

**GELECEĞİN MİNERALİ VE MALZEMESİ
BOR VE BOROFEN I:
Borofenin Özellikleri ve Kullanım Alanları**



İşbu eserde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup, bu eserde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir. STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde sunulan verilerin/bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir. Bu eserde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın işbu eserde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.



1. GİRİŞ

İlk bakışta beyaz bir kayayı andıran bor, adeta mucizevi niteliklere sahiptir. Enerji tasarrufu sağlayan malzemelerde, karbon azaltımında, küresel gıda zincirinde, sayısız tüketim ürününde kullanılan bor, birçok biçimiyle hem nadir toprak elementlerinden hem de lityumdan daha geniş bir gelişmiş uygulama yelpazesine sahiptir. Bir bileşen olarak bor içeren yenilikçi malzemelere yönelik sürekli artan talep dünyada bora olan talebi artırmaktadır.

Yakın bir tarihte bordan üretilen yeni süper malzeme borofen ise tüm dünyada ezber bozan bir teknoloji olarak görülmektedir. Borofen adlı maddenin süper hızlı bilgisayarlardan pillere, transistörlerden dokunmatik ekranlara kadar birçok kullanım alanında “grafen”in yerini alması beklenmektedir. Bilim dünyasının “yeni süper malzeme” olarak adlandırdığı ve fiyatına paha biçilemeyen borofenin yakın bir zamanda, dünyadaki en fazla bor rezervine sahip olan Türkiye’de ürünleştirilmesi konuyu ülkemiz açısından da oldukça önemli hâle getirmiştir.

“Geleceğin Minerali ve Malzemesi Bor ve Borofen” başlıklı araştırma raporumuzun birinci bölümünde, borun özellikleri ve kullanım alanları ile bordan üretilen süper malzeme borofenin kullanım alanları ve insan yaşamı, sağlık ve ekonomi bakımından sunduğu fırsatlar değerlendirilmiştir.

2. BORUN TANIMI VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Borun Tanımı

Bor (B) atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 g, yoğunluğu 2,84 g/cm³, ergime noktası 2.300 °C (4.000 °F) olan, metalle ametal arası yarı iletken özelliklere sahip periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunan bir elementtir. Kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopu vardır^[1].

Bor, element hâlinde oluşmaz ve ekonomik bir yatağın oluşması için bir yanardağa, buharlaşmış suya, bor üretiminin ve rezervlerinin yüksek konsantrasyonlu doğasını açıklayan bir fay hattına ihtiyaç vardır^[2].

Bor doğada serbest olarak bulunmaz, diğer elementlerin oksitleriyle birlikte bor oksit (B₂O₃) hâlinde bulunmaktadır. Oksijenle bağ yapmaya yatkın olması sebebiyle pek çok değişik bor-oksijen bileşiği bulunmaktadır. Metal-bor oksijen bileşiklerine genel olarak borat denir. Bor mineralleri genellikle magnezyum (Mg), sodyum (Na), kalsiyum (Ca) gibi metallerle bileşik hâlinde bulunurlar^[1].

Tabiatta yaklaşık 250 çeşit bor minerali vardır. Ticari açıdan en önemli ve sıklıkla ticareti yapılan mineraller tinkal, kolemanit, üleksit ve kernittir. Bu cevherler ticari öneme sahip saf kimyasal bileşiklere dönüştürülebilir. Bunların başlıcaları; borik asit, susuz borik asit, susuz boraks, boraks pentahidrat, boraks dekahidrat ve

sodyum perborat olarak sıralanabilir^[3].

Bor mineralleri yapılarında farklı miktarlarda B₂O₃ içerir. Bor minerallerinin endüstriyel uygulamalarında önemli olan B₂O₃ içeriğidir, dolayısıyla kullanımda birbirlerinin yerini alabilirler. Bu, bir bor mineralinin diğerinin ticari rakibi olabileceği anlamına gelir^[3].

Bor, borik asit (bor, oksijen ve hidrojen), kalsiyum borat (bor, oksijen ve kalsiyum), sodyum borat (bor, oksijen, hidrojen ve sodyum) veya lityum borat (bor, oksijen ve lityum) gibi maddeler oluşturan oksijen ve diğer elementlerle çeşitli kombinasyonlarda bulunur. Boraks ise genellikle sodyum boratı ifade etmek için kullanılır^[4].

2.2 Borun Bulunduğu Yerler

Bor, toprakta, suda ve atmosferde bulunmaktadır.

Toprak: Bor, toprakta doğal olarak oluşan bir elementtir ve yer kabuğundaki minerallerden kaynaklanır. Geçirgen olmayan kil katmanları içinde yüksek konsantrasyonlarda boratların kapsüllandığı büyük yataklar uzun yıllar boyunca oluşmuştur. Suda çözünebilen bir element olarak borun bulunabilirliği ve topraktaki bor seviyeleri çeşitli faktörlere bağlıdır:

- Borun ana kayadaki çözünürlüğü,
- Toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri,
- Toprakta hareket eden suyun mevcudiyeti.

Topraktaki toplam bor seviyesi, düşük bor (10 mg B/kg topraktan az) veya yüksek bor (yaklaşık 100 mg/kg) olarak sınıflandırılabilir. Tüm topraklardaki ortalama toplam borun konsantrasyonu 10 ila 20 mg/kg arasında değişmektedir. Aşırı yüksek borlu topraklar nadirdir^[1].

Atmosfer: Bor deniz suyundaki buharlaşmada, yağmur, kar ve kaplıcaların buharlaşmasında, endüstriyel havadaki tozda ölçülebilir (minimum da olsa) miktarlarda tespit edilmiştir. Yağmurda ve karda bor konsantrasyonunun 0,002 ile 0,1 mg B/L arasında olduğu rapor edilmiştir^[1].

Su: Suda hemen eriyen boratlar toz ve kristal granüller hâlinde dirler. Özellikle okyanuslardan buharlaşarak havaya karışan borik asit, yağmur ve karla toprağa inip yeraltı ve yerüstü sularıyla geniş alanlara yayılmaktadır. Kayalar, denizler, yeraltı ve yerüstü suları bor içermektedir. Okyanuslardan tatlı su göllerine kadar çeşitli alanlarda bor bulunmaktadır^[1]. Deniz suyunda ortalama 5 mg B/L ve tatlı suda 1 mg B/L'den az miktarda bor bulunmaktadır^[5].

Gıdalar: Hücresel düzeyde bor, bir bitkinin üreme döngüsünün ayrılmaz bir parçasıdır. Bor çiçeklenmeyi, polen üretimini, çimlenmeyi, tohum ve meyve gelişimini kontrol eder. Bitkiler ihtiyaç duydukları boru topraktan ve sudan alırlar ve onsuz yaşayamazlar. Uzmanlar, insanlar için borun beslenme açısından önemli olduğu konusunda hemfikirdir ve giderek artan kanıtlar, borun beslenmemizde de önemli bir unsur olabileceğini göstermektedir^[5].

Borik asit veya borat formundaki bor, birçok kara bitkisinin büyümesi için ve dolayısıyla hayvan yaşamı için dolaylı olarak gereklidir. Uzun vadeli bor eksikliğinin tipik etkileri bodur ve şekilsiz büyümedir. Bor eksikliğinden kaynaklanan bozukluklar arasında sebzelerde “esmer kalp” ve şeker pancarında “kuru çürüklük” yer almaktadır. Çözünür boratların toprağa uygulanmasıyla bor eksikliği giderilebilir. Ancak aşırı miktarlarda boratlar seçici olmayan herbisit görevi görür. Borun doğal olarak bol olduğu toprakta yetişen çeşitli bitki türlerinin devasa olduğu rapor edilmiştir. Borun bitki yaşamındaki kesin rolünün ne olduğu henüz net değildir, ancak çoğu araştırmacı elementin bitki sürgünlerinin büyüyen uçlarının normal büyümesi ve işleyişi için bir şekilde gerekli olduğu konusunda hemfikirdir^[6].

Sebze ve meyve türleri dahil bitkiler elementi toprak ve sudan alırlar, o yolla da hayvan ve insanlara geçer. Borun canlılara geçmesi pek çok şekillerde olabilir. Canlılar hava ve sudaki bor mineralleriyle temas ederek, bor yataklarından zengin havzalardaki yeraltı ve yerüstü sularını içerek ve kullanarak, bor yoğunlukları yüksek yiyecek ve içecekleri alarak, ocak ve fabrikalarda çalışarak, sabun, deterjan gibi temizleyici ve beyazlatıcılar ile güzellik malzemesi ve benzeri maddeleri üreten yerlerde çalışarak veya bu tür ürünleri kullanarak vücutlarına bor alırlar. Bor insan vücuduna ağız, solunum ve deri yolu ile girebilir. Ancak, borun besin zinciri yoluyla biyolojik birikimi söz konusu değildir^[1].

Bor, bitki ve insanlar için esansiyel bir mikro elementtir. İnsan sağlığı açısından borun ana kaynağını bitkisel ürünler oluşturur. Bor açısından en zengin gıdalar kabuklu meyveler, baklagiller, meyve ve sebzelerdir. Elma, vişne, üzüm, fındık, ceviz, fasulye, pancar, biber ve baklagillerde yüksek oranlarda; tahıllarda, patates ve çiçekte az miktarda olduğu tespit edilmiştir. Balık, et ve süt ürünleri de borca fakir besinler arasında yer almaktadır. Önemli bir bor kaynağı olan erik kurusunun 100 gramı, vücudun günlük ihtiyacı olan 2-3 mg boru karşılar. Süt ve süt ürünleri düşük düzeyde bor içermelerine karşın beslenmede ağırlıklı olarak yer aldıkları için bor alımına önemli düzeyde katkı sağlamaktadırlar^[1].

2.3 Borun Özellikleri

Bor sahip olduğu benzersiz özelliklerle hem günümüzde hem de gelecek için önemli elementler arasında yer almaktadır. Enerji kaynağı olarak kullanılacak bir potansiyele sahip olan bor elementinin özellikleri şunlardır^[7]:

- Bor safir kristal olarak yarı iletken bir elementtir.
- Yüksek sıcaklıklarda aynı metal gibi elektrik iletmektedir. Ancak düşük sıcaklıklarda yarı iletken hâle gelmektedir.
- Bor yer kabuğu ağırlığının yaklaşık olarak yüzde 0,001'ini oluşturmaktadır.
- Bor elementinin çeliğin sertliğini artırma özelliği bulunmaktadır.
- Bor geleceğin enerji kaynağı olarak bilinmektedir.

Bor ilk olarak Fransız kimyagerler Joseph-Louis Gay-Lussac ve Louis-Jacques Thenard tarafından 1808'de ve bağımsız olarak İngiliz kimyager Sir Humphry Davy tarafından da bor oksit (B_2O_3) potasyum metali ile ısıtılarak izole edilmiştir.

Çok hafiftir, sertlik açısından elmasın sonra ikinci sırada yer alır, ısıya ve korozyona dayanıklıdır ve antimikrobiyaldir^[8].

Bor sert, kırılğan, yarı metalik bir elementtir. Saf olmayan amorf ürün, kahverengimsi siyah bir toz, bir yıldan fazla bir süredir bilinen tek bor şekliydi. Saf kristal bor, elektrikle ısıtılan bir tantal filamentinde bromür veya klorürün (BBr_3 , BCl_3) hidrojen ile indirgenmesiyle zorlukla hazırlanabilir^[9].

Saf bor en az dört kristal modifikasyon veya allotrop hâlinde bulunur. Bir ikosaedron (20 eşkenar üçgen yüz-lü biçim) şeklinde düzenlenmiş 12 bor atomu içeren kapalı kafesler, elemental borun çeşitli kristal formlarında meydana gelir. Kristal bor, normal sıcaklıklarda kimyasal olarak neredeyse inerttir. Kaynayan hidroklorik asit onu etkilemez ve sıcak konsantre nitrik asit, sadece ince toz hâline getirilmiş boru yavaş yavaş borik asite (H_3BO_3) dönüştürür. Bor kimyasal davranışında metalik değildir.

Doğada bor, iki kararlı izotopun karışımından oluşur: bor-10 (yüzde 19,9) ve bor-11 (yüzde 80,1). Bu orandaki küçük değişiklikler atom ağırlığında $\pm 0,003$ 'lük bir aralık üretir. Her iki çekirdek de nükleer dönüşe (atom çekirdeğinin dönüşü) sahiptir. Bor-10'un değeri 3, bor-11'ininki ise $3/2$ 'dir; değerler kuantum faktörleri tarafından belirlenir. Bu nedenle bu izotoplar nükleer manyetik rezonans spektroskopisinde kullanılır ve bor-11 çekirdeğini tespit etmek için özel olarak uyarlanmış spektrometreler ticari olarak mevcuttur. Bor-10 ve bor-11 çekirdekleri aynı zamanda diğer çekirdeklerin (örneğin bora bağlı hidrojen atomlarının) rezonanslarında bölünmeye (yani rezonans spektrumunda yeni bantların ortaya çıkmasına) neden olur^[9].

Bor-10 izotopu, termal nötronlar için son derece büyük bir yakalama kapasitesine sahip olması bakımından benzersizdir (Yani, düşük enerjili nötronları kolayca emer). Bir nötronun bu izotopun çekirdeği tarafından yakalanması, bir alfa parçacığının (α ile sembolize edilen bir helyum atomunun çekirdeği) dışarı atılmasına neden olur. Yüksek enerjili alfa parçacığı normal maddede uzağa gitmediğinden, bor ve bazı bileşikler nötron kalkanlarının (nötronlar tarafından nüfuz edilemeyen malzemeler) imalatında kullanılmıştır. Bor-10'un nötronlara olan yakınlığı aynı zamanda beyin tümörlerinden muzdarip hastaların tedavisine yönelik Bor Nötron Yakalama Terapisi (Boron Neutron Capture Therapy -BNCT) olarak bilinen bir tekniğin de temelini oluşturur^[9]. Bu tekniğin beyin tümörlerinin tespitindeki kullanımları analizimizin "Borofenin Kullanım Alanları" başlıklı beşinci bölümünde incelenmiştir.

2.3.1 Bor Bileşikleri

Boraks olarak da bilinen sodyum tetraborat dekahidrat, önemli bir bor bileşiği, bir mineral ve bir borik asit tuzudur. Sodyum tetraborat suda kolayca çözünen yumuşak renksiz kristallerden oluşan beyaz bir tozdu^[10]. Boraks

uzun zamandır sabunlarda ve hafif antiseptiklerde kullanılmaktadır. Metalik oksitleri çözme yeteneğinden dolayı yumuşak lehim akısı olarak da geniş uygulama alanları bulmuştur.

Çeşitli endüstriyel uygulamalara sahip bir diğer bor bileşiği borik asittir. Borasik veya ortoborik asit olarak da adlandırılan bu beyaz katı, konsantre bir boraks çözeltisinin sülfürik veya hidroklorik asitle işlenmesiyle elde edilir. Borik asit genellikle yanıklar ve yüzey yaraları için hafif bir antiseptik olarak kullanılır ve göz losyonlarının önemli bir bileşenidir. Diğer önemli uygulamaları arasında kumaşlarda yangın geciktirici olarak, nikel kaplama veya deri tabaklama çözümlerinde ve çok sayıda organik kimyasal reaksiyon için katalizörlerde ana bileşen olarak kullanılması yer alır. Borik asit ısıtıldığında su kaybeder ve metaborik asit HBO_2 'yi oluşturur. Metaborik asitten daha fazla su kaybı, bor oksitin oluşumuyla sonuçlanır. İkincisi, pişirme gereçlerinde ve belirli laboratuvar ekipman türlerinde kullanılmak üzere ısıya dayanıklı cam (borosilikat cam) yapmak için silika ile karıştırılır. Bor, karbonla birleşerek kompozit malzemelerde aşındırıcı ve takviye maddesi olarak kullanılan son derece sert bir madde olan bor karbürü (B_4C) oluşturur^[9].

Bor çeşitli metallerle birleşerek borür adı verilen bir bileşik sınıfını oluşturur. Borürler genellikle daha serttir, kimyasal olarak daha az reaktiftir, elektriksel olarak daha az dirençlidir ve karşılık gelen saf metalik elementlerden daha yüksek bir erime noktasına sahiptir. Borürlerin bir kısmı bilinen tüm maddeler arasında en sert ve ısıya en dayanıklı olanlar arasındadır. Örneğin alüminyum borür (AlB_2), birçok durumda taşlama ve cilalama için elmas tozunun yerine kullanılır.

Bor, nitrojenle birlikte, karbon gibi iki allotropik (kimyasal olarak aynı fakat fiziksel olarak farklı) formda bulunabilen Bor Nitürü (BN) oluşturur. Bunlardan biri grafitin kine benzeyen katman yapısına sahipken, diğeri elmasa benzer kübik kristal yapıya sahiptir. Borazon adı verilen son allotropik form, çok daha yüksek sıcaklıklarda oksidasyona dayanma kapasitesine sahiptir ve son derece serttir; bu özellikler onu yüksek sıcaklıkta bir aşındırıcı olarak kullanışlı kılar.

Bor, hidrojenle birlikte boran adı verilen bir dizi bileşik oluşturur; bunların en basiti diborandır (B_2H_6). Bu bor hidritlerin moleküler yapısı ve kimyasal davranışları inorganik bileşikler arasında benzersizdir. Bor hidrit kümeleri karbon atomları içerdiğinde karboranlar veya karbaboranlar oluştururlar. En sık karşılaşılan karboran kümesi ikosaedral dikarbaborandır ($C_2B_{10}H_{12}$). Bor kafesindeki karbon atomlarının konumuna bağlı olarak dikarbaboranlar üç izomer halinde sınıflandırılır: orto-karboran, meta-karboran ve para-karboran. Çokyüzlü (Poliedral) boranlar ve karboranların hidrojen depolama ve tıp gibi alanlarda uygulamaları vardır ve aynı zamanda dendritik makromoleküler yapılar için yapıtaşları görevi görürler. Diboran, organik bor bileşikler (örn. alkil- veya aril-boranlar ve aldehitlerle katkı maddeleri) dahil olmak üzere çok sayıda bor veya boran türevi oluşturmak üzere çok çeşitli bileşiklerle birleşir^[9].

3. BORUN KULLANIM ALANLARI

Yalıtımdan tarıma, sabunlardan kozmetiklere, TV'lerden cep telefonlarına kadar neredeyse her alanda kullanılan bor, adeta modern yaşamın ayrılmaz bir parçasına dönüşmüş bir elementtir. Aşağıda borun kullanıldığı alanlar detaylıca incelenmiştir.

3.1 İnşaat Malzemeleri

Bor ürünleri, çatı kaplama malzemeleri, selülozik izolasyon malzemeleri, çimento katkı maddesi olarak inşaatlarda kullanılmaktadır. Atık gazete kağıtları ve pamuk gibi malzemelerden borik asit veya borik asit ile boraks karışımı kullanılmak suretiyle elde edilen selülozik izolasyon malzemelerinin ABD ve özellikle İskandinav ülkelerinde geniş bir kullanım alanı vardır^[1].

3.2 Tarım

Bor birçok bitki için mikro besleyici özelliğindedir. Meyve ve sebzelerde mikro besleyici olarak bor takviyesi bitkilerin gelişimi ve optimum miktar ve kalitede ürün için önemlidir. Suda çözünürlüğü yüksek, bor içeriği zengin, farklı ebatlarda bor kristalleri bu amaçla kullanılabilir^[1].

Bor ayrıca gübreleme için hayati önem taşıyan yedi temel mikro besin maddesinden biridir. Uzmanlar, bor eksikliğinin tüm mikro besin eksiklikleri arasında ilk sırada geldiğini ve kök bitkileri, sebzeleri ve birçok meyve ağacını etkilediğini söylemektedir. Bor içeren bir mikro besin çözeltisi veya gübre, toprağın kalitesini artırabilir ve bitkilerdeki hücrelerin su tutma oranını artırabilir; bu nedenle gelişmekte olan bir pazardır. Bor, bir bitkinin üreme döngüsünün ayrılmaz bir parçasıdır ve çiçeklenmenin, polen üretiminin, çimlenmenin yanı sıra tohum ve meyve gelişiminin kontrol edilmesine yardımcı olmaktadır. 2020'de 83,5 milyar dolar değerinde olan dünya çapındaki gübre pazarının, 2020-2027 döneminde yıllık yüzde 1,69 oranında büyüyeceği tahmin edilmektedir. 2027 yılına gelindiğinde, küresel gübre pazarının değerinin 93,9 milyar doları geçeceği ve borun, mahsul verimini artırarak büyüyen bir nüfus için gıda üretimini en üst düzeye çıkarmaya yardımcı olacak şekilde göz önünde olacağı düşünülmektedir^[1].

Yeni Güney Galler (Avustralya) Gıda Otoritesi'ne göre, bazı Asya kültürleri boraksı gıda hazırlama sırasında sıklıkla bor kullanılmaktadır^[1].

3.3 Ahşap Koruma

Ahşap malzemenin emprenye edilmesi ile hem böceklenme ve buna benzer ahşabın ömrünü kısaltıcı etkenler önlenmekte hem de alevlenme geciktirilebilmektedir. Suda çözünen ve çözünmeyen çeşitli bor bileşikleri ve karışımlarını bu amaçla kullanmak mümkündür^[1].

3.4 Cam Sanayii

Boratların bir diğer ana kullanım alanı cam sanayiidir. Bütün dünyada bor kullanımının yüzde 42'si cam sanayiinde gerçekleşmektedir. Bor oksit; boro silikat camlar,

tekstil cam elyafı ve yalıtım cam elyafının önemli bir bileşimidir. Bu üç ürün cam endüstrisinde bor bileşiklerinin ana tüketim yeridir. Düz cam ve konteyner cam gibi birçok üründe az miktarda bor bileşikleri bulunabilir. Bor oksit, susuz boraks, borik asit gibi bor bileşikleri hâlinde veya boraks ya da kolemanit gibi mineraller şeklinde cama katılır. Bor oksit, çok kuvvetli bir cam yapıcıdır. Diğer bir ifade ile kristallenmeyi önler. Genleşmeyi düşürdüğünden ısı şoklarına dayanımı artırır. Cam elyafı; inşaat, otomotiv ve taşımacılık, elektrik ve elektronik, denizcilik, endüstriyel uygulamalar, havacılık, savunma, spor, eğlence, boru, depolama tankı, altyapı, anti korozif uygulamalar, tarım ve gıda sektörleri gibi hayatın her alanında çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır^[1]. Borat silika, camın çatlamadan ısıtma ve soğutmaya dayanacak kadar ince ve güçlü yapılmasına olanak tanımaktadır^[1].

3.5 Seramik Sanayii

Seramik sanayiinde bor mineral ve ürünleri çoğunlukla seramik sırası ve porselen emaye yapımında frit üretimi aşamasında kullanılmaktadır. Dünya seramik sektöründeki gelişme ve yeniliklere bağlı olarak bu alanda, çeşitli üretim aşamalarında bor ve bor ürünleri tüketimine yönelik Ar-Ge çalışmaları da devam etmektedir^[1].

3.6 Deterjan Sanayii

Borun başka bir yumuşak, renksiz bileşiği olan boraks, suda çözünebilir, çamaşır deterjanı ve temizlik ürünlerinde kullanılabilir^[1]. Modern deterjanlar birçok maddeden oluşur. Bunlardan yüzey aktif maddeler (sülfonatlar), suyun yüzey gerilimini düşürür. Böylece kumaşın ıslanmasını sağlar, yağ ve diğer lekeleri kumaştan uzaklaştırır. Deterjan geliştiriciler (zeolit), sert sularda kullanıldığı zaman kalsiyum ve magnezyum iyonlarını sudan uzaklaştırır. Böylece yüzey aktif maddesinin verimini artırır. Ağartıcılar (perborat ve hipoklorit), oksidasyon ile lekeleri uzaklaştırır. Ağartma aktivatörü TEAD (Tetraacetyl Ethylene Daimine) veya sodyum tuzları, düşük sıcaklıkta ağartma verimini artırmak için kullanılır. Dünya deterjan endüstrisinde oksijen bazlı sodyum perborat ve sodyum hipoklorit olmak üzere iki ana ağartıcı deterjan kullanılmaktadır. Hipokloritlerin 40 °C sıcaklıkta etkinliği yüksektir. Perborat ağartıcıların ise 60 °C sıcaklık üzerinde kullanıldıklarında etkinlikleri en yüksektir. Ancak 40 °C sıcaklıkta etkinliği düşürür. Sodyum perboratın düşük sıcaklıkta etkinliğini artırmak için yıkama süresi veya ağartıcı miktarı artırılabilir. Günümüzde perborat ağartıcıların 40 °C sıcaklıktaki etkinliğini artırmak için TEAD gibi aktivatörler kullanılmaktadır. Genel olarak bor, güçlü bir beyazlatıcıdır, lekeleri çözer, pH'ı dengeler, suyu yumuşatır, yağları parçalar, aktif oksijeni dengeler ve antibakteriyel özelliğe sahiptir^[1].

3.7 Tekstil Sanayiinde ve Tekstil Cam Elyafı Olarak Kullanımı

Bor, yanmayı geciktirici özelliğinden dolayı, cam elyaf hâlinde, tekstil sektöründe kullanılır. Bunun yanı sıra, kumaş boyalarında ve aprelemede de kullanılabilir^[1]. Tekstil cam elyafının en önemli özelliği, gerilmelere,

darbelere ve kimyasallara yüksek mukavemeti ve hafifliğidir. Bu özelliklerden dolayı tekstil cam elyafı plastik ve kompozitlerde kuvvetlendirici olarak kullanılır. Kolemanit minerali alkali içermez ve bu özelliği nedeniyle düşük alkali borosilikat cam (E-glas) üretiminde tercih edilir. Bor, tekstil cam elyafına, kolemanit minerali veya bor bileşiklerinden borik asit olarak eklenir. Modern E-glass yüzde 6-10 oranında bor oksit içerir. Bor oksit cama kararlılık verir. Borik asit pahalı olduğundan sodyum içermeyen kolemanit mineralinin kullanımı tercih edilmektedir. Böylece kireç katkısı için daha az gereksinim olur. E-glass bot, uçak, otomobil gibi endüstrilerde kullanılmaktadır^[1].

3.8 Metalurji Sanayii

Metalurji sanayinde borun erime sıcaklığını düşürme, çeliği sertleştirme ve fırın tuğlalarının aşınmasını azaltma özelliklerinden yararlanılmaktadır. Bor, kaplama sanayinde kullanılan elektrolitlerin oluşturulmasında ve lehimleme işlemlerinde de kullanılmaktadır^[1]. Demir alaşımli ferrobora olarak eklendiğinde, bu element birçok çelikte genellikle yüzde 0,001 ila 0,005 aralığında bulunur. Bor ayrıca demir dışı metaller endüstrisinde, genellikle bir oksit giderici olarak, bakır bazlı alaşımlarda ve yüksek iletkenlik özelliği olan bakırda gaz giderici olarak ve alüminyum dökümlerde tanecikleri inceltmek için kullanılır. Yarı iletken endüstrisinde, elektriksel iletkenliği değiştirmek için silikon ve germanyuma katkı maddesi olarak küçük, dikkatle kontrol edilen miktarlarda bor eklenir^[6].

3.9 Nükleer Sanayii

Bor izotopları nükleer reaksiyonların denetlenmesine yardımcı olur çünkü B10 ve B11 izotopların nötron absorblama tesiri keskinleşir. Bazı tip reaktörlerde fazla reaktiviteyi önlemek için soğutma suyuna borik asit ilave edilir^[1].

3.10 Sağlık

Bor sağlık açısından da önemli bir mineraldir. Kalsiyum, magnezyum ve fosfor mineralleri ile D vitamininin vücutta korunmasına ve etkili bir şekilde kullanılmasına yardımcı olarak diş ve kemik sağlığının korunmasına katkıda bulunur. Borun yeterli miktarda alınmaması, D vitamini eksikliğine ve buna bağlı olarak da kemik erimesi ve zayıflamasına ve kemiklerin daha kolay kırılmasına neden olur. Göz iltihaplarında sterilizasyon gereci olarak, bazı merhemlerin yapımında ve nükleer tıpta kullanılmaktadır^[1].

3.11 Elektrikli Araçlar

Hiçbir elektrikli araç bor olmadan çalışmaz^[8]. Sabit mıknatıslar, yüksek mukavemetli çelik şasi, seramik frenler, gösterge paneli ekranları, gövde panelleri, ısı ve ses yalıtımı dahil olmak üzere ortalama bir elektrikli araçta 40-50 kg bor kullanılmaktadır^[2]. Piyasa analistleri, borun neodimyum-demir-bor (NdFeB) mıknatıslarda kullanımı konusunda özellikle umutlu görünmektedir. Bunun nedeni yalnızca uygun maliyetli olmaları ve manyetikliğin giderilmesine karşı yüksek direnç sunmaları değil, aynı zamanda pazarın 2021-2027 döneminde yüzde 7,59'luk bir oranda büyümesinin beklenmesidir.

3.12 Yenilenebilir Enerji

NdFeB mıknatıslar aynı zamanda rüzgâr türbinlerinde de kullanılmakta ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talepteki artışın borun kullanımını yönlendiren önemli bir faktör olması beklenmektedir. Arizona Eyalet Üniversitesindeki araştırmacılar ayrıca elmas ve bor nitridten güç transistörleri oluşturmaya yönelik yeni bir proje üzerinde de çalışmaktadır. Araştırma ekibi transistörün ana gövdesi için malzeme olarak elması seçmiş olsa da transistörlerin elektrik kontakları için bor nitridin kullanımını da araştırmaktadır. Elmas gibi bor nitrid de yüksek bir arıza alanına ve yüksek termal iletkenliğe sahiptir; bu da söz konusu transistörlerin hücre kuleleri için gereken soğutma gücünü ve elektrik şebekesi trafo merkezlerinin boyut gereksinimlerini azaltabileceği anlamına gelmektedir^[11]. Yenilenebilir enerji sektörü, kalıcı mıknatıslarda bor, rüzgâr türbini kanatları için cam elyafı ve güneş panelleri için borosilikat cam kullanılmaktadır^[2]. Kısacası bor, geleceğin enerji kaynakları açısından önemli elementler arasında yer almaktadır.

3.13 Savunma Sanayii

Borun karbon ile oluşturduğu bir bileşik olan bor karbürden (B4C) yüksek sertliğe sahip, kimyasal ve mekanik korozyona karşı mükemmel direnci olan, düşük yoğunluğu sebebiyle mükemmel güç/ağırlık oranına sahip, yüksek ısıya dayanan zırh plakaları üretilmektedir. Ayrıca, hafiflik ve mobilitenin önem taşıdığı taktik araçlar, hafif zırhlı araçlar ve helikopterlerde de bor karbür zırh plakaları kullanılmaktadır. B4C ayrıca insansız hava araçlarında da kullanım alanı bulmaktadır. Zırh çözümlerinde amaç minimum yük, maksimum koruma sağlamaktır. Bor karpit olarak da adlandırılan hammaddeden yapılan seramik zırhlar, yeni nesil kurşun geçirmez yelek plakaları olarak kullanılmaktadır^[12]. B4C, elmas ve kübik bor nitridten sonra bilinen en sert maddedir^[13].

Boratlar bir uzay mekiğinin alt tarafındaki seramik kolları atmosfere yeniden girişin termal ısı şokuna dayanmasına yardımcı olmak için kaplanmaktadır^[11]. Bor, ABD askerlerinin çelik yeleklerinde, Predator insansız hava araçlarında, uydularda, kalıcı mıknatıslarda ve askeri helikopterlerde kullanılmaktadır^[8].

Isı ve korozyon direnci, bor bileşiklerinden yapılmış seramiklerin nükleer enerji ve havacılık endüstrileri için ideal olmasını sağlar^[2]. B4C'nin nötron soğurma yeteneği yüksek olduğu için nükleer reaktörlerde kullanılan kontrol çubuklarının üretiminde B4C'den yararlanılır. Roket yakıtlarında da kullanılan B4C'nin erime noktası yüksektir ve yüksek sıcaklıkta bozulmadan kararlı bir şekilde yapısını koruyabilir^[13].

Bugün, karbür üç ana sektörde kullanılmaktadır: havacılık ve savunma, elektrik enerjisi depolama cihazları (örneğin piller) ve yüksek sıcaklık seramikleri. B4C'nin havacılık endüstrisinde artan önemi, 5.600 °C'nin üzerinde bir erime noktasına sahip olduğundan aşırı sıcaklıklara dayanma kabiliyetine ve kalkış aşamasında jet motorlarının içinde çeşitli seviyelerde bulunan erimiş tuzlardan kaynaklanan korozyona karşı mükemmel direncine dayanmaktadır. Bor karbürü bir alaşım maddesi

olarak kullanım için cazip kılan özellikler, yüksek sıcaklıklarda kimyasal inertlik veya hidrojen florür gibi gazlara maruz kalma, düşük termal genleşme katsayısı vb. özellikleridir. Savunma sanayiinde daha etkin kurşun geçirmez yeleklerin araştırılması ve geliştirilmesi de dahil olmak üzere çok sayıda kritik öneme sahip kullanım alanı nedeniyle; B4C'ye olan küresel talebin büyüyeceği tahmin edilmektedir. B4C'nin tanklarda kullanılan zırhların geliştirilmesinde ve vücut zırhlarının kurşun geçirmezlik özelliklerinin artırılmasında kullanılabileceği tespit edildiğinden, savunma sanayiinde devam eden gelişmeler dikkate alındığında tüketimi artacaktır. Ayrıca insan ve araç koruma teknolojisine ilişkin önemli sayıda gelişme, balistik başlıklar ve farklı malzemelerden yapılmış zırhlı araçlar gibi daha iyi koruyucu mekanizmalara ihtiyaç duyan sistemler, askerleri kurşunlardan korumanın yeni yollarını bulmaya olan aşırı ihtiyaç, B4C'ye olan talebi sürekli artırmaktadır^[14].

Savunma sanayiinde sıklıkla kullanılan bir başka bor türevi de bor elyafıdır. Örneğin ABD Deniz ve Hava Kuvvetleri tarafından tasarlanan F-14 Tomcat uçağının inşasında bor kompozitlerinin kullanımı uçağın yapısal ağırlığını yüzde 19 azaltmıştır. Üstelik bor kompozitlerin hizmet ömrü diğer metallerden 2,5 kat fazladır. 1967'de McDonnell Aircraft ve Douglas Aircraft Company şirketlerinin birleşmesiyle kurulan büyük bir Amerikan havacılık imalat anonim şirketi ve savunma müteahhidi olan McDonnell Douglas firması, bor elyafın F-15'in hem gövde dış kaplaması ve dikey kanat dümenlerinde hem de uçak gövde panellerinde (kapaklar) ve dikey stabilatör (dikey kanat) yüzeyinde etken yapısal kompozit malzeme olarak kullanılmasını tercih etmiştir. Bor elyaf kompozit kullanımı F-15 Eagle'da yüzde 22 ağırlık tasarrufu sağlamıştır. Yüksek performanslı bor elyafı, F-14 ve F-15 uçaklarında ilk kez kullanılmasıyla tanınmıştır. Hava araçlarında bor katkılı kompozit malzeme kullanımına dair başka pek çok örnek daha vardır. Örneğin Predator Gray Eagle'da kullanılan bor katkılı kompozit malzemenin yüksek sıkıştırma mukavemeti, uçağın yük taşıma kapasitesinin artırılmasına olanak sağlamıştır. SH-60 helikopterinin rotor kanatlarında bor-epoksi kompozitler kullanılırken, B-1B uçağında yatay ve düşey stabilizatörlerde ve kanat slat'larında Bor-Epoxy kompozit malzeme kullanılmaktadır. Boronun yüksek sıkıştırma mukavemeti ve sertliği, bu uçakta dengeleyicilerde azaltılmış ağırlık sağlamıştır. Ayrıca uzay mekikleri, uzay istasyonları ve uyduların yapı bileşenlerinde bor fiber için birçok yeni uygulama alanları oluşmuştur^[14].

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş bir malzeme olan bir başka bor varyantı olan bor nitrür ise havacılık ve uzayın geleceği olarak lanse edilmektedir. Sahip olduğu çok iyi termal iletkenlik, bor nitrürü elektronik bileşenlerde ısı dağılımı için uygun hâle getirir. Bor nitrür ayrıca yüksek bir dielektrik sabitine sahiptir, bu da onu devreler arasında yalıtım gerektiren devre kartları için mükemmel bir seçim hâline getirir ve izolatör olarak kullanım için mükemmeldir. Bu özelliklere ek olarak, bor nitrür seramikler 2.000 °C'ye kadar aşırı sıcaklıklara dayanacak kadar güçlüdür, düşük termal

genleşme katsayısı sergilerler, uzun süreli dayanıklılıkları sayesinde parçalanmadan veya çevreye malzeme olarak dökülmeden tekrar tekrar kullanılabilirler.

Uygulama alanlarının çok yönlülüğü, bor nitrürün geleceğin uçaklarında ve uzay gemilerinde potansiyel kullanımına işaret etmektedir. Kullanılmayan potansiyelleri nedeniyle devletler, teknolojiye ilerlemek ve mevcut teknolojilerini geliştirmek için yeni bor karbür varyantları hakkında kapsamlı araştırmalar yürütmektedir^[14].

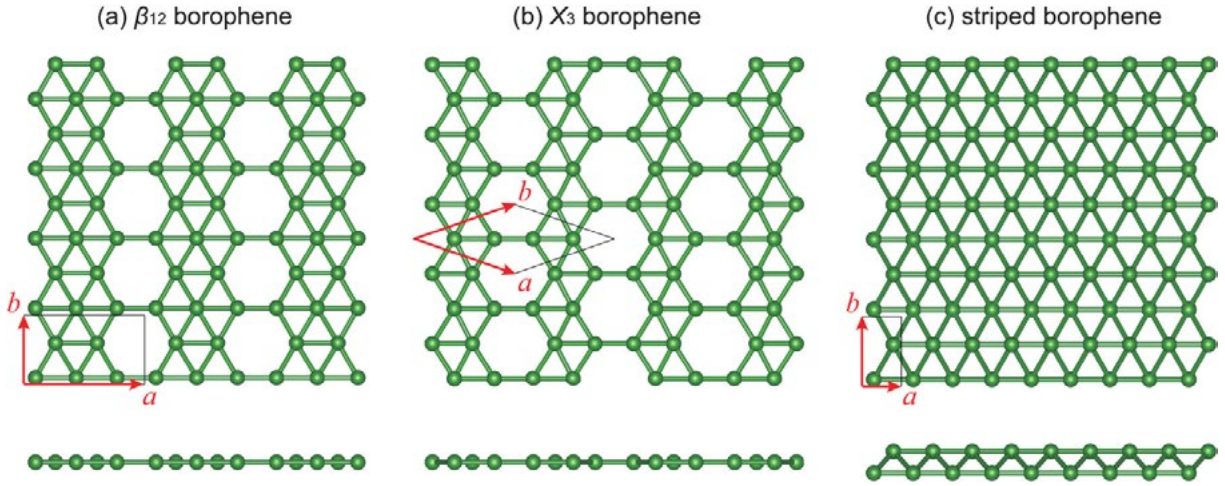
4. BORDAN YAPILAN MUCİZE MALZEME BOROFEN

Yeni malzemeler uygarlık tarihi boyunca dünyayı ve insanlığın yaşamını değiştiren ana itici kuvvetler arasında yer almıştır. Yeni keşfedilen malzemelerin etkisi o denli büyüktür ki bazıları tarihi çağlara isimlerini vermiştir. Tunç ve demir tarih öncesi çağlara şekil verirken, yakın tarihte beton, paslanmaz çelik, silikon gibi malzemeler medeniyetimizin temel malzemeleri arasında yer almıştır. Son yıllarda teknolojinin yarattığı sıçramayla beraber geniş kapsamlı potansiyele sahip, her biri tek bir atom katmanından oluşan yeni bir malzeme sınıfı ortaya çıkmış ve kullanım alanları hızla genişlemiştir. İki boyutlu malzemeler olarak bilinen bu sınıf, son birkaç yıl içinde karbon (grafen), bor (borofen) ve altıgen bor nitrür (diğer adıyla beyaz grafen), germanyum (germanen), silikon (silisen), fosfor (fosforen) ve kalay (stanen) gibi kafes benzeri katmanları içerecek şekilde büyümüştür. Ayrıca her biri heyecan verici özelliklere sahip çeşitli iki boyutlu maddeler bir araya getirilerek daha fazla yeni malzeme oluşturulabilmektedir^[15].

Tek katmanlı malzemelerdeki bu devrim, 2004 yılında Manchester Üniversitesinden Prof. Dr. Andre Geim ve Prof. Dr. Kostya Novoselov adlı iki araştırmacının selobant kullanarak meşhur iki boyutlu grafeni yaratmasıyla başlamıştır. Bu öncü çalışma, 2010 yılında ikiliye Nobel Fizik Ödülü'nü kazandırmıştır^[16]. Grafen çelikten daha güçlü, elmadan daha sert, neredeyse her şeyden daha hafif, şeffaf, esnek ve ultra hızlı bir elektrik iletkenidir. Başlangıçta fiyatı oldukça yüksek olan grafenin maliyeti üretim teknolojilerinin gelişmesi sayesinde ilerleyen yıllarda oldukça düşmüştür.

Ancak grafenin önemli sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar şöyle sıralanabilir^[16]:

1. Esnetilmesi, sıkıştırılması ve hatta bükülmesi gereken cihazlar için yüksek bükülme sertliğine sahiptir.
2. Bant aralığı, yalnızca açma ve kapatma özelliklerini elde etmek için uygun değildir.
3. Katalizör olarak kullanıldığında oksidatif ortamlara karşı yüksek duyarlılık gösterir.
4. Bazı toksik nitelikleri mevcuttur. Bilim insanları, grafenin hücre zarlarını kolayca delebilen, hücrelere girmesine ve normal işlevleri bozmasına izin veren pürüzlü kenarlara sahip olduğunu keşfetmiştir.



Şekil 1: Deneysel olarak elde edilen borofenlerin olası kristal yapıları:

(a) β_{12} borofen (diğer adıyla γ levha veya $u1/6$ levha), (b) χ_3 borofen (diğer adıyla $u1/5$ levha) ve düz olmayan bir borofen formu^[17].

Grafenin, harika bir malzeme olsa da bu tip sınırlamalarının mevcudiyeti bilim insanlarını bir alternatif aramaya zorlamıştır. Bu arayışta, elektronik özellikleri grafenden daha iyi sergilediği düşünülen borofen adı verilen yeni bir iki boyutlu malzeme keşfedilmiştir.

4.1 Borofen Nedir?

Borofen, boronun kristalli atomik tek tabakasıdır, yani boronun iki boyutlu bir allotropudur ve aynı zamanda bor levhası olarak da bilinmektedir^[17].

Borofen, tek katmanlı hegzagonal yapıda dizilmiş bor atomlarından oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar borofenin sabit bir diziliş biçiminden çok, farklı atom dizilimlerine ve farklı fazlara sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanında, borofen farklı karakteristik özellikler sergilemektedir. Bunun sebebi ise boşluklu bir yapısının olmasıdır. Ortaya çıkan farklı karakteristik özellikleri, borofenin kristal yapısında çeşitli modifikasyonlar yapılarak çok daha farklı uygulama alanlarında boy göstermesine olanak sağlamıştır^[18].

4.2 Borofenin Özellikleri ve Keşif Süreci

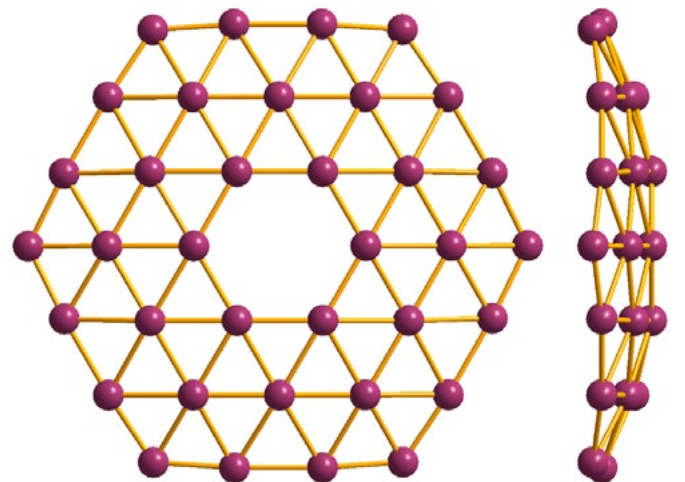
En dış katmanda elektron bulunmaması nedeniyle bor atomları kolaylıkla kimyasal bağlar oluşturabilir; bu nedenle bor kimyasal olarak aktiftir ve çeşitli kristal yapılarına sahip bileşikler oluşturur. Dökme borun ana kristal yapısı, temel yapısal birim olarak bir B_{12} ikosaedron'a dayanmaktadır; çeşitli türlerdeki bor kristalleri, B_{12} ikosaedron üzerinde farklı bağlantılar ve bağlanma yöntemleri yoluyla oluşturulur. Bu nedenle bor bloğu, grafen gibi katmanlı bir yapı değildir, bu da borofenin hazırlanmasını karmaşık ve zor hâle getirir. 2006 yılında Jens Kunstmann ve Alexander Quandt ilk olarak iki boyutlu bor tabakalarının temel yapısını tahmin ederek borofenin gizemini ortaya çıkarmıştır^[19].

Ihsan Boustani ve Alexander Quandt tarafından yapılan hesaplamalı çalışmalar, küçük bor kümelerinin boronlar gibi ikosaedral geometrileri benimsemediklerini, bunun yerine yarı düzlemsel olduklarını ortaya koymuştur. Ek çalışmalar, uzatılmış, üçgen borofenin (Şekil 1(c))

metalik olduğunu ve düzlemsel olmayan, bükülmüş bir geometri benimsediğini göstermiştir. Kararlı bir B_{80} bor fullereninin tahminiyle başlatılan ileri hesaplamalı çalışmalar, bal peteği yapılı ve kısmen doldurulmuş altigen deliklere sahip uzatılmış borofen tabakalarının kararlı olduğunu öne sürmüştür. Bu borofen yapılarının metalik olduğu tahmin edilmiştir. γ tabakası (diğer adıyla β_{12} borofen veya $u1/6$ tabakası) olarak adlandırılan tabaka Şekil 1(a)'da gösterilmektedir^[17].

2014 yılında, Lai-Sheng Wang ve meslektaşları, ilk kez altigen bir yapıyı çevreleyen üçgen yapılardan oluşan, bor atomlarından oluşan yarı düzlemsel bir katman olan B_{36} 'yı ortaya koydu. Daha sonra B_{36} 'nın yapısının (Şekil 2), altı katlı simetriye ve mükemmel bir altigen boşluğa sahip en küçük bor kümesi olduğunu ve uzatılmış iki boyutlu bor tabakaları için potansiyel bir temel görevi görebileceğini gösterdiler. Böylece grup, borofen kavramını da ilk kez ortaya koymuştur^[19].

Bu tahminden bir yıl sonra, 2015 yılında, Argonne Ulusal Laboratuvarında Nathan P. Guisinger liderliğinde, Northwestern Üniversitesinden Mark C. Hersham ve



Şekil 2: Bir B_{36} kümesi en küçük borofen olarak görülebilir; önden ve yandan görünüm.

Stony Brook Üniversitesi (New York), Skolkovo Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (Moskova) ve Moskova Fizik ve Teknoloji Enstitüsünde görev yapan Artem R. Oganov'dan oluşan uluslararası bir bilim insanları ekibi elementel borun yeni bir allotropu olan borofeni sentezlemiştir^[20]. Böylece ilk olarak 1990'ların ortalarında teoriyle tahmin edilen farklı borofen yapıları, 2015 yılında deneysel olarak doğrulanmıştır^[17].

2021'e gelindiğinde ise, ABD'deki Northwestern Üniversitesinden Mark Hersam başkanlığındaki araştırmacılar ilk kez "borofan" adı verilen atomik olarak hidrojenlenmiş bor sentezlemeyi başarmıştır (gümüş bir substrat üzerinde hidrojenlenmiş borofen)^[21]. Çalışmalar borofenin grafenden daha güçlü, daha hafif ve daha esnek olduğunu göstermiştir. Ancak borofenin yalnızca çok yüksek bir vakum odasının içinde var olabilmesi temel bir sorun oluşturmaktadır. Bu da laboratuvar dışındaki pratik kullanımını sınırlamıştır. Hersam liderliğindeki malzeme araştırmacılarından oluşan ekip, borofan geliştirmek için borofenin yüzeyine atomik hidrojen biriktirerek bu sorunun üstesinden gelmeyi başarmıştır^[22].

Böylece araştırmacılar ilk kez atomik olarak düz bir borofen çift katmanı yaratmıştır; bu da, borun tek atomlu katman sınırının ötesinde düzlemsel olmayan kümeler oluşturma yönündeki doğal eğilimine meydan okuyan bir başarı anlamına gelmektedir^[23]. Zira umut verici elektronik özellikleriyle bilinmesine rağmen, tek atom tabakası kalınlığında bir bor tabakası olan borofenin sentezlenmesi zordur. Çünkü grafenin aksine, borofen yalnızca dökme bordan soyulamamakta, bunun yerine doğrudan bir substrat üzerinde büyütülmesi gerekmektedir. Hersam ve ekibi, doğru koşulların anahtarının, malzemeyi yetiştirmek için kullanılan alt tabaka (substrat) olduğunu keşfederek düz, gümüş bir substrat üzerinde borofen üretmiştir. Çok yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında gümüş, atomik ölçekteki adımların arasında son derece düz, geniş teraslar oluşturacak şekilde bir araya gelmiştir. Araştırmacılar bu geniş, düz teraslarda borofen yetiştirdiğinde ikinci bir katmanın oluştuğunu görmüştür.

Yeni malzeme, borofenin elektronik özelliklerini korurken, ek olarak yeni avantajlar sunmuştur. Bu çift katmanlı malzeme, borofenin arzu edilen tüm elektronik özelliklerini korumaktadır. Örneğin malzeme, enerji veya kimyasal depolama için kullanılabilen, aralarında boşluk olacak şekilde birbirine bağlanmış iki atomik katman kalınlığında tabakadan oluşmaktadır. İki katmanlı borofenin piller için umut verici bir malzeme olduğuna dair teorik tahminler oldukça umut vericidir çünkü katmanlar arasında boşluk olması, lityum (Li) iyonlarını tutacak bir yer sağlamaktadır. Hersam'ın ekibi, diğer araştırmacıların artık daha da kalın borofen katmanları yetiştirmeye veya farklı atom geometrilerine sahip çift katmanlar oluşturmaya devam etme konusunda ilham alacağını ummaktadır. Hersam bulgularını şöyle yorumlamaktadır: "Elmaslar, grafit, grafen ve karbon nanotüplerin hepsi farklı geometrilere sahip tek bir elemente (karbon) dayanıyor. Bor, karbondan daha fazla olmasa da olasılıkları açısından zengin görünüyor. İki boyutlu bor destanının henüz ilk bölümlerinde olduğumuza inanıyoruz^[23]."

Bilim insanları iki boyutlu malzemelerle esas olarak benzersiz elektronik özelliklerinden dolayı ilgilenmektedir. Borofen alışılmadık bir malzemedir çünkü nano ölçekte birçok metalik özellik gösterir. Üç boyutlu veya hacimsel olmasına rağmen bor yarı iletkenidir^[16].

Son zamanlarda borofen çeşitli araştırmacılar tarafından başarıyla sentezlenmiştir. Sonuç olarak grafen ve şu anda kullanılan polimerlerden daha yüksek bir esnekliğe, daha yüksek bir sertlik-ağırlık oranına ve daha yüksek ideal dayanıma sahip olduğu gösterilen borofenin süperiletkenlik özelliği oldukça kritiktir. Gümüş bir substrat üzerinde yetiştirilen borofen dalgalı bir form alır ve bu da onu esnek elektronikler için uygun kılar. İki boyutlu bir metal olarak iki boyutlu nanoelektronik malzeme ailesindeki boşluğun doldurulmasına yardımcı olur. Düşük kütle yoğunluğu, yüksek mukavemet ve yüksek düzeyde esneklik gibi özellikler, borofeni kompozitlerin tasarımında ve esnek elektrotlar ve nanoelektronik kontakları gibi esnek nanoaygıtlarda güçlendirilmiş bir eleman olarak umut verici bir aday hâline getirmektedir^[16].

Borofen ayrıca hafif ve oldukça reaktiftir. Bu da onu metal iyonlarını pillerde depolamak için iyi bir aday hâline getirmektedir. Borofen, yüksek teorik spesifik kapasiteler, mükemmel elektronik iletkenlik ve olağanüstü iyon taşıma özellikleri nedeniyle Li, Na ve Mg iyon pilleri için umut verici bir anot malzemesidir.

Borofenler düzlem içi esneklik ve ideal güç sergiler. Bor nanotüpleri ayrıca grafenden daha serttir. Borofenin teorik olarak metalik elektronik yapılara sahip olduğu tahmin edildiğinden ve bor çoğu elementten daha hafif olduğundan, borofenin deneysel olarak gerçekleştirilebilecek en hafif iki boyutlu metal olması beklenmektedir. Çoğu iki boyutlu malzeme gibi borofenin de anizotropik özelliklere sahip olması öngörülmektedir. Özetle araştırmalar, borofenlerin esnek atom katmanları olduğunu göstermiştir; bu nedenle borofenler, kompozitler için takviye elemanları ve esnek elektronik ara bağlantılar, elektrotlar ve ekranlar gibi uygulamalarda kullanılabilir. Hidrojen kolayca borofene adsorbe olur ve ağırlığının yüzde 15'inden fazlası kadar hidrojen depolama potansiyeli sunar. Borofen, moleküler hidrojenin hidrojen iyonlarına parçalanmasını katalize edebilir ve suyu azaltabilir^[17].

5. BOROFENİN KULLANIM ALANLARI

Borofenin keşfinden bu yana geçen oldukça sınırlı zaman diliminde yapılan araştırma ve deneyler, bu mucizevi elementin sayısız alanda dönüştürücü bir etkisi olacağını ortaya koymaktadır. Borofen başta biyotıp olmak üzere sağlıktan enerjiye, bilişimden elektronik cihazlara kadar pek çok alanda çeşitli uygulamalarda potansiyel taşıyan mükemmel özelliklere sahiptir.

Mükemmel kimyasal, elektronik, mekanik ve termal özellikleri nedeniyle borofen, süperkapasitör, pil, hidrojen depolama ve biyomedikal uygulamalarda büyük umut vadetmektedir. Ayrıca biyogörüntüleme, ilaç dağıtımı ve fotonik terapi gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda

kullanılan borofen nanoplatformları söz konusudur, borofenin büyük ölçekli üretimde ve diğer olası uygulamalarda gelecekteki gelişimi için büyük önem taşıyan araştırmalar devam etmektedir.

Son yıllarda borofen, yeni bir süper malzeme olarak bilim dünyasının yoğun ilgisini çekmektedir. Borofen ile ilgili makalelerin atf oranı son beş yılda hızlı bir artış eğilimi göstermiştir. Ancak borofene ilişkin kapsamlı inceleme makalelerinin sayısı çok fazla değildir^[19].

Şu anda borofen, çeşitli alanlarda bir dizi uygulama için potansiyel bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Fizikçiler, borofenin çeşitli türdeki moleküllerinin ve atomlarının tespiti için bir sensör olarak yeteneğinden büyünmüştür. Kimyagerler, katalitik kabiliyeti konusunda heyecanlıdır ve elektrokimyacılar, borofeni daha iyi, güçlü bir metal iyon pil üretimi için iyi bir anot malzemesi olarak araştırmaktadır^{[24], [25]}.

Çok sayıda teorik ve deneysel veri, borofenin gelişmiş kompozit malzemelerde, esnek elektronik cihazlarda, enerji depolama ve biyotıp gibi birçok alanda çeşitli uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir. Borofenin boyutu ve fizikokimyasal özellikleri, elektronik cihazlarda ve diğer birçok alanda daha fazla uygulanmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, geniş yüzey alanlı borofenin laboratuvarında büyük ölçekli üretimi hâlen zorludur. Şu anda üretilen borofenin boyutu küçüktür (nanometre düzeyinde) ve serbest durumda kararsızdır; bu da borofenin elektronik cihazlarda daha fazla uygulanmasının önündeki engelleri temsil eder, ancak biyotıpta güçlü kullanım alanları vadetmektedir. Nano boyutlu malzemeler tümör tedavisi alanında popülerdir. Tümörlerin artırılmış geçirgenlik ve tutma (EPR) etkisi nedeniyle, boyutları 10 ila 1000 nm arasında değişen ilaç taşıyıcıları, tümörlerin pasif hedeflenmesini sağlamak ve ilaçların etkinliğini artırmak ve yan etkileri azaltmak için tümör bölgesinde zenginleştirilebilmektedir. Ayrıca serbest borofenin kendisini stabil hâle getirmek için diğer elementler veya gruplarla birleştirilmesi kolaydır, bu da borofene ilaç dağıtımında büyük bir avantaj sağlar. İlaçların akıllı bir şekilde verilmesi çoğu zaman tümör bölgesinde doğru salınımı sağlamak veya vücuttaki dağıtım sisteminin stabilitesini artırmak için taşıyıcı üzerindeki özel grupların modifikasyonunu gerektirir. Borofen üzerindeki özel grupların modifikasyonu, yalnızca özel işlevlere sahip bir bor ilaç taşıyıcısına sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda borun stabilitesinin zorluklarını da çözer^[19].

5.1 Enerji Depolama Uygulamaları

Enerji depolama uygulamaları arasında süper kapasitörler, metal iyon piller, hidrojen depolama cihazları, güneş pilleri vb. yer alır. Borofenin enerji depolama kapasitesi çoğunlukla moleküler dinamiğin yazılım simülasyonları yoluyla teorik olarak araştırılmaktadır^[24].

5.1.1 Süper Kapasitörler

Süperkapasitör, düşük maliyet, uzun çevrim ömrü, hızlı şarj/deşarj oranı, yüksek güç yoğunluğu ve düşük enerji yoğunluğu gibi dikkat çekici özelliklere sahip yeni bir enerji depolama cihazı türüdür. Yüzey şarj depolama

mekanizması temelinde, elektrot malzemelerinin elektriksel iletkenliği ve yüzey alanı, süperkapasitör performansını önemli ölçüde etkiler. İki boyutlu nanomalzemelerdeki son gelişmeler, ultra yüksek elektriksel hareketlilik, son derece geniş yüzey alanı ve ultra ince kalınlık ile süper kapasitörler için çeşitli umut verici adaylar sağlamıştır^[19].

Son teorik araştırmalar, borofenin iki boyutlu bir malzeme olarak bazı elektrokimyasal yönlerden grafenden daha iyi özellikler sergilediğini, dolayısıyla piller ve süper kapasitörler için daha umut verici bir elektrot malzemesi olduğunu göstermiştir. Bu özellikler şu şekilde açıklanmaktadır^[19].

- **Geniş ve Kararlı Voltaj Penceresi:** Borofen ile birleştirilmiş süper kapasitör, 3.0 V'a kadar voltaj penceresi sergiler; bu da hızlı şarj/deşarj özelliğini ve oldukça iyi bir kapasitif davranışı gösterir.
- **İyi Spesifik Kapasitans:** Maksimum özgül kapasitans, karbon bazlı malzemeler ve dökme bor bazlı süper kapasitörden çok daha yüksektir.
- **Mükemmel Hız Kapasitesi:** Akım yoğunluğu 0,3–6,0 A g⁻¹'den yaklaşık 20 kat artar, özgül kapasitans 98,3 F g⁻¹'dir ve kapasitans tutma oranı yüzde 66,6'dır.
- **İyi Çevrim Kararlılığı:** Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ile test edilen 6.000 döngüden sonra kapasitansta hafif bir azalma olmasına rağmen, 50 mV s⁻¹, tarama hızında 6.000 döngüden sonra ilk spesifik kapasitans tutması hâlâ yüzde 88,7'dir.
- **Mükemmel Enerji Yoğunluğu:** Pratik uygulamalarda, birkaç saniye şarj edildikten sonra, bir pil başarıyla ışığı veya fanı çalıştırmıştır. Bu nedenle, düşük kütle yoğunluğu, yüksek spesifik yüzey alanı, dikkate değer elektronik iletkenlik vb. özellikleriyle, borofen nanomalzemelerinin yeni nesil fotovoltaikler ve enerji depolaması için uygulama beklentileri çok ümit vericidir^[19].

Borofen özellikle rehabilite edici robotiklerde umut verici bir biyomedikal implante edilebilir cihaz olarak hizmet etmek için büyük miktarda enerji depolayabilir. Son teorik çalışmalar borofeni süperkapasitörler için uygun hâle getirmiştir^[24].

5.1.2 Piller

Metaliklik ve düşük atom ağırlığı özellikleri borofenin pillerin anodu olmasını mümkün kılar. Teorik çalışmalar, borofendeki içsel içi boş altıgen boşluklar, Li ve Na gibi adsorbe edilmiş metalleri sıkı bir şekilde tuttuğunda, tüm sistemin stabilitesinin yüksek kaldığını ve hatta geliştiğini göstermiştir. Daha da önemlisi, borofenin, nikel kobalt oksit (NiCo2O4), sert karbon ve kalay (Sn) gibi yaygın anot malzemelerinde bulunan ciddi hacim genişlemesi, yavaş kinetik ve düşük interkalasyon faydası gibi genel sorunları yoktur^[19]. Elektriksel iletkenliğin borofenin termal kararlılığı ile kombinasyonu, onu metal iyon piller için uygun bir malzeme hâline getirmektedir. Dört farklı metal iyon pili (Li, Na, Mg veya alüminyum (Al)) için umut

verici bir anot malzemesi olarak borofen filmlerin uygulamalarının incelendiği bir araştırma, borofenin lityum iyon (Li-ion) pillerde daha iyi bir anot malzemesi olarak görev yapabileceği gözlenmiştir. Sodasyon işlemi sırasında gözlemlenen metalik özellikler olağanüstü bir elektronik iletkenliğe işaret etmekte ve pillerin güç yoğunluğunu ve enerjisini artırarak sodyum iyon (Na-ion) piller için de verimli bir şekilde anot görevi görebileceğini göstermektedir^[24]. Özetle, borofen, teorik olarak tahmin edildiği gibi, özellikle Li-ion ve Na-ion piller için anot olarak aşağıdaki avantajlara sahiptir^[19].

- **Kararlı İletkenlik Özellikleri:** Pmmn borofen, bor atomlarının konum yüksekliklerine göre “tepe” ve “vadi” olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Katman yapısı gevşek paketlenmiş olup, Na ve Li gibi metal atomlarının farklı konsantrasyonları tarafından içine gömüldükten sonra küçük bir hacim genişlemesi (sadece yüzde 2) ve kafes değişimi sağlayabilir. Böylece borofen, batarya anot malzemesi olarak iyi bir yapısal bütünlük ve çevrim stabilitesi gösterebilir.
- **Olağanüstü Hız Yeteneği:** Borofenin özel yapısına yönelik bilim insanlarının gözlemleri, borofenin yavaş kinetik problemini açıkça çözebilen Li-ion veya Na-ion pillerin anodu olarak dikkate değer bir hız yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir.
- **Ultra Yüksek Teorik Kapasite:** Na-ion pilleri örnek alındığında, Na/B (sodyum/borofen) oranı 0,5'e ulaştığında (Na, borofenin üst ve alt kısımlarını tamamen eşit bir şekilde kaplar), teorik kapasitenin değeri maksimumuma (1.218 mAh g⁻¹ Na0.5B) ulaşır. Bu maksimum değerdir ve grafit anottan (372 mAh g⁻¹) yaklaşık üç kat daha yüksektir. Teorik kapasitesi 1.860 mAh g⁻¹ olan ve grafit anottan yaklaşık dört kat daha yüksek olan daha büyük atom yarıçapı nedeniyle durum Li (Li0.75B) için daha da iyidir. Böylece borofen, metallerin interkalasyon faydasını önemli ölçüde artırabilir, pil enerji yoğunluklarını ve güç yoğunluklarını artırabilir.
- **Dendrit Oluşumunu Etkin Bir Şekilde Önlemek:** Li-ion ve Na-ion pillerin her ikisi de düşük erime sıcaklığına sahip yüksek derecede reaktif metaller içermeleri nedeniyle dendrit sorunlarıyla karşı karşıyadır. Bu durum henüz etkili bir şekilde çözülmemiş ciddi bir güvenlik endişesi sunmaktadır. Ancak borofen bunu tersine çevirebilir. Bilim insanları, anot malzemesi olarak borofen kullanılan bir Na-ion pilin hesaplanan ortalama açık devre voltajının şarj sırasında 0,53 V kadar düşük olduğunu ve borofen ile Na arasındaki bağın güçlü olduğunu bulmuşlardır. Her ikisi de metal atomlarının, yüksek enerji yoğunluğunu korurken dendrit oluşumunu etkili bir şekilde engelleyebilen ayrı bir metal fazı oluşturmak için kümelenmek yerine borofeni eşit şekilde kapladığını göstermektedir.

Yukarıdaki veriler borofenin umut verici bir pil anot malzemesi olduğunu gösterse de, mevcut araştırma tamamen

teorik kalmaktadır ve pratik uygulamalarını doğrulamak için hâlâ geniş deneylere ihtiyaç vardır.

5.1.3 Hidrojen Depolama

Çevre sorunları ve sınırlı yakıt kaynakları göz önüne alındığında, verimli ve temiz bir yakıtın geliştirilmesi yüksek talep görmektedir. Hidrojen temiz, yenilenebilir ve bol miktarda enerji taşıyıcısıdır, ancak hızlı yükleme ve boşaltma ile birlikte ılımlı koşullarda güvenli ve yoğun depolanmasının dezavantajı nedeniyle büyük ölçekli kullanımını engellenmektedir. Yüksek gravimetrik ve hacimsel yoğunluğu ile hidrojenin uzun ömürlü depolanması gerekmektedir. Bu nedenle moleküler formda depolanması, atomik forma kıyasla daha faydalı olabilir.

Bor tabakaları, en yakın komşular arasında sabit bir kafes oluşturan büyük bir mesafeye sahip benzersiz yapıya sahip olduğundan, moleküler hidrojen, karbon tabakalara kıyasla bor tabakalarına (0.05 eV) daha güçlü bağlanır. Bor levhalar üzerinde hidrojen depolama kapasitelerini ortaya çıkaran çok sayıda hesaplama yapılan bir araştırmada düzlemsel borofen durumunda hidrojen depolama kapasitesinde bir iyileşme gözlenmiştir ve borofen, hidrojen depolama için potansiyel ortamlardan biri olarak kullanılabilir^[24].

Son zamanlarda borofenin, özellikle grafen veya geçiş metalleri ile eklendiğinde hafifliği ve geniş spesifik yüzey alanı avantajlarıyla H₂ depolaması için bir aday olduğu bulunmuştur. Daha hafif metal elemanlar kullanıldığında H₂ depolama yeteneklerinin büyük ölçüde geliştirilebileceği de kanıtlanmıştır^[19].

5.2 Tıp Alanındaki Uygulamalar

Daha önce çoğu araştırma borofenin elektronik cihazlarda geliştirilmesi ve uygulanması üzerine yoğunlaşırken, az sayıda çalışma bu malzemelerin biyotipteki gelişim değerine odaklanmıştır. Aslında bor hayatımızla ayrılmaz bir şekilde bağlantılıdır. Bor, yaşamın önemli bir yapıtaşı olan ribonükleik asidin oluşumu için bir gerekliliktir. Bu nedenle bor, yaşamın kökeni için önemli olabilir. 1988 gibi erken bir tarihte, borun hayvanların ve bitkilerin temel bir unsuru olan kemik kalsifikasyonunu iyileştirebileceği keşfedilmiştir. Ayrıca bor doğada bol miktarda bulunur. Doğal olarak üretilen boraks, antik Çin'de akut bademcik iltihabı, farenjit, stomatit ve dişeti iltihabını tedavi etmek için ilaç olarak kullanılmıştır. Günümüzde son derece yüksek spesifik yüzey alanı, iyi biyoyumluluğu, yüksek fototermal dönüşüm verimliliği ve iyi biyo görüntüleme etkileri nedeniyle borofen, kanser teşhis ve tedavisinde kullanılmaktadır. Antik çağlardan beri bor ve bununla ilgili bileşiklerin insan sağlığına katkısı heyecan vericidir ve borla ilgili ürünlerin biyomedikal alanlarda büyük bir fark yaratabileceğine inanmak için güçlü nedenler vardır^[19].

5.2.1 Biyo Görüntüleme

Floresan görüntüleme, fototermal görüntüleme ve fotoakustik (PA) görüntüleme dahil olmak üzere biyo görüntüleme, tümörlerin konumunu ve boyutunu gösterebilir ve tümörlerin klinik tanısı ve tedavisi için önemli



bir teknolojidir. Her görüntüleme modunun gösterdiği lezyon bilgisi farklıdır ve her görüntüleme modunun kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Bu nedenle tümör bilgileri, tümör multimodal görüntüleme platformu aracılığıyla daha kapsamlı bir şekilde sağlanabilir ve bu da yanlış teşhis riskini büyük ölçüde azaltabilir^[19].

PA görüntüleme, ultrasonu araç olarak kullanan, tahribatsız bir biyo görüntüleme yöntemidir. Optik görüntüleme ve akustik görüntülemeyle karşılaştırıldığında PA görüntüleme, bu iki görüntüleme teknolojisinin birçok eksikliğinin üstesinden gelir ve araştırma derinliğini, görüntü kontrastını ve uzamsal çözünürlüğü artırır. Ek olarak borofen, yakın kızılötesi (NIR) ışığın aydınlatması altında ışık enerjisini ısı enerjisine dönüştüren iyi bir fototermal dönüşüm oranına ve fototermal stabiliteye sahiptir. Borofenin dağılımı ve çeşitli organlardaki sıcaklık değişimleri de kızılötesi termal kamera ile elde edilebilmektedir. Sonuç olarak borofen, tümör multimodal biyo görüntüleme platformlarında potansiyel olarak kullanılabilir ve tümörlerin doğru tanısına ve kesin tedavisine yardımcı olabilir^[19].

5.2.2 Kanser Tedavisi ve İlaç Dağıtımı

Kanser tedavileri, tümörü ısınlamak için NIR radyasyonunun kullanıldığı ve fototermal dönüşüm yoluyla sıcaklıklarını artırarak tümör hücrelerini öldüren fototermal tedavi yoluyla minimal invazivlikle elde edilebilir. Araştırmalarda UV absorpsiyon özelliği ve fototermal dönüşüm ve fototermal stabilitedeki etkinliği nedeniyle borofen durumunda daha iyi bir terapötik etki gözlenmiştir; bu nedenle borofen, fototermal tümör tedavisi için potansiyel bir adaydır^[24].

Tümörlerin fototermal tedavisinde borofen kullanan bazı araştırmacılar iyi terapötik etkiler elde etmiştir. Yapılan araştırmalarda borofen özetle, yüksek fototermal

dönüşüm verimliliğine (yüzde 42,5), yüksek fototermal stabiliteye, yüksek verimli tümör giderme kabiliyetine ve iyi biyo uyumluluğa sahip mükemmel bir anti-tümör tedavi platformu olarak değerlendirilmektedir^[19]. Ayrıca borofen yoluyla ilacın taşınması, diğer grup veya elementlerle kolayca birleşerek kendini stabil hâle getirebildiğinden daha avantajlıdır^[24].

Kemoterapötik ilaçların lokalize salınımı, kanser tedavisinde kullanılan kemoterapinin yan etkilerini azaltmanın anahtarıdır. Bu nedenle, akıllı bir tümör mikro çevre yanıtı ilaç salınım platformunun tasarlanması özellikle önem taşımaktadır. Borofenin ultra yüksek spesifik yüzey alanı, ilaç yüklemesi için alan ve fonksiyonel grup modifikasyonu için bağlantı noktaları sağlamakta ve bu da onu kanser karşıtı tedavinin birçok yönü için uygun bir malzeme hâline getirmektedir. Özetle, yüksek ilaç yüklemeye kapasitesine ve pH ve kızılötesi ikili yanıtına sahip olan borofen, kanserin hem tanısı hem de tedavisi için umut verici bir entegre ilaç dağıtım platformudur^[19].

5.2.3 Biyosensörler

Biyosensörler, hormonlar, proteinler ve glikoz gibi biyobelirteçleri yüksek düzeyde özgüllük ve hassasiyetle hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebilmekte ve kan örneği tespiti, erken kanser tanısı ve klinik analiz için kullanılabilir. Bu da biyotıp alanında büyük ilgi görmektedir. İki boyutlu nanomalzemeler üstün elektrokimyasal performansları, yüksek yüzey/hacim oranları, daha fazla yüzey aktif bölgeleri ve tek katmanlı kalınlıklarda yüksek elektronik mobiliteleri nedeniyle biyosensörler için mükemmel adaylar hâline gelmiştir^[19].

Teorik elektrokimyasal çalışmalar, iletkenliğin değişmesine yol açan borofen nanotabakalar arasında daha kolay yük transferinin kimyasal sensörler için elverişli koşullardan biri olduğunu göstermiştir. Borofenden geçen

akımın keskin bir şekilde artmasıyla etanolün gözlenmesi, onun bir etanol sensörü olduğunu göstermektedir. Ayrıca B₃₆ borofende, formaldehit adsorpsiyonu sonrasında elektriksel iletkenliğinin artması nedeniyle elektrik sinyalleri oluşmuştur. Bu, B₃₆'nın formaldehit sensörünün yapımı için uygun olduğunu göstermiştir ve farklı HCN konsantrasyonlarına karşı duyarlılığı, B₃₆'nin zehirli gazlar için iyi bir sensör olduğu anlamına gelmektedir^[24].

Borofen, olağanüstü geniş yüzey alanı ve gaz molekülleri tarafından mükemmel emilebilirliği nedeniyle, gaz tespiti için geniş bir biyo algılama uygulaması potansiyeli gösterir. Biyosensör olarak, sadece etanol (CH₂OH) ve amonyak (NH₃) gibi toksik olmayan gazları değil, aynı zamanda formaldehit (CHOH), kobalt (CO) ve nobelyum (NO) gibi son derece toksik gazları da izleyebilir. Bunlar, her ikisi de son zamanlarda biyosensörler olarak oldukça hassas kabul edilen grafen ve fosfor gazı biyosensörleri tarafından dahi izlenememektedir. Borofenin elektronik bant aralığı, gaz adsorbe edildiğinde hızla azalabilir, bu da bol miktarda elektronun aktarılmasını kolaylaştırır ve elektriksel iletkenliği artırır ve böylece borofeni yüksek derecede toksik gaz biyosensörlerinin uygulamalarında dikkat çekici hâle getirmektedir^[19].

Artık borofen biyosensörleri CO ve NO konsantrasyonunun değişimine duyarlı olduğundan, gelecekteki araştırmalarda CO ve NO gaz terapisindeki gaz konsantrasyonunu etkili bir şekilde izleyecekleri düşünülebilir. Ek olarak, rejeneratif tıpta yapışkan iskele olarak kullanılan borofen ve hidrojel bazlı polimerlerden oluşan hibrid biyosensör, pH'ı, sıcaklığı ve diğer uyarıcıları optik, elektriksel ve mekanik sinyallere dönüştürebilen akıllı ve son derece hassas bir cihaz olarak kabul edilmiştir. Bu biyosensörün kan testi gibi biyomedikal alanlarda kullanılması beklenmektedir.

Borofen biyosensörü teoride özellikle gaz tespiti için seçkin bir cihaz olmasına rağmen, gaz adsorpsiyonu sonrasında azalan stabilite ve yüksek adsorpsiyon enerjileri nedeniyle düşük yeniden kullanılabilirlik, ele alınması gereken önemli konulardır. Bu nedenle, biyotıp alanında borofen biyosensörlerinin dönüşümünü gerçekleştirmek için sitotoksik etkileri, süresel stabiliteyi, biyolojik dokularla yakın temas hâlindeki etkileri vb. açıklığa kavuşturmak için daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulacaktır. Ayrıca borofen havaya maruz kaldığında kararsızdır; bu nedenle, metalik cihazlarla reaksiyonlar gibi olası dış reaksiyonları dikkate almak gerekir^[19]. Bununla birlikte, nem sensörleri, metronidazol ilaç sensörü ve başka sensörler olarak borofen ile ilgili hesaplamalı çalışmalar hakkında başka raporlar da vardır^[24].

5.2.4 Biyomedikal

İki boyutlu bir nanomateryal olan borofen, oldukça dikkat çekmiş ve iyi düzeydeki esnekliği nedeniyle biyotıp alanında geniş çapta araştırılmıştır. Tıbbi cihazların yanı sıra çeşitli biyoilaçlar için heterojen olarak kişiselleştirilebilen farklı fazlarında farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterdiği için umut verici biyomalzemelerden biri olarak kabul edilebilir. Bal peteği borofenin kararsız doğası, biyomedikal uygulamalar için gerekli olan biyobozunurluğu

karşılar. Borofen, metaller ve yarı iletkenlerle birleştirildiğinde, biyolojik uygulamalarda olumsuz etkiler olmaksızın gelişme göstermiştir^[24].

Borofenin, fototerma tedavisi, ilaç dağıtımı, tümör multimodal görüntüleme ve diğer işlemlere ek olarak biyotipteki birçok ilginç uygulamada kullanılması beklenmektedir. Tümör aşları son yıllarda ilgi odağı hâline gelmiştir. Kemoterapi ve radyoterapiyle karşılaştırıldığında yan etkileri daha azdır ve hastanın kendi bağışıklık sistemini harekete geçirecek tümörün büyümesini, yayılmasını ve nüksetmesini önleyebilir. Ancak şu anda geliştirilen tümör aşları, bağışıklıkla ilgili hücrelerin toplanmasında zorluk, yetersiz antijen dağıtımı veya zayıf tümör öldürme yeteneği gibi sorunlara sahiptir.

Bilim insanları oksitlenmiş grafen kullanarak tümör aşlarının mevcut sorunlarını çözmek için antijen sunan hücre (APC) alımı/aktivasyonu, antijen iletimi ve çapraz sunumu entegre eden "herkes için bir tümör aşısı" dağıtım platformu geliştirmişlerdir. Ayrıca iki boyutlu materyallerin immünoterapiye yardımcı olma konusunda büyük potansiyeli vardır. Mükemmel mekanik dayanıklılığa ve yüksek esnekliğe sahip iki boyutlu bir malzeme olan borofenin, sitokin benzeri aktivite, enzim benzeri aktivite ve oksitlenmiş grafeninkini yansıtan agonist aktivite dahil olmak üzere mükemmel bir bağışıklık fonksiyonuna sahip olması muhtemeldir ve bu da onu immünoterapi için potansiyel bir ilaç dağıtım platformu hâline getirir^[19].

Hidrojen gazı terapisinin iyi anti-tümör, anti-oksidasyon, serebral iskemi tedavisi ve karaciğer hastalığı tedavisi etkileri vardır. Yukarıda açıklanan borofenin hidrojen depolamadaki potansiyeli, borofenin hidrojen terapisinde uygulanması için iyi bir temel oluşturmaktadır. Hidrojen, kötü huylu tümörlerde radyoterapi ve kemoterapinin olumsuz reaksiyonlarını hafifletebilir ve tümör taşıyan hayvanların ömrünü önemli ölçüde uzatabilen kemoterapötik ilaçlarla iyi bir sinerjik etkiye sahiptir. Normal hücrelerde hidrojen hücre apoptozunu azaltabilir. Bugüne kadar, hidrojen açısından zengin su içmek ve daha yüksek hidrojen konsantrasyonuna sahip havayı solumak, yüksek arıtma maliyeti, karmaşık hidrojen üretim ekipmanı, hidrojenin suda sınırlı çözünürlüğü ve hastalıklı organın düşük kullanım oranı ile sınırlı olan iki ana hidrojen arıtma yöntemidir. Bu nedenle, lezyon bölgesinde hidrojenin zenginleştirilmesinin ve kullanımının iyileştirilmesi, hidrojen tedavisinin daha da geliştirilmesi için bir zorluktur. Hidrojen depolama potansiyeli ve benzersiz EPR etkisi ile borofen, hidrojen tedavisini ve çoklu tedavileri entegre ederek, hidrojenin verimli bir şekilde dağıtımını sağlayan bir ilaç dağıtım platformu olarak kullanılabilir^[19].

Tümör tedavisi, nanomalzemeleri popüler hâle getiren alanlardan biridir, çünkü tümörler gelişmiş geçirgenlik etkisi sergiler; 10 ila 1000 nm boyutlarındaki ilaçlar, tümörleri pasif olarak hedeflemek, yan etkileri azaltmak ve etkinliği artırmak için tümör bölgesini zenginleştirebilir^[24].

Kanser tedavisinde kullanılan Bor Nötron Yakalama Tedavisi (Boron Neutron Capture Therapy -BNCT), özellikle beyin kanserlerinin tedavisinde hasta hücrelerin seçilerek imha edilmesine yaraması ve sağlıklı hücrelere

zararının minimum düzeyde olması nedeniyle tercih nedeni olabilmektedir^[1].

Beyin tümörü olan bir hastaya belirli bor bileşikleri enjekte edildikten kısa bir süre sonra bileşikler tercihen tümörde toplanır. Tümör alanının, dokuda nispeten az genel hasara neden olan termal nötronlarla ışınlanması, bir bor-10 çekirdeğinin bir nötronu yakaladığı her seferde tümörde dokuya zarar veren bir alfa parçacığının salınmasına neden olur. Bu şekilde yıkım tercihen tümörle sınırlandırılabilir ve normal beyin dokusu daha az etkilenir. BNCT ayrıca baş ve boyun, karaciğer, prostat, mesane ve meme tümörlerinin tedavisi için de araştırılmıştır^[6].

Beyin tümörlerinin lezyonlarını tedavi etmek zordur. BNCT'nin bu lezyonlar üzerinde iyi bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. BNCT prensibi, kararlı izotop bor-10'un tümör hücrelerinde zenginleştirilmesini ve ardından kanser hücrelerini yok eden nükleer yakalama ve fisyon reaksiyonlarını indüklemek için nötron ışınları ile ışınlamayı içerir. Geleneksel radyoterapi ve kemoterapiyle karşılaştırıldığında BNCT'nin aşağıdaki avantajları vardır^[19]:

- Tümörler, bor içeren ilaçlara normal dokulardan çok daha yüksek bir afiniteye sahiptir ve bu da tümör hedefli tedaviye yol açar.
- BNCT, hem oksijen açısından zengin hem de hipoksik tümörler üzerinde iyi bir öldürme etkisine sahiptir ve radyoterapinin oksijene bağımlılığını önler.
- Hücre büyüme döngüsüne belirli bir bağımlılığı olan kemoterapi ve radyoterapi ile karşılaştırıldığında, BNCT'nin öldürücü etkisi hücre büyüme döngüsünden bağımsızdır ve sabit fazdaki tümör hücreleri için etkilidir. Bu nedenle BNCT daha olgun bir anti-tümör radyoterapi yöntemi olarak kabul edilir. Bununla birlikte, BNCT teknolojisi için önemli bir koşul, bor taşıyıcılarının tasarımının ve seçiminin kritik olduğu tümörlerde yüksek konsantrasyonda bor taşıyıcılarının elde edilmesidir. Ayrıca, ilacın kan-beyin bariyeri penetrasyonunun artırılması beyin hastalıklarının tedavisinde önemli bir konudur. Cesaret verici bir şekilde, araştırmalar, siyah fosfor gibi fototermal etkilere sahip nano tabakaların, fototermal etkiler yoluyla ilacın kan-beyin bariyeri penetrasyonunu etkili bir şekilde destekleyebildiğini ve Alzheimer hastalığı ile depresyonun tedavisini destekleyebildiğini bulmuştur. İyi tümör hedeflemesi ve fototermal etkilere sahip olan borofen, diğer bor içeren bileşiklerden daha yüksek bor saflığına sahiptir ve bu nedenle glioma tedavisinde potansiyel bir bor taşıyıcısı olması muhtemeldir.

Son raporlar, insanın biyolojik kodunun çözülmesi için gerekli olan bazı dizisi belirlenerek DNA dizilemesinin farklı şekillerde yapıldığını belirtmiş, tıp ve biyoloji ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Elektron duyarlılığı sonuçları B₃₆ borofenin DNA üzerindeki sitozin (C), timin (T), guanin (G) ve adenin (A) olmak üzere dört nitrojen bazına doğru incelenmesi, borofenin farklı bazlara bağlandığında farklı elektriksel özellikler verdiğini göstermiştir. Sinyaller ve iletkenliğin yanı sıra çeşitli enerji ve enerji

boşluğu seviyelerindeki değişiklikler, bunun DNA dizilimi cihazlarında kullanılmasını teşvik etmektedir^[24].

Ek olarak, nano ölçekli (1-100 nm) malzemeler, makroskobik ölçekte aynı malzemenin özelliklerinden farklı özellikler sergileme eğilimindedir. Bu şekilde, iki boyutlu nanomalzemeler, insan vücudundaki enzimlerininkine benzer aktivite sergileyebilir, yine de biyolojik enzimlere göre daha iyi stabilite ve etkinliğe sahiptir. Nanoenzimler olarak adlandırılan bu materyaller, hastalık teşhisi ve tedavisi alanlarında büyük ilgi görmüştür. Yukarıdaki örnekler araştırmacıları, aynı zamanda iki boyutlu bir yapıya sahip olan ve yüzey aktif alanlar açısından zengin olan borofenin de belirli enzimatik aktivitelere sahip olabileceğini tahmin etmeye yöneltmiştir^[19].

5.3 Elektrokatalitik Uygulamalar

Liyum, kükürt, fosfor, nitrojen ve karbon gibi elementel katkı maddeleriyle katkılama sonrası borofen üzerine yapılan bir çalışma, oksijen ve hidrojenin adsorpsiyon enerjilerinin en üstte olduğunu kanıtlamış ve bu da daha sonra katkılı borofenin hem oksijen hem de hidrojenin evrim reaksiyonları için katalizör olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Karbondioksitin (CO₂) hidrokarbonlara indirgenmesi, elektrokimyasal olarak CO₂ kullanımını teşvik ederek sera etkisini azaltır. Pratik olarak, iyi seçiciliğe ve uygun adsorbe edilebilirliğe sahip ideal bir gaz adsorban malzemesi seçmek zordur. Daha spesifik olarak, CO₂'nin azaltılması ve depolanması (enerji depolama) için yüksek verimli, metal içermeyen bir elektrokatalizör aramak hâlâ büyük bir zorluktur. Bununla birlikte, bir araştırmada, metal içermeyen metalik borofenin, CO₂'nin metana (CH₄) indirgenmesi için etkili bir elektrokatalizör görevi gördüğünü bildirmiştir^[24].

5.4 Optik Uygulamalar

Borofen absorpsiyon, hibridizasyon, optik modülasyon kabiliyeti, atomik katman kalınlığı ve mükemmel optik doğrusal olmama özelliği ile fotonik ve elektronik cihazlarda önemli bir rol oynamaktadır. Sıvı faz pul pul dökülme yoluyla sentezlenen iki boyutlu bir borofende, doğrusal olmayan optik özellikleri Z-taraması ile ölçüldüğünde, gözlemlenen doymuş emici (SA) özelliklerinin, orta kızılötesi ve yakın kızılötesi lazer sistemlerinde ultra hızlı mod kilitleme için kullanılacak mükemmel bir geniş bant optik anahtar olarak hizmet edebileceği bir araştırmada bildirilmiştir. Sonuçlar ayrıca, borofenin pasif mod kilitli lazerlerde ve gelecekteki elektro-optik uygulamalarda SA olarak da hizmet edebileceğini göstermiştir. Yapılan bir çalışmada borofenin anizotropik davranışının, polarizasyona bağlı absorpsiyon kılavuzlu rezonans ile birleştirildiğinde yapının ışık emilimini yüzde 99,8 oranında artırabileceği bildirilmiştir. Bu mekanizmanın sonuçları ayrıca, borofenin ömrünü ve taşıyıcı yoğunluğunu ayarlarken, gelecekteki fotonik ve elektronik cihazlar için kullanılacak absorpsiyon davranışının ayarlanabileceğini göstermiştir. Optik, elektronik ve optoelektronik özelliklerin entegrasyonu, çok katmanlı borofeni yüksek performanslı cihazlarda umut verici bir aday hâline getirebilir^[24].

6. SONUÇ

Bor kullanım alanları bakımından çok sayıda çeşitliliğe sahip benzersiz bir elementtir. Sağlıktan enerjiye, tıptan savunma sanayiine hem insan yaşamının kalitesinin artırılmasında hem de ulusal ekonomiye benzersiz bir güç kazandırılmasında sonsuz potansiyel taşımaktadır. Bilim insanlarının çalışmaları özellikle son yıllarda bordan elde edilen borofenin de aynı şekilde çok sayıda alanda fırsatlar barındıran mucizevi bir madde olduğunu kanıtlamaktadır.

Yükselen yeni ekonominin dinamikleri olan elektrikli araçlar, kapasitörler, piller, enerji depolama çözümleri gibi geleceğin temel dönüştürücü teknolojileri için bor

ve borofen anahtar işlevi görmektedir. Her şeyden öte insanların vücudundaki tümörlerin görüntülenmesindeki performansı ve kanser gibi ölümcül hastalıkların tedavisinde sergilediği başarı insan yaşamı için ne kadar büyük önem taşıdığına göstergesidir. Dünyada bor ve borofenin yeni özelliklerinin keşfedilmesi için çok sayıda bilim insanı çalışmalarını son hızla sürdürmektedir. Tüm bu gelişmeler Türkiye açısından çok daha büyük anlam ifade etmektedir, zira Türkiye dünyanın en zengin bor madeni rezervine sahip ülkesidir. Mucizevi malzeme bor ve borofenin Türkiye'deki kullanım ve uygulamaları ile ülkemize sağlayabileceği spesifik faydalar raporumuzun üçüncü bölümünde detaylı biçimde ele alınacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Yakıncı, Zehra Deniz; Kök, Mediha; (2016), "BORUN SAĞLIK ALANINDA KULLANIMI", *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dergisi*, (2016), <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/448527>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [2] Els, Frik; (2022), "Forget rare earths, boron is the critical mineral to track", *Mining.com*, (15 Eylül 2022), <https://www.mining.com/forget-rare-earths-boron-is-the-critical-mineral-to-track/>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [3] *Niceway Chemical*, "WORLD BORON RESERVES", <https://www.nicewaychemical.com/boron/>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [4] *Borax*, "Boron, Borates, and Borax", <https://www.borax.com/about/community/education>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [5] *Borax*, "BORATES IN NATURE", <https://www.borax.com/about/community/education/nature>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [6] *Britannica*, "Compounds", <https://www.britannica.com/science/boron-chemical-element/Compounds>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [7] *CNN Türk*, (2023), "Bor Kullanım Alanları Nelerdir? Borun Özellikleri Nelerdir, Nerelerde Kullanılır?", (29 Ağustos 2023), <https://www.cnnturk.com/ajanda/bor-kullanim-alanlari-nelerdir-borun-ozellikleri-nelerdir-nerelerde-kullanilir>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [8] Tiron, Roxana; (2022), "Mojave Desert Boron Mine Casts Bet on Critical Mineral Label", *Bloomberglaw*, (27 Nisan 2022), <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/mojave-desert-boron-mine-casts-bet-on-critical-mineral-label>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [9] *Britannica*, "boron", <https://www.britannica.com/science/boron-chemical-element>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [10] *Ataman Chemicals*, "Sodyum Tetraborat", https://www.atamanchemicals.com/sodium-tetraborate_u26196/?-lang=TR#:~:text=Boraks%20olarak%20da%20bi-linen%20Sodyum,10H2O%20olan%20do%20C4%-9FaI%20bir%20mineraldir. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [11] Cummins, Jessica; (2023), "Boron for Morons: Everything you need to know about the world's most perplexing mineral", *Stockhead*, (14 Şubat 2023), <https://stockhead.com.au/primers/everything-you-ever-wanted-to-know-about-boron-including-how-it-may-save-the-world/>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [12] Akbay, Aslı; "BORUN ÖNEMİ ve TEKNOLOJİK BOR BİLEŞİKLERİ", *Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü*, https://kimya.balikesir.edu.tr/Seminerler/dokuman/201810105025AsliAkbay_2.pdf. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [13] Sarıgül, Tuba; (2023), "Bor karbür nedir, nerelerde kullanılır?", *Savunma Sanayii Dergilik*, (29 Mart 2023), <https://www.savunmasanayiidergilik.com/tr/HaberDergilik/Bor-karbur-nedir-nerelerde-kullanilir>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [14] Bilgin, Raif; (2023), "Havacılık, Uzay ve Savunma Araçlarının Sihirli Malzemesi; Bor", *STRASAM*, (1 Ağustos 2023), <https://strasam.org/savunma/havacilik-ve-uzay-sanayii/havacilik-uzay-ve-savunma-araclarinin-sihirli-malzemesi-bor-2206>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [15] Harper, Tim; (2016), "You might not have heard of them, but these new materials will change the world", *World Economic Forum*, (23 Haziran 2016), <https://www.weforum.org/agenda/2016/06/two-dimensional-materials/>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [16] *electronicsforu*, (2017), "Materials: From Graphene to Borophene Electronics", (27 Kasım 2017), <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/tech-focus/materials-graphene-borophene-electronics>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)

- [17] *Wikipedia*, “Borophene”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Borophene>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [18] *Malzeme Bilimi*, “Borofen Nedir?”, <https://malzemebilimi.net/borofen-nedir.html>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [19] Ou, Meitong; Wang, Xuan; (2021), “The Emergence and Evolution of Borophene”, *National Library of Medicine*, (2 Mayıs 2021), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8224432/>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [20] ACS, (2019), “Borophene”, (3 Haziran 2019), <https://www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/b/borophene.html>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [21] Kapdan, Sultan; (2021), “Bir İlk: Kararlı 2D Bor Materyali Oluşturuldu”, *İnovatif Kimya*, (25 Mart 2021), <https://inovatifkimyadergisi.com/bir-ilk-kararli-2d-bor-materyali-olusturuldu>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [22] *Shaastra*, (2021), “Borophane, the new ‘wonder material’, is here”, (Mayıs 2021), <https://shaastramag.iitm.ac.in/news-brief/borophane-new-wonder-material-here>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [23] Morris, Amanda; (2021), “Engineers create double layer of borophene for first time”, *Northwestern*, (26 Ağustos 2021), <https://news.northwestern.edu/stories/2021/08/engineers-create-double-layer-of-borophene-for-first-time/>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [24] Bhavyashree, M.; (2022), “Exploring the emerging applications of the advanced 2-dimensional material borophene with its unique properties”, *Royal Society of Chemistry*, (Aralık 2022), <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ra/d2ra00677d>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)
- [25] *MIT Technology Review*, (2019), “Sorry, graphene—borophene is the new wonder material that’s got everyone excited”, (5 Nisan 2019), <https://www.technologyreview.com/2019/04/05/239331/borophene-the-new-2d-material-taking-chemistry-by-storm/>. (Erişim Tarihi: 18.10.2023)



thinktech
STM Teknolojik Düşünce Merkezi
<http://thinktech.stm.com.tr>

