



## طراحی و ساخت سیستم میکروفلوئیدیک مبتنی بر کریستال مایع کایرال و فناوری CNC برای تشخیص سدیم کلراید

سید مصطفی حسینعلی پور<sup>۱\*</sup>، میلاد اسفندیار<sup>۲</sup>، حسین رحیمی آسیابارکی<sup>۲</sup>، علی بشیری نژاد<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: alipour@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی	این مطالعه به بررسی کاربرد کریستال‌های مایع کایرال (CLC) در سیستم‌های میکروفلوئیدیک برای تشخیص دقیق غلظت‌های سدیم کلراید می‌پردازد. ابتدا، یک سیستم نوری مبتنی بر کریستال مایع 5CB طراحی شد که شامل منبع نور، پلاریزر، میکروسکوپ نوری و تجهیزات ثبت تغییرات رنگی بود. محلول‌های سدیم کلراید با غلظت‌های مختلف به صورت دستی با میکروپیپت به کریستال مایع تزریق و تغییرات رنگی ثبت گردید. این روش، اگرچه در شناسایی تغییرات رنگی مؤثر بود، اما به دلیل تزریق دستی و نیاز به تجهیزات نوری اضافی، محدودیت‌هایی در قابلیت حمل و کاربرد عملی داشت. برای رفع این مشکلات، کریستال مایع کایرال (CLC) با ترکیب 5CB و ناخالصی کایرال BDH1305 جایگزین 5CB شد تا حساسیت به تغییرات غلظت افزایش یافته و نیاز به پلاریزرهای خارجی حذف گردد. چیپ‌های میکروفلوئیدیک با استفاده از دستگاه فرز رومیزی CNC سفارشی ساخته شدند که میکروکانال‌هایی با دقت میکرونی (عرض ۲۰۰ میکرومتر و عمق ۳۰۰ میکرومتر) روی ورق‌های PMMA حکاکی نمود. این دستگاه با طراحی پیشرفته و کنترل دقیق، جریان یکنواخت محلول‌ها را به مخزن CLC تضمین کرد. تصاویر ثبت‌شده با نرم‌افزار ImageJ پردازش و مقادیر RGB برای تحلیل تغییرات رنگی استخراج گردید. نتایج نشان داد که سیستم میکروفلوئیدیک مبتنی بر کریستال مایع کایرال، به لطف دقت تولیدی دستگاه CNC، تغییرات رنگی یکنواخت و دقیقی را ثبت کرده و غلظت‌های سدیم کلراید را با دقت بالا اندازه‌گیری می‌نماید. این سیستم نوآورانه، با ترکیب فناوری CNC و حسگری CLC، ابزاری کارآمد برای اندازه‌گیری غلظت در پزشکی، صنایع غذایی و علوم زیست‌محیطی ارائه می‌دهد و پتانسیل بالایی برای توسعه آینده دارد.
دریافت: ۵ مرداد ۱۴۰۴ پذیرش: ۳۰ آبان ۱۴۰۴	
کلیدواژگان:	
کریستال مایع کایرال	
سیستم میکروفلوئیدیک	
دستگاه CNC	
تشخیص غلظت	
تغییرات رنگی	
تحلیل RGB	

## Design and fabrication of a microfluidic system based on chiral liquid crystal and CNC technology for sodium chloride detection

Seyed Mostafa Hosseinalipour<sup>1\*</sup>, Milad Esfandiar<sup>2</sup>, Hossein Rahimi Asiabaraki<sup>2</sup>, Ali BashiriNezhad<sup>1</sup>

1- Mechanical Engineering Department, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: alipour@iust.ac.ir

Article Information	Abstract
<p><b>Original Research Paper</b> Received: 27 July 2025 Accepted: 21 November 2025</p> <p><b>Keywords:</b> Chiral Liquid Crystal Microfluidic System CNC Machine Concentration Detection Color Changes RGB Analysis</p>	<p>This study investigates the application of chiral liquid crystals (CLCs) in microfluidic systems for precise detection of sodium chloride concentrations. Initially, an optical system based on 5CB liquid crystal was designed, consisting of a light source, polarizer, optical microscope, and color change recording equipment. Sodium chloride solutions with different concentrations were manually injected into the liquid crystal using a micropipette, and the color changes were recorded. Although this method was effective in detecting color variations, it faced limitations in portability and practical application due to manual injection and the need for additional optical components. To address these challenges, chiral liquid crystal (CLC) fabricated by mixing 5CB with BDH1305 chiral dopant replaced pure 5CB to enhance sensitivity to concentration changes and eliminate the need for external polarizers. Microfluidic chips were fabricated using a custom-built desktop CNC milling machine, which engraved microchannels with micron precision (200 μm width and 300 μm depth) on PMMA sheets. This device, with its advanced design and precise control, ensured uniform flow of solutions to the CLC reservoir. Recorded images were processed using ImageJ software, and RGB values were extracted for color change analysis. Results demonstrated that the microfluidic-CLC system, owing to the fabrication precision of the CNC device, recorded uniform and accurate color changes and measured sodium chloride concentrations with high accuracy. This innovative system, combining CNC technology and CLC sensing, provides an efficient tool for concentration measurement in medicine, food industry, and environmental sciences, with high potential for future development.</p>

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Hosseinalipour SM, Esfandiar M, Rahimi Asiabaraki H, BashiriNezhad A. Design and Fabrication of a Microfluidic System Based on Chiral Liquid Crystal and CNC Technology for Sodium Chloride Detection. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Nov 22;12(9):42-51. doi: 10.22034/ijme.2025.537359.2113 [In Persian]

## ۱- مقدمه

سدیم کلراید<sup>۱</sup> که به عنوان نمک طعام شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین ترکیبات شیمیایی در صنایع مختلف است. نقش‌های اساسی آن از نگهداری غذا و افزایش طعم تا کاربردهای پزشکی و نظارت محیطی گسترده است و توجه زیادی را در رشته‌های مختلف جلب کرده است.

در صنعت غذا، سدیم کلراید نه تنها به عنوان یک عامل طعم‌دهنده ضروری عمل می‌کند، بلکه برای حفظ ساختار و بافت محصولات غذایی و افزایش مدت نگهداری آن‌ها نیز کاربرد دارد. این ترکیب با کنترل فعالیت آبی در غذا، جذابیت حسی را افزایش داده و از رشد میکروبه‌های مضر جلوگیری می‌کند، در نتیجه ایمنی و کیفیت غذا را تضمین می‌نماید [۱]. علاوه بر این، دقت در اندازه‌گیری غلظت سدیم کلراید در طول تولید محصولات غذایی برای حفظ کیفیت و خلوص آن‌ها حیاتی است [۲].

در حوزه پزشکی، سدیم کلراید برای تولید سرم ایزوتونیک ضروری است که به حفظ سطح الکترولیت‌ها و حجم خون کمک می‌کند [۳]. تزریقات و شستشو با محلول‌های سرم به طور رایج برای اصلاح اختلالات الکترولیتی و حمایت از فشار خون استفاده می‌شوند [۴]. بیمارانی که دچار کم‌آبی می‌شوند (به دلیل استفراغ، تعریق یا سایر علل از دست دادن مایع) نیاز به تجویز دقیق و کنترل شده سدیم کلراید دارند [۵]. این موضوع، لزوم اندازه‌گیری دقیق و صحیح غلظت سدیم کلراید برای درمان مؤثر و ایمنی بیمار پررنگ می‌سازد، زیرا این ترکیب نقش مستقیم در عملکردهای بیولوژیکی دارد [۶].

در مطالعات محیطی، سدیم کلراید برای اندازه‌گیری آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده می‌شود. شوری زیاد در منابع آبی نزدیک به مناطق صنعتی یا کشاورزی معمولاً ناشی از آلودگی سدیم کلراید است که نظارت مستمر بر آن را ضروری می‌سازد. میزان بالای سدیم کلراید می‌تواند به اکوسیستم‌ها آسیب رسانده و تأثیرات منفی بر گونه‌های آبی و زنجیره‌های غذایی داشته باشد [۷، ۸]. به طور مشابه، در صنعت شیمیایی، سدیم کلراید ماده اولیه اصلی برای تولید کلر و سدیم خالص است که اجزای حیاتی در تولید مواد شوینده، پلاستیک‌ها و سایر مواد شیمیایی به شمار می‌روند [۹]. با توجه به تأثیر مستقیم غلظت و خلوص سدیم کلراید بر کیفیت محصول نهایی، اندازه‌گیری دقیق غلظت آن ضروری است [۱۰].

با توجه به نقش حیاتی سدیم کلراید در صنایع مختلف، اندازه‌گیری سریع، دقیق و قابل اطمینان غلظت آن در محلول‌های آبی از اهمیت بسزایی برخوردار است. باین‌حال، روش‌های استاندارد مانند تیتراسیون [۱۱]، کروماتوگرافی یون [۱۲] و طیف‌سنجی جذب اتمی [۱۳] دارای معایب ذاتی هستند که کاربرد گسترده آن‌ها را در شرایط عملیاتی و میدانی با محدودیت مواجه ساخته است. تیتراسیون، با وجود دقت بالا، به دلیل فرایند طولانی، نیاز به تجهیزات خاص و حجم نمونه نسبتاً زیاد برای استفاده در میدانی یا محیط‌های عملی دارد [۱۴]. کروماتوگرافی یون، اگرچه دقت بالایی در تشخیص یون‌های  $\text{Na}^+$  و  $\text{Cl}^-$  دارد، اما به دلیل هزینه و پیچیدگی، استفاده معمول در آزمایشگاه‌ها یا محیط‌های میدانی را محدود می‌کند [۱۵]. طیف‌سنجی جذب اتمی نیز، با وجود حساسیت بالا در غلظت‌های پایین، به تجهیزات پیچیده و زمان بیشتری برای پردازش نیاز دارد [۱۶]. این کاستی‌ها ضرورت توسعه تکنیک‌های نوآورانه برای اندازه‌گیری سریع، دقیق و ساده غلظت سدیم کلراید را برجسته می‌کند.

برای غلبه بر این محدودیت‌ها، این مطالعه یک سیستم میکروفلوئیدیک پیشرفته را با استفاده از کریستال‌های مایع کایرال<sup>۲</sup> (CLC) توسعه داده است که به طور خاص برای تشخیص دقیق غلظت‌های سدیم کلراید طراحی شده است. سیستم‌های میکروفلوئیدیک که توانایی کنترل مایع در مقیاس میکرومتر را دارند، پیشرفت‌های قابل توجهی در تحلیل شیمیایی و بیوسنسینگ ایجاد کرده‌اند [۱۷]. این سیستم‌ها با توزیع یکنواخت محلول در سطح حسگر، حجم نمونه و هزینه‌ها را کاهش می‌دهند و به دلیل جریان یکنواخت مایع، دقت و تکرارپذیری بالایی در آزمایش‌ها ارائه می‌کنند [۱۸]. ادغام سیستم میکروفلوئیدیک با کریستال‌های مایع کایرال، با استفاده از چیپ‌های ساخته‌شده توسط دستگاه CNC، دقت و سرعت اندازه‌گیری را بهبود می‌بخشد و امکان تحلیل سریع و حساس را در شرایط میدانی فراهم می‌آورد.

کریستال‌های مایع به دلیل دارا بودن ویژگی‌های نوری منحصر به فرد و حساسیت بالای خود به تغییرات محیطی، پتانسیل زیادی برای کاربرد در حسگرهای شیمیایی از خود نشان داده‌اند [۱۹]. این کریستال‌ها که خواصی از هر دو حالت جامد و مایع را دارند [۲۰]، به تغییرات دما [۲۱]، میدان‌های الکتریکی [۲۲] و غلظت‌های مختلف شیمیایی [۲۳] واکنش نشان می‌دهند. تغییرات رنگ یا سایر

<sup>1</sup> NaCl

<sup>2</sup> Chiral Liquid Crystal

ویژگی‌های نوری آن‌ها امکان استفاده به‌عنوان حسگرهای محیطی را فراهم می‌کند [۲۴]. در این مطالعه، از کریستال‌های مایع کایرال استفاده شد که به دلیل ساختار پیچشی خود، نورهایی با طول موج‌های خاص را بسته به غلظت سدیم کلراید بازتاب می‌کنند [۲۵]. این ویژگی امکان تشخیص دقیق غلظت‌های شیمیایی را از طریق تغییرات رنگی فراهم می‌کند. غلظت‌های مختلف سدیم کلراید باعث تنظیم پیچ چرخشی کریستال‌های مایع کایرال می‌شود که منجر به تغییرات رنگ می‌گردد و تحلیل این تغییرات با استفاده از نرم‌افزار [Image] امکان تعیین دقیق غلظت را فراهم می‌کند [۲۶].

نوآوری کلیدی این پژوهش، استفاده از یک دستگاه فرز رومیزی CNC سفارشی است که به‌طور اختصاصی برای ساخت چیپ‌های میکروفلوئیدیک با دقت میکرونی طراحی و ساخته شده است. این دستگاه امکان حکاکی کانال‌های میکرو روی ورق‌های پلی‌متیل متاکریلات<sup>۱</sup> (PMMA) را فراهم می‌کند که برای تحویل یکنواخت محلول‌های سدیم کلراید به کریستال مایع کایرال ضروری است. این فناوری تولیدی پیشرفته، همراه با حسگری مبتنی بر کریستال مایع، راه‌حلی مقرون‌به‌صرفه و قابل حمل ارائه می‌دهد که محدودیت‌های روش‌های سنتی را برطرف می‌کند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- طراحی سیستم اولیه و بهینه‌سازی کریستال مایع

ابتدا یک سیستم نوری پایه برای شناسایی سدیم کلراید در محلول‌های آبی طراحی شد. این سیستم مطابق شکل ۱ شامل یک منبع نور برای تأمین روشنایی لازم، یک پلاریزر خطی برای قطبی‌سازی نور پیش از برخورد با نمونه، یک میکروسکوپ نوری برای مشاهده تغییرات کریستال مایع و یک پلاریزر دوم در زیر میکروسکوپ برای تقویت تجزیه و تحلیل تصویر بود. ماده اصلی حسگر، کریستال مایع 5CB انتخاب گردید. یک لایه یکنواخت از محلول 5CB روی مش TEM با ابعاد  $300 \times 300$  میکرومتر پخش شد تا نمونه‌ای از کریستال مایع برای تجزیه و تحلیل دقیق غلظت سدیم کلراید ایجاد شود. این آرایش، امکان بررسی تغییرات نوری کریستال مایع را در واکنش به غلظت‌های مختلف سدیم کلراید فراهم آورد. قابلیت شناسایی این سیستم در غلظت‌های گوناگون سدیم کلراید مورد آزمایش قرار گرفت.



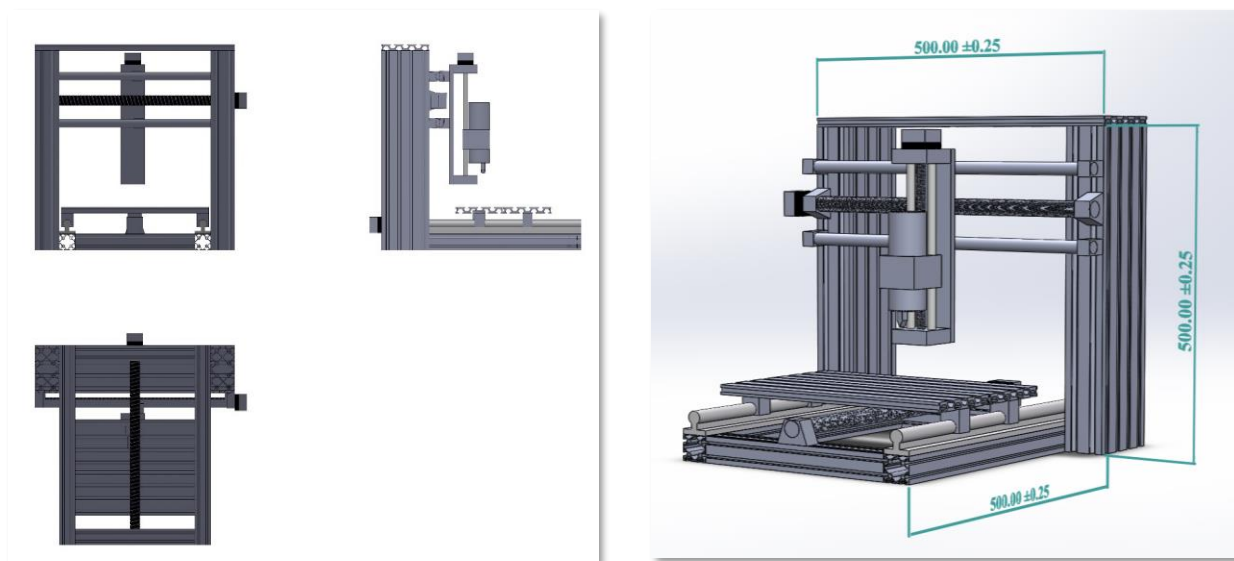
شکل ۱ شماتیک سیستم نوری اولیه برای شناسایی سدیم کلراید

<sup>۱</sup> Polymethyl Methacrylate

به منظور بهبود عملکرد سیستم و حذف نیاز به پلاریزهای خارجی، یک کریستال مایع کایرال از ترکیب کریستال مایع 5CB و ناخالصی کایرال BDH1305 ساخته شد. این ترکیب، ویژگی‌های نوری کریستال مایع را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که امکان شناسایی غلظت سدیم کلراید بدون نیاز به پلاریزهای خارجی فراهم گردد. برای آماده‌سازی نمونه، محلول حاصل از ترکیب 5CB و BDH1305 به‌طور یکنواخت روی مش TEM با ابعاد  $300 \times 300$  میکرومتر پخش شد که منجر به آرایش یکنواخت کریستال مایع گردید. کریستال مایع کایرال تهیه‌شده به این روش، برای اندازه‌گیری دقیق غلظت‌های مختلف سدیم کلراید مورد استفاده قرار گرفت. در این مرحله، نسبت بهینه 5CB به BDH1305 و روش ترکیب آن‌ها برای ایجاد کریستال مایع کایرال با عملکرد مطلوب، ثبت و اعتبارسنجی شد.

## ۲-۲- طراحی، ساخت و ارزیابی سیستم میکروفلوئیدیک

ساخت چیپ‌های میکروفلوئیدیک با استفاده از یک دستگاه فرز رومیزی CNC سفارشی انجام شد که به‌عنوان نوآوری کلیدی این پژوهش، به‌طور اختصاصی برای حکاکی کانال‌های میکرو با دقت میکرونی روی ورق‌های PMMA با ضخامت‌های مختلف طراحی و ساخته شد. این دستگاه با بهره‌گیری از مهندسی دقیق و فناوری پیشرفته، توانایی حکاکی میکروکانال‌هایی با ابعاد مختلف را فراهم کرد که برای تحویل یکنواخت محلول‌های سدیم کلراید به مخزن کریستال مایع کایرال ضروری است. طراحی دستگاه با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکز<sup>۱</sup> انجام شد که امکان مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق اجزای مکانیکی و الکترونیکی، شبیه‌سازی تعاملات قطعات و بهینه‌سازی ساختار قبل از ساخت را فراهم کرد. نماهای ایزومتریک، جلو، بالا و بغل دستگاه برای اطمینان از صحت طراحی و ارائه تصویری جامع مطابق شکل ۲ تهیه گردید.



شکل ۲ نماهای مختلف دستگاه فرز رومیزی CNC طراحی شده

شاسی دستگاه از پروفیل‌های آلومینیومی شیاردار (آلیاژ ۶۰۶۳ با روکش آنودایز نقره‌ای) در ابعاد  $120 \times 15$  میلی‌متر،  $30 \times 60$  میلی‌متر ساخته شد. این پروفیل‌ها به دلیل استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی و سهولت مونتاژ انتخاب گردیدند و با استفاده از مهره‌های تی چکشی و براکت‌های نبشی ۹۰ درجه با دقت بالا مونتاژ شدند تا پایداری ساختاری دستگاه تضمین شود. برای دستیابی به حرکت دقیق در محورهای X، Y و Z، از بال‌اسکروها و لیداسکروهای با کیفیت بالا استفاده شد که حرکت دورانی موتورها را به حرکت خطی با دقت میکرونی تبدیل می‌کنند. بلبرینگ‌های خطی بلوکی (SC10UU) و بلبرینگ‌های خطی (LM12UU) حرکت نرم و بدون لرزش محورها را تضمین نمودند. همچنین یاتاقان‌های پایه‌دار در ابتدا و انتهای بال‌اسکروها نصب شدند تا ثبات مکانیکی افزایش یافته و ارتعاشات در حین حکاکی کاهش یابد.

<sup>1</sup> SolidWorks

سیستم الکترونیکی دستگاه با دقت طراحی شد تا کنترل حرکات با رزولوشن بالا را ممکن سازد. استپر موتورهای Wantai 57BYGH206 با گشتاور بالا و دقت  $\pm 5\%$  درصد برای حرکت محورهای انتخاب شدند. برد آردوینو Uno R3 به عنوان کنترل کننده اصلی، با فریمور GRBL برنامه ریزی شد تا دستورات G-code را از نرم افزار Universal G-code Sender (UGS) دریافت و اجرا نماید. درایورهای TB6600 با قابلیت میکرواستپینگ (تا ۶۴/۱ گام) و جریان تا ۴/۵ آمپر، امکان کنترل دقیق و روان موتورها را فراهم آوردند. منبع تغذیه سوئیچینگ ۲۴ ولت ۱۵ آمپر، توان پایداری برای تمام اجزای الکتریکی تأمین کرد. این ترکیب پیشرفته از اجزای مکانیکی و الکترونیکی، دستگاه را به ابزاری قدرتمند برای حکاکی میکروکانالها با دقت بسیار بالا تبدیل نمود که توانایی تولید ساختارهای پیچیده در مقیاس میکرون را با انحراف ابعادی کمتر از  $\pm 5\%$  میکرومتر فراهم آورد.

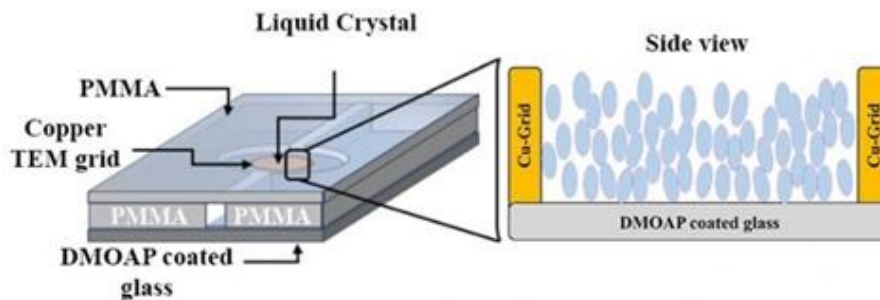
حکاکی میکروکانالها روی ورق PMMA با استفاده از مته ۱ میلی متری در تست های اولیه انجام شد که نتایج آن دقت و یکنواختی بالای دستگاه را تأیید نمود. برای دستیابی به دقت میکرونی، دستگاه برای استفاده از مته ۰/۱ میلی متری بهینه سازی گردید، هرچند به دلیل شکنندگی مته، آزمایش های نهایی به مراحل بعدی موکول شد. این قابلیت حکاکی در مقیاس میکرون که با فناوری CNC سفارشی محقق گردید، امکان تولید چیپ های میکروفلوئیدیک با هندسه های پیچیده را فراهم کرد که در روش های سنتی یا دستگاه های تجاری به سختی قابل دستیابی است.

سپس سطح PMMA با نانوذرات آگاروز آبدوست شد تا جریان آنالیت از ورودی به مخزن بهبود یابد و تعامل بهینه با کریستال مایع کایرال تضمین شود. یک مخزن دایره ای با قطر ۹ میلی متر در مرکز چیپ برای نگهداری کریستال مایع کایرال طراحی گردید و یک شبکه مسی TEM با ابعاد  $300 \times 300$  میکرومتر در آن قرار داده شد تا یکنواختی لایه کریستال مایع را بهبود بخشد. همچنین یک کانال خروجی برای آزادسازی آنالیت پس از تعامل به چیپ اضافه شد تا جریان و جمع آوری بهینه گردد. نمونه ورق PMMA پس از حکاکی کانال های میکرو با مته ۱ میلی متری که دقت بالای دستگاه را نشان می دهد، مطابق شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳ نمونه ورق PMMA پس از حکاکی کانال های میکرو با مته ۱ میلی متری

زیرلایه شیشه ای با پوشش DMOAP آب گریز شد تا هم راستایی عمودی مولکول های کریستال مایع کایرال تسهیل گردد و رابطی پایدار برای تجزیه و تحلیل نوری ایجاد شود. چیپ PMMA روی این زیرلایه ثابت گردید تا ثبات ساختاری و دقت حسگری تضمین شود. برای پوشاندن کانال های میکروفلوئیدیک، یک ورق نازک PMMA با شفافیت بالا به چیپ متصل شد که امکان مشاهده اجزای داخلی را بدون تأثیر بر عملکرد سیستم فراهم آورد. مخزن تعبیه شده در چیپ، یک شبکه مش حاوی کریستال مایع کایرال را در خود جای داده است که از طریق کانال های میکروفلوئیدیک هدایت می شود و امکان تجزیه و تحلیل نوری غلظت های مختلف سدیم کلراید را فراهم می آورد. این فرایندهای تولیدی پیشرفته، به ویژه حکاکی دقیق میکروکانالها توسط دستگاه CNC، نقش محوری در دستیابی به عملکرد برتر سیستم میکروفلوئیدیک مبتنی بر کریستال مایع ایفا نمودند و این سیستم را به ابزاری نوآورانه برای کاربردهای حسگری تبدیل کردند. شکل ۴ شماتیک سیستم میکروفلوئیدیک را نشان می دهد که در آن مخزن دایره ای و کانال های میکرو به وضوح قابل مشاهده هستند.



شکل ۴ شماتیک سیستم میکروفلوئیدیک

برای تجزیه و تحلیل تغییرات نوری، تصاویر ثبت شده توسط میکروسکوپ نوری با استفاده از نرم افزار [ImageJ پردازش شدند. مقادیر RGB استخراج شده از تصاویر، مبنای شناسایی و کمی سازی تغییرات نوری ناشی از غلظت های مختلف سدیم کلراید قرار گرفتند. به این منظور، مجموعه ای از محلول های سدیم کلراید با غلظت های ۰، ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۵، ۰/۰۵، ۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶، ۱/۸ و ۲ گرم در ۱۰ میلی لیتر آب مقطر تهیه شدند. این تحلیل به منظور ایجاد هم راستایی دقیق بین غلظت سدیم کلراید و تغییرات نوری مشاهده شده در سیستم انجام گردید. در نهایت، تجزیه و تحلیل های آماری و مقایسه با خروجی های قبلی سیستم، دقت و قابلیت اطمینان داده ها را تأیید نمودند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ارزیابی سیستم اولیه

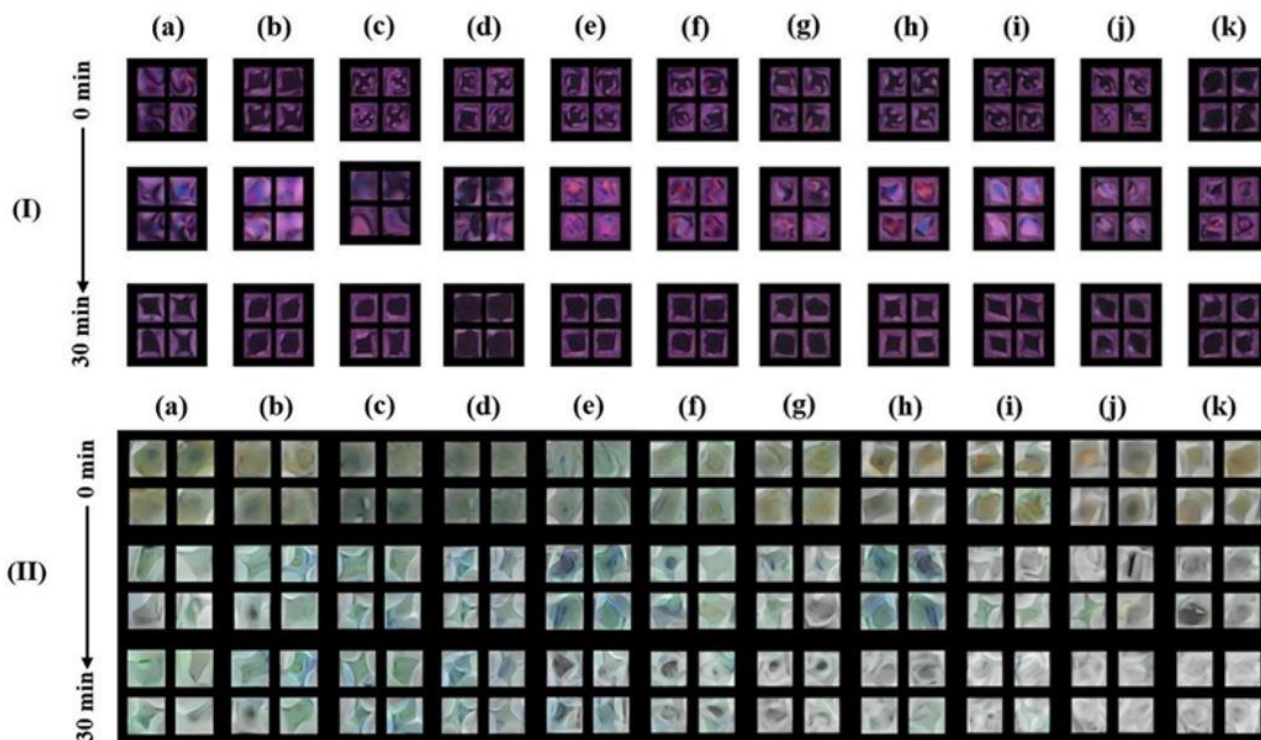
ابتدا از سیستم نوری برای بررسی تأثیر غلظت های مختلف سدیم کلراید بر کریستال مایع 5CB استفاده شد. بدین منظور، قطرات ۰/۵ میکرولیتری از محلول های سدیم کلراید با غلظت های ۰ تا ۲ گرم در ۱۰ میلی لیتر آب مقطر به کریستال مایع افزوده گردید. تغییرات رنگ کریستال مایع در سه بازه زمانی مجزا (۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه) مشاهده و ثبت شد. این تغییرات رنگی در واکنش به غلظت های مختلف در شکل ۵ (I) قابل مشاهده است. نتایج به دست آمده حساسیت کریستال مایع 5CB را به تغییرات غلظت سدیم کلراید نشان می دهد و امکان شناسایی بصری آن را فراهم می کند.

محدودیت های این روش شامل ابعاد نسبتاً بزرگ سیستم بود که برای کاربردهای میکروفلوئیدیک مناسب نیست و همچنین تزریق دستی نمونه که با خطا و عدم تکرارپذیری همراه است. علاوه بر این، نیاز به ابزارهای نوری اضافی در این طراحی، قابلیت حمل و کاربرد آن را در سیستم های کوچک تر کاهش می دهد.

#### ۳-۲- عملکرد و تحلیل کمی سیستم میکروفلوئیدیک

محدودیت های سیستم اولیه با به کارگیری کریستال مایع کایرال (CLC) حاصل از ترکیب 5CB و ناخالصی کایرال BDH1305 برطرف گردید. ویژگی های نوری منحصر به فرد این ماده، حساسیت بیشتری را نسبت به غلظت های مختلف سدیم کلراید از خود نشان می دهد. مهم ترین ویژگی CLC، ایجاد تغییرات نوری رنگی بدون نیاز به پلاریزر خارجی است که طراحی سیستم را ساده تر و قابلیت حمل آن را افزایش می دهد. نتایج حاصل از این سیستم در شکل ۵ (II) قابل مشاهده است که تغییرات رنگی واضح و متمایزی را در غلظت های مختلف سدیم کلراید نشان می دهد.

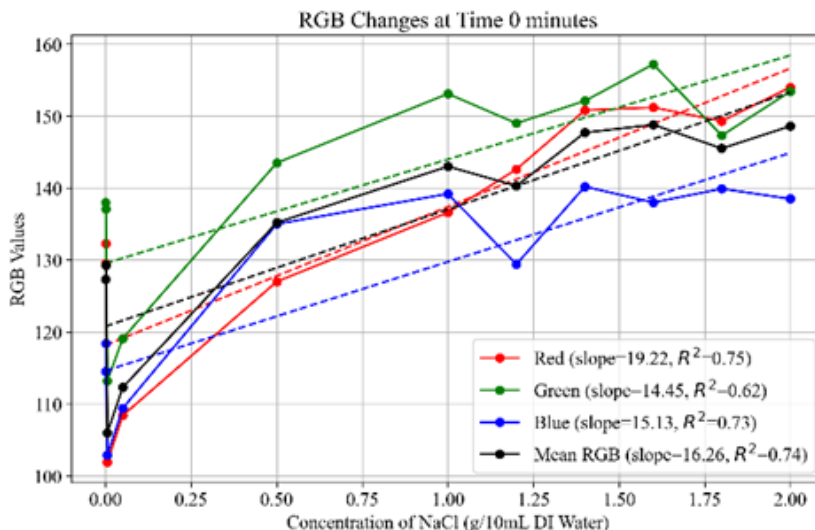
در ادامه، سیستم میکروفلوئیدیک طراحی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. این سیستم دارای یک مخزن دایره ای بود که کریستال مایع کایرال به طور یکنواخت در سراسر یک شبکه در آن پخش شده بود. محلول های سدیم کلراید با غلظت های مختلف از طریق کانال های میکروفلوئیدیک به این مخزن هدایت شدند. تغییرات رنگ کریستال مایع پس از تزریق قطرات ۰/۵ میکرولیتری از هر محلول، در بازه های زمانی ۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه ثبت گردید. یکنواختی و دقت بهبود یافته تغییرات رنگ در این سیستم در شکل ۵ (II) قابل مشاهده است. مقادیر RGB استخراج شده از تصاویر در غلظت ها و زمان های مختلف با استفاده از نرم افزار [ImageJ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات رنگ در کریستال مایع کایرال به طور مستقیم با غلظت سدیم کلراید همبستگی دارد.



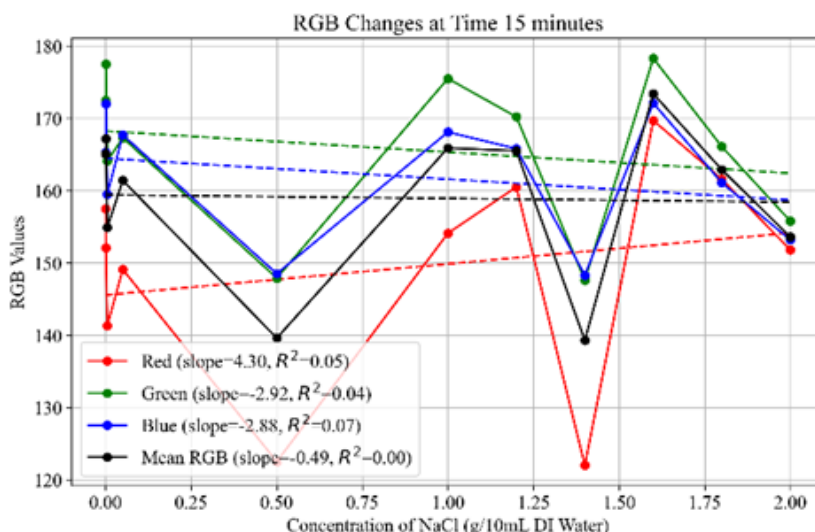
شکل ۵ تغییرات رنگ کریستال مایع تحت تأثیر غلظت‌های مختلف سدیم کلراید در بازه‌های زمانی ۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه در دو سیستم مختلف: (I) سیستم اولیه با تزریق دستی نمونه‌ها به کریستال مایع 5CB و (II) سیستم میکروفلوئیدیک با استفاده از کریستال مایع کایرال (CLC). از چپ به راست، غلظت‌ها عبارت‌اند از: (a: ۰، b: ۰.۰۰۰۵، c: ۰.۰۰۰۵، d: ۰.۰۰۵، e: ۰.۰۱، f: ۰.۰۲، g: ۰.۰۴، h: ۰.۰۶، i: ۰.۰۸، j: ۰.۱۵، k و ۰.۲ گرم در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر

مقادیر RGB (قرمز، سبز و آبی) استخراج‌شده از تصاویر کریستال مایع به‌عنوان ابزاری برای مطالعه تغییرات رنگ و روشنایی مورد استفاده قرار گرفت. در این تحلیل، تأثیر غلظت سدیم کلراید بر مقادیر RGB در سه بازه زمانی ۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه بررسی شد. شکل ۶ رابطه بین مقادیر RGB و غلظت سدیم کلراید را در زمان صفر نشان می‌دهد. این گراف آغاز واکنش‌ها و تأثیر تغییر آنالیت بر مقادیر RGB را به تصویر می‌کشد. بررسی اولیه مقادیر RGB در زمان صفر (بلافاصله پس از تزریق) نشان داد که همبستگی خطی نسبتاً ضعیفی بین مقادیر RGB و غلظت سدیم کلراید وجود دارد ( $R^2 = 0.74$ ). با انتقال از آب مقطر به محلول‌های حاوی سدیم کلراید، کاهش سریعی در مقادیر RGB رخ داد. این کاهش اولیه شدید، ناشی از تغییر ناگهانی ترکیب شیمیایی محیط و تأثیر آن بر ساختار کریستال مایع کایرال است. پس از این کاهش اولیه، شیب تغییرات به تدریج یکنواخت‌تر و کم شیب‌تر شد. با این حال، باید توجه داشت که در زمان صفر، قطره سدیم کلراید هنوز تعامل کاملی با کریستال مایع کایرال برقرار نکرده است. به‌علاوه، جریان اولیه محلول باعث بی‌نظمی موقتی در آرایش مولکول‌های کریستال مایع می‌گردد. بنابراین، داده‌های ثبت‌شده در زمان صفر نمی‌توانند به‌عنوان اندازه‌گیری پایدار و قابل‌اعتمادی برای تحلیل تغییرات در نظر گرفته شوند و صرفاً شروع فرایند تعامل را نشان می‌دهند.

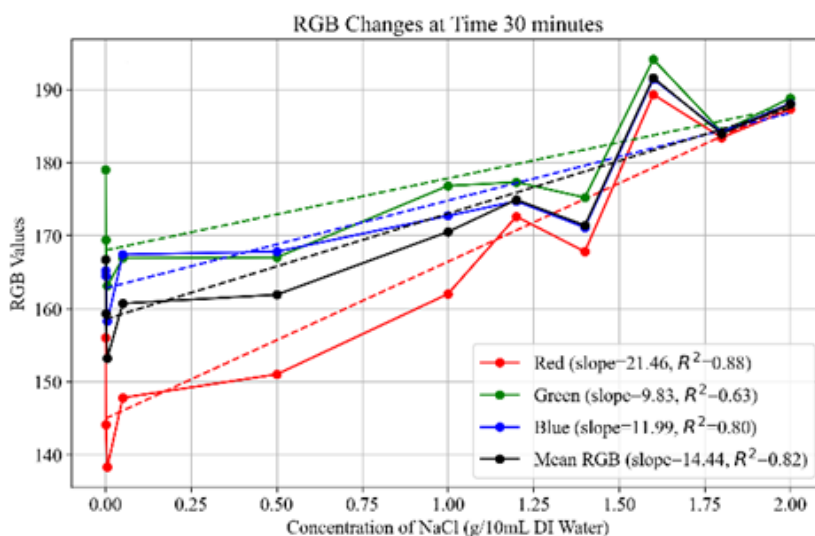
پس از ۱۵ دقیقه، رابطه بین مقادیر RGB و غلظت سدیم کلراید تقریباً به‌طور کامل از بین رفت ( $R^2 = 0.04$ ) و نقاط داده در گراف پراکندگی قابل توجهی را نشان دادند. این پراکندگی ناشی از فعالیت شیمیایی و واکنش‌های در حال انجام بین سدیم کلراید و کریستال مایع کایرال است. در این مرحله، سیستم همچنان پویا باقی می‌ماند، اما تغییرات ساختاری و شیمیایی مداوم به دلیل عدم تعادل در واکنش‌ها، منجر به پراکندگی زیاد داده‌ها می‌گردد. شکل ۷ این پراکندگی و عدم وجود رابطه خطی را در زمان ۱۵ دقیقه نشان می‌دهد. پس از ۳۰ دقیقه، رابطه بین مقادیر RGB و غلظت سدیم کلراید به‌طور واضحی تثبیت شد ( $R^2 = 0.82$ ). در این مرحله، سیستم به حالت پایدار خود رسید و تغییرات رنگ به‌طور مستقیم و منطقی با افزایش غلظت همبستگی داشت. شیب گراف در این نقطه نشان‌دهنده یک روند یکنواخت و صعودی است که بیانگر تکمیل واکنش‌ها و تثبیت ساختار کریستال مایع کایرال می‌باشد. شکل ۸ رابطه قوی و خطی بین مقادیر RGB و غلظت سدیم کلراید را در زمان ۳۰ دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۶ همبستگی بین مقادیر RGB و غلظت سدیم کلراید در زمان صفر (بلافاصله پس از تزریق)



شکل ۷ پراکندگی مقادیر RGB بر حسب غلظت سدیم کلراید در زمان ۱۵ دقیقه



شکل ۸ همبستگی بین مقادیر RGB و غلظت سدیم کلراید در زمان ۳۰ دقیقه

## ۴- نتیجه گیری

نتایج آزمایش‌ها به وضوح نشان می‌دهد که هر دو سیستم طراحی شده، یعنی سیستم نوری اولیه مبتنی بر پلاریزر و سیستم میکروفلوئیدیک مجهز به کریستال مایع کایرال (CLC)، حساسیت قابل توجهی به تغییرات غلظت سدیم کلراید دارند. سیستم نوری اولیه با استفاده از کریستال مایع 5CB، توانایی تشخیص تغییرات غلظت سدیم کلراید را از طریق تغییرات رنگ از خود نشان داد. باین حال، تزریق دستی نمونه‌ها و نیاز به اجزای نوری اضافی، قابلیت حمل و مقیاس پذیری این سیستم را محدود ساخت.

در مقابل، سیستم میکروفلوئیدیک مجهز به کریستال مایع کایرال (CLC) حاصل از ترکیب 5CB و ناخالصی کایرال BDH1305، دقت و یکنواختی بالاتری ارائه داد. در این سیستم، چیپ‌های میکروفلوئیدیک با استفاده از دستگاه فرز رومیزی CNC سفارشی حکاکی شدند که منجر به تولید میکروکانال‌هایی با ابعاد دقیق (عرض ۲۰۰ میکرومتر و عمق ۳۰۰ میکرومتر) و انحراف ابعادی کمتر از  $\pm 5$  میکرومتر گردید. این دقت بالای ساخت، جریان یکنواخت آنالیت را تضمین کرده و نویز نوری را به طور چشمگیری کاهش داد. تحلیل RGB تصاویر ثبت شده با نرم افزار [ImageJ، همبستگی خطی قوی بین غلظت سدیم کلراید (۰ تا ۲ گرم در ۱۰ میلی لیتر) و تغییرات رنگی را تأیید نمود.

به طور کلی، این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق فناوری میکروفلوئیدیک با حسگرهای مبتنی بر کریستال مایع کایرال به لطف دقت تولیدی دستگاه CNC می‌تواند ابزاری قابل اعتماد و دقیق برای سنجش غلظت در کاربردهای مختلف از جمله پزشکی، صنایع غذایی و علوم محیطی فراهم آورد. تحقیقات آینده می‌تواند بر بهینه سازی عملکرد سیستم برای تشخیص غلظت‌های پایین تر و همچنین گسترش دامنه کاربردهای آن برای شناسایی سایر آنالیت‌های هدف متمرکز شود.

## References

- [1] Kim TK, Yong HI, Jung S, Kim HW, Choi YS. Technologies for the production of meat products with a low sodium chloride content and improved quality characteristics—A review. *Foods*. 2021 Apr 28;10(5):957. doi: 10.3390/foods10050957
- [2] Frisón LN, Chiericatti CA, Aríngoli EE, Basílico JC, Basílico MZ. Effect of different sanitizers against *Zygosaccharomyces rouxii*. *Journal of food science and technology*. 2015 Jul;52(7):4619-24. doi: 10.1007/s13197-014-1471-y
- [3] Lee H, Kim JT. Pediatric perioperative fluid management. *Korean journal of anesthesiology*. 2023 Apr 19;76(6):519-30. doi: 10.4097/kja.23128
- [4] Buh A, Scott M, Kiska R, Fung SG, Solmi M, Kang R, Salman M, Lee K, Milone B, Wafy G, Syed S. Impact of electrolyte abnormalities and adverse outcomes in persons with eating disorders: A systematic review protocol. *PLoS One*. 2024 Aug 8;19(8):e0308000. doi: 10.1371/journal.pone.0308000
- [5] Da Silva TH. Understanding body fluid balance, dehydration and intravenous fluid therapy. *Emergency Nurse*. 2025 Jan 7;33(1). doi: 10.7748/en.2024.e2201
- [6] Ikehata A, Morisawa Y. Observation of Solid-Liquid Phase Transitions of Brine Using the Far-Ultraviolet Charge-Transfer-to-Solvent Band. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2023 Jul 11;127(28):6325-32. doi: 10.1021/acs.jpcc.3c01936
- [7] Sivakumar M, Subramani T, Prapanchan VN, Karunanidhi D. Appraisal of groundwater suitability for drinking and irrigation utilities in the Cooum River basin, South India: Implications from uranium, nitrate, and fluoride health risks. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*. 2024 Dec 1;136:103792. doi: 10.1016/j.pce.2024.103792
- [8] Tang W, Ye C, Zhang Q, Li J, Ao F, Zheng B, Luo Y. Study on the carbon sequestration performance and barrier mechanism of biochar cement-based vertical cutoff walls for phenol pollution in groundwater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024 Dec 1;12(6):114560. doi: 10.1016/j.jece.2024.114560
- [9] Salimbeni A, Di Bianca M, Rizzo AM, Chiaramonti D. Application of an integrated pyrolysis and chemical leaching process for pulper waste conversion into coal, hydrogen and chemical flocculating agent. *Waste Management*. 2024 Feb 15;174:549-57. doi: 10.1016/j.wasman.2023.12.038
- [10] Kusenberg M, Zayoud A, Roosen M, Thi HD, Abbas-Abadi MS, Eschenbacher A, Kresovic U, De Meester S, Van Geem KM. A comprehensive experimental investigation of plastic waste pyrolysis oil quality and its dependence on the plastic waste composition. *Fuel Processing Technology*. 2022 Mar 1;227:107090. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107090
- [11] Pablo-Calderón MA, Cano-Barrita PF, León-Martínez FM. Exploring the detection of Cl<sup>-</sup> penetration in portland cement mortars via surface electrical resistivity. *Materials*. 2023 Nov 10;16(22):7123. doi: 10.3390/ma16227123

- [12] Miller JD, Stuckman MY, Means N, Lopano C, Hakala JA. Determination of transition metal ions in fossil fuel associated wastewaters using chelation ion chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2022 Apr 12;1668:462924. doi: [10.1016/j.chroma.2022.462924](https://doi.org/10.1016/j.chroma.2022.462924)
- [13] Thien VH, Van Dong N. Matrix removal and enrichment of cadmium and lead in mineral-rich samples using liquid-liquid extraction and analysis by flame atomic absorption spectrometry. *Vietnam Journal of Chemistry*. 2023 Nov;61:66-72. doi: [10.1002/vjch.202300063](https://doi.org/10.1002/vjch.202300063)
- [14] Janssens JP, Cantero C, Pasquina P, Georges M, Rabec C. Monitoring long term noninvasive ventilation: benefits, caveats and perspectives. *Frontiers in Medicine*. 2022 May 19;9:874523. doi: [10.3389/fmed.2022.874523](https://doi.org/10.3389/fmed.2022.874523)
- [15] Moreno I, Barroso M, Martinho A, Cruz A, Gallardo E. Determination of ketamine and its major metabolite, norketamine, in urine and plasma samples using microextraction by packed sorbent and gas chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography B*. 2015 Nov 1;1004:67-78. doi: [10.1016/j.jchromb.2015.09.032](https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2015.09.032)
- [16] Hassan AH, Zeinhom MM, Shaban M, Korany AM, Gamal A, Abdel-Atty NS, Al-Saeedi SI. Rapid and sensitive in situ detection of heavy metals in fish using enhanced Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2024 May 15;313:124082. doi: [10.1016/j.saa.2024.124082](https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124082)
- [17] Karasu T, Özgür E, Uzun L. MIP-on-a-chip: Artificial receptors on microfluidic platforms for biomedical applications. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2023 Mar 20;226:115257. doi: [10.1016/j.jpba.2023.115257](https://doi.org/10.1016/j.jpba.2023.115257)
- [18] Soenksen LR, Kassis T, Noh M, Griffith LG, Trumper DL. Closed-loop feedback control for microfluidic systems through automated capacitive fluid height sensing. *Lab on a Chip*. 2018;18(6):902-14. doi: [10.1039/c7lc01223c](https://doi.org/10.1039/c7lc01223c)
- [19] Adeshina MA, Ogunleye AM, Lee H, Mareddi B, Kim H, Park J. Graphene-Liquid Crystal Synergy: Advancing Sensor Technologies across Multiple Domains. *Materials*. 2024 Sep 9;17(17):4431. doi: [10.3390/ma17174431](https://doi.org/10.3390/ma17174431)
- [20] Li YH, Cui M, Gong Y, Xu TY, Tong F. Size Reduction to Enhance Crystal-to-Liquid Phase Transition Induced by E-to-Z Photoisomerization Based on Molecular Crystals of Phenylbutadiene Ester. *Materials*. 2024 Jul 24;17(15):3664. doi: [10.3390/ma17153664](https://doi.org/10.3390/ma17153664)
- [21] Anan S, Kurihara T, Yamaguchi M, Kikuchi H, Kokado K. Enhanced Orientation of Liquid Crystals Inside Micropores of Metal-Organic Frameworks Having Thermoresponsivity. *Chemistry-A European Journal*. 2024 Mar 1;30(13):e202303277. doi: [10.1002/chem.202303277](https://doi.org/10.1002/chem.202303277)
- [22] Nakato T, Watanabe T, Harada T, Shintaku M, Mouri E, Tani S, Suzuki Y, Miyata H, Breu J, Kawamata J. Liquid-Crystalline Photonic Sandwich: Electroresponsive Colloids of Clay Nanosheets Loading Photofunctional Dyes. *Langmuir*. 2024 Aug 12;40(34):18297-304. doi: [10.1021/acs.langmuir.4c02246](https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02246)
- [23] Nayani K, Rai P, Bao N, Yu H, Mavrikakis M, Twieg RJ, Abbott NL. Liquid crystals with interfacial ordering that enhances responsiveness to chemical targets. *Advanced Materials*. 2018 Jul;30(27):1706707. doi: [10.1002/adma.201706707](https://doi.org/10.1002/adma.201706707)
- [24] Zhan X, Luo D, Yang KL. Multifunctional sensors based on liquid crystals scaffolded in nematic polymer networks. *RSC advances*. 2021;11(61):38694-702. doi: [10.1039/d1ra08030j](https://doi.org/10.1039/d1ra08030j)
- [25] Jiang Q, Zhao D, Wang J, Yan H, Cao S, Qiu Y, Wang H, Liao Y, Xie X. Light regulation and long-lived stability of RGB colors in cholesteric liquid crystal physical gels via a mixing strategy. *Soft Matter*. 2021;17(11):3216-21. doi: [10.1039/d0sm02283g](https://doi.org/10.1039/d0sm02283g)
- [26] Jin T, Yuan Y, Bagnani M, Wu C, Liu B, Mezzenga R. Structural colors from amyloid-based liquid crystals. *Advanced Materials*. 2024 Feb;36(8):2308437. doi: [10.1002/adma.202308437](https://doi.org/10.1002/adma.202308437)