



BOR DERGİSİ

JOURNAL OF BORON

Journal homepage: www.journal.boren.gov.tr



Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi

Tuğba Deniz Tombal, Şafak Gökhan Özkan*, İlgin Kurşun Ünver, Ahmet Erdal Osmanlıoğlu

İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 34320 İstanbul, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 21 Mart 2016
Revize gönderi 18 Temmuz 2016
Kabul 26 Temmuz 2016
Online yayınlanması 9 Eylül 2016

Derleme Makalesi

Anahtar kelimeler:

Bor mineralleri ve bileşiklerinin kullanım alanları,
Bor karbür,
Nükleer reaktör teknolojisi

ÖZET

Bu makalede, dünyada en büyük rezerv payı Türkiye'ye ait olan bor madenleri hakkında detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Öncelikle, bor elementi, bor içeren ticari mineral ve bileşikler tanımlanarak genel kullanım alanları vurgulanmış, ardından dünya bor rezervi, üretim ve tüketim değerlerine ait istatistik bilgilerin bir araya getirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, bor içeren mineral ve bileşiklerin nükleer reaktör teknolojisindeki önemi ile ilgili daha önce yapılmış olan bilimsel ve endüstriyel ölçekli araştırmalar incelenmiştir. Sonuç olarak, önemli bor kullanım alanlarının Türkiye ekonomisine olası katkıları ve konunun stratejik önemi de vurgulanmıştır.

Properties, production, uses of boron compounds and their importance in nuclear reactor technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 March 2016
Received in revised form 18 July 2016
Accepted 26 July 2016
Available online 9 September 2016

Review Article

Keywords:

Use areas of boron minerals and compounds,
Boron carbide,
Nuclear reactor technology

ABSTRACT

Within this article, a detailed literature survey was carried out on borates which Turkey has the largest reserve share in the world. Firstly, elemental boron, boron containing commercial minerals and compounds known as borates were introduced, general use areas were overviewed; then it was aimed to give the statistical data about global mineral reserves, production and consumption. Furthermore, importance of boron containing minerals and compounds in nuclear reactor technology was analyzed from the previous literature on scientific and industrial scale. In conclusion, possible contribution of important boron use areas and the relevant strategic importance to Turkish economy were emphasized.

1. Giriş (Introduction)

1.1. Bor elementi (Boron element)

Yer kabuğunda bolluk bakımından 51. yaygın element olarak boratlar ve borosilikatlar halinde yer alan bor elementi, yaklaşık 3 mg/kg'lık konsantrasyon düzeyindedir. Bor elementinin amorf toz halinde rengi koyu kahverengi ve çok gevrek; sert yapılı monoklinik kristal halinde ise sarımsı kahverengi renktedir. Ergime noktası yaklaşık 2300 °C'dir. Periyodik cetveldeki IIIA grubunda karbon ve silisyum elementlerine benzerliği çok fazla ve oksijene karşı afinitesi çok yüksek olan bir elementtir. Yer kabuğunda sırasıyla % 19,10-20,31 ve % 79,69-80,90 izotopik bollukta, ¹⁰B ve ¹¹B şeklinde iki adet kararlı izotopu bulunur. Bor izotoplarının yer kabuğunda bulunan bolluk miktarları bölgelere göre farklılık

gösterir, örneğin bilinen bor yataklarındaki ¹⁰B miktarı ABD Kaliforniya'da düşük, Türkiye'de ise yüksek düzeydedir [1-3].

Bor elementinin fiziksel özellikleri Çizelge 1'de görülmektedir [4].

Bor elementinin kimyasal özellikleri morfolojisine ve tane büyüklüğüne göre değişir. 1 mikrometreden düşük boyuttaki amorf bor kolaylıkla ve bazen yüksek hızda reaksiyona girerken, kristalin bor kolayca reaksiyon vermez. Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve bazı diğer yan ürünleri oluşturur. Mineral asitleri ile reaksiyonu, konsantrasyona ve sıcaklığa bağlı olarak yavaş veya patlayıcı olabilir; ana ürün olarak borik asit oluşur [5]. Çizelge 2'de bor elementinin kimyasal özellikleri gösterilmektedir [6].

*Sorumlu yazar: sgozkan@istanbul.edu.tr

Çizelge 1. Bor elementinin fiziksel özellikleri (Physical properties of boron element) [4]

Fiziksel özellikler	
Atom kütlesi	10,811 (g/mol)
Kaynama noktası	3 727 (°C)
Termal genleşme katsayısı	8,3 µm/(m.K), (0 °C' de)
Elektriksel iletkenlik	1,0 E ⁻¹² µS/cm
Isıl iletkenlik	0,274 W/cm.K
Yoğunluğu	2,34 g/cm ³ , (25 °C'de)
Görünüşü	Sarı-Kahverengi ametal kristal
Elastik modülü	Kütle: 320/GPa
Atomizasyon entalpisi	573,2 kJ/mol, (25 °C'de)
Füzyon entalpisi	22,18 kJ/mol
Buharlaştırma entalpisi	480 kJ/mol
Sertliği	Mohs: 9,3 Vickers: 49 000 MN.m ⁻²
Buharlaştırma ısı	489,7 kJ/mol
Ergime noktası	2075 °C
Molar hacmi	4,68 cm ³ /mol
Fiziksel durumu	Katı, (20 °C ve 1 atm'de)
Spesifik ısı	1,02 J/g.K
Buhar basıncı	0,348 Pa (300 °C'de)

Çizelge 2. Bor elementinin kimyasal özellikleri (Chemical properties of boron element) [6]

Kimyasal özellikler	
Elektrokimyasal Eşdeğer:	0,1344 g/amp-hr
Elektronegativite	2,04 Pauling
Füzyon ısı:	50,2 kJ/mol
İyonlaşma potansiyelleri:	
Birinci potansiyeli:	8,298 eV
İkinci potansiyeli:	25,154 eV
Üçüncü potansiyeli:	37,93 eV
Değerlik elektron potansiyeli	190 eV

Çizelge 3. Yerkabuğundaki en yaygın bor mineralleri (The most common boron minerals in the earth's crust) [4]

Tipi	Mineral adı	Bileşimi	%B ₂ O ₃	Buldukları bölgeler
Hidrojen boratlar	Sassolit	H ₃ BO ₃	56,3	Doğal borik asittir ve ilk kez İtalya'da üretilmiştir.
Sodyum boratlar	Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ •10H ₂ O	36,5	Kırka, ABD, Arjantin, Bolivya, Hindistan
	Tinkalkonit	Na ₂ B ₄ O ₇ •5H ₂ O	48,8	Genellikle aksesuar olarak kullanılmaktadır.
	Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ •4H ₂ O	51,0	Kernit yatakları Arjantin'in Tincalayu ve Blanca bölgelerinde bulunmaktadır. Ayrıca Türkiye, ABD ve Çin'de de vardır.
Sodyum-kalsiyum boratlar	Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ •8H ₂ O	43,0	Üleksit yatakları, Şili, ABD, Peru, Sırbistan, Bolivya, Çin ve Türkiye'de bulunmaktadır.
	Proberit	NaCaB ₅ O ₉ •5H ₂ O	49,6	ABD'de Death Valley bor yataklarında bulunmaktadır.
	Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ •5H ₂ O	50,8	En büyük rezerv Türkiye'dedir
Kalsiyum boratlar	Pandermit	CaB ₁₀ O ₁₉ •7H ₂ O	49,8	Peru, Bigadiç ve Kırka bor yataklarında bulunmaktadır. (İsmi Bandırma'dan almıştır.)
	Nobleit	CaB ₆ O ₁₀ •4H ₂ O	62,0	ABD'de Death Valley bor yataklarında bulunmaktadır.
	İnyoit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ •13H ₂ O	37,6	
Kalsiyum borosilikatlar	Meyerhofferit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ •7H ₂ O	46,7	
	Datolit	CaBSiO ₄ OH	24,9	Datolit yatakları esas olarak Rusya'nın Doğu bölgelerinde ve Kazakistan'da bulunmaktadır.
	Danburit	CaB ₂ Si ₂ O ₈	28,3	Danbury, Connecticut, ABD
	Havlit	Ca ₄ Si ₂ B ₁₀ O ₂₃ •5H ₂ O	44,5	Bigadiç, Susurluk
	Hidroborasit	CaMgB ₆ O ₁₁ •6H ₂ O	50,5	Arjantin'de kolemanit ile birlikte hidroborasit oluşumu da bulunmakta ve ağırlıklı olarak seramik sanayinde kullanılmaktadır. Ayrıca Kazakistan ve Türkiye'de vardır.
Magnezyum boratlar	İnderborit	CaMgB ₆ O ₁₁ •11H ₂ O	41,5	İnder Gölü, Kazakistan
	Aşarit	MgBO ₂ OH	41,4	Bu mineral oluşumu ağırlıklı olarak Kazakistan ve Çin'de bulunmaktadır.
	Borasit	Mg ₃ B ₇ O ₁₃ Cl	62,2	Türkiye'de Emet, Kırka, Bigadiç borat yataklarında oldukça sık görülür. Kolemanit, üleksit bazen tünelit ve veaçit-a ile birlikte rastlanır.
	Kurnakovit	Mg ₂ B ₆ O ₁₁ •15H ₂ O	37,3	İnder Gölü, Kazakistan
Diğer boratlar	İnderit	MgB ₃ O ₃ (OH) ₃ •5(H ₂ O)	37,3	İnder Gölü, Kazakistan
	Suanit	Mg ₂ B ₂ O ₅	46,3	Suan, Kuzey Kore
	Kotoit	Mg ₃ B ₂ O ₆	36,5	Bundjiro Koto (1856-1935)
	Pinnoit	MgB ₂ O ₄ •3H ₂ O	42,5	Almanya ve Death Valley, Kaliforniya
	Kahnit	CaAsBO ₆ •2H ₂ O	11,7	Emet, Kütahya
	Vonsenit	(Fe,Mg) ₂ FeBO ₅	10,3	Magnus Vonsen (1879-1954), Riverside, Kaliforniya
	Ludwigit	(Fe,Mg) ₄ Fe ₂ B ₂ O ₇	17,8	Ernst Ludwig (1842-1915)
	Tünelit	SrB ₆ O ₁₀ •4H ₂ O	52,9	George Tunnel (1900-1996)
	Bakerit	Ca ₄ B ₄ (BO ₄)(SiO ₄) ₃ (OH) ₃ •(H ₂ O)	27,9	Death Valley, Kaliforniya
	Searlesit	NaBSi ₂ O ₅ (OH) ₂	17,0	Searles Gölü, Kaliforniya
	Teepleit	Na ₂ B(OH) ₄ Cl	21,7	John Edgar Teeple (1874-1931), Searles Gölü, Kaliforniya

1.2. Bor mineralleri (Boron minerals)

Bor mineralleri yerkabuğunda genellikle senozoik yaşlı sedimanter tabakalar arasında oluşmaktadır. Bununla beraber borlu bölgelerde volkanik kayalara da rastlanmaktadır. Volkanik kayalar genellikle andezit ve dasitlerdir. Bor mineralleri genellikle Na⁺, Ca⁺⁺ ve Mg⁺⁺ gibi bir alkali katyonla birleşmiş sulu boratlardır. Doğada bulunan 2000'i aşkın bor mineralinin birçoğu bileşim olarak birbirlerine çok benzer olmalarına rağmen yapılarında içerdikleri kristal su miktarının farklı olması nedeniyle farklılık gösterirler [7].

Bor mineralleri yapılarında değişik oranlarda bor oksit (B₂O₃) içerirler. Bunlardan ticari değere sahip olanlar; Tinkal (Boraks), Kolemanit, Üleksit, Proberit, Borasit, Pandermit, Hidroborasit ve Kernit'tir [8-13]. Yerkabuğunda en yaygın bulunan bor mineralleri ve buldukları bölgeler Çizelge 3'te özetlenmiştir.

1.3. Dünya bor rezervleri (The world's boron reserves)

Dünya bor rezervleri bölgesel değişiklikler gösterdiğinden ve stratejik öneminden dolayı ülkelere göre kesin rezerv değerleri ortaya koymak oldukça güçtür [14].

Dünyadaki en önemli bor madeni yatakları Türkiye, Rusya ve A.B.D'de olup, dünya ticari bor rezervleri ise 4 farklı bölgede toplanmaktadır. Bunlar: ABD Kaliforniya Eyaletinin güneyinde yer alan "Mojave Çölü", Güney Amerika'da yer alan "And Kemer", Türkiye'nin de yer aldığı "Güney-Orta Asya Orojenik Kemer" ve Doğu Rusya'dır [15].

B₂O₃ bazında Dünya toplam bor rezervi yaklaşık 1,2x10⁹ ton'dur [16]. Şekil 1'de Dünya bor rezervlerinin dağılımı görülmektedir.

1.4. Dünya bor üretimi (The world's boron production)

Dünya bor madeni üretimi yıllara göre incelendiğinde, üretimin çoğunun iki ülke tarafından gerçekleştirildiği görülmektedir. 1970 yılında dünya üretiminin %66,4'ünü ABD, %15,9'unu Türkiye gerçekleştirirken, diğer ülkelerin ise %17,7 civarındadır [17].

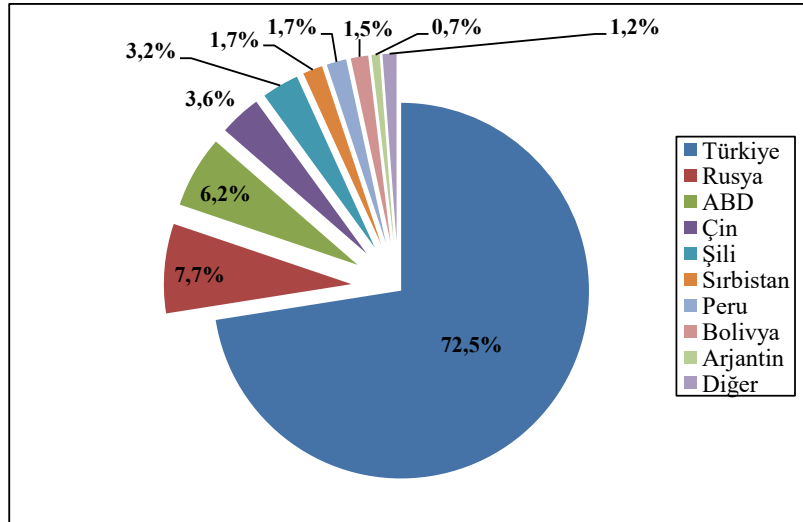
2012 yılında ise Dünya fiili bor madeni üretimi yaklaşık 4 milyon ton (1,9 milyon ton B₂O₃ eşdeğeri) civarında gerçekleşmiştir. Fiili bor üretiminin B₂O₃ bazında da

bölgesel dağılımı; Türkiye %47,2 pay ile birinci sırada yer alırken, bunu ABD %27,6, Güney Amerika %15,8 ve Asya %9,4 takip etmiştir [4].

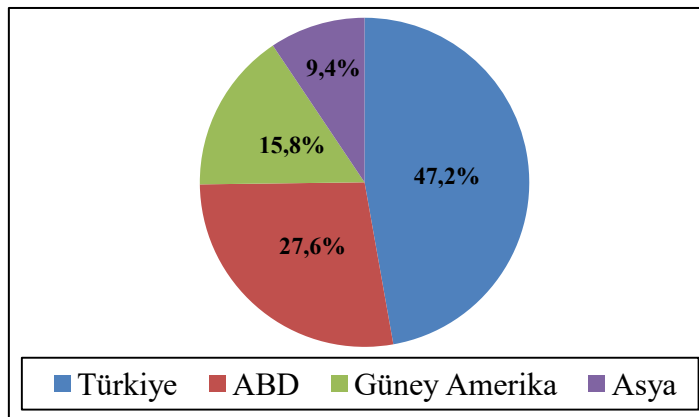
Dünya bor madeni üretiminin bölgelere göre dağılımı Şekil 2'de görülmektedir.

1.5. Bor mineralleri ve bileşiklerinin tüketimi ve kullanım alanları (Consumption and use areas of boron minerals and compounds)

Bor talebi, diğer endüstriyel minerallerde olduğu gibi, tüketim düzeyinin bir yansıması olarak kabul edilmiştir. Dünya bor cevherlerinin ve rafine bor bileşiklerinin tüketimlerinin artışı ve devamlılığı bu ürünlerin tüketiminin en fazla olduğu sanayileşmiş ülkelerdeki borların imalatta girdi olarak kullanıldığı yeni tüketim alanlarının bulunmasına, borların halen girdi olarak kullanıldığı mevcut nihai ürün ve endüstrilerin tüketim taleplerine, gelişmiş ülkelerdeki (özellikle Batı Avrupa ve Kuzey Amerika) ekonomik duruma bağlı olarak değişmektedir [18].



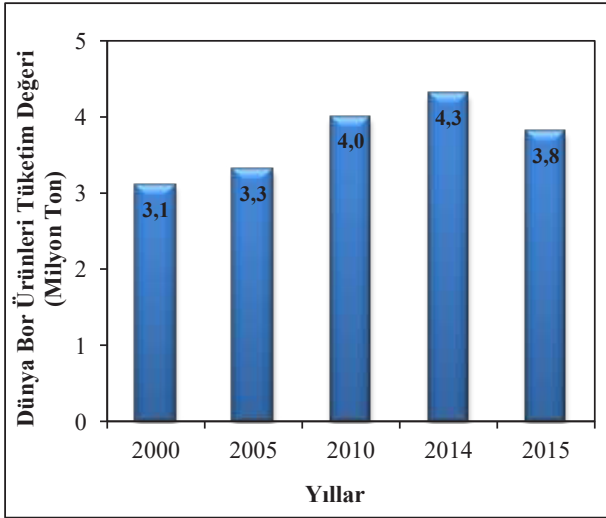
Şekil 1. Dünya bor rezervlerinin dağılımı (Distribution of the world's boron reserves) [4]



Şekil 2. Dünya fiili bor üretiminin bölgelere göre dağılımı (Distribution of the world's actual boron production by region) [4]

Bazı endüstri kollarında mineral konsantresi, bazılarında ise rafine bor ürünleri kullanılmaktadır. Bazı durumlarda ise uygunluk ve fiyata göre rafine ve konsantre bor ürünleri birbirlerinin yerini alabilmektedir. Diğer bazı durumlarda ise tüketici farklı rafine bor ürünleri ile birinin yerine diğerini ikame edebilmektedir. Bazı bor ürünleri diğer bor ürünlerinin hammaddesi olabilmektedir [17].

Dünya bor ürünleri tüketimi, 2000 yılında 3,1 milyon ton iken, 2014 yılında %39 artışla yaklaşık 4,3 milyon ton değerine ulaşmıştır. 2015 yılında tüketim önceki yıla göre yaklaşık %12 düşerek 3,8 milyon ton olmuştur [15]. Şekil 3'te yıllara göre dünya bor ürünleri tüketimi görülmektedir.



Şekil 3. Yıllara göre dünya bor ürünleri tüketimi (The world's annual consumption of boron products) [15]

2015 yılında dünya bor tüketiminin 2014 yılına göre %12 azalmasında küresel ekonomik faaliyetlerdeki zayıflık ve kırılmalara bağlı olarak yurt dışı piyasalarda yaşanan önemli talep daralmasının etkisi büyüktür [15].

Sektörel olarak bor içeren mineral ve bileşiklerin kullanım alanları başlıklar halinde aşağıda sıralanmıştır:

Savunma endüstrisi: Zırlı ve seramik plakalar, ateşli silah namluları, fişek vb.

Cam endüstrisi: Borosilikat camlar, laboratuvar camları, uçak camları, borcam, pyrex, izole cam elyafı, tekstil cam elyafı, optik lifler, cam seramikleri, şişe, diğer düz camlar, otomotiv camları vb.

Elektronik ve bilgisayar endüstrisi: Mikrodalga tüpleri, sensörler, süper iletkenler, yarı iletkenler, magnetler, elektron emitterleri, mikro çipler, LCD ekranları, CD sürücüler, akım levhaları, bilgisayar ağlarında; ısıya aşınmaya dayanıklı fiber optik kablolar, vakum tüpler, dielektrik malzemeler, elektrik kondansatörleri, kapasitörler, gecikmeli sigortalar, bataryalar, piller, laser printer tonerleri vb.

Enerji endüstrisi: Gaz türbinleri, yüksek ısı transistörleri, bor hidrür yakıtları (boranlar), ısı enerjisi depolayıcılar, piller, hidrojen depolayıcılar, güneş enerjisinin depolanması, güneş pillerinde koruyucu olarak, PV ve CSP güneş enerjisi panelleri, hücre yakıtları vb. [19].

Görüş sistemleri endüstrisi: Kamera ve mercek camları, fotoğraf makinaları, dürbünler, banyo ve film imalatları.

İlaç ve kozmetik endüstrisi: Dezenfekte ediciler, antiseptikler, diş macunları, lens solüsyonları, kolonya, parfüm, şampuan vb.

İletişim araçları endüstrisi: Cep telefonları, modemler, televizyonlar vb.

İnşaat endüstrisi: Çimentoya mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı olarak.

Kağıt endüstrisi: Geri kazanılan kağıtların mürekkeplerinden arındırılması, yüksek kaliteli kağıtların parlaklaştırılması, kağıt hamurunu beyazlatılması.

Kimya endüstrisi: Bazı kimyasalların indirgenmesi, elektrolitik işlemler, flotasyon reaktifleri, banyo çözeltileri, katalistler, atık temizleme amaçlı olarak, petrol boyaları, yanmayan ve erimeyen boyalar, tekstil boyaları, yapıştırıcılar, soğutucu kimyasallar, korozyon önleyiciler, mürekkep, pasta ve cilalar, kibrit, kireçlenme önleyicileri, dezenfektan kimyasallar, kozmetikler, yumuşatıcılar, sabun, toz deterjanlar, toz beyazlatıcılar, ağartıcılar, parlaticılar, ahşap empenye çözeltileri, mumyalama vb. [18].

Koruyucu malzeme endüstrisi: Ahşap malzemeler ve ağaçlarda koruyucu olarak, boya ve vernik kurutucularında, küf ve mantar önleyiciler, vb.

Makine endüstrisi: Manyetik cihazlar, zımpara ve aşındırıcılar kompozit malzemeler, titreşim söndürücü malzemeler, sert malzemeler, motorlar, katı yağlayıcılar, yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, yüksek performanslı motor yağları, vb.

Metalurjik ürün endüstrisi: Kaplama elemanları, yüksek sıcaklık refrakterleri, kaplama sanayiinde elektrolit olarak, paslanmaz ve alaşımli çelik, sürtünmeye-aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler, kaynak elektrotları, metalurjik flaks, briket malzemeleri, lehimleme, döküm malzemelerinde katkı maddesi olarak, kesiciler, kompozit malzemeler, zımpara ve aşındırıcılar vb.

Otomobil endüstrisi: Titreşim söndürücü malzemeler, hava yastığı şişirme mekanizmaları, bor hidrür yakıtları (boranlar), ısı enerjisi depolayıcılar, hidrojen depolayıcılar, hava yastıklarında, hidroliklerde, plastik aksamda, yağlarda ve metal aksamalarda, ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla, antifrizler, vb.

Seramik endüstrisi: Emaye, fayans, porselen boyaları ve sırlamada, vb. [20].

Spor malzemeleri endüstrisi: Kayak aksamaları, tenis raketleri, ok-yay, balık oltaları, golf sopaları, darbe söndürücüler, vb.

Tarım endüstrisi: Sentetik gübreler, biyolojik gelişim ve kontrol kimyasalları, küf ve mantar önleyiciler, böcek-bitki öldürücüler, yabancı otlar, vb.

Tekstil endüstrisi: Isıya dayanıklı kumaşlar, yanmayı geciktirici ve önleyici [21] Selülozik malzemeler, izolasyon malzemeleri, tekstil boyaları, deri renklendiricileri, dericilikte kireç çöktürücü, suni ipek parlatma malzemeleri, vb.

Tip endüstrisi: Yapay organlar, antibiyotikler (boromicyn), osteopoz tedavilerinde, alerjik hastalıklarda, psikiyatride, kemik gelişiminde ve artritte, menopoz tedavisinde, BNTC terapi yöntemiyle beyin kanserlerinin tedavisinde tümör öldürücüler, manyetik rezonans görüntüleme cihazlarında, vb.

Uzay ve havacılık endüstrisi: Sürtünmeye-aşınmaya ve ısıya dayanıklı malzemeler, roket yakıtı, uydular, uçaklar, helikopterler, zeplinler, balonlar, radar dalgası soğurucular, vb.

Nükleer endüstri: Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), reaktör aksamaları, nötron emiciler, reaktör kontrol çubukları, nükleer kazalarda güvenlik amaçlı ve nükleer atık depolayıcı olarak, nükleer teknolojide emniyet malzemeleri, vb. [22-24].

2. Nükleer reaktör teknolojisinde bor kullanımı (Boron use in nuclear reactor technology)

Dünya bor rezervleri açısından %72,5'lik payla birinci olan Türkiye aynı zamanda dünya rafine bor üretiminde de birinci sırada yer almaktadır [24-26]. Bor türevleri ile sıvı hidrojen taşıyıcıların hidrojenasyonu/dehidrojenasyonu çalışmalarının yoğunlaştığı önemli enerji araştırma konuları haline gelmiştir [27, 28]. Nükleer enerji reaktörleri, kullandıkları bor miktarı düşük olmasına rağmen teknolojik ilerleme açısından bor için büyük önemi olan bir kullanım alanıdır. Yüksek nötron yakalama kapasitesi nedeniyle bor bileşikleri nükleer santrallerde reaktör kalbinin etrafının betonlanmasında katkı maddesi olarak, ya da radyoaktiviteyi zırlamada kullanım alanı bulur. Bunlara ilave olarak radyasyondan korunma zırhı olarak bordan yararlanılmaktadır [7, 29-32].

Bor mineral ve bileşikleri ^{10}B ve ^{11}B izotoplarını içerirler. Bor izotopları nükleer reaksiyon sırasında nötron soğurma ve yavaşlatma özelliğiyle nötronların uranyum-235 ile fisyon reaksiyonunu engelleyip yavaşlatığından, dimetil eter, elementer bor, zenginleştirilmiş bor oksit veya asit veya ferrobora haline dönüştürüldüğünde nükleer reaktörün kontrol çubuklarının ve moderatörlerinin yapımında da kullanılırlar. Kontrol çubukları %2 bor içeren çelik-alüminyum alaşımlarıdır, nükleer reaktörlerde nötronları absorblayarak bunların

uranyum-235 ile verdiği zincir reaksiyonu olan fisyon reaksiyonunu engellemekte veya durdurmakta böylece reaktörün durdurulması veya reaksiyon veren nötronların miktarını ayarlayarak fisyon enerjisinde güç kontrolü sağlamaktadır [33, 34].

Nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu imalatında borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır. Bunlar daha çok amorf bor veya kristal bor formundadır. Paslanmaz borlu çelik, nötron absorbanı olarak tercih edilmektedir. Her bir bor atomu yaklaşık bir nötron absorbe etmektedir. Ayrıca, nükleer atıkların depolanmasında da nötron zırlaması için kalsiyum bor cevheri (kolemanit minerali) nötron bariyeri olarak kullanılmaktadır. Nükleer reaktörlerin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün acil kapatılmasında (^{10}B) bor kullanılır [11, 15, 34, 35].

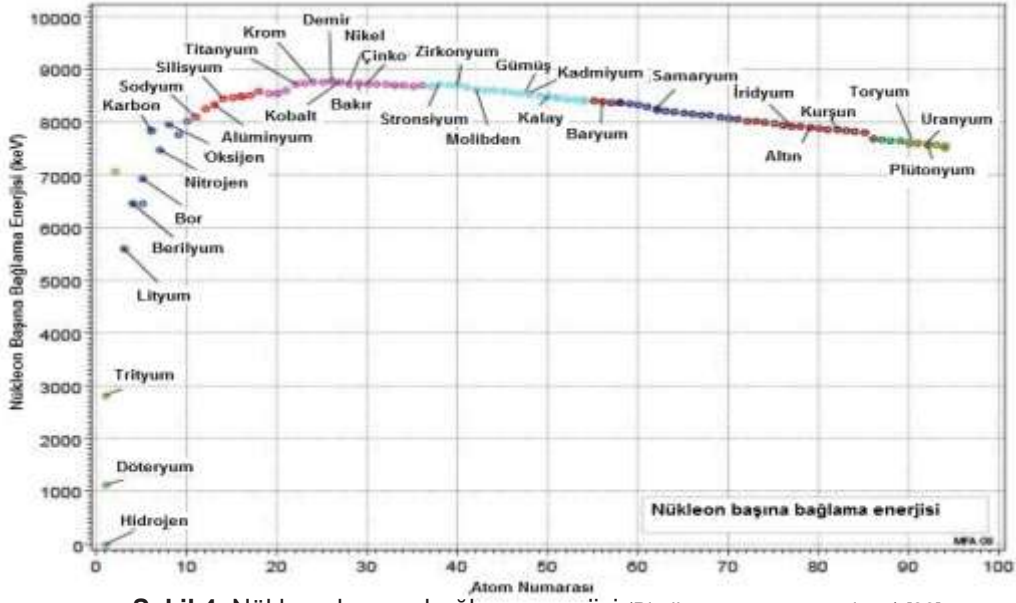
Bor karbürler Phenix reaktörlerinde dışarıya nötron sızdırmayan koruyucu kabuk inşasında kullanılmaktadır. Bor-304 adı verilen yeni bir paslanmaz çelik, atık nükleer yakıtın taşınmasında kullanılan kapların yapımında kullanılır. Nükleer sanayide kullanımda borun en yakın rakibi gadolinyum ve samaryumdur. Kaliforniya Üniversitesindeki araştırmalarda, ^{11}B 'in protonla füzyon (kaynaşma) reaksiyonu sırasında radyoaktifitesiz enerji açığa çıkmıştır. Böylece temiz nükleer enerji elde edilmektedir [28, 34]. En ilgi çekici füzyon reaksiyonu ^{11}B iyonuyla çarpışan bir protondur. Reaksiyon boyunca iyonla kaynaşır. ^{11}B 'in bir protonla füzyonu sonucu çok kısa bir sürede, kütle numarası 12 ve atom numarası 6 olan ^{12}C iyonu oluşur [32, 33].

Nötron absorpsiyonu ile helyum gazı salınımı ve bor karbürün şişmesi kontrol çubuğunu tasarlarken önemli parametrelerdir. Kontrol çubuğu işleminden elde edilen deneyimler, şişmenin hizmet ömrünü belirleyen parametre olduğunu göstermiştir [33].

Bir kontrol çubuğunun içine çatlak oluşmasıyla su girmesi durumunda, bor karbür emici malzemenin etkileri hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle nötron radyografi ile ilgili kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Bir kontrol çubuğu kanadını bir nötron kaynağına maruz bırakarak soğurulmayan nötronların tespitiyle bor karbür içeriği net olarak elde edilebilir [33, 34].

Nükleer reaktörlerin çalıştırılması ve geliştirilmesi ile ilgili temel gerekliliklerden biri, nötron yakalanmasını korumak, kontrol etmek ve fisyon reaksiyonu esnasında nötron üretilmesini sağlamaktır. Bor, nötron soğurucu olarak dikkate alınmaya değer, nükleer özelliklere sahip elementlerden biridir [36, 37]. Mevcut elementler nükleer reaksiyonlardaki davranışlarını belirleyen bazı özellikleriyle soğurucu olarak değerlendirilir. Bu özellikler, termal nükleon başına bağlama enerjisi, nötron absorpsiyon etki kesiti, termal nötron dağılıma kesiti ve yakıt yarı ömrüdür [38].

Şekil 4'te Ashby ve Smidman'a göre [39] elementlerin nükleon başına bağlama enerjisi gösterilmektedir.



Şekil 4. Nükleon başına bağlama enerjisi (Binding energy per nucleon) [39]

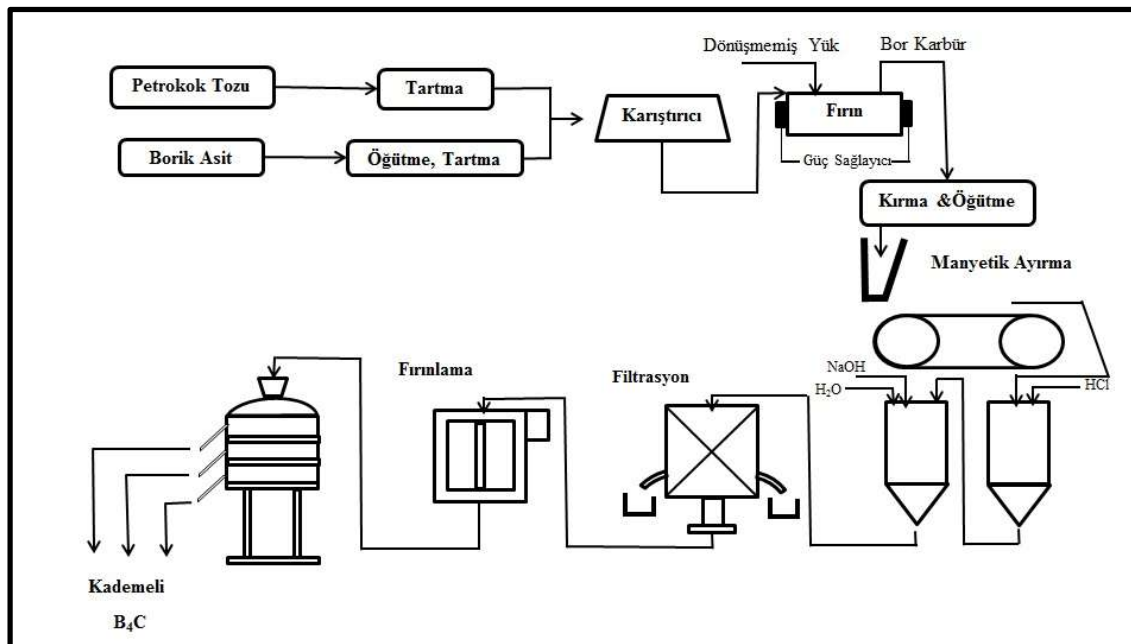
Yüksek reaktivite nedeniyle, borla veya bir arada kristal kafes içinde bulunan safsızlıklardan ötürü, saf bor hazırlamak oldukça zordur. Aşırı sert oluşu nedeniyle, bor pulverizasyonu kırıcılardan bazı safsızlıklar getirmektedir ve tanelerin yüzeyel oksidasyonuna neden olmaktadır [38].

Bor karbür 2450 °C'de eriyen, kimyasal reaksiyonlara ve radyasyona dayanıklı, oldukça sert bir malzemedir. Özgül ağırlığının 2,4 olması yanında, elmas ve bor nitrürden sonra en sert ve dayanıklı malzeme olması nedeniyle uçak ve diğer askeri araçların yapımında kullanılmaktadır [40, 41].

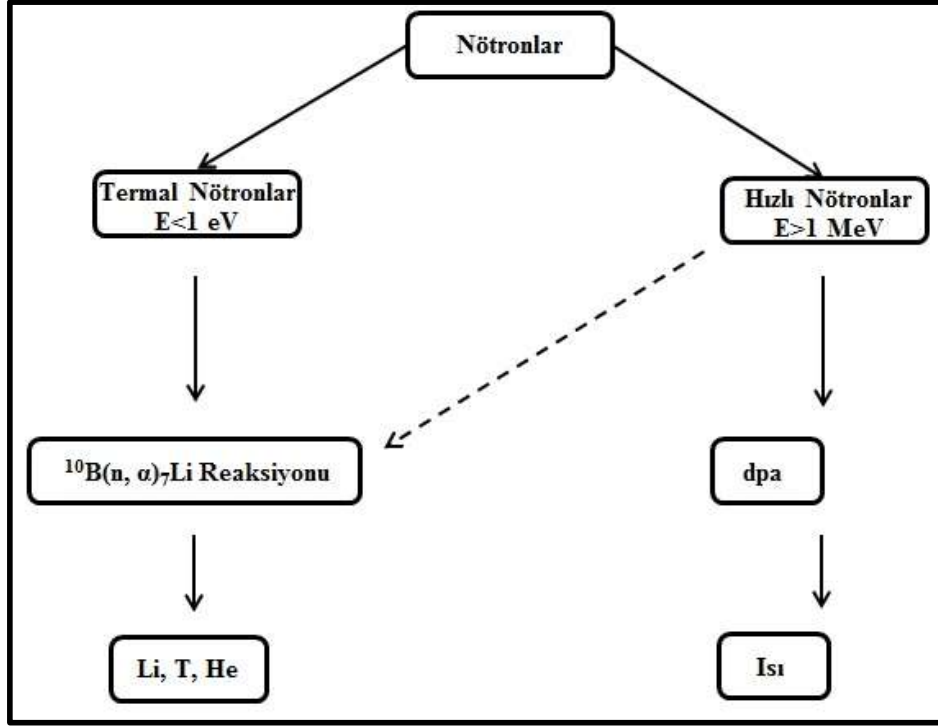
Şekil 5'te Date ve Kulkarni'ye göre [42] bor karbür üretimine ait akım şeması ve Şekil 6'da Simeone ve

arkadaşlarına göre [43] ^{10}B nötron absorpsiyonu gösterilmektedir.

Bor karbür toz formunda, ince tabaka halinde sinterlenmiş ürün olarak kullanılmaktadır. Bor karbür (aynı zamanda siyah elmas olarak bilinir) elmas ve kübik bor nitrürden sonra üçüncü en sert malzemedir. Bor karbürün olağanüstü sertliği, lapping (perdahlama), parlatma ve metallerin ve seramik malzemelerin su jeti ile kesimi için uygun bir aşındırıcı toz haline getirir. Bor karbürün nötron absorblama kapasitesi ^{10}B izotopunu zenginleştirerek artırılabilir. İyi ısı iletkenliğine ve termal şok dayanımına sahip bor karbür içeren bir karma malzeme, nükleer füzyon reaktörlerinin ilk çeper malzemesi olarak uygun görülmektedir [43].



Şekil 5. Bor karbür üretimine ait akım şeması (Boron carbide production flow sheet) [42]



Şekil 6. ^{10}B izotopunun nötron absorpsiyon mekanizması (Neutron absorption mechanism of ^{10}B isotope) [43]

Bor karbür genellikle, yüksek nötron absorpsiyon kapasitesi, yüksek erime sıcaklığı, hafifliği ve yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılığa (stabilite) sahip olması gibi özelliklerinden ötürü hızlı reaktörlerde kontrol çubuğu olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaksiyonuyla alfa (α) ışını şeklinde üretilen helyum peletten açığa çıkar ve absorblayıcı pimler içindeki gaz basıncının artmasına neden olur. Pelette muhafaza edilmiş helyum peletin şişmesine ve absorblayıcı-kaplayıcı mekanik bir etkileşime (ACMI) neden olur. Kontrol çubukları kullanılmaya başlandığı andan itibaren ağırlıklı olarak helyum salınımı ve peletlerin şişmesi görülür; bu boron karbürün nötron ışınlama davranışlarını değiştirmesi bakımından önemlidir [44].

Hızlı üretken reaktörlerin kontrol çubuklarında nötron absorblayıcı olarak bor karbür, %80'e kadar zenginleştirilmiş ^{10}B izotopundan elde edilir. Bu izotop acil reaktör kapatma işlevini yerine getiren hızlı nötron spektrumunda yeterli fiziksel absorpsiyon verimine sahip tek maddedir. İzotopik zenginleştirme işleminden dolayı bu malzeme oldukça pahalıdır. Diğer taraftan, kendi reaktör işletim koşullarına göre emniyet çubukları çoğu zaman yüksek bir konumdadır ve absorbe pimi sadece reaktör kalbine bitişik nötron akışının alt kısmına bağlıdır [45].

Bor karbür yaygın olarak Rus tasarımı hafif su reaktörlerinin kontrol çubuklarında kullanılmaktadır [46].

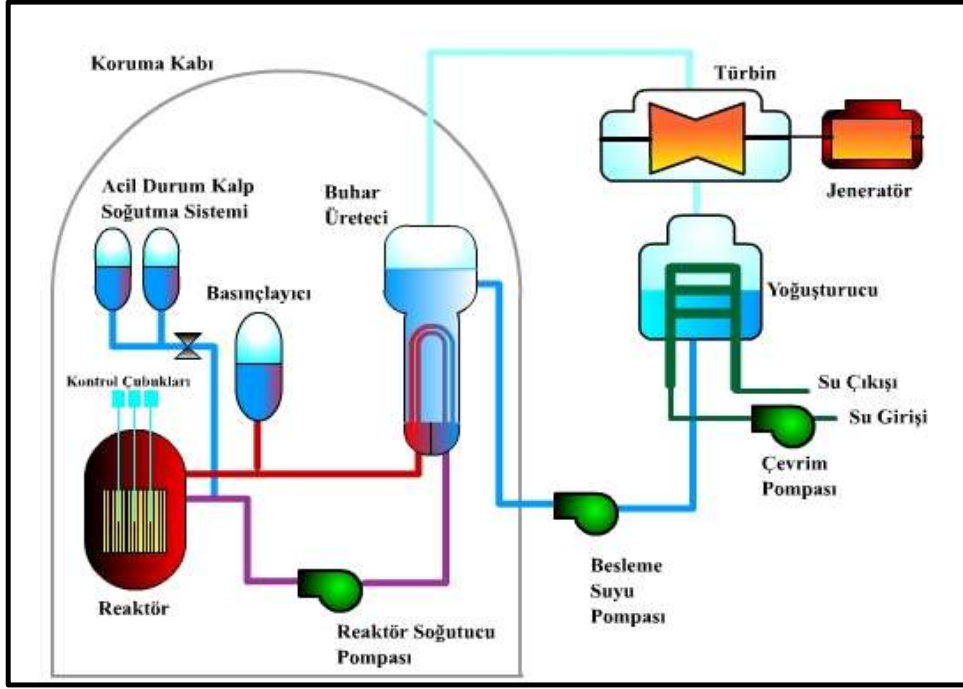
Nükleer reaktör kaynaklı olası kazalarda kontrol çubuklarının davranışları da göz önünde bulundurul-

muştur. Bor bazlı kontrol çubukları 1150 °C sıcaklıkta sıvılaşabilmektedir. Ayrıca, yayılan helyum nedeniyle, kaplamanın düşük sıcaklıkta patlayabilme ihtimali söz konusudur. Deneyler, absorblayıcı malzemelerin ciddi kazalar sırasında reaktör kalbinde ağır hasarlar başlatabileceğini göstermektedir. Reaktör kalbinin yapısının bozulması bor kontrol çubuğunun sıvılaşmasından kaynaklanmaktadır [47].

Şekil 7'de gösterilen basınçlı su reaktöründe (PWR) bor karbürden yapılmış kontrol çubuklarının yerleşimi görülmektedir [48].

Basınçlı su reaktörlerinde (PWR) reaksiyon veren nötron konsantrasyonunu düzenlemek için bor kullanımının avantajları:

1. Borik asit soğutma sıvısı (su) içinde çözünebilir ve nötron akışı dağılımı üzerinde etkisi yoktur.
2. Borik asit içeren kimyasal madde sistemi ve kontrol çubuğu sistemi, çubuksuz sistemle aynı sonuçları elde etmek üzere iyi eşleştirilmiş olabilir.
3. Borik asit reaktör içindeki diğer maddelerle uyumlu olması için yeterince stabildir.
4. Reaktörü kapatmak için birincil devreye borik asit eklemek uygundur, böylece yakıt ikmali güvenliği sağlanır [49].



Şekil 7. Basıncılı su reaktörü (PWR) (Pressurized water reactor) [48].

Nükleer teknoloji, günümüzde Dünya elektrik ihtiyacının %17'sini karşılamakla birlikte, tıp ve diğer endüstri alanlarında yararlanılan birçok izotopun da üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu bağlamda, ihtiyaç duyulacak enerjinin sağlanması için pek çok avantaja sahip iyi bir alternatiftir. Bugün için, nükleer enerji yakıt kapsamına uranyum ve toryum girmektedir. 1967-1974 yılları arasında 40 MWe güçteki Toryum Yüksek Sıcaklık Reaktörü Peach Bottom (HTR) ABD'de çalıştırılmıştır. 1976-1989 yılları arasında 330 MWe güçteki Toryum Yüksek Sıcaklık Reaktörü Fort St Vrain (HTR) ABD'de çalıştırılmıştır. 1983-1989 yılları arasında 300 MWe güçteki Toryum Yüksek Sıcaklık Reaktörü (THTR) Almanya'da Hamm-Uentrop'da çalıştırılmıştır. Günümüzde ise, Norveç'te, Thor Energy tarafından mevcut nükleer reaktörlerde test edilmek üzere iki toryum yakıt elemanı geliştirilmiştir. Bunların birisi mevcut uranyum yakıtına toryum eklenerek diğeri de plütonyumla birlikte MOX yakıt olarak hazırlanmıştır. Her iki toryum yakıt elemanı 2013 yılından bu yana Halden Test reaktöründe beş yıl boyunca denenmiştir. 2017-2018 yılında ticari reaktörlerde kullanılmasına başlanması beklenmektedir. Hindistan ise toryum yakıt çevrimi konusundaki çalışmalarını 500 MWe plütonyum ile karışık toryum yakıt kullanan Sodyum Soğutuculu Reaktörü üzerinde sürdürmekte ve Kalpakkam'da toryum yakıtlı hızlı üretken reaktör (FBR) yapımına da devam etmektedir [17-22, 29-32].

3. Değerlendirme ve öneriler (Evaluation and suggestions)

Dünyadaki en büyük rezerv ve üretim payı Türkiye'ye ait olan bor madenleri ve bileşiklerinin nükleer santrallerde kullanımı ile ilgili daha önce yapılmış olan bilimsel ve endüstriyel ölçekli araştırmaları bir araya

getirerek, sanayinin tuzu olarak anılan ve birçok farklı alanda farklı oranlarda tüketilen borlu malzemelerin enerji sektöründe de kullanım alanı bulabileceğini gözler önüne seren bu makalenin temel amacı, kamuoyunda çok sayıda bilgi kirliliğiyle beraber anılan bor elementi, mineralleri ve bileşikleri hakkında en güncel kaynaklardan istatistiki bilgileri bir araya getirerek, toplumu doğru bilgilendirmektir.

Ayrıca, ülkemiz enerji sektörünün yenilenebilir enerji başta olmak üzere, enerjide kaynak çeşitliliği amacıyla nükleer santrallere yönelmesi durumunda tüketilen her bir hammadde kaynağının doğrudan ve dolaylı olarak makalede bahsedilen borlu malzemeleri kullanma ihtimalinin göz önünde bulundurulması ve özellikle milli kaynaklarımızın en akılcı yoldan ve çağımızın gereklerine uygun olarak ülkemiz ekonomisine katkı yapabilmesi de bu makalenin temel amaçlarından birisi olmuştur.

Konuya ilgi duyacak bilim insanlarının bu makalede vurgulanan malzeme ve yöntemleri gözden geçirmesi, meslekler arası sinerji oluşturularak, ülkemiz bor madenlerinin kullanım alanlarının genişletilmesi amacıyla en yeni yöntem ve tekniklerin kullanıldığı projeler aracılığıyla gerek bilimsel, gerekse teknolojik ölçekte konunun stratejik önemine uygun bilgi alt yapısı oluşturulması da bu makalede hedeflenen ana konulardandır.

Kaynaklar (References)

- [1] Özkan Ş. G., Çebi H., Delice S., Doğan M., Bor minerallerinin özellikleri ve madenciligi, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu İzmir, Sayfa 224-228, 1997.

- [2] Özkan S. G., Kuyumcu H. Z., Önal G., A recent outlook for borates mining and industry in Turkey, World of Mining-Surface&Underground, January-February, GDMB Medienverlag, 60 (1), 43-47, 2008.
- [3] Özkan S. G., Lyday P. A., Physical and chemical treatment of boron ores, SME's Annual Meeting, Denver, Preprint 95-186, 1995.
- [4] BOREN-Ülusal Bor Araştırma Enstitüsü 2016, [online], <http://www.boren.gov.tr/tr/bor/bor-elementi>, [Ziyaret Tarihi: 16.06.2016].
- [5] Elçiçek, H., Sulu ortamda karbondioksit basıncı altında üleksit cevherinin çözünme kinetiği ve optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2012.
- [6] Yegül E. E., Bor zenginleştirme tesislerinde ara ürün tenörlerinin artırılması için yöntemlerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [7] Uçar A., Kestelek tesis atıklarından borun kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1989.
- [8] Güyagüler T., Türkiye bor potansiyeli, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Sayfa 18-27, 2001.
- [9] Frost R. L., Scholz R., Ruan X., Lma R. M. F., 2016, Thermal analysis and infrared emission spectroscopy of the borate mineral colemanite ($\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 124 (1), 131-135, 2001.
- [10] Celik A. G., Cakal G. O., Characterization of espey colemanite and variation of its physical properties with temperature, Physicochemical Problems of Mineral Processing 52 (1), 66-76, 2016.
- [11] Demir C., Bor minerallerinin enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
- [12] Eskibalci M. F., Ozkan S. G., An investigation of effect of microwave energy on electrostatic separation of colemanite and ulexite, Minerals Engineering, 31, 90-97, 2012.
- [13] Ozkan S. G., Güngören C., Enhancement of colemanite flotation by ultrasonic pre-treatment, Physicochemical Problems of Mineral Processing 48 (2), 455-462, 2012.
- [14] Sarıhan E., Bor sektör profili, İstanbul Ticaret Odası, 2006.
- [15] Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Bor Sektör Raporu, Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, 2016.
- [16] USGS, 2016, [online], <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/boron/mcs-2015-boron.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 16.06.2016].
- [17] Ertuğrul E., Bor ve Toryum Madenleri Sektörü, Sektörel Araştırmalar, Türkiye Kalkınma Bankası A.Ş. Araştırma Müdürlüğü, Ankara, 2004.
- [18] Bozan Z., Üleksitin okzalik asit çözeltisinde çözünme kinetiği, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 2006.
- [19] DPT, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Kimya Sanayii Hammaddeleri Cilt II (Bor Tuzları-Trona-Kaya Tuzu-Sodyum Sülfat-Stronsiyum) Çalışma Grubu Raporu, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara, 2001.
- [20] Yılmaz B., Evis, Z., Boron-substituted bioceramics: A review, Journal of BORON, 1 (1), 6-14, 2016.
- [21] Yılmaz Aydın D., Gürü M., Ayar B., Çakanyıldırım Ç., Bor bileşiklerinin alev geciktirici ve yüksek sıcaklığa dayanklı pigment olarak uygulanabilirliği, Journal of BORON, 1 (1), 33-39, 2016.
- [22] Lezhnina M. M., Katker H., Kaiser M., Stegemann L., Voss E., Resch-Genger U., Strassert C., Kynast U., Chemical behavior and spectroscopic properties of rare earth borates in glazes, Journal of Luminescence, 170, 387-394, 2016.
- [23] Xu K., Hrma P., Rice A. J., Schweiger M. J., Riley B. J., Overman N. R., Kruger A. A., Conversion of nuclear waste to molten glass: Cold-cap reactions in crucible tests, Journal of the American Ceramic Society, 2016.
- [24] Şahan H., Üleksit'in öğütülebilirlik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Eskişehir, 2010.
- [25] Akgül Ö., Farklı bor minerallerinden çinko borat üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [26] Hilliard Z., Hrma P., A method for determining bulk density, material density, and porosity of melter feed during nuclear waste vitrification, Journal of the American Ceramic Society, 99 (1), 98-105, 2016.
- [27] DPT, Nükleer enerji hammaddeleri uranyum-toryum, Yayın No: 2429, ÖĞK: 487, Ankara, 1996.
- [28] Kaya M., Toryum nükleer yakıtının perspektifi, ve ülkemizde enerji üretimi açısından önemi, 14. International Energy and Environmental Technology Systems Fair and Conferences, ICCI-2008, pp. 256-263, 2008.
- [29] Kurşun Ünver İ., Özkan Ş. G., Kılıç A., Terzi M., Enkhtaivan N., Recovery of trace elements with uranium and thorium from Yatagan Thermal Power Plant fly ashes by leaching, Physicochemical Problems Of Mineral Processing, 52, 588-596, 2015.
- [30] Kurşun Ünver İ., Terzi M., Research on the solubility of radioactive elements in the ashes from the Soma in Turkey, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1 (1), 27-33, 2015.

- [31] Kurşun Ünver İ., Terzi M., Investigation of solubility of radioactive elements contained in ashes of Yatagan Thermal Power Plant in acetic acid, *Asian Journal of Chemistry*, 27, 2685-2690, 2015.
- [32] Özkan S. G., Alp, M. S., Ergin Z., Akar A., Türkiye'nin radyoaktif hammadde potansiyeli ve değerlendirme olanaklarının araştırılması (The investigation of the evaluation possibilities of radioactive raw materials potential of Turkey), *Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Maden Mühendisliği Seksiyonu*, 8, 37-48, Isparta, 1995.
- [33] Yörükoğlu A., Yeni Türkiye'nin yeni enerji kaynakları (bor), *Mimar ve Mühendisler Grubu MMG Dergisi*, 81, 38-40, 2015.
- [34] Osmanlıoğlu A. E., Yerli ve yeni enerji kaynakları, *Mimar ve Mühendisler Grubu MMG Dergisi*, 81, 42-44, 2015.
- [35] Yılmaz O., Balıkesir-Bigadiç bor atıklarının flotasyon yöntemiyle zenginleştirilmesi çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2006.
- [36] Rebesdorff B., Bart G., Material operating behaviour of abb BWR control rods, control assembly materials for water reactors: Experience, performance and perspectives, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1998.
- [37] Ruggiero A. G., Nuclear fusion of protons with boron, Prospects for Heavy Ion Inertial Fusion Aghia Pelaghia Conference, Crete, Greece, 1992.
- [38] Subramanian C., Suri A. K., Ch. Murthy T. S. R., Development of boron-based materials for nuclear applications, *Technology Development Article*, 313, 14-22, 2010.
- [39] Ashby M. F., Smidman M., Materials for nuclear power systems, *Nuclear Power*, pp. 1-20, 2010.
- [40] Büyükyıldız E., Emet borik asit fabrikası atıklarından borun kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2007.
- [41] Suri A. K., Subramanian C., Sonber J. K., Ch. Murthy T. S. R., Synthesis and consolidation of boron carbide: A review, *International Materials Reviews*, 55 (1), 2010.
- [42] Date V. G., Kulkarni P. G., Status of control assembly materials in Indian water reactors, control assembly materials for water reactors: Experience, performance and perspectives, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1998.
- [43] Simeone D., Deschanel X., Cheminant P., Herter P., Behaviour of different boron rich solids as promising absorbers for PWR, control assembly materials for water reactors: Experience, performance and perspectives, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1998.
- [44] Kaito T., Maruyama T., Onose S., Horiuchi H., Irradiation behavior of boron carbide neutron absorber, absorber materials, control rods and designs of shutdown systems for advanced liquid metal fast reactors, International Atomic Energy Agency, 1996.
- [45] Risovany V. D., Zakharov A. V., Klochkov E. P., Osipenko A. G., Kosulin N. S., Mikhailichenko G. I., Reprocessing of the irradiated boron carbide enriched by boron-10 isotope and its reuse in the control rods of the fast breeder reactors, control rods and designs of shutdown systems for advanced liquid metal fast reactors, International Atomic Energy Agency, 1996.
- [46] Risovaniy V. D., Zaharov A. V., Klochkov E. P., Varlashova E. E., Suslov D. N., Dysprosium and hafnium base absorbers for advanced power control rods, control assembly materials for water reactors: Experience, performance and perspectives, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1998.
- [47] Troyanov V., Pomeschikov A., Sougonjaev V., High temperature study of the control rod behaviour under accident conditions, control assembly materials for water reactors: Experience, performance and perspectives, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1998.
- [48] TAEK, 2016, Basıncılı Su Reaktörü, [online], <http://www.taek.gov.tr/nukleer-guvenlik/nukleer-enerji-ve-reaktorler/170-nukleer-reaktorler/464-basincli-su-reaktoru-tipi.html>, [Ziyaret Tarihi: 16.06.2016].
- [49] Bruggeman A., Dubost E., Ekenved M., Hooper E. W., Houbetsov E. B., Kallonen I., Lucas M., Luo S., Sen Gupta S. K., Timulak J., Tsarenko A. F., Ojovan M., Vizlay J., Processing of nuclear power plant waste streams containing boric acid, International Atomic Energy Agency, 1996.