



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

## بهینه سازی حذف نیکل از محلول‌های آبی توسط بیوچار اصلاح شده به روش فیزیکی

محبوب صفاری\*

گروه محیط زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

**زمینه و هدف:** امروزه استفاده از بیوچار، به عنوان یک جاذب نوین و مناسب به منظور حذف آلاینده‌های غیرآلی از منابع آبی، رشد چشم‌گیری یافته است. مطالعه حاضر به منظور ارزیابی اثرات اصلاحات فیزیکی بیوچار در مقایسه با بیوچار غیر اصلاح شده، بر راندمان حذف نیکل در محلول‌های آبی، متاثر از فاکتورهای موثر بر حذف نیکل، انجام گرفت.  
**روش بررسی:** پس از تولید بیوچار میوه سرو (RB)، ذرات RB ( $> 164 \mu\text{m}$ ) با استفاده از دستگاه آسیاب سیاره‌ای به ابعاد بسیار کوچک ( $> 26 \mu\text{m}$ ) خرد شد (BMB) و پس از بررسی خصوصیات مختلف آن‌ها توسط تکنیک‌های SLS، BET، FTIR، SEM، کاربرد RB و BMB در بهینه سازی حذف نیکل از محلول‌های آبی با استفاده از روش سطح پاسخ (مدل باکس-بنکن)، مورد ارزیابی قرار گرفت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰  
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴  
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

**یافته‌ها:** بر اساس نتایج، اصلاح فیزیکی بیوچار (BMB) سبب کاهش ۶/۲ برابری اندازه ذرات، افزایش ۴/۹ برابری سطح ویژه، افزایش (حاوی اکسیژن) و کاهش (گروه‌های عامل آلیفاتیک و هیدروکسیل کشتی) گروه‌های عامل ویژه و مورفولوژی سطح ریزدانه‌تر، در مقایسه با RB شد. کاربرد BMB در محلول آبی سبب افزایش ۹/۷ درصدی (به طور متوسط) از حذف نیکل، در مقایسه با نمونه RB شد. برآزش داده‌های بدست آمده از حذف نیکل در مدل باکس-بنکن در هر دو جاذب، نشان از پیش بینی مناسب این مدل در بهینه سازی حذف نیکل از محلول‌های آبی دارد.  
**نتیجه‌گیری:** با توجه به نتایج این پژوهش، اصلاح فیزیکی بیوچار، به عنوان یک روش ساده، ارزان و دوست دار محیط زیست، با توجه به افزایش راندمان حذف آلاینده نیکل، می‌تواند روشی مناسب در فعال سازی بیوچارها معرفی شود که تحقیقات بیشتر بر اساس نوع بیوچار و آلاینده‌ها مختلف را طلب می‌کند.

**واژگان کلیدی:** بیوچار اصلاح شده، روش سطح پاسخ، جذب سطحی، حذف نیکل، محلول‌های آبی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:  
mahboobsaffari@gmail.com

Please cite this article as: Saffari M, Optimization of nickel removal from aqueous solutions by physical-modified biochar. Iranian Journal of Health and Environment. 2023;16(3):445-58.

## مقدمه

فلزات سنگین، بر خلاف آلاینده‌های آلی، غیر قابل تجزیه بوده و اثرات مخرب طولانی مدتی را در عملکرد متابولیسمی موجودات زنده بجای می‌گذارند. آلودگی آب به این دسته از آلاینده‌ها، یکی از مهمترین چالش‌های مهم محیط زیستی قرن حاضر محسوب می‌شود که می‌تواند سلامت جوامع بشری را با خطر جدی روبرو کند. نیکل، یکی از فلزات سنگین است که در صنایعی نظیر تولید فولاد ضدزنگ، آلیاژها و باتری‌های قابل شارژ مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱). این عنصر، به طور معمول به صورت یون دو ظرفیتی در محیط زیست وجود دارد که غلظت بالای آن سبب ایجاد سرطان‌های ریه، بینی و استخوان در انسان می‌شود (۱).

امروزه روش‌های مختلفی به منظور پالایش آب‌های آلوده به فلزات سنگین کاربرد دارد که در مقادیر کم آلودگی، روش جذب سطحی، یکی از مقرون به صرفه‌ترین و موثرترین روش‌های حذف فلزات سنگین محسوب می‌شود (۲). در روش جذب سطحی، جاذبی انتخاب می‌شود که علاوه بر جذب قابل قبول از آلاینده، ارزان و سازگار با محیط زیست باشد. امروزه با توجه به قیمت بالای برخی جاذب‌های رایج (نانوذرات، کربن فعال، پلیمرها و ...) در حذف فلزات سنگین از محلول‌های آبی، استفاده از ترکیبات طبیعی دوستدار محیط زیست و ارزان قیمت همچون مواد استحصالی از ضایعات کشاورزی رو به افزایش است. راندمان پایین برخی از این جاذب‌ها در حذف برخی از فلزات سنگین سبب شده است که راهکارهای مختلف فعال‌سازی به منظور افزایش خصوصیات جذبی جاذب‌ها، به کار گرفته شود (۳). یکی از روش‌های فعال‌سازی ترکیبات طبیعی آلی، استفاده از فرایند پیرولیز (Pyrolysis) و تولید ماده‌ای به نام بیوجار است که طی آن زیست توده (Biomass) طبیعی آلی، تحت شرایط بی‌هوازی یا اکسیژن کم، در دمای بالا سوزانده شده و در نتیجه آن، سطح ویژه و گروه‌های عامل زیست توده متحمل تغییراتی می‌شود (۳). بیوجار (زغال زیستی) به عنوان یک ماده جامد پایدار، غنی از کربن،

متخلخل با سطح ویژه بالا، سازگار با محیط زیست و ارزان قیمت معرفی می‌شود که تحقیقات در خصوص جذب آلاینده‌ها با این جاذب رو به افزایش است. در مطالعات مختلفی نشان داده شده است که جذب برخی آلاینده‌ها توسط برخی از بیوجارها از کارایی بالایی برخوردار نبوده و نیاز می‌باشد که تغییرات ویژه ای در ساختار این جاذب به وجود آید (۳). در تحقیقات انجام گرفته نشان داده شده است، اصلاحات فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی می‌تواند به نحو بسیار موثر، تغییرات شگرفی بر میزان کمی جذب آلاینده‌ها توسط بیوجار داشته باشد (۳، ۴). اصلاحات شیمیایی بیوجار به دلیل مصرف و یا رهاسازی مواد شیمیایی یا نانومواد و هزینه بالای تولید در مقیاس وسیع از محدودیت‌های زیادی برخوردار است (۵). در طرف مقابل، در روش اصلاح فیزیکی، نیاز به مصرف مواد شیمیایی و انرژی زیادی نیست و بیوجارها به اندازه ذرات میکرو-نانو با سطح ویژه و تخلخل بیشتر، تبدیل می‌شوند. روش اصلاح فیزیکی سازگار با محیط زیست بوده و کاهش اندازه ذرات بیوجار با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای انجام می‌شود (۵). در مطالعه انجام شده توسط Peterson و همکاران، انجام فرایند کاهش اندازه ذرات بیوجار توسط آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای سبب افزایش سطح ویژه بیوجار از  $3 \text{ m}^2/\text{g}$  به  $25-194 \text{ m}^2/\text{g}$  شده بود که این افزایش با توجه به روش انجام آسیاب (محیط تر و خشک آسیاب) متفاوت بوده است (۶).

بررسی جذب فلزات در محلول‌های آبی توسط هر جاذب، متأثر از فاکتورهای مختلفی از جمله غلظت آلاینده، سطوح کاربردی جاذب، قدرت یونی محلول، زمان تماس جاذب با آلاینده، pH محلول و دمای محلول است که در پیدا کردن حداکثر راندمان حذف هر عنصر توسط هر جاذب موثر است (۳). بررسی هر یک از این فاکتورها در سطوح مختلف به صورت جداگانه و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان حذف با روش‌های ساده آماری، نه تنها بسیار پیچیده و ناممکن می‌باشد، بلکه هزینه و زمان زیادی را جهت انجام آزمایشات در پی دارد. لذا برای غلبه بر این مشکل، از روش ریاضی سطح پاسخ به

در مدت فواصل زمانی مختلف (۱ تا ۶ h)، به صورت جداگانه و بدون اضافه کردن مواد افزودنی آسیاب شدند. پس از آسیاب کردن نمونه‌ها، مقادیر فراوانی اندازه ذرات با استفاده از روش اندازه گیری ذرات با روش پراکندگی استاتیک نور لیزر (Static light scattering (SLS): FRITTSCH Laser Particle Sizer ANALYSETTE 22 NanoTec) بررسی و در نهایت از میان بیوجارهای آسیاب شده، بیوجار اصلاح شده پس از مدت زمان آسیاب ۶ h (BMB)، به منظور مقایسه با بیوجار خام (بدون آسیاب شدن)، در مطالعه حاضر انتخاب گردید.

#### – خصوصیات بیوجارهای مورد مطالعه

بررسی خصوصیات بیوجار خام و بیوجار مهندسی شده فیزیکی، با استفاده از تکنیک‌های طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR: TENSOR II from Bruker) به منظور شناسایی گروه‌های عامل، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM: TESCAN MIRA3) به منظور شناسایی ساختار مورفولوژی سطح و شناسایی BET (BELSORP Mini II) به منظور تعیین مقادیر سطح ویژه و میزان تخلخل، انجام گرفت.

– بهینه سازی حذف نیکل در حضور بیوجارهای مورد مطالعه  
به منظور بررسی اثرات جاذب‌های تولید شده بر میزان حذف نیکل در محلول‌های آبی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های غیر پیوسته (Batch) بر پایه روش سطح پاسخ (Response surface methodology (RSM)) برای یافتن تأثیر متغیرهای مستقل (غلظت اولیه Ni، pH محلول، میزان جاذب، زمان تماس) بر حذف نیکل از محلول‌های آبی انجام شد. بدین منظور، یک محلول ۲۵ mL حاوی سطوح مختلف نیکل (۳۰، ۶۰، ۹۰ mg/L) تهیه شده از نیترات نیکل  $(\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$  با pH مورد نظر (۳، ۵، ۷) تنظیم شده توسط محلول‌های ۰/۱ M NaOH و HCl در لوله‌های سانتریفیوژ استریل ریخته شد و جاذب‌های مورد مطالعه در سطوح متفاوت (۲/۵، ۵، ۷/۵ g/L) به هر لوله به طور جداگانه

منظور مطالعات بهینه‌سازی استفاده می‌شود (۳). روش سطح پاسخ، یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. در این گونه روش‌ها، هدف بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است؛ که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است (۷). در هر آزمایش، تغییرات در متغیرهای ورودی به منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شود. بر اساس مطالعات گذشته انجام شده، تا بحال هیچ‌گونه مقایسه اثربخشی فرایند اصلاح فیزیکی بیوجار بر جذب یک کاتیون عنصری (نیکل) در محیط آبی انجام نگرفته است. بر این اساس، در مطالعه حاضر تلاش شد، پس از شناخت و مقایسه خصوصیات بیوجار خام میوه سرو (RB) و بیوجار اصلاح شده فیزیکی (BMB) حاصل از آن، به بررسی حذف نیکل در حضور این دو جاذب از محیط آبی، متأثر از فاکتورهای مختلف (غلظت آلاینده، دوز جاذب، زمان تماس جاذب با آلاینده، pH محلول) با استفاده از روش سطح پاسخ، پرداخته شود.

## مواد و روش‌ها

### – سنتز بیوجار خام و بیوجار اصلاح شده فیزیکی

در پژوهش حاضر، به منظور تولید نمونه بیوجار خام، نمونه‌های جمع آوری شده میوه درخت سرو از سطح شهر کرمان، به آزمایشگاه منتقل و پس از شستشو با آب مقطر و خشک کردن در آن (۶۰ °C؛ ۴ h)، در درون راکتور ویژه ساخت بیوجار (ارتفاع ۴۰ cm، قطر ۲۰ cm، دارای ورودی گاز بی اثر، سوپاپ اطمینان، المنت سرامیکی و کنترل دمای دیجیتال)، در دمای ۵۰۰ °C و مدت زمان ۴ h تحت شرایط بی هوازی و نیمه هوازی (در حضور گاز نیتروژن) تبدیل به بیوجار شدند. به منظور اصلاح فیزیکی بیوجارهای تهیه شده، از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای (Fritsch Pulverisette 6 planetary ball mill) استفاده گردید. در این فرایند تعداد ۱۰ گوی با قطر ۱۰ mm به محفظه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای منتقل و ۱۰ g از بیوجار خرد شده با آسیاب معمولی (RB) به درون آن اضافه شد و

می‌شود که اثرات اصلی و متقابل عوامل را بر روی هر متغیر مستقل (رفتار سیستم) بیان می‌کند. مدل روش سطح پاسخ مورد استفاده (۱۰) برای پیش بینی نقطه ایده آل به صورت زیر بیان می‌شود (معادله ۲):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i X_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{j=i+1}^m \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن  $Y$  مقدار پیش‌بینی شده پاسخ یا راندمان حذف،  $\beta_0$  ضریب رگرسیون ثابت،  $\beta_i$  ضریب اثر خطی متغیر  $X_i$ ،  $\beta_{ii}$  ضریب اثر درجه دوم متغیر  $X_i$ ،  $\beta_{ij}$  ضریب اثر متقابل متغیرهای  $X_i$  و  $X_j$ ؛ و  $\varepsilon$  خطای مشاهده شده است. به منظور ارزیابی دقت مدل‌های برازش شده در مدل، از مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب تعیین پیش بینی شده ( $Pred R^2$ )، ضریب تعیین متعادل شده ( $Adj R^2$ ) و پارامتر کفایت دقت ( $Adeq Precision$ ) استفاده شد. معادلات رگرسیون و نمودارهای سطح پاسخ برای شناسایی بهترین شرایط حذف نیکل توسط نرم‌افزار Design-Expert نسخه ۷ انجام گرفت.

### یافته‌ها

– خصوصیات بیوجار خام و بیوجار اصلاح شده فیزیکی جدول ۱، فراوانی اندازه ذرات دو جاذب مورد مطالعه با استفاده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، ۵۰ درصد ذرات در RB و MBM، به ترتیب دارای اندازه ذرات کمتر از  $10/99 \mu m$  و  $3/47$ ؛ و  $99/9$  درصد ذرات در RB و MBM، به ترتیب دارای اندازه ذرات کمتر از  $163/99 \mu m$  و  $26/37$  هستند. بر اساس نتایج حاضر، اصلاح فیزیکی بیوجار سبب کاهش  $6/2$  برابری اندازه ذرات در مقایسه با اندازه ذرات RB، شده است.

اضافه شد. لوله‌ها به مدت ۲۰، ۴۰ و ۶۰ min در دمای  $25 \pm 2^\circ C$  با شدت  $150 \text{ rpm}$  تکان داده شد و سپس نمونه‌ها به صورت جداگانه در  $3500 \text{ rpm}$  سانتریفیوژ شدند. در انتها، مایع رویی فیلتر شد و غلظت نیکل در محلول عصاره شفاف با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری جذب اتمی (Varian SpectrAA-10) تعیین شد. درصد حذف نیکل (q) به صورت ذیل محاسبه شد (معادله ۱):

$$q = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

که در این معادله،  $C_i$  و  $C_f$  به ترتیب غلظت اولیه و نهایی نیکل (mg/L) هستند.

روش سطح پاسخ بر مبنای مدل باکس بنکن (Box-Behnken design) به عنوان یک مدل طراحی تجربی برای یافتن بهترین شرایط حذف نیکل از محلول آبی در تحقیق حاضر استفاده شد. روش سطح پاسخ، به عنوان مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی معرفی شده است که برای مدل سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن متغیر پاسخ، تحت تأثیر چندین متغیر مستقل قرار می‌گیرد و هدف آن بهینه‌سازی متغیرهای پاسخ است، بسیار مفید است (۸).

آزمایش‌های بهینه‌سازی حاضر، با ارزیابی تأثیر چهار متغیر شامل غلظت اولیه نیکل، pH محلول، زمان تماس و میزان جاذب انجام شد. فاکتورهای مورد بررسی در سه سطح بالا، متوسط و پایین تعریف شدند. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز توسط مدل باکس بنکن از رابطه  $N=2K(K-1)+C$  تعیین شد (۹)، که در آن  $N$  تعداد نمونه‌های آزمایشی،  $K$  تعداد متغیرها (۴ متغیر) و  $C$  تعداد متغیرهای مرکزی است (۵ نقطه مرکزی). در این مطالعه مجموع آزمایشات بر اساس مدل باکس بنکن، ۲۹ تست (run) برای هر جاذب بود. در روش سطح پاسخ، مدلی برای هر متغیر وابسته (بازده حذف نیکل) تعریف

جدول ۱- فراوانی اندازه ذرات در جاذب‌های مورد مطالعه

جاذب RB										
۱۶۳/۹۹	۵۵/۷	۳۵/۶۱	۲۴/۱۳	۱۶/۵	۱۰/۹۹	۷/۰۶	۴/۳۹	۲/۶۳	۱/۴۲	اندازه ذرات (μm)
۹۹/۹	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	فراوانی (درصد)
جاذب BMB										
۲۶/۳۷	۹/۸۲	۷/۲۱	۵/۶۰	۴/۴۱	۳/۴۷	۲/۶۶	۱/۹۷	۱/۳۵	۰/۷۷	اندازه ذرات (μm)
۹۹/۹	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	فراوانی (درصد)

جدول ۲، خلاصه آماری و مساحت سطح ویژه اندازه ذرات بدست آمده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر جاذب‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، اصلاح فیزیکی بیوچار، به ترتیب سبب کاهش ۶، ۳/۱ و ۲/۱ برابری از میانگین حسابی، میانگین هندسی و میانگین هارمونیک ذرات در مقایسه با نمونه RB شد. همچنین بر اساس محاسبات سطح ویژه استخراجی از این روش، BMB دارای سطح ویژه ۲/۱ برابری نسبت به RB بود. در بررسی مقادیر سطح ویژه با روش BET، مساحت سطح ویژه BMB ۴/۹ برابر RB بدست آمد (جدول ۳). بر اساس نتایج، میزان تخلخل کل و قطر تخلخل متوسط در BMB، به ترتیب افزایش ۹/۳ و ۱/۹ برابری را در مقایسه با نمونه RB نشان داد.

جدول ۲- خلاصه آماری و مساحت سطح ویژه اندازه ذرات بدست آمده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر در جاذب‌های مورد مطالعه

جدول ۲- خلاصه آماری و مساحت سطح ویژه اندازه ذرات بدست آمده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر در جاذب‌های مورد مطالعه

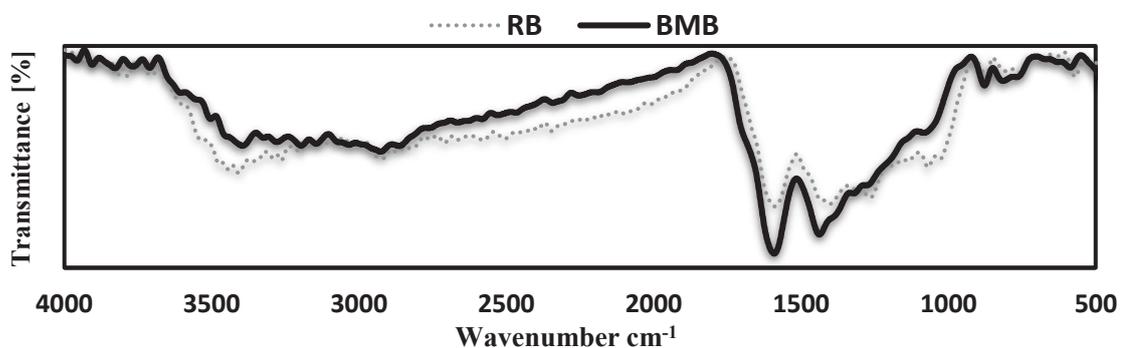
جاذب	میانگین حسابی (μm)	میانگین هندسی (μm)	میانگین هارمونیک (μm)	یکنواختی	میان (μm)	نما (μm)	میان/نسبت میانگین	مساحت سطح ویژه (cm <sup>2</sup> cm <sup>-3</sup> )
RB	۲۱/۱۱	۹/۷۱	۳/۶۸	۱/۵۴	۱۰/۹۹	۱۹/۹۸	۱/۹۲	۱۶۳۱۳/۸۱
BMB	۳/۴۷	۳/۰۶	۱/۷۵	۰/۸۱	۳/۴۷	۳/۹۲	۱/۳۱	۳۴۳۴۰/۳۴

جدول ۳- مقادیر سطح ویژه، حجم تخلخل و اندازه تخلخل جاذب‌های مورد مطالعه

جاذب	مساحت سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	تخلخل کل (cm <sup>3</sup> /g)	قطر تخلخل متوسط (nm)
RB	۲/۳۱۲	۰/۰۰۶۳	۱۰/۹۷
BMB	۱۱/۳۲۴	۰/۰۵۹	۲۰/۹۳

نشان از افزایش شدت گروه‌های عاملی aromatic C = C skeletal vibrations و aromatic C-H out of plane bending در مقایسه با RB داشت. در باندهای جذب<sup>۱</sup>  $2920\text{ cm}^{-1}$  (تا  $2820$  تا  $2980$ ) و  $3350\text{ cm}^{-1}$  (تا  $3200$  تا  $3500$ ) که به ترتیب نشان از گروه‌های aliphatic (CH stretching) و هیدروکسیل کششی (OH stretching) دارد، شدت جذب کمتری در BMB نسبت به RB مشاهده شد.

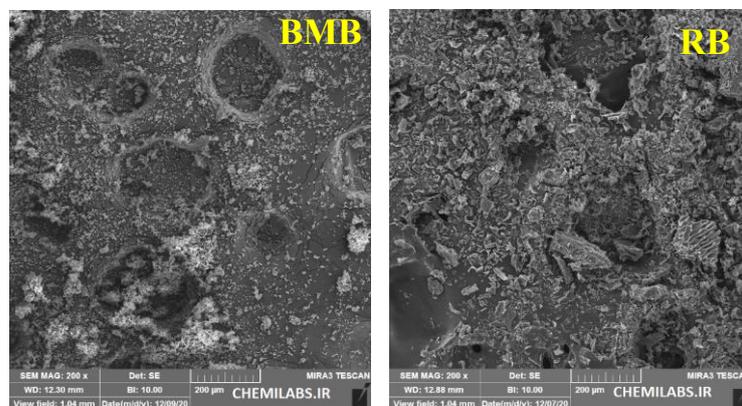
بررسی طیف سنجی مادون قرمز (FTIR) به منظور شناسایی تغییرات گروه‌های عاملی موجود در دو جاذب مورد بررسی، نشان از تغییرات نسبی برخی گروه‌های عاملی داشت (شکل ۱). بر اساس نتایج، وجود یک طیف قوی در طول موج  $1580\text{ cm}^{-1}$  در نمونه BMB در مقایسه با RB، نشان‌دهنده افزایش گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن (C-O stretch) بود. همچنین طیف‌های با شدت بیشتر در طول موج  $1430\text{ cm}^{-1}$  و  $878\text{ cm}^{-1}$  در نمونه BMB در مقایسه با RB، به ترتیب



شکل ۱- طیف سنجی فوریه مادون قرمز جاذب‌های مورد مطالعه

در مقایسه با نمونه RB شده است که این تغییر اندازه ذرات به درستی در نتایج سطح ویژه و همچنین آنالیز اندازه ذرات قابل مشاهده بود.

بررسی مورفولوژی سطح دو جاذب RB و BMB نیز نشان داد (شکل ۲)، اعمال فرایند کوچک سازی توسط آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای سبب ایجاد ذرات بسیار کوچکتر و ریزدانه‌تر از بیوجار



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از جاذب‌های مورد مطالعه در مقیاس  $200\text{ }\mu\text{m}$

حذف نیکل از محلول آبی

بررسی گردید. جدول ۵، آنالیز واریانس مدل‌های برازش شده بر مقادیر حذف نیکل در دو جاذب مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، مدل درجه سوم کاهش یافته و درجه دوم کاهش یافته، به ترتیب به عنوان مدل‌های مناسب بر داده‌های حذف نیکل توسط RB و BMB معرفی شدند. با توجه به اینکه در مدل‌های درجه دوم و سوم، همه پارامترها در مدل تأثیر معنی‌دار نداشتند، لذا با حذف برخی از این پارامترها مدل ساده تر شده، که به طبع آن مدل‌های مربوطه، کاهش (Reduced Model) یافتند. مقادیر  $p$  پایین‌تر از  $0/0001$  در مدل‌های بدست آمده و همچنین مقادیر  $p$  بالاتر از  $0/1$  در پارامتر مقدار عدم برازش (lack of fit) در مدل‌های بدست آمده از هر دو جاذب، نشان از تایید مدل‌های برازش شده در پیش بینی مقادیر تخمینی برای هر آزمایش دارد (جدول ۵). مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )  $0/98$  درصد و  $0/96$  درصد، به ترتیب بر مدل‌های جاذب RB و BMB، نشان از دقت قابل قبول مدل‌های برازش شده دارد. در طرف دیگر، مقادیر ضریب تعیین پیش بینی شده (Pred R-Squared) و ضریب تعیین متعادل شده (Adj R-Squared) بالا و مقادیر بالاتر از ۴ پارامتر کفایت دقت (Adeq Precision) که نشان دهنده میزان سیگنال به نویز مناسب است، در مدل‌های برازش شده نشان از صحت مدل‌ها دارد.

جدول ۴، مقادیر حذف نیکل از محلول آبی توسط دو جاذب RB و BMB، متاثر از مقادیر مختلف فاکتورهای مورد بررسی بر حذف نیکل را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست آمده، حداقل میزان حذف نیکل در حضور جاذب‌های RB و BMB به ترتیب برابر با  $14/17$  درصد (در شرایط آزمایش شماره ۱۷) و  $23$  درصد (در شرایط آزمایش شماره ۱) بدست آمد. در طرف مقابل، حداکثر حذف نیکل در حضور جاذب‌های RB و BMB به ترتیب برابر با  $51$  درصد (در شرایط آزمایش شماره ۲۸) و  $65/67$  درصد (در شرایط آزمایش شماره ۲۸) بدست آمد. به طور کلی، به طور متوسط میزان حذف نیکل در شرایط مشابه در جاذب BMB  $9/7$  درصد بیشتر از حذف نیکل در جاذب RB بود. به منظور بهینه‌سازی و همچنین بررسی اثرات فاکتورهای ذکر شده بر مقادیر حذف نیکل توسط جاذب‌های مورد مطالعه، طرح آزمایش برازش شده بر داده‌های مختلف حاصل از مدل باکس بنکن (جدول ۴) مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، مدل آماری مناسب (با توجه به ضرایب تعیین بالاتر) با توجه به روش تجزیه و تحلیل رگرسیون، بر داده‌های بدست آمده از حذف نیکل در شرایط آزمایشگاهی برازش شده و پس از تایید صحت مدل، پیش بینی متغیر پاسخ، بر اساس مدل ارائه شده و اثرات متقابل هر یک از فاکتورها

جدول ۴- مقادیر حذف نیکل از محلول‌های آبی توسط جاذب‌های مورد مطالعه متاثر از فاکتورهای مختلف

شماره آزمایش	متغیرهای مورد بررسی بر حذف نیکل					شماره آزمایش	میزان حذف نیکل (درصد)					
	A	B	C	D	RB		BMB	A	B	C	D	RB
(۱)	۹۰	۳	۵	۴۰	۱۵/۲۲	(۱۶)	۶۰	۷	۲/۵	۴۰	۳۱/۵	۴۱/۳۳
(۲)	۶۰	۵	۲/۵	۶۰	۲۹/۶۷	(۱۷)	۶۰	۳	۲/۵	۴۰	۱۴/۱۷	۲۳/۱۷
(۳)	۳۰	۵	۵	۶۰	۳۶/۳۳	(۱۸)	۹۰	۵	۷/۵	۴۰	۲۷/۵۶	۳۵
(۴)	۶۰	۵	۷/۵	۶۰	۳۱/۳۳	(۱۹)	۶۰	۷	۷/۵	۴۰	۳۹/۸۳	۴۸
(۵)	۹۰	۵	۲/۵	۴۰	۲۲	(۲۰)	۹۰	۷	۵	۴۰	۲۵	۳۳/۱۱
(۶)	۶۰	۳	۵	۲۰	۱۶/۱۷	(۲۱)	۳۰	۵	۲/۵	۴۰	۳۴	۴۷/۳۳

ادامه جدول ۴- مقادیر حذف نیکل از محلول های آبی توسط جاذب های مورد مطالعه متاثر از فاکتورهای مختلف

شماره آزمایش	متغیرهای مورد بررسی بر حذف نیکل				شماره آزمایش	میزان حذف نیکل (درصد)				
	A	B	C	D		BMB	RB	D	C	
(۷)	۶۰	۳	۵	۶۰	(۲۲)	۶۰	۲/۵	۲۰	۲۱/۵	۲۹/۶۷
(۸)	۶۰	۳	۷/۵	۴۰	(۲۳)	۶۰	۷	۵	۲۸	۳۹/۵
(۹)	۶۰	۵	۵	۴۰	(۲۴)	۳۰	۵	۵	۳۶	۵۲
(۱۰)	۶۰	۵	۵	۴۰	(۲۵)	۶۰	۵	۵	۳۳/۵	۴۰/۱۷
(۱۱)	۶۰	۷	۵	۶۰	(۲۶)	۳۰	۵	۷/۵	۴۶	۵۹/۳۳
(۱۲)	۹۰	۵	۵	۲۰	(۲۷)	۹۰	۵	۵	۱۹/۷۸	۲۸/۷۸
(۱۳)	۶۰	۵	۵	۴۰	(۲۸)	۳۰	۷	۵	۵۱	۶۵/۶۷
(۱۴)	۶۰	۵	۷/۵	۲۰	(۲۹)	۳۰	۳	۵	۳۲/۶۷	۴۷/۳۳
(۱۵)	۶۰	۵	۵	۴۰	-	-	-	-	-	-

A: غلظت اولیه نیکل، B: pH محلول، C: سطوح کاربردی جاذب، D: زمان تماس جاذب با محلول

جدول ۵- تجزیه واریانس مدهای برازش شده بر حذف نیکل در محلول های آبی متاثر از جاذب های RB و BMB

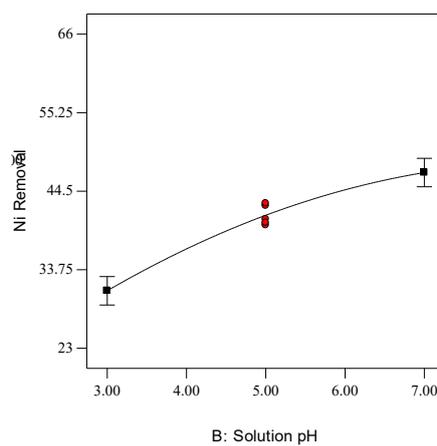
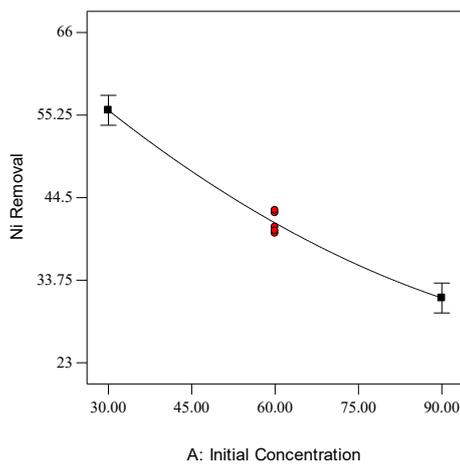
منابع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	f	p Prob > f
<b>مدل (Reduced Cubic) جاذب RB</b>					
Model	۲۲۴۱/۶۷	۱۴	۱۶۰/۱۲	۵۲/۴	< ۰/۰۰۰۱ significant
Lack of Fit	۳۳/۷۲	۱۰	۳/۳۷	۱/۴۹	۰/۳۷۳۳ not significant
R <sup>2</sup> : ۰/۹۸; Adj R <sup>2</sup> : ۰/۹۶; Pred R <sup>2</sup> : ۰/۸۹; Adeq Precision: ۲۹/۳۴					
<b>مدل (Reduced Quadratic) جاذب BMB</b>					
Model	۳۰۷۳/۳۸	۱۱	۲۷۹/۴	۳۸/۹۶	< ۰/۰۰۰۱ significant
Lack of Fit	۱۱۴/۳۴	۱۳	۸/۸	۴/۶۴	۰/۰۷۴۸ not significant
R <sup>2</sup> : ۰/۹۶; Adj R <sup>2</sup> : ۰/۹۳; Pred R <sup>2</sup> : ۰/۸۴; Adeq Precision: ۲۳/۵۸					

نمودار ۱، اثرات متغیرهای مختلف به تنهایی (نمودارهای دو بعدی) و اثرات متقابل آن‌ها (نمودارهای سه بعدی) بر میزان حذف نیکل در حضور جاذب BMB را نشان می‌دهد (روند تغییرات برای جاذب RB مشابه BMB بود، لذا از ارائه نمودارهای مربوط به جاذب RB صرف نظر شد). بر اساس نتایج حاصله، با افزایش غلظت اولیه نیکل، مقادیر حذف نیکل، روند کاهش نسبتاً خطی را نشان داد. در طرف مقابل با افزایش pH محلول و همچنین افزایش میزان جاذب در محلول، مقادیر حذف نیکل افزایش محسوسی را نشان داد. همچنین بررسی روند تغییرات حذف نیکل متأثر از فاکتور زمان تماس جاذب با محلول، روند افزایشی (هرچند کم) از حذف نیکل، را نشان داد. نمودار سه بعدی مربوط به عملکرد اثرات متقابل متغیرها در حضور جاذب BMB نیز نشان از اثرات مستقیم pH محلول و سطوح جاذب کاربردی داشت. در طرف مقابل، زمان تماس جاذب با محلول آبی در سطوح پایین از جاذب به خوبی اثرات خود را بر حذف نیکل نشان داد، اما در سطوح بالای جاذب، روند کاهشی جذب به خوبی مشهود بود.

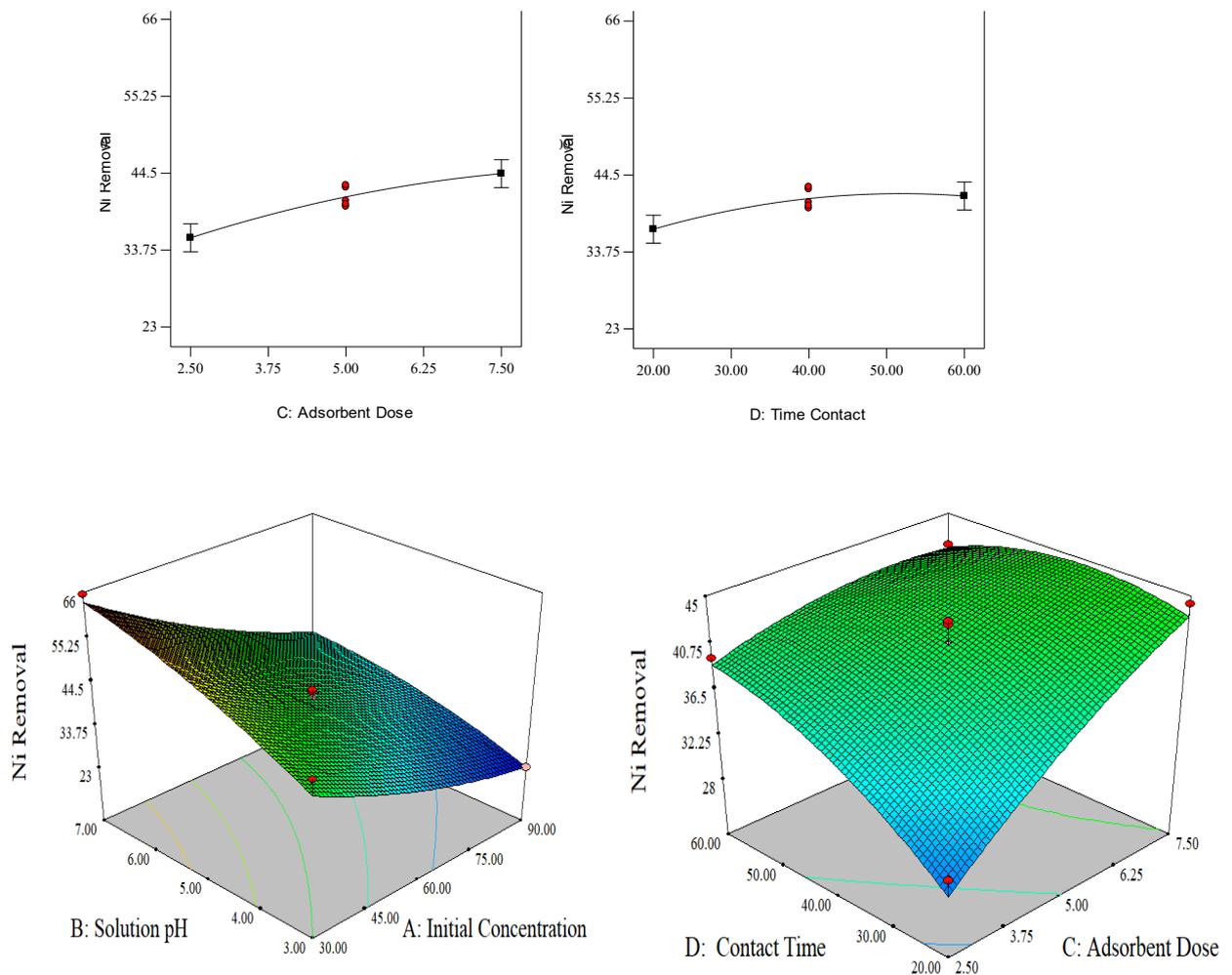
پس از تایید دقت مدل برازش شده، معادلات نهایی بدست آمده از دو مدل (معادلات ۳ و ۴) به صورت ذیل بدست آمد که در این معادلات، A غلظت اولیه نیکل، B مقدار pH محلول، C سطوح کاربردی جاذب و D زمان تماس جاذب با محلول است.

$$(3) \quad \begin{aligned} &= (-72/87) \\ &+ (0/60A) + (26/39B) + (7/46C) + (2/63D) + \\ &+ (0/23AB) - (0/21AC) - (1/06 \times 10^{-3}AD) - (0/25BC) \\ &- (0/76BD) - (0/074CD) - (2/16B^2) - (5/45 \times 10^{-3}D^2) \\ &- (0/026AB^2) + (0/082B^2D) \end{aligned} \quad (4)$$

$$(4) \quad \begin{aligned} &= (1/065) \\ &- (0/56A) + (9/96B) + (6/21C) + (0/59D) - \\ &+ (0/034AB) + (0/043BD) - (0/06CD) + \\ &+ (2/72 \times 10^{-3}A^2) - (0/56B^2) - (0/198C^2) - (4/90 \times 10^{-3}D^2) \end{aligned}$$



نمودار ۱- اثرات متغیرهای مختلف (نمودارهای دو بعدی) و اثرات متقابل آن‌ها (نمودارهای سه بعدی) بر حذف نیکل در حضور جاذب BMB



### ادامه نمودار ۱- اثرات متغیرهای مختلف (نمودارهای دو بعدی) و اثرات متقابل آن‌ها (نمودارهای سه بعدی) بر حذف نیکل در حضور جاذب BMB

جاذب  $6/37 \text{ g/L}$  و زمان تماس  $49/19 \text{ min}$ ، با میزان مطلوبیت ۱ بدست آمد. همچنین، به منظور صحت سنجی مقادیر حاصله از مدل‌های بدست آمده برای هر جاذب، مقادیر بدست آمده از بهینه سازی در شرایط آزمایشگاه ارزیابی شد و نتایج بدست آمده از پارامتر حذف ( $50/2$  درصد و  $66/7$  درصد به ترتیب برای جاذب‌های RB و BMB) نشان از صحت مناسب مدل در ارزیابی میزان حذف نیکل داشت.

#### بحث

در پیش فرض اولیه تحقیق حاضر این فرضیه وجود داشت که

بهینه سازی مدل

هدف اصلی از طراحی آزمایش و بهینه سازی، دستیابی به مقادیر بهینه متغیرها برای حذف نیکل توسط جاذب‌های مورد مطالعه است. نتایج بهینه سازی بر اساس قرار گرفتن متغیرها در محدوده معمول و میزان حذف نیکل در بیشینه خود انجام گرفت که بر این اساس، حداکثر حذف نیکل در حضور جاذب RB ( $52$  درصد) در غلظت اولیه نیکل  $31/32 \text{ mg/L}$ ،  $6/99 \text{ pH}$ ، دوز جاذب  $5/1 \text{ g/L}$  و زمان تماس  $43/78 \text{ min}$ ، با میزان مطلوبیت ۱ بدست آمد. در طرف مقابل حداکثر حذف نیکل در حضور جاذب BMB ( $65/68$ ) در غلظت اولیه نیکل  $30/85 \text{ mg/L}$ ،  $6/9 \text{ pH}$ ، دوز

کند، که می‌تواند فرضیه محتمل دیگر در خصوص افزایش گروه عامل  $C=C$  آروماتیک در بیوچار اصلاح شده را آشکار سازد. ارزیابی درصد حذف نیکل متأثر از دو جاذب مورد مطالعه نشان داد که BMB به طور معنی داری حذف مقادیر بالاتری از نیکل (۹/۷ درصد بیشتر) را در محلول‌های آبی در مقایسه با RB، سبب شده است. با توجه به بررسی خصوصیات بیوچار اصلاح شده و مقایسه آن با بیوچار غیراصلاح شده، افزایش سطح ویژه خارجی و داخلی بیوچار اصلاح شده (جذب فیزیکی: مکان‌های فعال بیشتری برای جذب یون‌های نیکل از محلول آبی) و همچنین افزایش گروه‌های عامل سطحی حاوی اکسیژن (جذب شیمیایی: تشکیل کمپلکس با یون‌های نیکل)، به عنوان مکانیسم‌های اصلی از حذف بیشتر نیکل در مقایسه با نمونه بدون اصلاح بیوچار شناخته می‌شوند. مکانیسم احتمالی دیگری که در این خصوص مطرح است، وجود گروه‌های عاملی  $C=C$  آروماتیک در سطح بیوچار اصلاح شده است که می‌تواند منجر به برهمکنش‌های الکترواستاتیک قوی تر بین بیوچار و یون‌های نیکل شود که به تبع آن فرآیند حذف نیکل را افزایش دهد. Lyu و همکاران در بررسی حذف متیلن بلو توسط بیوچار اصلاح شده با آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای، نشان دادند که فرآیند آسیاب کردن، سطح خارجی و داخلی و همچنین گروه‌های عامل سطح حاوی اکسیژن (به عنوان مثال کربوکسیل و هیدروکسیل) بیوچار را افزایش داده است که بدین سبب، بیوچار اصلاح شده با افزایش اثرات متقابل  $\pi-\pi$  (نیروی واندروالس) و برهمکنش‌های الکترواستاتیکی بیشتر، سبب حذف قابل قبولی از رنگ کاتیونی متیلن بلو گردیده است (۱۳). Qin و همکاران در بررسی حذف آمونیوم از آب توسط بیوچار آسیاب شده با آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای نشان دادند، گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن بر روی سطح بیوچار به دلیل فرآیندهای آسیاب کردن افزایش پیدا کرده است و بیان نمودند که اصلاح با آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای می‌تواند ظرفیت جذب آمونیوم را تا حد زیادی افزایش و سرعت جذب آمونیوم را تسریع کند (۱۱).

در بررسی اثرات فاکتورهای مورد بررسی بر حذف نیکل، با افزایش غلظت اولیه نیکل در محلول، کاهش میزان حذف به طور

اعمال فرایند اصلاح فیزیکی فقط می‌تواند سبب کاهش اندازه ذرات، افزایش سطح ویژه و ساختار ریزدانه‌تر بیوچار در مقایسه با بیوچار اصلاح نشده شود، که این تغییرات به ترتیب در نتایج حاصل از تکنیک‌های BET، SLS، FE-SEM مشاهده و اثبات شد. از طرفی، تغییرات در خصوصیات شیمیایی و گروه‌های عاملی، از نکات قابل توجه مطالعه حاضر بود به نحوی که اصلاح فیزیکی سبب افزایش گروه‌های عامل حاوی اکسیژن C-O و گروه‌های آروماتیک  $C=C$  در مقایسه با بیوچار غیراصلاحی گردید. در نتایج مشابه گزارش شده توسط Qin و همکاران، فرآیند خردایش توسط آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای تأثیر قابل توجهی بر ساختار شیمیایی بیوچار داشته و سبب افزایش گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار (carbonyl) و آروماتیک (aromatic C-H stretching) در بیوچار شد (۱۱). در طرف مقابل، برخلاف یافته‌های پژوهش حاضر، Naghdi و همکاران گزارش دادند که فرآیند خرد کردن بیوچار توسط آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای، تأثیری بر ساختار شیمیایی و گروه‌های عامل بیوچار ندارد (۱۲). در بررسی منابع گذشته، دلایل مشخصی از تغییرات به وجود آمده در گروه‌های عاملی، در نتیجه اصلاحات فیزیکی بیان نشده است (۱۱). با توجه به نتایج پژوهش حاضر این احتمال مطرح می‌شود که افزایش سطح ویژه در نتیجه فرآیند آسیاب کردن، فرصت بیشتری برای برهمکنش سطوح بیوچار با اکسیژن و رطوبت هوا فراهم کرده است که سبب تشکیل گروه‌های عاملی اکسیژن دار شده است. فرضیه دیگر که در مطالعه حاضر محتمل می‌باشد این است که فرآیند آسیاب مکانیکی، ذرات بیوچار را در معرض تنش‌های فیزیکی قرار داده و سبب شکستگی و برش پیوندهای شیمیایی در ساختار بیوچار اصلاح شده گردیده است که در نتیجه آن مکان‌هایی را که قبلاً غیرقابل دسترس و حاوی گروه‌های عاملی اکسیژن دار و  $C=C$  آروماتیک بوده، در ماتریکس بیوچار در معرض نمایش قرار می‌دهد. همچنین فرآیند آسیاب کردن به دلیل اصطکاک بین ذرات و گلوله‌های آسیاب سیاره‌ای، سبب تولید گرمای بسیار بالا شده است که این گرمایش موضعی می‌تواند برخی از پیوندهای کربن-کربن در ساختار بیوچار را شکسته و گروه‌های  $C=C$  آروماتیک را تولید

توسط کربن فعال به دست آمده از مغز باگاس نیشکر نشان دادند که محدوده pH ۵ تا ۷/۵، مناسب‌ترین محدوده برای جذب نیکل است (۱۶). تغییرات اثر مدت زمان تماس جاذب با محلول نیز نشان از افزایش نسبی حذف نیکل در محلول‌های آبی داشت که می‌توان بیان نمود با افزایش زمان تماس، احتمال تماس و برخورد یون‌های نیکل با جاذب افزایش یافته و در نتیجه آن، میزان جذب افزایش می‌یابد (۳).

### نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر بهبود عملکرد بیوچارها در جذب آلاینده‌های مختلف با استفاده از روش‌های متنوع فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی، تحقیقات وسیعی را به خود اختصاص داده است. در تحقیق حاضر، اصلاح خصوصیات بیوچار با استفاده از روش فیزیکی نشان داد که تغییرات ساختار بیوچار با این روش، صرفاً محدود به تغییرات خصوصیات فیزیکی نبوده و تغییرات شیمیایی نسبتاً معنی‌داری را نیز در ساختار بیوچار سبب شده است. بر اساس نتایج، بیوچار اصلاح شده، با افزایش سطح ویژه و همچنین افزایش گروه‌های عامل موثر در جذب آلاینده‌ها (گروه‌های عامل اکسیژن دار)، سبب افزایش حذف نیکل از محلول‌های آبی در مقایسه با نمونه غیراصلاحی شد. همچنین، روش سطح پاسخ (مدل باکس بنکن) برآزش داده شده بر داده‌های حذف نیکل، پیش بینی مناسبی را از حذف نیکل در حضور دو جاذب مورد مطالعه نشان داد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصلاحات فیزیکی بیوچار می‌تواند سبب بهبود خصوصیات جذبی بیوچار در حذف آلاینده نیکل شود، که نیاز به مطالعات تکمیلی بیشتر را طلب می‌کند.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

### تشکر و قدردانی

نویسنده این پژوهش، از پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته

محسوسی قابل مشاهده بود که این کاهش را می‌توان به اشغال سریع محل‌های جذب و نفوذ یون‌های نیکل به منافذ جاذب ارتباط داد (اشباع شدن خلل و فرج جاذب) که به تبع آن راندمان جذب کاهش می‌یابد (۳). از طرفی، با افزایش pH محلول و همچنین افزایش سطح کاربردی جاذب در محلول، حذف نیکل افزایش محسوسی را نشان داد. با افزایش pH در محلول‌های آبی، فرآیند پروتون‌زدایی گروه‌های عاملی (به ویژه گروه عاملی آلدوست) در سطح جاذب افزایش می‌یابد که به تبع آن مکان‌هایی با بار منفی بیشتر ایجاد شده و جذب نیکل افزایش می‌یابد (۱۴). در طرف مقابل، در pH پایین از محلول‌های آبی، یون‌های هیدروژن موجود در محلول با یون‌های نیکل رقابت کرده و جایگزین یون‌های فلزی روی جاذب می‌شوند (۳). همچنین در pH پایین از محلول، سطح جاذب‌های مورد مطالعه یونیزه شده و لایه‌ای از بار مثبت روی آن تشکیل می‌شود که این لایه یک نیروی دافعه ایجاد می‌کند و از جذب یون‌های نیکل جلوگیری و منجر به کاهش راندمان حذف نیکل می‌شود (۳). در مطالعه حاضر، مقادیر  $pH_{ZPC}$  (pH of zero point of charge) نقطه ای از pH که طی آن بارهای سطحی جاذب برابر صفر می‌باشد) اندازه‌گیری شده در دو جاذب RB و BMB به ترتیب برابر با ۳/۹ و ۳/۸ بودند. بر اساس گزارشات انجام شده (۱۴)، مقادیر pH بالاتر از  $pH_{ZPC}$ ، به دلیل تفکیک گروه‌های عاملی حاوی یون‌های هیدروکسید ( $OH^-$ )، سبب افزایش بار منفی سطح جاذب می‌شود. در طرف مقابل، در مقادیر pH پایین‌تر از  $pH_{ZPC}$ ، سطح جاذب‌ها به دلیل وجود پروتون‌ها ( $H^+$ ) دارای بار مثبت است (۱۴). بر اساس نتایج، در pH بالاتر از ۳/۸ در محلول‌های آبی، به دلیل وجود یون  $OH^-$ ، چگالی بار منفی در سطح جاذب‌های مورد مطالعه افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه یون نیکل دارای بار مثبت است به راحتی جذب شده و فرآیند جذب به صورت شیمیایی انجام می‌شود. Usman و همکاران گزارش دادند که با افزایش pH محلول، بار منفی سطحی بیوچار موجود در محلول آبی، به دلیل پروتون‌زدایی گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل افزایش می‌یابد (۱۵). Krishnan و همکاران در مطالعه جذب نیکل از محلول‌های آبی

حمایت‌های انجام گرفته، نهایت‌قدردانی و تشکر را دارد.

و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، به دلیل

## References

1. Genchi, G., et al., "Nickel: Human health and environmental toxicology". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020. 17(3): p. 679.
2. Muharrem, I. and O.K. Ince, "An overview of adsorption technique for heavy metal removal from water/wastewater: a critical review". *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 2017. 3(2): p. 10-19.
3. Saffari, M., "Response surface methodological approach for optimizing the removal of cadmium from aqueous solutions using pistachio residues biochar supported/non-supported by nanoscale zero-valent iron". *Main Group Metal Chemistry*, 2018. 41(5-6): p. 167-181.
4. Wang, B., B. Gao, and J. Fang, "Recent advances in engineered biochar productions and applications". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2017. 47(22): p. 2158-2207.
5. Kumar, M., et al., "Ball milling as a mechanochemical technology for fabrication of novel biochar nanomaterials". *Bioresource Technology*, 2020. 312: p. 123613.
6. Peterson, S.C., et al., "Increasing biochar surface area: Optimization of ball milling parameters". *Powder Technology*, 2012. 228: p. 115-120.
7. Khuri, A.I. and S. Mukhopadhyay, "Response surface methodology". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2010. 2(2): p. 128-149.
8. Dean, A., et al., "Response surface methodology". *Design and Analysis of Experiments*, 2017: p. 565-614.
9. Ferreira, S.C., et al., "Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods". *Analytica Chimica Acta*, 2007. 597(2): p. 179-186.
10. Myers, R.H., A.I. Khuri, and W.H. Carter, "Response surface methodology: 1966-1988". *Technometrics*, 1989. 31(2): p. 137-157.
11. Qin, Y., et al., "Enhanced removal of ammonium from water by ball-milled biochar". *Environmental Geochemistry and Health*, 2020. 42: p. 1579-1587.
12. Naghdi, M., et al., "A green method for production of nanobiochar by ball milling-optimization and characterization". *Journal of Cleaner Production*, 2017. 164: p. 1394-1405.
13. Lyu, H., et al., "Experimental and modeling investigations of ball-milled biochar for the removal of aqueous methylene blue". *Chemical Engineering Journal*, 2018. 335: p. 110-119.
14. Mohan, D., et al., "Sorption of arsenic, cadmium, and lead by chars produced from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production". *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007. 310(1): p. 57-73.
15. Usman, A., et al., "Sorption process of date palm biochar for aqueous Cd (II) removal: efficiency and mechanisms". *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016. 227: p. 1-16.
16. Krishnan, K.A., K. Sreejalekshmi, and R. Baiju, "Nickel (II) adsorption onto biomass based activated carbon obtained from sugarcane bagasse pith". *Bioresource Technology*, 2011. 102(22): p. 10239-10247.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Optimization of nickel removal from aqueous solutions by physical-modified biochar

Mahboub Saffari\*

Environment Department, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 10 June 2023  
**Revised:** 22 August 2023  
**Accepted:** 26 August 2023  
**Published:** 06 December 2023

**Keywords:** Modified biochar, Response surface methodology, Surface adsorption, Nickel removal, Aqueous solutions

**\*Corresponding Author:**  
mahboobsaffari@gmail.com

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Nowadays, the use of biochar as a new and suitable adsorbent to remove inorganic pollutants from water sources has grown significantly. The present study was conducted to evaluate the effects of biochar physical modifications compared to unmodified biochar on nickel (Ni) removal efficiency in aqueous solutions.

**Materials and Methods:** After the production of cypress cones biochar (RB), biochar particles (<164  $\mu\text{m}$ ) were crushed into very small (<26  $\mu\text{m}$ ) dimensions (BMB) using a planetary ball mill and after evaluation their various properties by SLS, BET, FTIR and SEM techniques, their application (RB and BMB) in optimizing the Ni removal from aqueous solutions were evaluated using the response surface methodology (RSM: Box-Behnken design).

**Results:** Based on the results, the physical modification of biochar (BMB) decreased the particle size by 6.2 times, increased the specific surface area by 4.9 times, increased (containing oxygen) and decreased (aliphatic and OH stretching groups) of specific functional groups and finer surface morphology, compared to RB. The use of BMB in the aqueous solution caused an increase of 9.7% (on average) in the removal of Ni compared to the RB sample. The fitting of the data obtained from Ni removal in the Box-Benken model in both adsorbents shows the appropriate prediction of this model in the optimization of Ni removal from aqueous solutions.

**Conclusion:** According to the results of this research, the physical modification of biochar, as a simple, cheap, and environmentally friendly method, due to the increase in the efficiency of Ni pollutant removal, can be introduced as a suitable method in the activation of biochar, which further research is required based on the type of biochar and various pollutants.

Please cite this article as: Saffari M, Optimization of nickel removal from aqueous solutions by physical-modified biochar. Iranian Journal of Health and Environment. 2023;16(3):445-58.

