

BOR MADENİNİN ENERJİ KAYNAĞI OLARAK KULLANILMASI

Yrd. Doç. Dr. Tuncay Uslu

Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü
tuncay43@ktu.edu.tr

ÖZET

Son yıllardaki bilimsel çalışmalar, bor ve bor bileşiklerini, hidrojen depolama ve üretiminde kullanılan bir enerji kaynağı konumuna getirmiştir. Bu sebeple, borun, hidrojen ve yakıt pili teknolojileri için önemi giderek artmıştır. Hidrojen, bir bor bileşiği olan sodyum bor hidrürden hiçbir zararlı yan ürün oluşmaksızın üretilebilmektedir. Sodyum borhidrür, ayrıca yakıt pilleri için potansiyel yakıt konumundadır. Bor, ayrıca element halinde, yüksek yanabilirliği sebebiyle doğrudan araçlar için motor yakıtı veya motor yakıtı katkı maddesi olarak da kullanılabilir. Bu makalede, borun hidrojen üretiminde ve depolanmasında kullanımı, yakıt pillerinde yakıt olarak kullanımı, araç motorları için yakıt veya yakıt ilave maddesi olarak kullanımı, bu amaç için geliştirilen yöntemlerin çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları, bu konudaki son gelişmeler ve Türkiye'de yapılan çalışmalar sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Dünyanın enerji ihtiyacının çoğunu karşılayan fosil yakıtlar (petrol, doğal gaz, kömür) hızlı bir şekilde tükenmektedir. Ayrıca bunların yanması sonucunda, hava kirliliği, sera gazı etkisi, ozon tabakası incilmesi, asit yağmurları gibi insan sağlığını tehdit eden bir çok problem ortaya çıkmaktadır. Hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanılması durumunda bu problemlerin ortadan kalkacak olması mühendis ve bilim adamlarının hemfikir olduğu bir konudur. Hidrojen çok etkin ve temiz bir yakıttır ve yanması sonucu kirliliğe yol açacak herhangi bir ürün ortaya çıkmaz (Veziroğlu, 2003). Hidrojenin enerji kaynağı olarak kullanılabilirliğiyle ilgili problem, hidrojen enerjisinin kolay ve ucuz bir şekilde nasıl depolanacağıdır. Hidrojenin depolanması, hidrojen ve yakıt pili teknolojilerinin daha da gelişmesi için anahtar konumdur (Zeybek ve Akın, 2005).

Bor, periyodik tablodaki yeri ve hidrür bileşiklerinin değişik kimyasal yapıları sebebiyle, hidrojen taşıma ve iletim işlemlerinin istenen kapasitede uygulanabilirliğini sağlayacak olan hidrojen depolama işlemi için anahtar konumda bulunan bir elementtir (Owen, 2005). Hidrojenin taşınması ve depolanması için şimdiye kadar, basınç tankında gaz halde depolama, sıvı halde depolama, metal hidrit şeklinde depolama, cam mikrokürelerde depolama, karbon nanotüplerde depolama gibi çeşitli yöntemler denenmesine rağmen bunların hiçbiri depolama için gerekli kriterleri sağlayamamıştır (Yürüm, 2004). Bu kriterlerin en önemlileri depolama yoğunluğu, güvenliği ve maliyetidir. Bir bor bileşiği olan sodyum borhidrür bu konuda çözüm olarak görülmekte ve üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. Yakıt pillerinde, sodyum borhidrür doğrudan yakıt olarak veya gerektiğinde hidrojen üretimi için kullanılabilir (MAM, 2006).

Ayrıca, bor, element halde de motor yakıtı olarak potansiyel kullanıma sahiptir (Cowan, 2004; Demirbas 2005; Balat 2007). Bor doğada saf halde bulunmaz ve oksijen ile kolayca reaksiyona girer. Belli koşullarda çok yüksek yanma özelliğine sahiptir. Yanması ekzotermik bir reaksiyon olup, reaksiyon sonucunda zararlı gaz emisyonu yoktur. Borun bu özelliğinden dolayı, alternatif motor yakıtı olarak kullanılabilmesi konusunda 1950'lerden bu yana ABD, Fransa, Almanya, Kanada, Rusya gibi ülkelerde çalışmalar devam etmektedir (Erarslan ve Karakoc, 2002a). Borun gelecekte önemli bir motor yakıtı olacağı düşünülmektedir (Demirbas 2005; Balat 2007).

2. BOR HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Periyodik tablonun beşinci elementi olan bor doğada daima oksijen ile bileşik halinde ve çoğunlukla da boratlar halinde bulunur (Uslu, 1996). Çeşitli miktarlarda bor oksit (B_2O_3) içeren minerallere de bor mineralleri denilmektedir (Altun, 2003).

Doğada 200 'ün üzerinde bor içeren mineral olmasına rağmen, ticari olarak en önemlileri tinkal (boraks), kolemanit, üleksit ve kernittir. Bor minerallerinden, ticari öneme sahip kimyasal bileşikler üretilir ki bunlar rafine bor ürünleri adını alır (Etimaden 2006). Ticari öneme sahip bor mineralleri ve rafine bor ürünleri Tablo1-2'de gösterilmektedir. Ayrıca üçüncü bir gurubu oluşturan bor bileşikleri vardır ki bunlar özel bor ürünleri adını alır. Bunlar elementel bor, bor karbür, bor nitrür, bor halidler,

inorganik boratlar, floroboratlar, borik asit esterleri, borhidrürler ve bor-azot bileşikleridir (Boren, 2006).

Tablo 1. Ticari öneme sahip bor mineralleri (Özbayoğlu, 2006).

Mineral	Kimyasal Formül	B₂O₃(%)
Kolemanit	2CaO.3B ₂ O ₃ .5H ₂ O	50.8
Sassolite	B(OH) ₃	56.4
Tinkal (Boraks)	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .3H ₂ O	36.5
Tinkalkonit	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .5H ₂ O	48.8
Kernit	Na ₂ O.2B ₂ O ₃ .4H ₂ O	51.0
Üleksit	Na ₂ O.2CaO. 5B ₂ O ₃ .16H ₂ O	43.0
Probertit	Na ₂ O.2CaO. 5B ₂ O ₅ .10 H ₂ O	49.6
Szaybelit	2.MgO. B ₂ O ₃ . H ₂ O	41.0

Tablo 2. Rafine bor ürünleri (Kılıç, 2004)

Ürün	Kimyasal Formül	B₂O₃(%)
Boraks Pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	47.8
Boraks Dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	36.5
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69.3
Borik Asit	H ₃ BO ₃	56.5
Susuz Borik Asit	B ₂ O ₃	100
Sodyum Perborat	NaBO ₃ .4H ₂ O	22.0
Sodyum Metaborat	Na ₂ B ₂ O ₄ .4H ₂ O	64.2
Sodyum Oktaborat	Na ₂ B ₈ O ₁₃	81.8

Tablo 3. Dünya Bor Rezervi (Bin Ton - B₂O₃) (Etimaden, 2006)

Ülke	Görünür Rezerv	Mümkün+Muhtemel Rezerv	Toplam Rezerv	Pay (%)
Türkiye	227.000	624.000	851.000	72.20
A.B.D	40.000	40.000	80.000	6.80
Rusya	40.000	60.000	100.000	8.50
Çin	27.000	9.000	36.000	3.10
Şili	8.000	33.000	41.000	3.50
Peru	4.000	18.000	22.000	1.90
Bolivya	4.000	15.000	19.000	1.60
Kazakistan	14.000	1.000	15.000	1.30
Arjantin	2.000	7.000	9.000	0.80
Sırbistan	3.000	0	3.000	0.30
Toplam	369.000	807.000	1.176.000	100

Dünyada en fazla bor rezervine sahip ülke Türkiye'dir (Uslu, 1996). Dünyadaki toplam bor rezervi B₂O₃ bazında 1,176 milyar tondur. Türkiye 851 milyon ton rezerv ile %72.2 paya sahiptir (Tablo 3) (Etimaden, 2006). Türkiye'deki bor yataklarının bulunduğu yerler Emet-Kütahya (Kolemanit), Kırka-Eskişehir (Tinkal), Bigadiç-Balıkesir (Kolemanit ve Üleksit) ve Kestelek-Bursa (Kolemanit)'dir (Acarkan, 2002). Türkiye'de bor madeni bor mineralleri ve kimyasallarının tek üretici ve ihracatçısı olan Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından işletilmektedir. Bor minerali üretiminin %40'ı ham ve konsantre cevher olarak ihraç edilmekte olup, geri kalanı borik asit, boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, sodyum perborat ve susuz boraks gibi rafine ürünlere dönüştürülmektedir (İGEME, 2006).

Bor mineralleri endüstrinin bazı alanlarında konsantre halinde kullanılmasına rağmen rafine bor ürünü veya özel bor ürünü halinde daha fazla kullanım alanı bulur (Kar ve diğ., 2006). Dünya bor tüketiminin % 43 ünü cam ve cam ürünleri (fiberglas, ısıya dayanıklı cam, cam yünü vb), %17 sini temizlik malzemeleri (deterjan, sabun, kişisel bakım ürünleri vb), % 12 sini seramik ve emaye sanayi, % 5 ini tarımsal gübre ve ilaç oluşturur (Borax, 2006). Bu kullanımların dışında da, ağaç koruma, roket yakıtı, nükleer uygulamalar, metalurji, kozmetik, tıp, kompozit malzeme üretimi, kauçuk-plastik üretimi, fotoğrafçılık, boya, yapıştırıcı malzeme, mumyalama gibi çok farklı alanlarda kullanılır (Kar ve diğ., 2006).

Türkiye'nin bor madeni kullanım miktarı ancak dünya üretiminin % 1-2'si civarında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla Türkiye dünya çapında bor üreticisi olmasına rağmen, bora dayalı ya da bor kullanan endüstrilerde tamamen dışa bağımlıdır. Sahip olduğu yüksek miktar ve kalitedeki bor madeni rezervlerinden yeterince yararlanamayan Türkiye, gelişmiş ülkelere ham bor ihraç ederken, boraks, sodyum perborat gibi katma değerleri yüksek bor ürünleri piyasasını rakip ülkelere bırakmaktadır. Türkiye'nin, 2002 yılında 186 milyon \$ olan bor ve bor ürünleri ihracatı, 2005 yılında, 2002 yılına nazaran % 61 artarak 299 milyon \$'a yükselmiştir. Öte yandan, Türkiye 2004 yılı itibarıyla dünya bor üretiminin % 33'ünü karşılarken, ABD ise bu üretimin ancak % 27'sini karşılamıştır. Buna rağmen Türkiye 1.5 milyar \$'lık dünya bor pazarından yalnızca 250 milyon \$ ihracat geliri elde ederken, ABD ise 650 milyon \$ gelir elde etmiştir. Bu durum büyük ölçüde Türkiye'nin dünya bor madeni pazarını yeterince kontrol edememesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca ABD pazarda sadece katma değeri yüksek rafine bor ürünleri satarken, Türkiye'nin bor madeni ihracatı katma değeri düşük ham bor şeklinde gerçekleşmektedir. Öte yandan, Türkiye bor madeninin % 86'sını ham, % 14'ünü ise bor ürünü olarak ihraç etmektedir. Bu nedenle 1.5 milyar \$ olan dünya bor ürünü piyasasından, ham bor madeni hariç, Türkiye ancak % 7 pay alabilmektedir. Dolayısıyla bor madenlerimizin GSMH içindeki payı ise sadece % 0.5 olarak gerçekleşmektedir (Polat, 2006).

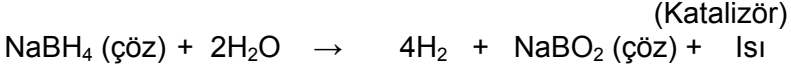
2. BORUN ENERJİ ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Borun enerji üretiminde kullanımını, hidrojen üretimi ve depolamasında kullanımı, yakıt pili yakıtı olarak kullanımı, motor yakıtı olarak kullanımı ve motor yakıtı katkı maddesi olarak kullanımı olmak üzere aşağıda dört başlık altında anlatılmaktadır.

2.1. Borun Hidrojen Üretimi ve Depolanmasında Kullanımı

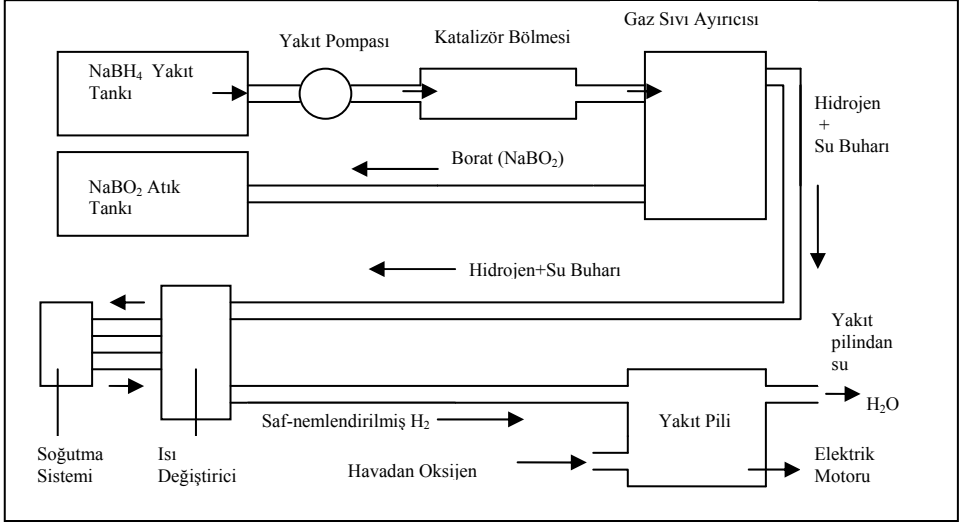
Yapısında bor olup hidrojen adsorbe eden ve açığa çıkaran çeşitli maddeler olmasına rağmen, bu konuda söz sahibi olan bor bileşikler borhidrürlerdir. Bunların içinde de sodyum borhidrür en önemlisidir (Owen, 2005). Sodyum borhidrür, Millennium Cell firması tarafından geliştirilen "Hydrogen on Demand (İhtiyaç anında hidrojen)" sistemi ile ticari değer kazanmıştır. Bu sistemde, sodyum borhidrür, su ile oda sıcaklığında yüksek basınç olmaksızın reaksiyona girmekte ve hidrojen üretmektedir. Bu reaksiyon, kontrol edilebilir bir ısı

salmakta ve zararlı yan ürün ortaya çıkarmamaktadır (Fakioğlu ve diğ., 2004). “Hydrogen on Demand” sistemiyle hidrojen üretimi işleminin reaksiyonu şu şekildedir:



“Hydrogen on Demand” sisteminde sodyum borhidrür çözeltisi bir yakıt tankında depolanır ve gerektiğinde minyatür bir reaktör içinde hidrojene dönüştürülür. Hidrojen üretimi, çözeltinin reaktör içinde bir katalizör ile kontrollü teması sayesinde kontrol edilir. Hidrojen gazı sonra yan ürün olarak oluşan sodyum meteborattan ayrılır. Hidrojen akımı sürekli nemlendirilir, çünkü reaksiyon ısı suyun bir kısmını buharlaştırır. Hidrojen/su buharı akımı yakıt pili güç modülüne gönderilmeden önce opsiyonlu olarak ısı değiştiriciye gönderilerek nem miktarı ayarlanır. Yan ürün olan sodyum metaborat atılmak veya yeniden kazanım için kullanılmış yakıt sahasına gönderilir. Üretilen hidrojen gazı direk olarak sodyum borhidrürün reaktöre pompalanma hızı ile bağlantılıdır(Millenium Cell, 2006). Hidrojen üretim hızı kullanılan katalizör miktarı ile de orantılıdır. “Hydrogen on Demand” sisteminin avantajları şunlardır:

- Bu yöntemle hidrojen üretimi diğer kimyasal yöntemlere göre daha güvenli, kolay ve kontrol edilebilir özelliğe sahiptir.
- Hacimsel ve kütleli olarak depolanabilecek hidrojen miktarı yüksektir.
- Sodyum borhidrür çözeltisi yanıcı-patlayıcı değildir.
- Hidrojen üretimi sadece katalizör varsa yapılır.
- Hidrojen üretim hızı kontrol edilebilir.
- Gaz halindeki yan ürün sadece su buharıdır.
- Reaksiyon ürünleri çevre için zararsızdır (Ay ve ark., 2006)
- Katalizör ve sodyum metaborat tekrar kullanılır (MAM,2006).



Şekil 1. Hydrogen on Demand™ sistemiyle hidrojen üretimi (Millenium Cell, 2006)

“Hydrogen on Demand” sisteminin birçok avantajı olmasına rağmen, sistemle ilgili bazı problemler mevcuttur. Kullanılan katalizör oldukça pahalıdır. Sodyum borhidrürün kendisi de pahalı olup sistemin ekonomik olabilmesi sodyum borhidrür üretim maliyetinin düşmesine bağlıdır (Zeybek ve Akın, 2005). 1 mol sodyum borhidrür üretmek için 4 mol sodyum metale ihtiyaç duyulması üretimi etkileyen ana faktördür (Bilici, 2004). Şu an için, yakıt pili ile çalışan bir arabada sodyum borhidrür maliyeti benzin maliyetinin 40 katıdır (Owen, 2005).

Otomobil üreticileri “Hydrogen on Demand” sistemine göre çalışan araba üretmeyi başarmışlardır. Bu sisteme göre üretilen “The Chrysler Town&Country Natrium” ve “Peugeot-Citroen H₂O” araçlarının teknik özellikleri Tablo 4-5 de verilmiştir.

Tablo 4. Bor yakıtlı “Chrysler Town & Country Natrium” aracının özellikleri (Erarslan ve Karakoc, 2002b)

Araç	Chrysler Town & Country Minivan
Çekiş	Önden çekişli –Etkili fren Sistemi
Motor:	35 kW Siemens AC motor
Akü	40 kW SAFT Li-Ion
Yakıt	Sodyum Bor Hidrür
Yakıt işlem birimi	Hydrogen on Demand Millennium Cell
Yakıt Pili	Ballard/XCELLIS
Yakıt Ekonomisi	30 mpg benzin eşdeğeri
0-60 mph hıza ulaşım	16 saniye
Maksimum hız	80 mph
Menzil	300 mil
Emisyon	0 Emisyon

Tablo 5. Bor yakıtlı “Peugeot-Citroën H₂O” aracının özellikleri (eere.energy, 2006* ;Wu, 2003**)

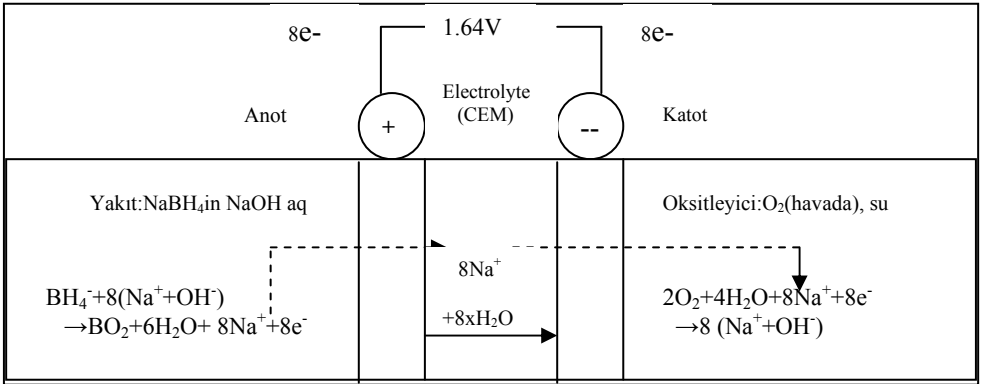
Araç	Peugeot-Citroën H ₂ O Yangın Söndürme Aracı
Yakıt Tipi	Sodyum Bor Hidrür
Motor Tipi	Battery/Fuel Cell APU*
Yakıt İşlem Birimi	Hydrogen on Demand system Millennium Cell, Inc*
Maksimum Hız	77mph (124 km/h)*
Menzil	----
İlk Tanıtım	Paris Auto Show, Ekim 2002**

2.2 Borun Yakıt Pili Yakıtı Olarak Kullanımı

Merit firması tarafından yakıt olarak sodyum borhidrür kullanan Direct Borohydride Fuel Cell (DBFC) (Doğrudan borhidrürlü yakıt pili)” geliştirilmiştir (Merit, 2006). Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pillinde, hidrojen üretim ara kademesi olmadan elektrik üretilmektedir. Hidrojen üretim ve depolama birimleri olmaksızın doğrudan sodyum borhidrür yakıt olarak kullanılmaktadır. Doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pili

özellikle güç gereksinimi düşük olan taşınabilir sivil (telefon, radyo, küçük televizyon, el süpürgesi, vb) ve askeri (lokal aydınlatma (varta, vb), seyyar telsiz, telefon, elektronik harp cihazları (radyo alıcıları, vb), personel ısıtma, dismounted soldier, insansız araçlar, sensör vb.) uygulamalarda öneme sahiptir (MAM, 2006). Yakıt pillerinde hidrojen gazı yerine sodyum borhidrür kullanımının birçok avantajı vardır. Depolama problemi yoktur. Mobil uygulamalar için tehlikeli yüksek basınç tankları veya enerji tüketen soğutucu ekipmanlara gerek yoktur. Sodyum borhidrür yakıtı güvenlidir, düşük sıcaklıkta yanar, yüksek hidrojen kapasitesine sahiptir. DBFC diğer yakıt pillerine göre daha ucuzdur ve performansı daha yüksektir. 4 elektron yerine 8 elektron açığa çıkarır (Şekil 2). Bu durum DBFC'ye yüksek performans sağlar (Merit, 2006).

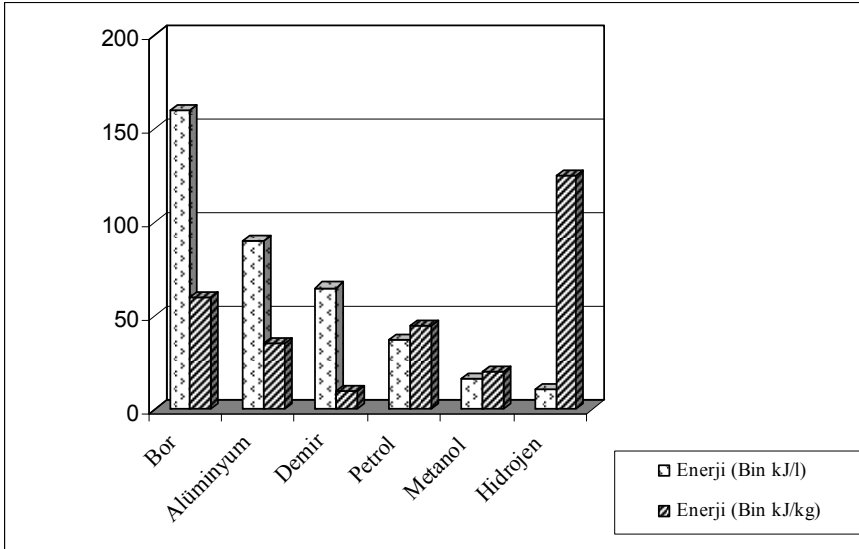
DBFC'de borhidrür ayrıştırılır ve oksitlenir. DBFC' de az da olsa, yakıt pili tarafından ısıtılan suyun sodyum borhidrür ile reaksiyona girmesi sonucu hidrojen oluşur. Bu hidrojen ya egzozdan atılır veya klasik hidrojen yakıt piline gönderilir. DBFC' de yan ürün olarak oluşan sodyum metaborat ya atık tankına gönderilir, ya da yakıt tankında biriktirilir. Bu yan ürün toksik özellikte olmayıp deterjan ve sabun yapımında katkı malzemesi olarak kullanılır. Sodyum metaboratın sodyum borhidrüre geri dönüştürülmesi için çeşitli teknikler mevcut olup henüz gelişme aşamasındadır (Wikipedia, 2006).



Şekil 2. DBFC'deki teorik elektrot reaksiyonları (Merit, 2006)

2.3 Borun Motor Yakıtı Olarak Kullanımı

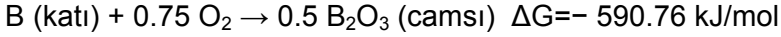
Hidrojen gibi bazı metaller de enerji kaynağıdır ve yandıklarında hiçbir kirlenici yan ürün vermeden enerji açığa çıkarırlar. Birim hacim başına hidrojenden daha fazla enerjiye sahiptirler (Nichols, 2005), ortam sıcaklığı ve basıncında depolanıp taşınabilirler, motor içinde yanma performansları yüksektir (Ornl, 2006). Bir metal olarak bor, yandığı zaman diğer metallerden, petrolden ve hidrojenden daha fazla enerji açığa çıkarır (Şekil 3). Bor yandığında, petrole göre 5 kez fazla enerji salar (Kleiner, 2005).



Şekil 3. Bor, diğer bazı metaller ve klasik yakıtların saldıkları enerji miktarları. (Kleiner, 2005)

Motorlarda potansiyel kullanıma sahip bor yakıtı bor elementinden ibarettir. Motor içinde saf oksijen ile karıştırılır. Çok zor tutuşması sebebiyle güvenlidir ve kaza durumunda tehlike oluşturmaz. Bor, çok yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Cowan, 2004; Demirbas 2005; Balat 2007). Borun içinde yanacağı ve yanma sonucu oluşan atığın koyulacağı tankların toplam hacmi sıvı hidrokarbon yakıt tankından daha büyük değildir (Cowan, 2004). 125 km/saat hızla 1000 km yol alacak bir otomobil için bor ve değişik yakıtlar kullanıldığında oluşacak yakıt tüketimi ve atık miktarları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Dolayısıyla, bir araba için pratik bir yakıttır. Boru yakıt olarak kullanacak arabalar çevreye zararlı gaz çıkışı olmayacaktır. Borun yanması sonucu oluşan bor oksit bileşiği daha sonra tekrar bora dönüştürülebilme için depolanabilecektir. Borun tutuşabilmesi için saf oksijen gereklidir (Cowan, 2004; Demirbas 2005; Balat 2007). 25 °C den başlayarak 1 mol saf bor 0.75 mol saf oksijen ile 100 bar basınçta reaksiyona girerek yanma işlemi gerçekleşir. Borun yanma reaksiyonu şu şekilde yazılabilir:

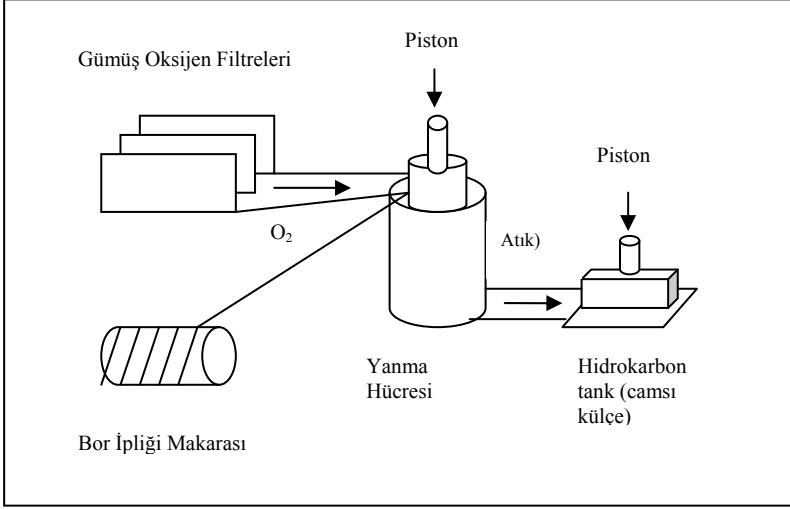


(Cowan, 2004)

Tablo 6. 125 km/saat hızla 1000 km gidecek olan bir araç için gereken yakıt ve oluşan atık miktarları
(Cowan 2004)

Yakıt Tipi		Hacim (L)	Ağırlık(Kg)
Bor	Yakıt B	32.3	54.9
	Atık B ₂ O ₃	96.7	176.8
Oktan	Yakıt H ₃ C.C(C ₂ H ₅) ₃	90.3	65.7
	Atık CO ₂ +9H ₂ O	102.500 (202.5 kg CO ₂)	295.7
Metanol	Yakıt CH ₃ OH	177.3	140.3
	Atık 2H ₂ O+CO ₂	97.500 (192.7 kg CO ₂)	350.4
Hidrojen	Yakıt H ₂	373.8	26.5
	Atık H ₂ O	237.1	236.4

Bor yanma haznesine, hazne duvarındaki delikten kontrol edilebilir bir hızda iplik halinde beslenir (Şekil 4). İplik hazne içinde sürekli yanar haldeki ateşle karşılaşır ve bor ipliği geldikçe yanma devam eder (Cowan, 2001). Borun yanması saf oksijen ve yüksek basınç ile mümkün olduğundan oksijenin havadan ayrılması gerekir. Saf oksijenin havadan ayrılması sıcak metalik gümüş filtresi kullanılarak yapılır (Cowan, 2004).



Şekil 4. Bor yakıtlı motor sisteminin temsili şeması. (Erarslan ve Karakoc , 2002b)

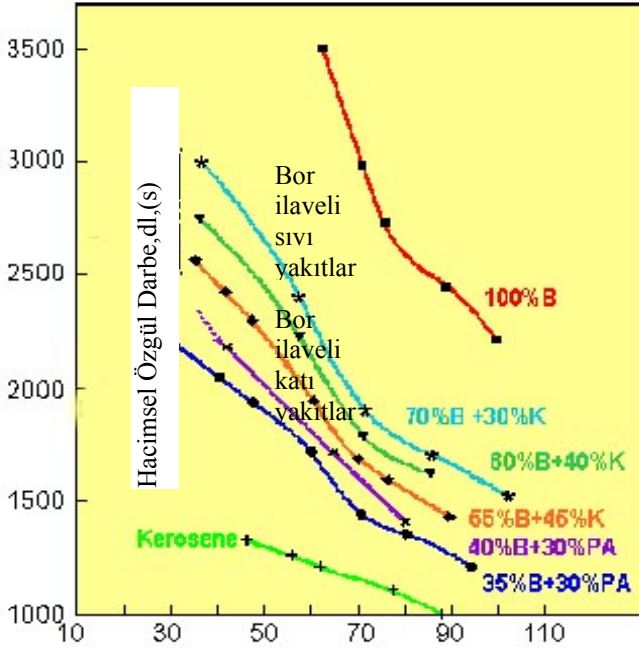
Bor esaslı motor sisteminin otomobillerde kullanılabilmesi için daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Problem, saf oksijenin düzenli olarak istenen miktarda nasıl sağlanacağıdır. Oksijeni gümüş filtreler ile saflaştırmak mümkün ise de, $\frac{3}{4}$ oranında saf oksijeni otomobilin hızına göre sürekli olarak sağlamak problemdir. Ayrıca, sistem henüz otomobil üzerinde uygulanmamış ve test sürüşü henüz yapılmamıştır. Maliyet analizi, sistemin tam ve etkin çalışması sağlandıktan sonra yapılabilecektir (Erarslan ve Karakoc, 2002b)

2.3 Borun Motor Yakıtı Katkı Maddesi Olarak Kullanımı

Metal yakıtlar, insansız araçlar ve savaş teknolojilerinde güç kaynağı olarak potansiyel kullanım alanına sahiptir (Ornl, 2006). Metal bazlı yakıt, bünyesinde yüksek yanma sıcaklığı veren metal içerir. Roketlerdeki yüksek yakıt performansı yakıtın yanma sıcaklığının yüksek olması ile sağlanır. Bu konuda en önde gelen aday bordur. Metal hale getirilmiş bor, sıvı veya katı yakıtlara katkı maddesi olarak ilave edilebilir. Sıvı yakıtlara ilave edildiğinde homojen bir süspansiyon sağlamak için jelleştirici madde ilave edilirken, katı roket yakıtları için, metal tozu haline getirilip bir oksitleyici ve polimer olmayan yakıt ile karıştırılması gerekmektedir. Bor katı roket yakıtlarının yanma sıcaklığını artırır ve yanmada homojenlik sağlar (McGraw-Hill, 2005). Bor bazlı yakıtlar 1950'lerden bu yana araştırılmakta olup, bazı askeri amaçlı ve ramjet itenekli füzelerde kullanılmıştır (Lorrey, 2006). 1950 li yıllarda Amerikan ordusu ZIP, HERMES, HEF

gibi bor içeren yüksek enerjili yakıt projeleri geliştirilmiştir. Bu çalışmalar çok değerli bilim adamları ile yüksek gizlilik içinde yürütülmüştür "Valkyrie XB-70A" olarak adlandırılan, bor bazlı yakıt kullanan uzun menzilli bombardıman uçağı üretilmiştir. 1959'da milyar dolarlar harcanan bu borlu yakıt projeleri iptal edilmiştir (Schubert 2001).

Bugün, borun yakıt katkı maddesi olarak kullanımına dair çalışmalar devam etmektedir. Fransa'daki "ONERA" programı bunlardan biridir. Bu programda, hipersonik özellikteki ramjet itenekli füzeler geliştirilmektedir. Yapılan çalışmalar, borlu yakıtın, ramjete yüksek performanslı bir jet yakıtı olan kerosenden (gazyacı) bile daha fazla özgül darbe (I_{sp} =Specific Impulse) kazandırdığını göstermiştir (Şekil 5). %55 bor-%45 kerosen karışımı yakıt bile sadece kerosenden oluşan yakıtı göre %50-100 oranında özgül darbe artışı sağlamıştır (Lorrey, 2006).



Şekil 5. Borun ramjetlerde özgül darbe üzerine etkisi (Lorrey, 2006)

3. BORDAN ENERJİ ÜRETİMİ KONUSUNDA TÜRKİYE'DEKİ ÇALIŞMALAR

Türkiye dünyanın en büyük bor rezervlerine sahip olmasına rağmen, bor teknolojisinin çok ileri düzeyde söylenemez. Üniversite ve bazı kamu kurumlarında bor madenciliği, bor cevherinin zenginleştirilmesi, borun çeşitli alanlarda kullanımı, çevreye etkisi vb. gibi çok sayıda çalışma mevcut olmasına rağmen, borun enerji alanında kullanılabilirliğine dair çok fazla sayıda çalışma yoktur ve bu konudaki çalışmalar yeni başlamıştır.

Bor Araştırma Enstitüsü, katma değeri yüksek bor bileşiklerinin üretilmesi ve kritik teknoloji alanlarında kullanılması için AR-GE faaliyetlerini yürütmekte ve koordine etmektedir. Bu bileşiklere sodyum borhidrür üretimi ve yakıt pillerinde kullanımı iyi bir örnektir. Bor Araştırma Enstitüsü'nün desteklediği "Sodyum Borhidrür Sentezi ve Üretimi" ve "Doğrudan Sodyum Borhidrürlü Yakıt Pili Üretimi ve Entegrasyonu" konulu iki proje TÜBİTAK MAM Kimya ve Çevre Enstitüsü ve Enerji Enstitüsü'nde paralel olarak yürütülecektir (MAM 2006).

"Sodyum Borhidrür Sentezi ve Üretimi" projesi kapsamında, sodyum borhidrür üretim teknolojisi önce laboratuvar ölçeğinde geliştirilerek sanayi ölçeğinde üretim biriminin kurulabilmesi için gerekli bilgiler oluşturulacaktır. Proje kapsamında ayrıca, laboratuvar çalışmalarından elde edilen bilgiler ışığında bir sodyum borhidrür üretimi pilot tesisi kurulacaktır. Dünyada yeni gelişmekte olan alternatif hidrojen depolama teknolojisinin ana girdisi olan sodyum borhidrürün üretim teknolojisinin geliştirilmesi Türkiye'nin zengin bor yataklarının yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlaması açısından çok önemlidir. Bu projede, şu anda dünya üzerinde pek çok araştırma kuruluşu tarafından da araştırılan, mevcut üretim teknolojilerinden daha ucuz sodyum borhidrür sentezinin ve üretim bilgisinin geliştirilmesi hedeflenmektedir (Bahar ve diğ. 2005).

"Doğrudan Sodyum Borhidrürlü Yakıt Pili Üretimi ve Entegrasyonu" projesinde ise doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pilinin geliştirilmesi ve son kullanıcı entegrasyonu yapılacaktır. Bu kapsamda doğrudan sodyum borhidrürlü yakıt pili modül ve sistem bileşenlerinin üretimi için bilgi, alt yapı ve özgün teknoloji oluşturulacak, doğrudan sodyum borhidrürlü tek hücreli ve üç hücreli yakıt pili, doğrudan sodyum borhidrür yakıt pili sistem alt bileşenleri geliştirilecek ve askeri/sivil amaçlı muhtelif uygulama alanları için 70-100W'lık doğrudan sodyum

borhidrür yakıt pili prototipi geliştirilecektir (MAM, 2006). Proje kapsamında anot, katot, elektrolit, akım toplayıcı, bipolar plaka ve gaz difüzyon plakası gibi yakıt pili modül bileşenleri ve yakıt besleme, enerji koşullandırma, kontrol ünitesi, ısı ve su yönetimi gibi yakıt pili sistem alt bileşenleri üretimi, geliştirilmesi ve/veya temini gerçekleştirilecektir (Boyacı San ve diğ.,2005).

4.SONUÇ

Bor ve bor bileşiklerinin, hidrojen, yakıt pili ve araç motor teknolojilerinde enerji kaynağı olarak potansiyel kullanımı mevcuttur. Konvansiyonel enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde tükenmesi bor madenini geleceğin enerji kaynağı adayı olarak güçlü bir konuma getirmiştir. Bor madeninin hidrojen üretimi ve depolanmasında, yakıt pillerinde ve araç motorlarında kullanımı teorik olarak ispatlanmıştır. Bor kaynaklı yakıt piliyle çalışan arabalar üretilip test edilmiştir. Bununla birlikte, kullanım maliyeti ve teknolojiyle ilgili bazı problemler de hala mevcut olup çözülmeye çalışılmaktadır. Bor madeninin enerji kaynağı olarak kullanımı konusunda çeşitli ülkelerde çalışmalar yapılmasına karşın dünyanın en fazla bor rezervine sahip olan Türkiye’de bu konuda çok fazla sayıda çalışma yoktur ve bu konudaki çalışmalar yeni başlamıştır. Türkiye’de bor madeni ile ilgili bilimsel çalışmaların, cevherin üretimi ve zenginleştirilmesi konusunun yanında, sodyum borhidrür üretimi, bora dayalı yakıt pili ve motor teknolojileri konularında da yapılması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu konuda üniversiteler arası ve üniversite-endüstri arası işbirliği güçlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Acarkan,N. 2002. Bor Ürün Çeşitleri ve Kullanım Alanları. 1. Uluslar arası Bor Sempozyumu Kitabı, Editör: K. Erarslan. Sayfa: 1-5
- Altun, F. 2003. The Role of Turkey in the World Boron Sector: New Targets and Policies. Proceedings of International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones. Editör: Erdoğan Yüzer-Hasan Ergin-Atiye Tuğrul. pp: 731-736
- Ay M, Midilli A, Dincer İ. 2006. Investigation of hydrogen production from boron compounds for pem fuel cells. Journal of Power Sources 157(2006) pp.104-113.
- Bahar T, Örs N, Kalafatoğlu İ.E, Yüzer H, Köroğlu H.J, Doğan H, Koral M, Sarıoğlu Ş, Türdü S, Tırıs M. 2005. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde Sodyum Borhidrür Sentezi ve Üretimi. 1. Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 28-29 Nisan 2005, Ankara.
- Balat M. 2007. Boron as an Alternate Engine Fuel, Energy sources 29, 79-83,

- Borax 2006. Borate in Use . Available from:
<http://www.borax.com/borates2.html>,
- Boren, 2006. National Boron Research Institute of Turkey.
<http://www.boren.gov.tr>
- Boyacı San F.G, Şener T, Behmenyar G, Karahan Ş, Akgün F, Tırıs M. 2005. Yakıt Pilleri ve Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili'nin Önemi, Sodyum Borhidrüllü Yakıt Pili. 1. Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı, 28-29 Nisan 2005, Ankara.
- Bilici U. 2004. Enerji Taşıyıcısı Hidrojen, Hidrojen Taşıyıcısı Sodyum Bor Hidrür. Madencilik Bülteni, January 2004, pp 43-47.
- Cowan G. 2004. Boron: A Better Energy Carrier Than Hydrogen? Available from http://www.eagle.ca/~gcowan/boron_blast.html
- Cowan G. 2001. Boron: A Better Energy Carrier Than Hydrogen? Available from www.eagle.ca/~gcowan/Paper_for_11th_CHC.html
- Demirbas A. 2005. Hydrogen and boron as recent alternative motor fuels. Energy sources 27, 741-748,
- Eere.Energy 2006. Heavy Duty Fuel Cell Vehicles -H2O Firefighting Concept Available from
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/ld_fc_vehicles.pdf
- Erarslan K, Karakoc, F. 2002 a. Boron Ignition System-1: Hydrogen Engines and Integrated Systems (In Turkish). Proceedings of the 1st International Boron Symposium,3-4 October 2002, Kütahya, Turkey. Ed : K.Erarslan pp 149- 154.
- Erarslan K, Karakoc, F. 2002 b. Boron Ignition System-2: Boron Fuelled Engines (In Turkish). Proceedings of the 1st International Boron Symposium, 3-4 October 2002, Kütahya, Turkey. Ed: K.Erarslan pp 155-159
- Etimaden, 2006. Eti Mine Works General Management.
<http://www.etimaden.gov.tr>
- Fakioglu E, Yürüm Y, Veziroglu T.N. 2004. A review of hydrogen storage systems based on boron and its compounds, Int. Journal of Hydrogen Energy, 29, (2004),1371-1376
- İGEME, 2006. The Turkish Economy: Bor Minerals. Report of Export Promotion Center of Turkey.
<http://www.igeme.org.tr/eng/turkey/industry.pdf>
- Kar Y, Sen N, Demirbas, A. 2006. Boron Minerals in Turkey, Their Application Areas and Importance for the Country's Economy. Minerals and Energy - Raw Materials Report, Volume 20, Numbers 3-4, -4/March 2006, pp. 2-10(9)
- Kılıç,A.M. 2004. Bor Madeninin Türkiye Açısından Önemi ve Gelecekteki Yeri. 2. Uluslar arası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı. Editör: Hüseyin Özdağ ve Diğ. Sayfa:31-41
- Kleiner K. 2005. Metal: The fuel of the future.
http://www.mng.org.uk/green_house/renewable_energy/metal_NS_article.htm
- Lorrey M. 2006. High Density Fuels, Boron-Gel Fuels and Diboride Thermal Protection Systems.
<http://www.islandone.org/Launch/boron-sharp-article.htm>

- MAM. 2006. Production of Sodium Borohydride and Fuel Cell with Direct Sodium Boron
<http://www.mam.gov.tr/eng/populer/proboron.htm>
- McGraw-Hill 2005. Metal-base fuel. McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology. <http://www.answers.com/topic/metal-base-fuel>
- Merit 2006. Research and Development, DBFC. Available from http://www.hydrogen.co.jp/merit/R&D/R&D_Main.html
- MillenniumCell 2006. Hydrogen Generation from Sodium Borohydride. Available from http://www.millenniumcell.com/fw/main/How_it_Works-31.html
- Nichols J.A. 2005. NLCF Explores the Potential of Burning Metal as the Fuel of the Future National Center for Computational Sciences, ORNL.
http://nccs.gov/aboutus/documents/factsheets/pdfs/nccs_burningMetal.pdf
- ORNL. 2006. Running on Iron. Metal nanoparticles show promise as future fuels.
http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v39_1_06/article18.shtml
- Owen J. 2005. Prospects for Borates as Raw Materials in a Hydrogen Economy. Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005 Istanbul, Turkey, 13-15 July 2005 www.ihec2005.org/abstract/MANUSPDF/Owen%20J.-USA.pdf
- Özbayoğlu, G. 2006. Beneficiation of Boron Minerals. Proceedings of XXIII International Mineral Processing Congress. Edited By: G.Önal et al. pp: 1053-1062
- Polat,A.2006. Bor madenlerinin Türkiye açısından ekonomik ve stratejik önemi.
<http://www.boraxtr.com/boraxtr/borpolitikasi/AydaPolatBorunStratejikOnemi.doc>
- Schubert D. 2001. From Missiles to Medicine:The development of boron hydrides
Pioneer Magazine, March 2001.
<http://www.borax.com/pioneer54.html>
- Uslu, T. 1996. Usability of Borax Tailingsbin Building Bricks as an Additive. MSc . Thesis. Middle East Technical University, Ankara, Turkey
- Veziroglu N.T. 2003. 21st Century's Energy: Hydrogen Energy System. 1st Ege Energy Symposium and Exhibition, May 2003, Denizli, Turkey. www.see.asso.fr/Jicable/wets03/pdf/wets03-1-10.pdf
- Wikipedia 2006. Direct Borohydride Fuel Cell,
http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_borohydride_fuel_cell
- Wu Y. 2003. Hydrogen Storage via Sodium Borohydride, Presented at GCEP- Stanford University, April 14-15 2003.
- Yürüm Y. 2004. Hydrogen Storage Systems Based on Boron Compounds. Presentation.
http://ie.jrc.cec.eu.int/events/2004/h2_knowledge_ws/Technical%20

session1_Some%20specific%20aspects/11a_Y.Yurum-Presentation.pdf

Zeybek O, Akın S. 2005. Hydrogen storage technology using sodium borhydride. Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005 Istanbul, Turkey, 13-15 July 2005. [www.ichet.org/ihec2005/files/posters /Zeybek%20O.%201-Tr.pdf](http://www.ichet.org/ihec2005/files/posters/Zeybek%20O.%201-Tr.pdf)