

حذف کدورت از آب با استفاده از گرافن اکساید به عنوان ماده منعقد کننده و مدل سازی با شبکه عصبی مصنوعی

نازیلا رضایا^۱

مریم حسنی زنوزی^{۲*}

mhzonoozi@iust.ac.ir

مطهره سعادتپور^۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۵

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر، کاربردهای نانومواد با پایه کربنی در عرصه‌های مختلف نظیر صنعت آب و فاضلاب توسعه یافته است. یکی از این ترکیبات، گرافن اکساید (GO) است که به دلیل دارا بودن ساختار ورقه‌ای با سطح ویژه بالا و گروه‌های سطحی متنوع، توجه زیادی را به خود جلب نموده است. در این راستا، هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، بررسی ویژگی‌های انعقادی گرافن اکساید در حذف کدورت از آب و مدل‌سازی فرایند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) می‌باشد.

روش بررسی: نمونه‌های کدورت با استفاده از خاک باغچه و آب شهری تهیه و نمونه GO به صورت سوسپانسیون غلیظ خریداری گردید. آزمایش‌های جارتست برای بررسی تاثیر pH، غلظت GO، کدورت اولیه، زمان ته‌نشینی و سایر پارامترها بر بازدهی حذف کدورت، انجام شد. به منظور شبیه‌سازی فرایند، از شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون استفاده شد.

یافته‌ها: تحت شرایط pH اسیدی و نیز با افزایش غلظت GO از ۲/۵ تا ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر، بازدهی حذف کدورت افزایش یافت. اما تغییرات کدورت اولیه اثر مشخص و مستقلی بر بازدهی فرایند نداشت. بخش عمده حذف کدورت در ۱۰ دقیقه ابتدای ته‌نشینی رخ داد و سرعت ته‌نشینی لخته‌ها با افزایش غلظت GO و کاهش pH به شدت افزایش یافت. در مدل‌سازی با ANN، مقادیر ضریب تعیین (R^2) و ضریب همبستگی (R) میان مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده حذف کدورت برای داده‌های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۴۹۲ و ۰/۹۷۴۰ به دست آمد که نشان‌دهنده کارایی خوب مدل بود.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)
۳- استادیار، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

بحث و نتیجه‌گیری: نانوماده گرافن اکساید کارایی بالایی در حذف کدورت از آب نشان داد. پارامترهای pH و غلظت منعقدکننده، به عنوان مهمترین پارامترهای کنترل‌کننده فرآیند تشخیص داده شد. مدل داده‌کاوی شبکه عصبی از عملکرد خوبی برای پیش‌بینی بازدهی حذف کدورت با استفاده از گرافن اکساید برخوردار بود.

واژه‌های کلیدی: مواد کلوئیدی، حذف کدورت، انعقاد و لخته‌سازی، گرافن اکساید، شبکه عصبی مصنوعی.

Turbidity Removal from Water Using Graphene Oxide as Coagulant and Modeling with Artificial Neural Network

Nazila Rezania¹

Maryam Hasani Zonoozi^{2*}

mhzonoozi@iust.ac.ir

Motahareh Saadatpour³

Admission Date: June 14, 2020

Date Received: October 7, 2019

Abstract

Background and Objective: In recent years, applications of carbon-based nanomaterials have been developed in various fields such as water and wastewater industry. One of these compounds is graphene oxide (GO), which has attracted a lot of attention due to its high specific surface two-dimensional structure and various surface groups. In this regard, the main purpose of this study is to investigate the coagulation properties of graphene oxide in removing turbidity from water and modeling the process using artificial neural network (ANN).

Material and Methodology: The samples were prepared by using garden soil and tap water and the GO was purchased in the form of suspension. Jar tests were performed to assess the influence of pH, GO dosage, initial turbidity, settling time and other parameters on the turbidity removal efficiency. In order to simulate the process, Perceptron neural network was used.

Findings: Under acidic pH conditions and with increasing the GO dosage from 2.5 mg/L to 40 mg/L, the removal efficiency increased considerably. However, the initial turbidity did not show a clear effect on the process performance. Much of the turbidity removal occurred within the first 10 minutes of the settling time and the flocs' exhibited higher settling rates at higher GO dosages and acidic pH condition. According to the results obtained from the created ANN model, the coefficient of determination (R^2) and the correlation coefficient (R) between the observed and predicted values of the test data were 0.9492 and 0.974, respectively, which reveal the model's high capability in predicting the process results.

Discussion and Conclusion: GO showed high capability in turbidity removal from water. The pH and GO dosage were recognized as the process controller parameters. The ANN data mining model showed good performance in predicting process efficiency.

Keywords: Colloidal Particles, Turbidity Removal, Coagulation and Flocculation, Graphene Oxide, Artificial Neural Network.

1- M.Sc., Student, Water and Environment Group, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Water and Environment Group, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.* (Corresponding Author)

3- Assistant Professor, Water and Environment Group, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

مقدمه

مشتقات پلی اکریل آمید) بیشترین استفاده را در فرآیند تصفیه آب دارا می‌باشند (۸-۶). با این وجود، افزایش یون‌های فلزی یا مونومرهای سمی هنگام استفاده از این مواد شیمیایی، ممکن است پیامدهای ناخواسته‌ای را برای بوم‌سازگان و سلامت انسان داشته باشد (۷). همچنین نتایج مطالعات گذشته نشان داده است که استفاده از سولفات آلومینیوم (آلوم)، که یکی از پرمصرف‌ترین مواد منعقدکننده در صنعت تصفیه آب می‌باشد، غلظت آلومینیوم در آب تصفیه شده را بالا می‌برد و از این رو می‌تواند بیماری‌هایی نظیر جنون زودرس و آلزایمر را در پی داشته باشد. در نتیجه استفاده از منعقدکننده‌های جدید که سازگاری بیشتری با محیط زیست داشته باشند، مورد نیاز است (۷، ۹-۱۱).

در دهه‌های اخیر، نانومواد با پایه کربنی که دارای مزایای سطح بزرگ‌تر و مکان‌های فعال بیش‌تر در سطح ذره می‌باشند، به شدت توسعه یافته‌اند. در همین راستا مطالعات بسیار محدودی در خصوص امکان استفاده از این نانومواد به عنوان منعقدکننده به منظور جایگزینی برای منعقدکننده‌های معدنی صورت گرفته است (۱، ۷). یکی از این مواد، گرافن اکساید (GO) می‌باشد. گرافن اکساید دارای ساختار ورقه‌ای با سطح ویژه بالا و شامل گروه‌های مختلفی نظیر هیدروکسیل، کربوکسیل و اپوکسی است (۱۲). برخلاف نگرانی‌ها در مورد اثرات سایر نانومواد همچون نانولوله‌های کربنی بر سلامت انسان، GO سازگاری بهتری را از خود نشان داده است (۱۳، ۱۴). مزایایی نظیر سطح ویژه بالا، گروه‌های فعال زیاد، پراکندگی خوب در آب و سازگاری با محیط زیست، استفاده از GO را به منظور حذف آلاینده‌ها از آب امکان‌پذیر می‌سازد (۷). به خاطر ویژگی‌های سطحی و گروه‌های فعال گرافن اکساید، بیشتر مطالعات انجام شده بر روی حذف آلاینده‌های مختلف توسط این ماده، با استفاده از فرآیند جذب بوده و پژوهش‌های کمی بر روی کارایی انعقادی آن انجام شده است. برای اولین بار یانگ و همکاران (۷) به بررسی عملکرد و سازوکار انعقاد گرافن اکساید برای حذف آلاینده‌های مختلف از آب پرداختند. در این پژوهش آن‌ها امکان استفاده از گرافن اکساید برای حذف آلاینده‌های با

حضور ذرات معلق کلئیدی از جمله سیلت، رس، ذرات آلی و معدنی و میکروارگانیزم‌ها در آب موجب کاهش شفافیت آب می‌شود که در اصطلاح به آن کدورت گفته می‌شود (۱-۳). این ذرات نسبت سطح به جرم بسیار بالایی دارند و مقدار جرم آن‌ها به قدری کم است که به واسطه نیروی ثقل ته‌نشین نمی‌شوند. نسبت سطح به جرم بالا در ذرات کلئیدی موجب تشدید ویژگی‌های سطحی آن‌ها می‌شود به طوری که یک عامل مهم در ثبات و پایداری این ذرات، وجود بار سطحی هم‌نام آنها است (۳، ۴). کدورت بیش از حد در آب آشامیدنی علاوه بر کاهش شفافیت آب و ایجاد ناخشنودی بصری، طعم و بوی آب را نامطلوب ساخته و موجب نارضایتی مصرف‌کنندگان می‌شود. وجود کدورت در آب همچنین اثرات نامطلوبی بر بهداشت و سلامت انسان دارد. ذرات مولد کدورت نظیر رس، لای، جلبک و نظایر آن، به دلیل دارا بودن سطح ویژه (نسبت سطح به جرم) بسیار بالا، محل‌های مناسبی را برای چسبیدن انواع آلودگی‌های معدنی و آلی موجود در آب فراهم کرده و به عنوان بستر مناسبی برای تشکیل بیوفیلم و رشد و تجمع انواع ویروس‌ها و باکتری‌های بیماری‌زا، عمل می‌کنند. به‌علاوه کدورت بالا در آب موجب کاهش تاثیر مواد ضدعفونی کننده آب همچون کلر شده و هزینه ضدعفونی‌سازی آب را افزایش می‌دهد. برخی بیماری‌های گوارشی نیز به وجود کدورت در آب نسبت داده شده است (۳، ۵).

در عموم تصفیه خانه‌های آب، از فرآیند دو مرحله‌ای انعقاد (مرحله شیمیایی) و لخته‌سازی (مرحله فیزیکی) برای حذف ذرات کلئیدی استفاده می‌شود (۳، ۵). در این فرآیند، ابتدا به واسطه مواد منعقدکننده شیمیایی نیروی دافعه بین ذرات کلئیدی کاهش داده می‌شود. غلبه بر این نیروی دافعه موجب چسبیدن ذرات ریز کلئیدی به یکدیگر (فرآیند انعقاد) می‌شود. در ادامه فرآیند، از برخورد ذرات ریز با یکدیگر، ذرات بزرگ‌تر و با جرم بیشتر (لخته‌سازی) تشکیل می‌شود که این مساله امکان ته‌نشینی لخته‌ها تحت وزن خود را فراهم می‌آورد (۳، ۴). در حال حاضر منعقدکننده‌های معدنی با پایه فلزی (مانند نمک‌های آلومینیوم و آهن) و پلیمرهای مصنوعی (مانند

این اساس هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، بررسی ویژگی-های انعقادی گرافن اکساید در حذف کدورت از آب و همچنین مدل سازی فرآیند با استفاده از روش ANN می باشد.

مواد و روش ها

مواد

در این پژوهش به منظور شبیه سازی شرایط واقعی، از خاک باغچه عبور داده شده از الک شماره ۲۰۰ (ذرات کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی متر) و آب شهری برای ایجاد کدورت استفاده گردید. همچنین ماده گرافن اکساید ساخت شرکت GrapheneX (ایران) به صورت سوسپانسیون خریداری شد. گرافن اکساید خریداری شده به صورت تک لایه، با ضخامت ۰/۱-۷/۴ نانومتر و سنتز شده به روش هامر بوده است. به منظور بررسی صحت ماده، طیف جذب آن با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل UV-Vis DR/4000 ساخت شرکت HACH آمریکا مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان دهنده پیک جذب در طول موج بیشینه (λ_{max}) ۲۲۸ نانومتر بود که در تطابق کامل با طیف جذب گزارش شده توسط شرکت تولیدکننده بود. برای تنظیم pH از هیدروکلریک اسید و سدیم هیدروکسید شرکت مرک (Merck) آلمان استفاده شد.

روش انجام آزمایش ها

به منظور بررسی کارایی انعقادی GO، تاثیر پارامترهای pH، غلظت GO، کدورت اولیه، زمان اختلاط تند و کند و نیز زمان ته نشینی بر بازدهی حذف کدورت از آب مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی و محدوده انتخابی آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

بارهای سطحی مختلف از جمله کائولن، هماتیت، محلول های هومیک اسید و یک رنگزای آزو را مورد بررسی قرار داده و با عملکرد پلی آلومینوم کلراید (PACl) مقایسه نمودند (۷). ابوبراکا و همکاران (۱) نیز اثر پارامترهای pH، غلظت GO و دما را برای تعیین شرایط بهینه حذف کدورت مورد بررسی قرار دادند.

به طور معمول برای انجام مطالعات در زمینه فرآیند انعقاد و لخته سازی، از روش آزمایش جار استفاده می شود. با این حال این آزمایش، دارای محدودیت هایی از نظر هزینه و وقت گیر بودن می باشد. برای غلبه بر این محدودیت ها، می توان از روش های مدل سازی استفاده نمود. اخیراً، روش داده کاوی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان روشی مناسب برای مدل سازی فرآیندهای پیچیده تصفیه آب مورد استفاده قرار گرفته است (۱۵، ۱۶). به طور مثال نجاح و همکاران (۱۷) از روش ANN برای پیش بینی پارامترهای کیفی آب رودخانه جوهور در مالزی همچون کدورت، کل مواد جامد محلول و هدایت الکتریکی استفاده نمودند. همچنین نصر و همکاران (۱۸) از ANN برای پیش بینی عملکرد تصفیه خانه ای در مصر به منظور تخمین مقادیر پارامترهای خروجی نظیر نیاز اکسیژن-خواهی بیولوژیکی (BOD) و ذرات معلق استفاده کردند. خیری و همکاران (۱۹) نیز به بررسی رویکرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی سطح کدورت آب با استفاده از پرتونگاری پرداختند.

طبق اطلاعات موجود، تاکنون مطالعات انگشت شماری در زمینه ویژگی های انعقادی گرافن اکساید انجام شده است. همچنین تا کنون از هیچ یک از روش های داده کاوی برای مدل سازی فرآیند انعقاد با استفاده از نانوماده گرافن اکساید استفاده نشده است. بر

جدول ۱- پارامترها و محدوده مورد بررسی آنها

Table 1. Parameters and their ranges

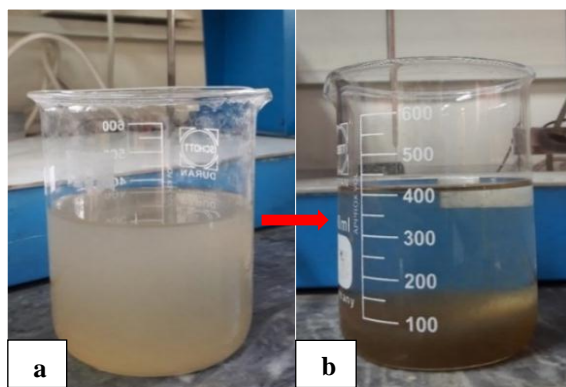
زمان ته نشینی (دقیقه)	زمان اختلاط (دقیقه)		کدورت اولیه (NTU)	غلظت GO (میلی گرم بر لیتر)	pH	پارامتر
	اختلاط کند	اختلاط تند				
۱۰-۵۰	۱۰-۴۰	۱-۵	۵۰-۳۰۰	۲/۵-۴۰	۳-۱۰	محدوده
۱۰	۱۰ و ۵	۱	۱۰۰ و ۵۰	۱۵ و ۵، ۲/۵	۱	گام

نشینی در نظر گرفته شد. پس از ته نشینی از قسمت سوپرناتانت نمونه به منظور تهیه کدورت‌های مورد نظر استفاده گردید. نمونه‌های اصلی مورد آزمایش به حجم ۴۰۰ میلی لیتر در بشرهایی با ظرفیت ۶۰۰ میلی لیتر تهیه شد. پیش از انجام آزمایش و افزودن ماده منعقدکننده، pH نمونه‌ها با هیدروکلریک اسید و سدیم هیدروکسید ۰/۱ نرمال تنظیم گردید. اندازه‌گیری کدورت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کدورت سنج Milwaukee مدل Mi 415 ساخت کشور رومانی انجام شده و pH نمونه‌ها نیز با دستگاه pH متر CyberScan سری ۳۰۰ ساخت کشور سنگاپور تنظیم گردید.

پس از تهیه نمونه‌ها با مشخصات مورد نظر، نمونه‌ها به دستگاه جارتست انتقال داده شدند. عمل اختلاط سریع با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲ دقیقه و اختلاط آرام با سرعت ۵۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. پس از پایان اختلاط، نمونه‌ها به مدت ۴۰ دقیقه برای ته نشینی در حالت سکون نگه داشته شدند. سپس از حدود ۲ سانتی‌متر زیر سطح آب درون ظرف، نمونه برداشته شد و کدورت آن با دستگاه کدورت سنج مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. شایان ذکر است که برای بررسی تاثیر زمان ته نشینی و همچنین زمان اختلاط، مراحل تهیه نمونه به همین منوال بوده و تنها تفاوت ایجاد شده به ترتیب در زمان مرحله ته نشینی و زمان مرحله اختلاط با دستگاه جار بود. تصویری از نمونه پیش و پس از فرآیند انعقاد در شکل ۱ نشان داده شده است. برای محاسبه بازدهی حذف کدورت از رابطه ۱ استفاده شد که در آن، TR بازدهی حذف کدورت، T_0 مقدار کدورت اولیه و T مقدار کدورت باقی مانده می‌باشد (۷).

$$TR(\%) = \frac{T_0 - T}{T_0} \times 100 \quad (1)$$

شایان ذکر است که نوع و محدوده پارامترها بر اساس گزارش‌های علمی و پژوهش‌های پیشین در زمینه فرآیند انعقاد و لخته‌سازی انتخاب شده است. به طور مثال بر اساس پژوهش‌های گذشته عموماً تاثیر pH در محدوده ۳ تا ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است (۱، ۲، ۶، ۷، ۲۰) که بر این اساس همین محدوده در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین کدورت مورد بررسی در مطالعات گذشته عموماً کمتر از NTU ۳۰۰ بوده است (۱، ۱۱، ۲۱، ۲۲) که به همین دلیل محدوده کدورت مورد بررسی در این پژوهش بین NTU ۵۰ تا NTU ۳۰۰ در نظر گرفته شد. در مورد محدوده انتخابی غلظت منعقدکننده (GO)، از آنجایی که طبق آزمایش‌های اولیه مشخص گردید غلظت‌های بالاتر از ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر (۴۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) تغییر چندانی در بازدهی حذف کدورت ایجاد نمی‌کند، در نتیجه غلظت مورد بررسی گرافن اکساید تا ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. زمان اختلاط تند و کند در گزارش‌های علمی پیشین (۳، ۷، ۲۳) به ترتیب در بازه ۱-۲ دقیقه و ۱۵-۱۰ دقیقه بررسی شده است. همچنین در این مطالعات (۲، ۷، ۲۳)، زمان ته نشینی به طور معمول بین ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر با توجه به نانوماده بودن گرافن اکساید و نیز به منظور بررسی دقیق تاثیر زمان‌های اختلاط و ته نشینی بر بازدهی حذف کدورت توسط این ماده، زمان اختلاط تند و کند به ترتیب در بازه ۵-۱ دقیقه و ۴۰-۱۰ دقیقه و زمان ته نشینی در بازه ۱۰ تا ۵۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. جهت کسب اطمینان از صحت پاسخ‌ها، هر آزمایش حداقل دو بار و حداکثر سه بار تکرار شد. به منظور تهیه نمونه‌ها ابتدا ذرات خاک عبوری از الک ۲۰۰ در ۲ لیتر آب پخش گردید. در ادامه به منظور هیدراتاسیون ذرات خاک، طبق روش ارائه شده توسط ابوبراکا و همکاران (۱)، نمونه به مدت ۱ ساعت با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه با دستگاه جار هم زده شد و ۲۴ ساعت به آن زمان داده شد. پس از ۲۴ ساعت، نمونه مجدداً هم زده و به مدت ۶۰ دقیقه زمان ته-



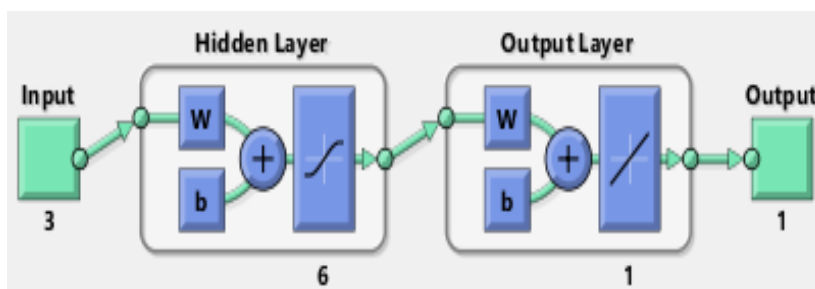
شکل ۱ - تصویری از نمونه پیش (a) و پس (b) از انعقاد

Figure 1. Image of sample (a) before and (b) after coagulation

مدل سازی با شبکه عصبی مصنوعی

آموزش شبکه و ۲۷٪ دیگر (۲۱ آزمایش) به عنوان داده‌های آزمون در نظر گرفته شدند. برای تعیین تعداد مناسب نرون‌ها و نیز توابع آموزش و یادگیری شبکه از آنالیز حساسیت استفاده شد و در نهایت تعداد نرون‌ها و نوع توابع از روی بهترین پاسخ از میان پاسخ‌های به دست آمده تعیین گردید. بهترین پاسخ به دست آمده در شبکه‌ای با ۳ نرون و تابع آموزش trainbr و تابع یادگیری learnlv1 بوده است. در شکل ۲ مدل شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

در پژوهش حاضر، برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی، از شبکه پرسپترون با یک لایه پنهان با الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شد. در این الگوریتم مقدار خروجی شبکه با خروجی مطلوب مقایسه می‌شود، سپس با توجه به میزان خطای به دست آمده، اصلاح وزن‌ها از لایه خروجی شروع و به سمت لایه‌های ورودی پیش می‌رود (۲۴). به منظور انجام مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی از نرم‌افزار متلب استفاده شد. در این راستا تعداد ۷۹ آزمایش تحت سطوح مختلفی از پارامترها انجام شد که به صورت کاملاً تصادفی حدود ۷۳٪ از داده‌ها (۵۸ آزمایش) برای



شکل ۲- شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده

Figure 2. The used artificial neural network

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص PMI طبق روابط زیر مورد استفاده قرار گرفت (۲۵، ۲۶):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_{act} - \bar{Y}_{act})(Y_{est} - \bar{Y}_{est})]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{act} - \bar{Y}_{act})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{est} - \bar{Y}_{est})^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{act} - \bar{Y}_{act})(Y_{est} - \bar{Y}_{est})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{act} - \bar{Y}_{act})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{est} - \bar{Y}_{est})^2}} \quad (3)$$

شایان ذکر است که شبکه عصبی انتخاب شده در این پژوهش از نظر ارتباط نرون‌ها، از نوع پیش‌خور می‌باشد. پارامترهای ورودی شبکه pH، غلظت GO و کدورت اولیه نمونه و پارامتر خروجی آن مقادیر بازدهی حذف کدورت بود. به منظور ارزیابی مدل، معیارهای ضریب تعیین (R^2)، ضریب همبستگی (R)،

یافته‌ها

تاثیر pH بر بازدهی فرآیند

آزمون بررسی تاثیر pH بر بازدهی حذف کدورت، در کدورت ثابت ۲۰۰ NTU، در محدوده pH ۳ تا ۱۰ و در سه حالت بدون استفاده از ماده منعقدکننده و غلظت‌های ۲/۵ و ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر از ماده منعقدکننده انجام شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تحت هر دو غلظت مورد استفاده GO، بازدهی حذف کدورت در محدوده pH اسیدی (۷ و کمتر از آن) بسیار بیش‌تر از pH‌های بازی است. روند نسبتاً مشابهی در شرایط بدون استفاده از GO نیز مشاهده گردید اما در این حالت میزان تاثیر pH بر بازدهی فرایند، کمتر بود.

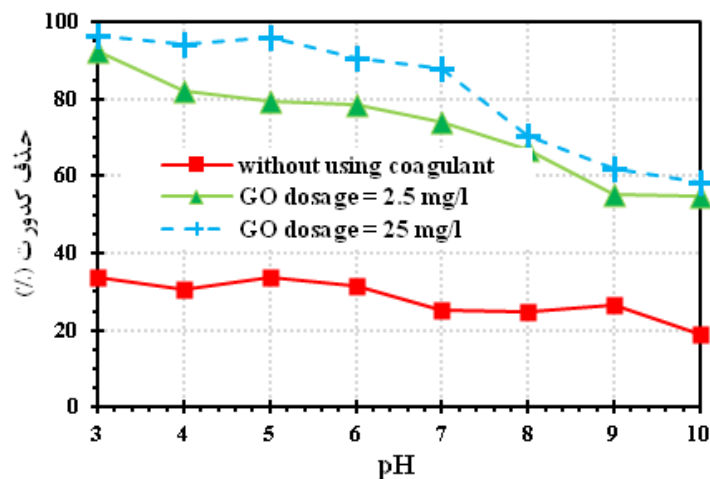
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{act} - y_{est})^2}{n}} \quad (۴)$$

$$PMI \quad (۵)$$

$$= \iint f_{X',Y'}(x',y') \log_e \left[\frac{f_{X',Y'}(x',y')}{f_{X'}(x')f_{Y'}(y')} \right] dx' dy'$$

$$\begin{cases} x' = x - E[x|z] \\ y' = y - E[y|z] \end{cases}$$

در روابط ۲، ۳ و ۴، y_{act} مقادیر مشاهده شده (مقادیر واقعی)، \bar{y}_{act} میانگین مقادیر مشاهداتی، y_{est} مقادیر پیش‌بینی شده، \bar{y}_{est} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌های ورودی است. در رابطه ۵، $E[\cdot]$ بیانگر عملیات امید ریاضی و x' و y' شامل اطلاعات باقیمانده در متغیر X و Y بعد از در نظر گرفتن اثر متغیر ورودی انتخاب شده Z می‌باشند. پارامترهای $f_{X'}(x')$ ، $f_{Y'}(y')$ و $f_{X',Y'}(x',y')$ نیز بیانگر تابع چگالی احتمال ناحیه‌ای و توام هستند.



شکل ۳- اثر pH بر بازدهی حذف کدورت (کدورت اولیه = ۲۰۰ NTU)

Figure 3. Effect of pH on turbidity removal efficiency (Initial turbidity = 200 NTU)

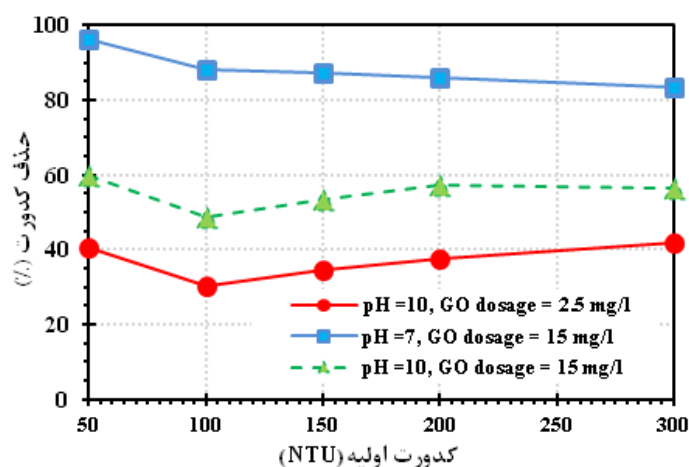
استفاده از آنها به انجام رسید. با توجه به شکل، تحت pH برابر با ۷ و غلظت ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر از GO، با افزایش مقدار کدورت از ۵۰ NTU به ۳۰۰ NTU، بازدهی حذف از حدود ۹۶٪ به ۸۴٪ کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر حذف کدورت در نمونه تحت pH برابر با ۷ و غلظت ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر از گرافن اکساید، به میزان قابل توجهی بیش‌تر از مقادیر حذف کدورت برای نمونه‌ی دیگر با pH برابر با ۱۰ و غلظت ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر از گرافن اکساید، است. این نتیجه با نتایج ارائه شده در بخش پیشین مبنی بر بهبود عملکرد فرآیند

با توجه به نتیجه فوق و به دست آمدن بازدهی حذف نسبتاً بالا تحت pH برابر با ۷، در ادامه برای انجام سایر آزمایش‌ها، عمدتاً از همین سطح pH استفاده شد. البته برای بررسی بهتر و نیز در شرایطی که اثر پارامتر مورد بررسی تحت pH برابر با ۷ به خوبی مشاهده نشد، سایر pHها نیز مورد آزمایش قرار گرفت.

تاثیر کدورت اولیه بر بازدهی فرآیند

به منظور بررسی اثر کدورت اولیه بر بازدهی فرآیند، سه نمونه با مشخصات ارائه شده در شکل ۴ تهیه گردید و آزمایش‌ها با

با کاهش pH، مطابقت دارد. در هر دو نمونه تحت pH برابر با بازدهی حذف شده است. ۱۰، افزایش کدورت ابتدا موجب کاهش و سپس موجب افزایش



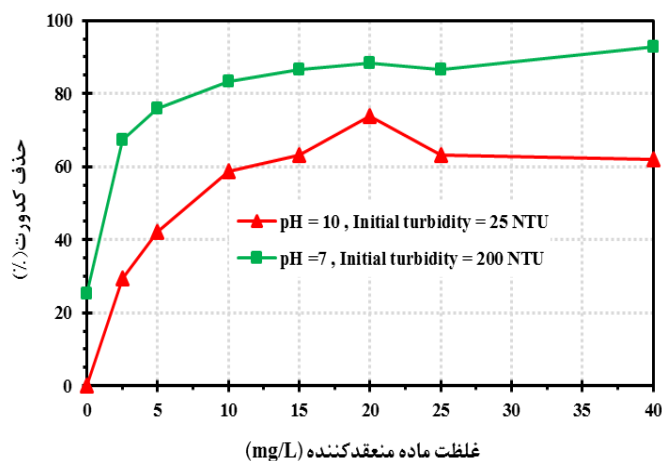
شکل ۴- تاثیر کدورت اولیه بر بازدهی حذف کدورت تحت شرایط مختلف

Figure 4. Effect of initial turbidity on turbidity removal under different conditions

تاثیر غلظت منعقدکننده بر بازدهی فرآیند

پس از آن بازدهی حذف کاهش یافت. شایان ذکر است که تحت کدورت اولیه ۲۰۰ NTU و pH برابر با ۷، افزودن تنها ۲/۵ میلی گرم بر لیتر از گرافن اکساید به عنوان منعقدکننده، موجب افزایش حذف کدورت از ۲۵٪ به ۶۷٪ شده و در غلظت ۱۵ میلی گرم بر لیتر از این ماده منعقدکننده، این مقدار به حدود ۹۰٪ رسیده است.

برای بررسی اثر غلظت منعقدکننده بر بازدهی فرآیند، دو نمونه با مشخصات ارائه شده در شکل ۵ تهیه و آزمایش‌ها با استفاده از آنها انجام شد. در نمونه با کدورت اولیه ۲۰۰ NTU و pH برابر با ۷ افزایش مقدار غلظت GO در محدوده ۰-۴۰ میلی گرم بر لیتر همواره سبب افزایش بازدهی حذف گردید. در حالی که در نمونه با کدورت اولیه ۲۵ NTU و pH برابر با ۱۰ این افزایش بازدهی تا غلظت ۲۰ میلی گرم بر لیتر از GO رخ داده و



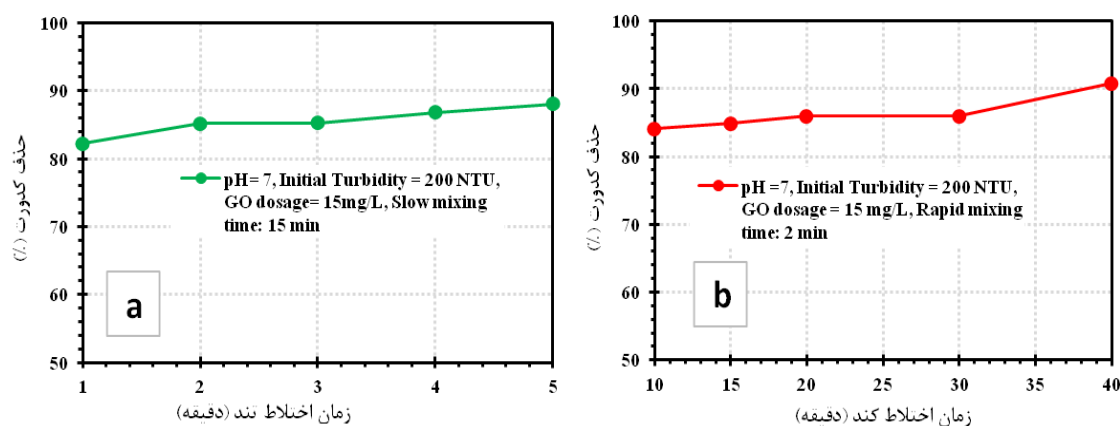
شکل ۵- اثر غلظت گرافن اکساید بر بازدهی حذف کدورت

Figure 5. Effect of GO dosage on turbidity removal efficiency

تاثیر زمان اختلاط بر بازدهی فرآیند

تنظیم شد. شکل ۶ نشان‌دهنده تاثیر زمان اختلاط تند و اختلاط آرام بر بازدهی حذف کدورت می‌باشد. از بررسی شکل می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش زمان اختلاط تند و نیز زمان اختلاط کند، تاثیر کمی بر بهبود بازدهی حذف کدورت داشته است.

برای بررسی تاثیر زمان اختلاط بر میزان حذف کدورت، یکبار زمان اختلاط آرام بر روی ۱۵ دقیقه تنظیم و زمان اختلاط تند از ۱ تا ۵ دقیقه با گام زمانی ۱ دقیقه در نظر گرفته شد. بار دیگر زمان اختلاط تند بر روی ۲ دقیقه ثابت نگه داشته و مدت زمان اختلاط آرام در پنج حالت ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه



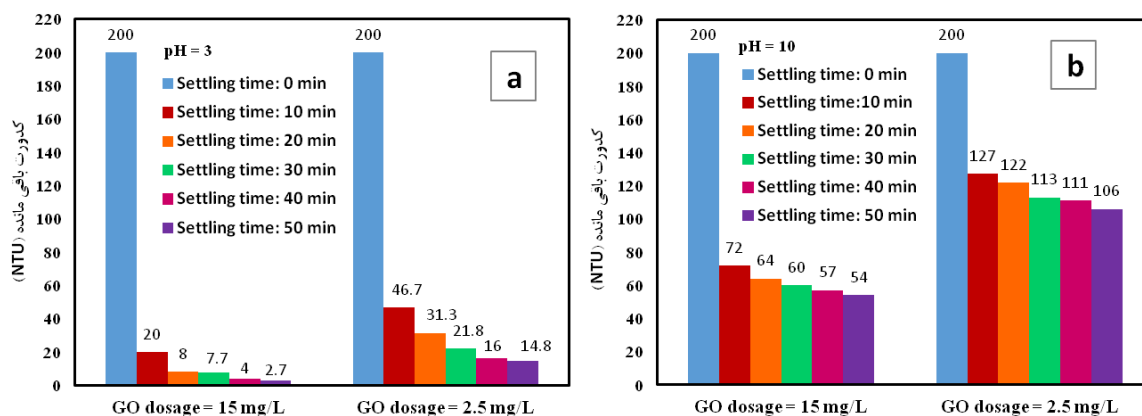
شکل ۶- تاثیر زمان اختلاط تند (a) و کند (b) بر بازدهی حذف کدورت

Figure 6. Effect of rapid mixing time (a) and slow mixing time (b) on turbidity removal efficiency

نرخ حذف کدورت نسبت به زمان ته‌نشینی

میزان کدورت باقی‌مانده کاهش یافته است. همچنین در هر چهار حالت، بخش عمده کاهش کدورت طی ده دقیقه اول اتفاق افتاده است. همچنین طبق شکل، پس از ۱۰ دقیقه ابتدایی و در گام‌های زمانی بعدی، تحت هر دو pH مورد بررسی و نیز هر دو غلظت GO، نرخ کاهش کدورت به شدت افت کرده است. این افت نرخ کاهش کدورت، تحت pH برابر با ۱۰ بسیار شدیدتر است.

برای بررسی تاثیر زمان ته‌نشینی بر بازدهی حذف و نیز نرخ کاهش کدورت نسبت به زمان، مقدار کدورت باقی‌مانده در بازه زمانی ۰ تا ۵۰ دقیقه و با گام زمانی ۱۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. بدین منظور چهار نمونه با کدورت اولیه ۲۰۰ NTU تحت pH های ۳ و ۱۰ و غلظت‌های منعقدکننده ۲/۵ و ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج حاصل در شکل ۷ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر چهار حالت مورد بررسی، با افزایش زمان ته‌نشینی،



شکل ۷- تاثیر زمان ته نشینی بر حذف کدورت (a) کدورت اولیه: ۲۰۰، pH=۳، (b) کدورت اولیه: ۲۰۰، pH=۱۰،

Figure 7. Effect of sedimentation time on turbidity removal (a) Initial turbidity = 200 NTU, pH = 3 and (b) Initial turbidity = 200 NTU, pH = 10

مورد بررسی GO، در pH برابر با ۳ نسبت به pH برابر با ۱۰، ده دقیقه اول سهم بسیار بزرگتری از کل کاهش کدورت را به خود اختصاص داده است (۹۰٪ در مقابل ۶۴٪ برای غلظت گرافن اکساید ۱۵ میلی گرم بر لیتر و ۷۷٪ در مقابل ۳۷٪ برای غلظت گرافن اکساید ۲/۵ میلی گرم بر لیتر).

بر اساس شکل ۷ و نیز مقادیر ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می شود که برای هر دو pH مورد بررسی، تحت غلظت GO برابر با ۱۵ میلی گرم بر لیتر نسبت به غلظت GO برابر با ۲/۵ میلی گرم بر لیتر، کاهش کدورت در ده دقیقه اولیه ته نشینی، بسیار شدیدتر بوده است (۹۰٪ در مقابل ۷۷٪ تحت pH برابر برای ۳ و ۶۴٪ در مقابل ۳۷٪ تحت pH برابر با ۱۰). از جنبه های دیگر، مطابق جدول مشاهده می شود که برای هر دو غلظت

جدول ۲ - مقادیر حذف کدورت در بازه های زمانی مختلف

Table 2. Turbidity removal values at different time intervals

pH : ۱۰		pH : ۳		زمان (دقیقه)
۱۵ : GO (میلی گرم بر لیتر)	۲/۵ : GO (میلی گرم بر لیتر)	۱۵ : GO (میلی گرم بر لیتر)	۲/۵ : GO (میلی گرم بر لیتر)	
٪ ۶۴	٪ ۳۶/۵	٪ ۹۰	٪ ۷۶/۶۵	۱۰
٪ ۱۶/۷	٪ ۱۱	٪ ۶۱/۵	٪ ۵۳/۳	۳۰
٪ ۱۰	٪ ۶/۲	٪ ۶۴/۹۳	٪ ۳۲/۱۱	۵۰

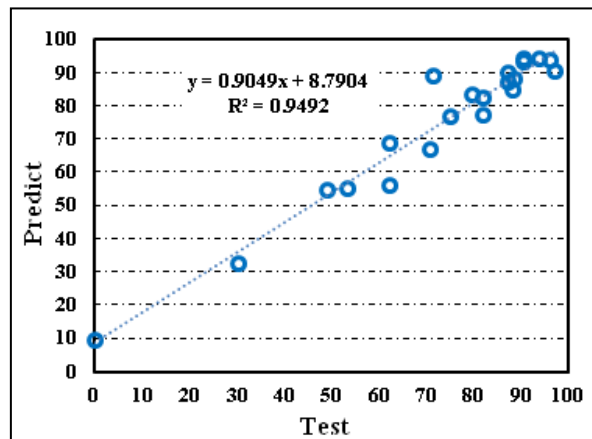
و نزدیک به ۱ می باشد که نشان دهنده برازش بالای مدل است. همچنین ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطا میان مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده داده های آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۷۴ و ۵/۷۱ به دست آمد که نشان دهنده صحت برازش مناسب مدل می باشد. همچنین شکل ۹ نشان دهنده نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و پیش بینی شده حذف کدورت

مدل سازی فرآیند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

در شکل ۸، نتایج مدل سازی فرایند حذف کدورت از آب با استفاده از GO، بر اساس روش ANN ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، ضریب تعیین (R^2) میان مقادیر واقعی (نتایج تهیه شده در محیط آزمایشگاه) و مقادیر پیش بینی شده داده های آزمون توسط شبکه عصبی برابر با ۰/۹۴۹۲

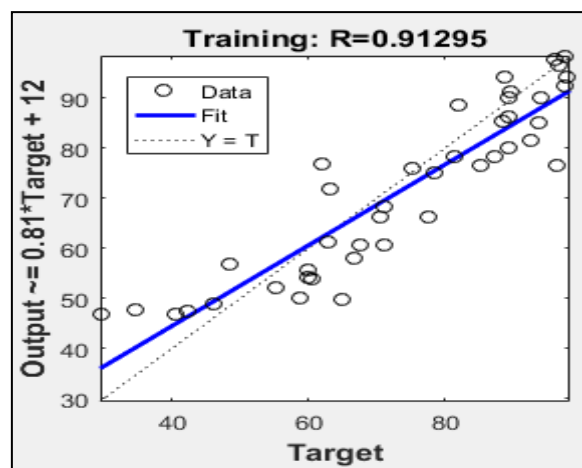
عصبی طراحی شده از کیفیت بسیار مناسبی برخوردار بوده است.

برای داده‌های آموزش می‌باشد. با توجه به مقدار به دست آمده برای ضریب همبستگی (R) برای داده‌های آموزش، که نزدیک به ۱ و برابر با ۰/۹۱۲۹ می‌باشد، می‌توان گفت آموزش شبکه



شکل ۸- ضریب تعیین میان مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده داده‌های آزمون

Figure 8. Coefficient of determination between observed and predicted values of test data



شکل ۹- پراکندگی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده حذف کدورت برای داده‌های آموزش

Figure 9. Distribution of observed and predicted values of turbidity removal for training data

حذف کدورت، در بررسی‌های آزمایشگاهی نیز مشاهده شده بود.

بحث و نتیجه‌گیری

بحث پیرامون نتایج تاثیر pH بر بازدهی فرآیند

بر اساس شکل ۳ مشاهده شد که با کاهش pH و اسیدی‌تر شدن محیط میزان حذف کدورت با استفاده از GO افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که بار الکتریکی GO و عموم ذرات

به منظور تعیین درجه اهمیت پارامترهای ورودی مورد استفاده در مدل داده‌کاوی، مقدار شاخص PMI برای سه پارامتر ورودی (pH، غلظت منعقدکننده و کدورت اولیه) محاسبه گردید که به ترتیب برابر با ۰/۷۲، ۰/۶۰۸ و ۰/۴۱۵ به دست آمد. مقادیر به دست آمده نشان دهنده شدت اثر بیشتر pH و غلظت GO نسبت به کدورت اولیه بر مقدار پاسخ سیستم می‌باشد. شایان ذکر است که شدت اثر بیشتر این دو پارامتر بر روی بازدهی

با نتایج بررسی‌های انجام شده در پژوهش حاضر می‌باشد. با این حال، بر خلاف گزارش ابوبراکا و همکاران (۱)، در پژوهش حاضر تحت pHهای بازی، افزایش راندمان حذف مشاهده نگردید. این تفاوت نتیجه می‌تواند به دلیل تفاوت ساختار گرافن اکساید مصرفی و نیز تفاوت منشاء کدورت مورد استفاده در دو پژوهش باشد.

بحث پیرامون نتایج تاثیر کدورت اولیه بر بازدهی فرآیند

مطابق با شکل ۴، تحت pH برابر با ۷ و غلظت ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر از GO، با افزایش مقدار کدورت در محدوده ۵۰ NTU-۱۰۰، کاهش نسبی بازدهی حذف مشاهده شد. این نتیجه نشان می‌دهد که در کدورت‌های بالاتر برای دستیابی به بازدهی نزدیک به ۹۶٪ (بیشترین بازدهی به دست آمده در این آزمایش)، غلظت منعقدکننده بالاتری مورد نیاز می‌باشد. همچنین در هر دو نمونه تحت pH برابر با ۱۰ کاهش اولیه بازدهی با افزایش کدورت از ۵۰ NTU به ۱۰۰ NTU احتمالاً به این دلیل رخ داده که برای حفظ درصد حذف تحت کدورت بیشتر، غلظت منعقدکننده بالاتری مورد نیاز بوده است. اما در کدورت‌های بیشتر از ۱۰۰ NTU، افزایش بازدهی احتمالاً به دلیل افزایش میزان برخورد بین ذرات کدورت و ماده منعقدکننده و نیز افزایش تعداد برخورد میان خود ذرات کدورت رخ داده که در نتیجه امکان تجمع بیشتر ذرات را فراهم نموده است. به عنوان جمع بندی می‌توان گفت در pH مناسب، با افزایش کدورت بازدهی فرآیند کاهش نسبی یافته اما به طور کلی مقادیر بازدهی نسبت به pH نامناسب بسیار بالاتر بوده است. در حالیکه در pH نامناسب، با افزایش کدورت، بازدهی حذف افزایش نسبی یافته و در واقع کدورت اضافی به نوعی به کمک فرآیند آمده است. این مساله نشان می‌دهد که چگونگی تاثیر کدورت اولیه، بستگی قابل توجهی به سایر پارامترها نظیر pH دارد.

با بررسی نتایج به دست آمده توسط ابوبراکا و همکاران (۱) مشاهده می‌شود که با افزایش کدورت نمونه از ۲۰ NTU به ۱۰۰ NTU و سپس به ۲۰۰ NTU، تحت غلظت گرافن

خاک، هر دو منفی است (۲۹-۲۷)، لذا احتمالاً افزایش یون‌های H^+ در محیط تحت شرایط pH اسیدی و قرار گرفتن این یون‌ها در اطراف ذرات GO و ذرات خاک، موجب کاهش شدت بار منفی و میزان دافعه بین ذرات خاک و گرافن اکساید شده و ذرات به حالت خنثی نزدیک‌تر شده‌اند. در نتیجه احتمال به هم پیوستن ذرات GO و ذرات خاک به یکدیگر در اثر برخوردهای متوالی افزایش یافته است. از آنجایی که همچنان ماده منعقدکننده و آلاینده دارای بارهای هم‌نام هستند، نمی‌توان خنثی‌سازی بار و فشرده‌گی لایه مضاعف الکتریکی را از سازوکارهای غالب در این فرآیند دانست، بلکه احتمالاً سازوکار اصلی انعقاد عمدتاً از نوع جارویی بوده است که بدون شک سطح ویژه بسیار بالای گرافن اکساید به انجام این نوع انعقاد و به دام انداختن ذرات کمک به سزایی کرده است.

نتایج حاصل از بررسی اثر تغییر pH بر بازدهی حذف در غلظت صفر از منعقدکننده نشان دهنده این موضوع است که اختلاط تند و کند، خود به عنوان نوعی کمک‌منعقدکننده عمل کرده و تا حدی موجب حذف کدورت شده است. همچنین با توجه به شیب کمتر منحنی در این حالت می‌توان نتیجه گرفت که در حالتی که منعقدکننده در محیط وجود ندارد، کاهش pH اثر کمتری بر بهبود فرآیند انعقاد داشته است. چرا که در این حالت، یون‌های H^+ صرفاً در اطراف ذرات کلوئیدی خاک قرار گرفته‌اند و دافعه بین آنها را کاهش داده‌اند (نه دافعه بین ذرات خاک و ذرات گرافن اکساید را) و از این طریق تا حدی به پیوستن آنها به یکدیگر کمک کرده‌اند.

یانگ و همکاران (۷) در پژوهش خود سه سطح pH اسیدی، خنثی و بازی (pHهای ۴، ۷ و ۱۱) را بررسی نموده و گزارش کردند که برای حذف کاتولین از آب توسط GO، همواره راندمان حذف در حالت اسیدی بهتر از حالت خنثی و بازی بوده است. همچنین ابوبراکا و همکاران (۱) با بررسی اثر pH در محدوده ۴ تا ۱۰ بر راندمان حذف کدورت، مشاهده کردند که راندمان حذف در pH اسیدی و pHهای بزرگ‌تر از ۸ بیشتر از راندمان حذف در pHهای ۶ و ۷ می‌باشد. نتایج کار این محققان مبنی بر راندمان حذف بالا در pHهای اسیدی مطابق

اولیه اختلاط، تماس حداکثری بین کدورت و ماده منعقدکننده اتفاق افتاده و به همین دلیل افزایش زمان اختلاط چندان سبب افزایش تماس موثر و در نتیجه افزایش بازدهی فرایند نشده است. به طور کلی می‌توان گفت که به منظور انجام بهینه مراحل انعقاد و لخته‌سازی توسط GO، مدت زمان‌های مورد نیاز برای اختلاط تند و اختلاط کند، بسیار کم و به ترتیب در حد ۲ دقیقه و ۱۵ تا ۲۰ دقیقه می‌باشد و لزومی برای افزایش این زمان‌ها که معادل با افزایش مصرف انرژی است، وجود ندارد.

بحث پیرامون نتایج تاثیر زمان ته‌نشینی بر بازدهی فرآیند

به طور کلی با توجه به شکل ۷ و مقادیر ارائه شده در جدول ۲ می‌توان گفت با کاهش pH و نیز با افزایش غلظت ماده منعقدکننده، نرخ ته‌نشینی لخته‌ها افزایش یافته است که این مساله احتمالاً ناشی از اندازه بزرگتر و یا ساختار متراکم‌تر لخته‌های تشکیل شده در شرایط یاد شده می‌باشد. همچنین افت نرخ کاهش کدورت در گام‌های زمانی پس از ۱۰ دقیقه ابتدایی، تحت هر دو pH (به ویژه تحت pH برابر با ۱۰) نشان دهنده آن است که در طول فرایند لخته‌های بسیار ریزی تشکیل می‌شوند که حتی در زمان‌های طولانی‌تر نیز به خوبی ته‌نشین نمی‌شوند.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر ویژگی‌های انعقادی نانوماده گرافن اکساید به‌عنوان جایگزینی برای منعقدکننده‌های معدنی متداول، به منظور حذف کدورت از آب مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور اثر پارامترهای pH (در محدوده ۳ تا ۱۰)، غلظت منعقدکننده (در محدوده ۲/۵-۴۰ میلی‌گرم بر لیتر)، کدورت اولیه (۳۰۰-۵۰ NTU) و زمان‌های اختلاط (اختلاط تند در بازه ۵-۱ دقیقه و اختلاط کند در بازه ۴۰-۱۰ دقیقه) و ته‌نشینی (۵۰-۱۰ دقیقه) به‌عنوان عوامل موثر بر فرآیند مورد ارزیابی قرار گرفتند. طبق نتایج به دست آمده، بازدهی حذف کدورت با افزایش غلظت گرافن اکساید از ۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر

اکساید ۲۴ میلی‌گرم بر لیتر (غلظت بهینه به دست آمده در پژوهش آنها)، بازدهی حذف افزایش یافته است. این افزایش حذف احتمالاً به دلیل بهینه بودن غلظت گرافن اکساید و نیز افزایش برخورد میان ذرات ایجادکننده کدورت با یکدیگر و با ماده منعقدکننده (همانند پژوهش حاضر) بوده است.

بحث پیرامون نتایج تاثیر غلظت منعقدکننده بر بازدهی فرآیند

با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش غلظت ماده منعقدکننده بازدهی فرایند فرآیند افزایش یافته است. در واقع با افزایش مقدار منعقدکننده میزان برخوردهای بین ذرات خاک و ماده منعقدکننده افزایش یافته، لخته‌های بیشتری تشکیل شده و در نتیجه حذف کدورت بیشتری رخ داده است. در نمونه با کدورت اولیه ۲۵ NTU و pH برابر با ۱۰، دلیل کاهش بازدهی فرآیند پس از غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر از منعقدکننده احتمالاً در اثر بیش مصرفی ماده منعقدکننده می‌باشد. به عبارتی استفاده بیش از حد از منعقدکننده خود سبب افزایش کدورت و کاهش بازدهی حذف گردیده است. یانگ و همکاران (۷) با مقایسه دو منعقدکننده گرافن اکساید و PACI برای حذف آلاینده‌های با بار منفی، گزارش کردند که به دلیل غالب بودن انعقاد جارویی در سازوکار انعقاد گرافن اکساید، همواره غلظت‌های بالاتری برای حذف آلاینده‌ها توسط GO نسبت به PACI لازم بوده است. اگرچه طبق نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، به نظر می‌رسد سطح بسیار زیاد گرافن اکساید سبب شده تا نیاز به غلظت‌های بالا تا حدودی جبران شود.

بحث پیرامون نتایج تاثیر زمان‌های اختلاط بر بازدهی فرآیند

در شکل ۶ که نشان دهنده تاثیر زمان اختلاط تند و اختلاط کند بر بازدهی فرآیند است مشاهده شد که افزایش این زمان‌ها تاثیر اندکی بر میزان حذف کدورت داشته است. در واقع، به دلیل نانوماده بودن GO و سطح ویژه بزرگ آن، در لحظات

References

1. Aboubaraka, A.E., Aboelfetoh, E.F., Ebeid, E.M., 2017. Coagulation effectiveness of graphene oxide for the removal of turbidity from raw surface water. *Chemosphere*, Vol. 181, pp. 738-746.
2. Altaher, H., 2012. The use of chitosan as a coagulant in the pre-treatment of turbid sea water. *Journal of hazardous materials*, Vol. 233, pp. 97-102.
3. Qasim, S.R., Motley, E.M., Zhu, G., 2000. *Water works engineering: planning, design, and operation*. Prentice Hall PTR.
4. Metcalf, I.N.C., 2003. *Wastewater engineering; treatment and reuse*. McGraw-Hill.
5. Reynolds, T.D., Richards, P.A., 1995. *Unit operations and processes in environmental engineering*. PWS Publishing Company.
6. Šćiban, M., Klačnja, M., Antov, M., Škrbić, B., 2009. Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource technology*. Vol. 100, No. 24, pp. 6639-6643.
7. Yang, Z., Yan, H., Yang, H., Li, H., Li, A., Cheng, R., 2013. Flocculation performance and mechanism of graphene oxide for removal of various contaminants from water. *Water research*, Vol. 47, No. 4, pp. 3037-3046.
8. Banihashemi, A., Alavi Moghaddam, M.R., Maknoun, R., Nikazar, M., 2008. Lab-scale study of water turbidity removal using aluminum inorganic polymer. *Water and Wastewater*, Vol. 19, No. 2, pp. 82-86. (In Persian)

تا ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر و نیز با تغییر pH محلول به سمت شرایط اسیدی (۷ و کمتر از آن) افزایش می‌یابد. همچنین مشخص گردید چگونگی تاثیر کدورت اولیه بر بازدهی فرآیند تحت تاثیر عوامل موثر دیگر به ویژه pH می‌باشد. افزایش زمان‌های اختلاط تند و کند تاثیر کمی بر بازدهی حذف کدورت توسط گرافن اکساید داشت که دلیل آن احتمالا نانوماده بودن گرافن اکساید و سطح ویژه زیاد آن می‌باشد که موجب شده در لحظات اولیه اختلاط تند، تماس حداکثری بین کدورت و ماده منعقدکننده اتفاق بیفتد و لذا افزایش زمان اختلاط چندان سبب افزایش تماس موثر و متعاقبا افزایش بازدهی حذف نگردد. بررسی تاثیر زمان ته‌نشینی نشان داد که عمده حذف کدورت در ده دقیقه ابتدایی ته‌نشینی رخ می‌دهد. همچنین با افزایش غلظت گرافن اکساید و به ویژه با کاهش pH، نرخ ته‌نشینی لخته‌ها افزایش یافت که این مساله احتمالا ناشی از اندازه بزرگتر و ساختار متراکم‌تر لخته‌های تشکیل شده در شرایط یادشده بوده است. با توجه به هم نام بودن بار سطحی ذرات گرافن اکساید و نیز ذرات کدورت و در نتیجه وجود دافعه میان آنها، می‌توان سازوکار غالب انعقاد توسط گرافن اکساید را از نوع انعقاد جارویی و به دام انداختن ذرات دانست. در مدل‌سازی فرآیند با شبکه عصبی، سه پارامتر pH، غلظت منعقدکننده و کدورت اولیه به عنوان پارامترهای ورودی شبکه و بازدهی حذف کدورت به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شد. نتایج مدل با استفاده از معیارهای ضریب تعیین (R^2) و ضریب همبستگی (R) مورد ارزیابی قرار گرفت که مقادیر به دست آمده کارایی بالای مدل شبکه عصبی طراحی شده در پیش‌بینی بازدهی حذف کدورت با استفاده از گرافن اکساید را تایید نمود. در پژوهش حاضر اثر دما بر بازدهی فرآیند مورد بررسی قرار نگرفت. به علاوه، طبق مشاهدات، لخته‌های تشکیل شده طی فرآیند، علی‌رغم ته‌نشینی نسبتا سریع در شرایط بهینه، از اندازه کوچک و ساختاری شکننده برخوردار بودند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود به منظور ادامه پژوهش در این زمینه، بررسی تاثیر دما بر فرآیند و نیز مطالعه بهبود کیفیت لخته‌ها مدنظر قرار گیرد.

- water treatment. *Environmetrics*, Vol. 22, No. 3, pp. 256-270.
16. Hernández, J.A., Romero, R.J., Juárez, D., Escobar, R.F., Siqueiros, J., 2009. A neural network approach and thermodynamic model of waste energy recovery in a heat transformer in a water purification process. *Desalination*, Vol. 243, No. 1-3, pp. 273-285.
 17. Najah, A., Elshafie, A., Karim, O.A., Jaffar, O., 2009. Prediction of Johor River water quality parameters using artificial neural networks. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 422-435.
 18. Nasr, M.S., Moustafa, M.A., Seif, H.A., El Kobrosy, G., 2012. Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of EL-AGAMY wastewater treatment plant performance-EGYPT. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 51, No. 1, pp. 37-43.
 19. Khairi, M.T.M., Ibrahim, S., Yunus, M.A.M., Famarzi, M., Yusuf, Z., 2016. Artificial neural network approach for predicting the water turbidity level using optical tomography. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 41, No. 9, pp. 3369-3379.
 20. Yang, R., Li, H., Huang, M., Yang, H., Li, A., 2016. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment. *Water research*, Vol. 95, pp. 59-89.
 21. Huang, C., Chen, Y., 1996. Coagulation of colloidal particles in water by chitosan. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental and Clean*
 9. Divakaran, R., Pillai, V.S., 2002. Flocculation of river silt using chitosan, *Water Research*, Vol. 36, No. 9, pp. 2414-2418.
 10. Huang, X., Zhao, Y., Gao, B., Sun, S., Wang, Y., Li, Q., 2016. Polyacrylamide as coagulant aid with polytitanium sulfate in humic acid-kaolin water treatment: Effect of dosage and dose method. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 64, pp. 173-179.
 11. Zhu, G., Zheng, H., Zhang, Z., Tshukudu, T., Zhang, P., Xiang, X., 2011. Characterization and coagulation-flocculation behavior of polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS). *Chemical Engineering Journal*, Vol. 178, pp. 50-59.
 12. Park, S., Ruoff, R.S., 2009. Chemical methods for the production of graphenes. *Nature nanotechnology*, Vol. 4, No. 4, pp. 217-244.
 13. Simate, G.S., Iyuke, S.E., Ndlovu, S., Heydenrych, M., 2012. The heterogeneous coagulation and flocculation of brewery wastewater using carbon nanotubes. *Water research*, Vol. 46, No. 4, pp. 1185-1197.
 14. Chen, L., Hu, P., Zhang, L., Huang, S., Luo, L., Huang, C., 2012. Toxicity of graphene oxide and multi-walled carbon nanotubes against human cells and zebrafish. *Science China Chemistry*, Vol. 55, No. 10, pp. 2209-2216.
 15. Bieroza, M., Baker, A., Bridgeman, J., 2011. Classification and calibration of organic matter fluorescence data with multiway analysis methods and artificial neural networks: an operational tool for improved drinking

26. Sharma, A., 2000. Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management: Part 1-A strategy for system predictor identification. *Journal of Hydrology*, Vol. 239, No. (1-4), pp. 232-239.
27. Holmes, M., Reeve, P., Pestana, C., Chow, C., Newcombe, G., West, J., 2015. Zeta potential measurement for water treatment coagulation control. SA Water, Adelaide.
28. Liu, G., Han, K., Ye, H., Zhu, C., Gao, Y., Liu, Y., Zhou, Y., 2017. Graphene oxide/triethanolamine modified titanate nanowires as photocatalytic membrane for water treatment. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 320, pp.74-80.
29. Tan, P., Bi, Q., Hu, Y., Fang, Z., Chen, Y., Cheng, J., 2017. Effect of the degree of oxidation and defects of graphene oxide on adsorption of Cu^{2+} from aqueous solution. *Applied Surface Science*, Vol. 423, pp. 1141-1151.
22. Bina, B., Mahdinezhad, M., Nikaein, M., Movahedian Attar. H., 2009. Effectiveness of chitosan as natural coagulant aid in treating turbid waters. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, Vol. 6, No.4, pp. 247-252.
23. Hu, C.Y., Lo, S.L., Chang, C.L., Chen, F.L., Wu, Y.D., Ma, J.L., 2013. Treatment of highly turbid water using chitosan and aluminum salts. *Separation and Purification Technology*, Vol, 104, pp. 322-326.
24. Zoqi, M.J., Jafari, M.A., 2014. A Neural Network Model for Prediction of Tri-Halo-Methane Concentration in Drinking Water. *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 1-10. (In Persian)
25. Kennedy, M.J, Gandomi, A.H, Miller, C.M., 2015. Coagulation modeling using artificial neural networks to predict both turbidity and DOM-PARAFAC component removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 3, No. 4, pp. 2829-2838.