

**YAPAY OLARAK HAZIRLANAN
DÜŞÜK DAYANIMLI KİLLERİN
ELEKTROKİNETİK YÖNTEM İLE STABİLİZASYONU**

**STABILIZATION OF
REMOULDED LOW STRENGTH CLAYS
WITH ELECTROKINETIC METHOD**

TAYLAN AŞKIN

**Doç. Dr. Dilek Türer
Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2014

**YAPAY OLARAK HAZIRLANAN
DÜŞÜK DAYANIMLI KİLLERİN
ELEKTROKİNETİK YÖNTEM İLE STABİLİZASYONU**

**STABILIZATION OF
REMOULDED LOW STRENGTH CLAYS
WITH ELECTROKINETIC METHOD**

TAYLAN AŞKIN

**Doç. Dr. Dilek Türer
Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2014

TAYLAN AŞKIN'ın hazırladığı “Yapay Olarak Hazırlanan Düşük Dayanımlı Killerin Elektrokinetik Yöntem ile Stabilizasyonu” adlı bu çalışma aŐađıdaki jüri tarafından **JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Candan Gökçeoğlu
BaŐkan

.....

Doç. Dr. Dilek Türer
DanıŐman

.....

Prof. Dr. Harun Sönmez
Üye

.....

Prof. Dr. Murat Ercanoğlu
Üye

.....

Doç Dr. Ali Kayabaşı
Üye

.....

Bu Tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
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 tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17/12/2014

Taylan Aşkın

ÖZET

YAPAY OLARAK HAZIRLANAN DÜŞÜK DAYANIMLI KİLLERİN ELEKTROKİNETİK YÖNTEM İLE STABİLİZASYONU

Taylan AŞKIN

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Dilek Türer

Aralık 2014, 79 sayfa

Elektrokinetik stabilizasyon yöntemi yumuşak killi toprakların dayanımlarının artırılmasında kullanılan ve gelişmekte olan yeni bir teknolojidir. Bu yöntemde amaç, toprağa elektrik akımı yardımıyla kalsiyum ve potasyum gibi iyonların girişini sağlayarak, toprak içinde elektromigrasyon, iyon değişimi ve puzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan çökelimle birlikte toprakta dayanım artışı sağlanmasıdır. Önceki çalışmalarda elektrokinetik stabilizasyon işleminin, pH 7 üzerindeki ortam koşullarında etkili olduğu ve anot çevresinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu düşük pH seviyeleri olduğundan dayanım artışının katot çevresiyle sınırlı kaldığı belirtilmiştir. Tez kapsamında; Ankara kili kullanılarak yumuşak killi toprak örnekleri yapay olarak hazırlanmış ve bu örnekler üzerinde laboratuvar ölçeğinde elektrokinetik stabilizasyon işleminin etkinliği test edilmiştir. Yapılan çalışmada, daha önceki çalışmalarda uygulanan kare düzenek yerine dairesel bir düzenek kullanılmıştır. Bu düzeneğin kullanılması ile yüksek pH koşullarının katottan anot yönüne doğru ilerlemesi ve böylece toprak içinde daha homojen bir dayanım artışının sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla dairesel düzenek üzerinde çoklu bir elektrot dizilimi kullanılmış, dizilimde yapılan değişikliklerin dayanım artışına, akım düşüş hızına ve düzeneğin farklı bölümlerindeki pH koşullarına etkisi gözlemlenmiştir.

Elektrokinetik yöntem ile stabilizasyonda, toprağa elektrik akımı ile birlikte stabilize edici bir maddenin girişi sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada tüm deneylerde, toprağa 10 V sabit elektrik potansiyeli altında stabilize edici madde olarak CaCl_2 girişi sağlanmıştır. Anot elektrotun düzeneğin iç bölümünde konumlandırıldığı ve

bu bölmeden toprağa CaCl_2 çözeltisinin girişinin sağlandığı 15 gün süren ilk deneyde, anot çevresinde şişmeye bağlı olarak dayanımda düşüş görülürken, katot çevresinde % 508'i aşan dayanım artışı sağlanmıştır. Anot elektrotların dairesel düzeneğin dış bölgesine yerleştirildiği ve böylece daha fazla miktarda Ca^{+2} iyonunun toprağa girmesinin amaçlandığı deneylerin ilkinde toprağa sadece CaCl_2 girişi sağlanmış ve bu durumda anot ve katot yakınlarındaki makaslama dayanımlarındaki artış sırasıyla %36,1 ve %136,67 olarak saptanmıştır. Anot bölgesinden CaCl_2 çözeltisine ilaveten pH'ı artırmak için Ca(OH)_2 girişinin de sağlandığı son deneyde ise dayanımdaki artışlar anot ve katot bölmeleri için sırasıyla %24,62 ve %123,16 şeklinde gerçekleşmiştir. Bu durum, anot elektrotların dışarı bölmede konumlandırıldığı deneylerde dayanım artışının tüm örnekte görüldüğünü, yani daha asidik koşullara maruz kalan anot çevresinde de artış sağlanabildiğini göstermiştir.

Her bir deneyde, anot bölgesinden uzaklığa göre oluşan son makaslama dayanımları kendi içlerinde değerlendirildiğinde, stabilizasyon malzemesi olarak CaCl_2 'ye ek olarak Ca(OH)_2 de kullanılan deneyde, belirgin bir şekilde daha uniform dayanım artışları gözlenmiştir.

Katot elektrotun iç bölmede konumlandırıldığı deneylerde, anot bölgesinde pH düşüşü 2-3 gün gibi uzun sürelerde gerçekleşmiş ve en düşük pH seviyesi 3'ün altına inmemiştir. Anot elektrotun iç bölmede konumlandırıldığı durumlarda ise pH çok hızlı bir şekilde 3'ün altına inmiştir. Bu durum katot elektrotun iç bölmede konumlandırıldığı durumlarda, elektrokinetik stabilizasyon için tercih edilen daha yüksek pH koşullarının sağlandığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokinetik stabilizasyon, elektrot dizilimi, makaslama dayanımı, yumuşak kil, Ankara kili.

ABSTRACT

STABILIZATION OF REMOULDED LOW STRENGTH CLAYS WITH ELECTROKINETIC METHOD

Taylan AŞKIN

Master of Science, Geological Engineering Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dilek Türer

December, 2014, 79 pages

Electrokinetic stabilization is a new and developing technology used for increasing strength of soft clayey soils. The purpose of this method is to create precipitation of species by electromigration, ion exchange and pozzolanic reactions in the soil, in order to increase the soil strength properties, by means of application of electrical current and injection of ions such as calcium and potassium. In the extent of this thesis, soft clay samples were prepared artificially by use of Ankara clay and laboratory scale electrokinetic stabilization effectiveness was examined on these samples. Former studies pointed out that electrokinetic stabilization process is effective in pH conditions above 7 and the increase of strength is limited to cathode region, since reactions that occur around anode region cause low pH levels. In the study, a circular unit was used instead of the square units used in the former studies, to move high pH conditions from cathode to anode, in order to provide a more homogenous strength increase. For this purpose, a multiple electrode configuration was used in the circular unit and effects of different configurations on strength increase, electrical current decrease and pH conditions on various sections of the soil were investigated

For stabilization with electrokinetic method, introduction of a stabilizing agent is provided to soil, together with electrical current. In all of the experiments of the study, a constant electric potential of 10 V was applied to soil, together with the introduction of CaCl₂. In the first experiment, where anode is positioned in the centre of the unit and CaCl₂ solution was applied from this section for 15 days, a strength decrease caused by swelling occurred around the anode section,

whereas strength increases that surpass 508% were obtained around the cathode region. In the first of the experiments where anode electrodes were positioned in the outer section of the unit in order to supply more Ca^{+2} ions to the soil; only CaCl_2 was supplied to soil and shear strength increases were determined as 36,1% and 136,67% around the anode and cathode sections respectively. In the last experiment, where an additional $\text{Ca}(\text{OH})_2$ injection was provided together with CaCl_2 in order to increase the pH, shear strength increases were found to be 24,62% and 123,16% for anode and cathode sections respectively. These results indicate that in the experiments where anode electrodes are positioned in the outer section, strength increase expanded to entire soil sample, i.e. increases were also achieved around the anode section where soil is subjected to higher acidic conditions.

By assessment of final shear strength values in accordance with the distance from anode section for each experiment, significantly more uniform strength distributions were observed in the experiment where $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was used in addition to CaCl_2 .

In the experiments where cathode is positioned in the inner section, pH decrease in the anode section took a long time, around 2-3 days, and the minimum pH levels were never below pH 3. For conditions where anode is positioned in the inner section, pH values decreased very rapidly and reached levels below pH 3. This demonstrated that higher pH conditions that are desirable for electrokinetic stabilization were achieved with the cathode positioned in the inner section.

Keywords: Electrokinetic stabilization, electrode configuration, shear strength, soft clay, Ankara clay.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her an yanımda olan ve bana bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini öğreten tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Dilek Türer'e, çalışmam süresince uzmanlık alanlarında katkılarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Abidin Temel ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Elif Varol'a, değerli yorumları ile katkıda bulunan jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Candan Gökçeoğlu, Sayın Prof. Dr. Harun Sönmez, Sayın Prof. Dr. Murat Ercanoğlu ve Sayın Doç. Dr. Ali Kayabaşı'na, uzun laboratuvar çalışmaları süresince hiçbir desteği esirgemeyen Özgür Erol'a ve beni yalnız bırakmayan arkadaşım Ali Cem Konuk'a, her zaman yanımda olan Ailem'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER	viii
ŞEKİLLER	ix
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	10
2.1. Elektrokinetik Yöntem ile İlgili Çalışmalar	10
2.1.1. Elektrokinetik Yöntem ile Stabilizasyona Yönelik Çalışmalar	12
2.1.2. Elektrokinetik Yöntem ile İyileştirmeye Yönelik Çalışmalar	18
2.2. Ankara Kili ile İlgili Çalışmalar	23
3. YÖNTEM	28
3.1. Örnek Alımı	28
3.2. Kullanılan Toprağın Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi	28
3.3. Elektrokinetik Stabilizasyon Düzeneği	30
3.4. Konsolidasyon İşlemi	32
3.5. Elektrokinetik Stabilizasyon Deneylerinin Yapılması ve Dayanımın Ölçülmesi	33
4. DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN VERİLER VE TARTIŞMA	38
4.1. Deneylerde Kullanılan Ankara Kilinin Özellikleri	38
4.1.1. Tane Boyu Analizi	38
4.1.2. Atterberg Limitleri ve Parametreleri	38
4.1.3. Mineraloji	40
4.2. Drenajsız Makaslama Dayanımları	46
4.3. pH Ölçümleri	53
4.4. Akım Ölçümleri	58
4.5. Elektrik Potansiyeli Ölçümleri	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	71

ÖZGEÇMİŞ	76
CURRICULUM VITAE	77

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Deneplerde elektrot konfigürasyonu, çözeltiler ve deney süreleri.....	33
Çizelge 4.1 Deneplerde kullanılan kil için Atterberg limitleri ve parametreleri.....	38
Çizelge 4.2 İşlem görmemiş toprakta belirlenen mineraller	40
Çizelge 4.3 İşlem görmemiş toprakta belirlenen kil mineralleri	40
Çizelge 4.4. Oluşan son drenajsız makaslama dayanımları (kPa)	47
Çizelge 4.5 Konsolidasyona göre dayanım artışları (%)	47
Çizelge 4.6. Dayanım artışında standart sapmalar.....	49
Çizelge 4.7. Oluşan son pH değerleri ve pH'ın ortalama olarak sabitlendiği seviyeye kadar geçen süreler.....	53

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1. Elektriksel çift tabaka şematik gösterimi [12]	3
Şekil 1.2. Doğru akım altında killi topraklarda oluşan elektroforez, elektromigrasyon ve elektroozmos işlemleri [19].	5
Şekil 1.3. Doğru akım altında killi topraklarda oluşan hareketler ile asit ve baz cephelerinde gerçekleşen işlemler [8]	9
Şekil 2.1. Chew vd. [29] tarafından elektro-ozmos çalışmalarında kullanılan dikey dren düzeneği - (a) plan görünümü, (b) dikey görünüm, (c) sahada uygulama	16
Şekil 2.2. Estabgrah vd. [30] tarafından elektro-ozmos çalışmalarında kullanılan dikey dren düzeneği	17
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan toprak örneğinin alındığı lokasyon	29
Şekil 3.2. Elektrokinetik düzenek şeması - (a) yan görünüm (3. deneydeki haliyle) [4], (b) üst görünüm	31
Şekil 3.3. Elektrokinetik düzeneğin kurulu hali	32
Şekil 3.4. Kanatlı kesici makaslama deneyinde dayanım verisi alınan noktalar - (a) D-2, (b) D-3, (c) D-4	35
Şekil 3.5. (a) Kanatlı kesici makaslama dayanımı aleti ve düzenek, (b) drenajsız makaslama dayanımları alındıktan sonra toprağın görünümü	36
Şekil 3.6. Yöntem aşamaları özeti	37
Şekil 4.1. Tane boyu dağılımı	39
Şekil 4.2. İşlem görmemiş toprakta XRD tüm kayaç analizi sonuçları	41
Şekil 4.3. İşlem görmemiş toprakta kil fraksiyonu	42
Şekil 4.4. Elektrokinetik stabilizasyon sonrası toprakta XRD tüm kayaç analizi sonuçları	44
Şekil 4.5. Elektrokinetik stabilizasyon sonrası toprakta kil fraksiyonu	45
Şekil 4.6. Anoda uzaklıklara göre drenajsız makaslama dayanımı	46
Şekil 4.7. Anoda uzaklıklara göre drenajsız makaslama dayanımı dağılımı, D-2 ..	50
Şekil 4.8. Anoda uzaklıklara göre drenajsız makaslama dayanımı dağılımı, D-3 ..	51
Şekil 4.9. Anoda uzaklıklara göre drenajsız makaslama dayanımı dağılımı, D-4 ..	52
Şekil 4.10. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-1	54
Şekil 4.11. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-2	55

Şekil 4.12. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-3	56
Şekil 4.13. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-4	57
Şekil 4.14. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-1	59
Şekil 4.15. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-2	60
Şekil 4.16. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-3	61
Şekil 4.17. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-4	62
Şekil 4.18. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-1	64
Şekil 4.19. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-2	65
Şekil 4.20. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-3	66
Şekil 4.21. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-4	67

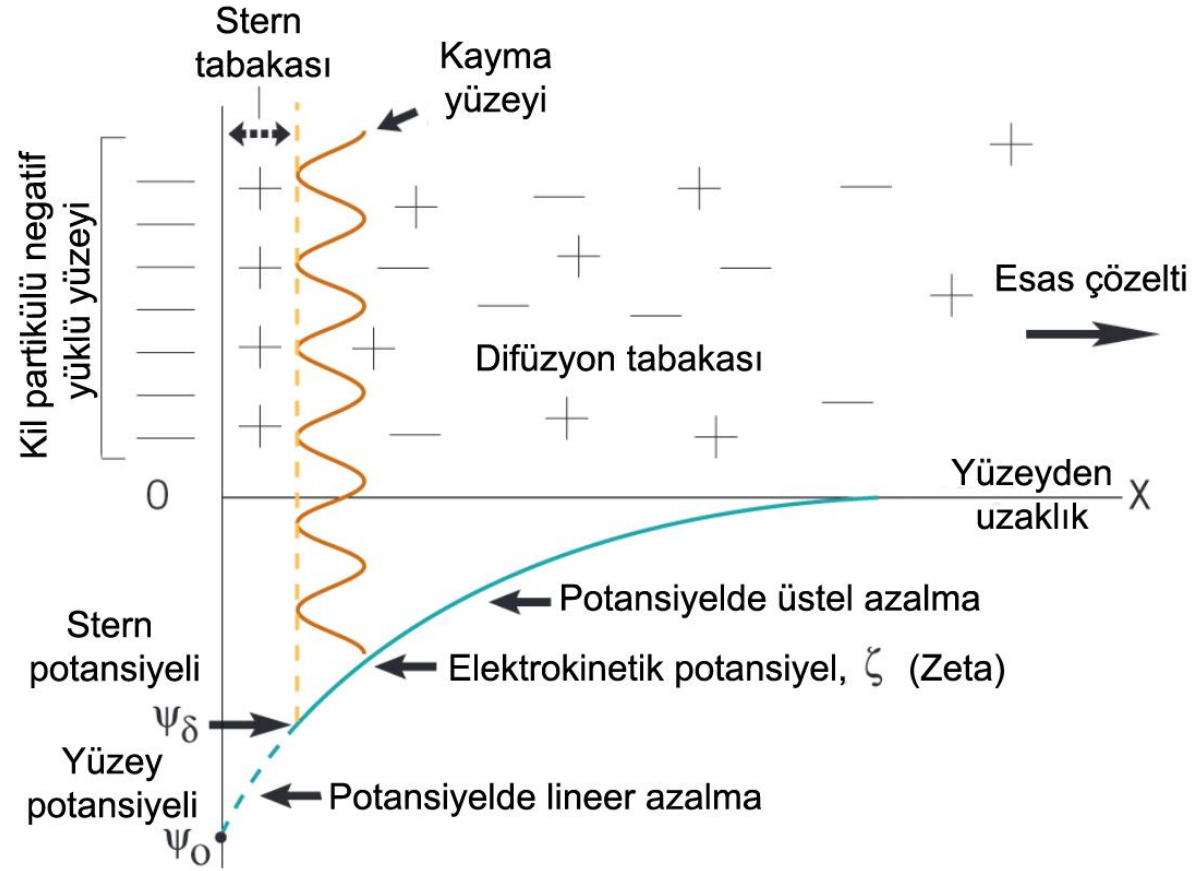
1. GİRİŞ

Yumuşak killerin yüksek şişme potansiyeli, düşük makaslama dayanımı, donmaya yatkınlık gibi özellikleri, bu tip zeminler üzerindeki yapılarda çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle, elektrokinetik yöntem de dahil olmak üzere pek çok yenilikçi stabilizasyon yöntemi geliştirilmektedir [1, 2]. Elektrokinetik yöntemde toprağa elektrik akımı verilmesi ile su ve çeşitli kimyasal türler ile partiküllerin istenen elektrot yönüne doğru hareketi sağlanmaktadır. Yöntem, stabilizasyonun yanı sıra ağır metallerin, radyonüklidlerin ve organik kirleticilerin doygun ve doygun olmayan topraklardan temizlenmesi için de kullanılmaktadır [3, 4]. Hem jeomekanik, hem de iyileştirme gibi çevresel amaçlarla killi topraklara doğru akım uygulaması, görece olarak yeni bir yöntemdir. Ancak, yöntemin gelecekte performans ve ekonomik anlamda bu tip toprakların stabilizasyonunda ve iyileştirmesinde artılar sağlaması olasıdır. Bu artılar genel olarak killi zeminlerde stabilizasyon yöntemi olarak elde edilen dayanım artışının oldukça yüksek olması ve yine bu tip zeminlerde bir iyileştirme yöntemi olarak özellikle ağır metallerin temizlenmesinde çok etkili olması şeklinde sıralanabilir. Bu nedenle yöntem, dünya çapında giderek daha sık araştırılmaktadır [5, 6, 7]. Elektrokinetik yöntemin esas artısı ise, klasik stabilizasyon yöntemlerinin uygulanamadığı bir durum olan, zemin özellikleri sebebiyle zarar görmüş veya zarar görmesi olası, mevcut yapıların altında uygulanabilmesidir [1].

Yöntemin killi topraklarda yüksek etkinliğe sahip olması, kil minerallerinin yapısı ve bu yapıdan kaynaklanan, killerdeki yüzey yüklerine etki eden faktörlerle ilişkilidir [8]. Goldman vd. (1986), kil minerallerinin, oluşumları sırasında yüzeylerindeki katyonların daha düşük iyon değerliğine sahip benzer boyutlu türler ile değişimi sonucunda, başka bir deyişle, yapıya katılan bu düşük iyon değerlikli türler sebebiyle, negatif yüzey yüklerine sahip olduklarını belirtmişlerdir [8]. Bir çözelti içindeki kil partiküllerinin yüzeyindeki negatif yükleri dengelemek amacıyla, çözeltideki pozitif yüklü türler kil yüzeyine doğru hareket etmekte ve burada tutulmaktadır. Burada adsorbe olan katyonlarının oluşturduğu pozitif yüklü alan ve çözelti yönüne doğru hareketli iyonların oluşturduğu alanın toplamı “elektriksel çift tabaka” olarak tanımlanmaktadır [9]. Elektriksel çift tabakayı tanımlamak üzere oluşturulan en kapsamlı model Stern modelidir [10]. Bu modelde adsorbe haldeki iyonlar Stern tabakası olarak adlandırılan iç kesimde bulunurken, karşıt iyonlar

difüzyon tabakası olarak adlandırılan dış kesimde bulunmaktadır. Bu iki kesimin arasında ise, kayma yüzeyi olarak adlandırılan düzlem bulunmaktadır [8]. Başka bir deyişle; negatif yüklü kil yüzeyi üzerine adsorbe halde bulunan tamamen pozitif iyonlardan oluşmuş bölge Stern tabakası, bu tabakadan çözelti yönüne doğru giderken hemen ardından gelen ve negatif yüklü iyonlara sahip bölge kayma yüzeyi, bu yüzeyden çözelti yönüne doğru giderken negatif iyonların yoğunlukta olduğu bölge difüzyon tabakası olarak adlandırılmaktadır. Bu tabakanın çözelti yönünde bittiği noktadan itibaren esas çözelti, yani elektriksel olarak nötr olan bölge başlamaktadır [11]. Stern tabakası ile difüzyon tabakası arasında kalan, negatif yüklü bölge olan kayma yüzeyi kil partikülüne bağlı olduğundan sıvıya göre hareket etmektedir. Kayma düzlemi adını almasının sebebi de budur. Kil yüzeyinden kayma yüzeyine erişilinceye değin elektriksel potansiyelde doğrusal düşüş oluşmakta, kayma yüzeyinin ötesinde yani difüzyon tabakasında ise bu düşüş üstel olarak gerçekleşmektedir. Elektriksel potansiyeldeki düşüş, esas çözeltiye geçişte sıfırlanmaktadır [8]. Şekil 1.1’de elektriksel çift tabakayı oluşturan bileşenler verilmiştir.

Bir elektriksel alan etkisi altında, kayma yüzeyindeki elektriksel potansiyel, zeta potansiyeli veya elektrokinetik potansiyel olarak tanımlanmaktadır [8, 12]. Elektriksel potansiyel esas çözeltiye doğru azalır, çözeltiye geçiş noktasında sıfırlandığından, zeta potansiyeli, kayma yüzeyi ile esas çözelti arasındaki potansiyel farkı olarak da tanımlanabilir [11]. Elektrokinetik stabilizasyon yönteminde, toprağa sabit voltaja sahip elektrik akımı verildiğinde, partiküllerin her biri kendi zeta potansiyeliyle doğru orantılı bir hızla hareket etmektedir. Partiküllerin hareket yönü ise pozitif veya negatif yüklü oluşlarına göre değişmektedir [13]. Zeta potansiyeli; iyon konsantrasyonu, iyon değeri, pH ve suya doymuş toprağın elektriksel iletkenliğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir [9]. Elektrokinetik stabilizasyon sırasında kalsiyum ve potasyum tuzları gibi malzeme girişinin sağlanmasının sebebi, yukarıda bahsedilen iyon konsantrasyonu ve pH gibi faktörlerin modifikasyonu sayesinde zeta potansiyelinde değişiklik yapabilmektir [8, 9]. Başka bir deyişle, zeta potansiyelinin değiştirilmesi ile partikül hareket hızı ve yönü değiştirilebilmekte, dolayısıyla elektrokinetik stabilizasyon etkinliği kontrol edilebilmektir [13].



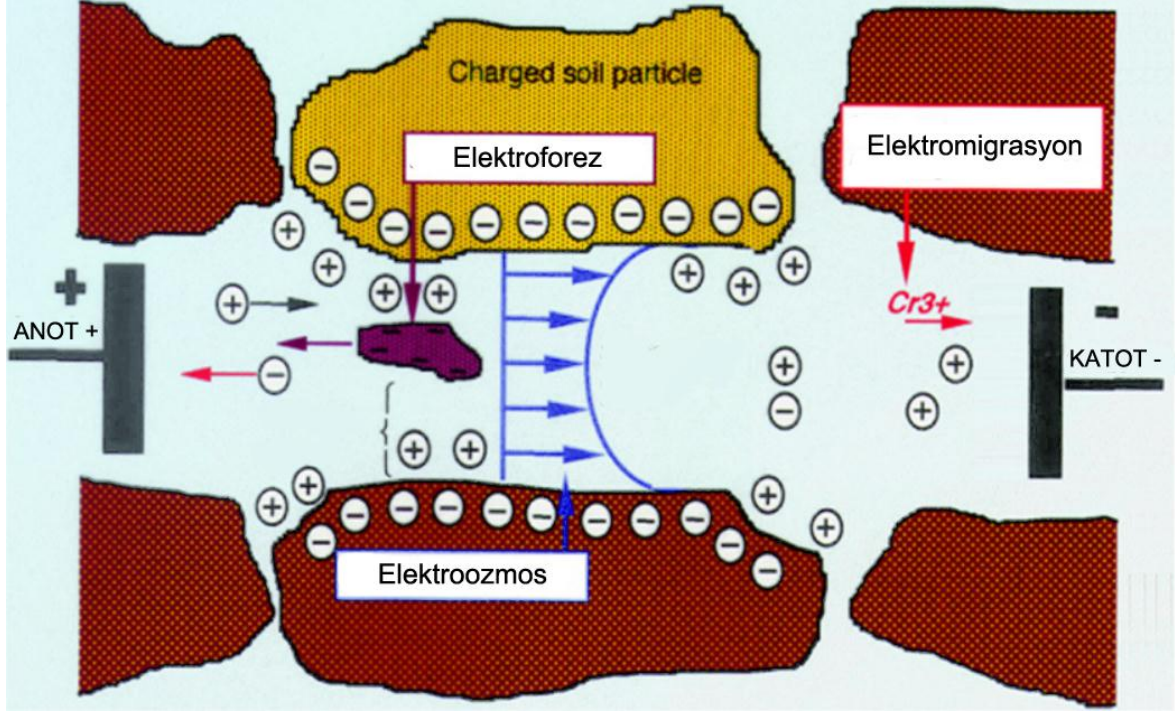
Şekil 1.1. Elektriksel çift tabaka şematik gösterimi [12].

Elektrokinetik stabilizasyon sırasında, toprak üzerinde belirlenen noktalara anot ve katot yerleştirilerek doğru akım uygulanmakta ve bunun sonucunda gerçekleşen iyon değişimi ve puzolanik reaksiyonlar ile dayanım artışı oluşturulmaktadır [6,7]. Yöntemde, toprağa doğru akım uygulanmasındaki amaç, aşağıda tanımlanan işlemlerin gerçekleştirilmesidir [8, 9, 14, 15, 16].

- Elektroforez: Dışarıdan uygulanan bir elektrik alanı etkisi altında, yüzey yükleri sebebiyle negatif yüklü kil partikülleri gibi türlerin, pozitif yüklü olan anot bölümüne doğru hareketidir.
- Elektromigrasyon: Dışarıdan uygulanan bir elektrik alanı etkisi altında, katyonların anottan katot yönüne ve anyonların katottan anot yönüne hareketi olarak tanımlanmaktadır. Hareketi sağlanan iyonik türler başlangıçta tamamen çözelti içeriğindeki türlerken, elektrokinetik işlemler devam ettikçe oluşan elektroliz ürünü türler de bu harekete katılmaktadır.
- Elektroozmos: Dışarıdan uygulanan bir elektrik alanı etkisi altında, gözenek sıvısındaki serbest iyonlar karşıt yüklü kutuplara çekilmekte (elektromigrasyon) ve bu hareketleri sırasında çevrelerindeki gözenek sıvısını da taşımaktadır. Bu işlem sırasında gözenek sıvısındaki tanecikler de gözenek sıvısı ile birlikte taşınmaktadır. Elektroozmos hareketi katot yönüne doğru gerçekleşmektedir.

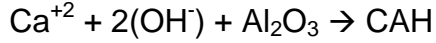
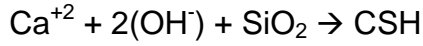
İyonların elektroozmos ve elektromigrasyonla hareketini gösteren bir şema Şekil 1.2'de verilmiştir.

Elektrokinetik stabilizasyon süresince gerçekleşen işlemlere bağlı olarak stabilizasyonu sağlayan üç mekanizma görev almaktadır. Bu mekanizmalar katyon değişimi, mineralizasyon ve stabilizasyona en yüksek katkıyı sağlayan çözeltide tanecik çökelimidir [2, 15, 17].

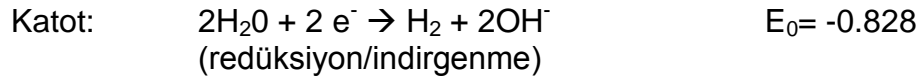
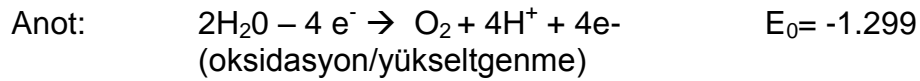


Şekil 1.2. Doğru akım altında killi topraklarda oluşan elektroforez, elektromigrasyon ve elektroozmos işlemleri [Iyer, 2001; 19'dan].

Mineralizasyon ve çökelimde; toprağa sağlanan bağlayıcı malzemedeki pozitif iyonlar ve işlem sırasında oluşan hidroksil iyonları, topraktaki silikat ve alüminatlarla puzolanik reaksiyonlara girmekte ve çimentolanma malzemelerini oluşturarak dayanım artışını sağlamaktadır [2]. Puzolanik reaksiyonlar; Müller [18] tarafından yüksek pH ve yüksek çözünmüş kalsiyum çözelti koşullarında kil minerallerinin kısmen çözünüp kalsiyum ile tepkimeye girmesi ve sonuç olarak çimento hidratlarını oluşturması olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, stabilizasyon maddesi olarak CaCl_2 kullanıldığında kilin yapısında bulunan silikat (SiO_2) ve alüminatlar (Al_2O_3), anot bölgesinde iyonize olarak oluşan elektrik alanı etkisinde katoda doğru hareket eden Ca^{+2} ve katot bölgesindeki saf suyun elektrolizi sonucu oluşan OH^- ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidratları (CSH) ve kalsiyum alüminat hidratlarını (CAH) oluşturmaktadır [2]. Bu işlemler sırasındaki puzolanik reaksiyonlar şu şekildedir:



Elektrokinetik yöntemin etkinliğini denetleyen önemli parametrelerden bir tanesi topraktaki pH düzeyidir. Hem elektrokinetik stabilizasyon, hem de elektrokinetik iyileştirme için çeşitli etki artırıcı maddeler kullanılmaktadır. Bu maddelerin temel amacı pH'ı istenen seviyede tutarken, partiküllerin çökelyiminin ya da mobilizasyonunun sağlanmasıdır. Elektrokinetik uygulamalarda pH'ın önemi Acar vd. (1990) tarafından 1980'lerde araştırılmış ve bulguları daha sonra Beddiar vd. (2005) gibi pek çok araştırmacı tarafından onaylanmıştır [16]. Elektrokinetik uygulamaları sırasında toprakta oluşan elektroliz işlemleri sonucunda, anot bölgesinde hidrojen iyonları ile oksijen ve katot bölgesinde hidroksil iyonları ile hidrojen iyonları oluşmaktadır [19].



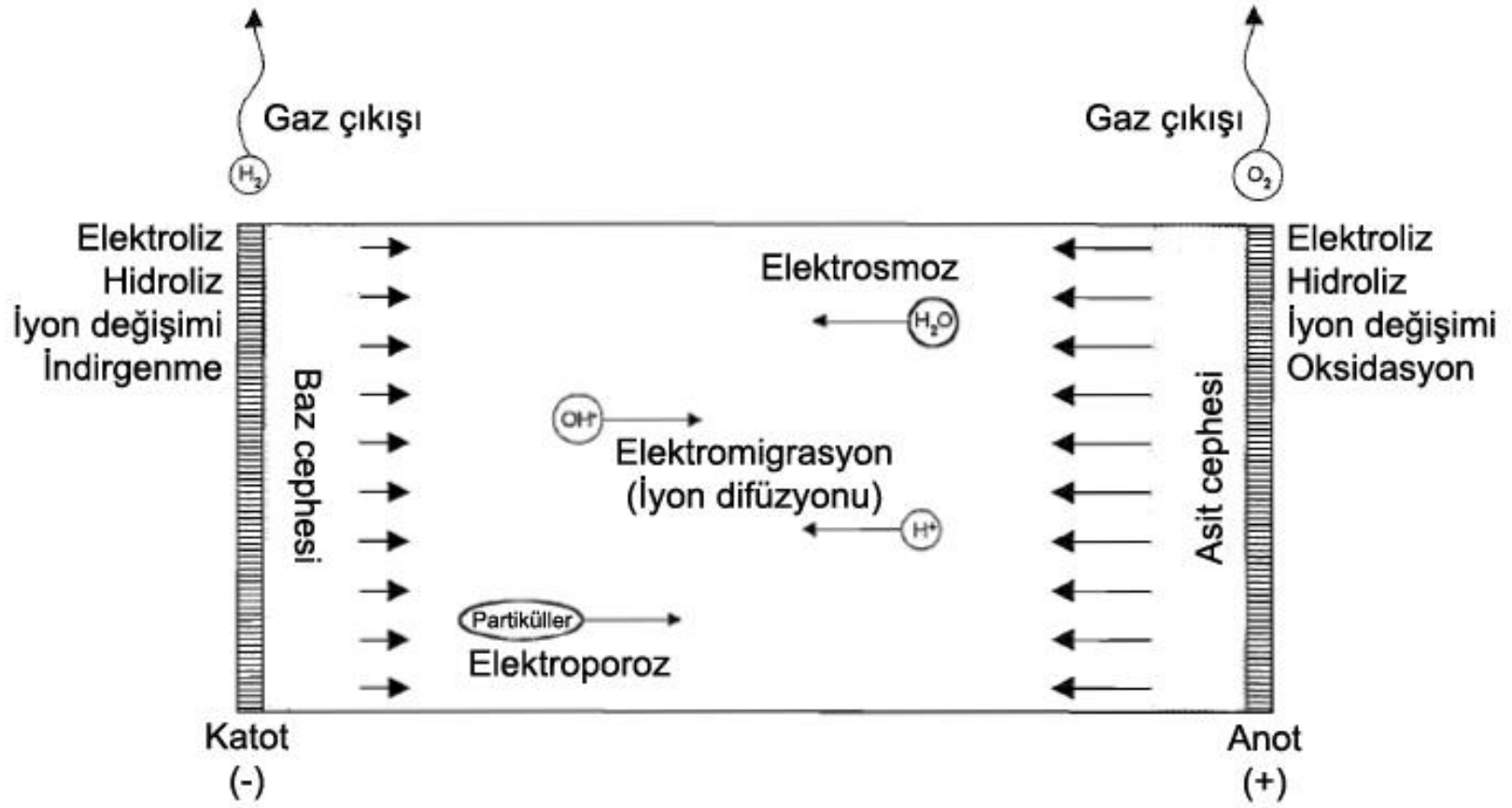
H⁺ iyon hareketliliği OH⁻ iyon hareketliliğinden 1,8 kat daha fazla olduğundan ve elektroozmotik akış katot yönüne doğru gerçekleştiğinden, toprak kütlelerinin büyük kısmında 7'den daha düşük pH koşulları oluşmaktadır [2]. Bu durum, katot çevresindeki yüksek pH koşullarını kısıtlarken, anot çevresindeki düşük pH koşullarının daha geniş bir alana yayılmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak elektrokinetik ile stabilizasyonda, çökelyim ile çimento malzemesinin oluştuğu pH>7 koşulları katot bölgesinde oluşmakta ve katottan anoda doğru gidildikçe azalan, uniform olmayan bir stabilizasyon sağlanabilmektedir [2, 4, 20]. Gray (1970), Shapiro vd. (1989), Acar vd., (1990) ve Stewart ve West (1990) gibi pek çok araştırmacı, pH cephelelerinin ilerlemesini incelemişlerdir [17].

Elektrokinetik iyileştirmede ise bu durumun tersi geçerlidir. Düşük pH koşullarında inorganik kirleticilerin çözünürlüğü ve dolayısıyla mobilitesi arttığından bu bölgelerde temizlenme daha yüksek oranda sağlanmaktadır. İstenmeyen etki olarak ise düşük pH koşullarında partiküllerin yüzeylerindeki zeta potansiyeli değişebilmekte ve buna bağlı olarak katottan anoda negatif elektroozmotik akış oluşabilmektedir. Önceden ayrıntılı olarak açıklandığı gibi; zeta potansiyeli ince taneli toprakların pH değişimlerinden etkilenen ve elektroozmotik akış hızını ve yönünü belirleyen önemli fizikokimyasal özelliklerinden biri olup elektrokinetik iyileştirme işlemlerinin etkinliğinde önemli rol oynamaktadır [21]. Vane ve Zang (1997), çeşitli deneyler sonucunda zeta potansiyelinin çözelti pH'ı, iyonik güç, iyonik tür tipleri, sıcaklık ve kil mineral tiplerine göre değişkenlik gösterdiğini saptamışlardır [15]. Sposito (1984), Sposito (1998) ve Yeung (2005), bu nedenlerle, bu olumlu ve olumsuz etkilerin birbirleriyle ilişkisinin farklı kirletici tipleri ve stabilizasyonda sağlanan farklı stabilize edici maddeler açısından da incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir [16]. Elektrokinetik stabilizasyon süresince toprakta oluşan hareketler ile toprağın asit ve baz cephelerinde gerçekleşen işlemleri gösteren bir şema, Şekil 1.3'de verilmiştir.

Elektrokinetik yöntemle stabilizasyon çalışmaları incelendiğinde çalışmalarda çoğunlukla dikdörtgen prizma şeklinde bir toprak kalıbı ve bu kalıbın iki tarafında plaka şeklinde elektrotlar kullanıldığı görülmektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışma ile dayanım artışının daha geniş bir bölgede, daha yüksek oranda ve daha uniform olarak oluşmasını sağlama amacıyla, deney düzeneği geometrisi olarak bir uçta katot ve diğer uçta anot levhalar kullanılan klasik dikdörtgen düzenek yerine, dairesel bir geometri ve çubuk şeklinde elektrotlar tercih edilmiştir. Anot elektrot, yapılan ilk iki deneyde katot çevresindeki yüksek pH alanını artırma amacı ile merkez bölmeye, son iki deneyde ise stabilizasyon malzemesinin daha geniş bir alandan sağlanması için dış bölmeye yerleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmaların tümünde yumuşak killi toprakta dayanım artışını sağlamak için toprağa CaCl_2 girişi anot bölgesinden sağlanmıştır.

Dördüncü deneyde ise CaCl_2 'ye ek olarak Ca(OH)_2 kullanılmış ve başlangıç pH'ı artırılmıştır. Deneyler süresince sürekli olarak pH, elektrik potansiyel, sıcaklık değişimi ve akım ölçümleri alınmış, bu parametrelerin zamanla değişimi incelenmiştir. Elektrokinetik sürecin bitiminde, kanatlı kesici kullanılarak, oluşan drenajsız makaslama dayanımlarındaki farklılıklar saptanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.3. Doğru akım altında killi topraklarda oluşan hareketler ile asit ve baz cephelerinde gerçekleşen işlemler [8].

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde elektrokinetik yöntem ile ilgili çalışmalar ile mevcut çalışmada kullanılan Ankara kili ile ilgili çalışmalara iki ayrı başlık altında değinilmiştir.

2.1. Elektrokinetik Yöntem ile İlgili Çalışmalar

Killi zeminlerde elektrokinetik yöntem ile ilgili çalışmalar, zemin stabilizasyonuna yönelik çalışmalar ve kirlilik azaltılmasına yönelik çalışmalar olmak üzere iki ana konu üzerine yoğunlaşmaktadır. Kirlilik azaltımına yönelik çalışmalar stabilizasyon için de bilgi verici olduğundan, bu bölümde iki konuya da yer verilmiştir. Bu ana konular altında ise pH düzenlenmesi, farklı kimyasallar kullanımı, farklı düzenek geometrileri, maliyet azaltımı gibi çeşitli amaçlar için araştırmalar yapıldığından, literatür taramasının bu bölümünde çalışmaların kronolojik olarak değil, dahil oldukları konulara göre sınıflandırılarak verilmesi daha uygun görülmüştür.

İlk elektroozmos çalışması Reuss (1809) tarafından yapılmıştır. Araştırmacı, alt kesiminde kuvars tozu ve doğru akım iletmek için kullanılan platin teller bulunan bir U-tüpü kullanarak yaptığı deneyde, suyun kapiler zondan ilerleyerek katot bölgesi yönünde 23 cm yükselmesini sağlamış, yani suyun yer çekiminin tersi yönünde herhangi bir mekanik parça hareketi gerekmeden pompalanabildiğini kanıtlamıştır. Bu çalışmada elektrik akımının kesildiği anda su hareketinin de anında durduğu görülmüştür [15, 22]. Daha sonraki çalışmalarda, katot tarafında yükselen suyun fazladan bir hidrolik basınca neden olduğu ve elektrik gradyanı sonucu oluşan elektroozmotik akışın, bu hidrolik basınç ile dengelenene kadar devam ettiği saptanmıştır.

Yeung [16], elektroozmotik iletkenlik katsayısını belirlemek için araştırmacılar tarafından öne sürülen, gözenek suyunda iyon dağılımına dayalı çeşitli yaklaşımları açıklamıştır. Bu yaklaşımlardan bazıları Schmid teorisi, Spiegler sürtünme modeli, iyon hidrasyon modeli, Gray-Mitchell yaklaşımı ve Helmholtz–Smoluchowski teorisi olarak sıralanabilir. Yeung [16], bunlardan en yaygın olarak kabul gören yaklaşım olarak Helmholtz–Smoluchowski teorisini önermiş ve Virkutyte vd. [15], bu teoriye göre, kolloid parçacıkların hareketine bağlı olarak, su-toprak ara yüzeyinde gelişen elektriksel potansiyel olan zeta potansiyeli ve toprak

yüzeyi yakınındaki sıvıdaki yük dağılımının elektroozmotik akışın belirlenmesinde büyük önem taşıdığını belirtmişlerdir.

Elektroozmosun toprağın su içeriğini azaltma ve akış yönünü değiştirme amacıyla ilk kullanımı, Casagrande (1952) tarafından Salzgitter, Almanya'da bir tren yolu toprağının stabilizasyonu amacıyla 1939'da denenmiştir [9]. Bu ilk çalışmadan sonra yöntem; yamaç, toprak set ve baraj stabilizasyonu, büyük inşaat temellerinin stabilizasyonu, ince taneli toprakların suyunun alımı ile konsolidasyonu ve yumuşak killerin makaslama dayanımının artırılması gibi jeoteknik uygulamalarında başarıyla kullanılmıştır. Tüm bu çalışmalar sırasında makaslama dayanımındaki artış, konsolidasyon sonucu oluşması beklenen artışın üzerinde çıkmıştır. Bu durum elektroozmos ile toprağın fizyokimyasal özelliklerinin de değiştiğini göstermiştir. Buna ek olarak, pek çok çalışmada plastisite indeksinde az miktarlarda artış gözlenmiştir [16].

Page ve Page [23], kirlenmiş toprakların elektrokinetik yöntem ile iyileştirilmesini konu alan makalelerinde, Casagrande ve sonra gelen diğer erken dönem araştırmacıların elektrokinetik ile materyal taşınımında, elektroozmosun tek etken olduğunu düşündüklerini, ancak bunun yanlış olduğunu vurgulamışlardır. Elektroozmos süspansiyondaki yüklü parçacıkların hareketini tanımlamada tek başına yetersizdir ve parçacık hareketi elektromigrasyon gibi ek mekanizmalarla açıklanabilmektedir [23]. Lageman vd (1989), elektromigrasyonu bir elektrik akımı altında, elektroliz ürünü olan ya da solüsyonda hazır olarak bulunan kimyasal türlerin zıt yüklü elektrota doğru hareketi olarak tanımlamışlardır [6].

Reuss (1809) tarafından incelen elektroforez mekanizması ise, bir kolloidal süspansiyona doğru akım uygulandığında, yüklü parçacıkların bir elektrot tarafından çekilirken, diğeri tarafından itilmesini ve buna bağlı olarak süspansiyon içindeki göçünü tanımlamaktadır [8]. Ahmad (2004), negatif yüklü kil parçacıklarının anoda doğru ilerleme eğilimi gösterdiğini ve bu durumun elektromigrasyondaki parçacık hareketi ile örtüşüğünü belirtmiştir [22]. Lockhart, (1981), Sprute ve Kelsh (1982), Lockhart ve Stickland (1984) gibi araştırmacılar elektroforezden maden atık çamurlarının yoğunlaştırılması ile kömür yıkama çamurlarının ve ince taneli süspansiyonların suyunun atılmasında yararlandığını belirtmişlerdir [8].

Esrig (1968), fazla gözenek suyu basıncını hesaplama amacıyla analitik çözümler sunmuştur ve bu çalışmadaki kontrol denklemi, Terzaghi'nin konsolidasyon teorisine benzerlik göstermektedir. Araştırmacı bu durumu, elektrokinetik yöntemde elektrik alanının sabit olmasına bağlamıştır. Wan ve Mitchel (1976) ise, benzer bir çalışmada yine elektroozmosdaki fazla gözenek suyunun hesaplanmasına dair analitik çözümler sunmuşlardır. Araştırmacılar bu çalışmada uniform bir elektrik alanı sağlamış ve ek basınç uygulamışlardır. Yine uniform elektrik alanı ve ek basınç uygulanan, anizotropik topraklarda elektroozmotik konsolidasyon için analitik çözümler sunma amacıyla bir diğer çalışma da Shang (1998) tarafından gerçekleştirilmiştir [24].

Asadi vd. [13], toprakta elektroozmotik akış için farklı teorileri genel olarak açıkladıkları çalışmalarında, elektroozmotik düzenek geometrisi için bir standart olmadığını, ancak pek çok araştırmacının ortada toprak ve iki tarafta elektrot bölmelerinin bulunduğu klasik dikdörtgen düzenekleri kullandığını belirtmişler ve bu tip düzeneklerin negatif ve pozitif yönlerini sıralamışlardır. Araştırmacılara göre, dikdörtgen düzeneklerde, örselenmemiş örnek kullanımı zordur ve elektriksel potansiyel gradyanın uniformluğu kullanılan düzenek yerleşimine göre değişkenlik gösterebilmektedir.

2.1.1. Elektrokinetik Yöntem ile Stabilizasyona Yönelik Çalışmalar

Asavadorndeja ve Glawe [2]; anot bölgesinde sürekli depolarizasyon uygulayarak H^+ iyonlarının anottan katot yönüne hareketini engellemeye ve böylece dayanım artışını azaltan asidik ortamın yayılmasını durdurmaya çalışmışlardır. Depolarizasyon, anot bölgesine H^+ eklemeyen OH^- iyonlarının artmasını sağlamak için OH^- iyonu veren bir çözelti kullanılarak sağlanmış, bu bölmede elektroliz sonucu oluşan H^+ iyonları, OH^- iyonları ile dengelenmiştir. Elektrokinetik işlemde hemen sonra ve 1 hafta sonra dayanım verilerinin alındığı çalışmada, özellikle 1 hafta sonra dayanım artışının anoda çok daha fazla yaklaştığı saptanmıştır. Anot depolarizasyonu sağlanmadığında dayanım artışının katoda 30 mm mesafede başladığı, depolarizasyon uygulandığında ise bu mesafenin 70 mm'ye çıktığı, yani anoda 30 mm gibi yakın mesafelere kadar artış sağlanabildiği belirtilmiştir.

Elektrokinetik yöntemde farklı iyonların çimentolanma potansiyelini araştıran Abdullah ve Al-Abadi [1]; işlem görmemiş toprakta içsel sürtünme açısını 24° olarak saptamışlar ve Ca^{+2} ve K^+ olmak üzere iki farklı iyon ile açının artışıdaki farkı belirlemişlerdir. Kalsiyum tuzu kullanılan deney sonucunda içsel sürtünme açısı $30,9^\circ$ 'ye çıkarken, potasyum tuzu kullanılan deneyde ise 36° 'ye çıkmıştır. Araştırmacılar, elektrokinetik stabilizasyonda potasyum kullanımının daha yüksek oranda çimentolanma sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Türer ve Genç [25], dairesel bir düzenek kullanarak dayanım artışının daha geniş bir alana yayılmasını sağlamaya çalıştıkları araştırmaları sonucunda anoda 2,5 cm yakınlıktaki dayanım artışına göre 7,5 cm uzaklıktaki artışın %689 - %1244 oranında daha fazla olduğunu saptamışlardır. Çalışma sonucunda, katot çevresinde oldukça yüksek dayanım artışı sağlanmış, ancak anoda yaklaştıkça artışın azaldığı görülmüştür. Çalışmada anoda 7,5 cm uzaklıktaki makaslama dayanımı deneyler bittiği anda ölçüldüğünde maksimum 168,3 kPa seviyesinde saptanırken, deneyin sonlanmasından 1 hafta sonra makaslama dayanımının maksimum 182.8 kPa'ya yükseldiği görülmüştür. Araştırmacılar bu düzenek geometrisinde katot bölmesi yakınlarında yüksek seviyelerde makaslama dayanımı artışı gözlemlendiğini, ancak anot bölgesine yakın kesimlerde dayanımda artış gerçekleşmediğini belirtmişlerdir.

Açık denizel kalkerli topraklarda elektrokinetik stabilizasyon etkinliğini araştıran Mohamedelhassan [26], toprak örneklerini doymuş hale getirirken, toprak örneklerinin alındığı noktaya eşdeğer nitelikte yapay deniz suyu çözeltileri kullanmış, böylece deniz suyundaki sodyum ve klorit iyonlarının elektrokinetik stabilizasyona etkisini incelemiştir. Deneylerde, 15% $CaCl_2$ çözeltisi kullanıldığında maksimum, 10% $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ çözeltisi kullanıldığında minimum seviyede elektroozmotik geçirgenlik oluşmuştur. Saf deniz suyu kullanımı ise bu iki çözelti arasında bir elektroozmotik geçirgenlik sağlamıştır. $CaCl_2$ solüsyonu kullanıldığında oluşan Ca^{2+} elektromigrasyonunun, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ kullanıldığında oluşan Al^{3+} elektromigrasyonundan 6,3 kat daha fazla olduğunu belirleyen araştırmacı, deniz suyu varlığında elektrokinetik yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabileceğini belirtmiştir.

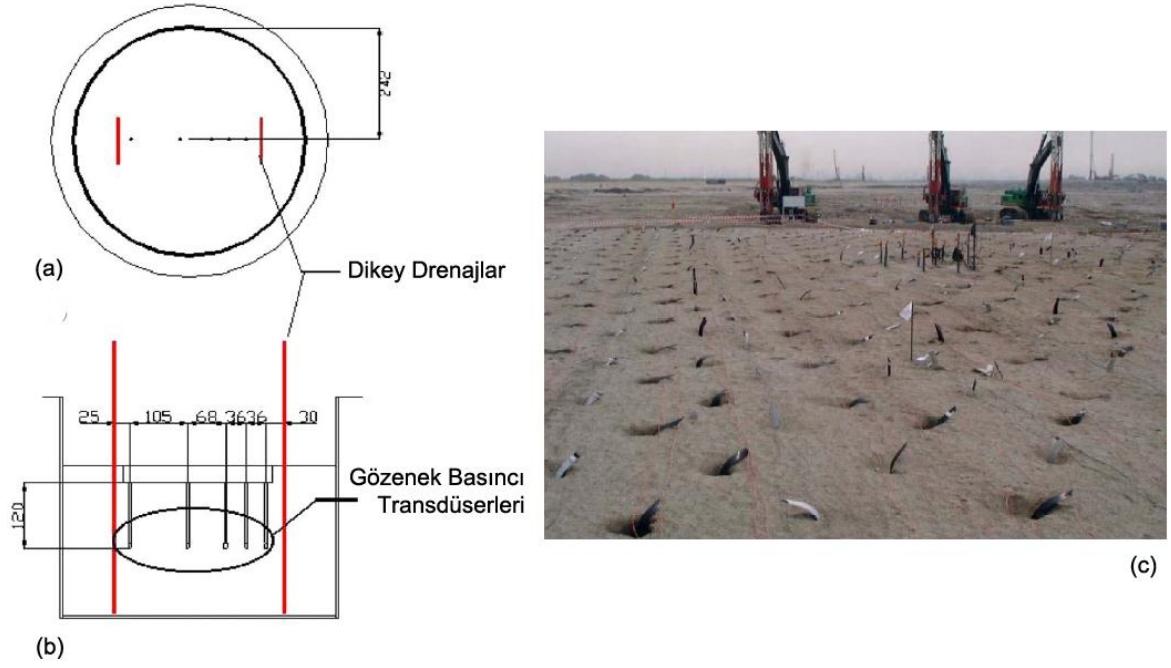
Açık denizde kurulacak temellerin çevresinde bulunan denizel yumuşak killerde elektrokinetik yöntemin uygulanabilirliğini araştıran Micic vd. [27], anot çevresinde elektroozmosa bağlı %185 ve katot çevresinde çimentolanmaya bağlı %5-80 aralığında dayanım artışı gözlemlemişler, dayanımın uygulama bittikten sonra da iyonik difüzyona bağlı olarak bir süre daha artmaya devam ettiğini saptamışlardır. Deneylerde, çimentolanma için herhangi bir ek stabilizasyon malzemesi kullanmayan çalışmacılar, katot çevresi dayanım artışının amorf çimentolanma malzemelerine bağlı olarak gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Daha uniform bir dayanım artışı sağlamak amacıyla aynı deneyleri polarite değiştirerek de tekrarlayan çalışmacılar, bu işlem sonucunda enerji tüketiminin 2 katına kadar çıkabildiğini, ancak çok daha homojen bir dayanım dağılımı oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ters polaritede oluşan dayanım artış ortalamaları ise, klasik sisteme göre daha düşük olarak belirlenmiştir.

Chien vd. [20], doğal Taipei silt/kili kullandıkları çalışmalarında, dayanım artışının tüm örnek alanında uniform olmasını sağlamak için düzenek tabanında anot ve katot bölmeleri arasında çözelti iletimi sağlayan, paslanmaz çelikten tüp şeklinde bir iletim borusu kullanmışlardır. Stabilizasyon malzemesi olarak CaCl_2 kullanılan bu çalışmanın sonucunda, CaCl_2 'nin sadece anot bölgesinden sağlandığı duruma oranla iletim borusu kullanıldığında konik penetrasyon direncinin 1,5 kat ve çimentolanma alanının 2 kat arttığı gözlemlenmiştir. Hem anot, hem de iletim borusundan stabilizasyon malzemesi sağlanan durumda ise, çimentolanma neredeyse tüm örnek alanına yayılmış ve belirli bölgelerinde konik penetrasyon direncinin, işlem görmemiş toprağa oranla 9 kata kadar çıkabildiği saptanmıştır.

Chien vd. [28], bir temel toprağındaki elektrokinetik konsolidasyon performansını artırmak amacıyla toprağa CaCl_2 sağladıkları benzer bir çalışmada, bu stabilizasyon malzemesi kullanıldığında, elektroozmotik permeabilitenin %172 daha fazla olduğunu saptamışlardır. 7 günlük uygulamanın ardından CaCl_2 kullanılan durumda, kullanılmayan duruma oranla 4-5 kat aralığında daha yüksek makaslama dayanımları elde edilmiştir.

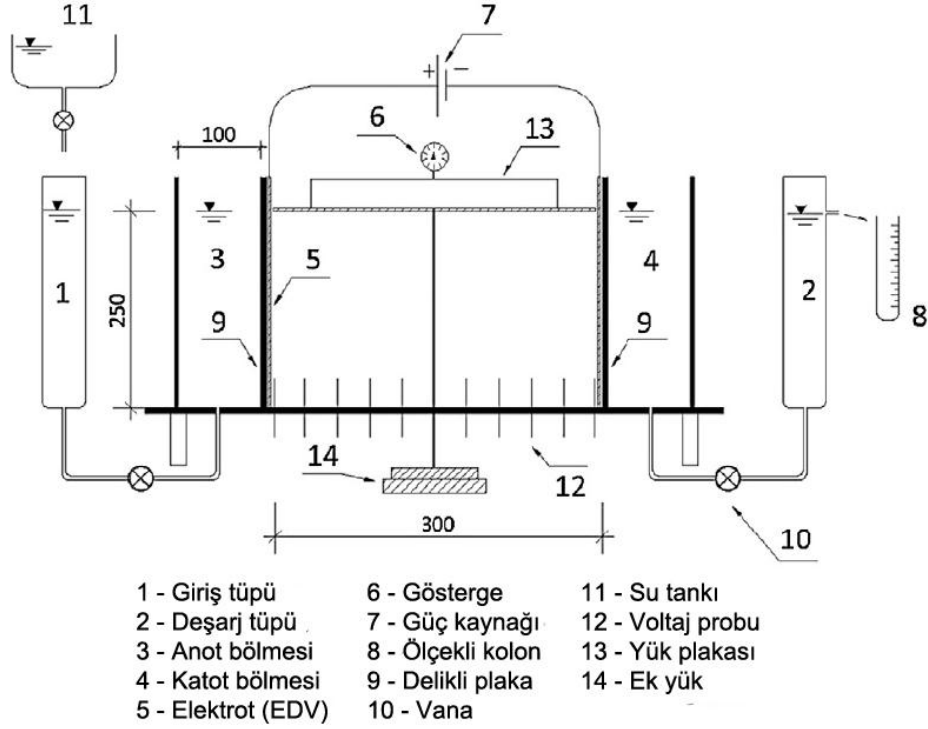
Chew vd. [29], büyük çaptaki çalışmalarda ekonomik olarak istenmeyen koşullar doğuran metal elektrot kullanımına alternatif olarak elektriksel iletkenliğe sahip polimer dikey drenler kullandıkları çalışmada, elektroozmos sonucu hem laboratuvar hem de büyük çaplı saha deneylerinde belirgin seviyede

konsolidasyona bağlı dayanım artışı sağlamışlardır. Araştırmacılar ilk olarak 100 kPa ile konsolide ettikleri 20 mm kalınlıklı 3 örnekten birinde 2 volt ve diğerinde 3 volt ile elektroozmos uygulamış ve elektroozmos uygulanmayan örnekle bu örnekleri karşılaştırmışlardır. Uygulamada 300 kPa üzerinde yapılan yüklemelerle, elektro-ozmos uygulanmayan örneğe göre, 2 volt uygulanan örneğin konsolidasyon katsayısı %40, 3 volt uygulanan örneğin konsolidasyon katsayısı ise %200 daha fazla saptanmıştır. Ardından 500 mm çaplı, 150 mm kalınlıklı daha büyük düzeneklerin kullanıldığı ikinci laboratuvar deneyinde ise, saha koşullarını yansıtmaması amacıyla kil 31, 52 ve 30 kPa ile konsolide edilmiş, her deney için 20 volt ile elektroozmos uygulanmış ve elektrot olarak metal plakalar kullanılmıştır. Daha yüksek su içeriğine sahip birinci örnekte, özellikle katoda yakın kısımlarda, ikinci örneğe göre drenajsız makaslama dayanımında daha fazla artış tespit edilmiştir. Elektroozmos uygulamasının sert killerden ziyade yumuşak killerde daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Saha deneylerinde ise, 50x50 m genişlikli alanlarda belirli aralıklarla elektriksel iletkenliğe sahip plastik dikey drenlerin etkinliğini ölçmeyi amaçlayan uygulama sonrası, saha tipi kanatlı kesici makaslama deneyleri yapılmıştır. Kil kolonunun özellikle üst yarısında makaslama dayanımı artışını yüksek olarak saptayan araştırmacılar, alt kesimlere doğru ise su içeriği daha az olan killi silte geçiş olduğundan, makaslama dayanımı artışının azaldığını belirtmişlerdir. Saha çalışmaları sonucunda, klasik stabilizasyon yöntemlerinden olan prefabrike dikey dren kullanımı yerine elektriksel iletkenliği olan dikey drenler ile elektro-ozmos uygulaması yapılması sonucunda stabilizasyonun 10 kat daha hızlı gerçekleştiği belirtilmiştir. Çalışmada, büyük çaplı laboratuvar deneylerinde kullanılan düzenek ve sahada deneylerindeki yerleşimi gösteren bir fotoğraf Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Chew vd. [29] tarafından elektro-ozmos çalışmalarında kullanılan dikey dren düzeneği - (a) plan görünümü, (b) dikey görünüm, (c) sahada uygulama.

Chew vd.'nin [29] çalışmalarına benzeyen bir diğer çalışmada, Estabragh vd [30], kendi tasarladıkları, elektriksel iletkenlikli plastik dikey drenlere sahip deney düzeneğinde kaolin kullanarak, 1-10 gün aralığında, farklı gerilimlerde elektro-ozmos performansını test etmişlerdir. 10 günlük uygulama sonrasında 15 volt gerilimde 11 mm, 45 volt gerilimde ise 13 mm oturma sağlayan araştırmacılar, oturmanın büyük kısmının ilk 3 günde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Deney süresince oluşan pH değişimlerinin voltajla ilişkisini de inceleyen araştırmacılar, uygulamada voltaj artırıldıkça hem anot hem de katot bölmelerinde pH değişiminin de daha fazla olduğunu saptamışlardır. Bu çalışmada kullanılan düzeneğin şeması Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Estabgrah vd. [30] tarafından elektro-ozmos çalışmalarında kullanılan dikey dren düzeneği.

Turba toprak örneklerinde elektrokinetik stabilizasyon sağlayan Moayedi vd. [31], elektrokinetik uygulamasının toprak mikro-yapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Doğal turba örneğinde %46,2 oksijen, %29,3 karbon, %5,1 silikat, %2,5 alüminat, ve %3 kalsiyum belirleyen araştırmacılar, sodyum silikat, kalsiyum klorit, kalsiyum oksit ve alüminyum hidroksit olmak üzere 4 ayrı stabilize edici madde ile elektrokinetik stabilizasyon uygulaması sonrasında oksijen içeriğini sırasıyla %47,6, %41,9, %53, %46, karbon içeriğini sırasıyla %24,9, %16,5, %31,4, %34, alümina içeriğini sırasıyla %2,5, %1,2, %2,2, %6,2 ve kalsiyum içeriğini sırasıyla %1,8, %18,6, %6,1, %2,6 olarak saptamışlardır. Araştırmacılar, toprak mikro-yapısındaki bu değişimlerin uygulama süresince toprak pH'ında oluşan değişimlere ve sıvı akışına bağlı gerçekleştiğini ve değişimin toprağın farklı noktalarında farklı olduğunu belirtmişlerdir. Kullanılan 4 farklı stabilizasyon maddesi içinde kalsiyum oksitin en iyi stabilizasyon performansını sağladığını saptayan araştırmacılar, bu maddenin toprağa sağlanması ile tüm toprak

örneğinde dayanım artışı olduğunu ve bu artışın katot bölgesinde %412'ye vardığını belirtmişlerdir.

Chien ve Ou [32], elektrokinetik stabilizasyonda doğru akım kullanımıyla oluşan ekonomik kaybı azaltmak için, alternatif akımlı bir kaynağa filtreleme uygulanması yoluyla doğru akım elde edilebilen bir teknik olan redresör filtresi tekniğini ve buna ek olarak, yarım ve tam dalga rektifiyeli harmonik dalgalar halinde elektrik uygulamasını kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, özellikle tam dalga rektifiye sistem kullanılan deneyde elde edilen dayanım artışı ve toprakta dağılımı, redresör filtresi uygulanan deneye oldukça yakın çıkmıştır. Tam dalga rektifiyeli harmonik dalga kullanımının ekonomik anlamda uygun bir teknik olduğunu belirten araştırmacılar, bu deney sonucunda dayanım artışının tüm toprağa yayıldığını ve işlem görmemiş topraktan 18 kat yüksek dayanımlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Airoidi vd. [5], çalışmalarında doğal bir kildeki elektrokinetik uygulamasında kalsitin etkisini değerlendirme amacıyla, öncelikle kalsitin çeşitli çevre koşullarıyla etkileşimini veren bir jeokimyasal model hazırlamış, ardından elektrokinetik deneyler yaparak sonuçları jeokimyasal model ile karşılaştırmışlardır. İllitik-kaolinitik bir kil olan Scanzano kilini kullanan araştırmacılar, 4 ayrı deneyde 40 mA akım ile 14 gün elektrokinetik uygulaması sonucunda, doğal topraklardaki kalsit içeriğinin elektrokinetik uygulamalar öncesinde dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiği vurgulamışlardır. Araştırmacılar, elektrokinetik deneyleri sonucunda; anoda yakın kesimlerde gözlenen ani pH değişiminin, toprak elektriksel iletkenliğinin düşüşün, şişmenin ve çatlak oluşumunun kalsite bağlı olarak gerçekleşen yüksek CO₂ çıkışından kaynaklanabileceğini ve bu önerilerinin kurdukları jeokimyasal model ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak, örnek boyunca oluşan farklı boşluk oranlarına kalsit çökeliminin neden olduğunu belirtilmiştir.

2.1.2. Elektrokinetik Yöntem ile İyileştirmeye Yönelik Çalışmalar

Elektrokinetik iyileştirme üzerine bir derleme makale yazan Virkutyte, vd. [15], en etkili sonucu alabilmek için farklı araştırmacıların farklı elektrot dizilimleri denediklerinden bahsetmiştir. Buna göre, Sims (1990), Acar ve Alshawabkeh (1993), Reddy vd. (1999), Sogorka vd. (1998) gibi bazı araştırmacılar elektrotları direk olarak ıslak toprağa yerleştirmeyi daha etkili bulurken, van Cauwenberghe

(1997), Baraud vd. (1998), Bena-zon (1999) gibi bazı araştırmacılar ise elektrotları topraktan ayrılmış solüsyon bölmelerine koymayı tercih ettiklerini belirtmişlerdir [15]. Buna ek olarak, solüsyon pH koşullarında anodik çözünmeye uğramayan elektrot kullanımının gerekliliğini, toprak koşullarının zamanla anot tarafından başlayarak asidikleşeceğini belirtmişlerdir.

Türer ve Genç [4], elektrokinetik yöntemle Pb, Zn ve Cu ağır metal temizliğini sağlamada klasik dikdörtgen düzeneğin yanı sıra dairesel bir düzenek kullanarak, düzenek geometrisinin temizlenme etkinliğine etkisini araştırmışlardır. Dairesel düzenek, ortada toprak bölmesi, iğeride katot bölmesi ve dışarıda anot bölmesi olmak üzere iç iče üç dairesel bölmeden oluşmaktadır. Metallerin katot yönüne doğru hareketinin metal türüne göre değişiklik gösterdiğinin belirlendiği çalışmada, dikdörtgen geometrili düzenek kullanılan deneylerde Pb ile kirletilmiş toprak kullanıldığında temizlenme etkinliği %48 olarak belirlenirken, toprak Pb, Zn ve Cu ile kirletildiğinde Pb temizlenme etkinliği %32 seviyesine gerilemiştir. Benzer şekilde, sadece Zn ve sadece Cu ile kirletilmiş toprakta sırasıyla %92 ve %37 temizlenme sağlanırken, üç kirleticinin de kullanıldığı durumda Zn temizlenme etkinliği %34'e, Cu temizlenme etkinliği ise %31'e düşmüştür. Deneyler dairesel düzenek ile tekrarlandığında, tüm kirleticilerin kullanıldığı deneyde Pb, Zn ve Cu temizlenme etkinliği daha da düşerek sırasıyla %29, %18 ve %18 olarak ölçülmüştür. Araştırmacılar bu durumu, dairesel düzenek kullanıldığında oluşan aktif olmayan elektrik alanların temizlenme etkinliğine olan negatif etkisi ile ağıklamışlardır.

Choi vd. [33], bir paslanmaz çelik tipi olan SS316L elektrotun elektrokinetik iyileştirme sırasındaki performans ve değişimlerini incelemişlerdir. Anot elektrot bölgesinde daha yüksek iletkenlik oluşurken, katot elektrot bölgesinde daha düşük iletkenlik oluştuğunu saptayan araştırmacılar, elektrotların korozyon değerlerini inceleyerek, SS tipi paslanmaz çeliklerin elektrokinetik işlemlerde kullanıma uygun olmadığını saptamışlardır. Araştırmacılar, anot kompartmanında kullanılacak elektrot materyalinin, asidik koşullarda korozyona uğramaması için kimyasal tepkimelere girmeyen grafit, kaplanmış titanyum ve platin gibi materyallerden; katod kompartmanında ise bazik ortamda korozyona uğramayan herhangi bir iletken materyalden oluşması gerektiğini belirtmişlerdir.

Sumbardo-Ramos vd. [7], elektrokinetik iyileştirmede adsorbe olan parçacıkların belirlenmesi ve toprak yüzeyindeki kimyasal reaksiyonların saptanmasında, elektrokinetik iyileştirme üzerine çalışan pek çok araştırmacının zeta potansiyeli ölçümlerinden faydalandığını belirtmişlerdir. Aynı elektrokinetik koşullar altında killi ve kumlu olmak üzere iki farklı toprak dokusunun fizikokimyasal özelliklerini saptamaya çalışan Sumbardo-Ramos vd. [7]; kirlenmemiş ve $PbCO_3$ ile kirlenmiş topraklarda zeta potansiyeli ölçümleri yapmışlardır. Bu çalışmayla, kumlu toprakta migrasyona yol açan ana etken, gözeneklerde elektrik akımı etkisiyle oluşan akış olarak saptanmıştır. Araştırmacılar bu durumu elektrokinetik yöntemin sadece killi topraklarda değil kumlu topraklarda da uygulanabileceği, ancak performansın daha düşük olacağı şeklinde yorumlamışlardır.

Katotta elektroliz reaksiyonları sonucu oluşan yüksek pH koşullarını nötralize etmek isteyen Puppala vd. [34], bu amaçla toprağa asetik asit girişi sağlamış ve buna ek olarak, oluşan OH^- iyonlarının geri taşınımını durdurma amacıyla iyon seçici bir membran kullanmışlardır. İllit, kaolinit, Na-montmorillonit ve ince taneli kum karışımından oluşan sentetik toprak kullanılan bu çalışmada, asetik asit kullanımının ağır metal temizliğinde etkiyi artırdığı ve ağır metal çökelinin yayılmasını katot bölgesine yaklaştırdığı saptanmıştır. Ancak, bu işlemler ile enerji kullanımının ve buna bağlı olarak da iyileştirme masrafının arttığını belirtmişlerdir. Asetik asite ek olarak membran kullanıldığında ise sürekli bir nötralize işlemi uygulaması gerekmediğinden, asit kullanımına bağlı masrafın daha az olacağı vurgulanmıştır.

Lee ve Yang [17]; pH koşullarını stabilize edilerek, ağır metal temizliğinin daha yüksek oranda sağlanması için elektrolit sirkülasyonu oluşturdukları yeni bir sistem denemişlerdir. Sistemde sirkülasyon, katot bölgesinden anot bölgesine doğru bir pompayla sağlanmaktadır ve bu işlem hidrolik gradyana göre otomatik olarak gerçekleşmektedir. Bu sistem ile pH'ın anot bölgesinde yükseltilip katot bölgesinde düşürülmesi amaçlanmıştır. Deneyler sonucunda pH'ın anot bölgesinde 2'den 4'e çıkmasını, katot bölgesinde ise 12'den 8'e inmesi sağlayan araştırmacılar, bu şekilde, kurşunun temizlenme etkinliğini artırırken, uygulamanın devam edebileceği sürenin de arttığını belirtmişlerdir.

Elektrokinetik yöntemin ağır metal temizliği amacıyla kullanıldığı diğer bir araştırmada Shen vd. [22]; bir sabit anot ve yer değiştiren anotlar kullanarak, toprak içerisindeki H^+ iyonlarının katot bölgesine hareketini, yani redoks potansiyelinin anottan katoda ilerlemesini sağlamışlardır. Bu yöntem ile sabit anoda oranla, işlem süresi %40, işlem süresince kullanılan enerji ise %44 azaltılmıştır.

Lu vd. [35], Çin'de 510 mg/kg krom (Cr) ve 200 mg/kg kadmiyum (Cd) kirliliği gözlenen, terk edilmiş bir endüstriyel saha toprakları üzerinde gerçekleştirdikleri elektrokinetik deneylerde, anot ve katot kutuplarının yerlerini, yani polariteyi değiştirerek bu durumun temizlenme potansiyeline etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, toplam 192 saat içinde 48 saatte bir polaritenin değiştirilmesi ile Cr temizlik etkinliği %88 ve Cd temizlik etkinliği %94 olarak saptanırken, polarite değişim periyodu 96 saate çıkarıldığında bu değerler sırasıyla, %70 ve %82'ye düşmüştür. Polaritenin değiştirilmediği konvansiyonel yöntemde ise, temizlenme etkinliği Cr için %57 ve Cd için %49 gibi çok daha düşük seviyelerde kalmıştır. Araştırmacılar polarite değişimi ile pH seviyesinin ek kimyasallara veya kompleks ekipmanlara ihtiyaç duyulmadan, 5-7 aralığında tutulabildiğini belirtmişlerdir.

Cang vd. [36], ağır metaller ve organik kirleticilerle eş zamanlı olarak kirlenmiş zeminlerde iyileştirme etkinliğini artırabilmek amacıyla, bakır (Cu) ve bir organik kirletici olan piren ile kirlenmiş toprakla yaptıkları deneylerde H_2O_2 , NaClO, $KMnO_4$ ve $Na_2S_2O_8$ olmak üzere dört oksidan madde kullanmış ve düşük ve yüksek pH koşullarını karşılaştırabilmek amacıyla elektrolit pH seviyesini 3.5 veya 10 seviyesinde tutmuşlardır. Deneyler sonucunda bakır migrasyonu %8-94, piren migrasyonu ise %30-52 aralığında gözlenmiştir. Piren temizliği için en uygun oksidanın $KMnO_4$ olduğunu, ancak bu oksidanın bakır oksit oluşumuna sebebiyet verdiği için bakır migrasyonunu engellediğini belirten araştırmacılar, bu iki kirletici tipinin bir arada bulunduğu durumlar için en etkili koşulların, pH'ın 3.5 seviyesinde tutulması ve oksidan olarak $Na_2S_2O_8$ kullanılmasıyla oluştuğu yorumunu yapmışlardır.

Alshawabkeh vd. [37], elektroozmotik drenaj ve konsolidasyon, iyon enjeksiyonu ve ağır metal temizliği gibi, topraklara doğru akım uygulanan çeşitli çalışmalardan, elektrotlar arasındaki elektrokimyasal ortamın değişiminde gözenek basıncının etkisine dair bulguları derlemişlerdir. Araştırmacılar çeşitli çalışma sonuçlarına

dayanarak; iyonik enjeksiyonla elektroozmos sırasında toprak örneği boyunca pH ve iyonik gücün değişiminde profile bağlı olarak gözenek basıncının negatif veya pozitif olabildiğini, gözenek basıncının pozitif olduğu durumlarda elektroozmos etkinliğinin düştüğünü belirtmişlerdir. Ek bir enjeksiyon olmadan yapılan ağır metal temizliği işlemlerinde pH ve iyonik güç dağılımının negatif gözenek basıncı ve konsolidasyon oluşumunu tetiklediğini belirten araştırmacılar, biyo-iyileştirme işlemlerinde ise, katot yönünden laktik asit eklenmesi sonucu iyonik güç profilinin pozitif gözenek basıncı oluşturduğunu ve toprakta şişme görüldüğünü belirtmişlerdir.

Altın ve Değirmenci [38], toprakta yüksek alkali özellikte, yüksek katyon değişim kapasitesine sahip mineral içeriğinin elektrokinetik iyileştirme etkinliğine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla klinoptiolit, jips ve kalsit mineral içeriği yüksek, doğal toprak örnekleri ile kaolinit içeriği yüksek toprak örneği karşılaştırılmıştır. Farklı koşulların test edildiği çalışmada, en iyi performans yüksek pH koşullarını düşürme amacıyla katot bölgesine asetilkolin (ACh) solüsyonu eklenen deney sonucunda elde edilmiştir. Bu deneylerde, klinoptiolit, jips ve kalsit içeriği yüksek topraklarda %60-%70 aralığında Pb temizlik etkinliği sağlanırken, kaolinit içeriği yüksek toprakta %50-%95 aralığında etkinlik sağlanmıştır.

Elektrokinetik iyileştirmede ekonomik etkinliği geliştirmek isteyen Kornilovich vd. [39]; ağır metal ve radyonükleid temizlenme etkinliğine voltajın ekonomik etkisini araştırmak amacıyla, sabit voltaj ile akımın sürekli kesilip başlatıldığı bir yöntem olan tek kutuplu atım voltajını karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda sabit voltaj ile tek kutuplu atım voltajı sonucu oluşan etkinlik aynı çıkmıştır ve tek kutuplu atım voltajında akım sürekli olmadığından ekonomik anlamda sabit voltaja göre daha kullanışlı bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, U radyonükleidleri ile kobalt kirliliğinin incelendiği çalışmada aynı zamanda, çeşitli etkinlik artırıcı solüsyonların performansları da araştırılmış ve özellikle katyon değişimini sağlayan, küresel granüller halinde bulunan çok güçlü bir asidik katyonit olan CU-2-8 kullanıldığında kirlilik temizliğinde performansın belirgin şekilde arttığını belirtmişlerdir.

Ryu vd. [40]; çinko ve kadmiyum kirlilikleri için, vurumlu voltaj kullanıldığında anot çevresinde ağır metallerin desorpsiyonun daha iyi olduğunu, ancak katot yönünde taşınma etkinliğin azaldığını belirlemişlerdir. Bu çalışmada, yüksek frekanslı vurum

kullanıldığında, düşük frekanslı vuruma oranla daha yüksek temizlenme etkinliği sağlandığı saptayan araştırmacılar, genel olarak vurumlu voltajın iyileştirme etkinliğine pozitif, iyon taşınımına ise negatif etkisi olduğunu vurgulamışlardır.

Yuan vd. [41]; kadmiyum (Cd) ile kirletilmiş bir toprakta elektrokinetik stabilizasyonda güneş panellerinin etkinliğini saptayabilmek amacıyla biri kapalı bir günde ve biri güneşli bir günde olmak üzere 2 ayrı güneş panelli deney ve 1 doğru akım sağlayan güç kaynaklı deney yapmışlardır. Güç kaynağı kullanılan deneyde %14.9, kapalı günde uygulanan güneş panelli deneyde %17.1 ve güneşli günde uygulanan deneyde %18.3 Cd migrasyon etkinliği belirleyen araştırmacılar, üç deneydeki akım ve potansiyel birbirinden farklı olsa da sonuçların karşılaştırılabilir olduğunu ve güneş paneli kullanımın elektrokinetik iyileştirmede çok yüksek ekonomik faydaları olabileceğini belirtmişlerdir.

Sıfır değerlikli demirin elektrokinetik iyileştirme üzerine etkisini inceleyen Weng vd. [42], 2497 mg/kg Cr (VI) ile yoğun olarak kirlettikleri bir toprak kullanmışlardır. Toprak örneğinin merkezine 1:1 oranında kum ve sıfır değerlikli demir iyonlarından oluşan bir duvar yerleştiren araştırmacılar, iyon kullanılmayan deneylerde 1 ve 2 V/cm'de sırasıyla 68.1% ve 79.2% oranında temizlik sağlarken, iyon kullandıkları deneylerde bu oranı 85.8% ve 92.5%'e çıkarmayı başarmışlardır. Bu çalışmada, elektrokinetik iyileştirme açısından saptanan en önemli bulgu, daha önceki çalışmalarda görülmeyen, anot yönüne doğru olan ters elektroozmotik harekettir. Araştırmacılar, bu ters elektroozmotik akışın, anyonik kromat iyonlarının anod yönüne hareketine bağlı olduğunu belirtmiş ve bu sayede, Cr desorpsiyonunun, yani elektrokinetik iyileştirme açısından tercih edilir olan alkali koşulların tüm toprak örneğine yayılabildiğini belirtmişlerdir.

2.2. Ankara Kili ile İlgili Çalışmalar

Ankara kili ile ilgili olarak günümüze dek jeoloji, jeomühendislik, jeoteknik, hidrojeoloji gibi alanlarda pek çok çalışma yapılmıştır. Mevcut çalışmanın kapsamı göz önünde bulundurularak, Ankara kilinin özellikle jeoteknik ve jeomühendislik özelliklerine yönelik çalışmalardan bir derleme bu bölümde sunulmuştur.

ODTÜ Yerleşkesi'nden örselenmiş ve örselenmemiş olarak alınan örnekler üzerinde çalışan Doruk [43], şişmenin doğal su içeriğinin artışıyla azaldığını, kil

içeriğiyle ve plastisite indeksi artışıyla ise arttığını saptamıştır. Benzer bir çalışmada Akbay [44] ise plastisite artışıyla şişmenin arttığını belirtmiştir. Yüncü [45] ise; 0,70-1,00 kgf/cm² aralığında şişme basıncı saptadığı killi zeminlerde, silt miktarı arttıkça şişme basıncının azaldığını saptamıştır. Ankara Kili'nin şişme-büzülme özelliği gösterdiğini belirten araştırmacı, bu tip zeminlerde yapı inşası sonrasında yapıların zarar görebileceğini, inşaattan önce zeminin sıkıştırılması veya kaldırılması gerektiğini belirtmiş, ayrıca zemin karakteristiğinin daha iyi anlaşılması için doğal su içeriği, yapısal özellikler ve kuru birim hacim ağırlık gibi faktörlere bağlı olarak zeminin daha fazla araştırılmasını önermiştir.

Ankara'nın kuzey ve orta bölgelerinden aldığı toprak ve kayaç örnekleri üzerinde jeomekanik deneyler yaparak zeminleri sınıflandıran Ulusay [46], bu sınıflandırmaya dayanan 1/15000 ölçekli ayrıntılı bir mühendislik jeolojisi haritası hazırlamış ve Ankara'da, üzerinde yoğun olarak yerleşim de gözlenen Pliyosen yaşlı göl çökellerinde şişme-büzülme, oturma gibi sorunlar olabileceğini vurgulamıştır.

Ordemir vd. [47], ön konsolidasyona uğramış, fisürlü çökeller olarak tanımladıkları killi zeminlerin üst seviyelerinde gözlenen karbonat konkresyonlarının şişme potansiyelini azalttığını saptamışlardır.

Ankara Kili'nin çeşitli jeolojik ve jeomühendislik özelliklerini araştıran Akalan [48], kil yüzdesini 35-77% aralığında saptamış ve simektit grubu killerin yüksek oranda olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, zeminin hidrolik iletkenliğini $2,7 \times 10^{-6}$, elektriksel iletkenliğini ise 0,413-1,420 mmhos/cm olarak belirlemiştir.

Birand [49], Ankara zeminlerini residüel, Ankara kili ve alüvyal killer olarak üç grupta inceleyerek bu zeminlerde oluşabilecek mühendislik sorunlarını araştırmıştır. Ankara kilinin şişme-büzülme özelliği gösterdiğini vurgulayan araştırmacı, bu tip zeminlerde hafif yapıların hasara uğradığını ve bu zeminlerin sıkıştırılmış dolgularda kullanılması halinde şişmeye bağlı sorunlar oluşacağını belirtmiştir. Bu sorun nedeniyle sıkıştırma dolgularda Ankara kili kullanılacaksa, kilin optimum su içeriğinde sıkıştırılması gibi önlemlerin alınması gerektiğini belirtmiştir.

Kasapoğlu [50], Ankara zeminlerinin mühendislik özelliklerini incelediği geniş kapsamlı çalışmasında; kayaç ve zeminleri sınıflandırarak 1/15000 ölçekli bir mühendislik jeolojisi haritası hazırlamıştır. Pliyosen yaşlı olarak tanımladığı akarsu ve gl çökellerindeki killi zeminlerde uyguladığı XRD analizleri ile simektit içeriğinin oldukça yüksek olduğunu saptayan araştırmacı, şişme-büzülme sorunları, şev stabilitesi gibi sorunların, özellikle yeraltı suyunun yzeeye yakın olduğu kesimlerde inşa edilecek yapıları etkileyebileceğini belirtmiştir.

Etimesgut-Batıkent st Pliyosen kellerinde konsolidasyonu inceleyen Kiper [51], içinde karbonat konkresyonları gözlenen bu zeminlerin, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırması'nda CH grubuna denk geldiğini ve n yüklemeye uğramış, $17,5 \times 10^{-8}$ cm/s konsolidasyon katsayılı, aşırı konsolide killer olduğunu belirtmiştir. Bu bölge zeminlerinde önemli bir oturma sorunu yaşanmayacağı, ancak zemine $3,5 \text{ kg/cm}^2$ 'den fazla basınc aktarılması durumunda mühendislik sorunlarına karşı önlem alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Teoman vd. [52], Ankara E90 otoyolu boyunca oluşan şev stabilitesi sorunlarını inceledikleri çalışmalarında, Ankara kilinin mineralojik ve jeo-teknik özelliklerinin stabilite sorunlarına etkisini araştırmışlardır. Kısa vadeli güvenlik katsayısı (FS) olarak Türkiye'de KGM (1995) tarafından önerilen 1,5'in kullanıldığı çalışmada, tüm şevlerin kısa vadeli sınır değerin üzerinde güvenlik katsayılarına sahip olduğu saptanmış, ancak şevlerin 1.1 olan uzun vadeli durumlar için güvenlik katsayısının ya altında ya da çok az üzerinde olduğu, halihazırda yenilmiş olan şevlerde uzun vadede tekrar sıkıntılar oluşabileceği belirtilmiştir.

Ergüler [53], Ankara kilinin şişme parametreleri ve anizotropisini incelemek amacıyla, 20 lokasyondan alınan örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde şişme deneyleri ve indeks parametreleri deneyleri gerçekleştirmiştir. Aktif zon derinliğini yüzeyden 2 m olarak belirleyen araştırmacı, örselenme ile birlikte şişmenin arttığını belirtmiş ve odometre deneyleri sonucunda yanal yönde şişme basıncının düşey yöne oranla daha fazla olduğunu saptamıştır. Su içeriğinin 30%'u aşmasıyla birlikte şişme basıncının sönümlendiğini belirleyen araştırmacı, su içeriğine dayanan, $W_{\max 23,72}$ olarak isimlendirdiği bir parametre ve bu parametrenin belirlenmesine yönelik bir deney yöntemi önermiştir. Bu parametre üzerine alışan Ergüler ve Ulusay [54, 55], kilin şişme basıncı ve miktarı ile önerilen parametre arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu ampirik ilişkiler ile

kanıtlamış, bu ilişkilere dayalı Ankara merkez ve güneybatı kesimlerini kapsayan bir şişme potansiyeli haritası hazırlamışlardır. Araştırmacılar, Ankara kilinin yüksek-çok yüksek aktiviteye ve yüksek şişme basıncına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Avsar vd. [56], Ankara kilinin şişme anizotropisini değerlendirmek için, kilin dikey ve yatay yönde şişme potansiyeli ile yüzdesini belirleyerek bu yönlerdeki parametreleri karşılaştırmışlar ve buna ek olarak elektron mikroskopisi analizi ile kilin mikroyapısının şişme davranışına etkisini araştırmışlardır. Yatay ve dikey yönlerdeki şişme basıncı oranının 0.34-0.98 aralığında değiştiğini saptayan araştırmacılar, Ankara kilinin kil minerallerinin yatay ya da yataya yakın katmanlanma gösterdiğini gözlemlemiş ve bu nedenle dikey yönlü şişme parametrelerinin daha yüksek olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Çamur ve Yazıcıgil [57], üç farklı seviyede sıkıştırılmış Ankara kilinde ağır metallerin hareketini absorpsiyon, adveksiyon ve hidrodinamik dispersiyon açısından inceledikleri çalışmalarında, optimum kompaksiyon koşullarında hazırlanmış örnek için efektif poroziteyi 0,32, hidrolik iletkenliği ise $0.13-0.26 \times 10^{-8}$ cm/s olarak belirlemişlerdir. Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, Pb ve Zn iyonları için difüzyon katsayılarını ise sırasıyla 2,54, 9,51, 2,22, 2,85, 2,22, 7,93, 2,54, 3,08, 1,59, 3,17 ve 2.54×10^{-6} cm²/s olarak saptamışlardır.

Ankara kilinin düzenli katı atık depo alanlarında astar malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştıran Sezer vd. [58], ana kil minerallerini illit, simektit, klorit ve kaolinit olarak saptamış ve bunlara ek olarak kuvars, feldspat, kalsit ve Fe-Ti oksitleri bulunduğunu belirtmişlerdir. Ag-Tu metodu ile kilin katyon değişim kapasitesi (CEC) 41 meq/100 g olarak belirlenmiş, çeşitli ağır metaller ile deneyler sonucunda kil tarafından tutulma oranları $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+}$, Cd^{2+} şeklinde gerçekleşmiştir. Kil içeriğindeki demir oksitlerin özellikle Pb^{2+} ve Cu^{2+} metallerinin tutulmasında etkili olduğunu belirten araştırmacılar, Ankara kilinin düzenli atık depo alanlarından geçirimsiz astar tasarımına dahil edilebileceği yorumunu yapmışlardır.

Simektitce zengin Ankara kilinin stabilizasyonu üzerine çok az araştırma yapıldığını vurgulayan Tonoç vd. [59], laboratuvar boyutunda kireç sütunu ile stabilizasyon tekniğini uygulamışlar ve kür sonrasında, kil özelliklerini stabilize

sütuna uzaklık ve kür süresi açısından değerlendirmişlerdir. Genel olarak, kireç migrasyonu için en etkin zonun, 28 gün kür süresi ile sütun çapının ortalama 2 katı mesafede olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, bu teknik ile %40 - %80 aralığında dayanım artışı, ön konsolidasyon basıncında yükselme ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinde azalma sağlanmıştır.

Tonoz vd. [60], benzer bir çalışmada, toz halinde sönmemiş kireç kullanarak Ankara kilinin fiziksel, şişme ve dayanım özelliklerini iyileştirmeye çalışmışlardır. Ağırlıkça %2 - %10 aralığında değişen 5 farklı kireç/kil karışımının performanslarını laboratuvar ölçeğinde test eden araştırmacılar, stabilizasyon süresini 3, 7, 14 ve 28 gün tutarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, 28 günlük kür sonrasında tek eksenli sıkışma dayanımının %84 arttığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, Ankara kilinde puzzolanik reaksiyonların flokülasyondan daha yavaş gerçekleştiği, şişme göz önünde bulundurulduğunda, %4 kireç içeriği ve 28 günlük kür süresinin optimum stabilizasyon sağladığı belirtilmiştir.

3. YÖNTEM

Bu bölümde deneylerin uygulanışına dair bilgilerin, deneyin her bir aşaması için ayrıntılı olarak anlatılmasına ek olarak, deneylerde kullanılan düzenek ve çözeltiler gibi bileşenlerin özellikleri de açıklanmaktadır.

Elektrokinetik stabilizasyon ve elektrokinetik iyileştirme deneylerinde genel olarak dikdörtgen prizma düzenekler ve bu düzeneğin iki ucunda plaka şeklinde elektrotlar kullanılmaktadır ancak Giriş bölümünde açıklanan amaçlara uygun olarak bu çalışmada dairesel bir düzenek ve çoklu elektrot konfigürasyonları uygulanmıştır. Deneylerin tamamında yapay olarak hazırlanmış Ankara kili örnekleri kullanılmıştır. Dairesel bir ünite içerisine örselemeden örnek yerleştirmek mümkün olmayacağı için bu yöntem tercih edilmiştir. Yapay örnek kullanımındaki bir diğer amaç, dayanım artışının doğru belirlenebilmesi ile ardından çeşitli deney koşullarındaki dayanım artışı farklılıklarının ve örneğin farklı noktalarından alınan dayanımlardaki değişimlerin tutarlı bir şekilde karşılaştırılması gerekliliğidir. Elektrokinetik deneylerine başlanmadan önce öncelikle konsolide edilen örnekten dayanım verileri alınmış, ardından elektrokinetik deneyleri sonrasında elde edilen dayanım verileriyle karşılaştırılmıştır. Deneyler süresince kaydedilen diğer veriler ise, pH, akım ve elektrik potansiyeldir.

3.1. Örnek Alımı

Deneylerde kullanılan Ankara kili; Orta Doğu Teknik Üniversitesi lojmanlar bölgesi, 39°53'22.44"K enlem ve 32°46'33.44"D boylam koordinatlarından örselenmiş örnek olarak alınmıştır. Örnekleme noktası Şekil 3.1'deki haritada verilmiştir. Deneyler için kullanılacak örneklerin tamamında ön hazırlık olarak gözle görülür boyutta, saptanabilen tüm bitki parçaları ve kökler temizlenmiştir.

3.2. Kullanılan Toprağın Karakteristik Özelliklerinin Belirlenmesi

Deneylerde kullanılacak olan Ankara kilinin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla tane boyu analizi (ASTM D422) [61] yapılmış, likit limiti ve plastik limit (ASTM D4318) [62] ile büzülme limiti (ASTM D427) [63] belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan toprağın mineral içeriği ve kil fraksiyonu XRD analizi ile belirlenmiştir.



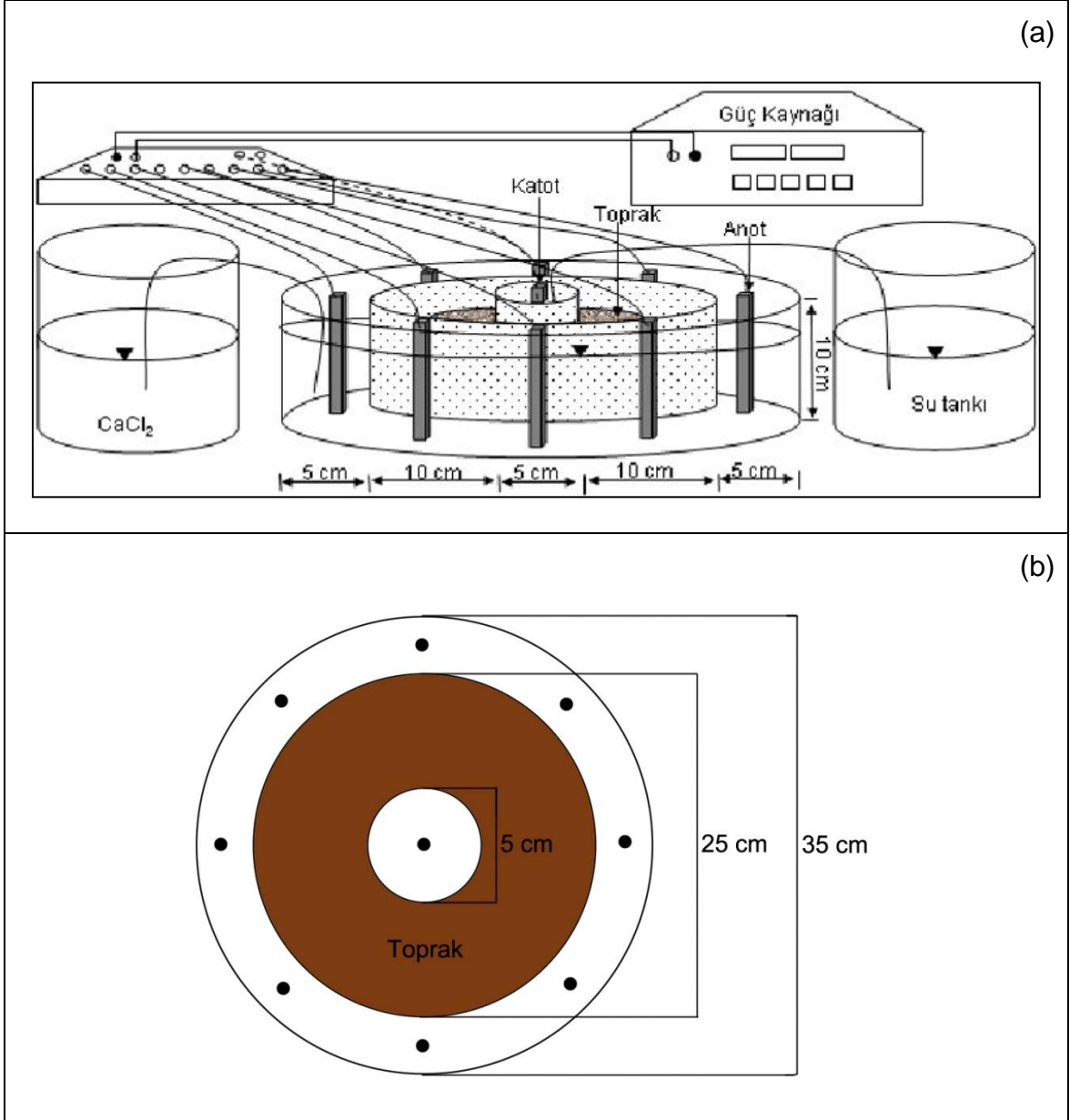
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan toprak örneğinin alındığı lokasyon.

3.3. Elektrokinetik Stabilizasyon Düzeneği

Elektrokinetik stabilizasyon düzeneği; dairesel elektrokinetik stabilizasyon ünitesi, 12 cm × 1.5 cm × 1.5 cm boyutlara sahip, özel olarak kestirilmiş 9 grafit elektrot, doğru akım sağlayan bir güç kaynağı, güç kaynağından gelen elektriği 9 elektrota dağıtan bir çoklayıcı ile ek bağlantı kabloları, çözeltiler için 2 su tankı ve çözeltili sirkülasyonunu sağlayan iletim borularından oluşmaktadır.

Elektrokinetik performansını ölçmek üzere tasarlanan düzenek, Türer ve Genç'in [4] kullandıkları dairesel düzenek ile aynı olacak şekilde, pleksiglastan özel olarak imal edilmiştir. Düzenek; dış, orta ve iç bölme olmak üzere toplam 3 eş merkezli dairesel bölümden oluşmaktadır. Yüksekliği 10 cm olan ünitenin 5 cm çaplı iç bölümü elektrot bölümü, 25 cm çaplı orta bölümü toprak bölümü ve 35 cm çaplı dış bölümü elektrot bölümüdür. Toprağın konulduğu orta bölmenin iç ve dış duvarları, çözeltili geçişini sağlamak amacıyla delikli olarak tasarlanmıştır. Çapı 3 mm olan bu delikler mümkün olduğunca sık aralıklarla açılmıştır ve deneyler öncesi düzeneğe toprak konulmadan önce, toprağın bu deliklerden geçmemesi için duvarların iç yüzeylerine filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Düzenek dışındaki su tanklarından iletim boruları aracılığıyla iç ve dış bölmeye çözeltili ve saf su girişı sağlanmaktadır. Deneylerde dış bölüme yerleştirilen elektrot konfigürasyonu, iç bölümdeki tek elektrota göre sekizgen olarak düzenlenmiştir.

Elektrokinetik düzeneğinin yan ve üst görünüm şemaları Şekil 3.2'de, düzeneğin kurulu haldeki bir fotoğrafı ise Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Elektrokinetik düzenek şeması -
(a) yan görünüm (3. deneydeki haliyle) [4], (b) üst görünüm.



Şekil 3.3. Elektrokinetik düzeneğin kurulu hali.

3.3. Konsolidasyon İşlemi

Deneyel çalışmalar yapay olarak Ankara kili ile hazırlanmış toprak örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak toprak, saf su ile %61 likit limitte hazırlanmıştır. Ardından deney düzeneğinin orta bölmesinin iç ve dış çeperlerine filtre kağıdı yerleştirilip, toprak bu bölmeye içinde hava kabarcığı kalmasını mümkün olduğunca engelleme amacıyla küçük parçalar halinde doldurulmuş ve yüzeyi bir spatula yardımıyla düzleştirilmiştir. Orta bölmenin çapına uygun kesilmiş ahşap bir kaide bu bölmenin üzerine yerleştirilmiş, bunun üzerine konan 130 kg yük ile toprağın konsolidasyonu sağlanmış ve kaide üzerine okuma saati yerleştirilerek konsolidasyonun sabitlenmesi için beklenmiştir. Konsolidasyonun sabitlenmesinin ardından, elektrokinetik stabilizasyon işlemleri öncesinde toprağın makaslama dayanımının saptanması amacıyla kanatlı kesici ile drenajsız makaslama dayanımı verileri alınmış ve kaydedilmiştir.

Konsolidasyon işlemi her bir elektrokinetik stabilizasyon deneyi öncesinde tekrar edilmiş ve konsolidasyonun durması sonrasında düzeneğin iç ve dış haznelere saf su konularak 1 gün süreyle toprağın suya doymun hale gelmesi sağlanmıştır.

3.4. Elektrokinetik Stabilizasyon Deneylerinin Yapılması ve Dayanımın Ölçülmesi

Her bir elektrokinetik deneyi için verilen kimyasal çözeltilerin ve elektrotların yerleştirilmesi aşağıda şekillerde yapılmıştır:

- 1. deneyde (D-1) anot iç bölüme yerleştirilmiş ve bu bölüme 1 molar CaCl_2 solüsyonu girişi düzeneğin dışındaki bir tankla sağlanmıştır. Toplam 8 adet katot ise dış bölüme yerleştirilmiş ve bu bölüme düzeneğin dışındaki bir tanktan saf su sağlanmıştır.
- 2. deney (D-2) D-1 ile aynı şekilde kurulmuştur. Ancak, uygulama süresi farklıdır.
- 3. deneyde (D-3) düzeneğin iç kısmına katot yerleştirilmiş ve bu bölümden saf su verilmiştir. Düzeneğin dış kısmına ise 8 adet anot yerleştirilmiş ve bu bölümden 1 molar CaCl_2 solüsyonu verilmiştir.
- 4. deneyde (D-4), D-3 ile aynı şekilde bir kurulum yapılmıştır. Ancak, bu deneyde dış bölümde, CaCl_2 çözeltisine ek olarak Ca(OH)_2 çözeltisi de sağlanmıştır.

Yukarıda ifade edilen farklı elektrot dizilimleri ile dairesel bir düzenekte anot ve katot elektrotların yerleri değiştirilerek etki ettikleri alanlar üzerindeki farklılıkların gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

Tüm deneyler için anot/katot yerleşim yerleri, deney süreleri, kullanılan çözeltiler ve çözeltiler ile saf suyun sağlandığı bölmeler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneylerde elektrot konfigürasyonu, çözeltiler ve deney süreleri.

Deney	İç Bölme		Dış Bölme		Süre (gün)
	Elektrot	Çözelti	Elektrot	Çözelti	
D-1	Anot	CaCl_2	Katot	Saf su	15
D-2	Anot	CaCl_2	Katot	Saf su	10
D-3	Katot	Saf su	Anot	CaCl_2	10
D-4	Katot	Saf su	Anot	$\text{CaCl}_2 + \text{Ca(OH)}_2$	10

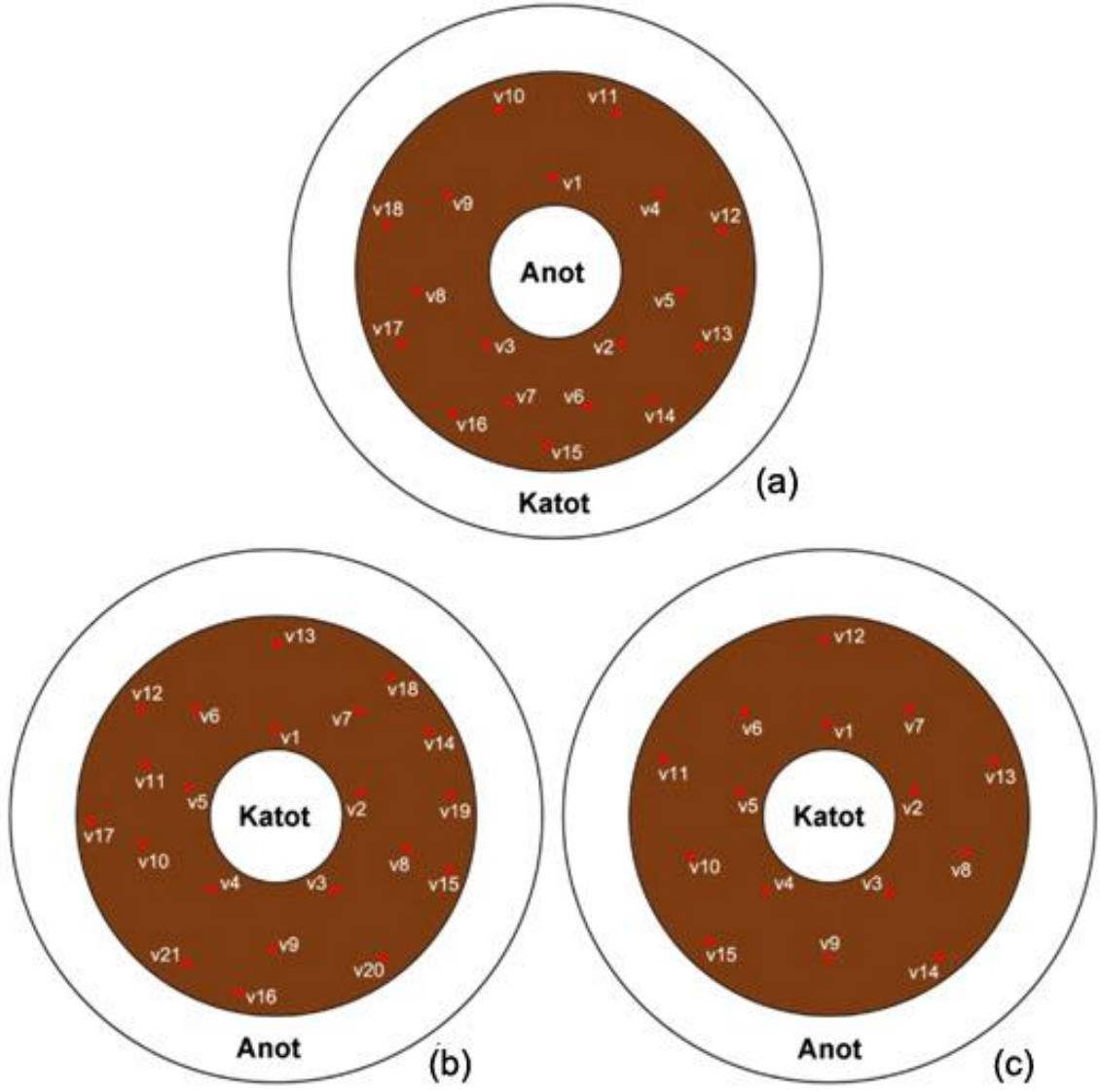
Elektrokinetik stabilizasyon deneylerinin birincisinde deney süresi 15 gün olarak belirlenmiştir. 4. Bölüm’de detaylı olarak anlatılacağı üzere, bu deney sonucunda dayanımdaki artışın çok yüksek olması ve oluşan son dayanımların makaslama

dayanımını ölçmede kullanılan kanatlı kesicinin yay limitlerini aşması sebebiyle daha sonraki deneylerin tamamı 10 gün süreyle gerçekleştirilmiştir.

Deneylerin tamamında doğru akım sağlayan güç kaynağı ile 10 volt sabit akım verilmiş ve tüm deneylerde akım verilen süre boyunca anot ve katot bölmelerinden pH, elektrik potansiyel ve akımın zamanla değişimi kaydedilmiştir.

Deneylerin sonunda, kanatlı kesici ile anot bölgesinden 2.5, 5 ve 7.5 cm mesafelerden mümkün olduğunca çok drenajsız makaslama dayanımı verisi alınmıştır. 10 gün süren tüm deneylerde, kanatlı kesici ile dayanım ölçülen noktaların şematik gösterimi Şekil 3.4'de verilmektedir. 15 gün süren Ek-1 deneyinde anot bölgesine yakın kesimlerde kanatlı kesicinin ölçemeyeceği kadar yüksek dayanım verileri alındığından bu deneye ait veri noktaları şekle dahil edilmemiştir. Kanatlı kesici ile drenajsız makaslama dayanımı verilerinin alınımı gösteren bir fotoğraf ve dayanım verisi alındıktan sonra düzenekte toprağın görünümünü gösteren bir fotoğraf ise Şekil 3.5'de verilmektedir.

Yöntem aşamaları Şekil 3.6'da verilen akış şemasında özetlenmektedir.



Şekil 3.4. Kanatlı kesici makaslama deneyinde dayanım verisi alınan noktalar –
 (a) D-2, (b) D-3, (c) D-4.

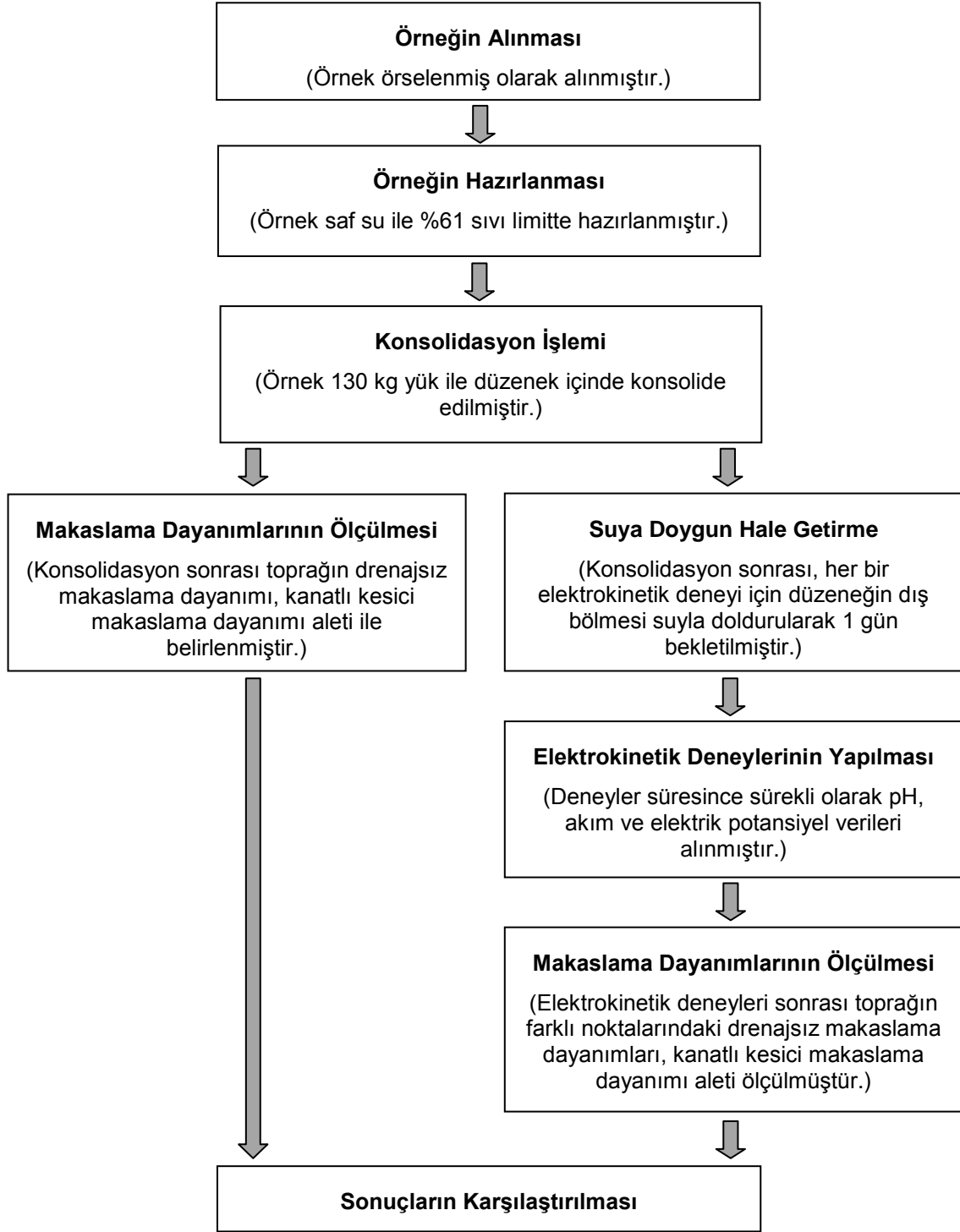
(a)



(b)



Şekil 3.5. (a) Kanatlı kesici makaslama dayanımı aleti ve düzenek, (b) drenajsız makaslama dayanımları alındıktan sonra toprağın görünümü.



Şekil 3.6. Yöntem aşamaları özeti.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR DAN ELDE EDİLEN VERİLER VE TARTIŞMA

4.1. Deneylerde Kullanılan Ankara Kilinin Özellikleri

4.1.1. Tane Boyu Analizi

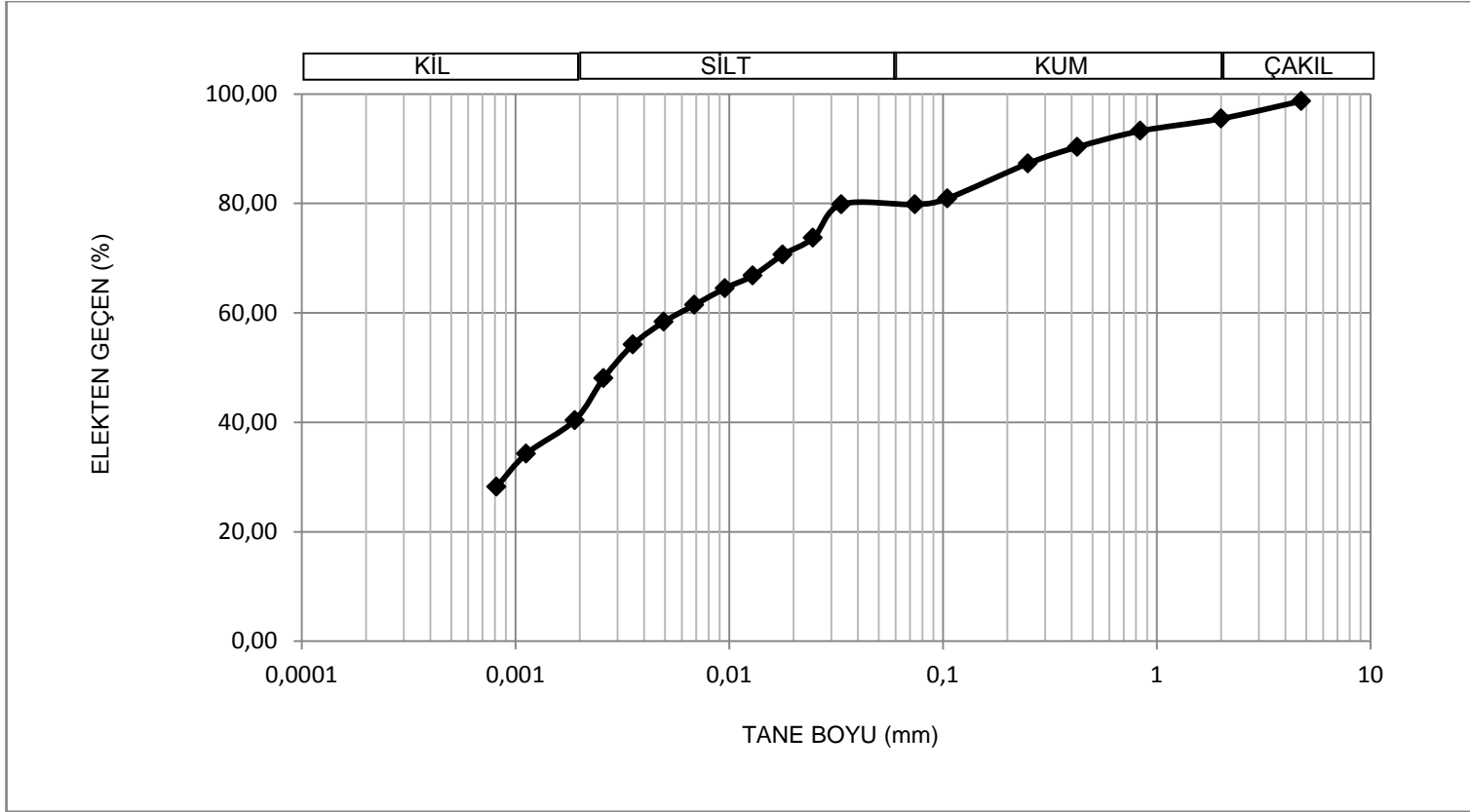
Deneylerde kullanılan toprak ortalama %40 kil, %40 silt, %15,5 kum ve %4,5 çakıl içermektedir. Toprağın tane boyu dağılımı Şekil 4.1’de verilmiştir. Elde edilen tane boyu dağılımları, deneylerde kullanılmak üzere seçilen toprağın elektrokinetik stabilizasyon işleminin en etkin şekilde uygulandığı killi zemin tanımlamasına uyduğunu göstermiştir.

4.1.2. Atterberg Limitleri

Atterberg limitleri ve büzülme limiti test sonuçları Çizelge 4.1’de verilmektedir. Bu sonuçlar göre deneylerde kullanılan kil, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’nde (USCS) CH sınıfındadır. ASTM Mühendislik Amaçları için Toprak Sınıflandırması Standardı’na göre (ASTM D2487) [63], CH sınıflandırması bu kilin yüksek plastisiteli, inorganik bir kil olduğunu belirtmektedir.

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

Atterberg Limitleri ve Parametreleri	
Likit Limit (LL) (%)	61,00
Plastik Limit (PL) (%)	22,14
Plastisite İndeksi (PI)	38,86
Büzülme Limiti (SL) (%)	15,92
Büzülme Oranı (SR)	1,792



Şekil 4.1. Tane boyu dağılımı

4.1.3. Mineraloji

Deneylerde kullanılan kilin işlem öncesi ve sonrasındaki mineral bileşiminin saptanması amacıyla yapılan XRD analizi sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. İşlem görmemiş toprakta yapılan tüm kayaç analizinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

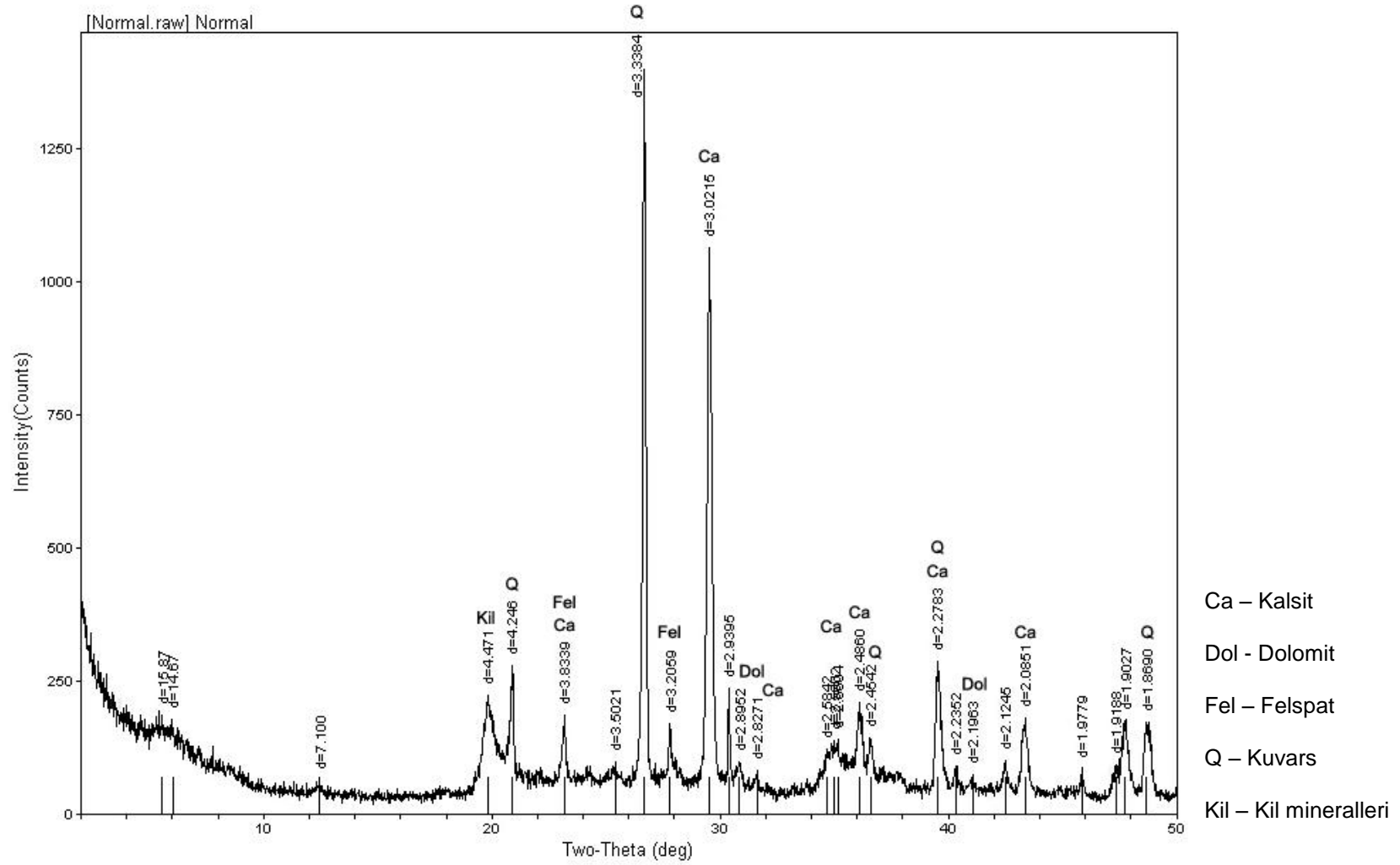
Çizelge 4.2. İşlem görmemiş toprakta belirlenen mineraller.

Mineral	Miktar (%)
Dolomit	4.4
Feldspat	4.2
Kalsit	19.2
Kil Mineralleri	60.2
Kuvars	12.1

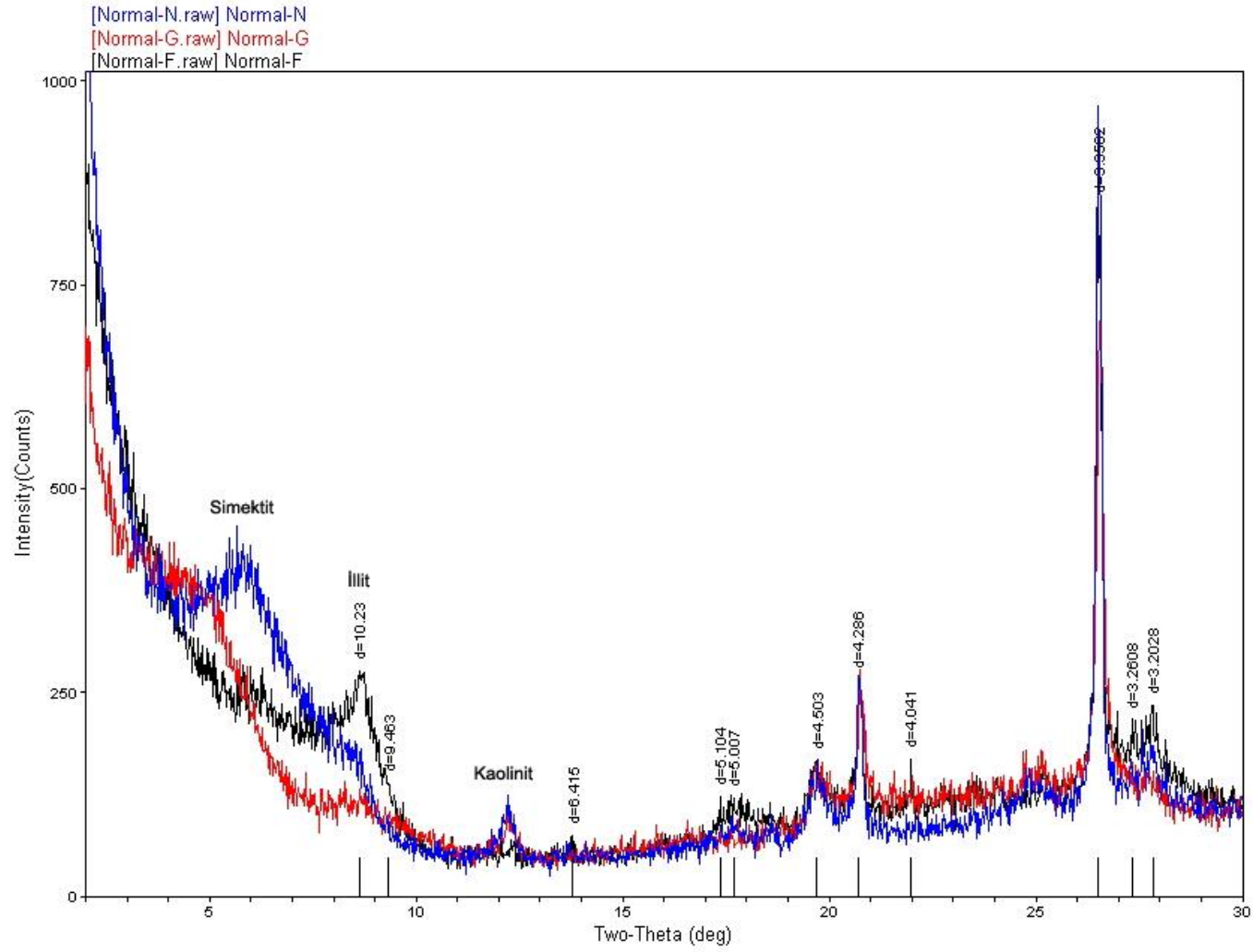
İşlem görmemiş toprakta XRD analizi sonucunda kil fraksiyonunda belirlenen yüzdelere incelendiğinde, kil fraksiyonunun önemli bir kısmını simektit minerallerinin oluşturduğu gözlenmektedir. Toprakta simektitin yanısıra illit ve kaolinit de bulunmaktadır. İşlem görmemiş toprak için kil mineral içeriği Çizelge 4.3 ve Şekil 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. İşlem görmemiş toprakta belirlenen kil mineralleri.

Kil Minerali	Miktar (%)
İllit	26.67
Kaolin	30.00
Simektit	43.33



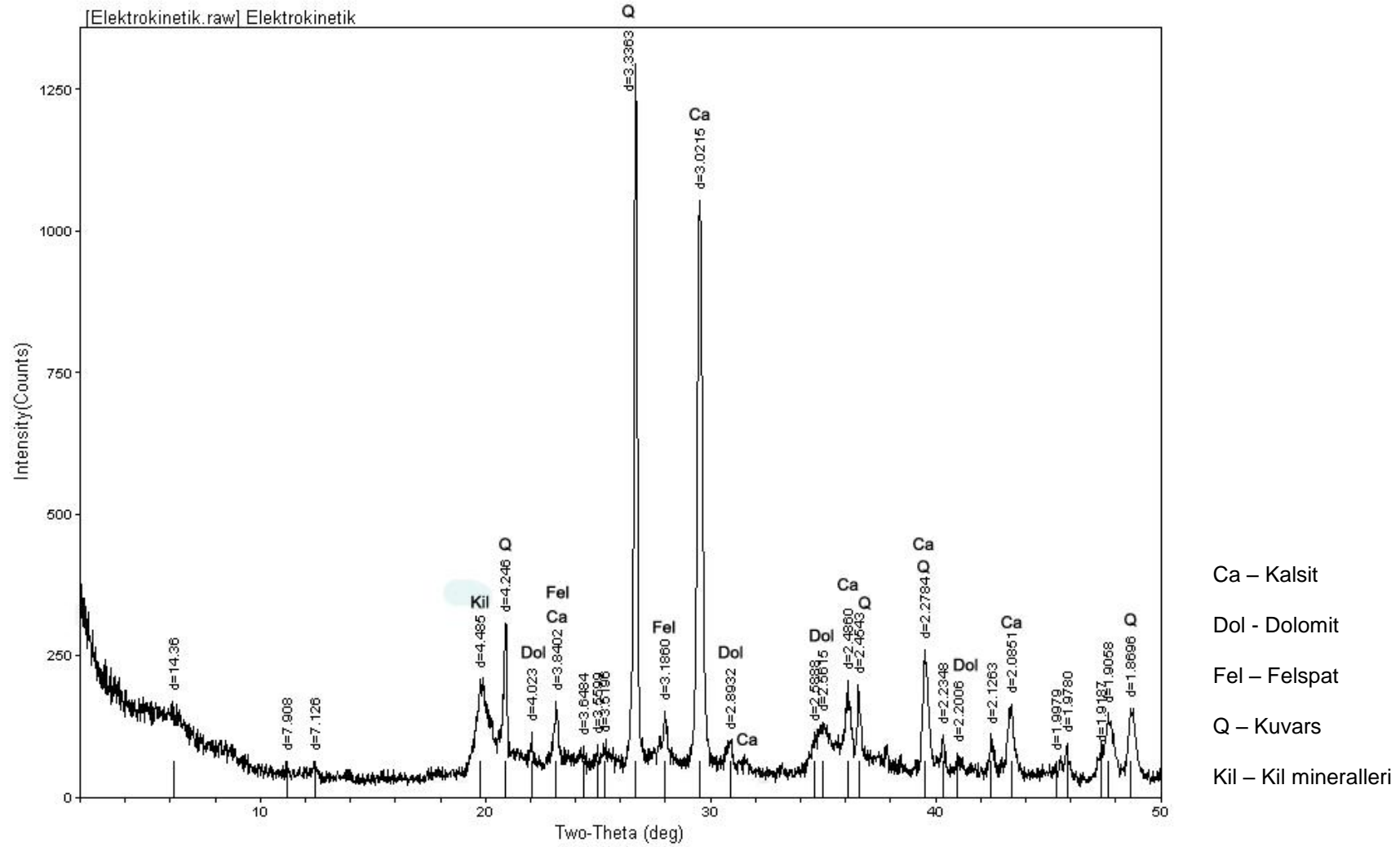
Şekil 4.2. İşlem görmemiş toprakta XRD tüm kayaç analizi sonuçları.



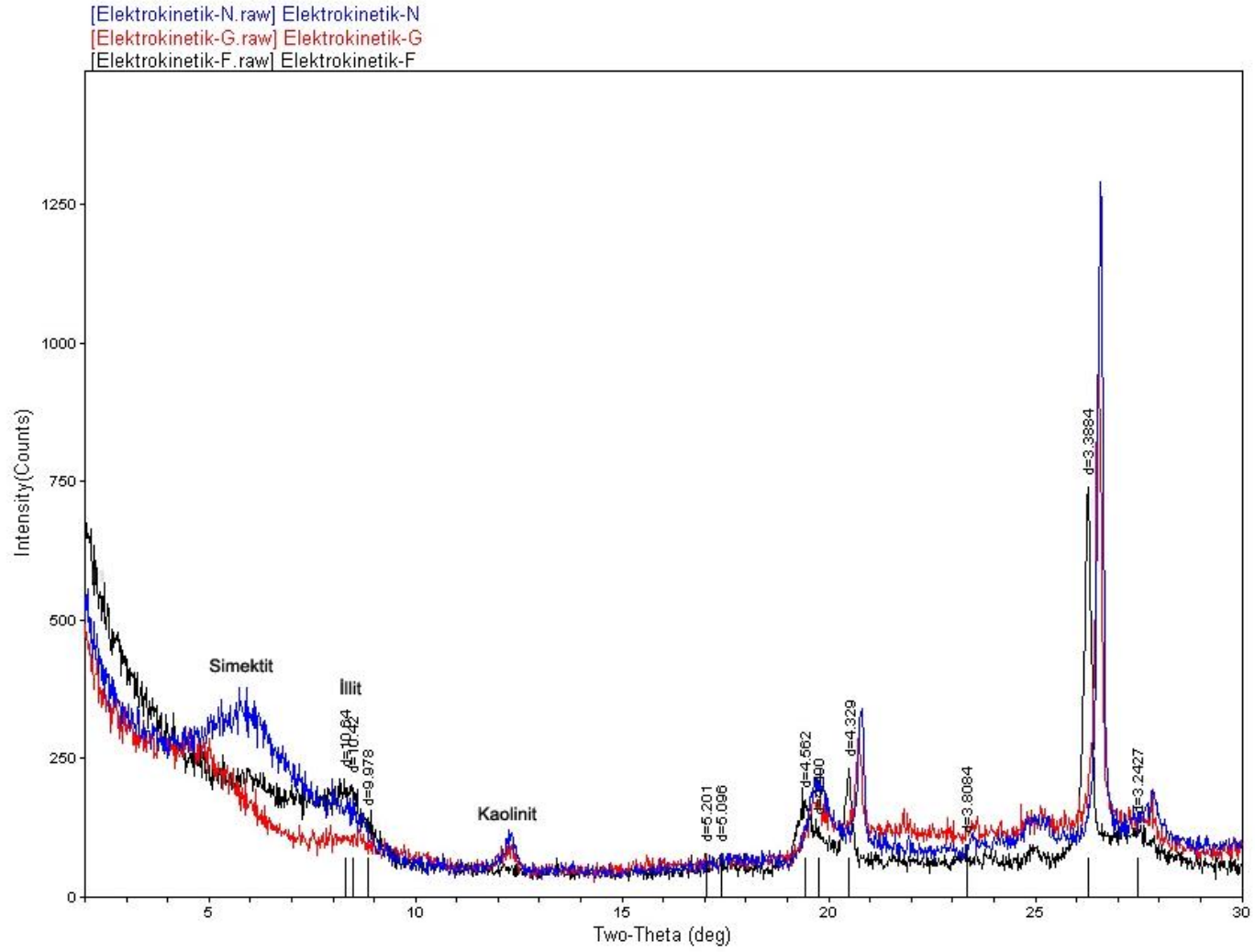
Şekil 4.3. İşlem görmemiş toprakta kil fraksiyonu

Elektrokinetik stabilizasyon sonrasında saptanan tüm minerallerin verildiği Şekil 4.4 ve kil fraksiyonunun verildiği Şekil 4.5 incelendiğinde, işlem sonrasında mineral içeriğinde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmektedir.

Hunnicut [65] ve Grangeon vd. [66], elektrokinetik stabilizasyon sonucunda oluşan ve makaslama dayanımında artış sağlayan esas mineral olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ile kalsiyum alumina hidrat (C-A-L) minerallerinin XRD'de saptanabilirliklerinin ve gösterdikleri piklerin içeriklerindeki silikat/kalsiyum oranına ve aluminyum içeriğine göre değişkenlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Hunnicut [65], işlem sonrasında oluşan ve dayanım artışını sağlayan C-S-H mineral piklerinin genel olarak kalsit ve silikat pikleri ile çakıştığını vurgulamıştır.



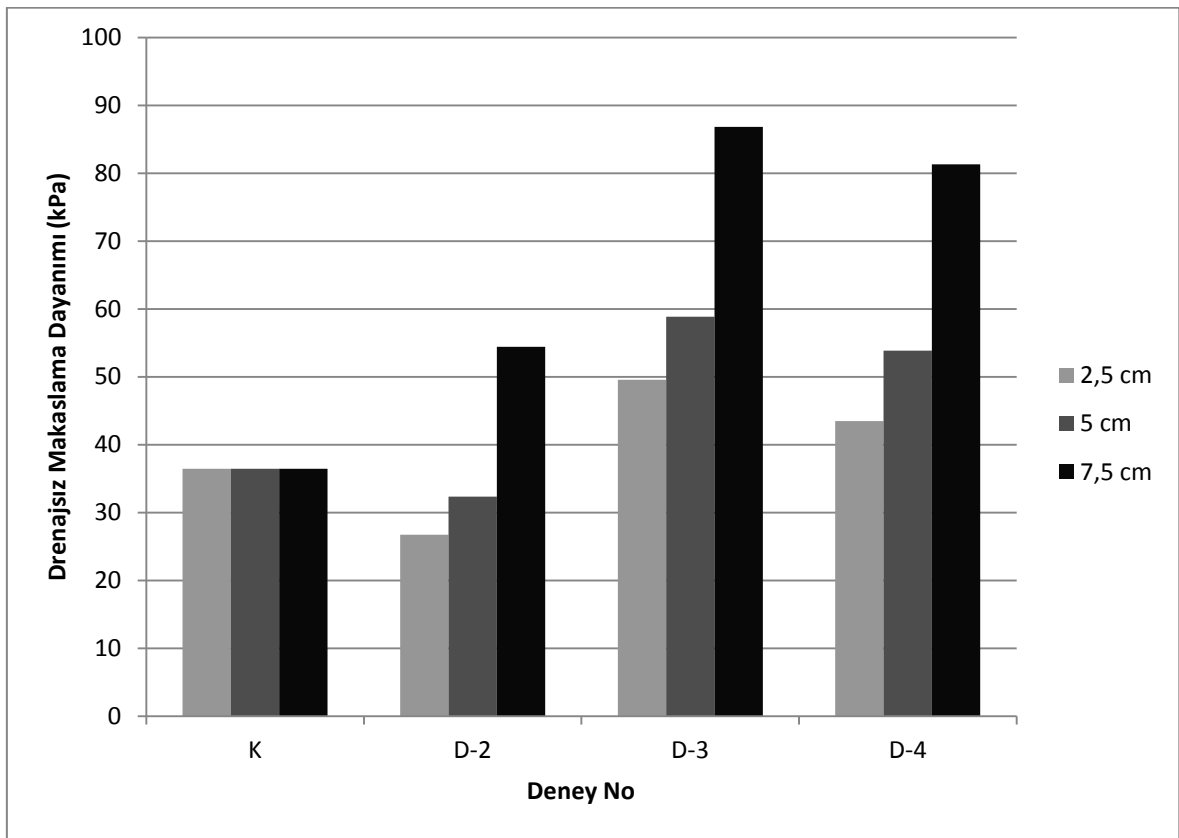
Şekil 4.4. Elektrokinetik stabilizasyon sonrası toprakta XRD tüm kayaç analizi sonuçları.



Şekil 4.5. Elektrokinetik stabilizasyon sonrası toprakta kil fraksiyonu.

4.2. Drenajsız Makaslama Dayanımları

Elektrokinetik stabilizasyon işleminin başarısını test etmek için önce işleme tabi tutulmamış örnekteki drenajsız makaslama dayanımı, konsolidasyon sonrası ölçülmüştür. Alınan dayanımlar birbirlerine yakın ve ortalama olarak 36.43 kPa olarak saptanmıştır. Konsolidasyon ve elektrokinetik deneyleri sonucu oluşan drenajsız makaslama dayanımları Şekil 4.6'da ve Çizelge 4.4'de, elektrokinetik stabilizasyon işlemi öncesine göre oluşan dayanım artış oranları ise Çizelge 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Anoda uzaklıklara göre makaslama dayanımı

Çizelge 4.4. Oluşan son drenajsız makaslama dayanımları (kPa)

Anoda Uzaklık	Son Dayanımlar (kPa)		
	2.5 cm	5 cm	7.5 cm
D-1	33.38	126.89	>221.6
D-2	26.73	32.37	54.4
D-3	49.58	58.37	86.22
D-4	45.25	53.83	81.3

Çizelge 4.5. Konsolidasyona göre dayanım artışları (%)

Anoda Uzaklık	Stabilizasyon İşlemi Öncesine Göre Dayanım Artışları (%)		
	2,5 cm	5 cm	7,5 cm
D-1	-8.37	248.31	>508.29
D-2	-26.62	-11.14	49.32
D-3	36.1	60.22	136.67
D-4	24.62	47.76	123.16

15 gün süreyle akım uygulanan ilk deney (D-1) sonucunda içte bulunan anoda 2.5 cm mesafeden alınan veriler dayanımda -8.33%'lük bir düşme olduğunu göstermektedir. Bu düşüşün, bu bölgede gözlenen topraktaki şişme ve çatlaklar sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Bu noktadan 2.5 cm katot yönüne doğru ilerlendiğinde ise dayanımın çok keskin bir sınırla artışa geçtiği görülmüştür. Bu noktada konsolidasyon sonrası elde edilen dayanıma oranla %248.31 dayanım artışı ile 126.89 kPa'lık bir son drenajsız makaslama dayanımı ölçülmüştür. Anottan 7.5 cm uzaklıkta ise dayanım artışı mevcut kanatlı kesici ile ölçülemeyecek kadar yüksek seviyelere ulaşmıştır. Bu noktada deney aletine zarar verilmeden alınabilen en yüksek veriye göre konsolidasyona oranla %508.29'luk bir dayanım artışı oluşmuştur.

D-1 ile aynı şekilde kurulan, ancak 10 gün süreyle stabilizasyon işlemine tabi tutulan 2. deneyde de (D-2) benzer bir şekilde anoda yakın kesimde şişme ve buna bağlı çatlaklar oluşmuştur. Ancak, bu kez orta kesimde de şişme görülmektedir. D-1'de orta kesimde dayanım artışının çok yüksek olup, D-2'de dayanımda bir düşüş görülmesinin, deney süresi uzadıkça asit-baz geçişinin anoda doğru yaklaştığının göstergesi olduğu düşünülmektedir.

Airoldi vd [5], elektrokinetik işlemler sırasında özellikle kalsit içeren doğal topraklarda, asidik koşulların hakim olduğu anoda yakın kısımlarda karbonatların çözüldüğünü ve yüksek CO₂ basınçlarının oluştuğunu belirtmişler, oluşan bu yüksek basınçların toprakta hidrolik çatlamaya neden olduğunu öne sürmüşlerdir. Alshawabkeh vd. [37] ise, elektrokinetik işlemler sırasında ortaya çıkan pozitif gözenek basınçlarının şişmeye neden olacağını belirtmişlerdir.

Anot bölmesinin dışarıda, katot bölmesinin ise içeride olduğu ilk deney olan D-3 deneyinde tüm örnekte dayanım artışı görülmektedir. Bu deney için anoda 2.5, 5 ve 7.5 cm uzaklıktaki ortalama dayanım artışları sırasıyla %36.1, %60.22 ve %136.67 olmuştur. Bu deneyde anoda her üç uzaklıktaki artış 10 gün süreyle yapılan deneyler içinde en yüksek seviyeleri sağlamıştır. Anot bölmesinin daha geniş olan dış kesime kurulması sonucu pH düşüşü D-1 ve D-2 deneylerine göre daha yavaş gerçekleşmiş ve en düşük seviyesi olan pH 3 seviyesi önceki deneylerin en düşük seviyesinden ortalama 10 kat daha yüksek ölçülmüştür. D-3 deneyindeki dayanım artışının tüm örneğe yayılmasını, bu tercih edilir pH koşullarına bağlamak mümkündür.

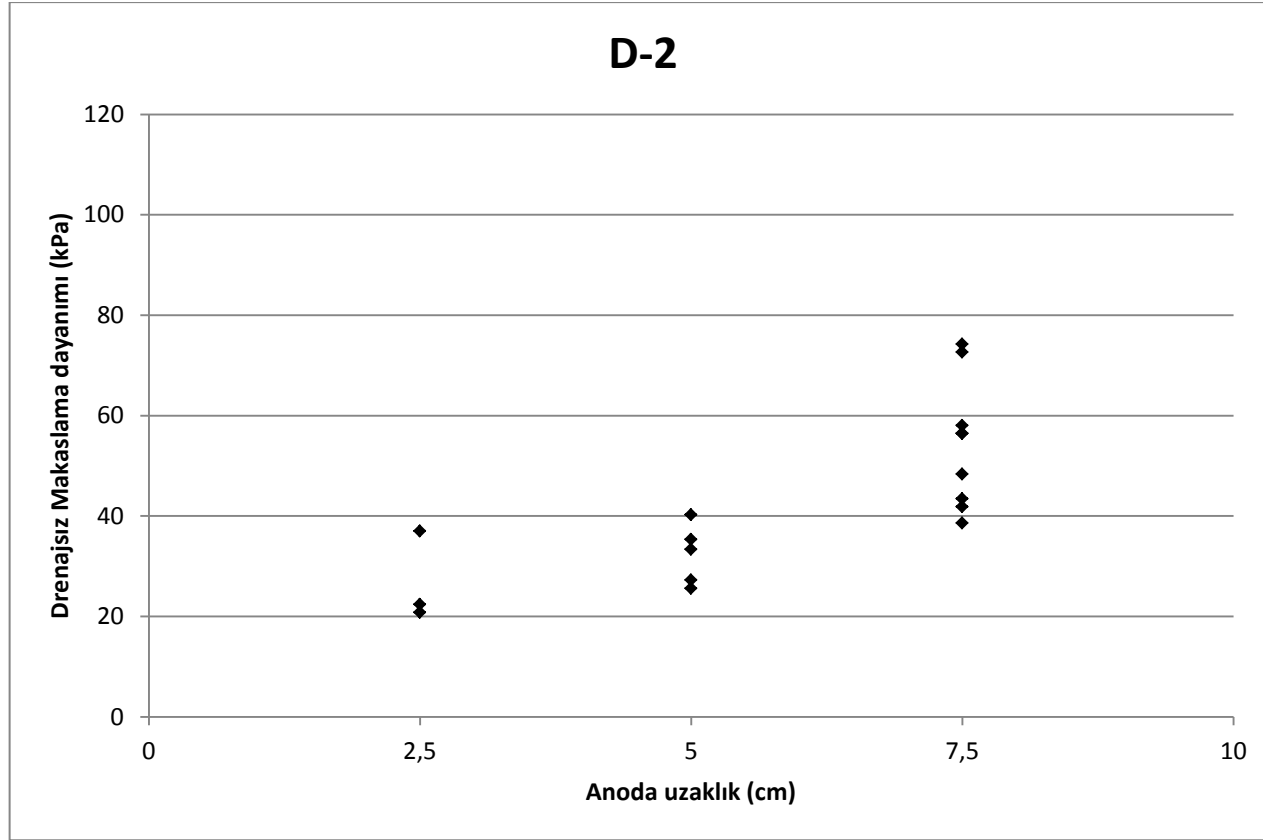
D-4 deneyinde ise dış kesimde pH yükseltme amacıyla eklenen Ca(OH)₂ çözeltilisinin etkisi kısa sürmüş ve deneyden D-3 deneyine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonucunda anottan uzaklaştıkça ölçülen ortalama dayanım artışları %24.62, %47.76 ve %123.16 olarak belirlenmiştir. Bu deneyde de, D-3 deneyi gibi anoda en yakın kesimde de dayanım artışı görülmüştür.

Yapılan deneylerde anoda belirli mesafelerde elektrokinetik stabilizasyon sonucunda elde edilen dayanım artışlarının kendi içindeki homojenlik derecesinin saptamak amacıyla standart sapmalar hesaplanmıştır. Çizelge 4.6'da verilen standart sapma verileri incelendiğinde, her üç uzaklık için de D-4 deneyinde en homojen dayanım artışının sağlandığı görülmektedir. Bu deneyde anoda 2.5 cm mesafede standart sapma sadece 2.59 kPa civarında gözlenirken, aynı mesafede D-3 deneyindeki standart sapma 8.42, D-2 deneyinde ise 7.28 kPa olarak saptanmıştır. Bu durum, anoda en yakın mesafede, D-4 deneyinde diğer deneylere oranla çok daha belirgin bir homojen artış olduğunu göstermektedir. Anoda 5 cm mesafede yani orta kesimde ise D-4, 3 kPa standart sapma ile yine en homojen dayanım artışını sağlayan deney olmuştur. Ancak, bu kesimde diğer deneyler ile arasındaki uniform dağılım farkı iç kesime (anoda 2.5 cm uzaklık) göre

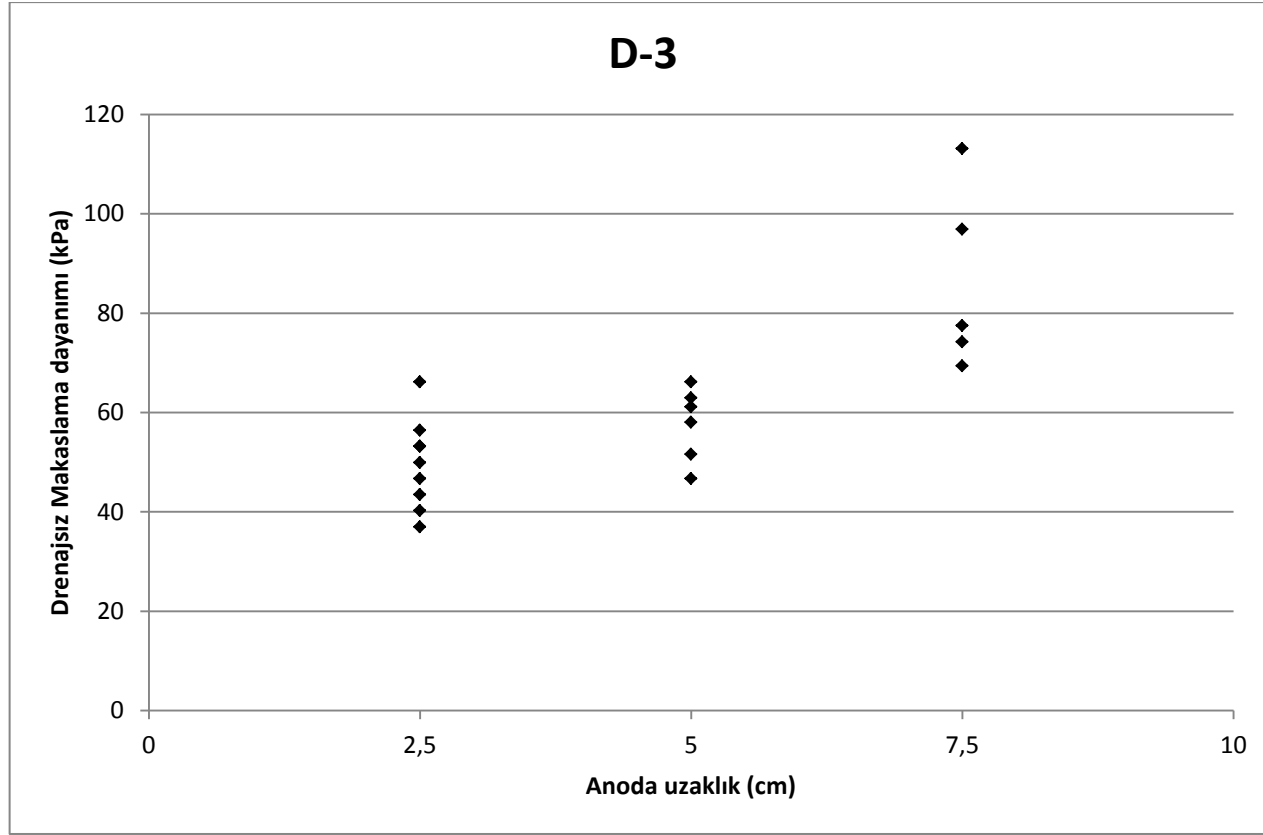
daha azdır. Anoda 7.5 cm uzaklıkta yani katoda yakın kesimde ise, D-4 deneyinde diğerlerine oranla çok daha yüksek bir dayanım homojenitesi gözlenmektedir. Bu durum, elde edilen dayanım dağılımlarının anottan uzaklığa göre sunulduğu Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da da görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, D-4 deneyindeki dayanım verilerinin dikey eksenindeki (makaslama dayanımı eksenini) dağılım aralığının diğer deneylerdeki aralıklara göre çok daha dar olduğu, yani bu deneyde anot elektrotta her mesafede elde edilen son dayanımların birbirine çok daha yakın olduğu gözlenmektedir.

Çizelge 4.6. Dayanım artışında standart sapmalar

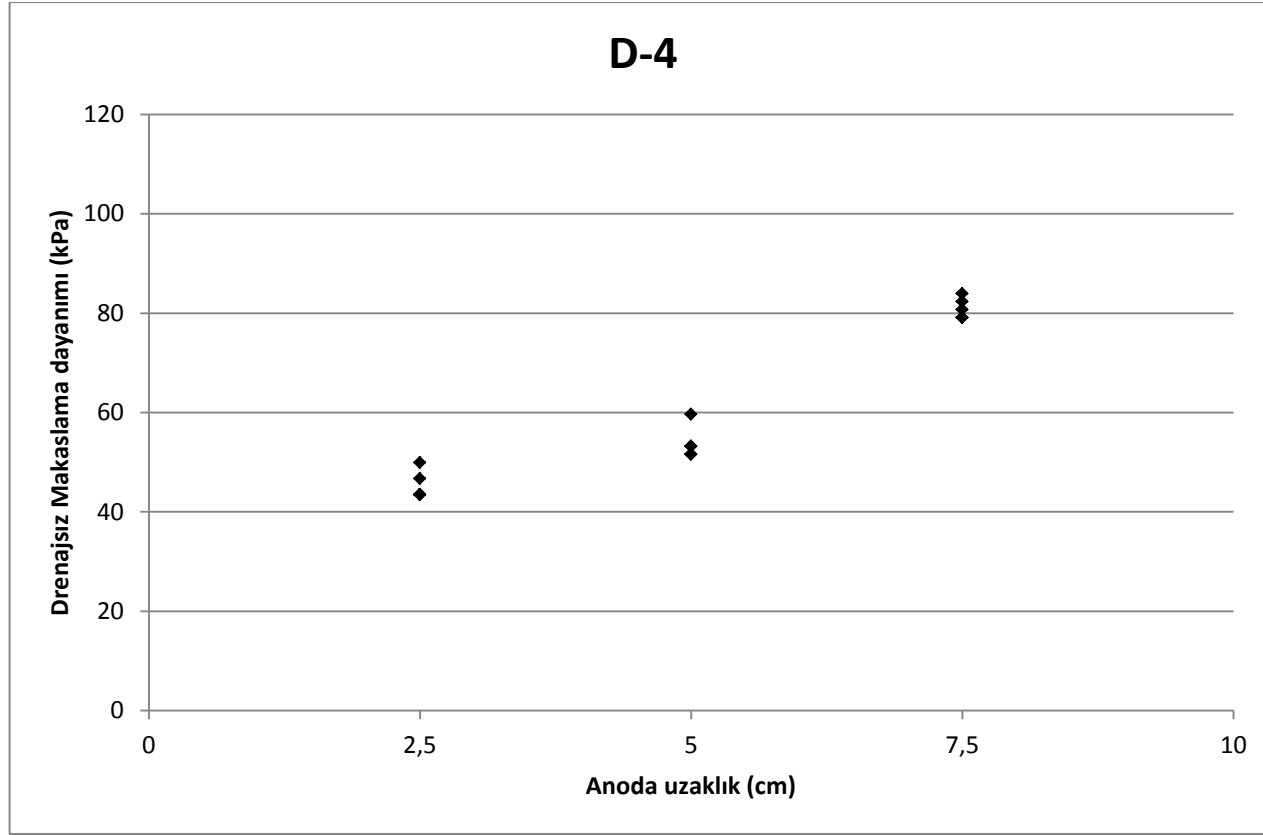
Anoda Uzaklık	Standart Sapma (kPa)		
	iç (2.5 cm)	orta (5 cm)	dış (7.5 cm)
D-2	7.28	5.35	12.06
D-3	8.42	6.69	16.38
D-4	2.59	3.00	1.89



Şekil 4.7. Anoda uzaklıklara göre drenajsız makaslama dayanımı dağılımı, D-2



Şekil 4.8. Anoda uzaklıklara göre drenajsız makaslama dayanımı dağılımı, D-3.



Şekil 4.9. Anoda uzaklıklara göre drenajsız makaslama dayanımı dağılımı, D-4.

4.3. pH Ölçümleri

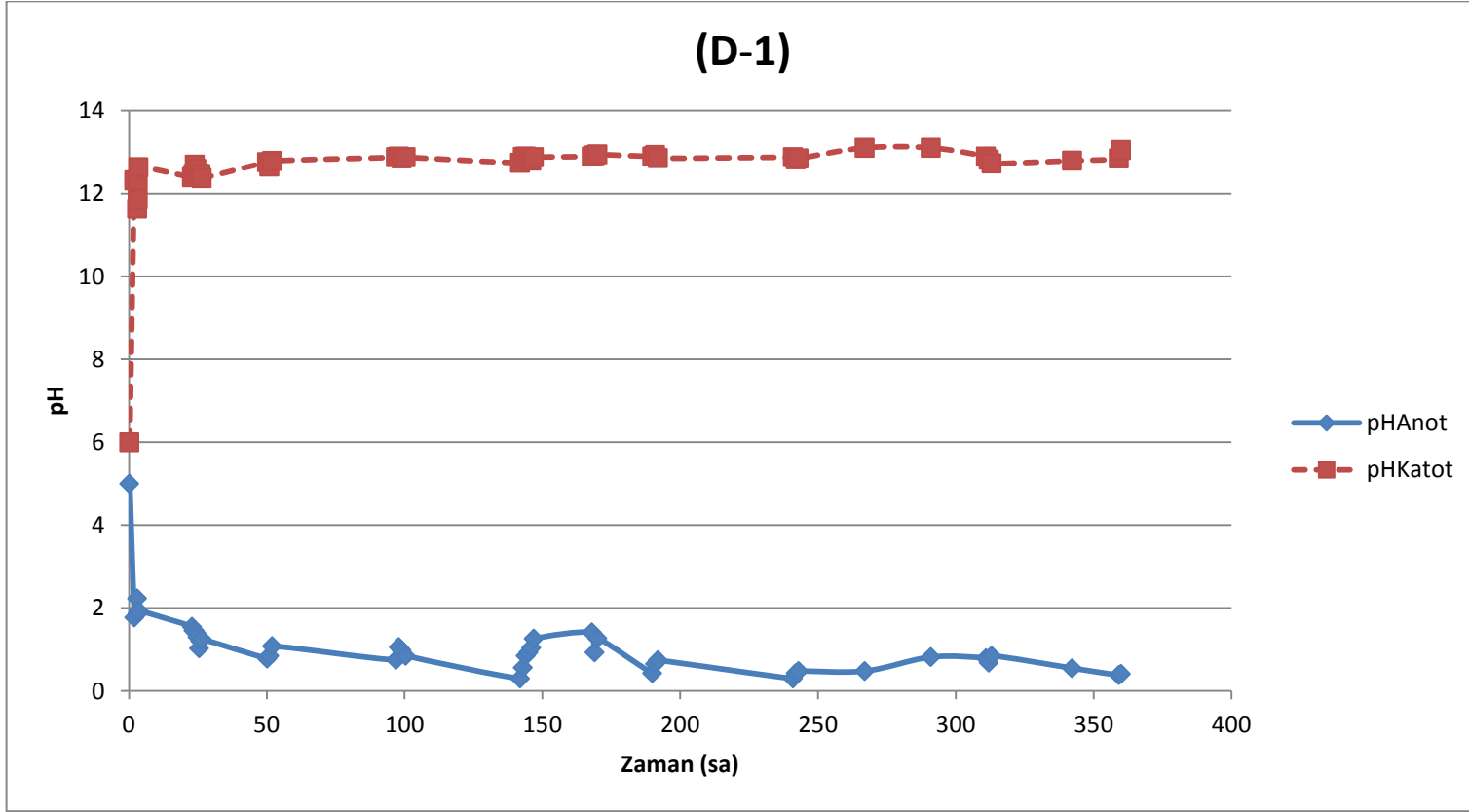
Anotun iç bölmede konumlandırıldığı D-1 ve D-2 deneylerinde pH düşüşü, bu bölmenin küçüklüğünden dolayı oldukça hızlı gerçekleşmiştir. Bu süreç D-1 ve D-2 deneylerinde sadece birkaç saat alırken, anotun dışarıda konumlandırıldığı D-3 ve D-4 deneylerinde ise ortalama olarak 2-3 gün aralığında gerçekleşmiştir. Buna ek olarak, D-1 ve D-2 deneylerinde pH sırasıyla 0.4 ve 1 civarına kadar düşerken, D-3 ve D-4 deneylerinde pH genel olarak 3'ün altına düşmemiştir. Bu durum, dairesel düzeneklerde elektrokinetik stabilizasyonda, anodun daha geniş olan dış kısımda konumlandırıldığı durumlarda daha tercih edilir pH koşullarının daha uzun süre sağlanabildiğini göstermektedir.

Katot bölgesinde pH seviyesi ise tüm deneylerde hızlı bir şekilde yükselerek deney süresince pH 12-13 aralığında seyretmiştir.

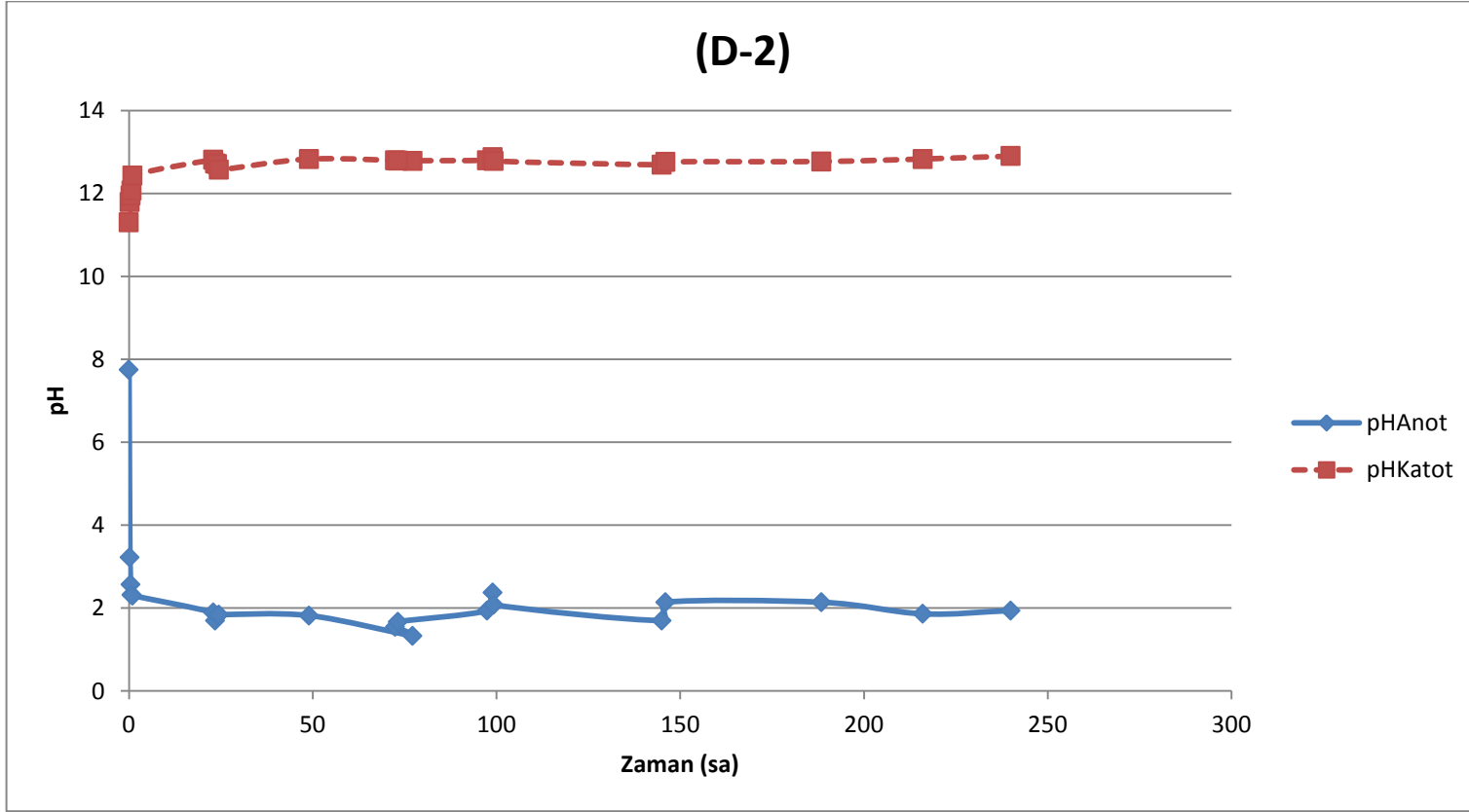
Çizelge 4.7'de elektrot bölmelerinde oluşan son pH değerleri ile pH'daki ani düşüşün sonlanıp, ortalama seviyelere varana kadar geçen süreler verilmektedir. Şekil 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13'de ise tüm deneyler için zamana göre pH değişim grafikleri sunulmaktadır.

Çizelge 4.7. Oluşan son pH değerleri ve pH'ın ortalama olarak sabitlendiği seviyeye kadar geçen süreler

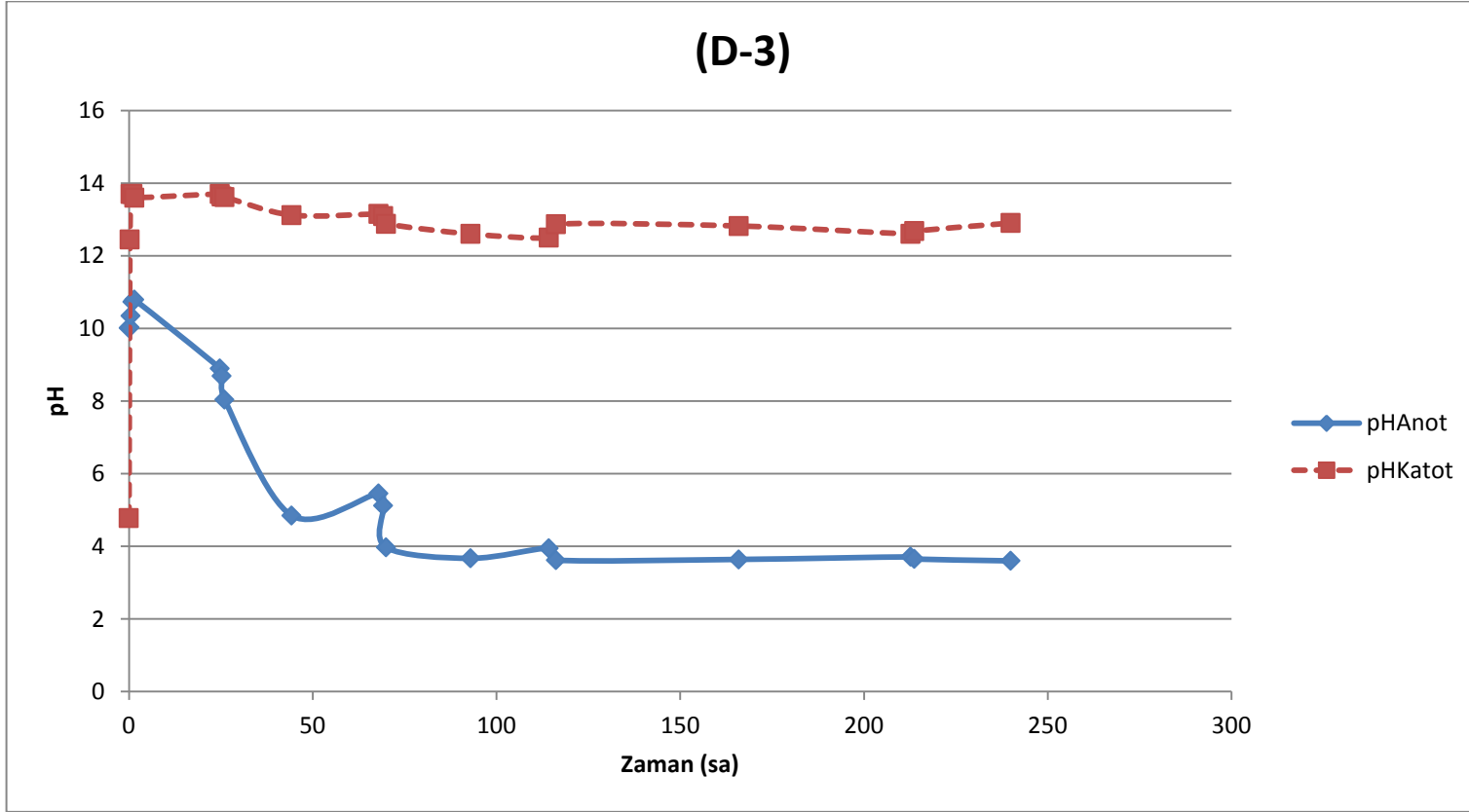
		Son pH	pH'in ortalama olarak sabitlendiği süre (sa)
D-1	Anot	0.41	2
	Katot	13.05	3.3
D-2	Anot	1.94	1
	Katot	12.9	23
D-3	Anot	3.6	70
	Katot	12.9	1
D-4	Anot	2.92	70.25
	Katot	13.3	23



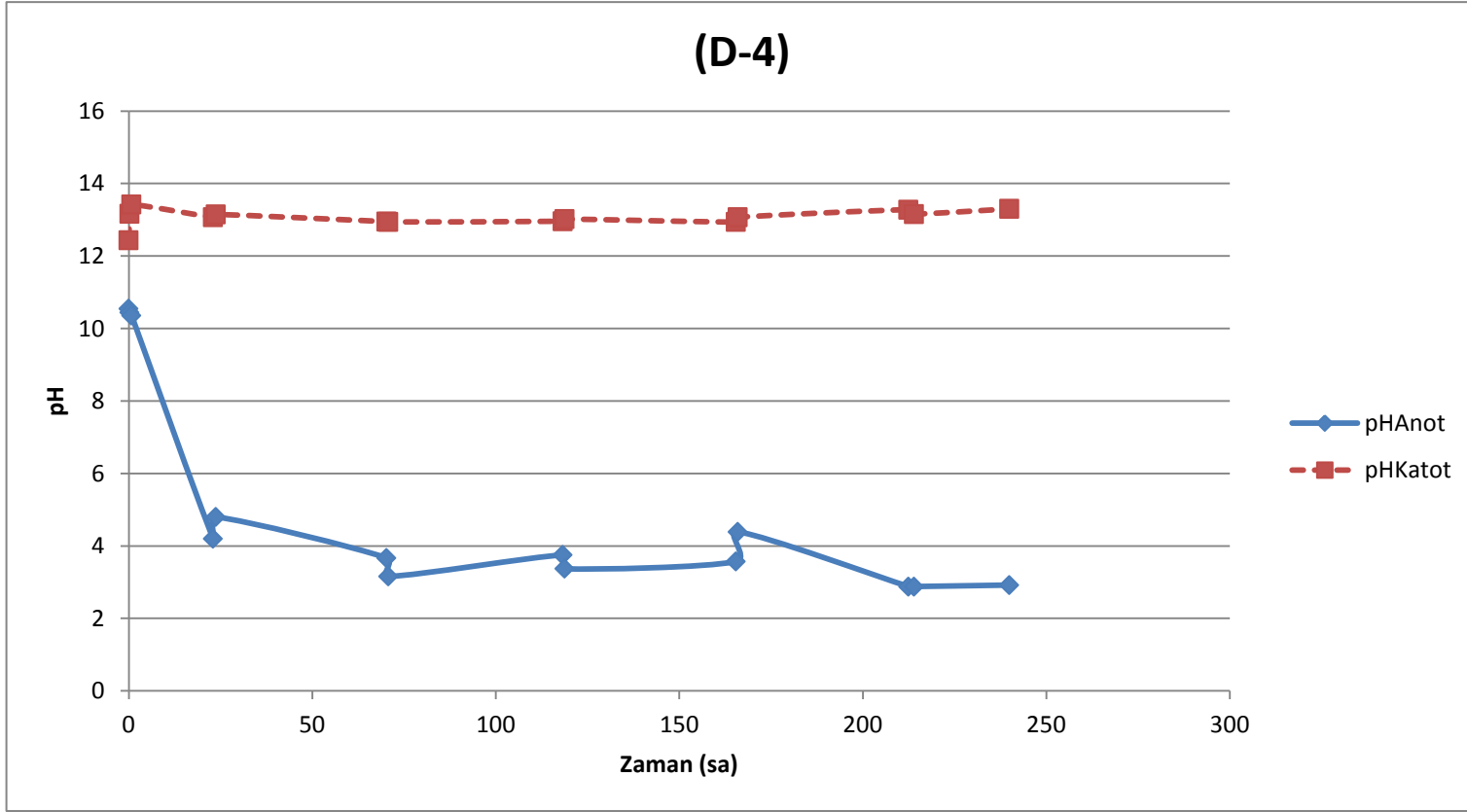
Şekil 4.10. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-1



Şekil 4.11. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-2.



Şekil 4.12. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-3.

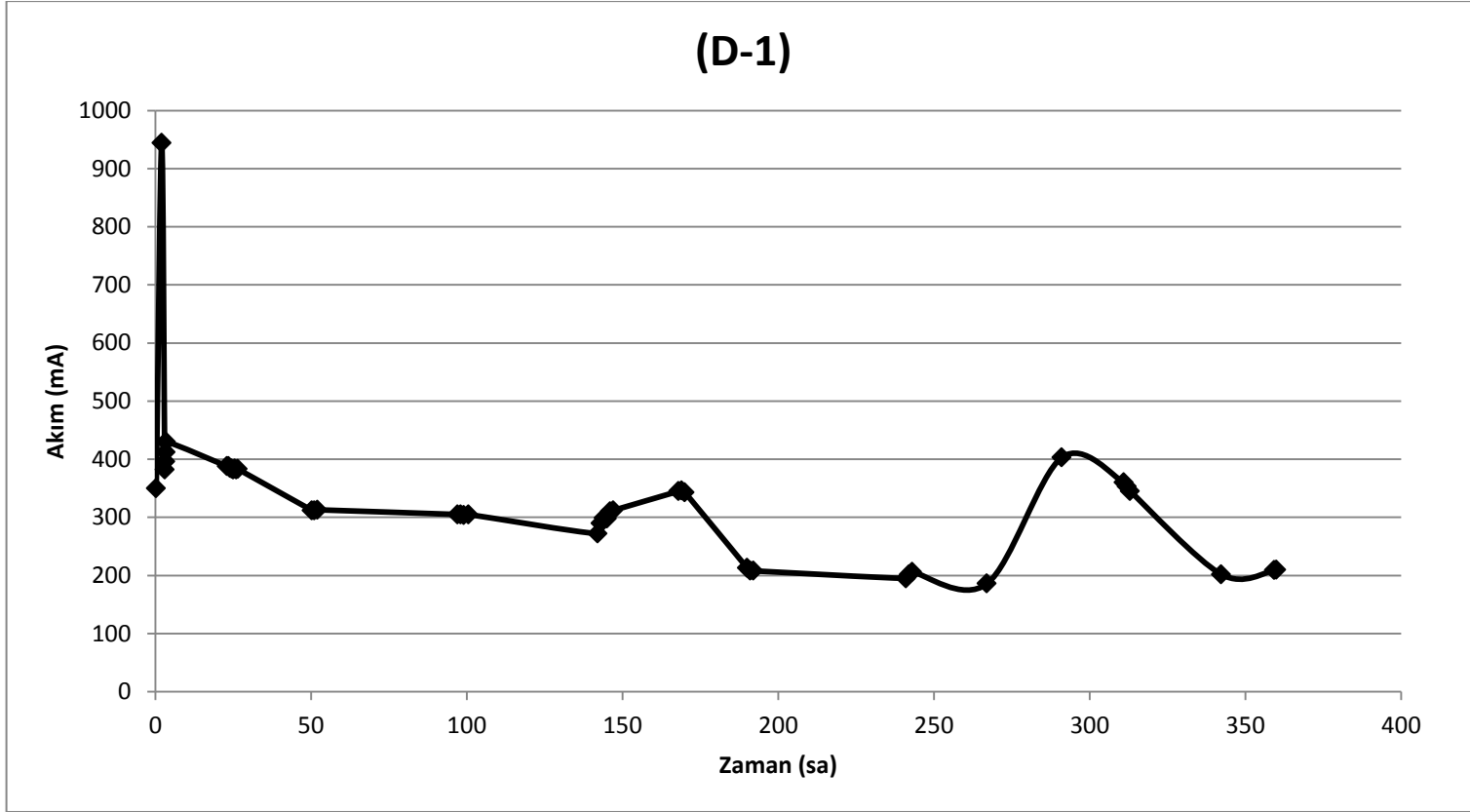


Şekil 4.13. Elektrokinetik deneyleri süresince pH değişimi, D-4.

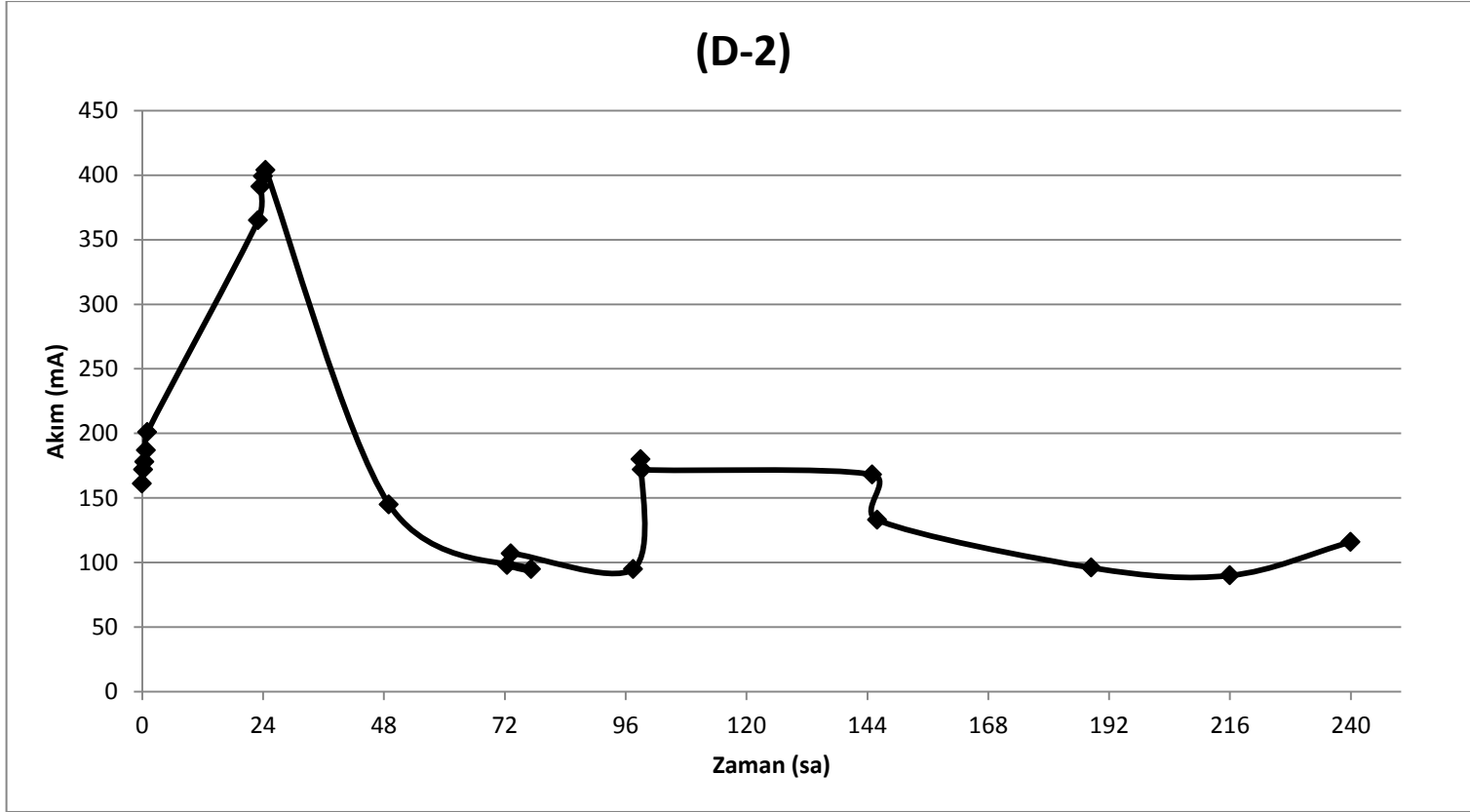
4.4. Akım Ölçümleri

Sabit voltajla yapılan deneyler süresince akımdaki düşüş, toprakta oluşan çimentolanma miktarının yani puzolanik reaksiyonların varlığının göstergesidir. Deneyler süresince ölçülen akım değerleri incelendiğinde tüm deneyler için ilk 24 saatte hızlı bir akım artışı varken bu noktadan sonra akımın düştüğü görülmektedir. Ayrıca, anodun orta bölmede konumlandırıldığı D-1 ve D-2 deneylerinde akım sırasıyla 950 mA - 200 mA arasında ve 400 mA - 100 mA arasında değişirken, anotun dış bölmede konumlandırıldığı D-3 ve D-4 deneylerinde çok daha düşük akım değerleri ölçülmüş olup, D-3 deneyinde 220 mA ile 15 mA, D-4 deneyinde ise 75 mA ile 20 mA aralığında akım değişimi görülmüştür.

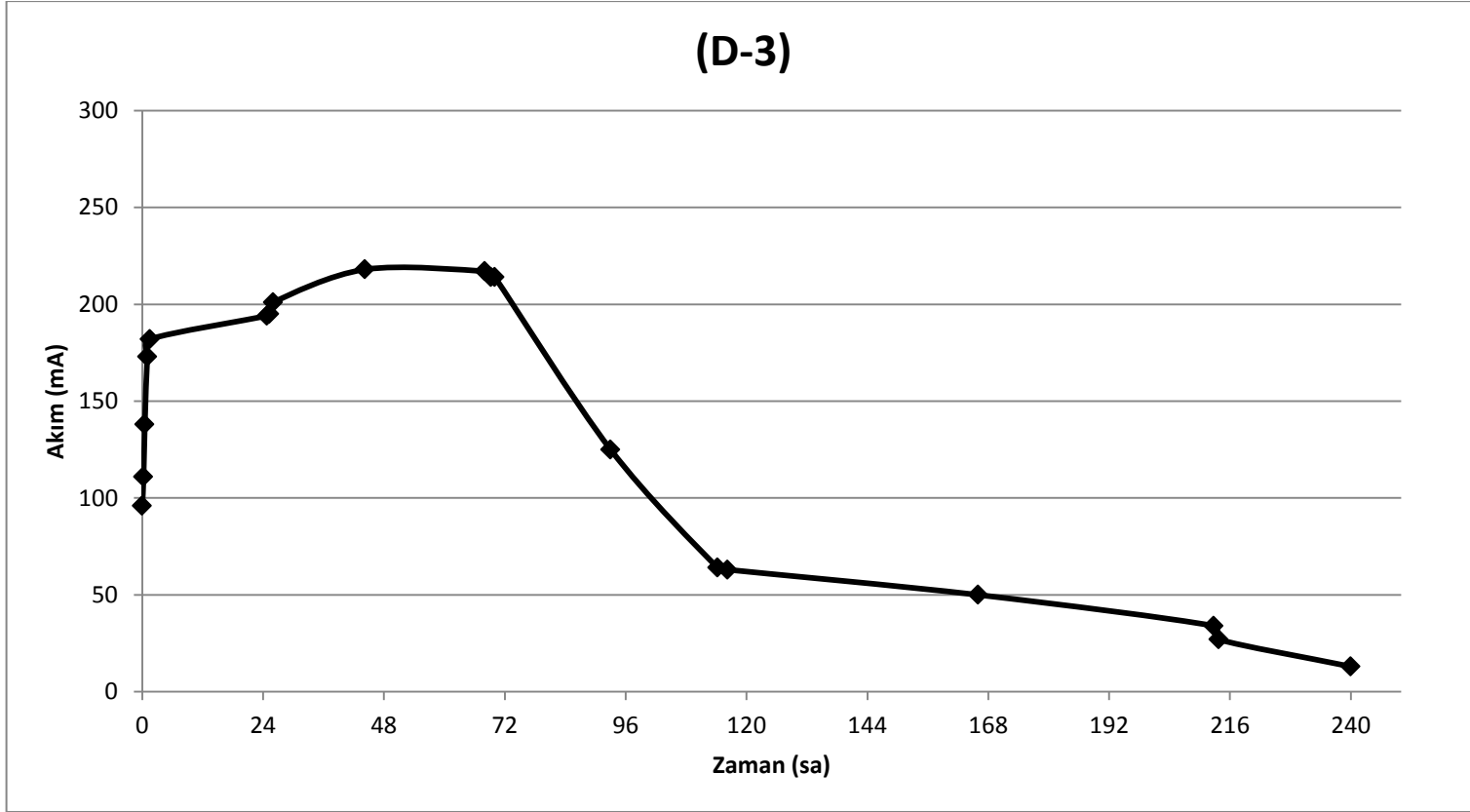
Tüm deneyler için akım değişimini gösteren grafikler Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



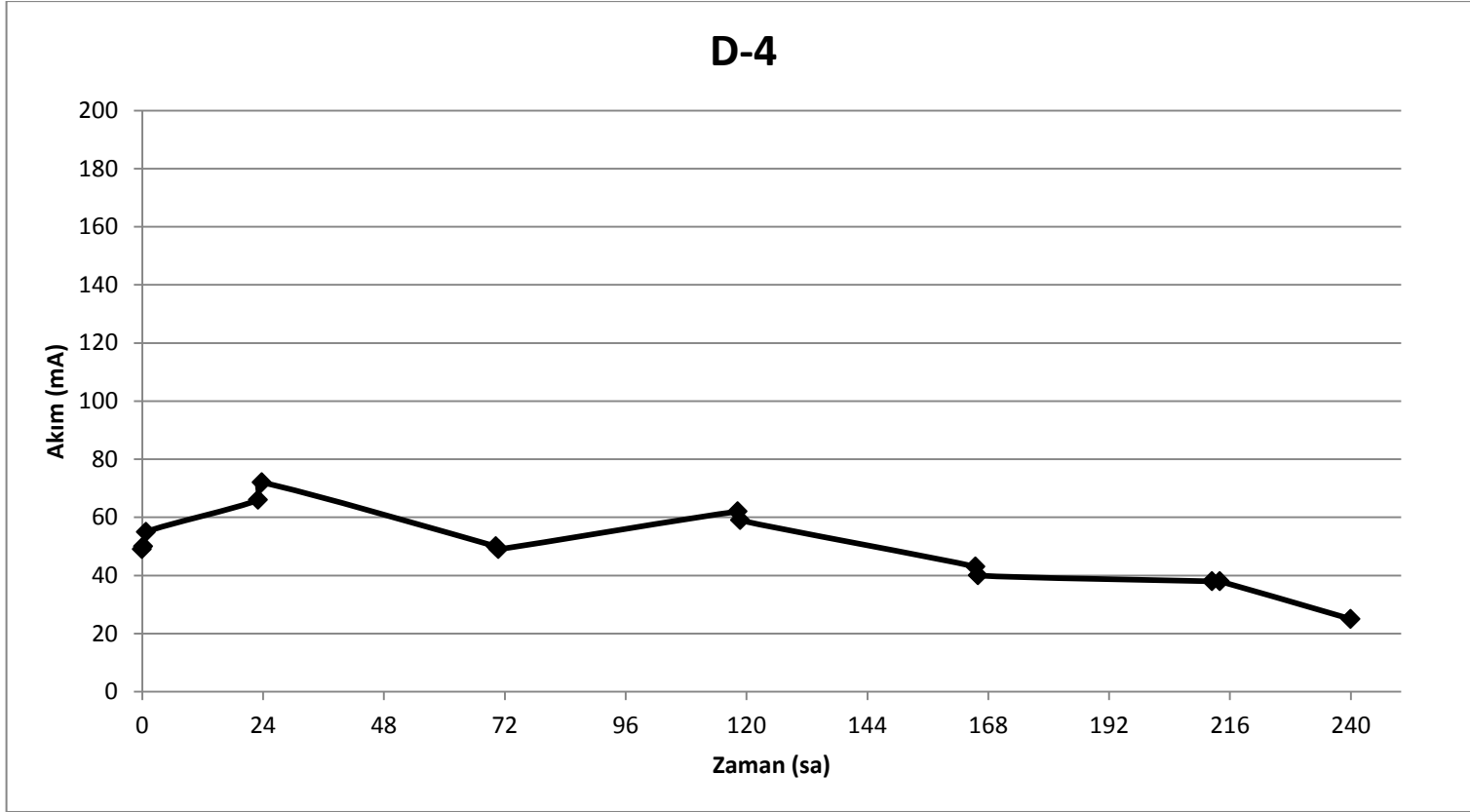
Şekil 4.14. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-1.



Şekil 4.15. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-2.



Şekil 4.16. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-3.

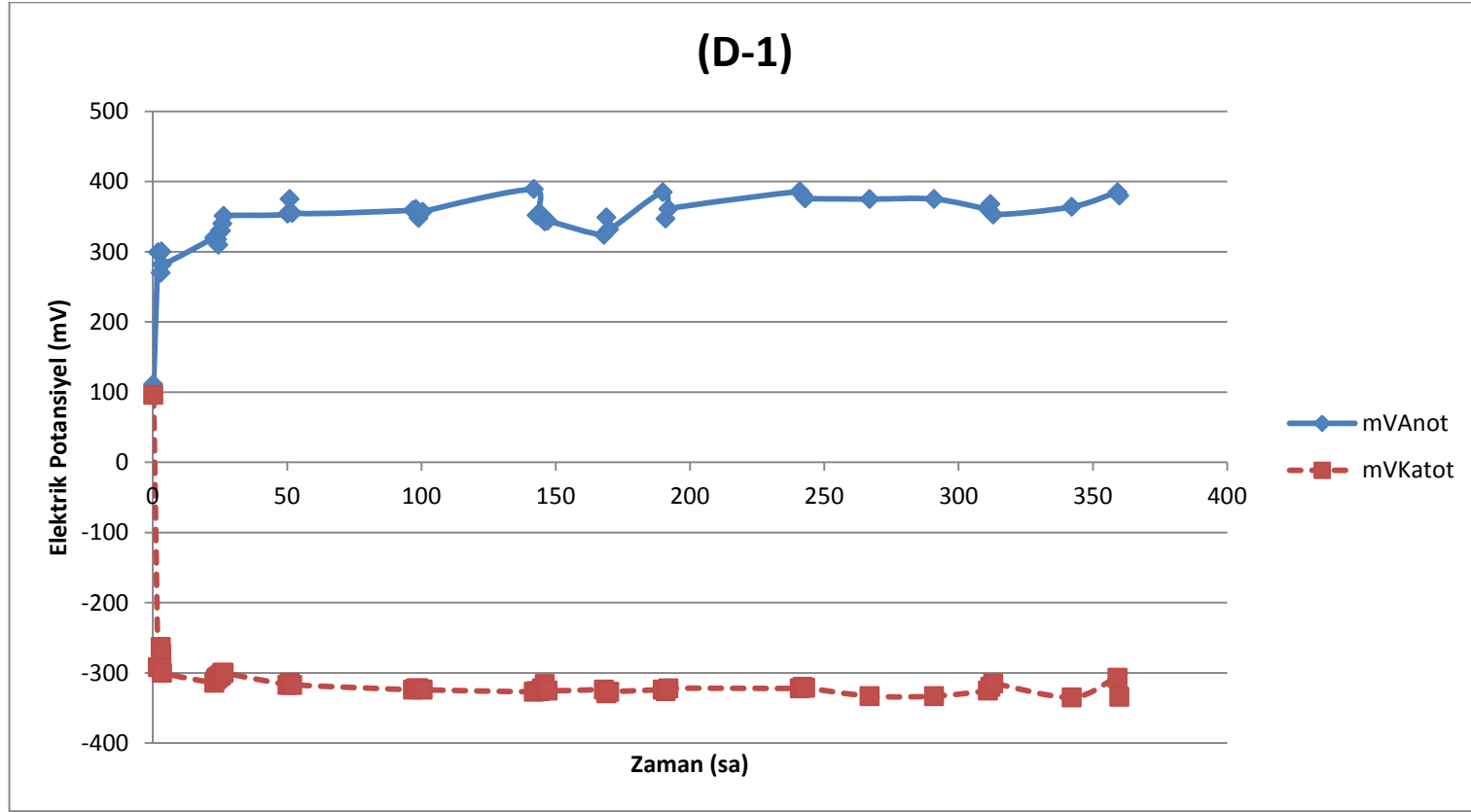


Şekil 4.17. Puzolanik reaksiyonlar sonucu akımda zamanla oluşan düşüş, D-4

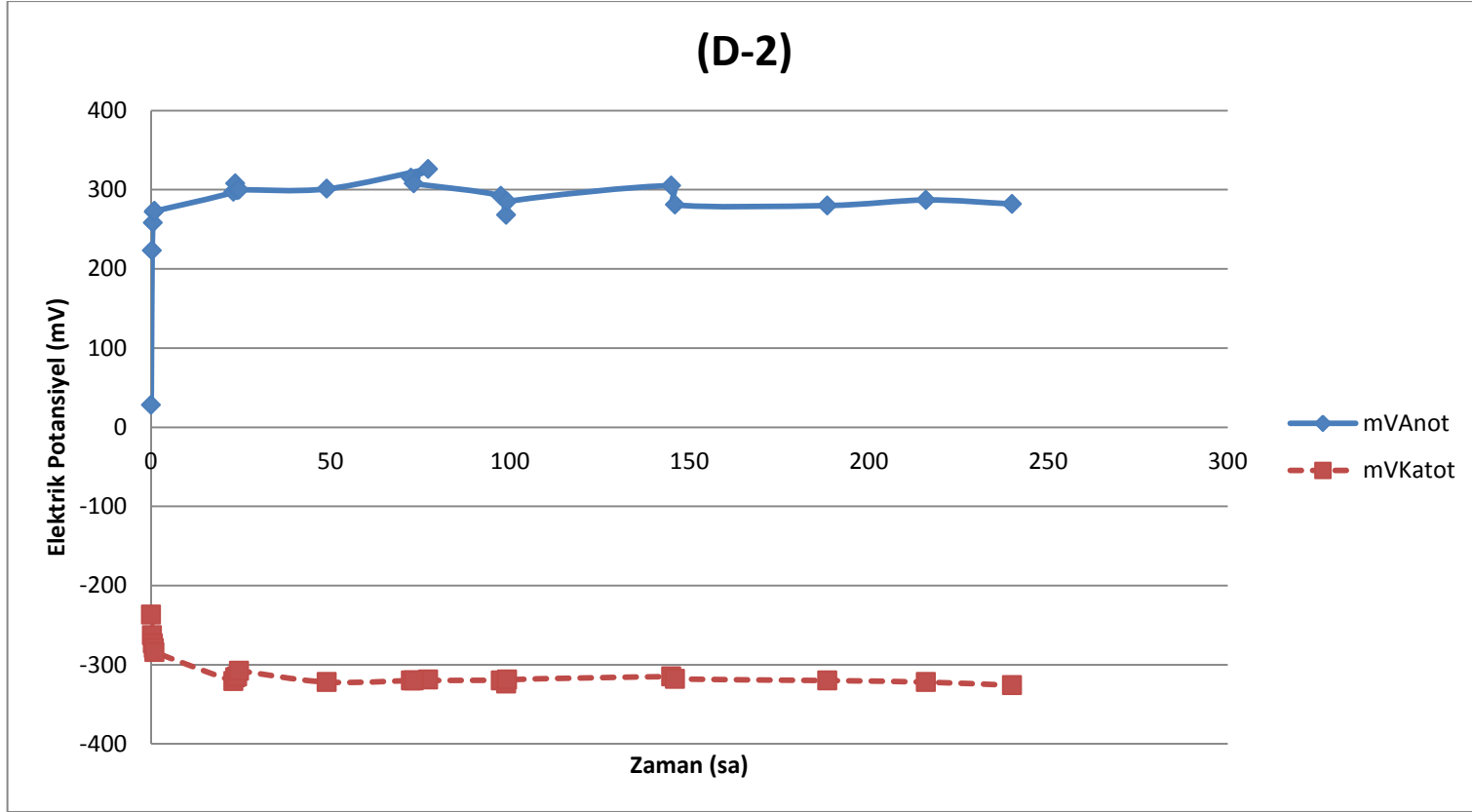
4.5. Elektrik Potansiyeli Ölçümleri

Deneyler süresince anot ve katot bölmelerinden sürekli olarak ölçülen elektrik potansiyelin zamanla değişimini gösteren Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilen grafikler incelendiğinde, D-1 ve D-2 deneylerinde elektrik potansiyel değişiminin çok kısa bir sürede hızla gerçekleştiği görülmektedir. Bu iki deney için, anot bölgesinde elektrik potansiyel, D-1'de 300-400 mV ve D-2'de 300 mV seviyelerinde gözlenmektedir. D-3 ve D-4 deneylerinde ise elektrik potansiyel değişimi daha yavaş gerçekleşmiş, anot bölgesinde 200 mV seviyesinde kalmıştır.

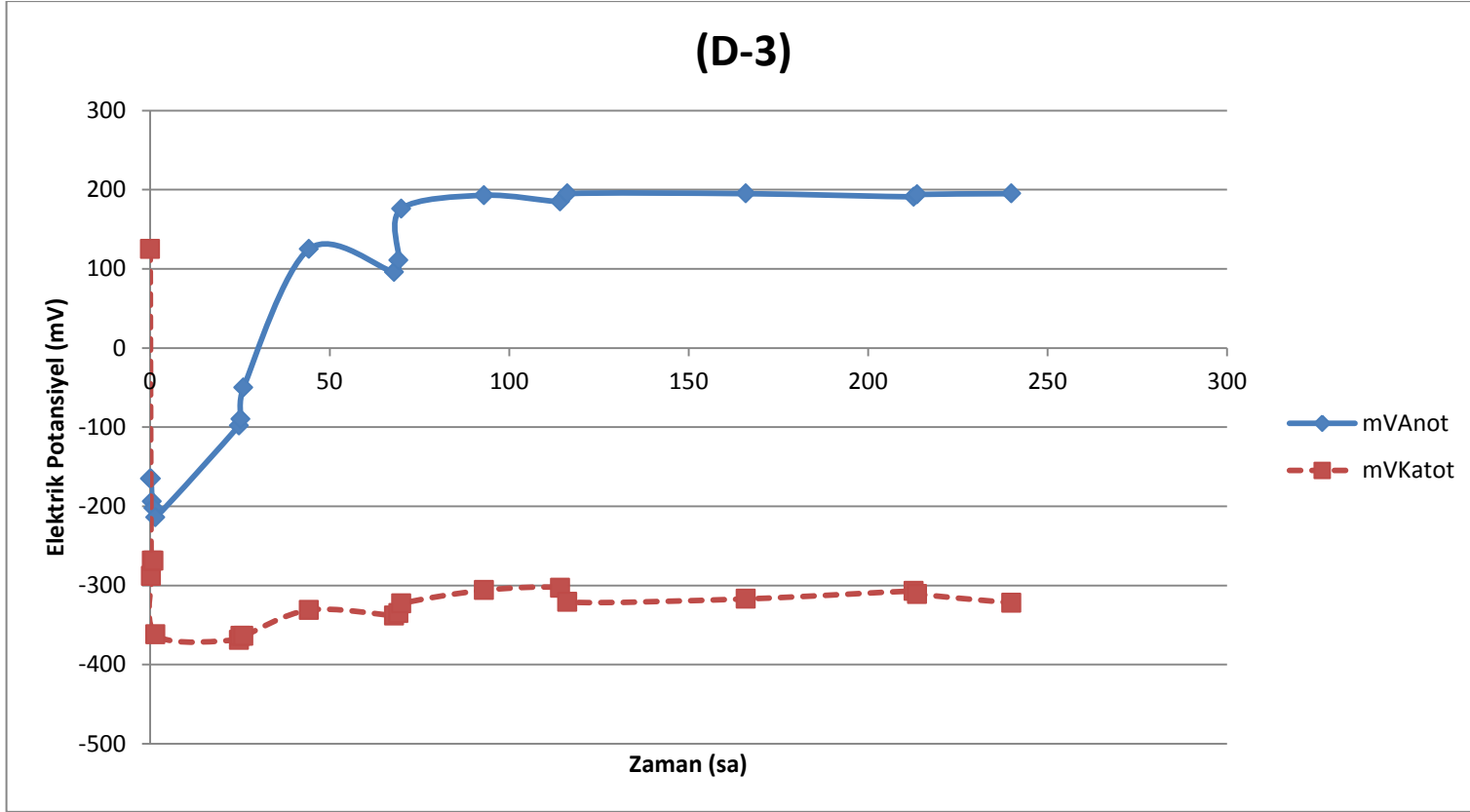
Tüm deneylerde katot bölmelerinde ölçülen değerler kısa sürede artmış ve -300 ve -400 mV arasında değişiklik göstermiştir. Anot bölmelerinden alınan yüksek pozitif değerler bu bölmede asidik koşulların, katot bölmelerinden alınan negatif değerler ise bu bölmede bazik koşulların hakim olduğunu göstermektedir.



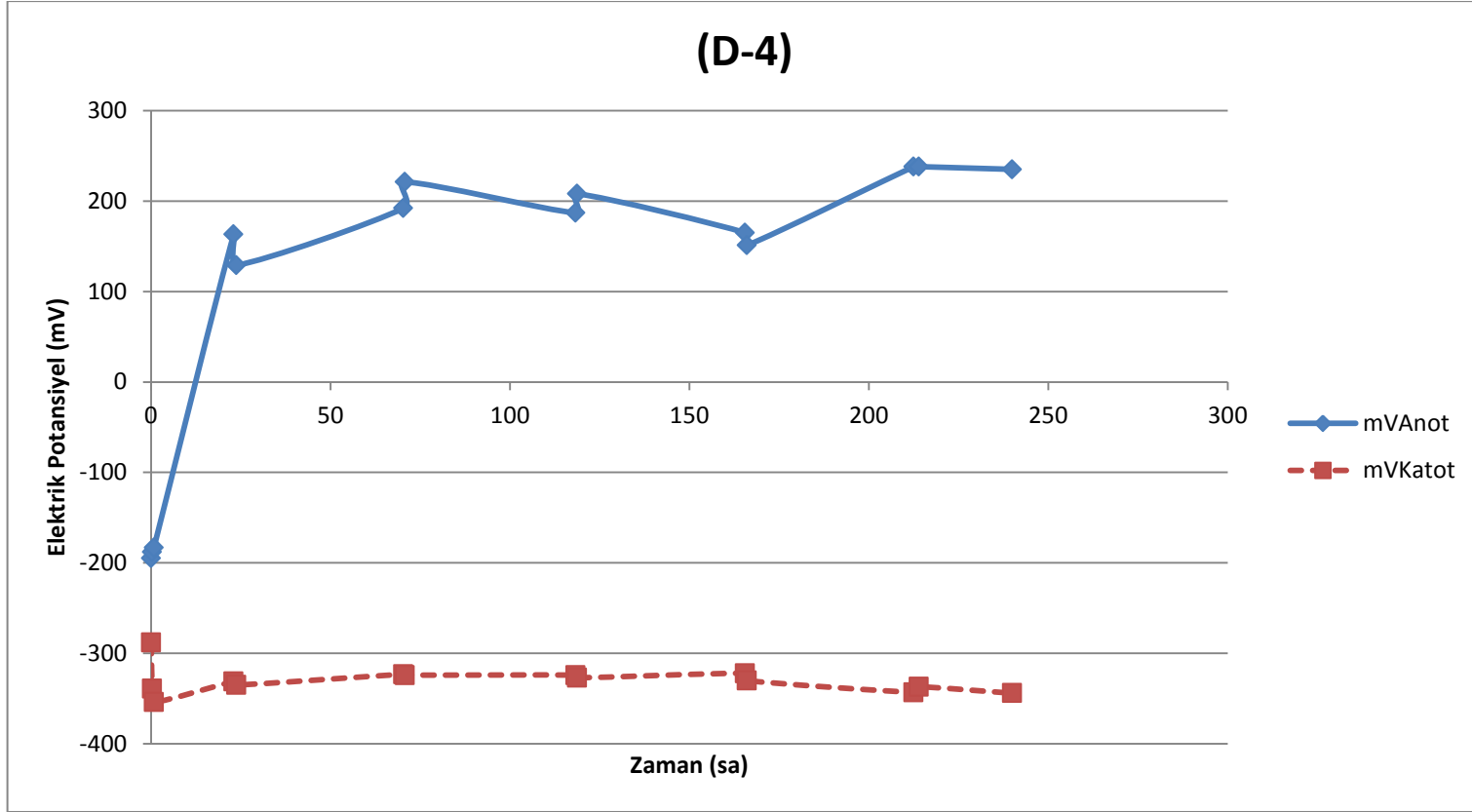
Şekil 4.18. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-1.



Şekil 4.19. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-2.



Şekil 4.20. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-3.



Şekil 4.21. Elektrokinetik deneyleri süresince elektrik potansiyel değişimi, D-4.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çoklu anot ve katot dizilimlerinin kullanıldığı elektrokinetik stabilizasyon çalışması sonucunda, yumuşak killerde katota yakın kesimlerde 15 gün süren deneyde %508 üzerinde, 10 gün süren deneylerde ise %136'ya varan dayanım artışları elde edilmiştir. Uygulanan farklı elektrot dizilimleri sonucunda, anodun dış kesimde konumlandırıldığı deneylerde daha iyi sonuçlar elde edildiği saptanmıştır. Bu sonuca ulaşılmasının ana nedenlerinden biri, anodun dış kesimde çok daha geniş bir alanda konumlandırıldığında pH düşüşünün daha yavaş ve daha az olarak gerçekleşmesidir. Bir diğer faktör de çok daha geniş bir hacime sahip olan anot bölmesinden toprağa daha fazla kalsiyum iyon girişinin sağlanmış olmasıdır. Bunun sonucu olarak, gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar ile bu deneylerde daha yüksek dayanım artışı elde edilmiştir. Bu deneylerde katot çevresinde çok yüksek dayanım artışları oluşmakla birlikte, drenajsız makaslama dayanımındaki artış sadece katot çevresiyle sınırlı kalmamış, anot çevresi de dahil olmak üzere toprağın her noktasında dayanım artışı gözlenmiştir. Anodun iç kesime konumlandırıldığı deneylerde ise, pH düşüşünün çok hızlı gerçekleşmesi ve çok düşük seviyelere inmesi, asit-baz geçişinin katoda doğru yaklaşmasıyla sonuçlanmıştır. Ayrıca anoda yakın kesimlerde topraktaki şişme nedeniyle elektrokinetik stabilizasyon öncesi dayanımlardan daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.

Deneyler süresince anot ve katot bölmelerinden alınan pH değerleri incelendiğinde, anodun dış kesimde konumlandırıldığı deneylerde bu bölmedeki pH değerlerinin, anodun iç kesimde konumlandırıldığı deneylere oranla daha fazla olduğu belirlenmiştir. Daha önce detaylı şekilde açıklandığı üzere, elektrokinetik stabilizasyon için yüksek pH koşulları gerekmektedir ve bu nedenle anodun dış kesimde konumlandırıldığı deneylerde anot çevresinde de makaslama dayanımında artış elde edilebilmiştir. Buna ek olarak, anodun dış kesimde konumlandırıldığı deneylerde, bu bölmedeki pH düşüşü çok daha uzun sürelerde gerçekleşmiş, dolayısıyla toprak boyunca daha yüksek pH koşulları aynı oranda uzun süre sağlanabilmiştir. Deneyler süresince alınan elektrik potansiyel verileri de pH verilerini destekler niteliktedir.

Başlangıç pH'ını artırma amacıyla $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kullanılan deneyde hem pH düşüş hızı ve oluşan son pH seviyesi, hem de toprak örneği genelinde dayanım artışı açısından bir pozitif değişim olmamıştır. Ancak, bu deneyde topraktaki dayanım artışının diğer deneylere oranla daha homojen olduğu saptanmıştır.

Deneylerde dairesel düzenek kullanımının amaçlarından ilki, katot bölmesinin daha geniş tutularak katot etki alanının, yani yüksek pH koşullarının etkili olduğu alanın artırılmasıdır. Bu amaçla, ilk iki deneyde katot elektrotlar dış bölmede konumlandırılmış ancak elde edilen dayanım verilerinden de anlaşılacağı üzere istenen sonuçlara ulaşılamamıştır. Bu deneylerde anodun iç kesimde konumlandırılması, bu bölmenin çok küçük olması nedeniyle pH'ın çok hızlı olarak çok düşük seviyelere gerilemesine neden olmuştur. Giriş bölümünde açıklandığı üzere, asit cephesi, baz cephesinden daha hızlı ilerlemektedir ve ilk iki deneyde oluşan düşük pH koşulları bu nedenle katot bölmesine doğru yayılarak bu deneylerde konsolidasyona göre daha düşük dayanımlar oluşmasına neden olmuştur. Deneylerde dairesel düzenek kullanımındaki ikinci amaç ise anot bölgesinden verilen stabilize edici maddenin daha geniş bir alandan sağlanmasıdır. Anot elektrotların bu amaçla dışarıda konumlandırıldığı deneylerde dairesel düzenek başarılı olmuş ve dayanım artışı tüm örnek boyunca sağlanabilmiştir.

Dairesel düzenek kullanımının avantajlarından biri, bu düzenek tipinde dikdörtgen düzeneklerdeki plaka şeklindeki elektrotlar yerine çubuk elektrotların kullanılmasıdır. Gelecekte uygulanması olası bir saha çalışmasında, bu tip elektrotların geniş çaplı sahalarda zemine yerleştirilmesi daha kolay olacaktır. Aynı zamanda, çubuk elektrotlar daha az elektrot malzemesi gerektirdiğinden daha ekonomiktir.

Deneylerde ana stabilizasyon maddesi olarak elektrokinetik stabilizasyonda yaygın olarak tercih edilen CaCl_2 kullanılmıştır. Gelecekte yapılacak bir çalışmada, CaCl_2 ve KCl gibi farklı stabilizasyon maddelerinin, dairesel düzenekte stabilizasyon performansına etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

Anot bölgesindeki pH seviyesinin artırılması ve bu sayede asit-baz geçişinin anoda yaklaştırılması amacıyla, klasik düzeneklerde daha önce denenmiş ve

başarılı olmuş çeşitli performans artırıcı yöntemlerin dairesel düzeneğe de denenmesi önerilmektedir. Bu yöntemlerin bir kısmı aşağıda sıralanmıştır:

- Anot depolarizasyonu: Anot bölümünde elektroliz sonucu oluşan H^+ iyonlarının OH^- iyonları ile dengelenmesi amacıyla, bu bölmeye sadece OH^- iyonu veren bir çözeltinin sağlanmasından ibarettir. Böylelikle H^+ iyonlarının katot yönüne hareketi engellenmekte ve yüksek pH koşulları sağlanmaktadır [2].
- İletim borusu kullanımı: Bu yöntemde, stabilize edici madde sadece elektrot bölmelerinden değil, anot ve katot bölmeleri arasına yerleştirilen bir iletim borusundan da sağlanmaktadır [20].
- pH sirkülasyonu: Katot bölümündeki yüksek pH koşullarının doğrudan anot bölümüne iletilmesini sağlama amacıyla, katot bölümünden anot bölümüne, bir pompa yardımıyla sirkülasyon oluşturulmasıdır. Yöntemde sirkülasyon hidrolik gradyana bağlı olarak gerçekleşmektedir [17].
- Polarite değişimi: Elektrokinetik stabilizasyon deneyi süresince, anot ve katot kutuplarının yerlerinin belirli aralıklarla değiştirilmesinden ibarettir [35].
- Hareketli elektrotlar: Bu yöntemde elektrotlardan biri sabit tutulurken, diğeri toprak üzerinde farklı noktalara yerleştirilerek sabit elektrota yaklaştırılıp uzaklaştırılmaktadır [22].
- Membran kullanımı: Toprakta ilerlemesi istenmeyen iyonların tutulumunu sağlayan seçici membranlar kullanılabilir [34].

KAYNAKLAR

- [1] Abdullah, W.S., Al-Abadi, A.M., Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil, *Applied Clay Science*, 47, 343-350, **2010**.
- [2] Asavadorndeja, P., Glawe, U., Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 64, 237-245, **2005**.
- [3] Shenbagavalli, S., Mahimairaja, S., Electrokinetic Remediation of Contaminated Habitats, *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4 (13), 930-935, **2010**.
- [4] Turer, D., Genc, A., Assessing effect of electrode configuration on the efficiency of electrokinetic remediation by sequential extraction analysis, *Journal of Hazardous Materials*, B119, 167-174, **2005**.
- [5] Airoldi, F., Jommi, C, Musso, G., Paglino, E., Influence of calcite on the electrokinetic treatment of a natural clay, *Journal of Applied Electrochemistry*, 39, 2227-2237, **2009**.
- [6] Lee, M.H., Electrically induced settling and consolidation behaviour of soft soil, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 11, 4, 185-191, **2007**.
- [7] Sumbardo-Ramos, E.G., Guerrero-Gtierrez, O.X., Murillo-Rivera, B., Gonzalez, I., Oropeza-Guzman, M.T., Electrokinetic treatment for clayey and sandy soils, *Journal of Applied Electrochemistry*, 40, 1255-1261, **2010**.
- [8] Lee, MH., *An Experimental and Analytical Study of Electrokinetic Consolidation*, MSc Thesis, St. Catherine's College, University of Oxford, **2000**.
- [9] Mok, C. K., *Design and Modelling of Electroosmotic Dewatering*, PhD Thesis, School of Civil Engineering and Geosciences, University of Newcastle upon Tyne, **2006**.
- [10] Bennett, P., *Surface Chemistry and Ion Exchange, Chemical Hydrogeology lecture notes*, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, **2014**.
- [11] Gönül, N., *Çok Fazlı Sistemler I – Yüzey Kimyası ve Kolloidler*, Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları, No:81, Ankara, **2000**.
- [12] Particle Scinces, *An Overview of the Zeta Potential*, Technical Brief 2012, vol.2., **2012**.
- [13] Asadi, A., Huat, B. B. K., Nahazanan H., Keykhah, H. A., Theory of electroosmosis in soil, *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 1016-1025, **2013**.
- [14] Glendinning, S., Jones, C.J.F.P., Lamont-Black, J., The use of electrokinetic geosynthetics (EKG) to improve soft soils, Chapter 35, *Ground Improvement - Case Histories*, Elsevier Geo-Engineering Book Series, 3, 997-1043, Elsevier, **2005**.
- [15] Virkutyte, J., Sillanpaa, M., Latostenmaa, P., Electrokinetic soil remediation – critical overview, *The Science of The Total Environment*, 289, 97-121, **2002**.

- [16] Yeung, A.T., Milestone developments, myths and future directions of electrokinetic remediation, *Separation and Purification Technology*, 79, 124-132, **2011**.
- [17] Lee, H., Yang, J., A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation, *Journal of Hazardous Materials*, 77, 227-240, **2000**.
- [18] Müller, C. J., *Pozzolanic Activity of Natural Clay Minerals with Respect to Environmental Geotechnics*, PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, **2005**.
- [19] Mosavat, N., Oh, E., Chai, G., A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils, *International Journal of Geomate*, 2, 2, 266-272, **2012**.
- [20] Chien, S.-C., Ou, C.-Y., Lee, Y., A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement, *Applied Clay Science*, 50, 481-492, **2010**.
- [21] Kaya, A., Yukselen, Y., zeta potential of soils with surfactants and its relevance to electrokinetic decontamination, *Journal of Hazardous Materials*, 120, 119-126, **2005**.
- [22] Shen, Z., Chen, X., Jia, J., Qu, L., Wang, W., Comparison of electrokinetic soil remediation methods using one fixed anode and approaching anodes, *Environmental Pollution*, 150, 193-199, **2007**.
- [23] Page, M. M. and Page, C.L., Electroremediation of contaminated soils, *Journal of Environmental Engineering*, 128, 3, **2002**.
- [24] Hu, L., Wu, W.-L., Wu, Z.-Q., Numerical simulation of electroosmosis in softclay, *Advances in Environmental Geotechnics, Proceedings of The International Symposium on Geoenvironmental Engineering*, 407-412. Hangzhou, China, **2009**.
- [25] Turer, D., Genc, A., Strengthening of soft clay with electrokinetic stabilization method, *6th Symposium on Electrokinetic Remediation Book of Abstracts*, 83-84, Spain, **2007**.
- [26] Mohamedelhassan E. E., *Soil Improvement Using Electrokinetic and Vacuum Techniques*, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, The University of Western Ontario, **2002**.
- [27] Micic, S., Shang, J.Q., Lo, K.Y., Electrokinetic strengthening of marine clay adjacent to offshore foundations, *Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, Stavanger, Norway, **2001**.
- [28] Chien, S.-C., Ou, C.-Y., Wang, M.-K., Injection of saline solutions to improve the electro-osmotic pressure and consolidation of foundation soil, *Applied Clay Science*, 44, 218-224, **2009**.
- [29] Chew, S.H., Karunaratne, G.P., Kuma, V.M., Lim, L.H., Toh, M.L., Hee, A.M., A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains, *Geotextiles and Geomembranes*, 22, 17-35, **2004**.

- [30] Estabragh, A.R., Naseh, M., Javadi, A.A., Improvement of clay soil by electro-osmosis technique, *Applied Clay Science*, 95, 32-36, **2014**.
- [31] Moayedi, H., Nazir, R., Kazemian, S., Huat, B.K., Microstructure analysis of electrokinetically stabilized peat, *Measurement*, 48, 187-194, Elsevier, **2014**.
- [32] Chien, S.-C. ve Ou, C.-Y., A novel technique of harmonic waves applied to electro-osmotic chemical treatment for soil improvement, *Applied Clay Science*, 52, 235-244, **2011**.
- [33] Choi, J.H., Maruthamuthu, S., Lee, H.G., Ha, T.H., Bae, J.H., Electrochemical studies on the performance of SS316L electrode in electrokinetics, *Metals and Materials International*, 15, 5, 771–781, **2009**.
- [34] Puppala, S.K., Alshawabkeh, A. N., Acar, Y. B., Gale, R. J., Bricka, M, Enhanced electrokinetic remediation of high sorption capacity soil, *Journal of Hazardous Materials*, 55, 203-220, **1997**.
- [35] Lu, P., Feng, Q., Meng, Q., Yuan, T., Electrokinetic remediation of chromium- and cadmium-contaminated soil from abandoned industrial site, *Separation and Purification Technology*, 98, 216-220, **2012**.
- [36] Cang, L., Fan, G-P., Zhou, D-M., Wang, Q-Y, Enhanced electrokinetic remediation of copper-pyrene co-contaminated soil with different oxidants and pH control, *Chemosphere*, 90, 2326-2331, **2013**.
- [37] Alshawabkeh, A.N., Sheahan, T.C., Wu, X., Coupling of electrochemical and mechanical processes in soils under DC fields, *Mechanics of Materials*, 30, 453-465, **2004**.
- [38] Altin, A., Degirmenci, M., Lead (II) removal from natural soils by enhanced electrokinetic remediation, *The Science of The Total Environment*, 337, 1-10, **2005**.
- [39] Kornilovich, B., Mishchuk, M., Abbruzzese, K., Pshinko, G., Klishchenko, R., Enhanced electrokinetic remediation of metals-contaminated clay, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 265, 114-123, **2005**.
- [40] Ryu, B-G., Yang, J-S., Kim, D-H., Baek, K., Pulsed electrokinetic removal of Cd and Zn from fine grained soil, *Journal of Applied Electrochemistry*, 40, 1039-1047, **2010**.
- [41] Yuan, S., Zheng, Z., Chen, J., Lu, X., Use of solar cell in electrokinetic remediation of cadmium-contaminated soil, *Journal of Hazardous Materials*, 162, 1583-1587, **2009**.
- [42] Weng, C-H., Lin, Y-T., Lin, T. Y., Kao, C. M., Enhancement of electrokinetic remediation of hyper-Cr(VI) contaminated clay by zero-valent iron, *Journal of Hazardous Materials*, 149, 292-302, **2007**.
- [43] Doruk, M., *Swelling Properties of Clays on the METU Campus*. MSc Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, **1968**.
- [44] Akbay, U., *The Influence of Saturation on Volume Change Characteristics of Ankara Clay Under Various Surcharge Pressure*, MSc.

- Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, **1972**.
- [45] Yüncü, H., *An Investigation of Volume Change of Ankara Clay*. MSc. Thesis. Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, **1972**
- [46] Ulusay, R., *Ankara Kenti Kuzey-Orta Bölgesinin Jeo-Mühendislik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, **1975**.
- [47] Ordemir, İ., Soydemir, Ç., Birand, A. A., Swelling problems of Ankara clay, *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 243-346, Tokyo, Japan, **1977**.
- [48] Akalan, İ., Ankara çevresi topraklarında çeşitli toprak özellikleri ile erozyon arasındaki ilişkiler, *Türkiye Jeoloji Kurumu, Yerbilimleri Açısından Ankara'nın Sorunları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 55-60, Ankara, **1978**.
- [49] Birand, A. A., Ankara yöresi zeminleri ve jeoteknik sorunlar, *Türkiye Jeoloji Kurumu, Yerbilimleri Açısından Ankara'nın Sorunları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 55-60, Ankara, **1978**.
- [50] Kasapoğlu, K. E., *Ankara Kenti Zeminlerinin Jeo-Mühendislik Özellikleri*, Doçentlik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Beytepe, Ankara, **1980**.
- [51] Kiper, O. B., *Etimesgut-Batıkent Yöresindeki Pliyosen Çökellerinin Jeo-mühendislik Özellikleri ve Konsolidasyonu*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, **1983**.
- [52] Teoman, M.B., Topal, T., Işık, N.S., Assessment of slope stability in Ankara clay: a case study along E90 highway, *Environmental Geology*, 45, 963- 977, **2004**.
- [53] Ergüler, Z. A., *Ankara Kilinin Şişme Davranışının ve Örselenmenin Şişmeye Etkisinin İncelenmesi, Şişme Potansiyelinin Görgül Yaklaşımlarla Belirlenmesi*, Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara, **2001**.
- [54] Ergüler, Z. A., Ulusay R., A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey), *Engineering Geology*, 67, 331-352, **2003a**.
- [55] Ergüler, Z. A., Ulusay, R., 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**.
- [56] Avsar, E. Ulusay, R., Sonmez, H., Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay, *Engineering Geology*, 105, is. 1-2, 24-31, **2009**.
- [57] Çamur, M.Z., Yazıcıgil, H., Experimental determination of hydrodynamic dispersion coefficients for heavy metals using compacted clay, *Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics (Proceedings of a symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht)*, The Netherlands, July, **2001**.

- [58] Sezer, G.A., Türkmenoğlu, A.G., Göktürk, E.H., Mineralogical and sorption characteristics of Ankara Clay as a landfill liner, *Applied Geochemistry*, 18, 711-717, **2003**.
- [59] Tonož, M. C., Gokceoglu, C., Ulusay, R., 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**.
- [60] Tonož, M. C., Gokceoglu, C, Ulusay, R., 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**.
- [61] American Standards for Testing Material, *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM D422, **2007**.
- [62] American Standards for Testing Material, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM D4318, **2010**.
- [63] American Standards for Testing Material, *Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method*, ASTM D427, **2004**.
- [64] American Standards for Testing Material, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, Designation: D2487, **2006**.
- [65] Hunnicutt, W. A., *Characterization of Calcium-Silicate-Hydrate and Calcium-Alumina-Silicate-Hydrate*, MSc Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, **2013**.
- [66] Grangeon, S., Claret, F., Linard, Y., Chiaberge, C, X-ray diffraction: a powerful tool to probe and understand the structure of nanocrystalline calcium silicate hydrates, *Acta Crystallographica Section B, Structural Science, Crystal Engineering and Materials*, B69, 465-473, **2013**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Taylan Aşkın

Doğum Yeri: Ankara

Medeni Hali: Bekar

E-posta: taylan.askin@gmail.com

Adresi: Uğur Mumcu Mah., İdareciler Sitesi, 20/15, Batıkent,
Yenimahalle, Ankara / Türkiye

Eğitim

Lise: Çağrıbey Anadolu Lisesi, Ankara

Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce – İleri

Almanca – Başlangıç

İş Deneyimi

2007 - 2013 / İngilizce-Türkçe çevirmen, serbest

2013 - devam / Encon Çevre Danışmanlık Ltd. Şti, jeoloji mühendisi

Deneyim Alanları

Çevresel jeoloji, doğal afetler, hidrojeolojik modelleme, çevirmenlik.

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-

CURRICULUM VITAE

Credentials

Name, Surname: Taylan Aşkın

Place of Birth: Ankara

Marital Status: Bachelor

E-mail: taylan.askin@gmail.com

Address: Uğur Mumcu Mah., İdareciler Sitesi, 20/15, Batıkent,
Yenimahalle, Ankara / Türkiye

Education

High School: Çağrıbey Anadolu Lisesi, Ankara

BSc.: Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara

Foreign Languages

English – Proficient

German - Beginner

Work Experience

2007 - 2013 / English-Turkish translator, freelance

2013 - ongoing / Encon Environmental Consultancy Co., geological
engineer

Areas of Experiences

Environmental geology, natural hazards, hydrogeological modelling,
translation.

Projects and Budgets

-

Publications

-

Oral and Poster Presentation

-