ORIGINAL ARTICLE

Photocatalytic Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Solutions Using Halloysite–TiO2 Nanocomposite

Mohammad Ali Zazouli[1],
Fathollah Gholami-Borujeni[2],
Esmaeil Babanejad[3],
Soheila Amiri-Hosseini[4]

[1] Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[2] Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran
[4] MSc Student in Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

(Received March 19, 2020 ; Accepted July 17, 2021)

Abstract

Background and purpose: Malachite green is one of the most widely used dyes in various industries, aquaculture, and fungicides. The residues have adverse effects on environmental and human health and should be removed from the effluent before discharging to the environment. The purpose of this study was to investigate the efficiency of photocatalytic process using halloysite-titanium dioxide nanocomposite in the removal of malachite green from aqueous solutions and the effect of various parameters on the process efficiency.

Materials and methods: This experimental study was performed on a laboratory scale in a discontinuous system. In this process, a 15 W (UV-C) lamp of 26 mm diameter and length of 45 cm and a nanocomposite (halloysite-titanium dioxide) were used. The influence of contact time, nanocomposite dose, dye concentration, and pH of the reaction on the removal efficiency was investigated. The properties of the synthesized nanocomposite were determined by sol-gel method using XRD and SEM techniques. The concentration of malachite green was measured using a UV-VIS spectrophotometer at 619 nm.

Results: The best photocatalytic dye removal efficiency (91.29%) was seen at 3 mg/l dye concentration, pH= 10, contact time= 90 min, and nanocomposite dose= 0.1 g/l.

Conclusion: This study showed that photocatalytic process using nanocomposite (halloysite-titanium dioxide) is efficient in decomposing and removing malachite green.

Keywords: malachite green, photocatalytic decomposition, halloysite, titanium dioxide, nanocomposite, wastewater treatment

J Mazandaran Univ Med Sci 2021; 31 (199): 107-120 (Persian).

* **Corresponding Author: Soheila Amiri-Hosseini -** Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran (E-mail: sohyl85959@gmail.com)

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره سی و یکم شماره 199 مرداد سال 1400 (120-107)

حذف فتوکاتالیستی رنگ مالاشیت گرین از محلولهای آبی با استفاده از نانوکامپوزیت هالوسیت-دی اکسید تیتانیوم

محمد علی زرولی[1]
فتح اله غلامی بروجنی[2]
اسماعیل بابانژاد[3]
سهیلا امیری حسینی[4]

چکیده

سابقه و هدف: مالاشیت گرین یکی از رنگ‌های پرکاربرد در صنایع مختلف، آبزی پروری و قارچ‌کش‌هاست. باقیمانده آن اثرات سوئی بر سلامت محیط و انسان دارد. بنابراین حذف آن‌ها از پساب قبل از تخلیه به محیط زیست ضروری است. با توجه به مطالعات انجام شده در حذف باقیمانده از محیط آبی، هدف این مطالعه بررسی کارایی فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانوکامپوزیت هالوسیت - دی اکسید تیتانیوم در حذف مالاشیت‌گرین از محلول‌های آبی و تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی فرایند می‌باشد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی در یک سیستم ناپیوسته انجام شد. در این فرایند از یک عدد لامپ 15 وات (UV-C) با قطر 26 میلی‌متر، طول 45 سانتی‌متر و نانوکامپوزیت (هالوسیت - دی‌اکسید تیتانیوم) استفاده شد. تاثیر متغیرهای زمان، تماس، دوز نانوکامپوزیت، غلظت رنگ و pH واکنش برکارایی حذف بررسی شد. مشخصات نانوکامپوزیت سنتز شده با استفاده از روش سل - ژل توسط تکنیک‌های XRD و SEM تعیین شد. غلظت مالاشیت گرین با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-VIS در طول موج 619 نانومتر ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد، بهترین راندمان حذف فتوکاتالیستی رنگ با نانوکامپوزیت هالوسیت - دی اکسید تیتانیوم در غلظت 3 میلی‌گرم در لیتر، pH=10، زمان تماس 90 دقیقه، دوز نانوکامپوزیت 0/1 گرم در لیتر با راندمان 91/29 درصد بود.

استنتاج: این مطالعه نشان داد که فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانوکامپوزیت (هالوسیت - دی اکسید تیتانیوم) در تجزیه و حذف رنگ مالاشیت گرین کارآمد می‌باشد.

واژه های کلیدی: مالاشیت گرین، تجزیه فتوکاتالیستی، هالوسیت، دی اکسید تیتانیوم، نانوکامپوزیت، تصفیه فاضلاب

مقدمه

رنگ‌ها کاربرد وسیع و فراوانی در بسیاری از صنایع نظیر فرآوری مواد غذایی، داروسازی، نساجی، پلاستیک، لاستیک، چرم و کاغذ دارد(1). پساب رنگ‌های شیمیایی نه تنها به دلیل رنگشان و اثر زیباشناختی در منابع آبی نامطلوب، بلکه به‌دلیل خصوصیات سمی بر اکوسیستم آبی، آبزیان و در نهایت انسان، دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشند(2،3). در میان صنایع مختلف، صنعت نساجی به عنوان یکی از بزرگترین صنایع تولید فاضلاب رنگی با

مولف مسئول: سهیلا امیری حسینی دانشگاه علوم پزشکی مازندران E-mail: sohyl85959@gmail.com

1. استاد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، مازندران، ایران
2. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، مازندران، ایران
3. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، مازندران، ایران
4. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، مازندران، ایران

تاریخ دریافت : 1399/12/9 تاریخ ارجاع جهت اصلاحات :1399/12/11 تاریخ تصویب : 1400/4/26

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

غلظت حدود 10 تا 200 میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است(4). پساب‌های رنگی علاوه بر رنگ حاوی مقادیر زیادی مواد جامد معلق (SS)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی(COD)، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی(BOD)، فلزات، دما و نمک‌ها هستند(8-5). براساس مطالعات مقدار 10 تا 15 درصد رنگ مصرفی در جهان وارد محیط زیست می‌شود(9). مالاشیت گرین بعنوان یک رنگ آلی با فرمول شیمیایی $C_{52}H_{54}N_4O_{12}$ با جرم ملکولی 927 گرم از جمله رنگ‌های کاتیونی است که دارای حلالیت بالایی در آب می‌باشد(10). این رنگ مشتقی از تری‌فنیل‌متان صنعتی است و به نام‌های دیگر مثل آلینین سبز، سبزپایه 4، و الماس سبز B شناخته شده است(13-11). مالاشیت گرین علاوه بر صنایع رنگرزی، چرم، پلاستیک و کاغذ در صنایع آبزی پروری برای کنترل بیماری‌های انگلی ماهی‌ها بعنوان ضد قارچ و ضدعفونی‌کننده کاربرد دارد(12). وقتی مالاشیت گرین وارد زنجیره غذایی میشود باعث ایجاد نقص و ناهنجاری در جنین(Teratogenic)، و جهش‌زایی (Mutagenesis)، کاهش باروری در انسان و ناهنجاریهای کروموزومی (Chromosomal abnormalities) می‌گردد(14،13). درتماس با پوست انسان باعث قرمزی و تحریک شده و در تماس با چشم منجر به آسیب دائمی می‌گردد(15،16). به این علت حذف مالاشیت گرین از خروجی سیستم‌های پرورش ماهی و یا فاضلاب صنایع نساجی، کاغذسازی و صنایع آکریلیک، به‌خاطر پیشگیری از تأثیر نامطلوب آن بر ارگانیسم‌های آبزی ضروری است(17). درحال حاضر با استفاده از روش‌های فیزیکوشیمیایی نظیر فیلتراسیون(18)، انعقاد(19)، تبادل یون(20)، اکسیداسیون پیشرفته(9)، ازناسیون(21)، اسمزمعکوس(22)، پالایش زیستی(23)، روش آنزیمی(24)، می‌توان مواد آلی به ویژه رنگ‌ها را از پساب صنایع مختلف حذف کرد. اما نتایج جدید نشان داده که روش جدید فتوکاتالیستی یکی از موثرترین روش‌های تصفیه پساب‌های حاوی مواد رنگی است. در این روش فوتوکاتالیست به‌وسیله شکاف باند، تحریک فوتون، و جدایی جفت چاله الکترونی با تولید رادیکال‌های آزاد منجر به تجزیه آلاینده غلظت‌های آلی می‌شود(25). رس هالوسیت به‌عنوان یک نانولوله به‌دلیل ساختارخاص و خصوصیات ویژه مثل منافذ بالا، پایداری شیمیایی، خواص مکانیکی خوب جذب بالاتری برای رنگ‌ها به‌ویژه رنگ‌های کاتیونی نسبت به رنگ‌های آنیونی دارد که همراه فرایند فتوکاتالیستی برای حذف آلاینده آلی مورد استفاده قرار گرفته است(27،26). هالوسیت‌ها (Halloysites) به‌عنوان پشتیبان برای بارگذاری نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) برای دستیابی به فعالیت فوتوکاتالیستی مناسب مورد مطالعه قرار گرفته است. دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل خصوصیات ویژه آن مانند ثبات شیمیایی، غیر سمی بودن، هزینه کم یکی از پرمصرف‌ترین اکسید فلزی با فعالیت کاتالیستی بالا بدون تشکیل آلاینده‌های ثانویه وسازگار با محیط زیست می‌باشد که تحت تابش نور ماوراءبنفش به‌طور گسترده‌ای در فرایندهای فوتوکاتالیستی برای تخریب آلاینده‌های آلی مورد استفاده قرار می‌گیرد(29،28). بنابراین هدف این مطالعه بررسی‌کارایی فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانوکامپوزیت هالوسیت-دی اکسید تیتانیوم در حذف مالاشیت گرین از محلول‌های آبی و تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی فرایند در یک سیستم ناپیوسته می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد و دستگاه‌ها

مالاشیت گرین از شرکت سیگما آلدریچ، نانوذرات تیتانیوم دی اکساید و ایزو پروپوکساید تیتانیوم از شرکت مرک و هالوسیت از شرکت سیگما آلدریچ و لامپ 15وات (UV-C) با قطر 26 میلی‌متر، طول 45 سانتی‌متر از شرکت فلیپس خریداری شد. در تمام مراحل آزمایش تنظیم pH با استفاده از محلول اسید کلریدریک یک دهم نرمال و یا هیدروکسید سدیم یک دهم نرمال انجام شد.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

سنتز نانوکامپوزیت هالوسیت - دی اکسید تیتانیوم

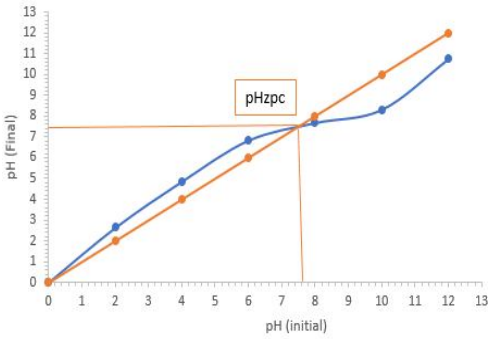
تهیه نانوکامپوزیت در 2 مرحله صورت گرفت(29).

مرحله اول) تهیه محلول سل-ژل تیتانیوم دی‌اکسید و مرحله دوم) نشاندن نانواکسید تیتانیوم بر روی هالوسیت که بدین‌صورت انجام گرفت: ابتدا 60 سی‌سی محلول تیتانیوم ایزو پروپوکساید داخل بشر ریخته و 20 سی‌سی پروپانول به همراه 100 سی‌سی آب مقطر دیونیزه افزوده و حدود دو ساعت روی شیکر قرار داده و کاملا هم زده شد. بعد 5 سی‌سی اسید نیتریک 65 درصد یک‌دهم مولار اضافه شد و بمدت 3 ساعت با همزن مغناطیسی هم‌زده و محلول شفاف حاصل شد. در مرحله دوم برای نشان دادن نانواکسید تیتانیوم برروی هالوسیت، 100 گرم هالوسیت را در بشر ریخته و محلول سل - ژل تهیه شده فوق قطره قطره به آن اضافه و بمدت 8 ساعت روی شیکر گذاشته شد و کاملا مخلوط شد و محلول سفید رنگی به‌دست آمد. نمونه محلول درآون به‌مدت 3 ساعت در دمای 100 درجه سانتی‌گراد قرار داده و خشک شد. بعد دردمای 500 درجه سانتی‌گراد به‌مدت 3 ساعت گذاشته تا کلسینه شده و پودر سفید تیتانیوم دی‌اکسید نشانده شده بر هالوسیت حاصل شد. برای بررسی مورفولوژی و اندازه نانوذرات تصویر (SEM مدل MIRA3 شرکت سازنده TESCAN کشور چک)، و جهت شناسایی و تعیین ترکیب شیمیایی نانوذرات از دستگاه XRD (مدل X pert pro MPD شرکت سازنده Netherlands کشور هلند) از آزمایشگاه مرکز پژوهش متالوژی رازی گرفته شد.

نقطه بار صفر (Point of zero charge) نانوکامپوزیت

نقطه بار صفر (Point of zero charge) با انجام آزمایش به صورت زیر تعیین شد(30):

ابتدا در شش بشر 100 میلی‌لیتر، 50 میلی‌لیتر کلرید سدیم به هر بشر اضافه شد. در مرحله بعد به هر بشر یک گرم نانوکامپوزیت هالوسیت - دی‌اکسید تیتانیوم سنتز شده افزوده شد. آنگاه pH بشرها با استفاده از سود و اسید کلریدریک یک‌دهم نرمال در مقادیر 2، 4، 6، 8، 10، 12 تنظیم شد. سپس به‌مدت 24 ساعت برروی شیکر به هم زده شد تا به نقطه تعادل برسد. بعد 24 ساعت pH محتویات هر بشر اندازه‌گیری و یادداشت شد. در پایان نمودار pH اولیه و pH ثانویه ترسیم شد (نمودار شماره 1) و نقطه‌ای که همدیگر را قطع نمودند به عنوان pH_{zpc} شناخته می‌شود.



نمودار شماره 1: نقطه بار صفر (Point of zero charge) نانوکامپوزیت

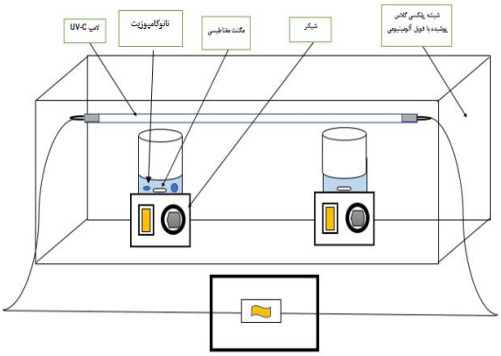
محلول رنگ با غلظت 1000 میلی‌گرم بر لیتر تهیه و در دمای 4 درجه سلسیوس تا زمان استفاده نگهداری شد. از این محلول سایر غلظت ها تهیه شد. برای انجام مطالعه محلول‌های رنگ مالاشیت با غلظت اولیه (1، 3، 5 میلی‌گرم در لیتر) تهیه شد. به‌منظور تعیین متغیرهای مستقل، نانوکامپوریت با دوزهای (0/1، 0/5، 1 گرم در لیتر)، دی‌اکسید تیتانیوم در مقادیر (0/1، 0/5 و 1 گرم در لیتر)، زمان تماس(30، 60، 90 دقیقه) و pH (3، 7، 10) بررسی شد. به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج، کلیه آزمایش‌ها به‌صورت سه بار تکرار، انجام و از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شد.

برای تعیین غلظت باقیمانده رنگ، غلظت‌های اولیه رنگ مالاشیت، بار اول در معرض تابش فرابنفش و بار دوم در حضور نانوکامپوزیت و تابش فرابنفش، در سه سطح زمان مورد نظر، زیر یک لامپ 15 وات (UV-C) با فاصله 7 سانتی‌متر از منبع نوری در دمای 27 درجه سانتی‌گراد بر روی شیکربا 350 دور در دقیقه قرار داده

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

شد. لازم به یادآوری است که تمام فرایند داخل یک راکتور از جنس پلکسی گلاس که به‌صورت محیط بسته که تمام اطراف آن با فویل آلومینیومی پوشانده شده بود، صورت گرفت. در تمام مراحل آزمایش قبل از سنجش غلظت باقیمانده رنگ با استفاده از اسپکتروفتومتر (JASCO Model UV–Vis spectroscopy)، نمونه داخل دستگاه سانتریفیوژ در دور 4000 دور در دقیقه به‌مدت 1/5 دقیقه قرار گرفت.

شماتیک پایلوت مقیاس آزمایشگاهی در تصویر شماره 1 نشان داده شد.



تصویر شماره 1: شماتیک راکتور پلکسی گلاس مورد استفاده

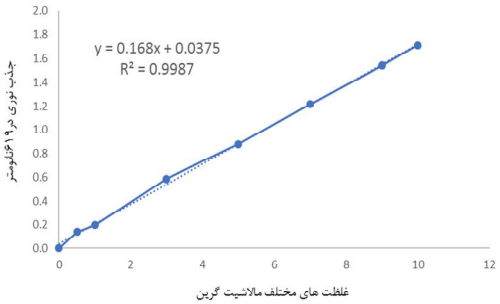
به منظور تعیین میزان تاثیر پارامترهای مختلف بر بازدهی حذف رنگ مالاشیت گرین توسط نانوکامپوزیت، کارایی فرآیند در هر مرحله از آزمایش با استفاده از رابطه زیر به‌دست آمد.

$$Efficiency(\%) = \frac{Cin - Cout}{Cin} \times 100$$

که در این معادله C_{in} غلظت رنگ اولیه و C_{out} غلظت رنگ ثانویه بوده است.

اندازه گیری غلظت مالاشیت گرین

برای سنجش غلظت باقیمانده مالاشیت گرین منحنی کالیبراسیون دستگاه اسپکتروفتومتری (JASCO Model UV–Vis spectroscopy) با استفاده از غلظت‌های مالاشیت گرین در گستره (0/5 ، 1 ، 3 ، 5 ، 7 ، 9 ، 10 میلی‌گرم در لیتر) ترسیم شد. این منحنی در نمودار شماره 3 نشان داده شده است.



نمودار شماره 2: منحنی استاندارد جذب نوری غلظت‌های مختلف مالاشیت گرین در طول موج 619 نانومتر

تعیین میزان COD ایجاد شده توسط مالاشیت گرین

برای بررسی میزان COD ایجاد شده توسط رنگ مالاشیت گرین غلظت‌های (5، 10، 20، 30، 40، 50 میلی‌گرم در لیتر) تهیه شد. برای هر کدام از غلظت‌ها مقدار 2/5 میلی‌لیتر از غلظت‌های تهیه شده بعنوان غلظت نمونه به همراه 1/5 میلی‌لیتر دی کرومات پتاسیم و 3/5 میلی‌لیتر از اسید هاضم به ویال COD اضافه شد. آن‌گاه به مدت 2 ساعت در راکتور COD با دمای 150 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از مدت زمان سپری شده و سرد شدن نمونه‌ها با کمک فرو آمونیوم سولفات (FAS) 0/025 نرمال عمل تیتراسیون انجام گرفت. بعد از ظهور تغییر رنگ نمونه (رنگ آجری) عمل تیتر کردن قطع و مقدار فرو آمونیوم سولفات مصرفی یادداشت شد. همین مراحل برای نمونه شاهد هم انجام گرفت. با استفاده از فرمول زیر مقدار COD به‌دست آمده محاسبه شد.

$$COD = \frac{(A-B)\times N\times 8000}{V}$$

A = FAS مصرفی برای شاهد

B = FAS مصرفی برای نمونه

N = نرمالیته FAS

V = حجم نمونه برحسب میلی لیتر

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

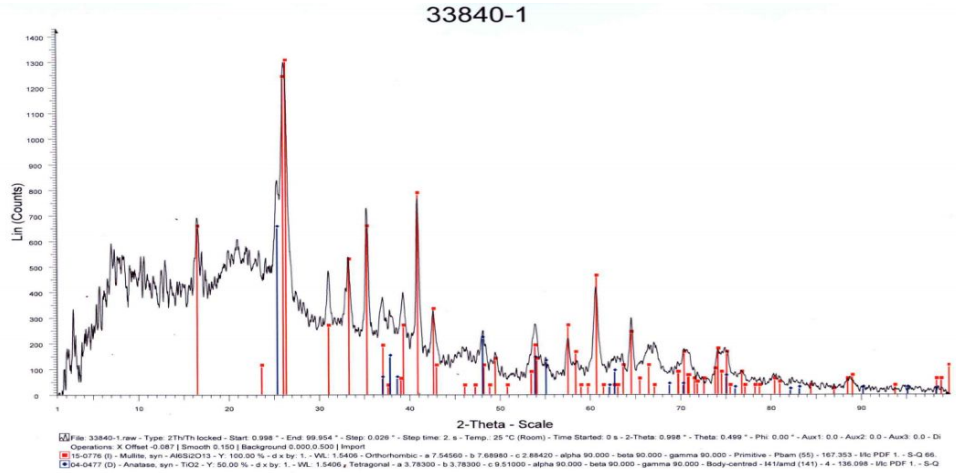
جهت اندازه‌گیری میزان کارایی فرآیند در معدنی سازی بار آلی نمونه، مقدار کاهش COD در شرایط بهینه بر اساس دستورالعمل کتاب استاندارد متد با روش 5220 اندازه‌گیری شد(31).

یافته ها

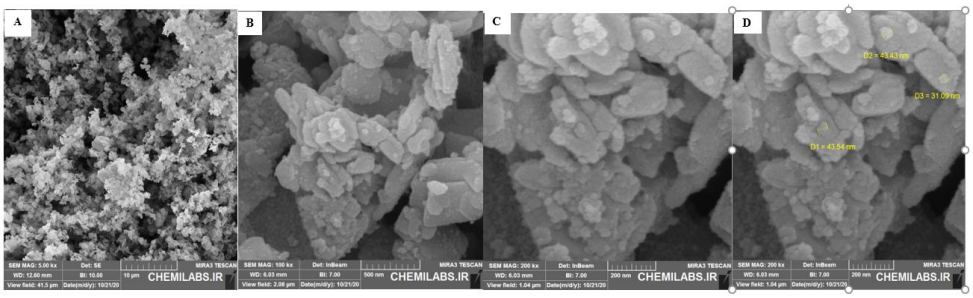
ویژگی های نانو کامپوزیت سنتز شده

نتایج XRD نشان داد که درکامپوزیت حاصله ساختار آلومینیوم سیلیکاتی به‌صورت مولیت (هالوسیت در دمای 800 درجه سانتی‌گراد به مولیت تبدیل می‌شود) با فرمول Al6Si2O13 می‌باشد. دی‌اکسید تیتانیوم در سه فاز کریستالی روتایل، آناتیس و بروکیت وجود دارد. برای برخی از کاربردها نیازی به فازکریستالی نیست ولی زمانی‌که فعالیت فتوکاتالیستی مدنظر باشد، ضروری است. فاز روتایل از دو فاز دیگر پایدارتر است و فازهای آناتیس و بروکیت در اثر حرارت به روتایل تبدیل می‌شوند(29). همچنین ساختار کریستالی دی اکسید تیتانیوم به‌صورت آناتاز بوده و در فرایند کلسینه شدن به فرم روتایل تبدیل نشده است. لازم به ذکر است که ساختار آناتاز فرایند فتوکاتالیستی بیش‌تری از فرم روتایل دارد. نتایج در نمودار شماره 3 نشان داده شده است.

تصاویر SEM با بزرگنمایی متفاوت (A-C) نشان می‌دهند که نانو کامپوزیت هالوسیت-دی‌اکسید تیتانیوم ساختار متخلخل با شبکه سه بعدی گسترده دارد. همچنین ذرات دی‌اکسید تیتانیوم درسطح شبکه هالوسیت به‌صورت پخش شده، اندازه حدود 43-31 نانومتر دارند، درحالی که دی‌اکسید تیتانیوم قبل از تشکیل نانوکامپوزیت به‌صورت توده‌ای انباشته و متراکم بودند. تصاویر در تصویر شماره 2 نشان داده شده است.



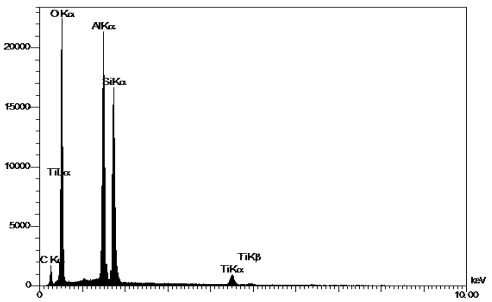
نمودار شماره 3: الگوی XRD نانوکامپوزیت (هالوسیت-دی اکسید تیتانیوم)



تصویر شماره 2: تصاویر SEM از نانوکامپوزیت سنتز شده

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

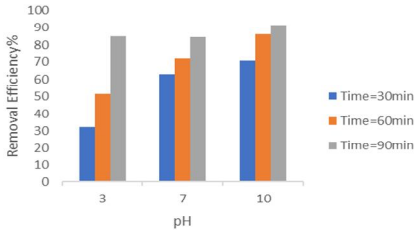
باتوجه به طیف EDS (نمودار شماره 4)، کامپوزیت حاصله دارای عناصر کربن، اکسیژن، آلومینیوم، تیتانیوم، سیلیس و... هست. میزان درصد اکسیژن، سیلیس، آلومینیوم و تیتانیوم به‌ترتیب 41/17، 23/51، 24/68، 1/6 درصد می‌باشد. بنابراین درصد دی‌اکسید تیتانیوم، نانوکامپوزیت حاصله 2/66 درصد است.



نمودار شماره 4: طیف EDS نانوکامپوزیت سنتز شده

تاثیر pH برکارایی فرایند

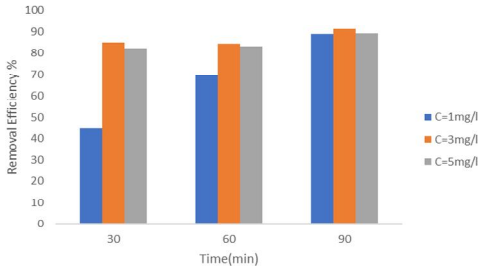
به منظور بررسی تاثیر تغییرات pH برروی کارایی فرآیند رنگ بری، آزمایشات در3 سطح pH (3، 7، 10) و زمان تماس (30، 60، 90 دقیقه)، غلظت اولیه رنگ 3 میلی‌گرم درلیتر تحت نور فرابنفش انجام شد. راکتور حاوی بشر محلول بر روی همزن مغناطیسی با دور ثابت 300 rpm قرار داده شد تا از رسوب نانوکامپوزیت جلوگیری شود. بعد از پایان زمان محلول سانتریفیوژ شد تا باقیمانده ذرات حذف شوند، آنگاه غلظت باقی مانده رنگ مالاشیت گرین اندازه‌گیری شد. نتایج تاثیر pH بر کارایی فرایند در نمودار شماره 5 آمده است همانطورکه در این نمودار دیده می‌شود، با افزایش pH راندمان افزایش می‌یابد.



نمودار شماره 5: تاثیر pH در حذف رنگ مالاشیت گرین با فرایند فتوکاتالیستی با نانو کامپوزیت هالوسیت-دی اکسید تیتانیوم (غلظت 3 میلی‌گرم در لیتر، غلظت نانوکامپوزیت 0/1 گرم در لیتر)

تاثیر زمان تماس برکارایی فرآیند

برای بررسی تاثیر زمان تماس بر کارایی فرایند فتوکاتالیستی زمان تماس در 3 سطح (30، 60، 90) دقیقه و غلظت اولیه رنگ 1، 3، 5 میلی‌گرم در لیتر با pH بهینه 10 و دوز کاتالیست 0/1گرم در لیتر تحت نور فرابنفش انجام شد. راکتور حاوی بشر محلول بر روی همزن مغناطیسی با دور ثابت 300 rpm قرار داده شد تا از رسوب نانوکامپوزیت جلوگیری گردد. بعد از پایان زمان مورد نظر، محلول سانتریفیوژ شد تا باقیمانده ذرات حذف شود. آنگاه غلظت باقی مانده رنگ مالاشیت گرین اندازه‌گیری شد. نتایج تاثیر زمان تماس بر کارایی فرایند فتوکاتالیستی در نمودار شماره 6 آمده است همان‌طور که در این نمودار مشاهده میشود با افزایش زمان تماس، راندمان افزایش می‌یابد.



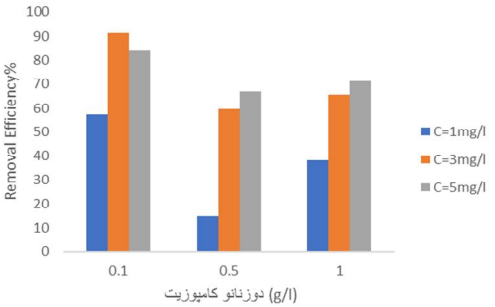
نمودار شماره 6: تاثیر زمان تماس در حذف رنگ مالاشیت با فرایند فتوکاتالیستی با نانو کامپوزیت هالوسیت- دی اکسید تیتانیوم (pH=10، غلظت نانوکامپوزیت 0/1 گرم در لیتر)

تاثیر دوز نانو کامپوزیت برکارایی فرآیند

جهت بررسی اثر دوز نانو کامپوزیت هالوسیت-دی‌اکسید تیتانیوم بر کارایی فرایند فتوکاتالیستی در 3 سطح نانو کامپوزیت (0/1، 0/5، 1 گرم در لیتر) در غلظت‌های مختلف رنگ (1، 3، 5 میلی‌گرم در لیتر) با pH=10 و زمان تماس برابر 90 دقیقه تحت نور فرابنفش انجام شد. راکتور حاوی بشر محلول بر روی همزن مغناطیسی با دور ثابت 300 rpm قرار گرفت تا از رسوب نانوکامپوزیت جلوگیری شود. بعد از پایان زمان مورد نظر، محلول سانتریفیوژ شد تا باقیمانده ذرات حذف

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

شوند. آن‌گاه غلظت باقی مانده رنگ مالاشیت گرین اندازه‌گیری شد. نتایج تاثیر دوز نانو کامپوزیت بر کارایی فرایند فتوکاتالیستی در نمودار شماره 7 آورده شده است. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود، با افزایش دوز نانو کامپوزیت، راندمان کاهش می‌یابد.



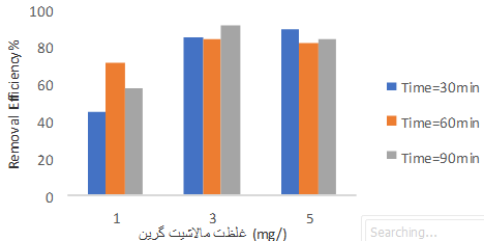
نمودار شماره 7: تاثیر دوز نانوکامپوزیت در حذف رنگ مالاشیت با فرایند فتوکاتالیستی با pH =10 و زمان تماس 90 دقیقه

تاثیر غلظت اولیه رنگ برکارایی فرآیند

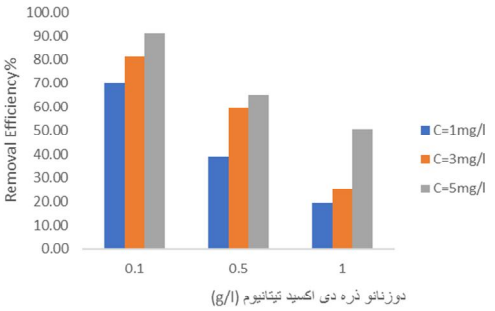
به منظور بررسی تاثیر تغییرات غلظت اولیه رنگ برروی کارایی فرآیند رنگ بری، آزمایشات در 3 سطح غلظت رنگ(1، 3، 5 میلی گرم درلیتر)، در زمان تماس‌های (30، 60، 90 دقیقه)، با دوز نانو کامپوزیت 0/1 گرم در لیتر، pH=10 تحت نور فرابنفش انجام شد. راکتور حاوی بشر محلول بر روی همزن مغناطیسی با دور ثابت 300 rpm قرار داده شد تا از رسوب نانوکامپوزیت جلوگیری شود. بعد از پایان زمان محلول سانتریفیوژ شد تا باقیمانده ذرات حذف شوند آنگاه غلظت باقی مانده رنگ مالاشیت گرین اندازه‌گیری شد نتایج تاثیر غلظت اولیه رنگ بر کارایی فرایند در تصویر شماره 10 آمده است. همان‌طور که در این نمودار دیده می‌شود، با افزایش غلظت رنگ، راندمان افزایش می‌یابد.

تاثیر دوز نانو ذره دی اکسید تیتانیوم برکارایی فرایند

به منظور بررسی تاثیر دوز نانو ذره دی اکسید تیتانیوم آزمایشات با 3 سطح (0/1، 0/5، 1 گرم در لیتر) با غلظت‌های رنگ (1، 3، 5 میلی گرم در لیتر)، pH=10 و زمان تماس برابر 90 دقیقه، تحت تابش نور فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت. راکتور حاوی بشر محلول بر روی همزن مغناطیسی با دور ثابت 300 rpm قرار گرفت تا از رسوب نانوکامپوزیت جلوگیری شود. بعد از پایان زمان مورد نظر، محلول سانتریفیوژ شد تا باقیمانده ذرات حذف شوند. آنگاه غلظت باقی مانده رنگ مالاشیت گرین اندازه‌گیری شد. نتایج تاثیر دوز نانو ذره دی اکسید تیتانیوم بر کارایی فرایند فتوکاتالیستی در نمودار شماره 9 آورده شده است. همان‌طورکه در این نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش دوز نانو ذره راندمان کاهش می‌یابد.



نمودار شماره 8: تاثیر غلظت اولیه رنگ در حذف رنگ مالاشیت گرین با فرایند فتوکاتالیستی نانو کامپوزیت هالوسیت-دی اکسید تیتانیوم (pH=10 و دوز نانوکامپوزیت 0/1 گرم در لیتر)



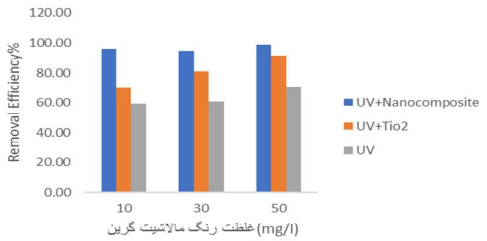
نمودار شماره 9: تاثیر دوز نانو ذره دی اکسید تیتانیوم در حذف رنگ مالاشیت با فرایند فتوکاتالیستی (pH=10 و زمان تماس 90 دقیقه)

مقایسه سه فرایند انجام شده برکارایی حذف رنگ مالاشیت گرین

در این مرحله حذف و تجزیه رنگ با سه فرایند، 1) نورفرابنفش بدون کاتالیست، 2) فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانو کامپوزیت هالوسیت - دی اکسید تیتانیوم،

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

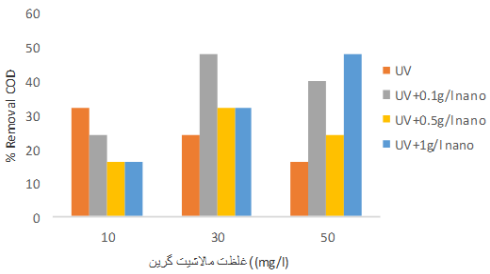
3) فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم انجام شد. نتایج این بررسی در نمودار شماره 10 نشان داده شده است. به وضوح درنمودار دیده می‌شود که فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانو کامپوزیت هالوسیت - دی‌اکسید تیتانیوم و فرایند نورفرابنفش بدون کاتالیست به ترتیب دارای بالاترین و کم‌ترین راندمان رنگبری است.



نمودار شماره 10: مقایسه سه فرایند انجام شده بر کارایی حذف رنگ مالاشیت گرین (pH=10 و زمان تماس 90 دقیقه)

مقایسه فرایند انجام شده در حذف COD ایجاد شده توسط رنگ مالاشیت گرین

در این مرحله حذف COD ایجاد شده توسط رنگ مالاشیت گرین با فرایند، 1) نورفرابنفش بدون کاتالیست، 2) فرایند فتوکاتالیستی با استفاده از نانو کامپوزیت هالوسیت - دی‌اکسید تیتانیوم، انجام شد. نتایج این بررسی در نمودار شماره 11 نشان داده شده است. با توجه به نمودار بالاترین درصد حذف COD در غلظت 30 و 50 میلی‌گرم در لیتر با نانو کامپوزیت 0/1 و 1 گرم در لیتر و پایین‌ترین درصد حذف در غلظت 10 میلی‌گرم در لیتر با نانو کامپوزیت 1 گرم در لیتر به‌دست آمد.



نمودار شماره 11: مقایسه فرایند نور فرابنفش و نانوکامپوزیت در حذف COD ایجاد شده با مالاشیت گرین (pH=10 و زمان تماس 90 دقیقه)

بحث

تاثیرpH: با بررسی pH بر کارایی فرایند حذف فتوکاتالیستی نانوکامپوزیت هالوسیت - دی اکسید تیتانیوم در 3 سطح (3، 7، 10)، نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش pH از 3 به 7 بازده حذف در شرایط بهینه از (70/54 درصد به 88 درصد) و از pH (7 به 10) میزان بازدهی به 91/27 درصد افزایش یافت. از دلایل افزایش راندمان حذف در pH بازی می‌توان به این اشاره کرد که نانوکامپوزیت مورد بررسی به‌دلیل دارا بودن نقطه بار صفر (zero point of charge) برابر 7/6 در محیط اسیدی بار مثبت پیدا کرده و رنگ مالاشیت به عنوان یک رنگ کاتیونی با دارا بودن بار مثبت، بین رنگ و نانو کامپوزیت نیروی دافعه ایجاد شده و کارایی حذف رنگ را کاهش می‌دهد. اما در pH بازه قلیایی بدلیل دارا بودن بار منفی نانوکامپوزیت و ماهیت کاتیونی رنگ یک نیروی جاذبه الکترواستاتیکی برقرار گردیده که باعث افزایش کارایی حذف رنگ می‌شود. از دلایل دیگر تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در بازه قلیایی می‌باشد. الکترون‌ها با اکسید کردن ملکول‌های اکسیژن باعث تولید رادیکال پراکسید می‌شوند. این رادیکال با هیدروژن محیط ترکیب شده، تولید رادیکال هیدروکسیل که نقش مهمی در فعالیت فتوکاتالیستی دارند،می نمایند. در واکنش‌های زیر به انجام روند تولید اشاره شده است(32).

واکنش شماره 1) : $e_{CB}^- + O_2 \rightarrow O_2^{\circ -}$

واکنش شماره 2) : $O_2^{\circ -} + O_2 \rightarrow O_2^{\circ -}$

واکنش شماره 3) : $HO_2^{\circ} + HO_2^{\circ} \rightarrow H2o2 + O_2$

واکنش شماره 4) : $O_2^{\circ -} + H2O2 \rightarrow HO^{\circ} + OH^- + O_2$

واکنش شماره 5) : $H2O2 + hv\ (UV) \rightarrow HO^{\circ}$

واکنش شماره 6) :

$O_2^{\circ} + MG \rightarrow CO_2 + H2O + other\ products$

واکنش شماره 7) :

$HO_2^{\circ} + MG \rightarrow CO_2 + H2O + other\ products$

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

نتایج به‌دست آمده با مطالعات جعفری و همکاران، فایون و همکاران مطابقت داشت(33،32).

تاثیر زمان تماس: راندمان حذف در زمان 30، 60، 90 دقیقه به ترتیب 84/42، 84/92، 91/27 درصد به‌دست آمد. از دلایل افزایش راندمان نانو کامپوزیت هالوسیت- دی‌اکسید تیتانیوم در فرایند حذف رنگ این است که هرچه زمان بیش‌تر باشد، ملکول‌های رنگ در تماس بیش‌تری با نانوکامپوزیت بوده و تعامل بیش‌تری بین رنگ و نانوکامپوزیت فراهم می‌شود و فرصت تولید بیش‌تری برای رادیکال‌های آزاد فراهم می‌شود. مطالعات انجام شده زیدی و همکاران، سایلکان و همکاران نتایج فوق را تایید می‌نمایند(35،34).

تاثیر دوز کاتالیست: در این مطالعه با بررسی دوز کاتالیست هالوسیت- دی‌اکسید تیتانیوم در 3 سطح 0/1، 0/5، 1 گرم در لیتر در شرایط بهینه بازده حذف به‌ترتیب 91/27، 59/72، 56/77 درصد به‌دست آمد. با افزایش دوز کاتالیست در فرایند حذف روند نزولی مشاهده شد. علت این روند این است که با افزایش سطح فعال کاتالیست تا یک مقدار معین رنگبری افزایش می‌یابد، چون در مقادیر بالاتر ذرات معلق کاتالیست مانع عبور نور فرابنفش شده و باعث پراکنده شدن بیش‌تر نور می‌شوند. بنابراین افزایش بیش‌تر مقدار کاتالیست هیچ اثری بر راندمان تجزیه فتوکاتالیستی ندارد. روند مشابهی در خصوص این موضوع توسط ولکان و همکاران، دربندی و همکاران، یانگ و همکاران گزارش شد(38-36).

تاثیر غلظت اولیه رنگ: با افزایش غلظت رنگ مالاشیت در غلظت‌های مختلف 1، 3، 5 میلی‌گرم در لیتر با شرایط بهینه، راندمان حذف به‌ترتیب 57/44، 91/27، 84/29 درصد به‌دست آمد.با افزایش غلظت رنگ، راندمان حذف رنگ تا یک حد مشخصی افزایش یافت و افزایش بیش‌تر غلظت رنگ منجر به کاهش راندمان حذف شد. سرعت حذف به تشکیل رادیکال آزاد در سطح کاتالیست و احتمال واکنش با ملکول‌های رنگ وابسته می‌باشد. علت کاهش رنگبری در اثر افزایش غلظت رنگ این است که مکان‌های فعال در سطح کاتالیست توسط ملکول‌های رنگ پوشیده می‌شود و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل کاهش می‌یابد. دلیل دیگر که می‌توان به آن اشاره کرد این است که در غلظت‌های بالای رنگ مقدار عمده‌ای از نور فرابنفش به جای این‌که توسط ذرات نانوکامپوزیت جذب شود، توسط ملکول رنگ جذب شده و کارایی کاتالیست به دلیل کاهش رادیکال هیدروکسیل و پراکسید، کاهش می‌یابد. مطالعات نوری و همکاران، داتا و همکاران با نتایج فوق همخوانی دارد(40،39).

تاثیردوز نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (Tio2): راندمان حذف برای 3 سطح دوز نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (0/1، 0/5، 1 گرم برلیتر) به ترتیب 81/02، 59/89، به‌دست آمد. با توجه به نتایج آزمایشات مشخص شد که با افزایش نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم راندمان و بازده رنگبری افزایش می‌یابد اما با افزایش بیش‌تر نانوذره تاثیری بر راندمان تجزیه ندارد. از دلایل آن می‌توان گفت که افزایش دوز نانو ذره، باعث بالارفتن کدورت محیط شده در نتیجه باعث‌کاهش نور فرابنفش و کاهش عملکرد نانوذره دی‌اکسید تیتانیوم می‌شود و دلیل دیگر تجمع نانو ذره و کاهش تعداد سایت‌های فعال موجود در سطح نانوذره می‌باشد که هر کدام می‌تواند باعث کاهش رادیکال هیدروکسیل شود. نتایج زززولی و همکاران، ویسی و همکاران مطالعه انجام شده را تایید می‌کند(42،41). بر اساس نتایج به‌دست آمده و با توجه به بازده‌ی حاصل شده برای نانوکامپوزیت هالوسیت- دی‌اکسید تیتانیوم مورد بررسی و سنتز آسان آن می‌توانیم از آن جهت تصفیه فاضلاب‌های رنگ استفاده نمود. همچنین می‌توان کاربرد آن را در حذف سایر مواد آلی موجود در محیط‌های آبی پیشنهاد نمود. برای تایید توانایی نانوکامپوزیت سنتز شده در حذف رنگ مالاشیت گرین، عملکرد آن با دیگر کاتالیست‌های گزارش شده مقایسه شد. همان‌طوری‌که در جدول شماره 1 مشاهده می‌شود، نانوکامپوزیت سنتز شده (هالوسیت- دی‌اکسیدتیتانیوم)، نتیجه مناسبی نسبت به سایر مطالعات داشته است.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

سپاسگزاری

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی مصوب معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران (کد اخلاق IR.MAZUMS.REC.1398.1191) می‌باشد. نویسندگان مقاله بدین‌وسیله از آن معاونت محترم تشکر و قدردانی می نمایند.

جدول شماره 1: مقایسه انواع مطالعات انجام شده

ردیف	نام کاتالیست	دوز کاتالیت گرم بر لیتر	ماکزیمم زمان تابش UV(دقیقه)	غلظت مالاشیت گرین میلی گرم در لیتر	درصد حذف مالاشیت گرین	رفرنس
1	UTio2	-	UV-A-70	2/5	68	(Asiltürk et al ,2009)
	UV+0.3FeTio2				79	
	UV+7FeTio2				76	
	UV Tio2			5	70	
	UV+0.3FeTio2				77	
	UV+7FeTio2				72	
2	TiO2/SiO2/PCC	-	UV-A-60	8	96/25	(Jafari et al ,2016)
	TiO2/PCC				87/5	
	PCC				62/5	
3	Nano-TiO2–SiO2/WPC	-	UV-A-120	10	95	(Jafari et al ,2016)
	Nano-TiO2–SiO2				85	
4	P-25	-	60	1	80	(Rengifo-Herrera et al ,2011)
	TiO2–TPA–0%				81	
	TiO2–TPA–20%				97	
	TiO2–TPA–30%				99	
5	SiO2-Tio2 CNS	0/5	120	20	98	(Jiangyan et al,2019)
6	anatase nanocrystalline+ TiO2	1	UV-A-50	75	100	(Rajesh J et al,2007)
	rutile nanocrystalline+ TiO2				86	
7	E-spun RGO/TiO2/PANCMA NFs	0/2	UV-A-120	0/1	100	(Fuyou et al,2019)
8	TN(Nio-Tio2)	0/01	60	5	60	(Purkayastha, et al,2020)
9	CdO	0/4	UV-A-240	5/5	52/72	(Eskizeybek,et al 2012)
	PANI				40	
	PANI/CdO				95	
10	Sn-doped TiO2 First use	-	130	5	96	(Sayılkan et al,2008)
	Sn-doped TiO2 Second use				94	
	Sn-doped TiO2 third use				93	
	undoped TiO2 First use undoped TiO2 Second use				89	
	undoped TiO2 third use				87	
	Sn-doped TiO2 First use				84	
11	Ni,La-STO-0	0/8	UV-A-90	20	98	(Jia, A. Z. et al,2010)
	Ni,La-STO-1.0				80	
	Ni,La-SrTO-5.0				75	
12	controlled TiO2	1	210	20	37	(Li, Yue-Sheng et al,2010)
	CdTe-0.06-TiO2				77	
	P25				60	

References

1. Zarrabi M, Haghighi M, Alizadeh R, Mahboob S. Solar-light-driven photodegradation of organic dyes on sono-dispersed ZnO nanoparticles over graphene oxide: Sono vs. conventional catalyst design. Separation and Purification Technology 2019; 211: 738-752.
2. Tan KA, Morad N, Teng TT, Norli I, Panneerselvam P. Removal of cationic dye by magnetic nanoparticle (Fe3O4) impregnated onto activated maize cob powder and kinetic study of dye waste adsorption. APCBEE Procedia 2012; 1: 83-89.
3. Jafari H, Afshar S. Improved photodegradation of organic contaminants using nano-TiO2

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

and TiO2–SiO2 deposited on Portland cement concrete blocks. Photochemistry and Photobiology 2016; 92(1): 87-101 (Persian).

4. Moussavi G, Mahmoudi M. Removal of azo and anthraquinone reactive dyes from industrial wastewaters using MgO nanoparticles. J Hazard Mater 2009; 168(2-3): 806-812.
5. Yaseen DA, Scholz M. Shallow pond systems planted with Lemna minor treating azo dyes. Ecological Engineering 2016; 94: 295-305.
6. Sekomo CB, Rousseau DP, Saleh SA, Lens PN. Heavy metal removal in duckweed and algae ponds as a polishing step for textile wastewater treatment. Ecological Engineering 2012; 44: 102-110.
7. Michailidou K, Hall P, Gonzalez-Neira A, Ghoussaini M, Dennis J, Milne RL, et al. Large-scale genotyping identifies 41 new loci associated with breast cancer risk. Nat Genet 2013; 45(4): 353-361.
8. Yaseen D, Scholz M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. International Journal of Environmental Science and Technology 2019; 16(2): 1193-1226.
9. Khatri J, Nidheesh P, Singh TA, Kumar MS. Advanced oxidation processes based on zero-valent aluminium for treating textile wastewater. Chemical Engineering Journal 2018; 348: 67-73.
10. Ghaedi M, Azad FN, Dashtian K, Hajati S, Goudarzi A, Soylak M. Central composite design and genetic algorithm applied for the optimization of ultrasonic-assisted removal of malachite green by ZnO Nanorod-loaded activated carbon. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc 2016; 167: 157-164.
11. Ghorbani F, Molavi H, Fathi S, Piri F. Application of response surface methodology to optimize malachite green removal by Cl-nZVI nanocomposites. Journal of Water and Wastewater 2017; 28(4): 79-92 (Persian).
12. Tewari K, Singhal G, Arya RK. Adsorption removal of malachite green dye from aqueous solution. Reviews in Chemical Engineering 2018; 34(3): 427-453.
13. Baek M-H, Ijagbemi CO, Se-Jin O, Kim D-S. Removal of Malachite Green from aqueous solution using degreased coffee bean. J Hazard Mater 2010; 176(1-3): 820-828.
14. Sacara AM, Cristea C, Muresan LM. Electrochemical detection of Malachite Green using glassy carbon electrodes modified with CeO2 nanoparticles and Nafion. Journal of Electroanalytical Chemistry 2017; 792: 23-30.
15. Kiani G, Dostali M, Rostami A, Khataee AR. Adsorption studies on the removal of Malachite Green from aqueous solutions onto halloysite nanotubes. Applied Clay Science 2011; 54(1): 34-39.
16. Rajabi HR, Khani O, Shamsipur M, Vatanpour V. High-performance pure and Fe3+-ion doped ZnS quantum dots as green nanophotocatalysts for the removal of malachite green under UV-light irradiation. J Hazard Mater 2013; 250-251: 370-378.
17. Yong L, Zhanqi G, Yuefei J, Xiaobin H, Cheng S, Shaogui Y, et al. Photodegradation of malachite green under simulated and natural irradiation: kinetics, products, and pathways. Journal of Hazardous Materials 2015; 285: 127-136.
18. Verma S, Daverey A, Sharma A. Slow sand filtration for water and wastewater treatment–a review. Environmental Technology Reviews 2017; 6(1): 47-58.
19. Teh CY, Budiman PM, Shak KPY, Wu TY. Recent advancement of coagulation–flocculation and its application in wastewater

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

treatment. Ind Eng Chem Res 2016; 55(16): 4363-4389.

20. Levchuk I, Màrquez JJR, Sillanpää M. Removal of natural organic matter (NOM) from water by ion exchange–A review. Chemosphere 2018; 192: 90-104.
21. Lee B-H, Song W-C, Manna B, Yang H-J, Kim J-H, Kim Y-S. Removal of color from wastewater using various ozonation techniques. 2007 International Forum on Strategic Technology; 2007.
22. Malaeb L, Ayoub GM. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. Desalination 2011; 267(1): 1-8.
23. Sevda S, Sreekishnan T, Pous N, Puig S, Pant D. Bioelectroremediation of perchlorate and nitrate contaminated water: a review. Bioresource technology 2018; 255: 331-339.
24. Gholami-Borujeni F, Nejatzadeh-Barandozi F, Mahvi AH. Application of low purity horseradish peroxidase enzyme to removal of oil from oily wastewater. Desalination and Water Treatment 2016; 57(42): 19760-19767.
25. Bansal J, Hafiz A, Sharma SN. Photoreduction of Dye with Noble Metal Gold Permeated with Metal Oxide Titania. J Nanosci Nanotechnol 2020; 20(6): 3896-3901.
26. Kurczewska J, Cegłowski M, Schroeder G. Alginate/PAMAM dendrimer–Halloysite beads for removal of cationic and anionic dyes. Int J Biol Macromol 2019; 123: 398-408.
27. Anastopoulos I, Mittal A, Usman M, Mittal J, Yu G, Núñez-Delgado A, et al. A review on halloysite-based adsorbents to remove pollutants in water and wastewater. Journal of Molecular Liquids 2018; 269: 855-868.
28. Zheng P, Du Y, Chang PR, Ma X. Amylose–halloysite–TiO2 composites: preparation, characterization and photodegradation. Applied Surface Science 2015; 329: 256-261.
29. Gilja V, Katančić Z, Krehula LK, Mandić V, Hrnjak-Murgić Z. Efficiency of TiO2 catalyst supported by modified waste fly ash during photodegradation of RR45 dye. Science and Engineering of Composite Materials 2019; 26(1): 292-300.
30. Souza RP, Freitas TK, Domingues FS, Pezoti O, Ambrosio E, Ferrari-Lima AM, et al. Photocatalytic activity of TiO2, ZnO and Nb2O5 applied to degradation of textile wastewater. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 2016; 329: 9-17.
31. Eaton A, Clesceri L, Association APH, Greenberg AE, Federation WPC, Association AWW, et al. Standard methods for the examination of water and wastewater Washington: American Public Health Association. 1995.
32. Du F, Sun L, Huang Z, Chen Z, Xu Z, Ruan G, et al. Electrospun reduced graphene oxide/TiO2/poly (acrylonitrile-co-maleic acid) composite nanofibers for efficient adsorption and photocatalytic removal of malachite green and leucomalachite green. Chemosphere 2019; 239: 124764.
33. Jafari H, Afshar S, Zabihi O, Naebe M. Enhanced photocatalytic activities of TiO2-SiO2 nanohybrids immobilized on cement-based materials for dye degradation. Research on Chemical Intermediates 2016; 42(4): 2963-2978.
34. Sayılkan F, Asiltürk M, Tatar P, Kiraz N, Arpaç E, Sayılkan H. Photocatalytic performance of Sn-doped TiO2 nanostructured mono and double layer thin films for Malachite Green dye degradation under UV and vis-lights. J Hazard Mater 2007; 144(1): 140-146.
35. Zeidi A, Mehrjo F. Investigation on the Removal of Malachite Green from Aqueous Solutions Using Photocatalysis of Titanium

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]

Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles. J Health 2020; 11(2): 156-169.

36. Yang J, Xu X, Liu Y, Gao Y, Chen H, Li H. Preparation of SiO2@ TiO2 composite nanosheets and their application in photocatalytic degradation of malachite green at emulsion interface. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2019; 582: 123858.
37. Eskizeybek V, Sarı F, Gülce H, Gülce A, Avcı A. Preparation of the new polyaniline/ZnO nanocomposite and its photocatalytic activity for degradation of methylene blue and malachite green dyes under UV and natural sun lights irradiations. Applied Catalysis B: Environmental 2012; 119-120: 197-206.
38. Zahra D, Mohammad Ali Z, Mohammad S, Noureddin Mousavi N, Ehsan R. Photocatalytic degradation of diazinon using Zno/TiO2 nano-photocatalysts. Koomesh 2016; 18(3): 343-349 (Persian).
39. Purkayastha MD, Datta J, Ray PP, Singh N, Darbha GK, Denrah S, et al. Modelling the photocatalytic behaviour of pn nickel-titanium oxide nanocomposite. Chemical Engineering Research and Design 2020; 161: 82-94.
40. Noori Motlagh z, Darvishi R, Shams khoram abadi G, Godini H, Foroughi M. of Methylene Blue Using UV Radiation in Study of the Effective Parameters on Decolorizationof Methylene Blue Using UV Radiation in the Presence of Immobilized Catalyst. Journal of Ilam University of Medical Sciences 2013; 21(1): 36-46 (Persian).
41. Veisi F, Zazouli MA, Ebrahimzadeh MA, Charati JY, Dezfoli AS. Photocatalytic degradation of furfural in aqueous solution by N-doped titanium dioxide nanoparticles. Environ Sci Pollut Res 2016; 23(21): 21846-21860.
42. Zazouli MA, Yousefi M, Ghanbari F, Babanezhad E. Performance of photocatalytic ozonation process for pentachlorophenol (PCP) removal in aqueous solution using graphene-TiO 2 nanocomposite (UV/G-TiO 2/O 3). Journal of Environmental Health Science and Engineering 2020; 18(2): 1083-1097.

[Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-13]