اندازه‌گیری غلظت اسید لاکتیک در محلول‌های آبی مبتنی بر بلور مایع با بهره‌گیری از قطبشگرهای متقاطع

میلاد اسفندیار*[۱]، رضا نباتی گوگرچین[۲]، امیرمحمد تقی خانی[۳]، محمدحسن نوری پور[۴]

۱- عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه ملی مهارت تهران، m-esfandiar@tvu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه ملی مهارت تهران، rezanabatigogarchin@gmail.com

۳- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه ملی مهارت تهران، taghikhani.amirmohammad@gmail.com

۴- دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه ملی مهارت تهران، m.mohammad.h.noori82@gmail.com

خلاصه

در این پژوهش، یک سامانه حسگری نوری بدون برچسب مبتنی بر بلور مایع نماتیک 5CB برای آشکارسازی و اندازه‌گیری غلظت اسید لاکتیک در محلول‌های آبی ارائه شده است. سامانه پیشنهادی بر پایه محصور سازی بلور مایع در شبکه پلی‌استری و ایجاد فصل مشترک‌های دوطرفه هوا - بلور مایع طراحی شده و پاسخ نوری آن تحت قطبشگرهای متقاطع مورد بررسی قرار گرفته است. با اعمال محلول‌های اسید لاکتیک در بازه غلظتی ۰ تا ۲۰۰ میلی‌مولار، تغییرات وابسته به غلظت و زمان در الگوهای نوری، شدت کانال‌های رنگی RGB و مقیاس خاکستری مشاهده و به‌صورت کمّی تحلیل شد. نتایج نشان داد که اسید لاکتیک با ایجاد بازآرایی در میدان دایرکتور بلور مایع و تغییر شرایط لنگرگیری بین‌سطحی، پاسخ نوری معناداری ایجاد می‌کند که به‌ویژه در کانال‌های سبز و آبی از حساسیت بالاتری برخوردار است. همچنین، رفتار وابسته به زمان سامانه منجر به وارونگی شیب پاسخ نوری در بازه‌های زمانی طولانی‌تر شد که بیانگر پویایی فرآیندهای بین‌سطحی و رسیدن سامانه به تعادل جدید است. تحلیل‌های آماری و بررسی تکرار پذیری، پایداری و قابلیت اعتماد پاسخ نوری سامانه را تأیید می‌کنند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که سامانه مبتنی بر بلور مایع ارائه شده، پتانسیل بالایی برای توسعه حسگرهای نوری ساده، کم‌هزینه و غیرتهاجمی جهت پایش اسید لاکتیک در کاربردهای زیست‌پزشکی، فیزیولوژیکی و شیمی تجزیه دارد.

کلمات کلیدی: بلورهای مایع، آشکار سازی نوری، اسید لاکتیک، تشخیص‌های زیست پزشکی.

۱. مقدمه

اسید لاکتیک[۱]، به دلیل کاربردهای گسترده‌ای که در صنایع غذایی، آرایشی- بهداشتی، داروسازی، پزشکی و صنایع شیمیایی دارد از اهمیت علمی و صنعتی بالایی برخوردار است و اندازه‌گیری دقیق غلظت آن در محیط‌های آبی امری ضروری محسوب می‌شود [۱-۵]. اسید لاکتیک نقش مهمی در تنظیم فرآیندهای متابولیکی به ویژه در شرایط تنفس بی‌هوازی[۲] که تجمع اسید لاکتیک در سلول‌های عضلانی به عنوان شاخصی از کمبود اکسیژن تلقی می‌شود. از این رو، تعیین غلظت اسید لاکتیک

[1] Lactic Acid
[2] Anaerobic Respiration

در خون و سایر مایعات زیستی برای تشخیص بالینی شرایطی نظیر سپسیس[1]، اسیدوز متابولیک[2] و هیپوکسی بافتی[3] دارای اهمیت حیاتی است [۶].

علاوه بر ارزیابی‌های سیستمیک، از آنجا که نمونه‌گیری از عرق ساده و غیرتهاجمی است، غلظت اسید لاکتیک در عرق به‌عنوان یک نشانگر زیستی برای پایش میزان فعالیت عضلانی و تنش متابولیکی، به ویژه در میان ورزشکاران، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. این پارامتر تغییرات پویای فیزیولوژیکی بدن را در طول فعالیت بدنی منعکس می‌کند. به همین علت بدون نیاز به نمونه برداری تهاجمی می‌توان وضعیت فیزیولوژیکی بدن را مورد تحلیل قرار داد.

روش های آشکار سازی اسید لاکتیک به دو دسته روش‌های تحلیلی کلاسیک آزمایشگاهی و زیست حسگرهای نوظهور تقسیم بندی میشوند [۴, ۵, ۷]. در دسته نخست، روش‌هایی نظیر آزمون‌های شیمیایی رنگ‌سنجی، فلورومتری و نیز روش‌های اسپکتروفتومتری آنزیمی استفاده می شوند و معمولا آزمون‌های رنگ سنجی ساده و کم هزینه هستند، در حالی که روش‌های آنزیمی دقت، گزینش پذیری و حساسیت بالاتری را فراهم می‌کنند [۴, ۵, ۷-۱۱]. با این حال بسیاری از این روش‌ها نسبت به آلودگی های موجود در نمونه حساس هستند و با افت دقت در حضور ماتریس‌های پیچیده زیستی مواجه می‌شوند [۱۲].

در میان آنها، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا[4] به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیلی دقیق برای اندازه‌گیری اسید لاکتیک شناخته می‌شود. در این روش با استفاده از ستون تبادل کاتیونی، اسید لاکتیک از سایر ترکیبات جدا شده و آشکارسازی آن بر اساس جذب مشخص در ناحیه فرابنفش انجام می‌گیرد. با تنظیم مناسب pH فاز متحرک، تفکیک اسید لاکتیک از سایر اسیدهای آلی امکان پذیر می‌شود. با وجود دقت و گزینش پذیری بالا، این روش مستلزم تجهیزات آزمایشگاهی گران قیمت، آماده‌سازی پیچیده نمونه و اپراتورهای آموزش‌دیده بوده و برای کاربردهای سریع و در محل محدودیت‌هایی دارد [۱۳-۱۵].

استفاده از بلورهای مایع[5] در سال‌های اخیر در سامانه‌های حسگری به عنوان یک رویکرد نوظهور و دقیق در حوزه زیست فناوری و حسگری نوری بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بلورهای مایع به‌دلیل هزینه پایین، حساسیت بالا و پاسخ دهی سریع، و همچنین به واسطه خواص نوری منحصر به فرد و حساسیت شدید آرایش مولکولی آن‌ها در ناحیه تماس با محیط‌های اطراف، به‌طور گسترده برای آشکارسازی برهم کنش‌های بسیار ضعیف رخ داده در مرز بین دو فاز از طریق تغییرات نوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶-۲۰].

برای مثال، هارتونو و همکاران[6] [۲۱] درباره یک سامانه مشخصه یابی مبتنی بر بلور مایع برای بررسی هیدرولیز آنزیمی فسفولیپازها ارائه کردند. در این سامانه، بلور مایع 5CB[7] درون شبکه‌های طلایی با ابعاد میکرومتری محصور شده بود. در این ساختار، لنگرگیری مولکول‌های بلور مایع از حالت صفحه‌ای به حالت هوموتروپیک[8] تغییر می‌کرد؛ به‌طوری‌که دم‌های غیرقطبی مولکول‌های 5CB عمود بر فصل‌مشترک هوا-بلور مایع قرار می‌گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که سکوی بلور مایع پشتیبانی‌شده با هوا می‌تواند به‌عنوان روشی ساده و بدون برچسب برای ارزیابی فعالیت آنزیمی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، تحلیل انجام‌شده عمدتاً مبتنی بر مشاهده کیفی تصاویر نوری بوده و بررسی کمّی یا تحلیل وابسته به زمان در آن ارائه نشده است.

[1] Sepsis
[2] Metabolic Acidosis
[3] Tissue Hypoxia
[4] High-Performance Liquid Chromatography
[5] Liquid Crystals
[6] Hartono, D., et al.
[7] 4-Cyano-4′-pentylbiphenyl
[8] Homeotropic

در پژوهشی دیگر، هی و همکاران[1] [۲۲] به بررسی عملکرد یک حسگر مبتنی بر بلور مایع 5CB را برای آشکارسازی اسید کولیک پرداختند. سامانه مورد استفاده شامل لایه‌هایی از بلور مایع بود که روی شبکه‌های قرارگرفته بر زیرلایه پلی‌ایمید نصب شده بودند، این لایه‌ها سپس با فاز آبی دارای سورفکتانت در تماس قرار گرفتند. در مرز مشترک، رقابت در جذب مولکول‌ها منجر به تغییر جهت‌گیری بلور مایع شد؛ این تحولات در قالب الگوهای نوری قابل‌مشاهده تحت میکروسکوپ قطبشی ظاهر گشتند. داده‌های به‌دست‌آمده اشاره داشت که تنظیم دقیق زیرلایه و همچنین همترازی حساس مؤلفه‌های نوری، از موانع مهم توسعه صنعتی و کاربرد گسترده این نوع حسگرها محسوب می‌شوند.

همچنین، حسگرهای مبتنی بر بلور مایع در آشکارسازی ترکیبات شیمیایی مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای مثال، کیم هونگ و جانگ[2] [۲۳] یک سامانه حسگری مبتنی بر 5CB ارائه کردند که در آن، برهم‌کنش شیمیایی با آنالیت هدف موجب برهم‌زدن آرایش هوموتروپیک بلور مایع و ایجاد گذار نوری از حالت تیره به روشن تحت قطبشگرهای متقاطع[3] شد. با وجود قابلیت آشکارسازی مناسب، تحلیل‌های ارائه‌شده در این مطالعات عمدتاً به استخراج ساده شدت نوری محدود بوده و بررسی‌های آماری جامع بر روی داده‌های تصویری گزارش نشده است.

در ادامه این مسیر پژوهشی، مطالعات متعددی با تمرکز بر توسعه سامانه‌های حسگری نوری مبتنی بر بلور مایع، به بررسی نقش ساختارهای پشتیبان، شرایط فصل مشترکی و آرایش مولکولی بلور مایع در بهبود حساسیت و پایداری پاسخ نوری پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که محصورسازی بلور مایع در بسترهای شبکه‌ای و ایجاد فصل مشترک‌های کنترل‌شده می‌تواند به بازآرایی‌های قابل توجه در بافت نوری منجر شود و بستر مناسبی برای آشکارسازی برهم‌کنش‌های شیمیایی ضعیف فراهم آورد. با این حال، همچنان نیاز به بررسی نظام‌مند پاسخ نوری بلورهای مایع نماتیک در مواجه با مولکول‌های زیست فعال، از منظر تغییرات وابسته به زمان، شدت و پایداری پاسخ نوری احساس می‌شود؛ به‌ویژه در سامانه‌هایی که بر پایه فصل‌مشترک‌های دوطرفه و بدون لایه‌های واسط جامد طراحی شده‌اند [۲۴-۲۷].

با توجه به حساسیت بالای فصل مشترکی[4] بلورهای مایع نسبت به برهم‌کنش با مولکول‌های فعال، مطالعه تغییرات نوری و فیزیکی بلور مایع در حضور اسید لاکتیک می‌تواند بستری مناسب برای توسعه حسگرهای نوری ساده، کم هزینه و بدون برچسب فراهم سازد. در این پژوهش، یک سامانه بلور مایع دو طرفه پشتیبانی شده با هوا معرفی شده است که رفتار نوری بلور مایع 5CB محصورشده در شبکه پلی‌استری[5] را در حضور اسید لاکتیک در محیط آبی مورد بررسی قرار می‌دهد. تمرکز اصلی این مطالعه بر تحلیل تغییرات رنگ، شدت نور و الگوهای نوری ناشی از برهم‌کنش اسید لاکتیک با بلور مایع و بازآرایی فیزیکی آن در فصل‌مشترک‌ها است.

نتایج این بررسی می‌تواند درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های لنگرگیری و پاسخ نوری بلورهای مایع در برابر مولکول‌های زیست‌فعال فراهم آورد و زمینه‌ساز توسعه حسگرهای نوری مبتنی بر بلور مایع برای کاربردهای زیست‌پزشکی، پایش فیزیولوژیکی و شیمی تجزیه شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد

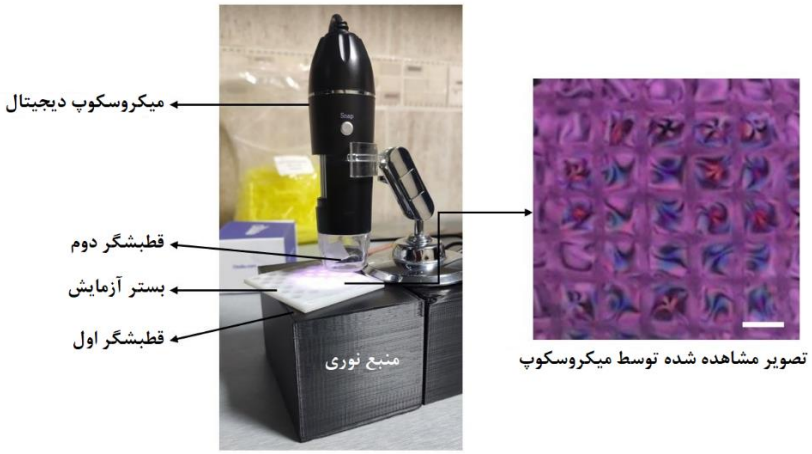
بلور مایع 5CB از شرکت Merck (دارمشتات، آلمان) تهیه شد. لایه نشانی بلور مایع بر روی یک زیرلایه شبکه‌ای پلی‌استری

[1] He, X., et al.
[2] Kim, H., Hong, J., and Jang, J.
[3] Crossed polarizers
[4] Interface
[5] Polyester mesh

به تعداد ۲۲۵ مش، ابعاد ($۳۰۰\ \mu m \times ۳۰۰\ \mu m$) و ضخامت ($۳۰\ \mu m$) انجام گرفت. زیرلایه‌های شبکه‌ای پلی‌استری از یک تأمین‌کننده داخلی تهیه شدند. اسید لاکتیک، از شرکت Sigma-Aldrich (سنت لوئیس، ایالات متحده آمریکا) خریداری شد. کلیه محلول‌های آبی مورد استفاده با حل‌کردن اسید لاکتیک در آب دی‌یونیزه و در غلظت‌های مشخص تهیه شدند.

۲-۲. چیدمان آزمایش

چیدمان کلی سامانه آزمایشی در شکل ۱ نمایش داده شده است. ساختار پایه از یک ورق پلکسی‌گلاس شیری رنگ با ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شد. به منظور ایجاد نواحی نمونه‌گذاری یکنواخت، با استفاده از دستگاه برش لیزری، مجموعه‌ای از حفره‌های دایره‌ای با شعاع ۷ میلی‌متر در این ورق ایجاد گردید. اتصال شبکه پلی‌استری به این ورق، نواحی مشخصی را برای لایه نشانی منظم نمونه‌های بلور مایع فراهم ساخت. به‌دلیل وجود فصل‌مشترک هوا در بالا و پایین بلور مایع محصور در شبکه‌ها، فصل‌مشترک هوا-بلور مایع موجب ایجاد آرایش هوموتروپیک مولکول‌های 5CB در ناحیه بین‌سطحی شد.



شکل ۱- چیدمان آزمایشی مورد استفاده برای آشکارسازی نوری قطبیده مبتنی بر بلور مایع. سامانه آزمایش شامل یک منبع نور LED با طراحی اختصاصی، یک جفت قطبشگر [1] خطی (که یکی از آن‌ها دارای قابلیت تنظیم جهت قطبش است)، یک زیرلایه شبکه‌ای پلی‌استری برای لایه‌نشانی بلور مایع بر روی بستر آزمایش، و یک میکروسکوپ دیجیتال برای ثبت تصاویر می‌باشد. تصویر، پاسخ نوری بافت بلور مایع را در مواجهه با اسید لاکتیک، تحت نور قطبیده نشان می‌دهد .مقیاس :۳۰۰ میکرومتر.

سامانه نوری شامل یک دیود ساطع کننده نور (LED) با طراحی اختصاصی (توسعه‌یافته در مرکز پژوهشی انرژی، آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران) بود که امکان تولید و تنظیم مقادیر نور قرمز، سبز و آبی (RGB) را فراهم می‌کرد. آزمایش‌های اولیه به منظور تعیین شرایط بهینه روشنایی انجام شد و تنظیمی انتخاب گردید که منجر به ایجاد نور سفید با ته رنگ بنفش ملایم شد. در طول کلیه آزمایش‌ها، منبع نور RGB در بخش پایینی سامانه قرار داشت و روشن‌سازی در محیط تاریک با تنظیمات (B:15, G:15, R:10) انجام گرفت.

برای یکنواخت سازی شدت نور، یک دیفیوزر پلکسی‌گلاس شیری رنگ با ضخامت ۵ میلی‌متر در بالای منبع نور قرار داده شد. در بالای دیفیوزر، یک قطبشگر خطی با قابلیت چرخش ۳۶۰ درجه درون نگهدارنده حلقه‌ای نصب گردید که امکان تنظیم دستی و دقیق جهت قطبش را فراهم می‌ساخت. این قابلیت، شرایط لازم برای دستیابی به آرایش بهینه قطبشگرهای متقاطع را در کنار قطبشگر دوم مهیا کرد.

[1] Linear polarizer

به‌منظور ثبت پاسخ نوری نمونه‌ها، از یک میکروسکوپ دیجیتال متصل به رایانه استفاده شد. برای این منظور، قطبشگر خطی دوم با زاویه ۹۰ درجه نسبت به قطبشگر اول، در مسیر نوری و در زیر میکروسکوپ قرار داده شد (مطابق شکل ۱). نمونه بلور مایع آماده شده با دقت مستقیماً بر روی قطبشگر اول قرار گرفت و قطبشگر بالایی تضمین می‌کرد که نمونه در مسیر نوری میکروسکوپ قابل مشاهده باقی بماند.

تمامی آزمایش‌ها در دمای ($۲۶ \pm ۱^{\circ}C$) و رطوبت نسبی ۲۳ درصد انجام شدند. از آنجا که آرایش و بافت نوری لایه‌های نازک بلور مایع نماتیک 5CB به دما حساس است، انجام آزمایش‌ها در این بازه (که در محدوده نماتیک گزارش شده برای 5CB قرار دارد) احتمال وقوع گذارهای فازی[1] ناخواسته را به حداقل رساند. گذار فازی 5CB معمولاً به‌صورت گذار بلوری نماتیک در حدود ($۲۱^{\circ}C$) و گذار نماتیک ایزوتروپ در حدود ($۳۵^{\circ}C$) گزارش می‌شود [۲۸]؛ ازاین‌رو، بازه عملی $۲۲^{\circ}C$ تا $۳۵^{\circ}C$ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳. آماده‌سازی محلول‌های آبی

محلول‌های اسید لاکتیک با استفاده از میکروپیپت‌های[2] با دقت بالا و حل‌کردن مقدار مشخصی از اسید لاکتیک در آب دی‌یونیزه تهیه شدند. محلول‌ها در حجم‌های کنترل شده بر روی شبکه‌های پوشش داده شده با بلور مایع اعمال شدند تا برهم‌کنش مستقیم و تکرارپذیر میان مولکول‌های اسید لاکتیک و بلور مایع فراهم شود. غلظت‌های مورد استفاده برای محلول‌های اسید لاکتیک شامل ۰، ۰.۱، ۱، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار بودند. این بازه غلظتی به‌گونه‌ای انتخاب شد که هم شرایط فیزیولوژیکی و هم محیط‌های اسیدی صنعتی را پوشش دهد. به‌منظور جلوگیری از آلودگی و کاهش اثرات تبخیر، تمامی نمونه‌ها در ظروف دربسته نگهداری شدند.

۲-۴. تصویربرداری و تحلیل تصاویر

آزمایش با لایه نشانی دقیق حجم ۲ میکرولیتر از بلور مایع 5CB بر روی شبکه پلی‌استری، به‌وسیله میکروپیپت، آغاز شد. پیکربندی نوری انتخاب‌شده که نور سفید با ته‌رنگ بنفش ملایم تولید می‌کرد در مقایسه با سایر ترکیب‌های نوری آزموده شده، حساسیت بالاتری در آشکارسازی تغییرات رنگی بلور مایع از خود نشان داد. پس از تنظیم شرایط روشنایی، هم‌ترازی دقیق قطبشگرها انجام شد تا آرایش قطبشگرهای متقاطع حاصل شود. در این وضعیت، نور عبوری از نمونه به حداقل مقدار می‌رسید و تصویر بلور مایع در میکروسکوپ دیجیتال به‌صورت کاملاً تیره مشاهده می‌شد. مشاهده این تصویر تیره تأییدکننده هم‌ترازی صحیح سامانه نوری بود؛ بنابراین، هرگونه تغییر نوری پس از آن ناشی از برهم‌کنش میان بلور مایع و محلول اسید لاکتیک تلقی شد.

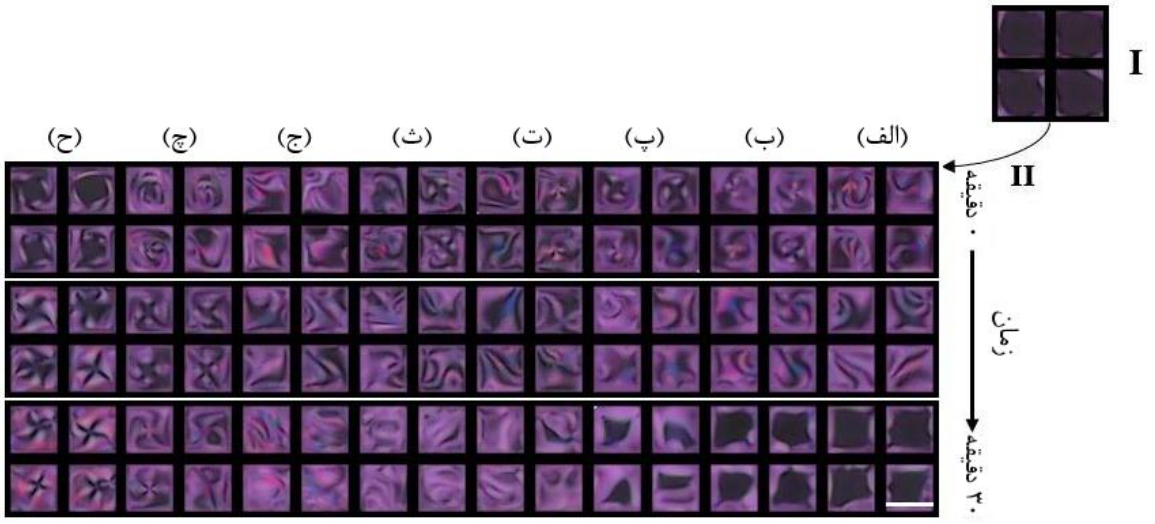
پس از تأیید پیکربندی، حجم دقیقی برابر با ۰.۵ میکرولیتر از محلول اسید لاکتیک به‌آرامی بر سطح نمونه بلور مایع قرار داده شد و تغییرات ایجادشده در سازمان دهی فضایی و آرایش مولکولی آن به صورت بلادرنگ توسط میکروسکوپ مورد مشاهده قرار گرفت. به‌منظور ثبت تغییرات پویای رنگی، فرایند تصویربرداری پیوسته به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. تصاویر استخراج شده با استفاده از نرم‌افزار ImageJ [۲۹] پردازش شدند. در این فرایند، مقادیر عددی مؤلفه‌های رنگی قرمز، سبز و آبی هر تصویر استخراج گردید. همچنین شدت مقیاس خاکستری هر تصویر محاسبه شد تا امکان تحلیل کمّی تغییرات نوری فراهم شود. تبدیل داده‌های تصویری کیفی به مقادیر عددی، امکان بررسی دقیق‌تر اثر غلظت اسید لاکتیک بر رفتار نوری و آرایش بلور مایع را فراهم ساخت.

[1] Phase transition
[2] Micropipette

۳. نتایج و بحث

۳-۱. تحلیل کیفی تصاویر

آزمایش‌ها با موفقیت الگوهای نوری متمایزی را که توسط سامانه آشکارسازی مبتنی بر بلور مایع ایجاد شده بودند ثبت و نمایش دادند؛ الگوهایی که به‌طور مستقیم با غلظت‌های مختلف اسید لاکتیک متناظر بودند. با افزودن محلول‌های اسید لاکتیک، رنگ و شدت پاسخ نوری سامانه به‌صورت وابسته به غلظت تغییر کرد که این تغییرات در شکل ۲ ارائه شده‌اند. در شکل ۲(I)، بلور مایع در حالت اولیه و در غیاب هرگونه آنالیت به‌صورت بصری نمایش داده شده است. آرایش هوموتروپیک بلور مایع 5CB از طریق مشاهده رنگ تیره نمونه در حالتی که میان قطبشگرهای متقاطع قرار گرفته است تأیید می‌شود. همچنین، در فصل‌مشترک پلی‌استر-5CB (به نواحی پیرامونی شبکه‌ها در شکل‌های ۲(I) توجه شود)، به‌دلیل جذب فیزیکی مولکول‌های 5CB بر سطح پلیمر، نیروهای واندروالس[1] و برهم‌کنش‌های دوقطبی-دوقطبی[2] میان گروه‌های سیانو[3] در 5CB و گروه‌های کربونیل پلی‌استر، شرایط لنگرگیری مایل[4] را در این نواحی القا می‌کنند؛ در حالی‌که در نواحی دورتر از لبه‌ها، آرایش هوموتروپیک غالب باقی می‌ماند. شکل ۲(II) توالی تغییرات رنگی بلور مایع را در پاسخ به افزایش غلظت اسید لاکتیک، در بازه ۰ تا ۲۰۰ میلی‌مولار، از تصویر سمت راست به سمت چپ نشان می‌دهد. با افزایش غلظت، بازآرایی‌های قابل توجهی در بافت بلور مایع مشاهده می‌شود که بیانگر حساسیت بالای سامانه نسبت به ویژگی‌های شیمیایی و بین‌سطحی اسید لاکتیک است.



شکل۲. (I)حالت همسانگرد نوری نمونه بلور مایع تحت قطبشگرهای متقاطع پیش از آغاز آزمایش‌ها. (II) تغییرات رنگی بلور مایع در پاسخ به غلظت‌های مختلف اسید لاکتیک (الف) ۰ ، (ب) ۰.۱ ، (پ) ۱ ، (ت) ۵ ، (ث) ۱۰ ، (ج) ۵۰ ، (چ) ۱۰۰ ، (ح) ۲۰۰ افزایش غلظت از راست به چپ و پیشرفت زمانی از بالا به پایین (از ۰ تا ۳۰ دقیقه) نمایش داده شده است. هر مجموعه متوالی شامل چهار شبکه، متناظر با یک آزمون مستقل می‌باشد. مقیاس :۳۰۰ میکرومتر.

[1] van der Waals forces
[2] dipole–dipole interactions
[3] Cyano group
[4] Tilted anchoring

در غلظت‌های پایین، بلور مایع تغییرات محدودی را نشان می‌دهد و بافت کلی نسبتاً یکنواخت باقی می‌ماند. با افزایش غلظت، نقص‌های توپولوژیکی به‌تدریج پدیدار شده و در غلظت‌های بالاتر ۱۰۰ میلی مولار، ظهور الگوهای شلیرن چهارقلمی[۱] به‌وضوح مشاهده می‌شود که با تشکیل دیسکلیناسیون‌های[۲] ±۱ و بازآرایی گسترده میدان دایرکتور[۳] سازگار است.

این مشاهدات نشان می‌دهند که اسید لاکتیک، تحت شرایط بررسی‌شده، تغییرات بزرگ‌تر، منظم‌تر و وابسته به غلظت‌تری را در لنگرگیری بین‌سطحی بلور مایع القا می‌کند. همچنین مشاهده شد که سینتیک[۴] تکامل بافت‌ها عمدتاً در چند دقیقه ابتدایی پس از اعمال محلول رخ داده و سپس سامانه طی بازه زمانی طولانی‌تر به سمت درشت سازی یا پایدارسازی الگوهای نوری میل می‌کند. از دیدگاه شیمی فیزیک بین سطحی، این رفتار را می‌توان به ساختار مولکولی اسید لاکتیک نسبت داد. اسید لاکتیک به‌عنوان یک اسید آلی کوچک، شامل یک سر آب دوست[۵] و یک بخش آب گریز[۶] کوتاه است؛ از این رو، در غلظت‌های کافی، مولکول‌های آن (یا گونه لاکتات دپروتونه شده[۷]) می‌توانند به فصل‌مشترک بلور مایع-محلول آبی مهاجرت کرده و در آن جذب شوند. این جذب، با ایجاد پیوندهای هیدروژنی[۸] و برهم کنش‌های دوقطبی جدید با گروه‌های قطبی انتهایی 5CB ، انرژی بین‌سطحی و جهت‌گیری ترجیحی مولکول‌ها را تغییر داده و به بازآرایی منسجم و وابسته به غلظت میدان دایرکتور منجر می‌شود [۲۸-۳۲].

از منظر مکانیک سیالات بین سطحی، الگوهای مشاهده شده بازتاب رقابت میان نیروهای بین‌سطحی (کشش سطحی و اثرات شبه سورفکتانتی) و جریان‌های لزج هستند. هنگام قرارگیری قطره محلول آبی اسید لاکتیک بر روی فصل‌مشترک بلور مایع، گرادیان‌های کشش سطحی (که می‌توانند در اثر جذب غیریکنواخت اسید لاکتیک ایجاد شوند) جریان‌های مارانگونی[۹] را در امتداد فصل‌مشترک القا می‌کنند [۳۳]. این تنش‌های مماسی باعث برش لایه‌های نزدیک به سطح بلور مایع، جابه‌جایی نقص‌ها و اعوجاج بافت‌ها شده و در نهایت به ظهور الگوهای شلیرن متقارن در غلظت‌های بالاتر منجر می‌شوند [۳۴-۳۶].

۳-۲. تحلیل RGB و مقیاس خاکستری

۳-۲-۱. تحلیل مقدار p

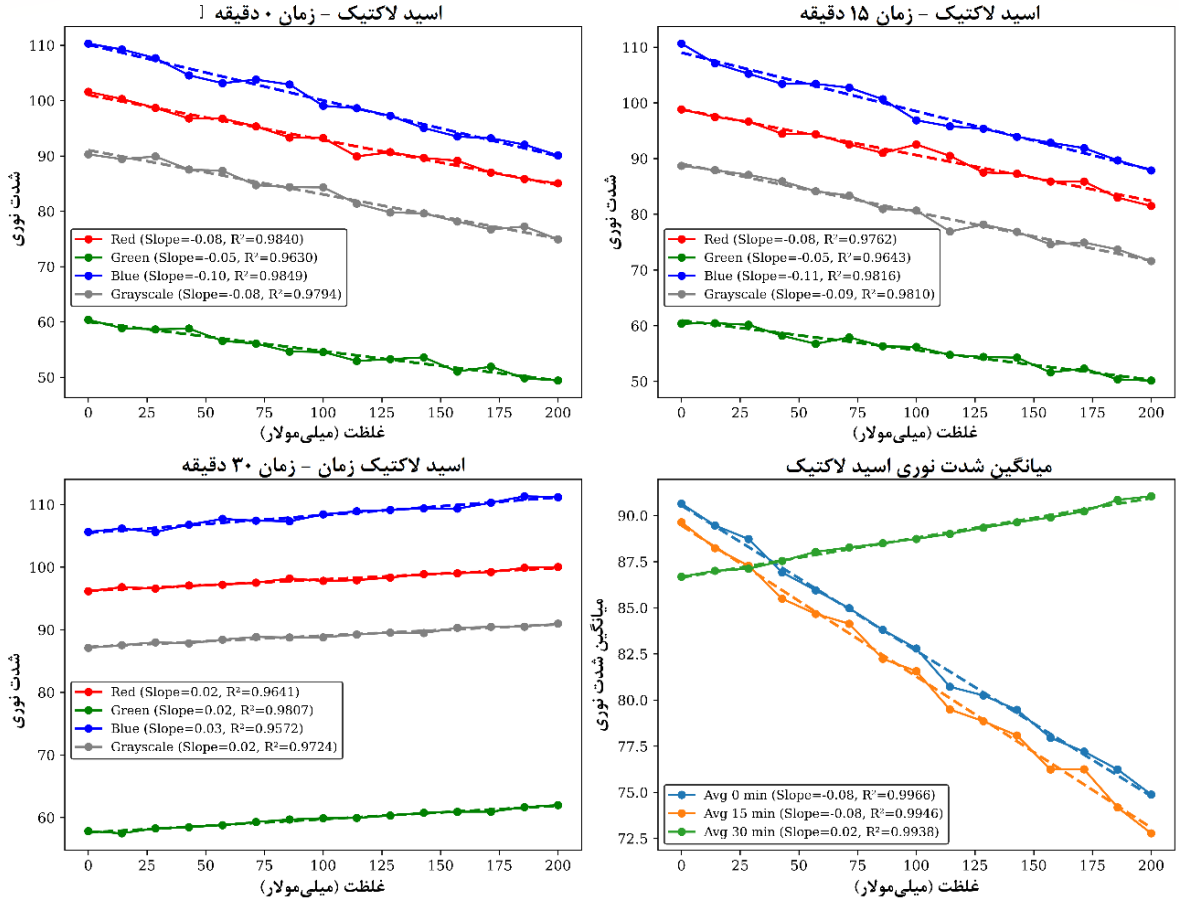
به‌عنوان گام مقدماتی برای تحلیل کمّی پاسخ نوری، شدت کانال‌های قرمز، سبز و آبی، به‌همراه شدت مقیاس خاکستری، از تصاویر ثبت‌شده استخراج شد. سپس، تحلیل مقدار p[۱۰] به‌منظور بررسی معنی‌داری آماری تغییرات پاسخ نوری در غلظت‌های مختلف اسید لاکتیک انجام گرفت. نتایج نشان داد که کانال سبز بیشترین اختلاف آماری معنی دار را میان سطوح مختلف غلظت اسید لاکتیک بروز می‌دهد. همچنین، کانال آبی و مقیاس خاکستری نیز تغییرات آماری معنی‌داری را نشان دادند، در حالی‌که کانال قرمز (به‌دلیل ته‌رنگ بنفش ملایم نوردهی) کمترین کنتراست را داشته و حساسیت کمتری از خود نشان داد. این یافته‌ها بیانگر آن است که کانال‌های سبز و آبی، به‌ویژه در مراحل اولیه اندازه‌گیری، ابزار مناسب‌تری برای پایش تغییرات نوری ناشی از اسید لاکتیک هستند. در بازه‌های زمانی طولانی‌تر (۱۵ و ۳۰ دقیقه)، اختلاف‌های آماری معنی‌دار همچنان حفظ شدند که نشان‌دهنده پایداری پاسخ نوری سامانه و تداوم اثر اسید لاکتیک بر آرایش بلور مایع است. از آنجا که شدت

[1] Four-brush Schlieren patterns
[2] Disclinations
[3] Director field
[4] Kinetics
[5] Hydrophilic head
[6] Hydrophobic tail
[7] Deprotonated lactate species (lactate ion)
[8] Hydrogen bonding
[9] Marangoni flows
[10] p-value Analysis

مقیاس خاکستری ترکیبی خطی از کانال‌های RGB است (Grayscale = R 0.299 + G0.587 + B0.114) رفتار آماری آن نیز بازتابی از تغییرات کانال‌های رنگی غالب، به‌ویژه کانال سبز، محسوب می‌شود.

۳-۲-۲. تحلیل رگرسیون خطی

در گام بعد، تحلیل رگرسیون خطی[1] بر روی مقادیر RGB و مقیاس خاکستری به‌منظور بررسی پاسخ کمّی وابسته به غلظت اسید لاکتیک انجام شد. منحنی‌های پاسخ نوری مربوط به بازه‌های زمانی مختلف در شکل ۳ ارائه شده‌اند.



شکل ۳. پاسخ نوری اسید لاکتیک در زمان‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه، به‌همراه مقدار میانگین‌گیری‌شده زمانی، به‌صورت نموداری ارائه شده است. تغییرات شدت نوری با افزایش زمان مواجهه تدریجی و هموار بوده و پس از زمان‌های مواجهه طولانی، وارونگی شیب پاسخ نوری مشاهده می‌شود.

در زمان آغاز اندازه‌گیری (t = ۰)، با افزایش غلظت اسید لاکتیک کاهش ملایم و یکنواختی در شدت کانال‌های RGB و مقیاس خاکستری مشاهده شد. در این مرحله، کانال آبی بیشترین حساسیت را نشان داد و پس از آن کانال‌های سبز و قرمز قرار گرفتند. خطیّت بالای داده‌ها و ضرایب همبستگی قوی بیانگر پاسخ قابل اعتماد سامانه در تشخیص تغییرات نوری ظریف بود.

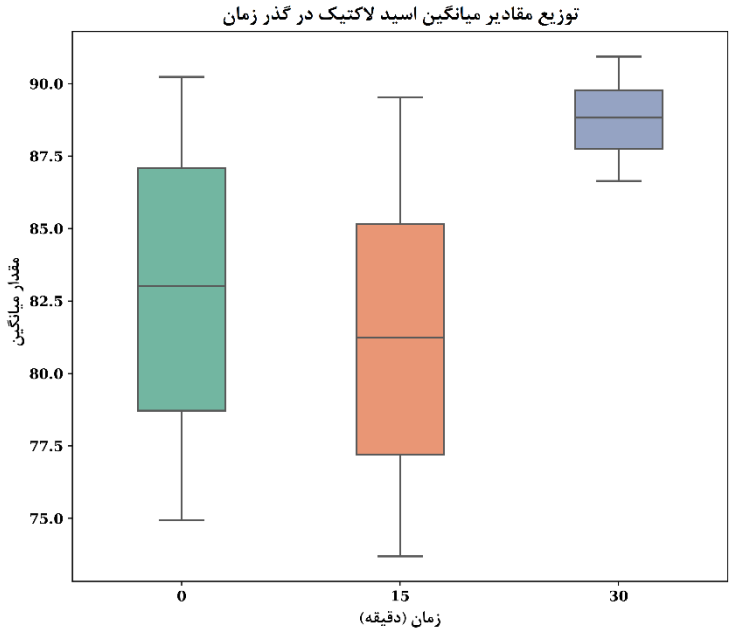
در بازه ۱۵ دقیقه‌ای، اگرچه دامنه تغییرات کاهش یافت، اما روند خطی و یکنواخت پاسخ نوری حفظ شد که نشان‌دهنده

[1] Linear Regression Analysis

تداوم برهم‌کنش اسید لاکتیک با فصل مشترک بلور مایع و پایداری نسبی آرایش مولکولی است. در زمان ۳۰ دقیقه، وارونگی قابل توجهی در شیب منحنی‌ها مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش غلظت اسید لاکتیک، افزایش شدت نوری در تمامی کانال‌ها رخ داد. این رفتار نشان‌دهنده وجود یک فرایند پویا و وابسته به زمان در سامانه است که به احتمال زیاد ناشی از آرام‌گیری تدریجی لنگرگیری بین‌سطحی، باز توزیع مولکول‌های جذب شده و رسیدن میدان دایرکتور به یک تعادل جدید است. مقادیر بالاتر ضرایب تعیین در این بازه زمانی بیانگر پایداری بیشتر پاسخ نوری در حضور اسید لاکتیک و تقویت رابطه خطی میان غلظت و شدت نوری است. به طور کلی، وارونگی شیب مشاهده شده را می‌توان به‌عنوان گذار سینتیکی از یک رژیم گذرا و دور از تعادل در زمان‌های اولیه، به یک رژیم متعادل‌تر و تحت کنترل لنگرگیری در زمان‌های طولانی‌تر تفسیر کرد.

۳-۳. توزیع مقادیر میانگین

برای توصیف تغییرات زمانی پاسخ نوری اسید لاکتیک، از آمار توصیفی در سه بازه زمانی ابتدایی، میانی و نهایی استفاده شد که نتایج آن در شکل ۴ نمایش داده شده‌اند.



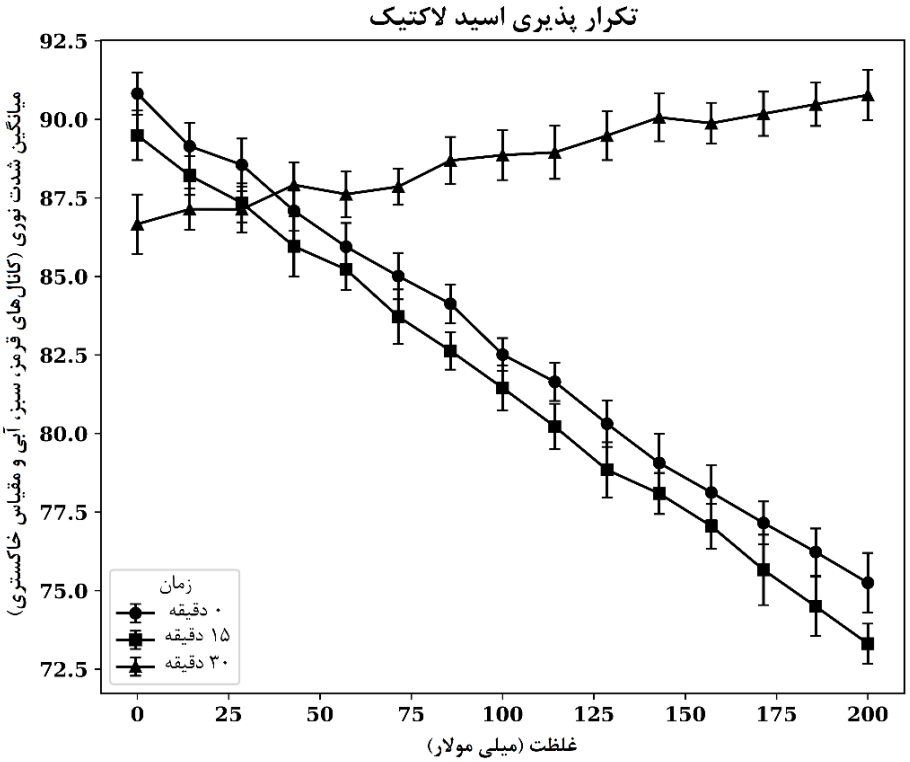
شکل ۴. توزیع مقادیر میانگین شدت نوری برای اسید لاکتیک در زمان‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه نمایش داده شده است.

در ابتدای دوره مشاهده، میانگین شدت پاسخ نوری همراه با پراکندگی نسبتاً بالا مشاهده شد که بیانگر ناهمگنی اولیه و حساسیت سامانه به شرایط بین سطحی آغازین است. این پراکندگی می‌تواند ناشی از توزیع غیریکنواخت اولیه اسید لاکتیک و جریان‌های گذرای بین سطحی باشد. در زمان میانی، کاهش اندکی در مقدار میانگین مشاهده شد، در حالی‌که سطح پراکندگی تقریباً ثابت باقی ماند. این رفتار نشان می‌دهد که سامانه همچنان در مرحله گذار قرار داشته و به تعادل نهایی نرسیده است. در زمان نهایی، افزایش قابل توجهی در مقدار میانگین شدت همراه با کاهش چشمگیر پراکندگی داده‌ها مشاهده شد. این همگرایی نشان‌دهنده بهبود پایداری سامانه و تثبیت آرایش بلور مایع در حضور اسید لاکتیک است. چنین رفتاری بیانگر آن است که اثر تجمعی زمان نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد پاسخ نوری پایدار و تکرارپذیر دارد. در مجموع،

نتایج این بخش نشان می‌دهند که سامانه مبتنی بر بلور مایع نسبت به تغییرات غلظت اسید لاکتیک حساس بوده و رفتار نوری آن به‌شدت وابسته به زمان و فرایندهای بین‌سطحی است. این ویژگی، پتانسیل بالای این سامانه را برای کاربردهای آشکارسازی نوری مبتنی بر تغییرات فیزیکی بلور مایع برجسته می‌سازد.

۳-۴. تحلیل تکرار پذیری

به‌منظور ارزیابی قابلیت اعتماد و استحکام سامانه نوری مبتنی بر بلور مایع 5CB در آشکارسازی اسید لاکتیک، تکرارپذیری پاسخ‌های نوری سامانه تحت شرایط یکسان آزمایشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل در شکل ۵ ارائه شده‌اند. در این راستا، پاسخ نوری سامانه برای هر غلظت اسید لاکتیک در پانزده تکرار مستقل آزمایشی اندازه‌گیری شد تا میزان پایداری و سازگاری پاسخ‌ها در کانال‌های رنگی قرمز، سبز و آبی، به‌همراه مقیاس خاکستری، ارزیابی شود. تمرکز اصلی این تحلیل بر بررسی تغییرات بالقوه پاسخ نوری از طریق مقایسه مقادیر میانگین شدت و میزان پراکندگی داده‌ها در تکرارهای متوالی قرار داشت. داده‌ها به‌صورت نمودارهای خطی نمایش داده شدند تا نوسانات میانگین شدت نوری در غلظت‌ها و بازه‌های زمانی مختلف به‌وضوح مشخص شود.



شکل ۵. نمودار خطی، تکرار پذیری پاسخ‌های نوری برای اسید لاکتیک را در زمان‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه نشان می‌دهد. غلظت آنالیت بر روی محور افقی و میانگین شدت نوری بر روی محور عمودی نمایش داده شده است. میله‌های خطا دامنه تغییرات شدت نوری را در طول ۱۵ تکرار آزمایشی نشان می‌دهند.

در نمودار ارائه شده در شکل ۵، میانگین شدت نوری کانال‌های RGB و مقیاس خاکستری برای زمان‌های ۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه نمایش داده شده است. هر منحنی متناظر با یک بازه زمانی مشخص بوده و دامنه تغییرات در هر نقطه (که به وسیله میله‌های خطا نشان داده شده است) پراکندگی داده‌ها در میان پانزده تکرار آزمایشی را بازتاب می‌دهد. میله‌های خطا حداقل

و حداکثر شدت‌های نوری ثبت‌شده را نشان داده و امکان کمّی‌سازی میزان تغییرپذیری پاسخ نوری سامانه را فراهم می‌کنند. نتایج نشان داد که پاسخ نوری سامانه در حضور اسید لاکتیک از تکرارپذیری مطلوبی برخوردار است. در بازه زمانی اولیه (t = ۰)، اگرچه پراکندگی داده‌ها نسبتاً محسوس بود، اما مقادیر میانگین شدت نوری در تمامی کانال‌ها روندی سازگار را نشان دادند. این رفتار می‌تواند ناشی از شرایط گذرای اولیه، از جمله توزیع اولیه اسید لاکتیک در فصل‌مشترک بلور مایع-محلول آبی و جریان‌های بین‌سطحی کوتاه‌مدت باشد.

در بازه زمانی میانی (t = ۱۵ دقیقه)، دامنه پراکندگی داده‌ها کاهش نسبی نشان داد و میانگین شدت‌ها در کانال‌های سبز و آبی (که پیش‌تر حساسیت نوری بالاتری از خود نشان داده بودند) پایداری بیشتری یافتند. این امر بیانگر آن است که با گذشت زمان، سامانه به‌تدریج به یک وضعیت پایدارتر نزدیک می‌شود و اثر نوسانات محیطی کاهش می‌یابد. در بازه زمانی نهایی (t = ۳۰ دقیقه)، کمترین میزان پراکندگی در داده‌ها مشاهده شد. فشرده‌تر شدن میله‌های خطا و همگرایی مقادیر میانگین شدت نوری نشان می‌دهد که آرایش بلور مایع در حضور اسید لاکتیک به یک تعادل پایدار رسیده است. این پایداری به ویژه در کانال‌های سبز و آبی مشهود بود که نقش کلیدی در ارزیابی پاسخ نوری سامانه ایفا می‌کنند.

پایداری بالای پاسخ نوری در تکرارهای آزمایشی را می‌توان به برهم کنش‌های مولکولی نسبتاً یکنواخت و پایدار اسید لاکتیک با مولکول‌های 5CB نسبت داد. این برهم کنش‌ها، که شامل پیوندهای هیدروژنی و تغییرات کنترل شده در لنگرگیری بین‌سطحی هستند، حساسیت کمتری به نوسانات محیطی نظیر تغییرات جزئی دما و رطوبت از خود نشان می‌دهند و در نتیجه پاسخ نوری تکرارپذیرتری ایجاد می‌کنند. در مجموع، تحلیل تکرارپذیری نشان می‌دهد که سامانه نوری مبتنی بر بلور مایع ارائه شده قادر است پاسخ‌های نوری پایدار، سازگار و قابل اعتماد در آشکارسازی اسید لاکتیک فراهم کند. این ویژگی، اهمیت سامانه را برای کاربردهایی که نیازمند نتایج یکنواخت در بازه‌های زمانی مختلف هستند (از جمله پایش زیستی و کاربردهای صنعتی) برجسته می‌سازد و نقش اساسی کنترل رفتار بین‌سطحی بلور مایع را در دستیابی به تکرارپذیری بالا تأیید می‌کند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، یک حسگر نوری مبتنی بر بلور مایع 5CB توسعه داده شد که توانایی آشکارسازی و کمّی‌سازی اسید لاکتیک در محلول‌های آبی را داراست. نتایج حاصل از بررسی الگوهای نوری کیفی و تحلیل‌های کمّی مبتنی بر شدت کانال‌های رنگی قرمز، سبز و آبی و همچنین مقیاس خاکستری نشان داد که پاسخ نوری سامانه به‌طور معناداری به غلظت اسید لاکتیک وابسته است. در این میان، کانال‌های سبز و آبی (به ویژه در بازه‌های زمانی ابتدایی اندازه‌گیری) بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات غلظت از خود نشان دادند. علاوه بر این، تغییرات وابسته به زمان در پاسخ نوری سامانه تا بازه ۳۰ دقیقه به‌طور مشخص مشاهده شد که بیانگر پویایی آرایش و لنگرگیری بلور مایع در فصل مشترک بلور مایع-محلول آبی است. این رفتار زمانی نشان می‌دهد که در کاربردهای عملی، عامل زمان نقش تعیین کننده‌ای در تفسیر صحیح سیگنال‌های نوری داشته و باید به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در طراحی و بهره برداری از حسگرهای مبتنی بر بلور مایع مورد توجه قرار گیرد.

تحلیل‌های انجام شده نشان داد که برهم کنش‌های مولکولی اسید لاکتیک با بلور مایع 5CB موجب بازآرایی منظم میدان دایرکتور و ایجاد تغییرات قابل تشخیص در الگوهای نوری می‌شود. این بازآرایی‌ها، که ناشی از تغییر در انرژی بین‌سطحی و شرایط لنگرگیری هستند، امکان استخراج اطلاعات کمّی از تغییرات غلظت را بدون نیاز به برچسب‌گذاری شیمیایی یا آماده‌سازی پیچیده نمونه فراهم می‌کنند.

نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که سامانه نوری ارائه شده از پایداری مناسب، تکرارپذیری قابل قبول و حساسیت کافی برای آشکارسازی اسید لاکتیک در محیط‌های آبی برخوردار است. این ویژگی‌ها، حسگر مبتنی بر بلور مایع را به گزینه‌ای امیدبخش برای کاربردهایی نظیر پایش زیستی غیرتهاجمی، کنترل فرایندهای شیمیایی و ارزیابی شرایط فیزیولوژیکی تبدیل

می‌کند.

در نهایت، لازم به ذکر است که مطالعه حاضر به بررسی محلول‌های تک آنالیتی تحت شرایط آزمایشگاهی کنترل شده محدود بوده است. ازاین‌رو، ارزیابی عملکرد سامانه در محیط‌های پیچیده‌تر و واقعی، که در آن‌ها برهم‌کنش‌های هم زمان چندین گونه شیمیایی می‌توانند بر رفتار بلور مایع اثرگذار باشند، به‌عنوان گام بعدی تحقیق پیشنهاد می‌شود. توسعه و بهینه‌سازی این سامانه در چنین شرایطی می‌تواند به درک عمیق‌تر رفتار بین‌سطحی بلورهای مایع و گسترش کاربردهای عملی حسگرهای نوری مبتنی بر آن‌ها منجر شود.

۵. مراجع

1. Li, Y., et al. (2025), “Recent advances in medically oriented research on lactic acid detection,” Chemical Papers, 79 (3), pp 1335–1353
2. Nikolaus, N. and B. Strehlitz. (2008), “Amperometric lactate biosensors and their application in (sports) medicine, for life quality and wellbeing,” Microchimica Acta, 160 (1), pp 15–55
3. Ojo, A.O. and O. de Smidt *Lactic Acid: A Comprehensive Review of Production to Purification*. Processes, 2023. **11**, 688 DOI: 10.3390/pr11030688.
4. Pundir, C.S., V. Narwal, and B. Batra. (2016), “Determination of lactic acid with special emphasis on biosensing methods: A review,” Biosensors and Bioelectronics, 86 pp 777–790
5. Rattu, G., et al. (2021), “Lactate detection sensors for food, clinical and biological applications: a review,” Environmental Chemistry Letters, 19 (2), pp 1135–1152
6. Yang, G., J. Hong, and S.-B. Park. (2024), “Wearable device for continuous sweat lactate monitoring in sports: a narrative review,” Frontiers in Physiology, Volume 15 - 2024 pp
7. Zhou, Y., et al. (2025), “Biosensing of Lactic Acid Enantiomers in Beverages: A Review,” IEEE Sensors Journal, 25 (1), pp 17–28
8. Guirguis, N., A.I. Machuca-Parra, and S. Matoori. (2023), “Portable Near-Infrared Fluorometer for a Liposomal Blood Lactate Assay,” ACS Pharmacology & Translational Science, 6 (6), pp 907–912
9. Herrera, D.J., et al. (2008), “Automated assay for plasma D-lactate by enzymatic spectrophotometric analysis with sample blank correction,” Annals of Clinical Biochemistry, 45 (2), pp 177–183
10. Liaud, N., et al. (2014), “High throughput automated colorimetric method for the screening of l-lactic acid producing microorganisms,” MethodsX, 1 pp 254–257
11. Ohayon, D., et al. (2016), “Cytoplasmic proliferating cell nuclear antigen connects glycolysis and cell survival in acute myeloid leukemia,” Scientific Reports, 6 (1), pp 35561
12. El-Masry, A.A., et al. (2025), “Implantation of impressive chromatographic and built-in UV spectrophotometry approaches for sustainable Estimation of olopatadine and mometasone in pharmaceuticals; eco-scale and BAGI applications,” Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 327 pp 125409
13. Ahmed, M.E., et al. (2023), “Measurement of carbohydrates and organic acids in varieties of cheese using high-performance liquid chromatography,” Food Science & Nutrition, 11 (5), pp 2081–2085

14. Cevasco, G., et al. (2011), "A simple, sensitive and efficient assay for the determination of d- and l-lactic acid enantiomers in human plasma by high-performance liquid chromatography," Journal of Chromatography A, 1218 (6), pp 787–792
15. Norton, D., et al. (2007), "High performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry (HPLC/MS/MS) assay for chiral separation of lactic acid enantiomers in urine using a teicoplanin based stationary phase," Journal of Chromatography B, 850 (1), pp 190–198
16. Popov, P., E.K. Mann, and A. Jákli. (2017), "Thermotropic liquid crystal films for biosensors and beyond," Journal of Materials Chemistry B, 5 (26), pp 5061–5078
17. Sil, S., K. Mishra, and S.K. Pal. (2025), "Liquid Crystal Biosensors: An Overview of Techniques to Monitor Enzyme Activity," Langmuir, 41 (8), pp 4959–4975
18. Song, J., et al. (2024), "Flexible Organic Transistors for Biosensing: Devices and Applications," Advanced Materials, 36 (20), pp 2300034
19. Tang, J., et al. (2024), "Liquid Crystal Based Label-Free Optical Sensors for Biochemical Application," Photonic Sensors, 14 (2), pp 240203
20 Wang, Z., et al. (2021), "Applications of liquid crystals in biosensing," Soft Matter, 17 (18), pp 4675–4702
21. Hartono, D., et al. (2008), "An Air-Supported Liquid Crystal System for Real-Time and Label-Free Characterization of Phospholipases and Their Inhibitors," Advanced Functional Materials, 18 (19), pp 2938–2٩٤٥
22. Tvorynska, S., J. Barek, and B. Josypcuk. (2023), "High-performance amperometric biosensor for flow injection analysis consisting of a replaceable lactate oxidase-based mini-reactor and a silver amalgam screen-printed electrode," Electrochimica Acta, 445 pp 142033
23. Kim Hong, P.T. and C.-H. Jang. (2020), "Sensitive and label-free liquid crystal-based optical sensor for the detection of malathion," Analytical Biochemistry, 593 pp 113589
24. BashiriNezhad, A., et al. (2026), "Machine learning assisted detection of lactic acid and sodium chloride in aqueous solutions using crystal-based polarized imaging," Sensors and Actuators A: Physical, 399 pp 117408
25. Hosseinalipour, S.M., et al. (2025), "Design, fabrication and geometric optimization of microchannels for wearable sensors," Journal of Engineering and Applied Research, 2 (2), pp 13–31
26. Hosseinalipour, S.M., M. Esfandiar, and S.S. Salehi. (2025), "Comparative analysis of prediction algorithms for sodium chloride concentration using a liquid crystal microfluidic system," Results in Engineering, 28 pp 107563
27. Shahnazari, M.R. and M. Esfandiar. (2018), "Capillary Effects on Surface Enhancement in a Non-Homogeneous Fibrous Porous Medium," Mechanics of Advanced Composite Structures, 5 (1), pp٩٠–٨٣
28. Selinger, J.V. (2016), "Introduction to the theory of soft matter: from ideal gases to liquid crystals," Springer ,
29. Schindelin, J., et al. (2015), "The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis," Molecular Reproduction and Development, 82 (7-8), pp 518–529
30. Laskowski, J., S. Castro, and O. Ramos. (2014), "Effect of seawater main components on frothability in the flotation of Cu-Mo sulfide ore," Physicochemical Problems of Mineral Processing, 50 pp

31. Muševič, I“ ,(۲۰۱۷) .Liquid crystal colloids,” Springer ,
32. Partanen, L.J. and J.I. Partanen. (2023), “Thermodynamically Traceable Calorimetric Results for Aqueous Sodium Chloride Solutions from T = (273.15 to 373.15) K up to the Saturated Solutions: Part 1—The Quantities Associated with the Partial Molar Enthalpy,” Journal of Solution Chemistry, 52 (12), pp 1352–1385
33. Hollis, M. and R. Sugden. (1993), “Rationality in action,” Mind, 102 (405), pp 1–35
34. Han, Y., et al. (2017), “Dynamics of ethyl cellulose nanoparticle self-assembly at the interface of a nematic liquid crystal droplet,” Physical Chemistry Chemical Physics, 19 (36), pp 24955–24960
35. Kim, J.-W., et al. (2004), “Interfacial Tension of a Nematic Liquid Crystal/Water Interface with Homeotropic Surface Alignment,” Langmuir, 20 (19), pp 8110–8113
36. Ramezani-Dakhel, H., et al. (2017), “Water Flux Induced Reorientation of Liquid Crystals,” ACS Central Science, 3 (12), pp 1345–1349