

Araştırma Makalesi - Research Article

İtriyum Katkılı Gadolinyum Oksit Numunelerinin Sentez ve Karakterizasyonu

Synthesis and Characterization of Yttrium Doped Gadolinium Oxide Samples

Tankut Ateş^{1*}, Aydan Aksoğan Korkmaz², Niyazi Bulut³, Serhat Keser⁴, Ömer Kaygılı⁵

Geliş / Received: 30/09/2021

Revize / Revised: 02/02/2022

Kabul / Accepted: 06/02/2022

ÖZ

Bu çalışmada, yaş kimyasal sentez ile üretilen katkısız ve itriyum (Y) katkılı gadolinyum oksit (Gd_2O_3) yapıların karakterizasyonu hakkında detaylı bilgi sunuldu. Numunelerin karakterizasyonu için, X-ışını kırınımı analizi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskopi tekniği kullanıldı. Örgü parametresinin, kristal büyüklüğünün ve kristalleşme derecesinin Y miktarıyla değişim gösterdiği gözlemlendi. Numunelerin kristal büyüklükleri, 31,17 nm ile 35,49 nm aralığında hesaplandı. Numunelerin kristalleşme değerleri, % 88,6 ile % 90,2 aralığında bulunmuştur. Gd_2O_3 'ün morfolojisinin Y miktarından etkilendiği belirlendi.

Anahtar Kelimeler- *Gadolinyum Oksit, İtriyum, X-Işını Kırınımı, Kristal Yapı Analizi*

ABSTRACT

In this study, detailed information about the un-doped and yttrium (Y)-doped gadolinium oxide (Gd_2O_3) structures produced by the wet chemical synthesis was presented. For the characterization of the samples, X-ray diffraction analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, and scanning electron microscopy technique were used. It was observed that the lattice parameter, crystallite size, and crystallization degree changed with the amount of Y. The crystallite sizes of the samples were calculated in the range of 31.17 nm to 35.49 nm. The crystallization values of the samples were found between 88.6% and 90.2%. It was determined that the morphology of Gd_2O_3 was affected by the amount of Y.

Keywords- *Gadolinium Oxide, Yttrium, X-Ray Diffraction, Crystal Structure Analysis*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: tankut.ates@ozal.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4519-2953>)
Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, 44210, Malatya, Türkiye

²İletişim: aydan.aksogan@ozal.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-3309-9719>)
Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Hekimhan Meslek Yüksekokulu, Maden Teknolojisi Bölümü, 44210, Malatya, Türkiye

³İletişim: nbulut@firat.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-2863-7700>)
Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

⁴İletişim: serhatkeser@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-9678-1053>)
Fırat Üniversitesi, EOSB Meslek Yüksekokulu, Kimya Teknolojisi Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

⁵İletişim: omerkaygili@yahoo.com (<https://orcid.org/0000-0002-2321-1455>)
Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

I. GİRİŞ

Günümüzde nadir toprak hidroksit/oksit nanomalzemeleri, mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle nanoteknoloji alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Nadir toprak elementleri, periyodik tabloda 15 tanesi lantanit grubu ve ek olarak skandiyum ve itriyum olmak üzere 17 element olarak yer almaktadır [1]. Nadir toprak elementleri (NTE); mıknatıs (manyetik rezonans görüntüleme cihazları (MRI), fren sistemleri ve otomobil parçaları, iletişim sistemleri, rulmanlar vb.), katalizör (petrol rafinasyonu, kimyasal prosesler, katalitik dönüştürücüler, mazot katkısı vb.), elektronik cihazlar (lazerler, fiber optikler, sensörler, medikal görüntüleme cihazları vb.), cam (optik camlar, optik termal sensörler, termal aynalar vb.), seramik (kapasitörler, sensörler, renklendiriciler vb.), alaşımlar (NiMH piller, çelik, dökme demir, süper alaşımlar vb.) ve diğer (su arıtma, floresan lambalar, pigmentler, gübre, tıbbi izleme, kaplamalar) alanlarda kullanılmaktadır [1-3].

Gadolinium (Gd) genellikle gümüşü-beyaz renkli bir nadir toprak elementi ve lantanit elementi olarak bilinmektedir. *f* seviyesindeki 7 eşleşmemiş elektronu nedeniyle paramanyetik özelliklere sahiptir. Ayrıca, yüksek termal nötron yakalama tesir kesiti ve mükemmel kimyasal kararlılık göstermektedir. Gd, X-ışınları ve diğer radyasyon türleriyle etkileşime izin veren yüksek atom numarası sayesinde, etkili bir radyosensitize edici bir ajandır [4]. Gd, sıcaklığa bağlı olarak kübik (oda sıcaklığında) ve monoklinik (1250 °C'nin üzerinde) olmak üzere iki farklı kristal yapıda bulunmaktadır [3].

Gd₂O₃, yüksek termal direnci ve yüksek yüzey alkalinitesi nedeniyle oksidasyon reaksiyonlarında katalizör olarak kullanılmasının yanında genellikle destek yapısı veya katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır. Destek olarak kullanılacak gadolinium oksidin yüksek yüzey alanına ve yüksek kristalleşmeye sahip olması önemlidir [5]. Gd₂O₃, Gd izotoplarının yüksek nötron yakalama tesir kesiti nedeniyle en düzenli olarak kullanılan yanabilir absorplayicilerden biridir [6]. Yüksek kırılma indeksine sahip olmasından dolayı optik madde olarak da kullanımı yaygındır. Yüksek göreceli geçirgenliği, yüksek direnci ve geniş bant aralığı Gd₂O₃'i ileri teknolojik uygulamalar için ilgi çekici kılmaktadır. Ek olarak, katkılı Gd₂O₃'lerin iyonik ve elektronik iletkenliği, onu yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun bir malzeme haline getirmektedir [7].

Gd₂O₃ parçacıklarının sentezlenmesinde poliöl, hidrotermal, sol-jel, mekanokimyasal, kimyasal çöktürme, darbeli lazer ablasyonu ve darbeli elektron ışını buharlaştırması gibi birçok yöntem kullanılmaktadır [4, 5, 8-11].

Kimyasal çöktürme yöntemi, malzeme sentezi için kullanılan en yaygın araştırma tekniklerinden biridir [12]. Kimyasal çöktürme; sıvıda kimyasal sentez ve katı halde ısıl işlem olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Kimyasal sentez nanomalzemelerin kimyasal bileşimlerini, katı halde ısıl işlem ise kristal yapılarını ve morfolojilerini etkilemektedir [13].

Literatürde evropiyum (Eu⁺³) [14,15], erbiyum (Er⁺³) ve iterbiyum (Yb⁺³) [16-21], kadmiyum oksit (CdO) [22], lityum oksit (Li₂O) ve potasyum oksit (K₂O) [23], cam boratlar (B₂O₃-CaO-Na₂O-SrO-P₂O₅) [24] gibi çeşitli katkı maddeleriyle sentezlenen Gd₂O₃ ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

İtriyum katkılı baryum serat[25-27], kadmiyum oksit [28], kobalt-çinko ferrit [29] ve baryum zirkonat[30-36] ile ilgili pek çok çalışma mevcutken, itriyum (Y) katkılı gadolinium oksit senteziyle ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, yaş kimyasal yöntemle itriyum (Y) katkılı Gd₂O₃ nanomalzeme sentezi gerçekleştirilmiş olup, üretilen numunelerin karakterizasyonu taramalı elektron mikroskopisi (SEM), X-ışını kırınımı (XRD) analizi ve Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Çözücü olarak saf su kullanılmak suretiyle, beş farklı balon jöje içerisinde (6-x) mmol gadolinium (III) nitrat heksahidrat (Gd(NO₃)₃·6H₂O) ve xmmol itriyum (III) nitrat heksahidrat (Y(NO₃)₃·6H₂O) çözeltileri hazırlandı. Burada x değerleri sırasıyla 0, 0,03, 0,06, 0,12 ve 0,24 şeklindedir. Hazırlanan her bir çözeltinin toplam hacmi 50 mL olup, çözücü olarak saf su kullanıldı. Her bir çözelti farklı bir beher içerisine döküldü ve çözeltiler manyetik karıştırıcıda 50 °C'de 2 saat karıştırıldı ve sonrasında bir etüv içerisine konulup, 140 °C'de 15 saat kurutuldu. Son olarak, kurutulmuş numuneler porselen krozelere boşaltıldı ve bir kül fırınında 1000 °C'de 1,5 saat ısıl işleme tabi tutularak katkısız ve Y katkılı Gd₂O₃ numuneleri elde edildi.

Numunelerin karakterizasyonu için; X-ışını kırınımı (XRD) analizinde Bruker D8 Advance model difraktometre, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) analizinde Perkin Elmer SpectrumOne model spektrofotometre ve morfolojik incelemelerde LEO EVO 40xVP taramalı elektron mikroskopu kullanıldı.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1’de verilen XRD desenlerinin tamamının, 12-0797 numaralı JCPDS kartında kübik kristal yapıya sahip Gd₂O₃ için tanımlanan standart desene mükemmel uyum içerisinde olduğu görülmektedir [37,38]. XRD spektrumunda görüldüğü gibi (211), (222), (400), (411), (322), (431), (440), (611), (541), (622), (631) ve (444) kristal düzlemlerine ait pikler sırasıyla 20,02°, 28,60°, 33,16°, 35,18°, 39,04°, 42,62°, 45,98°, 47,56°, 52,16°, 55,05°, 56,44°, 57,84° ve 59,24° konumlarında gözlemlendi. Y katkısıyla beraber yeni bir faz oluşumuna (Y₂O₃ gibi) rastlanmamaktadır. Bununla birlikte, Y katkısıyla XRD deseni üzerindeki piklerin şiddetlerinde belirgin bir biçimde değişiklikler meydana gelmektedir ki bu durum özellikle en yüksek şiddete sahip olan (222), (400), (440) ve (622) piklerinde belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Şekil 1 üzerinde (400) ve (440) düzlemlerine ait XRD piklerine ait çizilen çakıştırılmış grafikler yardımıyla bu durumun daha belirgin bir biçimde gözlemlenmesi mümkündür. Gerek pik şiddetlerinde değişimler gerekse pik konumlarında kısmen kaymalar gözlemlenmektedir ki bu durum, Y katkısının Gd₂O₃ yapısı içerisine nüfuz etmesiyle ilişkilendirilebilir.

Ortalama kristal büyüklüğü (*D*) değerlerinin hesaplanmasında Denklem (1)’de verilen Scherrer denklemi kullanılmıştır [39].

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

Kübik yapıya ait örgü sabiti olan *a* ve birim hücre hacmi olan *V* sırasıyla Denklem (2) ve Denklem (3) kullanılmak suretiyle hesaplanmıştır.

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

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

Kristalleşme yüzdesi (*X_C*%) aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplandı [40].

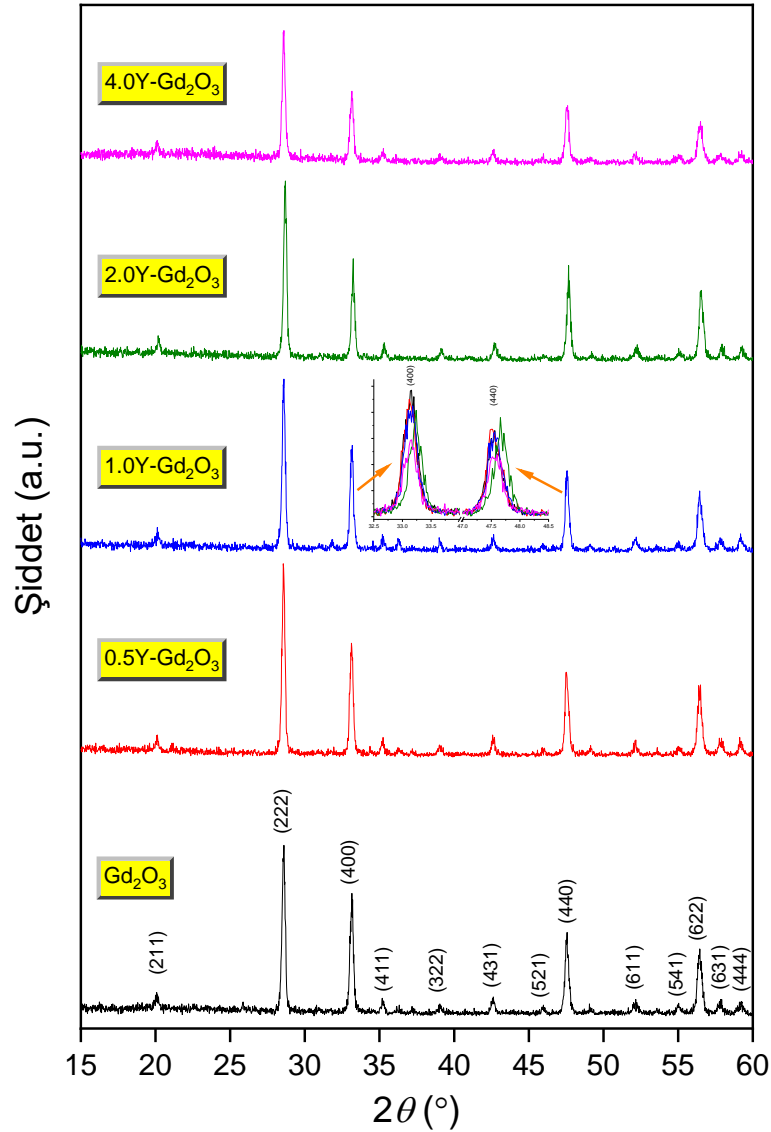
$$X_C\% = \frac{\sum A_C}{\sum A_C + \sum A_A} \times 100 \quad (4)$$

Burada $\sum A_C$ ve $\sum A_A$ sırasıyla kristal pikler altında kalan toplam alan ve amorf pikler altında kalan toplam alana karşılık gelmektedir.

Yukarıdaki bağıntılar ile numunelerin örgü sabiti (*a*), birim hücre hacmi (*V*), kristal büyüklüğü (*D*) ve kristalleşme yüzdesi (*X_C*%) değerleri hesaplandı ve Tablo 1’ de verildi. Y ilavesi ve bu katkının miktarının yukarıda bahsi geçen dört parametre üzerine etkili olduğu görülmektedir. Gözlemlenen bu değişimlerin hiçbirisi kademeli bir artış veya azalış şeklinde değildir. Kristal büyüklüğündeki değişime bakıldığında; tüm Y katkılı numunelerin kristal büyüklüğü katkısız numuneye nazaran daha yüksek bir değere sahiptir. Üretilen numunelerin kristalleşme yüzdeleri ise %88,6 ile %90,2 değerleri arasında olup, tüm numunelerin yüksek kristalleşme oranına sahip oldukları belirlendi.

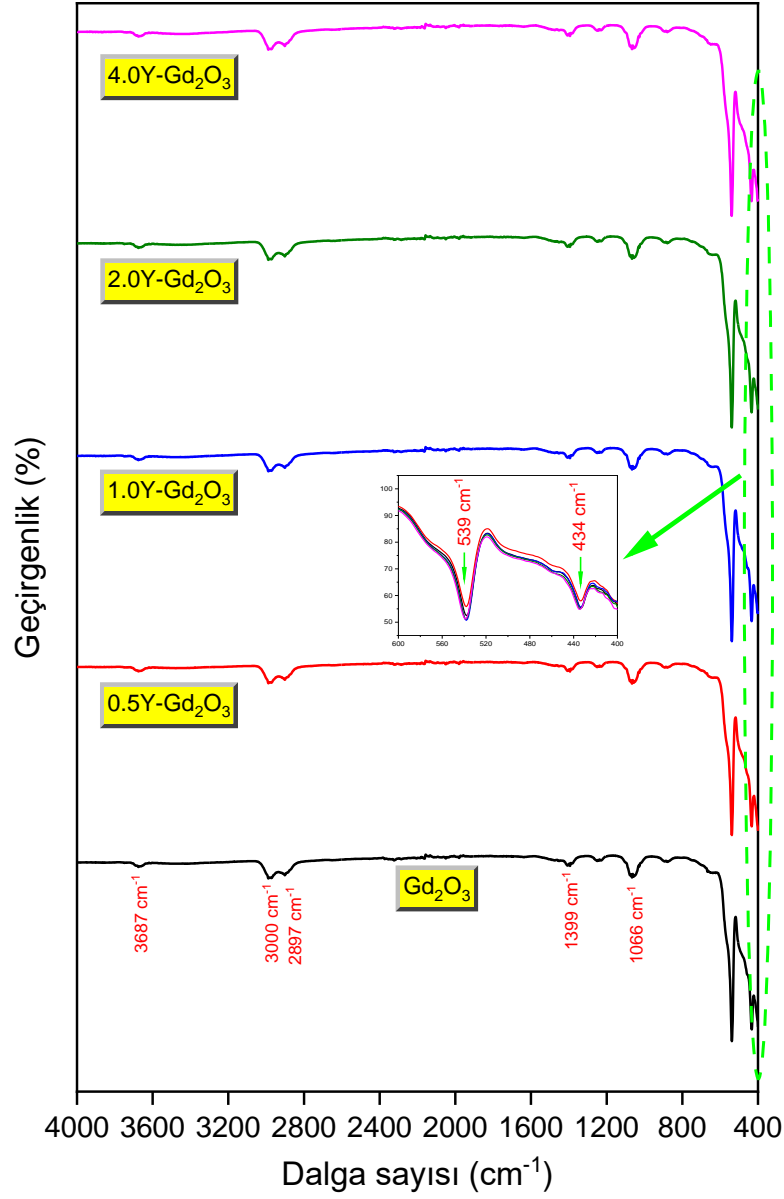
Tablo 1. Her bir numuneye ait örgü sabiti (*a*), birim hücre hacmi (*V*), kristal büyüklüğü (*D*) ve kristalleşme yüzdesi (*X_C*%) değerleri

Numune	<i>a</i> (nm)	<i>V</i> (nm) ³	<i>D</i> (nm)	<i>X_C</i> %
Gd ₂ O ₃	0,10806	0,0012618	31,17	89,0
0.5Y-Gd ₂ O ₃	0,10812	0,0012639	31,77	90,2
1.0Y-Gd ₂ O ₃	0,10807	0,0012622	33,74	88,6
2.0Y-Gd ₂ O ₃	0,10780	0,0012527	33,60	88,8
4.0Y-Gd ₂ O ₃	0,10803	0,0012608	35,49	86,2



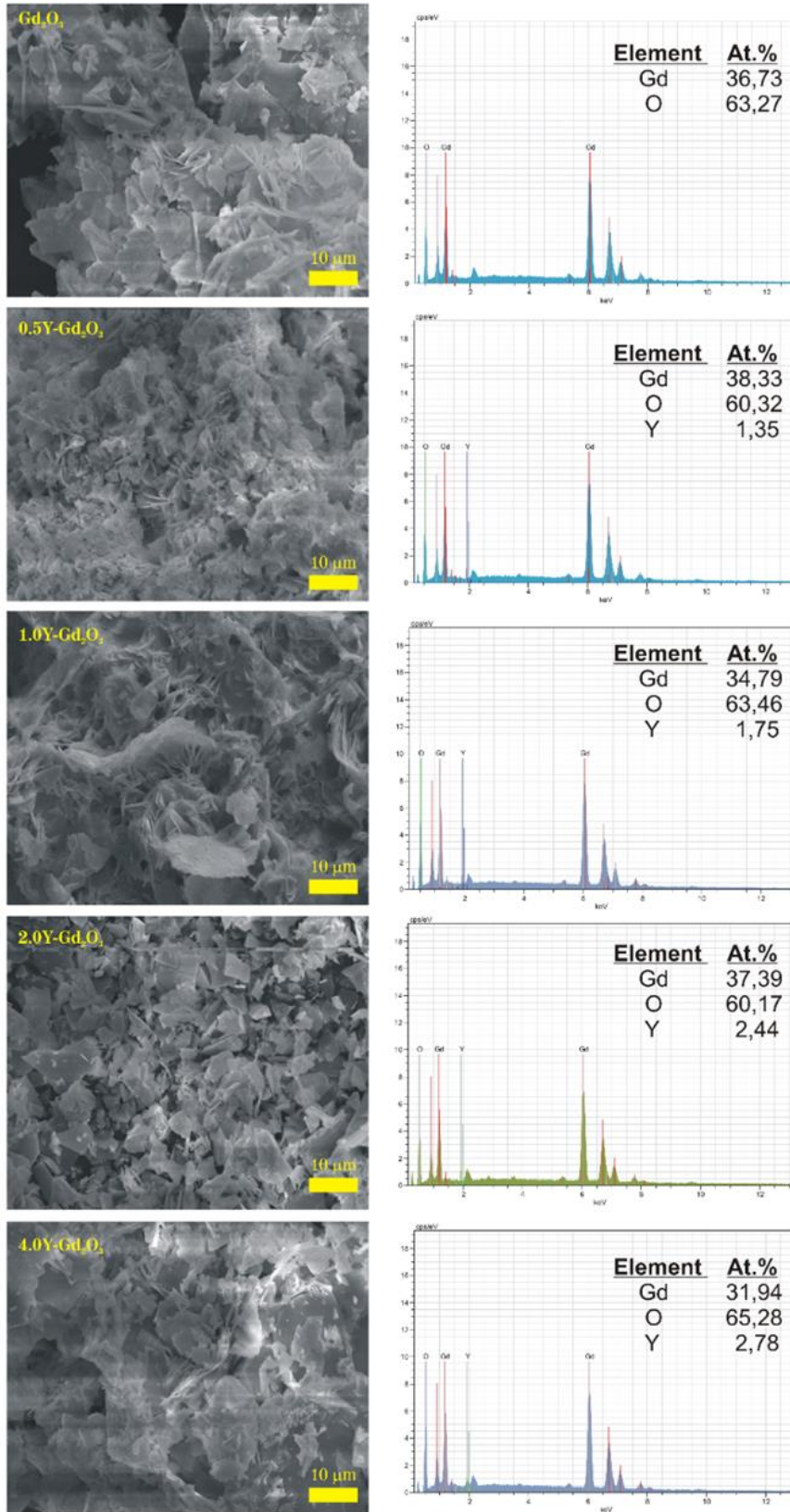
Şekil 1. Katkısız ve Y katkılı Gd_2O_3 numunelerine ait XRD spektrumları

Numunelere ait FTIR analiz sonuçları Şekil 2’de verilmiştir. $434cm^{-1}$ ve $539 cm^{-1}$ ’de tespit edilen bantlar Gd-O bağına ait titreşimlerden kaynaklanmaktadır ve bu bantlar, tüm numunelerde Gd_2O_3 yapısının oluşumunu doğrulamaktadır [41]. $1066 cm^{-1}$ ve $1399 cm^{-1}$ ’de gözlenen bantlar atmosferden numuneye adsorbe olan karbonat grubuna ait C-O bağıyla alakalı titreşimler ile ilişkilendirilebilir [42]. FTIR spektrumunda $2897 cm^{-1}$ ve $3000 cm^{-1}$ ’de tespit edilen bantlar C-H titreşimlerine aittir [43,44]. $3687 cm^{-1}$ ’de gözlenen bant hidroksil grubuyla alakalıdır [45].



Şekil 2. Katkısız ve Y katkılı Gd₂O₃ numunelerine ait FTIR spektrumları

Katkısız ve itriyum katkılı gadolinyum oksit numunelerinin 20 keV ivmelendirme voltajı altında alınan taramalı elektron mikroskobu görüntülemeleri ve enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analiz sonuçları Şekil 3'te gösterilmektedir. Y katkılamanın morfoloji üzerine etki ettiği görülmektedir. Numuneler üst üste istiflenmiş plakalardan oluşan morfolojiye sahiptir. EDX sonuçları incelendiğinde; numunelerde Gd, O ve Y (beklendiği üzere katkısız numune hariç) elementlerine ait pikler olduğu ve Y içeriğinin giderek artan değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. SEM analizi öncesi numuneler altın (Au) ile kaplanmıştır. Bu sebeple, doğal olarak Au ile ilgili pik de (2,12 keV'de) gözlenmektedir.



Şekil 3. Üretilen gadolinyum oksit numunelerin SEM analiz sonuçları

IV. SONUÇLAR

Katkısız ve farklı oranlarda Y katkılanmış Gd_2O_3 numuneleri yaş kimyasal yöntem kullanılarak üretildi. Bu çalışmada kullanılan tüm Y katkılarları için herhangi bir ikincil fazın oluşumu gözlenmedi. Y katkısının ve bu katkının miktarının örgü sabiti, birim hücre hacmi, kristal büyüklüğü ve kristalleşme yüzdesi üzerine belirgin biçimde etki ettiği gözlemlendi. Kristal büyüklüğünün 31,17 nm ile 35,49 nm aralığında ve kristalleşme yüzdesinin ise %88,6 ile %90,2 aralığında değerlere sahip olduğu bulundu. Ayrıca, tüm Y katkılı numunelerin kristal büyüklüğü değerlerinin katkısız numuneye kıyasla daha yüksek bir değere sahip olduğu görüldü. Y katkılanmasının morfoloji üzerinde de etkili olduğu gözlemlendi.

KAYNAKLAR

- [1] MTA Genel Müdürlüğü. (2017). *Dünyada ve Türkiye’de Nadir Toprak Elementleri (NTE)*. Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı Ankara. https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/dunyada_ve_turkiyede_nadir_toprak_elementleri.pdf. (19.09.2021).
- [2] Celep, O., Yazıcı, E. Y., & Devenci, H. (2021). Nadir toprak elementlerinin birincil ve ikincil kaynaklardan üretimi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 264-280.
- [3] Perevalov, T. V., Dolbak, A. E., Shvets, V. A., Gritsenko, V. A., Asanova, T. I., & Erenburg, S. B. (2014). Atomic and electronic structure of gadolinium oxide. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 65(1), 10702.
- [4] Whba, F., Mohamed, F., Rosli, N. R. A. M., Rahman, I. A., & Idris, M. I. (2021). The crystalline structure of gadolinium oxide nanoparticles (Gd_2O_3 -NPs) synthesized at different temperatures via X-ray diffraction (XRD) technique. *Radiation Physics and Chemistry*, 179, 109212.
- [5] Özdemir, H. (2020). Preparation of Gd_2O_3 Nanomaterials via Solution Combustion Synthesis for Oxidative Coupling of Methane. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 21(1), 165-172.
- [6] Bolukbasi, M. J., Middleburgh, S. C., Dahlfors, M., & Lee, W. E. (2021). Performance and economic assessment of enriched gadolinia burnable absorbers. *Progress in Nuclear Energy*, 137, 103752.
- [7] Jamnezhad, H., & Jafari, M. (2016). Structure of Gd_2O_3 nanoparticles at high temperature. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 408, 164-167.
- [8] Cheraghali, R., & Aghazadeh, M. (2016). A Simple and Facile Electrochemical Route to Synthesis of Metal Hydroxides and Oxides Ultrafine Nanoparticles (M=La, Gd, Ni and Co). *Analytical & Bioanalytical Electrochemistry*, 8(1), 64-77.
- [9] Majeed, S., & Shivashankar, S. A. (2014). Microspherical, hierarchical structures of blue–green-emitting Dy: GdOOH and Dy: Gd_2O_3 . *Materials Letters*, 125, 136-139.
- [10] Tamrakar, R. K., Tiwari, N., Dubey, V., & Upadhyay, K. (2015). Infrared spectroscopy and luminescence spectra of Yb^{3+} doped ZrO_2 nanophosphor. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8(3), 399-403.
- [11] Bedekar, V., Dutta, D. P., & Tyagi, A. K. (2010). White light emission from spin coated Gd_2O_3 : Dynano phosphors synthesized using polyol technique. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10(12), 8234-8238.
- [12] Santos, M. H., Oliveira, M. D., Souza, L. P. D. F., Mansur, H. S., & Vasconcelos, W. L. (2004). Synthesis control and characterization of hydroxyapatite prepared by wet precipitation process. *Materials Research*, 7(4), 625-630.
- [13] Ersöz, M., Işıtan, A., & Balaban, M. (2018). *Nano Teknoloji I Nanoteknolojinin Temelleri*, Bilal Ofset, Denizli. ISBN 978-975-6992-80-7.
- [14] de Moura, A. P., Oliveira, L. H., Nogueira, I. C., Pereira, P. F., Li, M. S., Longo, E., & Rosa, I. L. (2014). Synthesis, structural and photophysical properties of Gd_2O_3 : Eu^{3+} nanostructures prepared by a microwave sintering process. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 4(03), 374-388.

- [15] Durante, L. P., Rocha, L. A., Dos Santos, D. P., Coelho, F. O., Schiavon, M. A., Ribeiro, S. J. L., & Ferrari, J. L. (2015). Synthesis, characterization and evaluation of scintillation properties of Eu³⁺-doped Gd₂O₃ obtained using PEG as precursor. *Journal of Alloys and Compounds*, 648, 467-473.
- [16] Glaspell, G., Wilkins, J. R., Anderson, J., & El-Shall, M. S. (2008). Formation of rare-earth upconverting nanoparticles using laser vaporization controlled condensation. In *Infrared Technology and Applications XXXIV*. 17-20 March, Florida, 6940, 69403B.
- [17] Das, G. K., Heng, B. C., Ng, S. C., White, T., Loo, J. S. C., D'Silva, L., & Tan, T. T. Y. (2010). Gadolinium oxide ultranarrownanorods as multimodal contrast agents for optical and magnetic resonance imaging. *Langmuir*, 26(11), 8959-8965.
- [18] Huang, D., Zhang, X., Liu, J., & Zhang, D. (2010). Synthesis of polycrystalline Yb: Gd₃Ga₅O₁₂ nanopowders by homogeneous precipitation method. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(1), 123-126.
- [19] Szysiak, A., Zhydachevskii, Y., & Suchocki, A. (2014). Upconversion in Gd₂O₃: Er, Yb nanophosphors obtained by hydrothermal and reverse microemulsion methods. In *International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering-fabrication, properties and applications (OMEE-2014)*. 26-30 May, Lviv, 155-156.
- [20] Tamrakar, R. K., & Bisen, D. P. (2015). Thermoluminescence studies of ultraviolet and gamma irradiated erbium (III)-and ytterbium (III)-doped gadolinium oxide phosphors. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 33, 169-188.
- [21] Kamińska, I., Elbaum, D., Sikora, B., Kowalik, P., Mikulski, J., Felcyn, Z., & Fronc, K. (2017). Single-step synthesis of Er³⁺ and Yb³⁺ ions doped molybdate/ Gd₂O₃ core-shell nanoparticles for biomedical imaging. *Nanotechnology*, 29(2), 025702.
- [22] Sivasamy, R., Venugopal, P., & Mosquera, E. (2020). Synthesis of Gd₂O₃/CdO composite by sol-gel method: Structural, morphological, optical, electrochemical and magnetic studies. *Vacuum*, 175, 109255.
- [23] Zekri, M., Herrmann, A., Erlebach, A., Damak, K., Rüssel, C., Sierka, M., & Mañlej, R. (2021). The Structure of Gd³⁺-Doped Li₂O and K₂O Containing Aluminosilicate Glasses from Molecular Dynamics Simulations. *Materials*, 14(12), 3265.
- [24] Madshal, M. A., El-Damrawi, G., Abdelghany, A. M., & Abdelghany, M. I. (2021). Structural studies and physical properties of Gd₂O₃-doped borate glass. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 14642-14653.
- [25] Kulkarni, S., Duttagupta, S., & Phatak, G. (2015). Sol-gel synthesis and protonic conductivity of yttrium doped barium cerate. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 74(1), 94-102.
- [26] Loureiro, F. J., Ramasamy, D., Ribeiro, A. F., Mendes, A., & Fagg, D. P. (2020). Underscoring the transport properties of yttrium-doped barium cerate in nominally dry oxidising conditions. *Electrochimica Acta*, 334, 135625.
- [27] Loureiro, F. J., Shakel, Z., Graça, V. C., & Fagg, D. P. (2021). Effect of humidification on the grain boundary conductivity and space-charge effects in yttrium-doped barium cerate. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 23828-23838.
- [28] Kelley, K. P., Sachet, E., Shelton, C. T., & Maria, J. P. (2017). High mobility yttrium doped cadmium oxide thin films. *APL Materials*, 5(7), 076105.
- [29] Devkar, J. V., Patankar, K. K., Ghone, D. M., & Mathe, V. L. (2021). Investigations of yttrium-doped cobalt-zinc ferrite as potential material for transducer application. *Emergent Materials*, 1-9.
- [30] Babilo, P., Uda, T., & Haile, S. M. (2007). Processing of yttrium-doped barium zirconate for high proton conductivity. *Journal of Materials Research*, 22(5), 1322-1330.
- [31] Shim, J. H., Gür, T. M., & Prinz, F. B. (2008). Proton conduction in thin film yttrium-doped barium zirconate. *Applied Physics Letters*, 92(25), 253115.

- [32] Yamazaki, Y., Hernandez-Sanchez, R., & Haile, S. M. (2009). High total proton conductivity in large-grained yttrium-doped barium zirconate. *Chemistry of Materials*, 21(13), 2755-2762.
- [33] Shimada, H., Takami, E., Ohba, F., Takei, C., Hagiwara, A., & Ihara, M. (2011). Effect of yttrium-doped barium zirconate on reactions in electrochemically active zone of nickel/yttria-stabilized zirconia anodes. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(11), B1341.
- [34] Blanc, F., Sperrin, L., Lee, D., Dervişoğlu, R., Yamazaki, Y., Haile, S. M., Paëpe, G. D., & Grey, C. P. (2014). Dynamic nuclear polarization NMR of low- γ nuclei: structural insights into hydrated yttrium-doped BaZrO₃. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5(14), 2431-2436.
- [35] Xie, H., Biswas, M., Fan, L., Li, Y., & Su, P. C. (2017). Rapid thermal processing of chemical-solution-deposited yttrium-doped barium zirconate thin films. *Surface and Coatings Technology*, 320, 213-216.
- [36] Iguchi, F., & Hinata, K. (2021). High-Temperature Elastic Properties of Yttrium-Doped Barium Zirconate. *Metals*, 11(6), 968.
- [37] Rajan, A. R., Rajan, A., John, A., Vilas, V., & Philip, D. (2019). Biogenic synthesis of nanostructured Gd₂O₃: Structural, optical and bioactive properties. *Ceramics International*, 45(17), 21947-21952.
- [38] Ortega-Berlanga, B., Hernández-Adame, L., del Angel-Olarte, C., Aguilar, F., Rosales-Mendoza, S., & Palestino, G. (2020). Optical and biological evaluation of upconverting Gd₂O₃: Tb³⁺/Er³⁺ particles as microcarriers of a Zika virus antigenic peptide. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123414.
- [39] Cullity, B.D. (1978). *Elements of X-ray Diffraction*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 100-105.
- [40] Kaygılı, O. (2014). Synthesis and characterization of Na₂O–CaO–SiO₂ glass–ceramic. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117(1), 223-227.
- [41] Selvalakshmi, T., & ChandraBose, A. (2012). Optical study on gadoliniumoxide nano particles synthesized by hydro thermal method. *Advanced Materials Research*, 585, 105-109.
- [42] Ge, R., Zhao, X., Qin, L., Feng, Z., Dong, B., Chen, Q., & Li, Q. (2011). Synthesis and Optical Properties of Gd₂O₃:Er³⁺,Yb³⁺Microcrystal Using Different Solvent. *Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO)*. 16-18 May, Wuhan, 1-6.
- [43] Azizian, G., Riyahi-Alam, N., Haghgoo, S., Moghimi, H.R., Zohdiaghdam, R., Rafiei, B., & Gorji, E. (2012). Synthesis route and three different core-shell impacts on magnetic characterization of gadolinium oxide-based nanoparticles as new contrast agents for molecular magnetic resonance imaging. *Nanoscale Research Letters*, 7, 549.
- [44] Vijayaprasath, G., Habibulla, I., Dharuman, V., Balasubramanian, S., & Ganesan, R. (2020). Fabrication of Gd₂O₃ Nanosheet-Modified Glassy Carbon Electrode for Nonenzymatic Highly Selective Electrochemical Detection of Vitamin B2. *ACS Omega*, 5(29), 17892-17899.
- [45] Rahman, M.M., Alam, M.M., Asiri, A.M., & Opo, F.A.D.M. (2020). Fabrication of selective and sensitive chemical sensorprobe based on ternary nano-formulated CuO/MnO₂/Gd₂O₃ spikes by hydro thermal approach. *Scientific Reports*, 10, 20248.