Journal of Aquatic Ecology
ISSN Print: 2322-2751 ISSN Online: 2980-9355
Homepage: https://jae.hormozgan.ac.ir
University of Hormozgan

Synthesis of biochar from municipal sewage sludge and its effectiveness in removing phosphate and nitrate from shrimp farm effluent

Gholamali Akbarzadeh-Chamachaei, Hadi koohkan✉, Fereshteh Saraji, Mohammad Seddiq Mortazavi, Leila Mohebbi Nozar

Persian Gulf and Oman Sea Ecology Research Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Bandar Abbas, Iran. P.O. 79145-1597.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 16 September 2025
Accepted: 04 December 2025
Published: 12 May 2026

✉**Corresponding Author:**
hadi.koohkan@alumni.znu.ac.ir

Keywords:
biochar,
municipal sewage sludge,
phosphate,
Nitrate.

ABSTRACT

Biochar is a stable, carbon-rich material produced through the pyrolysis of organic matter under limited oxygen conditions. The present study aimed to produce biochar from municipal sewage sludge and evaluate its efficiency in removing nutrients, including nitrate, phosphate, and ammonium, from shrimp farm wastewater. Sewage sludge samples were collected from Bandar Abbas during the spring of 2023 and air-dried prior to processing. The dried samples were compressed in alumina crucibles and pyrolyzed in an electric furnace at temperatures of 300, 400, 500, 600, and 700°C to produce different biochar treatments. Following biochar synthesis, the physicochemical properties of the resulting biochars were characterized. Morphological analyses demonstrated that the synthesized biochars possessed porous structures and greater specific surface areas compared with the original sewage sludge. Elemental analyses further revealed that increasing pyrolysis temperature resulted in higher carbon, nitrogen, and sulfur contents, whereas oxygen content decreased. To evaluate nutrient removal efficiency, the synthesized biochars were applied to shrimp farm wastewater. The results showed that biochar produced at 700°C (BC700) exhibited the highest phosphate removal efficiency, reaching 91.7%. The optimal treatment conditions for phosphate removal were identified as 2.5 g of BC700 with a contact time of 2 h, resulting in approximately 95% phosphate removal from the wastewater. Among all treatments, BC700 also demonstrated the highest nitrate removal efficiency among the non-modified biochars, removing approximately 52% of nitrate. The highest nitrate removal was achieved using 3 g of BC700 with a contact time of 180 min. Furthermore, iron-modified biochar (Fe-BC) significantly enhanced nitrate removal efficiency, achieving up to 98% removal under optimal conditions of 2 g dosage and 2 h contact time. Overall, the findings indicated that BC700 was the most effective biochar for phosphate removal, whereas iron-modified biochar showed superior performance for nitrate removal. The study further demonstrated that the application of sewage sludge-derived biochar can substantially reduce nutrient loads and organic matter in aquaculture wastewater, thereby decreasing the environmental impacts of shrimp farming effluents on aquatic ecosystems.

CC BY NC

Publisher: University of Hormozgan

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Sustainable management of sewage sludge represents a major environmental challenge worldwide. Instead of conventional disposal methods such as landfilling, pyrolysis technology provides an effective approach for converting sewage sludge into biochar, a stable carbon-rich material with valuable physicochemical properties. The utilization of sewage sludge-derived biochar as an adsorbent for wastewater treatment aligns with circular economy principles and offers an environmentally sustainable strategy for pollution control (Gherghel et al., 2019). The adsorption capacity of biochar is primarily associated with the formation of functional groups such as hydroxyl, aliphatic, amide, aromatic, and hetero-aromatic compounds during pyrolysis.

One of the major environmental concerns in coastal regions is the discharge of nutrient-rich wastewater from shrimp farming activities. Intensive and uncontrolled expansion of shrimp aquaculture has resulted in significant environmental degradation in many coastal ecosystems worldwide (Saha, 2017). Effluents from shrimp farms contain high concentrations of nutrients and organic matter that can contribute to eutrophication and deterioration of water quality. Previous studies have shown that biochar application in shrimp ponds may improve environmental conditions through adsorption of heavy metals and toxic compounds, enhancement of system buffering capacity, and reduction of harmful microbial populations (Fagbohungbe et al., 2017). However, research on the application of biochar for nutrient removal from shrimp farm wastewater remains limited. Therefore, the present study aimed to synthesize biochar from municipal sewage sludge and evaluate its efficiency in removing nitrate, phosphate, and ammonium from shrimp farm effluent.

Materials and Methods

Biochar was synthesized from municipal sewage sludge collected from the wastewater treatment plant in Bandar Abbas through a pyrolysis process. The sludge samples were heated under low-oxygen conditions at different pyrolysis temperatures of 300, 400, 500, 600, and 700°C to produce various biochar treatments. After cooling, the resulting biochars were characterized as adsorbent materials with high specific surface area and adsorption capacity.

To evaluate nutrient removal efficiency, synthesized biochars were exposed to shrimp farm wastewater containing nitrate, phosphate, and ammonium. The adsorption efficiency was determined by measuring nutrient concentrations before and after treatment. Different biochar doses and contact times were tested to identify optimal treatment conditions. In addition, iron-modified biochar (Fe-BC) was prepared to improve nitrate adsorption performance.

The removal efficiency of nutrients was attributed to the strong adsorption properties and surface chemical interactions of biochar. Thermodynamic analyses were also conducted to compare the adsorption performance of standard biochar and iron-modified biochar.

Results

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

The results demonstrated that biochar produced at 700°C (BC700) exhibited the highest phosphate removal efficiency, reaching approximately 91.7%. Under optimal conditions, the most effective treatment involved 2.5 g of BC700 with a contact time of 2 h, which removed approximately 95% of phosphate from shrimp farm waste water. Among the non-modified biochars, BC700 also showed the highest nitrate removal efficiency, removing approximately 52% of nitrate from the wastewater. The maximum nitrate removal was achieved using 3 g of BC700 with a contact time of 180 min.

To enhance nitrate adsorption performance, iron-modified biochar (Fe-BC) was synthesized and evaluated. Optimization of dosage and contact time revealed that 2 g of Fe-BC with a contact time of 2 h increased nitrate removal efficiency to approximately 98%. Thermodynamic analyses further confirmed the superior adsorption capacity of Fe-BC compared with BC700 for both nitrate and phosphate removal.

The findings suggested that chemical adsorption was the dominant mechanism involved in nutrient removal from shrimp farm effluent.

Conclusion

In the present study, biochar synthesized from sewage sludge of the Bandar Abbas wastewater treatment plant was successfully evaluated as an adsorbent for nutrient removal from shrimp farm wastewater. The results demonstrated that biochar produced at 700°C (BC700) had the highest efficiency for phosphate removal (approximately 92%) and moderate efficiency for nitrate removal (approximately 52%). Furthermore, iron modification of biochar significantly improved nitrate adsorption performance, increasing removal efficiency to approximately 98% under optimized conditions. The superior adsorption properties of Fe-BC were confirmed by thermodynamic analyses, indicating its enhanced affinity for nutrient adsorption compared with non-modified biochar.

Overall, the study highlights the considerable potential of sewage sludge-derived biochar, particularly iron-modified biochar, as an efficient, sustainable, and environmentally friendly adsorbent for the treatment of nutrient-rich wastewater from shrimp farms. Application of this approach could contribute to reducing nutrient pollution, improving water quality, and minimizing the environmental impacts of aquaculture effluents on coastal aquatic ecosystems.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

بوم‌شناسی آبزیان
شاپا چاپی: ۲۷۵۱-۲۳۲۲ شاپا الکترونیکی: ۹۳۵۵-۲۹۸۰
https://jae.hormozgan.ac.ir
دانشگاه هرمزگان

سنتز بیوچار از لجن فاضلاب شهری و کارایی آن در حذف فسفات و نیترات از پساب مزارع پرورش میگو

غلامعلی اکبرزاده چماچایی، هادی کوهکن✉، فرشته سراجی ، محمدصدیق مرتضوی، سیده لیلی محبی نوذر

پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور ،سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

✉ **نویسنده مسئول:**
hadi.koohkan@alumni.znu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:
بیوچار،
لجن فاضلاب شهری،
نیترات،
فسفات.

چکیده

بیوچار ماده‌ای جامد و غنی از کربن پایدار است که حاصل سوزاندن مواد آلی طی فرایند گرماکافت می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق تولید بیوچار از لجن تصفیه خانه و تعیین کارایی آن در حذف مواد مغذی (نیترات، فسفات و آمونیوم) از پساب مزارع میگو بود. به منظور سنتز بیوچار، در پنج نوبت نمونه هایی از لجن تصفیه خانه بندرعباس در بهار ۱۴۰۲ تهیه شد و سپس در هوا خشک شدند و نمونه ها در بوته های آلومینا فشرده و در کوره الکتریکی در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. پس از سنتز بیوچار خصوصیات فیزیکیوشیمیایی بیوچارهای سنتز شده تعیین شد. بررسی‌های ریخت‌شناسی نشان داد که بیوچارهای تولیدشده دارای ساختار متخلخل و سطح ویژه بالاتری نسبت به لجن فاضلاب اولیه هستند. نتایج آنالیز عنصری نیز نشان داد که با افزایش دمای پیرولیز، درصد عناصر کربن، نیتروژن و گوگرد در بیوچار افزایش یافته، در حالی‌که درصد اکسیژن کاهش می‌یابد. به‌منظور ارزیابی عملکرد بیوچار در حذف مواد مغذی شامل نیترات، فسفات و آمونیوم، نمونه‌های سنتزشده با پساب مزارع پرورش میگو مورد تیمار و آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که BC700 (Biochar 700) بیشترین کارایی بر حذف فسفات (۹۱/۷٪) دارد. مناسبترین دوز و زمان تماس بیوچار ۷۰۰ با پساب مزارع میگو به ترتیب ۲/۵ گرم و ۲ ساعت بود که حدود ۹۵ درصد فسفات را از پساب مزارع میگو حذف نمود. کارایی BC700 نسبت به سایر بیوچارها در حذف نیترات (حدود ۵۲٪) بالاتر بود. بیشترین درصد حذف نیترات با ۳ گرم BC700 با ۱۸۰ دقیقه (دوساعت) زمان تماس مشاهده گردید. مقدار بهینه بیوچار اصلاح شده با آهن (۲ گرم) و مناسبترین مدت تماس (۲ ساعت)، کارایی حذف نیترات را تا ۹۸ درصد افزایش داد. با توجه به نتایج، بهترین بیوچار جهت حذف فسفات و نیترات به ترتیب BC700 و Fe-BC بود. همچنین استفاده از بیوچار درپساب مزارع می تواند موجب کاهش ورود مواد آلی به اکوسیستم ساحلی شود.

ناشر: دانشگاه هرمزگان.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

مقدمه

با رشد سالانه ۸۳ میلیون نفر، جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۸.۹ میلیارد نفر خواهد رسید (United Nations, 2017). این رشد جمعیت، تقاضا برای غذا، آب و انرژی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، در حالی‌که در بسیاری از مناطق جهان، به‌دلیل مصرف بی‌رویه، با کمبود این منابع مواجه هستیم (Godfray *et al*., 2010). چالش‌هایی نظیر تغییرات اقلیمی، آلودگی و فشارهای ناشی از توسعه اقتصادی، سیستم‌های تأمین غذا، آب و انرژی را تحت فشار قرار داده‌اند .(de Amorim *et al*., 2018) در این راستا، مدیریت یکپارچه و کارآمد منابع می‌تواند در حل چالش‌های جهانی مانند امنیت غذایی، پایداری محیطی و مقابله با تغییرات اقلیمی مؤثر باشد (Brandoni and Bosnjakovic, 2018; United Nations, 2015).

در آینده، افزایش تولید غذا، تأمین منابع آب و توسعه انرژی‌های جایگزین با حداقل مصرف منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی ضروری خواهد بود (Foereid, 2015). در همین راستا، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بهبود زنجیره تولید مواد غذایی و توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در حال انجام است. یکی از محورهای کلیدی در اقتصاد پایدار، ارزش‌گذاری مجدد پساب‌ها به‌عنوان منابع قابل بازیافت است. فاضلاب، برخلاف تصور رایج، می‌تواند در تأمین آب مورد نیاز شهرهای در حال گسترش، تولید انرژی، توسعه صنعتی و حمایت از کشاورزی پایدار نقش‌آفرینی کند. از این منظر، تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌توانند به الگویی برای فناوری‌های سبز تبدیل شوند. در کنار منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، باد و جزر و مد، تبدیل جریان‌های زباله به محصولات با ارزش نیز مورد توجه قرار گرفته است (Foereid, 2015).

با این حال، فرآیند تصفیه لجن فعال یکی از پرمصرف‌ترین مراحل در تصفیه فاضلاب است. مصرف انرژی در این فرآیند عمدتاً مربوط به پمپ‌ها و هواده‌هاست که تا ٪۷۰ از کل مصرف برق سالانه تصفیه‌خانه‌ها را شامل می‌شود. همچنین، مدیریت پسماند جامد از جمله فرآیندهای پرهزینه دیگر است. کاهش هزینه‌ها از طریق کاهش تولید لجن یا استفاده از آن به‌عنوان بستر بازیافت انرژی، از راهکارهای پیشنهادی است. با این وجود، تنوع خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی لجن، چالش‌هایی را در دفع آن ایجاد کرده است.

برای حذف ترکیبات مغذی مانند فسفات (PO_4^{3-}) و نیترات (NO_3^-) از فاز آبی، روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مختلفی پیشنهاد شده‌اند (Zhang *et al*., 2020). روش‌های فیزیکی مانند رسوب‌گذاری، کارایی پایینی دارند (کمتر از ٪۱۰ حذف) (Abdoli *et al*., 2024)، در حالی‌که رسوب شیمیایی با نمک‌های فلزی منجر به تولید لجن ثانویه و افزایش هزینه‌های دفع تا ٪۳۰ می‌شود. روش‌های بیولوژیکی، اگرچه راندمان بالایی دارند (٪۸۰–٪۹۰ حذف فسفر)، اما نیازمند کنترل‌های پیچیده و نیروی انسانی متخصص هستند و در محیط‌های با منابع محدود، کمتر قابل اجرا می‌باشند (Ye *et al*., 2016; Xia et al., 2016). در مقابل، جذب سطحی با استفاده از بیوچار (BC) به‌عنوان جاذب، راندمان بالایی (تا ٪۹۰ حذف مواد مغذی) دارد و آلودگی ثانویه ناچیزی ایجاد می‌کند .(Biswas *et al*., 2024; Wang *et al*., 2021) بیوچار از زیست‌توده‌هایی مانند بقایای کشاورزی، ضایعات چوب، لجن فاضلاب و مواد آلی دیگر، طی فرآیند پیرولیز تولید می‌شود (Saxena *et al*., 2017; Stella Mary *et al*., 2016; Bera *et al*., 2018; Mohan *et al*., 2018). ساختار متخلخل، سطح ویژه بالا و وجود گروه‌های عاملی فعال، بیوچار را به گزینه‌ای مناسب برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی از پساب‌ها تبدیل کرده است (Mohan *et al*., 2014; Sharma *et al*., 2018; Varjani *et al*., 2019). همچنین، کاربرد بیوچار در بهبود حاصلخیزی خاک و اصلاح محیط زیست نیز شناخته شده است (Ahmad *et al*., 2014; Vijayaraghavan, 2019).

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ظرفیت جذب فسفر توسط بیوچارهای مشتق‌شده از لجن فاضلاب به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر نوع اصلاح و منبع لجن قرار دارد. به‌عنوان نمونه، Yang و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که حداکثر ظرفیت جذب کل فسفر برای بیوچار حاصل از لجن فاضلاب اصلاح‌نشده برابر با ۲/۷۸ میلی‌گرم بر گرم بوده است، در حالی‌که این مقدار پس از اصلاح به ۱۰/۷۸ میلی‌گرم بر گرم افزایش یافت. همچنین، در همان مطالعه، ظرفیت جذب فسفات توسط بیوچار مبتنی بر لجن فعال اصلاح‌شده با آهن، ۱۱۱ میلی‌گرم بر گرم گزارش شد.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

در نواحی ساحلی، یکی از منابع اصلی آلودگی، مزارع پرورش میگو هستند که حجم قابل توجهی از مواد مغذی را به دریا وارد می‌کنند. توسعه بی‌رویه این صنعت در برخی کشورها منجر به آسیب‌های پایدار زیست‌محیطی شده است، از جمله شور شدن منابع آب، تخریب جنگل‌های مانگرو، شکوفایی پلانکتونی، تغییر در جوامع بنتوزی، ورود مواد شیمیایی مضر، شیوع بیماری‌های ویروسی و انگلی، و کاهش مقاومت گونه‌های دریایی (Samocha and Lawrence, 1997; Jayanthi *et al*., 2018) شد. در پاسخ به این چالش‌ها، مطالعات گسترده‌ای در زمینه مدیریت پساب‌های آبزی‌پروری در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه انجام شده است (Akbarzadeh chomachaei *et al*., 2021؛ Lara Anguiano *et al*., 2013؛ Audelo-Naranjo *et al*., 2012). مطالعاتی در کشور تایلند نشان داده‌اند که استفاده غیراصولی از غذاهای فرموله‌شده، غلظت بالای PO_4^{3-} و NO_3^- در پساب خروجی را به دنبال داشته و موجب شکوفایی پلانکتونی در اکوسیستم‌های ساحلی شده است (Choopunth and Tanyaros, 2002).

مطالعات محدودی در مورد استفاده از بیوچار در استخرهای پرورش میگو انجام شده است. افزودن بیوچار به استخرهای پرورش میگو، می‌تواند منجر به افزایش پایداری فرآیند از طریق (الف) جذب فلزات و ترکیبات سمی (فلزات سنگین، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای)، (ب) افزایش ظرفیت بافری سیستم و (ج) حذف سلولهای میکروبی مضر (Fagbohungbe *et al*., 2017) شود. علاوه بر این، مزایای استفاده از بیوچار در استخرهای پرورش میگو بر روی هضم بی‌هوازی لجن و کیفیت نهایی جامدات زیستی (biosolid) قابل مشاهده است. لذا با افزایش استفاده از بیوچار در کاربردهای متعدد، استفاده آن در تصفیه پساب مزارع میگو می‌تواند زنجیره ارزش بیوچار را گسترش داده و مزایای اقتصادی بیشتری ایجاد کند، هدف از انجام این تحقیق، تعیین کارایی بیوچار در کاهش مواد مغذی (نیترات، فسفات و آمونیوم) از پساب مزارع میگو بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری از لجن تصفیه‌خانه فاضلاب بندرعباس در ایستگاه خروجی، پس از مرحله آب‌گیری، انجام شد. این فرآیند در پنج نوبت و در تاریخ‌های ۱۰ و ۳۰ اردیبهشت، ۱۰ و ۳۰ خرداد و ۱۰ تیر ماه ۱۴۰۲ صورت گرفت. در هر نوبت، نمونه‌ها در ظروف استاندارد نمونه‌برداری جمع‌آوری شدند و هر نمونه‌برداری شامل سه تکرار مستقل بود.

لجن نمونه‌برداری شده از تصفیه خانه بندعباس، به مدت ۳ روز در هوا خشک شد. سپس نمونه‌ها در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد قرار گرفت. لجن خشک شده آسیاب گردیده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شد تا یکنواخت گردد. برای تولید بیوچار از طریق روش پیرولیز آهسته استفاده شد. نمونه‌ها درشرایط فاقد اکسیژن درون کوره الکتریکی قرار داده شدند. ابتدا نمونه‌ها را به دقت با ترازوی دیجیتال توزین و در داخل ظروف درب‌دار ریخته و نمونه‌ها به مدت زمان ۲ ساعت درون کوره در دماهای ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد با نرخ گرمایی$5\ ^\circ C/min$ قرارداده شد (Kim *et al*., 2012). نمونه‌های بیوچار تهیه شده (شکل ۳) برای حذف ناخالصی‌ها چندین بار با آب مقطر شستشو و درآون خشک گردیده و برای مراحل بعدی آزمایش نگهداری می‌شوند.

۵۰ گرم از بیوچار تولیدی به داخل بشر ریخته و به آنها۱۵۰میلی لیتر محلول ۰/۲ مولار $FeCl_3$ اضافه شد. وزن مشخصی از بیوچار تیمار شده را به درون بوته چینی ریخته و سپس آنها را برای چند دقیقه روی هیتر قرار داده تا حرارت ببینند و شکل دوغاب به خود بگیرند. بعد از خنک شدن نمونه‌ها، درب بوته‌های چینی بسته شد و در کوره الکتریکی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد و با زمان ماندگاری دو ساعت قرار داده شد. پس از پایان فرآیند فعال سازی، نمونه‌های فعال شده با آب مقطر شستشو داده شده و سپس آنها را درون آون در دمای۱۱۰ درجه سلسیوس برای ۲ ساعت قرار داده تا نمونه‌های فعال شده خشک شوند (Gumus and Okpeku, 2015).

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]



شکل ۳- نمونه‌هایی از بیوچار سنتز شده.

در ابتدا نمونه‌های پساب از مزارع پرورش میگو تهیه شد و میزان مواد مغذی (فسفات، نیترات و آمونیوم) در آنها اندازه‌گیری گردید. در این آزمایش کارایی بیوچار در حذف آلاینده‌های مورد مطالعه از پساب مزارع میگو مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های جذب نیترات، فسفات و آمونیوم به وسیله بیوچار لجن تصفیه خانه در دمای ۳۰° C انجام گرفت. تأثیر پارامترهای مؤثر بر فرایند جذب نیترات، فسفات و آمونیوم جذب شامل زمان تماس (۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰دقیقه) و مقدار بیوچار (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ گرم) بررسی شد. به منظور انجام آزمایش ۵۰ میلی لیتر نمونه فاضلاب تصفیه خانه به مقدار مشخصی از بیوچار (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ گرم) در ظرف پلی پروپیلن ۱۰۰ میلی لیتری با درپوش پیچی اضافه شد. ظروف در ۱۶۰ دور در دقیقه در انکوباتور شیکر به مدت (۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰دقیقه) تکان داده شدند و دمای محیط روی ۳۰ درجه سانتیگراد تنظیم شد و سپس درفاصله‌های زمانی ذکر شده از روی شیکر خارج شده و غلظت نیترات، فسفات و آمونیوم اندازه گیری گردید و سپس ظرفیت جذب ($qe, mg\ g^{-1}$) و درصد حذف (R) به ترتیب با استفاده از معادلات ۳ و ۴ محاسبه شد (Lawal *et al*., 2020).

رابطه ۳

$$qe = \frac{(Ci - Ce) * v}{M}$$

رابطه ۴

$$R = \frac{(Ci - Ce)}{Ci} * 100$$

C_i و C_e به ترتیب غلظت اولیه و نهایی محلول تعادلی است ($mg\ L^{-1}$)، V حجم پساب و M مقدار بیوچار اضافه شده (g) به پساب می‌باشد.

برای احیای نیترات به نیتریت از پودر روی استفاده شد و سپس غلظت نیتریت با روش رنگ‌سنجی دی‌آزو در طول موج ۵۴۰ نانومتر اندازه‌گیری و غلظت نیترات بر اساس آن محاسبه شد (MOOPAM, 2010).

غلظت فسفات به روش رنگ سنجی بر اساس تشکیل کمپلکس آبی رنگ فسفومولیبدات با دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۸۸۳ نانومتر تعیین شد (MOOPAM, 2010).

اندازه‌گیری غلظت آمونیوم بر اساس تشکیل کمپلکس آبی رنگی ایندوفنول، توسط فنل و هیپوکلریت در حضور گونه‌های NH_4^+ انجام شد. رنگ تشکیل شده در ۶۳۰ نانومتر اندازه گیری شده و حداقل برای ۳۰ ساعت پایدار بود (MOOPAM, 2010).

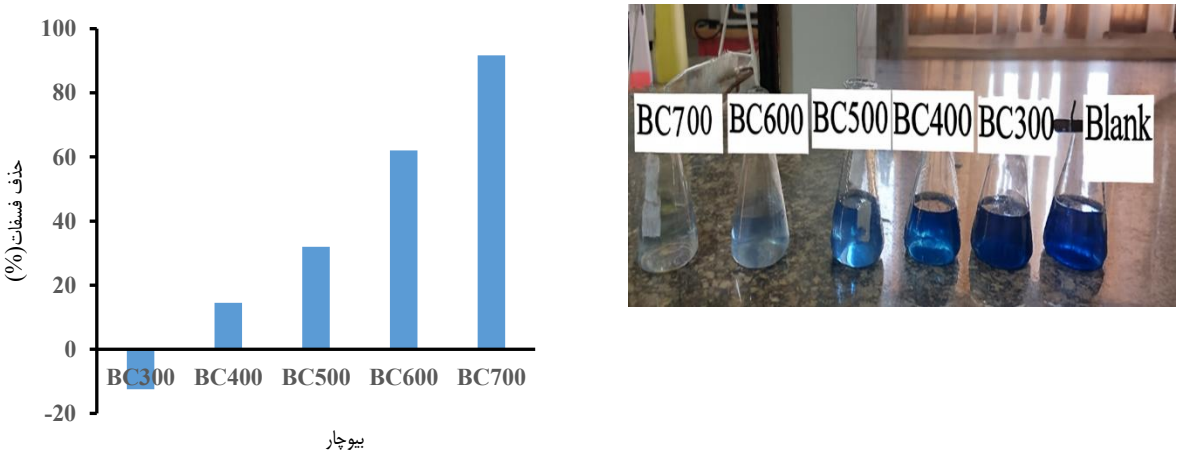
[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

روش‌های آنالیز

داده‌های جمع‌آوری شده در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Excel و SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و جداول تحلیل واریانس تهیه شد. همچنین مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح معنی‌داری ۵٪ انجام شد. نتایج به صورت میانگین ± خطای استاندارد (SE) بیان شد.

نتایج

دمای ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد برای فرآیند گرماکافت انتخاب شد؛ زیرا در دمای کمتر از ۳۰۰، همه لجن به بیوچار تبدیل نمی‌شود و در دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد عملکرد به شدت کاهش می‌یابد. با افزایش دمای پیرولیز درصد حذف فسفات از پساب مزارع میگو بطور معنی‌داری افزایش یافت. BC400، BC500، BC600 و BC700 درصد حذف فسفات را به ترتیب حدود ۱/۱۵، ۲/۵۶، ۴/۹۶ و ۷/۳۴ برابر نسبت به BC300 افزایش دادند. بالاترین درصد حذف فسفات در BC700 مشاهده شد که حدود ۹۲٪ بود و کمترین آن در BC300 (۱۲/۵-٪) اندازه شد (شکل ۴). زیرا ترکیبات آلی که از بیوچار سنتز شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد در محلول آزاد می‌شوند، برای اشغال مکان‌های جذب فعال با PO_4^{3-} رقابت می‌کنند (Wang *et al*., 2021). علاوه بر این، بیوچار سنتز شده در دماهای پایین دارای خواص آبگریزی است که مسئول کاهش ظرفیت جذب بیوچار برای آلاینده‌ها در محیط‌های آبی است (Faria *et al*., 2018).



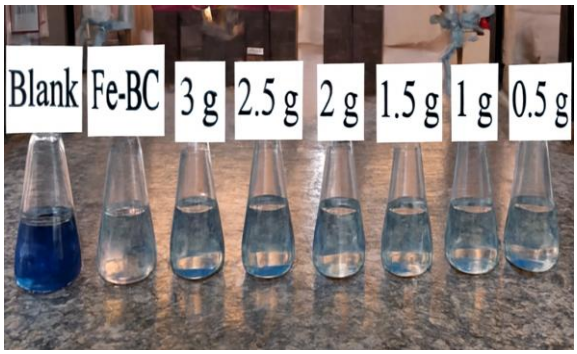
شکل٤- درصد حذف فسفات از پساب مزارع میگو توسط بیوچارهای سنتز شده.

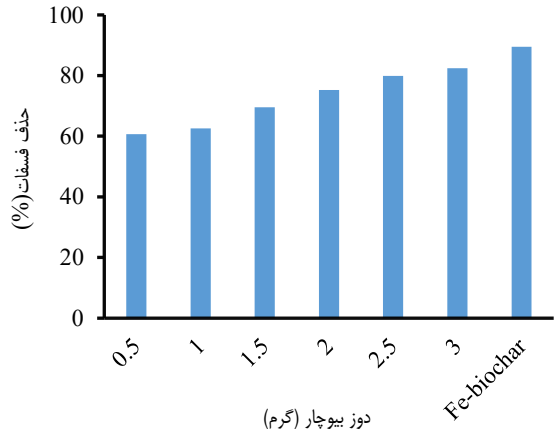
افزایش مقدار بیوچار BC700 منجر به افزایش درصد حذف فسفات از محلول شد (شکل ۶). بیشترین میزان حذف در حضور ۳ گرم بیوچار مشاهده گردید که به‌ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۳۱ برابر بیشتر از مقادیر ۰/۵ و ۱ گرم بود.

در این مطالعه درصد حذف فسفات بین دوزهای ۲/۵ و ۳ گرم بر لیتر تفاوت معنی‌داری نداشت. تمام مطالعات علمی نشان داد که جذب فسفر با افزایش دوز جاذب تا حد مشخصی افزایش یافته و سپس ثابت می‌ماند. یک توضیح ساده برای این موضوع این است که با افزودن جاذب بیشتر به محلول، محل‌های اتصال بیشتری برای فرآیند جذب در دسترس است. بنابراین، مقادیر بالایی از یون های فسفات می‌توانند جذب شوند (Kumar *et al*., 2010).

بیوچار اصلاح شده با Fe نسبت به بیوچار اصلاح نشده درصد حذف فسفات را بطور معنی‌داری افزایش داد. درصد حذف فسفات در حضور Fe-BC حدود ۹۰٪ بود که دلیل آن می‌تواند تشکیل رسوب $Fe\text{-}PO_4$ در سطح بیوچار باشد.

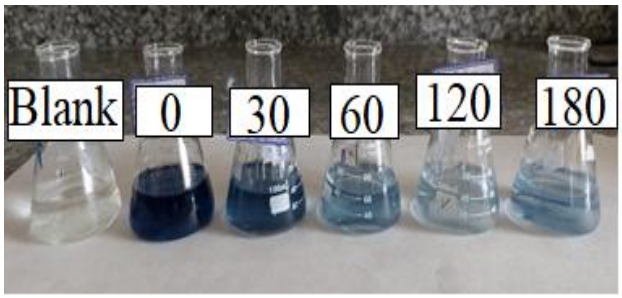
[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

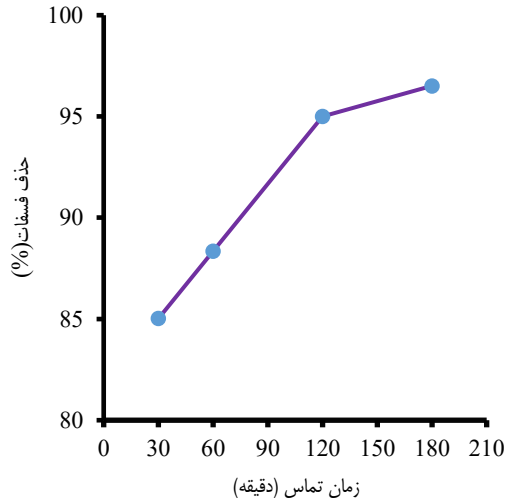




شکل ٦- تاثیر دوز بیوچار ۷۰۰ بر حذف فسفات از پساب مزارع میگو.

تأثیر زمان تماس بر کارایی جذب با تغییر زمان از ۳۰ دقیقه تا ۱۸۰ دقیقه بررسی شد. شکل ۸ تأثیر زمان تماس را بر کارایی حذف فسفات نشان می‌دهد. شکل۸ نشان داد زمان بهینه تماس برای حذف فسفات توسط بیوچار ۱۲۰ دقیقه بود. مقدار جذب در زمان های اولیه بسیار سریع با شیب افزایشی بود و با افزایش زمان تماس از ۳۰ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه راندمان جذب از ۸۵/۰۲٪ تا ۹۵٪ درصد افزایش می‌یابد.



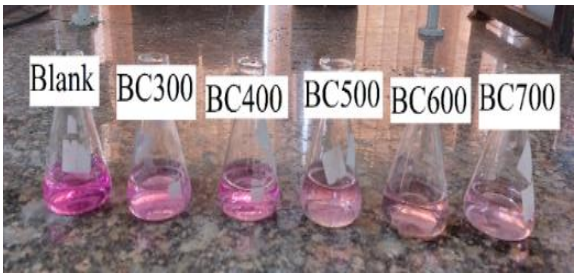


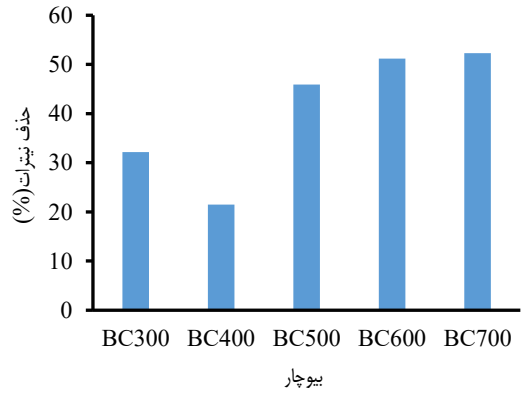
شکل ۸- تاثیر زمان تماس بر حذف فسفات از پساب مزارع میگو.

شکل۱۱ تاثیر بیوچارهای سنتز شده از لجن فاضلاب در دماهای مختلف بر درصد حذف نیترات را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود درصد حذف نیترات از پساب مزارع میگو توسط بیوچارها از ۲۲ تا ۵۲ درصد متغیر بود. بالاترین درصد حذف نیترات از پساب مزارع میگو توسط بیوچار ۷۰۰ و ۶۰۰ مشاهد شد که به ترتیب حدود ۵۱ و ۵۲٪ بود و کمترین کارایی حذف

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

نیترات در بیوچار ۴۰۰ اندازه گیری شد که علت آن می‌تواند مربوط به اندازه منافذ در این بیوچار باشد. زیرا منافذ درشت قادر به نگهداری نیترات در خود نمی‌باشد و مانع جذب فیزیکی نیترات توسط بیوچار می‌شود.

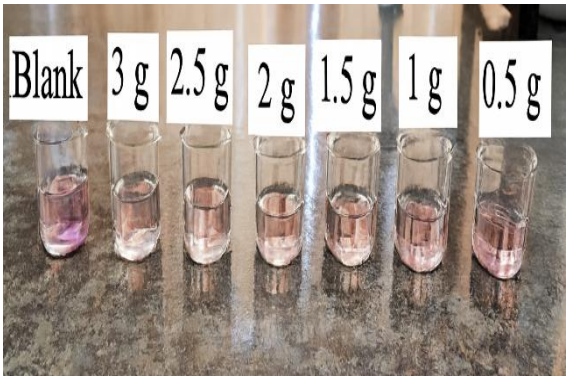


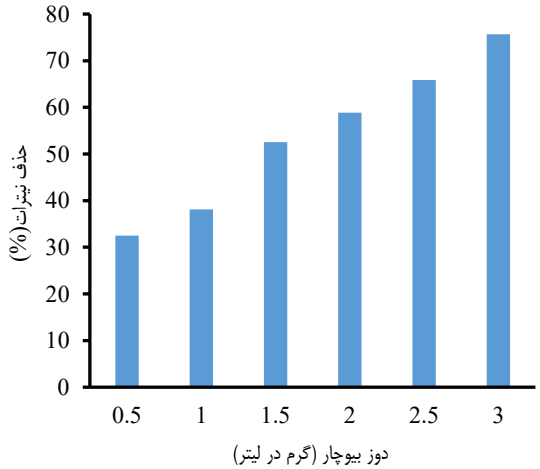


شکل ۱۰- تاثیر بیوچار بر حذف نیترات از پساب مزارع پرورش میگو

شکل۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش دوز جاذب (بیوچار ۷۰۰)، جذب نیترات بطور معنی‌داری یافت. بالاترین درصد حذف نیترات در تیمار ۳ گرم بیوچار و کمترین درصد حذف در تیمار ۰/۵ گرم بیوچار مشاهده شد. بطوری‌که دوزهای ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ و ۳ گرم بیوچار درصد حذف نیترات را ۱/۱۷، ۱/۶۱، ۱/۸۱، ۲/۰۲ و ۲/۳۲ برابر ۰/۵ گرم بیوچار افزایش داد.

دوز جاذب عامل مهمی است که مقدار بهینه جاذب را تعیین می‌کند که برای حذف مقدار معینی از آلاینده‌ها از محلول مورد نیاز است. به طور کلی، افزایش دوز جاذب باعث افزایش جذب نیترات از محلول می‌شود که به دلیل در دسترس بودن مکان‌های فعال و افزایش سطح تماس در دوزهای بالاتر است (Hou *et al*., 2016).



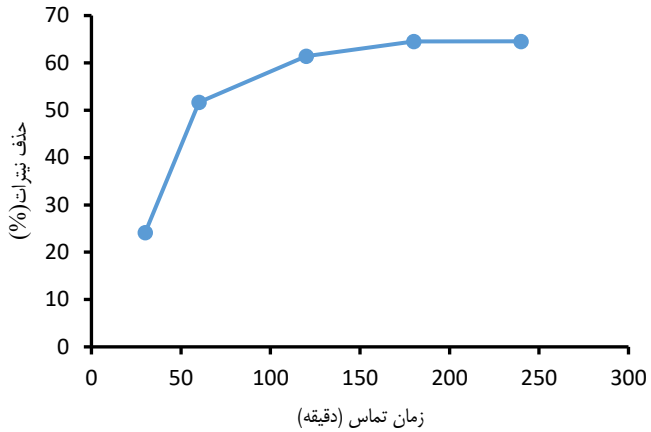


شکل۱۲- تاثیر سطوح بیوچار ۷۰۰ بر حذف نیترات از پساب مزارع میگو.

نتایج نشان داد که زمان تماس تأثیر قابل‌توجهی بر کارایی حذف نیترات توسط بیوچار تولیدشده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (BC700) داشت (شکل ۱۴). علاوه بر این، حضور آنیون‌های مزاحم مانند فسفات در پساب مزارع پرورش میگو موجب کاهش راندمان جذب نیترات شد. این پدیده را می‌توان به بار الکتریکی بالاتر فسفات نسبت داد که سبب می‌شود رقابت برای

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

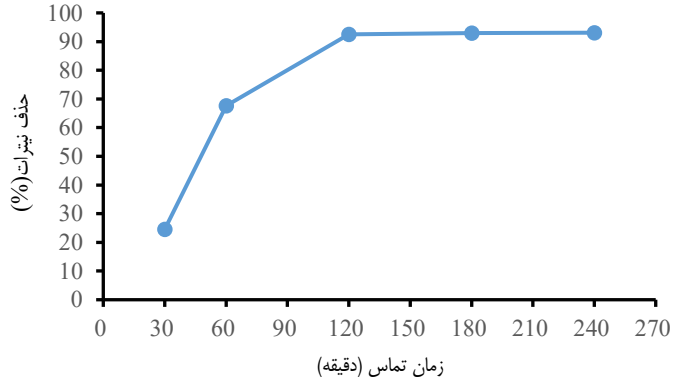
اشغال سایت‌های فعال سطحی به نفع فسفات پیش رود. در مقابل، وجود کاتیون‌هایی نظیر کلسیم و منیزیم در پساب نقش تقویت‌کننده‌ای در جذب نیترات ایفا کردند. این کاتیون‌ها ابتدا به نقاط دارای بار منفی روی سطح بیوچار متصل شده و سپس به‌عنوان پل‌های الکترواستاتیکی عمل می‌کنند که اتصال و نگهداشت یون‌های نیترات را تسهیل می‌نماید.



شکل۱۴- تاثیر زمان تماس بر حذف نیترات از پساب مزارع میگو.

کاربرد بیوچار اصلاح شده بطور معنی‌داری NO_3^- را از پساب مزارع پرورش میگو حذف نمود و کارایی بیوچار اصلاح شده نسبت به بیوچار اصلاح نشده در حذف نیترات بالاتر بود (شکل ۱۵). به عنوان مثال در ۱۲۰ دقیقه بیوچار اصلاح نشده و اصلاح شده به ترتیب ۱۵ و ۹۲/۴۸ ٪ NO_3^- را حذف نمودند که بیانگر کارایی بالاتر بیوچار اصلاح شده در حذف NO_3^- بود. در ۳۰ دقیقه دوم (۱ ساعت شیک نمودن) میزان حذف NO_3^- حدود ۳۷ درصد نسبت به ۳۰ دقیقه اول افزایش یافت.

زمان تماس بین بیوچار اصلاح‌شده با آهن (Fe-BC) و محلول آلوده به NO_3^- تأثیر قابل‌توجهی بر راندمان حذف این یون دارد. این بازه زمانی امکان برقراری تعادل بین مکان‌های فعال سطحی Fe-BC و یون‌های نیترات موجود در محلول را فراهم می‌سازد.

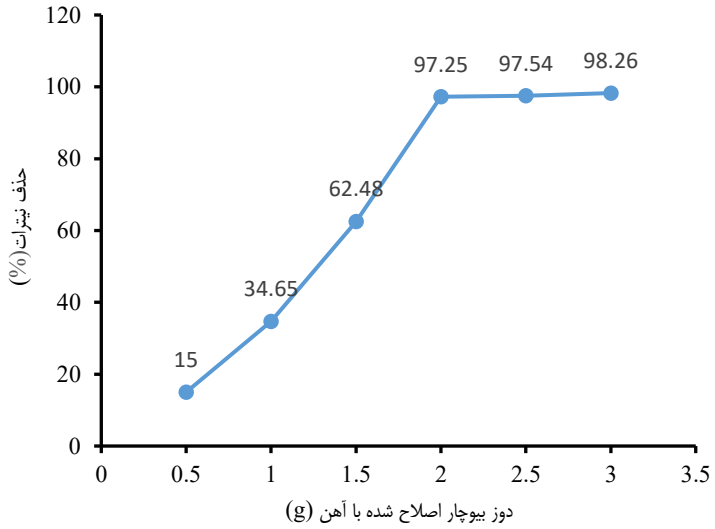


شکل۱۵-تاثیر زمان تماس بر درصد حذف نیترات از پساب مزارع پرورش میگو توسط بیوچار اصلاح شده با آهن.

با افزایش دوز بیوچار اصلاح شده درصد حذف نیترات از پساب افزایش یافت (شکل ۱۶). زیرا با افزایش جاذب، سطوح جذب بیشتری در اختیار جذب شونده (نیترات) قرار می گیرد و میزان جذب افزایش می‌یابد.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

اصلاح بیوچار با آهن نه تنها سبب افزایش سطح ویژه بیوچار می‌شود بلکه میزان بار مثبت سطوح بیوچار را افزایش می‌دهد در نتیجه درصد حذف نیترات توسط بیوچار اصلاح شده افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود با کاربرد ۱، ۱/۵، ۲ ، ۲/۵ و ۳ گرم بیوچار اصلاح شده درصد حذف نیترات را حدود ۲/۳۱، ۴/۱۶، ۶/۴۸ ، ۶/۵و ۶/۵۰ برابر نسبت به ۰/۵ گرم بیوچار اصلاح شده افزایش داد. حداکثر حذف نیترات در تیمار ۳ گرم بیوچار اصلاح شده با آهن (۹۸/۲۶ ٪) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری را نسبت به ۲ گرم بیوچار اصلاح شده (۹۷/۲۵ ٪) نشان نداد. می‌توان مقدار بهینه بیوچار را برای حذف نیترات را ۲ گرم معرفی نمود.



شکل۱۶- تاثیر سطوح مختلف بیوچار اصلاح شده با آهن بر حذف نیترات از پساب مزارع میگو.

بحث

دمای بالای پیرولیز (۵۰۰–۷۰۰) از چندین طریق بر جذب PO_4^{3-} تأثیر می‌گذارد: ۱- افزایش محتوای کاتیون‌هایی مانند کلسیم و منیزیم، که می‌تواند جذب PO_4^{3-} را از طریق رسوب سطحی افزایش دهد (Feng *et al*., 2022) ۲- پیرولیز در دماهای بالاتر منجر به توسعه گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن مانند گروه‌های کربوکسیل، فنلی و هیدروکسیل روی سطح BCs می‌شود. این گروه‌های عاملی برای اتصال PO_4^{3-} از طریق برهمکنش‌های الکترواستاتیکی یا مکانیسم‌های تبادل یونی مهم هستند (Feng *et al*., 2022) و ۳- بیوچار تولید شده در دماهای بالاتر عموماً مساحت سطح و تخلخل بیشتری را نشان می‌دهد که مکان‌های جذب بیشتری را برای PO_4^{3-} فراهم می‌کند.

نتایج این مطالعه نشان داد که رسوب سطحی فسفات بر روی بیوچارها نقش مهمی در افزایش کارایی جذب دارد. به‌طور خاص، حذف مؤثر فسفات عمدتاً به تشکیل رسوبات فسفاتی بر پایه کلسیم در سطح بیوچار نسبت داده می‌شود، که بیانگر غالب بودن مکانیسم جذب شیمیایی در فرآیند حذف PO_4^{3-} است. در همین راستا، Wangو همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نشان دادند که پس از جذب فسفات، پیک‌های مشخصه CaO و $Ca(OH)_2$ ناپدید شده و پیک‌های جدیدی مربوط به $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ ظاهر می‌شوند، که تأییدی بر تشکیل فازهای معدنی فسفاتی است.

علاوه بر رسوب، جذب فسفات می‌تواند از طریق برهم‌کنش با گروه‌های عاملی سطحی نیز رخ دهد. گروه‌های O–H یونیزه شده (هیدروکسیل‌های آزاد) و باندهای O–H متصل به اسیدهای کربوکسیلیک، در فرآیند تبادل لیگاند مشارکت دارند (Shepherd *et al*., 2017).

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

Antunes و همکاران (۲۰۱۸) همچنین مکانیسم جذب فسفر را بر روی بیوچار اصلاح شده با کلسیم گزارش کردند. بیوچار اصلاح شده با کلسیم به دلیل واکنش $Ca(OH)_2$ و PO_4^{3-} برای تشکیل کریستال‌های هیدروکسی آپاتیت ($Ca_5(PO_4)_3(OH)$) جذب ترجیحی برای فسفر داشت. در پژوهشی دیگر، Li و همکاران (۲۰۱۹) جذب فسفر را در لجن‌های جمع‌آوری‌شده از پنج شهر مختلف چین بررسی کردند و ظرفیت جذب در محدوده ۴/۲۰ تا ۹۰/۱۰ میلی‌گرم بر گرم متغیر بود. در همین راستا، Yinو همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند که بیوچار حاصل از لجن فاضلاب(SBC) ، که غنی از اکسیدهای فلزی و گروه‌های عاملی سطحی بود، توانست حداکثر ظرفیت جذب ۳۰۳/۴۹ میلی‌گرم بر گرم برای یون فسفات (PO_4^{3-}) را نشان دهد.

بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، این مطالعه نخستین گزارشی است که موفقیت در سنتز بیوچار مشتق‌شده از لجن فاضلاب برای جذب مؤثر فسفات از پساب مزارع پرورش میگو را بدون نیاز به پوشش‌دهی سطحی (coating) نشان می‌دهد.

Gong و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که بیوچار سنتز شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد تأثیر محدودی بر کاهش کل فسفر (TP) در نمونه‌های یک دریاچه اوتروفیک و رودخانه ورودی آن داشت. این در حالی است که بیوچار تهیه شده در دمای بالاتر (۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) توانست ظرفیت جذب قابل‌توجهی برای PO_4–P (حدود ۲ میلی‌گرم بر گرم در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) از خود نشان دهد. این تفاوت عملکرد را می‌توان به افزایش سطح ویژه، توسعه ساختار متخلخل و تغییر در ترکیب شیمیایی سطح بیوچار در دماهای بالاتر نسبت داد.

Haddad و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که افزایش دوز بیوچار اصلاح شده از ۱ به ۲ گرم در لیتر منجر به افزایش چشمگیر راندمان حذف فسفات شد، اما در دوزهای بالاتر (۲/۲ تا ۲/۶ گرم در لیتر) این راندمان به حالت اشباع رسید و در نهایت در دوز ۲/۶ گرم در لیتر، حذف فسفات به حدود ۹۶/۸٪ رسید. این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر هم‌راستا هستند، به‌طوری‌که افزایش مقدار بیوچار BC700 نیز موجب افزایش راندمان حذف فسفات شد، که ناشی از افزایش تعداد مکان‌های فعال سطحی و فراهم شدن بستر مناسب برای برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک و واکنش‌های رسوبی است. علاوه بر این، نقش عناصر معدنی مانند منیزیم و کلسیم در بهبود عملکرد جذب نیز مورد تأکید قرار گرفته است. Haddad و همکاران (۲۰۱۸) این عملکرد را به حضور محتوای بالای Mg و Ca نسبت دادند که با آنیون‌های فسفات واکنش داده و رسوبات پایدار فسفات منیزیم و کلسیم تشکیل می‌دهند.

مقدار جذب در بیوچار در زمان‌های ابتدایی به دلیل جذب فیزیکی جاذب‌ها خیلی سریع و در مراحل بعدی کندتر بود. در ابتدای فرایند سطوح جذب در دسترس بیشتر بوده و بعد از مدتی با اشغال مکان‌های خالی سطح جذب به دلیل نیروهای دافعه شیب نمودار جذب کاهش یافته و در نهایت جذب به حالت اشباع می‌رسد (Bishnoi *et al*., 2004).

به طور کلی ظرفیت جذب در ابتدا با زمان جذب افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به تعادل جذب به مقدار ثابت می‌رسد. پس از یک دوره جذب، مکان‌های فعال جاذب‌های بیوچار عمدتا اشغال می‌شوند و غلظت فسفات در آب کاهش می‌یابد و برخورد فسفات با مکان‌های فعال جاذب را کاهش می‌دهد. زمان لازم برای رسیدن به جذب تعادلی می‌تواند یک شاخص مهم برای ارزیابی عملکرد جاذب‌های بیوچار باشد و جذب سریع برای کاربرد عملی مطلوب است. سینتیک جذب که ارتباط نزدیکی با زمان جذب دارد بینش‌هایی را در مورد فرآیند جذب فراهم می‌کند. با توجه به داده‌های آزمایش می‌توان گفت که وجود آنیون‌های دیگر اثر منفی بر جذب نشان داد و حتی منجر به دفع می‌شود. به طور نسبی، تأثیر SO_4^{2-} و PO_4^{3-} بر جذب بیشتر از نیترات است. احتمالاً به این دلیل است که میل جذبی آنیون با ظرفیت بالا به طور کلی بیشتر از آنیون با ظرفیت کم مانند نیترات و کلر است (Zhao *et al*., 2018).

از نتایج BET می‌توان تشخیص داد که علت حذف نیترات در بیوچار ۷۰۰ و ۶۰۰ می‌تواند مربوط به وجود منافذ متوسط و ریز و سطح ویژه بالای آنها باشد. زیرا نیترات به‌راحتی در این منافذ نفوذ کرده و حبس می‌شوند. Yaoو همکاران (۲۰۱۲) گزارش دادند که بیوچار ساخته شده در دمای بالا (۶۰۰ درجه سانتیگراد) می‌توانند نیترات را از محلول آبی با نرخ حذف ۰/۱۲–۳/۷ ٪ کاهش دهد. بیوچارهای سنتز شده در دماهای دیگر هیچ توانایی حذف نیترات را نشان ندادند و حتی نیترات را در محلول آزاد کردند. Mizuta و همکاران (۲۰۰۴) گزارش دادند که بیوچار ساخته شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتیگراد دارای ظرفیت جذب نیترات نسبتاً بالاتری حتی در مقایسه با کربن فعال تجاری است. Han و همکاران (۲۰۲۱) نتایج نشان می‌دهد که نیترات بر روی سطح بیوچار

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

با بار مثبت جذب شده است. با این حال، ظرفیت جذب بیوچار برای نیترات به اندازه کافی بالا نبود تا از آن به عنوان یک جاذب برای تصفیه آب استفاده شود.

اکثر مطالعات نشان می‌دهد که بیوچار اصلاح نشده تقریباً هیچ یا حداقل ظرفیت جذب نیترات را دارد. حذف نیترات در محلول آبی برای ۱۲ نوع بیوچار سنتز شده مشاهده نشد، که در میان آنها برخی از بیوچارها حتی به جای جذب نیترات، آن را آزاد کردند(Gai *et al*., 2014). نتایج مشابهی نیز برای بیوچارهای پیرولیز شده در دمای ۳۰۰–۴۵۰ درجه سانتیگراد (Hollister *et al*., 2013)، در دمای ۳۰۰–۳۵۰ درجه سانتیگراد مشاهده شد (Hale *et al*., 2013). این راندمان حذف نیترات ناچیز به احتمال زیاد به دلیل دافعه الکترواستاتیکی بین سطح بیوچار با بار منفی و آنیون نیترات است (Zhang *et al*., 2020).

در ابتدای فرآیند سرعت جذب یون بسیار بالا است، در این حالت یون‌ها از طریق انتشار به سطح بیوچار می‌رسند و پس از جذب در سطح بیوچار از طریق انتشار درون ذره‌ای در داخل منافذ آن قرار می‌گیرند، به تدریج و با پر شدن این مکان‌ها و به دلیل نیروی دافعه بین یون‌های در سطح جاذب و یون‌های موجود در محلول، جذب بیشتر یون‌ها مشکل می‌شود و فرآیند جذب به تعادل می‌رسد (Hou *et al*., 2016). نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققین گزارش دادند که جذب نیترات با افزایش زمان تماس افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به زمان تعادل، جذب ثابت باقی می‌ماند (Ganesan *et al*., 2013; Olgun *et al*., 2013).

زمان تماس بین بیوچار اصلاح‌شده با آهن (Fe-BC) و محلول آلوده به NO_3^- تأثیر قابل‌توجهی بر راندمان حذف این یون دارد. فرآیند جذب معمولاً از مدل سینتیک شبه مرتبه دوم پیروی می‌کند، که شامل یک مرحله اولیه سریع جذب سطحی و سپس یک مرحله کندتر با نزدیک شدن به تعادل و اشباع شدن مکان‌های اتصال است. در مرحله نخست، یون‌های نیترات به‌سرعت به مکان‌های فعال سطح بیوچار متصل می‌شوند، در حالی‌که در مرحله دوم، با اشباع شدن این مکان‌ها، نفوذ درون‌ذره‌ای محدود شده و نرخ جذب کاهش می‌یابد.

مطالعات مبتنی بر مدل شبه مرتبه دوم این رفتار را به‌خوبی توصیف کرده‌اند و نشان داده‌اند که جذب شیمیایی (chemisorption) مکانیسم غالب در این فرآیند است. نقش آهن در سطح بیوچار، که از طریق اصلاح سطحی افزایش یافته، در این میان حیاتی است؛ زیرا جاذبه الکترواستاتیکی بین یون‌های نیترات و سایت‌های مثبت سطحFe-BC ، عامل اصلی جذب محسوب می‌شود (Haghighi Mood *et al*., 2024).

رفتار سینتیکی جذب NO_3^-بر روی Fe-BC400 یک فرآیند وابسته به زمان را نشان می‌دهد که با مراحل متمایز راندمان جذب مشخص می‌شود. در ابتدا، ظرفیت جذب در طول دوره تماس اولیه (۳۰–۶۰ دقیقه) افزایش قابل توجهی را نشان داد که به فراوانی مکان‌های فعال قابل دسترس روی سطح BC عامل‌دار شده با آهن نسبت داده می‌شود. این افزایش راندمان جذب در مراحل اولیه مستقیماً ناشی از اصلاح آهن است که مکان‌های جذب متعددی با میل ترکیبی الکترواستاتیکی قوی برای یون‌های NO_3^- در محلول ایجاد می‌کند.

با پیشرفت فرآیند جذب از ۶۰ به ۱۲۰ دقیقه، کاهش قابل توجهی در سرعت جذب رخ می‌دهد که در حدود ۱۲۰ دقیقه با ایجاد شرایط تعادل به اوج خود می‌رسد. این الگوی زمانی، مکانیسم‌های اساسی حاکم بر فرآیند جذب را منعکس می‌کند. در طول فاز اولیه، یون NO_3^- به راحتی از طریق مسیرهای انتشار به سطح BC دسترسی پیدا می‌کند و به سرعت مکان‌های جذب موجود را اشغال می‌کند. کاهش سرعت بعدی در سینتیک جذب زمانی رخ می‌دهد که این مکان‌های فعال به تدریج اشباع می‌شوند و نیروهای دافعه الکترواستاتیکی بین یون NO_3^- جذب شده و یون‌های باقی مانده در محلول ایجاد می‌کنند. این برهمکنش‌های دافعه به طور قابل توجهی مانع جذب بیشتر می‌شوند و در نهایت حالت تعادلی ایجاد می‌کنند که در آن نرخ جذب و واجذب برابر می‌شود.

اصلاح بیوچار با آهن باعث ایجاد مکان‌های جذب با بار مثبت بیشتری روی سطح شد، که به نوبه خود بر ظرفیت جذب NO_3^- تأثیر گذاشت. به طور متوسط، درصد حذف NO_3^- توسط ۲ گرم بیوچار اصلاح نشده ۵۸/۸۴ ٪ بود در حالی‌که درصد حذف NO_3 توسط ۲ گرم بیوچار اصلاح شده ۹۷/۲۵ ٪ بود که حدود ۱/۶۵ برابر بیوچار اصلاح نشده است.

با افزایش دوز جاذب، مکان‌های جذب موثر و گروه‌های عاملی روی بیوچار نسبت به غلظت NO_3^- افزایش یافت که منطقه تماس برای NO_3^- را افزایش می‌دهد و سرعت حذف را بهبود می‌بخشید. علاوه بر این، هدف از مطالعه اثر دوز افزودنی بر فرآیند جذب،

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

جستجوی حداکثر نرخ حذف تحت فرض صرفه جویی در هزینه‌ها است. زیرا افزایش دوز جاذب بدون محدودیت غیرممکن است که منجر به هزینه بالاتر می‌شود و ممکن است تحت تأثیر اثر تجمعی جاذب قرار گیرد(Wang *et al*., 2019).

افزایش راندمان جذب نیترات توسط Fe-BC400 را می‌توان به سه مکانیسم مرتبط دانست: جذب سطحی اولیه، نفوذ درون‌ذره‌ای به دلیل ساختار ماکروپور بیوچار، و جذب الکترواستاتیکی ناشی از بار مثبت سطحی حاصل از اصلاح با آهن. شعاع کوچک یون نیترات و ساختار متخلخل بیوچار امکان نفوذ مؤثر را فراهم می‌کند، در حالی‌که اصلاح سطحی با آهن موجب افزایش انتخاب‌پذیری و جذب شیمیایی می‌شود. این هم‌افزایی ساختاری و شیمیایی، عملکرد بالای Fe-BC400 را در حذف نیترات از پساب مزارع میگو توضیح می‌دهد (Sundaram *et al*., 2003; Inyang *et al*., 2015; Jung *et al*., 2015; Zheng *et al*., 2020).

بیوچار اصلاح شده می‌تواند به عنوان یک جاذب موثر در مقایسه با جاذب‌های مواد معدنی غنی از کلسیم مانند دولومیت در نظر گرفته شود که بازده حذف فسفات را تقریباً ۴۱٪ در غلظت اولیه فسفات ۳۰ میلی‌گرم در لیتر، در دوز جاذب ۳ گرم در لیتر نشان می‌دهد (Boeykens *et al*., 2017).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بیوچار از لجن فاضلاب شهری بندرعباس در دماهای مختلف پیرولیز سنتز و کارایی آن در حذف نیترات و فسفات از پساب مزارع پرورش میگو بررسی شد. نتایج نشان دادند که افزایش دمای پیرولیز تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد باعث بهبود قابل توجه ساختار متخلخل و سطح ویژه بیوچار شده و بیشترین راندمان حذف فسفات (حدود ۹۲٪) را در BC700 ایجاد کرد. حذف نیترات نیز توسط بیوچار 700موثر بود (حدود ۵۲٪)، اما اصلاح سطحی بیوچار با آهن موجب افزایش چشمگیر حذف نیترات تا ۹۸٪ گردید. مکانیزم‌های جذب شامل جذب شیمیایی فسفات از طریق رسوب سطحی کلسیم و جذب الکترواستاتیکی نیترات روی سطوح با بار مثبت اصلاح شده با آهن بود. همچنین بهینه‌سازی دوز و زمان تماس نقش مهمی در افزایش راندمان حذف داشت. مناسبترین دوز و زمان تماس BC700 با پساب مزارع میگو به ترتیب ۲/۵ گرم و ۲ ساعت بود که حدود ۹۵٪ فسفات را از پساب مزارع میگو حذف نمود. بیشترین درصد حذف نیترات با ۳ گرم BC700 با ۱۸۰ دقیقه (دوساعت) زمان تماس مشاهده گردید. این نتایج ضمن تأکید بر پتانسیل بالای بیوچار به‌ویژه انواع اصلاح‌شده با فلزات در تصفیه پایدار پساب‌های غنی از مواد مغذی در مزارع میگو، مزایای زیست‌محیطی کاهش بار آلودگی در اکوسیستم‌های آبی را نیز به اثبات رساند.

References

Abdoli, S., Asgari Lajayer, B., Dehghanian, Z., Bagheri, N., Vafaei, A. H., Chamani, M., and Price, G. W., 2024. A review of the efficiency of phosphorus removal and recovery from wastewater by physicochemical and biological processes: challenges and opportunities. *Water,* 16(17), pp. 2507. https://doi.org/10.3390/w16172507

Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S., Ok, Y.S., 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere,* 99, pp. 19–33. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071.

Akbarzadeh chomachaei, G., Karim Zadeh, R., saraji, F., aghajari khazaei, S., mohebi nozar, S. L., Darvishi, M., behzadi, S., Ejlali Khanghah, K. Assessment of environmental risk caused by shrimp farming activities in Hormozgan province (Based on studies conducted in the Tiab Area). Ecology and Water Resources, 2021; 4(2), pp. 9-18. (in Persian).

Antunes, E., Jacob, M.V., Brodie, G., Schneider, P.A., 2018. Isotherms, kinetics and mechanism analysis of phosphorus recovery from aqueous solution by calcium-rich biochar produced from biosolids via microwave pyrolysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), pp.395–403. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.011.

Audelo-Naranjo, J.M., Martínez-Córdova, L.R., Gómez-Jiménez, S. and Voltolina, D., 2012. Intensive culture of Litopenaeus vannamei without water exchange and with an artificial

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

substrate. *Hidrobiológica*, 22(1), pp.1-7. https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/673

Bera, T., Purakayastha, T.J., Patra, A.K., Datta, S.C., 2018. Comparative analysis of physicochemical, nutrient, and spectral properties of agricultural residue biochars as influenced by pyrolysis temperatures. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, pp. 1115–1127. https://doi.org/10.1007/s10163-017-0675-4.

Bird, M., Keitel, C. and Meredith, W., 2017. *Analysis of biochars for C, H, N, O and S by elemental analyser*, 1, pp. 39-50. Clayton: CSIRO publishing. https://nottingham-repository.worktribe.com/output/970299

Bishnoi, N.R., Bajaj, M., Sharma, N., and Gupta, A., 2004. Adsorption of Cr. VI on activated rice husk carbon and activated alumina. *Bioresource Technology*, 91, pp. 305-307.doi: 10.1016/S0960-8524(03)00204-9

Biswas, B., Adhikari, S., Jahromi, H., Ammar, M., Baltrusaitis, J., Torbert, A., Linhoss, J., Lamba, J., 2024. Magnesium doped biochar for simultaneous adsorption of phosphate and nitrogen ions from aqueous solution. *Chemosphere,* 358, pp.142130. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142130

Boeykens, S.P., Piol, M.N., Legal, L.S., Saralegui, A.B., Vázquez, C., 2017. Eutrophication decrease: phosphate adsorption processes in presence of nitrates. *Journal of Environmental Management,* 203, pp. 888–895. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.026

Brandoni, C., Bosnjakovic, B., 2018. Energy, food and water nexus in the European Union: Towards a circular economy. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy,* 171(3), pp.140- 144. https://doi.org/10.1680/jener.18.00005

de Amorim, W. S., Valduga, I. B., Ribeiro, J. M. P., Williamson, V.G., Krauser, G. E., Magtoto, M. K., 2018. The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: An analysis of the interactions between food, water, and energy security. *Environmental Impact Assessment Review,* 72, pp. 1-11. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.002

Fagbohungbe, M. O., Herbert, B. M. J., Hurst, L., Ibeto, C. N., Li, H., Usmani, S. Q., 2017. The challenges of anaerobic digestion and the role of biochar in optimizing anaerobic digestion. *Waste Management,* 61, pp. 236-249. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.028

Faria, W.M., Figueiredo, C.C. de, Coser, T.R., Vale, A.T., Schneider, B.G., 2018. Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment. *Archives of Agronomy and Soil Science,* 64, pp. 505–519. https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1360488

Feng, M., Li, M., Zhang, L., Luo, Y., Zhao, D., Yuan, M., Zhang, K., Wang, F., 2022. Oyster shell modified tobacco straw biochar: efficient phosphate adsorption at wide range of pH values. *International Journal of Environmental Research,* 19, pp. 7227. https://doi.org/10.3390/ijerph.19127227

Foereid, B., 2015. Biochar in nutrient recycling—The effect and its use in wastewater treatment. *Open Journal of Soil Science,* 5(02):39. http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2015.52004

Gai, X.P., Wang, H.Y., Liu, J., Zhai, L.M., Liu, S., Ren, T.Z., Liu, H.B., 2014. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. *PLoS One* 9 (12), pp. 526-534. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113888

Ganesan, P., Kamaraj, R., Vasudevan, S., 2013. Application of isotherm, kinetic andthermodynamic models for the adsorption of nitrate ions on graphene fromaqueous solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 11, pp. 2735-2746. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.01.029

Gherghel, A., Teodosiu, C., De Gisi, S., 2019. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production,* 228, pp. 244–63. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science,* 327, pp. 812-818.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

Gong, Y.P., Ni, Z.Y. Xiong, Z.Z., Cheng, L.H. , Xu, X.H., 2017. Phosphate and ammo- nium adsorption of the modified biochar based on Phragmites australis after phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp. 8326–8335.

Gumus, R.H. and Okpeku, I., 2015. Production of Activated Carbon and Characterization from Snail Shell Waste (Helix pomatia). *Advances in Chemical Engineering and Science,* 5, pp. 51-61. http://dx.doi.org/10.4236/aces.2015.51006

Haddad, K., Jellali, S., Jeguirim, M., Trabelsi, A.B.H., Limousy, L., 2018. Investigations on phosphorus recovery from aqueous solutions by biochars derived from magnesium-pretreated cypress sawdust. *Journal of Environmental Management,* .216, pp. 305–314. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.020

Haghighi Mood, S., Pelaez-Samaniego, M.R., Han, Y., Mainali, K., Garcia-Perez, M., 2024. Iron-and Nitrogen-Modified Biochar for Nitrate Adsorption from Aqueous Solution. *Sustainability*, 16(13), pp. 5733. https://doi.org/10.3390/su16135733

Hale, S.E., Alling, V., Martinsen, V., Mulder, J., Breedveld, G.D., Cornelissen, G., 2013. The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in ca- cao shell and corn cob biochars. *Chemosphere*, 91(11), pp. 1612–1619. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.12.057

Han, L., Sun, H., Sun, K., Yang, Y., Fang, L., Xing, B., 2021. Effect of Fe and Al ions on the production of biochar from agricultural biomass: properties, stability and adsorption efficiency of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 145, pp. 111133. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111133

Hollister, C.C., Bisogni, J.J., Lehmann, J., 2013. Ammonium, Nitrate, and Phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from Corn Stover (L.) and Oak Wood (spp.). *Journal of Environmental Quality,* 42 (1), pp. 137–144. https://doi.org/10.2134/jeq2012.0033

Hou, J., Huang, L., Yang, Z., Zhao, Y., Deng, C., Chen, Y. and Li, X., 2016. Adsorption of ammonium on biochar prepared from giant reed. *Environmental Science and Pollution Research,* 23(19), pp. 19107-19115. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7084-4

Hu, Q., Chen, N., Feng, C., Hu, W., 2015. Nitrate adsorption from aqueous solution using granular chitosan-Fe^{3+}complex. *Applied Surface Science*, 347, pp. 1–9. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.049

Inyang, M., Dickenson, E., 2015. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: a review. *Chemosphere,* 134, pp. 232-240. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072.

Jayanthi, M., Thirumurthy, S., Muralidhar, M. and Ravichandran, P., 2018. Impact of shrimp aquaculture development on important ecosystems in India. *Global Environmental Change*, 52, pp.10-21. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.05.005

Jung, K.W., Hwang, M.J. , Ahn, K.H. , Ok, Y.S., 2015. Kinetic study on phosphate re- moval from aqueous solution by biochar derived from peanut shell as renew- able adsorptive media. *International Journal of Environmental Science and Technology,* 12 (10), pp. 3363–3372. https://doi.org/10.1007/s13762-015-0766-5

Kim, E., Jung, C., Han, J., Her, N., Park, C.M., Jang, M., Son, A., Yoon, Y., 2012. Sorptive removal of selected emerging contaminants using biochar in aqueous solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,* 36, pp. 364-371. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.03.004.

Kumar, P., Sudha, S., Chand, S. and Srivastava, V. C., 2010 'Phosphate Removal from Aqueous Solution Using Coir-Pith Activated Carbon'. *Separation Science and Technology,* 45(10), pp. 1463–1470. https://doi.org/10.1080/01496395.2010.485604

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

Lara-Anguiano, G.F., Esparza-Leal, H.M., Sainz-Hernández, J.C., Ponce-Palafox, J.T., Valenzuela-Quiñónez, W., Apun-Molina, J.P. and Klanian, M.G., 2013. Effects of inorganic and organic fertilization on physicochemical parameters, bacterial concentrations, and shrimp growth in Litopenaeus vannamei cultures with zero water exchange. *Journal of the World Aquaculture Society*, 44(4), pp.499-510. https://doi.org/10.1111/jwas.12058

Lawal, A. A., Hassan, M. A., Farid, M. A. A., Yasim-Anuar, T. A. T., Yusoff, M. Z. M., Zakaria, M. R., and Shirai, Y., 2020. Production of biochar from oil palm frond by steam pyrolysis for removal of residual contaminants in palm oil mill effluent final discharge. *Journal of Cleaner Production,* 265, pp. 121643. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121643

Mizuta, K., Matsumoto, T., Hatate, Y., Nishihara, K., Nakanishi, T., 2004. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal. *Bioresource Technology,* 95, pp. 255–257. https://doi.org/10.33086/etm.v1i1.2036

Mohan, D., Abhishek, K., Sarswat, A., Patel, M., Singh, P., Pittman, C.U., 2018. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration – a sustainable solution to crop-residue burning in India. *RSC Advances*, 8, pp. 508–520. https://doi.org/ 10.1039/C7RA10353K. https://doi.org/10.1039/C7RA10353K

Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y.S., Pittman, C.U., 2014. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - a critical review. *Bioresource Technology*, 160, pp. 191–202. https:// doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120.

Olgun, A., Atar, N., Wang, S., 2013. Batch and column studies of phosphate and nitrate adsorption on waste solids containing boron impurity. *Chemical Engeneering Journal*, 222, pp. 108–119. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.029

Oztürk, N., and Bektaş, T. E. l. 2004. Nitrate removal from aqueous solution by adsorption onto various materials. *Journal of Hazardous Materials,* 112, pp. 155-162. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.05.001

Saha, S. K., 2017. Socio-economic and environmental impacts of shrimp farming in the south-western coastal region of Bangladesh. International Journal of Research on Land-use *Sustainability,* 3(1), pp. 128-137.

Samocha, T.M. and Lawrence, A.L., 1997. Shrimp farms' effluent waters, environmental impact and potential treatment methods. Interactions between cultured species and naturally occurring species in the environment, pp.35-38.

Saxena, J., Rawat, J., Kumar, R. 2017. Conversion of biomass waste into biochar and the effect on mung bean crop production. *Clean*, 45, pp. 1501020. https://doi.org/10.1002/ clen.201501020.

Sharma, M., Singh, J., Baskar, C., Kumar, A., 2018. A comprehensive review on biochar formation and its utilization for wastewater treatment. *Pollution Research,* 37, pp. 1–18.

Shepherd, J.G., Joseph, S., Sohi, S.P., Heal, K. V., 2017. Biochar and enhanced phosphate capture: Mapping mechanisms to functional properties. *Chemosphere*, 179, pp. 57–74. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.123

Stella Mary, G., Sugumaran, P., Niveditha, S., Ramalakshmi, B., Ravichandran, P., Seshadri, S., 2016. Production, characterization and evaluation of biochar from pod (Pisum sativum), leaf (Brassica oleracea) and peel (Citrus sinensis) wastes. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture,* 5, pp. 43–53. https://doi.org/10.1007/s40093-016-0116-8.

Sundaram, S.K. Saraswathi, S. Jayalakshmi, S. Lalitha, S., 2003. Estimation of solvated ionic radii of bivalent nitrates through molal hydration number. *Bulletin of Electrochemistry,* 19(5), pp. 217–220.

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

Tanyaros, S., Choopunth, P. and Kurokura, H., 2002. A basic design and operating for shrimp-settling-oyster integration system to reduce discharge problem. *Fisheries science*, 68(1), pp.843-846. https://doi.org/10.2331/fishsci.68.sup1_843

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP/248. 2017.

Varjani, S., Kumar, G., Rene, E.R., 2019. Developments in biochar application for pesticide remediation: current knowledge and future research directions. *Journal of Environmental Management*, 232, pp. 505–513. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.043.

Vijayaraghavan, K., 2019. Recent advancements in biochar preparation, feedstocks, modification, characterization and future applications. *Environmental Technology Reviews,* 8, pp. 47–64. https://doi.org/10.1080/21622515.2019.1631393.

Wang, B., Ma, Y., Lee, X., Wu, P., Liu, F., Zhang, X., Li, L., Chen, M., 2021. Environmental-friendly coal gangue-biochar composites reclaiming phosphate from water as a slow-release fertilizer. *The Science of The Total Environment,* 758, pp. 143664. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143664

Wang, J., Wang, S., 2019. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review. *Journal of Cleaner Production,* 227, pp.1002–22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282

Wang, S., Kong, L., Long, J., Su, M., Diao, Z., Chang, X., Shih, K., 2018. Adsorption of phosphorus by calcium-flour biochar: isotherm, kinetic and transformation studies. *Chemosphere,* 195, pp. 666–672. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.101

Wang, S., Wang, J. 2019. Activation of peroxymonosulfate by sludge-derived biochar for the degradation of triclosan in water and wastewater. *Journal of Chemical Engineering*, 356, pp. 350–358. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.062.

Wang, T., Zhang, D., Fang, K., Zhu, W., Peng, Q., and Xie, Z., 2021. Enhanced nitrate removal by physical activation and Mg/Al layered double hydroxide modified biochar derived from wood waste: Adsorption characteristics and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), pp. 105184. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105184

Wang, T., Zheng, J., Liu, H., Peng, Q., Zhou, H., and Zhang, X., 2021. Adsorption characteristics and mechanisms of Pb^{2+} and Cd^{2+} by a new agricultural waste–Caragana korshinskii biomass derived biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp. 13800-13818.

Xia, P., Wang, Xuejing, Wang, Xin, Song, J., Wang, H., Zhang, J., Zhao, J., 2016. Struvite crystallization combined adsorption of phosphate and ammonium from aqueous solutions by mesoporous MgO loaded diatomite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,* 506, pp. 220–227. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.05.101

Yang, Q., Wang, X., Luo, W., Sun, J., Xu, Q., Chen, F., and Zeng, G., 2018. Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge. *Bioresoure Technology*, 247, pp. 537-544. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.136

Yang, X., Zhang, S., Ju, M., 2015. Preparation and modification of biochar materials and their application in soil remediation. *Applied Science*, 9(7), pp. 1365. https://doi.org/10.3390/app9071365.

Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M. and Zimmerman, A.R., 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 89(11), pp.1467-1471. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]

Ye, Y., Ngo, H.H., Guo, W., Liu, Y., Zhang, X., Guo, J., Ni, B., Chang, S.W., Nguyen, D.D., 2016. Insight into biological phosphate recovery from sewage. *Bioresoure Technology,* 218, pp. 874–881. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.003

Yin, Q., Liu, M., and Ren, H., 2019. Biochar produced from the co-pyrolysis of sewage sludge and walnut shell for ammonium and phosphate adsorption from water. *Journal of Environmental Management,* 249, pp. 109410. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109410

Zhang, M., Song, G., Gelardi, D. L., Huang, L., Khan, E., Mašek, O., and Ok, Y. S., 2020. Evaluating biochar and its modifications for the removal of ammonium, nitrate, and phosphate in water. *Water Research*, 186, pp. 116303. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116303

Zhao, H., Xue, Y., Long, L., and Hu, X., 2018. Adsorption of nitrate onto biochar derived from agricultural residuals. *Water Science & Technology,* 77(2), 548-554. https://doi.org/10.2166/wst.2017.568

Zheng, Q. Yang, L. Song, D. Zhang, S. Wu, H. Li, S. Wang, X., 2020. High adsorption capacity of Mg–Al-modified biochar for phosphate and its potential for phosphate interception in soil. *Chemosphere*, 259, pp. 127469. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127469

[Downloaded from jae.hormozgan.ac.ir on 2026-11-28]