T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# ARITMA ÇAMURLARININ ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA PROSESİ İLE İNCELENMESİ

AYŞEGÜL COŞKUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2017

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# ARITMA ÇAMURLARININ ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA PROSESİ İLE İNCELENMESİ

AYŞEGÜL COŞKUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. NİHAL BEKTAŞ

GEBZE
2017

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

# INVESTIGATION OF ELECTRO-DEWATERİNG OF TREATMENT SLUDGES

AYŞEGÜL COŞKUN

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF ENVIRONMENT ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

PROF. DR. NIHAL BEKTAS

GEBZE

2017

| | |
|---|---|
| GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ | **YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU** |

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/06/2017 tarih ve 2017/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/07/2017 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ayşegül COŞKUN'un tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ

ÜYE : Prof. Dr. Ahmet KARAGÜNDÜZ

ÜYE : Doç. Dr. Mahir İNCE

**ONAY**

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

Doç. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

# ÖZET

Atıksu Arıtma Tesislerinin işletilmesinde arıtma çamurları önemli problemdir. Özellikle kentsel atıksu arıtımında kolay tasarımı ve yüksek verimliliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan, çamur üretimi yüksek olan biyolojik arıtım tesislerinde çamur bertarafı büyük bir çevresel problem ve ekonomik yük olmaktadır. Genel olarak arıtma tesisi işletme maliyetlerinin yaklaşık yarısı çamurun bertaraf edilmesi için harcanmaktadır. Arıtma çamurlarının yüksek su içeriğinden dolayı oluşan büyük hacimleri dolayısıyla, taşıma ve bertaraf maliyetinin düşürülmesi ve su içeriğinin ekonomik ve teknik olarak alınması oldukça önemlidir.

Elektro-susuzlaştırma prosesi mekanik olarak alınamayan çamur flok suyunun, etkili ve ekonomik olarak alınmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde çamura uygulanan doğrusal elektrik alanı ile oluşan elektro-göç, elektroforez ve elektroosmotik akış ile floklardaki bağlı suyun katoda ilerlemesi ve toplanılması ile çamurun susuzlaştırılması sağlanmaktadır. Klasik mekanik susuzlaştırma teknikleri, yalnızca çamur içindeki serbest suyu uzaklaştırabilmektedirler. Klasik yöntemlerle % 15-25 olan çamur su verme verimi, elektro-susuzlaştırma yöntemi ile %50 oranlarına kadar çıkabilmektedir. Düşük enerji gereksinimi, kolay işletimi, şartlandırma için düşük kimyasal madde kullanımı bu prosesi cazip yapan diğer etkenlerdir.

Bu araştırmada, elektro-susuzlaştırma üzerinde deneysel stratejilerin ve çeşitli parametrelerin etkilerini incelemek için, farklı tip arıtma çamurları üzerinde basınç altında elektrik alanlı deneyler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler: Arıtma Çamuru, Elektro-Susuzlaştırma (ES), Elektrik Alan, Basınç.**

# SUMMARY

Sewage sludge is one of the important problems in the operation of wastewater treatment plants. High amount of sludge is a major environmental and economic load in the widely used, simple design and high efficiency biological treatment plants in especially used in urban wastewater treatments. In general, half of the operating cost treatment plants is spent for the disposal of the sludge. Larger volumes due to high water content of sludge cause higher handling and disposal costs so, it should economically and technically be very important reduced the water content.

Electro-dewatering is very effective and economical process for removing sludge water could not be taken by mechanical dewatering. . In this method, the electric field is applied then three phenomena namely electro-migration, electrophoresis and electroosmosis take place to remove sludge water. Intended method is a new technology for our country. Classic mechanical dewatering techniques can only remove the free water in sludge. With this method, the sludge dewatering rates can reach up to 50% instead of the rate of 15-25% in conventional methods. Low energy consumption, easy operation, low use of chemicals are the other attractive factors for this process.

In this research, pressure-driven experiments were set up to investigate the effect of various parameters and experimental strategies on electro-dewatering.

**Key Words: Sewage sludge, Electro-Dewatering (EDW), Elektric Field, Pressure.**

# TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını esirgemeyip teşvikleri ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Nihal BEKTAŞ'a,

Yüksek lisans çalışmalarıma ilk olarak birlikte başladığım ve bu süreçte her türlü bilgi ve görüşleriyle yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. H. Cengiz YATMAZ'a,

Tez çalışmamda bilgi ve görüşleriyle destek ve yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Ahmet KARAGÜNDÜZ'e,

Bu araştırma konusunu çalışmama vesile olan ve çalışmalarım süresince destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Yasemin ÇALIŞKAN'a, Hülya ÖZTÜRK'e ve değerli hocalarımdan Sayın Doç. Dr. Elif İNCE'ye

Çalışmalarımda kitlendiğim noktalarda gerek bilgisiyle gerek araştırmaları ile destek olan ve tez konusu üzerinde yaptığımız tartışmalar ile doğru sonuca ulaşmama yardım eden Sayın Arş. Gör. Mesut TEKBAŞ'a

İş hayatımda ve akademik kariyerimde her konuda bilgilerini, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen çok değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Gülşad USLU'ya, Sayın Doç. Dr. Mahir İNCE'ye, Sayın Prof. Dr. Sinan BİLGİLİ'ye ve Sayın Prof. Dr. Bestamin ÖZKAYA'ya,

İş hayatımda ve akademik kariyerimde, her ne zaman teknik konuda desteğe ihtiyacım olsa destek ve bilgilerini esirgemeyen Sayın Sezai KARAKÖSE'ye ve Adem AYDIN'a,

Gebze Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunup, bir şekilde eğitimimde ve çalışmalarımda emeği geçmiş herkese,

Ve özellikle AİLEME en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER


| | Sayfa |
|---|---|
| ÖZET | v |
| SUMMARY | vi |
| TEŞEKKÜR | vii |
| İÇİNDEKİLER | viii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | x |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | xii |
| TABLOLAR DİZİNİ | xv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Elektro-Susuzlaştırma ile Çamur Susuzlaştırma Çalışmaları | 3 |
| 1.2. Tez Çalışmasının Amacı | 6 |
| 2. ARITMA ÇAMURLARI | 7 |
| 2.1. Arıtma Çamuru Kaynakları | 9 |
| 2.2. Arıtma Çamurları Karakterizasyonu | 11 |
| 2.2.1. Çamur Katı Madde (KM) | 11 |
| 2.2.2. Uçucu Katı Madde (UKM) | 12 |
| 2.2.3. Partikül Boyutu | 12 |
| 2.2.4. Zeta Potansiyeli | 13 |
| 2.2.5. Çamurun Akışkanlık Özelliği | 14 |
| 2.2.6. Çamurda Suyun Dağılımı | 14 |
| 2.3. Çamur Şartlandırma Metotları | 16 |
| 2.4. Çamur Arıtım Basamakları | 17 |
| 2.5. Mekanik Susuzlaştırma Prosesleri | 19 |
| 3. ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA PROSESİ | 22 |
| 3.1. Elektrokinetik Olaylar | 22 |
| 3.1.1. Elektro-osmoz | 24 |
| 3.1.2. Elektroforez | 25 |
| 3.1.3. Elektrogöç | 26 |

3.2. Elektrolotlarda Elektroliz Reaksiyonları 26
3.3. Elektro-Susuzlaştırma Prosesini Etkileyen Faktörler 28
3.4. Elektro-Susuzlaştrma Prosesinin Gelişimi 29
3.5. Arıtma Çamurunun Elektro-Susuzlaştırması 30
4. MATERYAL ve METOTLAR 32
4.1. Deneysel Yöntem 32
4.2. Çamur Numuneleri 35
4.3. Basınçlı Elektro-Susuzlaştırma Deneyi 40
4.4. Analitik Metotlar 41
5. SONUÇLAR ve YORUMLAR 42
5.1. Farklı Potansiyel Değerlerinde Yapılan ES Çalışmaları 42
5.2. Çamur Numunelerinin Elektro-Susuzlaştırılabilirliği 50
5.3. Uygulanan Mekanik Basıncın Etkisi 51
5.4. Enerji Tüketimi Üzerine Etkileri 52
6. SONUÇLAR 58

KAYNAKLAR 60
ÖZGEÇMİŞ 67
EKLER 68

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| **Simgeler ve Kısaltmalar** | | **Açıklamalar** |
|---|---|---|
| $\Delta$KM | : | Başlangıç ve Nihai Katı Madde Arasındaki Fark |
| $\Delta$t | : | Zaman Aralığı |
| A | : | Amper |
| AAT | : | Atıksu Arıtma Tesisi |
| ÇO | : | Çözünmüş Oksijen |
| DC | : | Doğru Akım |
| E | : | Enerji Tüketimi (kWh) |
| ES | : | Elektro-Susuzlaştırma |
| F/M | : | Besin-Mikroorganizma Oranı |
| I | : | Elektrik Akımı |
| İAT | : | İçme Suyu Arıtma Tesisi |
| I-EDW | : | Akım Elektro-Susuzlaştırma |
| J | : | Akım Yoğunluğu |
| KAAY | : | Kentsel Atıksu Arıtma Yönetmeliği |
| KAKY | : | Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği |
| KM | : | Katı Madde |
| $KM_i$ | : | Başlangıç Katı Madde |
| $KM_s$ | : | Nihai Katı Madde |
| kPA | : | KiloPaskal |
| NTU | : | Bulanıklık |
| OSB | : | Organize Sanayi Bölgesi |
| P | : | Elektrik Güç |
| PP | : | Polipropleen |
| SRT | : | Çamur Bekletme Süresi |
| T | : | Sıcaklık (°C) |
| TKKY | : | Toprak Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği |
| U-EDW | : | Voltaj Elektro-Susuzlaştırma |

| | | |
|---|---|---|
| UKM | : | Uçucu Katı Madde |
| V | : | Volt |

# ŞEKİLLER DİZİNİ


| Şekil No: | | Sayfa |
|---|---|---|
| 2.1: | Tipik bir Atıksu Arıtma Tesisinde üretilen çamur tipleri ve kaynakları. | 10 |
| 2.2: | a) Yüklü partiküller birbirini iterek flokülasyonu engellemektedir, b) Yüksüz partiküller yumak yapı oluşturmaktadır. | 13 |
| 2.3: | Arıtma çamurunda suyun şematik gösterimi. | 16 |
| 2.4: | Arıtma çamurlarında bulunan suyun bertaraf metotları. | 16 |
| 2.5: | Çamur işleme ve uzaklaştırma süreçleri akış diyagramı. | 18 |
| 3.1: | Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırmanın şematik gösterimi. | 23 |
| 3.2: | Elektro-susuzlaştırma boyunca meydana gelen elektrokinetik olaylar. | 24 |
| 4.1: | Laboratuvar ölçekli basınca dayalı elektro-susuzlaştırma reaktörü şematik gösterimi. | 33 |
| 4.2: | Laboratuvar ölçekli elektro-susuzlaştırma reaktörü. | 34 |
| 4.3: | Doğru akım güç kaynağı. | 34 |
| 4.4: | PP filtre bezi. | 34 |
| 4.5: | A İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi akış diyagramı. | 36 |
| 4.6: | B Evsel atıksu arıtma tesisi akış diyagramı. | 37 |
| 4.7: | Endüstriyel atıksu arıtma tesisinden atıksu arıtma tesisi akış diyagramı. | 38 |
| 4.8: | Anaerobik çamur çürütücülü endüstriyel atıksu arıtma tesisinden atıksu arıtma tesisi akış diyagramı. | 39 |
| 5.1: | Evsel Biyolojik AAT-A çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi. | 43 |
| 5.2: | Evsel Biyolojik AAT-A çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, | 43 |

30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi.

5.3: Evsel Biyolojik AAT-anaerobik çürütülen B çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi. 44

5.4: Evsel Biyolojik AAT-anaerobik çürütülen B çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi. 44

5.5: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT-C çamur numumesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi. 45

5.6: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT-C çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi. 46

5.7: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütülen D çamuru numumesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi. 47

5.8: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütülen D çamuru üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi. 47

5.9: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütme öncesi E çamuru numumesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi. 48

5.10: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütme öncesi E çamuru üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi. 49

5.11: Arıtma çamurlarının nihai KM içerikleri. 50

5.12: Basınca dayalı ES testleri filtre edilen suyun bulanıklık değerleri. 51

5.13: Evsel Biyolojik AAT çamuruna uygulanan Elektro-Sususzlaştırma prosesi üzerine basıncın etkisi. 53

5.14: Evsel Biyolojik AAT- Çamur A akım yoğunluğu-zaman etkisi. 54

5.15: Evsel Biyolojik AAT- Çürütücü sonrası çamur B akım yoğunluğu-zaman etkisi. 55
5.16: San.Böl.Biyo.AAT- çamur C akım yoğunluğu-zaman etkisi. 55
5.17: San.Böl.Biyo.AAT- çürütücü sonrası çamur D akım yoğunluğu-zaman etkisi. 55
5.18: San.Böl.Biyo.AAT- çürütücü öncesi çamur E akım yoğunluğu-zaman etkisi. 56
5.19: Basınca dayalı ES testlerinde çamur numunelerinin nihai çamur katı madde oranları ve enerji tüketimleri. 57
5.20: Basınca Dayalı ES testlerinde çamur numunelerinin nihai çamur katı madde oranları. 57

# TABLOLAR DİZİNİ


| Tablo No: | | Sayfa |
|---|---|---|
| 2.1: | Arıtma çamurlarının katı madde konsantrasyonları. | 12 |
| 2.2: | Susuzlaştırma proseslerinin karşılaştırılması. | 19 |
| 4.1: | Basınca dayalı ES deneyleri için kullanılan çamur numunelerinin karakteristik özellikleri. | 40 |
| 5.1: | Arıtma çamurları üzerinde basınca dayalı elekto-susuzlaştırma çalışması sonuçları. | 53 |

# 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması ve teknolojinin hızla gelişmesi çeşitli çevre problemlerinin de oluşmasına neden olmuştur ve olmaya devam etmektedir. İnsanoğlu yaşam kalitesini artırmak için her alanda çalışmalarını sürdürmektedir. Ancak önlenemeyen nüfus artışı ve yaşam kalitesini artırma isteği ile birlikte gelen sanayileşme sonucunda yaşam kalitesi artarken, doğal kaynaklar hızla tükenmekte ve çevre hızla kirlenmektedir. Yaşam kalitesinin artması ile insanların tüketim alışkanlıklarının değişmesi neticesinde üretilen atıksu ve katı atık miktarı sürekli artış ve değişkenlik göstermektedir.

Değişik karakterizasyondaki atıksular, farklı yöntemlerle arıtılmakta ve arıtma işlemleri neticesinde arıtma çamurları oluşmaktadır. Arıtma çamurlarının arıtılması, depolanması, taşınması ve nihai bertarafı son yıllarda büyük sorun olmaya başlamıştır. Özellikle son yıllarda belediyeler ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinin faaliyetlerinin artması ile arıtma çamurlarında büyük oranda artış ile karşı karşıya kalınmıştır [Mahmoud et al., 2011], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011].

Atıksu Arıtma işlemleri neticesinde oluşan arıtma çamuru çoğunlukla sıvı veya katı formda olup, arıtma prosesine bağlı olarak değişik konsantrasyonlarda katı madde (KM) içermektedir. Arıtma sonucu çıkan çamur, sadece küçük bir kısmının katı madde, büyük bir kısmının ise sudan oluşması nedeni ile hacimce fazla olup, arıtma alanında işlenme ve uzaklaştırılma problemlerine neden olmaktadır. Özellikle biyolojik arıtma proseslerinden oluşan arıtma çamurları yüksek organik madde içermektedir. Arıtılmamış arıtma çamuru %60 ile %80 arasında değişen yüksek bir organik madde içeriğine sahiptir. Organik madde içeriği biyolojik arıtmadan sonra büyük oranda azalmaktadır. Örneğin organik madde, aerobik çürütme sonrasında KM'nin %60-80'i kadar, anaerobik çürütme sonrasında KM'nin %40-50'si kadar olmaktadır. Bununla birlikte, biyolojik stabilizasyon ile çamurun kalorifik değeri azalmaktadır. Bu değer ham çamurda yaklaşık 17.5MJ/kg dan, çürütülmüş çamurda yaklaşık 10.5 MJ/kg'a düşmektedir [Werther and Ogada, 1999], [Spinosa, 2011], [Andreoli et al., 2007].

Susuzlaştırılmış arıtma çamurundaki yüksek konsantrasyondaki besi maddelerinin örneğin fosfor (yaklaşık %3) ve azot (yaklaşık %1.5) bulunması, çamuru gübre olarak yeniden kullanım konusunda cazip hale getirmektedir. Ancak organik madde, ağır metal ve patojenler gibi potansiyel tehlikeli maddelerin yüksek konsantrasyonları çamurun yeniden kullanılabilirliğini sınırlayabilmektedir [Tenenbaum, 1997]. 1998 yılında arıtma çamurlarının denize dökülmesinin yasaklanmasının ardından, depolama, tarımda kullanma ve yakma, çamur bertarafında ana metot olmuştur [Werther and Ogada, 1999], [Spinosa, 2011], [Andreoli et al, 2007].

Genel olarak çamur, kompostlama, yakma, depolama ve gübre olarak geri kazanıma gönderilmeden önce susuzlaştırılmak zorundadır. Atıksu Arıtma Tesislerinde (AAT) oluşan çamur genellikle düşük susuzlaştırılabilme özelliğine sahiptir. Çamurun susuzlaştırılabilme özelliğini arttırmak ve su içeriğini başarılı bir şekilde azaltmak için genellikle polimer ilavesi ile çamur şartlandırılmaktadır. Çamur arıtımında temel amaç, santrifüj, filtre press, vakum filtre gibi mekanik susuzlaştırma proseslerinde sıvı-katı ayırımının etkinliğini arttırmaktır. Bununla birlikte çamur susuzlaştırma verimi, çamurun karakteristiğine olduğu kadar, polimer dozajına ve özelliklerine de bağlıdır. Diğer taraftan mekanik metotlar, hücre içindeki suyu çok dar gözenek boşluklarına doğru itmek için yeterli yüksek potansiyele ulaşamazlar, bu nedenle susuzlaştırmada kullanılan mekanik yöntemler son derece sınırlıdır ve ilave arıtmalar gerekmektedir [Glendinning et al., 2007], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989]. Dolayısıyla, çamur arıtımı ve uzaklaştırılması, AAT'nin işletme bütçesinin %50'sinden fazlasını kapsamaktadır [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989].

Arıtma çamurunun işletme maliyetinin azaltılması (uzaklaştırma, transfer, depolama) direkt olarak arıtılacak hacme ve çamurun nem içeriğine bağlıdır. Çamurda kalan su miktarı genellikle yer çekimli çökeltme, santrifüj, belt filtre, filtre pres ve gerekliyse klasik termal kurutmayla uzaklaştırılmaktadır. Atıksu çamuru ile elde edilen susuzlaştırma verimleri genelde düşüktür. Susuzlaştırma öncesinde çamurun şartlandırılmasına rağmen ulaşılabilecek en yüksek değer yaklaşık %35dir [Mahmoud et al., 2011]. Geleneksel termal kurutmada enerji tüketimi buharlaştırılması gereken suyun miktarı ile orantılıdır ve atıksu çamurundan suyu

uzaklaştırmak için yüksek sermaye ve işletme maliyetleri gerekmektedir [Mahmoud et al., 2008]. Bu nedenle, düşük enerji ile daha yüksek nihai kuru katı içeriği elde etmek için klasik susuzlaştırma teknolojilerini iyileştirmek için araştırma ve yenilik geliştirmeye açık bir şekilde ihtiyaç vardır [Mahmoud et al., 2016], [Dirkzwager, 1989].

Klasik susuzlaştırma teknikleriyle karşılaştırıldığında, elektro-susuzlaştırma (ES) olarak adlandırılan elektrik alan destekli susuzlaştırma, arıtma çamurlarının düşük enerji tüketimi ile suyunun alınması için alternatif ve etkili bir teknolojidir [Olivier et al., 2015], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989]. ES, çamur susuzlaştırma için, yüksek verimli, enerji tasarruflu, organik komposizyon korumalı bir metottur. Elektro-susuzlaştırma, özellikle mekanik susuzlaştırmanın ulaşamıyacağı nem muhtevasına ulaşmak için mekanik susuzlaştırmadan sonra tavsiye edilen bir yöntemdir [Zhanga et al., 2017].

## 1.1. Elektro-Susuzlaştırma ile Çamur Susuzlaştırma Çalışmaları

Visigalli ve arkadaşları (2017) dört farklı AAT'den aldıkları, farklı biyolojik proses, stabilizasyon metotları veya mekanik susuzlaştırma teknikleri ile arıtılan çamur numuneleri üzerinde, laboratuvar ölçekli bir araç üzerinde 300kPa sabit basınç ve 10, 15, 20V set edilen potansiyel değerleri uygulayarak, ES prosesinin fizibiletisini değerlendirmişlerdir. İlk olarak, benzer KM konsantrasyonuna sahip anaerobik ve aerobik olarak stabilize (çürütülen) edilen çamur numuneleri, nihai KM içeriği ve enerji tüketimi arasında en iyi ilişkiyi değerlendirmek için sabit potansiyel uygulanarak (10, 15 ve 20V) test edilmişlerdir. Nihai KM içeriği ve enerji tüketimi açısından en uygun ES performansı için 15V'a yakın bir potansiyel seçilmiştir. Ayrıca daha düşük başlangıç KM içerikli aerobik olarak stabilize edilmiş çamur numunesi üzerinde mekanik susuzlaştırmanın etkileri çalışılmıştır. Çamurun başlangıçtaki daha yüksek su içeriği, daha düşük nihai KM içeriğine sebep olmuştur ancak enerji tüketiminde önemli ölçüde azalma sağlanmıştır. Son olarak, membran bioreaktör ve klasik aktif çamur proseslerinden alınan çamur numuneleri karşılaştırılarak çalışılan

biyolojik proseslerin, ES üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı kanıtlanmıştır. Bu çalışma neticesinde; uygulanan potansiyelin arttırılması ile susuzlaştırmanın arttığı, 20V da basınçlı ES prosesinin anaerobik çürütülen çamur üzerinde daha etkili olduğu (nihai KM konsantrasyonu, anaerobik çamurda %42,9, aerobik çamurda %37,5'e yükselmiştir.), KM içeriği ile enerji tüketimi arasında en uygun basınçlı ES prosesinin 15V olduğu tespit edilmiştir. ES prosesini kontrol eden ana parametreler, uygulanan potansiyel değeri, başlangıç KM, UKM/KM oranı, iletkenlik ve ham çamurun ağırlığı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca AAT'de klasik metotlarla susuzlaştırması daha zor olan çamur için, basınçlı ES prosesinin daha düşük enerji tüketimi gerektirdiğini belirtmişlerdir [Visigalli et al., 2017].

Bir diğer çalışma Olivier ve arkadaşları (2015) tarafından, kentsel aktif arıtma çamuru için ES prosesinin kinetiği üzerinde proses parametrelerinin (uygulanan elektrik akımı, uygulanan voltaj ve başlangıçtaki KM miktarı vs.) etkisini belirlemek ve susuzlaştırma performansını değerlendirmek için yapılmıştır. Çalışma için Lescar AAT'den, ortalama başlangıç KM içeriği yaklaşık %0,5, elektrik iletkenliği 0,8mS/cm, zeta potansiyeli -20mV ve ortalama UKM içeriği %80 olan aktif çamur numunesi toplanmış ve laboratuvar ölçekli cihaz üzerinde deneyler yapılmıştır. Susuzlaştırma prosesi iki ardışık aşamadan oluşmuş, 1. Aşamada klasik filtreleme/basınçlandırmada maksimum susuzlaştırmaya ulaşmak için 2 saat 5 Bar basınç uygulanmış, 2. Aşamada, 1. Aşamadaki aynı koşullar altında ilave olarak elektrik basınç uygulanmıştır. Uygulanan prosedür ile elektrik katkısı sayesinde ek filtre kalıntısı toplanmıştır. Çalışma sonuçları, uygulanan elektrik akımı ve filtre suyu miktarı arasında ve sonuç olarak elektro-susuzlaştırma kinetiği arasında çok güçlü bir bağ olduğunu göstermiştir. Daha yüksek uygulanan elektrik akımı, daha hızlı ES kinetiğine ve daha yüksek KM içeriğine yol açmış, buna karşılık hücre içerisinde gösterilen kuru katıların kütlesi azaltılarak susuzlaştırma kinetiği belirgin şekilde artmıştır [Olivier et al., 2015].

Mahmoud ve arkadaşları (2016), atıksu çamurunun elektro-susuzlaştırma işlemi sırasında, proses işletme parametrelerinin enerji tasarrufuna ve çamurun KM içeriği üzerine etkilerini incelemişlerdir. İşletme parametresi olarak, filtrasyon ve sıkıştırma aşamalarının birinde ya da her ikisinde voltaj veya akım uygulama zamanı ile basınç uygulamasının etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmaları sonucunda, filtre

keki sıkıştırma aşamasında, elektrik alan uygulamasını geciktirerek, enerji tüketiminde, U-EDW durumunda yaklaşık %10-12, I-EDW durumunda yaklaşık %30-46 kadar potansiyel tasarruf sağlandığı görüşülmüştür. Ayrıca, filtre kek sıkıştırma aşaması boyunca uygulanan basıncın 0.5 Bar'dan 12 Bar'a artışı ile elektro-susuzlaştırma kinetiğinin artmasına neden olduğu görülmüş ve yapılan çalışmalar ile düşük elektrik alan seviyesinde, işletme basıncının artışının, susuzlaştırma prosesi üzerinde nispeten belirgin bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Yüksek seviyelerdeki elektrik alanlarda, düşük enerji tüketimi için, elektrot ve çamur arasında elektrik kontağın iyileştirilmesi için minimum bir işletme basıncının gerektiği belirtilmiştir [Mahmoud et al., 2016].

Çamurun, elektrokinetik olarak susuzlaştırılmasının arttırılması için tasarım değerleri konusu, Glendinning ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır. Glendinning ve arkadaşlarının çalışmaları neticesinde, elde edilen denklemler ve deneysel sonuçlar, elektroosmotik akışın sabit voltajla susuzlaştırılırken zamanla azaldığı ve sabit akım koşulları muhafaza edildiğinde sabit kaldığı tespit edilmiştir [Glendinning et al., 2010].

Diğer bir başka çalışmada Pham-Anh ve arkadaşları, çamurun, basınçlı ve basınçsız koşullar altında elektro-susuzlaştırmasını incelemişlerdir. Değişik tip çamurlarda susuzlaştırma oranını ve elektro-susuzlaştırma sonrasında çamur kekindeki su içeriğini incelemek için, laboratuvar ölçekli basınçlı ve basınçsız susuzlaştırma reaktörleri kurulmuştur. Çalışmalar neticesinde, basınçsız deneylerde, su uzaklaştırma oranının, çamurun tipine ve çamurun pH tamponlama kapasitesine yüksek bir şekilde bağlı olduğu ve daha yüksek su giderim veriminin anaerobik çamurla gerçekleştirildiği gözlenmiştir. Basınç uygulandığı zaman, anottan katota suyun uzaklaştırılması akım yoğunluğuna bağlı olduğu kadar alkaliniteye de bağlı olduğu görülmüş ve çeşitli alkalinite derecelerine sahip farklı tip çamurların, zeta potansiyeli ve pH'ı değiştirerek çamurun elektro-susuzlaştırılmasını etkilediği belirlenmiştir [Tuan et al., 2008].

## 1.2. Tez Çalışmasının Amacı

Elektro-susuzlaştırma çamurun su verme özelliğini geliştirmek için son yıllarda kullanılmaya başlanmış bir tekniktir. Arıtma çamurların içindeki suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı mekanik olarak ile suyun alınması kolay olmamaktadır. Bu nedenle tüm dünyada olduğu gibi ülkemiz için de artıma çamurun susuzlaştırılmasında yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerekliği doğmuştur. Elektro-susuzlaştırma prosesi mekanik olarak alınamayan çamur flok suyunun, etkili ve ekonomik olarak alınmasını sağlayan bir yöntemdir. Önerilen bu proje kapsamında, arıtma çamurlarının su içeriğinin ekonomik ve çevreye zarar vermeden, elektrokimyasal bertarafı bu tezin özgün çalışma konusu olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi son yıllarda elektro-susuzlaştırma ile ilgili bazı akademik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, farklı tip evsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesislerinden ve içme suyu arıtma tesisinden alınan, aerobik ve anaerobik olarak stabilize edilmiş ve mekanik olarak susuzlaştırmadan geçirilmiş, benzer başlangıç katı madde (KM) konsantrasyonuna sahip aktif arıtma çamurlarının, basınçsız ve basınç altında elektro-susuzlaştırma (ES) prosesini etkileyen parametrelerin incelenmesi amaçlanmıştır.

Laboratuvar ölçekli bir cihaz kullanılarak, 2,5Bar sabit basınç altında, 10mm sabit çamur keki kalınlığında, farklı elektrik potansiyeli değerlerinde (20V, 30V, 40V), 30 dakika süre ile paslanmaz çelik elektrot ve PP filtre bezi kullanılarak, arıtma tesislerinden toplanan farklı tip arıtma çamuru numuneleri üzerinde, ES performansı, enerji tüketimi, KM artışı, filtre edilen su miktarı ve filtre suyu bulanıklık değerleri açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

# 2. ARITMA ÇAMURLARI

Arıtma çamurları, içme suyu ve atıksu arıtımında, fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri ile çöktürülebilir ve yüzebilir forma giren, yüksek miktarlarda organik madde, patojen mikroorganizmalar, besin maddeleri ve çok miktarda su içeren, arıtılmadan çevreye verildiklerinde çevrede hasar oluşturan bu nedenle arıtılmaları gereken maddelerdir [Spinosa, 2011], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989].

Başka bir ifadeyle atıksuların arıtılmaları sonucu oluşan ve uygulanan arıtma yöntemine bağlı olarak % 0.5-10 arasında katı madde içeren akıcı atıklar, artıma çamurları olarak tanımlanabilir [ResGaz, 2], [ResGaz, 5], [ResGaz, 1]. Arıtma prosesinin türü ve atıksuyun karakterizasyonuna bağlı olarak oluşan arıtma çamurunun özellikleri değişmektedir. Bu çamurlar genellikle fiziksel özelliklerine göre, su verme, metal içeriği, besin maddesi içeriği ve mikrobiyolojik karakterine göre değerlendirilirler. Aynı şekilde evsel veya endüstriyel atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamurların özellikleri farklılık göstermektedir. Hatta farklı sektörlerdeki endüstriyel arıtma çamurları da esasında atıksu karakterine ve arıtma tipine bağlı olarak farklılık göstermektedir [ResGaz, 2], [ResGaz, 5], [ResGaz, 3].

Ham bir biyolojik arıtma çamuru kompozisyonu beş farklı grup bileşenle karakterize edilebilir;

- %90-99.5 arasında değişen su;
- Toksik olmayan organik karbon bileşikleri, azot, fosfor içeren bileşikler;
- Toksik kirleticiler;
- Patojenler ve diğer mikrobiyolojik kirleticiler;
- Silikat, alüminat, kalsiyum gibi inorganik bileşikler ve magnezyum içeren bileşikler.

Atıksuların arıtıldığı tesislerin farklı arıtım basamaklarından büyük miktarlarda arıtma çamuru oluşmaktadır. 1998 yılından itibaren birçok ülkede arıtma çamurlarının denizlere deşarjı yasaklanmış, arıtma çamurları yakma, tarımsal

kullanım ve depolama gibi yöntemleri ile bertaraf edilebilmektedirler. Bu yüzden arıtma çamurlarının yüksek su içeriğinden dolayı oluşan büyük hacimleri dolayısıyla, taşıma ve bertaraf maliyetinin düşürülmesi ve su içeriğinin ekonomik ve teknik olarak alınması oldukça önemlidir. Suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı mekanik olarak suyunun alınması kolay olmamaktadır.

Ayrıca, ülkemizde AB uyum sürecinde çıkarılan yasalar ile küçük beldelerde bile arıtma tesisi yapılma zorunluluğu, arıtma tesislerinin işletilmesi ile birlikte arıtma çamuru sorununu da yanında getirmiştir.

Avrupa'da ve ülkemizde arıtma çamurlarının yönetimine yönelik yasal düzenlemeler bulunmaktadır. Arıtma çamur tanımı ilk kez 1991 yılında çıkartılan Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği'nde (KAKY), "evsel ve evsel nitelikteki endüstriyel atık suların, fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemleri sonucunda ortaya çıkan, suyu alınmış, kurutulmuş çamur" şeklinde ilk kez tanımlanmıştır [ResGaz, 2]. Ayrıca, 2001 yılında yayınlanan ve 2005 yıllında revize edilen Toprak Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde de (TKKY) arıtma çamuru kavramına yer verilmiştir [ResGaz, 5]. 2006'da çıkarılan Kentsel Atıksu Arıtma Yönetmeliği (KAAY)'nde ise arıtma çamuru kavramı kentsel atıksu arıtma tesislerinden çıkan ham veya stabilize olmuş çamur anlamında kullanılmıştır [ResGaz, 3]. İlk kez arıtma çamurunun tarımda kullanım şartları ile kullanma sınır ve yasakları KAKY ile belirlenmiştir. Daha sonra Toprak Kirliliği Yönetmeliği, çamur üreticilerine çeşitli yükümlülükler getirmiş, ham çamurun kullanımı yasaklanmış, stabilize çamurun kullanımına ilişkin birtakım sınırlama ve yasaklamalar getirmiştir. 2005 yılında yürürlüğe giren Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği de arıtma çamurlarının tehlikeli atık sınıfında değerlendirilmesi ile ilgili hükümlere yer vermiştir [ResGaz, 4]. Son olarak 2010 yılında yürürlüğe giren Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik [ResGaz, 1]ile evsel ve kentsel atıksuların arıtılması sonucu ortaya çıkan arıtma çamurlarının toprağa, bitkiye, hayvana ve insana zarar vermeyecek şekilde, toprakta kontrollü kullanımına ilişkin teknik ve idari esasları kapsanmaktadır. Avrupa Birliğinin 1986'da çıkardığı "Arıtma Çamur Direktifi 86/278/EEC" arıtma çamurunun tarımda kullanımını düzenlemiştir [Web 1, 1986], Avrupa Birliğinin atıksular için çıkardığı, Kentsel Atıksu Direktifi 91/271/EEC de arıtma çamuru konusuna değinen diğer bir

yönetmeliktir. Bu yönergede arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurların bertarafı ile ilgili hükümler yer almıştır [Web 2, 1991].

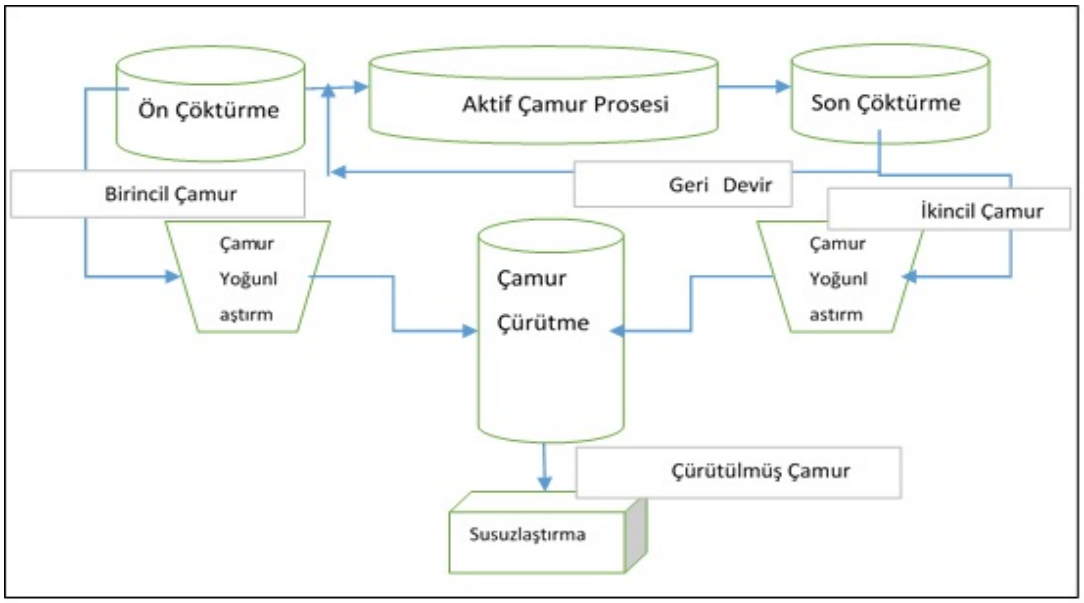
## 2.1. Arıtma Çamuru Kaynakları

Bir arıtma tesisindeki çamur kaynakları tesiste uygulanan fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma proseslerine ve uygulanan işletme yöntemine göre değişiklik göstermekte olup %0.25-12 oranında KM içermektedir [Öztürk et al., 2015], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989].

Arıtma çamurları;

- Ön Çökeltme (birincil) çamurları: Çökebilen katı maddelerin oluşturduğu ön çökeltme çamurları,
- Kimyasal arıtım ve flokülasyon ile oluşan kimyasal arıtma çamurları,
- Biyolojik ve ileri biyolojik arıtma prosesleri sonucu oluşan biyolojik (ikincil) çamurlar
- Flokülasyon-koagülasyon işlemlerinin gerçekleştiği içme suyu arıtma sonucu oluşan çamurlardır [Öztürk et al., 2015].

Tipik bir AAT de çamur, birincil çöktürme çamuru, ikincil çöktürme çamuru ve çürütülmüş çamur olarak sınıflandırılabilir. Çamur sınıflandırması Şekil 2.1'de verilmiştir [Tchobanoglous et al., 2003]. Çamur tipleri, çamurun susuzlaştırılabilme özelliğini etkileyen fiziksel, kimyasal ve biyolojik karakteristikler bakımından farklıdırlar [Tuan, 2011], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989], [Tchobanoglous et al., 2003].




Şekil 2.1:Tipik bir atıksu arıtma tesisinde üretilen çamur tipleri ve kaynakları.

- Birincil Çamur

Birincil çamur, fiziksel bir ön çökeltme prosesi kullanarak ham atıksudan çökelebilen katıların uzaklaştırılması ile oluşur. Birincil çamurun ana bileşenleri hücresel olmayan organiklerdir. Bileşenler %70-75 KM aralığındadır [Nellenschulte et al., 1997], [Andreoli et al., 2007], [Dirkzwager, 1989]. Birincil çamurda yüksek miktardaki biyolojik bozulabilen organik maddeler depolama altında istenmeyen kokulara sebep olurlar. Ayrı parçacıkların birleşiminden dolayı, birincil çamur, ikincil çamur ile karşılaştırıldığında daha düşük arıtma gereksinimleri ile kolay bir şekilde susuzlaştırılabilir [Turovskiy et al., 2006].

- İkincil Çamur

Fazla çamur, biyolojik çamur ve fazla aktif çamur olarak da bilinen ikincil çamur biyolojik arıtmada aerobik şartlarda üretilir. İkincil çamur esas olarak askıda katıların ve kolloidlerin adsorblanmasından ve mikroorganizmalardan oluşur. Biyolojik çamurun organik içeriği %60 ile %80 arasında değişir ve tipik değeri %75'dir. Genel olarak ikincil çamurun susuzlaştırılabilme özelliği birçok faktöre bağlıdır [Lio et al., 2006], [Andreoli et al., 2007], [Dirkzwager, 1989]. Çamur bekletme süresine (SRT), flamentli bakteri gruplarına, atıksu karakterizasyonuna,

düşük besin/mikroorganizma (F/M) oranına, düşük çözünmüş okijene (ÇO), nutrient eksikliğine, sıcaklığa vs.

- Çürütülmüş Çamur

Belediye AAT'lerinde, normalde birincil ve ikincil çamur, arazi uygulaması, depolama ve nihai uzaklaştırmadan önce stabilizasyon ve sonrasında susuzlaştırma işlemleri gerektirmektedir. Çamur stabilizasyonun amacı koku giderimi olduğu kadar tehlikeli kimyasalların ve mikropların azaltılmasıdır. Çamur stabilizasyonu için çoğunlukla aerobik ve anaerobik koşullar altında biyolojik çürütme kullanılır. Bio-stabilizasyon çamurdaki organik içeriği %70'den %50'ye azaltır. Metan gazı üretimi potansiyel enerji kaynağı olduğu ve işletme maliyeti düşük olduğundan çamur stabilizasyonu için en yaygın olarak anaerobik çürütme prosesi kullanılmaktadır. Aerobik ve anaerobik çürütme sonrası çürütülmüş çamurun susuzlaştırılabilmesi orjinal fazla çamura kıyasla azalmaktadır [Nellenschulte and Kayser 1997], [Andreoli et al., 2007], [Dirkzwager, 1989].

Hem aerobik hem anaerobik çürütme süresince ince partiküllerin içeriği azalır bu da çamurun susuzlaştırılabilmesinin azalmasına neden olur. Küçük partiküllerin oluşumu ve daha büyük dezentegrasyona neden olan mekanik stresin yanı sıra daha yüksek bakteriyel büyümeyi takip eden bozunmadan dolayı aerobik prosesin sebep olduğu çamurun susuzlaştırılabilmesindeki azalma çok daha büyüktür [Borowski and Szopa, 2007], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa et al., 2001].

## 2.2. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu

Arıtma tesislerinde farklı tip arıtma prosesleri sonucunda oluşan arıtma çamurlarının arıtılabilmesi ve bertaraf edilebilmesi için çamurun su verme, çökelebilme, organik madde içeriği vb. özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir [Filibeli, 1996], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011], [Spinosa and Vesilin, 2001], [Dirkzwager, 1989].

### 2.2.1. Çamur Katı Madde (KM)

Çamurun katı madde içeriği, arıtma prosesine göre değişmektedir. Ön çöktürme sonucu oluşan çamur genellikle %3-5, son çöktürme sonucu oluşan çamur %0.5-2, yerçekimli yoğunlaştırıcı sonucu oluşan çamur %5-10 katı madde içermektedir [Filibeli, 1996], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989].

Tablo 2.1 de arıtma çamurlarının ortalama katı madde konsantrasyonları verilmektedir [Tchobanoglous et al., 2003].

Tablo 2.1: Arıtma çamurlarının katı madde konsantrasyonları.

| Arıtma Çamuru Tipi | Katı Madde Konsantrasyonu %KM | |
|---|---|---|
| | Aralık | Tipik |
| Ön Çökeltim Çamuru | 4.0-10 | 5.0 |
| Aktif Çamur | 0.8-2.5 | 1.3 |
| Damlatmalı Filtre Çamuru | 1.0-3.0 | 1.5 |
| Ön Çökeltim Çamuru + Aktif Çamur | 0.5-1.5 | 0.8 |
| Anaerobik Çürütülmüş Çamur | 5.0-10 | 8.0 |

### 2.2.2. Uçucu Katı Madde (UKM)

Çamurun organik madde kısmı, çamurun bertarafını ve faydalı kullanımını etkiler. Çamurda organik madde koku problemine sebep olmakta ve çamurun su verme özelliğini de etkilemektedir [Filibeli, 1996], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989].

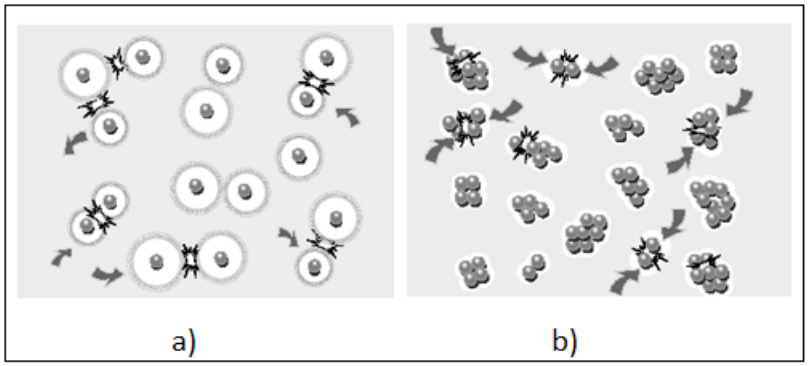
### 2.2.3. Partikül Boyutu

Çamurdaki partikül boyut dağılımının bilinmesi, çamurun su verme ve şartlandırma özelliklerinin belirlenmesi ve çamur gidermede kullanılacak proses

seçiminde çok önemli bir parametredir. Partikül boyutu, çamurun suyunu verme özelliğini direkt etkilemektedir [Filibeli, 1996]. Karr (1976) farklı çamur numuneleri kullanarak yaptığı çalışmada, 1-100µm aralığındaki partiküllerin, suyunu verme üzerinde olumsuz etkisinin olduğunu tespit etmiş ve bu aralıktaki partükül boyutuna sahip çamurların partikül büyüklüklerinin değiştirilmesi için ilave işlem yapılması gerektiğini belirtmiştir [Karr, 1976].

### 2.2.4. Zeta Potansiyeli

Zeta potansiyeli partiküller üzerindeki net elektriksel yüktür ve kollaidal haldeki katı maddelerin tanımlanması ve kontrolü amacıyla kullanılmakta ve mV olarak ölçülmektedir. Evsel arıtma çamurları -10 ile 20V arasında, endüstriyel arıtma çamurları ise -80mV'u aşan zeta potansiyeline sahiptir. Ancak şartlandırma için özelliklede katyonik polielektrolit kullanımları zeta potansiyellerini sıfıra doğru değiştirebilir [Lee and Liu, 2000], [Wolny et al., 2008]. Çamur partikülleri üzerindeki yük büyükse yanı zeta potansiyeli büyükse, bu durum flokülasyonu engeller ve böyle çamurların suyunu vermesi zorlaşır. Şekil 2.2.a) ve Şekil 2.2.b)'de elektrik yükü olan ve olmayan partiküllerin davranışı gösterilmektedir [Filibeli, 1996]. Zeta potansiyeli ayrıca, çamurun şartlandırması için ilave olarak kullanılan kimyasal şartlandırıcı dozunun belirlenmesinde de kullanılan bir parametredir [Filibeli, 1996], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011].




Şekil 2.2: a) Yüklü partiküller birbirini iterek flokülasyonu engellemektedir, b) Yüksüz partiküller yumak yapı oluşturmaktadır.

### 2.2.5. Çamurun Akışkanlık Özelliği

Akışkanlık özelliklerine göre çamurlar 4 gruba ayrılır [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011], [Spinosa et al., 2001].

- Sıvı: Çamur, kendi cazibesi ile akabilen akışkan durumundadır.
- Plastik: Çamur yoğun haldedir, serbestçe akamaz, ancak yeterli basınç uygulandığında deforme olabilir.
- Büzüşebilir: Çamur, pompalanamayacak kadar çok yoğundur, kurudukça hacminde azalma olur.
- Büzüşmez: Çamurun bünyesinde boşluklar meydana gelmiştir ve artık su ile doygun değildir. Kurur ancak hacmi değişmez [Hızal, 2000].

### 2.2.6. Çamurda Suyun Dağılımı

Su çamurda farklı tiplerde bulunur [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989]. Tüm tipler, buhar basıncı, entalpi, entropi, iletkenlik, yoğunluk, zeta potansiyeli, partikül boyutu gibi farklı kimyasal ve özelliklere sahiptir [Katsiris and Kouzeli, 1987]. Serbest ve bağlı su, suyun ana tipleri olarak kabul edilmektedir. Serbest su, suyun en büyük kısmını temsil eder. Termodinamik olarak saf su gibi davranır. Bağlı su, çamurda toplam su içeriğinin çok küçük bir oranını içerir ancak genellikle kütle açısından katı fazdan daha büyüktür. Bağlı su, kimyasal olarak bağlı su, fiziksel olarak bağlı su ve mekanik olarak bağlı su olarak görülebilir [Katsiris and Kouzeli, 1987].

Çamurdaki suyun, serbest ve bağlı su olarak ayrıldığı basit bir yol, susuzlaştırma proseslerinde fiziksel ve kimyasal mekanizmaları veya susuzlaştırma prosesini iyileştirmek için kullanılan ön-arıtma işlemlerini tanımlamak için yeterli değildir (örneğin koagülasyon, flokülasyon, fiziksel şartlandırma ve kimyasal oksidasyon). Genel olarak suyun, çamur parçacıklarına fiziksel bağlanmasına bağlı olarak, Vesilind çamurdaki suyu dört farklı su tipine ayırmıştır [Vesilind, 1994], [Hsu, 1997], [Vesilind, 1995].

- Serbest Su:

Çamur partiküllerine bağlı olmayan sudur. Diğer ifade ile de serbest su kapiler kuvvetler ile ilişkili olmayan sudan kaçınmayı içeren çamur parçacıkları ile ilişkili olmayan sudur. Serbest suyun içeriği arıtma çamurunun en geniş kısmını kapsar (%70-75).

- Flok Suyu:

Çamur flokları veya çatlaklarda ve geçiş boşlukları veya floklarda sıkışan su arasında kapiler kuvvetler tarafından bağlı olan sudur. Floklar dağıldığı zaman bu su serbest bırakılabilir. Santrifüj gibi mekanik susuzlaştırma araçları tarafından bazı doku içi sular uzaklaştırılabilmektedir.

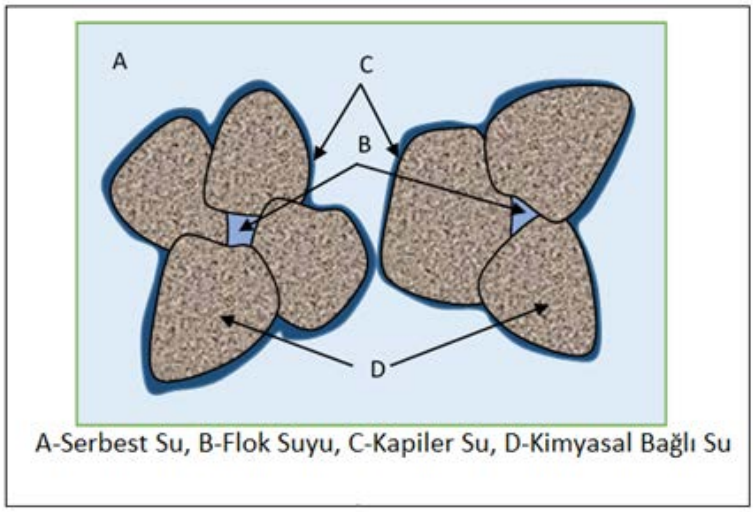
- Kapiler Su:

Katı parçacıkları ile ilişkili olan sudur. Çok katmanlı su molekülleri hidrojen bağıyla su yüzeyine sıkıca tutulurlar. Bu su, su moleküllerinin molekül yapısından dolayı partikül yüzeylerinde tutulur ve mekanik arıtma metodları ile uzaklaştırılamazlar.

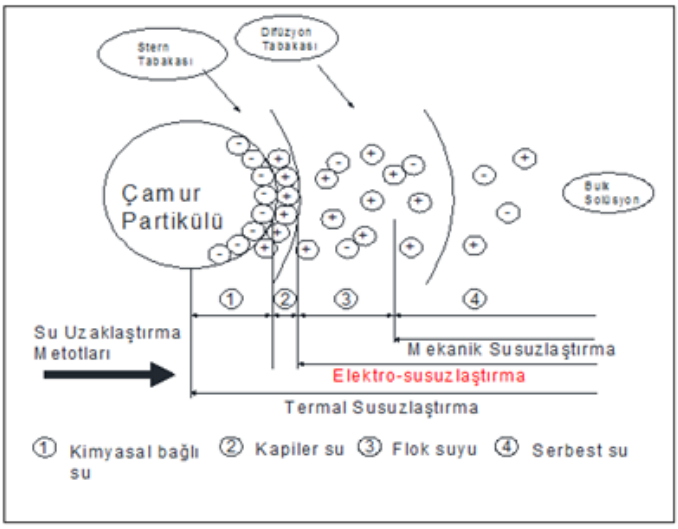
- Kimyasal Bağlı Su:

Partikül yapısı içerisinde kimyasal olarak bağlı olan ve sadece partiküllerin termo-kimyasal tahribatıyla serbest bırakılabilen sudur [Filbeli,1996].

Şekil 2.3'de suyun çamur partikülleri üzerindeki dağılımı [Pham-Anh et al., 2012], Şekil 2.4'de ise arıtma çamurlarında bulunan suyun özelliklerine göre bertaraf metotları görülmektedir [Jiaziang et al., 2012].




Şekil 2.3: Arıtma çamurunda suyun şematik gösterimi.




Şekil 2.4: Arıtma çamurlarında bulunan suyun bertaraf metotları.

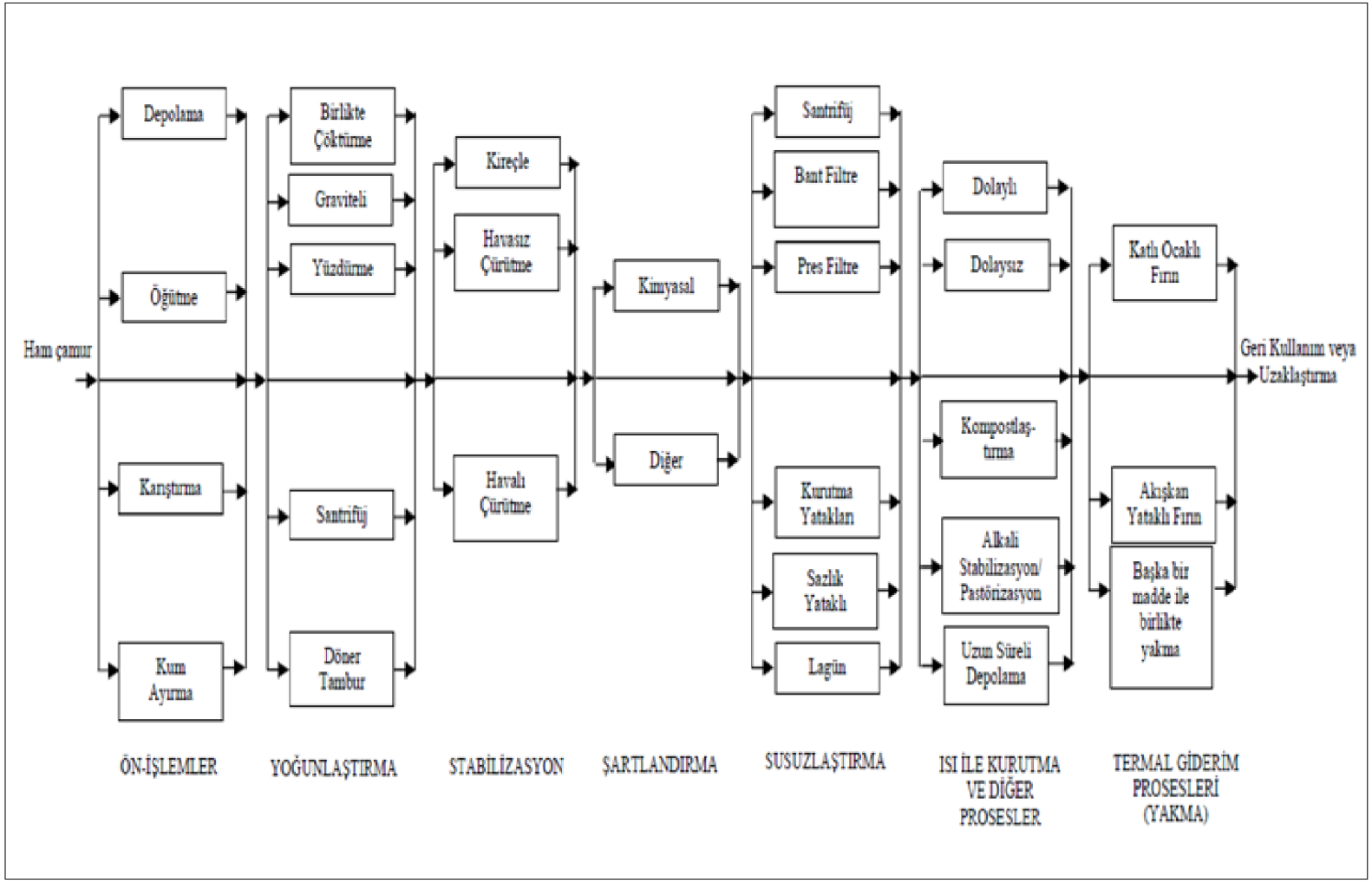
## 2.3. Çamur Şartlandırma Metotları

Çamur şartlandırma metotları iki tipe ayrılabilmektedir. Susuzlaştırabilme özelliğini geliştirmek için bir veya daha fazla kimyasalın eklendiği kimyasal şartlandırma ve fiziksel özellikler kullanılarak yapılan fiziksel şartlandırmadır. Şartlandırma metotları çamurun yapısını değiştirmekte ve bu nedenle çamur ve sıvı kısımları daha kolay ayrılabilir hale gelmektedir [Tuan, 2011], [Andreoli et al., 2007], [Dirkzwager, 1989].

## 2.4. Çamur Arıtım Basamakları

Atıksu Arıtma Tesislerinde arıtma işlemleri sonucunda oluşan arıtma çamurları, yoğunlaştırma (yüzdürme DAF, yerçekimli çökeltme, mekanik yoğunlaştırma), stabilizasyon (anaerobik çürütme, kireç ile stabilizasyon, kompostlama, ısıl işlem), susuzlaştırma (santrifüj, filtre pres, belt filtre vs), kurutma ve yakma yöntemlerinden uygun olan prosesler ile arıtılarak bertaraf edilmektedir [Öztürk et al., 2015], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011], [Spinosa et al., 2001], [Dirkzwager, 1989].

Şekil 2.5'de Çamur işleme ve bertaraf etme proseslerinin akış şeması görülmektedir [Tchobanoglous et al., 2003].




Şekil 2.5: Çamur işleme ve uzaklaştırma süreçleri akış diyagramı.

## 2.5. Mekanik Susuzlaştırma Prosesleri

Susuzlaştırma, çamurun hacminin ve su içeriğinin azaltıldığı fiziksel bir prosestir. Susuzlaştırma sonrasında, çamurun hacmi %80'den daha fazla azalır ve KM içeriği, susuzlaştırma metoduna ve çamurun tipine bağlı olarak %4'den %20-30'a kadar yükselebilmektedir. Sık olarak kullanılan susuzlaştırma prosesleri, belt filtre, vakum filtre pres, filtre pres, dekanter gibi mekanik prosesleri ve kurutma yatakları, lagünler gibi doğal prosesleri içermektedir [Tuan, 2011].

Susuzlaştırma proseslerinin temel avantajları ve dezavantajları Tablo 2.2'de gösterilmektedir [Turovskiy et al., 2006], [Tchobanoglous et al., 2003].

Tablo 2.2: Susuzlaştırma proseslerinin karşılaştırılması.

| Proses | Avantajları | Dezavantajları |
|---|---|---|
| Belt Filtre Pres | Diğerlerine nazaran daha düşük yatırım, işletme ve güç maliyeti<br>Daha kolay sistemi kapatma<br>Daha kolay bakım | Çamur karakteristik özelliklerine çok hassas<br>Polimer türüne ve dozaj oranına karşı hassas,<br>Çok miktarda belt yıkama suyu ihtiyacı |
| Basınçlı Filtre Pres | Yüksek çamur keki konsantrasyonu,<br>Filtrat suyunda düşük AKM,<br>Kontrol edilmesi zor çamur için iyi bir susuzlaştırma prosesi,<br>Taban alanında önemli bir artış olmaksızın kapasiteyi arttırmak için plakalar eklenebilir. | Kesikli işletme,<br>Yüksek sermaye ve iş gücü maliyeti,<br>Kalifiye bakım personeli gerektirir,<br>Sık sık ilave çamur üreten inorganik kimyasal şartlandırma gerektirir. |

Tablo 2.2: Devam.

| | | |
|---|---|---|
| Santrifüj | Diğerlerine nazaran az yere ihtiyaç vardır,<br>Hızlı devreye alma ve kapatma,<br>Sürekli operatör kontrolüne gerek duyulmaz,<br>Temiz görünüm ve iyi koku tutma özelliği. | Diğerlerine nazaran yüksek maliyet,<br>Üretilen ürünün birim başına daha fazla direkt güç tüketir,<br>Çamur beslemeden, kum çakıl uzaklaştırılmasını gerektirir,<br>Periyodik bakımlarda uzun süreli duruşlar gerektirir,<br>Kalite ve kalifiyeli personel gerektirir. |
| Kurutma yatakları ve Kurutma Lagünleri | Arazi kolaylıkla kullanılabilir olduğu zaman düşük sermaye maliyeti,<br>Düşük enerji tüketimi,<br>Düşük ya da hiç kimyasal tüketimi<br>Operatörün en az dikkat ve becerisini gerektirir. | Büyük alan ihtiyacı,<br>Çamur sitabilizasyonuna ihtiyaç duyar<br>İklim etkisini gözününe almak gerekir.<br>Çamur keki uzaklaştırılması emekli ve yoğundur,<br>Koku problemi vardır. |

Sonuç olarak, arıtma çamurları atıksu arıtma tesislerinin işletilmesinde önemli problemlerdir. Arıtma çamurların içindeki suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı mekanik olarak ile suyun alınması kolay olmamaktadır. Özellikle kentsel atıksu arıtımda kolay tasarımı ve yüksek verimliliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan çamur üretimi yüksek olan biyolojik arıtım tesislerinde çamur bertarafı büyük bir çevresel ve ekonomik yük olmaktadır. Genel olarak arıtma tesis işletme maliyetlerini yaklaşık yarısı çamurun bertaraf edilmesi için harcanmaktadır. Arıtma çamurların yüksek su içeriğinden dolayı oluşan büyük hacimleri dolayısıyla su içeriğinin

ekonomik olarak ve teknik olarak alınması, taşıma ve bertaraf maliyetinin düşürülmesi oldukça önemlidir.

Arıtma teknolojilerin yaygın bir biçimde kullanılması sonucunda, bu tesislerden kaynaklanan arıtma çamurların miktarları da her geçen gün artmaktadır. Özellikle çamur üretimi yüksek olan biyolojik arıtımın, kolay tasarımı ve yüksek verimliliği nedeniyle, geniş bir biçimde kullanılması ile çamur bertarafı bu tesisler için büyük bir çevresel ve ekonomik yük olmaktadır.

Arıtma tesislerinde, işletme maliyetlerinin yaklaşık yarısı çamurun bertaraf edilmesi için harcanmaktadır. Ancak arıtma çamurlarının tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de işlenmesi, çevre ile uyumlu bir şekilde çevreye en az zarar verecek şekilde bertaraf edilmesi oldukça önemlidir. Arıtma çamurlarının su içeriğinin fazla olmasından dolayı hacimleri artmakta olup, taşıma ve bertaraf maliyetleri yükselmektedir. Arıtma çamurlarının kompostlaşma, yakma, depolama ve araziye serme gibi farklı şekilde bertaraflarında da su içeriğinin azaltılması gerekmektedir. Çamur bertarafı için yakma, düzenli depolama, arazide kullanma ve kurutma gibi çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir. Ancak çamur miktarının artması, maliyet ve gelişen yönetmelikler çamurun susuzlaştırılmasında yeni yöntemlerin geliştirilmesine odaklanmıştır.

# 3. ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA PROSESİ

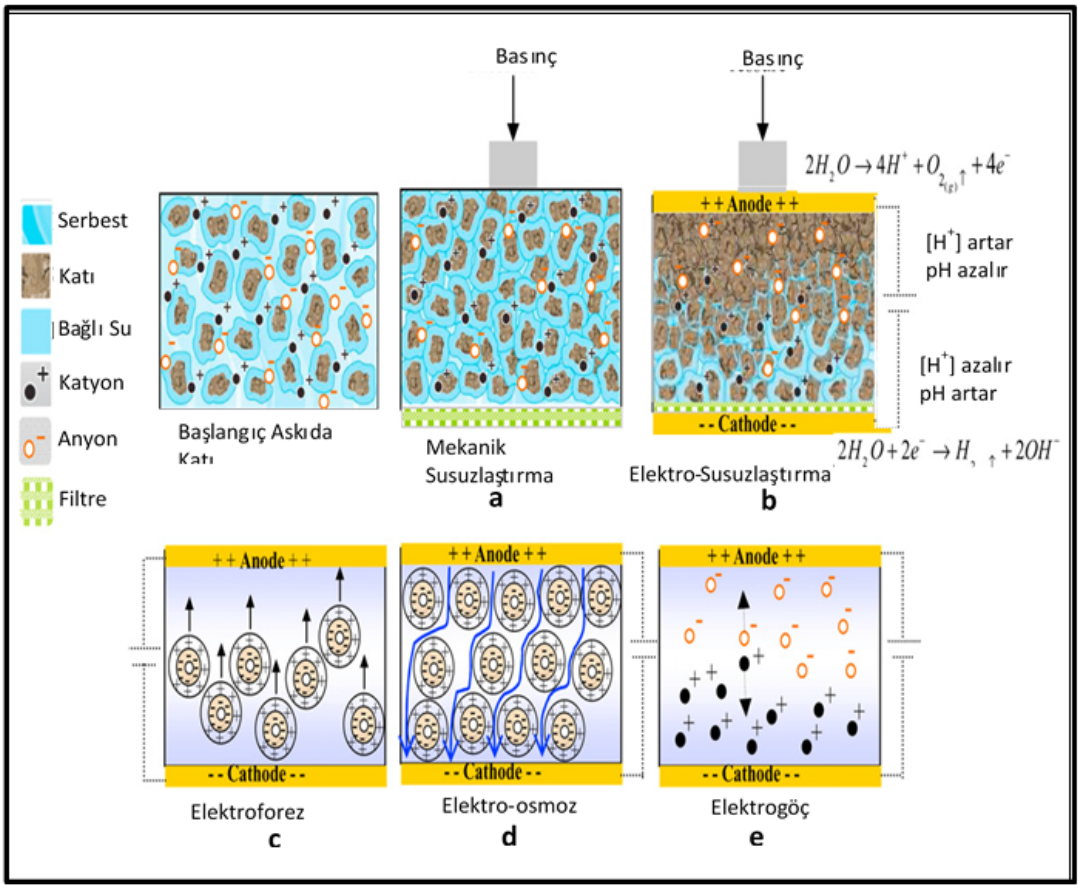
Çamur bertarafında vakum filtrasyon, belt fitre ve santrifüj gibi mekanik ve termal teknolojiler oldukça sık kullanılmaktadır [Spinosa et al., 2001], [Tchobanoglous, 2003], [Gray, 2005]. Özellikle de yanma öncesi çamurların katı içeriğinin %30-35 oranlarına getirilmelidir. Ayrıca bu işlemler çamurun deponi alanlarına gönderildiği durumlarda da önemlidir. Bu durumda çamur hacmi dolayısıyla su içeriği, taşıma maliyetini ve depolama alanını azaltacak seviyeye indirilmelidir. Ancak çamur susuzlaştırmada kullanılan vakum filtrasyon, belt fitre ve santrifüj gibi klasik mekanik teknikleri yalnızca çamur içindeki serbest suyu uzaklaştırabilirler [Spinosa et al., 2001], [Tchobanoglous et al., 2003], [Gray, 2005]. Elektroosmotik prensibine dayalı elektro-susuzlaştırma ise serbest, flok suyun uzaklaştırılmasında oldukça etkili olmaktadır [Pham et al., 2012], [Jiaxiang et al., 2012]. Tamamen kuru çamura ancak termal işlemle ulaşılabilir. Klasik susuzlaştırma sistemlerinin en önemli dezavantajı, susuzlaştırma veriminin çamurun por çapıyla (hidrolik geçirgenliği) ile orantılıdır. Özellikle filtre yüzeyine yakın yakın yerlerde porozite zamanla azalır ve susuzlaştırma verimi düşer. Bu yüzden düşük hidrolik geçirimliliğe sahip çamurlar için sorun teşkil etmektedir.

Elektro-susuzlaştırma çamurun su verme özelliğini geliştirmek için son yıllarda kullanılmaya başlanmış bir tekniktir [Pham-Anh et al., 2012], [Yoshida, 1993]. Düşük voltaj doğru akımın elektrotlar vasıtasıyla çamura uygulanması ile meydana gelir. Tüm yüklü iyonlar elektriksel olarak hareket ederler. Böylelikle çamur içindeki su uzaklaşır ve daha katı bir çamur keki meydana gelir. Elektriksel alan uygulanması çeşitli elektrokimyasal olaylar meydana gelir. Elektro-susuzlaştırma aşağıdaki temel mekanizmalar bu bölümde anlatılacaktır.

## 3.1. Elektrokinetik Olaylar

Elektro-susuzlaştırma, bir elektro-ozmotik olaya sebep olmak için, düşük doğru akım (DC) elektrik alanın çamur parçası boyunca uygulandığı bir prosestir. Elektro-osmotik akış, çamurdan ekstra su giderimini arttırarak nihai çamur kekinin katı

madde içeriğinde bir artışa sebep olur. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi elektrik alan uygulandığı zaman sadece elektro-osmoz değil, aynı zamanda elektrotlarda elektroforez, elektro-göç ve elektro-kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir [Tuan, 2011]. Bu elektrokinetik prosesler direkt veya indirekt olarak çamurun elektro-susuzlaştırmasını etkiler [Tuan, 2011].




Şekil 3.1: Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırmanın şematik gösterimi.

Elektro-susuzlaştırma Şekil 3.2'de verilen aşağıdaki temel mekanizmalar ile gerçekleşir [Wijh,1999].

- İyonik türlerin elektro-göçü:

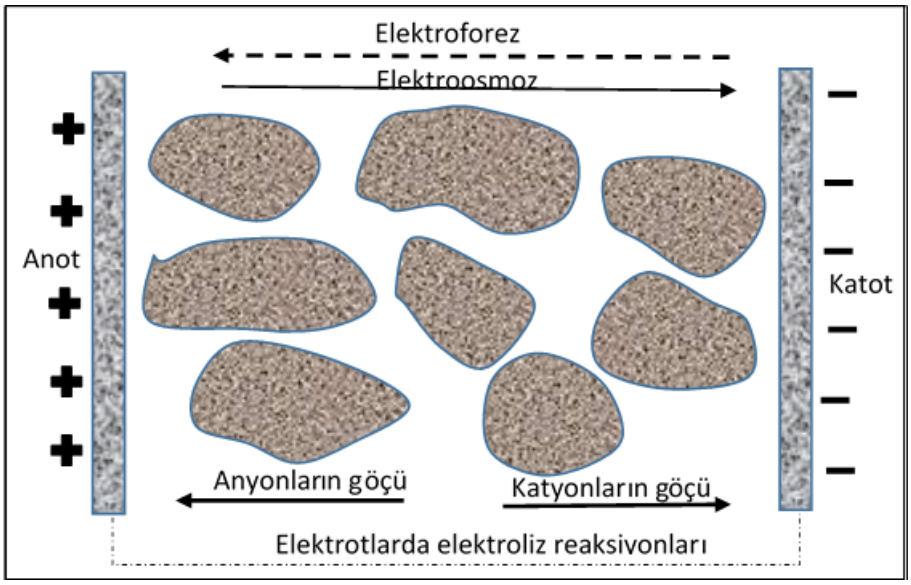
Elektriksel alanda katyonlar katoda doğru, anyonlar da anota doğru hareket ederler. Taşınma hızı her iyonun özgül iyonik hareketlilik değeri uyarınca belirlenir.

- Elektroforez:

Elektriksel alanda yüklü kolloidlerin taşınımı olarak tanımlanabilir. Özellikle kirleticilerin kolloidlere bağlı olduğu sistemlerde önemli bir mekanizmadır.

- Elektroosmoz:

Elektriksel alanda yüzey yüküyle ilişkili iyonik sıvı akışıdır. Arıtma çamurları suya nazaran genelde negatif elektrik yüklü olduklarından, elektrik alanı uygulandığından katyonlar katota doğru taşınırken, boşluk sıvısını da sürükleyerek, elektroosmoz olayını meydana getirir. Burada hem hidrolik akıştan kaynaklanan akış hem de elektriksel kuvvetten oluşan akış meydana gelmektedir. Elektroosmotik akış, katota doğru inorganik katyonların taşınımını hızlandırır.




Şekil 3.2: Elektro-susuzlaştırma boyunca meydana gelen elektrokinetik olaylar.

### 3.1.1. Elektro-osmoz

Elektro-susuzlaştırma boyunca, elektro-osmozun çamurdan su çıkarmada en önemli rolü oynadığı düşünülmektedir. Çamurun zeta potansiyeli genellikle eksi değerdedi, bu nedenle elektor-osmoz akışın yönü anottan katoda doğrudur [Pham-Anh et al., 2012]. Elektro-osmoztik akış, Saveyn ve arkadaşlarının (2006) yakın zamandaki çalışmalarında açıkça gösterilmiştir. Saveyn ve arkadaşları (2006) çamur kekinin su içeriğinin online izlenmesi için NMR ölçüm tekniği kullanmışlardır [Saveyn

et al., 2006]. Güç uygulamasında kısa süreli bir kesinti, elekto-osmotik akışı arttırmış ve sonuçta suyun uzaklaştırmasında %20-40 oranında bir artış sağlanmıştır [Gopalakrishnan et al., 1996]. Bununla birlikte, uzun süreli kesinti, çamur segmentinde suyun taşınması üzerinde negatif bir etkiye sahiptir [Rabie et al., 1994].

### 3.1.2. Elektroforez

Elektroforez, elektrik alan altında durgun sıvıda yüklü parçacıkların hareketidir. Elektroforez ve elektro-osmoz ilk olarak Prof. Ferdinand Friedrich Reuss tarafından 1809 yılında tarafından gözlemlenmiştir. Hayli dağıtılmış bir bölgede askıda malzeme içeren çözeltilerde bulunan askıdaki parçacıklar, elektrik alanın etkisi altında elektrotlardan birinin yönünde yer değiştirmeye başlamışlardır [Tuan, 2011]. Prof. Reuss, çok dağınık durumda askıda metaryel içeren solüsyonlarda, bu partiküllerin elektrik alan etkisi altında elektrotlardan birinin yönünde yerdeğiştirmeye başladığını bulmuştur. Gelişmiş su giderimi üzerine elektroforezin etkisi Barton ve arkadaşları tarafından tanımlanmıştır [Barton et al., 1999]. Elektrosusuzlaştırmanın başlangıç aşaması süresince, çamur partikülleri akışkan süspansiyon içinde hala serbest halde bulunmaktadırlar. Parçacıkların negatif yükünden dolayı, anota doğru göçetme ve yerleşme eğilimi gösterirler, böylece alt filtre ortamında kek oluşumunu geciktirirler ve dolayısıyla su akışının artmasına neden olurlar. Çamur segmentinde KM içeriği arttıkça, çamur partikülleri, birbirlerine kenetlenmiş pozisyonda olacağından dolayı hareket ettirilemez ve elektro-osmoz, suyun anottan katota doğru taşınmasında önemli rol oynar. Bununla birlikte, elektro-susuzlaştırma boyunca, elektroforezin fonksiyonu hala tam olarak anlaşılamamıştır ve genellikle matematik modellerde ihmal edilir [Pham-Anh et al., 2012].

### 3.1.3. Elektrogöç

Elektrogöç, kendi iyonik hareketliklerine bağlı olarak her bir iyon türünün hareket ettiği çözeltideki iyonların taşınmasıdır. Uygulanan elektrik alan altında anyonlar genellikle negatif yüklü katotdan pozitif yüklü anoda hareket ederler, katyonlar da pozitif yüklü anotton negatif yüklü katota hareket ederler [Tuan, 2011]. Elektrogöç, elektrokinetik iyileştirme için özellikle metal kirleticilerin uzaklaştırılması için çok önemlidir. Elektro-susuzlaştırma boyunca, elektrogöç meydana gelebilir ve elementlerin göçü son çalışmalarda rapor edilmiştir [Tuan et al., 2010], [Tuan et al., 2008].

## 3.2. Elektrolatlarda Elektroliz Reaksiyonları

Elektrik alanı uygulaması nedeniyle, elektrot yüzeyinde oksidasyon, redüksiyon, korozyon ve çökme reaksiyonları meydana gelir. Bu elektrot reaksiyonları güçlü bir şekilde elektrolitte bulunan iyonlara ve elektrolit materyaline bağlıdır [Pham-Anh et al., 2012]. Elektro-susuzlaştırma prosesinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar kullanılan elektrot malzemesine bağlı olmakla beraber genellikler oksidasyon ve indirgeme reaksiyonları şeklinde olur. Suyun anotta oksitlenmesi sonucu $H^+$ iyonları meydana gelir. $H^+$ iyonlar boşluk sıvısının ortaya çıkmasına yardımcı olurlar.

Elektrot reaksiyonları aşağıdaki gibidir:

Anotta:

$$2H_2O - 4e^- \rightarrow O_2 \uparrow + 4H^+ \quad Eo = 1.229\ V \tag{3.1}$$

$$M - ne^- \rightarrow M^{n+} \tag{3.2}$$

Katotta:

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 \uparrow + 2OH \quad Eo = 0.828\ V \tag{3.3}$$

$$Mn+ + ne^- \rightarrow M \tag{3.4}$$

Burada M bir metali işaret etmektedir.

Suyun anotta oksitlenmesi sonucu $H^+$ iyonları meydana gelir. $H^+$ iyonlar boşluk sıvısının ortaya çıkmasına yardımcı olurlar. Anotta suyun oksidasyonu ile üretilen protonlar, elektrogöç ve elektro-osmoz vasitasıyla katota doğru taşınırlar. Katotta da suyun indirgenmesi ile oluşan $OH^-$ iyonları, ortamı bazik hale getirir, pH artar ve anota doğru hareket ederler [Yoshida et al., 1999]. Bu katottan anota doğru çamur keki profilinde pH da azalmaya neden olur [Yoshida et al., 1999]. Düşük pH, çamurun karakterini değiştirebilir ve anotta düşük pH, çamur susuzlaştırılabilme üzerinde pozitif bir etkiye sahip olabilir [Tuan et al., 2008]. Bununla birlikte düşük pH ayrıca zeta potansiyelini arttırır ve yeniden elektroosmotik akışa sebep olarak su anottan katota taşınır [Tuan et al., 2008]. [Tuan et al., 2010]. Heriki elektrodun yüzeyindeki gaz çıkışı (Hidrohen, Oksijen), elektrot ve çamur segmenti içinde temasın azalmasına neden olur. Bu elektriksel olarak dirençli bir tabaka oluşturabilir. Bir basınçlı elektro-susuzlaştırma cihazında, oluşan gazlar, ekstra kuvvete sebep olabilir ve bu doymamış bir nihai çamur kekine sebep olabilir [Larue et al., 2004].

Anot materyalinin oksidasyonu, elektro-susuzlaştırma da ciddi bir problem olan korozyona sebep olabilir. Örneğin, tam ölçekli çalışmalarda, çamur susuzlaştırma için elektro kinetik faaliyetlerle kullanılan bir filtre presin paslanmaz çelik anotunun korozyona uğradığı rapor edilmiştir [Raats et al., 2002]. Altın ve platin gibi soy metaller korozif malzemeler değildir ve bir çok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır [Yoshida et al., 1999], [Yoshida, 1993]. Bununla birlikte soy metaller pahalıdır, bu nedenle sadece laboratuvar ölçekli deneylerde kullanılır. Grafit, ucuz bir materyaldir ve çamurun elektro-susuzlaştırmasında anot olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [Yang et al., 2005], [Yuan, 2003]. Katot elektrot materyali için korozyon büyük bir problem değildir. Normal paslanmaz çelik hasır veya diskler katot olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [Pham-Anh et al, 2012].

Kimyasal etkilere ek olarak, yüksek elektrik akımı büyük miktarda ısı ürettiği için çamur segmentinin sıcaklığını arttırır. Özellikle elektro-susuzlaştırma prosesinin sonunda, elektrik dirençteki artış ohmic ısınma ile sonuçlanır. Yüksek çamur sıcaklığı, çamur kekinden ekstra su uzaklaştırılmasını kolaylaştıran viskozitede azalmayla ilgilidir [Barton et al., 1999].

## 3.3. Elektro-Susuzlaştırma Prosesini Etkileyen Faktörler

- Çamurun elektrik iletkenliği:

Elektriksel iletkenliği arttığında, proses etkinliği azalır çünkü akımlar porlu ortamı atlayarak geçer. Şişik malzemenin elektrik dayanıklılığı elektrik enerjisini termal enerjiye çevirir, bu da süspansyion veya filtre kekinin sıcaklığının yükselmesine yol açar (Weber and Stahl, 2002).

- Gözenekli akışkan elektrik iletkenliği:

Akışkan elektrik iletkenliği artıkça etkinlik de artar.

- Nem İçeriği:

Verim nem içeriğine bağlıdır. Anota sürekli su sağlanmazsa ES prosesi bir yerde duracaktır.

- pH:

EK prosesi sırasında, pH anotta elektrolizde çıkan H+ iyonu sebebiyle düşük, katotta ise OH- iyonu sebebiyle yüksektir. Verimlilik önemli ölçüde pH'a bağlıdır. Düşük pH, zeta potansiyelinin negatiften daha az negatife veya pozitife çıkarır ve böylece elektroosmotiz akış dönebilir. Susuzlaştırma sebebiyle çamur pH'sında oluşan bir düşüş ke için de düşüşe sebep olacaktır.

- Zeta Potansiyeli:

Zeta potansiyeli iyon konsantrasyonu, pH ve çamur iletkenliğinden etkilenmektedir. Elektroozmotik akış hızı, daha yüksek bir zeta potansiyeli (veya daha negatif) ile birlikte artar. Zeta potansiyeli ke sabitiyle oransaldır ve elektroozmos verimliliğinin değerlendirilmesinde kullanılmaktadır.

- İyonik Güç:

İyonik güçteki fazla artış spesifik iletkenliğin artışına sebep olacaktır. Eğer porlu suyun iyonik gücü çok yüksekse, zeta potansiyelinin azalmasına yol açacaktır

böylece elektroozmitik akış hızı düşecektir. Doğal olarak, düşük ve orta seviye süpernatant veya elektrolik iyonik güç yüksek enerji verimliliği için istenmektedir.

- Elektrik Alan Yoğunluğu:

  Artarsa elektroozmotik akış hızı da artar.

- Akım Yoğunluğu:

  Yüksek akım daha fazla asit oluşturacak ve iyonların taşınım hızını artıracaktır fakat kullanılan akım bakımından pahalı olacaktır. Akım yoğunluğunu tüm arıtma alanı boyunca akıllıca kullanmak başarılı susuzlaştırma prosesi için elzemdir.

- Gaz Üretimi:

  Gaz üretimi, çamurun su içeriğini azaltır fakat enerji kullanımı açısından etkisizidir (ilave enerji su hareketine göre gaz oluştururken genişler). İstenmeyen hidrojen gazı oluşumu katotta ısıtma ve elektrot korozyonu ile birlikte yüksek tuzlulukta oluşan elektrokimyasal reaksiyonlar sebebiyle meydana gelebilir.

- Tuzluluk:

  Orta seviye tuz konsantrasyonu düşük voltajda daha iyi susuzlaştırma verimine imkan verir, böylece enerji tüketimini azaltır.

- Isı Üretimi:

Isı üretimi etkin bir şekilde susuzlaştırma prosesinin katkı sağlayan bir enerji kullanımı olmadığı için istenmeyen bir etkidir. İç ısı etkisi çamurun elektrik özelliklerini değiştirecektir [Glendinning et al., 2010].

## 3.4. Elektro-Susuzlaştırma Prosesinin Gelişimi

Elektro-susuzlaştırmanın arıtma çamuruna uygulanmasına yönelik çalışmalar 1990 yılların başında başlamıştır. Çamur ve diğer materyaller arasındaki en büyük fark, arıtma çamurunun esasen organik madde olan mikroorganizmalardan oluşması

ve gözenekli suda yüksek konsantrasyonda organik ve inorganik materyal içermesidir. Çamurun elektro-susuzlaştırması ilgili birçok çalışma, çeşitli parametrelerin etkisini, proses tasarım ve işletiminin iyileştirilmesini, ölçeklendirilmesini ve ticarileşmesini incelemiştir [Pham-Anh et al., 2012].

## 3.5. Arıtma Çamurunun Elektro-Susuzlaştırması

Diğer metaryaller ile karşılaştırıldığında arıtma çamurlarının susuzlaştırılması çok zordur. 20 yıldan fazladır, çamurun elektro-susuzlaştırılması birçok laboratuvarda pilot ve tam ölçekli çalışmalarla incelenmektedir. Birçok çalışmada, basınçlı ve basınçsız elektro-susuzlaştırma, nihai çamur kekindeki su içeriğini büyük oranda azaltmıştır [Tuan, 2011].

Bazı basınçsız elektro-susuzlaştırma testlerinde, elektrik alan direkt olarak orijinal çamura uygulanmıştır. Bununla birlikte, doğru akım (DC) kesilen elektro-susuzlaştırma, birçok çalışmada incelenmiştir [Vijh, 1995], [Vijh, 1999]. Bazı deneylerde, çamur, su içeriğinin azaltıldığı bazı mekanik susuzlaştırma prosesleri ile ön-susuzlaştırılmıştır. Elektro-susuzlaştırmanın süresi birkaç dakikadan [Barton et al., 1999], [Raats et al., 2002], birkaç saate [Yang et al., 2005], [Gazbar et al., 1994] hatta birkaç güne kadar çeşitli zaman aralığındadır. Süre, basınç ve elektrik alan uygulamasına bağlıdır [Tuan, 2011].

Elektro-susuzlaştırma çamurun su verme özelliğini geliştirmek için son yıllarda kullanılmaya başlanmış bir tekniktir. Literatürde yapılan çalışmaların bazı proses değişkenleri üzerinden incelendiği görülmüş ve bulunan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Laboratuvar ölçekli elektro-susuzlaştırma çalışmaları çeşitli boyutlarda yatay veya dikey, basınçlı veya vakumlu uygulamaları ile gerçekleştirilmiştir. Basınçlı silindir hücre kullanımı en yaygınıdır [Yoshida, 1993]. Genellikle de doğru akım kullanılmaktadır [Vijh, 1995], [Jumah et al., 2005]. Alternatif akım ile de yapılan bir çalışma da mevcuttur [Yoshida et al., 1999]. Bazı çalışmalarda sabit akım kullanımı rapor edilirken [Barton et al., 1999], [Miller et al., 1997], voltajın 5-50 V arasında değiştiği görülmüştür [Shin et al., 2006], [Gazbar et al., 1994], [Yuan et al., 2003]. Bu çalışmalar, voltaj artıkça çamurun kuruluğu artmasına rağmen enerji kullanımı

açısından olumsuzluk göstermiştir. Aynı zamanda elektro-susuzlaştırma prosesinin verimini artırılmasında polielektrolit kullanım ile ilgili çalışmaları da bulunmaktadır [Smollen et al., 1994]. Klasik susuzlaştırma proseslerinde yaygın olarak kullanılan polielektrolitler elektro proseslerinde verimi artırıcı olmuşlardır. Literatürde yapılan birkaç çalışma da enerji kullanımı ile ilgili yayınlar mevcuttur [Barton et al., 1999], [Snyman et al., 2000], [Lee et al., 2007]. Elektro-susuzlaştırmanın enerji verimliliği kwh/kgÇK (çözünmüş katı), olarak verilmektedir. Bazı araştırmacılar kwh/m3uzaklaştrılan su olarak vermiştir. Özetle, yapılan çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla laboratuvar ölçekli birkaç tane de pilot ölçekli çalışmaya rastlanılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle voltaj değişkeni kullanılmış ve zaman değişken olarak kullanılmıştır. Yapılan tüm bu çalışmalarda çamur su verme verimini %50 oranlarına kadar çıkarılmıştır. Bu oran mekanik susuzlaştırma proseslerinde olan % 15-25 civarında olduğu bilinmektedir.

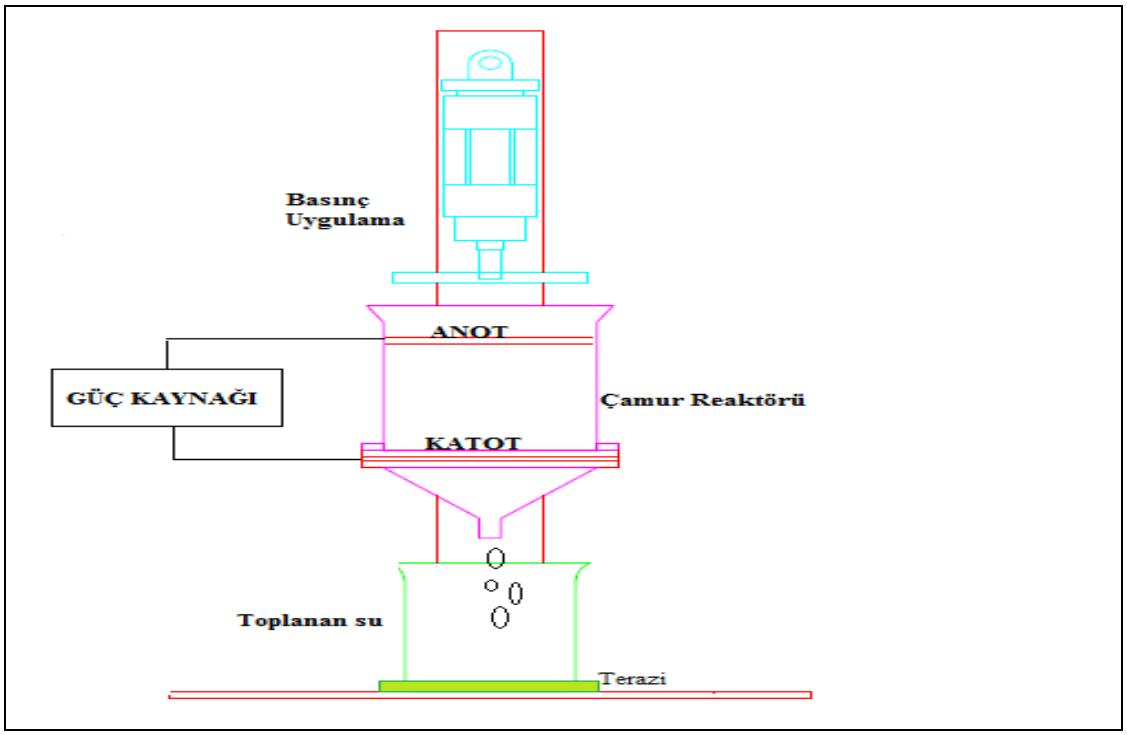
Görüldüğü gibi son yıllarda elektro-susuzlaştırmanın tek bir proses olarak kullanıldığı ile yüzey aktif maddenin şartlandırıcı olarak kullanıldığı bazı akademik çalışmalar bulunmaktadır [Chen et al., 2001], [Chen et al., 2004]. Bu amaç etrafında yapılan bu tez çalışmasında, literatürdeki yerini alıp, bir artım teknolojisi olarak piyasada yer bulması hedeflenmemiştir.

# 4. MATERYAL ve METOTLAR

Bu tezde yapılacak deneysel çalışmaları beş adımda açıklanabilir. İlk olarak reaktör dizaynı, ikinci adım olarak kullanılacak çamurun toplanması ve analizleri son aşama olarak ise elektro-susuzlaştırma deneyleri yapılması planlanmıştır. Deneyler elektriksel alan altında basınçlı ve basınç olarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle elektriksel alan olmadan sadece basıncın çamur susuzlaştırmaya olan etkisi belirlenecektir. Sonrasında deneysel düzenek içine yerleştirilen yaklaşık 10mm kalınlığındaki çamura farklı üç farklı voltaj değerinde ( 20, 30, 40V) çalışmalar ile katı madde ilişkileri her iki çamur için belirlenecektir. Sonuçlar farklı basınç değerlerinde elde edilen su miktarları zamana karşı değerlendirilecektir.

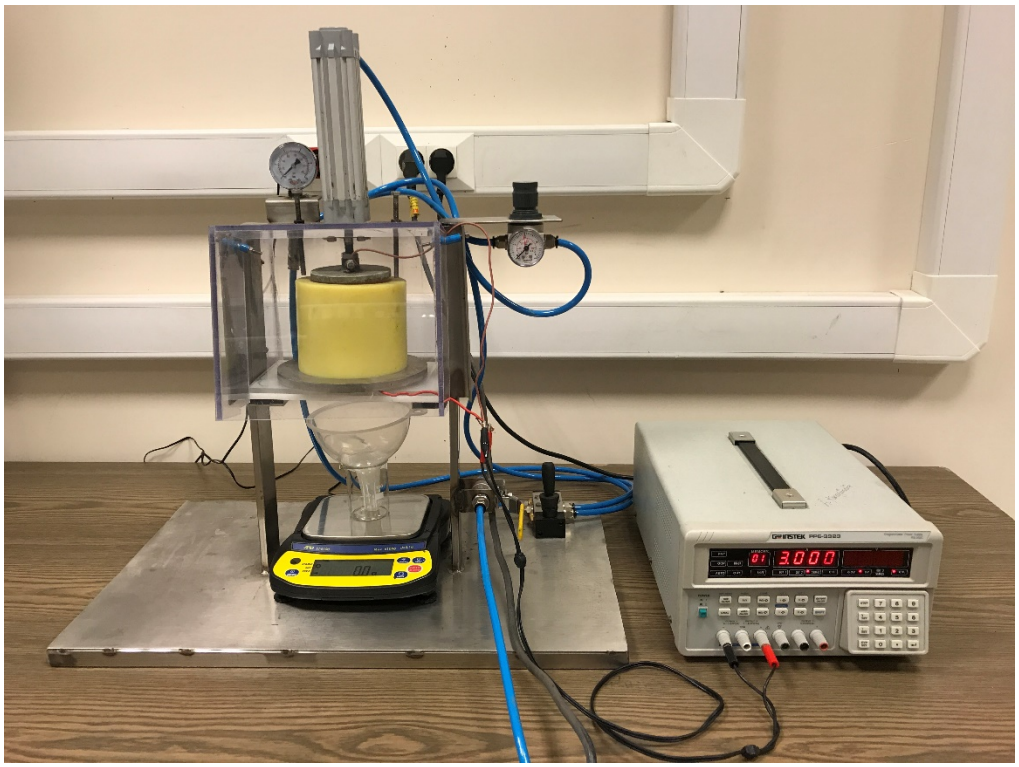
## 4.1. Deneysel Yöntem

Deneyler, 110 mm yüksekliğinde, 110mm iç çapında kestamit malzemeden yapılmış silindirik bir kaptan, üst ve alt tarafta bulunan disk şeklinde paslanmaz çelikten imal edilmiş anot ve katot elektrotlardan oluşan hem mekanik basınç hem de elektrik alanı üretebilen bir laboratuvar ölçekli silindirik bir reaktörde gerçekleştirilmiştir. Silindirin üstüne piston tipi basınç uygulayacak bir düzenek yerleştirilmiş ve istenen basınç seviyelerinde çamur silindirik reaktör içinde sıkıştırılabilecektir. Silindirik reaktör tabanına delikli paslanmaz çelikten oluşan bir katot yerleştirilmiş olup anot pistonun hemen altına çamurun üst tarafına yerleştirilmiştir. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi Şekil 4.1 'de sunulmaktadır.




Şekil 4.1: Laboratuvar ölçekli basınca dayalı elektro-susuzlaştırma reaktörü şematik gösterimi.

Elektrotlar, Şekil 4.3'de gösterilen doğru akım (DC) güç kaynağının (GW Instek PPE3323, maksimum 50V/5A tezgah üstü), pozitif ve negatif kutbuna bağlanmaktadır. Anot olarak kullanılan üst elektrota mekanik basınç oluşturacak piston eklenmiştir. Piston, basınç değerlerini set etmek için bir vana ve manometre ile donanımlı olup hava kaynağı olarak kompresör kullanılmıştır. Katot görevindeki alt elektrot delikli olup polipropilen filtre bezi (Şekil 4.4) bu delikler üzerine yerleştirilmiştir. Laboratuvar ölçekli Elektro-Susuzlaştırma Reaktörü Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Deşarj edilen su, hassas terazi üzerine konulan dereceli bir beherde toplanmıştır. Filtre edilen sıvının ağırlığı, uygulanan potansiyel ve akım düzenli aralıklarla (her 2 dakikada bir) kayıt edilmiştir.



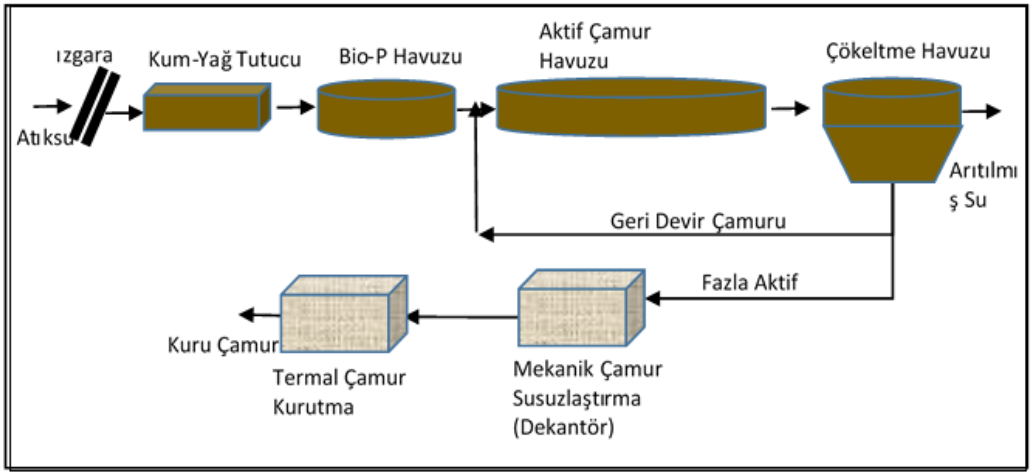
Şekil 4.2: Laboratuvar ölçekli elektro-susuzlaştırma reaktörü.

Şekil 4.3: Doğru akım güç kaynağı.

Şekil 4.4: PP filtre bezi.

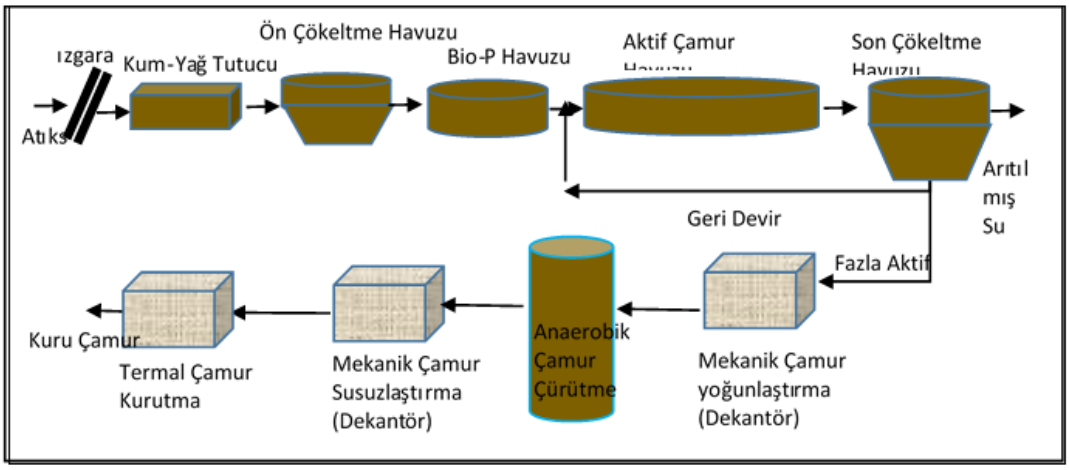
## 4.2. Çamur Numuneleri

Bu tez çalışmasında, farklı atıksu ve içme suyu arıtma tesislerinden altı farklı çamur numunesi alınmıştır. Çamur numuneleri A, B, C, D, E, F olarak adlandırılmıştır. A Çamuru: Evsel İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi dekantör ile susuzlaştırma sonrası alınan çamur numunesini; B Çamuru: Evsel İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik çürütme sonrası dekantör ile susuzlaştırma sonrası çamur numunesini;
C Çamuru: Sanayi Bölgesi Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi dekantör ile susuzlaştırma sonrası çamur numunesini; D Çamuru: Sanayi Bölgesi İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik çürütme sonrası dekantör ile susuzlaştırma sonrası çamur numunesini; E Çamuru: Sanayi Bölgesi İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi dekantör ile susuzlaştırma sonrası çamur numunesini; F Çamuru: İçme Suyu Arıtma Tesisi filtre press ile susuzlaştırma sonrası çamur numunesini tanımlamaktadır.
Birinci çamur numunesi (A Çamuru), evsel ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. A Atıksu Arıtma tesisi, kaba ızgara, ince ızgara, kum-yağ tutucu havuzlarını içeren fiziksel arıtma üniteleri; nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesleri ile C-N-P gideriminin gerçekleştirildiği Bio-P Havuzları ve Aktif Çamur Havuzları ve çökeltme havuzlarından oluşan biyolojik arıtma üniteleri ve mekanik çamur susuzlaştırma ve çamur kurutma ünitelerinden oluşmaktadır. Çamur, biyolojik aktif çamur olup, mekanik çamur susuzlaştırma olarak santrifüj kullanılmaktadır. A çamur numunesi, santrifüj çıkışından alınmıştır. İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi Akış Diyagramı tesisine ait akış diyagramı Şekil 4.5'de verilmiştir.



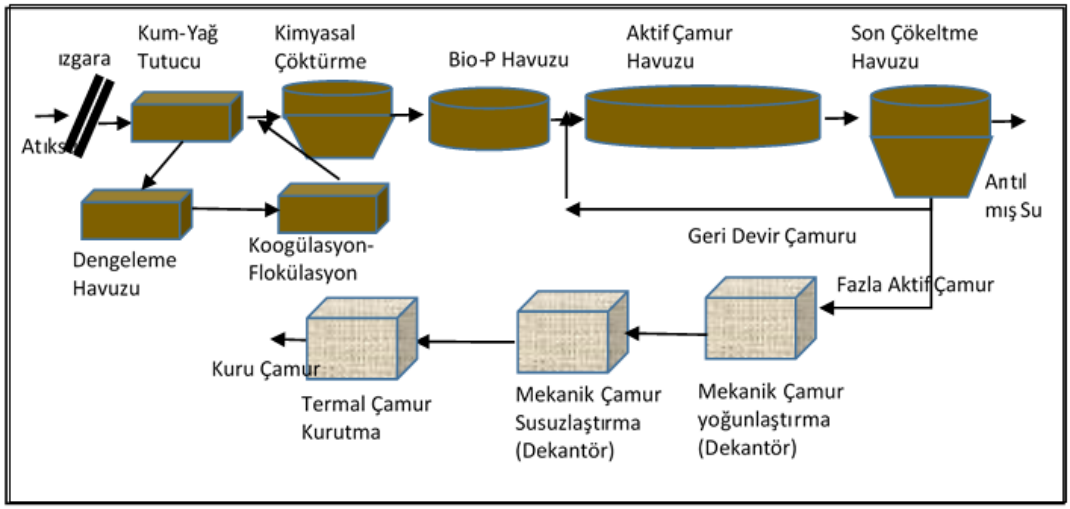

Şekil 4.5: A İleri biyolojik atıksu arıtma tesisi akış diyagramı.

İkinci çamur numunesi (B Çamuru), evsel ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. B Atıksu Arıtma tesisi, kaba ızgara, terfi pompaları, ince ızgara, kum-yağ tutucu havuzları ile ön çökeltme havuzlarını içeren fiziksel arıtma üniteleri; nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesleri ile C-N-P gideriminin gerçekleştirildiği Bio-P Havuzları ve Aktif Çamur Havuzları, son çökeltme havuzlarından oluşan biyolojik arıtma üniteleri; mekanik çamur yoğunlaştırma, anaerobik çamur stabilizasyonun gerçekleştiği çamur çürütme tankları, mekanik çamur susuzlaştırma ve çamur kurutma bölümlerinden oluşan çamur arıtma ünitelerinden oluşmaktadır. Çamur stabilizasyonu anerobik olarak yapılmakta olup, mekanik çamur susuzlaştırma olarak santrifüj kullanılmaktadır. B çamur numunesi, anaerobik çamur çürütücü tanklarından sonra mekanik olarak susuzlaştırma yapan santrifüj ünitesi çıkışından alınmıştır. Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Akış Diyagramı tesisine ait akış diyagramı Şekil 4.6'da verilmiştir.



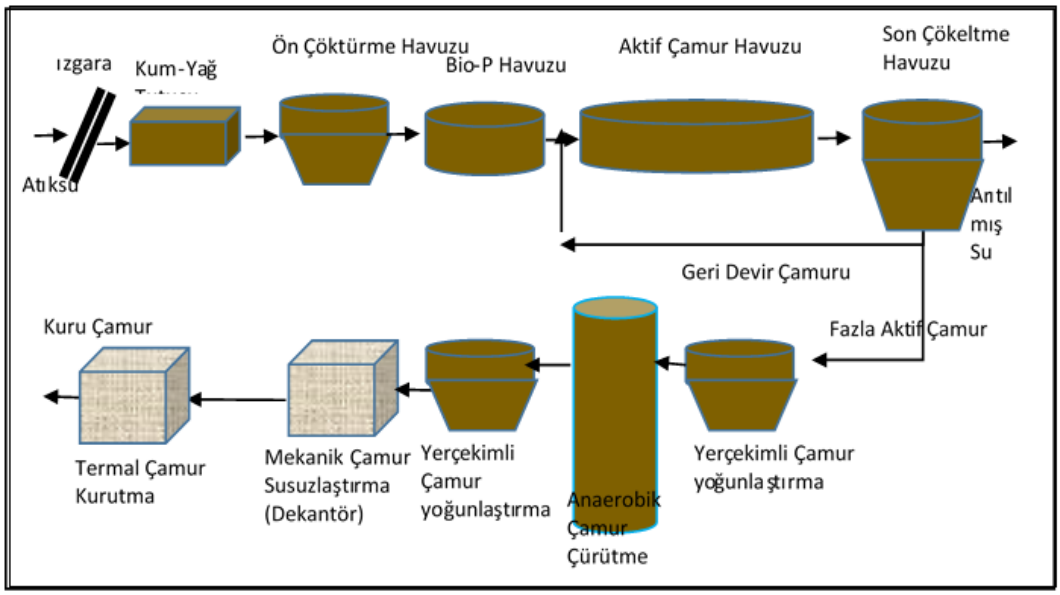

Şekil 4.6: B Evsel atıksu arıtma tesisi akış diyagramı.

Üçüncü çamur numunesi (C Çamuru), endüstriyel atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. C Atıksu Arıtma Tesisi (6400m³/gün), sektörel dağılım açısından daha çok kimya, gıda, ilaç ve otomotiv yan sanayi alanlarında faaliyet gösteren organize sanayi bölgesinin endüstriyel atıksularını arıtmaktadır. Tesis, kaba ve ince ızgara, havalandırmalı kum-yağ tutucu ve dengeleme havuzu, ön çökeltme havuzundan oluşan fiziksel arıtma üniteleri, koagülasyon-flokülasyon ve gerekli olması durumunda fosfor giderimi için kullanılacak Fe3Cl ünitesinden oluşan kimyasal arıtma üniteleri, ileri azot (N), fosfor (P) giderimli biyolojik aktif çamur üniteleri ile mekanik çamur yoğunlaştırma-susuzlaştırma ve termal çamur kurutma ünitelerinden oluşmaktadır. Kimyasal arıtma üniteleri ihtiyaç duyulmadığı için kullanılmamaktadır. C çamur numunesi, mekanik susuzlaştırıcı olarak kullanılan santrifüj çıkışından alınmıştır. C tesisine ait akış diyagramı Şekil 4.7 de verilmiştir.




Şekil 4.7: Endüstriyel atıksu arıtma tesisi akış diyagramı.

Dördüncü ve beşinci çamur numunesi (D-E Çamuru), anaerobik çamur çürütücülü endüstriyel atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. Atıksu Arıtma Tesisi (4000m³/gün), sektörel dağılım açısından daha çok deri, kimya, gıda, ilaç ve metal sanayi alanlarında faaliyet gösteren organize sanayi bölgesinin endüstriyel atıksularını arıtmaktadır. Tesis, dengeleme havuzu, kaba ve ince ızgara, havalandırmalı kum-yağ tutucu, ön çökeltme havuzundan oluşan fiziksel arıtma üniteleri, ileri azot (N), fosfor (P) giderimli biyolojik aktif çamur üniteleri ile anaerobik çamur çürütücü ünitesi, gravitili çamur yoğunlaştırma, mekanik çamur susuzlaştırma ve çamur kurutma ünitelerinden oluşmaktadır. Arıtma Tesisinde çamur susuzlaştırma iki aşamalı yapılmaktadır. İlk aşamada biyolojik arıtma sonrası graviteli çamur yoğunlaştıcıdan alınan çamur susuzlaştırılmaktadır. İkinci aşamada susuzlaştırılan bu çamur, anaerobik çamur çürütücülerde inhibisyona sebep olacak toksik maddelerden uzaklaştırılmak için komple yıkanmakta ve tekrar graviteli yoğunlaştırıcıdan ve mekanik çamur susuzlaştırma olarak kullanılan santrifüjden geçirilmektedir. D çamur numunesi, anaerobik çamur çürütücü sonrası mekanik susuzlaştırıcı olarak kullanılan santrifüj çıkışından, E çamur numunesi anaerobik çamur çürütücü öncesi mekanik çamur susuzlaştırıcı santrifüj çıkışından alınmıştır. D-E tesisine ait akış diyagramı Şekil 4.8 de verilmiştir.




Şekil 4.8: Anaerobik çamur çürütücülü endüstriyel atıksu arıtma tesisi akış diyagramı.

Altıncı çamur numunesi (F numunesi), içme suyu arıtma tesisinden alınmıştır. F içme suyu arıtma tesisi, kaskat havalandırma, flokülasyon-koagülasyon, durultucu, hızlı kum filtreleri, çamur yoğunlaştırıcı, mekanik çamur susuzlaştırıcı belt press ile ön ve son klorlama ünitelerinden oluşmaktadır. F çamur numunesi, belt press çıkışından alınmıştır.

Arıtma çamurları, biyolojik değişimlerden kaynaklanabilecek değişikliklerden kaçınmak için 4°C de saklanmış ve bir haftadan daha kısa sürede kullanılmıştır. Çamurlar kullanılmadan önce oda sıcaklığına (20°C) getirilmek için dışarda bekletilmiştir. Çamurların başlangıç ve nihai KM ve UKM konsantrasyonları, Standart Metoda (APHA ve WEF, 2012) göre ölçülmüştür. Başlangıç çamur numunelerinin pH (Thermo Scientific/Orion 3 star), iletkenlik ((Mettler Toledo/SevenGo Duo pro), zeta potansiyeli ve partikül boyutu değerleri ile filtre edilen suyun bulanıklık (Turbidimetre: Hach/2100P) değerleri ölçülmüştür. pH ve iletkenliğinin ölçülmesi için Standart Metoda göre çamur solüsyonu hazırlanmıştır. Ayrıca çamur numunelerinin zeta potansiyelleri ve partikül boyutları (Malvern ZSP zeta nanosizer) ölçülmüştür.

Farklı Arıtma Tesislerinden alınan arıtma çamur numunelerinin ana fiziko-kimyasal karakteristikleri Tablo 4.1 de gösterilmektedir.

Tablo 4.1: Basınca dayalı ES deneyleri için kullanılan çamur numunelerinin karakteristik özellikleri.

| Çamur Num. | Tesis Tipi | Biyolojik Proses +Stabilizasyon | Mekanik Susuzl. | Çamur KM % | UKM/KM % | pH | İletkenlik mS/cm | Zeta Potansiyeli mV | Partikül Boyutu µm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | İleri Biyolojik Evsel Atıksu Arıtma Tesisi | Aktif Çamur+Aerobik | Santrifüj | 25 | 56 | 6,97 | 1,22 | -1,34 | 104,383 |
| B | İleri Biyolojik Evsel Atıksu Arıtma Tesisi | Aktif Çamur+Anaerobik | Santrifüj | 26 | 49 | 8,24 | 0,833 | -4,06 | 110,835 |
| C | Sanayi Bölgesi Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi | Aktif Çamur+ Aerobik | Santrifüj | 20 | 77 | 6 | 1,067 | -0,73 | 107,809 |
| D | Sanayi Bölgesi Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi | Aktif Çamur+ Anaerobik | Santrifüj | 29 | 64 | 7,38 | 2,04 | -1,28 | 90,152 |
| E | Sanayi Bölgesi Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi | Aktif Çamur+Aerobik | Santrifüj | 20 | 81 | 8,39 | 1,005 | -0,196 | 100,163 |

## 4.3. Basınçlı Elektro-Susuzlaştırma Deneyi

Basınca dayalı ES deneyi iki ardışık aşamadan oluşturulmuştur. Birinci aşamada, 5 dakika süre ile 2,5Bar basınç uygulayarak bir ön filtreleme uygulanmış, bunu takiben seçilen sabit çalışma voltajında (20V, 30V, 40V) 25 dakika boyunca, elektrot diskin üzerine 10mm kalınlığında koyulan çamura potansiyel uygulanmıştır.

Deney başlangıcında silindir hücre, 10mm çamur numunesi ile doldurulmuş, sonra üst taraftaki elektroda bağlı piston, çamur üzerine 2,5Bar basınç uygulayacak şekilde çamur üzerine kapatılmıştır. Çamur, 5 dakika süre ile 2,5Bar basınca tabi tutulmasına rağmen, öncesinde zaten mekanik susuzlaştırma uygulandığı için bu süre zarfında hiç filtre suyu çıkışı gözlenmemiştir. Sonra güç kaynağı çalıştırılmış ve belirlenmiş sabit voltaj altında potansiyel uygulanmıştır. Deneyler 20V, 30V ve 40V olmak üzere üç farklı voltajda yapılmıştır. Çamurdan filtre edilen suyun ağırlığı, akım ve voltaj değerleri iki dakikalık aralıklarla kayıt altına alınmıştır.

## 4.4. Analitik Metotlar

Tüm deneysel datalar (filtre suyu ağırlığı, akım, voltaj ) elektro-susuzlaştırma prosesi boyunca zamanla kayıt altına alınmıştır.

Akım Yoğunluğu aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$J = I / A \tag{4.1}$$

Burada;

- J: Akım Yoğunluğu (Amper/$m^2$);
- I: Elektrik Akımı (Amper);
- A: İletkenin Kesit Alanı ($m^2$) 'dır.

Elektrik güç (P) aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$P = \sum V.I.\Delta t \tag{4.2}$$

Burada;

- V: Uygulanan voltajı (V),
- I: Elektrik akımını (Amper),
- $\Delta t$: Kaydedilen iki ölçüm arasındaki zaman aralığıdır.

Katı Madde ve Uçucu Katı Madde Tayin metotları Ek A'da verilmiştir.

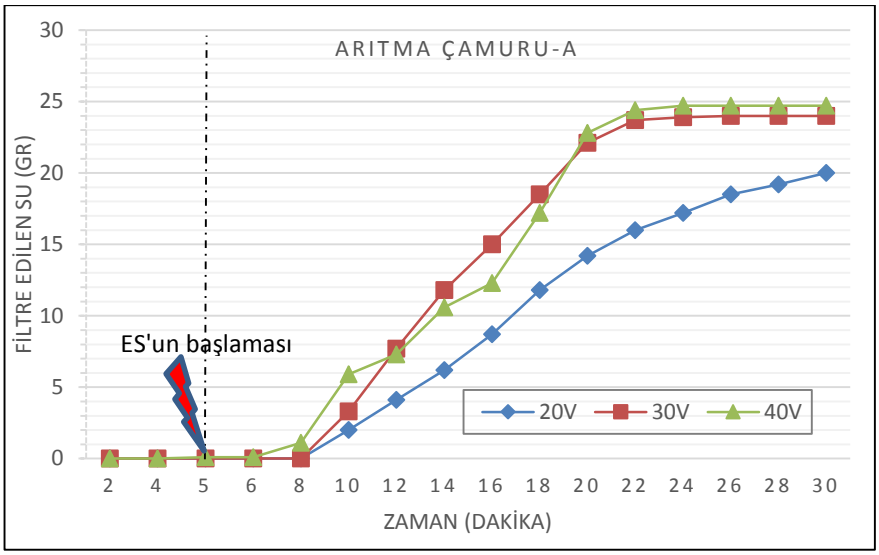
# 5. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu araştırmanın ana amacı farklı tip arıtma çamurlarının ES prosesini değerlendirmektir. Aerobik aktif çamur ve anaerobik çürütücü ile stabilize edilen, benzer KM içeriğindeki arıtma çamuru numuneleri, susuzlaştırılmış çamurun KM içeriği (KM) ve enerji tüketimi arasında en iyi uygunluğu değerlendirmek için, sabit basınç altında, sabit potansiyel uygulanarak test edilmişlerdir.

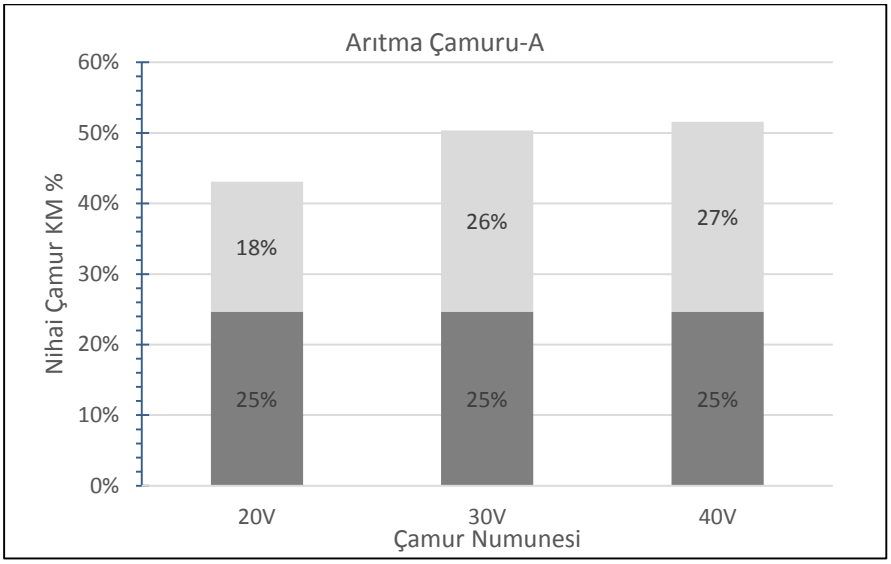
## 5.1. Farklı Potansiyel Değerlerinde Yapılan ES Çalışmaları

İlk beş dakikası elektrik potansiyel uygulanmaksızın mekanik susuzlaştırma yapılan (Aşama-1, sadece basınç uygulanması), beş dakika sonra hem basınç uygulanmasına devam edilirken sabit Voltaj (20V, 30V,40V) uygulanan (Aşama-2, basınç+elektrik akım uygulanması) çamurun, deney süresince filtre edilen suyunun zamanla değişimi ve uygulanan sabit voltajın nihai çamur KM konsantrasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Evsel Biyolojik AAT'den alınan ve polielektrolit ile şartlandırılarak mekanik susuzlaştırılan %25 KM içeren A çamur numunesi üzerinde, 20V, 30V, 40V sabit voltaj 25 dakika boyunca uygulanmıştır. Deneyin ilk 5 dakikasında voltaj uygulanmamıştır. Şekil 5.1'de gösterildiği gibi deneyin ilk beş dakikasında filtre edilen su olmayıp, sabit voltajın uygulanması ile birlikte çamur su vermeye başlamıştır. 20V da filtre edilen su miktarı, 30V ve 40V da filtre edilen su miktarından daha az olup, susuzlaştırma süresi daha uzundur. 30V ve 40V da susuzlaştırma süresi daha kısa olup, filtre edilen su miktarı daha fazladır. Aynı zamanda Şekil 5.2'de gösterilen, %25 başlangıç KM içeriğinde olan çamur numunesinin KM konsantrasyonunun, uygulanan voltajın arttırılması ile birlikte arttığı görülmektedir.



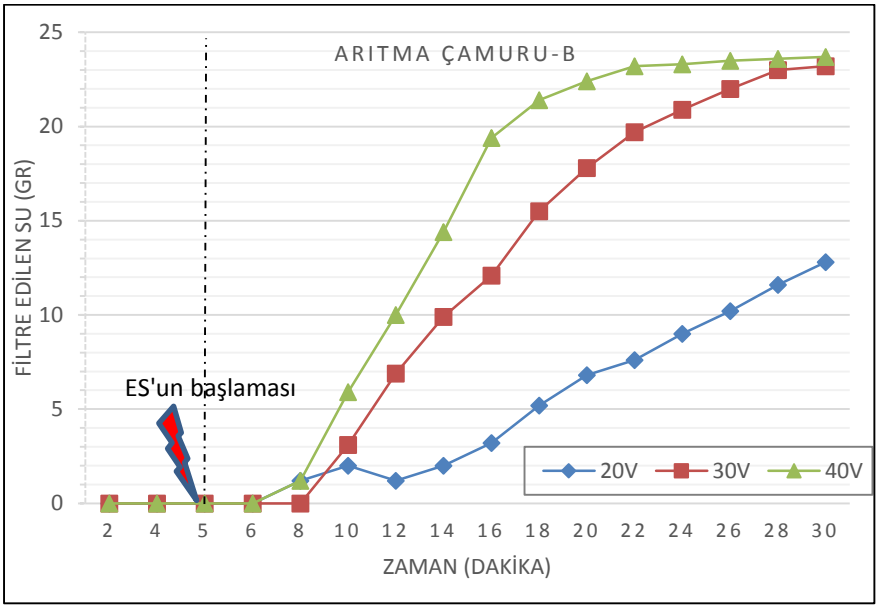

Şekil 5.1: Evsel Biyolojik AAT-A çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi.



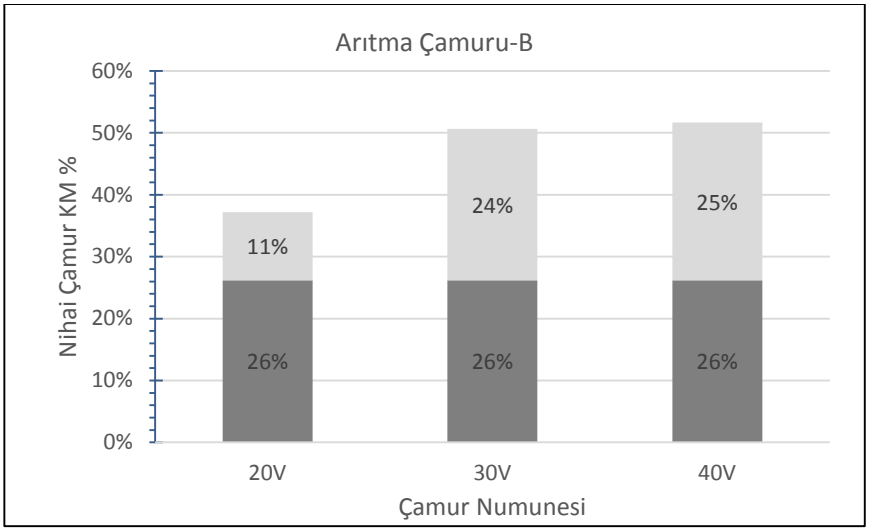

Şekil 5.2: Evsel Biyolojik AAT-A çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi.

İkinci çalışma Evsel Biyolojik AAT'den anaerobik çürütücü sonrasında alınan ve polielektrolit ile şartlandırılarak mekanik susuzlaştırılan %26 KM içeren B çamur numunesi üzerinde yapılarak, 20V, 30V, 40V sabit voltaj 25 dakika boyunca uygulanmıştır. Şekil 5.3'de gösterildiği gibi yine deneyin ilk 5 dakikasında voltaj uygulanmamış ve bu zaman zarfında filtre edilen su gözlenmemiştir. İlk beş dakika sonra, sabit voltajın uygulanması ile birlikte çamur su vermeye başlamıştır. Çamur numunesi üzerinde uygulanan voltajın artması ile birlikte filtre edilen su miktarının

(Şekil 5.3) ve çamur KM konsantrasyonunun (Şekil 5.4) arttığı ve daha kısa sürede susuzlaştırma gerçekleştiği gözlenmiştir. Düşük zeta potansiyeli çamurlarda su verme özelliğini arttırmaktadır [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011]. B çamur numunesinin zeta potansiyelinin (-4.06mV), diğer çamur numunelerinden düşük olması daha kolay suyunu verdiğini göstermektedir.

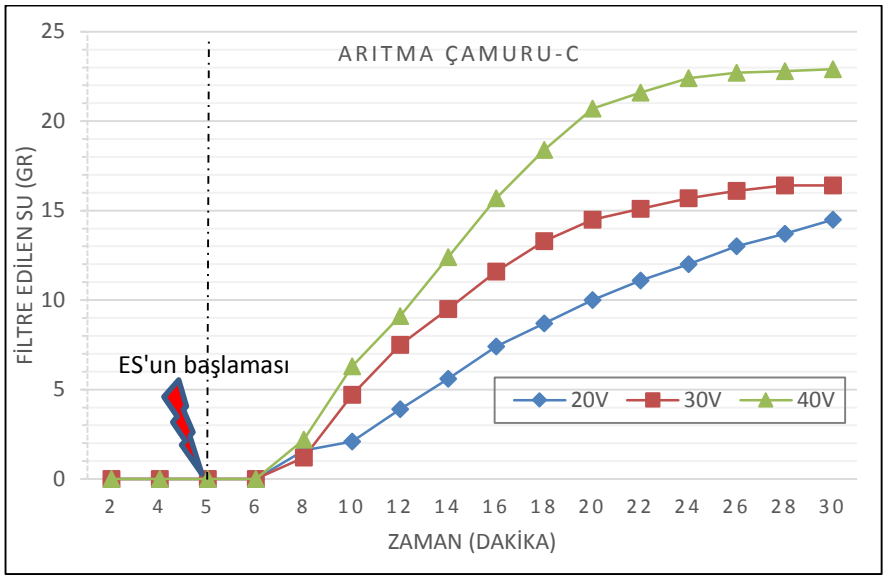



Şekil 5.3: Evsel Biyolojik AAT-anaerobik çürütülen B çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi.

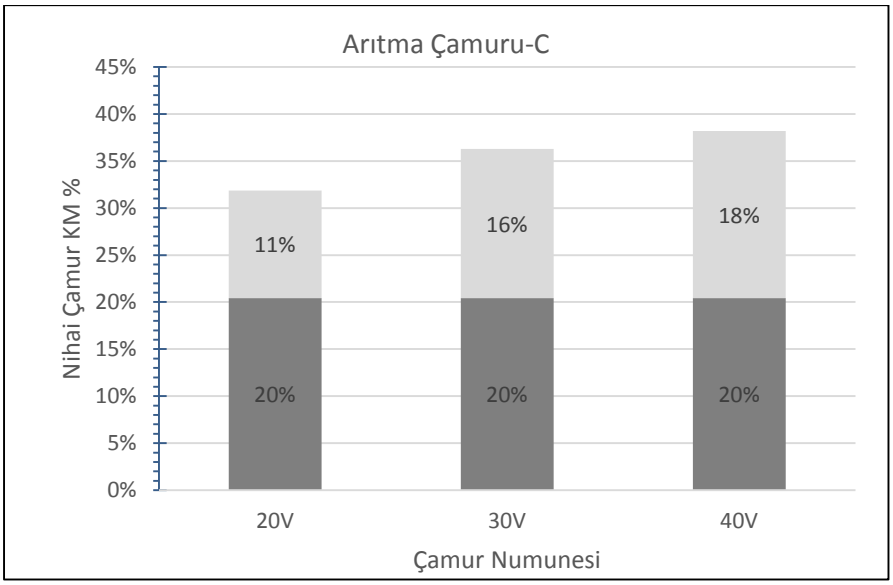



Şekil 5.4: Evsel Biyolojik AAT-anaerobik çürütülen B çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi.

Üçüncü çalışma, Sanayi Bölgesi Evsel Biyolojik AAT'den alınan ve polielektrolit ile şartlandırılarak mekanik susuzlaştırılan %20 KM içeren C çamur numunesi üzerinde yapılarak, 20V, 30V, 40V sabit voltaj 25 dakika boyunca uygulanmıştır. Şekil 5.5'de gösterildiği gibi yine deneyin ilk 5 dakikasında voltaj uygulanmamış ve bu zaman zarfında filtre edilen su aynı şekilde gözlenmemiştir. İlk beş dakika sonra, sabit voltajın uygulanması ile birlikte çamur susuzlaşmaya başlamıştır. Çamur numunesi üzerinde uygulanan voltajın artması ile birlikte filtre edilen su miktarı ve çamur KM konsantrasyonu artmıştır. Ancak susuzlaştırma süresi, uygulanan her bir voltaj değerinde diğer çamur numunelerine oranla daha uzun sürdüğü ve çamurun KM içeriği artışının diğer çamurlara oranla daha düşük olduğu Şekil 5.5'de ve Şekil 5.6'da da görülmektedir.



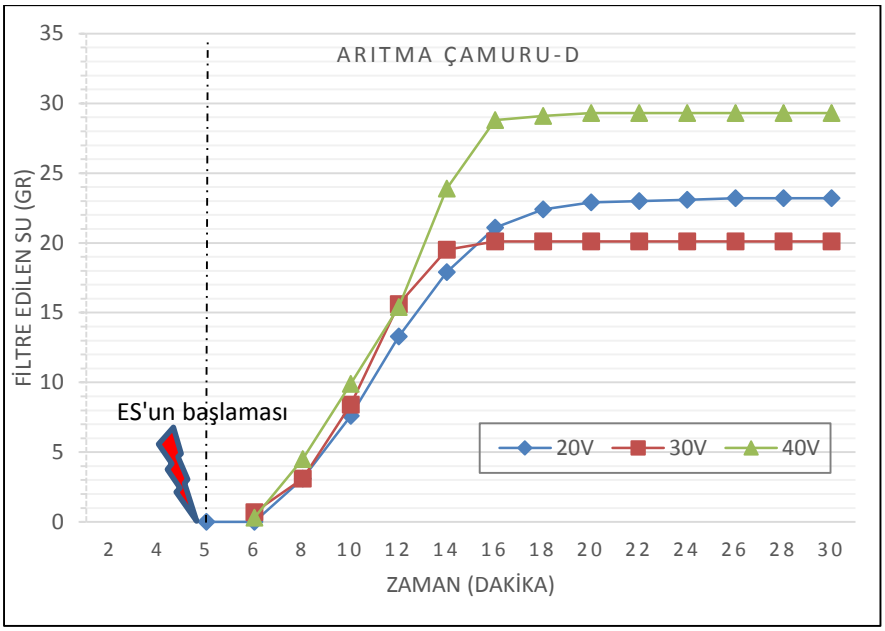

Şekil 5.5: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT-C çamur numumesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi.



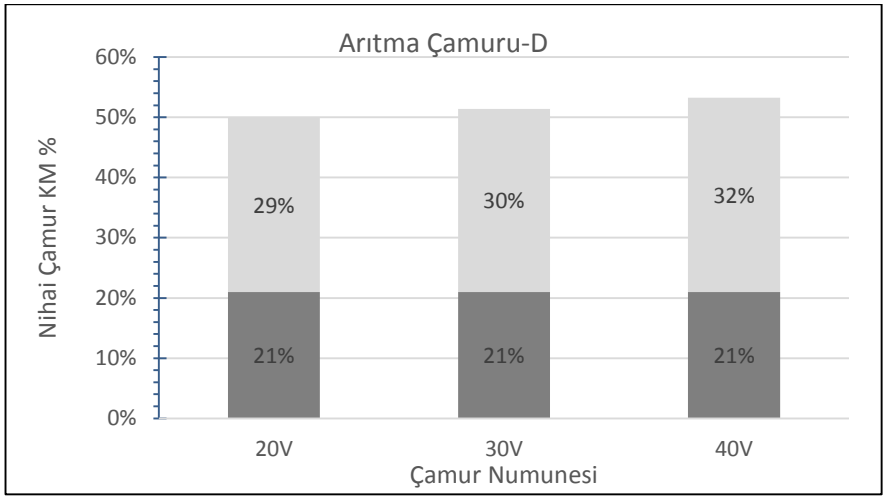

Şekil 5.6: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT-C çamur numunesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi.

Dördüncü çalışma, Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT'den anaerobik çürütücü sonrasında alınan ve polielektrolit ile şartlandırılarak mekanik susuzlaştırılan %21 KM içeren D çamur numunesi üzerinde yapılarak, 20V, 30V, 40V sabit voltaj 25 dakika boyunca uygulanmıştır. Şekil 5.7'de gösterildiği gibi diğer çamur numuneleri ile aynı şekilde, deneyin ilk 5 dakikasında voltaj uygulanmamış ve bu zaman zarfında filtre edilen su gözlenmemiştir. İlk beş dakika sonra, sabit voltajın uygulanması ile birlikte çamur su vermeye başlamıştır. Çamur numunesi üzerinde uygulanan voltajın artması ile birlikte filtre edilen su miktarı ve çamur KM konsantrasyonu artmıştır. Şekil 5.7'de ve Şekil 5.8'de görüleceği gibi susuzlaştırma süresi çok kısa sürmüş ve filtre edilen su uygulanan her bir voltajda, belirli bir süre sonra gözlenmemiştir.

B çamur numunesi ve D çamur numunesi, anaerobik olarak stabilize edikten sonra polimer ile şartlandırılmış ve santrifüjle mekanik olarak susuzklaştırılmıştır. Tablo 4.1'de gösterildiği üzere anaerobik olarak çürütülen B ve D çamur numunelerinin UKM/KM oranları (sırayla %49, %64) diğer çamurlardan (sırayla %56, %77, %81) daha düşüktür. Bu durum anaerobik çürütme sonrası çamurların organik kısmınn azaldığını ve inorganik yüzdesi fazla olan çamurların daha kolay susuzlaştırılabildiğini göstermektedir. Visigalli ve arkadaşlarının (2017) yaptığı çalışma bunu desteklemektedir.



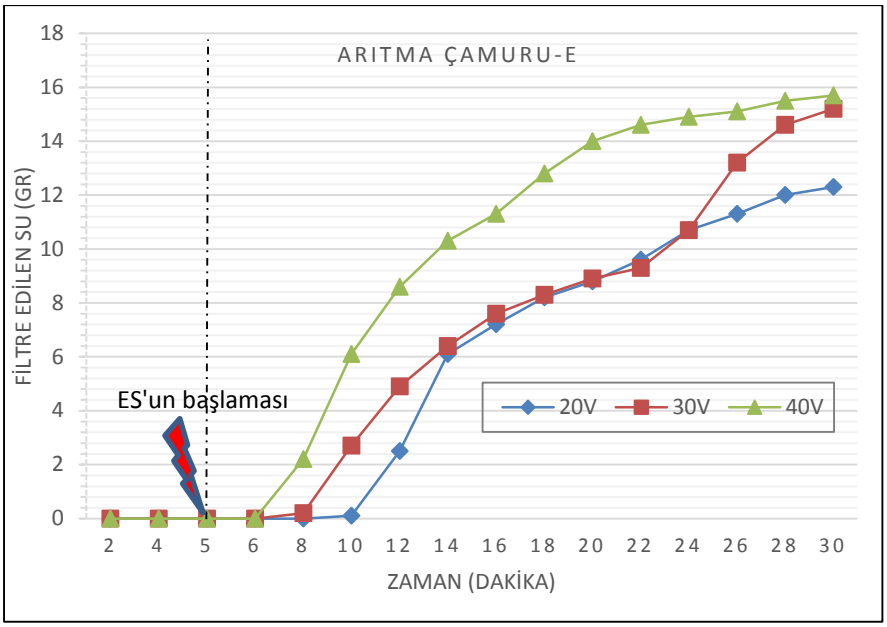

Şekil 5.7: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütülen D çamuru numumesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi.



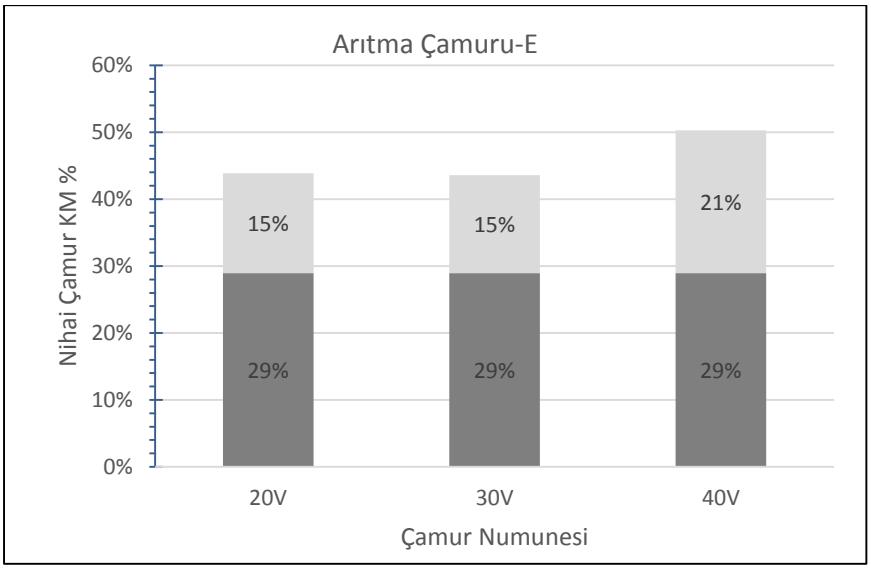

Şekil 5.8: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütülen D çamuru üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi.

Son olarak, Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT'den çamur çürütücü öncesi alınan ve polielektrolit ile şartlandırılarak mekanik susuzlaştırılan %29 KM içeren E çamur numunesi üzerinde, deneyin ilk 5 dakikasında voltaj uygulanmamış sonrasında, 20V, 30V, 40V sabit voltaj 25 dakika boyunca uygulanmıştır. Şekil 5.9'da gösterildiği gibi deneyin ilk beş dakikasında filtre edilen su olmayıp, sabit voltajın uygulanması ile birlikte çamur su vermeye başlamıştır. Uygulanan voltajın artması ile filtre edilen su

artmış ancak susuzlaştırma süresi daha uzun olmuştur. Şekil 5.10'da çamurun elektrik alan uygulaması ile birlikte çamur içeriğinin değişimi görülmektedir. E çamuru, organik kısmının (UKM/KM: %81) ve zeta potansiyelinin (-0.196mV) diğer çamur numunelerinden çok fazla olduğu görülmektedir. Organik madde içeriğinin yüksek olması susuzlaştırma süresinin artmasına ve zeta potansiyelinin büyük olması flokülasyonu engellediği için çamurun suyunu vermesini olumsuz etkilemektedir [Filibeli, 1996], [Andreoli et al., 2007], [Spinosa, 2011].




Şekil 5.9: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütme öncesi E çamuru numumesi üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin toplanan filtre suyu-zaman etkisi.




Şekil 5.10: Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT- anaerobik çürütme öncesi E çamuru üzerinde farklı voltaj (20V, 30V, 40V) uygulanarak yapılan ES deneyinin nihai çamur KM üzerine etkisinin gösterimi.

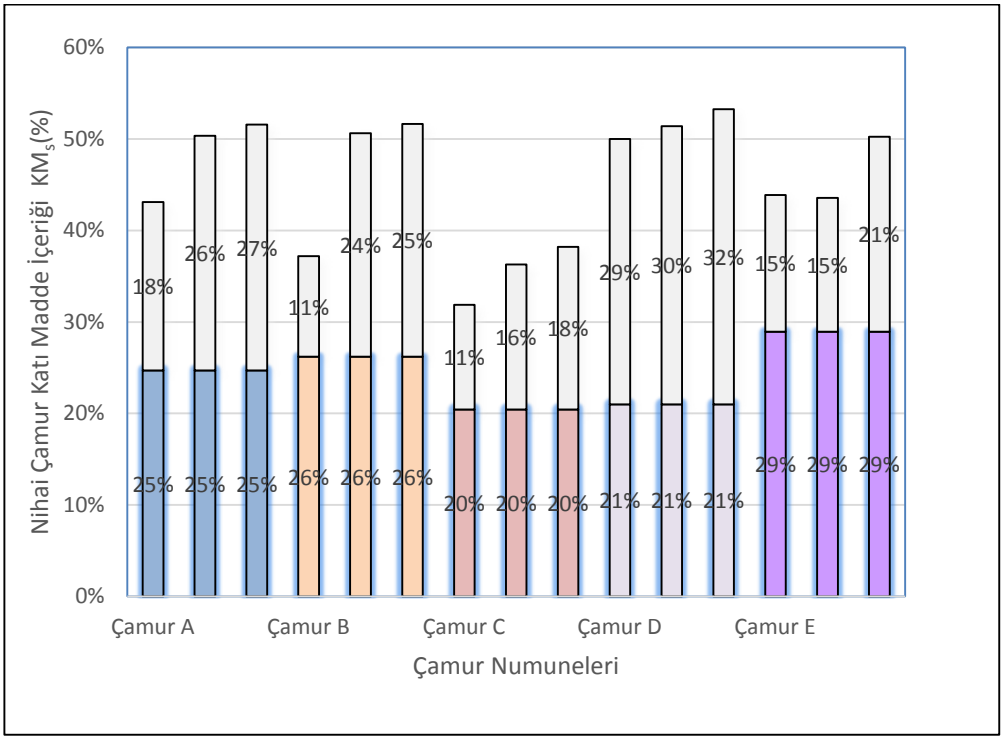
Tüm yapılan çalışmalarda görülmüştür ki, uygulanan potansiyel, nihai çamur KM konsantrasyonunu ve susuzlaştırma kinetiğini büyük oranda etkilemektedir. Uygulanan voltajın artışı, daha hızlı kinetiğe ve daha yüksek susuzlaştırma derecesine sebep olmaktadır. Benzer şekilde Gingerich et al (1999), Mahmoud et al (2011), Feng et al (2014), Olivier et al (2014) tarafından yapılan çalışmalarda, uygulanan potansiyelin Elektro-Susuzlaştırma (ES) kinetiğinin belirlenmesinde anahtar parametre olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, KMs içeriği %27 olan İçme Suyu Arıtma Tesisi F-çamur numunesi ile basınca dayalı ES deneyi yapılmıştır. Ancak çamur F ile yapılan deneylerde reaksiyon süresi çok uzun sürmüş ve filtre edilen suyun ve nihai çamur KMs içeriğinin çok düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, içme suyu arıtma tesisi çamurunun flokülayonu-koagülasyonu için kullanılan (Alum vs.) kimyasallardan, susuzlaştırılması için kullanılan yüksek dozajda polimer ve kireçden olabileceği düşünülmektedir (Lee and Liu, 2000), (Wolny et al, 2008).

## 5.2. Çamur Numunelerinin Elektro-Susuzlaştırılabilirliği

Arıtma Çamurlarının Nihai KM Konsantrasyonlarının verildiği Şekil 5.11'de görüleceği gibi, genellikle Nihai Çamur Katı Madde (KMs) içeriği ve giderilen çamur miktarı (ΔKM), , çamur numuneleri benzer başlangıç çamur (KMi) konsantrasyonunda olsalar bile, çamurlar farklı özelliklere ve karakteristiklere (zeta potansiyeli, pH, iletkenlik, filtreleme kabiliyeti, UKM/KM vs.) sahip oldukları için değişkenlik göstermektedirler.

Farklı Arıtma Tesislerinden alınan arıtma çamur numunelerinin ana fiziko-kimyasal karakteristikleri (Tablo 4.1) incelendiğinde her bir çamur numunesine göre değişkenlik arz eden karakteristik özelliklerin, çamurun susuzlaştırılabilme özelliği üzerinde farklı etkilerde olabileceği görülmektedir.

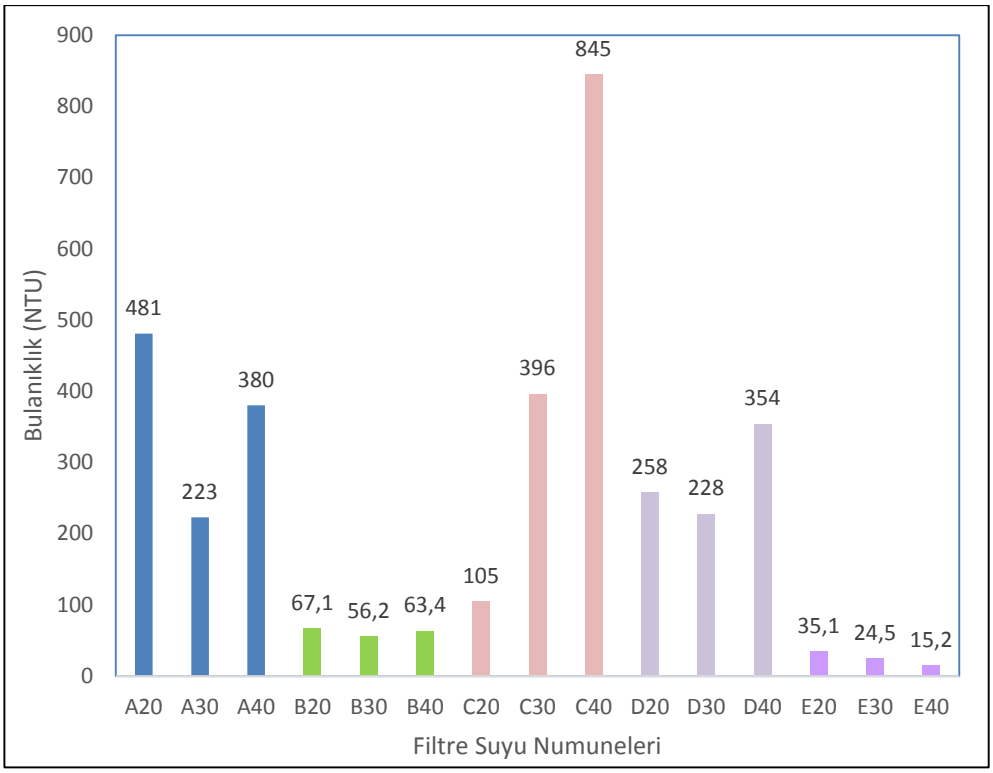



Şekil 5.11: Arıtma çamurlarının nihai KM içerikleri.

Çamur numuneleri, partikül boyutu olarak değerlendirildiğinde D çamurunun (sanayi bölgesi biyolojik arıtma tesisi anaerobik çürütücü sonrası) partikül boyutunun E çamurun'dan (sanayi bölgesi biyolojik arıtma tesisi anaerobik çürütücü öncesi) küçük olduğu görülmektedir. Partikül boyutunun küçük olması çamurlarda

susuzlaştırma özelliğini arttırmaktadır. Bu nedenle partikül boyutu büyük olan E çamuru, yüksek başlangıç $KM_i$ (%29) içeriğine sahip olmasına rağmen, düşük elektrik potansiyeli (20V) değerlerinde bile daha yüksek elektrik tüketimiyle ve daha uzun sürede daha az suyu çamurdan uzaklaştırabilmektedir.

Ayrıca anaerobik çamur çürütücü çıkışı olan çamur B ve çamur D'nin filtre edilen sularının bulanıklık değerleri, diğer çamurların filtre edilen suları ile karşılaştırıldığında (Şekil 5.12) diğerlerinden çok daha düşük olduğu gözlenmektedir.

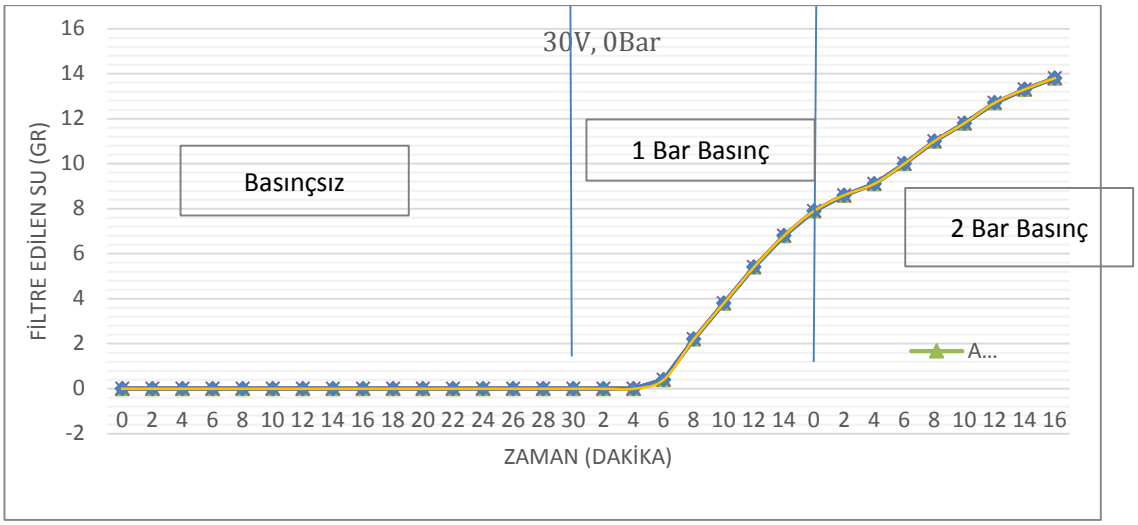



Şekil 5.12: Basınca dayalı ES testleri filtre edilen suyun bulanıklık değerleri.

## 5.3. Uygulanan Mekanik Basıncın Etkisi

Evsel Biyolojik AAT arıtma çamuru ile Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT anaerobik çürütücü sonrası alınan arıtma çamuru üzerinde basınç uygulanmaksızın, sadece elektrik alan uygulayarak deneyler de yapılmıştır. Elektrot disk üzerine 10mm koyulan çamur numunelerine 60 dakika boyunca 30V voltaj uygulayarak deneyler yapılmıştır. Ancak 60 dakika sonunda susuzlaştırma meydana gelmemiştir. Şekil 5.13'de gösterildiği şekilde, başka bir deneyde evsel biyolojik AAT çamuru, 30V

potansiyel uygulanarak ilk 30 dakika basınçsız, sonraki 15 dakika 1Bar basınç, en son olarak da son 15 dakika 2Bar basınç uygulanarak test edilmiştir. Deney sonunda sabit voltaj altında artan basınçla filtre edilen su miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, elektrotlar ile çamur arasında etkin bir elektrik alanın bulunması için basınç uygulanması gerektiğini göstermekte ve Tuan et al (2008), Citeau et al., (2012), Mahmoud et al., (2010) tarafından elektro-susuzlaştırma üzerine basıncın etkisini gösteren çalışmalarda bu sonucu desteklemektedir.




Şekil 5.13: Evsel Biyolojik AAT çamuruna uygulanan Elektro-Sususzlaştırma prosesi üzerine basıncın etkisi.

## 5.4. Enerji Tüketimi Üzerine Etkileri

Arıtma çamurlarının nihai çamur KM içerikleri, toplam ve spesifik enerji tüketimlerinin gösterildiği Tablo 5.1'de görüldüğü gibi uygulanan potansiyel değerlerinin artması ile birlikte nihai çamur KMs değerleri de artmaktadır. Ancak bu, daha yüksek bir elektrik enerjisi tüketimi anlamına gelmektedir. Çamur numunelerinin başlangıç koşulları, elektrik enerji tüketiminde temel bir rol oynar. Özellikle, başlangıç çamur KMi değerinin yüksek olması (KMi>%20) serbest suyun, çamurdan uzaklaştırılması için büyük bir enerji tüketimine ihtiyaç duyan hücre içi ve bağlı sudan çok daha düşük bir miktarda bulunması anlamına gelmektedir. Bu,

testlerin ilk 5 dakikasında çamur numuneleri üzerine 2,5Bar'lık basınç uygulanmasına rağmen hiç su toplanmamasından belli olmaktadır.

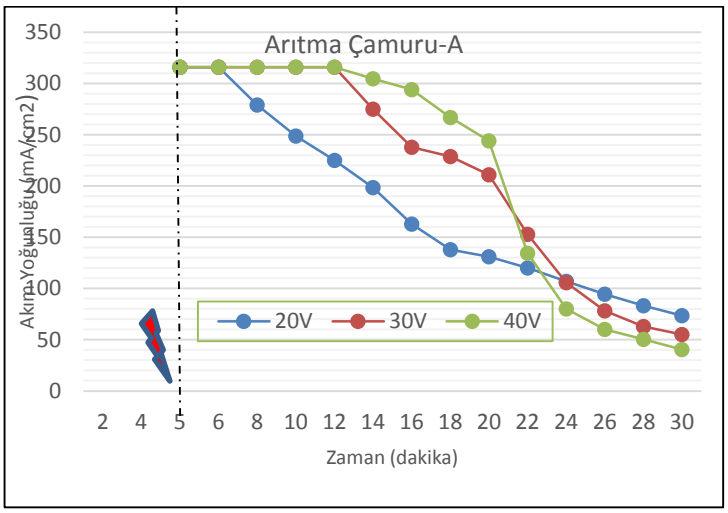
Tablo 5.1: Arıtma çamurları üzerinde basınca dayalı elekto-susuzlaştırma çalışması sonuçları.

| Numune No | Elektrik Potansiyeli (V) | $KM_i$ % | $KM_s$ % | ΔKM % | Elektrik Enerji Tüketimi ($t_v$ süresince) (Wh) | Spesifik Elektrik Enerji Tüketimi ($t_v$ süresince) ($Wh/kg_{H2O}$) | Filtre Edilen Süzüntü Suyu (gr) | Süzüntü Suyu Bulanıklık (NTU) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| İleri Biyolojik Evsel AAT Aerobik Stbl. | 20 | 25% | 43% | 18% | 10 | 501 | 20 | 481 |
| | 30 | 25% | 50% | 26% | 19 | 777 | 24 | 223 |
| | 40 | 25% | 52% | 27% | 35 | 1398 | 24,7 | 380 |
| İleri Biyolojik Evsel AAT Anaerobik Stbl. | 20 | 26% | 37% | 11% | 7 | 549 | 12,8 | 67,1 |
| | 30 | 26% | 51% | 24% | 10 | 446 | 23,2 | 56,2 |
| | 40 | 26% | 52% | 25% | 23 | 990 | 23,7 | 63,4 |
| Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT Aerobik Stbl. | 20 | 20% | 32% | 11% | 3 | 207 | 14,5 | 105 |
| | 30 | 20% | 36% | 16% | 4 | 262 | 16,4 | 396 |
| | 40 | 20% | 38% | 18% | 17 | 753 | 22,9 | 845 |
| Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT Anaerobik Stbl. | 20 | 21% | 50% | 29% | 8 | 364 | 23,2 | 258 |
| | 30 | 21% | 51% | 30% | 11 | 525 | 20,1 | 228 |
| | 40 | 21% | 53% | 32% | 16 | 552 | 29,3 | 354 |
| Sanayi Bölgesi Biyolojik AAT Aerobik Stbl. | 20 | 29% | 44% | 15% | 8 | 621 | 12,3 | 35,1 |
| | 30 | 29% | 44% | 15% | 7 | 435 | 15 | 24,5 |
| | 40 | 29% | 50% | 21% | 18 | 1131 | 15,7 | 15,2 |

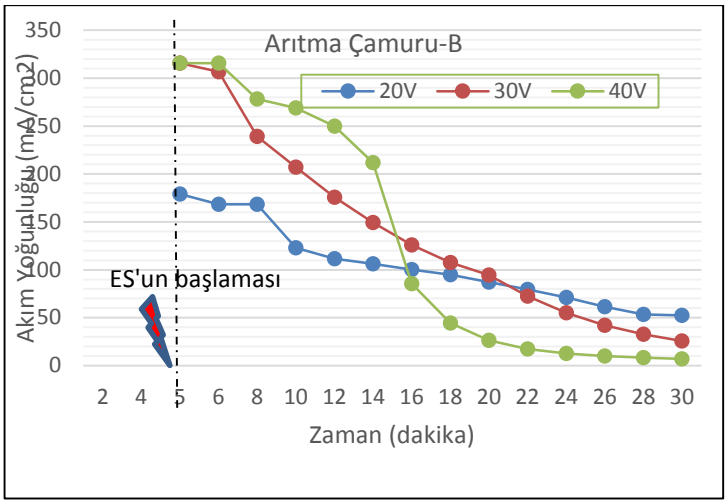
Sabit potansiyel uygulaması durumunda, voltaj ve gelişen akımlar, susuzlaştırma kinetiğini ve nihai kek kuruluğunu önemli ölçüde etkilemekte ve potansiyelin artması, daha hızlı kinetik ve daha yüksek su giderme derecesine neden olmaktadır [Feng, 2014], [Olivier, 2014].

Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18'de görülebildiği gibi, anodun yanında çamur kek direncinin artması, suyun giderilmesi ile birlikte akım yoğunluğunun zamanla monoton olarak azalma eğiliminde olduğunu göstermektedir [Citeau, 2012]. Bu, daha yüksek elektrik potansiyeli (40V) değerleriyle yapılan testler sırasında daha hızlı gerçekleşir ve uygulanan potansiyelden bağımsız olarak, akım yoğunlukları testlerin sonunda yaklaşık aynı değere ulaşmaktadır. Bununla birlikte, elektrik enerjisi tüketimi ve spesifik enerji tüketim değerleri, test sırasında ortaya çıkan yüksek maksimum akımlardan dolayı uygulanan potansiyel ile birlikte artmaktadır. Daha yüksek elektrik potansiyelinin uygulanması, daha fazla elektrik enerjisi tüketimi pahasına da olsa daha iyi nihai KM değerlerinin elde edilmesine izin vermektedir.

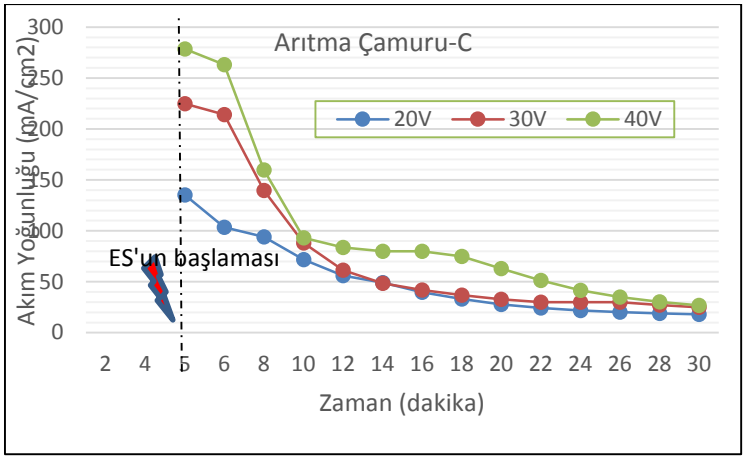
Basınca dayalı ES prosesi ile ilgili yapılan deneylerin Akım Yoğunluğu grafikleri Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18'de, gösterilmiştir.



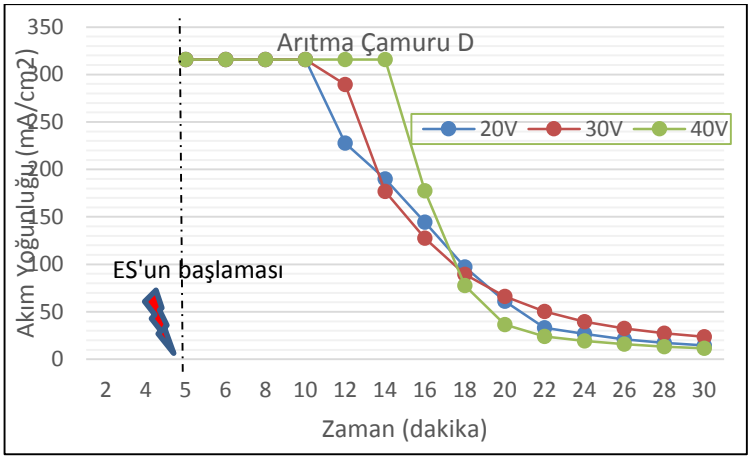

Şekil 5.14: Evsel Biyolojik AAT- Çamur A akım yoğunluğu-zaman etkisi.



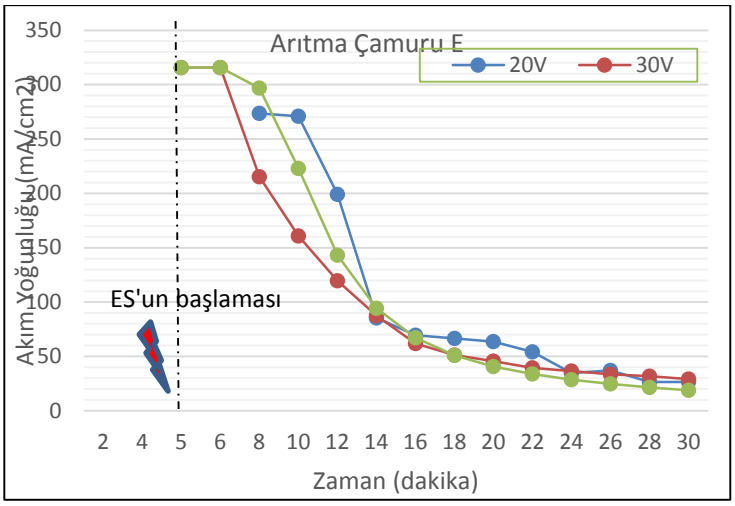

Şekil 5.15: Evsel Biyolojik AAT- Çürütücü sonrası çamur B akım yoğunluğu-zaman etkisi.




Şekil 5.16: San.Böl.Biyo.AAT- çamur C akım yoğunluğu-zaman etkisi.



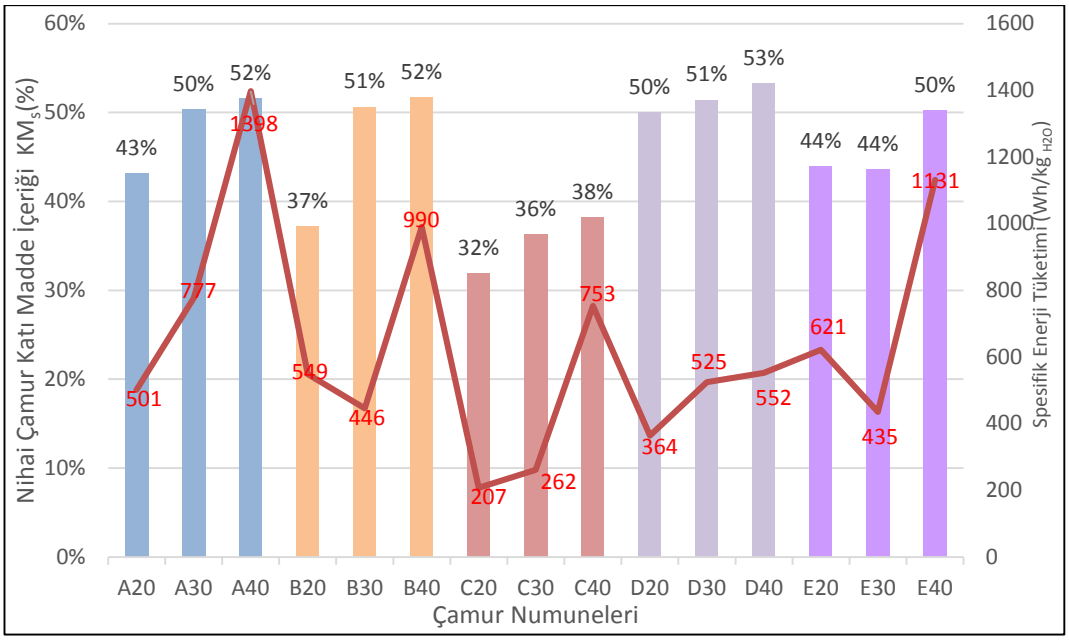

Şekil 5.17: San.Böl.Biyo.AAT- çürütücü sonrası çamur D akım yoğunluğu-zaman etkisi.



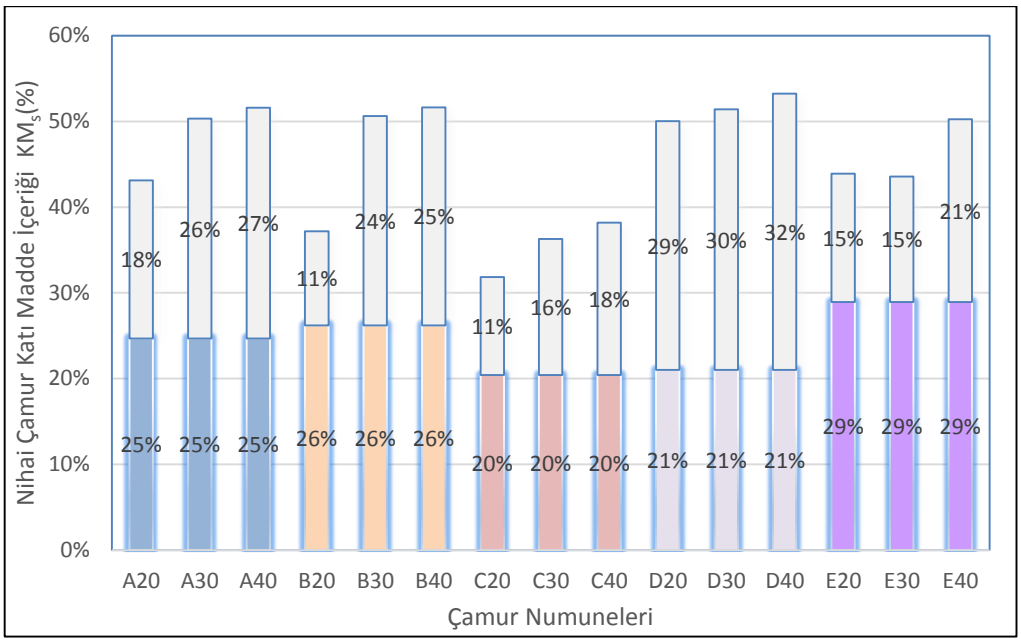

Şekil 5.18: San.Böl.Biyo.AAT- çürütücü öncesi çamur E akım yoğunluğu-zaman etkisi.

Atıksu Arıtma Tesislerinin, mekanik susuzlaştırma sonrasında düşük KMi konsantrasyonlarına sahip olan çamurlarının ES'ı, bu çamurlarda daha yüksek oranda serbest su bulunması nedeni ile Çamur C ve Çamur D numunelerinde görüldüğü gibi daha düşük enerji tüketimi gerektirmektedir.

Basınca dayalı ES prosesi ile ilgili yapılan deneylerin katı madde (KMs) içerikleri ile nihai katı madde&enerji tüketimi değerleri Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de gösterilmiştir.




Şekil 5.19: Basınca dayalı ES testlerinde çamur numunelerinin nihai çamur katı madde oranları&enerji tüketimleri.




Şekil 5.20: Basınca Dayalı ES testlerinde çamur numunelerinin nihai çamur katı madde oranları.

# 6. SONUÇLAR

Arıtma teknolojilerin yaygın bir biçimde kullanılması sonucunda, bu tesislerden kaynaklanan arıtma çamurlarının miktarları da her geçen gün artmaktadır. Özellikle çamur üretimi yüksek olan biyolojik arıtımın, kolay tasarımı ve yüksek verimliliği nedeniyle, geniş bir biçimde kullanılması ile çamur bertarafı bu tesisler için büyük bir çevresel ve ekonomik yük olmaktadır. Atıksuların arıtıldığı tesislerin farklı arıtım basamaklarından büyük miktarlarda arıtma çamuru oluşmaktadır. Özellikle arıtma çamurların yüksek su içeriğinden dolayı oluşan büyük hacimleri dolayısıyla, taşıma ve bertaraf maliyetinin düşürülmesi ve su içeriğinin ekonomik olarak ve teknik olarak alınması oldukça önemlidir. Suyun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı mekanik olarak suyun alınması kolay olmamaktadır. Arıtma tesislerinde, işletme maliyetlerinin yaklaşık yarısı çamurun bertaraf edilmesi için harcanmaktadır. Ancak arıtma çamurlarının tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de işlenmesi, çevre ile uyumlu bir şekilde çevreye en az zarar verecek şekilde bertaraf edilmesi oldukça önemlidir.

Bu tez çalışmasında, farklı atıksu arıtma tesislerinden kaynaklanan arıtma çamurlarının etkili ve ekonomik bir şekilde bertarafı için dolayısıyla arıtma çamurlarının su içeriğinin çevreye zarar vermeden, elektrokimyasal olarak giderilmesinin araştırılması ve elektro-susuzlaştırma prosesinin optimum çalışma şartlarının belirlenmesi olarak seçilmiştir.

Elektro-susuzlaştırma prosesi mekanik olarak alınamayan çamur flok suyunun etkin bir şekilde alınmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde çamura uygulanan doğrusal elektrik alanı sayesinde, elektroosmotik akış ile floklardaki bağlı suyun katoda ilerlemesi ve toplanması ile çamurun susuzlaştırılması yapılmaktadır. Klasik mekanik susuzlaştırma teknikleri yalnızca çamur içindeki serbest suyu uzaklaştırabilirler. Özellikle mekanik yöntemlerle susuzlaştırmaya karşı direnç gösteren çamurlarda veya daha yüksek oranda katı madde elde edilmesi planlandığında elektriksel alan uygulaması uygun bir proses olarak karşımıza çıkmaktadır. Klasik yöntemlerle % 15-25 olan çamur su verme verimi amaçlanan yöntem ile %50 oranlarına kadar çıkabilmektedir. Uygun susuzlaştırma

teknolojilerinin geliştirilmesi çamurun ekonomik olarak bertarafı açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışma, nihai çamur katı madde (KMs) ve enerji tüketimi açısından susuzlaştırma verimini belirlemek ve bu prosesin özelliklerini değerlendirmek amacı ile yapılmıştır. Laboratuvar ölçekli bir reaktör kullanarak, 2,5Bar sabit basınç altında, 20V, 30V ve 40V da potansiyel değerleri ayarlanmıştır. Çalışmada belirlenen başlıca sonuçlar şöyledir:

- Çamurdan suyun giderilmesi, uygulanan potansiyelin artması ile artar;
- Atıksu arıtma tesislerinde klasik yöntemlerle suyunun alınması daha zor olan çamurlar için daha düşük enerji tüketimi gerektirir;
- Elektro-ozmos sürecini kontrol eden ana parametreler, uygulanan potansiyel değerleri, başlangıçtaki çamur katı madde (KMi), UKM/KM oranı, iletkenlik, zeta potansiyeli, pH'dır.
- Düşük enerji gereksinimi, kolay işletimi, şartlandırma için düşük kimyasal madde kullanımı bu prosesi cazip yapan diğer etkenlerdir. Amaçlanan bu yöntem, ülkemiz için yeni bir teknolojidir.

# KAYNAKLAR


Andreoli C. V., Sperling M. V., Fernandes F., Ronteltap M., (2007), "Sludge Treatment and Disposal", IWA Publishing.

Barton W. A., Miller S. A., Veal, C.J., (1999), "The Electrodewatering of Sewage Sludges", Drying Technology, 497-522.

Borowski S., Szopa J. S., (2007), Experiences with the dual digestion of municipal. Bioresour.Technol. 98(6), 1199-1207.

Chen Y., Gu G., (2004), "Influence Of Pretreating Activated Sludge With Acid And Surfactant Prior To Conventional Conditioning On Filtration Dewatering", Chemical Engineering Journal, 99, 137-143.

Chen Y., Yang H., Gu G., (2001), "Effect Of Acid And Surfactant Treatment on Activated Sludge Dewatering And Settling", Water Research, 35, 2615-2620.

Citeau M., Olivier J., Mahmoud A., Vaxelaire J., Larue O., Vorobiev E., (2012), "Pressurised electro-osmotic dewatering of activated and anaerobically digested sludges: electrical variables analysis", Water Research, 46, 4405-4416.

Dirkzwager A., (1989), "Sewage sludge treatment and use: new developments, technological aspects, and environmental effects", Elsever Applied Science, 536.

Laturnus F., Groen C., Von Arnold K., (2007), "Organic Contaminants from Sewage Sludge", Environmental Science Pollution Research Intitue, 14, 53-60.

Feng J. Y., (2014), "Dynamic changes in the characteristics and components of activated sludge and filtrate during the pressurized electro-osmotic", Seperation and Purificaiton Technology, 134, 1-11.

Feng J., Wang Y. L., Ji X. Y., (2014), "Dynamic changes in the characteristics and component of activated sludge and filtrate during the pressurized electro-osmotic dewatering process", Seperation and Purificaiton Technology, 134, 1-11.

Filibeli A., (1996), "Arıtma Çamurlarının Genel Özellikleri, İşleme ve Bertaraf Yöntemleri", İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İzmir.

Gazbar S., Abadie J. M., Colin F., (1994), "Combined Action of Electro-Osmotic Drainage and Mechanical Compression on Sludge Dewatering", Water Science Technology, 30, 169-175.

Gingerich I., Neufeld R. D., Thomas T. A., (1999), "Electroosmotically enhanced sludge pressure filtration", Water Environmental Research, 71(3), 267-276.

Glendinning S., Lamont-Black J., Jones C., (2007), "Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics", Journal Hazardous Materials, 139, 491-499.

Glendinning S., Mok C. K., Kalumba D., Rogers C. D. F., Hunt D. V. L., (2010), "Design Framework for Electrokinetically Enhanced Dewatering of Sludge", Journal of Environmental Engineering, 417-426.

Gopalakrishnan S., Mujumdar A. S., Weber M. E., (1996), "Optimal off-time in interrupted electroosmotic dewatering", Seperation Thecnology, 197-200.

Gray N., (2005), "Sludge treatment and disposal, Water Technology, 2nd Edition", Butterworth-Heinemann, USA.

Hiemenz P.C. and Rajagopalan R., (1997), "Principles of colloid and surface chemistry", New York: Marcel Dekker.

Hızal M., (2000), "Santrifüjler Çamur Susuzlaştırma Etkinliğinin Belirlenmesi için Uygun Parametrelerin Araştırılması", İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hsu P. V., (1997), "Limits of sludge dewaterability", Water Science Technology, 36, 87-91.

Jiaxiang Z. A., Zheng L. A., Peng S., Fuxin D., (2012), "Water Removal From Sludge In A Horizontal Electric Field", Drying Technology, 19(3-4), 627-638.

Jumah R., Al-Asheh S., Banat F., Al-Zoubi K., (2005), "Electroosmotic Dewatering of Tomato Paste Suspension Under AC Electric Field", Drying Technology, 23, 1465-1475.

Karr P., (1976), "Factors İnfluencing the Dewatering Characteristics of Sludge", Phhd Dissertation, Clemson University.

Katsiris N., Kouzeli A., (1987), "Bound water content of biological sludge and waste activated sludge", Water Research, 21, 1319-1327.

Larue O., Vorobiev, E., (2004), "Sedimentation and water electrolysis effects in electrofiltration of kaolin suspension", AlChE Journal, 3120-3133.

Lee J. E., Lee J. K., Choi H. K. (2007), "Filter Press For Electrodewatering of Waterworks Sludge", Drying Technology, 25, 1985-1993.

Liao B. Q., Droppo I. G., Leppard G. G., Liss S. N., (2006), "Effect of solids retention time on structure and characteristics of sludge flocs in sequencing batch reactors", Water Research, 40, 2583-91.

Mahmoud A., Fernandez A., Arlabose P., (2008), "Thermally assisted mechanical dewatering of suspensions of fine particles: Analyses of the influence of the operating conditions using response surface methodology", Chemosphere, 72, 1765-1773.

Mahmoud A., Olivier J., Vaxelaire J., Hoadley A. F. A., (2011), "Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interaction effects ", Water Research, 45, 2795-2810.

Mahmoud A., Hoadley A. F. A., Conrardy J. P., Olivier J., (2016), "Influence of process operating parameters on dryness level and energy saving during wastewater sludge electro-dewatering", Water Research, 103, 109-123.

Miller S. A., Sacchetta C., Veal C., (1997), "Electrodewatering of Waste Activated Sewage Sludge", 17th AWWA Fereral Convention, 302-308.

Nellenschulte T., Kayser R., (1997), "Change of particle structure of sewage sludges during mechanical and biological processes with regard to the dewatering result", Water ScienceTechnology, 36, 293-306.

Olivier J., Conrardy J. B., Mahmoud A., Vaxelaire J., (2015), "Electtro-dewatering of wastewater sludge: An investigation of the relationship between filtrate flow rate and electric current", Water research, 82, 66-77.

Olivier, J. M., (2014), "Electro-Dewatering of Anaerobically Digested and Activated Sludges: An Energy Aspect Analysis", Drying Technology, 32, 1091-1103.

Öztürk İ., Çallı B., Arıkan O., Altınbaş M., (2015), "Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı", Ankara: Union of Municipalities of Turkey.

ResGaz 1, (2010), Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik, 3 Ekim 2010 tarih ve 27661 sayılı Resmi Gazete.

ResGaz 2, (1991), Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, , 14 Mart 1991 tarih ve 20814 sayılı Resmi Gazete.

ResGaz 3, (2006), Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği, , 08 Ocak 2006 tarih ve 26047 sayılı Rezmi Gazete.

ResGaz 4, (2005), Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, 14 Mart 2005 tarih ve 25755 sayılı Resmi Gazete.

ResGaz 5, (2010), Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 8 Haziran 2010 tarih ve 27605 sayılı Resmi Gazete.

Pham T., Sillanpa M., Isosaari P., (2012), "Sewage Sludge Electro-Dewatering Treatment", Drying Technology, 30, 691-706.

Raats M. H. M., Van Diemen A. J. G., Laven J., Stein H. N., (2002), "Full scale electrokinetic dewatering of waste sludge. scale electrokinetic dewatering of waste sludge" A. Physicochemical and Engineering Aspects, 231-241.

Rabie H. R., Mujumdar A. S., Weber M. E., (1994), "Interrupted electroosmotic dewatering of clay suspensions", Separations Technology, 38-46.

Gopalakrishnan S. A. M., (1996), "Optimal off-time in interrupted", Seperation and Purificaiton Technology, 6, 197-200.

Saltabaş F., Soysal Y., Yıldız Ş., Balahorli V., (2009), " Evsel Katı Atık Termal Bertaraf Yöntemleri ve İstanbul'a Uygulanabilirliği", TÜRKAY 2009 Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Saveyn H., Curvers D., Pel L., De Bondt P., Van der Meeren P., (2006 ), "In situ determination of solidosity profiles during activated sludge electro-dewatering" Water Research, (40)11, 2135-2142.

Shin H. S., Lee J. K., Korean J., (2006), "Performance Evaluation Of Electrocoagulation And Electrodewatering System For Reduction Of Water Content In Sewage Sludge", Chemical Engineering, 23, 188-193.

Smollen M., Kafaar A., (1994), "Electroosmotically Enhanced Sludge Dewatering Pilotplant Study", Water Science Technology, 30, 159-168.

Snyman H. G., Forssman P., Kafaar A., Smollen M., (2000), "The Feasibility Of Electroosmotic Belt Filter Dewatering Technology At Pilot Scale", Water Science Technology, 41, 137-144.

Spinosa L., Vesilind, A. P., (2001), "Sludge Into Biosolids: Processing, Disposal, Utilization", IWA, Comwall, UK.

Spinosa L., (2011), "Wastewater Sludge", 2.Baskı, IWA Publishing.

Spinosa L., Vesilind P. A., (2001), "Sludge into Biosolids", IWA Publishing.

Tchobanoglous G., Burton F.L. and Stensel H. D., McGraw-Hill, (2003), "Metcalf and Eddy, Wastewater Engineering, Treatment, And Reuse, Fourth Edition", New York, USA.

Tenenbaum D., (1997), "The beauty of biosolids", Environ, Health Perspect, 105. 32-36.

Tuan P. A., Sillanpa M., (2010), "Fractionation of macro and trace metals due to off-time interrupted electro-dewatering", Drying Technology, 28(6), 762-772.

Tuan P. A., Jurate V., Sillanpa M., (2008), "Electro-dewatering of Sludge Under Pressure and Non-Pressure Conditions", Environmental Technology, 29, 1075-1084.

Tuan P., (2011), "Sewage Sludge Electro-Dewatering", Lappeenranta University of Technology.

Tuan P.A., Sillanpa M., (2010), "Migration of ions and organic matter during electro-dewatering of anaerobic sludge", Journal of Hazardous Materials, 173 (1-3), 54-61.

Tuan P. A., Sillanpa M., Virkutyte, J., (2010), "Sludge dewatering by sand-drying bed coupled with electro-dewatering at various potential", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 151-162.

Tuan P. A., Virkutyte J., Sillanpa M., (2008), "Electro-dewatering of sludge under pressure and non-pressure conditions", Environmental Technology, 29(10), 1075-1084.

Turovskiy I. S., Mathai P. K., Izrail S., (2006), "Wastewater sludge processing", Wiley-Interscience, New Jersey, USA.

Vesilind J. S., (1995), "Dilatometric measurement of bound water in wastewater", Water Resourse, 29, 2621-2626.

Vesilind P. A., (1994), "The role of water in sludge dewatering", Water Environmental Research, 36, 4-11.

Vijh A., (1995), "Electrochemical aspects of electroosmotic dewatering of clay suspensions", Drying Technology, 215-224.

Vijh A., (1999), "Salient experimental observations on the electroosmotic dewatering (EOD) of clays and sludges and their interpretation", Drying Technology, 575-584.

Visigalli S., Turolla A., Gronchi P., Canziani R., (2017), "Performance of electro-osmotic dewatering on different types of sewage sludge", Environmental Research, 157, 30-36.

Werther J., Ogada T., (1999), "Sewage sludge combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 25, 55-116.

Web 1, (1986),http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278&from=EN, (Erişim Tarihi 12/06/2017).

Web 2, (1991),http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=%20CELEX:31991L0271&from=EN, (Erişim Tarihi 21/05/2017).

Wijh., (1999), EMICO Water Technology Cinetic.

Yang, L., Nakhla G., Bassi A., (2005), "Electro-kinetic dewatering of oily sludges", Journal of Hazardous Materials, 130-140.

Yıldız Ş., Yılmaz E., Ölmez E., (2009), "Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri: İstanbul Örneği", TÜRKAY 2009 Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yoshida H., Kitajyo K., Nakayama M., (1999), "Electroosmotic dewatering under AC electric field with periodic reversals of electrode polarity", Drying Technology, 17, 539-554.

Yoshida H., (1993), "Practical Aspects Of Dewatering Enhanced By Electroosmosis", Drying Technology, 11, 787-814.

Yuan C., Weng C.H., (2003), "Sludge Dewatering By Electrokinetic Technique: Effect Of Processing Time And Potential Gradient", Advances in Environmental Research, 7, 727-732.

Zhang G., (2015), "Environmental and Social-economic Impacts of Sewage Sludge Treatment", The Evidence of Beijing, 90.

Zhang S., Zhang K., Yang Z., Lv X., (2017), "Novel electro-dewatering system for activatedsludge biosolids in bench-scale, pilot-scale andindustrial-scale applications", Chemical Engineering Research and Design, 121, 44-56.

# ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül COŞKUN 1976 yılında İstanbul'da doğdu. 1999 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden başarı ile mezun oldu. 2014 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2003 yılında meslek hayatına başlayarak, Kuzu Grup bünyesinde İSKİ Tuzla Atıksu Arıtma Tesisi Proses Şefi, Gebze Atıksu Arıtma Tesisi İşletme Şefi, Antalya Atıksu Arıtma Tesisi Start-up&işletme uzmanı, Proje Departmanında Uzman Mühendis, Gümak İnşaat bünyesinde Teklif ve Planlama Müdürü olarak görev yapmıştır. Ve halen MWH Global bünyesinde Uzman Mühendis olarak görev yapmaktadır.

# EKLER

## Ek A: Katı Madde ve Uçucu Katı Madde

Katı Madde (KM) ve Uçucu Katı Madde (UKM) tayinleri için, Standard Methods for the Exanination of Water and Wastewater, Section 2540 D'den alınan metotlar kullanılmıştır.

Toplam Katı Madde (TKM) su veya pis su numunesinin buharşatırılarak suyunun uçurulması ve daha sonra belirli sıcaklıkta (103-105 °C) etüvde kurutulması neticesinde kalan bakiyeye denir.

Bu kalan bakiyeyinin 550 °C lik kül fırınında yakılırsa kalan bakiyeden Toplam Uçucu Katı Madde ve Toplam Sabit Katı Madde tayin edilir.

Kullanılan araç ve gereçler;

i) Etüv
ii) Desikatör
iii) Analitik Terazi
iv) Kroze
v) Kroze

Deneyin Yapılışı:

Bir porselen kapsül (buharlaştırma kabı ) alınır. Sabit tartıma getirilmiş olan bu kap hassas terazide tartılır ve darası kaydedilir. İyice karıştırılmış numuneden mezür yardımıyla 50-100 ml civarında numune alınarak porselen krozeye konur. Katı maddeyi belirlemek üzere porselen kapsül, etüvde 103-105 °C de en az 1 saat bekletilir. Daha sonra kapsül etüvden alınır. Desikatörde yarım saat süre ile soğutulur ve tartılır. Daha sonra 550 °C lik külfırınında 15 dakika bekletilir. Desikatörde 1 saat süre ile soğutulur ve son tartımı alınır.

Hesaplanması:

- Toplam Katı Madde (TKM) (mg/L) = (B– A) . 1000 (mL numune)

- Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM) (mg/L) = (B – C) . 1000 (mL numune)

- A: İlk tartım ( kapsül darası) (mg)
- B: 105 °C deki tartım (numune + kapsül), (mg)
- C: 550 °C deki tartım. (mg)