



## Optimization of nitrate, urea, and ammonium removal from agricultural wastewater using selected modified organic and inorganic adsorbents

Mehri Boroumand<sup>1</sup> | Mohammad Ali Bahmanyar<sup>2✉</sup> | Mehdi Ghajar Sepanlou<sup>3</sup> |  
Seyed Mostafa Emadi<sup>4</sup>

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: [m.boroumand@sanru.ac.ir](mailto:m.boroumand@sanru.ac.ir)
2. Corresponding Author, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: [m.bahmanyar@sanru.ac.ir](mailto:m.bahmanyar@sanru.ac.ir)
3. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: [ghajar@sanru.ac.ir](mailto:ghajar@sanru.ac.ir)
4. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: [mostafa.emadi@sanru.ac.ir](mailto:mostafa.emadi@sanru.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

Received 9 November 2025  
Received in revised form  
31 January 2026  
Accepted 4 February 2026  
Published online 22 June 2026

**Keywords:**

*Removal of contaminants*  
*Biochar*  
*Rice straw*  
*Leonardite and Bentonite*

### ABSTRACT

One of the most important pollutants of surface and underground water resources are nitrogen compounds. These compounds enter the environment, particularly surface water resources, through various means, including agriculture and the use of chemical fertilizers, aquaculture, food industries, and refineries, and cause numerous problems directly or indirectly. Therefore, it is necessary to find a solution to remove or reduce these compounds. The use of inorganic and organic adsorbents can be an easy, effective, and low-cost method. To investigate the efficiency of organic and inorganic adsorbents in removing nitrogenous compounds, some available organic adsorbents (including 7 treatments: rice straw and husk, biochar-rice straw and husk prepared at two temperatures of 300 and 600 °C, and Leonardite) and inorganic adsorbents (including 3 treatments: bentonite, pumice, and zeolite) were used to remove nitrogenous compounds (nitrate, urea and ammonium). To increase efficiency and comparison, the adsorbents were used in simple form, modified with acid, and with iron at two different acidity levels (pH=2 and pH=6). The results showed that biochar prepared from rice straw at a temperature of 600 °C and modified with iron at pH=2, with an absorption of about 79% of nitrate from water, was the best adsorbent for removing nitrate from water among all organic and inorganic adsorbents studied in this study. Rice straw biochar prepared at 600°C and modified with iron at pH=6 removed the highest amount of urea, and acid-modified zeolite showed the best performance with 92% ammonium absorption. Overall, this study indicates the effective and efficient removal of nitrogen compounds by these adsorbents, and modification with acid and iron improved the removal capability of these adsorbents. As a result, they can be used as a cheap and accessible method for removing pollutants from water sources.

**Cite this article:** Boroumand, M., Bahmanyar, M. A., Ghajar Sepanlou, M., & Emadi, S. M. (2026). Optimization of nitrate, urea, and ammonium removal from agricultural wastewater using selected modified organic and inorganic adsorbents. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (1), 109-126.  
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.404969.1271>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.404969.1271>

Publisher: University of Tehran Press.



## بهینه سازی حذف نیترات، اوره و آمونیوم از پسابهای کشاورزی با استفاده از برخی جاذبهای آلی و معدنی اصلاح شده

مهری برومند<sup>۱</sup> | محمدعلی بهمنیار<sup>۲\*</sup> | مهدی قاجار سپانلو<sup>۳</sup> | سید مصطفی عمادی<sup>۴</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [m.boroumand@sanru.ac.ir](mailto:m.boroumand@sanru.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [m.bahmanyar@sanru.ac.ir](mailto:m.bahmanyar@sanru.ac.ir)

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [ghajar@sanru.ac.ir](mailto:ghajar@sanru.ac.ir)

۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: [mostafa.emadi@sanru.ac.ir](mailto:mostafa.emadi@sanru.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

### کلیدواژه‌ها:

حذف آلاینده‌ها

بایوچار

کاه برنج

لئوناردیت و بنتونیت

یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های منابع آبی سطحی و زیرزمینی ترکیبات نیتروژنی هستند. این ترکیبات از طرق مختلف مانند کشاورزی و مصرف کودهای شیمیایی، پرورش آبزیان، صنایع غذایی و پالایشگاه‌ها وارد محیط زیست خصوصا منابع آبی گردیده و مشکلات زیادی را به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بوجود می‌آورند. بدین جهت، حذف و یا کاهش این ترکیبات با استفاده از جاذب‌های معدنی و آلی می‌تواند روشی آسان، مؤثر و کم هزینه باشد. لذا به منظور بررسی کارایی جاذب‌های آلی و معدنی در حذف ترکیبات نیتروژنه از برخی جاذب‌های آلی در دسترس (شامل هفت جاذب: کاه و پوسته برنج، بایوچار کاه و پوسته برنج تهیه شده در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و لئوناردیت) و معدنی (شامل سه جاذب: بنتونیت، پامیس و زئولیت) در کاهش ترکیبات نیتروژنه (نیترات، اوره و آمونیوم) استفاده گردید. جهت افزایش کارایی و مقایسه، جاذب‌ها به صورت ساده، اصلاح شده با اسید و با آهن در دو اسیدیته مختلف (pH=۲ و pH=۶) به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد بایوچار تهیه شده از کاه برنج در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح شده با آهن در pH=۲ با جذب حدود ۷۹ درصدی نیترات از آب بهترین جاذب برای حذف نیترات از آب در میان تمامی جاذب‌های آلی و معدنی مورد مطالعه در این پژوهش بود. بایوچار کاه برنج تهیه شده در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح شده با آهن در pH=۶ بیش‌ترین میزان اوره را حذف کرد و زئولیت اصلاح شده با اسید نیز با جذب ۹۲ درصدی آمونیوم بهترین عملکرد را نشان داد. لذا حذف مؤثر و کارآمد ترکیبات نیتروژنه به وسیله این جاذب‌ها صورت پذیرفت و اصلاح به وسیله اسید و آهن توانست قابلیت حذف این جاذب‌ها را بهبود بخشد. در نتیجه می‌توان از آن‌ها به عنوان روشی ارزان و در دسترس جهت حذف آلاینده‌ها از منابع آبی بهره برد.

**استناد:** برومند، مهری؛ بهمنیار، محمدعلی؛ قاجار سپانلو، مهدی و عمادی، سیدمصطفی (۱۴۰۵). بهینه سازی حذف نیترات، اوره و آمونیوم از پسابهای کشاورزی با استفاده از برخی جاذب‌های آلی و معدنی اصلاح شده. *تشریح مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۱)، ۱۰۹-۱۲۶.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.404969.1271>



## ۱. مقدمه

حجم فراوانی از آلاینده‌ها از طرق مختلف مانند فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی وارد منابع آبی سطحی و زیرزمینی می‌شوند. یکی از مهم‌ترین آلاینده‌ها ترکیبات نیتروژنی هستند. این ترکیبات از طریق کشاورزی و مصرف کودهای شیمیایی، پرورش آبزیان، صنایع غذایی و پالایشگاه‌ها وارد محیط زیست می‌گردند و ناهنجاری‌های زیادی را به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بوجود می‌آورند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان اوتروفیکاسیون، کاهش اکسیژن محلول و سمیت برای آبزیان را نام برد (Malkoutian *et al.*, 2010). در بسیاری از مناطق، کشاورزی بزرگ‌ترین منبع ورود نیتروژن به آب‌هاست. در سال‌های اخیر نیترات نشت کرده از خاک کوددهی شده به آب‌های زیر زمینی و چاه‌ها به دلیل حلالیت زیاد در آب و میل کم خاک به جذب آن، مساله آلودگی آب توسط نیترات را جدی کرده است. مقادیر زیاد نیترات وارد شده در آب‌های سطحی یکی از دلایل اصلی کمبود اکسیژن و اوتروفیکاسیون می‌باشد (Ling *et al.*, 2014). اوره یکی از محصولات اصلی متابولیسم به‌وسیله پستانداران بوده و مقادیر آن در طبیعت فراوان است. هم‌چنین به دلیل گسترده از اوره در شاخه‌های مختلف صنعت، تولید آن در مقیاس وسیع صورت می‌گیرد. اوره نه تنها از پساب‌های کارخانجات تولیدی بلکه از آبشویی مزارع و فاضلاب‌های کارخانجاتی که از آن به‌عنوان ماده خام استفاده می‌کنند وارد محیط می‌شود (Urban'czyk *et al.*, 2016). یکی دیگر از ترکیبات نیتروژنه که به‌ویژه در سیستم‌های کشاورزی در اثر مصارف کودهای شیمیایی به‌وفور یافت می‌شود آمونیوم است که افزایش غلظت آن سلامت موجودات زنده را تهدید کرده (Tang *et al.*, 2019) و علاوه بر دام‌ها، در انسان نیز اختلال در سیستم عصبی و تولید انسولین گزارش شده است (Britto & Kronzucker, 2002). لذا لازم است چاره‌ای جهت حذف و یا کاهش این ترکیبات از محیط زیست، به‌ویژه منابع آبی اندیشید. امروزه روش‌های مختلفی مانند استفاده از کاتالیست و اکسیدانت‌های قوی، آنزیم‌ها و روش‌های بیولوژیکی و به‌کارگیری جاذب‌های مختلف جهت حذف از آب استفاده می‌گردد (Urban'czyk *et al.*, 2016).

اگرچه روش‌هایی نظیر اکسیداسیون پیشرفته، استفاده از کاتالیست‌ها و فرایندهای بیولوژیکی قادر به حذف مؤثر نیترات، آمونیوم و اوره هستند، اما این روش‌ها معمولاً با محدودیت‌هایی نظیر هزینه بالای سرمایه‌گذاری اولیه، مصرف انرژی زیاد، نیاز به کنترل دقیق شرایط عملیاتی و تولید محصولات جانبی همراه می‌باشند (Crini & Lichtfouse, 2019; Wang *et al.*, 2021). در مقابل، استفاده از جاذب‌های آلی و معدنی، به‌ویژه جاذب‌های طبیعی و اصلاح‌شده، به دلیل دسترسی آسان به مواد اولیه، هزینه پایین، سادگی بهره‌برداری و قابلیت استفاده در مقیاس‌های مختلف، گزینه‌ای فنی-اقتصادی مناسب برای تصفیه پساب‌های کشاورزی محسوب می‌شود. علاوه بر این، امکان احیا و استفاده مجدد از جاذب‌ها و عدم تولید لجن ثانویه خطرناک، مزیت رقابتی این روش را نسبت به بسیاری از روش‌های جایگزین افزایش می‌دهد (Bhatnagar & Sillanpää, 2017; Zhang *et al.*, 2020). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که فرایند جذب، علاوه بر بازده مناسب در حذف ترکیبات نیتروژنه، از نظر اقتصادی نیز نسبت به بسیاری از روش‌های جایگزین مقرون‌به‌صرفه‌تر بوده و قابلیت ادغام با سیستم‌های تصفیه موجود را داراست (Bhatnagar & Sillanpää, 2017; Li *et al.*, 2014).

Dindarloo *et al.* (2021) با به‌کارگیری پامیس اصلاح‌شده توانستند ۸۹/۶۶ درصد از نیترات موجود در آب را حذف کنند. در این پژوهش که از کلریدمنیزیم جهت اصلاح پامیس استفاده شد، طی آن مشاهده گردید که یون نیترات در شرایط اسیدی توسط منیزیم احیا شده و طی آن گاز  $N_2$  و یون آمونیوم تولید می‌گردد. در نتیجه از آنجایی که پروتون‌ها در آمونیوم محلول کاهش می‌یابند، این امر سبب افزایش pH محیط شده که با استفاده از اسیدکلریدریک pH محیط واکنش ثابت نگه داشته شد. Li & Shi (2022) نیز با استفاده از بایوچار اصلاح‌شده با نیتروژن و آهن به‌طور هم‌زمان توانستند ترانسایکلین، آمونیوم و فسفات را با عملکرد عالی از فاضلاب جذب کنند. مکانیسم جذب هم‌زمان به‌طور عمده شامل

پُر کردن منافذ، برهم کنش الکترواستاتیکی، تبادل یونی، کمپلکس شدن سطح، رسوب سطحی، پیوند H و برهم کنش  $\pi-\pi$  بود. Mishra & Patel (2009) با مقایسه کارایی جذب نیترات از آب برای بایوچار کاه گندم، بایوچار کاه خردل و کربن فعال به این نتیجه رسیدند که بایوچار کاه خردل کارایی بیش‌تری نشان داد و سپس کربن فعال و بایوچار کاه گندم توانستند نیترات بیش‌تری جذب کنند.

در پژوهشی، از بایوچار اصلاح‌شده با آهن توسط  $FeCl_3$  و دمای پیرولیز ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای حذف نیتروژن بهره گرفته شد. نتایج نشان داد بایوچار آغشته به آهن ۱ درصد (B1) حداکثر ظرفیت جذب نیتروژن کل (TN) را نشان داد که بیش از ۱۴ میلی‌گرم در گرم بود و B1 توانست ۶۰ درصد TN از پساب مصنوعی و ۵۰ درصد TN را از فاضلاب واقعی کشاورزی حذف کند (Min et al., 2020). Darajeh et al. (2021) بایوچار حاصل از کمپوست قارچ در دمای ۶۰۰ درجه را با آهن III اصلاح نمودند. آنان اعلام کردند که بایوچار تولیدشده آن‌ها توانست ۱۹/۸۸ میلی‌گرم نیترات از آب را در گرم بایوچار جذب نماید. Zhao et al. (2023) از برگ نیلوفر آبی به‌عنوان ماده خام برای تهیه کربن فعال شده با  $HNO_3$  استفاده و سپس آن را به‌وسیله آهن سه ظرفیتی اصلاح نمودند. این پژوهش‌گران اعلام کردند که حجم کل منافذ، سطح ویژه و بارهای صفر کربن فعال اصلاح‌شده افزایش یافت. آهن با گروه‌های عاملی واکنش نشان داده و سایت‌های تبادل یونی را برای جذب فراهم کرد.

توانایی آلومینا فعال گرانولی را برای حذف اوره از فاضلاب از طریق جذب بررسی و عملکرد آن را با کربن فعال گرانولی مقایسه شد. نتایج نشان داد که با افزایش pH راندمان حذف افزایش یافت و حداکثر راندمان حذف اوره برای آلومینا فعال گرانولی و کربن فعال گرانولی به‌ترتیب ۲۴ و ۳۱ درصد در  $pH=9/0$  بود (Safwat & Matta, 2018). Hashemi et al. (2016) از پوسته برنج جهت حذف نیترات از آب استفاده نمودند. Diyanitelki et al. (2012) با استفاده از زئولیت، آمونیوم را از آب حذف کرده و عنوان نمودند که با این روش تبادل یون آمونیوم و استفاده از زئولیت می‌توان با حداقل هزینه آمونیوم را از آب حذف کرد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که اصلاح شیمیایی زئولیت با اسید می‌تواند موجب تغییر در خصوصیات سطحی، حذف یون‌های اولیه و افزایش دسترسی به منافذ داخلی شود که این عوامل در نهایت ظرفیت تبادل یونی و جذب آمونیوم را بهبود می‌بخشند. به‌عنوان مثال، Muscarella et al. (2021) گزارش کردند که زئولیت اصلاح‌شده با HCl عملکرد بهتری در جذب و بازیابی  $NH_4^+$  از محلول‌های آبی نسبت به زئولیت خام دارد که این بهبود را می‌توان به افزایش دسترسی به سایت‌های تبادل کاتیونی نسبت داد. همچنین مطالعات دیگر نشان داده‌اند که اصلاح شیمیایی همراه با روش‌های تشدیدشده می‌تواند ظرفیت جذب آمونیوم را به‌طور چشم‌گیری افزایش دهد، که این امر ناشی از تغییرات در ترکیب شیمیایی و ساختار سطح زئولیت است (Jahani et al., 2023). Eslami et al. (2014) با بنتونیت اصلاح‌شده با کلریدریک‌اسید و سولفوریک‌اسید موفق به حذف نیترات از آب آشامیدنی شدند. این پژوهش‌گران بهره‌گیری از جاذب‌های ارزان قیمت را راه‌کار مناسب برای حذف آلودگی‌های محیطی دانستند.

از آنجایی که هرساله مقادیر زیادی از کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی کشور مصرف می‌گردند، این کودها می‌توانند سبب آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی به‌ویژه با ترکیبات نیتروژنه گردند. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی حذف ترکیبات نیتروژنه از منابع آبی با استفاده از روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی پرداخته‌اند. در این میان، فرایند جذب به‌دلیل سادگی طراحی، هزینه نسبتاً پایین و کارایی مناسب، توجه پژوهش‌گران زیادی را به خود جلب کرده است. همانگونه که ذکر شد پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که جاذب‌های آلی و معدنی طبیعی توانایی حذف ترکیبات نیتروژنه از محلول‌های آبی را دارند، با این حال، کارایی این جاذب‌ها در بسیاری از موارد به‌دلیل ظرفیت جذب محدود و انتخاب‌پذیری پایین، نیازمند بهبود است (Bhatnagar & Sillanpää, 2017; Wang et al., 2010).

از سوی دیگر، استفاده از جاذب‌های آلی مانند زغال زیستی نیز به‌طور گسترده برای حذف ترکیبات نیتروژنه مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد که اصلاح زغال زیستی با فلزاتی نظیر آهن می‌تواند موجب افزایش بار سطحی مثبت، توسعه گروه‌های عاملی فعال و در نتیجه بهبود جذب نیترات و آمونیوم گردد (Ahmad et al., 2014; Zhang et al., 2020). با این حال، اغلب پژوهش‌های انجام‌شده تنها بر حذف یک یا دو گونه نیتروژنی تمرکز داشته و بررسی هم‌زمان نیترات، آمونیوم و اوره کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است.

علاوه بر این، در بسیاری از مطالعات پیشین، مقایسه عملکرد جاذب‌های آلی و معدنی اصلاح‌شده تحت شرایط یکسان آزمایشگاهی انجام نشده و اثر اصلاح جاذب‌ها بر بهینه‌سازی هم‌زمان حذف اشکال مختلف نیتروژن به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده است. این موضوع موجب ایجاد خلأ پژوهشی در زمینه انتخاب و بهینه‌سازی جاذب‌های کارآمد و اقتصادی برای تصفیه پساب‌های کشاورزی می‌گردد (Li et al., 2020; Crini & Lichtfouse, 2019).

بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در بررسی هم‌زمان حذف نیترات، آمونیوم و اوره با استفاده از جاذب‌های آلی و معدنی اصلاح‌شده، مقایسه عملکرد آن‌ها تحت شرایط یکسان و ارزیابی اثر اصلاح جاذب‌ها بر افزایش کارایی جذب نهفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای مناسبی برای انتخاب جاذب‌های مؤثر، کم‌هزینه و قابل‌استفاده در مقیاس‌های عملیاتی در تصفیه پساب‌های کشاورزی فراهم آورد.

## ۲. روش‌شناسی پژوهش

به‌منظور بررسی کارایی برخی جاذب‌های آلی و معدنی جهت حذف ترکیبات نیتروژنه (نیترات، آمونیوم و اوره) تیمارهایی شامل هفت جاذب آلی (کاه و پوسته برنج، بایوچار کاه و پوسته برنج تهیه‌شده در دو دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و لئوناردیت)، سه جاذب معدنی (بتونیت، پامیس، زئولیت) انتخاب شد و به‌صورت ساده، اصلاح‌شده با اسید و با آهن در دو اسیدیته  $pH=2$  و  $pH=6$  در سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفتند. به این ترتیب تیمارها شامل موارد زیر بودند:

کاه برنج (کاه)، کاه برنج اصلاح‌شده با هیدروکلریک‌اسید (کاه اسیدی)، کاه برنج اصلاح‌شده با آهن سه ظرفیتی در  $pH=2$  (کاه برنج آهن II)، کاه برنج اصلاح‌شده با آهن سه ظرفیتی در  $pH=6$  (کاه برنج آهن VI)، بایوچار کاه برنج تهیه‌شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد (بایوچار کاه ۳۰۰)، بایوچار کاه برنج تهیه‌شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با اسید (بایوچار کاه ۳۰۰ اسیدی)، بایوچار کاه برنج تهیه‌شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با آهن سه ظرفیتی در  $pH=2$  (بایوچار کاه ۳۰۰ آهن ۲)، بایوچار کاه برنج تهیه‌شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد اصلاح‌شده با آهن سه ظرفیتی در  $pH=6$  (بایوچار کاه ۳۰۰ آهن ۶)، سایر جاذب‌ها نیز به همین شکل تیمار گردیده که ۲۸ تیمار آلی، ۱۲ تیمار معدنی و در مجموع ۴۰ تیمار را شامل گردید.

### ۲.۱. تهیه بایوچار

ابتدا کاه و پوسته برنج پس از شست‌وشو با آب مقطر در آون با درجه حرارت ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت خشک شد. سپس در کوره الکتریکی با شیب دمایی ۵۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت دو ساعت در شرایط کم‌اکسیژن قرار داده شدند تا به بایوچار تبدیل گردید.

### ۲.۲. اصلاح جاذب‌ها با اسید

جهت ساخت نمونه‌های اسیدی از  $HCl$ ، ۱ مولار به نسبت ۱ به ۲۰ استفاده شد. نمونه‌ها به‌همراه اسید به‌مدت دو ساعت

شیک شده و پس از شست‌وشو با آب مقطر در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند. جهت ساخت نمونه اسیدی بنتونیت از نسبت ۱ به ۱۰ اسید استفاده شد. برای تهیه بایوچارهای اصلاح‌شده با اسید (بایوچار اسیدی) نیز بایوچارها با هیدروکلریک‌اسید با نسبت ۱:۲۰ به مدت دو ساعت شیک شدند. پس از سه بار اسیدشویی، نمونه‌ها با آب مقطر شست‌وشو شده و در آون در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند.

### ۳.۲. اصلاح جاذب‌ها با آهن

جهت تهیه بایوچار اصلاح‌شده با آهن، پس از چندین بار شست‌وشوی سطح بایوچار با آب مقطر، به مدت ۴۸ ساعت در آون با درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده و خشک گردید. مقدار ۵ گرم از بایوچار در ۱ لیتر محلول حاوی ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آهن (III) که از نمک  $FeCl_3$  تهیه گردیده، غوطه‌ور گردید. برای مقایسه تأثیر pH محلول آهن بر کارایی حذف نیترات، با استفاده از HCl، ۰/۱ مولار یا NaOH، ۰/۱ مولار pH محلول در ۶ تنظیم شد. سپس مخلوط بایوچارها و محلول آهن (III) هم در pH پایه که حدود ۲ بود (بایوچار آهن ۲) و هم در pH=۶ (بایوچار آهن ۶) به مدت ۲۴ ساعت شیک گردیدند و در ادامه با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ صاف و بایوچارهای برجا مانده با آب مقطر چندین بار شست‌وشو شده تا آهن آزاد حذف شود. پس از آن در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. برای ساخت سایر جاذب‌های اصلاح‌شده با آهن ۵۰ گرم از هر جاذب با ۱ لیتر محلول ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر کلرید آهن (III) به مدت ۲۴ ساعت شیک شد. پس از شست‌وشو با آب مقطر در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردیدند (Samsuri et al., 2013).

### ۴.۲. تعیین مقدار حذف نیترات، اوره و آمونیوم توسط جاذب‌ها

جهت تعیین مقدار حذف نیترات از آب، ابتدا محلولی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر از نیترات تهیه و سپس ۰/۵ گرم از جاذب‌ها به ۴۰ میلی‌لیتر از محلول اضافه گردید. تمامی نمونه‌ها به مدت ۹۰ دقیقه بر روی دستگاه شیکر قرار گرفتند. پس از آن مقدار باقیمانده نیترات در محلول اندازه‌گیری و میزان حذف از طریق رابطه (۱) برای هر یک از جاذب‌ها محاسبه گردید.

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

در رابطه (۱)،  $C_0$  غلظت اولیه در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)،  $C_e$  غلظت تعادلی در محلول (میلی‌گرم بر لیتر) و R درصد حذف می‌باشد. در ادامه جهت محاسبه درصد حذف اوره و آمونیوم از آب توسط جاذب‌ها، مراحل فوق با محلول‌های حاوی اوره و آمونیوم انجام شد و مقادیر حذف تعیین گردید.

### ۵.۲. تحلیل داده‌ها

تحلیل داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با کمک نرم‌افزارهای SPSS و Excel انجام شد. نمودارها و جدول‌ها نیز با کمک نرم‌افزار Excel رسم گردید.

### ۳. یافته‌های پژوهش و بحث

#### ۳.۱. اثر جاذب‌ها به صورت خام بر جذب ترکیبات نیتروژنی (نیترات، اوره و آمونیوم)

نتایج آزمایش‌های به عمل آمده نشان داد که هنگامی که جاذب‌های مورد مطالعه به صورت خام به کار برده شدند بایوچارکاه برنج تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با حدود ۲۷ درصد، زئولیت حدود ۷۲ درصد و کاه برنج با حدود ۲۸ درصد به ترتیب بیش‌ترین میزان جذب را برای نیترات، آمونیوم و اوره داشتند (جدول ۱).

**Table 1.** Comparison of the average percentage of nitrate, urea, and ammonium absorption by the organic and inorganic adsorbents studied in raw form

Adsorbent	Nitrate	Urea	Ammonium
Rice straw	19.03 e	27.79a	43.11 <sup>c</sup>
Straw Biochar 300	27.40 a	13.63b	43.06 <sup>c</sup>
Straw Biochar 600	26.00 c	11.93d	31.75 <sup>f</sup>
Rice husk	20.70d	9.25f	33.62 <sup>d</sup>
Rice husk biochar 300	18.20 f	13.30c	29.30 <sup>g</sup>
Rice husk biochar 600	26.89 b	7.24h	56.51 <sup>b</sup>
Leonardite	5.96 i	9.66e	6.08 <sup>i</sup>
Bentonite	6.89h	5.28i	33.44 <sup>e</sup>
Pomice	6.95 h	8.64g	21.20 <sup>h</sup>
Zeolite	9.60 g	13.00bc	71.59 <sup>a</sup>

Summary of the analysis of variance results

\*\* Indicates a significant difference at the 1% probability level, and in each column, means with the same letter or letters do not differ significantly at the 5% probability level using Duncan's range test (the numbers 300 and 600 indicate the temperature of biochar production in degrees Celsius).

این نتایج بیانگر آن هستند که عملکرد جاذب‌های خام در حذف ترکیبات نیتروژنه به‌طور معنی‌داری وابسته به ماهیت شیمیایی آلاینده و ویژگی‌های سطحی جاذب است. بیش‌ترین راندمان حذف نیترات توسط بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. این موضوع را می‌توان به حضور گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار نظیر هیدروکسیل و کربوکسیل در بایوچارهای تولیدشده در دماهای پایین‌تر نسبت داد که موجب افزایش قطبیت سطح و تسهیل برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی با یون نیترات می‌گردد. مطالعات پیشین نیز گزارش کرده‌اند که بایوچارهای پیرولیز شده در دماهای پایین، به‌دلیل بار سطحی منفی کم‌تر و حفظ گروه‌های عاملی فعال، کارایی بالاتری در جذب آنیون‌ها نشان می‌دهند (Ahmad *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2020).

Akbarizadeh *et al.* (2022) نیز از کاه برنج به‌عنوان جاذب استفاده کردند و کاه برنج را جاذبی کارآمد، ارزان قیمت و سازگار با محیط زیست معرفی نمودند. این پژوهش‌گران با بررسی‌هایی که با طیف مادون قرمز (FT-IR) و میکروسکوپ روبشی (SEM) انجام دادند اعلام کردند که کاه برنج دارای گروه‌های عاملی مختلفی است. سطحی ناهمگن و نامنظم داشته و دارای حفرات و تخلخل‌های ریز و درشت متعددی است که سبب افزایش سطح تماس جاذب و جذب شونده می‌شود. در نتیجه ظرفیت جذب را افزایش می‌دهد. Zamani *et al.* (2024)، در پژوهشی از هشت نوع بایوچار مختلف (کاه و پوسته برنج، باگاس نیشکر و خرده چوب نراد تولیدشده در دماهای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) جهت جذب نیترات از آب استفاده نمودند. آنان اعلام کردند که از بین جاذب‌های مورد مطالعه، بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین مقدار نیترات را جذب کرد که با مشاهدات مقاله حاضر همخوانی داشت.

در مقابل، بیش‌ترین میزان جذب آمونیوم توسط زئولیت خام به‌دست آمد که این امر با ساختار کریستالی و ظرفیت تبادل کاتیونی بالای زئولیت‌ها مطابقت دارد. زئولیت‌ها به‌طور طبیعی دارای سایت‌های تبادل یونی هستند که امکان جایگزینی یون آمونیوم با کاتیون‌های موجود در ساختار شبکه را فراهم می‌کند و در نتیجه حذف مؤثر آمونیوم از محلول‌های آبی را ممکن می‌سازد. این یافته با نتایج گزارش شده در مطالعات مختلف که زئولیت را یکی از مؤثرترین جاذب‌ها برای حذف آمونیوم معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد (Bhatnagar & Sillanpää, 2017; Wang *et al.*, 2010).

Kizito *et al.* (2015) اعلام کردند که بایوچار چوب ۵۴/۸۶ میلی‌گرم و بایوچار پوسته برنج ۱۴/۴۷ میلی‌گرم آمونیوم را جذب کرد. Diyantelki *et al.* (2012) نیز از زئولیت جهت حذف آمونیوم از آب‌های آلوده بهره بردند و به نتایجی مشابه دست پیدا کردند. این پژوهش‌گران بیان کردند که به‌کارگیری زئولیت کلینوپتیلولایت با حداقل هزینه می‌تواند آمونیوم را از آب حذف نماید.

هم‌چنین نتایج نشان داد که بیش‌ترین راندمان حذف اوره توسط کاه برنج خام حاصل شد. این موضوع می‌تواند به

ماهیت آلی اوره و امکان برقراری پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های ضعیف فیزیکی بین مولکول‌های اوره و اجزای لیگنوسولوزی کاه برنج نسبت داده شود. سطح ناهمگن و حضور گروه‌های عاملی متعدد در بقایای گیاهی خام می‌تواند زمینه جذب ترکیبات آلی کوچک و قطبی مانند اوره را فراهم آورد. گزارش‌های پیشین نیز به توان بالقوه بقایای گیاهی خام در جذب ترکیبات آلی محلول اشاره کرده‌اند (Crini & Lichtfouse, 2019; Li *et al.*, 2020).

### ۲.۳. اثر اصلاح جاذب‌ها بر میزان جذب نیترات، اوره و آمونیوم

#### ۳.۲.۱. اثر تبدیل کاه و پوسته برنج به بایوچار

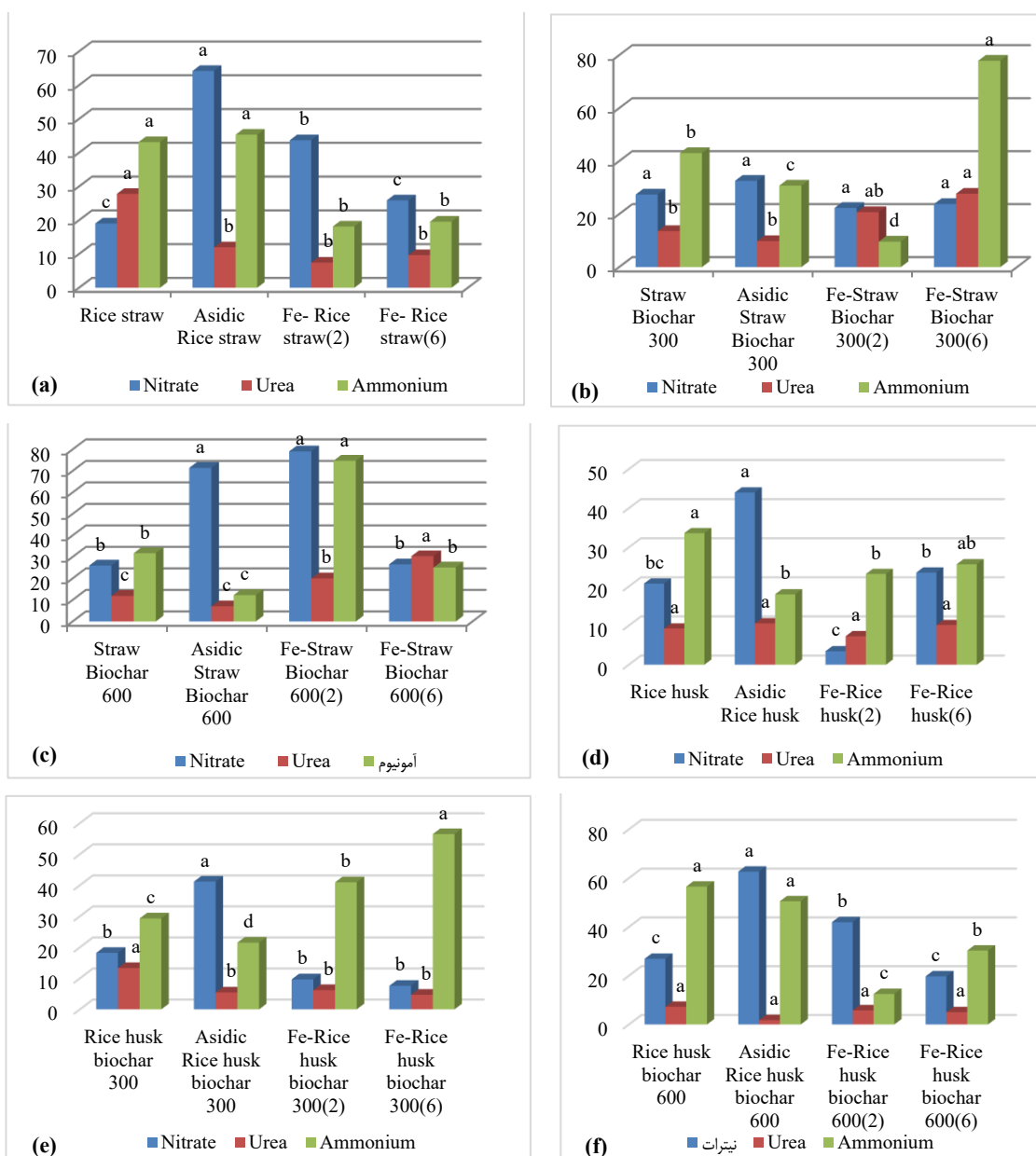
تبدیل کاه برنج به بایوچار در دمای ۳۰۰ درجه و دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب افزایش ۸ درصدی و ۷ درصدی جذب نیترات شده است، اما تأثیر مثبتی در جذب اوره و آمونیوم نداشته است. تبدیل پوسته برنج به بایوچار نیز در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد توانست جذب نیترات و آمونیوم را افزایش دهد (جدول ۱). بایوچار دارای تخلخل بالا و گروه‌های عاملی مختلفی از جمله کربوکسیل، هیدروکسیل و فنولیک بوده که به‌طور مؤثری می‌تواند با آلاینده‌ها پیوند برقرار کند (Uchimiya *et al.*, 2010; Laird *et al.*, 2011). Nabizadeh *et al.* (2018) نیز اعلام کردند که بایوچار دارای سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و گروه‌های عاملی است که جذب بالایی دارد. به‌نظر می‌رسد ایجاد چنین ویژگی‌هایی در بایوچار سبب افزایش ظرفیت جذب آن شده که می‌تواند به‌عنوان یک جاذب مؤثر برای آلاینده‌ها در خاک و آب عمل نماید.

#### ۳.۲.۲. اثر اصلاح جاذب‌ها با اسید و آهن

در شکل‌های (۱) و (۲) اثر اصلاح جاذب‌های آلی و معدنی مورد مطالعه با اسید و آهن در شرایط  $pH=2$  و  $pH=6$  نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که اصلاح کردن جاذب‌ها در اغلب موارد سبب افزایش کارایی و جذب آن‌ها شده است، به‌گونه‌ای که اسیدی کردن کاه برنج سبب افزایش ۴۵ درصدی جذب نیترات شد. این افزایش برای اصلاح با آهن در  $pH=2$  حدود ۲۵ درصد و در  $pH=6$  در حدود ۶ درصد بوده است. این در حالی است که اصلاح کردن کاه برنج بر میزان جذب اوره و آمونیوم تأثیر مثبت معناداری نداشته است (شکل ۱-a).

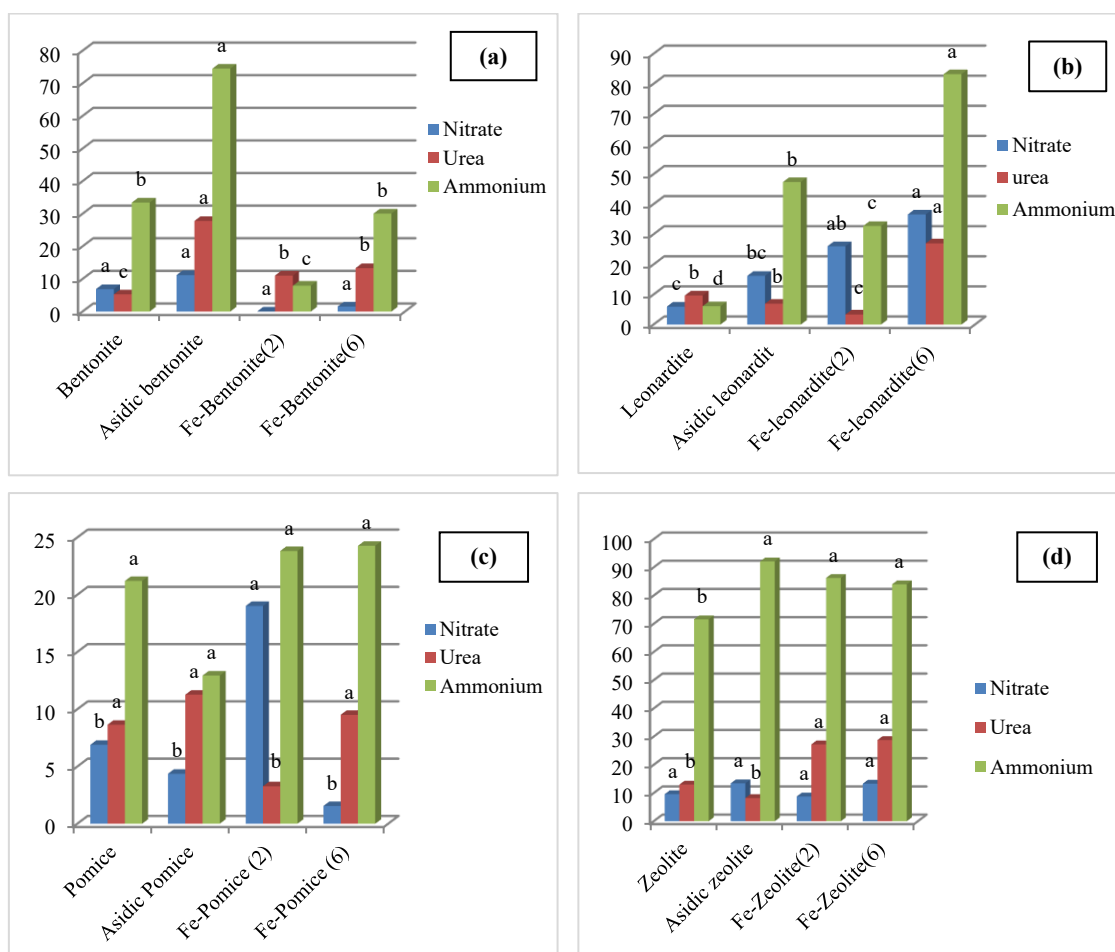
بایوچار کاه برنج ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با آهن در  $pH=6$  حدود ۸۱ درصد جذب آمونیوم بیش‌تری نسبت به بایوچار ساده ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد داشت و مقدار بیش‌تری اوره نیز جذب کرد (شکل ۱-b). اسیدی کردن بایوچار کاه تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار حذف نیترات را از مقدار ۲۶ درصد به ۷۹ درصد رسانید که از نظر آماری با آهن  $pH=2$  با حدود ۷۱ درصد در یک رده قرار گرفت. اصلاح بایوچار کاه ۶۰۰ با آهن ۲ بر آمونیوم نیز تأثیر خوبی داشته و حدود ۲ برابر به افزایش جذب کمک کرده است. در جذب اوره نیز اصلاح با آهن ۲ و آهن ۶ مؤثر بود (شکل ۱-c). اصلاح کردن پوسته برنج با اسید سبب افزایش حدود دو برابری جذب نیترات شد. در مورد بایوچار پوسته برنج ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد و اصلاح با اسید در جذب نیترات تأثیر معنی‌داری داشت (شکل ۱-d, e, f). در لئوناردیت جذب نیترات از ۵ درصد در لئوناردیت ساده به ۱۶، ۲۶ و ۳۶ درصد به‌ترتیب در اصلاح با اسید و آهن در  $pH$ های ۲ و ۶ رسید. این تأثیر برای آمونیوم بسیار مشهودتر بود و از ۹ درصد به حدود ۴۷، ۳۳ و ۸۳ درصد به‌ترتیب در اصلاح با اسید و با آهن در  $pH$ های ۲ و ۶ درصد رسید. اصلاح با آهن در  $pH=6$  در جذب اوره تأثیر بیش‌تری نشان داد (شکل ۲-a). در بنتونیت، اسیدی کردن آن بیش‌ترین اثر را بر جذب هر سه ترکیب نیترات، اوره و آمونیوم داشته است (شکل ۲-b). اصلاح پامیس با آهن ۲ مقدار جذب نیترات را از حدود ۷ درصد به ۱۹ درصد رساند، اما در مورد اوره اسیدی کردن پامیس تأثیر بیش‌تری داشت (شکل ۲-c). کارایی بالای زئولیت در جذب آمونیوم با اسیدی کردن آن تا حدود

۹۲/۵ درصد افزایش یافت (شکل d-۲). به نظر می رسد اصلاح با اسید بر اندازه ذرات و مساحت سطحی مؤثر بوده و ظرفیت جذب را بهبود می بخشد. مطابق نتایج به دست آمده Muscarella *et al.* (2021) گزارش کردند که زئولیت اسیدی شده توانایی بالاتری در جذب و بازیابی یون آمونیوم نسبت به زئولیت خام دارد. این بهبود عملکرد به حذف یون های مسدودکننده، افزایش دسترسی به منافذ داخلی و فعال تر شدن سایت های تبادل نسبت داده شده است. Jahani *et al.* (2023) نیز گزارش دادند که ترکیب اصلاح شیمیایی با روش های تشدیدکننده می تواند با ایجاد تغییر در ترکیب شیمیایی و ساختار سطح زئولیت، ظرفیت جذب آمونیوم را به طور قابل توجهی افزایش دهد.



**Figure 1.** Effect of modifying the studied adsorbents with acid and iron at pH 2 and 6 on the adsorption of nitrate, urea, and ammonium: (a) Rice straw (b) Rice straw biochar 300 (c) Rice straw biochar 600 (d) Rice husk (e) Rice husk biochar 300 (f) Rice husk biochar 600 (The numbers 300 and 600 in the figures indicate the production temperature of the biochars in degrees Celsius).

Arabi & Asgari (2013) در مطالعه‌ای با استفاده از زئولیت اصلاح‌شده مشاهده نمودند که با افزایش زمان تماس و غلظت جاذب راندمان حذف افزایش یافت، درحالی‌که با افزایش غلظت نیترات راندمان حذف کاهش پیدا کرد و حداکثر جذب برای نیترات را ۸۷ درصد به دست آمد. آنان اعلام کردند که زئولیت اصلاح‌شده با توجه به استخراج زئولیت از معادن کشور و تأثیر به‌سزای آن در حذف نیترات از منابع آبی می‌تواند به‌عنوان یک روش کم هزینه و کارآمد استفاده شود. Khajavi Shojaei *et al.* (2019) از بایوچار نی جهت حذف نیترات و آمونیوم از آب بهره بردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که بایوچار ظرفیت خوبی برای جذب نیترات و آمونیوم داشته و می‌تواند به‌عنوان یک جاذب کارآمد مورد استفاده قرار گیرد. Min *et al.* (2020) اظهار داشتند که سطوح بایوچار معمولاً دارای بار منفی هستند که می‌تواند جذب کاتیونی با بار مثبت را تسهیل کند، اما از جذب آنیون‌هایی مانند نیترات و فسفات جلوگیری می‌کند. بنابراین، بایوچار ساده اغلب برای حفاظت از کیفیت آب ناکارآمد و ناپایدار است. این پژوهش‌گران اعلام کردند که در مقایسه با بایوچار خام، بایوچار اصلاح‌شده با آهن توانست نیتروژن و فسفر را به‌طور مؤثر حذف کند. توانایی جذب افزایش یافته بایوچار آهن در درجه اول به تشکیل لایه اکسیدهای آهن و توسعه ساختار منافذ نسبت داده شد که این عوامل ممکن است دلایلی بر افزایش جذب بایوچار اصلاح‌شده در پژوهش حاضر باشد.



**Figure 2.** Effect of modifying the studied adsorbents with acid and iron at pH 2 and 6 on the adsorption of nitrate, urea, and ammonium: (a) Leonardite (b) Bentonite (c) Zeolite (d) Pumice (The numbers 300 and 600 in the figures indicate the production temperature of the biochars in degrees Celsius).

Zhang *et al.* (2020) ظرفیت جذب آمونیوم توسط بایوچار اصلاح‌نشده را کم‌تر از ۲۰ میلی‌گرم بر گرم گزارش نمودند و ظرفیت جذب آن را نسبتاً کم دانسته و اعلام کردند که این جذب بیش‌تر از طریق تبادل یونی و یا برهم‌کنش با گروه‌های عاملی سطوح بایوچار رخ می‌دهد. در مورد نیترات به دلیل وجود دافعه الکترواستاتیکی بین سطوح بایوچار دارای بار منفی و نیترات با بار منفی حتی کم‌تر است. اصلاح بایوچار توسط فلزات، بار سطحی را تغییر داده و اکسیدهای فلزی روی سطح بایوچار افزایش می‌یابند در نتیجه ظرفیت برای حذف آمونیوم و نیترات به‌طور قابل‌توجهی نسبت به بایوچار اصلاح‌نشده بیش‌تر می‌شود.

Heaney *et al.* (2020) نیز ذکر کردند که نیترات به شکل آنیون ( $\text{NO}_3^-$ ) در آب وجود دارد و بین نیترات و سطح بایوچار با بار منفی دافعه الکترواستاتیکی وجود داشته که از مهم‌ترین موانع جذب نیترات توسط بایوچار و زیست‌توده‌هاست. بنابراین بدیهی است که بدون پروتونه کردن سطح آن‌ها، کارایی و اثربخشی پایینی را دارا باشند. Ren *et al.* (2020) نشان دادند که اصلاح با آهن کارایی جذب نیتروژن آمونیاکی را در کربن فعال افزایش داد و نتایج حاکی از افزایش حجم کل منافذ، سطح ویژه و نقطه بار صفر کربن فعال پس از اصلاح بود. در مجموع با شواهد به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح جاذب‌ها با آهن و اسید سبب افزایش میزان جذب و در نتیجه حذف ترکیبات نیتروژنه از آب می‌شوند که دلیل آن را می‌توان به افزایش سطح ویژه، توسعه ساختار منافذ، تغییر بار سطحی و افزایش اکسیدهای فلزی در سطح جاذب‌ها نسبت داد.

### ۳.۳. بهترین جاذب در میان جاذب‌های مورد مطالعه

#### ۳.۳.۱. بهترین جاذب آلی

در میان جاذب‌های آلی، بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با اسید بیش‌ترین مقدار نیترات را آب جذب کرد. این در حالی بود که بایوچار تولیدشده در دمای ۶۰۰ سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با آهن در  $\text{pH}=6$  بیش‌ترین میزان حذف اوره را از محیط آب نشان داد. اما از لحاظ آماری با کاه برنج، بایوچار کاه برنج ۳۰۰ آهن ۶ و لئوناردیت آهن ۶ در یک جایگاه قرار گرفت. لئوناردیت اصلاح‌شده با آهن ۶ توانست حدود ۸۳ درصد آمونیوم موجود در آب را حذف کند و همراه با بایوچار کاه ۳۰۰ آهن ۶ و بایوچار کاه ۶۰۰ آهن ۲ در میان اصلاح‌کننده‌های آلی بالاترین درصد حذف را نشان داد (جدول ۲).

در واقع نتایج حاصل از بررسی جاذب‌های آلی اصلاح‌شده نشان داد که نوع اصلاح، دمای تولید بایوچار و شرایط  $\text{pH}$  نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی حذف ترکیبات مختلف نیتروژنه دارند. بیش‌ترین میزان حذف نیترات در میان جاذب‌های آلی توسط بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با اسید مشاهده شد. این افزایش کارایی را می‌توان به توسعه سطح ویژه، افزایش تخلخل و ایجاد گروه‌های عاملی اسیدی بر سطح بایوچار نسبت داد که موجب بهبود برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و افزایش تمایل سطح جاذب به جذب یون‌های نیترات می‌شود. مطالعات پیشین نیز گزارش کرده‌اند که اصلاح اسیدی بایوچار، به ویژه در دماهای بالای پیرولیز، می‌تواند ظرفیت جذب آنیون‌ها را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد (Ahmad *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2020). در واقع عملکرد بهتر بایوچار کاه برنج تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در این پژوهش در جذب نیترات، با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان دادند دمای بالای پیرولیز موجب افزایش سطح ویژه، کاهش محتوای مواد فرار و افزایش گروه‌های عاملی اکسیژنی می‌شود که نقش کلیدی در جذب آنیون‌هایی مانند نیترات دارند (Li *et al.*, 2020; Ahmad *et al.*, 2014).

**Table 2.** Comparison of the average effects of organic amendments on the percentage of ammonium, urea and nitrate adsorption

Adsorbent	Nitrate	Urea	Ammonium
Rice Straw	19.03 g-k	27.79 <sup>a</sup>	43.11 <sup>cd</sup>
Asidic Rice straw	64.19 b	11.97 <sup>e-g</sup>	45.32 <sup>c</sup>
Fe- Rice straw(2)	43.66 c	7.43 <sup>e-i</sup>	18.13 <sup>i-k</sup>
Fe- Rice straw(6)	25.87 e-h	9.66 <sup>e-h</sup>	19.56 <sup>h-k</sup>
Straw Biochar 300	27.40 d-h	13.63 <sup>de</sup>	43.06 <sup>cd</sup>
Asidic Straw Biochar 300	32.60 c-g	9.82 <sup>e-h</sup>	30.76 <sup>e-g</sup>
Fe-Straw Biochar 300(2)	22.35 f-j	20.74 <sup>b</sup>	9.63 <sup>kl</sup>
Fe-Straw Biochar 300(6)	23.83 f-i	27.71 <sup>a</sup>	77.917 <sup>a</sup>
Straw Biochar 600	26.00 e-h	11.93 <sup>e-f</sup>	31.75 <sup>e-g</sup>
Asidic Straw Biochar 600	71.43ab	7.05 <sup>c-h</sup>	12.28 <sup>j-l</sup>
Fe-Straw Biochar 600(2)	79.08a	20.03 <sup>cd</sup>	74.76 <sup>a</sup>
Fe-Straw Biochar 600(6)	26.54 e-h	30.35 <sup>a</sup>	25.12 <sup>f-i</sup>
Rice husk	20.70f-k	9.25 <sup>e-i</sup>	33.62 <sup>d-f</sup>
Asidic Rice husk	44.02 c	10.58 <sup>e-h</sup>	17.99 <sup>i-k</sup>
Fe-Rice husk(2)	3.44 l	7.28 <sup>e-i</sup>	23.20 <sup>f-i</sup>
Fe-Rice husk(6)	23.56 f-i	10.14 <sup>e-i</sup>	25.68 <sup>f-i</sup>
Rice husk biochar 300	18.20 g-l	13.30 <sup>d-f</sup>	29.30 <sup>f-h</sup>
Asidic Rice husk biochar 300	41.17 c-e	5.44 <sup>g-i</sup>	21.49 <sup>g-j</sup>
Fe-Rice husk biochar 300(2)	9.66 i-l	6.20 <sup>e-i</sup>	40.92 <sup>e-c</sup>
Fe-Rice husk biochar 300(6)	7.59 j-l	4.70 <sup>g-i</sup>	56.46 <sup>b</sup>
Rice husk biochar 600	26.89 d-h	7.24 <sup>e-i</sup>	56.51 <sup>b</sup>
Asidic Rice husk biochar 600	62.63 b	1.78 <sup>i</sup>	50.51 <sup>bc</sup>
Fe-Rice husk biochar 600(2)	41.90 cd	5.78 <sup>f-i</sup>	12.49 <sup>j-l</sup>
Fe-Rice husk biochar 600(6)	19.75 g-k	5.05 <sup>g-i</sup>	30.27 <sup>f-h</sup>
Leonardite	5.96 kl	9.66 <sup>e-f</sup>	6.08 <sup>l</sup>
Asidic leonardit	16.19 h-l	6.94 <sup>e-i</sup>	47.37 <sup>bc</sup>
Fe-leonardite(2)	26.02 e-h	3.35 <sup>hi</sup>	32.75 <sup>d-f</sup>
Fe-leonardite(6)	36.59 c-f	26.99 <sup>a</sup>	83.19 <sup>a</sup>

Summary of the analysis of variance results

\*\*

\*\*

\*\*

\*\* Indicates a significant difference at the 1% probability level and in each column, means with the same letter or letters do not have a significant difference at the 5% probability level using Duncan's test (numbers 2 and 6 indicate iron amendment at pHs 2 and 6 and numbers 300 and 600 indicate the temperature of biochar production in degrees Celsius).

Marzi *et al.* (2016) با یوچارهای تولیدشده در دماهای ۴۵۰، ۶۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد را جهت حذف نیترات از محلول آبی استفاده نمودند و با یوچار تولیدی در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد توانایی بیشتری در خارج‌سازی نیترات از محلول آبی نشان داد. این پژوهش‌گران اعلام داشتند که در شرایط بهینه با یوچار می‌تواند تا ۹۶ درصد نیترات را از محلول خارج کند. Khajavi Shojaei *et al.* (2019) نیز جذب نیترات و آمونیوم توسط با یوچار را بررسی نمودند و اعلام کردند که با یوچار گیاه نی می‌تواند از محلول‌های آبی ۷۳/۵ میلی‌گرم بر گرم نیترات و ۴۲/۶ میلی‌گرم بر گرم آمونیوم جذب نماید. Wang *et al.* (2015) در آزمایشی که با با یوچار بلوط انجام دادند، بیان کردند که با یوچار توانایی جذب نیترات و آمونیوم را از آب دارد که با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش مطابقت دارد. Xia *et al.* (2022) نیز در پژوهشی جهت حذف نیترات از با یوچار حاصل از بقایا و کاه ذرت در ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده نمودند. این با یوچار توانست نیترات را از رواناب کشاورزی حذف نماید و به‌عنوان یک جاذب برای نیترات عمل نماید.

جذب بالای آمونیوم به‌وسیله لئوناردیت می‌تواند به‌دلیل وجود گروه‌های عاملی در لئوناردیت، به‌ویژه کربوکسیل و فنول، پس از اصلاح با آهن باشد که ویژگی‌های تبادل یونی بالایی از خود نشان می‌دهند و حذف آمونیوم را تسهیل می‌کنند (Huang *et al.*, 2022). با یوچارهای کاه برنج اصلاح‌شده با آهن در pH=۶ و pH=۲ نیز در این زمینه عملکرد مناسبی داشتند و همراه با لئوناردیت در یک سطح آماری قرار گرفتند (جدول ۲). این نشان می‌دهد که اصلاح با آهن می‌تواند ظرفیت جذب یون‌های آمونیوم را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد که مطابق با گزارش‌های پیشین در این زمینه است (Song *et al.*, 2014).

در مورد حذف اوره، با یوچار کاه برنج ۶۰۰ اصلاح‌شده با آهن در pH=۶ بیش‌ترین عملکرد را نشان داد (جدول ۲). علت این امر را می‌توان به حضور گونه‌های فعال آهن نسبت داد که می‌تواند با اوره واکنش داده یا آن را کمپلکس کنند (Zhou *et al.*, 2017). هم‌چنین pH محلول در نزدیکی خنثی باعث حفظ پایداری سطح با یوچار و گروه‌های عاملی درگیر در جذب می‌شود، درحالی‌که pHهای بسیار اسیدی یا بازی ممکن است این کارایی را کاهش دهند (Chen *et al.*, 2011). علاوه بر آن این موضوع می‌تواند ناشی از ایجاد سایت‌های فعال حاوی آهن بر سطح با یوچار و افزایش توانایی برقراری

پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های سطحی بین مولکول‌های اوره و کمپلکس‌های آهن-کربن باشد. از سوی دیگر، ساختار آروماتیک‌تر بایوچار تولیدشده در دمای بالا می‌تواند موجب پایداری بیش‌تر این برهم‌کنش‌ها و افزایش ظرفیت جذب اوره گردد. یافته‌های مشابهی در پژوهش‌های پیشین در خصوص نقش اصلاح آهنی در افزایش جذب ترکیبات آلی محلول گزارش شده است (Li *et al.*, 2020).

### ۲.۳.۳. بهترین جاذب معدنی

در میان اصلاح‌کننده‌های معدنی، پامیس آهن ۲ مقادیر بیش‌تری از نیترات را از آب حذف کرد، اما در مورد اوره زئولیت اصلاح‌شده با آهن در pHهای ۶ و ۲ و بنتونیت اسیدی نسبت به سایر اصلاح‌کننده‌های معدنی کارآمدتر عمل کردند، این در حالی بود که زئولیت اسیدی توانست حدود ۹۲ درصد آمونیوم موجود در محلول آبی را از آن خارج کرده و بهترین نتیجه را نشان دهد (جدول ۳).

همچنان که مشاهده شد پامیس اصلاح‌شده با آهن در pH=۲ بیش‌ترین میزان نیترات را جذب کرد که می‌تواند ناشی از افزایش گروه‌های فعال سطحی و ظرفیت تبادل یونی در حضور یون‌های آهن باشد (Darezereshki *et al.*, 2023). همچنان که در این مطالعه مشاهده شد (Mirzadeh-Ahari *et al.*, 2021) نیز اذعان کردند که زئولیت می‌تواند مقادیر بالایی از آمونیوم را از آب جذب نماید. این پژوهش‌گران از دو زئولیت از معادن فیروزکوه و گرمسار جهت جذب آمونیوم استفاده نمودند که در نهایت زئولیت طبیعی فیروزکوه بیش‌ترین ظرفیت جذب آمونیوم را نشان داد. Hosseini & Bakhshandeh-Moghadam (2024) نیز با توجه به نتایج پژوهش‌هایشان، پامیس را یک گزینه ارزان قیمت و کارآمد برای جذب نیترات از آب معرفی کردند. در مورد اوره، زئولیت اصلاح‌شده با آهن در pHهای ۶ و ۲ و همچنین بنتونیت اسیدی نسبت به سایر جاذب‌های معدنی کارآمدتر عمل کردند که این یافته با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد که نشان داده‌اند اصلاح سطحی زئولیت با یون‌های فلزی یا اسیدی‌سازی بنتونیت موجب افزایش تعداد سایت‌های فعال و بهبود جذب ترکیبات نیتروژن‌دار می‌شود (Latifah *et al.*, 2017). از سوی دیگر، زئولیت اسیدی توانست حدود ۹۲ درصد آمونیوم موجود در محلول را حذف کند و بهترین نتیجه را نشان دهد. این کارایی بالا با مطالعاتی هم‌راستا است که نشان داده‌اند تبادل یونی در زئولیت‌های اصلاح‌شده با اسید به‌طور ویژه برای جذب آمونیوم مؤثر است و ظرفیت جذب آن‌ها می‌تواند تا بیش از ۲۵-۳۰ mg/g برسد (Zhao *et al.*, 2024). مکانیسم غالب در این فرآیند، تبادل کاتیونی بین  $NH_4^+$  و یون‌های سدیم/کلسیم موجود در ساختار زئولیت است که با افزایش سطح ویژه و تعداد سایت‌های فعال پس از اصلاح اسیدی تقویت می‌شود.

**Table 3.** Comparison of the average effects of inorganic amendments on the percentage of ammonium, urea and nitrate adsorption

Adsorbent	Nitrate	Urea	Ammonium
Bentonite	6.89 <sup>ab</sup>	5.28 <sup>c</sup>	33.44 <sup>d</sup>
Asidic bentonite	11.18 <sup>ab</sup>	27.80 <sup>a</sup>	74.51 <sup>bc</sup>
Fe-Bentonite(2)	0.00 <sup>b</sup>	11.04 <sup>b</sup>	7.94 <sup>f</sup>
Fe-Bentonite(6)	1.55 <sup>b</sup>	13.31 <sup>b</sup>	30.06 <sup>d</sup>
Pomice	6.95 <sup>ab</sup>	8.64 <sup>bc</sup>	21.20 <sup>de</sup>
Asidic Pomice	4.36 <sup>b</sup>	11.27 <sup>b</sup>	12.94 <sup>ef</sup>
Fe-Pomice (2)	19.01 <sup>a</sup>	3.27 <sup>d</sup>	23.81 <sup>de</sup>
Fe-Pomice (6)	1.55 <sup>b</sup>	9.50 <sup>bc</sup>	24.27 <sup>de</sup>
Zeolite	9.60 <sup>ab</sup>	13.00 <sup>b</sup>	71.59 <sup>c</sup>
Asidic zeolite	13.46 <sup>ab</sup>	8.23 <sup>bc</sup>	92.10 <sup>a</sup>
Fe-Zeolite(2)	8.77 <sup>ab</sup>	27.25 <sup>a</sup>	86.24 <sup>ab</sup>
Fe-Zeolite(6)	13.32 <sup>ab</sup>	28.79 <sup>a</sup>	83.99 <sup>ab</sup>
Summary of the analysis of variance results	**	**	**

\*\* Indicates a significant difference at the 1% probability level and in each column, means with the same letter or letters do not have a significant difference at the 5% probability level using Duncan's test (numbers 2 and 6 indicate iron amendment at pHs 2 and 6 and numbers 300 and 600 indicate the temperature of biochar production in degrees Celsius).

### ۳.۳.۳. بهترین جاذب در میان جاذب‌های آلی و معدنی مورد مطالعه

براساس نتایج این پژوهش، بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با آهن سه‌ظرفیتی در  $\text{pH}=2$ ، با دستیابی به حدود ۷۹ درصد جذب نیترات، بالاترین کارایی را در میان جاذب‌های آلی و معدنی مورد بررسی نشان داد (جدول‌های ۲ و ۳). این برتری را می‌توان به اثر هم‌زمان دمای بالای پیرولیز و اصلاح شیمیایی با آهن نسبت داد، به طوری که پیرولیز در دماهای بالا سبب افزایش پایداری ساختار کربنی، توسعه شبکه منافذ و افزایش سطح ویژه بایوچار می‌شود، در حالی که اصلاح با آهن سه‌ظرفیتی موجب ایجاد سایت‌های فعال جدید برای جذب آنیون‌هایی مانند نیترات می‌گردد (Zhao et al., 2023; Ahmad et al., 2014).

افزایش چشم‌گیر راندمان جذب نیترات از حدود ۲۶ درصد در بایوچار ساده تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۷۹ درصد در بایوچار اصلاح‌شده با آهن در  $\text{pH}=2$ ، بیانگر نقش تعیین‌کننده آهن در تغییر خصوصیات فیزیکوشیمیایی سطح جاذب است. مطالعات نشان داده‌اند که اصلاح بایوچار با ترکیبات آهن می‌تواند منجر به برهم‌کنش یون‌های آهن با گروه‌های عاملی اکسیژنی نظیر کربوکسیل و هیدروکسیل شده و در نتیجه کمپلکس‌های پایدار آهن-اکسیژن بر سطح جاذب تشکیل شود. این فرایند علاوه بر افزایش بار مثبت سطح و جابه‌جایی نقطه بار صفر ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ ) به مقادیر بالاتر، موجب تقویت برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و بهبود جذب آنیون‌هایی نظیر نیترات، به‌ویژه در شرایط اسیدی می‌شود (Zhao et al., 2023; Fang et al., 2015).

در مورد حذف اوره، نتایج نشان داد که بایوچار کاه برنج ۶۰۰ اصلاح‌شده با آهن در  $\text{pH}=6$  بیش‌ترین کارایی را داشته و میزان جذب اوره از حدود ۱۲ درصد در بایوچار ساده به حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است (جدول ۲). این تفاوت را می‌توان به ماهیت غیر یونی اوره و وابستگی جذب آن به برهم‌کنش‌هایی نظیر پیوند هیدروژنی، جذب فیزیکی در منافذ و برهم‌کنش با گروه‌های عاملی سطحی نسبت داد. در  $\text{pH}$  نزدیک به خنثی، پایداری ساختار بایوچار و دسترسی بهتر مولکول‌های اوره به منافذ داخلی افزایش یافته و حضور آهن می‌تواند نقش پل بین اوره و سطح جاذب را ایفا کند (Zhang et al., 2020; Chen et al., 2011).

از سوی دیگر، نتایج مربوط به آمونیوم نشان داد که زئولیت اصلاح‌شده با اسید کلریدریک با راندمان جذب ۹۲ درصد، بهترین عملکرد را در حذف این یون کاتیونی داشته است. زئولیت‌ها به‌طور ذاتی به دلیل ساختار آلومینوسیلیکاتی و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، جاذب‌های مؤثری برای آمونیوم محسوب می‌شوند. اصلاح اسیدی زئولیت می‌تواند با حذف ناخالصی‌ها، کاهش اندازه ذرات، افزایش مساحت سطحی ویژه و آزادسازی سایت‌های تبادل یونی، ظرفیت جذب را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Muscarella et al., 2021; Wang & Peng, 2010). به‌گونه‌ای که در این پژوهش، میزان جذب آمونیوم از ۷۹ درصد در زئولیت ساده به ۹۲ درصد در زئولیت اسیدی افزایش یافت (جدول ۳).

اما در مجموع به‌نظر می‌رسد بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با آهن سه‌ظرفیتی در  $\text{pH}=2$  با جذب حدود ۷۹ درصدی نیترات، حدود ۷۵ درصدی آمونیوم و ۲۰ درصدی اوره در میان تمامی جاذب‌ها توانست در حذف هم‌زمانی این ترکیبات موفق‌تر عمل کند.

### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که انتخاب نوع جاذب و روش اصلاح آن نقش تعیین‌کننده‌ای در حذف ترکیبات نیتروژنی از پساب‌های کشاورزی دارد. بررسی جاذب‌های آلی و معدنی مورد مطالعه بیانگر آن بود که هر یک از این جاذب‌ها بسته به

ماهیت آلاینده، عملکرد متفاوتی در حذف نیترات، اوره و آمونیوم از محیط آبی از خود نشان می‌دهند و اصلاح شیمیایی آن‌ها می‌تواند به‌طور معنی‌داری کارایی جذب را افزایش دهد.

براساس یافته‌ها، بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با آهن سه‌ظرفیتی در  $\text{pH}=2$ ، با جذب حدود ۷۹ درصد نیترات، بیش‌ترین کارایی را در حذف این یون آنیونی نشان داد. همچنین بایوچار کاه برنج ۶۰۰ اصلاح‌شده با آهن در  $\text{pH}=6$  توانست حدود ۳۰ درصد اوره موجود در آب را حذف نماید که بیانگر نقش مؤثر اصلاح با آهن در بهبود برهم‌کنش بایوچار با ترکیبات نیتروژنی غیریونی است. در مقابل، زئولیت اصلاح‌شده با کلریدریک‌اسید با جذب حدود ۹۲ درصد آمونیوم، بهترین عملکرد را در حذف این یون کاتیونی از خود نشان داد که این امر به افزایش ظرفیت تبادل یونی و توسعه سطح ویژه زئولیت پس از اصلاح اسیدی نسبت داده می‌شود. بایوچار کاه برنج تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و اصلاح‌شده با آهن سه‌ظرفیتی در  $\text{pH}=2$  نیز در مجموع بهترین عملکرد را در حذف هم‌زمانی هر سه ترکیب به‌طور هم‌زمان نشان داد.

به‌طور کلی، نتایج این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از جاذب‌های آلی و معدنی اصلاح‌شده می‌تواند به‌عنوان روشی ساده، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای کاهش غلظت آلاینده‌های نیتروژنی نظیر نیترات، اوره و آمونیوم در پساب‌های کشاورزی موردتوجه قرار گیرد. با این حال، به‌منظور دستیابی به حداکثر کارایی جذب و امکان‌سنجی کاربرد عملی این جاذب‌ها، انجام مطالعات تکمیلی در زمینه بررسی اثر عوامل محیطی و عملیاتی نظیر زمان تماس، دوز جاذب، اسیدیته محلول، غلظت اولیه آلاینده‌ها و همچنین ارزیابی رفتار جاذب‌ها در شرایط واقعی پساب پیشنهاد می‌شود.

## ۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۶. منابع

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Akbarizadeh, M., Daghbandan, A., Abbasi Sourki, B., Rahbar Masouleh, F., & Falkadehi, A. (2022). Removal of iron and manganese from water sources using tea leaves and rice straw. *Water and Wastewater Journal*, 33(2), 1-16. <https://doi.org/10.22093/wwj.2022.281340.3131> (In Persian)
- Arabi, F., & Asgari, G. (2013). Nitrate removal from aqueous solution using surfactant-modified zeolite (HDTMA-Br). In *Proceedings of the 16th National Conference on Environmental Health*, Tabriz. (In Persian)
- Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2017). Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption – A review. *Chemical Engineering Journal*, 326, 365–388.
- Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2002).  $\text{NH}_4^+$  toxicity in higher plants: A critical review. *Journal of Plant Physiology*, 159(6), 567-584. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(02\)80265-3](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(02)80265-3)
- Chen, B., Chen, Z., & Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource Technology*, 102(2), 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145-155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Darajeh, N., Alizadeh, H., Leung, D. W. M., Nodeh, H. R., & Rezaia, S. (2021). Application of modified spent mushroom compost biochar (SMCB/Fe) for nitrate removal from aqueous solution. *Toxics*, 9(11), 277. <https://doi.org/10.3390/toxics9110277>
- Darezreshki, E., Bakhtiari, F. & Rahmani, M. (2023). Adsorption removal of nitrate by a novel magnetic zeolite adsorbent (zeolite/ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  nanocomposite) in solution. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 8, 153-166. <https://doi.org/10.1007/s41204-022-00294-6>

- Dindarloo, K., Sheikh-Mohammadi, H., & Jamali, H. (2021). Optimization of nitrate removal from drinking water using pumice modified with magnesium chloride by Box–Behnken design. *Preventive Medicine Journal*, 18(4), 56-68. (In Persian)
- Diyantitelki, R., Kahe, D., & Zazuli, M. (2012). Efficiency of clinoptilolite zeolite for ammonium removal from contaminated waters. *University of Mazandaran Medical Sciences Journal*, 22(97), 250-256. (In Persian)
- Eslami, A., Yazdanbakhsh, A. R., Asadi, A., & Ghadimi, M. (2014). Removal of nitrate from drinking water using acid-modified natural clay. *Water and Wastewater Journal*, 25(91), 127-134. (In Persian)
- Fang, C., Zhang, T., Li, P., Jiang, R. F., & Wang, Y. C. (2014). Application of magnesium modified biochar for phosphorus removal and recovery from swine wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(9), 9217-9237. <https://doi.org/10.3390/ijerph110909217>
- Hashemi, S. A., Shah-Nazari, A., Sadeghzadeh, F., & Khanlari, K. (2016). Rice husk efficacy for nitrate removal from aqueous solution. In *Proceedings of the National Irrigation and Drainage Congress of Iran*. Available at: SID. (In Persian)
- Heaney, N., Ukpong, E., & Lin, C. (2020). Low-molecular-weight organic acids enable biochar to immobilize nitrate. *Chemosphere*, 240, 124872. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124872>
- Hosseini, P., & Bakhshandeh-Moghadam, F. (2024). Effect of magnetic field on nitrate adsorption from nitrate solutions using pumice. *Abkhan Journal (Scientific-Promotional)*, 16(1). (In Persian)
- Huang, H., Wang, X., Xue, W., Yang, H., & Chen, H. (2022). Enhanced ammonium removal by iron-modified humic substances: Mechanisms and applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106980. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106980>
- Jahani, F., Sadeghi, R., & Shakeri, M. (2023). Ultrasonic-assisted chemical modification of a natural clinoptilolite zeolite: Enhanced ammonium adsorption rate and resistance to disturbing ions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110354. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110354>
- Khajavi Shojaei, S., Moazeni, A., Norouzi Masir, M., & Taghavi Zahed Kelā'i, M. (2019). Kinetics and isotherms of nitrate and ammonium adsorption from aqueous solution using date-palm biochar. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(8), 2009-2021. <https://doi.org/10.2295/ijswr.2019.274777.668111>. (In Persian)
- Kizito, S., Wu, S., Kirui, W. K., Lei, M., Lu, Q., Bah, H., & Dong, R. J. (2015). Evaluation of slow pyrolyzed wood and rice husks biochar for adsorption of ammonium nitrogen from piggery manure anaerobic digestate slurry. *Science of the Total Environment*, 505, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.096>
- Latifah, O., Ahmed, O. H., & Majid, N. M. A. (2017). Enhancing nitrogen availability from urea using clinoptilolite zeolite. *Geoderma*, 306, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.012>
- Laird, D. A., Fleming, P. D., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. L. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3-4), 436-442.
- Li, X., & Shi, J. (2022). Simultaneous adsorption of tetracycline, ammonium and phosphate from wastewater by iron and nitrogen modified biochar: Kinetics, isotherm, thermodynamic and mechanism. *Chemosphere*, 239, 133574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133574>
- Li, Y., Shao, J., Wang, X., & Deng, Y., (2014). Characterization of modified biochars derived from bamboo pyrolysis and their utilization for target Component (Furfural) Adsorption. *Energy & Fuels*, 28(8), 5119-5127. <https://doi.org/10.1021/ef500725c>
- Malkoutian, M., Jafarzadeh-Haqiqifard, N. A., Hosseini, H., & Mousavi, S. G. (2010). Ammonium removal from aqueous solutions using pumice under static and dynamic conditions: Influential parameters. In *Proceedings of the 13th National Conference on Environmental Health*, Kerman, 1-3 November. (In Persian)
- Marzi, M., Farahbakhsh, M., & Salah, Kh. (2016). Kinetics and isotherms of nitrate adsorption from aqueous solution using biochar. *Danesh Ab va Khāk (Water and Soil Science)*, 26(1), 145-158. (In Persian)
- Min, L., Zhongsheng, Z., Zhe, L., & Haitao, W. (2020). Removal of nitrogen and phosphorus pollutants from water by FeCl<sub>3</sub>-impregnated biochar. *Ecological Engineering*, 149, 105792. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105792>
- Mirzadeh-Ahari, Sh. Sh., Mahvi, A., Jalilzadeh Yingjeh, R., Dadban Shahamat, Y., & Takdastan, A. (2021). A novel method for ammonium removal from drinking water using modified zeolites combined with catalytic ozonation. *Tolou-e Behdasht*, 20(2), 89-104. Available at: SID. (In Persian)

- Mishra, P. C., & Patel, R. K. (2009). Use of agricultural waste for the removal of nitrate-nitrogen from aqueous medium. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 519-522. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.12.003>
- Muscarella, S. M., Badalucco, L., Cano, B., Laudicina, V. A., & Mannina, G. (2021). Ammonium adsorption, desorption and recovery by acid and alkaline treated zeolite. *Bioresource Technology*, 341, 125812. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125812>
- Nabizadeh, S., Sadeghzadeh, F., Jalili, B., & Emadi, M. (2018). Adsorption of methylene blue by biochar, soil and biochar-treated soil from aqueous solutions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 25(6), 281-292. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.14913.3002>. (In Persian)
- Ng, T. L., Wayland Eheart, J., Cai, X., Braden, J. B., & Czapar, G. F. (2014). Agronomic and stream nitrate load responses to incentives for bioenergy crop cultivation and reductions of carbon emissions and fertilizer use. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(1), 112-120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000320)
- Ren, Z., Jia, B., Zhang, G., Fu, X., Wang, Z., Wang, P., & Lv, L. (2020). Study on adsorption of ammonia nitrogen by iron-loaded activated carbon from low temperature wastewater. *Chemosphere*, 262, 127895. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127895>
- Safwat, S. M., & Matta, M. E. (2018). Adsorption of urea onto granular activated alumina: A comparative study with granular activated carbon. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39(12), 1699-1709. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1461644>
- Samsuri, W. A., Sadegh-Zadeh, F., & She-Bardden, J. B. (2013). Adsorption of As(III) and As(V) by Fe-coated biochars and biochars produced from empty fruit bunch and rice husk. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 981-988.
- Song, Z., Lian, F., Yu, Z., Zhu, L., Xing, B., & Qiu, W. (2014). Synthesis and characterization of a novel Fe-Mn binary oxide-biochar composite for efficient removal of lead and cadmium from aqueous solution. *Environmental Science & Technology*, 48(9), 4985-4992. <https://doi.org/10.1021/es405057w>
- Tang, Y., Alam, M. S., Konhauser, K. O., Alessi, D. S., Xu, S., Tian, W., & Liu, Y. (2019). Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 209, 927-936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.269>
- Uchimiya, M., Chang, S., & Klasson, K. T. (2011). Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.063>
- Urbańczyk, E., Sowa, M., & Simka, W. (2016). Urea removal from aqueous solutions—a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, 46, 1011-1029. <https://doi.org/10.1007/s10800-016-0997-2>
- Wang, Z., Guo, H., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Zeng, Y., Wang, L., Xiao, H., & Deng, S. (2015). Biochar produced from oak sawdust by Lanthanum (La)-involved pyrolysis for adsorption of ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), and phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). *Chemosphere*, 119, 646-653. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.084>
- Wang, S., & Peng, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
- Wang, Y., Song, X., Xu, Z., Cao, X., Song, J., Huang, W., Ge, X., & Wang, H. (2021). Adsorption of Nitrate and Ammonium from Water Simultaneously Using Composite Adsorbents Constructed with Functionalized Biochar and Modified Zeolite. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(198). Doi: [10.1007/s11270-021-05145-9](https://doi.org/10.1007/s11270-021-05145-9)
- Xia, Y., Lu, D., Qi, Y., Chen, H., Zhao, Y., Bai, Y., Zhu, L., Geng, N., Xu, C., & Hua, E. (2022). Removal of nitrate from agricultural runoff in biochar electrode-based biofilm reactor: Performance and enhancement mechanisms. *Chemosphere*, 301, 134744. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134744>
- Zameni, L., Sadeghzadeh, F., Jalili, B., & Bahmanyar, M. (2024). Nitrate adsorption from aqueous solution by biochar and iron-coated biochar. *Modeling and Management of Water and Soil*, 4(1), 70-84. <https://doi.org/10.22098/MMWS.2023.12082.1203>. (In Persian)
- Zhang, M., Song, G., Gelardi, D. L., Huang, L., Khan, E., Mašek, O., & Ok, Y. S. (2020). Evaluating biochar and its modifications for the removal of ammonium, nitrate, and phosphate in water. *Water Research*, 186, 116303. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116303>

- Zhao, X., Su, Y., Lei, Z., Wang, H., Hu, E., Hu, F., Wang, Q., Xu, L., Fan, S., Liu, X., & Hao, X. (2023). Adsorptive removal of beryllium by Fe-modified activated carbon prepared from lotus leaf. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 18340-18353. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23415-9>
- Zhou, Y., Gao, B., Zimmerman, A. R., Fang, J., Sun, Y., & Cao, X. (2017). Sorption of heavy metals on chitosan-modified biochars and its biological effects. *Chemical Engineering Journal*, 307, 1095-1101.
- Zhou, H.-D., Wang, C.-Y., Wang, Q., Xu, B.-X., Zhu, G. (2024). Efficiency, mechanism and application prospect of ammonium adsorption and desorption over a sodium-acetate-modified synthetic zeolite. *RSC Advances*, 14(25), 17843-17854. <https://doi.org/10.1039/d4ra01547a>