



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.08.2023  
Kabul Tarihi : 13.12.2023

Received Date : 02.08.2023  
Accepted Date : 13.12.2023

### NEMATİK SIVI KRİSTALE $V_2O_5$ NANOPARÇACIK KATKILANDIRILMASI İLE DİELEKTRİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

#### INVESTIGATION OF DIELECTRIC BEHAVIOR WITH $V_2O_5$ NANOPARTICLE DOPING TO NEMATIC LIQUID CRYSTAL

Şükrü ÖZĞAN (ORCID: 0000-0001-9334-327X)

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

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

#### ÖZET

Bu çalışmada Vanadyum Pentaoksit ( $V_2O_5$ ) nanoparçacık, E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katkılanarak numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerin gerçel ve sanal dielektrik sabitlerinin frekansa ve voltaja bağlı olarak değişimleri empedans analizör ile 100 Hz-20 MHz frekans ve 0-40 Volt DC voltaj aralığında oda sıcaklığında incelenmiştir. Gerçel dielektrik sabiti düşük frekanslarda hızlı bir düşüş göstermiştir, sonra yaklaşık sabit kalarak çok az azalarak değişmiştir, 0.2 MHz frekans değerinde azalarak sıfıra gitmektedir. Sanal dielektrik kısmı düşük frekanslarda azalmakta, sonra neredeyse sabit gibi davranmakta ve daha yüksek frekanslarda artarak yaklaşık 3 MHz frekans civarında pik yapmaktadır ve daha yüksek frekanslarda azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Gerçel dielektrik sabiti düşük voltajlarda birden bire artış göstermekte ve daha sonra daha yüksek voltajlarda sabit bir şekilde devam etmektedir. Sanal dielektrik kısmı ise düşük voltajlarda hızlıca azalırken, belirli bir voltaja geldiğinde yeniden artışa geçmekte ve bir pik yaptıktan sonra azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Numunelerin gevşeme frekansı ve zamanını belirlemek için dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısım eksenlerinde Cole-Cole grafiği elde edilmiştir. Nematik sıvı kristalin iyonları ile katkı malzemesi  $V_2O_5$  nanoparçacığın iyonlarının etkileştiği, grafikteki saf sıvı kristale ait yarım çemberin yarıçapının katkılı numunelerinkinden büyük olduğu görülmektedir. Bu ise  $V_2O_5$  malzemenin elektrik enerjisi depolama aygıtlarında kullanımı ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Vanadyum Pentaoksit ( $V_2O_5$ ), nanoparçacık, sıvı kristal, dielektrik

#### ABSTRACT

In this study, samples were prepared by adding Vanadium Pentoxide ( $V_2O_5$ ) nanoparticles to the E7 nematic liquid crystal in various proportions. The real and imaginary dielectric constants of these samples were investigated at room temperature using an impedance analyzer in the frequency range of 100 Hz to 20 MHz and a DC voltage range of 0-40 Volts. The real dielectric constant showed a rapid decrease at low frequencies, then remained approximately constant with slight variations, eventually decreasing towards zero around 0.2 MHz. The imaginary dielectric component decreased at low frequencies, behaved almost as a constant, and exhibited a peak at around 3 MHz before decreasing towards zero at higher frequencies. The real dielectric constant exhibited a sudden increase at low voltages and then continued to remain relatively constant at higher voltages. The imaginary dielectric component, on the other hand, decreased rapidly at low voltages, then increased again at a certain voltage, formed a peak, and decreased towards zero. To determine the relaxation frequency and time of the samples, Cole-Cole graphs were obtained for the real and imaginary parts of the dielectric constant. It was observed that the radius of the semicircle associated with the pure liquid crystal in the graph was larger for the doped samples, indicating an interaction between the ions of the nematic liquid crystal and the  $V_2O_5$  nanoparticles. This suggests compatibility with the use of  $V_2O_5$  material in electrical energy storage devices.

**Keywords:** Vanadium Pentoxide ( $V_2O_5$ ), nanoparticle, liquid crystal, dielectric

**To Cite:** ÖZĞAN, Ş., (2024). NEMATİK SIVI KRİSTALE  $V_2O_5$  NANOPARÇACIK KATKILANDIRILMASI İLE DİELEKTRİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(1), 61-68.

## GİRİŞ

Maddenin katı ve sıvı ana fazları arasında bir ara faz olarak tanımlanan sıvı kristaller teknolojiye birçok alanda kullanılmakta ve sıvı kristallerin önemi gittikçe artmaktadır. Özellikle farklı elektro-optik cihazların gösterge sistemlerinde yoğun kullanım alanı bulmaktadır. Sıvı kristaller, daha düşük güç tüketimi ve daha az yer kaplaması nedeniyle bilgisayar ve televizyon ekranlarında, birçok makinenin ve aracın gösterge sistemlerinde kullanılmaktadır (Khoo 2022; Meier, Sackmann ve Grabmaier 2012). 2000'li yılların başlarında, endüstriyel uygulamalarda sıvı kristallerin yıllık satışının oldukça fazla olduğu görülmüştür (Stolpe 2002). Sıvı kristaller elektro-optik filtreler (Caputo vd., 2009), hologram (Matharu, Jeeva ve Ramanujam 2007), dijital veri depolama (Bleha vd., 1978; Lencer vd., 2011) ve biyosensörlerin (Wang vd., 2021) yapımında da yoğun olarak kullanılmaktadır. 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 kristal sentezlenmesi (Ahmed and Aboelnaga 2022) veya ikili, üçlü hatta daha fazla sıvı kristal karışımının oluşturulması (Özgan ve Okumuş 2011) ve katkı malzemelerin kullanılması (Özgan, Eskalen, ve Tapkıranlı 2018) farklı amaçlar için kullanım potansiyeline sahip sıvı kristal elde etmek için uygulanan yöntemlerdir. Sıvı kristal kullanan gösterge cihazının performansı, kullanılan sıvı kristale ve konuk katkı malzemelerine önemli ölçüde bağlıdır. Farklı özellikte sıvı kristal üretmek için boya (Shen vd., 2023), polimer (Bronnikov, Kostromin ve Zuev 2013) ve nanoparçacık (Eskalen vd., 2015) gibi malzemeler konuk katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Nematik sıvı kristallerdeki %1 boya katkısı, nematik sıvı kristal molekülünün yeniden yönelmesini iki katına kadar artırabilmektedir. Nematik sıvı kristale boya katkısının, eşik voltajını neredeyse %25'e kadar, kırılma indisi modülasyonunu da üç kata kadar azalttığı tespit edilmiştir (Jánossy 1994; Köysal vd., 2011).

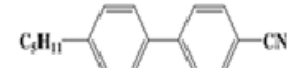
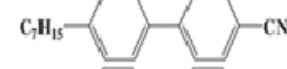
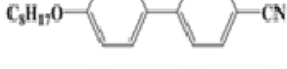
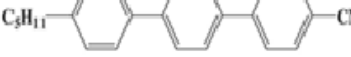
Gösterge sistemlerinde sıvı kristal kullanan cihazlarının performansının artırılması için kullanılan konuk malzemeler polimer, boyar malzemeler ve nano malzemelerdir. Bu çalışmada kullandığımız dört sıvı kristalin ötektik karışımı olan E7 nematik sıvı kristalinde olduğu gibi iki veya daha çok sıvı kristali belirli oranlarda karıştırarak farklı fiziksel özelliklere sahip yeni sıvı kristal malzeme elde edilebilmektedir. Eskalen ve ark. E7/6CB/6AB üçlü sıvı kristal karışımın elektro-optik, ısısal ve dielektrik özelliklerini incelemişlerdir (Eskalen, Okumuş ve Özgan 2019). Sıvı kristallere katılan nanoparçacık sıvı kristalin özelliklerini değiştirmektedir. Literatürde bu amaçla metalik nano parçacıklar (Li vd., 2013), ferromanyetik nanoparçacıklar (Okutan vd., 2012), yarı iletken ve karbon nanoparçacık (Lee ve Chiu 2001; Lee, Gau, and Chen 2005) gibi farklı tipte nanoparçacık kullanılmaktadır. Özgan ve ark. heksilsiyano-bifenil sıvı kristaline grafen oksit nanoparçacık katkılayarak ısısal ve elektro-optik özelliklerini incelemişlerdir (Özgan vd., 2018). Bir başka çalışmada karbon kuantum noktaların nematik sıvı kristalin elektro-optik performansı üzerine etkisi incelenmiştir (Eskalen 2020). GO@ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ TiO<sub>2</sub> tipi organik-inorganik nanohibrit materyal sentezi ve bu nanohibrit malzemenin E7 sıvı kristaline katkısının nasıl bir değişikliğe sebep olduğu ve siprofloksasinin fotokatalitik bozunması araştırılmıştır (Uruş vd., 2022). Farklı sıcaklıklarda hidrotermal yöntemi ile üretilen kobalt oksit nanoparçacık nematik sıvı kristalin faz geçiş sıcaklığı ve eşik voltajına etkisi araştırılmıştır (Eskalen, Kerli ve Özgan 2017).

Vanadyum pentoksit (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) düşük üretim maliyeti ile iyi bilinen bir geçiş metal oksit malzemedir. İyi termal ve kimyasal kararlılığa ve termoelektrik özellikler sahip olmasından dolayı güneş pilleri, gaz sensörleri, kimyasal algılama, elektrokromik ve optoelektronik cihazlar başta olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Lu ve Zhou 2018; Wu vd., 2016). Bu çalışmada, hidrotermal yöntem ile sentezlenmiş olan V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanoparçacık (Eskalen, Özgan, ve Kerli 2019) E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katılandırılmıştır. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:E7 katkılı numuneler İndiyum Kalay Oksit (ITO) hücrelere doldurulmuştur. Empedans analizör kullanılarak katkılı sıvı kristal numunelerin gerçel ve sanal dielektrik sabiti frekansa ve voltaja bağlı olarak incelenmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

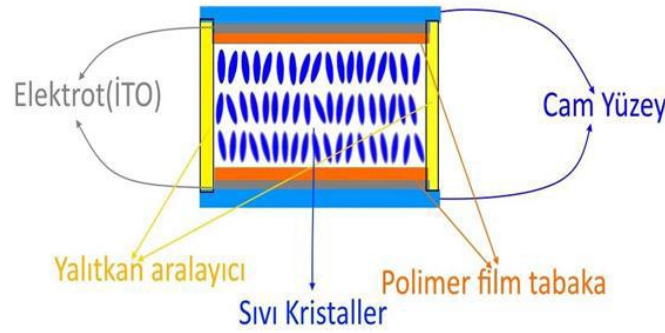
Çalışmada kullanılan E7 nematik sıvı kristal dört farklı sıvı kristalin ötektik bileşeni olup satın alınma yoluyla temin edilmiştir (Military University of Technology, Warsaw, Poland). E7 nematik sıvı kristalin kimyasal yapısı Şekil 1'de görülmektedir.

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanoparçacıkların belirli oranlarda E7 nematik sıvı kristale katılarak elde edilen numunelerin gerçel ve sanal dielektrik sabitleri frekansa ve voltaja bağlı ölçümlerini yapabilmek için birer yüzeyi indium kalay oksit ile iletken haline getirilmiş, ışığı geçiren, düzlemsel (planar) yönelime sahip üst üste iki plakadan oluşan 0.8 µm aralıklı ve 1 cm<sup>2</sup> etkin alanlı cam hücre satın alınmıştır (Military University of Technology, Warsaw, Poland) ve kullanılmıştır.

İsim	Yüzde	Faz geçiş sıcaklık aralığı	Molekül yapısı
5CB	51 %	22°C → 35°C	<chem>C7H11</chem> 
7CB	25 %	28°C → 42°C	<chem>C7H15</chem> 
8OCB	16 %	54°C → 80°C	<chem>C8H17O</chem> 
7CT	8 %	130°C → 239°C	<chem>C9H11</chem> 

Şekil 1. E7 Nematik Sıvı Kristal Karışımın Kimyasal Yapısı

$V_2O_5$  nanoparçacık %0.1, %0.2 ve %0.5 üç farklı oranda alınarak ayrı ayrı E7 nematik sıvı kristale karıştırılmıştır.  $V_2O_5$  nanoparçacık katkılı nematik sıvı kristal karışımlar boş ITO hücrelere 65°C sıcaklıkta kılcal hareket yoluyla doldurulmuştur. Numunelerin doldurulduğu ITO hücrelerin numune doldurmak için açık bırakılan iki kenarı epoksi yapıştırıcı ile kapatılmıştır. Numunelerin ITO hücrelere doldururken 65°C sıcaklık olması, E7 nematik sıvı kristalin nematik-izotropik sıvı faz geçiş sıcaklığında E7'nin daha akıcı olması ve ITO hücreye kılcal hareket yöntemiyle kolaylıkla doldurulabilmesi için yapıldı. Nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin doldurulduğu ITO hücrenin yapısı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. ITO Hücre Yapısı

Gösterge sistemlerinde kullanılan sıvı kristallerin dielektrik özelliğini bilmek önemlidir. Dielektrik, gerçel ve sanal kısımlarına bağlı olarak kompleks olarak verilir.

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

Burada sırasıyla  $\varepsilon'$  dielektrik sabitinin gerçel kısmıdır malzemede elektrik yükü ve dolayısıyla enerji depolanmasını göstermektedir.  $\varepsilon''$  dielektrik sabitinin sanal kısmıdır malzemedeki elektrik yükü boşalmasını ifade etmektedir.

Dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısmı birbirine bağlı olarak bu şekilde verilmektedir,

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \quad (2)$$

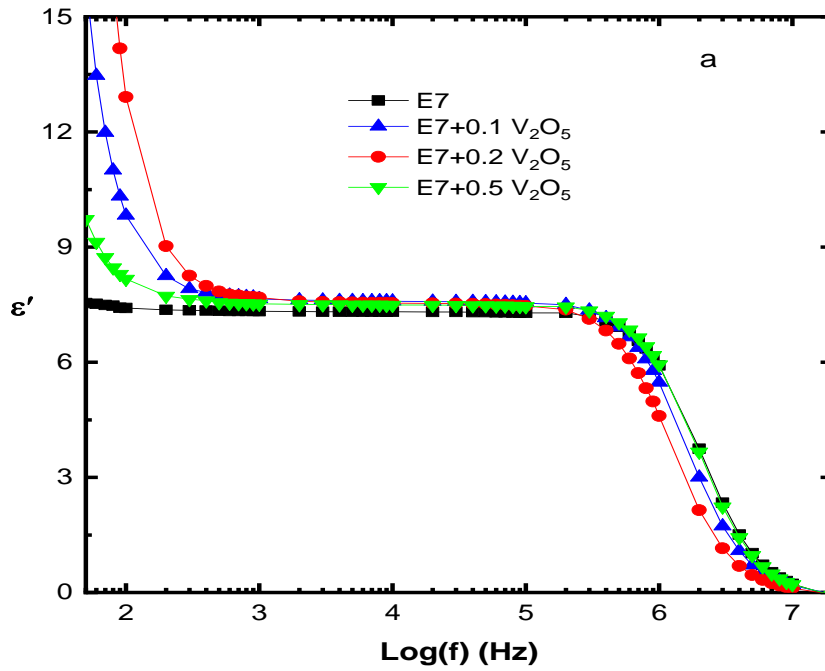
Bu eşitlikteki  $\delta = 90 - \varphi$  ile verilir ve  $\varphi$  ise faz açısıdır.

Hazırlanan üç farklı oranda  $V_2O_5$  nanoparçacık E7 nematik sıvı kristale katılanmasıyla elde edilen numunelerin dielektrik değerleri, 100 Hz-20 MHz frekans aralığında, sıfır doğru akım voltajında ve oda sıcaklığında, frekansa bağlı olarak ölçümleri yapıldı. Benzer şekilde hazırlanan numunelerin dielektrik değerleri, 0-40 Volt doğru akım aralığında ve 1 kHz sabit frekans ve oda sıcaklığında HP 4194A empedans analizör ile voltaja bağlı olarak ölçüldü ve elde edilen değerlerin grafikleri üretildi.

## BULGULAR

Sentezlenen  $V_2O_5$  nanoparçacık %0.1, %0.2 ve %0.5 oranında E7 nematik sıvı kristaline ayrı ayrı karıştırılarak elde edilen numuneler ITO hücrelere dolduruldu. Numunelerin dielektirik gerçel ve sanal kısmı frekansa ve voltaja bağlı olarak incelendi.

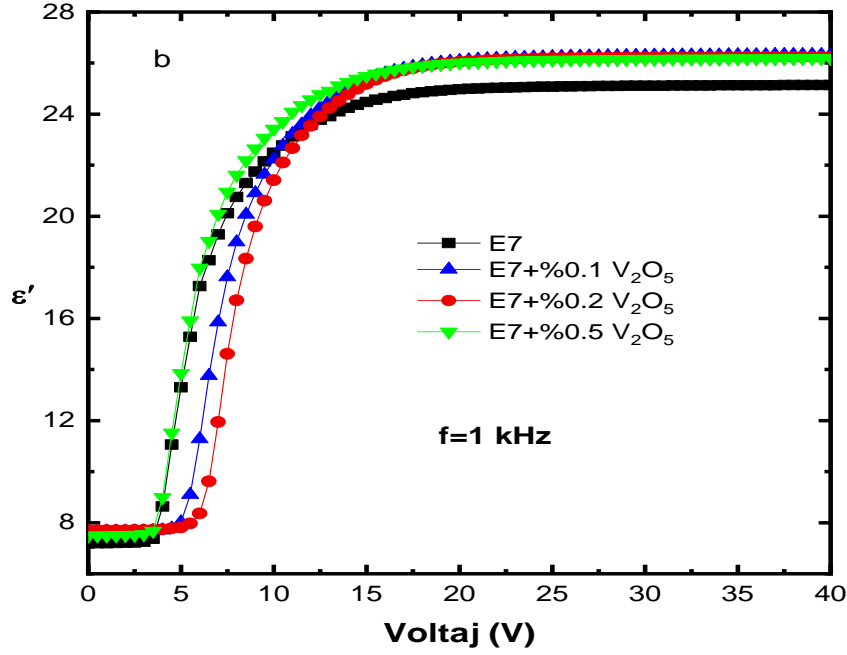
Saf E7 sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin dielektirik gerçel kısmının frekansa bağlı değişimi DC 0 V ve AC 0.5 V potansiyel fark uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik Şekil 3'de görülmektedir. Düşük frekanslarda (100 Hz-300 kHz) dielektrik gerçel kısmı hızlıca azalıyor, yani elektrik yük kaçışının arttığı anlaşılmaktadır; sonra 7-8 civarında sabit olarak devam etmektedir. Elektrik yükün şarj olması küçük ve daha büyük frekanslarda azalmaktadır, yaklaşık 500 Hz- 300 kHz frekans aralığında sabit kalmaktadır. Yaklaşık 20 MHz frekansta sıfır olmaktadır.



Şekil 3. Dielektrik Gerçel Kısmı Frekans ile Değişimi

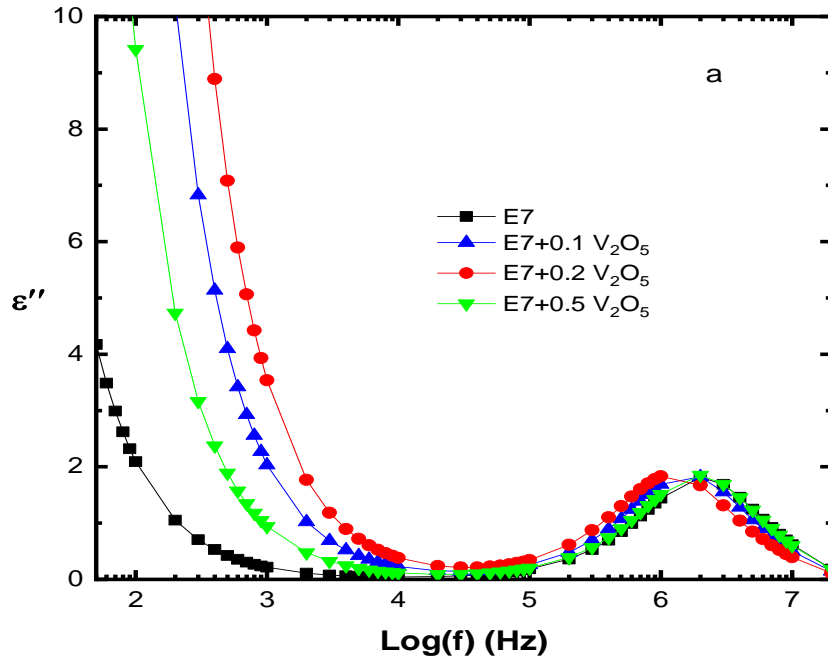
Nematik sıvı kristal ve nanoparçacık karışımli numunelerin dielektirik gerçel kısmının voltaja bağlı değişimi,  $f=1$  kHz sabit frekans, AC 0.5 V gerilim uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4'de görülmektedir. Düşük voltajlarda dielektrik gerçel kısmı sabit gibi davranmakta ve yaklaşık 5 V civarında birdenbire büyük bir değere ulaşmakta, yaklaşık 10 voltta sabit gibi çok az artış davranışı sergilemektedir. Bu artış 3-10 Volt DC geriliminde dielektrik gerçel kısmının çok hızlı bir şekilde arttığı, yani elektrik yüklerin plakaları doldurduğu ve elektrik enerjisi depolandığı, daha yüksek voltajlarda sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Bu sonuç ise adaptörlerin ve elektrik şarj aletlerinin genel olarak 6-12 voltta tutulması, daha küçük voltajlarda yapılmaması ile uyumludur. Daha yüksek voltajlarda şarj yapılabilir, ancak şarj kabiliyeti pek değişmemektedir ve yüksek voltajlar kullanıcı açısından risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada frekans 1 kHz sabit frekans alınarak dielektrik gerçel kısmının voltaja bağlı değişimi incelendi. Elbette ki farklı frekanslarda da aynı araştırma yapılabilir. Ne için 1 kHz frekansta bu araştırma yapıldı denilirse, Şekil 3'de dielektrik gerçel kısmının frekansa bağlı değişim grafiğinde, dielektrik gerçel kısmı yaklaşık 1 kHz ile 0.2 MHz frekans aralığında kararlı bir davranış sergilediği için bu frekans değeri kullanıldı.

Saf E7 nematik sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı numunelerin dielektrik sanal kısmının frekansa bağlı değişimi DC 0 V ve AC 0.5 V potansiyel fark uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik Şekil 5'de görülmektedir. Dielektrik sanal kısmı düşük frekanslarda hızlıca azalmakta ve sıfıra yaklaşmakta, yaklaşık 50 kHz frekans civarında artmakta ve 3 MHz frekansta (Gevşeme frekansı - Relaxtion frequency) bir maksimuma ulaşmakta, 20 MHz frekansta sıfır olmaktadır.



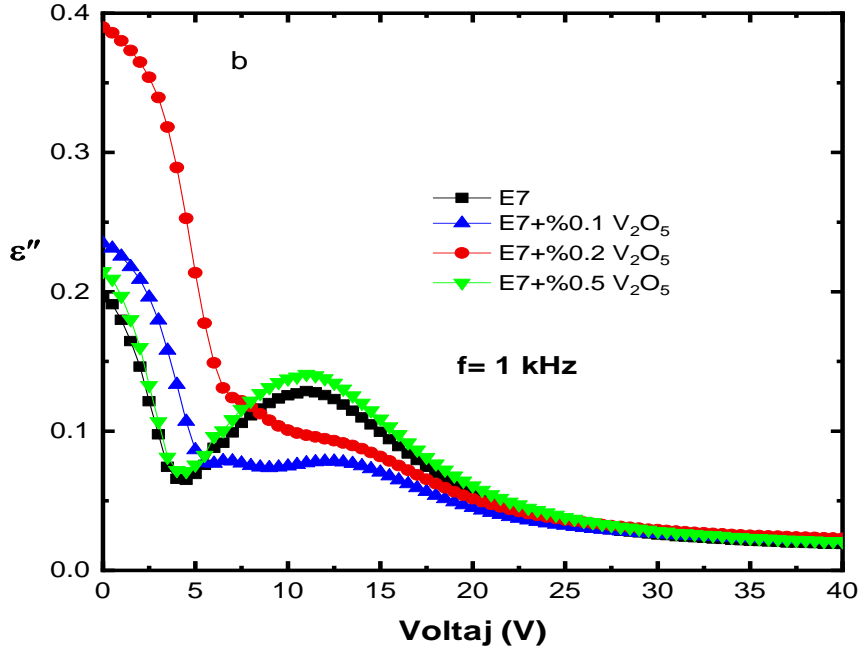
Şekil 4. Dielektrik Gerçel Kısmı Voltaj ile Değişimi

Dielektrik sanal kısmının yüksek değerde olması bu frekanslarda elektrik yük kaçıışı, yani deşarjı büyük miktarda olmakta, tersi durumunda yani dielektrik sanal kısmının düşük olduğu frekanslarda ise elektrik yüklerinin plakalarda tutulduğu, depolandığı durumunu göstermektedir.



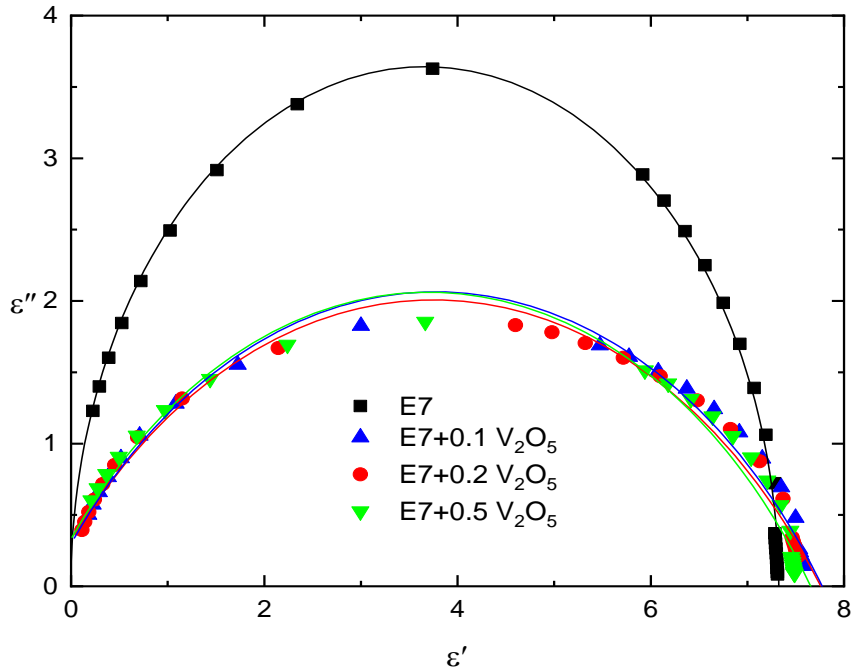
Şekil 5. Dielektrik Sanal Kısmı Frekans ile Değişimi

Nematik sıvı kristal ve nanoparçacık karışımı numunelerin dielektrik sanal kısmının voltaja bağlı değişimi AC 0.5 V gerilim uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik,  $f=1$  kHz sabit frekans için, Şekil 6'de görülmektedir. Dielektrik sanal kısmı düşük voltajlarda hızlıca azalmakta, 5 volt civarında artışa geçmekte ve yaklaşık 12 volt'da bir pik yaparak voltajın artmasına bağlı olarak azalarak sifira yaklaşmaktadır.



Şekil 6. Dielektrik Sanal Kısmı Voltaj ile Değişimi

Saf E7 sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin dielektrik gerçel kısmı yatay eksen ve sanal kısmı düşey eksen olarak çizilen Cole-Cole grafiği Şekil 7’de görülmektedir. Doğrusal Olmayan Örtük Eğri Uydurma (Nonlinear Implicit Curve Fit) uygulanmıştır. Bu yarım çemberlerin tepe noktası gevşeme frekansını (relaxation frequency) vermektedir. Gevşeme frekansı bütün numunelerde yaklaşık 2 MHz frekansta meydana gelmektedir. Saf E7 nematik sıvı kristalin grafiğinde yarı çemberin yarıçapı daha büyük olmaktadır. Katkı olan V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanoparçacık sıvı kristal hücrede elektriksel yüklerin çabuk boşalmasına engel oluyor şeklinde yorumlanabilir. Vanadyumun elektrik yük ve enerji depolayan aygıtlarda ve lityum pillerde kullanılmasının sebebi bataryanın çabuk boşalmasını engel olmasıdır ki burada elektrik yük taşınmasını ifade eden dielektrik sanal kısmının değerini düşük olması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu durum Vanadyumun pil ve bataryalarda enerji depolanmasında olumlu etkisinin olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 7. Dielektrik Gerçel ve Sanal Kısmı Cole-Cole Grafiği

## TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, vanatyum pentaoksit  $V_2O_5$  nanoparçacık %0.1, %0.2 ve %0.5 oranlarında E7 nematik sıvı kristal ile katkılılandırıldı. Üretilen karışım numuneler ITO hücrelere doldurularak empedans analizör kullanılarak dielektrik sabiti gerçel ve sanal kısmı frekans ve voltaja bağlı olarak oda sıcaklığında incelendi. Dielektrik gerçel kısmı frekansa bağlı olarak değişimi incelendiğinde, düşük frekanslarda hızlıca azalmakta, sonra 7-8 civarında sabit olarak devam etmekte ve daha sonra 300 kHz frekansta azalarak sifıra yaklaşmaktadır. Numunelerin dielektrik gerçel kısmının voltaja bağlı  $f=1\text{kHz}$  sabit frekansta değişimi incelendiğinde, düşük voltajlarda sabit gibi davranmakta, yaklaşık 5 volt civarında birdenbire artarak büyük bir değere ulaşmakta ve yaklaşık 10 volttan sonra sabit gibi çok az artış ile değişim göstermektedir. Dielektrik gerçel kısmının voltaja bağlı değişiminde 1kHz sabit frekansta incelenmesinin sebebi, dielektrik gerçel kısmı yaklaşık 1 kHz ile 0.2 MHz arasında karalı bir davranış sergilemektedir. Numunelerin dielektrik sanal kısmının frekansa bağlı değişimi, düşük frekanslarda hızlıca azalmakta ve sifıra yaklaşmakta, yaklaşık 50 kHz frekans civarında artmaya başlamakta ve 2 MHz frekansında bir maksimuma ulaşmakta, sonra azalarak 20 MHz frekansta sıfır olmaktadır. Saf sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin dielektrik gerçel kısmı yatay eksen ve sanal kısmı düşey eksenini olarak çizilen Cole-Cole grafiği incelendiğinde gevşeme frekansı ve zamanı değişmemektedir. Ancak Coe-Cole grafiğinde yarım çemberlerden saf E7 nematik sıvı kristalin oluşturduğu yarı çemberin yarıçapı daha büyük iken, nanoparçacık katkılı numunelerin yarıçapları daha küçük olmaktadır. Dielektrik kayıp (Dielectric loss) olarak da adlandırılan dielektrik gerçel kısmının nanoparçacık katkılı numunelerde gevşeme frekansında daha düşük olması katkı maddesi olan vanadyum penta oksit nanoparçacığının elektrik yük kaybına veya kaçışına engel olduğu anlamına gelmektedir. Bu sonuç ise Vanadyumun elektrik yük ve enerji depolayan aygıtlarda ve lityum pillerin üretilmesinde kullanılması ile uygunluk içerisinde (Kim vd., 2021).

## KAYNAKLAR

- Ahmed, H. A., & Aboelnaga A. (2022). Synthesis and Mesomorphic Study of New Phenylthiophene Liquid Crystals. *Liquid Crystals* 49(6):804–11. <https://doi.org/10.1080/02678292.2021.2008032>
- Bleha, W. P., Lipton, L. T., Wiener-Avneer, E., Grinberg, J., Reif, P. G., Casasent, D., Brown, H. B. & Markevitch B. V. (1978). Application of the Liquid Crystal Light Valve to Real-Time Optical Data Processing. *Optical Engineering* 17(4):371–84. <https://doi.org/10.1117/12.7972245>
- Bronnikov, S., Kostromin S., and Zuev V. (2013). Polymer-Dispersed Liquid Crystals: Progress in Preparation, Investigation, and Application. *Journal of Macromolecular Science, Part B* 52(12):1718–35. <https://doi.org/10.1080/00222348.2013.808926>
- Caputo, R., De Luca, A., De Sio, L., Pezzi, L., Strangi, G., Umeton, C., Veltri, A., Asquini, R., d'Alessandro, A., & Donisi, D., (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. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/2/024017>
- Eskalen, H., Okumuş, M., & Özğan, Ş. (2019). Electro-Optical, Thermal and Dielectric Properties of Ternary Mixture of E7/6CB/6BA Liquid Crystal Mixture Complex. *Optik* 187. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.119>
- Eskalen, H., Özğan, Ş., Alver, Ü., & Kerli, S. (2015). Electro-Optical Properties of Liquid Crystals Composite with Zinc Oxide Nanoparticles. *Acta Physica Polonica, A*. 127(3). <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.756>
- Eskalen, H., Özğan, Ş., & Kerli, S. (2019). Synthesis, Characterization of  $V_2O_5$  Nanoparticle and Dispersion of Them into Nematic Liquid Crystal. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 125(12). <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3157-9>.
- Eskalen, H. (2020). "Influence of Carbon Quantum Dots on Electro-Optical Performance of Nematic Liquid Crystal." *Applied Physics A* 126(9):708. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03906-7>.
- Eskalen, H., Kerli, S., & Özğan, Ş. (2017). Hydrothermally Produced Cobalt Oxide Nanostructures at Different Temperatures and Effect on Phase Transition Temperature and Threshold Voltage of Nematic Liquid Crystal Host. In K. Maaz (ed.) *Cobalt*. s 71-85, IntechOpen.
- Jánossy, I. (1994). "Molecular Interpretation of the Absorption-Induced Optical Reorientation of Nematic Liquid Crystals." *Physical Review E* 49(4):2957. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.2957>
- Khoo, I. (2022). *Liquid Crystals*. John Wiley & Sons.

- Kim, A., Kalita, G., Kim, J.H., & Patel, R. (2021). Recent Development in Vanadium Pentoxide and Carbon Hybrid Active Materials for Energy Storage Devices. *Nanomaterials* 11(12):3213. <https://doi.org/10.3390/nano11123213>
- Köysal, O., Okutan, M., & Gökçen, M. (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. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.06.046>
- Lee, W., & Chiu, C. (2001). Observation of Self-Diffraction by Gratings in Nematic Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Optics Letters* 26(8):521–23. <https://doi.org/10.1364/OL.26.000521>
- Lee, W., Gau, J. S., & Chen, H. Y. (2005). Electro-Optical Properties of Planar Nematic Cells Impregnated with Carbon Nanosolids. *Applied Physics B* 81(2):171–75. <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1914-2>
- Lencer, D., Salinga, M., & Wuttig, M. (2011). Design Rules for Phase-change Materials in Data Storage Applications. *Advanced Materials* 23(18):2030–58. <https://doi.org/10.1002/adma.201004255>
- Li, X., Yang, C., Wang, Q., Jia, D., Hu, I., Peng, Z., & Xuan, L. (2013). Enhanced Birefringence for Metallic Nanoparticle Doped Liquid Crystals. *Optics Communications* 286:224–27. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.001>
- Lu, Y., & Zhou, X. (2018). Synthesis and Characterization of Nanorod-Structured Vanadium Oxides. *Thin Solid Films* 660:180–85. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.06.020>
- Matharu, A. S., Jeeva, S., & Ramanujam, P. S. (2007). Liquid Crystals for Holographic Optical Data Storage. *Chemical Society Reviews* 36(12):1868–80. <https://doi.org/10.1039/B706242G>
- Meier, G., Sackmann, E., & Grabmaier, J. G. (2012). *Applications of Liquid Crystals*. Springer Science & Business Media.
- Okutan, M., Köysal, O., San, S. E., & Köysal, Y. (2012). Electrical Parameters of Different Concentrations of Methyl Red in Fullerene Doped Liquid Crystal. *International Scholarly Research Notices*. <https://doi.org/10.5402/2012/596125>
- Özgan, Ş., Eskalen, H. & Tapkıranlı, Y. (2018). Thermal and Electro-Optic Properties of Graphene Oxide-Doped Hexylcyanobiphenyl Liquid Crystal. *Journal of Theoretical and Applied Physics* 12(3):169–76. <https://doi.org/10.1007/s40094-018-0307-y>.
- Özgan, Ş., & Okumuş, M. (2011). Thermal and Spectrophotometric Analysis of Liquid Crystal 8CB/8OCB Mixtures. *Brazilian Journal of Physics* 41(2–3):118–22. <https://doi.org/10.1007/s13538-011-0034-1>.
- Shen, W., Zhang, H., Miao, Z. & Ye, Z. (2023). Recent Progress in Functional Dye-Doped Liquid Crystal Devices. *Advanced Functional Materials* 33(6):2210664. <https://doi.org/10.1002/adfm.202210664>
- Stolpe, M. (2002). Determinants of Knowledge Diffusion as Evidenced in Patent Data: The Case of Liquid Crystal Display Technology. *Research Policy* 31(7):1181–98. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00192-5)
- Uruş, S., Çaylar, M., Eskalen, H., & Özğan, Ş. (2022). Synthesis of GO@ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ TiO<sub>2</sub> 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. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07625-4>
- Wang, Z., Xu, T., Noel, A., Chen, Y., & Liu, T. (2021). Applications of Liquid Crystals in Biosensing. *Soft Matter* 17(18):4675–4702. <https://doi.org/10.1039/D0SM02088E>
- Wu, K., Sun, X., Duan, C., Gao, J., & Wu, M. (2016). Vanadium Oxides (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) Prepared with Different Methods for Application as Counter Electrodes in Dye-Sensitized Solar Cells (DSCs). *Applied Physics A* 122:1–6. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0317-z>