

Eu katkılı NiO Nanoparçacıkların Sol-Jel Yöntemi ile Sentezlenmesi, Yapısal ve Morfolojik Karakterizasyonu

Ezgi GÜRGENÇ^{1*}

¹ Enerji Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
*ezgigurcenc89@gmail.com

(Geliş/Received: 16/05/2022;

Kabul/Accepted: 27/06/2022)

Öz: Bu çalışmada, saf nikel oksit (NiO) ve Evropiyum (Eu) katkılı NiO nanoparçacıklar sol-jel yöntemi kullanılarak sentezlendi. Ni kaynağı olarak Nikel (II) asetat tetrahidrat ve Eu kaynağı olarak ise Evropiyum klorür kullanıldı. Sentezleme işlemi 80 °C’de 3 saat sürede gerçekleştirildi. Sentezlenen nanoparçacıklar 450 °C’de 1 saat süreyle tavlandı. Nanoparçacıkları oluşturan bileşikler X-ışını kırınımı (XRD) analiz edildi. Nanoparçacıkların morfolojileri alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile araştırıldı. Nanoparçacıkları oluşturan elementler ise enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile belirlendi. Sentezlenen parçacıkların nano boyutta olduğu ve Eu katkısı ile morfolojilerin değiştiği görüldü. Eu katkısı arttıkça kafes parametreleri ve birim hücre hacimlerinin arttığı tespit edildi. Eu katkısı arttıkça kristalite boyutlarında azalma meydana gelmiştir. Yapısal ve morfolojik karakterizasyonlar neticesinde Eu katkısının başarıyla gerçekleştiği görüldü. Üretilen saf ve Eu katkılı NiO nanoparçacıkların yarıiletken endüstrisinde nanomalzeme olarak kullanım alanı bulabileceği sonucuna varıldı.

Anahtar kelimeler: NiO, Nadir toprak elementi, Yarıiletken, Sol-jel, Nanomalzeme.

Synthesis, Structural and Morphological Characterization of Eu-doped NiO Nanoparticles by Sol-Gel Method

Abstract: In this study, pure nickel oxide (NiO) and Europium (Eu) doped NiO nanoparticles were synthesized using the sol-gel method. Nickel (II) acetate tetrahydrate was used as the Ni source and Europium chloride was used as the Eu source. The synthesis process was carried out at 80 °C for 3 hours. The synthesized nanoparticles were annealed at 450 °C for 1 hour. The compounds forming the nanoparticles were analyzed by X-ray diffraction (XRD). The morphologies of nanoparticles were investigated by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The elements that make up the nanoparticles were determined by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). It was observed that the synthesized particles were in nano size and the morphologies changed with the doping of Eu. It was determined that as the Eu contribution increased, the lattice parameters and unit cell volumes increased. As the Eu contribution increased, the crystallite size decreased. As a result of the structural and morphological characterizations, it was observed that the Eu contribution was successfully realized. It was concluded that the produced pure and Eu doped NiO nanoparticles could find use as nanomaterials in the semiconductor industry.

Key words: NiO, Rare earth element, Semiconductor, Sol-gel, Nanomaterial.

1. Giriş

Sonlu boyuta, tanılanmış yapıya ve morfolojik özelliklere sahip metal oksit nanoparçacıklarının üretilmesi, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği ve sürdürülebilir insan gelişimi için enerji depolama ve dönüşümü işlemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yeni bir tip malzeme olan nanomalzemeler esasen veri depolama, biyotıp, manyetoelektronik, enerji depolama ve telekomünikasyon gibi alanlarda doğan ihtiyaç üzerine geliştirilmiştir [1]. Geçiş metal oksitleri (GMO), ilgi çekici fiziksel özellikleri ve farklı teknolojik alanlardaki umut vadeden özellikleri nedeniyle son yıllarda oldukça yoğun şekilde araştırılmaktadır [2]. Bu metal oksitler arasında nikel oksit (NiO) önemli bazı ilgi çekici özelliklerinden dolayı son yıllarda gaz sensörlerinde, düz panel ekranlarda, güneş pillerinde, pencere kaplamalarında, elektrokromik cihazlarda, esnek elektronik cihazlarda, Li-ion pillerde ve katı hal sensörleride dâhil olmak üzere birçok uygulamada kendine kullanım alanı bulmaktadır. NiO’nun ilgi

* Sorumlu yazar: ezgigurcenc89@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: 10000-0002-0653-4041

çekici özellikleri arasında daha düşük direnç, gaz absorbanlarına daha yüksek tepki, elektrokimyasal tersinirlik, yüksek optik modülasyon, yüksek döngüsel kararlılık, hızlı anahtarlama hızı, hafıza etkisi, iyi manyetik, termal, optik, mekanik ve elektrik performansı, yüksek iletkenlik, mükemmel redoks aktivitesi, iyi kimyasal elektroaktivite, yüksek toplu iletkenlik ve geniş spesifik yüzey alanı sayılabilir. Bunların yanında inorganik bir metal oksit olarak NiO, p-tipi bir iletkenliğe sahiptir ve 3.6-4.0 eV arasında geniş bir bant aralığına sahiptir [3].

Stokiyometrik NiO yalıtkan bir malzeme iken, deneysel NiO_x'de Ni boşluklarının varlığı p-tipi yarı iletkenin özelliği göstermesine neden olmaktadır. Buna ilaveten Ni boşluklarının büyük iyonlaşma enerjisi nedeniyle bozulmamış NiO_x içerisindeki delik yoğunluğu güçlü bir şekilde sınırlandırılmıştır. NiO'nun iletkenlik ve optik özelliklerini geliştirmekte en etkili ve verimli yöntem olarak dıştan bir katkı ile doğal boşlukların yoğunluğunun değiştirilmesi gösterilebilir. Çeşitli katkı maddeleri arasında, nadir toprak elementleri (NTE), çeşitli yarı iletken metal oksitlerin optiksel ve elektriksel özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. NTE'ler optik aktivitelerinin güvenilir olası ve kabul edilebilir katalitik fonksiyon özelliklerinden dolayı elektrik, optik, katalitik ve manyetik alanlarda tercih edilebilirler. NTE'ler arasında en ilginç özellikte olanlarından birisi lantanitlerin bir üyesi olan evroppyum' dur (Eu) ve 150 ila 180 °C arasındaki hava sıcaklıklarında tutuşur. Sertliği kurşuna benzerdir ve kolayca kalıplanabilir veya şekillendirilebilir. Ayrıca Eu NTE'ler arasında en reaktifidir ve havada hızla oksitlenebilir. NTE'lerin 4f-5d elektron yörüngelerinin benzersiz özelliklerinden ötürü araştırmacılar son yıllarda nadir toprak elementlerini metal oksitlerle katkılayarak yeni nanokompozit malzemeler geliştirmeye başlamışlar ve bunların farklı uygulamalarda kullanımlarını araştırmışlardır [5-9].

NiO nanoparçacıkların manyetik, elektrik, optik ve dielektrik gibi özellikleri, parçacık boyutu, bileşimdeki değişkenliği, katkılama, yüzey aktif maddeleri, tavlama sıcaklığı ve yüzey morfolojisinden etkilenir [10]. NiO nanoparçacıklar katı hal termal ayrışma, mikro emülsiyon tekniği, sol-jel, solvotermal işlem, hidrotermal metot, kimyasal yöntem, sonokimyasal yöntem ve anodik plazma tekniği gibi yöntemlerle üretilebilmektedir [11, 12]. Sol-jel tekniğinin, düşük maliyet, basitlik, işlem sıcaklığının kontrol edilebilmesi, homojenlik, güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik gibi avantajları vardır [13-15].

Goumri-Said vd., çalışmalarında saf ve farklı katkı oranlarında (at.% 1, at.% 2, at.% 3, at.% 5 ve at.% 7) Eu katkılı NiO ince filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretmişlerdir [6]. Mokoena vd., saf ve farklı katkı oranlarında (ağ.% 1, ağ.% 2, ağ.% 3 ve ağ.% 4) Eu katkılı NiO nanoparçacıkları hidrotermal yöntemle üretmişlerdir [16]. Bir başka çalışmada yine hidrotermal yöntemle Eu katkılı NiO nanoparçacıklar üretilmiştir [5]. Chen vd., çalışmalarında saf ve farklı katkı oranlarında (mol.% 1, mol.% 3 ve mol.% 5) Eu katkılı NiO ince filmleri sol-jel döndürerek kaplama yöntemi üretmişlerdir [4]. Literatür çalışmalarında Eu katkılı NiO nanoparçacıkların üretimi ile ilgili yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Ayrıca bizim fikrimize göre yüksek oranda Eu katkılı NiO nanoparçacıkların sol-jel yöntemi ile üretilmesi ve karakterizasyonu ile ilgili bir çalışmaya literatürde rastlanmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada yüksek oranda Eu katkılı NiO nanoparçacıkların sol-jel yöntemi ile üretilmesi, yapısal ve morfolojik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

Mevcut çalışmada, saf ve farklı oranlarda (mol.% 1, mol.% 3 ve mol.% 5) Eu katkılı NiO nanoparçacıklar sol-jel yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen nanoparçacıkların yapısal ve morfolojik özellikleri FE-SEM, XRD ve EDX analizleri ile araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Tablo 1'de çalışmada kullanılan kimyasallar verilmiştir. 0.2 M Nikel (II) asetat tetrahidrat 20 ml metanole eklenmiş ve tüm parçacıklar çözününceye kadar manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Bir başka beherde 20 ml metanole 1 M NaOH eklenmiş ve yine tüm parçacıklar çözününceye kadar manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. NaOH çözeltisi yavaşça Nikel (II) asetat tetrahidrat içeren çözeltiye karıştırma işlemi devam ederken eklenmiştir. Nihai çözelti 80 °C' de 3 saat süre ile karıştırılmıştır. Bu işlem bittikten sonra oda sıcaklığına gelen sol-jel çözeltisi filtre kâğıdı ile süzümüştür. Filtre kâğıdı üzerinde biriken parçacıklar birkaç defa etanolle yıkandıktan sonra birkaç defa saf su ile durulanmıştır. Etüvde 80 °C' de 5 saat boyunca kurutulan parçacıklar havanda dövüldükten sonra 450 °C'de 1 saat süreyle tavlannmıştır. Böylelikle saf NiO nanoparçacıklar üretilmiştir. Eu katkılı NiO nanoparçacıklar da aynı şekilde üretilmekle beraber tek fark olarak Nikel (II) asetat tetrahidrat çözeltisine toplam 0.2 M olacak şekilde Nikel (II) asetat tetrahidrat ve farklı oranlarda (mol.% 1, mol.% 3 ve mol.% 5) EuCl₃ eklenmiştir. Numuneler katkı oranına göre % 0, % 1, % 5 ve % 10 için sırasıyla, NiO, NiO-Eu1, NiO-Eu5 ve NiO-Eu10 olarak isimlendirilmiştir. Üretilen nanoparçacıkların yapısal özellikleri PANalytical Empyrean marka XRD cihazı ile belirlendi. XRD analizleri, CuK α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonunda, 45 kV'da, 40 mA'de ve $2\theta = 10 - 90^\circ$ tarama aralığında gerçekleştirildi. Nanoparçacıkların morfolojileri Zeiss Crossbeam 540 marka FE-SEM cihazında

farklı büyütmelelerde belirlendi ve nanoparçacıkları oluşturan elementlerin kompozisyonları EDX analizi ile tespit edildi.

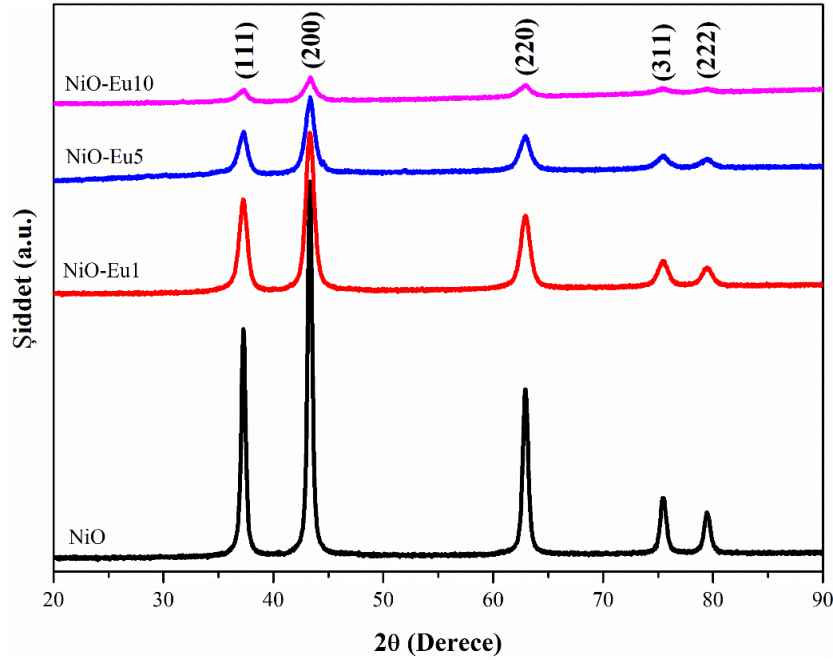
Tablo 1. Çalışmada kullanılan kimyasallar.

Kimyasal	Marka	Formül
Nikel (II) asetat tetrahidrat	Carlo Erba	$\text{Ni}(\text{OCOCH}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Evropiyum klorür	PubChem	EuCl_3
Metanol	Chemsolute	CH_3OH

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yapısal Özellikler

Şekil 1’de sol-jel yöntemi ile üretilen saf ve Eu katkılı NiO nanoparçacıkların XRD kırınım desenleri görülmektedir. Tablo 2’ de XRD kırınım desenlerinde yüksek yoğunluklu piklere denk gelen 2θ açısı değerleri verilmiştir. Niteliksel faz analizleri tüm numunelerde XRD kırınım piklerinin Bunsenit NiO fazının kübik yapısı içinde, JCPDS kartı numara 47–1049 ile uyumlu olarak indekslenebileceğini göstermektedir [6]. Eu katkısı numunelerde herhangi bir ikincil faza veya safsızlığa neden olmamıştır. Bu durum üretilen nanoparçacıkların yüksek saflıkta olduğunu ve tek fazlı yapıda göstermektedir [4, 5, 16]. Yüksek yoğunluklu pikler (111), (200), (220), (311) ve (222) düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bunlardan (200) düzleminin yoğunluğunun, standart NiO modeline kıyasla nispeten yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum (200) düzlemi boyunca tercihli yönelimin varlığını ortaya koyduğunu göstermektedir [6]. Tüm piklerin şiddetleri Eu katkı oranı arttıkça azalmıştır. Bu durumun Eu’nun NiO konak kafesine dâhil edilmesinin, belirli bir çözünürlük sınırına ulaştıktan sonra nanoparçacıkların kristalliğinde bir düşüşe neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [6]. Eu katkısı arttıkça NiO’nun karakteristik pikleri daha yüksek 2θ açısı değerlerine kaymıştır ve pikler genişlemiştir. Bu durum 0.947 Å olan Eu^{3+} ’nin iyonik yarıçapının 0.69 Å olan Ni^{2+} ’nin iyonik yarıçapına oranla daha yüksek olmasından kaynaklanmış olabilir. Katkı elementlerinin iyonik yarıçaplarının büyük olması NiO’nun kristal kafesinde genişlemeye yol açabilir [6, 16].



Şekil 1. Sol-jel yöntemi ile üretilen saf ve Eu katkılı NiO nanoparçacıkların XRD kırınım desenleri.

Tablo 2. Yüksek yoğunluklu piklerin kırınım düzlemlerinin 2θ açı değerleri.

Numune	(111)	(200)	(220)	(311)	(222)
NiO	37.27°	43.32°	62.91°	75.46°	79.43°
NiO-Eu1	37.28°	43.32°	62.91°	75.44°	79.46°
NiO-Eu5	37.28°	43.35°	62.96°	75.57°	79.48°
NiO-Eu10	37.33°	43.40°	62.99°	75.44°	79.48°

Sentezlenen nanoparçacıkların kafes sabitleri aşağıdaki bağıntıdan yararlanarak ($a = b = c$) için (1 1 1) piki kullanılarak hesaplanmıştır [6, 17, 18];

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)}{a^2} \quad (1)$$

Burada, h, k, l miller indekslerini ve d ise düzlemler arası mesafeyi göstermektedir. Sentezlenen nanoparçacıkların birim hücre hacimleri (V) ise aşağıdaki bağıntı ile bulunabilir [18];

$$V = a^3 \quad (2)$$

Kristalite boyutları (D), iyi bilinen yöntemlerden biri olan aşağıdaki Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanmıştır [6, 19]:

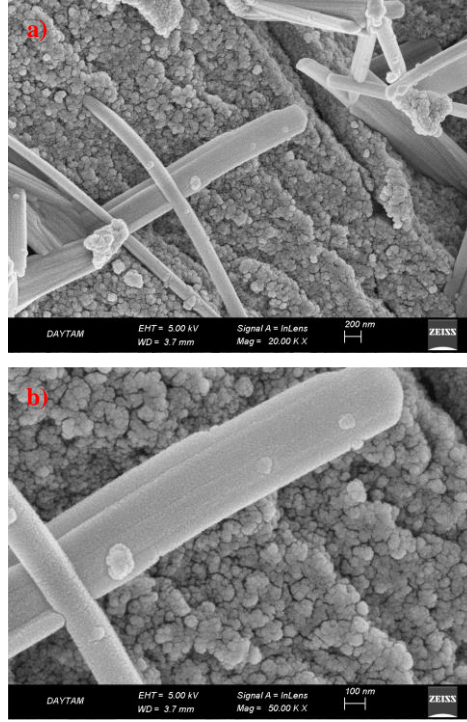
$$D = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (3)$$

Burada, 0.9 sabit, λ nm cinsinden X-ışınının dalga boyu, β radyan cinsinden yarı maksimum tam genişlik ve θ derece cinsinden kırınım açısıdır. Tablo 3'de yukarıdaki denklemlerden yararlanılarak ve XRD kırınım desenleri analiz edilerek elde edilen yapısal özellikler verilmiştir. Eu katkısı arttıkça kafes parametreleri ve birim hücre hacimleri katılanan Eu^{3+} 'nin iyonik yarıçapının konakçı Ni^{2+} 'nin iyonik yarıçapına oranla daha yüksek olmasından dolayı artmıştır [6, 16]. Ortalama kristalite boyutları (D_{ort}) ise, Eu katkısının artışına bağlı olarak düşmüştür. Benzer bir sonuç literatür çalışmalarında da elde edilmiştir ve bu duruma iyonik yarıçaplar arasındaki farkın neden olduğu düşünülmektedir [5, 6, 16].

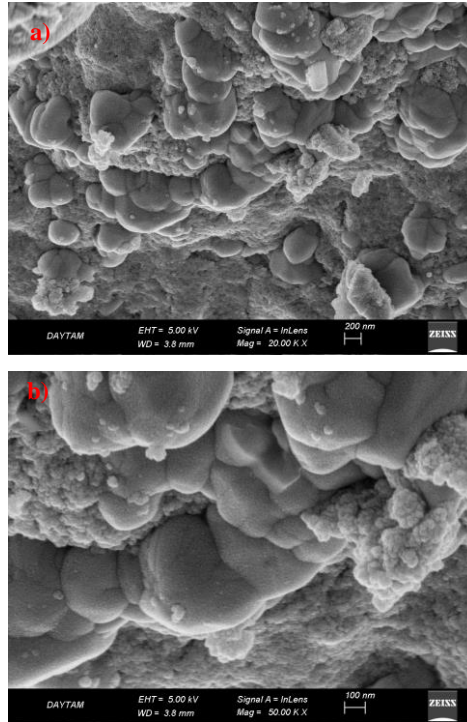
Tablo 3. XRD kırınım desenleri kullanılarak hesaplanan a, V ve D değerleri.

Numune	a (Å)	V (Å ³)	D ₁₁₁ (nm)	D ₂₀₀ (nm)	D _{ort} (nm)
NiO	4.1749	72.76727	16.1550	16.1587	16.15682
NiO-Eu1	4.1778	72.91909	9.0054	8.9900	8.997705
NiO-Eu5	4.1803	73.05198	8.1280	7.7656	7.946782
NiO-Eu10	4.1870	73.40404	7.4810	6.2646	6.872787

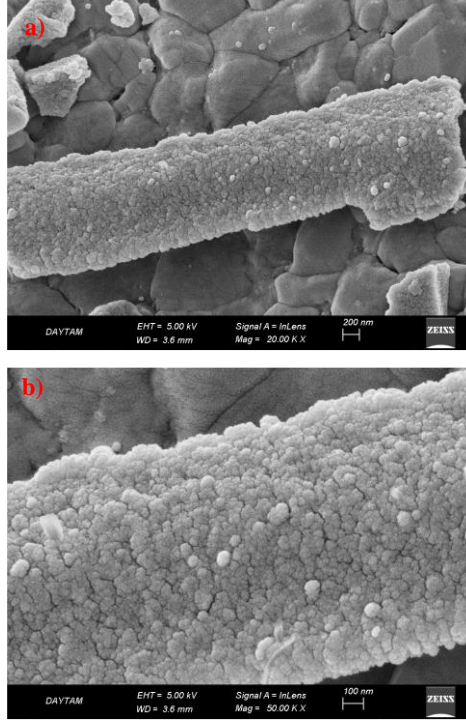
Şekil 2-5'de sentezlenen nanoparçacıkların FE-SEM görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü gibi tüm tozlar nanoboyuttadırlar ve Eu katkısı ile morfolojilerinde değişimler gözlenmiştir. Katkısız numunede nanoçubukların yanında üst üste istiflenmiş ince nanotanecikli yapılar görülmektedir. Eu katkılı numuneler ise üst üste istiflenmiş nanoboyutlu neredeyse küresel yapılardan meydana gelmekle beraber Eu katkısı arttıkça bu nanoparçacıklar daha fazla topaklanmaya başlamış ve hegzagonal benzeri yapılar görülmüştür. Nanoparçacıkların morfolojilerinin değişmesi Eu katkısının NiO'ya başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir [16].



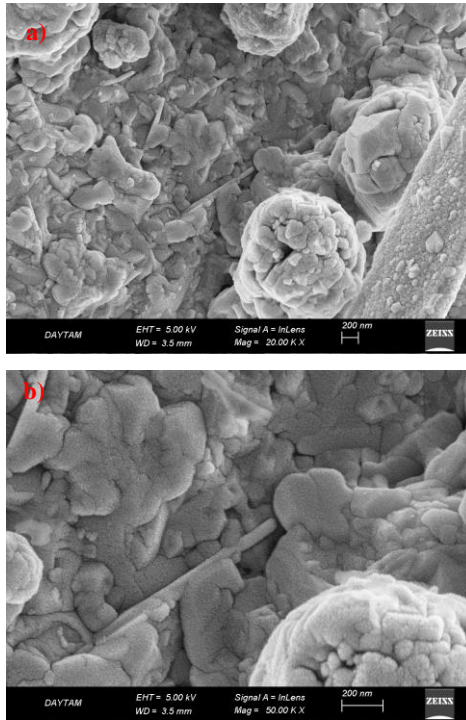
Şekil 2. NiO numunesinin farklı büyütmelerde FE-SEM görüntüleri a) 20 kX ve b) 50 kX.



Şekil 3. NiO-Eu1 numunesinin farklı büyütmelerde FE-SEM görüntüleri a) 20 kX ve b) 50 kX.

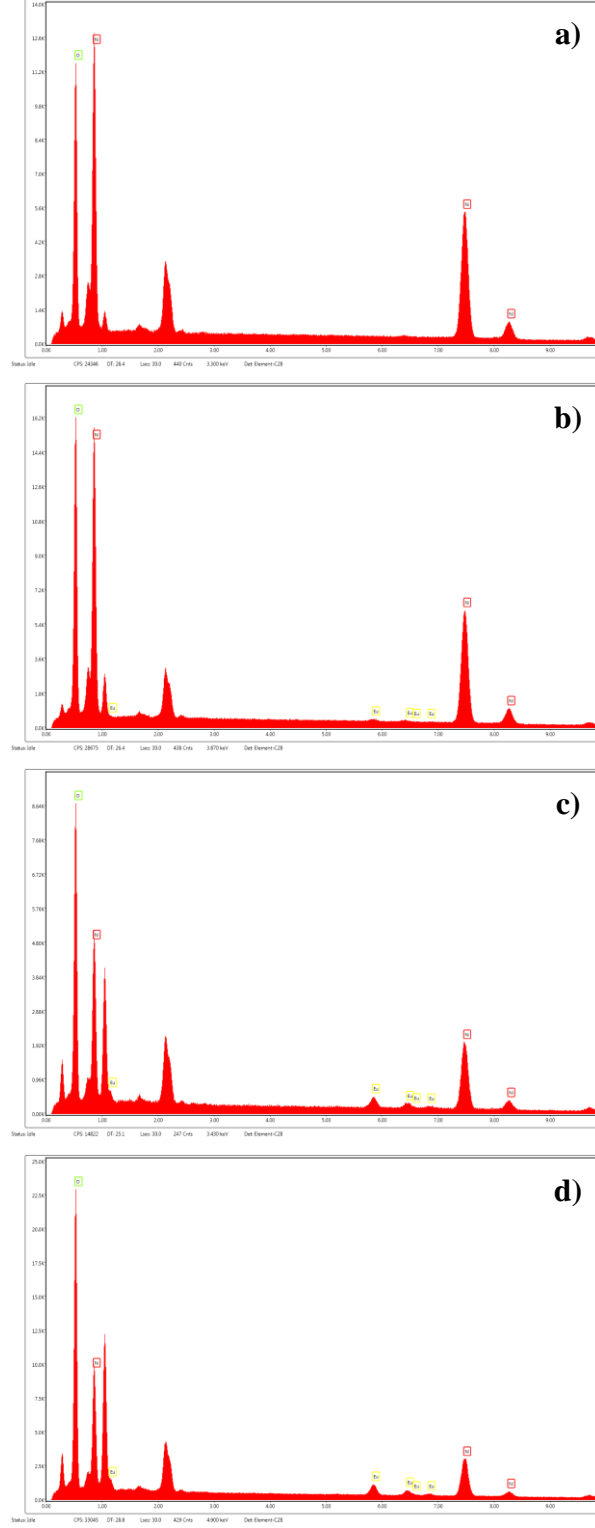


Şekil 4. NiO-Eu5 numunesinin farklı büyütmelerde FE-SEM görüntüleri a) 20 kX ve b) 50 kX.



Şekil 5. NiO-Eu10 numunesinin farklı büyütmelerde FE-SEM görüntüleri a) 20 kX ve b) 50 kX.

Şekil 6 ve Tablo 4’de sırasıyla sentezlenen nanoparçacıkların EDX analiz grafikleri ve EDX analiz sonuçları verilmiştir. Eu katkı oranı arttıkça nanoparçacıklardaki Eu oranının artması Eu’nun NiO’ya farklı oranlarda başarılı bir şekilde katıldığını göstermektedir.



Şekil 6. EDX analiz grafikleri a) NiO, b) NiO-Eu1, c) NiO-Eu5 ve d) NiO-Eu10.

Tablo 4. Sentezlenen nanoparçacıkların EDX analiz sonuçları.

Numune/Element (at.%)	O	Ni	Eu
NiO	38.24	61.76	-
NiO-Eu1	43.21	56.25	0.55
NiO-Eu5	54.34	42.09	3.57
NiO-Eu10	65.51	30.26	4.22

4. Sonuçlar

Eu katkılı NiO nanoparçacıklar sol-jel yöntemi ile başarı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen nanoparçacıklar nanoboyutlu yapılardan meydana gelmiştir. Nanoparçacıkların yapısal ve morfolojik özellikleri Eu katkısından etkilenmiştir. Eu katkı miktarı arttıkça kafes parametreleri ve birim hücre hacminde genişleme meydana gelmiştir. Eu katkısı arttıkça kristalite boyutları azalmıştır. Sentezlenen nanoparçacıkların elektronik endüstrisinde kullanılan cihazlarda yarıiletken olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Yazar Ezgi GÜRGENÇ 100/2000 doktora burs programı ile verdiği burs desteği için Yüksek Öğretim Kuruluna (YÖK) teşekkür eder. E.G. fikir sahibi. E.G. nanoparçacıkları sentezledi. E.G. yapısal ve morfolojik özellikleri yorumladı.

Kaynaklar

- [1] Rahman M A, Radhakrishnan R, Gopalakrishnan R. Structural, optical, magnetic and antibacterial properties of Nd doped NiO nanoparticles prepared by co-precipitation method. *J. Alloys Compd.* 2018; 742: 421-429.
- [2] Zargouni S, El Whibi S, Tessarolo E, Rigon M, Martucci A, Ezzaouia H. Structural properties and defect related luminescence of Yb-doped NiO sol-gel thin films. *Superlattices Microstruct.* 2020; 138: 106361.
- [3] Chtouki T, El Mrabet M, Tarbi A, Goncharova I, Erguig H. Comprehensive review of the morphological, linear and nonlinear optical characterization of spin-coated NiO thin films for optoelectronic applications. *Opt. Mater.* 2021; 118: 111294.
- [4] Chen X, Xu L, Chen C, Wu Y, Bi W, Song Z, Zhuang X, Yang S, Zhu S, Song H. Rare earth ions doped NiOx hole transport layer for efficient and stable inverted perovskite solar cells. *J. Power Sources* 2019; 444: 227267.
- [5] Javar H A, Garkani-Nejad Z, Dehghannoudeh G, Mahmoudi-Moghaddam H. Development of a new electrochemical DNA biosensor based on Eu³⁺-doped NiO for determination of amsacrine as an anti-cancer drug: Electrochemical, spectroscopic and docking studies. *Anal. Chim. Acta* 2020; 1133: 48-57.
- [6] Goumri-Said S, Khan W, Boubaker K, Turgut G, Sönmez E, Minar J, Bououdina M, Kanoun M B. Europium incorporation dynamics within NiO films deposited by sol-gel spin coating: experimental and theoretical studies. *Mater. Res. Bull.* 2019; 118: 110525.
- [7] Al Boukhari J, Khalaf A, Sayed Hassan R, Awad R. Structural, optical and magnetic properties of pure and rare earth-doped NiO nanoparticles. *Appl. Phys. A* 2020; 126(5): 1-13.
- [8] Al Boukhari J, Khalaf A, Awad R. Structural analysis and dielectric investigations of pure and rare earth elements (Y and Gd) doped NiO nanoparticles. *J. Alloys Compd.* 2020; 820: 153381.
- [9] Al Boukhari J, Khalaf A, Awad R. Structural and electrical investigations of pure and rare earth (Er and Pr)-doped NiO nanoparticles. *Appl. Phys. A* 2020; 126(1): 1-16.
- [10] Agrawal S, Parveen A, Azam A. Microwave assisted synthesis of Co doped NiO nanoparticles and its fluorescence properties. *J. Lumin.* 2017; 184: 250-255.
- [11] Al Boukhari J, Zeidan L, Khalaf A, Awad R. Synthesis, characterization, optical and magnetic properties of pure and Mn, Fe and Zn doped NiO nanoparticles. *Chem. Phys.* 2019; 516: 116-124.
- [12] Ponnusamy P, Agilan S, Muthukumarasamy N, Senthil T, Rajesh G, Venkatraman M, Velauthapillai D. Structural, optical and magnetic properties of undoped NiO and Fe-doped NiO nanoparticles synthesized by wet-chemical process. *Mater. Charact.* 2016; 114: 166-171.
- [13] Rakibuddin M, Shinde M A, Kim H. Sol-gel fabrication of NiO and NiO/WO₃ based electrochromic device on ITO and flexible substrate. *Ceram. Int.* 2020; 46(7): 8631-8639.
- [14] Ganesan V, Hariram M, Vivekanandhan S, Muthuramkumar S. Periconium sp.(endophytic fungi) extract mediated sol-gel synthesis of ZnO nanoparticles for antimicrobial and antioxidant applications. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2020; 105: 104739.

- [15] Manikandan B, Endo T, Kaneko S, Murali K, John R. Properties of sol gel synthesized ZnO nanoparticles. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2018; 29(11): 9474-9485.
- [16] Mokoena T P, Swart H C, Hillie K T, Motaung D E. Engineering of rare-earth Eu³⁺ ions doping on p-type NiO for selective detection of toluene gas sensing and luminescence properties. *Sens. Actuators B Chem.* 2021; 347: 130530.
- [17] Tilley R J, *Crystals and crystal structures*: John Wiley & Sons, 2020.
- [18] Shkir M, Chandekar K V, Khan A, Alshahrani T, El-Toni A M, Sayed M, Singh A, Ansari A A, Muthumareeswaran M, Aldalbah A. Tailoring the structure-morphology-vibrational-optical-dielectric and electrical characteristics of Ce@ NiO NPs produced by facile combustion route for optoelectronics. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2021; 126: 105647.
- [19] Joshi U, Matsumoto Y, Itaka K, Sumiya M, Koinuma H. Combinatorial synthesis of Li-doped NiO thin films and their transparent conducting properties. *Appl. Surf. Sci.* 2006; 252(7): 2524-2528.