

Investigating Factors Affecting the Removal of dyestuff from Wastewater Using Different Nanocomposites: A Review Study

Ali Hosseinian Naeini¹, Mohammad Reza Kalaei^{1,2}, Omid Moradi³, Niyaz Mohammad Mahmoodi^{4*}

1- Department of Chemical and Polymer Engineering, Tehran South Branch, Islamic Azad University, P. O. Box: 15847/43311, Tehran, Iran.

2- Nanotechnology Research Centre, Tehran South Branch, Islamic Azad University, P. O. Box: 15847/43311, Tehran, Iran.

3- Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, P. O. Box: 37541-374, Tehran, Iran.

4- Department of Environmental Research, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 167654-654, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16- 11- 2022

Accepted: 07 -03 -2023

Available online: 12 -03-2023

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

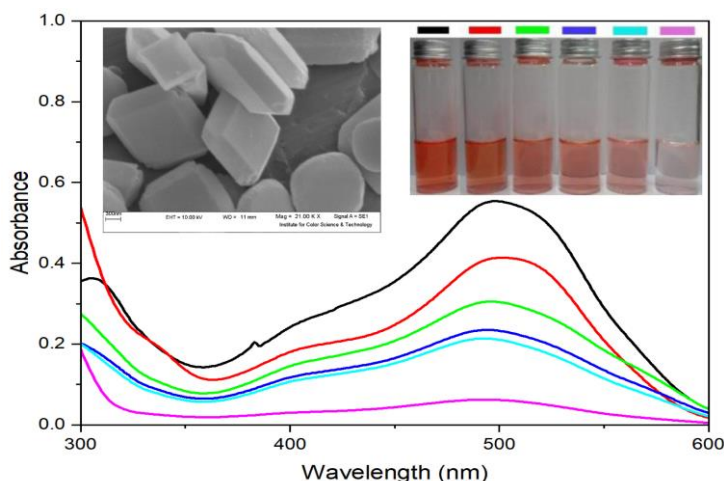
DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.4.4.5

Keywords:

Dye removal
Nanocomposites
Adsorption
Wastewater

ABSTRACT

In recent years, the textile industry has produced more than 50 % of the colored wastewater in the world. Clean water is essential in the lives of humans, aquatic organisms, and agricultural products. Due to their toxicity, dyestuff in water causes adverse quality, endangers their health, and causes environmental changes. There are different methods for wastewater treatment, which, based on the research, shows that today's surface absorption method is mainly used for wastewater treatment due to its cheapness, simplicity, and cost-effectiveness. In this article, the removal of dyestuff from wastewater was investigated using different nanocomposites, and the effect of adsorption with nanocomposites was investigated based on factors affecting adsorption, including contact time, initial concentration, the effect of temperature, and pH of the solution. Adsorbents significantly impact removing dyestuff and can perform wastewater treatment with good quality. This research used activated carbon nanocomposites, carbon nanotubes, silver nanoparticles, zinc ferrite, ZnO, TiO₂, Fe₃O₄ and zero-valent iron nanoparticles for wastewater decolorization. In this article, the results show that different nanocomposite adsorbents are promising. They are a promising future for the treatment of colored wastewater.



Corresponding author: mahmoodi@icrc.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



بررسی عوامل مؤثر بر حذف مواد رنگزا از پساب با استفاده از نانوکامپوزیت های مختلف:

مطالعه مروری

علی حسینیان نائینی^۱، محمد رضا کلایی^{۲،۳}، امید مرادی^۴، نیازمحمد محمودی^{۵*}

۱- دکتری، گروه مهندسی شیمی و پلیمر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۴۷/۴۳۳۱۱.

۲- دانشیار، مرکز تحقیقات فناوری نانو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۴۷/۴۳۳۱۱.

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۵۸۴۷/۴۳۳۱۱.

۴- دانشیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس، شهرقدس، تهران، ایران، صندوق پستی: ۳۷۴-۳۷۵۴۱.

۵- استاد، گروه پژوهشی محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.

چکیده

اطلاعات مقاله

در سال های اخیر، صنعت نساجی بیش از ۵۰ درصد از پساب های رنگی در جهان را تولید کرده است. آب پاکیزه نقش مهمی در زندگی انسان ها، موجودات آبی و محصولات کشاورزی دارد. وجود مواد رنگزا در آبها به دلیل سمیتی که دارند باعث کیفیت نامطلوب، به خطر انداختن سلامتی آنها شده و تغییراتی را در محیط زیست ایجاد می کند. روش های مختلفی جهت تصفیه پساب وجود دارد که براساس تحقیقاتی که انجام شده نشان می دهد که امروزه بیشتر از روش جذب سطحی برای تصفیه پساب به دلیل ارزان بودن، سادگی و مقرون به صرفه بودن استفاده می شود. در این مقاله بررسی حذف مواد رنگزا از پساب با استفاده از نانوکامپوزیت های مختلف انجام شده است که تاثیر جذب سطحی با نانوکامپوزیت ها براساس عوامل مؤثر بر جذب سطحی شامل زمان تماس، غلظت اولیه، اثر دما و pH محلول می باشند مورد بررسی قرار گرفتند. نانوکامپوزیتها تاثیر زیادی در حذف مواد رنگزا دارند و می توانند با کیفیت خوبی، تصفیه پساب را انجام دهند. در این پژوهش از نانوکامپوزیت های کربن فعال، نانولوله های کربنی، نانوذرات نقره، فریت روی، Fe_3O_4 ، TiO_2 و ZnO و نانوذرات آهن صفر ظرفیتی معمولا برای رنگبری پساب استفاده می شوند. در این مقاله نتایج نشان می دهد که نانوکامپوزیت های مختلف نوید بخش آینده ای امیدوارکننده برای تصفیه پساب رنگی می باشند.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.4.4.5

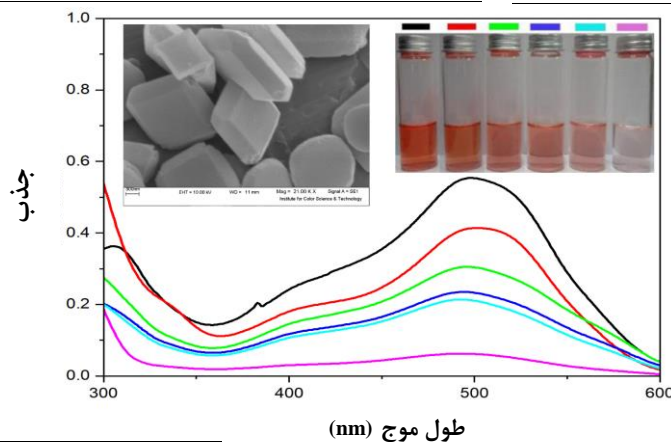
واژه های کلیدی:

حذف ماده رنگزا

نانوکامپوزیت ها

جذب سطحی

پساب



Corresponding author: mahmoodi@icrc.ac.ir



۱- مقدمه

صنعت نساجی با مصرف بالای آب مشخص می‌شود و یکی از بزرگترین تولیدکنندگان پساب صنعتی است. منابع اصلی آلودگی پساب نساجی فرآیندهای رنگرزی هستند. پساب‌های حاوی ماده رنگزا به دلیل سمیت زیاد و تجمع احتمالی در محیط، یک مشکل زیست‌محیطی جدی ایجاد می‌کنند. بیشتر این مواد رنگزا ماهیتی مصنوعی دارند و بر اساس ساختار شیمیایی خود به ۶ دسته مختلف به عنوان مشتقات آزو، آنترآکینون، گوگرد، ایندیگوئید، تری فنیل متان و فتالوسیانین طبقه بندی می‌شوند. اکثر این مواد رنگزا حاوی حلقه‌های معطر هستند که آنها را سرطان‌زا و جهش‌زا می‌کند [۱].

۲. مواد رنگزا حاوی N پیوند دوگانه گروه -N=N- به عنوان مواد رنگزای آزو شناخته می‌شوند. با توجه به استفاده گسترده از این ماده رنگزا در صنایع، به بخشی جدایی‌ناپذیر از پساب صنعتی تبدیل می‌شوند. بنابراین، حذف رنگ از پساب نساجی در حال حاضر مورد توجه زیادی است. روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای تصفیه پساب‌های صنعتی پیشنهاد شده است که شامل روش‌های جذب، فرآیندهای انعقاد، تخریب کاتالیزور نوری و تصفیه ازن و هیپوکلریت پساب‌های پسماند رنگ می‌شود [۳-۵]. در بین تیمارهای شیمیایی یا فیزیکی پیشرفته، جذب سطحی بالاتر از سایر روش‌ها در نظر گرفته می‌شود. این امر به سهولت در دسترس بودن، سادگی طراحی، سهولت عملیات، زیست تخریب‌پذیری، عدم حساسیت به مواد سمی و توانایی پردازش مواد رنگزا در اشکال غلیظ تر ثابت شده است که جذب فیزیکی کارآمدترین روش برای کاهش سریع غلظت مواد رنگزای محلول در پساب است. در این راستا، کربن فعال پرمصرف ترین نانوکامپوزیت برای حذف مواد رنگزا از محلول آبی است [۶، ۷]. اما دارای معایبی نیز می‌باشد. قابل اشتعال است و بازسازی آن دشوار است زیرا نیاز به بازیابی دارد. همچنین، کربن می‌تواند نشان دهد که آبدوست ضعیفی دارد و در نتیجه میل ترکیبی ضعیفی برای جذب مواد رنگزا کاتیونی یا آنیونی از محلول آبی ایجاد می‌کند [۸-۱۱].

۲- نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها دسته‌ای از مواد هستند که در آنها یک فاز در مقیاس نانو مانند نانوذرات، نانولوله‌ها یا نانوساختار لایه‌ای است و دارای چند فاز هستند. حداقل فازها باید دارای ابعادی در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر باشد. امروزه برای غلبه بر محدودیت مواد مختلف مهندسی، نانوکامپوزیت‌ها جایگزین‌های مفیدی ارائه می‌دهند. نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان بر اساس بستر پراکنده و مواد فاز پراکنده طبقه‌بندی کرد [۱۲-۱۴]. با کمک این زمینه که به سرعت در حال گسترش است، امروزه امکان تولید بسیاری از مواد جدید هیجان‌انگیز با ویژگی‌های جدید از طریق رویکردهای مصنوعی نوآورانه وجود دارد. خواص به

اصطلاح یافت شده نه تنها به خواص اصلی آنها بستگی دارد، بلکه به ویژگی‌های سطحی و ریخت‌شناسی آنها نیز بستگی دارد [۱۶، ۱۵]. مواد نانوکامپوزیتی را می‌توان بر اساس وجود یا عدم وجود مواد پلیمری در کامپوزیت به روش زیر طبقه‌بندی کرد. نانوکامپوزیت‌هایی که در آنها ترکیبات حاوی پلیمر یا مواد مشتق از پلیمر نیستند، نانوکامپوزیت‌های غیرپلیمری نامیده می‌شوند نانوکامپوزیت‌های غیرپلیمری به عنوان نانوکامپوزیت‌های غیر آلی نیز شناخته می‌شوند. نانوکامپوزیت‌ها به سه دسته شامل فلزی، سرامیکی و پلیمری تقسیم می‌شوند [۱۷-۱۹]. نانوذرات دو فلزی به دلیل بهبود و پیشرفت خواص نوری مربوط به فلزات جداگانه و متمایز، به شکل جزئی از ساختارهای آلیاژی یا پوست‌های مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرند که شامل انعطاف‌پذیری فوق العاده، نقاط ذوب پایین تر، افزایش استحکام و سختی، بهبود خواص و افزایش مقاومت الکتریکی می‌باشند [۲۰]. نانوکامپوزیت‌های فلزی اغلب برای مقابله با مشکلات آلودگی محیط‌زیست استفاده می‌شوند. مقیاس نانو، مساحت سطح زیاد و واکنش پذیری بالا برای تصفیه آب و سنجش زود هنگام آلاینده‌ها بسیار موثر هستند. نانوذرات فلزی در ترکیب با گرافن، سیلیس و CNT برای حذف ماده رنگزا به کار می‌روند و به طور گسترده در بسته بندی مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، نه تنها به عنوان ماده پرکننده (سیلیکات و TiO_2)، بلکه به عنوان یک عامل ضد میکروبی مانند نانوکامپوزیت‌های اکسید نقره و پاک‌کننده‌های اکسیژن نیز به کار می‌روند. در حالی که در بخش کشاورزی، نانوکامپوزیت‌های اکسید فلزی برای تشخیص آفت‌کش‌ها و عوامل بیماری‌زا در گیاهان و منبع تحویل مواد ژنتیکی برای بهبود محصولات به کار برده می‌شوند. نانوذرات فلزی که شامل (اکسید روی، اکسید سریم و اکسید مس ۲) و نانوکامپوزیت آن‌ها (با کود و زئولیت) در کودها مورد استفاده قرار می‌گیرند، مواد مغذی را برای گیاهان به مدت طولانی تامین می‌کنند و همچنین به جلوگیری از تخریب خاک و بهبود کشاورزی پایدار کمک می‌کنند. در زمینه پزشکی، برای تحویل داروها و تصویربرداری، تشخیص و غربالگری بیماری‌ها، تعیین توالی DNA، در ژن درمانی و کشت بافت و در درمان سرطان کاربردهای زیادی دارند [۲۱]. نانوکامپوزیت‌های ایده آل جهت تصفیه پساب باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:

- دوست‌دار محیط‌زیست باشند
 - دارای ظرفیت جذب بالا بوده و جهت حذف آلاینده‌ها با غلظت پایین استفاده شوند
 - آلاینده‌های جذب شده از سطح به راحتی حذف شوند
 - قابل بازیافت باشند [۲۲].
- فرآیند جذب به عنوان یکی از بهترین روش‌ها جهت حذف ماده رنگزا می‌باشند. در مقایسه با نانوکامپوزیت‌های نانوساختار عمدتاً به دلیل مساحت سطح بالا، کارایی جذب بالاتر و سرعت جذب بیشتر نقش

مختلف در شکل ۱ ارائه شده است که آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی برای چارچوب فلز - آلی با جاذب‌های مختلف که شامل موارد زیر می‌باشد MIL-125(Ti), MIL-X1, MIL-X2, MIL-X3, NH2-MIL-125(Ti) در شکل تغییرات آنالیز را برای هر کدام از نانوکامپوزیت‌ها نشان می‌دهد و این شکل از چارچوب فلز - آلی به عنوان قالب جهت سنتز کامپوزیت‌های اکسید فلزات استفاده می‌شود [۳۴].

شکل ۱ در مورد ۱، ۴-بنزنندی کربوکسیلات و ۲-آمینو-۱، ۴-بنزنندی کربوکسیلات به عنوان پیوندهای آلی و تترا ایزوپروپیل ارتوتینانات به عنوان یک منبع فلزی برای سنتز چندین چارچوب فلز - آلی (MOFs) استفاده شده است. در نانومواد سنتز شده برای جذب مواد رنگزا کاتیونی با کمک فراصوت، قرمز پایه ۴۶ (BR46)، آبی پایه ۴۱ (BB41) و متیلن آبی (MB) از سیستم‌های تک و چند جزئی استفاده شده است. پتانسیل BET, XRD, FTIR, SEM, TEM, TGA و زتا برای توصیف MILها استفاده شده است. حذف رنگزا از سینتیک شبه مرتبه دوم با مقدار مشخص 0.00481 ، 0.000833 و 0.00051 میلی گرم بر گرم در دقیقه برای BR46، BB41 و MB به ترتیب دنبال شده است. علاوه بر این، جذب ماده رنگزا مطابق با مدل ایزوترم لانگمیر بوده است و ظرفیت جذب تجربی ماده رنگزا برای BR46، BB41 و MB به ترتیب 1296 ، 1257 و 862 میلی گرم بر گرم می‌باشد.

MIL سنتز شده قابلیت استفاده مجدد و پایداری بالایی را در سه چرخه نشان داده است. داده‌های ترمودینامیک جذب نشان می‌دهد که حذف رنگزا یک واکنش خود به خود، گرماگیر و فیزیکی است. انرژی آزاد گیبس برای حذف ماده رنگزا توسط NH2-MIL-125(Ti) در 308 K به ترتیب $19/424$ kJ/mol، $15/721$ و $17/413$ - برای BR46، BB41 و MB می‌باشد [۳۴].

مهمی در تصفیه آب دارند. ماده رنگزا ترکیبات رنگی هستند که به طور گسترده در منسوجات، لاستیک، لوازم آرایشی، پلاستیک، صنایع چرم به منظور رنگ کردن آن‌ها استفاده می‌شوند و سبب تولید مقدار زیادی پساب رنگی می‌گردند. مواد رنگزا اصلی به مواد رنگزای آنیونی، کاتیونی و غیر یونی طبقه‌بندی می‌شوند. در میان همه مواد رنگزا مورد استفاده در صنایع، صنعت نساجی در استفاده از مواد رنگزا برای رنگ آمیزی الیاف در رتبه اول قرار دارد [۲۲]. مواد رنگزا ترکیبات شیمیایی هستند که برای انتقال رنگزا به پارچه‌ها یا پوسته‌های سطحی متصل می‌شوند. پساب صنایع نساجی و تولیدی یک چالش بزرگ برای محیط زیست است [۲۳]. این تحقیق نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌ها چه تاثیری بر روی حذف ماده رنگزا دارد و هر کدام با مثال‌هایی از طریق آنالیزها با نتایج مختلفی از طریق جذب سطحی با عوامل موثر شامل دما، غلظت اولیه، زمان تماس، pH محلول، ایزوترم، سینتیک و ترمودینامیک برای حذف رنگزا مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد زیادی از نانوکامپوزیت‌ها نظیر مواد طبیعی، ضایعات و بقایای کشاورزی، محصولات جانبی صنایع و مواد زیست توده جهت پاک‌سازی آب و پساب استفاده می‌شوند (جدول ۱) [۲۳-۳۳].

۲-۱- انواع نانوکامپوزیت‌ها

تعداد زیادی از مواد طبیعی ویژگی‌های یک نانوکامپوزیت را دارا می‌باشند. از بین آن‌ها ترکیباتی نظیر کیتین، ژئولیت، خاک رس، گل سرخ، چوب و زغال سنگ به طور موفقیت آمیزی جهت حذف مواد رنگزا از آب و پساب مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

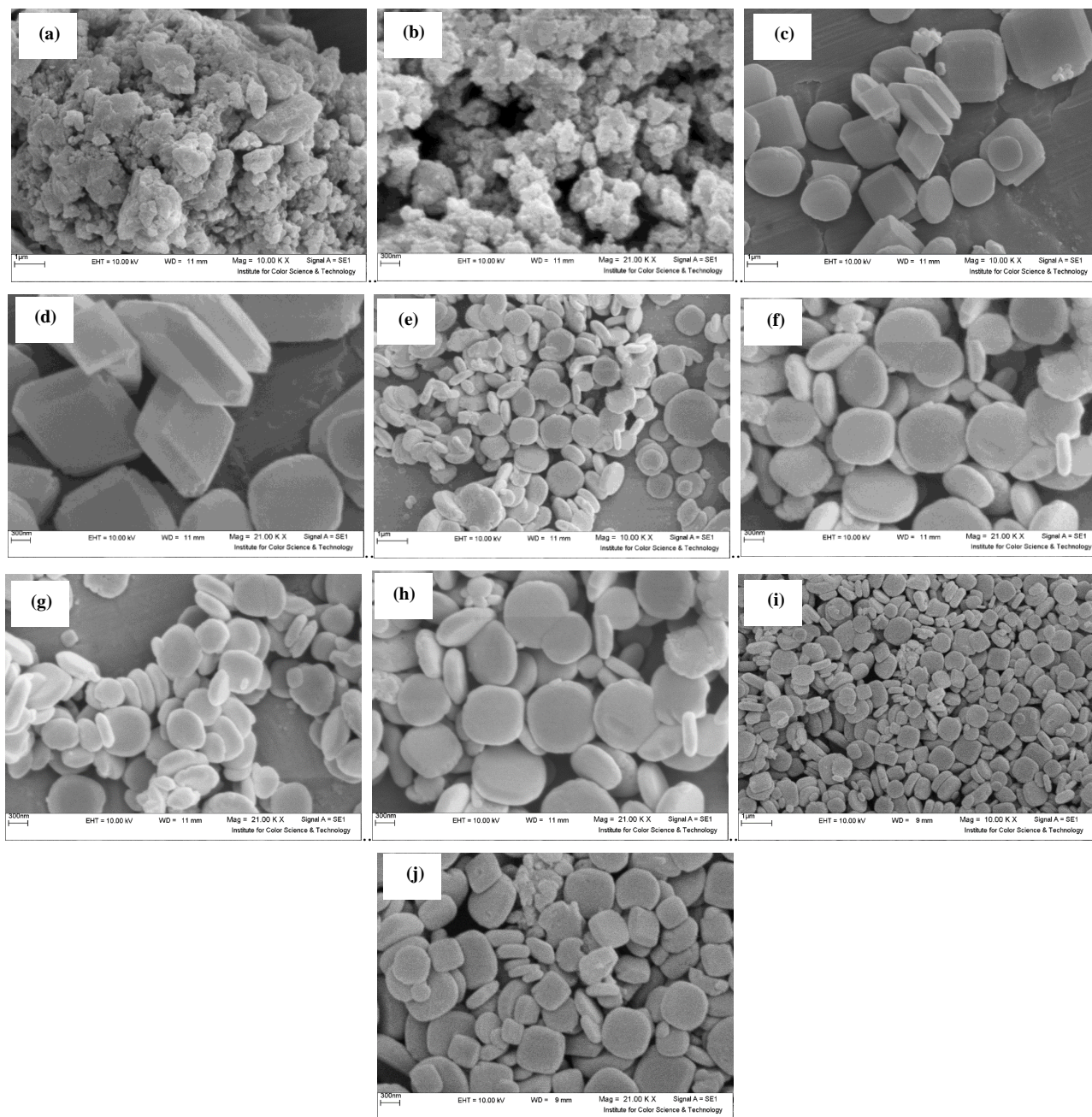
۲-۱-۱- نانوکامپوزیت بر پایه MOF

تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت‌های چارچوب فلز- آلی

جدول ۱: نانوکامپوزیت، ماده رنگزا و مشخصه‌یابی.

Table 1: Nanocomposite, dye and characterization.

Nanocomposite	Dye	Characterization	Ref
Copper (II) Oxide, Copper (I) Oxide	Methyl orange	TEM, XRD, FTIR	[23]
Iron oxide nanoparticles 2,3 and activated carbon magnetic composite	Reactive blue 5	EDX, BET, XRD, SEM, TEM	[24]
Magnetic nanocomposite metal-organic framework	Methylene blue	VSM, XRD, SEM, BET, TGA	[25]
Azolla modified by magnetic nanoparticles	Brilliant Blue	FTIR, DLS, SEM	[26]
Nanocomposite hydrogels based on gelatin and nickel oxide nanoparticles	Crystal violet	SEM, TGA, TEM, FTIR	[27]
Magnesium aluminate-graphene composite	Methylene blue	FTIR, XRD, SEM, UV-VIS	[28]
Magnetic chitosan-itaconic acid nanofibers	Indigo	FTIR, TGA, VSM	[29]
Zinc oxide-manganese oxide nanocomposite based on activated alumina	Methyl orange	XRD, FTIR, TGA, SEM	[30]
Copper ferrite nanoparticles	Direct red 264	FTIR, UV-VIS, XRD, SEM	[31]
Graphene oxide, activated carbon nanocomposites, aluminum hydroxide and oxide graphene nanoparticles, activated carbon nanoparticles and cerium oxide	Safranin	SEM, FTIR, XRD	[32]
Nanoparticles of chitin, alginate, strontium, silicon dioxide, graphene oxide	Methylene blue	TEM, SEM, XRD	[33]



شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت‌های مختلف با چارچوب فلز- آلی (a, b) MIL-125(Ti) (c, d) MIL-X1 (e, f) MIL-X2 (g, h) MIL-X3 و (i, j) NH₂-MIL-125(Ti) [۳۴].

Figure 1. Electron microscope images of different nanocomposites with metal-organic framework (a, b) MIL-125(Ti), (c, d) MIL-X1, (e, f) MIL-X2, (g, h) MIL-X3, and (i, j) NH₂-MIL-125(Ti) [34].

در تحقیقی قید شده است حدود ۱۰۷ تن کیتین از صید سخت پوستانی از خانواده خرچنگ‌ها تولید شده است [۳۶]. به عنوان مثال نانولوله‌های کربنی چند جداره به طور فیزیکی با کیتین و مگنتیت زیست پلیمری مخلوط شدند تا یک نانوکامپوزیت مغناطیسی تشکیل دهند. نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی چند جداره / کیتین / مگنتیت تولید شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز سطح

۲-۱-۲- نانوکامپوزیت بر پایه کیتین

نانوکامپوزیت‌های بر پایه کیتین یکی از امیدبخش‌ترین پلیمرهای زیستی طبیعی در جذب می‌باشد. این ماده جزء اصلی اسکلت، کوتیکول و دیواره سلولی سخت پوستان، حشرات و میکروارگانیسم‌ها است. استیل‌زدایی کیتین در شکل‌گیری کیتوسان نقش دارد و مشتقات آن حتی نسبت به کیتین بسیار امیدبخش‌تر هستند [۳۵].

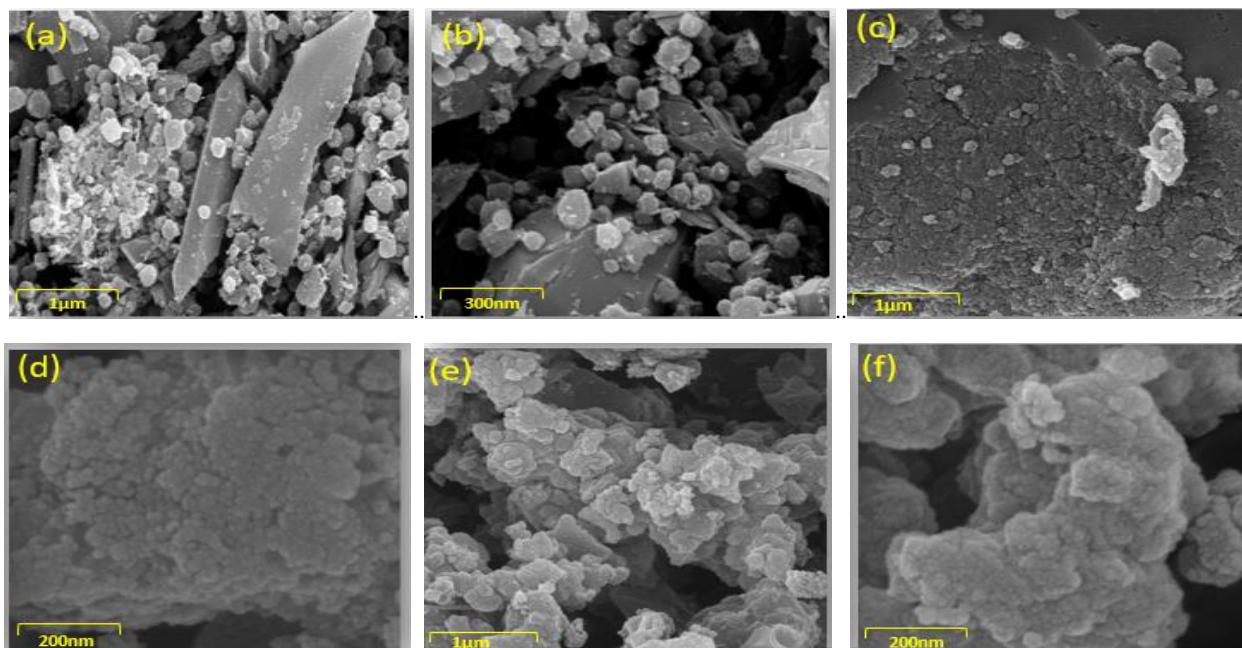
آلاینده‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. عبارت کربن فعال اساساً اشاره به یک ماده کربنیک با سطح ویژه بالا، توزیع مناسب منافذ و ظرفیت جذب بالا دارند. تقریباً تمام مواد کربندار را می‌توان جهت تولید کربن فعال استفاده کرد اما خواص آنها با توجه به مواد خام و روش فعال‌سازی تفاوت خواهند داشت. اگرچه کربن فعال نانوکامپوزیت خوبی جهت تصفیه آب است اما هزینه بالای آن استفاده از آن را محدود کرده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۲ نانوکامپوزیت‌های مختلف (MIL-53(Fe), AC, CAC/MIL-53(Fe)) را بررسی و تغییرات هرکدام از این آنالیز را به طور دقیق نشان می‌دهد [۳۷].

شکل ۲ نشان می‌دهد که کربن فعال (AC)، یکی از رایج‌ترین نانوکامپوزیت‌ها، و چارچوب فلز - آلی (MOF)، موادی هستند که برای سنتز کامپوزیت AC/MOF با روش حل گرمایی استفاده شده است. استراتژی طراحی شده در این مقاله بهبود عملکرد حذف و جذب AC برای مواد رنگزاست. MIL-53 (Fe) بر روی کربن فعال تجاری (CAC) برای تهیه کامپوزیت CAC/MIL-53 (Fe) سنتز شده است. مواد رنگزای آنیونی مستقیم قرمز ۲۳ (DR23) به عنوان آلاینده استفاده شده است. آنالیزهای FT-IR, XRD, SEM و EDX برای مطالعه ساختار و ویژگی‌های CAC/MIL-53 (Fe) استفاده شد. عوامل pH محلول، مقدار دوز جاذب، غلظت اولیه رنگزا و زمان تماس) موثر بر راندمان حذف ماده رنگزا مورد بررسی قرار گرفته است.

مشخص شد و خواص نانولوله‌های کربنی چندجداره به طور فیزیکی با کیتین و مگنتیت زیست پلیمری مخلوط شدند تا یک نانوکامپوزیت مغناطیسی تشکیل دهند. نتایج توزیع همگن نانوکامپوزیت کیتین و مگنتیت را در داخل نانولوله‌های کربنی چند جداره در نانوکامپوزیت مگنتیت نشان داد. از نانوکامپوزیت مگنتیت برای مطالعه حذف/جذب مواد رنگزا آلی شناخته شده رزبنگال استفاده شد. اثر عوامل مختلف جذب مورد مطالعه و بهینه‌سازی قرار گرفت. فرآیند جذب در دماهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج به صورت سینتیکی تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که جذب از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند. همچنین مشخص شد که جذب ماده رنگزا رزبنگال در مراحل مختلفی از جمله انتشار رزبنگال از طریق لایه مرزی به سطح خارجی نانوکامپوزیت، مگنتیت نفوذ درون ذره‌ای و جذب رزبنگال از طریق ذرات نانوکامپوزیت مگنتیت رخ داده است. جذب به صورت ترمودینامیکی آنالیز شد و نتایج نشان داد که ماده رنگزا به صورت خود به خود جذب می‌شود زیرا مقدار ΔG° منفی و طبیعت گرماگیر بود مقدار ΔH° مثبت بود و همراه با افزایش تصادفی بودن به عنوان مقدار ΔS° مثبت بود [۳۷].

۲-۱-۳- کامپوزیت بر پایه کربن

مواد با پایه کربن نظیر کربن فعال، الیاف کربن، آنروژل و کربن نانوساختار به خوبی به عنوان نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. کربن فعال به عنوان یک جاذب بسیار کارآمد جهت حذف



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت‌های مختلف (a, b) MIL-53(Fe)، (c, d) AC، و (e, f) CAC/MIL-53(Fe) [۳۷].

Figure 2: Electron microscope images of different nanocomposites (a, b) MIL-53(Fe), (c, d) AC, and (e, f) CAC/MIL-53(Fe) [37].

نانوکامپوزیت‌های تجاری می‌باشد. ثانیاً نانولوله‌های کربنی دارای خاصیت جذب خوبی برای مقابله با باکتری‌هاست؛ ویژگی که در سایر جاذب‌ها دیده نمی‌شود. در نهایت؛ از طریق سینتیک جذب نانولوله‌های کربنی می‌توانند برای حذف آلاینده‌ها مناسب باشند [۴۱]. جذب مواد آلی طبیعی توسط نانولوله‌های کربنی یک فرآیند آگزوترمیک است و با این حال دارای ارزش آنتروپی مثبت است. به دلیل اثر هیدروفوبیک، واکنش $\pi-\pi$ پیوندهیدروژنی، پیوند کووالانسی و واکنش الکترواستاتیک ترکیبات آلی را به شدت جذب می‌کنند. نانولوله‌های کربنی دارای خواص فیزیکی شیمیایی، مکانیکی، حرارتی و الکتریکی قابل توجهی هستند که کاربرد آنها را به عنوان نانوکامپوزیت در محیط‌زیست زیاد می‌کنند. عامل‌دار کردن و یا اصلاح نانولوله‌های کربنی راندمان حذف آلاینده‌ها را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. با این حال استفاده از نانولوله‌های کربنی جهت تصفیه آب به روش آگزوترمیک، پرهزینه است و به عوامل مختلف بستگی دارد. به همین دلیل تحقیقات بیشتری جهت بهینه‌یابی عوامل فرآیند به منظور کاهش هزینه‌های تصفیه آب مبتنی بر نانولوله‌های کربنی لازم است که بهترین گزینه جذب سطحی می‌باشند [۴۲]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانولوله کربن و نانولوله کربن مغناطیس در شکل ۳ ارائه شده است که بررسی مورفولوژی برای هر کدام از نانوکامپوزیت‌ها را مشخص کرده است [۴۳].

در کار حاضر، نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل‌دار برای جذب (رنگبری) سه ماده رنگزا مختلف آزوئیک استفاده و با روش رسوب بخار شیمیایی سنتز و با اکسیدشدن هوا و تیمار اسیدی خالص شدند. این نانولوله‌های کربنی چند جداره خالص شده بیشتر با تیمار اسیدی فعال شدند. روش‌های مشخصه‌یابی مختلف مانند میکروسکوپ الکترونی، رامان و طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه برای مطالعه جذب مواد رنگزا آزوئیک روی سطح نانولوله‌های کربنی چندجداره عامل‌دار استفاده شده‌اند.

برای تعیین کمیت رنگبری مواد رنگزا از طیف سنجی جذبی مرئی UV-Vis استفاده شد. ایزوترم و سینتیک جذب سطحی نانولوله‌های کربنی چندجداره عامل‌دار برای حذف مواد رنگزا آزوئیک مورد مطالعه قرار گرفته و به مدل‌های مختلف بررسی شده‌اند. بیشینه ظرفیت جذب ۱۴۸، ۱۵۲ و ۱۴۱ میلی گرم بر گرم به ترتیب برای مواد رنگزا کنگوی قرمز، HE4BD سبز و MR زرد طلایی به دست آمده است.

درصد حذف ماده رنگزا (DR23) در شرایط بهینه توسط کربن فعال تجاری و CAC/MIL-53(Fe) به ترتیب ۵۰ درصد و ۹۹/۹ درصد می‌باشد. بیشینه ظرفیت جذب نیز از ۵۰ به ۱۰۰ میلی گرم در گرم افزایش یافته است. ایزوترم جذب و سینتیک به ترتیب از مدل‌های لانگمویر و شبه مرتبه دوم پیروی کردند [۳۷].

۲-۱-۴- نانو کامپوزیت بر پایه نانولوله کربنی

نانوکامپوزیت‌های بر پایه نانولوله کربنی موادی هستند که متعلق به خانواده کربن هستند. این مواد به دو گروه نانولوله‌های تک دیواره و نانولوله‌های چند دیواره طبقه بندی می‌شوند. نانولوله‌های کربنی به عنوان نانوکامپوزیت جهت حذف یون‌های فلزی و ناخالصی‌های آلی و غیر آلی موجود در منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. این جاذب‌ها به طور موثری یون‌های فلزی را از پساب جدا می‌کنند. ظرفیت جذب فلزات سنگین در نانولوله‌های تک دیواره بیشتر از چند دیواره است. در بیشتر مطالعات جذب؛ ایزوترم لانگمویر با داده‌های تعادلی همخوانی بیشتری داشته و جذب تک لایه بر سطح جاذب را پیشنهاد می‌کند و همچنین داده‌های جذب در اغلب مطالعات از مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم تبعیت می‌کند (جدول ۲) [۳۸].

به طور کلی جذب با افزایش pH محلول برای کاتیون‌ها افزایش و با افزایش قدرت یونی محلول کاهش می‌یابد. حداکثر ظرفیت بازیابی نانولوله‌های کربنی برای کاتیون‌های فلزی را در پایین ترین pH را به دست می‌آورند. در حالی که در مورد رادیونوکلوئیدها، به دلیل ایجاد کمپلکس‌های قوی بین رادیونوکلوئیدها و نانولوله‌های کربنی؛ دارای بازیابی ضعیف می‌باشند. این اشکال عمده بازیابی نانولوله‌های کربنی اشباع شده با رادیونوکلوئیدهاست [۳۹]. نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره به دلیل مساحت سطح ویژه بالا؛ نسبت به بسیاری از ترکیبات آلی تمایل شدیدی از خود نشان می‌دهند. با این حال مهمترین ضعف نانولوله‌های کربنی تک دیواره که کاربرد آنها را محدود می‌کنند، هزینه بالای آن می‌باشد. نانولوله‌های کربنی چند دیواره ارزان تر هستند اما ظرفیت جذب نسبتاً کم آنها، کاربرد آنها را محدود می‌کند. اصلاح نانولوله‌های کربنی چند دیواره ظرفیت جذب آنها را برای ترکیبات آلی مختلف افزایش می‌دهند؛ به طوری که می‌توانند با کاربردهای انتخابی تطابق یابند [۴۰]. نانولوله‌های کربنی با ۳ ویژگی منحصر به فرد باکتری‌ها را جذب می‌کنند: اولاً ظرفیت جذب میکروبی نانولوله‌های کربنی بسیار بالاتر از سایر

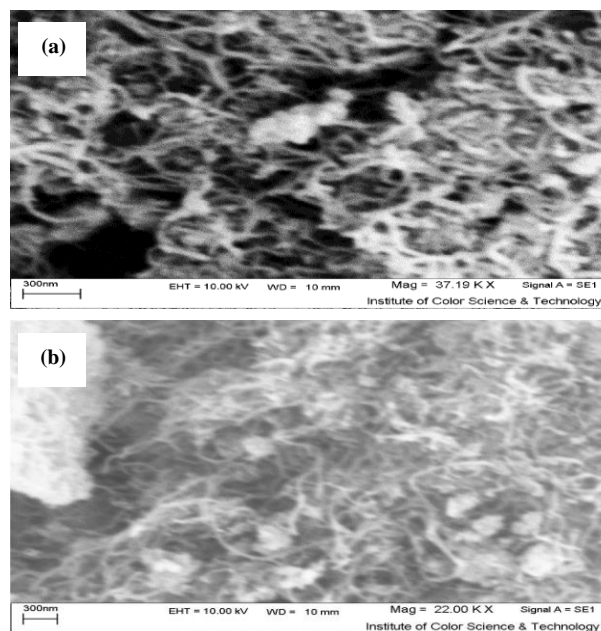
جدول ۲: شرایط بهینه جذب مواد رنگزا با نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی [۳۸].

Table 2: Optimum conditions for adsorption of dyes with nanocomposite of carbon nanotubes [38].

Number	Adsorbents	Dye	Optimum conditions	Ref
1	Coated iron nanoparticles	Methylene blue	Initial concentration (20 mg/L), Dose (0.75 g/l), q_{max} (48.1 mg/g)	[38]
2	Graphene oxide	Methylene blue	Initial concentration (10 mg/L), Dose (0.4 g/l), q_{max} (81.97 mg/g)	[38]
3	Iron carbide	Direct red 23	Initial concentration (20 mg/L), Dose (0.2 g/l), q_{max} (50 mg/g)	[38]

طلا مطالعه و تایید شده است [۴۵]. از فریت روی، اکسید روی، دی اکسید تیتانیم، اکسید آهن ۲ و ۳ و کامپوزیت‌های آنها جهت حذف یون‌های فلزی سمی و آلاینده‌های آلی از آب و پساب مورد استفاده قرار گرفتند [۴۶]. این نانوکامپوزیت‌ها با توجه به ارزان بودن و فراوانی در طبیعت در تصفیه پساب‌های صنعتی کاربرد دارند [۴۷]. برخی از نانوکامپوزیت‌ها جهت تخریب موادرنگزا و ترکیبات آلی کاربرد خوبی دارند [۴۸]. آلومینای فعال شده به طور گسترده‌ای در تصفیه آب و پساب نظیر حذف فسفات، کلراید و فلوراید کاربرد دارد. آلومینای فعال یک ماده متخلخل با مساحت سطح ویژه بالاست که از اعمال حرارتی هیدروکسید آلومینیم تولید شده و حاوی یکسری اشکال ناپایدار اکسید آلومینیم موثری برای آرسنیک هستند. یک کامپوزیت کربوکسی متیل کتیوسان (nZVI@nBent-CMC) حاوی نانوبنتونیت آهن صفر ظرفیتی ساخته شده و با FT-IR، TEM، EDX، XRD، BET و اندازه‌گیری پتانسیل زتا شناسایی شده است. کامپوزیت کربوکسی متیل کتیوسان کارایی حذف عالی را برای موادرنگزا قرمز آنیونی کنگو و رنگزای بنفش کریستال کاتیونی نشان داده است. بیشینه ظرفیت جذب موادرنگزا کنگوی قرمز و کریستال بنفش بر روی کامپوزیت nZVI@nBent-CMC به ترتیب ۸۸۴/۹۵ و ۵۰۵/۰۵ میلی گرم بر گرم می‌باشد. فرآیند جذب هر دو ماده رنگزا به خوبی با مدل ایزوترم لانگمویر و مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم مطابقت دارد. داده‌های ترمودینامیکی روشن کرد که جذب مواد رنگزا کنگوی قرمز و بلور بنفش روی کامپوزیت nZVI@nBent-CMC بر اثر فرآیندهای خود به خودی ایجاد شده است. علاوه بر این، جذب کنگوی قرمز روی کامپوزیت nZVI@nBent-CMC یک فرآیند گرمازا است، در حالی که جذب کریستال بنفش یک فرآیند گرماگیر می‌باشد. کامپوزیت nZVI@nBent-CMC همچنین قابلیت استفاده مجدد برای هر دو ماده رنگزای مورد مطالعه بدون از دست دادن قابل توجه در راندمان حذف مواد رنگزا آنیونی و کاتیونی از پساب را نشان می‌دهد [۴۹]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرافن اکسید، اکسید روی و کامپوزیت نانومیله اکسید روی - اکسید گرافن در شکل ۴ ارائه شده است که هر کدام ریخت آنها را بررسی می‌کنند [۵۰].

همان گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، هیو و همکارانش از نانوکامپوزیت اکسید منیزیم برای حذف کنگوی قرمز استفاده کردند. موسوی و محمودی، این نانوکامپوزیت را برای حذف آبی واکنش گر ۱۹ و قرمز واکنشگر ۱۹۸ به کار گرفتند. این دو مطالعه نشان می‌دهند که این مواد رنگزا را می‌توان به سرعت و با زمان رسیدن به تعادل ۱۰-۵ دقیقه و با ظرفیت‌های جذب بسیار بالا، جذب کرد. ظرفیت‌های جذب برای کنگوی قرمز، آبی واکنشگر ۱۹ و قرمز واکنشگر ۱۹۸، به ترتیب برابر با ۱۳۱/۳ mg/g، ۱۶۶/۷ mg/g و ۱۲۳/۵ mg/g است. در نانوکامپوزیت اکسید منیزیم، مساحت سطح (۲۰۰-۱۵۰ m²/g) برای جذب سطحی فراهم شده است.



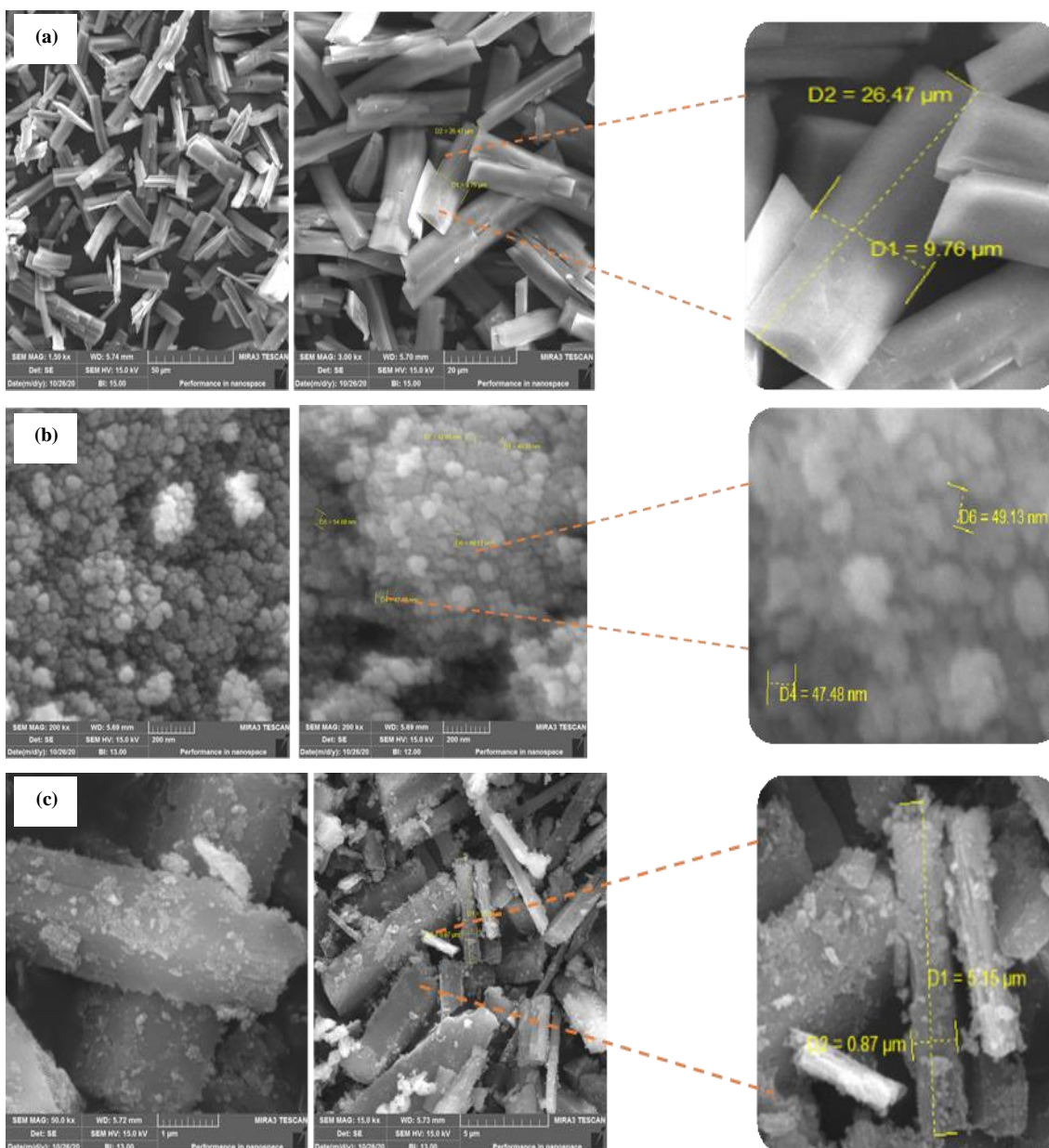
شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی (a) نانولوله کربن و (b) نانولوله کربن مغناطیسی [۴۳].

Figure 3: Electron microscope images of (a) carbon nanotube, and (b) magnetic carbon nanotube [43].

علاوه بر این، اثر pH اولیه محلول ماده رنگزا و غلظت اولیه محلول ماده رنگزا بر ویژگی جذب نانولوله‌های کربنی چندجداره عامل دار مورد مطالعه قرار گرفته است. حذف بیشتر مواد رنگزا آزو با نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل دار به دخالت الکترواستاتیک بین سطح نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل دار و مواد رنگزا آزو همراه با برهم کنش واندرالس نسبت داده شده است. ایزوترم‌های جذب سطحی برای مواد رنگزا آزوئیک به دنبال لانگمویر، فروندلیش و ایزوترم‌های تمکین هستند. بیشینه ظرفیت جذب نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل دار برای هر ماده رنگزا بیشتر از مقادیر گزارش‌ها می‌باشد. سینتیک نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل دار برای جذب مواد رنگزا آزوئیک بررسی و عمدتاً از مدل شبه مرتبه اول در مقایسه با مدل شبه مرتبه دوم پیروی می‌کنند. جذب مواد رنگزا آزوئیک با تغییر pH محلول حساسیت کمتری نسبت به تصفیه پساب دارند [۴۴].

۲-۱-۵- نانوکامپوزیت‌های بر پایه نقره، طلا، جیوه، اکسید گرافن، اکسید روی، نانومیله اکسید روی، فریت روی، دی اکسید تیتانیم، اکسید آهن ۲ و ۳، آلومینا، اکسید آهن، آهن صفر ظرفیتی و اکسید منیزیم

نانوکامپوزیت‌های جدید نظیر نقره و طلا در تصفیه آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانوکامپوزیت نقره در حذف آلاینده‌های سمی مورد استفاده قرار گرفته است. حذف جیوه از آب توسط نانوکامپوزیت



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی (a) MIL-53(Fe)، (b) فریت روی و (c) کامپوزیت MIL-53(Fe) و فریت روی [۵۰].

Figure 4: Electron microscope images of (a) MIL-53(Fe), (b) zinc ferrite and (c) composite of MIL-53(Fe) and zinc ferrite [50].

جدول ۴: حذف مواد رنگزا توسط نانو اکسید منیزیم [۵۲، ۵۳].

Table 4: Removal of pigments by nano magnesium oxide [52, 53].

Number	Dye	Optimum condition	Ref.
1	Congo red	Initial concentration (25 mg/g)	[52]
		q_{max} (588)	
		Time (2.5 minutes)	
2	Congo red	Initial concentration (100 mg/g)	[53]
		q_{max} (131.3)	
		Time (10 minutes)	

درصد وزنی، حذف ۹۵/۳ درصد وزنی از متیل نارنجی (۴۰) (MO) میلی گرم در لیتر در ۴۵ دقیقه با داده‌های تجربی، نشان می‌دهد که مطالعه‌های جدیدی برای طراحی و ساخت نانوکامپوزیت‌ها با راندمان بالا جهت تصفیه آب از پساب فراهم شده است [۵۷]. نانوکامپوزیت اکسید روی معمولاً در حذف مواد رنگزا استفاده می‌شود. اما از آن به همراه کیتوسان، به عنوان نانوکامپوزیتی برای حذف سیاه اسیدی ۲۶ و آبی مستقیم ۷۸ نیز استفاده شده است.

مطالعات زیادی در زمینه جذب سطحی کیتوسان انجام شده است، زمان رسیدن به تعادل با صرف نظر از نوع ماده رنگزا، حداقل ۷ ساعت محاسبه شده است ولی با تثبیت نانواکسید روی بر سطح کیتوسان، زمان رسیدن به تعادل تنها ۳ دقیقه کاهش داشته است. علاوه بر نانوکامپوزیت الکترواستاتیکی قوی میان گروه آمونیاک با بار الکتریکی مثبت از کیتوسان و مواد رنگزا آنیونی با بار الکتریکی منفی، خواص فیزیکی نانو اکسید روی باعث جذب سطحی مواد رنگزا می‌شود. این خواص دارای بار الکتریکی می‌باشند و نانواکسید روی $+۴۰$ mv در $(pH=2)$ از نظر مساحت سطح در مقیاس نانو بررسی شده است. از نانو اکسید روی برای جذب سیاه اسیدی ۲۶ و آبی مستقیم ۷۸ در غلظت مواد رنگزا اولیه ۲۵ppm و با مقدار نانوکامپوزیت ۵ g/l در $pH=2$ استفاده شده است. ظرفیت جذب سطحی نانوکامپوزیت اکسید روی برای مواد رنگزای سیاه اسیدی ۲۶ و آبی مستقیم ۷۸، به ترتیب برابر با ۶۳/۵۲ mg/g و ۴۸/۳۴ mg/g محاسبه شده است. اما این ظرفیت‌های جذب، در pHهای بالاتر از ۲ به دلیل افزایش تعداد یون‌های دارای بار منفی و افزایش نانوکامپوزیت الکترواستاتیکی، به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مکانیزم اصلی جذب سطحی این مواد رنگزا بر روی نانواکسید روی، جاذبه الکترواستاتیکی است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرافن اکسید، اکسید روی و کامپوزیت نانومیله اکسید روی - گرافن اکسید در شکل ۵ ارائه شده و شکل مورفولوژی هر کدام براساس نمونه‌های استفاده شده مشاهده شده است [۵۸].

ظرفیت‌های جذب نسبتاً بالا و حذف سریع مواد رنگزا به وسیله این نانوکامپوزیت، به دلیل نواحی سطحی بازی قوی آنها می‌باشد. علیرغم سرعت جذب سطحی بالای نانواکسید منیزیم، ظرفیت جذب خوبی برای تهیه نانولوله‌های کربنی ندارد. به عنوان مثال، ظرفیت نانولوله‌های کربنی خالص برای جذب سطحی کنگوی قرمزی ۱۴۸ mg/g، ظرفیت نانو اکسید منیزیم ۱۳۳/۳ mg/g را در نظر گرفته است. این در حالی است که مساحت سطح نانو اکسید منیزیم ($198 \text{ m}^2/\text{g}$) از مساحت سطح نانولوله‌های کربنی خالص ($96/91 \text{ m}^2/\text{g}$) بیشتر است. مطالعات در این زمینه نشان داده است که نانولوله‌های مسطح علاوه بر جاذبه الکترواستاتیکی قوی‌تر نسبت به نانواکسید منیزیم، یک نیروی محرکه اضافی به وسیله پیوندهای پای-پای نیز ایجاد می‌کنند. در حالی که سازوکار جذب نانوکامپوزیت اکسید منیزیم، تنها مبتنی بر جاذبه الکترواستاتیکی است [۵۱].

۲-۱-۶- نانوکامپوزیت بر پایه آهن صفر ظرفیتی

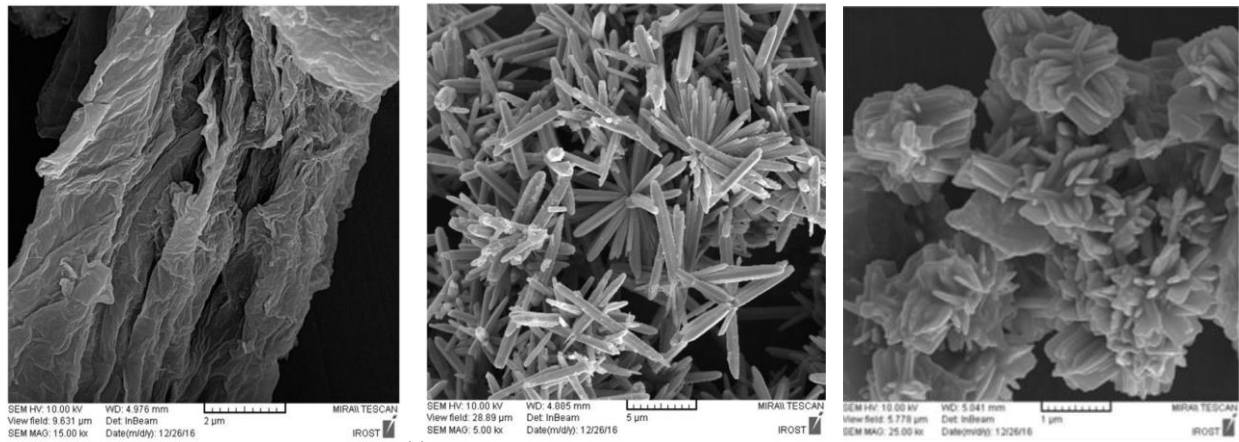
نانوکامپوزیت آهن صفر ظرفیتی معمولاً جهت حذف ماده رنگزا از پساب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نانوکامپوزیت، یک ترکیب دوست‌دار محیط زیست است و با موفقیت جهت حذف سرب، باریم، روی، آرسنیک، کرم، مس، کادمیم و کبالت از طریق واکنش‌پذیری بالا، مکان‌های سطحی فعال و اندازه ذرات قابل کنترل مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵۴-۵۶]. جدول ۴ در مورد شرایط بهینه مختلف توسط نانوکامپوزیت صفر ظرفیتی آورده شده با مواد رنگزا اسید نارنجی ۷ و اسید نارنجی ۸ بررسی شده است [۵۴-۵۶].

این نانوکامپوزیت‌ها برای تصفیه آب مورد بررسی قرار گرفته است و با راندمان پائین، کاربرد عملی آن را محدود می‌کند. در اینجا، سنتز نانوصفحات دو بعدی اکسید روی (ZnO) تزئین شده با نانوکامپوزیت دو فلزی مس (Cu) با پالادیم (Pd) برای حذف مواد رنگزا آلی در محلول آبی مورد بررسی قرار گرفته است. در مقایسه با نانو ورق‌های ZnO، کامپوزیت‌های CuPd/ZnO تهیه شده عملکرد بهتری برای حذف مواد رنگزا آلی تحت تابش نور مرئی از خود نشان داده است. بالاترین راندمان نانوکامپوزیت‌های CuPd/ZnO با محتوای CuPd با مقدار ۰/۵

جدول ۴: حذف مواد رنگزا و شرایط بهینه توسط نانوکامپوزیت آهن صفر ظرفیتی [۵۴-۵۶].

Table 4: Removal of dyes and optimal conditions by zero-valent iron nanoparticles [54-56].

Number	Dye	Optimum condition
1	Acid orange 7	Initial concentration (2500 mg/g)
		Dose (0.05 g/l)
		Percent removal(97 %)
		Time (4.5 minutes)
2	Acid orange 8	Initial concentration (2500 mg/g)
		Dose (0.05 g/l)
		Percent removal(97 %)
		Time (4 minutes)



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی (a) گرافن اکسید، (b) اکسید روی و (c) کامپوزیت نانومیله اکسید روی - گرافن اکسید [۵۸].
Figure 5: Electron microscope images of (a) graphene oxide, (b) zinc oxide and (c) zinc oxide-graphene oxide nanorod composite [58].

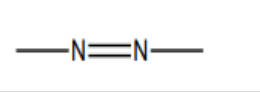
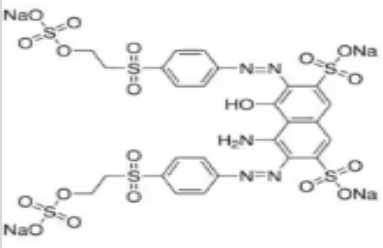
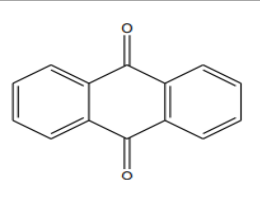
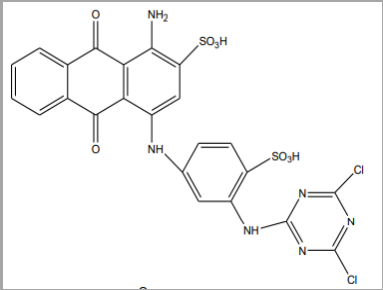
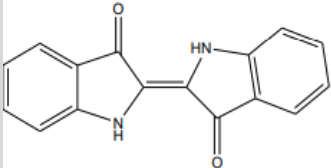
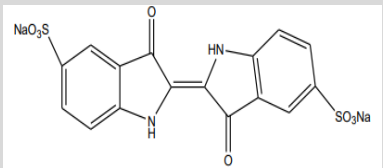
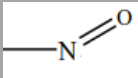
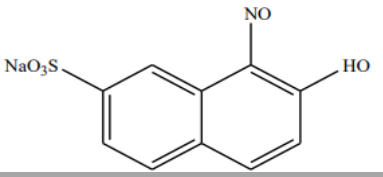
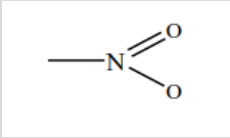
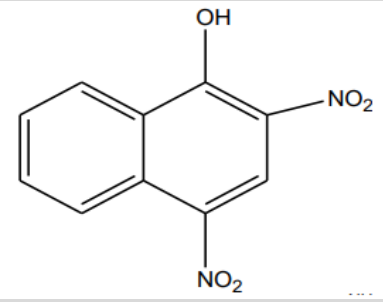
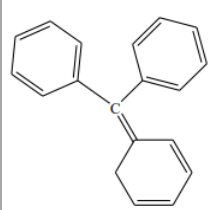
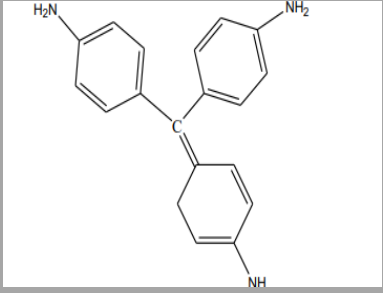
به خود جلب کرده است. به همین دلیل، به غیر از جاذبه الکترواستاتیکی، اطلاعات چندانی در رابطه با مکانیزم جذب سطحی این نانوماده در دسترس نیست. همچنین، عملکرد مناسب و مؤثر نانو اکسید منیزیم تنها در حذف مواد رنگزا آنیونی نشان داده شده است و انجام تحقیقات بیشتر جهت مشخص کردن روش تصفیه مواد رنگزا کاتیونی نظیر متیلن آبی ضروری است [۶۶، ۶۷].

۳- مواد رنگزا

اکثر مواد رنگزا محلول در آب هستند. پیش بینی شده است که صنایع نساجی و تولیدی در سراسر جهان از بیش از ۱۰،۰۰۰ ماده رنگزا موجود استفاده می کنند و مصرف مواد رنگزا در صنعت نساجی بیش از ۱۰۰۰ تن در سال است و حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از این مواد رنگزا به صورت پساب در طی فرآیند رنگرزی تخلیه می شوند [۶۸]. روش های مختلفی برای طبقه بندی مواد رنگزای تجاری وجود دارد. می توان آن را از نظر ساختار رنگزا و روش های کاربردی طبقه بندی کرد. با این حال، به دلیل پیچیدگی های نام گذاری مواد رنگزا بر مبنای ساختار شیمیایی، غالباً طبقه بندی بر اساس کاربرد انجام می شود. به غیر از موارد فوق، مواد رنگزا معمولاً بر اساس بار ذراتشان بر اثر انحلال در محیط آبی، مانند کاتیونی (همه مواد رنگزا بازیگ)، آنیونی (مواد رنگزا مستقیم، اسیدی و راکتیو) و غیر یونی (رنگزاهای دیسپرس) طبقه بندی می شوند. مواد رنگزا در صنایع مختلفی مانند نساجی، کاغذ، فرش، پلاستیک، مواد غذایی و مواد آرایشی استفاده می شوند [۶۹-۷۶]. طبقه بندی مواد رنگزا بر اساس ساختار شیمیایی در جدول ۵ ارائه شده است [۷۷، ۷۸]. جدول ۶ نشان دهنده کاربردهای مختلف مواد رنگزا بر اساس طبیعت شیمیایی و کاربردهای مختلف آنها می باشد [۷۹، ۸۰].

از سال ۲۰۰۹، نانو اکسید منیزیم برای حذف مواد شیمیایی و باکتری از پسابها استفاده می شود [۶۳-۵۹]. هزینه تولید این ماده بسیار اندک است؛ زیرا به سادگی از مواد معدنی قلیایی طبیعی که به فراوانی موجود هستند، سنتز می شود. سنتز نانو اکسید منیزیم خالص از نانو کامپوزیت و نانوصفحات به ترتیب به وسیله موسوی، محمودی و هیو و همکارانش انجام شده است [۶۵، ۶۴]. لی و همکارانش برای بهبود عملکرد نانو اکسید منیزیم، از یک ماده فعال سطح سدیمی، سدیم بیس (۲-اتیل هگزریل) سولفوسوکسینات (AOT)، به عنوان الگوی برای سنتز نانوصفحاتی از اکسید منیزیم با مزوپوری بالا استفاده کردند. این محققان با انجام آزمایشات در غلظت های مختلفی از این ماده فعال سطح، به این نتیجه رسیدند که غلظتی برابر با 0.064 مولار از این ماده فعال سطح، بهترین مساحت سطح (m^2/g) را $36/191$ ، حجم متخلخل (cm^3/g) و ابعاد تخلخل ($52/7$ nm) را فراهم می کنند. علیرغم کاهش اندک مساحت سطح، هیو و همکارانش گزارش کردند که نانو اکسید منیزیم سنتز شده موفق شده است تا کنگوی قرمز، متیل نارنجی و سودان (III) را به سرعت و تنها در مدت ۲.۵ دقیقه و به ترتیب با ظرفیت های جذب mg/g ۵۸۸، 370 و 180 حذف کند. نانو اکسید منیزیم سنتز شده با AOT، از مزوپوری بالایی برخوردار می باشد و علاوه بر جاذبه الکترواستاتیکی، نواحی جذب سطحی بیشتری را نیز فراهم می کند و ظرفیت جذب کنگوی قرمز را در مقایسه با نانو کامپوزیت اکسید منیزیم خالص ($131/3$ mg/g)، نانولوله های کربنی خالص (mg/g) ۱۴۸ و نانو کامپوزیت نانولوله کربنی-کیتوسان ($450/4$ mg/g) بهبود می بخشد. با توجه به ظرفیت جذب بالا، قیمت پایین و نرخ جذب سطحی بالا، نانو اکسید منیزیم در مقایسه با نانومواد رایج تر نظیر نانولوله های کربنی، از پتانسیل بالایی برای تجاری سازی به عنوان یک نانو کامپوزیت برتر برای تصفیه سریع پساب های با ظرفیت بالا، برخوردار است. این نانوماده، به تازگی توجه دانشمندان و محققان را

جدول ۵: طبقه‌بندی مواد رنگزا براساس ساختار شیمیایی [۷۸، ۷۹].
 Table 5: Classification of dyes based on chemical structure [77, 78].

Dye	Chromophore	Example	Chemical structure
Azo		Reactive black 5	
Anthraquinone		Reactive blue 4	
Vat		Aqueous acid 71	
Nitroso		Green acid 1	
Nitro		Yellow acid 24	
Triarylmethane		Basic Red 9	

جدول ۶: طبقه‌بندی ماده رنگزا براساس طبیعت شیمیایی و کاربرد [۷۹، ۸۰].

Table 6: Classification of dyes based on chemical nature and application [79,80].

Chemical species	Method	Application	Dye
Anthraquinone, xanthan	Generally from neutral to acidic bath	Ink, leather and paper	Acid
Hemicyanine, azo, cyanine and diazahemi cyanine	Using colored materials in acid bath	Acrylonitrile	Base
Phthalocyanine and Azo	Using a neutral or slightly alkaline bath containing extra electrolytes	Nylon, rayon and paper	Direct
Benzodifuranone, azo and anthraquinone	Good dispersion in water, often using a high temperature/pressure or lower temperature holding method	Polyamide, polyester and acrylic	Dispersed
Phthalocyanine, azo, oxazine and base	The reaction of the reactive site in the dyes on the fiber with the functional group	Wool, cotton, silk and nylon	Reactive
Unspecified structures	Exposing the aromatic substrate to sodium sulfide and re-oxidizing products containing unstable sulfur on the fiber	Rayon and cotton	Sulfur
Indigo and anthraquinone	Solubility of color substances insoluble in water by hydrogen	Wool and cotton	Vat

متناوب غشاها باید از نظر اقتصادی بررسی گردد. نتایج نشان دادند که جذب گاز مایع یکی از رایج‌ترین روش‌ها می باشد زیرا طراحی درست فرآیند جذب سبب ایجاد یک سیال تصفیه شده با کیفیت بالا می گردد. این فرآیند یک روش بسیار مناسب برای تصفیه آبهای آلوده می باشد بخصوص اگر که نانوکامپوزیت مورد مصرف گران نبوده و نیازمند مرحله آماده‌سازی مقدماتی قبل از کاربرد نباشد. در طول فرآیند جذب سطحی، مولکول‌های حل‌شونده از محلول خارج شده و توسط نانوکامپوزیت، جذب می شوند. بخش اعظم مولکول‌ها روی مساحت سطح بزرگی از تخلخل‌های نانوکامپوزیت، جذب شده و به مقدار نسبتاً کمتری روی سطح بیرونی ذره، جذب می شوند. انتقال جذب شونده از محلول بر روی نانوکامپوزیت تا زمانی ادامه پیدا می کند که غلظت حل‌شونده باقیمانده در محلول با غلظت حل‌شونده جذب شده توسط جاذب در حال تعادل باشد. زمانی که تعادل برقرار گردد انتقال جذب شونده متوقف شده و توزیع حل‌شونده بین فاز مایع و جامد را که قابل اندازه‌گیری است به خوبی می توان تعیین کرد [۸۹]. شکل ۷ فرآیند تخریب رنگزای قرمز مستقیم ۲۳ در آب را نشان می‌دهد [۹۰].

۴-۳- روش زیستی

به طور معمول تصفیه بیولوژیکی در مقایسه با سایر روش‌های فیزیکی و شیمیایی اقتصادی‌ترین راهکار است. روش‌های تجزیه زیستی مانند رنگبری قارچی، تجزیه میکروبی و جذب توسط زیست توده میکروبی (زنده یا مرده) برای آلاینده‌های صنعتی به کار می روند زیرا بسیاری از موجودات ریز زیستی همچون باکتری، مخمر، جلبک و قارچ قادر به تجمع و سپس تجزیه آلاینده‌های مختلف می باشند. هر چند که اغلب کاربرد آنها به دلیل محدودیت‌های فنی، منحصر به فرد و محدود می باشد، تصفیه زیستی نیاز به یک فضای گسترده دارد و به همان نسبت قیمت نیز در آن تأثیرگذار و دارای انعطاف پذیری کمی از جهت طراحی می باشد.

۴- روش‌های حذف مواد رنگزا از پساب

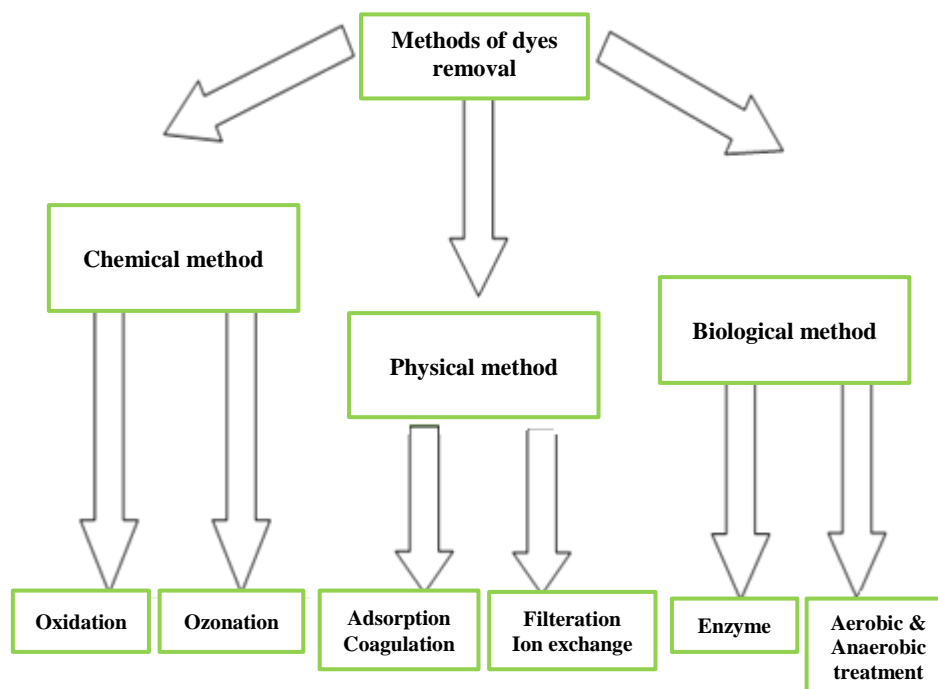
صنایع نساجی از مقدار زیادی آب در فرآیند رنگرزی استفاده می‌کنند در نتیجه حجم زیاد پساب، فرآیند تصفیه را با مشکل مواجه می‌کند (شکل ۶) [۸۱، ۸۲]. برای تحقق این امر، از فناوری‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی برای محافظت از محیط‌زیست و سلامت انسان در برابر مشکلات تخلیه پساب به محیط‌زیست استفاده شده است. این روش‌ها را می‌توان به تنهایی و یا به صورت ترکیبی اجرا کرد تا نتایج موثری بدست آورد [۸۳-۸۸].

۴-۱- روش شیمیایی

روش‌های شیمیایی شامل روش‌های اکسیدشدن متداول توسط اکسیدکننده‌ها و ازن، تابش یا فرآیندهای الکتروشیمیایی می باشند. این فناوریهای شیمیایی اغلب گران هستند و اگرچه مواد رنگزا حذف می‌گردند، تجمع لجن متراکم شده سبب ایجاد مشکل در دفع مواد می‌گردد. همچنین امکان اینکه مساله آلودگی ثانویه، به دلیل مصرف بیش از حد مواد شیمیایی رخ دهد نیز وجود دارد. اخیراً سایر فناوری‌های تأثیرگذار، که تحت عنوان فرآیندهای پیشرفته اکسیدشدن شناخته شده‌اند و بر مبنای ایجاد اکسیدکننده‌های بسیار قدرتمند مانند رادیکال‌های هیدروکسیل می باشند نیز برای تخریب آلاینده‌ها با موفقیت پذیرفته شده‌اند. اگرچه این روشها برای تصفیه آبهای آلوده کافی و مناسب هستند، بسیار گران و از نظر اقتصادی نامطلوب می باشند [۸۹].

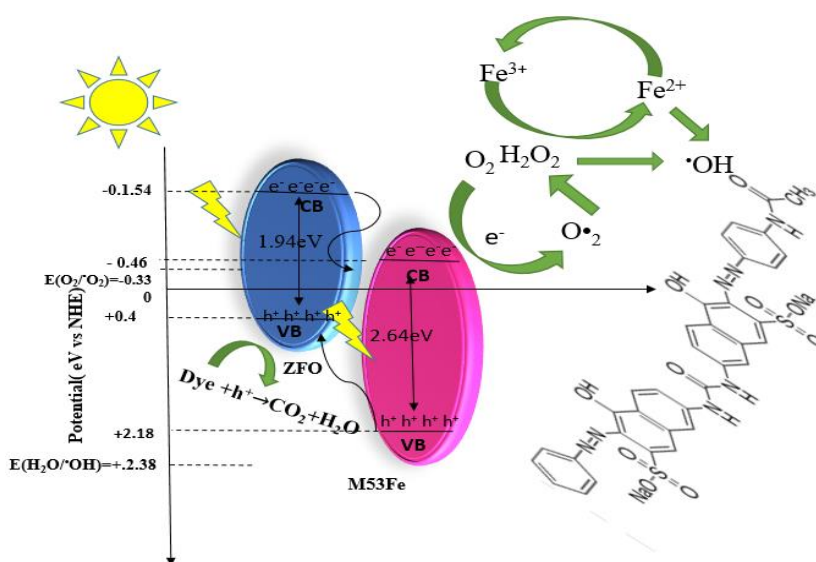
۴-۲- روش فیزیکی

روشهای فیزیکی مختلفی مانند فرآیندهای صاف کردن غشایی (نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، الکترودیالیز و غیره) و فناوری‌های جذب به طور گسترده جهت حذف مواد رنگزا از پساب استفاده می‌شوند. اشکال اصلی فرآیندهای غشایی این است که طول عمر غشاها قبل از گرفتگی آنها کم است و همچنین هزینه جایگزینی



شکل ۶: روش‌های حذف مواد رنگزا از پساب [۸۸-۸۳].

Figure 6: Methods of removing dyestuff from wastewater [83-88]



شکل ۷: فرآیند تخریب ماده رنگزا قرمز مستقیم ۲۳ [۹۰].

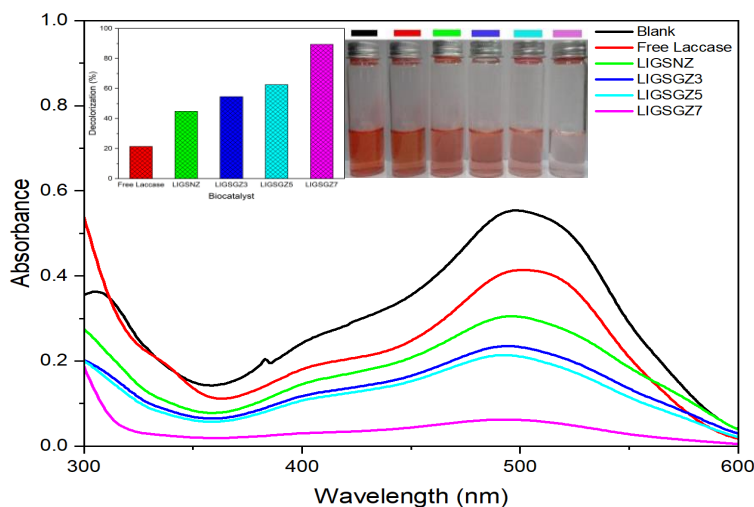
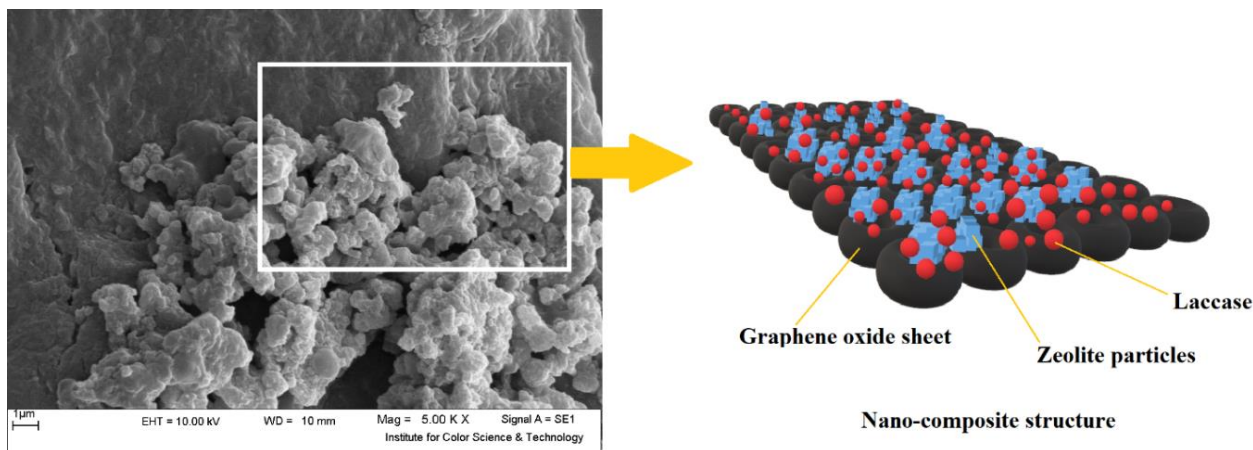
Figure 7: Degradation process of direct red dye 23 [90].

است [۹۷].

۵- بررسی معادلات ایزوترم جذب سطحی

ایزوترم جذب برای مطالعه چگونگی جذب آلاینده روی جاذب استفاده می‌شود. فاز سطح ممکن است به عنوان یک یا چند لایه در نظر گرفته شود.

تصفیه زیستی در حذف مواد رنگزای مقاوم در پساب ناتوان است. علاوه بر این، گرچه بسیاری از مولکولهای آلی تجزیه می‌شوند، بسیاری دیگر از آنها به خاطر ساختار شیمیایی پیچیده و منشاء آلی مصنوعی خود در مقابل تجزیه مقاوم هستند [۹۶-۹۱]. شکل ۸ رنگبری آنزیمی با آنزیم لاکاز تثبیت شده بر روی پایه گرافنی و ژئولیت را نشان می‌دهد در اینجا ساختار نانوکامپوزیت با استفاده از مورفولوژی و طول موج بیشینه با مواد رنگزا مورد بررسی قرار گرفته



شکل ۸: رنگبری آنزیمی با آنزیم لاکاز تثبیت شده بر روی پایه گرافنی و زئولیت [۹۷].
Figure 8: Enzymatic decolorization with laccase enzyme stabilized on graphene and zeolite [97].

این میزان را می‌توان از طریق مطالعه سینتیک محاسبه کرد. بنابراین، سینتیک مواد رنگزای آنیونی و کاتیونی بر روی مواد نانوکامپوزیت مختلف با استفاده از مدل‌های مختلف سینتیک که در زیر ارائه شده است، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (جدول ۹) [۱۱۹-۱۲۸].

۷- بررسی ترمودینامیک

در مطالعات مختلف ترمودینامیک مدل‌های مختلف ایزوترم برای حذف ماده رنگزا مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲۹-۱۳۳]. تغییرات انرژی آزاد (ΔG°)، تغییر آنتالپی (ΔH°) و تغییر آنتروپی (ΔS°) به عنوان عوامل ترمودینامیکی جذب ماده رنگزا محاسبه می‌شوند. انرژی آزاد گیبس استاندارد با رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (1)$$

چندین مدل ایزوترم ارائه شده است که از میان آنها مدل‌های فروندلیش و لانگمویر بیشترین کاربرد را در توصیف ایزوترم جذب دارند [۹۸-۱۰۱]. در جدول ۷ ایزوترم‌های جذب با جزئیات بررسی شده است که هر کدام دارای مدل با فرم‌های خطی می‌باشند که این رابطه‌ها جهت حذف ماده رنگزا استفاده می‌شوند [۱۰۲-۱۱۱].

۶- بررسی رابطه‌های سینتیکی جذب

سازوکارهای کنترل فرآیند جذب مانند مواد شیمیایی واکنش، کنترل انتشار یا ضریب انتقال جرم برای تعیین مدل‌های سینتیک استفاده می‌شود [۱۱۲-۱۱۵]. سینتیک جذب ماده رنگزا بر روی مواد نانوکامپوزیت قبل از انتخاب بهترین شرایط عملیاتی برای فرآیند دسته‌ای در مقیاس کامل قرار دارد. سینتیک جذب علاوه بر سرعت جذب، مقدار آلاینده جذب شده روی جاذب را نیز مطالعه می‌کند (جدول ۸) [۱۱۶-۱۱۸].

این میزان بیشترین اهمیت را در هنگام طراحی سیستم جذب دارد و

جدول ۷: بررسی ایزوترم‌های جذب سطحی [۱۱۱-۱۰۲].

Table 7: Investigation of adsorption isotherms [102-111].

Number	Name	Model	فرم خطی	Ref
1	Langmuir	$q_e = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e}$	Type 1: $q_e = \frac{1}{Q_0} + \frac{b C_e}{1 + b Q_0 C_e}$ Type 2: $\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b Q_0} + \frac{C_e}{Q_0}$ Type 3: $q_e = Q_0 - \frac{q_e}{b C_e}$ Type 4: $q \frac{e}{C_e} = b Q_0 - b q_e$	[102]
2	Freundlich	$q_e = K F C_e^{1/n}$	$\log q_e = \log K F + \frac{1}{Q_{n0}} \log C_e$	[103]
3	Dubinin-Radushkevich	$(q_e) \exp(-K a d d \varepsilon^2)$	$\ln(q_e) = \ln(q_s) - K a d d \varepsilon^2$	[104]
4	Temkin	$q_e = \frac{RT}{bT} \ln A T C_e$	$q_e = \frac{RT}{bT} \ln A T C_e + (\frac{RT}{bT}) \ln C_e$	[105]
5	Flory-Huggins	$q_e = \frac{\theta}{C_0} = K F H (1-\theta)^{n F H}$	$\log(\frac{\theta}{C_0}) = \log(K F H) + n F H \log(1-\theta)$	[106]
6	Hill	$q_e = \frac{q_s H C_e^{n H}}{K D + C_e^{n H}}$	$\log(\frac{q_e}{q_s H - q_e}) = n H \log(C_e) - \log(K D)$	[107]
7	R-P	$q_e = \frac{K R C_e}{1 + a R C_e^b}$	$\ln(K R \frac{C_e}{q_e} - 1) = \ln(C_e) + \ln(a R)$	[108]
8	Sips	$q_e = \frac{K_s C_e^{\beta s}}{1 + a S C_e^{\beta s}}$	$\beta \ln(C_e) = -\ln(\frac{K_s}{q_e}) + \ln a s$	[109]
9	Toth	$q_e = \frac{K T C_e}{(a T + C_e)^{1/t}}$	$\ln(\frac{q_e}{K T}) = \ln(C_e) - \frac{1}{t} \ln(a T + C_e)$	[110]
10	Kubel-Corrigan	$q_e = \frac{A C_e^n}{(1 + B C_e^n)}$	$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{A C_e^n} + \frac{B}{A}$	[111]

جدول ۸: رابطه‌های سینتیک جذب سطحی [۱۱۸-۱۱۶].

Table 8: Adsorption kinetic equations [116-118].

Number	Models	Equations	Ref
1	Pseudo-first-order	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1 t}{2.3}$ $\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t$	[116]
2	Pseudo-second-order	$q_e = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t}$ $\frac{t}{q} = \frac{1}{K_2 q_e^2 t} + \frac{1}{q_e t}$	[117]
3	Bengham	$\log q_t = \log k + \frac{1}{b} \log t$	[117]
4	Intraparticle diffusion	$q_t = K d i f t^{0.5} + C$	[118]
5	Elovich	$q_e = (\frac{1}{\beta}) \ln(\alpha \beta) + (\frac{1}{\beta}) \ln t$	[118]

جدول ۹: جاذب‌های نانوکامپوزیتی، ماده رنگزا، شرایط جذب، ایزوترم و سینتیک [۱۲۸-۱۱۹].

Table 9: Adsorbent, dye, adsorption conditions, isotherm and kinetics [119-128].

Adsorbents Nanocomposite	Dye	Adsorption condition	Isotherm	kinetic	Ref
Nickel ferrite-polyaniline nanocomposite	Methylene blue	Contact time (min) = 80, dose = 5 (g), pH = 7, initial concentration = 80 (mg/L), temperature = 35 (°C)	Langmuir	pseudo-second-order	[119]
Polyaniline grafted Ag-ZnO and polyethylene glycol nanocomposites	Brilliant green	Contact time (min) = 180, dose = 0.075 (g), pH = 8, initial concentration = 70 (mg/L), temperature = 45 (°C)	Langmuir	pseudo-second-order	[120]
Organic-metallic framework	Acid red 1, Acid blue 80	Contact time (min) = 720, dose = 0.003 (g), pH = 7, initial concentration = 200 (mg/L), temperature = 25 (°C)	Langmuir	-	[121]
Combination of graphene with polydopamine-kaolin	Methylene blue	Contact time (min) = 1440, dose = 0.8 (g), pH = 11, initial concentration = 5 (mg/L), temperature = 47 (°C)	Langmuir	pseudo-second-order	[122]

(ادامه جدول ۹)

Adsorbents Nanocomposite	Dye	Adsorption condition	Isotherm	kinetic	Ref
Graphene oxide with activated carbon	Methylene blue	Contact time (min) = 40, dose = 0.8 (g), pH = 12, initial concentration = 40 (mg/L), temperature = 25 (°C)	Freundlich	pseudo-second-order	[123]
Chitosan/silica/zinc oxide nanocomposite	Methylene blue	Contact time (min) = 120, dose = 1 (g), pH = 7, initial concentration = 100 (mg/L)	Langmuir	-	[124]
Activated carbon	Carmine Indigo	Contact time (min) = 90, dose = 1 (g), pH = 2, initial concentration = 60 (mg/L), temperature = 40 (°C)	Langmuir	pseudo-second-order	[125]
Commercial activated carbon	Methylene blue	Contact time (min) = 60, dose = 0.1 (g), pH = 5, initial concentration = 5 (mg/L), temperature = 40 (°C)	Langmuir	pseudo-second-order	[126]
Commercial activated carbon	Rhodamine B	Contact time (min) = 180, dose = 2 (g), initial concentration = 15 (mg/L), temperature = 42 (°C)	Langmuir	pseudo-second-order	[127]
Commercial activated carbon	Yellow acid 17	Contact time (min) = 180, dose = 2 (g), initial concentration = 30 (mg/L), temperature = 42 (°C)	Langmuir	pseudo-second-order	[128]

رنگزا در مقیاس صنعتی کمک زیادی می‌کند [۱۳۵].

۸-۱- اثر غلظت اولیه

اثر غلظت اولیه بر روی ماده رنگزای سافرانین با نانوکامپوزیت‌های سنتز شده در غلظت‌های مختلف ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۱۰ میلی گرم بر لیتر در ۲۵ میلی لیتر محلول ماده رنگزا با مقدار نانوکامپوزیت بهینه ۰/۰۵ گرم در فواصل زمانی مشخص بر روی هم‌زن مغناطیسی در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) مورد بررسی قرار گرفت. نمودار غلظت اولیه ماده رنگزا با جاذب‌های نانوکامپوزیتی اکسید گرافن/کربن فعال، اکسید گرافن/کربن فعال/اکسید سریم و اکسیدگرافن/کربن فعال/هیدروکسید آلومینیم در شکل ۹ ارائه شده است [۱۳۵]. در هر سه نانوکامپوزیت با افزایش غلظت اولیه ماده رنگزای سافرانین، درصد حذف افزایش یافته است به نحوی که میزان جذب ماده رنگزا سافرانین تحت تاثیر غلظت اولیه آن است. اما در غلظت‌های اولیه بالاتر از ppm ۲۰ تقریباً ظرفیت جذب به مقدار بیشینه خود می‌رسد و مقدار آن ثابت می‌ماند و مستقل از غلظت اولیه می‌شود. در غلظت پایین ppm ۱۰ مولکول‌های ماده رنگزا سافرانین به مکان‌های خالی نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کربن فعال متصل شده و با افزایش غلظت این مکان‌های خالی پر می‌شوند و در نتیجه پس از یک غلظت مشخص میزان جذب تغییر نکرده و ثابت می‌ماند [۱۳۵].

۸-۲- اثر pH محلول رنگزای سافرانین

pH محلول از مهم‌ترین عوامل موثر در فرآیند جذب سطحی است که می‌تواند تغییری در درجه یونی‌شدن، بار سطحی نانوکامپوزیت‌ها و همچنین تفکیک گروه‌های عاملی موجود در مکان‌های فعال جذبی نانوکامپوزیت ایجاد کند. زیاد بودن یون‌های هیدروژن نه تنها بر مقدار درجه یونی‌شدن مولکول‌های ماده رنگزا، بلکه بر مقدار بار سطحی نانوکامپوزیت‌ها نیز اثر گذارند.

ثابت تعادل (Kc) در هر دما با استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید [۱۳۲، ۱۳۳].

$$K_c = \frac{q_e}{C_e} \quad (2)$$

آنتالپی استاندارد (ΔH°) و آنتروپی (ΔS°) با استفاده از رابطه وانت هاف (رابطه ۳) به دست می‌آید.

$$\ln K_c = \left(\frac{\Delta S^\circ}{R} \right) - \left(\frac{\Delta H^\circ}{RT} \right) \quad (3)$$

جدول ۱۰ عوامل ترمودینامیکی جذب ماده رنگزا در پلی وینیل الکل / کتیوسان / کامپوزیت سیلیس را نشان می‌دهد [۱۳۴]. مقادیر مثبت ΔH° نشان می‌دهد که حذف ماده رنگزا آزو DR80 توسط پلی وینیل الکل / کتیوسان / کامپوزیت سیلیس یک واکنش گرماگیر است و مقادیر منفی ΔG° نشان دهنده فرآیند جذب خود به خود ماده رنگزا در پلی وینیل الکل / کتیوسان / کامپوزیت سیلیس است. مقدار ΔG° برای جذب فیزیکی بین ۰ تا ۲۲۰ کیلوژول بر مول است، اما برای جذب شیمیایی در محدوده ۲۸۰ تا ۲۴۰۰ کیلوژول بر مول است. مقادیر ΔG° به دست آمده برای این مطالعه در محدوده ۲۲۰ و ۰ کیلوژول بر مول است. داده‌ها نشان می‌دهد که جذب فیزیکی ماده رنگزا آزو DR80 در پلی وینیل الکل / کتیوسان / کامپوزیت سیلیس مکانیسم غالب است. علاوه بر این، مقادیر مثبت ΔS° نشان می‌دهد که میل خاصی بین ماده رنگزا آزو DR80 و نانوکامپوزیت تهیه شده وجود دارد و تصادفی بودن در رابط جاذب / محلول افزایش می‌یابد [۱۳۴].

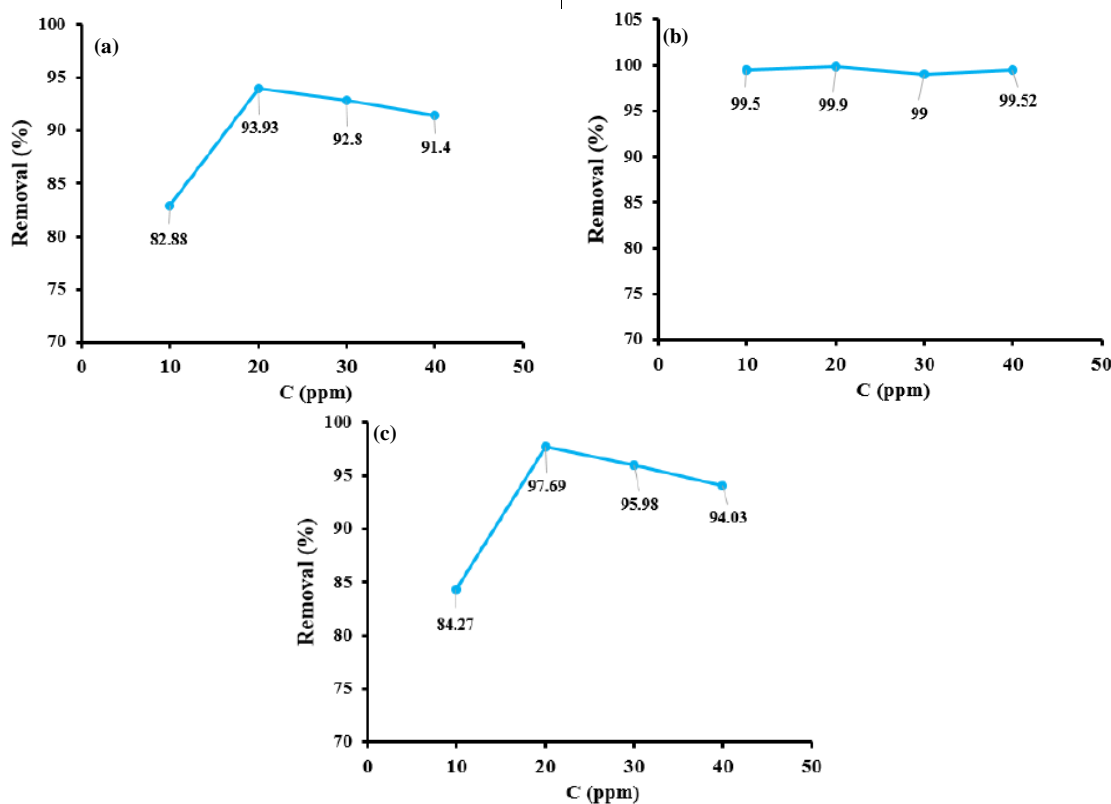
۸- بررسی عوامل مختلف

عوامل زیادی بر جذب ماده رنگزا تأثیر دارند مانند pH محلول، دما، زمان تماس و غلظت اولیه رنگزا. بنابراین، اثرات این عوامل باید در نظر گرفته شود. بهینه سازی چنین شرایطی به پیشرفت روند روش حذف

جدول ۱۰: جذب ماده رنگزا آزو DR80 در پلی وینیل الکل / کتیوسان / کامپوزیت سیلیس در دماهای مختلف [۱۳۴].

Table 10: Absorption of azo dye DR80 in polyvinyl alcohol/chitosan/silica composite at different temperatures [134].

K_c		ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol)	ΔG° (kJ/mol)			
Temperature		1.1575	0.113	Temperature			
410	571			25 °C	35 °C	45 °C	55 °C
45 °C	55 °C			-4/67	-4.83	-4/99	-5/14
528	925						

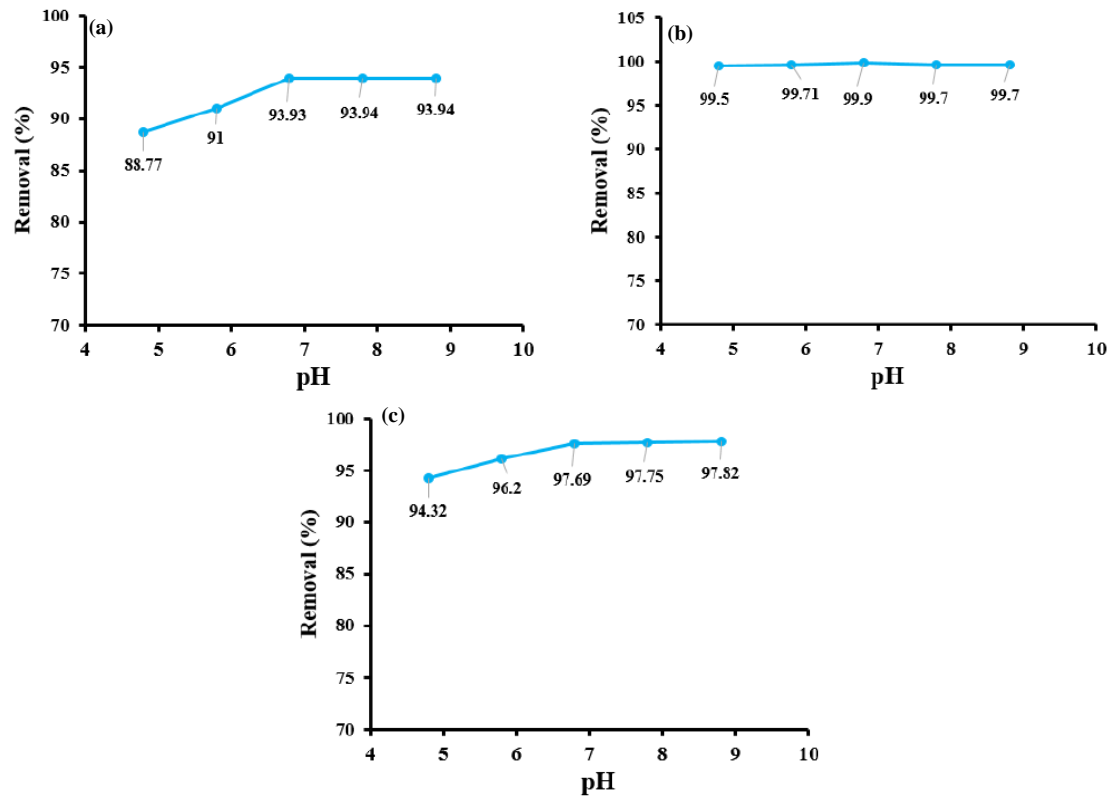


شکل ۹: اثر غلظت اولیه بر روی رنگزای سافرانین با نانوکامپوزیت‌ها (a) اکسید گرافن/کربن فعال، (b) اکسید گرافن/کربن فعال/سرمیم اکسید و (c) نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کربن فعال / هیدروکسید آلومینیم [۱۳۵].

Figure 9: The effect of initial concentration on safranin dye with nanocomposites (a) Graphene oxide/activated carbon, (b) Graphene oxide/activated carbon/cerium oxide, and (c) Graphene oxide/activated carbon/aluminum hydroxide nanocomposite [135].

افزایش pH محلول از ۴/۸ به ۶/۸ افزایش می‌یابد و در ادامه با افزایش pH از ۶/۸ به ۸/۸ بسیار کم می‌شود. این را می‌توان به رقابت یون‌های H^+ و ماده رنگزا سافرانین در مقادیر pH پایین برای اتصال به سطح نانوکامپوزیت نسبت داد که به برتری یون‌های H^+ منجر می‌شود اما با افزایش pH مقدار جذب به علت کاهش غلظت یون‌های H^+ افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش pH و کاهش تعداد گروه‌های با بار مثبت روی سطح نانوکامپوزیت، میزان جذب ماده رنگزا افزایش یافته و در ۸/۸ pH = ۶ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. بنابراین، مؤثر $pH = 6 \pm 0.1$ در نظر گرفته شد [۱۳۵].

از اینرو بررسی تاثیر pH بر فرایند حذف ماده رنگزا بسیار مهم و ضروری است. اثر pH محلول بر روی ماده رنگزا سافرانین با نانوکامپوزیت سنتز شده اکسید گرافن/کربن فعال، اکسید گرافن/کربن فعال/سرمیم اکسید و اکسید گرافن/کربن فعال / هیدروکسید آلومینیم در pH های مختلف شامل ۸/۴، ۸/۵، ۸/۶، ۸/۷، ۸/۸ در ۲۵ میلی لیتر محلول ماده رنگزا با مقدار نانوکامپوزیت بهینه ۰/۰۵ گرم و با غلظت بهینه ۲۰ ppm در فواصل زمانی مشخص بر روی هم‌زن مغناطیسی در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۱۰ آمده است [۱۳۵]. با بررسی نتایج به دست آمده از هر سه جاذب نانوکامپوزیتی به کار رفته مشاهده می‌شود میزان درصد جذب ماده رنگزا سافرانین با



شکل ۱۰: اثر pH محلول بر روی ماده رنگزای سافرانین با نانوکامپوزیت‌ها (الف) اکسید گرافن/کربن فعال (ب) اکسید گرافن/کربن فعال/سریم (ج) نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کربن فعال / هیدروکسید آلومینیم [۱۳۵].

Figure 10: Effect of solution pH on safranin dye with nanocomposites (a) Graphene oxide/activated carbon (b) Graphene oxide/activated carbon/cerium (c) Graphene oxide/activated carbon/aluminum hydroxide nanocomposite [135].

به وضوح نشان داد که فرآیند جذب برای ماده رنگزای سافرانین بسیار سریع است [۱۳۵].

۸-۴- اثر دما

تاثیر دما بر جذب ماده رنگزای سافرانین با نانوکامپوزیت سنتز شده اکسید گرافن/کربن فعال، اکسید گرافن/کربن فعال / سریم اکسید و اکسید گرافن/کربن فعال/آلومینیم هیدروکسید در گستره زمانی مشخص ۵-۶۰ دقیقه و با ثابت نگاه داشتن سایر عوامل غلظت اولیه رنگزا ۲۰ میلی گرم بر لیتر، مقدار جذب ۰/۰۵ گرم و pH= ۶/۸ در دمای محیط بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۱۱ آمده است [۱۳۵]. همانطور که در شکل ۱۱ a و b و c برای هر سه جاذب نانوکامپوزیت سنتز شده مشاهده می شود میزان درصد جذب ماده رنگزا با گذشت زمان افزایش می یابد و در زمان ۶۰ دقیقه به بیشترین مقدار جذب خود می رسد [۱۳۵]. بعد از گذشت ۴۰ دقیقه، تغییر بسیار جزئی در میزان جذب مشاهده می شود و می توان گفت نانوکامپوزیت اشباع شده و فرآیند جذب به حالت تعادل رسیده است. به عبارت دیگر می توان بیان کرد که فراوانی و در دسترس بودن سایت های فعال خالی نانوکامپوزیت منجر به جذب بسیار سریع مولکول های ماده رنگزای سافرانین از محلول آبی در دقایق اولیه می شود. روند تغییرات بر حسب زمان را می توان به اشباع شدن تدریجی محل های جذبی نانوکامپوزیت توسط مولکول های ماده رنگزا نسبت داد. نتایج بررسی زمان تماس بر نانوکامپوزیت های ذکر شده

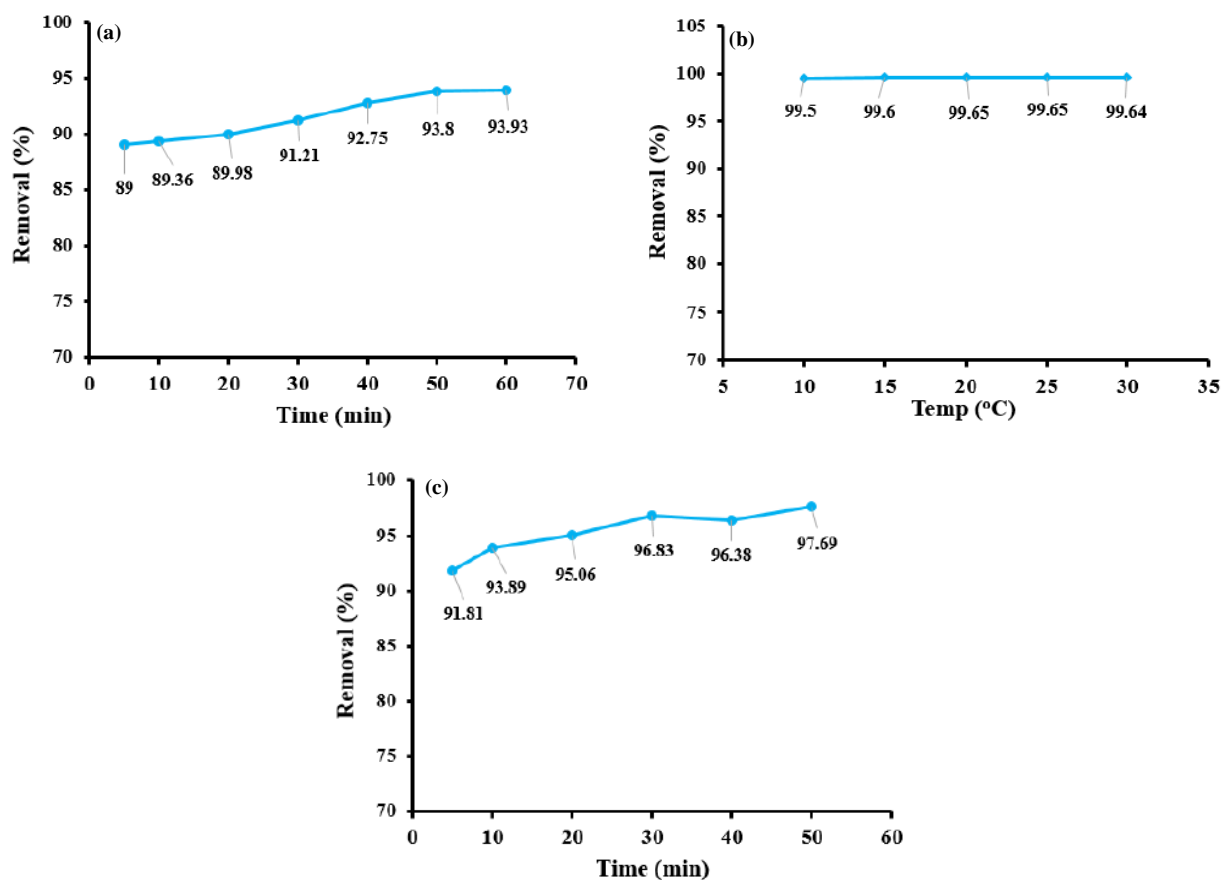
۸-۳- اثر زمان تماس

تاثیر زمان تماس بر جذب ماده رنگزای سافرانین با نانوکامپوزیت سنتز شده ی اکسید گرافن/کربن فعال، اکسید گرافن/کربن فعال / سریم اکسید و اکسید گرافن/کربن فعال / هیدروکسید آلومینیم در گستره زمانی ۵-۶۰ دقیقه و با ثابت نگاه داشتن سایر عوامل غلظت اولیه ماده رنگزا ۲۰ میلی گرم بر لیتر، مقدار نانوکامپوزیت ۰/۰۵ گرم و pH= ۶/۸ در دمای محیط بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۱۱ آمده است [۱۳۵]. همانطور که در شکل ۱۱ a و b و c برای هر سه جاذب نانوکامپوزیت سنتز شده مشاهده می شود میزان درصد جذب ماده رنگزا با گذشت زمان افزایش می یابد و در زمان ۶۰ دقیقه به بیشترین مقدار جذب خود می رسد [۱۳۵]. بعد از گذشت ۴۰ دقیقه، تغییر بسیار جزئی در میزان جذب مشاهده می شود و می توان گفت نانوکامپوزیت اشباع شده و فرآیند جذب به حالت تعادل رسیده است. به عبارت دیگر می توان بیان کرد که فراوانی و در دسترس بودن سایت های فعال خالی نانوکامپوزیت منجر به جذب بسیار سریع مولکول های ماده رنگزای سافرانین از محلول آبی در دقایق اولیه می شود. روند تغییرات بر حسب زمان را می توان به اشباع شدن تدریجی محل های جذبی نانوکامپوزیت توسط مولکول های ماده رنگزا نسبت داد. نتایج بررسی زمان تماس بر نانوکامپوزیت های ذکر شده

جدول ۱۱: نتایج حاصل از اثر pH محلول و ظرفیت جذب سطحی در فرآیند جذب [۱۳۶-۱۴۳].

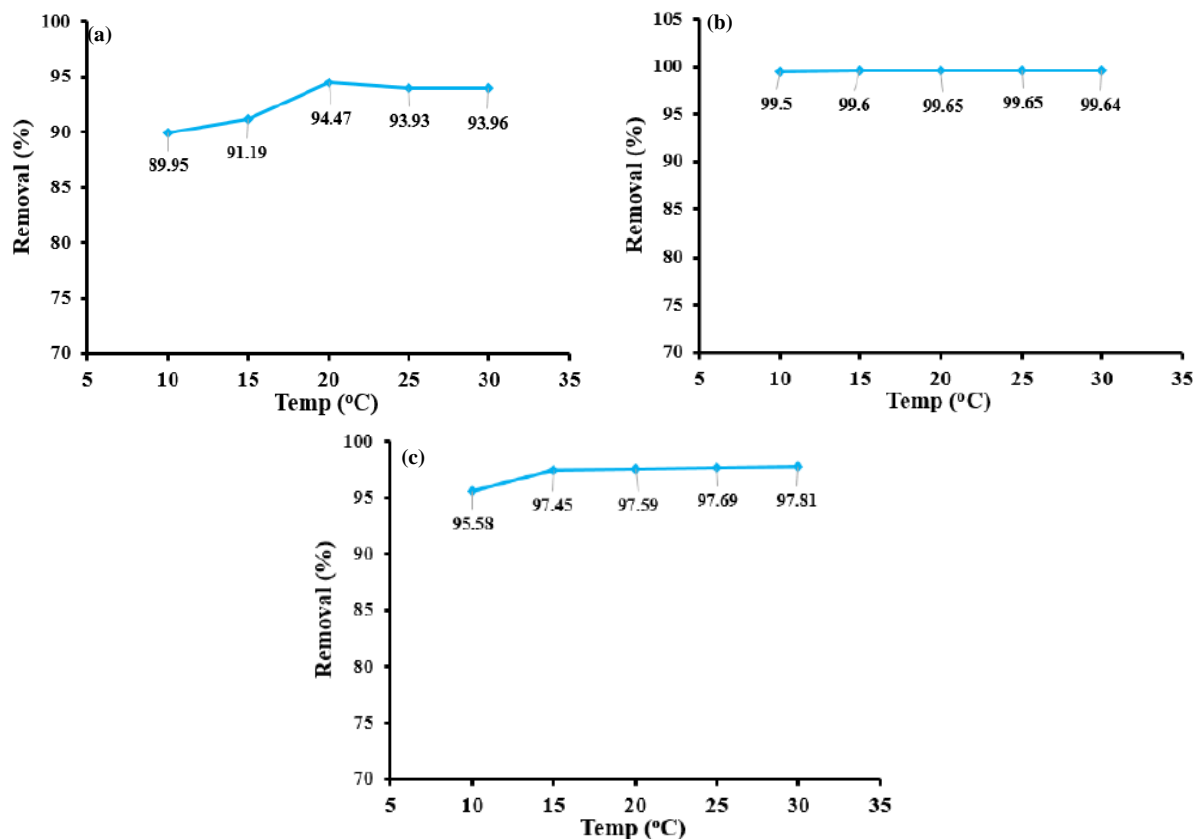
Table 11: The results of the effect of solution pH and surface adsorption capacity in the adsorption process [136-143].

No.	Adsorbent	Dye	Adsorption capacity (mg/g)	pH	Ref
1	Calcined oyster shell	Anionic dyes	34.1	11	[136]
2	Activated carbon	Carmine Neal	—	1-12	[137]
3	Iron doped activated carbon	Tartrazine and methylene blue	357.142, 147.057	3-6	[138]
4	Activated carbon and mesoporous carbon	acid yellow 17, B Rhodamine	35, 40, 53	—	[139]
5	Copper (II) Oxide, Copper (I) Oxide	Methyl orange	11.4, 63.12, 39.36, 5.84, 14.28, 26.72, 39.8, 39.64	2-12	[140]
6	Organic-metallic framework and magnetic nanoparticles in silica substrate	Methylene blue	9.897, 4.8284, 10.7567, 270.27, 14.4145, 13.93	26, 3, 9	[141]
7	Azolla modified with magnetite nanoparticles	Brilliant blue	1.197, 1.099	2-5	[142]
8	Nanocomposite hydrogels based on gelatin and nickel oxide nanoparticles	Violet crystal	1.700	2-8	[143]



شکل ۱۱: اثر زمان تماس با نانوکامپوزیت‌ها بر روی رنگزای سافرانین (a) اکسید گرافن/کربن فعال، (b) اکسید گرافن/کربن فعال/سرمیم اکسید و (c) نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کربن فعال/آلومینیم هیدروکسید [۱۳۵].

Figure 11: Effect of contact time on safranin dye with nanocomposites (a) Graphene oxide/activated carbon (b) Graphene oxide/activated carbon/cerium oxide (c) Graphene oxide/activated carbon/aluminum hydroxide nanocomposite [135].



شکل ۱۲: اثر دما بر روی ماده رنگزای سافرانین در تماس با نانوکامپوزیت‌های (a) اکسید گرافن/کربن فعال، (b) اکسید گرافن/کربن فعال/سربیم اکسید و (c) نانوکامپوزیت اکسید گرافن/کربن فعال / هیدروکسید آلومینیم [۱۳۵].

Figure 12: Effect of temperature on safranin dye with nanocomposite (a) Graphene oxide/activated carbon, (b) Graphene oxide/activated carbon/cerium oxide, and (c) Graphene oxide/activated carbon/aluminum hydroxide nanocomposite [135].

تصفیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه رنگ، گروه مهندسی شیمی و پلیمر دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، مرکز تحقیقات فناوری نانو دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب و گروه شیمی دانشکده علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری، کاربرد مواد کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی در حذف مواد رنگزا از پساب با جزییات بررسی شده است. مکانیسم و سینتیک و ایزوترم جذب ماده رنگزا در فرآیند جذب به ماهیت نانوکامپوزیتها بستگی دارد. از بین مدل‌های ایزوترم معمولاً ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیش برای ارزیابی فرآیند جذب سطحی استفاده می‌شوند. نانوکامپوزیت‌ها با خواص خوبی که دارند شامل مساحت سطح بزرگتر، فعل و انفعالات بر سطح و واکنش‌پذیری بالا بهترین روش برای حذف مواد رنگزا بوده و روشی کارآمد و به صرفه می‌باشد و بهترین نتایج را برای حذف انواع مواد رنگزا ارائه می‌دهد و اگر حذف مواد رنگزا به خوبی انجام شود پساب با کیفیت بالایی

۱۰- مراجع

1. T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, P. Nigam, "Remediation of dyes in textile effluent: a critical review

on current treatment technologies with a proposed alternative", *Bioresour. Technol.* 77, 247-255, 2001.

2. A. Mittal, J. Mittal, L. Kurup, "Adsorption isotherms, kinetics and column operations for the removal of hazardous dye, tartrazine from aqueous solutions using waste materials-bottom ash and de-oiled soya, as adsorbents", *J. Hazard. Mater.* 136, 567–578, 2006.
3. N.M. Mahmoodi, S. Soltani-Gordefaramarzi. "Dye removal from single and quaternary systems using surface modified nanoparticles: isotherm and kinetics studies". *Prog. Color. Colorants and Coat.* 9, 85-97, 2016.
4. M.A. Behnajady, N. Modirshhla, N. Daneshvar, M. Rabbani, "Photocatalytic degradation of an azo dye in a tubular continuous-flow photoreactor with immobilized TiO₂ on glass plates", *Chem. Eng. J.* 127, 167–176, 2007.
5. V.K. Gupta, Suhas, "Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review", *J. Environ. Manage.* 90, 2313–2342, 2009.
6. M.A. Rauf, S.B. Bukallah, A. Hamadi, A. Sulaiman, F. Hammadi, "The effect of operational parameters on the photoinduced decoloration of dyes using a hybrid catalyst V₂O₅/TiO₂", *Chem. Eng. J.* 129, 167–172, 2007.
7. A. Demirbas, "Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: a review", *J. Hazard. Mater.* 167, 1–9, 2009.
8. X. Luo, L. Zhang, "High effective adsorption of organic dyes on magnetic cellulose beads entrapping activated carbon", *J. Hazard. Mater.* 171, 340–347, 2009.
9. S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature.* 354, 56–58, 1991.
10. R.B. Rakhi, K. Sethupathi, S. Ramaprabhu, "Field emission from carbon nanotubes on a graphitized carbon fabric", *Carbon.* 46, 1656–1663, 2008.
11. A.L.M. Reddy, S. Ramaprabhu, "Nanocrystalline Metal Oxides dispersed multiwalled carbon nanotubes as supercapacitor electrode", *J. Phys. Chem. C.* 111, 7727–7734, 2007.
12. N. Jha, S. Ramaprabhu, "Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluids", *J. Appl. Phys.* 106, 084317–84326, 2009.
13. W.H. Shin, H.M. Jeong, B.G. Kim, J.K. Kang, J.W. Choi, "Nitrogen-doped multiwall carbon nanotubes for lithium storage with extremely high capacity", *Nano Lett.* 12, 2283–2288, 2012.
14. X. Liu, M. Antonietti, "Molten salt activation for synthesis of porous carbon nanostructures and carbon sheets", *Carbon.* 69, 460–466, 2014.
15. J. Wang, S. Kaskel, "KOH activation of carbon-based materials for energy storage", *J. Mater. Chem.* 22, 3710–3725, 2012.
16. S. Wang, C. Xiao, Y. Xing, H. Xu, S. Zhang, "Carbon nanofibers/nanosheets hybrid derived from cornstalks as a sustainable anode for Li-ion batteries", *J. Mater. Chem.* 3, 6742–6746, 2015.
17. M. Abdel Salam, M. Mokhtar, S.N. Basahel, S.A. A.I. Thabaiti, A.Y. Obaid, "Removal of chlorophenol from aqueous solution by multi-walled carbon nanotubes: Kinetic and thermodynamic studies", *J. Alloys .Compd.* 500, 87–92, 2010.
18. H. Al-Johani, M. Abdel Salam, "Kinetics and thermodynamic study of aniline adsorption by multi-walled carbon nanotubes from aqueous solution", *J. Colloid Interface Sci.* 360, 760–767, 2011.
19. X. Xin, Q. Wei, J. Yang, L. Yan, R. Feng, G. Chen, B. Du, L. Hi, "Highly efficient removal of heavy metal ions by aminefunctionalized mesoporous Fe₃O₄ nanoparticles", *J. Chem. Eng.* 184, 132–140, 2012.
20. N. Khandoker, S.C. Hawkins, R. Ibrahim, C.P. Huynh, F. Deng, "Tensile strength of spinnable multiwall carbon nanotubes", *Procedia. Eng.* 10, 2572–2578, 2011.
21. D.W.H. Fam, A. Palaniappan, A.I.Y. Tok, B. Liedberg, S.M. Moochhala. "A review on technological aspects influencing commercialization of carbon nanotube sensors", *Sens. Actuators. B. Chem.* 157, 1–7, 2011.
22. A. Verma, M. Nath, N. Malhan, A. K. Gangulia, "Improved optical properties in nanocrystalline Ce:YGG garnets via normal and reverse strike co-precipitation method", *Mater. Lett.* 93, 21–24, 2013.
23. T.V.N. Padmesh, k. Vijayaraghavan, G. Sekaran, M. Velan, "Application of Azolla rongpong on biosorption of acid red 88, acid green 3, acid orange 7 and acid blue 15 from synthetic solutions", *J. Chem. Eng.* 122, 55–63, 2006.
24. A. Sanjabi, S. Azizian, M. Torabi, M. A. Zolfigol, M. Yarie, "On the applicability of triazine-based covalent organic polymer as adsorbent for dye removal from aqueous solution", *Microporous. Mesoporous. Mater.* 348, 112367, 2023.
25. H. Nguyen, T.J.-C. Bollinger, E.C. Lima, R.-S. Juang, "How to avoid mistakes in treating adsorption isotherm data (liquid and solid phases): Some comments about correctly using Radke-Prausnitz nonlinear model and Langmuir equilibrium constant", *J. Environ. Manage.* 325, 116475, 2023.
26. Y. Bulut, H. Aydın, "A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells", *Desalin.* 194, 259–67, 2006.
27. A. R. Tehrani-Bagha, H. Nikkar, N. M. Mahmoodi, M. Markazi, F. M. Menger, "The sorption of cationic dyes onto kaolin: kinetic, isotherm and thermodynamic studies", *Desalination.* 266, 274–280, 2011.
28. I.D. Mall, V.C. Srivastava, N.K. Agarwal, I.M. Mishra, "Removal of Congo red from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon: kinetic study and equilibrium isotherm analyses", *Chemosphere.* 61, 492–501, 2005.
29. C.H. Liu, J.J. Li, H.L. Zhang, B.R. Li, Y. Guo, "Structure dependent interaction between organic dyes and carbon nanotubes", *Colloids .Surfaces. A .Physicochem .Eng .Asp.* 313–314, 9–12, 2008.
30. S. Wang, C.W. Ng, W. Wang, Q. Li, Z. Hao, "Synergistic and competitive adsorption of organic dyes on multiwalled carbon nanotubes", *Chem. Eng. J.* 197, 34–40, 2012.
31. A. Rodríguez, G. Ovejero, J. L. Sotelo, M. Mestanza, J. García, "Adsorption of dyes on carbon nanomaterials from aqueous solutions", *J. Environ .Sci. Heal. Part .A.* 45, 1642–1653, 2010.
32. H.Y. Lin, J. Zhao, G. Song, J. Luan, X.X. Liu, G.C. Liu, "High quality and high performance adsorption of Congo red using as-grown MWCNTs synthesized over a Co-MOF as a catalyst precursor: via the CVD method", *Dalt Trans.* 46, 17067–17073, 2017.
33. L. Ma, X. Dong, M. Chen, L. Zhu, C. Wang, F. Yang, Y. Dong, "Fabrication and water treatment application of carbon nanotubes (CNTs)-based composite membranes: a Review", *Membranes.* 7, 16, 2017.

34. S. Hosseinzadeh, H. Hosseinzadeh, S. Pashaei, Z. Khodaparast, "Synthesis of magnetic functionalized MWCNT nanocomposite through surface RAFT copolymerization of acrylic acid and N-isopropyl acrylamide for removal of cationic dyes from aqueous solutions", *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 161, 34–44, 2018.
35. M. Oveisi, M.A. Asli, N.M. Mahmoodi, "MIL-Ti metal-organic frameworks (MOFs) nanomaterials as superior adsorbents: Synthesis and ultrasound-aided dye adsorption from multicomponent wastewater systems", *J. Hazard. Mater.* 347, 123–140, 2018.
36. L. Ai, C. Zhang, F. Liao, Y. Wang, M. Li, L. Meng, J. Jiang, "Removal of methylene blue from aqueous solution with magnetite loaded multi-wall carbon nanotube: kinetic, isotherm and mechanism analysis", *J. Hazard. Mater.* 198, 282–290, 2011.
37. H. Qi, C. Qian, J. Liu, "Synthesis of uniform double-walled carbon nanotubes using iron disilicide as catalyst", *Nano. Lett.* 7, 2417–2421, 2007.
38. S. Soroush, N.M. Mahmoodi, B. Mohammadnezhad, A. Karimi, "Activated carbon (AC)- Metal-organic framework (MOF) composite: Synthesis, characterization and dye removal", *Korean J. Chem. Eng.* 39, 2394–2404, 2022.
39. Y. Zeng, L. Zhao, W. Wu, G. Lu, F. Xu, Y. Tong, W. Liu, J. Du, "Enhanced adsorption of malachite green onto carbon nanotube/polyaniline composites", *J. Appl. Polym. Sci.* 127, 2475–2482, 2013.
40. N.B. Singh, G. Nagpal, S.R. Agrawal, "Water purification by using Adsorbents: A Review", *Environ. Technol. Innov.* 11, 187–240, 2018.
41. A. Dabrowski, "Adsorption—from theory to practice", *Adv. Colloid Interface Sci.* 93, 135, 2001.
42. S. Allen, B. Koumanova, "Decolourisation of water/wastewater using adsorption", *J. Univ. Chem. Technol. Metall.* 40, 175–92, 2005.
43. L. Rani, A.L. Srivastav, J. Kaushal, X.C. Nguyen, "Recent advances in nanomaterial developments for efficient removal of Hg(II) from water", *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 62851–62869, 2022.
44. N.M. Mahmoodi, O. Masrouri, "Cationic dye removal ability from multicomponent system by magnetic carbon nanotube", *J. Solution. Chem.* 44, 1568–1583, 2015.
45. A.K. Mishra, T. Arockiadoss, S. Ramaprabhu, "Study of removal of azo dye by functionalized multi walled carbon nanotubes", *J. Chem. Eng.* 162, 1026–1034, (2010).
46. Q. Liu, W. Deng, Q. Wang, X. Lin, L. Gong, C. Liu, W. Xiong, X. Nie, "An efficient chemical precipitation route to fabricate 3D flower-like CuO and 2D leaf-like CuO for degradation of methylene blue", *Adv. Powder. Technol.* 31, 1391–1401, 2020.
47. G. Crini, "Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review", *Bioresour. Technol.* 97, 1061–85, 2006.
48. O. Gok, A.S. O'zcan, A.O'zcan, "Adsorption behavior of a textile dye of Reactive Blue 19 from aqueous solutions onto modified bentonite", *Appl. Surf. Sci.* 256, 5439–43, 2010.
49. R. Rehman, S. J. Muhammad, M. Arshad, "Brilliant Green and Acid Orange 74 Dyes Removal from Water by Pinus roxburghii Leaves in Naturally Benign Way: An Application of Green Chemistry", *J. Chem.* 2019, 10, 2019.
50. H. Zhao, Z-X. Liang, Z-Z. Gao, "Facile preparation of floatable carboxymethyl cellulose-based composite hydrogel for efficient removal of organic dyes", *Colloids. Interface. Sci. Commun.* 49, 100637, 2022.
51. A. R. Tehrani-Bagha, N. M. Mahmoodi, M. Markazi, E. Talaei, "Removal of a cationic dye from wastewater by lowcost kaolin", *J. Color. Sci. Technol.* 2009 3, 145- 155.
52. S. E. Abdelazeem, M. El-T. Ashraf, M. Abd El-M. Eman, M. El-S. Gehan, "Zero Valent Iron Nanoparticle-Loaded Nanobentonite Intercalated Carboxymethyl Chitosan for Efficient Removal of Both Anionic and Cationic Dyes", *ACS Omega.* 6, 6348–6360, 2021.
53. P. Waranusantigul, P. Pokethitiyook, M. Kruatrachue, E.S. Upatham, "Kinetics of basic dye (methylene blue) biosorption by giant duckweed (*Spirodela polyrrhiza*)", *J. Environ. Pollut.* 125, 385–392, 2003.
54. J. Xu, D. Xu, Z. Bicheng, "Adsorptive removal of an anionic dye Congo red by flower-like hierarchical magnesium oxide (MgO)-graphene oxide composite microspheres", *Appl. Surf. Sci.* 435, 1136–1142, 2018.
55. H. Sun, S-Y. Lee, S-J. Park, "Bimetallic CuPd alloy nanoparticles decorated ZnO nanosheets with enhanced photocatalytic degradation of methyl orange dye", *J. Colloid. Interface. Sci.* 629, 87–96, 2023.
56. F.D. Ardejani, K.H. Badii, N.L. Yousefi, N.M. Mahmoodi, M. Arami, S.Z. Shafaei, A.R. Mirhabibi, "Numerical modelling and laboratory studies on the removal of Direct Red 23 and Direct Red 80 dyes from textile effluents using orange peel, a low-cost adsorbent", *Dyes. Pigm.* 73, 178–185, 2007.
57. P. Parthipan, M.A. Al-Dosary, A.A. Al-Ghamd, A. Subramania, "Eco-friendly synthesis of reduced graphene oxide as sustainable photocatalyst for removal of hazardous organic dyes", *J. King. Saud. Univ. Sci.* 33, 101438, 2021.
58. P. Parthasarathy, S. Sajjad, J. Saleem, M. Alherbawi, G. McKay, "A Review of the Removal of Dyestuffs from Effluents onto Biochar", *Separations.* 9, 139, 2022.
59. M. Mazarji, G. Nabi-Bidhendi, N.M. Mahmoodi, "One-pot synthesis of a reduce d graphene oxide-ZnO nanorod composite and dye decolorization modeling", *J. Taiwan. Inst. Chem.* 80, 439–451, 2017.
60. C. Chen, J. Hu, D. Shao, J. Li, X. Wang, "Adsorption behavior of multiwall carbon nanotube/iron oxide magnetic composites for Ni(II) and Sr(II)", *J. Hazard. Mater.* 164, 923–928, 2009.
61. S. Saxena, A.S.M. Raja, "Natural Dyes: Sources, Chemistry, Application and Sustainability Issues. In: Muthu, S. (eds) Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing", *J.T.S.F.T.* 37-80, 2014.
62. Y.S. Ho, C.C. Chiang, "Sorption studies of acid dye by mixed sorbents", *Adsorption.* 7, 139–147, 2001.
63. S. Kadolph, "Natural Dyes: A Traditional Craft Experiencing New Attention", *The Delta. Kappa. Gamma. Bulletin.* 75, 14, 2008.
64. G. Crini, "Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review", *Bioresour. Technol.* 97, 1061–1085, 2006.
65. E. Forgacs, T. Cserhati, G. Oros, "Removal of synthetic dyes from wastewater: a review", *Environ. Int.* 30, 953–971, 2004.
66. M. Muthukumar, N. Selvakumar, "Studies on the effect of inorganic salts on decolouration of acid dye effluents by ozonation", *Dyes. Pigm.* 62, 221–228, 2004.

67. S.T. Ong, C.K. Lee, Z. Zainal, "Removal of basic and reactive dyes using ethylene diamine modified rice hull", *Bioresour. Technol.* 98, 2792-2799, 2007.
68. Z. Bingul, "Determination of affecting parameters on removal of methylene blue dyestuff from aqueous solutions using natural clay: Isotherm, kinetic, and thermodynamic studies", *J. Mol. Struct.* 1250, 131729, 2022.
69. M. Purkait, S. DasGupta, S. De, "Adsorption of eosin dye on activated carbon and its surfactant based desorption", *J. Environ. Manage.* 76, 135-142, 2005.
70. H. Ali, "Biodegradation of synthetic dyes—a review", *Water. Air. Soil. Pollut.* 213, 251-273, 2010.
71. P. Ka. Yeow, S. W. Wong, T. Hadibarata, "Removal of Azo and Anthraquinone Dye by Plant Biomass as Adsorbent – A Review", *Biointerface. Res. Appl. Chem.* 11, 8218 – 8232, 2021.
72. K. Bing Tan, M.T. Vakili, B. Amini Horri, P. E. Poh, A. Z. Abdullah, B. Salamatinia, "Adsorption of dyes by nanomaterials: Recent developments and adsorption mechanisms", *Sep. Purif. Technol.* 150, 229–242, 2015.
73. A. Vashisht, R. Rai, S. Thakur, S. Kondal, K. Ashish Singh, Manju, D. Sharma, V. Gilhotra, "Anaerobic Processes in Dye Removal. In: Khadir, A., Muthu, S.S. (eds) *Biological Approaches in Dye-Containing Wastewater*", S.T.P.P.M.C. Springer. Singapore. 95-118, 2022.
74. Z. Karim, A. P. Mathew, M. Grahn, J. Mouzon, K. Oksman, "Nanoporous membranes with cellulose nanocrystals as functional entity in chitosan: Removal of dyes from water", *Carbohydr. Polym.* 112, 668–676, 2014.
75. R. Laib, S. Amokrane-Nibou, D. Nibou, M. Trari, "Recovery of recycled paper in the removal of the textile dye basic yellow 28: characterization and adsorption studies", *Nord. Pulp Pap. Res. J.* 2019.
76. R. A. Diyanati Tilaki, D. Balarak, M. Ghasemi, "Study Survey of Efficiency Agricultural Yeast in Removal of Acid Orang 7(AO7) Dyes from Aqueous Solution: Kinetic and Equilibrium Study", *Iran. J. Health. Sci.* 2, 51-61, 2014.
77. A. H. Mahvi and B. Heibati, "Removal of Reactive Red 120 and Direct Red 81 dyes from aqueous solutions by Pumice", *Res. J. Chem. Environ.* 16, 2012.
78. Mohammad, Lazem H. Aboud, Alaa H. Jassim, "Study of Molecular Electronic Energy Levels of Malachite Green Dye Rajaa K", *AIP. Conf. Proc.* 2144, 030022, 2019.
79. M. A. M. Abo-State, Y. E. Saleh and H. A. Hazaa, "Decolorization of Congo Red dye by bacterial isolates", *J. Eco. Heal. Env.* 5, 2, 41-48, 2017.
80. M.A. El Hajj Hassan and M.M. El Jamal, "Kinetic Study of the Electrochemical Oxidation of Methylene Blue with Pt Electrode", *Port. Electrochim. Acta.* 30, 351-359, 2012.
81. L. Singh, "Biodegradation of Synthetic Dyes: A Mycoremediation Approach for Degradation/Decolourization of Textile Dyes and Effluents", *J. Appl. Biotechnol. Bioeng.* 3, 430–435, 2017.
82. M.A. hmad, M. Yousaf, A. Nasir, I.A. Bhatti, A. Mahmood, X. Fang, X. Jian, K. Kalantar-Zadeh, N. Mahmood, "Porous Eleocharis@MnPE Layered Hybrid for Synergistic Adsorption and Catalytic Biodegradation of Toxic Azo Dyes from Industrial Wastewater", *Environ. Sci. Technol.* 53, 2161–2170, 2019.
83. M.Z. Hossen, M.E. Hussain, A. Hakim, K. Islam, M.N. Uddin, A.K. Azad, "Biodegradation of Reactive Textile Dye Novacron Super Black G by Free Cells of Newly Isolated *Alcaligenes Faecalis* AZ26 and *Bacillus* Spp Obtained from Textile Effluents", *Heliyon.* 5, 02068, 2019.
84. R. Al-Tohamy, J. Sun, M.F. Fareed, E.R. Kenawy, S.S. Ali, "Ecofriendly Biodegradation of Reactive Black 5 by Newly Isolated *Sterigmatomyces Halophilus* SSA1575, Valued for Textile Azo Dye Wastewater Processing and Detoxification", *Sci. Rep.* 10, 12370, 2020.
85. Q. Dai, S. Zhang, H. Liu, J. Huang, L. Li, "Sulfide-Mediated Azo Dye Degradation and Microbial Community Analysis in a Single-Chamber Air Cathode Microbial Fuel Cell", *Bioelectrochemistry.* 131, 107349, 2020.
86. R. V. Kandisa, S. K.V. Narayana, K. B. Shaik, R. Gopinath, "Dye Removal by Adsorption: A Review", *J. Bioremediat. Biodegrade.* 7, 6, 2016.
87. Y. Köseoğlu, M. Bay, M. Tan, A. Baykal, H. Sözeri, R. Topkaya, N. Akdoğan, "Magnetic and dielectric properties of Mn₀. 2Ni₀. 8Fe₂O₄ nanoparticles synthesized by PEG-assisted hydrothermal method", *J. Nanopart. Res.* 13, 2235-44, 2011.
88. P.S. Kumar, G.J. Joshiba, C.C. Femina, P. Varshini, S. Priyadharshinia, M.S. Arun Karthicka, R. Jothirani, "A critical review on recent developments in the low-cost adsorption of dyes from wastewater", *Desalination. Water. Treat.* 172, 395-416, 2019.
89. S.R. Mousavi, M. Asghari, N.M. Mahmoodi, "Chitosan-wrapped multiwalled carbon nanotube as filler within PEBA thin film nanocomposite (TFN) membrane to improve dye removal", *Carbohydr. Polym.* 237, 116128, 2020.
90. Y. Wang, G. Xu, Z. Ren, X. Wei, W. Weng, P. Du, G. Shen, G. Han, "Mineralizer-Assisted Hydrothermal Synthesis and Characterization of BiFeO₃ Nanoparticles", *J. Am. Ceram. Soc.* 2007;90(8):2615-7.
91. M.M. Nejadian, N.M. Mahmoodi, C. Ghotbi, F. Khorasheh, "Novel heterojunction magnetic composite MIL-53 (Fe)/ZnFe₂O₄: Synthesis and photocatalytic pollutant degradation", *Korean J. Chem. Eng.* 39, 2713-2724, 2022.
92. S. Verma, P. Joy, Y. Khollam, H. Potdar, S. Deshpande, "Synthesis of nanosized MgFe₂O₄ powders by microwave hydrothermal method", *Mater. Lett.* 58, 1092-5, 2004.
93. Z. Li, B. Hou, Y. Xu, D. Wu, Y. Sun, Hu .W, Deng. F, "Comparative study of sol-gel-hydrothermal and sol-gel synthesis of titania-silica composite nanoparticles", *J. Solid State Chem.* 178, 1395-405, 2005.
94. H. Wang, Y. Ma, G. Yi, D. Chen, "Synthesis of Mn-doped Zn₂ SiO₄ rodlike nanoparticles through hydrothermal method", *Mater. Chem. Phys.* 82, 414-8, 2003.
95. R.S. Sabry, Y.K. Al-Haidarie, M.A. Kudhier, "Synthesis and photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles prepared by sol-gel method", *J. Solgel. Sci. Technol.* 78, 299–306, 2016.
96. M.T. Yagub, T.K. Sen, S. Afroze, H.M. Ang, "Dye and its Removal from aqueous solution by Adsorption: A review", *Adv. Colloid. Interface. Sci.* 209, 172–84, 2014.
97. K. Hunger, "Industrial dyes: Chemistry, Properties, Applications", Germany. Wiley-VCH. 648, 2007.
98. N.M. Mahmoodi, M.H. Saffar-Dastgerdi, "Clean Laccase immobilized nanobiocatalysts (graphene oxide - zeolite nanocomposites): From production to detailed biocatalytic degradation of organic pollutant", *Appl. Catal. B: Environ.*

- 268,118443,2020.
99. B. Enayatpour, M. Rajabi, M. Yari, M.R. Mirkhan, F.Najafi, O.Moradi, A.K. Bharti, S. Agarwal, V.K. Gupta , "Adsorption/desorption study of proteins onto multi-walled carbon nanotubes and amino multi-walled carbon nanotubes surfaces as adsorbents", *J .Mol .Liq.* 231,566–71,2017.
 100. A.T. Mansour, A. E. Alprol , K. M. Abualnaja , H.S. El-Beltagi, K.M. A. Ramadan ,M.Ashour, "Dried Brown Seaweed's Phytoremediation Potential for Methylene Blue Dye Removal from Aquatic Environments", *Polymers.* 14, 1375, 2022.
 101. Z. karimi, A.Allahverdi, F. Oshani, "Investigation on the Removal of Dyes from Wastewater Using Alumina Composite Nano Adsorbent", *J. Stud.color world*, 10, 41-59, 2020 (In Persian) .
 102. B Kayranli , "Adsorption of textile dyes onto iron based waterworks sludge from aqueous solution; isotherm, kinetic and thermodynamic study", *J. Chem. Eng.* 173, 782-791, 2011.
 103. M. Ghaedi, A. Ansari, M.H. Habibi, A.R. Asghari, "Removal of malachite green from aqueous solution by zinc oxide nanoparticle loaded on activated carbon: kinetics and isotherm study", *J. Ind. Eng. Chem.* 20,17–28, 2014.
 104. M. Ghasemi, S. Mashhadi, M. Asif, I. Tyagi, S. Agarwal, V.K. Gupta, "Microwave-assisted synthesis of tetraethylenepentamine functionalized activated carbon with high adsorption capacity for Malachite green dye", *J. Mol .Liq.* 213,317–25,2016.
 105. S.C.R. Santos, V.J.P. Vilar, R.A.R , Boaventura , "Waste metal hydroxide sludge as adsorbent for a reactive dye", *J .Hazard. Mater.* 153, 999-1008, 2008.
 106. H. Wang, X. Yuan, G. Zeng, L. Leng, X. Peng, K. Liao, L. Peng , Z. Xiao, "Removal of malachite green dye from wastewater by different organic acid-modified natural adsorbent: kinetics, equilibriums, mechanisms, practical application, and disposal of dye-loaded adsorbent", *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21, 11552–11564 ,2014.
 107. J. Castañeda-Díaz, T. Pavón-Silva, E. Gutiérrez-Segura, A. Colín-Cruz, "Electrocoagulation-Adsorption to Remove Anionic and Cationic Dyes from Aqueous Solution by PV-Energy", *J. Chem.* 2017, 14, 2017 .
 108. B. Uçar, A. Güvenç, Ü. Mehmetoglu, "Use of Aluminium Hydroxide Sludge as Adsorbents for the Removal of Reactive Dyes: Equilibrium, Thermodynamic, and Kinetic Studies", *Hydrol .Current .Res.* 2 ,112, 2011.
 109. P. Shraddha, M. Srinivas Kini , R. Selvaraj, "A review on adsorptive removal of dyes from wastewater by hydroxyapatite nanocomposites", *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 11835–11849 , 2021 .
 110. P.P. Selvam, S. Preethi, P. Basakaralingam, N. Thinakaran, A. Sivasamy, S. Sivanesana, "Removal of rhodamine B from aqueous solution by adsorption onto sodium montmorillonite", *J. Hazard. Mater.* 155, 39-44, 2008 .
 111. S.C. Santos, R.A. Boaventura, "Treatment of a simulated textile wastewater in a sequencing batch reactor (SBR) with addition of a low-cost adsorbent", *J. Hazard. Mater.* 291, 74-82, 2015.
 112. M. Shirmardi, A. H. Mahvi, B. Hashemzadeh, A. Naeimabadi, G. Hassani and M. Vosoughi Niri, "The adsorption of malachite green (MG) as a cationic dye onto functionalized multi walled carbon nanotubes", *Korean. J. Chem. Eng.* 30, 1603,2013.
 113. Y. Yao, F. Xu, M. Chen, Z. Xu and Z. Zhu , "Adsorption behavior of methylene blue on carbon nanotubes" , *Bioresour. Technol.* 101, 3040,2010.
 114. K. M. Abualnaja , A. E. Alprol, M. Ashour , A. T. Mansour, "Influencing Multi-Walled Carbon Nanotubes for the Removal of Ismate Violet 2R Dye from Wastewater: Isotherm, Kinetics, and Thermodynamic Studies ",*Appl. Sci.* 11, 4786, 2021 .
 115. J. Ma, F. Yu, L. Zhou, L. Jin, M. Yang, J. Luan, Y. Tang, H. Fan, Z. Yuan and J. Chen, "Enhanced adsorptive removal of methyl orange and methylene blue from aqueous solution by alkali-activated multiwalled carbon nanotubes", *ACS .Appl. Mater. Interfaces.* 4, 5749,2012.
 116. S. Yang, L. Wang, X. Zhang, W. Yang and G. Song, "Enhanced adsorption of Congo red dye by functionalized carbon nanotube/mixed metal oxides nanocomposites derived from layered double hydroxide precursor", *Chem. Eng. J.* 275, 315,2015.
 117. W. Konicki, I. Pelech, E. Mijowska and I. Jasinska, "Adsorption of anionic dye Direct Red 23 onto magnetic multi-walled carbon nanotubes-Fe₃C nanocomposite: Kinetics, equilibrium and thermodynamics",*Chem. Eng. J.* 210, 87, 2012.
 118. S. M. R. Goddeti, M. Bhaumik, A. Maity , S. S. Ray, "Removal of Congo red from aqueous solution by adsorption using gum ghatti and acrylamide graft copolymer coated with zero valent iron", *Int. J. Biol. Macromol.*149, 21–30, 2020.
 119. B. Nandi, A. Goswami, M. Purkait, "Removal of cationic dyes from aqueous solutions by kaolin: kinetic and equilibrium studies", *Appl. Clay. Sci.* 42,583–90,2009.
 120. N.M. Mahmoodi, "Nickel ferrite nanoparticle: Synthesis,modification by surfactant and dye removal ability", *Water. Air .Soil .Pollut.* 224, 1419,2013.
 121. S. Dawood, and T.K. Sen, "Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design", *Water. Res.* 46,1933–46, 2012.
 122. W. Zhang, H. Li, X. Kan, Lei.Dong, H.Yan, Z. Jiang, H. Yang, A. Li, R. Cheng, "Adsorption of anionic dyes from aqueous solutions using chemically modified straw", *Bioresour. Technol.* 117, 40-47, 2013.
 123. M.T. Yagub, T.K. Sen, H. Ang, "Equilibrium, kinetics, and thermodynamics of methylene blue adsorption by pine tree leaves", *Water .Air. Soil. Pollut.* 223,5267–82, 2012.
 124. W. Liu, C. Yao , M. Wang, J. Ji, L. Ying , C. Fu , " Kinetics and thermodynamics characteristics of cationic yellow X-GL adsorption on attapulgite/rice hull- based activated carbon nanocomposites " , *Environ. Prog .Sust .Energ.* 32,655–622012, 2013 .
 125. N.B. Singh, K. Rachna, A. Agrawal , "Methylene blue dye removal from water by nickel ferrite polyaniline nanocomposite", *J .Sci. Ind. Res.* 78,118–121,2019 .
 126. A. Gouthaman, J . Auslin Asir, A . Gnanaprakasam, V.M. Sivakumar, M. Thirumarimurugan, A . Mohamed , A. Riswan, R .S. Azarudeen , "Enhanced dye removal using polymeric nanocomposite through incorporation of Ag doped ZnO nanoparticles: Synthesis and characterization", *J .Hazard .Mater.* 373,493-503, 2019 .

127. N.M. Mahmoodi, "Synthesis of amine-functionalized magnetic ferrite nanoparticle and its dye removal ability", *J. Environ. Eng.* 139, 1382–1390, 2013.
128. N.M. Mahmoodi, "Synthesis of core-shell magnetic adsorbent nanoparticle and selectivity analysis for binary system dye removal", *J. Ind. Eng. Chem.* 20, 2050–2058, 2014.
129. D. de . Oliveira Lopes, L. Oliveira Santos, E.D. Nascimento, A.D. Vieira de Souza, F.A.de. Oliveira Carvalho, "Adsorption of acid yellow dye 17 on activated carbon prepared from *Euterpe oleracea*: kinetic and thermodynamic studies", *Research. Society and Development.* 11, 2022 .
130. F. Largo, R. Haounati, S.Akhouairi, H.Ouachtak, R.El Haouti, A. El , Guerdaoui, N. Hafid, D. M.F.Santos, F. Akbal, A. Kuleyin, A. Jada, A. AitAdd , "Adsorptive removal of both cationic and anionic dyes by using sepiolite clay mineral as adsorbent: Experimental and molecular dynamic simulation studies", *J. Mol. Liq.* 318, 114247, 2020.
131. Z. Hussain, N. Chang, J.q. Sun, S. Xiang, T.Ayaz , H.Zhang, H.Wang, "Modification of coal fly ash and its use as low-cost adsorbent for the removal of directive, acid and reactive dyes" , *J. Hazard. Mater.* 422, 126778, 2022 .
132. M. Sarker, S. Shin, J.H. Jeong, S.H. Jung , "Mesoporous metal-organic framework PCN-222(Fe): promising adsorbent for removal of big anionic and cationic dyes from water", *Chem .Eng. J.* 371, 252– 259, 2019 .
133. B. Tanhaei, A. Ayati, M. Sillanpää , "Magnetic xanthate modified chitosan as an emerging adsorbent for cationic azo dyes removal: kinetic, thermodynamic and isothermal studies", *Int. J. Biol. Macromo.* 121, 1126–1134, 2019 .
134. A. Abd-Elhamid, Elbadawy A. Kamoun, A. El-Shanshory, H. Soliman, H. Aly, "Evaluation of graphene oxide-activated carbon as effective composite adsorbent toward the removal of cationic dyes: composite preparation, characterization and adsorption parameters", *J. Mol. Liq.* 279, 530–539, 2019 .
135. N. M. Mahmoodi , Z. Mokhtari-Shourijeh, and J. Abdi, "Preparation of Mesoporous Polyvinyl Alcohol/Chitosan/Silica Composite Nanofiber and Dye Removal from Wastewater", *Environ. Prog. Sustain.* 38, S100-S109, 2019.
136. O. Moradi, S. Maraghe, S. Arab-Salmanabadi, "Removal of safranin dye using graphene oxide, activated carbon nanocomposites, aluminum hydroxide and oxide graphene nanoparticles, activated carbon and cerium oxide nanoparticles", *J. Color.Sci. Tech.* 2012-1123, 2021.
137. X. Inthapanya, S. Wu, Z. Han, G. Zeng, M. Wu, C. Yang , "Adsorptive removal of anionic dye using calcined oyster shells: isotherms, kinetics, and thermodynamics", *Environ .Sci. Pollut. Res.* 26, 5944– 5954, 2019.
138. Z. Harrache, M. Abbas, T. Aksil, M. Trari, "Thermodynamic and kinetics studies on adsorption of indigo carmine from aqueous solution by activated carbon", *Microchem. J.* 144, 180–189, 2019.
139. G. Janet Joshiba, P. Senthil Kumar, Gayathri Rangasamy, P. Tsopbou Ngueagni, G. Pooja, G. Bharat Balji, Krishnapandi Alagumalai, Hamed A. El-Serehy, "Iron doped activated carbon for effective removal of tartrazine and methylene blue dye from the aquatic systems: Kinetics, isotherms, thermodynamics and desorption studies", *Environ. Res.* 215, 114317, 2022 .
140. K. Jedynak, D. Wideł, N. Rędzia, "Removal of rhodamine B (a basic dye) and acid yellow 17 (an acidic dye) from aqueous solutions by ordered mesoporous carbon and commercial activated carbon", *J. Colloid. Interface. Sci.* 3, 30, 2019.
141. Aliakbar Dehno Khalaji , "of CuO/Cu2O nanocomposite to removal of methyl orange dye from aqueous solution ", *J. Color. Sci. Tech.* 2101-1127, 2021.
142. M. Heydari, M. Gharagozlou , M. Ghahari, "Synthesis and Application of Nanocomposite Containing Metal-Organic Framework and Magnetic Nanoparticles in Silica Matrix for Decolorization of Methylene Blue", *J. Color. Sci. Tech.* 15, 103-115, 2021.
143. Sh. Shariati , M. Bostani1 , F. Shariati, S. Rahnama, "Application of Magnetite Nanoparticle Modified Azolla as an Adsorbent for Removal of Brilliant Blue Dye", *J. Color .Sci. Tech.* 15, 131-141, 2021.
144. H. Ghasemzadeh Mohammadi ,A. Keshtkar Vanashi ,M. Taghipour Ziaratgah ,M. Pirgholi, "Nanocomposite Hydrogels Based on Gelatin and Nickel Oxide Nanoparticles for Adsorption of Cationic Pollutants", *J. Color .Sci. Tech.* 14, 295-310, 2021.

How to cite this article:

A.Hosseinian Naeni, M. Reza. Kalae, O. Moradi, N. M. Mahmoodi, Investigating Factors Affecting the Removal of dyestuff from Wastewater Using Different Nanocomposites: A Review Study, *J. Stud. Color world*, 12, 4(2023), 343-368.

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.4.4.5