

ARITMA ÇAMURLARININ ELEKTRO-SUSUZLAşTIRMASINDA
TİTANYUM ELEKTROT PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ

YALÇIN İPEK

şUBAT 2015

ARITMA ÇAMURLARININ ELEKTRO-SUSUZLAşTIRMASINDA
TİTANYUM ELEKTROT PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ

YALÇIN İPEK

ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS
DERECESİ İÇİN GEREKLİ ALIşMALARI YERİNE GETİREREK
ONAYA SUNULAN TEZ

şUBAT 2015

Fen Bilimleri Enstitüsü'nün Onayı

Prof. Dr. Duran KARAKAŞ

Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinde bir tez olarak gerekli çalışmaları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Duran KARAKAŞ

Anabilim Dalı Başkanı

Okuduğumuz bu tezin Yüksek Lisans derecesinde bir tez olarak onaylanması, düşüncemize göre, amaç ve kalite olarak tamamen uygundur.

Yrd. Doç. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

1- Yrd. Doç. Dr. Murak SOLAK

2- Yrd. Doç. Dr. Berrin TOPUZ

3- Yrd. Doç. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

ÖZET

ARITMA ÇAMURLARININ ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMASINDA TİTANYUM ELEKTROT PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

İPEK, Yalçın

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

Şubat 2015, 75 Sayfa

Atıksu arıtma işlemleri sonunda üretilen arıtma çamurlarının bertarafında karşılaşılan en büyük problem, çamurun bünyesinde yüksek oranda bulunan suyun katı maddeden etkili şekilde ayırmaktır. Çamurun bünyesinde bulunan su içeriğini azaltmak için birçok çamur susuzlaştırma tekniği geliştirilmiştir. Çamur susuzlaştırmada çoğunlukla tercih edilen belt-pres ve santrifüj gibi mekanik susuzlaştırma yöntemleri, sadece çamur yapısındaki serbest suyun ve düşük miktarda hücre yüzeyi suyu üzerinde etkilidir. Susuzlaştırma verimini arttırmak amacıyla çamura öncelikle şartlandırma işlemi uygulanmaktadır.

Fakat çamurun şartlandırma işleminde kullanılan kimyasal madde nedeniyle hem susuzlaştırma işlemine tabi tutulacak çamur hacminde artış meydana gelmekte hem de susuzlaştırılan çamurun kimyasal kompozisyonu bozulduğu için, çamura geri kazanım işlemleri uygulanamamaktadır.

Diğer su türlerinin çamur bünyesinden alınırken susuzlaştırılmış çamurun kimyasının bozulmaması için değişik yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Son yıllarda çamura elektrik alanı uygulanması ile yapılan çamur susuzlaştırma işlemleri konusundaki çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Elektro-susuzlaştırma yöntemi susuzlaştırılmak istenen çamurun elektrik alan ile muamele edilerek çamurdaki katı madde ile sıvı maddenin ayrımın gerçekleştirildiği bir metottur.

Tez kapsamında evsel atıksu arıtma çamurlarının, patates endüstrisi atıksu arıtma çamurlarının, beyaz et sektörü atıksu arıtma çamurlarının ve şeker endüstrisi atıksu arıtma çamurlarının susuzlaştırma özelliklerini iyileştirmek için model reaktörünün kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Susuzlaştırma verimi; kapiler emme süresi (KES), viskozite, toplam katı madde (TKM) verilerinin değerlendirilmesi ile ortaya koyulmuştur. Ayrıca model reaktörün çıkış suyunda çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOI) parametresi gözlemlenmiştir.

Elektro-susuzlaştırma işlemi için düşey elektrotlarla hazırlanmış titanyum elektrotları ile oluşturulmuş dikey elektrik alanı arasında bırakılan sistem kullanılmıştır. Deneysel analiz sonuçları bilgisayar istatistiksel programı MINITAB 17.0 programında Box-Behnken istatistiksel dizaynı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu dizayn yöntemi ile bağımlı değişkenler (KES, viskozite, TKM ve ÇKOI) üzerinde üç bağımsız değişkenin (sıcaklık, pH, işletme süreci) etkileri saptanmıştır. Aynı zamanda farklı arıtma çamuru türleri üzerindeki susuzlaştırma performansları belirlenmiştir. Sonuç olarak tüm arıtma çamuru türlerinde genel olarak asidik pH ve

işletim süresinin uzun olmasının susuzlaştırma performansını olumlu etkilediği görölmüştür.

Anahtar Kelimeler: Susuzlaştırma, evsel arıtma çamur, beyaz et sektörü çamuru, patates cipsi üretimi endüstrisi çamuru, şeker endüstrisi çamuru, titanyum elektrot

ABSTRACT

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF TITANIUM ELECTRODES IN ELECTRO-DEWATERING OF SLUDGE

İPEK, Yalçın

M.Sc., Department of Environmental Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

February 2015, 75 Pages

The major problem encountered in elimination of sewage sludge which is produced as a result of wastewater treatment process is to separate water found within the sludge. Many sludge dewatering techniques are developed in order to reduce the water content contained within the sludge. The most preferred techniques in sludge dewatering such as belt-press and centrifuge have an effect on free water and floc water in the sludge. Conditioning procedures are applied to sludge in order to increase the efficiency of dewatering.

However, due to the chemical substances used in the sludge conditioning, dimension of mud which is subjected to dewatering process increases and chemical design of dewatered sludge is disrupted. Therefore, recycling is not applied to mud.

While other water species are being taken from structure of sludge, development of alternative methods are required to not deteriorate chemistry of dewatered sludge.

During the recent years, studies on process of sludge dewatering made with electric field technics applied to sludge gain importance. Electro-dewatering is a method which solid and liquid matter of sludge are separated from each other by using electric field techniques for dewatering of sludge.

In this thesis, the availability of models reactor was evaluated to improve the dewatering capacity of the sewage sludges, the potatoes industry sludges, the poultry sludges, the sugar industry sludges. The dewatering capacity was determined with evaluation of Capillary Suction Time (CST), Viscosity, Total Solids (TS) parameters. Also, Soluble Chemical Oxygen Demand (SCOD) was analyzed in effluent waters of the model reactor.

It was used horizontal electric field system which is formed vertical titanium electrodes for electro-dewatering (EDW).

The assessment of the experimental analysis results using Box-Behnken Design was carried out using MINITAB 17.0 computer program. The effects of tree independent variables (Temperature, pH and Process time) on dependent variables (CST, Viscosity, TS and SCOD) was determined by making use of the statistical design analysis. Addition, dewatering capacity of different sludge types was identified. As a result, Positive effect has acidic pH and long process time for all sludge types was observed.

Key Words: Dewatering, municipal sewage sludge, white meat sector sludge, potato chips industry sludge, sugar industry sludge, titanium electrodes.

TEŞEKKÜRLER

Lisansüstü eğitimim boyunca değerli fikirleriyle beni her zaman destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL' e,

Tez deneysel çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Murat PAKDİL' e, Prof. Dr. Duran KARAKAŞ' a, Yrd. Doç. Dr. Arda YALÇUK' a, proje çalışma arkadaşlarım Serap BALABAN, Cemre KARSLIOĞLU, Önder DURAK' a, Burcu UZUN' a, laboratuvar imkânlarından yararlanmamı sağlayan ve lisansüstü eğitimim sırasında bilgilerini esirgemeyen, Çevre Mühendisliği Bölümü' nün kıymetli öğretim üyelerine,

Hayatım boyunca kendi tecrübelerinin ışığında beni kolladığı ve bana kazandırdığı birbirinden değerli yetiler için değerli babam Yılmaz İPEK' e ve hayatta belirlediğim hedeflerime ulaşmam da destekçilerim olan annem Döne İPEK' e ve ablam Gülçin İPEK' e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez, TUBİTAK-ÇAYDAG tarafından desteklenen 112Y301 no'lu proje kapsamındaki deneysel ve istatistiksel çalışmalarla oluşturulmuştur. Proje ekibi olarak desteklerinden dolayı TUBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜRLER.....	ix
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR.....	xvi
BÖLÜM 1.....	1
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Arıtma Çamurları Susuzlaştırma Yöntemleri.....	1
BÖLÜM 2.....	4
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.2. Elektro-Susuzlaştırma (ES) Prosesi.....	4
2.2.2. Klasik çamur susuzlaştırma yöntemlerine göre elektro- susuzlaştırmanın üstünlükleri ve kısıtlamaları.....	11
2.2.3. Elektro-susuzlaştırmayı etkileyen faktörler.....	12
2.2.4. Elektro-susuzlaştırma için kullanılan reaktör konfigürasyonları.....	13
2.2.5. Elektro-susuzlaştırmada kullanılan elektrot türleri.....	17
2.2.5.1. Titanyum.....	18

BÖLÜM 3.....	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1. Model Reaktör.....	19
3.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Arıtma Çamur Türleri, Temini ve Özellikleri.....	21
3.3. Fiziksel ve Kimyasal Analizler.....	23
3.4. İstatistiksel Analiz.....	24
BÖLÜM 4.....	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	27
4.1. Evsel Arıtma Çamuru ile Yapılan Çalışmalar.....	27
4.2. Tavuk Sektörü Arıtma Çamuru İle Yapılan Çalışmalar.....	39
4.3. Patates Endüstrisi Arıtma Çamuru İle Yapılan Çalışmalar.....	44
4.4. Şeker Endüstrisi Arıtma Çamuru İle Yapılan Çalışmalar.....	54
BÖLÜM 5.....	61
5.VARGILAR.....	61
KAYNAKLAR.....	73

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1.	Deneysel çalışmalarda kullanılan arıtma çamurlarının tipik özellikleri.....	22
Tablo 3.2.	Bağımsız değişkenler matrisi ve kullanılan bağımsız değişken noktaları.....	25

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Arıtma çamurlarının yapısındaki su çeşitleri.....	4
Şekil 2.2.	Çamur su dağılımı ve susuzlaştırma metotları.....	6
Şekil 2.3.	Elektro-susuzlaştırma işlemi esnasında meydana gelen elektrokinetik olaylar.....	8
Şekil 2.4.	(a) Mekanik susuzlaştırma (b) Elektro-susuzlaştırma (c,d,e) bir elektrik alanına yerleştirilen negatif yüklü partiküllerin hareketi..	9
Şekil 2.5.	Laboratuar ölçekli filtre presin şematik gösterimi.....	13
Şekil 2.6.	(a) Elektro-susuzlaştırma ünitesinin şematik gösterimi (b) Vida kapağı ve pistonun altındaki elektrot görünümü.....	14
Şekil 2.7.	Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırma testlerine yönelik deney düzeneğinin şematik diyagramı.....	15
Şekil 2.8.	Laboratuar ölçekli şematik gösterimi (a) Elektro-susuzlaştırma kum kurutma yatağı ve (b) Basınç uygulanmış elektro- susuzlaştırma reaktörü.....	16
Şekil 3.1.	Model reaktörün şematik görünümü ve görselleri.....	19
Şekil 3.2.	Deneyisel çalışmada kullanılan titanyum elektrotu.....	20
Şekil 3.3.	(a) Kapiler emme süresi (KES) cihazı, (b) Viskozimetre.....	23
Şekil 3.4.	Yüzey merkezli merkezi kompozit Box Behnken dizaynı.....	24
Şekil 4.1.	Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	28

Şekil 4.2.	Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	30
Şekil 4.3.	Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	31
Şekil 4.4.	Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	32
Şekil 4.5.	Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	34
Şekil 4.6.	Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	35
Şekil 4.7.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	37
Şekil 4.8.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin (ÇOKİ) incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	38
Şekil 4.9.	Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	40
Şekil 4.10.	Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	42
Şekil 4.11.	Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	43
Şekil 4.12.	Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	45
Şekil 4.13.	Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	46
Şekil 4.14.	Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	48
Şekil 4.15.	Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	49
Şekil 4.16.	Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	51
Şekil 4.17.	Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm).....	53
Şekil 4.18.	Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	55
Şekil 4.19.	Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	57

Şekil 4.20.	Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	58
Şekil 4.21.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm).....	60
Şekil 5.1.	Evsel arıtma çamuru ile titanyum 5 cm elektrot optimizasyonu (VİS, TKM, KES, ÇKOİ).....	63
Şekil 5.2.	Evsel arıtma çamuru ile titanyum 9 cm elektrot optimizasyonu (VİS, TKM, KES, ÇKOİ).....	64
Şekil 5.3.	Tavuk sektörü arıtma çamuru ile titanyum 9 cm elektrot optimizasyonu (VİS, TKM, KES).....	66
Şekil 5.4.	Patates endüstrisi arıtma çamuru ile titanyum 5 cm elektrot optimizasyonu (VİS, TKM, KES).....	67
Şekil 5.5.	Patates endüstrisi arıtma çamuru ile titanyum 9 cm elektrot optimizasyonu (VİS, TKM, KES).....	68
Şekil 5.6.	Şeker endüstrisi arıtma çamuru ile titanyum 5 cm elektrot optimizasyonu (VİS, TKM, KES, ÇKOİ).....	72

KISALTMALAR

ES	Elektro-Susuzlaştırma
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)
ÇKOİ	Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı (mg/L)
VİS (μ)	Viskozite (N.sn/m ²)
KES	Kapiler Emme Süresi (sn)
TKM	Toplam Katı Madde (%)

BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

1.1. Arıtma Çamurları Susuzlaştırma Yöntemleri

Evsel, endüstriyel ve özellikle gıda sektörü atıksularının arıtılmasında, biyolojik arıtma yöntemlerinden biri olan aktif çamur yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin dezavantajlarından biri atık aktif çamurun büyük miktarlarda üretilmesidir. (European Commission, 2010). Üretilen çamur, susuzlaştırma yöntemlerine tabi tutularak; çamurun nihai bertaraf sahasına taşınma maliyeti önemli ölçüde azaltılabilir, suyu alınmış çamur daha kolay işlenebilir, yakma işleminden önce su alma işlemi çamurun enerji içeriği arttırılabilir, çamurun aşırı nemi alınarak koku giderimi gerçekleştirilebilir, çamurun kimyasal yapısı bozulmadığı için gübre niteliği taşıyan çamur zirai amaçlı kullanılması sağlanabilir.

Mevcut çamur susuzlaştırma proseslerinden alınan çamurun % 80-85 oranında su içermesi ve büyük hacimlerde olmasından dolayı çamur nihai bertaraf maliyeti de çamur hacmi ile orantılı olarak artmaktadır.

Spinosa ve Vesilind (2001) tarafından yapılan çalışmada çamur arıtımı ve bertaraf maliyeti, atıksu arıtma tesis maliyetinin yaklaşık % 50'sini oluşturduğu bildirilmiştir.

Genel olarak kullanılan çamur susuzlaştırma yöntemleri; mekanik su alma yöntemleri (belt-filtre presler, vakum filtreler, santrifüjler) ve doğal su alma yöntemleri(kurutma yatakları, lagünler) olarak ikiye ayrılır (Tchobanoglous ve Burton, 1991).

Atıksu arıtma tesislerinden gelen çamurların susuzlaştırılabilme kapasini artırmak amacı ile çamura şartlandırma işlemi uygulanır. Yaygın olarak çamurun şartlandırılması için, son yıllarda yüksek verimlerinden dolayı inorganik şartlandırıclar yerine organik şartlandırıcı tipi olan polimer tercih edilmektedir (Tuan ve ark., 2012).

Şartlandırıcı ilavesi pahalı ve aynı zamanda ikincil çevre kirliliğine neden olabileceğinden, çamur susuzlaştırmada son yıllarda çeşitli alternatif yöntemler önerilmiştir. Bunlar, asit ve yüzey aktif maddelerin eklenmesi de dahil olmak üzere (Chen ve ark., 2001), fenton ön arıtımı (Lu ve ark., 2003; Tony ve ark., 2008), yardımcı şartlandırma (Chang ve ark., 2001), ultrasonikasyon (Na ve ark., 2007; Neis, 2000; Bien,1991; Bien ve Wolny, 1997; Feng ve ark., 2009), ani kurutma (Ohm ve ark., 2009) ve ani dondurma (Parker ve Colins, 1999) sayılabilir.

Günümüzde arıtma çamurları bertaraf edilmesi gereken bir atık olmakla birlikte sahip oldukları kaliteye bağlı olarak aynı zamanda tarımsal amaçlı enerji eldesi, yapı malzemesi olarak kullanım gibi pek çok yararlı kullanım alternatiflerine sahip olan bir "kaynak-hammadde" olarak önem kazanmıştır.

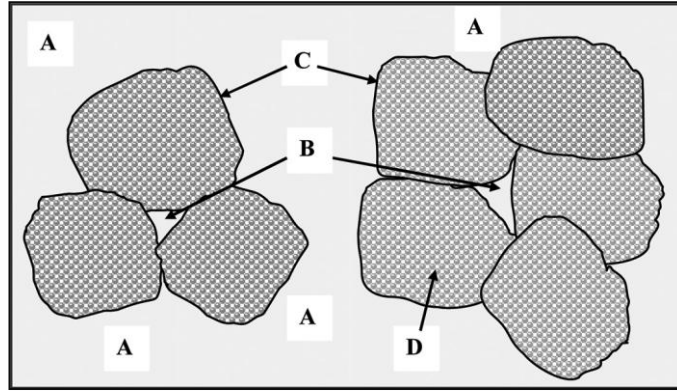
Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar çamurun yeniden kullanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Bu tez çalışmasında çamurun elektrik alan içerisine bırakıldığında susuzlaştırma performansı değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.2. Elektro-Susuzlaştırma (ES) Prosesi

Arıtma çamurlarından giderilmek istenen su miktarı ve çamuru oluşturan materyaldeki su dağılımı susuzlaştırma performansını etkileyen önemli parametrelerdir. Çamur içerisinde farklı su türleri bulunmaktadır (Katsiris, 1987). Su türlerinin herbiri kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu özellikler arasında buhar basıncı, entalpi, entropi, viskozite ve yoğunluk sayılabilir (Katsiris, 1987). Vesilind tarafından çamurun sahip olduğu su türleri dört ana grupta tanımlanmıştır.



Şekil 2.1. Arıtma çamurlarının yapısındaki su çeşitleri; (A) Serbest su ; (B) Hücreler arası su; (C) Hücre yüzeyi suyu; (D) Kimyasal bağlı su (Tuan ve ark., 2012)

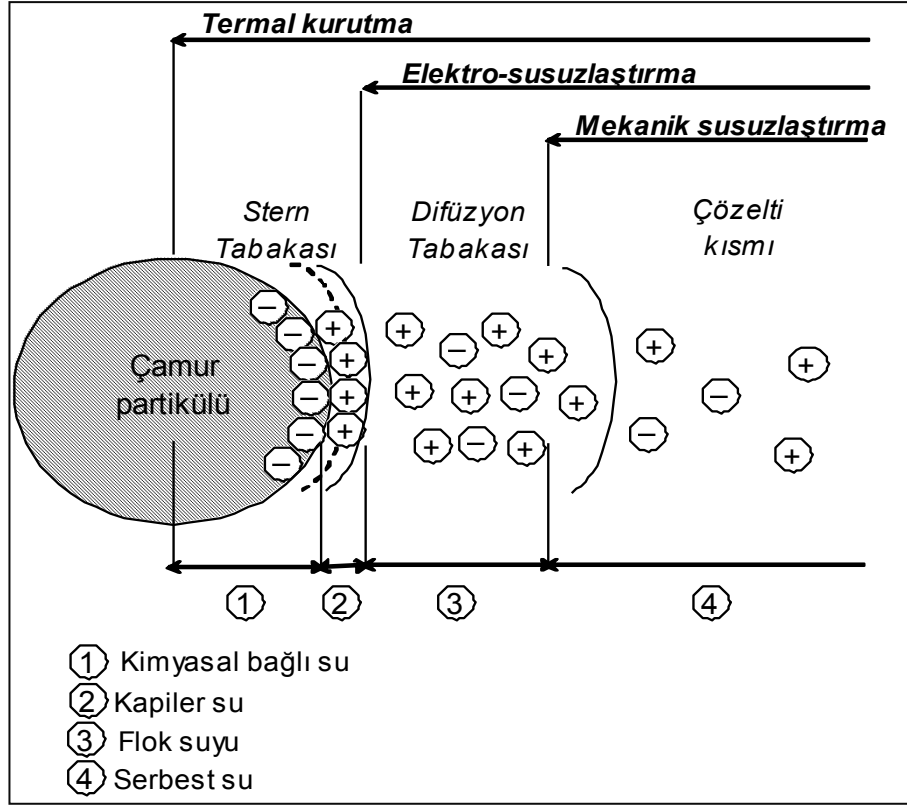
Bunlar Şekil 1.1'de de gösterildiği gibi hücreler arası su, serbest su, hücre yüzeyi suyu ve kimyasal bağlı su olarak sınıflandırılır (Vesilind, 1994).

Sözü geçen su tiplerinin özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Serbest su: Çamur taneciklerine dağılmamış su; diğer bir deyişle katı parçacıklar ve kılcal kuvvetler ile ilişkisi olmayan arıtma çamurlarının % 70-75'ini oluşturan kısma denir.
- Hücreler arası su (Kapiler su): Kapiler kuvvetler sonucunda çamur yumakları arasında sıkışmış floklar arasındaki suya denir. Flok yapılar dağıtıldığında bu su serbest kalabilmektedir.
- Hücre yüzeyi suyu (Flok suyu): Katı parçacıklar ile ilişkili olan sudur. Çok katmanlı su molekülleri parçacık yüzeyine hidrojen bağları ile güçlü bir şekilde tutunmaktadır. Bu su, su moleküllerinin molekül yapısı sayesinde parçacık yüzeyine tutunduğundan mekanik yöntemlerde alınması mümkün değildir.
- Kimyasal bağlı su: Partikül yapısı içinde hidrasyon suyu ya da kimyasal su olarak bağlıdır. Parçacıkların termokimyasal olarak parçalanması sonucu serbest kalabilmektedir (Vesilind, 1994).

Belt-pres, çökeltme ve santrifüj gibi mekanik susuzlaştırma yöntemleri, sadece çamur yapısındaki serbest suyun ve düşük miktarda flok suyu üzerinde etkilidir. Klasik susuzlaştırma yöntemleri her bir su türünde aynı verimde etkili olmadığından susuzlaştırma veriminin artırılması için şartlandırma yöntemleri geliştirilmiştir.

Şartlandırma işlemi, su içerisinde bulunan koloidal veya partikül haldeki askıda katı maddelerin üstündeki, fiziksel ve kimyasal kuvvetler sonucunda oluşmuş elektriksel yüklerin kararsız veya nötr halde getirilmesi demektir (Filibeli, 2002).



Şekil 2.2. Çamur su dağılımı ve susuzlaştırma metotları (Zhou ve ark., 2001).

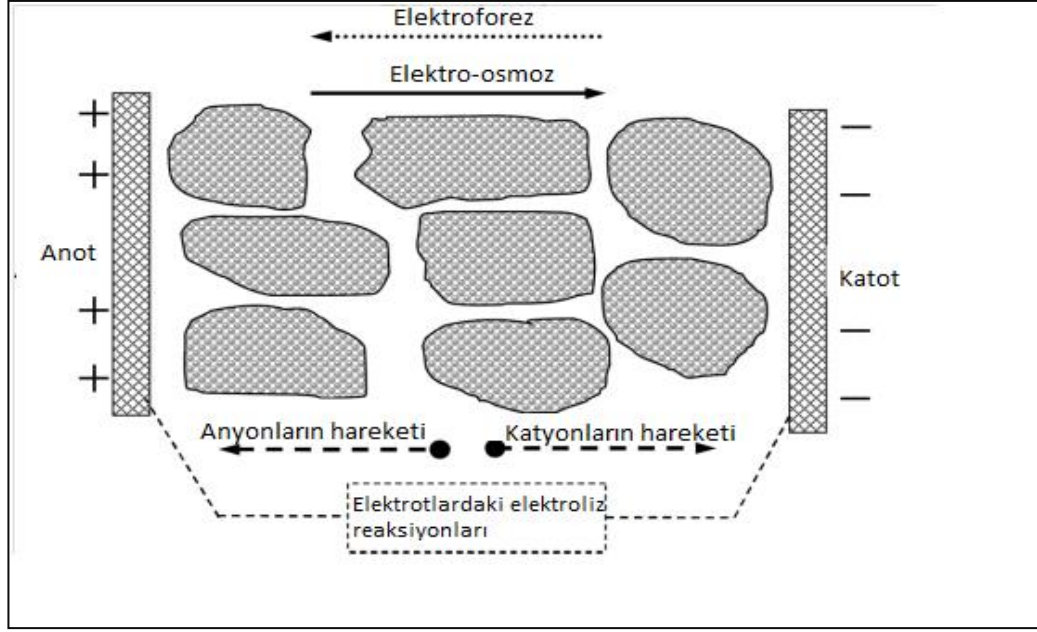
Şekil 2.2' ye bakıldığında mekanik susuzlaştırmanın serbest suyun ve belli miktarda flok suyunun uzaklaştırılmasında etkili olduğu görülmüştür. Mekanik susuzlaştırma işlemleri hem maliyetli hem de çıkan çamurun katı madde oranları düşük olduğundan son yıllarda enerji maliyetlerini düşürmek ve katı madde oranını iyileştirmek amacıyla birçok farklı yöntem geliştirilmiştir (Mahmoud ve ark., 2010). Bu yöntemleri sıralamak gerekirse;

- Mekanik ve termal susuzlaştırma birleştirilerek çamurun suyunun alınması,
- Elektriksel alan oluşturularak mekanik susuzlaştırma işlemiyle birleştirilmesi,
- Ultrason ve/veya manyetik alanların üst üste uygulanması,
- Ultrason ve elektrik alanların aynı anda çamura uygulanması şeklindedir.

Uygulanacak yöntemin seçimi, susuzlaştırılacak çamurun tipine, istenilen çamurun nem içeriğine, daha düşük enerji ve çevresel maliyeti en az olacak şekilde yapılır. Bu yöntemlerden biri olan elektrik alanı yardımıyla susuzlaştırma; elektro-susuzlaştırma olarak ifade edilir. Bu teknoloji basınçla susuzlaştırma gibi klasik susuzlaştırma ile birleştirilerek nihai katı madde içeriğini artırır, termal susuzlaştırma yöntemine kıyasla daha düşük enerji tüketimi gerektirir. Elektro-susuzlaştırma halen laboratuvar ölçeğinde olan pratik endüstriyel uygulamaları sınırlı bir işlemdir. Son yıllarda ince parçacıklar içeren çamurlar, peltamsi çamurlar, arıtma çamurları, ilaç endüstrisi, yiyecek atıkları ve yosunlar gibi mekanik susuzlaştırmanın başarılı olmadığı alanlarda kullanımı artmıştır (Mahmoud ve ark., 2010).

Elektro-susuzlaştırma prosesi, doğru akım (DC) elektrik alanı uygulamasıyla elektro-osmotik proses ile çamurun flokleşmesine neden olur. Elektro-osmotik akım çamurdan ekstra su giderimini artırarak, son çamur kekinde katı madde içeriğini yükseltir. Elektrik alanı uygulandığında elektrotlarda elektro-osmozun yanında; elektroforez, elektro-göç ve elektro-kimyasal reaksiyonlar da meydana gelir (Şekil 2.3).

Elektro-osmoz: İlk olarak Prof. Ferdinand Friedrich Reuss tarafından 1809 yılında gözenekli bir malzeme ile ikiye bölünmüş U şeklinde bir hücre içerisinde elektrolit solüsyonu kullanılarak tarifi yapılmıştır. Bu sistemde elektrolit çözeltisi ve gözenekli bir malzeme arasındaki sınıra iki elektrot yerleştirilerek, elektrik alan uygulaması etkisi altında elektronların gözenekli malzeme içerisinde belli bir yöne doğru akmaya başladığı tespit edilmiştir (Bagotsky, 2006).

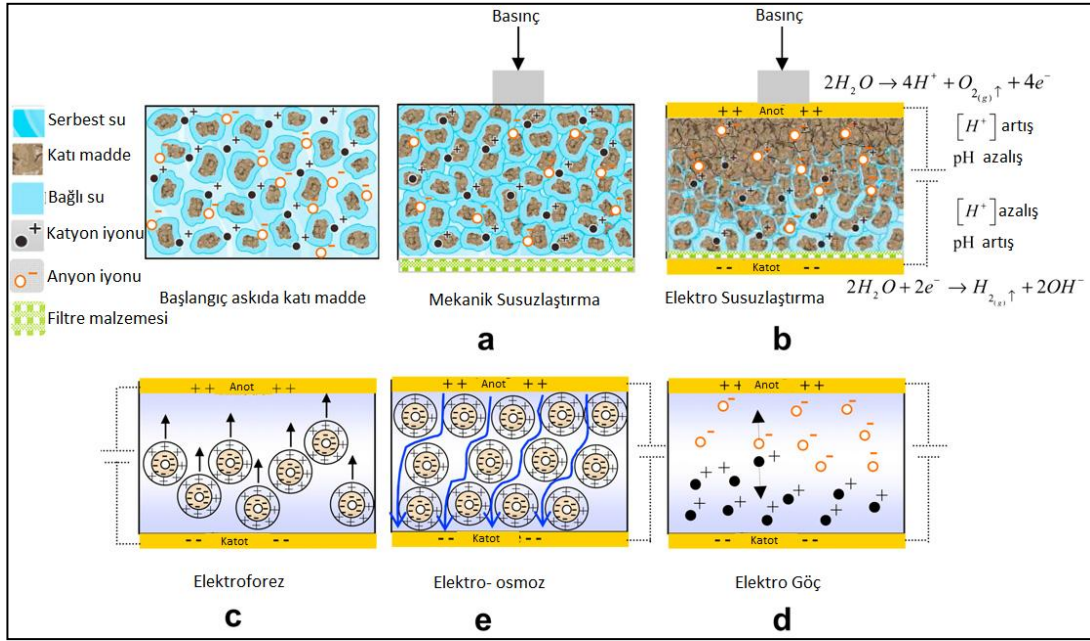


Şekil 2.3. Elektro-susuzlaştırma işlemi esnasında meydana gelen elektro kinetik olaylar (Tuan ve ark., 2012)

Elektroforez: Elektrik alanı uygulandığı zaman, elektrotlar arasında bulunan askıdaki çözeltide dağılmış halde bulunan katı partiküllerin elektrotlardan birinden diğerine doğru hareket etmeye başladığı Prof. Reuss tarafından bulunmuştur. Böylece elektroforez; elektrik alanı altında kararlı sıvı çözelti içindeki yüklü partiküllerin hareketi olarak tanımlanabilir.

Elektro-göç: Her bir iyon türünün hareketi, kendisinin iyonik hareketine bağlı olan çözeltideki iyonların taşınmasına elektro-göç ismi verilir. Uygulanan elektrik alanı altında, anyonlar genellikle negatif yüklü katottan pozitif yüklü anota doğru hareket ederken katyonlar için bu durum tam tersi şeklindedir (Fernandez ve ark., 2009, Acar ve ark., 1993)

Elektro-susuzlaştırma işlemini etkileyen önemli bir değişken de elektrotlarda meydana gelen reaksiyonlardır. Şekil 2,3’de anlatılan EMICO Water Technology CINETIK™,den adapte edilerek Mahmoud ve arkadaşları tarafından çalışılan reaktörde süspansiyona silindirik piston ile basınç uygulanılarak reaktörün altında yer alan geçirgen zar veya membran filtreden çamurun içerisinde ki sıvı ortamdan süzülerek atılmaktadır.



Şekil 2.4. (a) Mekanik susuzlaştırma (b) Elektro-susuzlaştırma (c,d,e) bir elektrik alanına yerleştirilen negatif yüklü partiküllerin hareketi (Mahmoud ve ark, 2010)

Reaktörün altında bulunun filtre malzemesi sıvı geçişini sağlayarak katı partiküllerin tutunmasına sağlayacak gözenek yapısına sahip filtre bezi veya polimer membrandan meydana gelebilmektedir (Mahmoud ve ark, 2010).

Fiziksel müdahale sonucunda çamurun suyunun alınması esnasında filtre ortamında meydana gelen basınç düşmesinin kek içerisindeki basınç düşmesi oranı

işletme sũresince azalmakta ve çamur keki oluştuğu esnada filtre ortamı yakınındaki hidrolik basınç sıfıra (filtre direnci ihmal edildiği zaman) yaklaşmaktadır (Mahmoud ve ark, 2010)

Buradan yola çıkararak çamur partikũllerinin birbirlerine uygulamış oldukları çamur partikũl madde ũzerinde oluşan elektriksel yũklerden dolayı susuzlaştırma işlemi performansı belli bir noktadan sonra azalarak sabit kalmaktadır. (Mahmoud ve ark, 2010).

Aynı zamanda elektrik alanı uygulandığı zaman elektrot yũzeyinde, korozyon, oksidasyon, okelme reaksiyonları meydana gelmektedir (şekil 2.4.b). Bu nedenle elektrot seçimi elektro-susuzlaştırma işlemlerinde çok onemlidir. Elektro seçiminde sistemdeki pH dũřmesi de dikkate alınmalıdır.

Elektro-susuzlaştırma işleminde anot elektrot yakınındaki çamur pH'ının azalması ve suyun elektroliz olmasından dolayı hidrojen iyonları (protonlar) oluşur. Dũřuk pH susuzlaştırılabilirlik ũzerinde pozitif etki yaptığı sahip olduğu bildirilmiştir. ũnkũ dũřuk pH, çamur yũzeyinde bağlı olan hũcre dışı polimerlerin salınmasına sebep olabilir ve bundan dolayı zeta potansiyelini azaltarak çamur partikũl oluşumu desteklenir (Tuan ve ark., 2008).

Anot materyalinin oksidasyonu korozyona neden olduğundan; materyal seçiminde, elektriksel iletkenlik performansının yanı sıra seçilen elektrotların herhangi bir kimyasal etkileşim oluşurmaması gerektiği de gũz nũnde tutulmalıdır (Saveyn ve ark., 2005)

2.2.2. Klasik çamur susuzlaştırma yöntemlerine göre elektro-susuzlaştırmanın üstünlükleri ve kısıtlamaları

Günümüzde çamur susuzlaştırma işlemi için genellikle şartlandırıcı ilavesinden sonra mekanik susuzlaştırma yöntemi tercih edilmektedir. Ancak susuzlaştırma performansının artırılması için inorganik veya organik kökenli şartlandırıcı ilavesi, bertaraf edilmesi gereken çamur miktarının artmasına neden olmaktadır. Bu noktadan hareketle; elektro-susuzlaştırma işlemlerinde ilave bir kimyasal kullanımına gerek kalmadan çamurun susuzlaştırılabilmesi yöntemin üstünlüğü olarak verilebilir.

Elektro-susuzlaştırma işlemlerinde, enerji ve işletme gibi ilave maliyetler düşünüldüğünde gelecekte klasik susuzlaştırma metotları ile yer değiştirmesinde güç olacağı düşünülmektedir. Ancak elektro-susuzlaştırmayı anlama ve onun ek onun ek yararlarını (çamurdan tuz giderimi, fekal koliform giderimi) belirlenmesinin sürdürülmesi gerekmektedir (Tuan vd., 2012).

Düşük katı madde içeriğinden dolayı oluşan çamurun su içeriği % 80-85 arasında olması da dikkate alınarak, çamur bertaraf işlemleri maliyeti artışı ile karşılaşılır. Spinosa ve Vesilind tarafından yapılan çalışmada çamur arıtımı ve bertaraf maliyeti, atıksu arıtma tesis maliyetinin yaklaşık % 50'sini oluşturduğu bildirilmiştir (Spinosa ve Vesilind, 2001).

2.2.3. Elektro-susuzlaştırmayı etkileyen faktörler

Elektro-susuzlaştırma işlemini etkileyen faktörler; başlangıç su içeriği, uygulanan voltaj miktarı, işlem süresi, polielektrolit şartlandırma etkisi, alkalinite ve tuzluluk olarak belirlenmiştir (Tuan ve ark., 2012). Yapılan çalışmaların çoğunda basınçla veya basınç uygulanmadan yapılan elektro-susuzlaştırma işlemlerinde nihai çamur kekinde önemli ölçüde su içeriği azaltılmıştır. Elektro-susuzlaştırmada çamurdaki başlangıç su içeriğinin susuzlaştırma verimini önemli ölçüde etkilediği, verimli bir susuzlaştırma işlemi için, başlangıç çamurunun su içeriğinin çok yüksek veya düşük olmaması gerektiği görülmüştür (Tuan ve ark., 2010).

Elektro-susuzlaştırma işlemi büyük ölçüde elektrik alan uygulama süresine bağlıdır ve optimum olmalıdır. Basınç altında elektro-susuzlaştırma işlemi birkaç dakikadan birkaç saat arasında değişebilmektedir (Smollen ve ark., 1994, Snyman ve ark., 2000).

Kısa elektro-susuzlaştırma süresi ise yeterli susuzlaştırma etkisine neden olmadığı bununla birlikte arttırılmış elektrik alan sürelerinin ise enerji verimliliğine olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Smollen ve ark., 1994, Snyman ve ark., 2000).

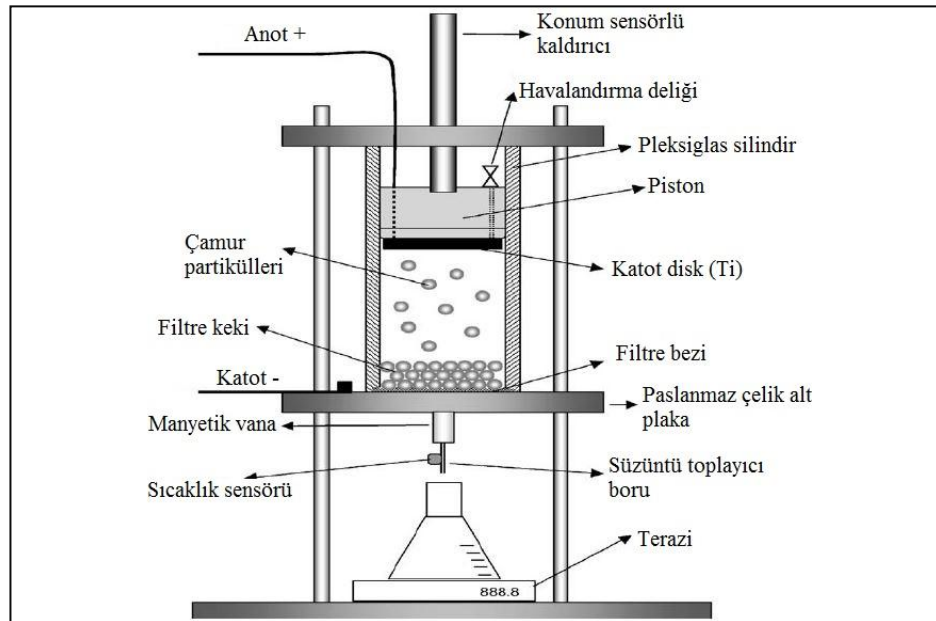
Elektriksel alana uygulanan gerilim miktarının arttırılmasıyla, yüksek katı maddesi ve susuzlaştırma süresinin kısılmasına neden olmaktadır. Ancak voltaj artışıyla da enerji tüketim miktarını arttırdığı da unutulmamalıdır (Tuan ve ark., 2010).

Citeau ve arkadaşları, yapılan çalışmada ise elektro-susuzlaştırma prosesini etkileyen faktörler arasında yüksek konsantrasyondaki tuz, yüksek akım sıklığına bağlı enerji tüketimi sayılabilir. (Tuan vd., 2008, Citeau vd., 2011).

Aynı çalışmada ise başlangıç pH'ının ve çamurdaki tuz içeriğinin susuzlaştırma üzerinde etkili olmadığı belirlenmiştir.

2.2.4. Elektro-susuzlaştırma için kullanılan reaktör konfigürasyonları

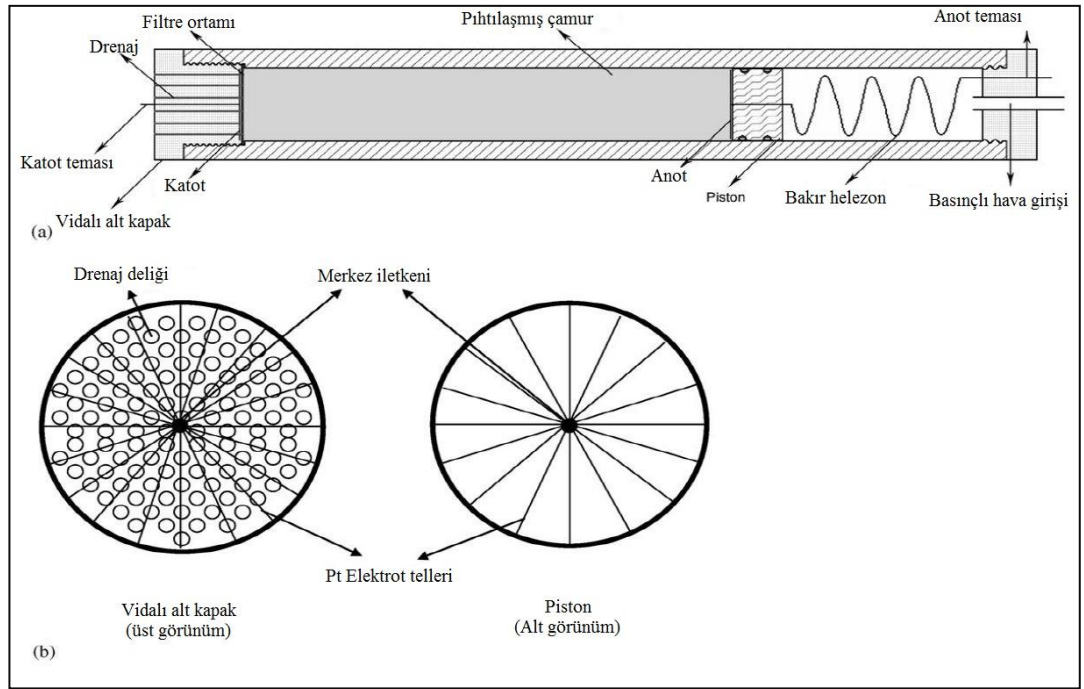
Saveyn ve arkadaşları tarafından elektro-susuzlaştırma işlemi laboratuvar ölçekli piston akımlı silindir filtre pres ile gerçekleştirilmiş (Şekil 2.6), çalışmada 1 saat boyunca 400 kPa basınç uygulanarak filtreleme yapılmış ve her deneysel etap için yeni filtre bezi kullanılmıştır. Elektro-susuzlaştırmada anot ve katot elektrotlar güç kaynağına bağlanmıştır.



Şekil 2.5. Laboratuvar ölçekli filtre presin şematik gösterimi (Saveyn ve ark., 2005)

Basınçla susuzlaştırma sırasında akış potansiyeli ölçüsü elektrotlara bağlı multimetre ile ölçülmüştür. Bu amaç için disk şeklinde titanyum kaplanmış iridyum-oksit anot piston olarak ve üzerine filtre geçirilmiş, paslanmaz çelik tabanla oluşturulmuş zemin ise katot olarak kullanılmıştır (Saveyn ve ark., 2005).

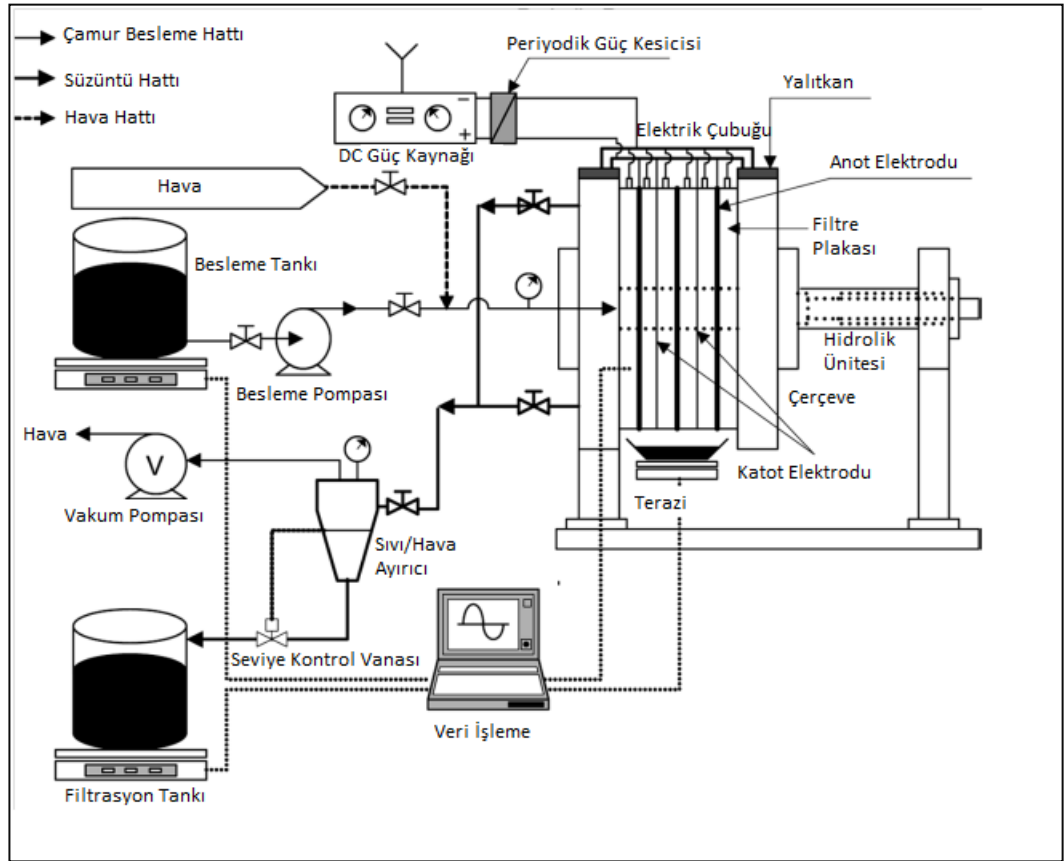
Aynı grubun 2006 yılında yaptığı çalışmada ise 50 ml şartlandırılmış çamura 300 kPa basınç uygulayarak elektrik alanı uygulamasıyla elektro-susuzlaştırma işlemine tabi tutmuşlardır. Piston ile elektrot arasındaki esnek bağlantı spiral şeklinde bakır telle yapılmıştır. Elektrik alanı uygulamak için ayarlı sabit akım kullanılmıştır (Philips, maksimum 100 mA ve 72 V).



Şekil 2.6. (a) Elektro-susuzlaştırma ünitesinin şematik gösterimi (b) Vida kapağı ve pistonun altındaki elektrot görünümü (Saveyn ve ark., 2006).

Burada alt vida kapağı katot işlevi, pistondaki elektrot ise anot işlevi görmüştür (Şekil 2.6.) Çalışmada platin elektrot teli kullanılmıştır (Saveyn ve ark., 2006). Şekil 2,6'da verilen reaktörde çamura, filtre plakalar arasında mekanik susuzlaştırma ve elektrik uygulamasıyla elektro-susuzlaştırma uygulanabilmektedir.

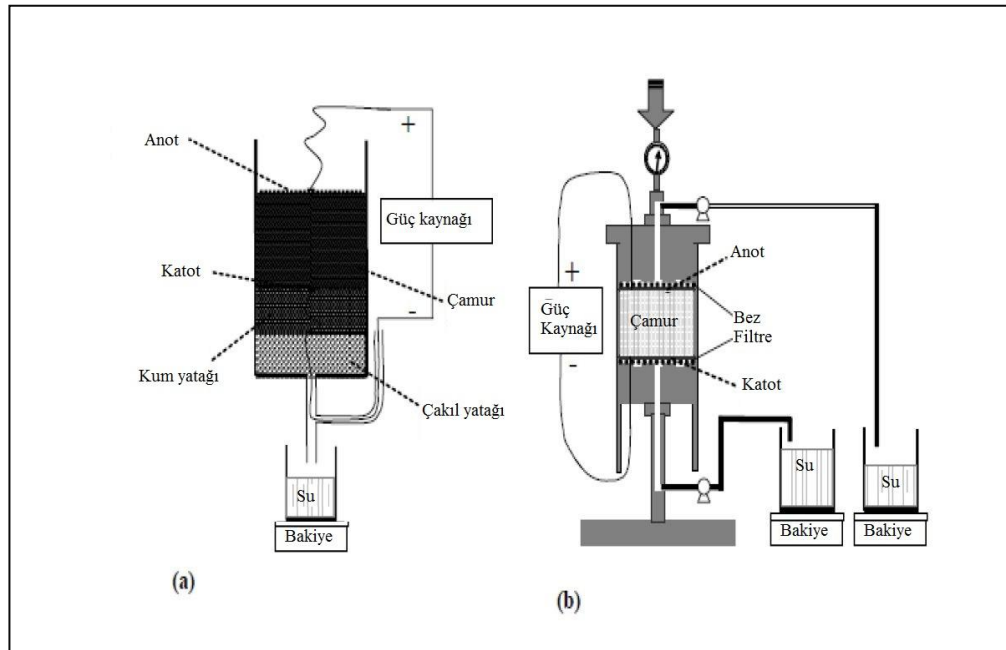
Bu ekipman, çamur besleme kısmı, basınçla birleştirilmiş elektrik alanı uygulama kısmı ve süzüntüleri toplama kısmı olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırma testlerine yönelik deney düzeneğinin şematik diyagramı (Lee ve ark., 2007)

Optimum şartlar şöyle bulunmuştur: 70 V/cm elektrik alanı şiddeti, 30 dakika uygulama süresi ve 588 kPa basınç (Lee ve ark., 2007). Elektro-susuzlaştırma oranı mekanik susuzlaştırma ile karşılaştırıldığında iki katı, susuzlaştırılmış çamur keki su içeriği % 25 azalmıştır (Lee ve ark., 2007).

Şekil 2.8.a' da basınçsız deneyler akrilik reaktörde yürütülmüştür. Reaktörde 10 cm çakıl yatağı ve 10 cm kum yerleştirilmiştir. Şekil 2.8.b' de basınçla çalışan elektro-susuzlaştırma reaktörü, polivinil klorürden imal edilmiş ve 9,8 cm çapında, 30 cm uzunluğundadır.



Şekil 2.8. Laboratuvar ölçekli şematik gösterimi (a) Elektro-susuzlaştırma kum kurutma yatağı ve (b) Basınç uygulanmış elektro-susuzlaştırma reaktörü (Tuan ve ark., 2008)

Katotta paslanmaz çelik, anotta titanyum levhalar kullanılmıştır. Çamur, sabit 4.0 bar basınca tabi tutulmuştur.

İkinci fazda düşük düzeyli 15 V elektrik akımı uygulanmıştır. Elektrik alanı uygulaması negatif yüklü organik maddeleri katottan anoda taşımaya neden olmuştur ve basınçla çalışan deneylerde çamurdan su akışı gidermiştir.

Kontrollü deneylerde KOİ ve TOK konsantrasyonları karşılaştırıldığında anotta daha fazla olan su giderimi, katotta daha düşük olarak gözlemlenmiştir (Tuan ve ark., 2008).

2.2.5. Elektro-susuzlaştırmada kullanılan elektrot türleri

Bölüm 2.2.4'de elektro-susuzlaştırma için kullanılan reaktör konfigürasyonların da verilen elektrot türleri; Saveyn ve arkadaşları tarafından 2005 yılında laboratuvar ölçekli yapılan çalışmada anot için titanyum kaplanmış iridyum-oksit, katot için ise paslanmaz çelik, aynı grup 2006 yılında yapmış olduğu başka bir çalışmada ise anot ve katot için platin elektrotlar kullanılmıştır (Saveyn vd.,2005; Saveyn vd., 2006).

Tuan ve arkadaşlarının 2008 yılında basınçsız akrilik reaktörde yapmış oldukları deneylerde katotta paslanmaz çelik, anotta titanyum levhalar kullanılmıştır (Tuan vd., 2008).

Bir diğer çalışmada ise Mahmoud ve arkadaşlarının yapmış oldukları basınçlı yatay elektrik alanda elektro-susuzlaştırma işlemi için anot görevi gören hareketli pistonla karışık metal oksitle kaplanmış titanyum, katot elektrot ise titanyumdan imal edilmiştir (Mahmoud, 2012).

2.2.5.1. Titanyum

Titanyum sembolü Ti olan 22 atom numaralı kimyasal elementtir. Hafif, güçlü, parlak, korozyona karşı dirençli grimsi bir geçiş metalidir. Titanyum demir, alüminyum, vanadyum, molibden gibi elementler ile alaşım yapabilir. Bu güçlü, hafif alaşımlar havacılık (jet motorları, füzeler ve uzay araçları) askeri, endüstriyel işlemler (kimyasallar ve petrokimyasallar, arıtma santralleri, kâğıt hamuru ve kâğıt) otomotiv, yiyecek, tıp (protezler, implantlar , dental endodontik malzemeler, dental implantlar), spor eşyaları, mücevher, cep telefonu, ve diğer uygulamalarda kullanılır (Wikipedia, 2015).

Düşük yoğunluklu hafif ve güçlü bir metaldir. Saf haliyle tamamen esnektir (Wikipedia, 2015). Göreli olarak yüksek erime noktası (1649 °C' nin üstünde) ile dayanıklı metallere göre olması açısından kullanım alanı geniştir.

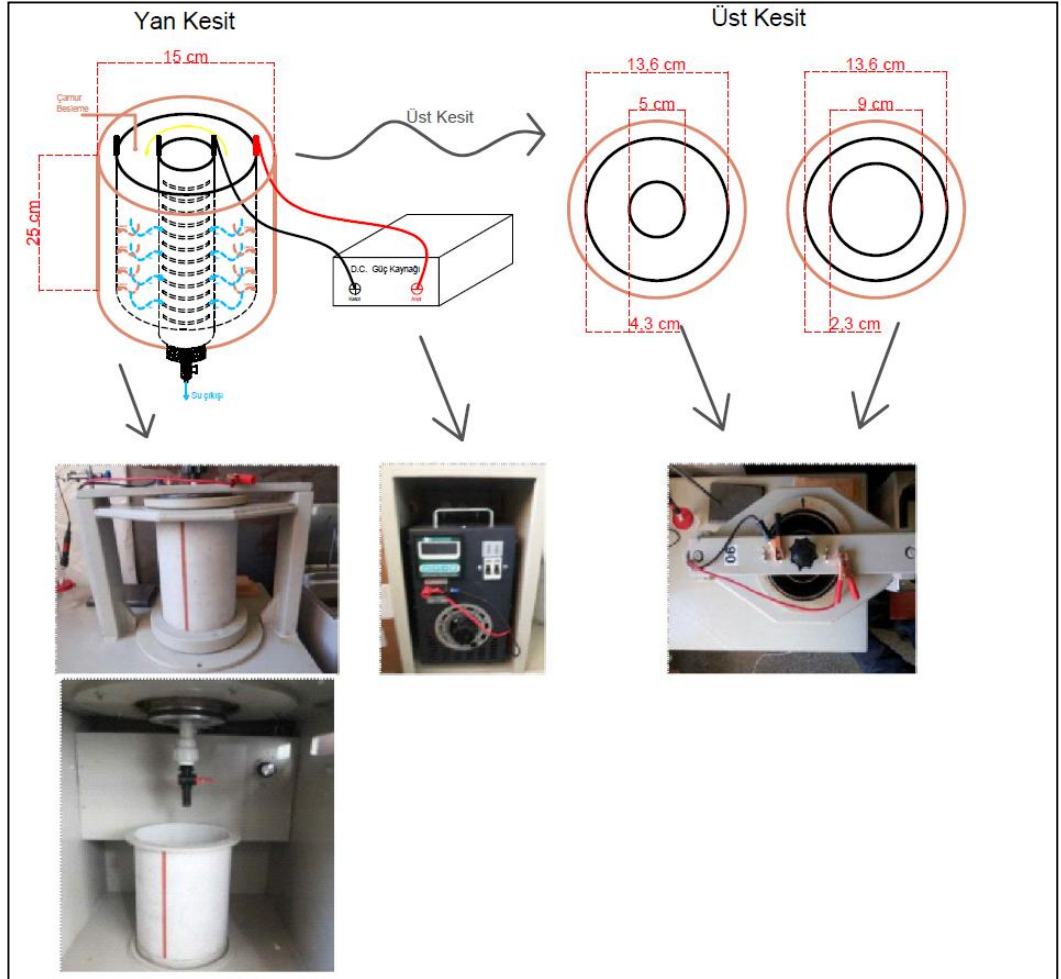
Titanyumun en önemli kimyasal özelliği korozyona karşı gösterdiği yüksek direncidir. Neredeyse platin kadar dirençli olan element asitler, klor gazı ve yaygın tuz çözeltilerinin maruziyetine karşı koyabilecek yeterliliktedir. Saf titanyum su içerisinde çözünmez ancak yoğun asit içinde çözünebilir (Wikipedia, 2015).

BÖLÜM 3

3. MATERYAL VE YÖNTEM

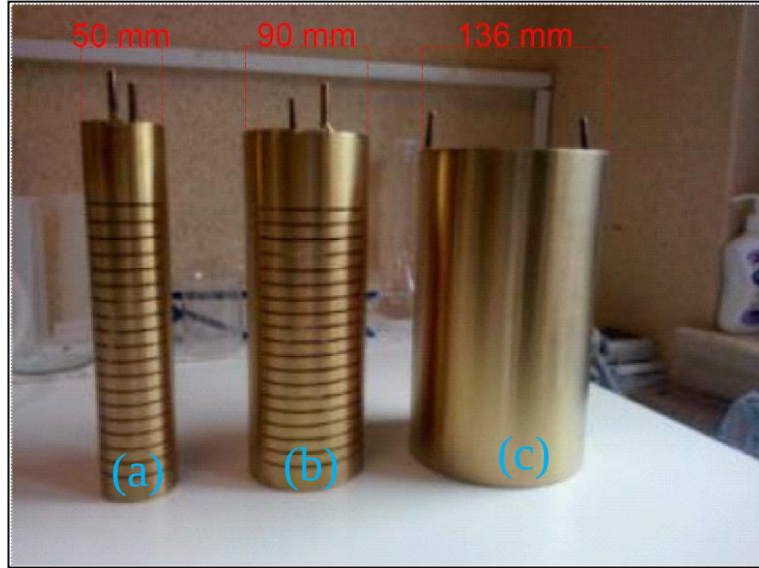
3.1. Model Reaktör

Deneyisel çalışmalarda elektro - susuzlaştırma prosesinin gerçekleştirildiği kesikli olarak işletilen model reaktörün kesiti ve görselleri Şekil 3,1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Model reaktörün şematik görünümü ve görselleri

Model reaktör 25 cm yüksekliğinde, 15 cm çapında pleksiglastan imal edilmiş istenilen hızda dönebilen bir dış kısımdan oluşmaktadır. Titanyum kaplamadan oluşan elektrotlardan dış kısmında anot olarak kullanılan elektrodun çapı (et kalınlığı hariç) 13,6 cm, iç kısmında katot olarak kullanılan elektrotun çapı elektrotlar arasındaki mesafenin etkisinin incelenmesi amacıyla 5 cm ve 9 cm olmak üzere 2 farklı çapta titanyum kaplama elektrotlar kullanılmıştır. Elektrotlar arasındaki mesafe, 5 cm çapındaki katot elektrot kullanılması durumunda 4,3 cm, 9 cm çapındaki katot elektrot kullanılması durumunda ise 2,3 cm olmaktadır.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmada kullanılan titanyum a) katot (5 cm), b) katot (9 cm), c) anot (13,6 cm)

Şekil 3.2'de görüldüğü üzere katot olarak kullanılan elektrot üzerine su geçişinin sağlanabilmesi için 5 cm çapındaki katot elektrotta 50 mm genişlikte, 2 mm yükseklikte, 9 cm çapındaki katot elektrotta ise 90 mm genişlikte, 2 mm yükseklikte delikler açılmış ve elektrotların DC güç kaynağına bağlantılarının yapılabilmesi için üst kısımlarına demir uçlar kaynak yapılmıştır.

Anot ve katot elektrot arasına çamur girişı yapıldıktan sonra işletme süresince, sistemin susuzlaştırma verimini arttırmak amacıyla, reaktör 120 devir/dakika döndürölerek çamur floklarının sudan ayrılması kolaylaştırılmıştır. Kesikli olarak işletilen sistemde çıkış suyu model reaktörün alt kısmından alınmıştır.

Elektrik akımı uygulandıktan sonra çamur bünyesinden ayrılan çıkış suyu katot elektrota, çamur ise anot elektrota yönlenmektedir. Bu özellikten yararlanılarak, çamur bünyesinden ayrılmış çıkış suyu katot elektrot üzerinde açılmış delikler vasıtası ile (dönme etkisiyle) çıkışa yönlendirilmiştir.

Model reaktör, optimum işletme şartlarını belirlemek amacıyla istatistiksel yanıt yüzey yöntemi (Bölüm 3.4) kullanılarak oluşturulan farklı işletim şartlarında çalışılmıştır.

3.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Arıtma Çamur Türleri, Temini ve Özellikleri

Evsel atıksu arıtma çamuru örnekleri klasik aktif çamur sistemine göre işletilen Bolu Atıksu Arıtma Tesis'i'nden, patates endüstrisi atıksu arıtma çamur örnekleri kimyasal arıtma sistemine göre çalışan dondurulmuş patates üreten bir işletme atıksu arıtma tesisinden, beyaz et sektörü atıksu arıtma çamuru örnekleri tavuk kesimhane atıksularını arıtan bir atıksu arıtma tesisinden, şeker endüstrisi atıksu arıtma çamur örnekleri şeker pancarından şeker üretimi yapan bir fabrikanın atıksu arıtma tesisinden temin edilmiştir.

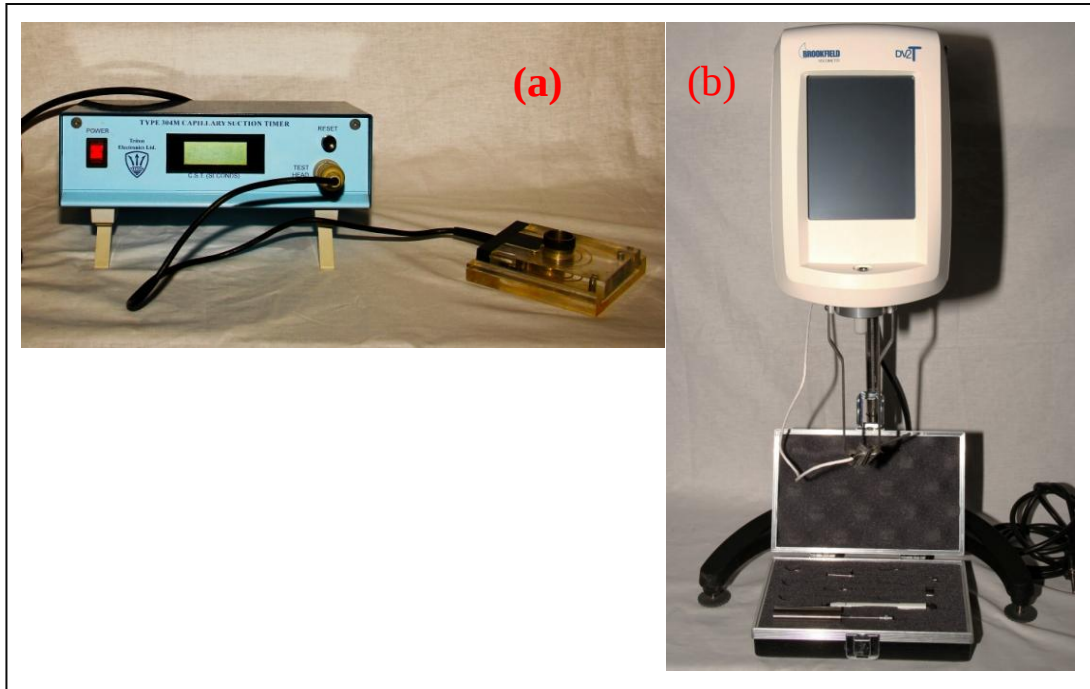
Tesislerden alınan çamur örnekleri arıtma tesislerinden en fazla bir saat içerisinde laboratuara ulaştırılmıştır. Laboratuvarda çamurun fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlendikten sonra çamurun model reaktöre uygulanması ve diğer işlemlerde kullanılmak üzere +4° C' de en fazla 3 gün süre ile buzdolabında saklanmıştır. Model reaktörde üzerinde çalışılması planlanan arıtma çamurlarının tipik özellikleri Tablo 3,1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan arıtma çamurlarının tipik özellikleri

Sektör	Parametreler	Değerler
Evsel arıtma çamuru	Kapiler Emme Süresi (sn)	14,6±6,69
	Çözünmüş KOİ (mg/L)	72,5±15,5
	Viskozite (N.Sn/m ²)	0,59±0,16
	pH	6,83±0,68
	Toplam Katı Madde (%)	1,07±0,27
Beyaz et sektörü arıtma çamuru	Kapiler Emme Süresi (sn)	200±31
	Çözünmüş KOİ (mg/L)	580±50,5
	Viskozite (N.Sn/m ²)	6,45±2,65
	pH	5,72±0,08
	Toplam Katı Madde (%)	9,98±1,27
Patates cipsi üretimi endüstrisi arıtma çamuru	Kapiler Emme Süresi (sn)	68,9±15
	Çözünmüş KOİ (mg/L)	28,66±1,53
	Viskozite (N.Sn/m ²)	0,301±0,155
	pH	6,95±0,46
	Toplam Katı Madde (%)	2,30±0,54
Şeker endüstrisi arıtma çamuru	Kapiler Emme Süresi (sn)	72,6±16
	Çözünmüş KOİ (mg/L)	6900±1350
	Viskozite (N.Sn/m ²)	0,005±0,00024
	pH	7,08±0,31
	Toplam Katı Madde (%)	2,51±1,6

3.3. Fiziksel ve Kimyasal Analizler

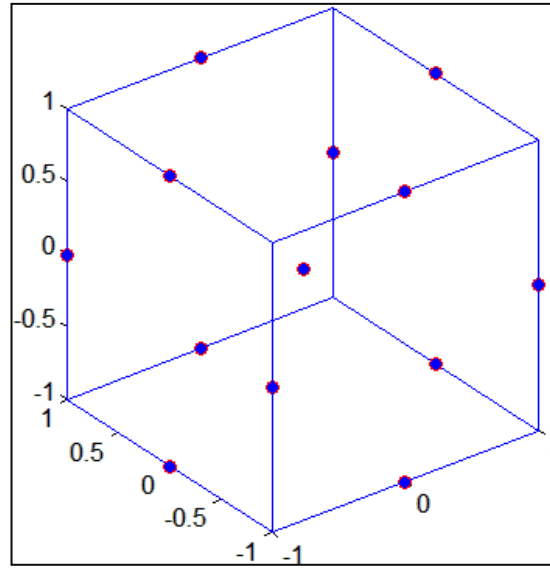
Çamurda sıcaklık ve pH değişiminin model reaktörün çamur numuneleri üzerinde oluşturduğu fiziksel ve kimyasal değişimlerin ve susuzlaştırılabilme kapasitesinin incelenmesi için işlem öncesi ve sonrasında Standart Metotlara dayanarak, yoğun çamurda; kapiler emme süresi-KES (Triton 304 cihazı ile SM 2710 G), viskozite (Brookfield DV2T), toplam katı madde-TKM (SM 2540 G), çamur üst suyunda ise; çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı-ÇKOİ (SM 5220 D) parametrelerinin analizleri yapılmıştır (APHA, 2005). KES ve viskozite parametrelerinin incelenmesi sırasında kullanılan cihazlar Şekil 3.3' de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. (a) Kapiler emme süresi (KES) cihazı, (b) Viskozimetre

3.4. İstatistiksel Analiz

Yapılan tez kapsamında deneysel etap yoğunluğu azaltmak, susuzlaştırma performanslarını maksimum seviyeye getirecek olan işletim şartlarını optimize edebilmek amacıyla bilgisayar istatistiksel analiz programı MINITAB 17.0'de Box-Behnken istatistiksel dizaynı kullanılmıştır. Box-Behnken dizaynı ikinci derece model parametrelerinin tahminlenmesinde kullanılan üç seviyeli tamamlanmamış (incomplete) çok etkenli tasarımlardan, dönersel tasarımların bir çeşidi olan bu dizayn 1960 yılında Box ve Behnken tarafından geliştirilmiştir. Box-Behnken tasarımlarında her bir etken üç düzeye sahiptir (Köksoy 2001).



Şekil 3.4. Yüzey merkezli merkezi kompozit Box Behnken dizaynı

Box Behnken her bir değişken için üst ve alt sınırlar aracılığıyla kübik bölgenin köşelerinde oluşturulan ve köşeleri içermeyen bir dizayn şeklidir (Şekil 3.4).

Küpün köşelerindeki noktaları temsil eden faktör düzeyi kombinasyonlarını bilmek avantajlı olabilir fakat fiziksel süreç kısıtlamaları yüzünden bu noktaları bulmak hem pahalı hem de test etmesi zordur. (Montgomery, 1991).

Box-Behnken tasarımları merkezsiz bileşik tasarımlara kıyasla daha ekonomik bir tasarım sınıfıdır (Köksoy 2001).

Bu dizayn yöntemi ile bağımlı değişkenler (KES, viskozite, TKM ve ÇKOİ) üzerinde üç bağımsız değişkenin (sıcaklık, pH, işletme süreci) etkilerini araştırmak için 4 farklı endüstri atık çamuru kullanılarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Tablo 3.2. Bağımsız değişkenler matrisi ve kullanılan bağımsız değişken noktaları

X_1	X_2	X_3	pH	İşlem süresi (dk)	Uygulanan voltaj (V)
-1	-1	0	5.0	30	17.5
1	-1	0	8.0	30	17.5
-1	1	0	5.0	60	17.5
1	1	0	8.0	60	17.5
-1	0	-1	5.0	45	10.0
1	0	-1	8.0	45	10.0
-1	0	1	5.0	45	25.0
1	0	1	8.0	45	25.0
0	-1	-1	6.5	30	10.0
0	1	-1	6.5	60	10.0
0	-1	1	6.5	30	25.0
0	1	1	6.5	60	25.0
0	0	0	6.5	45	17.5
0	0	0	6.5	45	17.5
0	0	0	6.5	45	17.5

Box-Behnken dizaynına göre oluşturulan Tablo 3.2' de gösterilmiş 15 etaplık deneysel çalışma prosedürü sonunda her bir bağımlı değişken için cevap fonksiyonu adı verilen denklemler oluşturulmuş (Denklemler 1), bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki 3 boyutlu grafiklerde gösterilecektir.

İşletme süresince 10-25 V arasında voltajlar uygulanmıştır. Model reaktör, en az 30 dakika en fazla 60 dakikalık periyotlarda çalıştırılmış. Bağımsız değişken uygulama aralıkları yapılan ön deneysel çalışmalara göre seçilmiştir.

Denklem 1'de tahmin edilen cevap fonksiyonu, $B_0, B_1, B_2, \dots$, fonksiyon katsayılarını ve X_1, X_2, X_3 , bağımsız değişken parametrelerini belirlemektedir. Minitab 17.0 (Minitab Inc. USA) kullanılarak ANOVA tabloları oluşturulup, yapılan analizlerin güvenirliliği, işletme şartlarının verim üzerindeki etkileri ve her bir parametrenin diğer parametrelerle arasındaki ilişkiler ortaya konulacaktır.

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^k B_{ij} X_i^2 + \sum_{i>j}^k B_{ij} X_i X_j \dots\dots\dots \text{Denklem 3.1}$$

Ayrıca bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkileri gösteren grafikler sunularak, çamur türleri arasında ki en yüksek katı madde yüzdesine sahip çamur eldesi için elektro-susuzlaştırma yönteminin uygulanabilirliği ve işletme esnasında oluşabilecek durumlar hakkında bilgi ortaya konulacaktır.

BÖLÜM 4

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Evsel Arıtma Çamuru ile Yapılan Çalışmalar

Elektrot olarak titanyum kullanılan model reaktöre evsel arıtma çamuru uygulanması ile elde edilen çıkış suyunda KES, TKM, viskozite ve ÇKOİ parametreleri izlenmiştir. Elde edilen sonuçların giriş ve çıkış değerleri gözönüne alınarak yüzdesel değerleri hesaplanmış ve Minitab 17.0 istatistiksel programı kullanılarak Box-Behnken istatistiksel dizayn yöntemine göre oluşturulan cevap fonksiyon denklemleri ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerinde etkisini gösteren grafikler verilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış KES süresi değerleri ve Denklem 4.1 kullanılarak Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında katot çapı 5 ve 9 cm'lik titanyum deneyleri için KES yüzdesel değişim grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.1, Şekil 4.2)

$$E_{KES} = [(G_{KES} - C_{KES})/G_{KES}] \times 100 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.1}$$

E_{KES} = Kapiler emme süresinin değişimi (%)

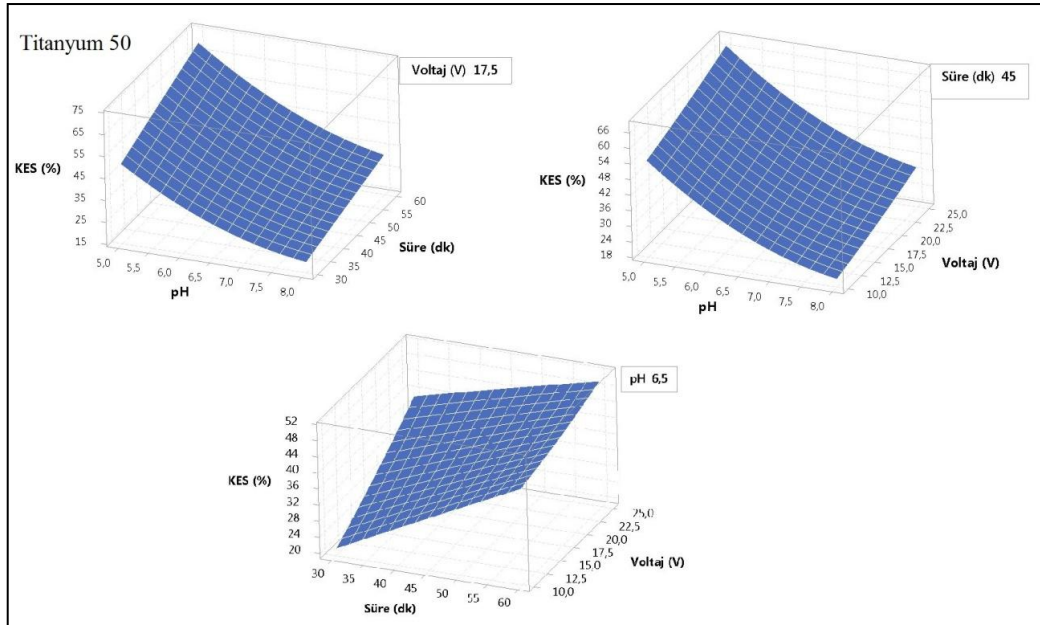
C_{KES} = Elektro-susuzlaştırma sonrasındaki KES (sn)

G_{KES} = Elektro-susuzlaştırma öncesindeki KES (sn)

Katot çapı 5 cm olan titanyum elektrot kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonu (R^2 değeri 0,90 olarak tespit edilmiş) kullanılarak hazırlanan grafiksel sonuçlar aşağıda verilmiştir (Denklem 4.2, Şekil 4.1). KES'nin yüzdesel değişimi incelendiğinde pH 5'te çalışıldığında sürenin 30. dakikadan 60. dakikaya kadar değişiminde KES değeri % 30 arttığı; voltajın ise 10 V'tan 25 V'a yükseltildiğinde sadece % 12 değerinde artmaya neden olduğu görüşmüştür. pH değerinin asidikten başlayarak bazik değere kadar arttırıldığında ise süre ve voltajın olumlu etki yaptığı ancak KES yüzdesel değişimin üzerinde yaklaşık % 20 'den fazla etkilemediği görülmüştür.

- 5 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,73$)

$$\text{KES (\%)} = 137 - 40,1 \cdot X_1 + 1,48 \cdot X_2 + 1,74 \cdot X_3 + 2,48 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0004 \cdot X_2 \cdot X_2 + 0,0112 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,071 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,026 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0245 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.2}$$



Şekil 4.1. Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm)

Ham evsel atık çamur pH'nın ortamları 6,83 olduğu düşünüldüğünde pH 6,5 sabit pH değerinde yapılan çalışmaların incelenmesi yararlı olacaktır. Sabit pH 6,5 değerinde voltaj ve sürenin arttırılmasının KES değerini etkili şekilde düşürerek (% 52) su verme özelliklerini ortaya koyan KES değerinin yaklaşık yarı yarıya azaldığı gözlenmiştir.

Sonuç olarak evsel atıksu arıtma çamurlarının elektro-susuzlaştırma performansının belirlenmesinde ham çamurun pH değeri ile çalışılırsa sistemde düşük voltaj değerleri ile çalışılabileceği ve ekonomik değerler sağlanacağı ancak etkili verim için işlem süresinin 60 dakikadan az olmaması gerektiği tespit edilmiştir.

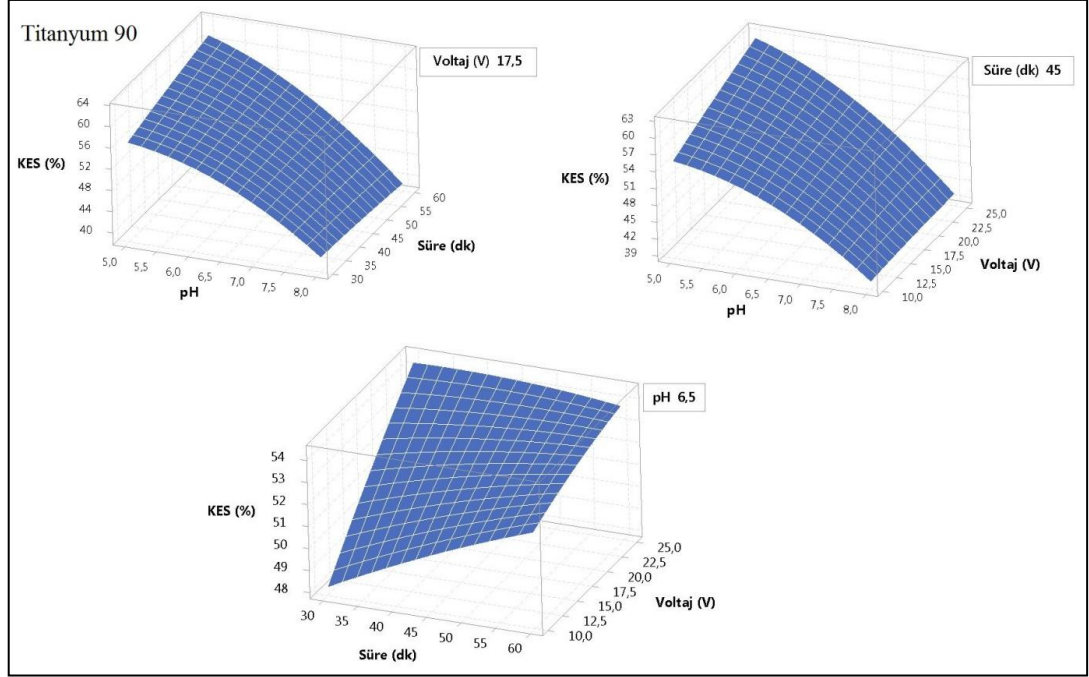
9 cm çapında katot titanyum elektrot kullanıldığında ise anot ve katot arasında mesafe 2,3 cm'ye düştüğünden mesafe azalmasının sistem verimini nasıl etkilediği tespit edilmeye çalışılmıştır.

İstatistiksel denklem ile oluşturulan grafikler içlerinde incelendiğinde ise asidik pH değerlerinin 5 cm çapında elektrot kullanılarak yapılan deneysel sonuçlara benzer olarak sistem verimini olumlu etkilediği ve en yüksek KES değeri azalma yüzdesinin (% 64) asidik pH değerlerinde elde edildiği gözlenmiştir (Denklem 4.3).

Ham çamur pH değeri dikkate alındığında ise işlem süresinin 30. dakikadan 60. dakikaya arttırılması ile KES değeri % 3 (10 volt için) değiştirdiği; voltajın ise 10 volttan 25 volta arttırıldığında ise % 6 (30 dakika için) değiştirdiği görülmüştür.

- 9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,86$, düzeltilmiş $R^2=0,61$)

$$\text{KES (\%)} = -15 + 16 \cdot X_1 + 0,77 \cdot X_2 + 1,75 \cdot X_3 - 1,29 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,001 \cdot X_2 \cdot X_2 - 0,003 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,071 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,146 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0099 \cdot X_2 \cdot X_3, \dots \dots \dots \text{Denklem 4.3}$$



Şekil 4.2. Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm)

Sonuç olarak söylenebilir ki sistem verimini değiştirmek için 30 dakikada çalışıldığında 25 volt uygulanması sistem verimi üzerinde etkili olmadığı ekonomik olarak süre ve voltajın minimum seviyede tutulduğunda % 48 KES değerinin azaltılabileceği belirlenmiştir (Şekil 4.2.) Elektrot çapları karşılaştırıldığında ise başka bir deyişle anot ve katot arasındaki mesafe etkisi incelendiğinde mesafenin azalmasının sistemi olumlu etkilemediği hatta Titanyum 50 için maksimum KES azalması % 75, Titanyum 90 için maksimum KES azalmasının % 64 olduğu dikkate alındığında % 11'lik bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

TKM parametresinin giriş ve model reaktörün alt kısmından alınan sulu çamur arasındaki fark Denklem 4.4 ile yüzde olarak hesaplanarak Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 deki TKM giderim grafikleri oluşturulmuştur.

$$E_{TKM} = [(G_{TKM} - C_{TKM})/G_{TKM}] \times 100 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.4}$$

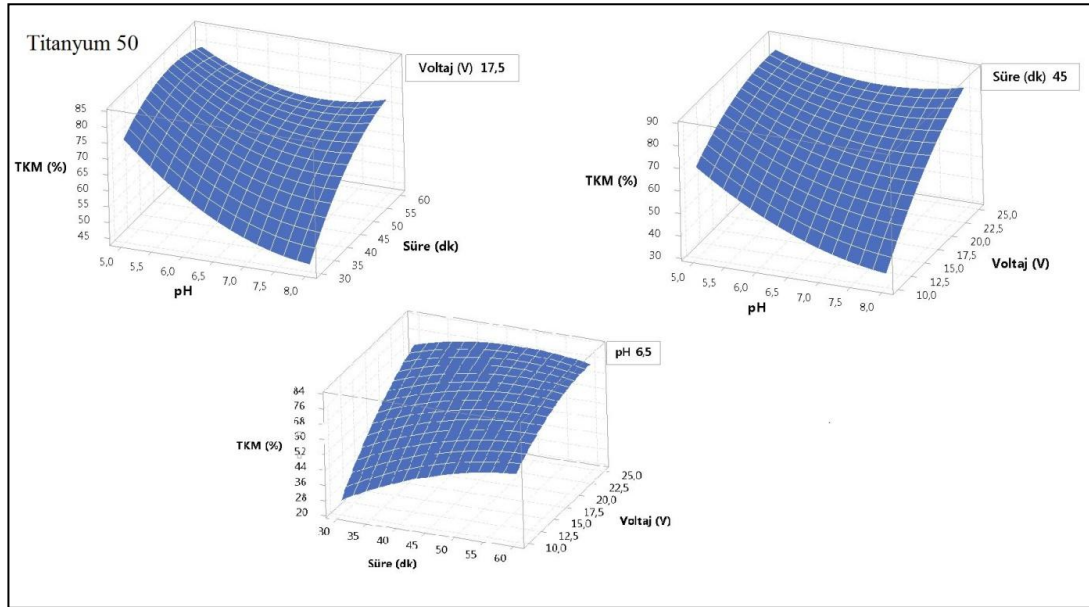
E_{TKM} = TKM giderim (%)

C_{TKM} = Elektro-susuzlaştırma sonrasındaki TKM (%)

G_{TKM} = Elektro-susuzlaştırma öncesindeki TKM (%)

- 5 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,87$, düzeltilmiş $R^2=0,64$)

$$\text{TKM (\%)} = 197 - 65,8 \cdot X_1 + 1,97 \cdot X_2 + 3,4 \cdot X_3 + 2,78 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,024 \cdot X_2 \cdot X_2 - 0,095 \cdot X_3 \cdot X_3 + 0,254 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,648 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,053 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.5}$$



Şekil 4.3. Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 5 cm)

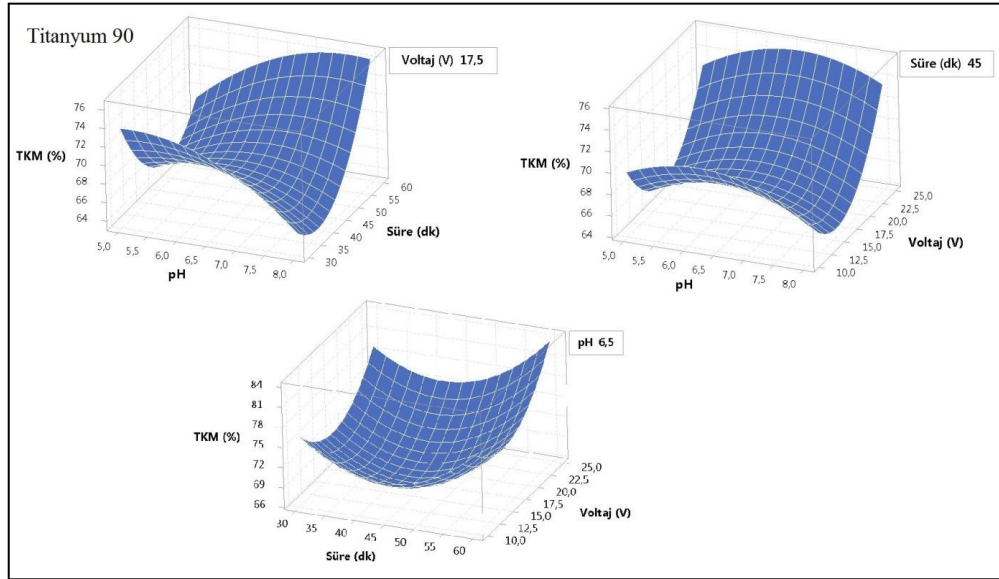
İstatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonu denklemi kullanılarak titanyum 5 cm elektrot çapı için asidik pH değerinde maksimum (% 90) verim elde edilebileceği görülmüştür (Denklem 4.5, Şekil 4.3).

KES parametresi değişimine benzer olarak asidik pH değerinde susuzlaştırma işleminin iyileştiği görülmüştür. Ham pH 6,5'te ise işletim süresinin ve uygulanan voltajın artmasının olumlu etkilediği görüşmüştür.

- 9 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,77$)

$$\text{TKM (\%)} = 162,8 + 4,64 \cdot X_1 - 3,5 \cdot X_2 - 4,07 \cdot X_3 - 1,056 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,02586 \cdot X_2 \cdot X_2$$

$$0,4136 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,047 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,409 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0322 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots\dots\dots \text{Denklem 4.6}$$



Şekil 4.4. Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 9 cm)

30 dakika işletim süresi uygulanmasında voltaj kademeli olarak 10 voltta 25 volta yükselmesinde TKM yüzdesel değişimi lineer olarak arttığı, 10 voltta TKM yüzde gideriminin % 25, 25 voltta ise % 84'e yükseldiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak ham çamurun pH değerini değiştirmeden işletim suresi olarak 30 dakika ve 25 volt değerleri uygulandığında etkili bir susuzlaştırma işleminin gerçekleştirilebileceği tespit edilmiştir.

Deneysel alışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış çamurun viskozite değerleri ve Denklem 4.7 kullanılarak Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında katot çapı 5 ve 9 cm'lik titanyum deneyleri için viskozite düşmesi grafikleri oluşturulmuştur (şekil 4.5, şekil 4.6)

$$E_{\mu} = \left[(C_{\mu} - G_{\mu}) / C_{\mu} \right] \times 100 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.7}$$

E_{μ} = Viskozite düşmesi (%)

C_{μ} = Elektro-susuzlaştırma sonrası viskozite, cP

G_{μ} = Elektro-susuzlaştırma öncesindeki viskozite, cP

* 1cp= 0,001 Ns/m²

Yuksek voltaj ve uzun işletme suresinin uygulandığı etaplarda; giriş çamuru ile çıkış çamuru sıcaklıkları arasında fark oluştuğu gozlemlenmiştir. Viskozitenin sıcaklık parametresi ile ters orantılı olduğundan sıcaklık artışının viskozite değerinin düşrdğ dikkate alınarak, viskozite 25±1° C olacak şekilde sıcaklık değeri tm çamur numunelerinde sabit tutularak belirlenmiştir.

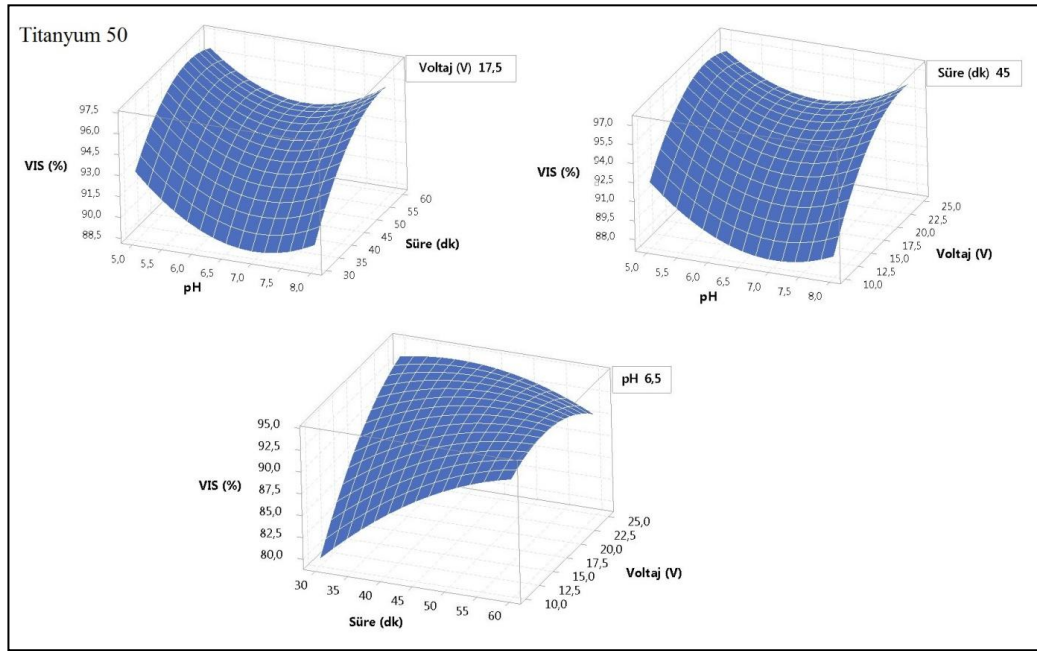
Yapılan deneysel çalışmalarda istatistiksel dizayna gre oluşturulmuş cevap fonksiyonu (R² değeri 0,82 olarak tespit edilmiş) kullanılarak hazırlanan grafiksel sonuç verilmiştir (Denklem 4.8, şekil 4.5). 5 cm'lik katot elektrot kullanıldığı çalışma sonucunda sabit 17,5 V'ta işletme suresindeki artış çıkış çamurunun daha

akışkan hal almasını ve ham numuneye göre pH 5 değerinde 60. dakikada % 95 oranında viskozite değerinin düştüğü görülmüştür.

- 5 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,82$, düzeltilmiş $R^2=0,50$)

$$\mu (\%) = 90,7 - 18,1 \cdot X_1 + 1,365 \cdot X_2 + 2,94 \cdot X_3 + 1,118 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,00873 \cdot X_2 \cdot X_2 -$$

$$0,0416 \cdot X_3 \cdot X_3 + 0,0295 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,075 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,035 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.8}$$

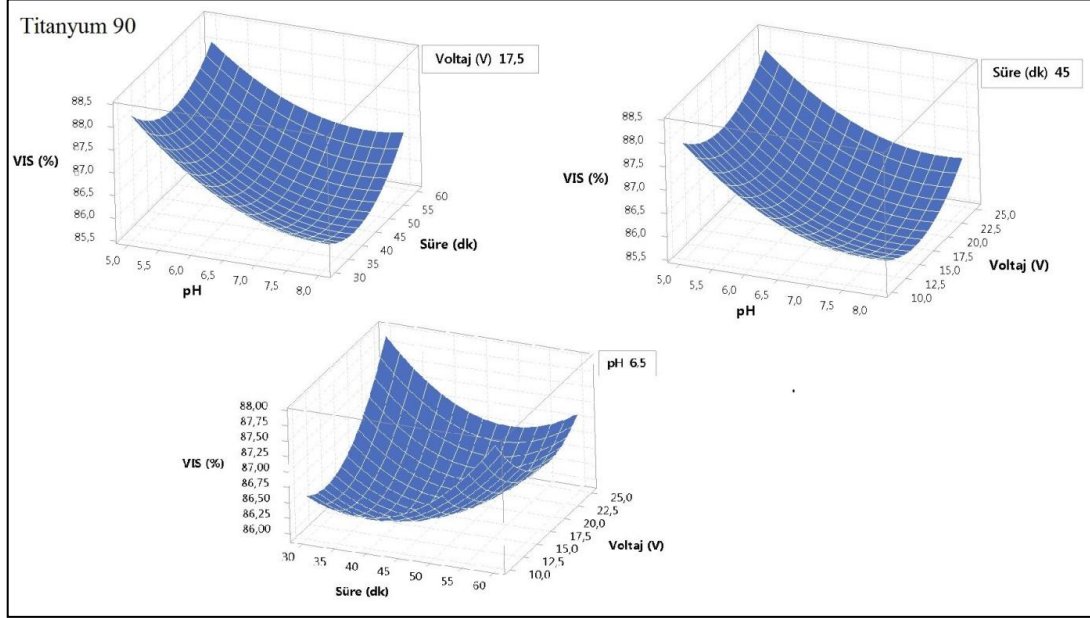


Şekil 4.5. Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm)

Ham çamurun pH değeri ile çalışıldığında; 30. dakikada artan voltaj değerlerinin çamura yüksek oranda akışkan özelliği kazandırarak viskozite azalma oranının lineer olarak yükseldiği, oysa 60 dakikalık işletim süresi uygulamasında ise voltaj artışının sistem verimine önemli bir katkı sağlamadığı hatta en düşük voltaj uygulaması (10 V) ile en yüksek voltaj uygulaması (25 V) arasında % 2,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

- 9 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,98$, düzeltilmiş $R^2=0,96$)

$$\mu (\%) = 108,71 - 4,18 \cdot X_1 - 0,2578 \cdot X_2 - 0,2034 \cdot X_3 + 0,238 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0032 \cdot X_2 \cdot X_2 + 0,0116 \cdot X_3 \cdot X_3 + 0,0094 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0043 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0046 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.9}$$



Şekil 4.6. Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm)

Elektrotlar arasındaki mesafe azalmasının viskozite düşmesi verimi üzerindeki etkiyi incelemek amacıyla 9 cm katot elektrot çapı kullanılarak yürütülen deneysel çalışmada elde edilen cevap fonksiyonu denklemi ve hazırlanan grafikler sunulmuştur (Denklem 4.9, Şekil 4.6). 17,5 volt değerinde viskozite değerinin yüzdesel değişimi incelendiğinde artan işletme süresinin verime büyük bir katkı sağlamadığı, pH 8 değerinden pH 5 değerine kadar değişiminde verimin % 2’lik bir artış gösterdiği görülmüştür.

Sabit 45 dakika işletme süresi uygulanarak pH ve voltaj değişimleri karşılaştırıldığında, bazik pH’larda asidik pH’lara gidildikçe verimin arttığı, voltaj

değerlerindeki değişimlerin verim üzerinde önemli bir değişim sağlamadığı gözlemlenmiştir. Sabit pH 6,5, 25 volt değerinde çalışıldığında 30. dakikada maksimum seviyede (% 88) olan viskozite düşmesi veriminin 60 dakikalık işletme süresi boyunca azaldığı (% 87), 10 volt değerinde çalışıldığında ise 30. dakikadan 60. dakikaya kadar değişimde sürenin çamurun akışkanlık özelliğine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak elektro- susuzlaştırma işlemi için model reaktörün kullanılması halinde maksimum susuzlaştırma oranının her iki katot elektrot için de, sabit pH 6,5 değerinde 30 dakikalık işletme süresi boyunca sisteme 25 volt uygulandığında elde edileceği tespit edilmiştir.

Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış çamurlarının üst suyundan alınan örneklerdeki ÇKOİ miktarları ve Denklem 4.10 kullanılarak katot çapı 5 ve 9 cm'lik titanyum deneyleri için Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonları ve ÇKOİ salınım grafikleri oluşturulmuştur (Denklem 4.11, Denklem 4.12, Şekil 4.7, Şekil 4.8)

$$E_{\text{ÇKOİ}} = [(G_{\text{KOİ}} - \text{Ç}_{\text{KOİ}}) / G_{\text{KOİ}}] \times 100 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.10}$$

$$E_{\text{ÇKOİ}} = \text{ÇKOİ giderimi (\%)}$$

$$\text{Ç}_{\text{KOİ}} = \text{Elektro-susuzlaştırma sonrasındaki ÇKOİ (\%)}$$

$$G_{\text{KOİ}} = \text{Elektro-susuzlaştırma öncesindeki ÇKOİ (\%)}$$

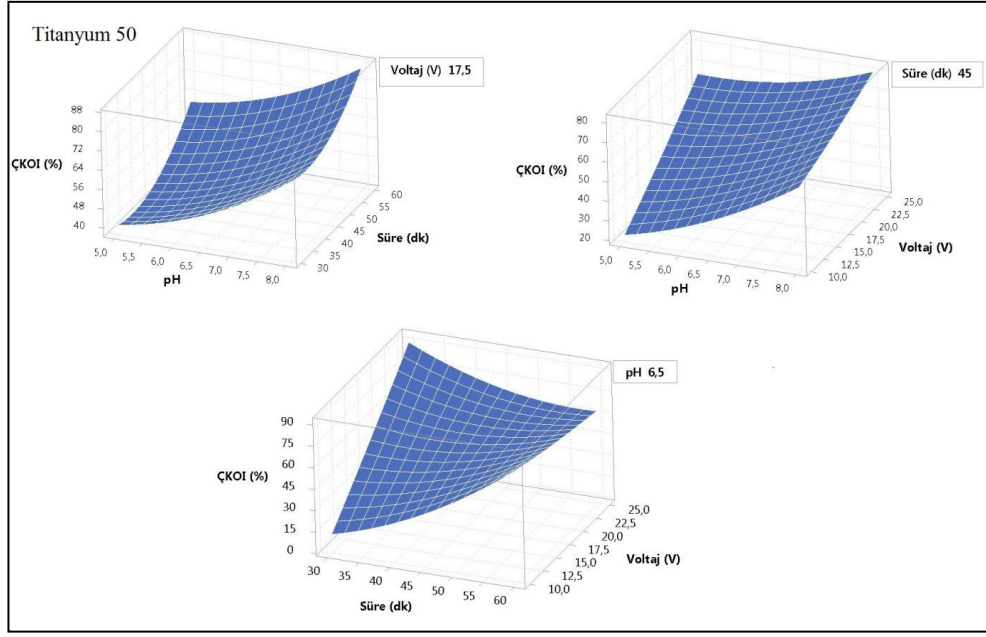
5 cm katot elektrot ile evsel arıtma çamurlarındaki elektro-susuzlaştırma prosesi sonucunda ÇKOİ parametresinin giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark yüzde

olarak hesaplandığında pH 6,5 değerinde maksimum % 90 değerine ulaşabildiği görülmüştür.

- 5 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,82$, düzeltilmiş $R^2=0,49$)

$$\text{ÇKOİ (\%)} = -136 - 7,9 \cdot X_1 + 1,17 \cdot X_2 + 14,14 \cdot X_3 + 2,12 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,037 \cdot X_2 \cdot X_2 +$$

$$0,019 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,036 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,515 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,207 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.11}$$



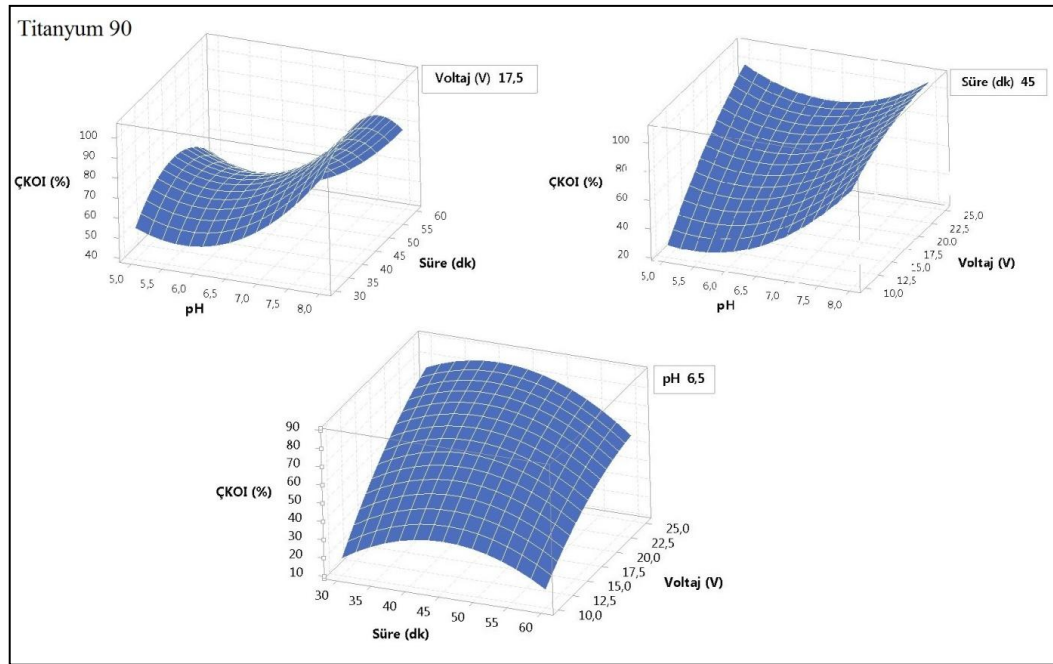
Şekil 4.7. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) değişiminin incelenmesi
(katot çapı 5 cm)

Asidik ve bazik pH'larda artan işletim süresinin ÇKOİ miktarındaki azalışı desteklediği, pH 6,5'de çalışıldığında sürenin 30. dakikadan 60. dakikaya kadar değişiminde ÇKOİ değeri % 75 arttığı, voltajın ise 10 V'dan 25 V'a yükseltildiğinde sadece % 45 değerinde artmasına neden olduğu görülmüştür. 45 dakikalık işletme süresi boyunca pH 5'de çalışıldığında voltajın 10 V'dan 25 V'a kadarki değişiminde ÇKOİ değeri % 60 arttığı, pH 8'de çalışıldığında ise bu artışın % 45 civarında olduğu tespit edilmiştir.

Ham evsel atık çamur pH'ının ortalama 6,83 olduğu düşünüldüğünde sabit pH 6,5 değerinde çalışılırsa 25 volt ve 30 dakikalık işletme süresi sonucunda % 90 civarında bir ÇKOİ artışı elde edilebilir. 9 cm katot çapı uygulamasında 5 cm katot çapı uygulamasına göre maksimum ÇKOİ yüzdesinde dikkate değer bir fark oluşmadığı gözlemlenmiştir.

- 9 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,71$)

$$\begin{aligned} \text{ÇKOİ (\%)} = & -68 - 78,8 \cdot X_1 + 8,41 \cdot X_2 + 16,58 \cdot X_3 + 8,89 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0782 \cdot X_2 \cdot X_2 - \\ & 0,120 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,138 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,104 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0453 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.12} \end{aligned}$$



Şekil 4.8. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin (ÇKOİ) incelenmesi
(katot çapı 9 cm)

5 cm çaplı katot elektrot ile çalışıldığında asidik pH 'da gözlemlenen işletme süresi ile doğru orantılı artan ÇKOİ miktarı, elektrotlar arası mesafe 2,3 cm'ye düşürüldüğünde pH 5'de işletme süresi 30. dakikadan 45. dakikaya kadar geçen

sürede azalarak arttığı ve % 80 oranına çıktığı, 45. dakikadan 60. dakikaya gelindiğinde ise azalan bir yol izleyerek % 50 seviyesine gerilediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.8). Süre ve voltajın ÇKOİ miktarındaki değişime katkısının incelenmesi amacıyla sistem sabit pH 6,5'da çalıştırıldığında artan voltaj değerlerinin ÇKOİ miktarını arttırdığı, sisteme uygulanan tüm işletme sürelerinde voltaj ile bu miktarın lineer olarak arttığı, maksimum ÇKOİ oranının 45.dakikada 25 volt değerinde tespit edilmiştir.

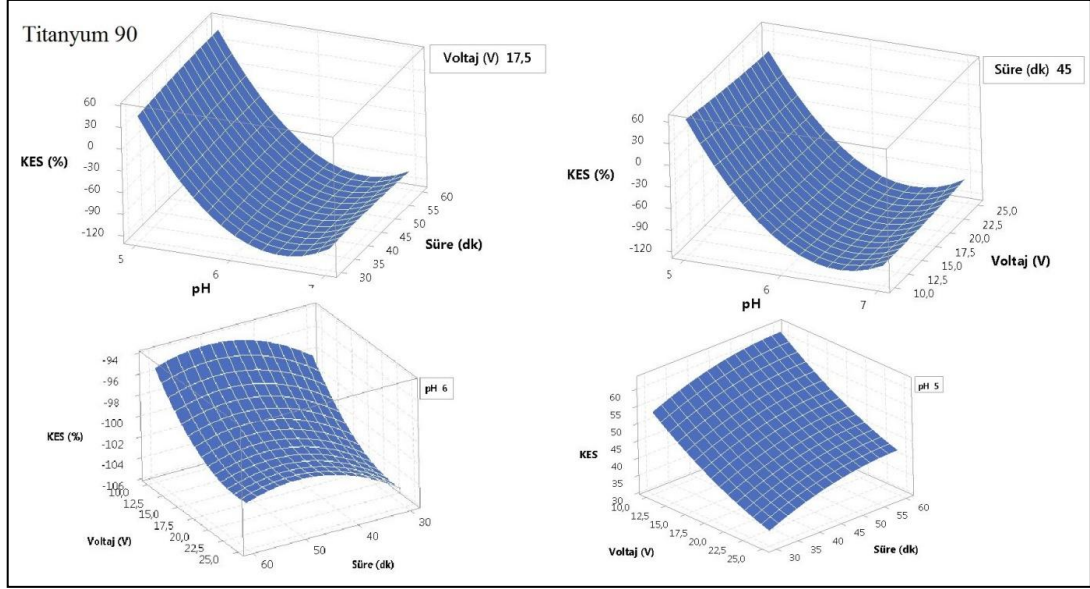
4.2. Tavuk Sektörü Arıtma Çamuru İle Yapılan Çalışmalar

Beyaz et sektörü çalışmalarında 5 cm katot çapı kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların çamur üzerinde susuzlaştırma etkisinin olmadığı belirlenmiştir. 9 cm çapındaki katot elektrot kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların sonucunda oluşturulan cevap fonksiyonu denklemleri ve grafikleri aşağıda verilmiştir. Buna ek olarak evsel nitelikli arıtma çamurlarında çalışılan pH 5-9 aralığı, beyaz et sektöründe değiştirilerek 5-7 olarak belirlenmiştir. Bu durumun en önemli belirleyicisi pH 8 deki susuzlaştırma performansının kötüleşmesi ve reaktörün yüksek pH değerlerinde köpürerek işletimin mümkün olmayışdır.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış KES süresi değerleri ve Bölüm 4.1'de verilen $E_{(KES)}$ (%) denklemi kullanılarak katot çapı 9 cm'lik titanyum deneyi için KES giderim verimi grafiği Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında oluşturulmuştur (Şekil 4.9).

- 9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,99$, düzeltilmiş $R^2=0,99$)

$$\text{KES (\%)} = 3040 - 967,8 \cdot X_1 + 2,08 \cdot X_2 - 6,92 \cdot X_3 + 73,95 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0092 \cdot X_2 \cdot X_2 + 0,0367 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,193 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,867 \cdot X_1 \cdot X_3 \dots \text{Denklem 4.14}$$



Şekil 4.9. Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm)

Katot çapı olarak 9 cm titanyum elektrot kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonları ve hazırlanan grafiksel sonuçlar aşağıda sunulmuştur (Denklem 4.14, Şekil 4.9). Kapiler emme süresinin yüzdesel değişimi incelendiğinde bazik pH değerlerinde çalışılmanın sistem verimi üzerinde olumsuz etki yaptığı, işletme süresinin ve sisteme verilen voltaj miktarının verim üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Sabit pH 6 değerinde etkili verim sağlanamadığı görüldüğünden KES'nin azaltılması için pH 5 değeri sabit alınarak hazırlanan istatistiksel değerlendirme

grafiğinde görüldüğü gibi işletme süresinin arttırılması; 10 V değerinde çalışılırsa % 7,5 oranında, 25 V değerinde çalışılır ise % 10 oranında bir verim artışına neden olacağı sonucuna varılmıştır.

TKM parametresinin giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark Bölüm 4.1'de verilen $E_{(TKM)}$ (%) denklemi kullanılarak yüzde olarak hesaplanmış, Şekil 4.10'da ki TKM giderim grafiği oluşturulmuştur.

9 cm çapında katot elektrot kullanılarak TKM parametresinin giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark yüzdelerinin belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalarda istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyon denklemleri (Denklem 4.16) ve hazırlanan grafiksel sonuçlar Şekil 4.10'da verilmiştir. KES parametresi değişimine benzer olarak bazik pH değerlerinde susuzlaştırma işleminin iyileştiği görülmüştür.

İşletme süresinin susuzlaştırma performansına etkisi pH değerinin etkisinden daha az olduğu, 30. dakikadan 60. dakikaya kadarki değişimde pH 5 ve pH 7 değerinde TKM giderim verimi % 16 arttığı görülmüştür. 45 dakikalık işletme süresi boyunca bazik pH 7 değerinde voltaj değişimlerinin verim üzerine etkisinin kayda değer olmamasına rağmen asidik pH 5 değerinde 25 V'dan 10 V 'a kadarki değişimde susuzlaştırma verimi % 35 artmıştır.

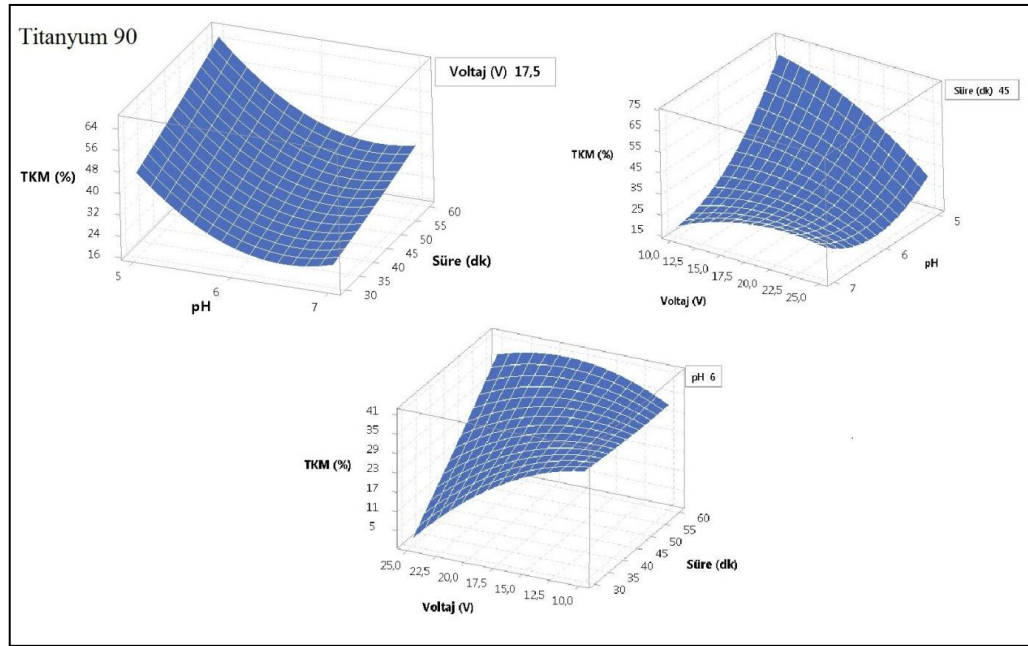
Fakat sabit pH 6 da ise yüksek voltaj değerinde (25 V) işletme süresinin artışıyla birlikte verimin % 41 seviyesine çıktığı, voltaj miktarı 10 V'a doğru

azalması ile birlikte işletme süresinin yaratmış olduğu bu verim artışının azalarak 25 voltta etkisini tamamen kaybettiği görülmüştür.

- 9 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,71$)

$$\text{TKM (\%)} = 690 - 173,5 \cdot X_1 - 0,47 \cdot X_2 - 10,85 \cdot X_3 + 11,42 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0022 \cdot X_2 \cdot X_2 -$$

$$0,1041 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,101 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,607 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0816 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.16}$$



Şekil 4.10. Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 9 cm)

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış çamurun viskozite değerleri ve Bölüm 4.1'de verilen E_μ (%) denklemi kullanılarak Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında katot çapı 9 cm'lik titanyum deneyi için viskozite düşme verimi grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4.11)

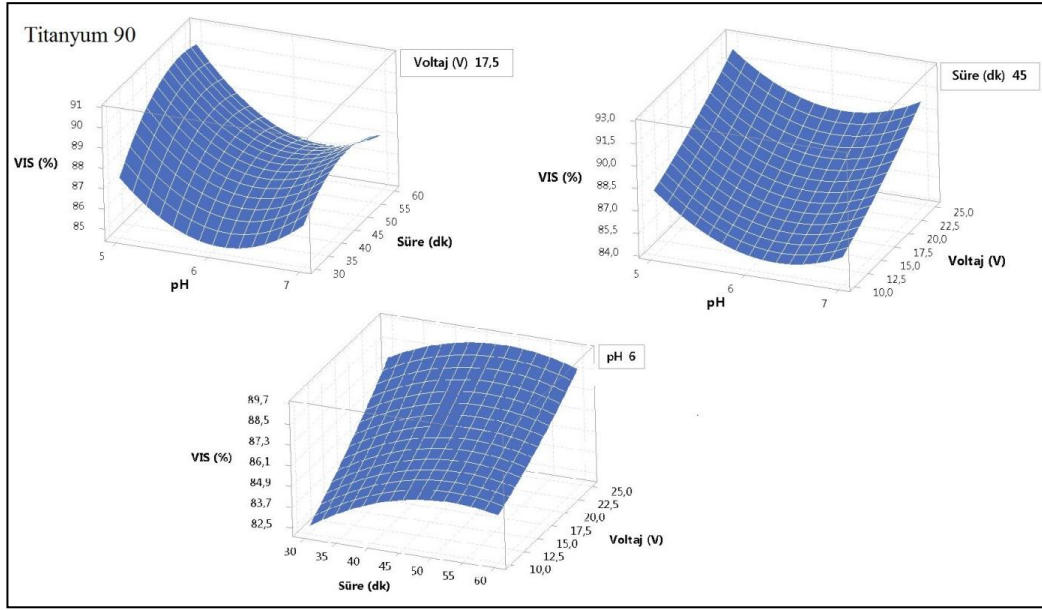
Titanyum 9 cm katot elektrot kullanılarak yürütülen elektro-susuzlaştırma yönteminde istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonu denklemleri

(Denklem 4.18) ve kullanılarak hazırlanan grafiksel sonuçlar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4.11). Viskozite düşmesi yüzdesel değişimi sabit 17,5 V'da incelendiğinde işletme süresinde ki değişim 30. dakikadan 60. dakikaya kadar gelindiğinde, pH 5 'de % 4 oranında, pH 8 'de ise % 2 oranında viskozite düşmesin de bir artış sağlandığı gözlemlenmiştir.

- 9 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,84$, düzeltilmiş $R^2=0,71$)

$$\mu (\%) = 145 - 25,9 * X_1 + 0,8 * X_2 + 0,065 * X_3 + 2,16 * X_1 * X_1 - 0,00533 * X_2 * X_2 +$$

$$0,0049 * X_3 * X_3 - 0,0356 * X_1 * X_2 + 0,033 * X_1 * X_3 - 0,00289 * X_2 * X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.18}$$



Şekil 4.11. Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm)

Genel olarak artan işletme süresi ve voltaj değerinin viskozite düşmesi veriminde lineer bir artış yarattığı, sabit 45 dakikalık işletme süresinde maksimum giderim veriminin (% 93) pH 5, 25 voltta gözlemlenmiştir. Fakat daha ekonomik bir işletme şartları oluşturulmak istenildiğinde pH 5 değerinde 10 volt verilerek

gerçekleştirilen deneysel çalışmada % 3 oranında düşüş yaşanarak % 89'luk bir verim elde edilebileceği tespit edilmiştir.

Beyaz et sektörü arıtma çamuru pH değeri ortalama 5,72 olduğu göz önüne alındığında, sabit pH 6 değerinde çalışılarak elde edilen grafiğin incelenmesi yararlı olacaktır. Sonuç olarak pH 6 değerinde çalışılırsa sistemde düşük işlet süresinde 25 volt değerinde ekonomik değerler sağlanabileceği ancak etkin verim sağlanabilmesi için işletme süresinin 45 dakikadan az olmaması gerektiği tespit edilmiştir.

4.3. Patates Endüstrisi Arıtma Çamuru İle Yapılan Çalışmalar

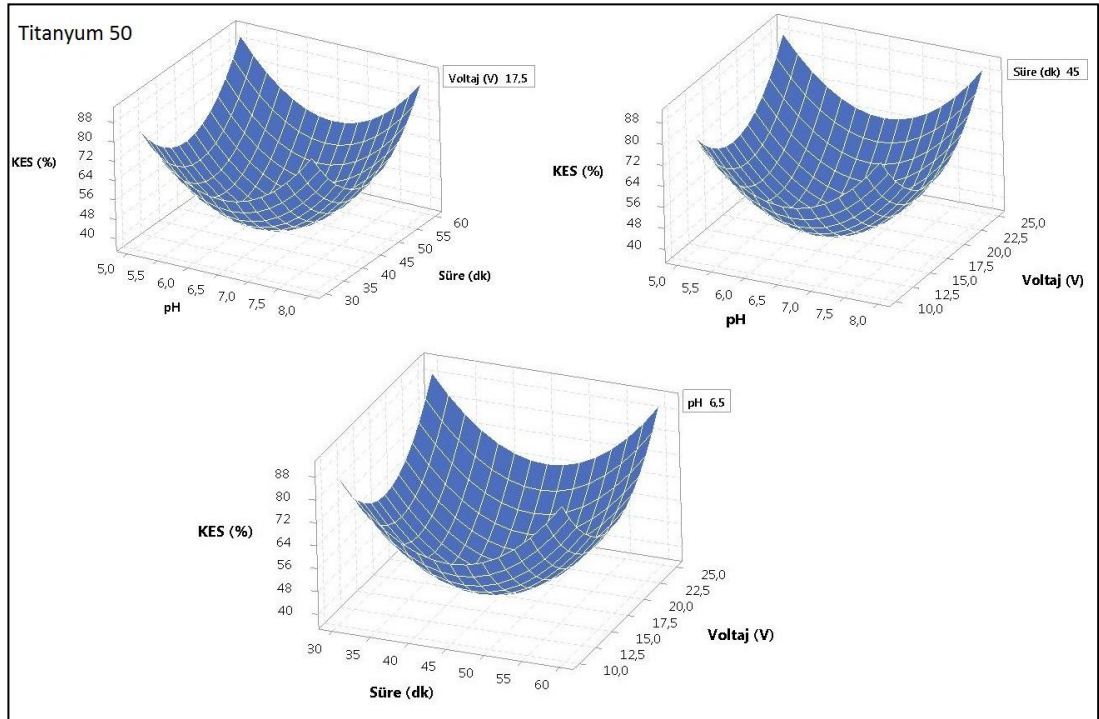
Patates cipsi endüstrisinde; patatesin, hazır gıda sektöründe kullanılmak amacıyla soyulmakta, doğranmakta, ısı muamele görmekte ve dondurulma yapılmaktadır. Bu işlemler esnasında üretilen atık suyun arıtımı sonucu oluşan atık çamurun özellikleri Bölüm 3.2'de bulunan Tablo 3.3'de sunulmuştur. Katot çapı 5 ve 9 cm titanyum elektrotlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların sonucunda Box-Behnken yöntemine oluşturulan cevap fonksiyonu denklemleri ve parametre grafikleri aşağıda verilmiştir.

Elektro-susuzlaştırma öncesi giriş ve işlem sonrası çıkış çamurlarındaki KES süresi değerleri ve Bölüm 4.1'de verilen $E_{(KES)}$ (%) denklemi kullanılarak Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonları ve KES giderim verimi grafikleri oluşturulmuştur (Denklemler 4.20, Denklem 4.21, Şekil 4.12, Şekil 4.13)

Katot çapı olarak 5 cm titanyum elektrot kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonları ve hazırlanan grafiksel sonuçlar aşağıda sunulmuştur (Denklem 4.22, Şekil 4.12). Kapiler emme süresinin yüzdesel değişimi incelendiğinde hem bazik pH değerlerinde hem de asidik pH değerlerinde çalışılabileceği, ham atık çamurun pH değeriyle çalışılması halinde maksimum elde edilebilecek % 88'lik verimden % 40 daha az verim elde edilebileceği görülmektedir.

- 5 cm katot çapı için; KES ($R^2=99,49$, düzeltilmiş $R^2=98,57$)

$$\text{KES (\%)} = 884,7 - 146,59 \cdot X_1 - 10,188 \cdot X_2 - 16,22 \cdot X_3 + 11,280 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,11619 \cdot X_2 \cdot X_2 + 0,4486 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,0387 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,087 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0006 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.20}$$



Şekil 4.12. Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm)

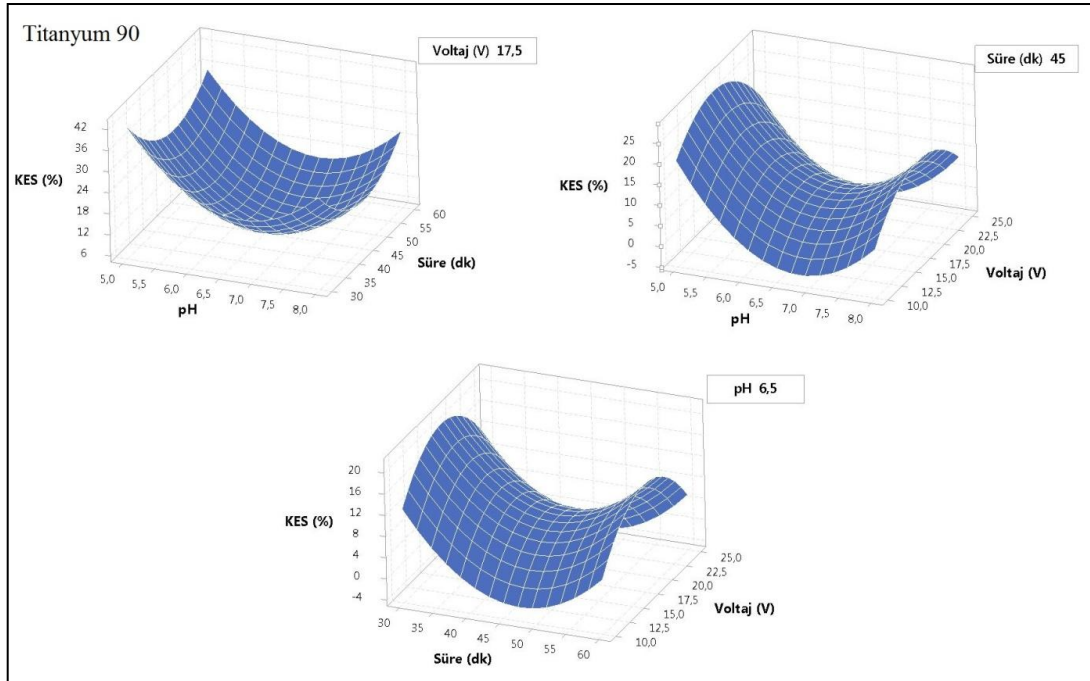
Şekil 4.12'deki üç grafik genellenirse işletme süresi olarak 45 dakika, voltaj olarak 17,5 ve sistem pH'ı olarak 6,5 değerlerinin verimin en kötü olduğu noktalardaki değerler olduğunu sonucunu çıkarabiliriz.

Sonuç olarak patates endüstrisi atık çamurunun pH'ı asidik veya bazik pH'larda çalışılması halinde ekonomik bir işletme şartı oluşturulması için 10 V 30 dakika değerlerinde % 80 'e yakın KES'de bir azalış elde edilebileceği tespit edilmiştir.

- 9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,76$, düzeltilmiş $R^2=0,34$)

$$\text{KES (\%)} = 409 - 96,9 \cdot X_1 - 5,52 \cdot X_2 + 4,86 \cdot X_3 + 6,95 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0496 \cdot X_2 \cdot X_2 -$$

$$0,177 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,039 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,149 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,006 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.21}$$



Şekil 4.13. Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm)

Katot çapı 9 cm olan titanyum elektrot ile yapılan deneysel çalışmalarda KES parametresi için giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark yüzdeleri incelendiğinde evsel arıtma çamur çamurlarından alınan verimden daha düşük bir verim alındığı görülmüştür (Şekil 4.13).

Asidik ve bazik pH değerlerinin sistem verimi üzerinde olumlu sonuçlar yarattığı bununla birlikte işletme süresi 30. dakikadan 45. dakikaya kadarki değişiminde artan işletme süresinin KES yüzde giderim verimini düşürdüğü, 45. dakikadan itibaren yeniden artmasına sebep gözlemlenmiştir.

Sistem asidik pH 5 de 30. dakika süre boyunca sabit 17,5 V'da çalıştırıldığında maksimum verimin elde edildiği % 42 oranında bir KES değerinde azalışın olduğu görülürken, patates endüstri atık ham çamurun ortalama pH değeri 6,95 dikkate alındığında ham atık çamur pH ile çalışılarak elde edilebilecek maksimum verimin sabit 17,5 V'da 30 dakikalık işletme süresinde % 20 civarlarında olacağı ve sonuç olarak sisteme verilecek çamurun önceden pH ayarlamasına maruz kalması gerektiği gözlemlenmiştir.

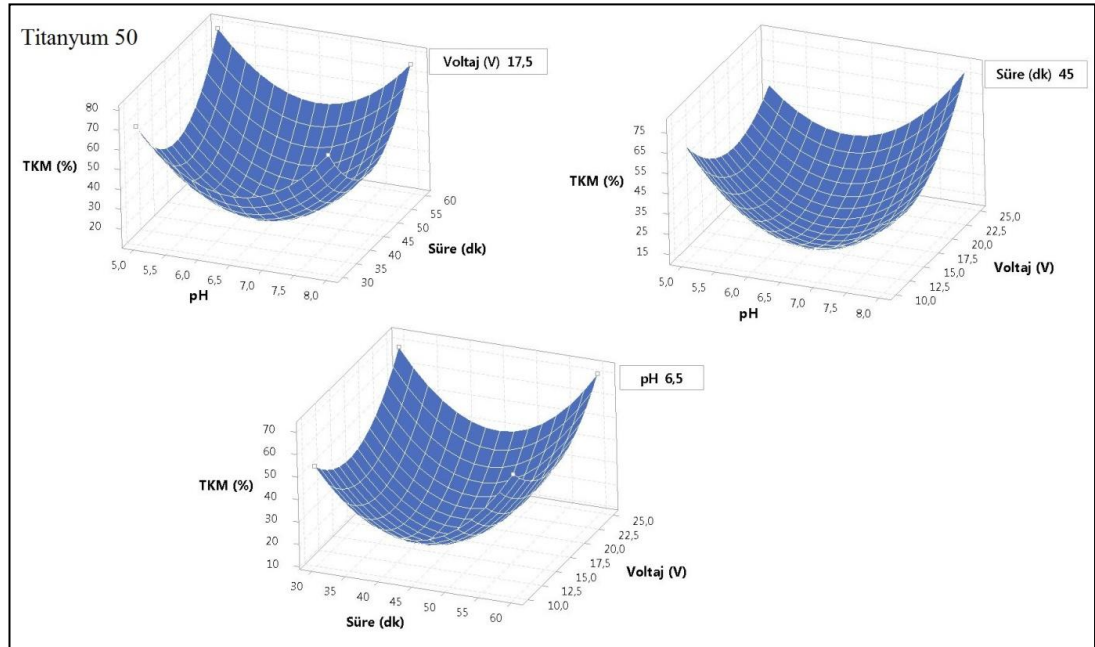
TKM parametresinin giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark Bölüm 4.1'de verilen $E_{(TKM)}$ (%) denklemi ile hesaplanarak istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonları (Denklem 4.23, Denklem 4.24) ve Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 deki TKM giderim grafikleri oluşturulmuştur.

TKM parametresinin giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark yüzdesel olarak hesaplandığı, katot çapı 5 cm titanyum elektrotun kullanıldığı deneysel etaplardan

elde edilen sonuçlara göre maksimum % 80 çamurun susuzlaştırılabileceği görülmüştür. Şekil 4.14'de bakıldığında voltaj 17,5 V'a sabit tutularak yürütülen KES parametresi değişimine benzer olarak pH 5 ve pH 8 değerlerinde işletme süresi 30.dakikada ki ve 60.dakikadaki TKM giderim verimleri maksimum seviyelerde olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak sisteme verilen voltaj değerlerinin verime nasıl etkilediğini anlamak amacıyla pH değeri 6,5'da sabit tutularak yapılan deneylerde; 30 dakikalık işletme süresi boyunca artan voltaj değerleri ile verim 10 V'dan 17,5 V'a kadar azalan bir şekilde artmış ve bu noktadan sonra 25 V'a kadar lineer bir şekilde artmaya devam ederek % 70 verime ulaşmıştır.

- 5 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,85$, düzeltilmiş $R^2=0,60$)

$$\text{TKM (\%)} = 1003 - 180,8 \cdot X_1 - 11,75 \cdot X_2 - 16,79 \cdot X_3 + 12,64 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,1394 \cdot X_2 \cdot X_2 + 0,333 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,041 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,033 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0186 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.23}$$



Şekil 4.14. Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 5 cm)

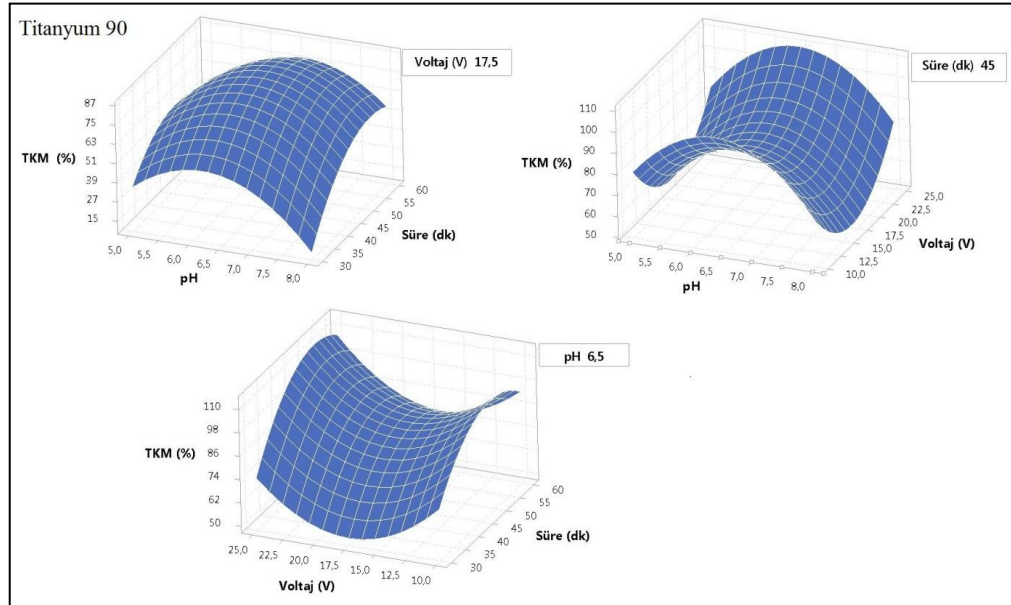
Sabit pH 6,5 değerinde 60 dakikalık işletme süresine bakıldığında ise artan voltaj değerleri ile verim 10 V'dan 17,5 V'a kadar azalan bir şekilde artmış ve bu noktadan sonra 25 V'a kadar lineer bir şekilde artmaya devam ederek pH 5'deki gibi % 70 verime ulaştığını görmekteyiz.

Sonuç olarak patates endüstrisi arıtma çamurlarının elektro-susuzlaştırma performansının belirlenmesinde ham çamurun pH değeri (pH 6,95) ile çalışarak 10 V değerinde ve 60 dakikalık işletme süresinde en ekonomik değerlerin oluşturulabileceği tespit edilmiştir.

- 9 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,77$)

$$\text{TKM (\%)} = -362 + 136,7 \cdot X_1 + 5,54 \cdot X_2 - 16,22 \cdot X_3 - 12,18 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,0842 \cdot X_2 \cdot X_2 +$$

$$0,409 \cdot X_3 \cdot X_3 + 0,372 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,157 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,00157 \cdot X_2 \cdot X_3, \dots \dots \dots \text{Denklem 4.24}$$



Şekil 4.15. Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 9 cm)

9 cm çapında katot elektrotlar kullanıldığında ise anot ve katot arasındaki mesafenin ksalmasından verimin nasıl etkileneceği aşağıda incelenmiştir. Buna göre oluşturulan grafikler incelendiğinde, 5 cm çapında elektrot kullanılarak yapılan deneysel sonuçların tam tersine pH 5 ve pH 8 değerlerinde işletme süresi 30. dakikada ki ve 60. dakikada ki TKM giderim verimleri minimum seviyelerde olduğu grlmektedir (şekil 4.15).

Sistem sabit pH 6,5 değerinde çalıştırıldığında artan işletme süresinin sisteme olumlu yaptığı, sisteme 25 V verilerek çalışıldığında sürenin 30. dakikadan 60. dakikaya kadar değişiminde TKM değer i % 24 arttığı; sisteme 10 V verildiğinde ise 30. dakikadan 60. dakikaya kadar değişiminde TKM değer i % 38 arttığı görülmüştür.

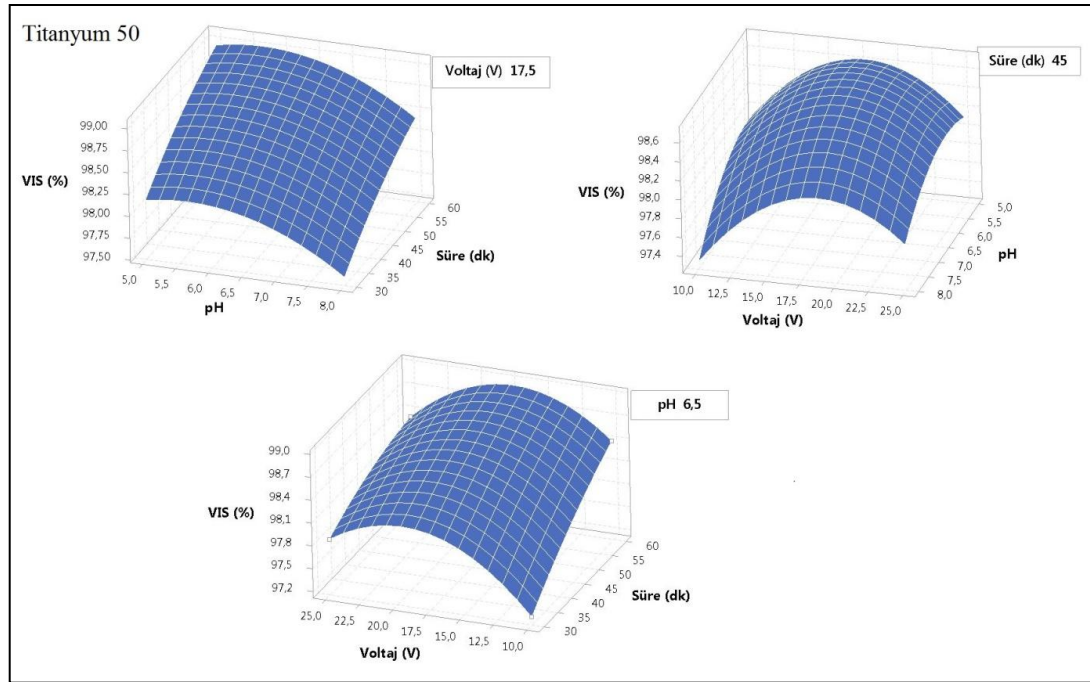
Buradan da anlaşılacağı gibi sabit 6,5 pH değerinde alışıldığın sisteme verilen voltaj 10 V seçilip işletme süresi 60 dakika olarak belirlendiğinde hem daha ekonomik hem daha iyi bir verim elde edilebilecektir. İşletme süresi 45 dakika sabit tutularak yapılan, pH ve voltaj değerlerinin verimi nasıl etkilediğini incelediğinde, verimin en yüksek değerler ulaştığı pH değerinin ham çamurun pH değerine yakın 6,5 değer i olduğu ve 10 V veya 25 V'larının da bu pozitifliğe en çok etki ettikleri nokta olduğunu görülmüştür.

Sonuç olarak ham çamur pH değer i ile çalışılıp ekonomik değerler elde edilmek istendiğinde sisteme verilebilecek voltaj değerinin 10 V olması gerektiği ki değerler ile maksimum % 90 verimin elde edileceği, fakat 25 V 'da da çalışıldığında ise verimin % 110 'lara kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir.

Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış çamurun viskozite değerleri ve $E\mu$ (%) denklemi kullanılarak Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonları ve viskozite düşme verimi grafikleri oluşturulmuştur (Denklem 4.26, Denklem 4.27, Şekil 4.16, Şekil 4.17)

- 5 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,86$, düzeltilmiş $R^2=0,62$)

$$\mu (\%) = 89,17 + 1,15 * X_1 + 0,0854 * X_2 + 0,411 * X_3 + 3,81 * X_1 * X_1 - 0,1121 * X_2 * X_2 - 0,000369 * X_3 * X_3 + 0,0005 * X_1 * X_2 + 0,0058 * X_1 * X_3 - 0,00157 * X_2 * X_3 \dots \text{Denklem 4.26}$$



Şekil 4.16. Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm)

Katot çapı 5 cm titanyum elektrot kullanılarak yapılan deneyisel çalışmalarda istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonu (R^2 değeri 0,86 olarak tespit edilmiş) kullanılarak hazırlanan grafiksel sonuç aşağıda verilmiştir.

viskozite değişim yüzdesi incelendiğinde asidik pH'lar da çalışıldığında sistemin olumlu etkilendiği, pH 5 'de çalışıldığında işletme süresinin 30.dakikadan 60.dakikaya kadar ki değişiminde % 1,75 arttığı; voltajın ise 10 V'dan 17,5 V'a gelinceye kadar önce % 0,3 oranında arttığı, 17,V'dan 25 V'a gelinceye kadar ise % 0,6 oranında azaldığı görölmektedir (Şekil 4.16).

pH değerinin asidik pH'dan başlayarak bazik pH'a doğru yükseltildiğinde ise süre ve voltajı olum etki yaptığı ancak viskozite düşme yüzdesi üzerinde % 1,5 'den fazla etki yapmadıkları görölmektedir.

Patates endüstrisi atık suyu ile çalışılması halinde sabit pH6,5 değerinde voltaj ve süreninin etkilerinin incelendiği grafiğin yorumlanması yararlı olacaktır.

Sabit pH 6,5 değerinde yapılan çalışmalarda, voltaj 25 V'dan 17,5 V'a kadar verimin azaldığı 17,5 V'dan 10 V' a gelindiğinde ise minimum seviyede (% 97,2) olduğu; işletme süresi 30. dakikadan 60. dakikaya gelinceye kadar sistem verimine olumlu katkısının olduğu 25 V verildiğinde süre verime % 0,9, 10 V verildiğinde % 1,5 arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ham çamurun pH değeri ile çalışıldığında sisteme verilecek voltaj değerinin 17,5 V işletme süresinin de 60 dakikadan az olmaması gerektiği tespit edilmiştir.

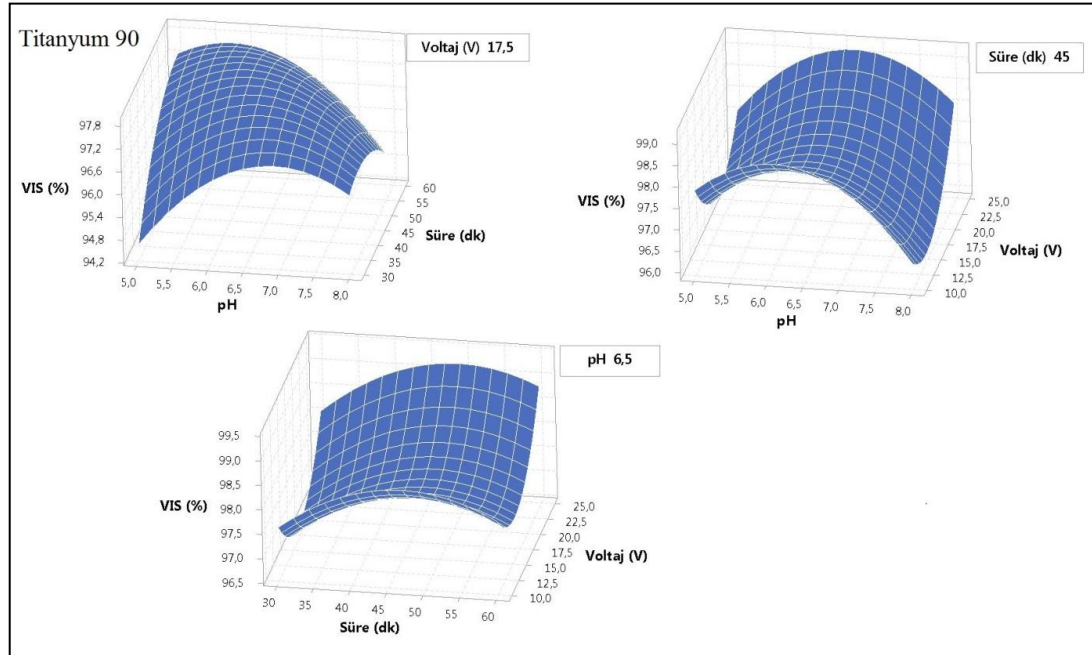
Elektrotlar arasındaki mesafenin viskozite yüzde giderim verimini nasıl etkilediğini anlamak amacıyla 9 cm çapında katot titanyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonu denklemleri ve Şekil 4.17'de gösterilen grafikler oluşturulmuştur.

5 cm çapında katot elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneysel sonuçlardan farklı olarak, sisteme sabit 17,5 volt uygulandığında yüksek pH değerlerinde artan işletme süresinin viskozite düşmesi verimine olumsuz etki yaptığı, pH 8, 60 dakikada elde edilebilecek maksimum verim 5 cm katot çapı kullanılarak elde edilecek verimden % 5 daha az bir verim elde edildiği görülmüştür. Elektrotlar arasındaki mesafe 2,3 cm olduğunda 5 cm katot çapı için artan voltaj değerleri 17,5 volt değerinden sonra sistemi olumsuz etkilerken 9 cm katot çapı için 25 voltta giderim veriminde ki maksimum değere bakıldığında % 3,5 'luk bir artışın sağlandığı görülmektedir. Buna ek olarak asidik pH'dan bazik pH'a gidildikçe viskozite düşmesi veriminin azaldığı gözlemlenmiştir.

- 9 cm katot çapı için; Viskozite $(R^2=0,93, \text{düzeltilmiş } R^2=0,79)$

$$\mu (\%) = 63,26 + 8,93 \cdot X_1 + 0,587 \cdot X_2 - 0,929 \cdot X_3 - 0,595 \cdot X_1 \cdot X_1 - 0,00312 \cdot X_2 \cdot X_2 +$$

$$0,01894 \cdot X_3 \cdot X_3 + 0,0464 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0421 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,00085 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \text{Denklem 4.27}$$



Şekil 4.17. Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm)

Sonuç olarak elektrotlar arasındaki mesafe kısaltıldıkça sistem veriminin arttığı, ekonomik bir işletme şartları yaratılmak istenirse pH ayarlaması yapılmaksızın ham çamur pH'ı ve 60 dakikalık işletme süresi ile % 97 oranında viskozite düşüşünün sağlanabileceği görülmüştür.

4.4. Şeker Endüstrisi Arıtma Çamuru İle Yapılan Çalışmalar

Şeker endüstrisinde, şeker pancarının yıkanması, parçalanması, haşlanması ve kurutma işlemleri sonrasında oluşan genellikle düşük organik içeriğe ve topraksı bir yapıya sahip arıtma çamuru kullanılarak deneysel çalışmalar yürütülmüştür. 9 cm katot çapı ile yapılan deneysel çalışmalarında reaktör işletimi esnasında köpürme problemi yaşanmış ve çamur üzerinde susuzlaştırma etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

5 cm çapındaki katot elektrot kullanılarak yapılan TKM, KES, viskozite ve ÇKOİ parametreleri izlenmiş, TKM, KES ve viskozite parametreleri için elde edilen sonuçların giriş ve çıkış değerleri dikkate alınarak yüzdesel değerleri, ÇKOİ için ise konsantrasyon cinsinden değerleri hesaplanmış ve Box-Behnken yöntemi ile oluşturulan cevap fonksiyonu denklemleri ve parametre grafikleri aşağıda verilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış KES süresi değerleri ile yüzdesel değişim miktarları $E_{(KES)}$ (%) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Susuzlaştırma veriminin incelenmesinde bakılması gereken öncelikli parametrelerden biri olan KES'nin, titanyum 5 cm katot çapındaki elektrotlar

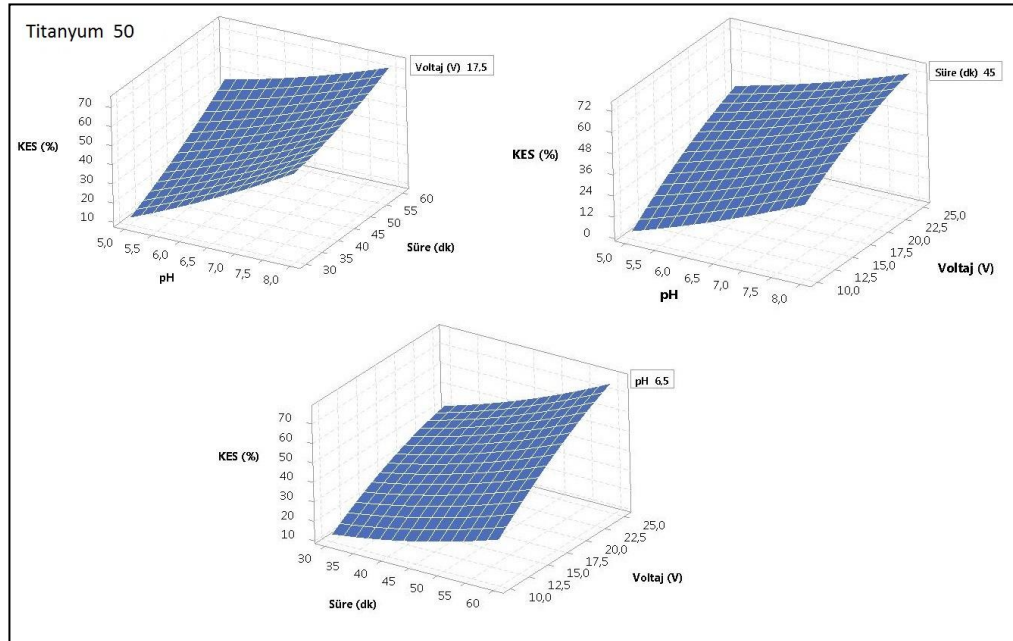
kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde artan pH, işletme süresi ve voltaj değerleri ile maksimum % 70 oranında azalma gösterdiği, istatistiksel dizayna göre hazırlanmış cevap fonksiyonu (Denklem 4.29) kullanılarak oluşturulmuş grafiksel sonuçlarda görülmektedir (Şekik 4.18).

Sabit 17,5 voltta 30. dakikadan 60. dakikaya kadar değişimde KES'nin pH 5'de çalışıldığında % 50, pH 8'de çalışıldığında ise % 30 oranında artarak KES'nin azaldığı tespit edilmiştir.

- 5 cm katot çapı için; KES ($R^2 = 99,07$, düzeltilmiş $R^2 = 97,40$)

$$\text{KES (\%)} = -131,3 + 12,9 \cdot X_1 + 0,624 \cdot X_2 + 4,41 \cdot X_3 + 0,770 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,01046 \cdot X_2 \cdot X_2 -$$

$$0,0641 \cdot X_3 \cdot X_3 - 0,1867 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,181 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0315 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.29}$$



Şekil 4.18. Kapiler emme süresi (KES) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm)

Sonuç olarak yüksek voltajlarda çalışıldığında KES giderim veriminin maksimum seviyelere çıktığı, süre ve pH'ın ise bu artışa destek sağladığı, maksimum verimin (% 70) pH 8'de 25 voltta işletme süresi 60 dakikadan az olmamak kaydı ile elde edildiği, şeker endüstrisinin ham atık çamur ortalama pH'ı gz önünde bulundurulduğunda elektro-susuzlaştırma işlemi öncesinde pH ayarlamasının yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

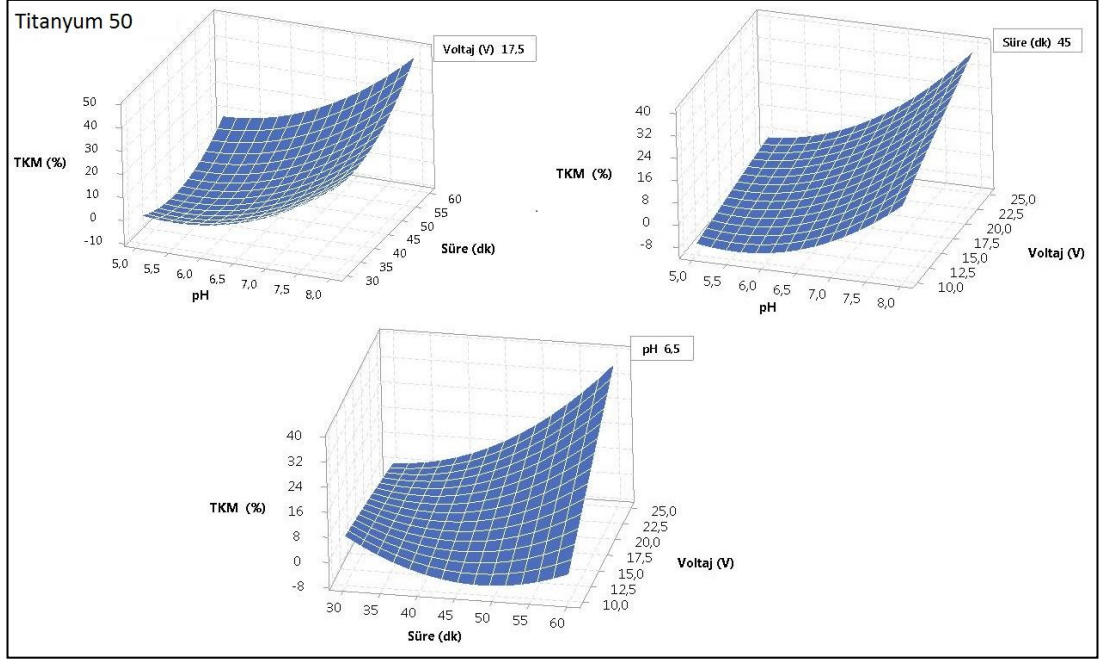
TKM parametresinin giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark E_{TKM} (%) denklemini kullanarak hesaplanmış daha sonrasında istatistiksel analiz programında işlenmiştir. Katot apı 5 cm titanyum elektrot kullanılarak yapılan TKM giderim veriminin incelendiği deneysel çalışmalarda istatistiksel dizayna göre oluşturulmuş cevap fonksiyonu (R^2 değeri 0,92 olarak tespit edilmiştir) kullanılarak (Denklem 4.31) hazırlanan grafiksel sonuç aşağıda verilmiştir (şekil 4.19).

TKM giderim veriminin yüzdesel değişimi incelendiğinde bazık pH'lar da çalışmanın sistem verimine olumlu etki yaptığı, pH 8'de çalışıldığında işletme süresi 30. dakikadan 60.dakikaya kadarki değişiminde TKM değerinin % 25 azaldığı; voltajın ise 10 V'dan 25 V'a yükseltildiğinde ise yaklaşık % 30 azalmasına neden olmuştur. İşletme şartları bazikten başlayarak asidikleştirildike süre ve voltajın verimi olumsuz etkilediği ve bu etkinin TKM yüzdesel değişimi üzerinde yaklaşık % 40 civarında olduğu görülmüştür. Ham şeker endüstrisi atık çamurunun pH'ının ortalama 7,08 olmasından dolayı herhangi bir pH ayarlaması yapılmaksızın sistem çalıştırılmış olsaydı yaklaşık olarak TKM yüzdesel giderim değeri maksimum %10 civarında olacaktır.

- 5 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,77$)

$$\text{TKM (\%)} = 311 - 56,1 \cdot X_1 - 5,82 \cdot X_2 - 5,65 \cdot X_3 + 4,04 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0393 \cdot X_2 \cdot X_2 -$$

$$0,0061 \cdot X_3 \cdot X_3 + 0,165 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,385 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0973 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.31}$$



Şekil 4.19. Toplam katı madde (TKM) incelenmesi (katot çapı 5 cm)

Şekil 4.19'a bakıldığında sabit pH 6,5 değerinde 60 dakika işletme süresinde sisteme 25 V akım verildiğinde aynı giderim verimin (% 40) elde edilebileceği görülmüştür.

Sonuç olarak şeker endüstrisi atık çamurlarının elektro-susuzlaştırma performansının belirlenmesinde ham çamur pH'ına yakın pH 6,5'da çalışıldığında yüksek voltaj değerleri ile giderim veriminin en fazla % 40 seviyelerine çıkartılabileceği ve bu durumun enerji sarfiyatını arttırabileceği düşünülmektedir.

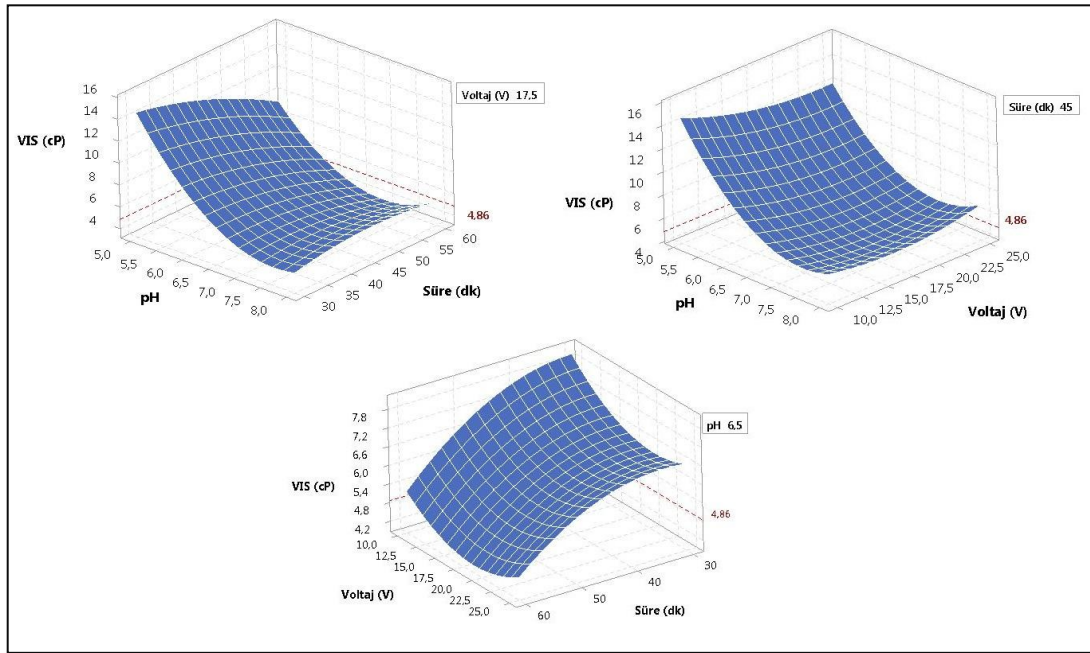
Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış çamurun viskozite değerleri kullanılarak Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında katot çapı 5

cm'lik titanyum deneyi için cevap fonksiyonu ve viskozite düşme verimi grafiği oluşturulmuştur (Denklem 4.33, Şekil 4.20).

- 5 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=95,32$, düzeltilmiş $R^2=86,88$)

$$\mu = -2181 + 510,3 \cdot X_1 + 4,74 \cdot X_2 + 21,7 \cdot X_3 - 29,46 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,0634 \cdot X_2 \cdot X_2 -$$

$$0,281 \cdot X_3 \cdot X_3 - 1,255 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,37 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,036 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.33}$$



Şekil 4.20. Viskozite (μ) değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm)

5 cm çapında katot titanyum elektrot kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda sisteme sabit 17,5 volt uygulandığında bazik pH değerlerinde işletme süresinin verim üzerinde etkisini fazla olmadığı, bazik pH değerlerinden asidik pH değerlerine geçildikçe artan işletme süresinin viskozite düşmesi verimine olumlu etki yaptığı ve pH 5, 30 dakikada elde edilebilecek maksimum viskozite değerinin 14 cP olduğu görülmüştür. Sabit voltaj değerindeki işletme sonucu elde edilen sonuçlara benzer olarak bazik pH'larda voltajın viskozite değişimine katısının dikkate alınacak

derece olmadığı ve sistem pH'ı asidikleştikçe artan voltaj değeri ile viskozite değerlerinde düşüş yaşanarak çamurun akışkan özellik kazandığı görülmüştür.

Şeker endüstrisi arıtma çamuru pH'ının ortalama 7 civarında olmasından dolayı sabit pH 6,5 sağlanarak işletilen sistemin sonuçlarının sergilendiği grafik incelenirse, artan işletme süresiyle birlikte çamurun daha akışkan bir hal aldığı görülmüştür.

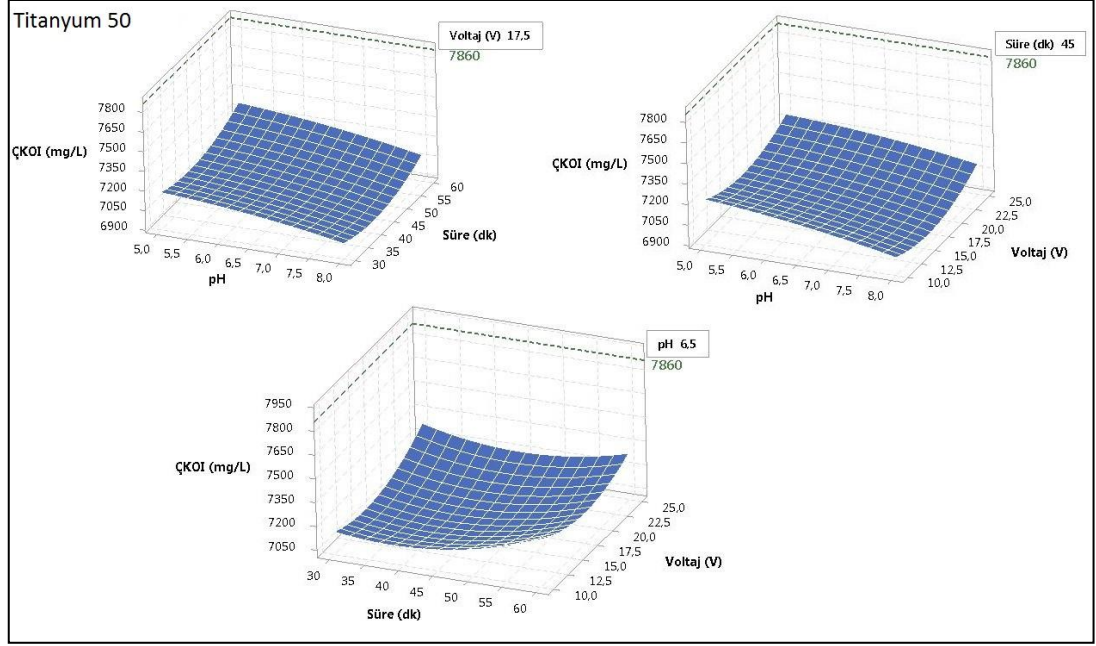
Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen giriş ve çıkış çamurlarının üst suyundan alınan örneklerdeki ÇKOİ miktarları ve Denklem 4.34 kullanılarak Minitab 17.0 istatistiksel analiz programında katot çapı 5 cm'lik titanyum deneyi için cevap fonksiyonu ve ÇKOİ salınım grafiği oluşturulmuştur (Denklem 4.35, Şekil 4.21)

ÇKOİ parametresinin giriş ve çıkış çamuru arasındaki fark konsantrasyon cinsinden hesaplandığında 5 cm çapında titanyum katot elektrot kullanılarak yapılan çalışmada salınım yerine giderim yaşandığı saptanmıştır.

Sisteme verilen ham çamurun ÇKOİ miktarı (7860 mg/L) bazik pH ve 30 dakikalık işletme süresi sonunda 7250 mg/L ölçülmüştür ve bu değer Şekil 4.21'de bakıldığında giderim miktarı olarak incelendiğinde elde edilebilecek minimum konsantrasyon olarak görülmektedir.

- 5 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,83$, düzeltilmiş $R^2=0,55$)

$$\begin{aligned} \text{ÇKOİ} = & 8085 + 47 \cdot X_1 - 26,4 \cdot X_2 - 56,8 \cdot X_3 - 9,4 \cdot X_1 \cdot X_1 + 0,394 \cdot X_2 \cdot X_2 + 1,889 \cdot X_3 \cdot X_3 - \\ & 0,11 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,33 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,311 \cdot X_2 \cdot X_3 \dots \dots \dots \text{Denklem 4.35} \end{aligned}$$



Şekil 4.21. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) değişiminin incelenmesi
(katot çapı 5 cm)

Asidik pH'lar sabit 17,5 V uygulandığında işletme süresinin 30. dakikadan 45.dakikaya kadar 7200 mg/L değerine kadar azalan bir artışla arttığı 45. dakikadan 60. dakikaya lineer bir şekilde artarak 7250 mg/L civarına kadar geldiği görülmektedir. Her ne kadar işletme esnasında ÇKOİ salınımı olsa da değişimler % olarak çok ufak değere tekamül etmektedir.

Sabit 6,5 pH değerinde sisteme süre ve voltajın etkisini incelediğimizde ise artan işletme süresinin ÇKOİ miktarını %6 arttırdığı, en yüksek salınımın yaşandığı 10 volt 60 dakikada gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 5

5. VARGILAR

Çalışması yapılan tüm arıtma çamuru türlerinde genel olarak asidik pH ve işletim süresinin uzun olmasının (katot çapı 90 mm ile yapılan evsel arıtma çamuru çalışması hariç) susuzlaştırma performansını olumlu etkilediği söylenebilir. Maksimum susuzlaştırma verimleri incelendiğinde çalışılan diğer arıtma çamurlarına göre evsel atıksu arıtma çamuru ile yapılan çalışmada en etkili sonuçlar elde edildiği, evsel arıtma çamuru için anot ve katot elektrotlar arasındaki mesafenin susuzlaştırma verimine etkisi incelendiğinde ise 2,3 cm elektrot mesafesinin verimde önemli bir artışa neden olmadığı fakat işletme süresinde % 50' ye varan bir azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Evsel arıtma çamuru ile yürütülen deneysel çalışmalarda, 5 cm çapında katot titanyum elektrot kullanıldığında asidik pH değerlerinde yüksek voltaj ve işletme sürelerinde KES değerini azaltarak sistem performansına olumlu katkı yaptığı, en yüksek KES' ndeki azalma yüzdesinin ortalama % 70 civarlarında olduğu sonucuna varılmıştır.

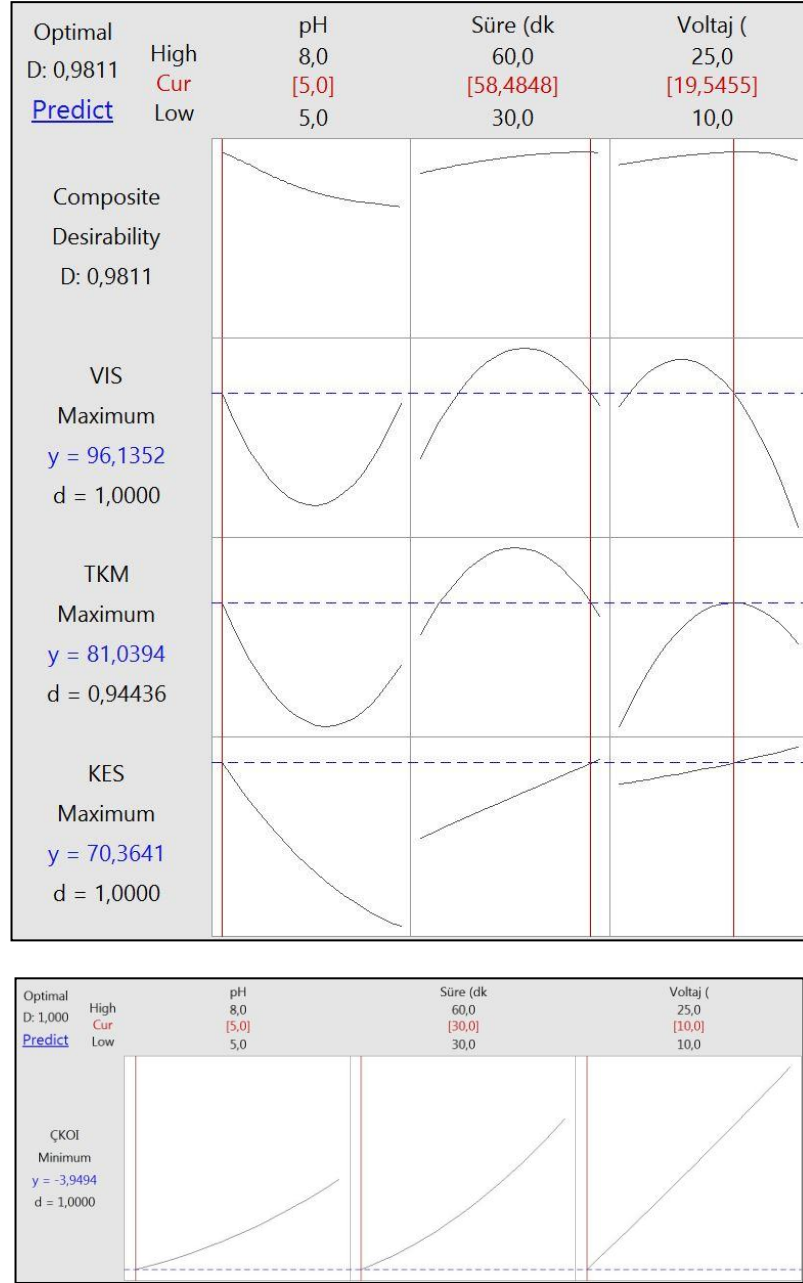
TKM yüzde giderim verimi incelendiğinde KES yüzde giderim verimine benzer olarak asidik pH değerlerinde susuzlaştırma performansının yükseldiği görülmüştür. Deneysel çalışmalarda TKM parametresi diğer 3 bağımlı değişkenden

farklı incelendiğinde düşük işletme sürelerinde, düşük voltaj değerlerinde ve ham çamurun pH değerinde (30 dk, 10 V, pH 6,5 gibi) giderim veriminin % 76 oranına kadar çıkabileceği fakat diğer 3 bağımlı değişken ile birlikte sistem performansı bir bütün olarak incelendiğinde ise işletme süresinin 50 dakikandan, voltajın ise 10 volttan yüksek olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Asidik pH'ların diğer parametrelerde olduğu gibi viskozite düşmesine olumlu etki yaptığı, viskozite yüzde giderim veriminin artması için sabit pH 6,5 değerinde voltaj ve işletme sürelerinin birbirleriyle ters orantılı olarak; sisteme verilen voltaj düştükçe işletme süresinin arttırılmasının, voltaj yükseldik işletme süresinin azaltılmasının gerektiği görülmüştür.

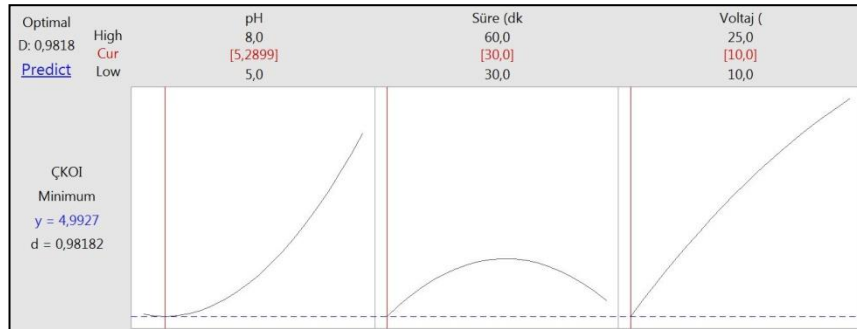
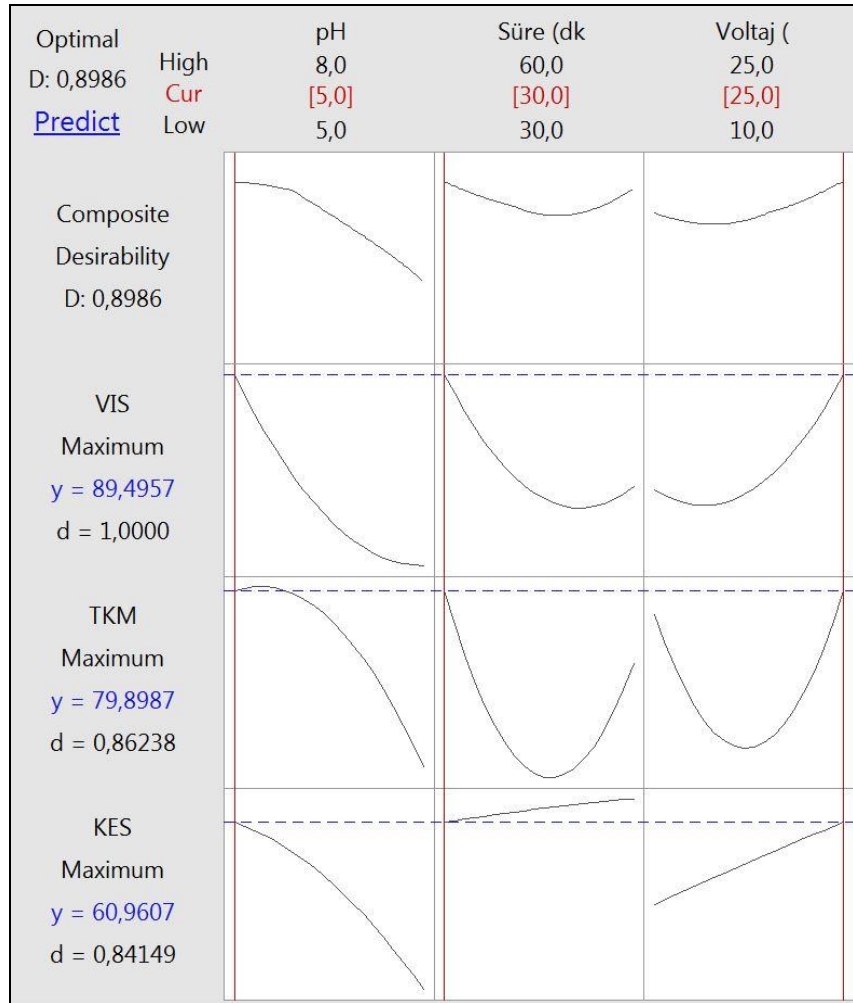
Titanyum elektrotları kimyasal özelliklerinden dolayı elektrik iletimi sırasında ohmik ısıya neden olduklarından çamurun yapısındaki mikroorganizmaların parçalanmasına neden olabilmektedirler. Bundan dolayı giriş ve çıkış çamurlarında bakılan ÇKOİ parametresinin pH 6,5 da, 30 dakikalık işletme süresi ve 25 volt uygulandığında maksimum % 90 oranında ÇKOİ salınmasına neden ulaşabileceği Bölüm 4.1'de de belirtilmişti. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere ÇKOİ salınımının en yüksek olduğu şartların pH 5, 10 V ve 60 dakika olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak 5 cm katot çapına sahip titanyum elektrot ile yapılan çalışmada susuzlaştırma gösterge parametrelerinin verimleri incelenerek en iyi pH 5, ortalama 20 volt ve 58 dakikalık işletme süresinde elde edilebileceği görülmüştür (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Evsel arıtma çamuru ile titanyum 5 cm elektrot optimizasyonu (VİS, TKM, KES, ÇKOİ)

Anot ve katot elektrotlar arasındaki mesafe, 9 cm çapında katot titanyum kullanılarak 2,3 cm' ye düşürüldüğünde KES değeri azalma yüzdesinin bundan fazla etkilenmediği ve optimum işletme şartı yakalandığında maksimum % 60 oranında azaltılabileceği görülmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Evsel arıtma çamuru ile titanyum 9 cm elektrot optimizasyonu (VIS, TKM, KES, ÇKOİ)

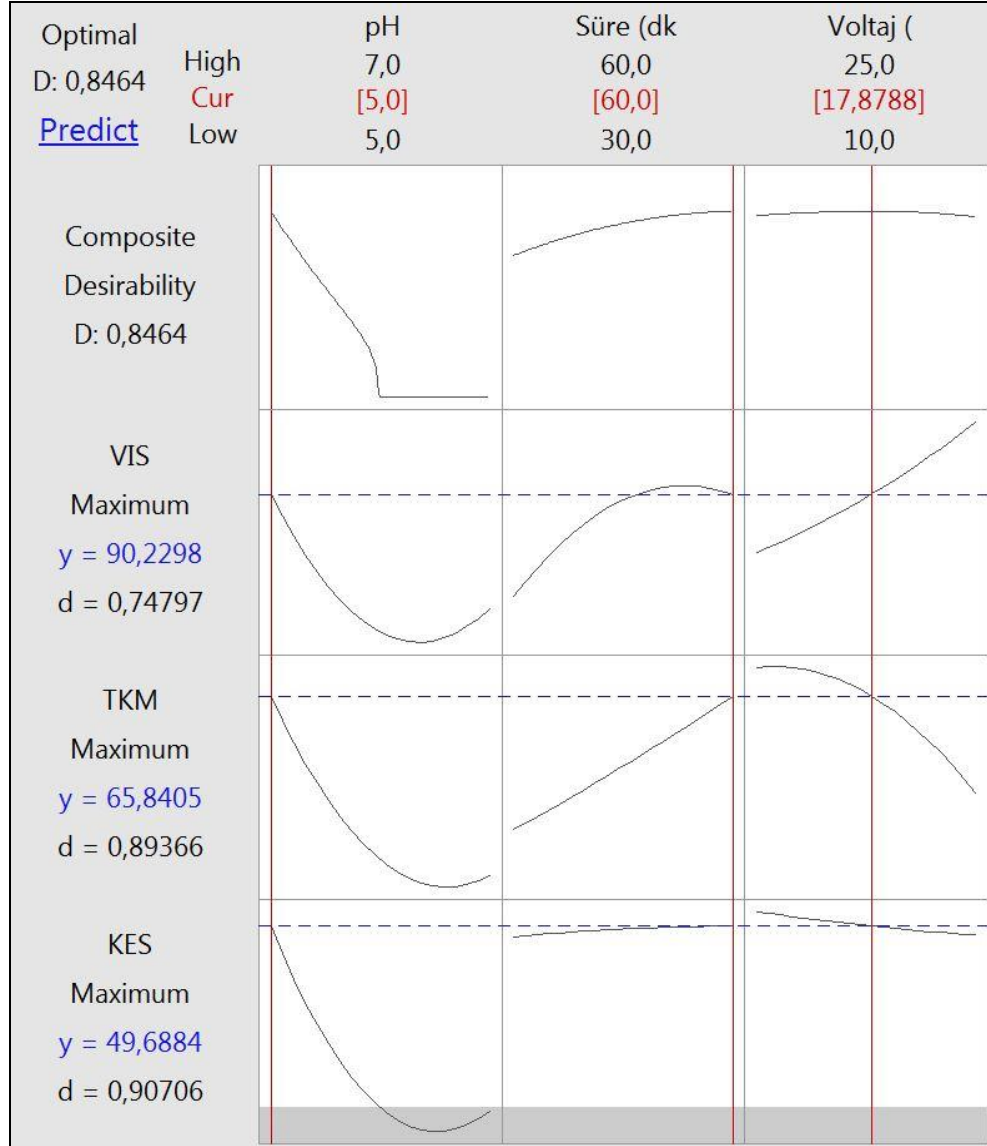
TKM parametresi incelendiğinde 5 cm katot çapı kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalarda ki sonuçlara benzer olarak asidik pH'larda TKM yüzde giderim veriminin en yüksek seviyelerde olduğu (% 79), viskozite parametresinde ise

elektrotlar arasındaki mesafenin azalması viskozite yüzde giderim verimi üzerinde aşırı bir etkisinin olmadığı daha çok sistem performansının uygulanan voltaj ve işletme süresine bağlı olduğu, optimum şartların ise pH 5, 25 volt ve 30 dakikalık işletme süresinde elde edilebileceği görülmüştür (Şekil 5.2). Sonuç olarak evsel arıtma çamuru KES, TKM, viskozite parametreleri için 5 cm katot çaplı titanyum elektrot kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Beyaz et sektörü arıtma çamuru ile yapılan çalışmalarda elektro-susuzlaştırma işlemi için 5 cm elektrot çapı kullanılarak 4,3 cm anot-katot arasında mesafe oluşturulduğu susuzlaştırma parametrelerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür. Bu nedenle 9 cm katot elektrot çapı ile yürütülen deneysel çalışma sonuçları incelenmiştir. Buna göre 9 cm çapındaki katot elektrot ile yapılan çalışmalar sonucunda evsel arıtma çamurunda olduğu gibi asidik pH'ların beyaz et sektörü arıtma çamurunda da etkin sonuçlar verdiği pH 5'te susuzlaştırmanın en yüksek oranda olduğu sisteme verilen voltaj ve uygulanan işletme süresinin susuzlaştırılabilirliğe kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir (Şekil 5.3).

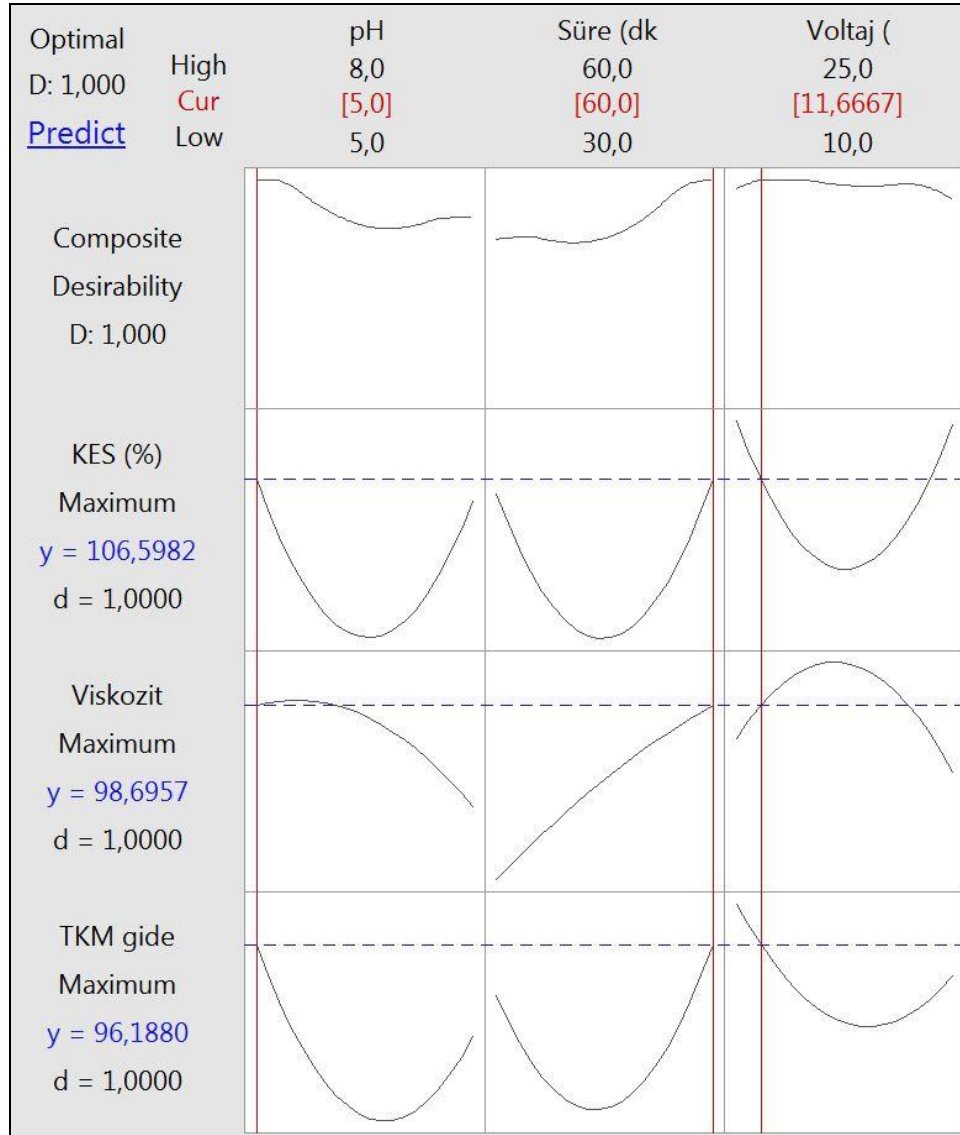
Viskozite parametresi ayrı olarak incelendiğinde, artan pH ile çıkış çamuru akışkanlığının azaldığı, voltaj ve işletme süresindeki artışın ise bu azalmayı lineer olarak azalttığı görülmektedir. TKM ve KES parametreleri, sistem pH'sı nötr pH'tan bazik pH'a doğru gidildikçe viskoziteden farklı olarak susuzlaştırma işleminin iyileştiği ve TKM için artan voltajın % 30 oranında giderimin arttığı görülmüştür. (Şekil 5.3).

Her bir susuzlaştırma parametresi tek tek değerlendirildiği Bölüm 4.2’ de bahsedilen pH 6’ da çalışılabileceği ancak optimizasyon yapılarak tüm susuzlaştırma parametreleri değerlendirildiğinde pH 5 ile çalışılmanın uygun olduğu kanatine varılmıştır.



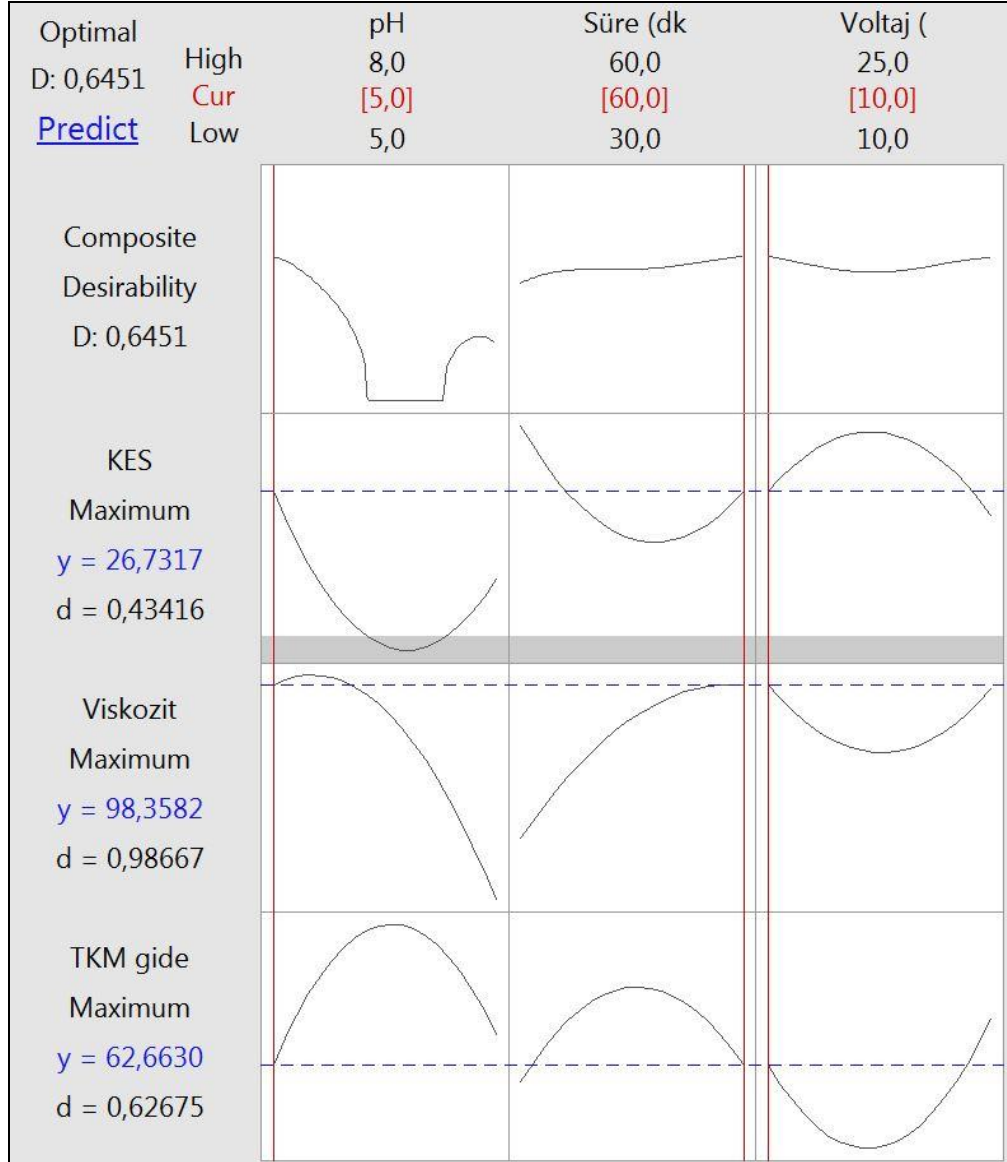
Şekil 5.3. Tavuk sektörü arıtma çamuru ile titanyum 9 cm elektrot optimizasyonu
(VIS, TKM, KES)

Patates endüstrisi arıtma çamurları ile yapılan optimizasyon çalışmasında nötr pH değerlerinde susuzlaştırma verimini azalttığı asidik ve bazik ph değerlerinin sistemi olumlu etkilediği görüldü. Tüm susuzlaştırma parametreleri dikkate alındığında asidik pH, 60 dakika işletme süresi ve 11,6 v voltaj değeri ile çalışıldığında maksimum susuzlaştırma verimi elde edilebileceği belirlenmiştir.



Şekil 5.4. Patates endüstrisi arıtma çamuru ile titanyum 5 cm elektrot optimizasyonu
(VİS, TKM, KES)

Giriş ve çıkış çamurlarında viskozite parametresi incelendiğinde artan işletme süresinin çıkış çamurunun daha akışkan bir hal almasını, optimizasyon grafiğinde de görüldüğü üzere 60 dakikalık işletme süresi boyunca ortalama 17,5 volt değerine kadar artan voltajın viskozite giderim yüzdesini arttırdığı bu değerden sonra lineer bir şekilde azalttığı görülmüştür (Şekil 5.4).



Şekil 5.5. Patates endüstrisi arıtma çamuru ile titanyum 9 cm elektrot optimizasyonu
(VİS, TKM, KES)

TKM yüzde giderimi incelendiğinde pH ve işletme süresinin sisteme etkisinin birlikte hareket ederek düşük pH ve işletme süresinden başlamak kaydı ile sistem bazı işletme süresi arttıkça çıkış çamurun katı madde içeriğinin azaldığı nötr pH ve 30. dakikadan sonra TKM giderim yüzdesinin lineer bir şekilde artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Sisteme uygulanan voltajın Şekil 5.4'de de görüldüğü üzere pH ve işletme süresi ile birlikte hareket etmesine rağmen sistem üzerine etkisi diğer iki bağımsız değişkene göre daha az olduğu ve 17,5 volttan 25 volta kadarki çalışmalarda susuzlaştırma performansını arttırdığı bulunmuştur (Şekil 5.4).

Sistem bir bütün halinde incelendiğinde ise, 60 dakikalık işletme süresi, pH 5 ve 10 volt uygulamanın maksimum susuzlaştırma oranının elde edileceği nokta olduğu anlaşılmıştır (Şekil 5.4).

Viskozite yüzde giderim oranı, asidik pH değerlerinden başlayarak bazik pH'a gidildikçe azaldığı işletme süresinin ise pH ile ters orantılı bir şekilde, işletme süresi arttıkça çıkış çamurunun akışkanlığının arttığı görülmüştür. Uygulanılan voltajın ise 17,5 volt değerine kadar sistemi olumsuz, 17,5 volttan 25 volta kadar ise olumlu etki yaptığı sonucuna da varılmıştır (Şekil 5.5).

TKM giderim yüzdesi, sistem asidik pH'tan nötr pH'a kadar artış göstermiş, nötr pH'tan bazik pH'a gidildikçe azalmaya başlamıştır. Reaktörün işletme süresi 45. dakikaya kadar artması reaktörden çıkan çamurun katı madde içeriğinin yükselmesini arttırırken 45. dakikadan sonra bu verim azalmaya başladığı ve TKM parametresi tek başına incelendiğinde uygun işletme şartları sağlandığında maksimum % 96 seviyelerine çıkabileceği görülmüştür (Şekil 5.5).

KES parametresine bakıldığında ise artan pH ve işletme süresinin pH 7, 45 dakikalık işletme süresine kadar KES'ni azalarak arttırdığı bu noktandan sonra lineer bir şekilde azalttığı ve kısa işletme sürelerinde ve asidik pH değerlerinde düşük voltların, uzun işletme sürelerinde ve bazik pH değerlerinde yüksek voltların etkili sonuçlar verdiği görülmüştür (Şekil 5.5).

Sonuç olarak 9 cm çapında titanyum katot kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre en iyi susuzlaştırmanın, sistem pH'sı 5, işletme süresi 60 dakika ve sisteme 10 volt verilmesi ile elde edilebileceği anlaşılmıştır (Şekil 5.5).

Patates cipsi endüstrisi için katot çapları optimizasyon grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre kıyaslandığında her iki katot çapının da benzer sonuçlar verdiği, katot çapının artması ile kullanılacak titanyum malzemesi miktarının atmamasına sebebiyet vermemek adına 5 cm çapında katot elektrot kullanılmasının uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.

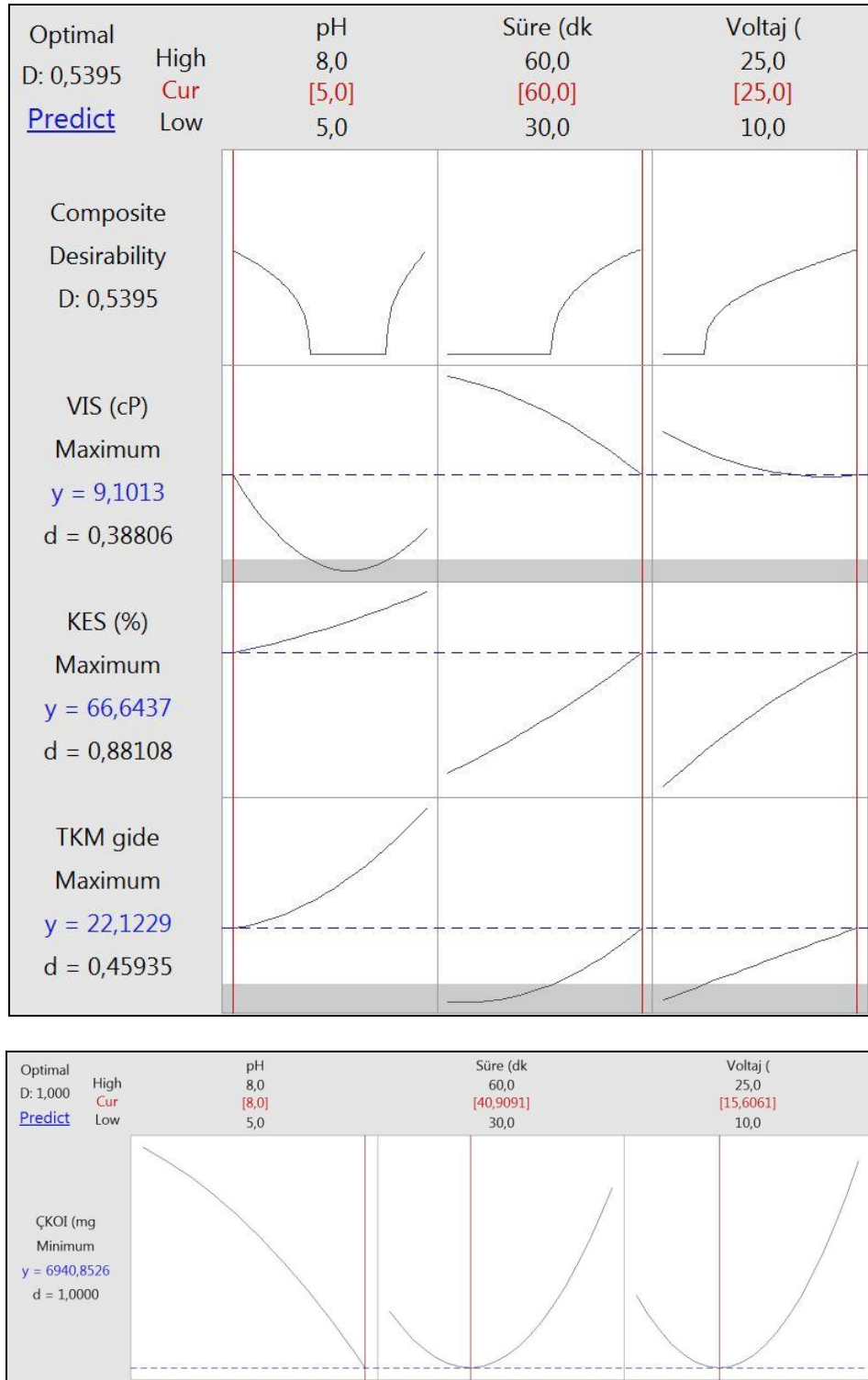
Şeker endüstrisinde, genellikle düşük organik içeriğe ve topraksı bir yapıya sahip artıma çamuru kullanılarak deneyler yürütülmüş ve 9 cm katot çapı ile yapılan deneysel çalışmalarda reaktör işletimi esnasında köpürme problemi yaşandığı bununla birlikte çamur üzerinde susuzlaştırma etkisinin olmadığı belirlendiği için atık çamur 5 cm katot çapındaki titanyum elektrot ile susuzlaştırma performansı araştırılmıştır.

Genel olarak viskozite parametresi hariç KES ve TKM giderimi için baktığımızda pH, sistem voltajı ve işletme süresi arttıkça susuzlaştırma veriminde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu azalış Bölüm 4.4'de KES için % 70, TKM için % 40 oranına kadar çıkabileceği fakat optimizasyon grafiğine baktığımızda, sistem bir bütün olarak incelendiğinde bu oranlar KES için % 66 TKM için ise % 22 olacağı belirlenmiştir (Şekil 5.6).

Viskozite parametresi diğer iki bağımsız değişkenden farklı olarak asidik pH larda daha etkin sonuçlar verdiği çıkış çamurunun daha akışkan bir hal kazandığı işletme süresi ve sisteme verilen voltajdaki artışın viskozite giderim verimini azalan artış şeklinde olumsuz etkilediği gözlemlenmektedir (Şekil 5.6).

Artan pH değeri ile birlikte ÇKOİ miktarı lineer bir şekilde azalmış, bu azalışa işletme süresi ve sisteme verilen voltaj 15. dakika ve 17,5 volt değerlerine kadar bu azalış desteklenmiştir. 15. dakikadan 60. dakikaya ve 17,5 volttan 25 volta kadar sisteme ÇKOİ salınması üssel olarak artarak devam etmiştir (Şekil 5.6).

Sonuç olarak 5 cm çapında titanyum katot kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre en iyi susuzlaştırmanın, sistem pH'sı 5, işletme süresi 60 dakika ve sisteme 25 volt verilmesi ile elde edilebileceği anlaşılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Şeker endüstrisi arıtma çamuru ile titanyum 5 cm elektrot optimizasyonu
(VIS, TKM, KES, ÇKOİ)

KAYNAKLAR

- Acar, Y.B., Alshawabkeh, A.N. Principles of electrokinetic remediation. Environmental Science and Technology, 1993, 27(13), 2638–2647.
- APHA, AWWA, WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed. American Public Health Association, Washington, D.C., 2005.
- Bagotsky, V.S. Fundamental of Electrochemistry, 2nd Ed., John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, 2006.
- Bien, J.B., The application of ultrasound in the preparation of sludge for its mechanical dewatering. Acustica, 1991, 74, 279–283.
- Bien, J.B., Wolny, L., Changes of some sewage sludge parameters prepared with an ultrasonic field. Water Sci. Technol, 1997, 36, 101–106.
- Chang, G.R., Liu, J.C., Lee, D.J., Co-conditioning and dewatering of chemical sludge and waste activated sludge. Water Res, 2001, 35, 786–794.
- Chen, Y.G., Yang, H.Z., Gu, G.W., Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling. Water Res, 2001, 35, 2615–2620.
- Citeau, M., Larue, O., Vorobiev, E., Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge. Water Research, 2011, 45(6), 2167–2180.
- Doyle, C. L., Haight, D. M. Hazardous Material Control Research Institute, American Cyanamid Co: Wayne, NJ, 1986, pp 103-110.
- European Commission. Environmental, Economic and Social Impacts of the Use of Sewage Sludge on Land. Final report, part III: Project interim reports. Milieu Ltd., Brussels, Belgium, 2010.
- Feng, X., Deng, J.C., Lei, H.Y., Bai, T., Fan, Q.J., Li, Z.X., Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning. Bioresour. Technol, 2009, 100, 1074–1081.
- Fernandez, A., Hlavackova, P.; Pome`s, V., Sardin, M. Physico-chemical limitations during the electrokinetic treatment of a polluted soil. Chemical Engineering Journal, 2009, 145(3), 355–361.

Filibeli, A., Arıtma Çamurlarını İşlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını, 2002, No:255 Sf:170.

Glendinning, S., Lamont-Black, J., Jones, C.J.F.P. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(3), 491–499.

Katsiris, N., Kouzeli-Katsiris, A. Bound water content of biological sludge and waste activated sludge. *Water Research*, 1987, 21(11), 1319–1327.

Köksoy, O., Taguchi ve Cevap Yüzeyi Felsefelerinin Birleştirilmesi: Problem ve Çözüm Teknikleri, Hacettepe Üniversitesi, 2001.

Lee, J.E., Lee, J.K., Choi, H.K., Filter Press for Electrodewatering of Waterworks Sludge. *Drying Technology: An International Journal*, 2007, 25:12, 1985-1993.

Lu, M.C., Lin, C.J., Liao, C.H., Huang, R.Y., Ting, W.P., Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent. *Adv. Environ. Res.*, 2003, 7, 667–670.

Mahmoud, A. , Olivier , J., Vaxelaire, J., Hoadley, A. F.A., Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering, *Water Research*, 2010, 44, 2381 – 2407.

Montgomery, D.C., Design and Analysis of Experiments, 3 rd ed; John Wiley & Sons, Inc.: Singapore, 1991.

Na, S., Kim, Y.U., Khim, J., Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment. *Ultrason. Sonochem*, 2007, 14, 281–285.

Neis, U., Ultrasound in water, wastewater and sludge treatment, 2000, *Water* 21, 36–39.

Ohm, T.I., Chae, J.S., Kim, J.E., Kim, H.K., Moon, S.H., A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology. *J. Hazard. Mater*, 2009, 168, 445–450.

Öztürk, İ., Gençsoy, E.B., Aydın, A.F., Kırmızı, Y., Eker, Z., Patates işleme endüstrisi atıksularının iki kademeli biyolojik arıtımı, 2003, *SKKD*, 13, 1, 1-9.

Parker, P.J., Collins, A.G., Ultra-rapid freezing of water treatment residuals. *Water Res.*, 2009, 33, 2239–2246.

Saveyn, H., Pauwels, G., Timmerman, R., Meeren, P. V., Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase, *Water Research*, 2005, 39, 3012–3020.

Saveyn, H.; Van der Meeren, P.; Pauwels, G.; Timmerman, R. Bench- and pilot-scale sludge electrodewatering in a diaphragm filter press. *Water Science and Technology*, 2006, 54(9), 53–60.

Smollen, M., Kafaar, A., Electroosmotically enhanced sludge dewatering-Pilot-plant study. *Water Science and Technology*, 1994, 30(8), 159-168.

Snyman, H.G., Forssman, P., Kafaar, A., Smollen, M., The feasibility of electro-osmotic belt filter dewatering technology at pilot scale. *Water Science and Technology*, 2000, 41(8), 137-144.

Spinosa, S., Vesilind, P.A., *Sludge into Biosolids Processing, Disposal and Utilization*; IWA Publishing: London, 2001.

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Çevre ve Orman Bakanlığı, Resmi Gazete Tarih:31/12/2004, Sayı:25687.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., *Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd ed.; McGraw-Hill: NewYork, 1991.

Tony, M.A., Zhao, Y.Q., Fu, J.F., Tayeb, A.M., Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability. *Chemosphere*, 2008, 72, 673–677.

Wikipedia, 2015 (tr.wikipedia.org)

Tuan, P. A., Jurate, V., Mika, S., Electro-dewatering of sludge under pressure and non-pressure conditions, *Environmental Technology*, 2008, 29:10, 1075-1084.

Tuan, P.A., Sillanpaa, M., Fractionation of Macro and Trace Metals Due to Off-Time Interrupted Electrodeewatering, *Drying Technology*, 2010, 28: 762–772.

Tuan P.A., Sillanpaa M., Isosaari P., Sewage Sludge Electro-Dewatering Treatment—A Review, *Drying Technology: An International Journal*, 2012, 30, 7, 691-706.

Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş. yayınları, Cumhuriyetin 80. Yılında Türk Şeker Sanayi, No:221, Ankara, 2003.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. *Design Manual-Dewatering Municipal Wastewater Sludges*; 1987.

Vesilind, PA., The role water in sludge dewatering. *Water Environment Research*, 1994, 66, 1, 4-11.

Yordanov, D., Preliminary study of the efficiency of ultrafiltration treatment of poultry slaughterhouse wastewater, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2010, 16, 6, 700-704.

Zhou, J., Liu, Z., She, P., Ding, F., Water Removal from Sludge in a Horizontal Electric Field, *Drying Technology*, 2001, 19, 3, 627- 638.