

Using Date Palm Leaves Biochar for Agricultural Drainage Water Management: Mechanisms and Effects

Sara Hoveizavi¹; Abdolrahim Hooshmand²; Parvaneh Tishehzan^{3*}

1. Ph.D. student, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
- *3. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*Email Address: Partishehzan@scu.ac.ir

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article history:

Received Date:

2024/06/26

Revised Date:

2024/06/30

Accepted Date:

2024/07/03

Published Date:

2025/07/21

Keywords:

Adsorption,
Biochar,
Date palm leaves,
Drainage water,
Taguchi experimental design.

ABSTRACT

Salinity is one of the most important water quality issues in agriculture, which plays an important role in the production and productivity of crops. In this research, to reduce the salinity of agricultural drainage water simulated with sodium chloride salt, biochar was prepared from date palm leaves waste at different pyrolysis temperatures (350, 450, 550, and 650 °C), and their performance was investigated for the adsorption of water salinity ions (sodium and chloride) using batch adsorption experiments in a completely randomized design with four replications. The results of this experiment showed that date palm leaves biochar prepared at 650 °C (DPLB650) had the highest adsorption. In the second step, the effect of independent variables pH (5, 6, 7, 8, 9), adsorbent dosage (10, 20, 30, 40, 50) g/L, contact time (30, 60, 120, 180, 240) minutes and EC (4, 8, 12, 16, 20) dS/m on the adsorption efficiency of sodium and chloride ions by DPLB650 adsorbent, using Taguchi experimental design method was evaluated and the most optimized variables and their levels was determined. The results showed that the maximum adsorption efficiency of sodium and chloride ions (27.43% and 27.56%, respectively) occurs at pH equal to 7, an adsorbent dosage of 30 g/L, a contact time of 180 minutes, and an initial EC of 20 dS/m. To validate this prediction, an experiment was conducted under the mentioned optimal conditions, and the adsorption efficiency of sodium and chloride ions was obtained as 27.61% and 27.65%, respectively. Investigating different adsorption kinetic and isotherm models showed the results followed the pseudo-second-order kinetic model and the Langmuir isotherm model.

Cite this article: Sara Hoveizavi , Abdolrahim Hooshmand, Parvaneh Tishehzan (2025). Using Date Palm Leaves Biochar for Agricultural Drainage Water Management: Mechanisms and Effects, Journal of Environmental Sciences Studies, 10(2), Pages 10058 – 10073.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The world's growing population and water resource shortages make it necessary to utilize saline water, such as agricultural drainage water. However, the salinity of irrigation water has many destructive effects on crops and soil particles. Various methods are used to desalinate saline water, but relatively expensive. Thus, using low-cost methods such as using inexpensive adsorbents is important. Biochar is a carbon-rich solid produced from the pyrolysis of plant biomass and agricultural wastes. Biochar, Due to its physical and chemical properties, has shown promise in the adsorption of various pollutants from aqueous solutions. One potential source of biochar is agricultural waste, such as date palm tree leaves waste. By converting this waste into biochar, we can effectively manage agricultural waste.

Materials and methods

Agricultural drainage water was simulated using sodium chloride salt at five different salinity levels of 4, 8, 12, 16, and 20 dS/m. The biochars were produced from date palm tree leaves biomass at four different pyrolysis temperatures 350, 450, 550, and 650 °C with a retention time of 3 hours. The prepared biochars were sieved to 105-500 micron particle sizes. Then, their product yield and ash were determined. The EC and pH of biochars were measured. Using the BET method the specific surface area of biochars was measured. In the first step, the performance of biochars was investigated for the adsorption of sodium and chloride ions. Then, the most optimized biochar was selected for use in the next step. Batch adsorption experiments were conducted in a completely randomized design for each of the adsorbents with four replicates under the same conditions, pH equal to 7, an adsorbent dosage of 20 g/L, a contact time of 240 minutes, and an initial EC of 12 dS/m. In the end, the sodium and chloride ions adsorption capacity of the adsorbents was calculated. After selecting the optimized adsorbent, its elemental composition was determined using EDS analysis. Also, the pH_{pzc} of the selected adsorbent was determined. In the second step, the Taguchi experimental design method was used to optimize the effective factors pH, adsorbent dosage, contact time, and initial EC at five different levels on the adsorption efficiency of sodium and chloride ions. 25 batch adsorption experimental combinations were determined and each of the experiments was conducted with three replicates. The evaluation of the signal-to-noise ratio (S/N) and analysis of variance (ANOVA) were conducted to analyze the experimental results. Given the goal of this research, the S/N based on the larger value is better chosen. Finally, kinetic and isotherm models were fitted on the adsorption experimental data.

Results and discussion

The results indicated that the production yield of prepared biochars has decreased with the increase of pyrolysis temperature from 350 °C to 650 °C while, their EC, pH, ash percentage, and specific surface area have increased. By comparing the performance of date palm leaves biochars, the DPLB650 adsorbent, which had the highest adsorption of sodium and chloride ions, was selected as the most optimized one and used in the second step of the research. In the second step, the results of Taguchi's experiments revealed that under optimal conditions (pH equal to 7, an adsorbent dosage of 30 g/L, a contact time of 180 min, and an initial EC of 20 dS/m), the maximum adsorption efficiency of sodium and chloride ions is 27.43% and 27.56%, respectively. For validation, an experiment was conducted under the mentioned conditions, where the adsorption efficiency of sodium and chloride ions was obtained as 27.61% and 27.65%, respectively. In addition, the pH, contact time, and initial EC at the $p \leq .01$ level and adsorbent dosage at the $p \leq .05$ level have a significant effect on the adsorption of sodium and chloride ions. The investigating results indicated that the pseudo-second-order kinetic model and the Langmuir isotherm model have the best fit on the experimental data of the adsorption of sodium and chloride ions.

Conclusion

In this study, reducing the salinity of agricultural drainage water simulated with sodium chloride salt at different salinity levels was investigated using date palm leaves biochar prepared at different pyrolysis temperatures (350, 450, 550, and 650 °C). The results indicated that DPLB650 had the highest performance on the adsorption of sodium and chloride ions. This adsorbent under optimal conditions (pH equal to 7, an adsorbent dosage of 30 g/L, a contact time of 180 min, and an initial EC of 20 dS/m), can reduce the electrical conductivity of agricultural drainage water by about 27%. The initial EC has the largest contribution to the adsorption of sodium and chloride ions. The pseudo-second-order kinetic model and the Langmuir isotherm model satisfactorily described the adsorption process.



استفاده از بیوچار برگ نخل برای مدیریت زه آب کشاورزی: مکانیسم‌ها و اثرات

سارا حویزای^۱، عبدالرحیم هوشمند^۲، پروانه تیشه‌زن^{۳*}

۱. دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲. استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳*. استادیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: Partishehzan@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی	شوری یکی از مهم‌ترین مسائل کیفی آب در کشاورزی است که نقش مهمی در تولید و بهره‌وری محصولات زراعی دارد. در این پژوهش به منظور کاهش شوری زه آب کشاورزی شبیه‌سازی شده با نمک سدیم کلرید، از ضایعات برگ نخل در دماهای گرماکافت مختلف (۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۵۰ درجه سلیسیوس)، بیوچار تهیه و کارایی آن‌ها برای جذب یون‌های شوری آب (سدیم و کلر) با استفاده از آزمایش‌های جذب ناپیوسته در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار بررسی شد. نتایج این آزمون نشان داد که بیوچار برگ نخل تهیه شده در دمای ۶۵۰ درجه سلیسیوس (DPLB650) بیش‌ترین جذب را داشته است. در گام دوم، اثر متغیرهای مستقل pH (۵، ۶، ۷، ۸، ۹)، مقدار جاذب (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰) گرم بر لیتر، زمان تماس (۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰) دقیقه و EC اولیه (۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰) دسی‌زیمنس بر متر بر راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب DPLB650، به کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی ارزیابی و مناسب‌ترین متغیرها و سطوح آن‌ها تعیین گردید. نتایج نشان داد بیشینه‌ی راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر (به ترتیب ۲۷/۴۳ و ۲۷/۵۶ درصد) در pH برابر ۷، مقدار جاذب ۳۰ گرم بر لیتر، زمان تماس ۱۸۰ دقیقه و EC اولیه ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر رخ می‌دهد. برای صحت‌سنجی این پیش‌بینی، آزمایشی در شرایط مناسب مذکور انجام شد و راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر به ترتیب ۲۷/۶۱ و ۲۷/۶۵ درصد به دست آمد. بررسی مدل‌های مختلف سینتیک و ایزوترم جذب نشان داد نتایج از مدل سینتیک شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر پیروی می‌کنند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰	
کلید واژه‌ها: برگ نخل، بیوچار، طراحی آزمایش تاگوچی، جذب، زه آب.	

افزایش تقاضای آب به دلیل رشد جمعیت و کاهش ذخایر منابع آب، کمبود آب را در بیشتر مناطق جهان تشدید می‌کند. این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مانند ایران که با محدودیت منابع آب در دسترس مواجه است، بسیار جدی می‌باشد. یکی از راه‌های جبران کمبود آب، استفاده از آب‌های شور مانند زه‌آب‌های کشاورزی است. کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در جهان است. از آنجایی که شوری آب آبیاری اثرات نامطلوبی بر تولید محصولات زراعی، آسیب به محیط‌زیست، شوری و تخریب ساختار خاک دارد، شوری‌زدایی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. روش‌های شوری‌زدایی مختلفی در جهان وجود دارد که اغلب هزینه نسبتاً زیادی دارند و استفاده از آن‌ها به‌خصوص در کشاورزی مقرون‌به‌صرفه نیست. از میان روش‌های شوری‌زدایی، جذب سطحی به دلیل کارایی بالا و کم‌هزینه بودن، مورد استقبال محققان قرار گرفته است. در فرایند جذب پارامترهای مختلفی مؤثرند که بهینه‌سازی و درک همبستگی آن‌ها نیاز به آزمایش‌های زیاد، دشوار و زمان‌بر دارد. برای حل این مشکل از روش‌های طراحی آزمایش مانند روش تاگوچی استفاده می‌شود تا تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌های اجرای آن‌ها کاهش یابد. در روش طراحی آزمایش تاگوچی با توجه به عوامل مؤثر بر فرایند و سطوح انتخاب‌شده آن‌ها، آرایه‌های متعامد تعیین می‌شوند. این آرایه‌ها با حذف مجموعه‌ای از آزمایش‌های اضافی سبب سرعت بخشیدن به فرایند شده و با حداقل تعداد آزمایش‌ها، اطلاعات دقیقی در مورد تعامل عوامل مؤثر بر متغیر پاسخ ارائه می‌دهند. همچنین در روش تاگوچی تحلیل و ارزیابی دقیق‌تر نتایج آزمایش‌های طراحی‌شده با استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N) و تحلیل واریانس (ANOVA) صورت می‌پذیرد. این روش به‌طور گسترده‌ای در بهینه‌سازی فرایندهای جذب توسط برخی محققان استفاده شده است. انتخاب جاذب مناسب برای دستیابی به بالاترین راندمان کاهش آلاینده‌ها یا برخی یون‌های آب، بسیار مهم است. مویز و گونفا (۲۰۲۲) در پژوهشی کارایی جاذب‌های بنتونیت طبیعی و فعال‌شده با اسیدسولفوریک را در کاهش شوری آب مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد بنتونیت فعال‌شده با اسیدسولفوریک عملکرد بهتری در کاهش شوری آب دارد. بافکار و رسولی (۱۴۰۰) در پژوهشی نشان دادند نانو ساختار پوسته تخم‌مرغ، جاذب مؤثری در جذب سدیم از محلول‌های آبی است. زاهد و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای عملکرد گرافن اکسید و گرافن اکسید اصلاح‌شده با کیتوزان را در شوری‌زدایی آب‌شور بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که گرافن اکسید اصلاح‌شده با کیتوزان با ظرفیت جذب بالاتر و عملکرد بهتر، می‌تواند به‌عنوان یک جاذب مؤثر برای شوری‌زدایی آب‌شور به‌کار برده شود. مطالعات بسیاری نشان داده است که بیوچار به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن، سادگی در تولید و بهره‌برداری، سازگاری با محیط‌زیست، تطبیق‌پذیری و پایداری بالا، جاذب مؤثری در جذب آلاینده‌های مختلف از محلول‌های آبی بوده است. بیوچار یک ماده‌ی غنی از کربن است که از تجزیه در اثر حرارت (گرماکافت) زیست‌توده‌ها در شرایط اکسیژن محدود یا عدم حضور اکسیژن تهیه می‌شود. عملکرد بیوچار در جذب آلاینده‌ها از محلول‌های آبی به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن مانند تخلخل، سطح ویژه و گروه‌های عاملی سطح بستگی دارد که متأثر از نوع زیست‌توده، دمای تجزیه حرارتی، نرخ تغییرات دما و مدت زمان نگهداشت حرارت است. بیوچار از مواد مختلفی مانند ضایعات کشاورزی تهیه می‌شود. دفع نادرست ضایعات کشاورزی می‌تواند پیامدهای نامطلوبی برای محیط‌زیست به دنبال داشته باشد. کشور ایران و به‌ویژه استان خوزستان دارای نخلستان‌های وسیع و گسترده‌ای است که سالانه ضایعات کشاورزی فراوانی از جمله برگ درخت نخل در آن تولید می‌شود. یکی از راه‌های حفاظت از محیط‌زیست و مدیریت ضایعات کشاورزی، تبدیل این ضایعات به بیوچار (زغال زیستی) است. نگوین و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی جذب سدیم از محلول آبی با استفاده از بیوچار ضایعات کشاورزی مختلف مانند بیوچار پوسته برنج، ساقه ذرت و الیاف نارگیل پرداختند. نتایج نشان داد بیوچار پوسته برنج دارای سطح ویژه بزرگ‌تر و بیش‌ترین ظرفیت جذب برآورد شده توسط مدل ایزوترم لانگمویر نسبت به دو جاذب دیگر است. سینگ و همکاران (۲۰۱۷) توانایی بیوچار کاه برنج و خاکستر پوسته برنج را در کاهش شوری محلول آبی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد خاکستر پوسته برنج مؤثرترین جاذب در کاهش شوری آب بود. رستمیان و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی شوری‌زدایی آب آبیاری توسط بیوچارهای شلتوک برنج تهیه‌شده در دماهای گرماکافت ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلیسیوس را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد دمای گرماکافت اثر معنی‌داری بر خصوصیات جاذب دارد و بیوچار شلتوک برنج تهیه‌شده در دمای گرماکافت ۶۰۰ درجه سلیسیوس دارای بهترین عملکرد در شوری‌زدایی بود. با توجه به مرور منابع به نظر می‌رسد مطالعه‌ای مبنی بر استفاده از جاذب بیوچار برگ نخل تهیه‌شده در دماهای گرماکافت مختلف برای کاهش هدایت الکتریکی یا یون‌های مؤثر بر شوری آب انجام‌نشده است. لذا در این پژوهش از ضایعات برگ نخل در دماهای گرماکافت مختلف، بیوچار تهیه و کارایی آن در جذب یون‌های مولد شوری (سدیم و کلر) از محلول سنتتیک مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش انجام تحقیق

• تهیه جاذب بیوچار برگ نخل و اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های آن

این پژوهش در آزمایشگاه کیفیت آب دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. برای تهیه بیوچار، بقایای برگ نخل از نخلستان‌های دانشگاه شهید چمران اهواز جمع‌آوری و پس از چندین مرتبه شستشو با آب مقطر برای رفع گرد و غبار روی آن‌ها، در آون با درجه حرارت ۶۰ درجه سلیسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. سپس برای تهیه بیوچار برگ نخل، در کوره الکتریکی به مدت سه ساعت در درجه حرارت‌های ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۵۰ درجه سلیسیوس قرار داده شدند. بیوچارهای تهیه‌شده از الک‌های استاندارد (شماره ۳۵ و ۱۴۰) با اندازه ذرات ۵۰۰-۱۰۵ میکرون عبور داده شدند. هدایت الکتریکی (EC) و pH بیوچارهای تهیه‌شده در نسبت ۱:۱۰۰ بیوچار به آب مقطر اندازه‌گیری شد. از روش Brunauer-Emmett-Teller (BET) برای اندازه‌گیری سطح ویژه بیوچارها استفاده شد. بازده هر بیوچار از نسبت وزن نهایی بیوچار تولیدشده به وزن قبل (برگ نخل خشک) به‌دست آمد. درصد خاکستر از نسبت وزن خاکستر به وزن آون خشک‌شده بیوچار برآورد شد.

• تهیه محلول‌های آبی آزمایش

سدیم و کلر مهم‌ترین یون‌های ایجادکننده شوری می‌باشند. در این پژوهش برای شبیه‌سازی زه‌آب کشاورزی در پنج سطح شوری مختلف ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر از نمک سدیم کلرید استفاده شد.

• آزمایش‌های جذب ناپیوسته

در گام اول این پژوهش کارایی بیوچارهای تهیه‌شده در درجه حرارت‌های ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۵۰ درجه سلیسیوس در جذب یون‌های سدیم و کلر بررسی و مناسب‌ترین آن‌ها برای استفاده در گام بعدی انتخاب شد. به این منظور آزمایش‌های جذب ناپیوسته در قالب طرح کاملاً تصادفی برای هر یک از جاذب‌های ذکرشده در چهار تکرار صورت پذیرفت. آزمایش‌ها در شرایط یکسان pH برابر ۷، مقدار جاذب ۲۰ گرم بر لیتر، زمان تماس ۲۴۰ دقیقه، EC اولیه ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در دمای محیط بر روی شیکر با سرعت ثابت ۱۸۰ دور در دقیقه انجام شد. در پایان آزمایش‌ها، جاذب از محلول به کمک کاغذ صافی جدا شد و غلظت یون سدیم محلول با دستگاه فلیم‌فتمتر و غلظت یون کلر محلول از روش تیتراسیون با نیترات نقره اندازه‌گیری گردید. سپس ظرفیت جذب یون‌های شوری آب توسط جاذب‌های موردنظر از رابطه (۱) تعیین شد.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

در این رابطه؛ q_e : ظرفیت جذب جاذب (mg/g)، C_0 و C_e : به ترتیب غلظت اولیه و نهایی یون شوری در محلول (mg/L)، m : جرم جاذب (g) و V : حجم محلول (L) یون شوری می‌باشد. پس از انتخاب جاذب مناسب، بررسی تجزیه عنصری جاذب منتخب با استفاده از آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) انجام شد. همچنین pH بار صفر جاذب (pH_{pzc}) منتخب اندازه‌گیری شد. برای تعیین pH بار صفر جاذب (pH_{pzc})، ۲ گرم بر لیتر جاذب موردنظر در محلول نیترات پتاسیم یک‌دهم مولار با pH اولیه بین ۲ تا ۱۲ به مدت ۲۴ ساعت بر روی شیکر با ۱۵۰ دور در دقیقه قرار داده شد. در پایان هر آزمایش، pH نهایی محلول اندازه‌گیری شد. با رسم نمودار (pH نهایی - pH اولیه) در مقابل pH اولیه، نقطه‌ای که محور افقی را قطع می‌کند، به‌عنوان pH بار صفر (pH_{pzc}) جاذب معرفی شد.

• طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی

در گام دوم برای تعیین اثر عوامل مختلف بر راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب منتخب گام اول، چهار عامل pH (۵، ۶، ۷، ۸، ۹)، مقدار جاذب (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰) گرم بر لیتر، زمان تماس (۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰) دقیقه و EC اولیه (۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰) دسی‌زیمنس بر متر با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی (به کمک نرم‌افزار مینی‌تب) بررسی شدند. بر اساس آرایه متعامد ($L_{25}(5^4)$) ترکیب آزمایش جذب ناپیوسته تعیین و هر یک از آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. در همه آزمایش‌ها دمای محیط، اندازه ذرات جاذب (۵۰۰-۱۰۵ میکرون) و دور شیکر (۱۸۰ دور بر دقیقه) ثابت بود. برای تنظیم pH‌های مختلف، از محلول‌های اسیدسولفوریک و آمونیاک یک مولار استفاده شد. پس از انجام ۲۵ آزمایش طراحی‌شده در سه تکرار، راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب منتخب گام اول از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} * 100 \quad (2)$$

در رابطه بالا؛ C_0 : غلظت اولیه یون شوری در محلول (mg/L)، C_e : غلظت نهایی یون شوری در محلول (mg/L) و R : راندمان جذب یون شوری (درصد) می باشد. سپس برای تحلیل نتایج آزمایش های انجام شده، نسبت سیگنال به نویز (S/N) و آزمون واریانس (ANOVA) بررسی شد. با توجه به هدف این تحقیق (دستیابی به بیشینه ی راندمان جذب یون های شوری)، نسبت سیگنال به نویز با استفاده از رابطه (۳)، مقدار بزرگتر-بهرتر انتخاب شد.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

در رابطه (۳)؛ n : تعداد تکرار آزمایش ها و y_i : پاسخ به دست آمده از هر آزمایش می باشد. به منظور صحت سنجی نرم افزار، آزمایش جذب با سطوح پیشنهادی هر متغیر (برای دستیابی به بیشینه ی جذب) در سه تکرار انجام شد.

• آزمایش های سینتیک جذب

به منظور تعیین مدل سینتیک جذب یون های سدیم و کلر توسط جاذب منتخب، آزمایش های ناپیوسته در سطوح مناسب تعیین شده برای pH، مقدار جاذب، شوری اولیه و در زمان تماس های مختلف (۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰) دقیقه انجام شد. سپس مدل های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم بر داده های جذب برازش داده شدند و ضرایب آن ها محاسبه گردید. شکل خطی مدل های سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم به ترتیب در رابطه های (۴ و ۵) آورده شده است.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

در رابطه های بالا؛ q_e : ظرفیت جذب تعادلی (mg/g)، q_t : مقدار یون جذب شده در زمان های مختلف (mg/g)، K_1 : ثابت سرعت جذب مدل شبه مرتبه اول ($1/\text{min}$) و K_2 : ثابت سرعت جذب مدل شبه مرتبه دوم (g/mg.min) می باشند.

• آزمایش های ایزوترم جذب

برای تعیین ایزوترم جذب یون های سدیم و کلر توسط جاذب منتخب، آزمایش های ناپیوسته در سطوح مناسب تعیین شده برای pH، مقدار جاذب، زمان تماس و در شوری های مختلف (۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰) دسی زیمنس بر متر انجام شد. سپس مدل های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ بر داده های جذب برازش داده شدند و ضرایب آن ها محاسبه گردید. شکل خطی مدل های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ به ترتیب در رابطه های (۶ و ۷) آورده شده است.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max} C_e} + \frac{1}{q_{\max}} \quad (6)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

در این رابطه ها؛ q_e : ظرفیت جذب تعادلی (mg/g)، q_{\max} : حداکثر ظرفیت جذب (mg/g)، C_e : غلظت یون جذب شونده در محلول در زمان تعادل (mg/L)، K_L : ثابت تعادل لانگمویر (L/mg)، K_F : ثابت مدل فروندلیچ ($(\text{L/mg})^{1/n}$) و n : ثابت مدل فروندلیچ (g/L) می باشند. برای بررسی میزان مطلوبیت جذب سطحی از پارامتر تعادل R_L استفاده شد که با پارامترهای مدل لانگمویر از رابطه (۸) محاسبه شد.

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_0} \quad (8)$$

در رابطه (۸)؛ C_0 : غلظت اولیه محلول (mg/L) و k_L : ثابت تعادل لانگمویر (L/mg) و R_L : پارامتر تعادل (بدون بعد) است. در این رابطه اگر R_L بین صفر تا یک باشد، جذب سطحی مطلوب؛ اگر R_L بزرگ تر از یک باشد، مدل نامطلوب؛ اگر R_L برابر یک باشد، استفاده از شکل خطی مناسب و اگر R_L برابر صفر باشد، مدل ناکارآمد است.

۳- نتایج و بحث

• ویژگی‌های بیوچارهای برگ نخل

در جدول (۱) نتایج اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های بیوچارهای برگ نخل تهیه‌شده در درجه حرارت‌های ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۵۰ درجه سلیسیوس که به ترتیب با علامت‌های اختصاری DPLB350، DPLB450، DPLB550 و DPLB650 نشان داده‌شده‌اند، آورده‌شده است. جدول (۱) نشان می‌دهد بازده تولید بیوچار با افزایش دمای گرماکافت به علت خارج شدن مواد فرار کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش درجه حرارت سبب افزایش درصد خاکستر، pH و EC بیوچارها شد. افزایش درصد خاکستر و میزان pH احتمالاً به دلیل خارج شدن گروه‌های عامل اسیدی در طول فرایند گرماکافت و افزایش نمک‌های قلیایی در ساختار بیوچار است. افزایش EC با افزایش دمای گرماکافت احتمالاً می‌تواند به دلیل افزایش درصد خاکستر و افزایش نمک‌های قلیایی در خاکستر بیوچار باشد. نتایج BET نشان داد که سطح ویژه بیوچارها با افزایش درجه حرارت، افزایش یافت. در واقع با افزایش دمای گرماکافت به دلیل تجزیه ترکیبات سلولزی، همی سلولزی و لیگنین در بیوچارها، مواد فرار خارج‌شده و با ایجاد حفره‌ها در بیوچار، حجم منافذ ریز آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه سبب افزایش سطح ویژه می‌شود. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر برای بیوچار ضایعات نخل گزارش شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های بیوچارهای برگ نخل تهیه‌شده در درجه حرارت‌های مختلف

DPLB650	DPLB550	DPLB450	DPLB350	بیوچار پارامتر
۱۰۵ - ۵۰۰	۱۰۵ - ۵۰۰	۱۰۵ - ۵۰۰	۱۰۵ - ۵۰۰	اندازه ذرات (میکرون)
۳۲/۹۶	۳۵/۱۲	۳۹/۸۷	۴۴/۵۸	بازده بیوچار (درصد)
۴۶/۳۷	۴۲/۶۸	۳۵/۸۲	۲۹/۷۶	خاکستر (درصد)
۰/۱۲۱	۰/۰۸۹	۰/۰۷۱	۰/۰۵۴	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)
۸/۵۶	۸/۴۳	۸/۲۵	۸/۰۶	pH
۱۷۸/۶۱	۸۷/۰۷	۵۴/۱۶	۲۳/۸۴	سطح ویژه (مترمربع بر گرم)

• انتخاب جاذب مناسب

نتایج تجزیه واریانس اثر بیوچارهای برگ نخل بر ظرفیت جذب یون‌های سدیم و کلر در جدول (۲) ارائه شده است. بر اساس این نتایج، اثر نوع بیوچار برگ نخل بر ظرفیت جذب یون‌های سدیم و کلر در سطح یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین‌های ظرفیت جذب یون‌های سدیم و کلر در بیوچارهای برگ نخل مختلف بر اساس آزمون دانکن نیز در جدول (۳) نشان داد ظرفیت جذب یون‌های سدیم و کلر توسط بیوچار برگ نخل با افزایش دمای گرماکافت از ۳۵۰ تا ۶۵۰ درجه سلیسیوس به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد. بنابراین بیوچار برگ نخل تهیه‌شده در دمای ۶۵۰ درجه سلیسیوس (DPLB650) به عنوان جاذب منتخب در گام دوم پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر بیوچار برگ نخل بر ظرفیت جذب سدیم و کلر

یون	منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار معنی‌داری
سدیم	بیوچار برگ نخل	۳	۱۸۲/۰۶۸	۶۰/۶۸۹	۰/۰۰۰**
کلر			۳۷۴/۶۷۴	۱۲۴/۸۹۱	۰/۰۰۰**
سدیم	خطا	۱۲	۰/۱۲۰	۰/۰۱۰	
کلر			۰/۰۸۰	۰/۰۰۷	
سدیم	کل	۱۵	۱۸۲/۱۸۸		
کلر			۳۷۴/۷۵۴		

ns، * و ** به ترتیب بیانگر فاقد اثر معنی‌دار و دارای اثر معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

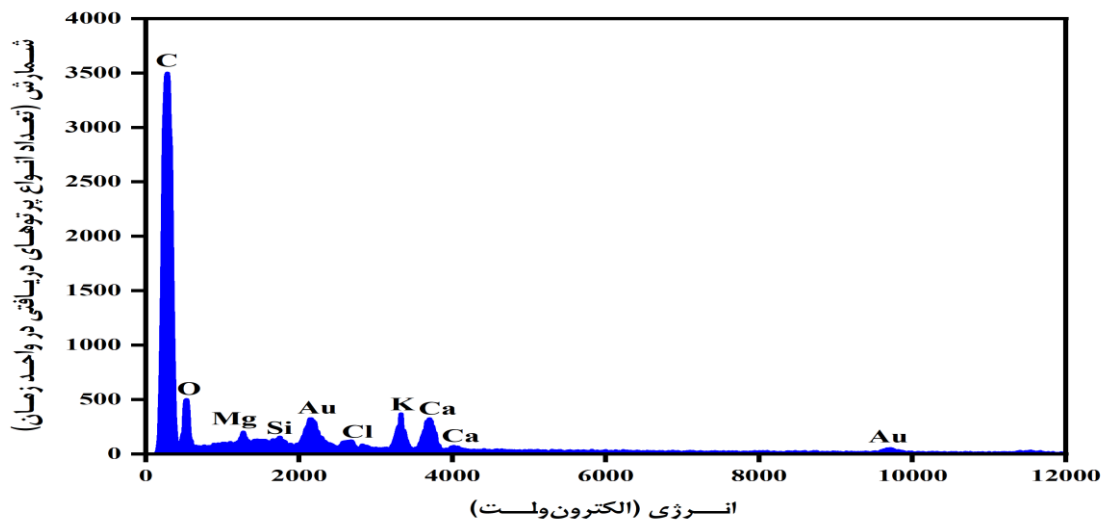
جدول ۳. مقایسه میانگین‌های ظرفیت جذب سدیم و کلر در بیوچارهای برگ نخل مختلف بر اساس آزمون دانکن

DPLB650	DPLB550	DPLB450	DPLB350	بیوچار برگ نخل	یون
۲۸/۳۶ ^d	۲۴/۵۶ ^c	۲۱/۹۶ ^b	۱۹/۲۱ ^a	ظرفیت جذب	سدیم
۴۰/۷۸ ^d	۳۵/۳۴ ^c	۳۱/۵۹ ^b	۲۷/۶۶ ^a		کلر

ارقام دارای حروف غیر مشابه، در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری دارند.

• آنالیز تجزیه عنصری جاذب منتخب (DPLB650)

نتایج آنالیز عنصری جاذب DPLB650 (شکل ۱) نشان می‌دهد که این جاذب دارای عناصر کربن، اکسیژن، کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سیلیسیم و کلر می‌باشد. بیش‌ترین فراوانی مربوط به عنصر کربن است و کمترین فراوانی را عنصر کلر دارد. همان‌طور که انتظار می‌رفت این جاذب، محتوای کربن بالایی دارد که به دلیل دمای زیاد تجزیه حرارتی زیست‌توده و کربونیزه شدن آن می‌باشد. حضور عناصری با بار مثبت مانند کربن، پتاسیم و کلسیم در ساختار جاذب DPLB650، می‌تواند به دلیل میل ترکیبی با کلر، نقش مؤثری در جذب یون کلر داشته باشند. علاوه بر این، حضور عنصر اکسیژن که دارای بار منفی است احتمالاً بر جذب یون سدیم مؤثر است. عنصر طلا در آنالیز به علت پوشش طلایی می‌باشد که روی جاذب مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۱. آنالیز تجزیه عنصری جاذب DPLB650

• آزمایش‌های طراحی‌شده‌ی تاگوچی

در این تحقیق ۲۵ ترکیب آزمایش بر اساس روش تاگوچی تعیین و هر یک از آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. در جدول (۴) آزمایش‌های طراحی‌شده‌ی تاگوچی و نتایج راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب DPLB650 (میانگین سه تکرار) ارائه شده است. برای تحلیل این نتایج و انتخاب مناسب‌ترین سطح هر عامل، نسبت سیگنال به نویز برای سطوح مختلف هر پارامتر مورد بررسی محاسبه شد (جدول ۵). دلتا در جدول (۵) میزان تأثیر عوامل مؤثر بر جذب را رتبه‌بندی می‌کند. با توجه به مقدار دلتا مشخص شد مؤثرترین عامل بر جذب یون‌های سدیم و کلر، مقدار EC اولیه بوده است و پس از آن به ترتیب زمان تماس، pH و مقدار جاذب مؤثر بوده‌اند.

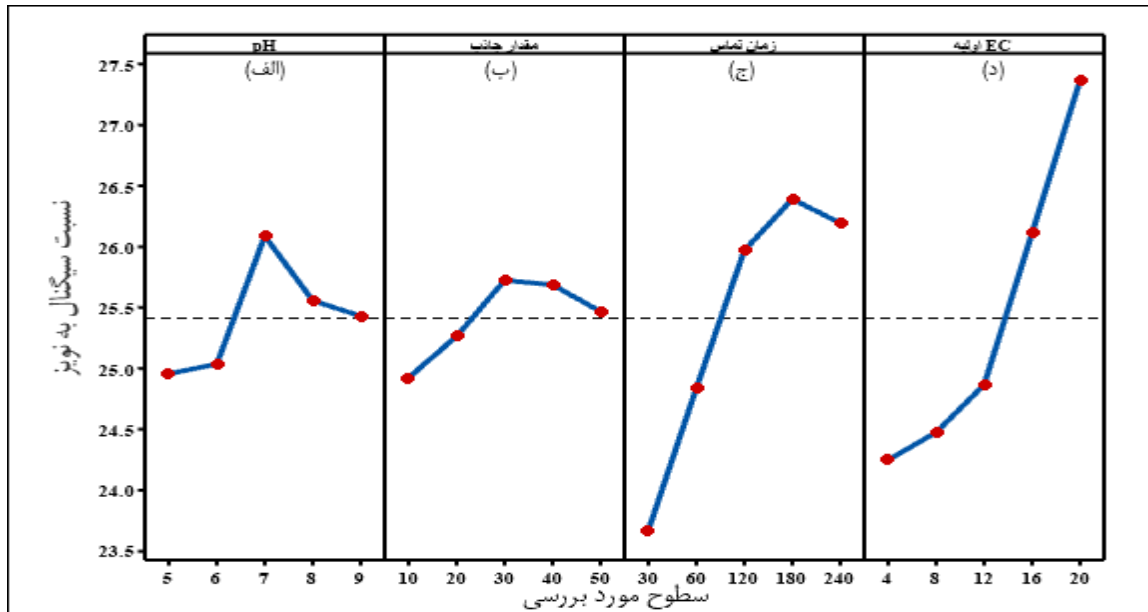
جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش‌های تاگوچی بر راندمان جذب سدیم و کلر

شماره آزمایش	pH	مقدار جاذب (گرم بر لیتر)	زمان تماس (دقیقه)	EC اولیه (دسی‌زیمنس بر متر)	میانگین راندمان جذب سدیم (درصد)	میانگین راندمان جذب کلر (درصد)
۱	۵	۱۰	۳۰	۴	۱۲/۰۴	۱۲/۹۲
۲	۵	۲۰	۶۰	۸	۱۴/۴۹	۱۵/۴۷
۳	۵	۳۰	۱۲۰	۱۲	۱۸/۰۲	۱۹/۱۷
۴	۵	۴۰	۱۸۰	۱۶	۲۲/۰۳	۲۳/۲۸
۵	۵	۵۰	۲۴۰	۲۰	۲۵/۰۵	۲۶/۶۴
۶	۶	۱۰	۶۰	۱۲	۱۵/۰۹	۱۶/۰۳
۷	۶	۲۰	۱۲۰	۱۶	۲۰/۴۲	۲۲/۱۷
۸	۶	۳۰	۱۸۰	۲۰	۲۶/۱۳	۲۷/۲۷
۹	۶	۴۰	۲۴۰	۴	۱۷/۶۴	۱۸/۷۱
۱۰	۶	۵۰	۳۰	۸	۱۲/۷۹	۱۳/۸۶
۱۱	۷	۱۰	۱۲۰	۲۰	۲۵/۱۲	۲۵/۲۱
۱۲	۷	۲۰	۱۸۰	۴	۱۹/۲۲	۱۹/۲۴
۱۳	۷	۳۰	۲۴۰	۸	۲۰/۴۶	۲۰/۴۹
۱۴	۷	۴۰	۳۰	۱۲	۱۶/۱۱	۱۶/۱۳
۱۵	۷	۵۰	۶۰	۱۶	۲۰/۹۱	۲۰/۹۵
۱۶	۸	۱۰	۱۸۰	۸	۱۸/۳۱	۱۷/۱۵
۱۷	۸	۲۰	۲۴۰	۱۲	۱۹/۲۱	۱۸/۱۹
۱۸	۸	۳۰	۳۰	۱۶	۱۷/۶۱	۱۶/۴۵
۱۹	۸	۴۰	۶۰	۲۰	۲۲/۲۹	۲۱/۱۴
۲۰	۸	۵۰	۱۲۰	۴	۱۷/۷۷	۱۶/۶۵
۲۱	۹	۱۰	۲۴۰	۱۶	۲۰/۳۸	۱۹/۵۶
۲۲	۹	۲۰	۳۰	۲۰	۱۸/۹۶	۱۷/۰۲
۲۳	۹	۳۰	۶۰	۴	۱۵/۹۱	۱۴/۶۵
۲۴	۹	۴۰	۱۲۰	۸	۱۸/۹۴	۱۷/۳۱
۲۵	۹	۵۰	۱۸۰	۱۲	۱۹/۵۷	۱۸/۴۹

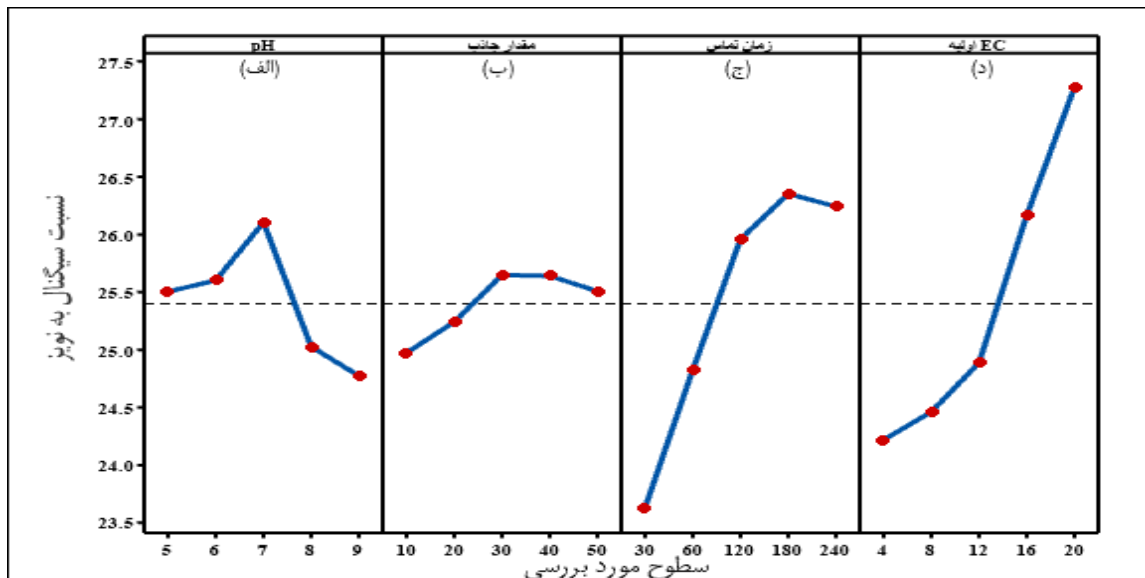
جدول ۵. نسبت سیگنال به نویز در سطوح مختلف هر پارامتر بر راندمان جذب سدیم و کلر

یون	سطح	pH	مقدار جاذب	زمان تماس	EC اولیه
سدیم		۲۴/۹۶	۲۴/۹۲	۲۳/۶۷	۲۴/۲۵
کلر	۱	۲۵/۵۰	۲۴/۹۷	۲۳/۶۳	۲۴/۲۲
سدیم		۲۵/۰۴	۲۵/۲۶	۲۴/۸۴	۲۴/۴۸
کلر	۲	۲۵/۶۰	۲۵/۲۴	۲۴/۸۳	۲۴/۴۶
سدیم		۲۶/۰۹	۲۵/۷۲	۲۵/۹۷	۲۴/۸۷
کلر	۳	۲۶/۱۰	۲۵/۶۵	۲۵/۹۶	۲۴/۸۹
سدیم		۲۵/۵۶	۲۵/۶۹	۲۶/۳۹	۲۶/۱۱
کلر	۴	۲۵/۰۳	۲۵/۶۴	۲۶/۳۵	۲۶/۱۷
سدیم		۲۵/۴۳	۲۵/۴۷	۲۶/۲۰	۲۷/۳۷
کلر	۵	۲۴/۷۷	۲۵/۵۱	۲۶/۲۴	۲۷/۲۸
سدیم		۱/۱۳	۰/۸۰	۲/۷۲	۳/۱۲
کلر	دلنا	۱/۳۳	۰/۶۷	۲/۷۲	۳/۰۶
سدیم		۳	۴	۲	۱
کلر	مرتبه	۳	۴	۲	۱

شکل‌های (۲ و ۳) به ترتیب نمودار نسبت سیگنال به نویز در سطوح مختلف هر پارامتر مؤثر بر راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر را نشان می‌دهند. در این پژوهش نسبت S/N بر اساس مقدار بزرگتر-بهتر محاسبه شد. بنابراین سطح مناسب برای هر پارامتر در بالاترین نسبت S/N است. بیشینه‌ی راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب DPLB650 در شرایط مناسب (pH برابر ۷، مقدار جاذب ۳۰ گرم بر لیتر، زمان تماس ۱۸۰ دقیقه و EC اولیه ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) توسط نرم‌افزار به ترتیب ۲۷/۴۳ و ۲۷/۵۶ درصد پیش‌بینی شد. آزمایش صحت‌سنجی در شرایط مناسب ذکر شده در سه تکرار انجام و راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر به ترتیب ۲۷/۶۱ و ۲۷/۶۵ درصد به دست آمد. اختلاف اندک بین مقدار راندمان جذب پیش‌بینی و صحت‌سنجی شده برای هر دو یون سدیم و کلر نشان‌دهنده‌ی قابل اعتماد بودن طراحی آزمایش تاگوچی است. تحلیل واریانس (ANOVA) عوامل مؤثر بر راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر (جدول ۶) نشان داد که عوامل pH، زمان تماس و EC اولیه در سطح یک درصد و مقدار جاذب در سطح پنج درصد، اثر معنی‌داری بر جذب یون‌های سدیم و کلر دارند.



شکل ۲. نمودار نسبت سیگنال به نویز در سطوح مختلف هر پارامتر بر راندمان جذب سدیم: (الف) pH، (ب) مقدار جاذب، (ج) زمان تماس و (د) EC اولیه



شکل ۳. نمودار نسبت سیگنال به نویز در سطوح مختلف هر پارامتر بر راندمان جذب کلر: (الف) pH، (ب) مقدار جاذب، (ج) زمان تماس و (د) EC اولیه

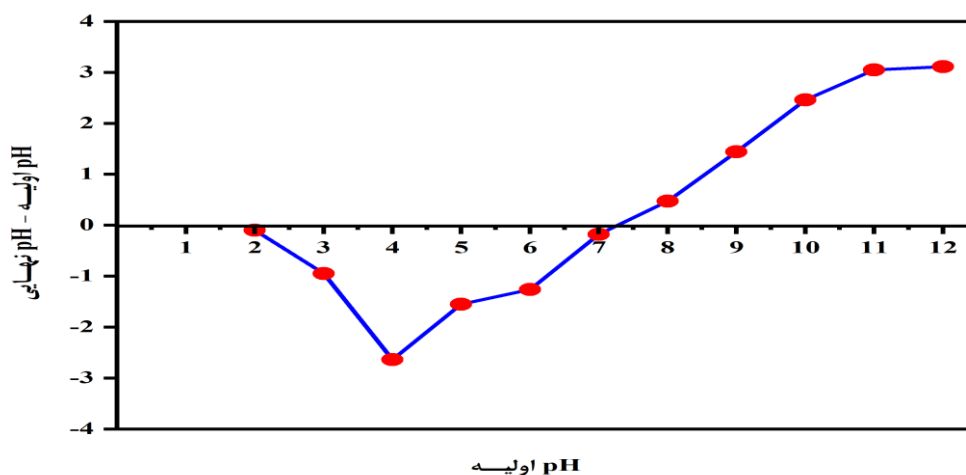
جدول ۶. تحلیل واریانس بر راندمان جذب سدیم و کلر

مقدار معنی داری	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات	یون
./۰۰۴**	۳/۳۹۸۶	۱۳/۵۹۴	۴	pH	سدیم
./۰۰۰**	۷/۸۷۱۳	۳۱/۴۸۵	۴		کلر
./۰۱۹*	۱/۹۳۷۱	۷/۷۴۹	۴	مقدار جاذب	سدیم
./۰۳۰*	۱/۹۷۷۷	۷/۹۱۱	۴		کلر
./۰۰۰**	۲۶/۹۳۰۴	۱۰۷/۷۳۲	۴	زمان تماس	سدیم
./۰۰۰**	۳۰/۲۵۹۵	۱۲۱/۰۳۸	۴		کلر
./۰۰۰**	۴۲/۶۱۱۳	۱۷۰/۴۴۵	۴	EC اولیه	سدیم
./۰۰۰**	۴۳/۹۷۷۵	۱۷۵/۹۱۰	۴		کلر
	۰/۳۴۵۸	۲/۷۶۶	۸	خطا	سدیم
	۰/۴۲۱۹	۳/۳۷۵			کلر
		۳۰۲/۲۷۶	۲۴	کل	سدیم
		۳۳۹/۷۱۹			کلر

ns * و ** به ترتیب بیانگر فاقد اثر معنی دار و دارای اثر معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

• اثر pH بر جذب سدیم و کلر

بررسی اثر pH های مختلف بر جذب یون های سدیم و کلر توسط جاذب DPLB650 (شکل های ۲-الف و ۳-الف) نشان داد با افزایش pH از مقدار ۵ تا ۷، راندمان جذب یون های سدیم و کلر روند صعودی و سپس با ادامه ی افزایش pH از ۷ تا ۹، راندمان جذب هر دو یون روند نزولی داشته است. بنابراین مناسب ترین pH برای دستیابی به بیشینه ی راندمان جذب این یون ها pH برابر ۷ است. فتحی و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه مشابهی برای جذب سدیم از محلول آبی توسط کرین فعال کاه برنج به دست آوردند. شاددل (۱۳۹۶) نیز در پژوهشی به بررسی جذب کلر از محلول آبی با استفاده از جاذب لیموترش اصلاح شده با سدیم هیدروکسید پرداخت. نتایج نشان داد بیشینه ی جذب کلر در pH برابر ۷ رخ داده است. در شکل (۴)، نتایج اندازه گیری pH بار صفر جاذب DPLB650 ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) pH بار صفر جاذب مذکور ۷/۲۳ تعیین شد که در واقع pH مناسب برای جذب سدیم و کلر از pH بار صفر جاذب کمتر بود. هنگامی که pH مناسب کمتر از pH بار صفر جاذب باشد، سطح جاذب دارای بار مثبت بوده و از این رو جاذب تمایل به جذب یون هایی با بار منفی مانند کلر دارد. همچنین با توجه به این که سطح جاذب دارای بار مثبت است می توان نتیجه گرفت که بخشی از جذب سدیم روی سطح جاذب DPLB650 از طریق تعامل غیر الکترواستاتیک مانند جذب شیمیایی صورت پذیرفته است.



شکل ۴. pH بار صفر جاذب DPLB650

• تأثیر مقدار جاذب بر جذب سدیم و کلر

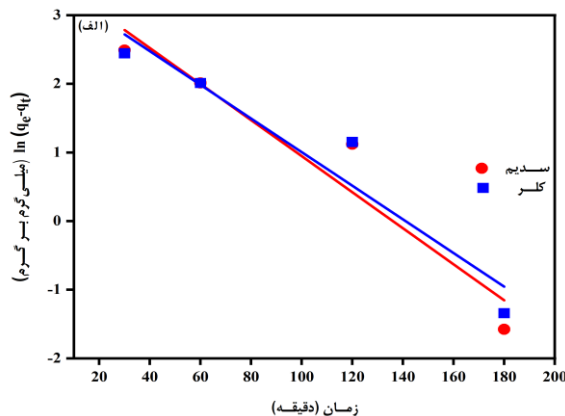
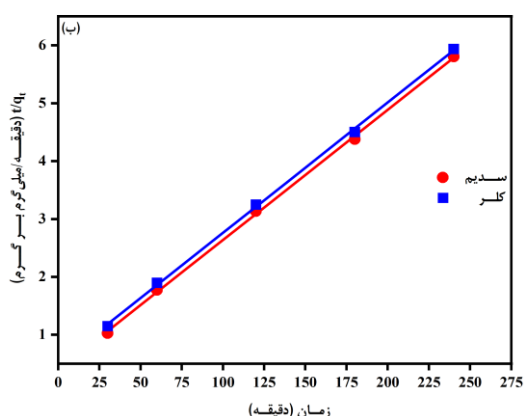
بیشینه‌ی راندمان جذب یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب DPLB650 در مقدار جاذب ۳۰ گرم بر لیتر رخ می‌دهد (شکل‌های ۲-ب و ۳-ب). همان‌گونه که در این دو شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار جاذب از ۱۰ تا ۳۰ گرم بر لیتر، راندمان جذب سدیم و کلر به دلیل افزایش سطح ویژه و مکان‌های جذب، افزایش یافت ولی با افزودن مقدار جاذب بیش‌تر از ۳۰ گرم بر لیتر کاهش راندمان جذب برای هر دو یون رخ داد که احتمالاً می‌تواند به علت تراکم و کلوخه‌ای شدن ذرات جاذب و در نتیجه کاهش سطح ویژه آن‌ها باشد. این نتیجه با نتایج پژوهش بافکار و رسولی (۱۴۰۰) برای جذب سدیم از محلول آبی توسط نانو جاذب پوسته تخم‌مرغ مطابقت دارد.

• بررسی اثر زمان تماس و سینتیک جذب سدیم و کلر

بررسی اثر زمان تماس‌های مختلف بر جذب دو یون مولد شوری (سدیم و کلر) توسط جاذب DPLB650 نشان داد که بیشینه‌ی راندمان جذب برای هر دو یون مورد مطالعه در زمان تماس ۱۸۰ دقیقه به دست می‌آید (شکل‌های ۲-ج و ۳-ج). در ابتدای فرایند جذب با افزایش زمان تماس تا ۱۸۰ دقیقه، یون‌های سدیم و کلر دسترسی بیشتری به مکان‌های جذب بر سطح جاذب داشتند ولی افزایش زمان تماس بیش‌تر، تأثیر چندانی بر راندمان جذب نداشت که احتمالاً می‌تواند به علت اشباع شدن مکان‌های جذب و کاهش خلل و فرج جاذب باشد. جدول (۷) و شکل‌های (۵-الف و ۵-ب) نتایج برازش مدل‌های سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم بر داده‌های آزمایشگاهی جذب یون‌های سدیم و کلر را نشان می‌دهند. نتایج نشان داد که برای هر دو یون، مدل شبه مرتبه دوم با ضریب R^2 بزرگ‌تر (به ترتیب ۰/۹۹۹۴ و ۰/۹۹۹۵) فرایند جذب را بهتر توصیف می‌کند. علاوه بر این، بر اساس نتایج جدول (۷) مقدار ظرفیت تعادلی محاسبه‌شده‌ی جذب یون‌های سدیم و کلر در مدل شبه مرتبه دوم به مقدار ظرفیت تعادلی آزمایش‌شده‌ی آن‌ها نزدیک‌تر است. تبعیت فرایند جذب از مدل شبه مرتبه دوم نشان‌دهنده این است که این یون‌ها عمدتاً به صورت شیمیایی جذب شده‌اند. مویز و گونفا (۲۰۲۲) نیز در بررسی کاهش شوری آب با استفاده از جاذب‌های بنتونیت طبیعی و فعال شده با اسیدسولفوریک، مدل سینتیک شبه مرتبه دوم را به‌عنوان بهترین مدل سینتیک برای فرایند جذب معرفی کردند.

جدول ۷. پارامترهای مدل‌های سینتیک جذب سدیم و کلر توسط DPLB650

مدل سینتیک شبه مرتبه اول				
یون	R^2	$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_1 (1/min)	$q_{e,exp}$ (mg/g)
سدیم	۰/۹۲۴۲	۳۵/۵۵۲۱	۰/۰۲۶۳	۴۱/۳۴۶۲
کلر	۰/۹۲۶۴	۵۴/۶۱۹۹	۰/۰۲۷۰	۶۱/۹۶۴۱
مدل سینتیک شبه مرتبه دوم				
یون	R^2	$q_{e,cal}$ (mg/g)	K_2 (1/min)	$q_{e,exp}$ (mg/g)
سدیم	۰/۹۹۹۴	۴۴/۴۴۴۵	$۱۳/۰۲۷۵ \times 10^{-۴}$	۴۱/۳۴۶۲
کلر	۰/۹۹۹۵	۶۶/۶۶۶۷	$۸/۸۰۶۳ \times 10^{-۴}$	۶۱/۹۶۴۱



شکل ۵. نمودارهای سینتیک جذب سدیم و کلر توسط DPLB650: (الف) مدل سینتیک شبه مرتبه اول و (ب) مدل سینتیک شبه مرتبه دوم

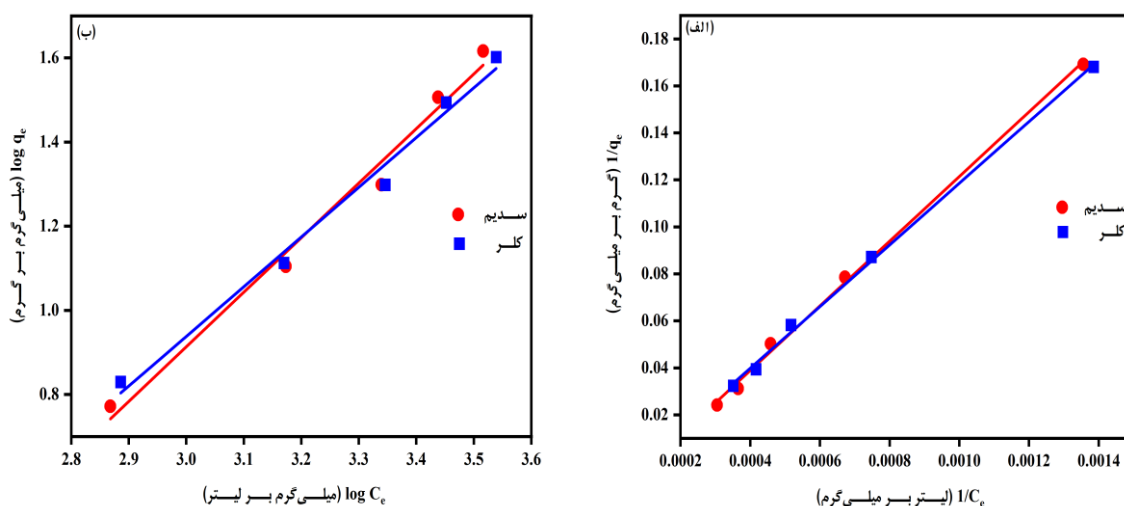
• بررسی اثر EC اولیه و ایزوترم جذب سدیم و کلر

شکل‌های (۲-د و ۳-د) بررسی اثر ECهای مختلف بر جذب یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب DPLB650 را نشان می‌دهند. پیشینه‌ی راندمان جذب هر دو یون سدیم و کلر در EC اولیه ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. افزایش راندمان جذب با افزایش EC اولیه می‌تواند به دلیل دسترسی بیشتر جاذب به یون‌های محلول در آب شور باشد (قاسمی و همکاران، ۱۳۹۶). جدول (۸) و شکل‌های (۶-الف و ۶-ب) نتایج برازش مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ بر داده‌های آزمایشگاهی جذب یون‌های سدیم و کلر را نشان می‌دهند. نتایج این برازش نشان داد فرایند جذب یون‌های سدیم و کلر توسط DPLB650 با مدل ایزوترم لانگمویر با ضریب R^2 بزرگ‌تر (به ترتیب ۰/۹۹۷۸ و ۰/۹۹۸۲) تطابق بهتری دارد. پیروی فرایند جذب از مدل ایزوترم لانگمویر بیانگر جذب همگن و تک لایه‌ی یون‌های سدیم و کلر توسط جاذب مورد مطالعه است. با توجه به نتایج جدول (۸) مقدار پارامتر تعادل (R_L) برای جذب سدیم و کلر به ترتیب برابر ۰/۶۴۸۳ و ۰/۶۴۸۳ به دست آمد (مقداری بین صفر تا یک) که تأیید کننده‌ی مطلوبیت ایزوترم جذب لانگمویر است. همچنین بیش‌ترین ظرفیت DPLB650 برای جذب سدیم و کلر توسط مدل لانگمویر به ترتیب ۶۱/۱۱۱۹ و ۹۰/۹۰۹۱ میلی‌گرم بر گرم تخمین زده شده است. نگین و همکاران (۲۰۲۲) نیز در بررسی کاهش شوری آب با استفاده از بیوچار پوسته برنج، مدل لانگمویر را بهترین مدل ایزوترم برای فرایند جذب گزارش کردند.

جدول ۸. پارامترهای مدل‌های ایزوترم جذب سدیم و کلر توسط DPLB650

مدل ایزوترم لانگمویر				
یون	R^2	R_L	k_L (L/mg)	q_{max} (mg/g)
سدیم	۰/۹۹۷۸	۰/۶۴۳۸	$۱۱/۷۰۹۹ \times ۱۰^{-۱۰}$	۶۱/۱۱۱۹
کلر	۰/۹۹۸۲	۰/۶۴۸۳	$۸/۰۴۳۳ \times ۱۰^{-۱۰}$	۹۰/۹۰۹۱

مدل ایزوترم فروندلیچ				
یون	R^2	n (g/L)	K_F (mg/g) (L/mg) ^{1/n}	
سدیم	۰/۹۸۵۰	۰/۷۷۰۹	$۱۰/۵۱۷۲ \times ۱۰^{-۱۰}$	
کلر	۰/۹۸۷۰	۰/۷۶۹۳	$۹/۲۷۰۴ \times ۱۰^{-۱۰}$	



شکل ۶. نمودارهای ایزوترم جذب سدیم و کلر توسط DPLB650: (الف) مدل ایزوترم لانگمویر و (ب) مدل ایزوترم فروندلیچ

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کاهش شوری زه‌آب کشاورزی شبیه‌سازی شده با استفاده از بیوچار برگ نخل بررسی شد. از بین چهار دمای مورد بررسی برای تهیه‌ی بیوچار از ضایعات برگ نخل، دمای ۶۵۰ درجه سلیسیوس سبب تولید جاذبی با بیش‌ترین توانایی جذب یون‌های سدیم و کلر شد. بنابراین بیوچار DPLB650 به‌عنوان مناسب‌ترین جاذب، مورد بررسی بیش‌تری قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیشینه‌ی راندمان جذب یون‌های مولد شوری (سدیم و کلر) توسط این جاذب در pH برابر ۷، مقدار جاذب ۳۰ گرم بر لیتر، زمان تماس ۱۸۰ دقیقه و EC اولیه ۲۰

دسی زیمنس بر متر به دست می‌آید. EC اولیه محلول مؤثرترین عامل بر کارایی جاذب موردنظر بود. نتایج این پژوهش نشان داد که جاذب DPLB650 در شرایط مناسب توانایی کاهش حدود ۲۷ درصد یون‌های مؤثر بر شوری آب را دارد. مدل سینتیک شبه مرتبه دوم و ایزوترم لانگمویر به‌طور رضایت بخشی فرایند جذب را توصیف کردند. با توجه به این که سالانه مقدار زیادی ضایعات برگ نخل تولید می‌شود، تبدیل آن‌ها به بیوجار می‌تواند علاوه بر کاهش پسماندهای کشاورزی، نقش مؤثری در کاهش شوری زه‌آب کشاورزی به‌عنوان یک منبع آب غیرمتعارف برای آبیاری بسیاری از محصولات باشد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.WI1402.144) و سازمان آب و برق خوزستان در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- Aghakhani, A., Mousavi, S. F., Mostafazadeh-Fard, B. 2013. Desalination of saline water with single and combined adsorbents. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 51: 7-9, P. 1928-1935. doi: 10.1080/19443994.2012.714731
- Ahmad, M., Rafique, M. I., Akanji, M. A., Al-Swadi, H. A., Usama, M., Mousa, M. A., Al-Wabel, M. I., Al-Farraj, A. S. F. 2023. Microplastic-Assisted Removal of Phosphorus and Ammonium Using Date Palm Waste Derived Biochar. *Toxics*, Vol. 11(11), P. 881. <https://doi.org/10.3390/toxics11110881>
- Aichour, A., Zaghouane-Boudiaf, H., Djafer Khodja, H. 2022. Highly removal of anionic dye from aqueous medium using a promising biochar derived from date palm petioles: Characterization, adsorption properties and reuse studies. *Arabian Journal of Chemistry*, Vol. 15 (1), P. 103542. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103542>.
- Alsewaileh, A. S., Usman, A. R., Al-Wabel, M. I. 2019. Effects of pyrolysis temperature on nitrate-nitrogen (NO₃⁻-N) and bromate (BrO₃⁻) adsorption onto date palm biochar. *Environmental Management*, Vol. 237, P. 289–296. doi:10.1016/j.jenvman.2019.02.045
- Dano, M., Viglasova, E., Stamberg, K., Galambos, M., Galanda, D. 2021. Pertechnetate/ Perrhenate Surface Complexation on. *Bamboo Engineered Biochar*. *Materials*, Vol. 14 (3), P. 486. <https://doi.org/10.3390/ma14030486>
- Estrada-Vázquez, R., Vaca-Mier, M., Bustos-Terrones, V., Rangel-Peraza, J. G., Loaiza, J. G., Hermosillo-Nevárez, J. J., Bustos-Terrones, Y. A. 2024. Degradation of agricultural pollutants by biopolymer-enhanced photocatalysis: application of Taguchi method for optimization. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, Vol. 137(1), P. 523-545. <https://doi.org/10.1007/s11144-023-02515-8>
- Fathy, M., Mousa, M. A., Moghny, T. H. A., El-Bellihi, A. A. A., Awadallah, A. E. 2016. Novel Amorphous Carbon Thin Film (ACTF) from Rice Straw to Remove Sodium Ions from Synthetic Saline Water. *Advances in Recycling and Waste Management*, Vol. 1(2), P. 1000111. doi: 10.4172/2475-7675.1000111
- Freundlich, H. M. F. 1906. Over the adsorption in solution. *Physical Chemistry*, Vol. 57, P. 385–471.
- Fseha, Y. H., Sizirici, B., Yildiz, I. 2022. Manganese and nitrate removal from groundwater using date palm biochar: Application for drinking water. *Environmental Advances*, Vol. 8, P. 100237. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100237>
- Hadj-Otmane, C. h., Ouakouak, A., Touahra, F., Grabi, H., Martin, J., Bilal, M. 2022. Date palm petiole-derived biochar: effect of pyrolysis temperature and adsorption properties of hazardous cationic dye from water. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Vol. 14, P. 8895-8905. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03127-3>
- Ho, Y. S., McKay, G. 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*. Vol. 34 (5), P. 451–465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)
- Jagadeesh, N., Sundaram, B. 2023. Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. *Hazardous Materials Advances*, Vol. 9, P. 100226. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>.

- Jones, E., Qadir, M., Vliet, M. T. H. V., Smakhtin, V., Kang, S. M. 2019. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, Vol. 657, P. 1343-1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- Lagergren, S. 1898. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, Vol. 24 (4), P. 1-39.
- Langmuir, I. 1917. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. liquids. *American Chemical Society*, Vol. 39 (9), P. 1848–1906. <https://doi.org/10.1021/ja02254a006>
- Liu, T., Lawluyv, Y., Shi, Y., Ighalo, J. O., He, Y., Zhang, Y., Yap, P. S. 2022. Adsorption of cadmium and lead from aqueous solution using modified biochar: A review. *Environmental Chemical Engineering*, Vol 10 (1), P. 106502. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106502>
- Musie, W., Gonfa, G. 2022. Adsorption of sodium from saline water with natural and acid activated Ethiopian bentonite. *Results in Engineering*, Vol. 14, P. 100440. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100440>
- Mutasher, A. K. A., Al-Saadi, R. J. M., Al-Mohammed, F. M. 2021. Assessment and Management of Drainage Water Quality for Reuse in Irrigation Projects. *Smart Science*, Vol. 9(2), P. 80-102. <https://doi.org/10.1080/23080477.2021.1898795>
- Nguyen, B. T., Dinh, G. D., Dong, H. P., Le, L. B. 2022. Sodium adsorption isotherm and characterization of biochars produced from various agricultural biomass wastes. *Cleaner Production*, Vol. 346, P. 131250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131250>
- Patra, B. R., Nanda, S., Dalai, A. K., Meda, V. 2021. Taguchi-based process optimization for activation of agro-food waste biochar and performance test for dye adsorption. *Chemosphere*, Vol. 285, P. 131531. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131531>
- Qiu, B., Gorgojo, P., Fan, X. 2022. Adsorption desalination: Advances in porous adsorbents. *Chemical Engineering*, Vol. 42, P.151-169. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.08.032>
- Razmi, B., Ghasemi-Fasaei, R., Ronaghi, A., Mostowfizadeh-Ghalamfarsa, R. 2022. Application of Taguchi optimization for evaluating the capability of hydrochar, biochar, and activated carbon prepared from different wastes in multi-elements bioadsorption. *Cleaner Production*, Vol. 347, P. 131292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131292>
- Rostamian, R., Heidarpour, M., Mousavi, S. F. and Afyuni, M. 2015. Characterization and Sodium Sorption Capacity of Biochar and Activated Carbon Prepared from Rice Husk. *Agricultural Science and Technology*, Vol. 17, P. 1057-1069
- Saremi, F., Miroliaei, M. R., Shahabi Nejad, M., Sheibani, H. 2020. Adsorption of tetracycline antibiotic from aqueous solutions onto vitamin B6-upgraded biochar derived from date palm leaves. *Molecular Liquids*, Vol. 318, P. 114126. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114126>
- Singh, P., Garg, S., Satpute, S., Singh, A. 2017. Use of Rice Husk Ash to Lower the Sodium Adsorption Ratio of Saline water. *Current Microbiology and Applied Sciences*. Vol. 6 (6), P. 448-458.
- Wang, S., Kwak, J. H., Islam, M. D. S., Naeth, M. A., Gamal El-Din, M., Chang, S. X. 2020. Biochar surface complexation and Ni(II), Cu(II), and Cd(II) adsorption in aqueous solutions depend on feedstock type. *Science of The Total Environment*, Vol. 712, P. 136538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136538>
- Xue, Y., Kamali, M., Askari, N., Costa, M. E. V., Appels, L., Dewil, R. 2024. Exploring the roles of ascorbic acid/L-cysteine in boosted carbamazepine degradation by biochar-CuFe₂O₄/Fe₂O₃/CuO/peroxymonosulfate: Taguchi optimization and mechanistic studies. *Environmental Chemical Engineering*, Vol. 12 (3), P. 112540. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112540>
- Zahed, M., Parsamehr, P. S., Ahmadzadeh Tofighy, M., Mohammadi, T. 2018. Synthesis and functionalization of graphene oxide (GO) for salty water desalination as adsorbent. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 138, P. 358-365. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.08.022>

- بافکار، ع.، رسولی، ا.، ۱۴۰۰. توانایی جاذب نانو ساختار پوسته تخم مرغ در کاهش غلظت سدیم از محیط آب و خاک، فصلنامه مطالعات علوم محیط زیست ، دوره ۶ ، شماره ۱، ص ۳۳۳۶-۳۳۴۴.
- دیوبند هفشجانی، ل.، ناصری، ع.، ۱۳۹۹. بهینه سازی حذف فسفات از زه آب های کشاورزی با استفاده از هیدروچار فعال شده باگاس نیشکر، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۵، جلد ۱۴، ص ۱۸۵۳-۱۸۶۵.
- رسولی، ا. ۱۳۹۶. بررسی حذف عنصر سدیم از محلول های آبی و ستون خاک با استفاده از نانو جاذب ها: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- شاددل، م. ۱۳۹۶. بررسی میزان حذف کلر از محلول آبی توسط جاذب لیموترش: پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شکریان، ف.، سلیمانی، ک.، نعمت زاده، ق.، بی پروا، پ.، ۱۳۹۶. امکان سنجی کاهش شوری آب توسط جاذب های زیستی پوسته برنج و صدف، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ۷، شماره ۲۷، ص ۹۳-۱۰۶.
- قاسمی، م.، عابدی کوپایی، ج.، حیدر پور، م.، دیناری، م.، ۱۳۹۶. تأثیر کربن فعال تولید شده از مخروط های درخت کاج در کاهش پارامترهای شوری آب آبیاری، مجله تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، دوره ۴۸، شماره ۵، ص ۱۰۹۷-۱۱۰۷.
- کرابی، ع.، معزی، ع.، خدادوست، س.، ۱۳۹۹. بررسی جذب فسفر از محلول آبی توسط زغال های زیستی چوب نخل و باگاس نیشکر تهیه شده در دماهای مختلف گرماکافت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۳، ص ۶۱۷-۶۲۸.