

**T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MAYA ENDÜSTRİSİ ARITMA ÇAMURLARININ
ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA PERFORMANSININ
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEMRE KARSLIOĞLU

BOLU, OCAK - 2016

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



MAYA ENDÜSTRİSİ ARITMA ÇAMURLARININ
ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA PERFORMANSININ
BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEMRE KARSLIOĞLU

BOLU, OCAK - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Cemre KARSLIOĞLU tarafından hazırlanan “MAYA ENDÜSTRİSİ
ARITMA ÇAMURLARININ ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA
PERFORMANSININ BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması 29.01.2016
tarihinde Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre
Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL

Üye
Prof. Dr. Serpil YENİSOY KARAKAŞ
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Serkan EKER
Dokuz Eylül Üniversitesi

İmza

.....
.....
.....

.....D. Karakas

Prof. Dr. Duran KARAKAŞ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

1. Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 2. Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 3. Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 4. Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 5. Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Cemre KARSLIOĞLU

ÖZET

**MAYA ENDÜSTRİSİ ARITMA ÇAMURLARININ
ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
CEMRE KARSLIOĞLU
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YARD. DOÇ. DR. NAZLI BALDAN PAKDİL)**

BOLU, OCAK - 2016

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. 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.

Tez kapsamında maya endüstrisi atıksu arıtma çamurlarının susuzlaştırma özelliklerini iyileştirmek için model reaktörünün kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Susuzlaştırma verimi; kapiler emme süresi (KES), viskozite, toplam katı madde (TKM) ve hücre dışı polimerik madde (EPS) verilerinin değerlendirilmesi ile ortaya koyulmuştur. Ayrıca model reaktörün çıkış suyunda çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) parametresi gözlemlenmiştir. Elektro susuzlaştırma işlemi için düşey elektrotlarla hazırlanmış elektrotlar ile oluşturulmuş yatay elektrik alanı arasında bırakılan sistem kullanılmıştır. Deneysel analiz sonuçları bilgisayar istatistiksel programı MİNİTAB 17.1 programında Box-Behnken istatistiksel dizaynı kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu dizayn yöntemi ile bağımlı değişkenler (KES, viskozite, TKM ve ÇKOİ) üzerinde üç bağımsız değişkenin (sıcaklık, pH, işletme süresi) etkileri saptanmıştır. Aynı zamanda farklı elektrot türlerinin (platin, bakır, paslanmaz çelik ve grafit) etkisi belirlenmiştir.

Sonuç olarak, model reaktörle oluşturulan elektrik alanının susuzlaştırma etkisi dikkate alınarak tüm elektrot türleri arasında grafit elektrodun etkili olduğu gözlenmiştir. Çamur örneğinin susuzlaştırılmasında uygun elektrot aralığı 4.3 cm olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda EPS ve metal konsantrasyonu üzerinde elektrik alanının etkili olduğu görülmüştür. Genel olarak asidik pH ve işletim süresinin uzun olmasının susuzlaştırma performansını olumlu etkilediği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Elektro-Susuzlaştırma, Çamur, Platin, Grafit, Bakır, Paslanmaz Çelik

ABSTRACT

DETERMINATION OF ELECTRO-DEWATERING PERFORMANCE OF THE YEAST INDUSTRY'S SLUDGES

PHD THESIS

CEMRE KARSLIOĞLU

**ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. NAZLI BALDAN PAKDİL)**

BOLU, JANUARY 2016

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. 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.

In this thesis, the availability of model reactor was evaluated to improve the dewatering capacity of the yeast industry's sludges. The dewatering capacity was determined with evaluation of capillary suction time (CST), viscosity, total solids (TS) and Exopolymeric substances (EPS) parameters. Also, soluble chemical oxygen demand (SCOD) was analyzed in effluent waters of the model reactor. Horizontal electric field system was used which is formed with vertical electrodes for to do electro-dewatering (EDW). The assessment of the experimental analysis results using Box-Behnken Design was carried out using MINITAB 17.1 computer program. The effects of tree independent variables (temperature, pH and process time) on dependent variables (CST, viscosity, TS and SCOD) were determined by making use of the statistical design analysis. Additionally, platinum electrode, copper electrode, stainless steel electrode and graphite electrodes were used to see the effect of different electrode types.

As a result, graphite electrodes has been observed to be effective in all types of electrodes by considering the effect of dewatering of the electric field generated with model reactor. The proper distance between the electrodes was noted to 4.3 cm for the dewatering of sludge sample. Also the electricity field has affected the EPS and metal concentrations was detected. It was generally observed that keeping process time long and acidic pH had positive effect.

KEYWORDS: Electro-Dewatering, Sludge, Platinum, Graphite, Copper, Stainless Stain

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ.....	ix
TEŞEKKÜR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. MAYA ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU ARITIM TEKNOLOJİLERİ.....	4
2.1 Maya Üretimi	4
2.2 Maya Üretimi Prosesi	4
2.2.1 Fermentasyon.....	5
2.3 Kullanılan Hammadde ve Ürünler.....	6
2.4 Maya Üretiminde Su Kullanımı	7
2.5 Temel Kirletici Parametreler ve Maya Atıksularının Özellikleri	7
2.6 Maya Atıksularının Arıtım Teknolojileri	9
3. ARITMA ÇAMURLARININ SUSUZLAŞTIRILMASI.....	10
3.1 Doğal Su Alma Yöntemleri.....	10
3.2 Mekanik Su Alma Yöntemleri	10
4. ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA (ES) PROSESİ	12
4.1 Elektro-susuzlaştırma Teknikleri	15
4.2 Elektro-susuzlaştırmayı Etkileyen Faktörler	18
5. MATERYAL VE YÖNTEM	23
5.1 Model Reaktör ve Elektrot Tipleri	23
5.2 Çamur Karakteristiğinin Belirlenmesi.....	26
5.3 Fiziksel ve Kimyasal Analizler	26
5.4 Özgül Filtre Direnci.....	27
5.5 Kapiler Emme Süresi.....	27
5.6 Viskozite Tayini	28
5.7 EPS (Extracellular Polymeric Substances) Tayini	28
5.7.1 EPS Ekstraksiyonu.....	29
5.7.2 EPS Protein ve Karbonhidrat Konsantrasyon Belirleme	29
5.7.3 Polisakkarit Metodu.....	29
5.7.4 Hümik Asit Metodu	30

5.8	İstatistiksel Analizler	30
5.9	Model Reaktörün İşletilmesi	32
6.	BULGULAR VE TARTIŞMA	33
6.1	Maya Endüstrisi Arıtma Çamurunun Özelliklerinin Belirlenmesi	33
6.2	Platin Elektrot Kullanımı	34
6.2.1	Platin 50 Optimizasyon Çalışması	38
6.2.2	Platin 90 Optimizasyon Çalışması	42
6.3	Bakır Elektrot Kullanımı	44
6.3.1	Bakır 50 Optimizasyon Çalışması	48
6.3.2	Bakır 90 Optimizasyon Çalışması	52
6.4	Paslanmaz Çelik Kullanımı	53
6.4.1	Paslanmaz Çelik 50 Optimizasyon Çalışması	57
6.4.2	Paslanmaz Çelik 90 Optimizasyon Çalışması	60
6.5	Grafit Elektrot Kullanımı	61
6.5.1	Grafit 50 Optimizasyon Çalışması	65
6.5.2	Grafit 90 Optimizasyon Çalışması	69
6.6	Mikrodalga Radyasyonunun İşlem Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	71
6.6.1	Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda Metal İzlenmesi	71
6.6.2	Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda EPS İzlenmesi	73
6.6.3	Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda TOK İzlenmesi	77
6.6.4	Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda Zeta Potansiyeli ve pH İzlenmesi	80
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	82
8.	KAYNAKLAR	86
9.	ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Çamurdaki su tipleri	2
Şekil 2.1. Maya üretimi için tipik proses akış diyagramı	5
Şekil 4.1. Elektro-susuzlaştırmada meydana gelen elektrokinetik olay (Tuan, 2012)14	
Şekil 4.2. Çamur su dağılımı ve susuzlaştırma metotları (Zhou, 2001)	14
Şekil 4.3. Laboratuar ölçekli filtre presin şematik gösterimi (Saveyn, 2005)	15
Şekil 4.4. Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırma testlerine yönelik deney düzeneğinin şematik diyagramı (Lee ve ark., 2007).	16
Şekil 4.5. Laboratuar ölçekli şematik gösterimi (a) Elektro-susuzlaştırma kum kurutma yatağı ve (b) Basınç uygulanmış elektro-susuzlaştırma reaktörü (Tuan vd., 2008).	17
Şekil 4.6. (a) Laboratuar ölçekli elektro-susuzlaştırma cihazı (b) Elektro- susuzlaştırma sürecinin farklı aşamalarındaki şematik tasarımı (Mahmoud, 2011).	18
Şekil 5.1. Model Reaktör Şematik Görünümü ve Görseller	23
Şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrot türleri a) platin b) bakır c) paslanmaz çelik d) grafit	24
Şekil 5.3. Elektro-susuzlaştırma prosesi akım şeması	25
Şekil 5.4. Maya endüstrisi ham arıtma çamuru.....	26
Şekil 5.5. (a) Özgül filtre direnci (b) Kapiler emme süresi cihazı (Triton 304)	27
Şekil 5.6. Viskozimetre cihazı (Brookfield DV2T)	28
Şekil 5.7. Yüzey merkezli merkezi kompozit Box Behnken dizaynı (Box ve Behnken, 1960)	30
Şekil 6.1. Deneysel çalışmada işleme tabi tutulmuş 15 etaplık örnekler.....	34
Şekil 6.2. Maya endüstrisi arıtma çamurunda TKM değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)	36
Şekil 6.3. Maya endüstrisi arıtma çamurunda ÇKOİ değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)	36
Şekil 6.4. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)	37
Şekil 6.5. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)	38
Şekil 6.6. Platin 50 KES, viskozite ve TKM optimizasyonları	39
Şekil 6.7. Platin 50 ÇKOİ salınımı	39
Şekil 6.8. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)	40

Şekil 6.9. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)	41
Şekil 6.10. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)	41
Şekil 6.11. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)	42
Şekil 6.12. Platin 90 KES, viskozite ve TKM optimizasyonları	43
Şekil 6.13. Platin 90 ÇKOİ salınımları	43
Şekil 6.14. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)	45
Şekil 6.15. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)	46
Şekil 6.16. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)	46
Şekil 6.17. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)	47
Şekil 6.18. Bakır 50 KES, viskozite ve TKM optimizasyonları	48
Şekil 6.19. Bakır 50 ÇKOİ salınımlar	49
Şekil 6.20. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)	49
Şekil 6.21. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)	50
Şekil 6.22. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)	51
Şekil 6.23. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)	51
Şekil 6.24. Bakır 90 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları	52
Şekil 6.25. Bakır 90 ÇKOİ salınımı	53
Şekil 6.26. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)	55
Şekil 6.27. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)	55
Şekil 6.28. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)	56
Şekil 6.29. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)	57
Şekil 6.30. Paslanmaz Çelik 50 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları	58
Şekil 6.31. Paslanmaz Çelik 50 ÇKOİ salınımı	58
Şekil 6.32. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 9 cm)	59

Şekil 6.33. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 9 cm).....	59
Şekil 6.34. Paslanmaz Çelik 90 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları.....	60
Şekil 6.35. Paslanmaz Çelik 90 ÇKOİ salınımı	60
Şekil 6.36. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm).....	62
Şekil 6.37. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm).....	63
Şekil 6.38. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm).....	63
Şekil 6.39. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm).....	64
Şekil 6.40. Grafit 50 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları	65
Şekil 6.41. Grafit 50 ÇKOİ salınımı	66
Şekil 6.42. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm).....	66
Şekil 6.43. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm).....	67
Şekil 6.44. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm).....	68
Şekil 6.45. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm).....	68
Şekil 6.46. Grafit 90 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları	69
Şekil 6.47. Grafit 90 ÇKOİ salınımı	70
Şekil 6.48. ÇKOİ Salınım Grafiği	70
Şekil 6.49. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Protein grafiği	75
Şekil 6.50. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Hümkasit grafiği	75
Şekil 6.51. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Polisakkarit grafiği.....	76
Şekil 6.52. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Karbonhidrat grafiği.....	77
Şekil 6.53. EPS ile Toplam Organik Karbon değerleri karşılaştırması	79

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Atıksu karakterizasyonunda kullanılan temel kirletici parametreler	8
Çizelge 2.2. Anaerobik girişi, çıkışı ve aerobik çıkışı maya atıksuyu özellikleri.....	8
Çizelge 2.3. Yüksek dirençli maya endüstrisi proses çıkışı atıksuyu karakterizasyonu.....	9
Çizelge 5.1. EPS Ekstraksiyon tampon çözelti miktarları	29
Çizelge 5.2. Bağımsız değişkenler matrisi ve kullanılan bağımsız değişken noktaları.....	31
Çizelge 6.1. Maya endüstrisi arıtma çamuru karakteristiği	33
Çizelge 6.2. İşlemden geçmemiş ve mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılan numunelerde metal izlenmesi.....	72
Çizelge 6.2. devamı.....	73
Çizelge 6.3. EPS (protein, hümit asit, karbonhidrat ve polisakkarit) izlenmesi	74
Çizelge 6.4. İşlemden geçmemiş ve mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılan numunelerde Toplam Organik Karbon izlenmesi	78
Çizelge 6.5. İşlemden geçmemiş numunelerde zeta potansiyeli ve pH	80

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
ÇKOİ	: Çözünmüş Kimyasal Oksijen İhtiyacı
Düzeltilmiş R²	: Modeldeki faktörlerin sayısını yansıtan R ² istatistiğinin değişimi
EPS	: Extracellular Polymeric Substances
ES	: Elektro-Susuzlaştırma
FZ	: Filtreleme Zamanı
KES	: Kapiler Emme Süresi
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MD	: Mikrodalga
ÖFD	: Özgül Filtre Direnci
R²	: ANOVA modeli tarafından açıklanan datalardaki değişkenlik oranı
TKM	: Toplam Katı Madde
TOK	: Toplam Organik Karbon
VİS (μ)	: Viskozite

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca her türlü yardım ve fedakarlığı gösteren, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, aile sıcaklığı ile bizlerden yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Nazlı BALDAN PAKDİL'e,

Proje çalışmamız boyunca yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Murat PAKDİL'e, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Duran KARAKAŞ'a, Doç. Dr. Arda YALÇUK'a, Prof. Dr. Fatih EVRENDİLEK'e, Araş. Gör. Gamze DOĞDU'ya,

Tez savunmam da yanımda olan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Serpil YENİSOY KARAKAŞ ve Yard. Doç. Dr. Serkan EKER'e çok teşekkür ederim.

Proje çalışma arkadaşlarım Serap BALABAN, Yalçın İPEK, Önder DURAK, Burcu UZUN, arkadaşım Şennur Merve ADANUR'a ve laboratuvar stajyerleri Mizgin YILMAZ, Seval ZEYTİN, Şilan ÇAM, Şeyma YARAR, Rana ULUER ve Gözde İNALÖZ'e,

Her zaman yanımda olan annem Sema, babam Mehmet ve kardeşlerim Merve, Ceren ve Hatice Beren KARSLIOĞLU'na, benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Gökhan GÖKALİ ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez, TÜBİTAK – ÇAYDAG tarafından desteklenen 112Y301 no'lu proje kapsamında deneysel ve istatistiksel çalışmalarla yürütülmüştür. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

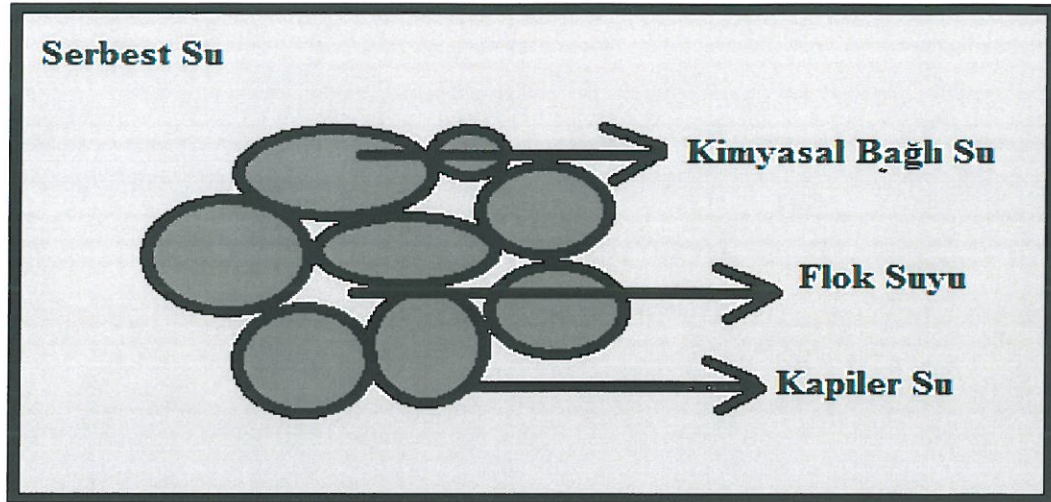
1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak endüstriyel üretimin artması ve nüfus artışı her geçen gün arıtılması gereken atıksu miktarına paralel olarak bertaraf edilmesi gereken evsel ve endüstriyel nitelikteki arıtma çamurları artmaktadır. Arıtma çamurlarının etkili şekilde bertaraf edilmesi alıcı ortamda oluşabilecek istenmeyen etkilerden korunması açısından çok önemlidir (<http://www.bhrgroup.co.uk>).

Gerek evsel gerekse endüstriyel ve kentsel atık su arıtma tesislerinden açığa çıkan arıtma çamurları, depolama ve uzaklaştırma problemlerine sebep olmaktadır. Şu anda ülkemizde belediyeler tarafından çalıştırılan ve toplam nüfusun ancak yaklaşık % 15'ine karşılık gelen evsel atık su arıtma tesislerinde her yıl yaklaşık 500 bin ton arıtma çamuru açığa çıkmaktadır (<http://www.bhrgroup.co.uk>).

Arıtma çamurları su ve atıksu arıtma tesislerinin işletilmesi sırasında veya sonrasında oluşan bir yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Çamur bertaraf etme işlemleri arıtma tesisinin toplam yatırım masrafının %20-30'unu, işletim masrafının ise %40-60'ını oluşturmaktadır (<http://www.bhrgroup.co.uk>).

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. Atıksu arıtma tesislerinde oluşan çamur, stabilizasyon işlemlerinden önce %50-70 C, % 6,5-7,3 H, %21-24 O, %15-18 N, %1-1.5 P ve %0-2.4 S içermektedir (www.lenntech.com). Vesilind (1994) tarafından önerilen çamur su dağılımında çamurda dört tür su tipi bulunur.



Şekil 1.1. Çamurdaki su tipleri

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

□ Serbest su: Çamur taneciklerine dağılmamış su; diğer bir deyişle katı parçacıklar ve kılcal kuvvetler ile ilişkisi olmayan arıtma çamurlarının % 70-75'ini oluşturan kısma denir.

□ Hücreler arası su (Flok su): Kapiler kuvvetler sonucunda çamur yumakları arasında sıkışmış, floklar arasındaki suya denmektedir. Flok yapılar dağıtıldığında su serbest kalabilmektedir.

□ Hücre yüzeyi suyu (Kapiler su): Katı parçacıklar ile ilişkili olan sudur. Çok katmanlı su molekülleri parçacık yüzeyine hidrojen bağları ile güçlü bir şekilde tutunmaktadır. Hücre yüzeyi suyu, su moleküllerinin molekül yapısı sayesinde parçacık yüzeyine tutulduğundan mekanik yöntemlerle alınması mümkün değildir.

□ Kimyasal bağlı su: Partikül yapısı içinde hidrasyon suyu ya da kimyasal su olarak adlandırılır. Parçacıkların termokimyasal olarak parçalanması sonucu serbest kalabilmektedir (Vesilind, 1994).

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 olarak belirtilmiştir (Filibeli A., 2002).

Çamur içerisinde farklı su türleri bulunmaktadır ve hepsi buhar basıncı, entalpi, entropi, viskozite ve yoğunluk gibi değişik kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir (Katsiris & Kouzeli-Katsiris, 1987).

Arıtma çamurlarının önemli bir kısmının su olması nedeniyle kapladıkları hacim oldukça fazladır. Özellikle biyolojik arıtma işleminden oluşan arıtma çamurlarının organik madde içeriği çok yüksek olduğu için bu tip çamurlar bozunma ve kokuşma eğilimindedir. Bu özelliklerinden dolayı arıtma çamurlarının işlenmesi ve bertaraf edilmesi konusu mühendisler için oldukça problemli bir konudur (Filibeli, 2002).

Çamurlar fiziksel yapılarına göre, mikrobiyolojik karakteri, besin maddesi (nutrient), su verme özelliği ve metal içeriğine göre değerlendirilmelidir. Evsel nitelikli atıksuların arıtıldığı arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurların özellikleri birbirine benzemekle beraber, endüstriyel kaynaklı arıtma çamurlarının özellikleri endüstriyel sektör ve alt sektörler bazında büyük farklılıklar göstermektedir. Her endüstri için oluşacak çamurun özellikleri ayrı ayrı belirlenmelidir (Filibeli, 2013).

Atık suların arıtılması sonucu oluşan çamurların doğrudan veya belirli işlemler sonunda kurutma yataklarına verilerek susuzlaştırılması mümkündür. Ancak bu işlem için gerekli arazi çoğu hallerde temin edilemez veya ekonomik değildir. Bu nedenle çamurların uzaklaştırılmasında çamur hacminin azaltılması öncelikli sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sorunu gidermek amacıyla çamura susuzlaştırma işlemi uygulanır. Çamur susuzlaştırma işlemi; çamurun içerdiği büyük orandaki suyun (~% 99) çamurdan ayrılması işlemidir. Çamurun susuzlaştırılmasıyla, sıvı yerine katı madde özelliklerine sahip bir çamur elde edilir ve susuzlaştırma sonrasındaki arıtma ve bertaraf maliyetleri azaltılır (EPA, 1987).

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

2. MAYA ENDÜSTRİSİ VE ATIKSU ARITIM TEKNOLOJİLERİ

2.1 Maya Üretimi

Ekmek Mayası Üretimi; Türkiye’de ve Dünya’da önemli bir yere sahiptir. Ekmeğin tarihi 8 bin yıl öncesinden; insanların hububatı taşlar arasında kırıp ufaladığı, sonra da bunlara su katıp elde ettiği hamuru yassı bir kaya üzerine yayarak ateşte pişirdiği günlere kadar uzanmaktadır (www.mauri.com.tr).

1835’te Caignard de Latour, Scwann ve Kutsing gibi bilim adamları tomurcuklanma yoluyla yeniden üretildiğini gördükleri mayanın canlı bir organizma olduğu sonucuna vardılar. 1838’de bira mayasına Meyer tarafından ‘*Saccharomyces cerevisia*’ adı verildi (www.mauri.com.tr).

1859’da ünlü Fransız bilim adamı Louis Pasteur fermantasyona yol açan organizmanın maya olduğunu ortaya çıkarmıştır (www.mauri.com.tr). Endüstriyel maya üretimi ise yine 19.yüzyılda Avustralya’da başlamış ve o günden bu yana teknolojiye çok hızlı ilerlemeler kaydedilmiştir (www.pakmaya.com.tr).

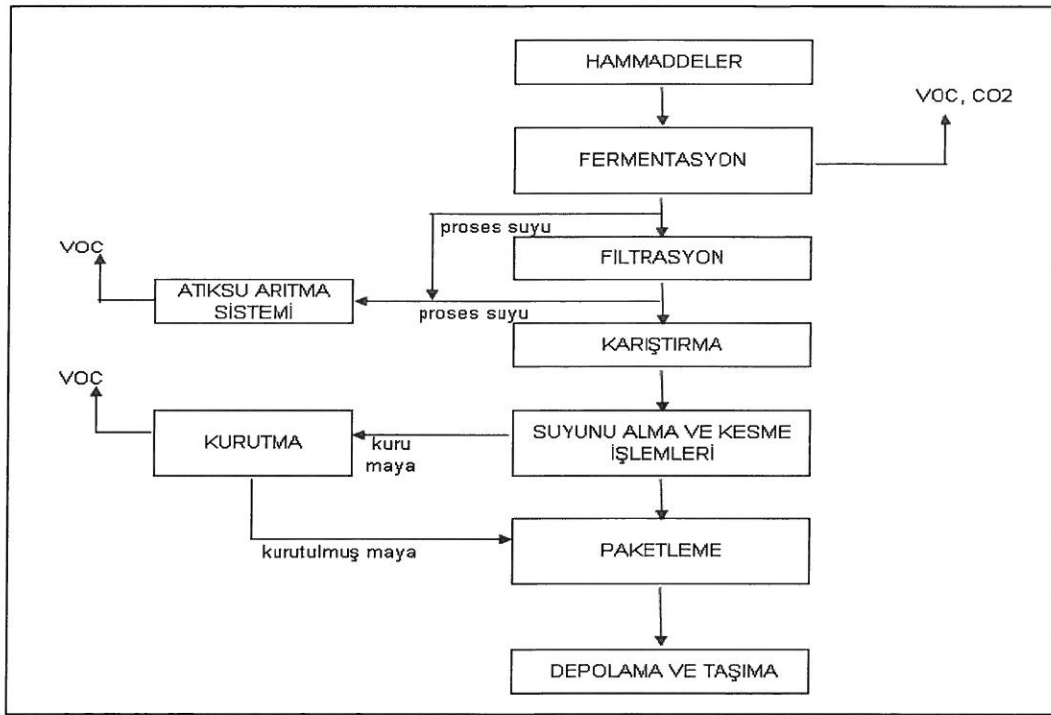
Genel olarak toplam üretiminin yaklaşık %85’i yaş (krem) maya ve %15’i kuru mayadır. Yaş ve kuru maya benzer yollarla üretilir, ancak kuru maya farklı maya soyundan geliştirilir ve proses sonrasında kurutulur. Aktif ve instant olmak üzere iki çeşit kuru maya üretilir. Bu iki çeşit kuru maya arasındaki ana fark; aktif kuru maya ılık suda çözünürken instant kuru mayanın çözünmemesidir (Safriet, 1994).

2.2 Maya Üretimi Prosesi

Maya Üretimi proses akış şeması ve bu proseslerden kaynaklanan atıklar Şekil 2.1’de görüleceği gibi, üretimin birinci aşaması saf maya kültüründen (aşı) bir dizi fermenter içinde maya üretilmesidir. Maya üretiminde konsantre maya üretmek için

santrifüjleme ve ardından son fermenterde (ticari fermantasyon aşaması) biriken maya toplanır. Bu toplama işlemi merkezkaç ayırıştırıcılarda yapılarak maya hücrelerinin krem rengini alıncaya kadar yıkandıktan sonra 'Sıvı Maya' elde edilmiş olur. Aktivitesini ve dayanıklılığını korumak için sıvı maya paslanmaz çelik tanklarda 0-4°C'de depolanır. Sıvı maya vakum filtrelelere aktarılarak suyu alınıp bıçaklar yardımıyla filtrelerden kazınır. Karıştırıcılar ile ufalanmış granül parçalar halinde ambalajlarda paketlenir. 0-4°C'de temiz ve hava sirkülasyonu iyi olan odalarda depolanır (Safriet, 1994).

Maya üretimi proses akış şeması ve bu proseslerden kaynaklanan atıklar Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Maya üretimi için tipik proses akış diyagramı

2.2.1 Fermentasyon

Maya hücreleri, bir dizi fermentasyon tankları içinde geliştirilirler. Maya fermentasyon tankları, aerobik şartlar altında (serbest oksijen veya aşırı hava ortamı) işletilirler, çünkü anaerobik (oksijensiz) şartlarda, fermente olabilen şekerler, etanol

ve karbondioksit oluşumunda tükenirler ki, bu da maya üretim verimini düşürür (Safriet, 1994).

Maya büyümesinin ilk aşaması, laboratuvar şartlarında çoğaltılarak hazırlanır. Maya 2-4 gün içinde büyür. Bu saf kültür fermentasyonu olup kesikli fermentasyondur ve burada 13-24 saat içinde maya gelişimi oluşur. Tipik olarak bu aşamada iki fermentör ünitesi kullanılır (Safriet, 1994).

Saf kültür, fermentasyonunu takiben, maya karışımı orta fermentere transfer edilir. Sonraki aşama, stok fermentasyonudur, ve transfer sırasında iyi havalandırma olmalıdır. Bu aşamada, maya santrifüj ile sıvı kısmından ayrılır ve sonraki step için koyu maya üretilir. Son fermentere alınan tohum mayaya, kontrollü biçimde melas şurubu ve besleyiciler ilave edilir. Aynı anda fermentöre yüksek dozda steril hava sağlanarak hücre sayısının artmasını sağlayacak şekilde 10-15 saat süre ile gerekli oksijen verilir. Tüm melas türleri fermentöre girdikten sonra, ilaveten 0,5-1,5 saat daha havalandırma yapılır ve kararlı hale getirilen maya soğutucularda depolanır (Safriet, 1994).

Fermentasyonun ana aşamalarındaki maya büyümesi, her bir aşamada artarak gelişir. Tipik olarak maya büyümesi, orta fermentörde 120 kg iken, stok fermentörde 420 kg ve en son (ticari) fermentörde 15,000-100,000 kg olabilmektedir. Bu ana fermentasyon aşamaları üreticiden üreticiye değişkenlik göstermektedir (Safriet, 1994).

2.3 Kullanılan Hammadde ve Ürünler

Ekmek mayası üretiminde saf maya kültürü ve karbon kaynağı olarak melas hammadde olarak kullanılmaktadır. Yaş maya üretiminde, '*Saccharomyces cerevisiae*' türü maya tercih edilmektedir ve bu maya türünün stoplazmik membranının yaklaşık %49'u protein, %45'i yağdır (Pak, 2011).

Maya üzerinde bulunan gözeneklerin büyüklüğü 0,42 nm'dir (Kutay, 2001). Diğer maya türleri, kuru maya üretimi için gereklidir. Şeker kamışı ve şeker pancarı melasları, maya büyümesi için temel karbon kaynağıdır. Melas; içinden ekonomik

olarak daha fazla şeker alınamayan şeker fabrikalarının yan ürünü olup, kristalizasyon aşamasından sonra elde edilen koyu kahve renkli bir sıvıdır. Melas, %45-55 oranında fermente edilebilir şeker (sükroz, glikoz ve früktoz formlarında) içerir. Genellikle pancar ve kamış melasları karıştırıldıktan sonra fermentasyonda kullanılır. Önce melaslar karıştırılır ve pH 4,5-5 arasına ayarlanır, çünkü çözeltinin alkalileşmesi durumunda bakteri oluşabilir. Maya büyümesi ile aynı şartlar altında bakteri büyümesi de olabileceğinden pH izlenmesi çok önemlidir. Melas karışımından çamurlar giderilir ve yüksek basınçlı buhar ile sterilize edilir. Sterilizasyon sonrasında, su ile seyreltilir ve fermentasyonda kullanılabilecek kadar tanklarda depolanır. Maya üretiminde ayrıca bazı besin elementleri ve vitaminlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Besin ve mineral ihtiyaçları azot, fosfat, potasyum, magnezyum, kalsiyum, demir, bakır, molibden ve mangandır (Pak, 2011).

2.4 Maya Üretiminde Su Kullanımı

Maya endüstrisi üretiminde önemli ölçüde ve yüksek kalitede su kullanılmaktadır.

- Hammadde olan melasın temizlenmesi ve sterilize edilmesinde,
- Fermentasyon prosesinin her aşamasında ve sonrasında,
- Filtreleme, karıştırma, ekstrüzyon ve kesme aşamalarında,
- Üretim alanlarının ve donanımın temizliğinde kullanılmaktadır.

Genel olarak, yaklaşık 3000 m³/gün atıksu sirkülasyonu olmaktadır (Delipınar, 2007).

2.5 Temel Kirletici Parametreler ve Maya Atıksularının Özellikleri

Maya endüstrisinde temel kirletici parametreler; KOİ, BOİ, AKM, türbidite, yağ ve gres, toplam azot, toplam fosfordur. Atıksu karakterizasyonunda kullanılan temel kirletici parametreler çizelge 2.1’de verilmiştir (Tünay, 1996).

Çizelge 2.1. Atıksu karakterizasyonunda kullanılan temel kirletici parametreler

Fiziksel Parametreler	Kimyasal Parametreler	Biyolojik Parametreler	Deşarj Bilgileri
• Renk • Koku • Radyoaktivite • Sıcaklık • AKM • ÇO • Köpük • Korozyon • Bulanıklık	• pH • KOİ • TOK • İnorganik bileşenler • Klor ihtiyacı • Yağ ve hidrokarbonlar • Fenol • Toplam çözünmüş tuzlar • Sülfatlar • Azot ve fosfor • Sertlik • Klor iyonu	• BOİ₅ • Patojenik mikroorganizmalar • Toksisite	• Ortalama günlük akış oranı • Sürekli maksimum akış oranı • Akış değişimin maksimum oranı

Ekmek mayası endüstrisi atıksuyunun karakteristik özellikleri (Anaerobik girişi ve çıkışı, Aerobik çıkışı) çizelge 2.2’de verilmiştir. Bu endüstrinin atıksuyunun sahip olduğu renk değeri ölçülememekle beraber, çıkış suyu her zaman çok koyu bir renktedir (Pala, 2005).

Çizelge 2.2. Anaerobik girişi, çıkışı ve aerobik çıkışı maya atıksuyu özellikleri

Maya Atıksuyu Özellikleri			
Parametreler	Proses Çıkış Suları (Anaerobik girişi)	Anaerobik Çıkışı (Aerobik Girişi)	Aerobik Çıkışı
pH	5,9 – 6,12	7,6 – 8	7,6 – 8
KOİ (mg/l)	20100 – 22122	3746 – 4400	601 – 899
BOİ (mg/l)	14120 – 15420	2250 – 3004	90 – 148
Yağ ve gres (mg/l)	9 - 10	9 - 10	9 - 10

Maya endüstrisi atıksuları kolaylıkla asitlendirilemeyen yüksek konsantrasyonlu organik maddeler içermektedir. Çizelge 2.3’de yüksek dirençli proses suyunun karakteristik değerleri verilmiştir (Deveci & Çiftçi, 2000).

Çizelge 2.3. Yüksek dirençli maya endüstrisi proses çıkışı atıksuyu karakterizasyonu

Parametreler	Değer Aralıkları
pH	5 - 6
Sıcaklık (°C)	20 – 28
KOİ (mg/l)	10000 – 30000 (ort. 20000)
BOİ ₅ (mg/l)	7000 – 21000 (ort. 20000)
Süspanse Katılar (mg/l)	50 – 1200
Sülfatlar (mg/l)	1300 – 2700
Toplam Azot (mg/l)	250 – 1200
Toplam Fosfor (mg/l)	27
Su Akış Hızı (m ³ /ton)	7,8

2.6 Maya Atıksularının Arıtım Teknolojileri

Türkiye'nin önemli endüstrilerinden biri olan maya endüstrisi atıksuları, yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam kjeldahl azotu (TKN), koyu renk ve biyolojik olarak parçalanamayan organik bileşiklerle karakterize edilen çok çeşitli kirlilikler içerdiğinden biyolojik arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Bilindiği gibi, biyolojik arıtma yöntemleri, atıksulardaki organik bileşikleri elimine etmek için uygulanan en yaygın yöntemlerdir. Ancak, bu biyolojik arıtma yöntemleri atıksulardaki refraktör organiklerin ve rengin giderilmesinde yeterli olmayabilmektedir. Bu nedenle atıksulardaki refraktör organiklerin giderimin de deşarj kriterlerini sağlamak için bu yöntemlerin geliştirilmesi veya farklı yöntemlerin araştırılması yapılmaktadır (Delipınar, 2007).

Maya üretimi yapan fabrikalar yüksek ve düşük kirlilik yüküne sahip iki tipte atıksu üretmektedir. Yüksek kirlilik yüküne sahip olan atıksudaki başlıca kirlilik bileşenleri KOİ ve renktir (Mutlu vd., 2002; Gönder, 2004). Bu endüstride hammadde olarak kullanılan şeker pancarı melasları yüksek moleküler ağırlıklı, melanoidin tipinde, koyu kahverengi renkli, biyolojik olarak zor parçalanabilir organikleri içermektedir (Tübitak, 2013).

3. ARITMA ÇAMURLARININ SUSUZLAŞTIRILMASI

Aritma çamurlarının susuzlaştırma yöntemleri; doğal su alma yöntemleri (çamur kurutma yatakları ve çamur lagünleri) ve mekanik su alma yöntemleri (santrifüjler, plakalı pres filtreler, bantlı pres filtreler ve vakum filtreler) olmak üzere ikiye ayrılırlar.

3.1 Doğal Su Alma Yöntemleri

Susuzlaştırma amacıyla uygulanan doğal su alma yöntemleri sırasında buharlaşma ve süzülme işlemleri gerçekleşmektedir. Susuzlaştırma yönteminin seçiminde göz önünde bulundurulması gereken en önemli etkenler çamur tipi, susuzlaştırmadan sonra oluşacak ürünün (kek) özelliği ve alan ihtiyacıdır. Yer problemi yoksa kurutma yatakları veya lagünler tercih edilebilir (Türkiye Belediyeler Birliği, 2015).

Lagünler, çamurlarının çürütülmesi, yoğunlaştırılması, kurutulması, depolanması ve nihai bertarafında kullanılan sistemlerdir. Büyük alanlarda kurulan lagünlerde buharlaşma ve çökeltmeden dolayı çamur hacminde önemli azalma olur, çamurun katı madde içeriği artar (Türkiye Belediyeler Birliği, 2015).

3.2 Mekanik Su Alma Yöntemleri

Belt-pres, çöktürme ve santrifüj gibi mekanik susuzlaştırma yöntemleri, sadece çamur yapısındaki serbest suyun ve düşük miktarda flok suyu üzerinde etkilidir. Susuzlaştırma veriminin artırılabilmesi için öncelikle çamura şartlandırma işlemi uygulanmaktadır. Şartlandırma işlemi, su içerisinde bulunan kolloidal veya partikül haldeki askıda katı maddelerin üstündeki, fiziksel ve kimyasal kuvvetler sonucunda oluşmuş elektriksel yüklerin kararsız veya nötr hale getirilmesi demektir (Filibeli, 2002).

Mekanik susuzlaştırma işlemleri hem maliyetli hem de çıkan çamurun katı madde oranları düşük olduğundan son yıllarda enerji maliyetlerini düşürmek ve katı madde oranını iyileştirmek amacıyla birçok farklı yöntem geliştirilmiştir (Mahmoud vd., 2010).

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

Uygulanacak yöntemin seçimi, susuzlaştırılacak çamurun tipine, istenilen çamur nem içeriğine, daha düşük enerji ve çevresel maliyeti en az olacak şekilde yapılır. Bu yöntemlerden biri olan elektrik alanı yardımıyla susuzlaştırma; elektro-susuzlaştırma olarak ifade edilir. Bu teknoloji basınçla susuzlaştırma gibi klasik susuzlaştırma ile birleştirilerek nihai katı madde içeriğini artırır, termal susuzlaştırma yöntemine kıyasla daha düşük enerji tüketimi gerektirir (Mahmoud vd., 2011).

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

Diğer su türlerinin çamur bünyesinden alınırken susuzlaştırılmış çamurun kimyasının bozulmaması için değişik yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Son yıllarda çamura elektrik alanı uygulanması ile yapılan çamur susuzlaştırma işlemleri konusundaki çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

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

4. ELEKTRO-SUSUZLAŞTIRMA (ES) PROSESİ

Elektro-susuzlaştırma ince parçacıklar içeren çamurlar, peltemsi çamurlar, arıtma çamurları, ilaç endüstrisi, yiyecek atıkları ve yosunlar gibi mekanik susuzlaştırmanın başarılı olmadığı alanlarda kullanımı artan bir susuzlaştırma yöntemidir. Elektro susuzlaştırma yöntemi susuzlaştırılmak istenen çamurun elektrik alan ile muamele edilerek çamurdaki katı madde ile sıvı maddenin ayrımın gerçekleştirildiği bir metottur (Tchobanoglous, 1991).

Mekanik susuzlaştırma yöntemleri sadece çamur dokusundaki serbest suyun giderilmesinde etkilidir. Diğer su türlerinin etkili olarak giderilebilmesi ve çamur amacı ile çamurların susuzlaştırılabilme kapasiteleri artırmak susuzlaştırma işlemlerinden önce çamur şartlandırma işlemi uygulanır (Filibeli, 2002; Tuan, 2012). 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).

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

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

laboratuar 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, 2010).

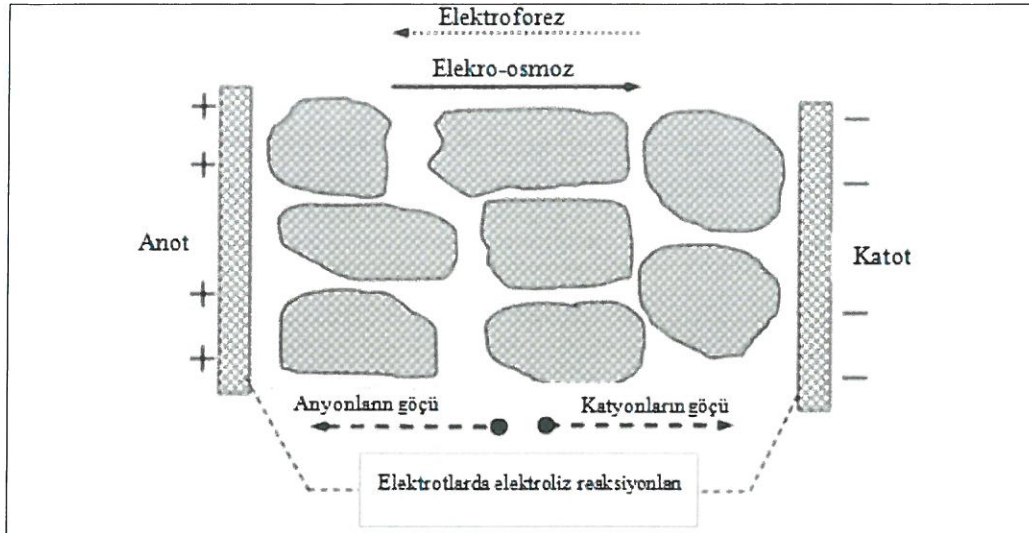
Ancak elde edilen çamurun katı madde konsantrasyonu diğer yöntemlere göre düşüktür. Bundan dolayı son yıllardaki araştırmalar daha az maliyetle düşük su içeriğine sahip çamur oluşturacak susuzlaştırma yöntemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Bu amaçla birkaç farklı yöntem geliştirilmiştir (Mahmoud, 2010).

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

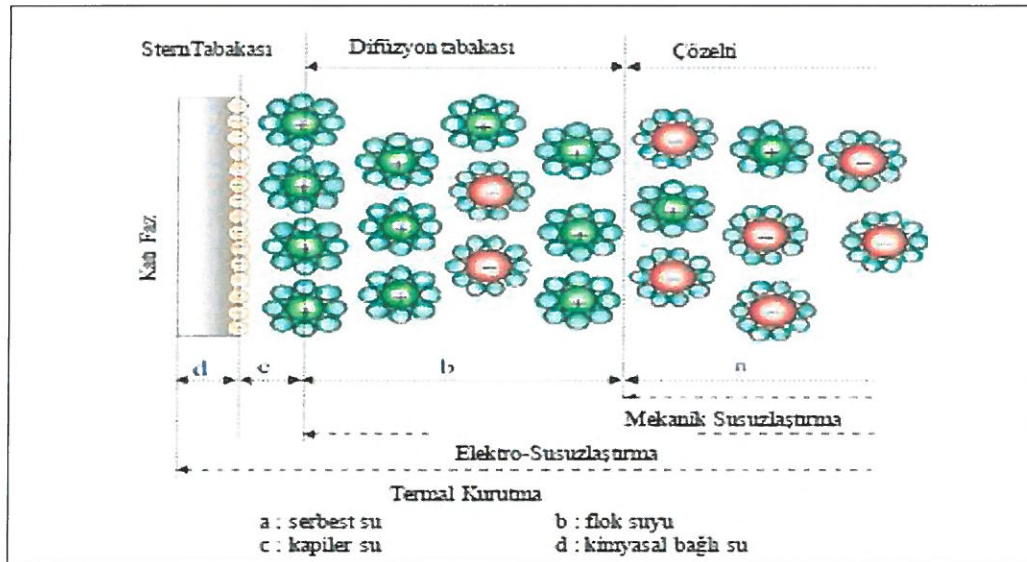
Elektro-susuzlaştırma teknikleri hem evsel, hem de endüstriyel çamurların susuzlaştırılması için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik aynı zamanda susuzlaştırma maliyetini azaltan ve susuzlaştırma verimini artıran bir teknolojidir (Mahmoud, 2010). Elektro-susuzlaştırma ince parçacıklar içeren çamurlar, peltemsi çamurlar, arıtma çamurları, ilaç endüstrisi, yiyecek atıkları ve yosunlar gibi mekanik susuzlaştırmanın başarılı olmadığı alanlarda kullanımı artan bir susuzlaştırma yöntemidir. Elektro susuzlaştırma yöntemi susuzlaştırılmak istenen çamurun elektrik alan ile muamele edilerek çamurdaki katı madde ile sıvı maddenin ayrımın gerçekleştirildiği bir metottur (Tuan, 2012).

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 (Tuan, 2012).

Elektrik alanı uygulandığında elektrotlarda elektro-osmosun yanında; elektroforez, elektro- göç ve elektro-kimyasal reaksiyonlar da meydana gelir. Sözü geçen elektro kinetik prosesler doğrudan ya da dolaylı olarak çamurun elektro-susuzlaştırma işlemini etkiler (Tuan, 2012).



Şekil 4.1. Elektro-susuzlaştırmada meydana gelen elektrokinetik olay (Tuan, 2012)



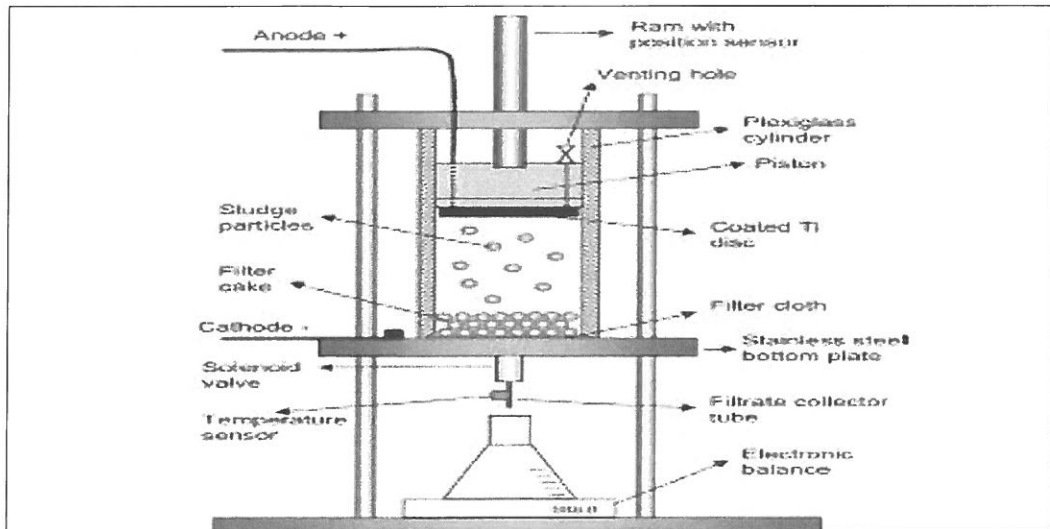
Şekil 4.2. Çamur su dağılımı ve susuzlaştırma metotları (Zhou, 2001)

Şekil 4.2'e bakıldığında mekanik susuzlaştırma serbest suyun uzaklaştırılmasında etkilidir. Mekanik susuzlaştırma işlemleri hem maliyetli hem de çıkan çamurun katı madde oranları düşük olduğundan son yıllarda enerji maliyetlerini düşürmek ve katı madde oranını iyileştirmek amacıyla birçok farklı yöntem geliştirilmiştir (Mahmoud, 2010).

Çamur supernatant içeriğinde protein ve polisakkarit konsantrasyonları bileşiklerin şartlandırma prosesi sırasında çamurun susuzlaştırılabilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir (Yuan vd., 2010).

4.1 Elektro-susuzlaştırma Teknikleri

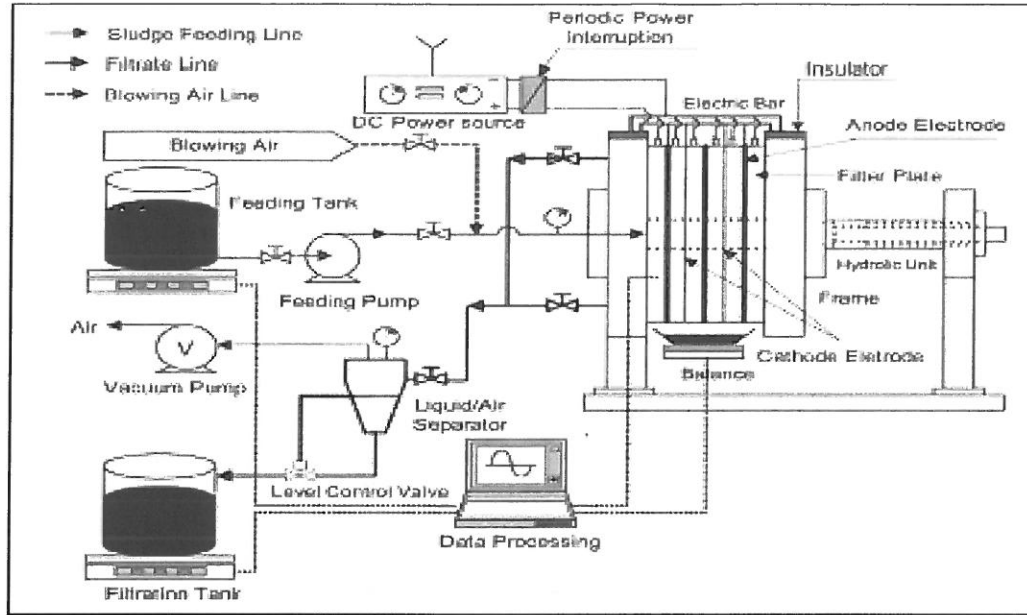
Saveyn ve arkadaşları tarafından elektro-susuzlaştırma işlemi laboratuvar ölçekli piston akımlı silindir filtre pres ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3). Çalışmada 1 saat boyunca 400 kPa basınç uygulanarak filtreleme yapılmış ve her deneysel etap için yeni filtre bezi kullanılmıştır. Elektro-susuzlaştırmada anot ve katot elektrotlar güç kaynağına bağlanmıştır. Basınçla susuzlaştırma sırasında disk şeklinde titanyum kaplanmış iridyum-oksit (Ir_2O_3) anot piston olarak kullanılmış ve üzerine filtre bezi geçirilmiş, paslanmaz çelik tabanla oluşturulmuş zemin ise katot olarak kullanılmıştır (Saveyn, 2005).



Şekil 4.3. Laboratuvar ölçekli filtre presin şematik gösterimi (Saveyn, 2005)

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

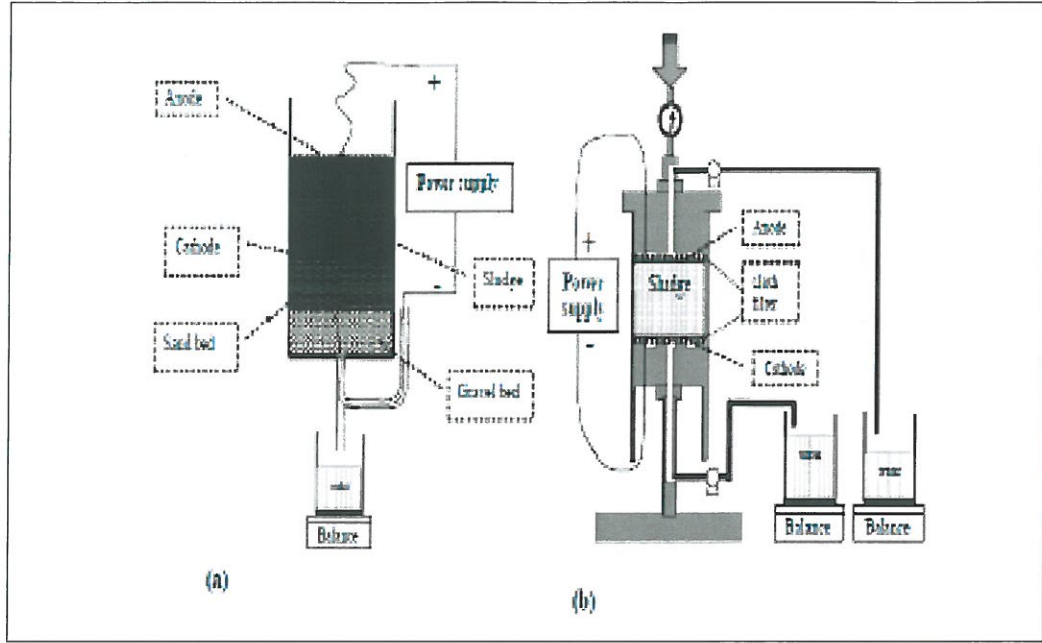
Burada alt vida kapağı katot işlevi, pistondaki elektrot ise anot işlevi görmüştür. Çalışmada platin elektrot teli kullanılmıştır (Saveyn ve ark., 2006).



Şekil 4.4. Mekanik susuzlaştırma ve elektro-susuzlaştırma testlerine yönelik deney düzeneğinin şematik diyagramı (Lee ve ark., 2007).

Şekil 4.4’de gösterilen deney düzeneğinde çamura, filtre plakalar arasında mekanik susuzlaştırma ve elektrik alan uygulamasıyla elektro-susuzlaştırma uygulanmaktadır. Deney düzeneği çamur besleme ünitesi, basınçla birleştirilmiş elektrik alan uygulama ünitesi ve süzüntüleri toplama ünitesi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (Lee vd., 2007).

Enerji tüketimi ve elektrot aşınmalarına rağmen işletme maliyetleri dikkate alındığında, optimum şartlar şöyledir: 70 V/cm elektrik alan 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 4.5. Laboratuvar ölçekli şematik gösterimi (a) Elektro-susuzlaştırma kum kurutma yatağı ve (b) Basınç uygulanmış elektro-susuzlaştırma reaktörü (Tuan vd., 2008).

Şekil 4.5.(a)'da basınçsız deneyler akrilik reaktörde yürütülmüştür. Reaktörde 10 cm çakıl yatağı ve 10 cm kum yerleştirilmiştir. Şekil 4.5.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 (Tuan vd., 2008).

Elektrik alanı uygulaması negatif yüklü organik maddeleri katottan anota taşımaya neden olmuştur ve basınçla çalışan deneylerde çamurdan su akışı giderilmiştir. Yapılan deneylerde KOİ ve TOK konsantrasyonları karşılaştırılmış, anotta ise katoda göre daha fazla olan su giderimi olduğu gözlemlenmiştir (Tuan vd., 2008).

Elektro-susuzlaştırmada çamurdaki başlangıç su içeriği önemli ölçüde etkilidir. Verimli bir susuzlaştırmaya ulaşmak için, başlangıç çamuru çok ıslak veya çok kuru olmamalıdır (Tuan, 2010). Kısa elektro-susuzlaştırma süresi ise yeterli susuzlaştırma etkisine neden olamamıştır (Smollen, 1994; Snyman, 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, 2010). Polielektrolitle şartlandırmada asıl etki özellik ve dozdur fakat elektro-ozmotik su taşınmasında önemli etkiye sahip değildir (Saveyn, 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).

Hcredişı polimerik madde (EPS) içeriği, şartlandırma prosesinde meydana gelen vizkozite ve zeta potansiyeli değişimlerini açıklamak için belirlenmektedir (Yuan, 2010).

Çamurda EPS fraksiyonu çamur yapısındaki değişikliklerin gözlenmesinde en önemli parametrelerdendir. Yüksek EPS içeriği ile çamur çözeltisi düşük kesme hassasiyeti ve dağılımına sahiptir. Çamurun filtrelenebilme direnci (SRF) açısından düşük olması daha iyi filtrelenebilir olduğunu göstermektedir (Mikkelsen & Keiding, 2002).

EPS konsantrasyonu gibi, çözünmüş partikül madde içeriği, vizkozite, yoğunluk, partikül boyutu, bağlı su içeriği, pH, zeta potansiyeli ve organik madde konsantrasyonu, çamurun susuzlaştırılabilirliğinde etkilidir (Feng vd., 2009). Bunların yanı sıra, EPS konsantrasyonu çamurun susuzlaştırılabilirliğine en önemli etkisi olan faktörlerden birisidir (Poxon, 1997, Lui & Fang, 2003, Wilen, 2003, Feng, 2009). EPS, suda yüksek çekim kuvvetine ve aynı zamanda genellikle sulu bir çözeltiye sahiptir. EPS konsantrasyonu dolayısıyla çamurun vizkozite içeriğini arttırmakta ve susuzlaştırılabilirliğini etkilemektedir (Yuan, 2010).

Aktif çamur içerisinde %70-89 hücre dışı organik madde protein ve polisakkarit formundadır (Dignac vd., 1998). Bu bileşiklerin amacı, çamurun su tutma kapasitesini arttırarak suya bağlanma özelliğine katkı sağlamaktadır (Jin vd., 2004).

Stabilizasyon işlemini gerçekleştiren bakteriler genellikle, flokleştirilmiş EPS yapısının içinde yer alır. Genel olarak, EPS bileşenleri hücre-sınır olarak tanımlanabilir; diğer bir deyişle seyrelme veya yıkanma ile bunların gideriminin önlenmesi; negatif yüklü ve hidrofilik olmaları (hücre sel materyalin koagülasyonunun kapalı devre eşleşmesi); +2 ve +3 yüklü katyonlarla bağlanabilme yeteneklerinin olması (daha uzun süreli bağlanmalarla flokülasyona izin vermeleri) gibi özellikleri vardır (Ayol, 2007).

EPS flokülasyon, çökeltim ve çamurun susuzlaştırılmasında önemli rol oynamaktadır. Bunlara ek olarak, gözenek ve kanallar ile polimerik bir ağ oluşturarak, besin ve mineralleri adsorbe edebilmekte ve geniş bir yüzey alanı oluşturmaktadır (Tuan, 2011). Aerobik ve anaerobik koşullar altında EPS bileşenlerinin bozunmasında çamur arıtma süreçlerindeki farklılıklar görülmektedir. Protein ve polisakkarit konsantrasyonlarında azalış meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak, biyolojik çamur arıtma tesislerinde çamurun susuzlaştırılabilirliği aerobik ve anaerobik koşullar altında azalmaktadır. Anaerobik çürütme sırasında çözünmüş EPS'deki artış çamurun susuzlaştırılabilirliğini azalttığı belirtilmiştir (Tuan vd, 2012).

Çamur anaerobik koşullar altında 24 saat boyunca 4°C'de tutulmuş ve çamurda EPS miktarı önemli ölçüde azalmıştır. Nielsen ve ark., çamurda EPS_{Protein} ve EPS_{Karbonhidrat} değerlerinin anaerobik koşullar altında ilk 2 gün içinde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çamurun niteliği ve EPS atıksu tipi, nütrient içeriği, çamur alıkonma süresi ve çözünmüş oksijen konsantrasyonu gibi çok sayıda değişkene bağlıdır (Tuan, 2012).

EPS'nin çamurun susuzlaştırılabilirliğindeki etkisi çamur arıtım süreçlerine de bağlıdır. Aerobik ve anaerobik koşullar altında çamurun susuzlaştırılabilirliği biyolojik çamur arıtma tesislerinde azalmaktadır (Novak vd., 2003).

Fazla çamur, biyolojik çamur veya aktif çamur olarak bilinen ikincil çamur, biyolojik arıtma da aerobik olarak üretilir. İkincil çamur ağırlıklı olarak

mikroorganizmalar ve adsorbe katı madde ve kolloidlerden oluşmaktadır. Biyolojik çamur organik madde içeriği tipik olarak %75, ortalama %60-80 değerleri arasında değişmektedir (Tuan, 2012).

Çamurun zeta potansiyeli, genellikle negatif bir değere sahiptir; bu nedenle, elektro-osmotik akış yönü anottan katoda doğrudur. Saveyn ve arkadaşları (Saveyn vd., 2006) tarafından elektro-osmotik akış, çamur kekinin su içeriğinin çevrimiçi izlenebilmesi için bir NMR ölçüm tekniği bulunmuştur.

Düşük pH çamur özelliklerini değiştirebilir, diğer bir deyişle, anotta düşük pH çamur susuzlaştırılabilirliği üzerinde olumlu bir etkisi olabilir; ancak, düşük pH'da anottan katoda su taşıyan bir ters elektro-osmotik akışa neden olur, zeta potansiyelini artırır (Tuan vd., 2008).

Hücre dışı polimerik bileşenler (EPS); bakteriyel hücrelerin yüzeylerinde bulunan metabolik ürünlerden oluşmaktadır. Bunlar; karbonhidratlar, polisakkaritler, proteinler, deoksiribonükleik asitler, humik asit, ürik asit; vb. gibi çeşitli organik maddeler içermektedir (Li ve Ganczarczyk, 1990; Mikkelsen., 1999). Çamur içerisinde proteinler EPS bileşiminde daha baskındır (Poxon 1996; Ayol, 2005.a; Dursun ve Dentel, 2005; Dursun ve Dentel, 2007). Biyolojik çamurların içerdiği hücre dışı (ekstrasellüler) polimerik bileşenlerin (örn. Proteinler, polisakkaritler, humik maddeler) (EPS), bu çamurların suyunu vermesini zorlaştırdığı ve önemli bir rol oynadığı bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Ayol, 2007).

EPS formları mikroorganizmalar içine gömülü halde bulunan yüksek sulu biyofilm bileşenleridir (Rosenberger ve Kraume, 2002; Le Clech vd., 2006). EPS miktarının filtre edilebilirliğe ve çamur susuzlaştırmaya etkileri bilinmektedir. (Mikkelsen ve Keiding, 2002). Çamur içerisindeki EPS fraksiyonlarının çamur yapısını yansıtan en önemli parametre olduğunu belirtmişlerdir. Mikkelsen ve Keiding (2002) çamurdaki yüksek EPS konsantrasyonunun, çamurun dispersiyon derecesinin düşük olmasına ve ÖFD değerleri ile daha iyi bir filtre edilebilirliğe sebep olduğunu belirtmişlerdir (Mikkelsen ve Keiding, 2002). Diğer taraftan Rosenberger ve Kraume (2002) MBR'larda yüksek EPS konsantrasyonlarının çamur filtre edilebilirliğini negatif olarak etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca Evenblij ve Van der

Graaf (2004) alışmalarında su fazındaki EPS'in aktif çamurun filtre edilebilirliğine etkileyen önemli ve belirleyici bir parametre olduğunu rapor etmişlerdir.

Çamurda, proteinler EPS bileşiminde baskındır (Dignac vd., 1998). Lui ve Fang'a göre (2003); EPS fonksiyonlarının bazıları, bu tür toksisite ve pH ani değişimi gibi sert dış ortamlara karşı hücrelerinde koruyucu bir tabaka oluşturarak eksojen besin ve organik moleküller ve flok oluşturmuş bakteri hücreleri yığını adsorbe eder ve aynı zamanda açlık sınırında karbon ve enerji rezervleri olarak hizmet vermektedir.

EPS, negatif yüklü bir polimer ağı oluşturabilir (Mikkelsen & Keiding, 2002; Lui & Fang, 2003). Böylece, EPS flokülasyon, çökeltme ve çamurun susuzlaştırılmasında önemli rol oynarlar (Lee vd., 2010). Buna ek olarak, gözenek ve kanallar ile polimerik bir ağı oluşturarak bu kirleticiler, besin ve mineral adsorbe edebilir ve geniş bir yüzey alanı oluşturur. Birçok araştırmacı tarafından belirtildiği gibi, çamurun susuzlaştırılabilirliğindeki azalış ile çamur sonuçlarında EPS artışı sağlanmaktadır (Finlayson ve ark., 1998).

Çamur yoğunlaştırma prosesinde meydana gelen değişimleri açıklamak için çamur üst suyunda EPS, çamurda zeta potansiyeli ve viskozite ölçülerek belirlenmektedir (Yuan, 2010).

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 (amurdan tuz giderimi, fekal koliform giderimi) belirlenmesinin sürdürülmesi gerekmektedir (Tuan, 2012).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Model Reaktör ve Elektrot Tipleri

Çalışmada geliştirilen elektro-susuzlaştırma prosesinin gerçekleştirildiği model reaktör kesitleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

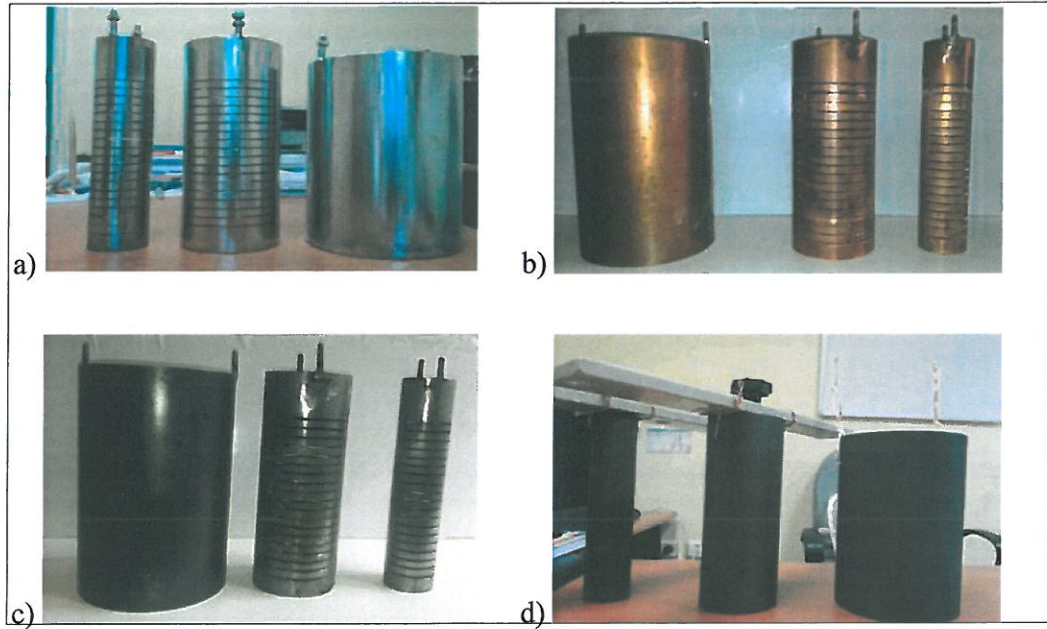


Şekil 5.1. Model Reaktör Şematik Görünümü ve Görseller

Çalışmada geliştirilen model reaktör, 25 cm yüksekliğinde ve 15 cm çapındadır. Reaktör pleksiglas malzemeden imal edilmiş olup, istenilen hızda dönebilen dış kısımdan oluşmaktadır (Şekil 5.1). Çalışmada kullanılan elektrot türleri; platin, bakır, paslanmaz çelik ve grafit olmak üzere dört farklı malzemeden imal edilmiştir. Anot olarak kullanılan elektrot çapı (et kalınlığı hariç) 13,6 cm’dir.

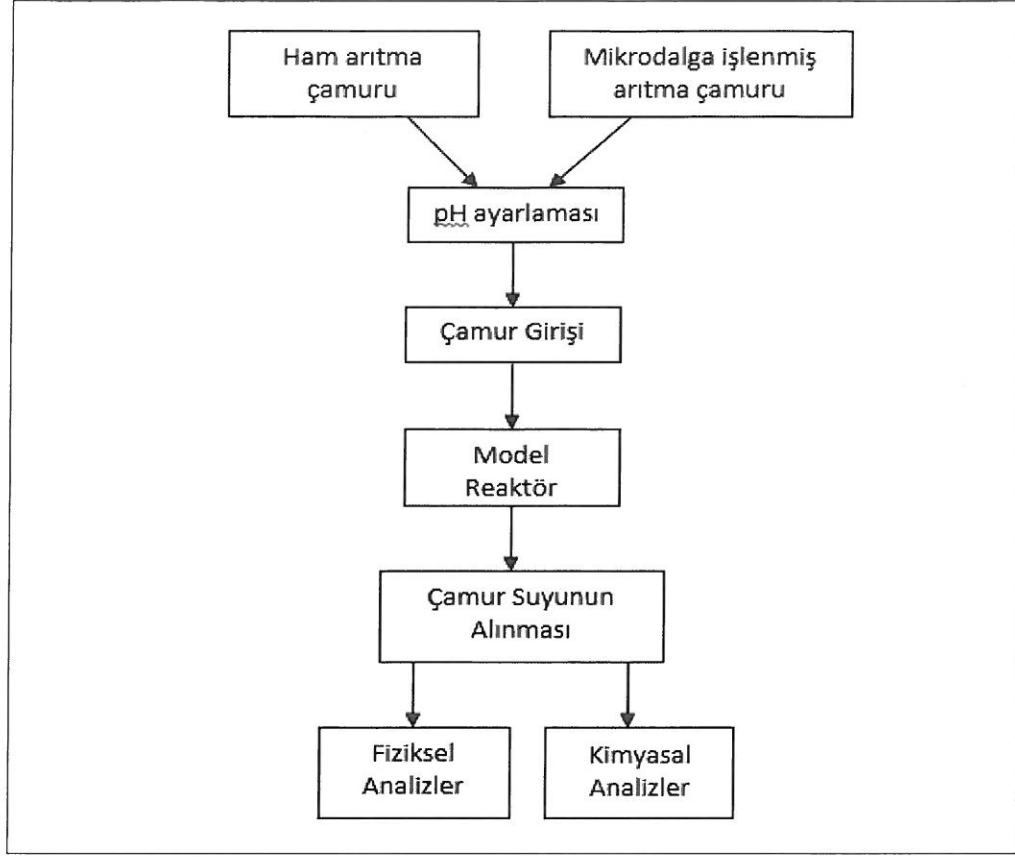
Anot ve katot arasındaki mesafe değişiminin sistem verimine etkisinin incelenmesi amacıyla iç kısmında katot olarak kullanılan elektrot çapları 5 cm ve 9 cm olmak üzere iki farklı çapta imal edilmiştir. Elektrotlar arasındaki mesafe, 5 cm çapındaki elektrot kullanımında 4,3 cm, 9 cm çapındaki elektrot kullanımında 2,3 cm olmaktadır.

Katot elektrotlar üzerinde, su geçişinin sağlanabilmesi için delikler açılmıştır. Ancak, grafit elektrotta açılan delik sayısı malzemenin mukavemetini azaltacağından, 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 elektrotuna ise elektrik bağlantısı elektrotlar üzerinde açılan deliklere bakır teller geçirmek sureti ile sağlanmıştır (şekil 5.2).



şekil 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrot türleri a) platin b) bakır c) paslanmaz elik d) grafit

Model reaktör, optimum işletme şartları belirlemesi amacı ile istatistiksel yanıt yüzey yöntemi MINITAB 17.1 kullanılarak farklı işletim şartları belirlendikten sonra farklı pH, süre ve voltajlar uygulanarak süreç kesikli olarak işletilmiştir.



Şekil 5.3. Elektro-susuzlaştırma prosesi akım şeması

Çamur girişi, anot ve katot elektrot arasındaki kısma yapıldıktan sonra işletme süresince, sistemin susuzlaştırma verimini arttırmak amacıyla, reaktör 120 devir/dakika döndürülerek çamur floklarının sudan ayrılması kolaylaştırılmıştır. Kesikli olarak işletilen sistemde, işletme süresi sonunda model reaktörün alt kısmından çıkış suyu alınarak çamur susuzlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Elektrik akımı uygulandıktan sonra çamur bünyesinden ayrılan çıkış suyu katoda, çamur ise anot elektroduna yönelmektedir. Bu özellikten yararlanarak, çamur bünyesinden ayrılmış çıkış suyu elektro üzerinde açılmış delikler vasıtası ile (döndürme etkisiyle) çıkışa yönlendirilmiştir.

5.2 Çamur Karakteristiğinin Belirlenmesi

Maya endüstrisi arıtma çamuru örnekleri instant maya üretimi yapan bir fabrikanın Atıksu Arıtma tesisi yeni sedimentasyon çıkışından alınmış, 24 saat süre ile 4°C'de bekletilerek yoğunlaştırılması sağlanmıştır. Üst suyu alındıktan sonra deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Tesislerden alınan çamur örnekleri fabrikadan temin edildikten en fazla bir saat içerisinde laboratuvara ulaştırılmıştır.



Şekil 5.4. Maya endüstrisi ham arıtma çamuru

5.3 Fiziksel ve Kimyasal Analizler

Çamurda sıcaklık ve pH değişiminin model reaktörün çamur numuneleri üzerinde oluşturduğu fiziksel ve kimyasal değişimlerin ve susuzlaştırılabilme kapasitesinin incelenmesi için işlem öncesi ve sonrasında Standart Metotlara dayanarak, yoğun çamurda; kapiler emme süresi-KES (Triton 304 cihazı ile SM 2710 G), özgül filtre direnci-ÖFD, filtreleme zamanı-FZ (SM 2710 H), viskozite (Brookfield DV2T), toplam katı madde-TKM (SM 2540 G), askıda katı madde-AKM, pH (SM 4500-H⁺ B), çamur üst suyunda ise çözülmüş fosfat fosforu-ÇF (SM 4500-P D), amonyum azotu (SM 4500-NH₃ F), çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı-ÇKOİ (SM 5220 D) parametrelerinin analizleri yapılmıştır (APHA, 2005).

5.4 Özgöl Filtre Direnci

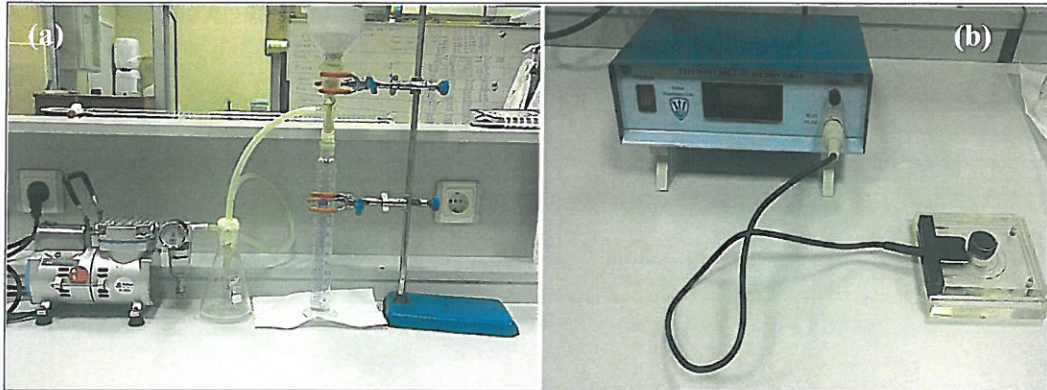
Çamur susuzlaştırılabilirliğini ölçmek için Buhner hunisi testi kullanılır, çamurun susuzlaştırılabilme direnci özgöl filtre direnci ve filtreleme zamanı ile ifade edilir (Greenberg vd., 1992). Çamur filtre kağıdı (Whatman No. 1) ile donatılmış 200 mL huni içine dökülerek iki dakika graviteli bir şekilde süzildükten sonra 50 kPa'lık vakum uygulanır. Filtreleme zamanı, çamurdan 100 ml filtrat toplamak için gereken süreyi tanımlar ve özgöl filtre direnci aşağıdaki denklem 1 kullanılarak hesaplanır:

$$\text{ÖFD} = \frac{2bPA^2}{\mu c} \dots\dots\dots(\text{Denklem 1})$$

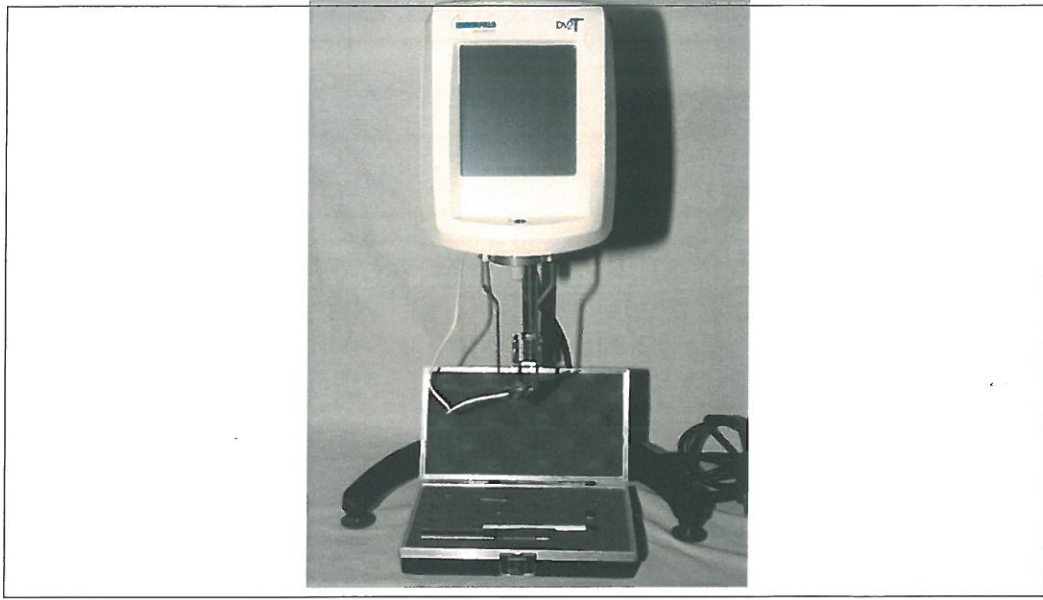
P filtre basıncını, N/m²; A filtre alanını, m².μ filtrat viskozitesini, N(s)/m²; c çamur katı madde ağırlığı/filtrat hacmi, kg/m³ = 1/C_i/(100-C_i) - C_f/(100-C_f); C_i başlangıç nem içeriği, %; C_f son nem içeriği, t filtreleme zamanı, s (Şekil 5.5.a).

5.5 Kapiler Emme Süresi

Çamurun suyunu verebilme hızını hesaplamak için kullanılır. İki plastik plaka arasına filtreleme özellikli kağıt koyulur, cihaz çalıştırılır ve bir miktar çamur cihaza dökülür. Kapiler emme süresi on saniyeden az ise çamurun suyunu verme özelliği çok iyi demektir. Kapiler emme süresinin az olması istenir (Şekil 5.5 b).



Şekil 5.5. (a) Özgöl filtre direnci (b) Kapiler emme süresi cihazı (Triton 304)



Şekil 5.6. Viskozimetre cihazı (Brookfield DV2T)

5.6 Viskozite Tayini

Viskozite tayini yapılmadan önce sıcaklık $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ olana kadar su banyosunda bekletilir. Şekil 5.6'da verilen Brookfield marka cihaz ile arıtma çamuru numunelerine uygun olarak spindle uçları kullanılarak viskozite tayinleri yapılmıştır.

5.7 EPS (Extracellular Polymeric Substances) Tayini

Arıtma çamurlarının susuzlaştırılması sonucunda elde edilen çamur içeriğinin protein, hümkik asit, karbonhidrat, polisakkarit değerlerini inceleyebilmek için uygulanmaktadır.

Kullanılan cihazlar; hassas terazi, su banyosu, etüv, spektrofotometri cihazı, çeker ocak, otomatik pipet, santrifüj ve santrifüj tüpü, balon joje, erlen.

5.7.1 EPS Ekstraksiyonu

50 ml çamur örneği alınır. Alınan çamur örneği 3000 rpm'de 15 dakika süre ile santrifüj cihazında santrifüjlenir. Arta kalan üst suyu pipet yardımıyla alındıktan sonra kalan çamurun üzerine önceden hazırlanan tampon çözelti eklenerek 50 ml 'ye tamamlanır. pH= 7 olmalıdır.

Çizelge 5.1. EPS Ekstraksiyon tampon çözelti miktarları

Tampon çözelti	Eklenecek miktar
1 mmol/L KCl	0,0746 gr
2 mmol/L Na ₃ PO ₄ .12H ₂ O	0,328 gr
4 mmol/L NaH ₂ PO ₄ .12H ₂ O	0,552 gr
9 mmol/L NaCl	0,526 gr

Hazırlanan test tüpleri 80°C sıcaklıkta bir saat süre ile su banyosunda bekletilir. Numuneler 10000 rpm (12000 G) 'de 20 dakika boyunca ultrasantrifüj cihazında santrifüjlenir. İşlem 14 ml'lik santrifüj tüplerinden üçer adet hazırlanarak gerçekleştirilir (Erden ve Filibeli, 2010).

5.7.2 EPS Protein ve Karbonhidrat Konsantrasyon Belirleme

EPS karbonhidrat konsantrasyonu Dubois vd., (1956) tarafından fenol sülfürik asit metoduna göre ve EPS protein konsantrasyonu da Lowry vd. (1951) tarafından belirtilen metoda göre belirlenmiştir. EPS konsantrasyonu protein ve karbonhidrat konsantrasyonlarının toplanması ile bulunmuştur.

5.7.3 Polisakkarit Metodu

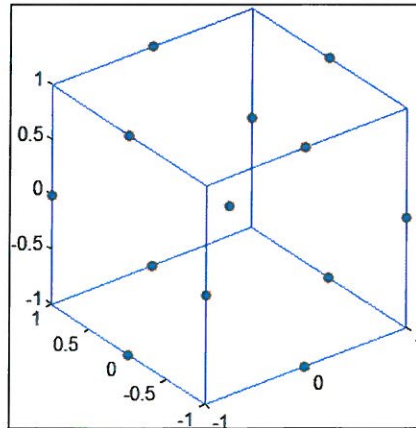
Polisakkarit analizi Dubois metoduna göre belirlenmiştir. Polisakkarit analizinde D-glikoz mono hidrat kullanılarak kalibrasyon eğrisi hazırlanmış, 490 nm dalga boyunda okumalar gerçekleştirilmiştir (Dubois vd., 1956; Eurombra, 2007).

5.7.4 Hümik Asit Metodu

Arıtma çamuru içeriğindeki hümik asitlerin belirlenmesi için Frølund tarafından geliştirilen modifiye Lowry metodu kullanılmıştır (Frølund vd., 1955). Spektrofotometrik olarak 750 nm dalga boyunda numunelerin hümik asit seviyeleri belirlenmiştir (Lowry vd., 1951; Eurombra, 2007).

5.8 İstatistiksel Analizler

Proje kapsamında deney sonuçlarının daha iyi değerlendirilebilmesi, deneysel etap yoğunluğunun azaltılması, susuzlaştırma performanslarını maksimum seviyeye getirecek olan işletim şartlarını maksimize edebilmek amacıyla istatistiksel program MINITAB 17.1 programında Box-Behnken istatistiksel analiz yöntemi kullanılmıştır. Box-Behnken tasarımları ikinci derece model parametrelerinin tahmin edilmesinde kullanılan üç seviyeli tanımlanmamış (incomplete) çok etkenli tasarımların bir çeşidi olan Box-Behnken tasarımları (Box ve Behnken, 1960) 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).



Şekil 5.7. Yüzey merkezli merkezi kompozit Box Behnken dizaynı (Box ve Behnken, 1960)

Box Behnken her bir değişken için üst ve alt sınırlar aracılığıyla kübik bölgenin köşelerinde oluşturulan ve köşeleri içermeyen bir dizayn şeklidir (Şekil 5.7). Küpün köşelerindeki noktaları temsil eden faktör düzeyi kombinasyonlarını bilmek avantajlı olabilir fakat fiziksel süreç kısıtlamaları yüzünden bu noktaları bulmak hem pahalı hem de test etmesi zordur (Montgomery, 1991).

Box-Behnken yöntemine göre; pH değeri, işlem süresi ve uygulanan voltaj değeri olarak üç farklı bağımsız değişken seçilmiştir. Bağımsız değişkenlere yanıt değişkeni olarak işlem sonrası numunede bağımlı değişkenler (KES, viskozite, TKM ve ÇKOİ) belirlenmiştir. Bu işlem çalışmamızda kullandığımız elektrot türleri (platin, bakır, paslanmaz çelik ve grafit) için 5 cm ve 9 cm çapındaki elektrotlarda tekrarlanmıştır.

Çizelge 5.2. Bağımsız değişkenler matrisi ve kullanılan bağımsız değişken noktaları

X ₁	X ₂	X ₃	pH	İşlem süresi (dk)	Uygulanan voltaj (V)
-1	-1	0	5.0	30	17.5
1	-1	0	8.0	30	17.5
-1	1	0	5.0	60	17.5
1	1	0	8.0	60	17.5
-1	0	-1	5.0	45	10.0
1	0	-1	8.0	45	10.0
-1	0	1	5.0	45	25.0
1	0	1	8.0	45	25.0
0	-1	-1	6.5	30	10.0
0	1	-1	6.5	60	10.0
0	-1	1	6.5	30	25.0
0	1	1	6.5	60	25.0
0	0	0	6.5	45	17.5
0	0	0	6.5	45	17.5
0	0	0	6.5	45	17.5

Box-Behnken yöntemine göre oluşturulan çizelge 5.2’de gösterilen 15 etaplık deneysel çalışma prosedürü sonunda her bir bağımlı değişken için sonuçlar MINITAB 17.1 istatistiksel programı kullanılarak cevap fonksiyonu adı verilen denklemler oluşturulmuş, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki üç boyutlu grafiklerde gösterilmiştir.

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

5.9 Model Reaktörün İşletilmesi

İşletme süresince giriş çamurunun pH aralığı 5-8, uygulama voltajı 10-25 V arasında çalışılmıştır. Model reaktör, en az 30 dakika en fazla 60 dakikalık periyotlar da çalıştırılmıştır.

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, viskozite ve KES parametrelerinin yüzde olarak değişimleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Denklem 2'de tahmin edilen cevap fonksiyonu, $B_0, B_1, B_2, \dots$, fonksiyon katsayılarını ve X_1, X_2, X_3 , bağımsız değişken parametrelerini belirlemektedir. MİNİTAB 17.1 kullanılarak ANOVA çizelgeleri oluşturulup, yapılan analizlerin güvenilirliği, işletme şartlarının verim üzerindeki etkileri ve her bir parametrenin diğer parametrelerle arasındaki ilişkiler ortaya konulacaktır.

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

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

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1 Maya Endüstrisi Arıtma Çamurunun Özelliklerinin Belirlenmesi

Maya endüstrisi arıtma çamurunun özelliklerinin belirlenmesi için ü defa tekrarlanmış ve farklı zamanlarda alınan numunelerde parametre değişimleri göz önüne alınarak her bir parametrenin ortalama ve standart sapma değerleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. Maya endüstrisi arıtma çamuru karakteristiği

Parametre	Değer
Kapiler emme süresi (sn)	$10,52 \pm 2,16$
Özgül filtre direnci (m/kg)	$1,55 \cdot 10^{15} \pm 7,24 \cdot 10^{15}$
Filtreleme zamanı (dk)	$7,13 \pm 4,53$
Viskozite (N.s/m ²)	$0,018 \pm 0,014$
Çözünmüş KOİ (mg/L)	$8,06 \pm 0,74$
Toplam amonyum azotu (mg/L)	$36 \pm 7,2$
pH	$8,06 \pm 0,74$
Toplam katı madde (%)	$0,88 \pm 0,48$

Çizelge 5.2’de verilen bağımsız değişkenler matrisi ve bağımsız değişken noktaları kullanılarak yapılan 15 etaplık deneysel çalışma sonucunda elde edilen KES, TKM, ÇKOİ, viskozite parametrelerinin yüzde olarak değişimleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel çalışmada işleme tabi tutulmuş 15 etaplık örnekler

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 sırasıyla 4,3 ve 2,3 cm).

6.2 Platin Elektrot Kullanımı

Platin elektrotlar kullanılarak yapılan 15 etaplık deneysel çalışma sonucunda elde edilen TKM, ÇKOİ, viskozite, KES 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; TKM ($R^2=0,88$, düzeltilmiş $R^2=0,67$)

$$TKM = -7,3 + 7,1 * X_1 + 0,41 * X_2 + 0,94 * X_3 - 1,7 * X_1 * X_1 - 0,0046 * X_2 * X_2 - 0,0751 * X_3 * X_3 + 0,152X_1 * X_2 + 0,627 * X_1 * X_3 - 0,0407 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÇKOI ($R^2=0,86$, düzeltilmiş $R^2=0,61$)

$$ÇKOI = 190 + 23,7 * X_1 - 6,15 * X_2 - 27,5 * X_3 - 1,57 * X_1 * X_1 + 0,0375 * X_2 * X_2 + 0,403 * X_3 * X_3 - 0,028X_1 * X_2 + 1,196 * X_1 * X_3 + 0,1576 * X_2 * X_3$$

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

$$Viskozite = 164,9 - 60,9 * X_1 + 3,13 * X_2 + 4,01 * X_3 + 4,67 * X_1 * X_1 - 0,0198 * X_2 * X_2 - 0,075 * X_3 * X_3 - 0,12X_1 * X_2 - 0,092X_1 * X_3 - 0,0191 * X_2 * X_3$$

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

$$KES = -218 + 11,3 * X_1 + 7,38 * X_2 + 7,49 * X_3 - 2,16 * X_1 * X_1 - 0,0857 * X_2 * X_2 - 0,2146 * X_3 * X_3 + 0,172X_1 * X_2 + 0,252X_1 * X_3 - 0,0252 * X_2 * X_3$$

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

$$TKM = -98,7 + 38,7 * X_1 - 0,81 * X_2 - 1,05 * X_3 - 2,7 * X_1 * X_1 - 0,0036 * X_2 * X_2 + 0,0333 * X_3 * X_3 + 0,133X_1 * X_2 - 0,076 * X_1 * X_3 + 0,0127 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÇKOI ($R^2=0,97$, düzeltilmiş $R^2=0,90$)

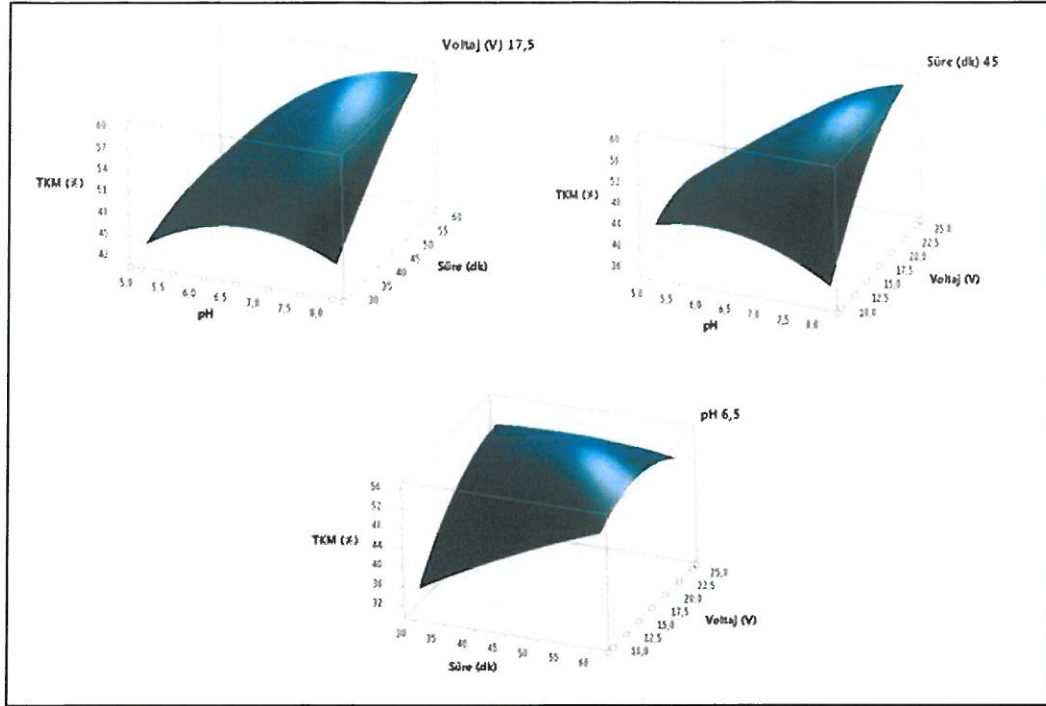
$$ÇKOI = -53 - 4,6 * X_1 + 0,83 * X_2 + 1,27 * X_3 - 0,05 * X_1 * X_1 + 0,0031 * X_2 * X_2 + 0,2602 * X_3 * X_3 - 0,164X_1 * X_2 + 1,304 * X_1 * X_3 + 0,0433 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,75$ düzeltilmiş $R^2=0,30$)

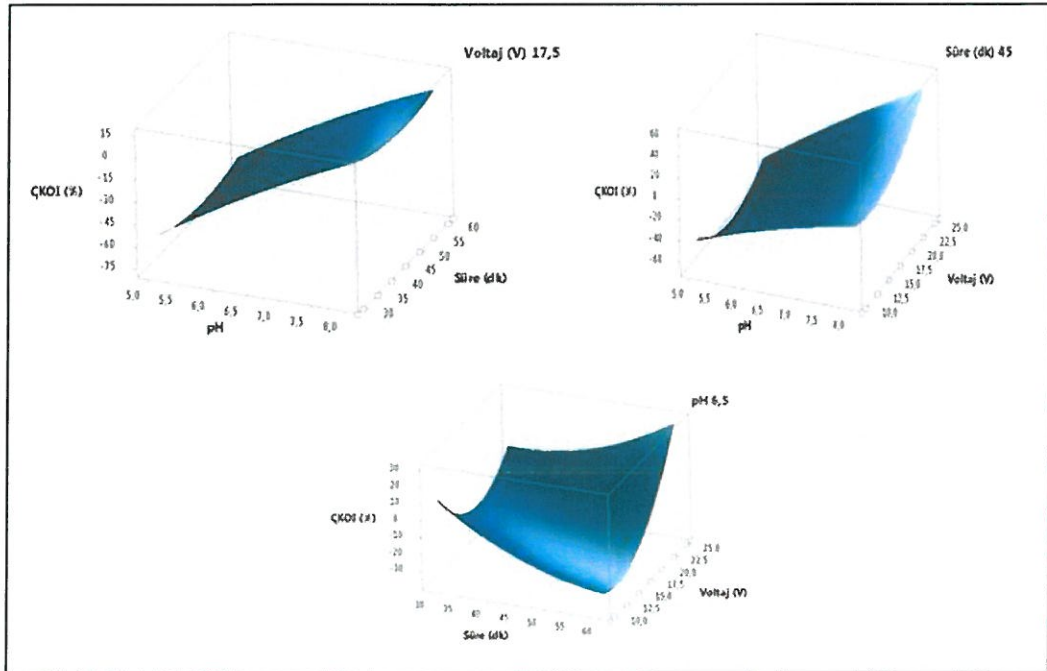
$$Viskozite = -183,8 + 59,6 * X_1 - 2,31 * X_2 - 1,05 * X_3 - 4,65 * X_1 * X_1 - 0,0121 * X_2 * X_2 + 0,0123 * X_3 * X_3 - 0,11X_1 * X_2 + 0,283X_1 * X_3 - 0,029 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,89$, düzeltilmiş $R^2=0,68$)

$$KES = 260,1 - 76,3 * X_1 + 0,73 * X_2 + 0,25 * X_3 + 5,69 * X_1 * X_1 - 0,0022 * X_2 * X_2 - 0,0701 * X_3 * X_3 - 0,131X_1 * X_2 + 0,263X_1 * X_3 + 0,0175 * X_2 * X_3$$



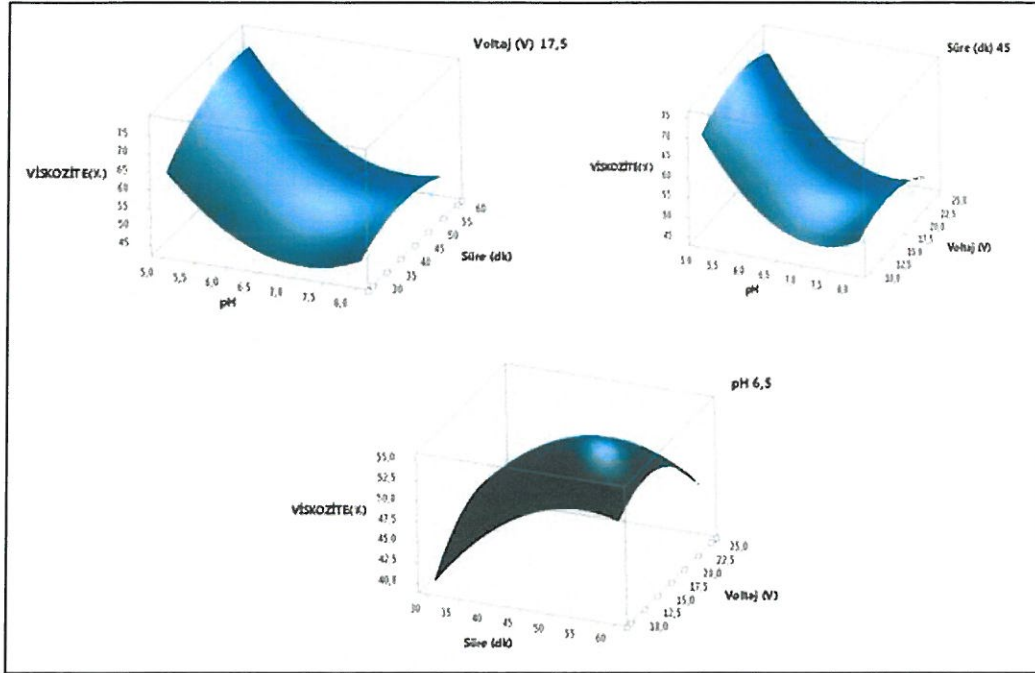
Şekil 6.2. Maya endüstrisi arıtma çamurunda TKM değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)



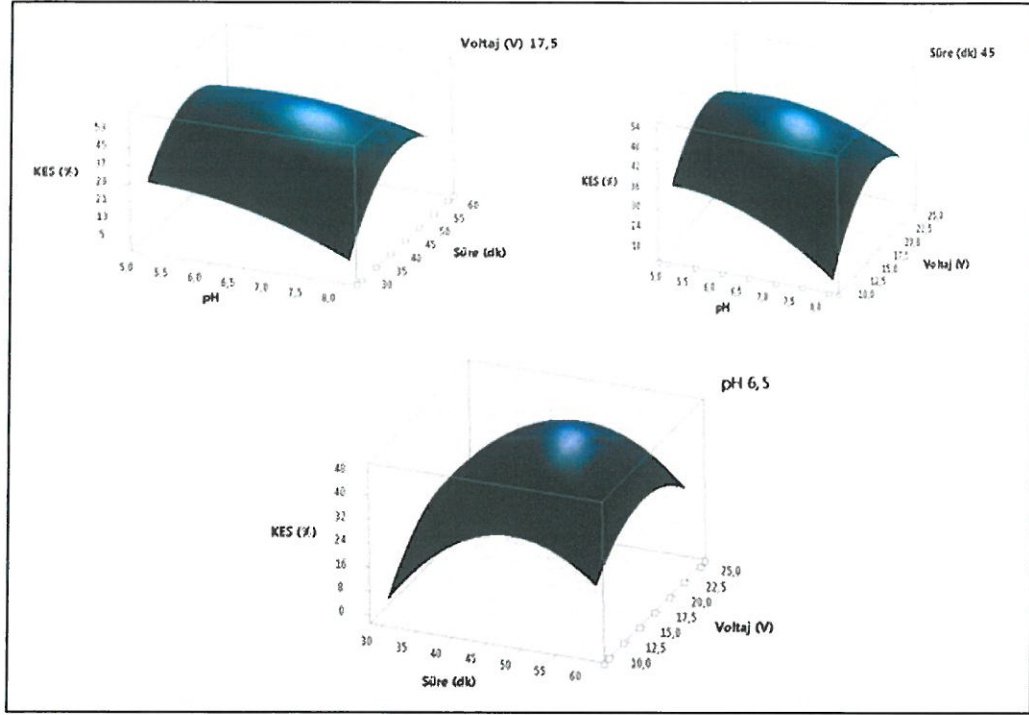
Şekil 6.3. Maya endüstrisi arıtma çamurunda ÇKOİ değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)

Maya üretim tesisi arıtma çamurunda 5 cm platin elektrot kullanılması durumunda elektro-susuzlaştırma işleminde TKM giderimi en fazla %60 oranında gerçekleştiği, bazik pH değerlerinde çalışılması gerektiği ve işlem süresinin, uygulanan voltajın artırılmasının, sistemin performansını olumlu etkilediği görülmüştür (Şekil 6.2).

Model reaktörün çıkışından alınan numunenin ÇKOİ konsantrasyonu üzerinde pH değerinin çok etkili olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bazik pH değeri olan pH 8’de gözlemlenmiş olan ÇKOİ salınımı üzerinde voltaj ve süre artışı ile ciddi şekilde değişmediği görülmüştür (Şekil 6.3).



Şekil 6.4. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)

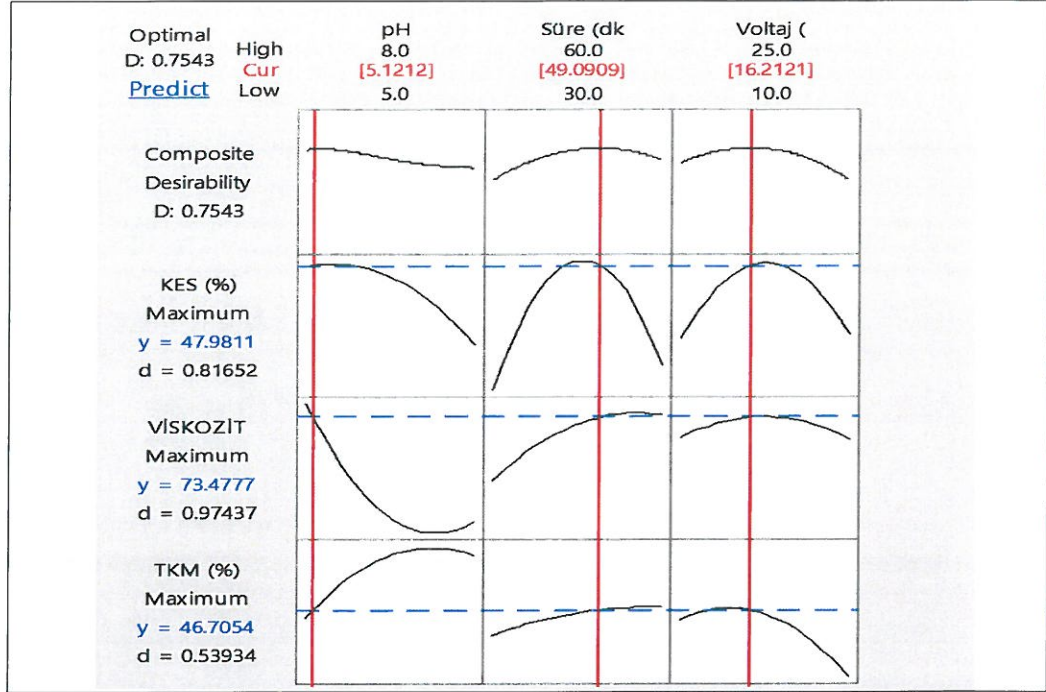


Şekil 6.5. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (platin, 5 cm)

Viskozite ve KES değerleri incelendiğinde ise maya sektörü arıtma çamurlarının susuzlaştırılmasında platin elektrotun etkisinin yüksek olmadığı en yüksek %75 verim elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 6.4 ve 6.5).

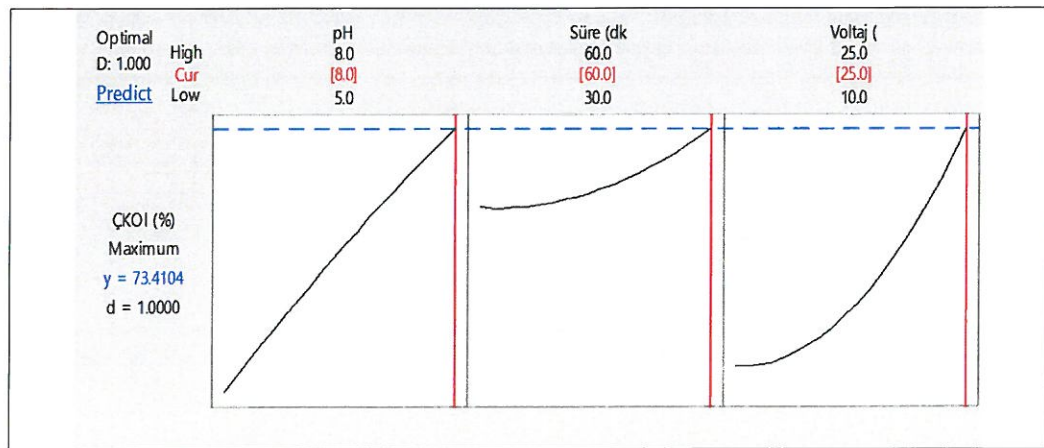
6.2.1 Platin 50 Optimizasyon Çalışması

DeneySEL çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



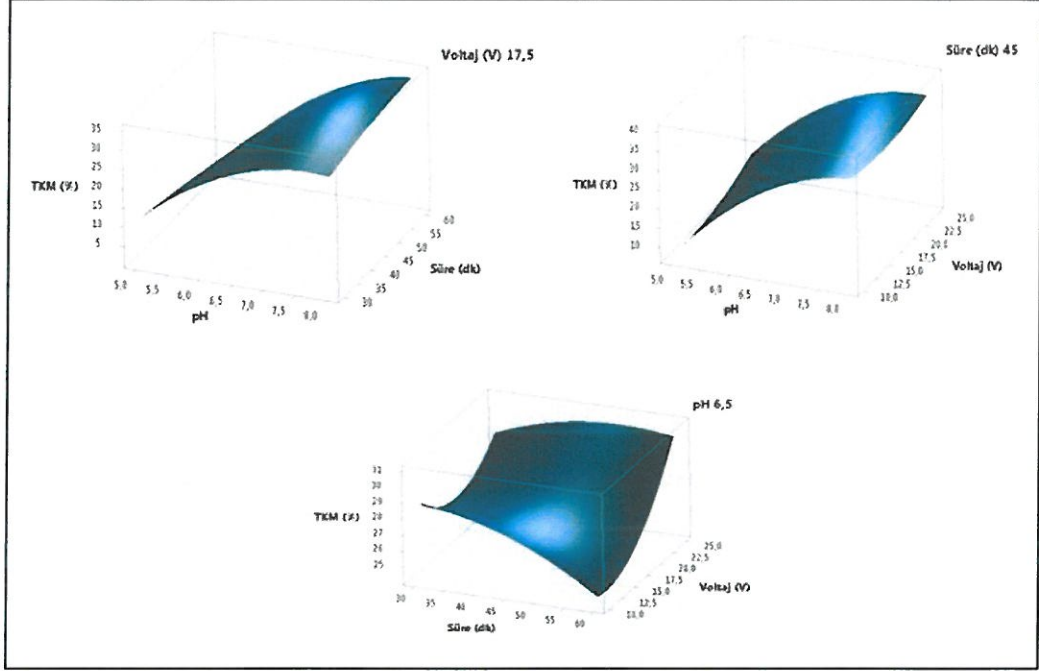
Şekil 6.6. Platin 50 KES, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliği tanımlayan parametreler olduğu için platin elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:5, süre:49 dakika, voltaj:16 volt olarak belirlenmiştir.



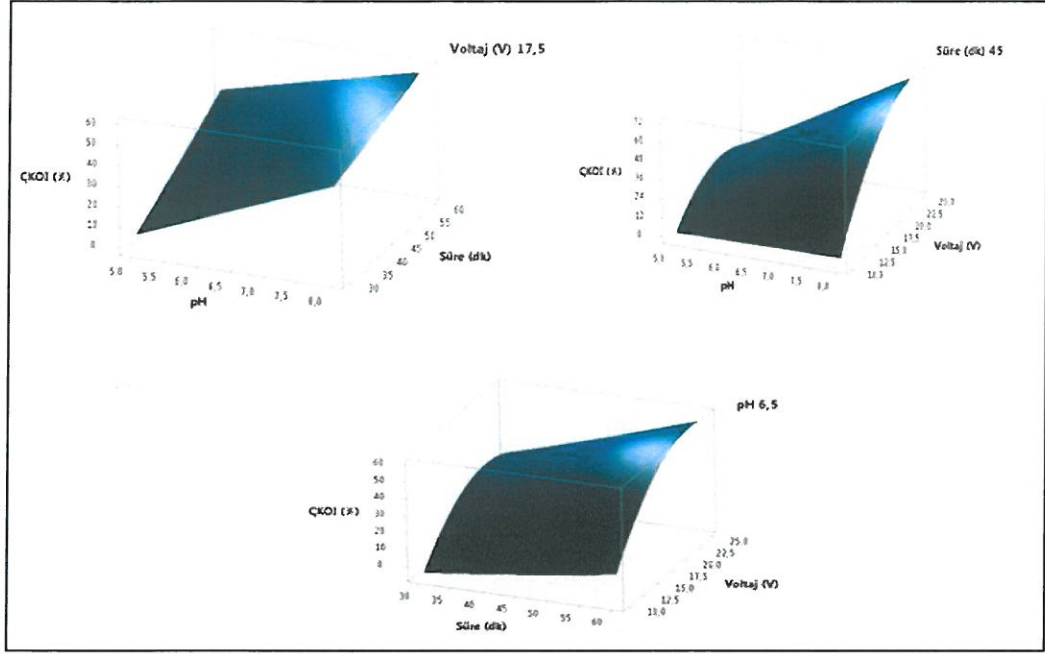
Şekil 6.7. Platin 50 ÇKOI salınımı

Optimizasyon çalışmalarında ise çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) salınımının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 73'e ulaştığı ($y=73.4104$) ve bu değere pH:8, süre:60 dakika, voltaj:25 volt uygulandığında ulaştığı görülmüştür.

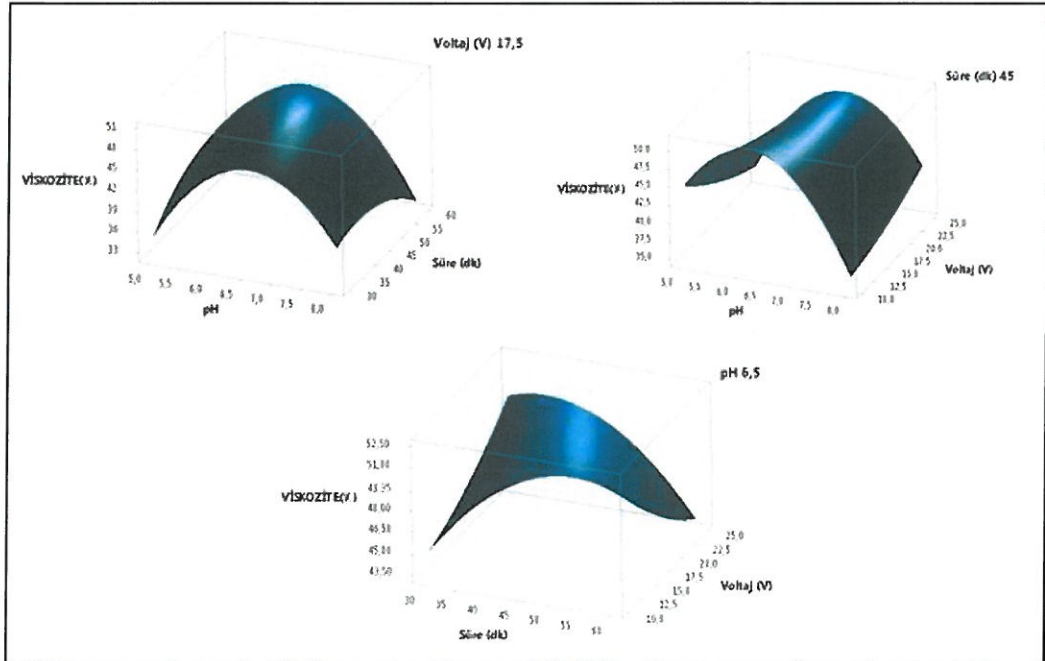


Şekil 6.8. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)

9 cm çapında elektrot kullanıldığında ise sistemin TKM gideriminin olumsuz etkilendiği ve sistem verimini %35'e kadar düştüğü gözlenmiştir (Şekil 6.8). ÇKOİ konsantrasyon değerinin ise yükseldiği (Şekil 6.9) gözlenerek anot ve katot arasındaki mesafenin 2,3 cm düşmesinin TKM üzerinde olumsuz ÇKOİ üzerinde ise olumlu etki yaptığı görülmüştür.

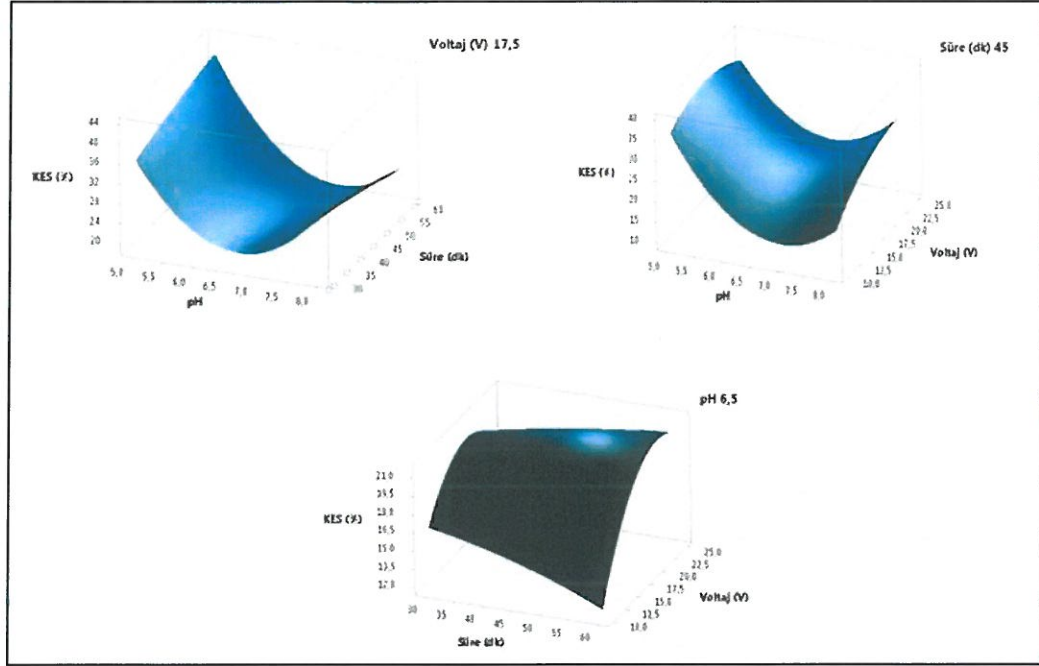


Şekil 6.9. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)



Şekil 6.10. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)

Platin 9 cm elektrot çapı ile çalışıldığında nötral pH değerinin viskozitesi model reaktör çıkış suyunda %50 azalmaya neden olduğu uygulanan voltaj ve sistem süresinin etkisinin pH kadar etkili olmadığı gözlenmiştir (Şekil 6.10).

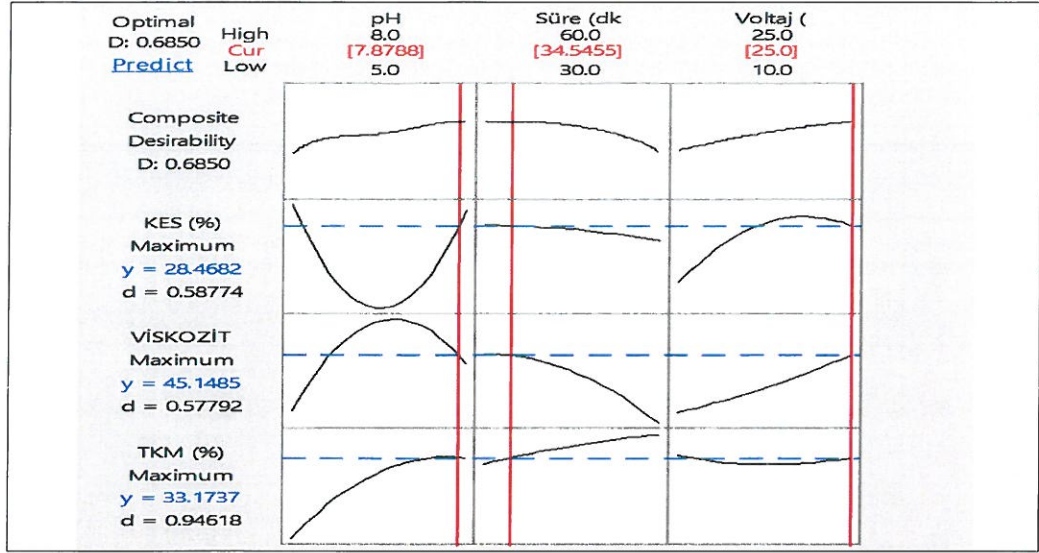


Şekil 6.11. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (platin, 9 cm)

Çalışmada susuzlaştırma gösterge parametrelerinden biri olan KES değeri incelendiğinde maya sektörü çamurlarında yüksek giderim verimine ulaşamadığı görülmüştür. Aynı zamanda KES değeri için veriminin artması için nötral pH seviyesinde çalışıldığında yüksek voltaj ve sistem süresinin bir saat olarak uygulanması gerektiği belirlenmiştir (Şekil 6.11).

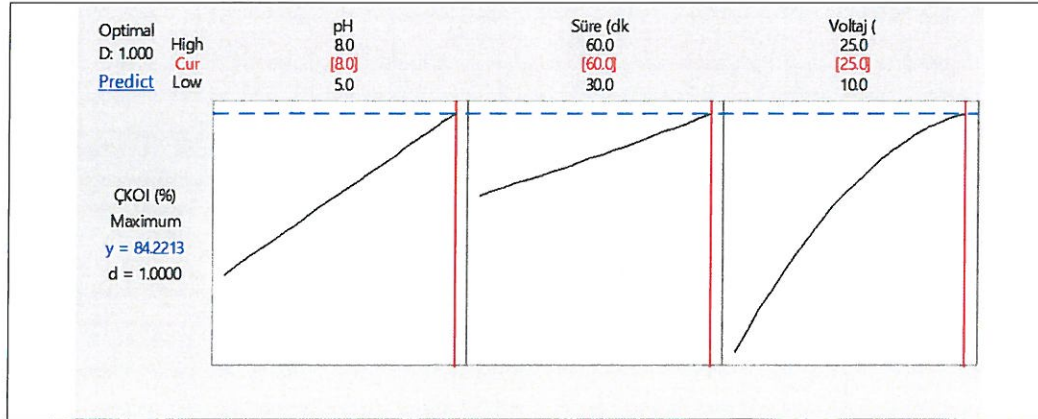
6.2.2 Platin 90 Optimizasyon Çalışması

Deneyisel çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



Şekil 6.12. Platin 90 KES, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliği tanımlayan parametreler olduğu için platin 90 elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler saptanarak yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:7, süre:34 dakika, voltaj:25 volt olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.13. Platin 90 ÇKOI salınımları

Optimizasyon çalışmalarında; çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımlarının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 84'e ulaştığı ($y=84,2213$) ve pH:8, süre:60 dakika, voltaj:25 volt uygulandığında ulaştığı belirlenmiştir.

6.3 Bakır Elektrot Kullanımı

Bakır elektrot kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamurun susuzlaştırma veriminin değerlendirilmesi için TKM, ÇKOİ, viskozite, KES parametreleri belirlenmiştir. Ölçülen değerler istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

5 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,93$, düzeltilmiş $R^2=0,80$)

$$TKM = 432 - 123,6 * X_1 - 4,65 * X_2 + 4,74 * X_3 + 10,75 * X_1 * X_1 + 0,02224 * X_2 * X_2 + 0,004 * X_3 * X_3 + 0,321X_1 * X_2 - 0,722 * X_1 * X_3 - 0,0098 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,72$, düzeltilmiş $R^2=0,21$)

$$ÇKOİ = 543 - 135 * X_1 - 5,7 * X_2 - 7,1 * X_3 + 16,05 * X_1 * X_1 + 0,0316 * X_2 * X_2 + 0,501 * X_3 * X_3 - 0,336X_1 * X_2 - 2,79 * X_1 * X_3 + 0,207 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,73$, düzeltilmiş $R^2=0,25$)

$$Viskozite = 222 - 109,5 * X_1 + 3,33 * X_2 + 10,13 * X_3 + 10,26 * X_1 * X_1 - 0,0153 * X_2 * X_2 - 0,083 * X_3 * X_3 - 0,2X_1 * X_2 - 0,872 * X_1 * X_3 - 0,0465 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,72$, düzeltilmiş $R^2=0,21$)

$$KES = -113 + 47,2 * X_1 - 1,16 * X_2 + 6,61 * X_3 - 2,846 * X_1 * X_1 + 0,0122 * X_2 * X_2 - 0,0252 * X_3 * X_3 + 0,014X_1 * X_2 - 0,883 * X_1 * X_3 - 0,01 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,91$, düzeltilmiş $R^2=0,75$)

$$TKM = 318,7 - 102,1 * X_1 + 1,22 * X_2 + 3,04 * X_3 + 7,29 * X_1 * X_1 - 0,027 * X_2 * X_2 - 0,1814 * X_3 * X_3 + 0,102X_1 * X_2 + 0,336 * X_1 * X_3 + 0,0239 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÇKOİ ($R^2=0,91$, düzeltilmiş $R^2=0,75$)

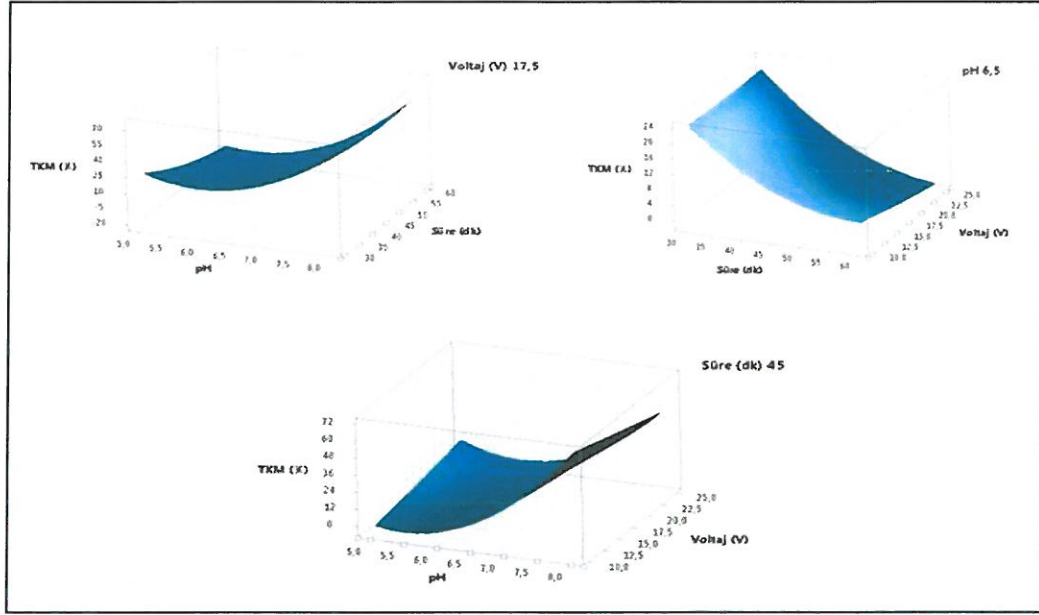
$$ÇKOİ = -576 + 101,5 * X_1 + 6,2 * X_2 + 8,81 * X_3 - 5,07 * X_1 * X_1 + 0,0023 * X_2 * X_2 - 0,086 * X_3 * X_3 - 0,627X_1 * X_2 + 0,095 * X_1 * X_3 - 0,067 * X_2 * X_3$$

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

$$Viskozite = 103,6 - 51 * X_1 + 3,54 * X_2 + 4,46 * X_3 + 3,48 * X_1 * X_1 - 0,0391 * X_2 * X_2 - 0,2341 * X_3 * X_3 - 0,058X_1 * X_2 + 0,336 * X_1 * X_3 + 0,0329 * X_2 * X_3$$

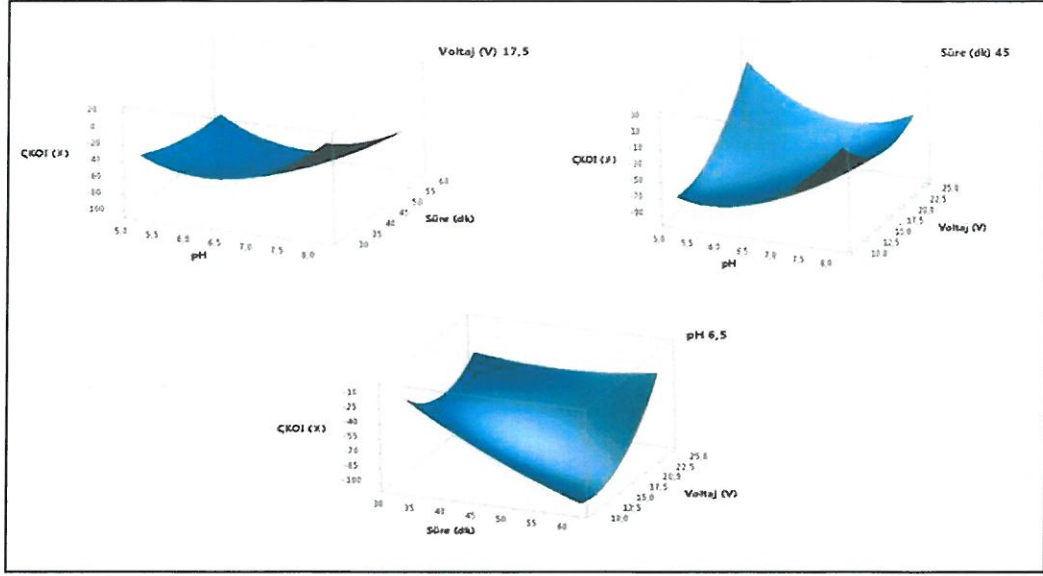
9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,68$, düzeltilmiş $R^2=0,11$)

$$KES = 688 - 203 * X_1 + 2,2 * X_2 + 4,4 * X_3 + 12,8 * X_1 * X_2 - 0,036 * X_2 * X_3 - 0,294 * X_3 * X_3 + 0,14 X_1 * X_2 + 0,2 * X_1 * X_3 + 0,011 * X_2 * X_3$$



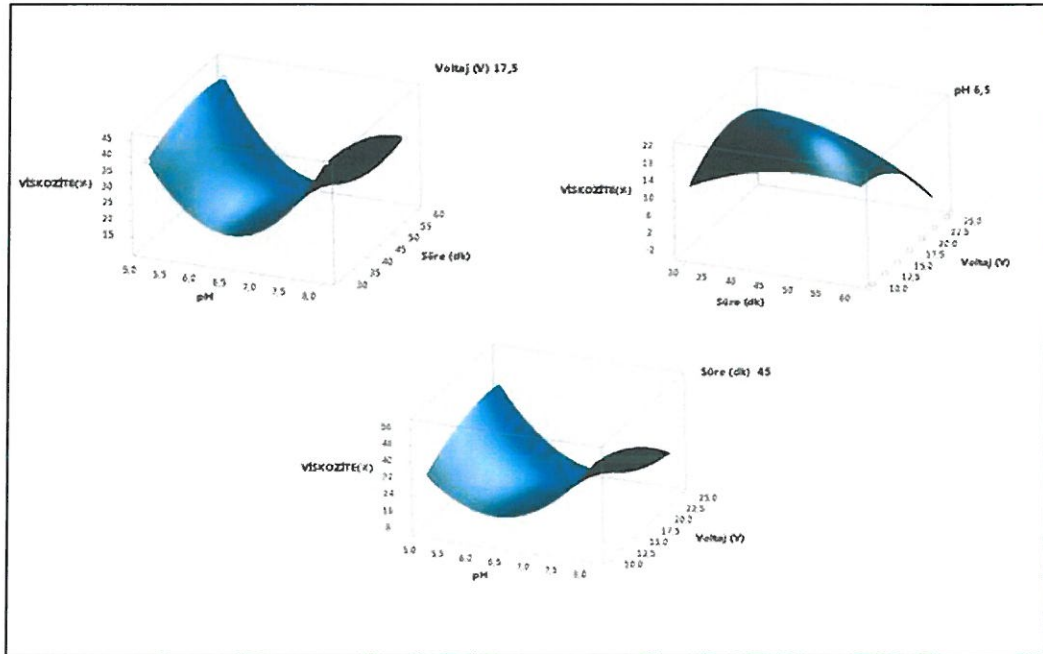
Şekil 6.14. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)

Bakır elektrotlar ile yapılan çalışmada TKM gideriminin yüksek olması için sistemin bazik pH değeri ile çalışılması gerektiği sistem performansını sistem süresinin ve voltajın çok etkili olmadığı görülmüştür. Nötral pH değerinin uygulanması halinde ise 30 dk işletim süresinin uygun olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.14).



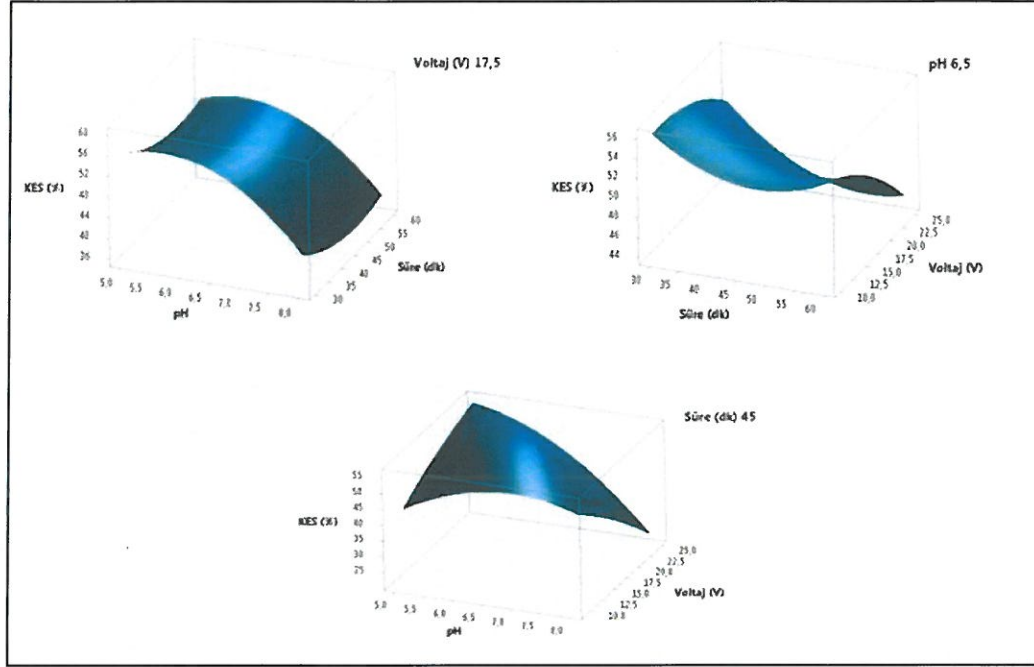
Şekil 6.15. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOI değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)

5 cm çaplı katot ve 13,6 cm çaplı anot bakır elektrot kullanıldığında çamurun üst suyunda bulunan ÇKOI konsatrasyonunun artmadığı görülmüştür (Şekil 6.15).



Şekil 6.16. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)

Şekil 6.16'da elektro-susuzlaştırma işleminin çamur üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılan parametrelerden biri olan viskozite, bakır elektrot kullanıldığında ham çamur viskozitesinin işletim süresi ve uygulanan voltaj ile yaklaşık %20 oranında değiştiği gözlenmiştir. Asidik pH'ın sistem performansını bazik pH'a göre daha olumlu etkilediği belirlenmiştir.

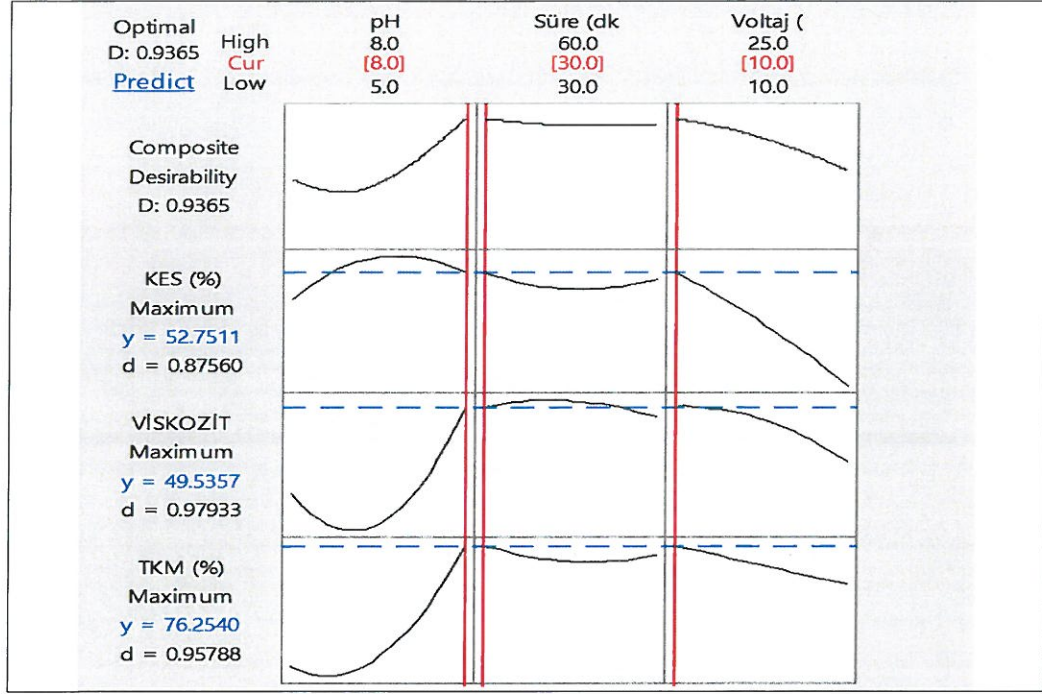


Şekil 6.17. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (bakır, 5 cm)

İşletim süresi 45. dakikada sabit iken, asidik pH ve yüksek voltajda KES yüzde değişiminin azaldığı görülmüştür. pH 6,5 ve işletim süresi 60. dakikada da voltajın önemli bir etkisinin meydana gelmediği, 30. dakikada %55 oranında bir değişim meydana geldiği görülmüştür. Viskozite değeri ise nötral pH değerlerinde ve KES değerinin ise asidik pH değerlerinde ise etkili olarak azaldığı görülmüştür (Şekil 6.16 ve 6.17). Sistem performansının artırılması için TKM parametresi nötral pH değerlerinde çalışıldığında işletim süresinin 30 dakika uygulanması gerektiği gözlenmiştir.

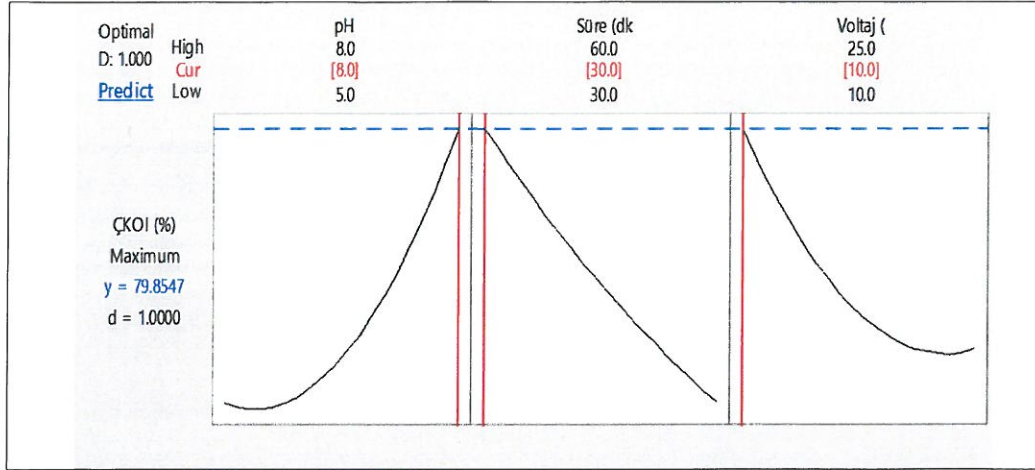
6.3.1 Bakır 50 Optimizasyon Çalışması

Deneysel çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



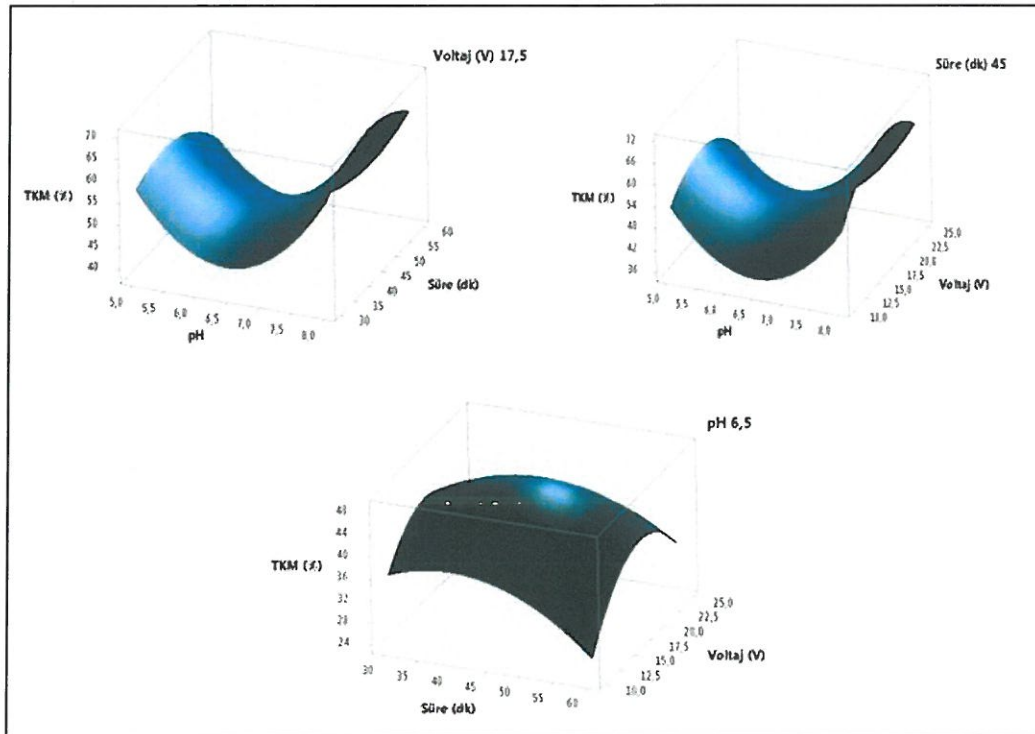
Şekil 6.18. Bakır 50 KES, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için bakır 5 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değer gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:8, süre:30 dakika, voltaj:10 volt olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 6.19. Bakır 50 ÇKOI salınımlar

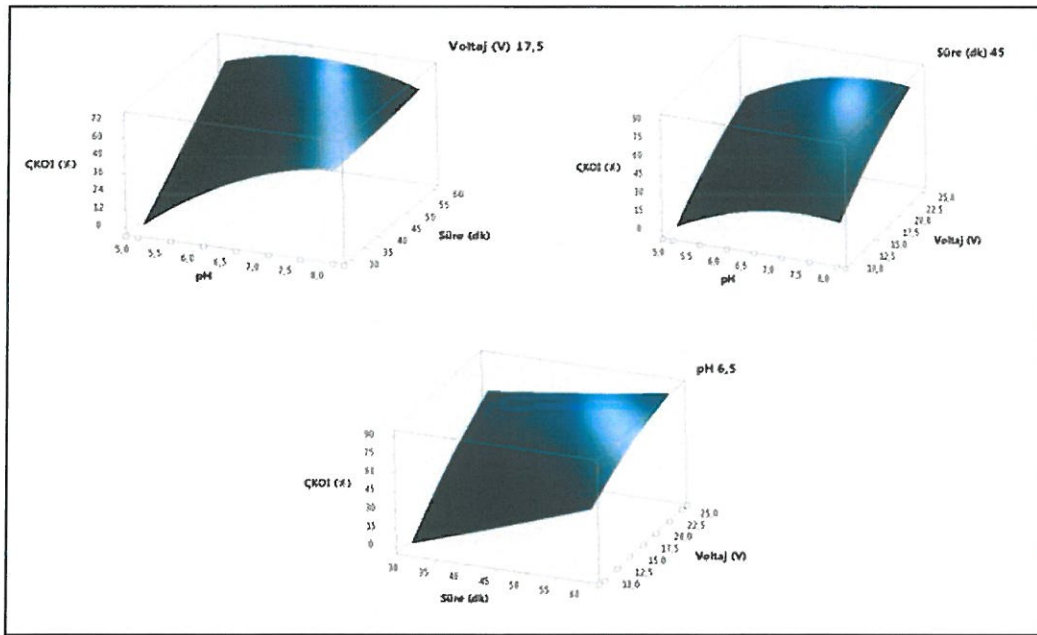
Optimizasyon çalışmalarında ise çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 79'a ulaştığı ($y=79,8547$) ve bu değere pH:8, süre:30 dakika, voltaj:10 volt uygulandığında ulaştığı görülmüştür.



Şekil 6.20. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)

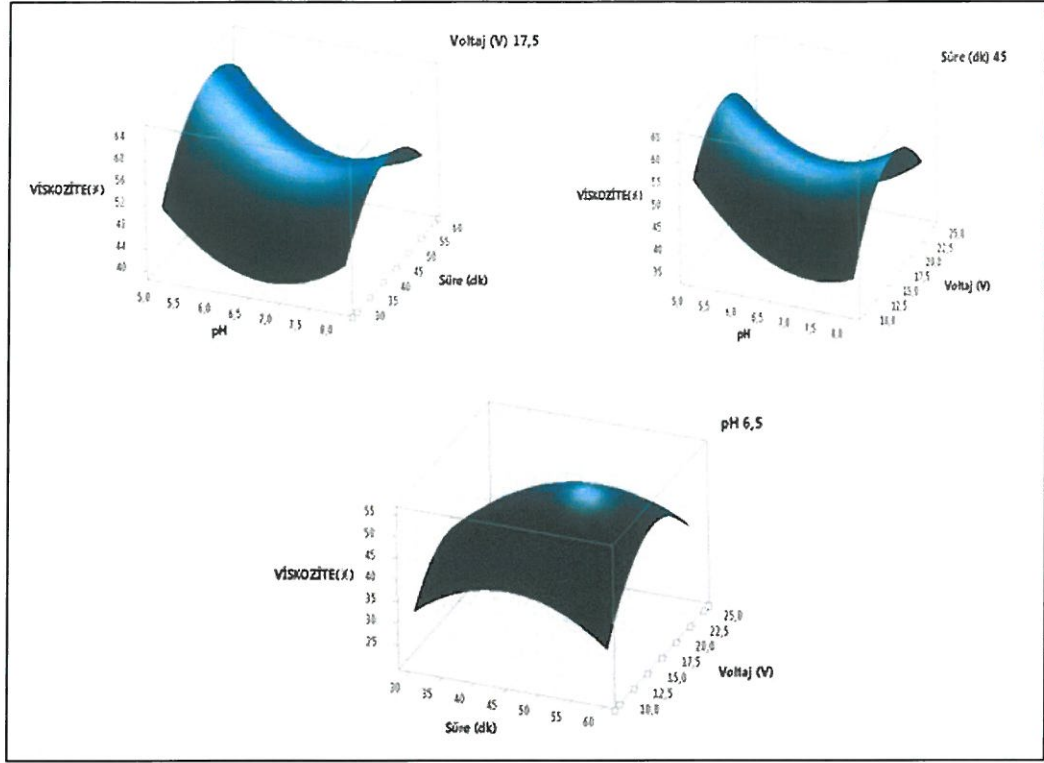
Bakır 5 cm elektrot kullanılarak yapılan çalışmalara benzer olarak bakır 9 cm elektrot ile yapılan çalışmalarda TKM veriminin aynı olduğu görülmüştür. Buradan yola çıkılarak katı madde gideriminde bakır elektrotlar arasındaki mesafenin önemli şekilde etkili olmadığı görülmüştür (Şekil 6.20).

Bakır elektrotlar ile yapılan çalışmada TKM gideriminin yüksek olması için sistemin bazik pH değeri ile çalışılması gerektiği sistem performansını sistem süresinin ve voltajın çok etkili olmadığı görülmüştür. Nötral pH değerinin uygulanması halinde ise 30 dk işletim süresinin uygun olduğu gözlenmiştir.

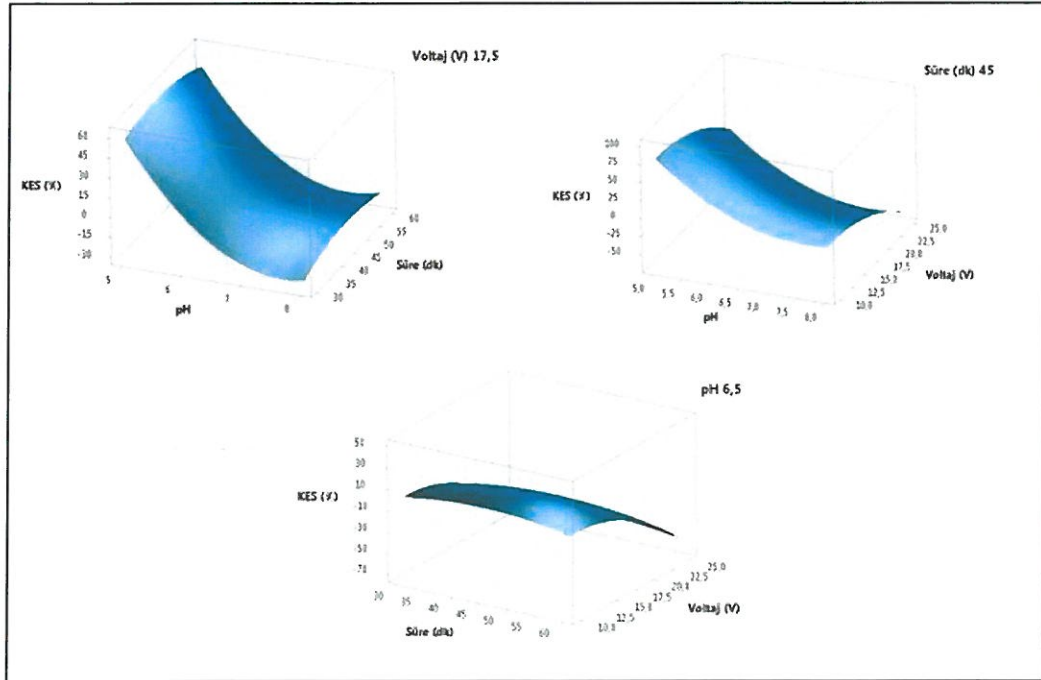


Şekil 6.21. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)

ÇKOİ konsantrasyonu ise diğer yapılan çalışmalar benzer olarak arttığı sistem süresi ve voltajın konsantrasyon artmasına neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.21). 9 cm çaplı bakır elektrot ile çalışıldığında viskozite değeri işletim süresi ve voltaj değerinden olumlu etkilendiği belirlenmiştir (Şekil 6.22).



Şekil 6.22. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)

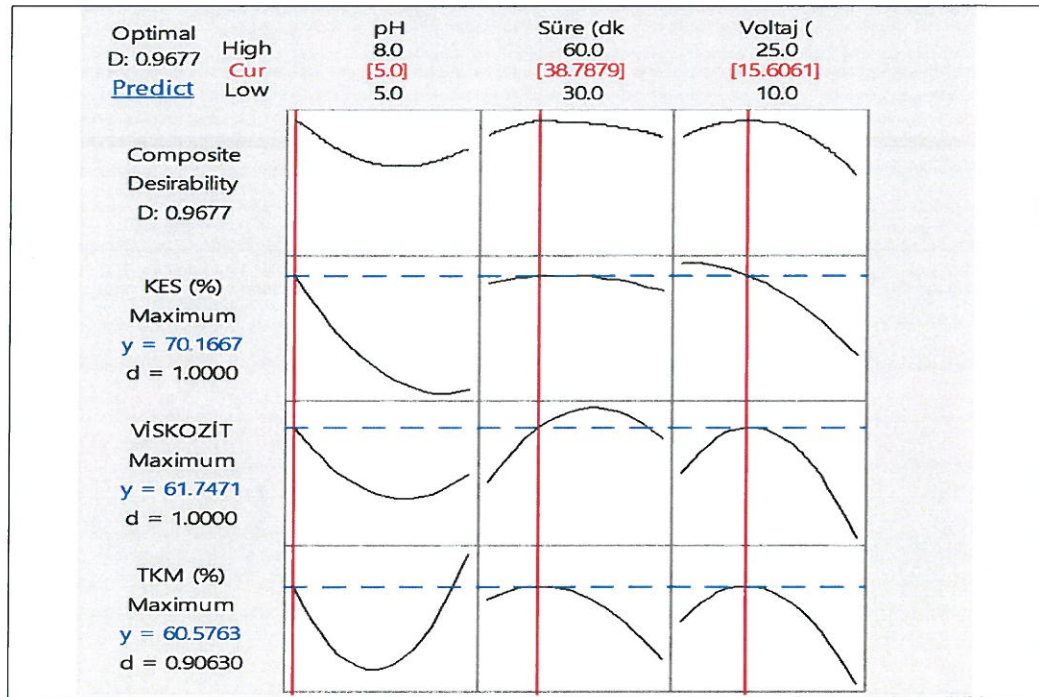


Şekil 6.23. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (bakır, 9 cm)

Kapiler emme süresinin asidik pH değerinden olumlu etkilendiği, voltaj ve işletme süresinin pH kadar önemli bir etki yapmadığı görülmüştür. Bazik pH'ta ise KES artmış, ancak sistemin nötral pH değeri ile çalıştırılması durumunda çamurun susuzlaştırma kapasitesini düşürdüğü gözlenmiştir (Şekil 6.23).

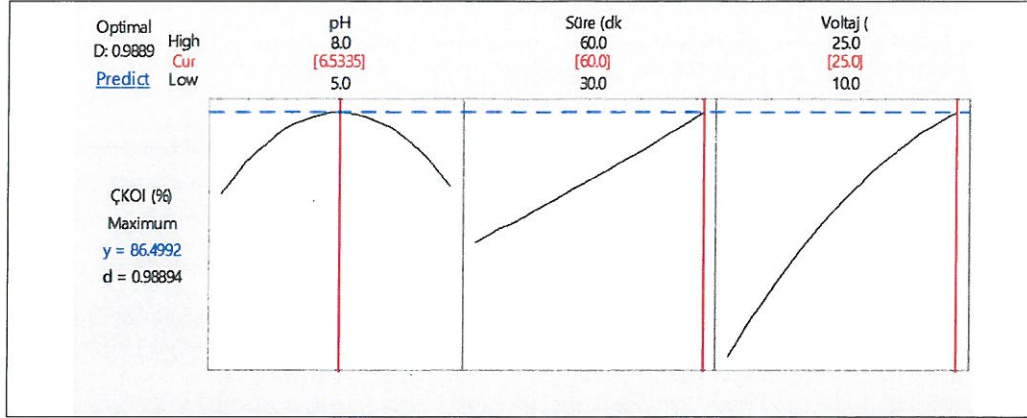
6.3.2 Bakır 90 Optimizasyon Çalışması

Deneysel çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



Şekil 6.24. Bakır 90 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için bakır 9 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:5, süre:38 dakika, voltaj:15 volt olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.25. Bakır 90 ÇKOI salınımı

Optimizasyon çalışmalarında ise çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 86'a ulaştığı ($y=86,4992$) ve bu değere pH:8, süre:60 dakika, voltaj:25 volt uygulandığında ulaştığı belirlenmiştir.

6.4 Paslanmaz Çelik Kullanımı

Paslanmaz çelik elektrot kullanılarak yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen çamurun susuzlaştırma veriminin değerlendirilmesi için TKM, ÇKOİ, Viskozite, KES 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; TKM ($R^2=0,96$, düzeltilmiş $R^2=0,89$)

$$TKM = 11,6 + 6,38 * X_1 + 0,614 * X_2 + 1,34 * X_3 + 0,766 * X_1 * X_1 - 0,00501 * X_2 * X_2 - 0,0064 * X_3 * X_3 + 0,00397 X_1 * X_2 - 0,005 * X_1 * X_3 - 0,0173 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; ÇKOI ($R^2=0,72$, düzeltilmiş $R^2=0,21$)

$$ÇKOI = -36 - 7,1 * X_1 + 0,36 * X_2 + 6,56 * X_3 + 143 * X_1 * X_1 - 0,0071 * X_2 * X_2 - 0,009 * X_3 * X_3 + 0,10 X_1 * X_2 + 0,0 * X_1 * X_3 - 0,0 * X_2 * X_3$$

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

$$\begin{aligned} \text{Viskozite} = & 101,3 - 12,86 * X_1 - 1,73 * X_2 + 2,77 * X_3 + 2,137 * X_1 * X_1 + 0,02531 * X_2 * X_2 \\ & - 0,0184 * X_3 * X_3 - 0,1259 X_1 * X_2 - 0,493 * X_1 * X_3 + 0,0257 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

5 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,78$, düzeltilmiş $R^2=0,28$)

$$\begin{aligned} KES = & 27,3 - 1,5 * X_1 + 1,09 * X_2 - 1,17 * X_3 + 0,05 * X_1 * X_1 - 0,0213 * X_2 * X_2 \\ & + 0,0201 * X_3 * X_3 - 0,160,1711 * X_1 * X_3 + 0,0412 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} TKM = & -285,2 + 60,9 * X_1 + 2,74 * X_2 + 7,47 * X_3 - 3,753 * X_1 * X_1 - 0,00278 * X_2 * X_2 \\ & - 0,1286 * X_3 * X_3 - 0,1971 X_1 * X_2 - 0,133 * X_1 * X_3 - 0,0496 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

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

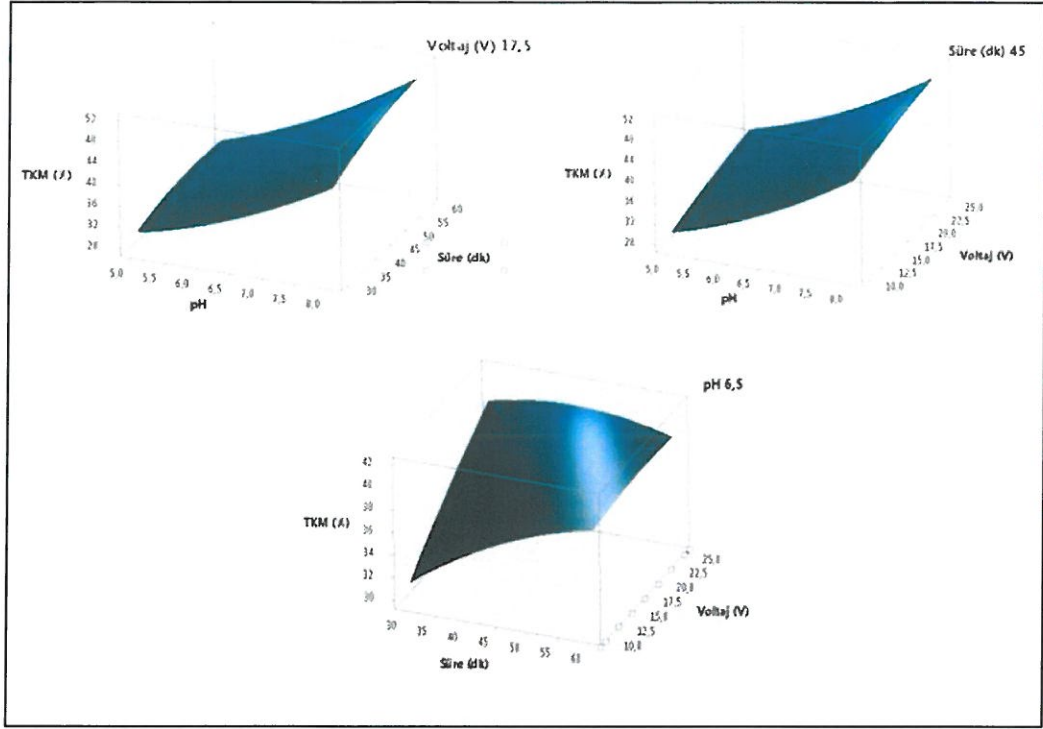
$$\begin{aligned} \text{ÇKOI} = & -76 - 33,5 * X_1 + 4,66 * X_2 + 4,83 * X_3 + 2,13 * X_1 * X_1 - 0,0543 * X_2 * X_2 \\ & - 0,111 * X_3 * X_3 + 0,108 X_1 * X_2 + 0,479 * X_1 * X_3 + 0,0113 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

9 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,88$, düzeltilmiş $R^2=0,67$)

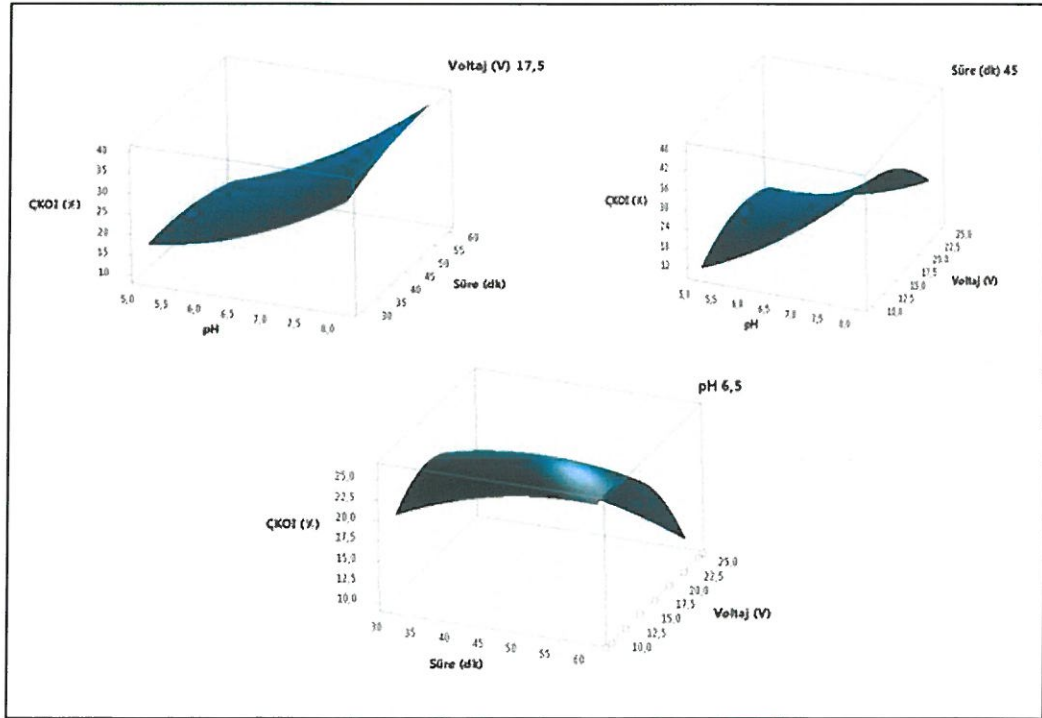
$$\begin{aligned} \text{Viskozite} = & 115,5 - 3,76 * X_1 - 0,695 * X_2 - 0,737 * X_3 - 0,246 * X_1 * X_1 + 0,00863 * X_2 * X_2 \\ & + 0,02964 * X_3 * X_3 + 0,0073 X_1 * X_2 + 0,0015 * X_1 * X_3 - 0,00527 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} KES = & -10,7 + 22,3 * X_1 - 2,88 * X_2 + 5,62 * X_3 - 1,70 * X_1 * X_1 + 0,0288 * X_2 * X_2 \\ & - 0,0221 * X_3 * X_3 + 0,057 * X_1 * X_2 - 0,756 X_1 * X_3 - 0,0069 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

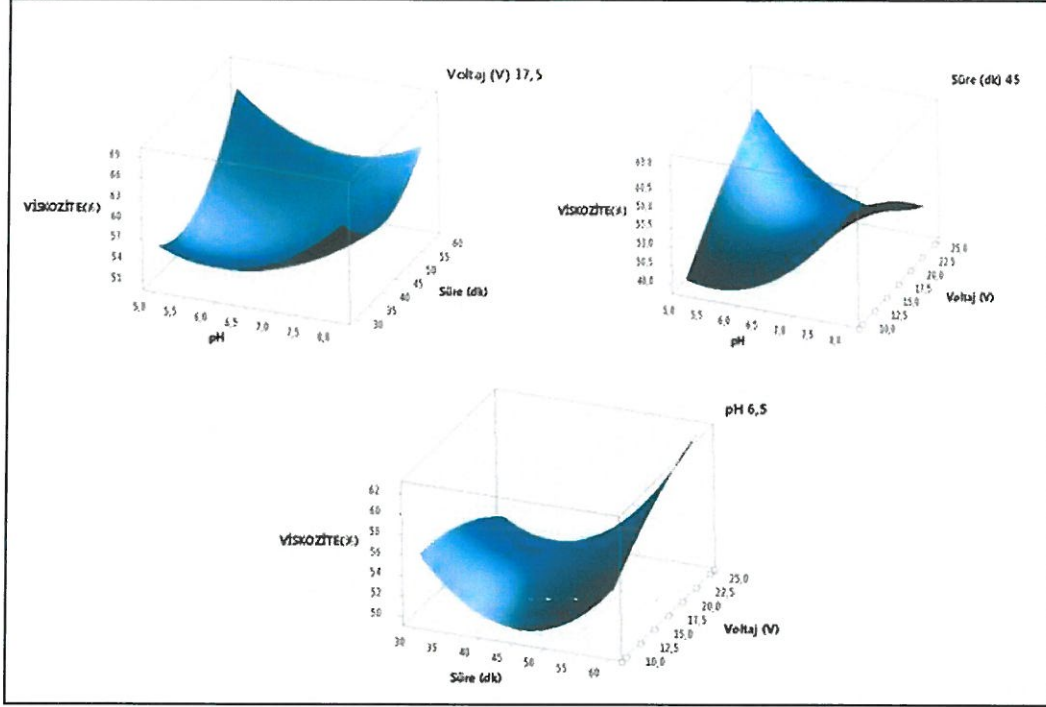


Şekil 6.26. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)



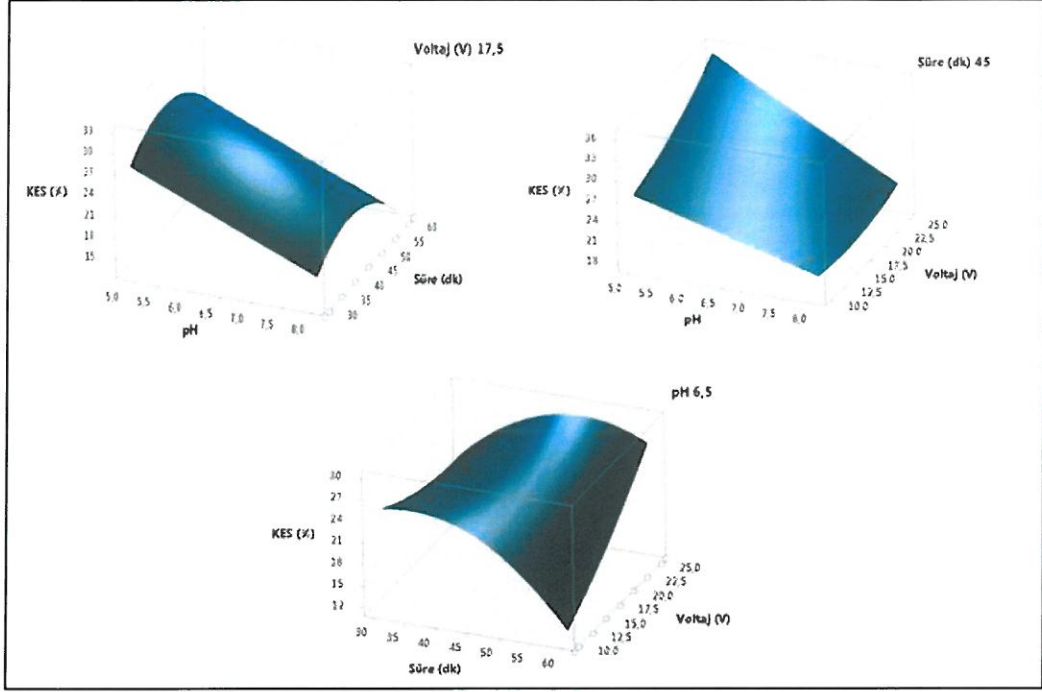
Şekil 6.27. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)

Paslanmaz çelik elektrot kullanılması TKM üzerinde olumlu etki yapmış ve bazik pH değerinin sistemin verimini %20 oranında artmasına neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.26). ÇKOI değeri ise bazik pH değerlerinde artarak sisteme verilen çamurun sistem performansı ile etkilendiği tespit edilmiştir (Şekil 6.27).



Şekil 6.28. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)

Viskozite ise asidik pH değerinde % 65 oranında en yüksek değerine ulaşmış ve voltaj ve sistem süresinin olumlu etkisi olduğu görülmüştür (Şekil 6.28).

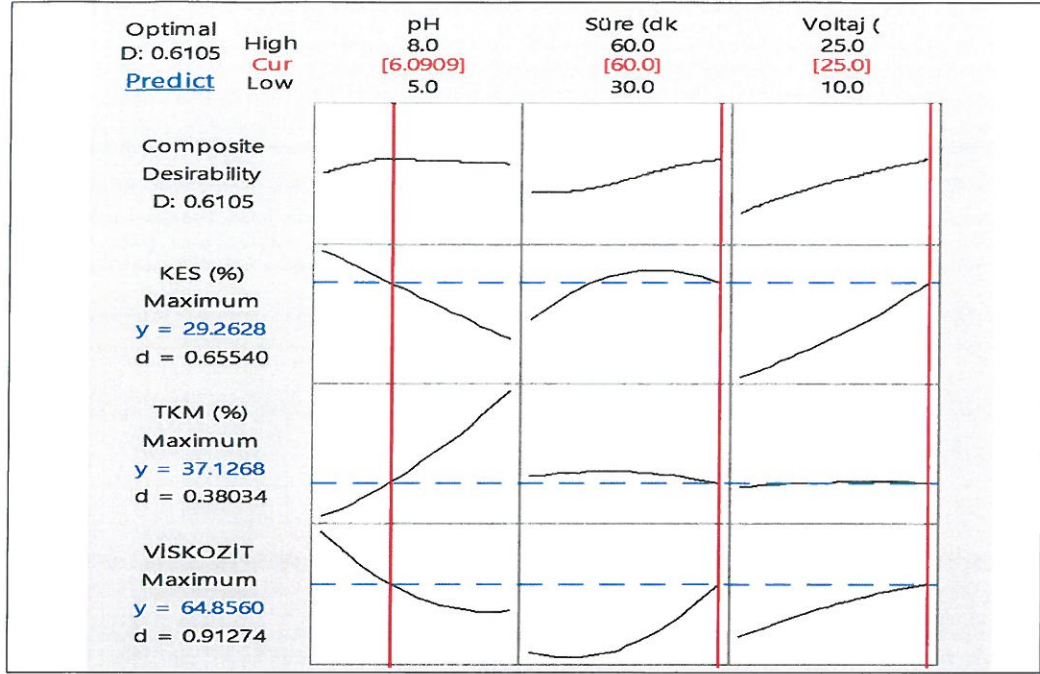


Şekil 6.29. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 5 cm)

Paslanmaz çelik 9 cm ile yapılan çalışmada ise 5 cm elektrot çapına benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Şekil 6.28). Voltaj ve işletme süresinin sabit tutulduğunda asidik pH'ta KES'in %25 oranında azaldığı görülmüştür. Çalışmada elektrotların arasındaki mesafenin azalmasının ÇKOI konsantrasyon artmasına neden olduğu (Şekil 6.29) ancak KES değerinde ciddi bir etkiye yol açmadığı hatta bazı işletim şartlarında çamurun susuzlaştırma özelliklerini iyileştirmek yerine bu özellikleri bozduğu görülmüştür. Viskozite ise nötral pH değerinde azaldığı belirlenmiştir.

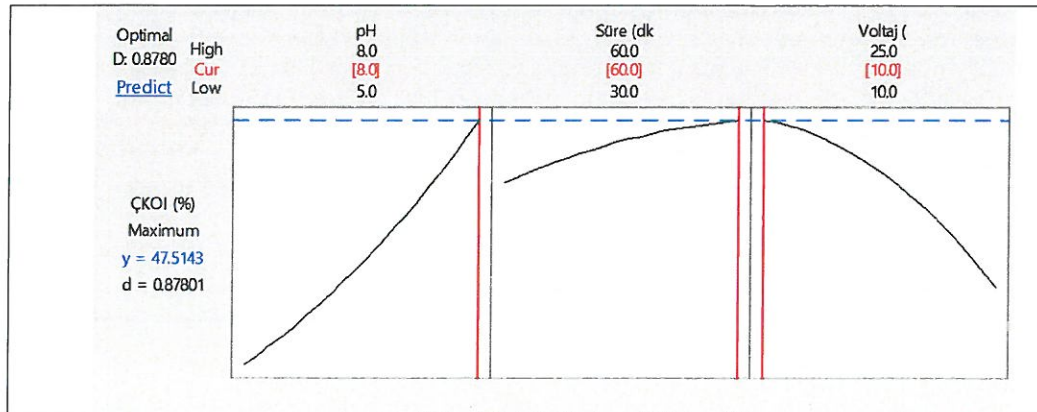
6.4.1 Paslanmaz Çelik 50 Optimizasyon Çalışması

DeneySEL çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



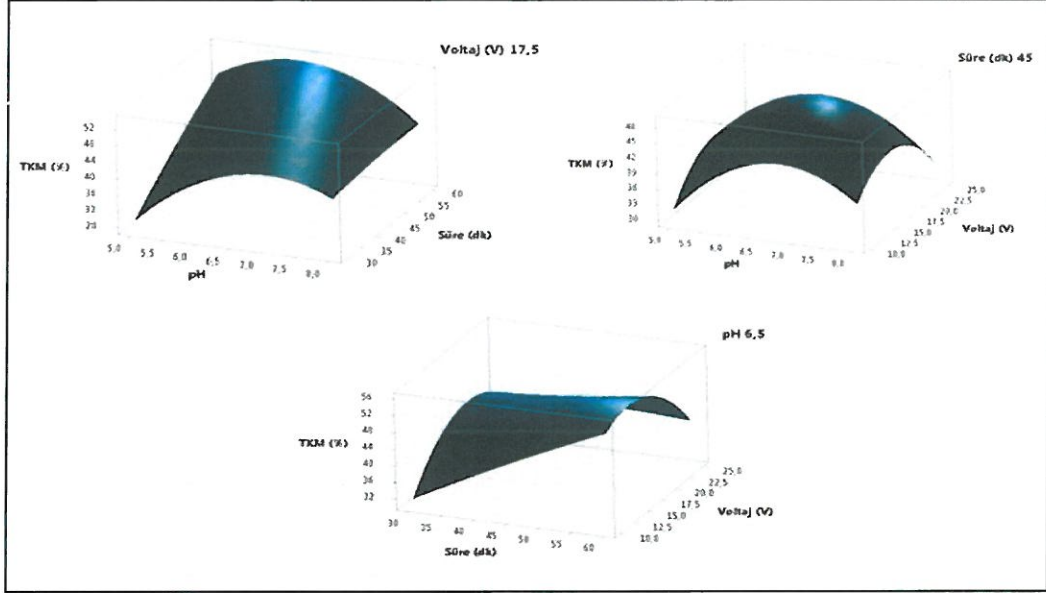
Şekil 6.30. Paslanmaz Çelik 50 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için paslanmaz çelik 5 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:6, süre:60 dakika, voltaj:25 volt olarak gözlemlenmiştir.

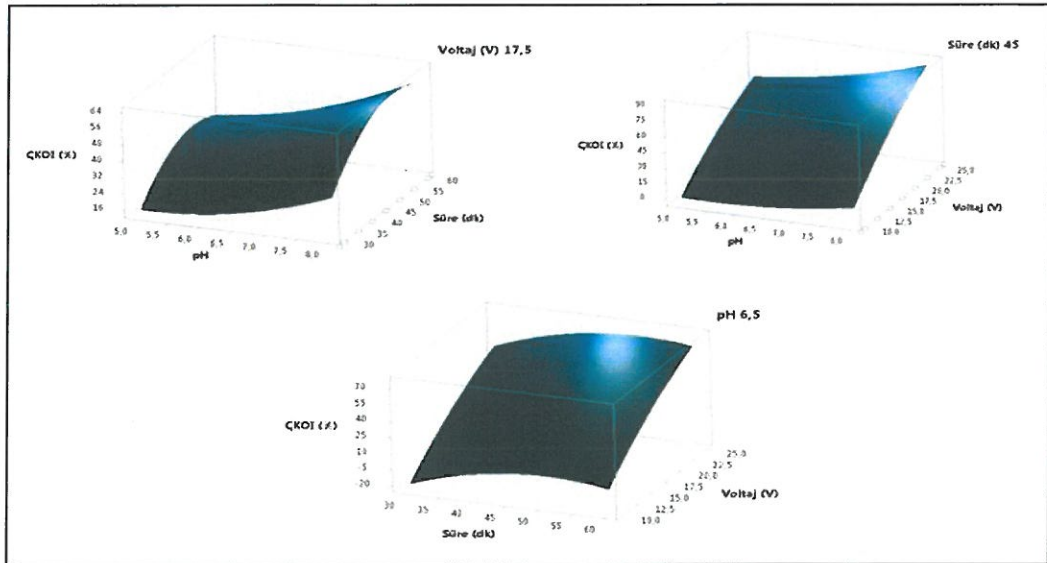


Şekil 6.31. Paslanmaz Çelik 50 ÇKOI salınımı

Optimizasyon çalışmalarında ise çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 47'e ulaştığı ($y=47,5143$) ve bu değere pH:8, süre:60 dakika, voltaj:10 volt uygulandığında ulaştığı gözlemlenmiştir.



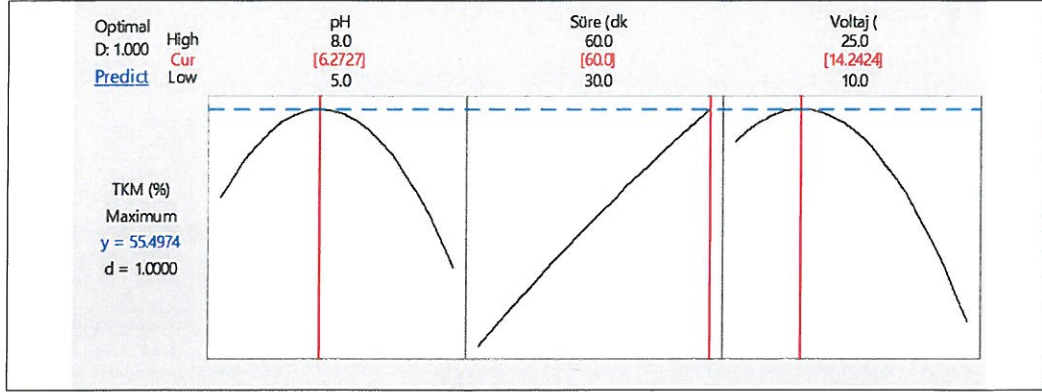
Şekil 6.32. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 9 cm)



Şekil 6.33. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (paslanmaz çelik, 9 cm)

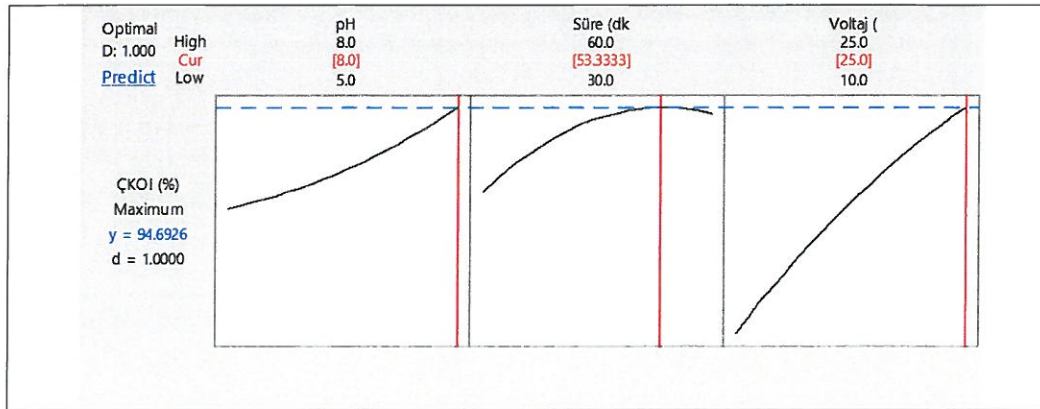
6.4.2 Paslanmaz Çelik 90 Optimizasyon Çalışması

Deneysel çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



Şekil 6.34. Paslanmaz Çelik 90 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için paslanmaz çelik 90 elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:6, süre:60 dakika, voltaj:14volt olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 6.35. Paslanmaz Çelik 90 ÇKOI salınımı

Optimizasyon çalışmalarında ise çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 94'e ulaştığı ($y=94,6926$) ve bu değere pH:8, süre:53 dakika, voltaj:25 volt uygulandığında ulaştığı görülmüştür.

6.5 Grafit Elektrot Kullanımı

Grafit elektrotlar kullanılarak yapılan 15 etaplık deneysel çalışma sonucunda elde edilen TKM, ÇKOİ, viskozite, KES 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; TKM ($R^2=0,90$, düzeltilmiş $R^2=0,73$)

$$TKM = -144,1 + 59 * X_1 - 1,7 * X_2 + 2,23 * X_3 - 5,96 * X_1 * X_1 + 0,0088 * X_2 * X_2 - 0,0875 * X_3 * X_3 + 0,280 X_1 * X_2 - 0,557 * X_1 * X_3 - 0,0459 * X_2 * X_3$$

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

$$ÇKOİ = -335 + 85 * X_1 - 3,61 * X_2 + 10,92 * X_3 - 6,69 * X_1 * X_1 + 0,0221 * X_2 * X_2 - 0,243 * X_3 * X_3 + 0,329 X_1 * X_2 - 0,519 * X_1 * X_3 + 0,0621 * X_2 * X_3$$

5 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,88$, düzeltilmiş $R^2=0,67$)

$$Viskozite = 8,2 + 22,2 * X_1 - 0,9 * X_2 - 1,24 * X_3 - 3,205 * X_1 * X_1 + 0,00097 * X_2 * X_2 - 0,0236 * X_3 * X_3 + 0,1892 X_1 * X_2 + 0,475 * X_1 * X_3 - 0,0131 * X_2 * X_3$$

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

$$KES = 96 + 5,7 * X_1 + 0,37 * X_2 - 8,76 * X_3 - 3,04 * X_1 * X_1 + 0,0102 * X_2 * X_2 + 0,116 * X_3 * X_3 + 0 * X_1 * X_2 + 1,463 * X_1 * X_3 - 0,0814 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; TKM ($R^2=0,72$, düzeltilmiş $R^2=0,21$)

$$TKM = 81,6 - 4,1 * X_1 - 0,42 * X_2 - 1,03 * X_3 + 0,132 * X_1 * X_1 + 0,01312 * X_2 * X_2 - 0,0073 * X_3 * X_3 - 0,0676 X_1 * X_2 + 0,363 * X_1 * X_3 - 0,015 * X_2 * X_3$$

9 cm katot çapı için; ÇKOI ($R^2=0,93$, düzeltilmiş $R^2=0,78$)

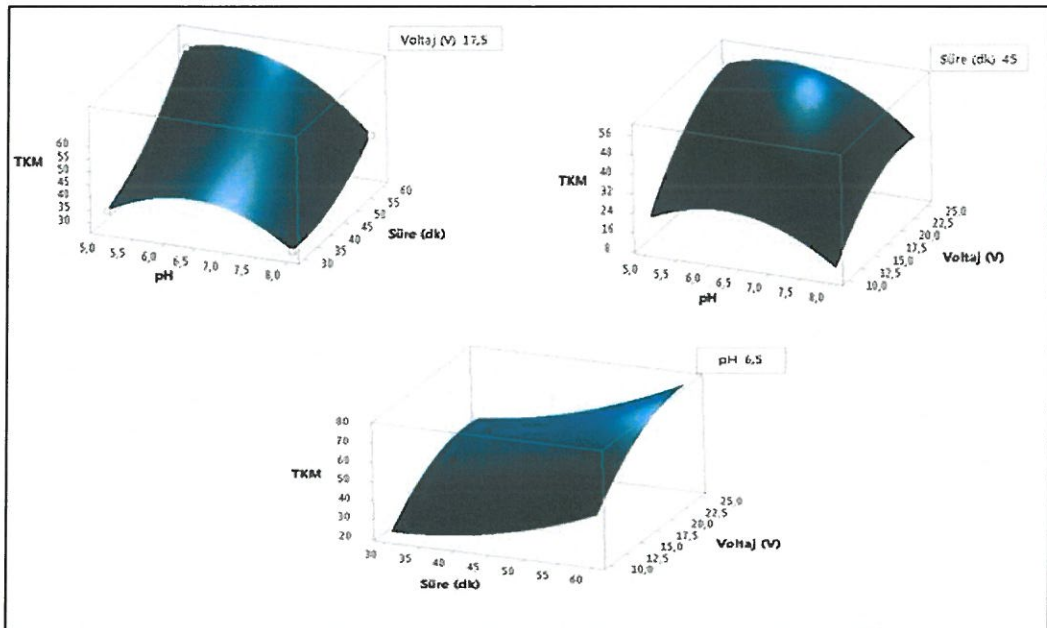
$$\begin{aligned} \text{ÇKOI} = & -1112 + 180,1 * X_1 + 11,1X_2 + 27,6 * X_3 - 12,43 * X_1 * X_1 - 0,0335 * X_2 * X_2 \\ & - 0,777 * X_3 * X_3 - 0,684X_1 * X_2 + 1,547 * X_1 * X_3 - 0,133 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

9 cm katot çapı için; Viskozite ($R^2=0,88$, düzeltilmiş $R^2=0,67$)

$$\begin{aligned} \text{Viskozite} = & 84,9 - 0,69 * X_1 + 0,312 * X_2 + 0,143 * X_3 - 0,059 * X_1 * X_1 - 0,00187 * X_2 * X_2 \\ & + 0,00056 * X_3 * X_3 + 0,0X_1 * X_2 + 0,038 * X_1 * X_3 - 0,00615 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

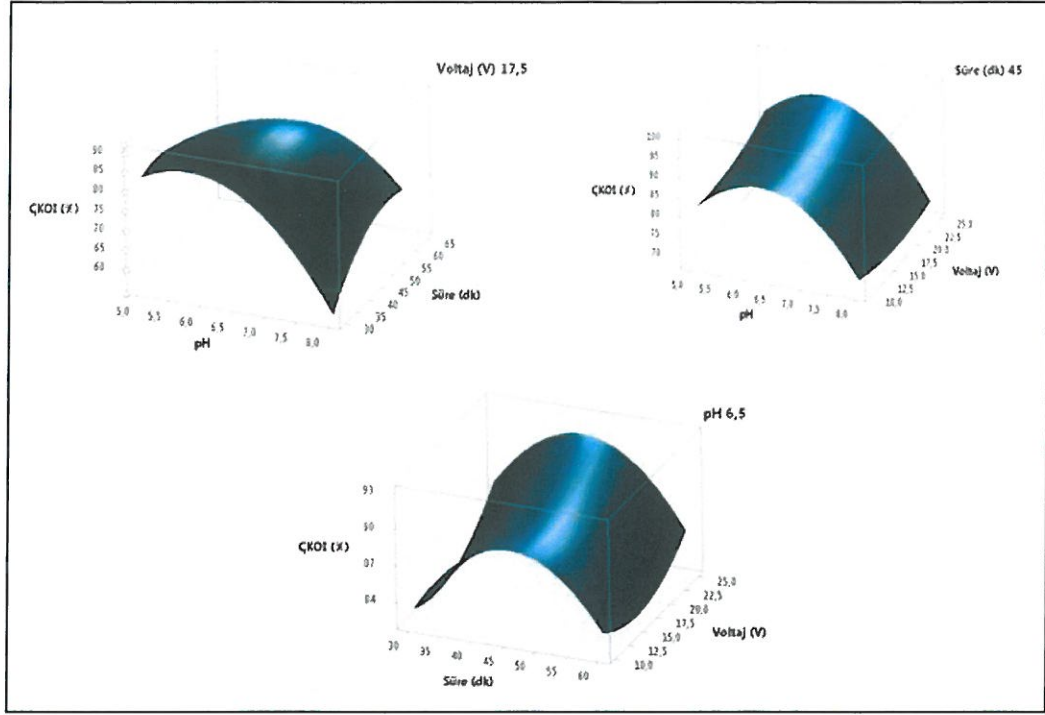
9 cm katot çapı için; KES ($R^2=0,74$, düzeltilmiş $R^2=0,26$)

$$\begin{aligned} \text{KES} = & 220 - 35,2 * X_1 - 0,26 * X_2 - 5,52 * X_3 - 0,23 * X_1 * X_1 + 0,0228 * X_2 * X_2 \\ & - 0,017 * X_3 * X_3 + 0,01X_1 * X_2 + 1,607 * X_1 * X_3 - 0,0981 * X_2 * X_3 \end{aligned}$$

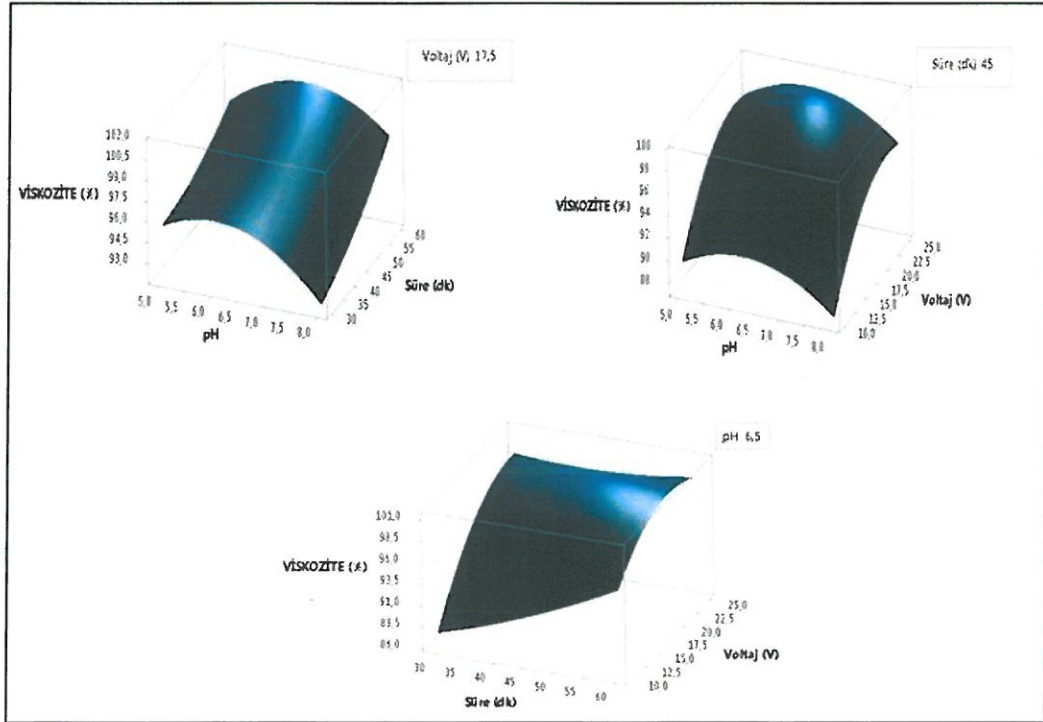


Şekil 6.36. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm)

Grafit elektrot diğer elektrot ile yapılan çalışmalarda işletim parametrelerinin olumlu etkisi görüldüğü ve uygulanan voltajın artması ile sistem verimini %30 kadar artırılabilceği gözlenmiştir. Bunun yanında TKM giderimini %60 mertebesinde kaldığı görülmüştür (Şekil 6.36).

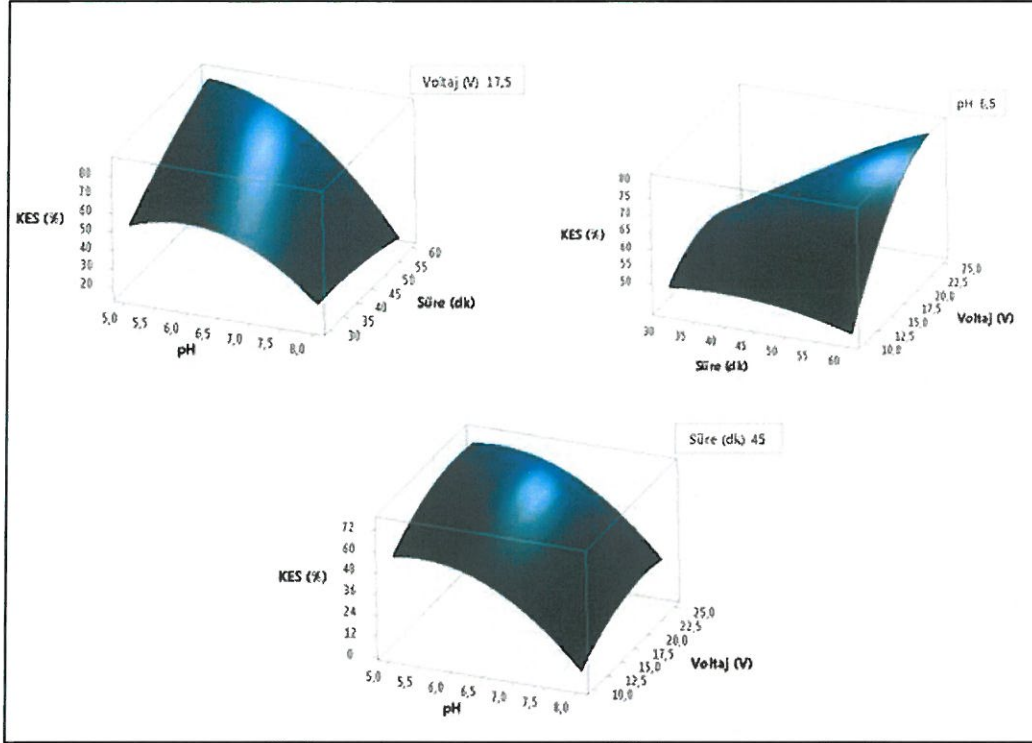


Şekil 6.37. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm)



Şekil 6.38. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm)

5 cm grafit elektrot kullanılarak yapılan çalışmada diğer elektrot türlerine benzer olarak işlem sonunda alınan çıkış suyunda ÇKOI konsantrasyonunun arttığı ve voltaj ve işletim süresinin olumlu etkilediği belirlenmiştir (Şekil 6.37). Viskozite değeri ise TKM değeri gibi büyük oranda etkilenmediği görülmüştür. 5 cm elektrot çapı kullanılarak oluşturulan 4,3 cm elektrot arası mesafenin susuzlaştırma parametreleri üzerinde ciddi bir etki yapmadığı gözlenmiştir (Şekil 6.38).

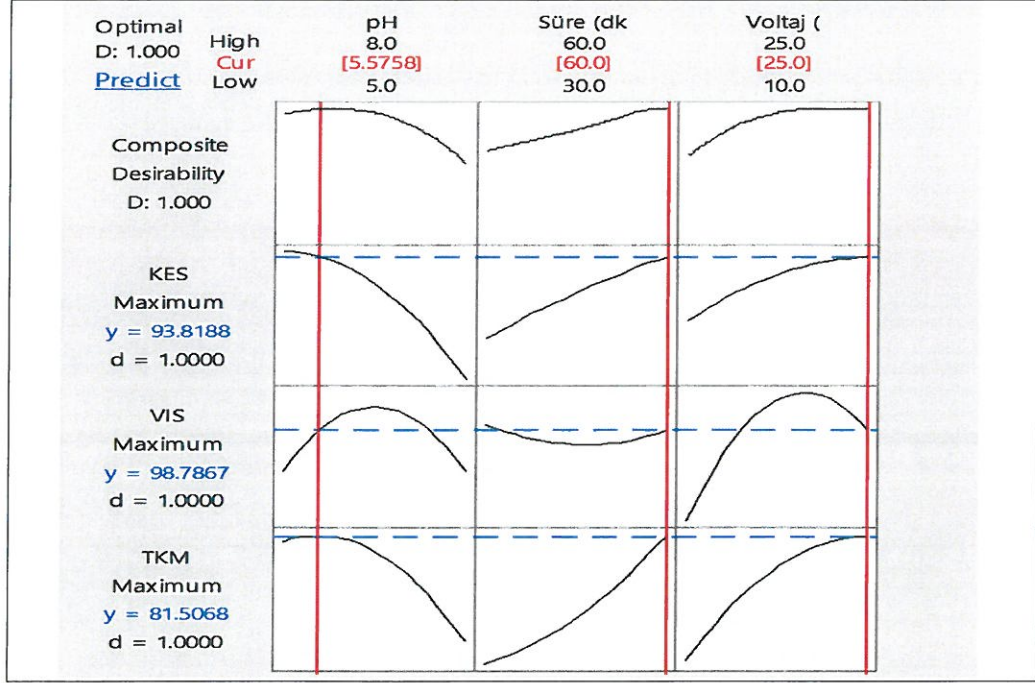


Şekil 6.39. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (grafit, 5 cm)

KES değeri değişimi gözlemlendiğinde asidik pH seviyelerinde olumlu olarak kapiler emme süresi azalarak verimin yükseldiği bazı pH değerlerinde ise olumsuz etki ettiği görülmüştür. %50 oranında KES değeri azaldığı nötral pH değerinde ise sistemin 30 dk gibi kısa süreli çalışmasının yeterli olacağı gözlenmiştir (Şekil 6.39).

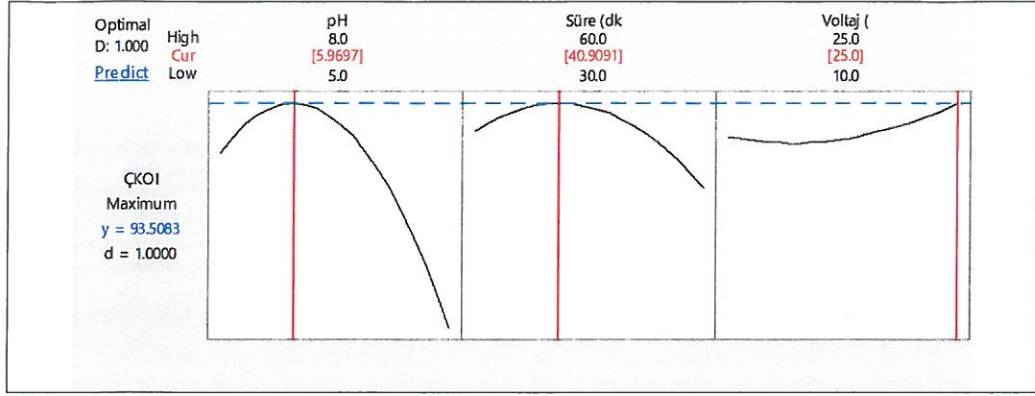
6.5.1 Grafit 50 Optimizasyon Çalışması

Deneysel çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



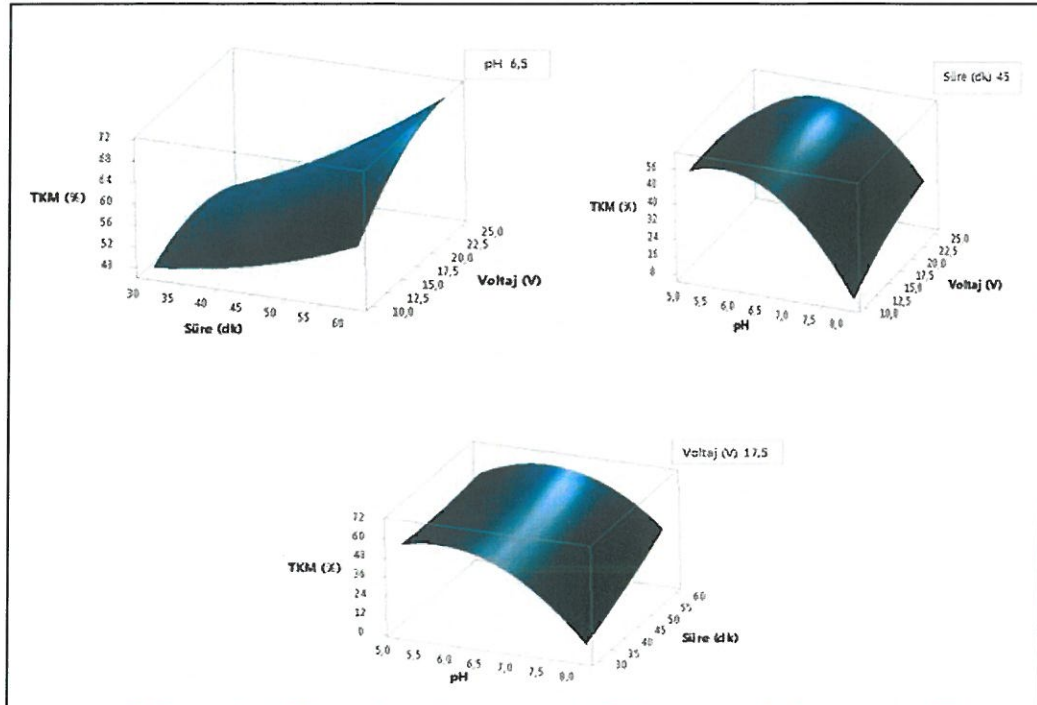
Şekil 6.40. Grafit 50 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için grafit 5 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:5, süre:60 dakika, voltaj:25 volt olarak gözlemlenmiştir.

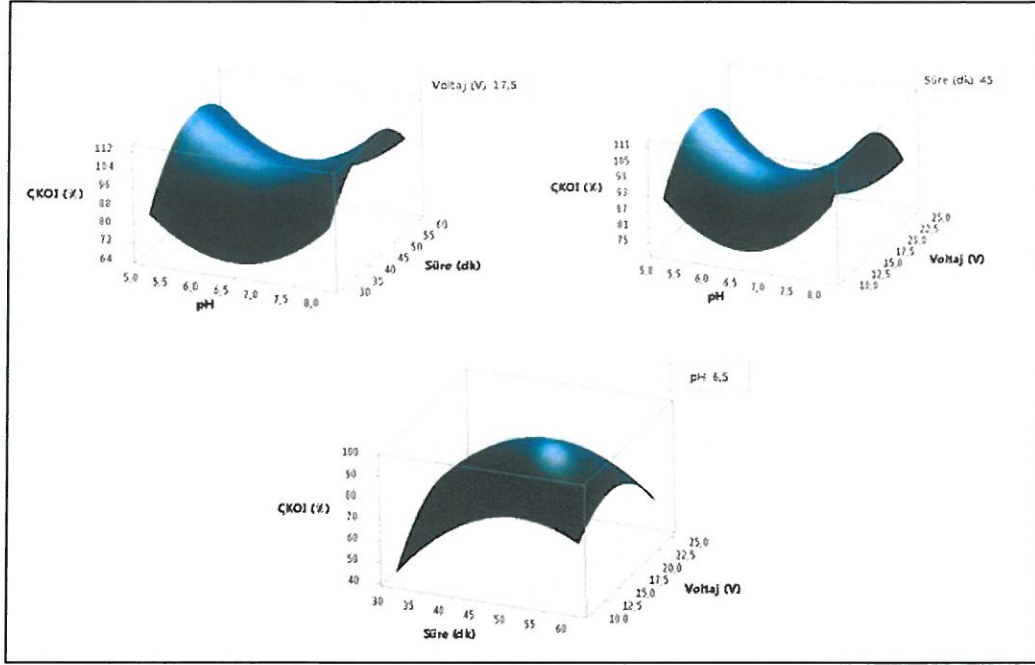


Şekil 6.41. Grafit 50 ÇKOI salınımı

Optimizasyon çalışmalarında ise çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 93'e ulaştığı ($y=93,5083$) ve bu değere pH:8, süre:60 dakika, voltaj:25 volt uygulandığında ulaştığı görülmüştür.



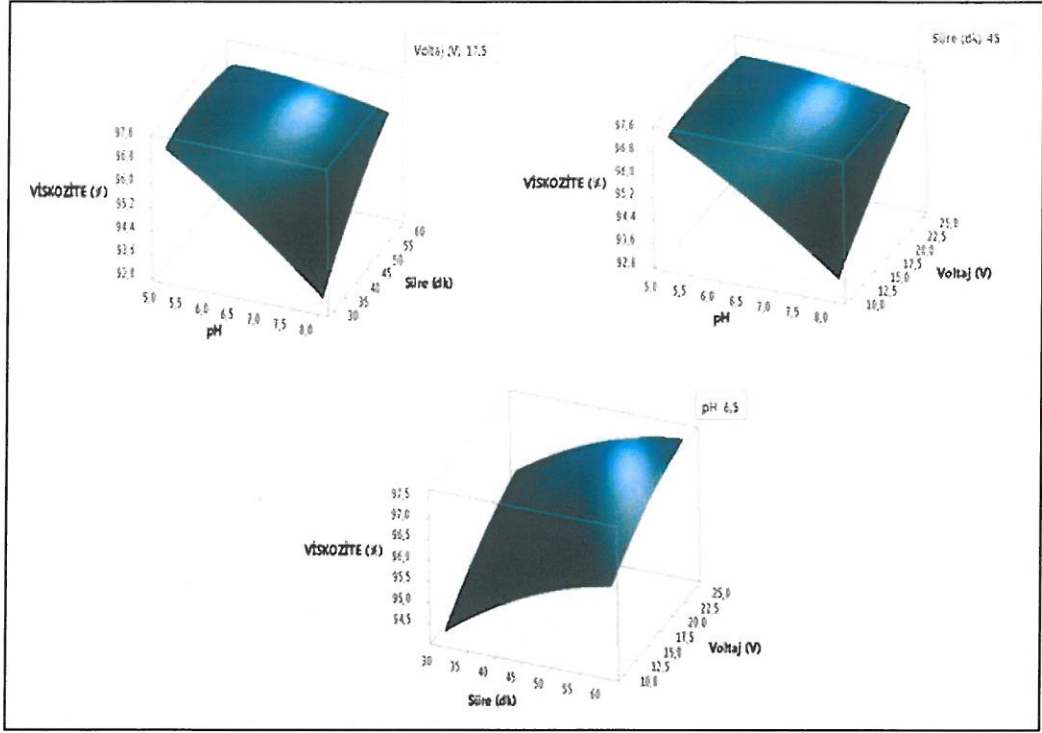
Şekil 6.42. Maya endüstrisi arıtma çamurunun TKM değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm)



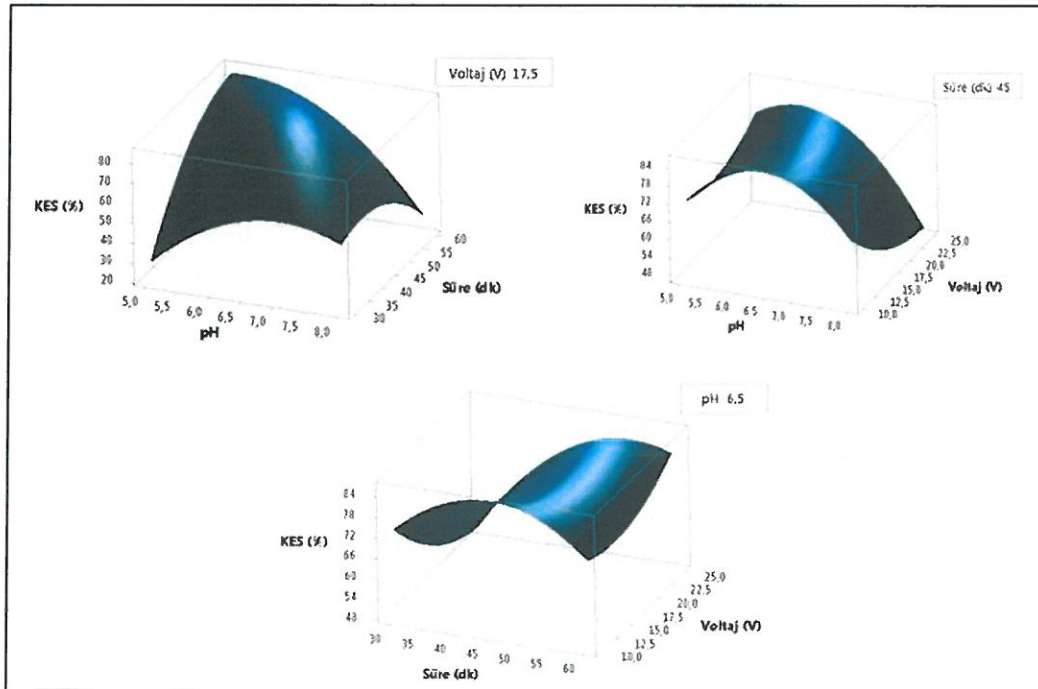
Şekil 6.43. Maya endüstrisi arıtma çamurunun ÇKOİ değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm)

Grafit 9 cm elektrot çapında TKM değeri elektrot çapı 5 cm gibi en yüksek %60 değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Buradan elektrotlar arasındaki mesafenin değiştirilmesinin sistemin TKM giderimi üzerinde önemli bir etki yapmadığı gözlenmiştir (Şekil 6.42). Aynı zamanda sistemin ÇKOİ konsantrasyonunu ise voltaj ve işletim süresine bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir (Şekil 6.43).

Viskozite değeri sistemin voltajın ve işletim süresinin yüksek tutulması durumunda etkili olarak azaldığı (Şekil 6.43), KES değeri 5 cm grafit elektrot çapına göre %20 daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 6.44).



Şekil 6.44. Maya endüstrisi arıtma çamurunun viskozite değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm)

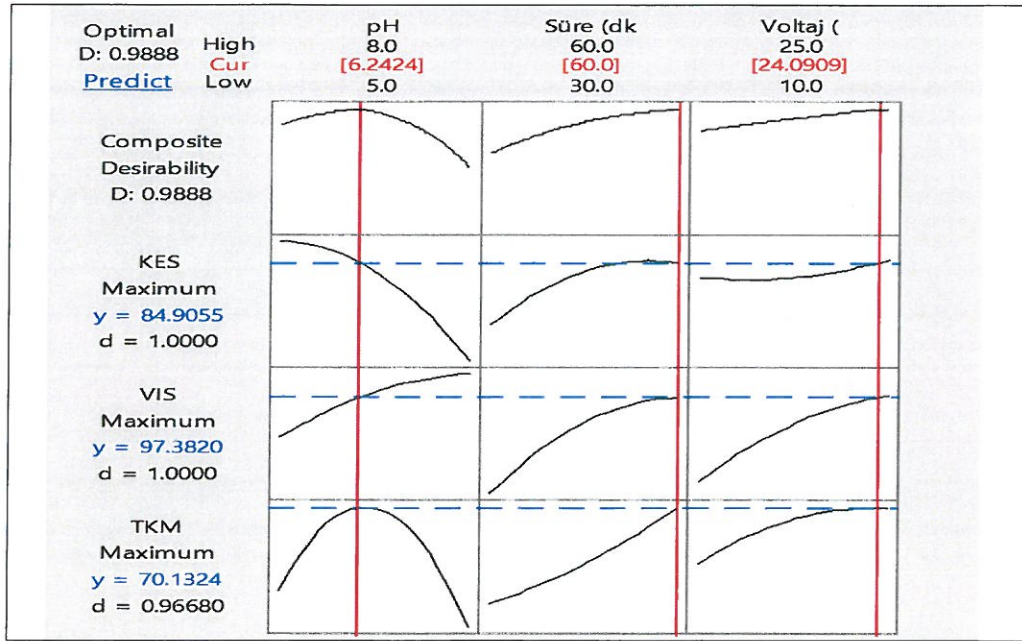


Şekil 6.45. Maya endüstrisi arıtma çamurunun KES değişiminin incelenmesi (grafit, 9 cm)

Grafit düşük maliyetli bir malzemedir ve yaygın olarak çamurun elektro-susuzlaştırılmasında anot olarak kullanılır. Ancak normal grafit, mekanik strese dayanabilir ama basınç koşullarında bükülebilir. Son zamanlarda anodun korozyonuna engel olarak Ir_2O_3 gibi karışık metal oksit ile kaplanmış titanyum kaplatılarak engellenmiştir (Tuan, 2012).

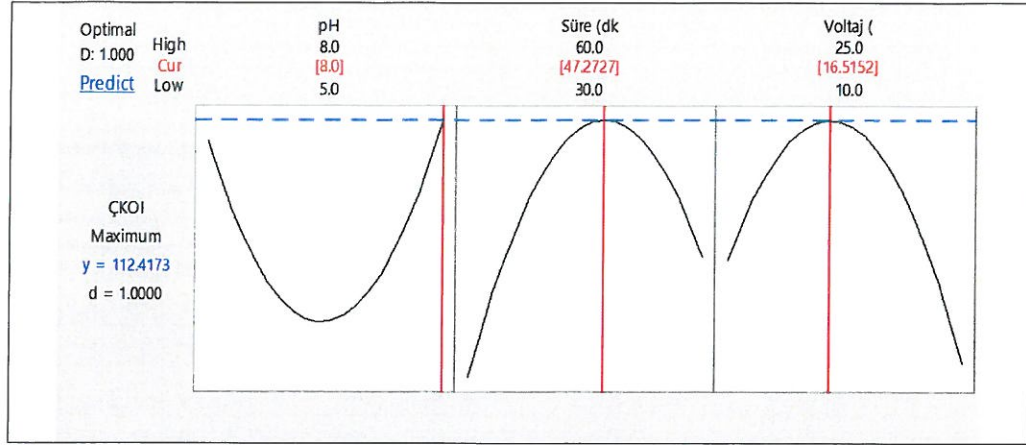
6.5.2 Grafit 90 Optimizasyon Çalışması

Deneysel çalışmalarda bulunan sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilip bağımsız değişkenlerin optimize edilmesi; üzerinde çalışılan susuzlaştırılabilirlik parametrelerinin (KES, viskozite, TKM) maksimum değerlerini saptayabilmektir.



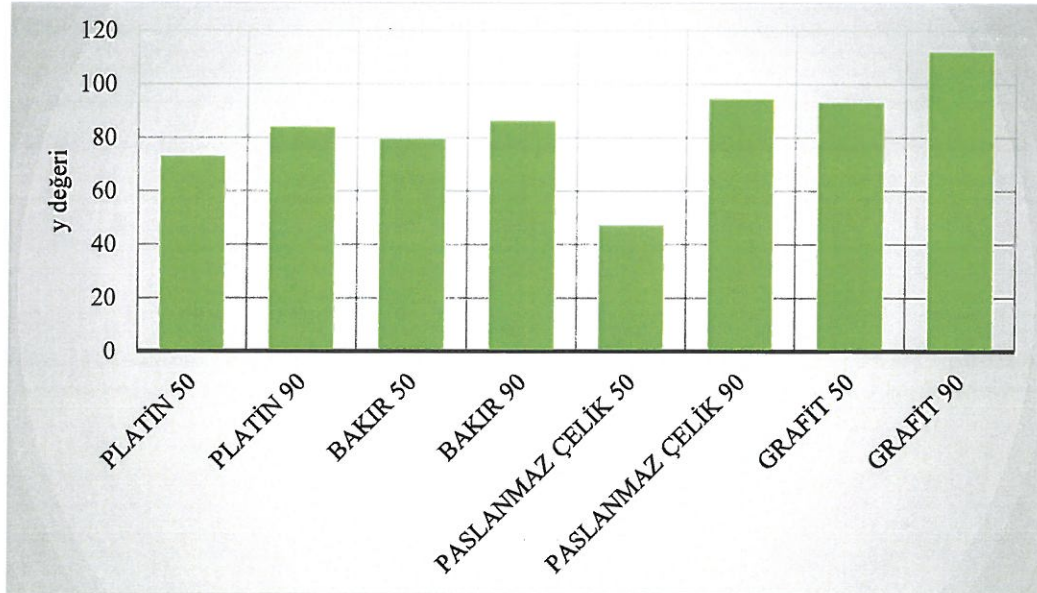
Şekil 6.46. Grafit 90 TKM, viskozite ve TKM optimizasyonları

KES, viskozite ve TKM susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için grafit 90 elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri; pH:6, süre:60 dakika, voltaj:24 volt olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.47. Grafit 90 ÇKOİ salınımı

Optimizasyon çalışmalarında ise çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımının en yüksek olduğu değerler araştırıldığında maksimum olarak % 112'e ulaştığı ($y=112,4173$) yani %100 olduğu ve bu değere pH:8, süre:47 dakika, voltaj:16 volt uygulandığında ulaştığı görülmüştür.



Şekil 6.48. ÇKOİ Salınım Grafiği

6.6 Mikrodalga Radyasyonunun İşlem Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Elektro-susuzlaştırma üzerinde mikrodalga etkisinin belirlenebilmesi için elektro-susuzlaştırma prosesine tabi tutulmadan önce numuneler deneysel çalışmamızda bulunan değerlere dayanılarak ham çamur numunesi mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılmış ve daha sonra model reaktöre giriş çamuru olarak verilmiştir. Bir dakika boyunca 960 W mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılmıştır. Mikrodalga gücü ve süre daha önce AİBÜ-BAP (2009.09.04.318 nolu proje) tarafından desteklenen proje kapsamında belirlenmiştir.

6.6.1 Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda Metal İzlenmesi

Ham çamur numunesi hiçbir muameleye tutulmadan ve mikrodalga radyasyonuna maruz bırakıldıktan sonra model reaktörden alınan çıkış numuneleri üzerinde metal konsantrasyonları izlenerek mikrodalga işlenmesinin elektro-susuzlaştırma performansı üzerindeki verimi ortaya koyulmuştur (Çizelge 6.2).

Maya endüstrisi arıtma çamurunun sahip olduğu kalsiyum miktarı elektrot türlerine göre azalma artma göstermiştir. Mikrodalga etkisi incelendiğinde ise ham arıtma çamurundan daha yüksek değerler gözlemlendiği ve buna karşılık sistemin ağır metal salınımını daha çok desteklediği belirlenmiştir.

Elektrot türlerine göre sodyum miktarları üzerinde mikrodalga etkisi incelendiğinde ham arıtma çamurlarına karşılık artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda diğer parametrelere de bakıldığında mikrodalga etkisi ile arıtma çamurlarının salınım gösterdiği görülmüştür.

Platin elektroduna bakıldığında arıtma çamuru içeriğinde alüminyum miktarının ölçülemediği görülmüştür. Bakır 90 ve Grafit 50 elektrotlarına demir ve kadmiyum içeriğine rastlanmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 6.2. İşlemden geçmemiş ve mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılan numunelerde metal izlenmesi

Elektrot türü	Ca (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Ni (mg/L)	Fe (mg/L)
HAM	46,5±0,4	862±18	254±4	0,18±0,003	0,011±0,002	0,048±0,003	0,165±0,09
HAM	50,4±0,4	749±14	270±6	0,126±0,001	8,67±0,7µg	0,040±0,001	0,37±0,03
Bakır 50	191±2	887±18	300±7	1,93±0,03	-	0,045±0,001	0,065±0,005
Bakır 50 MD	225±1	834±5	298±3	12,2±0,2	0,03±0,001	0,32±0,03	-
Bakır 90	33,1±0,6	898±12	303±3	1,09±0,03	-	4,37±0,36	-
Bakır 90 MD	155±4	847±3	305±6	0,02±0,001	0,028±0,002	0,019±0,001	-
Grafit 50	432±2	843±28	273±6	1,62±0,03	-	0,207±0,004	-
Grafit 50 MD	407±4	763±4	279±6	35,3±0,8	0,054±0,001	0,23±0,02	1,18±0,02
Grafit 90	342±4	821±24	274±9	42,4±0,8	0,03±0,001	1,71±0,10	1,59±0,05
Grafit 90 MD	421±3	801±14	287±5	48±0,5	0,112±0,002	0,91±0,04	2,62±0,01
Paslanmaz Çelik-50	90±1	842±36	227±9	0,066±0,005	17,5±0,1	3,027±0,007	0,24±0,02
Paslanmaz Çelik -50 MD	327±4	844±24	318±12	1,13±0,02	29,6±0,3	9,90±0,05	0,503±0,008
Paslanmaz Çelik -90	156±3	896±16	276±4	0,135±0,005	37,2±0,6	2,86±0,05	0,075±0,005
Paslanmaz Çelik -90 MD	493±14	842±24	310±8	0,086±0,003	0,461±0,004	1,10±0,03	0,226±0,014
Platin 50	85±2	851±7	249V1	0,033±0,001	24,4±0,2	15,7±0,2	-
Platin 50 MD	273±4	863±54	331±17	1,89±0,02	55±1	51±1	0,221±0,006
Platin 90	158±2	922±52	318±18	0,082±0,007	68±1	34,7±0,5	0,042±0,004
Platin 90 MD	378±7	900±24	341±3	0,354±0,008	75±1	37,0±0,9	0,207±0,015

Çizelge 6.2. devamı

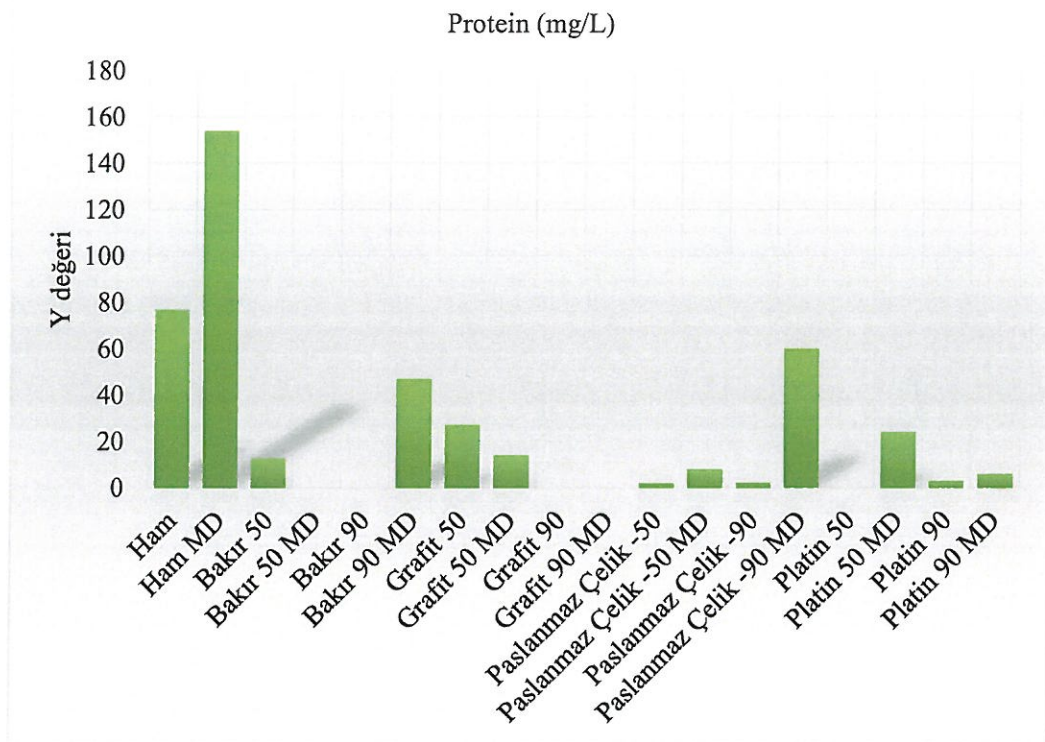
Elektrot türü	Zn (mg/L)	Al (mg/L)	Co (mg/L)	Ag (mg/L)	Cd (mg/L)
HAM	0,074±0,002	-	2,65±0,008	0,70±0,09	-
HAM	0,057±0,001	-	7,65±0,30	0,40±0,02	0,35±0,02
Bakır 50	0,038±0,002	-	-	0,45±0,03	-
Bakır 50 MD	0,182±0,006	0,095±0,008	-	1,26±0,06	0,64±0,005
Bakır 90	0,025±0,001	0,085±0,004	1,65±0,10	-	-
Bakır 90MD	0,151±0,004	0,106±0,007	8,38±0,32	0,59±0,04	-
Grafit 50	0,25±0,01	-	6,69±0,42	0,25±0,002	-
Grafit 50 MD	1,056±0,008	0,48±0,003	28,4±1,1	0,94±0,07	1,31±0,14
Grafit 90	3,04±0,006	0,73±0,04	27,9±0,6	1,13±0,04	1,19±0,04
Grafit 90 MD	3,50±0,03	0,85±0,006	21,9±0,2	1,33±0,10	1,79±0,15
Paslanmaz Çelik-50	0,130±0,001	0,16±0,02	28,1±1,1	1,10±0,08	0,86±0,05
Paslanmaz Çelik -50 MD	0,40±0,01	0,085±0,004	232±8	0,75±0,05	0,53±0,05
Paslanmaz Çelik -90	0,080±0,004	0,127±0,010	57±1	1,21±0,12	-
Paslanmaz Çelik -90 MD	0,084±0,005	-	25,2±1,0	0,46±0,03	-
Platin 50	0,056±0,003	-	30,9±0,2	0,82±0,05	1,38±0,13
Platin 50 MD	0,394±0,037	-	327±2	0,84±0,05	0,57±0,04
Platin 90	0,468±0,004	-	91±1	0,67±0,04	-
Platin 90 MD	0,52±0,01	-	265±8	1,60±0,08	-

6.6.2 Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda EPS İzlenmesi

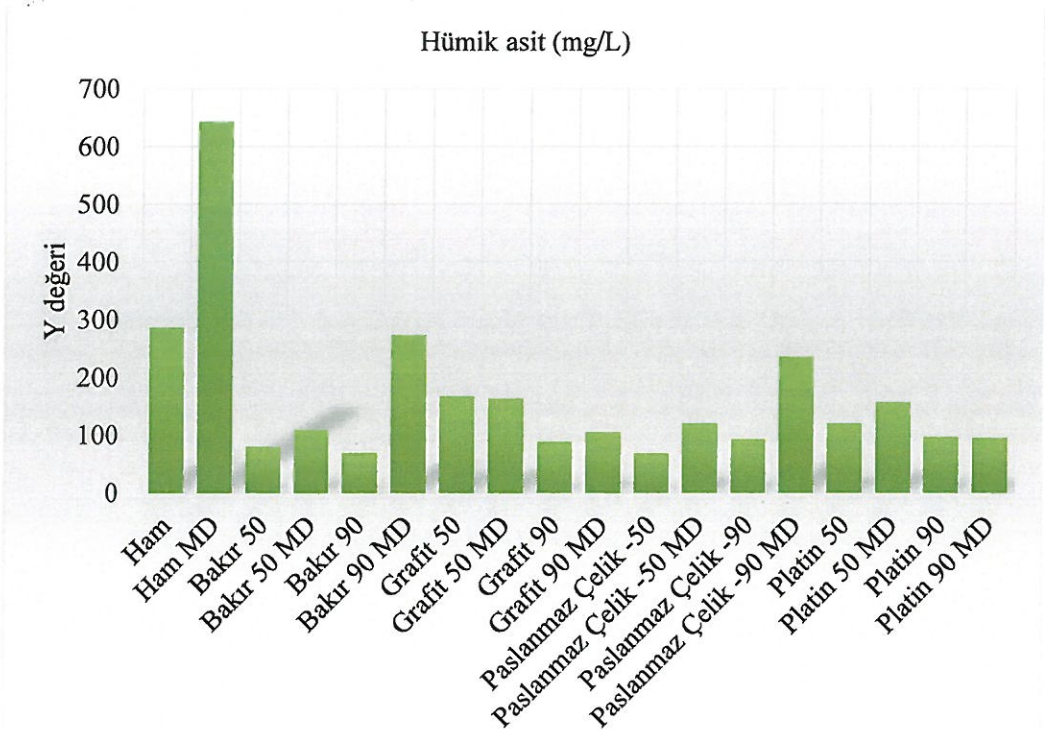
Herhangi bir işleme tabi tutulmadan ve mikrodalga radyasyonuna maruz bırakıldıktan sonra elektro-susuzlaştırma işlemine tabi tutulan arıtma EPS içeriği aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3. EPS (protein, hümik asit, karbonhidrat ve polisakkarit) izlenmesi

Elektrot türü	Protein (mg/L)	Hümik asit (mg/L)	Karbonhidrat (mg/L)	Polisakkarit (mg/L)
Ham	76,80928	286,2526	25,61654	237,9047
Ham MD	153,90976	643,052	30,36774	154,7664
Bakır 50	12,64342	80,0744	32,94731	84,0021
Bakır 50 MD	Belirlenmedi*	108,4702	28,04013	53,45359
Bakır 90	Belirlenmedi*	68,963	27,54821	59,64063
Bakır 90 MD	46,88212	272,672	29,71985	131,1783
Grafit 50	27,09976	166,4964	31,31559	58,09387
Grafit 50 MD	13,91152	162,7926	27,58421	89,80245
Grafit 90	Belirlenmedi*	87,482	27,66819	77,81506
Grafit 90 MD	Belirlenmedi*	104,7664	28,10012	71,24133
Paslanmaz Çelik -50	1,73776	67,7284	28,91599	45,71979
Paslanmaz Çelik -50 MD	7,82464	119,5816	29,75585	79,36182
Paslanmaz Çelik -90	1,99138	92,4204	27,36824	86,70893
Paslanmaz Çelik -90 MD	59,81674	235,634	29,15595	119,1909
Platin 50	Belirlenmedi*	119,5816	29,23993	40,69282
Platin 50 MD	24,05632	156,6196	28,00414	121,511
Platin 90	2,75224	96,1242	27,26026	70,85464
Platin 90 MD	5,79568	94,8896	30,46373	72,4014



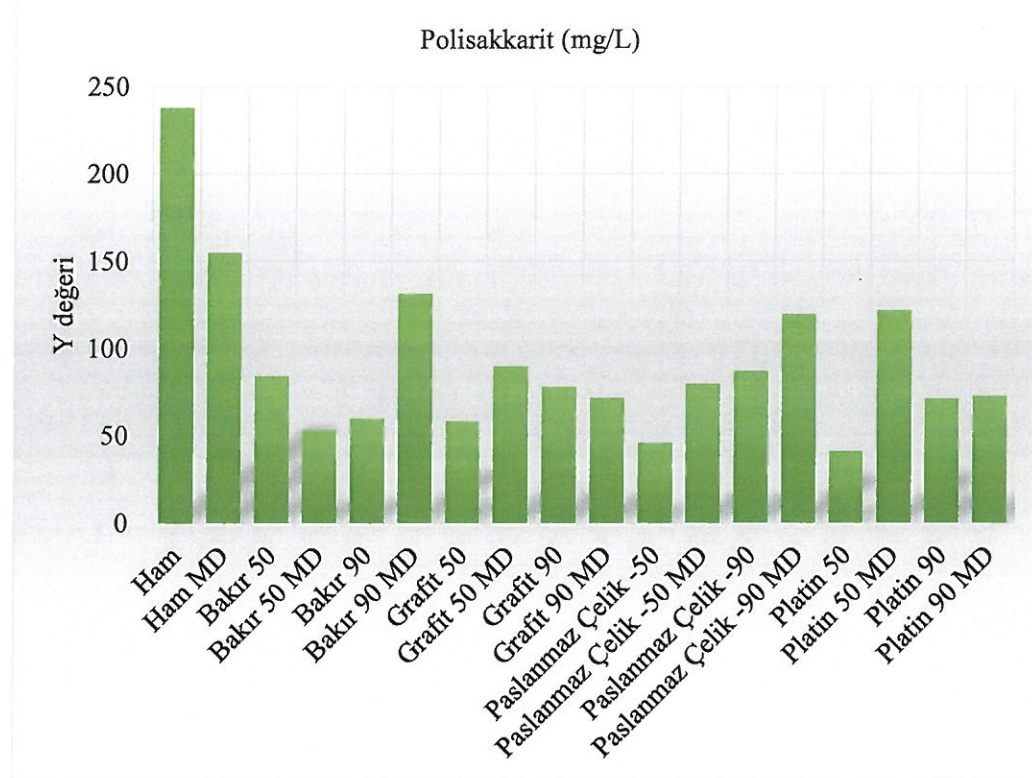
Şekil 6.49. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Protein grafiği



Şekil 6.50. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Hümikasit grafiği

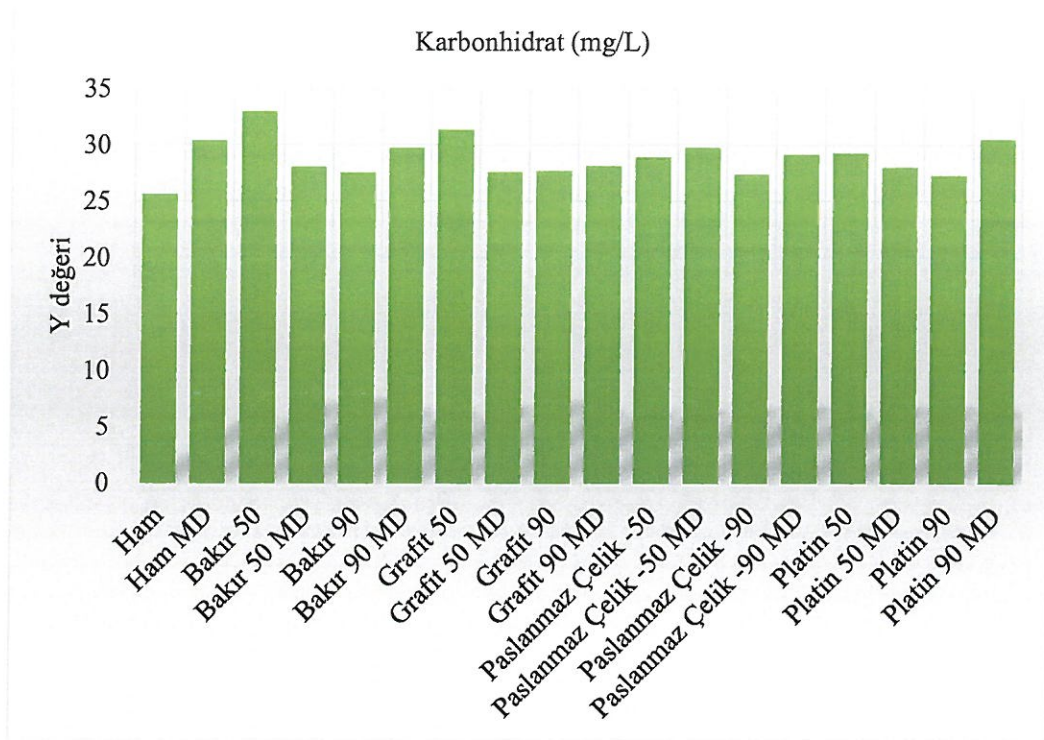
Maya endüstrisi ham arıtma çamurunda protein salınımına bakıldığında mikrodalga etkisi ile daha fazla artış beklenmiştir. Çoğunlukla protein salınım elektrot türlerine bakıldığında azalma gösterdiği görülmüştür, mikrodalga etkisi ile arttığı gözlenmiştir (Şekil 6.49).

Ham arıtma çamuru EPS hümkik asit miktarı (286,25 mg/L)'na karşılık mikrodalga uygulaması ile hümkik asit miktarlarında artış gözlenmiştir (Şekil 6.50).



Şekil 6.51. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Polisakkarit grafiği

Yapılan deneysel çalışmalarda polisakkarit miktarında ham arıtma çamuru miktarı 237,90 mg/L olarak belirlenmiştir. Mikrodalga uygulaması ile polisakkarit miktarının genellikle arttığı, ancak çoğunlukla ham arıtma çamuruna karşılık azalma gösterdiği görülmüştür (Şekil 6.51).



Şekil 6.52. Maya endüstrisi arıtma çamuru EPS Karbonhidrat grafiği

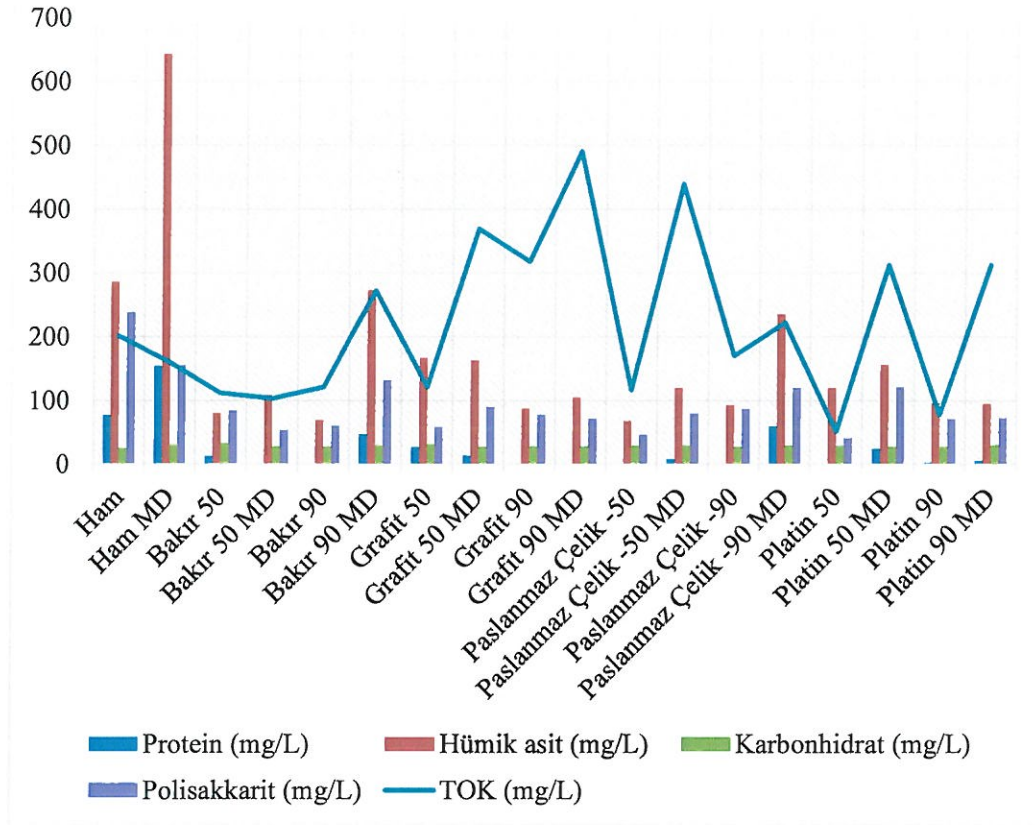
Çalışmalarda ham giriş çamurunun EPS karbonhidrat miktarı (25.61) çıkış sularında ise artış gösterdiği görülmüştür. Çoğunlukla EPS karbonhidrat miktarı $28,65 \pm 2,26$ değerleri arasındadır. Aynı zamanda mikrodalga işlemine tabi tutulmuş arıtma çamuru ile yapılan elektrik alan uygulamalarında ise EPS karbonhidrat miktarı $29,02 \pm 1,10$ değerleri arasındadır (Şekil 6.52).

6.6.3 Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda TOK İzlenmesi

Ham ve mikrodalga radyasyonuna maruz kalmış numuneler model reaktörde elektrik alanı işlemi uygulandıktan sonra alınan çıkış suyunda bulunan Toplam Organik Karbon (TOK) konsantrasyonları çizelge 6.4.'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. İşlemden geçmemiş ve mikrodalga radyasyonuna maruz bırakılan numunelerde Toplam Organik Karbon izlenmesi

Çamur türü	Elektrot türü	TOK (mg/L)
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Ham	201
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Ham MD	160
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 50	111
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 50 MD	103
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 90	121
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 90 MD	272
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 50	121
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 50 MD	369
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 90	318
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 90 MD	490
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik -50	116
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik -50 MD	439
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik -90	170
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik -90 MD	222
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 50	51
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 50 MD	312
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 90	77
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 90 MD	312



Şekil 6.53. EPS ile Toplam Organik Karbon değerleri karşılaştırması

Çalışmalarda ham giriş arıtma çamurunun TOK değeri (201) çıkış sularında azalma gösterdiği gözlenmiştir. Çoğunlukla TOK $142,88 \pm 79,26$ değerleri arasındadır. Aynı zamanda mikrodalga işlemine tabi tutulmuş arıtma çamuru ile yapılan elektrik alan uygulamalarında ise TOK $297,66 \pm 125,34$ değerleri arasındadır (Çizelge 6.4.). Yapılan deneysel çalışmalarda TOK değerinin elektrot türlerine bakıldığında azalma gösterdiği, ancak mikrodalga işlemine tabi tutulduğunda ham arıtma çamuru değeri (160) çıkış sularında artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir.

6.6.4 Ham ve Mikrodalga Radyasyonuna Maruz Bırakılan Numunelerde İşlem Sonunda Zeta Potansiyeli ve pH İzlenmesi

Ham ve mikrodalga radyasyonuna maruz kalmış numuneler model reaktörde elektrik alanı işlemi uygulandıktan sonra alınan çıkış suyunda bulunan Zeta Potansiyelleri ve pH değerleri çizelge 6.5.'de verilmiştir.

Çizelge 6.5. İşlemden geçmemiş numunelerde zeta potansiyeli ve pH

Çamur türü	Elektrot türü	Zeta potansiyeli (mV)	pH
Maya endüstrisi arıtma çamuru	HAM	-15,2	5,77
Maya endüstrisi arıtma çamuru	HAM MD*	-16,3	5,82
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 50	-2,60	5,73
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 50 MD*	-9,03	5,71
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 90	-9,75	5,78
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Bakır 90 MD*	-6,88	5,80
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 50	-11,7	5,71
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 50 MD*	okunmadı	5,64
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 90	-19,3	5,57
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Grafit 90 MD*	okunmadı	5,26
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik-50	okunmadı	5,43
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik -50 MD*	-2,72	5,45
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik -90	-9,19	5,61
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Paslanmaz Çelik -90 MD*	-10,7	5,51
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 50	-9,50	5,68
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 50 MD*	okunmadı	5,53
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 90	-0,596	5,62
Maya endüstrisi arıtma çamuru	Platin 90 MD*	-1,49	5,54

Ham Maya endüstri arıtma çamurunun zeta potansiyeli -15.2 olarak belirlenmiştir. Çalışmalarda elektrik alanı uygulamasının zeta potansiyeli üzerinde çoğunlukla tüm elektrot türleri için yükseldiği sıfır değerine yaklaştığı görülmüştür. Böylece çamurun susuzlaştırılabilirlik potansiyelinin yükseldiği düşünülmektedir.

Çalışmalarda ham giriş çamurunun pH değeri (5.77) çıkış sularında da çok fazla değişime uğramadığı gözlenmiştir. Çoğunlukla pH $5,65 \pm 0,11$ değerleri arasındadır. Aynı zamanda mikrodalga işlemine tabi tutulmuş arıtma çamuru ile yapılan elektrik alan uygulamalarında ise pH $5,84 \pm 0,18$ değerleri arasındadır (Çizelge 6.5).

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda maya endüstrisi arıtma çamurlarının elektrik alanı uygulanarak susuzlaştırma kapasitesinin arttırılabileceği sonucuna varılmıştır. Susuzlaştırılabilirliği gösteren başlıca parametrelerden biri olan KES değeri incelendiğinde 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 gözlenmiştir. pH 6,5'ta ise işletim süresinin ve uygulanan voltajın artmasının olumlu etkilendiği görülmüştür. Yüksek voltaj ve uzun işletme süresinin uygulandığı etaplarda; giriş çamuru ile çıkış çamuru sıcaklıkları arasında fark oluştuğu gözlemlenmiştir. Viskozitenin sıcaklık parametresi ile ters orantılı olduğundan sıcaklık artışının viskozite değerinin düşürdüğü dikkate alınarak, viskozite $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ olacak şekilde sıcaklık değeri tüm çamur numunelerinde sabit tutularak belirlenmiştir. Sabit 45 dakika işletme süresi uygulanarak pH ve voltaj değişimleri karşılaştırıldığında, bazik pH değerinden asidik değerlere gidildikçe verimin arttığı, voltaj değerlerindeki değişimlerin verim üzerinde önemli bir değişim sağlamadığı tespit edilmiştir. 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.

Tüm elektrot türlerinde KES değerleri karşılaştırıldığında platin elektrodu ile yapılan çalışmalarda platin 5 cm elektrodu için %47, platin 9 cm elektrodu için %28 olduğu; bakır elektrodu ile yapılan çalışmalara bakıldığında bakır 5 cm için %52 ve bakır 9 cm elektrodou için %70 olduğu görülmüştür. Optimizasyon grafiklerine bakıldığında susuzlaştırma parametrelerinin en iyi verim sağladığı elektrot türleri grafit 5 ve 9 cm çaplı elektrotlar olduğu görülmüştür. Tüm elektrot türleri arasında KES parametresi değerleri grafit 5 cm için %93, grafit 9 cm için %84 olduğu gözlenmiştir. Elektrotlar arasındaki mesafe kısaldıkça, yani anot ve katot elektrotları birbirine yakınlaştıklarında susuzlaştırma verimini kötü etkilemekte ve KES verimini düşürdüğü ön görülmüştür. Grafit 5 cm elektrodunun en verimli olduğu çalışma

performansı pH 5.57, 60 dakika işletim süresi ve 25 volt arasında çalışması gerektiği anlaşılmaktadır.

9 cm çapındaki tüm elektrot türleri için yapılan çalışmalar sonucunda ise TKM değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. 5 cm çapındaki elektrotlara nazaran 9 cm çapında elektrotlar ile çalışıldığında %10-20 oranında azalma meydana geldiği gözlenmiştir.

Ham çamura ait viskozite değerine göre çamura bağlı su, çamur bünyesinden ayrıldığından dolayı model reaktörden alınan çıkış suyu örneklerinde platin 5 cm elektrodu viskozite değeri %73 iken, platin 9 cm elektrodunun %45 değerine azaldığı görülmüştür. Bakır elektrodunda viskozite değerleri artış gösterirken, grafit elektrotları birbirine yaklaştırıldığında viskozite değerlerinin etkilenmediği belirlenmiştir. KES, viskozite ve TKM değerleri için genel olarak 5 cm grafit elektrot kullanılmasının uygun olacağı görülmüştür. Bakır 9 elektrodunda işletim süresi ve voltaj artışı sistem performansını olumlu etkilediği görülmüştür, grafit 9 cm elektrotlarında da işletim süresi ve voltaj artışı sistem performansını kötü etkilemiştir.

KES, viskozite ve TKM çamurun susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için platin 5 ve 9 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri platin 5 cm elektrodu için pH:5, süre:49 dakika, voltaj:16 volt; platin 9 cm elektrodu için pH:7, süre:34 dakika, voltaj:25 volt olarak belirlenmiştir.

Optimizasyon çalışmalarında çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımı incelendiğinde en yüksek olduğu değerler belirlendiğinde platin 5 cm elektrodu için maksimum olarak % 73'e ulaştığı ($y=73.4$); platin 9 cm elektrodu için ise maksimum olarak % 84'e ulaştığı ($y=84.2$) gözlemlenmiştir.

KES, viskozite ve TKM çamurun susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için bakır 5 ve 9 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız

değişkenlerin optimum değerleri bakır 5 cm elektrodu için pH:8, süre:30 dakika, voltaj:10 volt; bakır 9 cm elektrodu için pH:5, süre:38 dakika, voltaj:15 volt olduğu görülmüştür.

Optimizasyon çalışmalarında çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımı incelendiğinde en yüksek olduğu değerler belirlendiğinde bakır 5 cm elektrodu için maksimum olarak % 79'a ulaştığı ($y=79,8$); bakır 9 cm elektrodu için ise maksimum olarak % 86'a ulaştığı ($y=86,5$) belirlenmiştir.

KES, viskozite ve TKM çamurun susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için paslanmaz çelik 5 ve 9 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri paslanmaz çelik 5 cm elektrodu için pH:6, süre:60 dakika, voltaj:25 volt; paslanmaz çelik 9 cm elektrodu için pH:6, süre:60 dakika, voltaj:14volt olduğu gözlenmiştir.

Optimizasyon çalışmalarında çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımı incelendiğinde en yüksek olduğu değerler incelendiğinde paslanmaz çelik 5 cm elektrodu için maksimum olarak % 47'e ulaştığı ($y=47,5$); paslanmaz çelik 9 cm elektrodu için ise maksimum olarak % 94'e ulaştığı ($y=94,7$) görülmüştür

KES, viskozite ve TKM çamurun susuzlaştırılabilirliğini tanımlayan parametreler olduğu için grafit 5 ve 9 cm elektrodu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda her üç parametrenin de alabileceği maksimum değerler gözetilerek yapılan optimizasyon çalışmasında deneysel çalışmalarda odaklanılan bağımsız değişkenlerin optimum değerleri grafit 5 cm elektrodu için pH:5, süre:60 dakika, voltaj:25 volt; grafit 9 cm elektrodu için pH:6, süre:60 dakika, voltaj:24 volt olarak belirlenmiştir..

Optimizasyon çalışmalarında çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı salınımı incelendiğinde en yüksek olduğu değerler incelendiğinde grafit 5 cm elektrodu için maksimum olarak % 93'e ulaştığı ($y=93,5$); grafit 9 cm elektrodu için ise maksimum olarak % 112'e ulaştığı ($y=112,4$) yani %100 olduğu görülmüştür.

Maya sektörüne ait arıtma çamuru bazik ve akışkanlığı yüksek özelliğe sahiptir. Proje kapsamında tasarlanmış olan model reaktörde işleme maruz bırakıldığında tüm elektrot türlerinde yaklaşık olarak %50-70 arasında TKM giderimi ve %30-50 arasında KES süresinde kısalma gözlenmiştir. Ayrıca bakır elektrot kullanılmasının sistem verimini artırdığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, tez çalışması kapsamında grafit 5 cm elektrodu ile çalışılması önerilmektedir. Grafit 5 cm elektrodu kullanılarak maksimum susuzlaştırma performansına ulaşılacağı düşünülmektedir.

Ham ve mikrodalga ile işlenmiş arıtma çamurlarının model reaktörde işlenmesi sonunda alınan çıkış suyunda metal izlemesi yapıldığında bakır elektrotun sistemde çözülmediği ve çıkış suyuna geçtiği görülmüştür. Diğer elektrot türlerinin ise minimal düzeyde çözülmediği gözlenmiştir. Ayrıca uygulanan mikrodalga işleminin çamur bünyesinde bulunan metallerin çözülmesine neden olduğu da tespit edilmiştir. Aynı zamanda çamurun EPS miktarı protein, hümitik asit, karbonhidrat ve polisakkarit analizleri yapılarak belirlenmiş ve uygulanan işlemlerin bu maddelerin konsantrasyonlarına önemli derece de etkileyerek arttığı gözlenmiştir.

Çalışmalarda elektrik alanı uygulamasının zeta potansiyeli üzerinde etkisi incelendiğinde çoğunlukla tüm elektrot türleri için yükseldiği sıfır değerine yaklaştığı görülmüştür. Çoğunlukla pH 5,65±0,11 değerleri arasındadır. Aynı zamanda mikrodalga işlemine tabi tutulmuş arıtma çamuru ile yapılan elektrik alan uygulamalarında ise pH 5,84±0,18 değerleri arasında olduğu belirlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda TOK değerinin elektrot türlerine bakıldığında elektrik alan uygulandığında azalma gösterdiği, ancak mikrodalga işlemine tabi tutulduğunda ham arıtma çamuru değeri çıkış sularında artışa sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; maya endüstrisine ait arıtma çamurlarının elektrik alanı kullanılarak susuzlaştırılacağı, çamurun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin susuzlaştırma verimini etkilediği, tüm elektrot türlerinin bu amaçla kullanılabileceği ancak sistem verimi açısından grafit 5 cm çaplı elektrodun daha avantajlı olduğu söylenebilir.

8. KAYNAKLAR

- Filibeli A, Erden G (2010) "Ultrasonic pre-treatment of biological sludge: consequences for disintegration, anaerobic biodegradability, and filterability", *J Chem Technol Biotechnol*, 85; 145-150.
- APHA AW (2005) "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed.*", Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Ayol A (2007) "Aritma çamuru flok ayrıştırma mekanizmalarının çamur su verme özellikleri üzerine etkisi: Enzimlerle arıtım yöntemi", *İTÜ Dergisi/e Su Kirlenmesi Kontrol, Cilt:17 Sayı:3*.
- Ayol A (2005a) "Enzymatic treatment effects on dewaterability of anaerobically digested biosolids- I: Performance evaluations", *Process Biochemistry*, 40, 7, 2427-2434.
- Bien J (1991) "The application of ultrasound in the preparation of sludge for its mechanical dewatering", *Acustica*, 74, 279-283.
- Bien J, Wolny L (1991) "Changes of some sewage sludge parameters prepared with an ultrasonic field", *Water Science Technology*, 36, 101-106.
- Box G, Behnken D (1960) "Some new three level designs for the study of quantative variables", *Technometrics*, 2: 455-475.
- Chang G, Wolny L (2001) "Co-conditioning and dewatering of chemical sludge and waste activated sludge", *Water Research*, 35, 786-794.
- Chen Y, Yang H, Gu G (2001) "Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling", *Water Research*, 35, 2615-2620.
- Citeau M, Laure O, Vorobiev E (2011) "Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge", *Water Research*, 45(6), 2167-2180.
- Dursun D, Dentel SK (2005) "Sludge as a gel like material", *I. Ulusal Arıtma Çamurları Sempozyumu - AÇS2005 Bildirimler Kitabı*, (s. 77-86). İzmir.
- Dursun D, Dentel SK (2007) "The importance of structural and gel fractions in determining shear sensitivity of sludge", *Proceedings of IWA Specialist Conference on Facing Sludge Diversities: Challenges, Risks, and Opportunities*, (s. 721-730). Antalya.

- Delipinar Ş (2007) "*Maya endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon İle Arıtımı*", Gebze: GYTE Çevre Mühendisliği A.B.D. Yük.Lis.Tezi.
- Deveci N, Çiftçi G (2000). "A Mathematical model for the anaerobic treatment of Baker's yeast effluents", *Waste Management*, 21 99 - 103.
- Dignac M, Urbain V, Rybacki D, Bruchet A, Snidaro D, Scribe P (1998) "Chemical description of extracellular polymers: implication on activated sludge floc structure", *Water Science Technology*, 38, 45-53.
- Dubois M, Gilles K, Hamilton J, Rebers P, Smith F (1956) "Calorimetric method for determination of sugar and related substances", *Anal. Chem.*, 28, 350-356.
- EPA (1987) "*Dewatering Municipal Wastewater Sludges*", EPA Design Manual.
- Eurombra (2007) "*Membran bioreactor technology (MBR) with an EU perspective for advanced municipal wastewater treatment strategies for the 21st century*", IBET - Instituto de Biological Experimental e Technologica.
- Feng X, Deng J, Lei H, Bai T, Fan Q, Li Z (2009) "Dewaterability of waste activated sludge with ultrasound conditioning", *Bioresour. Technology*, 100, 1074-1081.
- Filibeli A (2013) Arıtma Çamurlarının Genel Özellikleri "*Arıtma Çamurlarının Genel Özellikleri, İşleme ve Bertaraf Yöntemleri*", İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.
- Finlayson J, Liao B, Droppo I, Leppard G, Liss S (1998) "The relationship between the structure of activated sludge flocs and the sorption of hydrophobic pollutants", *Water Science and Technology*, 37(4-5), 353-357.
- Frølund B, Griebe T (1955) "Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 43 (4):755-61.
- Greenberg A, Clescerl I, Eaton A (1992) "*Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater*", (s. 18.bölüm).
- Evenblij H, Van der Graaf J (2004) "Occurrence of EPS in activated sludge from a membrane bioreactor treating municipal wastewater", *Wat. Sci. Tech.*, 50, 293-300.
- <http://www.bhrgroup.co.uk>.
- Jin B, Wilen B, Lant P (2004) "Impacts of morphological, pyhsical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge", *Chem. Eng. J.*, 98, 115-126.

- Katsiris N, Kouzeli-Katsiris A (1987) "Bound water content of biological sludge and waste activated sludge", *Water Research*, 21(11), 1319-1327.
- Köksoy N (2001) "*Taguchi ve Cevap Yüzeyi Felsefelerinin Birleştirilmesi: Problem ve Çözüm Teknikleri*", Ankara: Hacettepe Üniversitesi.
- Kutay H (2001) "*Ekmek mayası (saccharomyces cerevisiae)'nin çeşitli metodlar ile immobilizasyonu*", *Yük.Lis.Tezi*, Gebze: GYTE Biyoloji.
- Mikkelsen LH, Keiding K (2002) "Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering", *Water Res.*, 36, 2451-2462.
- Le-Clech P, Chen V ve Fane (2006) "Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment", *J. Membr. Sci.*, 284, 17-53.
- Lee J, Lee J, Choi H (2007) "Filter Press for Electro-dewatering of Waterworks Sludge", *Drying Technology: An International Journal*, 25:12, 1985-1993.
- Li DH, Ganczarczyk J (1990) "Structure of activated sludge flocs", *Biotechnol Bioeng*, 35, 1, 57-65.
- Lowry O, Rosebrough N, Farr A, Randall R (1951) "Protein measurement with the folin phenol reagent", *J.Biol.Chem.*, 193, 265-275.
- Lu M, Lin C, Liao C, Huang R, Ting W (2003) "Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent", *Adv. Environmental Research*, 7, 667-670.
- Lui Y, Fang H (2003) "Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on flocculation, settling, and dewatering of activated sludge", *Crit. Rev. Environ. Sci. Technology*, 33, 237-273.
- Mahmoud A, Oliver J, Hoadley 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 (2011) "Electro-dewatering of wastewater sludge: Influence of the operating conditions and their interactions effects", *Water Research*, 45, 2795-2810.
- Mikkelsen L (1999) "A physical chemical approach to the floc strength concept-with dewatering implications", Denmark: Ph.D. Dissertation, Aalborg University.
- Mikkelsen L, Keiding K (2002) "Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering", *Water Research*, 36(10), 2451-2462.
- Montgomery D (1991) "*Design and Analysis of Experiments*", (s. 3 rd ed), Singapore.

- Na S, Kim Y, Khim J (2007) "Physiochemical properties of digested sewage sludge with ultrasonic treatment", *Ultrason. Sonochem.*, 14, 281-285.
- Neis U (2007) "Ultrasound in water, wastewater and sludge treatment", *Water*, 14, 281-285.
- Novak J, Sadler M, Murthy S (2003) "Mechanisms of floc destruction during anaerobic and aerobic digestion and the effect on conditioning", *Water Research*, 3136-3144.
- Ohm T, Chae J, Kim J, Kim H, Moon S (2009) "A study on the dewatering of industrial waste sludge by fry-drying technology", *J. Hazard Matter*, 168, 445-450.
- Pak Ü (2011) "Ekmek mayası endüstrisi seperasyon prosesiatüksularında membran prosesler ile renk giderimi", *Yüksek Lisans Tezi*.
- Pala A, Gülbin E (2005) "Decolorication of a baker's yeast industry effluent by Fenton oxidation", *Journal of Haz. Materials*, B127 141 - 148.
- Parker P, Collins A (1999) "Ultra-rapid freezing of water treatment residuals", *Water Research*, 33, 2239-2246.
- Poxon T, Darby J (1997) "Extracellular polyanions in digested sludge: measurement and relationship to sludge dewaterability", *Water Research*, 31, 749-758.
- Rosenberger S, Kraume M (2002) "Filterability of activated sludge in membrane bioreactors", *Desalination*, 151, 195-200.
- Safriet D (1994) "Emission Factor Documnetation for AP-42 section9.13.4 Yeast", *Environmental Protection Agency EPA*, 68-D2-0159.
- Saveyn H, Pauwels G, Timmerman R, Meeren P (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, Van der Meeren P (2006) "In situ determination of solidosity profiles during activated sludge electrodewatering", *Water Research*, 40(11), 2135-2142.
- Smollen M, Kafaar A (1994) "Electroosmotically enhanced sludge dewaterering-Pilot-plant study", *Water Science and Technology*, 30(8), 159-168.
- Snyman H, 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.

- Spinoza S, Vesilind P (2001) "*Sludge into Biosolids Processing, Disposal and Utilization*", London.
- Poxon TL (1996) "Structure and dewaterability in anaerobically digested sludge. In Proceedings of the Water", E. F. WEFTEC içinde, *Residuals and Biosolid Management Collection Systems*, (s. 2, 167-178). Dallas, Texas.
- Türkiye Belediyeler Birliği (Mayıs 2015) "*Atıksu Arıtma Çamurlarının İşlenmesi ve Bertarafı (El Kitabı)*", (s. 125-129), Ankara
- Tchobanoglous G, Burton F (1991), McGraw-Hill içinde, "*Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse*", (s. 3rd ed.), New York.
- Tony M, Zhao Y, Fu J, Tayeb A (2008) "Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability", *Chemosphere*, 72, 673-677.
- Tuan P, Virkutyte J, Sillanpaa M (2008) "Electro-dewatering of sludge under pressure and non-pressure conditions", *Environmental Technology*, 29(10), 1075-1084.
- Tuan P, 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, Sillanpaa M, Isosaari P (2012) "Sewage Sludge Electro-Dewatering Treatment", *A Review, Drying Technology: An International Journal*, 30, 7, 691-706.
- Tübitak & KAMAK (2013) "Boyar Madde İçeren Atıksu Arıtma Tesislerinin İşletilmesine Yönelik El Kitabı", 86-87.
- Tünay O (1996) "*Endüstriyel Kirlenme Kontrolü*", İstanbul: İTÜ Yayınları.
- Vesilind P (1994) "The role water in sludge dewatering", *Water Environmental Research*, 66, 1, 4-11.
- Wilen B, Ji B, Lant P (2003) "The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties", *Water Research*, 37, 2127-2139.
- www.lenntech.com.
- www.mauri.com.tr.
- www.pakmaya.com.tr.

- Yu G, He P, Shao L, Lee D, Mujumdar A (2010) "Extracellular polymeric substances (EPS) and extracellular enzymes in aerobic granules", *Drying Technology*, 28(7), 910-915.
- Yuan H, Zhu N, Song F (2010) "Dewaterability characteristics of sludge conditioned with surfactants pretreatment by electrolysis", *Bioresource Technology*.
- Yuan H, Zhu N, Song F (2010) "Dewatering characteristics of sludge conditioned with surfactants pretreatment by electrolysis", *Bioresource Technology*.
- Yuan H, Zhu N., Song L. (2010). "Conditioning of sewage sludge with electrolysis: effectiveness and optimizing study to improve dewaterability" *Bioresour. Technology*, 101, 4285-4290.
- Zhou J, Liu Z, She P, Ding F (2001) "Water Removal from Sludge in a Horizontal Electric Field", *Drying Technology*, 19,3,627-638.

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cemre KARSLIOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi : Düzce / 25.06.1991

Lisans Üniversite : İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Çevre Müh. Böl.

Elektronik posta : cemre.karslioglu@gmail.com

İletişim Adresi : Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi (II) Çevre
Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi :

Ödüller :