

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ters Osmoz Sisteminde Tuz Gideriminin Modellenmesi ve
Optimizasyonu**

Hacı Ahmet EDİKLİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZ ONAYI

**Ters Osmoz Sisteminde Tuz Gideriminin Modellenmesi ve
Optimizasyonu**

Hacı Ahmet EDİKLİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu Yüksek Lisans Tezi 25/08/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Bülent SARI (Danışman)
: Prof. Dr. Olcayto KESKİNKAN
: Dr. Öğr. Üyesi Emre Oğuz KÖROĞLU

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2023-16401

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak
gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Deniz Suyundan Tuz Giderimi	3
1.2. Deniz Suyu Tuz Giderim Prosesleri	5
1.2.1. Buharlaştırma (Termal Damıtma) Prosesleri	6
1.2.2. Membran Prosesleri	7
1.3. Tuz Giderim Teknolojilerinin Avantaj ve Dezavantajları	10
1.4. Tuz Giderim Proseslerinde Ön Arıtma	12
1.5. Tuz Giderimi Proseslerinde Maliyet Analizi	13
1.5.1. İlk Yatırım Maliyetleri (İYM)	14
1.5.2. İşletme ve Bakım Maliyetleri (İBM)	14
1.5.3. Tuz Giderimi Proseslerinde Ölçek Büyütme	15
1.6. Tuz Giderim Teknolojilerinde Yapay Zekâ (AI) Kullanarak Modelleme ve Optimizasyon	15
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	19
2.1 Tuz Giderim Proseslerinde Membran Teknolojileri ve Proses Optimizasyonu	19
2.2 Tuz Giderim Proseslerinde Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Uygulamaları	28
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1. TO Membran Filtrasyon Düzenneği	35
3.2. Tuz Çözeltileri	36
3.3. Deneysel Tasarım	36
3.3.1. Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel Tasarım (DİS-FT)	37
3.3.2. Merkezi Kompozit Tasarım (MKT)	38
3.3.3. Modelleme Plan ve Organizasyonu	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
4.1. DİS-FT ile TO Tuzluluk Gideriminin Optimizasyonu	45
4.1.1. Tuzluluk Giderimi	47
4.1.2. TÇKM Giderimi	68

4.1.3. Eİ İndirgenmesi	73
4.2. MKT ile TO Tuzluluk Gideriminin Optimizasyonu	80
4.2.1. Tuzluluk Giderimi.....	82
4.2.2. TÇKM Giderimi.....	103
4.2.3. Eİ İndirgenmesi.....	122
4.3. Tahmin için Yapay Sinir Ağları (YSA) Analizi	140
4.3.1. DİS-FT Verilerinin YSA Modelleme Sonuçları	140
4.3.2. MKT Verilerinin YSA Modelleme Tahmin Sonuçları	146
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	155
KAYNAKLAR	157
ÖZGEÇMİŞ	167



Ters Osmoz Sisteminde Tuz Gideriminin Modellenmesi ve Optimizasyonu

Hacı Ahmet EDİKLİ

Danışman: Prof. Dr. Bülent SARI

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZ

Bu çalışma, deniz suyunun tuzdan arındırılmasında yaygın olarak kullanılan ters osmoz (TO) sistemlerinde tuz gideriminin modellenmesi ve optimizasyonuna odaklanmaktadır. Araştırmanın temel amacı; pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi başlıca operasyonel parametrelerin optimize edilmesi yoluyla TO membranların ayırma verimliliğini artırmaktır. Operasyonel parametrelerin tuzluluk giderimi, toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) giderimi ve elektriksel iletkenlik (EI) azaltılması üzerindeki etkilerini araştırmak için Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel Tasarım (DİS-FT) ve Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) kullanılmıştır. Veriler, istatistiksel analiz yöntemleriyle değerlendirilmiş ve çeşitli operasyonel koşullarda TO sistem performansını öngörmek üzere ikinci dereceden (kuadratik) regresyon modelleri geliştirilmiştir. Ayrıca, sistem performansının daha hassas tahmin edilebilmesi ve optimizasyon sürecinin desteklenmesi amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi de kullanılmıştır. DİS-FT deney setlerinde pH, basınç ve tuz konsantrasyonunun tüm bağımlı değişkenler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiş olup, sıcaklığın etkisi sınırlı kalmıştır. MKT deney setlerinde özellikle basınç ve tuz konsantrasyonunun bağımlı değişkenler üzerinde etkili olduğu, pH ve sıcaklığın ise sınırlı etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. DİS-FT ve MKT için YSA ile yapılan performans tahminlerinde korelasyon katsayıları (R^2) sırasıyla 0,77 ve 0,97 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, MKT'nin doğrusal olmayan ilişkiler ve karmaşık etkileşimler için hem daha yüksek tahmin doğruluğu sağladığını hem de sürecin optimizasyonunda daha güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. MKT ile geliştirilen modellerin bağımlı değişkenler için gerçek veriler ile uyumu %80'in üzerindedir. TO sisteminde tuzluluk giderimi için MKT ile belirlenen optimal işletme koşulları; pH 9, basınç 40 bar, sıcaklık 45 °C ve tuz konsantrasyonu 10 g/L olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak, araştırma bulguları TO sistemlerinde tuz giderme performansının artırılmasına ve sistem optimizasyonuna yönelik önemli bilimsel çıktılar sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda değerlendirildiğinde, özellikle 6 nolu "Temiz Su ve Sanitasyon" hedefi kapsamında hem literatüre hem de endüstriyel uygulamalara anlamlı katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ters Osmoz, Tuz Giderimi, Optimizasyon, Yapay Sinir Ağları, Merkezi Kompozit Tasarım, Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel Tasarım

Modeling and Optimization of Salt Removal in Reverse Osmosis System

Hacı Ahmet EDIKLI

Advisor: Prof. Dr. Bulent SARI

Department of Environmental Engineering

ABSTRACT

This study focuses on modeling and optimizing salt removal in reverse osmosis (RO) systems, which are widely used for desalination of seawater. The main objective of the research is to increase the separation efficiency of RO membranes by optimizing key operational parameters such as pH, temperature, pressure, and salt concentration. To investigate the effects of operational parameters on salt removal, total dissolved solids (TDS) removal, and electrical conductivity (EC) reduction, a Regular Two-Level Factorial Design (RTL-FD) and Central Composite Design (CCD) were employed. The data were evaluated using statistical analysis methods, and second-order (quadratic) regression models were developed to predict RO system performance under various operational conditions. Additionally, the Artificial Neural Networks (ANN) method was used to enable more accurate prediction of system performance and to support the optimization process. In the RTL-FD experimental sets, it was observed that pH, pressure, and salt concentration had a significant effect on all dependent variables, while the effect of temperature was limited. In the CCD experimental sets, it was observed that pressure and salt concentration were particularly effective on the dependent variables, while pH and temperature had a limited effect. In the performance predictions made with ANN for RTL-FD and CCD, the correlation coefficients (R^2) were calculated as 0.77 and 0.97, respectively. This result demonstrates that CCD provides both higher prediction accuracy and greater reliability in process optimization for non-linear relationships and complex interactions. The models developed using CCD show over 80% agreement with real data for dependent variables. The optimal operating conditions for salt removal in the RO system determined by CCD are defined as pH 9, pressure 40 bar, temperature 45 °C, and salt concentration 10 g/L. In conclusion, the research findings provide important scientific outputs for improving salt removal performance and system optimization in RO systems. When evaluated in line with the United Nations Sustainable Development Goals, the results obtained are expected to provide meaningful contributions to both the literature and industrial applications, particularly under Goal 6, “Clean Water and Sanitation.”

Keywords: Reverse Osmosis, Salt Removal, Optimization, Artificial Neural Networks, Central Composite Design, Regular Two-Level Factorial Design

TEŞEKKÜR

Başta danışman hocam Sn. Prof. Dr. Bülent SARI'ya yolumuzun kesiştiği Lisans eğitim-öğretim döneminden bugüne kadar süregelen uzun ince yolda, akademi ve yaşama dair farklı alanlarda gösterdiği yol, ettiği rehberlik, ayırdığı zaman, verdiği emek ve en zor zamanlarda sağlamış olduğu destek için,

Sn. Prof. Dr. Mesut BAŞIBÜYÜK, Sn. Prof. Dr. Zeynep ZAIMOĞLU, Sn. Prof. Dr. Deniz ÜNAL ve Sn. Doç. Dr. F. Elçin ERKUT'a bu tez çalışmasıyla birlikte diğer akademik çalışmalarına sağladığı katkılar, yönlendirmeler ve destekler için,

Çukurova Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli hocalarıma lisans ve Yüksek Lisans eğitim-öğretimi dönemlerimde verdikleri emek ve mesleki öğretiler ile kazandırdıkları yetkinlikler için,

Yüksek Lisans çalışmalarım ve akademik araştırma ve deneysel süreçlerde birlikte çalışmaktan her zaman gurur duyduğum değerli meslektaşlarım ve hocalarım Sn. Dr. Selman TÜRKEŞ ve Sn. Dr. Hakan GÜNEY'e yardımları, desteği ve akademik hayattaki yol arkadaşlığı için,

Değerli meslektaşlarım Sn. Çevre Yük. Müh. Muhammet ŞAHİN ve Sn. Çevre Müh. Merve ARABACI'ya tez çalışmamdaki yardımları ve sunduğu kaynaklar için,

Tez savunma jürisinde yer alan Sn. Prof. Dr. Olcayto KESKİNKAN ve Sn. Dr. Öğr. Üyesi Emre Oğuz KÖROĞLU hocalarıma ayırdıkları zaman, verdikleri emek ve kıymetli görüşleri için,

Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimine destekleri için,

Eğitim hayatım boyunca emeklerini ödeyemeyeceğim sevgili aileme ve tez aşamasında bana sabır gösteren beni destekleyen eşim Zeliha, kızlarım Fatmanur ve Eda'ma teşekkür ediyorum.

“Yol yürümeye başladığında, yollar görünür”

“If you start walking the way. the way appears”

Mevlâna Celaleddin Rumi

Merhum Dedem Hacı Mustafa ŞERBETÇİ anısına ...

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Tuz Giderim Teknolojilerinin Avantajları ve Dezavantajları	11
Çizelge 1.2. TO Tuz Giderim Tesisine Ait Doğrudan ve Dolaylı Maliyetler (İYM).....	14
Çizelge 3.1. DİS-FT Deneysel Çalışma Verileri.....	38
Çizelge 3.2. MKT Deneysel Çalışma Verileri	39
Çizelge 3.3. Model metodolojisine ilişkin şema	40
Çizelge 4.1. DİS-FT Çalışma Bilgisi	45
Çizelge 4.2. Faktörler ve Yanıtlar	45
Çizelge 4.3. TO membranı için yanıtlarla birlikte deneysel girdi değişkenleri.....	47
Çizelge 4.4. 4FI model için ANOVA analizi (Tuzluluk Giderimi).....	48
Çizelge 4.5. Uygunluk İstatistikleri (Tuzluluk Giderimi)	48
Çizelge 4.6. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (Tuzluluk Giderimi)	49
Çizelge 4.7. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (Tuzluluk Giderimi)	50
Çizelge 4.8. Optimum Tuzluluk Giderimi Koşulları.....	58
Çizelge 4.9. 4FI model için ANOVA analizi (TÇKM Giderimi)	68
Çizelge 4.10. Uygunluk İstatistikleri (TÇKM Giderimi)	69
Çizelge 4.11. 4FI model için ANOVA analizi (Eİ İndirgenmesi).....	73
Çizelge 4.12. Uygunluk İstatistikleri (Eİ İndirgenmesi)	74
Çizelge 4.13. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (E.İletkenlik İndirgenmesi)	75
Çizelge 4.14. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (E.İletkenlik İndirgenmesi)	75
Çizelge 4.15. MKT Çalışma Bilgisi.....	80
Çizelge 4.16. Faktörler ve Yanıtlar	81
Çizelge 4.17. TO membranı için yanıtlarla birlikte deneysel girdi değişkenleri.....	82
Çizelge 4.18. Kuadratik model için ANOVA analizi (Tuzluluk Giderimi)	83
Çizelge 4.19. Uygunluk İstatistikleri (Tuzluluk Giderimi)	84
Çizelge 4.20. Model Karşılaştırma İstatistikleri (Tuzluluk Giderimi)	84
Çizelge 4.21. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (Tuzluluk Giderimi)	85
Çizelge 4.22. Gerçek Faktörler Açısından Son Eşitlik (Tuzluluk Giderimi)	85
Çizelge 4.23. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (Tuzluluk Giderimi)	86
Çizelge 4.24. Optimum Tuzluluk Giderimi Koşulları.....	94
Çizelge 4.25. Kuadratik model için ANOVA analizi (TÇKM Giderimi)	103
Çizelge 4.26. Uygunluk İstatistikleri (TÇKM Giderimi)	104
Çizelge 4.27. Model Karşılaştırma İstatistikleri (TÇKM Giderimi)	104
Çizelge 4.28. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (TÇKM Giderimi)	105
Çizelge 4.29. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (TÇKM Giderimi)	106
Çizelge 4.30. Optimum TÇKM Giderimi Koşulları	114

Çizelge 4.31. Kuadratik model için ANOVA analizi (Eİ İndirgenmesi)	122
Çizelge 4.32. Uygunluk İstatistikleri (Eİ İndirgenmesi)	123
Çizelge 4.33. Model Karşılaştırma İstatistikleri (Eİ İndirgenmesi)	123
Çizelge 4.34. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (Eİ İndirgenmesi)	124
Çizelge 4.35. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (Eİ İndirgenmesi)	125
Çizelge 4.36. Gerçek Faktörler Açısından Nihai Denklem (Eİ İndirgenmesi)	126
Çizelge 4.37. Optimum Eİ İndirgenme Koşulları	132
Çizelge 4.38. YSA modelinin LM öğrenme algoritması sonuçları	142
Çizelge 4.39. YSA modelinin SCG öğrenme algoritması sonuçları	143
Çizelge 4.40. Tuzlu suyun gideriminde TO membran performansı ve model tahminleri (DİS-FT)	146
Çizelge 4.41. YSA modelinin LM öğrenme algoritmasının sonuçları	148
Çizelge 4.42. YSA modelinin SCG öğrenme algoritması sonuçları	149
Çizelge 4.43. Tuzlu suyun gideriminde TO membran performansı ve model tahminleri (MKT) .	152
Çizelge 4.44. TO giderim proseslerinde kullanılan diğer çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması.	153

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tuz Giderim Tesislerinin Gelişimi.....	4
Şekil 1.2. Tuz Giderimi Uygulamalarının Bölgesel Dağılımı	4
Şekil 1.3. Deniz Suyundan Tuz Giderim Prosesleri	6
Şekil 1.4. Osmoz ve Ters Osmoz	8
Şekil 1.5. TO Tuz Giderim Sistemi Akış Diyagramı	8
Şekil 1.6. EDI süreç akış diyagramı	10
Şekil 1.8. Dünya genelindeki yenilenebilir enerji tabanlı tuz giderim tesislerinin yüzdesi	15
Şekil 1.9. Yapay zeka, makine öğrenimi, derin öğrenme ve açıklanabilir yapay zeka arasındaki şematik bağlantı	16
Şekil 3.1. TO Membran Filtrasyon Düzeneginin Membran Preperatı	35
Şekil 3.2. TO Membran Filtrasyon Düzenegi	36
Şekil 3.3. YSA modelin Plan ve Organizasyonu.....	40
Şekil 3.4. TO tuz giderim prosesleri için geliştirilmiş YSA model tasarımı.....	41
Şekil 4.1. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	51
Şekil 4.2. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	52
Şekil 4.3. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	53
Şekil 4.4. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	54
Şekil 4.5. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	55
Şekil 4.6. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	56
Şekil 4.7. Tuzluluk giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması	59
Şekil 4.8. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	61
Şekil 4.9. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	62
Şekil 4.10. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği.....	63
Şekil 4.11. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	64

Şekil 4.12. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Tuz Konsantrasyonu ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	65
Şekil 4.13. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Tuz Konsantrasyonu ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	66
Şekil 4.14. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	70
Şekil 4.15. TÇKM giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması	71
Şekil 4.16. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	73
Şekil 4.17. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	76
Şekil 4.18. Eİ İndirgenmesi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması	77
Şekil 4.19. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	79
Şekil 4.20. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	88
Şekil 4.21. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	89
Şekil 4.22. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	90
Şekil 4.23. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	91
Şekil 4.24. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	92
Şekil 4.25. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	93
Şekil 4.26. Tuzluluk giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması	95
Şekil 4.27. TO membranlarında tuz giderimine pH ve sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği	97
Şekil 4.28. TO membranlarında tuz giderimine pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği	98
Şekil 4.29. TO membranlarında tuz giderimine pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği	99
Şekil 4.30. TO membranlarında tuz giderimine Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği	100
Şekil 4.31. TO membranlarında tuz giderimine Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği	101

Şekil 4.32. TO membranlarında tuz giderimine Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği	102
Şekil 4.33. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	108
Şekil 4.34. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	109
Şekil 4.35. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	110
Şekil 4.36. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	111
Şekil 4.37. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	112
Şekil 4.38. TO membranlarla TÇKM gideriminde Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	113
Şekil 4.39. TÇKM giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması.....	114
Şekil 4.40. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	116
Şekil 4.41. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği.....	117
Şekil 4.42. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	118
Şekil 4.43. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	119
Şekil 4.44. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	120
Şekil 4.45. TO membranlarla TÇKM gideriminde Tuz Konsantrasyonu ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	121
Şekil 4.46. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	127
Şekil 4.47. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	128
Şekil 4.48. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	128
Şekil 4.49. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği.....	129
Şekil 4.50. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Tuz Konsantrasyonu ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	130

Şekil 4.51. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği	131
Şekil 4.52. Eİ İndirgenmesi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması	132
Şekil 4.53. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Sıcaklık ve pH etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	134
Şekil 4.54. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	135
Şekil 4.55. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	136
Şekil 4.56. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	137
Şekil 4.57. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	138
Şekil 4.58. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Tuz Konsantrasyonu ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği	139
Şekil 4.59. LM algoritmasının YSA Regresyon sonucu	144
Şekil 4.60. SCG Algoritmasının YSA Regresyon sonucu	145
Şekil 4.61. LM algoritmasının YSA Regresyon sonucu	150
Şekil 4.62. SCG Algoritmasının YSA Regresyon sonucu	151

SİMGELER VE KISALTMALAR

AI	: Yapay Zeka
ANFIS	: Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi
CaCl ₂	: Kalsiyum Klorür
CDI	: Kapasitif Deiyonizasyon
CMS	: Karbon Moleküler Elek
COF	: Kovalent Organik Yapılar
DİS-FT	: Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel Tasarım (Regular Two-Level Factorial Design)
DSPM	: Donnan Sterik Gözenek modeli
ED	: Elektrodializ
EDI	: Elektredeiyonizasyon
Eİ	: Elektriksel İletkenlik
EN	: Nernst Planck Denklemi
FD	: Faktöryel Dizayn (Factorial Design)
FO	: İleri Osmoz
GWO	: Gri Kurt Optimizasyon Algoritması
HDH	: Nemlendirme/Nem Alma
HGS	: Açlık Oyunu Arama Algoritması
IP	: Arayüzey Polimerizasyonu
İBM	: İşletme ve Bakım Maliyetleri
İYM	: İlk Yatırım Maliyetleri
K	: Kelvin
LBL	: İn Situ Büyüme ve Katman Katman
LPHR	: Düşük Basıncılı Yüksek Geri Kazanım
MBR	: Membran Biyo-Reaktörler
MCM	: Çok Katmanlı Kompozit Membran
MD	: Membran Distilasyonu
MED	: Çok Etkili Damıtma (Multi-Effect Distillation)
MENA	: Ortadoğu ve Afrika (Middle East & North Africa)
MF	: Mikro-filtrasyon
MFO	: Güve Alevi Optimizasyonu algoritması
MgCl ₂	: Magnezyum Klorür
MKT	: Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design), (CCD)
ML	: Makine Öğrenimi (Machine Learning)
MOF	: Metal-organik yapılar
mPa	: Megapaskal

MSE	: Ortalama Karesel Hata
MSF	: Çok Aşamalı Flaş (Multi-Stage Flash)
mV	: Milivolt
MVC	: Mekanik Buhar Sıkıştırma
NaCl	: Sodyum Klorür
NchOA	: Nişan Şempanzesi Optimizasyon Algoritması
NF	: Nano-filtrasyon
nm	: Nanometre
PA	: Poliamid
PA-TFC	: İnce Film Kompozit Membran
PEBAX	: Polieter blok amid
PES	: Polieter sülfon
ppm	: Milyonda Bir (parts per million)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması
PV	: Fotovoltaik
PVDF-Ni	: Poliviniliden Florür-Nikel
R ²	: Tüm modellerin uygunluğu belirleme katsayısı
RSM	: Yanıt yüzey metodolojisi
SDI	: Silt Yoğunluğu İndeksi
SEC	: Spesifik Enerji Tüketimi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SL	: Denetimli Öğrenme
SSD	: Güneş Enerjili Damıtma
SSL	: Yarı Denetimli Öğrenme
T	: Sıcaklık (C°)
TÇKM	: Toplam Çözünmüş Katı Madde (Total Dissolved Solids)
TO	: Ters Osmoz
TOTEX	: Toplam Maliyet/Harcama
TVC	: Termal Buhar Sıkıştırma
UF	: Ultra-filtrasyon
USL	: Denetimsiz Öğrenme
WaterTAP	: Su Arıtma Tekno Ekonomik Değerlendirme Platformu
YSA	: Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network), (ANN)
µm	: Mikrometre

1. GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyıla ulaşan insanlık, mevcut teknolojik ilerlemelerin etkisiyle yaşam standartlarının ve tüketim kalitesinin sürekli olarak arttığı bir sürece doğru evrilmiştir. Dünya nüfusunda yaşanan hızlı artış, medeniyetin ve sanayileşmenin devam etmesiyle birlikte, tatlı su kaynaklarının kıtlığı dünya çapında en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir (Qin ve ark., 2023). Su kıtlığı, yeryüzünde yaşayan insanların yüzde 40'ından fazlasını etkilemekte, iklim değişikliği, kuraklık ve sıcaklık artışıyla bu oranın daha da artmasından endişe edilmektedir. 1990'dan günümüze kadar 2,1 milyar insan için sağlıklı su temini ve tüketimi sağlanmış olsa da azalan içme suyu kaynakları ve bunun getirdiği stres her kıtayı günden güne daha fazla etkilemektedir. Ülkeler, giderek daha fazla su sıkıntısı yaşamakta; artan kuraklık ve çölleşme bu eğilimleri daha da kötüleştirmektedir. 2050 yılına kadar, en az dört kişiden birinin tekrarlayan su kıtlığı yaşayacağı tahmin edilmektedir. Bu sebeple, 2030 yılına kadar herkes için güvenli ve uygun fiyatlı içme suyu temini için yeterli altyapı yatırımlarının yapılması ve su arıtımının teşvik edilmesi gerekmektedir. Bu perspektiften bakıldığında, su kaynaklarının korunması ve eski haline getirilmesi büyük önem arz etmektedir. Evrensel, güvenli ve uygun fiyatlı içme suyunun sağlanması, temel hizmetlerden yoksun 800 milyondan fazla insana ulaşmayı ve iki milyardan fazla insan için hizmetlerin erişilebilirliğini ve güvenliğini artırmayı içermektedir (UNDP, 2023). Deniz suyu tuzdan arındırma endüstrisinin aktif gelişimi, kıyı bölgelerindeki ve adalardaki tatlı su kaynakları sıkıntısını hafifletmek, su kullanım yapısını rasyonel bir şekilde optimize etmek ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını teşvik etmek için büyük önem taşımaktadır (Jones ve ark., 2019). Yeryüzünde mevcut olan tatlı su kaynaklarının yetersizliği sorunu, öngörülebilir gelecekte ciddi bir krize neden olacaktır. Artan dünya nüfusu ve su ihtiyacı, küresel ısınma, iklim değişikliği, kuraklık, tatlı su kaynaklarının azalması ve kirlenmesi gibi sorunlarla yüzleşilen bu günlerde, deniz suyundan tatlı su temini ilgi çeken bir konu haline gelmiştir. Su temininde baş gösteren talep artışını karşılamak için çeşitli termal ve membran bazlı tuzdan arındırma teknolojileri geliştirilmiştir. Geleneksel olarak, çok etkili damıtma (MED- (Multi-Effect Distillation)) ve çok aşamalı flaş (MSF-(Multi-Stage Flash)) gibi termal teknolojiler MENA bölgesi (Ortadoğu ve Afrika) gibi su ihtiyacının yoğun olduğu coğrafyalarda faaliyet gösteren tuzdan arındırma tesislerinde öne çıkmaktadır. Termal tuzdan arındırma teknolojileri, buharlaşmanın gizli ısısı nedeniyle çok fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu nedenle, 90'lı yılların ortalarında, ters ozmoz (TO) birincil tuzdan arındırma teknolojisi olarak termal teknolojilere nazaran pazarda üstünlük dengesini lehine çevirmiştir. Bunun nedeni, düşük spesifik enerji tüketimi ve membran tabanlı sistemlerin çalışma verimliliğindeki büyük çaplı ilerlemelerdir (Mansour, 2023).

Bu kapsamda, TO membranının çeşitli çalışma koşulları (besleme hızı, uygulanan basınç, sıcaklık, pH ve tuzluluk, geri kazanım ve giderim oranı) ve konfigürasyonları (farklı membran türü ve sayısı) denenerek test edilmiştir (Abd Elaziz ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2023; Ahunbay ve ark.,

2018). Ancak, TO membran sisteminin performans tahminine yönelik modelleme ve optimizasyon çalışmalarının sayısı literatürde sınırlıdır. Bunun yanında, laboratuvar ya da pilot ölçekte gerçekleştirilen deneysel süreçlerin saha ölçeğine yansıtılması ve optimize edilmiş sistemlerin saha ölçeğindeki maliyet analizi hakkındaki araştırmalar da oldukça azdır. Deniz suyundan TO prosesi ile içme suyu üretimi, faz geçişi gerektirmediği için buharlaştırma gibi termal damıtma yöntemlerine kıyasla daha verimlidir. Bununla birlikte, TO'da ozmotik basınç farkının üstesinden gelmek için uygulanması gereken basınç yüksektir ve bu da suyun tuz giderim maliyetinde kayda değer bir artışa neden olmaktadır (Ahunbay ve ark., 2018). TO membranların tuz giderimindeki en önemli dezavantajı, kirlenmeye yatkın olmalarıdır. Kirlenme, esas olarak deniz suyunda yüksek konsantrasyonda bulunan Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları ile silika ve karbonatlar gibi inorganik maddeler tarafından kireç oluşumuna bağlı olarak gerçekleşir. Ayrıca, deniz suyunda bulunan organik maddeler ve bakteriyel biyofilmler tarafından sebep olunan tıkanmalar da etkili bir kirlilik türüdür (Jiang ve ark., 2017). TO membranı ile etkin bir tuz giderimi için, ham deniz suyundan kirlenmeye neden olan maddelerin ön arıtma ile uzaklaştırılması gerekir (Yadai ve Suzuki, 2023). Membran kirlenmesinin üstesinden gelmek için ihtiyaç duyulan bu ek ön arıtma üniteleri, kimyasallar, enerji ve malzemeler proses maliyetinin artmasına neden olur (Alhseinat ve Sheikholeslami, 2012). Bu nedenle, TO membran ile tuz gideriminde karşılaşılan sorunların çözümünde ve en uygun işletme şartlarının belirlenmesinde, proses modelinin oluşturulması ve işletme şartlarının optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Modelleme, gerçek dünyada meydana gelen davranışları bir denklem içerisinde ifade eden matematiksel veya istatistiksel işlemler topluluğudur (Kaya, 2017). Modellemeler, tam ölçekli bir sürece müdahale etmeden ve etkinliğini kesintiye uğratmadan teknolojik iyileştirme ve kontrol stratejilerini önceden test etmek için yararlıdır (Jeppsson ve ark., 2013; Man ve ark., 2017). Modellerin temel yapı taşları, verilerdir. Endüstri 4.0'ın gelişimiyle birlikte, yazılımsal hesaplamadaki programlar, yeni modeller sunmanın yanı sıra klasik modelleri artırarak veri teknolojisi koleksiyonunu zenginleştirmiştir. Veriye dayalı modeller, genellikle ucuz, doğru, hassas ve daha da önemlisi esnekler. Veriler ne kadar doğru elde edilebilirse, modeller de o kadar gerçeğe yakın davranışlar sergiler. Bu nedenle, farklı karmaşıklık seviyelerine sahip veri çalışmalarının daha etkili bir şekilde optimize edilebileceği ve yapay sinir ağı (YSA) modelleriyle daha iyi bir şekilde analiz edilebileceği söylenebilir (Araghinejad, 2013). Optimizasyon, bir sistemin veya sürecin en iyi sonuca ulaşması için tasarlanması veya ayarlanması sürecini ifade eder. Temel amacı, belirli bir hedefi maksimize etmek veya minimize etmek için en uygun koşulları bulmaktır. Optimizasyon ve Yapay Sinir Ağı (YSA) modelleri, farklı alanlarda kullanılan iki farklı kavramdır (Lee ve ark., 2022). TO membran prosesi ile tuz gideriminin modelleme ve optimizasyon çalışmaları ile, sistem performansının artırılabilirliği ve maliyetinin nispeten azaltılabilirliği öngörülmektedir.

Bu çalışma ile, TO membran sistemleri ile gerçekleştirilen tuz gideriminin makine öğrenme tabanlı programlar ile modellenerek performans tahmininin gerçekleştirilmesi ve sistemin optimal

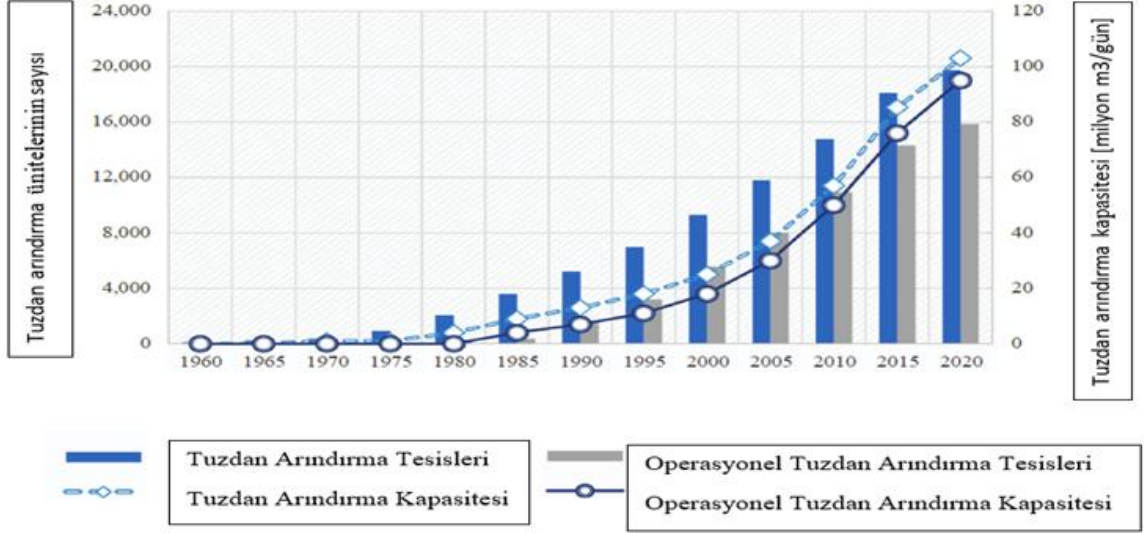
işletme koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları neticesinde, sistemin işletim süreçlerinde ekonomik etkinliğin artırılması ve operasyonel verimliliğin en üst düzeye çıkarılması hedeflenmektedir. Yapılacak çalışma, kapsam itibarıyla Birleşmiş Milletler, Avrupa Birliği ve Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma, çevre yönetimi ve su yönetimi gibi temel başlıklarda yer alan hedefleri ve referans belgelerinde (Vizyon 2053, 12. Kalkınma Planı, UNEP 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, UN 2018-2028 Uluslararası Su Eylemi 10 Yılı) yer almaktadır. Çalışmanın, ilgili mevcut literatüre katkı sağlayacağına inanılmakla birlikte, akademik ve ticari ilgi de uyandıracığı öngörülmektedir.

1.1 Deniz Suyundan Tuz Giderimi

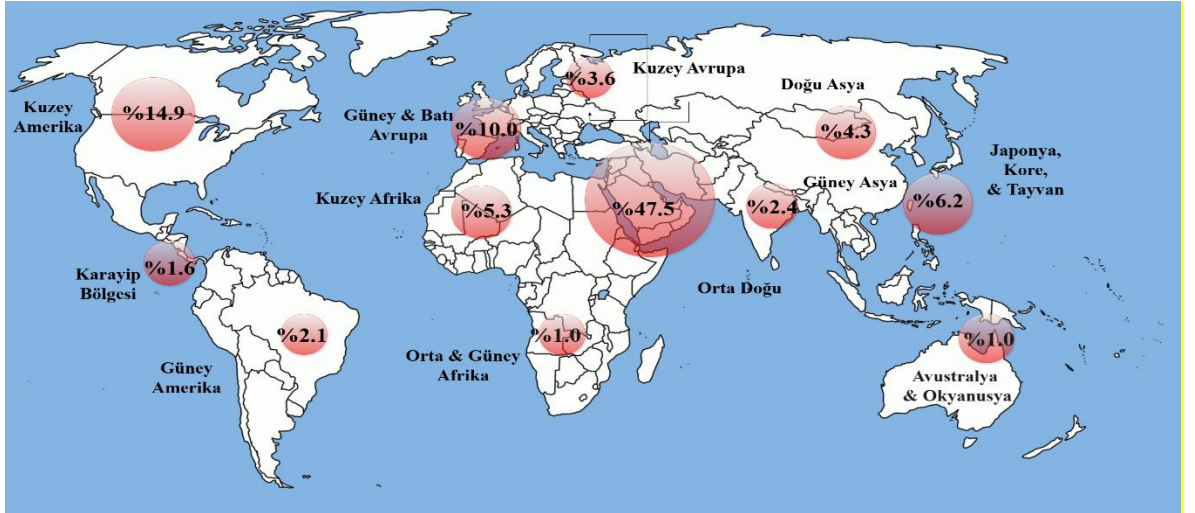
Dünya yüzeyinin %71'i, okyanus ve denizlerle kaplı olup, tüm dünya deniz ve okyanuslarında çözünmüş halde yaklaşık olarak 50 katrilyon ton mineral ve metal bulunduğu tahmin edilmektedir (Loganathan ve ark., 2017; Xing ve ark., 2023). Ayrıca, dünyada üzerindeki tüm suyun yaklaşık %97'si okyanuslarda, %2'si ise yeraltı sularında, buz tabakaları ve buzullar içinde hapsolmuş halde bulunmaktadır. Yeryüzündeki suyun sadece %1'i tatlı sudur ve bu su, insanların içme suyu olarak kullanımına uygundur (Pangarkar ve ark., 2010; Srivastava ve ark., 2022). ABD' de yapılan bir jeolojik araştırmaya göre, dünya suyunun %96,5'i denizlerde ve okyanuslarda, %1,7'si buzullarda bulunurken, geri kalanı sırasıyla yüzey ve yeraltı sularıdır (Bhausahab ve ark., 2011; Srivastava ve ark., 2022). Bu perspektiften bakıldığında, okyanuslar neredeyse sınırsız miktarda su ile doludur. Ancak, deniz suyu uygun arıtma olmadan insani tüketim veya endüstriyel kullanım için uygun değildir. Bu nedenle tuzdan arındırma, tatlı su üretiminde giderek daha hayati bir konu haline gelmiştir (Tang ve ark., 2024). Gelecekte, taşınabilir suyun mevcudiyeti özellikle kurak ve yarı kurak ülkelerde en ciddi sorunlardan biri olarak görülmektedir. Artan tatlı su talebini karşılamak için, tuzlu sudan tatlı su elde etmek ve kullanıma sunmak önemli bir çözüm yoludur. Yüksek konsantrasyonlu tuzlu suyun yönetilmesi ve arıtılmasına yönelik talep, her geçen gün daha da artmaktadır. Ancak, mevcut yüksek konsantrasyonlu tuzdan arındırma teknolojileri nispeten yüksek maliyetlere ve enerji tüketimine sahiptir (Tong ve Elimelech, 2016; Atia ve ark., 2023).

Su temini açısından, tuz gideriminin gelecekteki potansiyel rolünü değerlendirmek için, su kaynakları yönetimindeki rolünü anlamak büyük önem taşımaktadır. Genel olarak, tuzdan arındırma uygulaması küresel ölçekte istikrarlı bir şekilde genişlemektedir (Şekil 1.1). Şekil 1.1'den görülebileceği gibi, sektör hem kurulu tuzdan arındırma tesisleri hem de toplam kapasite açısından istikrarlı bir büyüme göstermektedir (Angelakis ve ark., 2021). Bununla birlikte, su kaynakları ve sosyo-ekonomik koşullar bölgeden bölgeye değiştiği için, tuzdan arındırma projelerinin gelişimi de değişmektedir (Lattemann ve ark., 2010; Zolghadr ve ark., 2023). Şekil 1.2'den görülebileceği gibi, Orta Doğu bölgesi tek başına tuzdan arındırma için mevcut küresel kapasitenin çoğunluğunu oluştururken (%47,5), Kuzey Amerika (%14,9), Güney ve Batı Avrupa (%10,0) hemen arkasından gelmektedir. 2019 yılı itibarıyla, dünya genelinde en az 15.906 tuzdan arındırma tesisi faaliyet

göstermektedir. Tuzdan arındırma tesislerinden elde edilen küresel üretim yaklaşık 95 milyon m³ /gün tatlı su ve 142 milyon m³ /gün atık tuzlu su (brine) olduğu tahmin edilmektedir. Ters osmoz (TO) gibi yöntemlerde genellikle %35–50 arasında bir geri kazanım oranı vardır. Yani, 100 litre deniz suyundan sadece 35–50 litresi tatlı suya dönüştürülür; geri kalanı ise tuz, kimyasallar ve diğer atıklarla yüklü konsantre su olarak sistemden deşarj edilir. Bu yüksek tuzlu su çıkışı, sistemin "verimsizliği" değil; şu anki teknolojilerin doğal sonucu ve çevresel sınırlarla dengelenmiş bir mühendislik uygulamasıdır. (Jones, E. ve ark., 2019).



Şekil 1.1. Tuz Giderim Tesislerinin Gelişimi (Angelakis ve ark., 2021)



Şekil 1.2. Tuz Giderimi Uygulamalarının Bölgesel Dağılımı (Jones, E. ve ark., 2019)

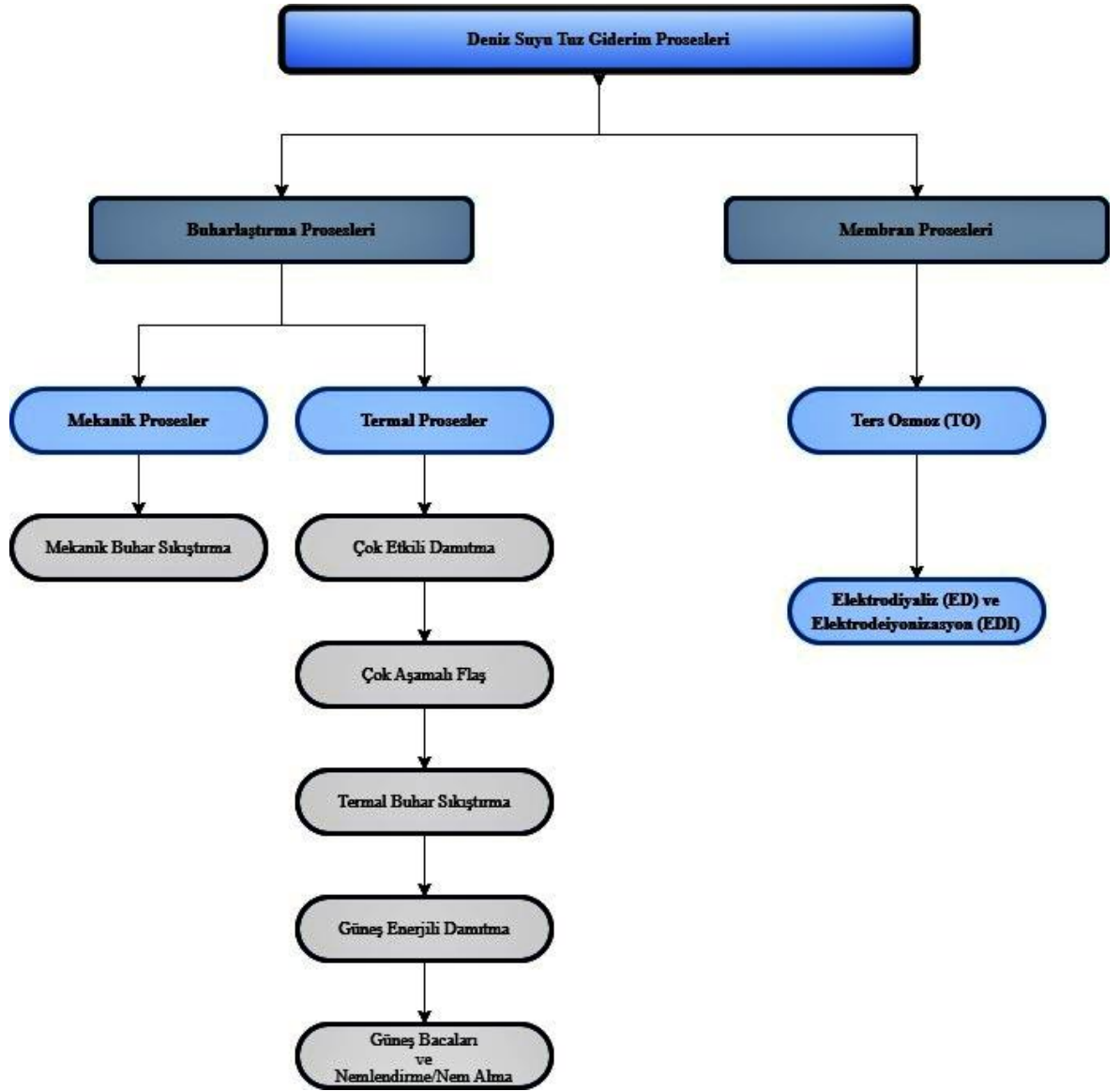
Dünya genelinde bir milyardan fazla insan, kurak ve su kıtlığı olan bölgelerde yaşamakta olup, 2025 yılına kadar her dört kişiden biri su kriziyle karşı karşıya kalması beklenmektedir. Dünya nüfusunun %20'si, mekânsal olarak kısıtlı yerlerde yaşadığından, su kıtlığı her kıtadaki her üç kişiden birini etkilemesi muhtemeldir. Su taleplerinin yanı sıra, nüfus artışı, kentleşme, iklim değişikliği

etkileri, hane halkı ve endüstriyel büyüme de dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Tuzdan arındırma, acı su, haliç veya okyanus gibi değişken tuzluluk oranına sahip suların tuzdan arındırması için kullanılan bir yöntemdir. Sonuç olarak, birçok ülke tuzlu suyun içilebilir veya kullanılabilir suya dönüştürülmesine yönelik proseslere yatırım yapmaktadır (Murugan ve ark., 2023).

1.2 Deniz Suyu Tuz Giderim Prosesleri

Tuz giderim proseslerinde, termal (distilasyon) bazlı ve membran bazlı teknolojilere dayanan tuzdan arındırma teknoloji yöntemleri geliştirilmiş olup, bu teknolojiler deniz suyunun tuzdan arındırılması pazarına hâkim olmuştur (Tang ve ark., 2024). Geleneksel olarak, çok etkili damıtma (MED) ve çok aşamalı flaş (MSF) gibi termal teknolojiler, Körfez Arap ülkelerinde tuzdan arındırma pazarına başlangıçta hâkim olmuştur. Bununla birlikte, termal tuzdan arındırma teknolojileri, gizli buharlaşma ısısı nedeniyle çok fazla enerji gerektirmektedir. Bu nedenle, 1990'lı yılların ortalarında, birincil tuzdan arındırma teknolojisi olarak ters osmoz (TO) termal teknolojilere kıyasla üstünlük sağlamaya başlamıştır. Bunun temel nedeni, düşük özgül enerji tüketimi ve membran tabanlı sistemlerin çalışma verimliliğindeki büyük ilerlemelerdir (Bhawan ve Nagar, 2007; Mansour, 2023).

Deniz suyundan tuz giderim proseslerinde, dünyada en çok kullanılan prosesler arasında farklı ayırma esaslarına dayanan damıtma ve membran tuz giderim prosesleri işlemleri yer almaktadır. Büyük ölçekli üretim için güvenilir olan ticari tuz giderim prosesleri arasında, Şekil 1.3'te görüldüğü üzere, genellikle buharlaştırma prosesleri tercih edilirken; membran işlemleri olarak da ters osmoz (TO) ve Elektrodializ (ED) yaygın olarak kullanılmaktadır (Lawrence ve ark., 2011).



Şekil 1.3. Deniz Suyundan Tuz Giderim Prosesleri (Lawrence ve ark., 2011)

1.2.1 Buharlaştırma (Termal Damıtma) Prosesleri

Buharlaştırma teknolojileri, tuzlu solüsyondan suyun buharlaştırılması ve sonrasında oluşan buharın yoğunlaştırılarak saf suyun elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Elde edilen saf suyun miktarı ve kalitesi, buharlaşmayı sağlayan buharın özelliklerine, deniz suyunun sıcaklığına, damıtma tesisinin tipine, tasarımına ve performansına bağlı olarak değişmektedir. Bunların dışında, yüksek performanslı malzemelerin kullanılması, korozyon direncinin artırılması ve termodinamik verimliliğin yükseltilmesi gibi faktörler, proses süreçlerini daha ekonomik hale getirmektedir (Lawrence ve ark., 2011).

Bu proseslerde termal enerji ya da güneş enerjisi kullanılmaktadır. Membran proseslerin kullanıma girmesinden önce, buharlaştırma yöntemleri deniz suyu arıtımı için en popüler yöntem olmuştur. Termal işlemlere ek olarak, damıtma prosesleri genellikle daha düşük sıcaklıklarda

buharlaştırma verimini arttırmak amacıyla vakum uygulamasıyla birleştirilmiştir (Aydın ve Ardalı., 2012).

Buharlaştırma yöntemleri mekanik ve termal prosesler olarak ikiye ayrılabilir. Bilinen tek mekanik proses, mekanik buhar sıkıştırma (MVC) iken, termal yöntemler ise, çok etkili damıtma (MED), çok aşamalı flaş (MSF), termal buhar sıkıştırma (TVC), güneş enerjili damıtma (SSD), güneş bacaları ve nemlendirme/nem alma (HDH) olarak sıralanabilir (El-Emam ve ark., 2022).

1.2.2 Membran Prosesleri

Her geçen gün daha da ilerleyen membran teknolojisi, gelişimini sürekli olarak devam ettirmektedir. Membran prosesler, içme suyu temini, evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılması, gazların ayrılması, elektrokimyasal prosesler, biyomedikal alanda kan ve idrar diyalizi, oksijen kazandırılması, membran bazlı sensörler ve kontrollü ilaç salınımı gibi çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Koyuncu ve ark., 2018).

Membran teknolojisinin kapsamı, daha iyi kimyasal, termal ve mekanik özelliklere sahip yeni veya geliştirilmiş membran malzemelerinin üretilmesi, geçirgenlik ve seçicilik özelliklerinin iyileştirilmesi ile sermaye ve işletme maliyetlerinin azalması sayesinde genişlemeye devam etmektedir. İnsani tüketim için kimyasal ve mikrobiyolojik olarak güvenli, yüksek kaliteli içme suyu elde edilmesinde membran teknolojileri sıklıkla tercih edilmektedir. Su arıtma tesisleri genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma süreçlerinden oluşmaktadır. Membranlar sıvı-katı ayrımında, özellikle bakteri ve diğer mikroorganizmaların, partiküllerin ve doğal organik maddelerin giderilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Membranların içme suyu arıtımında kullanılması, kimyasal ön arıtma ihtiyacını ortadan kaldırmak, kimyasal kullanımını azaltmak, devridaim ve yeniden pompalama ihtiyacını en aza indirmek gibi çeşitli avantajlar sunarak arıtma sürecini basitleştirmektedir (Fane ve ark., 2011).

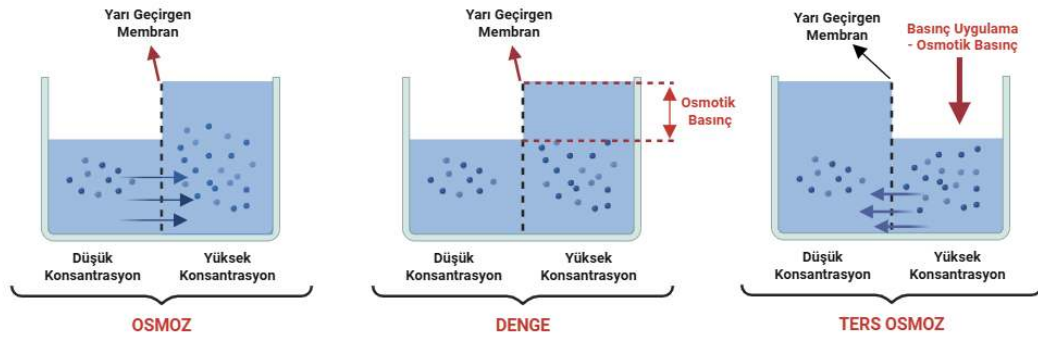
Deniz suyundan tuz giderme proseslerinde en yaygın kullanılan iki membran prosesi, TO ve ED/EDI prosesleridir (Tong ve Elimelech, 2016; Koyuncu ve ark., 2018).

Ters Osmoz (TO)

Yeryüzünün suya ulaşmakta güçlük çeken bazı bölgelerinde tatlı su kaynaklarının kıtlığı önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda, deniz suyunun tuzdan arındırılması hem içme hem de sulama amaçlı tatlı su temini için uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır. Tuzdan arındırma işleminde kullanılan başlıca teknolojilerden biri, ozmotik basıncın üzerinde bir basınç altında tuzdan arındırıcı membranlar kullanan TO prosesleridir (Ahunbay, 2019).

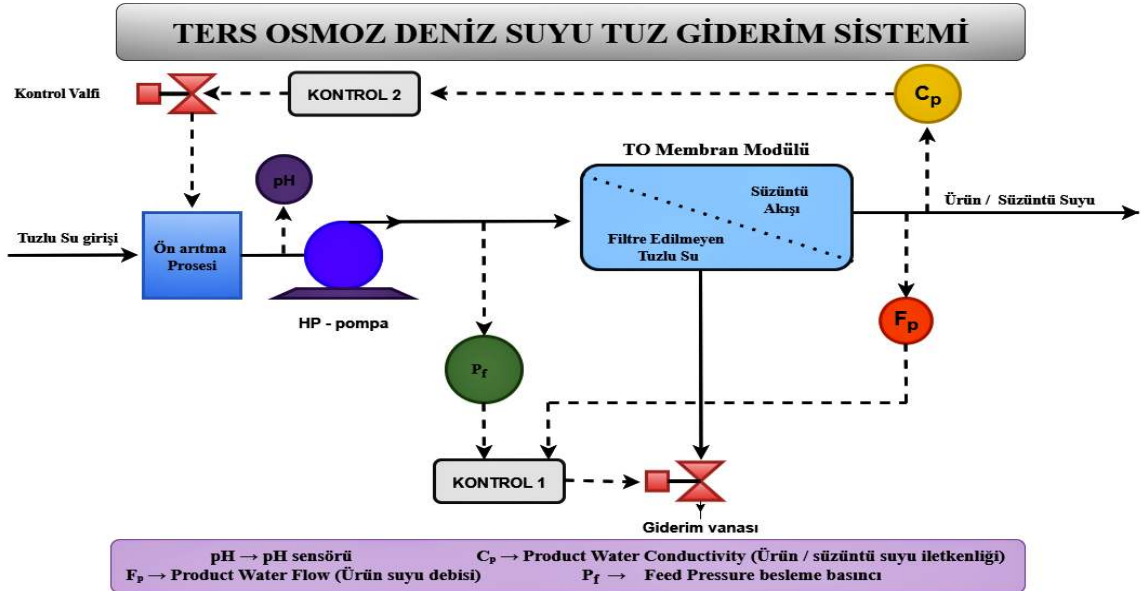
Osmoz, 1748 gibi erken bir tarihte keşfedilen doğal bir olaydır. Bu süreç, düşük çözünen madde konsantrasyonuna sahip bir çözeltinin, yarı geçirgen bir zar (membran) üzerinden yüksek çözünen madde konsantrasyonuna sahip bir çözeltiye difüzyonu şeklinde gerçekleşir. Membranın her iki tarafındaki sıvı konsantrasyonu dengeye ulaşana kadar bu geçiş devam eder. Membranın iki

tarafı arasındaki basınç farkı, çözeltinin ozmotik basıncına eşittir. Membran boyunca oluşan kimyasal potansiyel gradyanı, suyun taşınımı için itici güç görevi görür. Ozmotik basıncın üzerinde bir basınç uygulandığında, saf su yüksek çözünen madde konsantrasyonu tarafından bir membran aracılığıyla düşük çözünen madde konsantrasyonu tarafına doğru akar ve böylece suyun çözeltiden ayrılması sağlanır. Bu işlem, normal osmozun tersi bir süreçtir ve "ters osmoz" (TO) olarak adlandırılır (Şekil 1.4). İki sıvı fazı arasındaki membran yarı geçirgen özellikte olup, suyun geçişine izin verirken çözünen maddelerin geçişini engeller. Bu süreci tanımlamak için "hiperfiltrasyon" terimi de kullanılmakla birlikte, yaygın olan kullanım TO'dur (Lawrence ve ark., 2011).



Şekil 1.4. Osmoz ve Ters Osmoz (Lawrence ve ark., 2011)

TO prosesi ile tuz giderimi için geliştirilmiş akım diyagramı Şekil 1.5'te gösterilmiştir (Natwar ve ark., 2019).



Şekil 1.5. TO Tuz Giderim Sistemi Akış Diyagramı (Natwar ve ark., 2019)

TO sistemi; ön arıtma, yüksek basınç pompası, membran modülü ve son arıtma olmak üzere dört ana bölümden oluşmaktadır (Gambier ve ark., 2009). İlk aşamada, yani ön arıtmada, denizden veya başka bir kaynaktan elde edilen tuzlu su, suda bulunan ana safsızlıkları gidermek için kimyasal

ve fiziksel bir işlemten geçirilerek filtrelendirir. Bu işlem, TO membranının ömrünü uzatmak açısından TO tuzdan arındırma tesislerinde büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, kireçlenmeyi ve kirlenme riskini azaltır. Bir sonraki aşamada, ön arıtma işleminden geçen suyun basıncını artırmak için bir yüksek basınç pompası kullanılır. Sonraki aşamada, basınçlandırılan su bir membran montaj modülüne beslenir. Membran montaj modülü, basınçlı besleme suyuna dayanacak kadar güçlü bir yapıya sahip olmalıdır. Bu nedenle, TO membran montaj modülleri genellikle kompozit poliamid tipi membranlardan oluşur ve bu tür membranlar birçok TO tuzdan arındırma tesisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Membran prosten geçen su, iki farklı çıkışa ayrılır: bir tarafta tatlı su bir depolama tankında birikirken, diğer tarafta tuzlu su tahliye kanalına yönlendirilerek atılır. Elde edilen tatlı su, son aşamada inhibitörler eklenerek ve pH değeri uygun seviyeye ayarlanarak son işleme tabi tutulur (Rathore ve ark., 2015).

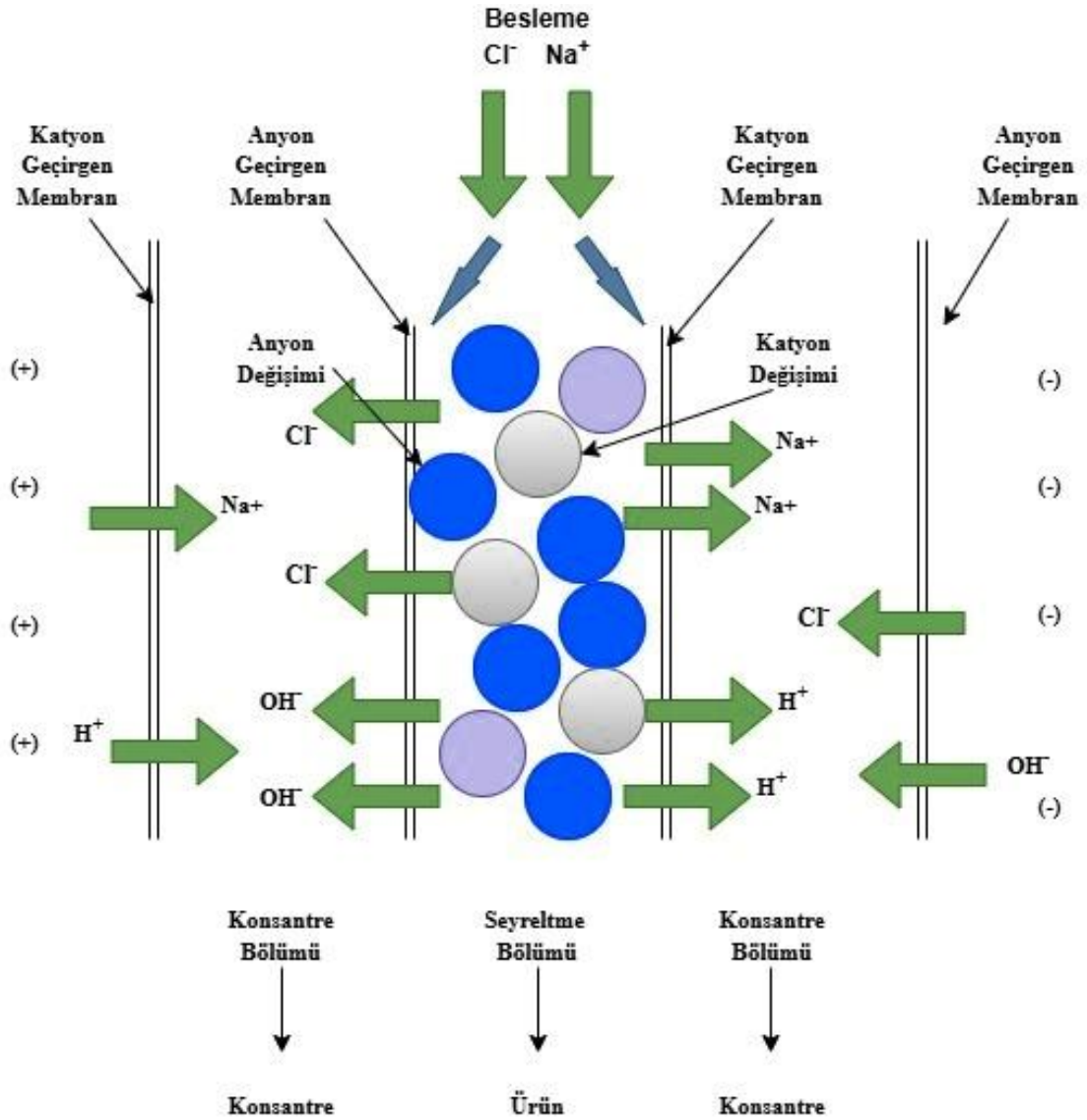
Elektrodiyaliz (ED) ve Elektrodeiyonizasyon (EDI)

Elektrodiyaliz (ED), bir membran teknolojisi türüdür ve elektrokimyasal bir işlemle tuzu sudan ayırmak için kullanılır. Bu proses, iyonların seçici hareketlerine dayanan bir membran arıtma yöntemidir ve iyon değişimi prensibi üzerine kuruludur. 1950'lerden günümüze kadar ticari olarak kullanılmaktadır (Koyuncu ve ark., 2018).

ED'de iyonik bileşenler, bir elektrik alanının itici gücü kullanılarak membranlar aracılığıyla sulu çözeltilerden uzaklaştırılır. ED'de kullanılan membranlar seçici ve yarı geçirgen özellikte olup, yalnızca anyonların veya katyonların geçişine izin verir. Bu proseste, anyon değişimli ve katyon değişimli olmak üzere iki tip membran kullanılmaktadır. Bu membranlar, birbirleriyle sıralı bir şekilde düzenlenerek birçok hücre çifti oluşturur. Her bir anyon ve katyon değişimli membranlar, birçok hücre çifti oluşturur. ED'de iyonik bileşenler, elektrik alanının itici gücü sayesinde membranlar aracılığıyla sulu çözeltilerden ayrıştırılır. Bu ayırım, yüklü maddelerin doğasından kaynaklanmaktadır. Deniz suyunun tuzdan arındırılması sırasında, tuzun çözünmesi Na^+ , Ca^{2+} ve Mg^{2+} gibi pozitif yüklü katyonların ve Cl^- gibi negatif yüklü anyonların oluşmasını sağlar. Katyonlar ve anyonlar sırasıyla katot ve anot tarafından çekilir ve daha sonra uzaklaştırılır. Sonuç olarak, arıtılan su daha az iyonik madde içerir. Tipik bir elektrodiyaliz tesisi, %50-90 arasında dönüşüm oranıyla çalışır ve bu oran tuzlu su devridaim hızına göre belirlenir. Bir ED sistemi, geniş bir pH aralığında (pH 1.0-13.0) ve geniş bir sıcaklık aralığında (43°C'ye kadar) çalışabilir. ED'nin işletme ve bakım maliyeti TO'ya kıyasla biraz daha yüksektir (Lawrence ve ark., 2011).

ED prosesinin bir dezavantajı, membran yüzeylerinin kolayca kirlenebilmesidir. Bu sorunu çözmek için, ED prosesi modifiye edilerek geliştirilmiş bir süreç akışı tasarlanmıştır. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi, bu modifiye edilmiş proseste polarite aralıklı olarak tersine çevrilerek membran yüzeyleri temizlenebilir. Standart ED'de polarite her 15 dakikada bir değiştirilir. Elektrodeiyonizasyon (EDI), ED yığınlarına yerleştirilen reçineler ile geleneksel ED sistemlerinin bir modifikasyonudur. Reçineler, ünitenin elektrik direncini azaltır ve doğru akım potansiyeli

sayesinde su, hidrojen ve hidroksil iyonlarına ayrışarak reçinelerin bir kısmını sürekli olarak rejenere eder. EDI özellikle ultra saf su üretimi için kullanılan bir yöntemdir (Lawrence ve ark., 2011).



Şekil 1.6. EDI süreç akış diyagramı (Lawrence ve ark., 2011)

1.3 Tuz Giderim Teknolojilerinin Avantaj ve Dezavantajları

Tuz giderim sistemleri, tuzlu suyu içme suyu kalitesine dönüştürmek için kullanılan teknolojilerdir. Bu prosesler sayesinde, deniz suyu gibi bol miktarda bulunan tuzlu su kaynakları kullanılarak tatlı su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunur. Ayrıca, su kıtlığı yaşanan bölgelerde içme suyu temin edilmesine yardımcı olur. Arıtılmış tuzlu suyun tarımsal amaçlarla kullanılabilmesi de bir başka avantaj olarak değerlendirilebilir.

Ancak, tuz giderim proseslerinin tüm bu bahsettiğimiz avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu prosesler enerji yoğun süreçler olduğundan yüksek işletme maliyetlerine sahiptir. Ayrıca, tuz giderim tesislerinin geniş alanlara ihtiyaç duyması, çevresel

etkilerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Tuzdan arındırılmış su, korozyon oluşumuna yatkın olduğu için çevre ve insan sağlığı açısından olumsuz etkilere sahip olabilir. Bu nedenle, tuzdan arındırılmış su doğrudan içme suyu olarak kullanıma uygun değildir. Tuzdan arındırılmış su hafif asidik özellikte olup, mineral bakımından da yetersizdir. Bu durum, suyun tamponlanma işlemine tabi tutulmasını gerektirir. Magnezyum, kalsiyum ve sülfat gibi belirli minerallerin eksikliğinin hem insan sağlığı hem de çevre üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir (Lesimple ve ark., 2020). Çizelge 1.1’de tuz giderim sistemlerinin avantaj ve dezavantajları özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Tuz Giderim Teknolojilerinin Avantajları ve Dezavantajları

Teknoloji	Avantajlar	Dezavantajlar	Durum
Çok Etkili Damıtma (MED)	- Su kalitesinin yüksek olması - Düşük enerji tüketimi (Tek kademeye kıyasla)	- Alan Gereksinimi - Korozyon sorunu - Yüksek enerji talebi (TO’ya kıyasla)	Ticari
Çok Aşamalı Flaş (MSF)	- Kireçlenmeyi gidermek için yapılan bakım işlemleri MED'dekinden daha basittir - Yüksek su kalitesi - Yüksek nominal kapasite	- Yüksek enerji talebi - Büyük yatırım - Korozyon sorunu - Yavaş başlatma - Tüm tesis bakım için durdurulması	Ticari
Mekanik Buhar Sıkıştırma (MVC)	- Yüksek su kalitesi - Düşük enerji tüketimi	Düşük üretim kapasitesi	Ticari
Ters Osmoz (TO)	- Yalnızca elektrik ihtiyacı - Düşük yatırım maliyeti - Birçok yenilenebilir enerji kaynağı ile entegre olabilir - Tesisin modüler yapısı	- Membran Kirlenmesi (Fouling) ve Tıkanma Riski - Membranlar ve kimyasallar için yüksek maliyetler - Yüksek Basınç Gereksinimi	Ticari
Nanofiltrasyon (NF)	Düşük enerji ihtiyacı	Yumuşak su üretir	Deniz suyu için çift aşamalı ünite geliştirme sürecinde
Elektrodiyaliz (ED)	- Yüksek saflıkta tatlı su - Tuz konsantrasyonu ile orantılı enerji tüketimi	- Sadece acı su için (2000 ppm'e kadar) - Sistem tarafından giderilmeyen bakteriyel kirleticiler	Ticari
Elektrodeiyonizasyon (EDI)	Potansiyel olarak ED'den daha verimlidir	Sadece acı su için (2000 ppm'e kadar)	Geliştirme sürecinde

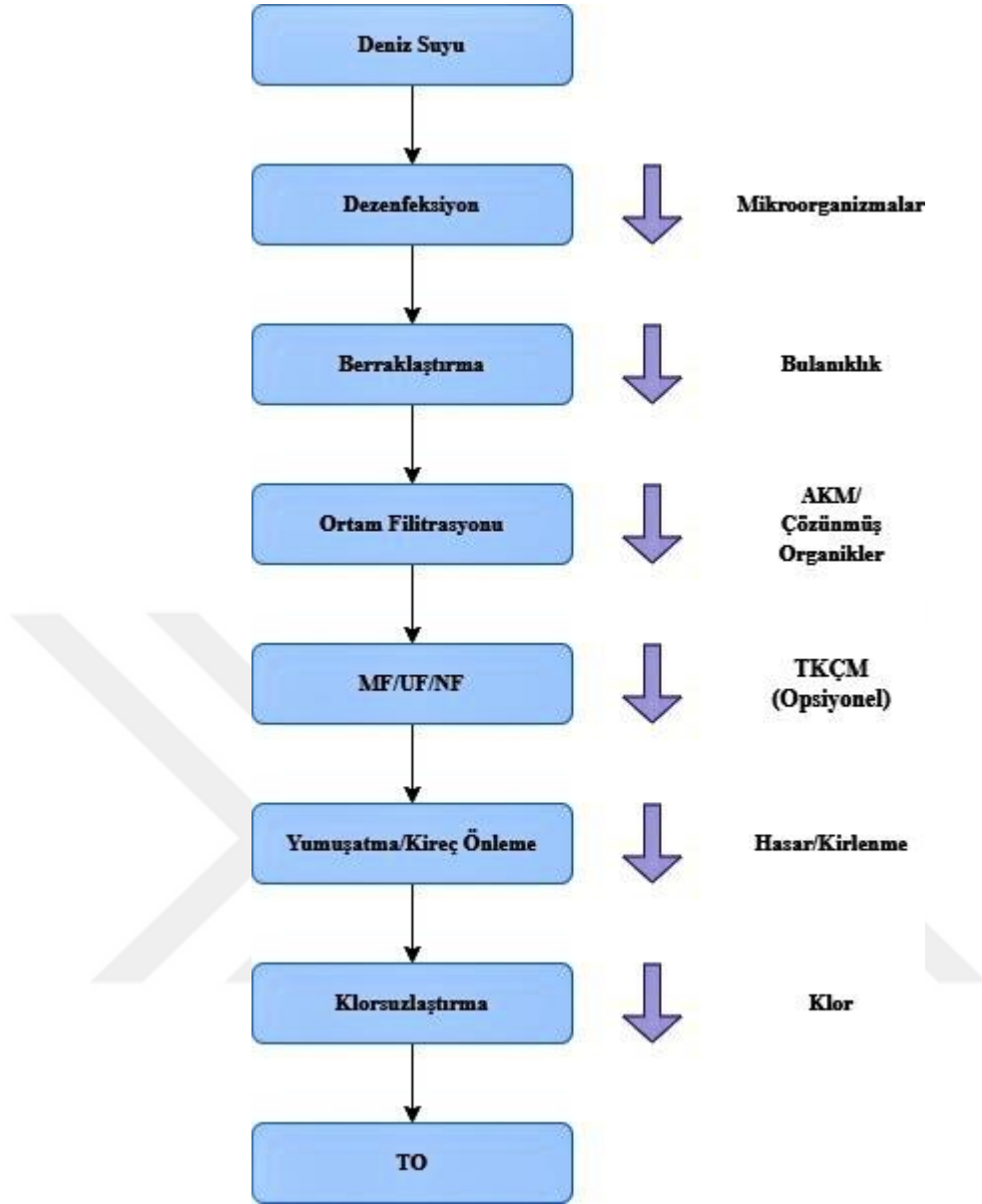
1.4 Tuz Giderim Proseslerinde Ön Arıtma

Herhangi bir tuz giderim prosesi için etkili bir ön arıtma sistemi son derece önemlidir. Bulanıklık, mikroorganizmalar, kolloidler, çözünmüş organik ve inorganik maddeler, toplam çözünmüş katı madde (TÇKM), silt yoğunluğu indeksi (SDI) ve diğer kirleticilerin konsantrasyonunun, sonraki işlemler için kabul edilebilir seviyelere düşürülmesi amacıyla besleme suyunun ön arıtma işleminden geçirilmesi gerekmektedir. Günümüzde kullanılan ön arıtma yöntemleri, geleneksel ve membran bazlı yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

Geleneksel ön arıtma yöntemleri arasında çökeltme ve filtrasyon gibi fiziksel yöntemler; havalandırma ve biyo-reaktörler gibi biyolojik yöntemler; koagülasyon, flokülasyon ve klorlama gibi kimyasal yöntemler ile dezenfeksiyon yöntemleri bulunmaktadır. Son yıllarda ise membran bazlı yöntemler ön arıtma süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Mikro-filtrasyon (MF), ultra-filtrasyon (UF), nano-filtrasyon (NF), elektriksel olarak iletken membranlar ve membran biyo-reaktörler (MBR) gibi membran teknikleri bu yöntemlere örnek olarak verilebilir.

Membran sistemler, kirlenme ve kireçlenmeye karşı oldukça hassastır. Bu nedenle, yeterli ön arıtma adımlarının uygulanması büyük önem taşır. Bu adımlar, değiştirilmesi pahalı olan membranların kullanım ömrünü uzatarak işletme maliyetlerini düşürmeye katkıda bulunur (Poirier ve ark., 2023).

Şekil 1.7, deniz suyunun TO prosesi ile arıtılmasından önce uygulanabilecek ön arıtma işleminin bir örneğini göstermektedir. Biyolojik kirlenmeyi önlemek amacıyla dezenfeksiyon işlemi uygulanır. Ardından, bulanıklığı azaltmak için durultma/berraklaştırma işlemi gerçekleştirilir ve kalan askıda katı maddeleri gidermek için ortam filtrasyonu kullanılır. TO membranının enerji gereksinimini azaltmak ve toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) giderimini artırmak için, ortam filtrasyonu işlemi sonrasında bir mikro-filtrasyon (MF), ultra-filtrasyon (UF) veya nano-filtrasyon (NF) membranı yerleştirilebilir. Ayrıca, membranlarda oluşabilecek hasar ve kireçlenmenin önlenmesi için yumuşatma ve klorsuzlaştırma işlemleri kullanılır (Bonnelye ve ark., 2004; Poirier ve ark., 2023).



Şekil 1.7 TO ile tuz giderimi öncesi ön arıtma proses örneği (Poirier ve ark., 2023)

1.5 Tuz Giderimi Proseslerinde Maliyet Analizi

Tuz giderim tesislerinin maliyetlerini etkileyen faktörler arasında besleme suyu kalitesi, tesis kapasitesi, saha özellikleri ve yasal gereklilikler bulunmaktadır (Younos, 2005). Bir TO tuz giderim tesisinde maliyetler, ilk yatırım maliyetleri (İYM) ve işletme ve bakım maliyetleri (İBM) olarak iki ana gruba ayrılır.

İYM, direkt ilk yatırım maliyetleri ve dolaylı ilk yatırım maliyetleri olarak iki alt başlıkta incelenebilir. Direkt İYM, projelendirme ve mühendislik, arazi temini ve düzenlemesi, alt yapı (elektrik, su ve mekanik) düzenlemeleri, ekipman alımları, membran alımları ve benzeri giderleri kapsar. Dolaylı İYM ise inşaat işleri ve bilinmeyen giderlerden oluşur.

İşletme ve bakım maliyetleri (İBM) ise enerji, kimyasal maddeler, parça değişimi, membran değişimi, işçilik, bakım ve diğer giderler olarak sınıflandırılabilir. (Koyuncu ve ark., 2018).

1.5.1 İlk Yatırım Maliyetleri (İYM)

İYM, doğrudan ve dolaylı sermaye maliyetlerini içerir. Dolaylı sermaye maliyeti, genellikle toplam doğrudan sermaye maliyetinin bir yüzdesi olarak varsayılır. Dolaylı maliyetler, navlun ve sigorta, inşaat genel giderleri, mal sahibinin maliyetleri ve beklenmedik durum maliyetlerini içerebilir. Kurulması düşünülen bir TO tuz giderim tesisine ait doğrudan ve dolaylı maliyetler çizelge 1.2’de gösterilmiştir (Younos, 2005).

Çizelge 1.2. TO Tuz Giderim Tesisine Ait Doğrudan ve Dolaylı Maliyetler (İYM)

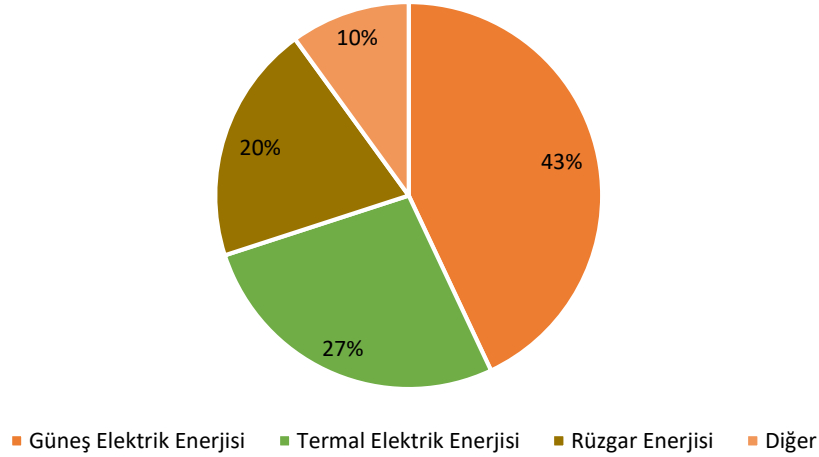
Doğrudan Maliyetler	Dolaylı Maliyetler
Arazi	Nakliye ve Sigorta
Üretim Kuyuları	İnşaat Genel Giderleri
Yüzey Suyu Alma Yapısı	Mal Sahibinin Maliyetleri
Proses Ekipmanları	Beklenmedik Durum Maliyetleri
Yardımcı Ekipmanlar	
Binalar	
Konsantre Bertarafı	

1.5.2 İşletme ve Bakım Maliyetleri (İBM)

TO tuz giderim tesislerinde en önemli işletme maliyeti enerji tüketimidir. Bunun başlıca nedeni, TO membranlarının NF membranlarına kıyasla daha yüksek basınçlarda çalıştırılmasıdır. Bunun yanında, kimyasal giderler NF tesislerine göre daha düşük bir paya sahip olmakla birlikte, membran değiştirme maliyetleri daha yüksektir. (Koyuncu ve ark., 2018).

Tuz giderim sistemlerinin enerji tüketen tedarik ağı deniz suyunun alınması ve ön arıtma, tuz giderimi, suyun depolanması ve suyun dağıtımı olarak dört aşamaya ayrılır (Al-Nory ve Graves, 2013; Balfağih ve ark., 2017). Modern bir TO tuz giderim tesisi için enerji tüketimi 2-4 kWh/m³ aralığındadır (Amy ve ark., 2017; Park ve ark., 2020). TO tesislerinde membran değişim maliyetleri %13-25 arasında değişirken, kimyasal sarfiyat maliyetleri %8-15 aralığındadır. Membranların kullanım ömrü yaklaşık 5-7 yıl olmakla birlikte, kimyasal temizlemenin düzenli ve doğru şekilde yapılması durumunda 10 yıla kadar kullanılabilir. TO maliyetleri, konsantre yönetimi ve enerji geri kazanımı optimizasyonu ile daha da düşürülebilir (Koyuncu ve ark., 2018).

Tuz giderim tesisleri için uygun enerji kaynağı, mevcut enerji kaynaklarına ve belirli bir konumdaki tuzlu suyun spesifik özelliklerine bağlıdır (Busch ve Mickols, 2004; Miller ve ark., 2015). Halihazırda faaliyet gösteren tuz giderim tesislerinin büyük bir çoğunluğu, ana enerji kaynağı olarak fosil yakıtları veya fosil yakıtlardan üretilen elektriği kullanmaktadır (Forstmeier, 2007; Ghermandi ve Messalem, 2009). Son yıllarda, yeşil enerji (rüzgâr, güneş, jeotermal, gelgit ve dalga enerjisi) kullanımına yönelik artan farkındalık, tuz giderim tesislerinde de bu alana doğru bir yönelim başlatmıştır. Şekil 1.8’de, dünya genelindeki yenilenebilir enerji tabanlı tuz giderim tesislerinin yüzdesi gösterilmektedir. TO tuz giderim tesisleri için yeşil enerji doğrudan veya elektrik üretiminde kullanılarak maliyetlerim düşürülmesine katkı sağlayabilir (Dunnett ve Wallace, 2009).



Şekil 1.8. Dünya genelindeki yenilenebilir enerji tabanlı tuz giderim tesislerinin yüzdesi (Dunnett ve Wallace, 2009)

1.5.3 Tuz Giderimi Proseslerinde Ölçek Büyütme

İnşası planlanan bir TO tuzdan arındırma tesisinde yapılacak olan ölçek büyütme prosesi için, alan gereksinimi, membran elemanlarının bileşenlerinin sayısı, basınçlı kaplar, borular ve kullanılan enstrümanlar ve büyük miktarda atık bertarafı (tuzlu su) gibi konular bu proseste öne çıkan unsurlardır (Wenten ve ark., 2016). Planlanan bir tesisin inşa aşamasına başlamadan önce, herhangi bir prosesin laboratuvar ölçeğinde kanıtlanması ve optimize edilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerin ardından, tüm süreçleri doğrulamak ve endüstriyel ölçekli süreci simüle etmek için pilot tesis aşamasına geçilir (Piccinno ve ark., 2016). Ölçek büyütme prosesi, sistemin yetersiz veya aşırı boyutlandırılmasının maliyetli sonuçlarından kaçınmayı hedefler (Lilley, 2005).

Büyük ölçekli TO tuz giderim tesislerinde kullanılan alan gereksinimi ve bileşenler, yatırım maliyetinin artmasına neden olur ve bu durum toplam maliyet artışı olarak geri döner. Ayrıca, tuzlu su deşarj yönetimi, çevre üzerindeki etkisi nedeniyle endişe verici bir sorun teşkil etmektedir. Sonuç olarak, TO tuzdan arındırma prosesinin ölçek büyütme adımlarında, yukarıda bahsedilen bu faktörlerin dikkate alınması büyük önem taşır (Wenten ve ark., 2016).

1.6 Tuz Giderim Teknolojilerinde Yapay Zekâ (AI) Kullanarak Modelleme ve Optimizasyon

Uygarlığın gelişim evrelerini incelediğimizde, ateşin keşfi, elektriğin keşfi, ilaçların keşfi ve ilaç endüstrisinin gelişimi sayesinde insanlığın ölümcül hastalıkları yenmesi, buhar makinelerinin icadıyla endüstriyel alanda yaşanan devasa gelişmeler gibi dönüm noktaları karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde ise, bu büyük çığır açıcı olaylara benzer şekilde, yapay zeka (AI) teknolojilerinin toplumların yararına kullanılmaya başlanmasıyla insan hayatının daha da kolaylaşması beklenmektedir (Acemoğlu ve Johnson., 2023).

Tuz giderim proseslerinde yapay zeka (AI), sensörlerden gelen verileri analiz ederek tesis performansını optimize etmek, enerji kullanımını azaltmak ve işletme verimliliğini artırmak için kullanılabilir. Yapay zeka (AI) ve makine öğrenimi (ML) gibi akıllı yöntemlere yönelik artan ilgi, membran bazlı ayırma tekniklerinde önemli ilerlemelerin yaşanmasına zemin hazırlamıştır.

Yapay zeka (AI) terimi ilk olarak 1956 yılında ortaya atılmıştır. Günümüzde ise, Yapay Sinir Ağları (YSA), Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) ve Model Ağaçları gibi modern AI tabanlı tahmin teknikleri, çeşitli endüstrilerde gerekli parametrelerin sonuçlarını tahmin etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi tekniklerle hibrit şekilde kullanılarak büyük bir uygulama potansiyeli göstermiştir. Şekil 1.9'da, yapay zeka, makine öğrenimi, derin öğrenme ve açıklanabilir yapay zeka arasındaki şematik bağlantı gösterilmiştir (Yuan ve ark., 2023).



Şekil 1.9. Yapay zeka, makine öğrenimi, derin öğrenme ve açıklanabilir yapay zeka arasındaki şematik bağlantı (Yuan ve ark., 2023)

Yapay zekanın bir dalı olan makine öğrenimi, aracılığıyla verileri analiz etmek ve bu verilerdeki potansiyel kalıpları belirleyerek yeni bilgileri tahmin etmek için kullanılmaktadır. Güncel veri analizi ve işleme yöntemi olan makine öğrenimi, yüksek hassasiyeti, esnek özelleştirme yetenekleri ve kolay genişletilebilir özellikleri sayesinde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhu ve ark., 2022). Makine öğrenimi, pratikte uygulanmadan önce veri toplama, uygun algoritma seçimi, model eğitimi ve model doğrulama gibi adımların gerçekleştirilmesini gerektirir.

Deniz suyundan tuz giderimi için membran bazlı proseslerde, membran kirlenmesini anlamak ve tahmin etmek amacıyla membran akısı, transmembran basıncı, kirlenme (tuz) giderimi ve diğer işletme parametrelerine dayanan mekanik modeller geliştirilmiştir. Modelleme, gerçek dünyada meydana gelen davranışları bir denklem içerisinde ifade eden matematiksel veya istatistiksel işlemler topluluğudur (Kaya, 2017). Modellemeler; tam ölçekli bir sürece müdahale etmeden ve etkinliğini kesintiye uğratmadan teknolojik iyileştirme ve kontrol stratejilerini önceden test etmek için oldukça yararlıdır (Jeppsson ve ark., 2013; Man ve ark., 2017). Modellerin temel yapı taşları verilerdir. Endüstri 4.0'ın gelişimiyle birlikte yazılımsal hesaplama programları, yeni modeller

sunmanın yanı sıra klasik modelleri de geliştirerek veri teknolojisi koleksiyonunu zenginleştirmiştir. Veriye dayalı modeller genellikle ucuz, doğru, hassas ve daha da önemlisi esnektir. Veriler ne kadar doğru elde edilirse, modeller de o kadar gerçeğe yakın davranışlar sergiler. Bu nedenle, farklı karmaşıklık seviyelerine sahip veri çalışmalarının daha etkili bir şekilde optimize edilebileceği ve YSA modelleriyle daha iyi analiz edilebileceği söylenebilir (Araghinejad, 2013).

Optimizasyon, bir sistemin veya sürecin en iyi sonuca ulaşması için tasarlanması veya ayarlanması sürecini ifade eder. Temel amacı, belirli bir hedefi maksimize etmek veya minimize etmek için en uygun koşulları bulmaktır. Optimizasyon ve YSA modelleri, farklı alanlarda kullanılan iki farklı kavramdır (Lee ve ark., 2022). TO membran prosesi ile tuz gideriminde modelleme ve optimizasyon çalışmaları yapılarak sistem performansının artırılabilirliği ve maliyetlerin nispeten azaltılabilirliği öngörülmektedir.





2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Tuz Giderim Proseslerinde Membran Teknolojileri ve Proses Optimizasyonu

Membran teknolojileri kullanılarak tuz giderimi ve optimizasyonu üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda değişik tuz giderim prosesleri kullanılarak farklı tuzlu su bileşenlerinin giderim verimleri rapor edilmiştir. Yapılan çalışmaların bazıları aşağıda özet olarak verilmiştir.

Qadir ve ark. (2020), sulu çözeltilerden metal iyonlarının uzaklaştırılmasını incelemek amacıyla Polieter sülfon (PES)/Karbon moleküler elek (CMS) bazlı karışık matrisli membranlar geliştirmiştir. Çalışmada %15 PES matrisine farklı oranlarda (%1, 3, 5) CMS eklenerek membranlar sentezlenmiş ve performansları basınç, besleme konsantrasyonu ve katyon türü (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sn^{2+}) gibi parametreler altında test edilmiştir. Saf su akısı, permeat akısı ve tuz giderimi üzerine CMS miktarının etkisi değerlendirilmiştir. Optimum performans, %1 CMS içeren membranda elde edilmiş; bu membran hidrofilitiklik, gözenek çapı, yüzey yükü ve termal özellikler bakımından üstün nitelikler göstermiştir. Ayrıca saf su akısı 1,5 kat artmış ve tüm iyonlar için giderim oranı yükselmiştir. Sonuç olarak, karışık matrisli membranların düşük enerji tüketimi ve yüksek seçicilik ile tuz gideriminde umut vadettiği belirtilmiştir.

Qadir ve ark. (2023), membran performansını Genişletilmiş Nernst-Planck temelli Donnan Sterik Gözenek Modeli (DSPM) ile modellemiş ve modelin giderim tahminlerinde başarılı olduğunu göstermiştir. En iyi sonuç, E5C1 membranında elde edilmiş; bu membran NaCl için %60, CaCl_2 için ise 10 bar basınçta %80 giderim sağlamıştır. E5C1'in yapısal parametreleri (0,5 nm gözenek yarıçapı, 16 μm kalınlık, $-6,04 \text{ mol/m}^3$) optimize edilmiştir. Ayrıca yöntemin deney ihtiyacını azaltarak nanofiltrasyon membranlarının performans tahmininde etkili bir araç olduğu yorumunda bulunmuşlardır.

Bargeman G. (2023), farklı basınçlar altında, süzülmeyen kısım (kalıntı) konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak Düşük Tuz Giderimli TO için izin verilen NaCl tutma değerleri, ticari TO ve NF membranları için bildirilen değerler arasında yer almaktadır. Bu durum, Düşük Tuz Giderimli TO membranlarının geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Elde edilen ilişkiler temel alınarak, arıtılmış deniz suyu TO kalıntıları ve klor/alkali üretiminden kaynaklanan tükenmiş tuzlu su konsantrasyonu için gerekli konsantrasyon faktörleri belirlenmiştir. Optimizasyon açısından, çok aşamalı sistem tasarımlarının membran alanı ve enerji tüketimi üzerinde kritik etkisi olduğu belirtilmiştir. Geri beslemeli sistemlerde (örneğin, permeatın önceki aşamalara geri döndürülmesi), spesifik membran alanının $\sim 1.2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}$ ve enerji tüketiminin $28.9 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ seviyelerinde optimize edilebileceği hesaplanmıştır. Ayrıca, osmotik basınç verimliliği (η_p) ve konsantrasyon polarizasyonunun ihmal edildiği durumlarda model sonuçlarının pratikle uyumlu olduğu, ancak yüksek tuz konsantrasyonlarında membran geçirgenliğinin düşmesinin ekonomik fizibiliteleri etkileyebileceği tartışılmıştır.

Atia ve ark. (2023), seviyelendirilmiş su maliyetini en aza indirmek amacıyla bir maliyet optimizasyonu yaklaşımı kullanarak düşük tuz giderimi sağlayan ters osmoz hakkında kapsamlı analizler yapmışlardır. Su arıtma için açık kaynaklı bir simülasyon ve optimizasyon yazılımı olan WaterTAP'ı (Su Arıtma Tekno Ekonomik Değerlendirme Platformu) kullanarak TO modülü ve diğer ekipmanlar için ayrıntılı modeller geliştirmişlerdir. Düşük tuz giderimi sağlayan ters osmozun diğer evaporatif ve membran bazlı teknolojilere göre yüksek tuzlulukta tuzdan arındırmanın enerji tüketimini ve maliyetini azaltma potansiyeline sahip olduğu bildirilmiştir.

Xing ve ark. (2023), $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ bazlı inorganik membranlar kullanarak tatlı ve tuzlu sulardan uranyumun uzaklaştırılmasını incelemişlerdir. Çalışmalarında pH değeri, sıcaklık, basınç, tuz konsantrasyonu, çözelti bileşimi gibi çeşitli fiziksel-kimyasal parametreler, farklı metal (U, Ca, Mg, Na, vb.) ayırıştırıcıları üzerindeki etkileri açısından değerlendirmişlerdir. Uranyumun konsantre edilmesi için U'nun Na'ya verimli bir şekilde ayrılmasına yönelik deneysel koşullar belirleyerek, Doğal veya sentetik deniz suları ve tatlı sularla yapılan filtreleme deneyleri sonucunda, CaCl_2 veya MgCl_2 varlığının U dahil her türün gideriminin engellediğini tespit etmişlerdir. PHREEQC yazılımı ile yapılan tür dağılımı simülasyonları, uranyumun karbonat kompleksleri gibi yüksek yüklü türlerin membran yüzeyiyle elektrostatik etkileşimlerinin giderimi artırdığını göstermiştir. Ancak yüksek tuzluluk (örneğin deniz suyu) ve $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ gibi divalent iyonların varlığı, elektriksel etkileri maskeleyen için uranyum giderimini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu sonuçlar, tuz gideriminde iyonik kuvvet ve çözelti bileşiminin optimizasyonunun önemini ortaya koymakta olduğunu vurgulamışlardır.

Jun ve ark. (2020), NF membranlarının yüzey yükü ve zeta potansiyeli gibi elektrokimyasal özelliklerinin tuz giderim davranışı üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemişlerdir. Potansiyometrik titrasyon ile yüzey yükü ve elektroforez yöntemi ile zeta potansiyeli ölçülmüş; bu parametrelerin pH, iyonik kuvvet, iyon türleri ve organik kirlenme gibi koşullar altında nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Yüzey yükünün membranın kimyasal fonksiyonel gruplarından (karboksilik asit ve amin) kaynaklandığı, zeta potansiyelinin ise elektroozmotik ve elektroforetik akışların kesme düzlemindeki etkileşimleri yansıttığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar, iyonik kuvvet artışının her iki parametreyi de azalttığını ve bu durumun tuz giderim verimliliğini düşürdüğünü göstermiştir. Ancak, farklı iyon türleri ve nötr organik kirleticilerle kirlenmiş membranlarda zeta potansiyelinin, iyon valensi ve difüzyon katsayısı gibi taşınım özelliklerini daha iyi temsil ettiği vurgulanmıştır. Bu bulguların, tuz giderim mekanizmasının temelinde Donnan dışlama etkisinin yanı sıra iyon taşınım dinamiklerinin de etkili olduğunu belirtmişlerdir. Modelleme açısından bakıldığında, zeta potansiyelinin Smoluchowski denklemi ve Nernst-Planck yaklaşımı ile ilişkilendirilmesi, membran yüzeyindeki elektrokimyasal davranışın matematiksel olarak tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle, iyon türlerine bağlı giderim eğilimlerinin zeta potansiyeli ile korelasyonu, optimizasyon süreçlerinde bu parametrenin bir gösterge olarak kullanılabileceğini işaret etmektedir. Organik kirlenme durumunda ise yüzey yükü ve zeta potansiyelindeki değişimlerin tuz konsantrasyon

polarizasyonunu artırdığı ve membran performansını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuçların, kirlenme etkilerinin modellemeye entegre edilmesi gerekliliğini ifade etmişlerdir.

Mansour (2023), tersinmez termodinamik teori ve çözelti difüzyon teorisi birleştirilerek, çözünen konsantrasyon polarizasyonunu da dikkate alan yeni bir TO taşıma modeli geliştirilmiştir. Model; basınç, akış hızı, sıcaklık, pH ve tuzluluk gibi değişken koşullarda proses optimizasyonu için kullanılmıştır. Bor gideriminin çoğunlukla difüzyonla gerçekleştiği, ancak yüksek pH ve basınçta konvektif taşınımın da %20'ye kadar katkı sağladığı belirlenmiştir. Besleme tuzluluğunun azaltılması geri kazanımı %20 artırırken, basınç artışı hem tuz hem de bor giderimini iyileştirmiştir. 40–55 bar aralığında performans artışı sağlanırken, >60 bar'da polarizasyon etkisinin kritik olduğu görülmüştür. Spesifik enerji tüketiminin (SEC) optimum değeri 2,52 kWh/m³ (geri kazanım %35,9; akış 0,002 m³/s) olarak bulunmuş, akış hızı arttıkça optimum SEC'in %39,6 yükseldiği ve geri kazanımın %11,6 azaldığı tespit edilmiştir.

Srivastava ve ark. (2022), Delhi-NCR bölgesindeki acı yeraltı sularının arıtımı için Nanofiltrasyon (NF), Ters osmoz (TO) ve Nanofiltrasyon-Ters Osmoz (NF-TO) hibrit membran filtrasyon sistemlerinin performans verimliliklerini karşılaştıran bir inceleme yapmışlardır. Yanıt yüzey metodolojisinin (RSM) merkezi kompozit tasarım (MKT), su akışı, tuz giderimi, permeat geri kazanımı ve spesifik enerji tüketimi (SEC) gibi çeşitli çıktıların optimizasyonu ve simülasyonu için öngörücü modeller formüle etmek için uygulanmışlardır. Bu çalışmada üç farklı girdi faktörü (besleme konsantrasyonu, pH ve basınç) değerlendirilmiştir. RSM modelinin sağlaması bir varyans analizi (ANOVA) kullanılarak test ederek ve doğrulamışlardır. Optimum koşulları, NF ve TO membran pilot tesislerinin sayısal optimizasyonu ile belirlemişlerdir. Son olarak, acı yeraltı suyunun iyileştirilmesi için uygun teknolojiyi belirlemek amacıyla optimum koşullar kullanılarak NF ve TO'nun hibrit konfigürasyonları araştırmışlardır. TO membranı yeraltı suyundan TÇKM'nin %99'undan fazlasını elimine etmesine rağmen, daha düşük geri kazanım oranı onu çevresel açıdan elverişsiz hale geldiğini belirtmişlerdir. Sonuçlar, hibrit sistemin geri kazanımının (%40,35) tek başına TO'dan (%18,796) daha yüksek olduğunu ve SEC'in de azaldığını (5.090-3.8 kW H/m³) hesaplamışlardır. Bu nedenle, daha iyi geri kazanım ve daha düşük SEC için acı yeraltı suyunu arıtmak üzere hibrit bir membran düzenlemesini NF-RO ile birleştirmek uygulanabilir bir alternatif olduğu yorumunda bulunmuşlardır. Bireysel moddaki nanofiltrasyon membranının giderim oranı düşük olduğundan, acı suyun iyileştirilmesi için yetersiz olduğunu bildirmişlerdir.

Zhang ve ark. (2023), mikro-kirli suyu arıtan adsorptif dinamik membran için proses optimizasyonunu incelemişlerdir. Çalışma koşullarının (boya konsantrasyonu, karıştırma hızı, karbon nanotüp dozajı, transmembran basıncı ve pH) boya giderimi ve akı üzerindeki etkisini araştırmak için Box-Behnken yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılmıştır. Yüksek belirleme katsayısı değerlerine sahip yanıt yüzeyi metodolojisi deneysel verilere uyarlanmış, bu da polinom yanıt modellerinin boya giderimini ve adsorptif dinamik membran filtrasyon verimliliğini tanımlamak için iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir. Tasarıma göre, en yüksek boya giderim oranını (%100) elde

etmek için optimize edilen koşullar boya konsantrasyonu = 5 mg/L, karıştırma hızı = 210 rpm, karbon nanotüp dozajı = 13 g/m², transmembran basıncı = 0,2 mPa ve pH = 5,8 dir. Üst üste bindirilmiş kontur grafiklerinin grafiksel optimizasyonu, >%95 boya giderimi ve >100 L m⁻² h⁻¹ akı elde etme koşullarının yanı sıra çeşitli çalışma koşulları arasındaki etkileşimleri de yerine getirildiğini hesaplamışlardır. Çalışmalarının yanıt yüzey metodolojisi (RSM)'nin çalışma koşullarının etkisini analiz etmek ve su/atıksu arıtımında adsorptif dinamik membran optimize edilmiş koşullarını sağlamak için uygulanabileceği sonucunu bildirmişlerdir.

Nandala ve ark. (2023), çalışmalarında PES ve Torlon polimerleri kullanılarak çok katmanlı kompozit membranlar (MCM) gözenekli tabakasının üretilmesi ve optimize edilmesine ve bunların genel membran performansı üzerindeki morfolojik etkilerine odaklanmışlardır. PES gözenekli substrattan imal edilen MCM membranları Torlon'a göre 3-4 kat daha yüksek geçirgenlik sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, zeolit tipinin ve % yüklemenin CO₂ gazı geçirgenliğinde seçici tabaka performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gaz geçirgenliği deneylerinden, %6 yüklü 3A zeolit numunesi CO için maksimum geçirgenlik akısı sergilemiştir, bu da seçicilikten ödün vermeden saf Polieter blok amid (PEBAX)/PES membrana kıyasla 1,7 kat ve saf PEBAX/Torlon'a kıyasla 5,8 kattır. Ayrıca, Aspen Hysys kullanılarak yapılan proses simülasyonu, membran bazlı biyometan zenginleştirmenin ekonomik fizibilitesini ortaya koymuşlardır. Genel olarak, çalışma sonuçları Robeson'un grafiği ile karşılaştırılarak MCM tabanlı membran teknolojisinin biyogaz yükseltme prosesi olarak önemli potansiyelini ortaya koymuş olup ve MCM için uygun bir gözenekli destek geliştirilmesine yardımcı olduğunu bildirmişlerdir. Bu bulguların, dolgu malzemelerinin membran performansını optimize etmedeki önemini vurgulamakta olduğunu ifade etmişlerdir.

Rizki ve Ottens (2023), Tek aşamalı membranların yanı sıra, ayırma performansını artırmak için çok aşamalı membran sistemlerini optimize etmek için mekanik modeller, makine öğrenimi modelleri de dahil olmak üzere ampirik modeller veya bunların bir kombinasyonunu kullanarak birleşik dört aşamalı model tabanlı optimizasyon çerçevesi üzerinde çalışmışlardır. Her bir aşamanın önemi ve dikkate alınması gereken kritik noktalar üzerine yoğunlaşmışlardır. Optimizasyon süreçlerini membranların modellenmesi ve optimizasyon sorunlarının programlanması olarak çerçevelendirmişlerdir. İkili karışımlar için, çok aşamalı membran modelleri yalnızca aşamalar arasında karşılıklı bağımlılık yaratan geri dönüşüm akışlarının varlığında gerekli görüldüğünü vurgulamışlardır. Geri dönüşüm akışları genellikle yan ürün akışı hala değerli bileşikler içerdiğinde ortaya çıktığını ve bunun da genellikle belirli bir membrandaki ana ürün ve yan ürün bileşikleri arasındaki düşük seçicilik nedeniyle meydana geldiğini belirtmişlerdir. Geri dönüşümlerin uygulanmasının bir başka nedeninin ise diafiltrasyonda taze solvent ihtiyacını azaltmak olduğunu ekleyerek diafiltrasyonun kendisi, geçirilen bileşiklerin sınırlandırılması nedeniyle genellikle çok aşamalı bir proses olarak tasarlandığını söylemişlerdir. Sonuç olarak, her diafiltrasyon aşamasının taze solvent gerektirdiği ve bu da üretim maliyetini arttıracak. permeat akışını hemen aynı aşamaya geri döndürmek boşuna bir çaba olsa da, sonraki diafiltrasyon aşamasından gelen permeat

akışlarının diafiltrat olarak kullanmak taze solvent ihtiyacını önemli ölçüde azaltacağını bildirmişlerdir.

Yujie ve ark. (2023), ilk aşamada 12 motordan oluşan bir deniz suyu tuzdan arındırma sistemini incelemişler ve bu 12 motorun spesifik parametrelerini ayrıntılı olarak tanıtmışlardır. İkinci olarak, su akışı, su basıncı ve diğer faktörlerin kısıtlamaları kapsamlı bir şekilde dikkate alındıktan sonra, 12 motor için sırasıyla üç kontrol stratejisi önerilmiştir. Sonrasında, deniz suyu tuzdan arındırma ünitelerinin ayrıntılı bir matematiksel modeli ve deniz suyu tuzdan arındırma özelliğine sahip yeni bir güç sisteminin optimum işletim modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon modeli, deniz suyunu tuzdan arındırmanın minimum işletme maliyetini hedeflemekte ve motor gücü gereksinimleri ve su depolama kapasitesi gibi pratik problemlerin kısıtlamalarını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Son olarak, çalışmalarında optimizasyon problemini çözmek için gri kurt optimizasyon algoritması (GWO) kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, makalelerinde önerilen modelin deniz suyu tuzdan arındırma sistemindeki her bir üniteyi hassas bir şekilde kontrol edebileceğini ve sistemin ekonomik faydalarını artırabileceğini gösterdiklerini ileri sürmüşlerdir. Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması (PSO) ve Güve Alevi Optimizasyonu algoritması (MFO) ile karşılaştırıldığında, bu makalede kullanılan algoritmanın küresel optimum çözümü bulabileceğini ve hem daha hızlı yakınsama hızına hem de daha geniş uygulanabilirliğe sahip olacağını ifade etmişlerdir.

Hendrickson ve ark. (2023), tüketicilere en uygun su miktarını ve kalitesini sağlamak için tuz giderim kaynaklarını isale hattı boyunca doğal kaynaklarla harmanlayan bölgesel su tedarik sistemlerini yöneten karar vericiler için modelleme aracı sağlamak üzerine odaklanmışlardır. Bu tür sistemler için başlıca problemleri şu şekilde sıralamışlardır. (1) çok kaliteli kaynaklar ve çeşitli tüketiciler, (2) farklı karar zaman çizelgeleri ve (3) tüketici taleplerinde ve hidrolojik girişlerde belirsizlik. Bu sorunları çözebilmek için (1) tuzluluk değerlendirmeleri için doğrusal olmayan kısıtlamalar (2) farklı karar zaman çizelgelerini ele almak için iki aşamalı bir yaklaşım ve (3) her iki modelleme aşamasında farklı potansiyel senaryolar için doğrusal olmayan optimizasyon modelini çözen senaryo tabanlı bir yöntemi birleştiren bir optimizasyon yaklaşım önermişlerdir. Tuz giderimi yapılan ön yatırımın sistem sağlamlığı ve beklenen işletme maliyeti üzerindeki etkilerinin belirlendiği İsrail Ulusal Su Temin Sistemi kullanılmıştır. Bu yöntemin, yeterli verinin mevcut olmadığı veya gelecekteki koşulları doğru bir şekilde temsil etmeyebilecek dağılımlarla belirsizliğin parametrelendirilmesini gerektirmeyen sistemler için faydalı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, çok kriterli değerlendirmenin deneysel sonuçlarına göre yapılması, modelin çok sayıda belirsiz senaryoyu örneklerken çok büyük bir problem yaratmadan birden fazla rekabet eden hedef arasında bir uzlaşma bulmasını sağladığını belirtmişlerdir.

Qin ve ark. (2023), Tuz giderim prosesleri sırasında temel bileşenler olarak seçilebilecek birçok membran malzemesi bulunduğundan bahsetmişler, Metal-organik yapılar (MOF'lar) ve kovalent organik yapılar (COF'lar) dahil olmak üzere kristal gözenekli malzemeler, yapısal

çeşitlilikleri ve ayarlanabilirliklerinin yanı sıra çeşitli materyalleri periyodik olarak organik yapılarına entegre etme kolaylığı nedeniyle membran tuz giderimde fayda sağlayacağını ileri sürmüşlerdir. Çalışmalarında, MOFs ve COFs tabanlı membranların arayüzey polimerizasyonu (IP), in situ büyüme ve katman katman (LBL) tekniği gibi sentetik stratejiler kullanmışlardır. Ayrıca, çeşitli membran tuz giderim tekniklerindeki uygulamalar, çok sayıda MOF ve COF malzemesine yönelik kriterleri genelleştirmek için incelemişlerdir. Çalışmalarının amacının MOFs ve COFs tabanlı membran tuzsuzlaştırma alanındaki son gelişmeleri özetlemek ve endüstriyel uygulamaları için ileriye dönük strateji olduğunu belirtmişlerdir. MOF'lara ve COF'lara dayalı membranlar TO, NF, FO ve MD gibi farklı membran tuz giderim teknolojileri için uygun olduğunu ve bu da onları bu alanda sürdürülebilir gelişim için umut verici olduğunu belirtmişlerdir. MOF/COF yükleme miktarı, parçacık boyutu ve yüzey hidrofiliği gibi parametrelerin sistematik optimizasyonunun kritik olduğunu vurgulamışlardır. MOF'ların ve COF'ların çeşitli yapıları ve ayarlanabilir kimyasal işlevleri gibi güçlü avantajları, membran tuz giderimi için cazip malzemeler olarak kullanılmalarını sağladığını ileri sürmüşlerdir.

Ahunbay (2019), TO ve NF aşamalarını birleştiren çok aşamalı membran konfigürasyonları değerlendirilmiştir. Önerilen düşük basınçlı yüksek geri kazanım (LPHR) prosesi, tek aşamalı TO'ya göre daha düşük toplam maliyetle tatlı su üretirken, güçlü bir tuzlu su da elde etmektedir. Analizlerde NF aşama sayısının artmasıyla gerekli ozmotik basınç farkı ve SEC'in azaldığı, bu nedenle 5 aşamalı konfigürasyonun daha avantajlı olduğu görülmüştür. 35.000 ppm tuzlu su için yapılan ekonomik değerlendirmeler, 58–65 bar basınç farkında %70'in üzerinde geri kazanımın ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu göstermiştir. DOW™ WAVE yazılımıyla yapılan modelleme ise, ticari membranlar kullanılarak 55 bar basınçta %73 toplam geri kazanım sağlanabileceğini ve hesaplanan SEC değerlerinin termodinamik limitlerle uyumlu olduğunu ortaya koymuştur.

Al-Rajabi ve ark. (2024), Çalışmalarında maliyet analizi, hibrit kapasitif deiyonizasyon (CDI) tuz giderim teknolojileri, CDI teknolojisinde sürdürülebilirlik, süreç optimizasyonu, kullanılan matematiksel modeller üzerinde çalışmışlardır. İyon değiştirme membranlarının membranlı kapasitif deiyonizasyona dahil edilmesi, seçiciliği ve genel hücre performansını artırdığı hesaplanmıştır. CDI, düşük ve orta tuz içeriğine (<10 g/L) sahip suyu tuzdan arındırmak için kullanılırken, akış elektrotlu kapasitif deiyonizasyon deniz suyu da dahil olmak üzere daha yüksek tuzlulukta besleme suları için bir çözüm olacağını ifade etmişlerdir. CDI'nın tuzların (%92'ye kadar ulaşabilir), sudaki kirleticilerin ve ağır metallerin seçici olarak giderilmesindeki (arseniğin %98'e kadar giderilmesi) etkinliğinin değerlendirilmesi, geniş kullanım alanını sağladığını hesaplamışlardır. İki çalışma modu da dahil olmak üzere CDI kurulumu ve yapılandırmasının ayrıntılı incelemesi: tek geçiş modu ve kesikli mod ve özellikle tuzlu su arıtımında belirli uygulamalarda her modun önemi, iyon giderme verimliliği, enerji tüketimi, çevrim ömrü ve diğer faktörler dahil olmak üzere önemli CDI performans ölçütleri geniş perspektif sağladığını bildirmişlerdir.

Ahunbay ve ark. (2018), TO ve NF aşamalarını seri olarak birleştiren ve permeat geri dönüşümünü kullanan çok aşamalı TO prosesi araştırılmıştır. Bu konfigürasyon, tek ve iki aşamalı TO ile enerji tasarruflu TO prosesine kıyasla değerlendirilmiş; NF'den gelen permeatın tuzlu su beslemesiyle karıştırılması sayesinde su geri kazanımının arttığı ve TO'da gerekli ayırım oranının düştüğü görülmüştür. Termodinamik analizler, 35.000 ppm deniz suyu için %65 geri kazanımda ≤ 350 ppm tuz içeren su üretildiğini ve SECnet değerlerinde tek aşamalı TO'ya göre %35'e varan azalma sağlandığını göstermiştir. Modelleme ve optimizasyon sonuçları, enerji maliyetlerinin düşerken yüksek geri kazanım ve proses esnekliğinin sağlandığını ortaya koymuştur.

Nam ve ark. (2022), Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) ve Yapay Sinir Ağı (YSA) modelleme tekniklerini kullanarak geliştirilen inseries FO-UF hibrit sisteminin (İleri Osmoz-Ultrafiltrasyon) performansını değerlendirmek için çalışmalar yapmıştır. Elde edilen sonuçlar, yalnızca osmotik olarak tahrik edilen basınçla çalışan güçsüz FO-UF hibrit sisteminin fizibilitesini ortaya koymuştur. Modelleme ve tahmin sonuçları, daha fazla pratik uygulama için tasarlanan düzeneğin ölçeklenebilirliğini genişlettiğini bildirmişlerdir.

Tang ve ark. (2024), yüksek verimli bir tuz giderim performansına ulaşmak için terleme yoğunlaştırmasını dondurma kristalizasyonu ile birleştirme çalışması yapmışlardır. Dondurma sıcaklığı ve süresi: 259,15 K ve 150 dakika, terleme sıcaklığı, ısıtma hızı ve terleme süresi: 272,15 K, 0,5 K/dak ve 120 dakika olarak çalışmışlar ve tuz giderim oranının %70'i aştığını hesaplamışlardır. Donma kristalleşmesi sürecinde, kinetik modeller kristal tabaka büyüme hızı (G_C) ve süper soğuma derecesi (ΔT) arasındaki ilişkiyi açıklamak için kullanılmıştır. Benzer şekilde, terleme aşamasında eriyik akış hızı (Q_r) ile süper ısınma derecesi (ΔT_s) arasında güç yasası ilişkisi kurulmuştur. Bu modeller, proses tasarımı düşük büyüme hızlarının daha homojen kristal yapıları sağladığını ve dolayısıyla tuz tutulumunu azalttığını göstermiştir. Ayrıca, fraktal dilim modeli ile kristal tabakanın mikro yapısı (porozite Φ , ortalama kıvrımlılık $t_{average}$) analiz edilerek, porozitenin termal iletkenlik (λcl) ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Yüksek porozitenin, eriyik akışını kolaylaştırır da ısı transfer verimliliğini düşürdüğünü bildirmişlerdir. Sınır tabakası modeli ise katı-eriyik arayüzündeki tuz dağılımını matematiksel olarak tanımlamış ve etkin dağılım katsayısı (K_{eff}) ile kinetik parametreler arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Bu modelin, tuz giderim oranı (D_R) ile kristal büyüme hızı ve kütle transfer katsayısı (kd) arasındaki ampirik ilişkiyi doğrulayarak proses optimizasyonuna teorik bir temel sağladığını vurgulamışlardır.

Alhseinat ve Sheikholeslami. (2012), TO modülü boyunca lokal ölçeklenme eğilimini termodinamik prensiplere dayalı bir indeks (Scaling Potential Index, SPI) ile değerlendirmiştir. SPI, Gibbs serbest enerjisi, iyon aktiviteleri ve Pitzer etkileşim modellerini kullanarak yüksek tuzluluk koşullarında bile doğru öngörüler sunduğunu bildirmişlerdir. Model, membran kanalı boyunca değişen kirletici konsantrasyonlarını, konsantrasyon polarizasyonunu ve hidrodinamik parametreleri entegre ederek kütle korunumu ve membran transport denklemleri ile birleştirmiştir. Bu sayede, başlangıç basıncı, akış hızı, tuzluluk ve sıcaklık gibi operasyonel değişkenlerin lokal kirlenme

eğilimi üzerindeki etkileri niceliksel olarak simüle edilebilmiştir. Örneğin, artan ilk basıncın SPI'yi yükselterek ölçeklenme riskini artırdığı, yüksek tuzluluğun ise çözünürlük artışı nedeniyle SPI'yi düşürdüğü gösterilmiştir. Ayrıca, membran direncinin düşük olmasının lokal akışı artırarak konsantrasyon faktörünü yükselttiği ve dolayısıyla kirlenme eğilimini tetiklediğini ifade etmişlerdir.

Lesimple ve ark. (2020), korozyon kontrolü, insan sağlığı ve tarımsal ihtiyaçlar olmak üzere üç ana husus göz önünde bulundurularak arıtma sonrası eklenecek minerallerin miktarları ve göreceli oranlarını analiz edilmişlerdir. Geleneksel remineralizasyon yöntemleri, kireçtaşı (CaCO_3) veya dolomit ($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$) çözünmesi gibi kimyasal katkıları ile uygulanmıştır. Ancak bu yöntemler, yüksek kimyasal tüketimi ve çevresel etkileri nedeniyle eleştirilmiştir. Klorür-Sülfat Kütle Oranı (CSMR) ve Larson Oranı (LR) gibi parametreler, boru malzemelerindeki ağır metal salınımını kontrol etmek için optimize edilmiştir. $\text{CSMR} < 0,5$ ve $\text{LR} < 0,4$ hedefleri, kurşun ve bakır korozyonunu önlemek için kritik öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır. Sağlık ve tarım açısından ise, kalsiyum-magnezyum oranı ($\text{Ca:Mg} \approx 2-3$) ve toplam çözünmüş katılar (TDS) gibi parametrelerin optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Değerlendirmeleri sonucunda, Kalsiyum karbonat birikimi ve pH tamponlama yoluyla kurşun ve bakır korozyonunu kontrol edecek parametreler eklenmesi gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Bu parametrelerin kurşun ve bakır korozyon kontrolü için klorürden en az iki kat daha yüksek sülfat konsantrasyonu veya klorür iyonlarından sülfat iyonlarına $< 0,5$, sülfat eklendiğinde, çelik korozyon kontrolü için düşük sülfat ve klorür konsantrasyonları veya Larson oranı $< 0,4$, olması gerektiği ve insan sağlığı için, korozyon kontrolü için her zaman eklenen kalsiyum dışında, magnezyum konsantrasyonu 10 mg/l'den yüksek olmalı ve 20 mg/l'den daha yüksek, kalsiyum / magnezyum oranı 2 ila 3 aralığında, tercihen 3'e yakın olmalı, florür ve iyodür eklenmiyorsa, iyotlu sofra tuzu kullanmaları için topluma bilgi verilmeli ve florür tabletleri sağlanmalı tavsiyesinde bulunmuşlardır. Membran tabanlı remineralizasyon yöntemlerinin, bu hedeflere ulaşmak için geleneksel kimyasal dozajlara kıyasla daha sürdürülebilir bir alternatif sunduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Banakar ve ark. (2020), tuz giderim işlemini yoğunlaştırmak ve daha iyi ısı transferi oranlarına yol açan kireç oluşumunu önlemek amacıyla tuz giderme beslemesi olarak sentetik olarak hazırlanmış deniz suyuna ultrason ön işleminin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, 20 kHz frekansta çalışan ultrasonik akış hücresi kullanılarak Ca^{2+} , Mg^{2+} gibi ölçek oluşturan iyonların uzaklaştırılması optimize edilmiş ve bu sayede ısı transfer katsayısının %23 oranında iyileştiği gösterilmiştir. Optimizasyon parametreleri olarak genlik (%70), işlem süresi (30 dakika) ve sıcaklık (30°C) belirlenmiş, SEM-EDX analizleriyle ölçek bileşenlerindeki azalma doğrulanmıştır. Bu sonuçlar, ultrasonik işlemin tuz kristalleşmesini hızlandırarak membran veya ısı eşanjörü yüzeylerindeki birikimi önlemede etkin bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır.

Sigue ve ark. (2024), ekonomik ve teknik parametrelerin etkilerini göz önünde bulundurarak bir FO tuzdan arındırma tesisi için çok amaçlı bir optimizasyon çalışması yapmışlardır. Çok amaçlı optimizasyon, seviyelendirilmiş su maliyetini minimize ederken transmembran su akısını maksimize

etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, ilişkili özel hedefler belirlemişlerdir. İlk olarak, FO modeli Python programlama dili ve açık kaynaklı kimyasal proses simülatörü DWSIM yazılımı içindeki kütüphaneleri kullanılarak oluşturmuşlardır. Bu simülatörün kullanımı, Akış Şemasının görselleştirilmesine ve parametrik duyarlılık analizinin konvansiyonel olarak kullanılmasına olanak tanıdığını belirterek sonrasında, karar değişkenlerindeki değişikliklerin amaç fonksiyonlarını nasıl etkilediğini ölçmek için bir duyarlılık analizi çalışması yapmışlardır. Son olarak, çok amaçlı bir optimizasyon algoritması geliştirilmiş ve FO fenomenolojik modeline bağlanmış, farklı büyüklükteki topluluklar için üç FO birimi tasarlanmıştır. Sonuç olarak optimum tasarım, her biri 44 kanallı seri 37 FO modülü gerektirirken, optimum acı su ve DS (Draw Solution) akış hızları sırasıyla 3,463 ve 2,467 kg/s'dir. Optimal konfigürasyon, farklı su üretim kapasitelerine sahip üç FO ünitesinin tasarımında başarıyla kullanıldığı ifade edilmiştir.

Easa ve ark. (2024), pnömatik bir püskürtücü ile nemlendirme-nem alma güneş enerjili tuz giderim ünitesi aracılığıyla tatlı su üretimini tartışmak için yapay sinir ağları ve yanıt yüzeyi yaklaşımı kullanılmaktadır. Basınçlı hava akış hızı, hava basıncı ve zamanın önerilen sistem tarafından tuzdan arındırılan verim üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Tasarladıkları yapay sinir ağları modeli, yanıtların gözlemlenen bulgulara yakın olduğunu bildirmişlerdir. Oluşturdukları modellerin, inceleme alanındaki verimliliği ve birikmiş verimliliği tahmin etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Maksimum birikmiş verimlilik için optimum parametrelerin verimlilik 150 L/dak basınçlı hava akış hızı, 7 bar hava basıncı ve maksimuma ulaşmak için saat 16, birikmiş tatlı su üretkenliği 19,4 L/gün olarak hesaplamışlardır. Sonuç olarak, yapay sinir ağları modelinde, yanıt yüzeyi metodolojisi yaklaşımına göre daha yüksek hassasiyet olduğunu bildirmişlerdir.

Song (2024), çalışmasında TO deniz suyu tuz giderim proseslerinin tasarımı ve işletimi için farklı bir optimizasyon yöntemini tanıtmaktadır. Kullanmış olduğu bu optimizasyon yönteminde bir TO prosesinin geri kazanımının belirlenmesinde tek bir ideal TO modeli kullanmıştır. “Beyaz kutu” Hesaplama yöntemi ile üç farklı seviyedeki TO deniz suyu tuz arındırma proseslerinin optimizasyon vakalarını incelemiştir. Enerji, membran, besleme suyu ön arıtımı ve konsantrenin işlenmesinin bir membran tuz giderim prosesinin optimum geri kazanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmiş olup, permeat geri kazanımının belirlenmesinde çok sayıda denklemden ve sayısal entegrasyondan kaçınılması, deniz suyu tuz giderim proseslerinin tasarım ve işletim optimizasyonunu büyük ölçüde kolaylaştırabileceği sonucuna varmışlardır.

Ravajiri ve ark. (2024), uzak bölgelerde sürdürülebilir su temini için nemlendirme-nem alma, fotovoltaiik-termal ve buhar sıkıştırırmalı soğutucu teknolojilerine dayalı bağımsız bir tuzdan arındırma ünitesi üzerine çalışmışlardır. Sistem hem teknik hem de ekonomik açıdan değerlendirilmiş ve buhar sıkıştırırmalı soğutucu için en iyi seçeneği belirlemek üzere üç soğutucu akışkan (R22, R134a ve R407C) test edilmiştir. Sistem, genetik algoritma kullanılarak üç amaçlı optimizasyon için YSA kullanılarak kapsamlı bir şekilde modellenmiştir. Optimizasyon, maliyet

oranını minimize ederken tatlı su üretim oranını ve kazanç çıktı oranını maksimize etmeyi amaçlamıştır. Sonuçlar, fotovoltaiik-termal ünitenin maliyet oranının yaklaşık %97'sini oluşturduğunu göstermiştir. Optimum noktada, tatlı su üretim oranları R22 için 43,81 m³ /gün, R407C için 40,56 m³ /gün ve R134a için 36,65 m³ /gün olarak hesaplanmıştır. Maliyet oranları 48,04 \$/saat ile R407C için en yüksektir, bunu 45,72 \$/saat ile R134a ve 43,74 \$/saat ile R22 izlemektedir. Benzer şekilde, kazanç çıktı oranı da aynı sırayı takip etmekte olup, R407C 1,28 ile en yüksek orana sahipken, onu 1,27 ile R134a ve 1,24 ile R22 takip etmektedir. Çalışma, R407C'nin teknik, ekonomik ve çevresel faktörler açısından en iyi seçenek olduğu sonucuna varmışlardır.

Cai ve ark. (2024), yüksek sıcaklık proton değişim membranlı yakıt hücresinden atık ısıyı toplamak için yüksek sıcaklık proton değişim membranlı yakıt hücresi ve sprej flaş tuz giderim sisteminden oluşan yeni bir hibrit sistem önermişlerdir. Sistem performansını değerlendirmek için çıkış güç yoğunluğu ve enerji verimliliği analiz edilmiştir. Hibrit sistem tek başına yüksek sıcaklık proton değişim membranlı yakıt hücresi sistemiyle karşılaştırıldığında, önerilen sistemin maksimum güç yoğunluğunun ve enerji verimliliğinin tek başına yüksek sıcaklık proton değişim membranlı yakıt hücresi sisteminden %69 ve %40 daha yüksek olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca, hibrit sistemin performansının tasarım ve çalışma koşullarına nasıl bağlı olduğunu belirlemek için birçok parametrik çalışma yürütmüşlerdir. Hücre çalışma sıcaklığı yüksek sıcaklık proton değişim membranlı yakıt hücresi ve sprej flaş tuz giderim sistemi üzerinde zıt etkiler göstermiştir. Membranın kararlılığı ve termodinamik performansın iyileştirilmesi göz önünde bulundurularak katkılama seviyesi 30'dan az olması gerektiğini bildirmişlerdir. Daha düşük bir besleme suyu akış hızı veya daha yüksek bir soğutma suyu akış hızı önerilen sistem için elverişli olacağını vurgulamışlardır. Son olarak, çok amaçlı optimizasyon genetik algoritmaya dayalı olarak gerçekleştirdiklerini ifade etmişlerdir.

2.2 Tuz Giderim Proseslerinde Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi Uygulamaları

Zhu ve ark. (2022), yüzey suyu, yeraltı suyu, içme suyu, kanalizasyon ve deniz suyu gibi farklı su ortamlarında su kalitesini değerlendirmek için makine öğrenimi algoritmalarının uygulandığı durumları incelemişlerdir. Makine öğreniminin genellikle büyük miktarlarda yüksek kaliteli veriye bağlı olduğu, su arıtma ve yönetim sistemlerinde yüksek doğrulukta yeterli veri elde etmek, maliyet veya teknoloji sınırlamaları nedeniyle genellikle zor olduğu, gerçek su arıtma ve yönetim sistemlerindeki koşullar son derece karmaşık olabileceğinden, mevcut algoritmalar yalnızca belirli sistemlere uygulanabilir ve bu da makine öğrenimi yaklaşımlarının geniş çapta uygulanmasını engelleyebileceği, pratik uygulamalarda makine öğrenimi algoritmalarının uygulanması, araştırmacıların belirli profesyonel arka plan bilgisine sahip olmasının gerekli olduğunu vurgulamışlardır. Makine öğrenimi yaklaşımlarının uygulanmasını kolaylaştırmak için yeterince doğru veri toplamak üzere yumuşak sensörler de dahil olmak üzere daha gelişmiş sensörler geliştirilmenin ve su kalitesi izlemede uygulanmasının, algoritmaların uygulanabilirliği ve

güvenilirliği artırılarak ve su arıtma ve yönetim gereksinimlerine göre daha evrensel algoritmalar ve modeller geliştirilmesinin, farklı alanlarda bilgi sahibi olan disiplinler arası yetenekler, daha gelişmiş makine öğrenimi teknikleri geliştirmek ve bunları mühendislik uygulamalarında kullanmak üzere eğitilmesinin gerektiğini ifade etmişlerdir.

Niu ve ark. (2022), membran kirlenmesinin tahmini için AI algoritmalarındaki (örneğin, yapay sinir ağları, bulanık mantık, genetik programlama, destek vektör makineleri ve arama algoritmaları) gelişmeler hakkında teknolojileri incelemişler, farklı AI tekniklerinin çalışma prensipleri ve farklı membran bazlı proseslerde membran kirlenmesinin tahmini için kullanılan uygulamaları tartışmışlardır. Çalışmalarında, membran kirlenme tahmini için farklı AI yaklaşımlarının girdileri, çıktıları ve doğruluklarının karşılaştırmaları yapılmıştır. Membran kirlenmesinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesini ve membran bazlı proseslerde operasyonun optimizasyonunu amaçlayan AI tabanlı teknikler için gelecekteki araştırma çabaları hakkında bilgi vermişlerdir.

Jawad ve ark. (2021), iki tür sinir ağının (Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Radyal Taban Fonksiyonlu Sinir Ağı (RBFNN)) geliştirilmesine ilişkin metodoloji üzerine çalışmışlardır. Ayrıca, geriye dönük son yirmi beş yılda MF, UF, NF, RO, FO, MBR ve MD prosesleri üzerine yapılan çeşitli çalışmaların incelemesini yapmışlardır. YSA modeli kullanılarak en çok tahmin edilen parametrelerin membran kirlenmesi, permeat kalitesi, permeat akısı ve transmembran basıncı olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, YSA'nın çıktılarının geleneksel modellerle karşılaştırılabilir niteliklere sahip olduğu ve doğruluk ve hesaplama süresi açısından daha iyi tahmin ederek iyi bir genelleme yeteneğinin bulunduğu sonucuna varmışlardır.

Yuan ve ark. (2023), optimizasyon doğruluğunu artırmak ve çeşitli membran proseslerinde kütle transferini ve olumsuz olayları (kirlenme vb.) tahmin etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (sayısal/hesaplamalı prosedürlerin uygulanması) ile yaygın olarak kullanılan makine öğrenimi (ML) tabanlı tekniklerin avantajları hakkında kapsamlı bir genel bakış sağlamayı amaçlamışlardır. Bu amaca ulaşmak için denetimli öğrenme (SL), denetimsiz öğrenme (USL), yarı denetimli öğrenme (SSL) ve yapay sinir ağı (YSA) dahil olmak üzere dört temel yapay zeka stratejisi açıklayarak ve bunların avantajları/dezavantajlarını tartışmışlardır. Daha sonra, membran tabanlı ayırma işlemleri için yaygın ML tabanlı algoritma. Son olarak, AI tekniklerinin farklı membran proseslerindeki (örneğin, kirlenme kontrolü, tuzdan arındırma ve atık su arıtma) uygulama potansiyelini açıklamışlardır.

Dansawad ve ark. (2023), ML tabanlı membran ayırma modellemesinin ilerlemesini özetleyerek ve membran ayırma tabanlı atık su arıtımında ML'nin gelecekteki gelişim yönünü araştırmışlardır. Membran ayırma tabanlı atık su arıtımında yaygın olarak kullanılan makine öğrenimi algoritmalarının güçlü yönleri ve dezavantajları üzerinde yoğunlaşmışlardır. YSA'nın membran ayırma tabanlı atık su arıtımını modellemek için en çok kullanılan algoritma olduğunu belirtmişlerdir. Gelecekteki araştırmaların entegre makine öğrenimi algoritmalarının geliştirilmesine

ve makine öğrenimi algoritmalarının diğer modelleme yaklaşımlarıyla (örn. süreç tabanlı modeller ve istatistiksel modeller) birleştirilmesine odaklanılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Ma ve ark. (2023), yüksek performanslı MD sistemlerinin belirleyici faktörlerini inceleyerek dört farklı modülden oluşan kapsamlı bir makine öğrenimi iş akışı geliştirilmişlerdir. Akı, ıslanma ve kirlenme olmak üzere üç çıktı performans endeksinin dahil edilmesinin yanında membran özellikleri, çalışma koşulları ve çözelti bileşimi ile 25 girdi özelliğinden oluşan kapsamlı bir veri tabanı oluşturarak, otomatik makine öğrenimi algoritmaları yardımıyla MD sisteminin performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için üç ML modeli geliştirilmişlerdir. ML modellerini yorumlayarak ve önemli faktörlerin performans üzerindeki katkılarına ilişkin anlamlı sonuçlar elde etmişlerdir. Sonuçların, ML'nin besleme ve permeat (ΔT) arasındaki sıcaklık farkının önemli rollerini yakalayabildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, su temas açısının membran ıslanmasına önemli katkılarda bulunmuş olduğunu ve modül boyutunun membran kirlenmesine olan yatkınlığının üzerine odaklanmışlardır. Tahmini modellere dayanarak, parçacık sürüşü optimizasyonu, MD sistemi için yüksek performans elde etmek üzere 6 optimum parametreyi etkili bir şekilde çıkarmış olduğu sonucuna varmışlardır.

Jbari ve Abderafi (2023), Tortu saflaştırması için Fas'taki bir içki fabrikasına entegre edilebilecek bir TO ünitesi tasarlamak ve optimize etmek, optimizasyon doğruluğunu akıllı bir şekilde artırmak ve farklı membran süreçlerinde kütle aktarımını ve istenmeyen olayları (yani kirlenme) tahmin etmek için bir araştırma gerçekleştirmiştir. TO membranı, asetik asit ve gliserol giderimindeki etkinliği nedeniyle seçilmiştir. Su akısı hesaplamalarına dayanarak, TO ünitesi tasarımı gerçekleştirilmiş ve seri olarak gruplandırılmış modüllerle tek aşamalı bir konfigürasyon önerilmiştir. Sonrasında, Yapay sinir ağı (YSA) ve Baskın olmayan sıralama genetik algoritması-II (NSGA-II), önerilen sürecin çalışma parametrelerine bağlı olarak giderimleri optimize etmek için uygulanmıştır. Deneyler besleme akış hızı (F_i) 0,00613 ile 0,048 m³/s, başlangıç tortu konsantrasyonu (C_{aa} & C_g) gliserol için 0,04 ile 10 kmol/m³ ve asetik asit için 0,0008 ila 0,3 kmol/m³, sıcaklık (T) 15–40°C, başlangıç basıncı (P_i) 9–24 atm aralıkları arasında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, giderimlerin tatmin edici bir şekilde tahmin edilmesini sağlayan güvenilir bir YSA modeli geliştirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, optimize edilmiş TO ünitesi tasarımının Tortu saflaştırması için başarılı bir şekilde işleme performansını gösterdiği rapor edilmiştir.

Li ve ark. (2022), çalışmalarında poliviniliden florür-nikel (PVDF-Ni) membran üretimi için ENP koşullarını optimize etmek amacıyla yanıt yüzeyi yöntemini (RSM) yapay zeka ile bütünleştiren bir yöntem önermişlerdir. Deneyler VNH_3 H₂O (mL) 3-9, sıcaklık 30-50°C, akış hızı 90-341, zaman 5-15 dk aralıklarında çalışılmıştır. Deneysel verilere dayanan RSM simülasyonu, bu çalışmada 30°C reaksiyon sıcaklığı, 14,50 dakika reaksiyon süresi ve 9 mL amonyak miktarının en uygun koşullar olduğunu göstermiştir. RSM tarafından girdi olarak tasarlanan deney verileri ile kombine RSM-YSA yöntemi, optimum membranın akı ve Kongo kırmızısı (CR) giderimini tahmin etmeyi sağladığını

belirtmişlerdir. Daha sonra optimum koşullar altında membran üreterek, optimal membranın öngörülen akı ve giderim değerlerinin, sırasıyla % -3,64 ve %- 0,58'lik daha az bağıl hata ile gerçek değerlere oldukça yakın olduğu bulmuşlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) karakterizasyonu, optimum membranın uygun gözenek boyutuna sahip düzenli bir mikro gözenekli yapıya sahip olduğunu gösterdiği sonucuna ulaştıklarını bildirerek önerilen yöntemin uygulanabilirliğini ileri sürmüşlerdir.

Boubakri ve ark. (2023), çekme çözeltisi olarak deniz suyu kullanılarak ileri ozmoz-membran distilasyonu (FO-MD) hibrit prosesi ile atık sudan kurşun kirleticisinin giderilmesine yönelik çalışmışlardır. FO performansının modellenmesi, optimizasyonu ve tahmini, yanıt yüzey metodolojisi (RSM) ve yapay sinir ağına (YSA) dayalı tamamlayıcı bir yaklaşım kullanılarak geliştirilmiştir. RSM kullanılarak yapılan FO prosesi optimizasyonu, 60 mg/L başlangıç kurşun konsantrasyonu, 11,57 cm/s besleme hızı ve 7,66 cm/s çekme hızı altında FO prosesinin 6,75 (L/ (m² h) ile en yüksek su akısına, 2,78 (g/ (m² h) ile en düşük ters tuz akısına ve %87,07 ile en yüksek kurşun giderme verimine ulaştığını ortaya koymuştur. Tüm modellerin uygunluğu belirleme katsayısı (R²) ve ortalama karesel hataya (MSE) göre değerlendirilmiştir. Sonuçlar 0.9906'ya kadar en yüksek R² değerini ve 0.0102'ye kadar en düşük R-MSE değerini göstermiştir. YSA modellemesi su akısı ve ters tuz akısı için en yüksek tahmin doğruluğunu üretirken, RSM kurşun giderme verimliliği için en yüksek tahmin doğruluğunu üretmektedir. Daha sonra, FO optimum koşulları, çekme çözeltisi olarak deniz suyu kullanılarak FO-MD hibrit prosesine uygulanmış ve aynı anda kurşun kirleticinin giderilmesi ve deniz suyunun tuzdan arındırılması için performansları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, FO-MD prosesinin neredeyse hiç ağır metal içermeyen ve çok düşük iletkenliğe sahip tatlı su üretmek için oldukça verimli bir çözüm olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Abd Elaziz ve ark. (2024), boru şeklindeki doğrudan temaslı membran distilasyon ünitesinin permeat akısını elde etmek için yeni bir gelişmiş makine öğrenme modeli üzerinde çalışma yapmışlardır. Model, seçim tabanlı bir optimizasyon algoritması (EBOA) ile uzun-kısa vadeli bellek (LSTM) modelinin optimize edilmesiyle oluşturmuşlardır. Modelin girdileri, permeat ve besleme akışının sıcaklıkları ile besleme akışının hızı ve tuzluluğudur. Optimize ettikleri model, sinüs-kozin optimizasyon algoritması (SCA), yapay ekosistem optimize edici (AEO) ve gri kurt optimizasyon algoritması (GWO) ile optimize edilen diğer LSTM modelleri ile karşılaştırılmıştır. LSTM-EBOA, farklı doğruluk ölçütlerine dayalı olarak sızıntı suyu akışını tahmin etmede diğer modellerden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. LSTM-EBOA, eğitim ve test için sırasıyla 0,998 ve 0,988 ile en yüksek belirleme katsayısına ve 1,272 ve 4,180 ile en düşük kök ortalama kare hatasına sahip olduğunu hesaplamışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarının, tatlı su üretim oranlarını maliyetli deneyler yapmadan tahmin etmek için en uygun şekilde tasarlanmış bir model oluşturan membran distilasyon sistemlerinin boyutlandırma parametrelerinin seçimi ve performansının tahmin edilmesi için yararlı bir yol sağlayacağı sonucuna varmışlardır.

Guo ve ark. (2024), yenilenebilir enerji ile çalışan şebeke bağlantılı tuz giderim tesislerinin optimizasyonu için Açlık Oyunu Arama ve Nişan Şempanzesi Optimizasyon Algoritması (HGS-NChOA) üzerinde çalışmışlardır. HGS-NChOA yönteminin özellikle tatlı su üretim maliyetini düşürme ve sera gazı emisyonlarını azaltma açısından önemli avantajlar sağladığını belirtmişlerdir. Temel sonuçlar, HGS-NChOA'nın tatlı su üretim maliyetlerini ve sera gazı emisyonlarını azaltmada üstünlük sağladığını vurgulamışlardır. Özellikle, PV-pil depolama rüzgâr türbini sisteminde 0,223 \$/m³ maliyet düşüşü ile tuzdan arındırma ünitesi kapasitesi 10,4 m³ 'den 8,5 m³ 'ye indiğini hesaplamışlardır. Deneysel sonuçlar, PV-batarya ve PV-hidrojen sistemleri için hesaplama süresinde sırasıyla %59 ve %49 azalma olduğunu belirtmişlerdir. Duyarlılık analizi, güneş ışınımının yatırım maliyetleri üzerindeki önemli etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir. Genel olarak, HGS-NChOA şebekeye bağlı, yenilenebilir enerji ile çalışan tuzdan arındırma tesislerinin yönetiminde gelişmiş verimlilik ve ekonomik uygulanabilirlik sağlanabileceğini önermişlerdir. Hassasiyet analizinin, güneş radyasyonunun yatırım maliyetleri üzerinde rüzgâr hızına kıyasla daha önemli bir etkiye sahip olduğunu ve saatlik güneş radyasyonu dalgalanmalarının su üretim maliyetlerini %17,09 ila %19,56 oranında etkilediğini hesaplamışlardır. Bunun yanı sıra çalışmalarında, sisteme bir dizel jeneratörün entegre edilmesinin maliyetleri ve sera gazı emisyonlarını daha da azaltabileceğini göstererek HGS-NChOA'nın hibrit enerji sistemlerini optimize etmedeki çok yönlülüğünü sağlayacağı sonucuna varmışlardır.

Qudah ve ark. (2024), TO tuz giderimi için rüzgâr-fotovoltaik hibrit sistemlerini optimize etmek için diferansiyel evrim algoritmasını kullanan bir yaklaşım önermişlerdir. Diferansiyel evrim algoritması küresel optimum çözümü arayan sezgisel, popülasyon tabanlı bir algoritmadır. Çalışmalarında, seviyelendirilmiş enerji maliyetini en aza indirmeyi ve tuz giderim maliyetlerinin uygun bir aralıkta olmasını sağlamayı amaçlamışlardır. Algoritma, Suudi Arabistan'ın Dhahran kentinde yapılan bir vaka çalışmasında kullanılmıştır. Sonuçlar, 1 kW TO yük talebi için optimize edilmiş hibrit sistem konfigürasyonunun 7,67 kW üretim kapasitesine sahip 26 fotovoltaik panel, her biri 1 kW üretim kapasitesine sahip 2 rüzgâr türbini ve 38,79 kWh depolama kapasitesine sahip 9 bataryalı depolama sistemi içerdiğini göstermiştir. Dhahran şehri için seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0,39 \$/kWh ve tuzdan arındırılmış suyun maliyeti 1,98 ila 2,16 \$/m³ arasında olduğunu ve bunun ise literatürde bildirilen maliyetlerden daha düşük olduğunu hesaplamışlardır.

Xu ve ark. (2023), Poliamid (PA), katmanlı modülasyonu üzerine araştırma geliştirmeye yönelik çalışmalar yapmışlardır. Poliamid (PA), substrat ve nonwoven (dokusuz) destek içeren üç katmanlı yapıya sahip poliamid ince film kompozit (PA-TFC) membran, ters osmoz (TO) ve nanofiltrasyon (NF) gibi tuzdan arındırma teknolojileri aracılığıyla tatlı su krizine katkıda bulunmaktadır. Çalışmada arayüzey polimerizasyonu (IP) sürecini kontrol ederek gerçekleştirilen PA katman yönlendirmesi yapmışlardır. PA katman genellikle sıvı arayüzünde meydana gelen ve difüzyona bağlı bir süreç olan IP ile üretilir. Bu nedenle, arayüzey özelliklerini düzenlemek ve/veya difüzyon sürecini kontrol etmek IP'yi ayarlayarak ve PA katman yapısını ve performansını daha da

modüle ederek çalışmışlardır. Burada, katmanlar arası interkalasyon, katkı maddesi ekleme, ortak çözücü destekli IP (CAIP) ve yeni IP'ye vurgu yaparak IP ayarı ve PA katman modülasyonu için mevcut stratejileri gözden geçirmişlerdir. Optimizasyon çalışmalarında, ANN ve deneysel tasarım (DOE) yöntemleri kullanılarak IP parametrelerinin (monomer konsantrasyonu, reaksiyon süresi) membran performansına etkisi modellenmiştir. Örneğin, yüksek m-fenilendiamin konsantrasyonlarının daha kalın ancak daha az çapraz bağlı PA katmanlarına yol açtığı, buna karşılık düşük konsantrasyonların inceltme ile birlikte kırılabilirliği artırdığı gösterilmiştir. Bu bulguların, membran tasarımında multi-disipliner optimizasyon yaklaşımlarının gerekliliğini vurgulamakta olduğunu ifade etmişlerdir.

Chaoui ve ark. (2024), deniz suyu ve acı suyun tuzdan arındırılmasında FO kullanmak için en uygun çalışma koşullarını belirlemeyi amaçlamışlardır. Çekme çözeltisi konsantrasyonu, sıcaklık ve akış hızının su akışı, ters çözünen akışı ve spesifik maliyet indeksi yanıtları üzerindeki etkilerini araştırmak için Merkezi Kompozit Tasarım gerçekleştirilmiştir. Yanıtları etkileyen faktörleri belirlemek için Yanıt Yüzeyi Metodolojisi analizi yapılmıştır. En iyi girdi değişkenlerini belirlemek için arzu edilebilirlik fonksiyonu kullanılmıştır. FO prosesi için optimum çalışma koşulları 0,6 L/dak akış hızında, 32,9°C sıcaklıkta ve 1,79 mol/l konsantrasyonda olduğunu ileri sürmüşlerdir. Deneysel olarak doğruladıkları su akışı, ters çözünen akışı ve spesifik maliyet indeksi için karşılık gelen değerler sırasıyla 18,16 L/m² h ve 41,03 g/m² h ve 0,274 olarak hesaplamışlardır. Deneylerini ayrıca deniz suyu ve acı su besleme çözeltileri kullanılarak da gerçekleştirmişlerdir



3. MATERYAL VE METOT

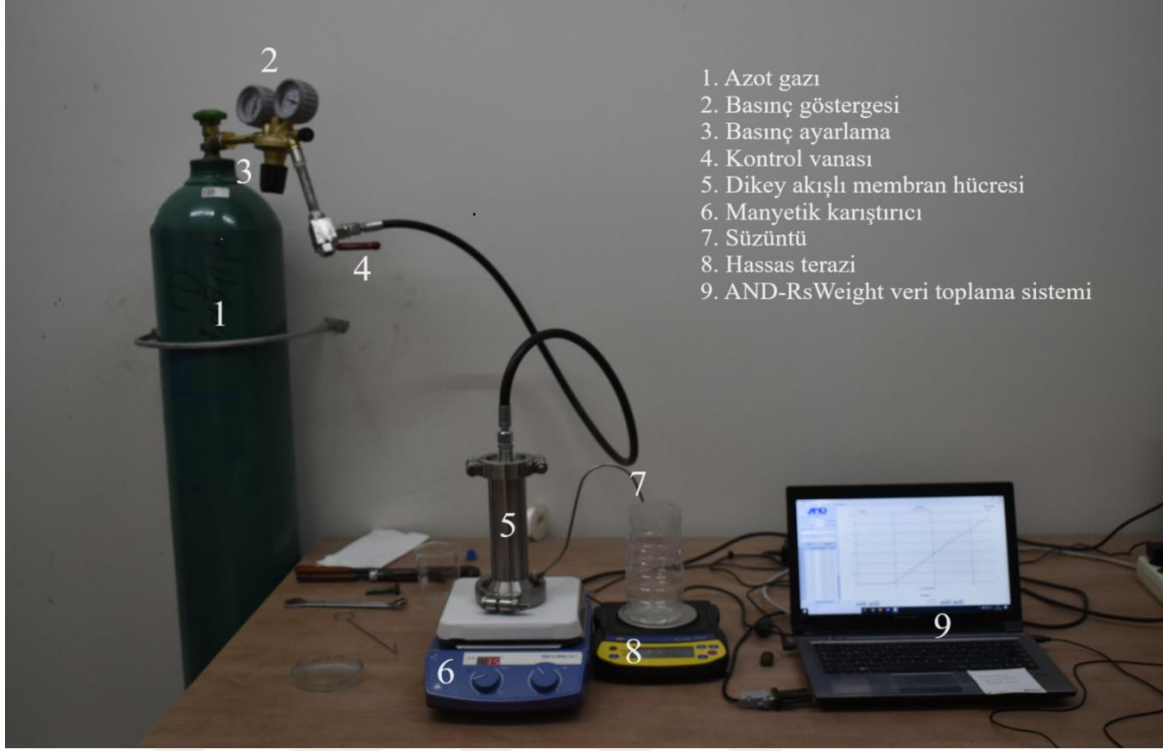
3.1 TO Membran Filtrasyon Düzeneği

Deneyisel alışmalar, laboratuvar ölçeğinde tasarlanmış, dikey akışlı “dead-end system” (uçtan kapalı sistem) konfigürasyonuna sahip yüksek basınçlı bir membran filtrasyon ünitesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Bu sistemde, besleme akışı yalnızca membrana doğru yönlendirilmekte olup, konsantre akış (retentat) hattı bulunmamaktadır; böylece tüm sıvı permeat olarak toplanmaktadır. Deney düzeneği, Şekil 3.2’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Düzeneği oluşturan başlıca bileşenler; 300 mL hacminde yüksek basına dayanıklı bir membran hücresi, azot gazı tüpü, iki kademeli basınç regülatörü, emniyet vanası, bağlantı elemanları ve hortumlar, hassas elektronik terazi, manyetik karıştırıcı ve veri kaydı amacıyla kullanılan bir bilgisayardır. Bu yapı, hem kontrollü çalışma koşullarının sağlanmasına hem de deneyisel verilerin yüksek hassasiyetle toplanmasına olanak tanımaktadır. Bu sistem bileşenlerinin koordineli çalışması, deneyisel prosedürün güvenilir ve tekrarlanabilir şekilde yürütölmesini mümkün kılmıştır.

Bu kapsamda, deneyisel prosedürler řu adımlardan oluşmaktadır: Seçilen membran, basınçlı hücre içerisine yerleştirildikten sonra belirli hacimde tuzlu su numunesi eklenmiş ve hücre sızdırmaz şekilde kapatılmıştır. Hedef basının sağlanması için azot gazı uygulanmış, süzölntü (permeat) suyu zamana bağlı olarak hassas terazide tartılmış ve veriler “*AND-RsWeight*” yazılımı aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Elde edilen bu veriler, daha sonra “*Excel*” ortamına aktarılarak membran akıları (flux, $L/m^2 \cdot h$) hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. TO Membran Filtrasyon Düzeneđinin Membran Preparatı



Şekil 3.2. TO Membran Filtrasyon Düzeneği

3.2 Tuz Çözeltileri

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, sentetik tuz çözeltileri; analitik saflık derecesine sahip NaCl, MgCl₂, CaCl₂, KCl, Na₂SO₄ ve NaHCO₃ kimyasalları ile ultra saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Bu çözeltiler, TO membran sistemine besleme suyu olarak uygulanmıştır. Membran besleme sularının fizikokimyasal karakterizasyonu için; pH, Eİ, tuzluluk, TÇKM ve T (°C) parametreleri ölçülmüştür. Ölçümler, AZ Instrument 84051 model portatif multiölçer cihazı kullanılarak, çoklu prob desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Cihazın kalibrasyonu, standart NaOH ve HCl çözeltileri ile pH ayarı yapılarak sağlanmıştır. TO sisteminin matematiksel modellenmesi ve parametre optimizasyonu tamamlandıktan sonra, elde edilen optimum işletme koşulları altında gerçek deniz suyu ile de deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Tüm deneysel süreç boyunca membran performansı, sistematik olarak izlenmiştir. Bu kapsamda; akı (L/m²·h), uygulanan basınç (bar), T (°C), pH, tuzluluk (ppm), ve geri kazanım oranı (%) gibi temel performans göstergeleri analiz edilmiştir.

3.3 Deneysel Tasarım

Bu çalışmada, iki farklı deneysel tasarım yöntemi kullanılarak süreç optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. İlk yöntem, faktöriyel tasarım yaklaşımının temel alt yapılarından biri olan Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel Tasarım (Regular Two-Level Factorial Design); ikinci yöntem ise, daha gelişmiş bir yanıt yüzeyi modeli sunan Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design) olarak belirlenmiştir. Her iki tasarım, deneysel koşulların sistematik şekilde incelenmesini ve bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerin çok boyutlu analizini mümkün kılmaktadır.

3.3.1 Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel Tasarım (DİS-FT)

Faktöriyel tasarım, istatistiksel deney tasarımı yöntemlerinin temel türlerinden biri olup, deneysel çalışmaların planlanması, yürütülmesi ve elde edilen sonuçların analiz edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, birden fazla faktörün deney üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkilerini eş zamanlı olarak incelemeye olanak tanır (Lee ve ark., 2022). Bu bağlamda, çalışmada kullanılan faktöriyel deneysel tasarım kapsamında, Design Expert yazılımı aracılığıyla belirlenen girdi değişkenleri; pH (3–9), sıcaklık (25–45 °C), basınç (15–40 bar) ve tuz konsantrasyonu (1–10 g/L) olarak tanımlanmıştır (Çizelge 3.1). Deneysel çalışmalarda çıktı değişkenleri olarak ise; tuzluluk (ppm), TÇKM, (ppm) ve EI ($\mu\text{S}/\text{cm}$) parametreleri değerlendirilmiştir. Belirlenen faktör seviyelerine göre oluşturulan 16 farklı koşul altında yürütülen deneylerin her birinde, tuz giderim verimliliği (%) ve membran geçirgenliği ($\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$) ölçülmüştür. Elde edilen veriler, istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiş ve faktörler arasındaki etkileşimlerin membran performansı üzerindeki etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir.

Çizelge 3.1. DİS-FT Deneysel Çalışma Verileri

	Faktör	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4	Yanıt	Yanıt 2	Yanıt 3
Çalışma	A:pH	B:Sıcaklık	C:Basınç	D:Tuz Konsantrasyonu	Tuzluluk	TÇKM	Eİ
		C°	bar	g/L	ppm	ppm	µS/cm
1	9	25	40	1	290	277	556
2	3	45	15	2,5	820	754	1507
3	6	30	15	5,5	790	730	1465
4	9	45	27,5	7	3310	2960	5910
5	3	35	40	10	3390	3020	6040
6	6	45	27,5	4	1860	1640	3440
7	5	35	27,5	1	350	338	674
8	9	25	40	10	6520	5580	11140
9	4	45	15	1	770	707	1416
10	3	30	40	8,5	3210	2870	5750
11	6	25	40	1	330	313	626
12	4	25	15	10	2080	1900	3280
13	3	45	15	8,5	3380	3020	6030
14	5	25	15	1	670	620	1237
15	3	25	40	10	3500	3120	6240
16	9	25	15	1	320	306	609

3.3.2 Merkezi Kompozit Tasarım (MKT)

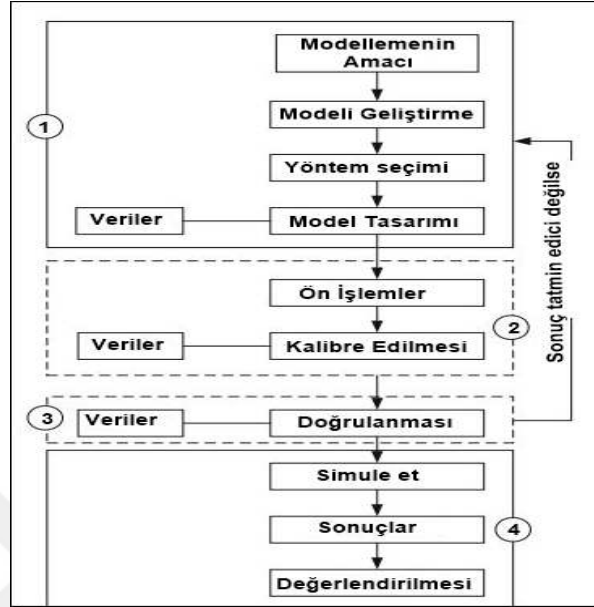
Merkezi Kompozit Deneysel Tasarım (Central Composite Design-MKT), istatistiksel deney tasarımı yaklaşımlarından biri olup, özellikle çok değişkenli sistemlerde faktörlerin etkilerini modellemek ve optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu tasarım, faktörlerin doğrusal, ikili etkileşimli ve ikinci dereceden etkilerini kapsayan matematiksel modeller oluşturarak sistem davranışını geniş kapsamlı bir biçimde analiz etmeye olanak tanır. Modelleme sonucunda elde edilen denklemler, istatistiksel analiz yöntemleri ile optimize edilerek, belirlenen çıktı parametrelerine ulaşmak için faktörlerin en uygun değerleri belirlenir (Rakic ve ark., 2014; Lee ve ark., 2022). Bu çalışmada, Merkezi Kompozit Tasarım'ın tercih edilme nedeni, Box-Behnken gibi diğer yanıt yüzeyi yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek model uyumu ve tahmin doğruluğu sağlamasıdır. Uygulanan deneysel tasarım kapsamında, Design Expert yazılımı aracılığıyla tanımlanan dört bağımsız değişken; pH (3–9), sıcaklık (25–45 °C), basınç (15–40 bar) ve tuz konsantrasyonu (1–10 g/L) olarak belirlenmiştir (Çizelge 3.2). Deneysel çalışmalarda yanıt (çıktı) değişkenleri olarak; Tuzluluk (ppm), TÇKM (ppm) ve Eİ (µS/cm) değerleri analiz edilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler, 30 farklı deneysel koşul altında yürütülmüş ve istatistiksel olarak modellenmiştir.

Çizelge 3.2. MKT Deneysel Çalışma Verileri

	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4	Yanıt 1	Yanıt 2	Yanıt 3
Çalışma	A:pH	B:Sıcaklık	C:Basınç	D:Tuz Konsantrasyonu	Tuzluluk	TÇKM	Eİ
		C°	bar	g/L	ppm	ppm	µS/cm
1	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
2	3	45	15	10	4170	3680	7350
3	9	25	15	10	4750	4140	8290
4	9	25	15	1	320	306	609
5	3	25	15	1	560	527	1041
6	3	25	40	10	3500	3120	6240
7	9	45	15	10	9980	8220	16500
8	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
9	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
10	6	35	15	5,5	5790	4970	9960
11	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
12	9	35	27,5	5,5	450	280	710
13	9	25	40	1	290	277	556
14	6	35	40	5,5	5100	4430	8850
15	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
16	3	25	40	1	460	432	867
17	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
18	9	45	40	10	900	818	1639
19	9	45	15	1	630	589	1181
20	3	45	40	1	590	551	1103
21	3	25	15	10	6340	5420	10820
22	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
23	3	45	15	1	490	410	860
24	3	45	40	10	2260	2430	4820
25	9	45	40	1	400	370	753
26	9	25	40	10	6520	5580	11140
27	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
28	6	35	27,5	10	3450	3080	6150
29	6	35	27,5	5,5	5520	4770	9550
30	3	35	27,5	5,5	5580	4810	9610

3.3.3 Modelleme Plan ve Organizasyonu

Yapay Sinir Ağı (YSA) modelinin genel yapısı ile planlama ve organizasyon şeması, Araghinejad (2013) çalışmasından uyarlanarak Şekil 3.3'te sunulmuştur.



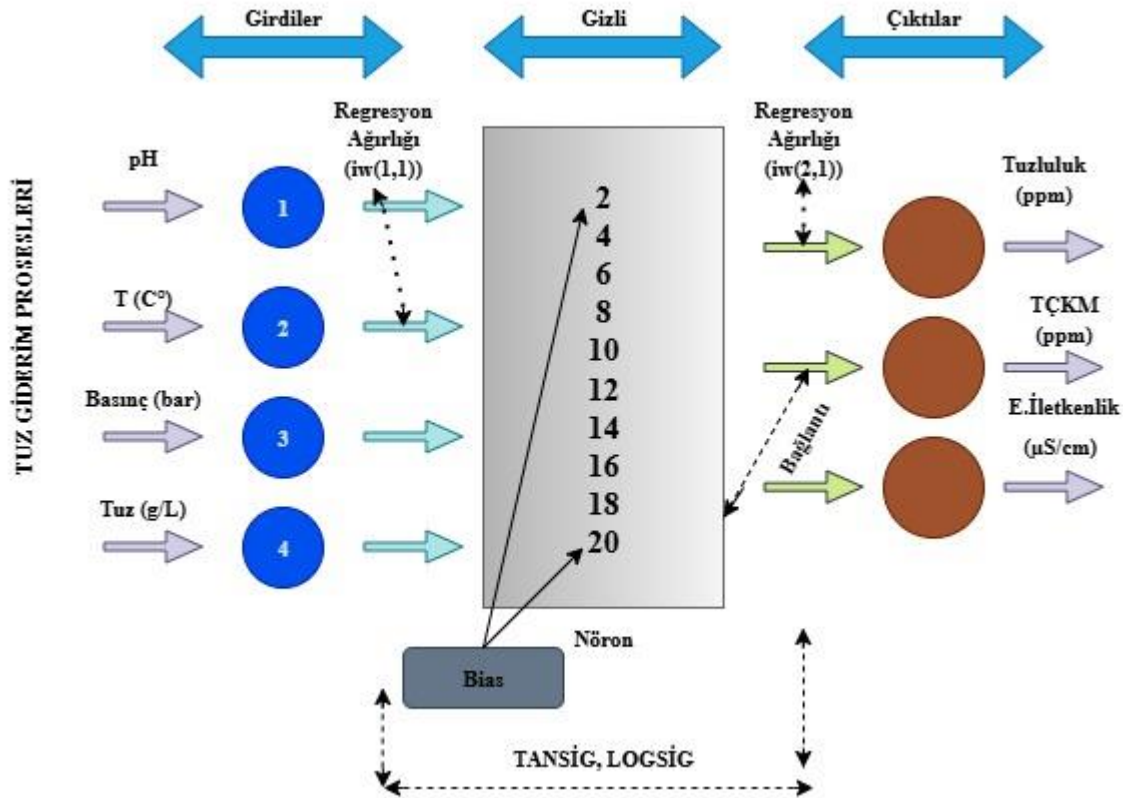
Şekil 3.3. YSA modelin Plan ve Organizasyonu

YSA modelinin oluşturulmasında kullanılan metodoloji, MATLAB R2020a yazılımının nntool arayüzü (MathWorks, 2020) kullanılarak geliştirilmiş olup, deneysel çalışmaya ait modelleme sürecinin ayrıntıları Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Model metodolojisine ilişkin şema

DENİZ SUYU	
TO TUZ GİDERİM PROSESLERİ (İletkenlik (μ s), Tuzluluk (ppm), TÇKM (ppm))	
MODEL	YSA
Komut	nntool
Ağ türü	Feedforward backprop train algorithm in LM, train algorithm in SCG
Eğitim algoritması	LEARNGDM
Adaptasyon öğrenme işlevi	70% Training, 15% Validation, 15% Test
Ağ parametreleri	MSE
Performans işlevi	R
Regresyon	2
Katman sayısı	2-20 (2 her defa)
Nöron sayısı	TANSIG, LOGSIG
Transfer fonksiyonu	

YSA modeline ait giriş ve çıkış katmanları arasındaki yapısal ilişki, Şekil 3.4'te şematik olarak sunulmuştur. Modelde kullanılan giriş parametreleri, TO prosesiyle ilişkili dört temel değişkenden oluşmaktadır: pH, sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), basınç (bar) ve tuz konsantrasyonu (g/L). Bu değişkenler, deneysel metodoloji doğrultusunda YSA'ya giriş verisi olarak tanımlanmıştır. Modelin çıktı değişkenleri ise; tuzluluk (ppm), TÇKM (ppm) ve Eİ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) parametreleridir. Her bir deney koşulunda dört giriş ve üç çıkış olmak üzere toplamda 156 giriş (4×39 deney) ve 117 çıkış (3×39 deney) verisi kullanılmıştır. YSA modellerinde test edilen nöron sayısı, 2 ile 20 arasında, ikişer adımlarla artırılarak belirlenmiştir. Veri kümesinin %70'i ağırlık eğitimi, %15'i doğrulama ve kalan %15'i test aşaması için ayrılmıştır. Bu oranlama, modelin genellenebilirliğini sağlamak ve aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla uygulanmıştır.



Şekil 3.4. TO tuz giderim prosesleri için geliştirilmiş YSA model tasarımı (girdi ve çıktı katmanlarındaki ilişkiler)

YSA modelinin gizli katmanlarında, aktivasyon fonksiyonu olarak Tansig (tanjant sigmoid) ve Logsig (lojistik sigmoid) fonksiyonları kullanılmıştır. Modelin eğitilmesinde, her biri 1000 epoch boyunca çalıştırılan iki farklı eğitim algoritması karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır: trainlm (Levenberg–Marquardt) ve trainscg (scaled conjugate gradient). Bu algoritmalar, ağırlık optimizasyonu ve veri trendlerine uyum açısından değerlendirilmiştir. Eğitim sürecinde, gradyan inişine dayalı ağırlık güncellemelerinde kullanılan momentum ve önyargı (bias) öğrenme fonksiyonu olarak LEARNGDM (gradient descent with momentum) tercih edilmiştir. Bu yapılandırma, öğrenme hızını artırırken aynı zamanda optimizasyon sürecinde yerel minimumlardan kaçınmaya yardımcı

olmaktadır. Özellikle trainlm algoritması, hızlı ve kararlı yakınsama özelliği nedeniyle literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir (Levenberg, 1944; Yu ve Wilamowski, 2011; Alsumaiei, 2020; Khaki ve Yusoff Islami, 2015). Bu algoritma, doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözme yeteneğine sahiptir ve çözüm sürecinde yaklaşık Hessian matrisine dayanan ikinci dereceden yaklaşım kullanmaktadır (MathWorks, 2020; Bishop, 1995; Di Nunno ve Granata, 2020). İlgili yaklaşım, Denklem (3.1)'de matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\Delta w = [J^T(w)J(w) + \lambda I]^{-1} J^T(w) e(w) \quad (3.1)$$

Burada w ağırlık vektörü; J Jacobian matrisi, $J^T(w)$ ters çevrilmiş, $j(w)$ özdeşlik matrisi, e , hata vektörü ve λ öğrenme sabiti ve I özdeşlik matrisidir.

Denklem (3.1), ağırlık toplam hatasını minimize etmek amacıyla yinelemeli (iteratif) olarak güncellenmiştir. Eğitim algoritmalarından biri olan ölçeklendirilmiş eşlenik gradyan algoritması (trainsecg), ağırlık optimizasyonu için kullanılmakta olup; bu algoritma, ağda kullanılan net giriş ve transfer fonksiyonları türevlenebilir olduğu sürece herhangi bir yapay sinir ağı mimarisini eğitime yeteneğine sahiptir (Møller, 1993; Chitsazan ve ark., 2015).

Di Nunno ve Granata (2020) ve Du ve Stephanus (2018) tarafından kullanılan Denklem (3.2)'ye göre k iterasyon indeksidir ve α_k k . iterasyondaki adım uzunluğu olarak tanımlanırken, d_{k-1} arama yönü olarak kabul edilir.

$$\Delta w = w_k - w_{k-1} = \alpha_k d_{k-1} \quad (3.2)$$

Denklem (3.3), modelde kullanılan giriş ve çıkış verilerinin normalize edilmesi ve ölçeklendirme işleminin optimizasyonu amacıyla uygulanmıştır (Jawad ve ark., 2020). Bu bağlamda, veriler min-max normalizasyon yöntemi kullanılarak -1 ile +1 aralığına ölçeklendirilmiştir. Bu işlem, yapay sinir ağı modelinin öğrenme performansını artırmak ve parametrelerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

$$y = \frac{(y_{max} - y_{min})(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} + y_{min} \quad (3.3)$$

Burada x_{max} ve x_{min} verilerin maksimum ve minimum değerlerini temsil ederken, y_{max} ve y_{min} sırasıyla 1 ve -1 değerlerini alır ve y , x 'in normalleştirilmesidir.

YSA modelinin tahmin performansını değerlendirmek amacıyla, determinasyon katsayısı (R^2) ve ortalama karesel hata (MSE – Mean Squared Error) istatistiksel değerlendirme kriterleri olarak kullanılmıştır (Bararpour ve ark., 2018; Kalantary ve ark., 2019). Bu parametreler, modelin

hem doğruluğunu hem de hata payını nicel olarak ortaya koymakta ve YSA'nın genelleme yeteneğini analiz etmede temel ölçütler arasında yer almaktadır.

YSA modelinin tahmin edilen değerlerinin performanslarını değerlendirmek için R^2 ve ortalama karesel hata (MSE) dikkate alınmıştır (Bararpour ve ark., 2018; Kalantary ve ark., 2019).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{thm,i} - y_{dny,i})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{thm,i} - y_{ort})^2} \quad (3.4)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|y_{thm,i} - y_{dny,i}|)^2 \quad (3.5)$$

Burada N veri miktarını, $y_{thm,i}$ beklenen tahmin değerini, $y_{dny,i}$ ise gerçek örneklerin değerini temsil etmektedir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, sistemin genel verimliliğini artırmak ve tuz giderim sürecini optimize etmek amacıyla farklı operasyonel parametrelerin etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, TO sisteminin daha etkin ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına yönelik yenilikçi stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çerçevede, tartışma bölümünde; elde edilen sonuçların mevcut literatür ile ne ölçüde örtüştüğü, hangi yönleriyle özgün katkılar sunduğu ve alana nasıl yeni açılımlar getirdiği ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

4.1 DİS-FT ile TO Tuzluluk Gideriminin Optimizasyonu

Bu bölümde, pH, sıcaklık (°C), basınç (bar) ve tuz konsantrasyonu (g/L) olmak üzere dört bağımsız değişkenin, sistem performansını temsil eden üç temel bağımlı değişken üzerindeki etkileri nicel olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu bağımlı değişkenler; tuzluluk giderim oranı, TÇKM giderim verimi ve Eİ indirgenme düzeyi olarak tanımlanmıştır. Deneysel süreç, Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel Tasarım (DİS-FT) yaklaşımı temel alınarak yapılandırılmış ve her biri belirli faktör kombinasyonlarını temsil eden toplam 16 deney koşulu altında sistematik olarak yürütülmüştür (Çizelge 4.1 ve 4.2).

Çizelge 4.1. DİS-FT Çalışma Bilgisi

Dosya Versiyonu	12.0.3.0		
Çalışma Tipi	Faktöriyel	Alt Tür	Rastgele
Dizayn Tipi	Düzenli İki Seviyeli Faktöriyel	Çalışma Sayısı	16
Dizayn Modeli	4FI	Blok	Blok yok
Merkez Noktası	0		

Çizelge 4.2. Faktörler ve Yanıtlar

Parametre	Birim	Tip	Değişimler	Std. Sapma	Düşük	Yüksek
pH		Faktör	Kolay	0	3	9
Sıcaklık	C°	Faktör	Kolay	0	25	45
Basınç	bar	Faktör	Kolay	0	15	40
Tuz Konsantrasyonu	g/L	Faktör	Kolay	0	1	10
Tuzluluk	% Giderim	Yanıt		7,7523	34,2	85,7
TÇKM	% Giderim	Yanıt		13,5463	32,4	84,8
Eİ	% Giderim	Yanıt		13,3163	32,7	84,7

DİS-FT, deneysel çalışmalar kapsamında faktörlerin etkilerinin sistematik biçimde analiz edilebilmesine olanak sağlayan klasik bir istatistiksel yöntemdir. Bu tasarım, her bir faktör için

yalnızca iki seviye (“düşük” ve “yüksek”) dikkate alınarak oluşturulan faktör kombinasyonlarını kapsar. k adet faktör için uygulanacak toplam deney sayısı, 2^k formülüyle hesaplanır. Örneğin, bu çalışmada kullanılan dört faktör (pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu) için $k = 4$ ise $2^4 = 16$ koşul altında deneysel analiz gerçekleştirilmiştir. Bu yapı sayesinde, tüm birinci dereceden (lineer) ana etkiler ve ikili etkileşim terimleri tahmin edilebilmekte, ancak ikinci dereceden (quadratic) ve daha yüksek dereceli etkiler modele dahil edilmemektedir (Smucker ve ark., 2019).

DİS-FT yöntemi, Deneysel Tasarım (DoE) süreçlerini kolaylaştıran etkili bir istatistiksel araç olarak, kullanıcı tarafından belirlenen faktörler ve bunlara ait seviye aralıkları (örneğin: -1 ve +1) doğrultusunda otomatik bir deneysel matris oluşturmaktadır. Yöntem, Tam Faktöriyel Tasarım (Full Factorial) ve Kesirli Faktöriyel Tasarım (Fractional Factorial) seçeneklerini destekleyerek, deney sayısını optimize etme olanağı sunar. Uygulamanın öne çıkan avantajları arasında; deney sürecinin adım adım yönlendirilmesi, istatistiksel bilgi düzeyi sınırlı olan kullanıcılar için erişilebilir bir yapı sunması, sonuçların grafikler ve tablolar aracılığıyla özetlenerek raporlanabilmesi ve model doğruluğunu test etmek üzere kalıntı analizi, R^2 değerleri ve yeterlilik analizlerine olanak sağlaması yer almaktadır. Ayrıca, sistemdeki gürültü faktörleri dikkate alınarak daha kararlı ve güvenilir çözümler üretilmesi hedeflenmektedir (Grömping, 2014).

Bu çalışmada kullanılan tasarım, 4FI (Four-Factor Interaction) modeline dayalı olarak oluşturulmuş ve dört faktörün tüm olası etkileşim kombinasyonları hesaba katılmıştır. Bununla birlikte, uygulamalı deney tasarımlarında üçlü ve özellikle dördü etkileşimler genellikle istatistiksel olarak anlamsız kabul edilmekte ve sınırlı yoruma olanak tanımaktadır (Zhao ve Ding, 2021). Bu nedenle, model tam faktöriyel tasarım olarak kurgulanmış; yalnızca ana etkiler ve anlamlı ikili etkileşimler (örneğin $A \times B$, $A \times C$) dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Bu kapsamda, deneysel veriler üzerinde varyans analizi (ANOVA), regresyon modelleme ve istatistiksel anlamlılık testleri uygulanarak her bir faktörün ve faktörler arası etkileşimlerin süreç çıktıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve ilgili istatistiksel değerlendirmeler Çizelge 4.3'te ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Cizelge 4.3. TO membranı için yanıtlarla birlikte deneysel girdi değişkenleri

	Faktör	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4	Yanıt	Yanıt 2	Yanıt 3
Çalışma	A:pH	B:Sıcaklık	C:Basınç	D:Tuz Konsantrasyonu	Tuzluluk	TÇKM	Eİ
		C°	Bar	g/L	% Giderim	% Giderim	% Giderim
1	9	25	40	1	73,9	73,9	73,8
2	3	45	15	2,5	71,4	72,5	70,7
3	6	30	15	5,5	85,7	84,8	84,7
4	9	45	27,5	7	53,7	52,7	52,8
5	3	35	40	10	68,1	65,4	65,4
6	6	45	27,5	4	55,5	55,6	53,3
7	5	35	27,5	1	68,8	68,1	68,2
8	9	25	40	10	34,8	32,4	32,7
9	4	45	15	1	34,2	36,3	36,2
10	3	30	40	8,5	64,9	62,3	62,2
11	6	25	40	1	70,8	71	70,9
12	4	25	15	10	80,2	78	81
13	3	45	15	8,5	63	60,3	60,4
14	5	25	15	1	40,2	41,5	41,7
15	3	25	40	10	65,7	62,9	62,9
16	9	25	15	1	71,2	71,1	71,3

4.1.1 Tuzluluk Giderimi

Çizelge 4.4'te sunulan ANOVA analiz sonuçlarına göre, dört faktörlü etkileşim modelinin (4FI) tuzluluk giderimi üzerindeki genel etkisi, $F=4,0696$ ve $p=0,3722$ değerleri temelinde değerlendirilmiştir. Elde edilen p-değeri, genel kabul gören %5 anlamlılık düzeyinin üzerinde kaldığı için, modelin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı sonucuna varılmıştır (Fisher, 1925; Neyman ve Pearson, 1933; Lehmann ve Romano, 2005; Casella ve Berger, 2002). Bu durum, bağımsız değişkenlerin (pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu) etkileşimli kombinasyonlarının, tuzluluk giderimi üzerinde anlamlı bir etki oluşturmadığını göstermektedir.

Modelde yer alan etkileşim terimlerine ayrı ayrı bakıldığında; basınç $\times$ tuz konsantrasyonu (CD) etkileşimi, $p=0,1357$ değeri ile tüm etkileşimler arasında en düşük p-değerine sahip olmasına rağmen, bu değer de istatistiksel anlamlılık eşiği olan 0,05'in üzerindedir ve dolayısıyla anlamlı kabul edilmemektedir (Fisher, 1925; Neyman ve Pearson, 1933; Casella ve Berger, 2002). Benzer şekilde, pH $\times$ sıcaklık (AB) ve sıcaklık $\times$ basınç (BC) etkileşimleri sırasıyla $F=5,6157$ ve $F=4,4754$ gibi nispeten yüksek F-değerleri göstermelerine karşın, karşılık gelen p-değerleri (sırasıyla 0,2542 ve 0,2811) anlamlılık kriterlerini karşılamamaktadır.

Çizelge 4.4. 4FI model için ANOVA analizi (Tuzluluk Giderimi)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
Model	3424,116289	14	244,5797	4,069676	0,372204	Anlamsız
A-pH	1,079084861	1	1,079085	0,017955	0,9152	
B-Sıcaklık	201,9559339	1	201,9559	3,360439	0,317921	
C-Basınç	63,12932367	1	63,12932	1,050438	0,492169	
D-Tuz Konsantrasyonu	199,8466296	1	199,8466	3,325341	0,319328	
AB	337,4904594	1	337,4905	5,615661	0,254213	
AC	6,974256528	1	6,974257	0,116048	0,79098	
AD	111,9393744	1	111,9394	1,862611	0,402567	
BC	268,965754	1	268,9658	4,475446	0,28111	
BD	5,20488334	1	5,204883	0,086606	0,817793	
CD	1282,996016	1	1282,996	21,34837	0,135691	
ABC	61,2049448	1	61,20494	1,018418	0,497095	
ABD	8,580348379	1	8,580348	0,142772	0,770009	
ACD	51,58990687	1	51,58991	0,858428	0,524272	
ABCD	25,42416856	1	25,42417	0,423045	0,632881	
Kalıntı	60,09808621	1	60,09809			
Cor Toplamı	3484,214375	15				

Çizelge 4.5'te sunulan performans ölçütlerine göre, modelin determinasyon katsayısı (R^2) 0,9827 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, modelin bağımlı değişkenin toplam varyansının yaklaşık %98,28'ini açıkladığını göstermektedir ve yüksek bir uyum düzeyine işaret etmektedir. Düzeltilmiş R^2 değeri ise 0,7413 olup, modelin bağımsız değişken sayısı dikkate alınarak değerlendirilmesi durumunda da açıklayıcılığının kabul edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, R^2 ile düzeltilmiş R^2 arasındaki belirgin fark, modelde yer alan bazı terimlerin istatistiksel olarak anlamlı katkı sunmadığını ve modelin kısmen aşırı uyum (overfitting) gösterebileceğini düşündürmektedir (Montgomery ve ark., 2021). Modelin varyasyon katsayısı (C.V. %) 12,38 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, çoğu mühendislik uygulamasında kabul edilebilir bir aralık olan %10–15 sınırları içerisinde yer almakta olup, modelin doğruluk düzeyinin yeterli olduğunu göstermektedir (Myers ve ark., 2016). Ayrıca, modelin yeterlilik oranı (Adeq Precision) değeri 6,86 olarak bulunmuştur. Bu değer, sinyal/gürültü oranının istatistiksel olarak tatmin edici olduğunu ve modelin oluşturulan deneysel tasarım uzayında güvenilir tahminler yapabildiğini göstermektedir (Anderson, 2017). Yüksek bir yeterlilik oranı, modelin yanıt değişkenindeki değişimleri açıklamada rastlantısal varyasyonlardan çok, deneysel faktörlerin gerçek etkileriyle ilişkilendirildiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.5. Uygunluk İstatistikleri (Tuzluluk Giderimi)

Std. Sapma	7,752296	R^2	0,982751324
Ortalama	62,63125	Düzeltilmiş R^2	0,741269854
C.V. %	12,37768	Tahmini R^2	Tanımlanmadı
		Yeterlilik Oranı	6,861060828

Çizelge 4.6’da sunulan model denklemleri, kodlanmış faktör düzeyleri kullanılarak oluşturulmuş ve bu sayede farklı deneysel koşullarda tuzluluk giderimi değerlerinin tahmin edilmesine olanak sağlanmıştır. Kodlanmış regresyon denklemleri, faktörlerin düşük (–1) ve yüksek (+1) seviyelerdeki etkilerini karşılaştırmaya imkân tanıyarak, değişkenlerin göreceli öneminin analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır. İlgili tabloda modelin regresyon katsayıları, bu katsayıların %95 güven aralıkları ve değişkenler arası çoklu doğrusal ilişki düzeyini belirleyen VIF (Variance Inflation Factor) değerleri yer almaktadır. Yapılan değerlendirmede, tüm faktörlere ait güven aralıklarının sıfırı içerdiği (örneğin, A–pH için –231 ile +236 arası) görülmektedir. Bu durum, ilgili regresyon katsayılarının istatistiksel olarak sıfır olma ihtimalini yükselttiği ve dolayısıyla anlamlı bir etkilerinin bulunmadığı anlamına gelmektedir. Bu bulgu, önceki ANOVA analizinde elde edilen p-değerleri ile de tutarlılık göstermektedir. Öte yandan, bazı faktörlerin VIF değerlerinin 10’un üzerinde olması, çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) sorununa işaret etmektedir. Bu durum, modelin genel güvenilirliğini azaltmakta; regresyon katsayılarının sapmasına, standart hataların büyümesine ve p-değerlerinin yanıltıcı biçimde yorumlanmasına neden olabilmektedir. Bu bağlamda, modelin tahmin gücünü artırmak ve çoklu doğrusal ilişkilerin etkisini azaltmak amacıyla değişken seçimi, boyutsal indirgeme (örneğin ana bileşen analizi) veya alternatif modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesi önerilebilir.

Çizelge 4.6. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (Tuzluluk Giderimi)

Faktör	Katsayı	df	Standart	95% CI Düşük	95% CI Yüksek	VIF
Kesişim	74,75880696	1	4,015230735	23,74046318	125,7771507	
A-pH	2,468431342	1	18,4214399	-231,5981555	236,5350182	53,91712305
B-Sıcaklık	-10,97722291	1	5,988175157	-87,06420245	65,10975664	7,122652109
C-Basınç	14,78871151	1	14,42929426	-168,5528555	198,1302785	44,82083062
D-Tuz Konsantrasyonu	21,55906558	1	11,82256854	-128,6609108	171,779042	26,61691723
AB	-35,6419766	1	15,04046806	-226,7492431	155,4652899	29,94949026
AC	-9,062723214	1	26,60357975	-347,0932542	328,9678078	103,9447535
AD	37,68093134	1	27,60962525	-313,1326198	388,4944825	90,19819486
BC	40,48258621	1	19,13595218	-202,66274	283,6279124	57,88461072
BD	-4,439830665	1	15,08659486	-196,1331937	187,2535323	34,90038709
CD	-36,75674107	1	7,955265275	-137,8379704	64,32448825	9,99665519
ABC	34,57889163	1	34,26479473	-400,7966054	469,9543887	135,904077
ABD	12,54433805	1	33,19904642	-409,2895429	434,378219	96,66513477
ACD	-22,26162408	1	24,02729021	-327,5572927	283,0340446	68,04349696
ABCD	11,82807266	1	18,18531907	-219,2383146	242,8944599	32,86375373

Çizelge 4.7’de sunulan model sonuçları incelendiğinde, kodlanmış faktörler düzeyinde basınç (C) faktörünün tuzluluk giderimi üzerinde tek başına en yüksek artırıcı etkiye sahip olduğu görülmektedir. Buna karşılık, tuz konsantrasyonu (D) faktörü, negatif katsayısı ile modeldeki en güçlü azaltıcı etkiyi göstermektedir. pH (A) faktörü ise bireysel olarak azaltıcı yönde etkili olmakla

birlikte, belirli etkileşim terimleri (özellikle AC: pH × basınç ve AD: pH × tuz konsantrasyonu) aracılığıyla tuzluluk giderimini olumlu yönde etkileyebilmektedir.

Benzer şekilde, sıcaklık (B) faktörü tek başına pozitif katkı sağlasa da, BD (sıcaklık × tuz konsantrasyonu) etkileşimi kapsamında tuzluluk giderimini azaltıcı yönde önemli bir etki oluşturduğu anlaşılmaktadır. Bu bulgular, faktörlerin yalnızca bireysel etkilerinin değil, aynı zamanda ikili etkileşimlerinin de süreç performansı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu doğrultuda, tuzluluk gideriminin maksimize edilmesi için basınç (C) seviyesinin yüksek tutulması önerilmekte; aynı zamanda pH ile basınç (AC) veya pH ile tuz konsantrasyonu (AD) etkileşimlerinden faydalanılarak tuz konsantrasyonunun (D) oluşturduğu olumsuz etkinin dengelenmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Ancak, D faktörünün negatif etkisi oldukça yüksek olduğundan, bu parametrenin optimizasyon sürecinde dikkatle kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır.

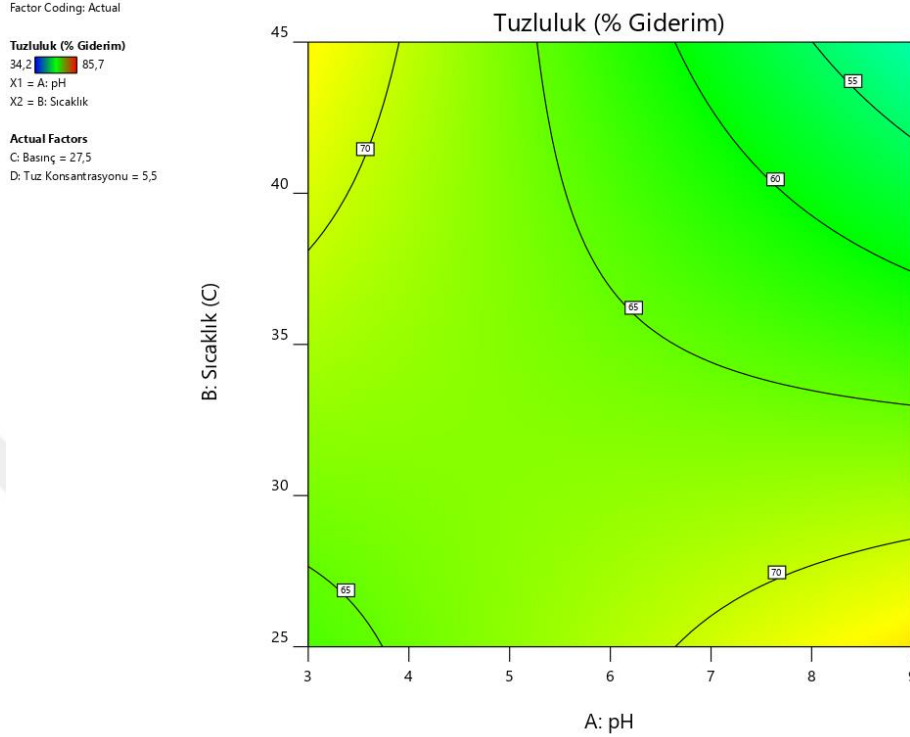
Çizelge 4.7. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (Tuzluluk Giderimi)

Tuzluluk	=
74,75880696	
2,468431342	A
-10,97722291	B
14,78871151	C
21,55906558	D
-35,6419766	AB
-9,062723214	AC
37,68093134	AD
40,48258621	BC
-4,439830665	BD
-36,75674107	CD
34,57889163	ABC
12,54433805	ABD
-22,26162408	ACD
11,82807266	ABCD

Tuzluluk Gideriminin Renkli İzohips Grafikler ile İncelenmesi

Renkli İzohips grafikler, bir deneysel tasarımda (örneğin, yanıt yüzeyi metodolojisi) bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken (yanıt) arasındaki ilişkiyi görselleştirmek için kullanılan iki boyutlu bir temsildir. Bu grafikler, iki farklı faktörün seviyelerine karşılık gelen yanıt değerlerini eş yanıt eğrileri (izohips çizgileri) ile göstermektedir. Her bir Contour çizgisi, aynı yanıt değerine sahip noktaları birleştirir ve bu sayede optimal koşulların belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Anderson ve Whitcomb, 2016). Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.1- 4.6 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla pH ve Sıcaklık, pH ve Basınç,

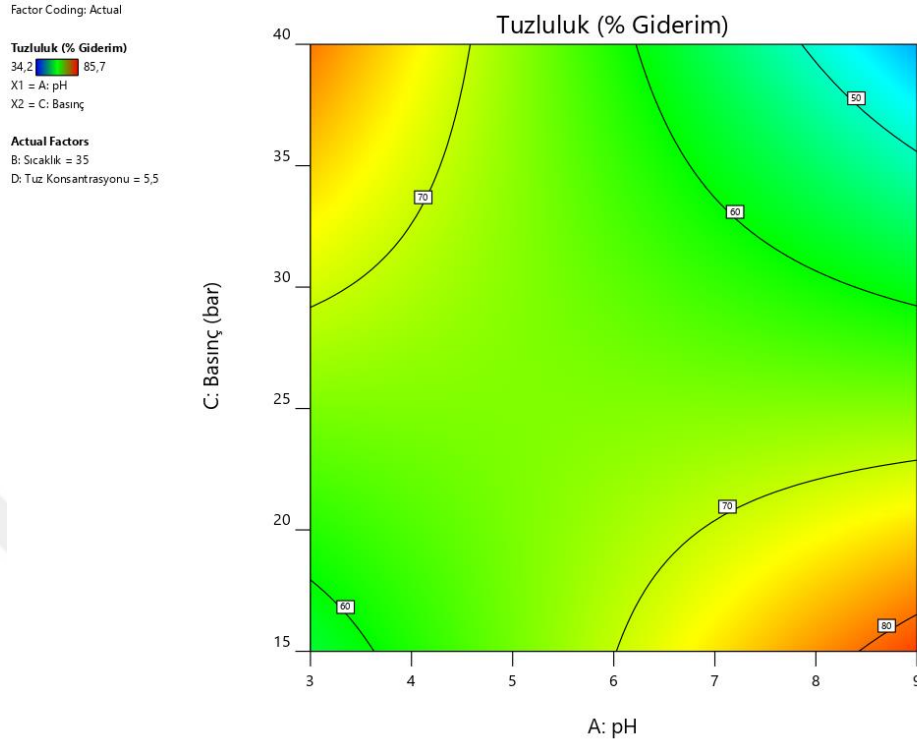
pH ve Tuz Konsantrasyonu, Sıcaklık ve Basınç, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu, Basınç ve Tuz konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden tuzluluk giderimleri incelenmiştir.



Şekil 4.1. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Renkli izohips grafiklerin ilki olan şekil 4.1’de, pH ve sıcaklık faktörlerinin etkileşiminin tuzluluk giderimi üzerindeki etkisi görsel olarak sunulmuştur. Grafik üzerindeki renk skalası, giderim verimini temsil etmektedir: mavi tonlar düşük giderim oranlarını (%0–20), yeşil ve sarı geçişler orta düzey giderimi (%60–80), kırmızı bölgeler ise yüksek giderim aralığını (%90–97) göstermektedir. Grafik analizi, sıcaklık değerinin artmasıyla birlikte tuzluluk gideriminin anlamlı şekilde yükseldiğini, özellikle pH 3–4 aralığında sıcaklığın yaklaşık 40–45 °C ve pH 8–9 aralığında sıcaklığın yaklaşık 25°C seviyelerinde olduğu koşullarda en yüksek performansın elde edildiğini göstermektedir. Sıcaklık eksenini 25–45 °C aralığında değişmekte olup, sıcaklığın tek başına etkisi sınırlı görünmektedir. Ancak pH ile birlikte değerlendirildiğinde, sıcaklığın etkisi daha anlamlı hale gelmekte; bu durum grafik üzerindeki eğik ve kıvrımlı izohips eğrileriyle açıkça gözlemlenmektedir. Bu eğrilerin doğrusal olmaması, iki faktör arasında önemli bir etkileşim olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu analizde tuz konsantrasyonu sabit tutulmuştur; dolayısıyla elde edilen eğilimler, diğer faktörlerin kontrol altında olduğu koşullarda değerlendirilmiştir. Özellikle pH 8–9, sıcaklık 40–45°C arasında giderim %50 civarında kalıyor. Yani yüksek pH + orta/yüksek sıcaklık

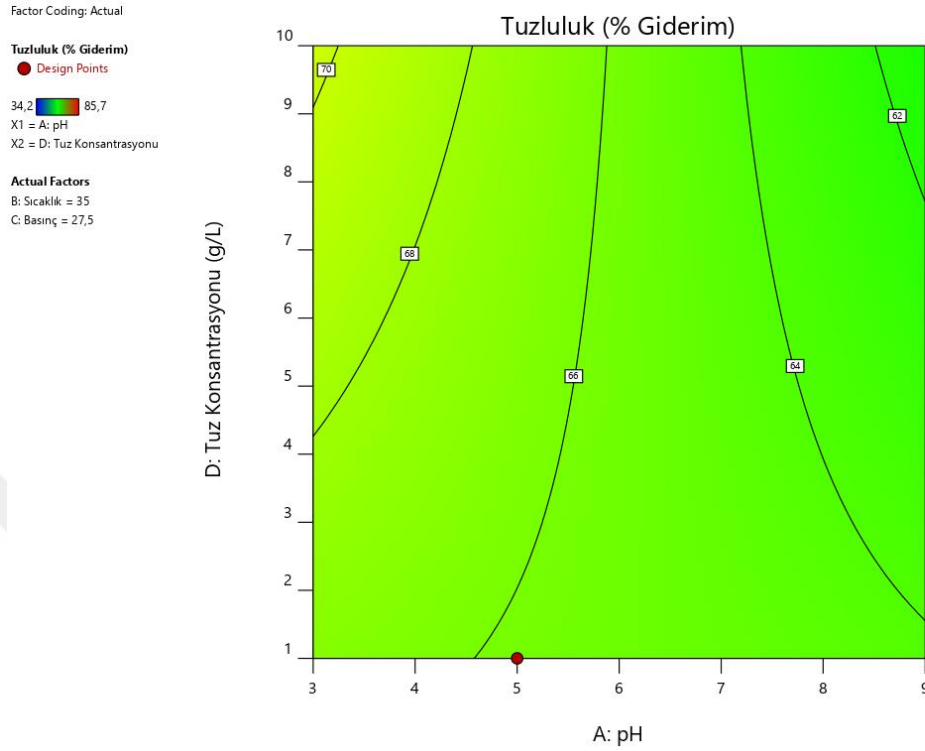
olumsuz etki yapıyor. Bu durum, optimum işletme koşullarının belirlenmesinde pH kontrolünün kritik önem taşıdığını göstermektedir.



Şekil 4.2. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.2’de sunulan renkli izohips grafik, pH (3–9) ve basınç (15–40 bar) değişkenleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi (%) üzerindeki etkisini görsel olarak yansıtmaktadır. Grafik yüzeyinde, %50–70 aralığındaki orta düzey giderim oranları mavi ve yeşil tonlarla, %70’in üzerindeki yüksek giderim bölgeleri ise sarı ve kırmızı renk tonlarıyla temsil edilmiştir. Düşük pH (3–5) ve düşük basınç (15–20 bar) seviyelerinde tuzluluk giderimi oranı sınırlı kalmakta olup, bu alanlar renkil izohips grafik üzerinde sol alt bölgeyi oluşturmaktadır. Bu koşullarda giderim oranı genellikle %50’nin altında seyretmektedir. Ancak hem pH hem de basınç seviyesinin artmasıyla birlikte giderim oranlarında anlamlı bir artış gözlenmiştir. Özellikle pH > 7 ve basınç > 30 bar olduğunda, tuzluluk giderim verimi yaklaşık %86 seviyelerine kadar ulaşmaktadır (grafikğin sağ alt ve sol üst bölgesi). pH değerinin artışı, genelde verimi artırıyor, ancak yüksek basınçla birleştiğinde (pH ~9 + 40 bar) verim düşüyor. Düşük–orta basınç (15–20 bar) optimumda; çok yüksek basınç (≥ 35 bar) bazı pH değerlerinde olumsuz etki yapıyor. Basınç ve pH arasında belirgin etkileşim varlığı ile optimum pH, uygulanan basınca bağlı değişiyor. Bu durum, iki faktörün birlikte değerlendirildiğinde birbirlerinin etkisini artırarak sinerjik bir etki oluşturduğunu desteklemektedir. Bu analizden elde edilen bulgular doğrultusunda, en yüksek tuzluluk giderimi, yaklaşık pH 8–9 ve basınç 15–20 bar koşullarında gerçekleşmektedir. İkinci güçlü bölge (%70 civarı) ise, pH $\approx 3,5 - 4,5$ ve Basınç $\approx 35 - 40$ bar koşullarında gerçekleşmektedir. Minimum giderim (%34–40 civarı), pH ≈ 9

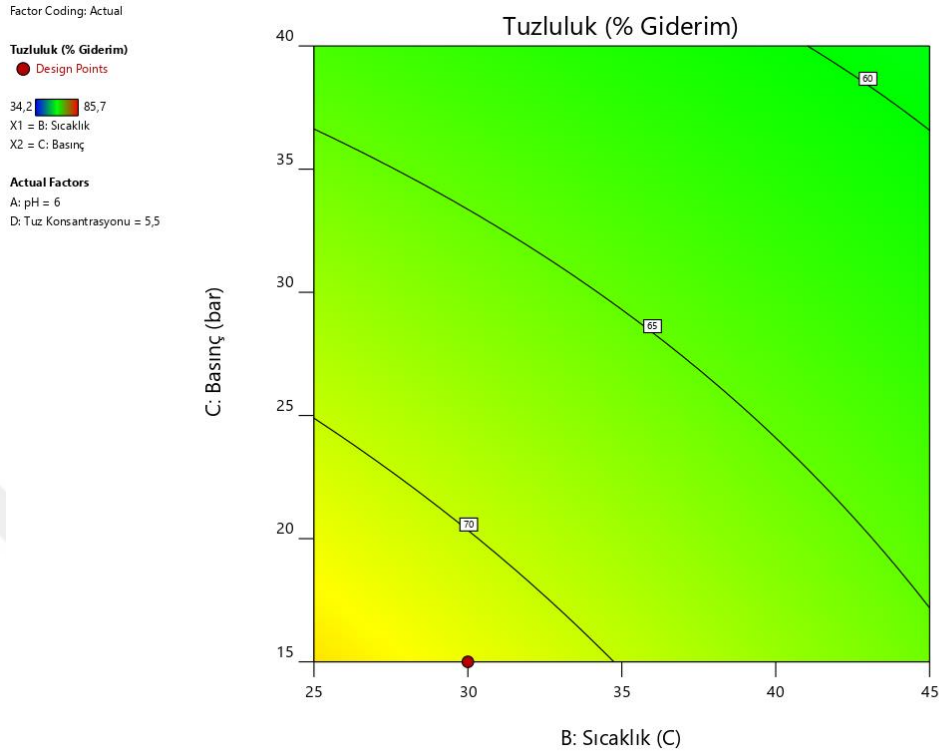
ve Basınç ≈ 40 bar olan bölgede gerçekleşmiştir. Dolayısıyla her iki parametre hem ayrı ayrı hem de birlikte ele alındığında, tuzluluk giderimi açısından kritik öneme sahip oldukları söylenebilir.



Şekil 4.3. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.3'te sunulan renkli izohips grafik, pH (3–9) ve tuz konsantrasyonu (1–10 g/L) değişkenleri arasındaki etkileşimin, tuzluluk giderimi (%) üzerindeki etkisini görsel olarak değerlendirmektedir. Grafik üzerinde kırmızı tonlarla temsil edilen alanlarda %70'e kadar ulaşan yüksek tuzluluk giderim oranları, özellikle düşük pH ($\approx 3-4$) ve yüksek tuz konsantrasyonu ($\approx 8-10$ g/L) koşullarında elde edilmiştir. pH faktörü açısından değerlendirildiğinde, artan pH değeriyle birlikte tuzluluk gideriminin anlamlı bir biçimde azaldığı görülmektedir. Buna karşın tuz konsantrasyonu faktörü, arttıkça yüzdelik giderim oranı artmaktadır. pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşim etkisi incelendiğinde, düşük pH seviyelerinde tuz konsantrasyonunun giderim üzerindeki etkisi daha baskın ve olumludur. Ancak pH değeri yükseldikçe bu etkinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, iki faktör arasında anlamlı bir etkileşim olduğunu göstermektedir; yani bir faktörün etkisi, diğerinin seviyesine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Grafik yüzeyinde izlenen düzgün ve belirgin izohipsler, modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu ve deneysel verilerin istatistiksel modele uyum sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, en yüksek tuzluluk giderimi düşük pH (3–4) ve yüksek tuz konsantrasyonu (8–10 g/L) koşullarında elde edilmiştir. Bu bulgular, sistemin bu parametre aralığında çalıştırıldığında tuz giderim verimliliğinin optimize edilebileceğini ve pH'ın negatif, tuz konsantrasyonunun ise pozitif yönde etkili bir faktör

olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, pH ve tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşim dikkate alınarak, optimum işletme koşullarının belirlenmesi sistem performansını artıracaktır.



Şekil 4.4. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.4'te sunulan renkli izohips grafik, sıcaklık (25–45 °C) ve basınç (15–40 bar) değişkenleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi (%) üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Grafik yüzeyindeki renk dağılımı incelendiğinde, koyu yeşil tonlar %50–60 aralığındaki düşük tuz giderim oranlarını, sarı ve kırmızı tonlar ise %75 düzeyindeki yüksek giderim performansını temsil etmektedir. Grafik incelendiğinde, en parlak sarı alanın sol alt köşede, yani düşük sıcaklık ve düşük basınç değerlerinin kesişiminde yer aldığı görülüyor. Sıcaklık 25-30 °C aralığındayken, basınç 15-20 bar aralığında olduğunda tuzluluk giderimi %70'in üzerine çıkıyor. Basınç veya sıcaklık arttıkça (grafik sağ üst köşesine doğru gidildikçe), renk yeşile dönerek tuzluluk gideriminin azaldığını gösteriyor. Örneğin, sıcaklık 45 °C ve basınç 40 bar olduğunda giderim %60'ın altına düşüyor. En yüksek tuzluluk giderimi (sarı bölge), sıcaklığın yaklaşık 25-30 °C ve basıncın 15-20 bar arasında olduğu alanda bulunuyor. Bu bulgular, Yüksek verim için beklenenin aksine düşük sıcaklık ve düşük basınç yeterli oluyor. Bu, enerji verimliliği açısından en ideal senaryoyu sunmakta olup, sistemin tasarım ve işletme parametrelerinin belirlenmesinde yol gösterici niteliktedir.

Factor Coding: Actual

Tuzluluk (% Giderim)

● Design Points

34,2 85,7

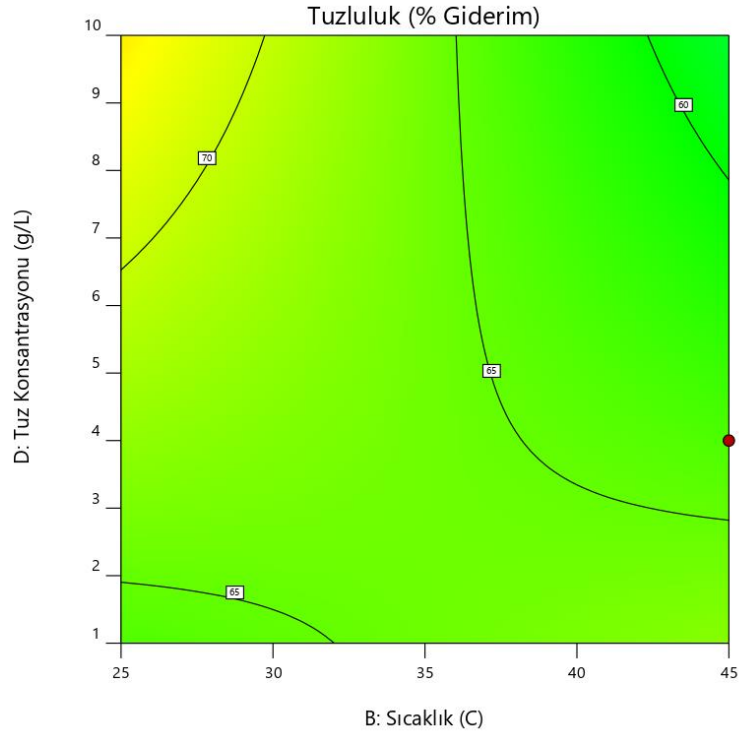
X1 = B: Sıcaklık

X2 = D: Tuz Konsantrasyonu

Actual Factors

A: pH = 6

C: Basınç = 27,5



Şekil 4.5. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.5'te sunulan renkli izohips grafik, sıcaklık (25–45 °C) ve tuz konsantrasyonu (1–10 g/L) değişkenleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi (%) üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Grafik yüzeyinde gözlenen renk dağılımı, sistemin performansının ilgili iki parametreye bağlı olarak nasıl değiştiğini görselleştirmektedir. Yeşil tonlar, %50–60 aralığında düşük giderim oranlarını temsil ederken; sarı ve açık turuncu tonlar, %70 üstü düzeyinde yüksek giderim oranlarını göstermektedir. Sıcaklık faktörü, tek başına değerlendirildiğinde, artan sıcaklıkla birlikte tuzluluk gideriminin genel olarak pozitif yönde bir artış eğilimi sergilediği belirlenmiştir. Ancak bu artışın etkisi, tuz konsantrasyonunun seviyesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Özellikle 9 g/L seviyesindeki tuz konsantrasyonu ve 25°C sıcaklık kombinasyonunda, sistem maksimum giderim verimine ulaşmaktadır (%70 üstü). Buna karşılık, en düşük giderim verimi 45 °C sıcaklık ve 9-10 g/L tuz konsantrasyonu koşullarında gözlemlenmiştir. Deneysel düzende basınç parametresi sabit tutulduğundan, bu grafik yalnızca sıcaklık ve tuz konsantrasyonu faktörlerinin etkisini izole bir şekilde değerlendirmektedir.

Factor Coding: Actual

Tuzluluk (% Giderim)

34,2 85,7

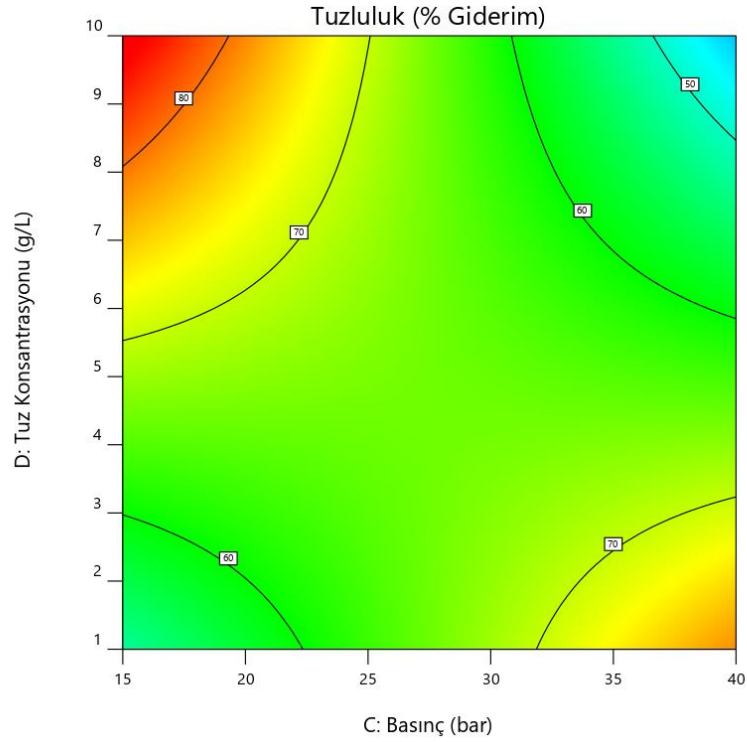
X1 = C: Basınç

X2 = D: Tuz Konsantrasyonu

Actual Factors

A: pH = 6

B: Sıcaklık = 35



Şekil 4.6. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.6’da sunulan renkli izohips grafik, basınç (15–40 bar) ve tuz konsantrasyonu (1–10 g/L) parametreleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderim oranı (%) üzerindeki etkisini göstermektedir. Renk dağılımı dikkate alındığında, mavi ve yeşil tonlar (özellikle grafik yüzeyinin sağ alt ve sol alt bölgelerinde) %50–60 aralığında düşük giderim oranlarını temsil etmektedir. Buna karşılık, kırmızı renk tonları (özellikle sol üst köşe), %85–86 seviyelerinde yüksek giderim oranlarına karşılık gelmektedir. Basınç faktörü, sistemin performansı üzerinde pozitif yönde belirgin bir etkiye sahiptir. Özellikle 15 bar civarındaki düşük basınç koşullarında tuz giderimi sınırlı kalmakta; buna karşılık, 35–40 bar aralığındaki yüksek basınç seviyelerinde maksimum giderim performansına ulaşılmaktadır. Bu durum, membran üzerindeki transmembran basınç farkının artmasıyla birlikte difüzyon ve geçirgenliğin iyileştiğini göstermektedir. Tuz konsantrasyonu faktörü, sistemin tuz yüküne karşı verdiği tepkiyi değerlendirme açısından önem arz etmektedir. Bulgulara göre, 1–3 g/L aralığındaki düşük tuz konsantrasyonlarında giderim oranı maksimum değerlere ulaşmıştır. Bu durum, sistemin tuz konsantrasyonu etkisini negatif olarak net bir şekilde ortaya koymuştur. Tuz Konsantrasyonunda meydana gelen artış, ozmotik basıncı artırır ve bu sayede net akış düşer, sonuçta tuz giderimini azaltır. Basıncı meydana gelen artış, ozmotik basıncı yenerek suyun membran geçirgenliğini artırır, böylece tuz giderimi yükselir. Sonuç olarak, en yüksek tuz giderimi yaklaşık olarak 35–40 bar basınç ve 1–3 g/L tuz konsantrasyonu aralığında elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük giderim oranları ise 15–40 bar basınç ve 8–10 g/L tuz konsantrasyonu koşullarında gözlemlenmiştir. Elde edilen bu bulgular, sistemin hem besleme suyu tuzluluğu hem de

uygulanan operasyonel basınç açısından duyarlı olduğunu ve yüksek performans elde edebilmek için bu iki parametrenin birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Şekil 4.1-4.6 serisine ait renkli izohips grafiklerin bütüncül analizi sonucunda, pH ve basınç parametrelerinin tuzluluk giderimi üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle bu iki faktör birlikte yüksek seviyelerde uygulandığında, tuz giderimi oranı önemli ölçüde artış göstermektedir. Elde edilen bulgular, faktörlerin tek başına etkilerinin sınırlı olabildiğini, ancak birlikte değerlendirildiğinde sinerjik bir etki oluşturdıklarını ortaya koymaktadır.

- **pH:** pH değeri, tuzluluk giderimi üzerinde en güçlü pozitif etkiye sahip parametrelerden biridir. pH seviyesi azaldıkça (pH 3–4) giderim oranı da artış göstermekte olup, pH 8–9 aralığında giderimde düşüş veya sınırlı artış gözlemlenmiştir.
- **Sıcaklık:** Sıcaklık tek başına değerlendirildiğinde etkisi sınırlı kalmakla birlikte, özellikle pH veya tuz konsantrasyonu ile birlikte değerlendirildiğinde anlamlı hale gelmektedir. Bazı koşullarda düşük sıcaklık (25–30 °C) daha yüksek giderim sağlıyor (Şekil 4.4). Bu durum enerji verimliliği açısından avantaj sağlamaktadır. Yüksek sıcaklık (40–45 °C), yüksek pH veya yüksek tuzla birleştiğinde giderim oranını düşürmektedir.
- **Basınç:** Basınç değeri, en güçlü pozitif etkiye sahip parametrelerden biridir. Basıncın artışıyla birlikte giderim oranında belirgin bir iyileşme sağlanmıştır. pH ile değerlendirildiğinde sinerjik etki gözleniyor (Şekil 4.2). Tuz konsantrasyonu ile birlikte incelendiğinde (Şekil 4.6), yüksek basınç ozmotik basıncı yenerek yüksek performans sağlamaktadır.
- **Tuz Konsantrasyonu:** Tuz konsantrasyonunun etkisi, birlikte değerlendirildiği faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir:
 - **Yüksek pH’la birlikteyken:** Bu etkinin azaldığı görülüyor.
 - **Düşük pH’l birlikteyken:** Tuz konsantrasyonu arttıkça giderim artıyor (Şekil 4.3).
 - **Basınç ve sıcaklıkla birlikteyken:** Yüksek tuz konsantrasyonu, giderimi azalmaktadır (Şekil 4.6). Çünkü ozmotik basınç yükseliyor.
 - Bu durum, faktörler arası etkileşimlerin sistem performansını doğrudan etkilediğini ve etkileşim etkisinin oldukça güçlü olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.8. Optimum Tuzluluk Giderimi Koşulları

Faktör	Optimum Değer Aralığı	Etkileşim Bağlamı
pH (A)	3 – 4	Düşük seviyelerde pozitif etki
Basınç (C)	35 – 40 bar	Çoğunlukla pozitif etki
Sıcaklık (B)	25 – 30 °C	Yalnızca etkileşimli durumlarda olumlu katkı
Tuz Konsantrasyonu (D)	1–3 g/L (operasyonel olarak tercihli)	Faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

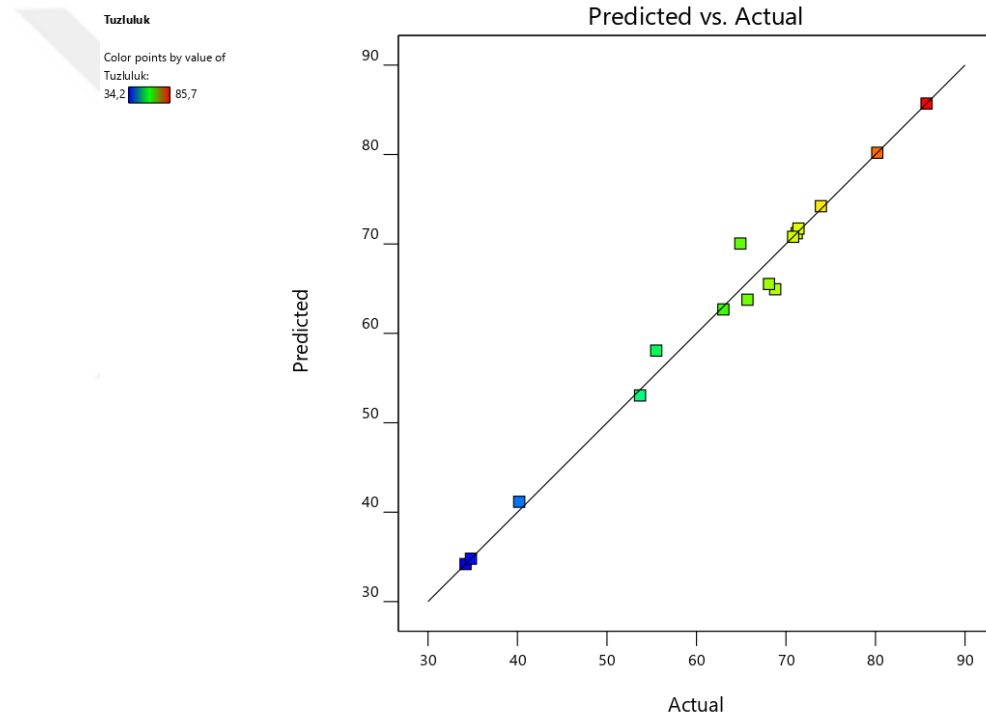
Bu sonuçlar, tuz giderim sistemlerinin optimizasyonu açısından çok değişkenli analizlerin gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Yalnızca tek bir parametrenin artırılması, sistem verimini maksimize etmek için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, faktörler arası etkileşimlerin dikkatli bir şekilde analiz edilmesi gereklidir.

Bazı parametreler tek başına anlamlı bir etki oluşturmazken, diğer faktörlerle birlikte değerlendirildiğinde sistem performansını belirleyici rol oynamaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan iki seviyeli faktöriyel tasarım, bu etkileşimlerin görsel ve istatistiksel olarak net biçimde analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca oluşturulan istatistiksel modeller ve izohips (eşgiderim) grafiklerinde gözlemlenen desenler, sistemin karmaşık ancak tahmin edilebilir bir yapıya sahip olduğunu ve bu yapının modellenilebilirliğinin yüksek olduğunu göstermiştir.

Ahunbay (2019), Yüksek basınç (35–40 bar) ve optimize edilmiş proses koşullarının (pH kontrolü dahil) birlikte uygulanması, tuz giderimini artırarak yüksek verimlilik sağladığını belirtmiştir. Bu, "pH ve basıncın sinerjik etkisi" bulgumuzu doğrulamaktadır. pH-basınç sinerjisinin verimliliği maksimize ettiğini, tuz konsantrasyonunun ancak diğer parametrelerle dengelendiğinde kabul edilebilir risk oluşturduğunu ve sıcaklığın tamamlayıcı bir rol oynadığını deneysel/modelleme verileriyle kanıtlamaktadır. Bulgularımız, LPHR (düşük basınçlı yüksek geri kazanım) proseslerinin temel prensipleriyle birebir örtüşmektedir. Özellikle yüksek tuzlu beslemelerde (örn. Basra Körfezi) pH-basınç optimizasyonunun kritikliği, her iki çalışmanın ortak vurgusudur. Ahunbay ve ark. (2018), 35–40 bar basınç aralığı, geleneksel TO'ya kıyasla spesifik enerji tüketiminde %8–35 azalma sağladığını bunun da yüksek basıncın verimliliği optimize ettiğini belirtmişlerdir. Basınç optimizasyonu ve geri besleme ile tuz konsantrasyonu/kirlenme etkilerinin kontrol edilebileceğini vurgulamışlardır. Bu bulgular, pH ve sıcaklığın membran verimi/ kirlenme üzerindeki etkileriyle birleştirildiğinde, faktörler arası sinerjinin pratik uygulanabilirliğini desteklemektedir. Mansour (2023), Artan besleme tuzluluğunun, osmotik basıncı artırarak zarın etkinliğini düşürdüğünü, ancak yüksek basınç ile bu etkilerin dengelenebileceğini ileri sürmüştür. Bu da araştırmacının çok değişkenli yüzey yanıt metodolojisi ve YSA analizi ile örtüşmektedir.

Tuzluluk Giderimi için Deneysel ve Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Tuzluluk giderimi amacıyla elde edilen deneysel ve tahmin değerleri Şekil 4.7'de sunulmuştur. "Tahmin ve Gerçek" grafiği, modelin tahmin ettiği tuzluluk giderimi değerleri ile deneysel olarak elde edilen gerçek veriler arasındaki ilişkinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Grafik, modelin öngörü gücünü görsel olarak incelemek açısından önemli bir araçtır. Yatay ekseninde gözlenen (Actual), dikey ekseninde ise model tarafından tahmin edilen (Predicted) değerler yer almaktadır. Modelin tahmin performansının ideal düzeyde olması durumunda, tüm veri noktalarının 45 derece eğimli referans doğrusu üzerinde veya bu doğruya çok yakın bir konumda yer alması beklenir. Bu referans çizgisi, tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere ne derece yakın olduğunu göstermesi bakımından karşılaştırmalı bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Grafikteki dağılım, modelin genel geçerliliği ve doğruluk düzeyi hakkında nitel bir fikir sunmaktadır.



Şekil 4.7. Tuzluluk giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması

Modelin tahmin performansına ilişkin olarak Şekil 4.7'de yer alan "Tahmin ve Gerçek" grafiğinde, tahmin edilen değerlerin büyük bir kısmının referans çizgisine yakın bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin genel anlamda yüksek doğrulukla tahminlerde bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bazı veri noktalarının referans çizgisinden belirgin şekilde sapması, modelin belirli koşullar altında daha yüksek hata payı ile çalıştığını işaret etmektedir.

Grafikte kullanılan renk skalası, model çıktılarının görsel olarak daha iyi yorumlanmasını sağlamaktadır. Mavi tonlar, yaklaşık %0,3 düzeyinde olan düşük tuzluluk giderimini; yeşil ve sarı

tonlar, orta düzey giderimi (%50–60 aralığı); kırmızı tonlar ise %80'in üzerindeki yüksek giderim oranlarını temsil etmektedir. Mavi ve açık mavi tonlarda gözlemlenen noktaların, çoğunlukla 0–40 aralığındaki gerçek değerlerde kümелendiği ve bu değerler için modelin tahminlerinin oldukça tutarlı olduğu görülmüştür. Bu da düşük giderim seviyelerinde modelin yüksek doğrulukla çalıştığını göstermektedir. Yeşil ve sarı tonlardaki noktalar ise orta seviyeli giderim verilerini yansıtmakta olup, bu noktaların referans çizgisine yakın konumlanması, modelin orta düzey giderim tahminlerinde de başarılı olduğunu göstermektedir. Kırmızı nokta, yaklaşık %85,7 düzeyinde bir giderim oranını temsil etmektedir. Bu yüksek değer referans çizgisine oldukça yakın veya doğrudan çizgi üzerinde konumlanması, modelin yüksek tuzluluk giderimi değerlerini de başarılı biçimde öngörebildiğini göstermektedir. Renk geçişlerindeki süreklilik, modelin doğrusal eğilimleri etkili biçimde yakaladığını ve doğru ölçeklendirme yaptığını işaret etmektedir.

Grafik üzerindeki veri noktalarının genel dağılımı, modelin hem düşük hem de yüksek giderim oranları için tutarlı ve kararlı tahminlerde bulunduğunu göstermektedir (%30- %85,7). Tahmin edilen değerler ile gerçek gözlemler arasındaki sapmalar, büyük oranda kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmakta, bu da modelin tahmin performansının güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

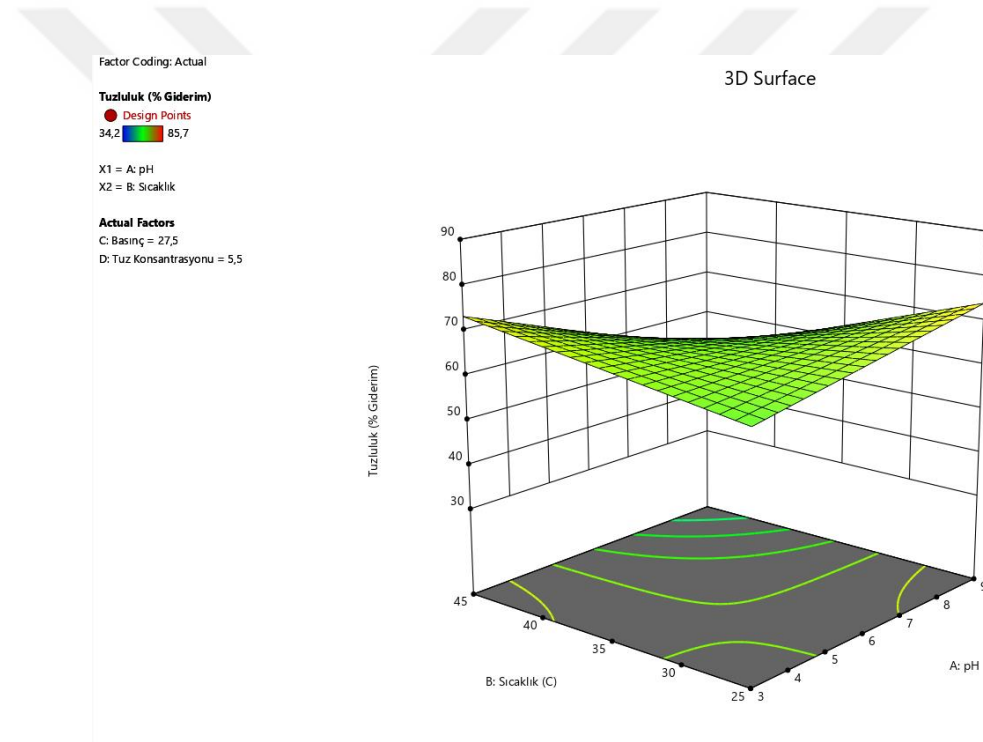
Referans çizgisine yakın veri noktaları, modelin yüksek doğrulukla tahmin ürettiğini ifade etmektedir. Buna karşın, çizgiden uzaklaşan noktalar (%60-70 arası), modelin doğruluk düzeyinin azaldığı ve tahmin hatalarının arttığı bölgeleri temsil etmektedir. Bu durumlar, özellikle modelin sınır koşullardaki tahmin yeteneğinin değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Jbari ve Abderafi (2023), çok amaçlı baskın olmayan sıralama genetik algoritması-II (NSGA-II) + YSA yaklaşımının, görsel analizdeki modelin %60-70 giderim aralığındaki hatalarını azaltmak için potansiyel bir çözüm sunabileceğini bildirmişlerdir. Bu sayede hem tuz hem de organik kirleticiler için optimal çözümler elde edilebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, modelin özellikle orta ve yüksek seviyelerdeki (>%50) tuzluluk giderimi oranlarını başarılı bir şekilde öngörebildiği ve bu bağlamda güvenilir sonuçlar sunduğu görülmektedir. Tüm giderim aralıklarında tahminlerin referans çizgisine yakın dağılması, modelin istatistiksel doğruluk açısından tatmin edici bir performans sergilediğini ve sistemin davranışlarını başarılı bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Literatüre baktığımızda, Li ve ark. (2022), Sadece RSM kullanıldığında akı için %8,68, giderim için %5,88 bağıl hata elde etmiş olup, YSA ile birleştirildiğinde hataların %0,58'e kadar düşmüş olduğunu bildirmişlerdir. Bu bakımdan YSA analizleri kullanmanın daha yüksek bir çözüm sunabileceği düşünülmektedir.

Tuzluluk Gideriminin Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafikler ile İncelenmesi

Yüzey yanıt modellemesinde yüzey grafikleri, çok değişkenli veri analizinde kritik bir görselleştirme aracı olarak kullanılmaktadır. Bu grafikler, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri üç boyutlu bir yüzey üzerinde temsil ederek, optimizasyon sürecinde

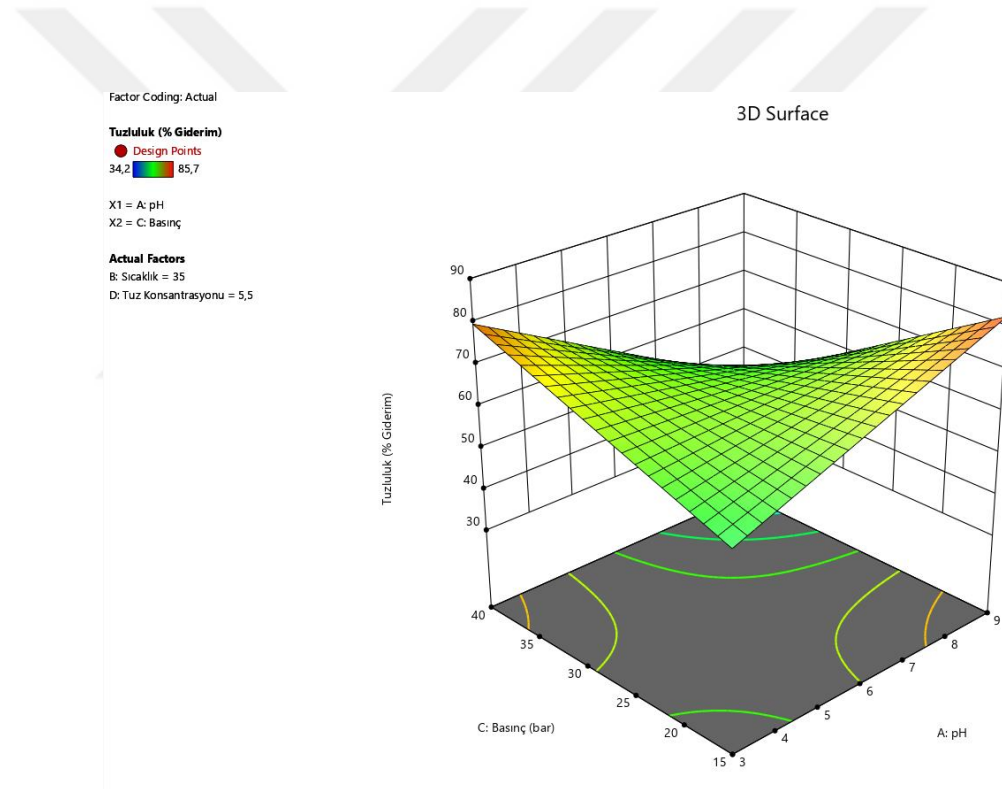
eğilimlerin ve etkileşimlerin anlaşılmasını kolaylaştırır. Özellikle yanıt yüzeyinin şeklini, maksimum/minimum noktalarını ve değişkenlerin birbirleri üzerindeki etkilerini görselleştirmek için tercih edilir (Myers ve ark., 2016). Üç boyutlu yüzey yanıt grafikleri, deney tasarımı ve proses optimizasyonunda, parametrelerin optimal kombinasyonlarının belirlenmesine yardımcı olurken, aynı zamanda verilerin doğrusal olmayan davranışlarını da ortaya koyar (Box ve Draper, 2007). Literatürde, bu grafiklerin, özellikle kimyasal prosesler, mühendislik tasarımları ve biyoteknolojik uygulamalarda, değişkenler arasındaki sinerjistik veya antagonistik (diğerinin etkisini yok eden) etkileşimleri yorumlamak için yaygın şekilde kullanıldığı belirtilmektedir (Khuri ve Mukhopadhyay, 2010). Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.8- 4.13 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla pH ve Sıcaklık, pH ve Basınç, pH ve Tuz Konsantrasyonu, Sıcaklık ve Basınç, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu, Basınç ve Tuz konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden tuzluluk giderimleri incelenmiştir.



Şekil 4.8. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.8’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ve sıcaklık parametrelerinin tuzluluk giderimi üzerindeki ortak etkilerini görselleştirmektedir. Grafik üzerindeki renk skalası, mavi tonların düşük giderim oranlarını (~%35 düzeyinde), yeşil ve sarı tonların ise yüksek giderim seviyelerini (%85,7’ye kadar) temsil ettiğini göstermektedir. Yüzeyin eğimli ve dalgalı yapısı, analiz edilen iki faktör arasında belirgin bir etkileşim bulunduğuna işaret etmektedir. Grafikselleştirilen yüzeyin belirgin bir düzlemsellikten uzak olması, pH ve sıcaklık değişkenlerinin sistematik ve bağımsız etkilerinden ziyade, birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Düşük pH ve yüksek

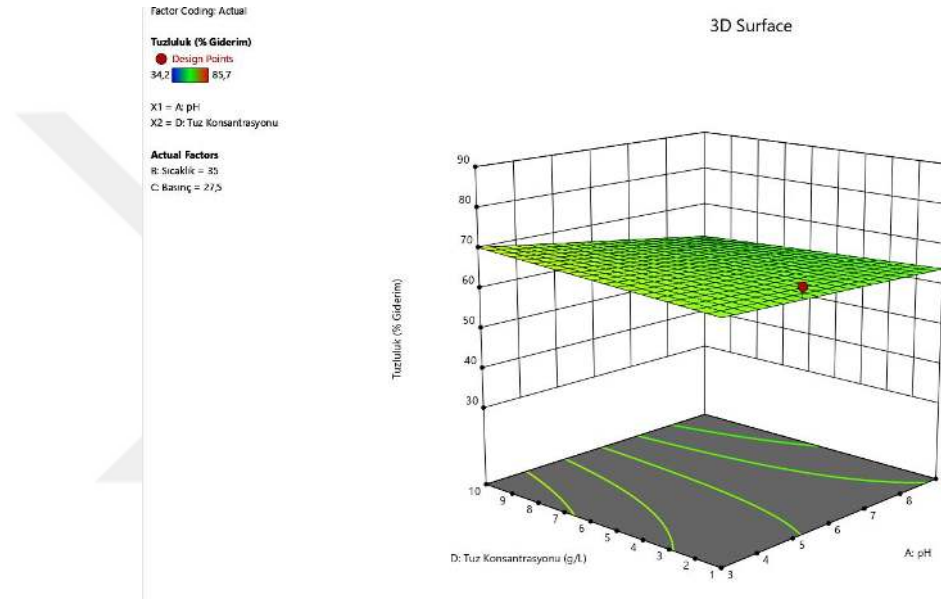
sıcaklık değerlerinin artışı ile tuzluluk gideriminde pozitif bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Özellikle pH'nın 8–9 aralığına ve sıcaklığın 40–45 °C düzeyine ulaşmasıyla birlikte giderim oranı %70'in üzerine çıkmaktadır. Bu durum, sistemin performansının, bu iki faktörün birlikte optimize edilmesine bağlı olduğunu göstermektedir. Sıcaklık değişiminin etkisi, yalnız başına ele alındığında sınırlı bir etkiye sahip görünse de yüksek pH ile birleştiğinde tuzluluk giderimi üzerinde belirgin bir artış sağlamaktadır. Bu bulgu, sıcaklık ve pH faktörleri arasında anlamlı bir sinerjik etkileşimin var olduğunu ve bu etkileşimin tuzluluk giderimini maksimize etmekte kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Elde edilen üç boyutlu yüzey modeli, pH ve sıcaklık faktörlerinin birlikte artırılmasının tuzluluk giderimini optimize etmek açısından etkili bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır. Model çıktıları, bu iki parametre arasında pozitif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon bulunduğuna işaret etmekte olup, proses performansının iyileştirilmesi açısından çok değişkenli yaklaşımın önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.9. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.9'da sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ve basınç parametreleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini görselleştirmektedir. Grafik yüzeyinin eğimli yapısı, her iki değişkenin giderim oranı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymakla birlikte, bu etkilerin büyük ölçüde bağımsız ve doğrusal nitelikte olduğunu göstermektedir. Yüzeydeki renk skalası, giderim performansındaki artışı açıkça ortaya koymaktadır: mavi tonlar düşük giderim oranlarını (%35), yeşil ve sarı tonlar orta düzeyde giderimi (%60–75), kırmızı tonlar ise yüksek

giderim oranlarını (~%85) temsil etmektedir. Bu renk geçişlerinin düzenli ve homojen şekilde dağılması, modelin istatistiksel açıdan kararlı bir yapı sergilediğini göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre, minimum giderim (%34,2 civarı) orta pH değerlerinde (yaklaşık pH 6), ve düşük-orta basınç (15–20 bar) civarında ortaya çıkıyor. Maksimum giderim ise (%80 civarı) düşük pH (~3 civarı) ve yüksek basınç (~40 bar) koşullarında veya yüksek pH (~9 civarı) ve yine yüksek basınç (~40 bar) koşullarında gerçekleşiyor. pH'nın etkisi U-şekilli bir eğri vermekte olup; orta değerlerde giderim düşük, uç değerlerde (3 veya 9) daha yüksektir. Basınç arttıkça tuzluluk giderimi genelde artmıştır. Sonuç olarak hem pH hem de basınç parametrelerinin tuzluluk giderimi üzerinde ayrı ayrı anlamlı ve olumlu etkiler yarattığı görülmektedir.



Şekil 4.10. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.10'da sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ve tuz konsantrasyonu parametreleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Grafik yüzeyi, oldukça düzgün ve yatay görünmektedir. Bu da pH ve tuz konsantrasyonunun bu aralıkta giderim üzerine sınırlı etkiye sahip olduğunu gösterir. Analiz sonuçlarına göre, en yüksek giderim yüksek pH (7–8) değerlerinde elde edilmektedir. pH ve tuz konsantrasyonu faktörlerinin tuzluluk giderimi üzerinde güçlü bir etkisi olmadığı yorumu yapılabilir. Bu grafik için optimum kombinasyonun, pH $\approx$ 7–8 tuz konsantrasyonunun ise $\approx$ 4–6 g/L aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, optimum tuz giderimi yüksek pH değerlerinde, tuz konsantrasyonundan bağımsız olarak gerçekleşmektedir. pH ve tuz konsantrasyonunun geniş bir aralıkta benzer etki göstermesi, prosesin bu iki parametreye karşı nispeten duyarsız olduğunu göstermektedir.

Factor Coding: Actual

Tuzluluk (% Giderim)

● Design Points
34,2 85,7

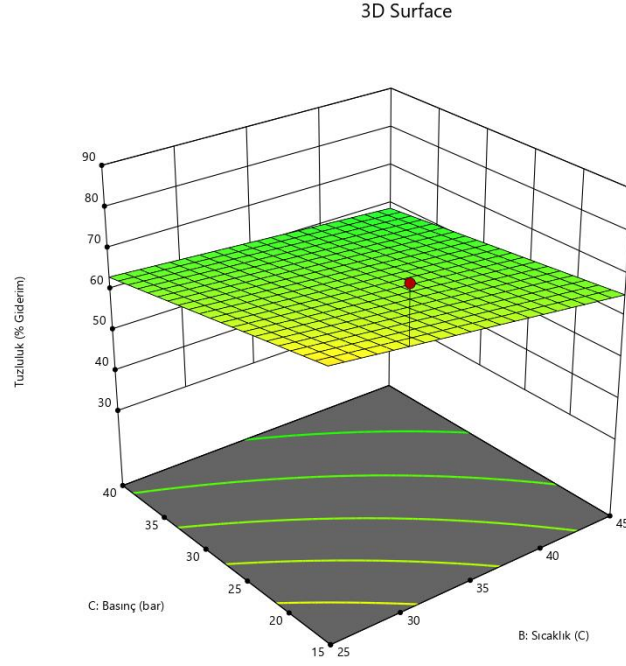
X1 = B: Sıcaklık

X2 = C: Basınç

Actual Factors

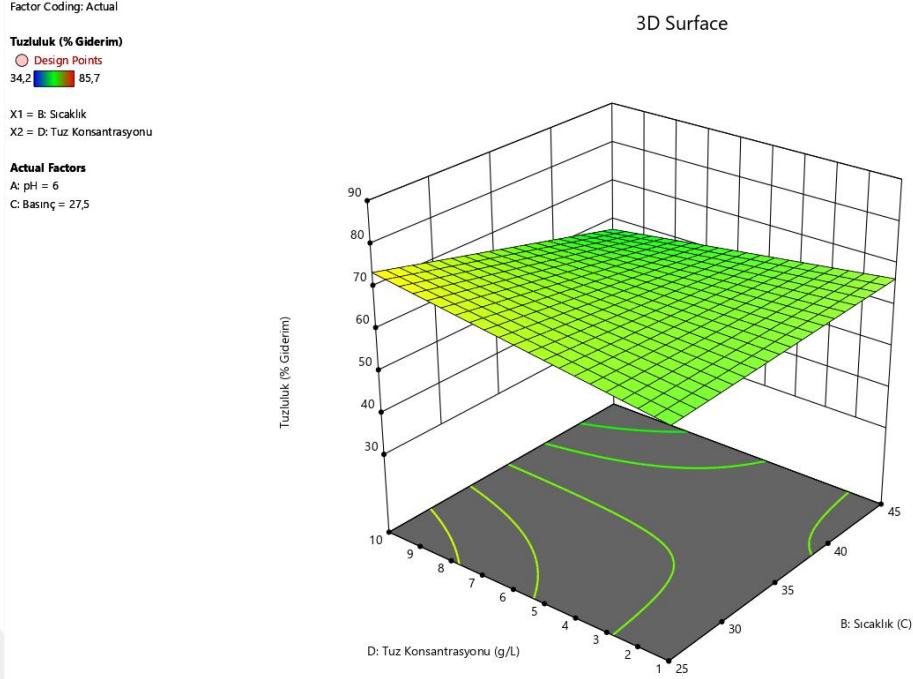
A: pH = 6

D: Tuz Konsantrasyonu = 5,5



Şekil 4.11. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

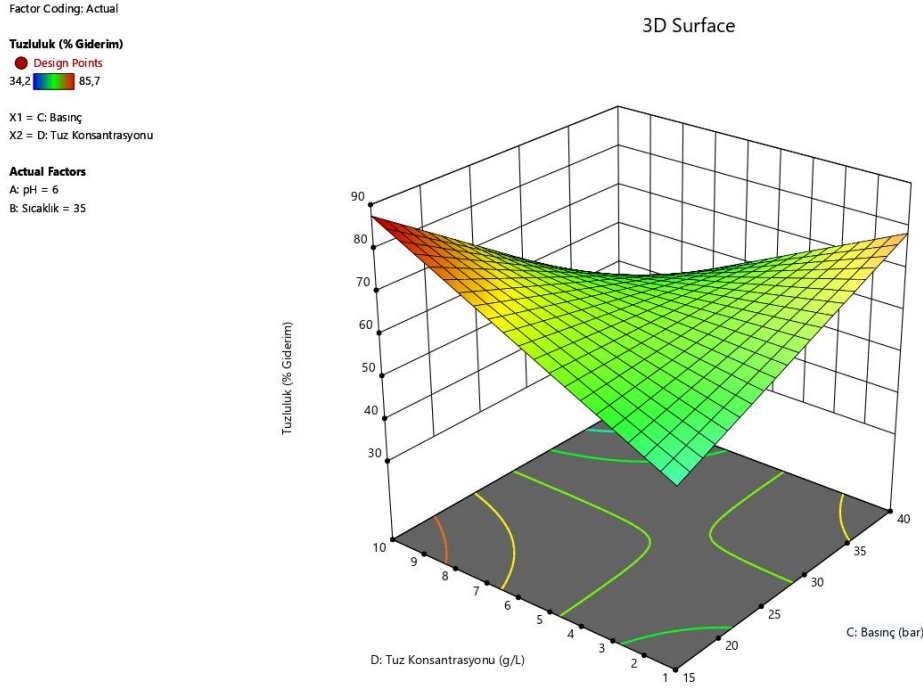
Şekil 4.11’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sıcaklık ve basınç faktörleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Grafik yüzeyi düz olduğu için (eğrilik az), sıcaklık ve basınç artışıyla birlikte giderimde lineer artış görülüyor. Artan basınç değerleriyle tuzluluk gideriminin yükseldiği anlaşıyor. Grafikte, 15 bar civarında daha düşük, 40 bar civarında daha yüksek verim gözlemlenmektedir. Analiz sonuçlarına göre, sıcaklık değerleri 25 °C civarında nispeten düşük verim, 45 °C’ye doğru artış gözlemlenmiştir. Ancak sıcaklığın etkisi basınca göre daha sınırlı olduğu düşünülmektedir. Yüzeyde en yüksek tuzluluk giderimi yüksek basınç (35–40 bar) ve orta-yüksek sıcaklık (40–45 °C) aralığında elde ediliyor. Yüzey çok dik olmadığı için, optimum nokta geniş bir aralıkta sağlanabiliyor (40 bar civarı basınç + 40 °C üstü sıcaklık). Bu bulgu, sistemin verimli çalışabilmesi için her iki parametrenin birlikte optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak, sıcaklık ve basınç değerlerinin artışı ile elde edilen yüksek verim, enerji tüketimini ve işletme maliyetlerini de doğrudan etkileyebileceğinden, optimum çalışma koşullarının belirlenmesinde yalnızca teknik verimliliğin değil, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliğin de dikkate alınması önem arz etmektedir. Bu bağlamda, söz konusu grafik, deneysel verilerin yalnızca teknik değil, enerji-maliyet boyutuyla birlikte bütüncül olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.12. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Tuz Konsantrasyonu ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.12’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, tuz konsantrasyonu ile sıcaklık değişkenlerinin tuzluluk giderimi üzerindeki etkileşimini göstermektedir. Grafik yüzeyinde belirgin bir eğrilik gözlemlenmemektedir; bu durum, iki değişkenin etkileşim düzeyinin düşük olduğunu ve tuzluluk giderimi üzerinde daha çok bireysel (ana) etkilerin belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Tuz konsantrasyonunun artışıyla birlikte tuzluluk giderimi oranında azalma gözlenmiştir. Bu durum, yüksek tuzlulukta sistemin tuz uzaklaştırma kapasitesinin düştüğünü göstermekte olup, bu düşüş; membran üzerinde artan ozmotik basınç farkı, ters iyon difüzyonu ve iyon yükünün artışı gibi etkilerle açıklanabilir. Özellikle 8–10 g/L aralığında tuz konsantrasyonuna sahip besleme çözeltilerinde, giderim oranlarının ciddi şekilde azaldığı dikkati çekmektedir. Öte yandan, sıcaklık arttıkça sistemin tuzluluk giderim performansı belirgin şekilde artmaktadır. Grafiğin sağ tarafında, yaklaşık 45 °C sıcaklık seviyelerinde %80’e yaklaşan giderim oranları elde edilmiştir. Bu eğilim, sıcaklığın membran geçirgenliğini artırması ve çözünmüş iyonların difüzyonunu zorlaştırarak giderim etkinliğini yükseltmesiyle uyumludur. Genel olarak değerlendirildiğinde, en yüksek tuzluluk giderimi düşük tuz konsantrasyonu (~1 g/L) ve yüksek sıcaklık (~45 °C) kombinasyonunda elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük giderim oranları yaklaşık 10 g/L tuz konsantrasyonu ile yüksek sıcaklık (~45 °C) koşullarında gözlemlenmiştir. Bu bulgular, sıcaklığın tuz giderimi üzerinde pozitif ve baskın bir etkiye sahip olduğunu, tuz konsantrasyonunun ise negatif etkiler doğurduğunu göstermektedir. Bu grafik, sistemin termal koşullara daha duyarlı olduğunu; buna karşın tuz yükünün artışına karşı daha kırılgan bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, sistemin optimize edilmesinde sıcaklık parametresi etkin bir kontrol aracı olarak kullanılabilirken, yüksek tuz

yüklerinin neden olduğu performans düşüşü dikkate alınarak tuz konsantrasyonu sınırlandırılmalıdır. Ayrıca, bu sonuçlar, sıcaklık–basınç kombinasyonları üzerinden geliştirilecek daha kapsamlı optimizasyon çalışmalarına da temel oluşturabilecek niteliktedir.



Şekil 4.13. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Tuz Konsantrasyonu ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.13'te sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, basınç ve tuz konsantrasyonu değişkenlerinin tuzluluk giderimi üzerindeki etkileşimini göstermektedir. Grafik yüzeyinin doğrusal olmayan ve asimetrik bir yapıya sahip olması, bu iki faktör arasında belirgin bir etkileşim bulunduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek tuzluluk giderimi yüksek basınç (~35–40 bar) ve düşük tuz konsantrasyonu (~1–2 g/L) koşullarında elde edilmiştir. Buna karşılık, düşük basınç (~15–20 bar) ve yüksek tuz konsantrasyonu (~8–10 g/L) kombinasyonlarında giderim oranı en düşük seviyelere (yaklaşık %30–40) gerilemiştir. Bu durum, faktörler arasında güçlü bir etkileşim etkisine işaret etmektedir. Basınç değişkeni incelendiğinde, artan basınç seviyeleriyle birlikte tuzluluk giderimi oranının da belirgin şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu bulgu, TO sistemlerinin temel çalışma prensipleriyle tutarlıdır; zira yüksek basınç, membran yüzeyinde yeterli kuvvet oluşturarak suyun geçişini sağlarken, çözünmüş tuzların membran tarafından geri tutulmasını kolaylaştırmaktadır. Tuz konsantrasyonu faktörü ise sistem performansı üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Grafik yüzeyinde, tuz konsantrasyonu ekseninde aşağıya doğru belirgin bir eğim gözlemlenmiştir. Bu durum, artan tuz yükünün membran üzerindeki osmotik basınç farkını azaltarak su geçişini zorlaştırdığı ve giderim verimini düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca, yüksek tuz konsantrasyonları membran yüzeyinde polarlanma ve kirlenme gibi olumsuz

etkileri de artırarak performans kayıplarına neden olabilmektedir. Bu analiz ışığında, basınç parametresi sistemin performansı açısından en kritik kontrol değişkenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Öte yandan, tuz konsantrasyonundaki artışlar sistem üzerinde ek yük oluşturarak verimliliği azaltmaktadır. Bu nedenle, bu iki faktörün birlikte değerlendirilerek optimize edilmesi, özellikle yüksek verim hedeflenen ileri düzey membran uygulamalarında (örneğin NF veya TO sistemlerinde) proses verimliliğinin artırılması açısından stratejik önem taşımaktadır. Söz konusu grafik, sistem tasarımı ve proses parametrelerinin optimizasyonu açısından karar destekleyici nitelikte bir araç sunmaktadır.

Üç boyutlu yüzey grafiklerinin bütüncül analizi sonucunda (Şekil 4.8–4.13), tuzluluk giderimi performansı üzerinde en kritik kontrol parametrelerinin basınç ve pH olduğu açıkça ortaya konulmuştur. Basınç düzeyindeki artış, hemen her etkileşim kombinasyonunda tuz giderim verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Öte yandan, tuz konsantrasyonu, tüm grafiklerde genellikle negatif bir etki göstermiştir. Artan tuz konsantrasyonu, sistem üzerindeki osmotik yükü artırarak membran performansını düşürmekte ve proses koşullarını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, tuz konsantrasyonu faktörü, sistem açısından en riskli değişkenlerden biri olarak değerlendirilmelidir. Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Elimelech ve Phillip (2011), çalışmasında TO sistemlerinde basınç artışının tuz giderimi ve su akışını doğrudan etkilediğini vurgulamış olup. Yüksek basınç, osmotik basıncın üstesinden gelerek verimliliği artıracaklarını ifade etmişlerdir. Sonuçlar bu bakımdan benzerlik göstermektedir.

Yüksek basınç ile yüksek tuz konsantrasyonu birlikte değerlendirildiğinde, bazı durumlarda tuzluluk giderimi açısından maksimum verime ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak bu durum, sistemin aşırı koşullarda çalıştırılmasına bağlı olarak enerji tüketimi ve operasyonel maliyet açısından dezavantaj yaratabilir. pH değeri, özellikle tuz konsantrasyonu ve sıcaklık faktörleriyle birlikte değerlendirildiğinde, güçlü sinerjik etkiler göstermekte; her iki değişkenle de birlikte çalıştığında tuzluluk gideriminde olumlu katkılar sunmaktadır. Benzer şekilde, sıcaklık faktörü de tek başına sınırlı bir etki göstermesine rağmen, pH ve tuz konsantrasyonu ile etkileşime girdiğinde tuz gideriminde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Literatürü incelediğimizde, Mansour (2023), yüksek basınç (örneğin 55-56.5 bar) ve artan tuz konsantrasyonu (35 g/L) altında bor gideriminin (%90'a kadar) ve tuz gideriminin (%99,7) maksimum seviyelere ulaştığı sonucuna varmıştır. Ancak, bu koşullarda spesifik enerji tüketimi (SEC) 3.52 kWh/m³'e yükselerek maliyet dezavantajı yaratmakta olduğu sonucuna varmıştır.

Bu grafiklerin sunduğu eğilimler, tuzluluk giderimi optimizasyonunun tek değişkenli bir yaklaşım ile gerçekleştirilemeyeceğini, çok değişkenli analiz ve optimizasyon stratejilerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Sistem performansında anlamlı bir artış sağlanabilmesi için etkileşimli faktörlerin birlikte ele alınması ve dengelenmesi gerekmektedir. Özellikle enerji tüketimi ile tuz giderim verimliliği arasındaki denge, proses tasarımında ihmal edilmemesi gereken temel bir parametredir. Zira yüksek performans hedefleri, beraberinde önemli enerji tüketimi ve maliyet

yükleri getirebilir. Bu nedenle, optimum işletme koşullarının belirlenmesi sürecinde teknik verimliliğin yanı sıra ekonomik sürdürülebilirlik de dikkate alınmalıdır.

4.1.2 TÇKM Giderimi

Çizelge 4.9’de sunulan ANOVA analizi, TÇKM giderimi üzerindeki faktörlerin etkisini inceleyen 4FI modeline dayanmaktadır. DİS-FT kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma, bağımsız değişkenlerin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini değerlendirir.

Çizelge 4.9. 4FI model için ANOVA analizi (TÇKM Giderimi)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
Model	1125,768921	3	375,2563071	2,044983	0,161293	Anlamsız
A-pH	23,46123312	1	23,46123312	0,127853	0,726878	
D-Tuz Konsantrasyonu	148,8628583	1	148,8628583	0,811238	0,385474	
AD	1060,79299	1	1060,79299	5,780859	0,033254	
Kalıntı	2202,011079	12	183,5009232			
Cor Toplamı	3327,78	15				

Modelin genel anlamlılığı, varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Elde edilen F değeri 2,04 olup, bu değere karşılık gelen p-değeri 0,1613 ($> 0,05$) düzeyindedir. Bu durum, modelin tüm faktörleriyle birlikte toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) giderimindeki varyasyonu istatistiksel olarak anlamlı bir düzeyde açıklayamadığını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, modelin genel yapısı anlamlı bulunmamış ve kurulan regresyon modelinin TÇKM giderimi üzerinde güçlü bir açıklayıcılık ortaya koymadığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, modele dahil edilen iki faktörlü etkileşim terimlerinden pH (A) ile tuz konsantrasyonu (D) arasındaki etkileşim (AxD), anlamlı bulunmuştur. Bu etkileşim terimi için elde edilen kareler toplamı (OK = 1.060,79, serbestlik derecesi = 1), $F = 5,7809$ ve p-değeri = 0,0333 olup, bu değer 0,05 anlamlılık düzeyinden küçüktür ($p < 0,05$). Bu da söz konusu etkileşimin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, modelin genel olarak istatistiksel anlamlılık taşımasına karşın, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşim, TÇKM giderimi üzerinde anlamlı ve belirleyici bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda, özellikle bu iki değişkenin birlikte değerlendirilmesi, proses optimizasyonu açısından kritik önemdedir.

Çizelge 4.10. Uygunluk İstatistikleri (TÇKM Giderimi)

Std. Sapma	13,54625	R²	0,338294
Ortalama	61,8	Düzeltilmiş R²	0,172868
C.V. %	21,9195	Tahmini R²	-0,16095
		Yeterlilik Oranı	4,903005

Çizelge 4.10'da verilen istatistiksel bulgulara göre, modelin açıkladığı toplam varyans oranı ($R^2 \approx 0,338$) olup, bu durum modelin deneysel verideki toplam varyansın yaklaşık %33,8'ini açıklayabildiğini göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, deney tasarımında kullanılan bağımsız değişkenler (faktörler), gözlenen değişimin yalnızca üçte birini temsil edebilmektedir.

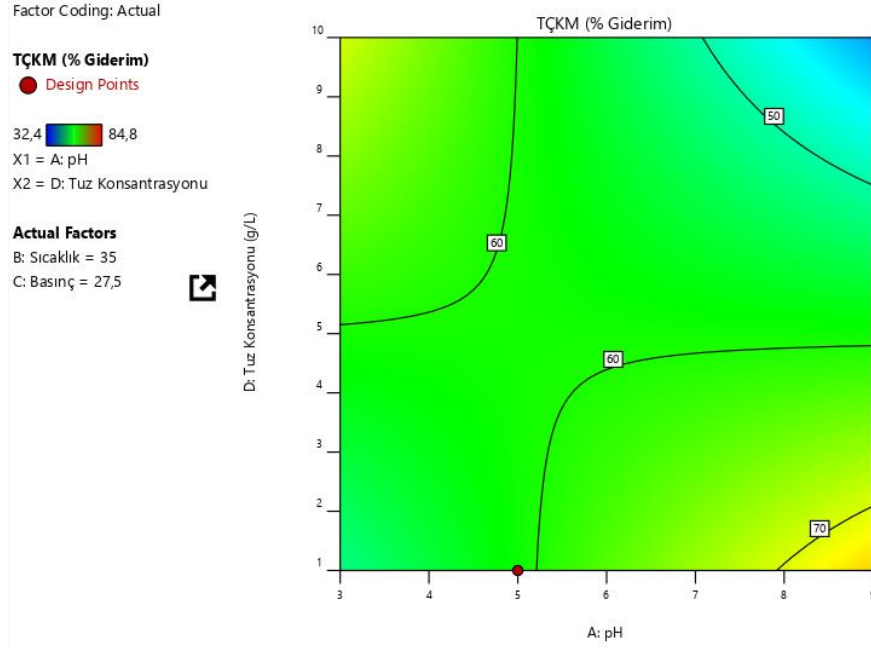
Modelin düzeltilmiş R^2 determinasyon katsayısı ise yaklaşık 0,1729 olarak hesaplanmıştır. Bilindiği üzere, R^2 değeri modelde yer alan faktör sayısı arttıkça doğal olarak yükselme eğilimindedir; buna karşılık düzeltilmiş R^2 , bu artışı örneklem büyüklüğü ve faktör sayısı doğrultusunda dengeleyerek daha gerçekçi bir değerlendirme sunar. Bu çalışmada düzeltilmiş R^2 'nin %17,3 seviyesine düşmesi, modele dâhil edilen bazı değişkenlerin anlamlı bir katkı sunmadığını ve hatta modele istatistiksel gürültü eklemiş olabileceğini düşündürmektedir.

Öte yandan, tahmini $R^2 \approx -0,1609$ olarak bulunmuştur. Bu negatif değer, modelin dış örneklerde yani eğitim verisi dışında kalan gözlemlerde güvenilir tahminler yapamayacağını göstermekte; bu durum ise genellikle modelin “overfitting” (aşırı uyum) problemi yaşadığını ya da değişkenler arası ilişkilerin yeterince temsil edilemediğini işaret etmektedir.

Modelin deneysel tasarımdaki genel yeterliliğini gösteren sinyal-gürültü oranı (Adequate Precision) yaklaşık 4,9030 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4'ün üzerinde olması, deney tasarımının sistemdeki sinyali algılayabildiğini ve ölçülebilir bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Ancak bu değer, sinyalin çok güçlü olmadığını da ortaya koymakta; dolayısıyla modelin iyileştirilmesine yönelik potansiyelin bulunduğu ifade edilebilir.

TÇKM Gideriminin Renkli İzohips Grafikler ile İncelenmesi

Bu renkli izohips grafik, toplam çözünmüş katıların (TÇKM) giderimi üzerindeki çeşitli faktörlerin (pH ve tuz konsantrasyonu) etkisini incelemektedir. Grafik, iki değişkenin etkileşimlerini inceleyerek, diğer değişkenler sabit tutulduğunda TÇKM gideriminin nasıl değiştiğini görsel olarak göstermektedir. Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.14'te sunulmuştur.

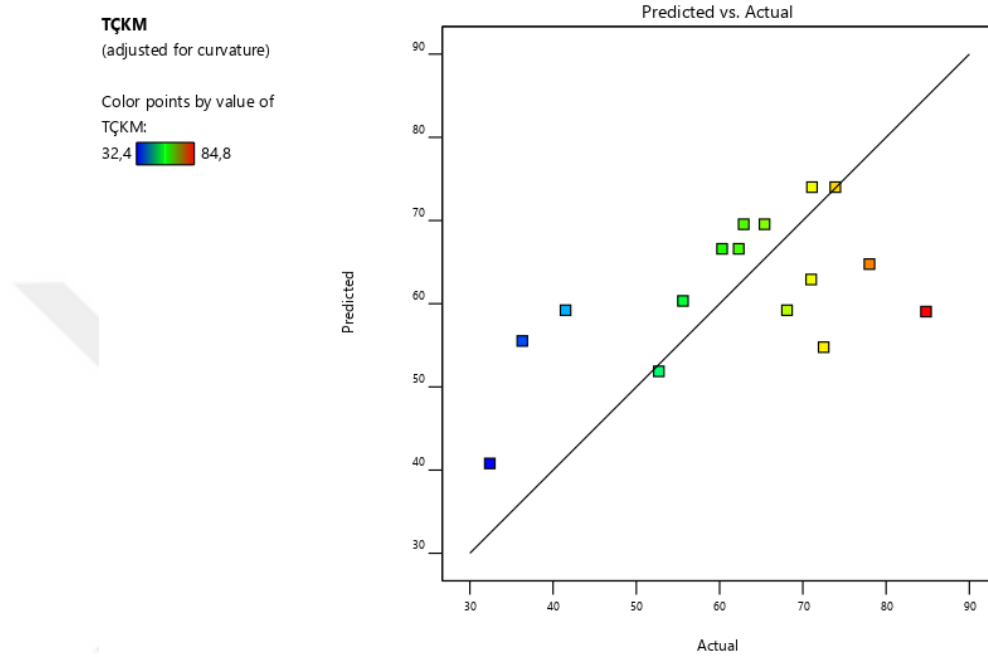


Şekil 4.14. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.14'te sunulan renkli izohips grafik, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin toplam çözünmüş madde (TÇKM) giderimi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Grafik analizine göre, düşük pH değerleri (yaklaşık 3–5 aralığı) ile yüksek tuz konsantrasyonlarının (8–10 g/L) bir arada bulunduğu bölgeler, TÇKM gideriminin en düşük seviyelerde gerçekleştiği alanları temsil etmektedir. Bu bölgeler grafik üzerinde genellikle yeşil tonlarla ifade edilmiş olup, giderim oranları yaklaşık %30–40 civarındadır. Özellikle düşük tuz konsantrasyonlarında (örneğin 1-2 g/L), pH'ın giderim üzerindeki etkisi daha belirgin hâle gelmektedir. Bu duruma örnek olarak, pH değeri arttıkça, düşük tuz konsantrasyonu bölgelerinde TÇKM gideriminde gözle görülür bir artış meydana gelmekte; bu artış grafik üzerinde sarı tonlarla temsil edilen alanlarda izlenmektedir. Bu bulgu, pH'ın etkisinin doğrudan tuz konsantrasyonuna bağımlı olduğunu ve pH'ın tek başına etkili bir parametre olmadığını göstermektedir. Grafikte konumlandırılmış olan tasarım noktası (kırmızı nokta), yaklaşık olarak pH = 5 ve tuz konsantrasyonu = 2,75 g/L düzeyinde yer almakta olup, bu bölge açık yeşil tonlarla ifade edilmiştir. Bu da söz konusu koşullarda TÇKM gideriminin yaklaşık %45–50 seviyelerinde gerçekleştiğini göstermektedir. En yüksek giderim oranları (%80 ve üzeri), grafik yüzeyinin sağ alt köşesinde, yani pH $\approx$ 9 ve tuz konsantrasyonu 1-2 g/L olan bölgede gözlemlenmektedir. Bu durum, TÇKM gideriminin optimizasyonu açısından yüksek pH ve yüksek tuz konsantrasyonu kombinasyonlarının birlikte değerlendirilmesinin kritik önemde olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, bu renkli izohips grafik, pH ve tuz konsantrasyonu arasındaki güçlü etkileşimi açık bir şekilde ortaya koymakta ve optimum giderim performansı elde edebilmek için her iki parametrenin eşzamanlı olarak optimize edilmesi gerektiğini bilimsel olarak desteklemektedir.

TÇKM Giderimi için Deneysel ve Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

TÇKM giderimi amacıyla elde edilen deneysel ve tahmin değerleri Şekil 4.15'te sunulmuştur. "Tahmin ve Gerçek" grafiği, modelin tahmin ettiği TÇKM giderimi değerleri ile deneysel olarak elde edilen gerçek veriler arasındaki ilişkinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Grafikteki dağılım, modelin genel geçerliliği ve doğruluk düzeyi hakkında nitel bir fikir sunmaktadır.



Şekil 4.15. TÇKM giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması

Modelin öngördüğü değerlerin büyük bir kısmı, referans çizgisine yakın bir dağılım göstermektedir. Bu durum, modelin genel anlamda başarılı tahminlerde bulunduğuna işaret etmektedir. Bununla birlikte hem düşük hem de yüksek toplam çözünmüş madde (TÇKM) giderim değerlerinde belirli sapmalar gözlemlenmektedir. Özellikle uç değerlerde (örneğin %85–90 gibi yüksek ya da %10'un altındaki düşük giderim oranlarında), modelin tahminlerinde ± 15 –30 birim arasında değişen hatalar oluşmuş, bu da modelin ekstrem değerleri yeterince doğru temsil edemediğini göstermektedir. Dolayısıyla, modelin tahmin gücü merkezi değerlerde güçlü iken, uç değerlerde görece bir performans düşüşü gözlemlenmiştir.

Grafikte kullanılan renk skalası, tahmin doğruluğunu görsel olarak değerlendirmek açısından önemli bir araçtır. Mavi tonlar düşük TÇKM giderimini (yaklaşık %0,3 civarı), yeşil ve sarı tonlar orta düzey giderimi (%50–60 arası) ve kırmızı tonlar yüksek giderim oranlarını (%80 ve üzeri) temsil etmektedir. Grafik üzerinde düşük giderim değerlerine sahip gözlemler (mavi tonlar), model tarafından genellikle gerçek değerlerin üzerinde tahmin edilmiş; buna karşın, yüksek giderim değerleri (kırmızı tonlar) model tarafından sistematik olarak olduğundan düşük tahmin edilmiştir. Bu

durum, modelin uçlardaki verileri merkezileştirme eğiliminde olduğunu ortaya koymakta ve renk geçişleri bu kalıbı net bir şekilde doğrulamaktadır.

Modelin orta aralıkta (%50–70 giderim aralığında) yaptığı tahminler oldukça hassas olup, bu bölgelerdeki sapmalar genellikle ± 5 –10 birim arasında kalmıştır. Ancak, uç değerlerde tahmin hatalarının ± 15 –30 birime kadar çıktığı görülmektedir. Bu, özellikle ekstrem pH–tuz konsantrasyonu kombinasyonlarında modelin varyansı yeterince açıklayamadığını ve etkileşim terimlerinin modelde yeterince temsil edilmediğini göstermektedir.

Ortalama tahmin hatası yaklaşık ± 8 –10 birim civarındadır. Model, yüksek giderim değerlerinde genellikle “eksik tahmin”, düşük giderim değerlerinde ise “fazla tahmin” eğilimi göstermektedir. Bu sistematik sapma, modelin doğrusal varsayımları ile sınırlandığını ve verideki doğrusal olmayan yapıları tam olarak yakalayamadığını düşündürmektedir. Ayrıca, hata dağılımının homojen olmaması, modelde ek polinomsal (kuadratik veya kübik) terimlere ya da parametrik olmayan dönüşümlere (örneğin logaritmik dönüşüm) ihtiyaç olabileceğine işaret etmektedir.

Model, orta düzey giderim aralıklarında güçlü bir tahmin performansı sergilemekte; ancak, uç değerlerdeki doğruluk sınırlıdır. Bargeman G. (2023), çalışmasındaki modelin düşük giderimdeki hataları, NF membranlarının gerçek davranışını yansıttığını, yüksek konsantrasyonlarda ise zorlandığını çünkü membran davranışı doyumlukta nonlineer hale geldiğini raporlamıştır. Bu bakımdan çalışmalar örtüşmektedir. Özellikle pH ve tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin ANOVA analizinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş olması, bu etkileşimin modelde daha esnek yapılarda (örneğin çok terimli polinomlar veya dönüşümlü regresyon modelleri) temsil edilmesinin faydalı olacağını göstermektedir. Sonuç olarak, mevcut grafik modelin genel tahmin gücünü ortaya koymakta, ancak uç değerlerdeki sapmalar, daha gelişmiş modelleme yaklaşımlarının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

TÇKM Gideriminin Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafikler ile İncelenmesi

Üç boyutlu yüzey yanıt grafikler, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri üç boyutlu bir yüzey üzerinde temsil ederek, optimizasyon sürecinde eğilimlerin ve etkileşimlerin anlaşılmasını kolaylaştırır. Özellikle yanıt yüzeyinin şeklini, maksimum/minimum noktalarını ve değişkenlerin birbirleri üzerindeki etkilerini görselleştirmek için tercih edilir (Myers ve ark., 2016). Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.16 ile aşağıda sunulmuştur. Şekilde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden TÇKM giderimleri incelenmiştir.

Factor Coding: Actual

3D Surface

TÇKM (% Giderim)

● Design Points

32,4 84,8

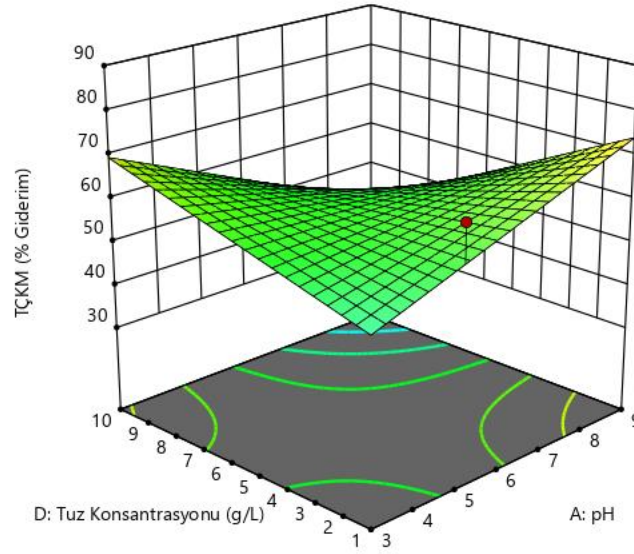
X1 = A: pH

X2 = D: Tuz Konsantrasyonu

Actual Factors

B: Sıcaklık = 35

C: Basınç = 27,5



Şekil 4.16. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.16’da sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin toplam çözünmüş madde (TÇKM) giderimi üzerindeki etkisini incelemektedir. Grafik yüzeyi, belirgin biçimde eğimli ve asimetric bir yapı sergilemekte olup, bu durum söz konusu iki faktör arasında güçlü ve doğrusal olmayan bir etkileşimin varlığını açıkça ortaya koymaktadır. Grafikteki eğimleri incelediğimizde, Düşük pH ve yüksek tuz konsantrasyonu etkileşiminin giderimi düşürdüğü gözlemlenmiştir (~%30–40). Yüksek pH (8–9) ve düşük tuz (1–2 g/L) seviyelerinde giderim maksimuma çıkmıştır (~%70–85). Bu grafik, pH ve tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerinde kuvvetli bir sinerji oluşturduğunu ve bu etkileşimin göz ardı edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Modelin çıktısı, sistemin performansının sadece ana etkilerle değil, bu tür etkileşimlerle de önemli ölçüde belirlendiğini açıkça göstermektedir.

4.1.3 Eİ İndirgenmesi

Çizelge 4.11’de belirtilen ANOVA tablosu, Eİ (% giderim) değerleri üzerinde faktörlerin etkisini inceleyen 4FI modele dayanmaktadır. DİS-FT kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma, bağımsız değişkenlerin elektriksel iletkenlik üzerindeki etkilerini değerlendirir.

Çizelge 4.11. 4FI model için ANOVA analizi (Eİ İndirgenmesi)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
Model	923,456183	1	923,456183	5,207765	0,038642	Anlamlı
CD	923,456183	1	923,456183	5,207765	0,038642	
Kalıntı	2482,52132	14	177,322951			
Cor Toplamı	3405,9775	15				

Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, modelin genel olarak istatistiksel açıdan anlamlı olduğu belirlenmiştir (F-değeri = 5,20; p-değeri = 0,039). Bu bulgu, modelin açıklayıcı gücünün yüksek olduğunu ve gözlenen değişkenliğin rastlantısal hata yerine bağımsız değişkenlerin etkisiyle açıklandığını göstermektedir. Başka bir deyişle, modelde yer alan faktörlerin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesi üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır.

Özellikle CxD (basınç $\times$ tuz konsantrasyonu) etkileşim terimi incelendiğinde, bu faktörler arasındaki etkileşimin de anlamlı olduğu ortaya konmuştur (K.T. = 923,456; df = 1; O.K. = 923,456; F = 5,2078; p = 0,03864). Belirlenen p-değeri < 0,05 olduğundan, bu etkileşim istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmektedir.

Bu durum, basınç (C) ve tuz konsantrasyonu (D) faktörlerinin Eİ indirgenimi üzerindeki etkilerinin yalnızca bağımsız olarak değil, birlikte değerlendirildiğinde anlamlı farklılık yarattığını göstermektedir. Dolayısıyla, sistem performansı açısından her iki değişkenin etkileşimsel düzeyde birlikte ele alınması gereklidir. Bu sonuçlar, tekil etkilerin ötesinde çoklu faktör kombinasyonlarının, özellikle de etkileşimli modellerin, proses optimizasyonu açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.12. Uygunluk İstatistikleri (Eİ İndirgenmesi)

Std. Sapma	13,3	R²	0,271
Ortalama	61,8	Düzeltilmiş R²	0,219
C.V. %	21,6	Tahmini R²	0,078
		Yeterlilik Oranı	4,19

Çizelge 4.12'de sunulan verilere göre, modelin deneysel verideki toplam varyansın yaklaşık %27,1'ini açıkladığı belirlenmiştir ($R^2 \approx 0,271$). Bu durum, bağımsız değişkenlerin model kapsamında yalnızca sınırlı bir açıklayıcılık sağladığını, kalan %72,9'luk varyansın ise henüz açıklanamadığını (residüel varyans) ortaya koymaktadır. Özellikle, tahmin edilen R^2 değerinin düşük olması, modelin yeni verilere genelleme yapma yetisinin zayıf olduğunu göstermektedir. Bu durum, modelin mevcut veriye “uyum” göstermesine rağmen öngörü performansının sınırlı olabileceğine işaret etmektedir. Modelin değişkenlik katsayısı (CV = %21,6) incelendiğinde, bu değer %10'un üzerinde olması, sistemde orta ile yüksek düzeyde bir değişkenliğin söz konusu olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde genellikle CV < %10 “çok iyi”, %10–20 arası “kabul edilebilir” ve %20 üzeri değerler “daha yüksek varyanslı” sistemler olarak değerlendirilir. Bu bağlamda, modelin varyans açısından daha tutarlı hale getirilmesi gerektiği söylenebilir.

ANOVA sonuçları incelendiğinde, model içerisinde yalnızca basınç ve tuz konsantrasyonu etkileşimi (CxD) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (p < 0,05). Bu, diğer faktörlerin ya da ana etkilerin model üzerinde yeterli katkı sunmadığını göstermektedir. Buna rağmen, modelin yeterlilik oranı > 4 olarak belirlenmiştir. Bu değer, modelin sinyal-gürültü oranının kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve deneysel tasarımın ayırım gücünün "makul" seviyede gerçekleştiğini göstermektedir.

Ancak genel model yapısı, yalnızca bu etkileşim üzerinden anlamlı sonuçlar üretmekte; dolayısıyla daha yüksek açıklayıcılık ve genellenebilirlik için model yapısının iyileştirilmesi önerilmektedir.

Çizelge 4.13. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (E.İletkenlik İndirgenmesi)

Faktör	Katsayı	df	Standart	95% CI Düşük	95% CI Yüksek	VIF
Kesişim	64,02275055	1	3,473279174	56,57330761	71,47219349	
CD	-9,862911485	1	4,321947271	-19,13256646	-0,593256511	1

Çizelge 4.13'te yer alan kodlanmış faktörlere ilişkin regresyon katsayıları incelendiğinde, tüm bağımsız değişkenler sıfır değeri aldığı anda (yani modelin merkez noktasında), elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenimi yaklaşık 64 birim olarak öngörülmektedir. Bu sabit terime ait %95 güven aralığı 56,57 ile 71,47 birim arasında olup, modelin temel düzeydeki tahmin gücünün güvenilir bir sınırdan yeri aldığı göstermektedir. Ayrıca sabit katsayının standart hatası 3,47 birim olarak hesaplanmıştır; bu da modelin temel tahmininde hata payının düşük ve istatistiksel olarak anlamlı olduğunu işaret etmektedir.

Modelde anlamlı bulunan CxD (Basınç $\times$ Tuz Konsantrasyonu) etkileşim terimi incelendiğinde, bu faktör 1 birim artırıldığında, Eİ indirgeniminde yaklaşık 9,86 birimlik bir azalma meydana gelmektedir. Bu değişken için %95 güven aralığı tamamen negatif değerlerden oluşmakta olup, söz konusu etkileşimin indirgeme üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve negatif bir etki yarattığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, Varyans Enflasyon Faktörü (VIF) değeri bu değişken için 1 olarak bulunmuştur. Bu, modelde herhangi bir çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) problemi bulunmadığını ve regresyon katsayılarının güvenilir şekilde tahmin edildiğini göstermektedir. VIF değerinin bu denli düşük olması, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle yüksek derecede ilişkisiz olduğunu ve modelin istatistiksel sağlamlık açısından yeterli düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, sabit katsayı modelin genel düzeyde sağlam bir temel öngörü sunduğunu, CxD etkileşimi ise negatif yönlü etkisiyle modelin duyarlılığını artırdığını göstermektedir. Bu tür parametrik değerlendirmeler, modelin hem anlamlı hem de yorumlanabilir yönlerini ortaya koymada önemli bir araçtır.

Çizelge 4.14. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (E.İletkenlik İndirgenmesi)

E.İletkenlik	=
64,02275055	
-9,862911485	CD

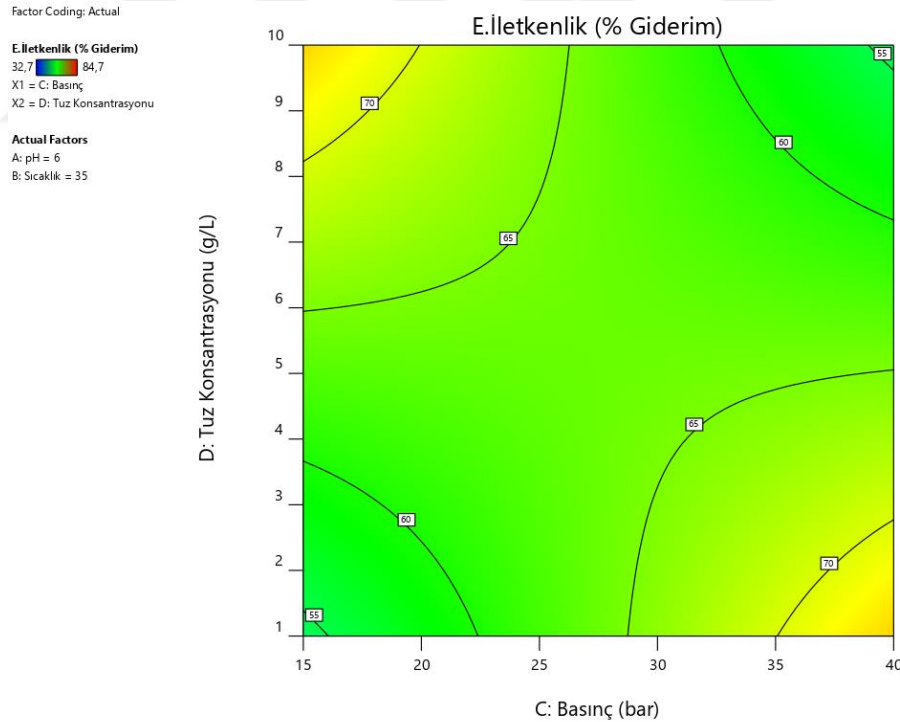
Çizelge 4.14'te sunulan model eşitliği, kodlanmış faktörler temelinde incelendiğinde, CxD etkileşim terimi—yani basınç (C) ile tuz konsantrasyonu (D) arasındaki çarpma etkisi—arttıkça, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgeniminin azaldığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu iki

değişkenin etkileşiminin, sistem performansı üzerinde negatif yönde bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer bir ifadeyle, basınç ve tuz konsantrasyonu birlikte artırıldığında, Eİ indirgenimi düşmekte; bu da CxD etkileşim terimi ile Eİ indirgenimi arasında ters yönlü (negatif) bir ilişki bulunduğunu göstermektedir.

Bu bulgu, sistemin özellikle bu iki parametrenin eş zamanlı yükseltilmesi durumunda, çözünmüş iyonların uzaklaştırılmasında zayıf performans sergileyebileceğini ve proses optimizasyonunda CxD etkileşiminin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

4.1.3.1 Eİ İndirgenmesinin Renkli İzohips Grafikler ile İncelenmesi

Eİ indirgenmesi için elde edilen renkli izohips grafik sonuçlarının ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler aşağıda sunulmuştur. Bu grafik, Eİ indirgenmesi üzerindeki çeşitli faktörlerin (Basınç ve tuz konsantrasyonu) etkisini incelemektedir. Grafik, iki değişkenin etkileşimlerini inceleyerek, diğer değişkenler sabit tutulduğunda Eİ indirgenmesinin nasıl değiştiğini görsel olarak göstermektedir. Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.17’de sunulmuştur.



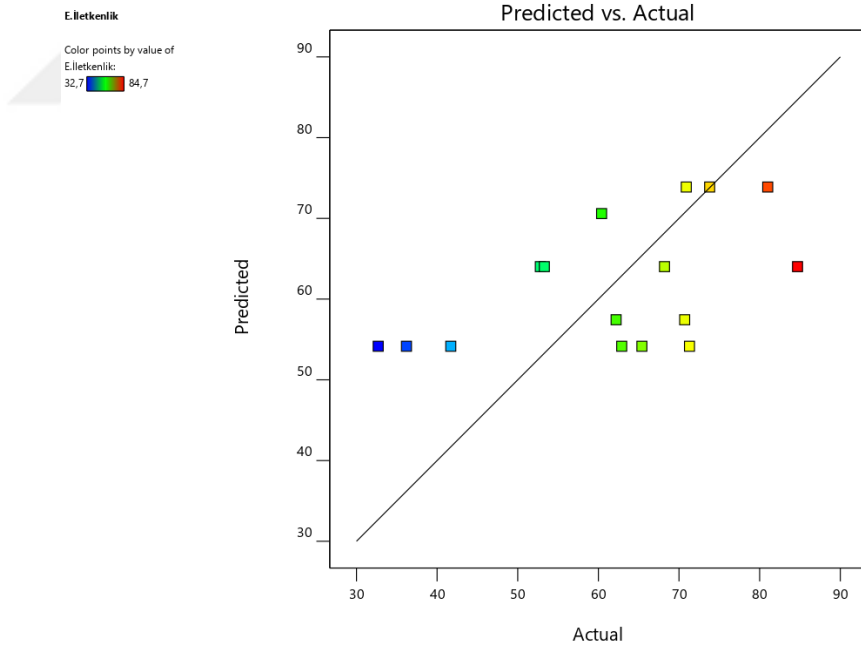
Şekil 4.17. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.17’de sunulan renkli izohips grafik, sabit pH değeri (pH = 6) ve sabit sıcaklık (35 °C) koşulları altında, besleme basıncı ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesine etkisini göstermektedir. Grafikte, en düşük indirgenim oranı (~%55)

yaklaşık 15 bar basınç ve 1 g/L tuz konsantrasyonu seviyesinde gözlemlenmiştir. Buna karşılık, en yüksek indirgenim oranı (~%80) yaklaşık 15 bar basınç ve 10 g/L tuz konsantrasyonu ile 35-40 bar basınç ve 2-3 g/L tuz konsantrasyonuna karşılık gelen bölgelerde elde edilmiştir. Bu durum, Basınç arttıkça tek başına sürekli iyileşme sağlanmadığını göstermektedir. Tuz konsantrasyonu arttığında düşük basınçta olumlu (giderim artıyor), fakat yüksek basınçta olumsuz (giderim azalıyor) etkiler görülüyor. Bu nedenle Eİ indirgenimi için, tek optimum yerine, etkileşimli optimum bölgelerin mevcut olduğunu göstermektedir.

4.1.3.2 Eİ İndirgenmesi için Deneysel ve Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Eİ İndirgenmesi amacıyla elde edilen deneysel ve tahmin değerleri Şekil 4.18'de sunulmuştur. "Tahmin ve Gerçek" grafiği, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek gözlemler arasındaki ilişkiyi incelenmektedir. Grafik, tuzluluk giderimi için modelin ne kadar başarılı bir tahmin yaptığını değerlendirmek açısından önemlidir. Grafikte yatay eksen Gerçek (Actual), dikey eksen ise Tahmin (Predicted) değerleri temsil etmektedir. Doğru sonuçlar için, tahmin edilen değerlerin, gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu değerlendirmek amacıyla 45 derece eğimli bir referans çizgisi çizilmiştir.



Şekil 4.18. Eİ İndirgenmesi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması

Modelin tahmin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla oluşturulan grafik, birçok veri noktasının ideal referans çizgisinin (gerçek değer = tahmin edilen değer) üstünde veya altında dağıldığını göstermektedir. Özellikle düşük gerçek değer aralığında (yaklaşık 30–50 birim), modelin tahminleri sistematik olarak gerçek değerlerden daha yüksek gerçekleşmiştir. Buna karşılık, yüksek

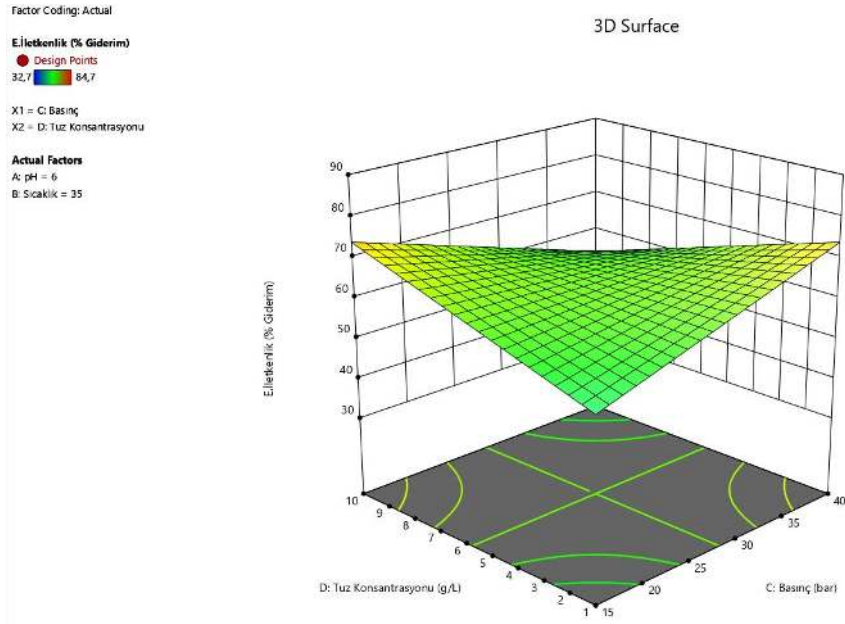
gerçek değerler (yaklaşık 70–90 birim) için modelin tahminleri genellikle gerçek değerlerin altında kalmıştır. Bu durum, modelin sistematik sapma (bias) içerdiğine işaret etmekte olup, düşük değerlerde aşırı tahmin, yüksek değerlerde ise eksik tahmin eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sapma, modelin kalibrasyon açısından yetersiz olabileceğini veya varyansın sabit olmamasına (heteroskedastisite) bağlı sorunlar yaşandığını düşündürmektedir.

Grafikte uygulanan renk kodlaması, modelin tahmin performansını daha görsel biçimde yorumlamaya olanak sağlamaktadır. Mavi-yeşil tonlar düşük elektriksel iletkenlik (EI) indirgenim yüzdelere temsil ederken, sarıdan kırmızıya doğru geçiş daha yüksek EI giderim oranlarını işaret etmektedir. Ancak, grafik üzerinde gözlemlenen renk dağılımı ile modelin tahmin hataları arasında doğrudan bir ilişki kurmak mümkün olmamıştır. Zira tahmin hatalarının hem düşük hem de yüksek iletkenlik düzeylerinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu da, modelin hata dağılımında belirgin bir yapısalılık olmadığını, hataların rastlantısal değilse bile tutarlı şekilde bir değişkenle açıklanamadığını göstermektedir.

Model, genel eğilimi makul düzeyde yakalamaktadır. Ancak tahminlerin düşük ve yüksek değerlerde sistematik sapma göstermesi, modelin kalibrasyonunun iyileştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Eİ İndirgenmesinin Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafikler ile İncelenmesi

Üç boyutlu yüzey yanıt grafikler, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri üç boyutlu bir yüzey üzerinde temsil ederek, optimizasyon sürecinde eğilimlerin ve etkileşimlerin anlaşılmasını kolaylaştırır. Özellikle yanıt yüzeyinin şeklini, maksimum/minimum noktalarını ve değişkenlerin birbirleri üzerindeki etkilerini görselleştirmek için tercih edilir (Myers ve ark., 2016). Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.19 ile aşağıda sunulmuştur. Şekilde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden EI indirgenmesi verileri incelenmiştir.



Şekil 4.19. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.19’da sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sabit pH ve sıcaklık koşullarında, besleme basıncı ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik analizine göre, orta düzey koşullar altında (basınç $\approx$ 25 bar, tuz konsantrasyonu $\approx$ 5 g/L) Eİ indirgenim oranı minimum seviyede kalmış olup yaklaşık %30 civarında gerçekleşmiştir. Bu durum, orta seviye parametre kombinasyonlarının sistem açısından en düşük performansa sahip bölgeyi temsil ettiğini göstermektedir. Öte yandan, her iki parametrenin de yüksek değerlere ulaştığı koşullarda (35-40 bar, 10 g/L), Eİ indirgenimi belirgin şekilde artmış ve %60–%70 aralığına ulaşmıştır. Bu bulgu, ekstrem koşulların (düşük–düşük veya yüksek–yüksek) orta düzey parametrelerden daha yüksek performans sağladığını ortaya koymaktadır. Grafik yüzeyinde gözlemlenen konkav yapı ve izohips çizgilerinin dairesel "çukur" biçimi, iki faktör arasında belirgin bir etkileşimin varlığına işaret etmektedir. Düşük tuz konsantrasyonlarında basınç arttıkça Eİ indirgenimi kademeli olarak artarken, yüksek tuz seviyelerinde basınç artışı daha çarpıcı bir performans artışıyla sonuçlanmaktadır. Model için orta düzey basınç ve tuz konsantrasyonu kombinasyonlarından kaçınılması önerilmekte; bunun yerine, düşük konsantrasyonlar düşük basınçla veya yüksek konsantrasyonlar yüksek basınçla bir araya getirilerek sistem verimliliği artırılabilir. Modelin analizinde hem basınç ve tuz konsantrasyonu faktörlerinin bireysel (ana) etkileri hem de basınç ve tuz konsantrasyonu etkileşim teriminin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Bu durum, çok değişkenli optimizasyonun sistem performansını artırmadaki önemini vurgulamaktadır.

4.2 MKT ile TO Tuzluluk Gideriminin Optimizasyonu

Bu deneysel çalışma, dört temel bağımsız değişkenin; pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu ile üç farklı yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu yanıt değişkenleri sırasıyla: tuzluluk giderim oranı, TÇKM giderimi ve elektriksel iletkenlik (EI) indirgenimidir.

Bu bağlamda çalışma kapsamında, Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) yaklaşımı kullanılarak toplam 30 deneysel koşul oluşturulmuş ve bu deneyler üzerinden çok değişkenli modelleme gerçekleştirilmiştir. MKT yöntemi sayesinde hem faktörlerin bireysel etkileri hem de olası etkileşim terimleri değerlendirilmiş, sistem performansının optimizasyonu hedeflenmiştir. Elde edilen deneysel bulgular ile model parametrelerine ait detaylı değerler, Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da sunulmaktadır.

Çizelge 4.15. MKT Çalışma Bilgisi

Dosya Versiyonu	12.0.3.0		
Çalışma Tipi	Yanıt Yüzey	Alt Tür	Rastgele
Dizayn Tipi	Merkezi Kompozit	Çalışma Sayısı	30
Dizayn Modeli	Kuadratik	Blok	Blok yok
Yapım Süresi (ms)	53		

MKT, amaç olarak ikinci dereceden (quadratic) modeli de sağlam bir şekilde tahmin etmeyi hedefler. Bu nedenle MKT üç bölümden oluşur:

- **Temel faktöriyel blok (2^k):** İki seviyeli faktöriyel kombinasyonlar (ör. 16 deney),
- **Eksen (axial/star) noktaları ($2k$):** Her bir faktör için, diğer faktörler merkez noktasında sabitlenerek “ $\pm\alpha$ ” uzaklıkta çalışılan ek deneyler (ör. $k = 4$ için 8 deney),
- **Merkez noktaları (n^c):** Tasarımın tekrarlanmasına, yeniden üretilebilirliğin ve hata terimi tahmininin iyileştirilmesine yönelik içsel replikalar (çoğunlukla 4–6 tekrarlı).

Design-Expert yazılımında $k = 4$ ve $n^c = 6$ olarak varsayıldığında MKT için toplam deney sayısı;

$$N = 2^k + 2k + n^c = 16 + 8 + 6 = 30 \quad (4.1)$$

şeklinde gerçekleşir. Bu ek eksen ve merkez noktaları, modelde eğrilik terimlerini tahmin etmemizi sağlarken tasarımın rotatabilitesini (istatistiksel özelliklerinin faktör uzayı içinde eşit dağılmasını) da korur. Sonuç olarak, faktöriyel tasarım yalnızca lineer ve etkileşimleri çözerken, MKT ikinci

dereceden etkileri, model uyumunu ve deneysel hatanın güvenilir tahminini mümkün kıldığı için daha fazla sayıda deneye ihtiyaç duyar (Myers ve ark., 2016).

Çizelge 4.16. Faktörler ve Yanıtlar

Parametre	Birim	Tip	Değişimler	Std. Sapma	Düşük	Yüksek
pH		Faktör	Kolay	0	3	9
Sıcaklık	C°	Faktör	Kolay	0	25	45
Basınç	Bar	Faktör	Kolay	0	15	40
Tuz Konsantrasyonu	g/L	Faktör	Kolay	0	1	10
Tuzluluk	% Giderim	Yanıt		16,656596	0,2	91,5
TÇKM	% Giderim	Yanıt		18,236788	0,5	90,7
Eİ	% Giderim	Yanıt		17,267602	0,3	90,6

MKT, faktörlerin hem merkez noktalarında hem de uç noktalarda test edilmesine olanak sağlayarak, deneysel tasarımın kapsamını genişletir ve faktörlerin hem lineer hem de doğrusal olmayan etkilerini anlamaya yönelik güçlü bir araç sunar. Bu tasarımın temel avantajlarından biri, deney alanında geniş bir yelpazede veri toplanmasına olanak tanınması ve böylece faktörlerin geniş bir aralıktaki etkilerinin daha doğru ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesidir (Myers ve ark., 2016). Çalışmada kullanılan kuadratik model, faktörlerin yalnızca ana etkilerini değil, aynı zamanda faktörler arası etkileşimler ve ikinci dereceden etkileri de analiz ederek, sistemdeki potansiyel doğrusal olmayan ilişkileri ortaya çıkarır. Bu kapsamda, her bir faktörün bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerinin daha derinlemesine anlaşılmasına olanak tanınmış ve deneysel süreçlerin optimizasyonu için daha güvenilir sonuçlar elde edilmiştir. Kuadratik modelin tercih edilmesi, özellikle karmaşık sistemlerde doğrusal olmayan etkilerin belirgin olduğu süreçlerde daha hassas ve ayrıntılı analizlerin yapılmasına imkan tanımıştır. Bu tasarım yaklaşımı, faktörlerin hem bağımsız etkilerinin hem de ikili etkileşimlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi açısından önemli bir bilimsel katkı sunar. Bu bağlamda çalışmada elde edilen ANOVA sonuçları ve elde edilen veriler aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.17).

Çizelge 4.17. TO membranı için yanıtlarla birlikte deneysel girdi değişkenleri

	Faktör	Faktör 2	Faktör 3	Faktör 4	Yanıt	Yanıt 2	Yanıt 3
Çalışma	A:pH	B:Sıcaklık	C:Basınç	D:Tuz Konsantrasyonu	Tuzluluk	TÇKM	Eİ
		C°	Bar	g/L	% Giderim	% Giderim	% Giderim
1	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
2	3	45	15	10	60,8	57,9	58
3	9	25	15	10	55	52,2	52,2
4	9	25	15	1	71,2	71,1	71,3
5	3	25	15	1	59,7	59,8	60,3
6	3	25	40	10	65,7	62,9	62,9
7	9	45	15	10	0,2	0,5	0,3
8	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
9	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
10	6	35	15	5,5	2,5	2,7	2,2
11	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
12	9	35	27,5	5,5	59,5	73,6	66,5
13	9	25	40	1	73,9	73,9	73,8
14	6	35	40	5,5	14,1	13,3	13,1
15	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
16	3	25	40	1	66,9	67	66,9
17	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
18	9	45	40	10	91,5	90,7	90,6
19	9	45	15	1	43,2	44,4	44,3
20	3	45	40	1	57,6	57,9	57,9
21	3	25	15	10	37,8	35,6	35,7
22	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
23	3	45	15	1	64,7	68,7	67,2
24	3	45	40	10	75,2	72,4	72,6
25	9	45	40	1	64	65,1	64,5
26	9	25	40	10	34,8	32,4	32,7
27	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
28	6	35	27,5	10	67,5	64,8	64,9
29	6	35	27,5	5,5	7,1	6,7	6,2
30	3	35	27,5	5,5	8,1	7,7	8,1

4.2.1 Tuzluluk Giderimi

Çizelge 4.18'de sunulan modele ilişkin p-değeri analizine göre, istatistiksel anlamlılık sınırı olan $p < 0,05$ kriteri esas alınmıştır (Fisher, 1925; Neyman ve Pearson, 1933; Lehmann ve Romano, 2005; Casella ve Berger, 2002). Bu kapsamda, tuz konsantrasyonunun ikinci dereceden etkisi (D^2) anlamlı bulunmuş olup, p-değeri 0,002494 olarak belirlenmiştir. Bu durum, tuz konsantrasyonunun sistem üzerinde doğrusal olmayan bir etki yarattığını ve bu faktörün modeldeki en belirleyici parametrelerden biri olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, C-Basınç faktörünün p-değeri

0,052777 olup anlamlılık sınırına oldukça yakındır. Bu bulgu, basıncın tuzluluk giderimi üzerinde etkili olabileceğini ancak bu etkinin istatistiksel olarak yüksek güven düzeyiyle doğrulanamadığını göstermektedir.

Modelde yer alan diğer bağımsız değişkenler incelendiğinde, A-pH ($p = 0,96448$) ve B-Sıcaklık ($p = 0,908357$) değişkenlerinin tuzluluk giderimi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bu sonuçlar, söz konusu iki faktörün bu spesifik çıktı türü üzerinde belirgin bir rol oynamadığını göstermektedir. Ayrıca, ikili etkileşim terimlerinden pH ve sıcaklık (AB), pH ve basınç (AC) ile pH ve tuz konsantrasyonu (AD) arasındaki etkileşimlerin de modelde anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Bu bulgular, söz konusu etkileşimlerin tuzluluk giderimi üzerinde sınırlı düzeyde etkili olduğunu ve sistem davranışının esas olarak tuz konsantrasyonu ve basınç gibi faktörlerle belirlendiğini göstermektedir.

Çizelge 4.18. Kuadratik model için ANOVA analizi (Tuzluluk Giderimi)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
Model	21248,05	14	1517,718	5,470392	0,001153	Anlamlı
A-pH	0,568889	1	0,568889	0,00205	0,96448	
B-Sıcaklık	3,8025	1	3,8025	0,013706	0,908357	
C-Basınç	1226,776	1	1226,776	4,421734	0,052777	
D-Tuz Konsantrasyonu	402,0025	1	402,0025	1,448959	0,247348	
AB	257,6025	1	257,6025	0,928491	0,350534	
AC	170,3025	1	170,3025	0,613831	0,445544	
AD	235,6225	1	235,6225	0,849267	0,371345	
BC	647,7025	1	647,7025	2,334549	0,147342	
BD	366,7225	1	366,7225	1,321798	0,268271	
CD	504,0025	1	504,0025	1,816604	0,197723	
A ²	1166,547	1	1166,547	4,20465	0,058211	
B ²	712,0997	1	712,0997	2,56666	0,129983	
C ²	2,356364	1	2,356364	0,008493	0,927792	
D ²	3645,837	1	3645,837	13,14089	0,002494	
Kalıntı	4161,633	15	277,4422			
Uyumsuzluk	4161,633	7	594,519			
Saf Hata	0	8	0			
Cor Toplamı	25409,68	29				

Çizelge 4.5'te sunulan model değerlendirme kriterlerine göre, R² değeri 0,8362 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, modelin bağımlı değişken üzerindeki toplam varyansın yaklaşık %83,62'sini açıkladığını göstermektedir. Düzeltilmiş R² değeri ise 0,6834 olup, modelin açıklayıcılığının faktör sayısına göre düzeltilindiğinde de önemli düzeyde korunduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, iki R² değeri arasındaki fark, modele dahil edilen bazı değişkenlerin

katkısının sınırlı olabileceğini ya da modele istatistiksel olarak anlamlı olmayan terimlerin eklenmiş olabileceğini düşündürmektedir.

Modelin varyasyon katsayısı (C.V. %) %43,92 olarak hesaplanmış olup, bu oran modelin tahminlerinde göreceli hata düzeyinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum, verilerdeki varyansın model tarafından tam anlamıyla yakalanamadığını ve hata dağılımının belirgin olduğunu işaret etmektedir. Diğer taraftan, yeterlilik oranı değeri 6,9516 olarak bulunmuştur. Bu değer, modelin sinyal/gürültü oranının kabul edilebilir düzeyde olduğunu ve tasarım uzayı içinde güvenilir tahminler üretebildiğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, modelin oluşturduğu varyans büyük ölçüde faktörlerin sistematik etkilerinden kaynaklanmakta; rastgele hata ya da gürültü etkisi sınırlı kalmaktadır (Çizelge 4.19).

Çizelge 4.19. Uygunluk İstatistikleri (Tuzluluk Giderimi)

Std. Sapma	16,66	R²	0,836
Ortalama	37,93	Düzeltilmiş R²	0,683
C.V. %	43,92	Tahmini R²	NA
		Yeterlilik Oranı	6,952

Çizelge 4.20. Model Karşılaştırma İstatistikleri (Tuzluluk Giderimi)

PRESS	NA
-2 Log Olasılık	233,11
BIC	284,13
AICc	297,4

Çizelge 4.21 ve 4.22’de sunulan model denklemleri hem kodlanmış hem de gerçek faktör değerlerine dayalı biçimde oluşturulmuştur. Kodlanmış modele ait denklem, faktörlerin yüksek (+1) ve düşük (-1) seviyelerinde sistem üzerindeki göreceli etkilerinin karşılaştırılması açısından analitik avantaj sağlamaktadır. Buna karşılık, gerçek faktör değerlerine dayalı model denklemi, deneysel koşullara daha yakın tahminler üretme kapasitesiyle öne çıkmakta ve uygulamalı senaryolarda daha işlevsel bir tahmin aracı olarak değerlendirilmektedir. Bu iki yaklaşım birlikte ele alındığında, modelin hem faktörel analizde hem de proses optimizasyonunda geniş bir kullanım potansiyeli sunduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.21. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (Tuzluluk Giderimi)

Faktör	Katsayı	df	Standart	95% CI	95% CI2	VIF
Kesişim	7,1	1	5,552199	-4,73423	18,93423	
A-pH	-0,17778	1	3,925997	-8,54584	8,190288	1
B-Sıcaklık	-0,4875	1	4,164149	-9,36317	8,388174	1
C-Basınç	8,255556	1	3,925997	-0,11251	16,62362	1
D-Tuz Konsantrasyon	-5,0125	1	4,164149	-13,8882	3,863174	1,060417
AB	-4,0125	1	4,164149	-12,8882	4,863174	1
AC	3,2625	1	4,164149	-5,61317	12,13817	1
AD	-3,8375	1	4,164149	-12,7132	5,038174	1
BC	6,3625	1	4,164149	-2,51317	15,23817	1
BD	4,7875	1	4,164149	-4,08817	13,66317	1
CD	5,6125	1	4,164149	-3,26317	14,48817	1
A ²	26,7	1	13,02106	-1,05373	54,45373	4,4
B ²	-42,775	1	26,69967	-99,684	14,134	19,18519
C ²	1,2	1	13,02106	-26,5537	28,95373	4,4
D ²	65,4125	1	18,04465	26,95125	103,8738	8,645602

Çizelge 4.22. Gerçek Faktörler Açısından Son Eşitlik (Tuzluluk Giderimi)

Tuzluluk	=
-255,095	
-31,8071	pH
28,71136	Sıcaklık
-2,61423	Basınç
-41,4086	Tuz Konsantrasyon
-0,13375	pH * Sıcaklık
0,087	pH * Basınç
-0,28426	pH * Tuz Konsantrasyon
0,0509	Sıcaklık * Basınç
0,106389	Sıcaklık * Tuz Konsantrasyon
0,099778	Basınç * Tuz Konsantrasyon
2,96667	pH ²
-0,42775	Sıcaklık ²
0,00768	Basınç ²
3,23025	Tuz Konsantrasyon ²

Çizelge 4.23'te verilen model katsayıları incelendiğinde, basınç (C) değişkeninin pozitif bir katsayıya sahip olduğu görülmektedir (8,26). Bu durum, basınç artışının tuzluluk giderimi üzerinde anlamlı ve olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Diğer yandan, tuz konsantrasyonu (D) değişkeni negatif bir katsayı ile temsil edilmiştir (-5,01); bu da tuz konsantrasyonundaki artışın tuzluluk giderimini azalttığını ortaya koymaktadır. Ancak, D² teriminin pozitif katsayısı, bu

değişkenin doğrusal olmayan bir etkiye sahip olduğunu ve özellikle çok düşük ya da çok yüksek konsantrasyonlarda sistem davranışının farklılık gösterebileceğini işaret etmektedir. İkili etkileşimler arasında, sıcaklık ile basınç (BC) arasındaki etkileşim anlamlı ve pozitif bir etki göstermektedir (6,36). Buna karşın diğer ikili etkileşim terimlerinin model üzerindeki etkileri istatistiksel açıdan sınırlı kalmıştır.

Sonuç olarak, tuzluluk giderimi üzerinde en belirgin etkilerin basınç ve tuz konsantrasyonu tarafından belirlendiği anlaşılmaktadır. Özellikle tuz konsantrasyonunun doğrusal olmayan bileşeni, sistem performansının kritik kontrol noktalarında farklı davranışlar sergileyebileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.23. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (Tuzluluk Giderimi)

Tuzluluk	=
7,1	
-0,1778	A
-0,4875	B
8,26	C
-5,01	D
-4,01	AB
3,26	AC
-3,84	AD
6,36	BC
4,79	BD
5,61	CD
26,7	A ²
-42,77	B ²
1,2	C ²
65,41	D ²

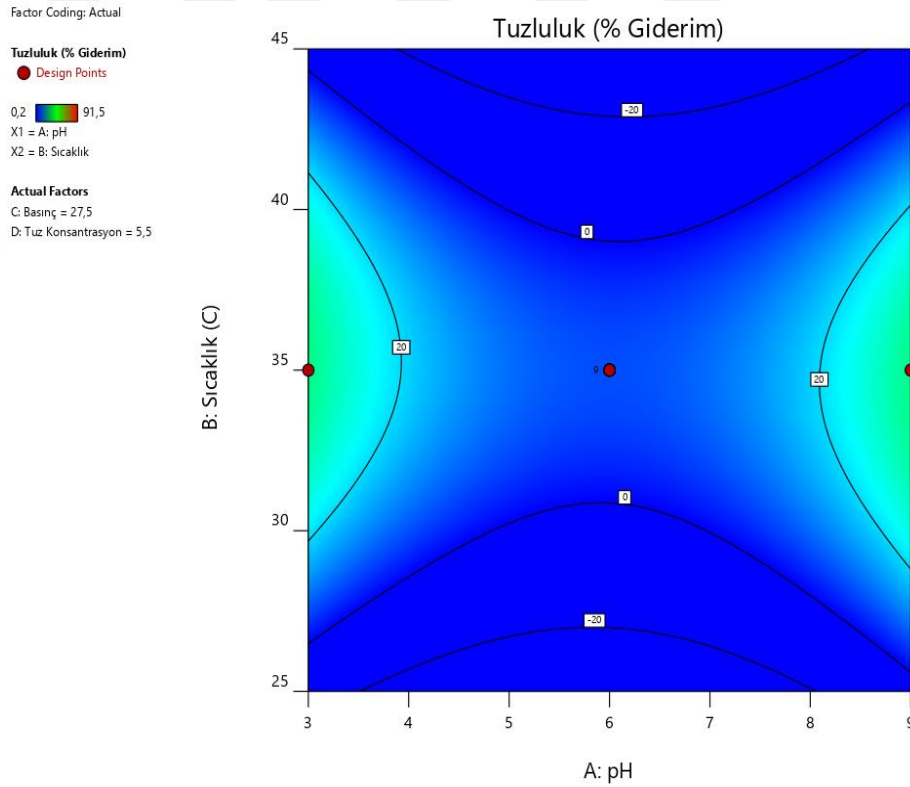
Yapılan analizler sonucunda, tuzluluk giderimi üzerinde en belirleyici etkinin tuz konsantrasyonunun doğrusal olmayan (ikinci dereceden) etkisinden kaynaklandığı, bunu takiben basınç faktörünün de önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, pH ve sıcaklık gibi diğer bağımsız değişkenlerin bu modele göre istatistiksel açıdan anlamlı etkiler üretmediği, ayrıca incelenen ikili etkileşimlerin de genel olarak düşük katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, özellikle membran bazlı su arıtım sistemlerinde tuzluluk gideriminin optimizasyonunda, basınç ve tuz konsantrasyonu parametrelerinin hassasiyetle kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir. Model, belirli işletme koşullarında tuzluluk giderimini tahmin etmede güvenilir bir araç olarak öne çıkmakta; su arıtma proseslerinin verimliliğini artırmak amacıyla uygulanabilir nitelikte önemli veriler sunmaktadır. Performans göstergeleri genel olarak kabul edilebilir düzeylerde olup, modelin deneysel tasarıma dayalı olarak güvenilir çıktılar ürettiği anlaşılmaktadır.

Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Qadir ve ark. (2023) tarafından üç farklı membran (E5, E5C1, E5C5) ile yürütülen çalışmada, 100 ppm ila 1000 ppm arasında değişen NaCl ve CaCl₂ içeren sulu çözeltilerin tuz giderimi, Donnan-Steric Pore Model (DSPM) kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, tuz konsantrasyonu 1000 ppm seviyesine ulaştığında, E5 membranı için giderim oranı %40'tan yaklaşık %15'e düşmüş; benzer eğilimler E5C1 ve E5C5 membranlarında da gözlenmiş olup giderim sırasıyla %60'tan %37'ye ve %40'tan %30'a gerilemiştir. Ahunbay (2019) tarafından yürütülen çalışmada, düşük basınçlı yüksek geri kazanım (LPHR) prosesinin dört ve beş aşamalı konfigürasyonları, farklı tuz konsantrasyonlarına sahip tuzlu su beslemeleri (CF = 15.000 ppm, 35.000 ppm, 45.000 ppm) için analiz edilmiştir. Amaç, ürün suyunda tuz konsantrasyonu ≤ 350 ppm (≈ 0.35 g/L) olacak şekilde, spesifik enerji tüketimi ve osmotik basınç farkı esas alınarak, bu sistemlerin tek aşamalı ters ozmoz (TO) ve iki aşamalı TO ile karşılaştırılmasıdır. Beş aşamalı konfigürasyonun proses ekonomisi, %65 ve %75 su geri kazanım oranlarında, 35.000 ppm (≈ 35 g/L) tuzluluğa sahip bir besleme suyu için tek aşamalı TO'ya kıyasla su üretim maliyetini daha düşük tuttuğu görülmüştür. Özellikle, çözeltilerde çözünmüş katı maddelerin %20'sinin iki değerlikli iyonlardan oluştuğu durumda, bu tuzluluk düzeyinin (35.000 ppm) çalışma basıncı açısından tipik deniz suyuna (yaklaşık 40.000 ppm) çok yakın değerlere sahip olduğu vurgulanmıştır. Abd Elaziz ve ark. (2024), besleme akısı sıcaklığının 35 °C (min), 65 °C (maks), ortalama 52,71 °C ve standart sapma 9,19 °C olduğunu; tuzluluğun ise minimum 0 g/L, maksimum 35 g/L, ortalama 17,85 g/L ve standart sapma 13,52 g/L olduğunu raporlamıştır. Permeat akısı sıcaklığı için ise minimum 25 °C, maksimum 45 °C, ortalama 28,57 °C ve standart sapma 6,43 °C değerleri hesaplanmıştır. Atia ve ark. (2023), üç farklı vaka çalışması kapsamında seviyelendirilmiş su maliyetinin değişimini, farklı besleme konsantrasyonları ve geri kazanım oranlarında incelemiştir. %70 geri kazanım ile 35 g/L TÇKM, %55 geri kazanım ile 70 g/L TÇKM ve %35 geri kazanım ile 125 g/L TÇKM içeren üç farklı senaryoda, su geçirgenlik katsayısının 5 LMH/bar'dan 10 LMH/bar'a yükseltilmesiyle sırasıyla %0,4, %2 ve %4 oranlarında su maliyetinde azalma sağlandığı belirtilmiştir. Mansour (2023), ters ozmoz (TO) sistemlerinde besleme suyu tuzluluğunun performans üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemiş; artan tuzluluk düzeylerinin membran üzerinde daha yüksek osmotik basınç oluşturduğunu ve buna bağlı olarak enerji tüketimini artırdığını raporlamıştır. Çalışmada, tipik deniz suyu tuzluluğu 35.000 ppm olarak kabul edilmiş; 40.000 ppm üzerindeki değerlerde TO performansında düşüş, enerji ihtiyacında ise artış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, tuzluluğun 25.000 (≈ 25 g/L) ppm'den 45.000 (≈ 45 g/L) ppm'ye yükselmesiyle enerji tüketiminin de belirgin biçimde arttığı vurgulanmıştır. Xing ve ark. (2023) ise, 5 kDa por çapına sahip membran kullanarak 2,3 ile 8,25 arasında değişen pH değerlerinin U ve Na giderimi üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Deneysel çalışmalarda 3 bar basınç, yaklaşık 22 ± 2 °C sıcaklık ve 0,1 m³/h akış oranı kullanılmıştır. Bulgulara göre, Na giderimi pH 3'te %50 seviyesinde iken, pH 5,5'te %0'a kadar düşmekte, pH 8,25'te ise yeniden %35 seviyelerine ulaşmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen bulgular, Şekil 4.1 ve 4.3'te sunulan verilerle uyumlu olup, literatürdeki verilerle önemli ölçüde paralellik göstermektedir. Modelin, özellikle tuz konsantrasyonu ve basınç gibi kritik parametrelerin kontrolü altında, su arıtma sistemlerinin optimizasyonuna katkı sağlayabilecek potansiyel bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Tuzluluk Gideriminin Renkli İzohips Grafikler ile İncelenmesi

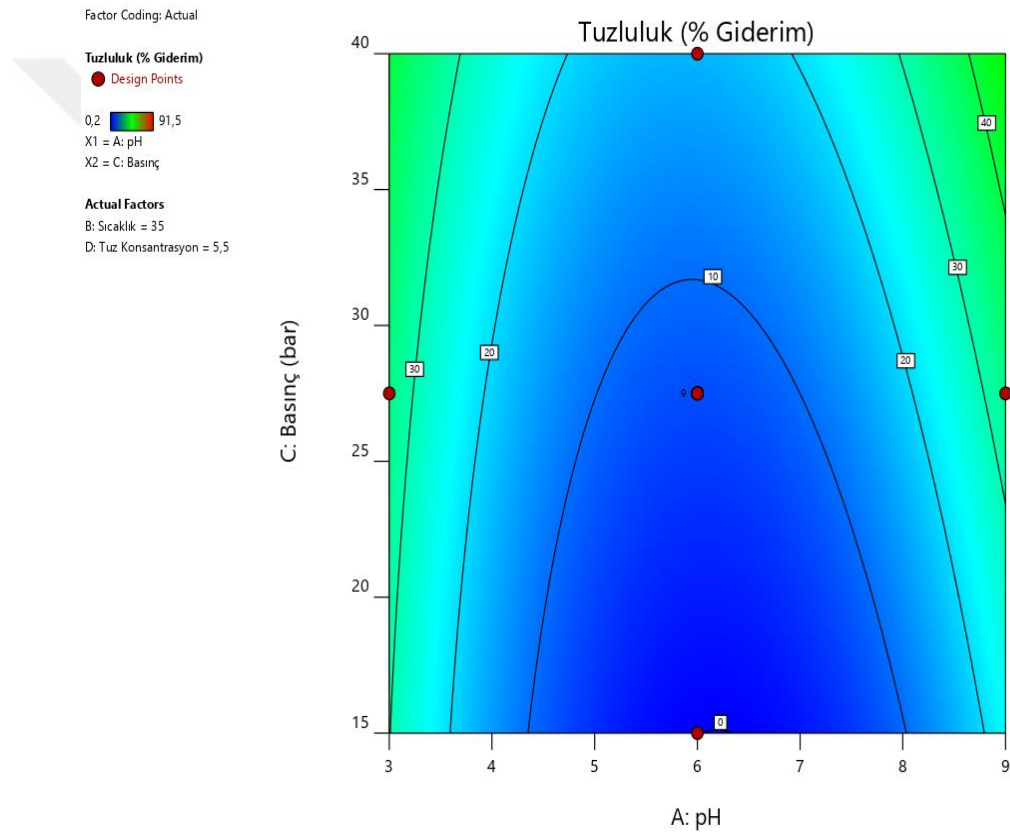
Bu analiz, merkezi kompozit deneysel tasarım sonuçlarına dayanan bir tuzluluk giderimi (% giderim) incelemesidir. Her grafik, iki faktörün etkileşimi altında tuzluluk gideriminin nasıl değiştiğini görselleştirmektedir. Yüzey grafiklerinde kullanılan renkler ve sayısal ifadeler, belirli parametre kombinasyonlarında gözlenen giderim oranlarını yansıtmaktadır. Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.20- 4.25 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla pH ve Sıcaklık, pH ve Basınç, pH ve Tuz Konsantrasyonu, Sıcaklık ve Basınç, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu, Basınç ve Tuz konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden tuzluluk giderimleri incelenmiştir.



Şekil 4.20. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Renkli izohips grafiklerin ilki olan şekil Şekil 4.20'de sunulan, pH ile sıcaklık parametreleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkisini analiz etmektedir. Grafikte kullanılan renk skalasına göre; mavi tonlar düşük giderim oranlarını (%0–20), yeşil ve sarı tonlar ise daha yüksek giderim oranlarını (%60–80) temsil etmektedir. pH eksenini incelendiğinde, yaklaşık pH 6

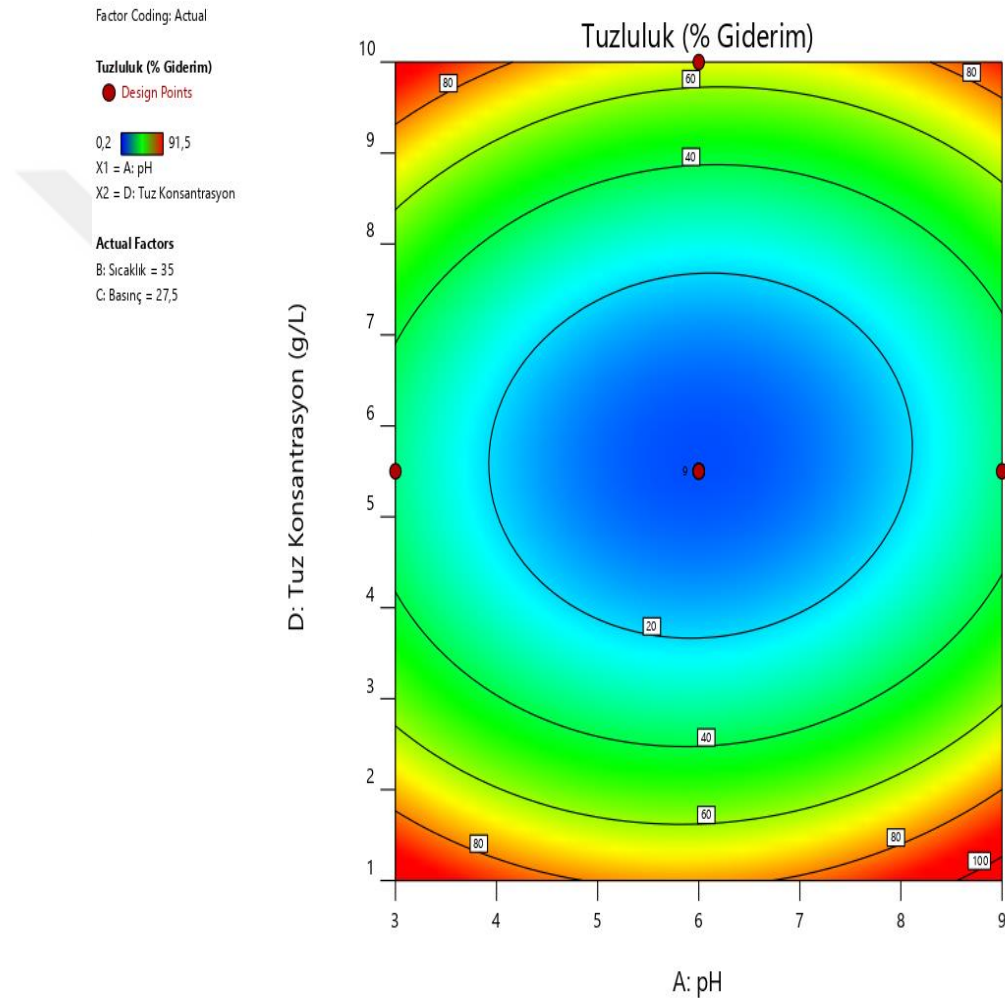
civarında minimum giderim (%0–10) değerleri gözlemlenmiştir. Buna karşın, hem düşük (yaklaşık pH 3) hem de yüksek (yaklaşık pH 9) pH seviyelerinde giderim oranlarında belirgin bir artış meydana gelmekte; bu aralıkta %20 ile %40 arasında değişen tuzluluk giderimi değerleri elde edilmektedir. Sıcaklık değişiminin ise tuzluluk giderimi üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır. 25 °C ile 45 °C arasındaki sıcaklık aralığında, giderim oranlarında dikkate değer bir artış ya da azalma gözlenmemiştir. Bu durum, söz konusu çalışma koşullarında pH'nın, sıcaklığa kıyasla tuzluluk giderimi üzerinde daha belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Grafik üzerindeki renk dağılımı ve ilgili giderim değerleri dikkate alındığında, optimum tuzluluk gideriminin pH değerinin uç sınırlarında, yani düşük (≈ 3) veya yüksek (≈ 9) olduğu koşullarda gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 4.21. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.21’de sunulan renkli izohips grafik, pH ve basınç faktörleri arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini göstermektedir. Grafik üzerinde mavi tonlar düşük giderim oranlarını (%0–10), yeşil ve sarı tonlar orta seviyeli giderimleri (%20–30), kırmızı tonlar ise yüksek giderim oranlarını (%40 ve üzeri) temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, basınç arttıkça tuzluluk giderimi anlamlı şekilde yükselmektedir. Özellikle 35–40 bar aralığında, pH seviyesinden bağımsız olarak yüksek tuzluluk giderimi değerleri elde edilmiştir. Örneğin, pH 9 ve basınç 40 bar

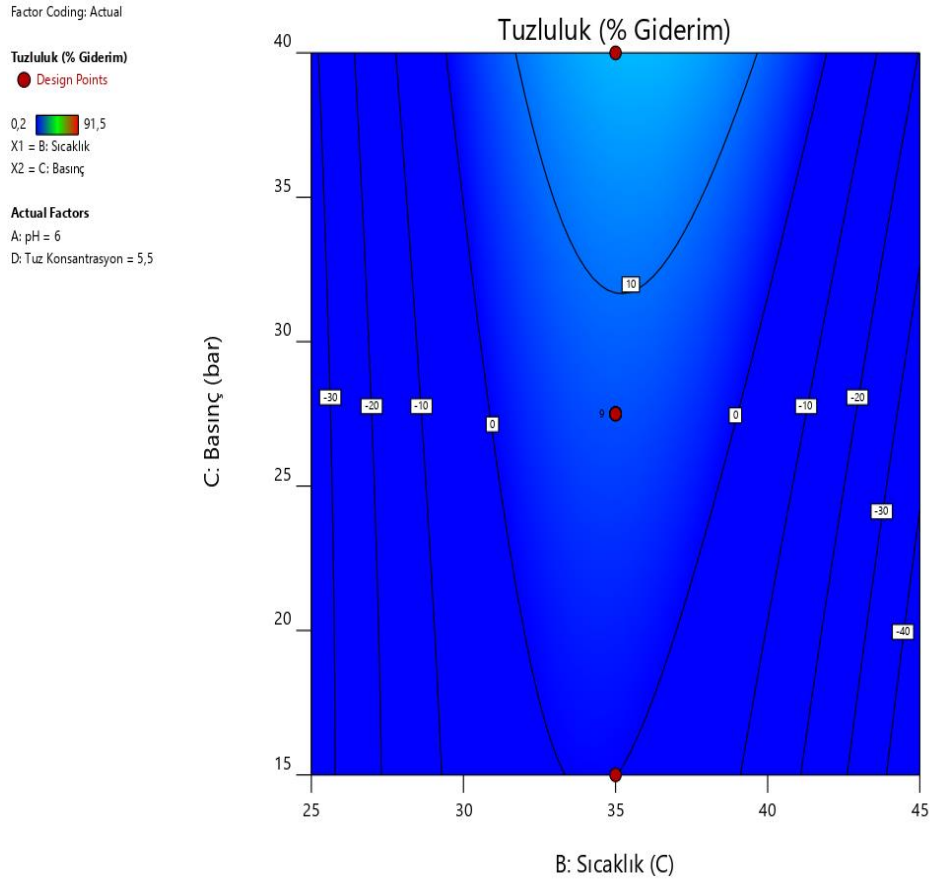
seviyesindeyken tuzluluk giderimi %40'a kadar çıkabilmektedir. Analizler, pH faktörünün, basınca kıyasla daha sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Orta düzey pH değerlerinde (yaklaşık pH 6) giderim en düşük seviyelerde gerçekleşirken, basınç seviyesinin yükselmesiyle birlikte hem düşük hem de yüksek pH koşullarında tuzluluk giderimi artış göstermektedir. Bu durum, sistemin basınca daha duyarlı olduğunu ve pH'ın etkisinin basınç arttıkça görece azaldığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, özellikle membran tabanlı ve basınca duyarlı su arıtım süreçlerinde, yüksek basınç uygulamasının tuzluluk giderim performansını artırmak açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.22. TO membranlarla tuzluluk gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

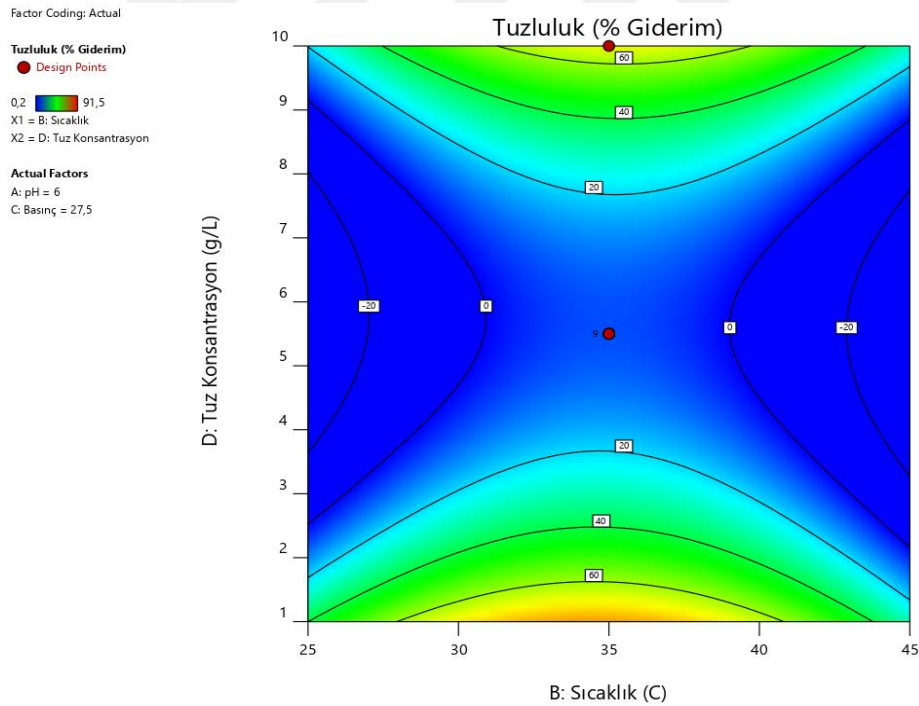
Şekil 4.22’de sunulan renkli izohips grafik, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, özellikle uç pH değerlerine (yaklaşık 3 ve 9) ulaşıldığında ve tuz konsantrasyonu 8–10 g/L aralığına yükseldiğinde, tuzluluk giderimi oranlarında dikkate değer bir artış gözlemlenmektedir. Örneğin, pH

değeri 9 ve tuz konsantrasyonu 10 g/L olduğunda, giderim oranı yaklaşık %80 düzeyine ulaşmaktadır. Benzer şekilde, düşük pH (3 civarı) ve yüksek tuz konsantrasyonu kombinasyonlarında da yüksek performans elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, pH'ın orta seviyelerinde (özellikle $\text{pH} \approx 6$) ve tuz konsantrasyonunun yaklaşık 5 g/L olduğu durumlarda, giderim oranları minimum seviyelere kadar düşmektedir. Bu bölgede elde edilen giderim oranı yaklaşık %9 civarındadır. Tuz konsantrasyonu 1–4 g/L gibi düşük seviyelerde tutulduğunda ise, genel olarak tuzluluk gideriminde sınırlı başarı elde edilmekte, bu durum grafikte mavi tonların hâkim olduğu alanlarla temsil edilmektedir. Elde edilen bu bulgular, tuz konsantrasyonunun tuzluluk giderimi açısından baskın ve kritik bir değişken olduğunu; özellikle 5 g/L'nin üzerindeki değerlerde giderim oranlarını anlamlı şekilde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, sistemin performansı üzerinde doğrusal olmayan, ancak birlikte optimize edilmesi gereken bir dinamik oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, sistemin maksimum verimle çalışabilmesi için her iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi ve özellikle yüksek tuz konsantrasyonlarında pH optimizasyonunun dikkatle ele alınması önerilmektedir.



Şekil 4.23. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

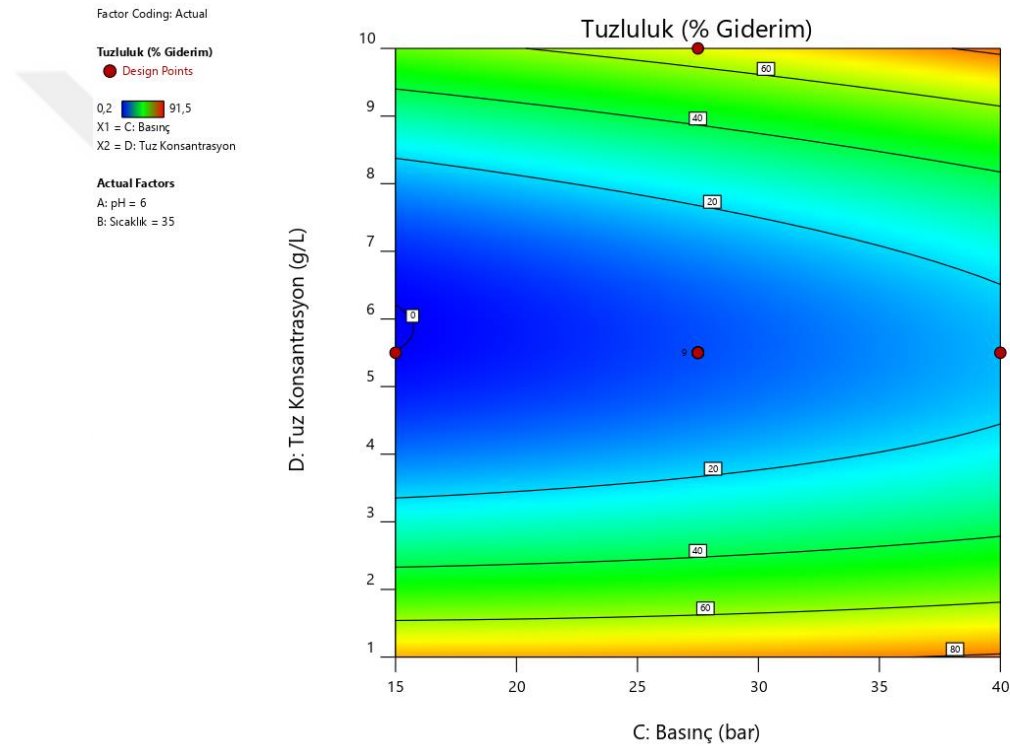
Şekil 4.23'te sunulan renkli izohips grafik, sıcaklık ile basınç parametrelerinin tuzluluk giderimi üzerindeki etkileşimini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, sistem performansı üzerinde en belirleyici değişkenin basınç olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle basınç 40 bar seviyelerine ulaştığında, tuzluluk giderimi %40 civarına kadar artmakta; bu da basıncın doğrudan pozitif etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Buna karşılık, sıcaklık değişimi (25–45 °C aralığında) giderim üzerinde sınırlı bir rol oynamakta olup, elde edilen değerler sıcaklık farklılıklarına büyük ölçüde duyarsız kalmaktadır. Örneğin, 30–35 °C aralığında izohips çizgileri yatay bir seyir izlemekte ve giderim oranlarında anlamlı bir değişim gözlenmemektedir. Bu bağlamda, yüksek basınç seviyelerinde sıcaklığın marjinal etkisi, renk dağılımı üzerinden de doğrulanmıştır. Grafik üzerindeki geçiş tonlarının düşük sıcaklıklarda bile basınca duyarlı olarak eğilim göstermesi, sıcaklık faktörünün etkisinin görece zayıf olduğunu ve modelin bu faktöre karşı daha az duyarlı olduğunu teyit etmektedir. Sonuç olarak, bu kontur grafik, basıncın membran tabanlı filtrasyon sistemlerindeki belirleyici rolünü açıkça göstermektedir. Sıcaklık ise bu sistem özelinde, ancak yüksek tuz konsantrasyonları ya da basınçla birlikte değerlendirilmediği sürece, tek başına anlamlı bir artış sağlamamaktadır.



Şekil 4.24. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.24'te sunulan renkli izohips grafik, sıcaklık ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Grafik verilerine göre, tuz konsantrasyonu 8–10 g/L aralığına yükseldikçe giderim verimliliği anlamlı biçimde artmaktadır. Özellikle, tuz konsantrasyonu 10 g/L ve sıcaklık 40 °C olduğunda, tuzluluk giderimi yaklaşık %60

seviyesine ulaşmaktadır. Buna karşılık, 1–3 g/L gibi düşük tuz konsantrasyonlarında elde edilen giderim oranları oldukça düşüktür ve genellikle %0–20 aralığında kalmaktadır. Dikkat çeken bir diğer bulgu, sıcaklığın giderim üzerindeki etkisinin tuz konsantrasyonuna bağlı olarak değişmesidir. 35 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda, yüksek tuz konsantrasyonu ile birlikte giderim oranlarında belirgin artış gözlemlenmiştir. Ancak, düşük sıcaklık koşullarında (örneğin 25–30 °C), bu etkinin sınırlı kaldığı ve giderim üzerinde anlamlı bir fark yaratmadığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu analiz tuz konsantrasyonunun tuzluluk giderimi açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymakta; yüksek tuz seviyelerinde sıcaklık artışının olumlu yönde katkı sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, giderim verimliliğini maksimize etmek amacıyla her iki değişkenin — özellikle ≥ 10 g/L tuz konsantrasyonu ve ≥ 35 °C sıcaklık — birlikte optimize edilmesi gerektiği önerilmektedir.



Şekil 4.25. TO membranlarla tuzluluk gideriminde Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.25'te sunulan renkli izohips grafik, basınç ile tuz konsantrasyonunun birlikte tuzluluk giderimine olan etkisini net biçimde ortaya koymaktadır. Grafik verilerine göre, yüksek basınç (> 35 bar) ve yüksek tuz konsantrasyonu (> 8 g/L) koşullarında giderim oranları %60 ve üzerinde seyretmektedir. Örneğin, 40 bar basınç ve 10 g/L tuz kombinasyonunda giderim oranı yaklaşık %80'e kadar yükselmektedir. Buna karşın hem basınç düşük olduğunda hem de tuz konsantrasyonu 1–3 g/L düzeyindeyken, giderim sadece %0–20 aralığında kalmaktadır. Bu durum, her iki faktörün de sistem performansı açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir. Grafik üzerinde izohips çizgilerinin hem yatay hem de dikey eksende belirgin eğime sahip olması, basınç

ve tuz konsantrasyonunun ayrı ayrı değil, birlikte optimize edilmesi gerektiğini vurgular. Kısacası, maksimal tuzluluk giderimi ancak yüksek basınç ve aynı zamanda yüksek tuz konsantrasyonu sağlandığında elde edilebilmektedir.

Grafiklerin bütüncül analizi, tuzluluk giderimi üzerinde en etkili parametrelerin basınç ve tuz konsantrasyonu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu iki faktör, özellikle basınç 40 bar seviyelerine yaklaştığında ve tuz konsantrasyonu 8–10 g/L aralığında olduğunda, giderim oranlarını maksimum düzeye taşımaktadır. Bu bulgu, yüksek basınç ve tuz konsantrasyonunun eş zamanlı olarak uygulanmasının sistem performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Öte yandan, pH değişkeni ikinci dereceden etkili bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Spesifik olarak, orta düzey pH (~6) koşullarında giderim verimi oldukça düşüktür; ancak uç pH değerleri (pH $\approx$ 3 veya 9) söz konusu olduğunda, giderim oranlarında gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Bu durum, pH'ın doğrusal olmayan bir etki mekanizması ile sistem performansını etkilediğini göstermektedir. Sıcaklık faktörü ise diğer değişkenlerle karşılaştırıldığında sınırlı bir etkiye sahiptir. Yalnızca belirli tuz konsantrasyonlarıyla birlikte değerlendirildiğinde anlamlı hale gelen bu etki, genel sistem optimizasyonunda tek başına belirleyici değildir. Nitekim sıcaklık değişiminin giderim oranı üzerindeki etkisi, çoğunlukla ihmal edilebilir düzeydedir (Çizelge 4.24). Tüm bu bulgular, membran bazlı su arıtma sistemlerinin optimizasyonu açısından stratejik öneme sahiptir. Özellikle tuzluluk gideriminde, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi başat faktörlerin dikkatle kontrol edilmesi, en yüksek verimin elde edilmesi açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

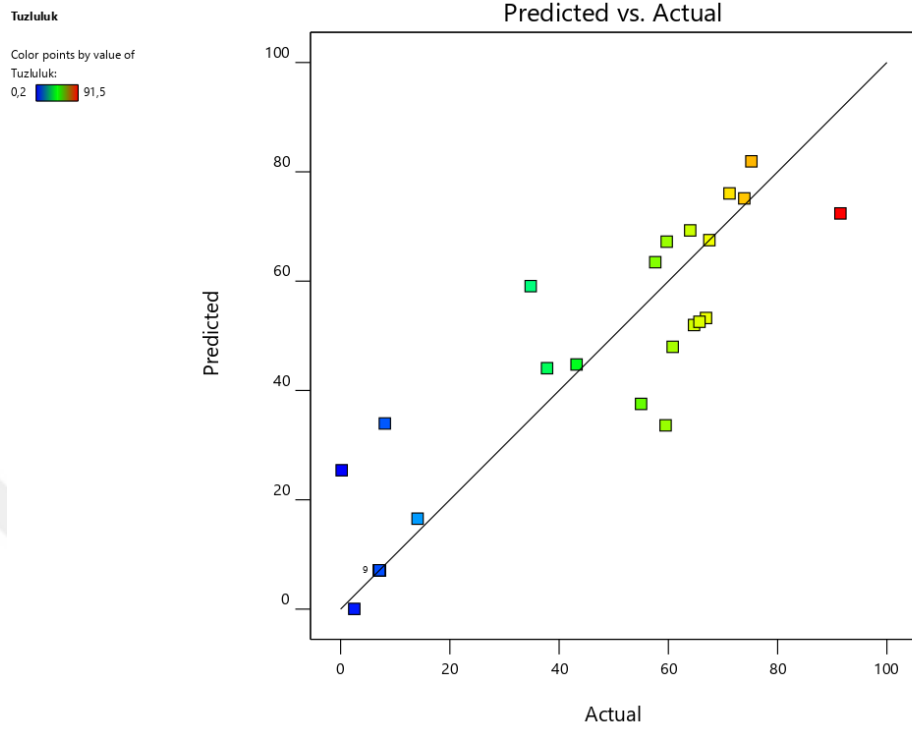
Çizelge 4.24. Optimum Tuzluluk Giderimi Koşulları

Faktör	Optimum Değer Aralığı	Etkileşim Bağlamı
pH (A)	Uç değerlere yaklaştığı (3 veya 9 civarı) bölgelerde	İkinci dereceden etki
Basınç (C)	40 bar	Her durumda pozitif etki
Sıcaklık (B)	Çoğunlukla ihmal edilebilir düzeyde	Diğer faktörlere kıyasla daha sınırlı etki
Tuz Konsantrasyonu (D)	8 – 10 g/L	Her durumda pozitif etki

TO Membranlarla Tuzluluk Giderimi için Deneysel ve Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması (MKT)

Şekil 4.26'da "Tahmin ve Gerçek (Predicted vs. Actual)" başlığı altında, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek gözlemler arasındaki ilişki incelenmektedir. Grafik, tuzluluk giderimi için modelin ne kadar başarılı bir tahmin yaptığını değerlendirmek açısından önemlidir. Grafik, modelin öngörü gücünü görsel olarak incelemek açısından önemli bir araçtır. Grafikte yatay eksen Gerçek (Actual), dikey eksen ise Tahmin (Predicted) değerleri temsil etmektedir. Doğru sonuçlar için, tahmin edilen değerlerin, gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu değerlendirmek amacıyla 45

derece eğimli bir referans çizgisi çizilmiştir. Grafikteki dağılım, modelin genel geçerliliği ve doğruluk düzeyi hakkında nitel bir fikir sunmaktadır.



Şekil 4.26. Tuzluluk giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması

Gerçek ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırıldığı grafik, verilerin büyük bir bölümünün referans çizgisine yakın bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Bu durum, modelin genel doğruluk açısından yeterli performans sergilediğini ve tahminlerin büyük ölçüde güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bazı veri noktalarının referans çizgisine belirgin şekilde uzaklaştığı gözlemlenmiş olup, bu sapmalar modelin belirli koşullarda hatalı tahminlerde bulunabildiğine işaret etmektedir.

Grafikteki renk dağılımı, tahmin doğruluğuna dair önemli ipuçları sunmaktadır. Mavi tonlar, %0,2 düzeyindeki düşük tuzluluk giderimi oranlarını temsil ederken; yeşil ve sarı tonlar, %20 ila %60 aralığında orta düzeyde giderim performansını göstermektedir. Kırmızı tonlar ise %90 üzeri yüksek giderim değerlerine işaret etmektedir. Düşük giderim oranlarını temsil eden mavi ve açık mavi tonların, genellikle gerçek değerlerin %0–20 aralığında olduğu bölgelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu alanlarda tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasında fark oldukça azdır; dolayısıyla model bu giderim aralığında yüksek doğruluk sağlamaktadır. Orta düzeydeki giderim oranlarını (özellikle %20–60) temsil eden yeşil ve sarı noktaların da referans çizgisine yakın konumlandığı gözlemlenmiştir; bu da modelin orta seviyelerde tatmin edici bir tahmin performansına sahip olduğunu göstermektedir. Buna karşın, %91,5 gibi yüksek bir giderim oranını temsil eden kırmızı noktada tahmin ile gerçek değer arasında dikkat çekici bir fark söz konusudur. Bu durum,

modelin yüksek giderim seviyelerinde doğruluğunun düştüğünü ve sapmaların belirginleştiğini ortaya koymaktadır.

Modelin tahmin doğruluğu referans çizgisi etrafında homojen bir dağılım göstermekteyse de özellikle %80 ve üzerindeki giderim oranlarında tahmin hatalarının arttığı gözlemlenmiştir. Grafik üzerindeki kırmızı noktaların referans çizgisinden uzak pozisyonları, modelin bu yüksek performans bölgelerinde sapma eğilimi gösterdiğini doğrulamaktadır. Bu bağlamda, düşük ve orta giderim seviyeleri için modelin istikrarlı tahminler üretebildiği, ancak yüksek giderim koşullarında performansının zayıfladığı anlaşılmaktadır.

Referans çizgisine yakın dağılan noktalar, modelin yüksek doğrulukla tahmin yaptığını; çizgiden uzaklaşan noktalar ise artan hata paylarını temsil etmektedir. Özellikle yüksek giderim bölgelerinde modelin sapma eğiliminin artması, sistemin bu alanlarda daha karmaşık etkileşimler içerdiğine işaret etmektedir.

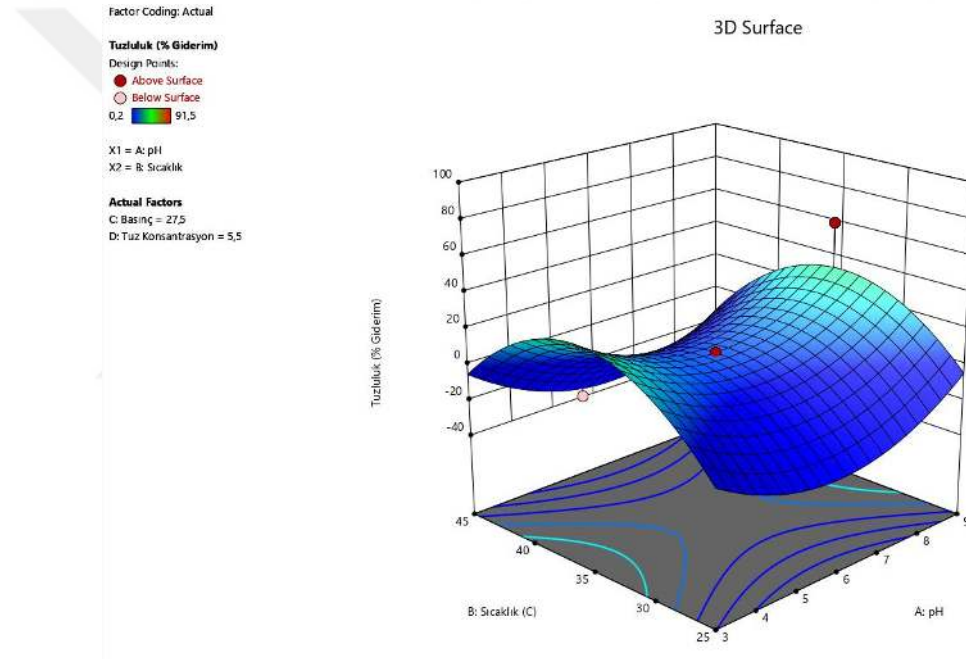
Modelin yüksek giderim seviyelerinde daha güvenilir tahminlerde bulunabilmesi için, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi etkili değişkenlerin daha ayrıntılı analiz edilmesi önerilmektedir. Gözlemlenen sapmalar, bu parametrelerin yükselmesiyle birlikte sistemin doğrusal olmayan karmaşık bir davranış sergileyebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, modelin optimizasyonu tekrar gözden geçirilmeli; yüksek giderim bölgelerinde doğruluğu artırmak amacıyla ek veri toplanması veya daha gelişmiş algoritmaların denenmesi düşünülmelidir. Alternatif olarak, mevcut veri seti üzerinde yeniden kalibrasyon yapılması ya da regresyon modeli yerine yapay sinir ağları gibi farklı modelleme tekniklerinin değerlendirilmesi de, modelin genel doğruluk düzeyini iyileştirebilir.

İlgili grafik, modelin düşük (%0–20) ve orta (%20–60) düzeylerdeki tuzluluk giderim oranları için yüksek doğrulukla tahminler sunduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. Bu seviyelerde, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki sapmalar minimal düzeyde kalmakta ve model istikrarlı bir performans sergilemektedir. Ancak, %80 ve üzeri gibi yüksek giderim oranlarında modelin tahmin doğruluğu belirgin biçimde düşmektedir. Özellikle, %91,5 tuzluluk giderim oranına sahip kırmızı renkle gösterilen nokta, modelin bu ekstrem koşullarda ciddi tahmin hataları yaptığını göstermektedir. Bu sapmalar, genellikle yüksek basınç (>35–40 bar) ve yüksek tuz konsantrasyonu (8–10 g/L) gibi parametrelerin bir araya geldiği ve sistemin daha karmaşık, doğrusal olmayan tepkiler verdiği durumlarda meydana gelmektedir. Bu tür uç koşullar altında, mevcut modelin sınırlı yapısı bu doğrusal olmayan davranışları yeterince iyi temsil edememekte ve tahmin edilen değerlerde anlamlı sapmalar oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu sonuçlar doğrultusunda modelin yüksek giderim seviyelerine yönelik performansının iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, modelin daha geniş ve yüksek çözünürlüklü veri setleriyle yeniden eğitilmesi, alternatif olarak ise çok değişkenli regresyon, karar ağaçları veya yapay sinir ağları gibi daha sofistike algoritmaların uygulanması önerilmektedir. Aşırı uçlardaki bu gibi sapmaların giderilmesi, sadece modelin genel doğruluk düzeyini artırmakla kalmayacak; aynı

zamanda su arıtma sistemlerinin yüksek verim koşullarında daha güvenilir şekilde optimize edilmesine de katkı sağlayacaktır.

Tuzluluk Gideriminin Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafikler ile İncelenmesi

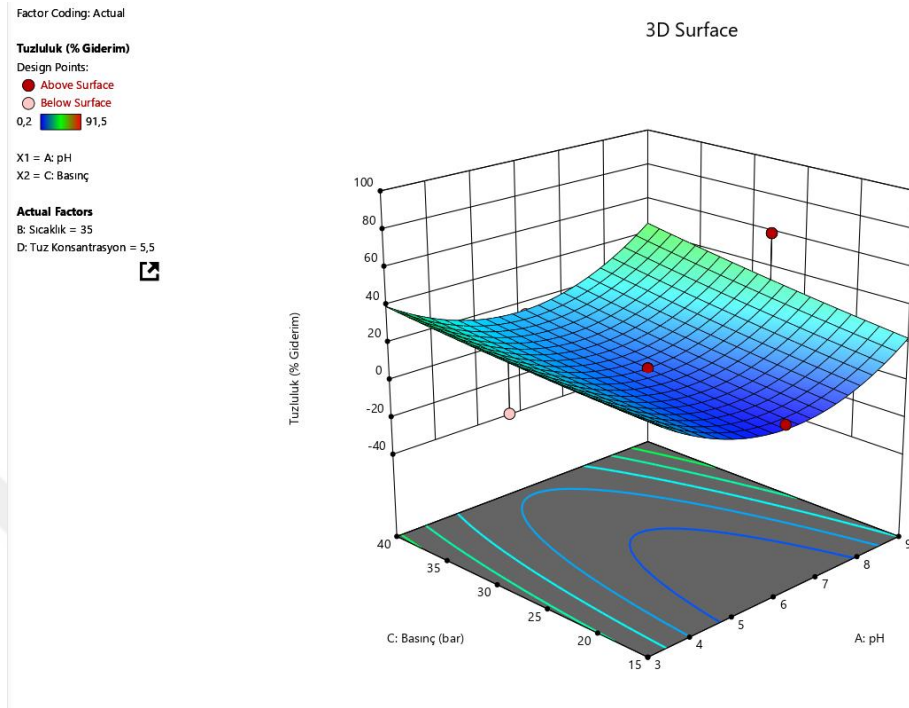
Üç boyutlu yüzey yanıt grafikleri, deney tasarımı ve proses optimizasyonunda, parametrelerin optimal kombinasyonlarının belirlenmesine yardımcı olurken, aynı zamanda verilerin doğrusal olmayan davranışlarını ortaya koyar (Box ve Draper, 2007). Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.27- 4.32 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla pH ve Sıcaklık, pH ve Basınç, pH ve Tuz Konsantrasyonu, Sıcaklık ve Basınç, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu, Basınç ve Tuz konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden tuzluluk giderimleri incelenmiştir.



Şekil 4.27. TO membranlarında tuz giderimine pH ve sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği

Şekil 4.27’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ile sıcaklık arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, Orta pH seviyelerinde (5-6 civarında) tuzluluk giderimi minimum seviyede olduğu gözlenmiştir. Ancak, hem düşük pH (3-4 civarı) hem de yüksek pH (9 civarı) seviyelerinde giderim oranının arttığı tespit edilmiştir. Özellikle pH’ın yüksek olduğu durumlarda daha yüksek giderim oranlarına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, sıcaklık değişimi, pH’a kıyasla daha sınırlı bir etkiye sahiptir. Giderim oranları 25°C ile 45°C arasında çok fazla değişiklik göstermemiştir. Bu sonuçlar, pH’ın tuzluluk giderimi üzerindeki en önemli faktörlerden biri olduğunu, ancak sıcaklığın etkisinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, membran bazlı filtrasyon sistemlerinde tuzluluk

gideriminin artırılmasına yönelik optimizasyon çalışmaları kapsamında, hem pH seviyesinin uç değerlere ayarlanması önerilmektedir.



Şekil 4.28. TO membranlarında tuz giderimine pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği

Şekil 4.28’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ile basınç arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, basınç artışıyla birlikte giderim oranlarında belirgin bir yükselme eğilimi gözlenmiştir. Özellikle 40 bar seviyelerine ulaşıldığında, sistemin tuzluluk giderme kapasitesinin anlamlı biçimde arttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, pH düzeylerinin sistem performansı üzerindeki etkisi, basınçla birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı hâle gelmektedir. Özellikle orta düzey pH aralığı (5–6), sistemin en düşük giderim performansını gösterdiği bölge olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, pH’ın uç değerlerde seyretmesi (yaklaşık pH 3 veya pH 9 civarı) ve bu durumun yüksek basınçla (≥ 35 –40 bar) birleşmesi, tuzluluk gideriminin %60’ın üzerine çıktığı optimum çalışma koşullarını tanımlamaktadır. Bu sonuçlar, pH ve basınç değişkenlerinin birbirleriyle sinerjik bir etkileşim göstererek giderim performansını belirlediğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek basınç koşullarında, pH’ın sistem davranışını modüle eden önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, membran bazlı filtrasyon sistemlerinde tuzluluk gideriminin artırılmasına yönelik optimizasyon çalışmaları kapsamında, hem pH seviyesinin uç değerlere ayarlanması hem de basıncın yüksek tutulması önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

Tuzluluk (% Giderim)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

0,2 91,5

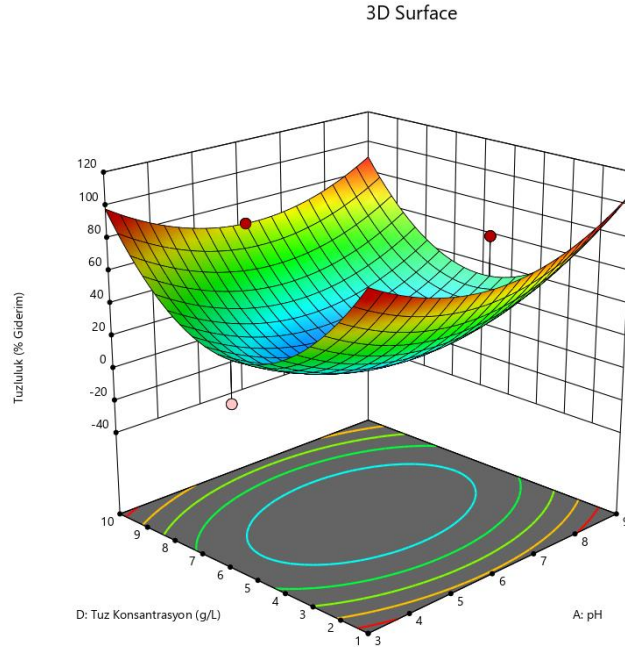
X1 = A: pH

X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

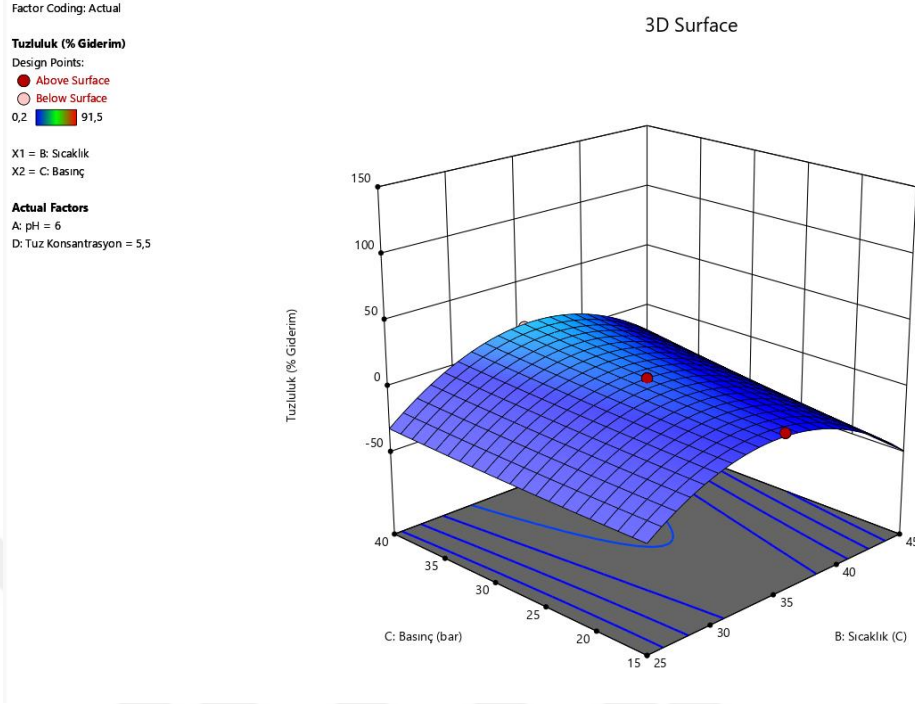
B: Sıcaklık = 35

C: Basınç = 27,5



Şekil 4.29. TO membranlarında tuz giderimine pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği

Şekil 4.29’da sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ve tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Grafik verilerine göre, tuz konsantrasyonu arttıkça (özellikle 9–10 g/L aralığında) tuzluluk giderim oranlarında belirgin bir yükseliş gözlemlenmektedir. Bu eğilim, yüksek tuz seviyelerinin sistemdeki iyonik yük yoğunluğunu artırarak membran üzerinden iyon geçişini sınırladığını ve böylece daha yüksek oranda tuzun tutulduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, pH parametresinin etkisi de dikkat çekicidir. Özellikle düşük ($\text{pH} \approx 3$) ve yüksek ($\text{pH} \approx 9$) uç değerlerde, tuzluluk giderim oranları artış göstermektedir. Buna karşın, orta pH seviyelerinde ($\text{pH} 5\text{--}6$ aralığında) giderim oranlarında bir azalma meydana gelmiş, bu da pH’ın optimumdan uzaklaştığı durumlarda iyon yükünün membran davranışını olumlu etkilediğini düşündürmektedir. Bu bulgular, her iki faktörün de —tuz konsantrasyonu ve pH— tuzluluk giderimi açısından kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Grafik yüzeyi üzerinde oluşan eğilimler, bu iki değişkenin eş zamanlı olarak yüksek seviyelere ulaştığı koşullarda, giderim oranlarının maksimum değerlere eriştiğini göstermektedir. Sonuç olarak, sistemin performansını optimize etmek amacıyla pH ve tuz konsantrasyonu parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği ve bu iki faktörün etkileşimli bir biçimde sürecin verimliliğini artırdığı söylenebilir.



Şekil 4.30. TO membranlarında tuz giderimine Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği

Şekil 4.30’da sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sıcaklık ve basınç parametrelerinin ters osmoz sisteminde tuzluluk giderimi üzerindeki etkileşimlerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Grafik analizine göre, özellikle basınç değişkeni, sistemin performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Öyle ki, 40 bar seviyesindeki yüksek basınç koşullarında tuzluluk giderimi oranı anlamlı düzeyde artmakta; buna karşın, düşük basınç seviyelerinde (örneğin 10–20 bar) giderim oranları oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu durum, basıncın pozitif yönlü etkisinin sistem optimizasyonu açısından kritik olduğunu göstermektedir. Öte yandan, sıcaklık değişiminin tuzluluk giderimi üzerinde görece olarak daha sınırlı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. 25°C ile 45°C arasındaki sıcaklık aralığında yapılan değerlendirmeler, giderim oranlarında anlamlı bir farklılık ortaya koymamaktadır. Bu bulgu, sıcaklık değişkeninin sistem performansı üzerindeki etkisinin, en azından bu aralık içinde, istatistiksel olarak sınırlı düzeyde kaldığını işaret etmektedir. Sonuç olarak, bu grafiksel analiz, basınç faktörünün tuzluluk giderimi üzerindeki etkisinin baskın olduğunu, buna karşılık sıcaklık faktörünün etki düzeyinin minimal kaldığını açıkça göstermektedir. Bu nedenle, sistem tasarımı ve operasyonel optimizasyon süreçlerinde özellikle basınç parametresine öncelik verilmesi gerektiği önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

Tuzluluk (% Giderim)

● Design Points
0,2 91,5

X1 = B: Sıcaklık

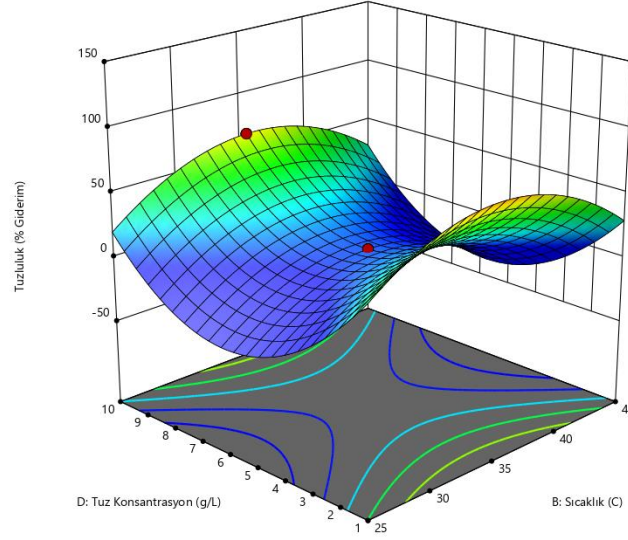
X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

A: pH = 6

C: Basınç = 27,5

3D Surface



Şekil 4.31. TO membranlarında tuz giderimine Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği

Şekil 4.31’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sıcaklık ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin tuzluluk giderimi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Grafik incelendiğinde, tuz konsantrasyonunun yüksek seviyelerde bulunduğu durumlarda tuzluluk giderim oranlarının da arttığı görülmektedir. Buna karşılık, düşük tuz konsantrasyonlarında giderim oranları oldukça sınırlı kalmakta; özellikle 8–10 g/L aralığında tuz konsantrasyonuna ulaşıldığında, maksimum giderim performansına erişilmektedir. Sıcaklık değişkeni ise basınç ve tuz konsantrasyonu gibi diğer işlem parametrelerine kıyasla daha düşük etkili bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, sıcaklığın etkisi, yüksek tuz konsantrasyonlarıyla birlikte ele alındığında kısmen artmakta ve giderim verimliliğine sınırlı düzeyde katkı sağlamaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, tuz konsantrasyonu tuzluluk giderimi üzerinde başat bir rol üstlenirken, sıcaklık değişiminin bu etkiye oranla daha ikincil düzeyde kaldığı sonucuna varılmaktadır.

Factor Coding: Actual

Tuzluluk (% Giderim)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

0,2 91,5

X1 = C: Basınç

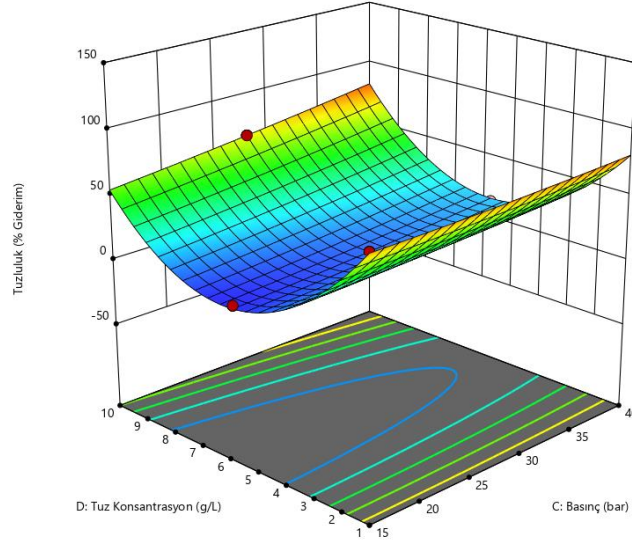
X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

A: pH = 6

B: Sıcaklık = 35

3D Surface



Şekil 4.32. TO membranlarında tuz giderimine Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren üç boyutlu yanıt yüzey grafiği

Şekil 4.32’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, basınç ve tuz konsantrasyonu değişkenlerinin tuzluluk giderimi üzerindeki etkileşimsel etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Grafik verilerine göre, bu iki faktörün birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlar oldukça dikkat çekicidir. Özellikle tuz konsantrasyonunun 8–10 g/L aralığında olduğu ve basınç seviyesinin 35–40 bar arasında bulunduğu koşullarda, tuzluluk giderimi en yüksek düzeyine ulaşmaktadır. Yani, yüksek basınç ile yüksek tuz konsantrasyonunun eşzamanlı olarak uygulanması, sistemin maksimum giderim performansını göstermesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, basınç ve tuz konsantrasyonu faktörlerinin eş zamanlı kontrolü, optimum tuzluluk giderimi elde edilmesi açısından temel belirleyiciler arasında yer almaktadır.

Üç boyutlu yüzey yanıt grafiklerine ilişkin genel değerlendirme yapıldığında, tuzluluk giderimini en fazla etkileyen parametrelerin basınç ve tuz konsantrasyonu olduğu açıkça görülmektedir. Özellikle bu iki değişkenin yüksek seviyelere ulaştığı durumlarda, sistemin tuz giderim verimliliği maksimum düzeye ulaşmaktadır. Diğer yandan, pH faktörünün de uç değerlere yaklaştığında giderim performansı üzerinde anlamlı bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ancak, sıcaklık değişkeni, basınç, tuz konsantrasyonu ve pH ile karşılaştırıldığında, tuzluluk giderimi üzerindeki katkısının oldukça sınırlı kaldığı sonucuna varılmaktadır. Bu bulgular, membran prosesleri ve genel su arıtma uygulamalarında etkin tuz giderimi sağlanabilmesi için, özellikle basınç, tuz konsantrasyonu ve pH değişkenlerinin birlikte ve dikkatli biçimde optimize edilmesinin gerekliliğine işaret etmektedir. Buna karşın, sıcaklık parametresi, bu sistemlerde daha ikincil bir rol üstlenmekte olup, giderim performansına olan katkısı nispeten düşük düzeydedir.

4.2.2 TÇKM Giderimi

Çizelge 4.25'te yapmış olduğumuz ANOVA analizi, TÇKM giderimi üzerindeki faktörlerin etkisini inceleyen kuadratik modele dayanmaktadır. Merkezi kompozit deneysel tasarım kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışma, pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi bağımsız değişkenlerin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini değerlendirir.

Çizelge 4.25. Kuadratik model için ANOVA analizi (TÇKM Giderimi)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
Model	21023,72	14	1501,694	4,515281	0,003169	Anlamlı
A-pH	10,88889	1	10,88889	0,032741	0,858834	
B-Sıcaklık	0,455625	1	0,455625	0,00137	0,970963	
C-Basınç	1131,294	1	1131,294	3,401565	0,084975	
D-Tuz Konsantrasyonu	666,9306	1	666,9306	2,005321	0,177178	
AB	228,7656	1	228,7656	0,687851	0,4199	
AC	193,9056	1	193,9056	0,583034	0,456968	
AD	182,9256	1	182,9256	0,550019	0,469763	
BC	589,2756	1	589,2756	1,771829	0,203035	
BD	343,1756	1	343,1756	1,031858	0,325828	
CD	532,4556	1	532,4556	1,600983	0,225067	
A ²	1886,077	1	1886,077	5,67104	0,030928	
B ²	952,6478	1	952,6478	2,864413	0,11122	
C ²	2,765455	1	2,765455	0,008315	0,92855	
D ²	3551,014	1	3551,014	10,67716	0,005193	
Kalıntı	4988,707	15	332,5804			
Uyumsuzluk	4988,707	7	712,6724			
Saf Hata	0	8	0			
Cor Toplamı	26012,42	29				

Modelin genel geçerliliği, ANOVA (Varyans Analizi) sonuçlarına dayanarak değerlendirilmiştir. Elde edilen F-değeri 4,52 olup, bu sonuç modelin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir ($p = 0,003169$). Bu bağlamda, modelin genel varyasyonunun yalnızca %0,32 olasılıkla tesadüfi gürültüden kaynaklanmış olabileceği, dolayısıyla modelin güvenilir bir yapı sunduğu söylenebilir. p -değeri 0,05'in altında olan faktörler modele anlamlı katkı sağlayan değişkenler olarak değerlendirilmekte olup, bu doğrultuda A² (pH'nin ikinci dereceden etkisi) ve D² (tuz konsantrasyonunun ikinci dereceden etkisi) istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Fisher, 1925; Neyman ve Pearson, 1933; Lehmann ve Romano, 2005; Casella ve Berger, 2002). Buna karşılık, diğer faktörlerin p -değerlerinin 0,10'un üzerinde seyretmesi, bu değişkenlerin model üzerindeki etkilerinin istatistiksel açıdan anlamlı olmadığını ortaya koymaktadır.

İstatistiksel uyum ölçütleri incelendiğinde, Çizelge 4.24'te raporlanan R² değeri 0,8082 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, modelin toplam çözünmüş katı madde (TÇKM) giderimindeki

varyansın yaklaşık %80,82'sini açıkladığını göstermektedir. Ancak, modelde yer alan değişken sayısına göre düzeltilmiş açıklayıcılığı temsil eden Adjusted R² değeri 0,6292 olarak belirlenmiş olup, bu durum bazı terimlerin modele gereksiz yere dâhil edilmiş olabileceğine ve model karmaşıklığının açıklayıcılığı olumsuz etkilediğine işaret etmektedir. Diğer bir deyişle, modeldeki fazladan parametreler nedeniyle varyansın açıklanma oranı %63,0 seviyelerine kadar gerilemiştir.

Ayrıca, modelin tahmin başarımına ilişkin standart sapma (Standard Deviation) değeri 18,24 olarak bulunmuştur. Bu değer, tahmin edilen sonuçlar ile gözlenen veriler arasındaki sapmanın büyüklüğünü ortaya koymakta olup, modelin genel hata payı hakkında fikir vermektedir. Yine de bu düzeydeki bir sapma, çalışmanın kapsamı içerisinde kabul edilebilir olarak değerlendirilebilir.

Modelin sinyal-gürültü oranını temsil eden Yeterlilik Oranı (Adequate Precision) değeri ise 6,046 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 4'ün üzerinde olması, modelin tasarım uzayında güvenilir tahminler yapabildiğini ve optimizasyon sürecinde istatistiksel açıdan anlamlı bir rehber olarak kullanılabileceğini açıkça göstermektedir (Çizelge 4.26).

Çizelge 4.26. Uygunluk İstatistikleri (TÇKM Giderimi)

Std. Sapma	18,24	R²	0,808
Ortalama	37,83	Düzeltilmiş R²	0,629
C.V. %	48,21	Tahmini R²	NA
		Yeterlilik Oranı	6,047

Çizelge 4.27. Model Karşılaştırma İstatistikleri (TÇKM Giderimi)

PRESS	NA
-2 Log Olasılık	238,55
BIC	289,57
AICc	302,83

Modelde yer alan bağımsız değişkenlerin ikinci dereceden etkilerine ilişkin analizler, A² (pH²) ve D² (tuz konsantrasyonu²) terimlerinin istatistiksel olarak anlamlı bulunduğunu göstermektedir (Çizelge 4.28). Bu bulgu, hem pH'ın hem de tuz konsantrasyonunun TÇKM (Toplam Çözünmüş Katı Madde) giderimi üzerindeki etkilerinin doğrusal olmaktan ziyade, eğrisel (non-linear) bir yapı sergilediğine işaret etmektedir. Diğer bir ifadeyle, bu faktörlerin giderim performansını belirleyici biçimde etkilediği noktalar, çoğunlukla orta seviyelerden sapılan uç değerlerde yoğunlaşmaktadır.

Özellikle A² (pH²) terimi, pH'ın kare etkisinin modele anlamlı katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu etki, p-değeri 0,030928 ile istatistiksel olarak anlamlıdır ve pH değerinin hem düşük (örneğin pH $\approx$ 3) hem de yüksek (örneğin pH $\approx$ 9) seviyelerinde TÇKM gideriminin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Bu durum, optimum giderimin yalnızca belirli pH aralıklarında değil, uç pH koşullarında da elde edilebildiğini ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde, D^2 (tuz konsantrasyonu²) terimi de model kapsamında anlamlı bulunmuştur (p-değeri = 0,005193). Bu bulgu, tuz konsantrasyonunun yalnızca artış veya azalış yönünde doğrusal bir etki göstermediğini; aksine, düşük (<3 g/L) ya da yüksek (>8 g/L) tuz konsantrasyonlarının TÇKM giderimi üzerinde daha baskın etkiler yarattığını işaret etmektedir. Diğer bir deyişle, orta düzey konsantrasyonlara kıyasla uç konsantrasyonlar sistem davranışında daha belirleyici hale gelmektedir.

Sonuç olarak hem A^2 hem de D^2 terimlerinin modele anlamlı katkı sunması, sistemin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğunu doğrulamaktadır. Bu durum, TÇKM giderimi performansının yalnızca tekil değişken seviyelerine değil, bu değişkenlerin ikinci dereceden etkilerine ve etkileşim yapılarına göre de dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.28. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (TÇKM Giderimi)

Faktör	Katsayı	df	Standart	95% CI	95% CI2	VIF
Kesişim	6,7	1	6,0789294	-6,25693	19,65693	
A-pH	0,777778	1	4,2984522	-8,38416	9,939712	1
B-Sıcaklık	0,16875	1	4,559197	-9,54895	9,886448	1
C-Basınç	7,927778	1	4,2984522	-1,23416	17,08971	1
D-Tuz Konsantrasyonu	-6,45625	1	4,559197	-16,1739	3,261448	1,060417
AB	-3,78125	1	4,559197	-13,4989	5,936448	1
AC	3,48125	1	4,559197	-6,23645	13,19895	1
AD	-3,38125	1	4,559197	-13,0989	6,336448	1
BC	6,06875	1	4,559197	-3,64895	15,78645	1
BD	4,63125	1	4,559197	-5,08645	14,34895	1
CD	5,76875	1	4,559197	-3,94895	15,48645	1
A^2	33,95	1	14,256353	3,563303	64,3367	4,4
B^2	-49,475	1	29,232635	-111,783	12,83289	19,18519
C^2	1,3	1	14,256353	-29,0867	31,6867	4,4
D^2	64,55625	1	19,75652	22,44622	106,6663	8,645602

Çizelge 4.25'te sunulan ANOVA sonuçlarına göre, model genel olarak istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmekle birlikte, bazı ikinci dereceden terimlerin — özellikle B^2 (sıcaklık²) ve C^2 (basınç²) — modele anlamlı katkı sağlamadığı görülmektedir. Bu bulgu, sıcaklık ve basınç değişkenlerinin TÇKM giderimi üzerindeki ikinci dereceden etkilerinin sınırlı olduğunu ve doğrusal olmayan katkılarının zayıf kaldığını göstermektedir. Böyle bir durumda, modelin parsimony ilkesine uygun olarak yeniden düzenlenmesi önerilebilir. Anlamlılık taşımayan terimlerin modelden çıkarılması hem modelin gereksiz karmaşıklığını azaltacak hem de tahmin doğruluğunu iyileştirecektir. Özellikle daha geniş veri kümeleri ile yapılacak yeni modellemeler, sistemin davranışını daha güçlü şekilde temsil edebilir.

Çizelge 4.29'da yer alan model denklemi incelendiğinde, TÇKM giderimi üzerinde en yüksek etkiye sahip faktörlerin basınç ve tuz konsantrasyonu olduğu anlaşılmaktadır. Basınç

değişkeninin katsayısı 7,93 olarak hesaplanırken, tuz konsantrasyonu için bu değer -6,46'dır. Bu durum, basınç arttıkça TÇKM giderim oranlarının yükseldiğini, buna karşın tuz konsantrasyonunun artışının giderimi olumsuz etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Diğer bağımsız değişkenler olan pH ve sıcaklık, bu sistemde daha sınırlı etkiler göstermiştir; dolayısıyla bu iki değişkenin giderim performansı üzerindeki belirleyiciliği düşüktür. Elde edilen bu sonuçlar, TÇKM gideriminde en yüksek verimliliğe ulaşmak adına basınç ve tuz konsantrasyonu değişkenlerinin birlikte optimize edilmesinin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.29. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (TÇKM Giderimi)

TÇKM	=
6,7	
0,777778	A
0,16875	B
7,927778	C
-6,45625	D
-3,78125	AB
3,48125	AC
-3,38125	AD
6,06875	BC
4,63125	BD
5,76875	CD
33,95	A ²
-49,475	B ²
1,3	C ²
64,55625	D ²

Yapılan ANOVA analizine göre, TÇKM giderimi üzerinde en anlamlı etkiye sahip model terimleri pH² ve tuz konsantrasyonu² olarak belirlenmiştir. Bu durum, pH ve tuz konsantrasyonunun doğrusal etkilerinden ziyade, ikinci dereceden (kuadratik) etkilerinin daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Basınç değişkeni, giderimi pozitif yönde etkileyen bir unsur olarak öne çıkmakla birlikte, sıcaklık ve çoğu ikili etkileşim terimi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamış, yani modele anlamlı katkı sağlamamıştır. Bu bağlamda, modelin optimize edilmesi amacıyla anlamlı olmayan terimlerin çıkarılması, modelin sadeliğini ve tahmin gücünü artırabilir. Ayrıca, daha geniş bir deneysel veri seti ile modelin yeniden eğitilmesi önerilmektedir. Bu sonuçlar, TÇKM gideriminin optimizasyonunda özellikle pH, tuz konsantrasyonu ve basınç parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini; sıcaklık ve etkileşim terimlerinin ise daha sınırlı bir etki gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Qadir ve ark. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, NaCl çözeltisi ile yapılan membran testlerinde toplam çözünmüş madde (TÇKM) artışının, permeat akışı ve tuz giderim oranlarında azalmaya neden olduğu raporlanmıştır. Örneğin, ESC1 membranı kullanıldığında, NaCl

için giderim oranı 100 ppm'de %50,26 iken, 1.000 ppm'de bu oran %42,5'e düşmüştür. Bu düşüşe rağmen, ESC1 membranının 6,04 nm ortalama gözenek çapı ve %77,04 oranındaki porozitesi ile yüksek TÇKM giderimi için yapısal olarak optimize edildiği belirtilmiştir. Benzer şekilde Atia ve ark. (2023) tarafından incelenen üç farklı vaka çalışmasında; Vaka A'da %70 geri kazanım oranı ile 35 g/L TÇKM'li beslemeden 114,4 g/L son brine konsantrasyonu elde edilmiştir. Vaka B'de %55 geri kazanım ve 70 g/L besleme TÇKM ile 153,5 g/L son brine, Vaka C'de ise %35 geri kazanım ve 125 g/L TÇKM besleme ile 190,8 g/L son brine konsantrasyonu rapor edilmiştir. Tüm vakalarda, permeat suyunun TÇKM değeri ≤ 1 g/L olarak ölçülmüş ve bu değer Dünya Sağlık Örgütü'nün içme suyu kalite standardı sınırlarının altında kalmıştır. Srivastava ve ark. (2022), az tuzlu suyun (TÇKM aralığı 1–10 g/L) arıtılmasında NF ve TO membranlarının performansları karşılaştırmışlardır. NF membranlarının daha yüksek su geri kazanımı sunduğu, ancak TO membranlarının daha yüksek tuz giderim oranlarına sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Her iki membranın hibrit kullanımı ile yaptıkları çalışmada NF-TO kombinasyonu, geri kazanımı %40,35'e çıkararak ve enerji tüketimini (SEC) 3.8 kWh/m³'e düşürerek etkili bir alternatif olabileceğini savunmuşlardır. Xing ve ark. (2023), yapmış oldukları deneylerde NaCl Konsantrasyonu ve Uranyum kalıntısının, NaCl 1 g/L iken uranyum kalıntısı %100, NaCl 8 g/L iken uranyum kalıntısı %45,26, NaCl 35 g/L (deniz suyu seviyesi) iken uranyum kalıntısı %0 olarak tespit etmişlerdir. Tuzluluk ve TÇKM giderimi, çözeltinin iyonik gücüyle doğrudan ilişkili olduğunu. Yüksek tuzluluklu sulara (örneğin Akdeniz), elektriksel iletkenlik arttığını ve uranyum kalıntısının düştüğünü, düşük tuzluluklu sistemlerde (Baltık Denizi veya nehir suyu) kalıntının daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Bu sonuçlar, mevcut çalışmadaki çıkarımlarla paralellik göstermekte; özellikle yüksek besleme konsantrasyonları ve geri kazanım oranları altında dahi permeat kalitesinin korunabileceğini göstermektedir.

TÇKM Gideriminin Renkli İzohips Grafikler ile İncelenmesi

Renkli izohips grafikler, toplam çözünmüş katıların (TÇKM) giderimi üzerindeki çeşitli faktörlerin (pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu) etkisini incelemektedir. Her grafik, iki değişkenin etkileşimlerini inceleyerek, diğer değişkenler sabit tutulduğunda TÇKM gideriminin nasıl değiştiğini görsel olarak göstermektedir. Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.33- 4.38 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla pH ve Sıcaklık, pH ve Basınç, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu, pH ve Tuz Konsantrasyonu, Sıcaklık ve Basınç, Basınç ve Tuz konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden TÇKM giderimleri incelenmiştir.

Factor Coding: Actual

TÇKM (% Giderim)

● Design Points

0,5 90,7

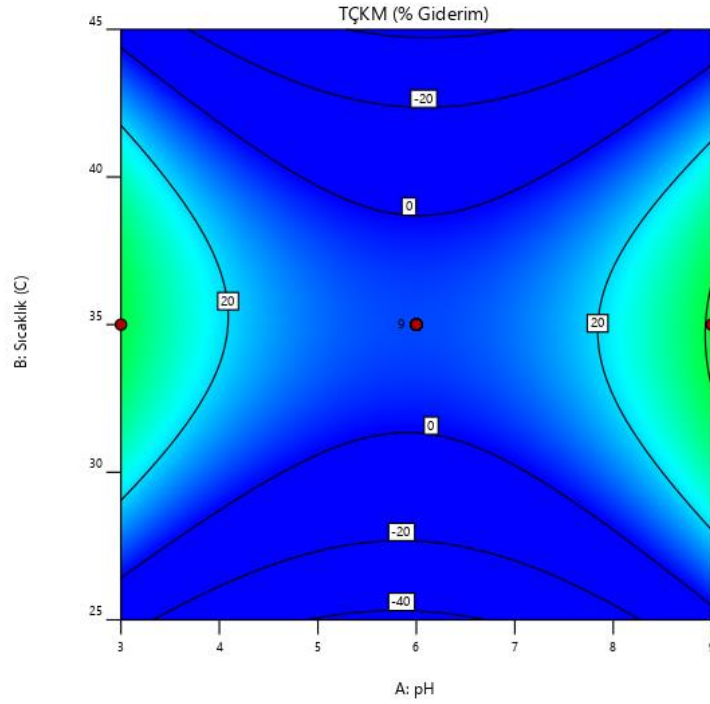
X1 = A: pH

X2 = B: Sıcaklık

Actual Factors

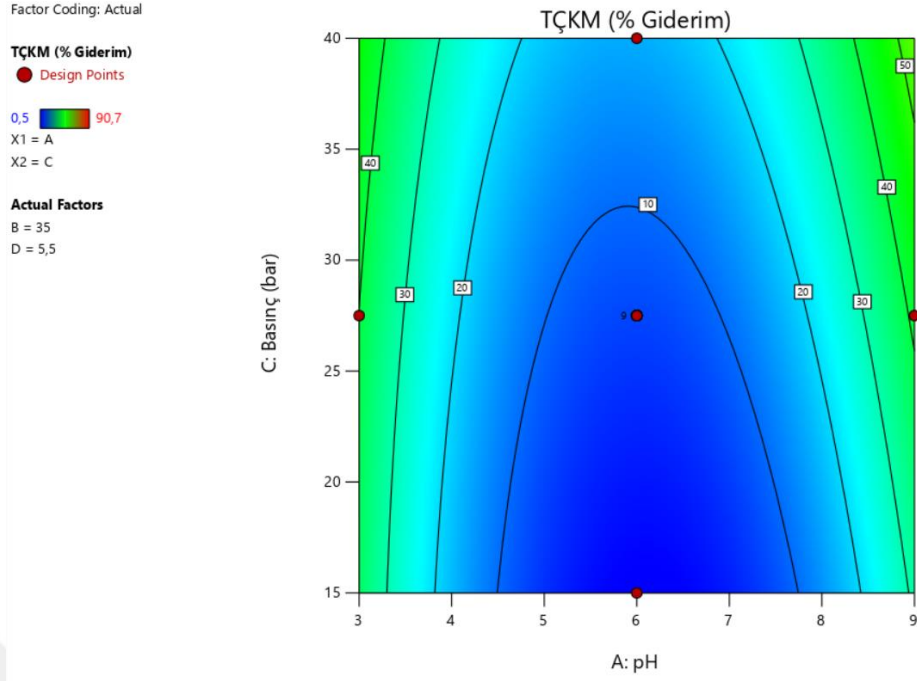
C: Basınç = 27,5

D: Tuz Konsantrasyon = 5,5



Şekil 4.33. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.33'te sunulan renkli izohips grafik, pH ile sıcaklık parametreleri arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkisini analiz etmektedir. Grafikte kullanılan renk skalasına göre; mavi tonlar düşük giderim oranlarını (%0–20), yeşil ve sarı tonlar ise daha yüksek giderim oranlarını (%90,7'ye kadar) temsil etmektedir. pH eksenini incelendiğinde, yaklaşık pH 6 civarında minimum giderim (%0–10) değerleri gözlemlenmiştir. Buna karşın, hem düşük (yaklaşık pH 3) hem de yüksek (yaklaşık pH 9) pH seviyelerinde giderim oranlarında belirgin bir artış meydana gelmekte; bu aralıkta %20 ile %40 arasında değişen tuzluluk giderimi değerleri elde edilmektedir. Sıcaklık değişiminin ise TÇKM giderimi üzerinde etkisi daha sınırlıdır. 25 °C ile 45 °C arasındaki sıcaklık aralığında, giderim oranlarında dikkate değer bir artış ya da azalma gözlenmemiştir. Bu durum, söz konusu çalışma koşullarında pH'ın, sıcaklığa kıyasla TÇKM giderimi üzerinde daha belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Grafik üzerindeki renk dağılımı ve ilgili giderim değerleri dikkate alındığında, optimum tuzluluk gideriminin pH değerinin uç sınırlarında, yani düşük (≈ 3) veya yüksek (≈ 9) olduğu koşullarda gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır.



Şekil 4.34. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.34'te sunulan renkli izohips grafik, pH ve basınç faktörleri arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini göstermektedir. Grafik üzerinde mavi tonlar düşük giderim oranlarını (%0–10), yeşil ve sarı tonlar orta seviyeli giderimleri (%20–30), kırmızı tonlar ise yüksek giderim oranlarını (%40 ve üzeri) temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, basınç arttıkça TÇKM giderimi anlamlı şekilde yükselmektedir. Özellikle 40 bar civarında maksimum giderim oranına ulaşılmaktadır. Basınç azaldıkça giderim oranı düşmektedir. pH'ın etkisi belirgin olmakla birlikte, düşük pH ve yüksek basınç kombinasyonu yüksek giderim oranlarına neden olmaktadır. pH seviyesinden bağımsız olarak yüksek tuzluluk giderimi değerleri elde edilmiştir. Örneğin, pH 9 ve basınç 40 bar seviyesindeyken tuzluluk giderimi %40'a kadar çıkabilmektedir. Analizler, basıncın TÇKM giderimi üzerindeki en önemli faktörlerden biri olduğunu, pH'ın ise daha küçük ama etkili bir değişken olduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, özellikle membran tabanlı ve basınca duyarlı su arıtım süreçlerinde, yüksek basınç uygulamasının TÇKM giderim performansını artırmak açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Factor Coding: Actual

TÇKM (% Giderim)

● Design Points

0,5 90,7

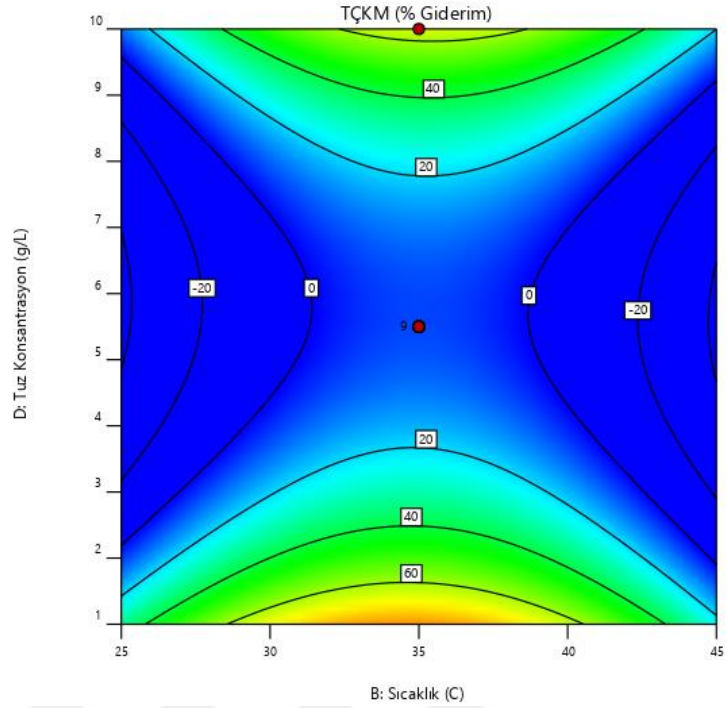
X1 = B: Sıcaklık

X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

A: pH = 6

C: Basınç = 27,5



Şekil 4.35. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.35'te sunulan renkli izohips grafik, sıcaklık ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Grafik verilerine göre, tuz konsantrasyonu 1 g/L ve orta sıcaklıklarda (~35 °C) aralığına yükseldikçe giderim verimliliği optimum seviyeye ulaşmıştır. Tuz konsantrasyonu yüksekken (D: 10 g/L) ve sıcaklık hem düşük (~25 °C) hem de yüksek (~45 °C) olduğunda en düşük giderim oranları gözlemlenmiştir (grafikte koyu mavi alanlar). Bu bölgelerde proses etkinliği ciddi şekilde düşmüştür. Sıcaklığın etkisinin orta seviyelerde (30-35 °C) tutulduğunda giderim daha yüksek olduğu, sıcaklık uç değerlere çıktığında ise (hem düşük hem yüksek), giderimin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu, sıcaklık ile giderim arasında parabolik bir ilişki olduğunu gösterir. Sonuç olarak, bu analiz tuz konsantrasyonunun TÇKM giderimi açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymakta; optimal giderim için orta sıcaklık ve düşük tuz konsantrasyonu seviyelerinde olumlu yönde katkı sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, giderim verimliliğini maksimize etmek amacıyla her iki değişkenin — özellikle ~1-3 g/L tuz konsantrasyonu ve ~35 °C sıcaklık — birlikte optimize edilmesi gerektiği önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

TÇKM (% Giderim)

● Design Points

0,5 90,7

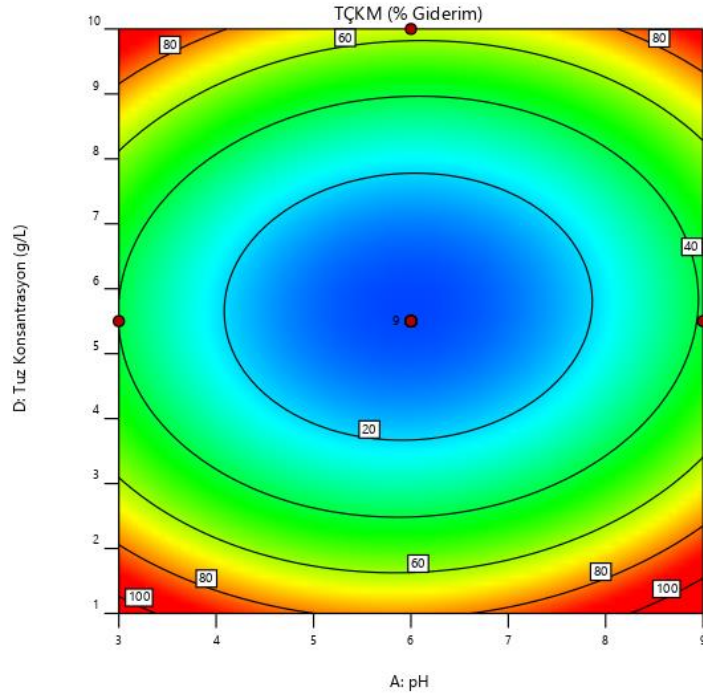
X1 = A: pH

X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

B: Sıcaklık = 35

C: Basınç = 27,5



Şekil 4.36. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.36’da sunulan renkli izohips grafik, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, özellikle uç pH değerlerine (yaklaşık 3 ve 9) ulaşıldığında ve tuz konsantrasyonu 8–10 g/L aralığına yükseldiğinde, TÇKM giderimi oranlarında dikkate değer bir artış gözlemlenmektedir. Örneğin, pH değeri 9 ve tuz konsantrasyonu 10 g/L olduğunda, giderim oranı yaklaşık %80 düzeyine ulaşmaktadır. Benzer şekilde, düşük pH (3 civarı) ve yüksek tuz konsantrasyonu kombinasyonlarında da yüksek performans elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, pH’ın orta seviyelerinde (özellikle $pH \approx 6$) ve tuz konsantrasyonunun yaklaşık 5 g/L olduğu durumlarda, giderim oranları minimum seviyelere kadar düşmektedir. Bu bölgede elde edilen giderim oranı yaklaşık %9 civarındadır. Tuz konsantrasyonu 1–4 g/L gibi düşük seviyelerde tutulduğunda ise, genel olarak TÇKM gideriminde sınırlı başarı elde edilmekte, bu durum grafikte mavi tonların hâkim olduğu alanlarla temsil edilmektedir. Elde edilen bu bulgular, tuz konsantrasyonunun TÇKM giderimi açısından baskın ve kritik bir değişken olduğunu; özellikle 5 g/L’nin üzerindeki değerlerde giderim oranlarını anlamlı şekilde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, sistemin performansı üzerinde doğrusal olmayan, ancak birlikte optimize edilmesi gereken bir dinamik oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, sistemin maksimum verimle çalışabilmesi için her iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi ve özellikle yüksek tuz konsantrasyonlarında pH optimizasyonunun dikkatle ele alınması önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

TÇKM (% Giderim)

● Design Points

0,5 90,7

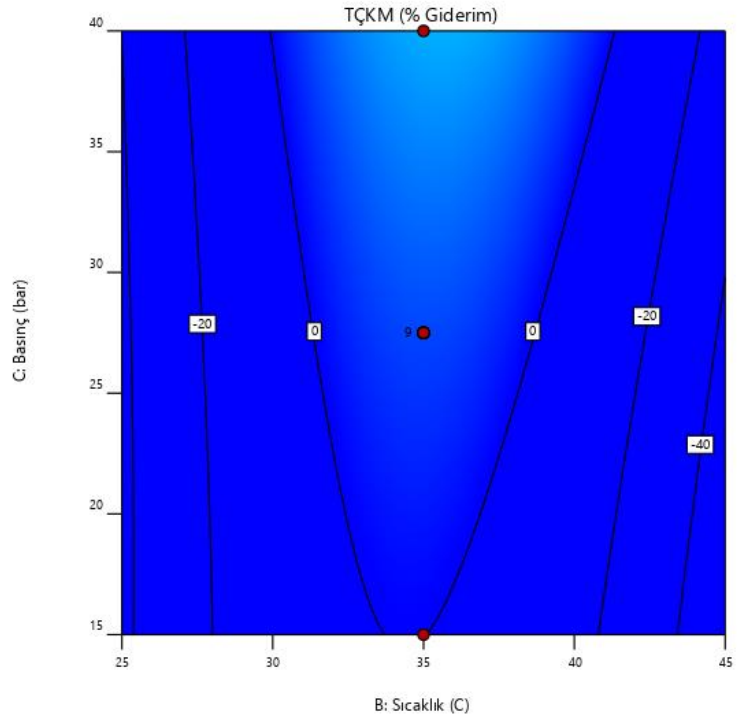
X1 = B: Sıcaklık

X2 = C: Basınç

Actual Factors

A: pH = 6

D: Tuz Konsantrasyon = 5,5



Şekil 4.37. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.37’de sunulan renkli izohips grafik, sıcaklık ile basınç parametrelerinin TÇKM giderimi üzerindeki etkileşimini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, sistem performansı üzerinde en belirleyici değişkenin basınç olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle basınç 40 bar seviyelerine ulaştığında, TÇKM giderimi artmakta; bu da basıncın doğrudan pozitif etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Buna karşılık, sıcaklık değişimi (25–45 °C aralığında) giderim üzerinde sınırlı bir rol oynamakta olup, elde edilen değerler sıcaklık farklılıklarına büyük ölçüde duyarsız kalmaktadır. Örneğin, 30–35 °C aralığında izohips çizgileri yatay bir seyir izlemekte ve giderim oranlarında anlamlı bir değişim gözlenmemektedir. Bu bağlamda, yüksek basınç seviyelerinde sıcaklığın marjinal etkisi, renk dağılımı üzerinden de doğrulanmıştır. Grafik üzerindeki geçiş tonlarının düşük sıcaklıklarda bile basınca duyarlı olarak eğilim göstermesi, sıcaklık faktörünün etkisinin görece zayıf olduğunu ve modelin bu faktöre karşı daha az duyarlı olduğunu teyit etmektedir. Sonuç olarak, bu kontur grafik, basıncın membran tabanlı filtrasyon sistemlerindeki belirleyici rolünü açıkça göstermektedir. Sıcaklık ise bu sistem özelinde, ancak yüksek tuz konsantrasyonları ya da basınçla birlikte değerlendirilmediği sürece, tek başına anlamlı bir artış sağlamamaktadır.

Factor Coding: Actual

TÇKM (% Giderim)

● Design Points

0,5 90,7

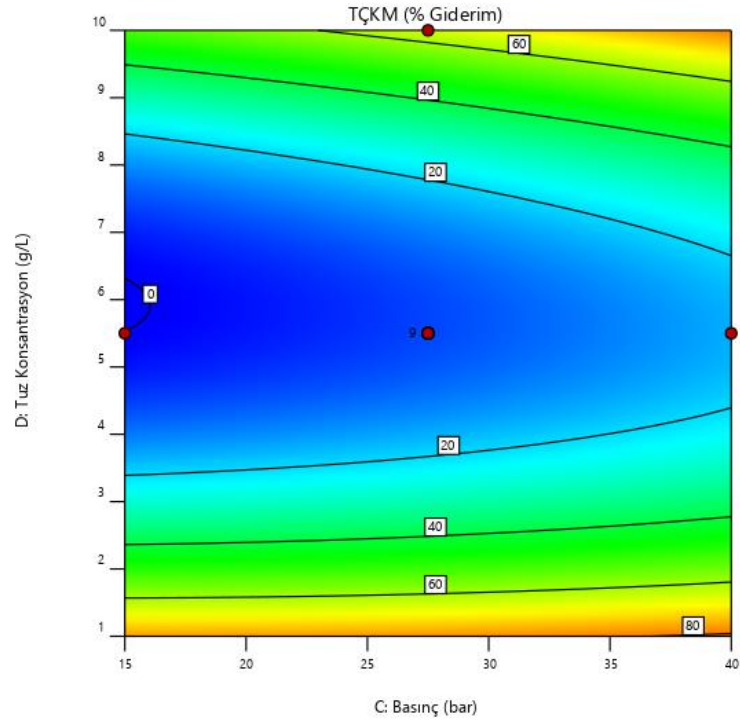
X1 = C: Basınç

X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

A: pH = 6

B: Sıcaklık = 35



Şekil 4.38. TO membranlarla TÇKM gideriminde Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.38’de sunulan renkli izohips grafik, basınç ile tuz konsantrasyonunun birlikte TÇKM giderimine olan etkisini net biçimde ortaya koymaktadır. Grafik verilerine göre, yüksek basınç (> 35 bar) ve yüksek tuz konsantrasyonu (> 8 g/L) koşullarında giderim oranları %60 ve üzerinde seyretmektedir. Örneğin, 40 bar basınç ve 10 g/L tuz kombinasyonunda giderim oranı yaklaşık %80’e kadar yükselmektedir. Buna karşın hem basınç düşük olduğunda hem de tuz konsantrasyonu 1–3 g/L düzeyindeyken, giderim sadece %0–20 aralığında kalmaktadır. Bu durum, her iki faktörün de sistem performansı açısından kritik önem taşıdığını göstermektedir. Grafik üzerinde izohips çizgilerinin hem yatay hem de dikey ekseninde belirgin eğime sahip olması, basınç ve tuz konsantrasyonunun ayrı ayrı değil, birlikte optimize edilmesi gerektiğini vurgular. Kısacası, maksimal tuzluluk giderimi ancak yüksek basınç ve aynı zamanda yüksek tuz konsantrasyonu sağlandığında elde edilebilmektedir.

Grafiklerin bütüncül analizi, TÇKM giderimi üzerinde en etkili parametrelerin basınç ve tuz konsantrasyonu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu iki faktör, özellikle basınç 40 bar seviyelerine yaklaştığında ve tuz konsantrasyonu 8–10 g/L aralığında olduğunda, giderim oranlarını maksimum düzeye taşımaktadır. Bu bulgu, yüksek basınç ve tuz konsantrasyonunun eş zamanlı olarak uygulanmasının sistem performansını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Öte yandan, pH değişkeni ikinci dereceden etkili bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Spesifik olarak, orta düzey pH (~6) koşullarında giderim verimi oldukça düşüktür; ancak uç pH değerleri (pH ≈ 3 veya 9) söz konusu olduğunda, giderim oranlarında gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Bu durum, pH’ın doğrusal olmayan bir etki mekanizması ile sistem performansını etkilediğini göstermektedir.

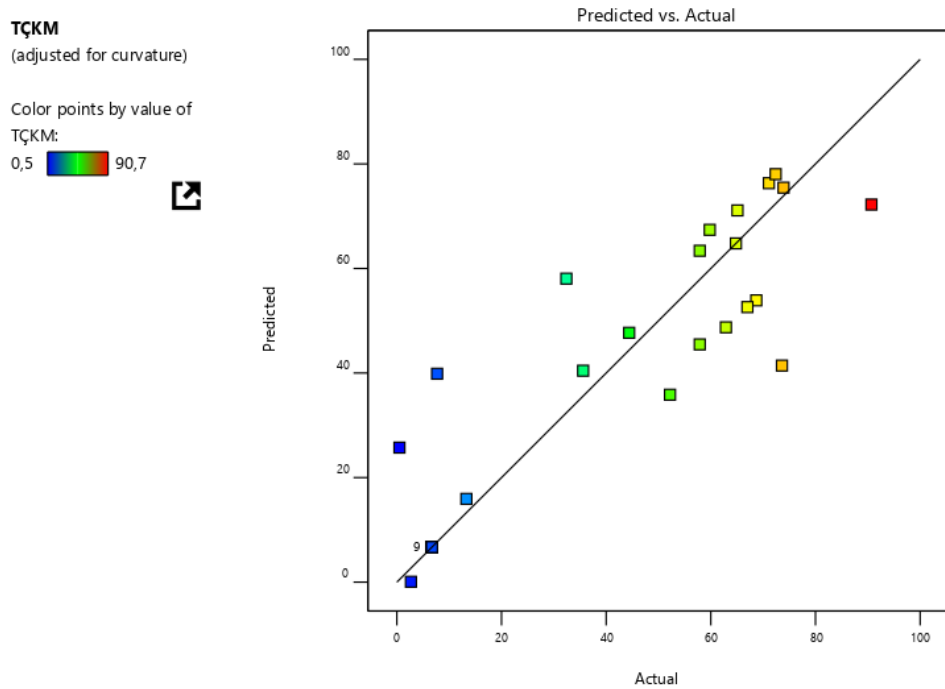
Sıcaklık faktörü ise diğer değişkenlerle karşılaştırıldığında sınırlı bir etkiye sahiptir. Yalnızca belirli tuz konsantrasyonlarıyla birlikte değerlendirildiğinde anlamlı hale gelen bu etki, genel sistem optimizasyonunda tek başına belirleyici değildir. Nitekim sıcaklık değişiminin giderim oranı üzerindeki etkisi, çoğunlukla ihmal edilebilir düzeydedir (Çizelge 4.30). Tüm bu bulgular, membran bazlı su arıtma sistemlerinin optimizasyonu açısından stratejik öneme sahiptir. Özellikle TÇKM gideriminde, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi başat faktörlerin dikkatle kontrol edilmesi, en yüksek verimin elde edilmesi açısından kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Çizelge 4.30. Optimum TÇKM Giderimi Koşulları

Faktör	Optimum Değer Aralığı	Etkileşim Bağlamı
pH (A)	Uç değerlere yaklaştığı (3 veya 9 civarı) bölgelerde	İkinci dereceden etki
Basınç (C)	40 bar	Her durumda pozitif etki
Sıcaklık (B)	Çoğunlukla ihmal edilebilir düzeyde	Diğer faktörlere kıyasla daha sınırlı etki
Tuz Konsantrasyonu (D)	8 – 10 g/L	Her durumda pozitif etki

4.2.2.2 TÇKM Giderimi için Deneysel ve Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 4.39’da sunulan "Tahmin ve Gerçek" grafiğinde, tahmin edilen TÇKM değerleri ile gerçek TÇKM değerleri arasındaki ilişki incelenmektedir. Grafik, tahmin edilen ve gerçek değerler arasında nasıl bir uyum olduğunu analiz etmek için kullanılır ve genel olarak modelin doğruluğunu değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Renk skalası, farklı TÇKM giderim seviyelerini (0,5 ile 90,7 arasında) ifade eden bir renk paleti ile sonuçların dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.39. TÇKM giderimi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması

Modelin tahmin doğruluğu, genel olarak referans çizgisi etrafında homojen bir dağılım sergilemektedir. Düşük ve orta TÇKM giderim seviyeleri (%0–60 arası) için çoğu nokta 45° referans çizgisine oldukça yakın konumlanmıştır. Bu durum, modelin bu aralıkta istikrarlı ve güvenilir tahminler üretebildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yüksek giderim oranlarında (%60 ve üzeri) modelin tahmin performansında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle %90,7 giderim oranına sahip kırmızı noktanın referans çizgisinden uzaklaşması, modelin bu ekstrem koşullarda anlamlı sapmalar yaptığını göstermektedir. Bu sapmalar, modelin yüksek giderim seviyelerinde karmaşık sistem davranışlarını yeterince temsil edemediğini işaret etmektedir.

Referans çizgisine yakın konumlanan mavi ve yeşil tonlu noktalar, düşük (%0–20) ve orta (%20–60) giderim seviyelerinde modelin yüksek doğrulukla tahminler yaptığını göstermektedir. Bu bölgelerde, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki sapmalar minimal düzeyde kalmıştır. Öte yandan, yüksek giderim oranlarını temsil eden sarı, turuncu ve kırmızı tonlu noktalar, özellikle %60 ve üzerindeki giderim seviyelerinde, artan hata paylarını vurgulamaktadır. En yüksek giderim değerinde (%90,7) modelin tahmin ettiği değer gerçek değerden oldukça altında kalmıştır. Bu durum, sistemin yüksek basınç (>35–40 bar) ve yüksek tuz konsantrasyonu (8–10 g/L) gibi uç koşullarda doğrusal olmayan davranışlar sergilemesiyle ilişkilendirilebilir.

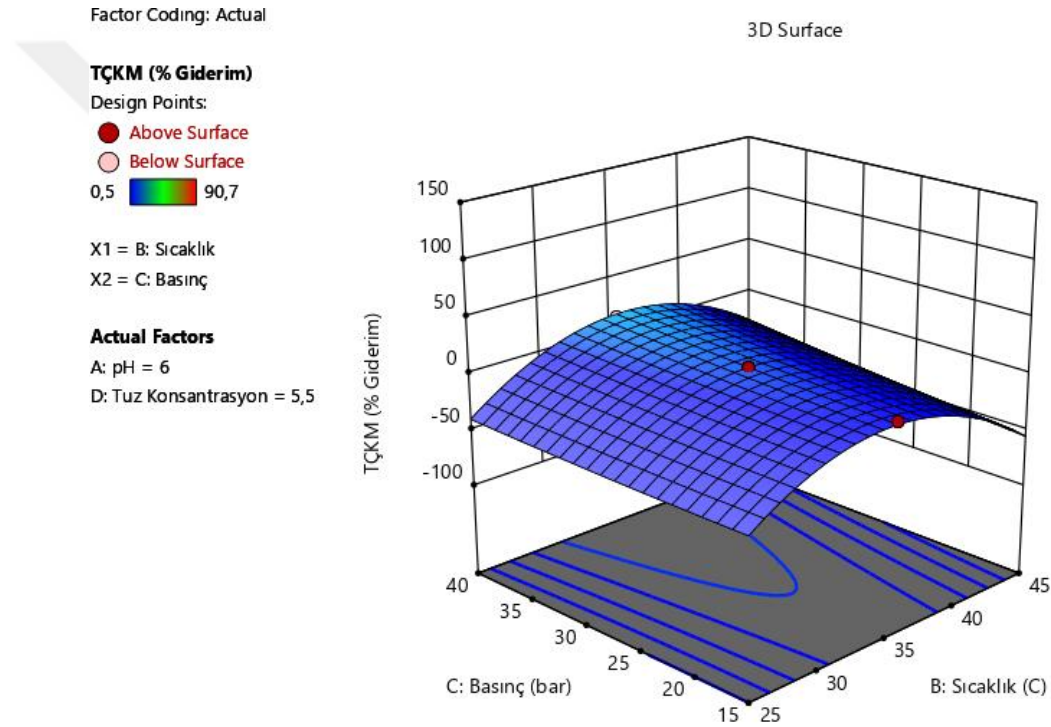
Modelin yüksek TÇKM giderim seviyelerinde daha güvenilir tahminler sunabilmesi için çeşitli iyileştirme adımları önerilmektedir. Öncelikle, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi kritik parametrelerin daha ayrıntılı incelenmesi, sistemin karmaşık dinamiklerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca, yüksek giderim koşullarında veri yoğunluğunun artırılması ve modelin bu verilerle yeniden eğitilmesi, tahmin doğruluğunu iyileştirebilir. Alternatif olarak, mevcut regresyon modeli yerine çok değişkenli regresyon, karar ağaçları veya yapay sinir ağları gibi daha sofistike modelleme tekniklerinin kullanılması düşünülebilir. Bu tür yaklaşımlar, sistemin doğrusal olmayan davranışlarını daha etkin biçimde temsil edebilir ve modelin genel performansını artırabilir.

Grafik, modelin düşük ve orta TÇKM giderim oranları için (%0–60 arası) yüksek doğrulukla tahminler sunduğunu açıkça göstermektedir. Bu aralıkta tahmin edilen değerler referans çizgisine yakın konumlanarak modelin istikrarlı bir performans sergilediğini doğrulamaktadır. Ancak, yüksek giderim seviyelerinde (%60 ve üzeri), modelin doğruluğunun belirgin biçimde azaldığı ve tahmin sapmalarının arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle %90,7 giderim oranına sahip kırmızı nokta, modelin uç koşullarda ciddi tahmin hataları yaptığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, modelin yüksek giderim seviyelerinde daha doğru ve tutarlı tahminler yapabilmesi için optimizasyon süreçlerinin yeniden ele alınması ve daha karmaşık modelleme algoritmalarının değerlendirilmesi önerilmektedir. Dolayısıyla, bu sonuçlar doğrultusunda modelin yüksek giderim seviyelerine yönelik performansının iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, modelin daha geniş ve yüksek çözünürlüklü veri setleriyle yeniden eğitilmesi, alternatif olarak ise çok değişkenli regresyon, karar ağaçları veya yapay sinir ağları gibi daha sofistike algoritmaların uygulanması önerilmektedir. Aşırı uçlardaki bu

gibi sapmaların giderilmesi, sadece modelin genel doğruluk düzeyini artırmakla kalmayacak; aynı zamanda su arıtma sistemlerinin yüksek verim koşullarında daha güvenilir şekilde optimize edilmesine de katkı sağlayacaktır.

TÇKM Gideriminin Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafikler ile İncelenmesi

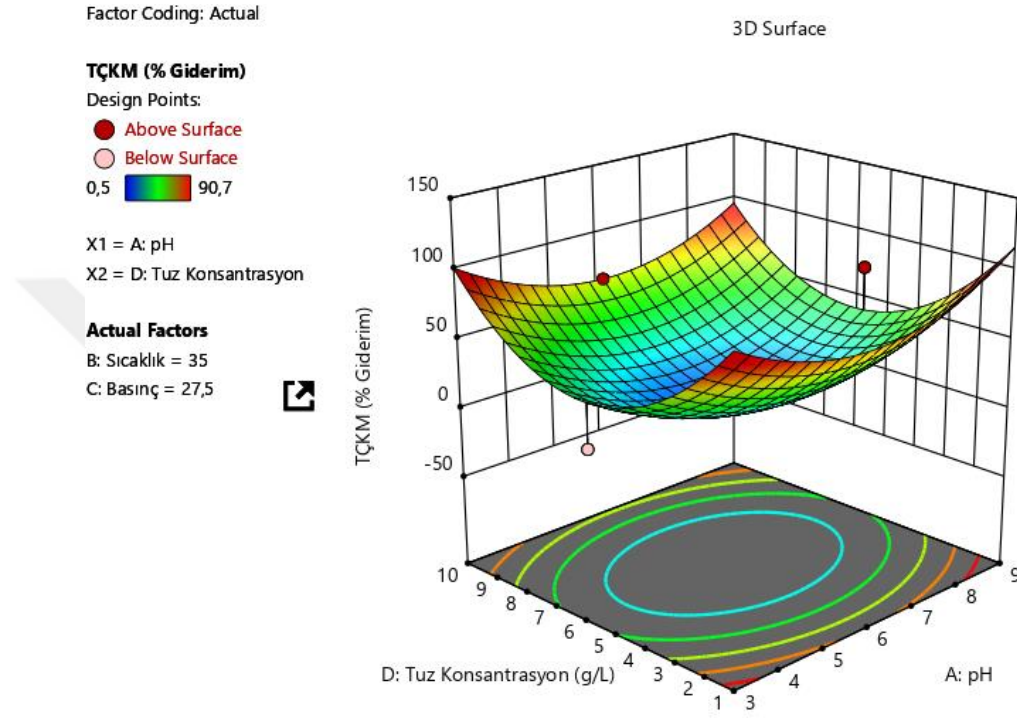
Üç boyutlu yüzey yanıt grafikler, MKT sonuçlarına dayanan TÇKM giderim oranlarının pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi faktörlerle etkileşimini görsel olarak sunmaktadır. Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.40- 4.45 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla Sıcaklık ve Basınç, pH ve Tuz Konsantrasyonu, pH ve Basınç, pH ve Sıcaklık, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu, Basınç ve Tuz konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden TÇKM giderimleri incelenmiştir.



Şekil 4.40. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.40'ta sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sıcaklık ve basınç parametrelerinin TO sisteminde TÇKM giderimi üzerindeki etkileşimlerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Grafik analizine göre, özellikle basınç değişkeni, sistemin performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Öyle ki, 40 bar seviyesindeki yüksek basınç koşullarında tuzluluk giderimi oranı anlamlı düzeyde artmakta; buna karşın, düşük basınç seviyelerinde (örneğin 10–20 bar) giderim oranları oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu durum, basıncın pozitif yönlü etkisinin sistem optimizasyonu açısından kritik olduğunu göstermektedir. Öte yandan, sıcaklık değişiminin tuzluluk giderimi üzerinde görece olarak daha sınırlı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. 25°C ile 45°C arasındaki sıcaklık aralığında yapılan

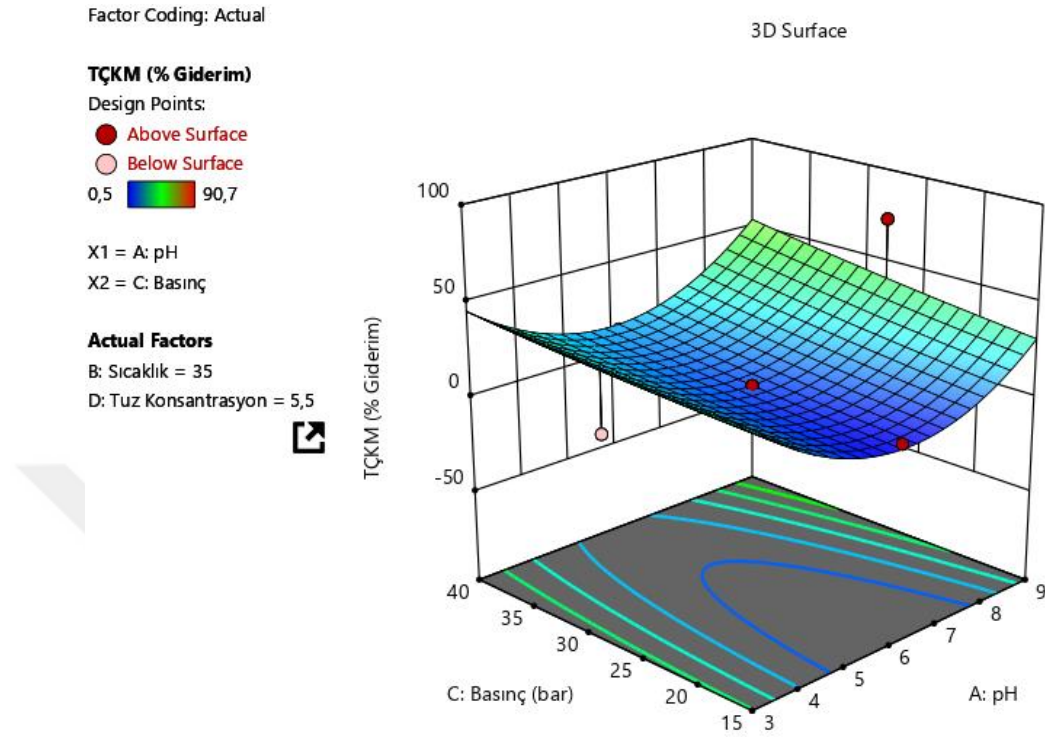
değerlendirmeler, giderim oranlarında anlamlı bir farklılık ortaya koymamaktadır. Bu bulgu, sıcaklık değişkeninin sistem performansı üzerindeki etkisinin, en azından bu aralık içinde, istatistiksel olarak sınırlı düzeyde kaldığını işaret etmektedir. Sonuç olarak, bu grafiksel analiz, basınç faktörünün TÇKM giderimi üzerindeki etkisinin baskın olduğunu, buna karşılık sıcaklık faktörünün etki düzeyinin minimal kaldığını açıkça göstermektedir. Bu nedenle, sistem tasarımı ve operasyonel optimizasyon süreçlerinde özellikle basınç parametresine öncelik verilmesi gerektiği önerilmektedir.



Şekil 4.41. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.41’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ve tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Grafik verilerine göre, tuz konsantrasyonu arttıkça (özellikle 9–10 g/L aralığında) tuzluluk giderim oranlarında belirgin bir yükseliş gözlemlenmektedir. Bu eğilim, yüksek tuz seviyelerinin sistemdeki iyonik yük yoğunluğunu artırarak membran üzerinden iyon geçişini sınırladığını ve böylece daha yüksek oranda tuzun tutulduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, pH parametresinin etkisi de dikkat çekicidir. Özellikle düşük (pH $\approx$ 3) ve yüksek (pH $\approx$ 9) uç değerlerde, tuzluluk giderim oranları artış göstermektedir. Buna karşın, orta pH seviyelerinde (pH 5–6 aralığında) giderim oranlarında bir azalma meydana gelmiş, bu da pH’ın optimumdan uzaklaştığı durumlarda iyon yükünün membran davranışını olumlu etkilediğini düşündürmektedir. Bu bulgular, her iki faktörün de (tuz konsantrasyonu ve pH) TÇKM giderimi açısından kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Grafik yüzeyi üzerinde oluşan eğilimler, bu iki değişkenin eş zamanlı olarak yüksek seviyelere ulaştığı koşullarda, giderim oranlarının maksimum değerlere eriştiğini göstermektedir. Sonuç olarak, sistemin performansını optimize etmek

amacıyla pH ve tuz konsantrasyonu parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği ve bu iki faktörün etkileşimli bir biçimde sürecin verimliliğini artırdığı söylenebilir.



Şekil 4.42. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.42’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ile basınç arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, basınç artışıyla birlikte giderim oranlarında belirgin bir yükselme eğilimi gözlenmiştir. Özellikle 40 bar seviyelerine ulaşıldığında, sistemin TÇKM giderme kapasitesinin anlamlı biçimde arttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak, pH düzeylerinin sistem performansı üzerindeki etkisi, basınçla birlikte değerlendirildiğinde daha anlamlı hâle gelmektedir. Özellikle orta düzey pH aralığı (5–6), sistemin en düşük giderim performansını gösterdiği bölge olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, pH’ın uç değerlerde seyretmesi (yaklaşık pH 3 veya pH 9 civarı) ve bu durumun yüksek basınçla (≥ 35 –40 bar) birleşmesi, TÇKM gideriminin %50’nin üzerine çıktığı optimum çalışma koşullarını tanımlamaktadır. Bu sonuçlar, pH ve basınç değişkenlerinin birbirleriyle sinerjik bir etkileşim göstererek giderim performansını belirlediğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek basınç koşullarında, pH’ın sistem davranışını modüle eden önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, membran bazlı filtrasyon sistemlerinde tuzluluk gideriminin artırılmasına yönelik optimizasyon çalışmaları kapsamında, hem pH seviyesinin uç değerlere ayarlanması hem de basıncın yüksek tutulması önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

3D Surface

TÇKM (% Giderim)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

0,5 90,7

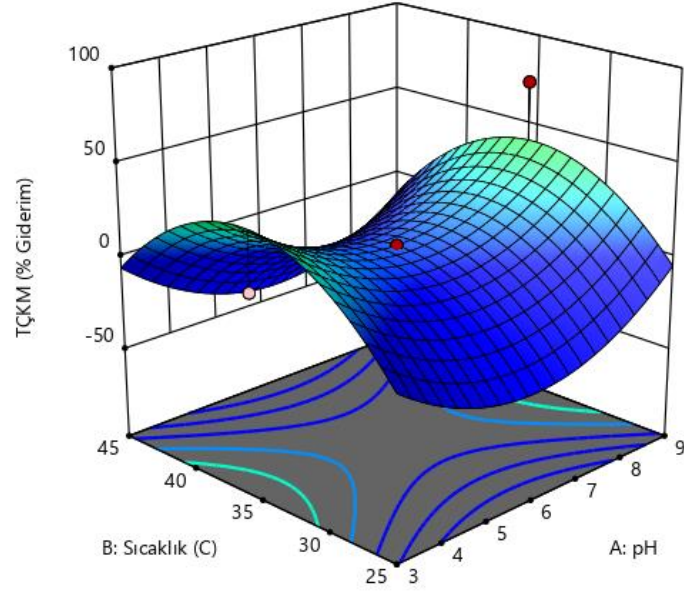
X1 = A: pH

X2 = B: Sıcaklık

Actual Factors

C: Basınç = 27,5

D: Tuz Konsantrasyon = 5,5



Şekil 4.43. TO membranlarla TÇKM gideriminde pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.43'te sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, pH ve sıcaklık etkileşimleri ele alınmıştır. TÇKM giderim oranı yüksek pH ile artmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda, özellikle 40°C'nin üzerinde, TÇKM giderimi daha verimli hale geldiği gözlenmektedir. Yanıt yüzeyi doğrusal değildir, bu da pH ve sıcaklık arasında etkileşim etkileri olduğunu göstermektedir. Şekil 4.15d'de sunulan üç boyutlu yüzey grafiği, pH ile sıcaklık arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Analiz sonuçlarına göre, Orta pH seviyelerinde (5-6 civarında) TÇKM giderimi minimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, hem düşük pH (3-4 civarı) hem de yüksek pH (9 civarı) seviyelerinde giderim oranının arttığı tespit edilmiştir. Özellikle pH'ın yüksek olduğu durumlarda daha yüksek giderim oranlarına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, sıcaklık değişimi, pH'a kıyasla daha sınırlı bir etkiye sahiptir. Giderim oranları 30°C ile 40°C arasında optimum seviyededir. Bu sonuçlar, pH'ın tuzluluk giderimi üzerindeki en önemli faktörlerden biri olduğunu, ancak sıcaklığın etkisinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, membran bazlı filtrasyon sistemlerinde TÇKM gideriminin artırılmasına yönelik optimizasyon çalışmaları kapsamında, hem pH seviyesinin uç değerlere ayarlanması önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

3D Surface

TÇKM (% Giderim)

● Design Points

0,5 90,7

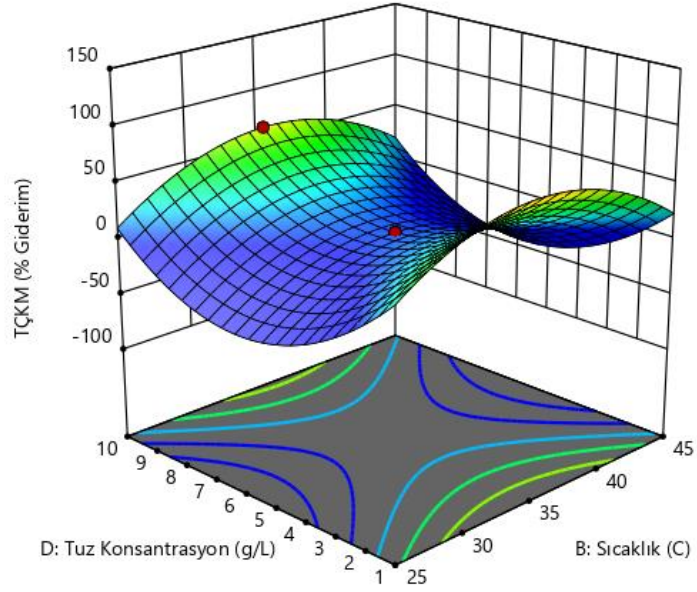
X1 = B: Sıcaklık

X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

A: pH = 6

C: Basınç = 27,5



Şekil 4.44. TO membranlarla TÇKM gideriminde Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.44'te sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, tuz konsantrasyonu ile sıcaklık arasındaki etkileşimin TÇKM giderimi üzerindeki etkilerini incelemektedir. Grafik incelendiğinde, tuz konsantrasyonu 5-7 g/L ve orta sıcaklıklarda (~35 °C) aralığına yükseldikçe giderim verimliliği optimum seviyeye ulaşmıştır. Tuz konsantrasyonunun yüksek seviyelerde bulunduğu durumlarda, Tuz konsantrasyonu yüksekken (~10 g/L) ve sıcaklık hem düşük (~25 °C) hem de yüksek (~45 °C) olduğunda en düşük TÇKM giderim oranları gözlemlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, tuz konsantrasyonu TÇKM giderimi üzerinde başat bir rol üstlenirken, sıcaklık değişiminin bu etkiye oranla daha ikincil düzeyde kaldığı sonucuna varılmaktadır.

Factor Coding: Actual

3D Surface

TÇKM (% Giderim)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

0,5 90,7

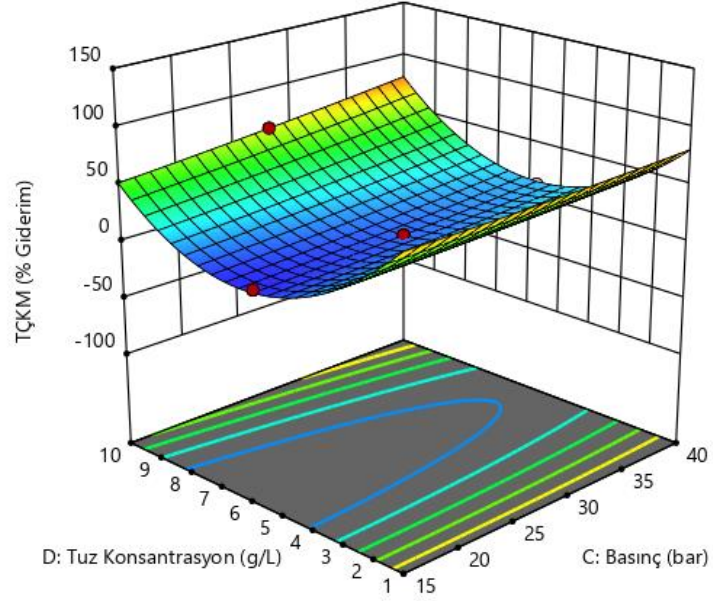
X1 = C: Basınç

X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

A: pH = 6

B: Sıcaklık = 35



Şekil 4.45. TO membranlarla TÇKM gideriminde Tuz Konsantrasyonu ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.45'te sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, basınç ve tuz konsantrasyonu değişkenlerinin TÇKM giderimi üzerindeki etkileşimsel etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Grafik verilerine göre, bu iki faktörün birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlar oldukça dikkat çekicidir. Özellikle tuz konsantrasyonunun 8–10 g/L aralığında yüksek tuz seviyelerinde basınç artışının TÇKM giderimini olumlu etkilediği gözlemlenmiştir. Basınç seviyesinin 35–40 bar arasında bulunduğu koşullarda, TÇKM giderimi en yüksek düzeyine ulaşmaktadır. Yani, yüksek basınç ile yüksek tuz konsantrasyonunun eşzamanlı olarak uygulanması, sistemin maksimum giderim performansını göstermesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sonuç olarak, basınç ve tuz konsantrasyonu faktörlerinin eş zamanlı kontrolü, optimum TÇKM giderimi elde edilmesi açısından temel belirleyiciler arasında yer almaktadır.

Üç boyutlu yüzey yanıt grafiklerine ilişkin genel değerlendirme yapıldığında, TÇKM giderimi üzerinde en belirleyici faktörün tuz konsantrasyonu olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle yüksek tuz konsantrasyonları, giderimi ciddi şekilde azaltmakta ve diğer parametrelerin etkisini sınırlandırmaktadır. Düşük tuz seviyelerinde ise sıcaklık, basınç ve pH gibi diğer parametrelerin etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle düşük pH seviyelerinde basıncın olumlu etkisi dikkat çekerken, yüksek tuz konsantrasyonu ve yüksek pH seviyeleri TÇKM giderimi üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu bulgular, optimum giderim sonuçlarına ulaşabilmek için tuz konsantrasyonu, pH, basınç ve sıcaklık arasında hassas bir denge oluşturulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, yüksek tuz konsantrasyonu gibi engelleyici faktörlerin varlığında, diğer parametrelerin

katkısı sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, optimizasyon stratejileri geliştirilirken tuz konsantrasyonu başta olmak üzere tüm faktörler dikkatle ele alınmalıdır.

4.2.3 Eİ İndirgenmesi

Çizelge 4.31’de belirtilen ANOVA tablosu, Eİ (% giderim) değerlerinin merkezi kompozit tasarımına dayalı olarak dört bağımsız değişken (pH, sıcaklık, basınç, tuz konsantrasyonu) üzerinden inceleyen Kuadratik modele dayanmaktadır. ANOVA analizi sonuçlarına göre modelin anlamlı olduğu belirlenmiştir (F-value = 5,10, p-value = 0,0017), (Fisher, 1925; Neyman ve Pearson, 1933; Lehmann ve Romano, 2005; Casella ve Berger, 2002). Bu sonuç, modelin açıklayıcı gücünün yüksek olduğunu ve rastgele gürültüden ziyade bağımsız değişkenlerin etkisinin anlamlı bir şekilde Eİ indirgenim yüzdesini etkilediğini göstermektedir.

Çizelge 4.31. Kuadratik model için ANOVA analizi (Eİ İndirgenmesi)

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F-değeri	P-değeri	
Model	21302,95	14	1521,639	5,103259	0,001675	Anlamlı
A-pH	2,42	1	2,42	0,008116	0,929408	
B-Sıcaklık	0,01	1	0,01	0,0000335	0,995456	
C-Basınç	1144,014	1	1144,014	3,836783	0,069	
D-Tuz Konsantrasyon	640,09	1	640,09	2,146728	0,16352	
AB	226,5025	1	226,5025	0,759642	0,397177	
AC	184,96	1	184,96	0,620317	0,443198	
AD	189,0625	1	189,0625	0,634076	0,438286	
BC	612,5625	1	612,5625	2,054406	0,172281	
BD	364,81	1	364,81	1,223496	0,286101	
CD	535,9225	1	535,9225	1,797372	0,199982	
A ²	1582,707	1	1582,707	5,308069	0,03595	
B ²	853,3287	1	853,3287	2,861886	0,111365	
C ²	3,440455	1	3,440455	0,011539	0,915881	
D ²	3602,77	1	3602,77	12,08294	0,003386	
Kalıntı	4472,551	15	298,1701			
Uyumsuzluk	4472,551	7	638,9359			
Saf Hata	0	8	0			
Cor Toplamı	25775,5	29				

Yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, modelin genel olarak istatistiksel açıdan anlamlı olduğu belirlenmiştir (F-değeri = 5,10; p-değeri = 0,0017). Bu bulgu, modelin açıklayıcı gücünün yüksek olduğunu ve gözlenen değişkenliğin rastlantısal hata yerine bağımsız değişkenlerin etkisiyle açıklandığını göstermektedir. Başka bir deyişle, modelde yer alan faktörlerin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesi üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır.

Özellikle P-değerleri (p-value) 0,05'in altında olan A² (pH'nin ikinci dereceden etkisi) p-değeri = 0,0359 ve D² (tuz konsantrasyonunun ikinci dereceden etkisi) p-değeri = 0,0033 modelde anlamlı terimler olarak kabul edilmektedir.

Bu durum, pH (A) ve tuz konsantrasyonu (D) faktörlerinin Eİ indirgenimi üzerindeki etkilerinin elektriksel iletkenlik indirgenmesi üzerinde doğrusal olmayan etkiler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, pH ve tuz konsantrasyonunun ikinci dereceden etkileri, elektriksel iletkenlik indirgenmesi üzerinde proses optimizasyonu açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.32'de sunulan verilere göre, modelin deneysel verideki toplam varyansın yaklaşık %82,7'ini açıkladığı belirlenmiştir ($R^2 \approx 0,827$). Bu durum, bağımsız değişkenlerin model kapsamında yalnızca sınırlı bir açıklayıcılık sağladığını, kalan %17,3'lük varyansın ise henüz açıklanamadığını (residüel varyans) ortaya koymaktadır. Düzeltilmiş $R^2 \approx 0,6645$, ise modelin değişkenlerin etkisini hesaba kattıktan sonra yaklaşık %66,45'lik bir açıklama gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Bu değerler, modelin bağımlı değişken (Eİ) üzerindeki açıklayıcılığının tatmin edici olduğunu, ancak bazı geliştirmelerle modelin daha iyi hale getirilebileceğini işaret etmektedir. Modelin değişkenlik katsayısı (CV = %46,18) incelendiğinde, bu değer %10'un üzerinde olması, sistemde orta ile yüksek düzeyde bir değişkenliğin söz konusu olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde genellikle $CV < \%10$ “çok iyi”, %10–20 arası “kabul edilebilir” ve %20 üzeri değerler “daha yüksek varyanslı” sistemler olarak değerlendirilir. Bu bağlamda, modelin varyans açısından daha tutarlı hale getirilmesi gerektiği söylenebilir.

Modelin sinyal-gürültü oranını gösteren Yeterlilik Oranı (Adeq Precision) değeri 6,476'dır ve bu değer 4'ün üzerinde olduğu için modelin sinyal-gürültü oranının yeterince güçlü olduğunu ve tasarım alanında güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.32. Uygunluk İstatistikleri (Eİ İndirgenmesi)

Std. Sapma	17,27	R²	0,827
Ortalama	37,39	Düzeltilmiş R²	0,665
C.V. %	46,18	Tahmini R²	NA
		Yeterlilik Oranı	6,477

Çizelge 4.33. Model Karşılaştırma İstatistikleri (Eİ İndirgenmesi)

PRESS	NA
-2 Log Olasılık	235,27
BIC	286,29
AICc	299,56

Çizelge 4.34'te yer alan kodlanmış faktörlere ilişkin regresyon katsayıları incelendiğinde, tüm bağımsız değişkenler sıfır değeri aldığı anda (yani modelin merkez noktasında), elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenimi yaklaşık 31,1 birim olarak öngörülmektedir. Bu sabit terime ait %95

güven aralığı -6,06 ile 18,46 birim arasında olup, modelin temel düzeydeki tahmin gücünün güvenilir bir sınırdan olmadığını göstermektedir. Ayrıca sabit katsayının standart hatası 5,75 birim olarak hesaplanmıştır; bu da modelin temel tahmininde hata payının düşük ve istatistiksel olarak anlamlı olduğunu işaret etmektedir.

Modelde anlamlı bulunan (Çizelge 4.35) (A^2) pH^2 etkileşim terimi incelendiğinde, bu faktör 1 birim artırıldığında, Eİ indirgeniminde yaklaşık 31,1 birimlik bir artış meydana gelmektedir. Bu değişken için %95 güven aralığı tamamen pozitif değerlerden oluşmakta olup, söz konusu etkileşimin indirgeme üzerinde istatistiksel olarak anlamlı ve pozitif bir etki yarattığını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, Varyans Enflasyon Faktörü (VIF) değeri bu değişken için 4,4 olarak bulunmuştur. Bu, modelde herhangi bir çoklu doğrusal bağlantı (multicollinearity) problemi bulunmadığını ve regresyon katsayılarının güvenilir şekilde tahmin edildiğini göstermektedir. VIF değerinin bu denli düşük olması, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle yüksek derecede ilişkisiz olduğunu ve modelin istatistiksel sağlamlık açısından yeterli düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, sabit katsayı modelin genel düzeyde sağlam bir temel öngörü sunduğunu, (A^2) etkileşimi ise pozitif yönlü etkisiyle modelin duyarlılığını artırdığını göstermektedir. Bu tür parametrik değerlendirmeler, modelin hem anlamlı hem de yorumlanabilir yönlerini ortaya koymada önemli bir araçtır.

Çizelge 4.34. Kodlanmış Faktörler Açısından Son Eşitlik (Eİ İndirgenmesi)

E.İletkenlik	=
6,2	
0,366666667	A
-0,025	B
7,972222222	C
-6,325	D
-3,7625	AB
3,4	AC
-3,4375	AD
6,1875	BC
4,775	BD
5,7875	CD
31,1	A^2
-46,825	B^2
1,45	C^2
65,025	D^2

Bu denklem, Eİ indirgenmesi (% giderim) üzerindeki pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonunun etkilerini ve bunların ikili etkileşimlerini göstermektedir. Anlamlı olan A^2 (pH 'nin ikinci derece etkisi) ve D^2 (tuz konsantrasyonunun ikinci derece etkisi) terimleri, doğrusal

olmayan etkileri vurgulamaktadır. Yani, Eİ indirgenmesinde pH ve tuz konsantrasyonunun ikinci dereceden etkileri önemli bir rol oynamaktadır.

Çizelge 4.35. Kodlanmış Faktörler Bakımından Katsayılar (Eİ İndirgenmesi)

Faktör	Katsayı	df	Standard	95% CI	95% CI2	VIF
Kesişim	6,2	1	5,755867	-6,06834	18,46834	
A-pH	0,3666667	1	4,070013	-8,30836	9,041694	1
B-Sıcaklık	-0,025	1	4,316901	-9,22626	9,176256	1
C-Basınç	7,9722222	1	4,070013	-0,7028	16,64725	1
D-Tuz Konsantrasyonu	-6,325	1	4,316901	-15,5263	2,876256	1,060417
AB	-3,7625	1	4,316901	-12,9638	5,438756	1
AC	3,4	1	4,316901	-5,80126	12,60126	1
AD	-3,4375	1	4,316901	-12,6388	5,763756	1
BC	6,1875	1	4,316901	-3,01376	15,38876	1
BD	4,775	1	4,316901	-4,42626	13,97626	1
CD	5,7875	1	4,316901	-3,41376	14,98876	1
A ²	31,1	1	13,49871	2,328191	59,87181	4,4
B ²	-46,825	1	27,67908	-105,822	12,17156	19,18519
C ²	1,45	1	13,49871	-27,3218	30,22181	4,4
D ²	65,025	1	18,70657	25,15289	104,8971	8,645602

Çizelge 4.36’te sunulan model eşitliği, kodlanmış faktörler temelinde incelendiğinde, A² ve D² etkileşim terimi—yani pH (A) ile tuz konsantrasyonu (D) etkilerinin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenimi için önemli olduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu iki değişkenin etkileşiminin, sistem performansı üzerinde negatif yönde güçlü etkili etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer bir ifadeyle, pH ve tuz konsantrasyonu arttıkça, Eİ indirgenimi düşmekte; bu da Eİ indirgenimi arasında ters yönlü (negatif) bir ilişki bulunduğunu göstermektedir.

Bu bulgu, sistemin özellikle bu iki parametrenin eş zamanlı yükseltilmesi durumunda, çözünmüş iyonların uzaklaştırılmasında zayıf performans sergileyebileceğini ve proses optimizasyonunda pH ve tuz konsantrasyonu etkileşiminin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

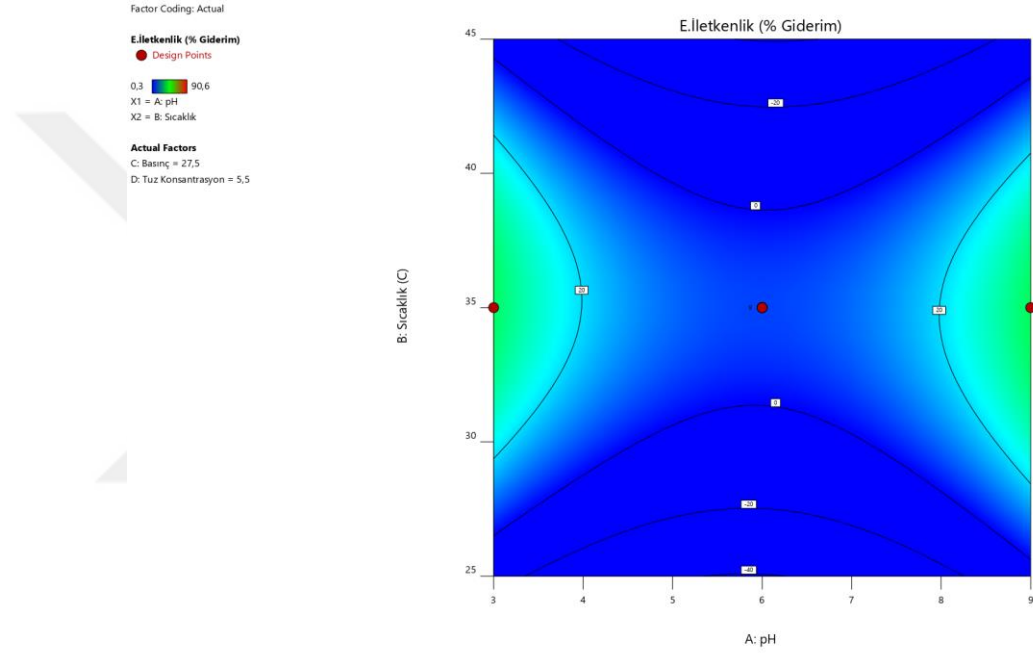
Çizelge 4.36. Gerçek Faktörler Açısından Nihai Denklem (Eİ İndirgenmesi)

E.İletkenlik	=
-285,4545	
-38,04773	pH
31,58264	Sıcaklık
-2,71501	Basınç
-41,74333	Tuz Konsantrasyon
-0,125417	pH * Sıcaklık
0,090667	pH * Basınç
-0,25463	pH * Tuz Konsantrasyon
0,0495	Sıcaklık * Basınç
0,106111	Sıcaklık * Tuz Konsantrasyon
0,102889	Basınç * Tuz Konsantrasyon
3,45556	pH ²
-0,46825	Sıcaklık ²
0,00928	Basınç ²
3,21111	Tuz Konsantrasyon ²

Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Qadir ve ark. (2020), Zeta Potansiyeli membran yüzey yükü, tuz giderim mekanizmasını doğrudan etkilemiştir. ESC1 membranı -13,8 mV yüzey yükü ile en yüksek negatif potansiyele sahip olmuştur. Yüksek yüzey yükü, iyonların elektrostatik itilmesini artırarak tuz giderimini iyileştirmiştir. Qadir ve ark. (2023), Elektriksel iletkenliğin çözeltideki iyon miktarıyla doğru orantılı olduğunu bildirmişlerdir. ESC1 membranının yüksek tuz giderimi (%80 CaCl₂), permeatın düşük iyon içeriği ve dolayısıyla düşük elektriksel iletkenlik sağladığını göstermiştir. Saf polimerik ES membranı, daha düşük tuz giderimi (%40 NaCl) nedeniyle daha yüksek iletkenlik değerleri ürettiğini ifade etmişlerdir. ESC1 membranının -6.04 mol/m³ efektif yük yoğunluğu, iyonların elektrostatik itilmesini artırarak elektriksel iletkenliği düşürdüğünü. Düşük gözenek yarıçapı (0.5 nm) ise sterik engelleme ile katkı sağladığını rapor etmişlerdir. Bargeman G. (2023), Elektriksel iletkenliğin, çözeltideki iyon miktarıyla doğru orantılı olduğunu, düşük tuz giderimli TO membranlarının düşük gideriminin, permeatta daha yüksek NaCl konsantrasyonu bırakarak daha yüksek Eİ değerlerine yol açtığını bildirmiştir. Xu ve ark. (2023), pH ve tuz konsantrasyonundaki artışın, poliamid katmanının kimyasal yapısını (çapraz bağlanma derecesi, yüzey yükü) ve morfolojisini (gözenek boyutu, yüzey pürüzlülüğü) değiştirerek tuz geçirgenliğini artırdığını ve dolayısıyla Eİ indirgenimini düşürdüğünü desteklemektedir. Proses optimizasyonu için bu parametrelerin kontrollü yönetimi kritik öneme sahiptir. Bu modelin doğruluğu göz önüne alındığında, düşük ve orta seviyelerdeki Eİ indirgenmesi için tatmin edici sonuçlar sunmaktadır. Ancak, modelin özellikle yüksek giderim seviyelerinde iyileştirilmesi ve doğruluğunun artırılması için ek veri ile yeniden eğitilmesi veya daha karmaşık modellerin kullanılması önerilmektedir. pH ve tuz konsantrasyonunun doğrusal olmayan etkileri göz önüne alınarak, bu iki faktör üzerinde daha detaylı çalışmalar yapılabilir.

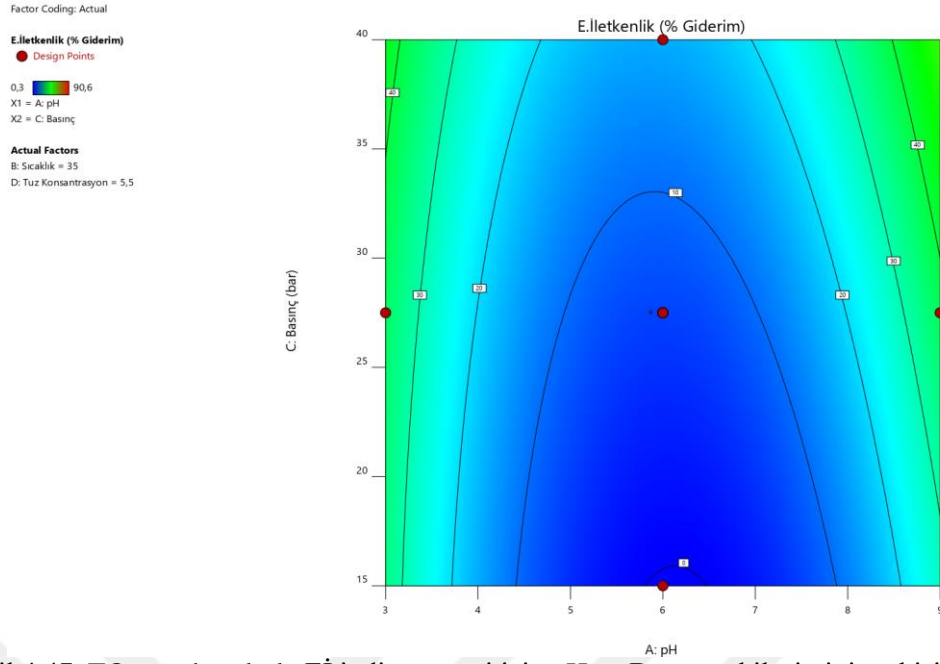
Eİ İndirgenmesinin Renkli İzohips Grafikler ile İncelenmesi

Bu renkli izohips grafikler, Eİ indirgenmesi üzerindeki çeşitli faktörlerin (Basınç ve tuz konsantrasyonu) etkisini incelemektedir. Grafik, iki değişkenin etkileşimlerini inceleyerek, diğer değişkenler sabit tutulduğunda Eİ indirgenmesinin nasıl değiştiğini görsel olarak göstermektedir. Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.46- 4.51 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla pH ve Sıcaklık, pH ve Basınç, pH ve Tuz Konsantrasyonu, Sıcaklık ve Basınç, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu, Basınç ve Tuz konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden Eİ indirgenmesi incelenmiştir.



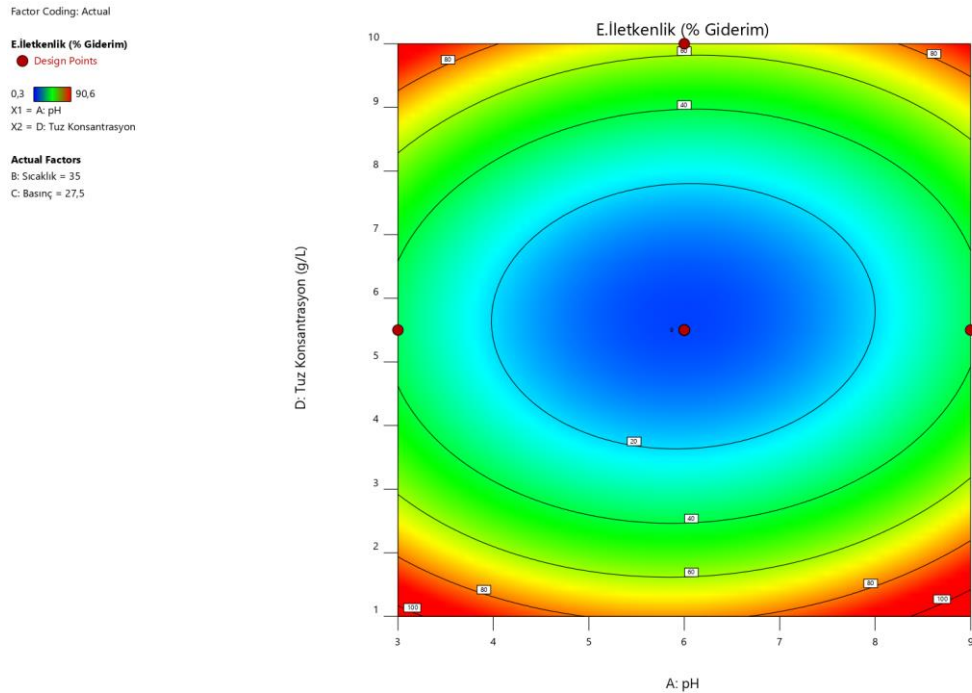
Şekil 4.46. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.46’da sunulan renkli izohips grafik, sabit besleme basıncı değeri (27.5 bar) ve sabit tuz konsantrasyonu (5.5 g/L) koşulları altında, pH ile sıcaklık arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesine etkisini göstermektedir. Grafikte, pH eksenini incelendiğinde, yaklaşık pH 6 civarında minimum giderim (% -40 - 0) değerleri gözlemlenmiştir. Buna karşın, hem düşük (yaklaşık pH 3) hem de yüksek (yaklaşık pH 9) pH seviyelerinde giderim oranlarında belirgin bir artış meydana gelmekte; bu aralıkta %20 ye varan Eİ giderimi değerleri elde edilmektedir. En yüksek iletkenlik gideriminin hem düşük (yaklaşık pH 3) hem de yüksek (yaklaşık pH 9) pH ve orta sıcaklık (yaklaşık 35°C) civarında ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu, sistemin alt veya üst pH ve orta sıcaklıkta optimum çalıştığını göstermektedir. Buna karşılık, pH ve sıcaklık değerleri orta kısımlara kaydıkcça iletkenlik giderimi düşmektedir. En yüksek indirgenim oranı için pH ≈ 3;9 ve Sıcaklık ≈ 35°C civarına karşılık gelen bölgede elde edilmiştir.



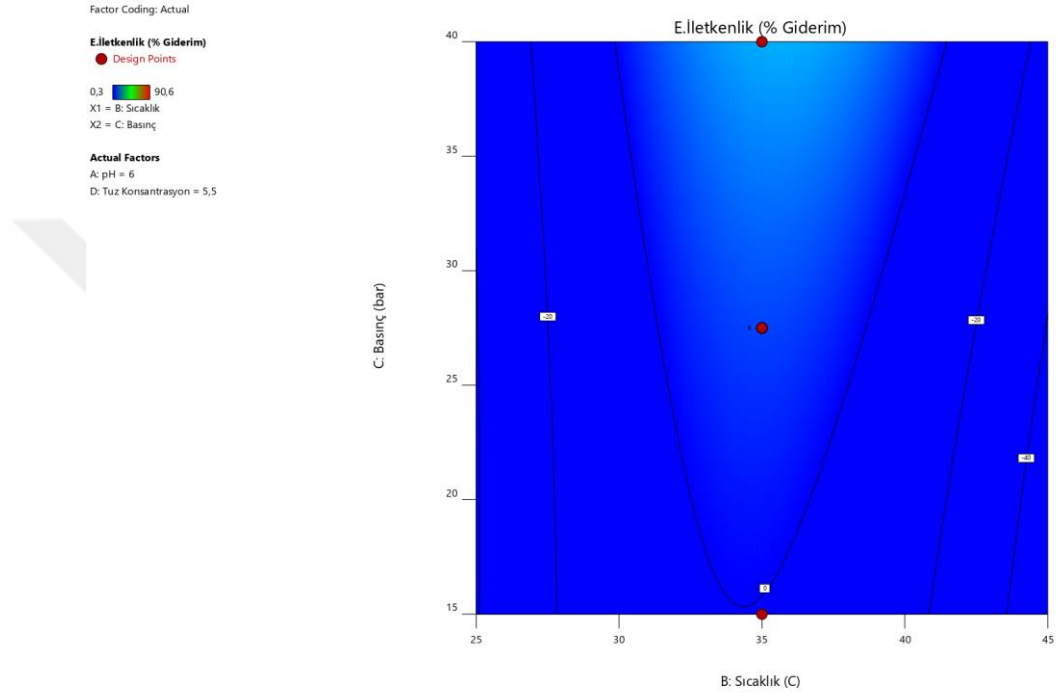
Şekil 4.47. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.47’de sunulan renkli izohips grafik, sabit sıcaklık değeri (35°C) ve sabit tuz konsantrasyonu (5.5 g/L) koşulları altında, pH ile besleme basıncı arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesine etkisini göstermektedir. Grafikte, en düşük giderim pH orta değerlerde (5-7) ve basınç düşük seviyelerde (15-20 bar) meydana gelmiştir. En yüksek giderim ise, yüksek basınç (40 bar civarı) pH = 3 veya pH = 9 civarına karşılık gelen bölgede elde edilmiştir.



Şekil 4.48. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.48’de sunulan renkli izohips grafik, sabit sıcaklık değeri (35°C) ve sabit besleme basıncı (27.5 bar) koşulları altında, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesine etkisini göstermektedir. Grafikte, en düşük giderim orta seviyelerde ($\text{pH} \approx 6$ ve Tuz ≈ 5.5 g/L) meydana gelmiştir. En yüksek giderim ise (%90.6), $\text{pH} = 3$ veya 9 ve Tuz Konsantrasyonu = 1 veya 10 g/L civarında ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu, sistemin uç koşullarda daha verimli olduğunu göstermektedir. Tuz konsantrasyonu ve pH’nin etkisi özellikle yüksek seviyelerde güçlü bir sinerji yaratmaktadır.



Şekil 4.49. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.49’da sunulan renkli izohips grafik, sabit pH değeri (6) ve sabit tuz konsantrasyonu (5.5 g/L) koşulları altında, sıcaklık ile besleme basıncı arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesine etkisini göstermektedir. Grafikte, basınç arttıkça (40 bar’a kadar) giderimin pozitif bir şekilde arttığı ancak düşük sıcaklık seviyelerinde (25-30°C aralığında) giderimin düşük (20 ile 30 arası) olduğu gözlemlenmektedir. Sıcaklık ve basıncın ortak etkisiyle optimum indirgenme değerlerinin daha yüksek basınç (≈ 40 bar) ve 35°C sıcaklık seviyelerinde olduğu görülmektedir.

Factor Coding: Actual

E.iletkenlik (% Giderim)

● Design Points

0,3 90,6

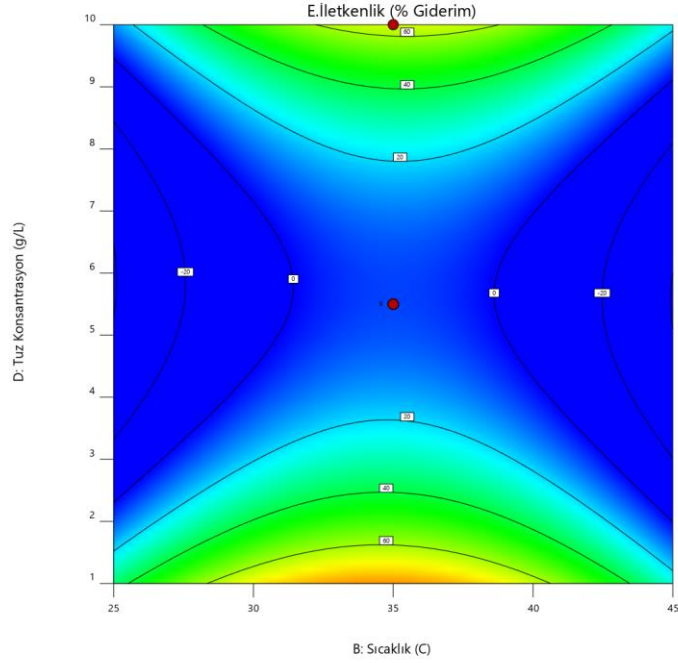
X1 = B: Sıcaklık

X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

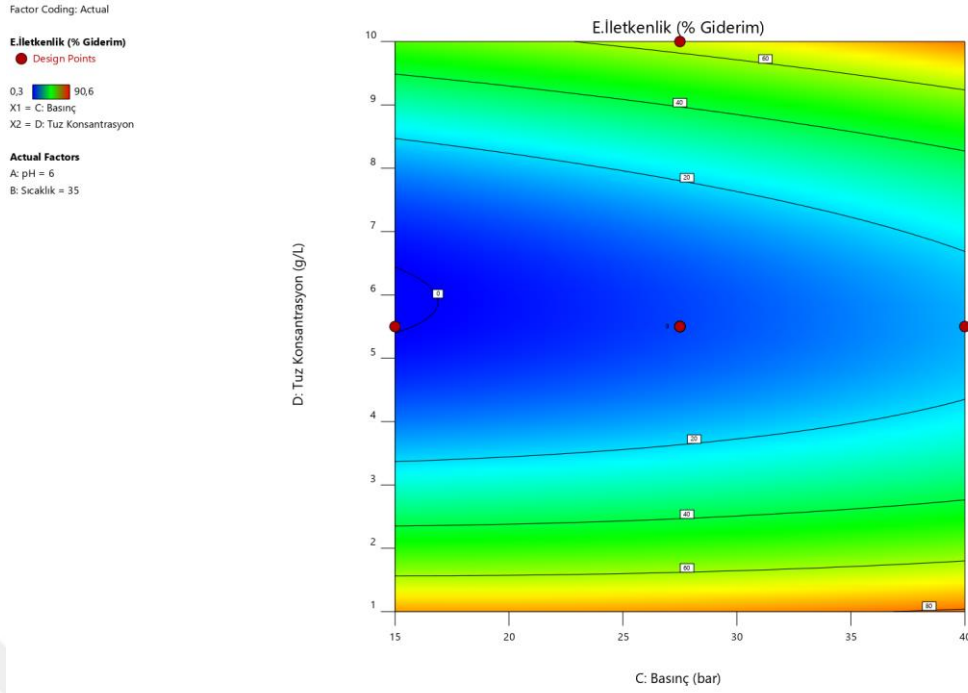
A: pH = 6

C: Basınç = 27,5



Şekil 4.50. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Tuz Konsantrasyonu ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.50’de sunulan renkli izohips grafik, sabit pH değeri (6) ve sabit besleme basıncı (27.5 bar) koşulları altında, sıcaklık ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesine etkisini göstermektedir. Grafikte, düşük sıcaklık ve tuz konsantrasyonu seviyelerinde (1-2 g/L) giderimin düşük kaldığı (20 ile 30 arası) ancak sıcaklık arttıkça ve tuz konsantrasyonu yükseldikçe indirgenme oranlarının yükseldiği görülmektedir. En yüksek giderim, 1 ve 10 g/L tuz konsantrasyonu, 30-35°C civarı sıcaklık değerinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu, sistemin orta sıcaklık ve uç tuz konsantrasyonu koşullarında daha verimli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.51. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Renkli İzohips grafiği

Şekil 4.51’de sunulan renkli izohips grafik, sabit pH değeri (6) ve sabit sıcaklık (35 °C) koşulları altında, basınç ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenim yüzdesine etkisini göstermektedir. Grafikte, iletkenlik gideriminin orta basınç değerlerinde (~25-30 bar) ve orta tuz konsantrasyonlarında (~5-6 g/L) minimum seviyelerde olduğunu (mavi alan) göstermektedir. Basınç arttıkça giderimde belirgin bir artış veya azalış eğilimi gözlenmemiştir. En düşük giderim oranları orta bölgede (~5-7 g/L tuz, ~25-30 bar), En yüksek giderim oranları ise kenarlara yakın bölgelerde (1 g/L veya 10 g/L tuz, 15 bar veya 40 bar basınç) olarak giderim değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu bağlamda, Basınç ve tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşim sınırlı görünse de tuz konsantrasyonundaki uç değerler (düşük veya yüksek) daha yüksek giderim sağlamaktadır. Basıncın etkisinin ise daha sınırlı olduğu görülmektedir.

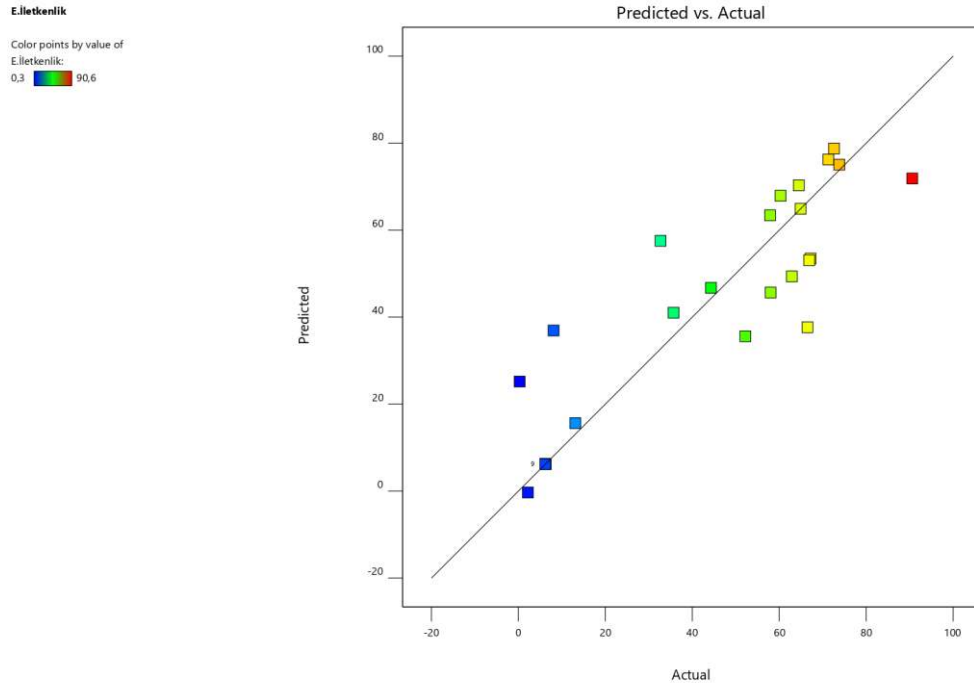
Bu analiz sonuçları, pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi faktörlerin Eİ indirgenmesi üzerindeki karmaşık etkilerini ortaya koymaktadır. Çalışma, tek bir "global optimum" noktadan ziyade, parametre uzayında birden fazla yüksek verimli bölgenin (özellikle parametrelerin ekstrem değerlerinde) varlığını ortaya koymaktadır. Özellikle pH ile tuz konsantrasyonu ve pH ile basınç arasındaki etkileşimlerin gücü, sistemin davranışını şekillendirmede bireysel parametre etkilerinden daha belirleyici olabilmektedir (Çizelge 4.37).

Çizelge 4.37. Optimum Eİ İndirgenme Koşulları

Faktör	Optimum Değer Aralığı	Etkileşim Bağlamı
pH (A)	3–4 veya 8–9	Yalnızca yüksek basınç (≈ 40 bar) veya uç tuz konsantrasyonu (1 g/L veya 10 g/L) ile kombinasyon halinde etkilidir. Tek başına uç pH değerleri performansı düşürür.
Basınç (C)	≈ 40 bar	Her durumda pozitif etki
Sıcaklık (B)	$\approx 35^\circ\text{C}$	Diğer faktörlere kıyasla sınırlı etki, ancak $25\text{--}30^\circ\text{C}$ arasında belirgin düşüş gözlenir. Yüksek sıcaklık ($>40^\circ\text{C}$) verimi azaltır.
Tuz Konsantrasyonu (D)	1 g/L veya 8–10 g/L	Uç değerlerde yüksek verim, ancak pH veya basınçla güçlü etkileşim şart; Orta değerlerde (5–7 g/L) minimum verim gözlenir.

Eİ İndirgenmesi için Deneysel ve Tahmin Değerlerinin Karşılaştırılması

Eİ İndirgenmesi amacıyla elde edilen deneysel ve tahmin değerleri Şekil 4.52’de sunulmuştur. "Tahmin ve Gerçek" grafiği, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek gözlemler arasındaki ilişkiyi incelenmektedir.



Şekil 4.52. Eİ İndirgenmesi tahmin edilen ve deneysel giderim değerlerinin karşılaştırılması

Gerçek ve tahmin edilen iletkenlik değerlerinin karşılaştırıldığı grafik, verilerin büyük bölümünün referans çizgisine yakın dağılım sergilediğini göstermektedir. Bu durum, modelin genel

doğruluk açısından kabul edilebilir performans sergilediğine işaret etmektedir. Ancak özellikle düşük iletkenlik seviyelerinde (0-20 birim) belirgin sapmalar gözlemlenmekte olup, bu durum modelin bu aralıkta sistematığe yakın hatalar ürettiğini ortaya koymaktadır.

Grafikteki renk dağılımı, tahmin doğruluğuna dair önemli ipuçları sunmaktadır. Mavi tonlar, %0,2 düzeyindeki düşük Eİ giderimi oranlarını temsil ederken; yeşil ve sarı tonlar, %20 ila %60 aralığında orta düzeyde giderim performansını göstermektedir. Kırmızı tonlar ise %90 üzeri yüksek giderim değerlerine işaret etmektedir. Düşük giderim oranlarını temsil eden mavi ve açık mavi tonların, tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerin sürekli altında kaldığı dikkat çekmektedir (örneğin tahmin: ~10 birim, gerçek: ~20 birim). Modelin bu bölgede performansı belirgin şekilde zayıftır. Orta düzeydeki giderim oranlarını (özellikle %20–60) temsil eden yeşil ve sarı noktaların da referans çizgisine yakın konumlandığı gözlemlenmiş; Tahmin ile gerçek değerler arasında ortalama 10 birim sapma gözlenmekte olup, performans kısmen tatmin edicidir. Sarı/Turuncu tonlar, (%50-70) yüksek iletkenlik bölgesine karşılık gelmektedir. Referans çizgisine yakın konumlanan bu noktalar (5-10 birim sapma), modelin bu seviyelerde dengeli performans sergilediğini göstermektedir. Kırmızı tonlar, (%90.6) En yüksek iletkenlik değerini temsil etmektedir. Minimal sapma (1-3 birim) ile modelin bu ekstrem noktada yüksek doğruluk sağladığı görülmektedir.

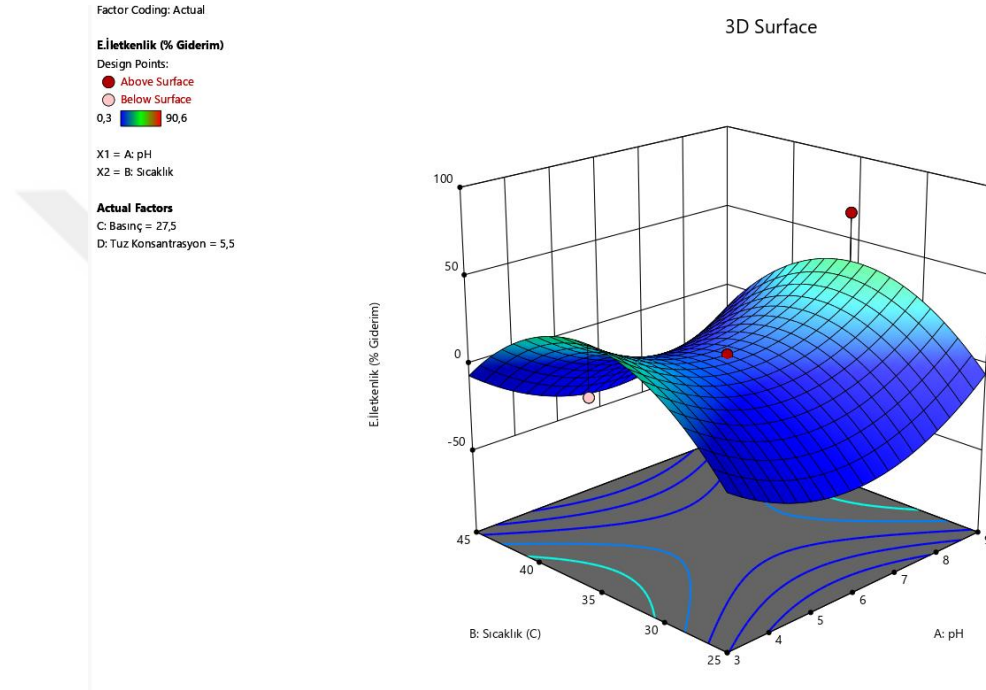
Modelin performansı iletkenlik seviyelerine göre belirgin farklılıklar göstermektedir: Düşük seviyelerde (0-20 birim): Tahminler gerçek değerlerin sistematik olarak altında kalmakta ve performans kritik düzeyde zayıflamaktadır. Orta seviyelerde (30-50 birim): Sapmalar (~10 birim) kabul edilebilir düzeyde olmakla birlikte iyileştirme potansiyeli barındırmaktadır. Yüksek seviyelerde (50-90.6 birim): Referans çizgisine yakın dağılım (≤ 10 birim sapma) ve özellikle 90.6 birimdeki minimal hata, modelin bu bölgede güvenilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Referans çizgisinden uzaklaşan mavi noktalar, düşük iletkenlik bölgesinde yüksek hata paylarına işaret etmektedir. Kırmızı ve sarı tonlardaki yoğunlaşma ise yüksek değerlerde modelin güvenilirliğini desteklemektedir. Bu ikili davranış, sistemin farklı iletkenlik seviyelerinde farklı dinamikler sergilediğine dair ipucu vermektedir.

0-20 birim aralığındaki sistematik hatanın kaynağının araştırılması (veri kalitesi, ölçüm hassasiyeti veya model yapısı) ve düşük iletkenlik optimizasyonu sağlanmalıdır. Model, 50 birim üzerindeki yüksek iletkenlik değerlerinde yüksek doğruluk (%90.6'daki ≤ 3.3 hata) sergilemektedir. Ancak 0-20 birim aralığındaki tutarlı düşük tahmin eğilimi (gerçek değerlerin ortalama %50 üzerinde), modelin bu bölgede kullanımını kısıtlamaktadır. Bu polarize performans, sistemin düşük ve yüksek iletkenlik koşullarında farklı fizikokimyasal davranışlar sergilediğini düşündürmektedir. Önerilen iyileştirmelerle özellikle düşük değerlerdeki sapmaların azaltılması, modelin endüstriyel uygulanabilirliğini artıracaktır.

Eİ İndirgenmesinin Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafikler ile İncelenmesi

Bu MKT sonuçlarına dayalı olarak Eİ için üretilen üç boyutlu yüzey yanıt grafikler, süreçlerin çeşitli değişkenler arasındaki etkileşimini görselleştirir. Her grafik, belirli bir kombinasyonda değişkenlerin (pH, sıcaklık, basınç, tuz konsantrasyonu) elektriksel iletkenliğe olan etkisini gösterir. Bu çerçevede, elde edilen sonuçların ayrıntılı olarak ele alındığı incelemeler şekil 4.53- 4.58 ile aşağıda sunulmuştur. Şekillerde sırasıyla pH ve Sıcaklık, pH ve Basınç, pH ve Tuz Konsantrasyonu, Sıcaklık ve Basınç, Basınç ve Tuz konsantrasyonu, Sıcaklık ve Tuz Konsantrasyonu etkileşimleri üzerinden Eİ indirgenmesi incelenmiştir.



Şekil 4.53. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Sıcaklık ve pH etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.53'te sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sabit besleme basıncı ve tuz konsantrasyonu koşullarında, pH ile sıcaklık arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik analizine göre, pH 3 veya 9 aralığında ve sıcaklık ~30-40°C civarındayken, iletkenlik giderim oranı maksimum değerlere ulaşmaktadır (grafikte yeşil-mavi tonlu yükselti). pH düşük (4-8 arası) ve sıcaklık yüksek (25 veya 45°C) olduğunda giderim oranı negatif değerlere iniyor, bu da sistemin bu koşullarda verimsiz olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, üst düzey sıcaklık ve düşük pH kombinasyonlarından kaçınılması önerilmekte; bunun yerine, pH konsantrasyonu pH ≈3 veya 9, orta sıcaklık düzeyi (35°C civarı) bir araya getirilerek sistem verimliliği artırılması önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

E.İletkenlik (% Giderim)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

0,3 90,6

X1 = A: pH

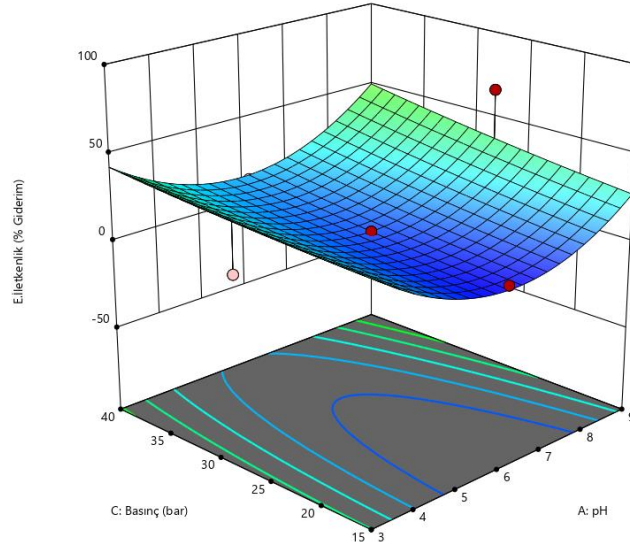
X2 = C: Basınç

Actual Factors

B: Sıcaklık = 35

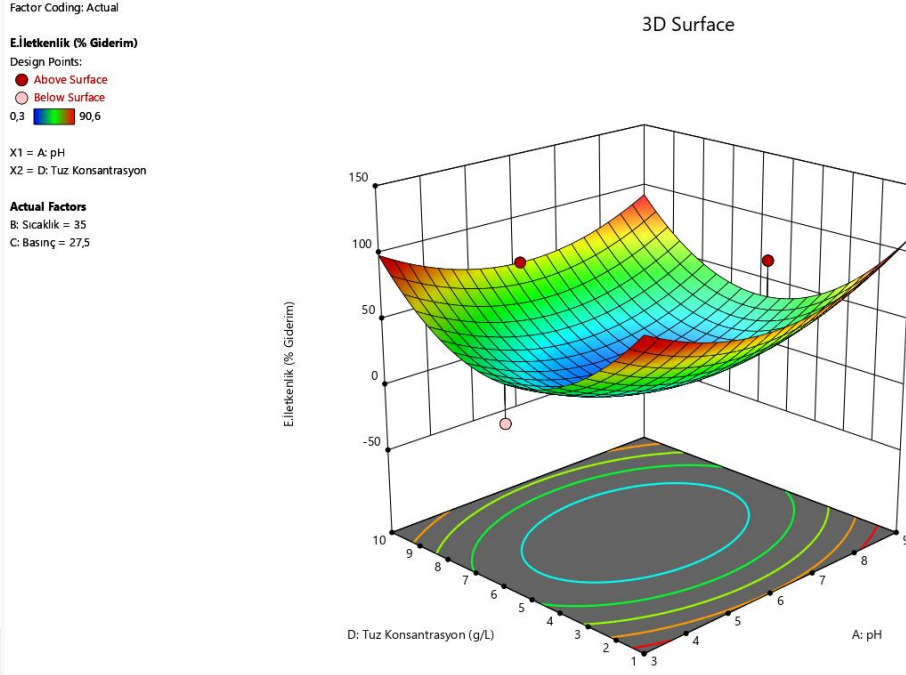
D: Tuz Konsantrasyon = 5,5

3D Surface



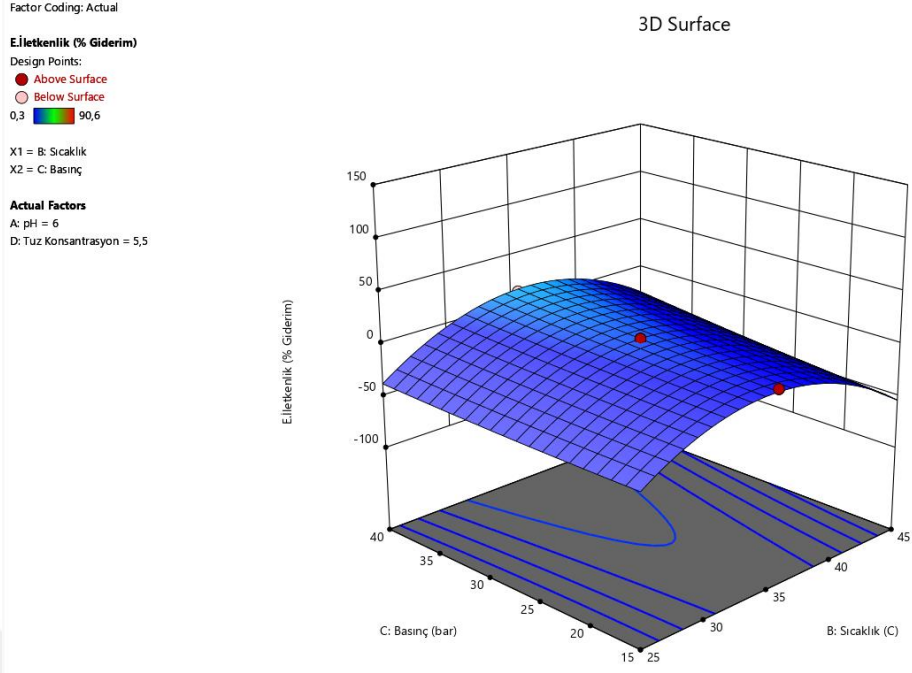
Şekil 4.54. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Basınç etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.54'te sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sabit besleme sıcaklığı (35°C) ve tuz konsantrasyonu (5.5 g/L) koşullarında, pH ile basınç arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) indirgenimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik analizine göre, pH değerinin düşük (pH ≈ 3) veya yüksek olduğu (pH ≈ 9) durumlarda, basınç değişimine bağlı olarak iletkenlik değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Özellikle düşük basınç seviyelerinde bile yüksek pH ile Eİ değerlerinin nispeten sabit kaldığı görülmektedir. Buna karşılık, yüksek basınç (≥ 40 bar) ve pH (pH ≈ 3 veya 9) kombinasyonlarında Eİ indirgenmesinde optimum verim gözlenmiştir (grafikte mavi tonlu alanlar). Bu bağlamda, düşük basınç (<40 bar) ve orta pH ($\approx 4-8$) koşullarından kaçınılması; bunun yerine (pH ≈ 3 veya 9) aralığında ve yüksek basınç (≥ 40 bar) bir araya getirilerek sistem verimliliğinin artırılması önerilmektedir.



Şekil 4.55. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için pH ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.55'te sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sabit sıcaklık (35 °C) ve basınç (27,5 bar) koşullarında, pH ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) giderimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik analizine göre, düşük pH değerleri ($\text{pH} \approx 4$) veya yüksek pH değerleri ($\text{pH} \approx 8$) ve düşük tuz konsantrasyonu seviyelerinde (1-3 g/L) veya yüksek tuz konsantrasyonu seviyelerinde (9-10 g/L), Eİ giderim oranı maksimum değerlere ulaşmaktadır (grafikte yeşil-mavi tonlu yükselti). Buna karşılık, orta pH seviyeleri ($\text{pH} \approx 3-5$) ve orta tuz konsantrasyonları (5-6 g/L) birlikte olduğunda, Eİ giderim oranlarında belirgin bir düşüş gözlemlenmektedir; hatta bu koşullarda negatif giderim değerleri ortaya çıkmaktadır (grafikte kırmızı-sarı tonlar). Özellikle pH'nın düşük olduğu durumlarda, tuz konsantrasyonundaki artış, iletkenlik giderimini ciddi şekilde azaltmaktadır. Bu bağlamda, orta pH ve orta tuz konsantrasyonu kombinasyonlarından kaçınılması; bunun yerine, $\text{pH} \approx 3-4$ veya 8-9 aralığı ile düşük veya yüksek tuz konsantrasyonu düzeylerinin (1-3 veya 8-9 g/L) tercih edilerek sistem verimliliğinin artırılması önerilmektedir.



Şekil 4.56. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.56’da sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sabit pH (6) ve tuz konsantrasyonu (5,5 g/L) koşullarında, sıcaklık ile basınç arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) giderimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik analizine göre, basınç arttıkça ve sıcaklık orta düzeylerde (30-35°C) seyrettiğinde, Eİ giderim oranında kısmi bir artış gözlemlenmektedir (grafikte açık mavi tonlar). Ancak genel olarak değerlendirildiğinde, grafik yüzeyinin büyük bölümünün negatif giderim değerlerine işaret etmesi, sistemin bu değişken kombinasyonlarında düşük performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle düşük basınç (15-25 bar) ve yüksek sıcaklık (40-45°C) kombinasyonlarında, Eİ giderimi negatif değerlere düşmekte ve sistem verimsiz hale gelmektedir. Bu bağlamda, yüksek sıcaklık ve düşük basınç birlikteliklerinden kaçınılması; bunun yerine, orta düzey sıcaklık (30-35°C) ve yüksek basınç (35-40 bar) aralığında çalışılması, sistem verimliliğini artırmak açısından önerilmektedir.

Factor Coding: Actual

E.İletkenlik (% Giderim)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

0,3 90,6

X1 = C: Basınç

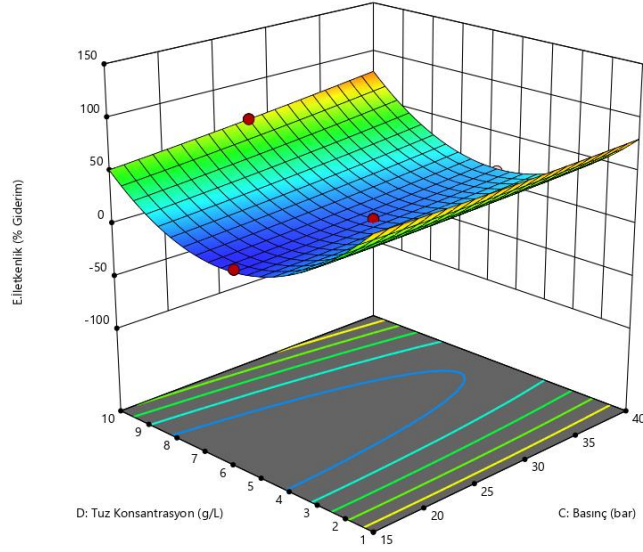
X2 = D: Tuz Konsantrasyon

Actual Factors

A: pH = 6

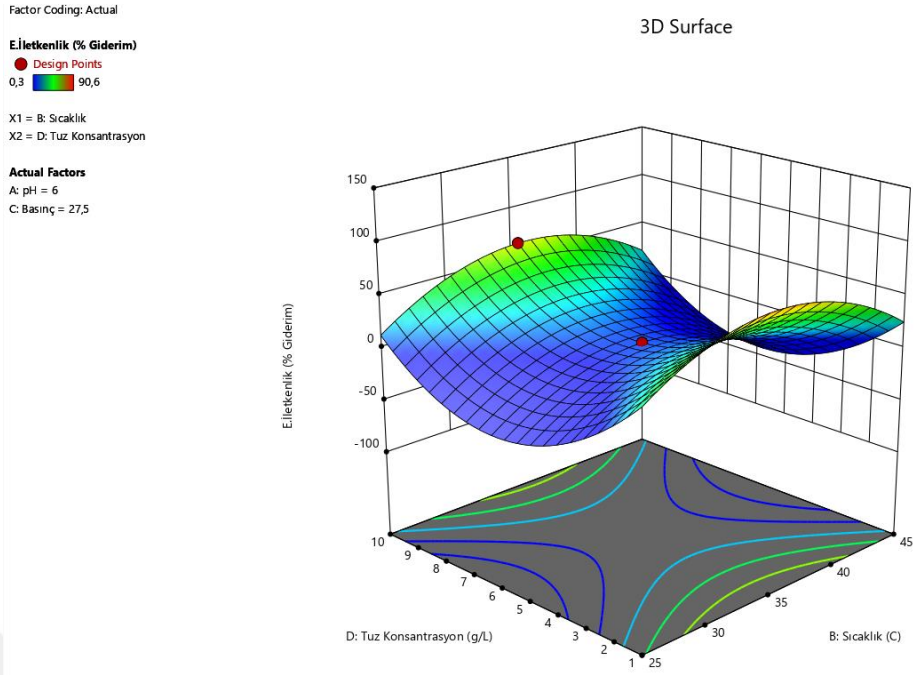
B: Sıcaklık = 35

3D Surface



Şekil 4.57. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Basınç ve Tuz Konsantrasyonu etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.57’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sabit pH (6) ve sıcaklık (35 °C) koşullarında, basınç ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) giderimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik analizine göre, düşük tuz konsantrasyonları (1-3 g/L) ve yüksek basınç (35-40 bar) seviyelerinde, Eİ giderim oranı maksimum değerlere ulaşmaktadır (grafikte yeşil-mavi tonlu yüzey). Buna karşılık, tuz konsantrasyonunun yüksek değerlere (≥ 8 g/L) ulaştığı durumlarda, özellikle düşük basınçla (15-25 bar) birleştiğinde Eİ giderim oranları negatif seviyelere inmektedir. Bu durum, yüksek tuzluluk ve düşük basıncın sistem verimliliğini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu bağlamda, yüksek tuz konsantrasyonu ve düşük basınç koşullarından kaçınılması; bunun yerine, düşük tuz konsantrasyonu ($\approx 1-3$ g/L) ve yüksek basınç (≥ 35 bar) kombinasyonlarının tercih edilmesi sistem performansını artırmak açısından önem arz etmektedir.



Şekil 4.58. TO membranlarla Eİ indirgenmesi için Tuz Konsantrasyonu ve Sıcaklık etkileşiminin etkisini gösteren Üç Boyutlu Yüzey Yanıt Grafiği

Şekil 4.58’de sunulan üç boyutlu yüzey yanıt grafiği, sabit pH (6) ve basınç (27.5 bar) koşullarında, sıcaklık ile tuz konsantrasyonu arasındaki etkileşimin, elektriksel iletkenlik (Eİ) giderimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafik analizine göre, düşük tuz konsantrasyonları (1-3 g/L) ve orta sıcaklık (30-40 °C) seviyelerinde, Eİ giderim oranı maksimum değerlere ulaşmaktadır (grafikte yeşil-mavi tonlu yüzey). Buna karşılık, tuz konsantrasyonunun yüksek değerlere (≥ 8 g/L) ulaştığı durumlarda, özellikle yüksek sıcaklıkla (45 °C) birleştiğinde Eİ giderim oranları negatif seviyelere inmektedir. Bu durum, yüksek tuzluluk ve düşük basıncın sistem verimliliğini olumsuz etkilediğini göstermektedir. Bu bağlamda, yüksek tuz konsantrasyonu ve yüksek sıcaklık koşullarından kaçınılması; bunun yerine, düşük tuz konsantrasyonları (1-3 g/L) ve orta sıcaklık (30-40 °C) kombinasyonlarının tercih edilmesi sistem performansını artırmak açısından önem arz etmektedir.

Üç boyutlu yüzey yanıt grafiklerine ilişkin kapsamlı analiz sonucunda, Eİ indirgenme performansı üzerinde en etkili parametrelerin basınç ve tuz konsantrasyonu olduğu açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Özellikle yüksek basınç seviyeleri (≥ 35 bar) ile düşük tuz konsantrasyonu (1–3 g/L) kombinasyonları, sistemin maksimum Eİ indirgenim verimliliğine ulaştığı koşulları temsil etmektedir. Bununla birlikte, pH değişkeni de indirgenim performansında kritik bir rol oynamaktadır. Hem düşük ($\text{pH} \approx 3-4$) hem de yüksek ($\text{pH} \approx 8-9$) seviyelerde, diğer parametrelerle uygun şekilde eşleştğinde Eİ indirgenim oranını önemli ölçüde artırmaktadır. Orta pH düzeylerinde ise sistem verimliliği düşmekte, hatta bazı durumlarda negatif indirgenim değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu durum, pH’nın özellikle uç değerlerde optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Sıcaklık parametresi ise, basınç, tuz konsantrasyonu ve pH ile karşılaştırıldığında daha ikincil bir etkiye

sahiptir. Orta düzey sıcaklık aralığı (30–40°C) genellikle sistem verimliliğini artırırken, yüksek sıcaklıkla ($\geq 45^\circ\text{C}$) özellikle düşük basınç ya da yüksek tuzlulukla birleştiğinde sistem performansında ciddi düşüşler gözlemlenmektedir. Bu da sıcaklık faktörünün dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini ancak sistemin verimliliğine olan katkısının sınırlı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, membran tabanlı su arıtma sistemlerinde etkili Eİ indirgenmesi için, özellikle yüksek basınç, düşük tuz konsantrasyonu ve uç pH değerleri birlikte optimize edilmelidir. Sıcaklık ise, bu kritik parametrelere destekleyici ama daha az belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu bulgular, ileri seviye membran proseslerinin tasarımı ve işletilmesi açısından yol gösterici niteliktedir.

4.3 Tahmin için Yapay Sinir Ağları (YSA) Analizi

Yapay Sinir Ağları (YSA), veri analizi ve tahmin süreçlerinde devrim niteliğinde yenilikler sunmaktadır. Yapay sinir ağları, biyolojik sinir sistemlerinden ilham alınarak geliştirilmiş bir makine öğrenimi tekniğidir ve farklı alanlarda, özellikle finans, sağlık, pazarlama ve mühendislik gibi sektörlerde başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

YSA'lar, çok katmanlı yapıları sayesinde, karmaşık ilişkileri ve desenleri öğrenebilme kapasitesine sahiptir. Geleneksel istatistiksel yöntemlerin ötesinde, bu teknolojiler, doğrusal olmayan veri yapılarında bile yüksek doğrulukla tahmin yapabilme yeteneğine sahiptir. Aynı zamanda, sürekli değişen piyasa koşulları ve kullanıcı ihtiyaçları çerçevesinde, dinamik ve özelleştirilebilir modeller oluşturulmasına olanak tanımaktadır.

Bu bölümde, YSA'ların tahmin süreçlerindeki rolü, temel prensipleri, uygulama alanları ve faydaları detaylı bir şekilde incelenecektir. Ayrıca, bu yöntemlerin etkinliği, karşılaştıkları zorluklar ve gelecekteki gelişim potansiyelleri üzerine de değerlendirmeler yapılacaktır. Yapay sinir ağlarının sunduğu olanaklarla, veri analizi ve tahmin süreçlerinin nasıl dönüştüğünü anlamak, modern dünyada önemli bir avantaj elde etmek için kritik öneme sahiptir.

4.3.1 DİS-FT Verilerinin YSA Modelleme Sonuçları

Tuz giderimi modellemesinde en yüksek uyum, Levenberg–Marquardt öğrenme algoritmasının Tansig transfer fonksiyonu ile sağlanmıştır. Bu modelde elde edilen ortalama kare hata (MSE) değeri son derece düşük olup 1.53×10^{-10} olarak hesaplanmıştır. Aynı yapı için belirlenen determinasyon katsayısı (R^2) eğitim, doğrulama, test ve genel veri setleri için sırasıyla 0.91412, 0.58666, 0.99992 ve 0.77290 olarak raporlanmıştır. Bu sonuçlar, söz konusu algoritmanın özellikle test verileri üzerinde oldukça yüksek bir doğruluk sergilediğini ancak doğrulama aşamasında modelin performansında bir miktar düşüş gözlemlendiğini göstermektedir.

Alternatif olarak uygulanan Scaled Conjugate Gradient (SCG) algoritması, Logsig transfer fonksiyonu ile kullanıldığında $\text{MSE} = 0.000182$ olarak belirlenmiş; bu yapı için hesaplanan R^2 değerleri eğitim, doğrulama, test ve genel sırasıyla 0.85606, 0.92443, 0.99921 ve 0.77927 olmuştur. SCG algoritması, özellikle doğrulama setinde daha yüksek bir uyum göstermiştir.

Her iki algoritma için kullanılan yapay sinir ağı topolojileri de farklılık göstermektedir: Levenberg–Marquardt algoritmasında 4-20-3, SCG algoritmasında ise 4-1-3 katman yapısı tercih edilmiştir (Çizelge 4.38 ve 4.39). Bu farklılık, her algoritmanın öğrenme kapasitesi ve parametre optimizasyonuna yönelik karakteristiklerinin modele yansması olarak değerlendirilebilir. Sonuçlar, algoritma seçimi ve ağ topolojisinin model başarımında kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



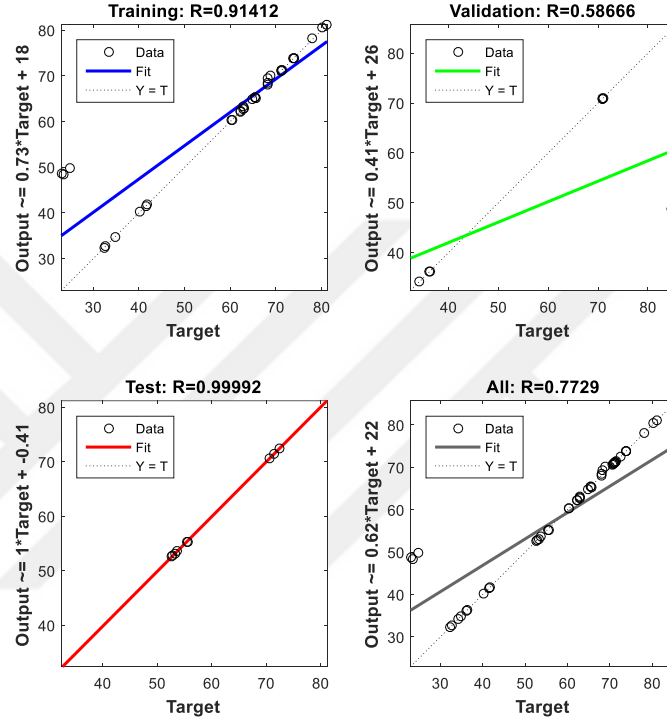
Çizelge 4.38. YSA modelinin LM öğrenme algoritması sonuçları
(Sarı çizgiler en yüksek sonuçlara sahip topolojileri göstermektedir)

Faktöryel Tasarım YSA-nntool-Levenberg Marquardt Algorithm (trainlm) Eİ Tuzluluk TÇKM MSE-R											
ANN Structure	Epoch	TANSIG Function					LOGSIG Function				
		MSE	Regression (R)				MSE	Regression (R)			
			Training	Validation	Test	All		Training	Validation	Test	All
4-2-3	1000	0,352	0,30726	0,41215	0,49046	0,31505	214	0,5159	0,73278	-0,036608	0,48387
4-4-3	1000	171	0,67944	0,69463	0,83002	0,45327	171	0,49485	0,9971	0,98887	0,55363
4-6-3	1000	5.33e+10	0,19802	0,98783	0,052599	0,25434	5.51e-5	0,60187	0,96964	0,96808	0,58961
4-8-3	1000	2.67e+09	0,99355	0,97554	-0,99461	0,54899	2.39e-8	0,55887	0,99406	0,032179	0,58783
4-10-3	1000	3.11e-23	0,59842	-0,057528	0,81527	0,32	1.74e-10	0,96742	0,085233	0,99829	0,60923
4-12-3	1000	707	0,18359	0,060458	-0,25506	0,057099	1.12e-9	0,76782	0,76793	1	0,7617
4-14-3	1000	248	-0,068061	0,54651	0,096937	0,10136	5.35e-10	0,35052	0,86982	0,56336	0,53514
4-16-3	1000	3.33e-10	0,67565	0,99966	-0,93917	0,45524	4.43e-10	0,43344	0,94875	0,0063513	0,46863
4-18-3	1000	8.99e-10	0,9145	0,41501	-0,50309	0,26771	4.55e-10	0,60357	0,75245	0,021628	0,53727
4-20-3	1000	1.53e-10	0,91412	0,58666	0,99992	0,7729	1.64e-11	0,82311	0,96718	0,62243	0,74886

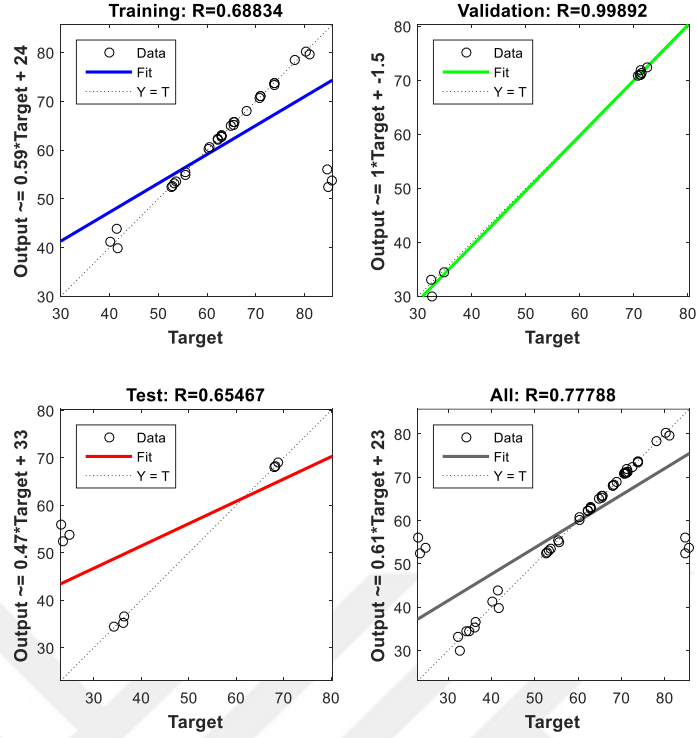
Çizelge 4.39. YSA modelinin SCG öğrenme algoritması sonuçları
(Sarı çizgiler en yüksek sonuçlara sahip topolojileri göstermektedir)

Faktöryel Tasarım YSA -nntool-Scaled Conjugate Gradient Algorithm (trainscg) Eİ Tuzluluk TÇKM MSE-R											
ANN Structure	Epoch	TANSIG Function					LOGSIG Function				
		Regression (R)					Regression (R)				
		MSE	Training	Validation	Test	All	MSE	Training	Validation	Test	All
4-2-3	1000	187	0,58174	0,97512	0,97396	0,69721	410	0,44391	0,36159	0,98773	0,46382
4-4-3	1000	0,0216	0,63823	0,16687	0,80105	0,59322	0,0283	0,81392	0,96116	0,99789	0,77561
4-6-3	1000	171	0,6415	0,90448	0,97576	0,67632	0,0247	0,82657	0,93088	0,94309	0,7781
4-8-3	1000	171	0,62275	0,99712	0,87699	0,71202	0,000755	0,43159	0,9959	0,99899	0,59529
4-10-3	1000	7.78e-05	0,68834	0,99892	0,65467	0,77788	0,000283	0,15133	0,99995	0,99997	0,64982
4-12-3	1000	2.04e-05	0,81382	0,98646	0,19251	0,73469	0,000182	0,85606	0,92443	0,99921	0,77927
4-14-3	1000	1.91e-05	0,99589	-0,23339	0,98927	0,6683	4.26e-05	0,79821	0,99824	0,96725	0,75642
4-16-3	1000	8.18e-06	0,88929	0,98756	0,18099	0,70171	3.13e-05	0,79574	0,96783	0,99077	0,76631
4-18-3	1000	6.35e-06	0,29276	0,9873	0,99334	0,62669	1.75e-05	0,75312	0,99065	0,99693	0,76302
4-20-3	1000	5.54e-06	0,39373	0,97929	0,99901	0,56024	6.47e-06	0,52791	0,98256	0,97096	0,619

Modellerin regresyon (R) grafikleri sırasıyla Şekil 4.59 ve 4.60'de gösterilmiştir. Grafiklerde, X eksenini deneysel verilerden, Y eksenini tahmin edilen değerlerden oluşmaktadır. En iyi uyum çizgisi, giriş verileri ile tahmin edilen değer arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. $Y = T$ çizgisi, gerçek değer ile tahmin edilen değerlerin eşit olduğu hedef çizgisi olarak tanımlanmıştır. Veri noktaları ise modelin deneysel değerlerini göstermektedir (Neto ve ark., 2021). Şekil 4.59 ve 4.60 dikkate alındığında, TO ile El, Tuzluluk ve TÇKM giderimi üzerine elde edilen deneysel verilerin karşılaştırması ile geliştirilen modellerle elde edilen tahmin sonuçları Çizelge 4.36'da verilmektedir.



Şekil 4.59. LM algoritmasının YSA Regresyon sonucu



Şekil 4.60. SCG Algoritmasının YSA Regresyon sonucu

Bu veriler değerlendirildiğinde, İlk olarak, pH değerinin membran performansı üzerindeki etkisi dikkate alındığında, pH aralığının (3-9) membranın iyonik dengesi ve yüzey yükleri üzerinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Tabloda görüldüğü üzere, pH 6'da gerçek giderim oranı %84,7 iken, YSA modeli bu oranı %80,5 olarak tahmin etmiştir. Bu durum, YSA modelinin membranın yüksek pH koşullarında verimli çalıştığını doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, sıcaklık (25-45°C) incelendiğinde, membranın daha yüksek sıcaklıklarda performansında bir düşüş yaşadığı gözlemlenmiştir. 25°C'de gerçek giderim %81 olarak hesaplanmışken, YSA modeli bu değeri %74,1 olarak tahmin etmiştir. Bu sapma, sıcaklığın membran yüzeyinde meydana getirebileceği yapısal değişiklikler veya su moleküllerinin hareketliliğindeki artışın membran geçirgenliğini etkilediği düşünülmektedir.

Basınç parametresi (15-40 bar) analiz edildiğinde, 40 bar'lık bir basınçta gerçek giderim oranı %73,8 olarak hesaplanmış ve YSA modeli de %71 tahmini ile bu değere çok yakın bir sonuç vermiştir. Yüksek basınç genellikle membranın verimliliğini artırırken, burada görülen düşük giderim oranı, belirli bir basınç seviyesinin üzerinde performansın azaldığını işaret eder. Bu, ozmotik basınç farkının membran üzerindeki aşırı yük oluşturabileceğini düşündürmektedir. Benzer şekilde, tuz konsantrasyonu (1-10 g/L) değerlendirildiğinde, 1 g/L'de gerçek giderim oranı %71,3 iken YSA modeli %70,7 olarak tahmin etmiştir. Bu değerler, YSA modelinin tuz konsantrasyonu değişimlerini doğru bir şekilde yansıtabildiğini ve membranın yüksek tuz konsantrasyonunda verimliliğinin

azaldığını göstermektedir. Yüksek tuz konsantrasyonu, ozmotik basınç farkını artırarak suyun membran içinden geçişini zorlaştırabilir (Çizelge 4.40).

Çizelge 4.40. Tuzlu suyun gideriminde TO membran performansı ve model tahminleri (DİS-FT)

DİS-FT	pH	T (C°)	Basınç (bar)	Tuz (g/L)	Gerçek Giderim (%)			Tahmini Giderim (YSA) (%)		
					Eİ (µs)	Tuzluluk (ppm)	TÇKM (ppm)	Eİ (µs)	Tuzluluk (ppm)	TÇKM (ppm)
pH (3-9)	6	30	15	5,5	84,7	85,7	84,8	80,5	81,5	77,5
T (C°) (25-45)	4	25	15	10	81	80,2	78	74,1	73,6	74,1
Basınç (bar) (15-40)	9	25	40	1	73,8	73,9	73,9	71	70,8	71,4
Tuz (g/L) (1-10)	9	25	15	1	71,3	71,2	71,1	70,7	71,4	71,8

Tabloya genel olarak bakıldığında, YSA modelinin tahminleri ile gerçek veriler arasında yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi parametreler membranın performansını önemli ölçüde etkilemekte olup, YSA modeli bu parametreleri dikkate alarak isabetli tahminlerde bulunmuştur. YSA modelinin bu tahmin başarısı, sistemin eğitim sürecinin yeterince doğru ve kapsamlı veri ile yapıldığını göstermektedir. Modelin sapma oranlarının düşük olması, YSA'nın gelecekte daha karmaşık süreçlerde kullanılabileceğine dair bir gösterge niteliğindedir. Bununla birlikte, modelin tahminlerinde, özellikle sıcaklık ve yüksek tuz konsantrasyonu gibi faktörlerin membran performansını olumsuz etkilediği ve bu koşulların optimize edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta membranın yapısal bütünlüğünün korunması veya yüksek tuz konsantrasyonunda ozmotik basıncın düzenlenmesi, verimliliği artıracak potansiyel çözüm yolları olarak değerlendirilebilir.

4.3.2 MKT Verilerinin YSA Modelleme Tahmin Sonuçları

Yapay Sinir Ağları (YSA) modelinin, deniz suyunun tuzdan giderim performans tahmini için geliştirilen istatistiksel parametreleri Çizelge 4.41-4.42'de verilmiştir. Modeller için sabit bir ağ topolojisi veya sabit bir nöron sayısı bulunmadığından, optimum nöron sayısı 2 ile 20 arasında değişkenlik göstermiştir. Ölçeklenmiş birleşik gradyan (SCG), Bayesyen düzenleme algoritması (BR), Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) ve Levenberg-Marquardt (LM) gibi algoritmalar YSA modellerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar arasında, LM algoritması, ikinci dereceden türevleri kullanan geleneksel eğitim algoritmalarından biridir ve birçok çalışmada eğitim algoritması olarak tercih edilmiştir (Mohammadi ve ark., 2020; Gadekar ve Ahammed, 2019;

Besliu-Ionescu ve ark., 2019). Bu çalışmada, LM ve SCG algoritmaları kullanılmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. BR algoritması, verilerin eğitiminde doğrulama sonuçları verilmediği gerekçesiyle tercih edilmemiştir. Benzer şekilde, BFGS algoritması çalışmamıza dahil edilmemiştir, çünkü MATLAB R2020a (MathWorks, 2020) programında nntool-nnstart komutlarında bulunmamaktadır.



Çizelge 4.41. YSA modelinin LM öğrenme algoritmasının sonuçları
(Sarı çizgiler en yüksek sonuçlara sahip topolojileri göstermektedir)

Merkezi Kompozit Tasarım YSA-ntool-Levenberg Marquardt Algorithm (trainlm) Eİ Tuzluluk TÇKM MSE-R											
ANN Structure	Epoch	TANSIG Function					LOGSIG Function				
		Regression (R)					Regression (R)				
		MSE	Training	Validation	Test	All	MSE	Training	Validation	Test	All
4-2-3	1000	506	0,35183	0,037635	0,99604	0,36159	8,68	0,59652	0,30598	0,19798	0,51705
4-4-3	1000	2.02e+03	0,02952	0,047536	0,0086568	0,011045	12,4	0,15746	0,56203	0,46569	0,19703
4-6-3	1000	0,00597	0,46783	0,1923	0,34344	0,9257	133	0,69205	0,10886	0,59242	0,60468
4-8-3	1000	5.01e+08	0,98913	0,11942	0,98018	0,57684	205	1	0,99727	0,6882	0,69321
4-10-3	1000	3.24e+14	0,99994	0,93589	0,9866	0,96603	3.45e+09	0,92326	1	0,99984	0,96567
4-12-3	1000	2.41e+09	1	0,88673	0,572	0,88104	1.20e+09	0,25379	0,45633	0,18983	0,24846
4-14-3	1000	1.90e+09	0,69097	0,93379	0,91459	0,76739	8.85e+09	0,23818	0,13457	0,10791	0,17569
4-16-3	1000	7.85e+10	0,44524	0,53642	0,37605	0,38488	4.31e+09	0,83969	0,79419	0,18543	0,75484
4-18-3	1000	1.22e+03	0,47523	0,64767	0,35649	0,40368	2.65e+10	0,63681	0,010368	0,7024	0,4827
4-20-3	1000	2.77e+09	0,85237	0,98548	0,97477	0,77754	6.49e+10	0,73033	0,1778	0,99133	0,75091

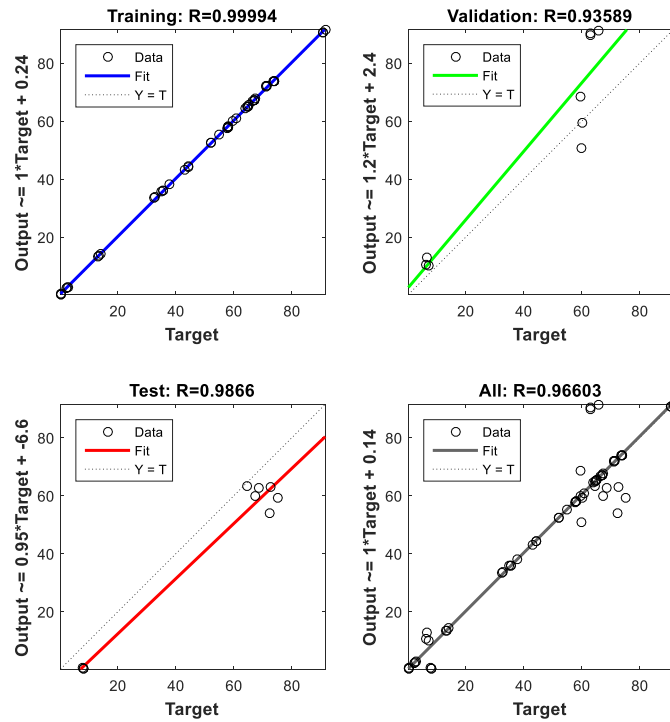
Çizelge 4.42. YSA modelinin SCG öğrenme algoritması sonuçları
(Sarı çizgiler en yüksek sonuçlara sahip topolojileri göstermektedir)

Merkezi Kompozit Tasarım YSA- <i>nn</i> tool-Scaled Conjugate Gradient Algorithm (trainscg) Eİ Tuzluluk TÇKM MSE-R											
ANN Structure	Epoch	TANSIG Function					LOGSIG Function				
		Regression (R)					Regression (R)				
		MSE	Training	Validation	Test	All	MSE	Training	Validation	Test	All
4-2-3	1000	289	0,027361	0,36501	0,16619	0,0028993	267	0,4802	0,36337	0,71761	0,075331
4-4-3	1000	0,37	0,88373	0,76696	0,33446	0,7733	0,173	0,80848	0,98333	0,74976	0,65293
4-6-3	1000	0,13	0,99507	0,83397	0,12566	0,74093	752	0,47696	0,15303	0,11952	0,31216
4-8-3	1000	0,00331	0,99988	0,21415	0,76479	0,76712	0,132	0,91053	0,75456	0,42652	0,71201
4-10-3	1000	0,00791	0,97762	0,99648	0,93967	0,97014	0,00429	0,94886	0,96789	0,99493	0,95007
4-12-3	1000	0,00201	0,99833	0,29246	0,477	0,66764	0,00214	0,51379	0,07276	0,30875	0,42548
4-14-3	1000	0,000201	0,17866	0,33197	0,082356	0,18181	1.45e+07	0,46491	0,48509	0,66114	0,50736
4-16-3	1000	5.22e+09	0,57919	0,41647	-0,41129	0,26396	0,000929	0,77484	0,73266	0,92911	0,75712
4-18-3	1000	7.52e+05	0,31709	0,037698	0,012515	0,22641	0,000716	0,087273	0,071104	0,036938	0,081226
4-20-3	1000	1.18e+05	1	0,8762	0,59741	0,76151	9.26e+05	0,3192	0,060382	0,45349	0,27034

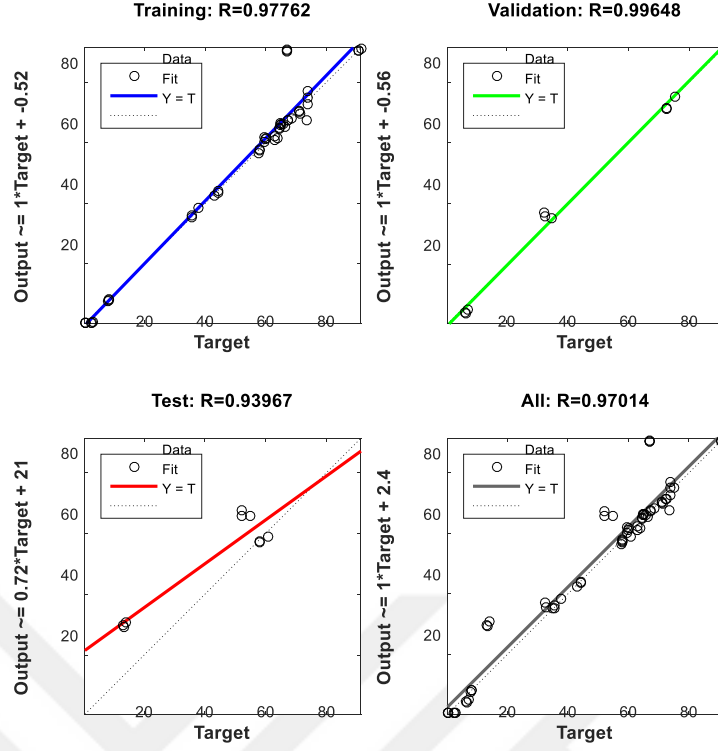
LM ve SCG algoritmalarına ait veriler şu şekilde uygulanmıştır: %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test. Çalışmada geliştirilen YSA modelinin güvenilirliği, hesaplanan MSE ve R^2 değerleri karşılaştırılarak yapılmıştır. R^2 , 0 ile 1 arasında değerlendirilir ve modelin her aşamasında değişkenlerin tahmin edilme verimliliğini yüzde olarak gösterir. Değer 1'e ne kadar yakınsa, model o kadar verimli olur. MSE değeri her zaman pozitif olup 0'a ne kadar yakınsa tahmin verimliliği o kadar yüksektir (Ahmad ve ark.,2020; Jawad ve ark., 2020; Ghaedi ve Vafaei, 2017; Kocak ve Siray, 2021).

Tuz giderimi için en iyi uyum Levenberg–Marquardt öğrenme algoritmasının Tansig transfer fonksiyonu ile MSE $3.24e+14$, R^2 değerleri ise sırasıyla eğitim, doğrulama, test ve genel için 0.99994, 0.93589, 0.9866 ve 0.96603 olarak hesaplanmıştır. SCG algoritmasında ise benzer şekilde Tansig fonksiyonunda MSE 0.00791 olup R^2 değerleri sırasıyla 0.97762, 0.99648, 0.93967 ve 0.97014 olarak hesaplanmıştır; bu değerler 4-10-3 ağ topolojisi ile elde edilmiştir.

Modellerin regresyon (R) grafikleri sırasıyla Şekil 4.61,4.62'de gösterilmiştir. Grafiklerde, X eksenini deneysel verilerden, Y eksenini tahmin edilen değerlerden oluşmaktadır. En iyi uyum çizgisi, giriş verileri ile tahmin edilen değer arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. $Y = T$ çizgisi, gerçek değer ile tahmin edilen değerlerin eşit olduğu hedef çizgisi olarak tanımlanmıştır. Veri noktaları ise modelin deneysel değerlerini göstermektedir (Neto ve ark., 2021). Şekil 4.61-4.62 dikkate alındığında, TO ile Eİ, Tuzluluk ve TÇKM giderimi üzerine elde edilen deneysel verilerin karşılaştırması ile geliştirilen modellerle elde edilen tahmin sonuçları çizelge 4.43'te verilmektedir.



Şekil 4.61. LM algoritmasının YSA Regresyon sonucu



Şekil 4.62. SCG Algoritmasının YSA Regresyon sonucu

Bu veriler değerlendirildiğinde, İlk olarak, pH değerinin membran performansı üzerindeki etkisi dikkate alındığında, pH aralığının (3-9) membranın iyonik dengesi ve yüzey yükleri üzerinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Tabloda görüldüğü üzere, pH 9'da, gerçek giderim oranı %90,6 iken, YSA modeli bu oranı %90,5 olarak tahmin etmiştir. Bu durum, YSA modelinin membranın yüksek pH koşullarında verimli çalıştığını doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, sıcaklık (25-45°C) incelendiğinde, membranın daha yüksek sıcaklıklarda performansında bir düşüş yaşadığı gözlemlenmiştir. 45°C'de gerçek giderim %72,6 olarak hesaplanmışken, YSA modeli bu değeri %90,2 olarak tahmin etmiştir. Bu sapma, sıcaklığın membran yüzeyinde meydana getirebileceği yapısal değişiklikler veya su moleküllerinin hareketliliğindeki artışın membran geçirgenliğini etkilediği düşünülmektedir.

Basınç parametresi (15-40 bar) analiz edildiğinde, 25 bar'lık bir basınçta gerçek giderim oranı %73,8 olarak hesaplanmış ve YSA modeli de %75,1 tahmini ile bu değere çok yakın bir sonuç vermiştir. Yüksek basınç genellikle membranın verimliliğini artırırken, burada görülen düşük giderim oranı, belirli bir basınç seviyesinin üzerinde performansın azaldığını işaret eder. Bu, ozmotik basınç farkının membran üzerindeki aşırı yük oluşturabileceğini düşündürmektedir. Benzer şekilde, tuz konsantrasyonu (1-10 g/L) değerlendirildiğinde, 1 g/L'de gerçek giderim oranı %71,3 iken ANN modeli %71,5 olarak tahmin etmiştir. Bu değerler, YSA modelinin tuz konsantrasyonu değişimlerini doğru bir şekilde yansıtabildiğini ve membranın yüksek tuz konsantrasyonunda verimliliğinin

azaldığını göstermektedir. Yüksek tuz konsantrasyonu, ozmotik basınç farkını artırarak suyun membran içinden geçişini zorlaştırabilir.

Çizelge 4.43. Tuzlu suyun gideriminde TO membran performansı ve model tahminleri (MKT)

MKT	pH	T (C°)	Basınç (bar)	Tuz (g/L)	Gerçek Giderim (%)			Tahmini Giderim (YSA) (%)		
					Eİ (μs)	Tuzluluk (ppm)	TÇKM (ppm)	Eİ (μs)	Tuzluluk (ppm)	TÇKM (ppm)
pH (3-9)	9	45	40	10	90,6	91,5	90,7	90,5	91,3	90,6
T (C°) (25-45)	3	45	40	10	72,6	75,2	72,4	90,2	90,8	90,5
Basınç (bar) (15-40)	9	25	40	1	73,8	73,9	73,9	75,1	72,8	77,1
Tuz (g/L) (1-10)	9	25	15	1	71,3	71,2	71,1	71,5	75,1	71,2

Tabloya genel olarak bakıldığında, YSA modelinin tahminleri ile gerçek veriler arasında yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. pH, sıcaklık, basınç ve tuz konsantrasyonu gibi parametreler membranın performansını önemli ölçüde etkilemekte olup, YSA modeli bu parametreleri dikkate alarak isabetli tahminlerde bulunmuştur. YSA modelinin bu tahmin başarısı, sistemin eğitim sürecinin yeterince doğru ve kapsamlı veri ile yapıldığını göstermektedir. Modelin sapma oranlarının düşük olması, YSA'nın gelecekte daha karmaşık süreçlerde kullanılabileceğine dair bir gösterge niteliğindedir. Bununla birlikte, modelin tahminlerinde, özellikle sıcaklık ve yüksek tuz konsantrasyonu gibi faktörlerin membran performansını olumsuz etkilediği ve bu koşulların optimize edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta membranın yapısal bütünlüğünün korunması veya yüksek tuz konsantrasyonunda ozmotik basıncın düzenlenmesi, verimliliği artıracak potansiyel çözüm yolları olarak değerlendirilebilir.

Kullanılan yöntemleri inceleyen önceki çalışmalardan bazıları TO giderim proseslerinde kullanılan diğer çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması çizelge 4.44'te verilmiştir. Bu çalışma, TO giderim proseslerinde kullanılan diğer çeşitli yöntemler ile karşılaştırıldığında, giderim seviyelerinin MKT (%97) gibi deneysel tasarım yöntemleriyle entegre YSA modelleri proses optimizasyonunda esneklik sağladığını göstermektedir.

Çizelge 4.44. TO giderim proseslerinde kullanılan diğer çeşitli yöntemlerin karşılaştırılması.

Proses	Model	Nöron Sayısı	Yapı (Structure)	Ağ Türü	Eğitim Algoritması	Adaptasyon Öğrenme İşlevi	Ağ Parametresi	Transfer fonksiyonu	Performans işlevi	Regresyon (R ²)	Referans
TO sistemlerinde tuz gideriminin modellenmesi ve optimizasyonu	YSA	2-20 (2 her defa)	4--12--3 DİS-FT; 4--10--3 MKT	Feedforward backprop	Train algorithm in LM, Train algorithm in SCG	LEARNGDM	70% Training, 15% Validation, 15% Test	TANSIG, LOGSIG	MSE	0.77 DİS-FT; 0,97 MKT	Bu Çalışma
TO ünitesinin optimizasyonu için NSGA-II algoritması ile entegre edilmiş YSA modeli kullanılmıştır.	YSA	Gizli katmanda 5 nöron kullanılmıştır	5--5--2	Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP)	L-BFGS	Belirtilmemiştir	44 deney verisinin %70'i (30 veri) eğitim, %30'u (14 veri) test	Lojistik (Sigmoid)	MSE (0.0005)	Raa: 0.84, Rg: 0.92	Jbari ve Abderafi (2023)
YSA, membran tabanlı ayırma proseslerinde (tuzdan arındırma, atık su arıtımı, kirlenme kontrolü) kullanılmıştır.	YSA	Spesifik nöron sayısı belirtilmemiş	3 katmanlı (girdi, gizli, çıktı)	Feedforward Neural Networks	Geri yayılım, GA/PSO optimizasyonu	LSTM ve CNN	Kayıp Fonksiyonu: Ortalama Karesel Hata (MSE)	ReLU, Sigmoid, tanh	MSE	0.97	Yuan ve ark. (2023)
Elektroless nikel kaplama (ENP) ile membran üretimi ve optimizasyonu.	YSA	LM-13 (13 nöronlu LM ağı), SCG-12 (12 nöronlu SCG ağı)	Giriş: 3 nöron Çıkış: 1 nöron	Back propagation (BP)	Train algorithm in LM, Train algorithm in SCG	Belirtilmemiştir	Eğitim Seti: %70, Doğrulama Seti: %15, Test Seti: %15.	ReLU, Sigmoid,	MSE	Akış =97.86, Giderim=96.86	Li ve ark. (2022)
Deniz suyunun çekici çözelti olarak kullanıldığı FO-MD hibrit prosesi ile kurşun (Pb ²⁺) giderimi ve su desalinasyonu	YSA	Spesifik nöron sayısı belirtilmemiş	3--7--3	Back propagation (BP)	Train algorithm in LM	Belirtilmemiştir	Eğitim Seti: %80, Doğrulama Seti: %10, Test Seti: %10.	TANSIG, PURELIN	MSE	0.99	Boubakri ve ark. (2023)



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, TO membranda tuzluluk gideriminin optimizasyonuna yönelik olarak DİS-FT ve MKT deneysel tasarım yöntemlerinin performansları YSA ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler ile TO membranın tuzluluk giderimi için optimal işletme koşullarının belirlenmesi amaçlanarak sistemin işletim süreçlerinde ekonomik etkinliğin artırılması ve operasyonel verimliliğin en üst düzeye çıkarılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- TO membranda uygulanan basınç ve başlangıç tuz konsantrasyonunun; tuzluluk ve TÇKM giderimi ile Eİ indirgenmesi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. pH ve sıcaklığın etkisi ise daha sınırlıdır.
- DİS-FT ve MKT deneysel tasarım modellerinin kıyaslanmasında; MKT tasarımının hem ikinci dereceden etkileri modelleme yeteneği hem de yüksek tahmin doğruluğu açısından TO membranda tuzluluk gideriminin optimizasyonu için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- MKT tasarım modelinin YSA ile entegre kullanımı yüksek tahmin gücü (R^2 0,97) sağlarken; DİS-FT tasarım modelinde bu entegrasyon gücü düşük kalmıştır (R^2 0,77). Bu bulgular, DİS-FT tasarım modelinin doğrusal olmayan ilişkileri yeterince temsil edemediğini ortaya koymaktadır.
- MKT deneysel tasarım modeli ile TO membranda tuzluluk giderimi için optimize edilen şartlar; pH: 9, basınç: 40 bar, Sıcaklık: 45 °C, başlangıç tuz konsantrasyonu: 10 g/L olarak tespit edilmiştir. Özellikle yüksek basınç ile yüksek tuz konsantrasyonunun birlikte uygulandığı koşullarda sistem performansının arttığını söylemek mümkündür.
- İlerleyen süreçte, pH ve sıcaklık gibi parametrelerin ikinci dereceden etkilerinin detaylı şekilde ele alınması, DİS-FT modelinde elde edilen düşük R^2 değerine karşı modelin geçerliliğini artırmak adına deneylerde tekrar sayısının, faktör ve faktör seviyesi çeşitliliğinin artırılması, daha kompleks YSA mimarileri kullanılarak TO tuzluluk giderme sistemlerinde performans tahmin oranlarının güçlendirilmesi ve optimizasyon verilerinin sahada pilot ölçekli sistemlerde test edilmesi planlanan çalışmalar arasındadır. Ayrıca, membran tıkanması, enerji tüketimi ve işletme maliyeti gibi pratik kriterlere dayalı çok kriterli optimizasyon çalışmalarının planlanması da önerilmektedir.

Çalışmanın, ilgili mevcut literatüre katkı sağlayacağına inanılmakla birlikte, akademik ve ticari okuyucular için de bir altyapı oluşturacağı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Abd Elaziz, M., Zayed, M. E., Abdelfattah, H., Aseeri, A. O., Tag-eldin, E. M., Fujii, M., & Elsheikh, A. H. (2024). Machine learning-aided modeling for predicting freshwater production of a membrane desalination system: A long-short-term memory coupled with election-based optimizer. *Alexandria Engineering Journal*, 86, 690–703. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.012>
- Acemoğlu D., Johnson S. (2023). Power and Progress Our Thousand-Year Struggle Over Technology and Prosperity. *Doğan Yayıncılık* (1). 37-40.
- Ahmad, Z. U., Yao, L., Lian, Q., Islam, F., Zappi, M. E., & Gang, D. D. (2020). The use of artificial neural network (ANN) for modeling adsorption of sunset yellow onto neodymium modified ordered mesoporous carbon. *Chemosphere*, 256, 127081. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127081>
- Ahunbay, M. G., Tantekin-Ersolmaz, S. B., & Krantz, W. B. (2018). Energy optimization of a multistage reverse osmosis process for seawater desalination. *Desalination*, 429, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.042>
- Ahunbay, M. G. (2019). Achieving high water recovery at low pressure in reverse osmosis processes for seawater desalination. *Desalination*, 465, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.04.023>
- Ahunbay, M. G., Tantekin-Ersolmaz, S. B., ve Krantz, W. B. (2018). Energy optimization of a multistage reverse osmosis process for seawater desalination. *Desalination*, 429, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.042>
- Al-Nory, M. T., & Graves, S. C. (2013, April). Water desalination supply chain modelling and optimization. In 2013 IEEE 29th International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW) (pp. 173-180). IEEE. Doi: [10.1109/ICDEW.2013.6547447](https://doi.org/10.1109/ICDEW.2013.6547447)
- Al-Rajabi, M. M., Abumadi, F. A., Laoui, T., Atieh, M. A., & Khalil, K. A. (2024). Capacitive deionization for water desalination: Cost analysis, recent advances, and process optimization. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 58). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104816>
- Alsumaiei, A. A. (2020). A nonlinear autoregressive modeling approach for forecasting groundwater level fluctuation in urban aquifers. *Water*, 12(3), 820. <https://doi.org/10.3390/w12030820>
- Alhseinat, E., Sheikholeslami, R. (2012). A completely theoretical approach for assessing fouling propensity along a full-scale reverse osmosis process. *Desalination*, 301, 1-9.
- Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., & Lattemann, S. (2017). Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 401, 16-21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.002>

- Anderson, M. J., & Whitcomb, P. J. (2016). RSM simplified: optimizing processes using response surface methods for design of experiments. Productivity press. <https://doi.org/10.1201/9781315382326>
- Anderson, M. J. (2017). DOE simplified: practical tools for effective experimentation. CRC press, 97-99
- Aydın F., Ardalı Y., Deniz Suyu Arıtım Teknolojileri, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma 30, Syf 156-178, 2012
- Araghinejad, S. (2013). Data-driven modeling: using MATLAB® in water resources and environmental engineering (Vol. 67). Springer Science & Business Media. DOI: <https://10.1007/978-94-007-7506-0>
- Atia, A. A., Allen, J., Young, E., Knueven, B., Bartholomew, T. V. (2023). Cost optimization of low-salt-rejection reverse osmosis. *Desalination*, 551. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116407>
- Balfaqih, H., Al-Nory, M. T., Nopiah, Z. M., & Saibani, N. (2017). Environmental and economic performance assessment of desalination supply chain. *Desalination*, 406, 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.08.004>
- Banakar, V. V., Sabnis, S. S., Gogate, P. R., Raha, A., & Saurabh. (2020). Improvements in heat transfer in thermal desalination operation based on removal of salts using ultrasound pretreatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105251>
- Bararpour, S. T., Feylizadeh, M. R., Delparish, A., Qanbarzadeh, M., Raeiszadeh, M., & Feilizadeh, M. (2018). Investigation of 2-nitrophenol solar degradation in the simultaneous presence of K₂S₂O₈ and H₂O₂: using experimental design and artificial neural network. *Journal of cleaner production*, 176, 1154-1162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.191>
- Bargeman, G. (2023). Maximum allowable retention for low-salt-rejection reverse osmosis membranes and its effect on concentrating undersaturated NaCl solutions to saturation. *Separation and Purification Technology*, 317. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123854>
- Besliu-Ionescu, D., Talpeanu, D. C., Mierla, M., & Muntean, G. M. (2019). On the prediction of geoeffectiveness of CMEs during the ascending phase of SC24 using a logistic regression method. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 193, 105036. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.04.017>
- Bishop C. M., *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press, New York **1995**.
- Boubakri, A., Elgharbi, S., Dhaouadi, I., Mansour, D., & Al-Tahar Bouguecha, S. (2023). Optimization and prediction of lead removal from aqueous solution using FO–MD hybrid process: Statistical and artificial intelligence analysis. *Journal of Environmental Management*, 337. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117731>
- Box, G. E., & Draper, N. R. (2007). Response surfaces. Mixtures, and Ridge Analyses, 649.

- Busch, M., Mickols, W. E., Jons, S., Redondo, J., & De Witte, J. (2004). Boron removal in sea water desalination. *International Desalination and Water Reuse Quarterly*, 13(4), 25.
- Cai, B., Du, Q., Long, C., Che, X., Wang, H., Zhang, Y., & Cai, W. (2024). Thermodynamic modeling and optimization of a novel hybrid system consisting of high-temperature PEMFC and spray flash desalination. *Applied Thermal Engineering*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122193>
- Casella, G., Berger, R. L. (2002). *Statistical Inference* (2nd ed.). Duxbury Press.
- Chaoui, I., Ndiaye, I., Eddouibi, J., Abderafi, S., Vaudreuil, S., & Bounahmidi, T. (2024). Unveiling the potential of forward osmosis desalination: Multi-objective optimization for peak efficiency. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 135, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.01.040>
- Chitsazan, M., Rahmani, G., & Neyamadpour, A. (2015). Forecasting groundwater level by artificial neural networks as an alternative approach to groundwater modeling. *Journal of the Geological Society of India*, 85(1), 98-106.
- Curto, D., Franzitta, V., & Guercio, A. (2021). A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences*, 11(2), 670. <https://doi.org/10.3390/app11020670>
- Dansawad, P., Li, Y., Li, Y., Zhang, J., You, S., Li, W., & Yi, S. (2023). Machine learning toward improving the performance of membrane-based wastewater treatment: A review. In *Advanced Membranes* (Vol. 3). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.advmem.2023.100072>
- Di Nunno, F., & Granata, F. (2020). Groundwater level prediction in Apulia region (Southern Italy) using NARX neural network. *Environmental Research*, 190, 110062. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110062>
- Du, Y. C., & Stephanus, A. (2018). Levenberg-Marquardt neural network algorithm for degree of arteriovenous fistula stenosis classification using a dual optical photoplethysmography sensor. *Sensors*, 18(7), 2322. <https://doi.org/10.3390/s18072322>
- Dunnett, D., & Wallace, J. S. (2009). Electricity generation from wave power in Canada. *Renewable Energy*, 34(1), 179-195. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.034>
- Easa, A. S., Khalaf-Allah, R. A., Mohamed, S. M., I. A. Habba, M., & Tolan, M. T. (2024). Optimization of Humidification-Dehumidification solar desalination Unit: Comparative analysis. *Applied Thermal Engineering*, 236. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121610>
- El-Emam, R. S., Ozcan, H., Bhattacharyya, R., & Awerbuch, L. (2022). Nuclear desalination: A sustainable route to water security. In *Desalination* (Vol. 542). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116082>
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *science*, 333(6043), 712-717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>

- Fane, A. G., Wang, R., & Jia, Y. (2011). Membrane Technology: Past, Present and Future. (L. K. Wang, J. P. Chen, Y. Hung, & N. K. Shammam Editors). Membrane and Desalination Technologies. Humana Press, New York, p.1-45. <https://doi.org/10.1007/978-1-59745-278-6>
- Fisher, R. A. (1925). Statistical Methods for Research Workers. Oliver and Boyd.
- Forstmeier, M., Mannerheim, F., D'Amato, F., Shah, M., Liu, Y., Baldea, M., & Stella, A. (2007). Feasibility study on wind-powered desalination. *Desalination*, 203(1-3), 463-470. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.009>
- Gadekar, M. R., & Ahammed, M. M. (2019). Modelling dye removal by adsorption onto water treatment residuals using combined response surface methodology-artificial neural network approach. *Journal of environmental management*, 231, 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.017>
- Ghaedi, A. M., Karamipour, S., Vafaei, A., Baneshi, M. M., & Kiarostami, V. (2019). Optimization and modeling of simultaneous ultrasound-assisted adsorption of ternary dyes using copper oxide nanoparticles immobilized on activated carbon using response surface methodology and artificial neural network. *Ultrasonics sonochemistry*, 51, 264-280. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.007>
- Ghermandi, A., & Messalem, R. (2009). Solar-driven desalination with reverse osmosis: the state of the art. *Desalination and water treatment*, 7(1-3), 285-296. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.723>
- Grömping, U. (2014). R package FrF2 for creating and analyzing fractional factorial 2-level designs. *Journal of Statistical Software*, 56, 1-56. <https://doi.org/10.18637/jss.v056.i01>
- Guo, Y., Bouteraa, Y., Khishe, M., & Ibrahim, B. F. (2024). Grid-connected desalination plant economic management powered by renewable resources utilizing Niching Chimp Optimization and hunger game search algorithms. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2024.100976>
- Hendrickson, G., Housh, M., & Sela, L. (2023). Optimizing desalination for regional water systems: Integrating uncertainty, quality, and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 415. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137785>
- Jawad, J., Hawari, A. H., & Javaid Zaidi, S. (2020). *Desalination*, 484, 114427.
- Jawad, J., Hawari, A. H., & Javaid Zaidi, S. (2021). Artificial neural network modeling of wastewater treatment and desalination using membrane processes: A review. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 419). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129540>
- Jbari, Y., & Abderafi, S. (2023). Design and optimization of reverse osmosis unit for vinasse purification of Moroccan distillery. *Computers and Chemical Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108280>

- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- Jun, B. M., Cho, J., Jang, A., Chon, K., Westerhoff, P., Yoon, Y., & Rho, H. (2020). Charge characteristics (surface charge vs. zeta potential) of membrane surfaces to assess the salt rejection behavior of nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117026>
- Kalantary, R. R., Moradi, M., Pirsaeheb, M., Esrafil, A., Jafari, A. J., Gholami, M., ... & Dragoi, E. N. (2019). Enhanced photocatalytic inactivation of E. coli by natural pyrite in presence of citrate and EDTA as effective chelating agents: experimental evaluation and kinetic and ANN models. *Journal of environmental chemical engineering*, 7(1), 102906. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102906>
- Khaki, M., Yusoff, I., & Islami, N. (2015). Application of the artificial neural network and neuro-fuzzy system for assessment of groundwater quality. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 43(4), 551-560. <https://doi.org/10.1002/clen.201400267>
- Khuri, A. I., & Mukhopadhyay, S. (2010). Response surface methodology. *Wiley interdisciplinary reviews: Computational statistics*, 2(2), 128-149. <https://doi.org/10.1002/wics.73>
- Koçak, Y., & Şiray, G. Ü. (2021). New activation functions for single layer feedforward neural network. *Expert Systems with Applications*, 164, 113977. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113977>
- Koyuncu, İ. ve Taşdemir, R. Ş. (2018). *Membran Teknolojileri ve Su Arıtma*. İ. Koyuncu, Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, 1.baskı, Yıldız Ofset Matbaa, İstanbul, (s. 532-539).
- Koyuncu, İ. ve Taşdemir, R. Ş. (2018). *Membran Teknolojileri ve Su Arıtma*. İ. Koyuncu, Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, 1.baskı, Yıldız Ofset Matbaa, İstanbul, (s. 1161-1165).
- Koyuncu, İ., Korkut, S., Türken, T., ve Köşe-Mutlu, B. (2018b). *Membran Teknolojilerinde Maliyet*. (İ. Koyuncu editör). *Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları*. Yıldız Ofset Matbaa, İstanbul, s.1161-1240.
- Lawrence K. Wang, Jiaping Paul Chen, Yung-Tse Hung, Nazih K. Shammass, (2011). *Membrane and Desalination Technologies*. *Handbook of Environmental Engineering Volume 13*, 7-8, 531-533.
- Lehmann, E. L., & Romano, J. P. (2005). *Testing Statistical Hypotheses* (3rd ed.). Springer.
- Lesimple, A., Ahmed, F. E., & Hilal, N. (2020). Remineralization of desalinated water: Methods and environmental impact. *Desalination*, 496, 114692. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114692>
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2), 164-168.

- Li, B., Yue, R., Shen, L., Chen, C., Li, R., Xu, Y., Zhang, M., Hong, H., & Lin, H. (2022). A novel method integrating response surface method with artificial neural network to optimize membrane fabrication for wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134236>
- Lilley, T. (2005). Membrane filters -microfiltration and ultrafiltration. (R. J. Wakeman, and E. S. Tarleton editors). *Solid/Liquid Separation: Scale-up of Industrial Equipment*. Elsevier, U.K., p.140-195.
- Miller, S., Shemer, H., & Semiat, R. (2015). Energy and environmental issues in desalination. *Desalination*, 366, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.034>
- Mansour, R. Ben. (2023). Modeling and optimization of salt and boron removal in reverse osmosis system. *Desalination*, 562. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116699>
- MathWorks, MATLAB Deep Learning Toolbox Release 2020a. License Number: 968398, Natick, MA 2020.
- Mohammadi, F., Bina, B., Karimi, H., Rahimi, S., & Yavari, Z. (2020). Modeling and sensitivity analysis of the alkylphenols removal via moving bed biofilm reactor using artificial neural networks: Comparison of levenberg marquardt and particle swarm optimization training algorithms. *Biochemical Engineering Journal*, 161, 107685. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107685>
- Møller, M. F. (1993). A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. *Neural networks*, 6(4), 525-533.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons, 72-75.
- Murugan, T. M., Kiruba Shankar, R., Shivkumar, P., Raja Kumar, S., Gayathri, K. ve Jeyam, A. (2023). Monitoring and controlling the desalination plant using IoT. *Measurement: Sensors*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100720>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, 52-54.
- Nam, S. N., Kim, S., Her, N., Choong, C. E., Jang, M., Park, C. M., Heo, J., Yoon, Y. (2022). Performance assessment and optimization of forward osmosis–low pressure ultrafiltration hybrid system using machine learning for rhodamine B removal. *Desalination*, 543. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116102>
- Nandala, S. P., Tallam, A., Roy Choudhary, N., Sundergopal, S., & Bhargava, S. K. (2023). Design and optimization of multilayer composite membrane for biomethane enrichment: Process simulations and economics. *Separation and Purification Technology*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124073>

- Neto, J. G., Ozorio, L. V., de Abreu, T. C. C., Dos Santos, B. F., & Pradelle, F. (2021). Modeling of biogas production from food, fruits and vegetables wastes using artificial neural network (ANN). *Fuel*, 285, 119081.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119081>
- Neyman, J., Pearson, E. S. (1933). On the problem of the most efficient tests of statistical hypotheses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 231(694-706), 289-337.
- Niu, C., Li, X., Dai, R., & Wang, Z. (2022). Artificial intelligence-incorporated membrane fouling prediction for membrane-based processes in the past 20 years: A critical review. In *Water Research* (Vol. 216). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118299>
- P. Loganathan, G. Naidu, S. Vigneswaran, Mining valuable minerals from seawater: A critical review, *Environ. Sci. (Camb)*. 3 (2017), <https://doi.org/10.1039/C6EW00268D>
- Park, K., Kim, J., Yang, D. R., & Hong, S. (2020). Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions. *Journal of Membrane Science*, 595, 117607. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117607>
- Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., & Som, C. (2016). From Laboratory to Industrial Scale: A Scale-Up Framework for Chemical Processes In Life Cycle Assessment Studies. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1085-1097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.164>
- Poirier, K., Lotfi, M., Garg, K., Patchigolla, K., Anthony, E. J., Faisal, N. H., Mulgundmath, V., Sahith, J. K., Jadhawar, P., Koh, L., Morosuk, T., & Al Mhanna, N. (2023). A comprehensive review of pre- and post-treatment approaches to achieve sustainable desalination for different water streams. In *Desalination* (Vol. 566). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116944>
- Qadir, D., Nasir, R., Mukhtar, H. B., & Keong, L. K. (2020). Synthesis, characterization, and performance analysis of carbon molecular sieve-embedded polyethersulfone mixed-matrix membranes for the removal of dissolved ions. *Water Environment Research*, 92(9), 1306–1324. <https://doi.org/10.1002/wer.1326>
- Qadir, D., Idris, A., Nasir, R., Mannan, H. A., Sharif, R., & Mukhtar, H. (2023). Prediction of single salt rejection in PES/CMS based membranes. *Chemosphere*, 311, 136987.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136987>
- Qin, X., Qin, X., Xu, X., Zhao, J., Gui, Y., Guo, H., Mao, J., Wang, Y. ve Zhang, Z. (2023). The membrane-based desalination: Focus on MOFs and COFs. *Desalination*, 557. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116598>
- Qudah, A., Almerbati, A., & Mokheimer, E. M. A. (2024). Novel approach for optimizing wind-PV hybrid system for RO desalination using differential evolution algorithm. *Energy Conversion and Management*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117949>

- Ravajiri, E. S., Hasanloo, M., Jalali, A., & Houshfar, E. (2024). Techno-economic analysis and tri-objective optimization of a novel HDH desalination with PVT and vapor-compression chiller for sustainable water supply in remote areas. *Sustainable Cities and Society*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105211>
- Rizki, Z., & Ottens, M. (2023). Model-based optimization approaches for pressure-driven membrane systems. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 315). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123682>
- Sigue, S., Abderafi, S., & Bounahmidi, T. (2024). Multi-objective optimization of a forward osmosis process for desalination using a non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of Water Process Engineering*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104804>
- Smucker, B., Krzywinski, M., & Altman, N. (2019). Two-level factorial experiments. *Nat Methods*, 16(3), 211-212. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0335-9>
- Song, L. (2024). Optimization of seawater desalination processes with the ideal reverse osmosis equation. *Desalination*, 576. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117376>
- Srivastava, A., Singh, R., Rajput, V. D., Minkina, T., Agarwal, S., & Garg, M. C. (2022). A systematic approach towards optimization of brackish groundwater treatment using nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) hybrid membrane filtration system. *Chemosphere*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135230>
- Tang, X., Jia, S., Tang, W., Wang, J., & Gong, J. (2024). Highly efficient freezing desalination technology: Parameters optimization and model configuration. *Desalination*, 576. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117331>
- Tong, T., & Elimelech, M. (2016). The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies, and Future Directions. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 50, Issue 13, pp. 6846–6855). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01000>
- Wenten, I., Aryanti, P., Hâkim, A. (2016). Scale-up Strategies for Membrane-Based Desalination Processes: A Review. In *Journal of Membrane Science and Research* (Vol. 2). 43. www.msrijournal.com
- Xing, C., Bernicot, B., Arrachart, G., & Pellet-Rostaing, S. (2023). Application of ultra/nano filtration membrane in uranium rejection from fresh and salt waters. *Separation and Purification Technology*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123543>
- Xu, G. R., An, Z. H., Min-Wang, Ke-Xu, Zhao, H. L., & Liu, Q. (2023). Polyamide layer modulation for PA-TFC membranes Optimization: Developments, Mechanisms, and implications. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 311). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123200>
- Younos, T. (2005). The economics of desalination. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 132(1), 39-45.

- Yu H., Wilamowski B.M., Industrial Electronics Handbook. Levenberg-Marquadt Training, CRC Press, Boca Raton, FL 2011.
- Yuan, S., Ajam, H., Sinnah, Z. A. B., Altalbawy, F. M. A., Abdul Ameer, S. A., Husain, A., Al Mashhadani, Z. I., Alkhayyat, A., Alsalamy, A., Zubaid, R. A., ve Cao, Y. (2023). The roles of artificial intelligence techniques for increasing the prediction performance of important parameters and their optimization in membrane processes: A systematic review. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 260). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115066>
- Yujie, G., Hao, Y., Bowen, Z., Xinyi, C., & Zhijun, H. (2023). Optimal operation of new coastal power systems with seawater desalination based on grey wolf optimization. *Energy Reports*, 9, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.299>
- Zhang, W., Liang, W., Du, X. (2023). Adsorptive dynamic membrane for water purification: Model and optimization. *Results in Engineering*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101018>
- Zhao, A., & Ding, P. (2022). Regression-based causal inference with factorial experiments: estimands, model specifications and design-based properties. *Biometrika*, 109(3), 799-815. <https://doi.org/10.1093/biomet/asab051>
- Zhu, M., Wang, J., Yang, X., Zhang, Y., Zhang, L., Ren, H., Wu, B ve Ye, L. (2022). A review of the application of machine learning in water quality evaluation. In *Eco-Environment and Health* (Vol. 1, Issue 2, pp. 107–116). <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.06.001>



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : EDİKLİ, Hacı Ahmet

Eğitim

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Ön Lisans	Samsun 19 Mayıs Polis Meslek Yüksekokulu	2006
Lisans	Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi İktisat Bölümü	2009
Lisans	Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Uluslararası İlişkiler Bölümü	2016
Lisans	Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü	2022
Yüksek Lisans	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dış Ticaret ve Kambiyo Programı	2018

Çalışma Tecrübesi

Yıl	İşyeri	Ünvan
2021 Ağustos	Adana Büyükşehir Belediyesi Atık Yönetim Şube Müdürlüğü	Stajyer
2020 Ağustos	Atasar Mühendislik İmar İnş. Mad. Pet. ve Sağ. Ür. Dan. Ltd. Şti.	Stajyer
2006-Halen	Emniyet Genel Müdürlüğü	Polis Memuru

Projeler:

EDİKLİ H.A. & GÜNAY E., (2018), Türkiye'nin Dış Ticaret Mevzuatı ile Ekonomi Politikaları Arasındaki Çatışmalar, K.S.Ü. Ord. Prof Mükrimin Halil YINANÇ Kütüphanesi, IX, 69 syf.