

مقاله پژوهشی

ارزیابی خواص فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت NiAl-LDH/CeO₂ دو جزئی ترکیب

مریم نیک‌نام^۱، ابراهیم قاسمی^{۲*}، نرگس یوسفی لیمائی^۳، محمد باوند وند چالی^۱ و ارغوان کاظمی نافجی^۱

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی، تهران، ایران

۲- گروه پژوهشی رنگ‌های سرامیکی و لعاب، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

۳- گروه پژوهشی محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

چکیده

در این تحقیق، بررسی عملکرد فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت دو جزئی هیدروکسید مضاعف لایه‌ای نیکل-آلومینیوم/اکسید سریم (NiAl-LDH/CeO₂) برای رنگبری رودامین B مورد بررسی قرار گرفت. اکسید سریم با روش سل ژل سنتز شد. برای ساخت نانوکامپوزیت دوتایی از روش هیدروترمال انجام شد. محصول تهیه شده توسط آزمون‌های پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مشخصه‌یابی شد. نتایج بدست آمده حاکی از سنتز مطلوب ترکیب NiAl-LDH/CeO₂ می‌باشد. نتایج حاصل از رنگبری که با دستگاه اسپکتروفوتومتر انجام شد نشان داد که نانوکامپوزیت تهیه شده قادر به حذف رنگزای رودامین B با راندمان حدود ۹۰٪ در مدت زمان ۳۶۰ دقیقه است. نتایج بدست آمده از این تحقیق، قابلیت کاربرد نانوکامپوزیت NiAl-LDH/CeO₂ را در فرآیندهای تصفیه آب و پساب برای رنگبری تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: رودامین B، NiAl-LDH، CeO₂، نانوکامپوزیت، رنگبری.

۱- مقدمه

قابل توجهی قرار دارد. آلودگی منابع آب و بحران‌های انرژی، مهمترین مسائل دنیای مدرن امروزی را تشکیل می‌دهد [۶، ۷]. روش‌های گوناگونی از جمله جذب سطحی، جداسازی غشایی، انعقاد-لخته‌زایی، ازناسیون، تجزیه فوتوکاتالیستی و غیره برای تصفیه پساب‌های نساجی وجود دارند [۲]. مواد فوتوکاتالیستی نیمه‌رسانای سنتی، محدودیت‌هایی از جمله استفاده کم از نور مرئی به دلیل

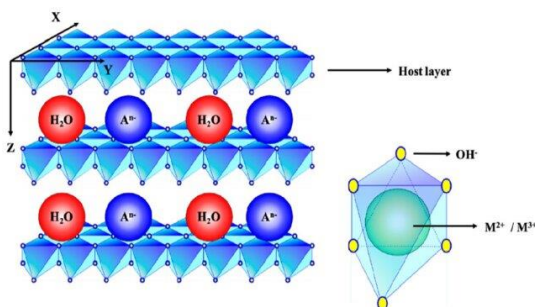
فناوری‌های نانو در علوم نانومواد توجه چشمگیری را به دلیل پتانسیل خود برای مهندسی نانومواد با ویژگی‌های مناسب برای کاربردهای متنوع تصفیه آب به خود جلب کرده‌اند [۱-۵]. ذخیره آب جهان به دلیل افزایش صنعتی شدن، افزایش تقاضا و کاهش ذخایر به دلیل آلودگی، تحت فشار

* عهده‌دار مکاتبات: ابراهیم قاسمی

نشانی: تهران، پژوهشگاه رنگ، گروه پژوهشی رنگ‌های سرامیکی و لعاب

تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۴۴۱۸۴، دورنگار: ۰۲۱-۲۲۹۴۴۱۸۴، پست الکترونیکی: eghasemi@icrc.ac.ir

و غلظت فلزات، می‌توان بند گپ را می‌توان در محدوده ۲ تا $3/4 \text{ eV}$ کنترل کرد [۱-۳]. این مواد دارای ظرفیت جذب بالا و بند گپ قابل تنظیم برای تبادل کاتیون-آنیون هستند و می‌توانند مکان‌های واکنش احیا و اکسیداسیون را برای تولید H_2 و O_2 از شکافت آب فراهم کنند. به طور کلی، این هیدروکسیدها مواد نیمه رسانا هستند که واکنش‌های الکتروشیمیایی را تحت تابش نور در سیستم واکنش تحریک می‌کند [۱۴].



شکل ۱: ساختار شماتیک هیدروکسید مضاعف لایه‌ای [۱۰].

روش‌های مختلفی برای تهیه هیدروکسید مضاعف لایه‌ای (LDH)، گزارش شده است. روش هم‌رسوبی و هیدروترمال با عملیات ساده‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای تولید انبوه مساعدتر هستند. روش هیدروترمال زمانی موثر است که گونه بین لایه‌ای LDH یک ترکیب آلی باشد [۱۵]. اخیراً، هیدروکسیدهای مضاعف لایه‌ای، مانند NiAl-LDH ، NiMn-LDH و NiCo-LDH ، به دلیل ترکیبات قابل تنظیم، ساختارهای لایه‌ای و فعالیت‌های الکتروشیمیایی بالا، توجه زیادی را در مواد الکتروکاتالیزور ابرخازن به خود جلب کرده‌اند. کاتالیست‌های تهیه شده از پیش‌ماده‌های LDH می‌توانند بطور موثر از عیب‌های آماده‌سازی جلوگیری کنند [۱۶-۲۱]. با بهره‌مندی از فراوانی عناصر زمین و فعالیت‌های مربوط به تولید اکسیژن از آب (OER) بسیار فعال، LDH‌های مبتنی بر Ni مانند NiFe-LDH ، NiCo-LDH ، NiMn-LDH ، NiFeMn-LDH ، NiTi-LDH و NiV-LDH به عنوان کاندیدهای مفید بعدی در نظر گرفته می‌شوند [۲۲].

شکاف‌های باند وسیع را دارند. فوتوکاتالیست نیمه‌هادی می‌تواند از انرژی خورشیدی تجدیدپذیر برای شروع فرآیندهای احیای شیمیایی مانند تخریب آلاینده‌ها و تولید هیدروژن، حل مسائل زیست‌محیطی و انرژی به روشی پاک، کم‌هزینه و پایدار استفاده کند [۳]. طبق اعلام سازمان جهانی بهداشت (WHO)، حد مجاز بسیاری از فلزات سنگین سمی نظیر سرب، آرسنیک، مس، کادمیم، روی و نیکل کمتر از $0/1 \text{ mg/lit}$ است. زدودن فلزات سنگین سمی از پساب‌های صنعتی بسیار مهم است که اثرات نامطلوبی بر بدن انسان داشته است. رنگ‌ها، ترکیباتی که به طیف وسیعی از مواد، از جمله کاغذ، منسوجات و لوازم آرایشی رنگ می‌بخشند، می‌توانند طبیعی یا مصنوعی باشند [۵-۷]. از میان روش‌های موجود، تهیه و کاربرد فوتوکاتالیست‌های مختلف بسیار پر اهمیت است. یکی از فوتوکاتالیست‌هایی که کاربرد آن در دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است هیدروکسیدهای مضاعف لایه‌ای (LDHs) هستند. شکل ۱، تصویر ساده‌ای از ساختار LDH را نشان می‌دهد [۸]. این مواد دارای ساختار لایه‌ای هستند که لایه‌ها متشکل هیدروکسیدهای دو فلز دو و سه ظرفیتی و بین لایه‌ها آنیون‌های OH^- ، نیترات (NO_3^-) یا کربنات (CO_3^{2-}) قرار می‌گیرد. LDH‌ها نسبت به سایر فوتوکاتالیست‌ها دارای مزایایی از جمله جذب نور و پایداری بالاتری هستند که به دلیل مورفولوژی لایه‌ای آن می‌باشد [۹]. LDH‌ها با فرمول $[\text{M}^{2+}_{1-x}\text{M}^{3+}_x(\text{OH})_2] (\text{A}^{n-})_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}$ هستند که در آن M^{2+} فلز دو ظرفیتی، M^{3+} فلز سه ظرفیتی، A^{n-} آنیون بین لایه‌ای و M و n مقدار x بین $0/2$ تا $0/33$ قرار دارد. این نسبت x به این صورت که $0/5 > x > 0/1$ قرار دارد [۱۰]. هیدروکسیدهای لایه‌ای دوتایی ترکیبات هیدروکسید هستند که ترکیبات آن حاوی لایه‌های اصلی با اکسیدهای فلزی دو و سه ظرفیتی است که داخل لایه‌ها آنیون‌ها استقرار دارند. LDH‌ها بطور گسترده در فرآیندهایی نظیر کاهش دی‌اکسید کربن، تولید هیدروژن و در رنگبری به کار رفته‌اند [۱۱-۱۳]. در ساختار LDH با تنظیم و کنترل نوع

آسان تغییر ظرفیت، بطور گسترده به عنوان یک فوتوکاتالیست کارآمد استفاده شده است [۲۵،۲۶]. بطور خاص، روش هم‌رسوبی و روش سل-ژل بهتر نتیجه می‌دهند و مقالات زیادی راجع به اکسید سریم و خاصیت فوتوکاتالیست در کنار ترکیبات دیگر بیان شده است [۷،۲۷]. مسئله‌ای که در موضوع فوتوکاتالیست‌ها وجود دارد دستیابی به سامانه‌های پر بازده با هزینه ساخت نسبتاً پایین و آسان بودن روش ساخت است. در خصوص استفاده از ترکیب دوجزیی NiAl-LDH/CeO_2 برای رنگبری تاکنون هیچ مقاله‌ای منتشر نشده است و این کار برای اولین بار انجام می‌شود.

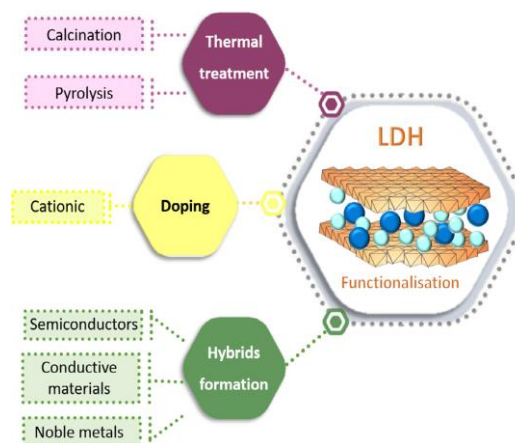
در انجام این کار پژوهشی برای رنگبری، از رودامین B استفاده شده است. رودامین B با فرمول مولکولی $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$ یک رنگزای کاتیونی پرکاربرد بر پایه آنتراکینون است [۲۸]. رنگزای رودامین B یک رنگزای رایج محلول در آب است که یکی از قدیمی‌ترین رنگزاهای مصنوعی مورد استفاده در صنایع غذایی و رنگرزی پارچه است [۲۹]. در این مطالعه، نانوکامپوزیت دو جزئی NiAl-LDH/CeO_2 با استفاده از روش هیدروترمال سنتز و خواص فوتوکاتالیستی آن در تجزیه فوتوکاتالیستی رنگزای رودامین B مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- فعالیت‌های تجربی

مواد مورد استفاده شامل نیترات نیکل شش آبه با فرمول $\text{Ni(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، نیترات آلومینیوم نه آبه با فرمول $\text{Al(NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ، نیترات سریم شش آبه با فرمول $\text{Ce(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، اوره، هیدروکسید سدیم، آمونیاک، نیترات سدیم، اسید کلریدریک و رودامین B با فرمول $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$ بود. مواد مورد استفاده متعلق به شرکت مرک بود.

برای تهیه LDH با در نظر گرفتن نسبت مولی نیکل به آلومینیوم ۲، ابتدا مقادیر $3/1 \text{ g}$ نیترات نیکل در داخل 50 cc آب دی یونیزه در داخل یک بشر حل شد. همچنین 2 g نیترات آلومینیوم جداگانه در داخل 50 cc آب دی یونیزه در

مزایای ترکیب LDHs با فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) در تصفیه پساب به شرح زیر است: [۲۳]، الف- LDHها به راحتی سنتز می‌شوند و می‌توانند یون‌های فلزی مختلف را برای بهبود خاصیت کاتالیستی جایگزین کنند. ب- ظرفیت بافر آن‌ها می‌تواند pH را در حد خنثی نگه دارد که برای تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر مختلف نظیر سولفات‌ها و رادیکال‌های هیدروکسیل مفید است. ج- حضور گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر که می‌تواند اثر منفی بسترهای همزیستی مانند آنیون‌های معدنی را کاهش دهد. د- ساختار پایدار کاتالیست مبتنی بر LDH می‌تواند رسوب کردن فلز را کاهش دهد و قابلیت استفاده مجدد را افزایش دهد. LDHها می‌توانند با مواد دیگر جفت شوند مانند نیمه‌هادی‌ها و مواد مغناطیسی برای تشکیل نانوکامپوزیت‌های جدید مبتنی بر LDH یا کاتالیست‌های اصلاح شده که برای افزایش پایداری، رسانایی، عملکرد کاتالیستی و نامناسبی هستند.



شکل ۲: نمای کلی از فرآیندهای بهینه‌شده برای مواد مبتنی بر لایه‌های هیدروکسید دوتایی [۱۱].

در سابقه استفاده از نانوکامپوزیت NiAl-LDH/CeO_2 به عنوان کاتالیست برای رنگبری موردی دیده نمی‌شود. ولی این ترکیب برای جذب CO_2 گزارش شده است [۲۴]. CeO_2 هم به دلیل ویژگی‌های اکسید فلزی خاکی کمیاب به دلیل فعالیت بالا، هزینه پایین، خواص فیزیکی، شیمیایی و سازگار با محیط‌زیست، ظرفیت بالای ذخیره اکسیژن و تبدیل

پودر CeO_2 تهیه شده نیز به اتوکلاو افزوده شد. در اتوکلاو، در دمای 170°C به مدت ۱۰ ساعت قرار داده شدند. در پایان کار، کامپوزیت تهیه شده در اتوکلاو با استفاده از کاغذ صافی و آب مقطر چنین بار شستشو داده شد. سپس در آون به مدت ۶ تا ۷ ساعت خشک شد.

۳- نتایج و بحث

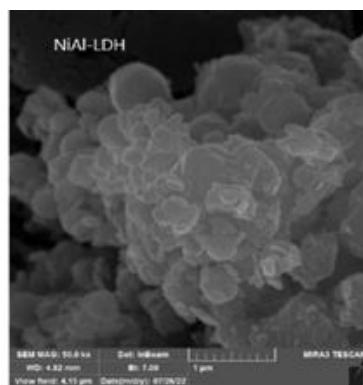
شکل ۳-الف نتایج پراش اشعه ایکس نمونه NiAl-LDH را نشان می‌دهد. پیک‌های پراش مشاهده شده در زوایای $10/5^\circ$ درجه، $20/2^\circ$ درجه، $35/3^\circ$ درجه، $61/7^\circ$ درجه و $63/1^\circ$ درجه به ترتیب نشان‌دهنده بازتاب صفحه کریستالی مربوط به صفحات (۰۰۳)، (۰۰۶)، (۰۱۲)، (۱۱۰) و (۱۱۳) که با کارت مرجع JCPDS شماره 035-0964 مطابقت دارد. شکل ۳-ب پراش اشعه X مربوط به اکسید سریم را نشان می‌دهد. پیک‌های اکسید سریم در زوایای پراش $28/8^\circ$ درجه، $33/2^\circ$ درجه، $47/7^\circ$ درجه و $56/5^\circ$ درجه، مربوط به صفحات کریستالی (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) مشاهده می‌شود که با کارت مرجع JCPDS شماره ۳۴-۳۹۴ مطابقت دارد. شکل ۳-ج، پراش اشعه ایکس مربوط به نانو کامپوزیت دو جزئی NiAl-LDH/CeO_2 را نشان می‌دهد. وجود پیک‌های اصلی هر دو ترکیب، نشان‌دهنده تشکیل موفق کامپوزیت دوتایی مورد نظر است.

نتایج بررسی ریزساختاری توسط روش‌های FESEM و TEM برای نمونه‌های LDH و CeO_2 در شکل ۳ آورده شده است. شکل ۳-الف و ب به ترتیب تصاویر ریزساختاری FESEM و TEM از LDH را نشان می‌دهد. شکل ورقه‌ای ذرات این نمونه بخوبی با ساختار LDH تطابق دارد و اندازه ذرات حدود 200 nm است. از طرف دیگر شکل ۳-ب تصاویر ریزساختاری FESEM و TEM از CeO_2 را نشان می‌دهد. بر اساس این تصاویر می‌توان گفت که ذرات CeO_2 دارای شکل شبه کروی و اندازه کمتر از 50 nm است.

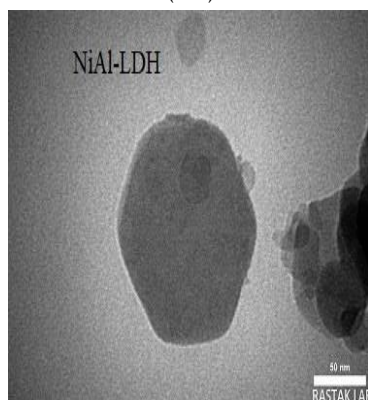
داخل بشر حل شد. محلول هیدروکسید سدیم $0/5$ مولار تهیه شد. در ادامه کار، هر دو محلول داخل یک بالن بزرگ تر افزوده شده و تحت حرارت 40°C قرار داده شدند و pH ترکیب حاصل هم با افزودن هیدروکسید سدیم در محدوده ۸ تا ۹ تنظیم شد. محلول حاصل بلافاصله به ظرف اتوکلاو که جنس بدنه بیرون ضد زنگ و ارتفاع محفظه بیرون 12 cm و قطر بیرونی 9 cm و جنس محفظه داخلی از پلی اتیلن با قطر بیرونی $6/7\text{ cm}$ و قطر داخلی 4 cm و کاملاً تمیز شده بود انتقال داده شد. در محفظه فلزی با پیچ‌های تعبیه شده سفت بسته شد تا در اثر اعمال حرارت و فشار به بیرون نریزد. سپس در دمای 110°C در زمان ۱۲ ساعت در آون قرار گرفت. پس از سرد شدن، اتوکلاو تخلیه و مراحل شستشوی محلول با آب مقطر و بر روی کاغذ صافی چندین بار انجام شد. سپس ترکیب حاصل در آون به مدت ۷ ساعت و در دمای 70°C قرار گرفت.

۳ گرم پودر نیترات سریم ۶ آبه در داخل 500 cc آب دی یونیزه ریخته و با استفاده از استیرر و مگنت به مدت زمان ۳۰ تا ۴۵ دقیقه هم زده شد [۳۰]. سپس محلول NH_4OH که حاوی NH_3 با غلظت 25% بود و با استفاده از پیپت به ترکیب افزوده شد تا رسوب هیدروکسید سریم تشکیل شود. این افزودن تا زمانی که pH به ۱۰ برسد ادامه داشت. محلول با استفاده از کاغذ صافی، شستشو داده شد تا همه نیترات و آمونیاک حذف شود. رسوب حاصل به ظرف محلول اوره $0/1$ مولار انتقال داده شد و در این مرحله از محلول HCl با غلظت 10% برای تنظیم pH در محدوده ۲ استفاده شد. سل حاصل با کمک کاغذ صافی و آب مقطر سه مرتبه شستشو داده شد و ۴ ساعت در دمای 100°C در آون خشک شد و با سرعت ۵ درجه در دقیقه در دمای 500°C به مدت ۲ ساعت در کوره مافلی قرار داده شد.

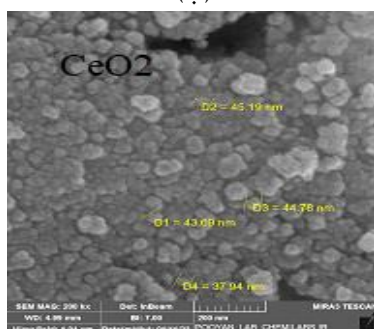
برای سنتز کامپوزیت دو تایی، محلول‌هایی مشابه فرآیند سنتز LDH آماده و در داخل اتوکلاو ریخته شد. مقدار مناسبی از



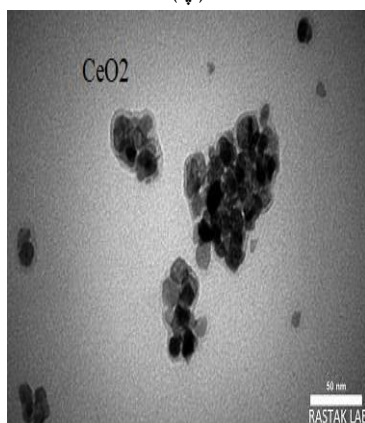
(الف)



(ب)

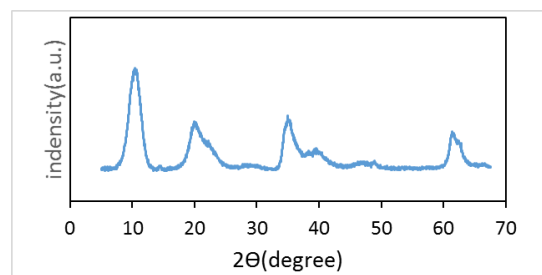


(پ)

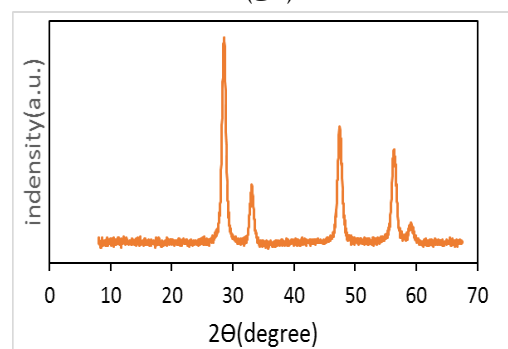


(ت)

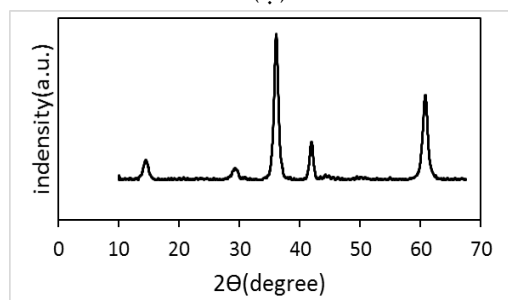
شکل ۴: نتایج بررسی ریزساختاری. الف- تصویر FE-SEM برای نمونه LDH ب- تصویر FE-SEM برای نمونه CeO₂ پ- تصویر TEM از نمونه LDH و ت- تصویر TEM از نمونه CeO₂.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۳: نتایج آزمون پراش اشعه ایکس الف: نمونه NiAl-LDH خالی ب: نمونه CeO₂ خالی پ: نانوکامپوزیت NiAl-LDH/CeO₂.

نتایج ذکر شده در این بخش مربوط عملکرد فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت دوتایی NiAl-LDH/CeO₂ است.

درصد تجزیه فوتوکاتالیستی رنگزا با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد [۳۱-۳۳].

$$\text{Degradation}\% = (1 - (C_f/C_0)) \times 100,$$

C₀: غلظت اولیه رودامین B

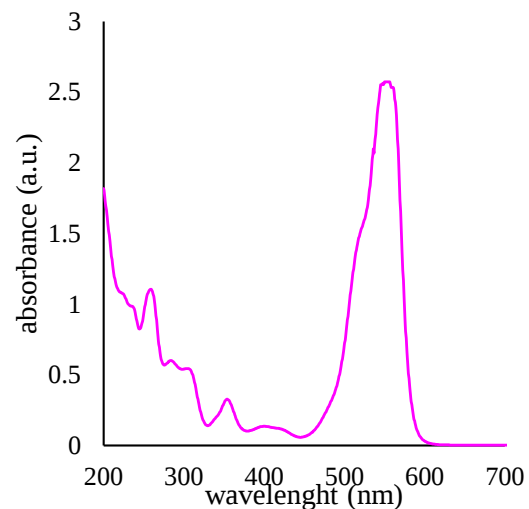
C_f: غلظت نهایی رودامین B

برای انجام کار رنگبری یک لامپ UV با توان ۱۵ W استفاده شده است. pH بهینه ۳/۵ محلول برای این کار استفاده شده است. شکل ۵-الف، نمودار جذب ماده رنگزای رودامین B با غلظت ۲۰ mgL⁻¹ را نشان می‌دهد. این رنگزا دارای طول موج بیشینه ۵۵۶ می‌باشد.

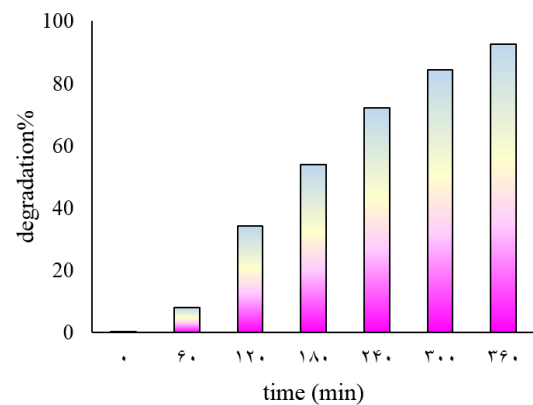
ارائه شده مربوط به شرایط بهینه شامل 0.075 g نانوکامپوزیت و رنگزای رودامین B با غلظت 20 mgL^{-1} است. نتایج حاکی از میزان عملکرد فوتوکاتالیست در رنگبری به میزان حدود 92% در مدت زمان 360 دقیقه است. سینتیک تجزیه فوتوکاتالیستی توسط سینتیک مرتبه اول مطالعه شد که نتایج مربوطه در شکل ۵-ج آمده است. در مقایسه با نتایج دیگران، نتیجه بدست آمده نسبت به نتایج حاصل از کارهای دیگران که ترکیبات بر پایه CeO_2 یا LDH را ارائه داده‌اند [$15, 27, 30$] نتیجه قابل قبولی است. با توجه به آسان بودن روش ساخت ترکیب دوتایی NiAl-LDH/CeO_2 این ترکیب برای کاربری رنگبری توصیه می‌شود. وقتی فوتون‌هایی با انرژی‌های مساوی یا بزرگ‌تر از شکاف نواری جذب می‌شوند، الکترون‌های باند ظرفیت به نوار هدایت می‌روند و بطور هم زمان، حفره‌هایی در باند ظرفیت ایجاد می‌شود. مهاجرت الکترون‌ها به لایه هدایت سریا، تولید یون‌های سوپراکسید را راحت‌تر می‌کند در نتیجه، سریا می‌تواند با کاهش مولکول‌های اکسیژن جذب شده، یون‌های سوپراکسید تولید کند. مشارکت یون‌های سوپراکسید در تجزیه رودامین B را موجب می‌شوند. از طرف دیگر، حفره‌ها بطور همزمان در جهت مخالف حرکت می‌کند و از باند والانس سریا به باند ظرفیت LDH منتقل می‌شوند. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که گونه‌های فعال، یون سوپراکسید، رادیکال هیدروکسیل و الکترون حفره روی سطح فوتوکاتالیست در تخریب رودامین B نقش دارند [$31-34$].

۴- نتیجه‌گیری

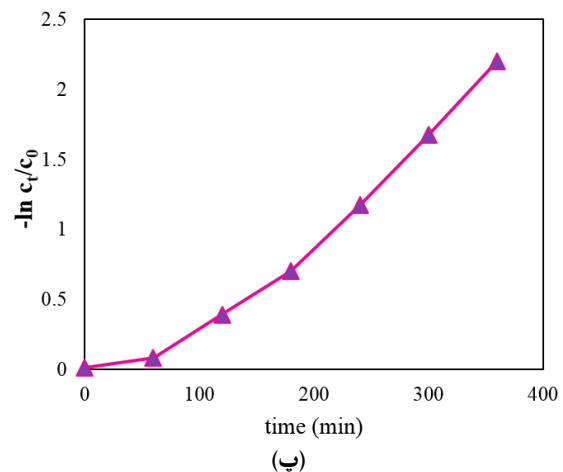
در این مطالعه، مواد NiAl-LDH (به روش هیدروترمال)، CeO_2 (به روش پیرولیز حرارتی) و کامپوزیت دو جزئی NiAl-LDH/CeO_2 (به روش هیدروترمال) تهیه و خواص ساختاری و مورفولوژیکی آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که در نانوکامپوزیت حاصل، LDH دارای ساختار نانو با ابعاد زیر میکرون و CeO_2 دارای ابعاد نانومتری و زیر 50 nm است. نتایج رنگبری نشان داد که



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۵: الف: نمودار جذب ماده رنگزای رودامین B، ب: درصد تجزیه فوتوکاتالیستی ماده رنگزا توسط نانوکامپوزیت دو جزئی NiAl-LDH/CeO_2 و ج: سینتیک تجزیه ماده رنگزا.

نتایج مربوط به رنگبری ماده رنگزای رودامین B توسط نانوکامپوزیت مربوطه در شکل ۵-ب آورده شده است. نتایج

- [13] S. Megala, P. Ravi, P. Maadeswaran, M. Navaneethan, M. Sathish, *Nanoscale Adv.*, **3**, 2021, 2075.
- [14] J.M. Rocha, R.P. Sousa, R. Fanguiero, D.P. Ferreira, *A Review, Polymers*, **16**, 2024, 801.
- [15] Y. Chao, Z. Guanhua, *Journal of Hazardous Materials*, **408**, 2021, 124908.
- [16] Y. Qinghua, *Journal of Hazardous Materials*, **400**, 2020, 123260.
- [17] M. Eman, *npj clean water*, **34**, 2023,
- [18] Y. Nova, *Science and Technology Indonesia*, 2023, **8**, 2023.
- [19] C. Chiang, *Journal of Materials Chemistry A*, **11**, 2023, 11179.
- [20] X. Long Guo, *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, **27**, 135.
- [21] Y. Shuai, *Scientific Reports*, **8**, 2018, 5246.
- [22] M. Mutian, *Industrial Crops and Products*, **166**, 2021, 113472.
- [23] X. Zhi-Hui, *Chemical Engineering Journal*, **414**, 2021, 128713.
- [24] M. Yang, *Chemical Engineering*, **472**, 2023, 145071.
- [25] S. Ansari, M. Shahnawaze Ansari, H. Devnani, S.P. Satsangee, *Sensors and Actuators B*, **273**, 2018, 1226.
- [26] W. Xianwei, *Frontiers in Chemistry*, **10**, 2022, 10897081089708.
- [27] M. Tiziano, *American Chemical Society*, **116**, 2016, 31.
- [28] X. Dong, *Jornal of Cleaner Production*, **313**, 2021, 127758.
- [29] L. Tunde, *Royal Society of Chemistry*, **12**, 2022, 26176.
- [30] P. Periyat, F. Laffir, S.A.M. Tofail September, *Royal Society of Chemistry*, **1**, 2011, 1794.
- [31] O.O. Akintunde, L. Yu, J. Hu, M.G. Kibria, G. Achari, *Catalyst*, **12**, 2022, 281.
- [32] Z. Lianyang, *Applied Surface Science*, **576**, 2021, 150760.
- [33] D. Xiaoqing, *Applied Surface Science*, **499**, 2020, 143939.
- [34] M. Niknam, M. Bavand vand chali, E. Ghasemi, A Kazemi Nafchi, N Yousefi limaee, *International Journal of Environmental Science and Technology*, **15**, 2024, 135.

نانوکامپوزیت حاصل به میزان قابل توجهی قادر به حذف رنگ ماده رنگرزی رودامین B می باشد. همچنین، نتایج بدست آمده نشان دادند که رنگزدایی رنگزا توسط نانوکامپوزیت از سینتیک مرتبه اول تبعیت می کند. با توجه به نتایج بدست آمده، این کامپوزیت جهت استفاده در صنایع تصفیه آب و فاضلاب پیشنهاد می گردد.

مراجع

- [1] Z. Cigeroglu, Z.M. Şenol, G. Baskan, J. Georgin, S. Gubernat, *Material Today Sustainability*, **20**, 2024, 100735.
- [2] A. Pirkarami, M.E. Olya, *Journal of Saudi Chemical Society*, **21**, 2017, 179.
- [3] M.E. Olya, A. Pirkarami, M. Soleimani, M. Bahmaei, *Journal of Environment Management*, **121**, 2013, 210.
- [4] J.M. Rocha, R.P. Sousa, R. Fanguiero, D.P. Ferreira, *A Review, Polymers*, **16**, 2024, 801.
- [5] G. Prashanth, *Frontiers in Chemistry*, **10**, 2022, 917831.
- [6] Z.A. Al-Ahmed, N.S. Al-Radadi, M. Ahmed, K. Shouair, *Arabian. Journal of Chemistry*, **13**, 2020, 8626.
- [7] E. kusmirek, *Catalyst*, 2020, **10**, 1435.
- [8] Y. Xing, *Nanomaterials*, **11**, 202, 3221.
- [9] R. Abdul Razzaq, *catalysts* **10**, 2020, 1185.
- [10] S.A.M. Zobir, *Biology*, 2021, **10**, 1077.
- [11] B. Hanane *Energy chemistry*, **64**, 2022, 406.
- [12] H. Mengya, *catalysts*, **12**, 2022, 443.