



Effect of NiO nanoparticles on the temperature dependence of birefringence and threshold voltage, and on ionic transport properties of E7 nematic liquid crystal

Zahra Seidalilir^{a, b}, Fatemeh Hamid^a, Mohammad Sabaeian^{a, b}

^aDepartment of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

^bCenter for Research on Laser and Plasma, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ah

Received: 2026-05-01

Revised: 2026-06-06

Accepted: 2026-06-18

Abstract: In this study, the temperature-dependent electro-optical properties of the nematic liquid crystal E7 in the presence of nickel oxide (NiO) nanoparticles were investigated. Birefringence variations of liquid crystal samples containing different weight percentages of NiO nanoparticles (0.01, 0.03, 0.06, 0.09, and 0.12 wt%) were measured at various temperatures. The presence of nanoparticles resulted in an increase in birefringence and an improvement in molecular ordering of the liquid crystal. The results showed that adding nanoparticles reduced the threshold voltage of the nematic liquid crystal cell. At 0.09 wt% concentration, the threshold voltage decreased by approximately 31% in the nematic phase. With increasing temperature, the threshold voltage decreased in all samples; however, this reduction was more pronounced in nanoparticle-doped samples compared to the pure one. In addition, impedance spectroscopy of the devices in the isotropic phase was performed over the frequency range of 0.1 Hz to 100 kHz to evaluate the effect of nanoparticles independent of molecular orientational order. The presence of NiO nanoparticles increased electrical conductivity and significantly affected ion transport dynamics, including ion mobility and diffusion coefficient. The simultaneous improvement in electrical and electro-optical properties demonstrates the strong potential of NiO-doped liquid crystal systems for advanced optoelectronic applications.

Keywords: Nematic liquid crystal, electro-optical properties, electrical properties, threshold voltage, and nanoparticle.

Corresponding Author. Email: z.seidalilir@scu.ac.ir

How to Cite This Article:

seidalilir Z, Hamid F, Sabaeian M. Effect of NiO nanoparticles on the temperature dependence of birefringence and threshold voltage, and on ionic transport properties of E7 nematic liquid crystal. Nanomeghyas. 2026;():e737801 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2092047.1434



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

اثر نانوذرات NiO بر وابستگی دمايي دوشكستى و ولتاژ آستانه و ويژگى‌هاى انتقال يونى در بلور مايع نماتيك E7

زهرا صيدالى لير^{۱*}، فاطمه حميد^۱ و محمد صباييان^۲

^۱ گروه فيزيك، دانشكده علوم، دانشگاه شهيد چمران اهواز، اهواز، ايران
^۲ مركز تحقيقات ليزر و پلاسما، دانشگاه شهيد چمران اهواز، اهواز، ايران

تاريخ دريافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱ تاريخ بازنگري: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ تاريخ پذيرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۸

چكیده: در اين تحقيق، وابستگى دمايي خواص الكتروپتيكى بلور مايع نماتيك E7 در حضور نانوذرات اكسيد نيكل (NiO) مورد بررسى قرار گرفت. تغييرات دوشكستى نمونه‌هاى بلور مايع حاوى درصد‌هاى وزنى مختلف نانوذرات NiO (۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲)، در دماهاى مختلف اندازه‌گيرى شد. حضور نانوذرات منجر به افزايش دوشكستى و بهبود نظم مولكولى در بلور مايع شد. همچنين نتايج نشان داد كه افزودن نانوذرات منجر به كاهش ولتاژ آستانه سلول بلور مايع نماتيك مى‌شود؛ به گونه‌اى كه با حضور ۰/۰۹ درصد وزنى نانوذرات، ولتاژ آستانه در فاز نماتيك حدود ۳۱ درصد كاهش يافت. با افزايش دما، ولتاژ آستانه سلول روندى كاهشى نشان داد؛ با اين حال، شدت اين كاهش در نمونه آلاييده با نانوذرات در مقايسه با نمونه خالص به طور قابل توجهى بيشتر بود. همچنين، پاسخ امپدانسى دستگاه‌هاى بلور مايع در فاز ايزوتروپيك در بازه فرکانسى ۰/۱ هرتز تا ۱۰۰ كيلوهرتز بررسى شد تا اثر نانوذرات، مستقل از نظم جهت‌گيرى مولكولى، ارزيابى شود. افزودن نانوذرات NiO موجب افزايش رسانايى الكتريكى و بهبود قابل توجه در ديناميك انتقال يونى (تحرك پذيرى و ضريب نفوذ يون‌ها) در فاز ايزوتروپيك شد. بهبود هم‌زمان خواص الكتريكى و الكتروپتيكى در نمونه‌هاى آلاييده با نانوذرات NiO، پتانسيل بالاي اين سامانه‌ها را براى كاربردهاى اپتوالكترونيكى پيشرفته نشان مى‌دهد.

واژگان كليدى: بلور مايع نماتيك، خواص الكتروپتيكى، خواص الكتريكى، ولتاژ آستانه و نانوذرات.

نويسنده مسئول: z.seidalilir@scu.ac.ir

نحوه استناد به اين مقاله: صيدالى لير زهرا، حميد فاطمه، صباييان محمد. اثر نانوذرات NiO بر وابستگى دمايي دوشكستى و ولتاژ آستانه و ويژگى‌هاى انتقال يونى در بلور مايع نماتيك E7. Nanomeghyas. 1405;():e737801. doi: 10.22034/ns.2026.2092047.1434

اين مقاله تحت مجوز دسترسى آزاد CC-BY منتشر شده است (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



۱- مقدمه

سامانه می‌شوند. در نتیجه، پاسخ الکترواپتیکی بلور مایع تقویت شده و عملکرد آن در کاربردهای مختلف بهبود می‌یابد [۱۱].

در میان نانومواد مختلف، نانوذرات اکسیدهای فلزی به دلیل پایداری شیمیایی مناسب، سهولت سنتز و قابلیت برهم‌کنش مؤثر با مولکول‌های بلور مایع، به‌طور گسترده‌ای برای بهبود عملکرد سامانه‌های بلور مایع نماتیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۶]. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که حضور این نانوذرات می‌تواند خواص دی‌الکتریکی، الکتریکی و الکترواپتیکی بلورهای مایع را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد [۱۷-۲۰]. گزارش شده است که نانوذرات CuO در محیط بلور مایع ساختارهای رشته‌ای تشکیل داده و موجب افزایش قابل توجه رسانایی الکتریکی سامانه می‌شوند [۱۸]. همچنین، افزودن نانوذرات Fe₂O₃ سبب افزایش قطبش‌پذیری مولکولی، دوشکستی و پارامتر نظم بلور مایع شده است [۱۹]. علاوه بر این، نشان داده شده است که نانوذرات MgO با بهبود آرایش مولکولی در محیط بلور مایع، ناهمسانگردی دی‌الکتریک سامانه را افزایش می‌دهند [۲۰]. همچنین ایجاد نواحی نانورسانا در حضور این نانوذرات، انتقال بار را تسهیل کرده و در نهایت موجب بهبود رسانایی الکتریکی محیط بلور مایع می‌شود. این نتایج بیانگر آن است که انتخاب مناسب نوع و غلظت نانوذرات می‌تواند رویکردی مؤثر برای کنترل و بهینه‌سازی خواص بلورهای مایع نماتیک باشد.

در سال‌های اخیر، نانوذرات اکسید نیکل (NiO) به دلیل برخورداری از خواص الکتریکی، اپتیکی و بین‌سطحی مناسب، به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای اصلاح و بهبود عملکرد سامانه‌های مواد پیشرفته، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۲۱]. وجود جای‌خالی‌های اکسیژن و مراکز فعال سطحی در ساختار این نانوذرات، امکان برهم‌کنش مؤثر با محیط بلور مایع و جذب یون‌های ناخالص را فراهم می‌کند. از این‌رو، حضور نانوذرات NiO می‌تواند با کاهش اثر ناخالصی‌های یونی و بهبود فرآیند انتقال بار، رفتار الکتریکی سامانه را تحت تأثیر قرار دهد [۲۲]. علاوه بر این، تشکیل آرایش‌های موضعی از نانوذرات در محیط بلور مایع می‌تواند مسیرهای مناسبی برای انتقال حامل‌های بار ایجاد کرده و رسانایی الکتریکی را افزایش دهد [۲۰]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات NiO به سامانه‌های مختلف بلور مایع موجب بهبود خواص نوری، دی‌الکتریکی و الکترو-اپتیکی می‌شود؛ از جمله اثرات گزارش شده می‌توان به کاهش ولتاژ آستانه، کاهش پسماند خازنی، افزایش سرعت پاسخ و بهبود دوشکستی و خواص دی‌الکتریکی اشاره کرد [۲۲-۲۴]. با وجود این نتایج امیدوارکننده، بررسی تأثیر نانوذرات NiO بر سامانه بلور مایع E7 همچنان محدود بوده و نیازمند مطالعات بیشتری است. از این‌رو، در پژوهش حاضر اثر نانوذرات NiO بر خواص فیزیکی، الکتریکی و الکترواپتیکی بلور مایع E7 مورد بررسی قرار گرفته است.

بلورهای مایع به دلیل برخورداری هم‌زمان از ویژگی‌های سیال بودن مایعات و ناهمسانگردی مواد بلوری، توجه گسترده‌ای را در حوزه فوتونیک و اپتوالکترونیک به خود جلب کرده‌اند [۱]. در میان فازهای مختلف این مواد، فاز نماتیک به‌واسطه قابلیت کنترل مؤثر جهت‌گیری مولکول‌ها توسط میدان‌های خارجی و همچنین پاسخ الکترواپتیکی مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در نمایشگرها [۲]، حسگرهای نوری [۳] و سایر سامانه‌های مبتنی بر بلور مایع [۴، ۵] یافته است. در این فاز، مولکول‌های میله‌ای شکل گرچه فاقد نظم مکانی بلندبرد هستند، اما تمایل دارند در امتداد یک جهت میانگین مشترک آرایش یابند که با بردار راهنما^۱ توصیف می‌شود. جهت‌گیری بردار راهنما تحت تأثیر شرایط مرزی اعمال‌شده توسط زیرلایه‌ها و همچنین میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و نوری قرار می‌گیرد. هنگامی که میدان الکتریکی اعمال‌شده از مقدار بحرانی مشخصی فراتر رود، مولکول‌های بلور مایع در راستای میدان بازآرایی می‌شوند. این پدیده که به گذار فریدریکس^۲ شناخته می‌شود، مبنای عملکرد بسیاری از ادوات مبتنی بر بلور مایع به شمار می‌رود [۶].

در سال‌های اخیر، استفاده از نانوذرات به‌عنوان روشی مؤثر برای اصلاح و بهبود خواص بلورهای مایع نماتیک، توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است [۷، ۸]. نتایج مطالعات نشان داده است که افزودن مقادیر اندکی از نانومواد به محیط بلور مایع می‌تواند ویژگی‌های دی‌الکتریکی، الکتریکی و الکترواپتیکی سامانه را به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد [۹، ۱۰]. نوع و میزان این تغییرات به ماهیت نانوماده مورد استفاده و نحوه برهم‌کنش آن با مولکول‌های بلور مایع وابسته است. از جمله مهم‌ترین آثار گزارش شده می‌توان به کاهش ولتاژ آستانه، بهبود پاسخ الکترو-اپتیکی، افزایش ناهمسانگردی مؤثر و اصلاح رفتار دی‌الکتریکی اشاره کرد [۹-۱۳]. حضور نانوذرات در محیط بلور مایع نه تنها بر آرایش مولکولی اثر می‌گذارد، بلکه می‌تواند فرایندهای انتقال بار را نیز تحت تأثیر قرار دهد. نانوذرات به دلیل قطبش‌پذیری بالا در میدان الکتریکی، قادرند بخشی از یون‌های ناخالص موجود در محیط را جذب یا به دام اندازند. در نتیجه، تجمع یون‌ها در مجاورت الکترودها کاهش یافته و اثر پوششی یونی تضعیف می‌شود. این امر سبب افزایش میدان الکتریکی مؤثر در لایه بلور مایع شده و در نهایت کاهش ولتاژ آستانه را به همراه دارد [۱۴]. علاوه بر این، مطالعات پیشین نشان داده‌اند که نانوذرات می‌توانند در محیط بلور مایع آرایش‌های خودمنظم‌شده‌ای تشکیل دهند [۱۵، ۱۰]. این ساختارها با تأثیرگذاری بر جهت‌گیری مولکول‌های مجاور، موجب افزایش نظم موضعی و بهبود ناهمسانگردی

¹ director vector

² Fredericksz

E7 مخلوط شد. برای دستیابی به مخلوطی همگن، این ترکیبات به مدت حدود ۶ ساعت در حمام فراصوت تحت اعمال گرما قرار گرفتند. پس از آن، حلال اتانول با قرار دادن نمونه‌ها در آن حذف شد. به منظور بررسی خواص الکترونوری نمونه‌های NLC آلاییده شده با نانوذرات، دو نوع سلول بلور مایع مسطح^۵ و نماتیک پیچ‌خورده^۶ (TN) ساخته شد. این سلول‌ها از دو صفحه شیشه‌ای پوشیده‌شده با اکسید قلع آلاییده با ایندیم^۷ (ITO) به ابعاد $1.5 \times 1 \text{ cm}^2$ تشکیل شدند که بلور مایع بین آن‌ها قرار گرفت. برای ساخت سلول‌های مسطح، صفحات شیشه‌ای با لایه نازکی از پلی‌وینیل الکل^۸ (PVA) پوشش داده شدند. سپس، به منظور ایجاد جهت‌گیری یکنواخت و مؤثر مولکول‌های NLC، زیرلایه‌ها با استفاده از یک پارچه نرم در یک جهت مشخص مالش مکانیکی داده شدند. در آرایش TN، شیارهای ایجادشده روی دو الکترود بر یکدیگر عمود هستند؛ در نتیجه، مولکول‌ها از یک سمت تا سمت دیگر سلول به میزان ۹۰ درجه می‌چرخند. فاصله بین دو صفحه سلول با استفاده از یک فاصله‌دهنده مایلار^۹ در مقدار ۲۵ میکرومتر حفظ شد. سلول‌ها، در فاز ایزوتروپیک و با استفاده از خاصیت موبینگی، با مخلوط‌های NLC حاوی مقادیر مختلف نانوذرات پر شدند. در نهایت، سلول‌های ساخته‌شده با استفاده از میکروسکوپ نوری قطبیده (POM) مورد بررسی قرار گرفتند تا جهت‌گیری مولکولی و پراکندگی یکنواخت نانوذرات در آن‌ها تأیید شود.

۲-۳- روش‌های مشخصه‌یابی نمونه‌های بلور مایع

در این تحقیق، از یک چیدمان الکترونوری مطابق شکل ۱ به منظور بررسی تأثیر دما بر مقدار دوشکستی سلول‌های حاوی بلور مایع و نانوذرات NiO با جهت‌مندی مسطح استفاده شده است. در این آرایش الکترونوری، سلول مسطح بلور مایع نماتیک جهت بررسی شدت کمینه و شدت بیشینه عبوری لیزر، به ترتیب میان دو قطبشگر متقاطع و موازی قرار گرفته است؛ همچنین، برای اندازه‌گیری شدت بهینه عبوری، سلول مسطح در این چیدمان، تحت زاویه ۴۵ درجه میان دو قطبشگر متقاطع در معرض نور لیزر با توان ۵ mW و طول موج ۶۳۲٫۸ nm قرار گرفته است. برای تغییر دمای سلول‌ها، از دستگاه کنترل‌کننده دمایی با دقت ۰٫۱ °C استفاده شده است. ولتاژ mV ۱۰۰ که بسیار کمتر از ولتاژ لازم برای چرخش مولکولی است به نمونه‌ها در طول آزمایش اعمال شده است. در این چیدمان با استفاده از فوتودتکتور متصل به اسیلوسکوپ دیجیتال هانتک^{۱۰} مدل DSO4202C، عبور نور لیزر برحسب دمای سلول به دست آمد. اختلاف فاز برای دماهای مختلف، از روابط ۱ و ۲ به دست آمد [۲۷]:

در پژوهش حاضر، تأثیر نانوذرات اکسید نیکل بر رفتار وابسته به دمای دوشکستی و ولتاژ آستانه در بلور مایع نماتیک E7 به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، به منظور دستیابی به درک عمیق‌تر از نقش نانوذرات در تغییر خواص فیزیکی سامانه، از طیف‌سنجی امپدانس برای مطالعه ویژگی‌های الکتریکی و خازنی نمونه‌ها در نواحی حجمی و بین‌سطحی استفاده شده است. این بررسی‌ها در فاز ایزوتروپیک انجام شده‌اند تا اثر نانوذرات بر فرآیندهای انتقال بار و رفتار الکتریکی سامانه، مستقل از نظم جهت‌گیری فاز نماتیک، ارزیابی شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که آلایش بلور مایع با نانوذرات NiO به بهبود عملکرد الکترواپتیکی سامانه منجر شده و از طریق افزایش دوشکستی و کاهش ولتاژ آستانه، پاسخ‌پذیری آن را در برابر میدان الکتریکی تقویت می‌کند. علاوه بر این، افزودن نانوذرات NiO موجب افزایش قابل توجه رسانایی الکتریکی سامانه در فاز ایزوتروپیک می‌شود. همچنین حضور این نانوذرات تأثیر چشمگیری بر فرآیندهای انتقال یونی داشته و تحرک و ضریب نفوذ یون‌ها را به طور محسوسی تغییر می‌دهد. در مجموع، بهبود هم‌زمان خواص الکتریکی و الکترواپتیکی در نمونه‌های آلاییده با نانوذرات NiO نشان می‌دهد که این سامانه‌ها می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای کاربردهای اپتوالکترونیکی پیشرفته باشند.

۲-۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد مورد استفاده

در این تحقیق، بلور مایع نماتیک E7 ساخت شرکت مرک^۳ مورد استفاده قرار گرفته است. بلور مایع E7 از ترکیب ۴ نوع بلور مایع نماتیک 5CT، 8OCB، 7CB و 5CB به دست می‌آید [۲۵]. این بلور مایع دارای دمای انتقال فاز تقریباً ۶۱ °C و نیز دوشکستی حدوداً ۰٫۲۱ در دمای اتاق می‌باشد [۱۰]. به دلیل ناهمسانگردی دی‌الکتریکی و پایداری بالا، بلور مایع نماتیک E7 بسیار مورد توجه پژوهشگران در تحقیقات عملی و نظری بوده است. جهت بهبود عملکرد الکترونوری بلور مایع نماتیک E7، نانوذرات NiO تهیه شده از شرکت تحقیقاتی نانومواد ایالات متحده^۴، در درصدهای وزنی مختلف مورد استفاده قرار گرفت. این نانومواد دارای سطح مؤثر $100-150 \text{ m}^2/\text{g}$ و اندازه ذرات ۱۵-۳۵ nm می‌باشند [۲۶].

۲-۲- ساخت سلول‌های بلور مایع نماتیک

ابتدا نانوذرات در اتانول پراکنده شده و به مدت ۶ ساعت تحت دستگاه فراصوت حمامی قرار گرفتند. سپس، به منظور تهیه نمونه‌های بلور مایع نماتیک آلاییده شده با مقادیر مختلف نانوذرات (۰٫۰۱، ۰٫۰۳، ۰٫۰۶، ۰٫۰۹ و ۰٫۱۲ درصد وزنی (wt%))، حجم‌های متفاوتی از این محلول با بلور مایع

^۵ planar

^۶ twisted nematic

^۷ indium-doped tin oxide

^۸ polyvinyl alcohol

^۹ Mylar

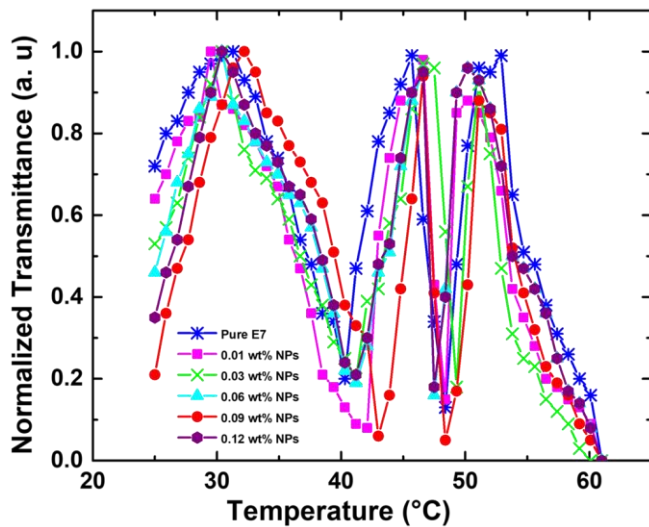
^{۱۰} Hantek

^۳ Merck

^۴ US Research Nanomaterials, Inc.

۳- نتایج و بحث

تغییر شدت عبوری بر حسب دما برای سلول‌های مسطح بلور مایع نماتیک خالص و آلاییده با نانوذرات NiO در شکل ۲ نمایش داده شده است. با افزایش دما، به دلیل تغییر جهت مولکولی، شدت در حال نوسان می‌باشد. در این منحنی‌ها هر پیک نمایش دهنده اختلاف فاز π میان پرتو عادی و غیرعادی می‌باشد. با توجه به پاسخ متفاوت مولکولی در حضور نانوذرات، اختلاف فازها در نمونه‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. شکل ۳ مقدار دوشکستی بر حسب دما را نمونه‌های بلور مایع حاوی مقادیر مختلف نانوذرات NiO نمایش می‌دهد.



شکل ۲: شدت عبوری بر حسب دما برای نمونه‌های بلور مایع حاوی مقادیر مختلف نانوذرات NiO.

مقدار دوشکستی برای تمام نمونه‌ها با افزایش دما، روندی کاهشی را نمایش می‌دهد و در دمای انتقال فاز به صفر نزدیک می‌شود. دلیل این امر کاهش نظم و ترازمندی مولکولی با افزایش دما می‌باشد. تغییرات مقدار دوشکستی نمونه‌های مختلف بلور مایع در دمای ۲۵ °C در شکل ۴ نمایش داده شده است. مقدار دوشکستی برای بلور مایع نماتیک خالص E7 برابر با ۰/۲۱۵ به دست آمد که با گزارشات قبلی مطابقت دارد [۲۷، ۲۸]. با افزودن نانوذرات، این مقدار افزایش یافت و در غلظت ۰/۰۹ wt% به مقدار ۰/۲۶۸ رسید. با این حال، با اضافه کردن مقادیر بیشتری از نانوذرات، مقدار دوشکستی کاهش یافت.

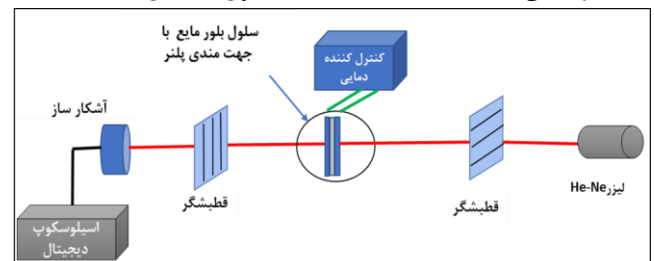
$$\Delta\varphi = m\pi + 2\sin^{-1}\sqrt{\frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}} \quad \text{for even } m \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = (m+1)\pi - 2\sin^{-1}\sqrt{\frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}} \quad \text{for odd } m \quad (2)$$

که در این روابط، m تعداد پیک مشاهده شده در نمودار شدت عبوری لیزر بر حسب دما و I شدت به دست آمده در هر دما است؛ $I_{\max}$ و $I_{\min}$ شدت بیشینه و کمینه عبوری از سلول می‌باشد. مقدار دوشکستی نمونه‌ها (Δn) در دماهای مختلف مطابق رابطه زیر با استفاده از اختلاف فاز میان پرتوهای عادی و غیر عادی نور عبوری محاسبه شد [۲۷]:

$$\Delta n = \frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\varphi \quad (3)$$

که در آن d ضخامت سلول، λ طول موج لیزر و $\Delta\varphi$ اختلاف فاز میان پرتوهای عادی و غیر عادی نور لیزر عبوری می‌باشد. در ادامه، ولتاژ آستانه نمونه‌های بلور مایع اندازه‌گیری شد. در چیدمان الکترواپتیکی اندازه‌گیری ولتاژ آستانه، سلول بلور مایع نماتیک پیچ خورده میان دو پلاریزور خطی عمود بر هم قرار می‌گیرد و تحت تابش نور لیزر He-Ne با توان ۵ mW و طول موج ۶۳۲/۸ nm قرار می‌گیرد. عبور نور، به صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده بر سلول، با استفاده از یک فوتودتکتور ثبت شد. ولتاژی که در آن، عبور به ۹۰ درصد مقدار بیشینه اولیه خود کاهش می‌یابد، به عنوان ولتاژ آستانه تعریف می‌شود [۱۱]. علاوه بر این، مقدار ولتاژ آستانه نمونه‌های بلور مایع خالص و آلاییده با نانوذرات در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. داده‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) برای نمونه‌های بلور مایع نماتیک خالص و حاوی نانوذرات با استفاده از دستگاه Autolab PGSTAT302 N و با قدرت تفکیک فرکانسی ۰/۰۰۳٪ ثبت شدند. اندازه‌گیری‌های امپدانس بر روی نمونه‌های با جهت‌مندی مسطح در فاز ایزوتروپیک انجام گرفت. برای این منظور، ولتاژ متناوبی به دامنه ۱۰۰ mV در بازه فرکانسی ۱۰۰ kHz تا ۱۰۰ kHz به سلول‌ها اعمال شد.

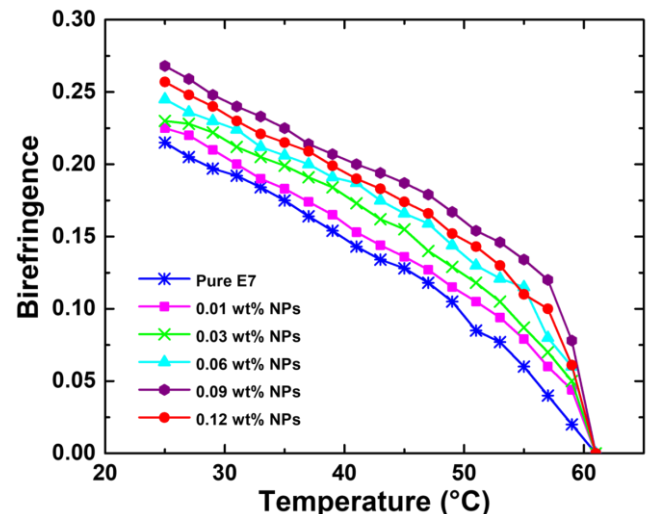


شکل ۱: چیدمان آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری دوشکستی نمونه‌های بلور مایع خالص و آلاییده با نانوذرات NiO.

مایع می‌شود. این پدیده، قطبیت مؤثر مولکول‌های بلور مایع را بهبود بخشیده و در نتیجه مقدار ناهمسانگردی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، حضور نانوذرات می‌تواند نظم مولکولی را در سیستم بلور مایع بهبود ببخشد. ناخالصی‌های یونی در یک سلول بلور مایع تحت تأثیر میدان الکتریکی به سمت زیرلایه‌ها جریان می‌یابند و یک لایه پوشش بر روی لایه هم‌تراز کنند ایجاد می‌کنند. در نتیجه، مولکول‌های بلور مایع نمی‌توانند به‌طور کامل درون سلول جهت‌مند شوند. زمانی که نانوذرات NiO به بلور مایع اضافه می‌شوند، در حضور میدان الکتریکی، بر روی این نانوذرات دوقطبی‌هایی القاء می‌شود. در نتیجه، ناخالصی‌های یونی به‌جای نفوذ به سمت زیرلایه‌ها، جذب این دوقطبی‌های القائی می‌شود. کاهش لایه پوششی بر روی زیرلایه‌ها منجر به بهبود نظم مولکولی در سیستم می‌شود. از طرف دیگر، گزارش‌های متعددی در ارتباط با خودنظم‌شدگی مولکولی نانوذرات درون سیستم بلور مایع وجود دارد. این ساختارهای منظم می‌تواند در نهایت به افزایش نظم کل سیستم بلور مایع کمک کند.

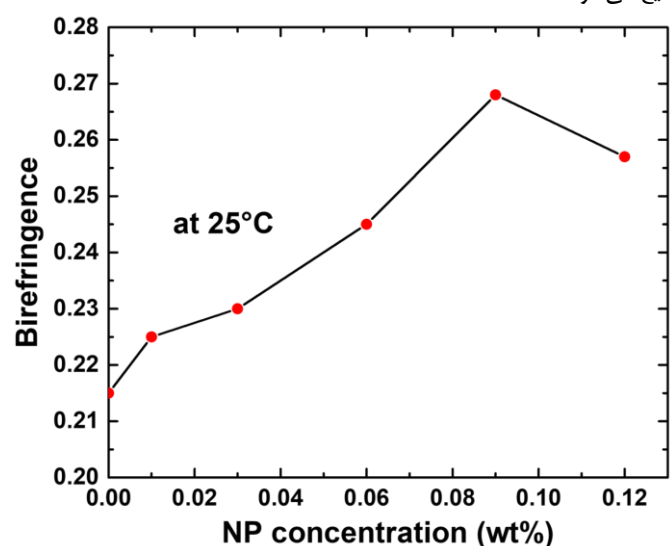
ناهمسانگردی یک سیستم بلور مایع تحت تأثیر برهم‌کنش‌های موجود در آن قرار می‌گیرد. در یک سامانه آلائیده شده با نانوذرات انواع مختلفی از برهم‌کنش‌ها می‌تواند رخ دهد؛ از جمله برهم‌کنش میان مولکول‌های بلور مایع، برهم‌کنش میان مولکول‌های بلور مایع و نانوذرات و همچنین برهم‌کنش میان خود نانوذرات. در یک سلول بلور مایع خالص، تنها برهم‌کنش موجود بین مولکول‌های بلور مایع وجود دارد. با افزودن نانوذرات به محیط بلور مایع، دو برهم‌کنش دیگر نیز آشکار می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن نانوذرات تا غلظت ۰/۰۹ wt%، برهم‌کنش‌های میان نانوذرات و مولکول‌های بلور مایع غالب هستند. با این حال، در نمونه حاوی ۰/۱۲ wt% نانوذره، برهم‌کنش‌های میان نانوذرات بیشترین سهم را داشته و منجر به تشکیل تجمعات یا کلوخه‌های نانوذرات می‌شوند.

در ادامه و به‌منظور تکمیل تحلیل خواص الکترو-اپتیکی سامانه، وابستگی دمایی ولتاژ آستانه مورد بررسی قرار گرفت. سلول‌های بلور مایع نماتیک پیچ‌خورده در حالی که بین دو پولاریزر خطی متقاطع قرار دارند، تحت تابش لیزر He-Ne قرار گرفتند. در صورتی که سلول در مسیر پرتو لیزر قرار نداشته باشد، توان نور لیزر پس از عبور از پولاریزرها به صفر می‌رسد. شدت عبوری نور به‌عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی به نمونه‌ها ثبت شد تا ولتاژ آستانه تعیین شود. در غیاب میدان الکتریکی، محور بلند مولکولی، در سلول نماتیک پیچ‌خورده به‌گونه‌ای می‌چرخد که در کل ضخامت سلول، چرخشی معادل ۹۰ درجه از یک الکتروود به الکتروود دیگر ایجاد می‌شود؛ زیرا مولکول‌های بلور مایع نماتیک در این سلول‌ها در سطح زیرلایه‌ها به‌صورت عمود بر هم تراز شده‌اند. در این چیدمان، قطبش نور لیزر ورودی هنگام عبور از سلول به میزان ۹۰ درجه چرخانده می‌شود و در نتیجه امکان عبور آن از آنالیزور فراهم می‌گردد. زمانی که به سلول نماتیک پیچ‌خورده، میدان الکتریکی بسیار بزرگ‌تر از ولتاژ آستانه اعمال می‌شود، مولکول‌های بلور مایع در راستای میدان الکتریکی هم‌راستا می‌شوند. در این حالت، قطبش نور ورودی تغییر



شکل ۳: مقدار دوشکستی بر حسب دما برای نمونه‌های بلور مایع حاوی مقادیر مختلف نانوذرات NiO.

به طور کلی، ناهمسانگردی اپتیکی بلورهای مایع، تابعی است از چگالی مولکول‌های بلور مایع، ناهمسانگردی قطبش‌پذیری مولکولی و نظم مولکولی [۲۹]. افزودن نانوذرات به بلور مایع منجر به کاهش چگالی مولکول‌های بلور مایع و در نتیجه کاهش ناهمسانگردی در یک سلول بلور مایع می‌شود.



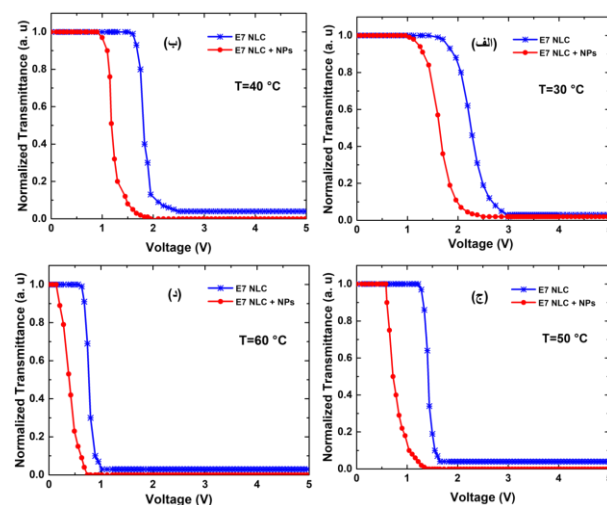
شکل ۴: تغییرات دوشکستی بر حسب غلظت نانوذرات NiO در دمای ۲۵ °C.

هنگامی که یک میدان الکتریکی به مولکول‌های بلور مایع نماتیک اعمال می‌شود، ممان دوقطبی دائمی آن‌ها سبب می‌شود که سمت مثبت مولکول‌ها یون‌های منفی را جذب نماید و سمت منفی آن‌ها یون‌های مثبت را به خود جذب کند. به دلیل تجمع یون‌ها، قطبیت مؤثر مولکول‌های بلور مایع کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش مقدار مؤثر ممان دوقطبی و در نهایت کاهش ناهمسانگردی محیط می‌شود [۲۰]. از سوی دیگر، فرایند جذب یون‌ها توسط نانوذرات موجب کاهش تجمع یون‌ها بر روی مولکول‌های بلور

محسوسی نمی‌کند و در نتیجه آنالیزور از عبور نور جلوگیری کرده و شدت نور خروجی کاهش می‌یابد.

شکل ۵ تغییرات شدت عبوری نرمال‌شده را بر حسب ولتاژ برای سلول‌های بلور مایع نماتیک خالص و حاوی نانوذرات NiO در دماهای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد نمایش می‌دهد. با توجه به بالاتر بودن ناهمسانگردی اپتیکی در نمونه حاوی ۰/۰۹ wt% نانوذرات، در این بخش ولتاژ آستانه نمونه خالص و نمونه آلاینده‌شده با ۰/۰۹ wt% نانوذرات در دماهای مختلف با یکدیگر مقایسه شد. با افزایش ولتاژ، به دلیل بازآرایی مولکول‌های بلور مایع نماتیک، شدت عبوری نور در سلول‌ها کاهش می‌یابد. در ولتاژ آستانه، شدت عبوری نور به ۹۰ درصد مقدار پیشینه خود کاهش می‌یابد.

مشاهده می‌شود که در هر ۴ دما، ولتاژ آستانه با افزودن نانوذرات کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه، در دمای ۳۰ درجه، برای سلول بلور مایع خالص، مقدار ولتاژ آستانه برابر ۱/۹۱ V به دست آمد. با افزودن ۰/۰۹ wt% نانوذرات NiO، این مقدار به ۱/۳۲ V کاهش یافت که معادل حدود ۳۱ درصد کاهش را نمایش می‌دهد. دلایل احتمالی کاهش ولتاژ آستانه در حضور نانوذرات شامل افزایش ناهمسانگردی، تقویت شار الکتریکی درون سلول و کاهش یون‌های ناخالص در سیستم بلور مایع نماتیک می‌باشد.



شکل ۵: تغییرات شدت نور عبوری بر حسب ولتاژ برای سلول‌های بلور مایع نماتیک خالص و حاوی نانوذرات NiO در دماهای (الف) ۳۰، (ب) ۴۰، (ج) ۵۰ و (د) ۶۰ درجه سانتی‌گراد.

زمانی که مولکول‌های بلور مایع نماتیک تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند، مطابق گذار فریدریکس، گشتاوری متناسب با ناهمسانگردی دی‌الکتریکی بر آن‌ها وارد می‌شود که در نتیجه آن، مولکول‌ها در راستای میدان الکتریکی بازآرایی می‌شوند [۶]. در نتیجه، افزایش نظم مولکولی و در نتیجه آن افزایش ناهمسانگردی سیستم، منجر به افزایش گشتاور مربوط به میدان خواهد شد. بنابراین، میدان الکتریکی آستانه لازم برای بازآرایی

مولکول‌ها کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، گزارش شده است که، در نزدیکی نانوذرات نیم‌رسانا درون محیط بلور مایع، به دلیل افزایش تمرکز شار الکتریکی، چگالی شار و در نتیجه شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد [۳۰]. این امر موجب تقویت موضعی میدان الکتریکی درون سلول و بنابراین کاهش ولتاژ آستانه مورد نیاز برای بازآرایی مولکول‌ها می‌شود. عامل دیگر در کاهش ولتاژ آستانه، کاهش اثر پوششی ناخالصی‌های یونی بر روی زیرلایه‌ها می‌باشد. تشکیل لایه‌ای از ناخالصی‌های یونی بر روی زیرلایه‌های سلول، میدان داخلی‌ای ایجاد می‌کند که در خلاف جهت میدان خارجی عمل می‌کند. در نتیجه، میدان مؤثر اعمال‌شده بر لایه بلور مایع را کاهش می‌یابد و باعث افزایش ولتاژ آستانه می‌شود. با این حال، نانوذرات NiO به عنوان تله‌های یونی برای این ناخالصی‌ها در داخل سلول عمل می‌کنند. این امر به‌طور قابل توجهی تشکیل تجمع یون‌ها بر روی الکترودها را کاهش داده و در نتیجه اثر پوششی آن‌ها را تضعیف می‌کند.

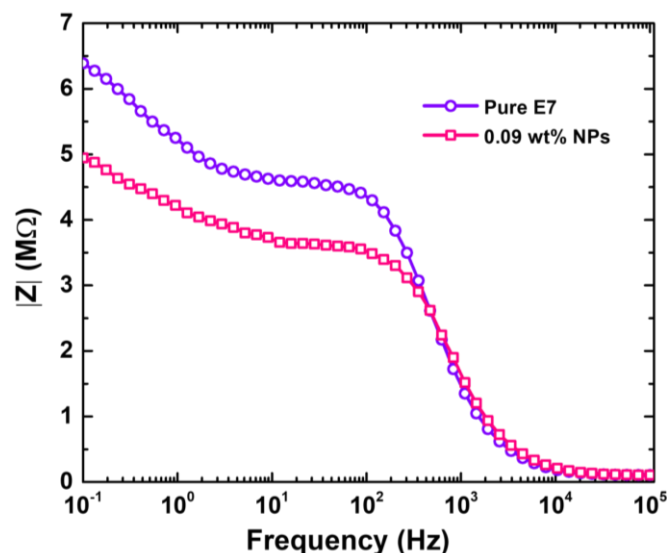
شکل ۶ تغییرات ولتاژ آستانه بر حسب دما برای نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نانوذرات NiO را نمایش می‌دهد. با افزایش دما و نزدیک شدن به دمای گذار نماتیک-ایزوتروپیک، ولتاژ آستانه در هر دو نمونه روندی کاهشی از خود نشان داد. با این حال، میزان کاهش ولتاژ آستانه در نمونه حاوی نانوذرات NiO بیشتر از نمونه خالص بود؛ به‌طوری‌که در نزدیکی دمای گذار، ولتاژ آستانه نمونه دوطرفه به حدود ۱۴ درصد مقدار اولیه خود کاهش یافت، در حالی که این مقدار برای نمونه خالص حدود ۳۴ درصد مقدار اولیه بود. کاهش ولتاژ آستانه با افزایش دما را می‌توان به تضعیف تدریجی نظم جهت‌گیری مولکول‌ها و کاهش مقاومت الاستیکی فاز نماتیک نسبت داد. با نزدیک شدن به دمای گذار، برهم‌کنش‌های بین مولکولی ضعیف‌تر شده و در نتیجه مولکول‌ها با صرف انرژی کمتری در راستای میدان الکتریکی بازآرایی می‌شوند. از این‌رو، میدان الکتریکی کمتری برای وقوع گذار فریدریکس مورد نیاز بوده و ولتاژ آستانه کاهش می‌یابد. کاهش بیشتر ولتاژ آستانه در نمونه حاوی نانوذرات نشان می‌دهد که حضور نانوذرات NiO حساسیت پاسخ الکترواپتیکی سامانه را نسبت به تغییرات دما افزایش داده است. از آنجا که این نمونه در کل بازه دمایی دارای دوشکستی بیشتری نسبت به نمونه خالص است، می‌توان نتیجه گرفت که برهم‌کنش بین نانوذرات و مولکول‌های بلور مایع موجب تغییر در خواص مؤثر فاز نماتیک شده است. علاوه بر این، نانوذرات با ایجاد تمرکز موضعی میدان الکتریکی در اطراف خود، بازآرایی مولکول‌ها را تسهیل می‌کنند. در نتیجه، با افزایش دما و کاهش پایداری ساختار نماتیک، اثر نانوذرات در کاهش ولتاژ مورد نیاز برای جهت‌دهی مجدد مولکول‌ها آشکارتر شده و افت ولتاژ آستانه در نمونه حاوی نانوذرات نسبت به نمونه خالص شدیدتر مشاهده می‌شود.

بیشتر تحت تأثیر برهم‌کنش میان‌های دوقطبی مولکول‌های بلور مایع موجود در توده نمونه با میدان الکتریکی قرار می‌گیرد [۱۰، ۱۱].

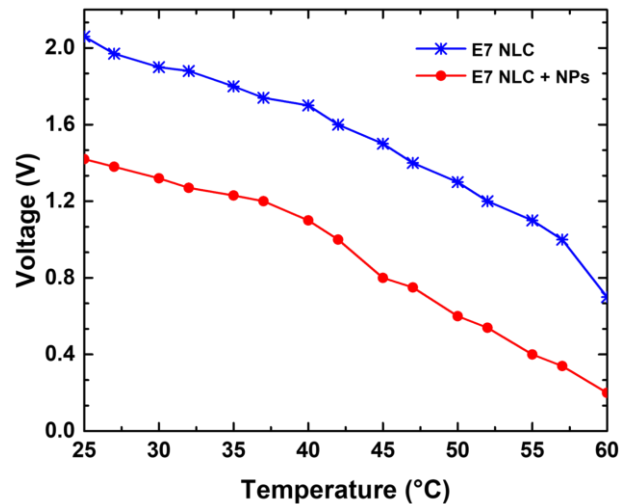
تا فرکانس حدود ۳ هرتز، مقدار امپدانس کلی نمونه خالص با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد؛ پس از آن، امپدانس تا حدود ۵۰ هرتز تقریباً ثابت باقی می‌ماند. سپس تا حدود ۱۰ کیلوهرتز با نرخ تقریباً خطی کاهش یافته و در فرکانس‌های بالاتر، روند کاهشی آن تدریجی‌تر شده و به سمت یک مجانب افقی میل می‌کند. امپدانس کلی نمونه حاوی نانوذرات نیز با افزایش فرکانس رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهد. با این حال، در مقایسه با نمونه خالص، منحنی نمونه آلائیده به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شده است. همچنین، افزودن نانوذرات NiO موجب کاهش امپدانس کل می‌شود. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزودن نانوذرات NiO باعث انتقال قله زاویه فاز بلور مایع به سمت فرکانس‌های بالاتر می‌شود.

در فرکانس f_{peak} اتلاف دی‌الکتریک به بیشینه مقدار خود می‌رسد؛ زیرا در این فرکانس، میدان الکتریکی با آهنگی تغییر جهت می‌دهد که برای مهاجرت یون‌های آزاد به سمت الکترودهای با بار مخالف کافی است. تجمع این یون‌ها در نزدیکی فصل مشترک الکترودها-بلور مایع منجر به تشکیل ناحیه بار فضایی شده و در نتیجه ظرفیت خازنی سلول افزایش می‌یابد.

ویژگی‌های الکتریکی و خازنی نمونه‌های بلور مایع نماتیک را می‌توان از طریق نمودارهای نایکوئیست^{۱۲} امپدانس (شکل ۹) به‌دست آورد. در این نمودارها، بخش موهومی امپدانس بر حسب بخش حقیقی آن رسم شده است.



شکل ۷: زاویه فاز نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نانوذرات NiO به صورت تابعی از فرکانس در فاز ایزوتروپیک.



شکل ۶: تغییرات ولتاژ آستانه برحسب دما برای نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نانوذرات NiO.

نتایج ارائه‌شده در بخش‌های قبل نشان دادند که افزودن نانوذرات NiO تأثیر قابل توجهی بر خواص الکتروپتیک بلور مایع داشته و منجر به افزایش دوشکستی و کاهش ولتاژ آستانه شده است. به‌منظور دستیابی به درک عمیق‌تر از منشأ این تغییرات و بررسی تأثیر نانوذرات بر رفتار انتقال بار در سامانه، خواص الکتریکی نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری امپدانس الکتروشیمیایی مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجا که پاسخ امپدانس در فاز نماتیک علاوه بر فرایندهای انتقال بار، تحت تأثیر نظم جهت‌گیری و ناهمسانگردی دی‌الکتریک نیز قرار دارد، در این پژوهش تحلیل امپدانس به فاز ایزوتروپیک محدود شد. در این فاز، حذف نظم جهت‌گیری امکان بررسی مستقیم اثر نانوذرات بر رسانایی الکتریکی و فرایندهای انتقال یونی را فراهم می‌سازد.

اندازه امپدانس کلی^{۱۱} و تانژانت اتلاف دی‌الکتریک^{۱۲} به‌وسیله به‌ترتیب روابط ۴ و ۵ تعریف می‌شوند [۳۱]:

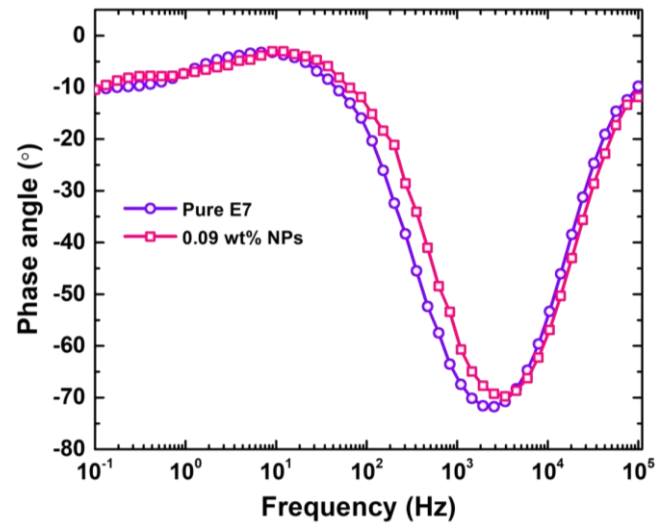
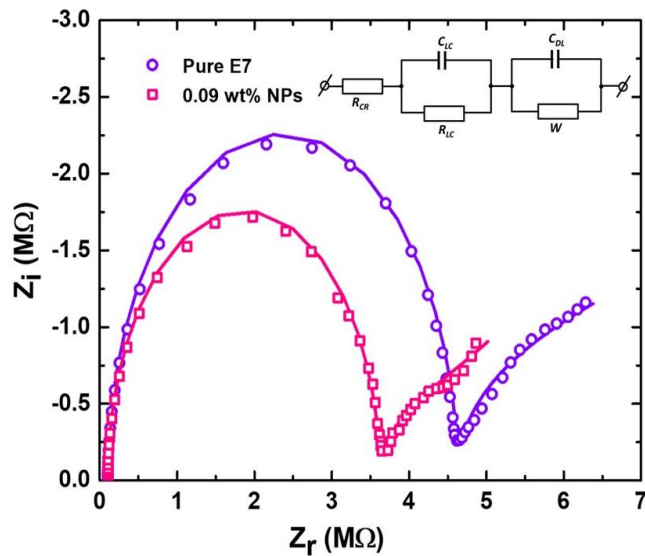
$$|Z| = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2} \quad (4)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{Z_i}{Z_r} \quad (5)$$

که در آن، Z_r و Z_i به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی امپدانس می‌باشند. امپدانس کلی نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نانوذرات به‌صورت تابعی از فرکانس در شکل ۷ نمایش داده شده است. پیش از این، گروه ما نشان داده است که برهم‌کنش بین مولکول‌های بلور مایع در ناحیه فصل مشترک الکترودها-بلور مایع و میدان الکتریکی عمده‌تاً در بازه فرکانس‌های کوتاه رخ می‌دهد. در مقابل، در فرکانس‌های بالا، پاسخ الکتریکی سیستم

¹¹ overall impedance

¹² dielectric loss tangent



شکل ۸. امپدانس کلی نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نانوذرات NiO به صورت تابعی از فرکانس در فاز ایزوتروپیک.

هر یک از نمودارها در فرکانس‌های بالا دارای یک نیم‌دایره بوده و در ناحیه فرکانس‌های پایین رفتار امپدانس واربورگ را نشان می‌دهند. برای استخراج پارامترهای فیزیکی مختلف از داده‌های امپدانس تجربی، استفاده از یک مدل مدار معادل الکتریکی مناسب ضروری است. با توجه به ویژگی‌های بلورهای مایع نماتیک و رفتار امپدانس آن‌ها در نواحی مختلف فرکانسی، مدل‌های متعددی از مدارهای معادل الکتریکی برای شبیه‌سازی و تحلیل داده‌های امپدانس این سامانه‌ها پیشنهاد شده‌است [۳۲-۳۴]. شکل داخلی نمایش داده شده در شکل ۹ مدل مدار معادل الکتریکی استفاده شده در این تحقیق را نمایش می‌دهد. عناصر این مدل شامل مقاومت الکترودها و اتصالات خارجی سلول (R_{cr})، ظرفیت خازنی توده^{۱۴} بلور مایع (C_{LC})، ظرفیت لایه دوگانه (C_{DL}) و عنصر واربورگ (W) می‌باشند. مقادیر به دست آمده برای عناصر مختلف مدار معادل در جدول ۱ خلاصه شده است.

شکل ۹. منحنی نایکوئیست نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نانوذرات NiO در فاز ایزوتروپیک. نمادها نشان‌دهنده داده‌های تجربی بوده و خطوط پیوسته بیانگر برازش‌های متناظر به دست آمده از مدل مدار معادل الکتریکی، نشان داده شده در شکل داخلی، هستند.

کمیت‌های رسانایی الکتریکی، ضریب تحرک‌پذیری یونی و ضریب نفوذ یونی با استفاده از عناصر استخراج شده از مدل‌سازی محاسبه می‌شوند. رسانایی الکتریکی از طریق رابطه $\sigma = L/R_{LC}B$ محاسبه می‌شود که در آن L ضخامت لایه بلور مایع و B سطح مقطع مؤثر می‌باشد.

یون‌ها درون سلول، فاصله میان دو الکترود را در مدت زمان t_{tr} که نصف سیکل میدان الکتریکی است، طبق رابطه ۶ طی می‌کنند [۳۳، ۳۴].

$$t_{tr} = \frac{d}{\mu E} = \frac{d^2}{\alpha V_0 \mu} \quad (6)$$

که در آن، V_0 ولتاژ مؤثر اعمال شده بر سلول، μ ضریب تحرک‌پذیری یونی و ضریب $\alpha = C_{DL}/C_{LC}$ نمایش‌دهنده درجه میرا شدن ولتاژ در سلول بلور مایع است. در نتیجه، f_{peak} را از طریق رابطه ذیل با تحرک‌پذیری یونی مرتبط می‌شود:

$$f_{peak} = \frac{\alpha V_0 \mu}{2d^2} \quad (7)$$

با استفاده از رابطه ۷ می‌توان تحرک‌پذیری یونی را به دست آورد. ضریب نفوذ D به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \frac{\mu k_B T}{e} \quad (8)$$

که در این رابطه، k_B ثابت بولتزمن می‌باشد. مقادیر محاسبه شده رسانایی الکتریکی، ضریب تحرک‌پذیری یونی و ضریب نفوذ یونی برای نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نانوذرات در فاز ایزوتروپیک در جدول ۱ نمایش

¹⁴ bulk

نواحی بین‌سطحی است. اگرچه این اندازه‌گیری‌ها در فاز ایزوتروپیک انجام شده‌اند، نتایج به‌دست‌آمده درک عمیق‌تری از نقش نانوذرات در سامانه فراهم کرده و می‌توانند به‌عنوان شواهدی در تأیید منشأ بهبود خواص الکترو-اپتیکی، از جمله افزایش دوشکستی و کاهش ولتاژ آستانه در فاز نماتیک، در نظر گرفته شوند.

جدول ۱: پارامترهای امپدانس برای نمونه‌های بلورمایع خالص و حاوی نانوذرات NiO با درصد وزنی ۰/۰۹ در حالت ایزوتروپیک.

نمونه	R_{LC} (MΩ)	C_{LC} (pF)	C_{DL} (nF)	σ (10^{-10} S cm $^{-1}$)	μ (10^{-10} m 2 s $^{-1}$ V $^{-1}$)	D (10^{-12} m 2 s $^{-1}$)
E7خالص	۴/۵۱	۱۰۴/۵۰	۱۱۳/۰	۶/۱۴	۷/۹۴	۲۰/۲۷
۰/۰۹ wt%	۳/۵۲	۸۷/۶۶	۹۱/۲	۷/۸۷	۱۴/۵۰	۳۷/۰۲

۴- نتیجه گیری

خواص الکترواپتیکی نمونه‌های بلور مایع E7 حاوی مقادیر مختلف نانوذرات NiO به صورت تابعی از دما مورد بررسی قرار گرفت. افزودن نانوذرات منجر به افزایش مقدار دوشکستی شد که حاکی از تقویت نظم مولکولی در سامانه بلور مایع است. استفاده از نانوذرات موجب کاهش قابل توجه ولتاژ آستانه در فاز نماتیک شد و در ۰/۰۹ درصد وزنی، کاهش حدود ۳۱ درصدی مشاهده گردید. مطابق نتایج به‌دست آمده، افزایش دما موجب کاهش ولتاژ آستانه در سلول بلور مایع می‌شود، با این وجود این اثر در نمونه‌های حاوی نانوذرات NiO به‌مراتب بیشتر از نمونه خالص است. همچنین در فاز ایزوتروپیک، افزایش قابل توجهی در رسانایی الکتریکی بلور مایع نماتیک در حضور نانوذرات مشاهده شد. علاوه‌براین، ضرایب تحرک‌پذیری یونی و نفوذ یونی با افزودن نانوذرات بهبود یافت. نتایج نشان می‌دهد که آرایش بلورهای مایع نماتیک با نانوذرات NiO رویکردی مؤثر برای بهبود هم‌زمان خواص الکتریکی و الکترواپتیکی به شمار می‌رود. این دستاورد، چشم‌انداز مناسبی را برای بهره‌گیری از سامانه‌های بلور مایع حاوی نانوذرات NiO در کاربردهای نوین اپتوالکترونیکی فراهم می‌سازد.

داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، در فاز ایزوتروپیک، با افزودن نانوذرات، R_{LC} کاهش و در نتیجه σ افزایش می‌یابد. لازم‌به‌ذکر است که رسانایی الکتریکی بلورهای مایع نماتیک از دو مؤلفه رسانایی یونی و رسانایی الکترونی تشکیل شده است. در این سامانه‌ها، یون‌های متحرک مسئول رسانایی یونی بوده، در حالی که حامل‌های بار الکترونی در رسانایی الکترونی نقش دارند. حضور نانومواد در محیط بلور مایع می‌تواند از یک سو با آزادسازی یون‌ها موجب افزایش رسانایی یونی و از سوی دیگر با به دام انداختن یون‌ها سبب کاهش آن شود. نتایج الکترو-اپتیکی و دی‌الکتریکی این پژوهش نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی نانوذرات NiO، اثر تله‌اندازی یون‌ها بر آزادسازی آن‌ها غالب است. از طرف دیگر، نانوذرات NiO می‌توانند از طریق افزایش انتقال بار، رسانایی الکتریکی کل سامانه را بهبود بخشند. ایجاد نواحی رسانا در اثر نقص‌ها و جای‌خالی‌های اکسیژن موجود در ساختار نانوذرات و همچنین تشکیل مسیرهای انتقال بار در میان تجمعات موضعی نانوذرات، از جمله عوامل مؤثر در افزایش رسانایی هستند. در نتیجه، افزودن نانوذرات NiO موجب تسهیل انتقال بار و افزایش رسانایی الکتریکی بلور مایع می‌شود. کاهش مقدار C_{LC} در نمونه حاوی نانوذرات نسبت به نمونه خالص در فاز ایزوتروپیک، نشان‌دهنده کاهش مؤلفه عمودی ثابت دی‌الکتریک است. از آنجا که در سلول‌های مسطح، افزایش نظم جهت‌گیری مولکول‌ها موجب نزدیک شدن ثابت دی‌الکتریک عمودی ($\epsilon_{\perp}$) به مقدار حداقل آن می‌شود، این نتیجه بیانگر تقویت آرایش ترجیحی مولکول‌ها در مجاورت سطوح سلول است. اگرچه در فاز ایزوتروپیک نظم دوربرد مولکول‌های بلور مایع از بین می‌رود، اما لایه‌های مولکولی نزدیک به زیرلایه‌ها همچنان تحت تأثیر شرایط مرزی و جهت‌دهی اعمال‌شده توسط لایه هم‌ترازکننده قرار دارند. بنابراین، کاهش C_{LC} در حضور نانوذرات NiO می‌تواند نشان‌دهنده تقویت نظم القاشده توسط سطح و افزایش جهت‌مندی مولکول‌ها در نواحی بین‌سطحی باشد. علاوه‌براین، افزودن نانوذرات موجب جذب بخشی از یون‌های موجود در محیط بر روی سطح نانوذرات می‌شود. از این رو، با کاهش یون‌های باقی‌مانده در محیط بلور مایع، انتقال آن‌ها در سلول تسهیل می‌شود. در نتیجه، ضریب تحرک‌پذیری یونی و ضریب نفوذ یونی افزایش یافته و انتقال بار در محیط بلور مایع با سهولت بیشتری انجام می‌شود. کاهش ظرفیت لایه دوگانه در نمونه حاوی نانوذرات را می‌توان به جذب و تله‌اندازی بخشی از یون‌های آزاد توسط نانوذرات NiO نسبت داد. درحقیقت، تعداد یون‌های قابل تجمع در مجاورت الکترودها کاهش یافته و تشکیل ناحیه بار فضایی در فصل مشترک الکترودها-بلور مایع تضعیف می‌شود. کاهش تراکم بارهای انباشته‌شده در این ناحیه موجب کاهش ظرفیت لایه دوگانه می‌گردد. این نتیجه بیانگر کاهش قطبش بین‌سطحی و تضعیف اثر پوششی یون‌ها در حضور نانوذرات است.

به‌طور کلی، نتایج امپدانس در فاز ایزوتروپیک نشان می‌دهد که حضور نانوذرات NiO موجب تغییر فرایندهای انتقال بار، تله‌اندازی یون‌ها و کاهش اثر پوششی یون‌ها در سامانه بلور مایع می‌شود. همچنین شواهد حاصل از تغییرات ظرفیت‌های معادل بیانگر تأثیر نانوذرات بر آرایش مولکولی در

- [13] C.-W. Oh, E.-G. Park, H.-G. Park, "Enhanced electro-optical properties in titanium silicon oxide nanoparticle doped nematic liquid crystal system," *Surface and Coatings Technology*, 360, 50–55, 2019.
- [14] C.Y. Huang, P. Selvaraj, G. Senguttuvan, C.J. Hsu, "Electro-optical and dielectric properties of TiO₂ nanoparticles in nematic liquid crystals with high dielectric anisotropy," *Journal of Molecular Liquids*, 286, 110902, 2019.
- [15] N. Atzin, O. Guzmán, O. Gutiérrez, L.S. Hirst, S. Ghosh, "Free-energy model for nanoparticle self-assembly by liquid crystal sorting," *Physical Review E*, 97, 062704, 2018.
- [16] S. Anas, T.K. Abhilash, H. Varghese, A. Chandran, "Metal oxide nanomaterials-dispersed liquid crystals for advanced electro-optical devices, in: *Metal Oxides for Next-Generation Optoelectronic, Photonic, and Photovoltaic Applications*," Elsevier, 511–540, 2024.
- [17] G. Yadav, R. Katiyar, G. Pathak, R. Manohar, "Effect of ion trapping behavior of TiO₂ nanoparticles on different parameters of weakly polar nematic liquid crystal, *Journal of Theoretical and Applied Physics*," 12, 191–198, 2018.
- [18] M. Jaiswal, G. Srivastava, S. Mishra, P. Kumar Singh, R. Dhar, R. Dabrowski, "Synthesis and characterization of semiconducting copper oxide nanoparticles and their impact on the physical properties of a nematic liquid crystalline material 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl," *Journal of Molecular Liquids*, 383, 122032, 2023.
- [19] P.K. Tripathi, D.P. Singh, T. Yadav, V. Singh, A.K. Srivastava, Y.S. Negi, "Enhancement of birefringence for liquid crystal with the doping of ferric oxide nanoparticles," *Optical Materials*, 135, 113298, 2023.
- [20] Z. Seidalilir, S.A. Taher, "Enhanced electro-chemical characteristics and superior electro-optical switching performance of nematic liquid crystal doped with MgO nanoparticles," *Optical and Quantum Electronics*, 56, 1229, 2024.
- [21] F.H. Alkallas, A. Toghan, H.A. Ahmed, S.H. Alrefae, R.A. Pashameah, T.A. Alrebdi, E.A. Mwafy, A.M. Mostafa, "Catalytic performance of NiO nanoparticles decorated carbon nanotubes via one-pot laser ablation method against methyl orange dye," *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 3336–3346, 2022.
- [22] A. Chandran, J. Prakash, J. Gangwar, T. Joshi, A.K. Srivastava, D. Haranath, A.M. Biradar, "Low-voltage electro-optical memory device based on NiO nanorods dispersed in a ferroelectric liquid crystal," *RSC Advances*, 6, 53873–53881, 2016.
- [23] G. Jamwal, J. Prakash, A. Chandran, J. Gangwar, A.K. Srivastava, A.M. Biradar, "Effect of nickel oxide nanoparticles on dielectric and optical properties of nematic liquid crystal," *Journal of Molecular Liquids*, 383, 122032, 2023.
- [1] P.J. Collings, J.W. Goodby, "Introduction to Liquid Crystals, CRC Press, Second edition," 2019.
- [2] J. Mather, L.P. Jones, P. Gass, A. Imai, T. Takatani, K. Yabuta, "Potential improvements for dual directional view displays," *Applied Optics*, 53, 769, 2014.
- [3] Z.M. Mykytyuk, H.I. Barylo, I.P. Kremer, Y.M. Kachurak, O.Y. Shymchyshyn, "Sensitive liquid crystal composites for optical sensors," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 768, 1–8, 2024.
- [4] M. Zhang, F. Zhang, Q. An, Q. Sun, W. Wang, X. Ma, J. Zhang, W. Tang, "Nematic liquid crystal materials as a morphology regulator for ternary small molecule solar cells with power conversion efficiency exceeding 10%," *Journal of Materials Chemistry A*, 5, 3589–3598, 2017.
- [5] S.J. Woltman, G.D. Jay, G.P. Crawford, "Liquid-crystal materials find a new order in biomedical applications," *Nature Materials*, 6, 929–938, 2007.
- [6] S.D. Durbin, S.M. Arakelian, Y.R. Shen, "Optical-Field-Induced Birefringence and Freedericksz Transition in a Nematic Liquid Crystal," *Physical Review Letters*, 47, 1411–1414, 1981.
- [7] J. Prakash, S. Khan, S. Chauhan, A.M. Biradar, "Metal oxide-nanoparticles and liquid crystal composites: A review of recent progress," *Journal of Molecular Liquids*, 297, 112052, 2020.
- [8] A. Rastogi, A. Mishra, F.P. Pandey, R. Manohar, A.S. Parmar, "Enhancing physical characteristics of thermotropic nematic liquid crystals by dispersing in various nanoparticles and their potential applications," *Emergent Materials*, 6, 101–136, 2023.
- [9] C.-J. Hsu, L.-J. Lin, M.-K. Huang, C.-Y. Huang, "Electro-optical Effect of Gold Nanoparticle Dispersed in Nematic Liquid Crystals," *Crystals*, 7, 287, 2017.
- [10] Z. Seidalilir, E. Soheyli, M. Sabaeian, R. Sahraei, "Enhanced electrochemical and electro-optical properties of nematic liquid crystal doped with Ni:ZnCdS/ZnS core/shell quantum dots," *Journal of Molecular Liquids*, 320, 114373, (2020).
- [11] Z. Seidalilir, S. Shishehbor, E. Soheyli, M. Sabaeian, "Impact of red emissive ZnCdTeS quantum dots on the electro-optic switching, dielectric and electrochemical features of nematic liquid crystal: Towards tunable optoelectronic systems," *Optical Materials*, 140, 113868, 2023.
- [12] Z. Seidalilir, E. Soheyli, R. Sahraei, M. Sabaeian, "Enhanced dielectric properties and electro-optic switching responses of Ag-In-S quantum dots-doped nematic liquid crystal," *Applied Physics A*, 130, 363, 2024.

liquid crystal,” AIP Conference Proceeding, 1675, 030065, 2015.

[24] H.M. Lee, H.-K. Chung, H.-G. Park, H.-C. Jeong, J.-H. Kim, T.-K. Park, D.-S. Seo, “Nickel Oxide Nanoparticles Doped Liquid Crystal System for Superior Electro-Optical Properties,” Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 15, 8139–8143, 2015.

[25] A. Selevou, G. Papamokos, T. Yildirim, H. Duran, M. Steinhart, G. Floudas, “Eutectic liquid crystal mixture E7 in nanoporous alumina. Effects of confinement on the thermal and concentration fluctuations,” RSC Advances, 9, 37846–37857, 2019.

[26] <https://www.us-nano.com/inc/sdetail/497>.

[27] G. Kaur, Khushboo, P. Malik, “Mesomorphic, electro-optic and dielectric behavior of self-assembled nanocomposite materials: Nematic mixture doped with carbon coated cobalt nanoparticles,” Journal of Molecular Liquids, 351, 118639, 2022.

[28] C.-Y. Huang, Y.-L. Zhang, S.-Y. Liao, W.-C. Huang, J.-H. Chen, B.-C. Dong, C.-J. Hsu, C.-Y. Huang, “Real-Time Cell Gap Estimation in LC-Filled Devices Using Lightweight Neural Networks for Edge Deployment,” Nanomaterials, 15, 1289, 2025.

[29] A. Rastogi, F. Pandey, R. Manohar, S. Singh, “Effect of Doping of Cd_{1-x}Zn_xS/ZnS Core/Shell Quantum Dots in Negative Dielectric Anisotropy Nematic Liquid Crystal p-Methoxybenzylidene p-Decylaniline,” Crystals. 11, 605, 2021.

[30] B.P. Singh, P. Mishra, M.R. Hatshan, D.P. Singh, S.-J. Hwang, “Unveiling the role of electrode polarization in modulating dielectric and electro-optical properties of SnSe dispersed nematic liquid crystal,” Materials Advances, 5, 349–360, 2024.

[31] A.Ch. Lazanas, M.I. “Prodromidis, Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial,” ACS Measurement Science Au, 3, 162–193, 2023.

[32] J.-H. Seo, J.-W. Huh, H.-J. Sohn, E. Lim, T.-H. Yoon, “Analysis of Optical Performance Degradation in an Ion-Doped Liquid-Crystal Cell with Electrical Circuit Modeling,” Crystals, 10, 55, 2020.

[33] B.A. Belyaev, N.A. Drokin, “Impedance spectroscopy investigation of electrophysical characteristics of the electrode-liquid crystal interface,” Physics of the Solid State, 57, 181–187, 2015.

[34] M. Urbanski, J.P.F. Lagerwall, “Nanoparticles dispersed in liquid crystals: impact on conductivity, low-frequency relaxation and electro-optical performance,” Journal of Materials Chemistry C, 4, 3485–3491, 2016.



Effect of NiO nanoparticles on the temperature dependence of birefringence and threshold voltage, and on ionic transport properties of E7 nematic liquid crystal

Zahra Seidalilir^{a, b}, Fatemeh Hamid^a, Mohammad Sabaeian^{a, b}

^aDepartment of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

^bCenter for Research on Laser and Plasma, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ah

Received: 2026-05-01

Revised: 2026-06-06

Accepted: 2026-06-18

Abstract: In this study, the temperature-dependent electro-optical properties of the nematic liquid crystal E7 in the presence of nickel oxide (NiO) nanoparticles were investigated. Birefringence variations of liquid crystal samples containing different weight percentages of NiO nanoparticles (0.01, 0.03, 0.06, 0.09, and 0.12 wt%) were measured at various temperatures. The presence of nanoparticles resulted in an increase in birefringence and an improvement in molecular ordering of the liquid crystal. The results showed that adding nanoparticles reduced the threshold voltage of the nematic liquid crystal cell. At 0.09 wt% concentration, the threshold voltage decreased by approximately 31% in the nematic phase. With increasing temperature, the threshold voltage decreased in all samples; however, this reduction was more pronounced in nanoparticle-doped samples compared to the pure one. In addition, impedance spectroscopy of the devices in the isotropic phase was performed over the frequency range of 0.1 Hz to 100 kHz to evaluate the effect of nanoparticles independent of molecular orientational order. The presence of NiO nanoparticles increased electrical conductivity and significantly affected ion transport dynamics, including ion mobility and diffusion coefficient. The simultaneous improvement in electrical and electro-optical properties demonstrates the strong potential of NiO-doped liquid crystal systems for advanced optoelectronic applications.

Keywords: Nematic liquid crystal, electro-optical properties, electrical properties, threshold voltage, and nanoparticle.

Corresponding Author. Email: z.seidalilir@scu.ac.ir

How to Cite This Article:

seidalilir Z, Hamid F, Sabaeian M. Effect of NiO nanoparticles on the temperature dependence of birefringence and threshold voltage, and on ionic transport properties of E7 nematic liquid crystal. Nanomeghyas. 2026;():e737801 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2092047.1434



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).