

Endüstriyel Atıksulardan Alüminyum Sülfat Koagülantı Kullanılarak Kimyasal Koagülasyon Yöntemi İle Bor Giderimi

Zeynep KARCIOĞLU KARAKAŞ¹ Murat Tolga YILMAZ¹ Alper Erdem YILMAZ¹

ÖZET: Dünyada birçok endüstrinin atıksularında sınır değerlerin üstünde bor bulunmaktadır. Bu çalışmada borun endüstriyel atıksulardan kimyasal koagülasyon yöntemi ile giderimi ve bu prosese etki eden çeşitli parametreler incelenmiştir. Denemelerde koagülant olarak alüminyum sülfat kullanılmıştır. Bor gideriminde, başlangıç bor konsantrasyonu, karıştırma hızı, çözeltinin başlangıç pH'sı ve koagülant maddenin cinsi ve dozajı parametreleri incelenmiştir. Optimum karıştırma hızı için yapılan denemelerde, hızlı karıştırma hızı için 120 dev dak⁻¹ ve yavaş karıştırma hızı için 30 dev dak⁻¹ karıştırma hızı olarak seçilmiştir. Kimyasal koagülasyon prosesine etki eden en önemli parametrenin pH olduğu görülmüştür. Proses süresince farklı koagülant maddeleri ve dozajları uygulanmıştır. Çözeltilerin çıkış pH'ları 7-9 arasındaki değerlerde olduğunda, bor giderim veriminin en yüksek olduğu görülmüştür. Başlangıç bor konsantrasyonu artışıyla da bor giderim veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Denemeler sonucunda pH'ya bağlı olarak, alüminyum sülfatın, giderim verimi üzerinde etkin olmadığı ve %35'lere kadar bor giderilebileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alüminyum sülfat, bor, giderim, kimyasal koagülasyon



Boron Removal From Industrial Waste Waters By Using Aluminum Sulfate Coagulant With Chemical Methods

ABSTRACT: Removal of boron from the industrial waste waters by chemical coagulation methods and effecting parameters of the process has been investigated by using aluminum sulfate ($Al_2(SO_4)_3$) as coagulant. Initial boron concentration, mixing speed, initial pH of the solution and types of the coagulant materials and dosing parameters had been considered in the boron removal. In the experiments for optimum mixing speeds, 120 rpm was chosen for the fast mixing speed and 30 rpm was chosen for the slow mixing speed. pH has been found the most important effecting parameter to the coagulation process. Different coagulant materials and dosing have been applied during the experimental trials. The highest boron removal yield has been observed in the initial pH values of 7-9 and it has been determined that increasing the initial concentration of boron has increased the yield. Depending on the pH values, aluminum sulfate was not effective on the removal yield and it has also been recorded that the boron removal would be reached within 35%.

Keywords: Aluminum sulfate ($Al_2(SO_4)_3$), boron, removal, chemical coagulation

GİRİŞ

Koagülasyon, su ve atıksulardan askıda katı madde, organik ve inorganik partiküller gibi çeşitli kirleticilerin gideriminin de kullanılan önemli bir prostesdir (Wanga et al., 2009; Hasçakır and Dolgen, 2008). İnorganik alüminyum tuzları küçük partikülleri daha büyük yumaklara dönüştürmede en yaygın kullanılan koagülantlardır (Matsui et al., 2003; Alkan et al., 2006). Yaygın kullanılan alüminyum bileşiklerinden alüm ($Al_2(SO_4)_3$) koagülasyon proseslerinde koagülant olarak kullanılmaktadır.

Alüminyum türleri sentetik olarak hazırlanan bor atıksuyu gideriminin de kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılan ve Türkiye’de üretilen önemli bor bileşikleri boraks ve borik asittir. Üretim prosesleri sonucunda önemli miktarlarda bor oksit atık olarak atılmaktadır. Bor içeren atıksuların arıtımında, özel arıtım proseslerine ihtiyaç duyulmaktadır. WHO (World Health Organization) içme suyunda borun limit değerini 0.3 mg L^{-1} olarak tavsiye etmektedir. Bor konsantrasyonu, yüzey ve yer altı sularının birçoğunda bu limit değerinin altındadır. Sudan bor giderimi ve toksiditesi birçok kez araştırılmıştır (Badruk et al., 1999a; Dilek et al., 2002; Badruk et al., 1999; Taniguchi et al., 2004; Simonnot et al., 2000). İnorganik bor bileşikleri antiseptik olduğu için geleneksel biyolojik arıtım metodları, atıksulardan bor giderimi için kullanılamamaktadır. Atıksudan borun uzaklaştırılması için kullanılan yöntemlerden bazıları, adsorpsiyon (Rajakoviç and Ristiç, 1996; Polat et al., 2004; Öztürk and Kavak, 2005; Yurdakoç et al., 2005; Karahan et al., 2006), iyon değişimi (Schilde and Uhlemenn, 1991; Şahin, 1996), ters ozmos (Nadav, 1999), elektrokoagülasyon (Yılmaz et al., 2005), elektrodiyaliz (Yazıcıgil and Oztekin, 2006) ve çöktürmedir.

Bu çalışmada, kimyasal koagülasyon metoduyla atıksulardan bor giderimi ve bu prosesi etkileyen alüminyum tuzlarının etkileri incelenmiştir. Koagülant olarak alüminyum sülfat kullanılmıştır. Kimyasal koagülasyon denemelerinde çözeltinin başlangıç pH’sı, başlangıç bor konsantrasyonu, karıştırma hızı, koagülant maddenin cinsi ve dozajı parametre olarak incelenmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyallerin Temini ve Hazırlanması

Deneyel çalışmalarda % 99.9 saflıkta sodyum tetra boraks deka hidrat ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) bileşiğinden laboratuvar ortamında sentetik olarak hazırlanmış belir-

li bor konsantrasyonuna sahip stok çözeltiler kullanılmıştır. Koagülasyon ve flokülasyon işlemleri için kullanılan $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, Merck firmasından temin edilmiş analitik saflıktadır. Her bir yumaklaştırıcıdan 50 g L^{-1} lik konsantrasyonlarda stok çözeltiler hazırlanmıştır. Tüm çözeltilerin hazırlanmasında distile su ve pH ayarlamalarında ise seyreltik (% 35-37) HCl ve 5 N NaOH kullanılmıştır.

Deneyel Ekipman

Koagülasyon ve flokülasyonun optimizasyonu için jar test yöntemi kullanılmıştır. Karıştırma hızı, pH, koagülant cinsi ve koagülant dozajı için bor giderimi açısından optimum şartlar belirlenmeye çalışılmıştır. Deneylerde Phipps&Bird marka dijital kontrollü Jar testi cihazı kullanılmıştır. Jar testi denemelerinde koagülant madde ilavesinden önce çözeltiler belirlenen pH değerlerine ayarlanmıştır. Koagülant madde ilave edildikten sonra 3 dakika 120 dev dak^{-1} hızlı ve 12 dakikada 30 dev dak^{-1} yavaş karıştırma uygulanmıştır. Daha sonra 1 saat süre ile örneklerin çökmesi beklenmiştir. Çökmeden sonra çözeltinin pH’sı WTW marka multimetre kullanılarak ölçülmüştür. Deneyin sonunda alınan numuneler de bor analizleri yapılmıştır. Bor analizleri titrimetrik olarak yapılmıştır. Giderim verimleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

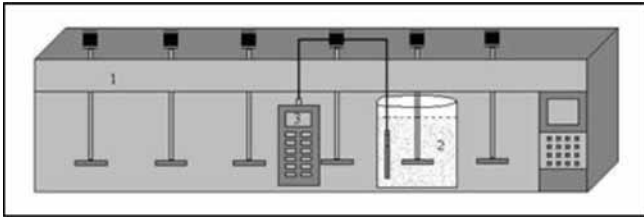
$$\eta = 1 - \frac{C_{\text{çıkış}}}{C_{\text{başlangıç}}} \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte η ; giderim verimini, $C_{\text{çıkış}}$; çıkış konsantrasyonu ve $C_{\text{başlangıç}}$ ise başlangıçtaki bor konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Koagülasyon ve flokülasyon denemelerinde incelenen parametreler ve aralıkları Çizelge 1’de, denemelerin gerçekleştirildiği düzenek ise Şekil 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Koagülasyon ve flokülasyon deneylerinde kullanılan parametreler

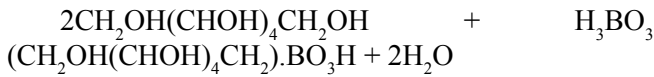
Parametreler	Parametre aralığı
pH	7-8-9-10-11-12
Koagülant dozu (g L^{-1})	0.1-0.25-0.5-1
Bor Konsantrasyonu (mg L^{-1})	250-500-1000
Hızlı Karıştırma Hızı (dev dak^{-1})	60-90-120-150



Şekil 1. Kimyasal koagülasyon prosesinin deneysel sisteminin şematik görünüşü (1-Jar testi cihazı, 2- Kimyasal koagülasyon hücresi, 3- pH metre).

Bor analizi

Bor analizi yapmak için potansiyometrik metod kullanılmıştır. Potansiyometrik yöntem, borik asit sulu çözeltilerinde çok zayıf asit özelliği gösterdiğinden baz çözeltisi ile doğrudan tayin edilememektedir. Bu yüzden organik polialkoller kullanılmaktadır. Bu deneyde polialkol olarak mannitol kullanılmıştır. Borik asit ve mannitol molekülü kompleks yapar ve reaksiyon,



şeklinde olur. Mannitollü ortamda K_1 değerinin yaklaşık 10^{-6} olduğu yani 25°C 'deki borik asitin K_1 de-

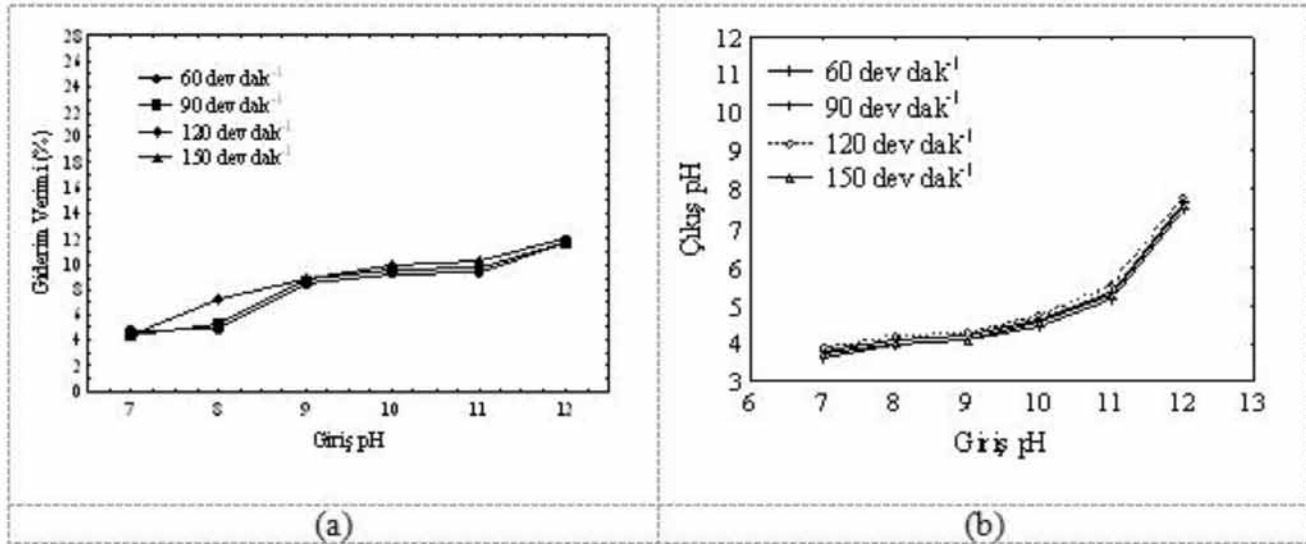
mg B_2O_3 'e karşılık gelir. Buradan numune içerisindeki bor miktarı hesaplanmış olur (Demircioğlu, 1972).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular

Karıştırma hızının giderim verimi üzerine etkisi: Karıştırma hızının arıtma verimi üzerine etkisini incelemek için sabit bor konsantrasyonu ve sabit koagülant dozajı kullanılmıştır. Başlangıçta 500 mg L^{-1} lik bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksulardan 1000 ml 'lik örnekler alınarak başlangıç pH'ları 7-8-9-10-11-12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu örneklerin üzerine 0.5 g L^{-1} dozaja sahip koagülant madde ilave edilerek jar testinde farklı karıştırma hızları uygulanmıştır. 1 saat süre ile örneklerin çökmesi beklenilmiş ve çökmeden sonra çözeltilerin pH değerleri ölçülmüştür. Deneyin sonunda alınan numuneler de bor analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 2'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Farklı karıştırma hızlarında çözeltilerin çıkış pH'larında ve konsantrasyonlarında önemli bir değişim gözlenmemiştir. Yapılan literatür taramasında bulunan standart Jar testi hızlı karıştırma hızı olan 120 dev dak

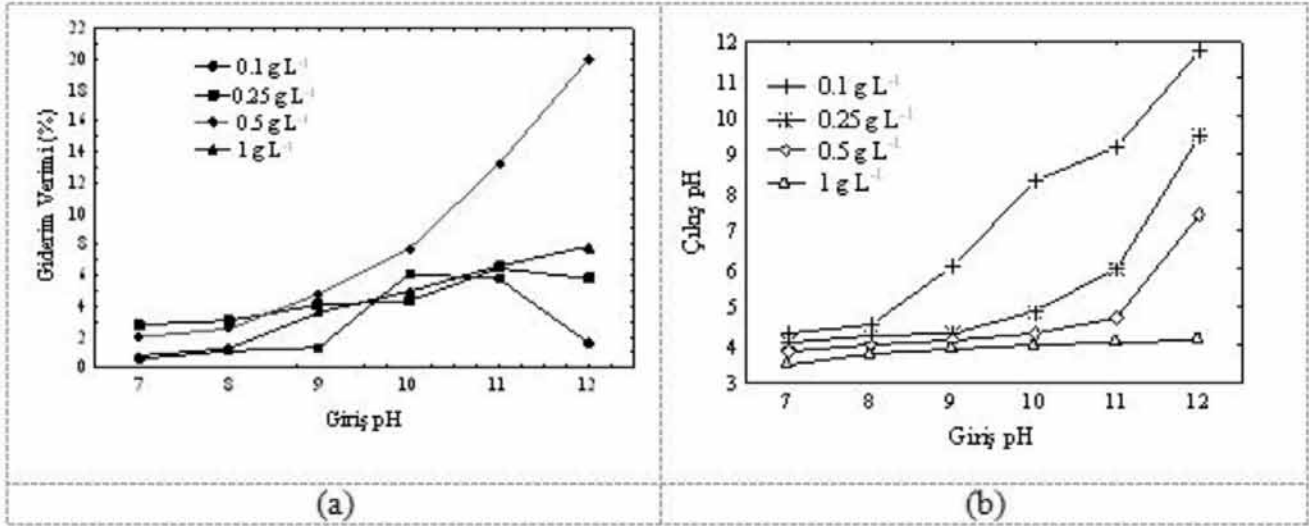


Şekil 2. Farklı karıştırma hızlarında, çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine b) çıkış pH'larına etkisi.

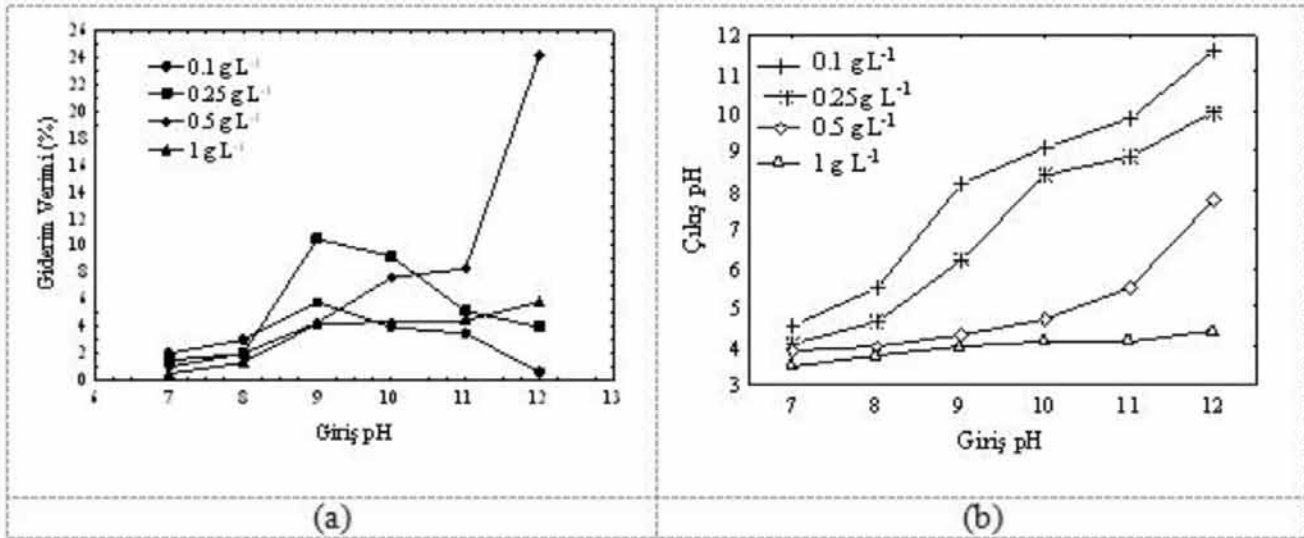
ğerine ($5.79 \cdot 10^{-10}$) göre 10.000 kat daha arttığı belirlenmiş ve ayarlı KOH çözeltisi ile titre edilmiştir. Böylece 1 eşdeğer gram KOH, bir mol borik aside karşılık gelir. Bor tayini yapılmadan önce ortamın pH'sı 7.60'a ayarlandıktan sonra ortama 5 g mannitol ilave edilir ve ortamın pH'sı tekrar 7.60'a ulaşıncaya kadar 0.5 N KOH çözeltisi ile titre edilir. 1 mL 0.5 N KOH 17.41

¹ optimum kabul edilerek denemelerde kullanılmıştır (Eckenfelder, 2000).

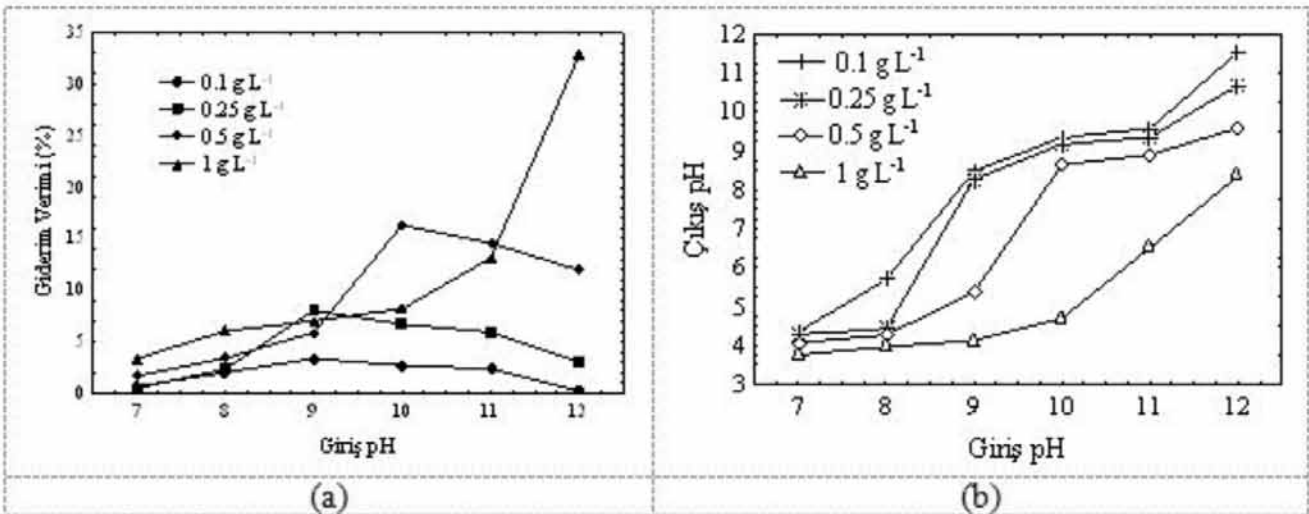
pH optimizasyonu: Çözeltinin başlangıç pH'ının arıtma verimi üzerine etkisini incelemek için 250 , 500 , 1000 mg L^{-1} lik başlangıç bor konsantrasyonlarına sahip sentetik atıksu çözeltileri hazırlanmıştır. Bu çözeltilerden 1000 ml 'lik örnekler alınarak, başlangıç pH'



Şekil 3. 250 mg L⁻¹ bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksu için çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine b) çıkış pH'larına etkisi.



Şekil 4. 500 mg L⁻¹ bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksu için çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine b) çıkış pH'larına etkisi.



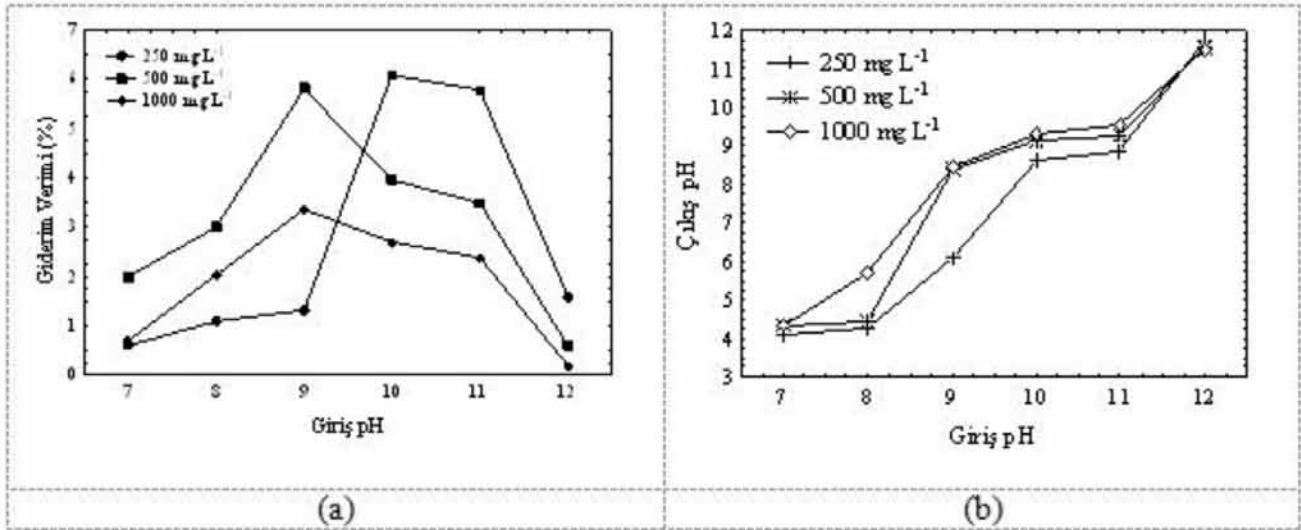
Şekil 5. 1000 mg L⁻¹ bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksu için çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine b) çıkış pH'larına etkisi.

ları 7-8-9-10-11-12 olacak şekilde ayarlanmıştır. pH' sı ayarlanan örnekler 0.1, 0.25, 0.5 ve 1 g L⁻¹ dozaja sahip alüminyum sülfat koagülantı ilave edilerek jar testi-ne tabi tutulmuştur. 1 saat süre ile örneklerin çökelme-si beklenmiş ve sonra çözeltinin pH değerleri ölçülmüş-tür. Deney sonunda alınan numunelerde bor analizleri yapılmış ve bor giderim verimleri incelenmiştir. Sonuç-lar Şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir.

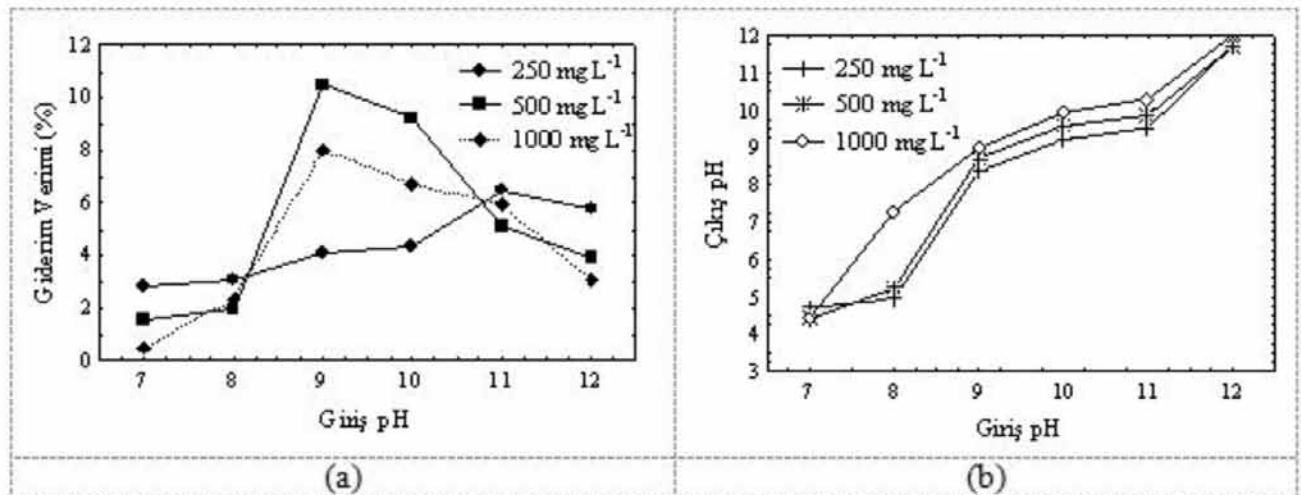
Şekiller incelendiğinde 250 mg L⁻¹ bor konsantras-yonuna sahip sentetik atıksu için başlangıç pH'sı 12 ve koagülant dozajı 0.5 g L⁻¹ olduğunda, 500 mg L⁻¹ bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksu için, başlangıç pH'sı 12 ve koagülant dozajı 0.5 g L⁻¹ olduğunda ve 1000 mg L⁻¹ bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksu

için ise başlangıç pH' sı 12 ve koagülant dozajı 1 g L⁻¹ olduğunda en yüksek giderim verimlerinin elde edildi-ği görülmektedir. 250 mg L⁻¹ bor konsantrasyonu için pH'nın 12'den 7.42'ye, 500 mg L⁻¹ bor konsantrasyo-nu için 12'den 7.74' e, 1000 mg L⁻¹ bor konsantrasyo-nu için 12' den 8.35' e düştüğü görülmektedir. Sonuçlar göz önüne alındığında farklı bor konsantrasyonuna sa-hip sentetik atıksulara farklı koagülant dozajları uygu-landığında en yüksek giderim verimleri çözeltilerin çı-kış pH'larının 7.5-8.5 arasında olduğu durumlarda göz-lemellenmiştir.

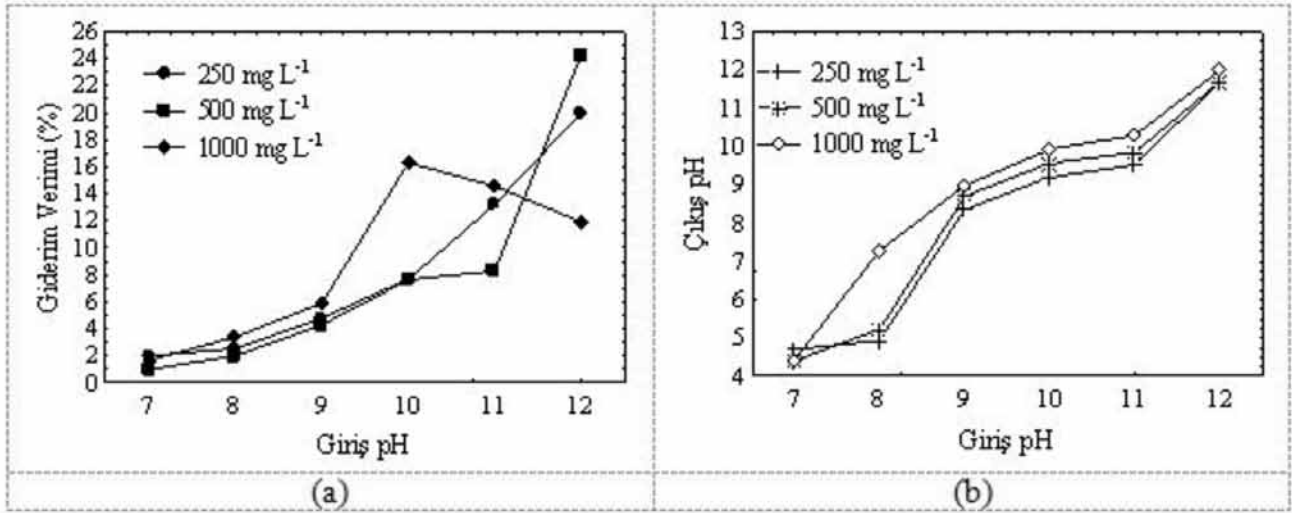
Koagülant dozajı optimizasyonu: Optimum ko-agülant dozajını belirlemek için pH denemelerinde uy-



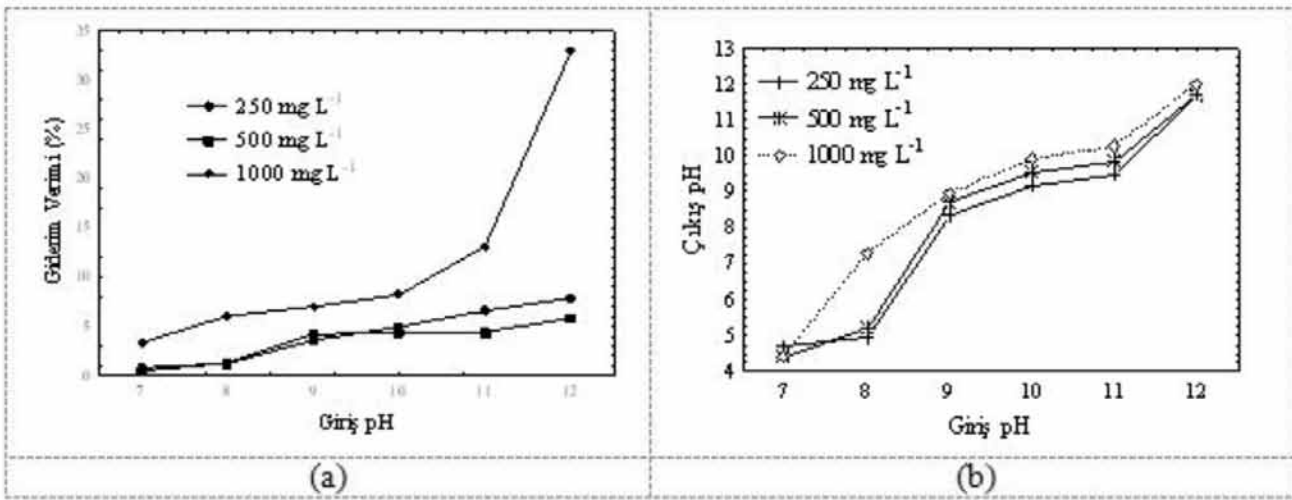
Şekil 6. Farklı bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksular için 0.1 g L⁻¹ koagülant dozajında çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine etkileri b) çıkış pH'larına etkisi.



Şekil 7. Farklı bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksular için 0.25 g L⁻¹ koagülant dozajında çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine etkileri b) çıkış pH'larına etkisi.



Şekil 8. Farklı bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksular için 0.5 g L⁻¹ koagülant dozajında çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine etkileri b) çıkış pH'larına etkisi.



Şekil 9. Farklı bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksular için 1 g L⁻¹ koagülant dozajında çözeltilerin başlangıç pH'larının a) giderim verimlerine etkileri b) çıkış pH'larına etkisi.

gülenen deneysel prosedür aynen tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6, 7, 8 ve 9'da verilmektedir.

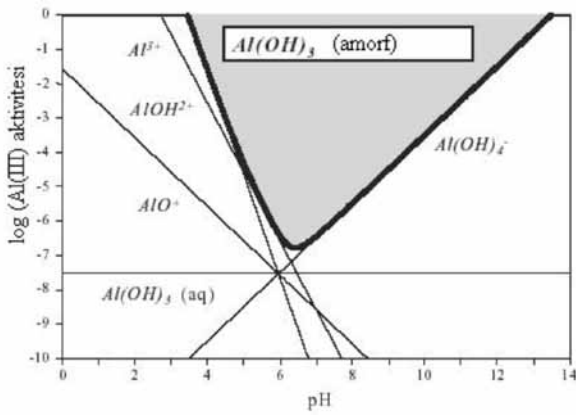
Şekiller incelendiğinde pH, bor konsantrasyonu ve koagülant dozajı parametrelerinin bor kirliliğinin giderimi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Başlangıç pH değeri ve bor konsantrasyonuna bağlı olarak sentetik atıksuya eklenen koagülant madde miktarı atıksuyun pH'sını değiştirerek giderim verimini etkilemektedir. En yüksek giderim verimi çıkış pH değeri 7-8.5 arasında olduğu zaman gözlemlenmiştir. Bu giderim verimi, bor konsantrasyonunun 1000 mg L⁻¹ ve başlangıç pH değerinin 12 olduğu çözeltilere, 1 g L⁻¹ koagülant ilavesi ile gözlemlenmiştir. Bu şartlarda çözeltinin çıkış pH değerinin 7.5-8.5 arasında olduğu ve giderim veriminin yaklaşık % 35 olduğu gözlemlenmiştir.

Tartışma

Araştırmada koagülant olarak alüminyum sülfat kullanılmıştır. 250, 500 ve 1000 mg L⁻¹ bor konsantrasyonuna sahip sentetik atıksular için jar testi denemeleri yapılmıştır. Denemeler esnasında optimum karıştırma hızları, optimum pH, optimum koagülant cinsi ve dozajı araştırılmıştır.

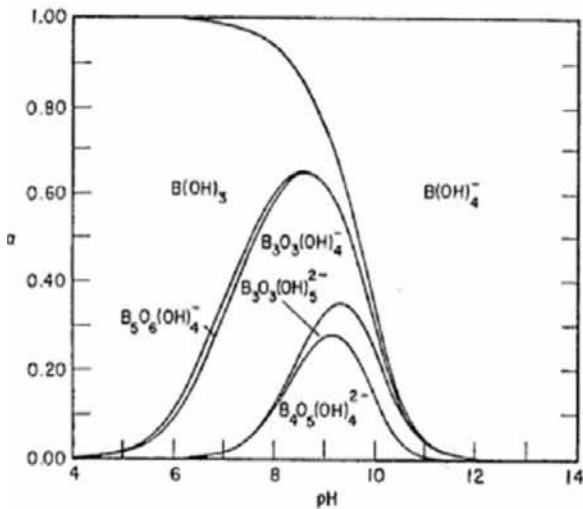
Alüminyum sülfat ile yapılan denemeler incelendiğinde farklı bor konsantrasyonuna ve farklı başlangıç pH'larına sahip sentetik atıksulara farklı koagülant dozajları uygulandığında çözeltilerin çıkış pH'ları 7-8.5 arasında olduğunda bor giderim veriminin en yüksek olduğu görülmektedir. Alüminyumun ortam pH'sına bağlı olarak çözünme diyagramı Şekil 10'da verilmiştir. Diyagram incelendiğinde bu pH aralıklarında ortamda bulunan alüminyumun büyük bir kısmının

$Al(OH)_3$ formunda bulunduğu görülmektedir. Bu pH aralığı, $Al(OH)_3$ çözünürlüğünün en az olduğu pH aralığıdır. Bu verilerin ışığında ortamda yeterli yumaklaştırıcının bulunması ve pH'nın alüminyumun en düşük çözünürlüğe sahip olduğu aralıkta olmasının arıtım veriminin artmasında en önemli etken olduğu düşünülmektedir (Jiang et al., 2002). Şekil 10' da görüldüğü gibi bu aralığın altında ve üstündeki pH değerlerinde alüminyum $Al(OH)_{3(k)}$ formundan uzaklaşmakta ve ortamda çözünebilir alüminyum bileşikleri formunda bulunmaktadır. Ortamda alüminyum iyonları olmasına rağmen bu pH aralıklarının dışında flok oluşturacak eğilimde değildir.



Şekil 10. Alüminyumun ortam pH'sına bağlı olarak çözünme diyagramı (Jiang et al., 2002).

Şekil 11'de sulu bor çözeltilerinde pH'ya bağlı olarak oluşan çeşitli borat iyonlarının dağılımı verilmiştir. Bu diyagram incelendiğinde, bor iyonlarının düşük pH'larda poliboratlar, yüksek pH'larda ise monoboratlar şeklinde bulunduğu görülmektedir (Juang, 1993).



Şekil 11. Sulu ortamda pH'ya bağlı olarak borat iyonlarının dağılımı (Jiang et al., 2002).

Sulu bor çözeltilerinde ortam pH'sı 8'den büyük olduğunda bor iyonları genellikle $B(OH)_4^-$ formunda bulunmaktadır (Anderson and Eyring, 1964; Jiang et al., 2002). Şekiller incelendiğinde yukarıda belirtilen pH aralıklarında oluşan $Al(OH)_{3(k)}$ flokları ortamdaki borun giderimini yapabilmekte ve pH'nın aşağı ya da yukarı salınımlarında ise flok oluşumunun yetersiz kalmasından dolayı giderim verimi düşük değerlerde kalmaktadır. Yapmış olduğumuz tüm denemeler sonucunda alüminyum sülfat için maksimum giderim veriminin % 35 olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Alkan, U., Teksoy, A., Savas Baskaya, H., 2006. Determination of optimum coagulation conditions for the removal of natural organic matter from surface waters. *Ekoloji*, 15(59): 18-26.
- Anderson, J.L., Eyring, E.M., Whittaker, M.P., 1964. Temperature jump rate studies of polyborate formation in aqueous boric acid. *J Phys Chem.*, 68: 1128-1132.
- Badruk, M., Kabay, N., Demircioglu, M., Mordogan, H., Ipekoglu, U., 1999a. Removal of boron from wastewater of geothermal power plant by selective ion-exchange resins. I. Batch sorption-elution studies. *Separation Science and Technology*, 34: 2553-2995.
- Badruk, M., Kabay, N., Demircioglu, M., Mordogan, H., Ipekoglu, U., 1999b. Removal of boron from wastewater of geothermal power plant by selective ion-exchange resins. II. column sorption-elution studies. *Separation Science and Technology*, 34:2981-2569.
- Demircioğlu, A., 1972. Bor Titrasyonlarına Kısa Bir Bakış, *Kimya ve Sanayii*, XX, s: 89.
- Dilek, C., Ozbelge, H.O., Bicak, N., and Yilmaz, L.2002. Removal of boron from aqueous solutions by continuous polymer enhanced ultrafiltration with polyvinyl alcohol. *Separation Science and Technology*, 37: 1257-1271.
- Eckenfelder, W.W., 2000. *Industrial Water Pollution Control*. McGraw Hill International Edition, Environmental Engineering Series, p: 124-138.
- Hascakır, B., Dolgen, D., 2008. Utilization of Clay Minerals in Wastewater Treatment: Organic Matter Removal with Kaolinite. *Ekoloji*, 17(66): 47-54.
- Jiang, J., Graham, N., Andre, C., Kelsall, G., Brandon, N., 2002. Laboratory study of electrocoagulation-flotation for water treatment. *Water Research*, 36: 4064-4078.
- Juang, W.N., Kun, J.L., 1993. Characteristic of boron adsorption on strong-base anion Exchange resin. *Ann. Nucl. Energy*, 20(7): 455-462.
- Karahan, S., Yurdakoç, M., Seki, Y., Yurdakoç, K., 2006. Removal of boron from aqueous solution by clays and modified clays. *Journal of Colloid and Interface Science*, 293: 36-42.
- Matsui, Y., Matsushita, T., Sakuma, S., Gojo, T., Mamiya, T., Suzuki, H., Inoue, T., 2003. Virus inactivation in aluminum and polyaluminum coagulation. *Environmental Science and Technology*, 37: 5175-5180.

- Nadav, N., 1999. Boron removal from seawater reverse osmosis permeate utilizing selective ion exchange resin. *Desalination*, 124: 131-135.
- Ozturk, N., Kavak, D., 2005 Adsorption of boron from aqueous solutions using fly ash: Batch and column studies. *Journal of Hazardous Materials*, 127: 81-88.
- Polat, H., Vengosh, A., Pankratov, I., Polat, M., 2004. A new methodology for removal of boron from water by coal and fly ash. *Desalination*, 164: 173-188.
- Rajaković, L.V., Ristić, M.D., 1996. Sorption of boric acid and borax by activated carbon impregnated with various compounds. *Carbon*, 34, 6769-774.
- Sahin, S., 1996. Mathematical model of boron adsorption by ion exchange. *Models in Chemistry*, 133:143-150.
- Schilde, U., Uhlemann, E., 1991. Extraction of boric acid from brines by ion exchange. *International Journal of Mineral Processing*, 32: 295-305.
- Simonnot, M.O., Castel, C., Nicolaie, M., Rosin, C., Sardin, M.L., Jauffret, H., 2000. Boron removal from drinking water with a boron selective resin: is the treatment really selective. *Water Research*, 34: 109-116.
- Taniguchi M., Fusaoka Y., Nishikawa T., Kurihara, M., 2004. Boron removal in RO seawater desalination. *Desalination*, 167: 419-426.
- Wanga, Y, Zhoua., W.Z, Gaoa, B.Y., Xua, X.M, Xub, G.Y., 2009. The effect of total hardness on the coagulation performance of aluminum salts with different Al species. *Separation and Purification Technology*, 457-462.
- Yazicigil, Z., Oztekin, Y., 2006. Boron removal by electro dialysis with anion-exchange membranes. *Desalination*, 190:71-78.
- Yılmaz, A.E., Boncukcuoglu, R., Yılmaz, M.T., Kocakerim, M.M., 2005. Adsorption of boron from boron-containing wastewaters by ion exchange in a continuous reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 117: 221-226.
- Yurdakoç, M., Seki, Y., Karahan, S., Yurdakoç, K., 2005. Kinetic and thermodynamic studies of boron removal by Siral 5, Siral 40, and Siral 80. *Journal of Colloid and Interface Science*, 286: 440-446.