

Survey of Nickel (II) Adsorption in Aqueous Solutions Using Rock Wool Waste

ABSTRACT

Background and Aim: Increasing levels of toxic heavy metals in the environment have led to risks to the health of humans and living organisms.

Materials and Methods: First, some characteristics of rock wool including pH, EC, pH_{zpc} , chemical composition, structure, and morphology were determined using XRD, XRF, and Scanning Electron Microscopy (SEM). Adsorbing tests were then conducted in a non-continuous reactor using synthetic solutions containing nickel. Optimum adsorption conditions were determined concerning pH, metal initial concentration, contact time, and adsorbent dose. The data were analyzed in a completely randomized block design.

Results: The highest adsorption was seen at pH=5 and the lowest at pH=3, with a significant difference. The absorption rate was significantly higher in the 5 mg/l solutions than in other concentrations and the lowest was observed at 100 mg/l concentration. The lowest nickel adsorption rate was observed in 5 min and the highest adsorption efficiency was observed in 90 min, with a significant difference. The adsorption percentage of rock wool waste at the 10 g/l doses was significantly higher than that in other adsorbent doses and the lowest adsorption percentage was observed at the 1 g/l dose. The isotherm studies showed that the adsorption of nickel by rock wool waste was consistent with the Freundlich model.

Conclusion: It can be concluded that rock wool waste could remove nickel from industrial effluents.

Keywords: Rock Wool Waste; Nickel (II) Adsorption; Isotherm.

Mohammad Hadi Abolhasani

* Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Agricultural Engineering and Natural Resources, Islamic Azad University of Khorasgan, Isfahan, Iran;
E-Mails: Hadi.Mha2001@yahoo.com (F.L.).(Corresponding Author);
EMail: Hadi.Mha2001@yahoo.com

Niloofar Pirestani

Ph.D. Student in Environment, Department of Environment, Faculty of Agricultural Engineering and Natural Resources, Islamic Azad University of Khorasgan, Isfahan, Iran.

Ali Eslami

MSc., Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Khomeini Shahr Branch, Isfahan, Iran.

Received: 2020/09/20

Accepted: 2020/12/15

Document Type: Research article

► **Citation:** Abolhasani MH, Pirestani N, Eslami A. Survey of Nickel (II) Adsorption in Aqueous Solutions Using Rock Wool Waste. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Winter 2021; 6(4): 346-359.

بررسی تأثیر خصوصیات پشم‌سنگ در جذب نیکل (II) از محلول‌های آبی تعیین میزان جذب نیکل (II) از محلول‌های آبی با استفاده از پسماند پشم‌سنگ

محمدحادی ابوالحسنی

* استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی خوراسگان، اصفهان، ایران. (نویسنده مسئول):
پست الکترونیک:

Hadi.mha2001@yahoo.com

نیلوفر پیرستانی

دانشجوی دکتری محیط زیست، گروه محیط زیست، دانشکده مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی خوراسگان، اصفهان، ایران.

علی اسلامی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵

نوع مقاله: مقاله اصیل پژوهشی

چکیده

زمینه و هدف: افزایش غلظت فلزات سنگین سمی در محیط زیست، مخاطراتی را برای سلامتی انسان و موجودات زنده به دنبال داشته است. هدف از انجام این مطالعه بررسی تأثیر خصوصیات پشم‌سنگ در جذب نیکل (II) از محلول‌های آبی با استفاده از پسماند پشم‌سنگ می باشد.

مواد و روش‌ها: ابتدا برخی خصوصیات پسماند پشم‌سنگ مانند pH، هدایت الکتریکی، pH_{ZPC} ، ترکیب شیمیایی با استفاده از آنالیزهای پراش اشعه ایکس و فلوتورسانس اشعه ایکس و همچنین ساختار و ریخت‌شناسی جاذب‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تعیین شد. آزمایشات جذب به‌صورت ناپیوسته با استفاده از محلول‌های آزمایشگاهی حاوی نیکل انجام گرفت و شرایط بهینه جذب در اثر فاکتورهای مختلف pH، غلظت اولیه یون‌های فلزی، زمان تماس و مقدار جاذب بر میزان جذب در سطوح مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور رسم نمودارهای هم‌دما از ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ استفاده شد.

یافته‌ها: بیش‌ترین میزان جذب با اختلاف معنی‌داری در $pH=5$ و کم‌ترین مقدار آن در $pH=3$ مشاهده شد. میزان جذب در غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر محلول با اختلاف معنی‌داری بیشتر از سایر غلظت‌ها بود و کم‌ترین میزان در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. کم‌ترین میزان جذب نیکل با اختلاف معنی‌داری در زمان ۵ دقیقه و بیش‌ترین کارایی جذب در زمان ۹۰ دقیقه مشاهده شد. درصد جذب پسماند پشم‌سنگ در ۱۰ گرم در لیتر با اختلاف معنی‌داری بیشتر از دیگر مقادیر جاذب و کم‌ترین درصد جذب جاذب در ۱ گرم در لیتر مشاهده شد. برازش هم‌دمای جذب سطحی نشان داد که جذب نیکل توسط پسماند پشم‌سنگ با مدل فروندلیچ مطابقت داشت.

نتیجه‌گیری: پسماند پشم‌سنگ می‌تواند قابلیت حذف نیکل از پساب‌های صنعتی را داشته باشد.

کلید واژه‌ها: ایزوترم، پسماند پشم‌سنگ، جذب نیکل (II).

◀ **استناد:** ابوالحسنی م، ه، پیرستانی ن، اسلامی ع. بررسی تأثیر خصوصیات پشم‌سنگ در جذب نیکل (II) از محلول‌های آبی تعیین میزان جذب نیکل (II) از محلول‌های آبی با استفاده از پسماند پشم‌سنگ. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. زمستان ۱۳۹۹؛ ۶(۴): ۳۴۶-۳۵۹.

مقدمه

با پیشرفت تمدن بشری، توسعه فناوری، ازدیاد روزافزون جمعیت و آلودگی محیط زیست، زندگی ساکنان کره زمین را تهدید می‌کند؛ به طوری که در اغلب کشورها حفاظت محیط زیست در اولویت قرار گرفته است. علت اصلی تجمع فلزات سنگین در محیط زیست، توسعه سریع صنعت مدرن و افزایش جمعیت می‌باشد که این امر به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است. غلظت فلزات سنگین در فاضلاب صنایع با سرعتی بالا رو به افزایش می‌باشد. متداول‌ترین فلزات یافت شده در فاضلاب‌ها، سرب، مس، روی، کادمیوم، کروم و نیکل هستند (۱). نیکل، یکی از فلزات آلاینده آب و خاک به‌شمار می‌رود که افزایش غلظت آن در این منابع به دلیل فعالیت‌های انسانی سبب مخاطرات فراوان برای موجودات زنده می‌شود. ماندگاری این فلز در خاک زیاد بوده و در صورت ازدیاد، باعث آلودگی خاک و به تبع آن مسمومیت گیاهان و جانوران خواهد شد. آلودگی آب و خاک به نیکل در برخی مطالعات انجام شده در ایران گزارش شده است (۲-۴). حذف فلزات سنگین از آب و پساب آلوده، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ضروری جهت استفاده مجدد از این منابع آبی است. یون‌های فلز سنگین به‌طور معمول توسط فرآیندهای رسوب‌گذاری شیمیایی، تبادل یونی، استخراج حلال، واکنش‌های شیمیایی اکسایشی و کاهش، اسمز معکوس، فیلتراسیون و رزین‌های مختلف از محیط‌های آبی حذف می‌شوند (۵). بنابراین، امروزه توسعه فرآیندهای مقرون به‌صرفه و حامی محیط زیست برای تصفیه فلزات سنگین از پساب مورد توجه جدی قرار گرفته است. فرآیند جذب یکی از مناسب‌ترین روش‌هایی است که به دلیل هزینه کم، راندمان مناسب و سهولت عملیات برای حذف یون‌های فلزات سنگین از محیط‌های آبی به‌کار برده شده است (۱). جذب سطحی، یکی از فرآیندهای فیزیکی- شیمیایی است که در فصل مشترک دو فاز رخ داده و فرآیندی مقرون به‌صرفه بوده که دارای مزایایی چون سهولت استفاده، هزینه کم، ظرفیت جذب بالا و انعطاف‌پذیری در طراحی و بهره‌برداری است و روشی برتر

در حذف فلزات سنگین محسوب می‌شود (۶). الیاف معدنی مصنوعی اصطلاح ژنریک مورد استفاده برای بیان مواد لیفی شکل شامل: الیاف پشم سنگ، پشم سرباره، پشم شیشه و الیاف سرامیکی نسوز است و بیشتر متون علمی آن را به‌عنوان الیاف معدنی مصنوعی می‌شناسند (۷). تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته، مؤید این نکته است که تولیدکنندگان سعی در تولید محصولی از این دسته با کیفیت برتر، ثبات زیستی پایین‌تر و آثار زیان‌آور کمتر در بدن دارند (۷). پشم سنگ که در زبان انگلیسی Rock wool نامیده می‌شود، جزء خانواده عایق‌های حرارتی متشکل از الیاف معدنی است، به‌همین دلیل گاهی به آن Mineral wool نیز اطلاق می‌شود (۷). در ساختار شیمیایی پشم سنگ اکسیدهای فلزی مانند سیلیسیم دی‌اکسید^۱، تری‌اکسید بور^۲، آلومینیوم اکسید^۳، کلسیم اکسید^۴، تیتانیوم دی‌اکسید^۵ و اکسید منیزیم^۶ وجود دارد (۸). تحقیقات زیادی بر روی حذف فلز نیکل از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب‌های معدنی صورت گرفته است، به‌عنوان مثال تنح و همکاران نشان دادند که نانوکامپوزیت مغناطیسی هیدروکسی آپاتیت توانایی حذف نیکل و مس از محلول‌های آبی را دارد (۹). ژانگ و همکاران نشان دادند که زئولیت سنتز شده از خاکستر زغال‌سنگ تولید شده توسط یک فرآیند گازسیون برای حذف نیکل دو بار مثبت^۷ از آب مناسب است (۱۰). مطالعه سعادت و همکاران نشان داد که نانوکامپوزیت سیلیکا آئروژل-کربن فعال، به‌طور موفقیت‌آمیزی می‌تواند برای حذف نیکل از محلول‌های آبی استفاده شود (۱۱). در پژوهشی که توسط فغانی و حشمتی بر روی حذف رنگدانه فنل رد با استفاده از نانو جاذب مگنتیت از محلول آبی انجام شد به این نتیجه رسیدند که نانو جاذب مگنتیت می‌تواند به‌عنوان یک جاذب مناسب در

1. SiO₂
2. B₂O₃
3. Al₂O₃
4. CaO
5. TiO₂
6. MgO
7. Ni²⁺

و در جدول ۴ ارائه شد. با توجه به این نتایج، SiO_2 ، CaO ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، MgO و K_2O حدود ۹۵٪ مواد تشکیل دهنده پسماند پشم سنگ را شامل شدند. به نظر می‌رسد این پسماند عمدتاً از سیلیکات‌ها تشکیل شده است. خلل و فرج‌های پشم سنگ و ساختار تشکیل دهنده آن (سیلیس و سیلیکات‌ها و ...) باعث جذب نیکل شد (۱۴).

تهیه محلول‌های آزمایشگاهی حاوی نیکل

برای تهیه محلول‌های با غلظت متفاوت نیکل، محلول مادر از نیترات نیکل ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$) با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر تهیه شد. فرمول شیمیایی و مشخصات نمک مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. فرمول شیمیایی و مشخصات نمک مورد استفاده

مشخصات شیمیایی			
نام نمک	فرمول شیمیایی	یون فلزی بار الکتریکی	وزن اتمی (گرم)
نیکل نیترات	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$	Ni	۵۸/۹۳۵
			۲۳۶/۴۲

تأثیر پارامترهای مختلف بر فرآیند جذب

مقادیر متغیرهای مختلف برای pH (۳، ۵، ۷ و ۹)، مقدار جاذب (۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ گرم در لیتر)، زمان تماس (۵، ۱۵، ۳۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه) و غلظت‌های مختلف نیکل (۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) بود و مقادیر پارامترهای ثابت در اندازه‌گیری نیکل در آب برای pH=۳، برای مقدار جاذب ۱ گرم در لیتر، برای غلظت فلز سنگین ۱ میلی گرم در لیتر و برای زمان تماس ۹۰ دقیقه بود. در تمامی مراحل نمونه‌ها، به مدت ۹۰ دقیقه در دور ۱۸۰ rpm به وسیله دستگاه هم‌زن مخلوط شدند. سپس از کاغذ صافی عبور داده شدند. غلظت باقی‌مانده فلز نیکل در محلول توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 3030 قرائت گردید. آزمایش با ۳ تکرار انجام شد (۱۵). در نهایت درصد حذف نیکل برای تمام مراحل به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه شد.

حذف آلاینده فنل رد از محلول‌های آبی و پساب‌های صنعتی قبل از رهاسازی در محیط زیست استفاده شود (۱۲). مطالعه بافکار و بابلی که به بررسی راندمان حذف نیترات از محلول آبی با استفاده از جاذب نانو ساختار برگ درخت بلوط پرداختند، نشان داد که داده‌های جذب با مدل فروندلیچ مطابقت بیشتری داشت (۱۳). لذا مطالعه حاضر با هدف بررسی امکان استفاده از پسماند کارخانه تولید پشم سنگ به عنوان جاذب در حذف فلز سنگین نیکل از محیط آبی طی فرآیند جذب سطحی انجام شد.

روش کار

این مطالعه در راستای حذف فلز سنگین نیکل (II) از پساب ساخته شده انجام شد. تیمارهای pH، غلظت اولیه فلز، زمان تماس و مقدار جاذب در این پژوهش طبق مراحل زیر اندازه‌گیری شد:

تهیه و تعیین خصوصیات پسماند پشم سنگ

پسماند پشم سنگ از شرکت پشم سنگ آسیا واقع در منطقه صنعتی نجف‌آباد اصفهان تهیه شد. در ابتدا خصوصیات پسماند پشم سنگ شامل pH، هدایت الکتریکی، pH نقطه صفر بار الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی مورد بررسی قرار گرفت و سپس ویژگی‌های ساختاری پسماند پشم سنگ با استفاده از پراش اشعه ایکس^۱، طیف‌سنجی مادون قرمز^۲ و میکروسکوپ الکترونیکی روبشی^۳ تعیین شد. برای تعیین ساختار پشم سنگ، از دستگاه پراش اشعه ایکس Philips مدل PW1800 استفاده گردید. هم‌چنین جهت تعیین ترکیب شیمیایی نمونه مورد آزمایش از دستگاه طیف‌سنجی فلورسانس^۴ ساخت کمپانی Philips مدل PW1480 استفاده شد. تصویربرداری جهت ریخت‌شناسی و اندازه پسماند پشم سنگ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Philips XL30 صورت گرفت. ترکیب شیمیایی پسماند پشم سنگ مورد آزمایش از نتایج حاصل از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو X به دست آمد

1. XRD
2. XRF
3. SEM
4. XRF

$$R_L = 1/(1 + bC_0) \quad \text{معادله (۵)}$$

$$KL = b = \text{ثابت لانگمویر}$$

C_0 = غلظت اولیه جذب شونده در محلول (میلی گرم بر لیتر)

اگر مقدار R_L برابر صفر شود، نشان دهنده جذب غیرقابل برگشت، $0 < R_L < 1$ بیانگر جذب مطلوب، $R_L = 1$ بیانگر جذب خطی و $R_L > 1$ بیانگر جذب نامطلوب است (۱۹، ۲۰).

معادله فروندلیچ یک معادله جذب سطحی تجربی می باشد که شکل کلی آن عبارت است از (۲۰، ۲۱):

$$\text{Log } q_e = \text{Log } k_f + 1/n \text{ Log } C_e \quad \text{معادله (۶)}$$

که در آن q_e جرم ماده جذب شونده در واحد جرم جذب کننده (میکروگرم بر گرم)، C_e غلظت عنصر در حال تعادل (میکروگرم بر میلی لیتر) و k_f و n ضرایب مدل هستند (۲۰، ۲۲).

سینتیک جذب

سینتیک جذب، مطالعه سرعت فرآیندهای شیمیایی به منظور درک فاکتورهای مؤثر در فرآیند جذب و زمان رسیدن به تعادل تعریف می گردد. مطالعه سینتیک جذب، اطلاعات مفیدی در رابطه با شرایط آزمایش و سرعت واکنش های شیمیایی و در نتیجه زمان لازم برای برقراری تعادل را فراهم می کند. در طی دهه های گذشته، مدل های ریاضی متعددی جهت توصیف داده های جذب توسعه یافته اند (۲۳، ۲۴). مدل های شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، ایلوویچ، پخشندگی درون ذره ای و غیره از این دسته از مدل ها می باشند که دو مدل اول استفاده گسترده تری را در توصیف سرعت واکنش های جذبی دارند. سرعت در فرآیند جذب سطحی به غلظت گونه های درگیر در این فرآیند وابسته است (۲۵).

معادله سینتیکی شبه مرحله اول

لاگارجن در سال ۱۸۹۸، معادله سرعت مرتبه اول را جهت توصیف فرآیندهای سینتیکی فاز جامد- مایع جذب اسید اکسالیکی و اسید مالونیک بر روی زغال چوب ارائه داد. باور بر این است که این مدل نخستین مدل درباره سرعت جذب سطحی بر پایه ظرفیت جذب می باشد. از این معادله برای جذب یک ماده جذب شونده از محلول های آبی استفاده می شود. معادله شبه مرتبه اول لاگارجن

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

C_0 و C_t غلظت اولیه نیکل در محلول و غلظت نیکل بعد از

انجام آزمایش می باشند (۱۶).

$$Q_t = \frac{(C_i - C_t)}{M} \times V \quad \text{رابطه (۲)}$$

Q_t = مقدار فلز جذب شده در واحد جرم جاذب، C_i = غلظت

اولیه فلز، C_t = غلظت باقی مانده فلز در زمان t ، M = جرم جاذب و

V = حجم محلول است (۱۴).

همدماهای جذب سطحی

برای تعیین همدماهای جذب سطحی، غلظت های متفاوت ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر عنصر نیکل تهیه شد و سوسپانسیون هایی حاوی ۱ گرم جاذب و ۱۰۰ میلی لیتر محلول در $\text{pH} = 3$ و زمان ۹۰ دقیقه با ۳ تکرار استفاده گردید و محلول مانند مراحل قبلی از کاغذ صافی عبور داده شد و غلظت باقی مانده فلز توسط دستگاه جذب اتمی قرائت گردید. سپس نمودارهای برازش همدماهای جذب سطحی در غلظت های مختلف رسم و برازش مدل های لانگمویر و فروندلیچ جهت برازش داده ها مورد استفاده قرار گرفت (۱۶).

معادله لانگمویر به صورت زیر است (۱۷):

$$x/m = Kcb / (1 + kc) \quad \text{معادله (۳)}$$

x/m : جرم جذب شونده در واحد جرم جاذب (q_e).

K : عدد ثابت مربوط به انرژی جذب

b : حداکثر مقدار جذب شونده ای که می تواند جذب شود (یک

لایه مولکولی کامل)

C : غلظت تعادلی جذب شونده

فرم خطی معادله لانگمویر:

$$c/x/m = 1/kb + c/b \quad \text{معادله (۴)}$$

ماهیت مناسب جذب و خصوصیات ویژه همدمای جذب لانگمویر را می توان به کمک یک ثابت بدون واحد به نام فاکتور جداسازی یا پارامتر تعادلی که در سال ۱۹۶۶ توسط هال و همکاران معرفی شد، تشریح نمود (۱۸):

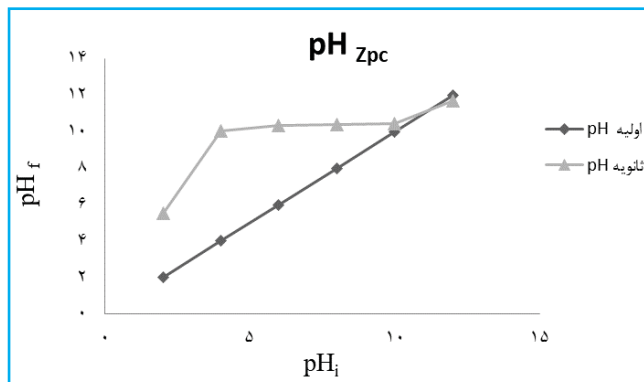
تصادفی استفاده شد. همچنین برای مقایسه میانگین داده‌ها از روش دانکن در سطح ۵٪ استفاده گردید.

یافته‌ها

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پسماند پشم سنگ مورد آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. نمونه دارای pH قلیایی در حدود ۸/۹۲ بود. هم‌چنین مقداری املاح محلول در نمونه وجود دارد که هدایت الکتریکی حدود ۱۴۲/۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر را ایجاد نمود. pH نقطه صفر الکتریکی (pHZPC) پسماند نیز مقدار ۱۱ بود. نمودار ۱ تغییرات pH بعد از گذشت مدت زمان ۲۴ ساعت نسبت به مقدار اولیه pH را نشان داد.

جدول ۲. برخی خصوصیات پسماند پشم سنگ

مقدار	خصوصیات
۸/۹۲	pH
۱۴۲/۲	EC (μs/cm)
۱۵/۶	CEC (Cmol/Kg)
۱۱	pHZPC



نمودار ۱. تغییرات pH بعد از گذشت مدت زمان ۲۴ ساعت نسبت به مقدار اولیه pH

شکل ۱ عکس‌های SEM گرفته شده توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Vega II از جاذب پسماند پشم سنگ قبل و بعد از جذب را نشان می‌دهد (هر دو تصویر با بزرگ‌نمایی یکسان ۵۰۰X بود).

به صورت زیر می‌باشد (۲۶):

$$=K_1(q_e - q_t) \frac{dq_t}{dt} \quad \text{معادله ۱-۱}$$

q_t = جرم ماده جذب‌شونده در واحد جرم جذب‌کننده (جاذب)

در زمان t (g/mg)

q_e = جرم ماده جذب‌شونده در واحد جرم جذب‌کننده (جاذب)

در زمان تعادل (g/mg)

K_1 = ثابت سرعت شبه مرتبه اول (min^{-1})

با انتگرال‌گیری از معادله ۱-۱ در شرایط $t=0$, $q_t=0$ و

$q_t = q_e$ می‌توان معادله را به صورت زیر بیان کرد (۲۷)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} \times t \quad \text{معادله ۱-۲}$$

معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم

در سال ۱۹۹۵، هو فرآیندهای سینتیکی جذب یون‌های فلزی دوظرفیتی بر روی زغال سنگ را بررسی کرد. رابطه جذبی مابین زغال سنگ و یون‌های فلزات در این مطالعه با استفاده از سینتیک شبه مرتبه دوم تعریف شد. این معادله برای جذب یون‌های فلزی، رنگ، غلف‌کش‌ها، روغن و مواد آلی از محلول‌های آبی کاربرد دارد (۲۶). معادله شبه مرتبه دوم به صورت زیر توصیف می‌گردد:

$$=K_2(q_e - q_t)^2 \frac{dq_t}{dt} \quad \text{معادله ۱-۳}$$

که با انتگرال‌گیری از معادله ۱-۳ در شرایط $t=0$ در $q_t=0$ و

$q_t = q_e$ می‌توان معادله را به صورت زیر بازنویسی کرد (۲۸)

$$= \frac{1}{q_e} + K_2 t \frac{1}{(q_e - q_t)} \quad \text{معادله ۱-۴}$$

با تغییر آرایش معادله ۱-۴ شکل خطی معادله شبه مرتبه دوم

به صورت معادله ۱-۵ تعریف می‌شود:

$$t/q_t = 1/K_2 q_e^2 + t/q_e \quad \text{معادله ۱-۵}$$

q_t = جرم ماده جذب‌شونده در واحد جرم جذب‌کننده (جاذب)

در زمان t (g/mg)

q_e = جرم ماده جذب‌شونده در واحد جرم جذب‌کننده (جاذب)

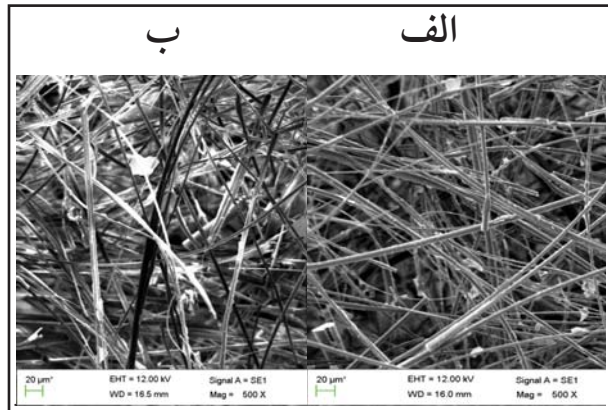
در زمان تعادل (g/mg)

K_2 = ثابت سرعت شبه مرتبه دوم ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$) (۲۸).

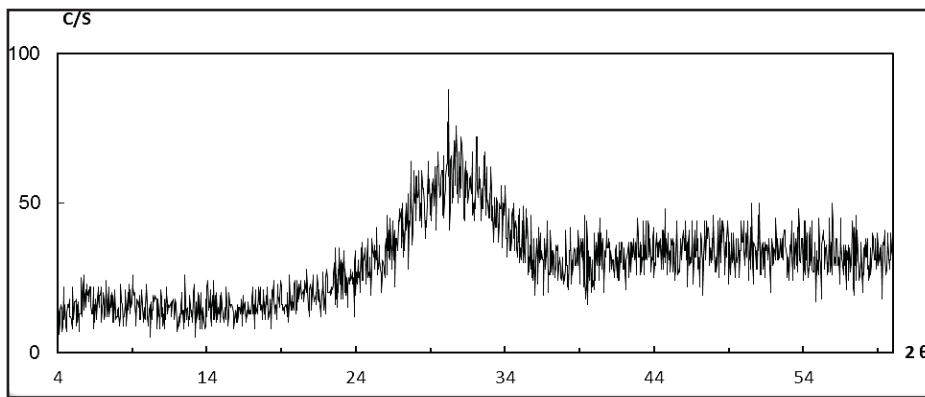
در این مطالعه برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از طرح بلوک

شکل الف، جاذب قبل از جذب و تصویر ب مربوط به جاذب بعد از جذب فلز نیکل در $\text{pH}=3$ بود که جاذب پس از جذب با استفاده از دستگاه فریز درایر^۱ خشک شد. همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهد، این جاذب شکل الیافی داشت که پس از جذب نیز شکل آن‌ها تغییر چندانی نکرد و به همین دلیل قابلیت جذب دوباره خود را حفظ کرد.

برای تعیین ویژگی‌های معدنی جاذب مورد آزمایش از دستگاه پراش اشعه ایکس استفاده شد. نمودار ۲ و جدول ۳ نتایج حاصل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. عکس‌های SEM گرفته شده از جاذب پسماند پشم‌سنگ قبل و بعد از جذب
(الف) جاذب قبل جذب نیکل، (ب) جاذب بعد از جذب نیکل



نمودار ۲. نمودار حاصل از پراش پرتو ایکس

را شامل شدند. به نظر می‌رسد این پسماند عمدتاً از سیلیکات‌ها تشکیل شده است. خلل و فرج‌های پشم‌سنگ و ساختار تشکیل‌دهنده آن (سیلیس و سیلیکات‌ها و ...) باعث جذب نیکل شد.

ترکیب شیمیایی پسماند پشم‌سنگ مورد آزمایش از نتایج حاصل از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو X به دست آمد و در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این نتایج، SiO_2 ، CaO ، Al_2O_3 ، MgO ، K_2O و Fe_2O_3 حدود ۹۵٪ مواد تشکیل‌دهنده پسماند پشم‌سنگ

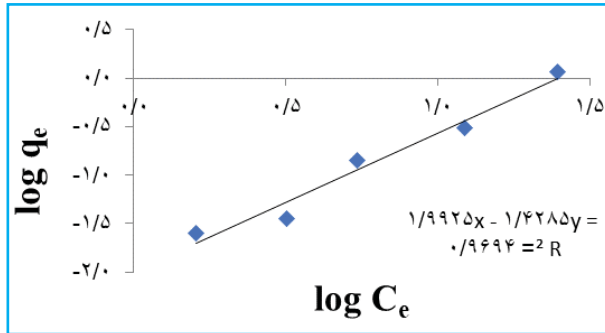
جدول ۳. آنالیز شیمیایی پشم‌سنگ

L.O.I	S	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ترکیب شیمیایی
۰/۱۶	۰/۶۴۸	۰/۲۱۱	۱/۰۱۵	۱/۲۶۵	۸/۵۲	۱/۱۵	۰/۹۶	۳۳/۵۲	۱/۳۳	۱۱/۸۷	۳۹/۰۶	درصد

$\text{pH} < 0.5$ مشاهده شد. همچنین بیش‌ترین میزان جذب پسماند پشم‌سنگ با اختلاف معنی‌داری در ۱۰ گرم در لیتر (به میزان ۷۴/۵۰٪، $\text{p} < 0.5$) و کم‌ترین مقدار آن با اختلاف معنی‌داری در

بیش‌ترین کارایی جاذب در بین pH های مختلف در $\text{pH}=5$ بود (به میزان ۸۹/۹۵٪، $\text{p} < 0.5$) و کم‌ترین مقدار آن با اختلاف معنی‌داری با سایر pH ها، در $\text{pH}=3$ (به میزان ۸/۱۶٪،

1. cryodesiccation

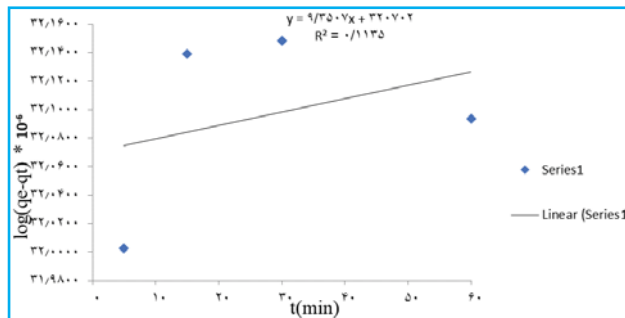


نمودار ۴. هم‌دمای جذبی فروندلیچ جذب نیکل به وسیله پسماند پشم‌سنگ

جدول ۴. ثابت‌های هم‌دمای جذبی لانگمویر و فروندلیچ برای جذب نیکل

مقدار	ضریب	مدل
۰/۰۱	$k_f(L/g)$	فروندلیچ
۱/۴۲۸۵	$1/n$	$\text{Log } q_e = \text{Log } k_f + 1/n$
۰/۹۶۹۴	R^2	$\text{Log } C_e$
۰/۷۷	$K_L(L/mg)$	لانگمویر
۰/۰۲	$b(mg/g)$	$c/x/m = 1/kb + c/b$
۰/۵۵	R^2	
۰/۹۸	R_L	

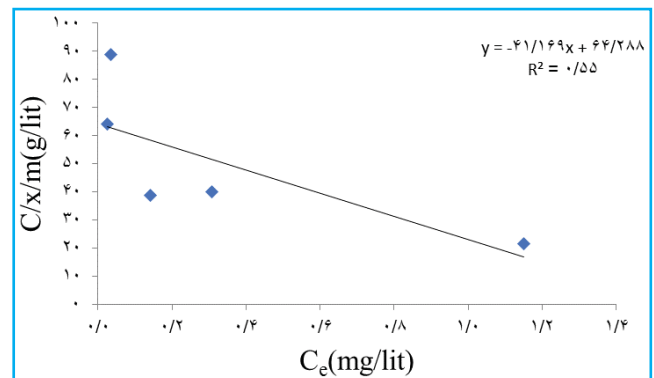
برازش مدل‌های سینتیکی شبه‌درجه اول و شبه‌درجه دوم برای جذب یون نیکل در نمودار ۵ و ۶ نشان داده شده است. مقادیر مربع ضرایب همبستگی (R^2) و ثابت مدل‌های سینتیکی مورد استفاده نیز در جدول ۵ مشخص گردید. با توجه به مقدار مربع ضرایب همبستگی به دست آمده برای مدل‌ها، سرعت جذب نیکل در مدل شبه‌مرتبه دوم برازش بهتری داشته است ($R^2=0/92$).



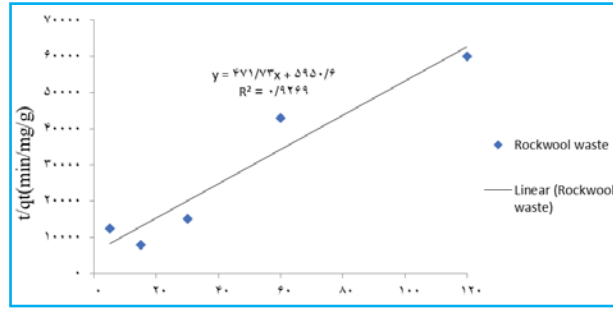
نمودار ۵. برازش سینتیک شبه‌مرتبه اول جذب نیکل توسط جاذب

۱ گرم در لیتر مشاهده شد (به‌میزان ۷۵/۲۶٪، $p < 0/05$). کم‌ترین میزان جذب نیکل در زمان ۵ دقیقه مشاهده شد (به‌میزان ۱۲/۱۷٪، $p < 0/05$) که اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر زمان‌ها داشت، اما بیش‌ترین کارایی جذب با اختلاف معنی‌داری در زمان ۹۰ دقیقه مشاهده شد (به‌میزان ۸۳/۶۵٪، $p < 0/05$). در نهایت افزایش بیشتر زمان تماس، تأثیری در افزایش کارایی جذب نداشت و نتایج نشان داد که جذب از زمان ۹۰ دقیقه به بالاتر اختلاف معنی‌داری با سایر زمان‌های تماس نداشت. میزان جذب پسماند پشم‌سنگ در ۵ گرم بر لیتر با اختلاف معنی‌داری بیشتر از سایر غلظت‌ها بود (به‌میزان ۸۱/۶۲٪، $p < 0/05$) و کم‌ترین مقدار آن با اختلاف معنی‌داری در ۱۰۰ گرم در لیتر مشاهده شد (به‌میزان ۵۵/۹٪، $p < 0/05$).

به‌منظور برازش مدل‌های جذبی بر روی هم‌دمای جذب باید به این نکته اشاره کرد که این هم‌دمای در اصل جذب سطحی مواد حل‌شونده بر روی مواد جامد را در دمای ثابت بر اساس واحدهای کمی توصیف می‌نمایند. هم‌دمای جذب سطحی نشان‌دهنده مقدار جذب به‌عنوان تابعی از غلظت تعادلی جذب‌شونده می‌باشند (۲۰). به این منظور برازش نتایج به‌دست آمده با مدل‌های جذبی لانگمویر و فروندلیچ برای نیکل در نمودار ۳ و ۴ نشان داده شده است. پارامترهای این مدل‌ها نیز در جدول ۸ ارائه شده است. پس از مقایسه ضرایب تبیین هم‌دمای خطی در جذب سطحی با یکدیگر، مدل فروندلیچ با $R^2=0/96$ انتخاب شد.



نمودار ۳. هم‌دمای جذبی لانگمویر جذب نیکل به وسیله پسماند پشم‌سنگ



نمودار ۶. برازش سینتیک شبه مرتبه دوم جذب نیکل توسط جاذب جدول ۵. پارامترهای مدل‌های شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم جذب نیکل

مدل شبه مرتبه دوم			مدل شبه مرتبه اول		
محاسبه شده Q_e (mg/g)	K_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	R^2	محاسبه شده Q_e (mg/g)	K_1 (min ⁻¹)	R^2
۰/۴	۰/۴۲۵	۰/۹۲	۰/۱۴	۰/۰۰۶	۰/۱۱

بحث

مطالعات آنالیز XRD نشان داد که این ماده به صورت آمورف یا غیرمتبلور بود. نتایج آنالیز XRF نشان داد که عناصر SiO_2 ، CaO ، Al_2O_3 ، MgO ، Fe_2O_3 ، K_2O حدود ۹۵٪ مواد تشکیل‌دهنده پشم‌سنگ را شامل می‌شوند. این مواد عمدتاً از سیلیکات‌ها تشکیل شدند و مواد تشکیل‌دهنده پشم‌سنگ مشابه مواد تشکیل‌دهنده زئولیت و سایر کانی‌های سیلیکاته بود که به عنوان جاذب استفاده می‌شوند. در مطالعه اردم و همکاران که بر روی استفاده از زئولیت طبیعی برای حذف فلزات سنگین انجام شد، عناصر تشکیل‌دهنده زئولیت به صورت CaO (۱/۳۱٪)، Fe_2O_3 (۱۳/۱۱٪)، Al_2O_3 (۶۹/۳۱٪)، SiO_2 (۲/۰۷٪)، MgO (۱/۱۳٪)، Na_2O (۰/۵۲٪) و K_2O (۲/۸۳٪) آورده شد که مشابه پشم‌سنگ بود (۲۹).

در مطالعه حاضر کم‌ترین میزان جذب نیکل در زمان ۵ دقیقه مشاهده شد (به میزان ۱۷/۱۲٪، $p < ۰/۰۵$) که اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر زمان‌ها داشت و بیش‌ترین میزان جذب با اختلاف معنی‌داری در زمان ۹۰ دقیقه مشاهده شد (به میزان ۶۵/۸۳٪، $p < ۰/۰۵$) که در نهایت افزایش بیش‌تر زمان تماس تأثیری در افزایش کارایی جذب نداشت. مطالعات انجام شده در این راستا

نشان داد که با افزایش زمان تماس، میزان حذف سیر صعودی داشت؛ چراکه مکان‌های فعال زیاد و خالی در سطح جاذب، با گذشت زمان اشغال شد و به همین علت روند افزایش جذب در زمان‌های اولیه بیشتر و در زمان‌های نهایی به علت کاهش ظرفیت جذب، میزان جذب کمتر بود. در مطالعه غلامی و همکاران که بر روی حذف نیکل و کادمیوم از آب‌های آلوده با استفاده از نانوذرات باگاس انجام شد، با افزایش زمان تماس، راندمان جذب روند صعودی داشت. در زمان‌های اولیه، سرعت جذب بسیار بالا بود؛ به طوری که در ۵ دقیقه ابتدایی حدود ۷۵٪ از نیکل و حدود ۶۵٪ از کادمیوم جذب شد و با گذشت زمان در حدود ۱۰ دقیقه راندمان جذب هر دو فلز نیکل و کادمیوم به ترتیب به ۸۰٪ و ۷۰٪ رسید. در نهایت بیش‌ترین زمان جذب و زمان تعادل برای هر دو فلز در زمان ۱۵ دقیقه به دست آمد و بعد از آن افزایش بیش‌تر زمان تماس تأثیری در افزایش میزان جذب نداشت (۳۰). در مطالعه سعادت‌ی و شوگردزاده که بر روی بررسی سینتیکی و ترمودینامیکی جذب سطحی نیکل توسط نانو کامپوزیت سیلیکا آئروژل-کربن اکتیو انجام شد، جذب تا زمان ۹۰ دقیقه افزایش داشت و پس از آن جذب ثابت ماند (۳۱). در مطالعه حیدری و همکاران که بر روی حذف مخلوط یون‌های فلزی سرب، نیکل و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب نانو حفره MCM-41 اصلاح شده صورت گرفت، جذب یون‌های کادمیوم، نیکل و سرب دارای سرعت بالایی بود؛ به طوری که سرب در مدت ۱۰ دقیقه به حداکثر جذب تعادلی رسید و کادمیوم و نیکل در مدت ۳۰ دقیقه به ۸۰٪ و ۵۰٪ جذب تعادلی رسیدند (۳۲). در مطالعه موحد و همکاران که بر روی حذف نیکل از محلول‌های آبی با استفاده از غشاء توخالی فیبر زئولیت انجام شد، بیش‌ترین درصد جذب به میزان ۶۳٪ در زمان تماس ۱۸۰ دقیقه رخ داد (۳۳). در مطالعه لینگلین و همکاران که به بررسی حذف کروم با استفاده از کامپوزیت پشم سنگ/نانو اکسید آهن پرداختند، بیش‌ترین بازده جذب کروم شش ظرفیتی در مدت ۳۰ دقیقه به میزان ۱۹۷/۶۹ میلی‌گرم بر گرم به دست آمد (۳۴).

pH محلول یکی از عوامل مهم در مطالعه جذب سطحی

یون‌های فلزی بود. وضعیت قرار گرفتن یون‌های فلزی در محلول به شدت وابسته به pH بود. هم‌چنین محلول‌های اسیدی و بازی می‌توانند بر ترکیب و خواص سطح جاذب تأثیر بگذارند. بیش‌ترین میزان جذب با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایرین، در pH=۵ (میزان ۸۹/۹۵٪، $p < ۰/۰۵$) و کم‌ترین مقدار آن با اختلاف معنی‌داری در pH=۷ و pH=۹ مشاهده شد (میزان ۸۰/۹۰ و ۸۲/۶۶٪، $p < ۰/۰۵$) که این دو pH با یک‌دیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند. علت را می‌توان به این‌صورت توضیح داد که در pH‌های پایین مقادیر H_3O^+ با یون‌های فلزی برای جذب در جایگاه‌های جذب رقابت نمود و با اشغال این جایگاه‌ها باعث کمتر شدن ظرفیت جاذب شدند. در نتیجه درصد جذب کاهش یافت. در مطالعه حیدری و همکاران که بر روی حذف مخلوط یون‌های فلزی سرب، نیکل و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب نانو حفره MCM-41 اصلاح شده صورت گرفت، با افزایش غلظت اولیه یون‌های فلزی میزان جذب این یون‌ها کاهش یافت، اما ظرفیت جذب جاذب افزایش یافت. با افزایش غلظت اولیه یون‌های فلزی، تعداد یون‌های در حال رقابت برای واکنش با گروه‌های فعال آمین سطح جاذب بیشتر شد و در نتیجه مکان‌های فعال جاذب اشباع گشت (۳۲). در مطالعه سعادت‌ی و شوگردزاده که بر روی خصوصیات سینتیکی و ترمودینامیکی جذب سطحی نیکل توسط نانو کامپوزیت سیلیکا آئروژل -کربن اکتیو انجام شد، عمده جذب یون نیکل در غلظت‌های پایین نیکل رخ داد و با افزایش غلظت، جذب کاهش یافت. این پدیده را می‌توان چنین توصیف کرد که با افزایش غلظت، مکان‌های موجود بر روی سطح جاذب کمتر می‌شود. هم‌چنین محدودیت ابعاد حفره‌های جاذب و دافعه نیروهای الکتروستاتیک بین بارهای مثبت یون‌های ماده جذب‌شونده، باعث کاهش میزان جذب شده و در نتیجه درصد حذف یون‌های فلزی کاهش یافت (۳۱). در پژوهش آلوما و همکاران که به حذف یون‌های نیکل (II) از محلول‌های آبی توسط جذب زیستی بر روی باگاس نیشکر پرداختند، آزمایش‌های ناپیوسته برای بررسی جذب نیکل بر روی جاذب باگاس نیشکر انجام شد (با در نظر

یون‌های فلزی بود. وضعیت قرار گرفتن یون‌های فلزی در محلول به شدت وابسته به pH بود. هم‌چنین محلول‌های اسیدی و بازی می‌توانند بر ترکیب و خواص سطح جاذب تأثیر بگذارند. بیش‌ترین میزان جذب با اختلاف معنی‌داری نسبت به سایرین، در pH=۵ (میزان ۸۹/۹۵٪، $p < ۰/۰۵$) و کم‌ترین مقدار آن با اختلاف معنی‌داری در pH=۷ و pH=۹ مشاهده شد (میزان ۸۰/۹۰ و ۸۲/۶۶٪، $p < ۰/۰۵$) که این دو pH با یک‌دیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند. علت را می‌توان به این‌صورت توضیح داد که در pH‌های پایین مقادیر H_3O^+ با یون‌های فلزی برای جذب در جایگاه‌های جذب رقابت نمود و با اشغال این جایگاه‌ها باعث کمتر شدن ظرفیت جاذب شدند. در نتیجه درصد جذب کاهش یافت. در مطالعه حیدری و همکاران که بر روی حذف مخلوط یون‌های فلزی سرب، نیکل و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب نانو حفره MCM-41 اصلاح شده صورت گرفت، با افزایش pH محلول از ۱/۵ تا ۵٪ حذف یون‌های مذکور افزایش یافت؛ به‌طوری‌که در pH=۱/۵ کم‌ترین میزان جذب و در pH=۵ بیش‌ترین میزان جذب به دست آمد (۳۲). در مطالعه آمیلتن و همکاران که بر روی حذف یون‌های نیکل از محلول‌های آبی با استفاده از دی‌اکسید منگنز حاصل از لجن تصفیه شده صورت گرفت، در بازه pH بین ۲ تا ۸ میزان جذب در pH برابر با ۷/۵ بیش‌ترین میزان جذب را داشت؛ به‌طوری‌که جذب فلز از ۶۶/۱۹ میلی‌گرم در لیتر در pH=۴/۵ به ۷۳/۳۹ میلی‌گرم در لیتر در pH=۷/۵ رسید (۳۵). در مطالعه سعادت‌ی و شوگردزاده که بر روی بررسی سینتیکی و ترمودینامیکی جذب سطحی نیکل توسط نانو کامپوزیت سیلیکا آئروژل -کربن اکتیو انجام شد، در pH=۵ بیش‌ترین میزان جذب و در pH=۲ کم‌ترین میزان جذب صورت گرفت که به دلیل این بود که در pH‌های پایین مقادیر H^+ با یون‌های فلزی برای جذب در جایگاه‌های جذب رقابت کرد.

در مطالعه حاضر با افزایش غلظت اولیه نیکل در پساب، مقدار جذب تا غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر افزایش یافت؛ به‌گونه‌ای که در غلظت ۵ گرم در لیتر، بیش‌ترین درصد جذب به دست آمد (میزان

گرفتن اثر زمان تماس، غلظت اولیه یون‌های نیکل، pH محلول و دما). فرآیند جذب با مدل سینتیکی شبه‌مرتبه دوم به خوبی توضیح داده شد. حداکثر ظرفیت جذب برای باگاس نیشکر برای حذف نیکل حدود ۲ میلی‌گرم در گرم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در $pH=5$ بود (۳۷).

در مطالعه حاضر بیش‌ترین میزان جذب پسماند پشم‌سنگ با اختلاف معنی‌داری در ۱۰ گرم در لیتر (به میزان $0.74/50$ ، $p < 0.05$) و کم‌ترین مقدار آن با اختلاف معنی‌داری در ۱ گرم در لیتر مشاهده شد (به میزان $0.26/75$ ، $p < 0.05$). با افزایش مقدار جاذب، محل‌های در دسترس برای برهم‌کنش جاذب-حل‌شونده افزایش یافت و در نتیجه درصد جذب افزایش یافت، ولی مقدار فلز جذب شده به واحد جرم جاذب یا ظرفیت جذب کاهش یافت. ممکن است کاهش ظرفیت جذب، دو دلیل داشته باشد، ۱- افزایش مقدار جاذب در حجم و غلظت ثابت محلول باعث اشباع شدن محل‌های جذب سطحی در طول فرآیند جذب خواهد شد (۳۸). در مطالعه حیدری و همکاران که بر روی حذف مخلوط یون‌های فلزی سرب، نیکل و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب نانو حفره MCM-41 اصلاح شده صورت گرفت، در بازه بین $0.125/10$ تا $0.125/10$ گرم در لیتر جاذب در مقدار ۵ گرم در لیتر بیش‌ترین میزان جذب را داشت؛ به گونه‌ای که غلظت فلزات در محلول به صفر رسید (۳۲). در مطالعه سعادت‌تی و شوگردزاده که بر روی خصوصیات سینتیکی و ترمودینامیکی جذب سطحی نیکل توسط نانو کامپوزیت سیلیکا آئروژل-کربن اکتیو انجام دادند، بیش‌ترین درصد حذف یون نیکل دو ظرفیتی با مقدار $0.1/1$ گرم از جاذب رخ داد، زیرا با افزایش مقدار جاذب، محل‌های در دسترس برای برهم‌کنش جاذب-حل‌شونده افزایش یافت و در نتیجه درصد جذب افزایش یافت ولی مقدار فلز جذب شده به واحد جرم جاذب یا ظرفیت جذب کاهش یافت (۳۱). به‌منظور بررسی امکان دست‌یابی به بیشینه ظرفیت جذب جاذب، نتایج به‌دست آمده با ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیچ مدل شدند. برای فلز نیکل به‌علت بالاتر بودن مقدار R^2 (به میزان $0.96/0$) با

مدل فروندلیچ تطابق بیشتری داشت. ضریب n مدل فروندلیچ که معیار شدت جذب است، برای جذب نیکل توسط پسماند پشم سنگ مقدار $1/42$ تعیین شد. انحراف n ، از واحد $1n$ ، در نشان‌دهنده جذب غیرخطی بر روی سطوح غیرهمگن بود (۳۹). در این نوع هم‌دما، با افزایش غلظت ماده جذب سطحی شونده ابتدا شیب افزایش یافت، ولی در نهایت با پر شدن مکان‌های جذب سطحی، کاهش یافت و به صفر رسید. این نوع هم‌دما، نشان داد که سطوح پسماند در غلظت‌های کم نیکل تمایل کمی به جذب آن داشتند و این تمایل در غلظت‌های بیشتر نیکل افزایش یافت. ضریب K_f نیز که معیاری از قدرت جذب بود برابر $0.1/0.1$ لیتر بر گرم بود. در مطالعه سعادت‌تی و شوگردزاده که بر روی خصوصیات سینتیکی و ترمودینامیکی جذب سطحی نیکل توسط نانو کامپوزیت سیلیکا آئروژل-کربن اکتیو انجام دادند، با توجه به نتایج ایزوترم‌های جذب رسم شده، به این نتیجه رسیدند که معادله ایزوترم جذب لانگمویر نسبت به سایر معادله‌های ایزوترم جذب دارای ضریب همبستگی بالاتر و مناسب‌تری بود ($R^2=0.9942$) (۳۱). در مطالعه حیدری و همکاران که بر روی حذف مخلوط یون‌های فلزی سرب، نیکل و کادمیوم از محلول‌های آبی با استفاده از جاذب نانو حفره MCM-41 اصلاح شده صورت گرفت، داده‌های آزمایش از مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ تبعیت کرد. حداکثر ظرفیت جذب با مدل لانگمویر برای یون‌های فلزات سرب، کادمیوم و نیکل به‌ترتیب برابر با $57/74$ ، $18/25$ و $12/36$ بود (۳۲). در مطالعه غلامی و همکاران که بر روی حذف نیکل و کادمیوم از آب‌های آلوده با استفاده از نانوذرات باگاس انجام شد، از بین مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و ردلیچ-پتerson مدل ردلیچ-پتerson داده‌های آزمایش را بهتر توصیف کرد (۳۰).

سینتیک جذب برای تعیین مکانیسم کنترل فرآیندهای جذب سطحی استفاده می‌شود. برای درک دینامیک واکنش و پیش‌بینی وضعیت جذب با زمان، اطلاع از سینتیک فرآیندها بسیار مهم است (۴۰). نتایج جذب برای فلز نیکل به وسیله پسماند پشم‌سنگ نشان داد که سرعت جذب بسیار سریع می‌باشد، اما زمان تعادل

داده شده، به علت بالاتر بودن میزان R^2 هم‌دماهای جذب نیکل دو ظرفیتی را به وسیله پسماند پشم‌سنگ به خوبی توصیف کرد. در نهایت مشخص شد که جاذب پسماند پشم‌سنگ کارایی بالایی در حذف نیکل از محلول‌های آبی داشت. نتایج جذب برای فلز نیکل به وسیله پسماند پشم‌سنگ نشان داد که سرعت جذب بسیار سریع می‌باشد، اما زمان تعادل برای جذب این فلزات توسط جاذب مورد نظر ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بررسی سینتیک جذب نشان‌دهنده برازش بهتر سینتیک شبه‌مرتبه دوم برای جذب یون نیکل به علت بالاتر بودن میزان R^2 می‌باشد. در نهایت نتایج نشان داد پشم‌سنگ کارایی خوبی در جذب نیکل از پساب ساختگی داشته است.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسنده مقاله برخود لازم میدانند از ریاست پژوهشکده پسماند و پساب دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) به جهت کمک در انجام پروژه و در اختیار قرار دادن امکانات برای انجام این پژوهش، کمال تقدیر و تشکر را بنماید.

برای جذب این فلزات توسط جاذب مورد نظر ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد. بررسی سینتیک جذب نشان‌دهنده برازش بهتر سینتیک شبه‌مرتبه دوم برای جذب یون نیکل به علت بالاتر بودن میزان R^2 می‌باشد. بر این اساس مرحله محدود کننده سرعت واکنش، فرآیند جذب شیمیایی در سطح جاذب بوده است، یعنی محلی که فرآیند جذب نیکل از محلول به واسطه برهمکنش‌های فیزیکی-شیمیایی و تبادل الکترون بین فاز محلول (نیکل) و فاز جامد (جاذب) به وقوع پیوسته است (۴۱). حداکثر مقدار جذب پیشنهادی مدل نیز نزدیک به حداکثر جذب اندازه‌گیری شده می‌باشد. در مطالعه دوایری و راوایفح که بر روی حذف کبالت و نیکل از فاضلاب با استفاده از ژئولیت و بنتونیت ارزان قیمت انجام دادند، سینتیک جذب برازش بهتری با مدل شبه‌مرتبه دوم داشت (۴۲).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه کارایی جذب نیکل (II) از محلول‌های آبی با استفاده از پسماند کارخانه پشم‌سنگ بررسی شد. آنالیزهای XRD، SEM و XRF برای شناسایی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جاذب استفاده شد. در این مطالعه پارامترهای مؤثر در جذب شامل: pH، مقدار جاذب، غلظت جذب‌شونده و زمان بررسی شد. در این پژوهش حذف نیکل به وسیله پسماند پشم‌سنگ در بخش‌های جداگانه صورت گرفت. در گام نخست به بررسی اثر زمان تماس در ۵ سطح (۵، ۱۵، ۳۰، ۹۰، ۱۲۰ دقیقه) بر مقدار جذب نیکل پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان تماس تا ۹۰ دقیقه، امکان جذب نیکل توسط جاذب افزایش یافت. در دومین گام اثر چهار سطح pH (۳، ۵، ۷، ۹) بر جذب توسط پسماند پشم‌سنگ مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که در $pH=5$ ، بیش‌ترین میزان جذب فلز اتفاق افتاد. در سومین گام تأثیر غلظت اولیه بر میزان جذب نیکل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش غلظت اولیه یون‌های نیکل در پساب، سبب افزایش میزان جذب شد. در چهارمین گام اثر مقدار گرم جاذب بر میزان جذب برای نیکل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش میزان جاذب، میزان جذب افزایش یافت. معادله فروندلیچ برازش

References

- 1- Zhanga H, Huang F, Lick DL, Shia P. Highly efficient removal of Cr(VI) from wastewater via adsorption with novel magnetic Fe₃O₄@C/MgAl-layered double-hydroxide. *Chinese Chemical Letters* 2015; 26: 1137–1143.
- 2- Shakeri A. Determination of the Origin and Phenomenon Potential in Contaminated Soils in Oil Fields, Bushehr Province Iran. *Engineering Geology Journal* 2015; 2675-2696. [In Persian]
- 3- Shakeri, A, Shakeri R, Mehrabi B. Investigation of Contamination of Chromium, Nickel, Arsenic and Chromium in Water, Sediment and Fish Shahid Rajae Dam of Mazandaran, North of Iran, *Ecology* 2015, 41(1): 24-13. (In Persian)
- 4- Qavidel A, Moatar F. Investigation of lead, zinc and nickel in river basins of Anzali wetland River study (Goharrood), *Environmental science and technology* 2014, 1393: 96-89. (In Persian)
- 5- Zhao P, Removal of lead from aqueous solutions by vermiculite. Faculty of Engineering, University of Regina, Regina, Saskatchewan 2009.
- 6-Talout HA, El def vow NM, Abulnour AG, and Hani HA. *International Conference On Environmental Science and Technology* 2011.
- 7- luoto K, Holopainen M, Kangas J, Pentti S. Dissolution of Short and Long Rockwool and Glasswool Fibers by Macrophages in flowthrough Cell Culture. *Environmental Research* 1998. 78: 25-37.
- 8- Pfretzschner J, Rodriguez RM. Acoustic properties of rubber crumbs, *Polymer Testing* 1999. 18(22): 81-92.
- 9- Thanh D, Nguyen a, Pavel b, Jana Vejpravova c, Hong Nguyen Vu, Jaromír b, Lederer a, Tasnim M. Removal of copper and nickel from water using nanocomposite of magnetic hydroxyapatite nanorods, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2018; 456: 451-460.
- 10- Yixin Zh, Jixiang D, Fanhui, G, Zhongye Sh, Jianjun Wu. Zeolite Synthesized from Coal Fly Ash Produced by a Gasification Process for Ni²⁺ Removal from Water *Minerals* 2018; 8(3): 2-14.
- 11- Sa'ati Z, Shougerzadeh M. The kinetic and thermodynamic study of nickel adsorption (II) by silica nanocomposite anorglycarbon-active, *Journal of Environmental Science and Technology* 2013, 20(4): 1-11. (In Persian)
- 12- Faghani HA, Heshmati JM. Investigation of phenol pigment removal using magnetite nanobacterium from aqueous solution, *journal of soil and water protection research* 1397; 25(6): 105-121. (In Persian)
- 13- Bafkar A, Baboli N. Effect of nitrate removal from aqueous solution using oak leaf nano structure adsorbent, *journal of soil and water protection research* 1397; 25(5): 233-247. (In Persian)
- 14-Kumar H, Rni R. Structural Characterization of Silver Nanoparticles Synthesized by Micro emulsion Route, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* 2013; 3: 2277-3754.
- 15- Osasona I, Aiyedatiwa K, Johnson J, Faboya OL. Activated Carbon from Spent Brewery Barley Husks for Cadmium Ion Adsorption from Aqueous Solution, *Indonesian Journal of Chemistry* 2018; 18: 145 - 152.
- 16-Huang Y, Zhao R, Liu W, Li Y, Zhang P, Wang Sh, Wang L. Using pretreated chestnut endothelium to adsorb lead and cadmium ions from water, *Saudi Journal of Biological Sciences* 2018; 25: 1154- 1162.
- 17- Malek A, Farooq S. Comparison of isotherm models for hydrocarbon adsorption on activated carbon. *AIChE Journal* 1996; 42: 3191– 3201.
- 18- Hall K, Eagleton R, Acrivos L, Vermeulen A. Pore and solid diffusion kinetics for fixed-bed adsorption under Constant- Pattern Condition, *Industrial & Engineering Chemistry fundamentals* 1996; 5: 212-223.
- 19- Roop ChB, Goyal M. *Activated Carbon Adsorption*, CRC Press; 497.
- 20-Rinkumoni B, Deepa K, Anindita G, Sunayana B, Ritusmita G, Jaehong Sh, Naznin A, Begum M. Efficacy and field applicability of Burmese grape leaf extract(BGLE) for cadmium removal An implication of metal removal from natural water, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2018; 147: 585–593.
- 21- Febrianto J, Kosasih AN, Sunarso J, Yi-Hsu J, Indraswati N, Ismadji S. Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: a summary of recent studies. *Journal of Hazardous Materials* 2009; 162: 616-645.
- 22-Essington ME. *Soil and water Chemistry An Intergrative Approach*. CRC Press, Boca Ration, Florida 2004.
- 23- Namasivayam C, Kavitha D. Adsorptive removal of 2,4-dichlorophenol from aqueous solution by low-cost carbon from an agricultural solid waste: coconut coir pith, *Sep. Sci. and Tech* 2005; 39:1407-1425.
- 24- Tan IAW, Ahmad AL, Hameed BH. Adsorption of basic dye on high surface-area activated carbon prepared from coconut husk: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies, *J.Hazard. Mater* 2008, 154: 337-346.
- 25- Sen Gupta S, Bhattachryya KG. Kineticvs of adsorption of metal ions on inorganic materials: A rewiew ,*Adv. Colloid*

- and interface Sci 2011; 162: 39-58.
- 26- Ho YS, Mckay G. Sorption of dye from aqueous solution by peat. Chem. Eng. J 1998, 70: 115-124.
- 27- Ho YS. Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reaction, Scientometrics 2004, 59: 171-177.
- 28- Ho YS. Review of second-order models for adsorption systems, J. Hazard. Mater 2006, 136: 103-111.
- 29- Erdem E, Karapinar N, Donat R. The removal of heavy metal cations by natural zeolites, Journal of Colloid and Interface Science 2004; 280: 309-314.
- 30- Gholami Z, Hooshmand A, Naseri A, Pourreza N. Removal of nickel and cadmium from contaminated water using bagasse nanoparticles, drinking water science and engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz 2015; 36 (2): 97-107. (In Persian)
- 31- Saadati Z, Shogarzadeh M. Kinetic and thermodynamic studies of nickel (II) adsorption by activated carbon silica nanocomposite, Journal of Environmental Science and Technology 2015, 20(4): 11-1. (In Persian)
- 32- Heidari A, Younesi H, Mehraban Z. Removal of lead, nickel and cadmium ions from aqueous solutions using modified MCM-41 nanocomposite, Journal of Water and Wastewater 2010, 21(1): 33-25. (In Persian)
- 33- Norfazilah M, Norfazliana A, Mukhlis A, Khairul R, Hamimah A, Abd Aziz A, Mohd H, Dzarfan O, Juhana J, Fauzi Ismail A. Removal of nickel from aqueous solution using supported zeolite-Y hollow fiber membranes, Environmental science and pollution research 2018; 25: 19054-19064.
- 34- linglin Zh, Rongrong L, Guilong Zh, Dongfang W, Dongqing C, Zhengyan W. Zero-valent iron nanoparticles supported by functionalized waste rock wool for efficient removal of hexavalent chromium, Chemical Engineering Journal 2018; 339: 85-96.
- 35- Amilton B, Botelho J, David B, Dreisinger C. R. A Review of Nickel, Copper, and Cobalt Recovery by Chelating Ion Exchange Resins from Mining Processes and Mining Tailings, Mining Metallurgy and Exploration 2019; 36: 199-213.
- 36- El-Ashtoukhy ESZ, Amin NK, Abdelwahab O. Removal of lead(II) and copper(II) from aqueous solution using pomegranate peel as a new adsorbent, Desalination 2008, 223: 162-173.
- 37- Aloma ML, Rodriguez B. Removal of nickel(II) ions from aqueous solutions by biosorption on sugarcane bagasse, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 2012; 43: 275-281.
- 38- Mandu L, Bin G, Ying Y, Yingwen, X, Andrew Z, Pratap P, Xinde C, Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass, Bioresource Technology 2012; 110: 50-56.
- 39- Ding Z, Xin H, Yongshan W, Shengsen W, Bin G. Removal of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: Batch and column tests, Journal of Industrial and Engineering chemistry 2016; 33: 239-245.
- 40- Mungapati VS, Yarramuthi V, Nedavala SJ, Alla SR, Abburi K. Biosorption of Cu(U), Cd(U) Pb(U) by Acacia leucocephala bark powder Kinetics, equilibrium and thermodynamics. Chemical Engineering J 2010; 157(2-3): 357-365.
- 41- Ho YS, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes, Process Biochem 1999; 34: 451-465.
- 42- Al Dwairi RA, Al-Rawajfeh A. Removal of cobalt and nickel from wastewater by using Jordan low-cost zeolite and bentonite. Journal of the university of chemical technology and metallurgy 2012; 47(1): 69-76.