



شناسایی یون سیانید در محیط آبی با استفاده از رنگ آزو حاوی فنانتروایمیدازول

زهرا ضمیرایی[✉]، کوروش رادمقدم^۲

۱- گروه شیمی، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	در این پژوهش، سنتز و کاربرد یک رنگ آزوی جدید حاوی گروه فنانترو[۱۰،۹] ایمیدازول به عنوان شناساگر یون سیانید (CN^-) در محیط‌های آبی مورد بررسی قرار گرفته است. یون سیانید به دلیل سمیت شدید و اثرات مخرب بر سلامت انسان و اکوسیستم‌های طبیعی، نیازمند روش‌های تشخیصی سریع، حساس و انتخابی است. رنگ سنتز شده در این مطالعه، با تغییر رنگ آشکار، گزینش پذیری و حساسیت بالایی نسبت به CN^- از خود نشان می‌دهد که قادر است این یون را حتی در حضور سایر آنیون‌های رقابتی با کارایی مطلوب شناسایی کند. بر اساس بررسی‌های طیف‌سنجی، حد تشخیص این شناساگر بر پایه تحلیل طیف جذبی، معادل 5×10^{-6} مولار و محدوده تشخیص بصری آن بر روی نوارهای آزمایش، 2×10^{-5} مولار تعیین شد. تغییر رنگ واضح از زرد کمرنگ به نارنجی همراه با جابجایی قرمز (red shift) در طیف UV-Vis، نشان‌دهنده تشکیل کمپلکس پایدار بین رنگ سنتزی و یون سیانید است. برای افزایش کاربری عملی این روش، نوارهای آزمایش با جذب رنگ سنتز شده تهیه شدند که امکان تشخیص سریع و بصری CN^- را در نمونه‌های واقعی (مانند آب‌های صنعتی و پساب‌ها) بدون نیاز به دستگاه‌های پیچیده فراهم می‌کند. روش پیشنهادی به دلیل سادگی اجرا، هزینه کم، حساسیت بالا و گزینش پذیری مطلوب، پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای محیط‌زیستی، صنعتی و کنترل کیفیت آب دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹	
دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰	
کلید واژه‌ها: رنگ‌های آزو، فنانتروایمیدازول، یون سیانید، شناساگر نوری، سمیت محیطی.	



Detection of cyanide ion in aqueous medium using an azo dye containing phenanthroimidazole

Zahra Zamiraei^{1✉}, Kurosh Rad-Moghadam²

1- Department of Chemistry, University Campus, University of Guilan, Rasht, Iran

2- Department of Chemistry, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

Article Info	Abstract
Article type: Research Article	In this study, the synthesis and application of a novel azo dye containing a phenanthro[10,9-d] imidazole group as a chemosensor for cyanide ions (CN⁻) in aqueous media were investigated. Due to its high toxicity and detrimental effects on human health and natural ecosystems, cyanide requires rapid, sensitive, and selective detection methods. The synthesized dye exhibited high selectivity and sensitivity toward CN⁻ via an optical absorption mechanism accompanied by a distinct color change, enabling effective detection even in the presence of competing anions. Spectroscopic analysis revealed a detection limit of 5×10^{-6} M based on absorption spectral analysis, while the visual detection limit using test strips was found to be 2×10^{-5} M. A noticeable color transition from pale yellow to orange, along with a red shift in the UV-Vis spectrum, indicated the formation of a stable complex between the dye and the cyanide ion. To improve the practical applicability of this method, test strips were fabricated by immobilizing the synthesized dye, allowing for rapid and visual detection of CN⁻ in real samples (such as industrial wastewater and effluents) without the need for complex instrumentation. Owing to its simplicity, low cost, high sensitivity, and excellent selectivity, the proposed method shows great potential for environmental monitoring, industrial applications, and water quality assessment.
Article history:	
Received: 2025/05/11	
Accepted: 2025/08/10	
Available online: 2025/10/12	
Keywords: Azo dyes, Phenanthroimidazole, Cyanide ion, Optical chemosensor, Environmental toxicity	

مقدمه

سیانیدها به عنوان یکی از خطرناک ترین آلاینده های محیطی و مواد سمی شیمیایی شناخته می شوند که می توانند اثرات مخربی بر سلامت انسان و اکوسیستم داشته باشند (پنجا و همکاران، ۲۰۲۱؛ دش و همکاران ۲۰۰۹). این ترکیبات به صورت طبیعی و سنتزی در صنایعی مانند معدنکاری، پتروشیمی، تولید پلاستیک و فرآوری فلزات یافت می شوند و از طریق پساب های صنعتی و انتشار گازهای سمی وارد محیط زیست می گردند (الویلو و همکاران، ۲۰۲۱؛ کویوکاک و آکچیل، ۲۰۱۳). یون سیانید (CN^-) با اختلال در سیستم تنفس سلولی و مهار سیتوکروم اکسیداز، موجب مسمومیت های حاد و حتی مرگ در موجودات زنده می شود (باود، ۲۰۰۷). با توجه به سمیت بالا و گستردگی منابع انتشار، کنترل و حذف سیانید از محیط های آلوده به یک چالش مهم محیط زیستی تبدیل شده است.

شناسایی دقیق و سریع یون های CN^- در نمونه های محیطی و بیولوژیکی به دلیل خطرات جدی آن برای سلامت انسان و اکوسیستم، از اهمیت ویژه ای برخوردار است (جسجاک و همکاران، ۲۰۱۷؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۱۷). با این حال، اندازه گیری سیانید با چالش های متعددی همراه است که دقت و کارایی روش های آنالیز را تحت تأثیر قرار می دهد. یکی از عمده ترین مشکلات، پایداری کم کمپلکس های سیانید در نمونه های آبی است که منجر به تغییر غلظت آن در طول زمان می شود (گول و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، تداخل گونه های شیمیایی مشابه مانند تیوسیانات (SCN^-) و نیتريت (NO_2^-) در برخی روش ها، منجر به نتایج مثبت کاذب یا منفی کاذب می گردد (ووگیزی و همکاران، ۲۰۱۹).

از دیگر محدودیت های مهم، مراحل آماده سازی پیچیده نمونه در برخی تکنیک ها مانند کروماتوگرافی گازی (GC) است که زمان بر بوده و احتمال خطا را افزایش می دهد (هندری-هوفر و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، حساسیت ناکافی روش های معمول مانند اسپکتروفتومتری در غلظت های بسیار پایین (زیر حد ppm) و محدودیت تجهیزات پیشرفته در آزمایشگاه های معمولی، از موانع اصلی در پایش دقیق سیانید محسوب می شوند (کاتیراوان و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به این چالش ها، توسعه روش های سریع، حساس و کم هزینه برای تشخیص سیانید همچنان یک نیاز حیاتی در علوم محیطی و سم شناسی است (لو و همکاران، ۲۰۱۲).

ترکیبات آروماتیک آزو به عنوان دسته ای مهمی از ترکیبات آلی با گروه عاملی $N=N$ شناخته می شوند که به طور گسترده در صنایع شیمیایی به عنوان رنگ و رنگدانه (هانگر، ۲۰۰۷)، شناساگرها (فاضل و حمدانی، ۲۰۲۴)، آغازگرهای واکنش رادیکالی (اتی، ۱۹۹۸)، در ساخت لوازم الکترونیکی (سینزنتی و همکاران، ۲۰۰۴) و مواد تحویل دارو (جین و همکاران، ۲۰۰۶) استفاده می شوند.

از ویژگی های مهم ترکیبات آزو، توانایی آنها در واکنش های جفت شدگی دی آزونیم است که پایه تولید رنگ های آزو محسوب می شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین، این ترکیبات در سنتز ترکیبات هتروسیکل، کاتالیزورهای فلزی و مواد پیشرفته کاربرد دارند (ونت و همکاران، ۲۰۲۲).

آزوبنزن ها اخیراً برای استفاده در زمینه های کریستال های مایع (الاسار، ۲۰۲۱)، سوئیچ های مولکولی فتوشیمیایی (بهارى و وولی، ۲۰۱۱)، نانولوله ها (کلپاک و گراسمن، ۲۰۱۱) و در تولید فیلترها (فوجی وارا و ایمورا، ۲۰۱۵) مورد توجه قرار گرفته اند. در سیستم های بیولوژیکی، ترکیبات آزوبنزن می تواند فعالیت آنزیم ها و پلی پتیدها را تغییر داده و یا اصلاح کند (لیانگ و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین ترکیبات آزو برای تشخیص دقیق تر بیماری آلزایمر به دلیل فعالیت فیزیولوژیکی آنها مورد توجه هستند زیرا می تواند به عنوان یک پروب تشخیصی برای تصویر پلاک های آمیلوئید در مغز بیماران استفاده شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۵).

یکی از کاربردهای رنگ های آزوبنزن به کارگیری آنها به عنوان سنسورهای رنگی است. سنسورهای رنگی به دلیل داشتن مزایایی همچون مقرون به صرفه بودن، پاسخ سریع، عدم نیاز به تجهیزات پیشرفته و قابل تشخیص با چشم غیر مسلح، بسیار مورد استقبال و کاربرد قرار گرفته اند. مطالعات زیادی در مورد سنسورهای رنگ سنجی بر پایه رنگ های آزو برای شناسایی یون های مس، روی، کبالت، نیکل، جیوه، فلئورید و سیانید گزارش شده است (کمالی و همکاران، ۲۰۲۲؛ آیشا و همکاران، ۲۰۲۱؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۶؛ دوس سانتوز و یوچی یاما، ۲۰۱۹).

در این مقاله، ما سنتز یک رنگ آزوی جدید حاوی فنانترو[۹،۱۰-d]ایمیدازول را برای تشخیص نوری CN^- ارائه داده‌ایم. رنگ آزوی سنتز شده، گزینش‌پذیری و حساسیت بالایی نسبت به CN^- در فاز محلول و همچنین در فاز جامد نشان داده است.

مواد و روش‌ها

مواد و دستگاه‌ها

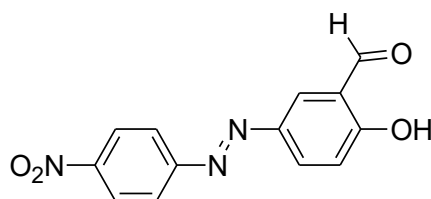
تمامی واکنشگرها، حلال‌ها و نمک‌ها (گرید آزمایشگاهی) از شرکت مرک (آلمان) خریداری شده است. طیف‌های جذبی محلول در دمای اتاق با استفاده از طیف‌سنج UV/Vis Jenway (UK, 7315) ثبت شد. طیف‌های زیر قرمز با استفاده از دستگاه تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR 8400) (Shimadzu, FT-IR)، ژاپن) به دست آمد. تعیین خلوص بسترها و نظارت بر پیشرفت واکنش با استفاده از TLC بر روی صفحات سیلیکاژل SIL G/UV F254 (شرکت مرک، آلمان) انجام شد.

روش سنتز رنگ آزو (رنگ S)

سنتز ۲-هیدروکسی-۵-(۴-نیترو-فنیل آزو)بنزالدهید

مخلوط ۴-نیتروآنیلین (۵۵۲/۰ گرم، ۴ میلی مول)، آب (۶ میلی لیتر)، و سولفوریک اسید غلیظ (۹۸٪، ۷/۵-۹ میلی مول) به آرامی (به مدت ۳۰ دقیقه) حرارت داده شد تا محلول شفاف شود. به این محلول، پس از سرد شدن در حمام یخ و رسیدن به دمای ۱ درجه سانتیگراد، محلول سدیم نیتريت (۲۷۶/۰ گرم، ۴ میلی مول) در آب (۱۰ میلی لیتر) به صورت قطره قطره در حال همزدن اضافه شد. در همین حال، دما در حدود ۱ درجه سانتیگراد نگه داشته شد. هم زدن مخلوط به مدت ۴۵ تا ۶۰ دقیقه در حمام یخ ادامه یافت تا تشکیل محلول دی‌آزونیوم تکمیل شد.

در یک ظرف دیگر، ۲-دی‌هیدروکسی بنزالدهید (۴۸۸/۰ گرم، ۴ میلی مول) در محلول سدیم هیدروکسید (۳ M، ۵ میلی لیتر) حل شد و در دمای صفر درجه سانتیگراد در حمام یخ نگهداری شد. در این مرحله، محلول دی‌آزونیوم تهیه شده به این محلول به آرامی و در مدت زمان ۳۰-۴۵ دقیقه اضافه شد درحالی‌که pH حاصل در محدوده ۷/۵-۸/۵ نگه داشته شد. پس از هم زدن در حمام یخ به مدت ۱-۲ ساعت، به محلول به دست آمده اجازه داده شد تا به دمای اتاق برسد. سپس با افزودن HCl رقیق، محلول تا pH = ۵/۵-۶/۵ اسیدی شد. رسوبات حاصل با صاف کردن، جمع‌آوری و چندین بار با آب سرد شسته و سپس در EtOH/H₂O تبلور مجدد شدند تا محصول دی‌آزو مطابق شکل ۱ بدست آید. فرآورده‌ی مورد نظر به صورت جامد به رنگ زرد پررنگ با بهره‌ی ۷۲٪ و دمای ذوب ۱۸۱/۳ °C بدست آمد.



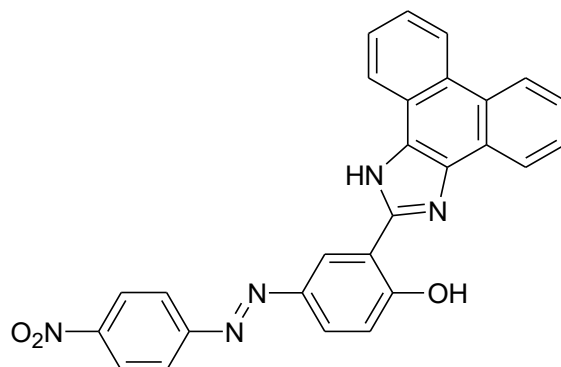
شکل ۱- ساختار ۲-هیدروکسی-۵-(۴-نیترو-فنیل آزو) بنزالدهید

FT-IR (KBr) $\bar{\nu}_{\max} \text{ cm}^{-1}$: 3105 (O-H), 2854 (C-H), 1658 (C=O), 1606-1578 (aromatic C=C), 1479 (N=N), 1282 (C-N), 1145 (C-OH), 1522 and 1339 (N-O, nitro group).

سنتز ۴-(۴-نیترو-فنیل آزو)-۲-(H۱-فنانترو[۹،۱۰-d]ایمیدازول-۲-یل) فنول (رنگ S)

رنگ S به شرح زیر تهیه شد: ۳۹/۰ گرم آمونیوم استات (۵ میلی مول) و ۱۰۴ میلی گرم ۱۰،۹-فنانتروکینون (۵/۰ میلی مول) در ۱۰ میلی لیتر استیک اسید حل شد. به این مخلوط، ۵۴/۰ گرم ۲-هیدروکسی-۵-(۴-نیترو-فنیل آزو) بنزالدهید (۲ میلی مول) اضافه و در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. پس از سرد شدن تا دمای اتاق، مخلوط در آب

سرد ریخته شد. رسوبات حاصل فیلتر و با متانول تبلور مجدد شدند. فرآورده‌ی مورد نظر به صورت جامد به رنگ دارچینی با بهره‌ی ۶۷٪ و دمای ذوب °C ۱۷۴/۱ بدست آمد (شکل ۲).



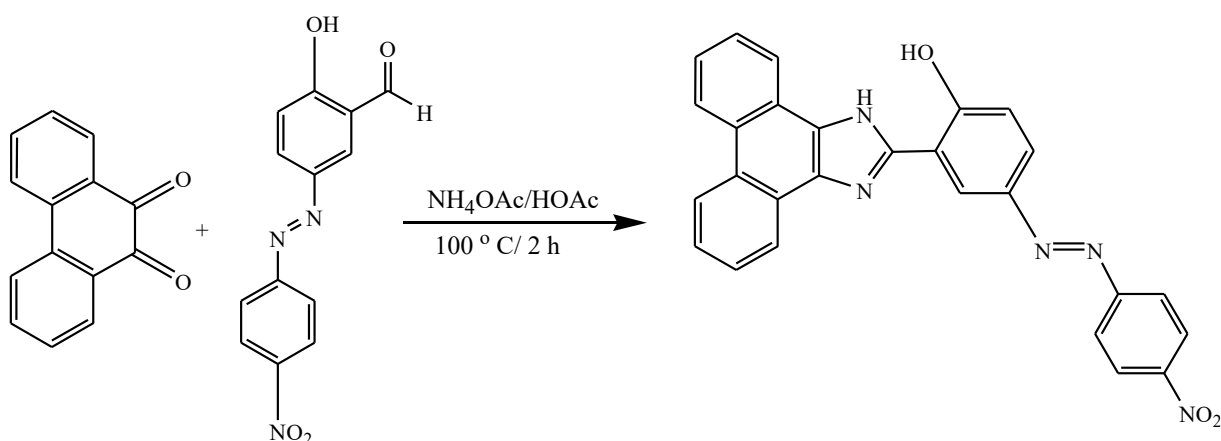
شکل ۲- ساختار ۴-(۴-نیترو-فنیل آزو)-۲-(۱H-فنانترو[۹،۱۰-d]ایمیدازول-۲-یل)فنول

FT-IR (KBr) $\bar{\nu}_{\max}$ cm⁻¹: 3103 (O-H), 3067 (N-H), 2854 (C-H), 1661 (C=N), 1607-1582 (aromatic C=C), 1479 (N=N), 1284 (C-N), 1145 (C-OH), 1521 and 1340 (N-O, nitro group).

¹H NMR (400 MHz, DMSO-*d*₆) δ 14.09 and 11.78 (s, 1H, OH), 10.38 (s, 1H, NH), 8.94-7.21 (m, 15H, Ar-H).

یافته‌های پژوهش

رنگ آزوی S مطابق شکل ۳ از طریق دی‌آزوکردن مشتقات پارا-نیترو آنیلین و سپس جفت‌شدن نمک دی‌آزونیوم حاصل با ۲-هیدروکسی بنزالدئید سنتز شد. سپس ۵-(۴-نیترو فنیل آزو)-۲-دی‌هیدروکسی بنزالدئید سنتز شده با آمونیوم استات و ۹،۱۰-فنانترو کینون وارد واکنش شده و محصولات آزوی ۴-(۴-نیترو-فنیل آزو)-۲-(۱H-فنانترو[۹،۱۰-d]ایمیدازول-۲-یل) فنول را تشکیل داد.



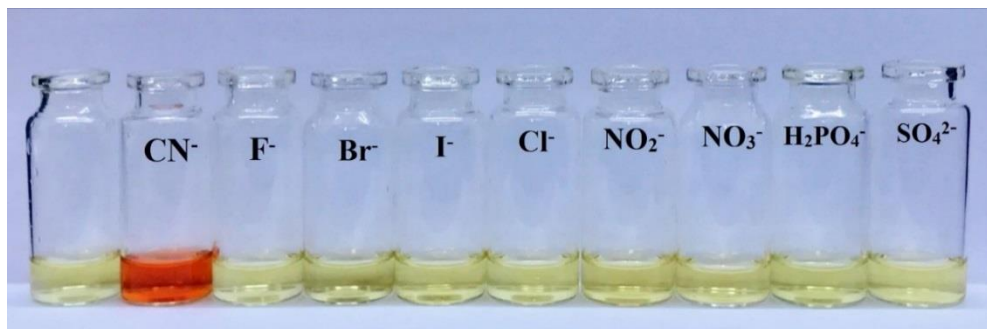
شکل ۳- مسیر سنتز ۴-(۴-نیترو-فنیل آزو)-۲-(۱H-فنانترو[۹،۱۰-d]ایمیدازول-۲-یل)فنول

بررسی نوری رنگ سنتز شده S

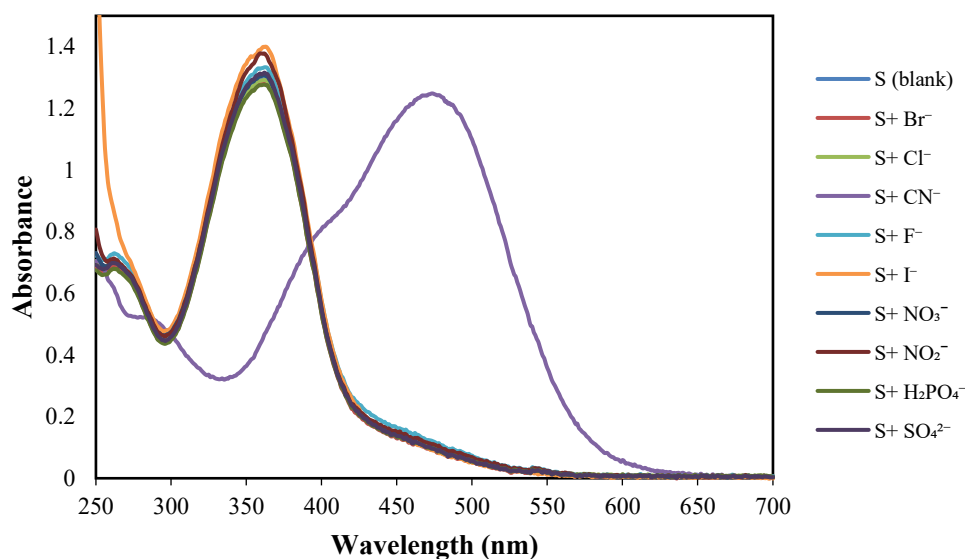
بررسی گزینش پذیری رنگ سنتزی

به‌منظور بررسی خواص شناساگری رنگ S در تشخیص آنیون‌ها، محلول استونیتریل رنگ S (5×10^{-5} M) در حضور محلول‌های آبی آنیون‌هایی مانند Br^- , Cl^- , I^- , F^- , CN^- , NO_3^- , NO_2^- و H_2PO_4^- به‌صورت نمک‌های سدیم و پتاسیم با تشخیص

چشم غیرمسلح و طیف‌سنجی جذبی UV-vis مورد آزمایش قرار گرفت. رنگ سنتزی S در حضور ده برابر مولی آنیون‌ها تغییر رنگ آشکاری را نشان نداد (شکل ۴). در مقابل یک پاسخ رنگی واضح در حضور یون CN^- مشاهده شد. رنگ S با افزودن یون CN^- ، تغییر رنگ قابل توجهی از زرد کم‌رنگ به نارنجی نشان داد. پاسخ‌های طیفی نیز با افزودن ۱۰ برابر مولی آنیون‌های مختلف به محلول رنگی با غلظت $5 \times 10^{-5} \text{ M}$ در استونیتریل مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). طیف جذبی رنگ S در استونیتریل یک باند جذبی را در ۳۶۳ نانومتر نشان داد. در حضور CN^- ، یک جابه‌جایی قرمز ($\Delta\lambda_{\text{max}}$) ۱۱۰ نانومتری در طیف جذبی رنگ S مشاهده گردید که می‌توان از این رنگ به‌عنوان یک شناساگر یون CN^- استفاده کرد.



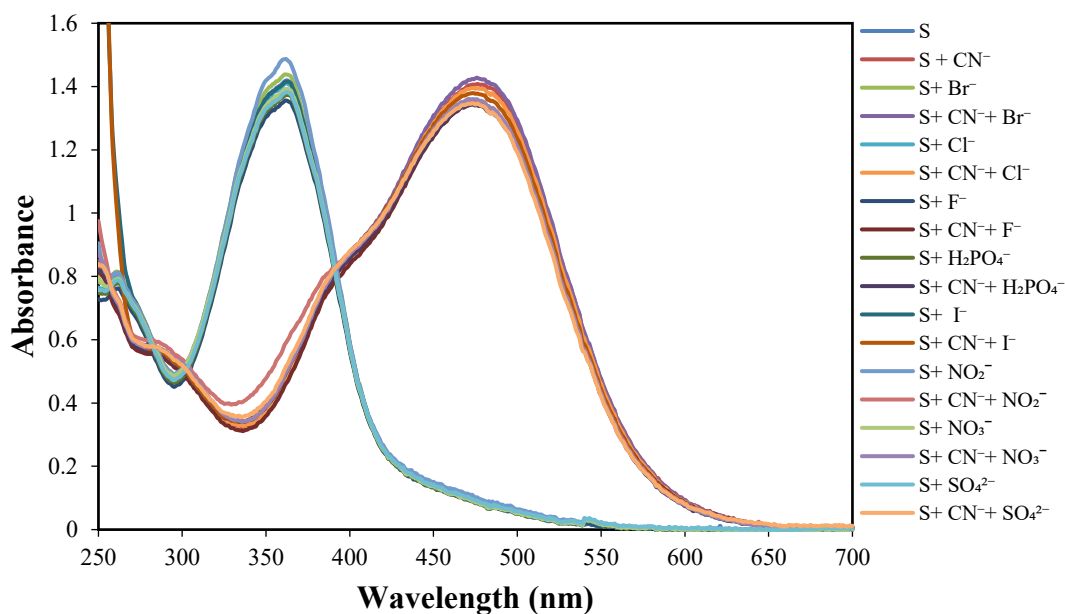
شکل ۴- تغییر رنگ محلول استونیتریل رنگ S ($5 \times 10^{-5} \text{ M}$) پس از افزودن ۱۰ equiv محلول آبی آنیون‌های مختلف.



شکل ۵- پاسخ‌های طیفی UV-vis رنگ S ($5 \times 10^{-5} \text{ M}$) در استونیتریل پس از افزودن ۱۰ کی‌والان از محلول آبی آنیون‌های مختلف.

بررسی گزینش‌پذیری نسبت به یون سیانید در حضور سایر یون‌ها

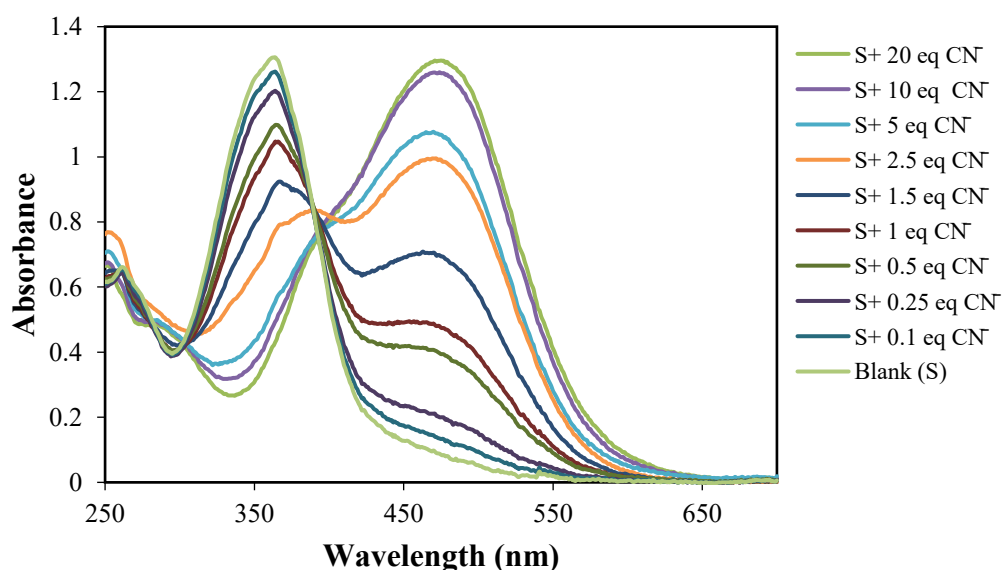
برای بررسی توانایی عملی رنگ سنتز شده نسبت به CN^- ، محلول استونیتریل رنگ S ($5 \times 10^{-5} \text{ M}$) با ۱۰ برابر مولی CN^- و اضافه کردن ۱۰ برابر مولی آنیون‌های دیگر مانند F^- ، I^- ، NO_3^- ، NO_2^- ، H_2PO_4^- ، HCO_3^- ، AcO^- و PO_4^{3-} و SO_4^{2-} مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، تنها CN^- منجر به تغییرات رنگی و طیفی در رنگ‌ها شده است، درحالی‌که هیچ تغییر مشخص طیفی با افزودن آنیون‌های دیگر به محلول رنگ S و CN^- قابل تشخیص نبود. این نتایج نشان می‌دهد که رنگ S می‌تواند به‌عنوان حسگرهای رنگی منحصر بفرد برای شناسایی یون CN^- حتی در حضور سایر آنیون‌ها در استونیتریل استفاده شوند.



شکل ۶- تغییرات طیف جذبی رنگ S ($5 \times 10^{-5} \text{ M}$) در استونیتریل نسبت به ۱۰ برابر مولی CN^- در رقابت با سایر آنیون‌ها

تیتراسیون غلظت‌های مختلف یون سیانید

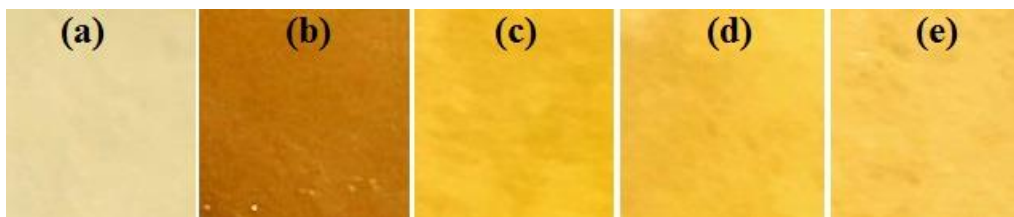
به منظور سنجش خواص شناساگری رنگ S، تیتراسیون اسپکتروفوتومتری UV-vis با افزودن محلول‌های آبی CN^- به صورت نمک پتاسیم به محلول استونیتریل رنگ S ($5 \times 10^{-5} \text{ M}$) انجام شد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، رنگ S دارای یک پیک جذبی با محوریت ۳۶۳ نانومتر است که می‌تواند به انتقال $\pi \rightarrow \pi^*$ نسبت داده شود. پس از افزودن یون CN^- به محلول رنگ، شدت باند در ۳۶۳ نانومتر به آرامی کاهش یافت، و به طور همزمان یک نوار جذبی جدید در ناحیه ۴۷۳ نانومتر با افزودن تنها ۰/۱ اکویالان یون CN^- شروع به ظاهر شدن کرد. در نتیجه کمترین غلظت قابل تشخیص طیفی $5 \times 10^{-6} \text{ M}$ می‌باشد. علاوه بر این، یک نقطه ایزوستیک در ۳۹۳ نانومتر وجود داشت که نشان‌دهنده یک کمپلکس پایدار با نسبت استوکیومتری مشخص بین رنگ S و آنیون CN^- است.



شکل ۷- تغییرات طیف جذبی محلول استونیتریل رنگ S ($5 \times 10^{-5} \text{ M}$) پس از افزودن تدریجی محلول آبی CN^- .

کاربرد حالت جامد رنگ S در تشخیص سیانید

برای سهولت کاربرد و بررسی سنجش مستقیم چشم غیرمسلح نسبت به CN^- ، نوارهای آزمایش با ابعاد ۳ در ۳ سانتیمتر با غوطه ور سازی آن در محلول استونیتریل رنگ S (یک میلی مولار) و خشک کردن آن‌ها در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد تهیه شد. زمانی که نوارهای آزمایش حاوی رنگ S در معرض محلول های آبی CN^- با غلظت‌های مختلف قرار گرفتند، تغییر رنگ آشکاری را نشان دادند (شکل ۸). این نتایج اثبات می‌کند که نوار آزمایش رنگ S به عنوان یک شناساگر رنگ سنجی ساده و کارآمد می‌تواند برای تشخیص سریع یون های CN^- در نمونه های واقعی بدون نیاز به ابزار آنالیز مناسب باشد.

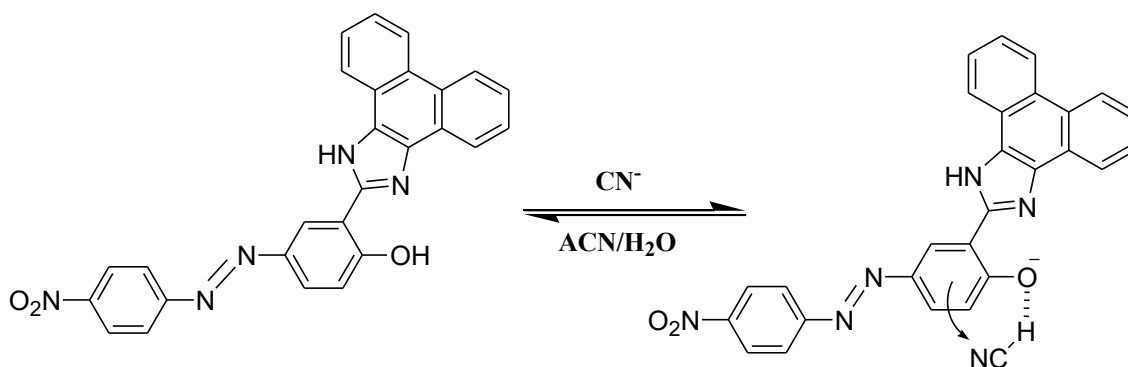


شکل ۸- تغییر رنگ نوارهای تست رنگ S تهیه شده در استونیتریل در مقابل غلظت‌های مختلف CN^-

(a) ۰، (b) 2×10^{-3} ، (c) 5×10^{-4} ، (d) 2×10^{-4} ، (e) 2×10^{-5} مولار.

مکانیسم‌های پیشنهادی واکنش‌ها

مکانیسمی که بر پایه طیف‌بینی رنگ S با افزودن سیانید در استونیتریل پیشنهاد می‌شود در شکل ۹ آورده شده است. بررسی دقیق طیف‌های UV-Vis به‌دست‌آمده، تغییرات قابل‌توجهی را در پیک‌های جذبی با افزودن CN^- آشکار می‌سازد، که نشان می‌دهد CN^- در یک انتقال بار با رنگ S در کنار پیوند هیدروژنی با گروه O-H فنولی آن شرکت می‌کند (محمدی و کیانفر، ۲۰۱۸). احتمالاً، پروتونه شدن CN^- با رنگ سنتزی و پیوند هیدروژنی $H-C \equiv N$ حاصل با باز مزدوج رنگ S سبب یک انتقال بار موثر بین رنگ آزو و CN^- می‌شود.



شکل ۹- مکانیسم واکنش رنگ S نسبت به CN^- در حلال استونیتریل

نتیجه گیری

در این پژوهش، یک رنگ آزوی جدید سنتز شد که به عنوان شناساگر نوری یون سیانید (CN^-) عمل می‌کند. این رنگ سنتزی با تغییر رنگ واضح و پاسخ طیفی مشخص، امکان تشخیص سریع و گزینش پذیر CN^- را حتی در حضور سایر آنیون‌ها فراهم می‌سازد. کمترین غلظت شناسایی شده توسط رنگ سنتزی براساس نمودار طیفی معادل 5×10^{-6} مولار و در نوار تشخیصی 2×10^{-5} مولار است. نتایج نشان داد که این روش از حساسیت بالایی برخوردار است و میتواند برای پایش محیط‌های آبی آلوده به سیانید مورد استفاده قرار گیرد. توسعه نوارهای آزمایش بر پایه این رنگ نیز امکان تشخیص بصری و کم هزینه CN^- را در نمونه های

واقعی میسر می‌سازد. با توجه به چالشهای موجود در روشهای سنتی تشخیص سیانید، این پژوهش گامی مهم در جهت ارائه راه حلی عملی، سریع و مقرون به صرفه برای کنترل این آلاینده خطرناک محسوب می‌شود.

منابع

- Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., Buitrón, G., Thangarasu-Sarasvathi, P., & Rosano-Ortega, G. (2021). Biological treatment for the degradation of cyanide: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1418-1433.
- Athey, R. D. (1998). Free radical initiator basics. *European coatings journal*, (3), 146-149.
- Aysha, T. S., Mohamed, M. B. I., El-Sedik, M. S., & Youssef, Y. A. (2021). Multi-functional colorimetric chemosensor for naked eye recognition of Cu^{2+} , Zn^{2+} and Co^{2+} using new hybrid azo-pyrazole/pyrrolinone ester hydrazone dye. *Dyes and Pigments*, 196, 109795.
- Baud, F. J. (2007). Cyanide: critical issues in diagnosis and treatment. *Human & experimental toxicology*, 26(3), 191-201.
- Beharry, A. A., & Woolley, G. A. (2011). Azobenzene photoswitches for biomolecules. *Chemical Society Reviews*, 40(8), 4422-4437.
- Chakraborty, S., Paul, S., Roy, P., & Rayalu, S. (2021). Detection of cyanide ion by chemosensing and fluorosensing technology. *Inorganic Chemistry Communications*, 128, 108562.
- Cisnetti, F., Ballardini, R., Credi, A., Gandolfi, M. T., Masiero, S., Negri, F., ... & Spada, G. P. (2004). Photochemical and electronic properties of conjugated bis (azo) compounds: an experimental and computational study. *Chemistry—A European Journal*, 10(8), 2011-2021.
- Dash, R. R., Gaur, A., & Balomajumder, C. (2009). Cyanide in industrial wastewaters and its removal: a review on biotreatment. *Journal of hazardous materials*, 163(1), 1-11.
- Dos Santos, C. H., Uchiyama, N. M., & Bagatin, I. A. (2019). Selective azo dye-based colorimetric chemosensor for F^- , CH_3COO^- and PO_4^{3-} . *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 210, 355-361.
- Fadhel, A. M., & Hamdani, A. A. S. (2024). Al Historical Background, Literature Review on the Synthesis and Applicability of Azo-Dye Compounds: An Extensive Review. *Adv. J. Chem. Sect. A*, 7, 687-724.
- Fujiwara, M., & Imura, T. (2015). Photo induced membrane separation for water purification and desalination using azobenzene modified anodized alumina membranes. *Acs Nano*, 9(6), 5705-5712.
- Gul, Z., Khan, S., Ullah, S., Ullah, H., Khan, M. U., Ullah, M., & Altaf, A. A. (2024). Recent development in coordination compounds as a sensor for cyanide ions in biological and environmental segments. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(3), 508-528.
- Hendry-Hofer, T. B., Ng, P. C., Witeof, A. E., Mahon, S. B., Brenner, M., Boss, G. R., & Beberta, V. S. (2019). A review on ingested cyanide: risks, clinical presentation, diagnostics, and treatment challenges. *Journal of medical toxicology*, 15(2), 128-133.
- Hunger, K. (Ed.). (2007). *Industrial dyes: chemistry, properties, applications*. John Wiley & Sons.
- Jain, A., Gupta, Y., & Jain, S. K. (2006). Azo chemistry and its potential for colonic delivery. *Critical Reviews™ in Therapeutic Drug Carrier Systems*, 23(5).
- Jaszczak, E., Polkowska, Ż., Narkowicz, S., & Namieśnik, J. (2017). Cyanides in the environment—analysis—problems and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 15929-15948.
- Kamali, S., Orojloo, M., Arabahmadi, R., & Amani, S. (2022). Design and synthesis of a novel azo-Schiff base ligand: Its application as a colorimetric chemosensor for selective detection of Ni^{2+} and CN^- in aqueous-organic media, computational studies, antimicrobial properties, and molecular logic circuits. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 433, 114136.
- Kathiravan, A., Sengottian, S., Puzyn, T., Gopinath, P., Ramasubramanian, K., Susila, P. A., & Jhonsi, M. A. (2022). Rapid colorimetric discrimination of cyanide ions—mechanistic insights and applications. *Analytical Methods*, 14(5), 518-525.
- Kolpak, A. M., & Grossman, J. C. (2011). Azobenzene-functionalized carbon nanotubes as high-energy density solar thermal fuels. *Nano letters*, 11(8), 3156-3162.
- Kuyucak, N., & Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*, 50, 13-29.
- Liang, X., Asanuma, H., & Komiyama, M. (2002). Photoregulation of DNA triplex formation by azobenzene. *Journal of the American Chemical Society*, 124(9), 1877-1883.

- Lou, X., Ou, D., Li, Q., & Li, Z. (2012). An indirect approach for anion detection: the displacement strategy and its application. *Chemical Communications*, 48(68), 8462-8477.
- Mohammadi, A., & Kianfar, M. (2018). A simple colorimetric chemosensor with highly performance for detection of cyanide and copper ions and its practical application in real samples. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 367, 22-31.
- Mohammadi, A., Dehghan, Z., Rassa, M., & Chaibakhsh, N. (2016). Colorimetric probes based on bioactive organic dyes for selective sensing of cyanide and fluoride ions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 230, 388-397.
- Alaasar, M. (2016). Azobenzene-containing bent-core liquid crystals: an overview. *Liquid Crystals*, 43(13-15), 2208-2243.
- Panja, S., Panja, A., & Ghosh, K. (2021). Supramolecular gels in cyanide sensing: a review. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(2), 584-602.
- Vogiazzi, V., De La Cruz, A., Mishra, S., Shanov, V., Heineman, W. R., & Dionysiou, D. D. (2019). A comprehensive review: Development of electrochemical biosensors for detection of cyanotoxins in freshwater. *ACS sensors*, 4(5), 1151-1173.
- Wen, J., Zhao, W., Gao, X., Ren, X., Dong, C., Wang, C., ... & Li, J. (2022). Synthesis of [1, 2, 3] triazolo-[1, 5-a] quinoxalin-4 (5 H)-ones through photoredox-catalyzed [3+ 2] cyclization reactions with hypervalent iodine (III) reagents. *The Journal of Organic Chemistry*, 87(6), 4415-4423.
- Zhang, D., & Jin, W. (2012). Highly selective and sensitive colorimetric probe for hydrogen sulfide by a copper (II) complex of azo-dye based on chemosensing ensemble approach. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 90, 35-39.
- Zhang, L., Ren, Y., Liu, W., Wang, A., & Zhang, T. (2018). Single-atom catalyst: a rising star for green synthesis of fine chemicals. *National Science Review*, 5(5), 653-672.
- Zhang, Y., Qian, C., Chen, Y., He, W., & Guo, Z. (2025). Phototherapy via Modulation of β -Amyloid in Combating Alzheimer's Disease. *Aggregate*, 6(5), e70020.