



Seramik membran teknolojisi ile bor giderimi: Model bor çözeltisi ve model jeotermal su üzerine deneysel bir araştırma

Saadet Acar Can^{1,*}, B. İlker Harman¹, Hasan Köseoğlu¹

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, 32260, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 14 Ocak 2026

Kabul 4 Temmuz 2026

Online 30 Eylül 2026

Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1863672

Anahtar kelimeler:

Bor giderimi
Döngüsel ekonomi
Jeotermal su
Seramik membran
Sürdürülebilir su yönetimi

ÖZET

Seramik membranlar, yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanıklılıkları sayesinde jeotermal su arıtımında polimerik membranlara kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada, model bor çözeltisi ve model jeotermal su örneklerinde 1 kDa MWCO değerine sahip seramik membranın bor giderim performansını, akı kararlılığını ve proses uygulanabilirliği değerlendirilmektedir. Deneysel çalışmalar, laboratuvar ölçekli çapraz akışlı seramik membran test sistemi kullanılarak, 1 kDa gözenek çapına sahip tübüler seramik membran ile gerçekleştirilmiştir. Model bor çözeltisi ve model jeotermal su örnekleri farklı işletme basınçlarında (1, 2 ve 4 bar), pH değerlerinde (doğal pH ve pH 9,5) ve bor konsantrasyonlarında (10 ve 20 ppm B) test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, basınç artışının süzünü akışını belirgin şekilde yükselttiğini, ancak bor giderim veriminin düşük seviyelerde kaldığını göstermiştir. Bu durum, borun doğal pH koşullarında boric asit formunda bulunması ve küçük moleküler boyutu nedeniyle membran gözeneklerinden geçebilmesiyle ilişkilendirilmiştir. Model jeotermal su deneylerinde de benzer eğilim gözlenmiş, çözünmüş iyonların ve tuzların 1 kDa seramik membran tarafından tutulmadığı belirlenmiştir. SEM ve SEM-EDX analizleri, membranın üç katmanlı yapısını, homojen gözenek morfolojisini ve TiO₂ esaslı bileşimini doğrulamıştır. Ekonomik değerlendirme, seramik membranların yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen, yüksek akı performansı, uzun kullanım ömrü ve yapısal dayanıklılıkları sayesinde uzun vadede sürdürülebilir bir seçenek oluşturabileceğini göstermiştir. Çalışmanın genel bulguları, 1 kDa gözenek boyutuna sahip seramik membranın mevcut haliyle jeotermal sulardan bor giderimi için yeterli olmadığını; ancak pH optimizasyonu, membran modifikasyonları, ön arıtma adımları ve hibrit proses entegrasyonları ile performansın artırılabilirliğini göstermektedir. Borun geri kazanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi, döngüsel ekonomi kapsamında çevresel ve ekonomik katkıların artırılmasına olanak sağlayabilir.

Boron removal by ceramic membrane technology: An experimental study on model boron solution and model geothermal water

ARTICLE INFO

Article History:

Received January 14, 2026

Accepted July 4, 2026

Available online September 30, 2026

Research Article

DOI: 10.30728/boron.1863672

Keywords:

Boron removal
Circular economy
Geothermal water
Ceramic membrane
Sustainable water management

ABSTRACT

Ceramic membranes offer significant advantages over polymeric membranes in geothermal water treatment due to their high temperature and chemical resistance. This study evaluates the boron removal performance, flux stability, and process feasibility of a ceramic membrane with a 1 kDa MWCO in model boron solutions and model geothermal water samples. Experimental studies were conducted using a laboratory-scale cross-flow ceramic membrane test system with a tubular ceramic membrane having a pore size of 1 kDa. Model boron solutions and model geothermal water samples were tested at different operating pressures (1, 2, and 4 bar), pH values (natural pH, and pH 9.5), and boron concentrations (10, and 20 ppm). The results showed that the increase in pressure significantly increased the permeate flow rate, but the boron removal efficiency remained low. This has been attributed to boron existing as boric acid under natural pH conditions and passing through the membrane pores due to its small molecular size. A similar trend was observed in model geothermal water, where dissolved ions and salts could not be retained by the 1 kDa ceramic membrane. SEM and SEM-EDX analyses confirmed the membrane's three-layer structure, homogeneous pore morphology, and TiO₂-based composition. Economic evaluation revealed that despite the high initial investment cost of ceramic membranes, their high flux performance, long service life, and structural durability make them a sustainable option in the long term. The findings of the study indicate that the ceramic membrane with a 1 kDa pore size is not sufficient for boron removal from geothermal waters in its current state; however, performance can be improved through pH optimization, membrane modifications, pre-treatment steps, and hybrid process integrations. Developing technologies for boron recovery could enable increased environmental and economic contributions within the scope of the circular economy.

*Corresponding author: saadetacar32@gmail.com

1. Giriş (Introduction)

Enerji ve su talebi, nüfus artışı, sanayileşme ve yaşam standartlarının yükselmesiyle birlikte giderek artmaktadır. Küresel ölçekte kişi başına düşen su tüketimindeki artış, yeraltı suyu kullanımını altı kat arttırmıştır. Mevcut su talebinin en büyük payını tarım sektörü oluşturmakta, toplam tatlı suyun yaklaşık %70'i sulamada kullanılmaktadır [1]. Türkiye, artan nüfus ve tarım-sanayi faaliyetleri nedeniyle su stresi riski ile karşı karşıya kalan ülkeler arasındadır. Bu durum, ülkemizde sayısı 2000'i aşan jeotermal kaynakların, özellikle tarımsal uygulamalarda kullanımını gerekli kılmaktadır [2]. Günümüzde jeotermal akışkanlar sadece tarımda değil; enerji üretimi, endüstriyel prosesler ve konut ısıtma gibi pek çok alanda yenilenebilir bir kaynak olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu kaynakların kullanımı sırasında açığa çıkan yüksek iyon konsantrasyonuna sahip atık sular, tarımsal verimlilik ve insan sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu nedenle, jeotermal tuzlu suların uygun arıtma teknolojileri ile geri kazanılması, bu kaynakların güvenli ve sürdürülebilir yönetimi açısından kritik bir öneme sahiptir [3].

Bor (B), jeotermal sularda yaygın olarak bulunan ve çevre ile insan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturan bir elementtir. Yüksek B içeriğine sahip jeotermal suların kontrolsüz deşarjı, toprak ve yeraltı su kaynaklarında birikime neden olmaktadır. Bu birikim, toprak yapısının bozulmasına neden olmakta; bitkilerde ise toksisite (yaprak ve meyvelerde sarımsı lekeler, bitkilerde çürüme gibi) belirtileriyle tarımsal verimi düşürmektedir. İnsan sağlığı açısından değerlendirildiğinde ise yüksek B içerikli su ve tarım ürünlerinin uzun süreli tüketimi; mide rahatsızlıkları, cilt sorunları ve çocuklarda nörolojik gelişim bozuklukları gibi sağlık problemlerine neden olabilmektedir [4]. Bu nedenle, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) içme sularındaki B limitini başlangıçta 0,5 ppm olarak önermiştir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Avrupa Birliği (AB) ve Japonya gibi ülkelerde ise bu sınır 1 ppm olarak belirlenmiştir. Daha sonra İçme Suyu Kalitesi Komitesi, bor kılavuz değerini 2,4 ppm'e yükseltmiş ve bu değer 2011'de yayımlanan İçme Suyu Kalitesi Kılavuzları'nın 4. baskısına dahil edilmiştir [5]. Buna karşın, Türkiye'de ve dünyada birçok jeotermal kaynağın B konsantrasyonu, belirlenen bu limit değerinin oldukça üzerindedir. Bu durum, jeotermal suların doğrudan kullanımını sınırlandırmaktadır. Dolayısıyla, jeotermal sulardan borun etkin bir şekilde giderimi, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de tarımsal üretkenlik açısından kritik bir öneme sahiptir.

Yüksek B konsantrasyonuna sahip jeotermal suların arıtımı; içme suyu ile evsel ve tarımsal sulama suyunun güvenle kullanılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu amaçla; adsorpsiyon, iyon değişimi, elektrokoagülasyon, elektrodializ, Donnan diyalizi, membran distilasyonu, ters osmoz (RO), buharlaşma, kimyasal çökeltme ve hibrit teknolojiler gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır [1, 2, 5-8]. Ancak bu

sistemlerin çoğu; reçine rejenerasyonu, yüksek çamur üretimi, çamur yönetimi, yüksek işletme maliyetleri ve membran tıkanması gibi ekonomik ve çevresel sorunlarla karşı karşıyadır. Bu nedenle, jeotermal tuzlu sulardan borun etkin, ekonomik ve çevre dostu yöntemlerle giderilmesini sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesi önem arz etmektedir [3]. Bu bağlamda seramik membranlar, sahip oldukları üstün malzeme özellikleri sayesinde umut vadeden bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yüksek mekanik dayanım ve sıcaklık direnci, bu membranların zorlu su arıtma koşullarında etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [9]. Farklı gözenek boyutlarına sahip yapıları, askıda katı maddeler, ağır metaller, bakteriler, virüsler, çözünmüş organik ve inorganik gibi kirleticilerin sudan uzaklaştırılmasına olanak tanımaktadır [10]. Ayrıca kimyasal dayanıklılıklarının yüksek olması, membranların uzun süre işlevini korumasına olanak sağlamakta; bu durum, membran değişim ihtiyacını azaltarak bakım maliyetlerini düşürmekte ve çevresel etkilerin azalmasına katkıda bulunmaktadır [11]. Bu özellikleri sayesinde seramik membranlar, yüksek ilk yatırım maliyetlerine rağmen uzun hizmet ömürleri ve kararlı performanslarıyla jeotermal su arıtımında tercih edilen bir teknoloji haline gelmektedir.

Bu çalışmada, 1 kDa moleküler ağırlık kesme sınırına (MWCO) sahip TiO_2 esaslı seramik membranın jeotermal sulardan bor giderim performansı ve akı kararlılığı araştırılmıştır. Borun küçük moleküler boyutu ve özellikle doğal pH koşullarında nötr borik asit formunda bulunması nedeniyle, ultrafiltrasyon (UF) membranları ile yüksek bor gideriminin sınırlı olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, ticari ölçekte temin edilebilen tübüler seramik membranlar içerisinde 1 kDa değeri, ulaşılabilir en düşük MWCO sınırlarından birini temsil etmektedir. Bu nedenle çalışma, modifiye edilmemiş ticari fine-UF seramik membranların bor giderimine yönelik teknik sınırlarını ve proses davranışını deneysel olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır. Deneysel çalışmalar, laboratuvar ölçekli seramik membran test sisteminde farklı işletme basınçları, pH değerleri ve bor konsantrasyonları altında yürütülmüştür. Model bor çözeltisi ve model jeotermal su kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, proses parametrelerinin süzüntü akışı, iletkenlik ve bor giderim verimi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, seramik membran prosesinin teknik performansının yanı sıra ekonomik uygulanabilirliği de incelenmiş; teknolojinin potansiyeli ve mevcut sınırlılıkları tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Materials and Method)

2.1. Seramik Membran Test Sistemi (Ceramic Membrane Test System)

Deneysel çalışmalar, TAMI Industries (Fransa) firmasından temin edilen ve çapraz akış (cross-flow) prensibine göre çalışan laboratuvar ölçekli seramik membran filtrasyon sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem konfigürasyonu; yüksek

basınç pompası (Hydra-Cell, D/G-03-X), 1,5 kW gücünde soğutma donanımlı elektrik motoru (WAT, 50 Hz, 1420 rpm), 2,2 kW kapasiteli frekans invertörü (ABB, ACS150), pompa çıkışında konumlandırılmış sönümleyici (surge dampener), konsantre hattında akış ayar vanası, yüksek basınca dayanıklı emniyet vanası, paslanmaz çelik ve silikon hortumlar ile paslanmaz çelik şaseden oluşmaktadır. Besleme tankı paslanmaz çelikten yapılmış olup, 45 L çözelti hacmine sahiptir. Sistem, tek kanallı tübüler seramik membranın yerleştirilebilmesi için özel bir membran kılıfıyla donatılmıştır. Çalışma basıncı, konsantre hattındaki vana ile ayarlanmış, maksimum 4 bar olarak belirlenmiştir. Deneyler süresince besleme tankındaki suyun sıcaklığı, tank çevresine monte edilen su ceketini ile sabit tutulmuştur. Tüm deneylerde, gözenek boyutu 1 kDa olan, tek kanallı, tübüler yapıdaki TiO_2 membran (Inside CeRAM, TAMI Industries) kullanılmıştır. Membranın iç ve dış çapı 6 mm ve 10 mm, aktif uzunluğu 25 cm, filtrasyon alanı $37,7 \text{ cm}^2$ 'dir. Membranın TiO_2 yapısı, 90 bar basınca, 0-14 pH aralığına ve 350°C sıcaklığa dayanıklıdır. Deneyler süresince elde edilen süzüntü miktarı, $\pm 10 \text{ mg}$ hassasiyetli dijital terazi ile ölçülmüştür.

2.2. Model Bor ve Model Jeotermal Su Örnekleri (Model Boron and Model Geothermal Water Samples)

Deneyisel çalışmalar, belirlenen farklı başlangıç konsantrasyonlarına sahip model bor çözeltileri ve model jeotermal su numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Filtrasyon süresince; sıcaklık, elektriksel iletkenlik (EC), süzüntü akışı ve giderim verimi gibi parametreler izlenmiş; süzüntü örneklerinde yapılan bor analizleri ile membranın bor giderim performansı değerlendirilmiştir. Jeotermal sulardan bor giderimini araştırmak amacıyla, literatür verileri ve Tablo 1'de verilen jeotermal su bileşimleri dikkate alınarak 10 ppm B ve 20 ppm B olmak üzere iki farklı başlangıç bor konsantrasyonu seçilmiştir.

Tablo 1. Model bor ve model jeotermal su örneklerinde bor konsantrasyonunun belirlenmesi (Determination of boron concentration in model boron and model geothermal water samples).

Jeotermal Su Kaynağı	Bor (ppm)	pH	Ref.
İzmir İlindeki Jeotermal Bölge	10,9	8,6	[12]
İzmir Jeotermal Kuyu	12	8,52	[1]
Kızıldere Jeotermal Santrali (Denizli)	20	9,0	[13]
Maren Jeotermal Santrali (Aydın)	60,84	7,67	[7]
Japonya Kyushu Adası (Hachoubaru Bölgesi)	33,9	8,0	[14]

Aydın bölgesindeki jeotermal suyun B içeriği yüksek bulunduğundan değerlendirmeye alınmamış, yalnızca B parametresi için dört farklı kaynağın ortalama değeri esas alınmıştır. Membran testleri model bor çözeltileri için 4 saat, model jeotermal su örneklerinde ise 6 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan detaylı deney planı ve işletme koşulları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Model bor ve model jeotermal su örnekleri ile gerçekleştirilen deneyisel çalışmalara ait matris ve kapsam (Matrix and scope of experimental studies conducted with model boron and model geothermal water samples).

Deney No	Trans-membran basıncı (TMP) (bar)	Besleme suyu pH	Bor (ppm)
1	1	Doğal pH (Model bor: $\approx 5,2$ ve Jeotermal: $\approx 7,7$)	10
2	2	Doğal pH (Model bor: $\approx 5,2$ ve Jeotermal: $\approx 7,7$)	10
3	4	Doğal pH (Model bor: $\approx 5,2$ ve Jeotermal: $\approx 7,7$)	10
4	1	9,5	10
5	2	9,5	10
6	4	9,5	10
7	1	Doğal pH (Model bor: $\approx 5,2$ ve Jeotermal: $\approx 7,7$)	20
8	2	Doğal pH (Model bor: $\approx 5,2$ ve Jeotermal: $\approx 7,7$)	20
9	4	Doğal pH (Model bor: $\approx 5,2$ ve Jeotermal: $\approx 7,7$)	20
10	1	9,5	20
11	2	9,5	20
12	4	9,5	20

Deneyisel çalışmaların ikinci aşamasında, gerçek saha koşullarını temsil etmesi amacıyla laboratuvar ortamında hazırlanan model jeotermal su örnekleri kullanılmıştır. Model jeotermal suyun kimyasal bileşimi; İzmir (iki farklı kuyu), Denizli-Kızıldere ve Aydın-Maren jeotermal enerji santralleri ve Japonya-Hachoubaru (Kyushu Adası) bölgesindeki jeotermal kaynaklara ait verilerin ortalaması alınarak hazırlanmıştır (Tablo 1). Silika konsantrasyonu, İzmir'deki jeotermal kuyuların ortalama değeri olan 60 ppm temel alınarak belirlenmiştir. Bu kaynakların tercih edilme sebebi, çalışmalarda kullanılmak üzere temin edilen jeotermal su/atık suların karakterizasyonlarının tam yapılmış olmasıdır. Model jeotermal suyun iyonik bileşimi ve konsantrasyon değerleri Tablo 3'te sunulmuştur.

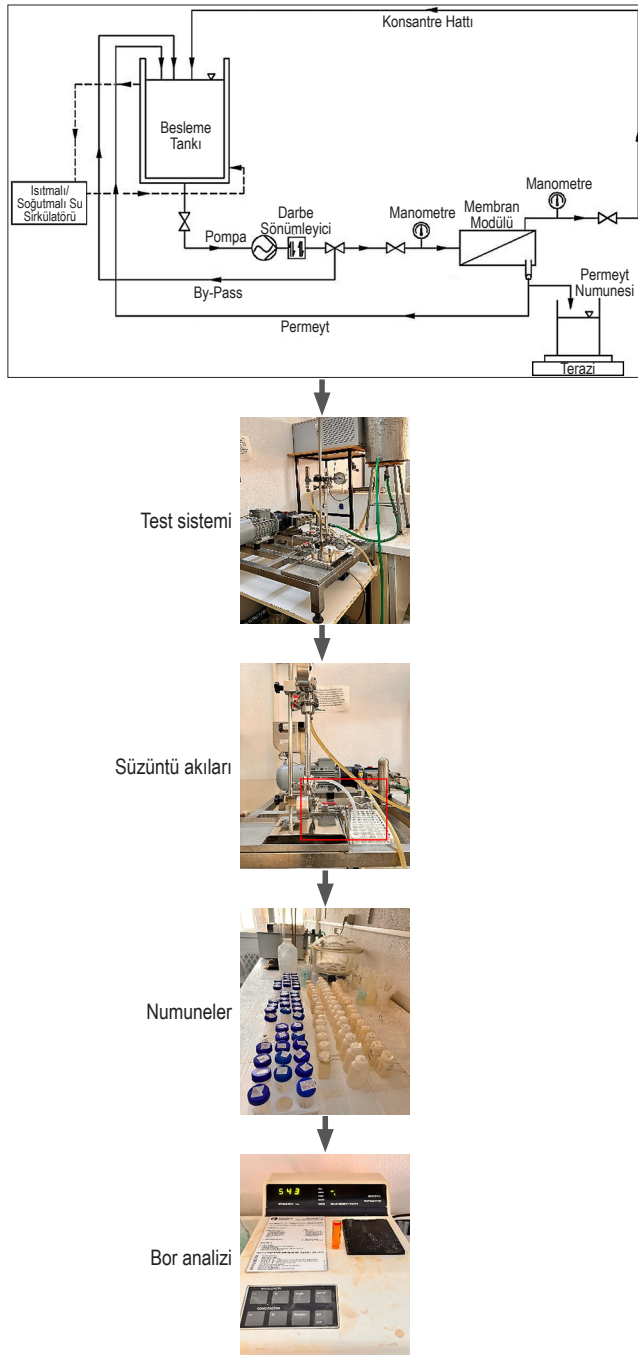
Tablo 3. Model jeotermal suyun kimyasal bileşimi (Chemical composition of model geothermal water).

Statistics	Bileşenler	Değer
	pH	7,8
	Elektriksel iletkenlik ($\mu\text{S/cm}$)	11.150
	Toplam sertlik (ppm CaCO_3)	114
Kasyonlar (ppm)	Sodyum (Na^+)	2.648,6
	Potasyum (K^+)	169,4
	Kalsiyum (Ca^{2+})	22
	Magnezyum (Mg^{2+})	4
	Klorür (Cl^-)	3475,3
Anyonlar (ppm)	Sülfat (SO_4^{2-})	327
	Florür (F^-)	8
Diğer (ppm)	Bikarbonat (HCO_3^-)	954
	Bor (B)	10-20
	Silisyum (Si)	60

Model bor çözeltilerinden elde edilen sonuçlar, araştırmanın ilerleyen aşamalarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar için referans niteliği taşımıştır. Bu referans değerler kullanılarak, model jeotermal suların sahip olduğu su kimyasının, bor giderim performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

2.3. Seramik Membran Filtrasyon Testleri (Ceramic Membrane Filtration Tests)

Tüm seramik membran deneyleri, çapraz akış prensibiyle çalışan laboratuvar ölçekli filtrasyon ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Laboratuvar ölçekli TAMI seramik membran test ünitesinin ve bor analizinin şematik gösterimi (Schematic representation of the laboratory-scale TAMI ceramic membrane test unit and boron analysis).

Bu sistem, ticari çapraz akışlı tübüler seramik membran modüllerinin laboratuvar koşullarında simüle edilmesine olanak sağlamaktadır. Filtrasyon deneyleri, sıcaklık kontrollü koşullar altında 20 ± 2 °C'de yürütülmüştür. Bu sıcaklık aralığı; sistemin hidrolik kararlılığının korunması, deneysel çalışmaların tekrarlanabilirliği ve elde edilen sonuçların karşılaştırılabilirliği açısından tercih edilmiştir. Çalışmanın temel amacı model bor çözeltileri ve model jeotermal su örneklerinden bor giderim mekanizmalarını değerlendirmek olduğundan, sıcaklık parametresi bir kontrol değişkeni olarak sabit tutulmuştur. Gerçek saha uygulamalarında jeotermal akışkanlar; elektrik üretimi veya merkezi/ tarımsal ısıtma proseslerinde kullanıldıktan sonra "atık jeotermal su" fazına geçmektedir. Bu suların sulama suyu olarak yeniden kullanılması hedeflendiğinde, yüksek sıcaklığın bitki gelişimi ve toprak ekosistemi üzerinde oluşturabileceği termal etkiler nedeniyle akışkanın soğutulması veya soğuma havuzlarına alınması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada, termal enerji kullanımından sonra soğutulmuş jeotermal suyun arıtımına odaklanan bir senaryo kurgulanmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklıkların; suyun viskozitesi, membran akışı, bor bileşiklerinin çözünürlüğü ve borik asit/borat iyonizasyon dengesi üzerinde eş zamanlı etkiler oluşturduğu bilinmektedir. Bu nedenle, proses basıncı ve pH gibi işletme parametrelerinin membran performansı üzerindeki etkilerini daha net değerlendirebilmek amacıyla sıcaklık sabit tutulmuş ve çalışma kapsamına dahil edilmemiştir. Deneysel çalışmalar iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, model bor çözeltileri kullanılarak iki pH seviyesi (doğal pH $\approx$ 5,2 ve pH 9,5), üç işletme basıncı (1, 2 ve 4 bar) ve iki bor konsantrasyonu (10 ve 20 ppm) olmak üzere bir deney matrisi oluşturulmuştur. Model bor çözeltisi deneylerinde, bor türleşmesinin membran performansı üzerindeki etkisini daha belirgin inceleyebilmek amacıyla özellikle alkali pH koşullarına odaklanılmıştır. İkinci aşamada ise model jeotermal su örnekleri kullanılarak aynı parametre kombinasyonları test edilmiştir. Bu aşamada, jeotermal suyun kimyasal bileşimine bağlı olarak besleme pH değeri yaklaşık 7,7 olarak belirlenmiştir. Model jeotermal su deneylerinde öncelikli hedef gerçek saha koşullarını temsil etmek olduğundan, akışkanın ham matrisini yansıtan doğal pH ($\sim$ 7,7) koşulları deneysel matrise dahil edilerek ayrıca değerlendirilmiştir. Membran çapraz akış hızı 1,46 m/s ve besleme debisi 2,48 L/dk olarak sabitlenmiştir. Tüm deneylerde süzüntü ve konsantre akımlar geri devrettirilerek besleme hacmi sabit tutulmuştur. Deneyler öncesinde membran, üretici firmanın önerdiği prosedüre uygun şekilde kimyasal olarak temizlenmiş ve temiz su akı testleri (1, 2, 3 ve 4 bar) gerçekleştirilmiştir. Her test sonrasında membran saf su ile durulanmış; çalışma setlerinin tamamlanmasını takiben temizlik prosedürü tekrarlanarak temiz su akı ölçümleri yapılmıştır. pH 9,5 değerinin sağlanması ve deney süresince korunması amacıyla besleme tankına kontrollü olarak 1 M NaOH çözeltisi eklenmiştir. Tüm deneylerde her saat

besleme ve süzöntü numunelerinde bor, iletkenlik, pH ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca konsantrasyon ve süzöntü debileri ile membran ünitesi ve pompa çıkış basınçları düzenli olarak kaydedilmiştir.

2.4. Analitik Yöntemler (Analytical Methods)

Deneyisel çalışmalarda, seramik membran ünitesinden alınan numunelerde bor tayini kurkumin yöntemi [15] ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, numuneye eklenen kurkumin çözeltisi borat iyonları ile reaksiyona girerek kırmızı-turuncu renkli bir kompleks oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan kurkumin çözeltisi, gerekli miktarda kurkuminin derişik asetik asitte çözülmesiyle hazırlanmıştır (40 numune için). Analizlerde, 0,5 mL numuneye 3 mL kurkumin çözeltisi ve 3 mL sülfürik asit-asetik asit karışımı eklenmiş, karışım plastik tüplerde 30°C'de bir saat çalkalanmıştır. Ardından 10 mL sodyum asetat tamponu ilave edilmiş, soğutulan örneklerin absorban değerleri 543 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Tüm çözelti hazırlıklarında ve seyreltmelerde deiyonize su kullanılmıştır. Seramik membranın yüzey özellikleri, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ve SEM-Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (SEM-EDX) analizleri ile belirlenmiştir. Tüm karakterizasyon çalışmaları Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ-YETEM) laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Seramik membran sisteminin performansı, süzöntü miktarı ve süzöntü suyu kalitesi üzerinden değerlendirilmiştir. Süzöntü suyu kalitesi; pH, EC, toplam çözünmüş katı madde (TÇK) ve B konsantrasyonu parametreleri ile izlenmiştir. pH ölçümleri WTW pH/Oxi 340i taşınabilir pH metre ile; EC ve TÇK ölçümleri ise WTW Inolab Cond. Level 1 cihazı ile yapılmıştır. Besleme, süzöntü ve konsantrasyon örneklerindeki B derişimi kurkumin yöntemi ile belirlenmiş ve sonuçlar ICP-MS ile doğrulanmıştır. Süzöntü akısı (J), süzöntü debisi (Q_p) ve membran aktif alanı (A) kullanılarak Denklem (1) ile hesaplanmıştır [16].

$$J = \frac{Q_p}{A} \quad (1)$$

Burada J (L/m^2sa) süzöntü akısını, Q_p (L/sa) süzöntü debisini ve A (m^2) membranın aktif yüzey alanını ifade etmektedir. Bor ve tuz giderimi (R) ise besleme çözeltisindeki (C_p) ve süzöntüdeki (C_p) bor derişimleri kullanılarak Denklem (2) ile hesaplanmıştır [17].

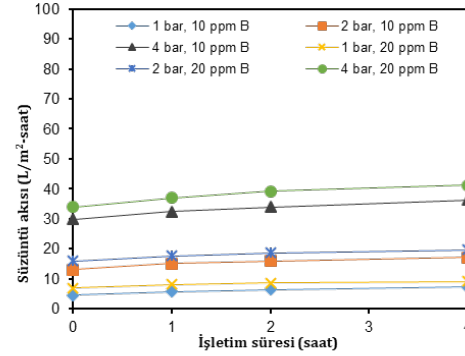
$$R (\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

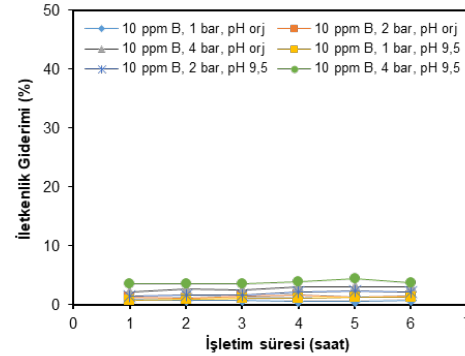
3.1. Model Bor Çözeltisi: Proses Parametrelerinin Akı ve Bor Giderimine Etkileri (Model Boron Solution: Effects of Process Parameters on Flux and Boron Removal)

Seramik membranlar; yüksek mekanik dayanım,

kimyasal ve termal stabilite, uzun kullanım ömrü, yüksek gözeneklilik ve hidrofiliklik özellikleri ile dikkat çekmektedir. Hidrofilik yapı, tıkanma eğiliminin azalmasına ve yüksek akı değerlerinde çalışmasına olanak tanımaktadır [18]. Bu çalışmada, tek kanallı tübüler seramik membran kullanılarak 1, 2 ve 4 bar basınçlarda 4 saat süreyle yürütülen filtrasyon deneylerinden elde edilen süzöntü akısı verileri değerlendirilmiştir. Doğal pH ($\approx 5,2$) koşullarındaki sonuçlar Şekil 2'de, pH 9,5 için elde edilen veriler ise Şekil 3'te sunulmaktadır.



Şekil 2. TMP'nin süzöntü akısına etkisi (pH≈5,2; besleme debisi: 2,48 L/dak; membran gözenek çapı: 1 kDa; besleme suyu sıcaklığı: ≈20±2°C) (Effect of membrane pressure on permeate flux (pH ≈ 5.2; feed flow rate: 2.48 L/min; membrane pore size: 1 kDa; feed water temperature: ≈ 20 ± 2°C)).



Şekil 4. TMP'nin ve pH'nın iletkenlik giderimine etkisi (doğal pH≈7,7 ve pH 9,5; besleme debisi: 2,48 L/dak; bor konsantrasyonu: 10 ppm; membran gözenek çapı: 1 kDa; besleme suyu sıcaklığı: ≈20±2°C) (Effect of membrane pressure and pH on conductivity removal (natural pH ≈ 7.7 and pH 9.5; feed flow rate: 2.48 L/min; boron concentration: 10 ppm; membrane pore size: 1 kDa; feed water temperature: ≈ 20 ± 2°C)).

Deneyisel bulgular, TMP'nin 1 bardan 4 bara yükselmesiyle süzöntü akısında belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Bu eğilim, teorik beklentilerle uyumlu olup literatürle de desteklenmektedir. Örneğin Kim ve Park [19], sentetik çamaşır atık suyu arıtımında seramik UF membranların tıkanma davranışı, toplam organik karbon giderimi ve akı geri kazanımı üzerine yaptıkları çalışmada, artan basınçla birlikte daha yüksek süzöntü hacimleri elde edildiğini bildirmiştir. Dolayısıyla artan TMP, gözeneklerden su geçişini hızlandırarak süzöntü akısının yükselmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmada 1 kDa seramik membran ile 10 ppm B konsantrasyonunun doğal pH ($\approx 5,2$) koşullarında

elde edilen süzüntü akıları; 1, 2 ve 4 bar basınçlarda sırasıyla 6-7, 12-15 ve 22-28 L/m²sa olarak ölçülmüştür. 20 ppm B konsantrasyonunda ise akı değerleri 1 barda 8-10 L/m²sa, 4 barda ise 33-40 L/m²sa aralığında bulunmuştur (Şekil 2). Yüksek pH koşullarında (pH 9,5) akı değerlerinin kısmen yükseldiği görülmüştür. Örneğin, 10 ppm B için süzüntü akıları 1, 2 ve 4 bar basınçlarda sırasıyla 4-7, 13-17 ve 30-36 L/m²sa iken; 20 ppm B için bu değerler 7-9, 16-20 ve 34-41 L/m²sa olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Tüm sonuçlar, farklı bor konsantrasyonlarında elde edilen akı değerlerinin birbirine yakın olduğunu, ancak pH 9,5'te süzüntü akısının belirgin biçimde yükseldiğini göstermektedir. Ayrıca 4 saatlik deneyler süresince her iki pH koşulunda da akı azalması gözlenmemiştir. Özellikle 4 bar basınç altında, yüksek pH ve 20 ppm B konsantrasyonunda süzüntü akısının dikkat çekici şekilde arttığı tespit edilmiştir. Yüksek pH seviyelerindeki bu artış, membran yüzey kimyasındaki değişimlere ve çözeltideki bor türlerinin çözünürlük/ionizasyon davranışlarına bağlı olabilir. Benzer şekilde Teow vd. [20], seramik UF membranların (15 kDa) yüksek hidrofiliklikleri ve geçirgenlikleri sayesinde polimerik membranlara kıyasla daha yüksek akı değerlerine ulaştığını ve tıkanmaya karşı daha dirençli olduğunu bildirmiştir. Araştırmacılar, bu durumu membran yüzeyinin su molekülleri ile etkileşiminin güçlenmesine ve artan ıslanabilirliğe bağlamıştır. Yüksek gözeneklilik ise ayırma performansını olumlu yönde destekleyen bir diğer faktör olarak öne çıkmaktadır.

Literatürde, pH'ın membran filtrasyon performansı üzerinde kritik bir parametre olduğu sıklıkla vurgulanmaktadır. Mamun Kabir vd. [21], pH değerinin 8'den 12'ye çıkarılmasıyla süzüntü akısında artış gözlemlendiğini bildirmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da benzer bir eğilim göstermektedir. pH 9,5 koşullarında özellikle 2 ve 4 bar basınçlarda süzüntü akılarının doğal pH'a ($\approx 5,2$) kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yüksek pH değerlerinin, seramik membranlarda tıkanmış gözenekleri açma eğilimi gösterdiği ve NaOH ile yapılan kimyasal temizleme işlemlerinin tıkanmayı azaltma potansiyeli taşıdığı bilinmektedir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular literatürle uyumlu olup, pH'ın seramik membran filtrasyon süreçlerinde kritik bir kontrol parametresi olduğunu ve proses performansını doğrudan etkileyebileceğini göstermektedir.

Bor türlerinin çözeltide farklı kimyasal formlarda bulunması ve bu türler arasındaki dönüşüm mekanizmaları, su ve atık suların arıtımında borun etkin ve seçici şekilde giderimini güçleştirmektedir [22, 23]. Membran teknolojileri, özellikle RO sistemleri, deniz suyu ve jeotermal su gibi alternatif su kaynaklarının arıtımında yaygın olarak kullanılan ve yüksek verimlilik sağlayan yöntemlerdir. Ancak, bor bileşiklerinin nötr yapıda ve küçük molekül boyutunda olması, RO membranlarının bor giderim performansını sınırlayan önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır [24]. Endüstriyel uygulamalarda, sıkı bor deşarj standartlarına uyum sağlayabilmek için genellikle

pH ayarlaması veya çift kademeli RO prosesleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemler hem enerji hem de kimyasal madde tüketimini artırarak işletme ve yatırım maliyetlerini yükseltmektedir. Bu nedenle, çift geçişli RO sistemlerine alternatif olabilecek, daha düşük enerji tüketimiyle çalışan ve yüksek bor giderim etkinliği sunan yeni yöntemlerin geliştirilmesi önem taşımaktadır [25]. Bu noktada, yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç ve uzun hizmet ömrü gibi avantajlarıyla seramik membranlar, bor giderimine yönelik umut vadeden bir alternatif olarak dikkat çekmektedir.

Bu çalışmada yürütülen deneylerin temel amacı, 1 kDa gözenek çapına sahip seramik membranın model bor ve jeotermal su örneklerinden B giderim performansını değerlendirmektir. Deneyler kapsamında, basınç, pH ve bor derişiminin giderim üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te özetlenmiştir. Doğal pH koşullarında ($\approx 5,2$) ve 10 ppm B içeren çözeltiyle gerçekleştirilen testlerde, 1, 2 ve 4 bar basınçlarda elde edilen bor giderim değerleri sırasıyla %1-9, %0-2 ve %2-10 olarak belirlenmiştir. Aynı koşullarda 20 ppm B içeren çözeltiyle ise giderim verimleri %0-3 (1 bar), %0-6 (2 bar) ve %0-5 (4 bar) seviyelerinde gözlenmiştir. Bu sonuçlar, doğal pH koşullarında seramik membranın bor giderim etkinliğinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Düşük giderim etkinliğinin temel nedeni, pH<9,2 seviyelerinde borun moleküler borik asit formunda bulunmasıdır. Borik asit molekülleri membran gözenek çapına göre oldukça küçük olduğundan, süzüntü fazına doğrudan geçmekte ve membran tarafından tutulmamaktadır. Bu nedenle, bor giderim etkinliğinin artırılması için proses parametrelerinin optimize edilmesi ve membran yapısına yönelik modifikasyonların araştırılması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında, doğal pH ($\approx 5,2$) koşullarına ek olarak, karşılaştırmalı değerlendirme yapabilmek amacıyla pH 9,5 değerinde de deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda bor gideriminde kısmi artışlar gözlenmiştir. Örneğin, 10 ppm B çözeltisinde 1 bar basınçta %0-3, 4 bar basınçta ise %5-23 aralığında giderim elde edilmiştir. Benzer şekilde, 20 ppm B çözeltisinde giderim verimleri sırasıyla %0-5 (1 bar), %10-28 (2 bar) ve %4-27 (4 bar) seviyelerinde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, genel olarak pH artışının giderim üzerindeki etkisi sınırlı kalmıştır. Kullanılan seramik membranın (1 kDa) fine-UF özellik göstermesi ve gözenek boyutunun borik asit moleküllerine kıyasla büyük olması, bu sonucun temel nedenidir. pH yükseldikçe çözeltide borat iyonlarının ($B(OH)_4^-$) oranı artmakta, ancak bu durum giderim performansında kayda değer bir artış sağlamamaktadır. Doğal pH ($\approx 5,2$) ve pH 9,5 koşullarının karşılaştırılması, pH artışının bor giderim verimini sınırlı düzeyde etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek pH değerlerinde ($\approx 9,5$), çözeltide borat iyonlarının varlığı artmakta ve membran yüzeyinde negatif yüklenme meydana gelmekte olup, bu durum borat iyonları ile membran yüzeyi arasında

Tablo 4. Model bor çözeltisinden elde edilen süzöntü akı değerleri ve bor giderimleri (Permeate flux values and boron removal efficiencies obtained from the model boron solution).

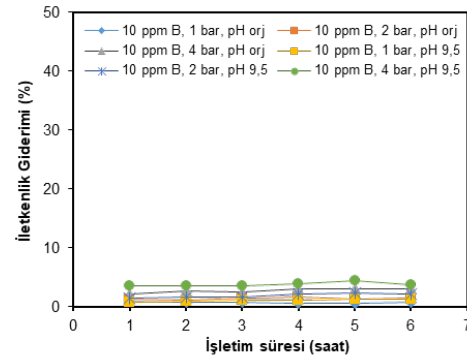
Deney No	TMP (bar)	Besleme Suyu pH	Bor (ppm)	Deney Süresi (saat)	Süzöntü akısı (L/m ² sa)	Bor Giderimi (%)
1	1	Doğal pH ≈5,2	10	1	5,8 (0.sa); 6,5 (1.sa)	9
				2	6,9	1
				4	7,3	1
2	2	Doğal pH ≈5,2	10	1	12 (0.sa); 14 (1.sa)	0
				2	14	0
				4	15	2
3	4	Doğal pH ≈5,2	10	1	22 (0.sa); 25 (1.sa)	10
				2	27	7
				4	28	2
4	1	9,5	10	1	4 (0.sa); 6 (1.sa)	1
				2	6	3
				4	7	0
5	2	9,5	10	1	13 (0.sa); 15 (1.sa)	19
				2	16	12
				4	17	4
6	4	9,5	10	1	30 (0.sa); 32 (1.sa)	19
				2	34	23
				4	36	5
7	1	Doğal pH ≈5,2	20	1	8 (0.sa); 9 (1.sa)	0
				2	9	3
				4	10	0
8	2	Doğal pH ≈5,2	20	1	15 (0.sa); 18 (1.sa)	0
				2	19	0
				4	20	6
9	4	Doğal pH ≈5,2	20	1	33 (0.sa); 35 (1.sa)	0
				2	37	0
				4	40	5
10	1	9,5	20	1	7 (0.sa); 8 (1.sa)	0
				2	9	5
				4	9	0
11	2	9,5	20	1	16 (0.sa); 18 (1.sa)	28
				2	19	10
				4	20	10
12	4	9,5	20	1	34 (0.sa); 37 (1.sa)	4
				2	39	11
				4	41	27

elektrostatik itici kuvvetlerin oluşmasına yol açmaktadır [26]. Dolayısıyla, seramik membran prosesiyle etkili bir bor giderimi sağlanabilmesi için membran yüzey yükü özelliklerinin yanı sıra pH optimizasyonu ve iyonik

etkileşimlerin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmaktadır.

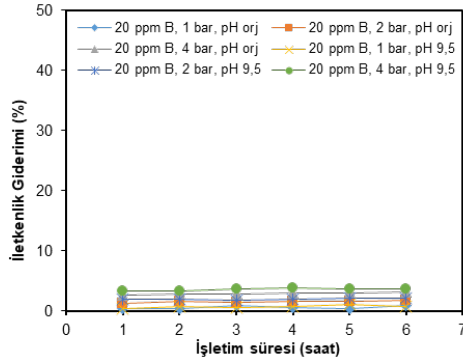
3.2. Model Jeotermal Su Örneği: Proses Parametrelerinin Akı, Tuz ve Bor Giderimine Etkileri (Model Geothermal Water Sample: Effects of Process Parameters on Flux, Salt, and Boron Removal)

Jeotermal sular, içerdikleri çözünmüş minerallerin konsantrasyonuna bağlı olarak yüksek iletkenlik değerlerine sahiptir. Bu çözünmüş madde konsantrasyonları; sıcaklık, gaz içeriği, jeotermal sistemin ısı kaynağı, kayaç tipi, geçirgenlik seviyesi, sistemin jeolojik yaşı ve deniz suyu girişi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu kapsamda, çalışmanın ikinci aşamasında seramik membranın model jeotermal sulardan tuz (iletkenlik) ve B giderim performansı değerlendirilmiştir. Deneyler sırasında her saat, hem besleme tankından hem de süzöntüden alınan numunelerde EC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sistem, 20±2°C'de sabitlenmiş olup, besleme tankı etrafına yerleştirilen su ceketi ile sıcaklık değişimleri en aza indirilmiştir. Besleme suyunun EC değeri doğal pH'ta (≈7,7) yaklaşık 10.650 µS/cm iken, pH 9,5'te yaklaşık 11.150 µS/cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4 ve Şekil 5'te farklı işletme koşullarında (B kons. basınç, pH) 6 saatlik filtrasyon sonunda elde edilen iletkenlik giderimleri sunulmaktadır.



Şekil 4. TMP'nin ve pH'nın iletkenlik giderimine etkisi (doğal pH≈7,7 ve pH 9,5; besleme debisi: 2,48 L/dak; bor konsantrasyonu: 10 ppm; membran gözenek çapı: 1 kDa; besleme suyu sıcaklığı: ≈20±2°C) (Effect of membrane pressure and pH on conductivity removal (natural pH ≈ 7.7 and pH 9.5; feed flow rate: 2.48 L/min; boron concentration: 10 ppm; membrane pore size: 1 kDa; feed water temperature: ≈ 20 ± 2°C)).

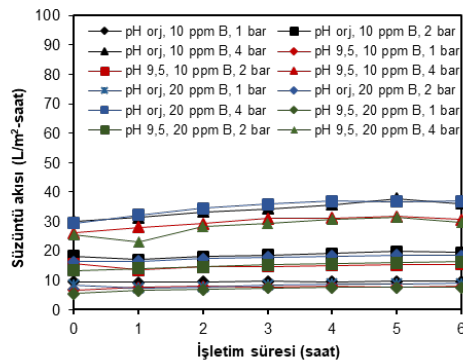
Doğal pH'ta (pH≈7,7) elde edilen iletkenlik giderimleri; 1 bar-10 ppm B koşulunda %0,6-1, 2 bar-10 ppm B'da %1-2 ve 4 bar-10 ppm B'da %2-3 aralığında bulunmuştur. Doğal pH ve 20 ppm B konsantrasyonunda elde edilen iletkenlik giderimleri ise; 1 bar basınçta %0,4-0,9, 4 bar basınçta ise %2,6-3 aralığında ölçülmüştür. pH 9,5'te gerçekleştirilen deneylerde ise; 10 ppm B konsantrasyonunda %0,8-1 (1 bar), %1-2 (2 bar) ve %3-4 (4 bar); 20 ppm B konsantrasyonunda %0,4-1 (1 bar), %1,8-2 (2 bar) ve %3-4 (4 bar) giderim değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 5. TMP'nin ve pH'nın iletkenlik giderimine etkisi (doğal pH≈7,7 ve pH 9,5; besleme debisi: 2,48 L/dak; bor konsantrasyonu: 20 ppm; membran gözenek çapı: 1 kDa; besleme suyu sıcaklığı: ≈20±2°C) (Effect of membrane pressure and pH on conductivity removal (natural pH≈7.7 and pH 9.5; feed flow rate: 2.48 L/min; boron concentration: 20 ppm; membrane pore size: 1 kDa; feed water temperature: ≈ 20 ± 2°C)).

Bu bulgular, 1 kDa gibi geniş gözenek boyutuna sahip membranların çözünmüş tuzları tutmada yetersiz olduğunu ortaya koymuştur. Farklı basınç ve konsantrasyon koşullarında iletkenlik giderimlerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Ayrıca yüksek tuzluluk seviyesinin, süzöntü akısı ve B giderimi üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Tarımsal sulama açısından kritik bir parametre olan EC değerleri, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen sınıflarla karşılaştırıldığında (EC<700 µS/cm düşük, 700-3000 µS/cm orta, >3000 µS/cm yüksek), süzöntü suyunun standartlarla uyumlu olmadığı görülmüştür [27]. Bu nedenle, elde edilen ürün suyunun tarımsal sulamada kullanılmasının bitki gelişimi, ürün verimi ve toprak özellikleri üzerinde olumsuz etkilere yol açacağı sonucuna varılmıştır.

Seramik membranlarda süzöntü akısını belirleyen temel faktör TMP'dir. Polimerik membranlardan farklı olarak, seramik membranlar yapısal olarak sıkışma ya da şişme etkisi göstermediğinden, süzöntü akısının basınçla doğrusal artış göstermesi beklenmektedir [21]. Benzer şekilde, Şekil 6'da doğal pH (≈7,7) ve 10 ppm B konsantrasyonunda yapılan testlerde süzöntü akıları; 1 bar basınçta 9-10 L/m²sa, 2 bar basınçta 17-20 L/m²sa ve 4 bar basınçta 30-36 L/m²sa olarak ölçülmüştür.



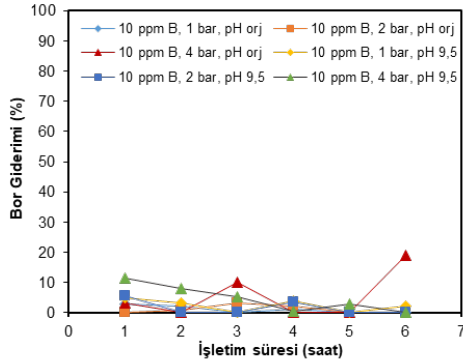
Şekil 6. pH'nın süzöntü akısına etkisi (besleme debisi: 2,48 L/dak; membran gözenek çapı: 1 kDa; besleme suyu sıcaklığı: ≈20±2°C) (Effect of pH on permeate flux (feed flow rate: 2.48 L/min; membrane pore size: 1 kDa; feed water temperature: ≈ 20 ± 2°C)).

20 ppm B konsantrasyonunda ise aynı basınç aralıklarında 7-9, 16-19 ve 29-37 L/m²sa değerleri kaydedilmiştir. Bu veriler, bor konsantrasyonunun akı üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığını göstermektedir. pH 9,5'te ise 10 ppm B içeren çözeltide süzöntü akıları 7-8 (1 bar), 14-16 (2 bar) ve 26- 32 L/m²sa; 20 ppm B'de ise 5-8, 13-16 ve 23-31 L/m²sa aralıklarında bulunmuştur. Her iki pH koşulunda da basıncın 1 bar'dan 4 bar'a yükseltilmesiyle süzöntü akısında belirgin artış gözlemlenmiştir. Bu durum, literatürde Delikanlı [28] tarafından, basınç artışıyla membran yüzeyinden birim zamanda daha fazla suyun geçmesiyle açıklanmaktadır.

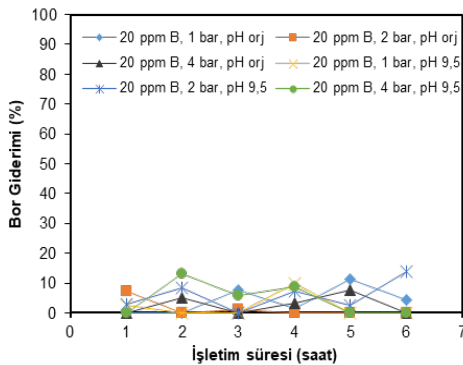
Membran proseslerinde uzun vadeli performans için tıkanma kontrolü büyük önem taşımaktadır. Tıkanma, organik/inorganik maddelerin birikimi, mikroorganizma gelişimi veya kimyasal reaksiyonlarla ortaya çıkabilen karmaşık bir olgudur [29]. Bu çalışmada, model jeotermal sularda pH'nın doğal değerinden (≈7,7) 9,5'e yükseltilmesiyle süzöntü akısında sınırlı bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, NaOH ile pH ayarlaması sırasında çözelti bileşiminin değişmesi ve bazı iyonların membran yüzeyinde birikimi ile ilişkilendirilmiştir. Benzer şekilde Yang vd. [30], yüksek akı değerlerinin seramik membranlarda daha yoğun tıkanmaya yol açabileceğini bildirmiştir. Kimyasal temizlik sonrası membran performansının yeniden sağlandığını rapor etmişlerdir. Shi vd. [31] ise meyve suyu filtrasyonunda pH artışıyla akıların düştüğünü, bu durumun çözeltide oluşan kalsiyum fosfat partiküllerinin membran davranışını etkilemesiyle ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bir diğer çalışmada Sentana vd. [32], doğal sulardan organik madde giderimi için 450 Da (NF450) ve 1000 Da (NF1000) seramik NF membranları kullanarak, basınç, iletkenlik ve pH parametrelerinin filtrasyon verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, iletkenlik arttıkça membran akısının azaldığı, özellikle NF1000 membranında akı kaybı ile iletkenlik arasında bir ilişki olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca iletkenlik artışının dezenfeksiyon yan ürünleri oluşum potansiyelini azalttığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde ise belirgin bir tıkanma problemi yaşanmamıştır. Her test sonrasında membran saf su ile yıkanmış, deneyler kesintisiz sürdürülmüş ve deneylerin tamamlanmasının ardından NaOH ve HNO₃ içeren çözeltiyle kimyasal temizlik uygulanmıştır. Ayrıca pH ayarlaması amacıyla kullanılan NaOH'ın, membran gözeneklerinde temizlik etkisi oluşturarak tıkanmayı sınırlamış olabileceği düşünülmektedir. Bu etki, membranın performansını koruyarak uzun süreli kullanımda tıkanma eğilimini azaltıcı bir katkı sağlamıştır.

Seramik membranın bor giderim performansı, model jeotermal su örnekleri ile yürütülen filtrasyon deneyleriyle incelenmiştir. Filtrasyon verimliliği, besleme tankı ve süzöntü hattından düzenli aralıklarla alınan numunelerde ölçülen bor konsantrasyonlarının karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Çalışmada, seramik membran ile iki farklı pH seviyesi (doğal pH≈7,7 ve pH 9,5), iki B konsantrasyonu (10 ppm ve

20 ppm) ve üç farklı işletme basıncı (1, 2 ve 4 bar) altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen B giderim verileri Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmaktadır.



Şekil 7. Farklı işletim koşullarının bor giderimi üzerine etkisi (doğal pH≈7,7 ve pH 9,5; besleme debisi: 2,48 L/dak; bor konsantrasyonu: 10 ppm B; TMP: 1, 2 ve 4 bar; membran gözenek çapı: 1 kDa; besleme suyu sıcaklığı: ≈20±2°C) (Effect of different operating conditions on boron removal (natural pH ≈ 7.7 and pH 9.5; feed flow rate: 2.48 L/min; boron concentration: 10 ppm B; membrane pressure: 1, 2, and 4 bar; membrane pore size: 1 kDa; feed water temperature: ≈ 20 ± 2°C)).



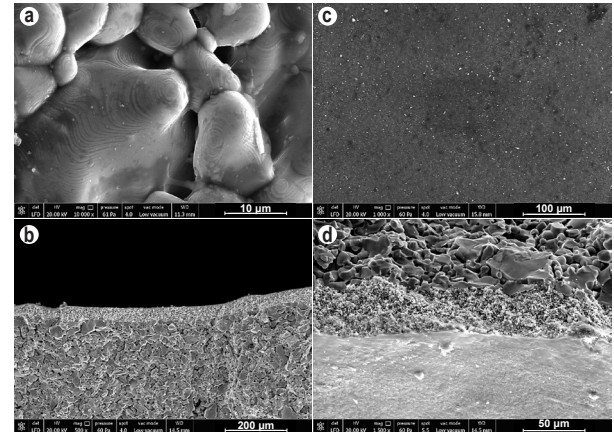
Şekil 8. Farklı işletim koşullarının bor giderimi üzerine etkisi (doğal pH≈7,7 ve pH: 9,5; besleme debisi: 2,48 L/dak; bor konsantrasyonu: 20 ppm B; TMP: 1, 2 ve 4 bar; membran gözenek çapı: 1 kDa; besleme suyu sıcaklığı: ≈20±2°C) (Effect of different operating conditions on boron removal (natural pH ≈ 7.7 and pH 9.5; feed flow rate: 2.48 L/min; boron concentration: 20 ppm B; membrane pressure: 1, 2, and 4 bar; membrane pore size: 1 kDa; feed water temperature: ≈ 20 ± 2°C)).

Buna göre, 10 ppm B içeren çözeltilerde giderim verimleri; 1, 2 ve 4 bar basınçlarda sırasıyla %0-3, %0-3 ve %0-10 aralığında ölçülmüştür. pH 9,5'e ayarlanan koşullarda ise benzer sonuçlar elde edilmiştir (1 bar: %0-5; 2 bar: %0-6; 4 bar: %0-11). Bu sonuçlar, kullanılan seramik membranın geniş gözenek çapı nedeniyle çözeltide baskın formda bulunan borik asit moleküllerini tutamamasına bağlanmaktadır. 20 ppm B içeren çözeltilerle yapılan deneylerde ise (Şekil 8), farklı işletme basınçları ve pH koşullarında elde edilen giderim verimlerinin, 10 ppm B içeren çözeltilerle benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, elde edilen bor giderim verimleri, tarımsal sulama suları için izin verilen maksimum bor konsantrasyonlarının oldukça üzerinde kalmaktadır. Bu nedenle, belirlenen koşullarda elde edilen süzuntu suyunun doğrudan sulama amacıyla kullanılmasının uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, deneyler boyunca elde edilen kararlı süzuntu akıları ve belirgin bir tıkanma eğiliminin gözlenmemesi, seramik membranların hibrit arıtma proseslerinde veya ön arıtma kademelerinde potansiyel kullanım alanına sahip olabileceğini göstermektedir. Bu açıdan çalışma, modifiye edilmemiş ticari fine-UF seramik membranların teknik performans sınırlarını ortaya koyan bir temel mühendislik değerlendirmesi niteliği taşımaktadır.

3.3. Membran Yüzey Morfolojisi ve Elementel Analiz (SEM, SEM-EDX) (Membrane Surface Morphology and Elemental Analysis (SEM, SEM-EDX))

DeneySEL çalışmalarda kullanılan 1 kDa gözenek boyutuna sahip TiO₂ esaslı seramik membranın yüzey morfolojisi, FEI QUANTA FEG 250 model SEM cihazı ile incelenmiştir. Şekil 9'da sunulan kesit görüntüleri, membranın makro gözenekli destek tabakası, mezo gözenekli ara tabaka ve seçici aktif üst tabakadan oluşan üç katmanlı tipik asimetrik yapısını göstermektedir.

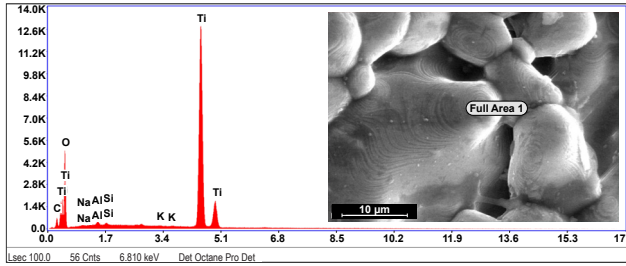


Şekil 9. a) Seramik membran dış yüzey SEM görüntüsü-10000x büyütme b) aktif yüzey SEM görüntüsü-1000x büyütme c) yan kesit SEM görüntüsü-500x büyütme d) yan kesit SEM görüntüsü-1500x büyütme ((a) SEM image of the outer surface of the ceramic membrane at 10000× magnification (b) SEM image of the active surface at 1000× magnification (c) Cross-sectional SEM image at 500× magnification (d) Cross-sectional SEM image at 1500× magnification).

Destek tabakası (Şekil 9a), geniş gözenekleri sayesinde mekanik dayanım sağlarken; ara tabaka madde geçişini sınırlamakta ve aktif tabaka ise daha küçük gözenekleriyle kirlenmelerin tutulmasını mümkün kılmaktadır [33]. Görüntüler, membranın iç ve dış yüzeylerinde çatlak veya yapısal kusur bulunmadığını, gözeneklerin ise homojen dağılım sergilediğini göstermektedir. Gözenek boyutu, membranın geçirgenlik ve ayırma verimliliğini belirleyen kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır [34]. Benzer şekilde, Das vd. [35], geliştirdikleri MF seramik membranlarda çatlak oluşmadığını ve bu özelliğin membranları MF uygulamaları için elverişli hale getirdiğini rapor etmiştir. Öte yandan Foorginezhad vd. [36], eksik sinterlemenin büyük çatlaklara yol açarak membran mukavemetini ve bütünlüğünü olumsuz etkileyebileceğini vurgulamıştır. Şekil 9b'de

aktif filtrasyon yüzey görüntüsü, ince ve homojen yapı bir tabakanın varlığını ortaya koymaktadır. Düşük yüzey pürüzlülüğü ve mikro gözenekli yapı, membranın seçicilik ve geçirgenlik özellikleri açısından önemlidir. Şekil 9c ve 9d'de verilen 500x-1500x büyütme yan kesit görüntüleri ise üç katmanlı yapıyı açıkça doğrulamaktadır: TiO_2 esaslı aktif tabaka, ara tabaka ve destek tabakası. İnce ve kompakt aktif tabakanın varlığı, düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerin tutulmasında belirleyici rol oynamaktadır. Dutoulié vd. [37], benzer bir TiO_2 esaslı membranda aktif tabakanın, ısı işlem sırasında nanopartiküllerin birleşerek kümeler oluşturması sonucu meydana geldiğini bildirmiştir. TiO_2 membranların yüksek geçirgenlik, tıkanmaya karşı direnç ve antibakteriyel özellikler gibi avantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Ayrıca, yüksek kimyasal kararlılıkları sayesinde aşındırıcı ortamlarda su arıtımı için uygunlukları çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır [38]. Sonuç olarak, gerçekleştirilen SEM analizleri, çalışmada kullanılan seramik membranın başarılı bir şekilde üretildiğini; iyi sinterlenmiş, homojen gözenek dağılımına sahip, çatlak içermeyen ve asimetrik bir yapıda olduğunu göstermektedir.

1 kDa gözenek boyutuna sahip seramik membranın dış yüzey (destek tabakası), aktif tabaka ve kesit bölgelerine ait elementel bileşimi SEM-EDX analizi ile karakterize edilmiştir. Şekil 10'da sunulan SEM-EDX spektrumu, kullanılan seramik membranın elementel bileşimini göstermektedir.



Şekil 10. Seramik membran destek tabakasının SEM-EDX spektrumu (Full Area 1) (SEM-EDX spectrum of the ceramic membrane support layer (Full Area 1)).

Spektrumda en belirgin piklerin titanyum (Ti, %47,7) ve oksijene (O, %45,52) ait olması, membranın temel yapısının TiO_2 esaslı olduğunu doğrulamaktadır. Daha düşük yoğunluklarda sodyum (Na, %1,17), alüminyum (Al, %0,49), silisyum (Si, %0,20) ve potasyum (K, %0,09) elementlerine ait pikler de tespit edilmiştir. Aktif tabaka bölgesinde ise eser miktarlarda kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), Si, K ve Na gibi elementler gözlenmiştir. Membranın aktif yüzeyinde gözlemlenen bu elementlerin, jeotermal suyun bileşiminden kaynaklanan birikimlerle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Elde edilen bulgular, jeotermal suyun karakterizasyonu sırasında elde edilen sonuçlarla da uyumludur. Ayrıca membranın destek ve ara tabakalarında Ti ve O elementlerinin yüksek yoğunlukta bulunması, kullanılan membranın TiO_2 esaslı seramik bir malzemeden üretildiğini güçlü biçimde desteklemektedir.

3.4. İşletme Koşullarının Optimizasyonu ve Ekonomik Değerlendirme (Optimization of Operating Conditions and Economic Evaluation)

Bu çalışmada seramik membran prosesine ait ekonomik analiz; toplam membran yatırım maliyeti, kimyasal temizlik maliyetleri ve enerji tüketimi dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Tasarlanan sistemin hem teknik performansı hem de uzun dönemli ekonomik sürdürülebilirliği bütüncül bir yaklaşımla ele alınmış ve ayrıntılı hesaplamalar sunulmuştur. Tablo 5'te verilen tasarım parametreleri temel alınarak, seramik membran prosesinin uygulanabilirliğini ortaya koymak amacıyla maliyet hesapları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. Seramik membran sisteminin ekonomik değerlendirmesi (Economic evaluation of the ceramic membrane system).

Parametre	Değer
Sistem kapasitesi	150 m ³ /gün
Ortalama membran akısı (LMH)	34 LMH
Çalışma basıncı	4 bar
Membran alanı (toplam)	184 m ²
Birim membran maliyeti	63.000 TL/m ²
Toplam membran yatırım maliyeti	11.715.648 TL
Temizlik periyodu	14 günde bir
Toplam temizlik sayısı (20 yıl)	520
Toplam kimyasal temizlik maliyeti (20 yıl)	293.032 TL
Toplam enerji maliyeti (tam yük-20 yıl)	2.119.568 TL

Sistem tasarımında günlük 150 m³/gün debi hedeflenmiş ve bu debiyi sağlayacak toplam membran alanı hesaplanmıştır. Laboratuvar ölçeğinde jeotermal su ile yürütülen deneylerde, 4 bar işletme basıncında elde edilen ortalama 34 LMH süzöntü akısı tasarım kriteri olarak kabul edilmiştir. Laboratuvar membranlarının sınırlı aktif yüzey alanına sahip olması nedeniyle mühendislik boyutlandırmasında ticari membran modülleri referans alınmış; bu doğrultuda Bonatech [39] tarafından sunulan BNCM3-2-M modeli esas alınmıştır. Bu modül için bir membran elemanı 0,286 m², bir filtrasyon seti ise 1,70 m² aktif alan sunmaktadır. Hedeflenen debi için teorik membran alanı 183,8 m² olarak hesaplanmış ve tasarım güvenliği açısından toplam 184 m² aktif alan kullanılmıştır. Tasarım debisini karşılayacak toplam set sayısı ise 108 olarak belirlenmiştir. Membran maliyetlerinin hesaplanmasında Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası'nın 14.11.2025 tarihli döviz kuru (1 USD ≈ 42 TL) esas alınmıştır [40]. Literatürde seramik membranlar için birim maliyetlerin 1.500-3.000 USD/m², modüller için ise 16-32 USD/m² aralığında değiştiği bildirilmektedir [41]. Bu çalışmada alt sınırlar dikkate alınmış; 1 m² membran için 63.000 TL (1.500 USD) ve modül için 672 TL (16 USD) birim fiyat kullanılmıştır. Toplam 184 m² aktif alan için membran maliyeti 11.592.000 TL (276.000 USD) ve modül maliyeti 123.648 TL (2.944 USD) olarak

hesaplanmış; böylece toplam membran yatırım maliyeti 11.715.648 TL (278.944 USD) olarak belirlenmiştir.

Sistemin işletmeye alınmasından sonra performansın korunabilmesi için düzenli kimyasal temizlik zorunludur. Çalışmada, 14 günde bir temizlik yapılacağı ve sistem ömrünün 20 yıl olacağı varsayılmıştır. Bu durumda toplam 520 temizlik döngüsü gerçekleştirilecektir. Temizlik sırasında NaOH (15 g/L) ve HNO₃ (1,5 mL/L) kullanılmaktadır. Güncel piyasa fiyatlarına göre 1 kg NaOH 37,8 TL (0,9 USD), 1 kg HNO₃ ise 20,1 TL (0,48 USD)'dir [42]. Endüstriyel membran sistemlerinde boru hatları içindeki hacim göz önüne alınarak 1 m² membran başına 5 L temizlik çözeltisi kullanıldığı varsayılmıştır. Buna göre bir temizlik döngüsünün kimyasal maliyeti 563,5 TL (13,41 USD) olup, 20 yıllık toplam maliyet yaklaşık 293.032 TL (6.977 USD) olarak hesaplanmıştır. Jeotermal sularda temizleme periyodu genellikle 14 gün olmakla birlikte, suyun silika, kalsiyum, demir ve organik madde konsantrasyonlarına bağlı olarak bu süre değişebilir. Antiskalant kullanımı tortu oluşumunu sınırlandırarak temizlik sıklığını azaltabilir ve işletme performansını stabilize edebilir.

Sistemin önemli işletme giderlerinden biri enerji tüketimidir. Enerji maliyeti analizinde, 2,3 kW gücünde soğutmalı bir elektrik motorunun kullanıldığı kabul edilmiştir [39]. Motorun tam yükte çalışması halinde yıllık enerji tüketimi yaklaşık 20.148 kWh olup, sanayi tarifesine göre (5,26 TL/kWh) [43] yıllık maliyet 105.978,4 TL (2.523,3 USD) olmaktadır. Enerji tüketiminin pratikte daha düşük olacağı göz önüne alınarak, motorun ortalama %80 yük faktörüyle çalıştığı varsayılmış ve bu durumda yıllık enerji maliyeti 84.782,7 TL (2.018,6 USD) olarak belirlenmiştir. Sistemin 20 yıllık işletme süresi boyunca toplam enerji maliyeti, tam yükte 2.119.568 TL (50.465,9 USD), %80 yük faktöründe ise 1.695.654 TL (40.372,7 USD) olarak hesaplanmıştır. Bu analizlerde yalnızca işletme basıncı ve süzöntü akısı dikkate alınmış olup, gerçek işletmede geri devir debisi, boru kayıpları, bağlantı elemanlarından kaynaklanan yerel kayıplar ve modül içi akış kanallarındaki hidrolik direnç hesaba katılmamıştır. Dolayısıyla verilen değerler teorik minimum enerji gereksinimlerini yansıtmaktadır. Gerçekçi bir mühendislik hesaplaması için geri devir oranını ve tüm hidrolik kayıpları içeren ayrıntılı bir tasarım gereklidir. Bu çalışmada sunulan 20 yıllık enerji ve kimyasal temizlik maliyetleri, mevcut ekonomik verilerin sabit kabul edildiği basitleştirilmiş bir projeksiyon yaklaşımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda paranın zaman değeri, enerji fiyat değişimleri ve iskonto oranı gibi ekonomik parametreler dikkate alınmamıştır. Bu nedenle sonuçlar ayrıntılı bir Net Bugünkü Değer (NPV) analizinden ziyade, prosesin uzun dönemli maliyet eğilimini ortaya koyan bir ön fizibilite değerlendirmesi olarak yorumlanmalıdır. Gerçek saha uygulamalarında ise yatırım kararlarının dinamik NPV analizleri ile desteklenmesi önem taşımaktadır.

Bulgular, seramik membranların yüksek performansına rağmen özellikle ilk yatırım maliyeti ve enerji tüketiminin ekonomik planlama açısından kritik olduğunu göstermektedir. Endüstriyel ölçekte, hedef debiye uygun daha düşük güçlü sirkülasyon ve dozaj pompalarının seçilmesi, sistemin toplam enerji kullanımını önemli ölçüde azaltabilir. Benzer şekilde, kimyasal temizlik aşamalarında endüstriyel saflıkta kimyasalların tercih edilmesi ve proses tasarımı enerji verimliliğini artıran yaklaşımların uygulanması işletme maliyetlerini düşürebilir. Buna ek olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegre edilmesi ve atık ısının geri kazanılması gibi sürdürülebilir uygulamalar, proses ekonomisinin güçlendirilmesine katkıda bulunacaktır. Genel olarak değerlendirildiğinde, seramik membranların teknik açıdan sunduğu avantajların pratikte karşılık bulabilmesi, sistemin uzun vadeli maliyet etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle ekonomik analiz, proses tasarımının önemli ve kritik bir bileşeni olarak ele alınmalıdır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tekno-ekonomik değerlendirme, modifiye edilmemiş 1 kDa seramik membranın tek başına nihai bir bor giderim prosesi olarak doğrudan uygulanabilir olduğunu göstermek amacıyla yapılmamıştır. Deneysel sonuçlar, mevcut membranın bor ve iletkenlik parametrelerini sulama suyu limitlerine düşürmekte yetersiz kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, deneyler boyunca elde edilen kararlı akı davranışı, düşük tıkanma eğilimi ve seramik membranların yüksek kimyasal/mekanik dayanımı; bu teknolojinin hibrit prosesler veya ön arıtma uygulamaları kapsamında değerlendirilebileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle gerçekleştirilen ekonomik analiz, teknolojinin mevcut teknik performansı altındaki yatırım, işletme ve enerji gereksinimlerini ortaya koyan bir mühendislik değerlendirmesi olarak ele alınmıştır. Elde edilen sonuçların, gelecekte geliştirilecek modifiye seramik membran sistemleri ve hibrit proses tasarımları için referans mühendislik verileri sağlayacağı düşünülmektedir.

4. Seramik Membran Teknolojisi ile Jeotermal Su Arıtımı: Bor Geri Kazanımı, Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilirlik Perspektifi (Geothermal Water Treatment Using Ceramic Membrane Technology: A Perspective on Boron Recovery, Circular Economy, and Sustainability)

Model bor çözeltileri ve model jeotermal su örnekleri ile yürütülen deneysel çalışmalar, B gideriminin oldukça zor bir süreç olduğunu ortaya koymuştur. Jeotermal sularda borun doğal pH koşullarında yüksüz borik asit formunda bulunması, membran tarafından tutulmasını zorlaştırmakta ve giderim verimini sınırlamaktadır. Ayrıca 1 kDa gözenek çapına sahip seramik membran, hem borik asit moleküllerini hem de borat iyonlarını etkin şekilde ayırmak için yetersiz kalmıştır. Bununla birlikte, seramik membranların sunduğu yüksek akı değerleri, kimyasal ve mekanik dayanıklılık, uzun hizmet ömrü ve yeniden kullanılabilirlik özellikleri jeotermal su

arıtımında önemli avantajlar oluşturmaktadır. Özellikle termal kullanım sonrası soğutulmuş jeotermal suların arıtımı açısından saha uygulamalarına uygun oldukları değerlendirilmektedir. Çalışma bulguları, yüksek bor giderim verimlerinin elde edilememesine rağmen, pH optimizasyonu ve uygun işletme koşullarının sağlanmasıyla performansın iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, seramik membran teknolojisinin geliştirilmesi ve gelecekte yapılacak araştırmalar için yol gösterici niteliktedir.

Döngüsel ekonomi, atık oluşumunun en aza indirilmesi ve kaynakların yeniden kullanımı ile geri dönüşümünün en üst düzeye çıkarılmasını hedefleyen ekonomik bir sistemdir [10]. Bu yaklaşım, bor gibi kritik elementlerin atık sulardan geri kazanımıyla hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlamaktadır. Bor geri kazanımı, cam (%47), tarım (%16), seramik (%15) ve deterjan (%2) gibi sektörlerdeki yüksek tüketimi karşılayarak hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli katkılar sağlayabilir [44]. Bor, doğal sularda düşük konsantrasyonlarda bulunmakla birlikte, deterjan, gübre, pestisit, ilaç ve kimya endüstrilerinden kaynaklanan atık sular yoluyla çevreye önemli miktarda yayılmaktadır. Artan endüstriyel talep ve borun 2014 yılından itibaren Avrupa'da "kritik element" olarak sınıflandırılması, piyasa değerini daha da yükseltmiştir [45]. Ancak, birincil cevherlerden bor üretimi yüksek enerji gereksinimi, yoğun kimyasal kullanımı ve önemli çevresel etkileri nedeniyle oldukça maliyetli bir prosestir. Bu nedenle, ikincil kaynaklardan borun geri kazanımı hem çevresel yükün azaltılması hem de sürdürülebilir hammadde tedarikinin (mıknatıs, cam elyafı, deterjan ve gübre gibi ürünler) sağlanması açısından önemlidir [46]. Bu bağlamda, seramik membran teknolojisi jeotermal sulardan bor gideriminde sunduğu yüksek dayanıklılık, uzun ömür ve yeniden kullanılabilirlik avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Çalışmadan elde edilen bulgular, bor giderim veriminin sınırlı olduğunu ortaya koysa da, proses optimizasyonu ve membran modifikasyonlarıyla performansın artırılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca, arıtma süreci sonunda oluşan borca zengin konsantrasyon, döngüsel ekonomi yaklaşımıyla cam-seramik, gübre ve deterjan gibi bor türevli ürünlerin üretiminde hammadde olarak değerlendirilebilir. Böylece borun çevresel bir kirlenici olmaktan çıkarak, ekonomik değeri yüksek bir kaynağa dönüştürülmesi mümkün hale gelmektedir.

Sürdürülebilir arıtma uygulamaları, kirlenici kabul edilebilir seviyelere indirilerek içme suyu, tarım ve sanayi için güvenli su teminini sağlamakta; halk sağlığını ve ekosistemleri korumaktadır. Ayrıca, su geri kazanımını arttırmak ve su kullanımını optimize etmek yoluyla mevcut su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunmakta ve küresel ölçekte giderek artan su kıtlığı sorunlarının azaltılmasına önemli ölçüde destek sağlamaktadır [11]. Seramik membranların sürdürülebilirliği ise yüksek kimyasal ve mekanik dayanıklılıkları, uzun ömürleri ve yenilenebilir yapılarından kaynaklanmaktadır. Geri yıkama ve kimyasal temizleme gibi etkin temizlik yöntemlerine

uyum sağlamaları, tıkanmaların giderilmesine ve membran performansının yeniden kazanılmasına olanak tanımaktadır. Böylece, membran kullanım ömrü uzarken atık miktarı da azalmaktadır [47]. Buna ek olarak, seramik membranların bol bulunan ve çevre dostu hammaddelerden üretilebilmesi, üretim süreçlerinde enerji tüketiminin ve atık oluşumunun azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Tüm bu özellikler, çevresel ayak izinin minimize edilmesine katkıda bulunmakta ve seramik membranları sürdürülebilir su ve atık su arıtım uygulamaları için ideal bir teknoloji haline getirmektedir [48].

Ekonomik değerlendirmeler, seramik membran sistemlerinin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, yüksek akı performansı, uzun hizmet ömrü ve dayanıklılık özellikleri sayesinde uzun vadede avantaj sağlayabildiğini göstermektedir. Nitekim Serhiienko vd. [49], seramik membranların polimerik membranlara kıyasla 3-5 kat daha yüksek maliyete sahip olduğunu, ancak daha yüksek geçirgenlikleri ve uzun kullanım ömürleriyle bu dezavantajın kısmen dengelendiğini belirtmektedir. Bununla birlikte, seramik membran sistemlerinin toplam işletme maliyetlerinde enerji tüketimi, pompa gücü, temizlik kimyasalları ve ilk yatırım giderleri belirleyici kalemler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji entegrasyonu (güneş, jeotermal, atık ısı destekli sistemler), temizlik sıklığının azaltılması ve ön arıtma süreçlerinin geliştirilmesi ekonomik sürdürülebilirliği artıracak stratejiler olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, seramik membran teknolojisi ile jeotermal suların arıtımı, yalnızca çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamakla kalmayıp, borun geri kazanımı yoluyla ekonomik değer sağlaması açısından da önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu teknoloji, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda, jeotermal kaynakların daha verimli ve çevre dostu olarak değerlendirilmesine katkı sağlayabilecek yenilikçi bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Gelecek çalışmalarda, membran yüzey modifikasyonları, hibrit proseslerin entegrasyonu ve enerji geri kazanımı gibi stratejilerle teknolojinin hem performans hem de sürdürülebilirlik boyutunun güçlendirilmesi önerilmektedir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Küresel ölçekte artan iklim değişikliği ve su kıtlığı sorunları, alternatif su kaynaklarına olan ihtiyacı artırmıştır. Bu bağlamda jeotermal sular, potansiyel bir kaynak olarak öne çıkmakla birlikte yüksek konsantrasyonda B içermektedir. Dolayısıyla, jeotermal suların doğrudan kullanımı çevresel ve tarımsal açıdan risk oluşturmakta, güvenli bir şekilde değerlendirilebilmeleri için etkin arıtma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, 1 kDa gözenek boyutuna sahip seramik membran kullanılarak model bor çözeltileri ve model jeotermal sulardan bor giderim performansı incelenmiştir. DeneySEL bulgular, seramik membranın yüksek süzünü akısı sağladığını ancak, bor gideriminin sınırlı kaldığını göstermiştir. Borun küçük moleküler çapına rağmen, bu çalışmada kullanılan

1 kDa MWCO değeri, günümüzde ticari ölçekte temin edilebilen tübüler seramik membranlar için ulaşılabilir en düşük kesme sınırını temsil etmektedir. Bu durum, modifikasyon uygulanmamış ticari seramik membranların bor giderimine yönelik teknik sınırlarını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar sonucunda, model bor çözeltilerinde, doğal pH ($\approx 5,2$) koşullarında süzüntü akıları 1 bar basınçta 6-7/L m²sa, 2 bar basınçta 12-15 L/m²sa ve 4 bar basınçta 22-28 L/m²sa olarak elde edilmiş; bor giderimi ise %0-10 aralığında kalmıştır. pH 9,5'e yükseltildiğinde akılar 30-36 L/m²sa seviyelerine ulaşmış, giderim ise %5-23'e çıkmıştır. En yüksek akı değeri 20 ppm B konsantrasyonunda, pH 9,5 ve 4 bar basınç altında 41 L/m²sa olarak elde edilmiştir.

Model jeotermal sularda elde edilen bulgular da benzer eğilimler göstermiştir. Doğal pH ($\approx 7,7$) ve 4 bar basınçta süzüntü akısı 30-36 L/m²sa iken, pH 9,5 koşullarında 26-32 L/m²sa değerlerinde tespit edilmiştir. Bor giderimi, farklı pH, basınç ve konsantrasyon koşullarında %0-11 aralığında kalmıştır. Çözünmüş tuzların seramik membran tarafından tutulamadığı ve süzüntü suyu EC değerlerinin (10.650-11.150 $\mu\text{S/cm}$) tarımsal sulama suyu standartlarının çok üzerinde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kullanılan 1 kDa seramik membranın borik asit ve borat iyonlarını ayırmada yetersiz kaldığını ve sulama suyu kullanımı açısından uygun kalite sağlayamadığını ortaya koymuştur. SEM ve SEM-EDX analizleri ise membranın asimetrik bir yapıya sahip olduğunu (destek tabakası, ara tabaka, aktif yüzey), homojen gözenek dağılımını ve TiO₂ esaslı bileşimini doğrulamıştır.

Ekonomik değerlendirmeler, 150 m³/gün kapasiteli bir sistem tasarımı esas alınarak gerçekleştirilmiş ve 4 bar işletme basıncında elde edilen ortalama 34 LMH akı değeri temel kabul edilmiştir. Bu doğrultuda yapılan hesaplamalar, toplam membran yatırım maliyetinin 11.715.648 TL (278.944 USD) olduğunu; 20 yıllık işletim sürecinde enerji tüketim giderlerinin yaklaşık 2.119.568 TL (50.465,9 USD-tam yük) ve kimyasal temizlik maliyetlerinin 293.032 TL (6.977 USD) seviyelerine ulaşabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar, seramik membran uygulamalarında özellikle ilk yatırım ve enerji tüketiminin ekonomik sürdürülebilirlik açısından belirleyici unsurlar olduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut koşullar altında, modifiye edilmemiş 1 kDa seramik membranın jeotermal sulardan sulama suyu kalitesinde yeterli bor giderimi sağlayamadığı belirlenmiştir. Bu nedenle prosesin mevcut haliyle nihai bir bor giderim sistemi olarak değerlendirilmesi sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte, elde edilen kararlı akı değerleri ve düşük tıkanma eğilimi, seramik membranların hibrit prosesler ve ön arıtma uygulamaları için uygun bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Özellikle pH kontrolü, membran yüzey modifikasyonları, uygun ön arıtma adımları ve adsorpsiyon-membran entegrasyonu gibi hibrit proses yaklaşımlarının sistem etkinliğini artırabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, proses sonunda oluşan bor açısından zengin konsantrasyonun döngüsel

ekonomi yaklaşımıyla değerlendirilmesi çevresel ve ekonomik açıdan ek faydalar sağlayabilir. Konsantrasyon biriken borun cam-seramik, gübre ve deterjan üretimi gibi sektörlerde hammadde olarak yeniden kullanılması, hem atık oluşumunu azaltmakta hem de kaynak verimliliğini arttırmaktadır. Bu durum, borun bir kirletici olmaktan çıkıp ekonomik değeri yüksek bir bileşene dönüşmesini sağlayarak sürdürülebilir su yönetimine katkı sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda, membran modifikasyonları, enerji geri kazanım teknikleri, hibrit proses konfigürasyonları ve işletme koşullarının iyileştirilmesine yönelik çalışmaların, hem bor giderim verimini hem de sistemin genel ekonomik performansını arttırabileceği öngörülmektedir.

4. Yazar Katkısı Beyanı (Author Contribution Statement)

Saadet Acar Can: Kavramsallaştırma, Biçimsel analiz, Metodoloji, Araştırma, Orijinal taslak yazma

Bilgehan İker Harman: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Biçimsel analiz, İnceleme, Yazma ve Düzenleme

Hasan Köseoğlu: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Biçimsel analiz, İnceleme, Yazma ve Düzenleme

5. Teşekkürler (Acknowledgement)

Yazar Saadet Acar Can, 'Sürdürülebilir Su Kaynakları' tematik alanında yürüttüğü doktora çalışmasını, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Programı ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2211/A Yurtiçi Genel Doktora Burs Programı kapsamında tamamlamıştır. Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (SDÜ-BAP, Proje No: FDK-2022-8648) ve YÖK 100/2000 Doktora Programı tarafından finansal olarak desteklenmiştir. Yazarlar, sağladıkları destek için SDÜ-BAP Birimi'ne, YÖK'e ve TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynaklar (References)

- [1] Jarma, Y. A., Karaoğlu, A., Tekin, Ö., Baba, A., Ökten, H. E., Tomaszewska, B., ... & Kabay, N. (2021). Assessment of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for simultaneous removal of arsenic and boron from spent geothermal water. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124129. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124129>
- [2] Orhun, G. E., Bektaş, T. E., Orhun, E., & Yılmaz, D. (2025). Boron-depleted geothermal water as an alternative irrigation source: Effects on the germination and nutritional composition of edible seed sprouts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 146, 107873. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107873>
- [3] Goren, A. Y., & Ökten, H. E. (2022). 3D electrode use in MDC for enhanced removal of boron from geothermal water. *Desalination*, 530, 115668. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115668>
- [4] Zhang, L., Liang, X., Yang, W., Xiao, C., Zhang, J., Wang, X., & Dai, R. (2024). Geothermal water boron enrichment patterns in the Quantou Formation,

- central depression of the southern *Songliao Basin. Geothermics*, 120, 103016. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103016>
- [5] Samatya, S., Tuncel, S. A., & Kabay, N. (2015). Boron removal from RO permeate of geothermal water by monodisperse poly(vinylbenzyl chloride-co-divinylbenzene) beads containing N-methyl-D-glucamine. *Desalination*, 364, 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.01.029>
- [6] Tomaszewska, B., Bodzek, M., & Kmiecik, E. (2016). Boron removal from geothermal water using DOW Chemical high separation BWRO membrane. *Desalination and Water Treatment*, 57(57), 27477-27484. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1176962>
- [7] Ozbey-Unal, B., Imer, D. Y., Keskinler, B., & Koyuncu, I. (2018). Boron removal from geothermal water by air gap membrane distillation. *Desalination*, 433, 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.033>
- [8] Çermikli, E., Şen, F., Altıok, E., Wolska, J., Cyganowski, P., Kabay, N., ... & Yüksel, M. (2020). Performances of novel chelating ion exchange resins for boron and arsenic removal from saline geothermal water using adsorption-membrane filtration hybrid process. *Desalination*, 491, 114504. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114504>
- [9] So, Y., & Park, C. (2025). Innovative bismuth oxyiodide-coated tubular ceramic nanofiltration membrane for improved treatment of semiconductor wastewater. *Separation and Purification Technology*, 361, 131553. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131553>
- [10] Lagdali, S., El-Habacha, M., Benjelloun, M., Lasfar, M., Mahmoudy, G., Dabagh, A., ... & Zerbet, M. (2026). Low-cost ceramic membranes: Manufacturing methods, cost analysis and application in water and wastewater treatment: A review. *ChemPhysMater*, 5(1), 22-49. <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2025.08.002>
- [11] Hosseinzadeh, F., Hashemi, H., & Sarpoolaky, H. (2025). Sustainable ceramic membrane for water and wastewater treatment: A comprehensive review of environmental, social, and economic aspects. *Desalination*, 615, 119231. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119231>
- [12] Gökrem Öner, Ş. G., Kabay, N., Güler, E., Kitiş, M., & Yüksel, M. (2011). A comparative study for the removal of boron and silica from geothermal water by cross-flow flat sheet reverse osmosis method. *Desalination*, 283, 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.038>
- [13] Yilmaz, İ., Kabay, N., Bryjak, M., Yüksel, M., Wolska, J., & Koltuniewicz, A. (2006). A submerged membrane-ion-exchange hybrid process for boron removal. *Desalination*, 198(1-3), 310-315. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.01.031>
- [14] Koseoglu, P., Yoshizuka, K., Nishihama, S., Yuksel, U., & Kabay, N. (2011). Removal of boron and arsenic from geothermal water in Kyushu Island, Japan, by using selective ion exchange resins. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 29(3), 440-457. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.573448>
- [15] Yılmaz-İpek, İ. (2009). *Boron removal from geothermal water by ion exchange-membrane filtration hybrid process* (Publication No. 255509) [Doctoral dissertation, Ege University]. National Thesis Center of the Council of Higher Education.
- [16] Jarma, Y. A., Karaoğlu, A., Tekin, Ö., Senan, I. R. A., Baba, A., & Kabay, N. (2022). Integrated pressure-driven membrane separation processes for the production of agricultural irrigation water from spent geothermal water. *Desalination*, 523, 115428. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115428>
- [17] Eryildiz, B., Yuksekdog, A., Korkut, S., & Koyuncu, İ. (2021). Performance evaluation of boron removal from wastewater containing high boron content according to operating parameters by air gap membrane distillation. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101493. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101493>
- [18] Altmann, T., Rousseva, A., Vrouwenvelder, J., Shaw, M., & Das, R. (2023). Effectiveness of ceramic ultrafiltration as pretreatment for seawater reverse osmosis. *Desalination*, 564, 116781. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116781>
- [19] Kim, S., & Park, C. (2022). Fouling behavior and cleaning strategies of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment and reuse of laundry wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102840. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102840>
- [20] Teow, Y. H., Chiah, Y. H., Ho, K. C., & Mahmoudi, E. (2022). Treatment of semiconductor-industry wastewater with the application of ceramic membrane and polymeric membrane. *Journal of Cleaner Production*, 337, 130569. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130569>
- [21] Mamun Kabir, S. M., Mahmud, H., & Schöenberger, H. (2022). Recovery of dyes and salts from highly concentrated (dye and salt) mixed water using nanofiltration ceramic membranes. *Heliyon*, 8(11), e11543. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11543>
- [22] Kabay, N., Güler, E., & Bryjak, M. (2010). Boron in seawater and methods for its separation: A review. *Desalination*, 261, 212-217. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.033>
- [23] Lou, X. Y., Boada, R., Yohai, L., & Valiente, M. (2023). Outstanding performance of hierarchical alumina microspheres for boron removal in the presence of competing ions. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104218. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104218>
- [24] Choi, W., Lee, M., & Lim, G. (2025). Multiscale, porous anion-exchangeable sponge for sustainable and convenient boron removal. *Journal of Hazardous Materials*, 485, 136784. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136784>
- [25] Wu, M. C., Kao, Y. H., & Hou, C. H. (2024). Evaluating boron removal from aqueous solutions using membrane capacitive deionization (MCDI): Efficacy and limitations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 113104. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113104>
- [26] Mansour, R. B. (2023). Modeling and optimization of salt and boron removal in reverse osmosis system. *Desalination*, 562, 116699. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116699>
- [27] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı [Republic of Türkiye Ministry of Environment and Urbanization]. (2010). *Atıksu arıtma tesisleri teknik usuller tebliği [Technical Procedures Communiqué for Wastewater Treatment Plants]. Resmî Gazete [Official Gazette]* (No. 27527). <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=13873&MevzuatTur=9&MevzuatTertip=5>

- [28] Delikanlı, N. E. (2019). *Removal and recovery from industrial wastewater using a polymeric/modified ceramic hybrid membrane process* (Publication No. 547730) [Doctoral thesis, Süleyman Demirel University]. National Thesis Center of the Council of Higher Education.
- [29] Lozada, G. S. L., López, A. I. G., Martínez-Férez, A., & Ochando-Pulido, J. M. (2022). On the modeling and optimization of two-phase olive-oil washing wastewater treatment and polyphenols recovery by ceramic tubular microfiltration membranes. *Journal of Environmental Management*, 316, 115227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115227>
- [30] Yang, W., Guo, Q., Duan, D., Wang, T., Liu, J., Du, X., ... & Xia, S. (2022). Characteristics of flat-sheet ceramic ultrafiltration membranes for lake water treatment: A pilot study. *Separation and Purification Technology*, 289, 120677. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120677>
- [31] Shi, C., Rackemann, D. W., Moghaddam, L., Wei, B., Li, K., Lu, H., ... & Doherty, W. O. (2019). Ceramic membrane filtration of factory sugarcane juice: Effect of pretreatment on permeate flux, juice quality and fouling. *Journal of Food Engineering*, 243, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.012>
- [32] Sentana, I., Puche, R. D., Sentana, E., & Prats, D. (2011). Reduction of chlorination byproducts in surface water using ceramic nanofiltration membranes. *Desalination*, 277(1-3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.016>
- [33] Samadi, A., Gao, L., Kong, L., Orooji, Y., & Zhao, S. (2022). Waste-derived low-cost ceramic membranes for water treatment: Opportunities, challenges and future directions. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106497. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106497>
- [34] Singh, P., Manikandan, N. A., Purnima, M., Pakshirajan, K., & Pugazhenth, G. (2020). Recovery of lignin from water and methanol using low-cost kaolin based tubular ceramic membrane. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101615. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101615>
- [35] Das, B., Chakraborty, B., & Barkakati, P. (2016). Preparation and characterization of novel ceramic membranes for micro-filtration applications. *Ceramics International*, 42(13), 14326-14333. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.125>
- [36] Foorginezhad, S., Zerafat, M. M., Mohammadi, Y., & Asadnia, M. (2022). Fabrication of tubular ceramic membranes as low-cost adsorbent using natural clay for heavy metals removal. *Cleaner Engineering and Technology*, 10, 100550. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100550>
- [37] Dutournié, P., Limousy, L., Anquetil, J., & Déon, S. (2017). Modification of the selectivity properties of tubular ceramic membranes after alkaline treatment. *Membranes*, 7(4), 65. <https://doi.org/10.3390/membranes7040065>
- [38] Akash, F. A., Shovon, S. M., Rahman, W., Rahman, M. A., Chakraborty, P., Prasetya, T. A. E., & Monir, M. U. (2024). Advancements in ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A comprehensive exploration of current utilizations and prospective horizons. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100569. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100569>
- [39] Bonatech. (2025, November 17). *Ceramic membrane pilot filtration equipment*. <https://bona-filtration.com/product-range/ceramic-membrane-pilot-plant/ceramic-membrane-pilot-plant-bncm3-2-m/>
- [40] Central Bank of the Republic of Türkiye. (2025, November 14). *Gösterge Niteliğindeki Merkez Bankası Kurları [Indicative Central Bank Exchange Rates]*. <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/tr/tcmb+tr/main+menu/istatistikler/doviz+kurlari/gosterge+niteligindeki+merkez+bankasi+kurlari>
- [41] Dilaver, M., Soydemir, G., Dursun, M., Hocaoglu, S. M., Keskinler, B., Ağtaş, M., ... & Alp, K. (2023). Highly alkali caustic discharges recovery using tubular and disc type of ceramic membranes and its applicability as a near zero liquid discharge opportunity in the textile industry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111351. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111351>
- [42] Kimya Borsası [Chemical Exchange]. (2025, November 14). *Tüm ürünler [All Products]*. <https://www.kimyaborsasi.com.tr/tr/tum-urunler-22.html>
- [43] Energy Market Regulatory Authority. (2025, November 14). *Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları [Tariff Tables for Electricity Bills]*. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>
- [44] Kim, K. C., Kim, N. I., Jiang, T., Kim, J. C., & Kang, C. I. (2023). Boron recovery from salt lake brine, seawater, and wastewater: A review. *Hydrometallurgy*, 218, 106062. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106062>
- [45] de Azevedo, J. C. V., de Urzedo, A. P. F. M., da Luz Mesquita, P., da Cunha Filho, R. G., Baston, E. P., Samanamud, G. L., ... & Naves, F. L. (2024). Recent advances in boron removal in aqueous media: An approach to the adsorption process and process optimization. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(8), 12207-12228. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31882-5>
- [46] Adavodi, R., Rahmati, S., & Vegliò, F. (2025). Towards efficient and selective boron recovery from end-of-life rare earth permanent magnets using an ionic liquid. *Journal of Cleaner Production*, 512, 145694. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145694>
- [47] Yusuf, A., Sodiq, A., Giwa, A., Eke, J., Pikuda, O., De Luca, G., ... & Chakraborty, S. (2020). A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121867>
- [48] Zare, J., Abbasi, M., Hashemifard, S. A., Dizge, N., Dibaj, M., & Akrami, M. (2024). Eco-friendly superhydrophobic modification of low-cost multi-layer composite mullite base tubular ceramic membrane for water desalination. *Water*, 16(11), 1593. <https://doi.org/10.3390/w16111593>
- [49] Serhiienko, A. O., Dontsova, T. A., Yanushevskaya, O. I., Nahirniak, S. V., & Ahmad, H. B. (2020). Ceramic membranes: New trends and prospects (short review). *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, 27(2), 4-31. <https://doi.org/10.20535/2218-93002722020208817>