

## Elektrodepozisyon Yöntemiyle Bakır Katkılı Tungsten Oksit (Cu:WO<sub>3</sub>) İnce Filmlerinin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu

Yunus Emre FIRAT<sup>1\*</sup>

**ÖZET:** Nanoyapılı Cu:WO<sub>3</sub> ince filmleri, elektrodepozisyon tekniğiyle indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam alttaş üzerine oda sıcaklığında büyütülmüştür. Filmlerin üretimi için kronoamperometri modu, -0.6 V potansiyelinde 1200 saniye uygulanmıştır. Kaplama elektroliti; sodyum tungstat dihidrat (Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve bakır klorür (CuCl<sub>2</sub>)’den oluşmaktadır. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile çözeltinin pH değeri 2 olarak ayarlanmıştır. Yüzey morfolojisinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır ve film yüzeylerinin boşluğu yapıya sahip olduğu görülmüştür. Kristal yapı analizi yapılması amacıyla X-ışınları kırınımı (XRD) cihazı kullanıldı ve Cu:WO<sub>3</sub> fazına ait karakteristik pikler ortaya çıkmıştır. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) analiziyle, Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin alternatif akım frekansına verdiği tepki ölçülmüştür ve filmin arayüzey direnci (R<sub>CT</sub>) 838.7 ohm olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrodepozisyon, WO<sub>3</sub>, Kronoamperometri, Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)

### Fabrication And Characterization Copper Doped Tungsten Oxide Thin Films (Cu:WO<sub>3</sub>) Using Electrodeposition Technique

**ABSTRACT:** Nanostructured Cu:WO<sub>3</sub> thin films were fabricated by electrodeposition technique on indium tin oxide (ITO)-coated glass substrate under room temperature. The chronoamperometric mode was applied to fabricate the films at -0.6 V for 1200 s. Deposition electrolyte was composed of sodium tungstate dihydrate (Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), sulphuric acid (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) and copper chloride (CuCl<sub>2</sub>). The pH of the solution was adjusted to 2 by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the surface morphology and the films indicate porous structures. X-ray diffraction (XRD) device was used for crystal structure analysis and the characteristic peaks of Cu:WO<sub>3</sub> phase were revealed. Using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), the response of Cu:WO<sub>3</sub> thin films to the alternating current frequency was measured and the interface resistance (R<sub>CT</sub>) of the film was obtained as 838.7 ohm.

**Keywords:** Electrodeposition, WO<sub>3</sub>, Chronoamperometry, Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

<sup>1</sup> Yunus Emre FIRAT (Orcid ID: 0000-0003-0510-6640), Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Karaman, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Yunus Emre FIRAT, e-mail: yunusef44@gmail.com

Geliş tarihi / Received: 26-10-2019  
Kabul tarihi / Accepted: 05-12-2019

## GİRİŞ

Günümüzde, elektronik aygıtların devre elemanları genellikle yarıiletken malzemelerden oluşmaktadır. Özellikle bu malzemeler, bilgisayar ve cep telefonu gibi taşınabilir aygıtlarda performans belirleyici bir rol üstlenmektedirler. Yarıiletken yapılar için en genel kullanılan malzemeler silisyum (Si), germanyum (Ge) ve galyum-arsenik (GaAs) olarak bilinir (Karteri, 2017). Alternatif olarak metal oksit yapıları da yarıiletken malzemeler olarak kullanılabilir (Tataroğlu, 2016).

Metal oksit malzemeler sahip oldukları görünür bölgedeki optik geçirgenlikleri, geniş bant aralıkları ve yüksek yük konsantrasyonundan dolayı güneş pillerinde, elektrokromik cam uygulamalarında, transistörlerde ve enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Firat ve Peksöz, 2019). Son yıllarda en sık kullanılan metal oksit malzemeler arasında WO<sub>3</sub>, nikel oksit (NiO) ve kobalt oksit (CoO) bulunmaktadır (Wu ve ark., 2018). Metal oksit malzemeler arasında WO<sub>3</sub> sahip olduğu gazkromik, fotokromik ve elektrokromik özelliklerinden dolayı literatürde önemli bir yer alır (Buch ve ark., 2016). Fakat sahip oldukları optik ve elektronik özellikleri çeşitli cihaz uygulamalarında (gazkromik, fotokromik ve elektrokromik) hala istenilen noktada değildir. Bu bakımdan WO<sub>3</sub> malzemesinin fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesinin en iyi yolu metallerle katkılanmasıdır (Kalanur ve Seo, 2019). Katkılama yapılan metaller sayesinde WO<sub>3</sub> malzemesinin morfolojisi ve kristal yönelimlerini geliştirilebilir. Bunun yanı sıra katkılanmış metaller, WO<sub>3</sub> bant seviyelerini etkileyerek yük taşıyıcıların özellikleri geliştirilebilir. Fakat uygun metaller seçilmediğinde istenilen sonuçlar elde edilmeyebilir (Kalanur ve Seo, 2019).

WO<sub>3</sub> malzemelerinin ince film şeklinde üretilmesi için çeşitli üretim teknikleri vardır: hidrotermal kaplama (Lu ve ark., 2017), sol-jel yöntemi ile kaplama (Chai ve ark., 2016), kimyasal püskürtme (Akl ve ark., 2003) ve elektrodepozisyon ile kaplama. Bu üretim teknikleri içerisinde elektrodepozisyon birçok avantaja sahiptir: 1) Geniş yüzeylere kaplama yapılabilir. 2) Kaynağı, saf su ve çok düşük miktarlarda tuzlu bileşikler olduğundan dolayı üretim maliyeti çok düşüktür. 3) Üretim parametreleri kontrol edilerek film morfolojisi ve kalınlığı kontrol edilebilir. 4) Vakum gerektiren bir yöntem olmadığından dolayı kolay bir şekilde kaplama yapılabilir (Peksöz, 2016).

Hem üretim tekniğinin avantajı hem de çeşitli metallerle katkılanmasına imkân sağlanması açısından elektrodepozisyon tekniği, katkılı metal oksitlerin üretilmesinde dikkat çekmektedir (Xie ve ark., 2018). Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, bakır (Cu) katkılı tungsten oksit (WO<sub>3</sub>) ince filmlerini indiyum kalay oksit (ITO) kaplı cam alttaşlar üzerine elektrokimyasal olarak üretilmesi ve elde edilen filmlerinin elektrokimyasal, yapısal ve morfolojik özelliklerinin araştırılmasıdır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

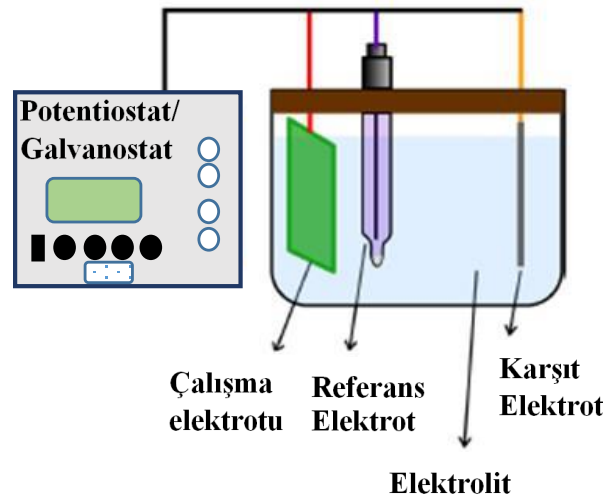
### Malzemeler

Kaplama çözeltisi olarak kullanılan kimyasallar Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, lityum perklorat LiClO<sub>4</sub>, propilen karbonat (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>) ve CuCl<sub>2</sub> Sigma-Aldrich firmasından alınmıştır. Bu kimyasallar %99'a yakın saflık derecesine sahiptir. Alttaş olarak kullanılacak ITO kaplı cam malzemeler Teknoma firmasından satın alınmıştır ve yüzey direnç değerleri 0-10 Ω·cm<sup>2</sup> arasında değişim göstermektedir. Kaplama öncesinde ITO kaplı camlar 1x2 cm<sup>2</sup> boyutlarında kesilmiştir ve daha sonra ultrasonik banyoda 30 dakika boyunca sırasıyla deiyonize su, aseton ve izoproponal içerisinde temizlenmiştir. Çözeltilerin tümü saf su ile hazırlanmıştır.

### Cu:WO<sub>3</sub> İnce Filmlerinin Elektrodepozisyon Yöntemiyle Üretilmesi

Üç elektrotlu elektrodepozisyon sistemiyle üretim gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde; ITO kaplı cam alttaş çalışma elektrotu, gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) referans elektrot, platin tel ise karşıt

elektrot olarak kullanılmıştır (Şekil 1). Kaplama çözeltisi için 10 mM Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0,05 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve pH değerinin 2'ye sabitlenmesi için H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmıştır. Ayrıca katkılanma amacıyla kullanılması gereken CuCl<sub>2</sub> bileşikli tuzundan 0.5 mM kullanılmıştır. Üretim öncesinde homojen bir elektrolit oluşturulana kadar çözelti karıştırılmıştır. Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin üretimi oda sıcaklığında kronoamperometri yöntemiyle -0.6 V potansiyelinde 1200 saniye gerçekleştirildi. Film üretimi bittikten sonra saf suyun içine daldırılıp temizlendi ve daha sonra kurumaya alındı. Son olarak, kristal bir yapının oluşturulması için 400°C'de 30 dakika boyunca argon gazı atmosferinde tavlandı. Üretilen filmlerin Argon atmosferinde tavlama sürecinin temel nedeni Argon elementinin soygaz olmasıdır. Bu sebeple Argon atmosferi, malzemelerin herhangi bir etkileşimine maruz kalmasını engellemiş olur.



Şekil 1. Üç elektrotlu elektrodepozisyon sistemi

### Karakterizasyon Sistemleri

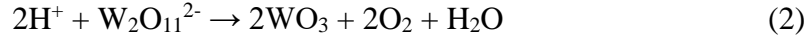
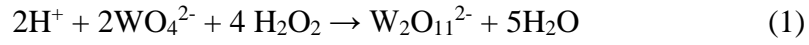
Üretilen filmlerin yüzey analizleri SEM cihazıyla (SEM, FESEM FEI Quanta 200 FEG) gerçekleştirilmiştir. XRD sistemi (PANalytical Xpert Pro MPD, Cu K $\alpha$  ışınımı ve  $\lambda=1.5418\text{\AA}$ ) kullanılarak üretilen ince filmlerin kristal yapı analizi sağlanmıştır. Elektrokimyasal analizler, Gamry Reference 3000 Potentiostat/Galvanostat sistemi ve PH200 elektrokimyasal analiz yazılımı yardımıyla kontrollü bir şekilde gerçekleştirildi. Elektrokimyasal analizlerin tümü 0.1 M LiClO<sub>4</sub> içeren 50 cc'lik C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub> ile elde edilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) analizi açık devre voltaj koşuluyla 5 mV AC şiddetinde ve 0.2 Hz - 300 kHz frekans aralığında alınmıştır.

### BULGULAR VE TARTIŞMA

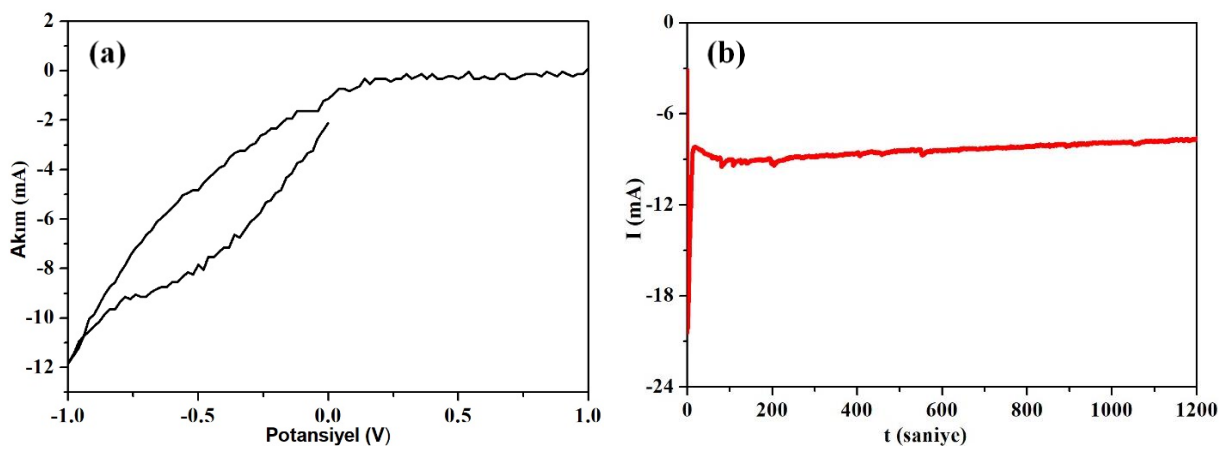
#### Döngüsel Voltametri ve Kronoamperometri Çalışması

Kronoamperometri tekniği, malzemelerin belirli bir sürede ve sabit potansiyelde kaplanmasını sağlayan bir tekniktir. Sabit potansiyelin belirlenmesi için öncelikle döngüsel voltametri'nin iyi analiz edilmesi gerekir (Şekil 2a). Şekil 2a' da görüldüğü üzere negatif bölgede bir akım artışı söz konusudur. Bu durum iyon akışından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu bölgede film oluşumundan bahsedilebilir. Fakat -1V değerine doğru yaklaştıkça H<sub>2</sub> gaz salınımı gerçekleşmektedir (Firat ve Peksoz, 2017). Döngüsel voltametri tekniği yardımıyla Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin en uygun kaplama potansiyeli -0.6 V olarak belirlendi. Daha sonra sabit potansiyelde kaplanması için kronoamperometri tekniği kullanıldı. Elektrolit olarak, 10 mM Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0.05 M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 0.5 mM CuCl<sub>2</sub> kimyasalları kullanıldı. Çözelti pH değerinin 2'ye sabitlenmesi için asidik bir malzeme olan sülfürik asit elektrolite ilave edildi. Şekil

2b’de görüldüğü üzere -0.6 V potansiyel uygulanarak 1200 saniyede Cu:WO<sub>3</sub> ince filminin ITO üzerine büyütülmesinin akım-zaman grafiği verilmiştir. WO<sub>3</sub> için gerçekleşmesi muhtemel reaksiyon aşağıdaki gibidir (Martins ve ark., 2017):



Yukarıdaki reaksiyonlarda görüldüğü gibi Sodyum Tungstat tuzlu bileşiklerinden olan 2WO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iyonu, çözelti içerisindeki Hidrojen Peroksit ve Hidrojen iyonlarıyla etkileşerek W<sub>2</sub>O<sub>11</sub><sup>2-</sup> bileşiğini oluşturmaktadır. Daha sonra W<sub>2</sub>O<sub>11</sub><sup>2-</sup> ile hidrojen iyonları birleşerek WO<sub>3</sub> yapısını meydana getirmektedir.



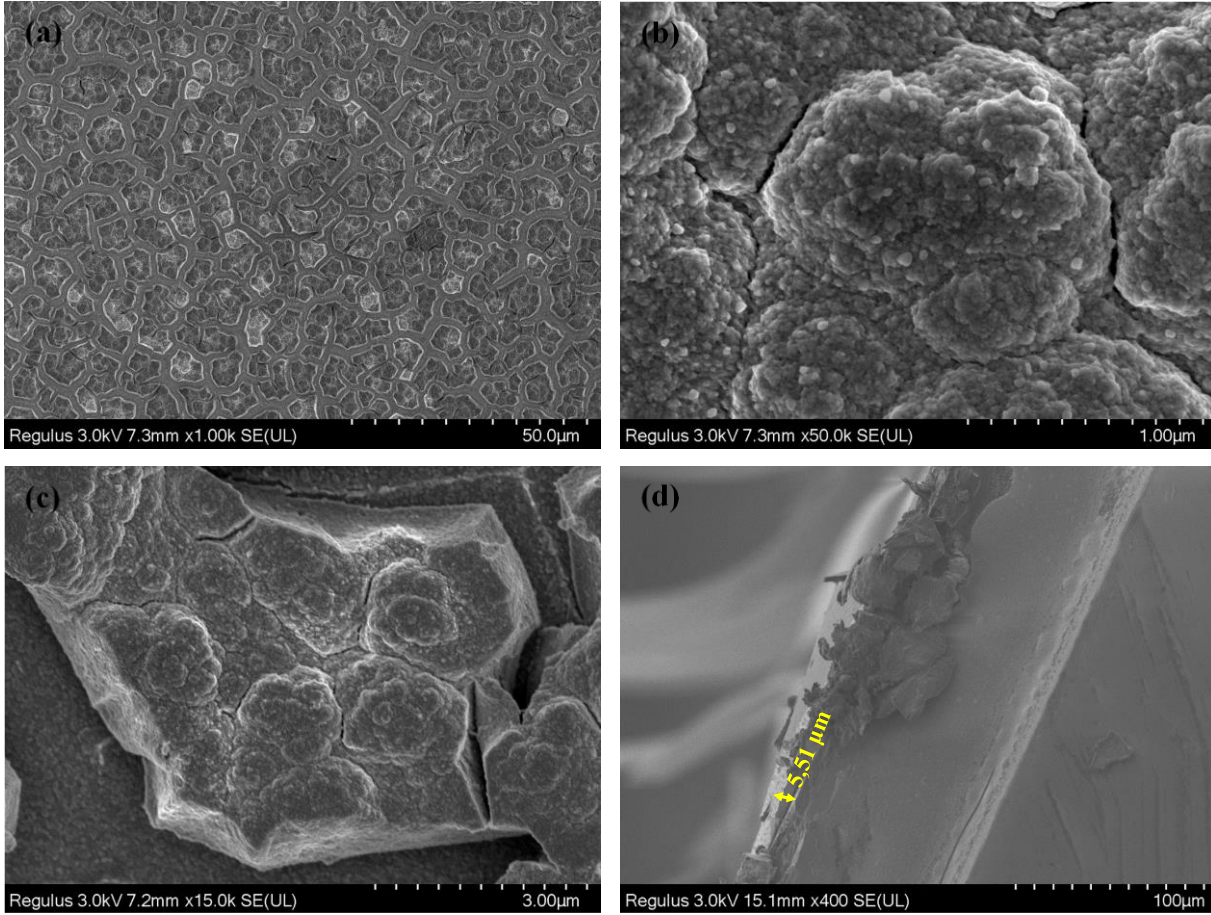
Şekil 2. Cu:WO<sub>3</sub> ince film üretimi için (a) akım-potansiyel (döngüsel voltametri) ve (b) akım-zaman (kronoamperometri) eğrisi.

Cu:WO<sub>3</sub> ince filmleri için verilen kronoamperometri grafiğine bakıldığında, ilk saniyelerdeki hızlı iyon hareketliliğinden dolayı yüksek bir akım değeri görülmektedir. Bu aşamada ITO kaplı cam yüzeyi üzerine ilk büyütme gerçekleştikten sonra elektrot yüzeyinde iletkenlik değeri değişmektedir ve bu durum akım eğrisinde sabit bir doğru olarak yansımıştır. Uygulanan zamanın film kalınlığı üzerinde ciddi bir etkisi vardır. Üretim kısmında sürenin uzun tutulması, SEM kesit görüntüsünden anlaşılacağı üzere 5.51 µm gibi yüksek bir film kalınlığa sebep olmuştur.

### SEM Analizleri

Elektrodepozisyon tekniğiyle üretilen Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerine ait farklı büyütmelelerdeki yüzey ve kesit görüntüleri Şekil 3’ de verilmiştir. Şekil 3a’ya bakıldığında yüzey üzerinde çoklu boşluğu yapılar görülmektedir. Bu boşluğu yapılar, iyon içeren bir çözelti ortamında iyonların elektrota ulaştırılmasında etkin rol oynamakta ve dolayısıyla süperkapasitör ve elektrokromik gibi cihazların performansını arttırmaktadır (Kondalkar ve ark., 2017). Özellikle süperkapasitör ve elektrokromik uygulamalarında bu tür yapılara ihtiyaç duyulur. Şekil 3b’de görülen SEM resminde, yüzeyin belli bölgelerinde nano parçacıkların topaklandığı belli olmaktadır. Bunun temel nedeni kaplama süresinin uzun tutulmasıdır. Ayrıca bu topaklanmaların etrafında oluşan çeşitli çatlaklar elektrot yüzeyinde herhangi bir kısa devreye sebep olabilir (Peksöz, 2016). Şekil 3c’ye bakıldığında 400°C argon atmosferinde gerçekleştirilen tavlamanın, Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin kristalleşmesinde başarılı olduğu söylenebilir. XRD grafiğindeki şiddetli ve keskin pikler bu resmi doğrulamaktadır. Son olarak Şekil 3d’de Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin kesit görüntüsü yer almaktadır. Bu şekle bakıldığında üretilen ince filmin

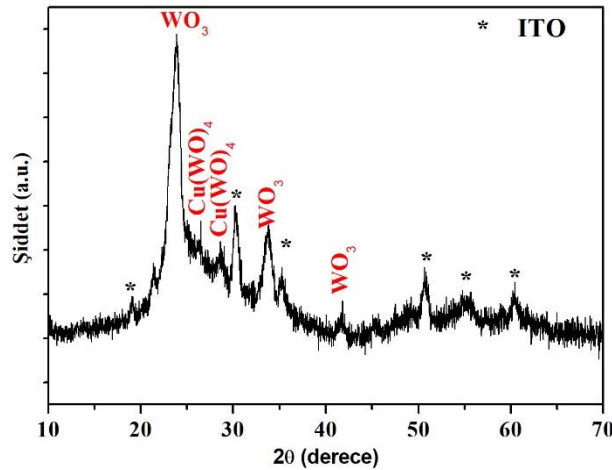
ITO yüzeyine çok iyi yapıştığı görülüyor. Bu yapışma derecesinin iyi olması, çeşitli cihaz uygulamalarında elektronların elektrot yüzeyi üzerinden cihaza aktarılmasını kolaylaştırabilir (Firat ve Peksöz, 2019). Buna ilaveten, kesit görüntüsü yardımıyla kaplanan ince filmin kalınlığı 5.51  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Kaplanan Cu:WO<sub>3</sub> ince filminin ITO yüzeyi üzerinde katmanlı bir yapı oluşturduğu da kesit görüntüsünden belli olmaktadır.



Şekil 3. Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin (a)1000, (b) 50000, (c)15000 büyütmedeki yüzey SEM görüntüsü ve (d) kesit görüntüsü

### XRD analizleri

Üretim kısmında bahsedildiği gibi Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin, kristal yapıya sahip olması için 400°C argon atmosferinde 30 dakika boyunca tavlandı. Üretilen bu filmlerin kristal yapı analizi Şekil 4'te verilmiştir. Film yüzeyi üzerinde oluşan kristal yapıların parametreleri Çizelge 1'de listelenmiştir. Bu grafiğe bakıldığında, Cu:WO<sub>3</sub> malzemesinin kristal bir doğaya sahip olduğu keskin ve uzun şiddetteki piklerden anlaşılıyor. Grafikte yıldız ile işaretlenmiş pikler, alttaş olan ITO kaplı cama aittir. WO<sub>3</sub> kristal fazına ait 2 $\theta$  açıları 23.967, 34.049 ve 42.112 olarak sıralanabilir (PDF 00-041-0905). WO<sub>3</sub> malzemesine katılanma olduğu için pikler daha belirgin ve büyük şiddettedir. Bunun yanı sıra bakır katılanmasının başarılı olduğunu Cu(WO)<sub>4</sub> kristal yapısının oluşumundan ortaya çıkıyor. Cu(WO)<sub>4</sub> kristal fazına ait 2 $\theta$  açıları 26.941 ve 28.660 derecelerinde görülmüştür. Ayrıca Cu(WO)<sub>4</sub> pik şiddetlerine bakıldığında nispeten daha düşük şiddette kalmıştır. Çünkü kaplama elektroliti içerisinde bulunan Cu miktarı WO<sub>3</sub>'e nazaran oldukça düşük seviyededir.



Şekil 4. 400°C argon atmosferinde tavlanan Cu:WO<sub>3</sub> ince filmlerinin XRD grafiği

Çizelge 1: Cu:WO<sub>3</sub> ve Cu(WO)<sub>4</sub> ait kristal yapı parametreleri

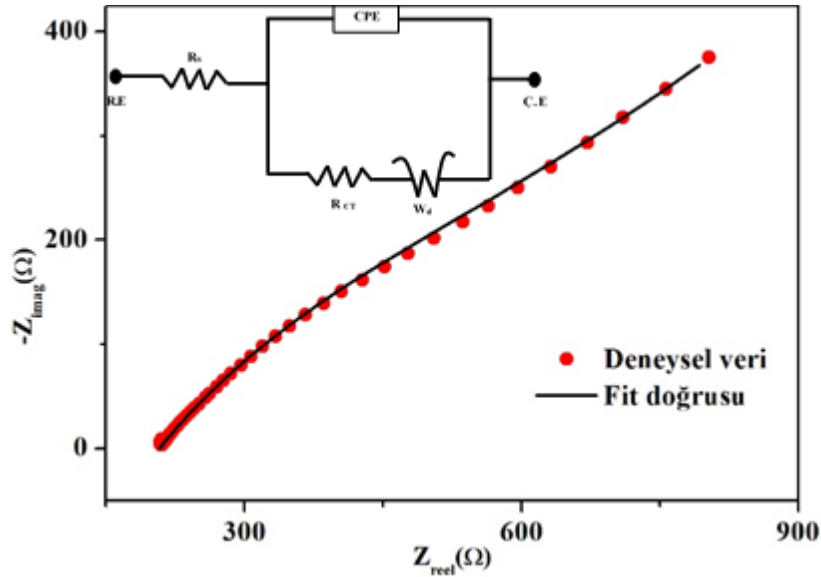
Kristal faz	2θ	h	k	l	Örgü
WO <sub>3</sub>	23.967	1	0	0	kübik
	34.049	1	1	0	kübik
	42.112	1	1	1	kübik
Cu(WO) <sub>4</sub>	26.941	1	0	1	triklinik
	28.660	-1	1	1	triklinik

### EIS Analizi

EIS analizi, üretilen malzemenin belli frekans aralığında alternatif gerilime vermiş olduğu empedansın bulunmasına yarayan bir elektroanalitik yöntemdir. Bu yöntemde Cu:WO<sub>3</sub> ince filmi, 0.1 M'lık LiClO<sub>4</sub> içeren 50 cc'lik C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O çözeltilisine daldırılmıştır. EIS analizi sonucunda elde edilen grafiğe Nyquist eğrisi adı verilir. Bu eğrinin temel amacı kompleks düzlemde elde edilen deneysel verilerin teorik bir eşdeğer devre ile özdeşleştirilmesidir (Mestan, 2008). Dolayısıyla Nyquist eğrisine en uygun fit doğrusu çizilerek bu doğru üzerinden verilerin alınması gerekmektedir. Karşılık gelen eşdeğer devre modelinin (Şekil 5 içerisinde) parametreleri Çizelge 2'de listelenmiştir. Fit edilmiş uyumluluk değerinin 10<sup>-6</sup> mertebesinde olması, deneysel verilerle modelleme yapılmış verilerin neredeyse çok uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Demiriz ve Peksoz, 2019). Kaplama elektrolitinin ohmik direnci (R<sub>S</sub>) 207.9 ohm olarak elde edilmiştir. R<sub>CT</sub>, Cu:WO<sub>3</sub> elektrotu ile kaplama çözeltilisi arasındaki arayüzey direncidir ve 838.7 ohm bulunmuştur. Govindasamy ve ark.'nın yapmış olduğu bir çalışmada çok katmanlı grafen etrafında kaplanan WO<sub>3</sub> yapısının 0.1 M KCl çözelti ortamında EIS analizine bakılmıştır. Bu çalışmadaki elde edilen R<sub>CT</sub> değerine bakıldığında (587.43 ohm) Cu:WO<sub>3</sub> için bulunan değerle uyumlu olduğu görülmüştür (Govindasamy ve ark., 2019). Devrede CPE olarak tanımlanan devre elemanı sabit faz elementidir ve eşitlik 3'deki gibi verilir (Orazem ve ark., 2008):

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad (3)$$

Denklemdaki "Y<sub>0</sub>" değeri n=1 olduğunda kapasitans değeridir, "ω" açısal frekanstır.



Şekil 5. Cu:WO<sub>3</sub> ince filmine ait Nyquist eğrisi (içerisindeki şekil eşdeğer devredir).

Çizelge 2. Nyquist modellemesinden elde edilen eşdeğer devre parametreleri

Parametre	Değer	Hata payı (±)
R <sub>s</sub> (Ω)	207.9	1.445
Y <sub>0</sub> (S·s <sup>a</sup> )	656.8·10 <sup>-6</sup>	84.74·10 <sup>-6</sup>
Alfa	535·10 <sup>-3</sup>	23.88·10 <sup>-3</sup>
W <sub>d</sub> (S·s <sup>1/2</sup> )	1.683·10 <sup>-3</sup>	231.4·10 <sup>-6</sup>
R <sub>CT</sub> (Ω)	838.7	188.2
Uyumluluk		137.5·10 <sup>-6</sup>

## SONUÇ

Üç elektrotlu elektrodepozisyon sistemiyle Cu:WO<sub>3</sub> ince filmleri ITO alttaş üzerine başarılı bir şekilde kaplanmıştır. Bu çalışma sonucunda kromoamperometri modu'nun ince film üretimi için uygun olduğu görülmüştür. Üretilen filmlerin SEM resimlerinde boşluklu yapılar meydana gelmiş ve bu yapıların süperkapasitör ve elektrokromik cam uygulamaları için ideal olduğu düşünülmektedir. 400°C argon atmosferinde 30 dakika boyunca tavlanan filmlerin kristal doğasına sahip olduğu XRD analizlerinde ortaya çıkmış ve bakır elementinin WO<sub>3</sub> yapısına katkılı olduğu görülmüştür. EIS analizi neticesinde elde edilen arayüzey direncinin (838.7 ohm) literatürle karşılaştırılabilir olduğu görülmüştür. Bütün bu sonuçlar bir arada değerlendirildiğine üretim tekniği olan elektrodepozisyon tekniğinin ince film malzeme üretimi için oldukça elverişli olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla bu yöntem ticari olarak geniş alanlı üretime oldukça elverişlidir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bursa Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan "Güneş Gözesi Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı"nda gerçekleştirilmiştir. Bu desteği sağlayan Prof. Dr. Ahmet PEKSÖZ'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

Akl AA, Kamal H, Abdel-Hady K, 2003. Characterization of tungsten oxide films of different crystallinity prepared by RF sputtering, Physica B: Condensed Matter, 325: 65-75.

- Buch VR, Chawla AK, Rawal SK, 2016. Review on electrochromic property for WO<sub>3</sub> thin films using different deposition techniques, *Materials Today: Proceedings*, 3: 1429-1437.
- Chai Y, Ha FY, Yam FK, Hassan Z, 2016. Fabrication of tungsten oxide nanostructure by Sol-Gel method, *Procedia Chemistry* 19: 113-118.
- Demiriz TM, Peksoz A, 2019. The sensitive control of semiconductor properties of non-vacuum and electrochemically synthesized CdTe thin films, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30:8645-8654.
- Firat YE, Peksoz A, 2019. Efficiency enhancement of electrochromic performance in NiO thin film via Cu doping for energy-saving potential, *Electrochimica Acta*, 295: 645-654.
- Firat YE, Peksoz A, 2017. Efficiently two-stage synthesis and characterization of CuSe/Polypyrrole composite thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 727:177-184.
- Govindasamy M, Subramanian B, Wang SF, Chinnapaiyan S, Ramalingam RJ, Al-lohedan HA, 2019. Ultrasound-assisted synthesis of tungsten trioxide entrapped with graphene nanosheets for developing nanomolar electrochemical (hormone) sensor and enhanced sensitivity of the catalytic performance. *Ultrasonic-Sonochemistry*, 56:134-142
- Kalanur SS, Seo H, 2019. Aligned nanotriangles of tantalum doped tungsten oxide for improved photoelectrochemical water splitting. *Journal of Alloys and Compounds*, 785: 1097-1105
- Karteri İ, 2017. İndirgenmiş Grafen Oksit Arayüzey Tabakalı Metal Oksit Yarıiletken Kapasitörün Dielektrik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2): 387-393.
- Kondalkar VV, Yang SS, Patil PS, Choudhury S, Bhosale PN, Lee K, 2017. Langmuir-Blodgett assembly of nanometric WO<sub>3</sub> thin film for electrochromic performance: A new way, 194: 102-106.
- Martins AS, Cordeiro-Junior PJM, Nunez L, Lanza MRV, 2017. A simple Method for the Electrodeposition of WO<sub>3</sub> in TiO<sub>2</sub> Nanotubes: Influence of the Amount of Tungsten on Photoelectrocatalytic Activity, *Electrocatalysis*, 8: 115-121.
- Mestan AD, 2008. Platin Elektrotun P-Aminobenzoik Asit ile Modifikasyonu ve Kararlılığının Belirlenmesi, Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Lu C, Hon MH, Leu I, 2017. Direct Growth of Crystalline Tungsten Oxide Nanorod Arrays by A Hydrothermal Process and Their Electrochromic Properties. *Journal of electronic materials*, 46 (4).
- Orazem METB, 2008. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, New Jersey: A John Wiley&Sons, Inc., Hoboken.
- Peksöz A, 2016. Güneş Pili Uygulamaları İçin Cdte Yarıiletken İnce Filmlerin Elektrodepozisyon Yöntemiyle Üretilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2).
- Tataroğlu A, 2016. Metal-Oksit-Yarıiletken (MOS) Kapasitörün Dielektrik Parametrelerinin Frekans ve Sıcaklık Bağımlılığı. *Gazi University Journal of Science*, 4(2):65-70
- Wu W, Wang M, Jianmin M, Cao Y, Deng Y, 2018. Electrochromic Metal Oxides: Recent Progress and Prospect. *Advanced Electronic Materials*, 4: 1800185.
- Xie S, Bi Z, Chen Y, He X, Guo X, Gao X, Li X, 2018. Electrodeposited Mo-doped WO<sub>3</sub> film with large optical modulation and high areal capacitance toward electrochromic energy-storage applications. *Applied Surface Science*. 459:774-781