

Elektrokimyasal Ayırma Yöntemi ile Sulu Çözeltilerden Bor Giderim Prosesinin Optimizasyonu

Optimization of Boron Removal Process from Aqueous Solutions by Electrochemical Separation Method

Sevgi POLAT¹ 

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Canlı yaşamının en temel ihtiyacı su, günümüzde teknolojinin ve endüstri alanlarının gelişmesiyle beraber ciddi oranda kirlenmektedir. Su kaynaklarının kısıtlı olması ve yakın gelecekte dünya nüfusunun su sıkıntısı yaşama olasılığının yüksek olduğu göz önüne alındığında, su kirliliğine sebep olabilen ve ülkemiz için önemli bir mineral olan borun sulardan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu kapsamda bu çalışmada, bor iyonlarının sulu çözeltilerden yenilikçi elektrokimyasal ayırma yöntemi kullanılarak giderilmesi incelenmiştir. Bu amaçla, aktif karbon ile kaplanarak hazırlanmış elektrotlar ve elektrokimyasal akış hücresi kullanılmıştır. Sürekli akış koşullarında bor adsorpsiyon verimini etkileyen akış hızı, hücreye uygulanan potansiyel ve bor konsantrasyonu parametrelerinin optimizasyonu Box-Behnken deney tasarımı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1-5 ml/dak akış hızı, 0,5-1,5 V potansiyel ve 10-90 ppm bor konsantrasyonu aralıklarında bor iyonlarının adsorpsiyon deneyleri yapılmıştır. Deney tasarımı sonuçlarına göre, çalışılan üç parametre arasından akış hızının bor giderimini etkileyen en önemli parametre olduğu belirlenmiştir. Bor adsorpsiyon veriminin en yüksek olduğu (%94,1) optimum koşullar 1 ml/dak akış hızı, 0,5 V potansiyel ve 50 ppm bor konsantrasyonu olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, optimum koşullarda çalışılan elektrotların yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu kullanılarak karakterize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bor giderimi, Optimizasyon, Deney tasarımı, Elektrokimyasal ayırma yöntemi.

Abstract

Water, the most basic need of both humans and ecosystems, is being seriously polluted today with the development of technology and industry. Considering that water resources are limited and the probability of the world population experiencing water shortage soon is high, boron, which can cause water pollution and is an important mineral for our country, needs to be removed from the water. In this study, the removal of boron ions from aqueous solutions using an innovative electrochemical separation method was investigated. For this purpose, electrodes prepared by coating with activated carbon and electrochemical flow cell were used. Optimization of flow rate, potential applied to the cell and boron concentration parameters affecting boron adsorption efficiency under continuous flow conditions was carried out using the Box-Behnken experimental design method. Adsorption experiments of boron ions were carried out in the ranges of 1-5 ml/min flow rate, 0.5-1.5 V potential and 10-90 ppm boron concentration. According to the experimental design results, it was determined that flow rate was the most important parameter affecting boron removal among the three parameters studied. The optimum conditions with the highest boron adsorption efficiency (94.1%) were determined to be 1 ml/min flow rate, 0.5 V potential and 50 ppm boron concentration. Surface morphologies of the electrodes studied under optimum conditions were characterized using a scanning electron microscope.

Keywords: Boron removal, Optimization, Experimental design, Electrochemical separation method.

I. GİRİŞ

Türkiye açısından stratejik öneme sahip olan bor, cam, tekstil, deterjan, ilaç, deri, kozmetik gibi çok sayıda endüstride geniş kullanım alanına sahiptir [1,2]. Bu endüstrilerde ortaya çıkan atık suların taşımış olduğu bor miktarı belirli konsantrasyon değerlerinin üzerine çıktığında ve su yollarına karıştığında su kirliliğine neden olmaktadır [3]. Bu durum, bitki ve insan sağlığı açısından sorun yaratmakta ve çevresel açıdan risk oluşturmaktadır [4]. Örneğin bor bitkilerin büyümesinde önemli bir role sahipken, bitki türlerine bağlı olarak bor iyon konsantrasyonunun fazla olması bitkilerin gelişiminin durmasına neden olmaktadır [5].

Bitkileri korumak için, sulama suyu bor sınır değeri 1 ppm'den yüksek olmamalıdır [6]. Benzer şekilde içme sularında da bor iyon konsantrasyonunun fazla olması insan sağlığı açısından olumsuz durumlar yaratmakta ve kardiyovasküler, koroner, sinir ve üreme sistemlerinde hastalıkların oluşmasına sebep olmaktadır [7,8]. Dünya sağlık örgütü içme suları için bor limitini maksimum 2,4 mg/L olarak belirlemiştir [9-10]. Bu kapsamda, belirli ve düşük konsantrasyonlarda bor iyonlarının ortamda bulunması insan ve çevre sağlığı açısından olumlu etkiler yaratsa da yüksek miktarlarda bulunması ciddi sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca, dünya nüfusunun hızla artması ve hızlı endüstrileşme suya olan ihtiyacın giderek artmasına neden olmaktadır. Buna karşın bu ihtiyacın karşılandığı su kaynakları ise sınırlıdır. Bu durum, su kaynaklarının iyi değerlendirilmesi ve tekrar kullanılabilir hale getirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Bor giderimi ile ilgili literatürde koagülasyon ve sedimentasyon [11], adsorpsiyon [12,13], ekstraksiyon [14], kristalizasyon [15], iyon değiştirme [16], membran prosesleri [17,18], ters osmoz [19], elektrodializ [20] gibi farklı arıtım yöntemleri kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu teknolojiler arasında koagülasyon ve sedimentasyon yöntemleri ile bor bileşiklerinin sulu çözeltilerden giderimi istenen yüksek bor giderim kapasitesine sahip olmayıp düşük verimde bir ayırım gerçekleşmektedir. Ayrıca, çöktürme işlemi sırasında da fazla miktarda ilave kimyasal maddelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bor gideriminde en çok kullanılan yöntemlerden biri olan adsorpsiyon yönteminde ise, iyon değiştirici reçineler ve selüloz gibi çok çeşitli inorganik ve organik adsorbanlar kullanılmıştır. Bor iyonlarının giderimi için geliştirilen iyon değiştirici reçinelerin maliyetleri yüksek olmasının yanı sıra rejenerasyon sonucu ortaya çıkan yıkama suyu da yeni bir atıksu oluşturmaktadır. Evaporasyon, kristalizasyon ve ekstraksiyon yöntemleri ise yüksek bor konsantrasyonuna sahip çözeltiler için daha etkili yöntemlerdir. Ters osmoz ve elektrodializ ise tek başına kullanıldıklarında bor yüksek verimde geri kazanılamamakta ve elektrokoagülasyon, kimyasal çöktürme, iyon değiştirme gibi ilave işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle elektrokoagülasyonun yüksek bor konsantrasyonuna sahip çözeltiler için oldukça etkili olduğu ve borun uzaklaştırılmasında anyonik iyon değiştirici kullanımının olumlu etkisi olduğu gösterilmiştir. Adsorpsiyon, elektrokoagülasyon ve elektrodializ ile bor giderimine dair yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlara ulaşılmakta ve günümüzde halen sıklıkla kullanılmalarına rağmen, adsorbentlerin rejenerasyon süreçlerindeki zorluk ve maliyet, iyon değiştirici reçine ihtiyaçları, membran

maliyetlerinin pahalı olması, sürekli bakım gerektirmeleri gibi nedenlerle çeşitli dezavantajlara da sahiptirler [11-20].

Bu çalışmada ise sulu çözeltilerden bor iyonlarının giderilmesi ve geri kazanılması için elektrotların rejenerasyon prosesi sırasında ek kimyasallara gerek olmaması (yani sistem yan kirletici üretmediği için ek maliyet oluşmaması), adsorpsiyon ve desorpsiyon sürecinin hızlı olması, elektrotların tekrar tekrar kullanılabilir olması ve buna bağlı olarak düşük karbon ayak izi ve ekonomik fayda sağlaması, düşük elektriksel potansiyel değerlerinde çalışılarak düşük enerji tüketimi ve prosesin modüler olması gibi su ekonomisi ve atık sürdürülebilirliği açısından diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında avantajlara sahip olması nedeniyle elektrokimyasal ayırma yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, sürekli akış koşullarında elektrokimyasal akış hücresi kullanılarak sulu çözeltilerden bor iyonlarının giderimi incelenmiştir. Bu yöntem ile literatürde mevcut olmayan maksimum bor adsorpsiyon veriminin sağlanabileceği proses koşulları deney tasarımı yöntemi kullanılarak incelenmiş ve proses parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır.

Deney tasarımı uygulaması genel olarak problemin, bağımsız parametrelerin ve bunların seviyelerinin belirlenmesi, cevap değişkeninin seçilmesi ve uygun deney tasarım yönteminin belirlenerek deney yapılması ve verilerin analiz edilmesini kapsamaktadır. Box-Behnken deney tasarımı, üç seviyeli faktörlerin ve ikinci seviyeden terimlerin söz konusu olduğu sistemlerin değerlendirilmesinde kullanılan istatistiksel bir yöntem olup minimum deney sayısı ile maksimum bilgiyi elde ederek, araştırmacının prosesin davranışını belirlemesini sağlamaktadır [21-24]. Bu çalışmada da Box-Behnken deney tasarım yöntemi kullanılarak akış hızı, potansiyel ve bor konsantrasyonu gibi proses parametrelerinin bor iyonlarının adsorpsiyon verimine etkisi incelenmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Deneyin Yapılışı

Bu çalışmada, bor iyonlarını ayırmak için kullanılacak elektrotların hazırlanmasında Toray karbon kağıdı, aktif karbon, karbon siyahı, poliviniliden florür (PVDF) ve aseton kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterildiği üzere, ağırlıkça aktif karbon: karbon siyahı: PVDF oranı 85:10:5 olacak şekilde tartılmıştır. Toz halde bulunan bu karışıma çözücü olarak kullanılan 20 ml aseton eklenmiş, manyetik karıştırıcı aracılığıyla süspansiyonun 2 saat karıştırılması sağlanmıştır. Daha sonra bu süspansiyon daldırılmalı ultrasonik prob kullanılarak 1 saat ultrasonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Damlatma (drop casting) yöntemi kullanılarak aktif yüzey alanı $5 \times 5 \text{ cm}^2$ olan elektrotlar hazırlanmıştır. Hazırlanan ve kurutulmuş elektrotlar

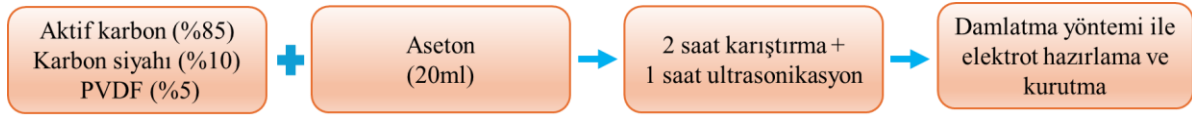
elektrokimyasal akış hücresine yerleştirilmiştir. Akış hücresi Rhinoceros 3D modelling yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve akrilikten oluşan plaka, aktif karbon ile kaplanmış elektrot, titanyum kollektör ve polimerden yapılmış dağıtıcıdan oluşmaktadır.

Bor iyonlarının adsorpsiyon deneyleri, bu akış hücresi kullanılarak, en az 5 döngü olacak şekilde sürekli akışın olduğu koşullarda Şekil 2’de şematik olarak gösterilen deney düzeneği kullanılarak yürütülmüştür. Elektrokimyasal ayırma prosesi sırasıyla besleme tankı, peristaltik pompa, elektrokimyasal akış hücresi, güç kaynağı, iletkenlik ölçer, data kaydedici ve çıkış tankından oluşmaktadır. Akış hücresini terk eden çözeltinin iletkenlik değeri sürekli olarak ölçülmüş ve adsorplanan bor miktarını belirleyebilmek için numuneler alınarak iyon derişimi indüktif eşleşmiş plazma atomik emisyon spektroskopisi (ICP-OES) kullanılarak belirlenmiştir. Adsorpsiyon verimi aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. C_i ve C_f sırasıyla başlangıç ve çıkış akımındaki bor iyon konsantrasyonunu göstermektedir.

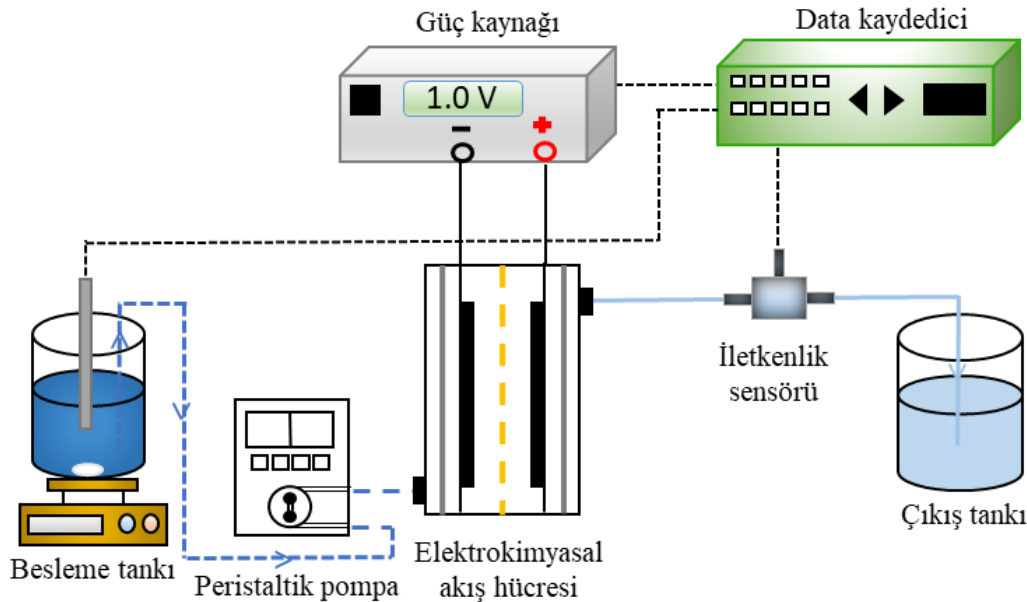
$$Verim(\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

2.2. Deney Tasarımı

Bu çalışmada, bor iyon giderimine etki eden parametreler yapılan ön deneyler sonucunda akış hızı, hücre potansiyeli ve iyon konsantrasyonu olarak belirlenmiştir. En yüksek adsorpsiyon verimini elde edebilmek için yanıt yüzey metodolojisi ve Box-Behnken deney tasarım modeli kullanılmıştır. Deney tasarımı ve veri analizleri için Design Expert 10.0 yazılımı kullanılmıştır. Adsorpsiyon deneyleri için merkez noktası 3 tekrar içeren toplam 15 deney yapılmıştır. Akış hızı, potansiyel ve konsantrasyon değişkenleri sırasıyla A, B ve C olarak tanımlanmış ve çalışılan aralık ve düzeyler Tablo 1’de verilmiştir. Değişken değerlerinin istenen aralıkları -1 (minimum), 0 (merkez nokta) ve +1 (maksimum) olarak kodlanmıştır. Box-Behnken deney tasarımına ait deney algoritması Tablo 2’de verilmiştir. İkinci dereceden polinomu deneysel verilere uydurmak ve ilgili model terimlerini belirlemek için doğrusal olmayan bir regresyon yöntemi kullanılmış ve model denklemin istatistiksel açıdan anlamlılığı varyans analiziyle (ANOVA) incelenmiştir.



Şekil 1. Bor iyonlarının adsorpsiyon için kullanılacak elektrotların hazırlanma diyagramı



Şekil 2. Deney düzeneği

Tablo 1. Bağımsız değişkenlerin deneysel aralığı ve düzeyleri

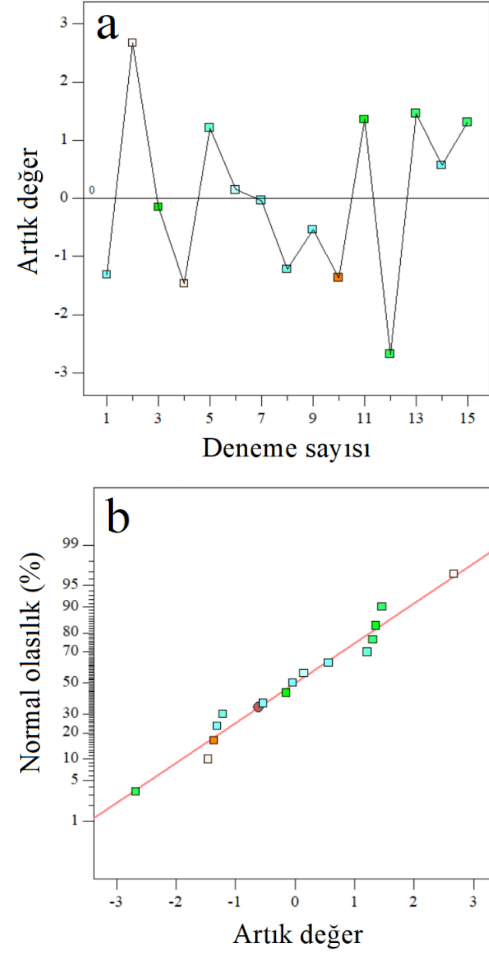
Değişkenler	Sembol	Aralık ve Düzeyler		
		-1	0	1
Akış Hızı	A	1,0	3	5
Potansiyel	B	0,5	1	1,5
Konsantrasyon	C	10	50	90

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Box-Behnken Deney Tasarım Sonuçları

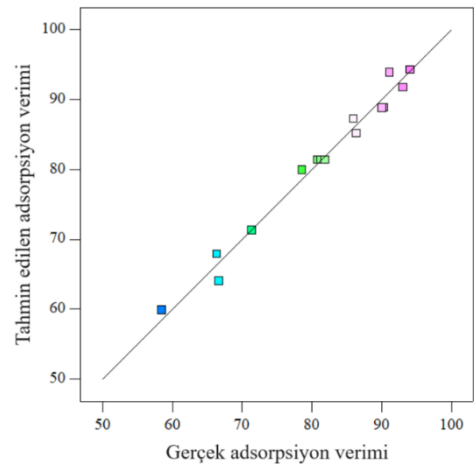
Elektrokimyasal ayırma yöntemi kullanılarak sulu çözeltilerden bor iyonu giderim sürecine etki eden akış hızı, hücre potansiyeli ve besleme çözeltisi konsantrasyonu parametrelerin etkisinin incelendiği bu çalışmada Box-Behnken deney tasarım yöntemi kullanılmış ve farklı koşullarda elde edilen adsorpsiyon verimi sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Bu üç bağımsız değişken ile proses cevabı arasındaki ilişki varyans analizi ile belirlenmiş, istatistiksel açıdan önemi %95 güven aralığıyla F-değeri ile analiz edilmiş ve yanıt yüzey ikinci dereceden modeli için ANOVA sonuçları Tablo 3’te verilmiştir. Kurulan matematik model 31,03 değeri ile %95 güven aralığında istatistiksel olarak anlamlıdır. Prob > F değeri yani P değerinin 0,05’ten küçük olması faktörlerin önemli olduğunu göstermesi nedeniyle A, C, A² ve B² modelde etkin ve anlamlı parametrelerdir. Bu parametreler arasında akış hızı (A) 238 F değeri ile bor iyonlarının geri kazanılmasında en etkili parametredir. Çalışılan deney koşulları aralığında hücreye uygulanan potansiyel ve bu potansiyelin akış hızı ve konsantrasyon ile etkileşimi adsorpsiyon verimini önemli ölçüde etkilememiştir. Ayrıca, Tablo 3’te verilen tanımlayıcı istatistikler incelendiğinde kurulan matematiksel modelin korelasyon katsayısı (R²=0.9824) deneysel verileri açıklayabilmiş ve adsorpsiyon verimi ile bağımsız değişkenler arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Design Expert programı yeterli kesinlik (adequate precision) değerinin 4’ten büyük olmasını önermektedir. Bu çalışmada, bu değer 17,386 olması nedeniyle modelin uyumluluğu desteklenmektedir.

Şekil 3a’da her bir deneye artık değerleri veren grafik, Şekil 3b’de ise sulu çözeltilerden bor iyonlarının giderim verimi için artık değer normal olasılık grafiği verilmiştir. Bu grafikler oluşturulan matematiksel modelin uygunluğunu kontrol etmek amacıyla çizilmiştir. Artık değer normal olasılık grafiğinde noktaların bir doğru boyunca dizilmesi artık değerlerin normal dağılıma uyduğunu göstermektedir. Bor adsorpsiyon verimi için bu durum sağlanmakta, noktalar düz bir doğruyu temsil ettiğinden artık değerler normal dağılıma uygunluk göstermektedir.



Şekil 3. a) Deneme sayısına karşı gelen artık değerler grafiği ve b) bor iyonlarının adsorpsiyon verimi için artık değer normal olasılık grafiği

Şekil 4’te verilen grafikte deneysel olarak elde edilen adsorpsiyon verimi değerlerine karşılık önerilen matematiksel model ile hesaplanmış olan tahmini değerler görülmektedir. Tahmin edilen değerlerin deneysel değerlere yakın olması, geliştirilen modelin elektrokimyasal ayırma yöntemi ile bor gideriminin incelenmesinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Bor iyonlarının adsorpsiyon verimi için deneysel ve tahmini değerlerin karşılaştırılması

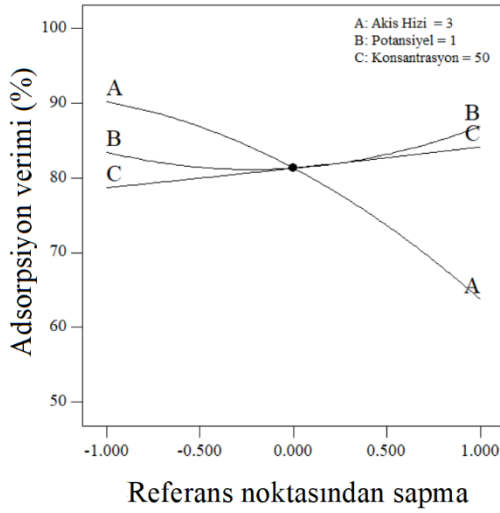
Tablo 2. Box-Behnken deney tasarımı algoritması

Deney No	Gerçek Değerler			Kodlanmış Değerler			Cevap Adsorpsiyon Verimi (%)
	Akış Hızı	Potansiyel	Konsantrasyon	A	B	C	
1	3	0,5	10	0	-1	-1	78,6
2	3	1,5	10	0	+1	-1	86,4
3	3	0,5	90	0	-1	+1	86,0
4	3	1,5	90	0	+1	+1	90,1
5	1	0,5	50	-1	-1	0	94,1
6	1	1,5	50	-1	+1	0	91,2
7	5	0,5	50	+1	-1	0	66,7
8	5	1,5	50	+1	+1	0	71,4
9	1	1,0	10	-1	0	-1	90,3
10	1	1,0	90	-1	0	+1	93,1
11	5	1,0	10	+1	0	-1	58,5
12	5	1,0	90	+1	0	+1	66,4
13	3	1,0	50	0	0	0	81,3
14	3	1,0	50	0	0	0	80,8
15	3	1,0	50	0	0	0	81,9

Tablo 3. ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-değeri Prob > F
Model	1638.72	9	182.08	31.03	0.0007
A-Akış Hızı	1396.56	1	1396.56	238.00	< 0.0001
B- Potansiyel	23.46	1	23.46	4.00	0.1020
C-Konsantrasyon	59.40	1	59.40	10.12	0.0245
AB	14.44	1	14.44	2.46	0.1775
AC	6.50	1	6.50	1.11	0.3407
BC	3.42	1	3.42	0.58	0.4795
A ²	69.60	1	69.60	11.86	0.0184
B ²	54.97	1	54.97	9.37	0.0281
C ²	0.026	1	0.026	4.370E-003	0.9499
Artık	29.34	5	5.87	-	-
Uyum Eksikliği	28.73	3	9.58	31.57	0.0309
R ²	0.9824				

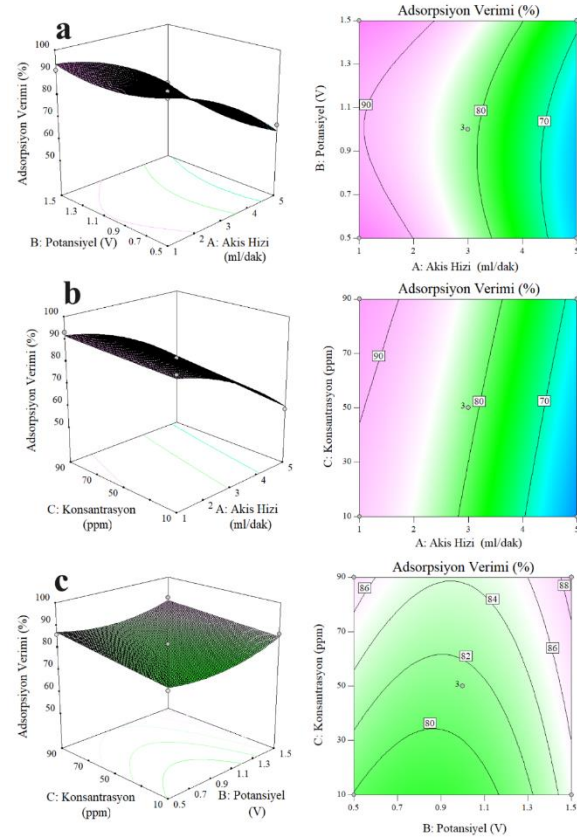
Şekil 5'te elektrokimyasal ayırma yöntemi ile bor iyonlarının adsorpsiyon verimini artırabilmek için geliştirilen modele ait değişkenlerin etkilerini açıklayan pertürbasyon eğrisi verilmiştir. Pertürbasyon eğrisinde 3, 1 ve 50 olarak verilen değerler, değişkenlere ait en düşük ve en yüksek değerlerin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Bu değerler, pertürbasyon eğrisinde 0 noktasına karşılık gelen değerleri belirtmektedir. Pertürbasyon eğrileri, geliştirilen modele ait değişkenlerin, cevaplar üzerindeki sonuçlarını daha iyi açıklayabilmek için kullanılmaktadır. Şekil 5 incelendiğinde akış hızı 3-5 ml/dak aralığındayken adsorpsiyon veriminin önemli ölçüde azaldığı yani artan akış hızının verime negatif etkisi olduğu belirlenmiştir. 1,0-1,5 V potansiyel ve 10-50 ppm konsantrasyon değerlerinde ise bor giderim veriminde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Bor iyonlarının adsorpsiyon verimi için geliştirilen modelin pertürbasyon eğrisi

Şekil 6'da akış hızı-potansiyel, akış hızı-konsantrasyon ve potansiyel-konsantrasyon parametrelerinin bor iyonlarının adsorpsiyon verimine etkisini gösteren kontur ve 3 boyutlu yüzey grafikleri gösterilmiştir. Üç faktörlü Box-Behnken tasarımına göre en yüksek adsorpsiyon verimi için optimum çalışma koşullarının 1 ml/dak akış hızı, 0,5 V potansiyel ve 50 ppm bor konsantrasyonu olduğu belirlenmiş ve en yüksek adsorpsiyon verimi %94,1 olarak elde edilmiştir. Çalışılan üç bağımsız değişkenin etkileri karşılaştırıldığında, her bir parametrenin borun geri kazanımına etkisi olsa da akış hızının en önemli etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir. Adsorpsiyon verimi artan akış hızıyla önemli ölçüde düşüş göstermektedir. Maksimum bor adsorpsiyon verimi de en düşük akış hızı olan 1ml/dak hızında bulunmuştur. Literatürde aktif karbon kullanılarak bor iyon giderimi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Kluczka ve arkadaşları [25] tarafından modifiye edilmiş aktif karbon kullanıldığında maksimum bor giderimi %51, Halim ve arkadaşları [26] tarafından ise maksimum adsorpsiyon verimi pH 5,5'te ~%40, Irawan ve

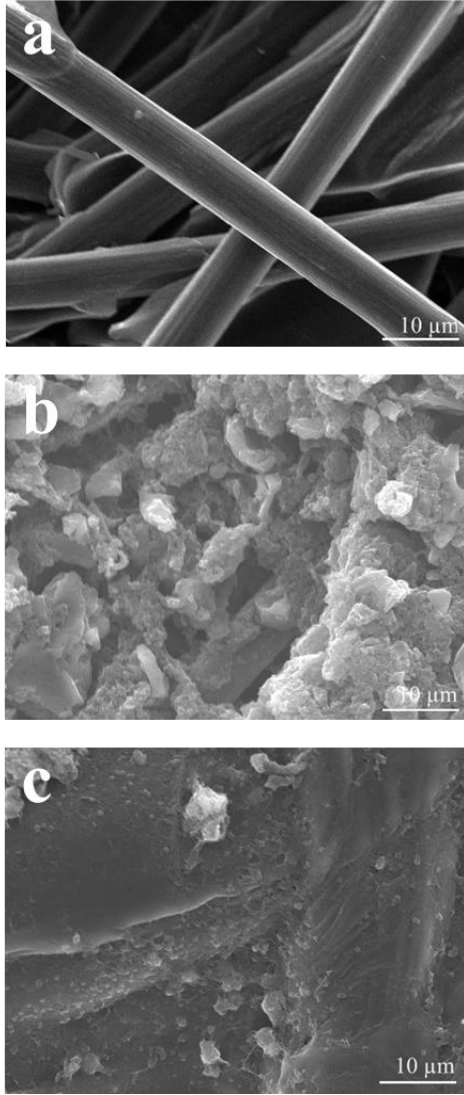
arkadaşları [27] tarafından ise kimyasal çöktürme yöntemini kullanıldığında 750 ppm bor konsantrasyonundaki çözelti için bu değer %87 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. a) Akış hızı-potansiyel, b) akış hızı-konsantrasyon ve c) potansiyel-konsantrasyon parametrelerinin bor iyonlarının adsorpsiyon verimine etkisini gösteren kontur ve 3 boyutlu yüzey grafikleri

3.2. Karakterizasyon Sonuçları

Box-Behnken deney tasarımı ile belirlenen ve bor adsorpsiyon veriminin en yüksek olduğu koşullarda elektrotların yüzey özellikleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak belirlenmiştir. SEM analizi elektrot yüzeylerini kaplayan malzemelerin element türleri ve miktarlarının belirlenmesinin yanı sıra yüzey topografyalarının saptanabilmesine de olanak sağlamaktadır. Şekil 7'de işlem görmemiş karbon kağıdı, aktif karbon ile kaplanmış karbon kağıdı ve adsorpsiyon sonucunda akış hücresinin anot bölgesindeki karbon kağıdının SEM görüntüleri verilmiştir. Literatür ile uyumlu olarak [28,29], Toray karbon kağıdının yüzeyi düzgün yüzeyli ve homojen dağılımlı fiber yapılarından oluşmaktadır. Karbon kâğıdı, aktif karbon ile kaplandığında yüzey değişmiş ve fiber yapılar yerini homojen olmayan gözenekli bir yüzeye bırakmıştır. Bor iyonlarının adsorpsiyon işleminden sonra yüzeyde bulunan boşluklar tamamen kapanmış, homojen yüzeyli düz bir yüzey elde edilmiştir.



Şekil 7. a) Toray karbon kağıdı, b) aktif karbon ile kaplanmış çalışma elektrodu ve c) bor adsorpsiyonu sonrasında çalışma elektrodunun SEM görüntüleri

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, sürekli akış koşullarında elektrokimyasal ayırma yöntemi ile bor gideriminin Box-Behnken deney tasarım yöntemi ile optimizasyonu incelenmiştir. Bu kapsamda akış hızı, hücre voltajı ve bor konsantrasyonunun adsorpsiyon verimine etkileri araştırılmıştır. Bu değişkenler arasında akış hızının bor adsorpsiyon veriminde etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Maksimum adsorpsiyon verimi 1 ml/dak akış hızı, 0,5 V potansiyel ve 50 ppm bor konsantrasyonunda %94,1 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, optimum çalışma koşullarda elektrotlar SEM analiz yöntemiyle karakterize edilmiş ve bor adsorpsiyonu sonrasında yüzeyin homojen olarak kaplandığı ve adsorpsiyon öncesi var olan gözeneklerin kapandığı görülmüştür.

Yapılan çalışma sonucunda Box-Behnken deney tasarım yönteminin sürekli akış koşullarında bor iyonlarının giderimi proses parametrelerinin optimizasyonunda uygun bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların, su kaynakların korunması, sürdürülebilir şekilde bu kaynaklarının yönetiminin sağlanması, yenilikçi, ekonomik ve çevre dostu alternatif proseslerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123M952 numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- [1] Ngwabebhoh, F.A., Mammadli, N., Yıldız, U. (2019). Bioinspired modified nanocellulose adsorbent for enhanced boron recovery from aqueous media: Optimization, kinetics, thermodynamics and reusability study. *J. Environ. Chem. Eng.*, 7, 103281.
- [2] Xu, Y., Jiang, J.Q. (2008). Technologies for boron removal. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 16-2410.
- [3] Yetgin, A.G., DüNDAR, O.A., Çakmakçı, E. (2023). Removal of boron from aqueous solution by modified cellulose. *Biomass Convers. Biorefin.*, 13, 13081–13090.
- [4] Wolska, J., Bryjak, M. (2013). Methods for boron removal from aqueous solutions — A review, *Desalination.*, 310, 18-24.
- [5] Kim, H., Kim, S., Kim, C. (2024). Enhanced boron removal without pre-pH adjustment via redox-mediated electrodialysis assisted by ion-exchange resins. *J. Environ. Chem. Eng.*, 12(4), 113159.
- [6] Hilal, N., Kim, G.J., Somerfield, C. (2011). Boron removal from saline water: A comprehensive review. *Desalination.*, 273, 23–35.
- [7] Guan, Z., Lv, J., Bai, P., Guo, X. (2016). Boron removal from aqueous solutions by adsorption — A review. *Desalination.*, 383, 29–37.
- [8] Ee, L.Y., Chia, S.Y.R., Xue, K., Chin, S.Y., Cho, C.A.H., Tan, X.Y., Li, S.F.Y. (2023). Hyperbranched nanocellulose enabling rapid boron removal from aqueous environment. *Chem. Eng. J.*, 454, 140218.
- [9] Akdağ, S., Keyikoglu, R., Karagunduz, A., Keskinler, B., Khataee, A., Yoon, Y. (2023). Recent advances in boron species removal and recovery using layered double hydroxides. *Appl. Clay Sci.*, 233, 106814.
- [10] Çelebi, H., Şimşek, İ., Bahadır, T., Tulun, Ş., (2023). Use of banana peel for the removal of boron from aqueous solutions in the batch adsorption system. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 20, 161-176.

- [11] Lin, J.Y., Mahasti, N.N., Huang, Y.H. (2021). Recent advances in adsorption and coagulation for boron removal from wastewater: A comprehensive review. *J. Hazard. Mater.* 407, 124401.
- [12] Xia, N.N., Zhang, H.Y., Hu, Z.H., Kong, F., He, F. (2021). A functionalized bio-based material with abundant mesopores and catechol groups for efficient removal of boron. *Chemosphere.*, 263, 128202.
- [13] Qiu, X., Sasaki, K., Hirajima, T., Ideta, K., Miyawaki, J. (2014). One-step synthesis of layered double hydroxide-intercalated gluconate for removal of borate. *Sep Purif Technol.*, 123, 114-123.
- [14] Mutlu-Salmanli, O., Koyuncu, I. (2022). Boron removal and recovery from water and wastewater. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 21, 635-664.
- [15] Lin, J.Y., Mahasti, N.N.N., Huan, Y.H. (2021). Fluidized-bed crystallization of barium perborate for continuous boron removal from concentrated solution: Supersaturation as a master variable. *Sep Purif Technol.*, 278, 119588.
- [16] Biçak, N., Bulutçu, N., Şenkal, B.F., Gazi, M. (2001). Modification of crosslinked glycidyl methacrylate-based polymers for boron-specific column extraction. *React. Funct. Polym.*, 47, 175-184.
- [17] Wang, S., Bing, S., Zhang, H., Zhou, Y., Zhang, L., Gao, C. (2022). Surface engineering design of polyamide membranes for enhanced boron removal in seawater desalination. *J. Membr. Sci.*, 651, 120425.
- [18] Ghiasi, S., Mohammadi, T., Tofighy, M.A. (2022). Hybrid nanofiltration thin film hollow fiber membranes with adsorptive supports containing bentonite and LDH nanoclays for boron removal. *J. Membr. Sci.* 655, 120576.
- [19] Tang, Y.P., Luo, L., Thong, Z., Chung, T.S. (2017). Recent advances in membrane materials and technologies for boron removal. *J. Memb. Sci.* 541, 434-446.
- [20] Guesmi, F., Louati, I., Hannachi, C., Hamrouni, B. (2020). Optimization of boron removal from water by electrodialysis using response surface methodology. *Water Sci. Technol.* 81, 293-300.
- [21] Khajeh, M. (2011). Optimization of process variables for essential oil components from *Satureja hortensis* by supercritical fluid extraction using Box-Behnken experimental design. *J. Supercrit. Fluids*, 55(3), 944-948.
- [22] Duranoğlu, D., Yılmaz, Y. (2024). Optimization of titanium dioxide production process for photocatalytic degradation of 2,4 dichlorophenoxyacetic acid. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 39(1), 233-242.
- [23] Alrefae, S.H., Aljohani, M., Alkhamis, K., Shaaban, F., El-Desouky, M.G., El-Bindary, A.A., El-Bindary, M.A. (2023). Adsorption and effective removal of organophosphorus pesticides from aqueous solution via novel metal-organic framework: Adsorption isotherms, kinetics, and optimization via Box-Behnken design. *J. Mol. Liq.*, 384, 122206
- [24] Al-dhawi, B.N.S., Kutty, S.R.M., Hayder, G., Elnaim, B.M.E., Mnzool, M., Noor, A., Saeed, A.A.H., Al-Mahbashi, N.M.Y., Al-Nini, A., Jagaba, A.H. (2023). Adsorptive Removal of Boron by DIAION™ CRB05: Characterization, Kinetics, Isotherm, and Optimization by Response Surface Methodology. *Processes.*, 11(2), 453.
- [25] Kluczka, J., Pudło, W., Krukiewicz, K. (2019). Boron adsorption removal by commercial and modified activated carbons, *Chem. Eng. Res. Des.*, 147, 30-42.
- [26] Halim, A.A., Roslan, N.A., Yaacob, N.S., Latif, M.T. (2013). Boron removal from aqueous solution using curcumin-impregnated activated carbon, *Sains Malaysiana*, 42(9), 1293-1300.
- [27] Irawan, C., Kuo, Y.L., Liu, J.C. (2011). Treatment of boron-containing optoelectronic wastewater by precipitation process, *Desalination*, 280, 146-151.
- [28] Polat, S. (2024). Sürekli akış koşullarında sulu çözeltilerden bor giderimi için elektrokimyasal ayırma prosesi tasarlanması ve işletilmesi, *Journal of Boron*, 9(4), 135-142.
- [29] Gurten-Inal, I.I., Aktas, Z. (2020). Enhancing the performance of activated carbon based scalable supercapacitors by heat treatment, *Appl. Surf. Sci.*, 514, 145895.