

هیدروژل‌های نانوجندسازه بر پایه ژلاتین و نانوذرات اکسید نیکل برای جذب آلاینده‌های کاتیونی

حسین قاسم‌زاده محمدی^{۱*}، ابوالفضل کشتکار وناشی^۲، مهدیه تقی‌پور زیارتگاه^۲، محدثه پیرقلی^۲
۱- دانشیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(۳)، قزوین، ایران، صندوق پستی: ۲۸۸
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(۳)، قزوین، ایران، صندوق پستی: ۲۸۸
۳- دانشجوی کارشناسی، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(۳)، قزوین، ایران، صندوق پستی: ۲۸۸
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۲۶ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۹۹/۸/۲۰

چکیده

در این مطالعه، هیدروژل‌های نانوجندسازه بر پایه ژلاتین و نانوذرات اکسید نیکل با استفاده از تک‌پارهای آکریل‌آمید (AAm) و ۲-آکریل‌آمیدو-۲-متیل‌پروپان‌سولفونیک‌اسید (AMPS) از طریق پلیمری‌شدن رادیکالی با استفاده از پرسولفات آمونیم به عنوان آغازگر و متیلن‌بیس‌آکریل‌آمید به عنوان شبکه‌ساز، تهیه شدند. ساختار هیدروژل‌های نانوجندسازه به وسیله طیف‌سنجی زیر قرمز (FT-IR)، تجزیه وزن‌سنجی حرارتی (TGA)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی (TEM) شناسایی شد. جذب ماده رنگزای بنفش بلوری به عنوان نمونه‌ای از مواد رنگزای کاتیونی با تغییر عوامل مختلف مانند زمان تماس، دما، pH و غلظت اولیه ماده رنگزا بررسی شد. در شرایط بهینه، بیشترین مقدار جذب ماده رنگزا از محلول‌های آبی در غلظت‌های پایین (10 ppm) حدود ۹۷٫۵ درصد و در غلظت‌های بالا (700 ppm) حدود ۹۹٫۵ درصد به دست آمد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که این هیدروژل‌ها می‌توانند به عنوان جاذب‌هایی کارآمد برای حذف مواد رنگزای کاتیونی از محلول‌های آبی به کار روند. همچنین فرآیند جذب ماده رنگزا از الگوی جذب لانگمویر و سینتیک شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آکریل‌آمید، هیدروژل نانوجندسازه، ژلاتین، ماده رنگزای بنفش بلوری، جذب ماده رنگزا.

Nanocomposite Hydrogels Based on Gelatin and Nickel Oxide Nanoparticles for Adsorption of Cationic Pollutants

H. Ghasemzadeh Mohammadi*, A. Keshtkar Vanashi, M. Taghipour Ziaratgah, M. Pirgoli

Department of Chemistry, Faculty of Basic Science, Imam Khomeini International University, P.O. Box: 288, Qazvin, Iran

Received: 12-11-2019

Accepted: 14-04-2020

Available online: 10-11-2020

Abstract

In this study, a nanocomposite hydrogel was synthesized based on gelatin and nickel oxide nanoparticles using acrylamide (AAm) and 2-Acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS) by radical polymerization method. The reaction was performed in the presence of ammonium persulfate as an initiator and methylene bis acrylamide as a crosslinker. The structure of nanocomposite hydrogels were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), thermal gravimetric analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM), and transmission electron microscopy (TEM). Crystal violet was selected as a template for cationic dyes. The adsorption was optimized by changing various parameters such as contact time, temperature, pH, and initial concentration of dye. In optimal conditions, the maximum amount of dye adsorption from aqueous solutions at low concentrations (10 ppm) was approximately 97.5%, and at high concentrations (700 ppm) was about 99.5%. The results of this study showed that the hydrogels can be applied as efficient absorbent for the removal of cationic dyes from aqueous solutions. The adsorption process follows Langmuir isotherm model and pseudo second order kinetic. J. Color Sci. Tech. 14(2021), 295-310©. Institute for Color Science and Technology.

Keywords: Acrylamide, Nanocomposite hydrogels, Gelatin, Crystal violet, Dye adsorption.

۱- مقدمه

خود را داشته باشد. همچنین سرعت جذب مواد رنگزا توسط هیدروژل‌های سنتز شده در مقایسه با جاذب‌های دیگر قابل توجه است. فرآیند جذب از الگوی جذب لانگمویر^۳ و سینتیک جذب از الگوی جذب شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند. جاذب تهیه شده می‌تواند در غلظت‌های پایین و بالا برای جذب انواع آلاینده‌های کاتیونی به کار رود.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

در این آزمایش‌ها از متیلن بیس آکریل آمید (MBA) (از شرکت فلوکا)، پرسولفات آمونیم (APS) (از شرکت لوباکم)، ژلاتین، سدیم بورهیدرید و آکریل آمید (از شرکت مرک) و بنفش بلوری به عنوان مواد رنگزای کاتیونی و ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (از شرکت سیگما آلد ریچ) استفاده شد. همچنین اتانل ۹۶ درجه تهیه شده از شرکت بیدستان به منظور خشک کردن هیدروژل‌ها استفاده شد.

۲-۲- دستگاه‌ها

طیف FT-IR نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج زیر قرمز (Brucker Tensor 27) ساخت آلمان، به دست آمد. نمونه‌ها ابتدا به صورت قرص KBr تهیه شدند و طیف آن‌ها در محدوده 400 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} ثبت شد. ریخت‌شناسی بافت نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ساخت آلمان (Asi 2100) (soren technology) پس از پوشش دادن نمونه‌ها با لایه نازکی از طلا بررسی شد. آزمون وزن‌سنجی حرارتی با استفاده از یک دستگاه (TGA) ساخت آمریکا (Perkin Elmer SII) انجام شد. میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ساخت آلمان (Zeiss-EM10C 100 KV) برای مشخص کردن اندازه نانوذرات مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات جذب با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی UV-Vis ساخت انگلیس (M 350 Double Beam) انجام گرفت.

۲-۳- سنتز هیدروژل

برای سنتز هیدروژل از ژلاتین به عنوان یک پلیمر زیستی^۴، پرسولفات آمونیم (APS) به عنوان آغازگر حرارتی، آکریل آمید (AAM) و ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPS) به عنوان تکپار و همچنین متیلن بیس آکریل آمید (MBA) به عنوان عامل شبکه‌ساز استفاده شد. در مرحله اول ۰٫۱ گرم ژلاتین درون ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر جوشیده و سرد شده حل شد و سپس این محلول درون حمام آب با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و با هم‌زن مکانیکی هم

آلایندگی آب‌ها و منابع آبی توسط مواد رنگزا، فلزات سنگین، مواد آلی و مواد فعال سطحی^۱ در سال‌های اخیر نگرانی بسیاری از پژوهشگران و فعالان زیست‌محیطی را به خود جلب کرده است [۵-۱]. اگرچه در دهه‌های گذشته جاذب‌های مختلفی مانند کربن فعال، خاک‌های معدنی، مواد سلولزی طبیعی، پلی‌ساکاریدها، ژئولیت‌ها، و اسفنج‌های پلی‌یورتان برای جذب آلاینده‌های آب معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۳-۶]، اما این جاذب‌ها هوشمند نبوده و نمی‌توانند به محرک‌های خارجی پاسخ دهند. هیدروژل‌های هوشمند می‌توانند به محرک‌های خارجی مانند تغییرات دما، نیروی مکانیکی، pH، حلال، میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی پاسخ دهند [۱۴]. هیدروژل‌ها شبکه‌های سه‌بعدی پلیمری هستند که توانایی جذب و نگهداری مقادیر زیادی آب و محلول‌های آبی را دارند. هیدروژل‌های متورم دارای منافذ بسیار زیادی هستند که می‌توانند به عنوان نانو واکنش‌گاه^۲ برای تولید نانوذرات عمل کنند [۱۵، ۷]. از طرف دیگر سهولت سنتز نانوذرات در بستر هیدروژل‌ها موجب شده است که این ترکیبات در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار قرار بگیرند. جذب آلاینده‌ها از محلول‌های آبی به وسیله هیدروژل‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار قرار گرفته است [۲۰-۱۶]. استفاده از زیست‌پلیمرها و مواد زیست‌سازگار در سنتز هیدروژل‌ها و جاذب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از ژلاتین به عنوان یک پلیمر زیست‌تخریب‌پذیر برای تولید هیدروژل نانوچندسازه استفاده شد. ژلاتین یک زیست پلیمر آب‌دوست است که از آبکافت جزئی کلاژن به دست می‌آید و با سرد کردن آن، ژل تشکیل می‌شود که مقاومت این ژل به غلظت ژلاتین وابسته است [۲۱]. ژلاتین شبکه‌ای شده در حضور تکپارهای آکریل آمید (AAM) و ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPS) بستری را برای سنتز یک نانوچندسازه فراهم کرده است که می‌تواند مواد رنگزای کاتیونی را به خوبی جذب کند. حضور نانوذرات در بستر هیدروژل با افزایش سطح تماس، میزان و سرعت جذب آلاینده را افزایش می‌دهد. در این پژوهش یک هیدروژل نانوچندسازه جدید برای جذب آلاینده‌های کاتیونی از محلول‌های آبی معرفی شده است که توانایی بسیار خوبی برای جذب مواد رنگزا دارد. بر اساس مطالعات انجام گرفته سنتز هیدروژل‌های نانوچندسازه بر پایه ژلاتین و نانوذرات اکسید نیکل در حضور تک‌پارهای آکریل آمید (AAM) و ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPS) جهت حذف مواد رنگزای کاتیونی تاکنون گزارش نشده است. نتایج نشان می‌دهند که جاذب تهیه شده برای چندین بار متوالی قابل استفاده است به طوری که پس از هشت بار استفاده، می‌تواند بیش از ۹۵ درصد قدرت جذب اولیه

3-Langmuir
4- Biopolymer

1- Surfactant
2- Nano-reactor



شکل ۱: تصویری از پودر تیره رنگ هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل.

زده شد تا محلول یکنواختی ایجاد شود. در مرحله بعد ۵ میلی لیتر محلول پرسولفات آمونیم شامل ۰٫۱ گرم نمونه جامد، به آرامی به این محلول اضافه شده و هم زدن محلول به کمک هم‌زن مکانیکی (با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه) به مدت ۵ دقیقه ادامه یافت. سپس مقدار ۱٫۵ گرم ۲-متیل پروپان سولفونیک‌اسید (AMPS) و ۰٫۵ گرم آکریل‌آمید، به تدریج و در حال هم زدن به محلول اضافه شد. در مرحله بعد ۵ میلی لیتر محلول متیلن بیس آکریل‌آمید (MBA) شامل ۰٫۱ گرم از نمونه جامد، به محتویات ظرف واکنش اضافه شد و محلول به مدت نیم ساعت در دمای ثابت ۸۰ °C قرار گرفت تا واکنش کامل شود. به منظور خشک شدن ژل‌های تهیه شده، نمونه‌ها درون ۱۰۰ میلی لیتر اتانل ۹۶ درجه قرار گرفتند. ژل‌های خشک شده پس از آسیاب کردن به مدت یک روز در آون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به طور کامل خشک شوند.

۴-۲- سنتز هیدروژل‌های نانوجندسازه

هیدروژل‌های نانوجندسازه با بارگذاری یون‌های نیکل در هیدروژل‌های متورم و سپس کاهش آن‌ها توسط بورهیدرید سدیم تهیه شدند. در این روش ابتدا مقدار ۰٫۵ گرم از نمک سولفات نیکل به ۵۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه و حل شد. در مرحله بعد مقدار ۰٫۱ گرم هیدروژل خشک پس از تورم کامل به مدت یک روز در آب مقطر، به این ظرف اضافه شد و به مدت ۱۲ ساعت در دمای محیط به آرامی هم زده شد. سپس ۱۰۰ میلی لیتر محلول حاوی ۰٫۱ گرم NaBH_4 تهیه شد و به ظرف حاوی هیدروژل اضافه شد و اجازه داده شد تا هیدروژل و محلول هیدرید سدیم بور به مدت سه ساعت در تماس باهم قرار گیرند [۲۲]. در مرحله بعد هیدروژل نانوجندسازه به دست آمده صاف شده و چندین بار به وسیله آب مقطر شست و شو داده شد. در ادامه به منظور آب‌گیری، هیدروژل درون ۱۰۰ میلی لیتر اتانل ۹۶ درجه قرار گرفت. ژل‌های تیره رنگ تهیه شده، پس از قطعه‌قطعه شدن به مدت یک شبانه‌روز در یک خشک‌کن با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. تصویری از پودر تیره رنگ هیدروژل نانوجندسازه حاوی اکسید نیکل در شکل ۱ آمده است.

۵-۲- اندازه‌گیری تورم هیدروژل‌ها

جهت اندازه‌گیری تورم، ابتدا ۰٫۱ گرم از پودر جامد هیدروژل‌های حاصل، به ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر اضافه شد و به مدت یک شبانه‌روز در دمای محیط قرار گرفت تا هیدروژل‌ها به طور کامل متورم شوند. سپس هیدروژل‌های متورم با صافی توری با مش ۱۰۰ صاف شدند و بعد از گذشت ۱۰ دقیقه برای از دست دادن آب سطحی، وزن هیدروژل‌ها با ترازو اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه ۱ میزان تورم نمونه‌ها اندازه‌گیری شد [۲۳].

$$DS (\%) = (W_2 - W_1) / W_1 \quad (1)$$

در این رابطه، W_2 وزن هیدروژل در حالت متورم، W_1 وزن اولیه هیدروژل خشک و DS درجه تورم نمونه را نشان می‌دهد.

۶-۲- اندازه‌گیری جذب ماده رنگزا

برای اندازه‌گیری جذب ماده رنگزا ابتدا محلول‌هایی با غلظت‌های شامل ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ میلی گرم برلیتر و همچنین با غلظت‌های بالاتر شامل ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی گرم برلیتر از ماده رنگزا تهیه شد و میزان جذب نور آنها به وسیله دستگاه طیف‌سنجی فرابنفش - مرئی (UV-VIS) در طول موج ۵۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد مقدار جذب و ظرفیت جذب ماده رنگزا توسط هیدروژل‌ها با تغییر pH، دما، غلظت اولیه ماده رنگزا و زمان تماس بررسی شد. درصد جذب ماده رنگزا توسط هیدروژل‌ها از رابطه ۲ به دست آمد.

$$RE (\%) = \{(C_0 - C_e) / C_0\} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه RE درصد جذب تعادلی ماده رنگزا، C_0 و C_e به ترتیب غلظت اولیه و نهایی محلول ماده رنگزا (میلی‌گرم بر لیتر) است.

ظرفیت جذب ماده رنگزا از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$Q = \{(C_0 - C_e) \times V\} / m \quad (3)$$

در این رابطه Q ظرفیت جذب ماده رنگزا (میلی‌گرم بر لیتر)، C_0 ، به ترتیب غلظت اولیه و نهایی محلول ماده رنگزا (میلی‌گرم بر لیتر)، V حجم محلول (لیتر) و m جرم نمونه (گرم) است.

۷-۲- بررسی رفتار جذب

برای بررسی رفتار جذب ماده رنگزا از الگوی جذب لانگمویر، فروندلیچ^۱ و تمکین^۲ استفاده شد. در رابطه تعادلی لانگمویر، فرض بر این است که یک لایه از ماده جذب‌شونده در سطح جاذبی که کاملاً همگن است جذب می‌شود. ایزوترم جذب لانگمویر با رابطه ۴ بیان می‌شود [۲۴، ۲۵].

$$q_e = q_{\max} \{ (K_L C_e) / (1 + C_e K_L) \} \quad (4)$$

که در آن q_e مقدار ماده رنگزای جذب‌شده نسبت به جرم جاذب (میلی‌گرم بر گرم)، C_e غلظت تعادلی و q_{\max} بیشترین میزان جذب ماده رنگزا (میلی‌گرم بر گرم) و K_L ضریب جذب لانگمویر (لیتر بر میلی‌گرم) است.

الگوی ایزوترم فروندلیچ یک الگوی تجربی است که جذب چندلایه‌ای جذب‌شونده را بر روی یک جاذب ناهمگن شرح می‌دهد و با رابطه ۵ بیان می‌شود [۲۶].

$$q_e = K_f + C_e^{1/n} \quad (5)$$

در این رابطه q_e مقدار ماده جذب‌شده در حالت تعادل نسبت به جرم جاذب (میلی‌گرم بر گرم)، C_e غلظت تعادلی (میلی‌گرم بر لیتر) و K_f ضریب جذب فروندلیچ است که به ظرفیت جذب مربوط می‌شود. n ثابتی است که به شدت جذب بستگی دارد. الگوی جذب تمکین توسط رابطه ۶ بیان می‌شود [۲۷].

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad (6)$$

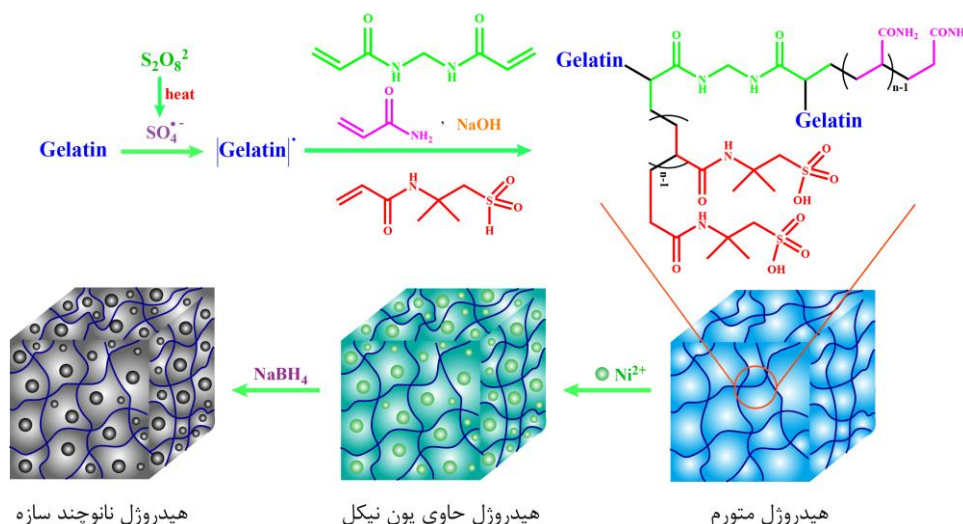
در این رابطه q_e مقدار ماده جذب‌شده در حالت تعادل نسبت به جرم جاذب (میلی‌گرم بر گرم)، C_e غلظت تعادلی (میلی‌گرم بر لیتر)، و B یک ثابت مربوط به گرمای جذب است که با $B = RT / b$ ، R می‌شود. همچنین b ثابت تمکین (J/mol)، T دمای مطلق (K)، R ثابت گاز (۸,۳۱۴ J / mol K) و A ثابت ایزوترم تمکین (L/g) است. با توجه به نمودار q_e در مقابل $\ln C_e$ ، A و B می‌توانند به ترتیب از شیب و عرض از مبدأ محاسبه شوند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- سنتز هیدروژل‌های نانوجندسازه

برای تهیه هیدروژل‌های نانوجندسازه ابتدا هیدروژل‌هایی بر پایه ژلاتین و تک‌پارهای آکریل‌آمید (AAM) و ۲-آکریل‌آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید (AMPS) با استفاده از آغازگر پرسولفات آمونیم (APS) و شبکه‌ساز متیلن‌بیس‌آکریل‌آمید به روش پلیمری-شدن رادیکالی تهیه شدند، هیدروژل‌های حاصل با استفاده از اتانل آب‌گیری شده و به وسیله آون خشک شدند. برای تهیه هیدروژل‌های نانوجندسازه، این هیدروژل‌ها به مدت یک شبانه‌روز در آب مقطر قرار داده شدند تا کاملاً متورم شوند. در مرحله بعد برای بارگذاری یون‌های نیکل، این هیدروژل‌ها را در محلول NiSO_4 (سولفات نیکل) وارد کرده و سپس هیدروژل‌های بارگذاری شده با یون نیکل جهت تهیه نانو ذرات اکسید نیکل وارد محلول هیدرید سدیم بور شدند. شکل ۲ مراحل تولید هیدروژل‌های نانوجندسازه را نشان می‌دهد.

- 1- Freundlich
- 2- Temkin



شکل ۲: طرحی از مراحل تهیه هیدروژل‌های نانوجندسازه بر پایه ژلاتین و نانوذرات اکسید نیکل.

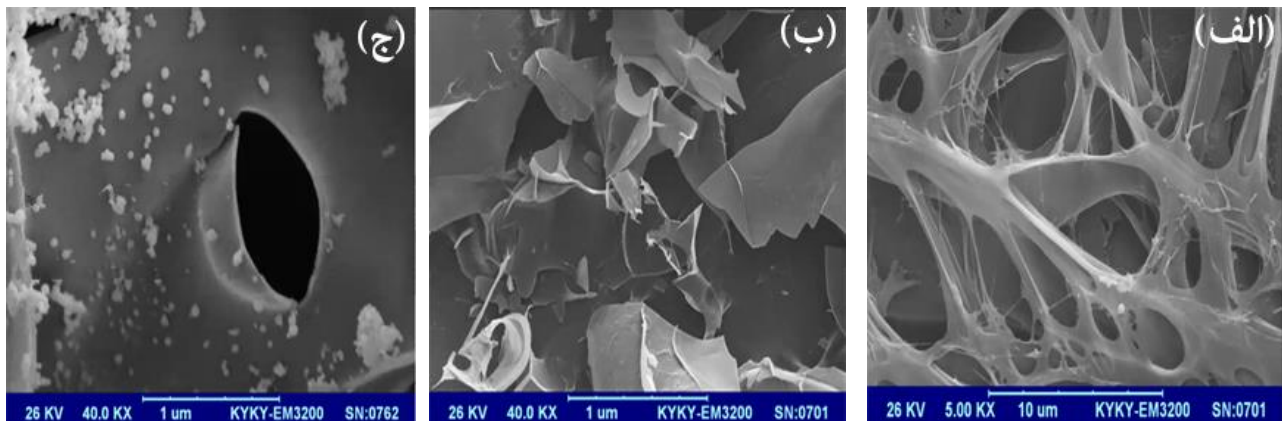
اکسید نیکل (شکل ج) نشان می‌دهد که نانوذرات نیکل در سراسر هیدروژل در سطح و داخل حفره‌های آن پراکنده شده‌اند، اگرچه در برخی موارد تجمع ذرات دیده می‌شود.

۳-۳- بررسی اندازه نانوذرات به وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری

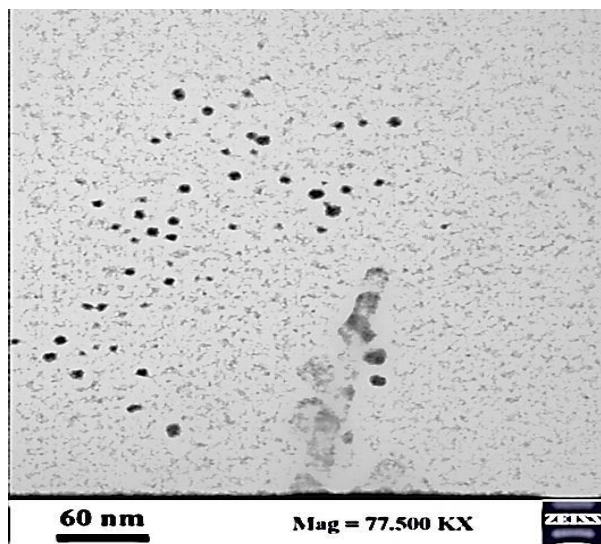
از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری برای بررسی اندازه نانوذرات نیکل اکسید بارگذاری شده در هیدروژل‌های نانوجندسازه استفاده شد. شکل ۴ تصویر TEM مربوط به هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل با بزرگنمایی ۷۷۵۰۰ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ذرات اکسید نیکل در هیدروژل با ابعاد تقریبی ۵-۱۵ نانومتر پراکنده شده‌اند.

۲-۳- بررسی ریخت‌شناسی و پراکندگی نانوذرات در هیدروژل‌های نانوجندسازه به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای مطالعه ریخت‌شناسی هیدروژل‌های نانوجندسازه از تصاویر SEM استفاده شد. برای تهیه تصاویر SEM ابتدا هیدروژل‌ها متورم و سپس به کمک دستگاه خشک‌کن انجمادی خشک شدند. در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به هیدروژل و هیدروژل‌های نانوجندسازه آمده است. شکل الف تخلخل‌های زیادی را در سطح هیدروژل نشان می‌دهد. خروج آب از ساختار هیدروژل، خلل و فرج‌هایی در سطح آن ایجاد می‌کند که جذب مواد را سرعت می‌بخشد. شکل ب مربوط به ریخت‌شناسی سطح هیدروژل با بزرگنمایی ۴۰۰۰۰ برابر است که در این بزرگنمایی تخلخل کمتری دیده می‌شود. تصاویر SEM مربوط به هیدروژل نانوجندسازه شامل نانوذرات



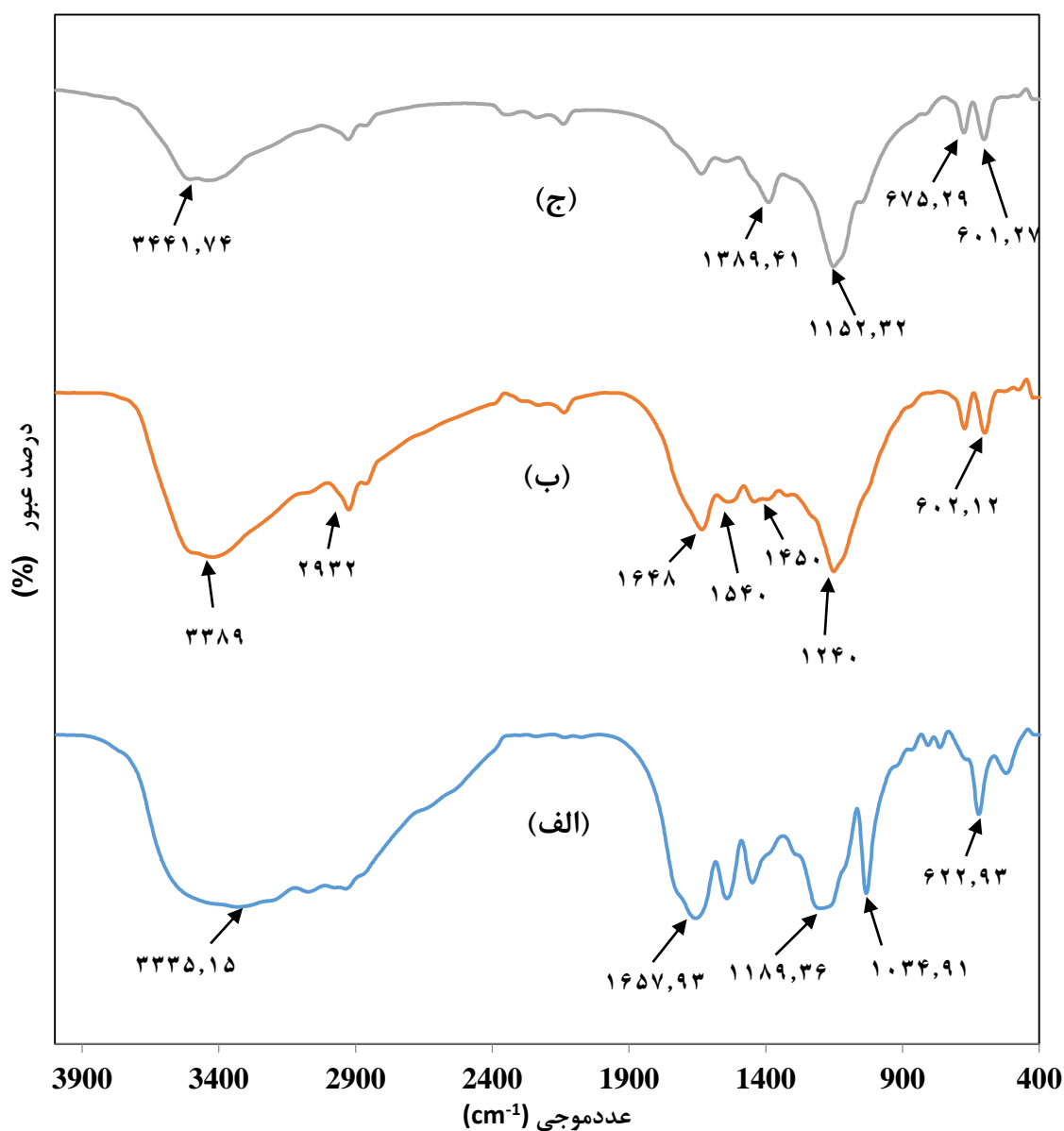
شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی هیدروژل با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر (الف)، ۴۰۰۰۰ برابر (ب) و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی هیدروژل نانوجندسازه حاوی اکسید نیکل با بزرگنمایی ۴۰۰۰۰ برابر (ج).



شکل ۴: تصویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی عبوری هیدروژل نانوجندسازه حاوی اکسید نیکل با بزرگنمایی ۷۷۵۰۰ برابر.

N-H در آمید نوع ۲ و ارتعاش کششی C-N است. جذب مشاهده شده در 1450 cm^{-1} مربوط به ارتعاش خمشی C-H آلیفاتیک است. در طیف زیر قرمز هیدروژل نوار جذبی مشاهده شده در 1667 cm^{-1} مربوط به گروه کربونیل آمید است و پیوند ژلاتین با تک‌پارها را نشان می‌دهد. جذب مربوط به N-H آمید توسط جذب قوی‌تر هیدروکسی در ناحیه 3400 cm^{-1} پوشانده شده و قابل مشاهده نیست. طیف ج مربوط به هیدروژل‌های نانوجندسازه است. کاهش پهن‌شدگی در ناحیه مربوط به ارتعاش کششی O-H و کاهش شدت جذب گروه‌های کربونیل به دلیل تغییر در پیوندهای هیدروژنی است.

۳-۴- بررسی ساختار هیدروژل و هیدروژل نانوجندسازه به وسیله طیف‌سنجی زیر قرمز (FT-IR) استفاده از طیف‌سنجی زیر قرمز یکی از بهترین روش‌ها برای مطالعه گروه‌های عاملی موجود در ساختار نمونه است. طیف زیر قرمز مربوط به هیدروژل، ژلاتین و هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل در شکل ۵ آمده است. در طیف زیر قرمز ژلاتین پیک مشاهده شده در فرکانس 3389 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی پیوند O-H و NH است. نوارهای جذبی در 1648 و 1540 و 1240 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی گروه C=O در آمید نوع ۱ و ارتعاش خمشی



شکل ۵: طیف زیر قرمز (الف) هیدروژل، (ب) ژلاتین و (ج) هیدروژل نانوجندسازه شامل نیکل اکسید.

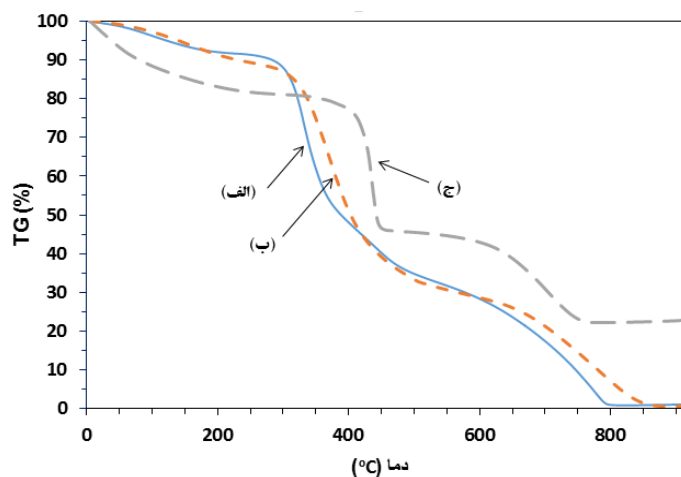
با نانوذرات در مقایسه با هیدروژل فاقد نانوذرات اکسید نیکل باشد.

۳-۶- بررسی سینتیک جذب آب هیدروژل‌ها

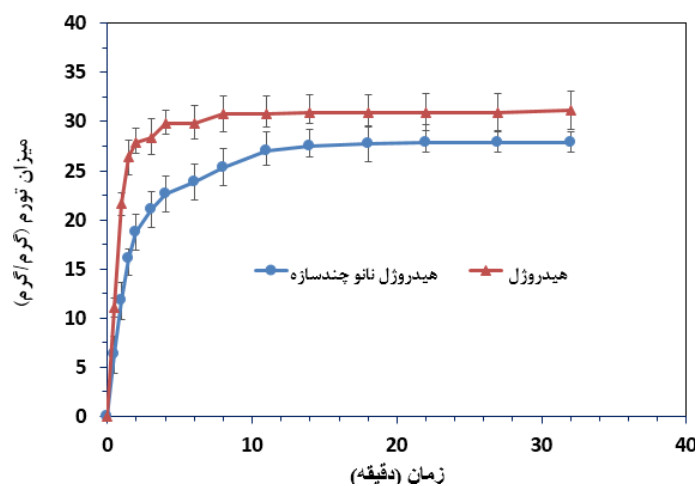
سینتیک جذب آب هیدروژل‌ها مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با گذشت زمان تورم هیدروژل‌ها بیشتر شده و پس از ۱۴ دقیقه یک تعادل ایجاد شود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که میزان تورم تعادلی هیدروژل نسبت به هیدروژل‌های نانوجندسازه شامل اکسید نیکل بیشتر است که می‌توان علت آن را شبکه‌ای شدن هیدروژل‌های نانوجندسازه و نیز برهم‌کنش شبکه هیدروژل با نانوذرات دانست که باعث می‌شود آب کمتری را جذب کنند.

۳-۵- بررسی پایداری حرارتی هیدروژل و هیدروژل نانوجندسازه

در شکل ۶ نمودار تجزیه حرارتی (TGA) نمونه‌ها شامل ژلاتین، هیدروژل و هیدروژل‌های نانوجندسازه حاوی اکسید نیکل آمده است. کاهش وزن اولیه در حدود ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده حذف آب از نمونه‌ها است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هیدروژل تهیه شده بر پایه ژلاتین پایداری بیشتری نسبت به ژلاتین اولیه دارد که به دلیل تشکیل ساختار شبکه‌ای هیدروژل و حضور تک‌پارهای آکریل آمید و ۲-آکریل آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید است. همچنین مشاهده می‌شود که حضور نانوذرات اکسید نیکل در ساختار هیدروژل سبب افزایش پایداری حرارتی شده است که می‌تواند به دلیل افزایش شبکه‌ای شدن هیدروژل‌های نانوجندسازه و برهم‌کنش



شکل ۶: گرمانگاشت مربوط به (الف) ژلاتین، (ب) هیدروژل و (ج) هیدروژل نانوجندسازه شامل اکسید نیکل.



شکل ۷: جذب آب توسط (الف) هیدروژل و (ب) هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل (شرایط: مقدار جاذب ۰.۱ گرم، دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد).

۳-۷- اثر زمان تماس بر روی میزان جذب ماده رنگزا

حضور گروه‌های عاملی آمین و هیدروکسی بر روی زنجیره ژلاتین و همچنین حضور تک‌پار آنیونی AMPS موجب می‌شود که هیدروژل‌های سنتز شده به‌خوبی مواد رنگزای کاتیونی را جذب کنند. اثر زمان تماس بر میزان درصد جذب ماده رنگزا در هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل در شکل ۸ نمایش داده شده است. با افزایش زمان تماس، درصد و ظرفیت جذب ماده رنگزا افزایش یافت. در ۱۰ دقیقه اول بیشترین مقدار جذب ماده رنگزا در حدود ۹۶٪ بود، مشاهده شد. این آزمایش نشان می‌دهد که هیدروژل‌های نانوجندسازه حاصل سرعت جذب نسبتاً زیادی دارند. پس از آن سرعت جذب ماده رنگزا کم شده و پس از ۲۰ دقیقه به مقدار تعادلی خود می‌رسد. هر چه زمان تماس زیاد شود، برخورد مولکول‌های ماده رنگزا با سطح جاذب زیادتر شده و جذب سطحی افزایش می‌یابد.

۳-۸- اثر تغییر مقدار هیدروژل نانوجندسازه بر روی جذب ماده رنگزا

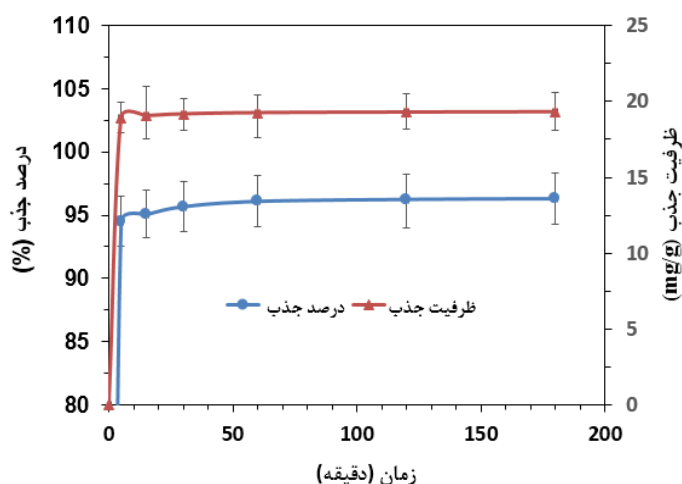
شکل ۹ نشان می‌دهد که هنگامی که مقدار هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل از ۰,۰۱ گرم به ۰,۰۱ گرم افزایش می‌یابد، درصد جذب ماده رنگزا از ۹۶٪ به ۹۷,۵٪ تغییر می‌کند که دلیل آن می‌تواند افزایش تعداد مکان‌های فعال برای برهم‌کنش با ماده رنگزا باشد؛ بنابراین افزایش میزان جاذب، درصد جذب ماده رنگزا ابتدا افزایش یافته و سپس ثابت می‌شود.

۳-۹- اثر pH بر روی میزان جذب ماده رنگزا

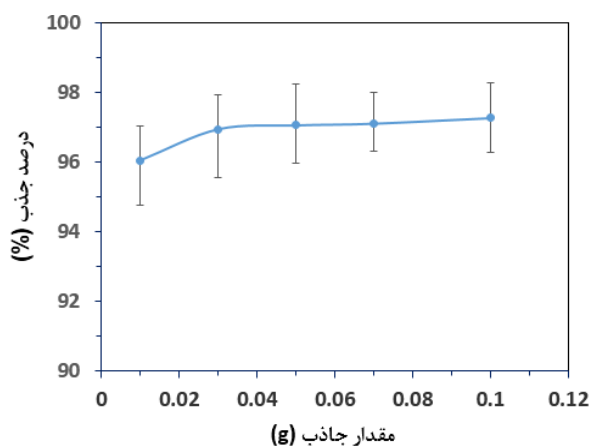
یکی از عوامل مهم برای جذب ماده رنگزا اثر pH است. در محیط اسیدی به دلیل رقابت موجود بین یون‌های کاتیونی ماده رنگزا و یون‌های هیدروژن، جذب ماده رنگزا کاهش می‌یابد. اثر pH بر مقدار جذب ماده رنگزا با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، مقدار ۰,۰۵ گرم جاذب و زمان تماس ۶۰ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود با بالا رفتن pH از ۲ تا ۸ میزان درصد جذب ماده رنگزا به‌وسیله هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل تا حدودی افزایش یافته است. بیشترین میزان جذب ماده رنگزا در محیط خنثی و یا قلیایی دیده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود جذب ماده رنگزا حساسیت زیادی به pH ندارد که نشان‌دهنده این است که بار الکتریکی گروه‌های عاملی موجود در ساختار هیدروژل با تغییر pH از ۲ تا ۸ تغییر چندانی نمی‌کند.

۳-۱۰- اثر دما بر روی میزان جذب ماده رنگزا

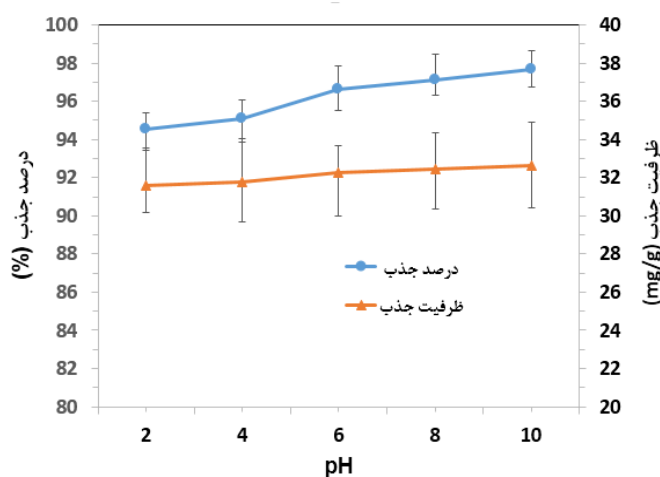
یکی دیگر از عوامل مهم در مطالعه فرآیندهای فیزیکی- شیمیایی اثر دما است. معمولاً با افزایش دما، میزان ظرفیت جذب جاذب تغییر می‌کند. در صورتی که با افزایش دما میزان جذب زیاد شود نشان دهنده گرماگیر بودن فرآیند جذب است. در این مطالعه به‌جز دما همه عوامل دیگر ثابت بوده‌اند. شکل ۱۱ نشان می‌دهد، درصد جذب ماده رنگزا با افزایش دما کمی کاهش یافته است. بیشترین مقدار جذب ماده رنگزا (۹۶,۸ درصد) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. در دمای بالا به دلیل تحرک زیاد مولکول‌های ماده رنگزا و کاهش برهم‌کنش میان مولکول‌های ماده رنگزا و مکان‌های فعال در هیدروژل نانوجندسازه، جذب ماده رنگزا مقداری کاهش یافته است که نشان می‌دهد فرآیند جذب آن به مقدار کمی گرمازاست.



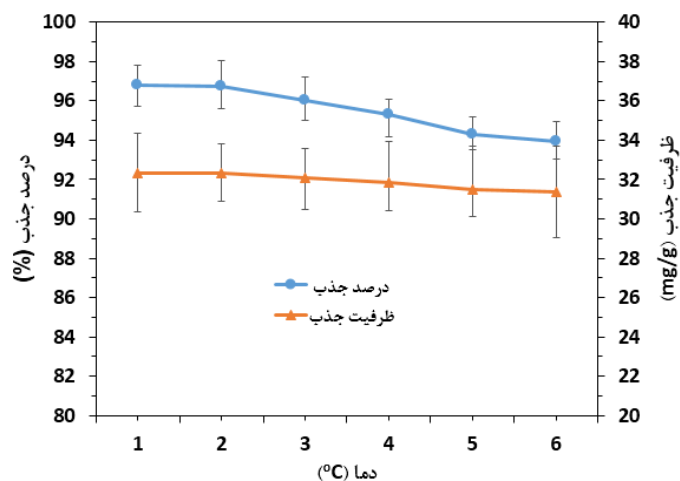
شکل ۸: اثر زمان تماس بر روی جذب ماده رنگزا به‌وسیله هیدروژل‌های نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل (شرایط: مقدار جاذب ۰,۰۵ گرم، غلظت ماده رنگزا: ۱۰ ppm، دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد و pH خنثی).



شکل ۹: اثر میزان جاذب بر روی جذب ماده رنگزا به‌وسیله هیدروژل نانوجندسازه حاوی اکسید نیکل (شرایط: دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، غلظت ماده رنگزا: ۱۰ ppm، pH خنثی و زمان تماس: ۱ ساعت).



شکل ۱۰: اثر pH بر روی درصد جذب و ظرفیت جذب ماده رنگزا به‌وسیله هیدروژل نانوجندسازه شامل نانوذرات اکسید نیکل (شرایط: مقدار جاذب ۰٫۰۵ گرم، غلظت ماده رنگزا: ۱۰ ppm، دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد و زمان تماس: ۱ ساعت).

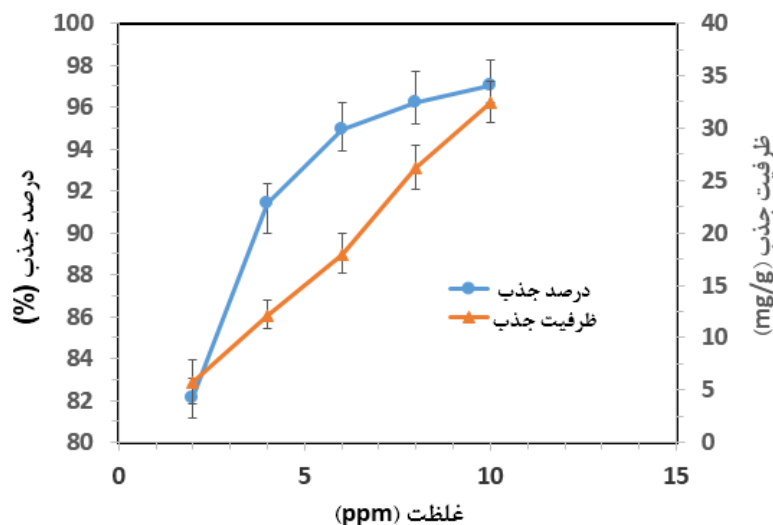


شکل ۱۱: اثر دما بر روی جذب ماده رنگزا به‌وسیله هیدروژل‌های نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل (شرایط: مقدار جاذب ۰٫۰۵ گرم، غلظت ماده رنگزا: ۱۰ ppm، pH خنثی و زمان تماس: ۱ ساعت).

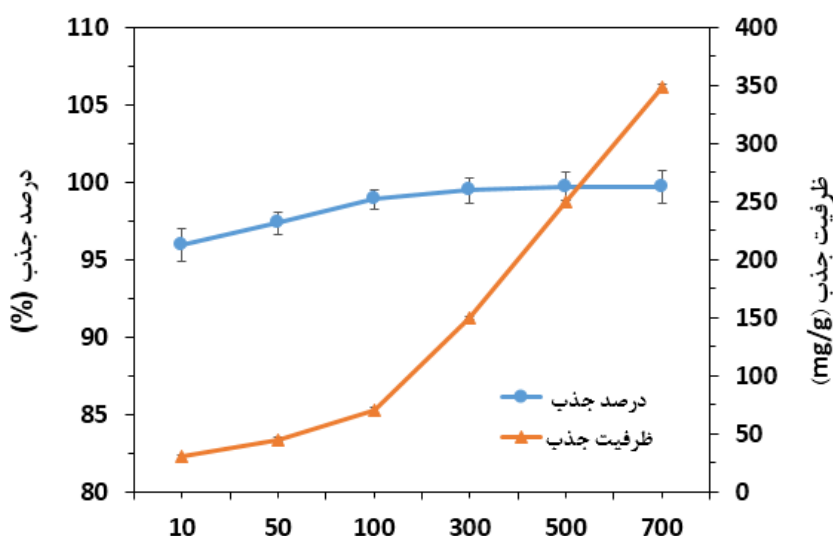
برهم‌کنش‌های مولکول‌های ماده رنگزا با سطح جاذب افزایش یافته و بنابراین درصد جذب ماده رنگزا و ظرفیت جذب آن نیز افزایش می‌یابند. بنابراین مقایسه ظرفیت جذب ماده رنگزا برای جاذب‌های مختلف نیز در صورتی معتبر است که غلظت محلول ماده رنگزای اولیه یکسان باشد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که بیشینه ظرفیت جذب ماده رنگزا برای جاذب‌های سنتز شده هنگامی که غلظت اولیه آن ۷۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد برابر با ۳۵۰ میلی‌گرم بر گرم است.

۱۱-۳- اثر غلظت ماده رنگزا بر روی میزان جذب آن

اثر تغییر غلظت اولیه ماده رنگزا بر روی میزان جذب آن به‌وسیله هیدروژل نانوجندسازه حاوی ذرات اکسید نیکل مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۲ تغییرات غلظت ماده رنگزا از ۲ تا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و شکل ۱۳ تغییرات از ۱۰ تا ۷۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را نشان می‌دهد. این نمودارها نشان می‌دهند که ظرفیت و درصد جذب ماده رنگزا با افزایش غلظت اولیه آن، افزایش یافته است. با افزایش غلظت آن، تعداد مولکول‌های ماده رنگزا در دسترس بیشتر شده و تعداد



شکل ۱۲: اثر غلظت ماده رنگزا بر روی درصد جذب آن توسط هیدروژل‌های نانوجندسازه شامل نانوذرات اکسید نیکل (شرایط: مقدار جاذب ۰,۰۵ گرم، دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد، pH خنثی، زمان تماس: ۱ ساعت).



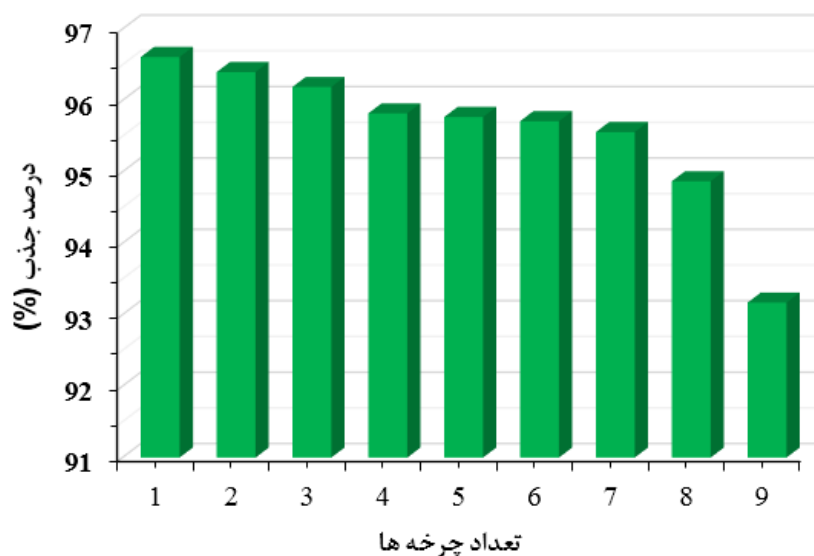
شکل ۱۳: اثر غلظت‌های بالای جاذب بر روی ظرفیت جذب و درصد جذب هیدروژل‌های نانوجندسازه حاوی اکسید نیکل (شرایط: میزان جاذب ۰,۱ گرم، دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، pH خنثی و زمان تماس: ۱ ساعت).

رنگزا از خود نشان می‌دهند به طوری که بعد از هشت چرخه جذب، بیش از ۹۵ درصد توانایی جذب اولیه حفظ می‌شود. از دست رفتن مقداری از جاذب پس از شست‌وشوهای مکرر و نیز شسته نشدن کامل جاذب، از جمله دلایل کاهش مقدار جذب ماده رنگزا پس از چرخه‌های متوالی است. تصویر هیدروژل‌های نانوجندسازه پس از هشت چرخه جذب - واجذب، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این تصویر نشان می‌دهد که هیدروژلهای حاصل تا حد زیادی شکل اولیه خود را حفظ کرده‌اند.

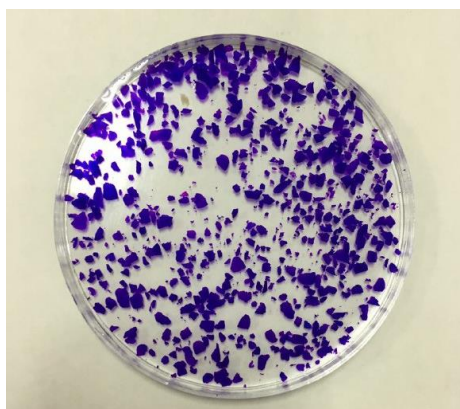
۱۲-۲- بررسی قابلیت استفاده مجدد از هیدروژل‌های نانو

چندسازه

یکی از ویژگی‌های بسیار مهم جاذب‌ها از نظر اقتصادی و کاربردهای صنعتی قابلیت استفاده مجدد آن‌هاست به طوری که پس از جذب و شستشو، ماده جاذب دوباره بتواند قابلیت جذب داشته باشد. بنابراین قابلیت استفاده مجدد جاذب مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج در شکل ۱۴ نشان داده شده است. این نتایج نشان داد که هیدروژل‌های نانوجندسازه سنتز شده قابلیت بسیار خوبی برای جذب مجدد ماده



شکل ۱۴: نمودار جذب-واجذب هیدروژل‌های نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل (غلظت اولیه ماده رنگزا ۱۰ میلی‌گرم برلیتر، مقدار جاذب ۰.۰۵ گرم، زمان ۱ ساعت).



شکل ۱۵: تصویر هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل پس از ۸ چرخه جذب-واجذب ماده رنگزا.

۳-۱۳- بررسی ایزوترم جذب

بلوری بر روی هیدروژل نانوچندسازه شامل نانوذرات اکسید نیکل به خوبی از ایزوترم جذب فروندلیچ تبعیت می‌کند. مقدار R^2 برای نمودار مربوط به ایزوترم فروندلیچ (شکل ۱۷) برابر با ۰,۹۹۵ به دست آمده است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

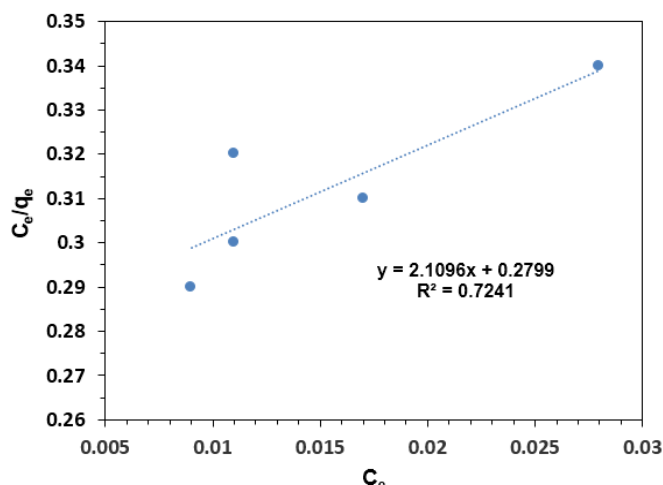
۳-۱۴- بررسی سینتیک جذب ماده رنگزا

جذب ماده رنگزا به وسیله الگوهای سینتیک شبه مرتبه اول و دوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار R^2 در رابطه‌های سینتیک مرتبه دوم نزدیک به یک شده است و نشان می‌دهد که جذب ماده رنگزا در جذب حاوی نانو ذرات اکسید نیکل از سینتیک شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند.

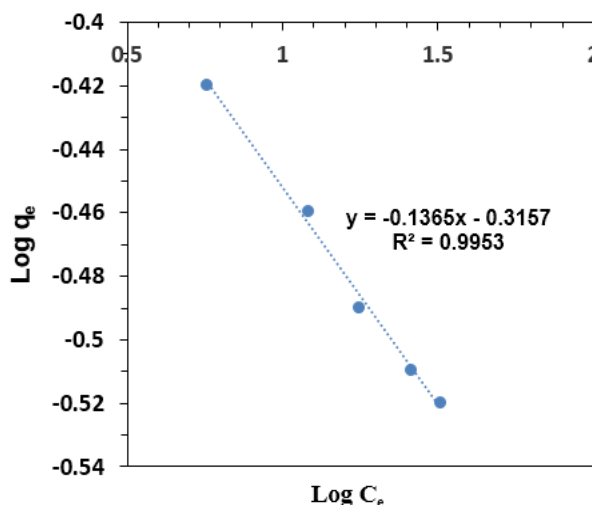
۳-۱۴-۱- مقایسه جذب ماده رنگزا

جدول ۱، مقایسه جذب ماده رنگزا توسط هیدروژل سنتز شده را با تعدادی از جاذب‌های دیگر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشخص شده است، هیدروژل سنتز شده نسبت به جاذب‌های دیگر ظرفیت جذب مناسبی داشته و همچنین سرعت جذب خوبی دارد به طوری که زمان تعادلی جذب ماده رنگزا حدود ۳۰ دقیقه می‌باشد. این سرعت جذب می‌تواند به دلیل تخلخل هیدروژل، حضور نانوذرات در بستر هیدروژل که سطح تماس بالایی دارند و اندازه ذرات هیدروژل باشد. همچنین هیدروژل‌های سنتز شده نسبت به جاذب‌های دیگر قابلیت بازیابی و استفاده مجدد خوبی دارند، به طوری که ۹۵ درصد فعالیت اولیه را پس از هشت چرخه جذب-واجذب ماده رنگزا حفظ می‌کند.

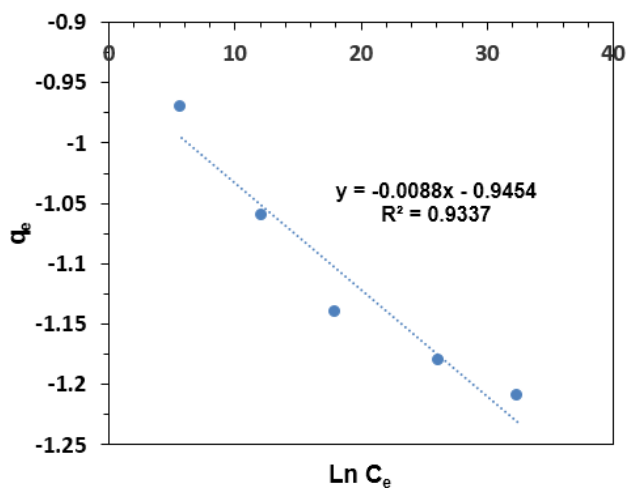
هم‌دمای جذب، روابط ریاضی به دست آمده جهت توصیف حالت تعادل گونه جذب‌شونده بین فاز جامد و سیال در دمای ثابت می‌باشند. این هم‌دمای را می‌توان به عنوان ابزارهایی جهت توصیف و پیش‌بینی میزان جذب، نوع و شدت برهم‌کنش جاذب و گونه جذب‌شونده و نیز چگونگی برهم‌کنش‌های ماده جذب‌شونده با جاذب در نظر گرفت [۲۵]. الگوهای جذب لانگمویر، فروندلیچ و تمکین سه الگوی رایج هم‌دمای هستند که به طور گسترده برای تعیین رفتار سامانه‌های جذب سطحی همگن و ناهمگن استفاده می‌شوند. الگوی جذب لانگمویر بر چند فرض اساسی استوار است: (۱) هر مولکول ماده رنگزا تنها یک‌بار یک مکان را اشغال می‌کند، (۲) جذب در مکان‌های ویژه‌ای از جاذب به صورت همگن صورت می‌گیرد و (۳) در هنگام تعادل، جاذب ظرفیت محدودی برای جذب‌شونده دارد؛ سطح جاذب تک‌لایه‌ای است و همه مکان‌ها بر روی این سطح، مشابه و دارای انرژی یکسانی هستند [۲۵]. ایزوترم فروندلیچ یک رابطه تجربی است که نشان می‌دهد انرژی جذب هنگام اشغال شدن مکان‌های جذب‌کننده یک جاذب، به‌طور نمایی کاهش می‌یابد. این هم‌دمای برای فرآیندهای جذب که در سطوح ناهمگن اتفاق می‌افتند قابل استفاده است. همچنین این هم‌دمای نشان دهنده توزیع نسبی انرژی و ناهمگونی مکان‌های جاذب است. مدل ایزوترم تمکین برهم‌کنش‌های غیرمستقیم جذب شونده / جاذب در فرآیند جذب را در نظر می‌گیرد. مدل ایزوترم تمکین فرض می‌کند که با افزایش پوشش سطح جاذب، میزان جذب همه مولکول‌ها به صورت خطی و نه لگاریتمی کاهش می‌یابد. ایزوترم تمکین در مورد سامانه‌های جذبی که دارای مکان‌های جذب ناهمگن باشند استفاده می‌شود. نتایج بررسی ایزوترم‌های لانگمویر، فروندلیچ و تمکین (شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸) نشان می‌دهند که جذب ماده رنگزای بنفش



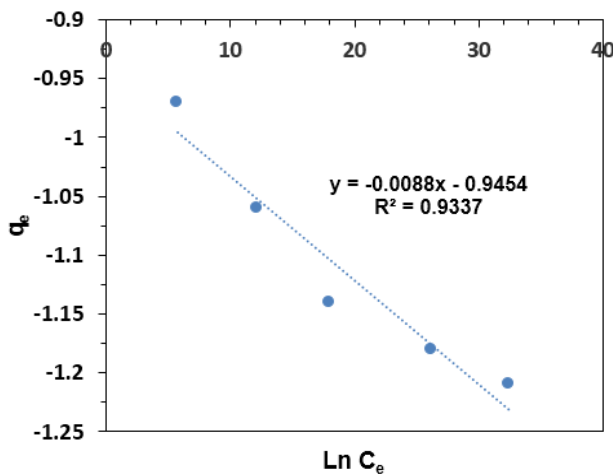
شکل ۱۶: نمودار لانگمویر برای جذب ماده رنگزا به وسیله هیدروژل نانوچندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل، (شرایط واکنش: مقدار جاذب ۰,۰۵ گرم، زمان ۱ ساعت و دمای محیط).



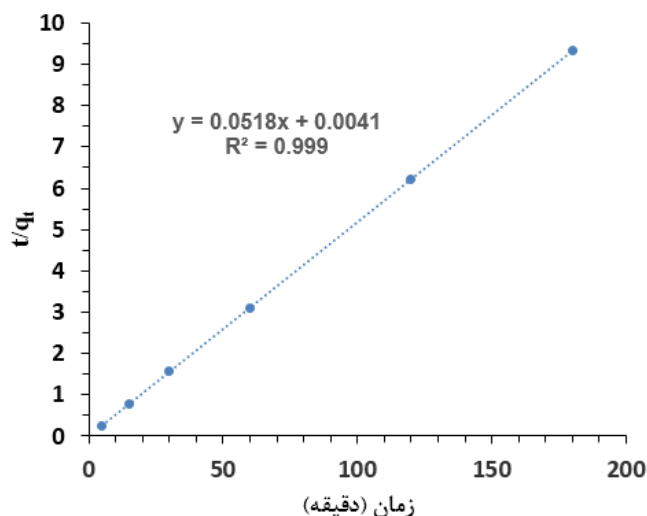
شکل ۱۷: نمودار فروندلیچ برای جذب ماده رنگزا به وسیله هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل، (شرایط واکنش: مقدار جاذب ۰,۰۵ گرم، زمان ۱ ساعت و دمای محیط).



شکل ۱۸: نمودار تمکین برای جذب ماده رنگزا به وسیله هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل، (شرایط واکنش: مقدار جاذب ۰,۰۵ گرم، زمان ۱ ساعت و دمای محیط).



شکل ۱۹: نمودار سینتیک شبه مرتبه اول برای جذب ماده رنگزا به وسیله هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل (شرایط واکنش: مقدار جاذب ۰,۰۵ گرم، زمان ۱ ساعت و دمای محیط).



شکل ۲۰: نمودار سینتیک شبه مرتبه دوم برای جذب ماده رنگزا به وسیله هیدروژل نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل (شرایط واکنش: مقدار جاذب ۰.۰۵ گرم، زمان ۱ ساعت و دمای محیط).

جدول ۱: مقایسه جذب ماده رنگزا هیدروژل نانوجندسازه با جاذب های دیگر.

مرجع	قابلیت استفاده مجدد و حفظ فعالیت	زمان تعادل جذب- ماده رنگزا (min)	غلظت اولیه ماده رنگزا (mg/l)	پیشینه ظرفیت (mg/g)	نوع ماده رنگزا	نوع جاذب
[۲۸]	٪ ۸۰ پس از ۳ چرخه	۳۰۰	۱۰۰	۲۲۵	بنفش بلوری / کاتیونی	هیدروژل بر پایه آکریل آمید، ۲-هیدروکسی اتیل متا اکریلات، و t-N-بوتیل مالتامیک اسید
[۲۹]	٪ ۸۸ پس از ۵ چرخه	۴۰	۱۰۰	۲۶۰	سبز مالاشیت / کاتیونی	هیدروژل چندسازه بر پایه کیتوسان و نانولوله هالوسیت (HNT)
[۳۰]	٪ ۶۴ پس از ۸ چرخه	۱۸۰	۱۰۰	۲۳۵	بنفش بلوری / کاتیونی	هیدروژل نانو چندسازه بر پایه کاراگینان، کانولن، اسید آکرلیک و نانوذرات کلرید نقره
[۳۱]	٪ ۷۴ پس از ۴ چرخه	۲۰۰	۱۰۰	۷۰	بنفش بلوری / کاتیونی	هیدروژل مغناطیسی بر پایه کاراگینان، پلی وینیل الکل
[۳۲]	-	۱۵۰۰	۱۰۰	۲۰۰	اسید قرمز ۱۸ / آنیونی	هیدروژل چندسازه بر پایه کیتوسان، پلی اتیلن گلیکول و آکریل آمید
[۳۳]	٪ ۵۰ پس از ۸ چرخه	۲۵	۱۰۰	۱۰	سبز مالاشیت / کاتیونی	نانوذرات مغناطیسی فیتوژنیک، عامل دار شده با اسید ۳-مرکاپتوپروپانویک
[۳۴]	-	۶۰	۱۰۰	۱۰۰	آبی متیلن / کاتیونی	هیدروژل چندسازه بر پایه کاراگینان، آکریل آمید و مونت موریلونیت سدیم
[۳۵]	٪ ۹۴ پس از ۵ چرخه	۷۸۰۰	۱۰۰	۱۲۰۰	آبی متیلن / کاتیونی	هیدروژل نانوجندسازه بر پایه اسید آکرلیک و Ca ₃ SiO ₅
[۳۶]	٪ ۸۵ پس از ۵ چرخه	۱۵۰	۱۰۰	۵۸۰	ردامین B / کاتیونی	هیدروژل بر پایه دی آلدئید کربوکسی متیل سلولز، ژلاتین
[۳۷]	٪ ۹۳ پس از ۶ چرخه	۳۰	۱۰۰	۹۵	آبی متیلن / کاتیونی	هیدروژل مغناطیسی بر پایه اسید پلی آسپاراتیک و اسید پلی آکرلیک
پژوهش حاضر	٪ ۹۵ پس از ۸ چرخه	۳۰	۱۰۰	۲۵۰	بنفش بلوری / کاتیونی	هیدروژل های نانوجندسازه بر پایه ژلاتین، آکریل آمید، AMPS و نانوذرات اکسید نیکل

تعیین شد. قابلیت بالای جذب مواد رنگزای کاتیونی از مهم‌ترین مزایای هیدروژل نانو چندسازه است. فرآیند جذب ماده رنگزا تعادلی هیدروژل‌های نانوجندسازه حاوی نانوذرات اکسید نیکل از الگوی فروندلیچ و سینتیک جذب شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند. آزمایش‌های مربوط به قابلیت استفاده مجدد نشان داد هیدروژل‌های تولید شده قابلیت استفاده مجدد خوبی دارند به طوری که هیدروژل‌های نانوجندسازه پس از هشت دوره جذب-واجذب می‌توانند حدود ۹۵ درصد جذب اولیه را حفظ کنند. هیدروژل‌های نانوجندسازه سنتز شده به دلیل سهولت در سنتز، قابلیت استفاده مجدد، سازگاری با محیط زیست، سطح تماس بالا و سرعت جذب زیاد در مقایسه با جاذب‌های دیگر جاذب‌های مناسبی برای جذب مواد رنگزا و آلاینده‌های کاتیونی از محیط‌های آبی هستند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه هیدروژل‌هایی بر پایه ژلاتین و تک‌پارهای آکریل‌آمید (AAM) و ۲-آکریل‌آمیدو-۲-متیل پروپان سولفونیک‌اسید (AMPS) به روش پلیمری شدن رادیکالی با استفاده از متیلن‌بیس‌آکریل‌آمید به عنوان شبکه‌ساز و پرسولفات آمونیم به عنوان آغازگر رادیکالی سنتز شد. سپس هیدروژل‌های نانوجندسازه با بارگذاری یون‌های نیکل در هیدروژل و سپس کاهش آن‌ها به وسیله محلول بورهیدرید سدیم تهیه شدند. حضور نانوذرات اکسید نیکل در بستر هیدروژل به وسیله میکروسکوپ الکترونی مورد تأیید قرار گرفت. اثر متغیرهای مختلف مانند دما، pH، زمان تماس، غلظت اولیه ماده رنگزا و مقدار جاذب بر روی رفتار جذب ماده رنگزا در محیط آبی مورد تحقیق قرار گرفت. با استفاده از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری اندازه نانوذرات اکسید نیکل در بستر هیدروژل در حدود ۱۵-۵ نانومتر

۵- مراجع

- O. Duman, E. Ayranci, Adsorption characteristics of benzaldehyde, sulphanic acid, and p-phenolsulfonate from water, acid, or base solutions onto activated carbon cloth. *Sep. Sci. Technol.* 41 (2006), 3673-3692.
- O. Duman, E. Ayranci, Adsorptive removal of cationic surfactants from aqueous solutions onto high-area activated carbon cloth monitored by in situ UV spectroscopy. *J. Hazard. Mater.* 174 (2010), 359-367.
- O. Duman, E. Ayranci, Attachment of benzo-crown ethers onto activated carbon cloth to enhance the removal of chromium, cobalt and nickel ions from aqueous solutions by adsorption. *J. Hazard. Mater.* 176 (2010), 231-238.
- E. Ayranci, O. Duman, In-situ UV-visible spectroscopic study on the adsorption of some dyes onto activated carbon cloth. *Sep. Sci. Technol.* 44 (2009), 3735-3752.
- S. Tunç, O. Duman, T. Gürkan, Monitoring the decolorization of Acid Orange 8 and Acid Red 44 from aqueous solution using Fenton's reagents by online spectrophotometric method: effect of operation parameters and kinetic study. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (2013), 1414-1425.
- A. Zehhaf, A. Benyoucef, C. Quijada, S. Taleb, E. Morallón, Algerian natural montmorillonites for arsenic(III) removal in aqueous solution. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12 (2015), 595-602.
- H. Hosseinzadeh, N. Khoshnood, Removal of cationic dyes by poly(AA-co-AMPS)/montmorillonite nanocomposite hydrogel. *Desalin. Water Treat.* 57 (2016), 6372-6383.
- X. Qi, L. Wu, T. Su, J. Zhang, W. Dong, Polysaccharide-based cationic hydrogels for dye adsorption. *Colloids Surf. B.* 170 (2018), 364-372.
- A. Seidmohammadi, G. Asgari, A. Dargahi, M. Leili, Y. Vaziri, B. Hayati, A. A. Shekarchi, A. Mobarakian, A. Bagheri, S. B. Nazari Khanghah, A. Keshavarzpour, A comparative study for the removal of Methylene blue dye from aqueous solution by novel activated carbon based adsorbents. *Prog. Color. Color. Coatings.* 12 (2019), 133-144.
- S. Sadighian, M. Abbasi, S.A. Arjmandi, H. Karami, Dye removal from water by zinc ferrite-graphene oxide nanocomposite. *Prog. Color. Color. Coatings.* 11 (2018), 85-92.
- A. Hamidi, K. Seifpanahi-Shabani, M. Karamoozian, Basic dyes removal by natural salvadora persica adsorbent. *Prog. Color. Color. Coatings.* 10 (2017), 115-128.
- M. Madadi, F. Tadayon, M.E. Olya, Synthesis, characterization and application of silica aerogel-eggshell nanocomposite for the dye removal from colored wastewater. *Prog. Color. Color. Coatings.* 9 (2016), 1-16.
- ر. تبارکی، ن. صادقی نژاد، هایده. پورعجم، مطالعه حذف مواد رنگزا از مخلوط دوتایی توسط پوست سبز فندق به عنوان پسماند کشاورزی با روش سطح پاسخ، نشریه علمی علوم و فناوری رنگ، ۱۳۹۹، ۱، ۲۳-۱۳.
- F. Ullah, M.B.H. Othman, F. Javed, Z. Ahmad, H.M. Akil, Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Mater. Sci. Eng. C.* 57 (2015), 414-433.
- M. Dargahi, H. Ghasemzadeh, A. Torkaman, CdS quantum dot nanocomposite hydrogels based on κ -carrageenan and poly (acrylic acid), photocatalytic activity and dye adsorption behavior. *Polym. Bull.* 76 (2019), 5039-5058.
- X. Qi, L. Wu, T. Su, J. Zhang, W. Dong, Polysaccharide-based cationic hydrogels for dye adsorption. *Colloids Surf. B.* 170 (2018), 364-372.
- V. Sinha, S. Chakma, Advances in the preparation of hydrogel for wastewater treatment: A concise review. *J. Environ. Chem. Eng.* 7 (2019), 103295.
- H. Huang, L. Hou, F. Zhu, J. Li, M. Xu, Controllable thermal and pH responsive behavior of PEG based hydrogels and applications for dye adsorption and release. *RSC Adv.* 8 (2018), 9334-9343.
- C.-Y. Tang, P. Yu, L.-S. Tang, Q.-Y. Wang, R.-Y. Bao, Z.-Y. Liu, M.-B. Yang, W. Yang, Tannic acid functionalized

- graphene hydrogel for organic dye adsorption. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 165 (2018), 299–306.
20. Y. Zhang, L. Liang, Y. Chen, X.-M. Chen, Y. Liu, Construction and efficient dye adsorption of supramolecular hydrogels by cyclodextrin pseudorotaxane and clay. *Soft Matter.* 15 (2019), 73–77.
 21. J. R. Soucy, E. Shirzaei Sani, R. Portillo Lara, D. Diaz, F. Dias, A.S. Weiss, A.N. Koppes, R.A. Koppes, N. Annabi, Photocrosslinkable Gelatin/Tropoelastin hydrogel adhesives for peripheral nerve repair. *Tissue Eng. Part A.* 24 (2018), 1393–1405.
 22. O. Ozay, N. Aktas, E. Inger, N. Sahiner, Hydrogel assisted nickel nanoparticle synthesis and their use in hydrogen production from sodium boron hydride. *Int. J. Hydrogen Energy.* 36 (2011), 1998–2006.
 23. Y. N. Patel, M. P. Patel, Adsorption of azo dyes from water by new poly (3-acrylamidopropyl)-trimethylammonium chloride-co-N,N-dimethylacrylamide superabsorbent hydrogel—Equilibrium and kinetic studies. *J. Environ. Chem. Eng.* 1 (2013), 1368–1374.
 24. I. Langmuir, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *J. Am. Chem. Soc.* 40 (1918), 1361–1403.
 ۲۵. ز. کریمی، ع. اله وردی، ف. اوشنی، بررسی حذف مواد رنگزا از پساب با استفاده از نانوجاذب‌های کامپوزیت آلومینا. *مجله مطالعات در دنیای رنگ.* ۲(۱۳۹۹)، ۴۱–۵۹.
 26. H. Freundlich, W. Heller, The adsorption of cis-and trans-azobenzene. *J. Am. Chem. Soc.* 61 (1939), 2228–2230.
 27. H. Mittal, A. Maity, S. Sinha Ray, The adsorption of pb²⁺ and cu²⁺ onto gum ghatti-grafted poly(acrylamide-co-acrylonitrile) biodegradable hydrogel: Isotherms and Kinetic Models. *J. Phys. Chem. B.* 119 (2015), 2026–2039.
 28. P. Ilgin, H. Ozay, O. Ozay, Selective adsorption of cationic dyes from colored noxious effluent using a novel N-tert-butylmaleamic acid based hydrogels. *React. Funct. Polym.* 142 (2019), 189–198.
 29. Q. Peng, M. Liu, J. Zheng, C. Zhou, Adsorption of dyes in aqueous solutions by chitosan–halloysite nanotubes composite hydrogel beads. *Microporous Mesoporous Mater.* 201 (2015), 190–201.
 30. M. Dargahi, H. Ghasemzadeh, A. Bakhtiary, Highly efficient absorption of cationic dyes by nano composite hydrogels based on κ-carrageenan and nano silver chloride. *Carbohydr. Polym.* 181 (2018), 587–595.
 31. G. R. Mahdavinia, A. Massoudi, A. Baghban, E. Shokri, Study of adsorption of cationic dye on magnetic kappa-carrageenan/PVA nanocomposite hydrogels. *J. Environ. Chem. Eng.* 2 (2014), 1578–1587.
 32. S. Zhao, F. Zhou, L. Li, M. Cao, D. Zuo, H. Liu, Removal of anionic dyes from aqueous solutions by adsorption of chitosan-based semi-IPN hydrogel composites. *Compos. Part B Eng.* 43 (2012), 1570–1578.
 33. I. Ali, C. Peng, T. Ye, I. Naz, Sorption of cationic malachite green dye on phytogetic magnetic nanoparticles functionalized by 3-mercaptopropanoic acid. *RSC Adv.* (2018), 8878–8897.
 34. G. R. Mahdavinia, A. Baghban, S. Zorofi, A. Massoudi, Kappa-carrageenan biopolymer-based nanocomposite hydrogel and adsorption of methylene blue cationic dye from water. *J. Mater. Env. Sci.* 5 (2014), 330–337.
 35. X.-S. Hu, R. Liang, G. Sun, Super-adsorbent hydrogel for removal of methylene blue dye from aqueous solution. *J. Mater. Chem. A.* 6 (2018), 17612–17624.
 36. S. Sethi, B. S. Kaith, M. Kaur, N. Sharma, S. Khullar, A hydrogel based on dialdehyde carboxymethyl cellulose–gelatin and its utilization as a bio adsorbent. *J. Chem. Sci.* 132 (2020), 1–16.
 37. X. Jv, X. Zhao, H. Ge, J. Sun, H. Li, Q. Wang, H. Lu, Fabrication of a magnetic poly (aspartic acid)-Poly (acrylic acid) hydrogel: Application for the adsorptive removal of organic dyes from aqueous solution. *J. Chem. Eng. Data.* 64 (2019), 1228–1236.