



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.05.2022
Kabul Tarihi : 06.08.2022

Received Date : 12.05.2022
Accepted Date : 06.08.2022

ÇİNKO OKSİT NANOPARÇACIK SENTEZLENMESİ VE E7 NEMATİK SIVI KRİSTALİNİN DİELEKTRİK VE KAPASİTANSA ETKİSİ

SYNTHESIS OF ZINC OXIDE NANOPARTICLE AND ITS EFFECT OF E7 NEMATIC LIQUID CRYSTALS ON DIELECTRIC AND CAPACITANCE

Şükrü ÖZĞAN* (ORCID: 0000-0001-9334-327X)
Fatma Betül YILDIZ (ORCID: 0000-0002-8950-8518)

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: : Şükrü ÖZĞAN, ozgan@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada hidrotermal yöntem kullanılarak Çinko Oksit (ZnO) nanoparçacık sentezlendi. Sentezlenen ZnO nanoparçacık geçirimli elektron mikroskobu ve x-ışınları difraksiyonu ile karakterizasyonu yapıldı. ZnO nanoparçacık, E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katılarak numuneler elde edildi. Bu numunelerin gerçek ve sanal dielektrik sabiti ve mutlak kapasitans değişimleri 100 Hz-15 MHz frekans aralığında oda sıcaklığında incelenmiştir. Gerçek dielektrik sabiti belli frekansa kadar sabit gibi çok az azalarak değiştiği, 0.8 MHz frekansa gelince birden bire azalarak sıfır olduğu, nanoparçacık katkı oran ile arttığı tespit edilmiştir. Sanal dielektrik kısmı düşük frekanslarda azalmakta, sonra sabit gibi davranıyor ve daha yüksek frekansta artarak yaklaşık 2 MHz frekans civarında pik yapar ve azalarak sıfıra yaklaşıyor. Sıvı kristalin dielektrik ve kapasitans değerleri % 0.6 ZnO nanoparçacık katkı oranında en büyük değişim göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: ZnO, nanoparçacık, sıvı kristal, dielektrik, kapasitans

ABSTRACT

In this study, Zinc Oxide (ZnO) nanoparticle was synthesized using hydrothermal method. Synthesized ZnO nanoparticle was characterized by transmission electron microscopy and x-ray diffraction. Samples were obtained by doping ZnO nanoparticle to E7 nematic liquid crystal at different rates. The real and imaginary dielectric constant and absolute capacitance changes of these samples were investigated in the frequency range of 100 Hz-15 MHz at room temperature. It has been determined that the real dielectric constant changes by decreasing as little as constant until a certain frequency, when it comes to the frequency of 0.8 MHz, it suddenly decreases and becomes zero, and increases with the nanoparticle contribution rate. The virtual dielectric part decreases at low frequencies, then behaves like a constant, and increases at higher frequency, peaking around 2 MHz and approaching to zero. The dielectric and capacitance values of the liquid crystal show the greatest variation at 0.6% ZnO nanoparticle contribution.

Keywords: ZnO, nanoparticle, liquid crystal, dielectric, capacitance

GİRİŞ

Organik malzemeler, potansiyel uygulama alanları ve sıra dışı özellikleri nedeniyle son yıllarda giderek daha fazla incelenmeye başlanmıştır. Özellikle, maddenin katı ve sıvı arasında bir ara faz olarak tanımlanan sıvı kristaller, farklı elektro-optik cihazlar için büyük öneme sahiptir. Sıvı kristal ekran teknolojisi, tam renk yelpazesi göstermesi, daha düşük güç tüketimi ve daha az yer kaplaması nedeniyle bilgisayar ekranlarında, TV ve birçok makinaların ve araçların gösterge sistemlerinde kullanılmaktadır (Chen 2011; Yang and Wu 2014). 2000 li yılların başlarında, endüstriyel uygulamalarda sıvı kristallerin yıllık satışının oldukça fazla olduğu görülmüştür (Castellano 2006). Ayrıca elektro-optik filtreler (Caputo et al. 2009; Wu 1989), holografi (Chen and Brady 1992), dijital veri depolama (Khoo et al. 1999; Matharu, Jeeva, and Ramanujam 2007) ve biyosensörlerin yapımında da sıvı kristallerin önemi azımsanamaz seviyelerdedir (Woltman et al. 2007). Genel olarak, modern sıvı kristallerin endüstriyel uygulamaları için geniş sıvı kristal faz sıcaklık aralığı, küçük anahtarlama süresi, yüksek optik ve dielektrik anizotropiye gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla yeni sıvı kristallerin sentezlenmesi veya sıvı kristal karışımının oluşturulması ve katkı malzemelerin kullanılması, bu özelliklere sahip sıvı kristal elde etmek için kullanılan yöntemlerdir. Bu nedenle sıvı kristalleri kullanan cihazın performansı, sıvı kristale ve konuk malzemelere büyük ölçüde bağlıdır (Dolgov, Yaroshchuk, and Lebovka 2008; Özgan and Okumuş 2011; Vardanyan, Palazzo, and Walton 2011). Boya, polimer ve nanopartiküller, konuk malzemelerin ana türleridir. Nematik sıvı kristallerdeki %1 boya katkısı, nematik sıvı kristalin yeniden oryantasyonunu iki katına kadar artırır. Ayrıca nematik sıvı kristallere boya katkısının, eşik voltajını neredeyse %25'e kadar, kırılma indisi modülasyonunu da üç kata kadar azalttığı tespit edilmiştir (Jánossy 1994; Köysal, Okutan, and Gökçen 2011).

Sıvı kristallerin cihazlarının performansının artırılması için kullanılan konuk malzemeler polimer, boyar malzemeler ve nanomalzemelerdir. Veya bu çalışmada kullandığımız dört sıvı kristalin ötektik karışımı olan E7 nematik sıvı kristalinide oldu gibi iki veya daha çok sıvı kristali belirli oranlarda karıştırarak farklı fiziksel özelliklere sahip yeni sıvı kristal malzeme elde edilebilir. Eskalen ve ark. E7/6CB/6AB üçlü sıvı karışım kompleksinin elektro-optik, ısıl ve dielektrik özelliklerini incelediler (Eskalen, Okumuş, and Özgan 2019). Sıvı kristallere katılan nanomalzeme, sıvı kristallerin özelliklerini geliştirir. Literatürde bu amaçla metalik nanopartiküller (Kobayashi et al. 2006), ferromanyetik nanopartiküller (Okutan et al. 2012), yarı iletken nanopartiküller (Zharkova and Streltsov 2020) ve karbon nanomalzemeler (Lee and Chiu 2001; Lee, Gau, and Chen 2005) gibi farklı tipte nanomalzemeler kullanılmaktadır. Özgan ve ark heksilsiyaniobifenil sıvı kristaline grefen oksit nanoparçacık katkılanarak ısıl ve elektro-optik özelliklerini incelemiştir (Özgan, Eskalen, and Tapkıranlı 2018). Karbon kuantum noktaları nematik sıvı kristale in elektro-optik performansına etkisi incelendi (Eskalen 2020). GO@ Fe₃O₄@ TiO₂ tipi organik-inorganik nanohibrit materyalin sentezi: Nanohibrit katkılı sıvı kristal E7'nin etkisinin ve siprofloksasinin fotokatalitik bozunması araştırılmıştır (Uruş et al. 2022). Farklı sıcaklıklarda hidrotermal olarak üretilen kobalt oksit nano yapıların nematik sıvı kristalin faz geçiş sıcaklığı ve eşik voltajına etkisi araştırılmıştır (Eskalen, Kerli, and Özgan 2017). ZnO nanopartiküller yapısında çinko ve oksijen atomlarını içeren yüksek elektriksel iletkenlik ve geçirgenliğe sahip metal oksit yarıiletken malzemelerdir. ZnO basit ve ekonomik üretimleri, 3.37 eV geniş bant aralığı enerjisine ve 60 meV'lik yüksek eksiton bağlama enerjisine sahip olmaları nedeniyle elektronikten optiğe, güneş pillerinden gaz sensörlerine kadar birçok uygulama alanında kullanılmaktadır (Li et al. 2011). Daha önceki yıllarda, çinko oksit nanopartiküllerin nematik sıvı kristallere katılanması eşik voltajını önemli ölçüde azalttığı ve bunun sıvı kristal cihazların daha düşük enerji tüketimine yardımcı olabileceği ifade edilmektedir. Ayrıca, çinko oksit nanopartikülleri, Sıvı kristal fazının sıcaklık aralığını artırmış ve sıvı kristallerin oryantasyonunu iyileştirmiştir (Eskalen et al. 2015). Bu çalışmada, ZnO nanopartiküller hidrotermal yöntem ile sentezlenmiştir. ZnO nanopartiküllerin yapısal özellikleri X-ışını difraksiyonu (XRD) aracılığıyla belirlenmiştir. Daha sonra ZnO nanopartiküller E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katılanmıştır. Son olarak da ZnO:E7 numunelerin elektriksel özellikleri araştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan E7 nematik sıvı kristal dört farklı sıvı kristalin ötektik bileşeni olup satın alınmıştır (Military University of Technology, Warsaw, Poland). Sentezlenen ZnO nanoparçacıkların belirli oranlarda E7 nematik sıvı kristale katılarak elde edilen numunelerin dielektrik ve kapasitans değerlerini frekansa ve voltaja bağlı ölçümlerini yapabilmek için birer yüzeyi İndium kalay oksit ile iletken haline getirilmiş ışığı geçiren üst üste iki plakadan oluşan cam hücre, (ITO) 0.8 µm aralıklı ve 1 cm² etkin alanı, Polanyadan satın alındı ve kullanıldı (Military University of Technology, Warsaw, Poland).

ZnO nanopartikülleri hidrotermal yöntem ile sentezlenmiştir. Çinko oksit nanopartikülleri sentezlemek için kullanılan NaOH ve Zn(Ac) Merck ten satın alındı. ZnO nanoparçacıkları sentezlemek için 2 gr NaOH ile 5.48 gr Zn(Ac) kullanılmıştır. 50 ml saf su kullanılarak 30 dk ultrasonik nebulizatörde karıştırılarak çözelti oluşturulmuştur. Çözelti bir çelik otoklavın yüksek sıcaklığa dayanıklı teflon kabına konup kapağı kapatıldıktan sonra 160°C sıcaklıktaki fırında 12 saat fırınlanmıştır. Fırınlanan numune süzülüp 12 gün oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Sonrasında numune 25 ml saf suda yıkanmış ve tekrar süzümüştür. Süzülen numune fırında 47°C'de kurutulup sonrasında numune 300°C de 3 saat tavlansmıştır. E7 nematik sıvı kristal ve ZnO nanopartiküller izoproponal içinde çözülmüştür. Daha sonra oda sıcaklığında ultrasonik banyo ve mekanik bir karıştırıcı yardımıyla homojen hale gelinceye kadar iki saat karıştırılmıştır. E7+ZnO karışımında izoproponalın tamamen buharlaşması için 45°C' de 10 saat fırınlanmıştır. Daha sonra ZnO ile sıvı kristal karışımı için her bir numune için 300 mg nematik sıvı kristale E7'ye, 0.9 mg (%0.3), 1.8 mg(%0.6) ve 3 mg (%1) ZnO nanopartikül katkılandırılarak üç farklı ZnO oranında numune elde edilmiştir. ZnO nanopartikül katkılı nematik sıvı kristal karışımı ITO boş hücrelere 65°C sıcaklıkta kılcal hareket yoluyla doldurulmuştur. Numunelerin doldurulduğu ITO cam hücrelerin numune doldurmak için açık bırakılan iki kenarı epoksi yapıştırıcı ile kapatılmıştır. Numunelerin ITO hücrelere doldururken 65°C sıcaklık olması, E7 nematik sıvı kristalin nemati-izotropik sıvı faz geçiş sıcaklığında E7 nin daha akıcı olması ve ITO hücreye kapalırite yöntemiyle kolaylıkla doldurulabilmesi için yapıldı.

Gösterge sistemlerinde kullanılan Sıvı kristallerin dielektirik ve kapasitan özelliklerini bilmek önemlidir. Dielektrik gerçek ve sanal kısımlarına bağlı olarak kompleks olarak verilir.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

Burada sırasıyla ε' dielektrik sabitinin gerçek kısmıdır malzemede elektrik yükü ve dolayısıyla enerji depolanmasını gösterir. ε'' dielektrik sabitinin sanal kısmıdır malzemeden elektrik yük boşalmasını ifade eder. Kapasitans dielektrik sabitinin gerçek kısmına bağlı olarak bu şekilde verilir;

$$C = \varepsilon' C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon' \frac{A}{d} \quad (2)$$

Burada C plakalar arası dolu iken kapasitans, C_0 plakalar arası boşken kapasitans ε_0 boş uzayın elektriksel geçirgenlik sabiti ($\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$); A, ITO hücrenin yüzey alanı ve d ise ITO hücre plakalar arasındaki mesafeyi ifade eder.

Dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısmı birbirine bağlı olarak bu şekilde verilir,

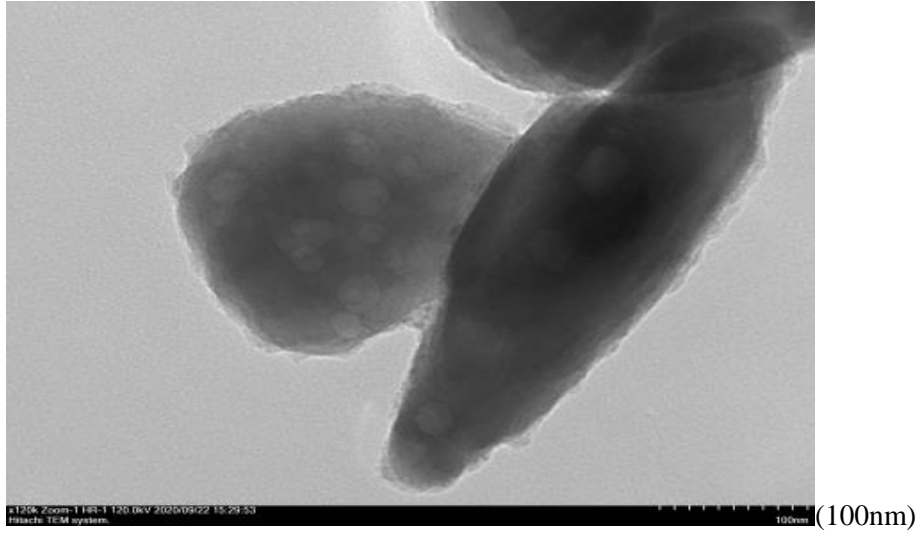
$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \quad (3)$$

Bu eşitlikte ki $\delta = 90 - \varphi$ ile verilir ve φ ise faz açısıdır.

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO nanoparçacık katkılı E7 nematik sıvı kristal kompozitlerin dielektrik ve kapasitan değerleri 100 Hz-15MHz frekans aralığında, sıfır doğru akım voltajında ve oda sıcaklığında HP 4194A empedans analizör ile ölçüldü ve grafik olarak verildi.

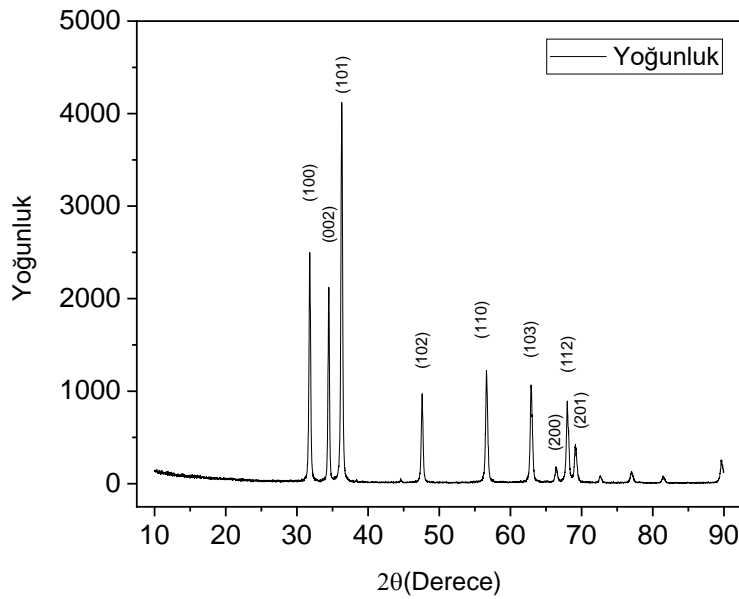
BULGULAR

Çalışmada kullanılan ZnO nanopartikülleri Materyal ve Yöntem bölümünde ifade edildiği gibi hidrotermal yöntemi ile sentezlenmiştir. Sentezlenen ZnO nanopartiküllerin geçirimli elektron mikroskobu (JEOL JEM-2100 UHR TEM) cihazı kullanılarak nanoparçacık yapısı incelendi, görüntüler Şekil 1'de verilmektedir.



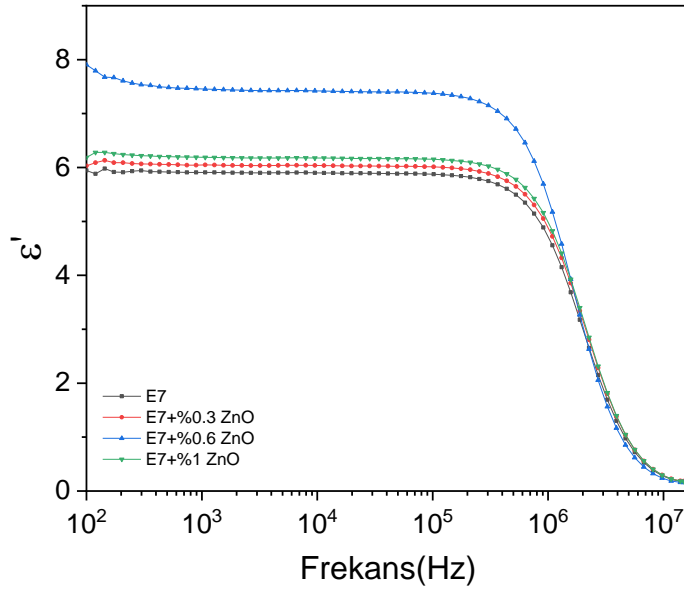
Şekil 1. ZnO Nanoparçacıkların TEM Görüntüsü

Üretilen ZnO nanopartiküllerin XRD kırınım desenleri Philips X'Pert PRO marka X-ışını difraksiyon cihazı ile incelendi ve Şekil 2'de görülmektedir. Tüm piklerin hekzagonal wurzit kristal yapısında Zincite fazına karşılık geldiği gözlemlenmektedir. XRD kırınım deseni incelendiğinde; 31.87°, 34.49°, 36.31°, 47.59°, 56.65°, 62.93°, 66.35°, 67.99° ve 69.15°'de bulunan 2θ karakteristik pikleri sırasıyla ZnO fazının (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112) ve (201) kafes düzlemlerine karşılık gelmektedir. Bu değerler, JCPDS 36-1451 standart kart değerleriyle uyşmaktadır.



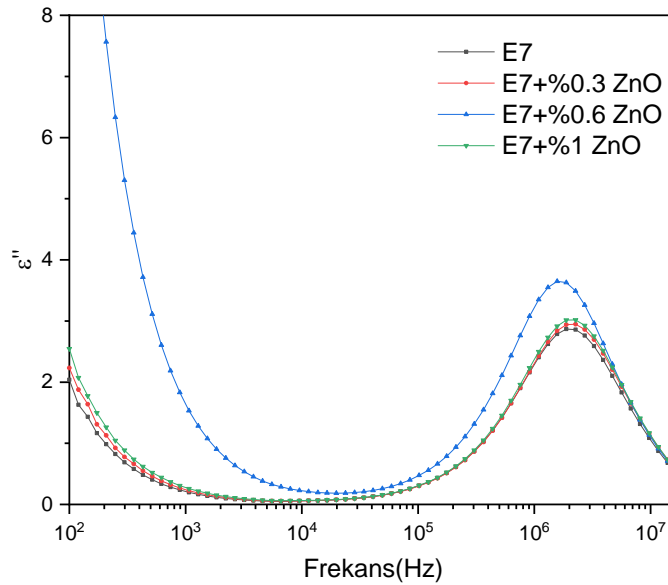
Şekil 2. ZnO Nanoparçacık X-ışını Kırınım Grafiği

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO:E7 nematik sıvı kristal kompozitin dielektrik gerçekte kısmının sıfır voltaj altında ve oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi Şekil 3'te görülmektedir. E7 nematik sıvı kristale %0.3 oranında ZnO nanopartikül katıldığında frekansa bağlı olarak dielektrik gerçekte kısmının (ϵ') değerinin arttığı, %0.6 oranında katıldığında daha fazla arttığı, %1 oranında katıldığında ise tekrar azaldığı görülmektedir. 0.1 MHz'e kadar Dielektrik değerinin sabit olup 0.1 MHz ile 1MHz aralığında azaldığı ve 1MHz'den sonra hızlı bir düşüşe geçtiği görülmektedir.



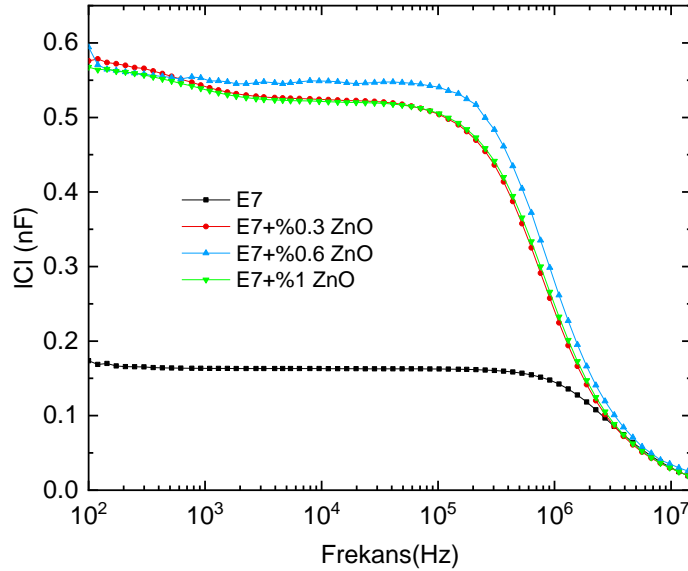
Şekil 3. Dielektrik gerçekte kısmı frekans ile değişimi

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO:E7 nematik sıvı kristal kompozitinin dielektrik sanal kısmının sıfır voltaj altında ve oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi Şekil 4'te görülmektedir. E7 nematik sıvı kristale %0.6 oranında ZnO nanoparçacık katılmasıyla dielektrik sanal kısmında 100 Hz değerinde en yüksek dielektrik değeri elde edilirken, 10 kHz ile 100 kHz aralığında ise sabit olup 100 kHz'den sonra tekrar bir artış olduğu ve yaklaşık 2MHz de frekansta pik yaptığı görülmektedir. Dielektrik sanal kısmı elektrik yük ve enerji kaybı olduğu için düşük frekanslarda serbest iyonlar sebebiyle büyük, frekans yükselirken azalıyor ve sıfıra yaklaşıyor, frekans daha da yükselirken dielektrik kayıp artıyor bir maksimum değere çıktıktan sonra, frekansın artışına bağlı olarak azalıyor ve sıfır yaklaşıyor. %0.6 ZnO katılı numunenin, dielektrik kayıp veya dielektrik sabiti sanal kısmı diğer numunelere nispeten bir miktar fazla artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4. Dielektrik Sanal Kısmı Frekans ile Değişimi

Hazırlanan üç farklı oranlarda ZnO:E7 nematik sıvı kristal kompozitin mutlak kapasitansı oda sıcaklığında frekansa bağlı değişimi Şekil 5'te görülmektedir. ZnO nanoparçacık katkılı E7 nematik sıvı kristal kompozitin ve saf E7 sıvı kristalin frekansa bağlı kapasitans değerlerine bakıldığında iki katından fazla kapasitansı artırdığı görülmektedir. Bunun sebebi ZnO nanoparçacıkların sıvı kristalin dielektrik katsayısını artırmasından kaynaklandığı söylenebilir. Yine en farklı kapasitans sonucunun %0.6 oranında ZnO nanoparçacık katkılanmasıyla ortaya çıktığı görülmektedir. Numunelerin kapasitans değeri 0.5 MHz kadar sabit gibi bir davranış sergilemekte, daha yüksek frekanslarda frekansın artmasıyla azalarak sifıra yaklaşmaktadır.



Şekil 5. Kapasitans Frekans ile Değişimi

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, çinko oksit nanopartikülleri hidrotermal yöntem ile sentezlendi ve karakterizasyonu yapıldı. Sentezlenen ZnO nanoparçacıklar belirli oranlarda E7 nematik sıvı kristali ile katkılanırıldı ve dielektrik sabiti gerçek ve sanal kısmı ve mutlak kapasitansı frekansa bağlı olarak oda sıcaklığında incelendi. ZnO nanoparçacıkları E7 sıvı kristalin dielektrik sabiti ve mutlak kapasitansı artırdığı sonucu elde edildi. Sıvı kristallerin elektro-optik özelliklerinin ZnO katkı konsantrasyonu ile değiştirilebileceği görüldü. Ancak sıvı kristallere katkı olarak kullanılan ZnO nanopartiküllerin belirli oranlara kadar sıvı kristalin dielektrik sabiti ve mutlak kapasitansını artırdığı, katkı oranı daha da artırılırsa aksi bir sonuçla karşılaşılacaktır. Bu çalışmada sıvı kristalin dielektrik sabiti ve kapasitansı frekansla değişiminde en yüksek değer E7 nematik sıvı kristaline %0.6 oranında ZnO nanoparçacık katkılanması ile elde edildi.

TEŞEKKÜR

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne 2019/6-11 YLS No'lu Proje kapsamında maddi destek sağlayanlara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Caputo, Roberto, Antonio De Luca, Luciano De Sio, Luigia Pezzi, Giuseppe Strangi, Cesare Umeton, Alessandro Veltri, Rita Asquini, Antonio d'Alessandro, and Domenico Donisi. (2009). POLICRYPS: A Liquid Crystal Composed Nano/Microstructure with a Wide Range of Optical and Electro-Optical Applications. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 11(2):24017.

Castellano, Joseph A. (2006). Modifying Light: Ubiquitous Today, Liquid-Crystal Displays Are the Outgrowth of More than a Century of Experimentation and Development. *American Scientist* 94(5):438–45.

Chen, Alan G., and David J. Brady. (1992). Real-Time Holography in Azo-Dye-Doped Liquid Crystals. *Optics Letters* 17(6):441–43. doi: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-17-6-441>.

- Chen, Robert H. (2011). *Liquid Crystal Displays: Fundamental Physics and Technology*. John Wiley & Sons.
- Dolgov, L., O. Yaroshchuk, and M. Lebovka. (2008). Effect of Electro-Optical Memory in Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 496(1):212–29.
- Eskalen, H., M. Okumuş, and Özgan. (2019). Electro-Optical, Thermal and Dielectric Properties of Ternary Mixture of E7/6CB/6BA Liquid Crystal Mixture Complex. *Optik* 187. doi: 10.1016/j.ijleo.2019.02.119.
- Eskalen, H., Ş. Özgan, Ümit Alver, and S. Kerli. (2015). Electro-Optical Properties of Liquid Crystals Composite with Zinc Oxide Nanoparticles. *Acta Physica Polonica, A*. 127(3).
- Eskalen, Hasan. (2020). Influence of Carbon Quantum Dots on Electro–Optical Performance of Nematic Liquid Crystal. *Applied Physics A* 126(9):708. doi: 10.1007/s00339-020-03906-7.
- Eskalen, Hasan, Süleyman Kerli, and Şükrü Özgan. (2017). Hydrothermally Produced Cobalt Oxide Nanostructures at Different Temperatures and Effect on Phase Transition Temperature and Threshold Voltage of Nematic Liquid Crystal Host. in *Cobalt*. IntechOpen.
- Jánossy, István. (1994). Molecular Interpretation of the Absorption-Induced Optical Reorientation of Nematic Liquid Crystals. *Physical Review E* 49(4):2957.
- Khoo, Iam Choon, Min-Yi Shih, Michael V Wood, Brett D. Guenther, Pao Hsu Chen, Francesco Simoni, Sergei S. Slussarenko, Oriano Francescangeli, and Liana Lucchetti. (1999). Dye-Doped Photorefractive Liquid Crystals for Dynamic and Storage Holographic Grating Formation and Spatial Light Modulation. *Proceedings of the IEEE* 87(11):1897–1911.
- Kobayashi, Shunsuke, Tomohiro Miyama, Naoto Nishida, Yoshio Sakai, Hiroyuki Shiraki, Yukihide Shiraishi, and Naoki Toshima. (2006). Dielectric Spectroscopy of Metal Nanoparticle Doped Liquid Crystal Displays Exhibiting Frequency Modulation Response. *Journal of Display Technology* 2(2):121–29.
- Köysal, Oğuz, Mustafa Okutan, and Muharrem Gökçen. (2011). Investigation of Dielectric Properties and Diffraction Efficiency Enhancements Caused by Photothermal Effect in DR9 Dye-Doped Nematic Liquid Crystal. *Optics Communications* 284(20):4924–28.
- Lee, Wei, and Chi-Shen Chiu. (2001). Observation of Self-Diffraction by Gratings in Nematic Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Optics Letters* 26(8):521–23.
- Lee, Wei, J. S. Gau, and H. Y. Chen. (2005). Electro-Optical Properties of Planar Nematic Cells Impregnated with Carbon Nanosolids. *Applied Physics B* 81(2):171–75.
- Li, Hui, Yu Zhang, Hongfei Liu, and John Wang. (2011). Large ZnO Mesocrystals of Hexagonal Columnar Morphology Derived from Liquid Crystal Templates. *Journal of the American Ceramic Society* 94(10):3267–75.
- Matharu, Avtar S., Shehzad Jeeva, and P. S. Ramanujam. (2007). Liquid Crystals for Holographic Optical Data Storage. *Chemical Society Reviews* 36(12):1868–80.
- Okutan, M., O. Köysal, S. E. San, and Y. Köysal. (2012). Electrical Parameters of Different Concentrations of Methyl Red in Fullerene Doped Liquid Crystal. *International Scholarly Research Notices* 2012.
- Özgan, Şükrü, Hasan Eskalen, and Yusuf Tapkıranlı. (2018). Thermal and Electro-Optic Properties of Graphene Oxide-Doped Hexylcyanobiphenyl Liquid Crystal. *Journal of Theoretical and Applied Physics* 12(3):169–76. doi: 10.1007/s40094-018-0307-y.
- Özgan, Şükrü, and Mustafa Okumuş. (2011). Thermal and Spectrophotometric Analysis of Liquid Crystal 8CB/8OCB Mixtures. *Brazilian Journal of Physics* 41(2–3):118–22. doi: 10.1007/s13538-011-0034-1.
- Uruş, Serhan, Mahmut Çaylar, Hasan Eskalen, and Şükrü Özgan. (2022). Synthesis of GO@ Fe₃O₄@ TiO₂ Type Organic–Inorganic Nanohybrid Material: Investigation of the Effect of Nanohybrid Doped Liquid Crystal E7 and the Photocatalytic Degradation of Ciprofloxacin. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 33(7):4314–29.
- Vardanyan, Karen Kolya, Ethan Daniel Palazzo, and Robert Dominic Walton. (2011). Nematic Nanocomposites with Enhanced Optical Birefringence. *Liquid Crystals* 38(6):709–15.
- Woltman, S. J., G. D. Jay, and G. P. Crawford. n.d. *Nature Mater.* 6, 929 (2007).
- Wu, Shin-Tson. (1989). Design of a Liquid Crystal Based Tunable Electrooptic Filter. *Applied Optics* 28(1):48–52.

Yang, Deng-Ke, and Shin-Tson Wu. (2014). *Fundamentals of Liquid Crystal Devices*. John Wiley & Sons.

Zharkova, G. M., and S. A. Streltsov. (2020). Effect of Yttrium Oxide Nanoparticles on the Dielectric Properties and Dynamics of the Formation of Holographic Polymer–Liquid-Crystal Composites. *Journal of Optical Technology* 87(1):23–28.