



## İÇME VE SULAMA SULARINDA BOR KİRLİLİĞİ VE BOR GİDERME YÖNTEMLERİ

### BORON CONTAMINATION IN DRINKING-IRRIGATION WATER AND BORON REMOVAL METHODS

Meltem BİLİCİ BAŞKAN<sup>1\*</sup>, Nevsi ATALAY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, 20070, Denizli.  
mbilici@pau.edu.tr, nevsiatalay@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: 21.11.2012, Kabul Tarihi/Accepted: 08.04.2013

doi: 10.5505/pajes.2014.47955

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

#### Özet

Periyodik cetvelin 3A grubunda yer alan bor yüksek iyonlaşma potansiyeline sahip olması nedeniyle yarı metal olarak kabul edilir. Yerkabuğundaki ortalama bor konsantrasyonu 10 mg/kg'dır. Bor doğada Ca, Na ve Mg'un tuzları şeklinde bulunur. Yüksek konsantrasyonlarda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları; borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri şeklinde daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesi olan bölgelerinde bulunmaktadır. Bor, bitkiler için gerekli bir mikro besin elementi olmanın yanı sıra, gerekli tüm besin elementleri içerisinde, eksiklik belirtilerine neden olan miktarı ile toksik etki yapan miktarı, birbirine çok yakın olan tek elementtir. Bor su ortamında genellikle borik asit ve kısmen de borat tuzları formlarında bulunmaktadır. Pek çok endüstride kullanım alanı bulan bor bileşiklerinin endüstriyel gelişmelere bağlı olarak yüzeysel sulara bulunan konsantrasyonu artış göstermektedir. Yüzeysel sulara bulunan bor aynı zamanda evsel atıksulardan da kaynaklanmaktadır. Türkiye'de içme ve sulama sularını en çok kirleten toksik elementlerin başında bor gelmektedir. Bu nedenle bor giderimi hem insan sağlığı açısından hem de sağlıklı tarım ürünü yetiştirilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Sulardan bor giderimi için uygulanan temel yöntemler arasında iyon değişimi, ultrafiltrasyon, ters osmoz ve adsorpsiyon gelmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Bor kirliliği, İçme suları, Sulama suları, Türkiye.

#### Abstract

Boron presents in IIIA group of periodic table and has high ionization capacity. Therefore it is classified as a metalloid. Average boron concentration in earth's crust is 10 mg/kg. It presents in the environment as a salts of Ca, Na, and Mg. Boron reserves having high concentration and economical extent are found mostly in Turkey and in arid, volcanic and high hydrothermal activity regions of U.S. as compounds of boron attached to oxygen. Boron is an essential micronutrient for plants, although it may be toxic at higher levels. The range in which it is converted from a nutrient to a contaminant is quite narrow. Boron presents in water environment as a boric acid and rarely borate salts. The main boron sources, whose presence is detected in surface waters, are urban wastes and industrial wastes, which can come from a wide range of different activities as well as several chemical products used in agriculture. In Turkey, the most pollutant toxic element in drinking and irrigation water is boron. Therefore boron removal is very important in terms of human health and agricultural products in high quality. Mainly boron removal methods from drinking water and irrigation water are ion exchange, ultrafiltration, reverse osmosis, and adsorption.

**Keywords:** Boron contamination, Drinking water, Irrigation water, Turkey.

#### 1 Giriş

Bor, yeryüzünde yüzden fazla minerali bulunan, değişik amaçlar ile kullanılan bir elementtir [1]. Bor bileşikleri toprak, kaya, yeraltı suyu, deniz suyu, yüzeysel su, bitki ve hayvanlarda doğal olarak bulunur. Ancak genellikle deniz suyunda ve kaplıca sularında bulunan bir elementtir. Doğada yaygın olarak bulunan bu element genellikle düşük konsantrasyondadır. Yerkabuğundaki ortalama bor konsantrasyonu 10 mg/kg'dır [2], [3]. Bor elementinin yerkabuğundaki genel dağılımı oldukça düşük konsantrasyonlarda olmasına karşın, bazı bölgelerdeki yüksek bor konsantrasyonları, ekonomik bor yataklarının oluşumuna neden olmaktadır [1]. Deniz suyundaki bor konsantrasyonu ortalama 4.5 ppm, tatlı sularda ise 0.01-1.5 ppm aralığındadır. Yer altı sularında bor konsantrasyonu bütün dünyada 0.3-100 ppm arasında değişmektedir. Ayrıca kanalizasyon atık sularında da bora rastlanmakta olup, bor konsantrasyonu 5-100 ppm arasındadır [4]-[6].

Son yıllarda Etibank tarafından yapılan arama, üretim ve zenginleştirme çalışmaları, ülkemizin bor rezervlerinin; büyüklüğü, minerallerin dünya pazarlarında aranılan

nitelikleri ve çeşitliliği açısından dünyada birinci sırada olduğunu göstermiştir. Türkiye'nin sahip olduğu madenler içerisinde, rezerv ve üretim kapasitesi, yüksek tenörü, rezerv büyüklüğü, işletme kolaylıkları ile gerek kalite ve çeşitlilik, gerekse de üretim maliyetlerindeki rekabet üstünlükleri açısından dünyada söz sahibi olabileceği en önemli maden, dünya rezervinin % 72'sine sahip olması sebebiyle bor cevherleridir [7], [8].

Bor, yeraltı suyunda doğal olarak, yüzey sularında endüstriyel kirletici olarak veya tarımsal yüzey akışların ve çürüyen bitki materyallerinin bir ürünü olarak bulunabilir. Ülkemizde sulama sularını en çok kirleten toksik elementlerin başında bor gelmektedir. Tarımsal üretimi ve insan sağlığını olumsuz etkileyen içme ve sulama sularındaki borun giderimi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada içme ve sulama sularında bulunan borun önemi, dünyadaki ve Türkiye'deki bor yatakları, bor mineralleri ve bileşikleri, bor kimyası, borun kullanım alanları, borun sağlık üzerine etkileri, borla ilgili standartlar ve sulardan bor giderim yöntemleri incelenmiş ve özellikle ülkemizdeki içme ve sulama sularında borun oluşumu ve kaynakları araştırılmıştır.

## 2 Borun Önemi

Temel mikronutrientlerden biri olması nedeniyle pek çok ürünün yetiştirilmesinde sulama suyundaki konsantrasyonu kritik bir rol oynar. Sulama suyunda belirli metabolik faaliyetler için mutlaka bor bulunması gerekmektedir [9].

Sulama suyundaki ve topraktaki bor konsantrasyonu hem ürünlerin yetişmesinde hem de kalitesinde önemli bir rol oynar [6], [10]. Borun hücre duvarlarının yapısal bir bileşeni olarak önemli bir rolü vardır [11]. Hücre duvarı oluşumundaki rolünün yanı sıra bor hücre duvarının yapısının stabilitesini sağlayan yapısal bütünlük için de gereklidir. Aynı zamanda membran taşınımı, enzim etkileşimleri, nükleik asit sentezi, fenol ve karbonhidrat metabolizması ve şeker, poliöl ve hidroksiasit taşınımında da önemli bir elementtir [10], [12]-[14]. Dolayısıyla ekonomik açıdan önemli sebze ve meyvelerin yetiştirilmesi için gerekli bir iz element olarak düşünülebilir. Bor, bitkilerin gelişmelerini tamamlamaları ve iyi ürün verebilmeleri için gerekli bir mikro besin elementi olmanın yanı sıra, gerekli tüm besin elementleri içerisinde, eksiklik belirtilerine neden olan miktarı ile toksik etki yapan miktarı, birbirine çok yakın olan tek elementtir [9].

Sulama suyundaki bor konsantrasyonunun yüksek olması, bitkilerde toksik semptomların görünmesine, bitkilerin fotosentez kapasitesinin ve üretkenliğinin azalmasına neden olmakta, bitki büyümesini olumsuz yönde etkilemekte ve bitki ölümünü hızlandırmaktadır [15]-[17]. Bor aynı zamanda insanların ve hayvanların beslenmesinde de önemli bir elementtir. Yetişkin bir insan için günlük olarak alınması gereken bor miktarı yaklaşık 1 mg'dır ve bu miktar normal

besin tüketimiyle sağlanmaktadır. Bundan dolayı bu elementi tamamlayıcı bir kaynağa ihtiyaç bulunmamaktadır [18].

İnsan ve hayvanlar için borun oldukça önemli, en azından faydalı bir element olduğuna dair yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır [19]. Fort ve arkadaşları (1999) borun en azından omurgalı hayvanların embriyolarının gelişiminde oldukça önemli olduğunu, bor yetersizliği durumunda gelişimsel bozuklukların ortaya çıktığını göstermişlerdir [20]. Beslenmeyle ilgili yapılan çalışmalar da borun kemik metabolizması ile ilgili oldukça faydalı etkileri olduğunu göstermektedir [21]. Ayrıca gıdalardaki bor organizmaların bağışıklık sistemlerini de etkilemektedir [19].

## 3 Dünyadaki ve Türkiye'deki Bor Yatakları

Dünya bor yatakları önem sırasına göre; Türkiye, ABD, Arjantin ve Rusya Federasyonu olmak üzere dört ülke üzerinde dağılmıştır. Bunların dışında; Çin, Şili, Bolivya, Peru gibi ülkeler de bor yataklarına sahiptir [22]. Dünya bor rezervi konusunda kesin bir rakam vermek güç olmakla birlikte, Tablo 1'de de belirtildiği gibi, Dünya toplam bor rezervi yaklaşık 1.2 milyar ton olup; bu rezervin % 72.2'si Türkiye'de (851 milyon ton B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), % 8.5'i Rusya'da ve % 6.8'i ABD'de bulunmaktadır [8].

Türkiye'deki yatakların en önemli minerali kolemanittir (Ca<sub>2</sub>B<sub>6</sub>O<sub>11</sub>.5H<sub>2</sub>O). Susurluk'ta panderit (5CaO.6B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O), Bigadiç'te üleksit (NaCaB<sub>5</sub>O<sub>9</sub>.8H<sub>2</sub>O), Kırka'da ise tinkal (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O) en çok rastlanan minerallerdir [23]. Türkiye'de bilinen bor rezervleri dört ana bölgede toplanmıştır. Bunlar Emet, Bigadiç, Kırka ve Mustafa Kemal Paşa'dır [24].

Tablo 1: Dünya Bor madeni rezervleri (milyon ton B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [8].

Ülke	Görünür Rezervler	Muhtemel Rezervler	Toplam Rezervler	Toplam Rezerv İçindeki Payı (%)	Yaşam Süresi (yıl)
Türkiye	227	624	851	72.2	389
Rusya	40	60	100	8.5	69
ABD	40	40	80	6.8	55
Şili	8	33	41	3.5	28
Çin	27	9	36	3.1	25
Kazakistan	14	1	15	1.3	10
Peru	4	18	22	1.9	15
Bolivya	4	15	19	1.6	13
Arjantin	2	7	9	0.8	6
Sırbistan	3	0	3	0.3	-
<b>TOPLAM</b>	<b>369</b>	<b>807</b>	<b>1176</b>	<b>100</b>	

## 4 Bor Kullanım Alanları

Bor pek çok endüstri için oldukça faydalı bir bileşendir. Bor bileşikleri ilaç üretiminden metal endüstrisine kadar geniş bir aralıkta kullanılmaktadır [25]. Cam endüstrisi dünyadaki toplam bor bileşiklerinin üretiminin yarısından fazlasını kullanan en önemli endüstridir. Cam endüstrisinin yanı sıra bor, temizleme ürünlerinde, yarı iletkenlerde, kanser tedavisinde ve kozmetik üretiminde de kullanılmaktadır. Nükleer endüstride, nükleer reaksiyon hızını kontrol etmek ve nükleer bir patlamadan kaçınmak amacıyla bor-10 izotopu kullanımı oldukça önemlidir [26].

Günümüzde bor bileşiklerinin görevini aynı kalitede ve ucuzlukta gerçekleştirebilecek başka bir mineral olmaması borun önemini arttırmaktadır [27].

Borun kullanım alanlarındaki tüketimin hızla artışı kadar, yeni kullanım alanlarının da günden güne artışı ve borun yakın gelecekte enerji üretim kaynağı olarak kullanılabilme olasılığı, bu hammaddeyi diğerleri arasında bir ayrıcalık kazandırmaktadır [22].

Bor üzerinde yapılan araştırmalar, özellikle savaş ve uzay endüstrisi açısından önem kazanmaktadır. Örneğin bor karbür, (B<sub>4</sub>C), 2450 °C'de eriyen, kimyasal tepkimelere ve radyasyona duyarlı, oldukça sert bir maddedir. Özgül ağırlığının 2.4 gr/cm<sup>3</sup> olması yanında, elmas ve bor nitrürden sonra en sert ve en dayanıklı madde olması nedeniyle de uçak ve diğer askeri araç ve gereçlerin yapımında yeri tutulamaz. Bor karbür nükleer enerji santrallerinde, nötron emici özelliği nedeniyle, denetim çubukları yapımında da önemli bir maddedir.

## 5 Bor Mineralleri ve Bileşikleri

Borun oksijene karşı yüksek bir ilgisi vardır ve oksit formlarda oluşur [28]. Toprak ve kayada, en yaygın türü boraks olmak üzere, borat olarak bulunmakta [3], su ortamında ise genellikle borik asit ve kısmen de borat tuzları formlarında bulunmaktadır [29]. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Yaygın olarak bulunan bor minerallerinden bir tanesi bir tür aluminoborosilikat minerali olan ve yapısında %10'a kadar bor içerebilen Turmalin'dir. Ancak, sanayide alkali ve toprak alkali bor mineralleri olan tinkal ( $\text{Na}_4\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), kernit ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), kolemanit ( $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ve üleksit ( $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) kullanılmaktadır.

Bor içeren yüzü aşkın mineral olmasına rağmen, bunlardan ancak bir kısmı ticari değere sahiptir ve uluslararası pazarlarda işlem görür. Ticari önemi olan bor bileşiklerinin çoğu, borun oksijenle ve toprak alkalilerle yapmış olduğu bileşiklerdir. Bir borat anyonu, metalik bir katyon ya da hidrojenle birleşerek bu mineralleri oluşturur ve mineraller

birleştikleri metal katyonunun adıyla tanınırlar (sodyum borat, kalsiyum borat gibi). İnorganik olan bu mineraller uluslararası pazarlarda  $\text{B}_2\text{O}_3$  içerikleri göz önüne alınarak pazarlanırlar [27].

Bor mineralleri yapılarında bulunan Ca, Mg, Na elementlerine göre isimlendirilirler. Na kökenli olanlar tinkal (boraks), Ca kökenli olanlar kolemanit ve Na-Ca kökenli olanlar üleksit olarak adlandırılır.

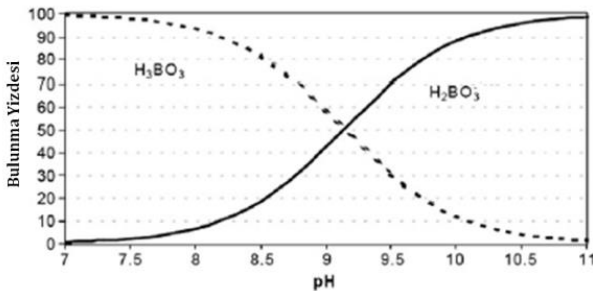
Bor bileşikleri içinde ticari olarak en fazla önem taşıyanları boratlardır. Bunlardan boraksın gerek doğada yaygın bulunuşu, gerekse endüstriyel kullanım alanının çok oluşu nedeniyle, bor bileşikleri ile ilgili endüstri boraks endüstrisi; madenciligi de boraks madenciligi olarak bilinir. Boraks madenciligi ve endüstrisi, katı boratlar kadar tuzlu göl sularından elde edilen ürünleri ve volkan bacalarından çıkan gazlardan elde edilen bor ürünlerini de kapsar. Ticari önemi olan ve kristal suyu içeren boratlardan en önemlileri, kimyasal kompozisyonları ile birlikte Tablo 2'de verilmiştir [8].

Tablo 2: Ticari önemi olan bor mineralleri [8].

Mineral	Formülü	% $\text{B}_2\text{O}_3$	Dünyada Bulunduğu Yer	Türkiye'de Bulunduğu Yer
<b>Boraks (Tinkal)</b>	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	36.6	Türkiye, ABD	Eskişehir
<b>Kernit (Razorit)</b>	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	51.0	Türkiye, ABD, Arjantin	Kırka
<b>Üleksit</b>	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	43.0	Türkiye, Arjantin	Kırka, Emet, Bigadiç
<b>Propertit</b>	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	49.6	Türkiye, ABD	Mustafa Kemal Paşa, Kestelek köyü, Emet, Doğanlar,
<b>Kolemanit</b>	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	50.8	Türkiye, ABD	Emet, Bigadiç, Kırka, Mustafa Kemal Paşa, Kestelek Köyü
<b>Pandermit (Priseit)</b>	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	49.8	Türkiye	Sultançayırı, Bigadiç
<b>Borasit</b>	$\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$	62.2	Türkiye	Susurluk
<b>Hidroborasit</b>	$\text{CaMgBO}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50.5	Türkiye	Emet, Doğanlar, İğdeköy, Kestelek

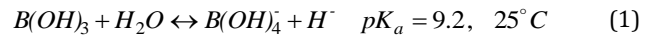
## 6 Bor Kimyası

Borik asit 9.2 pKa değerine sahip çok zayıf bir asittir. pH'ın 7'den küçük olduğu durumlarda çözünmeyen formu olan borik asit şeklinde, pH'ın 10.5'den daha büyük değerlerinde ise çözünmüş borat formunda bulunmaktadır. Düşük pH'larda borik asitin esas türü Şekil 1'de de görüldüğü gibi nötral formdadır [16].

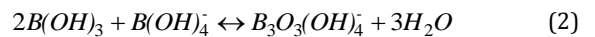


Şekil 1: pH'ın bir fonksiyonu olarak  $\text{H}_3\text{BO}_3/\text{H}_2\text{BO}_3^-$  dağılımı [16].

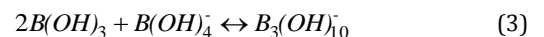
Borik asit ve boratın herhangi bir sıvı sistem içerisindeki oranı temel olarak pH değerine bağlıdır. Yüksek pH değerlerinde tek değerlikli borat anyonu  $\text{B}(\text{OH})_4^-$  hakim olurken, daha düşük pH'larda iyonize olmamış borik asit  $\text{B}(\text{OH})_3$  baskın olarak bulunmaktadır. Borik asidin suda çözünmesi aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir [16]:



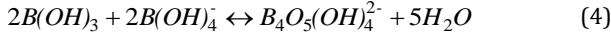
pH 6-11 arasında ve yüksek konsantrasyonlarda ( $>0.025$  mol/L),  $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_4^-$ ,  $\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4^-$  ve  $\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_4^-$  gibi yüksek çözünürlüklü poliborat iyonları oluşmaktadır [16]. Trimer borat oluşumu iki şekilde gerçekleşmektedir. Trimerik hidroksiboratin ( $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_4^-$ ) halka tipinin yapısı ve yüksek çözünürlüğü nedeniyle, ilk reaksiyon  $\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_4^-$  oluşturur [16]:



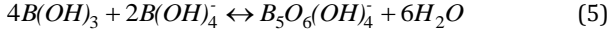
İkincisi reaksiyon ise aşağıdaki gibidir [16]:



Sonuç olarak  $B_3(OH)_{10}^-$  oluşumuna neden olur. Yüksek bor konsantrasyonlarında, tetraboratların oluşumu aşağıdaki reaksiyon sonucu gerçekleşmektedir [16]:



Pentaborat oluşumu ise aşağıda verilmiştir [16]:



## 7 İçme ve Sulama Sularında Borun Oluşumu ve Kaynakları

Bor, yeraltı suyunda doğal olarak, yüzey sularında endüstriyel kirletici olarak veya tarımsal yüzey akışların ve çürüyen bitki materyallerinin bir ürünü olarak bulunabilir. Ülkemizde sulama sularını en çok kirleten toksik elementlerin başında bor gelmektedir.

Pek çok endüstride kullanım alanı bulan bor bileşiklerinin endüstriyel gelişmelere bağlı olarak yüzeysel sulara bulunan konsantrasyonu artış göstermektedir. Yüzeysel sulara bulunan borun temel kaynakları deterjan ve temizleme ürünleri bakımından zengin evsel atıksular, özellikle tarımda kullanılan çeşitli kimyasalların üretildiği endüstrilerden kaynaklanan atıklardır [30], [31]. Bununla beraber ülkemizde içme suyu kaynağı olarak en çok kullanılan yer altı sularındaki bor genellikle doğal kaynaklıdır.

Dünya topraklarında genellikle kıtlığı gözlenen bor elementinin, Türkiye topraklarında bolluğu gözlenmektedir.

Dünyadaki en fazla bor rezervine sahip ülke olan Türkiye'de de bazı yer altı sularında yüksek konsantrasyonda bor bulunduğu görülmüştür. Bor kirliliği ülkemiz açısından önemli bir sorundur. Bor madenleri ve borik asit tesislerinden kaynaklanan atıklar kirliliğin esas kaynaklarıdır. Ayrıca özellikle Türkiye'nin Batı Anadolu Bölgesinde yüksek miktarda bor içeren jeotermal sular bulunmaktadır. [32]. Batı Anadolu'da bulunan akiferlerdeki bor konsantrasyonunun 1-63 mg/L aralığında olduğu rapor edilmiştir [33]. Türkiye'deki çeşitli bor tesisleri önemli çevre sorunlarına neden olmaktadır. Tesislerden yüksek bor içeren (yaklaşık 1500 mg/L) atıksular göletlere boşaltılmaktadır. Bu göletler bor tesis alanından daha geniş bir alanı işgal etmektedir [34].

Türkiye'de bor içeriği yüksek sular sebebiyle, Afyon, Aksaray, Bigadiç, Burdur, Konya-Ereğli, Eskişehir, Germencik-Ömerbeyli, Iğdır, Karasaz, Kayseri, Yüksekova ve Salihli yörelerindeki topraklarda yüksek düzeyde bor kirliliği görülmektedir. Bununla birlikte, bor mineralince zengin olan yeraltı sıcak su kaynaklarının, sulama sularına karışması önemli bir sorundur. Büyük Menderes Vadisi, jeotermal sıcak su kaynakları bakımından oldukça zengin bir bölgedir. Burada bulunan tesislerin birçoğu atık sularını Büyük Menderes Nehrine boşalttığı için Büyük Menderes Nehri suyunda ve bu suyun kullanıldığı tarım alanlarında bor kirliliği giderek artmaktadır [9].

## 8 Borun Sağlık Üzerine Etkileri

Yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bor insan sağlığı ve bitki türleri üzerinde toksik etki yapan bir elementtir. Bitkilerin büyümesinde oldukça önemli bir element olan bor, gereken miktardan çok az daha fazla alınması durumunda bitkiler için toksik olmaktadır. Dolayısıyla bor konsantrasyonunun yetersizliği ile fazlalığı arasında oldukça dar bir aralık bulunmaktadır. Mesela,

ayçiçeklerinde 0.5 ppm bor iyi bir büyüme için gerekliken 1 ppm bor kesinlikle toksik etki yapmaktadır [35].

Bitkiler üzerine borun olumsuz etkileri ile ilgili oldukça geniş çaplı araştırmalar yapılmıştır. Borun fizyolojik etkileri arasında kök hücre bölünmesi, gecikmeli filiz ve kök büyümesi, fotosentezin engellenmesi ve yapraklarda klorofilin azalması gösterilebilir [11]. Pek çok üründe bor toksisitesi semptomları arasında yaşlı yapraklar üzerinde yanıklar, yaprakların sararması, bozulmanın hızlanması ve sonunda ölmesi yer almaktadır. Bu belirtiler bor miktarına ve bitkinin toleransına göre değişmektedir [36]. Topraklarda gereğinden fazla miktarda bulunan borun, toksik etkileri nedeniyle bitki büyüme ve gelişmesini sınırlandırıcı etkisi, orta Anadolu'da karşılaşılan en yaygın mikro besin elementi sorunlarından [9].

Borun hayvanlar ve insanlar üzerine toksik etkileri çok iyi bilinmemektedir. Bor toksisitesi, maruz kalınma süresine, sıklığına ve miktarına bağlıdır. Dolayısıyla toksisitenin ölçümü oldukça zordur. Yapılan çalışmaların büyük bir bölümü borun hayvanlar üzerine olan toksik etkisinin ortaya çıkarılması adınıdır. Görülen en önemli rahatsızlıklar arasında deri ile ilgili hastalıklar, büyümenin gecikmesi ve tavşan ve farelerin üreme sisteminde olumsuz etkiler sayılabilir [37]-[39].

Bor bileşikleri, insan vücudunda solunum ve sindirim yollarıyla veya mukoz membranlar aracılığı ile girer. Çözünen bor bileşikleri vücuda alındıktan sonra, beyin omurilik sıvısının derişimi artar, en yüksek derişimlere beyin, karaciğer ve yağ dokularında rastlanır. En fazla kemiklerde birikir. Genellikle üre, dışkı, süt ve ter ile vücuttan atılır. İnsan üzerinde borik asit ve boraksın etkisi, mide bulantısı, şiddetli kusma, karın ağrısı ve ishal ile kendini gösterir. Karakteristik diğer bir belirti de deri döküntüleri ile sonuçlanan kızartılı isiliktir. Ciddi durumlarda taşikarti ve akteriyal basınçta düşme ile şok olabilir. Öldürücü doz çocuklar için 5-6 g, yetişkinler için ise 10-25 g'dır [40].

Vücuda nasıl girerse girsin, % 90-95 kadarı vücutta birikmeden hemen üre ile dışarı atılmaktadır. Yani vücutta pek tutulmamaktadır. Yalnızca, kemik, tırnak ve kıllarla karaciğer ve dalak gibi organlarda biraz birikmektedir.

## 9 Borla İlgili Standartlar

Uzun yıllar boyunca bor toksik bir element olarak kabul edilmemiştir. 1958, 1963 ve 1971 yıllarında Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) hazırladığı İçme Suları için Uluslararası Standartlar'da bordan bahsedilmemiştir. İçme sularında bordan ilk defa 1984 yılında yayınlanan İçme Suyu Kalitesi dokümanında bahsedilmiş ve bor giderimi ile ilgili herhangi bir işleme gerek olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer bir deyişle bor zararlı olarak kabul edilmemiştir. DSÖ tarafından içme sularında bor konsantrasyonu için yönerge ilk kez 1993'de çıkarılmıştır. Laboratuvar çalışmalarında borun hayvanlar üzerinde çeşitli zararlı etkilere neden olduğu görülerek 1993 standartlarında önerilen değer 0.3 mg/L olarak belirlenmiştir. Ancak sulardan bor gideriminde kullanılan proseslerin performanslarının iyi olmaması nedeniyle bu değer 1998 yılında 0.5 mg/L'ye yükseltilmiştir. Bu değer günümüzde de geçerlidir. Bununla beraber, Birleşik Krallık ve Amerika Birleşik Devletleri'nde gerçekleştirilen borun beslenme yoluyla vücuda alınması ile ilgili oldukça kapsamlı çalışmaların sonucunda, yiyecek yoluyla ve havanın solunması suretiyle borun vücutta alınma oranının beklenildiğinden daha az olduğu görülmüştür. Kabul edilebilir günlük alım miktarı da göz önünde bulundurularak

bor için izin verilen maksimum konsantrasyon 2.4 mg/L'ye yükseltilmiştir [6].

Tablo 3 dünyanın çeşitli bölgelerinde bor için içme sularında izin verilen maksimum konsantrasyonları göstermektedir. Tablodan da görüldüğü gibi birçok ülke DSÖ'nün önerisine uymamaktadır. Suudi Arabistan ve İsrail DSÖ'nün hazırladığı kılavuz değere uyan tek ülke olarak görülmektedir. Bu arada ABD içme usularındaki bor konsantrasyonu açısından herhangi bir yönetmeliğe sahip değilken, Kanada ve Avustralya ise belirlenen değerden çok daha yüksek maksimum bor konsantrasyonuna izin vermektedir. Bunun iki nedeni bulunmaktadır.

Tablo 3: Dünyanın çeşitli bölgelerine ait içme suyunda izin verilen maksimum bor konsantrasyonları [6].

Bölgeler	Maksimum bor Konsantrasyonu mg/L
Suudi Arabistan	0.5
Amerika Birleşik Devletleri	-
Minnesota	0.6
New Hampshire	0.63
Florida	0.63
Maine	0.63
Wisconsin	0.9
Avrupa Birliği	1
Güney Kore	1
Japonya	0.2
Yeni Zelanda	1.4
İsrail	0.5
Avustralya	4
Kanada	5
Türkiye	1
DSÖ'nün tavsiye ettiği değer	0.5

Birincisi insan üzerindeki zararlı etkilerini kanıtlayan yeterli bilginin olmamasıdır. İkincisi ise standartlardaki değeri elde edebilmek için uygulanan suların bor giderim yöntemleri oldukça zor ve pahalı yöntemlerdir [6]. Ülkemizde de İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'e göre içme sularında izin verilen maksimum bor konsantrasyonu 1 mg/L'dir.

## 10 Bor Giderme Yöntemleri

Tarımsal üretimi ve insan sağlığını olumsuz etkileyen içme ve sulama sularındaki borun giderimi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. En çok kullanılan bor giderme yöntemleri ve elde edilen verimler karşılaştırılmalı olarak Tablo 4'de verilmiştir.

Dünyada tatlı su kaynaklarının hızla azalmaya başlaması nedeniyle, yaklaşık 5 mg/L bor içeren deniz suyunun hem içme suyu hem de sulama suyu amaçlı alternatif bir su kaynağı olarak kullanımı cazip hale gelmiştir. Dolayısıyla farklı uygulamalar için artırılmış deniz suyundaki bor konsantrasyonunun kontrolü oldukça önemlidir. Suların bor giderimi için uygulanan temel yöntemler arasında çöktürme-koagülasyon [41], adsorpsiyon [31], elektrokoagülasyon [42], iyon değişimi [43], ters osmoz [46] yer almaktadır. Ancak bu yöntemlerle bor gideriminde bazı kısıtlar nedeniyle standartlar sağlanamamaktadır. Bu yöntemler özellikle düşük bor konsantrasyonlarında çeşitli sınırlamalara sahiptir. Mesela, ters osmoz yöntemi, normal pH şartlarında deniz suyundan bor giderimi için yetersiz kalmaktadır.

Tablo 4. Sulardan bor giderme yöntemleri ve verimleri.

Yöntem	İşletme şartları	Verim/Kapasite	Referans
Kimyasal Koagülasyon (KK) + Elektrokoagülasyon (EK)	Elektrot türü: Alüminyum, Koagülant türü: Alüminyum klorür B = 500 - 1000 mg/L, optimum pH = 8 Alüminyum dozu = 7.45 g/L, Uygulanan elektrik akımı = 0 - 5 A	KK ile %24 EK ile %94	[41]
Elektrokoagülasyon	Elektrot türü: Alüminyum, Kullanılan elektrolit: CaCl <sub>2</sub> B = 100 - 1000 mg/L, optimum pH = 8, Sıcaklık = 25°C Uygulanan elektrik akımı = 1.2 - 6.0 mA/cm <sup>2</sup>	%97	[42]
İyon Değişimi	Reçine türü: Dowex 2x8 anyon değiştirici reçine Optimum pH = 9, Sıcaklık = 25°C, B = 600 mg/L, Reçine miktarı = 1g/50 ml, Temas süresi = 480 dak	≈%50	[43]
Adsorpsiyon	Adsorban madde ve miktarı: uçucu kül (UK), 100 g/L; zeolit (Z), 50 g/L, demineralize linyit (DL), 50 g/L Optimum pH = 10, B = 10 ppm, Denge zamanı = 24 saat, Sıcaklık = 25°C	UK ile >%90 Z ile <%20 DL ile <%20	[31]
Adsorpsiyon	Adsorban madde ve miktarı: nötrale edilmiş kırmızı çamur, 6 g/L Denge zamanı = 20 dak, B = 12 - 200 mg/L, Optimum pH = 7, sıcaklık = 25°C	>%90	[44]
Adsorpsiyon	Adsorban madde: atık lüle taşı (LT) ve modifiye edilmiş atık lüle taşı (MLT) Denge zamanı = 48 saat, optimum pH = 10, Sıcaklık = 20°C, B = 600 mg/L	LT ile 96.15 mg/g MLT ile 178.57 mg/g	[45]
Ters Osmoz	Kullanılan membran: SWHR, basınç = maks. 40 bar Optimum pH = 11, sıcaklık = 34°C, B = 24.8 ve 9.4 mg/L	%99	[46]
Ters Osmoz	B = 5 mg/L, sıcaklık = 21.9°C, optimum pH = 9	%69	[47]

Bu yöntemde pH'nin yükseltilmesi bor giderimini arttırırsa da yüksek pH tortu oluşturma, korozyon ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir. [48]-[52]. Elektrokoagülasyon yöntemi ile yapılan bir çalışmada bor gideriminde alüminyum [42], demir [53] ve çinko [54] elektrot denenmiş ve yüksek bor konsantrasyonlarında % 90'ın üzerinde verim elde edilmiştir. Herhangi bir kimyasal madde ilavesi gerektirmeden ve oldukça makul bir elektrik enerjisi tüketimi ile (maksimum 0.8 kw saat/m<sup>3</sup>) yüksek bor giderme verimi elde edilmesi laboratuvar ölçekli modellerden tam ölçekli modellere geçiş için umut verici bulunmuştur.

Sulardan bor giderimi amacıyla gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise kimyasal koagülasyon yöntemi ile elektrokoagülasyon yöntemi karşılaştırılmıştır [41]. Elektrokoagülasyon yönteminde alüminyum elektrotların, kimyasal koagülasyon yönteminde ise koagülant olarak alüminyum klorürün kullanıldığı çalışmada, elektrokoagülasyon ile çok daha yüksek bor giderme verimi elde edilmiştir. Elektrokoagülasyon yöntemi ile optimum koşullarda elde edilen verim % 90'ın üzerinde iken, kimyasal koagülasyon kullanılarak sadece % 24 verim elde edilebilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yüksek uygulama ve rejenerasyon maliyetine rağmen içme sularından bor giderimi için en uygun yöntemin borat anyonları ile kompleks oluşturan bor seçici reçinelerin kullanımı olduğu görülmüştür [55]. Ancak bu yöntemle bor giderimi çok da ekonomik olmadığı için daha etkili ve ekonomik bir teknolojiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Son yıllarda, bazı sorpsiyon (adsorpsiyon, biyosorpsiyon ve iyon değişimi) prosesleri, bazı yeni materyallerin kullanılmaya başlanmasından dolayı sulardan toksik maddelerin gideriminde etkili yöntemler olarak önem kazanmışlardır. Şimdiye kadar modifiye edilmiş veya edilmemiş kil mineralleri, polimerik jeller ve aktif karbon gibi pek çok farklı materyal adsorpsiyon yöntemi ile su ve atıksulardan bor giderimi için kullanılmışlardır. Bor gideriminde adsorban madde olarak kullanılan materyaller arasında sepiyolit [45], kırmızı çamur [44], magnezyum oksit [30], hidrotalsit benzeri bileşikler [56] ve modifiye edilmiş bentonit [49] yer almaktadır.

Su ve atıksuların adsorpsiyon yöntemi ile arıtımında düşük maliyetli ve kolaylıkla elde edilebilir materyallerin kullanılması ile ilgili son yıllarda oldukça fazla araştırma bulunmaktadır. Adsorpsiyon, düşük kirletici konsantrasyonlarında nispeten daha kullanışlı ve ekonomik bir yöntemdir. Yüksel ve Yürüm (2010) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada sulardan klinoptilolit kullanılarak bor gideriminde önemli bir verim elde edilememiştir [31].

## 11 Kaynaklar

- [1] Çalık, A., "Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri", Mühendis ve Makine Dergisi, 508, 36-41, 2002.
- [2] Badruk, M., Kabay, N., Demircioğlu, M., Mordogan, H., İpekoglu, U., "Removal of Boron from Wastewater of Geothermal Power Plant by Selective Ion-Exchange Resins-Batch Sorption-Elution Studies", Separation Science and Technology, 34 (13), 2553-2569, 1999.
- [3] Volska, J., Bryjak, M., Kabay, N., "Polymeric microspheres with N-methyl-D-glucamine ligands for boron removal from water solution by adsorption-membrane filtration process", Environmental Geochemistry and Health, 32, 349-352, 2010.
- [4] Ünlü, M.Ü., Bilen, M., Gürü, M., "Kütahya-Emet bölgesi yeraltı sularında bor ve arsenik kirliliğinin araştırılması", Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26, (4), 753-760, 2011.
- [5] Kabay, N., Yılmaz, I., Bryjak, M., Yüksel, M., "Removal of boron from aqueous solutions by ion Exchange membrane hybrid process", Desalination, 198, 74-81, 2006.
- [6] Hilal, N., Kim, G.J., Somerfield, C., "Boron removal from saline water: A comprehensive review", Desalination, 273 (1), 23-25, 2011.
- [7] Poslu, K., Arslan, İ.H., "Dünya bor mineralleri ve bileşikleri üretiminde Türkiye'nin yeri", Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 33-34, 1995.
- [8] Buluttekin, M.B., "Bor maden ekonomisi: Türkiye'nin dünya bor piyasasındaki yeri", 2. Ulusal İktisat Kongresi, İzmir, 1-36, 2008.
- [9] Harite, Ü., Pamukta bor toksisitesine dayanıklılık, Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ZTO-YL-2008-0001, 2008.
- [10] Brown, P.H., Bellaloui, N., Wimmer, M.A., Bassil, E.S., Ruiz, J., Hu, H., Pfeffer, H., Dannel, F., Romheld, V., "Boron in plant biology", Plant Biol., 4, 205-223, 2002.
- [11] Reid, R., "Update on boron toxicity and tolerance in plants", in: F. Xu, H.E. Goldbach, P.H. Brown, R.W. Bell, T. Fujiwara, C.D. Hunt, S. Goldberg, L. Shi (Eds.), Advances in plant and animal boron nutrition: Proceedings of the 3rd International symposium all aspects of plant and animal boron nutrition, Springer, Dordrecht, 2007.
- [12] Blevins, D.G., Lukaszewski, K.M., "Boron in plant structure and function", Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 49, 481-500, 1998.
- [13] Bolanos, L., Lukaszewski, K., Bonilla, I., Blevins, D., "Why boron?", Plant Physiol. Biochem., 42, 907-912, 2004.
- [14] Goldbach, H.E., Wimmer, M.A., "Boron in plants and animals: Is there a role beyond cell-wall structure?" J. Plant Nutr. Soil Sci.-Z. Pflanzenernahrung Bodenkunde 170, 39-48, 2007.
- [15] Parks, J.L., Edwards, M., "Boron in the environment", Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 35 (2), 81-114, 2005.
- [16] Kabay, N., Guler, E., Bryjak, M., "Boron in seawater and methods for its separation-a review", Desalination 261 (3), 212-217, 2010.
- [17] Wei, Y., Zheng, Y., Chen, J.P., "Design and fabrication of an innovative and environmental friendly adsorbent for boron removal", Water Research, 45, 2297-2305, 2011.
- [18] Rainey, C.J., Nyquist, L.A., Christensen, R.E., Strong, P.L., Dwight Culver, B., Coughlin, J.R., "Daily boron intake from the American diet", Journal of the American Dietetic Association, 99, 335-340, 1999.
- [19] Hunt, C.D., "Dietary boron: an overview of the evidence for its role in immune function", J. Trace Elem. Exp. Med. 16, 291-306, 2003.
- [20] Fort, D.J., Stover, E.L., Strong, P.L., Murray, F.J., Keen, C.L., "Chronic feeding of a low boron diet adversely affects reproduction and development in Xenopus laevis", J. Nutr. 129, 2055-2060, 1999.
- [21] Bai, Y.S., Hunt, C.D., "Dietary boron enhances efficacy of cholecalciferol in broiler chicks", J. Trace Elem. Exp. Med. 9, 117-132, 1996.
- [22] Sarıöz, K., Nuhoglu, İ., "Endüstriyel hammadde yatakları ve madenciliği", Anadolu Üniversitesi Yayını, Eskişehir, 1992.

- [23] Balkı, N., "Simav Çay'ının bor kirliliği yönünden incelenmesi ve kirliliğe neden olan atıksuların adsorbsiyon ile arıtılma yöntemlerinin araştırılması", Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1982.
- [24] Şener, S., Özkara, M., "The boron pollution of Simav Creek waters and its effects on the soils and agricultural crops of Balıkesir Region", Köy Hizmetleri, Bitki, Toprak ve Su Araştırma Enstitüsü, İzmir, 411-420, 1988.
- [25] Harada, A., Takagi, T., Kataoka, S., Yamamoto, T., Endo, A., "Boron adsorption mechanism on polyvinyl alcohol", Adsorption, 17, 171-178, 2011.
- [26] Duderstadt, J.J., Hamilton, L.J., "Nuclear reactor analysis", Wiley, New York, 1976.
- [27] Polat, M., "Türkiye'de ve dünyada bor ve bor teknoloji uygulamalarının araştırılması", Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-6, 1987.
- [28] Wyness, A.J., Parkman, R.H., Neal, C., "A summary of boron surface water quality data throughout the European Union", The Science of the Total Environment, 314, 255-269, 2003.
- [29] Xu, Y., Jiang, J.Q., "Technologies for boron removal", Industrial & Engineering Chemistry Research, 47 (1), 16-24, 2008.
- [30] García-Soto, M.M.F., Camacho, E.M., "Boron removal by means of adsorption with magnesium oxide", Sep. Purif. Technol., 48, 36, 2006.
- [31] Yüksel, S., Yürüm, Y., "Removal of Boron from Aqueous Solutions by Adsorption Using Fly Ash, Zeolite, and Demineralized Lignite". Separation Science and Technology, 45, 105-115, 2010.
- [32] Kavak, D., "Removal of boron from aqueous solutions by batch adsorption on calcined alunite using experimental design", Journal of Hazardous Materials, 163, 308-314, 2009.
- [33] Dinçer, A.R., "Use of activated sludge in biological treatment of boron containing wastewater by fed-batch operation", Process Biochem. 39, 721-728, 2004.
- [34] Öztürk, N., Kavak, D., "Boron removal from aqueous solutions by adsorption using full factorial design", Fresenius Environ. Bull. 12, 1450-1456, 2003.
- [35] Eaton, S.V., "Effects of boron deficiency and excess on plants", Plant Physiol. 15, 95-107, 1940.
- [36] Nadav, N., "Boron removal from seawater reverse osmosis permeate utilizing selective ion exchange resin", Desalination, 124, 131-135, 1999.
- [37] Tarasenko, N.Y., Kasparov, A.A., Strongina, O.M., "Effect of boric-acid on the generative function in males", Gig. Tr. Prof. Zabol. 16, 13-16, 1972.
- [38] Lee, I.P., Sherins, R.J., Dixon, R.L., "Evidence for induction of germinal aplasia in male rats by environmental exposure to boron", Toxicol. Appl. Pharmacol. 45, 577-590, 1978.
- [39] Ku, W.W., Chapin, R.E., Moseman, R.F., Brink, R.E., Pierce, K.D., Adams, K.Y., "Tissue disposition of boron in male Fischer rats", Toxicol. Appl. Pharmacol. 111, 145-151, 1991.
- [40] Baykut, F., Aydın, A., Baykut, S., "Çevre Sorunları ve Korunma", İTÜ Yayın No: 3449, 419 s. 1987.
- [41] Yılmaz, A.E., Boncukoğlu, R., Kocakerim, M.M., "A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron-containing solution", J. Hazard. Mater. 149, 475-481, 2007.
- [42] Yılmaz, A.E., Boncukoğlu, R., Kocakerim, M.M., Keskinler, B., "The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method". J. Hazard. Mater. B125, 160-165, 2005.
- [43] Öztürk, N., Köse, T.E., "Boron removal from aqueous solutions by ion-exchange resin: Batch studies", Desalination 227, 233-240, 2008.
- [44] Cengeloglu, Y., Tor, A., Arslan, G., Ersoz, M., Gezgin, S., "Removal of boron from aqueous solution by using neutralized red mud", J. Hazard. Mater. 142, 412-417, 2007.
- [45] Öztürk, N., Kavak, D., "Boron removal from aqueous solutions by adsorption on waste sepiolite and activated waste sepiolite using full factorial design", Adsorption 10, 245-257, 2004.
- [46] Cengeloglu, Y., Arslan, G., Tor, A., Kocak, I., Dursun, N., "Removal of boron from water by using reverse osmosis", Separation Science and Technology 64, 141-146, 2008.
- [47] Öztürk, N., Kavak, D., Köse, T.E., "Boron removal from aqueous solution by reverse osmosis", Desalination 223, 1-9, 2008.
- [48] Glueckstern, P., Priel, M., "Optimization of boron removal in old and new SWRO systems". Desalination 156, 219-228, 2003.
- [49] Karahan, S., Yurdakoc, M., Seki, Y., Yurdakoc, K., "Removal of boron from aqueous solution by clays and modified clays". Journal of Colloid and Interface Science 293 (1), 36-42, 2006.
- [50] Kluczka, J., Trojanowska, J., Zolotajkin, M., Ciba, J., Turek, M., Dydo, P., "Boron removal from wastewater using adsorbents". Environmental Technology 28 (1), 105-113, 2007.
- [51] Nadav, N., Priel, M., Glueckstern, P., "Boron removal from the permeate of a large SWRO plant in Eilat". Desalination 185 (1-3), 121-129, 2005.
- [52] Prats, D., Chillón-Arias, M.F., Rodríguez-Pastor, M., "Analysis of the influence of pH and pressure on the elimination of boron in reverse osmosis", Desalination 128 (3), 269-273, 2000.
- [53] Sayiner, G., Kandemirli, F., Dimoglo, A., "Evaluation of boron removal by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes", Desalination 230, 205-212, 2008.
- [54] Vasudevan, S., Lakshmi, J., Sozhan, G., "Electrochemically assisted coagulation for the removal of boron from water using zinc anode", Desalination, baskıda, 2012.
- [55] Simonnat, M.O., Castel, C., Nicolai, M., Rosin, C., Sardin, M., Jauffret, H., "Boron removal from drinking water with a boron selective resin: Is the treatment really selective?", Water Research 34, 109-116, 2000.
- [56] Ferreira, O.P., Moraes, S.G., Durán, N., Cornejo, L., Alves, O.L., "Evaluation of boron removal from water by hydrotalcite-like compounds", Chemosphere 62, 80-88, 2006.