



## Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Tek ve Çok Katmanlı Grafen Sentezi ve Karakterizasyonu

### Synthesis and Characterization of Single and Multilayer Graphene by Chemical Vapor Deposition Method

Erhan Özkan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dikkan Arge Merkezi, Bornova, İzmir, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 26/12/2022

Kabul / Accepted: 31/01/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2023

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2023

#### Öz

Bu çalışmada son yılların keşfedildiği zamandan itibaren üstün özellikleri sayesinde dünya çapında endüstrinin yönünü değiştirmeyi başaran ve bu sebeple oldukça ilgi çeken malzeme durumuna gelen grafenin sentezlenmesi ve karakterizasyonuna ait detaylı bilgiler paylaşılmıştır. Karbon atomlarının hekzagonal şekilde dizildiği nano ölçekteki iki boyutlu bir formu olan grafenin; fayda-maliyet, yatırım ve zaman parametreleri ele alındığında şu ana kadar gerçekleştirilen en uygun üretim yöntemi olan kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile sentezlenmesinde; büyüme sıcaklığı, altlık malzeme, tavlama süresi, basınç, kullanılan gazların kalitesi ve akış miktarları gibi birçok parametre etkilidir. Bu parametrelerin kombinasyonlarına göre grafen yapısı farklılıklar göstermektedir. Bu çalışma kapsamında tek katmanlı ve çok katmanlı grafen sentezlenmesinin detayları araştırılmıştır. Tek katmanlı ve çok katmanlı üretilen grafen filmlerin karakterizasyonunda Raman Spektroskopisi kullanılmıştır. Filmlerin yapı kontrolü Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Tek katmanlı ve çok katmanlı grafen film tabakalarının üretimi ve karakterizasyonu için gerekli olan parametreler tespit edilmiştir.

#### Anahtar Kelimeler

*“Grafen, CVD, Tek Katmanlı Grafen, Çok Katmanlı Grafen, Raman, SEM.”*

#### Abstract

In this study, detailed information about the synthesis and characterization of graphene, which has been able to change the direction of the industry around the world thanks to its superior properties since its discovery in recent years, and has therefore become a very interesting material, has been shared. Graphene, which is a two-dimensional form at the nanoscale in which carbon atoms are arranged hexagonally; when the cost-benefit, investment and time parameters are taken into consideration, it is synthesized by chemical vapor deposition method, which is the most suitable production method so far; many parameters such as growth temperature, substrate material, annealing time, pressure, quality of the gases used, and flow rates are effective. Graphene structure differs according to the combinations of these parameters. In this study, the details of synthesizing single-layer and multi-layer graphene were investigated. Raman Spectroscopy was used in the characterization of monolayer and multilayer graphene films. The structures of the films were checked by Scanning Electron Microscopy (SEM). The necessary parameters for the producing and characterization of single-layer and multi-layer graphene film layers were determined.

#### Key Words

*“Graphene, CVD, Single Layer Graphene, Multilayer Graphene, Raman, SEM.”*

## 1. Giriş

Karbonun doğada farklı allotropik yapıları bulunmaktadır. Amorf yapıdaki karbon kömür olarak bilinirken kübik kristal yapıdaki karbon elmas, hekzagonal kristal kafes yapısı grafit olarak adlandırılmaktadır. Grafite hekzagonal yapıdaki katmanlı karbonlar birbirlerine zayıf Van der Waals bağları ile tutunurken, altıgen yapısı içerisinde yer alan karbonlar ise birbirlerine güçlü kovalent bağlar ile tutunurlar. Grafen, grafitteki zayıf Van der Waals bağlarının deformasyona uğrayarak meydana gelen iki boyutlu yapı olarak keşfedilmiştir. Altıgen yapıdaki iki boyutlu karbon atomlarının bu formu grafene üstün özellikler katmaktadır. Tek katmanlı grafen helyum atomları dahil tüm atomlara geçişi sağlayamayacak mertebede yoğundur. Grafen; ısıyı bakırdan on kat daha iyi iletirken, elektronların hızları ise silisyuma (silikon) göre yüz kat daha hızlıdır (Barkan, 2022).

Hekzagonal yapıda birbirlerine güçlü kovalent bağları ile bağlanmış olan karbon atomları grafeni şimdiye kadar bilinen en güçlü malzeme haline getirmiştir (Johnson, 2019). Çelikten yaklaşık 100 ila 300 kat daha güçlü olan grafen, karbonun bir diğer allotropu olan elmasa kıyasla ısıyı daha iyi iletmektedir. (Ambrosi ve ark., 2012). Metrekaresi 0,77 mg (miligram) ağırlığındaki grafen, esnekliği ve üst düzey yapışma özelliği ile karmaşık şekilli malzemelerin yüzeylerinde kaplama olarak kullanılabilir (Jing ve ark., 2013).

Grafenin üstün özellikleri bu malzemeyi malzeme biliminin odak noktası haline getirmiş olmakla birlikte seri üretimi için teknik ve ekonomik Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Geim ve Novoselov 2011 yılında kendilerine Nobel ödülü kazandıran çalışmada yapışkan bir bant ile grafitin katmanlarını basit bir şekilde ayırmış ve en yüksek kalitedeki grafeni elde etmişlerdir ancak bu tekniğin oldukça uzun süre alması sebebiyle bir mikrometre grafenin üretim maliyeti 1000 dolar mertebelerine ulaşmaktadır (Peplow., 2013). Üretim süresini hızlandırmak ve maliyetleri aşağıya çekmek adına grafenin alternatif üretim yöntemlerinin araştırmaları devam etmiş ve günümüzde kimyasal buhar biriktirme (CVD-Chemical Vapour Deposition) yöntemi yaygın olarak tercih edilmiştir. CVD yöntemi ile karbon kaynağı olarak metan gazı ve altlık malzeme olarak folyo formundaki bir metalin üzerinde 1000 °C sıcaklıkta grafenin sentezlenmesi sağlanır. Sentezlenen grafen kimyasallar yardımıyla polimer veya silika bir tabakaya aktarılır. Bu yöntem ile grafen tabakaların büyüklüğü yüksek miktarda santimetrekarelere ulaşabilir, dolayısıyla da grafenin bir metrekare maliyeti 100.000 doların altına düşebilmektedir ancak bu yöntem ile elde edilmiş olan grafen çeşitli kusurlar barındırmaktadır. CVD ile yüksek maliyetli titanyum, kadmiyum ve nikel gibi metallerin daha düşük maliyetli folyolar ile kullanımı 2015 yılında Glasgow Üniversitesi ve Bilkent Üniversitesi'nin ortak çalışmaları ile geliştirilmiştir. (Jeffrey., 2015) ancak CVD uygulamalarında gerekli olan yüksek sıcaklık mertebelerinin endüstriyel süreçler açısından çok yüksek bulunması sebebiyle sıcaklığı düşürme çalışmaları devam etmektedir (Millholland, 2018).

Her yeni malzemenin ürün yaşam eğrisinin başında yaşamış olduğu sıkıntılar grafen için de geçerlidir. Örnek olarak 1950'li yıllarda keşfedilen karbonfiber malzemesi yaklaşık kırk yıl sonra yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve üretim tekniklerinin geliştirilmesini beklemek zorunda kalmıştır. (Spanos ve ark., 2015). Çok yeni bir teknoloji olan grafenin üretim parametrelerinin standartlaştırılması ve maliyetlerinin düşürülmesi için çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmaların neticesinde grafen üretim maliyetlerinin çok yakın bir zamanda düşmesi beklenmektedir. Örnek olarak Çin ve Singapurlu bilim insanları 2018 yılında gerçekleştirdikleri çalışma neticesinde organik çözücü miktarındaki iyileştirmeler ile grafenin üretim maliyetlerinin yaklaşık yüz kat düşürecek bir yöntemi kazandırdıklarını yayımlamışlardır (Dong ve Chen, 2018). Kansas State Üniversitesi'nde gerçekleştirilen bir çalışma ile grafen "patlatma" tekniği ile üretilerek patent alınmıştır. Bu yöntemde sıkıştırılmış hidrokarbon gazı oksijen ile temas edip bir buji yardımıyla patlatılmış ve grafen tabakaları elde edilmiştir. Oldukça basit ancak riskler barındıran bu yöntem grafenin seri bir şekilde üretilmesinin önünü açmıştır. (Galeon, 2018).

2018 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde yüksek kaliteye sahip grafen şeritlerin seri üretimini sağlayacak bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu şeritler ile deniz suyunun arıtılması, biyolojik ayrıştırma, protein, büyük çaplı iyon ve nanopartikülleri filtreleyebilecek kapasitede olduğu tespit edilmiştir (Chu, 2018). CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) tarafından 2007 senesinde grafen üretimi için CVD'ye benzer bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde atmosferik kontrollü bir ortama gerek kalmadan soya yağından oda sıcaklığında grafen katmanları elde edilmiş ve "GraphAir" olarak tescillenmiştir (CSIRO, 2017). Seul Üniversitesi ve Graphane Square Inc. Şirketi'nin 2018 yılında tamamladıkları ortak proje neticesinde grafen ve grafen gibi iki boyutlu malzemeleri üretebilmek için lazer yazıcıların kullanılması mümkün hale gelmiştir. Oldukça ilgi uyandıran bu sıra dışı yöntemde lazer yazıcıların tonerinde grafit, kaplanacak olan altlık malzemelerde ise kâğıt yerine bakır folyolar tercih edilmiştir. Bu şekilde üretilen grafen kaplı bakır folyolar geliştirilerek "rulodan ruloya yöntemi" ile grafenin seri üretimine farklı bir bakış açısı getirilmiştir.

Yukarıda detaylı olarak aktarılan durumlardan da anlaşılacağı üzere grafenin seri üretimin yapılabilmesi için arayışlar halen sürmektedir. Günümüzde ülkemizin de dahil olduğu araştırmalardan sorumlu 250'den fazla firma grafen sentezi ve grafenin seri üretimi için çalışmalarına devam etmektedir. Bu firmalarda gerçekleştirilen çalışmalarda farklı sentez yöntemlerinin tercih edilmesi sebebiyle farklı kalitede ve fiziksel şartlardaki grafen ürünleri pazara sunulmaktadır. Gerçekleştirilen bir araştırmaya göre 60'tan fazla grafen çeşidi pazarda yer almaktadır. Bu ürünlerin ise 45'ten fazla varyantının olduğu ortaya konulmuştur ancak bu varyantların tek bir ortak noktası bulunmamaktadır. Piyasaya sürülen ürünlerin %60'ında katman sayısı tanımlanmamaktadır (Narayanan ve ark., 2012). Bu durumun handikabı ise grafen tedarik eden firmaların giriş kalite kontrollerini üst düzey bir laboratuvarında yapma

zorunluluğunun olmasıdır. Bu tespitleri yapabilen laboratuvarların test ve analiz maliyetleri numune başına 15.000 dolar seviyelerine çıkabilmektedir (Liu ve ark., 2014).

Bu çalışmanın özgün tarafı literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile farklı metal altlıklar ve parametreler kullanılarak tek katmanlı ve çok katmanlı grafen tabakaların üretimi ve karakterizasyonunun bir arada sunulmuş olmasıdır. Bu şekilde aynı deney düzeneğinde gerçekleştirilen sentezler ile parametre ve altlık malzemelerin katmanlara olan etkisi somut bir olarak ortaya konulmuş ve mukayese kriterleri net bir şekilde sunulmuştur. Elde edilen grafen tabakaların karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için transfer baskı tekniğinden faydalanılmıştır. Grafen tabakasının yapısal karakterizasyonu Raman spektrometresi ile gerçekleştirilmiş olup tek katmanlı ve çok katmanlı mikro yapılar Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile tespit edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Tek katmanlı ve çok katmanlı grafen üretimi FirstNano EasyTube 101 marka kimyasal buhar biriktirme sisteminde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de kurulu kimyasal buhar biriktirme sistemi gösterilmiştir.



Şekil 1. Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi

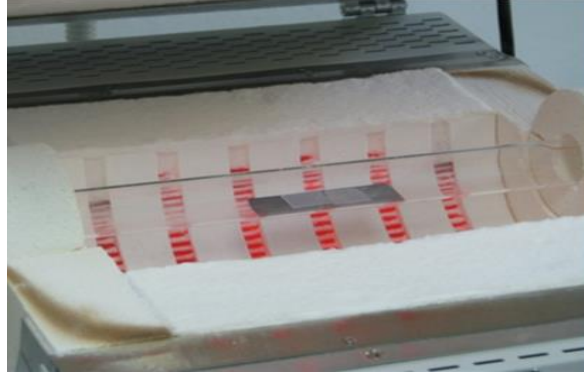
Yüksek saflık derecesindeki metan gazı ( $\text{CH}_4$ ) karbon kaynağı, yüksek saflık derecesine sahip hidrojen gazı ( $\text{H}_2$ ) indirgeyici, Argon gazı (Ar) taşıyıcı, 0,025 mm kalınlıkta ve %99,8 saflıkta bakır folyo ile %99,7 saflıkta nikel folyo katalizör olarak kullanılmıştır.

### 2.1. Tek Katmanlı Grafen Film Sentezi

İnce bakır levhalardan (0,025 mm kalınlıkta) 5cm x 5cm ölçülerinde altlık malzemeler kesilerek hazırlanmıştır. Bakır altlık malzemelerin üzerinde gerçekleşecek sentezleme öncesinde folyoların yüzey temizliği kritik bir öneme sahiptir. Folyolar üzerinde sentezlenecek grafen ince film kaplamaların kararlı, homojen ve pürüzsüz bir yapıda olması gerekmektedir. Bu amaçla bakır folyolar aseton, izopropanol ve saf su ultrasonik banyolarından geçirilerek ön hazırlıklar yapılmış sonrasında azot gazı ile atmosferik ortamda kurutulmuştur. Ön temizleme işleminin ardından bakır altlık malzemeler vakum odasına alınmıştır. Tek katmanlı grafen sentezinin parametreleri için literatürden ve önceki çalışmalarımızdan yararlanılmıştır. Bakır yüzeyindeki oksitleri gidermek amacıyla 50 mili Tor basınç, 100 sccm hidrojen gazı altında sistemin 1035 °C’ye ulaşması beklenmiştir. Sistemin bu sıcaklığa ulaşması ve bakır yüzeyindeki oksitlerin temizlenmesi 85 dakika sürmüştür. Sistem sıcaklığı 1035 °C’ye ulaşması sonrasında grafen sentezi için 1 dakika süresince 10 sccm metan gazı karbon kaynağı olarak sisteme yüklenmiştir. Sonrasında metan gazı kapatılarak sistemin oda sıcaklığına kadar soğutulması sağlanmıştır, bu işlem 30 dakika sürmüştür.

### 2.2. Çok Katmanlı Grafen Sentezi

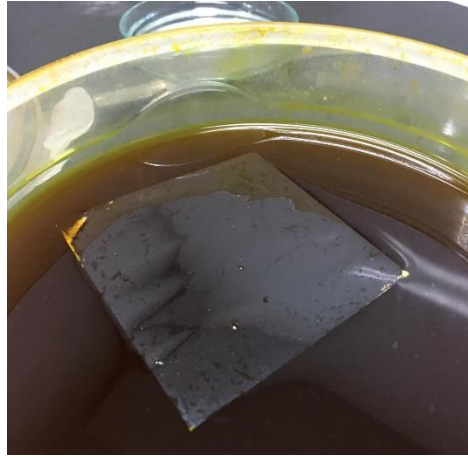
0,025 mm kalınlığa sahip nikel folyolar 5cm x 5cm ebadında kesilmiştir. Çok katmanlı grafen sentezinin parametreleri için literatürden ve önceki çalışmalarımızdan yararlanılmıştır. Yüzeyin aktif hale gelmesi için 20 mili Tor basınç elde edilinceye kadar sisteme 1000 sccm argon gazı yüklenip sıcaklık 875 °C’ye gelinceye kadar 100 sccm argon ve 100 sccm hidrojen gazı sisteme verilmiştir. Fırın 35 dakikada oda sıcaklığından 875 °C’ye gelecek şekilde ayarlanmıştır. 875 °C’de 25 dk. 35 sccm metan gazı karbon kaynağı olarak fırına iletilmiştir. 25 dk sonunda grafen üretimi tamamlanmış olup fırın ve metan gazı beslemesi kesilmiştir. Fırının oda sıcaklığına gelmesi 15 dk sürmüştür. Şekil 2’de bu işlemin gerçekleştiği ortam gösterilmiştir.



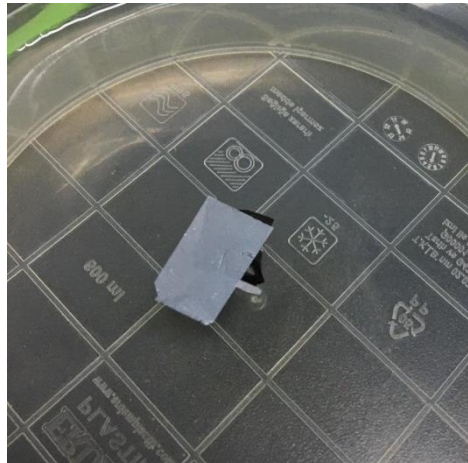
Şekil 2. CVD'de Grafen Sentezi

### 2.3. Transfer Baskı Tekniği ile Grafen Katmanlarının Altlıklardan Ayrıştırılması

Bakır üzerinde tek katmanlı ve nikel üzerinde çok katmanlı olarak sentezlenen grafen katmanının altlık malzemelerden ayrılması amacıyla transfer baskı tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemde kimyasal buhar biriktirme metodu ile sentezlenen grafen filmlerin üzeri yaklaşık olarak 1  $\mu\text{m}$  kalınlığında fotodirenç ile kaplanır. Daha sonra elastomerik bir malzeme olan PDMS polimeri fotodirenç kaplı bakır folyo üzerine uygulanır. Bu basamaktan sonra bakır tabakası 1M'lık  $\text{FeCl}_3$  çözeltisi içerisinde eritilir. Bakır tamamen eridikten sonra PDMS istenilen altlık üzerine uygulanarak ısıtılır. PDMS in yüzey enerjisi sıcaklık ile ters orantılı olduğu için üzerinde bulunan filmi altlık üzerine bırakır. Şekil 3'te tek katmanlı grafen filminin altlıktan ayrışması yer almaktadır.



Şekil 3. Tek Katmanlı Grafenin Bakır Altlıktan Ayrışması



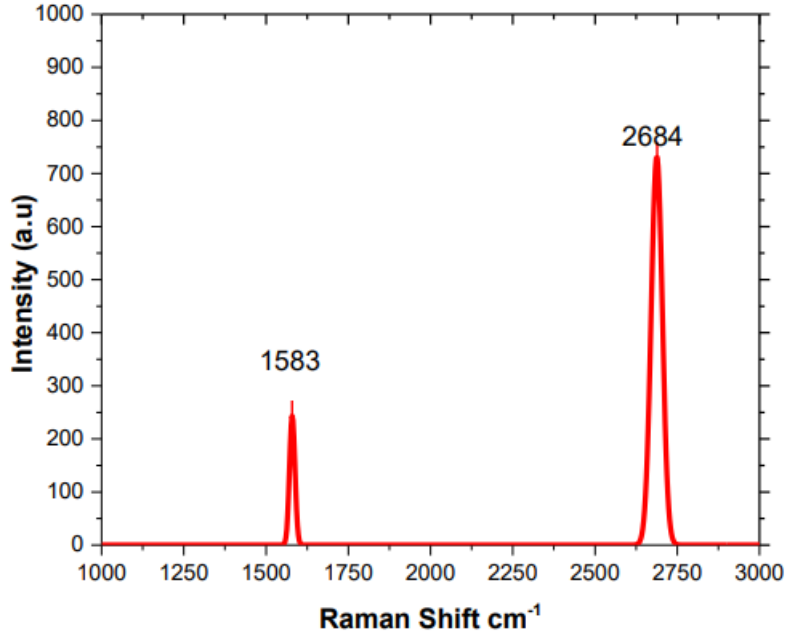
Şekil 4. Çok Katmanlı Grafen Tabakasının Nikel Altlık Malzemesinden Ayrıştırılması

### 3. Bulgular ve Tartışma

Bakır folyo ve nikel folyo üzerindeki grafen ince film tabakalarının karakterizasyonu için aşağıdaki analizler gerçekleştirilmiştir.

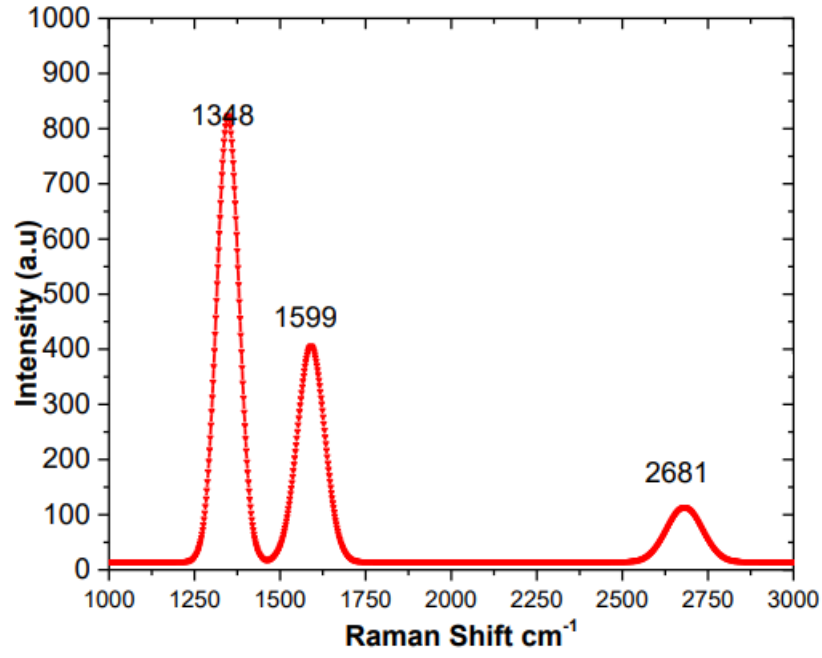
#### 3.1. Raman Spektroskopisi Analizleri

Şekil 5, bakır üzerinde sentezlenen grafen numunesinin Raman saçılmasını göstermektedir. Bu spektrumda 2 tane phonon modu vardır. Bu phonon modları sırasıyla G (~1550  $\text{cm}^{-1}$ ), ve 2D (~2700  $\text{cm}^{-1}$ ) olarak isimlendirilmektedir. D bandı grafen üzerinde bulunan kusurlardan dolayı oluşmaktadır ancak sentezlenen bu filmde D bandı gözlenmemiştir. Bu da büyütülen örnekte kusursuz yakın grafen yapısının elde edildiğinin bir ispatıdır. 2D piki ise ikinci derece bir Raman sinyalıdır. Momentumu çok yüksek olan zone boundary fononlarının Raman spektrumudur. Bu pikin spektral genişliği ve şiddeti bize büyütülen örneğin tabaka sayısı hakkında fikir vermektedir. 2D pikinin şiddeti G pikinin şiddetinin iki katından daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da bize büyütülen grafenin tek katmanlı olduğunu göstermektedir. Daha önce verilen bilgilerden yola çıkarak Şekil 5'te verilen değerler incelendiğinde bu adımda gerçekleşen en iyi değer,  $I_{2D}/I_G = 3,20$  ve  $\text{FWHM} = 30 \text{ cm}^{-1}$  değerine sahip 60 dakikalık büyütme işlemine ait olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Kimyasal buhar biriktirme metodu ile bakır tabaka üzerinde büyütülmüş grafen tabakasının Raman saçılma spektrumu

Nikel üzerine sentezlenen ince filmlerin spektrumunda birden fazla sayıda pik görülmüştür. D pikinin oluşması kusurların varlığının bir göstergesidir. Artan tabaka sayısı G pikinin şiddetini artırırken 2D pikinin şiddetinin azalmasına sebep olmuştur. Bu da sentezlenen ince film grafen tabakalarının çok katmanlı bir yapıda olduğunun göstergesidir. Şekil 6'da bu durumun gözlendiği Raman spektrumu yer almaktadır. G ve 2D bantları tespit edilmiştir. Bu film için D bandı gözlenmemiş ve dolayısıyla kusursuz grafen yapısının elde edildiği düşünülmektedir. Çok katmanlı grafen yapısının FWHM değerleri G ve 2D için sırasıyla  $92,9 \text{ cm}^{-1}$  ve  $119,6 \text{ cm}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır.  $I_{2D}/I_G$  oranı  $0,265$  tespit edilmiştir.



Şekil 6. Nikel Altlık Üzerinde Sentezlenmiş Grafene Ait Raman Spektrumu

### 3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri

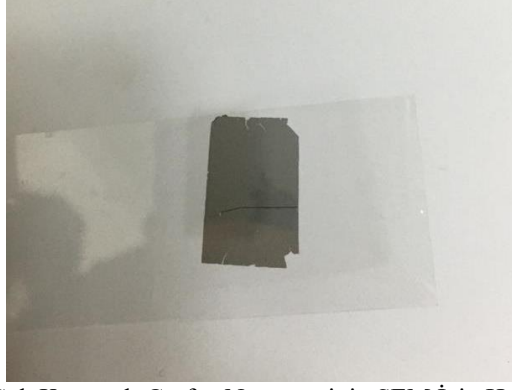
Tek katmanlı ve çok katmanlı olduğu tespit edilen grafen tabakaları SEM öncesinde numune hazırlıkları gerçekleştirilmiştir. Şekil 7’de tek katmanlı grafenin SEM öncesi hazırlık aşaması gösterilmiştir.



Şekil 7. Tek Katmanlı Grafen SEM Numunesi

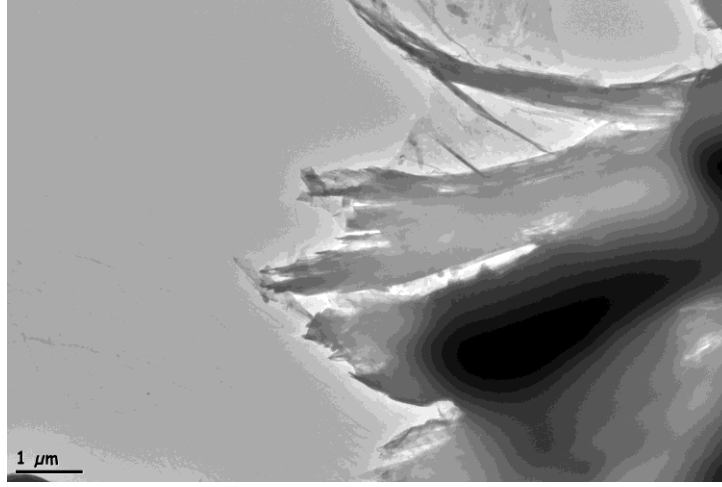
Çok katmanlı grafen numunesinin SEM öncesindeki hazırlıkları Şekil 8’de gösterilmiştir.





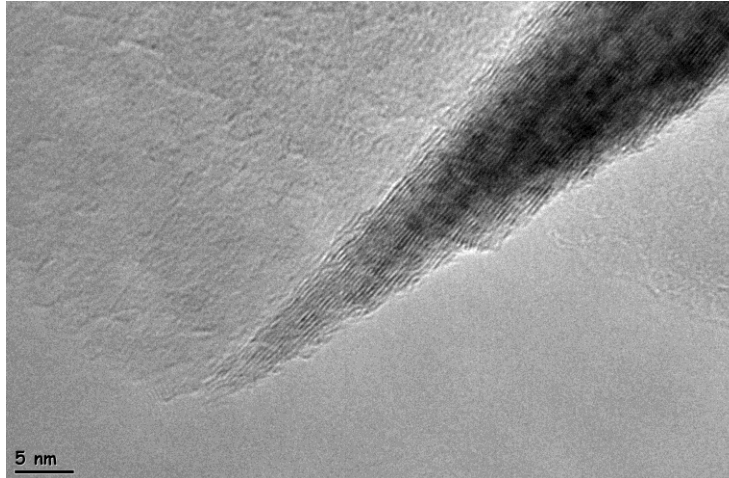
Şekil 8. Çok Katmanlı Grafen Numunesinin SEM İçin Hazırlanması

Mikroyapılar FESEM JEOL JSM 7900F görüntüleme cihazı ile gerçekleştirilmiş olup tek katmanlı grafen mikro yapısı Şekil 9’da yer almaktadır. Grafen tabakalarının kenarlarından katlanması SEM görüntülerinde açık bir şekilde görülmektedir. Bu kırışıklıkların karboksil ve hidroksil gibi oksijen içeren fonksiyonel grupların kalıntıları veya transfer aşamasında altlık malzeme-grafen arasındaki boşluklardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir ayrıca soğutma esnasında bakır altlık üzerinde sentezlenen grafen film tabakasının termal genleşme farklarından olması da muhtemeldir.



Şekil 9. Tek Katmanlı Grafen Mikro Yapısı

Şekil 10’da çok katmanlı grafen mikro yapısı yer almaktadır, nikel altlık üzerinde sentezlenen çok sayıdaki katman net bir şekilde gözlenmektedir. Katmanlar arasında tek katmanda olduğu gibi herhangi bir katlama gözlenmemiş olup katmanların istifleri birbirinden ayırt edilebilmektedir. Burada altlık malzeme ile grafen film tabakaları arasında herhangi bir termal genleşme olmaması sebebiyle katlamaların olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 10. Çok Katmanlı Grafen Mikro Yapısı

#### 4. Sonuç

Yapılan bu çalışma neticesinde CVD tekniği ile bakır folyolar üzerine tek katmanlı ve nikel folyolar üzerine çok katmanlı ince grafen filmlerin sentezlenmesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İnce grafen filmlerin yapısal karakterizasyonu için Raman Spektrometresi ve Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmadan elde edilen analiz sonuçları neticesinde, CVD tekniği kullanılarak bakır folyolar üzerinde tek katmanlı ince grafen filmler elde edilmiş olup nikel folyolar üzerinde ise çok katmanlı ince grafen filmler sentezlenmiştir.

Bakır ve nikel altlık üzerinde grafen sentezlenmesi farklı mekanizmalara dayanmaktadır. Karbonun bakır içerisindeki çözünürlüğü çok düşüktür. Kimyasal adsorpsiyon/çökeltme veya yüzey büyüme mekanizması tek katmanlı grafen oluşum mekanizmasını dahi iyi açıklamaktadır. Bu büyüme epitaksiyel değildir. Karbonun nikel içerisindeki çözünürlüğünün daha yüksek olması ile epitaksiyel büyüme sağlanmaktadır. Grafenin epitaksiyel büyüme için en ideal altlığın nikel olmasının sebebi de bu mekanizmayla açıklanmaktadır.

Yüksek sıcaklıkta karbon metal içerisinde çözünebilmektedir. Karbonun metal içerisinde çözünme oranına göre grafen büyüme mekanizması farklıdır. Nikel içerisinde karbonun çözünürlüğü oldukça yüksektir, 1000 °C de nikel içerisinde karbon yüksek miktarda çözünür. Daha sonra metan gazı kesilerek örnek hızlı bir şekilde soğutulur. Karbonun çözünürlüğü sıcaklık ile ters orantılıdır. Soğuyan örnek üzerinde ince bir karbon tabakası yoğunlaşmaya başlar. Nikel içerisinden gelen karbon yüzeyde grafen büyümesini sağlamaktadır. Bu mekanizmada nikel içerisinde çözülmüş karbon miktarı ve soğutma hızı çok önemlidir. Karbon nikelin içerisinden geldiği için birden fazla grafen tabakası oluşmaktadır. Karbonun bakır içerisindeki çözünürlüğü ise nikeldekine oranla oldukça düşüktür. Bakır üzerinde grafen büyüme mekanizması yüzeye fiziksel olarak tutunan karbon atomlarının yüzeyde grafen tabakası oluşturması prensibine dayanır. Yüzeyde biriken karbon atomları grafen tabakasını oluşturur ve grafen oluşuktan sonra reaksiyon durur. Bakır üzerinde grafen büyütülmesi daha kontrollüdür ve tek katman şeklinde büyüme gerçekleşir. Tek katmanlı grafen üretimi 1035 °C'de gerçekleşirken çok katmanlı grafen 875 °C'de sentezlenmiştir.

Bu makale neticesinde elde edilen en büyük bulgu, farklı altlık malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilecek çalışmaların grafenin yeni kullanım alanlarının önünü açacak olmasıdır. Özellikle altın üzerinde grafen büyütülmesi konusundaki akademik çalışmalar plazmonik sensörler konusuna yeni bir bakış getirmiştir. Bu çalışmaların olumlu neticelenmesi sonucunda grafen birçok sektörün beklentisine cevap verebilecek ucuz, erişimi ve üretilmesi kolay bir hammadde haline gelecektir.

#### Referanslar

Abdelkader, M. R., Al-Salaymeh A., Al-Hamamre, Z. And Sharaf F.” A Comparative Analysis of The Performance of Monocrystalline and Multiycrystalline PV Cells in Semi-Arid Climate Conditions: The Case of Jordan “, Jordan Journal Of Mechanical And Industrial Engineering, Volume 4 Number 5, Pages 543-552, 2010.

Al Badwawi, R., Issa, W. R., Mallick, T. K., &Abusara, M. (2019). Supervisory control for power management of an islanded AC microgrid using a frequency signaling-based Fuzzy Logic Controller. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 10(1), 94-104.

Arcos-Aviles, D. et al. "Battery management fuzzy control for a grid-tied microgrid with renewable generation." IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2012.

Arcos-Aviles, D., Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., Guinjoan, F., "Fuzzy Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. PP, no.99, pp.1-1 doi: 10.1109/TSG.2016.2555245.

Bergmann, R.B., Berge, C., Rinke, T.J., Schmidt, J., Werner, J.H. “Advances In Monocrystalline Si Thin Film Solar Cells by Layer Transfer “Solar Energy Materials &Solar Cells, Volume 74 Issues 1-4, Pages 213-218, 2002.

Copeland, B.J., (2017), Artificial intelligence (AI), Encyclopedia Britannica, Erişim tarihi: 12.Kasım.2022.

Erkul, A., “Monokristal, Polikristal ve Amorf-Silisyum Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi ve Aydınlatma Sistemi Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, (2010).

Ghazali, A., Rahman, A.M. “The Performance of Three Different Solar Panels for Solar Electricity Applying Solar Tracking Device Under the Malaysian Climate Condition “Energy and Environment Research, Volume 2 Number 1, Pages 235-243, 2012.

Kıyancıçek. E., “Fotovoltaik Sistemlerin Boyutlandırılması İçin PSV2 Paket Programının Gerçekleştirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, Türkiye, (2013).



Kiam Heong, A., Chong, G., and Li, Y. "PID control system analysis, design, and technology." IEEE transactions on control systems technology 13.4 (2005): 559-576.

Özsoy., M.F., "Hibrit Rüzgâr-Güneş Enerji Üretim Sistemi ile Bir Elektrik Laboratuvarının Genel Aydınlatma Tasarımı" Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Afyonkarahisar, Türkiye, (2011).

Russel S., Norvig P., Artificial Intelligence, A Modern Approach, Prentice Hall, 2nd Edition, 2003.

T. Butz, Fourier Transformation for Pedestrians. Cham, New York, NY, USA: Springer, 2015.

Tektaş M. vd., Yapay Zekâ Tekniklerinin Trafik Kontrolünde Kullanılması Üzerine Bir İnceleme, Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, 2002.

Zhou, Haihua, et al. "Composite energy storage system involving battery and ultra-capacitor with dynamic energy management in micro grid applications." IEEE transactions on power electronics 26.3 (2010): 923-930.