


## Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Borofen Üretimi ve Karakterizasyonu

Erhan Özkan<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Aryom İleri Teknolojik Ürünler, İzmir

Geliş Tarihi / Received Date: 29.03.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date: 10.07.2023

### Öz

Grafenin sentezlenmesinin ardından iki boyutlu (2D) malzemeler hakkında çalışmalar devam etmiş ve bu çalışmalar neticesinde borofenin 2D sihirli bir süper ince malzeme olduğu keşfedilmiştir. Borofen üzerindeki çalışmaların çoğu halen teorik olarak devam etmekle birlikte çok az deneysel çalışma gözlenmiştir. Üstün özellikleri sebebiyle gelecekte bu malzemenin farklı teknolojilerde çokça karşımıza çıkacağı ön görülmektedir. Bu çalışmada elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bakır yüzeylerin kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile sentezlenmiş borofen ile kaplanmasına ait parametreler ve kaplamaların karakterizasyonuna etkileri araştırılmıştır. İnce bakır filmler altlık malzemesi olarak seçilmiş ve 950-1035 °C sıcaklık aralıklarında CVD yöntemi ile 1/1 gravimetrik oranda metalik bor ve boroksit toz karışımı, 50 mili Tor basınç ve 100 sccm hidrojen gazı altında borofen sentezi gerçekleştirilmiştir. Üretilen borofen ince filmlerin karakterizasyon çalışmasında Raman Spektrometresi'nden faydalanılmış ve 181 cm<sup>-1</sup> ile 1148 cm<sup>-1</sup>deki karakteristik bantları gözlenmiştir. Sentezlenen ince film tabakaların yapı kontrollerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak nano yapı doğrulanmıştır. Kaplamaların elektriksel iletkenlikleri dört nokta prob tekniği ile test edilmiş, artan sıcaklık ile elektriksel direncin arttığı gözlenmiş ve 1035 °C'den sonra iletkenliğin tamamen ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda borofen film tabakalarının üretilmesi ve karakterizasyon çalışmaları için gerekli olan parametreler tanımlanarak kayıt altına alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** borofen, CVD, Raman, SEM

## Borophene Production and Characterization by Chemical Vapor Deposition Method

### Abstract

After the synthesis of graphene, studies on two-dimensional (2D) materials continued, and resulting that borophene is a magic 2D superfine material. While most of the study on borophene is still theoretical, and few experimental studies have been observed. In this study, the parameters of the copper coating surfaces, which are widely used in electronic applications, with borophene synthesized by chemical vapor deposition (CVD) method and the coatings' characterization were investigated. Thin copper films were chosen as the substrate material and borophene synthesis was carried out by CVD method with a 1/1 gravimetric ratio of metallic boron and boroxide powder mixture, 50 milliTor pressure and 100 sccm hydrogen gas at a temperature range of 950-1035 °C. Characteristic borophene bands at 181 cm<sup>-1</sup>, and 1148 cm<sup>-1</sup> were observed by Raman Spectrometry. The nanostructure was confirmed by using Scanning Electron Microscopy (SEM). The electrical conductivity was tested with the four-point probe technique, and it was observed that the electrical resistance increased with increasing temperature, the conductivity completely disappeared at 1035 °C. As a result of the study, the parameters required for the production and characterization studies of borophene film layers were defined and recorded.

**Keywords:** borophene, CVD, Raman, SEM

## Giriş

Malzemelerin özelliklerini iyileştirmek ve daha küçük hacimde daha yüksek performans elde etmek geçmişten günümüze gelen çalışmaların temelini oluşturmaktadır (Zhou vd., 2021). İki boyutlu (2D) malzemelerin sergiledikleri davranışlar daha detaylı araştırıldığında üstün entegrasyon potansiyelleri keşfedilmeye başlanmıştır. Şüphesiz ki son zamanlarda en çok rağbet gören malzemelerin başında grafen gelmektedir (Zhang vd., 2019). Grafenin gördüğü bu rağbetin sebepleri; güçlü, esnek, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik özelliklerini bünyesinde barındırmasıdır (Tai vd., 2015).

Grafenle başlayan 2D malzemelere olan ilginin artması ile bu alandaki bilimsel çalışmalara ağırlık verilmiş ve bu konudaki yatırımlar birçok kurum ve kuruluşun ana gündem maddesi haline gelmiştir (Tan vd., 2015). Günümüzde 2D malzemelerin farklı sektörlerde kullanımına ilişkin araştırmalar artan bir hızla devam etmektedir. İleri nesil elektrokimyasallar, sensörler, piller, transistörler, fotokatalizörler ve fotovoltajik teknolojideki gelişmeler 2D malzemeler için bir potansiyel oluşturmuştur (Mohan vd., 2018). Bu malzemeler detaylı olarak incelenmeye başlandığında; yüksek teorik yüzey alanı, son derece yüksek elektron hareketliliği ve termal iletkenlik ile karşılaşmıştır. Ayrıca çok katmanlı yüksek esneklik ve şeffaf özellikler göstermesi neticesinde bilim ve sanayi dallarında geniş bir ilgi kitlesiyle buluşmuştur (Wang vd., 2016).

DeneySEL olarak çeşitli 2B malzemeler üzerinde çalışmalar halen devam etmektedir. Fosforen, germanen, g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, metal-organik çerçeveler (Wang vd., 2016), kovalent organik çerçeveler (Shukla vd., 2017), antimonen (Li vd., 2017), organik-inorganik hibrit perovskitler (Rana vd., 2020), molibden disülfid ultra ince nano tabakalar (Bergmann vd., 2002) ve silikon gibi iki boyutlu birçok malzeme bilim insanlarının gündemine hızlı bir şekilde giriş yapmış bulunmaktadır (Shahbazi vd., 2016).

2B malzemelerden borofen ise oldukça kritik bir öneme sahiptir (Xu vd., 2016). Xiamen Üniversitesi'nin 2015 yılında gerçekleştirdiği bildiriye, borofenin elektronik ve süperiletken sistemlerinde yaygın olarak kullanılması planlanan grafenin önüne geçecek bir malzeme olduğu tespit edilmiştir (Wang vd., 2019). Yapılan araştırmalar neticesinde borofenin, çelikten yaklaşık iki yüz kat daha mukavemetli olduğu ifade edilen grafenden bile daha mukavemetli ve esnek olduğu ön görülmüştür (Mannix vd., 2018).

Massachusetts Institute of Technology kendi web sayfasında borofenle ilgili araştırmayı "Üzgünüz grafen artık herkesi heyecanlandıran yeni mucizevi malzeme borofen" başlığı ile duyurmuş bulunmaktadır (Meng vd., 2017). Şüphesiz borofenin bu şekilde gündeme gelmesi ülkemiz açısından kritik bir öneme sahiptir. Türkiye, dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olmasıyla bu konuda lider durumdadır. Ülkemize en yakın bor rezervine sahip ülkelerin maksimum rezervleri bile ancak %7 mertebelerindedir (Yiğitbaşıoğlu, 2004).

Bor hakkında bir diğer önemli konu ise süper iletken teknolojilerinde kritik bir öneme sahip olan sıvı helyum rezervlerinin 50 yıl sonra tükenecek olmasıdır (Li vd., 2019). Bu amaçla sıvı helyumun yerini alması beklenen hidrojen atomlarının depolanmasında bor elementi kritik bir öneme sahiptir (Peng vd., 2016). Kendi başına yanıcı bir element olan hidrojenin bor ile yaptığı bileşikler alev almaz özelliktedir. Bor, NaBO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O'dan NaBH<sub>4</sub> hidrolizi yoluyla hidrojenin çevreye zarar vermeden elde edilebilmesi ve hidrojenin sağlıklı bir şekilde depolanabilmesi avantajlarının yanında yakıt pilleri için büyük bir potansiyeldir (Zhou vd., 2010).

Borla üretilen ve stratejik bir malzeme olarak değerlendirilmesi planlanan borofen ile ilgili geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırmaların neticesinde teorik çalışmalara ağırlık verildiği ancak deneysel çalışmaların sınırlı sayıda olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma ile literatürde henüz karşılaşılmağı olan CVD ile borofen sentezinde parametrelerin elektriksel ve yapısal özelliklere etkisi detaylı olarak okuyuculara aktarılmıştır. Böylece aynı deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilen sentez çalışmalarında değişen parametrelere bağlı olarak meydana gelen değişime ait özgün bir çalışma literatüre kazandırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde CVD ile borofen sentezinin detayları anlatılmış, oluşacak hataları engellemek adına geliştirilen transfer baskı tekniğinden faydalanılarak borofen tabakalarının karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Raman spektrometresi yardımıyla borofen

tabakasının yapısal karakterizasyonu tespit edilmiş ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımıyla nano yapı analizleri yapılmıştır. Dört nokta prob tekniği ile elektriksel direnç ölçümleri gerçekleştirilmiş, parametre ve yapılaraya göre karşılaştırmanın detayları aktarılmıştır.

### Materyal ve Yöntem

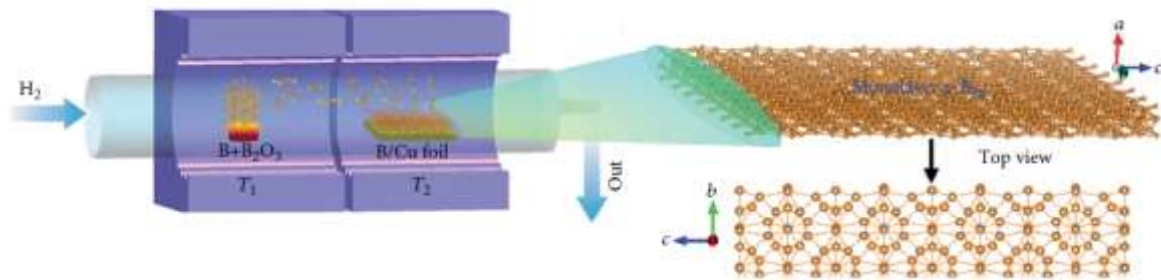
Borofen sentezi çalışmaları Protherm ASP 11/100/500 marka tüp fırının özellikleri iyileştirilerek CVD sistemine çevrilmesi ile gerçekleştirilmiştir. CVD sistemine ait görsel şekil 1'de yer almaktadır.



**Şekil 1.** CVD Sistemi

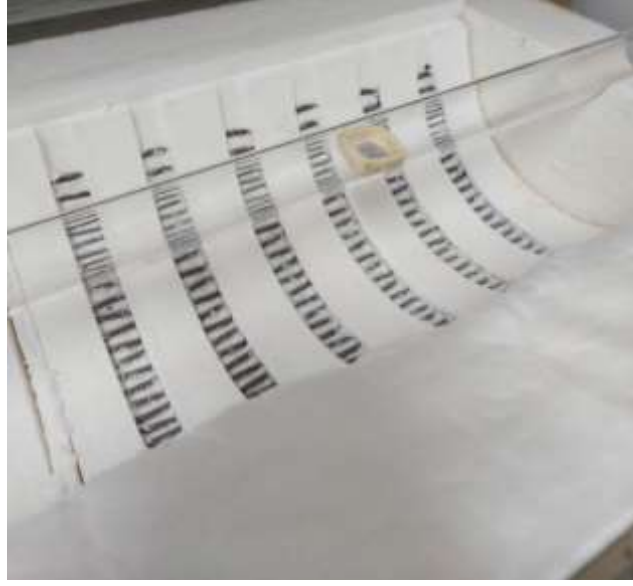
Bor kaynağı olarak metalik bor ve boroksit tozu, redüktif ortam için %99,9995 saflıkta hidrojen gazı ( $H_2$ ), taşıyıcı gaz için saf argon gazı (Ar), 0,025 mm kalınlığında ve %99,8 saflığında bakır folyolar ise katalizör olarak kullanılmıştır.

İnce bakır levhalardan 5cmx5cm ebadında altlık malzemeler kesilmiştir. Bakır folyoların sentezleme öncesi yüzeylerinin temiz olması önem arz etmektedir. Folyolar üzerindeki borofen ince film kaplamalar; pürüzsüz, homojen ve kararlı yapıda olmalıdır. Bu amaçla bakır folyolar; aseton, izopropanol ve saf su ultrasonic banyolarından geçirilmiş ve ardından atmosferik ortamda azot gazı ile kurutulmuştur. Bu işlemin ardından bakır atıklar vakum odasına alınmıştır. Borofen sentezinin parametreleri için önceki grafen çalışmalarından, borofen optimizasyon derlemelerimden ve literatürde yer alan farklı çalışmalardan yararlanılmıştır. Bakır yüzeyinde oluşan oksitlerin temizlenmesi için 50 mTor'luk basınç ve 100 sccm (molar akış hızını ifade eden standard cubic centimeters per minute teriminin kısaltmasıdır) hidrojen gazı atmosferinde düzenek 1035 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Sistemin bu şartlar altında 1035 °C'ye ulaşması ve bakır yüzeyinde oluşan oksitlerin giderilme süresi 85 dakika olarak kaydedilmiştir. Şekil 2'de bu sentez için tasarlanmış hücrenin çalışma prensibi gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Borofen Sentezi için Tasarlanmış İki Bölmeli CVD Sistem Akış Şeması (Xie, 2020).

100 mg  $B_2O_3$  ve 100 mg metalik bor tartılarak küçük bir pota içerisinde sisteme yüklenmiştir. Şekil 3'te potanın sistemin içerisine yerleştirilmiş halleri gösterilmektedir.



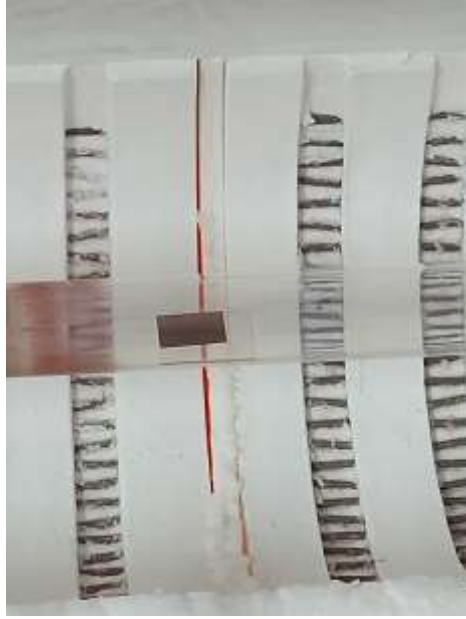
**Şekil 3.** Metalik Bor ve Boroksit Karışımının Sistem İçerisindeki Konumu

Fırının oda sıcaklığından 600 °C'ye kadar yükselmesi esnasında  $H_2$  gazı akış yönünde önce pota sonra bakır folyo gelecek şekilde sisteme besleme gerçekleştirilmiştir. Burada amaç  $B_2O_3$ 'teki oksijenin  $H_2$  ile indirgenerek saf bor elde edilmesini sağlamaktır. Şekil 4'te bakır folyo ve  $B+B_2O_3$  karışımının yer aldığı potanın CVD sistemi içerisindeki yerleşimi gösterilmektedir.



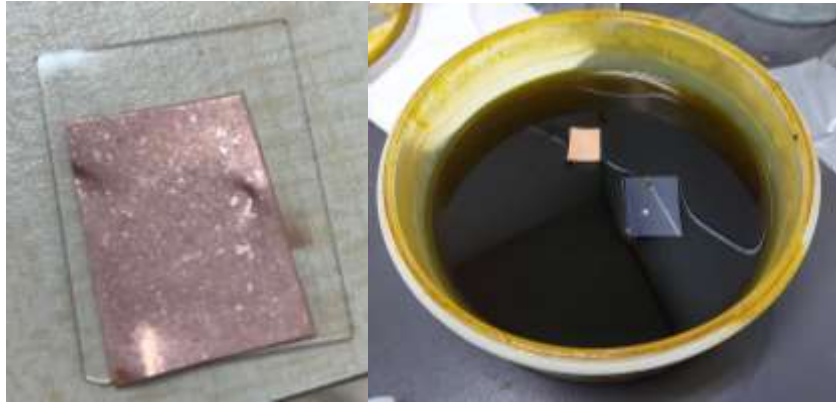
**Şekil 4.** CVD'de Borofen Sentezi

50 dakika sonunda sentezlenme işlemi sonuçlanmıştır. Şekil 5'te bakır folyonun sistem üzerindeki yerleşimi ve borofen sentezlenme işlemi gösterilmiştir.



**Şekil 5.** Bakır Folyo Üzerinde Meydana Gelen Kaplamanın CVD Sistemindeki Yerleşimi

Bakır folyo üzerinde sentezlenen kaplamaların karakterizasyonu 532.08 nm dalga boylu Xplora Plus marka Raman spektrometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların yapı ve elektriksel özelliklerinin tespit edilebilmesi için altlık malzeme ve kaplamanın ayrılması aşamasına geçilmiştir. Altlık malzemelerden bakır üzerinde sentezlenen borofen katmanını ayırmak için transfer baskı yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntemde CVD ile sentezlenen borofen filmlerin üzeri 1 µm kalınlığa sahip fotodirenç tabaka ile kaplanır. Daha sonra elastomerik bir malzeme olan PDMS (Poli dimetil siloksan) polimeri fotodirenç kaplı bakır folyo üzerine uygulanır. Bu aşama sonrasında 1M'lık  $FeCl_3$  çözeltisi içerisinde bakır tabakası tamamen eritilir. Bakır tamamen eritildikten sonra PDMS altlık malzeme üzerinde ısıtılarak uygulanır. PDMS'in yüzey enerjisinin sıcaklık ile ters orantılı çalışması sebebiyle artan sıcaklık ile üzerindeki filmi altlık üzerinden kolaylıkla bırakır. Şekil 6'da borofen filminin altlıktan ayrışmasına ait görseller yer almaktadır.



**Şekil 6.** Borofen Tabakasının Bakır Altlıktan Ayrışması

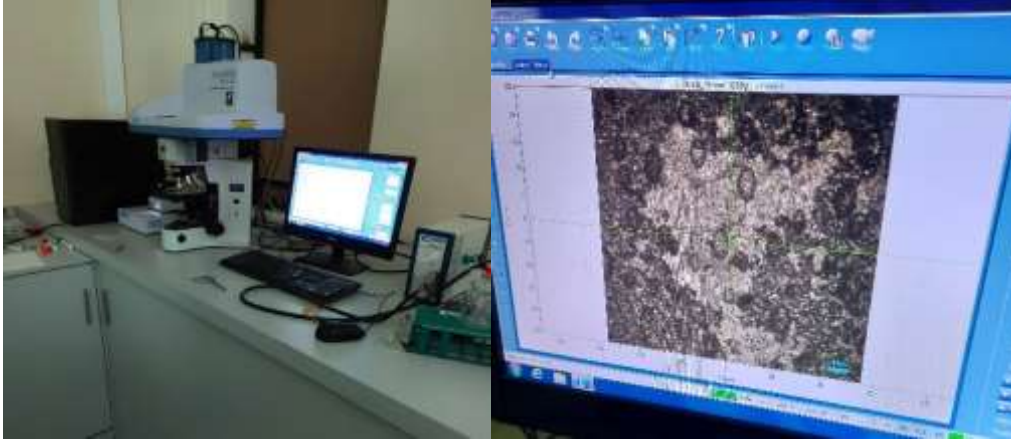
Bakır altıklarından ayrılan ve şeffaf bir fiziksel yapıda olan borofen sentezlerine ait yapı analizleri 500 nA prob akımı, 6Å çözünürlüğe sahip FESEM JEOL JSM 7900F cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların elektriksel iletkenlikleri ASTM D4935-10 standardına göre test edilmiştir. Rohde&Schwarz ZVL-Network analizörü ile elektromanyetik sinyal üreten ve geri dönüşün ölçüldüğü dört nokta prob testi gerçekleştirilmiştir.

## Bulgular ve Tartışma

Bakır folyo üzerinde sentezlenen borofen ince film tabakalarının karakterizasyonu için aşağıda başlıklar halinde verilen analizler gerçekleştirilmiştir.

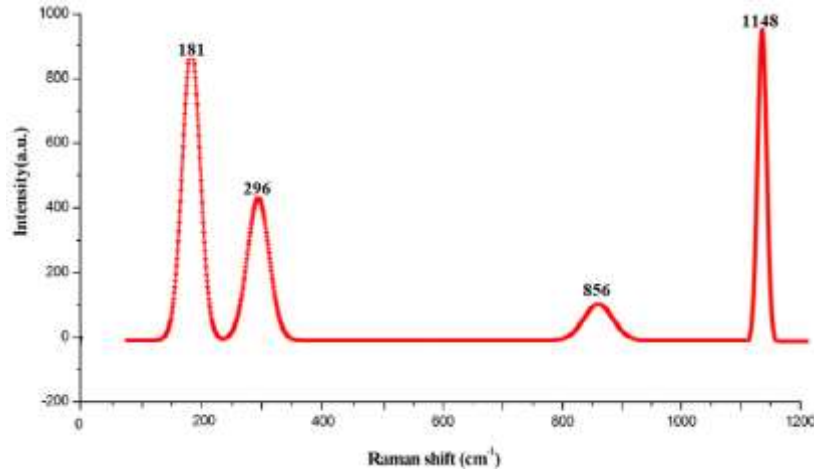
### Spektroskopi Analizleri

Şekil 7’de, bakır üzerinde sentezlenen borofen numunesinin Raman Mikroskobu ile gerçekleştirilen görseli yer almaktadır. Bu testin ilk aşamasında kaplamada analize uygun olan yüzeyin tespiti gerçekleştirilir. Optik mikroskopta yapılan yüzey taramasının ardından uygun görünen noktada spektrometre analizi yapılır.



**Şekil 7.** Borofen Kaplamaların Raman Mikroskobu Görseli

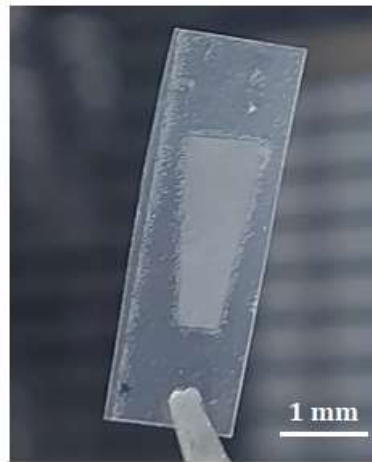
Şekil 8’de borofene ait Raman Saçılması gösterilmektedir. Bu spektrumda 4 adet pik ve 2 temel fonon modu bulunmaktadır. Bu fonon modları  $D_1$  ( $181 \text{ cm}^{-1}$ ),  $2D_1$  ( $296 \text{ cm}^{-1}$ ),  $D_2$  ( $856 \text{ cm}^{-1}$ ) ve  $2D_2$  ( $1148 \text{ cm}^{-1}$ ) olarak adlandırılmaktadır. Bu durum borofenin diğer 2D malzemelerden farklı bir konuma gelmesine sebep olan polimorfik özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır.  $181 \text{ cm}^{-1}$  ve  $296 \text{ cm}^{-1}$  pikleri  $\beta_{12}$  fazını temsil eder.  $\beta_{12}$  fazının oluşması neticesinde önce  $D_1$  bandı oluşmaktadır.  $2D_1$  bandı ise ikinci derece Raman Sinyali’ni göstermektedir. Bu sinyal oldukça yüksek momentuma sahip olan bölge sınırı fononlarına ait spektrumdur ve Raman Spektrumu olarak adlandırılır. Bu bandın aralığı borofen sentezinin başarılı bir şekilde yapıldığı, bandın şiddeti ve spektral genişliği ise büyütülen örnekteki tabaka sayısı ile ilgili bilgi vermektedir.  $D_1$  piki ile  $2D_1$  pikinin mukayesesinde,  $2D_1$  pikine ait şiddetin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yapıdaki katlanmadan meydana gelmektedir.  $856 \text{ cm}^{-1}$  ve  $1148 \text{ cm}^{-1}$  ise  $D_2$  ve  $2D_2$  bantlarını temsil etmektedir ve  $X_3$  borofen fazına aittir. Burada  $2D_2$  piki,  $D_2$  pikinden daha yüksektir, bu da çok fazlı borofen tabakasının bakır altlık üzerinde sentezlendiğinin bir göstergesidir. Parakhonskiy (2011) araştırmasında boronun Raman Spektrum analizinde birden çok pik gözlemiş ve bu piklerin  $\alpha$  ve  $\beta$  boron fazlarına ait olduğunu belirtmiştir. Bu da polimorfik özelliğin temel bir göstergedir.  $181 \text{ cm}^{-1}$ ,  $296 \text{ cm}^{-1}$  ve  $856 \text{ cm}^{-1}$  pikleri ise  $\beta_{12}$  ve  $X_3$  boronu temsil etmekte ve yapıdaki bor atomlarının farklı fazlarda borofen oluşturma eğilimin ifade etmektedir. (Zhao vd., 2019).



**Şekil 8.** CVD Tekniği ile Bakır Altlık Üzerinde Sentezlenen Borofen Tabakasına ait Raman Spektrumu

### Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri

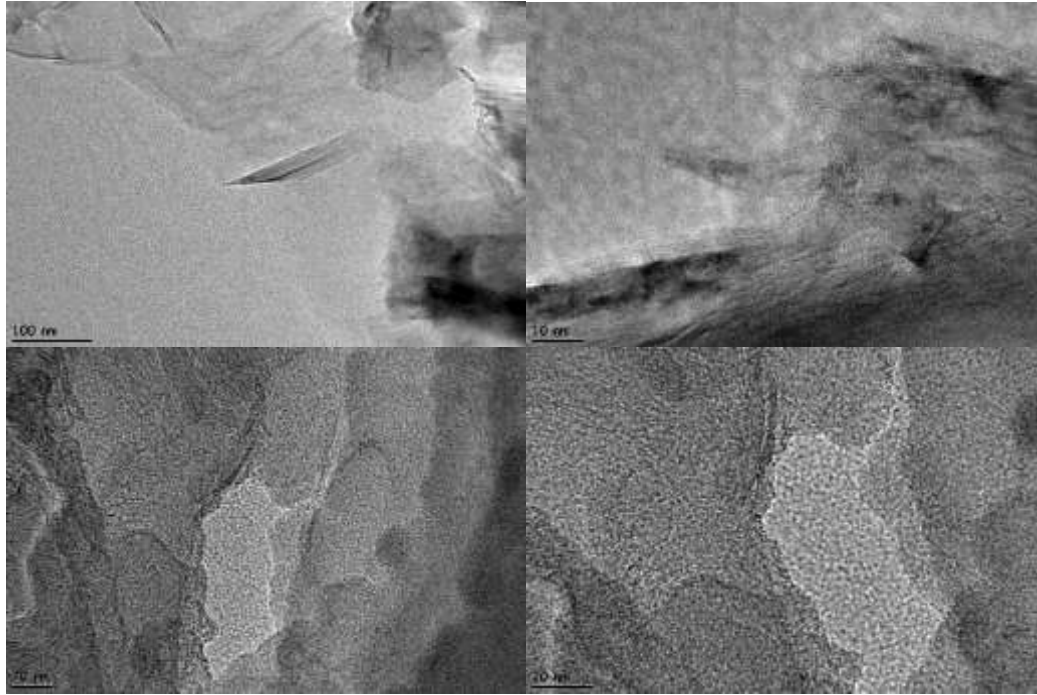
Sentezlenen borofen tabakalarının SEM analizleri için numune hazırlıkları gerçekleştirilmiştir. Bunun için kaplamalar bakır altlıklardan ayrılmış ve şeffaf hale getirilmiştir. Şekil 9'da borofen kaplamasının SEM öncesine ait hazırlık aşaması yer almaktadır.



**Şekil 9.** Tek Katmanlı Borofen SEM Numunesi

Borofen sentezlerine ait yapı analizi FESEM JEOL JSM 7900F cihazı ile gerçekleştirilmiş olup elde edilen nano yapı Şekil 10'da gösterilmiştir. Borofen tabakasının katlanmış kenar görüntüleri SEM'de net bir şekilde gözlenmiştir. Bu durum; oksijen içeren hidroksil organik bağların kalıntılarında kaynaklanmıştır. Xie (2020) gerçekleştirdiği çalışmada benzer kırışıklıkları gözlemiş ve bunun iki sebepten kaynaklandığını belirtmiştir. Birincisi; bakır altlıktan kaplamanın ayrılması esnasında borofen ile altlık malzeme arasında boşluk bulunması, ikincisi ise CVD'nin soğutma aşamasında meydana gelen termal genişleme farklarıdır. Deneysel çalışmalardan önce gerçekleştirilen literatür araştırmalarında bu riskin olabileceği göz önünde bulundurularak borofen ile altlık malzeme arasında boşluk kalmaması için transfer baskı tekniği kullanılarak boşluk oluşumu engellenmiştir. Yine aynı şekilde CVD'de sistem oda sıcaklığına gelinceye kadar argon gazı altında kontrollü soğutma gerçekleştirilerek termal genişleme farklarından kaynaklanan kırışıklıkların önüne geçilmiştir. Hidroksil bağlarından kaynaklanan kırışıklık ise CVD ile gerçekleştirilen kaplamalarda gözlenen normal bir durumdur (Wang, 2019). Bu aşamada nano borofen kümesi bakır altlık yüzeyinde Cu (111) düzleminde büyüme mekanizması ile sentezlenmiştir. Bu mekanizma, difüzyon ve hızlı soğuma aşamalarından oluşmaktadır. Parçalanmış bor atomları yüksek sıcaklıkta gerçekleşen tavlama aşamasında yığın halinde difüze olur, soğutma süresi boyunca bor atomları tekrar bakır yüzeyine çıkarak borofen filmini oluşturur. Bir başka ifadeyle bor

atomları Cu (111) düzlem yüzeyine çarpıp çökeler ve borofen tabakasını oluşturur. Bu oluşum Şekil 10'daki SEM yapı analizinde kademeli bir şekilde gözlenmektedir.



**Şekil 10.** Borofen Nano Yapısı

950 °C'den kademeli olarak sıcaklık ve çöktürme süreleri arttırılan numune yüzeylerinin fiziksel görüntüleri, iletkenlik durumları ve elektriksel direnç ölçümlerine ait veriler Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Borofen Kaplamaların Fiziksel ve Elektriksel Özellikleri

No	Sıcaklık (°C)	Süre (Dk.)	Numune Yüzeyi	İletkenlik	Elektriksel Direnç( $\Omega$ /sq)
1	1035	60	Mat	Yok	$2 \times 10^6$
2	1035	15	Mat	Yok	$1 \times 10^5$
3	1035	5	Mat	Yok	200
4	1035	1,5	Mat	Var	2
5	1035	1	Mat	Var	1,8
6	1000	1	Mat	Var	1,4
7	985	1	Mat	Var	1,2
8	975	1	Mat	Var	1
9	960	1	Mat	Var	0,1
10	950	1	Mat	Var	0,2

Bu aşamada ince kaplamalar için tabaka direnci ölçüm modu seçilmiştir. Tabaka direncinin birimi  $\Omega$ 'dur ancak uygulamada ince film kaplamaların alan bazında ele alınması sebebiyle genellikle  $\Omega$ /sq veya  $\Omega$ /□ kullanılmaktadır. Bu çalışmada borofen tabakalarının kare numuneleri ölçülmüş ve direnç değerinin sayısal karşılığı ele alınmıştır, bu sebeple birim olarak  $\Omega$ /sq kullanımı tercih edilmiştir. 950 °C'de sentezlenen borofen filmlerde 0,2  $\Omega$ /sq gibi oldukça düşük bir öz direnç ölçülmüş ve iletken özellik göstermiştir. 1035 °C'ye kadar yapılan sentezlerin ölçümleri 2  $\Omega$ /sq öz dirençe sahipken CVD işlem süresinin artmasıyla öz direnç değeri de artış göstermiş olup  $2 \times 10^6$   $\Omega$ /sq ölçülerek yalıtkan bir özellik sergilemiştir. Bunun sebebi, yüzeyde oluşan borofen tabakalarının aşırı difüzyonu sonrasında tane büyümesi ile altıgen borofen yapısını kaybedip iletken olmayan boroksit formuna dönüşmesidir. Şekil 11'de 1035 °C'de 60 dakika boyunca gerçekleştirilen senteze ait görüntü yer almaktadır. Yüzeydeki



borofen yapısının bozulmuş olduğu net bir şekilde tespit edilmiş olup gerçekleştirilen iletkenlik testinden de olumlu bir sonuç elde edilmemiştir.



**Şekil 11.** 1035 °C’de 60 Dakika Sentezlenen Borofen Yüzey Yapısı

### Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, CVD yöntemi ile borofen kaplamalar bakır altlıklar üzerinde başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Buna göre 950 °C’nin altındaki sıcaklıklarda borofen sentezi gözlenmemiş olup 1035 °C üzerinde ise borofenin iletkenlik ve homojen yüzey özelliğini kaybettiği tespit edilmiştir. Borofen tabakaların karakterizasyonunda Raman Spektroskopisi kullanılmış olup borofeni temsil eden 2 temel fonon modları  $181 \text{ cm}^{-1}$  ve  $1148 \text{ cm}^{-1}$  spektroskopide net bir şekilde gözlenmiştir. Elektron mikroskopunda gerçekleştirilen araştırmalar neticesinde nano yapıya sahip borofen tabakasının bakır altlık yüzeyindeki sentezlenmesine ait aşamalar tespit edilmiştir. Tabaka direnci ölçüm testleri neticesinde 950 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda sentezlenen numuneler oldukça güzel iletken özellik sergilerken 1035 °C’nin üzerinde ve 5 dakikayı aşan sentezlerde iletkenlik ortadan kalkmış ve heterojen bir yüzey elde edilmiştir.

Mevcut CVD sisteminin tek hazneli olması sebebiyle kuvars tüp sistem içerisinde hareket ettirmek suretiyle iki farklı sıcaklık alanı oluşturulmuştur. Aynı tüp içerisinde farklı iki alan oluşturabilecek kapasitedeki CVD sistemlerinin oluşturulması mümkündür. Bu çalışma ile CVD tekniği ile bakır folyo üzerinde farklı karakterde borofen kaplamaların elde edilebileceği tespit edilmiştir. Borofen sentez sıcaklığının 1035 °C’den 950 °C’ye düşürülmesi ile iletkenliğin arttığı tespit edilmiştir. Tüm yüzeyler mat olmakla birlikte farklı parametreler ile yüzey özelliklerinin geliştirilebileceği gözlenmiştir. Elde edilen verilerin yaygınlaştırılması ve CVD sisteminin geliştirilmesi ile Raman Spektrometresi’nde birden fazla D bandının gözlenmediği tek fazlı borofen tabakalarının sentezi mümkün olabilecektir. Ayrıca borofenin daha nitelikli özelliklerine ait çalışmaların ilerleyen zamanlarda geleceği bu özgün araştırma ile net bir şekilde ortaya konmuştur. Hegzagonal nano yapı görüntüleri için geçirimli elektron mikroskobu ile gerçekleştirilecek olan araştırmalar ile daha net yapı görsellerinin elde edilmesinin önü açılmıştır.

Tamamlanan bu çalışma ile farklı altlık malzemeler ve kaplama parametreleri kullanılarak borofenin yeni özelliklerinin tespit edilmesine ilişkin potansiyel araştırmaların temeli oluşturulmuştur. Özellikle altın altlıklar üzerine borofen sentezi hakkında yapılacak akademik çalışmalar plazmonik sensörlere yeni bir bakış açısı getirecektir. Bu makalenin öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde; borofenin birçok sektörün ihtiyaçlarına cevap verebilecek, erişimi ve üretilmesi kolay, ucuz bir hammadde haline dönüşmesinin çok kısa bir süre içerisinde gerçekleşeceği tespit edilmiştir. Bunun sonucunda ülkemiz borofen üretiminde stratejik bir konuma gelecektir.

**Yazar Katkısı**

Bu makaleye ilişkin tüm çalışmalar *Erhan Özkan* tarafından yapılmıştır.

**Etik**

Bu makalenin yayınlanmasıyla ilgili herhangi bir etik sorun bulunmamaktadır.

**Çıkar Çatışması**

Makaleye ilişkin çıkar çatışması teşkil edebilecek herhangi bir durum söz konusu değildir.

**ORCID**

*Erhan Özkan*  <https://orcid.org/0000-0002-3849-6713>

**Kaynaklar**

- Bergmann, R. B., Berge, C., Rinke, T. J., Schmidt, J. ve Werner, J. H. (2002). Advances in monocrystalline thin film solar cells by layer transfer. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 74(1-4), 213-218. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00070-3)
- Faghihnasiri, M., Jafari H., Ramazani A., Shabani, M., Estalaki, S. M. ve Larson, R. G. (2019). Nonlinear elastic behavior and anisotropic electronic properties of two-dimensional borophene. *Journal of Applied Physics*, 125(14), 145107. <https://doi.org/10.1063/1.5079932>
- Kootenaeei, A. S. ve Ansari G. (2016). B36 borophene as an electronic sensor for formaldehyde: Quantum chemical analysis. *Physics Letters A*, 380(34), 2664–2668. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.06.016>
- Li, D., Tang Q. Q., He J., Li B., Ding, G., Feng C., Zhou H. ve Zhang G. (2019). From two-to threedimensional van der waals layered structures of boron crystals: An ab initio study. *ACS Omega*, 4(5), 8015–8021. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00534>
- Li, L., Zhang H. ve Cheng X. (2017). The high hydrogen storage capacities of Li-decorated borophene. *Computational Materials Science*, 137, 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.05.032>
- Mannix, A. J., Zhang Z., Guisinger N. P., Yakobson B. I. ve Hersam M. C. (2018). Borophene as a prototype for synthetic 2D materials development, *Nature Nanotechnology*, 13, 444–450. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0157-4>
- Meng, F., Chen X., Sun S. ve He J. (2017). Electronic and magnetic properties of pristine and hydrogenated borophene nanoribbons. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 91, 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.04.014>
- Mohan, V. B., Lau, K. T. ve Hui, D. ve Bhattacharyya, D. (2018). Graphene-based materials and their composites: A review on production, applications and product limitations. *Composites Part B: Engineering*, 142, 200–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.013>
- Parakhonskiy, G., Dubrovinskaia, N., Dubrovinsky, L., Mondal, S. ve van Smaalen, S. (2011). High pressure synthesis of single crystals of  $\alpha$ -boron. *Journal of Crystal Growth*, 321, 162–166, <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.02.036>
- Peng, B., Zhang H., Shao, H., Xu, Y., Zhang, R. ve Zhu, H. (2016). The electronic, optical, and thermodynamic properties of borophene from first-principles calculations. *Journal of Materials Chemistry C*, 4, 3592–3598. <https://doi.org/10.1039/C6TC00115G>
- Rana, M., Luo B., Kaiser, M. R., Gentle, I. ve Knibbe, R. (2020). The role of functional materials to produce high areal capacity lithium sulfur battery. *Journal of Energy Chemistry*, 42, 195-209. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.06.015>

- Shukla, V., Wärnå, J., Jena N. K., Grigoriev, A. ve Ahuja, R. (2017). Toward the realization of 2D borophene based gas sensor. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121(48), 26869–26876. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b09552>
- Tai, G., Hu, T., Zhou, Y. Wang, X., Kong, J., Zeng, T., You, Y. ve Wang, Q. (2015). Synthesis of atomically thin boron films on copper foils. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(51), 15473–15477. <https://doi.org/10.1002/anie.201509285>
- Tan C., Cao X., Wu X. J., He, Q., Yang J., Zhang, X., Chen, J., Zhao W., Han, S. ve Nam, G. H. (2017). Recent advances in ultrathin two-dimensional nanomaterials. *Chemical reviews*, 117, 6225–6331. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00558>
- Wang, H. F., Li, Q. F., Gao, Y., Miao, F., Zhou, X. F. ve Wan, X. G. (2016). Strain effects on borophene: ideal strength, negative Poisson's ratio and phonon instability. *New Journal of Physics*, 18(7), 073016. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/7/073016>
- Wang, Z. Q., Lü, T. Y., Wang, H Q., Feng, Y. P. ve Zheng, J. C. (2019). Review of borophene and its potential applications. *Frontiers of Physics*, 14, 33403. <https://doi.org/10.1007/s11467-019-0884-5>
- Xie, Z., Meng, X., Li, X., Liang, W., Huang, W., Chen, K., ... ve Zhang, H. (2020). Two-dimensional borophene: Properties, fabrication, and promising applications. *Research*, 2020, 2624617, 1-23. <https://doi.org/10.34133/2020/2624617>
- Xu, L. C., Du, A. ve Kou, L. (2016). Hydrogenated borophene as a stable two-dimensional Dirac material with an ultrahigh Fermi velocity. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(39), 27284-27289. <https://doi.org/10.1039/C6CP05405F>
- Yiğitbaşıoğlu, H. (2004). Türkiye için önemli bir maden: Bor. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2(2), 13-25. [https://doi.org/10.1501/Cogbil\\_0000000046](https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000046)
- Zhang, C., He, Q., Chu, W. ve Zhao, Y. (2020). Transition metals doped borophene-graphene heterostructure for robust polysulfide anchoring: A first principle study. *Applied Surface Science*, 534(30), 147575. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147575>
- Zhang, Z., Mannix, A. J., Liu, X., Hu, Z., Guisinger, N. P., Hersam, M. C. Ve Yakobson, B. I. (2019). Near-equilibrium growth from borophene edges on silver. *Science advances*, 5(9), <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0246>
- Zhao, S., Wu, Y., Zhou, B. ve Liu, X. (2019). Synthesis of boron nanosheets in copper medium. *Scientific Reports*, 9(1), 17337. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53851-6>
- Zhou, H., Bhattacharya, T., Tran, D., Siew T. S. T. ve Khambadkone, A. M. (2010). Composite energy storage system involving battery and ultra-capacitor with dynamic energy management in micro grid applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(3), 923-930. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53851-6>
- Zhou, K., Otero-Mato, J. M., Hassan, F. E. H., Fahs, H., Vaezzadeh, M., López-Lago, E., Gallego, L. J. ve Varela, L. M. (2021). Tuning the hybrid borophene-/graphene-ionic liquid interface: Effect of metal cations on the electronic and photonic properties. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114759. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114759>