



**ELEKTROMEMBRAN PROSESİ İLE NaOH, H₃BO₃
ÜRETİMİNİN VE OPTİMİZASYONUNUN
İNCELENMESİ**

Hülya ŞENOL BALCI

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ATA

Doktora Tezi

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2026

(Her hakkı saklıdır.)

T.C
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ELEKTROMEMBRAN PROSESİ İLE NaOH, H₃BO₃ ÜRETİMİNİN VE
OPTİMİZASYONUNUN İNCELENMESİ**

(Investigation of The Production and Optimization of NaOH, H₃BO₃ by Electromembrane
Process)

DOKTORA TEZİ

Hülya ŞENOL BALCI

Danışman: Osman Nuri ATA

Erzurum
Şubat, 2026

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Hülya ŞENOL BALCI tarafından hazırlanan “**Elektromembran Prosesi ile NaOH, H₃BO₃ Üretiminin ve Optimizasyonunun İncelenmesi**” başlıklı çalışması 16 / 02 / 2026 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ergün YILDIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Danışman:	Prof. Dr. Osman Nuri ATA <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Arzu KANCA <i>Atatürk Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ertuğrul ERKOÇ <i>Bursa Teknik Üniversitesi</i>	
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Gözde GEÇİM <i>Bursa Teknik Üniversitesi</i>	

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Unvan Ad SOYAD

Enstitü Müdürü

Bu çalışma Tübitak 1003 projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 218M777

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Osman Nuri ATA* danışmanlığında sunulan “Elektromembran Prosesi ile NaOH, H₃BO₃ Üretiminin ve Optimizasyonunun İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	%2	30
Kuramsal Temeller	%5	30
Materyal ve Metot	%12	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	%4	20
Sonuçlar	%0	20
Tezin Geneli	%7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5’den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Hülya ŞENOL BALCI	Prof. Dr. Osman Nuri ATA
16.2.2026	16.2.2026
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora yolculuğum boyunca akademik ve kişisel gelişimime sunduğu katkılarla bana rehberlik eden, yalnızca bir danışman değil aynı zamanda ilham verici bir akademisyen olarak yanımda olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Osman Nuri ATA'ya en içten şükranlarımı sunarım. Sabırlı yaklaşımı, yapıcı eleştirileri ve güven veren duruşuyla bu çalışmanın her aşamasında büyük katkısı olmuştur.

Tez izleme komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Arzu KANCA ve Sayın Prof. Dr. Ergün YILDIZ'a, değerli bilgi ve yönlendirmeleriyle çalışmama sağladıkları katkılar için içten teşekkür ederim.

Bu süreçte, her koşulda yanımda olan değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunarım. Hayatımın her aşamasında desteğini hissettiğim, anısını daima yaşatacağım merhum babam Aydın ŞENOL'u sevgi ve saygıyla anarken; annem Yasemin ŞENOL'a, kardeşlerim Fahrettin ŞENOL ve Medine İkbal ŞENOL'a gösterdikleri sabır, anlayış ve verdikleri güç için gönülden teşekkür ederim. Ayrıca, aile sıcaklığını her zaman hissettiren kıymetli dostlarıma da destekleri ve içtenlikleri için müteşekkirim.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu zorlu süreçte de yanımda olan, desteği ve inancıyla gücümü artıran, sabrı ve sevgisiyle varlığına her gün şükrettiğim kıymetli eşim Muhammed BALCI'ya tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu çalışma, TÜBİTAK 1003 Öncelikli Alanlar Araştırma Programı kapsamında yürütülen 218M777 numaralı proje desteği ile gerçekleştirilmiş olup, sağlanan maddi ve teknik destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz.

Hülya ŞENOL BALCI

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTROMEMBRAN PROSESİ İLE NaOH, H₃BO₃ ÜRETİMİNİN ve OPTİMİZASYONUN İNCELENMESİ

Hülya ŞENOL BALCI

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ATA

Amaç: Bu çalışmada, herhangi bir reaktif kullanmadan ve sıvı atık üretmeden elektromembran prosesi ile borik asit (H₃BO₃) ve sodyum hidroksit (NaOH) üretimini mümkün kılacak çevreyle dost hibrit bir prosesin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada, bipolar membranlı elektrodializ (BMED) prosesi kullanılarak borik asit ve tuz içeren sentetik çözeltilerden eş zamanlı asit ve baz üretimi ile tuz ayrıştırılması hedeflenmiştir. Optimizasyon için, başlangıç tuz konsantrasyonu, asit ve baz konsantrasyonları, uygulanan akım ve akış hızı olmak üzere beş ana parametre belirlenmiş ve her biri dört seviyede Taguchi L16 ortogonal deney planı çerçevesinde sistematik olarak varyasyonları test edilmiştir. Deney sonuçları, ürün verimi, tuz dönüşüm oranı, akım verimliliği, enerji tüketimi ve ürün saflığı gibi performans kriterleri ışığında analiz edilmiştir. Optimum koşulların belirlenmesi için, elde edilen çoklu performans verileri Taguchi yöntemiyle desteklenen çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri olan TOPSIS ve MOORA yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bulgular: Bipolar membranlı elektrodializ (BMED) prosesi kullanılarak borik asit ve eş zamanlı asit-baz üretiminin optimizasyonu hedeflenmiştir. Taguchi deney tasarımı ile beş parametre (başlangıç tuz-H₃BO₃ konsantrasyonu, akım yoğunluğu, akış hızı, başlangıç asit-baz konsantrasyonu ve elektrolit konsantrasyonu) dört seviyede test edilmiş ve 16 farklı deneysel koşul oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, performans kriterleri (borik asit verimi, tuz dönüşümü, akım verimliliği, enerji tüketimi ve ürün saflığı) üzerinden değerlendirilmiş, varyans analizleri ile parametrelerin etkileri belirlenmiştir. Analizler, başlangıç tuz konsantrasyonu ve uygulanan akımın sistem performansı üzerinde en etkili faktörler olduğunu göstermiştir. Akış hızının artışı proses verimliliğini olumlu etkilerken, elektrolit konsantrasyonunun etkisi sınırlı kalmıştır. Çok kriterli karar verme yöntemleri (TOPSIS ve MOORA) ile en uygun parametre kombinasyonu seçilmiş ve doğrulama deneyleri ile desteklenmiştir. Borik asit kristallendirme süreci, karıştırma koşulları ve çözeltinin iyonik içeriği bağlamında incelenmiş; BMED ile %98,6 tuz giderimi sağlanarak ürün saflığı %99 ve üzerine yükseltilmiştir. Çalışma sonuçları, BMED prosesinin borik asit geri kazanımı ve asit-baz üretiminde enerji verimli, yüksek performanslı ve optimize edilebilir bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç: Bu çalışma sonucunda, çevreye duyarlı ve atık üretiminin minimize edildiği yenilikçi bir proses geliştirilerek, borik asit ve sodyum hidroksitin eş zamanlı ve yüksek verimlilikle üretilebileceği ortaya koyulmuştur. Bu proses, hem değerli kimyasalların geri kazanımını mümkün kılması hem de endüstriyel atıkların çevresel etkilerini azaltması açısından sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumlu bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bipolar membranlı elektrodializ, H₃BO₃, Elektrodializ, NaOH, TOPSIS, MOORA, Taguchi

Şubat 2026, 115 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF THE PRODUCTION AND OPTIMIZATION OF NaOH, H₃BO₃ BY ELECTROMEMBRANE PROCESS

Hülya ŞENOL BALCI

Supervisor: Prof. Dr. Osman Nuri ATA

Purpose: This allows the development of an environmentally friendly hybrid process that enables the production of boric acid (H₃BO₃) and sodium hydroxide (NaOH) via an electromembrane process that does not involve any reagents and produces liquid waste.

Method: This efficient bipolar membrane electrodialysis (BMED) process aims to simultaneously produce acid and base from synthetic solutions containing boric acid and salt, thereby separating the salts. For optimization, five key parameters were determined: initial salt temperature, acid and base concentrations, applied current, and flow rate, and each parameter was systematically tested within a four-stage Taguchi L16 orthogonal experimental design. The experimental results were analyzed for the distribution of performance criteria such as product yield, salt conversion rate, current efficiency, energy consumption, and product safety. To determine the optimum conditions, the obtained performance data were evaluated using the Taguchi method, using the multi-criteria decision-making (MCDM) techniques TOPSIS and MOORA.

Findings: Bipolar membrane electrodialysis (BMED) process aimed to configure boric acid and simultaneous acid-base production. Five parameters (initial salt-H₃BO₃ temperature, current density, flow rate, initial acid-base zones, and electrolyte temperatures) were tested over several years using the Taguchi experimental design and conditioned at 16 different four-terminal conditions. The obtained results were evaluated based on performance criteria (boric acid yield, salt consumption, current efficiency, energy consumption, and product purity), and variance analysis was used to determine the parameter values. The analyses showed that the initial salt temperature and applied current had an impact on system performance. While increasing the flow rate had positive effects on the process, the effect of electrolyte strength was limited. The most suitable parameter screening was determined using multi-criteria decision-making methods (TOPSIS and MOORA) and supported by experiments. The boric acid crystallization process was investigated in terms of mixing conditions and the ionic composition of the solution; with 98.6% salt removal achieved by BMED, product purity was increased to 99% and above. The study results demonstrate that the BMED process is an energy-efficient, high-performance, and optimized method for recovering boric acid and producing acid-base.

Results: This study demonstrates that boric acid and sodium hydroxide can be produced simultaneously and at high efficiency by developing an advanced process that minimizes both waste and valuations. This process offers an approach compatible with sustainable production goals, including both the recovery of valuable chemicals and the reduction of industrial waste growth.

Keywords: Bipolar membrane electrodialysis, H₃BO₃, Electrodialysis, NaOH, TOPSIS, MOORA, Taguchi

February 2026, 115 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
Tezin Ana Katkıları.....	8
KURAMSAL TEMELLER.....	10
Borun Endüstriyel Kullanımları.....	11
Membran teknolojisi ve uygulama alanları.....	14
Membran proseslerinin tarihsel gelişimi.....	15
Membranla ayırma	16
Membranlarda sürücü kuvvetler	17
Elektrodiyaliz	18
Elektrodiyaliz süreçleri	19
Elektrot reaksiyonları.....	20
Klasik elektrodiyaliz	21
Ters elektrodiyaliz.....	22
Bipolar membranlı elektrodiyaliz	22
Bipolar Membran teknolojisinin temel özellikleri	23
Bipolar Membranlı elektrodiyaliz hücresi (BMED)	24
Çok kriterli karar verme	38
MOORA Yöntemi.....	39
TOPSIS Yöntemi	39
MATERYAL VE YÖNTEM	42
Kimyasal Temini ve Sistemin Yapısı.....	42

BMED Prosesi Deneysel Uygulama Adımları.....	45
BMED Sistemi Çalıştırma Prosedürü	46
BMED Prosesi İçin Deney Planı.....	47
BMED Prosesinden Elde Edilen Çözeltilerin Kristallendirilmesi	49
MOORA.....	54
TOPSİS	55
BMED prosesinde yapılan ölçümler ve analizler.....	57
Asit ve baz konsantrasyonu.....	57
Desalinasyon oranının hesaplanması	58
Borik asit (H_3BO_3) tayini	58
Enerji tüketimi (kWh/kg)	58
Akım verimliliği (η).....	59
Asit ve baz ürün saflığı	59
Anyon ve katyon analizi.....	59
X-Işını Kırınımı (XRD) Yöntemi	60
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	62
Deneysel Parametrelerin S/N Değerlerine Göre Performans Kriterlerine Etkisi.....	66
H_3BO_3 miktarı üzerine parametrelerin etkisi	66
Oluşan asit ve baz miktarı üzerine parametrelerin etkisi	68
Asit ve baz dönüşüm üzerine parametrelerin etkisi	70
Asit ve baz içerisindeki safsızlıklar üzerine parametrelerin etkisi	73
Akım verimi üzerine parametrelerin etkisi	75
Enerji tüketimi üzerine parametrelerin etkisi	76
Proseslenme süresi üzerine parametrelerin etkisi	78
Performans Kriterlerinin Varyans Analizi	79
TOPSIS Yöntemi Uygulaması	83
BMED prosesinde tuzdan arındırılmış besleme çözeltisinden borik asit kristallendirilmesi.....	88
SONUÇLAR.....	92
KAYNAKÇA	95
ÖZGEÇMİŞ.....	101

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bor Mineralleri	11
Tablo 2. H_3BO_3 'ün Fiziksel Özellikleri	13
Tablo 3. Membran Proseslerde Sürücü Kuvvetler (Aslan 2016).....	18
Tablo 4. PCCell v Membranların Özellikleri.....	42
Tablo 5. Parametre ve Seviyeleri	47
Tablo 6. Deney Planı	48
Tablo 7. Deney Planı ve Besleme Çözeltilisinin Özellikleri.....	50
Tablo 8. Hacim ve Proseleme Süreleri	62
Tablo 9. Deney Çıktıları	65
Tablo 10. S/N Oranına Göre Performans Kriterlerinin Sınıflandırılması.....	66
Tablo 11. Besleme Çözeltilisinde Borik Asit Konsantrasyonu, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama	67
Tablo 12. İki Tekrarlı Deneyler Sonucunda Ölçülen Asit ve Baz Miktarları (mol) İle Hesaplanan Performans İstatistikleri	69
Tablo 13. Ürün Temelli Tuz Dönüşümü, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama	71
Tablo 14. Asit-Baz İçerisindeki Safsızlık, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama	73
Tablo 15. Akım Verimi, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama	75
Tablo 16. Enerji Tüketimi, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama	77
Tablo 17. Proseslenme Süresi, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama	78
Tablo 18. Üretilen Asit İçin Varyans Analizi	80
Tablo 19. Üretilen Baz İçin Varyans Analizi	80
Tablo 20. Üretilen H_3BO_3 İçin Varyans Analizi	80
Tablo 21. Ürüne Dayalı Tuz Dönüşümü (asit) İçin Varyans Analizi	81
Tablo 22. Ürüne Dayalı Tuz Dönüşümü (baz) İçin Varyans Analizi	81
Tablo 23. Akım Verimi İçin Varyans Analizi	81
Tablo 24. Asitteki Safsızlık İçin Varyans Analizi	81
Tablo 25. Bazdaki Safsızlık İçin Varyans Analizi.....	82
Tablo 26. Enerji Tüketimi İçin Varyans Analizi	82
Tablo 27. Çalışma Süresi İçin Varyans Analizi.....	82
Tablo 28. Optimum Çalışma Koşulları	82

Tablo 29. Taguchi Tahminlerine Göre S/N Değerleriyle Oluşturulan Karar Matrisi.....	84
Tablo 30. Ağırlıklı ve Normalize Edilmiş Karar Matrisi.....	84
Tablo 31. Pozitif ve Negatif İdeal Çözümleri.....	85
Tablo 32. Pozitif-Negatif Uzaklık Değerleri, Görelî Yakınlıklar ve Öncelik Sıralaması MOORA Yöntemi Uygulaması	85
Tablo 33. MOORA Yaklaşımına Göre Seçeneklerin Sıralanması	86
Tablo 34. Elde Edilen Ham Borik Asit Miktarı ve Saflığı	88



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bor elementi	10
Şekil 2. Dünya bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı	11
Şekil 3. Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı	12
Şekil 4. Borik asitin sudaki çözünürlüğünün sıcaklıkla değişimi	13
Şekil 5. Yarı geçirgenliği tesadüfen keşfeden Nollet'in karalama defterinden bir görüntü	16
Şekil 6. Bir Membran ve akım fazlarının şematik gösterimi	17
Şekil 7. Elektrodializ prensibi	19
Şekil 8. Elektrodializ hücresi	20
Şekil 9. Elektroliz hücresinin şematik gösterimi	21
Şekil 10. Bipolar membran hücresinin şematik gösterimi	22
Şekil 11. Bipolar membranlı elektrodializ hücresi	24
Şekil 12. Çalışmanın basamakları ve akış şeması	37
Şekil 13. BMED sistem	43
Şekil 14. Doğru akım güç kaynağı ve software ekran görüntüsü	43
Şekil 15. BMED sistemi ekipmanlar	44
Şekil 16. PCCell elektrodializ hücresi ve fonksiyonel parçalarının şematik görünümü	44
Şekil 17. PCCell ED 64 004 bipolar membranlı elektroliz hücresi membran ve spacer dizilişi	45
Şekil 18. BMED hücre gösterimi	46
Şekil 19. BMED hücresinin şematik gösterimi	49
Şekil 20. (a) Rotary evaporasyon sistemi; (b) Vakumlu filtrasyon düzeneği	50
Şekil 21. Katyon analizi için iyon kromatografi cihazı	60
Şekil 22. Anyon analizi için iyon kromatografi cihazı	60
Şekil 23. 10. deney için besleme ve baz çözeltisi iletkenliğinin zamanla değişimi	63
Şekil 24. 10. Deney için akım ve voltajın zamanla değişimi	63
Şekil 25. H_3BO_3 miktarı üzerine parametrelerin etkisi	68
Şekil 26. HCl oluşumu üzerine parametrelerin etkisi	69
Şekil 27. NaOH oluşumu üzerine parametrelerin etkisi	70
Şekil 28. Ürün temelli tuz dönüşümü (HCl) üzerine parametrelerin etkisi	71
Şekil 29. Ürün temelli tuz dönüşümü (NaOH) üzerine parametrelerin etkisi	72

Şekil 30. Asit içerisindeki safsızlık üzerine parametrelerin etkisi	73
Şekil 31. Baz içerisindeki safsızlık üzerine parametrelerin etkisi.....	74
Şekil 32. Akım verimliliği üzerine parametrelerin etkisi	76
Şekil 33. Enerji tüketimi üzerine parametrelerin etkisi	77
Şekil 34. Proseslenme süresi üzerine parametrelerin etkisi	79
Şekil 35. Uzun kullanımlardan sonra bipolar membranlarda oluşan çatlaklar.....	88
Şekil 36. BMED prosesi sonrası H_3BO_3 ve NaCl çözeltisinden elde edilen ham, yıkılmış ve ticari borik asidin XRD desenleri.....	91



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

ADM	Anyon değişim membran
BMED	Bipolar membranlı elektrodializ
BPM	Bipolar membran
ÇKKV	Çok kriterli karar verme tekniği
ED	Elektrodializ
KDM	Katyon değişim membran
RO	Ters Osmoz
S ⁻	Pozitif ideal çözüm
S [*]	Negatif ideal çözüm
S/N	Sinyal-gürültü oranı

Simgeler

C	Konsantrasyon
E	Enerji
E	Enerji Tüketim
F	Faraday sabiti
I	Akım
R	Direnç
t	Zaman
V	Gerilim
W	Ağırlık

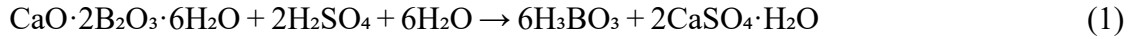
GİRİŞ

Bor elementi, günümüz sanayiinde geniş bir kullanım yelpazesine sahip olup, birçok endüstriyel ürünün üretiminde temel girdi olarak değerlendirilmektedir (Nas ve Yıldız, 2019). Mevcut sektörlerdeki tüketim artışına ek olarak, her geçen gün yeni uygulama alanlarının ortaya çıkması, borun stratejik önemini daha da artırmaktadır. Tarihsel kayıtlar, borun kullanımının çok eski dönemlere dayandığını göstermekte olup, dünya bor rezervlerinin yaklaşık %72,8'inin Türkiye'de bulunması (Eti Maden, 2024), ülkemizi küresel ölçekte son derece önemli bir konuma getirmektedir. Sürekli gelişen kullanım alanları sayesinde bor, geleceğe dönük potansiyeli yüksek bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Özekmekçi, 2015).

Doğal ortamda bor mineralleri genellikle sodyum (Na), magnezyum (Mg) ve kalsiyum (Ca) gibi alkali ve toprak alkali metallerle birleşmiş hidratlı borat bileşikleri şeklinde bulunmaktadır (Çelikoyan, 2008). Bu mineraller arasında ticari açıdan en önemli olanları tinkal ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{CaO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve üleksittir ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) (Elbeyli, 2015). Bor mineralleri; cam, seramik, deterjan, gübre, ilaç, elektronik ve nükleer teknoloji gibi birçok endüstride kullanılan stratejik hammaddeler arasında yer almaktadır. Bu minerallerden elde edilen borik asit (H_3BO_3), yüksek kimyasal saflığı, geniş kullanım alanı ve yüksek katma değeri nedeniyle dünya bor kimyasalları pazarında önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu geniş rezervler dikkate alındığında, bor minerallerinin yüksek verimle ve çevre dostu yöntemlerle değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

Borik asit (H_3BO_3), ticari ve stratejik açıdan en değerli bor bileşiklerinden biridir ve cam, seramik, tekstil, deterjan, tarım ve sağlık gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel ölçekte borik asit üretimi genellikle bor minerallerinin inorganik asitlerle reaksiyonu esasına dayanır. Bu üretim sürecinde boraks gibi hammaddelerin kullanımı çözünmeyen bir atık oluşturmazken, kullanılan asit türüne bağlı olarak farklı sodyum tuzları yan ürün olarak açığa çıkar. En yaygın tercih edilen asitler arasında hidroklorik asit (HCl), sülfürik asit (H_2SO_4) ve nitrik asit (HNO_3) yer almaktadır (Elbeyli, 2015). Ancak bu yöntemlerin güçlü asit kullanımı gerektirmesi nedeniyle ekipmanların kullanım ömrü azalmakta ve maliyet artmaktadır (Erkmen ve Yapıcı, 2016). Ayrıca bu işlemler sonucunda oluşan kalsiyum nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve kalsiyum sülfat (CaSO_4) gibi yan ürünler çevresel açıdan zararlı atıklar arasında yer almakta ve önemli ölçüde çevre

kirliliğine neden olmaktadır. Ticari olarak en sık uygulanan yöntem, kolemanit ile sülfürik asidin reaksiyonu yoluyla borik asit elde edilmesidir (Eş.1).



Bu süreçte oluşan kalsiyum sülfat monohidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, yani jibs), düşük çözünürlüğe sahip olduğu için çözelti fazından kolaylıkla ayrılabilir. Ancak prosesin önemli bir dezavantajı, oluşan jibsin cevherden gelen kil mineralleriyle karışık halde bulunmasıdır. Bunun yanı sıra, bu katı atık içerisinde belirli miktarda borik asit kalabilmekte; bu durum hem ekonomik kayıplara hem de çevresel sorunlara yol açmaktadır (Yorulmaz, 2014). Kolemanit ve tinkal gibi bor mineralleri, borik asit (H_3BO_3) ve boraks penta ile dekahidratlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bulutçu vd., 2011). Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar, özellikle tinkal, kolemanit ve üleksit gibi bor minerallerinin çeşitli asitlerle çözündürülerek etkin şekilde değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Günümüzde sülfürik asit (H_2SO_4) en yaygın kullanılan reaktif olmakla birlikte, hidroklorik asit (HCl), nitrik asit (HNO_3) ve fosforik asit (H_3PO_4) gibi alternatif asitlerin de farklı koşullar altında değerlendirilmesine yönelik çok sayıda araştırma yürütülmüştür. Bu çalışmalar, yalnızca kimyasal verimlilik açısından değil, aynı zamanda enerji tüketimi, çevresel etki ve atık yönetimi bakımından da çeşitli sonuçlar ortaya koymuştur.

Sülfürik asit, endüstriyel ölçekte en yaygın kullanılan çözücülerden biri olmakla birlikte, proses sonucunda oluşan sodyum sülfat (Na_2SO_4) yan ürünü nedeniyle çevresel açıdan belirli sınırlılıklara sahiptir (Mergen vd., 2003). Yapılan çalışmalarda tinkalin sülfürik asitle çözündürülmesi sonucu Na_2SO_4 'ün çöktürülmesiyle hem borik asidin ayrılabilirdiği hem de bu yan ürünün deterjan ve kâğıt sanayilerinde hammadde olarak değerlendirilebildiği bildirilmiştir (Çetin vd., 2001). Bununla birlikte, Na_2SO_4 'ün hidrat formda ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) elde edilmesi, susuzlaştırma gereksinimi nedeniyle proses maliyetini artırmaktadır (Mergen *et al.*, 2003). Ayrıca sülfürik asit kullanımında ortamın yüksek asitliği, borik asidin çözeltide kalmasına neden olmakta ve ürün ayrımını güçleştirmektedir. Bu durum, sülfürik asitli sistemlerin ekonomik ve çevresel açıdan yeniden değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Bulutçu vd., 2008).

Alternatif üretim yollarından biri olarak nitrik asit (HNO_3) kullanımı hem reaksiyon verimi hem de elde edilen yan ürünlerin ekonomik değeri bakımından dikkat çekicidir. Tinkalin nitrik asitle reaksiyonu sonucunda borik asit ve gübre sanayinde önemli bir bileşik olan sodyum nitrat (NaNO_3) elde edilmektedir. Yorulmaz (2014) tarafından yapılan yüksek lisans çalışmasında, $\text{NaNO}_3\text{--H}_3\text{BO}_3\text{--H}_2\text{O}$ sistemine ait faz diyagramları 40 °C ve 80 °C'de

incelenmiş, kristalizasyon koşulları optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki bileşiğin suda yüksek çözünürlüğe sahip olması nedeniyle saflaştırma işlemlerinde belirli zorlukların bulunduğunu göstermektedir.

Hidroklorik asit (HCl) kullanılarak gerçekleştirilen tinkal çözündürme proseslerinde ise hem borik asit hem de sodyum hidroksit üretimi hedeflenmektedir. Balkan (1979) tarafından yürütülen TÜBİTAK projesinde tinkal, gaz fazında HCl ile muamele edilerek NaCl ve borik asit elde edilmiş; daha sonra NaCl çözeltisi elektrolize edilerek NaOH, Cl₂ ve H₂ gazları üretilmiştir. Oluşan klor ve hidrojen gazlarının yeniden HCl sentezinde kullanılabilmesi sayesinde çevresel etkisi düşük, döngüsel bir sistem önerilmiştir. Bununla birlikte klasik elektrodializ sistemlerinde borik asidin zayıf iyonlaşması, iyon taşınımını sınırlamakta ve proses verimini düşürmektedir. Bu nedenle, daha etkin bir ayırma için bipolar membran elektrodializ (BMED) yöntemi önerilmektedir (Elbeyli vd., 2015).

Kolemanit, Türkiye’de yaygın olarak bulunan kalsiyum temelli bir bor mineralidir ve borik asit üretiminde en çok tercih edilen hammaddelerden biridir. Sülfürik asitle çözündürülmesi sonucunda borik asit ve jips (CaSO₄·2H₂O) oluşur. Bu reaksiyon genellikle 80–95 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmekte ve jipsin düşük çözünürlüğü nedeniyle çökelerek ayrılması sağlanmaktadır (Cetin *et al.*, 2001). Bununla birlikte, oluşan jipsin sanayide sınırlı kullanım alanına sahip olması ve yüksek miktarlarda katı atık üretmesi, prosesin çevresel sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Taylan vd., 2007). Ayrıca kolemanit cevherinin çözündürülmesi sırasında uygulanan kalsinasyon işlemi yüksek enerji gerektirmekte olup, bu durum ekonomik maliyeti artırmaktadır (Kurtbaş vd., 2006).

Bu sorunlara yönelik olarak çeşitli araştırmacılar, sülfürik asit yerine çevreye daha duyarlı asitlerin veya yardımcı çözücülerin kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Örneğin, asetik asit ve propiyonik asit gibi organik asitlerin kullanıldığı çalışmalarda, çözelti içerisindeki safsızlıkların çözünürlüğünün sınırlanmasıyla ürün saflığının artırılabilirdiği rapor edilmiştir. Özellikle propiyonik asit ilavesiyle yürütülen deneylerde, kolemanit cevherinde bulunan kil ve feldspat gibi yan minerallerin bozunmasının sınırlandığı; bu sayede çözeltideki sodyum, potasyum, magnezyum ve silis miktarlarının belirgin biçimde azaldığı bildirilmiştir (Bulutcu vd., 2008). Bu sonuçlar, organik asit katkılı sistemlerin klasik sülfürik asitli proseslere kıyasla daha seçici, çevre açısından daha az zararlı ve ürün kalitesini artırıcı potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Kolemanitin çözündürülmesinde yalnızca asit türü değil, aynı zamanda fiziksel iyileştirme yöntemleri de reaksiyon verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Ultrases enerjisinin

kullanıldığı çalışmalarda, difüzyon tabakasının incilmesiyle çözünme hızının arttığı ve jips kristallerinin daha küçük boyutlarda olduğu gözlemlenmiştir (Taylan, 2007). Bu bulgular, ultrasesin reaksiyon kinetiğini hızlandırdığı gibi kristal morfolojisini de iyileştirerek ürün saflığını artırdığını göstermektedir.

Benzer şekilde, SO₂ ile doymuş hâle getirilmiş borik asit çözeltilerinde kolemanitin çözündürülmesi üzerine yapılan çalışmalarda, sistemde Ca(HSO₃)₂ ara bileşiğinin olduğu ve bunu takiben CaSO₃·xH₂O çökmesiyle jips yerine değerlendirilebilir bir yan ürün elde edildiği bildirilmiştir (Kurtbaş vd., 2006). Bu sayede hem katı atık miktarı azaltılmış hem de çözelti içeriğindeki SO₂ yeniden kullanılarak döngüsel bir üretim süreci oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, klasik asitli sistemlere kıyasla atık oluşumunu minimize eden ve sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır.

Uleksit minerali de Türkiye’de geniş rezervlere sahip olan bir diğer önemli bor kaynağıdır. Kimyasal formülü Na₂O·2CaO·5B₂O₃·16H₂O olan bu mineral hem sodyum hem de kalsiyum içeren karmaşık yapısıyla çözündürme işlemlerinde farklı davranışlar göstermektedir. Sülfürik asitle gerçekleştirilen reaksiyonlar sonucunda borik asit, sodyum sülfat ve kalsiyum sülfat oluşmakta; bu sürecin kinetiği “küçülen çekirdek modeli” (shrinking core model) ile açıklanmaktadır (Tunç vd., 2001). Deneysel bulgular, asit konsantrasyonu ve katı/sıvı oranındaki artışın çözünme hızını azalttığını, buna karşın sıcaklık artışının ve daha küçük parçacık boyutlarının çözünme hızını artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca karıştırma hızının etkisinin sınırlı olduğu ve reaksiyon hızının difüzyon kontrollü olarak gerçekleştiği belirlenmiştir (Çetin vd., 2001).

Organik asitlerle yürütülen uleksit çözündürme çalışmalarında ise özellikle asetik asit (CH₃COOH) kullanımı ön plana çıkmıştır. Bu sistemlerde ana ürün borik asit olurken, sodyum asetat ve kalsiyum asetat yan ürün olarak elde edilmektedir. Bu bileşiklerin sıcaklığa bağlı çözünürlük farklarından yararlanılarak ürün ayrımı yapılabilir (Mergen vd., 2003). Çalışmalar, sıcaklığın artmasıyla çözünme hızının yükseldiğini, katı/sıvı oranı ve partikül boyutunun artışıyla ise hızın azaldığını göstermiştir. Reaksiyonun yüzey kontrollü olduğu ve daralan çekirdek modeline uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Borik asit üretiminde yalnızca kullanılan asit türü değil, aynı zamanda süreçte oluşan yan ürünlerin değerlendirilmesi ve enerji tüketiminin azaltılması da proses optimizasyonu açısından kritik öneme sahiptir. Türkiye’de endüstriyel ölçekte yürütülen üretimlerde özellikle kolemanit cevherinin sülfürik asit ile çözündürülmesi sonucu borik asit elde edilmekte ve bu prosesin doğal bir yan ürünü olarak jips oluşmaktadır. Ancak jipsin sanayideki kullanım

alanlarının sınırlı olması, oluşan yüksek miktardaki katının depolanmasını gerektirmekte; bu durum hem işletme maliyetini artırmakta hem de önemli çevresel riskler yaratmaktadır (Cetin vd., 2001). Buna ek olarak, süreç boyunca ortaya çıkan sıvı atıklar yüksek sülfat ve bor içeriği nedeniyle çevre mevzuatında belirtilen deşarj limitlerini aşmakta; bu durum işletmeleri yeni atık barajları oluşturmaya zorlamakta ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli sorunlara yol açmaktadır (Yorulmaz, 2014).

Borik asit üretim süreçlerine ek olarak, sodyum hidroksit (NaOH) üretimi de kimya endüstrisinde stratejik öneme sahiptir. Günümüzde NaOH, çoğunlukla klor-alkali endüstrisinde kullanılan membran elektrolizi teknolojisiyle üretilmektedir. Bu yöntemde tuz çözeltisinin elektrolizi sonucunda NaOH, klor (Cl_2) ve hidrojen (H_2) elde edilmektedir. Ancak prosesin önemli bir dezavantajı, üretilen her bir ton NaOH'a karşılık yaklaşık 0,9 ton klor gazının ortaya çıkmasıdır. Klorun pazarlanamadığı veya yeterli talep görmediği durumlarda, bu yan ürün üretim kapasitesini sınırlayan bir faktör hâline gelmekte; özellikle NaOH talebinin yüksek olduğu sektörlerde üretim verimliliğini azaltmakta ve ekonomik sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir (Elbeyli vd., 2015).

Borik asit üretimi ve NaOH üretim süreçleri birlikte değerlendirildiğinde, her iki prosesin de çevresel ve ekonomik açıdan çeşitli zorluklar içerdiği görülmektedir. Sülfürik asitli sistemlerde yüksek miktarda asit tüketimi, atık jipsin depolanması, sıvı atıkların deşarj limitlerini aşması ve yüksek enerji kullanımı gibi problemler öne çıkmaktadır. Ayrıca elde edilen borik asit genellikle sülfat, alkali ve metal iyonu gibi safsızlıklar içerdiğinden, ürünün birkaç kez yeniden kristallendirilmesi gerekmektedir; bu da ürün kaybı ve maliyet artışına yol açmaktadır (Mergen vd., 2003; Taylan, 2007).

Son yıllarda bu problemlerin aşılmasına yönelik olarak elektrokimyasal membran teknolojileri, özellikle bipolar membran elektrodializ (BMED) sistemleri üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Bu yöntemlerde, bor içeren çözeltiler uygun elektrot ve membran koşulları altında işlenerek hem borik asit hem de sodyum hidroksit gibi değerli ürünler eşzamanlı olarak elde edilebilmektedir. Örneğin Figueira vd. (2025), ticari ve polielektrolit kaplamalı iyon değiştirici membranların performansını karşılaştırarak, düşük enerji tüketimiyle yüksek saflıkta H_3BO_3 üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. Bu tür sistemler, klasik kimyasal proseslere göre daha düşük çevresel etki ve enerji tüketimiyle çevre dostu bir alternatif sunmaktadır.

Günümüzde klasik üretim yöntemlerinin çevresel ve ekonomik sınırlamalarını aşmak amacıyla geliştirilen en yenilikçi yaklaşımlardan biri elektromembran teknolojileridir. Bu

sistemlerde iyon seçici membranlar aracılığıyla çözeltilerdeki iyonlar kontrollü biçimde ayrılır, taşınır ve yeniden birleştirilir. Klasik elektrodiyaliz (ED) sistemleri uzun süredir iyon ayırımı ve saflaştırma işlemlerinde kullanılmakta olup, çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Li *et al.*, 2016). Ancak klasik ED sistemlerinde doğrudan asit ve baz üretimi mümkün değildir. Bu nedenle son yıllarda, klasik ED sistemlerine en az bir bipolar membran (BM) eklenmesiyle geliştirilen bipolar membran elektrodiyaliz (BMED) teknolojisi giderek artan bir ilgi görmektedir (Datta and Henry, 2006; Erkmen ve Yapıcı, 2015).

BMED sistemi, iyon ayırımı ve yeniden sentez özelliklerini bir araya getirerek tuz çözeltilerinden hem asit hem de baz üretimini mümkün kılar. Bu yöntemde, membranın bir tarafında protonlar (H^+), diğer tarafında hidroksit iyonları (OH^-) üretilir. Böylece sistemde herhangi bir kimyasal reaktif kullanılmadan NaOH ve H_3BO_3 gibi değerli ürünler elde edilebilir. Literatürde, borat içeren çözeltiler üzerinde yapılan BMED çalışmalarında %93–99 arasında verimlerle borik asit ve NaOH üretildiği, ürün saflıklarının %99'un üzerine çıktığı bildirilmiştir (Erkmen ve Yapıcı, 2015). Bu süreçler, zararlı yan ürün oluşturmada kapalı devre biçiminde işletilebilmekte ve çevresel etkileri minimuma indirmektedir. Ayrıca BMED sistemlerinin enerji tüketiminin klasik ED sistemlerine göre daha düşük olduğu ve iyon taşınımında daha yüksek seçicilik sağladığı çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur (Ghyselbrecht *et al.*, 2014; Ata *et al.*, 2018).

Bu bulgular, borik asit üretiminde yalnızca çözücü türünün değil, aynı zamanda seçilen ayırma ve geri kazanım teknolojilerinin de proses verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliği doğrudan etkilediğini göstermektedir. Dolayısıyla, çevresel etkileri azaltan, enerji verimliliği yüksek ve atık üretmeyen proseslerin geliştirilmesi, bor kimyasalları üretiminde stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu bağlamda bipolar membran elektrodiyaliz (BMED) sistemi; esnek işletme koşulları, düşük enerji tüketimi, çevre dostu yapısı ve reaktif kullanmadan doğrudan ürün sentezi yapabilmesi nedeniyle geleneksel yöntemlere kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde BMED tabanlı sistemlerin genellikle atık arıtımı veya bileşen geri kazanımı için kullanıldığı, doğrudan ürün sentezine yönelik çalışmaların ise sınırlı olduğu görülmektedir (Zhanga *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2016).

Bu çalışma, yalnızca borik asit üretimi açısından değil, genel anlamda kimyasal üretim teknolojilerinde sürdürülebilir, çevreye duyarlı ve uzun vadeli uygulanabilirliği yüksek bir proses yaklaşımı sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma hem bor sektörüne hem de çevre dostu üretim teknolojileri alanına önemli bir katkı sağlamayı hedeflemektedir. Bipolar membran

elektrodiyaliz (BMED) teknolojisi, düşük elektriksel potansiyel gereksinimi (yaklaşık 0,9 V) ve yüksek su ayrıştırma kapasitesi sayesinde çevre dostu, enerji açısından verimli ve ekonomik bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Koter and Warszawski, 2000; Mafe *et al.*, 1998). Elektrokimyasal membran proseslerinin başarısı, kullanılan membranların iyon seçiciliği, geçirgenliği ve kimyasal dayanıklılığına bağlıdır (Mulder, 1995).

Bipolar membranlar, bir katyon ve bir anyon değiştirici tabakanın birleşiminden oluşur. Bu tabakalar arasındaki ara yüzeyde, uygulanan elektrik alan etkisiyle su molekülleri oksijen ve hidrojen gazı oluşmadan H^+ ve OH^- iyonlarına ayrışır. Bu iyonlar sırasıyla katot ve anot bölmelerine geçerek sistemde asit ve baz oluşumunu sağlar. Böylece herhangi bir kimyasal reaktif kullanılmadan, ikincil tuz kirliliği olmaksızın doğrudan asit ve baz üretimi gerçekleştirilebilir. Bu özellik, BMED sistemlerini klasik elektroliz yöntemlerine kıyasla daha güvenli, enerji açısından verimli ve çevre dostu hale getirmektedir (Alvarez *et al.*, 1997; Lameloise *et al.*, 2009).

BMED prosesleri; asit ve baz üretimi (Alvarez *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2009), organik asit geri kazanımı (Molnar *et al.*, 2010), suyun iyonlara ayrıştırılması (Mafe *et al.*, 1998), gıda endüstrisinde tuz giderimi (Shee *et al.*, 2007), organik bileşenlerin saflaştırılması (Lameloise *et al.*, 2009), deniz suyu arıtımı ve tuzdan arındırılması (Sadrazadeh & Mohammadi, 2009), balık ekstraktı ve protein konsantrelerinden mineral uzaklaştırılması (Shi *et al.*, 2010), atık su ve sızıntı suyu ön arıtımı (Amokrane *et al.*, 1997), inorganik tuzlardan safsızlık giderimi ve konsantre üretimi (Zhang *et al.*, 2009; Ghyselbercht *et al.*, 2014), amonyum klorür atıklarından $HCl-NH_3$ geri kazanımı (Li *et al.*, 2016), yağ ve lipid giderimi (delipidation) (Shee *et al.*, 2007), lityum içeren tuzlu sulardan Li^+ ayrımı (Warszawski & Koter, 2000) ve bor-lityum karışımlarının seçici olarak ayrılması (Warszawski & Koter, 2000) gibi çok çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmaktadır. Ayrıca BMED sistemlerinin, mikrobiyal yakıt hücrelerinde iyon transferini artırarak enerji geri kazanımını iyileştirdiği de rapor edilmiştir (Ter Heijne *et al.*, 2006).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, BMED prosesinin yalnızca laboratuvar ölçeğinde değil, endüstriyel ölçekte de kimyasal üretim, saflaştırma ve çevresel atık geri dönüşümü gibi uygulama alanlarında giderek artan bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Amokrane *et al.*, 1997; Balster *et al.*, 2006).

Tüm bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, BMED teknolojisinin hem organik hem inorganik sistemlerde yüksek saflıkta ürün üretimi, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir alternatif sunduğu görülmektedir. Ancak membran ömrü,

iyon taşınımı kontrolü ve enerji optimizasyonu gibi konular halen geliştirilmeye açıktır. Bu literatür birikimi, önerilen bu çalışmanın amacını — yani BMED sisteminin borik asit ve NaOH üretiminde optimize edilerek kapalı döngülü, atıksız ve enerji açısından verimli bir yapıya dönüştürülmesini — bilimsel olarak temellendirmektedir.

Bu bağlamda geliştirilen proses, söz konusu kısıtlamaları ortadan kaldıracak şekilde tasarlanmıştır. Bu sistemde, borik asit üretiminde kullanılan klasik yöntemin doğrudan boraksın elektrodializi yerine; ekstraksiyon, çözündürme ve kristallendirme adımlarından elde edilen tuzlu atık çözeltinin BMED ile işlenmesi öngörülmektedir. Böylece NaCl içeren bu çözeltiden eş zamanlı olarak HCl ve NaOH elde edilirken, çözeltideki H_3BO_3 saflaştırılmakta ve konsantre hale getirilmektedir. Bu yaklaşım hem atık oluşumunu ortadan kaldırmakta hem de enerji tüketimini azaltarak çevresel etkiyi minimuma indirmektedir.

Tezin Ana Katkıları

Yukarıdaki değerlendirmeler doğrultusunda, önerilen çalışmanın özgün değeri şu noktalarla öne çıkmaktadır:

- Enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından, klasik klor-alkali veya yüksek potansiyelli elektroliz sistemlerine kıyasla daha düşük enerji gerektirmekte ve Cl_2 gazı salınımı olmaksızın çevre dostu bir üretim imkânı sunmaktadır.
- Entegre proses yapısı açısından, ekstraksiyon, çözündürme ve kristallendirme aşamalarının BMED sistemiyle birleştirilmesi hem borik asidin hem de NaOH'in yüksek saflıkta elde edilmesini mümkün kılmaktadır.
- Atıksız üretim yaklaşımıyla, proses boyunca NaCl döngüsel olarak yeniden üretilmekte, sıvı atık oluşmamakta ve iyonik denge sistem içinde korunmaktadır.
- Sanayiye katkı bakımından ise geliştirilen hibrit sistem, mevcut bor kimyası süreçlerine alternatif olarak endüstriyel ölçekte uygulanabilir, ekonomik ve çevreye duyarlı bir teknoloji potansiyeli sunmaktadır.

Sonuç olarak, önerilen çalışma, mevcut elektrokimyasal sistemlerin teknik sınırlamalarını aşmanın ötesine geçerek borik asit üretiminde enerji verimli, atıksız ve çevre dostu bir süreç tasarlamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda çalışmanın temel hedefi, asidik koşullar altında borik asit ve tuz içeren sentetik bir çözeltinin bipolar membran elektrodializ (BMED) prosesi kullanılarak eş zamanlı olarak tuzdan arındırılması ve asit-baz üretiminin gerçekleştirilmesidir. Yapılan deneysel çalışmalar, bu tür çözeltilerin **BMED sistemi ile etkin biçimde işlenebileceğini göstermiş; süreç boyunca ürün saflığı, akım verimliliği, enerji tüketimi ve tuz dönüşüm oranı** gibi performans kriterleri detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

Ayrıca çok kriterli optimizasyon tekniklerinin kullanılmasıyla, prosesin farklı çıktılarını dengeleyen en uygun işletme koşulları belirlenmiş ve sistemin verimliliği maksimize edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca borik asit ve tuz içeren sistemlerin BMED ile entegre ürün geri kazanımına uygunluğunu ortaya koymakla kalmamakta, aynı zamanda çevreci teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliğini güçlendirecek bilimsel ve teknik temeli de ortaya koymaktadır.



KURAMSAL TEMELLER

Bor (B), periyodik tablonun 3A grubunda yer alan, atom numarası 5 ve yaklaşık atomik kütlesi 10,81 olan bir yarı metaldir (Eti Maden 2025). Bu element hem metalik hem ametalik özellikler göstererek kimyasal davranışı bakımından benzersiz bir karakter sergiler. Grubundaki en elektronegatif element olan borun temel hal elektron dizilimi $1s^2 2s^2 2p^1$ şeklindedir (Meradji *et al.* 2009). Doğal izotopları arasında en kararlı olanları ^{10}B ve ^{11}B olup, bu izotoplar borun nükleer uygulamalar gibi özel teknolojik alanlarda kullanılmasına olanak sağlar (Isobar Science, 2023). Hafifliği, kimyasal stabilitesi ve farklı bileşikler oluşturma kapasitesi sayesinde bor, hem endüstriyel hem de bilimsel çalışmalarda yaygın olarak araştırılan stratejik bir element konumundadır (Nielsen 2014).



Şekil 1. Bor elementi

Bor elementinin çevresel davranışını belirleyen en temel özellik, oluşturduğu kimyasal bağların yapısıdır. Bu bağlar sayesinde bor, sulu ortamda bor oksit formundan borik aside dönüşebilir. Bu dönüşüm, borun çevredeki taşınım mekanizmaları ve çevresel etkileri açısından oldukça kritik bir özelliktir (Boren 2025)

Bor, metal ve ametal elementlerle çeşitli bileşikler oluşturma kapasitesine sahiptir. Bu çeşitlilik, farklı özelliklerde çok sayıda bor bileşiğinin sanayide kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Endüstriyel açıdan en yaygın kullanılan bor mineralleri arasında sodyum kökenli bor bileşikler olan boraks (tinkal), kalsiyum kökenli kolemanit ve hem sodyum hem de kalsiyum içeren üleksit yer almaktadır. Bu minerallerin kimyasal bileşimleri ve B_2O_3 (bor trioksit) içerikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Genellikle bir bor mineralinin ekonomik değeri,

içerdiği B_2O_3 oranına göre belirlenir; dolayısıyla B_2O_3 içeriği yüksek olan mineraller daha değerli kabul edilmektedir (Boren 2022).

Tablo 1. Bor Mineralleri

Mineral	Kimyasal Formülü	B_2O_3 içeriği (%)
Sasolit	$B(OH)$	56,3
Kolemanit	$2CaO.3B_2O_3.5H_2O$	50,8
Boraks (Tinkal)	$Na_2O.2B_2O_3.10H_2O$	36,5
Kernit	$Na_2O.2B_2O_3.4H_2O$	50,9
TinkalKonit	$Na_2O.2B_2O_3.4.67H_2O$	48,8
Üleksit	$Na_2O.2CaO.5B_2O_3.16H_2O$	43,0
Probertit	$Na_2O.2CaO.5B_2O_3.10H_2O$	49,6

Borun Endüstriyel Kullanımları

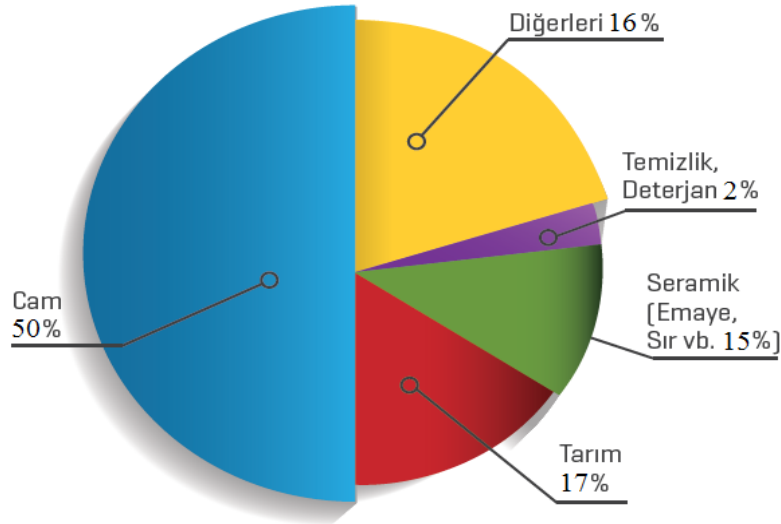
Bir ülkenin maden kaynakları, ekonomik ve siyasi açıdan önemli avantajlar sağlayabilir. Bor, stratejik bir öneme sahiptir ve dünya genelindeki bor rezervlerinin büyük bir kısmı Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri, Arjantin, Peru, Rusya ve Çin gibi ülkelerde yer almaktadır. Türkiye, sahip olduğu bor rezervleriyle dünya çapında lider konumdadır ve toplam rezervin %72'sine ev sahipliği yapmaktadır (İnce and Acaroz 2015). Şekil 2, dünyadaki en önemli bor rezervlerine sahip ülkelerin rezerv miktarlarını göstermektedir.



Şekil 2. Dünya bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı (Eti Maden 2013)

Bor mineralleri dünya genelinde pek çok bölgede az miktarda bulunmakla birlikte, belirli bölgelerdeki yüksek bor yoğunlukları, ekonomik açıdan değerli bor yataklarını oluşturur. Türkiye'deki Emet, Kırka, Bigadiç ve Kestelek yatakları, ABD'deki Kaliforniya, Rusya'daki Dal'negorsk ve Arjantin'deki And Dağları, bu ekonomik yataklardan bazılarıdır (Eti Maden 2025).

Bor, genellikle nihai kullanım alanlarında bor kimyasalları olarak değerlendirilse de bazı durumlarda doğrudan konsantre bor ürünleri olarak da kullanılabilir (Eti Maden 2022). Borik asit, sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde pek çok sektörde çeşitli amaçlarla değerlendirilmektedir. Bor, dünya genelinde 400'den fazla farklı sektörde kullanılmakta olup, kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Bor bileşiklerinin başlıca endüstriyel kullanım alanları arasında fiberglas izolasyon, borosilikat cam, deterjanlar, kozmetik ürünlerde koruyucu ve antiseptik maddeler, su yumuşatıcılar, pH ayarlayıcılar, emülgatörler, nötrleştiriciler ve tamponlar yer almaktadır. Ayrıca çimento, çanak çömlek, porselen, emaye, cam, deri, halı ve sabun üretiminde de önemli bir rol oynamaktadır. Bor, aynı zamanda gübreler, metalurji ve nükleer koruma gibi diğer alanlarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Parks and Edwards 2005).



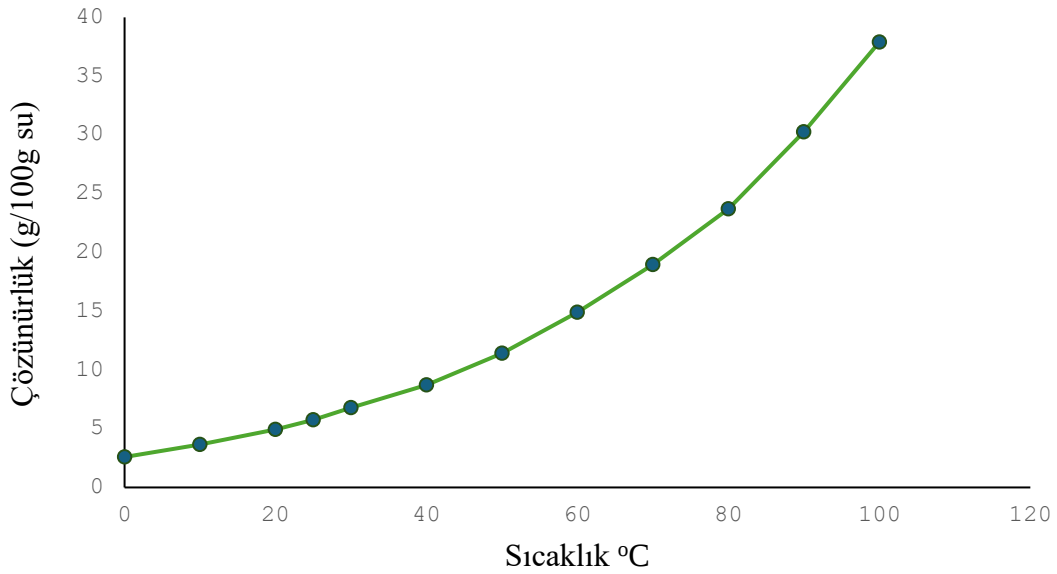
Şekil 3. Bor tüketiminin nihai kullanım alanlarına göre dağılımı (Eti Maden 2022)

Borik asit, kimyasal formülü H_3BO_3 olan, bor, oksijen ve hidrojen elementlerinin birleşiminden meydana gelen bir bileşiktir. Genellikle suda çözünebilir, renksiz kristaller veya beyaz bir toz formunda bulunur ve doğada sassolit minerali olarak yer alır (Wikipedia 2025). Molekül ağırlığı 61,83 g/mol, B_2O_3 içeriği %56,3 ve yoğunluğu ise 1,5172 g/cm³'tür. Borik asidin fiziksel özellikleri ve sudaki çözünürlüğü, Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Borik asit, borun zayıf bir asidi olarak kabul edilir. Endüstride en yaygın kullanılan bor ürünlerinden biri olan borik asit, genellikle kolemanit cevheri ile sülfürik asidin veya boraks ile herhangi bir mineral asidin reaksiyona girmesi sonucu üretilir (Özekmekçi 2015; Etifert B17 2025).

Tablo 2. H₃BO₃ 'ün Fiziksel Özellikleri

Özgöl ağırlık	1,51 g/cm ³ (20° C)
Dökme (yığın) yoğunluğu	0,892 g/cm ³
Molekül ağırlığı	61,83 g/mol
Erime noktası	450° C
Kaynama noktası	1860° C
Isı kapasitesi	24,7 J/g° C
Isıl iletkenlik	0,407 W/mK
Özgöl yüzey alanı	<1m ² /g
Difüzyon katsayısı	1,1 x 10 ⁻⁵ cm ² /s
Yüzey gerilimi	63,83 mN/m [Ağ. %1,0 sulu çözelti]
Renk ölçüm testi	94,52 [ortalama L değeri]

**Şekil 4.** Borik asitin sudaki çözünürlüğünün sıcaklıkla değişimi

Borik asit, sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde pek çok sektörde çeşitli amaçlarla değerlendirilmektedir. Özellikle cam sanayisinde, borosilikat camların dayanıklılığını artırmak için katkı maddesi olarak kullanılır. Aynı zamanda, deterjan ve sabun üretiminde temizlik gücünü artırmak ve formül stabilitesini sağlamak amacıyla tercih edilir. Tarımsal uygulamalarda ise bor eksikliği yaşayan bitkilerin gelişimini destekleyen gübrelerin içeriğinde yer alır (Parks and Edwards 2005). Bununla birlikte, böcek ilaçlarında da etkili bir bileşen olan borik asit, zararlı organizmalara karşı doğal bir mücadele yöntemi olarak kullanılmaktadır. Ancak tüm bu faydalarına rağmen borik asidin bazı sınırlayıcı yönleri de bulunmaktadır. Doğal ortamlarda çözündüğünde, özellikle tatlı su ekosistemlerinde canlı organizmalar üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Bu nedenle borik asidin kullanımı sırasında çevresel denge gözetilerek dikkatli bir uygulama yapılması önemlidir. Ayrıca uzun

sürekli ve yoğun maruziyet durumunda insan sağlığı üzerinde toksik etkiler oluşturabileceği de çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur (Weir and Fisher 1972). Dolayısıyla, borik asit gibi stratejik öneme sahip kimyasal maddelerin kullanımı, hem fayda-risk dengesine göre hem de sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda değerlendirilmelidir.

Elektrokimyasal yöntemler, elektrik enerjisi kullanarak kimyasal bileşiklerin üretimini veya ayrıştırılmasını sağlayan çevre dostu alternatif süreçlerdir. Bu yöntemler, özellikle atıkların değerlendirilmesi, kaynak geri kazanımı ve kimyasal sentez gibi alanlarda, geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük kimyasal tüketimi, daha az atık üretimi ve yüksek ürün saflığı gibi avantajlar sunar. Elektrokimyasal prosesler arasında öne çıkan BMED, tuz çözeltilerinden eş zamanlı olarak asit ve baz üretimi sağlayan yenilikçi bir tekniktir. Bu sistemde, seçici iyon değişim membranları sayesinde iyonlar ayrıştırılarak hedef ürünler elde edilir. Özellikle borlu bileşiklerin geri kazanımında, BMED gibi elektrokimyasal teknikler sayesinde borik asit gibi değerli ürünler üretilebilirken, sürece bağlı olarak NaOH gibi bazik yan ürünler de elde edilebilmektedir (Alves *et al.* 2025).

Bu yönüyle elektrokimyasal yöntemler hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen modern yaklaşımlar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin yüksek enerji gereksinimi, sistem tasarımı karmaşıklığı ve membran ömrü gibi bazı sınırlayıcı yönleri de bulunmaktadır. Yine de döngüsel ekonomi ve yeşil kimya ilkeleri doğrultusunda, bu yöntemler günümüzde büyük ilgi görmekte ve sanayi uygulamalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır.

Elektromembran proseslerin temelinde ise, iyonların elektrik alan etkisiyle hareket ettirildiği ve seçici membranlar yardımıyla ayrıştırıldığı çevre dostu ayırma teknolojilerindendir. Bu sistemlerde temel itici güç, uygulanan elektriksel potansiyel farkıdır. Elektrik enerjisi sayesinde hem elektrot yüzeylerinde redoks reaksiyonları gerçekleşmekte hem de çözelti içerisindeki iyonlar yönlendirilmiş biçimde taşınmaktadır. Elektrik alan altındaki iyonik taşınım davranışı, elektrot reaksiyonlarının doğası ve çözeltinin iletkenliğindeki değişimler gibi elektrokimyasal parametreler, elektromembran süreçlerinin anlaşılması ve geliştirilmesi açısından büyük önem taşır.

Membran teknolojisi ve uygulama alanları

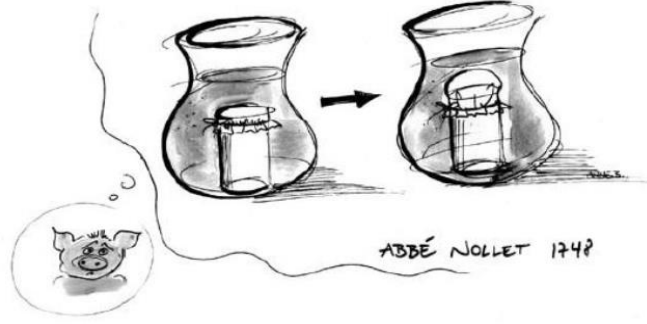
Membranlar, kimya teknolojisinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve pek çok endüstriyel süreçte önemli roller üstlenmiştir. Temel işlevleri, karışımlar içerisindeki istenilen bileşenleri seçici olarak geçirirken, diğer bileşenlerin geçişini sınırlandırmak üzerine kuruludur. Bu seçicilik özelliği sayesinde, çeşitli maddelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak

etkin bir ayırma işlemi gerçekleştirilir. Bu prensip, özellikle bir bileşenin membran yüzeyinden serbestçe geçmesine izin verirken, diğer istenmeyen bileşenlerin tutulmasını sağlar. Söz konusu özellikler, bilim dünyasında uzun yıllardır ilgi görmekte olup, yapay membranların geliştirilmesi birçok farklı alanda araştırmaların önünü açmıştır (Baker 2012).

Günümüzde membran teknolojileri; içme suyu temini, evsel ve endüstriyel atıksuların arıtılması, gaz ayrıştırıcıları, elektrokimyasal sistemler ve biyomedikal uygulamalar gibi oldukça geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Özellikle diyaliz, oksijen zenginleştirme, membran tabanlı sensör sistemleri, metal endüstrisinde geri kazanım ve çevresel kirlilik kontrolü gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca gıda ve biyoteknoloji sektörlerinde saflaştırma, sterilizasyon, yan ürün geri kazanımı gibi işlemlerde; tekstil ve deri endüstrilerinde ise ısı geri kazanımı ve kimyasal madde geri dönüşümü gibi amaçlarla membran sistemlerine başvurulmaktadır (Koyuncu 2018; Bilgin 2012; Wenten 2003). Bu çok yönlü uygulama alanları, membran teknolojisinin modern proses mühendisliğinde vazgeçilmez hale gelmesini sağlamaktadır.

Membran proseslerinin tarihsel gelişimi

“Membran” terimi, kökenini Latince’de “deri” anlamına gelen *membrana* kelimesinden alır ve günümüzde, iki farklı faz arasında seçici bir engel görevi gören yarı geçirgen, ince yapılar için kullanılmaktadır. Fiziksel olarak membranlar hem katı hem de sıvı halde bulunabilirler ve sahip oldukları seçicilik özellikleri sayesinde çeşitli madde ayırma işlemlerinde kullanılırlar (Wenten 2003). Membran teknolojilerinin tarihçesi, 18. yüzyıla kadar uzanmaktadır. 1748 yılında Fransız din adamı Abbe Nollet, osmoz olayını gözlemleyerek bu kavramı ilk kez tanımlamıştır (Şekil 5). 19. yüzyılın ikinci yarısında Traube ve Van’t Hoff osmotik olayları bilimsel olarak açıklamaya başlamış, Fick ise 1865’te ilk sentetik membranı nitroselülozdan üretmiştir. Aynı dönemde Graham, hem diyaliz üzerine hem de gazların kauçuk membranlardan ayrılması üzerine çalışmalar yapmıştır. 1867 yılında Hermann von Traube, sentetik membranlar kullanarak osmoz üzerine derinlemesine araştırmalar yürütmüştür. Pfeffer ise 1877’de seramik membranlar aracılığıyla osmoz fenomenine katkı sağlamış; Van’t Hoff ise 1887’de osmotik basınç kavramını bilim dünyasına kazandırmıştır.



Şekil 5. Yarı geçirgenliği tesadüfen keşfeden Nollet'in karalama defterinden bir görüntü (Nollet,1948)

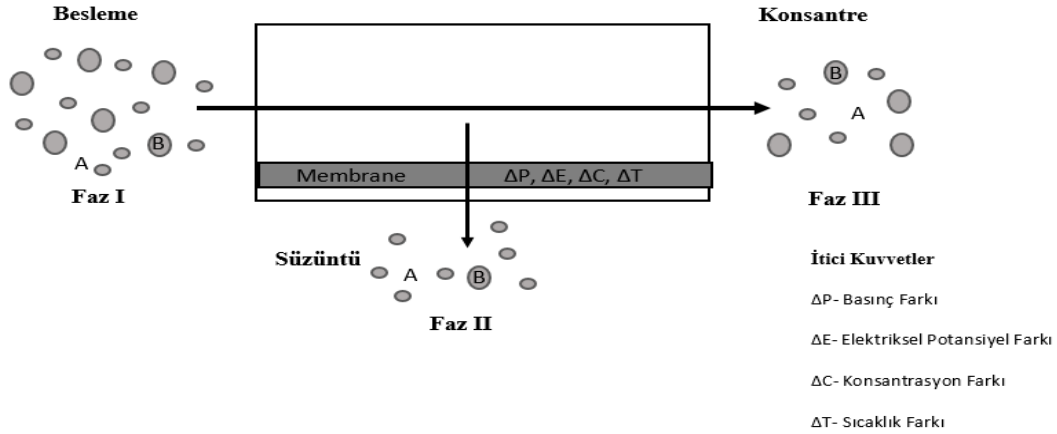
1926-1931 yılları arasında Michaels, Manegold ve McBain ters osmoz üzerine önemli çalışmalar yürütmüş; 1930'ların başında mikro gözenekli kolodyum membranlar ticari üretime geçmiştir. 1934'te Elder, elektrodializ üzerine deneysel uygulamalar yapmış ve bu teknolojiyi II. Dünya Savaşı sırasında içme suyu arıtımında kullanmıştır. 1960'ta Lonsdale, kompozit membranlarla ilgili araştırmalara öncülük ederken, 1962'de Loeb ve Sourirajan, asimetric membran üretimi ile gözenek boyutunun kontrolü üzerine çığır açan çalışmalar gerçekleştirmiştir. 1975'te Porter, membran bazlı prosesleri basınçla çalışan sistemler açısından sınıflandırmıştır. 1977'de Goddard, kolaylaştırılmış taşınım mekanizmasını tanımlarken, 1989'da Cussler, Aris ve Brown bu taşınımı zincir modeliyle açıklamışlardır (Bilgin 2012; Reahl 2006).

Bu gelişmeler, günümüzün ileri membran teknolojilerine temel oluşturarak içme suyu arıtımından endüstriyel geri kazanım proseslerine kadar pek çok alanda kullanılan modern sistemlerin doğuşuna zemin hazırlamıştır.

Membranla ayırma

Membranla ayırma prosesleri, günümüzde geleneksel ayırma yöntemlerine, örneğin distilasyon, kristalizasyon ve ekstraksiyon gibi işlemlere alternatif olarak kullanılmaktadır (Bilgin 2012). Bu proseslerin etkinliği, membranın kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak şekillenir. Ayırma işlemi, basınç farkı, konsantrasyon farkı (kimyasal potansiyel), elektriksel potansiyel farkı ve sıcaklık farkı gibi itici kuvvetlerle sağlanır. Membran, bir karışımındaki bileşenlerin ayrılmasını sağlayan seçici geçirgen bir bariyer görevi görür (Aslan 2016). Membran ayırma işleminde üç temel faz bulunur: besleme fazı (Faz I), süzüntü fazı (Faz II) ve konsantre fazı (Faz III). Besleme fazı, işlemdeki karışımın yer aldığı başlangıç fazıdır. Süzüntü fazı, membran aracılığıyla geçebilen ve istenilen özelliklere sahip bileşenlerin ayrıldığı fazdır. Konsantre fazı ise membran tarafından geçemeyen ve yoğunlaşan bileşenlerin yer aldığı

fazdır. Bu üç faz arasındaki etkileşim, membranla ayırma proseslerinin verimliliğini belirleyen önemli faktörlerden biridir. Şekil 6’da membran ve akım fazlarının şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 6. Bir Membran ve akım fazlarının şematik gösterimi

Membranlarda sürücü kuvvetler

Membranla ayırma proseslerinde, bileşenlerin ayrılmasını sağlayan birkaç temel sürücü kuvvet bulunmaktadır. Bunlar:

1. **Basınç Farkı:** Çözeltinin iki tarafı arasındaki basınç farkı, bileşenlerin membran üzerinden geçişini sağlar. Ters osmoz gibi proseslerde bu kuvvet etkilidir (Aslan 2016).
2. **Konsantrasyon Farkı:** Çözeltiler arasındaki konsantrasyon farkı, difüzyon ve osmoz gibi mekanizmalarla bileşenlerin hareketini yönlendirir (Bilgin 2012).
3. **Elektriksel Potansiyel Farkı:** Elektromembran sistemlerinde, iyonlar elektriksel alan etkisiyle membran üzerinden hareket eder, bu da ayrımı sağlar (Wenten 2003).
4. **Sıcaklık Farkı:** Sıcaklık farkı, moleküllerin kinetik enerjilerini değiştirerek çözünürlük ve difüzyon hızlarını etkiler (Koyuncu 2018).

Bu kuvvetler, membranla ayırma işlemlerinin etkinliğini ve verimliliğini doğrudan belirler. Tablo 3’te sürücü kuvvetlere göre çalışan membran prosesleri ve faz ilişkisi verilmiştir (Aslan 2016).

Tablo 3. Membran Proseslerde Sürücü Kuvvetler (Aslan 2016)

Membran Prosesler	Faz I	Faz II	İtici Kuvvet
Mikrofiltrasyon (MF)	Sıvı	Sıvı	ΔP
Ultrafiltrasyon (UF)	Sıvı	Sıvı	ΔP
Nanofiltrasyon (NF)	Sıvı	Sıvı	ΔP
Ters ozmos (RO)	Sıvı	Sıvı	ΔP
Gaz Ayırma	Gaz	Gaz	ΔP
Dializ	Sıvı	Sıvı	ΔC
Ozmos	Sıvı	Sıvı	ΔC
Pervaporasyon	Sıvı	Gaz	ΔP
Elektrodializ	Sıvı	Sıvı	ΔE
Temo-ozmos	Sıvı	Sıvı	$\Delta T/\Delta P$
Membrane distilasyonu	Sıvı	Sıvı	$\Delta T/\Delta P$

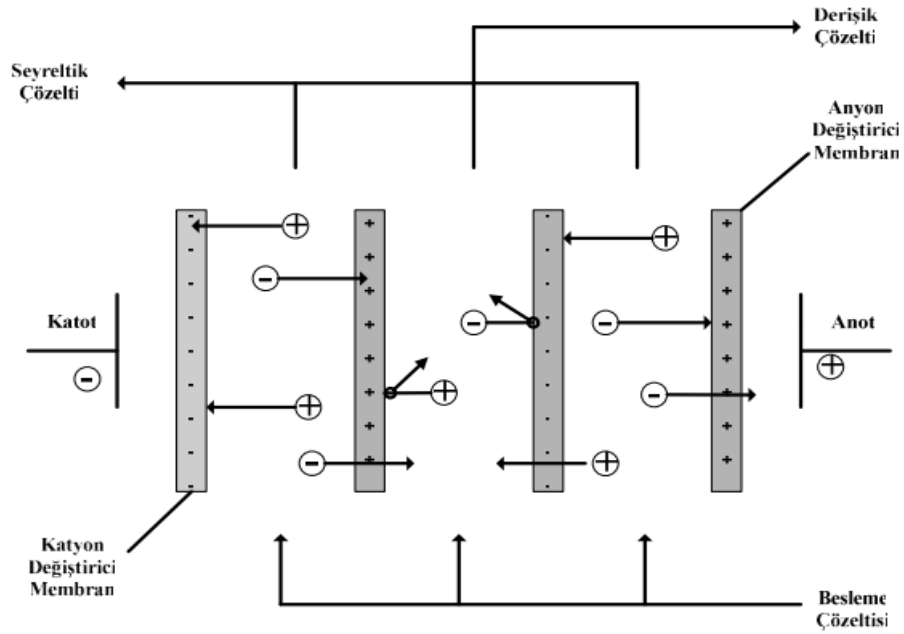
Elektrodiyaliz

İlk ticari elektrodiyaliz (ED) sistemini 1950 yılında IonicsInc firması üretmiştir. Bugün, yerel pazarda membran üreticileriyle bağlantılı veya bu teknolojiyi tamamen kapsayan çeşitli uygulayıcılar bulunmaktadır. Bu firmalardan örnek olarak MEGA (Çek Cumhuriyeti), Eurodia (Fransa), Hydrodex (Brezilya) ve Tecnoimpanti (İtalya) verilebilir (Aslan 2016).

Elektrodiyaliz (ED) işleminde, iyonlar elektriksel itici kuvvetin etkisiyle çözeltilerden ve membranlardan taşınır. Yarı geçirgen membranlar aracılığıyla iyon ayrımı için geleneksel membran teknolojilerinin aksine, itici güç olarak elektrik potansiyelini kullanan bir membran bazlı ayırma işlemidir (Jeremias *et al.* 2023). Günümüzde ED, genel anlamda, elektriksel alan ve iyon değiştirici membranlar aracılığıyla sisteme beslenen sulu elektrolit çözeltisinin, yüksek tuzlu sudan tuzun uzaklaştırılması için kullanılan elektrolitik bir işlem olarak tanımlanabilir (Hacıoğlu 2006). Elektrodiyalizin bir diğer önemli avantajı ise diğer membran tekniklerine kıyasla, oldukça asidik çözeltileri deiyonize edebilmesidir.

Elektrodiyalizle, sülfürik asit, hidroflorik asit, kromik asit, hidroklorik asit ve fosforik asit gibi çeşitli asitlerin geri kazanılabildiği bildirilmiştir (Shah ve Scamehorn 1987). Elektrodiyaliz, dünya genelinde geniş çapta işlem gören ve iyi geliştirilmiş bir teknolojidir. Bu teknoloji, özellikle saflaştırma, tuzlu suyun tuzdan arındırılması, amino asitlerin ve diğer organik çözeltilerin tuzdan arındırılması, atık suyun temizlenmesi, endüstriyel süreç akışlarının geri kazanılması ve tuz üretimi gibi alanlarda, ayırma, kimyasal, petrokimyasal ve metalürjik

süreçlerde değerli bileşenlerin geri kazanılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hacıoğlu 2006; Mıshra and Bhattacharya 1984; Tanaka 2003; Zourmand *et al.* 2015).

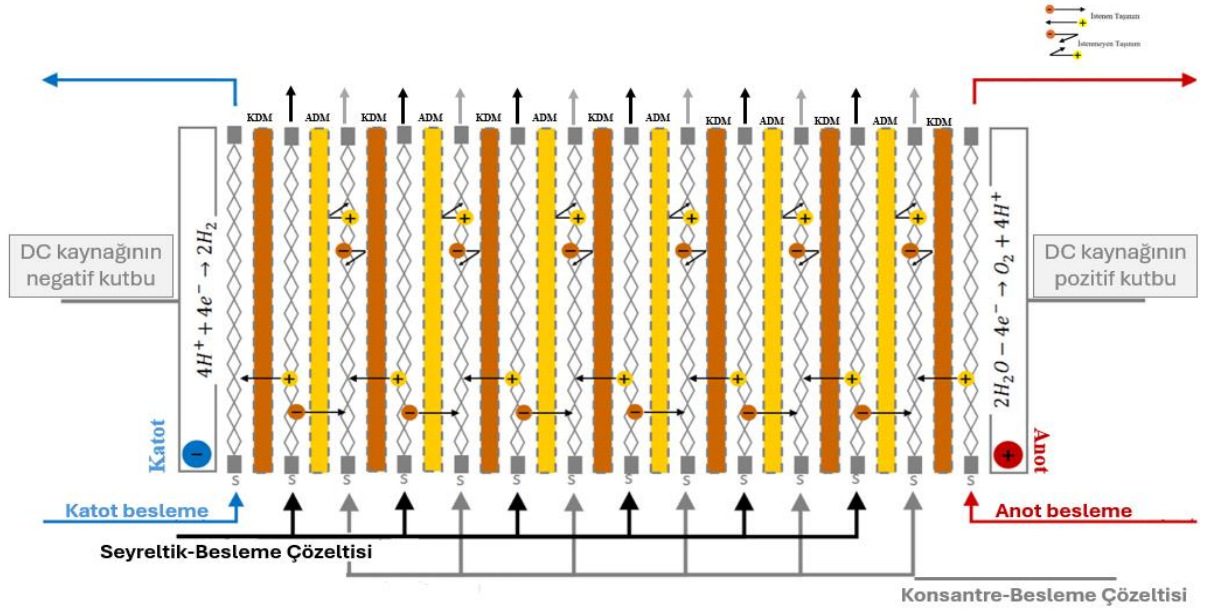


Şekil 7. Elektrodializinin prensibi

Elektrodializ süreçleri

Elektrodializ (ED) süreci, elektriksel alan ve iyon değiştirici membranlar kullanarak çözeltiden iyonların ayrılmasını sağlayan elektrokimyasal bir tekniktir (Baker 2004). Bu yöntem, özellikle su arıtma, tuzdan arındırma ve atık su işleme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır.

Elektrodializ üniteleri, ardışık biçimde dizilmiş kation değiştirici (KDM) ve anyon değiştirici (ADM) membranların bir araya gelmesiyle oluşturulan çok hücreli sistemlerdir. KDM ve ADM çiftlerinden her biri, “hücre çifti” (cell pair) olarak adlandırılır ve iyon ayırma işleminin temel yapı taşını oluşturur (Şekil 8). Sistemde yer alan hücre çifti adedi (N), toplam iyon aktarım kapasitesini belirleyen önemli bir parametredir; bu sayı arttıkça, iyonların taşınımı ve buna bağlı olarak sistemin genel verimliliği de yükselir (Strathmann 2010).



Şekil 8. Elektrodializ hücresi

Her hücre çifti, birincisi iyonların seyreltilerek uzaklaştırıldığı **seyreltme bölgesi** (diluate), diğeri ise iyonların toplandığı **konsantre bölgesi** (concentrate) olmak üzere iki akış kanalından meydana gelir. Bu iki bölge arasındaki çözelti geçişinin etkin şekilde sağlanabilmesi için, membranlar arasında genellikle **0.5–1.0 mm** kalınlıkta “ayırıcı” (spacer) yerleştirilir. Spacer elemanları, akışın dengeli ilerlemesine olanak tanırken aynı zamanda sıvı içinde mikro düzeyde karışımı artırarak madde taşınımını hızlandırır ve konsantrasyon farkına bağlı oluşabilecek sınırlamaların önüne geçilmesini sağlar. (Tanaka 2007; Pourcelly 2002; Strathmann 2010).

Elektrot reaksiyonları

Elektrodializ sistemlerinde, elektrotlar genellikle inert (platin, grafit) malzemelerden seçilir ve hücrelerin uç kısımlarında yer alır.

- Anotta (pozitif elektrot) suyun oksidasyonu meydana gelir:



Bu reaksiyon sonucu çözeltide H^+ iyonları artar ve oksijen gazı oluşur.

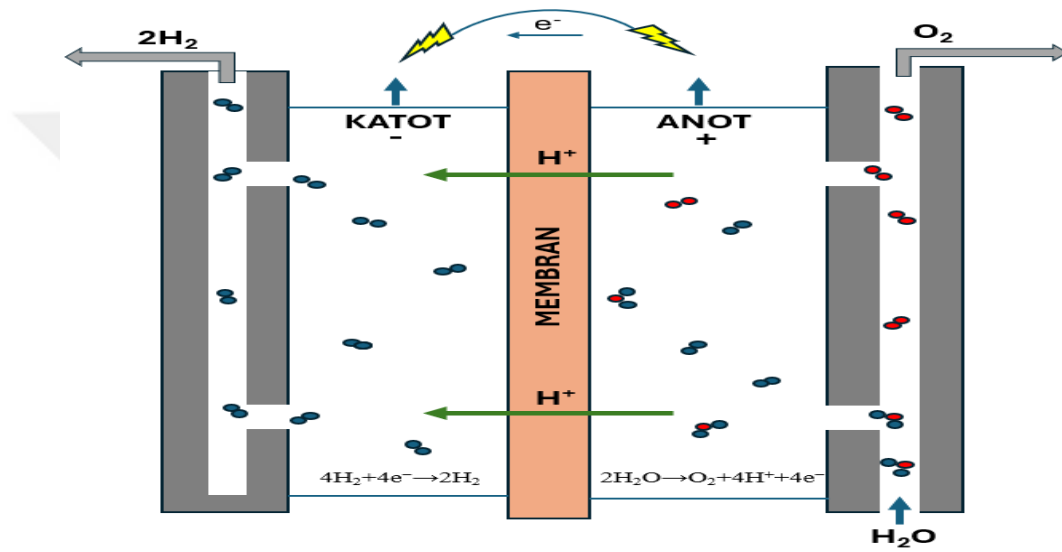
- Katotta (negatif elektrot) su indirgenerek hidrojen gazı ve OH^- iyonları açığa çıkar:



pH artışı gözlemlenebilir; özellikle uzun süreli çalışmalarda elektrot bölgesinde pH dengesinin kontrolü önemlidir (Strathmann 2010; Sata 2004; Tanaka 2007).

Bir elektrodializ sisteminde, seyreltik besleme akışı, tuzlu su veya konsantre akışı ve elektrot akışının, iyon değişim membranları tarafından oluşturulan hücre bölmelerinden

geçmesine olanak tanınır. Bir elektriksel potansiyel farkı uygulandığında, seyreltik akıştaki negatif yüklü iyonlar pozitif yüklü anoda doğru hareket eder. Bu iyonlar, pozitif yüklü anyon değişim membranından geçer, ancak negatif yüklü katyon değişim membranı, onların anoda doğru daha fazla hareket etmelerini engeller ve bu nedenle anyonlarla birlikte konsantre akışına dahil olurlar. Şekil 9'da görülen elektroliz hücresinde, anot ve katot görevindeki elektrotlar elektrik akımının taşınmasında rol oynarken; elektrolit, yüksek iletkenliğe sahip sulu yapısıyla iyonların hareketine aracılık eder. Doğru akım (DC) uygulandığında, pozitif iyonlar katoda, negatif iyonlar ise anoda doğru göç eder (Chen *et al.* 2005). Bu süreçte gerçekleşen elektrot reaksiyonları Eşitlik 1 ve 2'te detaylandırılmıştır.



Şekil 9. Elektroliz hücresinin şematik gösterimi

Seyreltik akışındaki pozitif yüklü türler ise negatif yüklü katoda doğru hareket eder ve negatif yüklü katyon değişim membranından geçer. Bu katyonlar da konsantre akışında kalır ve pozitif yüklü anyon değişim membranı, onların katoda doğru daha fazla ilerlemelerini engeller. Sonuç olarak, anyon ve katyonların hareketi nedeniyle elektrik akımı katot ile anot arasında akar. Elektrodializ sürecinin sonucu olarak, seyreltik çözelti besleme akışındaki iyonlar tükenirken, konsantre akışında iyon konsantrasyonu artar.

Elektrodializ süreci, son yıllarda giderek daha fazla tercih edilen bir deiyonizasyon yöntemidir. Elektrodializ, kendi içinde üç ana tipte işlem olarak karşımıza çıkar: klasik elektrodializ, ters elektrodializ ve bipolar membranlı elektrodializ (Aslan 2016; İlhan 2020).

Klasik elektrodializ

Klasik elektrodializ süreci, en az bir anot, bir katot, bir anyon seçici membran, bir katyon seçici membran ve bir güç kaynağına gereksinim duyar. Elektrik akımı yardımıyla sudaki iyonlar, reaktör içinde farklı bölgelere geçerek arıtma işlemi gerçekleştirilir. Özellikle

iyonik kirleticiler üzerinde etkili olan bu yöntem, yüksek verimli bir temizleme sağlama yeteneğine sahiptir (İlhan 2020).

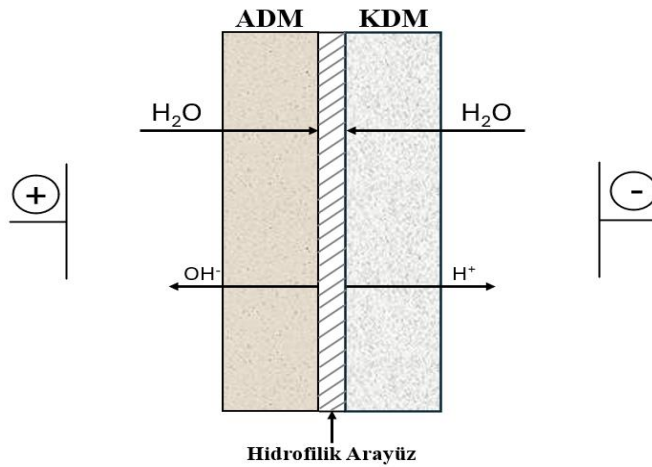
Ters elektrodiyaliz

Ters elektrodiyaliz süreci, son yıllarda popülerliği artan önemli bir teknolojidir. Bu yöntem, tuzları giderme ve su kaynaklarından belirli iyonik türleri arıtmak için uygulandı (Reahl 2006). Ters elektrodiyaliz işleminde, iyonlar, elektrik alanına karşıt yönde hareket ederek bir iyonik akım üretirler. Yani, elektrodiyaliz prosesinde elektrik tüketimi yapılırken, ters elektrodiyaliz, tuzluluk farkından elektrik enerjisi üretir. Özetle, ters elektrodiyaliz, farklı tuzlu su konsantrasyonlarının kontrollü karıştırılması yoluyla elektrik üreten, gelişmekte olan bir membran tabanlı teknolojidir (İlhan 2020).

Bipolar membranlı elektrodiyaliz

Bipolar membran (BPM), 1980'lerin sonunda ticari olarak piyasaya sürülen yenilikçi bir membran türüdür. Bu membranlar, elektriksel bir alan etkisi altında suyun ayrışmasını gerçekleştirir (Bazinet *et al.* 1998). Geleneksel iyon değişim membranlarının (KDM ve ADM) aksine, bir BPM'nin işlevi iyonları seçici olarak bir taraftan diğer tarafa iletmek değildir. Çünkü hiçbir iyon, membranın her iki katmanını geçemez.

Aslında, BPM'deki iyon hareketi istenmeyen bir durumdur (Parnamae *et al.* 2020). Bipolar membranlar, bir katyon değişim tabakası ile bir anyon değişim tabakasının birleştirilmiş halidir (Tanaka 2007; Strathmann *et al.* 1993; Parnamae *et al.* 2020). BPM'nin amacı, elektriksel alan altında iki katman arasındaki birleşim noktasında su molekülerini hidrofilik ara yüzeyde H^+ ve OH^- 'e ayırmaktır. (Şekil 10) (Bazinet *et al.* 1998, Parnamae *et al.* 2020).



Şekil 10. Bipolar membran hücresinin şematik gösterimi (Bazinet *et al.* 1998)

BMED, tuzlu suyun arıtılması ve işlenmesi amacıyla geliştirilen bir teknoloji olup, asit ve baz üretimi gerçekleştirerek, tuzdan arındırma tesislerinde büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, BMED teknolojisi, farklı niteliklere sahip endüstriyel atık sularının arıtılması ve yeniden değerlendirilmesi için de umut verici bir seçenek sunmaktadır. Bu teknoloji, metal işleme, kauçuk üretimi, ahşap işleme, içecek sektörü ve asetaldehit üretimi gibi pek çok endüstriyel alanda da kullanılabilmektedir (Fernandez-Gonzalez *et al.* 2016).

Pratikte bipolar bir membranın sağladığı gereksinimler, yüksek akım yoğunluğunda düşük elektriksel direnç, yüksek su ayrışma oranı, düşük ko-iyon geçişi, yüksek iyon seçiciliği ve güçlü asidik ve bazik ortamlar karşısında iyi kimyasal ve termal dayanıklılıktır (Bazinet *et al.* 1998).

Bipolar Membran teknolojisinin temel özellikleri

Bipolar membranlar, bir katyon değiştirici tabaka (KDM) ile bir anyon değiştirici tabakanın (ADM) birleşiminden oluşan özel membranlardır. Bu yapı sayesinde, uygulanan elektriksel alan altında membran ara yüzeyinde su molekülleri H^+ ve OH^- iyonlarına ayrışır. Bu ayrışma, sistemde eş zamanlı olarak asit ve baz üretimini mümkün kılar. Geleneksel membranlara kıyasla bipolar membranlar, kimyasal reaktif kullanımını azaltarak çevreci ve sürdürülebilir proseslerin geliştirilmesine katkı sağlar. Ayrıca, farklı iyon türlerine karşı yüksek seçicilik, düşük enerji tüketimi ve stabil performans gibi avantajlara sahiptirler. Bununla birlikte, membran kalınlığı, iyon iletkenliği ve su disosiyasyon kinetiği gibi parametreler performans üzerinde doğrudan etkilidir (Strathmann 2010; Luo *et al.* 2018). Bipolar membranların temel özellikleri şunlardır:

Su Ayrışımı Yeteneği: BPM'lerin en ayırt edici özelliği, suyun H^+ ve OH^- iyonlarına ayrışmasını sağlayarak asit ve baz üretiminde kullanılabilesidir. Bu özellik, özellikle asit-baz geri kazanımı gibi çevreci uygulamalarda büyük avantaj sağlar.

Yönlü İyon Geçişi: Katyonlar yalnızca katyon değiştirici kısımdan, anyonlar ise yalnızca anyon değiştirici kısımdan geçebilir. Bu seçicilik, istenmeyen iyonların geçişini engelleyerek yüksek ürün saflığı sağlar.

Kimyasal Dayanıklılık: Çoğu BPM, asidik ve bazik ortamlara karşı dayanıklıdır ve farklı pH koşullarında işlevini sürdürebilir.

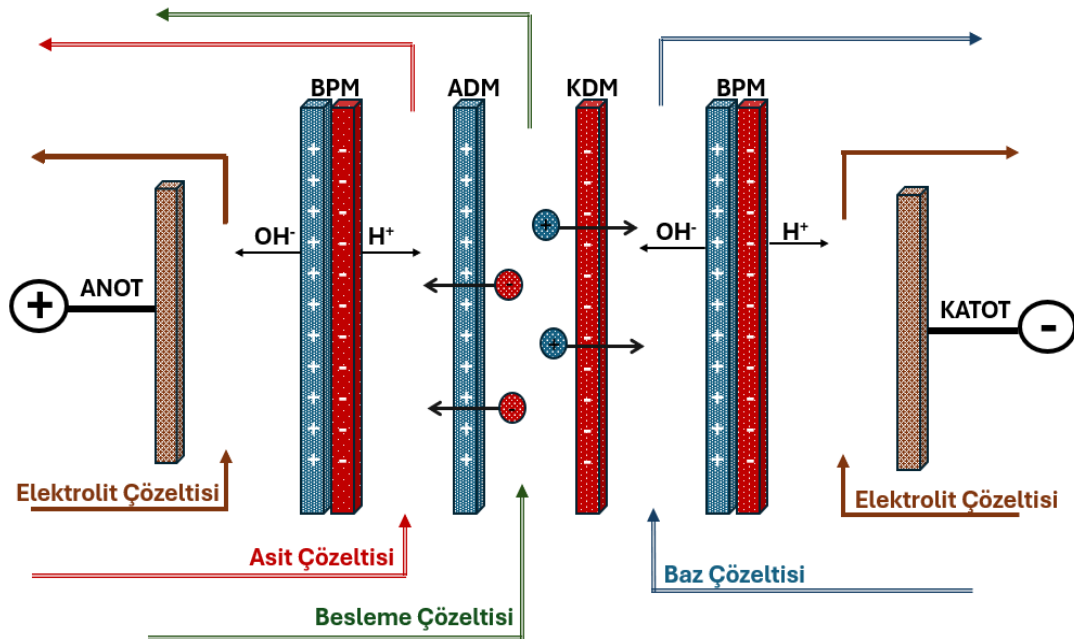
Düşük Enerji Tüketimi: Uygun koşullar altında çalıştırıldığında enerji tüketimi geleneksel yöntemlere göre daha düşük olabilir, özellikle membranlar düşük iç dirençli ise.

Çevreci ve Sürdürülebilir: Kimyasal katkı maddesi gerektirmemesi ve geri kazanım olanağı sunması sayesinde çevre dostu bir teknolojidir.

Uygulama Alanları: Atık su arıtımı, lityum geri kazanımı, borik asit ve kostik üretimi gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Strathmann 2010; Bilgin 2012).

Bipolar Membranlı elektrodializ hücresi (BMED)

Bipolar membranlı elektrodializ (BMED), iyon ayırımı ve eşzamanlı olarak asit ve baz üretimi amacıyla geliştirilen bir elektrokimyasal ayırma teknolojisidir. Sistemde kullanılan bipolar membranlar, elektrik alanı etkisi altında su moleküllerinin H^+ ve OH^- iyonlarına ayrışmasını katalize eder; böylece sistemde herhangi bir kimyasal reaktant kullanmaksızın asit ve baz üretimi sağlanabilir (Strathmann 2010). BMED hücresi tipik olarak bir dizi katyon değişim membranı (KDM), anyon değişim membranı (ADM) ve bipolar membranın (BPM) tekrarlayan birimler halinde dizilmesiyle oluşturulur. BMED hücresinde kullanılan hücrenin gösterimi Şekil 11’de yer almaktadır.



Şekil 11. Bipolar membranlı elektrodializ hücresi (Arribas *et al.* 2015)

Bu hücrede uygulanan doğru akım sayesinde iyonlar membranlar arasında göç eder: Katyonlar KDM aracılığıyla katoda doğru, anyonlar ise ADM aracılığıyla anoda doğru ilerler. BPM’in merkezinde gerçekleşen su ayrışması reaksiyonu, hem H^+ iyonlarının asidik bölmeye hem de OH^- iyonlarının bazik bölmeye yönelmesini sağlar. Böylece, sistemin bir tarafında asit (örneğin HCl), diğer tarafında ise baz (örneğin NaOH) oluşur (Tanaka, 2003; Bunani *et al.* 2017).

Bu yöntem, kimyasal reaktan gereksinimini ortadan kaldırarak çevre dostu bir yaklaşım sunar. Aynı zamanda yüksek saflıkta ürün elde edilmesi, enerji verimliliği ve proses kontrolünün kolaylığı gibi avantajlar taşımaktadır. Bununla birlikte membran ömrü, sistem optimizasyonu ve başlangıç yatırım maliyetleri gibi sınırlayıcı faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır.

BMED sistemlerinin performansı; membran yapısı, elektrot çözeltisinin özellikleri ve işletme parametreleri gibi birçok etkene bağlıdır. Özellikle membran kalınlığı, iyon iletkenliği ve suyun H^+ ve OH^- iyonlarına ayrışma kinetiği, ürün saflığı ve enerji verimliliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Chen *et al.* 2020). İşletme koşullarına bakıldığında, akım yoğunluğu suyun iyonlarına ayrışma hızını ve iyon göçünü doğrudan etkileyerek proses süresini azaltabilir; ancak artan akım yoğunluğu enerji tüketimini de beraberinde getirmektedir (Dursun *et al.* 2021). Benzer şekilde, başlangıç çözeltisinin tuz konsantrasyonu yükseltildikçe, elde edilen asit ve baz ürünlerinin derişimi artmakta; buna karşın düşük iyonik konsantrasyonlar, membran geçişini sınırlayarak verimi düşürebilmektedir (Parnamae *et al.* 2021; Chen *et al.* 2022). Sıcaklık artışı ise hem su ayrışmasını hem de iyon taşınımını teşvik ederek sistemi daha dinamik hale getirir. Ayrıca, membranlar arasındaki ayırıcı (spacer) yapıların tasarımı, akış dengesinin sağlanması, mikro karışımın artırılması ve konsantrasyon polarizasyonunun önlenmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır (González *et al.* 2023). Tüm bu faktörlerin optimize edilmesi, BMED sistemlerinin hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir hale getirilmesini mümkün kılmaktadır.

BMED sürecinin performansı, çeşitli kriterlere göre değerlendirilir. Bu kriterler, sürecin etkinliğini ve verimliliğini ortaya koyar. Teorik hesaplamalar ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında, BMED'nin performansına dair sağlıklı bir analiz yapılabilir. Performans kriterleri arasında, tuzdan arındırma (desalinasyon) verimliliği, asit ve baz çözeltilerindeki konsantrasyonlar, enerji tüketimi, akım verimliliği, ürünlerin asit-baz dönüşüm oranları, çözeltideki safsızlıklar ve proses süresi gibi parametreler öne çıkar. Ayrıca, yapılan spesifik çalışmalara göre, bu kriterler sistemin tasarımına ve hedeflenen çıkışa göre özelleştirilebilir ve optimize edilebilir.

BMED prosesinin pek çok farklı kullanım alanı bulunmaktadır. BMED prosesine yönelik yapılan çalışmalar, sistem performansını etkileyen farklı parametreleri ele almaktadır. Bu çalışmalarda, akım yoğunluğu, elektriksel direnç, uygulanan potansiyel, enerji verimi, seçicilik ve membran stabilitesi gibi parametrelerin BMED performansı üzerindeki etkileri detaylı biçimde analiz edilmiştir.

Bipolar membranlı elektrodializ (BMED) sürecinin performansı, çeşitli kriterlere göre değerlendirilir. Bu kriterler, sürecin etkinliğini ve verimliliğini ortaya koyar. Teorik hesaplamalar ile deneysel bulgular karşılaştırıldığında, BMED'nin performansına dair sağlıklı bir analiz yapılabilir. Performans kriterleri arasında, tuzdan arındırma (desalinasyon) verimliliği, asit ve baz çözeltilerindeki konsantrasyonlar, enerji tüketimi, akım verimliliği, ürünlerin asit-baz dönüşüm oranları, çözeltideki safsızlıklar ve proses süresi gibi parametreler öne çıkar. Ayrıca, yapılan spesifik çalışmalara göre, bu kriterler sistemin tasarımına ve hedeflenen çıkışa göre özelleştirilebilir ve optimize edilebilir.

BMED sisteminin en belirgin avantajlarından biri, asit-baz geri kazanımı konusunda sağladığı yüksek verimliliğidir. Erkmen ve Yapıcı (2016) tarafından yapılan çalışmada, borakstan borik asit üretimi hedeflenmiş ve sonuçlar, BMED ile borik asit ve sodyum hidroksit üretim verimliliğinin %93,13 ile %99,53 arasında değiştiğini göstermiştir. Bu bulgu, BMED'nin asit ve bazları oldukça yüksek saflıkla elde etme potansiyeline sahip olduğunu ve dolayısıyla endüstriyel uygulamalarda önemli bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymaktadır. BMED sisteminin yüksek saflıkta ürünler elde etmesi, özellikle endüstriyel atıkların geri kazanımında önemli bir avantaj sağlar. Yüksek saflık, ürünlerin daha az işleme gerektirmesi ve daha verimli kullanılması anlamına gelir. Bu da enerji ve maliyet tasarrufu sağlanmasına katkı sağlar.

Endüstriyel üretim süreçlerinden kaynaklanan yan ürünlerin yeniden değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu bağlamda Gao *et al.* (2021), lityum karbonat üretimi sırasında oluşan sodyum sülfat (Na_2SO_4) içeren atık çözeltileri, değerli kimyasallara dönüştürmek amacıyla bipolar membranlı elektrodializ (BMED) teknolojisini kullanarak dikkat çekici bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, sodyum sülfat çözeltisi BMED sistemine beslenmiş ve sistemde gerçekleşen iyon geçişleri sayesinde iki değerli ürün olan sülfürik asit (H_2SO_4) ve sodyum hidroksit (NaOH) başarıyla elde edilmiştir. Deneysel veriler, her iki ürünün de %98'in üzerinde bir saflıkta üretilbildiğini ve enerji tüketiminin 1,4 kWh/kg seviyelerinde olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, prosesin hem yüksek ürün verimi hem de enerji verimliliği açısından uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu yöntemin geleneksel kimyasal geri kazanım süreçlerine göre daha az çevresel etki oluşturduğu ve atık miktarını önemli ölçüde azalttığı vurgulanmıştır.

Gazigil ve arkadaşlarının (2022) çalışması, ters ozmoz (RO) konsantresinden asit ve baz geri kazanımını hedefleyen önemli bir uygulama örneği sunmaktadır. Bu çalışmanın temel bulgusu, RO konsantresinin doğrudan BMED sistemine beslenmesiyle, asit (HCl) ve baz (NaOH) ürünlerinin yüksek saflıkta ve verimli bir şekilde elde edilebilmesidir. Üstelik,

desalinasyon oranı %99'a yaklaşırken, enerji tüketimi ve akım verimi, literatürdeki diğerk çalışmalara kıyasla oldukça uygun seviyelerde kalmıştır.

Erkmen ve Yapıcı (2015), üç odalı bir BMED hücresinde boraks çözeltilerinden doğrudan H_3BO_3 ve NaOH üretimini incelemiş; akım etkinliğini %93–99, ürün saflıklarını ise %99'un üzerinde olarak rapor etmiştir. Ancak 25°C, 0,5 L/dak akış hızı, 0,1 M boraks ve 15 V altında 600 dakikada yalnızca %19 dönüşüm sağlanması, boraksın düşük iyonlaşma derecesi ve BMED'in 20–50°C ile sınırlı çalışma sıcaklığı nedeniyle prosesin yavaş ve enerji açısından verimsiz olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, borakstan doğrudan elektrodializ yoluyla H_3BO_3 üretimi endüstriyel ölçekte uygulanabilir bulunmamıştır. Bu tez çalışmasında önerilen yaklaşım, Erkmen ve Yapıcı'nın sisteminden iki temel noktada ayrılarak söz konusu sınırlamaları ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. İlk olarak, BMED'in doğrudan boraksı işlemek yerine atık NaCl çözeltilerinin dönüştürölmesi için kullanılması esas alınmıştır. Geleneksel H_3BO_3 üretiminde ekstraksiyon–çözündürme–kristallendirme adımlarının ardından, NaCl bakımından zengin ve düşük derişimli H_3BO_3 içeren bir atık çözelti oluşmaktadır. Önerilen sistemde bu çözelti BMED'e beslenmekte; böylece NaCl'nin tamamen iyonlarına ayrılması sağlanarak HCl ve NaOH elektrokimyasal olarak üretilmekte, düşük iyonlaşma özelliğine sahip H_3BO_3 ise tuzu giderilmiş ortamda tutulmakta ve su taşınımı sayesinde daha konsantre hâle gelmektedir.

Bu yaklaşım sayesinde, boraksın düşük iyonlaşmasıyla ilgili temel problem ortadan kalkmakta; BMED prosesi yüksek iyonik iletkenliğe sahip bir NaCl çözeltisiyle beslendiği için hem akım etkinliği hem de enerji verimi önemli ölçüde artmaktadır. Aynı zamanda klasik prosesten çıkan tuzlu atık kimyasal reaktiflere dönüştürölerek atık bertarafı yerine geri kazanım sağlanmaktadır.

İkinci temel farklılık ise H_3BO_3 sentezinin BMED içinde değil, konvansiyonel yüksek sıcaklıklı aşamalarda gerçekleştirilmesidir. Boraks ve H_3BO_3 'ün çözünürlüğünün 20–50°C aralığında oldukça düşük olması, BMED içinde doğrudan H_3BO_3 üretimini hem verimsiz hem de kinetik olarak sınırlı hâle getirmektedir. Bu nedenle önerilen sistemde H_3BO_3 sentezi 90–95°C gibi endüstriyel açıdan uygun sıcaklıklarda, klasik çözündürme–kristallendirme adımlarında yapılmakta; BMED ise yalnızca tuz giderme, HCl ve NaOH üretme ve H_3BO_3 'ün saflaştırılmasını destekleme işlevini üstlenmektedir. Böylece BMED'in sıcaklık sınırlamaları süreç için bir engel oluşturmamakta, yüksek sıcaklıkta maksimum H_3BO_3 verimi sağlanırken düşük sıcaklıkta elektrokimyasal saflaştırma ve reaktif üretimi mümkün olmaktadır.

Bunun yanı sıra, Öner *et al.* (2023)'ün distilasyon atığı çözeltisi ile ilgili çalışması, BMED'nin çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini vurgulamaktadır. Özellikle endüstriyel atıklardan asit ve baz üretimi sağlamak, çevresel etkileri önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmada da BMED kullanılarak asidik ve bazik çözeltilerin saflığına ve geri kazanım oranlarına dair olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Öner *et al.*'ın çalışmasında, desalinasyon oranı %99,8 civarlarında rapor edilmiştir ve saflık oranları oldukça yüksektir (%93,5 HCl ve %98,7 NaOH). Gazigil vd.'nin çalışmasıyla benzer bir desalinasyon oranı sağlanmış olsa da Öner *et al.*'ın çalışmasında kullanılan çözeltinin bileşimi daha düşük iyonik kuvvetlere sahiptir. Bu da her iki çalışmada elde edilen yüksek desalinasyon oranlarının, farklı çözeltin özelliklerine göre değişebileceğini göstermektedir.

Yapılan çalışmalara göre, BMED sistemlerinin asit-baz geri kazanımı ve verimliliği açısından farklı atık türleri ve proses koşullarına göre değişen performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Gazigil ve arkadaşları (2022), yüksek iyonik kuvvetli RO konsantresi kullanarak enerji verimliliği ve akım verimi açısından dikkat çekici bir başarı göstermiştir. Ancak, farklı çözeltilerin ve sistem yapılandırmalarının, BMED performansını etkileyen önemli faktörler olduğunu unutmamak gerekir. Gao'nun çalışması, düşük iyonik kuvvetli çözeltilerle daha yüksek akım verimi sağlarken, Erkmen ve Yapıcı'nın çalışması enerji verimliliği açısından daha düşük bir performans sergilemiştir. Öner *et al.*'ın distilasyon atığı çözeltisi üzerine yaptığı çalışma ise, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır, zira endüstriyel atıklardan yüksek verimlilikle asit ve baz üretimi sağlanabilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmalar BMED sistemlerinin çeşitli atık çözeltilerine ve işlem koşullarına göre özelleştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Membran seçiminin enerji verimliliğine etkisi incelendiği zaman Kikuchi *et al.* (2024)'ün çalışmasında proton engelleyici anion değişim membranları (ACM) kullanılarak gerçekleştirilen Bipolar Membranlı Elektrodializ (BMED) işleminde, NaCl çözeltisiyle yapılan deneylerde akım verimi artarken, enerji tüketimi azalmakta olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, membran seçiminin enerji verimliliği üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. ACM membranları, yüksek iyon selektivitesi sayesinde H^+ ve OH^- iyonlarının geçişini engellerken, Na^+ ve Cl^- iyonlarının iletimini optimize eder. Bu özellik, daha düşük enerji tüketimi ve yüksek akım verimliliği sağlar. Çalışma, BMED proseslerinde enerji verimliliğini artırmak için doğru membran seçiminin önemini ortaya koymaktadır ve endüstriyel uygulamalarda düşük enerji tüketimi ile yüksek verimlilik sağlanmasına olanak tanımaktadır.

Koivisto *et al.* (2023) ise, Bipolar Membranlı Elektrodializ (BMED) sistemlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik yapılan optimizasyonları incelemektedir. Çalışmada, iki

bölmeli BMED sistemlerinin, üç bölmeli sistemlere kıyasla daha düşük enerji tüketimi sağladığı ve daha yüksek dönüşüm hızları elde ettiği bulunmuştur. İki bölmeli sistemde enerji tüketimi 3630–4844 kJ/kg arasında değişirken, üç bölmeli sistemde bu değerler daha yüksek olmuştur. Ayrıca, enerji kaybının büyük bir kısmı ısı olarak açığa çıkmaktadır, bu da sistem verimliliğini artırmaya yönelik iyileştirmelere olanak tanımaktadır. Amonyum sülfatın enerji verimliliği açısından daha verimli bir reaktif olarak seçilmesi, bu tür sistemlerin tasarımında önemli bir faktördür. Bu bulgular, BMED teknolojisinin çevresel uygulamalarda daha sürdürülebilir ve verimli hale gelmesi için gerekli optimizasyonları vurgulamaktadır

Bir diğer çalışmada, Liu *et al.* (2022) bipolar membranlı elektrodializ (BMED) sistemlerinin enerji verimliliği ve asit-baz geri kazanımı üzerine yapılan optimizasyonlar ele alınmıştır. Çalışmada, sanayi atıklarından asit ve baz geri kazanımının, enerji tüketimi en aza indirilecek şekilde gerçekleştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Çeşitli parametreler, özellikle akım yoğunluğu, elektrot voltajı ve membran tipi gibi faktörler, BMED sisteminin enerji verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. Deneyler sonucunda, yüksek akım yoğunluğu kullanılarak enerji verimliliğinde %20'ye kadar iyileşmeler elde edilmiştir. Ayrıca, kullanılan membran türlerinin seçimindeki farkların, sistemin genel verimliliği üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu bulgular, BMED sistemlerinin sanayi atıklarından asit ve baz geri kazanımında yüksek saflıkla ve düşük enerji tüketimiyle verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Çalışma, aynı zamanda çevresel etkileri azaltma ve enerji verimliliğini artırma hedeflerine yönelik önemli bir adım olarak, BMED sistemlerinin sürdürülebilir uygulamaları için değerli bir rehber sunmaktadır.

Nagasawa ve arkadaşlarının (2011) çalışması, bor içeren sulu çözeltilerde BMED ve geleneksel elektrodializ (ED) yöntemlerinin etkinliğini karşılaştırarak, BMED'in üstün iyon ayırma kapasitesini açıkça ortaya koymuştur. Çalışmada, BMED ile %90 oranında bor giderimi sağlanırken, ED ile bu oran yalnızca %35,45 olarak kalmıştır. Bu fark, BMED'in çözelti pH'ını yerinde değiştirme yeteneği sayesinde, borik asit gibi zayıf asitlerin iyonlaşmasını kolaylaştırmasına bağlanmıştır. Aynı zamanda, süreçte herhangi bir kimyasal ek maddeye ihtiyaç duyulmaması, BMED'i daha çevreci ve sürdürülebilir hale getirmektedir.

Benzer temada bir başka çalışma da Tanaka ve arkadaşları (2005) tarafından gerçekleştirilmiş, bu çalışmada BMED sistemleri kullanılarak bor içeriği yüksek olan atık sularda bor giderim verimliliği %85'in üzerinde rapor edilmiştir. Tanaka'nın çalışmasında, özellikle pH kontrolünün süreçte ne kadar kritik olduğu vurgulanmış ve BMED'in, borun iyonik formu olan borat iyonlarını etkili biçimde uzaklaştırabildiği gösterilmiştir. Bu veriler, Nagasawa'nın çalışmasındaki bulgularla paralellik göstermekte olup, sistem parametrelerinin

optimize edilmesi durumunda BMED'in bor uzaklaştırmada oldukça kararlı ve verimli bir süreç sunduğunu desteklemektedir.

Dydo ve Türek (2013) yaptıkları bir çalışmada bor taşıma ve giderimi için iyon değişim membranlarının kullanımı ele alınmıştır. Elektrodializ (ED) ile borik asit taşıma verimliliği düşüken, borat taşınımında ise düşük elektrik akım verimliliği ve boratın düşük mobilitesi sorunları vurgulanmıştır. Ayrıca, yüksek pH seviyeleri membran tıkanmasına yol açmakta ve bu, sürecin ekonomik uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır. Donnan dializi üzerine yapılan çalışmalar ise, boron giderimi etkinliği hakkında yetersiz bilgi sunmaktadır. Bu durum, boron giderimi için daha verimli yöntemlere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Elektrodializ (ED) ile borik asit ve borat giderimi, düşük akım verimliliği ve membran tıkanması gibi sorunlarla sınırlıdır. Bu bağlamda, Bipolar Membranlı Elektrodializ (BMED) süreci, bu zorlukları aşma potansiyeline sahiptir çünkü asit ve baz geri kazanımında daha verimli sonuçlar sunmakta, ayrıca safsızlıkları minimize ederek daha saf ürünler elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Alcaraz *et al.*'nin çalışması, tuz çözelti konsantrasyonu ve sıcaklık gibi faktörlerin BM'lerin elektriksel davranışlarını doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle düşük akım yoğunluğunda elde edilen I-V eğrileri, membranların sabit ve tekrarlanabilir performans gösterdiğini göstermiştir. Bu bulgular, BMED sistemlerinde kullanılan membranların performansını etkileyen temel parametreleri anlamak açısından oldukça değerlidir.

Buna karşılık, BMED sistemleri genellikle iyon üretimi (örneğin asit ve baz) amacıyla yüksek akım yoğunluklarında çalıştırılır ve bu nedenle sistemin verimliliği, sadece membran elektriksel özelliklerine değil, aynı zamanda iyon seçiciliği ve su ayrışma kinetiğine de bağlıdır. Örneğin Kikuchi ve Koivisto gibi çalışmalarda, farklı membran tiplerinin enerji verimliliği ve akım verimi üzerindeki etkisi ele alınmıştır.

Wei ve arkadaşları (2012) bir çalışmada, endüstriyel prosesler sonucu oluşan harcanmış kostik çözültiden sodyum hidroksit (NaOH) geri kazanımı amacıyla bipolar membran elektrodializ (BMED) yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında elektrolit konsantrasyonu, başlangıç baz konsantrasyonu ve uygulanan akım yoğunluğu gibi işlem parametrelerinin geri kazanım verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, uygun işletme koşullarında BMED sisteminin hem enerji tüketimi açısından verimli çalışabildiğini hem de yüksek akım verimliliği sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen ekonomik analiz, bu yöntemin maliyet açısından da rekabetçi olabileceğini göstermiştir. Elde edilen bulgular, BMED teknolojisinin NaOH geri kazanımında çevresel

sürdürülebilirlik ve ekonomik uygulanabilirlik açısından önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Nagasawa ve arkadaşları (2008) çalışmasında, elektrodializ ve bipolar membran teknolojilerinin birleşimiyle bor giderme işlemini incelemiştir. Bipolar membran elektrodializi (BMED), çözeltinin pH seviyesini arttırarak borik asidin borat iyonlarına dönüşümünü hızlandırır, bu da borun daha etkin bir şekilde giderilmesini sağlar. Çalışma, BMED'nin geleneksel elektrodializ yöntemlerine kıyasla daha verimli olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, yüksek bor konsantrasyonları enerji gereksinimlerini artırmakta, bu da işlem maliyetlerini yükseltmektedir. BMED ile bu sorunun üstesinden gelmek için, akım yoğunluğu, pH düzeyi ve membran türü gibi parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu optimizasyonlar, daha düşük enerji tüketimiyle daha verimli bor giderimi sağlamayı mümkün kılabilir. Sonuç olarak, BMED teknolojisi bor giderme işlemlerinde yüksek verimlilik sunmakta, ancak enerji verimliliğini artırmak için doğru parametre ayarları ve optimizasyon gerekmektedir.

Balkan vd. (1979) yaptıkları çalışmada, gaz-sıvı çözündürme, elektroliz ve evaporasyon işlemleri kullanarak tinkalden borik asit (H_3BO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) üretimini incelemiştir. Ancak bu çalışmanın, önerilen proje yaklaşımından belirgin biçimde ayrıldığı görülmektedir. Çalışmada, gaz fazında HCl'nin reaktif olarak kullanılması ve klasik elektroliz yöntemiyle NaCl'den hem Cl_2 hem de H_2 gazlarının üretilmesi söz konusudur. Üretilen bu gazların işlenmeden sistemden uzaklaştırılması, çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi bir dezavantaj oluşturmaktadır. Her ne kadar araştırmacılar bu gazların HCl'e dönüştürülebileceğini belirtmiş olsalar da endüstriyel ölçekte bu dönüşümün gerçekleştirilememesi nedeniyle klor-alkali prosesinde Cl_2 gazı emisyonu günümüzde de önemli bir çevresel sorun olmaya devam etmektedir. Bu bağlamda, Balkan vd. (1979)'un çalışması proses bütünlüğü açısından eksik kalmakta ve çevresel etkiler göz önünde bulundurulduğunda modern yaklaşımlarla kıyaslandığında sürdürülebilir bir çözüm sunmamaktadır.

Elbeyli vd. (2012) ise iki kompartımanlı elektroliz hücresinde, boraks pentahidrat kullanarak borik asit ve sodyum hidroksit üretimini incelemiştir. Bu sistemde, tek tabakalı bir katyon değiştirici membran (Nafion 551) kullanılmış ve iletkenlik problemi, boraks çözeltisine H_3BO_3 ilavesiyle Na_2O/B_2O_3 oranı 0,1'in üzerine çıkarılarak çözülmüştür. Farklı NaOH konsantrasyonlarındaki (%10, %20, %30) katolit çözeltileriyle yapılan deneyler sonucunda akım verimliliği, enerji tüketimi ve elde edilen H_3BO_3 kalitesi değerlendirilmiştir. Aynı araştırma grubu, 2015 yılında benzer bir çalışmayı Nafion 321 kullanarak tekrarlamış;

ancak malzeme dengesi sonuçları, bazı deneylerde dönüşüm oranlarının %100'ü aşması nedeniyle sistemsal tutarsızlıklar göstermiştir.

Bu çalışmanın detaylı incelenmesi, önerilen proje ile aralarındaki farkların teknik ve sistematik açıdan belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışmada sisteminde OH^- ve H^+ iyonları, suyun elektrot reaksiyonlarından elde edilmekte ve bu nedenle yüksek potansiyel farkı (yaklaşık 2 V) gerektirmektedir. Oysa önerilen çalışmada kullanılan BMED sisteminde, suyun iyonlarına ayrışması bipolar membranın katalitik ara yüzeyinde düşük potansiyel farkı (yaklaşık 0,9 V) altında gerçekleşmektedir. Bu durum, enerji tüketimini azaltarak prosesi daha ekonomik hale getirmektedir. Boraks çözeltisi anolit ile anot kompartımanına beslenmektedir. Bu besleme şekli, çözünmeyen boraksın sistemde kalarak dönüşüm oranını sınırlamasına neden olmaktadır. Ayrıca boraksın düşük iyonlaşma derecesi ve H_3BO_3 ile benzer çözünürlük eğrisi, H_3BO_3 'ün verimli biçimde ayrılmasını güçleştirmektedir. Önerilen sistemde ise iyonik karaktere sahip, az miktarda H_3BO_3 içeren bir NaCl çözeltisi kullanıldığından, iyon taşınımı sorunsuz gerçekleşmekte ve karışım ya da ilave ayırma ihtiyacı ortadan kalkmaktadır.

Katyon değiştiricili sistemlerde yalnızca pozitif iyonlar geçebildiğinden, besleme çözeltisindeki negatif iyonlar (örneğin SO_4^{2-} , Cl^-) taşınmamaktadır. Bu durum, ürün saflığını doğrudan etkileyebilmektedir. Önerilen BMED sisteminde ise hem anyon hem katyon seçici membranlar bir arada bulunduğundan, iyonlar çift yönlü olarak ayrılmakta ve iyonik denge sağlanmaktadır. Böylece ilave reçine kolonu kullanımı gereksiz hale gelmekte ve sistemin işletme maliyeti azalmaktadır. Sisteminin 85°C 'de yürütülmesi, yüksek buhar basıncı nedeniyle hücre içinde gaz kabarcıkları oluşumuna yol açmakta, bu da elektriksel direnç ve aşırı potansiyel artışına neden olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık difüzyonla iyon taşınımını artırarak ürün saflığını olumsuz etkileyebilir. Buna karşılık önerilen BMED sistemi, $20\text{--}50^\circ\text{C}$ aralığında çalıştığından difüzyon kaynaklı iyon karışımı en aza iner ve ürün kalitesi korunur.

Ata vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, geleneksel Solvay prosesinde amonyağın distilasyon yoluyla geri kazanılması yerine, BMED sisteminin kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Araştırma sonuçları, BMED teknolojisinin hem CaCl_2 ve NaCl gibi geri dönüştürülemeyen atıkları ortadan kaldırdığını hem de HCl, NaOH ve NH_4OH gibi değerli kimyasalların eş zamanlı üretimini mümkün kıldığını göstermiştir. 1 L filtrat çözeltisinin işlenmesiyle yaklaşık %90 tuz dönüşümü, 4,11 mol HCl, 3,92 mol NaOH + NH_4OH ve 320 mL kullanılabilir su elde edilmiştir. Uçucu bileşenleri giderilmiş örneklerde dönüşüm oranı %93'e yükselmiş, enerji tüketimi ise 1,79 kWh/kg seviyesine kadar düşmüştür. Bu sonuçlar, BMED sisteminin enerji açısından verimli, çevre dostu ve geri dönüşümlü kimyasal üretim için umut verici bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Zhang vd. (2009) yaptıkları bir çalışmada çevreye zarar vermeden, suda çözünmeyen bir asit olan sebatik asit üretmek için etanol-su karışımlarında sodyum sebatatı sebatik aside dönüştürmek amacıyla iki bölmeli bipolar membran elektrodializ (BMED) yöntemi kullanmıştır. Çalışma sonuçları, BP-C (BP: bipolar membran; C: katyon değiştirici membran) konfigürasyonunun diğer düzeneklere göre daha yüksek performans sağladığını göstermiştir. BP-C düzeninde sodyum sebatat, %94 akım verimliliği ve 2,2 kWh/kg enerji tüketimiyle tamamen sebatik aside dönüştürülmüştür. Bu çalışma, organik bileşiklerin dönüşümünde BMED yönteminin enerji verimliliğini ve çevre dostu potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca, düşük enerji tüketimi ve yüksek iyon seçiciliği, yöntemin sadece inorganik tuz sistemlerinde değil, aynı zamanda organik sentezlerde de uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu sonuçlar, BMED'in çok bileşenli sistemlerde asit-baz üretimi için optimize edilebileceğine dair önemli bir referans oluşturmaktadır.

Balster vd. (2006), ticari bipolar membranların belirli koşullar altında tatmin edici performans sergilediğini, ancak bazı teknik sınırlamaların mevcut olduğunu belirtmiştir. Özellikle, proses süresince üretilen konsantre bazların membranın anyon değiştirici tabakasında olumsuz etkiler yarattığı; ayrıca sınırlı da olsa ortak iyon taşınımı nedeniyle tuz geçişinin meydana geldiği ve bunun ürünlerin saflığını düşürdüğü ifade edilmiştir. Bu bulgular, membran dayanıklılığının ve iyon taşınımı kontrolünün sistem verimliliği üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Zhang vd. (2009)'un olumlu sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, Balster vd. (2006) çalışması BMED'in endüstriyel uygulamalara geçişinde karşılaşılabilecek pratik sınırlamaları net biçimde ortaya koymaktadır. Bu analiz, membran yapısal optimizasyonunun (örneğin tabaka kalınlığı, iyon seçicilik dengesi) geliştirilmesi gerektiğini ve uzun süreli kullanımda performans kararlılığının temel bir sorun olduğunu göstermektedir.

Balster vd. (2007) yaptıkları çalışmada, bipolar membranlarda tuz geçişini azaltmak ve iyon seçiciliğini artırmak amacıyla yeni bir membran tasarımı geliştirmiştir. Araştırmada, membran asimetrisinin eş-iyon taşınımını azaltmada etkili olduğu ve tabaka kalınlığı değişiminin iyon akışını doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Katyon tarafına ince bir katyon değişim tabakası eklenmesiyle tuz kaçağı %47 oranında azalmış, kalın tabakaların ise su difüzyonunu sınırladığı gözlenmiştir. Ayrıca membran içerisine ince bir anyon değişim tabakası eklenerek toplamda %62 oranında tuz kaçağı azalması sağlanmıştır. Bu çalışma, BMED performansının yalnızca proses koşullarıyla değil, membran yapısal tasarımıyla da optimize edilebileceğini göstermektedir. Özellikle tabaka kalınlığı ve yük dağılımının kontrolüyle iyon taşınım veriminin artırılacağı ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, BMED sistemlerinin daha

uzun ömürlü ve yüksek seçiciliğe sahip hale getirilebileceğini göstermesi bakımından önemlidir.

Datta ve Henry (2006), bipolar membranlı elektrodializ (BMED) önemli bir kimyasal hammadde olan laktik asidin saflaştırılması ve geri kazanımı süreçlerinde karşılaşılan temel zorlukların üstesinden gelebilecek yeni bir teknoloji olduğunu vurgulamıştır. Çalışmada BMED yönteminin, atık tuz üretmeden laktik asidi saflaştırmak için hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, BMED'in yalnızca inorganik sistemlerle sınırlı olmadığını, aynı zamanda organik asitlerin geri kazanımı gibi karmaşık biyokimyasal süreçlerde de etkin biçimde kullanılabileceğini göstermesi açısından önemlidir. Ayrıca, tuz atığı oluşturmada yüksek saflıkta ürün elde edilmesi, BMED'in yeşil kimya ilkeleriyle tam uyumlu bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Bunani ve arkadaşları (2017), BMED yöntemi ile lityum ve borun su çözeltisinden ayrılmasını incelemiş ve lityum için %99,6 ayrılma ve %88,3 geri kazanım oranlarına ulaşmış, bor için ise bu oranlar sırasıyla %72,3 ve %70,8 olmuştur. Çalışma, pH'nın arttıkça borun ayrılma verimliliğinin arttığını göstermiştir. Jarma ve arkadaşları (2021) ise, farklı iyon değişim ve bipolar membranlara sahip elektrodializ sistemlerini karşılaştırarak 20 V uygulandığında ED-1 sisteminin boron için %77,5 ayrılma ve %54 geri kazanım, lityum için ise %99,8 ayrılma ve %86,4 geri kazanım sağladığını, ED-2 sisteminin bor için daha yüksek ayrılma oranı (%81) elde etmesine karşın geri kazanım oranlarının düşük kaldığını belirlemişlerdir. Ayrıca, Bunani *et al.* (2017) başka bir çalışmada, BMED ile %90'ın üzerinde ayrılma verimi elde etmiş ve voltajın artırılmasının belirli bir seviyeye kadar transfer hızlarını artırırken, yüksek voltajda akım veriminin düştüğü ve enerji tüketiminin arttığı sonucuna varmıştır. Ghyselbrecht ve arkadaşları (2013), EDBM ile tuzlu atık sulardan %99'un üzerinde tuz giderimi sağlarken, Li ve arkadaşları (2016) amonyum klorür atık suyunda BMED ile yüksek NH_4Cl konsantrasyonları ile en yüksek verimliliğin elde edildiğini ancak bu konsantrasyonun azalmasıyla verimliliğin düştüğünü ve enerji tüketiminin arttığını gözlemlemişlerdir. Alvarez ve arkadaşları (1997), sodyum salisilatın salisilik asite dönüştürülmesi için BMED kullandıklarında, farklı membranlar ile benzer akım verimlilikleri (%80-90) elde etmiş ancak enerji tüketimi açısından farklılıklar gözlemişlerdir. İpekçi ve arkadaşları (2018), BMED ile yapılan deneylerde, bor ve lityum için sırasıyla %86,9 ve %94,7 ayrılma verimi elde etmiş, ancak düşük asit ve baz konsantrasyonlarının geri kazanımı iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Genel olarak, bu çalışmalar BMED yönteminin lityum ve bor gibi bileşenlerin ayrılmasında etkili olduğunu, ancak verimliliğin pH, voltaj, akım yoğunluğu ve çözeltinin konsantrasyonu gibi parametreler ile optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu parametrelerin dikkatli

bir şekilde kontrol edilmesi, enerji verimliliğini artırabilir ve işlem verimliliğini maksimize edebilir. Ayrıca, farklı membran tiplerinin seçimi ve sistem optimizasyonu, geri kazanım oranlarının artırılması için kritik öneme sahiptir.

Yapılan bu çalışmalar genel olarak, bipolar membran teknolojisinin farklı bileşimlerdeki atık çözeltilerin işlenmesinde çok yönlü bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Literatür verilerinin ortak noktaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

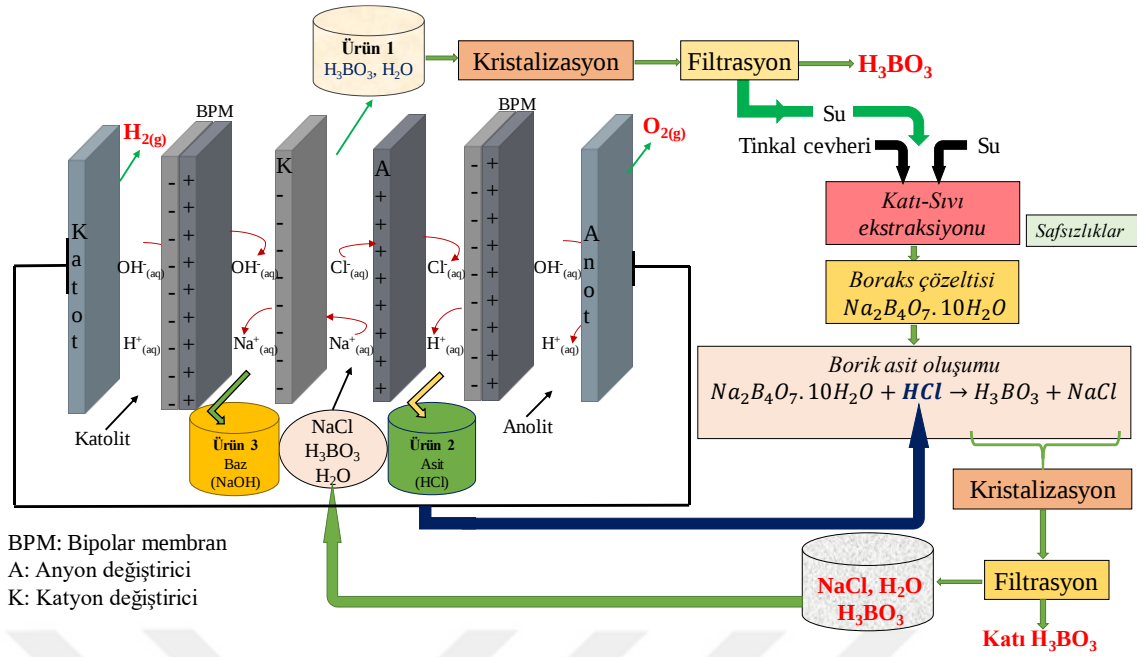
BMED teknolojisi hem inorganik hem de organik kökenli atıkların yeni bir atık oluşturmadan saflaştırılmasına olanak sağlarken, tuzlu çözeltilerden yüksek saflıkta asit ve baz üretimini mümkün kılmaktadır. Prosesin başarısı kullanılan membranların iyon seçiciliği, geçirgenliği ve kimyasal dayanımıyla doğrudan ilişkili olup; başlangıç çözeltisinin iyonik bileşimi, pH'sı, akım yoğunluğu ve hidrodinamik koşullar performansı belirleyen temel etmenlerdir. Bununla birlikte, çalışma sıcaklığının artması difüzyon temelli ortak iyon taşınımını hızlandırarak ürün saflığını düşürmekte ve dönüşüm verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, borik asit ve tuz içeren sistemlerde entegre ürün geri kazanımı için bipolar membran elektrodializ (BMED) prosesinin uygunluğunu deneysel verilerle değerlendirmenin yanı sıra, çok kriterli optimizasyon tekniklerini entegre ederek bu çevre dostu teknolojilerin endüstriyel uygulamalara adaptasyon potansiyelini güçlendirmeyi amaçlamaktadır. Sürecin verimliliği ile enerji tüketimi arasındaki dengeyi optimize ederek, sürdürülebilir çözümler sunmayı ve değerli bileşenlerin yüksek verimlilikle geri kazanılmasını sağlamayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda, BMED teknolojisinin çevresel etkilerini minimize ederek, kaynakların etkin kullanımını ve atık yönetimini iyileştirmesi beklenmektedir.

Bipolar Membran Elektrodializ (BMED) gibi ileri ayırma teknolojilerinde, sistem performansının artırılması, enerji tüketiminin azaltılması ve ürün saflığının maksimize edilmesi gibi hedefler doğrultusunda optimizasyon temel bir gereklilik haline gelmiştir. Bu tür çok değişkenli süreçlerde; akım yoğunluğu, membran seçimi, iyon konsantrasyonu, pH ve sıcaklık gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, proses verimliliğini doğrudan etkilemektedir (Xu *et al.*, 2008; Strathmann, 2010). Bu nedenle, BMED uygulamalarında matematiksel modelleme ve çok kriterli optimizasyon teknikleri kullanılarak sistemin en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir sonuçlar doğurmaktadır (Tanaka, 2015). Özellikle asit ve baz geri kazanımı gibi endüstriyel proseslerde BMED'nin kullanımı, proses parametrelerinin optimizasyonu ile birlikte kaynak verimliliğini artırmakta ve atık minimizasyonuna katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, optimizasyon çalışmaları BMED proseslerinin etkili tasarımı ve uygulanabilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, elektromembran prosesinin kullanımıyla NaOH ve H_3BO_3 üretiminin çevresel açıdan sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir bir yöntem olup olmadığı araştırılmış; süreç boyunca atık yönetiminin iyileştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve ürün saflığının optimize edilmesi hedeflenmiştir. Her bir deneysel basamak için belirlenen parametreler doğrultusunda sistemin genel verimliliği değerlendirilmiş, prosesin ölçeklenebilirliği tartışılmış ve elde edilen ürünlerin bir sonraki adıma entegrasyonu dikkate alınarak döngüsel bir üretim yapısı oluşturulmuştur. Bu doğrultuda geliştirilen BMED tabanlı entegre ekstraksiyon prosesi, reaktif kullanılmadan, atıksız, sülfatsız ve düşük alkalili yüksek saflıkta borik asit (H_3BO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) üretimini mümkün kılmakta; klasik yöntemlerin çevresel ve ekonomik sınırlamalarını aşmayı, karbon salınımını azaltmayı ve enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen bulgular, elektromembran teknolojisinin NaOH ve H_3BO_3 üretimi için endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir alternatif olduğunu göstermekte ve bor kimyasallarının üretiminde sürdürülebilir teknolojilere geçişte önemli bir adım niteliği taşımaktadır.

Literatürde yer alan bulgular, borik asit üretiminde kullanılan mevcut yöntemlerin yüksek reaktif tüketimi, enerji gereksinimi ve çevresel etkiler bakımından önemli kısıtlar içerdiğini göstermektedir. Özellikle sülfürik asit temelli geleneksel proseslerde yüksek miktarda jips oluşumu, ürün içerisindeki safsızlıkların giderilmesinde yaşanan güçlükler ve atık suların deşarj limitlerini aşması gibi sorunlar, bu sistemlerin sürdürülebilirliğini azaltmaktadır. Ayrıca kolemanit ve tinkal gibi bor minerallerinin çözündürülmesi sırasında yüksek enerji gerektiren kalsinasyon veya kristallendirme işlemlerinin uygulanması, prosesin ekonomik uygulanabilirliğini de sınırlamaktadır. Bu nedenlerle, çevreye duyarlı, enerji açısından verimli ve atıksız üretim sistemlerinin geliştirilmesi, günümüz bor kimyası araştırmalarında öncelikli bir hedef haline gelmiştir.

Bu çalışma, söz konusu eksiklikleri gidermeyi hedefleyen ve elektrokimyasal prensiplere dayalı yenilikçi bir prosesin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Geliştirilen sistem, tinkal cevherinden NaOH, teknik borik asit ve yüksek saflıkta borik asit üretimini herhangi bir kimyasal reaktif kullanılmadan ve sıvı atık oluşturmada gerçekleştirilmeyi mümkün kılmaktadır. Böylece hem geleneksel kimyasal yöntemlerin çevresel etkileri ortadan kaldırılmakta hem de entegre bir yapı aracılığıyla kapalı devre üretim sağlanmaktadır. Şekil 12’de bu çalışma kapsamında tasarlanan prosesin akış şeması yer almaktadır.



Şekil 12. Çalışmanın basamakları ve akış şeması

Geliştirilen proses üç temel aşamadan oluşmaktadır:

Birinci aşamada, üç odalı bir bipolar membran elektrodiyaliz (BMED) hücresi kurulmuş ve bu hücre aracılığıyla NaCl ve H₃BO₃ içeren besleme çözeltisinden NaOH ve HCl üretilmiştir. Bu süreçte aynı zamanda borik asidin çözeltiden ayrıştırılması sağlanmıştır. Elde edilen karışım içerisinde membran prosesi yardımıyla tuzdan ayrılan H₃BO₃ kristallendirilmiş; oluşan sıvı faz ise atık olarak değerlendirilmek yerine tinkal (Na₂B₄O₇·10H₂O) cevherinin yıkama aşamasında geri kazanım amacıyla kullanılmıştır.

İkinci aşamada, elektrokimyasal membran prosesiyle birinci aşamada elde edilen HCl, tinkal cevheri üzerinde kullanılarak borik asit (H₃BO₃) ve sodyum klorür (NaCl) üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu adımda NaCl'ün çözeltide kalması sağlanarak H₃BO₃'ün kristallendirilmesi ve saflaştırılması hedeflenmiştir.

Üçüncü aşamada ise ikinci aşamadan elde edilen ve H₃BO₃ içeren tuz çözeltisi yeniden BMED sistemine beslenmiş; böylece birinci ve ikinci aşamalar birleştirilerek sürekli ve döngüsel bir proses yapısı oluşturulmuştur. Bu bütünlük yapı sayesinde sistem, herhangi bir kimyasal reaktif gerektirmeden, atıksız, sürdürülebilir ve yüksek saflıkta ürün elde etmeye olanak tanıyan kapalı devre bir üretim döngüsü haline getirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında önerilen proses üç aşamadan oluşmakla birlikte, bu tezde yalnızca birinci aşama laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, üç odalı bir bipolar membran elektrodiyaliz (BMED) hücresi kullanılarak NaCl ve H₃BO₃ içeren besleme çözeltisinden NaOH ve HCl üretimi hedeflenmiştir. Süreç boyunca borik asidin çözeltiden

ayrıştırılması ve kristallendirilmesi sağlanmış; böylece sistemin temel çalışma prensipleri deneysel olarak ortaya konmuştur. Bu bütünleşik sistemde NaCl, elektrokimyasal membran prosesi aracılığıyla NaOH ve HCl'e dönüştürülmekte, oluşan HCl ise çözündürme aşamasında yeniden kullanılmaktadır. Böylece proses, herhangi bir kimyasal reaktif gerektirmeyen, atıksız, çevre dostu ve sürdürülebilir bir üretim modeli sunmakta; aynı zamanda sonraki aşamalarda planlanan kapalı devre sistem optimizasyonu için öncü nitelikte veriler sağlamaktadır.

Bu süreçte elde edilen deneysel veriler, farklı performans kriterlerinin eşzamanlı olarak değerlendirilmesini mümkün kılan Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinin uygulanması için uygun bir temel sağlamaktadır.

Çok kriterli karar verme

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), karar vericilerin birbirleriyle çelişen birden fazla kriter altında en uygun alternatifi sistematik bir şekilde belirlemesini sağlayan yöntemler bütünüdür. Bu yöntemler, belirsizlik içeren ve çok sayıda alternatifin değerlendirildiği durumlarda, karar sürecini daha objektif ve tutarlı hale getirmektedir. ÇKKV yaklaşımları; mühendislik tasarımı, tedarik zinciri yönetimi, sürdürülebilirlik değerlendirmeleri, finansal analizler ve stratejik planlama gibi birçok farklı alanda yaygın olarak uygulanmaktadır (Mardani *et al.* 2015).

Tezin bağlamına uygun şekilde, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) sürecinin dört temel aşaması aşağıdaki gibi detaylandırılabilir;

Kriterlerin belirlenmesi

BMED prosesi kapsamında değerlendirilecek performans ölçütleri belirlenir. Her bir kriter, sürecin verimliliği ve ekonomikliği açısından önemli bir rol oynar.

Alternatiflerin belirlenmesi

Deneysel çalışma sonucu elde edilen farklı deney koşulları alternatifler olarak tanımlanır. Her alternatif, belirlenen kriterler açısından farklı performans sergiler.

Karar matrisinin oluşturulması ve normalizasyon

Alternatiflerin her bir kriter açısından performansları tablo halinde gösterilir (karar matrisi). Ardından, kriterler farklı birimlerde olduğundan bu değerler normalize edilir. Böylece kriterler aynı ölçeğe getirilerek karşılaştırılabilir hale getirilir.

Kriter ağırlıklarının belirlenmesi ve yöntem uygulaması

Kriterlerin göreceli önem dereceleri belirlenir. Bu ağırlıklar subjektif (uzman görüşü) veya objektif (entropi gibi istatistiksel yöntemler) olarak belirlenebilir. Daha sonra TOPSIS veya MOORA gibi çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanarak, her alternatif için uygunluk skoru hesaplanır ve en iyi alternatif seçilir. Bu sistematik yaklaşım, Taguchi yöntemiyle elde edilen çok sayıda alternatif arasında en uygun kombinasyonun nesnel şekilde belirlenmesine olanak sağlar (Huang and Tzeng 1981).

MOORA Yöntemi

MOORA (Multi-Objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis), çok amaçlı karar problemlerinde birden fazla kriterin eşzamanlı değerlendirilmesini sağlayan etkin bir ÇKKV yöntemidir. Multi-attribute (çok ölçütlü) veya multi-objective (çok amaçlı) optimizasyon olarak da bilinen bu yaklaşım, iki veya daha fazla çelişkili özelliğin belirli kısıtlamalar altında aynı anda optimize edilmesi sürecini kapsar (Brauers, 2004). Yöntem, karar matrisinin oluşturulması, normalizasyon ve fayda–maliyet ayrımı adımlarına dayanır; farklı ölçeklerdeki performans değerleri karşılaştırılabilir hâle getirilir ve alternatiflerin genel uygunluk düzeyi hesaplanır (Özdağoğlu, 2014). Bu yapı, MOORA'yı özellikle mühendislik süreçlerinin optimizasyonunda sık tercih edilen bir yöntem hâline getirmiştir.

TOPSIS Yöntemi

TOPSIS, Hwang ve Yoon (1981) tarafından geliştirilmiş ve çok kriterli karar verme yöntemleri arasında en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Yöntem, her alternatifin pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme ise en uzak olacak şekilde değerlendirilmesini sağlar (Hwang and Yoon, 1981; Tzeng and Huang, 2011).

Pozitif ideal çözüm, fayda kriterleri için maksimum; maliyet kriterleri için minimum değerlere sahip teorik bir referans noktasıdır. Negatif ideal çözüm ise fayda kriterleri için minimum; maliyet kriterleri için maksimum değerlere sahip en olumsuz referans noktasıdır (Behzadian *et al.*, 2012).

TOPSIS, her alternatif için Göreceli Yakınlık Katsayısı (C_i^*) hesaplar. C_i^* değeri yüksekse alternatif pozitif ideal çözüme daha yakın kabul edilir (Opricović and Tzeng, 2004). Yöntemin avantajları arasında kriterlerin yönünü dikkate alması, normalizasyon ile birim farklılıklarını ortadan kaldırması, sezgisel olarak yorumlanabilir sonuçlar üretmesi ve sistematik hesaplama adımlarına sahip olması sayılabilir.

Çok kriterli karar verme yöntemleri arasında, MOORA ve TOPSIS, farklı performans kriterlerinin eşzamanlı olarak değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chakraborty, 2011; Hwang & Yoon, 1981). MOORA, özellikle mühendislik, kimyasal prosesler ve enerji sistemleri gibi çok parametrelili uygulamalarda tercih edilmekte ve proses optimizasyonu ile alternatiflerin sıralanmasında hızlı ve güvenilir sonuçlar sunmaktadır (Karande & Chakraborty, 2012). TOPSIS ise performans kriterlerini ideal çözüm ile karşılaştırarak en uygun alternatifin seçilmesini sağlamaktadır (Hwang & Yoon, 1981).

Bu bağlamda, TOPSIS yöntemi kullanılarak bipolar membran elektrodializi (BMED) ile simüle edilmiş NaCl ve NH₄Cl karışımından NaOH + NH₃·H₂O ve HCl üretimi incelenmiş; performans kriterleri olarak asit/baz konsantrasyonu, ürün bazında tuz dönüşümü, akış hızı, enerji tüketimi, tuz giderme oranı ve ürün saflığı dikkate alınmıştır (Öner and Ata, 2023). Deney tasarımı ve optimum koşulların belirlenmesi için Taguchi tabanlı çok kriterli karar verme yöntemi uygulanmış, optimum koşullar altında %93,5 saflıkta 4,04 M HCl, %98,7 saflıkta 3,66 M NaOH + NH₃·H₂O ve %99,8 tuz giderme elde edilmiştir. Bu sonuçlar, TOPSIS'in membran proses optimizasyonunda çok kriterli performans değerlendirmesi için etkin bir araç olduğunu göstermektedir; benzer şekilde, MOORA yöntemi de mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda çok kriterli karar problemlerinin çözümünde güvenilir ve esnek bir yöntem olarak kullanılmış, malzeme seçiminden tedarik zinciri yönetimine ve otomotiv sektörüne kadar farklı kriter ve belirsizlikler içeren çoklu karar problemlerinde başarılı uygulamalara sahiptir (Karande and Chakraborty, 2012; Dey, 2015; Özakin, 2022).

Bu amaç doğrultusunda, **proses performansını etkileyebilecek çeşitli işletme parametreleri—başlangıç tuz derişimi, başlangıç asit ve baz konsantrasyonları, çözelti akım hızları ve hacimsel akış oranları—bağımsız değişken** olarak ele alınmış ve bu değişkenlerin BMED çıktıları üzerindeki etkileri sistematik biçimde incelenmiştir. Performans değerlendirmesinde; elde edilen borik asit ile eş zamanlı üretilen asit ve baz çözeltilerinin derişimleri, ürün bazlı tuz dönüşüm verimi, akım verimliliği, özgül enerji tüketimi, desalinasyon oranı ve özellikle asit-baz fazlarında gözlenen safsızlık düzeyleri gibi kritik göstergeler kullanılmıştır. Bu çok boyutlu çıktıları daha bütüncül şekilde değerlendirebilmek amacıyla, deneysel tasarım aşamasında dört seviyeye sahip beş parametreden oluşan bir deney planı oluşturulmuş; proses optimizasyonu için Taguchi yöntemiyle desteklenen **TOPSIS** (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ve **MOORA** (Multi-Objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis) gibi **çok kriterli karar verme** (ÇKKV) yöntemleri uygulanmıştır. Bu yaklaşımlar aracılığıyla hem performans kriterleri arasındaki

denge sağlanmış hem de sistemin genel verimini en st düzeye çıkaracak optimum işletme koşulları istatistiksel olarak belirlenmiştir.



MATERYAL VE YÖNTEM

Kimyasal Temini ve Sistemin Yapısı

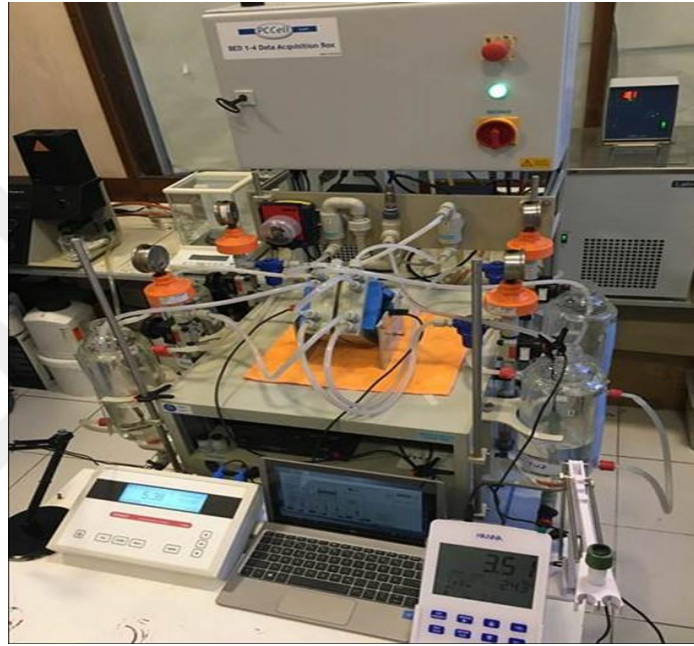
Deneylerde kullanılan tüm çözeltiler, besleme tankı için NaCl ve H₃BO₃, asidik tank için HCl, baz ve elektrolit tankları için ise NaOH, Merck firmasından temin edilen kimyasal maddelerle hazırlanmıştır. BMED işlemi için kullanılan sistem, Almanya'dan PCCell GmbH tarafından sağlanan PCCell BED 1–4 modeline sahip olup, çevrimiçi kontrol ve veri toplama birimleriyle donatılmıştır. Ayrıca, anyon değişim (PC Acid 60), kation değişim (PC SK) ve bipolar membranlar, BMED hücrelerinde kullanılmak üzere aynı firma tarafından temin edilmiştir. Membranların özellikleri Tablo 4'te verilmiştir (PCCell GmbH).

Sistemde doğru akım-gerilim uygulaması için DC güç kaynağı kullanılmıştır. Anot ve katot bileşenleri, titanyum kaplamalı karışık metal oksitlerden üretilmiştir. Bu çalışmada kullanılan PCCell GmbH üretimi BMED hücresinde, her biri 110 mm × 110 mm boyutlarında ve 64 cm² aktif alana sahip membranlar tercih edilmiştir. BMED membran paketi, her biri üç bölmeden oluşan beş tekrar hücresinden meydana gelmektedir. Bu hücrelerde iyon değişim membranları, bipolar membranlar ve spacer'lar yer almakta olup, toplamda 17 bölme oluşmaktadır. Membranlar arasında 5 anyon, 5 kation değişim membranı, 6 bipolar membran ve 17 spacer bulunmaktadır (Şenol vd. 2024). Elektrot ile membran arasındaki boşluk 1 mm iken, membranlar arasındaki boşluk 0,5 mm olarak tasarlanmıştır. BMED prosesinde membran konfigürasyonu, her bir bipolar membran (BPM) ve anyon değiştirici membran (ADM) arasına akış düzenleyiciler eklenerek şu şekilde yapılandırılmaktadır: BPM // KDM // ADM // BPM. Bu düzenleme, membranlar arasındaki iyon taşıma süreçlerinin optimize edilmesine ve akış dinamiklerinin iyileştirilmesine olanak tanır (Dursun 2018).

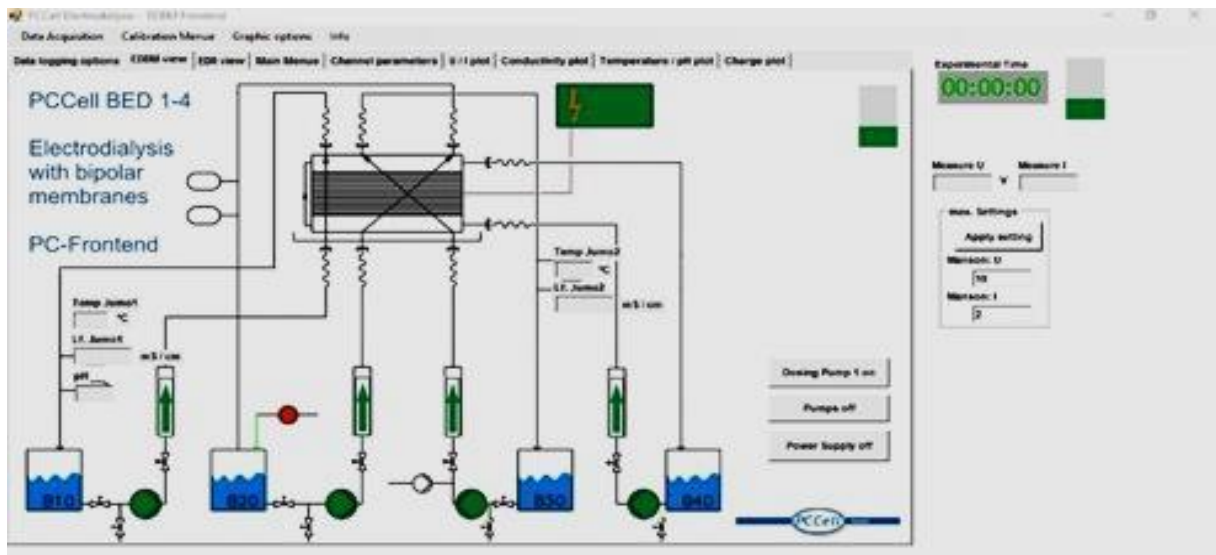
Tablo 4. PCCell v Membranların Özellikleri

Özellikler	PCCell Membran		
Membran Türü	ADM	KDM	BPM
Kalınlık (µm)	100-110	100-120	0.2-0.35
Direnç (Ω cm ²)	~ 2	~ 2.5	-
Çekme Mukavemeti (kg/cm ²)	4-5	4-5	-
pH Stabilesi	0- 9	0- 11	0 – 12
Saklama Koşulları (%NaCl çözeltisi)	%25	%25	%10
Maksimum Çalışma Sıcaklığı	60 °C	50 °C	40 °C
Su Ayrıştırma Voltajı	-		0,8-1 V
Su Ayrıştırma Verimliliği	-		> 95%

Çalışmada BMED sistemi olarak PCCell GmbH firmasının üretmiş olduğu PCCell ED 64 004 modeli tercih edilmiştir. Bu yapı, deneysel uygulamalarda hem modülerlik hem de kontrol kolaylığı sağlaması açısından tercih edilmiştir. Borik asit içeren tuzlu suyun bipolar membranlı elektrodializ yöntemiyle arıtılması amacıyla kurulan deney düzeneği; pompalama sistemi, kontrol ünitesi, doğru akım (DC) güç kaynağı ve elektrodializ hücresinden oluşmaktadır. Bu bileşenler bir araya getirilerek sistemin bütüncül çalışması sağlanmıştır. Deney setinin genel görünümü ve doğru akım güç kaynağı ve software ekran görüntüsü Şekil 13 ve 14 'te sunulmaktadır.



Şekil 13. BMED sistem

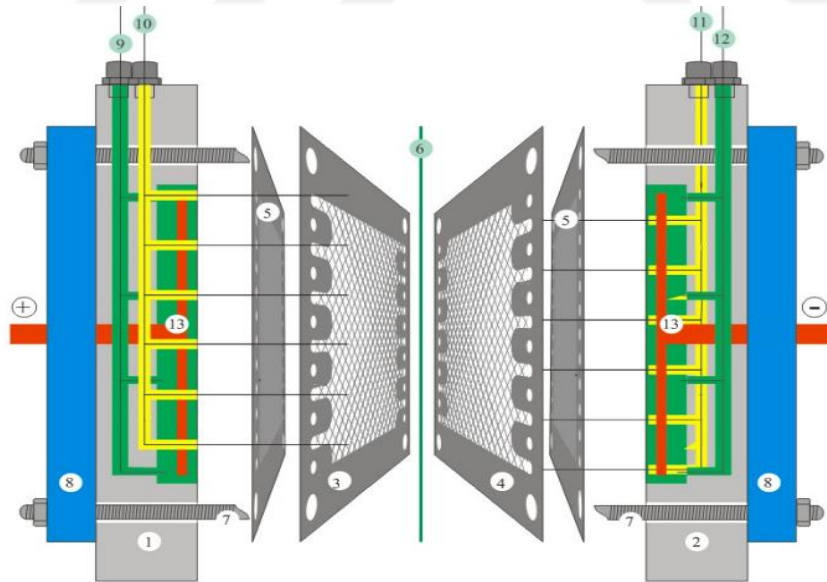


Şekil 14. Doğru akım güç kaynağı ve software ekran görüntüsü



Şekil 15. BMED sistemi ekipmanlar

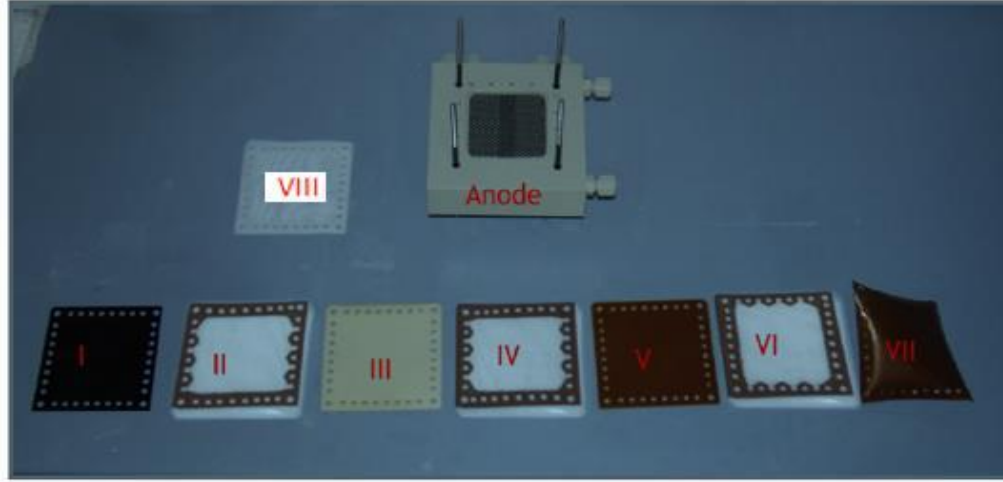
Pompalama ve kontrol seti; sistemin güvenli, kararlı ve izlenebilir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde yapılandırılmıştır. Bu set; 4 adet peristaltik pompa, ısıtma/soğutma ceketine sahip 4 adet tank, her bir hat için kartuş filtreli akış ölçerler, basınç ölçerler, 2 adet yüksek kapasiteli termostat, bilgisayar destekli veri toplama yazılımı ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Kontrol ünitesi; iki iletkenlik ölçer, iki sıcaklık sensörü ve bir pH ölçer ile donatılmıştır. Sistemin detaylı donanımı Şekil 15’te sunulmuştur.



Şekil 16. PCCell elektrodializ hücresi ve fonksiyonel parçalarının şematik görünümü

BMED hücresinin yapısal bileşenleri; hücrenin her iki ucunda yer alan elektrot kapak plakaları (1 ve 2), iyon taşınımının gerçekleştiği membran istif (yığma) katmanları (3, 4, 5 ve 6) ve hücre yapısının bütünlüğünü sağlayan vida setleri (7 ve 8) olarak tanımlanabilir. Elektrot bölmelerine elektrolit beslemesi, 9 ve 12 numaralı girişler aracılığıyla sağlanırken; konsantre

ve seyreltik çözeltiler 10 ve 11 numaralı hatlardan sisteme verilmektedir. Elektrik akımının uygulanmasında görev alan anot ve katot elektrotları ise sistemin 13 numaralı bileşeni olarak yer almaktadır. Şekil 16’te PCCell elektrodializ hücresinin ve ilgili fonksiyonel parçalarının şematik görünümü sunulmaktadır.



Şekil 17. PCCell ED 64 004 bipolar membranlı elektroliz hücresi membran ve spacer dizilişi

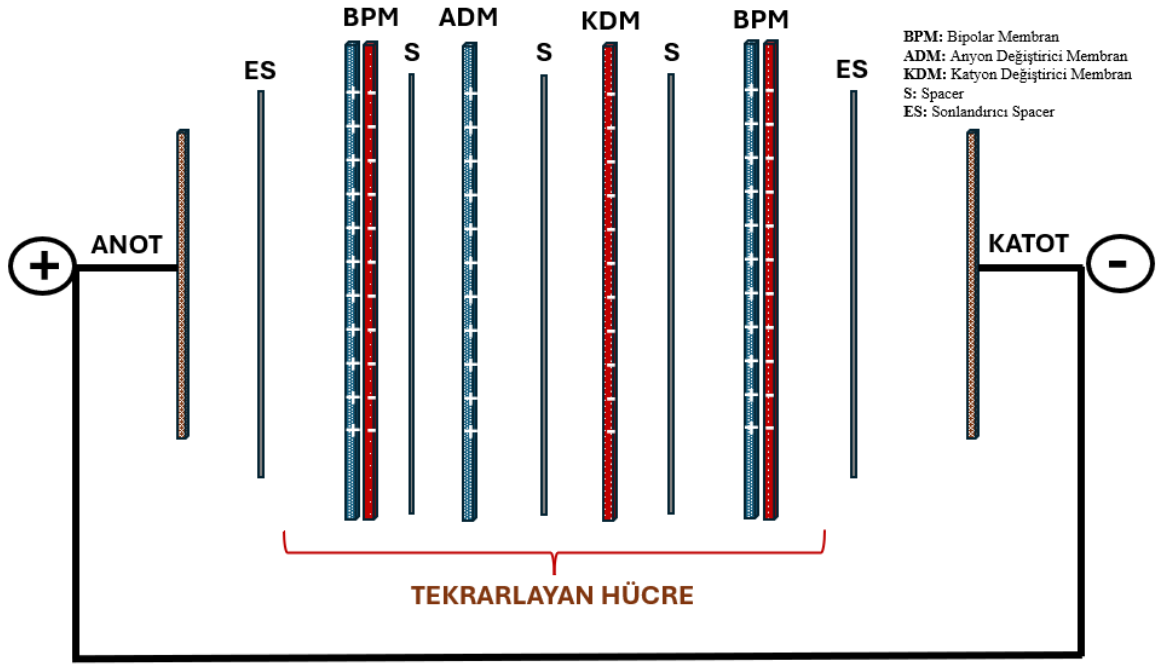
(I; kation değişim end membran, II; asit spacer, III; anyon değişim membran, IV; tuz spacer, V; kation değişim membran, VI; bipolar membran, VII - VIII; end spacer)

Şekil 17’da, bu çalışmada kullanılan BMED hücresinin genel yapısı ile birlikte, hücre içerisinde yer alan membranların dizilim düzeni görsel olarak sunulmuştur.

BMED Prosesi Deneysel Uygulama Adımları

BMED sisteminde gerçekleştirilecek deneyler için, hücre içine BPM//KDM//ADM//BPM dizilimine uygun olarak ve beş tekrarlı hücre yapısı esas alınarak membran yerleşimi yapılmıştır. Hücre montajı tamamlandıktan sonra, sızdırmazlık kontrolü saf su ile gerçekleştirilmiş; herhangi bir sızıntı tespit edilmediği durumda sistem devreye alınmıştır.

Şekil 18’da BMED sisteminde kullanılan hücre konfigürasyonuna ait bir tekrar eden hücre yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Bu yapı, bipolar membran (BPM), anyon değişim membranı (ADM), kation değişim membranı (KDM), spacer (S) ve sonlandırıcı spacer (ES) sırasına göre düzenlenmiştir. Tekrar eden bu konfigürasyon, iyonların uygun yönlerde taşınmasını sağlayarak sistemin asit ve baz üretimi hedeflerine ulaşmasını mümkün kılar. Hücre modülü içinde bu yapı birden fazla kez tekrarlanarak sistemin verimliliği artırılmaktadır.



Şekil 18. BMED hücre gösterimi

BMED Sistemi Çalıştırma Prosedürü

Deney öncesinde sistemde kullanılan termostatlar hedef sıcaklığa ayarlanmış ve çözeltiler ilgili tanklara yüklenmiştir. Tanklardaki çözeltilerin istenilen sıcaklığa ulaşması beklenmiştir. Ardından membran sistemi ile yazılım kontrol programı başlatılmıştır. Ölçüm sırasında elde edilecek verilerin zaman skalası (saniye, dakika, saat) belirlenmiş ve çalışma süresince elde edilecek verilerin kayıt altına alınacağı klasör tanımlanmıştır.

Çözeltilerin bulunduğu tanklardan çıkan ve hücreye giden boru hatları bağlanmadan önce, hatlarda oluşabilecek hava kabarcıklarının giderilmesi amacıyla çözeltiler kendi devreleri içinde sirküle ettirilmiştir. Hava alma işlemi tamamlandıktan sonra, çalışılacak debi değerleri belirlenmiş, pompalar durdurulmuş ve boru hatları BMED hücresine bağlanmıştır. Sonrasında sistem pompaları yeniden çalıştırılmış, doğru akım güç kaynağının anot ve katot uçları hücreye bağlanmış ve istenen akım–voltaj değerleri sisteme girilmiştir.

Sistem çalışmaya başladıktan sonra, yazılım üzerinden ölçüm alma komutu verilmiş ve verilerin eş zamanlı olarak grafiksel olarak izlenmesi sağlanmıştır. Deneyler, sistemde besleme (tuz) iletkenliği 2 ms/cm oluncaya kadar devam ettirilmiştir. Deney süresi boyunca belirli zaman aralıklarında her bir tanktan vanalar yardımıyla ayrı ayrı numuneler alınmış, alınan numuneler otomatik pipetler yardımıyla analiz için hazırlanmıştır. Asit ve baz konsantrasyon analizleri kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, tuz tankının pH değeri sisteme entegre pH probu ile izlenmiş ve veri olarak kayıt altına alınmıştır. Harici pH ölçümleri ile de

çözeltilerin pH değerleri doğrulanmış, numune alma işleminin ardından analiz edilen çözeltiler tanklara geri dökülmüş ve bir sonraki numune alma süresi beklenmiştir. Sistem çalışırken ölçüm cihazlarından gelen veriler yazılım üzerinden düzenli şekilde takip edilmiş ve grafiksel olarak izlenmiştir. Deney süresi sonunda DC güç kaynağı kapatılmış, sistem pompaları ve termostatlara durdurulmuştur. Çalışma tamamlandıktan sonra elde edilen tüm veriler kaydedilmiş, tanklardaki çözeltiler atık hatları yardımıyla güvenli şekilde boşaltılmıştır.

BMED Prosesi İçin Deney Planı

Başlangıçta, besleme, asit, baz ve elektrolit tankları 1 L simüle edilmiş çözelti ile doldurulmuştur. Çözelti sıcaklığı, termostatlara donatılmış ceketli tanklar kullanılarak 25 ± 1 °C’de sabit tutulmuştur. Deneyler, besleme tankındaki çözeltinin iletkenliği 2 mS/cm’nin altına düştüğünde sonlandırılmıştır. BMED sisteminin performans göstergeleri; besleme tankındaki H_3BO_3 derişimi, asit ve baz derişimleri, tuz bazlı asit ve baz dönüşüm oranları, akım verimi, asit ve baz çözeltilerindeki safsızlıklar, çalışma süresi ve enerji tüketimi olarak belirlenmiştir. Besleme, asit, baz ve elektrolit çözeltilerinin başlangıç derişimleri ile uygulanan başlangıç akımı ve çözelti akış hızları, performans göstergelerini etkileyen değişkenler olduğundan, bu değişkenler deneysel parametreler olarak seçilmiştir. Prosesin optimizasyonu için 5 parametre ve her biri 4 seviyeden oluşan bir deneysel tasarım yapılmıştır. İlgili parametreler ve seviyeleri Tablo 5’te sunulmuştur.

Tablo 5. Parametre ve Seviyeleri

Seviyeler		1	2	3	4
Parametreler					
A	Tuz+ H_3BO_3	120 + 36	140 + 36	160 + 36	180 + 36
B	Akım (A) 20 V	3,2	4,2	5,2	6,2
C	Akış hızı (L/h)	10	17	24	31
D	Baş. Asit-Baz Kons.	0,05	0,1	0,15	0,2
E	Elektrolit	0,05	0,1	0,15	0,2

Taguchi yöntemiyle oluşturulan deney planı Tablo 6’da sunulmuştur. Bu tabloda yer alan deney koşulları, Tablo 5’te tanımlanan parametre seviyelerine göre belirlenmiş olup, her bir deneyde kullanılan faktör düzeylerini ifade etmektedir. Böylece, deneysel çalışmalarda uygulanan parametre kombinasyonları sistematik bir şekilde değerlendirilmiştir.

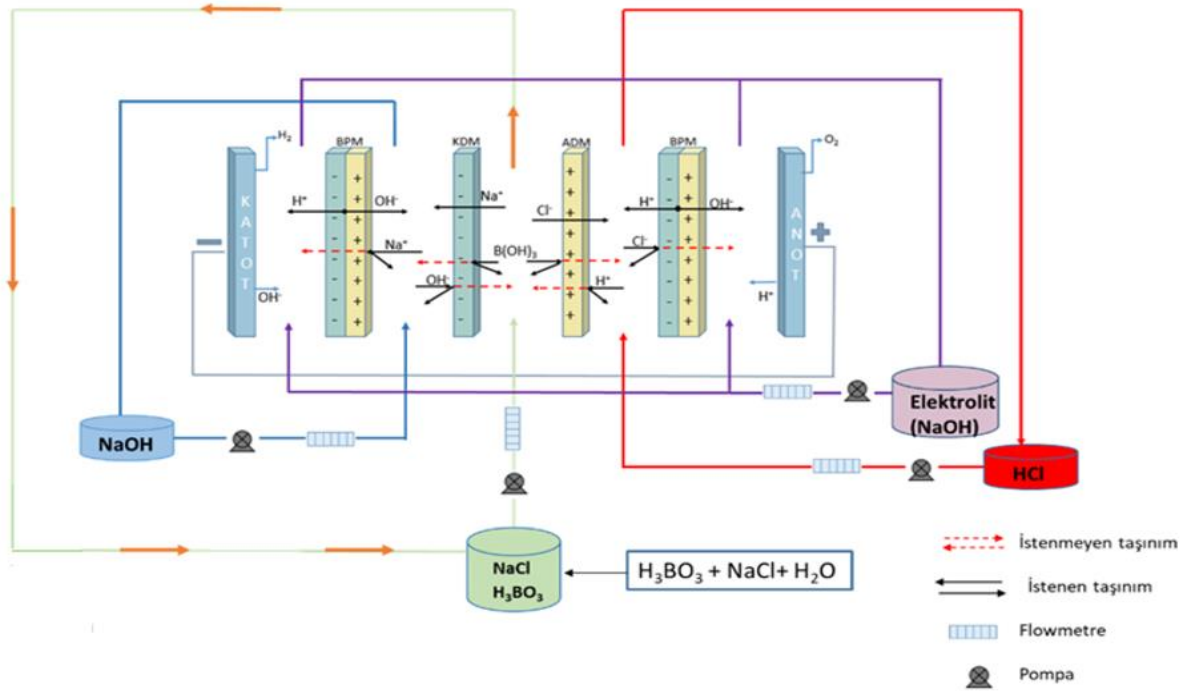
Tablo 6. Deney Planı

Deney no.	Parametre ve Seviyeleri				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

Taguchi yöntemi, Minitab (MiniTab 18) yazılımı kullanılarak deney planlamasında uygulanmıştır. Bu yaklaşım, minimum varyasyonla en yüksek performansı sağlayacak parametre ayarlarını belirlemeye yönelik bir mühendislik tekniği olan “parametre tasarımına” dayanmaktadır. Yöntem, süreç performansını etkileyen faktörlerin farklı seviyelerde test edildiği, istatistiksel olarak yapılandırılmış deney düzenlerini içermektedir (Karna vd 2012). Bu kapsamda yapılan optimizasyon ile deney sayısı mümkün olduğunca azaltılarak, yüksek dönüşüm oranlarına ulaşmak hedeflenmiştir. Aynı zamanda bu optimizasyon sayesinde, en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi sağlanmıştır.

BMED hücresi, asit, baz ve tuz kompartmanlarının yanı sıra anolit ve katolit bölmelerinden oluşmaktadır; bu yapı ve iyonların hareket yönleri Şekil 19’de şematize edilmiştir. Bu hücrede yer alan anyon değiştirici membranlar (ADM), pozitif yüklü fonksiyonel gruplar içeren polimerik yapıları sayesinde negatif yüklü iyonları geçirirken pozitif iyonların geçişini engelleyerek seçici geçirgenlik sağlamaktadır. Ancak, bu seçiciliğe rağmen, kompartmanlar arası konsantrasyon farklarından kaynaklı geri difüzyon ve eş-iyon geçişi gibi istenmeyen taşıma olayları da meydana gelebilmektedir. Her ne kadar BMED proseslerinde taşıyıcı kuvvetin elektriksel potansiyel olması bu istenmeyen geçişleri azaltıyor olsa da bazı

iyonlar membranlar arasında kontrolsüz olarak hareket edebilmektedir. (Öner 2023; Kanca 2023)



Şekil 19. BMED hücresinin şematik gösterimi

BMED hücresinde, iyon değiştirici membranlar (ADM ve KDM) ve bipolar membranlar (BPM) aracılığıyla kompartımanlar arasında iyon taşınımı sağlanır. Bu iyonlar, geçtikleri kompartımanlarda kimyasal reaksiyonlara girerek asit ve baz oluşumlarına yol açar. BPM'nin katalitik ara yüzeyinde, uygulanan elektrik alan etkisiyle su H^+ ve OH^- iyonlarına ayrılır. H^+ iyonları katyon değişim membranından katot tarafına, OH^- iyonları ise anyon değişim membranından anot tarafına hareket eder. Ancak, H^+ iyonları anyon değişim yüzeyini, OH^- iyonları ise katyon değişim yüzeyini geçemez (Şenol vd 2024). Bu sebeple, BPM'nin her iki yüzeyinde H^+ ve OH^- iyonları birikerek sırasıyla asit ve baz üretimi başlar.

Bu süreçte, besleme çözeltisindeki katyonlar ADM aracılığıyla asit kompartımanına, anyonlar ise KDM aracılığıyla baz kompartımanına taşınır (Bunani *et al.* 2017). Sonuç olarak, BPM'nin etkinliğiyle iyon taşınımı sağlanarak BMED sistemi içerisinde eş zamanlı olarak asit ve baz üretimi gerçekleştirilir.

BMED Prosesinden Elde Edilen Çözeltilerin Kristallendirilmesi

Bu aşamada, optimum koşullarda elde edilen tuzu giderilmiş borik asit çözeltisi kullanılarak kristallendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kristallendirme çalışmalarında karıştırma hızı ve başlangıç NaCl konsantrasyonunun etkisi, Tablo 7'de verilen deney planı ve besleme çözeltisinin özelliklerine göre incelenmiştir. Hazırlanan çözelti, Şekil 20(a)'da

gösterilen rotary evaporasyon sistemi kullanılarak 90 °C’de vakum altında buharlaştırılarak doymun hâle getirilmiş; ardından 25 °C’ye soğutularak kristallendirilmiş ve Şekil 20(b)’de verilen vakumlu filtrasyon düzeneği ile filtre edilmiştir. Elde edilen kristaller 40–50 °C’de kurutulmuş ve hem kristalde hem süzüntüde borik asit ve iyon analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 20. (a) Rotary evaporasyon sistemi; (b) Vakumlu filtrasyon düzeneği

Tablo 7. Deney Planı ve Besleme Çözeltisinin Özellikleri

Deney No	Karıştırma hızı (rpm)	Besleme çözeltisi (250 mL)			
		NaCl g	H ₃ BO ₃ g	İletkenlik mS/cm	pH
1	50	0,625	17,75	4,35	3,93
2	100	0,625	17,75	4,48	3,93
3	150	0,625	17,75	4,47	3,97
4	200	0,625	17,75	4,53	3,94
5	250	0,625	17,75	4,47	3,98
6	150	0,125	17,75	1,008	4,07
7	150	0,25	17,75	1,913	4,16
8	150	0,375	17,75	2,77	3,87
9	150	0,5	17,75	3,66	4,05

Optimizasyon, günümüzün çok değişkenli ve karmaşık problemleri karşısında karar verme süreçlerini daha verimli hale getiren temel bir analiz aracıdır. Sınırlı kaynakların en etkin biçimde kullanılması, maliyetlerin düşürülmesi, sistem performansının iyileştirilmesi ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması gibi kritik hedefler doğrultusunda; optimizasyon hem sayısal hem de yapısal problemlerin çözümünde matematiksel modellere dayanan sistematik yaklaşımlar sunar. Bu yöntem, mühendislikten lojistiğe, enerji yönetiminden üretim planlamasına kadar birçok disiplinde, gerçek dünyadaki dinamikleri göz önünde bulundurarak

en uygun çözümlerin geliştirilmesini sağlar (Öner 2023). Böylece, karmaşık sistemlerde karar vericilere stratejik avantajlar kazandırır.

Bu çok parametrelili sistemlerde optimum çalışma koşullarının belirlenmesi için çeşitli deneysel tasarım ve analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, Taguchi yöntemi, deneysel parametrelerin etkili bir şekilde analiz edilmesi ve sistem performansının iyileştirilmesi amacıyla sıklıkla tercih edilen güçlü bir optimizasyon aracıdır. Taguchi yaklaşımı, özellikle kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen değişkenlerin sistem üzerindeki etkilerini ayırt etme, deney sayısını azaltarak veri elde etme sürecini daha ekonomik hale getirme ve sinyal-gürültü (S/N) oranı gibi istatistiksel göstergelerle proses kararlılığını artırma yeteneği ile öne çıkar (Kackar 1985; Rao *et al.* 2008; Ata vd 2017). BMED gibi enerji verimliliği ve ürün kalitesi açısından hassasiyet gerektiren proseslerde, Taguchi yöntemiyle elde edilen veriler sayesinde proses parametrelerinin sistematik şekilde optimize edilmesi mümkün olmaktadır. Bu sayede hem maliyetler azaltılmakta hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli kazanımlar elde edilmektedir.

Taguchi, 1950 ve 1960'larda ortaya konan Robust Design ilkelerinin asıl geliştiricisi olarak öne çıkmıştır. Geliştirdiği yöntemin elektronik, otomotiv, fotoğrafçılık ve daha pek çok sektörde uygulanması, Japon sanayisinin hızlı büyüme döneminde kilit bir etken olmuştur (Rosa 2009). Taguchi yöntemi, geleneksel deney tasarımı yöntemlerine kıyasla daha az sayıda deneyle çok sayıda değişkenin analizini mümkün kılan ortogonal dizi sistemini kullanır. Bu yönüyle hem zaman hem de maliyet açısından oldukça verimlidir. Sinyal-gürültü (S/N) oranları, en uygun sonuçları analiz etmek ve tahmin etmek amacıyla kullanılır. Bununla birlikte, Taguchi yöntemi yalnızca seçilen faktör ve seviyeler aralığında en uygun kombinasyonu verebildiğinden, bu seviyelerin ötesinde genelleme yapılamaz (Li *et al.* 2019).

Taguchi yöntemi, kalite karakteristiklerinin türüne göre üç farklı **S/N oranı** hesaplama yaklaşımı sunar:

- En büyük en iyi: Maksimum verim, iletkenlik veya ürün saflığı istenen durumlar için,
- En küçük en iyi: Minimum enerji tüketimi, atık oluşumu veya kayıplar istendiğinde,
- Nominal değer en iyi: Belirli bir hedef değere en yakın sonucun arandığı durumlar için kullanılır.

Bu yaklaşımlar sayesinde hem prosesin kararlılığı artırılır hem de dışsal (gürültü) faktörlerin etkileri minimize edilir. Taguchi yöntemi, özellikle enerji ve çevresel verimliliğin kritik olduğu **BMED** gibi proseslerde önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin BMED ile asit-

baz geri kazanımında, akım yoğunluğu, tuz konsantrasyonu ve pH gibi faktörlerin etkileri bu yöntemle sistematik biçimde analiz edilerek optimum çalışma koşulları belirlenebilir (Ata vd. 2017).

En büyük en iyi için:

Bu formülasyon, performans değerinin yüksek olmasının tercih edildiği durumlar için uygundur. Eşitlik 3'te y 'nin hedef değeri sonsuzdur (Öner 2023).

$$S/N = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

En küçük en iyi için:

Bu formülasyon, performans değeri ne kadar düşük olursa o kadar iyi kabul edilen durumlar için kullanılır. Eşitlik 4'te yer alan bu yaklaşımda, kalite değişkeni y 'nin hedef değeri sıfırdır ve sistem performansı, bu değere ne kadar yaklaşırsa o kadar yüksek kabul edilir (Öner 2023).

$$S/N = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

Hedef değer en iyi için:

Bu formülasyon, performans değerinin belirli bir nominal hedefe en yakın olduğu durumlar için kullanılır. Eşitlik 5'te, kalite değişkeni y için önceden tanımlanmış bir hedef değer (örneğin, tane boyutu gibi) bulunmakta olup, sistem performansı bu değere yakınlıkla değerlendirilir (Öner 2023).

$$S/N = 10 * \log_{10} \left(\frac{y^{-2}}{s^2} \right) \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde; n tekrar edilen deney sayısını, y performans değerini, $\bar{y}$ ortalama ölçüm değeri ve s^2 varyans değerini ifade etmektedir (Öner 2023).

Taguchi deneysel matris tasarımı, özel ortogonal diziler kullanılarak oluşturulur. Bu yöntem sayesinde, deney sayısı minimize edilirken, deneysel matrise dâhil edilen proses parametrelerinin sayısı ve bu parametrelerin seviyeleri maksimize edilebilir (Öner vd 2023). Taguchi yönteminde, bir proseste amaç maksimum değere ulaşmaksa, SNL oranını maksimum yapan parametre seviyeleri optimum kabul edilir. Eğer amaç minimum değere ulaşmaksa, bu durumda SNS oranını maksimum yapan parametre seviyeleri optimumdur. S/N oranları, farklı faktör kombinasyonlarının performans etkisini karşılaştırmak için kullanılır. Yüksek bir S/N oranı, istenen performansa daha yakın bir sonucu ifade ederken, düşük bir S/N oranı, performansın hedeften uzaklaştığını gösterir. Taguchi yöntemi, bu S/N oranlarını analiz ederek

en iyi parametre kombinasyonlarını belirlemeye ve tasarım veya üretim süreçlerinin optimize edilmesine yardımcı olur.

Amaç fonksiyonlarına ait marjinal ortalama değerler (Y_m), Eşitlik 6 esas alınarak hesaplanmıştır.

$$Y_m = \sum_{j=1}^n \frac{X_{ij}}{n} \quad (6)$$

Taguchi yönteminde, optimum çalışma koşullarına karşılık gelen deney, deney planında mevcut değilse, performans değeri

$$Y_i = \mu + X_i + e_i \quad (7)$$

eşitliği kullanılarak tahmin edilebilir (Phadke *et al.* 1983).

Bu denklemde, Y_i ifadesi i. deneye ait öngörülen çıktı değerini, X_i ilgili deneyde uygulanan faktör seviyelerinin birikimli etkisini, e_i ise modele yansımayan rastgele hata bileşenini temsil etmektedir.

Elde edilen sonuçlar yüzde cinsinden ifade edildiğinde, bu değerler doğrudan Eşitlik 6'ı uygulanmadan önce önce Ω dönüşümüne tabi tutulur. Daha sonra optimizasyonla bulunan Ω değerleri, aynı bağıntı kullanılarak tersine dönüştürülerek tekrar yüzde formatına geri çevrilir (Taguchi 1987)

$$\Omega = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \quad (8)$$

Burada $\Omega(\text{db})$, desibel cinsinden dönüştürülmüş değeri; p ise deneysel olarak yapılan ölçümler sonucunda ortaya çıkan yüzde oranını ifade etmektedir. İstatistiksel incelemenin tamamlanmasının ardından, omega dönüşümüyle elde edilen desibel değerleri tersine çevrilerek orijinal yüzde değerleri yeniden elde edilebilir (Phadke 1989). Eşitlik 3'ün deneysel verilerden yola çıkarak yapılan bir nokta tahmini olması sebebiyle, doğrulama deneylerinin geçerliliğini sınamak amacıyla güven aralığı analizine başvurulmalıdır. Tahmin hatası, ölçülen p değeri ile tahmin edilen p değeri arasındaki fark olarak tanımlanır. Belirlenen bir hata düzeyine karşılık gelen güven aralığı ise Eşitlik 7 kullanılarak hesaplanır (Phadke 1989; Ross 1988).

$$Se = \pm 2 \sqrt{\left(\frac{1}{n_o}\right) \sigma e^2 + \left(\frac{1}{n_r}\right) \sigma e^2} \quad (9)$$

$$\sigma e^2 = \frac{\text{Hata kareleri toplamı}}{\text{Hata için serbestlik derecesi}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{n_o} = \frac{1}{n} + \left[\frac{1}{n_{Ai}} - \frac{1}{n} \right] + \left[\frac{1}{n_{Bi}} - \frac{1}{n} \right] + \left[\frac{1}{n_{Ci}} - \frac{1}{n} \right] + \dots \quad (11)$$

Burada Se , iki standart sapma genişliğindeki güven aralığını; n , deney tasarımında kullanılan toplam deney sayısını; nr , doğrulama deneylerinin tekrar sayısını; n_{Ai} , n_{Bi} , n_{Ci} ise A, B ve C parametrelerinin i . seviye gözlem sayısını belirtir. Tahmin edilen hata, hesaplanan güven aralığının dışına taşarsa, modelin geçerliliği sorgulanır (Phadke 1989).

Taguchi yöntemi kapsamında yapılan varyans analizi (ANOVA), deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerin sistem çıktısı üzerindeki etkisini istatistiksel olarak değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu analiz ile her bir faktörün performans değişkeni üzerindeki katkısı hesaplanarak, hangi parametrelerin anlamlı olduğu belirlenmektedir. S/N oranlarına dayalı yapılan ANOVA, hem sistemin ortalama performansını hem de değişkenliğini dikkate alarak yorumlanmasına olanak tanımaktadır. Serbestlik derecesi, kareler toplamı, ortalama kare ve F değeri gibi temel istatistiksel büyüklükler aracılığıyla faktörlerin etkisi analiz edilir. Ayrıca, katkı oranları hesaplanarak faktörlerin sürece ne düzeyde etki ettiği belirlenir. Bu sayede, sistem performansını en çok etkileyen parametreler ortaya konulmakta ve optimizasyon süreci bilimsel temellere dayandırılmaktadır (Phadke 1989; Ross 1988; Roy 2010).

Taguchi yöntemi ile elde edilen deneysel çıktılar, çok kriterli karar verme teknikleri olan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ve MOORA (Multi-Objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis) yöntemleri ile analiz edilmiş; yöntemlerin sonuçları karşılaştırılarak kararların güvenilirliği değerlendirilmiştir (Huang and Tzeng 1981 ; Brauers and Zavadskas, 2006).

MOORA

MOORA yöntemi, birden fazla kriteri aynı anda değerlendirmeye ve en uygun alternatifi belirlemeye yönelik çok kriterli karar verme tekniğidir. MOORA yöntemi, uygulanması açısından şu adımlardan oluşur;

1. Adım: Deney Sonuçlarının Elde Edilmesi

İlk adımda, uygun bir Taguchi deney tasarımı kullanılarak farklı parametre kombinasyonlarına sahip deneyler gerçekleştirilir. Bu deneyler, BMED prosesi gibi sistemlerin performansını değerlendirmek için gereklidir.

2. Adım: S/N Oranlarının Hesaplanması

Deneysel sonuçlar kullanılarak, hedeflenen performans kriterlerine göre uygun S/N (Signal-to-Noise) oranları hesaplanır. Bu oranlar, her bir alternatifin performansını değerlendirmek ve kıyaslamak için kullanılır.

3. Adım: Karar Matrisinin Oluşturulması

Hesaplanan S/N değerleri ile bir karar matrisi oluşturulur. Bu matriste, her bir alternatifiin çeşitli kriterler açısından performansı yer alır. Karar matrisi şu şekilde tanımlanır:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (12)$$

4. Adım: Vektörel Normalizasyon

Her bir alternatif için vektörel normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu, her alternatifiin kriterlerdeki performansını normalize etmek için aşağıdaki formül kullanılır:

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

Bu adımda, her bir kriterin farklı birimlere sahip olabileceği dikkate alınarak, kriterler aynı ölçeğe getirilir.

5. Adım: Maksimizasyon ve Minimizasyon Yönlü Performansların Ayrılması

Normalizasyon adımının ardından, her bir alternatifiin performansının maksimizasyon yönlü ve minimizasyon yönlü olarak ayrılması gerekir. Maksimizasyon yönlü performanslar toplamından, minimizasyon yönlü performanslar çıkarılır:

$$y_i = \sum_{j=1}^g X_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n X_{ij}^* \quad (14)$$

Burada g, maksimizasyon yönlü kriterlerin sayısını ifade eder.

6. Adım: Ağırlıklı Normalize Edilmiş Performans Matrisinin Hesaplanması

Ağırlıklı normalize edilmiş matris, her kriterin önem derecelerine göre hesaplanır. Bu adımda, her kriter için normalize edilmiş değerlerin ağırlıklarla çarpılması gerekir:

$$y_i = \sum_{j=1}^g w_j X_{ij}^* - w_j \sum_{j=g+1}^n X_{ij}^* \quad (15)$$

Burada w_j , j-inci kriterin ağırlığını temsil eder. Bu şekilde, her alternatifiin performansı, kriterlerin önemine göre yeniden değerlendirilir (Öner 2023, Özdağoğlu 2014).

TOPSİS

TOPSIS yöntemi, alternatiflerin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıklarına göre sıralanmasına dayanan pratik çok kriterli karar verme tekniğidir. TOPSİS yöntemi, uygulanması açısından şu adımlardan oluşur;

1. Adım:

Uygun bir Taguchi deney tasarımı kullanılarak, çalışmaya ilişkin deneysel veriler elde edilir.

2. Adım:

Her bir performans kriteri için uygun S/N oranları belirlenir. Bu oranlar, karar matrisinin temel girdilerini oluşturur.

3. Adım:

Elde edilen S/N oranları kullanılarak alternatiflerin her bir kriter altındaki performans değerleriyle karar matrisi oluşturulur:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (16)$$

4. Adım:

Karar matrisindeki değerler, aşağıdaki formül kullanılarak vektörel olarak normalize edilir:

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

5. Adım:

Normalize matris, kriterlerin ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı karar matrisi oluşturulur:

$$V_{ij} = w_j * X_{ij}^* \quad (18)$$

6. Adım:

Her kriter için en iyi (pozitif ideal A^*) ve en kötü (negatif ideal A^-) değerler aşağıdaki gibi belirlenir:

$$A^* = \{\max v_{ij} \mid j \in J; \min v_{ij} \mid j \in J'\} \quad (19)$$

$$A^- = \{\min v_{ij} \mid j \in J; \max v_{ij} \mid j \in J'\} \quad (20)$$

7. Adım:

Her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklığı hesaplanır:

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (21)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (22)$$

8. Adım

Her alternatifin ideal çözüme olan göreceli yakınlığı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (23)$$

Bu değerler sıralanarak en uygun alternatif belirlenir.

BMED prosesinde yapılan ölçümler ve analizler

BMED prosesi süresince, asit, baz ve H_3BO_3 konsantrasyonları, ilgili tanklardan belirli aralıklarla alınan numuneler üzerinde yaş kimyasal analiz yöntemleri kullanılarak tayin edilmiştir. Borik asit (H_3BO_3) tayini için, tüm tanklardan alınan numunelere mannitol ile kompleks oluşturulması yöntemi uygulanmıştır. Tuz konsantrasyonunun ve/veya desalinasyon oranının belirlenebilmesi amacıyla, besleme tankındaki iletkenlik değişimi süreç boyunca sistemin entegre donanımı ve yazılımı aracılığıyla otomatik olarak kaydedilmiştir.

BMED prosesinin performansı aşağıdaki kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir:

Asit ve baz konsantrasyonu

Belirli sürelerde asit ya da baz tankından alınan 1 ml numune bir miktar saf su ile seyreltildi. Daha sonra konsantrasyonu belli olan 0.1 M NaOH ile pH 7 olana kadar titre edilerek nötralize edildi ve sarfiyat kaydedildi.

Üretilen asit ve baz konsantrasyonu aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$C = \frac{n_t}{V_t} (mol/l) \quad (24)$$

Burada n_t : Herhangi bir anda asit veya bazın molar konsantrasyonu, V_t : Herhangi bir zamanda asit veya baz hacmi.

Beslemedeki tuzun ürünlere dönüşüm yüzdesi Eşitlik 25 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% Dönüşüm = \frac{C_t - C_o}{C_{Top}} * 100 \quad (25)$$

C_t : Herhangi bir andaki asit konsantrasyonu (mol/L), C_o : Başlangıçta asit tankındaki asit konsantrasyonu (mol/L), C_{Top} : Besleme çözeltisindeki tuzun tamamen ürüne dönüştüğünde elde edilecek asit ve baz konsantrasyonudur (mol/L).

Desalinasyon oranının hesaplanması

Besleme çözeltisindeki tuz miktarını bulmak için yaş metot kullanıldı. Besleme tankından alınan 1 ml örnek 50 ml saf su ile seyreltildi, elde edilen çözeltiye 1 ml K_2CrO_4 indikatör olarak eklendi ve 0,1M $AgNO_3$ ile çözelti rengi sarıdan kırmızıya dönene kadar titre edilir ve sarfiyat kaydedildi.

Üretilen tuzun konsantrasyonu aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$C = \frac{n_t}{V_t} (mol/l) \quad (26)$$

Burada n_t : Herhangi bir anda tuzun molar konsantrasyonu, V_t : Herhangi bir zamanda tuz hacmi.

Desalinasyon oranı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$\% \text{ Desalination} = \frac{V_o \times (C_{salt})_o - V_t \times (C_{salt})_t}{V_o \times (C_{salt})_o} \times 100 \quad (27)$$

Bu denklemde, deneyin herhangi bir t anında besleme tankındaki tuz konsantrasyonu $(C_{salt})_t$, $(C_{salt})_o$ ise başlangıç tuz konsantrasyonu olarak gösterilir. V_t , besleme tankının son hacmi, V_o ise besleme tankının ilk hacmidir.

Borik asit (H_3BO_3) tayini

Sistemden belirli aralıklarla alınan numuneler önce ultra saf su ile seyreltilmiş ve çözeltiye mannitol ilave edilerek pH değeri sabitlenmiştir. Ardından, çözeltideki borik asit miktarını belirlemek amacıyla, hazırlanan karışım 0.1 M NaOH çözeltisi ile pH 7.60 değerine ulaşınca kadar titre edilmiştir. Titrasyonda harcanan NaOH hacmi kaydedilmiştir. Bu yöntemde, tüketilen her bir mol NaOH, bir mol H_3BO_3 'e karşılık gelmektedir. Elde edilen verilerle borik asit miktarı ve derişimi aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır (Kanca vd 2023);

$$m_{H_3BO_3} (g) = V_{NaOH} \times M_{NaOH} \times 61.83 \quad (28)$$

$$C_{H_3BO_3} (g/L) = m_{H_3BO_3} / V_{sample} \quad (29)$$

Enerji tüketimi (kWh/kg)

Uygulanan elektriksel potansiyel (V), akım şiddeti (A) ve başlangıçtaki besleme miktarı (kg) dikkate alınarak, sistemin enerji tüketimi özgül bazda hesaplanmıştır. Böylece, üretilen birim ürün başına harcanan enerji miktarı belirlenmiştir.

$$\text{Enerji Tüketim}(E) = \frac{1}{m} \int_0^1 V * I * dt \quad (30)$$

Burada m , başlangıçtaki besleme çözeltisinin kütlesini (kg); V , uygulanan potansiyeli (volt); ve I , uygulanan elektrik akımını (amper) temsil etmektedir.

Akım verimliliği (η)

BMED sisteminde akım verimi, bipolar membran (BPM) üzerinde suyun ayrışması sonucu oluşan proton (H^+) ve hidroksil (OH^-) iyonları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada, uygulanan elektrik akımının ne kadarının gerçekten hedef iyonların (H^+ ve OH^-) üretimine katkı sağladığı belirlenmiş ve sistemin elektrokimyasal verimliliği değerlendirilmiştir.

$$\% \text{ Akım verimliliği } (\eta) = \frac{z \times F}{60 \times N \int_0^t I \cdot dt} \times [(C \cdot V)_{i,t} - (C \cdot V)_{i,o}] \quad (31)$$

Burada, z proton (H^+) veya hidroksil (OH^-) iyonlarının yükünü temsil eder; F , Faraday sabitini (96,485 coulomb/mol) ifade eder; N , BMED sistemindeki hücre sayısını belirtir; I , uygulanan elektrik akımını (amper) ifade eder; $(C \times V)_{i,t}$, son asit veya bazın molar miktarını (mol/L) gösterirken; $(C \times V)_{i,o}$ ise başlangıçtaki asit veya bazın molar miktarını (mol/L) temsil eder.

Asit ve baz ürün saflığı

Elde edilen asit ve baz çözeltilerinin içerdikleri yabancı iyon miktarları analiz edilerek ürünlerin kimyasal saflıkları belirlenmiştir. Asit veya baz safsızlık (g/L çözeltisi) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

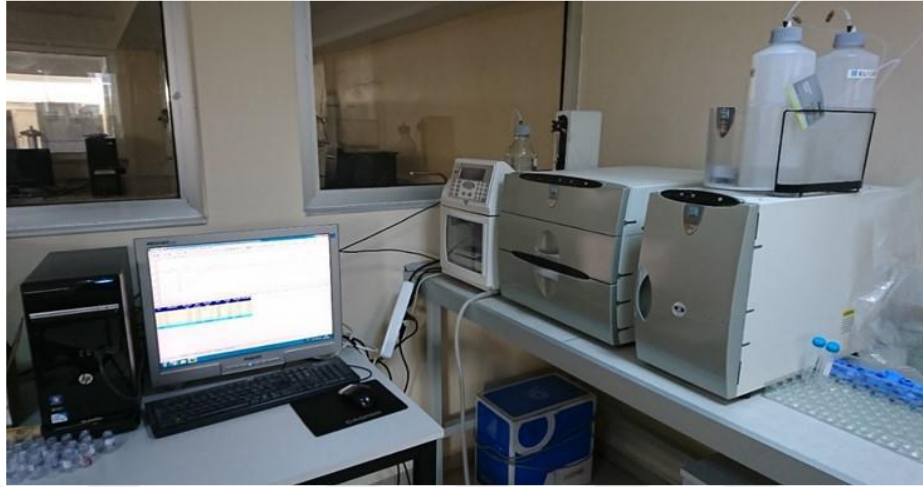
$$\text{Asit ve baz safsızlık } (\Sigma) = C_{\text{Borikasit},t} + C_{\text{Tuz},t} \quad (32)$$

Burada, $C_{\text{Borikasit},t}$, asit veya baz tankındaki son borik asit konsantrasyonunu (g/L); $C_{\text{Tuz},t}$ ise asit veya baz tankındaki son tuz konsantrasyonunu (g/L) ifade etmektedir.

Anyon ve katyon analizi

Anyon ve katyon analizleri için iki farklı iyon kromatografisi sistemi kullanılmıştır. Amonyum, sodyum, magnezyum ve kalsiyum iyonlarının tayini, Şekil 21’te gösterilen Thermo Dionex ICS 1100 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sülfat ve klor anyonlarının analizi ise Şekil 22’de gösterilen Thermo Dionex ICS 3000 cihazı ile yapılmıştır. Her iki cihaz ile iyon tayini yapılırken, ölçüm aralığı ppm düzeyinde hassasiyete sahip olup, analiz öncesinde numunelerin içerdiği iyon miktarları dikkate alınarak yaklaşık seyreltme oranları belirlenmiştir. Böylece, cihazların ölçüm sınırları içerisinde kalacak şekilde tüm numuneler uygun oranlarda seyreltilmiş ve analize hazır hale getirilmiştir (Öner 2023).

Analiz sürecinde kullanılan iyon metreler ve kromatografi sistemleri, yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Bu yöntemle, her bir kompartımandan alınan örneklerdeki iyon derişimleri güvenilir bir şekilde belirlenmiştir.



Şekil 12. Katyon analizi için iyon kromatografi cihazı (Thermo Dionex ICS 1100)



Şekil 22. Anyon analizi için iyon kromatografi cihazı (Thermo Dionex ICS 3000)

X-Işını Kırınımı (XRD) Yöntemi

X-ray Difraksiyon (XRD) analizi, malzemelerin kristal yapılarını ve fazlarını belirlemek için yaygın olarak kullanılan güçlü bir yöntemdir. XRD analizlerinde, bir malzemenin iç yapısındaki fazların ve kristal yapıların doğru bir şekilde tanımlanması, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlamada kritik öneme sahiptir. Analiz sırasında elde edilen veriler, kristal yapılarının difraksiyon desenleri şeklinde ifade edilir ve bu desenlerin incelenmesi, fazların nitel ve nicel tayini için kullanılır. Ayrıca, XRD yöntemi numuneye zarar vermeden ve çok küçük miktarlarda çalışabilme avantajı sunar; bu da özellikle hassas veya sınırlı örnek miktarları için önemlidir (Kalkan, 2024).

XRD cihazı; kayalar, kristalin yapılı inorganik malzemeler, polimerler ve ince film gibi çok çeşitli örneklerin analizinde yaygın olarak kullanılmakta olup, faz tayini, kristal yapı belirleme, kristalit boyutu hesaplama gibi birçok yapısal parametrenin değerlendirilmesine olanak tanır (DAYTAM 2025, METU 2023).

Bu çalışmanın kristalizasyon aşamasında elde edilen kristal formdaki borik asidin (H_3BO_3) yapısal ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, X-Işını Kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır. Söz konusu analiz, Atatürk Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM)'nden hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu sayede kristalin faz yapısı, saflığı ve olası safsızlık içeriği detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

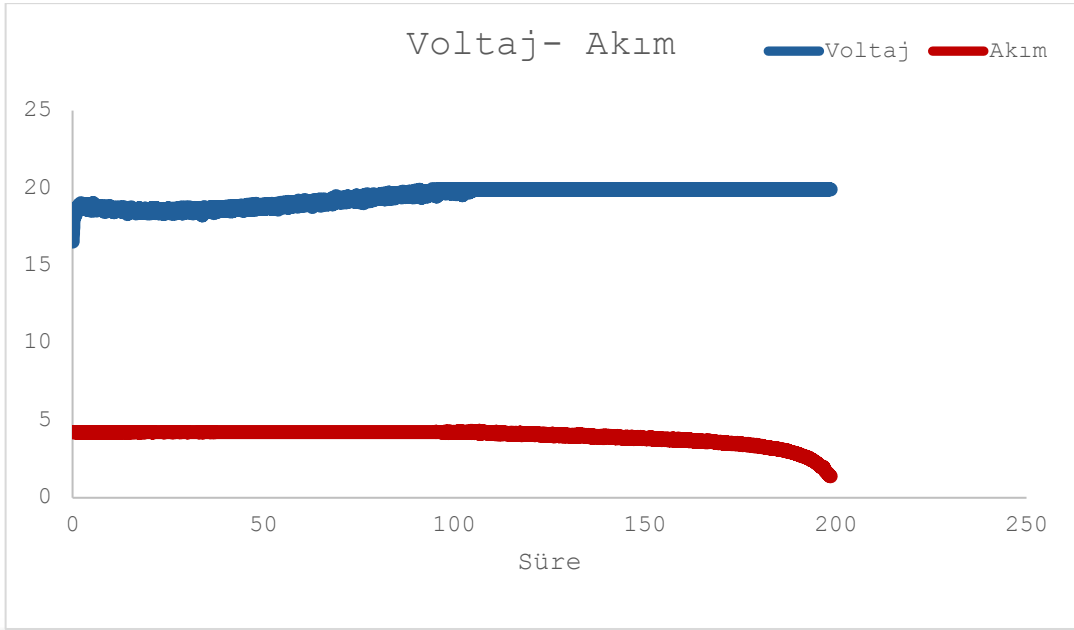


ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

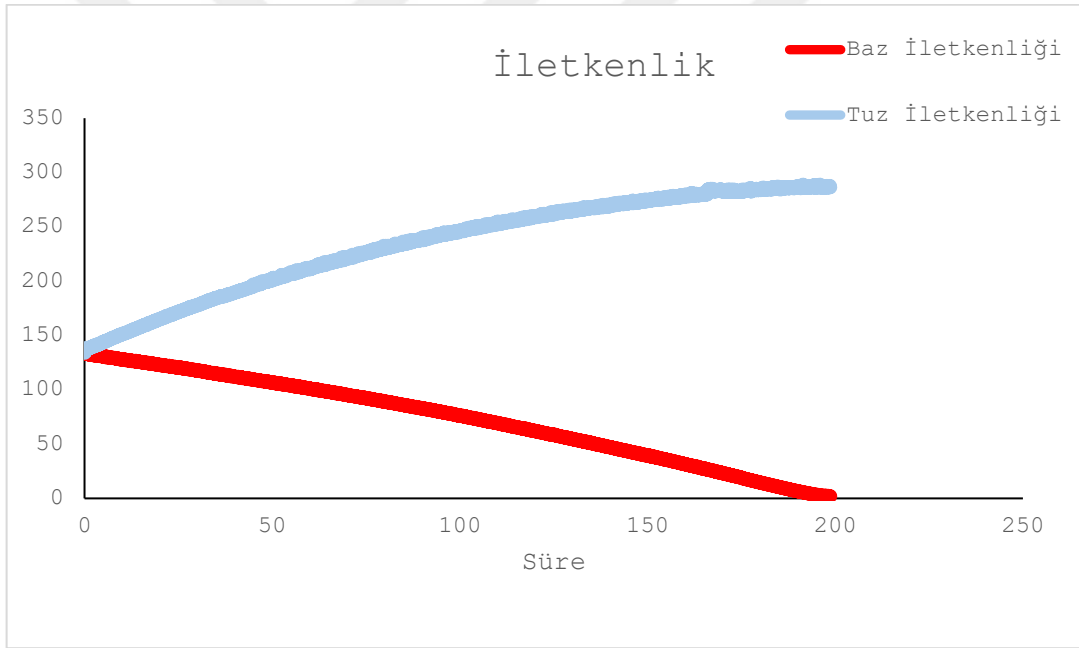
Deney planında yer alan her bir koşul, sistematik hata payını azaltmak ve veri güvenilirliğini artırmak amacıyla farklı zamanlarda ve rastgele sıralamayla olmak üzere iki kez tekrarlanmış, böylece elde edilen verilerin güvenilirliği ve istatistiksel sağlamlığı artırılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan deney tasarımı ve hacim-proseslenme süresi Tablo 8’de sunulmakta olup, bu tasarım kapsamında gerçekleştirilen 10. deneye ait sistem çıktıları Şekil 23-24’te ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Tablo 8. Hacim ve Proseleme Süreleri

Deney No	Parametre ve Seviyeleri					Hacim			Proses Süresi	
	A	B	C	D	E	Asit	Baz	Tuz	Elekt.	Süre (dk)
1	1	1	1	1	1	1,160	1,160	0,545	0,980	243
2	1	2	2	2	2	1,140	1,180	0,600	0,960	180
3	1	3	3	3	3	1,100	1,220	0,580	0,980	156
4	1	4	4	4	4	1,140	1,220	0,560	1	127
5	2	1	2	3	4	1,164	1,220	0,515	0,980	278
6	2	2	1	4	3	1,170	1,180	0,540	0,985	215
7	2	3	4	1	2	1,160	1,260	0,510	0,980	167
8	2	4	3	2	1	1,120	1,260	0,540	0,982	157
9	3	1	3	4	2	1,200	1,240	0,440	0,980	319
10	3	2	4	3	1	1,140	1,220	0,430	0,987	198
11	3	3	1	2	4	1,160	1,280	0,500	0,980	210
12	3	4	2	1	3	1,200	1,320	0,400	0,982	180
13	4	1	4	2	3	1,240	1,260	0,420	0,987	362
14	4	2	3	1	4	1,200	1,341	0,360	0,982	300
15	4	3	2	4	1	1,200	1,340	0,370	0,982	280
16	4	4	1	3	2	1,180	1,360	0,414	0,984	215



Şekil 23. 10. deney için besleme ve baz çözeltisi iletkenliğinin zamanla değişimi



Şekil 24. 10. Deney için akım ve voltajın zamanla değişimi

Bu çalışmada, optimum çalışma koşullarının belirlenmesi amacıyla Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmış ve 5 parametrelilik, 4 seviyeli L16 (4^5) ortogonal deney planı tasarlanmıştır (Şenol, 2024). Tasarlanan plana göre 16 farklı deneysel koşul altında gerçekleştirilen deneyler, sürecin performans kriterlerine göre değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 9’de sunulmuştur.

Çalışmada kullanılan performans kriterlerinin değerlendirilmesinde sinyal-gürültü (S/N) oranları dikkate alınmış ve bu oranlar aracılığıyla deneysel parametrelerin etkileri yorumlanmıştır. Ayrıca, ürün miktarı, tuz dönüşüm oranı, akım verimi, enerji tüketimi, ürün

içerisindeki safsızlık miktarı ve deney süresi gibi performans ölçütleri için varyans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon çalışmalarında performans kriteri olarak aşağıda belirtilen amaç fonksiyonları tercih edilmiştir.

- H_3BO_3 miktarı
- Sistemde üretilen asit-baz miktarı
- Ürün temeli üzerinden tuz dönüşümü
- Akım verimliliği
- Dönüşen tuz için tüm proseste tüketilen enerji
- Asit- Baz ürün saflığı
- Çalışma süresi

Tablo 9. Deney Çıktıları

Deney No.	Seviye ve Parametreleri					H ₃ BO ₃ (g/L)	HCl (M)	NaOH (M)	Desalinasyon (%)	Asit Dönüşümü (%)	Baz Dönüşümü (%)	Asit içerisindeki safsızlık (g/L)	Baz içerisindeki safsızlık (g/L)	Akım Verimliliği	Enerji Tüketimi (kWh/kg)	Çalışma Süresi (min.)
	A	B	C	D	E											
1	1	1	1	1	1	51.50	1.58	1.58	98.60	87.10	86.90	6.90	13.10	0.73	2.31	243.00
2	1	2	2	2	2	48.00	1.76	1.73	97.71	92.90	91.40	5.30	9.10	0.82	1.72	180.00
3	1	3	3	3	3	55.40	1.83	1.82	99.04	90.80	90.20	4.70	6.40	0.82	1.82	156.00
4	1	4	4	4	4	56.70	1.87	1.86	99.45	94.10	93.60	4.50	5.10	0.84	1.96	127.00
5	2	1	2	3	4	48.90	1.82	1.83	99.09	82.00	82.70	12.50	20.90	0.75	1.80	278.00
6	2	2	1	4	3	52.80	2.00	2.05	98.63	89.40	91.80	8.80	12.40	0.79	1.75	215.00
7	2	3	4	1	2	61.00	1.78	1.80	99.14	84.20	85.10	9.80	14.10	0.82	2.15	167.00
8	2	4	3	2	1	58.90	1.95	1.92	98.95	86.90	85.60	9.80	10.80	0.76	2.53	157.00
9	3	1	3	4	2	54.90	2.04	2.05	99.32	81.90	82.50	13.90	23.90	0.73	1.89	319.00
10	3	2	4	3	1	62.10	2.15	2.20	99.22	84.10	86.20	13.30	19.30	0.98	1.88	198.00
11	3	3	1	2	4	61.10	2.15	2.16	99.62	87.50	87.90	9.60	13.90	0.78	1.95	210.00
12	3	4	2	1	3	75.50	2.05	2.10	99.60	88.10	90.30	9.10	12.60	0.78	2.25	180.00
13	4	1	4	2	3	54.60	2.09	2.12	99.38	80.90	82.10	20.10	25.40	0.71	1.79	362.00
14	4	2	3	1	4	79.10	2.26	2.20	99.77	86.30	84.10	11.80	17.40	0.74	1.81	300.00
15	4	3	2	4	1	81.10	2.42	2.45	99.75	87.80	89.00	10.50	14.90	0.68	2.72	280.00
16	4	4	1	3	2	74.20	2.55	2.61	99.76	92.90	95.10	5.90	9.30	0.81	2.44	215.00

Deneyisel Parametrelerin S/N Değerlerine Göre Performans Kriterlerine Etkisi

Deneyisel çalışmada, farklı parametre seviyelerinin performans üzerindeki etkisi sinyal/gürültü (S/N) oranları üzerinden değerlendirilmiştir. S/N_L değerini maksimize eden parametre seviyeleri; besleme çözeltisindeki nihai H_3BO_3 konsantrasyonu, asit ve baz üretimi, tuz bazlı dönüşüm verimi ile akım verimi gibi hedefler açısından en uygun koşulları temsil etmektedir. Buna karşılık, enerji tüketimi, proses süresi ve ürün içerisindeki safsızlık miktarı gibi performans kriterleri için optimum parametre seviyeleri, S/N_S değerini maksimize eden seviyeler olarak belirlenmiştir. Karar matrisinin oluşturulmasından önce, toplamda on farklı performans kriteri Tablo 10'da her bir kriterin hedeflenen en yüksek (S/N_L) ve en düşük (S/N_S) değerleri dikkate alınarak gruplandırılmıştır. Tüm kriterler eşit öneme sahip kabul edilerek her birine 0,1 oranında ağırlık atanmıştır.

Tablo 10. S/N Oranına Göre Performans Kriterlerinin Sınıflandırılması

Performans Kriterleri	$S/N_{(L/S)}$	Ağırlık Faktörü (w)
H_3BO_3 Konsantrasyonu (g/L)	Maximum (SN_L)	0.1
Asit Konsantrasyonu (M)	Maximum (SN_L)	0.1
Baz Konsantrasyonu (M)	Maximum (SN_L)	0.1
Asit Dönüşümü (%)	Maximum (SN_L)	0.1
Baz Dönüşümü (%)	Maximum (SN_L)	0.1
Akım Verimliliği (%)	Maximum (SN_L)	0.1
Çalışma Süresi (min)	Minimum (SN_S)	0.1
Asitteki Safsızlık (g)	Minimum (SN_S)	0.1
Bazdaki Safsızlık (g)	Minimum (SN_S)	0.1
Enerji Tüketimi (kWh/kg)	Minimum (SN_S)	0.1

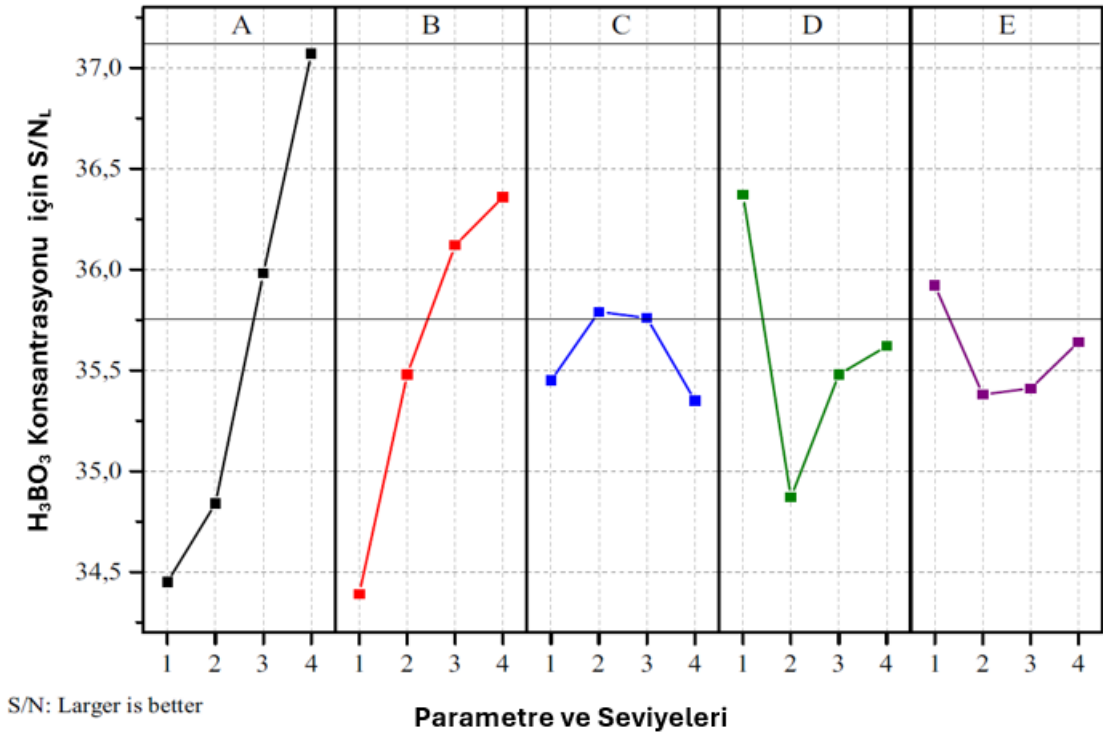
H_3BO_3 miktarı üzerine parametrelerin etkisi

Besleme çözeltisindeki borik asit konsantrasyonlarına ait veriler, Eşitlik 3 ve 6 kullanılarak hem performans istatistiklerine hem de marjinal ortalamalara dönüştürülmüş; her bir parametre seviyesine karşılık gelen ortalama performans değerleri Tablo 11'da detaylandırılmıştır. İlgili parametrelerin performans üzerindeki etkileri ise grafiksel olarak Şekil 25'te gösterilmiştir.

Tablo 11. Besleme Çözeltisinde Borik Asit Konsantrasyonu, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama

Deney No.	Parametre ve Seviyeleri					Ölçüm	Performans İstatistiği	
	A	B	C	D	E	Oluşan H_3BO_3	Oluşan H_3BO_3 S/N _L	Y _m
1	1	1	1	1	1	51,5	34,2431	51,5
2	1	2	2	2	2	48	33,6248	48
3	1	3	3	3	3	55,4	34,8805	55,4
4	1	4	4	4	4	56,7	35,0793	56,7
5	2	1	2	3	4	48,9	33,7953	48,9
6	2	2	1	4	3	52,8	34,4612	52,8
7	2	3	4	1	2	61,0	35,7205	61,0
8	2	4	3	2	1	58,9	35,4116	58,9
9	3	1	3	4	2	54,9	34,7965	54,9
10	3	2	4	3	1	62,1	35,8739	62,1
11	3	3	1	2	4	61,1	35,7293	61,1
12	3	4	2	1	3	75,5	37,5676	75,5
13	4	1	4	2	3	54,6	34,7469	54,6
14	4	2	3	1	4	79,1	37,9708	79,1
15	4	3	2	4	1	81,1	38,19	81,1
16	4	4	1	3	2	74,2	37,4141	74,2

Borik asit, oldukça zayıf bir asit olup çözeltide büyük oranda moleküler formda bulunmaktadır. Buna karşılık, NaCl tamamen iyonlaşarak çözeltiye serbest Na^+ ve Cl^- iyonları kazandırmaktadır. BMED karşı elektrodla doğru migrasyonunu sağlamaktadır. Bu iyonlar, hidratlaşmış şekilde taşınmakta prosesi sırasında uygulanan elektriksel alan, besleme kompartımanındaki iyonların ve beraberinde su moleküllerini de asit ve baz kompartmanlarına doğru sürüklemektedir. Yüksüz moleküller olan borik asidin iyonlaşmamış kısmı doğrudan elektriksel alandan etkilenmemektedir. Ancak, iyon taşınımı sırasında suyun sürüklenmesi, bu moleküllerin difüzyonunu dolaylı olarak etkilemektedir. Moleküler formdaki borik asit, konsantrasyon farkına bağlı olarak hem asit hem de baz kompartmanına doğru pasif difüzyonla geçebilmektedir



Şekil 25. H_3BO_3 miktarı üzerine parametrelerin etkisi

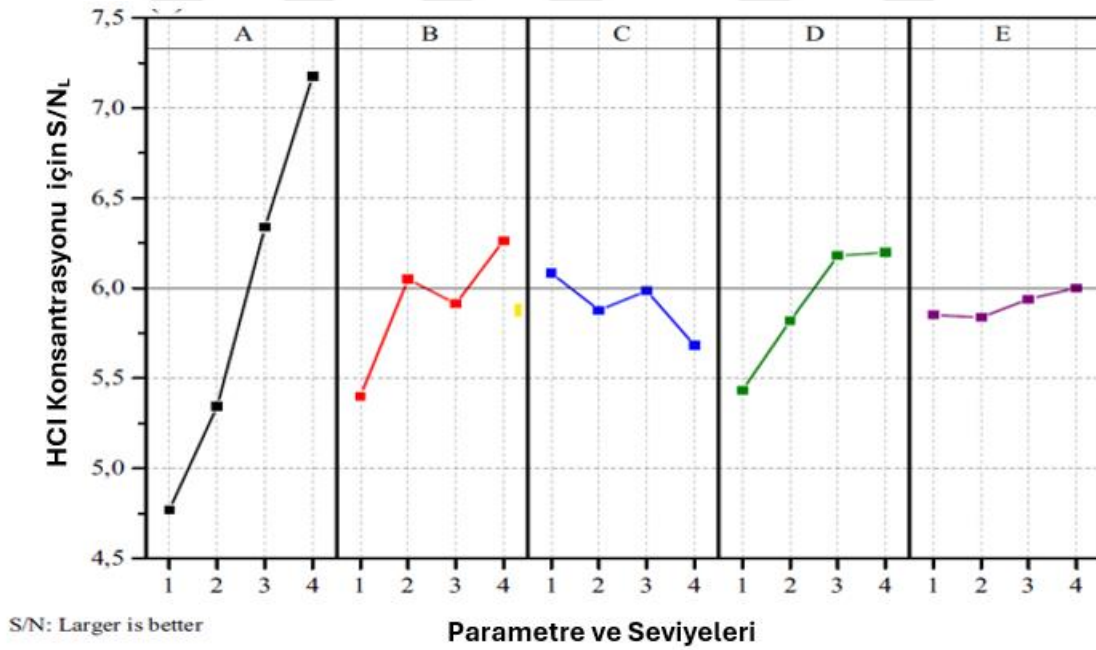
H_3BO_3 konsantrasyonu; başlangıç H_3BO_3 - tuz konsantrasyonu (A), akım şiddeti (B), akış hızı (C), başlangıç asit ve baz konsantrasyonu (D) ile elektrolit konsantrasyonu (E) gibi parametrelerden etkilenmektedir. Şekil 25'te de görüldüğü üzere, beş parametre arasında başlangıç tuz- H_3BO_3 konsantrasyonu ve uygulanan akım, beslemede elde edilen son H_3BO_3 konsantrasyonu üzerinde en etkili parametreler olarak öne çıkmaktadır. Bu parametrelerin artırılması, işlem süresi, iyon hareketliliği ve dolaylı olarak elektro-osmotik su taşınımı üzerinde etkili olmakta; bu da borik asit dengesine yansyarak, sistemdeki konsantrasyon değişimlerini belirgin şekilde şekillendirmektedir.

Oluşan asit ve baz miktarı üzerine parametrelerin etkisi

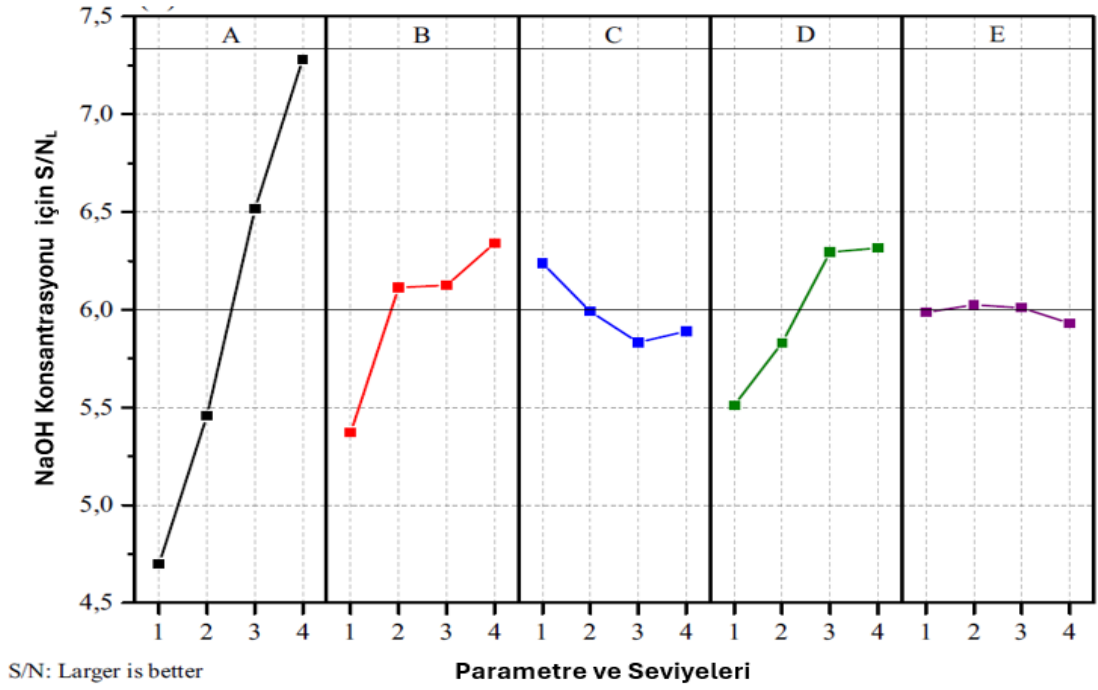
Tablo 6'da sunulan deney planı doğrultusunda her bir deney iki kez tekrarlanmış olup, elde edilen asit ve baz miktarlarının performans istatistikleri ile marjinal ortalama değerleri, Eşitlik 3 ve 6 kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 12'de verilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak, parametrelerin asit ve baz konsantrasyonu üzerindeki etkileri Şekil 26 ve Şekil 27'te görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 12. İki Tekrarlı Deneyler Sonucunda Ölçülen Asit ve Baz Miktarları (mol) İle Hesaplanan Performans İstatistikleri

Deney No.	Parametre ve Seviyeleri					Ölçüm				Performans İstatistiği			
	A	B	C	D	E	Oluşan Asit		Oluşan Baz		Oluşan Asit S/N _L	Y _m	Oluşan Baz S/N _L	Y _m
1	1	1	1	1	1	1,47	1,69	1,43	1,73	3,92756	1,584	3,85757	1,58
2	1	2	2	2	2	1,55	1,97	1,62	1,84	4,72431	1,76	4,72095	1,73
3	1	3	3	3	3	1,68	1,98	1,6	2,04	5,16139	1,83	5,01058	1,82
4	1	4	4	4	4	1,67	2,07	1,65	2,07	5,28751	1,87	5,22382	1,86
5	2	1	2	3	4	1,79	1,84	1,63	2,03	5,17506	1,815	5,09309	1,83
6	2	2	1	4	3	2,1	1,90	1,92	2,18	5,98801	2	6,18265	2,05
7	2	3	4	1	2	1,46	2,10	1,69	1,91	4,59028	1,782	5,05676	1,80
8	2	4	3	2	1	1,74	2,15	1,7	2,14	5,63977	1,947	5,49458	1,92
9	3	1	3	4	2	1,92	2,15	2,23	1,86	6,12966	2,035	6,12046	2,05
10	3	2	4	3	1	2,4	1,90	2,2	2,2	6,4722	2,15	6,84845	2,20
11	3	3	1	2	4	2,36	1,94	2,18	2,14	6,52427	2,15	6,68796	2,16
12	3	4	2	1	3	1,99	2,11	2,2	2,00	6,22391	2,05	6,41483	2,10
13	4	1	4	2	3	2,02	2,16	1,94	2,30	6,38831	2,09	6,43268	2,12
14	4	2	3	1	4	2,12	2,39	2,42	1,98	7,01621	2,255	6,71794	2,20
15	4	3	2	4	1	2,78	2,06	2,32	2,58	7,38687	2,42	7,74662	2,45
16	4	4	1	3	2	2,22	2,88	2,39	2,82	7,91646	2,552	8,22756	2,61



Şekil 26. HCl oluşumu üzerine parametrelerin etkisi



Şekil 27. NaOH oluşumu üzerine parametrelerin etkisi

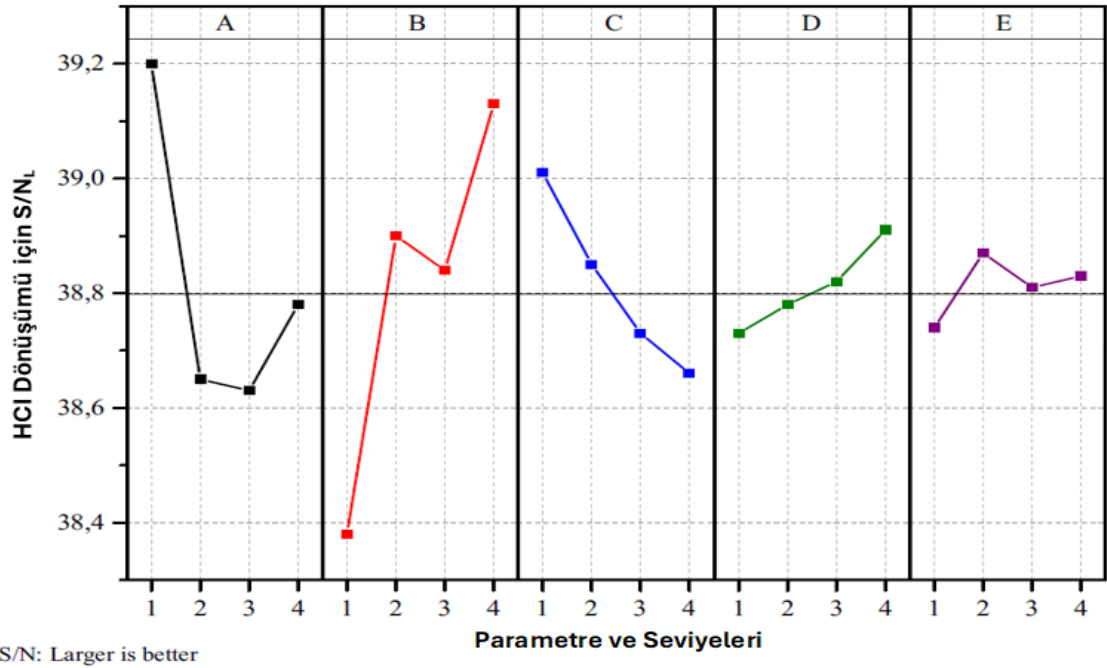
Yaptığımız değerlendirmeler sonucunda, başlangıç besleme konsantrasyonunun asit ve baz üretimi üzerinde en belirleyici parametre olduğu, buna karşılık elektrolit konsantrasyonu ve akış hızının etkisinin sınırlı kaldığı görülmüştür. Asit ve baz konsantrasyonlarını etkileyen temel mekanizmalar; ortak iyon taşınımı, ürünlerin geri difüzyonu ve besleme bölmesinden asit ve baz bölmelerine elektro-osmoz yoluyla gerçekleşen su taşınımı olarak belirlenmiştir (Rottiers *et al.*, 2014; Dursun *et al.*, 2021; Öner *et al.*, 2023). Yaptığımız deneyler, başlangıç tuz konsantrasyonunun artmasının, proses sonunda elde edilen asit ve baz konsantrasyonlarını da artırdığını göstermektedir. Proses boyunca, tuz bölmesinde bulunan hidratlı su molekülleri, elektrik alan etkisi altında iyonlarla birlikte elektro-osmoz yoluyla asit ve baz bölmelerine taşınmaktadır. Başlangıç tuz konsantrasyonunun artması, işlem süresini uzatmakta ve bunun sonucunda su taşınımı artarak, asit ve baz bölmelerinde daha yüksek derişimlerin elde edilmesine katkı sağlamaktadır.

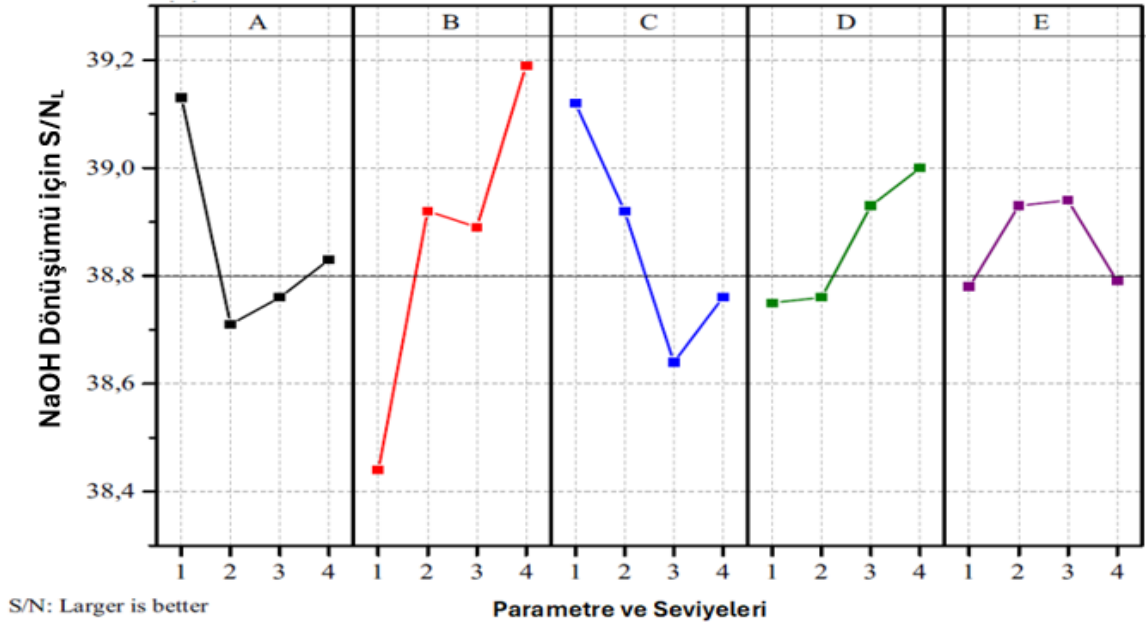
Asit ve baz dönüşüm üzerine parametrelerin etkisi

Elde edilen ortalama baz ve asit konsantrasyonu verileri, Eşitlik 25 kullanılarak ürün bazlı tuz dönüşüm oranlarına çevrilmiştir. Tuzun aside ve baza dönüşümüne ilişkin performans istatistikleri ile her bir parametre seviyesine ait marjinal ortalama değerler ise Eşitlik 3 ve 6'ya göre hesaplanarak Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13. Ürün Temelli Tuz Dönüşümü, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama

Deney No.	Parametre ve Seviyeleri					Ölçüm		Performans İstatistiği			
	A	B	C	D	E	% Asit Dönüşümü	% Baz Dönüşümü	% Asit Dönüşümü S/N _L	Y _m	% Baz Dönüşümü S/N _L	Y _m
1	1	1	1	1	1	87,1	86,9	38,8041	87,1	38,7844	86,9
2	1	2	2	2	2	92,9	91,4	39,3638	92,9	39,2229	91,4
3	1	3	3	3	3	90,8	90,2	39,1637	90,8	39,1123	90,2
4	1	4	4	4	4	94,1	93,6	39,4787	94,1	39,4273	93,6
5	2	1	2	3	4	82,0	82,7	38,2775	82,0	38,3544	82,7
6	2	2	1	4	3	89,4	91,8	39,0288	89,4	39,2631	91,8
7	2	3	4	1	2	84,2	85,1	38,5152	84,2	38,6046	85,1
8	2	4	3	2	1	86,9	85,6	38,7845	86,9	38,6573	85,6
9	3	1	3	4	2	81,9	82,5	38,2734	81,9	38,3392	82,5
10	3	2	4	3	1	84,1	86,2	38,4991	84,1	38,7116	86,2
11	3	3	1	2	4	87,5	87,9	38,8432	87,5	38,8852	87,9
12	3	4	2	1	3	88,1	90,3	38,9011	88,1	39,1147	90,3
13	4	1	4	2	3	80,9	82,1	38,1672	80,9	38,296	82,1
14	4	2	3	1	4	86,3	84,1	38,7222	86,3	38,5037	84,1
15	4	3	2	4	1	87,8	89,0	38,8778	87,8	38,9927	89,0
16	4	4	1	3	2	92,9	95,1	39,3691	92,9	39,5573	95,1

**Şekil 28.** Ürün temelli tuz dönüşümü (HCl) üzerine parametrelerin etkisi



Şekil 29. Ürün temelli tuz dönüşümü (NaOH) üzerine parametrelerin etkisi

Şekil 28-29 incelendiğinde, ürün bazlı tuz dönüşüm oranları üzerinde özellikle başlangıç tuz konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve akış hızı parametrelerinin belirleyici rol oynadığı görülmektedir. Başlangıç tuz konsantrasyonunun artması, işlem süresini uzatmakta, daha fazla ürün oluşumuna olanak sağlamakta ve tuz bölmesinden asit ve baz bölmelerine doğru suyun elektro-osmotik taşınımını artırmaktadır. Ancak bu durum, deney süresinin ilerleyen safhalarında, ürün bölmelerinden tuz bölmesine doğru ters iyon difüzyon akılarının artmasına neden olmakta ve sonuç olarak ürün bazlı tuz dönüşüm oranında azalma gözlenmektedir.

Buna karşılık, akım yoğunluğunun artırılması, iyonların elektriksel alan altında daha hızlı bir şekilde membranlardan geçmesini sağlayarak işlem süresini kısaltmakta, ters iyon geçişini azaltmakta ve böylece tuzdan asit ve baz üretimini daha verimli hale getirmektedir (Fu *et al.*, 2014; Ghyselbrecht *et al.*, 2014; Rottiers *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016). Bu yönüyle, akım yoğunluğu, dönüşüm verimini artıran en etkili parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Öte yandan, artan akış hızı, iyonların membran yüzeylerine taşınmasını kolaylaştırmasına rağmen, sistemdeki türbülans ve artan hidrodinamik direnç nedeniyle iyon geçiş dengesini bozarak tuz dönüşümünü olumsuz etkileyebilmektedir.

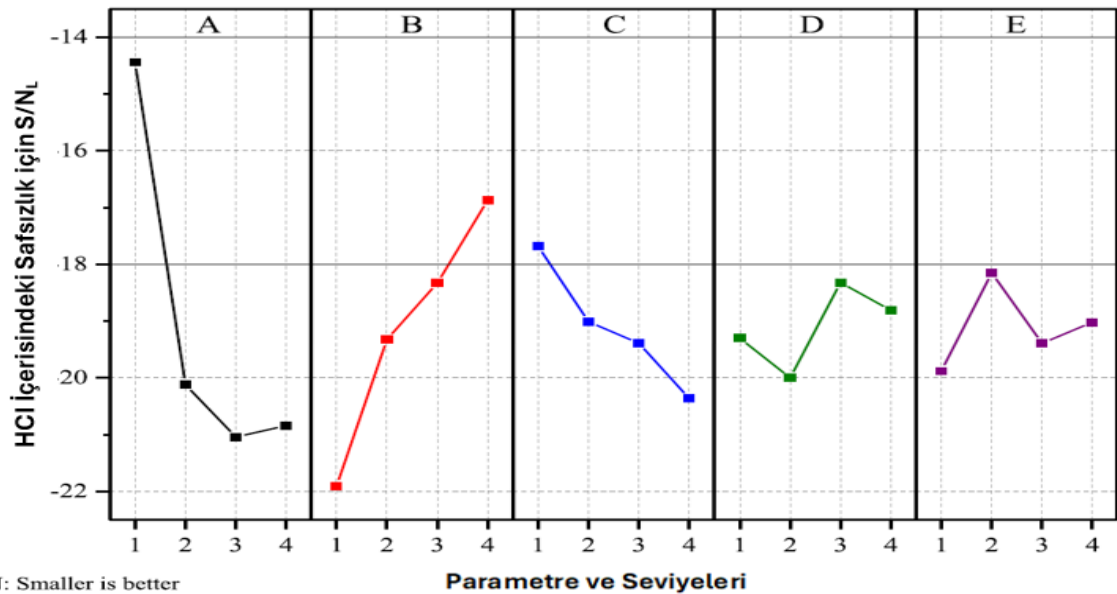
Genel olarak değerlendirildiğinde, **akım yoğunluğu** ve **başlangıç tuz konsantrasyonu**, ürün bazlı tuz dönüşümünü en fazla etkileyen parametreler olarak öne çıkmaktadır. Diğer parametrelerin etkisi ise sınırlı düzeyde kalmakta ve dönüşüm verimi üzerinde belirgin bir değişim yaratmamaktadır.

Asit ve baz içerisindeki safsızlıklar üzerine parametrelerin etkisi

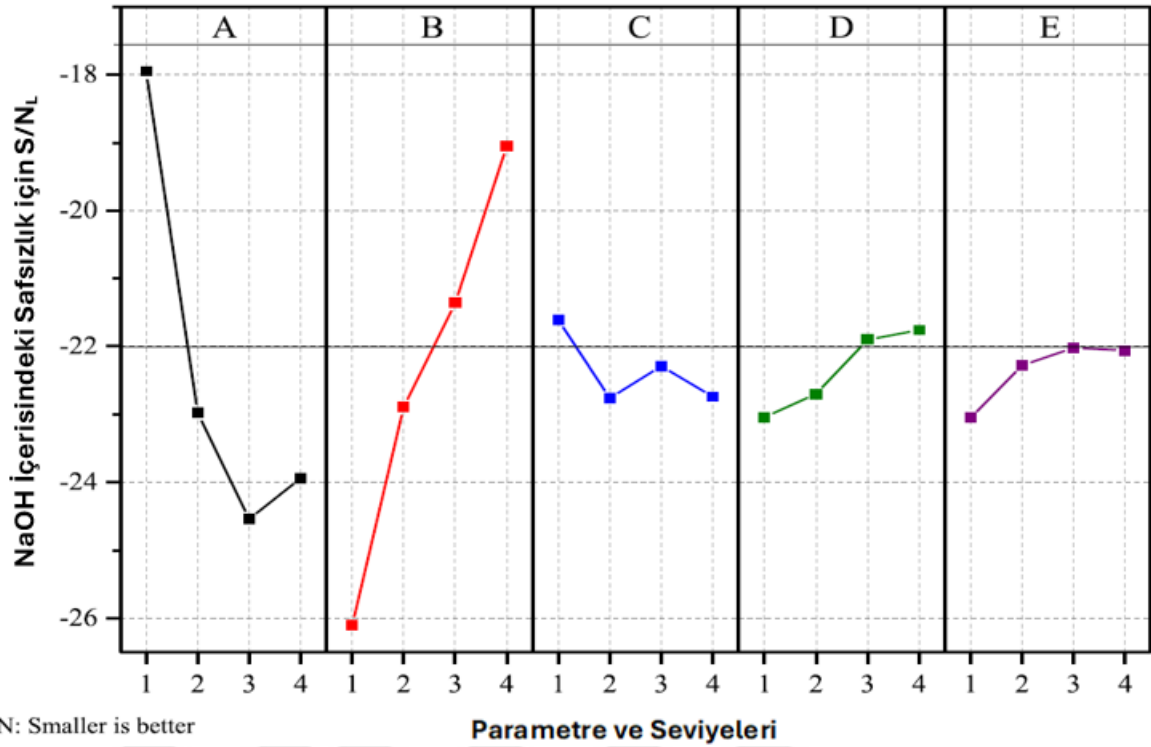
Deney planına göre yürütülen her çalışmada, üretilen asit ve baz fazlarındaki sodyum klorür ve H_3BO_3 içerikleri nicel olarak analiz edilmiş; elde edilen veriler Eşitlik 4 ve 6 doğrultusunda sinyal-gürültü (S/N) oranları ve marjinal ortalamalara dönüştürülmüştür. Her bir faktör düzeyi için hesaplanan ortalama performans istatistikleri Tablo 14'te sunulmuştur. Deneysel parametrelerin, ürünlerdeki safsızlık seviyelerine etkisi ise Şekil 30 ve 31'te grafiksel olarak S/N oranları ve marjinal değerler üzerinden ortaya konulmuştur.

Tablo 14. Asit-Baz İçerisindeki Safsızlık, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama

Deney No.	Parametre ve Seviyeleri					Ölçüm		Performans İstatistiği			
	A	B	C	D	E	Asit İçerisindeki Safsızlık (g)	Baz İçerisindeki Safsızlık (g)	Asit İçerisindeki Safsızlık S/Ns	Y _m	Asit İçerisindeki Safsızlık S/Ns	Y _m
1	1	1	1	1	1	6,9	13,1	-16,8752	6,9	-22,3361	13,1
2	1	2	2	2	2	5,3	9,1	-14,4987	5,3	-19,1354	9,1
3	1	3	3	3	3	4,7	6,4	-13,5355	4,7	-16,1741	6,4
4	1	4	4	4	4	4,5	5,1	-13,1138	4,5	-14,1627	5,1
5	2	1	2	3	4	12,5	20,9	-21,9811	12,5	-26,4173	20,9
6	2	2	1	4	3	8,8	12,4	-18,8971	8,8	-21,9331	12,4
7	2	3	4	1	2	9,8	14,1	-19,8831	9,8	-23,0384	14,1
8	2	4	3	2	1	9,8	10,8	-19,8528	9,8	-20,6815	10,8
9	3	1	3	4	2	13,9	23,9	-22,8657	13,9	-27,6017	23,9
10	3	2	4	3	1	13,3	19,3	-22,4978	13,3	-25,7556	19,3
11	3	3	1	2	4	9,6	13,9	-19,6509	9,6	-22,8803	13,9
12	3	4	2	1	3	9,1	12,6	-19,1854	9,1	-22,0523	12,6
13	4	1	4	2	3	20,1	25,4	-26,0676	20,1	-28,1163	25,4
14	4	2	3	1	4	11,8	17,4	-21,4737	11,8	-24,8119	17,4
15	4	3	2	4	1	10,5	14,9	-20,4867	10,5	-23,4798	14,9
16	4	4	1	3	2	5,9	9,3	-15,5481	5,9	-19,434	9,3



Şekil 30. Asit içerisindeki safsızlık üzerine parametrelerin etkisi



Şekil 31. Baz içerisindeki safsızlık üzerine parametrelerin etkisi

Safsızlık açısından daha düşük S/N (sinyal/gürültü) değerleri tercih edildiğinden, S/N değerini en düşük yapan parametre seviyeleri seçilmelidir. Şekil 30 ve Şekil 31, safsızlık üzerinde en etkili parametrelerin başlangıç besleme konsantrasyonu, akım ve akış hızı olduğunu göstermektedir. Safsızlığın temel nedenlerinden biri eş iyon (co-ion) taşınımıdır (Ghyselbrecht *et al.* 2014). İşlem süresi uzadıkça istenmeyen iyon taşınımı artmakta, bu da asit ve baz bölmelerinde safsızlığa yol açmaktadır. Başlangıç NaCl konsantrasyonunun ve akış hızının düşürülmesi, işlem süresini kısaltarak bu tür safsızlıkların azalmasını sağlamaktadır.

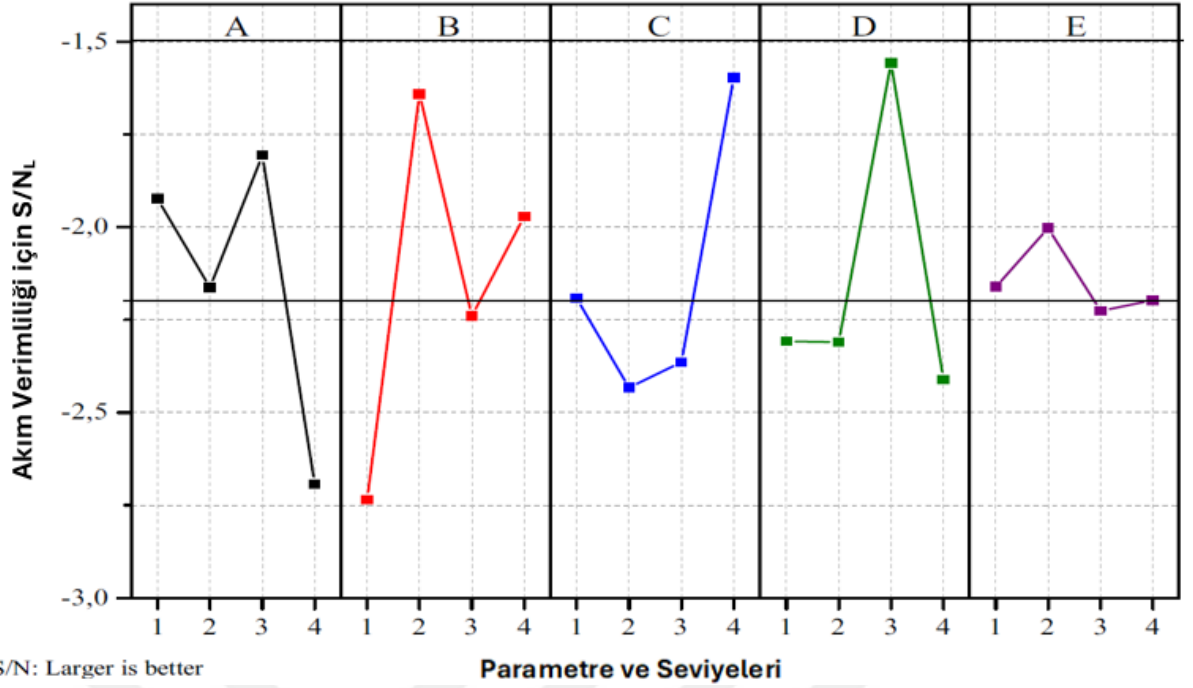
Buna ek olarak, H_3BO_3 difüzyonu da asit ve baz tanklarındaki safsızlığın bir diğer önemli nedenidir. İşlem süresinin uzun olması, H_3BO_3 kaynaklı safsızlığın artmasına neden olmaktadır (Kanca vd, 2022). Başlangıç tuz konsantrasyonu ve debinin aksine, akımın artırılması, işlem süresini kısaltarak ve ters iyon geçişini azaltarak safsızlık oranını düşürmektedir. Artan akım yoğunluğu, asit tarafındaki safsızlıkları azaltırken, baz tarafında borik asit taşınımını artırmaktadır. Bu durum, baz kompartımanına daha fazla su sürüklenmesiyle ilişkili olup, hidratlaşmış iyonların taşıdığı su molekülleri sayesinde gerçekleşmektedir. Tablo 15'te de görüldüğü üzere, baz kompartımanında asite kıyasla daha fazla borik asit birikimi ve hacim artışı gözlenmiştir. Bu da su sürüklenmesinin ve dolayısıyla borik asit geçişinin baz yönünde daha fazla olduğunu desteklemektedir (Kanca vd, 2022). Akım artışı asitteki safsızlığı azaltırken bazdaki safsızlığı artırmakta; buna karşın düşük akış hızları hem asit hem de baz içerisindeki safsızlıkları azaltıcı etki göstermektedir.

Akım verimi üzerine parametrelerin etkisi

Tablo 12’de sunulan asit ve baz konsantrasyonu verileri, Eşitlik 31 kullanılarak akım verimine dönüştürülmüştür. Elde edilen akım verimi sonuçları, Eşitlik 3 ve 6 yardımıyla performans istatistiği ve marjinal ortalama değerlerine çevrilmiş; her bir parametre seviyesi için ortalama performans istatistiği ve marjinal ortalama hesaplanarak Tablo 15’te sunulmuştur. Deneysel parametrelerin akım verimi üzerindeki etkileri ise Şekil 32’da grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 7. Akım Verimi, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama

Deney No.	Parametre ve Seviyeleri					Ölçüm	Performans İstatistiği		
	A	B	C	D	E	Akım Verimi %	Akım Verimi % S/N _L	Y _m	Proseslenme Süresi (min.)
1	1	1	1	1	1	0,73	-2,64348	0,73	243
2	1	2	2	2	2	0,82	-1,64501	0,82	180
3	1	3	3	3	3	0,82	-1,7147	0,82	156
4	1	4	4	4	4	0,84	-1,46109	0,84	127
5	2	1	2	3	4	0,75	-2,46501	0,75	278
6	2	2	1	4	3	0,79	-2,04384	0,79	215
7	2	3	4	1	2	0,82	-1,70839	0,82	167
8	2	4	3	2	1	0,76	-2,31229	0,76	157
9	3	1	3	4	2	0,73	-2,64398	0,73	319
10	3	2	4	3	1	0,98	-0,17539	0,98	198
11	3	3	1	2	4	0,78	-2,10439	0,78	210
12	3	4	2	1	3	0,78	-2,10875	0,78	180
13	4	1	4	2	3	0,71	-2,92768	0,71	362
14	4	2	3	1	4	0,74	-2,61208	0,74	300
15	4	3	2	4	1	0,68	-3,33699	0,68	280
16	4	4	1	3	2	0,81	-1,73832	0,81	215



Şekil 32. Akım verimliliği üzerine parametrelerin etkisi

Şekil 32’de, beş deneysel parametrenin akım verimliliğine ilişkin S/N (sinyal/gürültü) oranlarına etkisi gösterilmiştir. Verilere göre, başlangıç besleme konsantrasyonu, uygulanan akım ve başlangıç asit-baz konsantrasyonlarının akım verimliliği üzerinde elektrolit konsantrasyonuna kıyasla çok daha belirgin bir etkisi bulunmaktadır. Akım verimliliği, BMED prosesi sırasında tüketilen enerjinin ne kadarının hedef ürüne dönüştüğünü gösteren kritik bir performans göstergesidir. Özellikle besleme çözeltisinin derişimi ve uygulanan elektrik akımının bu kriter üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir. Akım verimliliği, hem başlangıç asit-baz derişimleri hem de uygulanan akımın bir fonksiyonu olduğundan, dönüşümü artıran parametreler aynı zamanda sistemin enerji verimliliğini de iyileştirmektedir. Örneğin, besleme çözeltisinin derişiminin artması işlem süresini uzatarak ortak iyon taşınımı ve ürünlerin geri difüzyonunu artırmakta, bu da hem dönüşüm oranını hem de akım verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Öte yandan, uygulanan akımın artırılması işlem süresini kısaltmakta; bu sayede hem ortak iyon taşınımı hem de ürünlerin geri difüzyonu azalarak akım verimliliği yükselmektedir. Sonuç olarak, ürün geri taşınımını ve ortak iyon geçişini minimize eden çalışma koşulları, akım verimliliğini artırmada temel rol oynamaktadır (Ibáñez *et al.*, 2013; Ghyselbrecht *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016; Kanca *et al.*, 2022).

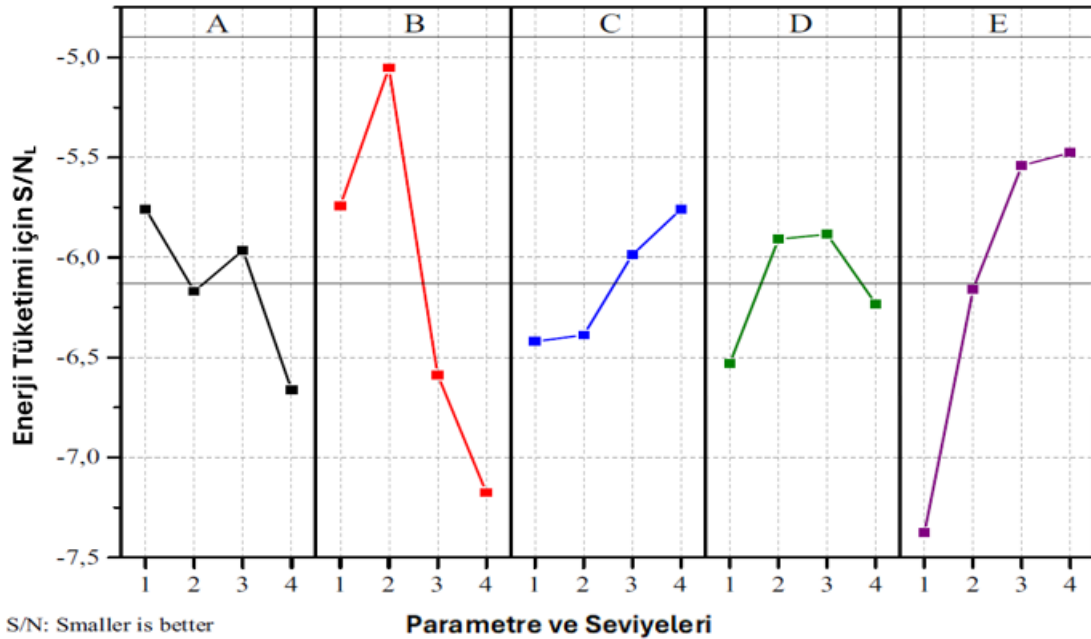
Enerji tüketimi üzerine parametrelerin etkisi

Proseste dönüşen kilogram tuz başına enerji tüketimi, Eşitlik 30 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen performans verileri, Eşitlik 4 ve 6 doğrultusunda sinyal-gürültü (S/N) oranları ve marjinal ortalama değerlere dönüştürülerek analiz edilmiştir. Hücre ve tüm

proses bazında, birim tuz başına ortalama enerji tüketim değerleri Tablo 16’te birlikte sunulmuştur. Bu verilere dayanarak, enerji tüketimi üzerine deneysel parametrelerin etkilerini değerlendirmek amacıyla Şekil 33’te sunulmuştur.

Tablo 16. Enerji Tüketimi, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama

Deney No.	Parametre ve Seviyeleri					Ölçüm	Performans İstatistiği		
	A	B	C	D	E		Enerji Tüketimi kWh/kg	Enerji Tüketimi S/N _s	Proseslenme Süresi (min.)
1	1	1	1	1	1	2,31	-7,29781	1,82	243
2	1	2	2	2	2	1,72	-4,7557	1,96	180
3	1	3	3	3	3	1,82	-5,23583	1,80	156
4	1	4	4	4	4	1,96	-5,84857	1,75	127
5	2	1	2	3	4	1,80	-5,14843	2,15	278
6	2	2	1	4	3	1,75	-4,87299	2,53	215
7	2	3	4	1	2	2,15	-6,68645	1,89	167
8	2	4	3	2	1	2,53	-8,09387	1,88	157
9	3	1	3	4	2	1,89	-5,55334	1,95	319
10	3	2	4	3	1	1,88	-5,52777	2,25	198
11	3	3	1	2	4	1,95	-5,83819	1,79	210
12	3	4	2	1	3	2,25	-7,07639	1,81	180
13	4	1	4	2	3	1,79	-5,06608	2,72	362
14	4	2	3	1	4	1,81	-5,19819	2,44	300
15	4	3	2	4	1	2,72	-8,72303	1,82	280
16	4	4	1	3	2	2,44	-7,76006	1,96	215



Şekil 33. Enerji tüketimi üzerine parametrelerin etkisi

Elektrodiyaliz hücresinde enerji tüketimi üzerindeki parametrelerin etkisi incelendiğinde başlangıç tuz konsantrasyonu ve uygulanan akım azaldıkça enerji tüketiminin

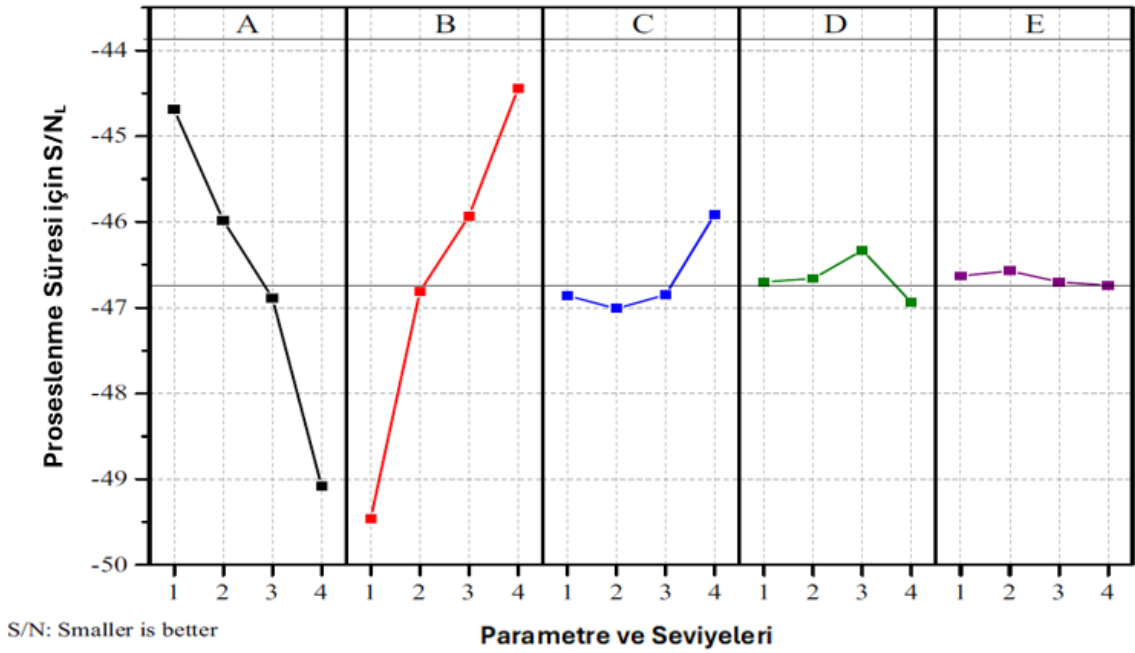
düştüğü; ancak düşük akış hızı ve elektrolit konsantrasyonunun enerji tüketimini artırdığı görülmektedir. Tuz konsantrasyonunun azalması, işlem süresini kısaltarak enerji ihtiyacını azaltır. Buna karşın, artan akım işlem süresini kısaltsa da elektrotlar arasındaki potansiyel farkı artırarak enerji tüketimini yükseltebilir. Elektrolit konsantrasyonundaki artış ise iyon iletkenliğini artırarak elektrot reaksiyonlarını hızlandırır ve bipolar membranlardaki iyon tüketimini kolaylaştırır. Bu da elektroozmotik akışı artırarak istenmeyen iyon geçişleri ve geri difüzyonu azaltır, böylece tuz dönüşümü artar ve enerji tüketimi azalır. Ayrıca, artan akış hızının da enerji tüketimini bir miktar düşürdüğü gözlemlenmiştir; çünkü yüksek akış hızı iyonların membran yüzeyine taşınmasını kolaylaştırarak tuz dönüşümünü desteklemektedir.

Proseslenme süresi üzerine parametrelerin etkisi

Tablo 8’de verilen prosesleme süresi verileri, Eşitlik 4 ve 6 doğrultusunda işlenerek performans istatistiklerine ve marjinal ortalama değerlere dönüştürülmüş ve Tablo 17’de verilmiştir. Bu sayede, her bir kontrol parametresinin farklı seviyeleri için ortalama performans istatistikleri ve marjinal ortalamalar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 34’de sunulan analizler doğrultusunda değerlendirilmiş ve her bir kontrol parametresinin prosesleme süresi üzerindeki etkisi nicel olarak ortaya konmuştur.

Tablo 17. Proseslenme Süresi, Performans İstatistiği ve Marjinal Ortalama

Deney No.	Parametre ve Seviyeleri					Ölçüm	Performans İstatistiği	
	A	B	C	D	E	Proseslenme Süresi (min.)	Enerji Tüketimi S/N _s	Y _m
1	1	1	1	1	1	243	-47.71	243
2	1	2	2	2	2	180	-45.11	180
3	1	3	3	3	3	156	-43.86	156
4	1	4	4	4	4	127	-42.08	127
5	2	1	2	3	4	278	-48.88	278
6	2	2	1	4	3	215	-46.65	215
7	2	3	4	1	2	167	-44.45	167
8	2	4	3	2	1	157	-43.92	157
9	3	1	3	4	2	319	-50.08	319
10	3	2	4	3	1	198	-45.93	198
11	3	3	1	2	4	210	-46.44	210
12	3	4	2	1	3	180	-45.11	180
13	4	1	4	2	3	362	-51.17	362
14	4	2	3	1	4	300	-49.54	300
15	4	3	2	4	1	280	-48.94	280
16	4	4	1	3	2	215	-46.65	215



Şekil 34. Proseslenme süresi üzerine parametrelerin etkisi

Şekil 34'teki analiz sonuçlarına göre, prosesleme süresi üzerinde en belirgin etkiye sahip parametreler başlangıç tuz konsantrasyonu ile uygulanan akım yoğunluğudur. Başlangıç tuz konsantrasyonunun artması, sistemde taşınması gereken iyon miktarını artırmakta; bu durum da doğrudan prosesleme süresinin uzamasına neden olmaktadır. Diğer yandan, artan akım yoğunluğu iyon migrasyonunu hızlandırarak iyonların hedef bölmelere geçişini kolaylaştırmakta; ayrıca prosesin ilerleyen safhalarında asit ve baz bölmelerinden tuz bölmesine doğru gerçekleşen ters iyon difüzyonunu azaltarak toplam prosesleme süresini düşürmektedir (Taguchi 1987; Dursun 2021; Öner 2021; Linden 2019). Şekil 32'deki değerlendirmeler doğrultusunda, diğer parametrelerin prosesleme süresi üzerinde anlamlı bir etki oluşturmadığı söylenebilir.

Performans Kriterlerinin Varyans Analizi

Ürün miktarı, tuz dönüşüm oranı, akı, enerji tüketimi, ürünlerdeki safsızlık miktarı ve test süresi gibi performans kriterleri için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 10'da yer alan ilk altı amaç fonksiyonu için, bu fonksiyonları maksimuma çıkaran parametre seviyeleri optimum çalışma koşulları olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, enerji tüketimi, ürünlerdeki safsızlık miktarı ve proses süresi gibi kriterler için optimum koşullar, bu değerleri minimize eden parametre seviyeleri olarak seçilmiştir. Şekil 25-34'te, tüm amaç fonksiyonları için belirlenen optimum çalışma koşulları gösterilmiştir. Ürün konsantrasyonu esas alınarak optimum koşullar belirlenmiş ve bu koşullarda iki adet doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarının ortalaması, gözlenen değer olarak Tablo 28'de sunulmuştur.

Ayrıca, aynı koşullar altında Eşitlik 4 kullanılarak teorik tahminler yapılmış ve bu tahmini değerler de Tablo 28’de verilmiştir. Varyans analiz sonuçlarına Tablo 18-27’de yer verilmiş olup, bu tablolarda her bir performans kriteri üzerinde parametrelerin ne düzeyde etkili olduğu gözlemlenebilmektedir. Hesaplanan F değerleri, parametrelerin etkinliğini ortaya koymakta; F değeri ne kadar yüksekse, ilgili parametrenin etkisi de o kadar fazla olmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, performans kriterleri üzerinde en etkili parametrelerin başlangıç tuz- H_3BO_3 konsantrasyonu ile uygulanan akım olduğu; en az etkili parametrenin ise başlangıç elektrolit konsantrasyonu olduğu belirlenmiştir.

Tablo 18. Üretilen Asit İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl + H_3BO_3 (g/L)	3	13,607	79,04%	13,607	4,53565	190,16	0,001
B: Akım (A)	3	1,6178	9,40%	1,6178	0,53925	22,61	0,015
C: Akış Hızı (L/min.)	3	0,3529	2,05%	0,3529	0,11763	4,93	0,111
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	1,5651	9,09%	1,5651	0,5217	21,87	0,015
Error	3	0,0716	0,42%	0,0716	0,02385		
Total	15	17,2142	100,00%				

Tablo 19. Üretilen Baz İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl + H_3BO_3 (g/L)	3	15,5674	78,08%	15,5674	5,18912	757,82	0,0001
B: Akım (A)	3	2,1528	10,80%	2,1528	0,71759	104,8	0,002
C: Akış Hızı (L/min.)	3	0,3855	1,93%	0,3855	0,1285	18,77	0,019
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	1,8123	9,09%	1,8123	0,60411	88,23	0,002
Error	3	0,0205	0,10%	0,0205	0,00685		
Total	15	19,9385	100,00%				

Tablo 20. Üretilen H_3BO_3 İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl + H_3BO_3 (g/L)	3	16,8874	52,69%	16,8874	5,6291	29,17	0,01
B: Akım (A)	3	9,3124	29,06%	9,3124	3,1041	16,08	0,024
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	4,5187	14,10%	4,5187	1,5062	7,8	0,063
E: Elektrolit Konst. (M)	3	0,7508	2,34%	0,7508	0,2503	1,3	0,418
Error	3	0,579	1,81%	0,579	0,193		
Total	15	32,0482	100,00%				

Tablo 21. Ürüne Dayalı Tuz Dönüşümü (asit) İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl +H ₃ BO ₃ (g/L)	3	0,85023	34,96%	0,85023	0,28341	22,04	0,015
B: Akım (A)	3	1,19795	49,26%	1,19795	0,39932	31,05	0,009
C: Akış Hızı (L/min.)	3	0,27836	11,45%	0,27836	0,09279	7,22	0,069
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	0,0666	2,74%	0,0666	0,0222	1,73	0,332
Error	3	0,03858	1,59%	0,03858	0,01286		
Total	15	2,43171	100,00%				

Tablo 22. Ürüne Dayalı Tuz Dönüşümü (baz) İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl +H ₃ BO ₃ (g/L)	3	0,42627	17,86%	0,42627	0,14209	4,77	0,116
B: Akım (A)	3	1,16646	48,88%	1,16646	0,38882	13,06	0,031
C: Akış Hızı (L/min.)	3	0,51339	21,51%	0,51339	0,17113	5,75	0,092
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	0,19085	8,00%	0,19085	0,06362	2,14	0,274
Error	3	0,0893	3,74%	0,0893	0,02977		
Total	15	2,38626	100,00%				

Tablo 23. Akım Verimi İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl +H ₃ BO ₃ (g/L)	3	1,8552	22,75%	1,8552	0,61839	15,62	0,025
B: Akım (A)	3	2,5667	31,48%	2,5667	0,85556	21,62	0,016
C: Akış Hızı (L/min.)	3	1,7325	21,25%	1,7325	0,57751	14,59	0,027
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	1,8812	23,07%	1,8812	0,62706	15,84	0,024
Error	3	0,1187	1,46%	0,1187	0,03958		
Total	15	8,1543	100,00%				

Tablo 24. Asitteki Safsızlık İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl +H ₃ BO ₃ (g/L)	3	118,053	59,20%	118,053	39,351	18,97	0,019
B: Akım (A)	3	53,987	27,07%	53,987	17,996	8,68	0,055
C: Akış Hızı (L/min)	3	14,736	7,39%	14,736	4,912	2,37	0,249
E: Elektrolit Konst. (M)	3	6,409	3,21%	6,409	2,136	1,03	0,491
Error	3	6,222	3,12%	6,222	2,074		
Total	15	199,407	100,00%				

Tablo 25. Bazdaki Safsızlık İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl +H ₃ BO ₃ (g/L)	3	108,201	48,30%	108,201	36,0669	39,54	0,007
B: Akım (A)	3	105,043	46,89%	105,043	35,0142	38,39	0,007
C: Akış Hızı (L/min.)	3	3,478	1,55%	3,478	1,1594	1,27	0,424
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	4,565	2,04%	4,565	1,5216	1,67	0,342
Error	3	2,736	1,22%	2,736	0,9121		
Total	15	224,022	100,00%				

Tablo 26. Enerji Tüketimi İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl +H ₃ BO ₃ (g/L)	3	1,805	7,54%	1,805	0,6015	1,61	0,352
B: Akım (A)	3	10,449	43,66%	10,449	3,4828	9,35	0,049
C: Akış Hızı(L/min)	3	1,236	5,17%	1,236	0,412	1,11	0,468
E: Elektrolit Konst. (M)	3	9,324	38,96%	9,324	3,108	8,34	0,058
Error	3	1,118	4,67%	1,118	0,3725		
Total	15	23,931	100,00%				

Tablo 27. Çalışma Süresi İçin Varyans Analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
A: NaCl +H ₃ BO ₃ (g/L)	3	40,9941	41,73%	40,9941	13,6647	633,04	0,0001
B: Akım (A)	3	53,3839	54,34%	53,3839	17,7946	824,36	0,0001
C: Akış Hızı (L/min.)	3	3,0492	3,10%	3,0492	1,0164	47,09	0,0051
D: Asit ve Baz Konst. (M)	3	0,7441	0,76%	0,7441	0,248	11,49	0,0375
Error	3	0,0648	0,07%	0,0648	0,0216		
Total	15	98,2361	100,00%				

Tablo 28. Optimum Çalışma Koşulları

Parametreler	Doğrulama Deneyleri	
	Değeri	Seviyesi
A: Başlangıç Tuz+H ₃ BO ₃	180 + 36	4
B: Akım (A) 20 V	6,2	4
C: Akış hızı (L/h)	10	1
D: Baş. Asit baz kons (M)	0,2	4
E: Elektrolit kons. (M)	0,2	4
Gözlenen ürün konsantrasyonu (M)	2,1 M HCl	2,1 M NaOH
Tahmin edilen ürün konsantrasyonu (M)	2,53 M HCl	2,55 M NaOH
Gözlenen ürün bazlı tuz dönüşümü %	%82 HCl	%94,1 NaOH
Tahmin edilen ürün bazlı tuz dönüşümü %	%93,3 HCl	%94,3 NaOH

Tablo 28. (devamı)

Gözlenen enerji tüketimi	2,17	
Tahmin edilen enerji tüketimi (kWatt/kg.dön tuz)	2,36	
Gözlenen beslemedeki borik asit kons. g/L	71,10	
Tahmin edilen beslemedeki borik asit kons.g/L	77,40	
Gözlenen ürün içerisindeki safsızlık miktarı	2,07 g NaCl + 2,8 g H ₃ BO ₃ (HCl içindeki)	5,2 g NaCl + 6,35 g H ₃ BO ₃ (NaOH içindeki)
Tahmin edilen ürün içerisindeki safsızlık miktarı	4,97(HCl)	7,23 (NaOH)
Gözlenen prosesleme süresi (dak.)	211	
Tahmin edilen prosesleme süresi (dak)	247	
Gözlenen beslemedeki NaCl (g)	0,915 (2.47 g/L)	

Taguchi yöntemiyle elde edilen çok sayıda deneysel sonuç arasından en uygun kombinasyonu belirleyebilmek için çok kriterli karar verme yaklaşımlarından TOPSIS ve MOORA yöntemleri uygulanmıştır. Her iki yöntemin analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve böylece karar verme sürecinin tutarlılığı ile elde edilen sonuçların güvenilirliği desteklenmiştir.

TOPSIS Yöntemi Uygulaması

TOPSIS yönteminin uygulanmasında ilk aşama, deney alternatifleri ve performans kriterlerine dayalı karar matrisinin oluşturulmasıdır (Tablo 29). Bu karar matrisi, Eşitlik 16 kullanılarak normalize edilmiş ve her kriter için önceden belirlenen ağırlık katsayısı (0,1) ile çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilmiştir (Tablo 30). Pozitif ideal (S^+) ve negatif ideal (S^-) çözümler, sırasıyla Eşitlik (21) ve (22) yardımıyla hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 31’de özetlenmiştir. Ardından, her deney için pozitif ideale olan göreceli yakınlık değeri (T_i) hesaplanmış ve bu değerler doğrultusunda deneyler sıralanmıştır.

En yüksek T_i değerine sahip deney, en uygun çalışma koşulunu göstermektedir. Bu kapsamda, Tablo 32’de 0.6006 T_i değeriyle 10 numaralı deney en uygun koşullar olarak belirlenmiştir. Onu, sırasıyla 0.5546 ve 0.5344 T_i değerleriyle 16 ve 15 numaralı deneyler takip etmektedir. Böylece, tüm kriterlerin birlikte değerlendirildiği bu analizde 10 numaralı deney en uygun deneysel tasarım olarak seçilmiştir.

Tablo 29. Taguchi Tahminlerine Göre S/N Değerleriyle Oluşturulan Karar Matrisi

Kriter ağırlıkları	H ₃ BO ₃ (g)	HCl (M)	NaOH (M)	Asit dönüşümü (%)	Baz dönüşümü (%)	ΣAsit içindeki Safsızlık (g)	ΣBaz içindeki Safsızlık (g)	Akım Verimliliği (%)	Enerji Tüketimi (kW.h/kg)	Proseslenme Süresi (min.)
	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Min	Min
Ağırlıklar	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1	34,24	3,91	3,86	38,80	38,78	-16,78	-22,35	-2,73	-7,27	-47,71
2	33,62	4,72	4,71	39,36	39,22	-14,49	-19,18	-1,72	-4,71	-45,11
3	34,87	5,16	5,01	39,16	39,10	-13,44	-16,12	-1,72	-5,20	-43,86
4	35,07	5,29	5,22	39,47	39,43	-13,06	-14,15	-1,51	-5,85	-42,08
5	33,79	5,18	5,09	38,28	38,35	-21,94	-26,40	-2,50	-5,11	-48,88
6	34,45	5,99	6,18	39,03	39,26	-18,89	-21,87	-2,05	-4,86	-46,65
7	35,71	4,58	5,06	38,51	38,60	-19,82	-22,98	-1,72	-6,65	-44,45
8	35,40	5,63	5,49	38,78	38,65	-19,82	-20,67	-2,38	-8,06	-43,92
9	34,79	6,13	6,11	38,27	38,33	-22,86	-27,57	-2,73	-5,53	-50,08
10	35,86	6,47	6,85	38,50	38,71	-22,48	-25,71	-0,18	-5,48	-45,93
11	35,72	6,52	6,69	38,84	38,88	-19,65	-22,86	-2,16	-5,80	-46,44
12	37,56	6,22	6,41	38,90	39,11	-19,18	-22,01	-2,16	-7,04	-45,11
13	34,74	6,39	6,43	38,16	38,29	-26,06	-28,10	-2,97	-5,06	-51,17
14	37,96	7,02	6,72	38,72	38,50	-21,44	-24,81	-2,62	-5,15	-49,54
15	38,18	7,39	7,75	38,87	38,99	-20,42	-23,46	-3,35	-8,69	-48,94
16	37,41	7,91	8,23	39,36	39,56	-15,42	-19,37	-1,83	-7,75	-46,65
K.Toplamı	20294,11	575,57	593,64	24104,57	24163,28	6042,16	8216,98	81,88	626,80	34929,52
K. Kök	142,457	23,991	24,4	155,3	155,4	77,7	90,6	9,049	25,036	186,894

Tablo 8. Ağırlıklı ve Normalize Edilmiş Karar Matrisi

Kriter ağırlıkları	H ₃ BO ₃ (g)	HCl (M)	NaOH (M)	Asit dönüşümü (%)	Baz dönüşümü (%)	ΣAsit içindeki Safsızlık (g)	ΣBaz içindeki Safsızlık (g)	Akım Verimliliği (%)	Enerji Tüketimi (kW.h/kg)	Proseslenme Süresi (min.)
	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Max	Min	Min
Ağırlıklar	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1	0,0240	0,0163	0,0158	0,0250	0,0249	-0,0216	-0,0247	-0,0302	-0,0290	-0,0255
2	0,0236	0,0197	0,0193	0,0254	0,0252	-0,0186	-0,0212	-0,0190	-0,0188	-0,0241
3	0,0245	0,0215	0,0206	0,0252	0,0252	-0,0173	-0,0178	-0,0190	-0,0208	-0,0235
4	0,0246	0,0220	0,0214	0,0254	0,0254	-0,0168	-0,0156	-0,0167	-0,0233	-0,0225
5	0,0237	0,0216	0,0209	0,0247	0,0247	-0,0282	-0,0291	-0,0276	-0,0204	-0,0262
6	0,0242	0,0250	0,0254	0,0251	0,0253	-0,0243	-0,0241	-0,0226	-0,0194	-0,0250
7	0,0251	0,0191	0,0208	0,0248	0,0248	-0,0255	-0,0254	-0,0190	-0,0266	-0,0238
8	0,0249	0,0235	0,0226	0,0250	0,0249	-0,0255	-0,0228	-0,0263	-0,0322	-0,0235
9	0,0244	0,0255	0,0251	0,0246	0,0247	-0,0294	-0,0304	-0,0302	-0,0221	-0,0268
10	0,0252	0,0270	0,0281	0,0248	0,0249	-0,0289	-0,0284	-0,0019	-0,0219	-0,0246
11	0,0251	0,0272	0,0274	0,0250	0,0250	-0,0253	-0,0252	-0,0239	-0,0232	-0,0249
12	0,0264	0,0259	0,0263	0,0251	0,0252	-0,0247	-0,0243	-0,0239	-0,0281	-0,0241
13	0,0244	0,0266	0,0264	0,0246	0,0246	-0,0335	-0,0310	-0,0329	-0,0202	-0,0274
14	0,0266	0,0292	0,0276	0,0249	0,0248	-0,0276	-0,0274	-0,0289	-0,0206	-0,0265
15	0,0268	0,0308	0,0318	0,0250	0,0251	-0,0263	-0,0259	-0,0370	-0,0347	-0,0262
16	0,0263	0,0330	0,0338	0,0254	0,0255	-0,0198	-0,0214	-0,0202	-0,0309	-0,0250

Tablo 31. Pozitif ve Negatif İdeal Çözümleri

	H ₃ BO ₃ (g)	HCl (M)	NaOH (M)	Asit dönüşümü (%)	Baz dönüşümü (%)	ΣAsit içindeki Safsızlık (g)	ΣBaz içindeki Safsızlık (g)	Akım Verimliliği (%)	Enerji Tüketimi (kW.h/kg)	Proseslenme Süresi (min.)
S ⁺	0,0268	0,0330	0,0338	0,0254	0,0255	-0,0335	-0,0335	-0,0019	-0,0347	-0,0274
S ⁻	0,0236	0,0163	0,0158	0,0246	0,0246	-0,0168	-0,0156	-0,0370	-0,0188	-0,0225

Tablo 9. Pozitif-Negatif Uzaklık Değerleri, Görelî Yakınlıklar ve Öncelik Sıralaması MOORA Yöntemi Uygulaması

	Pozitif İdeal Uzaklık Si+	Negatif İdeal Uzaklık Si-	Görelî yakınlıklar	SIRALAMA
1	0,3081	0,1872	0,3779	16
2	0,3078	0,1877	0,3788	15
3	0,3073	0,1886	0,3803	14
4	0,3020	0,1969	0,3946	13
5	0,2826	0,2239	0,4421	12
6	0,2767	0,2311	0,4551	11
7	0,2737	0,2346	0,4616	10
8	0,2707	0,2382	0,4681	9
9	0,2623	0,2473	0,4853	8
10	0,1997	0,3002	0,6006	1
11	0,2593	0,2505	0,4914	7
12	0,2558	0,2541	0,4984	5
13	0,2565	0,2534	0,4969	6
14	0,2556	0,2543	0,4987	4
15	0,2368	0,2718	0,5344	3
16	0,2257	0,2811	0,5546	2

MOORA yöntemine göre Taguchi optimizasyonu ile elde edilen S/N oranları ölçütlere göre Tablo 29'deki gibi karar verme matrisine yazılmıştır. Her bir alternatifin performans değerleri, vektörel normalizasyon yöntemi kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Bu işlem sayesinde, farklı ölçüm birimlerine sahip kriterler ortak bir değerlendirme düzlemine aktarılmış ve karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Daha sonra, maksimizasyon yönlü kriterlerin (örneğin ürün verimi, akı gibi) normalize edilmiş değerlerinin toplamından, minimizasyon yönlü kriterlerin (örneğin enerji tüketimi, safsızlık oranı gibi) normalize edilmiş değerlerinin toplamı çıkarılarak her alternatif için bileşik bir performans göstergesi hesaplanmıştır.

Devamında, normalize edilmiş değerler her bir kriterin önceden belirlenmiş ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklı normalize karar matrisi oluşturulmuştur. Bu matris, alternatiflerin sadece performanslarına göre değil, aynı zamanda kriterlerin görelî önemlerine göre de değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Son aşamada, her bir alternatifin elde ettiği toplam skorlar Tablo 33'te sunulmuş ve büyükten küçüğe doğru sıralanmıştır. Bu sıralama

doğrultusunda, en yüksek toplam skora sahip alternatif en uygun deneysel koşul olarak belirlenmiştir.

Tablo 10. MOORA Yaklaşımına Göre Seçeneklerin Sıralanması

	Yi*	Sıralama
1	17,6641	16
2	17,8229	15
3	17,8617	14
4	18,3122	13
5	19,0524	12
6	19,4643	11
7	19,7831	10
8	20,0135	9
9	20,1455	8
10	23,2217	1
11	20,4700	5
12	20,7166	4
13	20,3230	7
14	20,4334	6
15	21,3777	3
16	22,1481	2

Onuncu deney ve ilgili çalışma koşullarına bakıldığında, optimizasyon çalışmasında ele alınan ilk parametre, başlangıç tuz- H_3BO_3 konsantrasyonudur. Yapılan değerlendirmeler, bu parametrenin yüksek seviyelerinde sistem performansının belirgin şekilde iyileştiğini ortaya koymuştur. Bu durum, çözeltideki toplam iyon yoğunluğunun artmasıyla açıklanabilir; zira iyon miktarındaki artış, iyon göçünü hızlandırmakta ve bu da asit ile baz üretim verimlerinin artmasına ve enerjinin daha verimli kullanılmasına olanak tanımaktadır. Tuz iyonları membranlardan geçerken, H_3BO_3 çözeltide kalır ve sistemde birikir ya da çok sınırlı miktarda taşınır. Öte yandan, yüksek tuz- H_3BO_3 konsantrasyonunun dezavantajı, eş iyon geçişlerinin artmasıyla ilişkilidir. Bu geçişler, asit ve baz bölmelerine istenmeyen iyonların taşınmasına ve burada meydana gelen nötralizasyon reaksiyonları sonucunda dönüşüm oranlarının düşmesine ve ürün saflığının bozulmasına neden olmaktadır (Strathmann *et al.*, 2013). Ancak tüm parametreler birlikte ele alındığında, yüksek konsantrasyonun sağladığı olumlu etkilerin, eş iyon geçişi kaynaklı sınırlayıcı etkilerden daha baskın olduğu sonucuna varılmıştır.

Optimizasyon sürecinde değerlendirilen ikinci parametre, başlangıç asit ve baz konsantrasyonudur. Bu parametre, 0,05–0,2 M aralığında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 0,15 M’lik başlangıç konsantrasyonu, çalışmada değerlendirilen en yüksek seviye olarak öne çıkmaktadır. Asit ve baz konsantrasyonunun yüksek olması, doğrudan akım verimliliğini artırmakta; bu artış da sistemin genel enerji verimliliği üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır.

Proses performansı üzerinde etkili olan bir diğer önemli parametre ise uygulanan akımdır. ÇKKV yöntemleriyle yapılan analizler sonucunda, 4,2 A değeri optimum akım

seviyesi olarak belirlenmiştir. Uygulanan akımın artırılması, proses süresini kısaltmakta; bu da ortak iyon taşınımı ve ürünlerin geri difüzyonunu azaltarak akım verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu bağlamda, akımdönüşüm verimini doğrudan etkileyen ve artıran en kritik parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Akış hızı, optimizasyon çalışmaları kapsamında değerlendirilen dördüncü parametredir. ÇKKV yöntemleriyle yapılan analizler sonucunda, 31 L/h değeri optimum akış hızı olarak belirlenmiştir. Bu değer aynı zamanda çalışmada incelenen en yüksek seviye olarak öne çıkmaktadır. Artan akış hızı, iyonların membran yüzeyine taşınmasını kolaylaştırarak konsantrasyon kutuplaşmasını azaltmakta; bu da iyon geçişinin hızlanmasını, proses verimliliğinin artmasını ve işlem süresinin kısalmasını sağlamaktadır.

Başlangıç elektrolit konsantrasyonu, optimizasyon çalışmaları kapsamında değerlendirilen beşinci parametredir. Yapılan deneylerde, düşük konsantrasyon seviyelerinde dahi sistemin iletkenlik açısından yeterli performans sergilediği gözlemlenmiştir. Literatürde de benzer şekilde, elektrolit olarak kullanılan baz çözeltilerinin 0,05 M ile 1,6 M arasında değişen konsantrasyonlarda başarıyla kullanılabildiği ve düşük konsantrasyonlarda dahi sistem iletkenliğinin yeterli düzeyde olduğu çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (Ghyselbrecht *et al.*, 2013; Ghyselbrecht *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2016).

Deneysel bulgular ve literatür destekli değerlendirmeler, NaOH konsantrasyonunun gereğinden yüksek tutulmasının yalnızca kimyasal sarfiyatı artırmadığını, aynı zamanda besleme ve ürün çözeltilerinde Na⁺ iyon birikimine neden olarak sistem verimini olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır (Abusultan *et.al.*, 2024; Gao *et al.*, 2021). Asit bölmesinde Na⁺ ve Cl⁻ iyonlarının birleşerek tuz oluşumuna yol açması, serbest klorun bağlanmasına neden olmakta ve bu durum asit üretim verimini düşürmektedir.

Optimizasyon çalışmalarında kullanılan besleme çözeltileri, yüksek saflıktaki NaCl, H₃BO₃ ve ultra saf sudan hazırlanmıştır. Bu nedenle optimizasyon deneyleri süresince membran yüzeylerinde kirlenmeye bağlı herhangi bir sorun gözlemlenmemiştir. Literatürde, membran, akış hatları ve akış düzenleyicilerinde meydana gelen kirlenmelerin sistemde basınç dalgalanmalarına ve performans düşüşlerine yol açabileceği belirtilmektedir (Strathmann, 2010; Xu *et al.*, 2018). Ancak bu çalışmada, deneysel süreç boyunca böyle bir olumsuzluk yaşanmamıştır. Öte yandan, yalnızca uzun süreli kullanımın etkisiyle, anot ve katoda en yakın konumda yer alan bipolar membranlarda yapısal deformasyonlar meydana gelmiş, Şekil 35'te görüldüğü üzere yüzeyde çatlak oluşumları tespit edilmiştir.



Şekil 35. Uzun kullanımlardan sonra bipolar membranlarda oluşan çatlaklar

Bu tür yapısal bozulmalar, genellikle membranın sürekli iyon yüküne maruz kalması, pH değişimleri ve elektriksel stresler nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Membran ömrünü uzatmak ve sistem stabilitesini korumak adına, periyodik görsel kontrollerin yapılması, belirli çevrimler sonrasında membranların ters yıkama veya kimyasal temizlikle yenilenmesi, sistemdeki sıcaklık ve akım değerlerinin üretici tavsiyeleri doğrultusunda sınırlandırılması önerilmektedir.

BMED prosesinde tuzdan arındırılmış besleme çözeltisinden borik asit kristallendirilmesi

Kristallendirme çalışmalarında kullanılan saf suyun iletkenliği yaklaşık 1,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak ölçülmüş olup, bu değer besleme ortamında iyonik safsızlıkların minimum düzeyde olduğunu göstermektedir. Tablo 7’de sunulan deney planı ve besleme çözeltisi özellikleri ile Tablo 34’te verilen ham borik asit miktarı ve saflık değerleri birlikte değerlendirildiğinde, karıştırma hızının belirli bir seviyeye kadar artırılmasının borik asit saflığı üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu belirlenmiştir.

Tablo 34. Elde Edilen Ham Borik Asit Miktarı ve Saflığı

Deney No	Elde edilen kristal miktarı (g)	1 g kristal ultra saf suda çözündürüldü			
		NaCl g	% H_3BO_3	İletkenlik $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH
1	11,38	0,013	98,70	62,9	5,35
2	11,41	0,010	99,00	100,6	5,21
3	10	0,006	99,40	60,8	4,95
4	11,43	0,010	99,00	96,5	4,86
5	12,14	0,013	98,70	82,4	4,87
6	11,73	0,0004	99,96	16,7	5,12
7	12,22	0,0020	99,80	22,4	4,95
8	11,63	0,0047	99,53	62,3	5,15
9	13,32	0,0060	99,40	36,3	5,12

Karıştırma hızının artmasıyla birlikte çözeltideki sıcaklık ve konsantrasyon gradyentlerinin azalması, kütle transferinin iyileşmesine ve kristallerin daha düzenli ve homojen bir ortamda büyümesine katkı sağlamıştır. Ancak karıştırma hızının belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda, artan hidrodinamik kuvvetler nedeniyle oluşan kristal–kristal ve kristal–karıştırıcı etkileşimleri, mevcut kristallerin yüzeylerinden küçük parçaların kopmasına yol açabilmektedir. Bu kopan parçalar yeni çekirdekler gibi davranarak ikincil çekirdeklenmeye neden olmakta, kristal sayısının artmasına ve ortalama kristal boyutunun küçülmesine yol açmaktadır. Bu durum, kristal büyümesinin kontrolünü zorlaştırarak ürün saflığı üzerindeki olumlu etkinin sınırlı kalmasına neden

Karıştırma yoğunluğunun artmasıyla birlikte, kristal yüzeyleri çevresinde oluşan hidrodinamik kesme etkilerinin yükseldiği ve bunun mevcut kristallerden yeni çekirdeklerin oluşumunu tetiklediği literatürde deneysel olarak gösterilmiştir. Callahan ve Ni (2014), farklı akış ve karıştırma koşulları altında gerçekleştirdikleri kristallendirme çalışmalarında, mekanik etkilerin kristal yüzeylerinden parçacık kopmasına yol açtığını ve bu parçacıkların çözeltide ikincil çekirdekler olarak davrandığını rapor etmiştir. Benzer şekilde Cruz, Rocha ve Ferreira (2018), karıştırma şiddetinin belirli bir eşiğin üzerine çıkması durumunda ikincil çekirdeklenmenin baskın hâle geldiğini, bunun sonucunda kristal sayısının arttığını ve kristal büyümesinin olumsuz etkilendiğini ortaya koymuştur. Bu tür mekanizmalar, yüksek karıştırma hızlarında ürün saflığında beklenen artışın neden sınırlı kaldığını açıklamaktadır.

Besleme çözeltisindeki NaCl konsantrasyonunun azalmasıyla borik asit saflığının arttığı açıkça tespit edilmiştir. Çözeltide bulunan Na^+ ve Cl^- iyonları, borik asidin katmanlı kristal yapısı nedeniyle kristal yüzeylerine tutunabilmekte ve kristal büyümesi sırasında kristal boşluklarında hapsolabilmektedir. Bu durum, kristal içerisinde çözelti kapanmalarının oluşmasına ve safsızlıkların kristal yapıya taşınmasına neden olarak ürün saflığını düşürmektedir. Gündüz ve arkadaşları (2003), borik asit kristallendirme çalışmalarında çözeltide kalan tuzların kristal saflığını olumsuz etkilediğini ve bu nedenle yüksek saflık için iyonik safsızlıkların kristallendirme öncesinde mümkün olduğunca uzaklaştırılması gerektiğini rapor etmiştir. Benzer şekilde Kutluay ve arkadaşları (2020), borik asit kristallerinde safsızlık varlığının kristal morfolojisini bozduğunu ve çözelti kapanmalarını artırdığını göstermiştir. Bu nedenle, iyonik safsızlıkların azaltılması kristal saflığının artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada elde edilen ham borik asit kristallerinin saflığının **%99'un** üzerinde olması, çözeltideki iyonik safsızlıkların etkin biçimde kontrol edilmesinin kristallendirme performansı üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

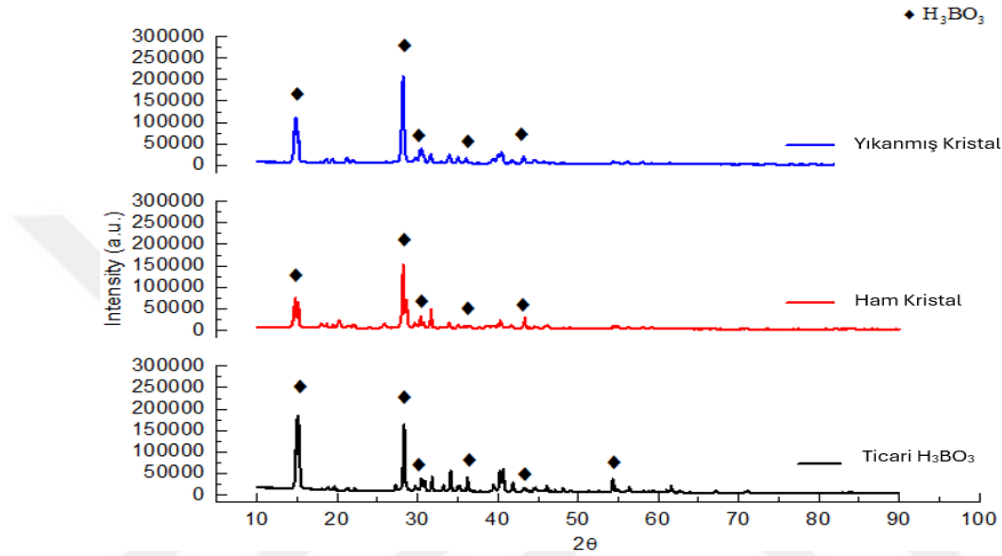
Optimum proses parametrelerinde borik asit içeren tuzlu çözeltinin bipolar membran elektrodializ (BMED) yöntemiyle işlenmesi sonucunda, çözeltide bulunan tuzun yaklaşık %98,6'sının ortamdan uzaklaştırıldığı belirlenmiştir. BMED prosesi, iyonların seçici olarak ayrılmasını sağlayarak çözeltideki iyonik rekabeti önemli ölçüde azaltmakta ve kristallendirme öncesinde daha saf ve konsantre bir borik asit çözeltisi elde edilmesine olanak tanımaktadır (Strathmann, 2010; Xu *et al.*, 2008). Tuzdan büyük ölçüde arındırılmış bu çözeltinin kristallendirilmesiyle, çözeltide kontrolsüz çekirdek oluşumunun azaldığı, kristal büyümesinin daha baskın hâle geldiği ve bu sayede çözelti kapanmalarının minimize edildiği gözlemlenmiştir.

Geleneksel kristallendirme yöntemlerinde borik asidin katmanlı kristal yapıda büyümesi, kristal büyümesi sırasında çözelti fazının kristal boşluklarında hapsolmasına neden olabilmekte ve bu durum ürün saflığını genellikle **%95–98 aralığında** sınırlamaktadır. Borik asidin klasik olarak kolemanit cevherinden sülfürik asit liçi yoluyla üretildiği proseslerde, liç sonrası çözeltide kalan sodyum, sülfat ve klorür gibi iyonların tamamen uzaklaştırılamadığı, bu nedenle kristallendirme sonrasında yeniden kristallendirme adımlarının sıklıkla gerekli olduğu literatürde rapor edilmiştir (Gündüz *et al.*, 2003). Bu tür iyonik safsızlıklar, kristal yüzeylerine adsorbe olarak çözelti kapanmalarını artırmakta ve kristal saflığını olumsuz etkilemektedir.

Buna karşılık, bipolar membran elektrodializ (BMED) prosesi kristallendirme öncesinde çözeltinin eş zamanlı olarak tuzdan arındırılmasını ve konsantre edilmesini sağladığından, kristal büyümesi sırasında safsızlık kaynaklı etkileşimleri büyük ölçüde azaltmaktadır. Erkmen ve Yapıcı (2016), boraks kökenli çözeltilerin BMED ile işlenmesi sonucunda yüksek oranda tuz giderimi sağlandığını ve bu sayede kristallendirme adımı daha yüksek saflıkta borik asit elde edilebildiğini göstermiştir. Benzer şekilde Kıpçak ve arkadaşları (2013), bor içeren çözeltilerin saflaştırılmasının kristal morfolojisini iyileştirdiğini ve yeniden kristallendirme ihtiyacını azalttığını rapor etmiştir. Bu nedenle BMED destekli proseslerde, doğrudan %99'a yakın hatta üzerindeki saflıklarda borik asit kristallerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Sonuç olarak, elde edilen deneysel veriler BMED prosesinin, borik asit üretiminde yalnızca tuz giderimi açısından değil, aynı zamanda kristal büyüme ortamının iyileştirilmesi, çözelti kapanmalarının azaltılması ve nihai ürün saflığının artırılması açısından da önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu yönüyle BMED, geleneksel kolemanit bazlı üretim ve klasik kristallendirme yöntemlerine kıyasla daha kontrollü, daha verimli ve daha yüksek saflıkta borik asit üretimine olanak tanıyan güçlü bir alternatif proses olarak değerlendirilebilir.

Geleneksel kristallendirme yöntemlerinde borik asidin katmanlı yapıda kristallenmesi nedeniyle çözelti kapanmaları meydana gelmekte ve bu durum ürün saflığını genellikle %95–98 aralığında sınırlamaktadır. Buna karşılık, BMED prosesi eş zamanlı saflaştırma ve konsantrasyon sağladığından, yeniden kristallendirme ihtiyacını önemli ölçüde azaltmakta ve doğrudan %99’a yakın saflıkta borik asit kristallerinin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Elde edilen kristallerin X-ışını kırınım (XRD) desenleri (Şekil 36), kristal yapının düzenli olduğunu ve ürünün yüksek saflığını açıkça doğrulamaktadır.



Şekil 13. BMED prosesi sonrası H_3BO_3 ve NaCl çözeltisinden elde edilen ham, yıkanmış ve ticari borik asidin XRD desenleri

Elde edilen tüm sonuçlar, ham borik asit kristallerinin ultra saf su ile yıkanması ve yeniden kristallendirilmesi yoluyla ultra yüksek saflıkta borik asit üretilebileceğini göstermektedir. Kristallendirme aşaması, projenin 2. ve 3. aşamalarında daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Bu aşamaya kadar elde edilen bulgular, projenin 1. aşamasının başarıyla tamamlandığını ve ulaşılan sonuçların belirlenen hedefler ve başarı ölçütleriyle tam uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, borik asit geri kazanım sürecinde optimum proses parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak, beş parametrelili dört seviyeli L16 (4^5) ortogonal deney planı oluşturulmuş ve toplamda 16 farklı deneysel koşul altında sistematik deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, sinyal/gürültü (S/N) oranları üzerinden değerlendirilmiş ve farklı performans kriterleri bakımından en uygun parametre seviyeleri belirlenmiştir.

Deneysel sonuçlar, özellikle başlangıç tuz- H_3BO_3 konsantrasyonu ile uygulanan akım yoğunluğunun, sistem performansı üzerinde en etkili iki parametre olduğunu göstermiştir. Bu iki parametrenin artışı, hem H_3BO_3 geri kazanımı, hem de asit ve baz üretim miktarları açısından belirgin pozitif etkiler yaratırken; elektro-osmotik su taşınımı, iyon mobilitesi ve işlem süresi üzerinde de doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Akım yoğunluğunun artırılması, iyon geçiş hızını yükselterek işlem süresini kısaltmakta ve ters iyon geçişlerini azaltarak sistemin akım verimliliğini artırmaktadır. Aynı zamanda, düşük akış hızlarının safsızlıkları azaltıcı etkisi olduğu tespit edilmiş; bu durum özellikle eş iyon taşınımı ve H_3BO_3 difüzyonu kaynaklı safsızlıkların kontrolü açısından önemli bulunmuştur.

Başlangıç besleme çözeltisinin derişimi, hem ürün dönüşüm oranı hem de enerji tüketimi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha yüksek başlangıç konsantrasyonları, ürün oluşumunu artırmakla birlikte, işlem süresini uzatarak geri difüzyon riskini ve safsızlık oluşumunu artırabilmektedir. Buna karşın, yüksek akım yoğunlukları, işlem süresini kısaltarak hem ürün geri taşınımını hem de ortak iyon geçişlerini minimize ederek sistemin genel verimliliğini artırmaktadır.

Deneysel verilerin varyans analizleri sonucunda, akım verimliliği üzerinde başlangıç besleme konsantrasyonu, uygulanan akım ve başlangıç asit-baz konsantrasyonlarının belirleyici olduğu görülmüştür. Elektrolit konsantrasyonu ve akış hızının ise bu kriterler üzerinde sınırlı etkiler gösterdiği tespit edilmiştir. Enerji tüketimi bakımından ise düşük tuz konsantrasyonu ve düşük akım, enerji ihtiyacını azaltmakta; buna karşılık yüksek elektrolit konsantrasyonu ve akış hızı enerji tüketimini optimize etmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen bulgular, BMED sürecinde optimum çalışma koşullarının belirlenmesinde başlangıç tuz konsantrasyonu, akım yoğunluğu ve akış hızının kritik rol oynadığını ortaya koymuştur. Bu bağlamda, ürün saflığı, dönüşüm verimi, enerji tüketimi ve işlem süresi gibi çoklu performans kriterlerinin dengeli bir şekilde optimize edilmesiyle hem prosesin teknik etkinliği hem de ekonomik uygulanabilirliği artırılabilir. Elde edilen sonuçlar, benzer sistemlerin tasarımı ve optimizasyonu açısından da yol gösterici niteliktedir.

Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımlarından TOPSIS ve MOORA yöntemleri, Taguchi optimizasyonu kapsamında elde edilen deneysel veriler arasından en uygun parametre kombinasyonunu belirlemek amacıyla uygulanmıştır. Her iki yöntemin analiz sonuçlarına göre 10. deney, tüm performans kriterleri açısından en yüksek toplam başarıyı gösteren optimum koşul olarak belirlenmiştir.

Performans kriterlerinden ürün miktarı, tuz dönüşüm oranı, akı gibi metrikler maksimize edilmesi hedeflenen çıktılar olarak değerlendirilirken; enerji tüketimi, ürünlerdeki safsızlık miktarı ve proses süresi minimize edilmesi gereken çıktılar olarak ele alınmıştır. Yapılan varyans analizlerine göre, başlangıç tuz- H_3BO_3 konsantrasyonu ile uygulanan akımın performans üzerinde en etkili iki parametre olduğu ortaya konmuştur. Buna karşılık, elektrolit konsantrasyonu değişiminin performans kriterleri üzerinde sınırlı düzeyde etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Başlangıç tuz- H_3BO_3 konsantrasyonunun artması, sistemdeki toplam iyon miktarını artırarak iyon geçişini hızlandırmış; böylece hem ürün verimliliği artmış hem de enerji daha etkin kullanılmıştır. Ancak bu artışın, eş iyon geçişleri yoluyla ürün saflığını sınırlayıcı etkiler oluşturabileceği de belirlenmiştir. Buna rağmen, genel değerlendirmede sağladığı faydaların olumsuz etkilerden daha baskın olduğu görülmüştür.

Başlangıç asit ve baz konsantrasyonu 0,15 M seviyesinde optimum değer olarak belirlenmiş ve bu koşulda sistemin akım verimliliği anlamlı şekilde artmıştır. Benzer şekilde, 4,2 A seviyesindeki akım, proses süresini kısaltarak ürünlerin geri difüzyonunu ve ortak iyon taşınımını azaltmış; bu da akım verimliliğini artırmıştır.

Akış hızı açısından 31 L/h seviyesi optimum değer olarak saptanmıştır. Bu hız, iyonların membran yüzeyine taşınmasını kolaylaştırarak konsantrasyon kutuplaşmasını azaltmış ve işlem verimliliğini artırmıştır. Elektrolit konsantrasyonu ise, düşük seviyelerde dahi yeterli iletkenlik sağladığından proses performansı üzerinde belirgin bir etki oluşturmamıştır.

Doğrulama deneyleri ve teorik tahminler, optimizasyon çalışmaları sonucunda belirlenen koşulların güvenilirliğini ve tutarlılığını desteklemiştir. Elde edilen bulgular, Elektromembran prosesinin NaOH ve H₃BO₃ üretimi için teknik olarak uygulanabilir ve optimize edilebilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Borik asit kristallendirme süreci, karıştırma koşulları, besleme çözeltisinin iyonik içeriği ve bipolar membran elektrodializ (BMED) ön arıtımının etkileri açısından değerlendirilmiştir. Karıştırma hızının belirli bir değere kadar artırılması, kütle transferini iyileştirerek daha düzenli bir kristal büyümesi sağlamış; ancak daha yüksek hızlarda ikincil çekirdeklenmenin artması nedeniyle ürün saflığındaki iyileşme sınırlı kalmıştır.

Besleme çözeltisindeki NaCl konsantrasyonunun azaltılmasıyla borik asit saflığında belirgin bir artış gözlenmiş ve iyonik safsızlıkların kristal içerisinde çözelti kapanmalarına yol açarak saflığı düşürdüğü belirlenmiştir. Bu koşullarda elde edilen ham borik asit kristallerinin saflığı %99'un üzerine çıkmıştır.

BMED yöntemi ile borik asit içeren tuzlu çözeltilerden yaklaşık %98,6 oranında tuz giderimi sağlanmış, bu sayede kristallendirme öncesinde daha saf ve konsantre bir borik asit çözeltisi elde edilmiştir. BMED destekli kristallendirme yaklaşımı ile geleneksel yöntemlerde %95–98 aralığında kalan ürün saflığının, doğrudan %99'a yakın ve üzeri değerlere çıkarılabildiği XRD analizleriyle de doğrulanmıştır.

KAYNAKÇA

- Abusultan, A. A. M., Wood, J. A., Sainio, T., Kemperman, A. J. B., & van der Meer, W. G. J. (2024). A hybrid process combining ion exchange resin and bipolar membrane electrodialysis for reverse osmosis remineralization. *Desalination*, 573, 117209.
- Akçay, M., & Gür, F. (2019). Investigation of the crystallization behavior of boric acid produced from colemanite. *Journal of Boron*, 4(1), 25–32.
- Alavia, W., Seidel-Morgenstern, A., Hermsdorf, D., Lorenz, H., & Graber, T. A. (2023). Real-time crystal growth monitoring of boric acid from sodium or lithium sulfate containing aqueous solutions by atomic force microscopy. *ACS Omega*, 8(11), 10139–10149.
- Alcaraz, A., Wilhelm, F. G., Wessling, M., & Ramírez, P. (2001). The role of the salt electrolyte on the electrical conductive properties of a polymeric bipolar membrane. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 513(1), 36–44.
- Alvarez, F., Alvarez, R., Coca, J., Sandeaux, J., Sandeaux, R., & Gavach, C. (1997). Salicylic acid production by electrodialysis with bipolar membranes. *Journal of Membrane Science*, 123(1), 61–69.
- Argust, P. (1998). Environmental and health aspects of boron. *Environmental Health Perspectives*, 106(Suppl. 7), 1139–1145.
- Arribas, P., Khayet, M., García-Payo, M. C., & Gil, L. (2015). Novel and emerging membranes for water treatment by electric potential and concentration gradient membrane processes. *Desalination and Water Treatment*, 55(9), 2452–2463.
- Aslan, M. (2016). *Membran teknolojileri*. TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Baker, R. W. (2023). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons.
- Başkan, A. E., & Erdemoğlu, M. (2016). Effect of phosphoric acid on boric acid production from colemanite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(2), 873–882.
- Bazinet, L. F. L. L., Lamarche, F., & Ippersiel, D. (1998). Bipolar-membrane electrodialysis: Applications of electrodialysis in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 9(3), 107–113.
- Bazinet, L., & Firdaous, L. (2009). Bipolar membrane electrodialysis for simultaneous acid and base production: A review. *Desalination*, 245(1–3), 12–19.
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069.
- Bilgin, M. (2012). Karboksilli asitlerin sulu ortamlardan sıvı membran tekniği kullanılarak ayrılmasının incelenmesi
- Brauers, W. K. M. (2004). Multi-objective optimization: Methodology and applications in manufacturing and management. Springer
- Bunani, D. Z., Yoshizuka, K., Nishihama, S., & Arifin, Z. (2017). Application of bipolar membrane electrodialysis (BMED) for simultaneous separation and recovery of boron and lithium from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*, 172, 296–302.

- Bunani, S., Arda, M., Kabay, N., Yoshizuka, K., & Nishihama, S. (2017). Effect of process conditions on recovery of lithium and boron from water using bipolar membrane electrodialysis (BMED). *Desalination*, 416, 10–15.
- Callahan, A., & Ni, X. (2014). Secondary nucleation mechanisms in crystallization processes under different hydrodynamic conditions. *CrystEngComm*, 16(14), 2734–2743.
- Chakraborty, S. (2011). Application of MOORA method for multi-objective decision making in engineering problems. *International Journal of Operational Research*, 9(2), 146–166.
- Chang, J. H., & Moon, S. H. (2002). Effect of electrolyte concentration on the performance of bipolar membrane electrodialysis for the treatment of wastewater from electroplating industry. *Journal of Membrane Science*, 207(2), 253–264.
- Chang, Y. J., Chou, T. C., & Juang, R. S. (2000). Recovery of hydrochloric acid from high concentration wastewater by electrodialysis with bipolar membranes. *Separation and Purification Technology*, 20(2–3), 185–197.
- Chen, X., & Xu, T. (2002). A new electrodialysis process for recovering HCl from waste acid solution containing FeCl₂. *Journal of Membrane Science*, 210(2), 307–315.
- Chen, X., & Xu, T. (2006). Purification of concentrated brine from polyvinyl chloride industry by electrodialysis with bipolar membranes. *Separation and Purification Technology*, 48(3), 288–293.
- Chen, X., Xu, T., & Wu, D. (2003). Purification of concentrated brine from chlor-alkali electrolysis by electrodialysis with bipolar membranes. *Desalination*, 154(2), 139–147.
- Choi, J. H., & Moon, S. H. (2001). Recovery of acids and bases from industrial wastewater by electrodialysis with bipolar membranes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 76(2), 188–192.
- Cruz, A. J. G., Rocha, F. A., & Ferreira, A. (2018). The role of mixing intensity on nucleation and crystal size distribution in crystallization processes. *CrystEngComm*, 20(8), 1141–1152.
- Çakır, A., & İnel, M. N. (2011). Boric acid production from borax by a semi-continuous process. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28(4), 1015–1021.
- Çakır, A., & Saraçoğlu, M. (2008). Investigation of crystallization kinetics of boric acid from aqueous solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(21), 8305–8310.
- Çelik, M. S., & Sarıtaş, S. (1994). Production of boric acid from colemanite. *Hydrometallurgy*, 35(3), 351–358.
- Das, C., & Bhattacharya, P. K. (2006). Purification of concentrated brine from chlor-alkali electrolysis by electrodialysis with bipolar membranes. *Journal of Membrane Science*, 283(1–2), 68–74.
- Davis, T. A., & Volesky, B. (2003). A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, 37(18), 4311–4330.
- De Cort, W., D’Haese, A., Degreève, J., Van der Bruggen, B., & Verliefde, A. R. D. (2013). Removal of boron from seawater using RO membranes: Assessment of boron rejection in relation to water flux. *Desalination*, 310, 76–83.
- De Smedt, C., Raes, L., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., & Verliefde, A. R. D. (2014). Rejection of trace organic compounds in high-pressure membranes (NF/RO): Role of solute–membrane affinity. *Journal of Membrane Science*, 451, 306–315.

- Demircioglu, M., & Kabay, N. (2012). Removal of boron from geothermal water by ion exchange and reverse osmosis processes. *Desalination*, 300, 16–21.
- Demircioglu, M., Koseoglu, H., Yildiz, N., & Kabay, N. (2003). Removal of boron from aqueous solutions by ion exchange resin: Effects of operating parameters. *Desalination*, 154(2), 157–164.
- Dey, B. (2015). A MOORA based fuzzy multi-criteria decision making approach for supply chain strategy selection. ResearchGate.
- Ding, Z., & Xu, T. (2003). A new electrodialysis process for recovering NaOH from sodium aluminate solution. *Separation and Purification Technology*, 31(2), 195–202.
- Ding, Z., & Xu, T. (2004). Development of an electrodialysis process for recovering acids and bases from salt solutions. *Journal of Membrane Science*, 231(1–2), 67–74.
- El-Bourawi, M. S., Khayet, M., Ma, R., Ding, Z., Li, Z., & Zhang, X. (2007). Application of vacuum membrane distillation for ammonia removal. *Journal of Membrane Science*, 301(1–2), 200–209.
- El-Manharawy, S., & Hafez, A. (2000). Water type and guidelines for RO system design. *Desalination*, 139(1–3), 97–113.
- Erkmen, Z. E., & Yapıcı, S. (2016). An environmentally friendly process for boric acid and sodium hydroxide production from borax by bipolar membrane electrodialysis. *Desalination and Water Treatment*, 57(43), 20261–20269.
- Esatoğlu, N., Yüksel, Ü., Yüksel, M., & Kabay, N. (2009). Effect of pH on boron removal from seawater using RO membranes. *Desalination*, 227(1–3), 151–159.
- Fang, Y., Wu, Y., & Yang, S. (2016). Recovery of boron and lithium from aqueous solutions by bipolar membrane electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 166, 144–150.
- Fernandez-Gonzalez, C., Dominguez-Ramos, A., Ibañez, R., & Irabien, A. (2016). Electrodialysis with bipolar membranes for valorization of brines. *Separation & Purification Reviews*, 45(4), 275–287.
- Fu, Y., Zhang, J., & Li, M. (2023). Production of HCl and NaOH using bipolar membrane electrodialysis: Influence of current density. *Journal of Membrane Science*, 680, 119–126.
- Gadakh, V. S., Shinde, V. B., & Khemnar, N. S. (2013). Optimization of welding process parameters using MOORA method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9–12), 2031–2039.
- Gao, W., Fang, Q., Yan, H., Wei, X., & Wu, K. (2021). Recovery of acid and base from sodium sulfate containing lithium carbonate using bipolar membrane electrodialysis. *Membranes*, 11(2), 152.
- Ghyselbrecht, K., Silva, A., Van der Bruggen, B., Boussu, K., Meesschaert, B., & Pinoy, L. (2013). Desalination feasibility study of an industrial NaCl stream by bipolar membrane electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 120, 362–371.
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Gündüz, A., Özdemir, M., & Genç, O. (2003). Processing of boric acid from borax by a wet chemical method. *Advanced Powder Technology*, 14(3), 279–293.

- Hacıoğlu, B. (2006). Elektrodializ yöntemi ile model çözeltilerden sitrik asit geri kazanımı [Yüksek lisans tezi, Üniversite adı].
- Herrero-Gonzalez, M., Ruiz, B., & Sánchez, P. (2023). Continuous bipolar membrane electrodialysis for base production: Process optimization. *Separation and Purification Technology*, 312, 120099.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey* (pp. 58-191). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ince, S., & Arslan-Acaröz, D. (2015). An update on health effects of metalloid trace element: Boron. *Aperito Journal of Drug Designing and Pharmacology*, 2(1).
- İpekçi, D., Altıok, E., Bunani, S., Yoshizuka, K., Nishihama, S., Arda, M., & Kabay, N. (2018). Effect of acid-base solutions used in acid-base compartments for simultaneous recovery of lithium and boron from aqueous solution using bipolar membrane electrodialysis (BMED). *Desalination*, 448, 69–75.
- Jarma, Y. A., Çermikli, E., İpekçi, D., Altıok, E., & Kabay, N. (2021). Comparison of two electrodialysis stacks having different ion exchange and bipolar membranes for simultaneous separation of boron and lithium from aqueous solution. *Desalination*, 500, 114850. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114850>
- Jeremias, J. S. D., Lin, J. Y., Dalida, M. L. P., & Lu, M. C. (2023). Abatement technologies for copper containing industrial wastewater effluents—a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109336.
- Kalkan, A. Ö. (2024). *XRD’de X-ışını kırınım verilerinin yapay zekâ yöntemleri ile analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi.
- Kanca, A., Şenol, H., Adıgüzel, D., Medin, C., & Ata, O. N. (2022). Boric acid recovery in dilute during the desalination process in BMED system. *Desalination*, 538, 115920.
- Karagöz, S., & Gök, A. (2022). Heat transfer and efficiency analysis in boric acid production from tincal using nitric acid. *Boron*, 7(2), 145–152.
- Karakaya, C. (1990). *Borik asitin kristalizasyonu üzerine safsızlıkların etkisi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Karan, D., & Atakli, Ö. (2020). Geleceğin dünyasında bilimsel ve mesleki çalışmalar 2020 doğa bilimleri ve ziraat/I. *Journal Name*, Volume(Issue), pages.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2012). Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for material selection. *Materials & Design*, 36, 456–462.
- Kipçak, A. S., Derun, E. M., & Pişkin, S. (2013). Production of boric acid from colemanite by sulfuric acid leaching. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(3), 838–842.
- Kishita, Y., Uwasu, M., Hara, K., & Takeda, H. (2020). Designing backcasting scenarios for sustainable manufacturing in the chemical industry. *Sustainability*, 12(3), 859.
- Kutluay, S., İzgi, M. S., & Şahin, Ö. (2020). *Borik asit ve boraks pentahidrat kristalleri için keşleşmenin incelenmesi*. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(3), 985–996.
- Li, Y., Shi, S., Cao, H., Wu, X., Zhao, Z., & Wang, L. (2016). Bipolar membrane electrodialysis for generation of hydrochloric acid and ammonia from simulated ammonium chloride wastewater. *Water Research*, 89, 201–209.

- Mergen, A., Demirhan, M. H., & Bilen, M. (2003). *Processing of boric acid from borax by a wet chemical method*. **Advanced Powder Technology**, 14(3), 279–293.
- Mishra, A. K., & Bhattacharya, P. K. (1984). Alkaline black liquor treatment by batch electrodialysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 62(5), 723–727.
- Nagawasa, H., Iizuka, A., Yamasaki, A., & Yanagisawa, Y. (2011). Utilization of bipolar membrane electrodialysis for the removal of boron from aqueous solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(10), 6325–6330.
- Nas, M. S., & Yıldız, A. (t.y.). Investigation of dissolution kinetics of tincal mineral in ammonium acetate solution in high solid/liquid ratios. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(3), 1486–1491.
- Nigam, P., & Pandey, A. (2009). A critical review of recent advances in bipolar membrane electrodialysis for acid and base production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(7), 992–1002.
- Opricović, S. & Tzeng, G.-H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- Öner, M. R., & Ata, O. N. (2023). Bipolar membrane electrodialysis for mixed salt water treatment: Determination of optimum conditions by TOPSIS-based Taguchi method. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), 587–604.
- Özakın, B. (2022). Evaluation of steel sheet materials in the automotive sector using MOORA method. *International Journal of Automotive Engineering*, 14(2), 101–110.
- Özdağoğlu, M. (2014). *MOORA method for multi-objective optimization: An application in engineering*. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(3), 45–53.
- Özekmekci, M. (2015). *Kolemanitten borik asit üretim prosesinin optimizasyonu* [Yüksek lisans tezi, Bursa Teknik Üniversitesi].
- Parks, J. H., & Edwards, P. A. (2005). The industrial uses of borates. In *Boron in Glass Industry*.
- Parks, J. L., & Edwards, M. (2005). Boron in the environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(2), 81–114.
- Pärnamäe, R., Gurreri, L., Post, J., van Egmond, W. J., Culcasi, A., Saakes, M., ... & Tedesco, M. (2020). The acid–base flow battery: Sustainable energy storage via reversible water dissociation with bipolar membranes. *Membranes*, 10(12), 409.
- Reahl, E. R. (2006). Half a century of desalination with electrodialysis. *GE Water & Process Technologies, General Electric Company*.
- Sata, T. (2004). *Ion exchange membranes: Preparation, characterization, modification and application*. Royal Society of Chemistry.
- Sertkaya, A. A., & Bayat, O. (2008). Crystal growth behavior in boric acid crystallization from colemanite. *Crystal Research and Technology*, 43(4), 389–395.
- Strathmann, H. (2010). Bipolar membrane electrodialysis: Principles, applications, and developments. *Desalination*, 264(1-2), 1–8.
- Strathmann, H. (2010). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264(3), 268–288.
- Strathmann, H. (2010). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264(3), 268–288

- Şenol, H., Adıgüzel, D., Kanca, A., Ata, O. N. & Yapıcı, S. (2025). Utilization and optimization of a sustainable environmental process for simultaneous recovery of H_3BO_3 and NaOH from tincal. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(8), 6711–6728.
- Tan, Y., Xu, T., Zuo, K., & Wu, D. (2018). Recent progress in bipolar membrane electrodialysis for acid and base production from salts. *Journal of Membrane Science*, 549, 585–597.
- Tanaka, Y. (2003). Mass transport and energy consumption in ion-exchange membrane electrodialysis of seawater. *Journal of Membrane Science*, 215(1-2), 265–279.
- Tanaka, Y. (2007). Bipolar membrane electrodialysis. In *Membrane science and technology* (Vol. 12, pp. 405–436).
- Tanaka, Y. (2007). Ion exchange membranes: Fundamentals and applications. Elsevier.
- Tian, Y., Liu, Z., Zhang, Y., & Xu, T. (2019). Recovery of boron from wastewater using bipolar membrane electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 212, 1–7.
- Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2011). Multiple attribute decision making: methods and applications. CRC press.
- Uslu, T., & Kabay, N. (2013). Boron removal from geothermal waters using ion exchange resins and membrane processes. *Desalination and Water Treatment*, 51(7–9), 1556–1565.
- Weir, R. J., & Fisher, R. S. (1972). Toxicologic studies on borax and boric acid. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 23(3), 351–364.
- Wenten, I. G. (2003). Recent development in membrane science and its industrial applications. *Journal Name*, (May).
- Xu, T. (2005). Ion exchange membranes: State of their development and perspective. *Journal of Membrane Science*, 263(1–2), 1–29.
- Xu, T., & Ang, W. L. (2005). Development of bipolar membrane electrodialysis (BMED): Process and applications. *Electrodialysis*, 190(3–4), 7–13.
- Xu, T., Huang, C., & Yang, W. (2008). Bipolar membrane electrodialysis for the production of acids and bases. *Journal of Membrane Science*, 322(1), 1–9.
- Xu, Y., Wang, D., & Zhang, Y. (2022). System stability of bipolar membrane electrodialysis under low pH conditions. *Journal of Environmental Management*, 312, 114–122.
- Yılmaz, S., & Kocabaş, Z. (2018). Kinetics of boric acid production from colemanite ore with hydrochloric acid. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 233–240.
- Yorulmaz, H. (2014). *Nitrik asit kullanılarak tinkalden borik asit üretimi* [Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi].
- Zhang, Y., Van der Bruggen, B., Pinoy, L., & Meesschaert, B. (2009). Separation of nutrient ions and organic compounds from salts in RO concentrates by standard and monovalent selective ion-exchange membranes used in electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 332(1), 104–112.
- Zhuang, L., Zhou, S., & Liu, C. (2013). Recovery of acid from industrial wastewater by BMED. *Chemical Engineering Journal*, 225, 240–246.
- Zourmand, Z., Faridirad, F., Kasiri, N., & Mohammadi, T. (2015). Mass transfer modeling of desalination through an electrodialysis cell. *Desalination*, 359, 41–51.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Hülya ŞENOL BALCI
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi (2011-2015)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi (2016-2019)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi (2019-2026)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Almanca:	
Rusça:	
Diğer	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Kanca, A., Şenol, H., Adıgüzel, D., Medin, C., & Ata, O. N. (2022). Boric acid recovery in dilute during the desalination process in BMED system. <i>Desalination</i>, 538, 115920. 2. Şenol, H., Adıgüzel, D., Kanca, A., Ata, O. N., & Yapıcı, S. (2025). Utilization and optimization of a sustainable environmental process for simultaneous recovery of H₃BO₃ and NaOH from tincal. <i>International Journal of Environmental Science and Technology</i>, 22(8), 6711-6728.	