

**EVSEL ARITMA ÇAMURLARININ
ELEKTRİK ALANI YARDIMIYLA SUSUZLAŞTIRILMASI**

SERAP BALABAN

**ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS
DERECESİ İÇİN GEREKLİ ÇALIŞMALARI YERİNE GETİREREK
ONAYA SUNULAN TEZ**

KASIM 2014

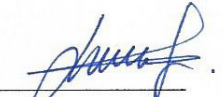
Fen Bilimleri Enstitüsü'nün Onayı

Prof. Dr. Duran KARAKAŞ
Enstitü Müdürü

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

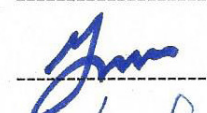
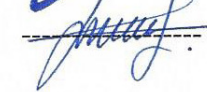

Prof. Dr. Duran KARAKAŞ
Anabilim Dalı Başkanı

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- Prof. Dr. Duran KARAKAŞ
- 2- Doç. Dr. M. Yunus PAMUKOĞLU
- 3- Yrd. Doç. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

ÖZET

EVSEL ARITMA ÇAMURLARININ ELEKTRİK ALANI YARDIMIYLA SUSUZLAŞTIRILMASI

BALABAN, Serap

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Nazlı Baldan Pakdil

Kasım 2014, 82 Sayfa

Son yıllarda su kirliliği artışına paralel olarak atıksu arıtma yöntemleri üzerinde çalışmalar yoğunluk kazanarak artmıştır. Atıksu arıtma işlemlerinin sonucunda oluşturulan büyük hacimlerdeki arıtma çamurlarının kolayca nihai olarak bertaraf edilebilmesi için çamurun su içeriğinin önemli derecede azaltılması gerekir. Bu nedenle çamurun bünyesinde farklı şekillerde bulunan su içeriğini (serbest su, flok suyu, kapiler su ve kimyasal bağlı su) azaltmak için çamur susuzlaştırma teknikleri geliştirilmiştir. Mekanik susuzlaştırma işlemlerinde çamur ortamda sıkıştırılarak sadece serbest suyun ve düşük oranda flok suyunun çamurdan alınabilmesi sağlanır. Diğer su türleri için değişik yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bunun yanı sıra daha az maliyetle, düşük su içeriğine sahip çamur oluşturacak susuzlaştırma yöntemleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Son yıllarda geliştirilen yöntemlerden biri de elektro-susuzlaştırma yöntemidir. Elektro-

susuzlaştırma yöntemi susuzlaştırmak istenilen çamurun elektrik alanı içinde maruz bırakılması esasına dayanan bir metottur. Elektro-susuzlaştırma yöntemi mekanik susuzlaştırma ile susuzlaştırılmayan farklı tipte çamurların örneğin ince partiküller ve jelatinimsi çamurları başarıyla susuzlaştırılmasında kullanılmıştır. Bu tezde atıksu çamurunun susuzlaştırma özelliklerini geliştirmek için örnek elektro-susuzlaştırma reaktörünün kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Elektrik alanının etkisinin belirlenmesi için kapiler emme süresi (KES), özgül filtre direnci (ÖFD), filtreleme zamanı (FZ) ve viskozite değerleri gözlemlenmiştir. Elektro susuzlaştırma işlemi için düşey elektrotlarla hazırlanan yatay elektrik alanı arasında bırakılan sistem kullanılmıştır. Deneysel analiz sonuçları Box-Behnken Design istatistiksel analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve bu çalışmada MINİTAB 17.0 bilgisayar programı kullanılmıştır. İstatistiksel metoda göre pH değeri, işlem süresi ve uygulanan voltaj değeri olarak üç adet bağımsız değişken susuzlaştırma parametreleri ve çamurun üzerinde meydana gelen kimyasal değişiklikler incelenmiştir. Aynı zamanda farklı elektrot türlerinin (Bakır, Paslanmaz Çelik ve Grafit) etkisi belirlenmiştir. Sonuç olarak tüm elektrot türlerinde genel olarak asidik pH, yüksek voltaj ve işletim süresinin uzun olmasının sistem performansını olumlu etkilediği görülmüştür. Aynı zamanda grafit ve bakır elektrotun, paslanmaz çelik elektrotla göre daha etkili olduğu görülmüştür. Anot ve katot elektrotlar arasındaki mesafenin etkisi incelendiğinde ise 2,3 cm elektrot mesafesinin verimi artırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrik alanı, susuzlaştırma, evsel çamur, şartlandırma, grafit elektrot, bakır elektrot, paslanmaz çelik elektrot

ABSTRACT

DEWATERING OF SEWAGE SLUDGE WITH THE HELP OF ELECTRIC FIELD

M.Sc., Department of Environmental Engineering

Supervisor: Asist. Prof. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

November 2014, 82 Pages

Parallel to the increase in water pollution in recent years, studies on the methods of wastewater treatment have increased. To ultimately eliminate the sewage sludge, which is produced as a result of treatment processes of wastewater in great volumes, the water content of the sludge should be decreased significantly. In order to decrease the water content that is present inside the sludge in different forms (free water, interstitial water, capillary water, chemically bonded water), sludge dewatering techniques have been developed. Because, with the method known as mechanical dewatering, which involves pressing the sludge, only the free water is removed from the sludge. For the other forms of water, development of various methods was required. Besides, studies on the methods that would lead to decreased water content in sludge with a lower cost have intensified. One of the methods developed in recent years is the electro-dewatering method. This method is based on the exposition of the sludge that is to be dewatered to an electric field. Electro-

dewatering method can be used successfully for various types of sludge that cannot be dewatered by mechanical dewatering such as sludge of fine-particles, and gelatinous sludge. The sustainability of sample electro-dewatering reactor for improving dewaterability properties of sewage sludge was evaluated in this thesis. Capillary Suction Times (CST), Specific Resistances to Filtration (SRF) parameters, Time to Filter (TTF) and viscosity were monitored to determine the effect of electric field. The performance analysis of the system to be placed within a horizontal electric field formed by vertical electrodes was be studied. The assessment of the experimental analysis results by using Box-Behnken Design will be carried out using MINITAB 17.0 computer program. Effect of three independent variables (pH, process time and the applied voltage) on dewatering parameters and chemical changes on sample sludge was evaluated according to statistical design. Additionally, copper electrode, stainless steel electrode and graphite electrodes were used to see the effect of different electrode types. As a result, significant effect on system performance was observed by applying acidic pH, high voltage, and long process time for the all electrode types. It was determined that graphite and copper electrode are more effective than stainless steel electrode. Finally, reducing of distances between the anode and cathode electrodes increased dewatering capacity and the optimum distance of 2.3 cm was identified.

Keywords: Electric field, dewatering, sewage sludge, conditioning, graphite electrode, copper electrode, stainless steel electrode

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Nazlı Baldan Pakdil'e sonsuz teşekkür ederim. Proje çalışmamız boyunca yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Murat Pakdil'e, proje çalışma arkadaşlarım Cemre Karşlıoğlu ve Yalçın İpek'e çok teşekkür ederim.

Neslihan Yıldız ve Esra Belge'ye desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Her türlü desteğini esirgemeyen arkadaşım Tuba Genç'e ve tez yazma tecrübelerinden yararlandığım Nursel Söylemez'e çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan anneme, babama ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez, TUBİTAK-ÇAYDAG tarafından desteklenen 112Y301 no'lu proje kapsamındaki deneysel ve istatistiksel çalışmalarla yürütülmüştür. Desteklerinden dolayı TUBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Model Reaktör ve Elektrotlar.....	11
3.2. Çamur Karakteristiğinin Belirlenmesi.....	14
3.3. Analizler.....	14
3.4. İstatistiksel Analiz.....	16
3.5. Model Reaktörün İşletilmesi.....	17
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	18
4.1. Evsel Arıtma Çamurunun Özelliklerinin Belirlenmesi.....	18
4.2. Paslanmaz Çelik Elektrot Kullanımı.....	19
4.3. Grafik Elektrot Kullanımı.....	36
4.4. Bakır Elektrot Kullanımı.....	52

5. SONUÇLAR.....	71
KAYNAKLAR.....	80

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1.	Bağımsız değişkenler matrisi ve kullanılan bağımsız değişken noktaları	17
Tablo 4.1.	Yoğun evsel arıtma çamuru karakteristiği	18
Tablo 5.1.	KES, TKM ve viskozite verim oranları	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Çamurdaki su tipleri	1
Şekil 1.2.	Çamurdaki su dağılımına göre susuzlaştırma yöntemleri	2
Şekil 1.3.	Elektro-susuzlaştırmada meydana gelen elektokinetik olay	5
Şekil 2.1.	Laboratuvar ölçekli filtre presin şematik gösterimi	6
Şekil 2.2.	(a) Elektro-susuzlaştırma ünitesinin şematik gösterimi (b) Vida kapağı ve pistonun altındaki elektrot görünümü	7
Şekil 2.3.	Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırma testi için reaktörün şematik gösterimi	8
Şekil 2.4.	Laboratuvar ölçek şematik gösterimi (a) elektro-susuzlaştırma kum kurutma yatağı ve (b) basınç uygulanmış elektro-susuzlaştırma reaktörü	9
Şekil 2.5.	Laboratuvar ölçekli elektro-susuzlaştırma cihazı (b) Elektro-susuzlaştırma sürecinin farklı aşamalarındaki şematik tasarımı	10
Şekil 3.1.	Model reaktörün şematik görünümü ve görselleri	12
Şekil 3.2.	Deneyisel çalışmalarda kullanılan elektrot türleri a) Grafit b) Bakır c) Paslanmaz Çelik	13
Şekil 3.3.	Özgül filtre direnci deney düzeneği	15
Şekil 3.4.	Kapiler emme süresi cihazı	15
Şekil 3.5.	Viskozimetre (BROOKFIELD DV2T)	15

Şekil 4.1.	Kapiler emme süresi değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	22
Şekil 4.2.	Özgül filtre direncinin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	23
Şekil 4.3.	Filtreleme zamanının değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	24
Şekil 4.4.	Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	25
Şekil 4.5.	Toplam katı madde değişimin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	26
Şekil 4.6.	Çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	27
Şekil 4.7.	Fosfat fosforu miktarı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	28
Şekil 4.8.	Amonyum azotu miktarı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)	29
Şekil 4.9.	Kapiler emme süresi değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)	30
Şekil 4.10.	Filtreleme zamanının incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)	31
Şekil 4.11.	Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)	31
Şekil 4.12.	Toplam katı madde miktarı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)	32

Şekil 4.13.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)	33
Şekil 4.14.	Fosfat fosforu miktarı incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)	34
Şekil 4.15.	Amonyum azotu miktarı incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)	35
Şekil 4.16.	Kapiler emme süresi incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	39
Şekil 4.17.	Özgül filtre direnci incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	39
Şekil 4.18.	Filtreleme zamanı incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	40
Şekil 4.19.	Viskozite incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	41
Şekil 4.20.	Toplam katı madde miktarının incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	42
Şekil 4.21.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	43
Şekil 4.22.	Fosfat fosforu miktarı incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	44
Şekil 4.23.	Amonyum azotu miktarı incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)	45
Şekil 4.24.	Kapiler emme süresinin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	46
Şekil 4.25.	Özgül filtre direnci değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	47

Şekil 4.26.	Filtreleme zamanı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	47
Şekil 4.27.	Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	48
Şekil 4.28.	Toplam katı madde değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	49
Şekil 4.29.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	50
Şekil 4.30.	Fosfat fosforu miktarı incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	51
Şekil 4.31.	Amonyum azotu miktarı incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)	52
Şekil 4.32.	Kapiler emme süresi değişimin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	56
Şekil 4.33.	Özgül filtre direnci değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	57
Şekil 4.34.	Filtreleme zamanındaki değişimin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	58
Şekil 4.35.	Viskozite incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	59
Şekil 4.36.	Toplam katı madde gideriminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	60
Şekil 4.37.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	60

Şekil 4.38.	Fosfat fosforu miktarı incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	61
Şekil 4.39.	Amonyum azotu miktarı incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)	62
Şekil 4.40.	Kapiler emme süresi değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	63
Şekil 4.41.	Özgül filtre direncinin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	64
Şekil 4.42.	Filtreleme zamanının incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	65
Şekil 4.43.	Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	66
Şekil 4.44.	Toplam katı madde gideriminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	67
Şekil 4.45.	Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	68
Şekil 4.46.	Fosfat fosforu miktarı incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	69
Şekil 4.47.	Amonyum azotu miktarı incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)	70
Şekil 5.1.	Paslanmaz çelik 5 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)	74
Şekil 5.2.	Paslanmaz çelik elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)	75
Şekil 5.3.	Grafit 5 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)	76

Şekil 5.4.	Grafit 9 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)	76
Şekil 5.5.	Bakır 5 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)	77
Şekil 5.6	Bakır 9 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)	78

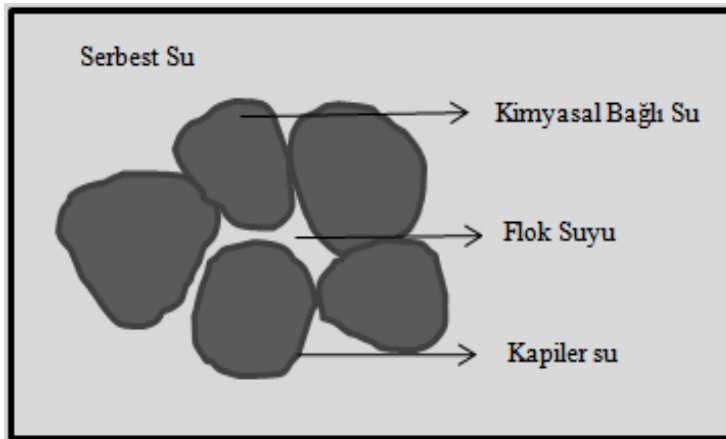
KISALTMALAR

ÇKOİ	Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı
FZ	Filtreleme Zamanı
KES	Kapiler Emme Süresi
ÖFD	Özgül Filtre Direnci
TKM	Toplam Katı Madde
μ	Viskozite

1. GİRİŞ

Kentsel atıksu arıtımı için çoğunlukla tercih edilen aktif çamur prosesi sonucu önemli miktarda bertaraf edilmesi gereken arıtma çamuru üretilmektedir. Filibeli (2002) tarafından, arıtma çamuru; atıksu arıtımı sonucu oluşan sıvı ya da yarı katı halde, kokulu; uygulanan arıtma işlemine bağlı olarak ağırlıkça %0,25 ile %12 katı madde içeren atıklar olarak tanımlanmıştır.

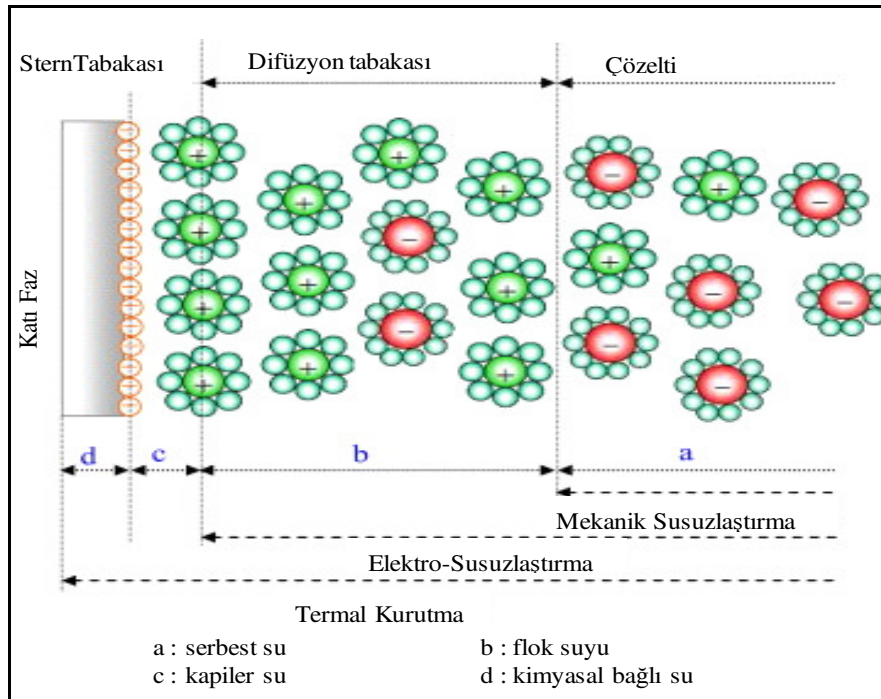
Arıtma çamurunu oluşturan tipik bir aktif çamurdaki suyun dağılımı: Serbest su %75, flok suyu %20, kapiler su %2, kimyasal bağlı su %2,5, katı maddeler %0,5 (Filibeli, 2002).



Şekil 1.1. Çamurdaki su tipleri

Çamurda serbest ve partiküllere yapışık olarak farklı şekillerde su aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Şekil 1.1).

1. Serbest su: Çamur partiküllerine bağlı olmayıp, graviteli çökelme ile kolayca ayrılır.
2. Flok suyu: Floklar içinde hapsedilmiş su olup, yumakla birlikte hareket eder. Mekanik su alma işlemleri ile giderilebilir.
3. Kapiler su: Partiküller üzerinde bağlı halde bulunur ve bu partiküllerin sıkıştırılarak deformasyonları sonucu uzaklaştırılabilir.
4. Kimyasal bağlı su: Partiküller içinde kimyasal olarak bağlanmış sudur (Filibeli, 2002).



Şekil 1.2. Çamurdaki su dağılımına göre susuzlaştırma yöntemleri (Mahmoud vd., 2010)

Bu su tiplerinin çamurdan giderimi için farklı bertaraf işlemleri uygulamak gerekir. Bu bertaraf işlemleri arasında çamur susuzlaştırma teknikleri, çamurun suyunun alınmasında önemli bir yere sahiptir. Böylece çamurun suyunun alınması ile çamur arıtma ünitelerinin yatırım bedeli toplam sistem maliyetinin %30-40'ı işletme maliyetinin ise bütün işletme maliyetinin %50'si civarında olduğu dikkate alındığında susuzlaştırma işlemleri daha önem kazanmaktadır (Eroğlu, 2008).

Çamur susuzlaştırma teknikleri doğal su alma yöntemleri (çamur kurutma yatakları, çamur tarlaları, çamur lagünleri) ve mekanik su alma yöntemleri (vakum filtreler, plakalı pres filtreler, bantlı pres filtreler, santrifüjler) olmak üzere ikiye ayrılır (Filibeli, 2002).

Serbest suyun giderilebilmesine yönelik olan mekanik susuzlaştırma işlemi; çamurun sıkıştırılması ve filtrelenmesi esasına dayandığından termal yöntemlere kıyasla çok düşük bir enerji ihtiyacı gerektirir. Ancak elde edilen çamurun katı madde konsantrasyonu diğer yöntemlere göre düşüktür. Bundan dolayı son yıllardaki araştırmalar daha az maliyetle düşük su içeriğine sahip çamur oluşturacak susuzlaştırma yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Bu amaçla birkaç farklı yöntem geliştirilmiştir (Mahmoud vd., 2010).

- Mekanik susuzlaştırma ve termal/güneş susuzlaştırma tekniklerinin birleştirilerek çamurun suyunun alınması (basınç/sıcaklık)
- Mekanik susuzlaştırma ve elektrik alanı oluşturularak susuzlaştırma tekniklerinin birleştirilmesi
- Ultrason ve/veya manyetik alanların üst üste uygulanması
- Ultrason ve elektrik alanların aynı anda çamura uygulanması

Uygulanacak yöntemin seçimi, susuzlaştırılacak çamurun tipine, arzu edilen çamur nem içeriğine ve daha düşük enerji ve çevresel maliyeti en az olacak şekilde

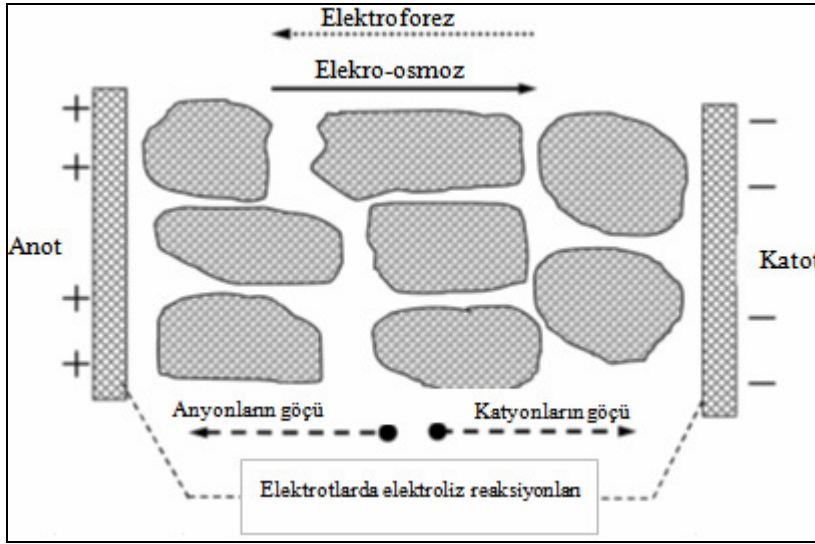
yapılır. Bu yöntemlerden biri olan elektrik alanı yardımıyla susuzlaştırma; elektro-susuzlaştırma olarak ifade edilir. Bu teknoloji basınçla susuzlaştırma gibi klasik susuzlaştırma ile birleştirilerek nihai katı madde içeriğini artırır, termal susuzlaştırma yöntemine kıyasla daha düşük enerji tüketimi gerektirir. Elektro-susuzlaştırma halen laboratuvar ölçeğinde olan pratik endüstriyel uygulamaları sınırlı bir işlemdir. Son yıllarda ince parçacıklar içeren çamurlar, peltemsi çamurlar, arıtma çamurları, ilaç endüstrisi, yiyecek atıkları ve yosunlar gibi mekanik susuzlaştırmanın başarılı olmadığı alanlarda kullanımı artmıştır (Mahmoud vd., 2010).

Mekanik susuzlaştırma yöntemleri sadece çamur dokusundaki serbest suyun giderilmesinde etkilidir. Diğer su türlerinin etkili olarak giderilebilmesi amacı ile çamur susuzlaştırma işlemlerinden önce çamur şartlandırma işlemi uygulanır. Çamur şartlandırma, su içinde bulunan kolloidal veya partikül haldeki askıda katı maddelerin üstünde, fiziksel ve kimyasal kuvvetlerin etkisiyle oluşan elektriksel yükleri nötralize etmek veya kararsız hale getirmek demektir. Şartlandırma işlemi sırasında küçük ve şekilsiz partiküller daha büyük ve parçalanması daha zor parçalar haline dönüştürülür. Bu şekilde sulu çamurdaki katı-sıvı faz ayrımı kolaylaşır (Filibeli, 2002).

Son yıllarda mekanik susuzlaştırma yöntemleri ile yüksek katı madde içeriğine ulaşamayan çamur türleri için elektro-susuzlaştırma yöntemleri geliştirilmiştir (Vesilind, 1994).

Elektro-susuzlaştırma teknikleri hem evsel, hem de endüstriyel çamurların susuzlaştırılması için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik aynı zamanda susuzlaştırma maliyetini azaltan ve susuzlaştırma verimini artıran bir teknolojidir (Mahmoud vd., 2010).

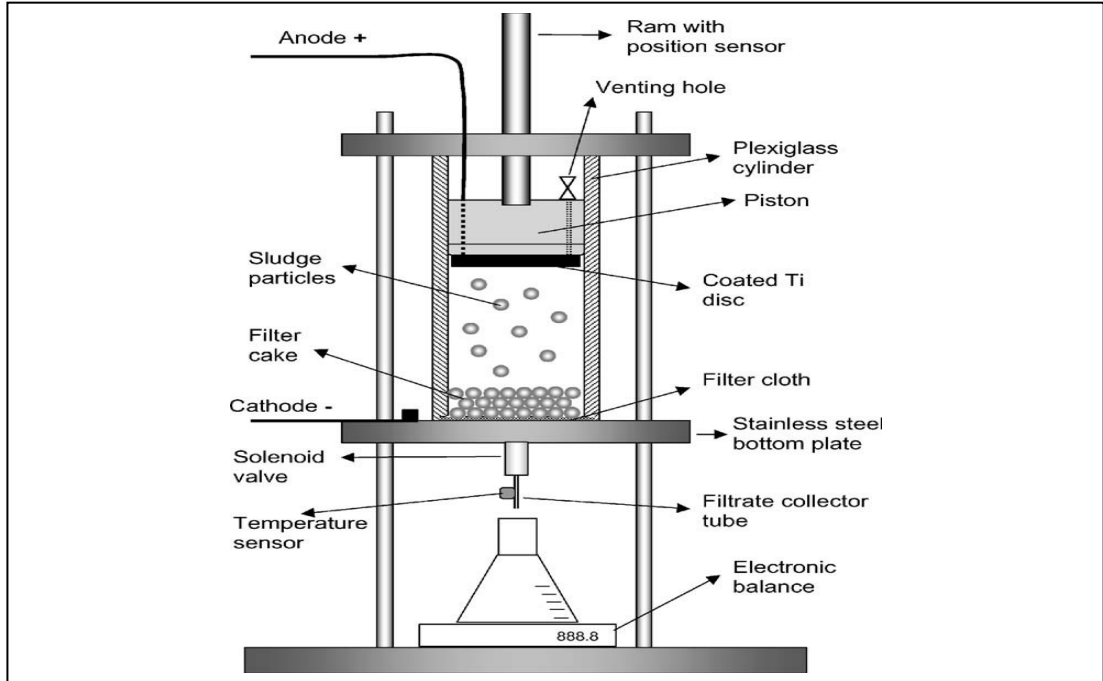
Elektro-susuzlaştırma prosesi, düşük doğru akım (DC) elektrik alanı uygulamasıyla elektro-osmotik olay ile çamurun flokleşmesine neden olur. Elektro-osmotik akım çamurdan ekstra su giderimini artırarak, son çamur kekinde katı madde içeriğini yükseltir. Elektrik alanı uygulandığında elektrotlarda elektro-osmozun yanında; elektroforez, elektro- göç ve elektro-kimyasal reaksiyolar da meydana gelir. Sözü geçen elektro kinetik prosesler doğrudan ya da dolaylı olarak çamurun elektro-susuzlaştırma işlemini etkiler (Tuan vd., 2012).



Şekil 1.3. Elektro-susuzlaştırmada meydana gelen elektrokinetik olay
(Tuan vd., 2012)

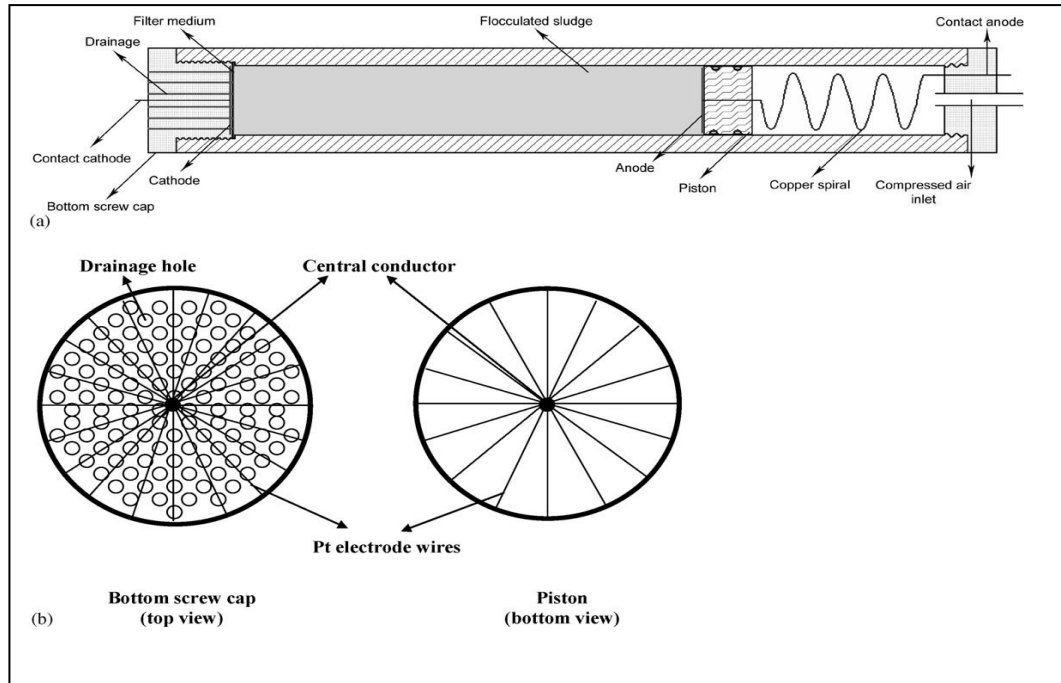
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Saveyn ve arkadaşları tarafından elektro-susuzlaştırma işlemi laboratuvar ölçekli piston akımlı silindir filtre pres ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1). 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. 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 vd., 2005).



Şekil 2.1. Laboratuvar ölçekli filtre presin şematik gösterimi (Saveyn vd., 2005)

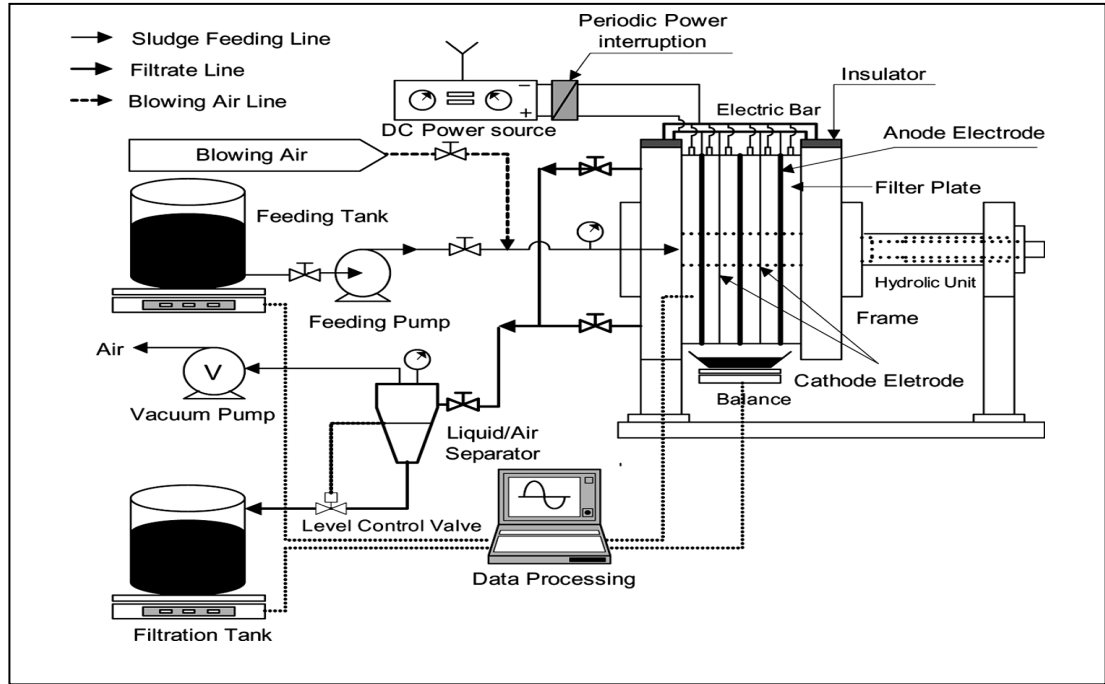
Aynı grubun 2006 yılında yaptığı çalışmada ise 50 ml şartlandırılmış çamura 300 kPa basınç uygulayarak elektrik alanı uygulamasıyla elektro-susuzlaştırma işlemine tabi tutmuşlardır. Piston ile elektrot arasındaki esnek bağlantı spiral şeklinde bakır telle yapılmıştır. Elektrik alanı uygulamak için ayarlı sabit akım kullanılmıştır (Philips, maksimum 100mA ve 72 V). Burada alt vida kapağı katot işlevi, pistondaki elektrot ise anot işlevi görmüştür. Çalışmada platin elektrot teli kullanılmıştır (Saveyn vd., 2006).



Şekil 2.2. (a) Elektro-susuzlaştırma ünitesinin şematik gösterimi (b) Vida kapağı ve pistonun altındaki elektrot görünümü (Saveyn vd., 2006).

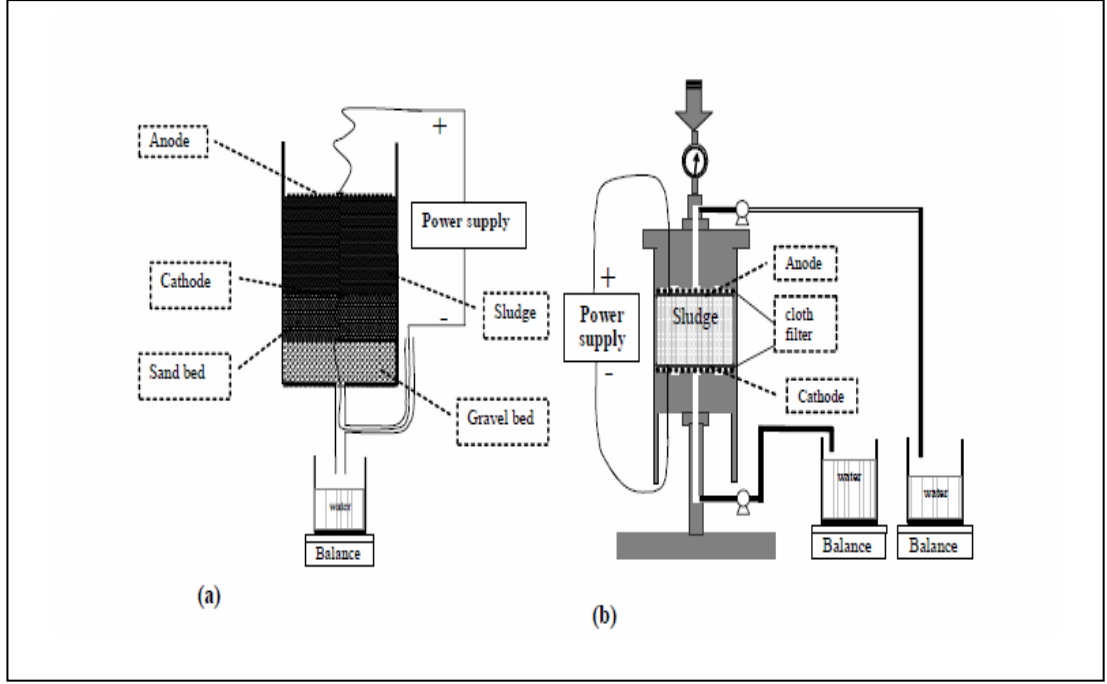
Şekil 2.3'te verilen reaktörde çamura, filtre plakalar arasında mekanik susuzlaştırma ve elektrik uygulamasıyla elektro-susuzlaştırma uygulanabilmektedir. Bu ekipman, çamur besleme kısmı, basınçla birleştirilmiş elektrik alanı uygulama kısmı ve süzüntüleri toplama kısmı olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır.

Enerji tüketimine ve elektrot aşınmasına rağmen işletme maliyetleri dikkate alındığında, optimum şartlar şöyle bulunmuştur: 70 V/cm elektrik alanı şiddeti, 30 dakika uygulama süresi ve 588 kPa basınç. Elektro-susuzlaştırma oranı mekanik susuzlaştırma ile karşılaştırıldığında iki katı, susuzlaştırılmış çamur keki su içeriği %25 azalmıştır (Lee vd., 2007).



Şekil 2.3. Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırma testinde kullanılan reaktörün şematik gösterimi (Lee vd., 2007)

Şekil 2.4.a'da basınçsız deneyler akrilik reaktörde yürütülmüştür. Reaktörde 10 cm çakıl yatağı ve 10 cm kum yerleştirilmiştir. Şekil 2.4.b'de basınçla çalışan elektro-susuzlaştırma reaktörü, polivinil klorürden imal edilmiş ve 9,8 cm çapında, 30 cm uzunluğundadır. Katotta paslanmaz çelik, anotta titanyum levhalar kullanılmıştır. Çamur, sabit 4.0 bar basınca tabi tutulmuştur. İkinci fazda düşük düzeyli 15 V elektrik akımı uygulanmıştır.

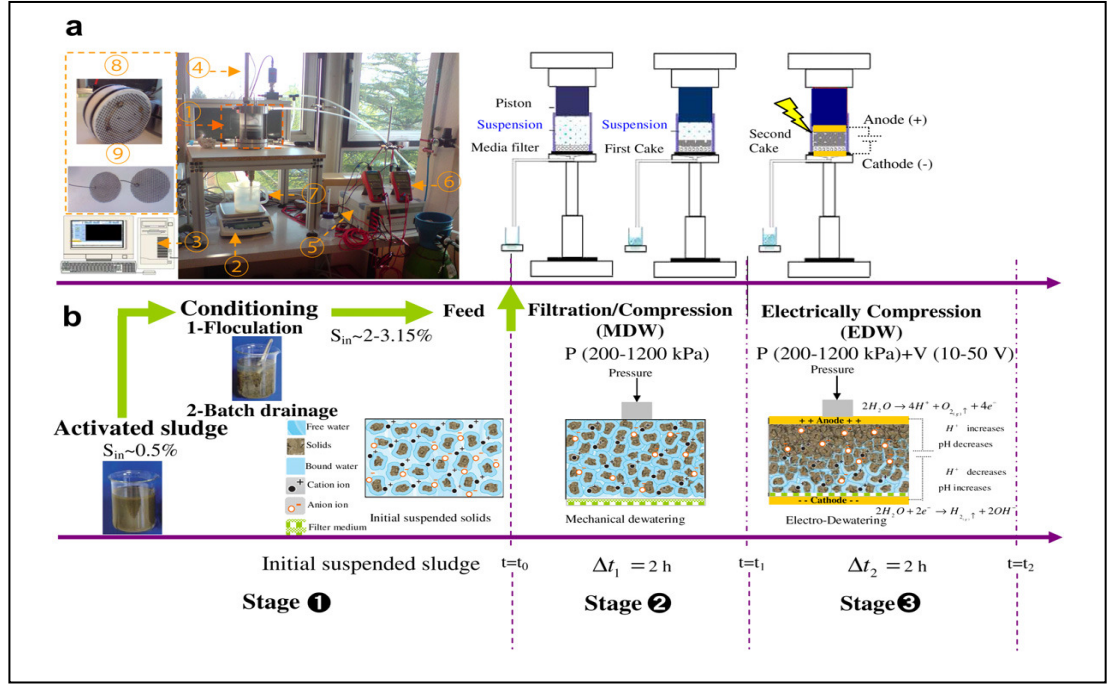


Şekil 2.4. Laboratuvar ölçekli şematik gösterimi (a) Elektro-susuzlaştırma kum kurutma yatağı ve (b) Basınç uygulanmış elektro-susuzlaştırma reaktörü (Tuan vd., 2008)

Elektrik alanı uygulaması negatif yüklü organik maddeleri katottan anota 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 vd., 2008).

Şekil 2.5 a'da verilen laboratuvar ölçekli elektro-susuzlaştırma cihazı; filtrasyon/basınç hücresi (1), elektronik ölçek (2), bilgisayar ve veri edinimi (3), hareket sensörü (4), DC güç kaynağı (5), dijital multimetre (6), filtrat toplayıcı (7), teflon piston (8), elektrotlar (9) kısımlarından oluşmaktadır. Bu reaktör için işletme koşulları; basınç 200-1200 kPa ve voltaj 10-15 V arasında seçilmiştir.

Üstteki hareketli elektrot karışık metal oksitle kaplanmış titanyumla imal edilmiş olup piston sistemine bağlanmıştır. Altta bulunan ve katot olarak görev yapan elektrot titandan yapılmış ve bu elektrot SEFAR TETEX MONO SK025 filtresiyle kaplanmıştır (Mahmoud vd., 2011).



Şekil 2.5. (a) Laboratuvar ölçekli elektro-susuzlaştırma cihazı (b) Elektro-susuzlaştırma sürecinin farklı aşamalardaki şematik tasarımı (Mahmoud vd., 2011)

Arıtma çamuru elektro-susuzlaştırmasını etkileyen faktörler; başlangıç su içeriği, işlem süresi, voltaj uygulaması, polielektrolit şartlandırma etkisi, alkalinite ve tuzluluk olarak belirlenmiştir (Tuan vd., 2012).

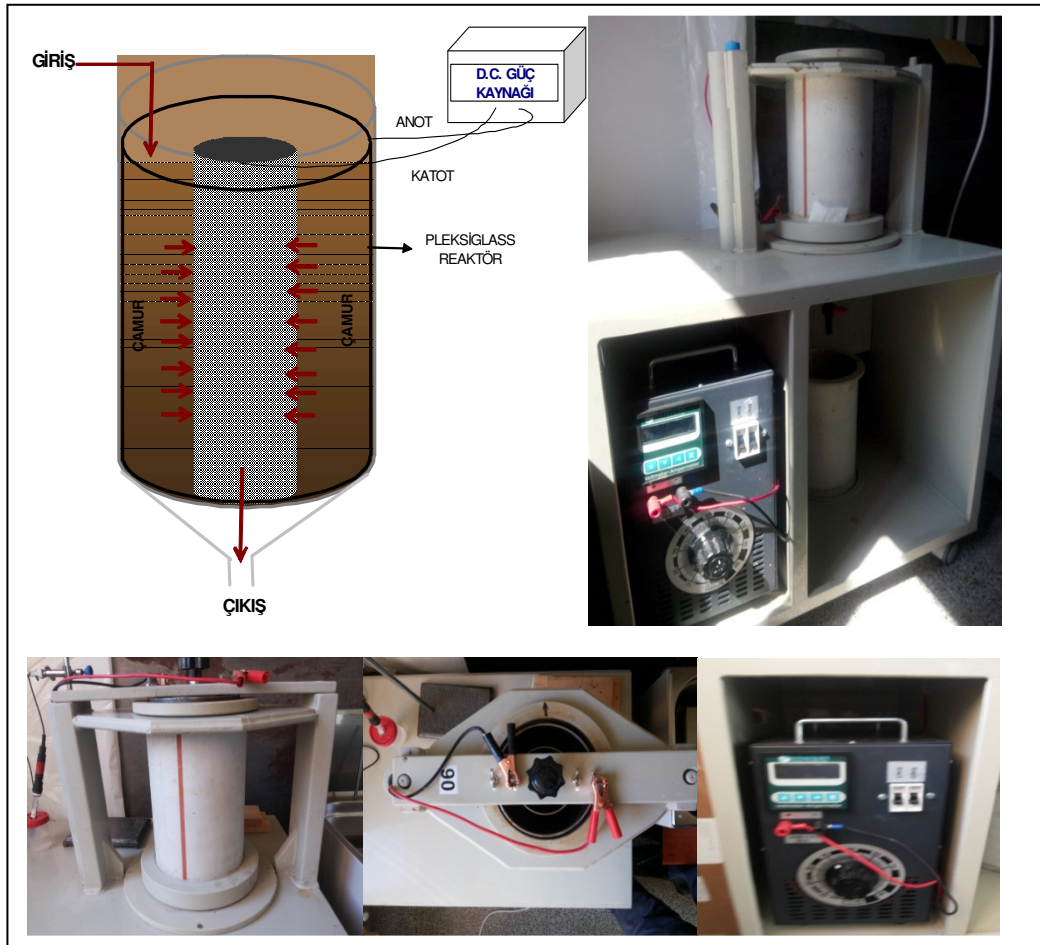
Elektro-susuzlaştırmada çamurdaki başlangıç su içeriği önemli ölçüde etkilidir. Verimli bir susuzlaştırmaya ulaşmak için, başlangıç çamuru çok ıslak veya çok kuru olmamalıdır (Tuan vd., 2010). Kısa elektro-susuzlaştırma süresi ise yeterli susuzlaştırma etkisine neden olamamıştır (Smollen vd., 1994, Snyman vd., 2000).

Voltaj artışı yüksek su giderim oranı, daha kuru çamur keki ve daha kısa susuzlaştırma süresi ile sonuçlanır. Bununla birlikte yüksek voltaj uygulamasıyla daha çok enerji harcanır (Tuan vd., 2010). Polielektrolitle şartlandırmada asıl etki özellik ve dozdur fakat elektro-ozmotik su taşınmasında önemli etkiye sahip değildir (Saveyn vd., 2005). Basınçlı elektro-susuzlaştırmada çamur başlangıç pH' ının su içeriğine etkisi yoktur (Citeau vd., 2011). Çamurdaki tuz içeriği, final çamur kekindeki kuruluğu etkilememektedir. Bununla birlikte yüksek konsantrasyondaki tuz, yüksek akım sıklığına bağlı enerji tüketimi artışıyla sonuçlanmıştır (Tuan vd., 2008, Citeau vd., 2011).

Elektro-susuzlaştırmanın avantaj ve dezavantajları ise çamurdaki elektro-susuzlaştırma ilerlemelerine rağmen enerji verimliliğindeki düzenlemeler ve daha kuru çamur keki oluşturmak için elektro-susuzlaştırma konusundaki ilerlemelere rağmen ekstra maliyetlerden dolayı, yakın gelecekte klasik susuzlaştırma metotlarıyla yer değiştirmesi mümkün değildir. Ama elektro-susuzlaştırma işlemini anlama ve onun ek yararlarını (çamurdan tuz giderimi, fekal koliform giderimi) belirlenmesinin sürdürülmesi gerekmektedir (Tuan vd., 2012).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Model Reaktör ve Elektrotlar



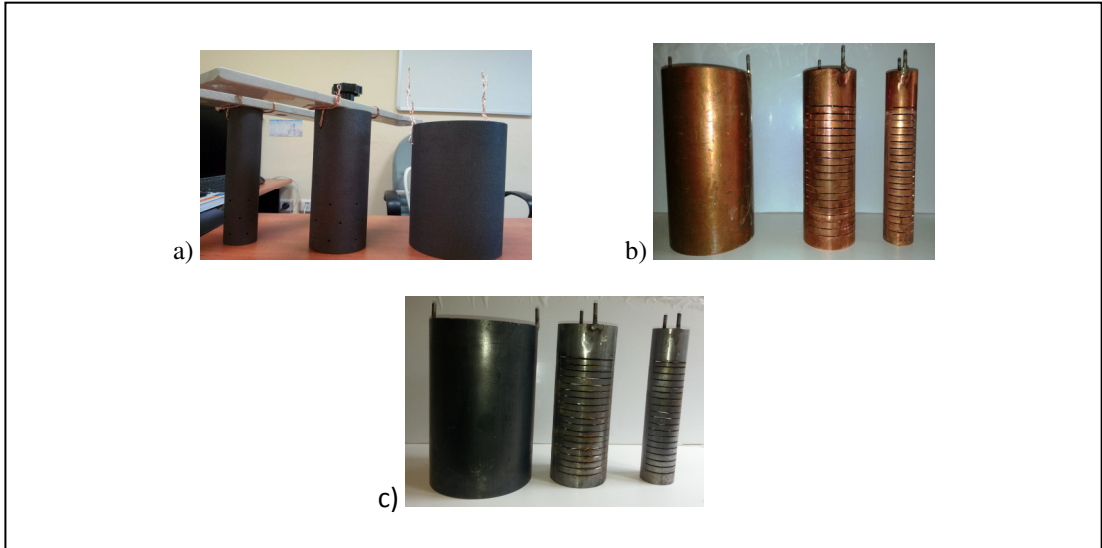
Şekil 3.1. Model reaktörün şematik görünümü ve görselleri

Çalışmada geliştirilen model reaktör, 25 cm yüksekliğinde ve 15 cm çapındadır. Reaktör pleksiglastan imal edilmiş, istenilen hızda dönebilen bir dış kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Elektrotlar bakır, paslanmaz çelik ve grafit olmak

üzere üç farklı malzemeden imal edilmiştir. Anot olarak kullanılan elektrotun çapı 13,6 cm'dir.

Anot ve katot arasındaki mesafe değişiminin sistem verimine etkisinin incelenebilmesi için elektrotlar 5 ve 9 cm olmak üzere iki farklı çapta hazırlanmıştır. 5 cm çapında katot elektrot kullanıldığında anot katot arasındaki mesafe 4,3 cm, 9 cm katot elektrotta ise 2,3 cm olmaktadır. Böylece elektrotlar arasındaki mesafenin etkisi incelenmiştir.

Katot elektrotlar üzerinde, su geçişinin sağlanabilmesi için delikler açılmıştır (Şekil 3.2). Ancak, grafit elektrotta açılan delik sayısı malzemenin mukavemetini zayıflatacağından, diğer elektrotlara göre daha az sayıda delik açılmıştır. Su geçişinde herhangi bir engel yaşanmamıştır. Elektrotların DC güç kaynağına bağlantısının yapılabilmesi için, elektrotlara demir uçlar kaynak yapılarak ilave edilmiştir. Grafit elektrotta ise elektrik bağlantısı elektrotlar üzerinde açılan deliklere bakır teller geçirmek vasıtası ile sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrot türleri a) Grafit b) Bakır c) Paslanmaz Çelik

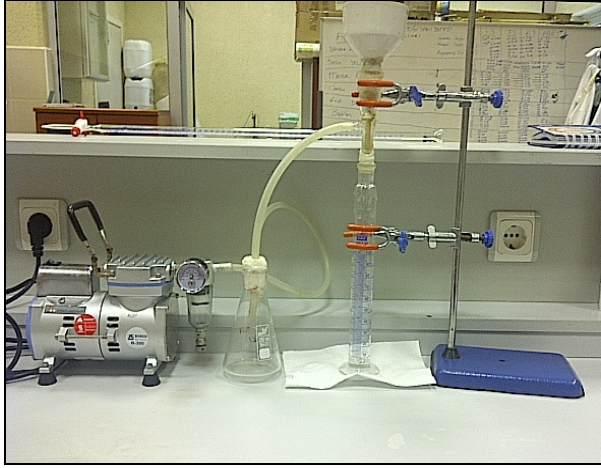
Projede tasarımı yapılan istatistiksel program (MINITAB 17.0) aracılığı ile istenilen deney şartları belirlendikten sonra farklı süre, pH ve voltajlar uygulanarak süreç işletilmiştir. Çamur girişi, anot ve katot arasındaki kısma yapılmış ve reaktör önceden belirlenen hızda döndürülmüştür. Bu sırada sisteme farklı voltajlar uygulanmıştır. İşletme süresi sonunda model reaktörün alt kısmından çıkış suyu alınarak çamurun susuzlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistem kesikli olarak işletilmiştir.

3.2. Çamur Karakteristiğinin Belirlenmesi

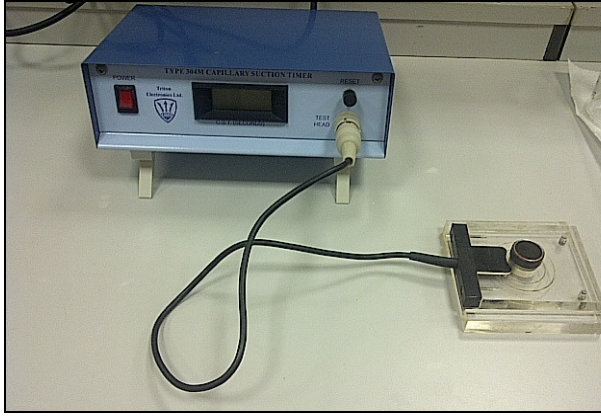
Evsel arıtma çamuru örnekleri kentsel atıksu arıtımı yapan bir arıtma tesisinin (Bolu Atıksu Arıtma Tesisi) havalandırma havuzundan alınmış, 24 saat süre ile 4°C’ de bekletilerek yoğunlaşması sağlanmıştır. Üst suyu alındıktan sonra deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

3.3. Analizler

Yoğun çamurda; kapiler emme süresi-KES (Triton 304 cihazı ile SM 2710 G), özgül filtre direnci-ÖFD, filtreleme zamanı-FZ (SM 2710 H), viskozite (BROOKFIELD DV2T), toplam katı madde-TKM (SM 2540 G), pH (SM 4500-H⁺ B), çamur üst suyunda ise çözünmüş fosfat fosforu-ÇF (SM 4500-P D), amonyum azotu (SM 4500-NH₃ F), çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı-ÇKOI (SM 5220 D), parametreleri tayin edilmiştir (Lo vd., 2001, APHA 2005).



Şekil 3.3. Özgöl filtre direnci deney düzeneği



Şekil 3.4. Kapiler emme süresi cihazı



Şekil 3.5. Viskozimetre (BROOKFIELD DV2T)

3.4. İstatistiksel Analizler

Proje kapsamında deneysel sonuçların daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla Box-Behnken istatistiksel analizi kullanılmıştır. Box-Behnken tasarımları ikinci derece model parametrelerinin tahminlenmesinde kullanılan üç seviyeli tamamlanmamış (incomplete) çok etkenli tasarımlardan, dönersel tasarımların bir çeşidi olan Box-Behnken tasarımları 1960 yılında Box ve Behnken tarafından geliştirilmiştir. Box-Behnken tasarımlarında her bir etken üç düzeye sahiptir. Box-Behnken tasarımları merkezsiz bileşik tasarımlara kıyasla daha ekonomik bir tasarım sınıfıdır (Köksoy 2001).

Box-Behnken yöntemine göre; pH değeri, işlem süresi ve uygulanan voltaj değeri olarak 3 adet bağımsız değişken seçilmiştir. Bağımsız değişkenlere yanıt değişkeni olarak işlem sonrası numunede bağımlı değişkenler belirlenmiştir. Aynı metot tüm elektrot türleri (bakır, paslanmaz çelik, grafit) için tekrarlanmıştır.

Üç faktörlü Box-Behnken deneysel dizaynı için kodlanmış deney etapları ve deneysel çalışma için belirlenmiş bağımsız değişken noktaları Tablo 3.1’ de verilmiştir. Bu noktalar için bağımlı değişkenler analizlendikten sonra sonuçlar MINITAB 17.0 bilgisayar programı kullanılarak cevap fonksiyonu (Denklem 1), B_0 , B_1 , B_2 , B_3 , B_{11} , B_{22} , B_{33} , B_{12} , B_{13} , B_{23} fonksiyon katsayılarını belirlenmiştir (MINITAB Inc, USA).

Hesaplanan cevap fonksiyonu katsayıları kullanılarak her bir yanıt değişkeni için oluşturulan cevap fonksiyon denklemleri ilgili bölümlerde verilmiştir. ANOVA regresyon analizi her bir yanıt değişkeni için oluşturularak R^2 ve düzeltilmiş R^2 değerleri hesaplanmıştır.

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

Tablo 3.1. Bağımsız değişkenler matrisi ve kullanılan bağımsız değişken noktaları

X1	X2	X3	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

3.5. Model Reaktörün İşletilmesi

Anot elektrot 13,6 cm çapındadır. Katot elektrot ise 5 ve 9 cm olarak çalışılmıştır (anot ve katot arasındaki mesafe sırası ile 4,3 cm ve 2,3 cm). Katot elektrot üzerinde çamur geçişine olanak verecek şekilde delikler açılmıştır. İstatistiksel analiz kısmında verilen bağımsız değişken noktaları kullanılarak 15 etaplık deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen TKM, ÇKOİ, NH₄-N, PO₄-P, Viskozite, FZ, KES ve ÖFD parametrelerinin yüzde olarak değişimleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Evsel Arıtma Çamurunun Özelliklerinin Belirlenmesi

Evsel arıtma çamurunun özelliklerinin belirlenmesi için analizler 3 defa tekrarlanmış ve farklı zamanlarda alınan numunelerde parametre değişimleri göz önüne alınarak aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Yoğun evsel arıtma çamuru karakteristiği

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Kapiler emme süresi (sn)	14,6±6,69	Çözünmüş KOİ (mg/L)	72,5±15,5
Özgül filtre direnci (m/kg)	$1,23 \times 10^{14} \pm 8,63 \times 10^{13}$	Toplam KOİ (mg/L)	8319,8±1569,4
Filtreleme zamanı (dk)	26±15	Toplam amonyum azotu (mg/L)	32,70±7,78
Viskozite (N.s/m ²)	0,59±0,16	Toplam uçucu katı madde (%)	21,33±3,26
pH	6,83±0,68	Çözünmüş fosfor (mg/L)	10,2±5,7
Toplam katı madde (%)	1,07±0,27	Toplam fosfor (mg/L)	29,98±10,83

Tablo 3.1’de verilen bağımsız değişkenler matrisi ve bağımsız değişken noktaları kullanılarak yapılan 15 etaplık deneysel çalışma sonucunda elde edilen TKM, ÇKOİ, NH₄-N, PO₄-P, Viskozite, FZ, KES ve ÖFD parametrelerinin yüzde olarak değişimleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Cevap fonksiyonu denklemleri belirlenen bağımlı değişkenlere ait grafiklerin değerlendirilmiş ve bağımlı değişkenler üzerinde bağımsız değişkenlerin (pH, işlem süresi, uygulanan voltaj) etkisi incelenmiştir. pH ve sürenin etkisinin belirlenmesi için voltaj bağımsız değişkenin merkez noktası olan 17,5 voltta sabitlenmiş, voltaj ve sürenin etkisi için pH, 6,5'te sabit tutulmuş, pH ve uygulanan voltajın etkisinin belirlenmesi için ise işletim süresi 45 dakikada sabitlenerek değerlendirmeler yapılmıştır. Anot olarak 13,6 cm çapında, katot olarak üzerinde çamur geçişine olanak verecek şekilde delikler açılmış olan 5 ve 9 cm çapındaki elektrotlarla çalışılmıştır (anot ve katot arasındaki mesafe sırası ile 4,3 cm ve 2,3 cm).

4.2. Paslanmaz Çelik Elektrot Kullanımı

Paslanmaz çelik elektrot kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamurun susuzlaştırma veriminin değerlendirilmesi için FZ, KES ve ÖFD parametreleriyle, ÇKOİ, NH₄-N, TKM, Viskozite, PO₄-P parametreleri belirlenmiştir. Ölçülen değerler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Katot çapı 5 cm ve 9 cm için oluşturulan cevap fonksiyonu denklemleri aşağıda verilmiştir.

5 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,96$, düzeltilmiş $R^2=0,90$)

$$KES = 29 + 23,1 * X_1 + 0,45 * X_2 - 2,08 * X_3 - 5,93 * X_1 * X_1 - 0,0176 * X_2 * X_2 - 0,0473 * X_3 * X_3 + 0,501 * X_1 * X_2 + 1,0303 * X_1 * X_3 - 0,0303 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÖFD ($R^2=0,91$, düzeltilmiş $R^2=0,74$)

$$ÖFD = -807 - 18 * X_1 + 19,1 * X_2 + 46,9 * X_3 + 22,63 * X_1 * X_1 + 0,0365 * X_2 * X_2 - 0,267 * X_3 * X_3 + 3,128 * X_1 * X_2 + 7,73 * X_1 * X_3 + 0,247 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; FZ ($R^2=0,93$, düzeltilmiş $R^2=0,79$)

$$FZ = -1486 + 333,9 * X_1 + 8,84 * X_2 + 23,2 * X_3 - 19,57 * X_1 * X_1 - 0,0184 * X_2 * X_2 - 0,679 * X_3 * X_3 - 1,513 * X_1 * X_2 + 0,0109 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; VİSKOZİTE ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,71$)

$$\mu = 111,2 + 0,94 * X_1 - 0,378 * X_2 - 0,981 * X_3 - 0,798 * X_1 * X_1 + 0,00236 * X_2 * X_2 - 0,0103 * X_3 * X_3 + 0,1161 * X_1 * X_2 + 0,6225 * X_1 * X_3 - 0,0326 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,99$, düzeltilmiş $R^2=0,98$)

$$TKM = -27,8 + 31,91 * X_1 + 0,049 * X_2 - 0,1 * X_3 - 5,045 * X_1 * X_1 + 0,01254 * X_2 * X_2 - 0,029 * X_3 * X_3 + 0,35 * X_1 * X_2 + 0,623 * X_1 * X_3 - 0,034 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,95$, düzeltilmiş $R^2=0,85$)

$$\text{ÇKOİ} = 136,5 + 2,32 * X_1 - 2,31 * X_2 - 1,282 * X_3 - 0,046 * X_1 * X_1 + 0,01754 * X_2 * X_2 - 0,1014 * X_3 * X_3 + 0,0955 * X_1 * X_2 + 0,346 * X_1 * X_3 + 0,00358 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; PO₄-P ($R^2=0,87$, düzeltilmiş $R^2=0,65$)

$$PO_4P = 363 + 14,7 * X_1 - 8,83 * X_2 - 10,2 * X_3 - 7,77 * X_1 * X_1 + 0,0574 * X_2 * X_2 - 0,053 * X_3 * X_3 + 0,62 * X_1 * X_2 + 1,876 * X_1 * X_3 - 0,0095 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; NH₄ -N ($R^2=0,94$, düzeltilmiş $R^2=0,82$)

$$NH_4N = -120,8 + 41,8 * X_1 + 1,64 * X_2 - 2,23 * X_3 - 2,212 * X_1 * X_1 + 0,00519 * X_2 * X_2 - 0,1061 * X_3 * X_3 + 0,3363 * X_1 * X_2 - 0,125 * X_1 * X_3 - 0,0013 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,97$, düzeltilmiş $R^2=0,92$)

$$KES = -405,7 + 87,3 * X_1 + 7,6 * X_2 + 7,78 * X_3 - 5,37 * X_1 * X_1 + 0,0856 * X_2 * X_2 - 0,0654 * X_3 * X_3 - 0,084 * X_1 * X_2 - 1,248 * X_1 * X_3 + 0,0457 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; FZ ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,70$)

$$FZ = -874 + 281,5 * X_1 - 5 * X_2 + 1,6 * X_3 - 17,59 * X_1 * X_1 + 0,2222 * X_2 * X_2 - 0,519 * X_3 * X_3 - 1,204 * X_1 * X_2 - 0,56 * X_1 * X_3 - 0,370 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; VİSKOZİTE ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,78$)

$$\mu = 100,62 - 0,683 * X_1 - 0,0432 * X_2 - 0,2348 * X_3 + 0,0286 * X_1 * X_1 + 0,001186 * X_2 * X_2 + 0,00698 * X_3 * X_3 - 0,00431 * X_1 * X_2 + 0,01443 * X_1 * X_3 - 0,001696 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,85$, düzeltilmiş $R^2=0,59$)

$$TKM = -3,5 + 18,76 * X_1 + 0,317 * X_2 + 1,67 * X_3 - 1,537 * X_1 * X_1 + 0,000156 * X_2 * X_2 + 0,0101 * X_3 * X_3 + 0,0285 * X_1 * X_2 - 0,0571 * X_1 * X_3 - 0,0351 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,96$, düzeltilmiş $R^2=0,89$)

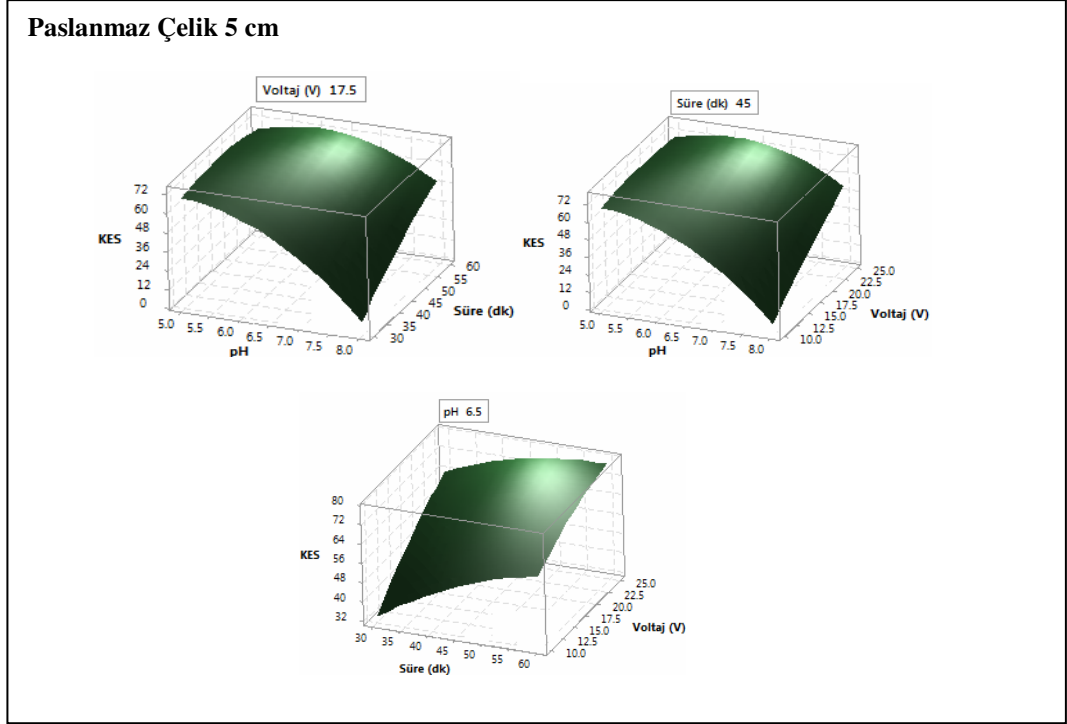
$$\text{ÇKOİ} = 940 - 211,7 * X_1 - 7,01 * X_2 - 7,37 * X_3 + 16,84 * X_1 * X_1 + 0,0512 * X_2 * X_2 - 0,0933 * X_3 * X_3 - 0,076 * X_1 * X_2 - 0,232 * X_1 * X_3 + 0,1562 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; PO₄-P ($R^2=0,95$, düzeltilmiş $R^2=0,86$)

$$PO_4P = 41,2 + 8,3 * X_1 + 1,57 * X_2 + 1,43 * X_3 - 0,367 * X_1 * X_1 - 0,00942 * X_2 * X_2 + 0,0221 * X_3 * X_3 - 0,0805 * X_1 * X_2 - 0,32 * X_1 * X_3 - 0,0331 * X_2 * X_3$$

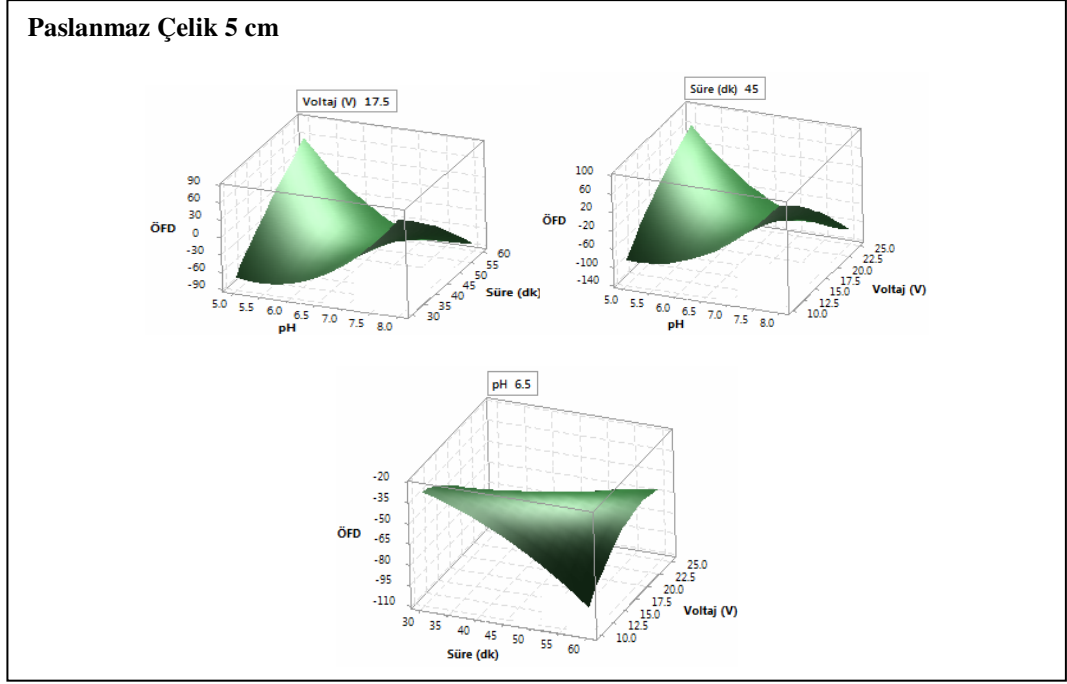
9 cm katot çapı için; NH₄-N ($R^2=0,99$, düzeltilmiş $R^2=0,98$)

$$NH_4N = 2269 - 725,9 * X_1 + 0,31 * X_2 + 4,68 * X_3 + 55,14 * X_1 * X_1 + 0,0092 * X_2 * X_2 - 0,2273 * X_3 * X_3 - 0,232 * X_1 * X_2 + 0,625 * X_1 * X_3 + 0,0076 * X_2 * X_3$$



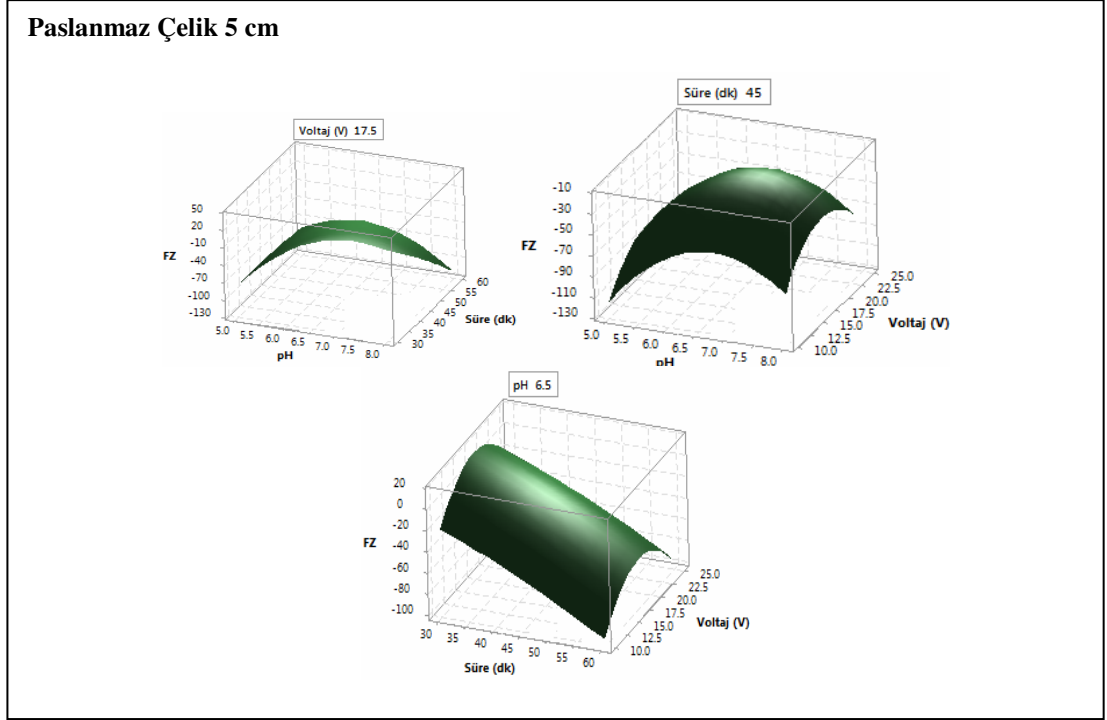
Şekil 4.1. Kapiler emme süresi değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

Şekil 4.1’de çamurun susuzlaştırma performansını gösteren bir parametre olan kapiler emme süresi incelenmiştir. Voltaj ve sürenin sabit tutulduğu grafiklerde, asidik pH’ ta KES’in %70 oranında azaldığı görülmüştür. Bazik pH’ ta KES değerleri süre ve voltaj artışıyla artmış, %48 değerine ulaştığı belirlenmiştir. pH 6,5’te işletim süresinin ve voltajın artmasıyla KES değeri arttığı gözlemlenmiştir. Paslanmaz çelik 5 cm elektrot kullanıldığında susuzlaştırma performansı olumlu etkilenmiş, asidik pH, voltaj ve işletim süresi artışıyla KES %72 oranında azaldığı görülmüştür. Deneysel ve istatistiksel veriler değerlendirildiğinde KES azalması maksimum %72 değerine ulaştığı görülmüştür (pH 6,5, 25 V ve işletim süresi 60. dakika).



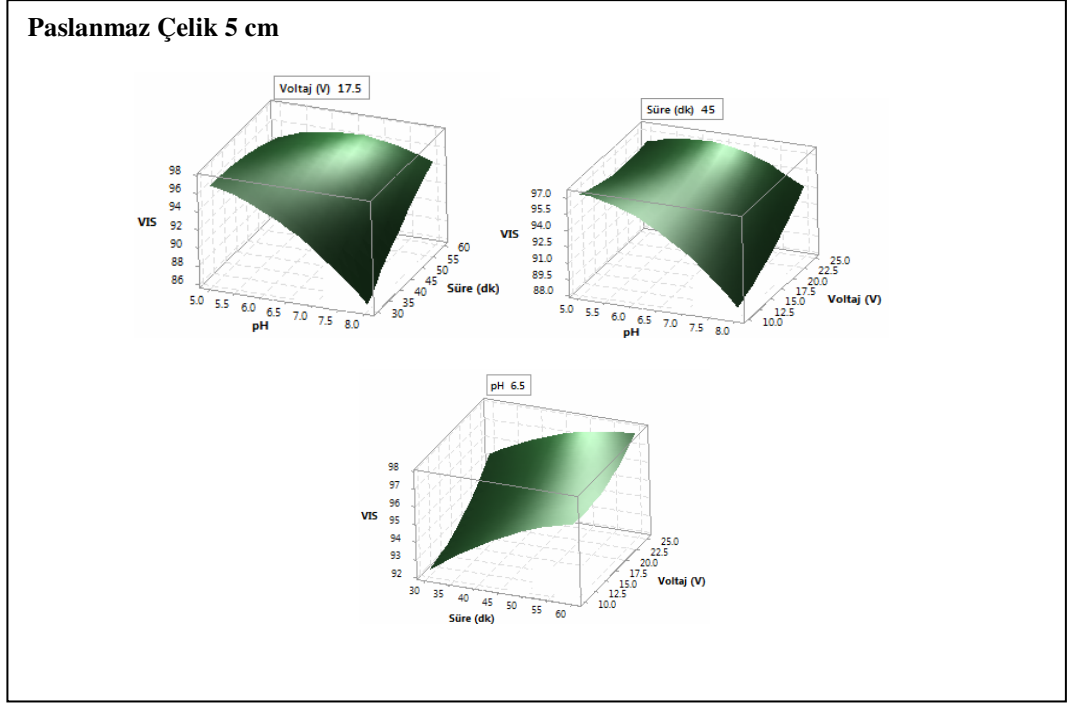
Şekil 4.2. Özgül filtre direncinin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

Özgül filtre direnci değeri çamurun yaklaşık 35 kPa basınç uygulaması ile basınç altında su verme özelliklerinin ortaya koyulması açısından önemlidir. Paslanmaz çelik 5 cm katot elektrot kullanılarak yapılan çalışmada ÖFD, pH 6,5, voltaj 25 V ve işletim süresi çamur elektro-susuzlaştırma işlemine tabi tutulduğunda dramatik olarak azaldığı görülmüş ve KES değerine benzer olarak yüzdesel azalma şeklinde ifade edilmiştir (Şekil 4.2). Voltaj 17,5'te sabitlendiğinde, ÖFD pH 5 en yüksek değerini 60. dakikada verirken (%60), pH 8'de en yüksek değerini (%60) 30. dakikada verdiği görülmüştür. Bazı pH değerleri sistem performansını olumlu etkilerken, düşük pH değerlerinde ise sistem performansının artırılması için işletim süresinin uzatılabileceği belirlenmiştir. pH 6,5'te sabitlendiğinde ise ÖFD olumsuz etkilenerek yükseldiği görülmüştür.



Şekil 4.3. Filtreleme zamanının değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

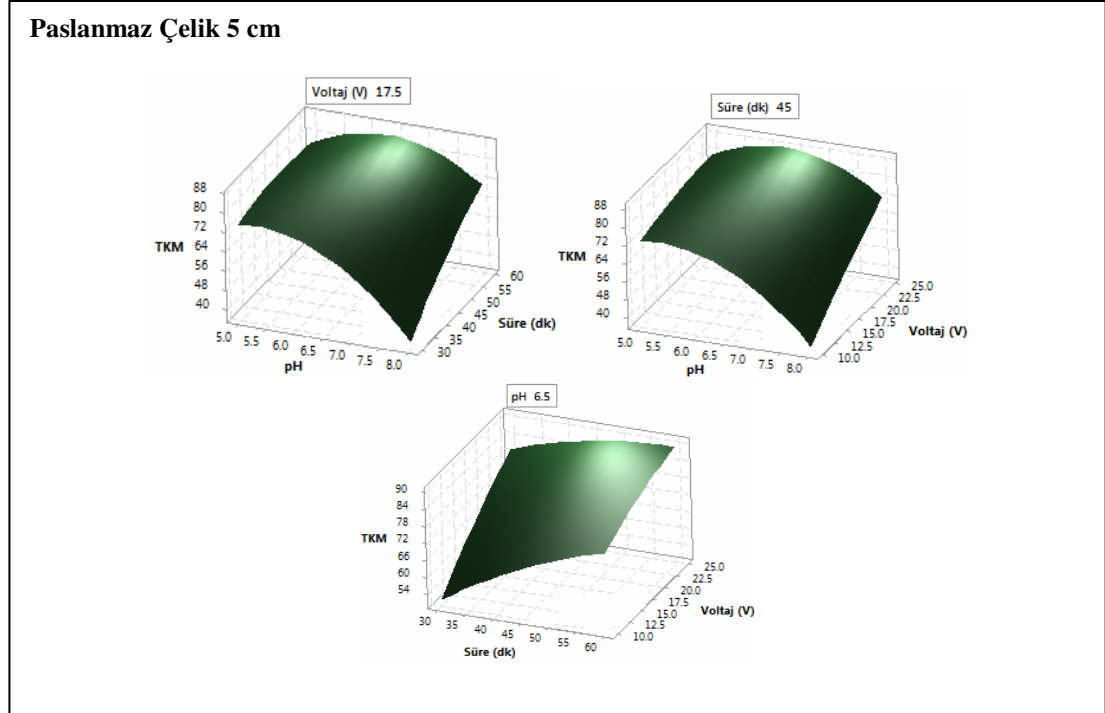
Ham atıksuyun yüzde olarak değişimi istatistiksel analiz kullanılarak hesaplanmıştır. Buradan yola çıkılarak pH 6,5'te filtreleme zamanı olumsuz etkilendiği görülmüştür. Aynı zamanda pH 6,5, voltaj 17,5 volt ve işletim süresi 30 dakikada %20 oranında azaldığı tespit edilerek sözü geçen işletim şartlarının uygulanması öngörülmüştür. Paslanmaz çelik 5 cm elektrot ile çalışıldığında filtreleme zamanı üzerinde verimli bir sonuç elde edilmediği görülmüştür (Şekil 4.3).



Şekil 4.4. Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

Ham çamura ait viskozite değerine göre çamura bağlı su, çamur bünyesinden ayrıldığından dolayı model reaktörden alınan çıkış suyu örneklerinde viskozite değerinin azaldığı görülmüştür. Bu azalma yüzde olarak ifade edilmiş ve Şekil 4.4'te sunulmuştur. Viskozitenin en yüksek değeri pH 6,5, voltaj 25 V ve işletim süresi 60. dakika olarak belirlenmiştir (%98). İşletim süresi 45. dakikada sabit kaldığında viskozitenin, pH 5'te %97 azaldığı görülmüş, pH yükseldikçe viskozite azalma veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Böylece çamurun viskozitesinin asidik pH'ta daha etkili azaldığı belirlenmiştir. pH 6,5'te voltaj ve işletim süresi artırıldığında sistem performansı olumlu etkilenmiştir. İşletim süresi 30. dakikada ve 10 voltta %94 azalmış olan viskozite, 60. dakikada ise 25 voltta en yüksek değerine ulaşarak %98 azaldığı görülmüştür. Voltaj 17,5'te sabit tutulduğunda pH 8'de ve işletim süresi 30. dakikada %86 değerine gerilemiş, pH 5 ve 30. dakikada ise %96 azaldığı

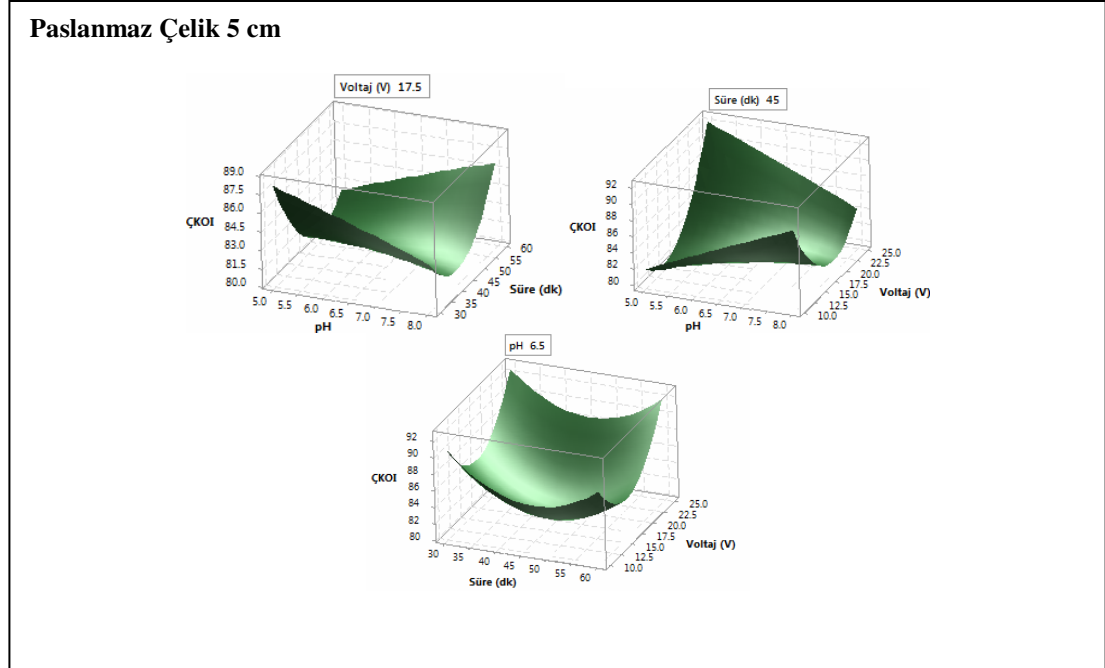
belirlenmiştir. Bu durum çamurun viskozitesinin asidik pH'ta daha çok azaldığını ve sistem performansını olumlu etkilediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. Toplam katı madde değişimin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

Şekil 4.5'te Box-Behnken yanıt yüzeyi yöntemi ile TKM değişimi incelenmiştir. pH 6,5 değerinde sabit tutulduğunda akım ve işletim süresinin artması ile TKM miktarının yüzde olarak azaldığı gözlemlenmiştir. TKM miktarı azalma yüzdesinin en yüksek (%90) değerine voltaj 25 V ve işletim süresi 60. dakikada ulaşılmıştır. İşletim süresi 45. dakikada sabit kaldığında ise pH 5'te voltajın artması TKM miktarını fazla değiştirmezken, pH 8'de voltajın artması ile TKM miktarı %40'tan %72 oranına kadar azalmıştır. Voltaj 17,5'te sabitlendiğinde ise asidik pH'ta %72 azalan katı madde miktarı bazik pH'ta %40 azalmıştır. Asidik pH, yüksek

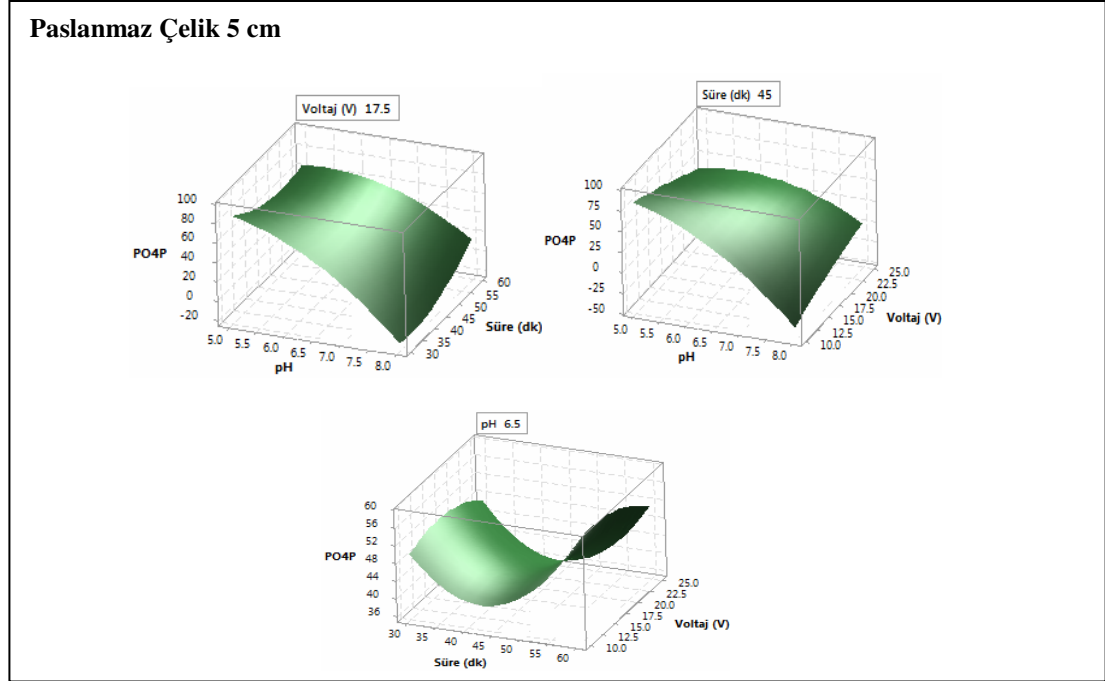
voltaj ve işletim süresinin arttırılmasıyla katı madde miktarının daha fazla azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

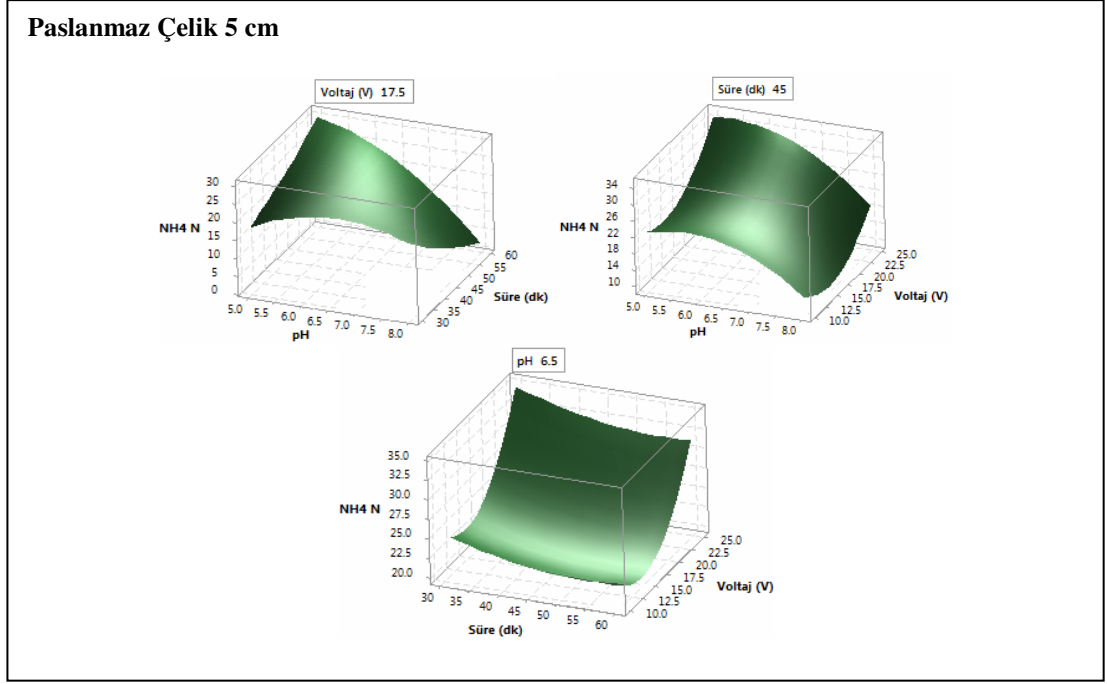
Şekil 4.6’da elektro-susuzlaştırma işlemi sonucunda elde edilen çıkış suyu içerisindeki ÇKOİ değeri belirlenerek uygulanan işlemin ÇKOİ konsantrasyonunu arttırdığı gözlenmiştir. İşlem sonunda artan konsantrasyon değerleri ile ham çamurun sahip olduğu ÇKOİ değerleri karşılaştırılmış ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan Box-Behnken yanıt yüzeyi yöntemine göre ÇKOİ, pH 6,5’te voltaj 10 voltta iken işletim süresinin 30. dakikasında %90, 60. dakikasında ise %92 oranında konsantrasyonun arttığı görülmüştür. İşletim süresi 45. dakikada sabitlendiğinde pH 8, voltaj 10 V ile çalışıldığında %86 olan ÇKOİ konsantrasyon artışı, 25 voltta ise %88 oranında azaldığı görülmüştür. Buna göre uygulanan voltajın, konsantrasyonun

yükselmesinde çok etkili olmadığı ancak pH ve işletim süresinin etkilerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Fosfat fosforu değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

Şekil 4.7’de giriş çamuru üst suyunun sahip olduğu fosfat fosforu konsantrasyonu azalması yüzde olarak ifade edilmiştir. Süre 45 dakikada sabitken pH 5, voltaj 10 voltta en yüksek değerine ulaşmış (%75), pH 8’de ise ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Voltaj 17,5’te sabitken de bazik pH değerleri sistem performansını olumsuz etkilemiştir. Bazik pH’ın sistem performansını olumsuz etkilediği belirlenmiştir. pH 6,5’te sabitken voltaj değerinin değişmesi fosfat fosforu konsantrasyonu üzerinde ciddi bir değişim yaratmamakla beraber, ilginç olarak 45. dakikada konsantrasyonun minimum seviyede olduğu 30. ve 60. dakikada ise elektro-susuzlaştırma işleminden alınan çıkış suyundaki fosfat fosforu konsantrasyonunun daha yüksek (%52-%60) olduğu gözlemlenmiştir.

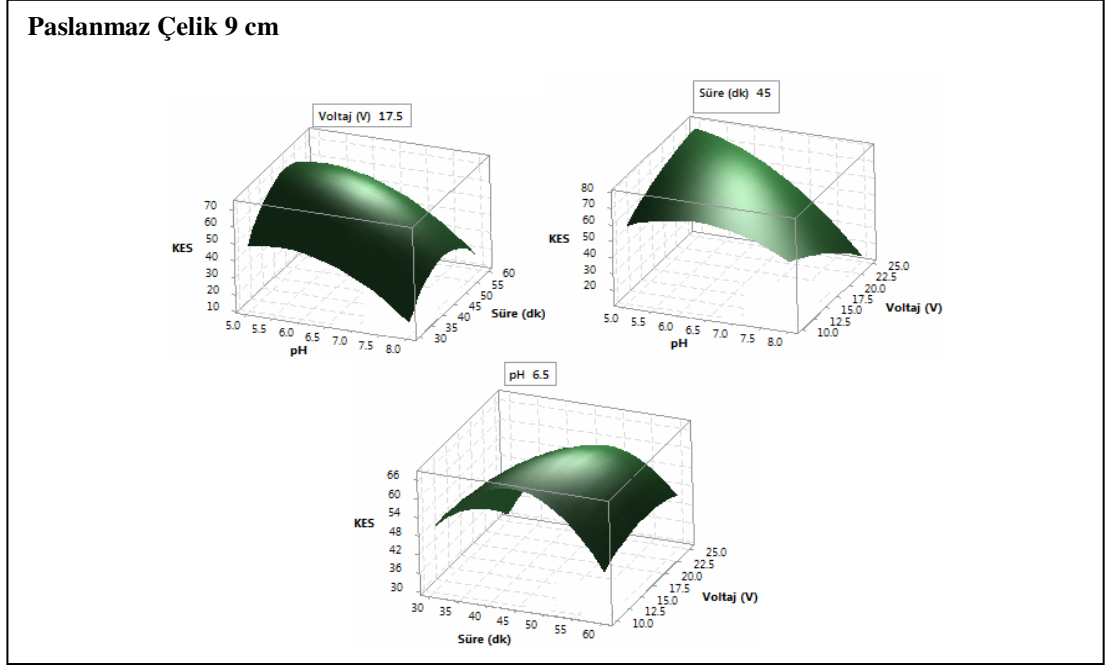


Şekil 4.8. Amonyum azotu değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm paslanmaz çelik)

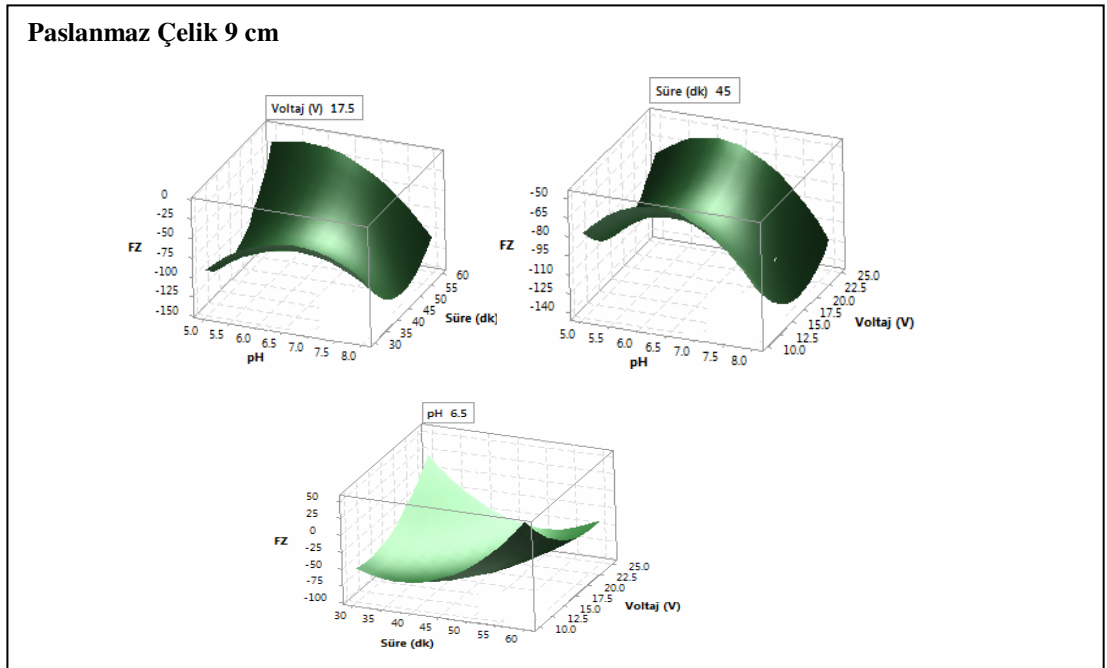
Katot çapı 5 cm olan elektrotta amonyum azotu konsantrasyonunun arttığı görülmüş ve Şekil 4.8’de sunulmuştur. Süre 45. dakikada sabitken amonyum azotu konsantrasyonunun yüksek pH değerinde düştüğü gözlemlenmiştir. pH 6,5’te yapılan çalışmada ise amonyum azotu konsantrasyonu %20’den %35’e kadar arttığı gözlemlenerek voltajın amonyum azotu konsantrasyonu üzerindeki önemini görülmüştür. İşletim süresinin artışı, amonyum azotu konsantrasyonunu voltaj kadar etkili bir şekilde değiştirmedigi tespit edilmiştir.

Kapiler emme süresi değişimi incelenen Şekil 4.9’da, asidik pH değerlerinde sürenin kısalarak çamur susuzlaştırma performansının arttığı görülmüştür. KES’in voltaj 17,5’ta pH 5 ve işletim süresi 45. dakikada %70’e ulaştığı tespit edilmiştir. İşletim süresi merkez değer olan 45. dakikada KES’in süresinin azaldığı ve %70’e

ulaştığı belirlenmiştir. pH 6,5'te de işletim süresi 45. dakikada en yüksek değere ulaşmış, voltajın çok etkili olmadığı görülmüştür.

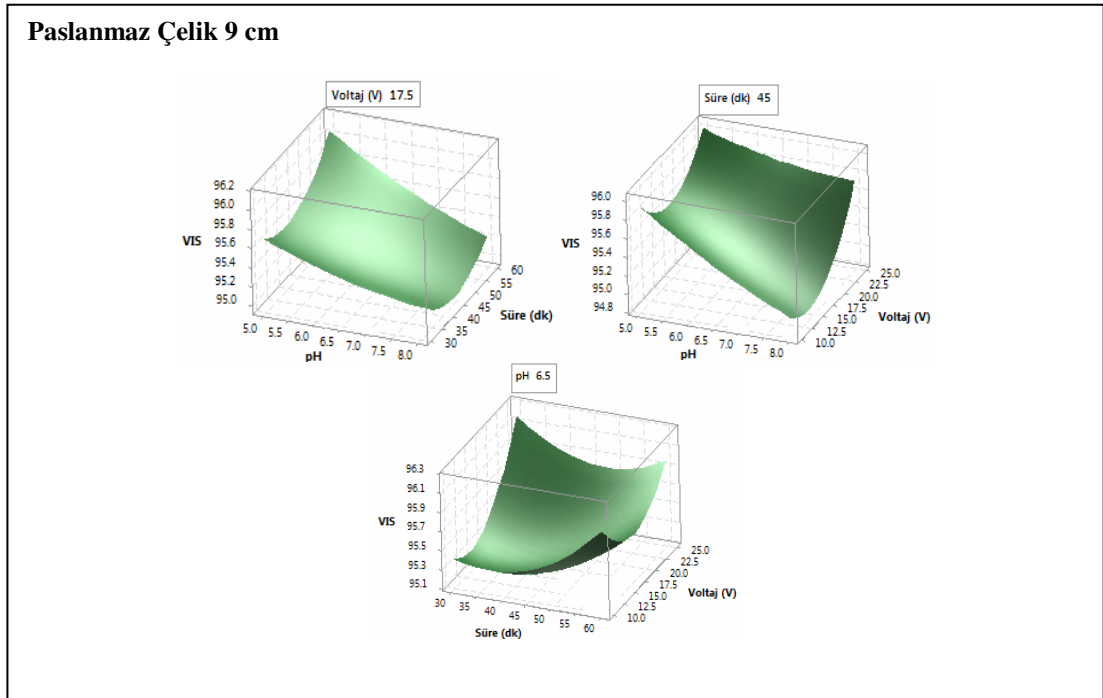


Şekil 4.9. Kapiler emme süresi değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)



Şekil 4.10. Filtreleme zamanının incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)

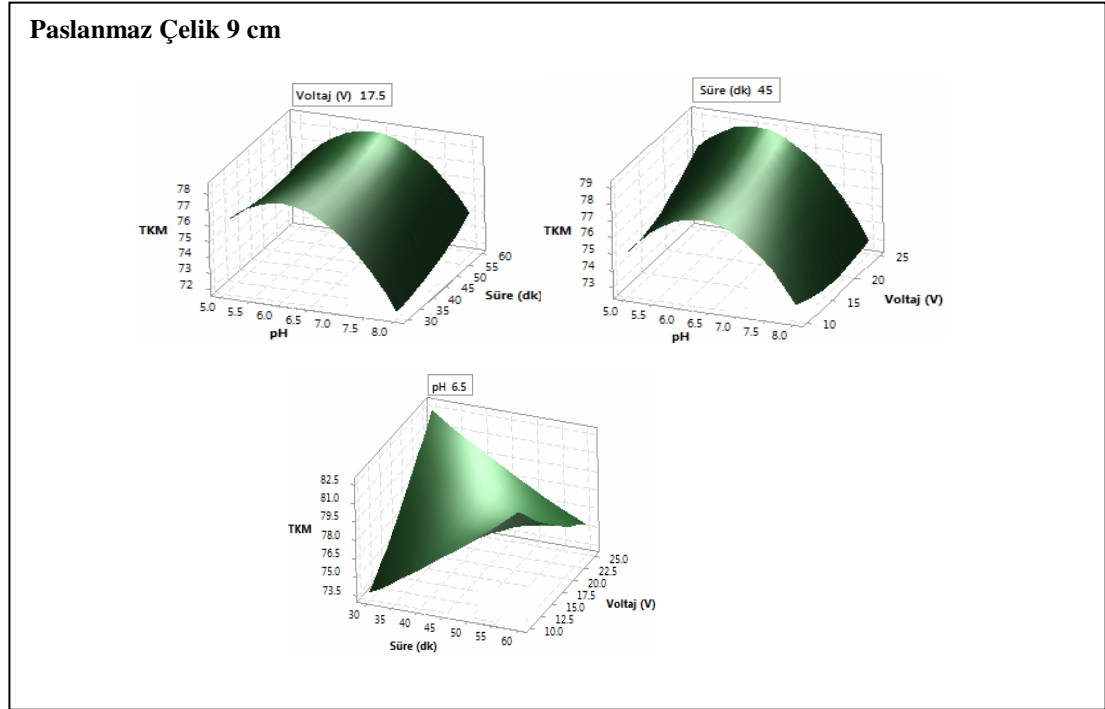
Şekil 4.10'da paslanmaz çelik 9 cm katot çaplı elektrot kullanılarak yapılan çalışmada FZ istatistiksel olarak incelenmiştir. Sisteme voltajın etkisinin, pH'ın etkisinden daha fazla olduğu görülmüştür. Voltaj 17,5 değerinde ciddi anlamda FZ'nin ham çamur değerine göre azalması beklenirken aksine bu sürenin uzadığı belirlenmiştir. Aynı zamanda voltaj süresinin FZ üzerinde paslanmaz çelik 5 cm katot çaplı elektrot kullanılarak yapılan çalışmanın FZ'nin kısalmasında olumlu etki yapmadığı gözlemlenmiştir. Sadece pH 6,5 değerinde %30'a kadar bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir.



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

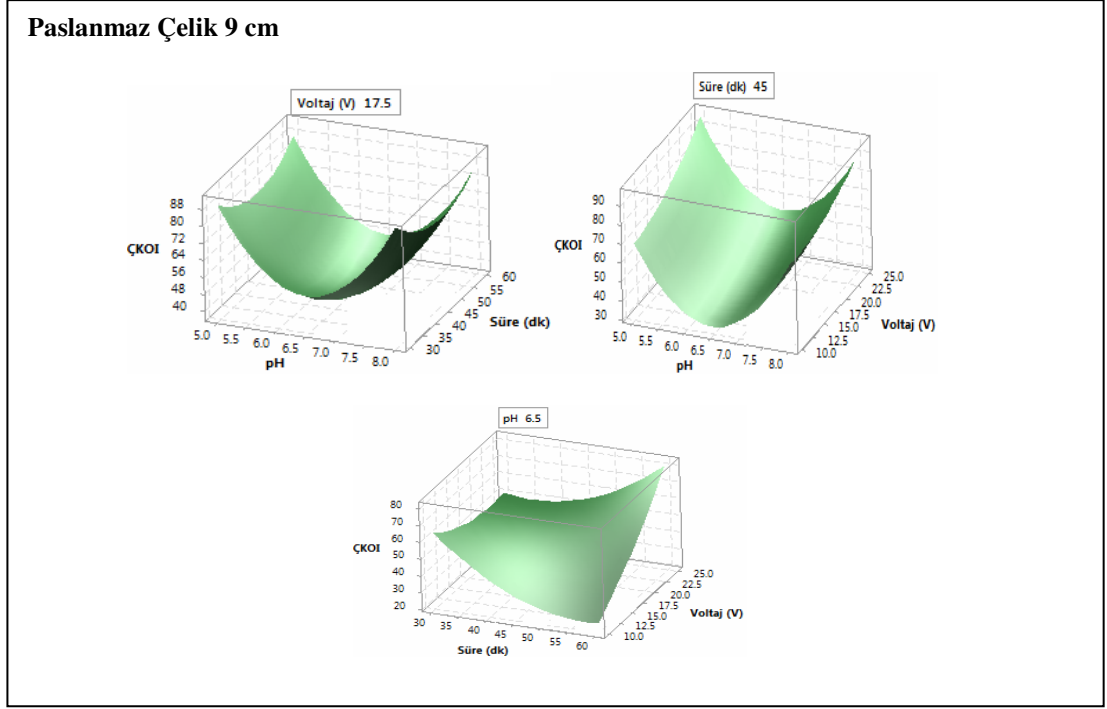
Şekil 4.11'de paslanmaz çelik 9 cm katot çaplı elektrot kullanılarak yapılan çalışmanın viskozite değişimi incelendiğinde, sistem performansının olumlu etkilendiği ve viskozitenin %96'ya kadar azaldığı tespit edilmiştir. Asidik pH

değerlerinde işletim süresinin daha çok etkili olduğu görülürken, bazik pH değerinde etkisinin azaldığı belirlenmiştir. Voltaj artışının ise sistem performansını önemli şekilde etkilemediği görülmüştür.



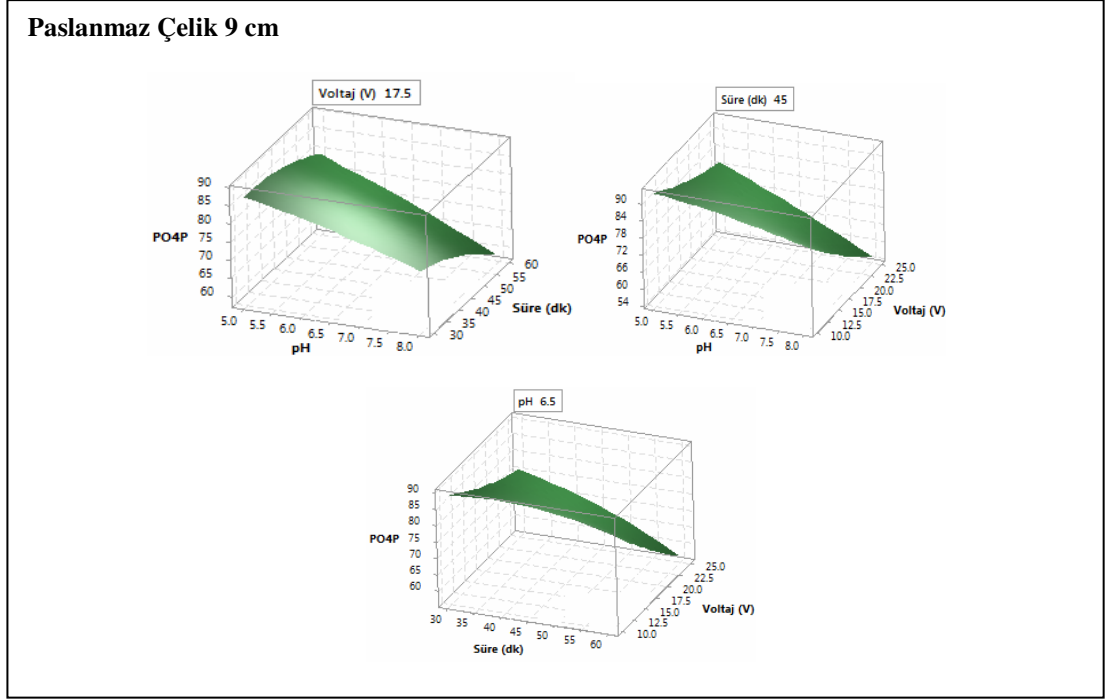
Şekil 4.12. Toplam katı madde değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)

9 cm katot çaplı paslanmaz çelik elektrot kullanılarak yapılan çalışmanın TKM değişimi Şekil 4.12’de incelenmiştir. TKM miktarının asidik pH seviyelerinde %78 azalmaya sebep olduğu görülmüştür. pH 6,5’te yapılan analizde 30. dakikada %73,5 azalan TKM miktarı, yine 30. dakikada voltaj artışıyla artmış, voltaj 25 voltta %82 oranında azalmaya sebep olmuştur. Bazik pH’ ın asidik pH’a göre sistem performansını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Süre 45. dakikada uygulanan voltajın TKM miktarının azalmasına ciddi bir katkısı olmadığı belirlenmiştir.



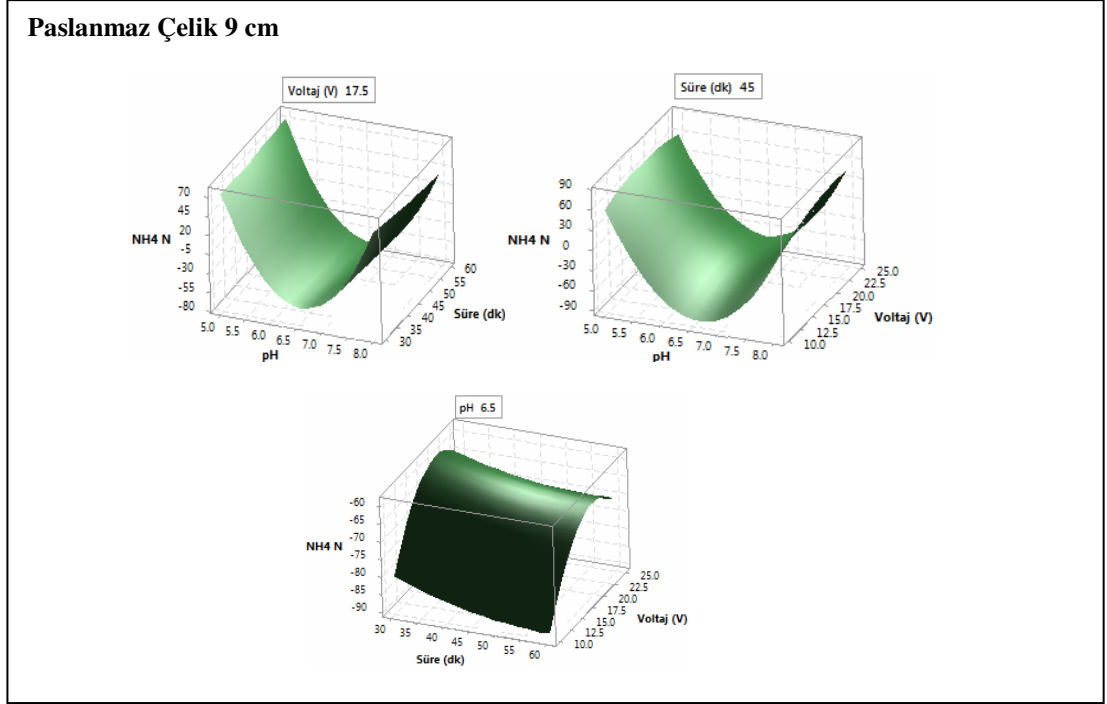
Şekil 4.13. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)

Paslanmaz çelik 9 cm katot çaplı elektrot kullanılarak yapılan elektrosüzleştirme işlemi sonucunda elde edilen çıkış suyu ÇKOİ için analizlenmiş ve sonuçlar Şekil 4.13'te verilmiştir. pH 6,5'te işletim süresi 30. dakikada voltajın etkisi görülmezken, 60. dakikada voltaj artışıyla beraber en yüksek değere ulaşmıştır (%80). İşletim süresi ve voltaj artışıyla ÇKOİ konsantrasyonu %90 seviyelerinde arttığı görülmüştür. Voltaj 17,5 volt ve işletim süresi 45 dakika merkez değer olan grafiklerde ÇKOİ'nin pH 6,5'te ilginç olarak konsantrasyonunun minimum seviyeye indiği belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Fosfat fosforu değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)

Elektro-susuzlaştırma işlemi uygulandığında çamur üst suyunun sahip olduğu fosfat fosforu konsantrasyonu Şekil 4.14'te incelenmiştir. Voltaj 17,5'te sabitken, konsantrasyon pH ve işletim süresi arttıkça azaldığı belirlenmiştir. pH 5 ve işletim süresi 30. dakikada %85 değerine ulaştığı görülmüştür. İşletim süresi merkez değer olarak alınan 45. dakikada, pH ve voltaj arttıkça konsantrasyonun azaldığı tespit edilmiştir. pH 6,5'te ise süre ve voltaj arttıkça konsantrasyonun azaldığı belirlenmiştir. En yüksek fosfat fosforu konsantrasyonu pH 5, voltaj 10 volt ve işletim süresi 45. dakikada gerçekleştiği gözlemlenmiştir (%90).



Şekil 4.15. Amonyum azotu değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm paslanmaz çelik)

Şekil 4.15'te amonyum azotu konsantrasyonu incelenmiştir. pH 6,5'te voltaj artışıyla konsantrasyon artmış yine de sistem performansının olumsuz olarak etkilendiği görülmüştür. İşletim süresi 45. dakikada, pH 5 değerinde konsantrasyonunun %60 değerine kadar yükseldiği belirlenmiştir. Bu grafikte de amonyum azotu konsantrasyonunun pH 6,5 değerinde en düşük seviyelere düştüğü görülmüştür. 17,5 voltajda da sürenin sabit tutulduğu grafikteki gibi en iyi sonucun pH 5'te olduğu tespit edilmiştir. Nötral pH seviyelerinde (pH 6,5) ise sistem performansını olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

4.3. Grafit Elektrot Kullanılımı

Grafit elektrotlar kullanılarak yapılan 15 etaplık deneysel çalışma sonucunda elde edilen FZ, TKM, PO₄-P, Viskozite, KES, ÇKOİ, NH₄-N, ÖFD parametrelerinin değişimleri yüzde olarak hesaplanmış, istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Katot çapı 5 cm ve 9 cm için oluşturulan cevap fonksiyonu denklemleri aşağıda verilmiştir.

5 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,85$, düzeltilmiş $R^2=0,58$)

$$KES = -335 + 103,6 * X_1 + 3,3 * X_2 + 2,45 * X_3 - 7,49 * X_1 * X_1 + 0,0121 * X_2 * X_2 - 0,138 * X_3 * X_3 - 0,489 * X_1 * X_2 - 0,013 * X_1 * X_3 + 0,0802 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; FZ ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,79$)

$$FZ = -1606 + 251 * X_1 + 14,68 * X_2 + 65,2 * X_3 - 16,94 * X_1 * X_1 - 0,1740 * X_2 * X_2 - 1,285 * X_3 * X_3 - 0,102 * X_1 * X_2 + 3,70 * X_1 * X_3 + 0,176 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; VİSKOZİTE ($R^2=0,94$, düzeltilmiş $R^2=0,84$)

$$\mu = 25,8 + 12,36 * X_1 - 0,04 * X_2 + 3,092 * X_3 - 1,135 * X_1 * X_1 + 0,00292 * X_2 * X_2 - 0,0539 * X_3 * X_3 - 0,0353 * X_1 * X_2 + 0,0108 * X_1 * X_3 - 0,01711 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,98$, düzeltilmiş $R^2=0,94$)

$$TKM = -278,8 + 76 * X_1 - 0,29 * X_2 + 7,78 * X_3 - 5,20 * X_1 * X_1 + 0,0242 * X_2 * X_2 - 0,1542 * X_3 * X_3 - 0,2087 * X_1 * X_2 - 0,213 * X_1 * X_3 + 0,0199 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,97$, düzeltilmiş $R^2=0,93$)

$$ÇKOİ = -106 + 61,63 * X_1 + 0,415 * X_2 - 0,21 * X_3 - 5,987 * X_1 * X_1 - 0,02585 * X_2 * X_2 + 0,0372 * X_3 * X_3 + 0,3037 * X_1 * X_2 - 0,11 * X_1 * X_3 - 0,0045 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; PO₄-P (R²=0,84, düzeltilmiş R²=0,55)

$$PO_4 - P = -307 + 11,2 * X_1 - 3,5 * X_2 + 4,77 * X_3 - 10,71 * X_1 * X_1 + 0,0233 * X_2 * X_2 - 0,2 * X_3 * X_3 - 0,283 * X_1 * X_2 + 0,153 * X_1 * X_3 + 0,0123 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; NH₄N (R²=0,92, düzeltilmiş R²=0,75)

$$NH_4N = -456 + 116,7 * X_1 + 6,1 * X_2 - 15,44 * X_3 - 6,147 * X_1 * X_1 - 0,0558 * X_2 * X_2 + 0,461 * X_3 * X_3 + 0,253 * X_1 * X_2 - 0,181 * X_1 * X_3 + 0,0398 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; KES (R²=0,84, düzeltilmiş R²=0,58)

$$KES = -566 + 138,6 * X_1 + 10,25 * X_2 - 3,02 * X_3 - 7,22 * X_1 * X_1 - 0,0569 * X_2 * X_2 + 0,09 * X_3 * X_3 - 0,897 * X_1 * X_2 + 0,569 * X_1 * X_3 + 0,068 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÖFD (R²=0,95, düzeltilmiş R²=0,87)

$$\ddot{O}FD = -364 + 109,3 * X_1 + 2,93 * X_2 + 6,31 * X_3 - 7,26 * X_1 * X_1 - 0,0099 * X_2 * X_2 + 0,296 * X_3 * X_3 - 0,318 * X_1 * X_2 - 2,177 * X_1 * X_3 - 0,0968 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; FZ (R²=0,93, düzeltilmiş R²=0,81)

$$FZ = -2216 + 708 * X_1 - 0,56 * X_2 - 2,8 * X_3 - 54,48 * X_1 * X_1 + 0,0725 * X_2 * X_2 - 0,290 * X_3 * X_3 + 0,333 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; VİSKOZİTE (R²=0,98, düzeltilmiş R²=0,93)

$$\mu = 108,49 - 2,67 * X_1 - 0,0576 * X_2 - 0,204 * X_3 - 0,0815 * X_1 * X_1 - 0,00135 * X_2 * X_2 - 0,0034 * X_3 * X_3 + 0,0384 * X_1 * X_2 + 0,071 * X_1 * X_3 - 0,00074 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; TKM (R²=0,96, düzeltilmiş R²=0,88)

$$TKM = -94,3 + 78,1 * X_1 - 2,65 * X_2 - 2,65 * X_3 - 8,71 * X_1 * X_1 + 0,0075 * X_2 * X_2 - 0,0565 * X_3 * X_3 + 0,309 * X_1 * X_2 + 0,59 * X_1 * X_3 + 0,0277 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÇKOI ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,78$)

$$\begin{aligned} \text{ÇKOI} = & 63 - 99,3 * X_1 + 9,33 * X_2 + 15,19 * X_3 + 8,18 * X_1 * X_1 - 0,0825 * \\ & X_2 * X_2 - 0,3225 * X_3 * X_3 - 0,062 * X_1 * X_2 - 0,205 * X_1 * X_3 - 0,0619 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

9 cm katot çapı için; PO4-P ($R^2=0,99$, düzeltilmiş $R^2=0,97$)

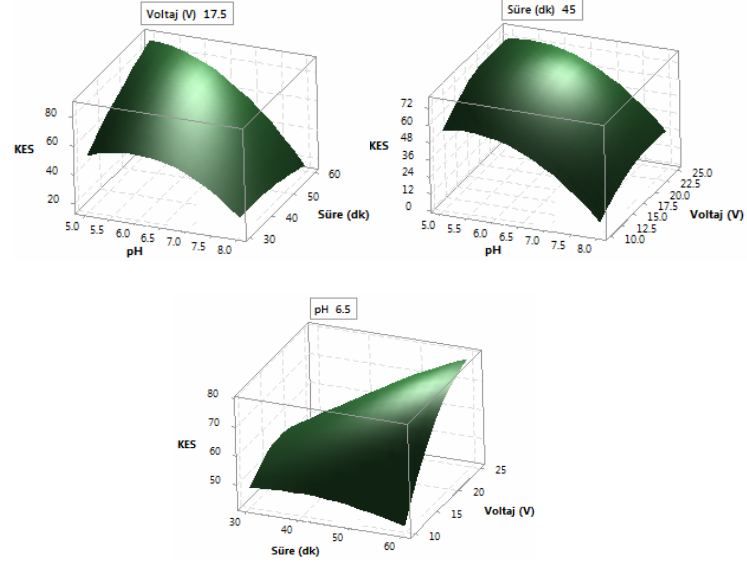
$$\begin{aligned} \text{PO 4 - P} = & 421,4 - 101,48 * X_1 - 0,682 * X_2 - 4,65 * X_3 + 6,216 * X_1 * X_1 - 0,00714 * \\ & X_2 * X_2 + 0,129 * X_3 * X_3 + 0,2707 * X_1 * X_2 + 0,036 * X_1 * X_3 + 0,0018 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

9 cm katot çapı için; NH4N ($R^2=0,85$, düzeltilmiş $R^2=0,59$)

$$\begin{aligned} \text{NH 4 N} = & -265 + 69,9 * X_1 + 2,61 * X_2 - 1,4 * X_3 - 5,2 * X_1 * X_1 - 0,014 * \\ & X_2 * X_2 - 0,0461 * X_3 * X_3 - 0,103 * X_1 * X_2 + 0,562 * X_1 * X_3 - 0,0122 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

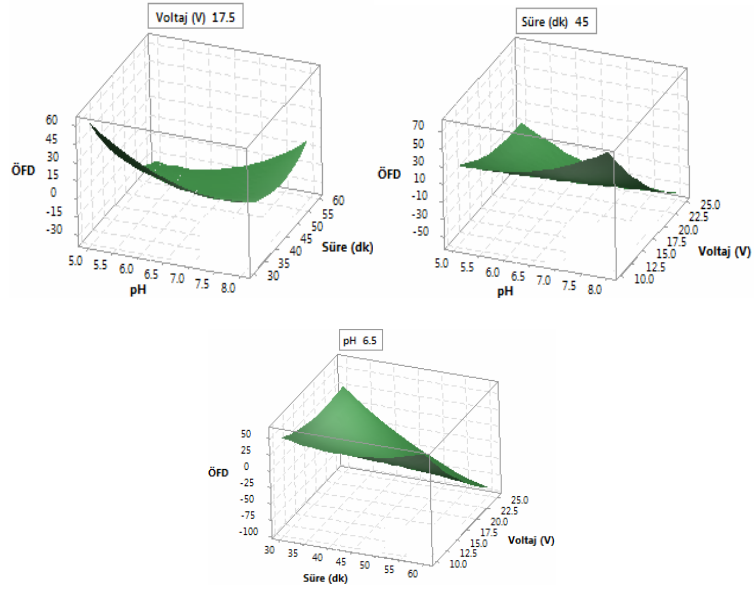
Grafit 5 cm katot elektrot kullanılarak yapılan, çamurun susuzlaştırma performansını gösteren bir parametre olan KES incelenmesi Şekil 4.16'da sunulmuştur. pH 6,5'te sabitken işletim süresi KES değerine çok fazla bir etki göstermezken, voltaj artışıyla %70 oranında azaldığı belirlenmiştir. Süre 45. dakikada ise bazik pH' ta KES değeri düşerken, pH 5 ve voltaj 25 voltta %70 değerine ulaştığı görülmüştür. Voltaj 17,5'te pH 5 değeri ve işletim süresi 60. dakikada %80 oranında azaldığı tespit edilmiş ve KES'nin, yüzde olarak maksimum bu işletme şartlarında azaldığı belirlenmiştir.

Grafit 5 cm



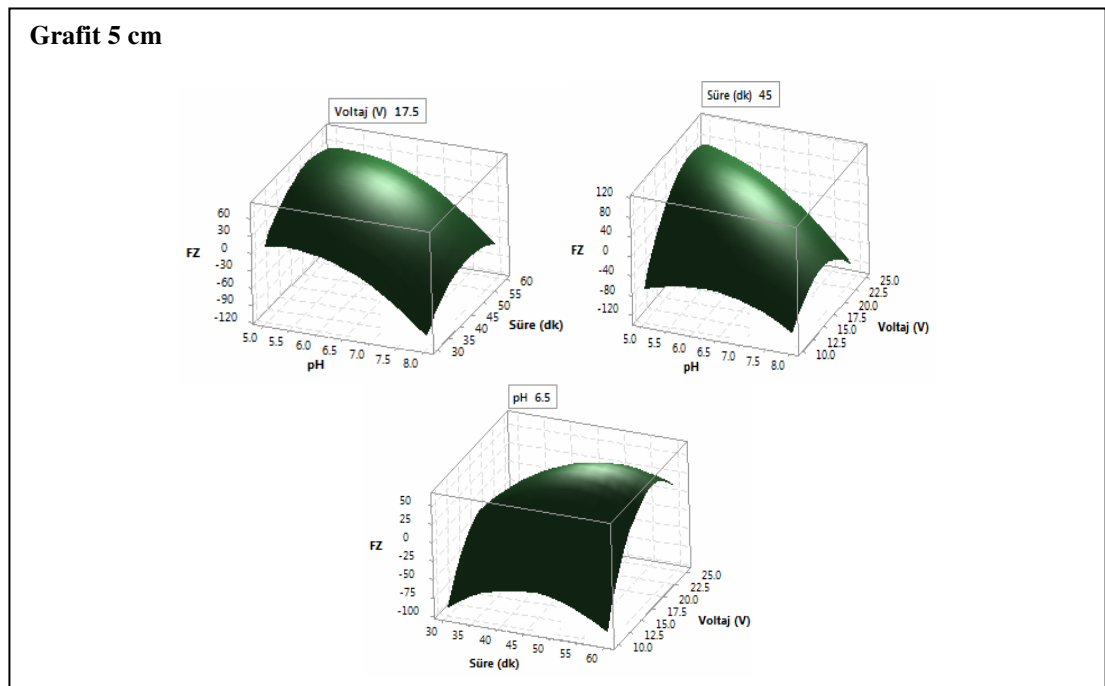
Şekil 4.16. Kapiler emme süresinin incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)

Grafit 5 cm



Şekil 4.17. Özgül filtre direnci değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm grafit elektrot)

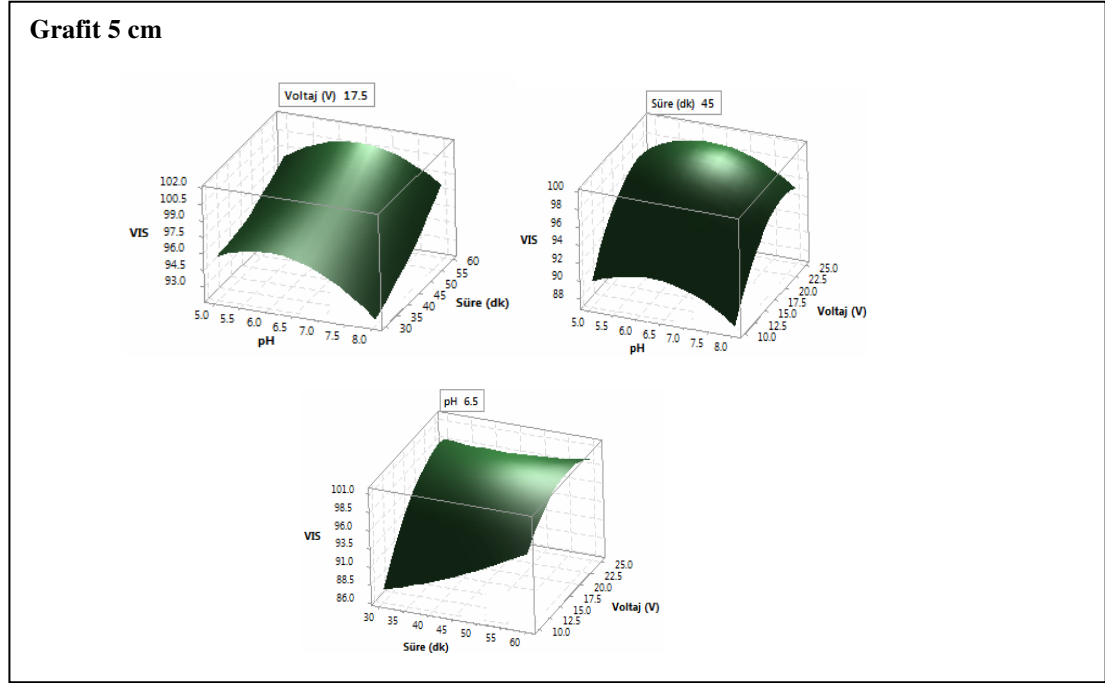
Şekil 4.17’de özgül filtre direncinin yüzde olarak değişimi istatistiksel analiz kullanılarak hesaplanmıştır. İşletim süresi 45. dakikada sabit olan grafikte ÖFD, pH 8 ve voltaj 10 voltta %70 azalırken, voltaj 25 voltta sistem performansı olumsuz etkilenecek yükseldiği görülmüştür. pH 6,5’te voltaj artışıyla beraber ÖFD artmış, işletim süresinin ÖFD’yi önemli şekilde etkilemediği belirlenmiştir. Voltaj 17,5’te sabitken yapılan çalışmada, pH 5 ve işletim süresi 30. dakikada ÖFD %45 azalmıştır.



Şekil 4.18. Filtreleme zamanı incelenmesi (katot çapı 5cm grafit elektrot)

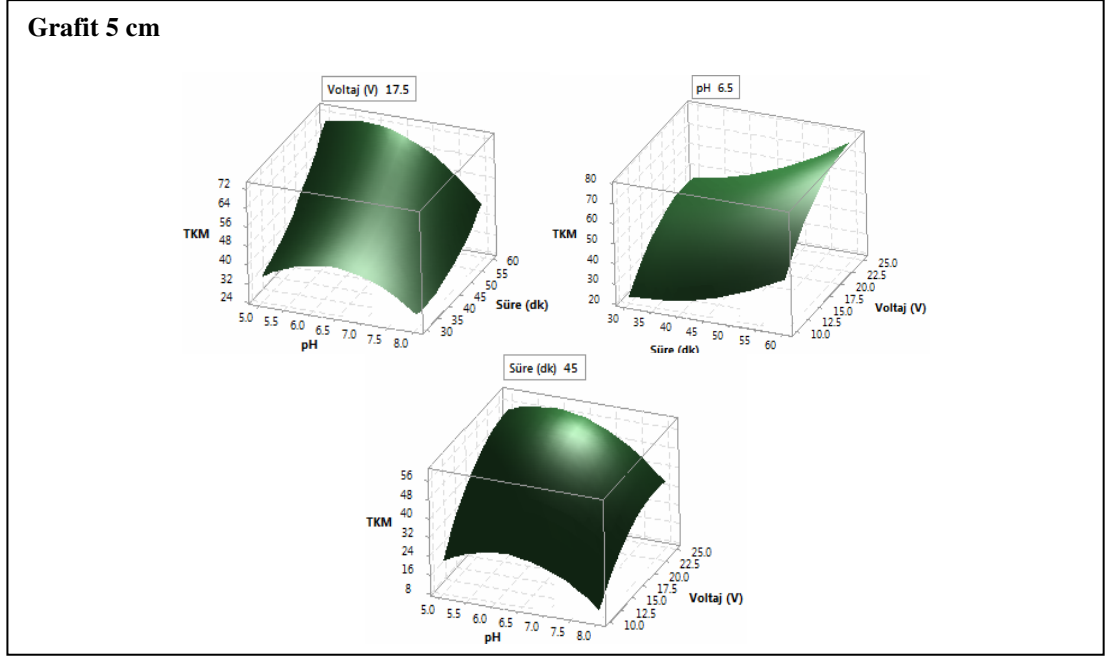
Şekil 4.18’de grafit 5 cm katot elektrot kullanılarak yapılan çalışmada, Box-Behnken yanıt yüzeyi yöntemine göre FZ’nın yüzde olarak değişimi incelenmiştir. pH 6,5’ te FZ olumsuz etkilendiği ve en yüksek yüzdesel değişimin %25 olduğu görülmüştür. Voltaj 17,5’te sabit tutulduğunda pH 5 ve işletim süresi 60. dakikada %30’a ulaştığı görülmüştür.

Grafit 5 cm katot elektrot kullanıldığında en verimli sonuç işletim süresi 45. dakikada sabitlendiğinde, pH 5 ve 25 voltajda verdiği ve FZ değerini yüzdesel olarak yaklaşık %80 kısalttığı görüldüğünden FZ değeri baz alınarak asidik pH değerlerinde model reaktörün işletilmesinin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.



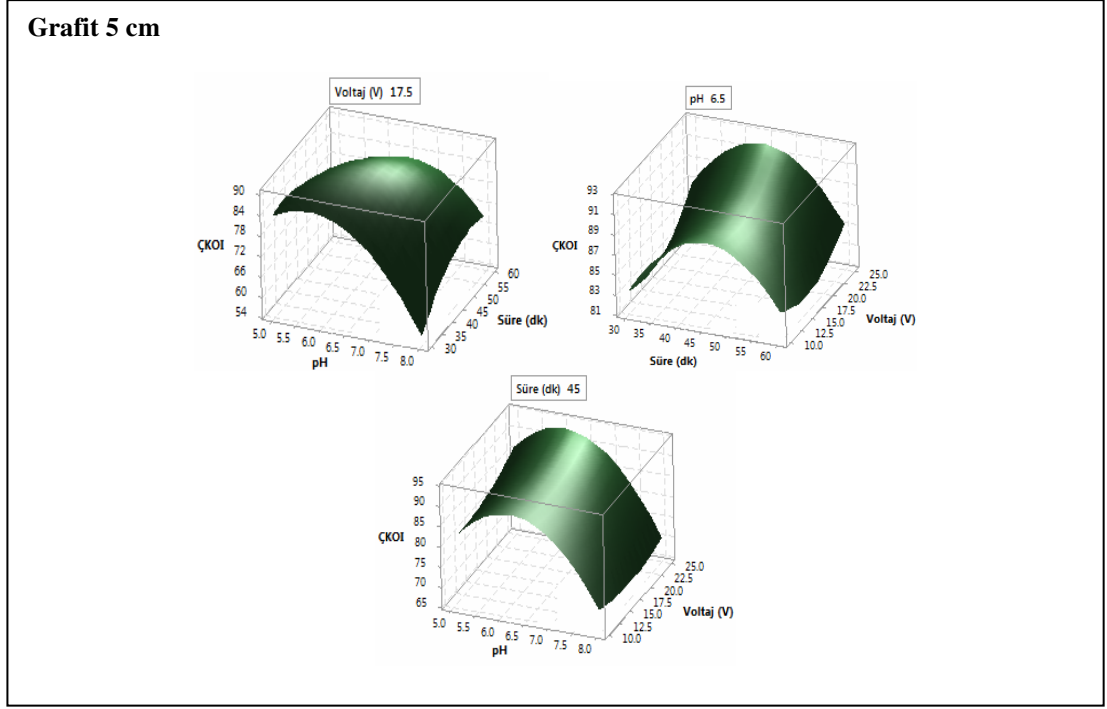
Şekil 4.19. Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 5cm grafit elektrot)

Elektro-susuzlaştırma işleminin uygulanması çamurun sahip olduğu viskozite değerini, ham çamura ait viskozite değerine göre %100 oranında azalttığı ve model reaktörden alınan çamur su karışımının yaklaşık olarak suyla aynı değerde viskoziteye sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.19). Asidik pH, süre ve voltajın artması viskozite değerini düşürerek, çamura bağlı suyun çamur bünyesinden ayrıldığını ve sistem performansının olumlu etkilendiğini göstermiştir.



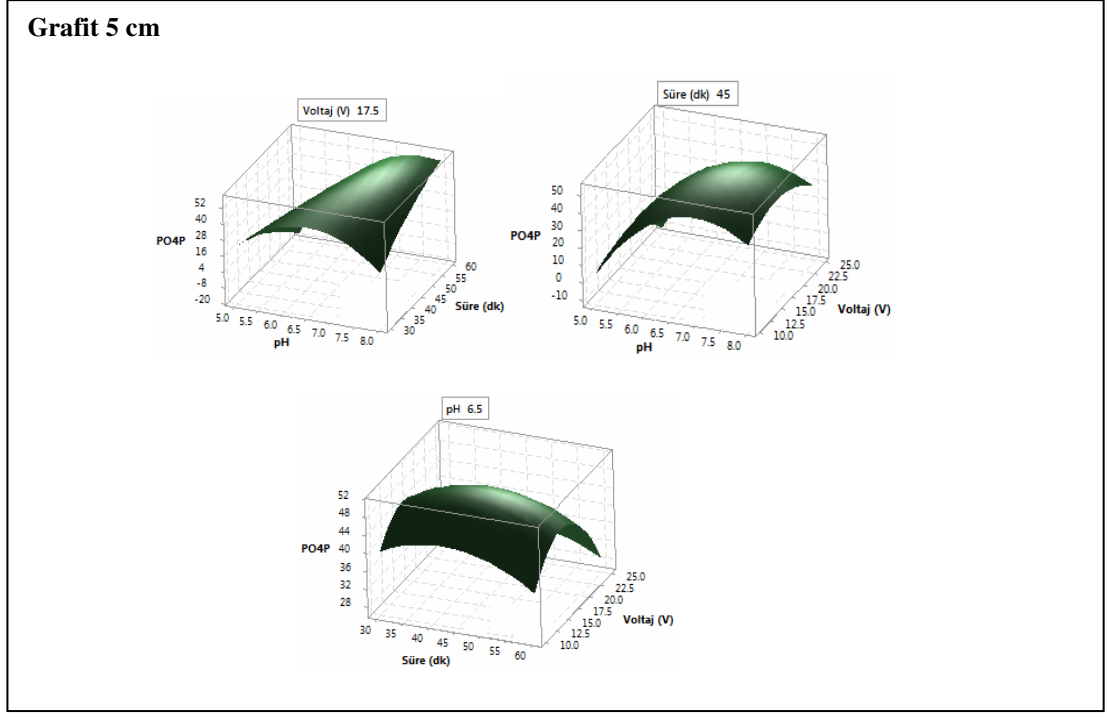
Şekil 4.20. Toplam katı madde miktarının incelenmesi (katot çapı 5cm grafit elektrot)

TKM değerinin yüzde olarak değişimi istatistiksel olarak hesaplanmış ve Şekil 4.20’de verilmiştir. Voltaj 17,5, pH 5 ve işletim süresi 60. dakikada TKM miktarının %70 oranına kadar azaldığı görülmüştür. En yüksek verime bu işletme şartlarında ulaşıldığı belirlenmiştir. Süre 45 dakikada sabitken pH 6,5’te ve voltaj 25 volta en yüksek %56 değerine çıktığı görülmüştür. Süre ve voltaj artışıyla TKM miktarının yüzdesel olarak arttığı belirlenmiştir. pH’ a göre voltaj ve işletim süresinin TKM miktarını daha fazla etkilediği görülmüştür.



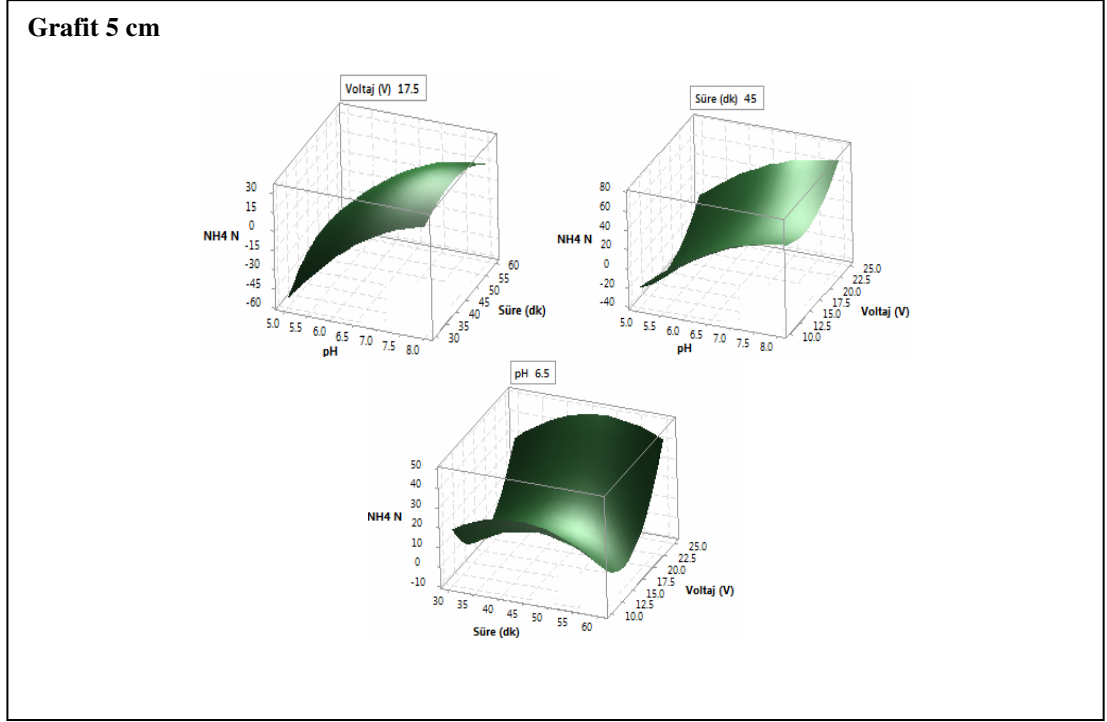
Şekil 4.21. Çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5cm grafit elektrot)

Şekil 4.21’de 5 cm katot çaplı grafit elektrot ile yapılan elektro-susuzlaştırma çalışması sonucunda ÇKOİ konsantrasyonu değişimi incelenmiştir. pH 6,5 değerinde işletim süresi 45. dakikada maksimum değere (%91) ulaşmış, voltajın ÇKOİ konsantrasyonu üzerinde önemli bir etki yapmadığı görülmüştür. ÇKOİ konsantrasyon artışı en yüksek değerine işletim süresi 45. dakika, pH 6,5 ve voltaj 25 voltta gerçekleştiği belirlenmiştir. Voltaj 17,5’te sabitken pH artışıyla ÇKOİ konsantrasyonu önemli derecede düşmüş, voltaj yükselmesi ise ÇKOİ konsantrasyonunu %8 artırdığı görülmüştür.



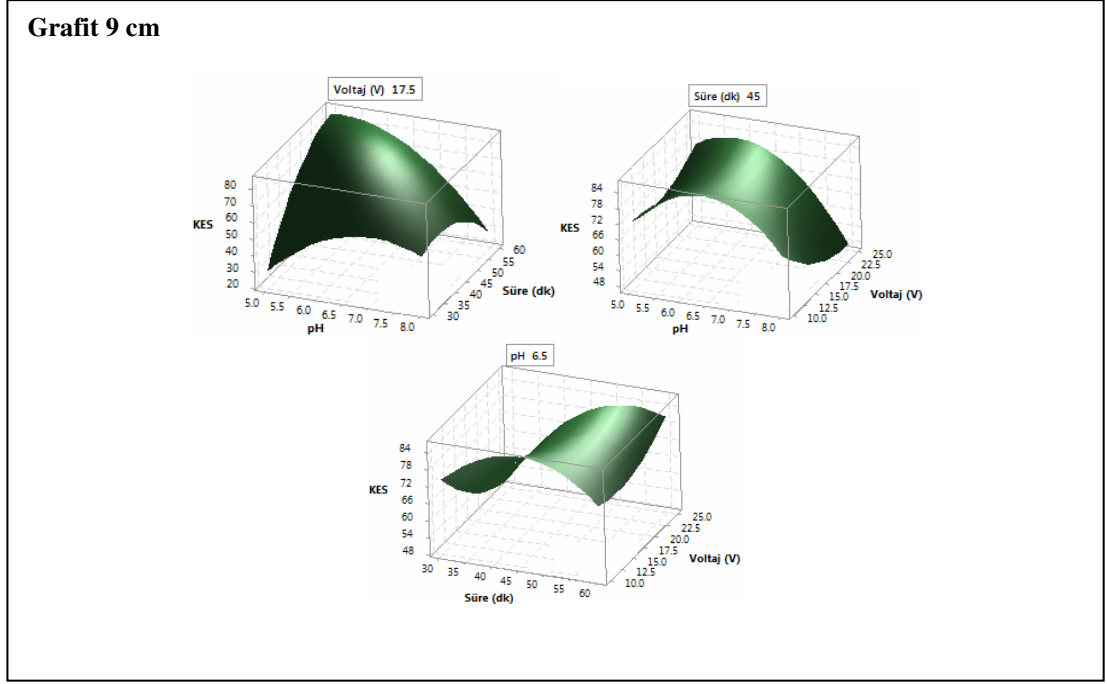
Şekil 4.22. Fosfat fosforu değişiminin incelenmesi (katot çapı 5cm grafit elektrot)

Şekil 4.22’de model reaktöre verilen giriş çamuru üst suyu ile sistem sonunda alınan suyun sahip olduğu fosfat fosforu değeri karşılaştırılmıştır. Voltaj 17,5’ te süre ve pH arttıkça konsantrasyon artmış, %50 seviyesine yükseldiği belirlenmiştir (pH 8 ve işletim süresi 60. dakikada). pH 6,5’ te çamura uygulanan 17,5 voltaj ve işletim süresi 60. dakikada fosfor değeri maksimum seviyeye ulaştığı görülmüştür. Süre 45 dakikada sabitken pH arttıkça konsantrasyon artmış, voltajın ise konsantrasyon değerini fazla etkilemediği belirlenmiştir.



Şekil 4.23. Amonyum azotu değişiminin incelenmesi (katot çapı 5cm grafit elektrot)

Yapılan Box-Behnken yanıt yüzeyi yöntemine göre amonyum azotu konsantrasyonu değişimi Şekil 4.23’ te incelenmiştir. İşletim süresi 45. dakikada pH arttıkça amonyum azotu konsantrasyonu artmış, voltajın ise amonyum azotu konsantrasyonunda önemli ölçüde değişim yapmadığı görülmüştür. Sistem performansının en iyi olduğu işletme şartları (pH 8 ve voltaj 25 volt, işletim süresi 45. dakika) amonyum azotu nu maksimum %60 oranında azalttığı belirlenmiştir. pH 6,5’te sabitlendiğinde işletim süresi 45. dakikada amonyum azotu konsantrasyonunun en 17,5’te sabitken asidik pH’ ta sistem performansının olumsuz etkilendiği görülmüş ancak, işletme süresinin sistem performansını önemli ölçüde etkilemediği belirlenmiştir.

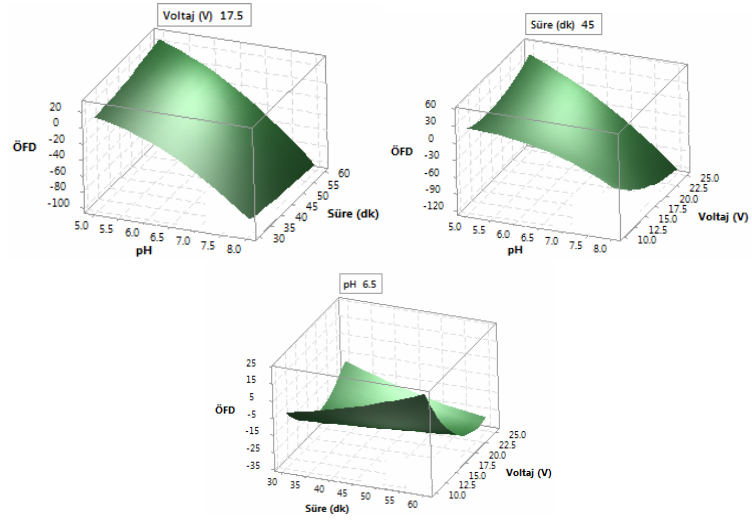


Şekil 4.24. Kapiler emme süresinin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)

Grafit 9 cm katot elektrot ile çalışıldığında KES’de maksimum kısalma %80 oranında meydana gelmiş olup, bu sürenin en düşük olduğu bağımsız değişken noktalarının pH 6,5, voltaj 10 volt ve işletim süresinin 45. dakikada olduğu belirlenmiştir. Uygulanan voltajın KES üzerinde ciddi bir değişim oluşturmadığı gözlenmiştir (Şekil 4.24).

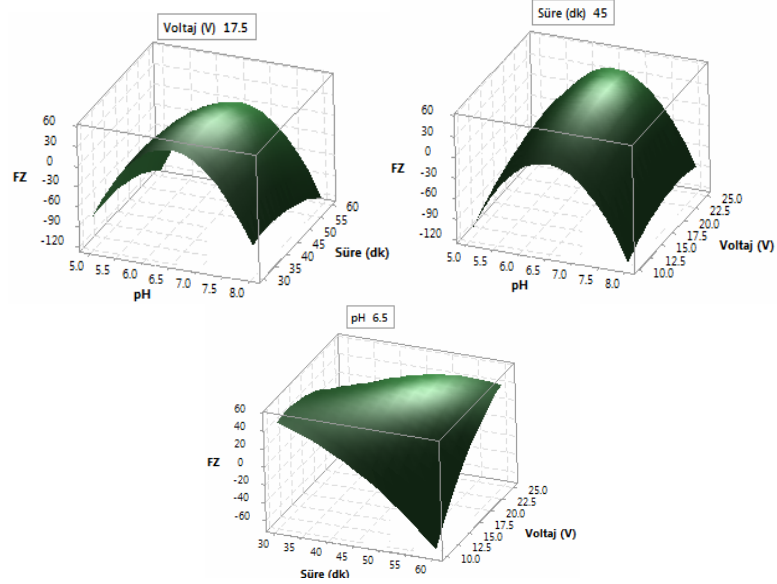
Şekil 4.25’te incelenen ÖFD, çamurun susuzlaştırma performansını gösteren parametrelerden biridir. Asidik pH ve düşük voltajın, sistem performansını olumlu etkilediği görülmüş ancak yine de ÖFD’nin azalmasına yeterli gelmediği belirlenmiştir. Bazı pH ve yüksek voltajda giriş numunesine göre çıkış numunesinin direnci daha yüksek olduğu söylenebilir. Sonuç olarak işletim süresi 45. dakikada sabit tutulduğunda pH 5 ve voltaj 25 voltta ÖFD değerinin %30 düşürülebileceği söylenebilir.

Grafit 9 cm



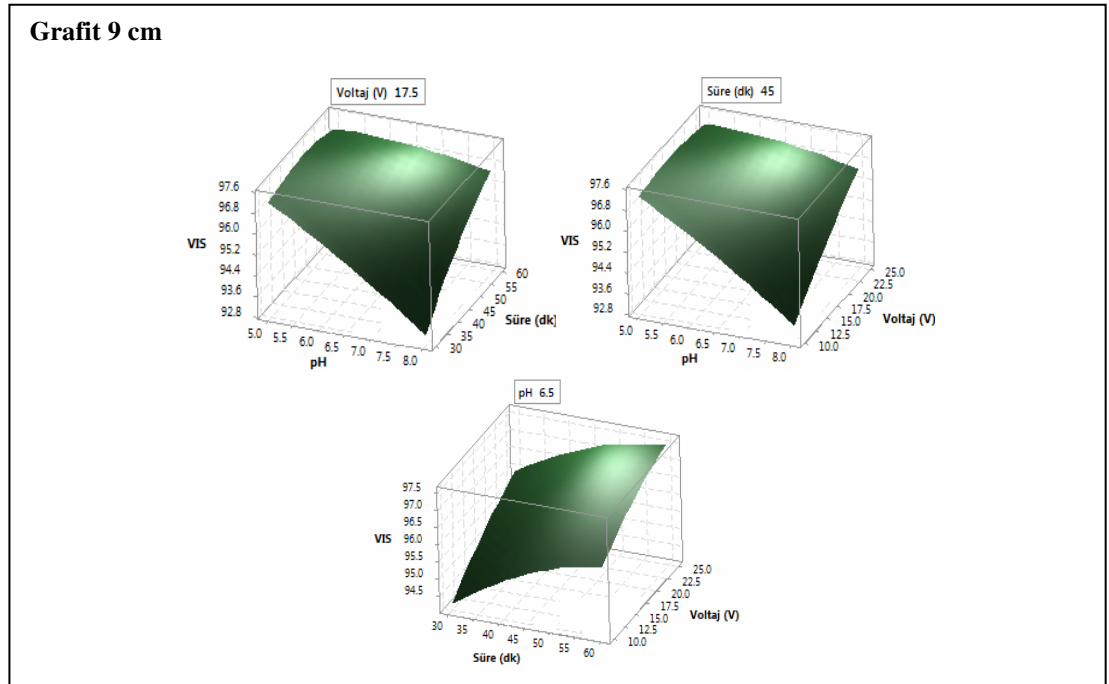
Şekil 4.25. Özgül filtre direnci değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)

Grafit 9 cm



Şekil 4.26. Filtreleme zamanı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)

FZ değerinin ham atıksuyun FZ zamanına göre yüzde olarak değışimi istatistiksel analiz kullanılarak hesaplanmış, Şekil 4.26’da verilmiştir. Voltaj 17,5’te FZ değerin olumsuz etkilendiğı gözlemlenmiştir. pH 6,5’te sabitken, işletim süresi artırıldıkça FZ değerin düştüğü görülmüştür. İlave olarak işletim süresinin 45 dakikadan uzun tutulmaması önerilmektedir. Voltaj artışıyla beraber FZ değeri yükselmiş, %40 oranında azalmıştır. Süre 45. dakikada pH 6,5’te FZ azalma oranı en yüksek seviyeye yükselmiş (%30), bu işletim süresinde voltajın FZ değerine önemli ölçüde etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

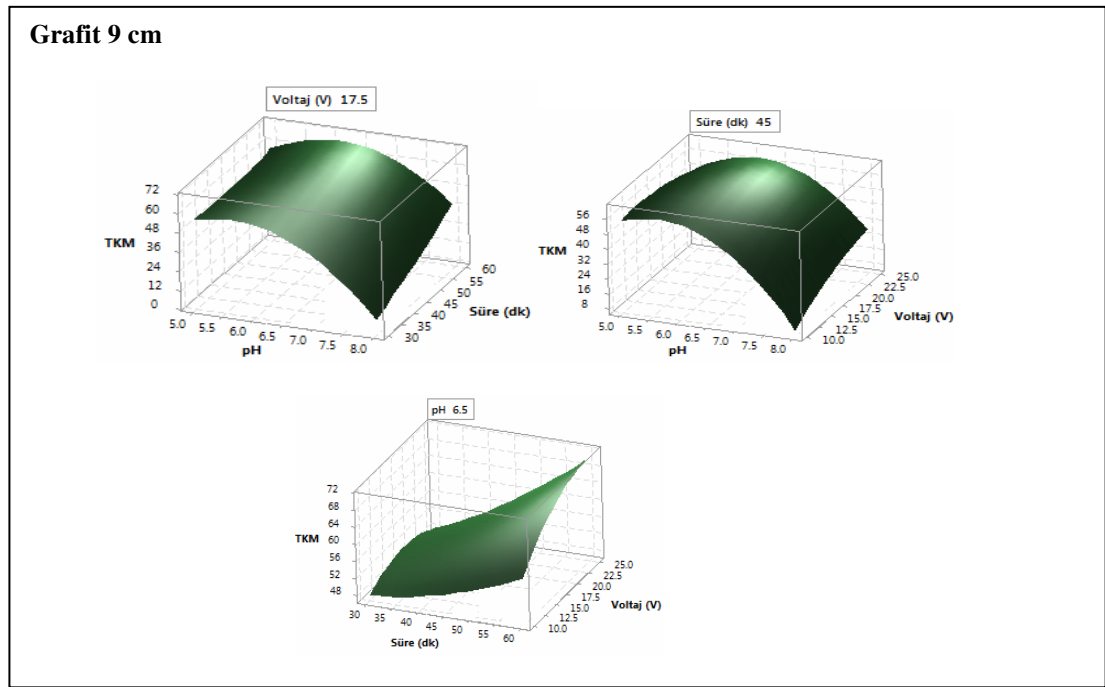


Şekil 4.27. Viskozite değışiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)

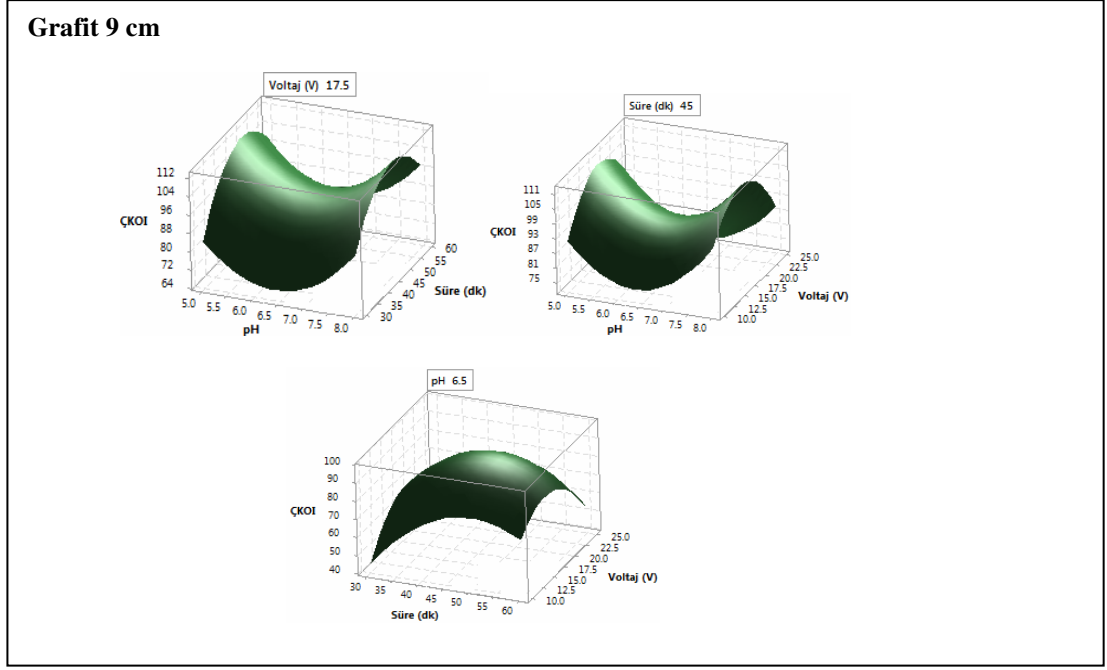
Şekil 4.27’de grafit 9 cm elektrot kullanılarak yapılan çalışmada viskozite değışiminin incelenmesi sunulmuştur. Viskozitenin süre ve voltaj artışıyla arttığı, bazik pH değerlerinde ise azaldığı görülmüştür. Diğer parametrelere kıyasla viskozitenin değeri %90 ile %100 arasında çok etkili bir şekilde elektro-

susuzlaştırma işlemi sonucunda azaldığı görülmüştür. Uygulanan voltajın, sürenin artırılması sistemin verimini olumlu etkilediği, aynı zamanda sistemin verim üzerinde maksimum %95'ten fazla viskozite değerinin düşmesi için asidik pH değerlerinde çalışmanın daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Çamurun sahip olduğu toplam katı madde miktarının azaltılması için yapılan çalışmanın sonuçları Şekil 4.28'de verilmiştir. İşletim süresinin artmasıyla TKM miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Asidik pH uygulamasının sistem verimine olumlu katkı yaparak, asidik pH değerinde işletim süresinin ve uygulanan voltajın düşük tutulduğunda yüksek giderim sağlanabileceği belirlenmiştir.

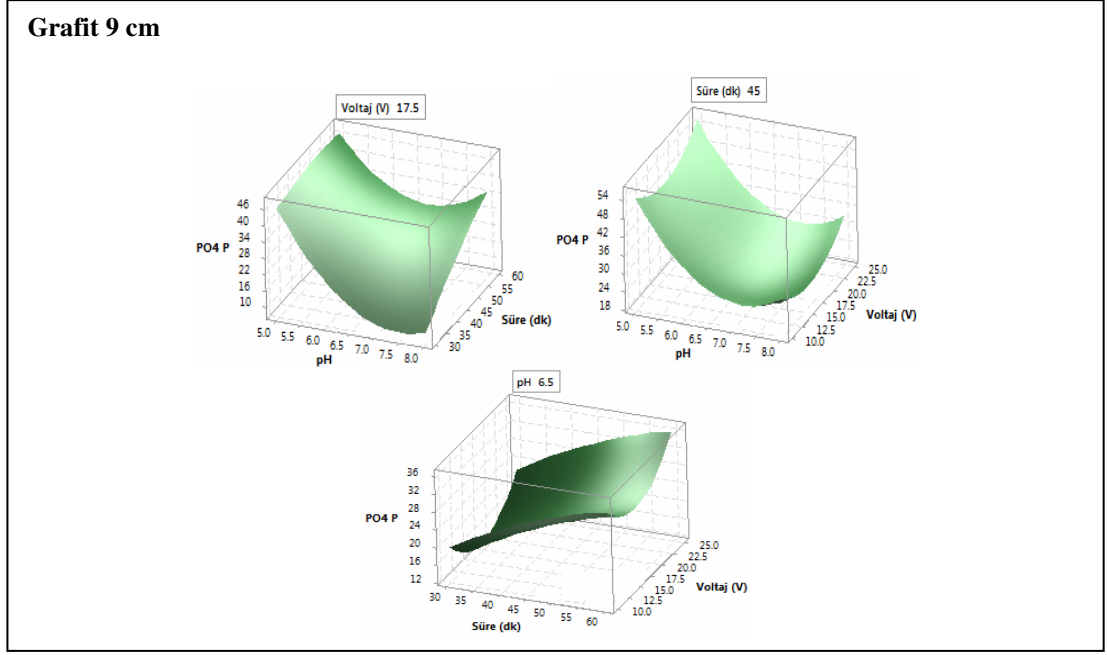


Şekil 4.28. Toplam katı madde değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)



Şekil 4.29. Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)

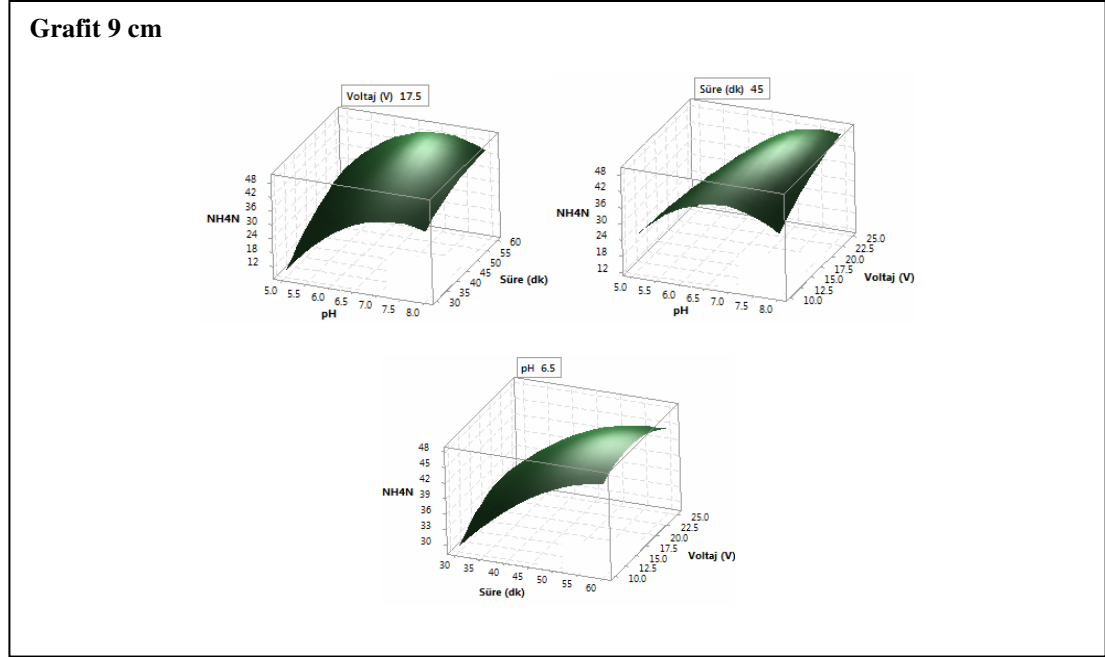
Grafit 9 cm katot elektrot kullanılarak yapılan elektro-susuzlaştırma işleminin sonucunda çamurun sahip olduğu üst sudaki ÇKOİ konsantrasyonunun değişimi Şekil 4.29’da verilmiştir. Süre ve voltajın sabit tutulduğu çalışmalarda pH 6,5 değerlerinde ÇKOİ konsantrasyonunda ciddi bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Voltaj ve işletim süresinin sabit tutulduğu çalışmalarda ise voltaj 10 ve 25 voltta ÇKOİ konsantrasyonun düştüğü, 17,5 voltta ise en yüksek değerine ulaştığı belirlenmiştir. İşletim süresinin ÇKOİ konsantrasyonunu %90’ın üzerine çıkardığı görülmüştür. Ayrıca pH değişiminin ise %18’ lik bir değişime sebebiyet verdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.30. Fosfat fosforu değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)

Katot çapı 9 cm grafit elektrot kullanılarak yapılan elektro-susuzlaştırma işleminde çamur üst suyunun sahip olduğu fosfat fosforu konsantrasyonu incelenmiştir (Şekil 4.30). pH 6,5'te süre ve voltaj arttıkça fosfat fosforu konsantrasyonu artmış, işletim süresi 60. dakika ve voltaj 25 voltta %36 oranına yükseldiği görülmüştür. Süre 45. dakikada sabitken bazik pH değerinde fosfat fosforu konsantrasyonu azalmış, voltajın ise önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sistem performansının en iyi olduğu işletme şartları, pH 5, voltaj 25 volt ve işletim süresi 45. dakika olduğu belirlenmiştir f(%54). Sonuç olarak uygulanan voltaj süresinin artırılmasının fosfat fosforu konsantrasyonu üzerinde önemli bir etki yapmadığının görülmesinden dolayı elektro-susuzlaştırma işleminde de düşük voltajın daha ekonomik olacağı da dikkate alınarak 10 voltta çalışılmasının önerilebileceği düşünülmüştür ancak işletim süresinin 30 dakikadan 60 dakikaya

ıkarılması fosfat fosforu konsantrasyonunu bazik pH şartlarında %36 oranına kadar artırdığı görülmüştür.



Şekil 4.31. Amonyum azotu değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm grafit elektrot)

Grafit 9 cm katot elektrot kullanılarak yapılan çalışmada amonyum azotu konsantrasyonunun yüzde olarak değişimi istatistiksel analiz kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 4.31). Voltaj 17,5 V'ta sabitken amonyum azotu konsantrasyonu işletim süresinin artmasıyla yükselmiş ve pH 6,5'te en yüksek değerine ulaştığı görülmüştür (%48). Süre 45. dakikada sabitlendiğinde de voltaj artışıyla amonyum azotu konsantrasyonunun arttığı belirlenmiştir. pH 6,5'te sabitken voltaj 17,5 V'ta sabitlendiğinde işletme şartlarına benzer olarak işletim süresi ile doğru orantılı şekilde amonyum azotu konsantrasyonu artmış, voltajın amonyum azotu konsantrasyonu üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Model

reaktörde sistemin voltajının yükselmesi ise amonyum azotu konsantrasyonu üzerinde farklı pH değerlerinde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir.

4.4. Bakır Elektrot Kullanımı

İstatistiksel analiz kısmında verilen bağımsız değişken noktaları kullanılarak yapılan 15 etaplık deneysel çalışma sonucunda elde edilen TKM, ÇKOİ, NH₄-N, PO₄-P, Viskozite, FZ, KES ve ÖFD parametrelerinin yüzde olarak değişimleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Katot çapı 5 cm ve 9 cm için oluşturulan cevap fonksiyonu denklemleri aşağıda verilmiştir.

5 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,74$)

$$KES = 264 - 55,3 * X_1 - 1,66 * X_2 + 1,84 * X_3 + 1,43 * X_1 * X_1 + 0,0427 * X_2 * X_2 - 0,12 * X_3 * X_3 - 0,025 * X_1 * X_2 + 1,345 * X_1 * X_3 - 0,0877 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÖFD ($R^2=0,96$, düzeltilmiş $R^2=0,88$)

$$ÖFD = 1548 - 638,2 * X_1 + 14,43 * X_2 + 23,2 * X_3 + 46,38 * X_1 * X_1 - 0,1248 * X_2 * X_2 - 0,52 * X_3 * X_3 + 0,266 * X_1 * X_2 + 0,46 * X_1 * X_3 - 0,193 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; FZ ($R^2=0,85$, düzeltilmiş $R^2=0,58$)

$$FZ = -152 - 124 * X_1 + 20,2 * X_2 + 26,5 * X_3 + 11,3 * X_1 * X_1 - 0,117 * X_2 * X_2 + 0,391 * X_3 * X_3 - 0,29 * X_1 * X_2 - 3,27 * X_1 * X_3 - 0,419 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,72$)

$$TKM = -8 - 9,6 * X_1 + 1,62 * X_2 + 4,34 * X_3 - 1,77 * X_1 * X_1 - 0,0292 * X_2 * X_2 - 0,1778 * X_3 * X_3 + 0,372 * X_1 * X_2 + 0,673 * X_1 * X_3 - 0,0295 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,78$)

$$\text{ÇKOİ} = 44 - 5,02 * X_1 + 0,861 * X_2 + 1,90 * X_3 + 1,518 * X_1 * X_1 + 0,0054 * X_2 * X_2 + 0,0561 * X_3 * X_3 - 0,1207 * X_1 * X_2 - 0,379 * X_1 * X_3 - 0,0296 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; PO₄-P ($R^2=0,92$, düzeltilmiş $R^2=0,77$)

$$PO_4P = 308 - 32,7 * X_1 - 2,75 * X_2 - 4,62 * X_3 - 2,71 * X_1 * X_1 - 0,0275 * X_2 * X_2 - 0,0241 * X_3 * X_3 + 0,568 * X_1 * X_2 + 1,658 * X_1 * X_3 + 0,1029 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; NH₄-N ($R^2=0,89$, düzeltilmiş $R^2=0,69$)

$$NH_4N = -74,7 + 35,94 * X_1 + 1,510 * X_2 - 3,52 * X_3 - 2,492 * X_1 * X_1 - 0,01310 * X_2 * X_2 + 0,0836 * X_3 * X_3 - 0,087 * X_1 * X_2 + 40,063 * X_1 * X_3 + 0,0026 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,96$, düzeltilmiş $R^2=0,90$)

$$KES = -877 + 273,3 * X_1 + 6,02 * X_2 + 13,6 * X_3 - 25,69 * X_1 * X_1 - 0,058 * X_2 * X_2 - 0,302 * X_3 * X_3 + 0,12 * X_1 * X_2 - 0,01 * X_1 * X_3 - 0,112 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÖFD ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,73$)

$$\text{ÖFD} = 1700 - 434 * X_1 - 28,5 * X_2 + 16,2 * X_3 + 34,19 * X_1 * X_1 + 0,3131 * X_2 * X_2 + 0,632 * X_3 * X_3 + 1,085 * X_1 * X_2 - 2,44 * X_1 * X_3 - 0,37 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; FZ ($R^2=0,94$, düzeltilmiş $R^2=0,84$)

$$FZ = 1561 - 526,9 * X_1 - 0,75 * X_2 + 20,4 * X_3 + 41,6 * X_1 * X_1 - 0,0058 * X_2 * X_2 + 0,094 * X_3 * X_3 + 0,391 * X_1 * X_2 - 3,7 * X_1 * X_3 - 0,036 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,78$, düzeltilmiş $R^2=0,40$)

$$\mu = 39 + 37,8 * X_1 - 2,95 * X_2 - 2,63 * X_3 - 4,89 * X_1 * X_1 + 0,0147 * X_2 * X_2 + 0,0059 * X_3 * X_3 - 0,284 * X_1 * X_2 + 0,589 * X_1 * X_3 - 0,0028 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,93$, düzeltilmiş $R^2=0,81$)

$$TKM = 63,2 + 37,7 * X_1 - 4,74 * X_2 - 5,29 * X_3 - 5,13 * X_1 * X_1 + 0,0283 * X_2 * X_2 + 0,0835 * X_3 * X_3 + 0,404 * X_1 * X_2 + 0,673 * X_1 * X_3 - 0,0129 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,99$, düzeltilmiş $R^2=0,98$)

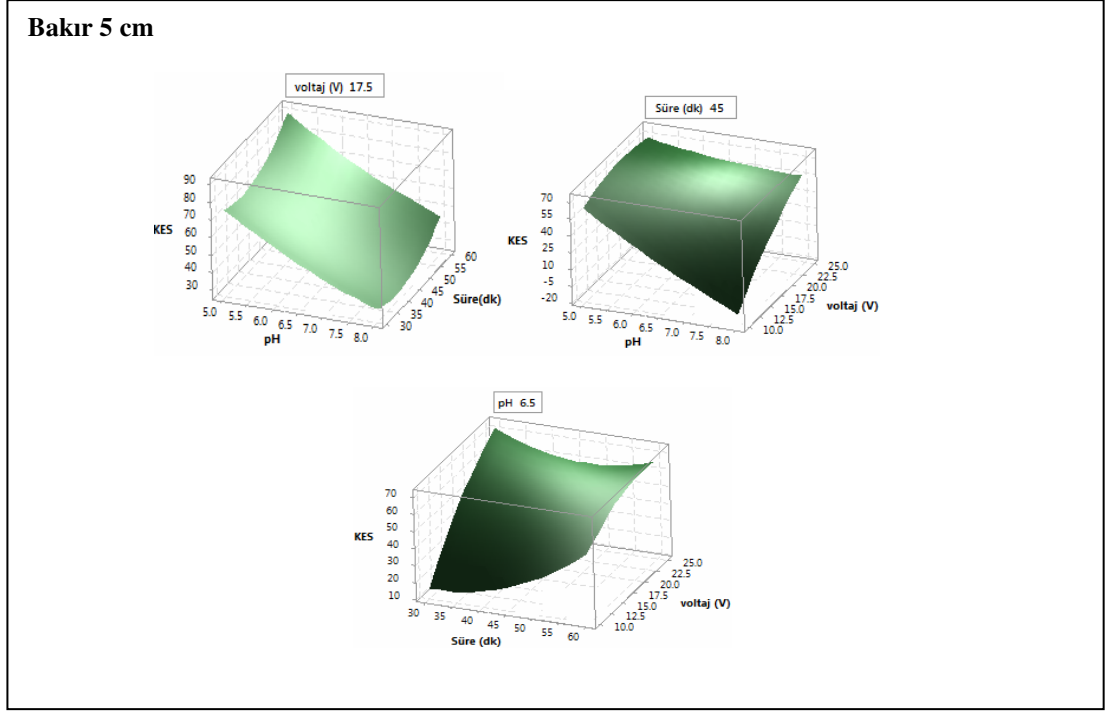
$$\text{ÇKOİ} = -829,1 + 240,9 * X_1 + 3,3 * X_2 - 1,88 * X_3 - 15,49 * X_1 * X_1 - 0,011 * X_2 * X_2 + 0,00731 * X_3 * X_3 - 0,329 * X_1 * X_2 - 0,096 * X_1 * X_3 + 0,0009 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; PO₄-P ($R^2=0,94$, düzeltilmiş $R^2=0,84$)

$$TKM = -142 + 110 * X_1 - 4,32 * X_2 - 0,96 * X_3 - 11,12 * X_1 * X_1 + 0,02 * X_2 * X_2 + 0,0033 * X_3 * X_3 + 0,46 * X_1 * X_2 + 0,155 * X_1 * X_3 + 0,0064 * X_2 * X_3$$

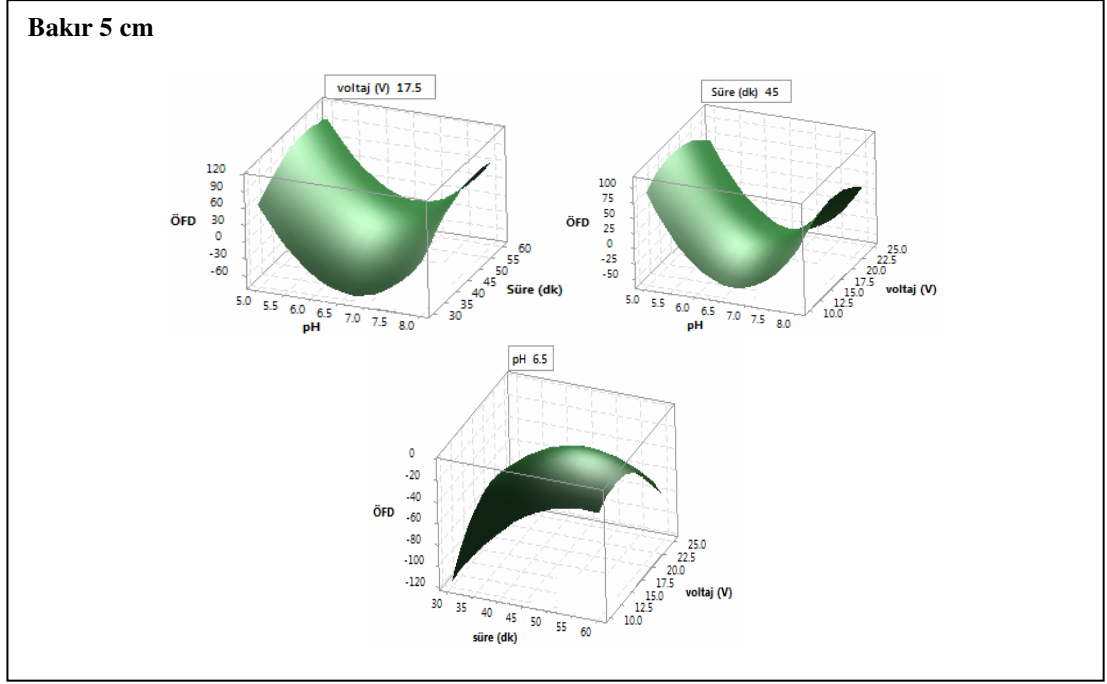
9 cm katot çapı için; NH₄ N ($R^2=0,79$, düzeltilmiş $R^2=0,41$)

$$NH_4N = 70 - 16 * X_1 - 2,96 * X_2 + 5,12 * X_3 + 2,75 * X_1 * X_1 + 0,0351 * X_2 * X_2 - 0,124 * X_3 * X_3 - 0,064 * X_1 * X_2 - 0,239 * X_1 * X_3 + 0,0342 * X_2 * X_3$$



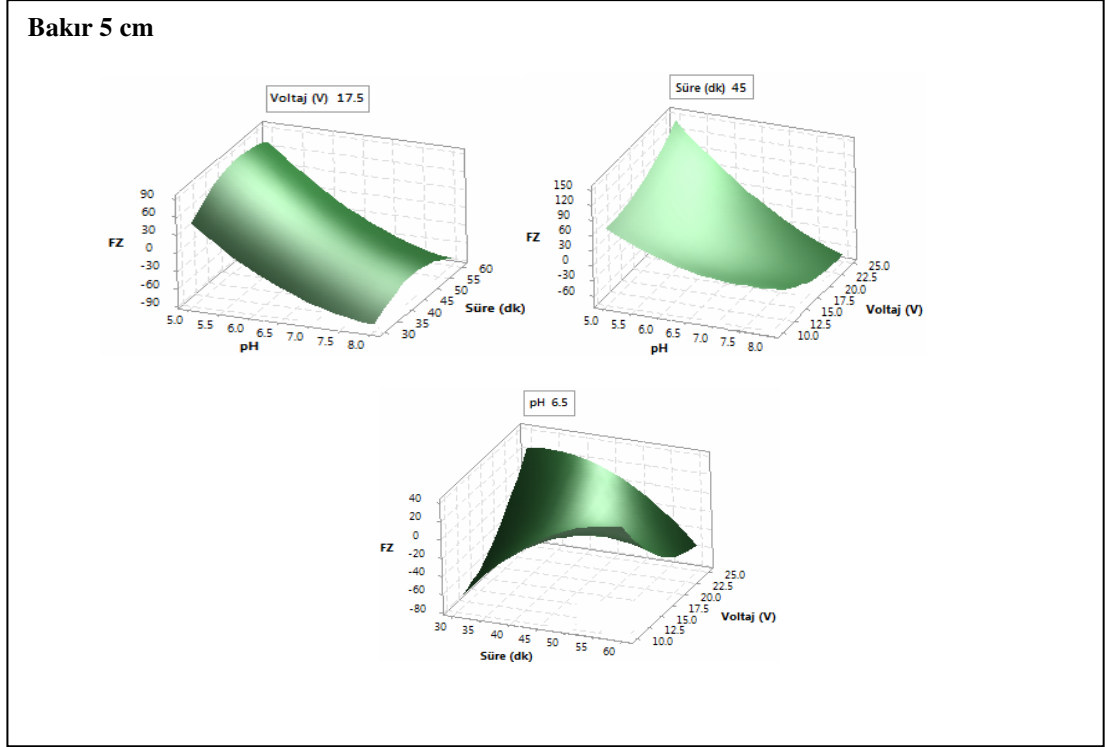
Şekil 4.32. Kapiler emme süresi değişimin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)

İşletim süresi 45. dakikada sabitken, asidik pH ve yüksek voltajda KES' nin daha fazla azaldığı görülmüştür. pH 6,5' te işletim süresi 60. dakikada voltajın önemli bir etkisi görülmezken, 30. dakikada %60 oranında bir değişimin meydana geldiği belirlenmiştir. Voltaj 17,5, pH 5 ve işletim süresi 60. dakikada KES' in %90 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 4.32). KES değerinin elektro-susuzlaştırma işlemiyle azaltılabilmesi için, arıtma çamurunun asidik değerde çalışılması gerektiği, bazik pH değerine sahip arıtma çamuruyla çalışılırsa voltajın artırılması ile KES' in azaltılabileceği görülmüştür.



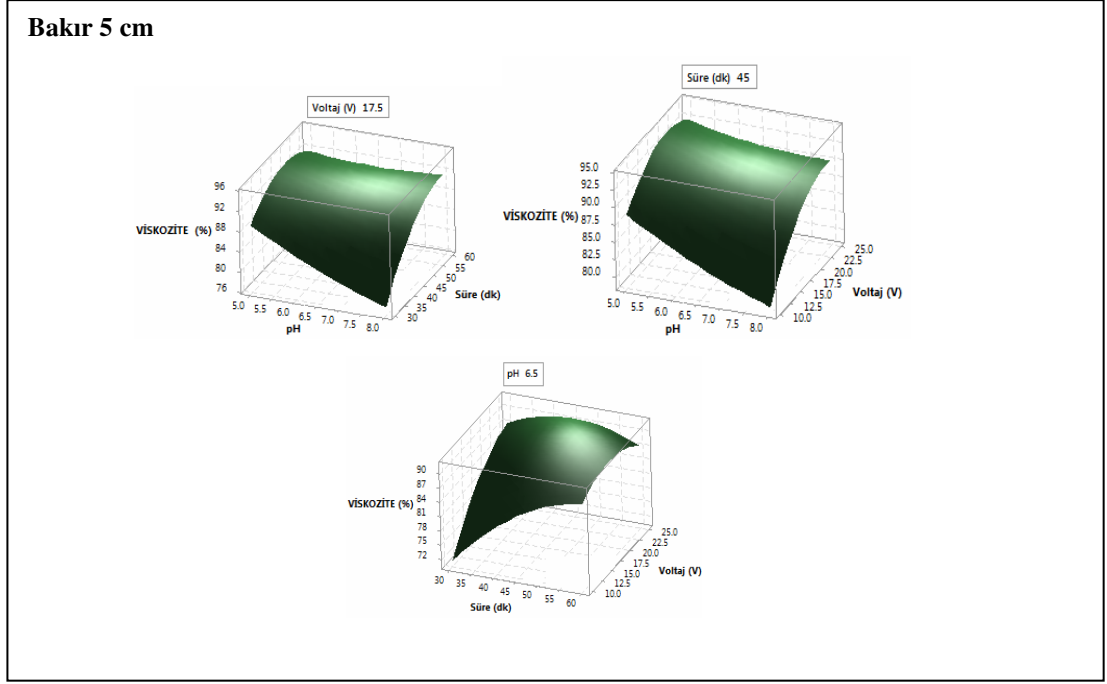
Şekil 4.33. Özgül filtre direnci değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)

Özgül filtre direncinin yüzde olarak değişimi istatistiksel analiz kullanılarak hesaplanmış ve elektro-susuzlaştırma prosesinde işlenmiş olan çamurun 35 kPa basınç altında su verme özellikleri incelenmiş ve Şekil 4.33'te sunulmuştur. ÖFD'nin hem asidik hem de bazik değerlerinde azaldığı, pH 6,5'te ÖFD'nin arttığı ve sistem performansının olumsuz etkilendiği görülmüştür. ÖFD'nin en fazla azaldığı işletme şartları; pH 5, voltaj 17,5 volt ve işletim süresinin 45. dakikasında gerçekleştiği görülmüştür (%90).



Şekil 4.34. Filtreleme zamanındaki değişimin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)

Şekil 4.34'te bakır 5 cm elektrot ile yapılan çalışmanın FZ yüzdesel olarak değişimi incelenmiştir. Voltaj 17,5'te sabitken bazık değerlerde FZ yükselmiş, işletim süresinin FZ'na önemli bir etki yapmadığı belirlenmiştir. Voltaj arttıkça FZ artmış, çamurun susuzlaştırma özelliği olumsuz etkilenmiştir. Viskozite ile benzer olarak asidik pH' ta FZ değerinin azaldığı belirlenmiştir. Süre 45. dakikada voltaj 25 volt ve pH 5'te FZ'nın %100 azaldığı ve sistem performansının olumlu etkilendiği görülmüştür.



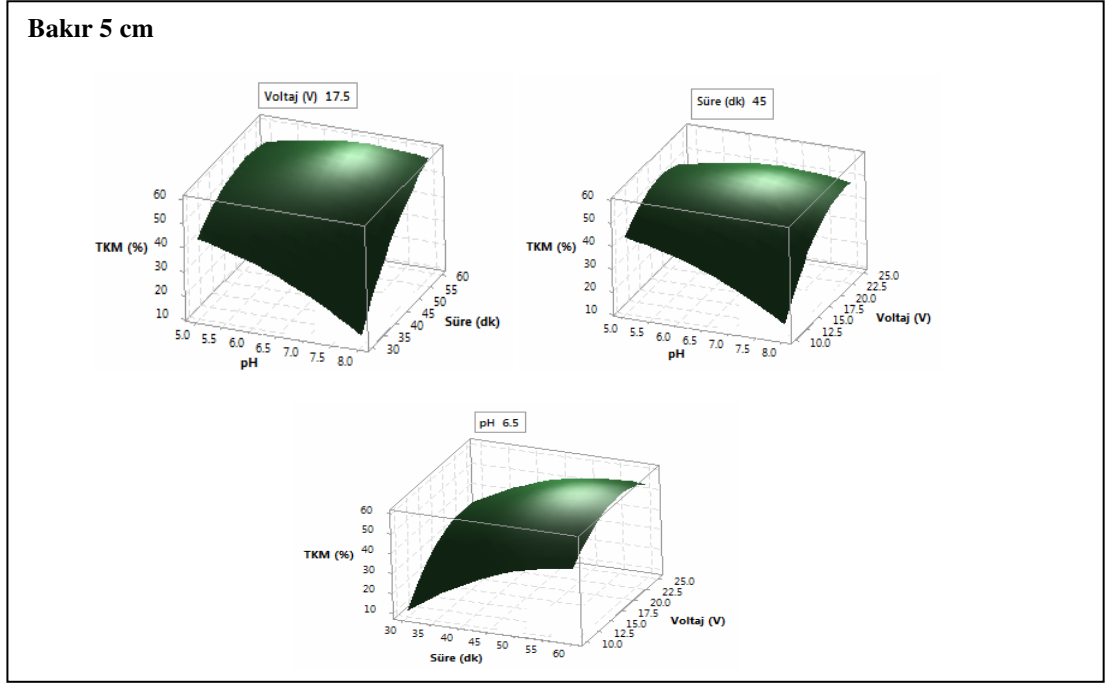
Şekil 4.35. Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)

Şekil 4.35'te elektro-susuzlaştırma işleminin çamur üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılan parametrelerden biri olan viskozite, bakır elektrot kullanıldığında ham çamur viskozitesinin işlem süresi ve uygulanan voltaj ile yaklaşık %20 oranında değiştiği belirlenmiştir. Asidik pH' ın sistem performansını bazik pH' a göre daha olumlu etkilediği görülmüştür.

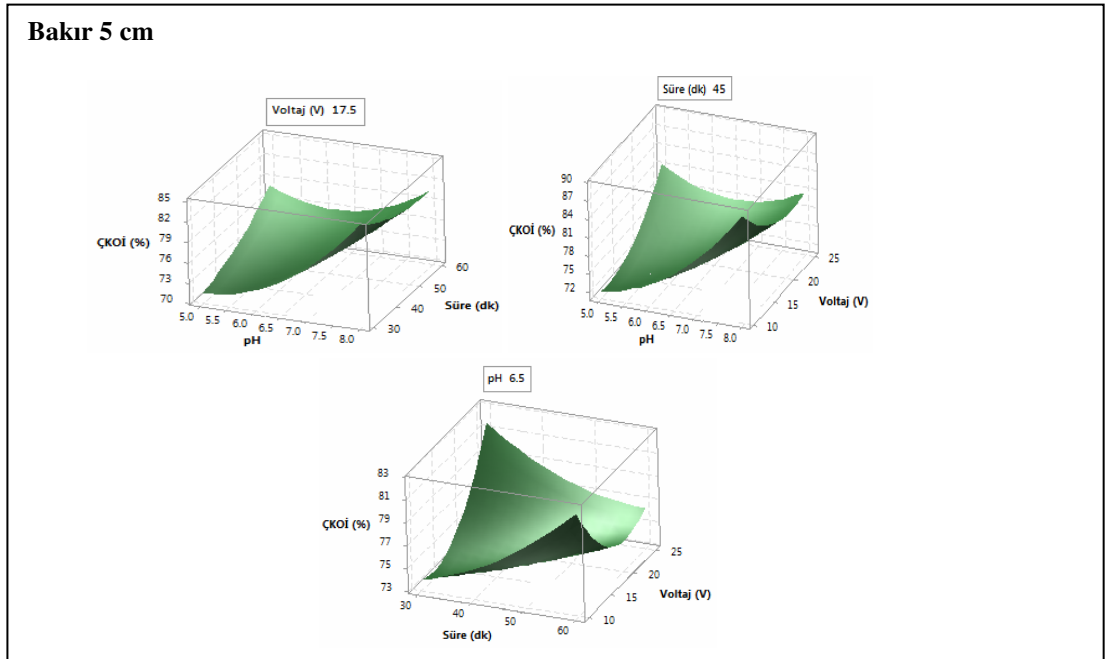
Viskozite değerinin diğer parametrelere göre daha etkili bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bakır elektrotun paslanmaz çelik 5 cm elektrot kullanıldığında da gözlemlenen benzer bir değişim sergilediği görülmüştür.

Katot olarak 5 cm çaplı bakır elektrot ile yapılan deneysel çalışmalarda TKM veriminin maksimum %60'a kadar yükseldiği belirlenmiştir. Çamurun sahip olduğu TKM için elektro-susuzlaştırma işleminde çamur pH değerinin asidik olması, işletim süresinin ve uygulanan voltajın artmasının olumlu etki yaptığı görülmüştür. Ayrıca

uygulanan voltaj ve süreye göre asidik pH değerinin verim üzerinde daha fazla etki yaptığı gözlenmiştir (Şekil 4.36).

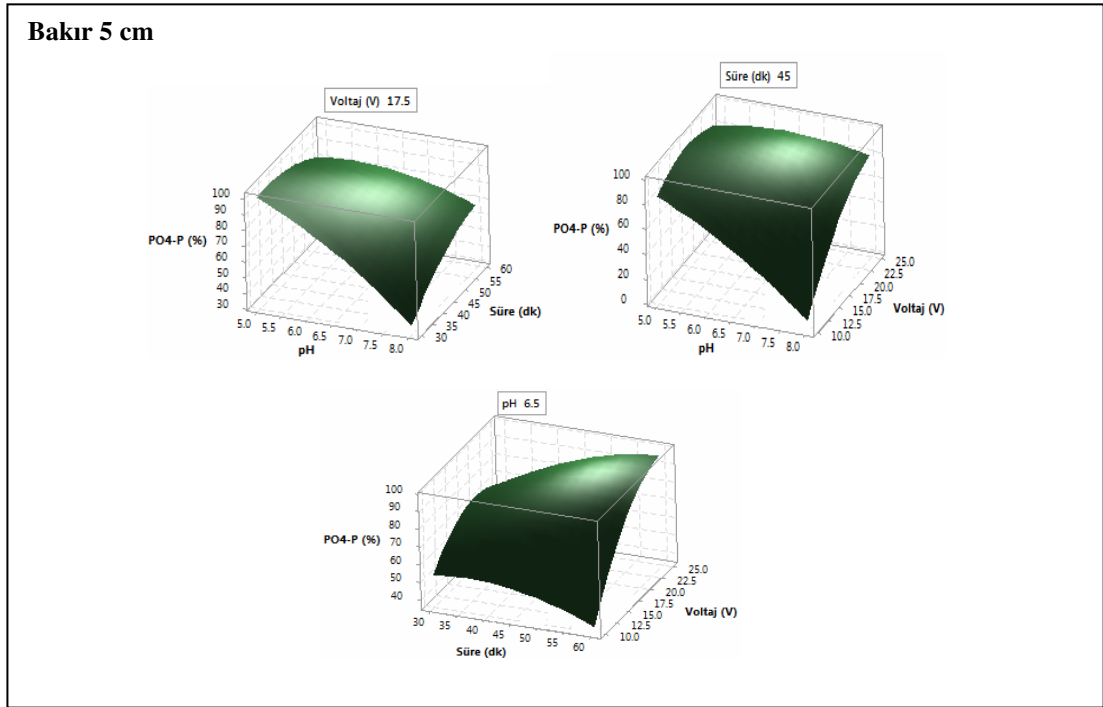


Şekil 4.36. Toplam katı madde gideriminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)



Şekil 4.37. Çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)

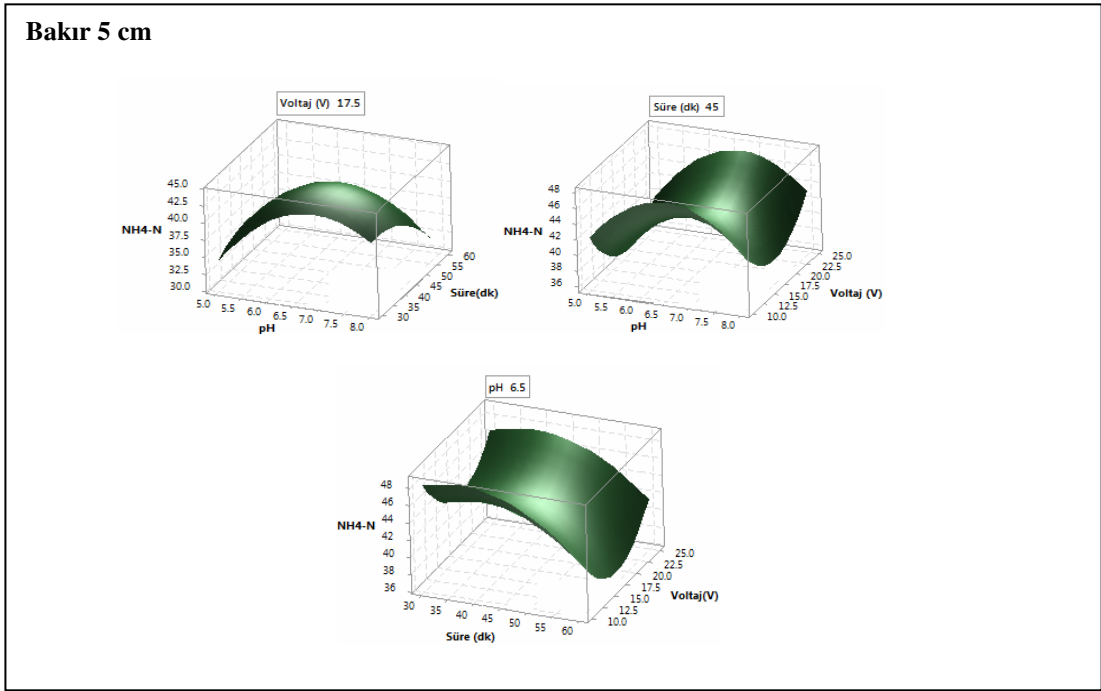
5 cm çaplı katot ve 13,6 cm çaplı anot bakır elektrot kullanıldığında çamurun üst suyunda bulunan ÇKOİ, prosesin işletimi sonucunda katı maddelerin parçalanmasıyla yükseldiği belirlenmiştir. ÇKOİ=57 mg/L ham evsel arıtma çamuru ile yapılan deneysel çalışma sonuçları ve istatistiksel değerlendirmede ÇKOİ verisinin bağımsız değişkenler etkisi ile değişimi Şekil 4.37’ de verilmiştir. Düşük pH değerinde ÇKOİ konsantrasyonu, çamur üst suyunda azalırken yüksek pH değerlerinde %15 kadar arttığı gözlenmiştir. İşletim süresi 45. dakikada sabitken, pH 8 ve voltaj 10 voltta ÇKOİ’nin, %87 arttığı ve en yüksek ÇKOİ verisine ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 4.38. Fosfat fosforu değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)

Bakır elektrot kullanıldığında çamur üst suyunda bulunan fosfat fosforu konsantrasyonu Şekil 4.38’de incelenmiştir. Sistem performansı $PO_4\text{-P}$

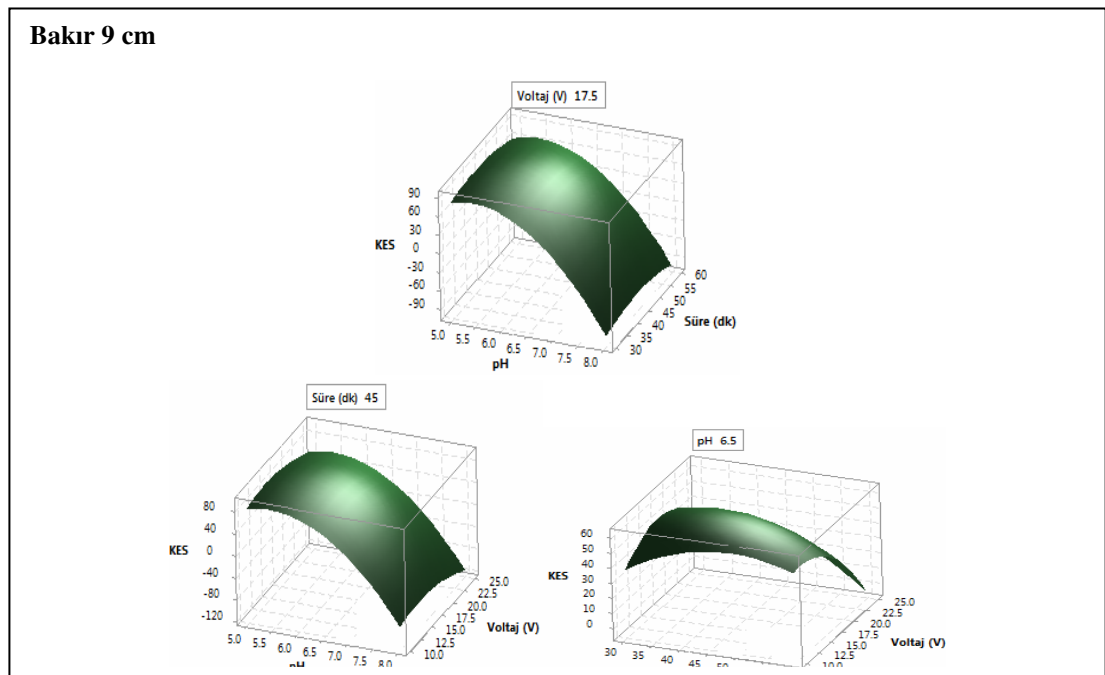
konsantrasyonu baz alındığında bazik pH' ta düştüğü, voltaj ve süre artışıyla beraber yükseldiği belirlenmiştir. İşletim süresi ise fosfat fosforu konsantrasyonunu voltaj ve pH kadar önemli derecede etkilemediği tespit edilmiştir. Bakır 5 cm katot elektrot kullanılarak yapılan çalışmada sistem performansı olumlu etkilenmiş, fosfat fosforu konsantrasyonunun yaklaşık olarak %100 oranında arttığı belirlenmiştir.



Şekil 4.39. Amonyum azotu değişiminin incelenmesi (katot çapı 5 cm bakır elektrot)

Çamurun üst suyunda bulunan amonyum azotunun, prosesin işletimi sonucunda katı maddelerin parçalanmasıyla yükseldiği belirlenmiştir. $\text{NH}_4\text{-N}=38,2$ mg/L ham evsel arıtma çamuru ile yapılan deneysel çalışma sonuçları ve istatistiksel değerlendirmede $\text{NH}_4\text{-N}$ verisinin bağımsız değişkenler etkisi ile değişimi Şekil 4.39'da verilmiştir. Voltaj 17,5'ta sabitken, pH değeri asidikten bazığe doğru değiştirildiğinde nötral pH değerlerinde amonyum azotu konsantrasyonu yükselerek

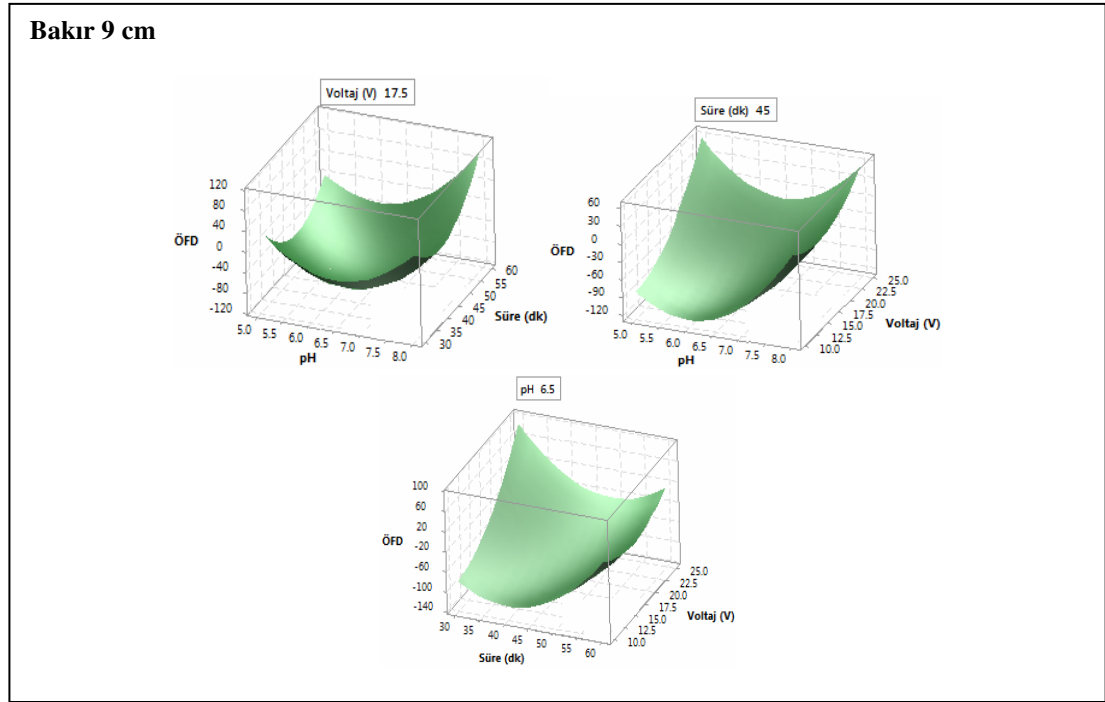
ham çamur konsantrasyonu değerine göre %37,5 arttığı ve işletim süresinin artırılmasının ise konsantrasyon üzerinde olumsuz etki yaptığı görülmüştür. Süre 45. dakikada sabit tutulduğunda ise voltaj değerinin 10 voltta çalışılabileceği, voltajın artırılmasının sistem performansı üzerinde olumsuz etki yaptığı ancak voltaj 17,5 değerinden sonra ise dikkat çekici şekilde amonyum azotu konsantrasyonunun yükseldiği görülmüştür.



Şekil 4.40. Kapiler emme süresi değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

Kapiler emme süresinin asidik pH değerinden olumlu olarak etkilenecek yaklaşık olarak %80 oranında azaldığı belirlenmiştir. Voltaj ve sürenin KES üzerinde pH kadar önemli bir etki yapmadığı görülmüştür. Bazı pH’ta ise KES artmış, sistem performansı olumsuz etkilenebilir. Süre 45. dakika, pH 5 ve 17,5 voltajda KES’ in yaklaşık %80 oranında azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.40). FZ benzer olarak KES

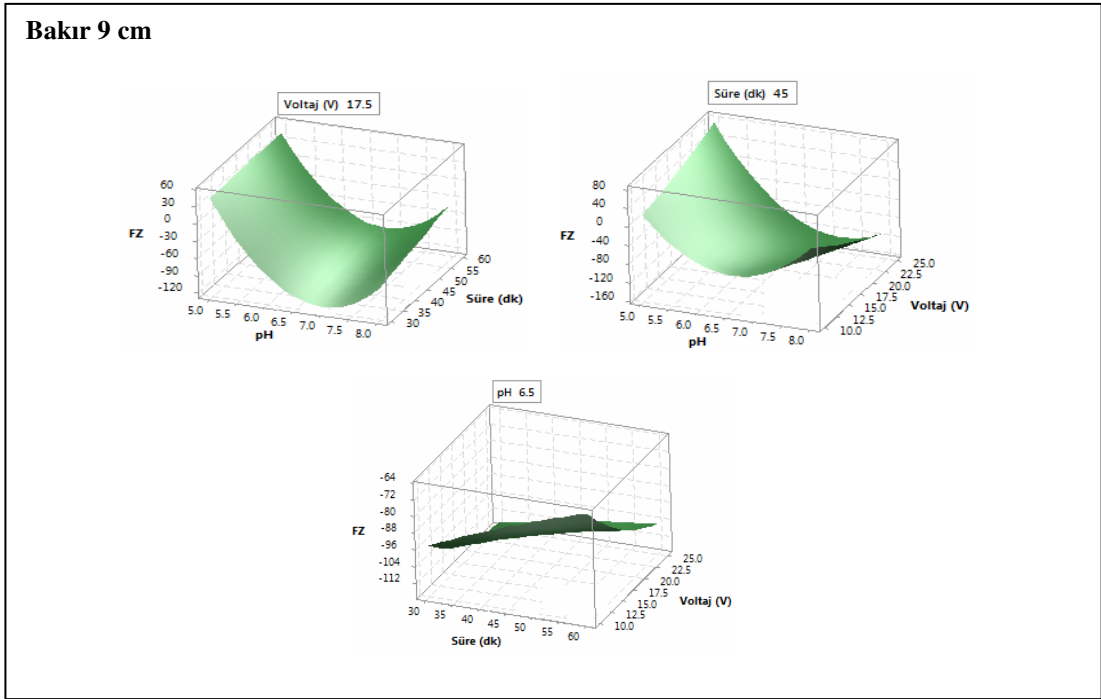
de asidik pH değerlerinde çalışılmasının daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Katot çapları incelendiğinde ise durumun değişmediği asidik pH değerlerinde çalışmanın KES' ni %60'a varan oranda kısalttığı ve böylece elektro-susuzlaştırma prosesinden elde edilen sulu çamur örneğinin etkili bir susuzlaştırma işlemine tabi tutulduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.41. Özgül filtre direncinin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

Şekil 4.41’de incelenen özgül filtre direnci pH 8, işletim süresi 60. dakika ve voltaj 17,5 voltta %80 oranında azalmış ancak diğer bağımsız değişkenler, pH ve işletim süresinin, ÖFD üzerinde fazla etkili olmadığı gözlenmiştir. Ancak asidik pH değerinde çalışıldığında, örneğin pH 5’te voltaj değerinin artması ÖFD değerinin düşmesini olumlu olarak etkilediği gözlemlenmiştir. 17,5 V’ tan daha yüksek voltaj uygulamalarında kademeli olarak performans değerinin yükseldiği belirlenmiştir. Bu

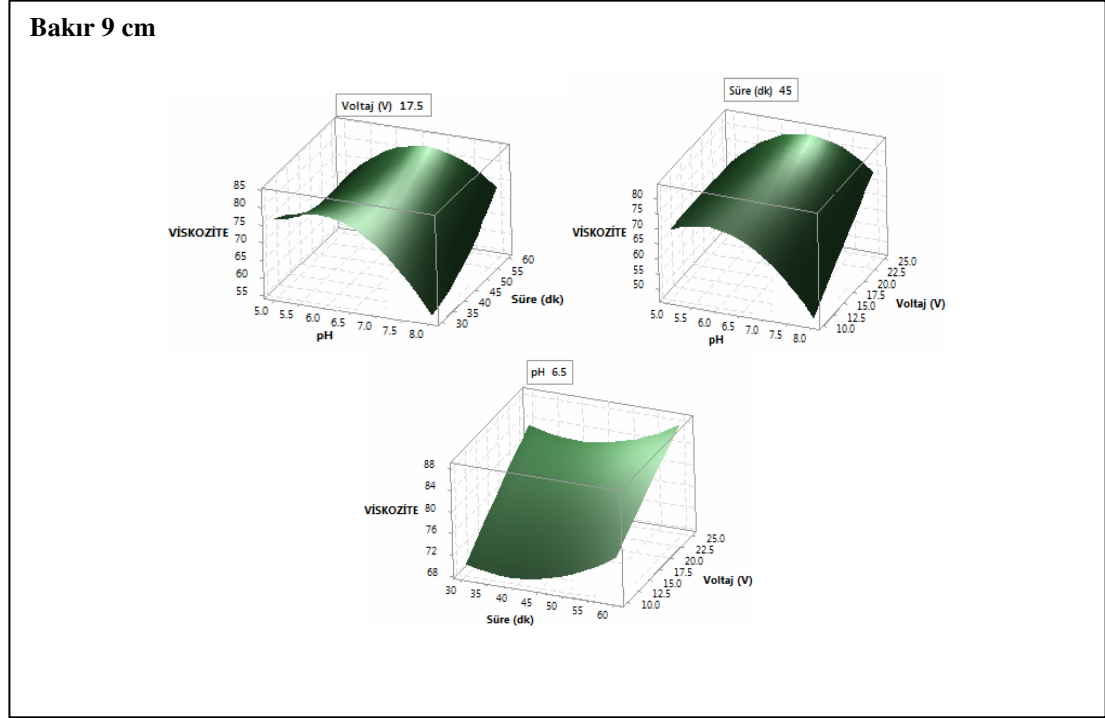
sonuçtan yola çıkarken susuzlaştırma etkisi üzerinde pH değerinin çok önemli olduğu, düşük pH değerlerine sahip arıtma çamurlarının yüksek voltaj uygulaması ile verimin artırılabilceği sonucuna varılmıştır. Her iki elektrotta da (5cm ve 9 cm) işletim süresi arttıkça ÖFD azalmış, pH 6,5'ta sistem performansının olumsuz etkilendiği belirlenmiştir.



Şekil 4.42. Filtreleme zamanının incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

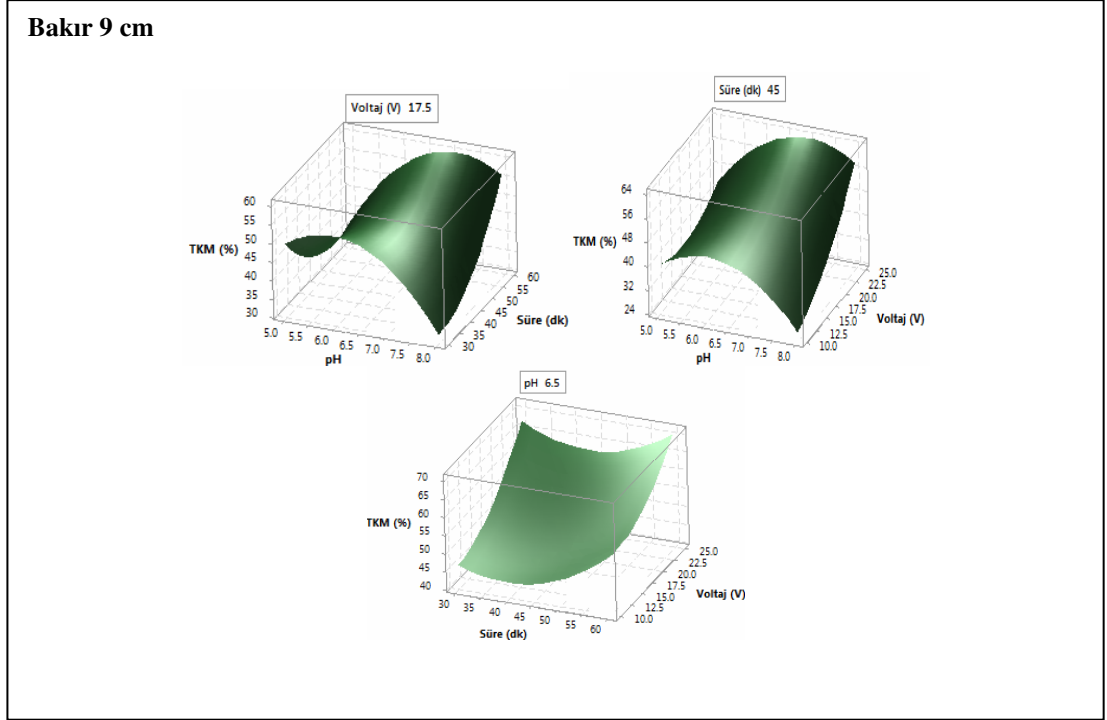
Şekil 4.42’de 9 cm çapındaki katot bakır elektrotlarla yapılan deneylerde FZ, asidik pH değerlerinde sistemi olumlu etkileyerek FZ’nı yaklaşık olarak %60 oranında kısalttığı belirlenmiştir. pH 6,5 ise model reaktörün işletim süresi sonunda alınan çıkış sulu çamur örneğinin sisteme verilen çamurdan daha yüksek filtreleme zamanı gerektirdiği başka bir deyişle filtreleme zamanının kısalması yerine aksine sürenin daha da uzadığı görülmüştür. Her iki katot çapı için de FZ üzerinde işletim

süresi ve voltajın çok etkili olmadığı belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve istatistiksel değerlendirmeler sonucunda, FZ değerinin kısılması bir başka deyişle yerçekimi etkisiyle çamurdan serbest su türünün alınabilmesi için sadece asidik pH değerlerinde çalışılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 4.43. Viskozite değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

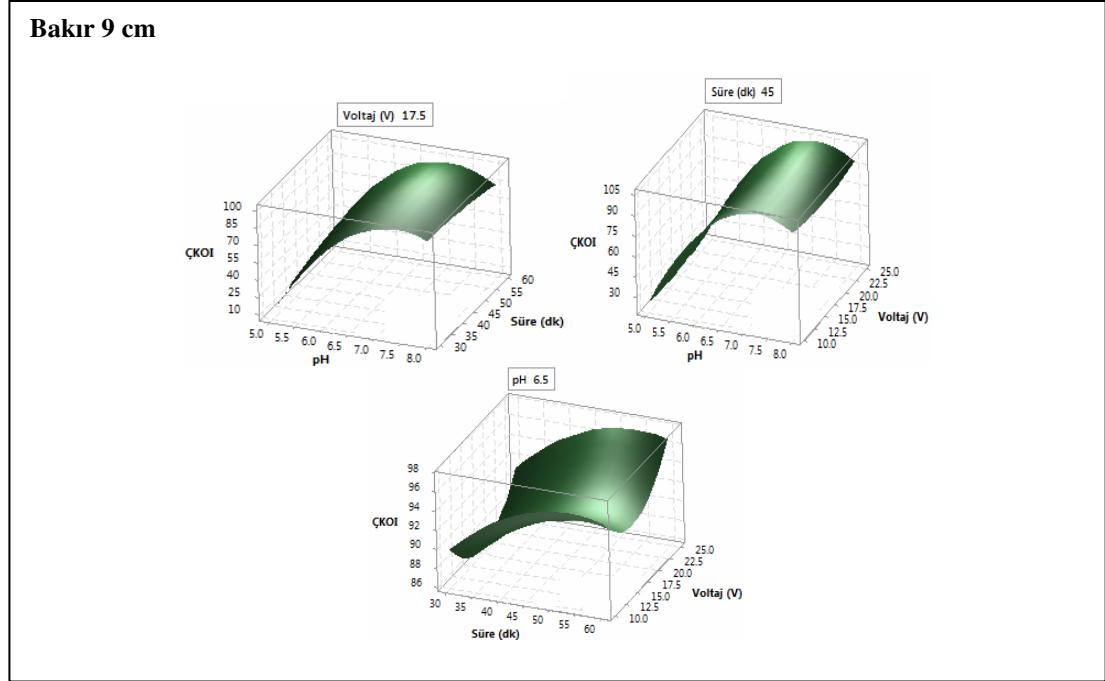
Viskozitenin değerinin azalması yüzde olarak ifade edilmiş ve Şekil 4.43'te incelenmiştir. Bazık pH'ta viskozite değeri yüzde olarak düşerken, voltaj ve süre artışıyla viskozitenin daha fazla azaldığı görülmüştür. pH 6,5'te sabit tutulduğunda uygulanan voltajın artması viskozite düşmesini %68'den %88'e kadar yükseltmiştir. Viskozite değerinin en fazla azaldığı işletme şartlarının pH 6'5, işletim süresi 60. dakika ve voltaj 25 volta gerçekleştiği belirlenmiştir. Her iki elektrotta da (5 cm ve 9 cm) viskozite değerinin asidik pH, yüksek voltaj ve işletim süresinde arttığı görülmüştür.



Şekil 4.44. Toplam katı madde gideriminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

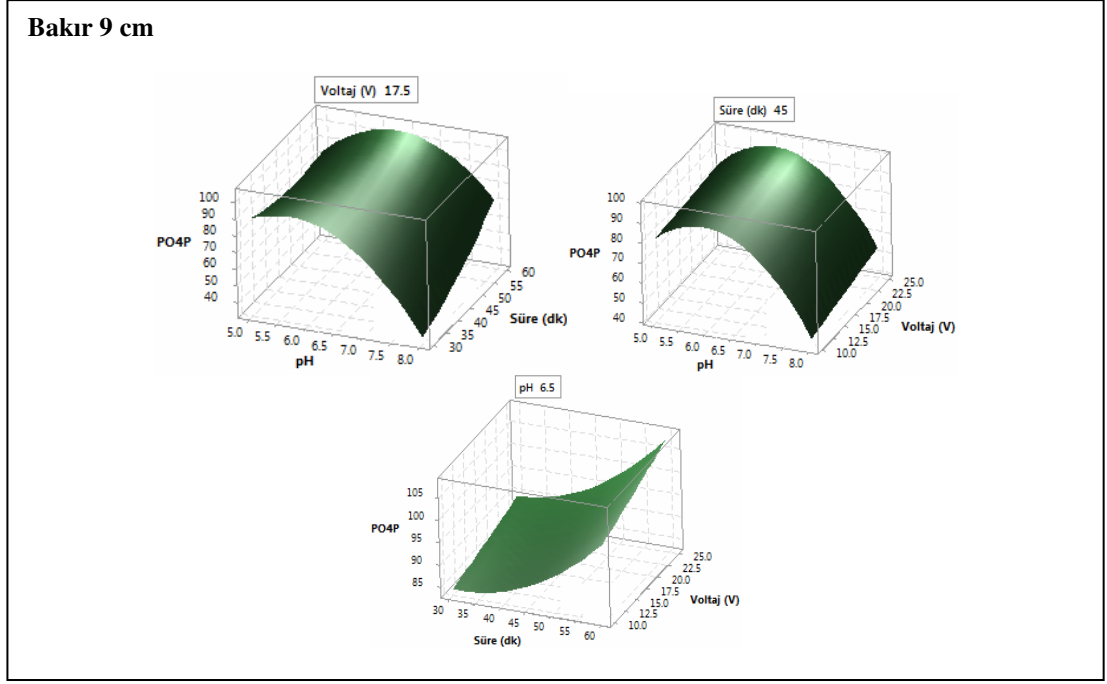
Toplam katı madde miktarı pH 6,5'te sabitlendiğinde voltaj 10 volttan 25 volta yükseldiğinde TKM miktarı %45'ten %65'e kadar azaldığı görülmüş, sistem performansı olumlu etkilenmiştir. İşletim süresinin diğer parametrelere göre etkisinin daha az olduğu belirlenmiştir. Bazik pH'ta TKM miktarının azaldığı tespit edilmiştir. TKM miktarı pH 6,5'te sabitken, işletim süresi 60. dakika ve 25 voltta yaklaşık %70 oranında azalmıştır. Bakır 5 cm elektrotla karşılaştırıldığında ise TKM verisinin benzer şekilde en iyi sonuçları asidik pH, yüksek voltaj ve yüksek işletim süresinde verdiği görülmüştür (Şekil 4.44). Özet olarak bazik pH değerlerine sahip arıtma çamurlarının elektro-susuzlaştırma işlemine tabi tutulduğunda işletim süresinin ve uygulanan voltajın yüksek tutularak susuzlaştırma performansının yükseltildiği,

çamurdan suyun ve katı maddenin ayrılmasının daha etkili şekilde uygulanabileceği belirlenmiştir.



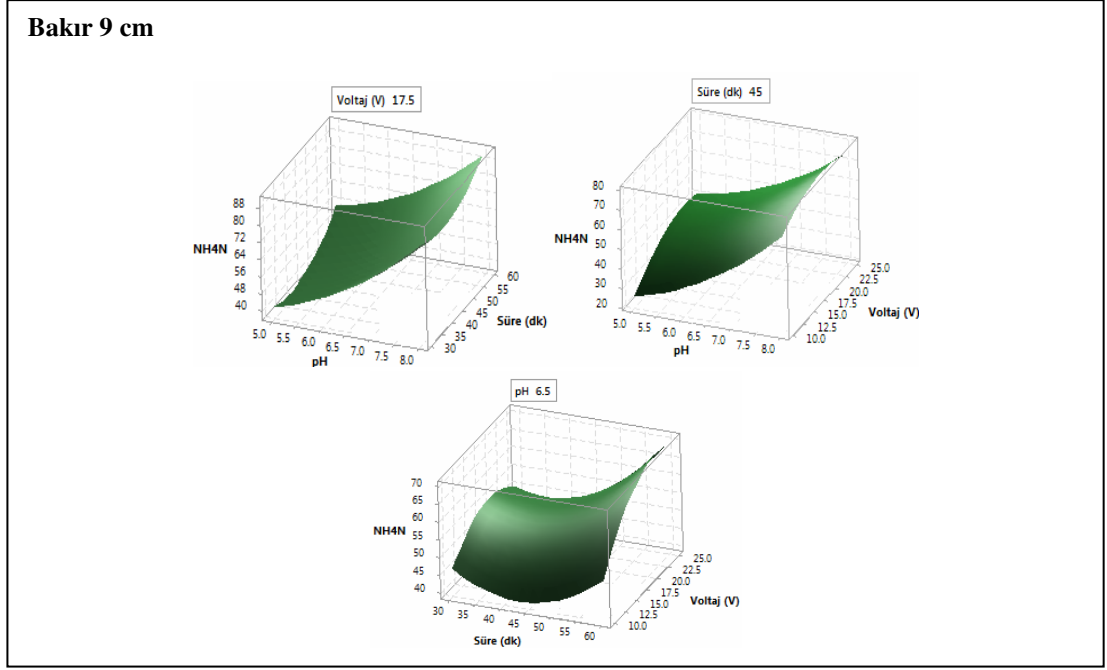
Şekil 4.45 Çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

Şekil 4.45'te verilen 9 cm çaplı bakır katot elektrot kullanılarak yapılan çalışmada, pH değerinin artması ÇKOİ konsantrasyonu artırdığı görülmüştür. Uygulanan voltajın ise ÇKOİ konsantrasyonunu önemli ölçüde değiştirmedeği belirlenmiştir. Buradan söylenebilir ki sistemin enerji harcaması azaldığından daha ekonomik şekilde süreç işletilebilir. Süre 45. dakikada sabitken pH 6,5 ve voltaj 25 V değerine %96 değerine, 10 voltta ise %94 değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Her iki katot çapının da yüksek olduğu noktada, bazik pH'ta çalışmanın konsantrasyonu etkilediği görülmüştür.



Şekil 4.46. Fosfat fosforu değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

Çamur üst suyunun sahip olduğu fosfat fosforu konsantrasyonu Şekil 4.46’ da incelenmiştir. Bazik pH’ ın sistem performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. Voltaj ve işletim süresi uzadıkça fosfat fosforu konsantrasyonunun ham çamura göre yaklaşık %100 arttığı tespit edilmiştir. Bakır 5 ve 9 cm elektrot kullanılarak yapılan deneylerde genel olarak görüldü ki her iki katot çapında asidik pH ve yüksek işletim süresi ve voltaj değerlerinin uygulamasının elektro-susuzlaştırma prosesinde fosfat fosforunun çamur bünyesinden salınarak çıkış suyunda konsantrasyon değerinin artmasına neden olmuştur. Fosfat fosforu ve ÇKOİ konsantrasyonları karşılaştırıldığında ise asidik şartlarda fosfat fosforunun, bazik şartlarda ise ÇKOİ konsantrasyonunun yükseldiği belirlenmiştir.



Şekil 4.47. Amonyum azotu değişiminin incelenmesi (katot çapı 9 cm bakır elektrot)

Çamur üst suyundaki amonyum azotu konsantrasyonunun elektro-susuzlaştırma işlemi sonunda %88 oranında arttığı, bazik pH değerlerinde maksimum seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. İşletim süresi ve uygulanan voltaj değerinin pH değeri kadar etkili olmadığı gözlenmiştir. pH 8, voltaj 17,5 volt ve süre 60. dakikada amonyum azotu konsantrasyonu %88 oranında arttığı görülmüştür (Şekil 4.47). Amonyum azotu konsantrasyonu, ÇKOİ konsantrasyonu gibi bazik pH değerinde yükseldiği görülmüştür.

5. SONUÇLAR

Deneyssel çalışmalarda kullanılan tüm elektrot türlerinde 5 cm çapında katot elektrot kullanıldığında asidik pH, yüksek voltaj ve işletim süresinde KES değerini etkili şekilde azaltarak sistem performansının olumlu etkilendiği gözlemlenmiştir. Paslanmaz çelik 5 cm elektrot kullanıldığında pH 6,5, voltaj 25 volt ve 60. dakikada KES %72 değerine ulaşırken, grafit ve bakır elektrotta pH 5, voltaj 17,5 volt ve 60. dakikada sırasıyla %80 ve %90 değerine ulaşmıştır. Bu durumda diğer elektrot türlerine göre bakır elektrotun kullanılmasının susuzlaştırma işleminde daha etkili olduğu belirlenmiştir.

9 cm çapındaki tüm elektrot türleri için yapılan çalışmalar sonucunda ise voltaj ve işletim süresinin pH kadar etkili olmadığı görülmüştür. Aynı zamanda 5 cm katot elektrotla yapılan çalışmalarda olduğu gibi asidik pH değerinde çalışılması gerektiği görülmüştür. KES değeri paslanmaz çelik 9 cm elektrotta %70 oranında azalma sağlanırken, grafit ve bakır elektrotlarda %80 oranında azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bakır elektrot pH 5, voltaj 17,5 volt ve 45. dakikada, grafit elektrot ise pH 6,5, voltaj 10 V ve 45. dakikada %80 değerine ulaşmıştır.

ÖFD bakır 5 cm elektrot, grafit ve paslanmaz çelik elektrota göre daha olumlu sonuç vermiş, ÖFD değeri pH 5, voltaj 17,5 volt ve 45. dakikada %90 azaldığı görülmüştür. Bakır 5 cm elektrotta voltajın önemli bir etkisinin olmadığı

görülmüştür. Bakır 9 cm elektrotta da ÖFD %80 azalmış, bu azalma pH 8, voltaj 17,5 volt ve 60 dakika olan işletme şartlarında gerçekleşmiştir.

Paslanmaz çelik 5 ve 9 cm elektrotlarda FZ değeri en fazla sırasıyla %20 ve %30 azaldığı görülmüştür. Grafit ve bakır 5 cm elektrotlar 9 cm elektrotlara göre sistem performansını daha olumlu etkilediği görülmüştür. Grafit ve bakır 5 cm elektrot kullanıldığında asidik pH değerinde sistem performansı olumlu etkilenmiş, FZ değeri pH 5, voltaj 25 volt ve 45. dakikada sırasıyla %80 ve %100 azaldığı görülmüştür.

Ham çamura ait viskozite değerine göre çamura bağlı su, çamur bünyesinden ayrıldığından dolayı model reaktörden alınan çıkış suyu örneklerinde viskozite değerinin azaldığı görülmüştür. Viskozite, 5 cm elektrotlarda, asidik pH, yüksek voltaj ve süre artışıyla %90-100 oranında azalmış ve sistem performansının olumlu yönde etkilendiği belirlenmiştir. Grafit ve bakır 9 cm elektrotlarda da işletim süresi ve voltaj artışı sistem performansını olumlu etkilemiştir. Paslanmaz çelik 9 cm elektrotta ise voltaj artışı ve işletim süresi çok etkili olmadığından, asidik pH, düşük voltaj ve sürede paslanmaz çelik elektrotta çalışılabilineceği sonucuna ulaşılmıştır.

TKM miktarı 5 cm elektrotlarda (paslanmaz çelik, grafit, bakır) asidik pH, yüksek voltaj ve işletim süresinin artırılmasıyla TKM miktarının önemli derecede azaldığı görülmüştür. Paslanmaz çelik 5cm elektrotta pH 6,5, voltaj 25 volt ve 60. dakikada TKM miktarı %90 azalmış, sistem performansı olumlu etkilenmiştir.

KES, ÖFD, FZ, TKM ve viskozite değerleri için genel olarak 5 cm bakır elektrot kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür.

ÇKOİ değeri 5 cm elektrotlarda pH ve süreye bağlı olarak değişmiş, voltajın fazla etkili olmadığı görülmüştür. Paslanmaz çelik 5 cm elektrotta ÇKOİ, pH 6,5, voltaj 10 volt ve 60. dakikada %92 oranında arttığı belirlenmiştir.

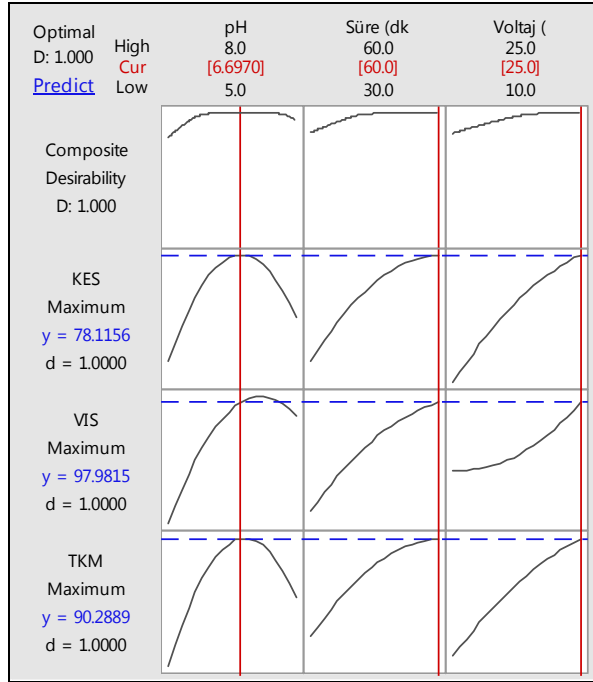
Bakır 5 cm elektrotta düşük voltaj değerlerinde ÇKOİ konsantrasyonunu arttığı için tercih edilebilir olduğu düşünülmüştür. 9 cm elektrotlar ÇKOİ değerini %90-100 arasında artırmış, sistem performansının olumlu etkilendiği görülmüştür. Paslanmaz çelik 9 cm elektrotta voltaj çok etkiliyken, grafit 9 cm elektrotta voltaj 17,5 voltta sistem performansı olumlu etkilendiği belirlenmiştir. Bakır 9 cm elektrotta ise ÇKOİ değeri pH 6,5, voltaj 25 volt ve 45. dakikada %96 artmış, 10 voltta ise %94 arttığı görülmüştür. Bakır 9 cm elektrotta voltaj değerinin önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Paslanmaz çelik 5 ve 9 cm elektrotta bazik pH değerler sistem performansını olumsuz etkilerken, işletim süresinin çok etkili olmadığı görülmüştür. Paslanmaz çelik 5 cm elektrotta pH 5, voltaj 10 volt ve 45. dakikada fosfat fosforu konsantrasyonu %75 azalırken, 9 cm elektrotta pH 5, voltaj 10 volt ve 45. dakikada fosfat fosforu konsantrasyonunun %90 arttığı görülmüştür. Bakır 5 cm elektrotta ise asidik pH ve yüksek voltaj sistem performansını olumlu etkilemiş, fosfat fosforu konsantrasyonunun %100 oranında arttığı belirlenmiştir. Bakır 9 cm elektrotta ise asidik pH ve işletim süresinin artırılması fosfat konsantrasyonunu arttırmış, voltajın önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Voltajın önemli bir etkisinin olmamasının bakır 9 cm elektrotunu diğer elektrotlardan daha avantajlı hale getirdiği tespit edilmiştir. Grafit 5 ve 9 cm elektrotların ise bakır ve paslanmaz çelik elektrotlar kadar sistem performansını etkilemediği görülmüştür.

En yüksek amonyum azotu konsantrasyonu artışının bakır 9 cm elektrotta gerçekleştiği görülmüştür. Amonyum azotu konsantrasyonu pH 8, voltaj 17,5 volt ve işletim süresi 60. dakika olan işletme şartlarında %88 arttığı belirlenmiştir. Diğer elektrotlarda ise amonyum azotu konsantrasyonu en fazla %60 oranında artmış, en yüksek oranların çoğunlukla yüksek voltajlarda gerçekleştiği görülmüştür.

ÇKOİ, amonyum azotu ve fosfat fosforu için bakır 9 cm elektrotun kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

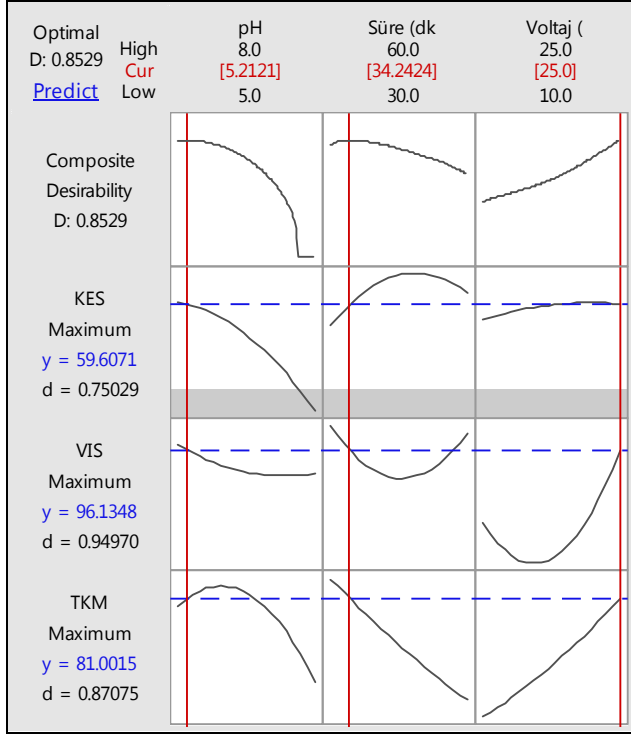
Sonuçları elektrotlara göre değerlendirirsek paslanmaz çelik 5 cm elektrot en iyi sonuçlarını genel olarak, asidik pH, yüksek voltaj ve işletim süresinde verdiği gözlemlenmiştir. Bu analizlerin sonuçları MINITAB 17.0 programında optimizasyon yapıldığında ise paslanmaz çelik 5 cm elektrotta KES, TKM ve viskozite değerleri en iyi sonuçlarını pH 6, işletim süresi 60. dakika ve voltaj 25 V' ta verdiği belirlenmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Paslanmaz çelik 5 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)

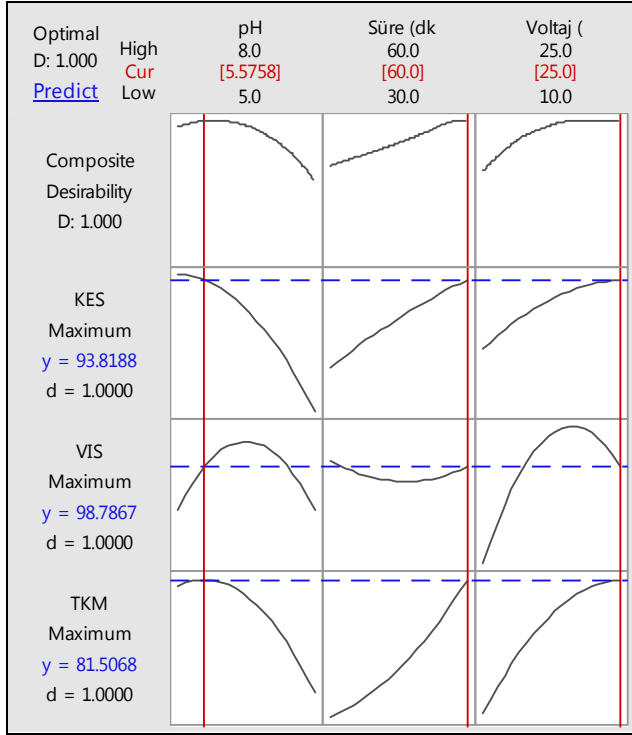
Paslanmaz çelik 9 cm elektrotta ise asidik pH değerlerinin sistem performansını olumlu etkilediği görülmüştür. Optimizasyon yapıldığında ise KES, TKM ve viskozitenin en uygun sonuçlarını pH 5, işletim süresi 34. dakika ve voltaj

25 V' ta verdiği görülmüştür. Paslanmaz çelik 5 cm elektrotla karşılaştırıldığında ise işletim süresinin kısaldığı gözlemlenmiştir.

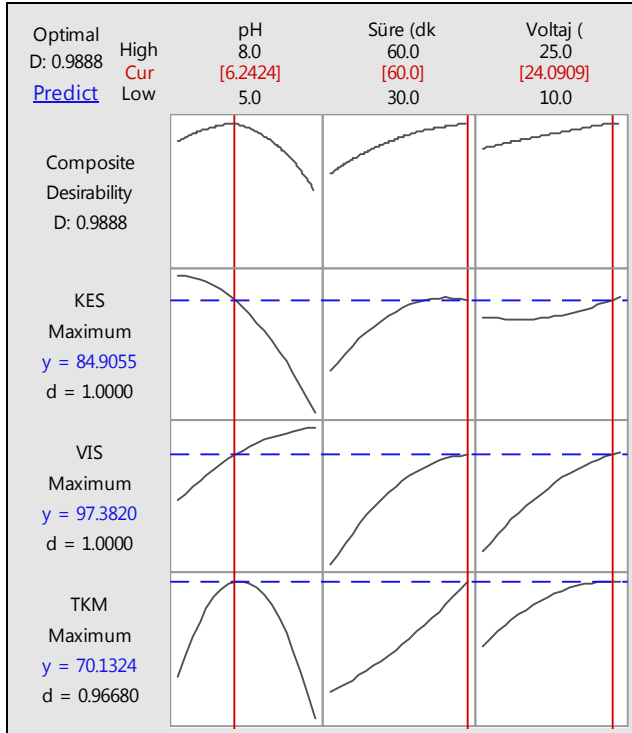


Şekil 5.2. Paslanmaz çelik elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)

Grafit 5 cm elektrotta asidik pH ,yüksek voltaj ve işletim süresinde sistem performansının olumlu etkilendiği görülmüştür. Optimizasyon yapıldığında ise KES, TKM ve viskozite değerleri pH 5, işletim süresi 60. dakika ve voltaj 25 voltta çalışılmasının uygun olacağı belirlenmiştir (Şekil 5.3).

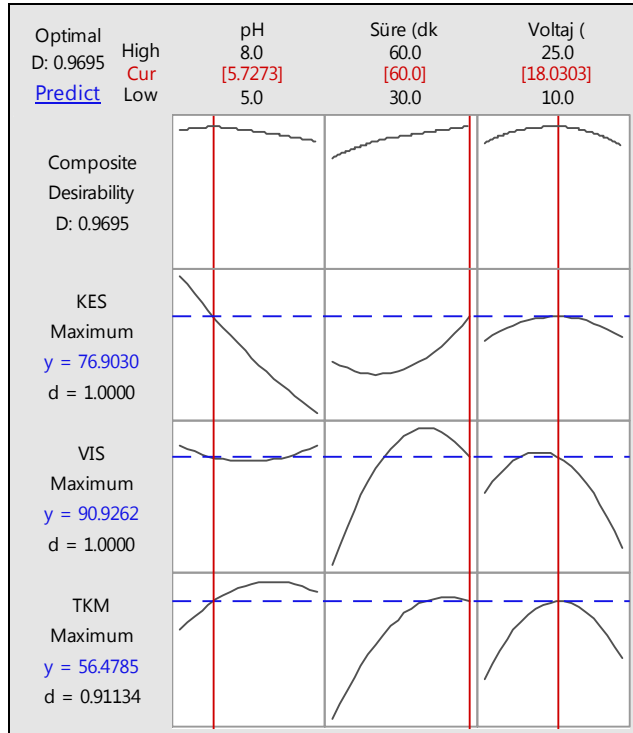


Şekil 5.3. Grafit 5 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)



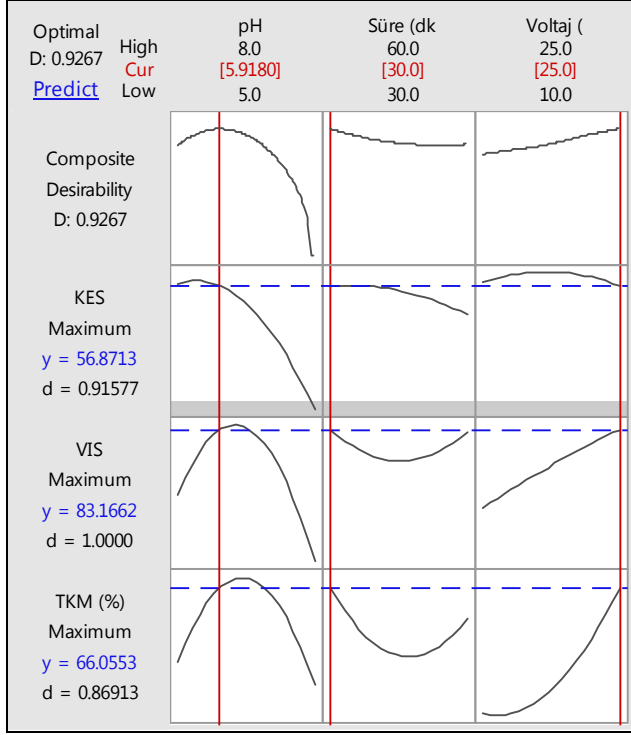
Şekil 5.4. Grafit 9 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)

Grafit 9 cm elektrot kullanıldığında KES, TKM ve viskozite değerleri incelendiğinde asidik pH, yüksek voltaj ve işletim süresinde sistem performansının olumlu etkilendiği görülmüştür. Şekil 5.4'te grafit 9 cm elektrotun optimizasyon sonuçları verilmiştir. Buna göre uygun sonuçların pH 6, işletim süresi 60. dakika ve voltaj 24 voltta verildiği görülmüştür.



Şekil 5.5. Bakır 5 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)

Bakır 5 cm elektrot incelendiğinde diğer elektrotlar gibi asidik pH ve yüksek voltajda sistem performansının arttığı görülmektedir. Optimizasyon sonuçlarına göre ise KES, TKM, viskozite değerleri pH 5, işletim süresi 60. dakika ve voltaj 18 voltta çalışılmasının uygun olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.6. Bakır 9 cm elektrot optimizasyonu (KES, TKM, viskozite)

Bakır 9 cm elektrotta asidik pH ve yüksek voltajda sistem performansının olumlu etkilendiği gözlemlenmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre ise bakır 5 cm elektrottan farklı olarak işletim süresinin daha az olduğu görülmüştür. pH 5, işletim süresi 30. dakika ve volta 25 voltta en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir (Şekil 5.6).

Tablo 5.1’de optimizasyon sonuçlarına göre KES, TKM ve viskozite için verim oranları verilmiştir. KES ve viskozite için 5 cm elektrotların, 9 cm elektrotlara göre veriminin daha yüksek olduğu görülmüştür. KES ve viskozite için en yüksek verim sırasıyla %93 ve %98, TKM için ise paslanmaz çelik 5 cm elektrotta %90 verim sağlandığı görülmüştür.

Tablo 5.1. KES, TKM ve viskozite verim oranları

	KES (%)	TKM (%)	ViSKOZİTE (%)
Paslanmaz Çelik 5 cm	78	90	97
Paslanmaz Çelik 9 cm	59	81	96
Grafit 5 cm	93	81	98
Grafit 9 cm	84	70	97
Bakır 5 cm	76	56	90
Bakır 9 cm	56	66	83

KAYNAKLAR

APHA. AWWA. WEF. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th ed. American Public Health Association, Washington, D.C.

CITEAU, M., Larue, O., Vorobiev, E. (2011). Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge. Water Research, 45(6), 2167–2180.

EROĞLU, V. (2008). Atıksuların Tasfiyesi. Su Vakfı, İstanbul, sf. 145.

FİLİBELİ, A. (2002). Arıtma Çamurlarının İşlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, İzmir, sf. 16.

KÖKSOY, O. (2001). Taguchi ve Cevap Yüzeyi Felsefelerinin Birleştirilmesi: Problem ve Çözüm Teknikleri. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

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

LO, I.M.C., Lai K.C.K., Chen G.H. (2001). Salinity effect on mechanical dewatering of sludge with and without chemical conditioning. *Environmental Science Technology*, 35;4691-4696.

MAHMOUD, A., Oliver, J., Hoadley, A.F.A. (2010). Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering. *Water Research*, 44, 2381-2407.

MAHMOUD, A., Oliver, J., Vaxelaire, J., Hoadley, A.F.A. (2011). Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interactions effects. *Water Research*, 45, 2795 -2810.

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

SAVEYN, H., Curvers, D., Pel, L., De Bondt, P., Meeren, P.V. (2006). In situ determination of solidosity profiles during activated sludge electro-dewatering. *Water Research*, 40, 2135 – 2142.

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

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

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

TUAN, P.A., Sillanpaa, M. (2010). Effect of freeze/thaw conditions, polyelectrolyte addition, and sludge loading on sludge electro-dewatering process. *Chemical Engineering Journal*, 164(1), 85–91.

TUAN P.A., Sillanpaa M., Isosaari P. (2012). Sewage Sludge Elektro-Dewatering Treatment-A Review. *Drying Technology: An International Journal*, 30, 7, 691-706.

TUAN, P.A., Sillanpaa, M., Virkutyte, J. (2012). Sludge dewatering by sand-drying bed coupled with electro-dewatering at various potentials. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 24(2), 151–162.

VESILIND, P.A. (1994). The role water in sludge dewatering. *Water Environment Research*, 66, 1, 4-11.