ORIGINAL ARTICLE

# *Efficiency of Activated Carbon Produced by Physical Activation Using Nitrogen Gas for Maximum Dye Adsorption from Polluted Effluents: Genetic Programming and Neural Network*

Seyyed Abbas Mirzaee[1,2],
Zahra Noorimotlagh[1],
Neemat Jaafarzadeh[3],
Fatemeh Sahraeei[4],
Behruz Bayati[5],
Mohammad Reza Valizadeh[6],
Morvarid Karamkhani[7]

[1] Assisstant Professor, Health and Environment Research Center, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran
[2] Assisstant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran
[3] Professor, Environmental Technologies Research Center, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran
[4] BSc Student in Environmental Health Engineering, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran
[5] Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran
[6] Associate Professor, Department of Computer and Information Technology, Ilam University, Ilam, Iran
[7] MSc in Occupational Health Engineering, Faculty of Health, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran

(Received June 16, 2021 ; Accepted September 19, 2021)

## *Abstract*

**Background and purpose:** This study was conducted for the first time to produce activated carbon (AC) from Milkvetch wood by physical activation in order to achieve the maximum adsorbent capacity in adsorption of dye. The aim of this study was to remove acid orange 7 (AO7) dye using AC produced by physical activation with nitrogen gas.

**Materials and methods:** AC activation was performed by physical method using nitrogen gas at 700°C. Scanning electron microscopy and isotherm technique were used to determine the structural characteristics of the adsorbent. The effect of operating parameters was investigated. The isotherms and kinetics of the dye adsorption were also studied.

**Results:** The synthesized AC-700°C sample had a specific surface area and a total pore volume of 774 $m^2/g$ and 181.49 $m^3/g$, respectively. The maximum adsorption of dye was 57.125 mg/g (removal efficiency 91.4%) that occurred at pH= 3, 0.04 g absorbent in 50 ml of solution, and 50 mg/l of dye in 75 min. The adsorption data followed the Langmuir adsorption isotherm model and the pseudo-second order model kinetics. Also, the ability to reuse the adsorbent using the heating method showed that the synthesized adsorbent can be used for three consecutive times with good performance. Correlation coefficients ($R^2$) for genetic program and neural network were 0.98 and 0.99, respectively, indicating the agreement of laboratory data with the models.

**Conclusion:** The as-prepared AC by physical activation has a high potential for adsorption of AO7 dye from aqueous solutions.

***Keywords:*** neural network, physical activation, dye, activated carbon, adsorption, genetic programming

**J Mazandaran Univ Med Sci 2021; 31 (203): 140-151 (Persian).**

* **Corresponding Author: Zahra Noorimotlagh -** Faculty of Health, Ilam University of Medical Sciences, Ilam, Iran
(E-mail: noorimotlagh.zahra@gmail.com)

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

پژوهشی

مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران
دوره سی و یکم شماره 203 آذر سال 1400 (151-140)

# کارایی کربن فعال تولید شده با فعال سازی فیزیکی با استفاده از گاز نیتروژن به منظور جذب حداکثری رنگ از پساب آلوده: کاربرد برنامه نویسی ژنتیک و شبکه عصبی

سید عباس میرزایی[1،2]
زهرا نوری مطلق[1]
نعمت جعفرزاده[3]
فاطمه صحرایی[4]
بهروز بیاتی[5]
محمدرضا ولی زاده[6]
مروارید کرمخانی[7]

## چکیده

**سابقه و هدف:** این مطالعه برای اولین بار با هدف تولید کربن فعال (AC) از دور ریز چوب گون جهت دستیابی به جذب سطحی حداکثری جاذب انجام گرفت. بنابراین هدف از این مطالعه حذف رنگزای اسید اورانژ 7 (AO7) با استفاده از AC سنتز شده طی فعال‌سازی فیزیکی بود.

**مواد و روش‌ها:** فعال‌سازی AC در روش فیزیکی با گاز نیتروژن در دمای 700 درجه سانتی‌گراد انجام شد. مشخصات ساختاری جاذب، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و تکنیک ایزوترم تعیین شد. اثر پارامترهای راهبری، سپس ایزوترم ها و سینتیک‌های واکنش، مطالعه شد.

**یافته‌ها:** AC سنتز شده دارای سطح ویژه 774 $m^2/g$ و حجم کلی حفرات 181/49 $m^3/g$ است. حداکثر جذب رنگ 57/125 mg/g (کارایی 91/4 درصد) در شرایط بهینه آزمایشگاهی شامل pH=3، 0/04 گرم جاذب در 50 ml محلول، 50 mg/L رنگ در زمان 75 دقیقه به‌دست آمد. نتایج نشان داد که داده‌های جذب از مدل ایزوترم جذب لانگمویر و سینتیک شبه درجه دوم پیروی می‌کنند. قابلیت استفاده مجدد از جاذب با روش حرارت‌دهی نشان داد که این جاذب می‌تواند برای 3 مرتبه متوالی با کارایی مناسب استفاده شود. ضرایب همبستگی ($R^2$) برنامه ژنتیک و شبکه عصبی به ترتیب برابر با 0/98 و 0/99 بود که بیانگر تطابق داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌هاست.

**استنتاج:** کربن فعال تهیه شده از دور ریز چوب گون به روش فعال‌سازی فیزیکی پتانسیل بالایی در جذب AO7 از محلول‌های آبی دارد.

**واژه های کلیدی:** شبکه عصبی، فعال‌سازی فیزیکی، رنگ، کربن فعال، جذب سطحی، برنامه‌نویسی ژنتیک

## مقدمه

صنعت نساجی یکی از مهم‌ترین صنایع مصرف‌کننده آب و در نتیجه تولید فاضلاب‌های رنگی می‌باشد که به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آلاینده محیط زیست به‌شمار می‌آید(۲،۱). بررسی‌ها نشان داده که حدود 12 درصد از

**مولف مسئول: زهرا نوری مطلق -** ایلام: دانشگاه علوم پزشکی ایلام، مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست E-mail: noorimotlagh.zahra@gmail.com
1. استادیار، مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران
2. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران
3.استاد، مرکز تحقیقات فناوری های زیست محیطی، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران
4. دانشجوی کارشناسی مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران
5. دانشیار،گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
6. دانشیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران
7. کارشناس ارشد بهداشت حرفه ای، دانشگاه علوم پزشکی ایلام، ایلام، ایران
تاریخ دریافت : 1400/3/26 تاریخ ارجاع جهت اصلاحات :1400/4/26 تاریخ تصویب :1400/6/28



[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

رنگ‌های مصرفی در صنایع نساجی وارد پساب می‌شوند و حدود 10- 5 درصد از طریق پساب صنایع وارد محیط می‌گردد. اسید اورانژ 7 (AO7) دارای فرمول مولکولی $C_{16}H_{11}N_2NaO_4S$ دارای یک گروه آزو (N=N) در ساختار خود و یک رنگ پرمصرف می‌باشد(۱،۳). ورود پساب‌های رنگی به منابع آبی باعث نگرانی‌های زیادی از لحاظ زیست محیطی و بهداشتی شده است. لذا حذف مواد رنگی پیش از تخلیه به آب‌های جاری امری ضروری است(4). تاکنون حذف ترکیبات‌رنگی با روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی مطالعه شده است. روش جذب سطحی به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن، راندمان بالا و عدم حساسیت به مواد سمی جهت حذف آلودگی‌های صنعتی از پساب استفاده شده است. در بین انواع جاذب‌ها، کربن فعال (Activated Carbon: AC) به‌دلیل جذب عالی، غیرسمی بودن و سهولت عمل بیش‌تر استفاده شده است(11–5). امروزه استفاده از AC تجاری به دلایلی مانند هزینه بالای تولید و نیاز به احیا مجدد محدود شده است. بنابراین یک روش بهینه برای تولید AC، تولید آن از مواد کربن دار ارزان قیمت و طبیعی برای کاهش یا حذف آلاینده‌ها از محیط آبی است. در این مطالعه از چوب درختچه‌گون با نام علمی Astragalus gummifer از خانواده Leguminosa (خانواده نخود) که از کوه‌های استان ایلام به‌دست آمده، جهت تهیه AC استفاده شد(13،12). دو روش عمده فعال‌سازی شیمیایی و فیزیکی برای تولیدAC استفاده می‌شود. فعال‌سازی با مواد شیمیایی دارای معایبی مانند خوردگی و مراحل شستشوی زیاد است. بنابراین، در این مطالعه از فعال‌سازی فیزیکی در دمای 700 درجه سانتی‌گراد با گاز نیتروژن جهت تهیه AC استفاده شد. استفاده از گاز نیتروژن در دمای بالا می‌تواند باعث ایجاد خلل و فرج بیش‌تر در ساختار AC گردیده که در نهایت منجر به افزایش عملکرد جذب سطحی می‌شود(14). برای بررسی و بهینه‌سازی کارایی جذب، از برنامه نویسی ژنتیک (Genetic programming:GP) که یکی از الگوریتم‌های بسیار قدرتمند در زمینه داده کاوی است، استفاده شد. این الگوریتم بر پایه ژنتیک استوار است، بنابراین از خانواده الگوریتم‌های تکاملی است. این الگوریتم توانایی تکامل و بهینه‌سازی عناصری را دارد که قابلیت تعریف براساس ساختار درختی را داشته باشند(15). شبکه‌های عصبی مصنوعی از معروف‌ترین ابزارهای هوش مصنوعی و داده کاوی هستند. اولین شبکه عصبی با الهام از نورون‌های طبیعی و اتصالات آن‌ها ساخته شد(16). یکی از معروف‌ترین این شبکه‌ها، شبکه چند لایه‌ای پرسپترون (Multilayer perceptron) است که دارای ساختار پیشخور (feed forward) است. بنابراین هدف از این مطالعه تولید AC با فعال‌سازی فیزیکی، جهت رسیدن به میزان حداکثری ظرفیت جاذب در جذب سطحی رنگ AO7 بود.

## مواد و روش ها

*مواد شیمیایی*

رنگ AO7 از شرکت نساج ثابت ایران خریداری شد. بوته گون، ماده اولیه تهیه AC از کوه‌های واقع در شهر ایلام گردآوری شد. محلول رنگ استوک (1000mg/L) تهیه شد و با استفاده از آب مقطر و با رقیق‌سازی غلظت‌های مورد نظر آماده شد. برای تنظیم pH از محلول NaOH و HCL یک نرمال استفاده شد. سایر مواد شیمیایی مورد استفاده از شرکت Merck آلمان خریداری شد.

*تهیه AC از چوب گون و بررسی ساختاری*

زائدات چوبی درختچه‌گون با آب مقطر کاملا شستشو شده و به مدت 7 روز در معرض نور خورشید گذاشته تا خشک شوند. سپس، چوب‌ها به قطعات کوچک‌تری خرد و 1 ساعت درون کوره الکتریکی (Electric Furnace FT 1200) با دمای 600°C تحت گاز اکسیژن قرار گرفتند. سپس کربن‌های تولید شده با هاون خرد شده و چندین مرتبه با آب مقطر شستشو داده و 1 ساعت در آون (DSL60) دمای 110- 100 °C

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

خشک شدند. به منظور فعال‌سازی کربن‌ها، 1 ساعت در کوره با گاز نیتروژن در دمای 700 °C قرار گرفتند. سپس، AC تولیدی با آب دیونیزه شسته شده و از الک با مش 60 و 120 عبور داده شدند. جهت جلوگیری از جذب رطوبت، AC تولیدی در یک دسیکاتور نگهداری شد. از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning electron microscopy)، ساخت کشور جمهوری چک مدل Tescan,model.MIRA3 جهت بررسی ویژگی ساختاری AC تولیدی استفاده شد وجهت سنجش سطح ویژه جاذب، از روش Brunauer–Emmett–Teller (BET) استفاده شد. جهت تعیین pHzpc، 500mL از محلول NaCL درون 5 ارلن 50mL ریخته و pH محلول‌ها در محدوده 11-3 با HCL و NaOH تنظیم شد. 100 میلی گرم جاذب به هر یک از 5 محلول فوق اضافه شد. ارلن‌ها مدت 24 ساعت بر روی شیکر قرار گرفتند. نمونه‌ها صاف شده و pH نهایی محلول‌ها پس از 24 ساعت اندازه‌گیری و نمودار آن در برابر pH اولیه رسم گردید. محل تلاقی نمودار pH اولیه و pH نهایی به عنوان pHzpc تعیین شد.

*آزمایش‌های جذب*

این مطالعه به‌صورت ناپیوسته و درمقیاس آزمایشگاهی انجام شد. از ارلن‌های آزمایشگاهی 100 mL جهت مطالعه اثر پارامترهای راهبری جذب رنگ AO7 توسط AC تولیدی استفاده شد. برای اختلاط کامل بین مولکول‌های رنگی و AC از یک شیکر (چین _Dragonlab,model:sk_L330_pro) استفاده شد. از اسپکتروفتومتر ماورا بنفش - مرئی (آمریکا ,Dr-5000 Hacal co) با طول موج 485 نانومتر برای سنجش غلظت رنگ استفاده شد. تعداد کل آزمایش‌ها 58 عدد بود که به‌صورت دوبار تکرار و میانگین مقادیر به‌دست آمده گزارش شد.

*تعیین سینتیک واکنش*

به منظور تعیین سینتیک واکنش جذب، از معادله‌های سینتیکی شبه درجه اول و دوم استفاده گردید که در جدول شماره 1 نشان داده شده اند.

**جدول شماره 1:** *معادلات سینتیکی در فرآیند جذب*

| معادلات سینتیکی | |
|---|---|
| $Ln(q_e - q_t) = Ln\ q_e - K_1$ | شبه درجه اول |
| $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$ | شبه درجه دوم |

در این معادلات، $q_e$ میزان رنگ جذب شده در واحد جرم جسم جاذب در زمان تعادل بر حسب mg/g، $q_t$ میزان رنگ جذب شده در واحد جرم جسم جاذب در زمان t بر حسب mg/g، $K_1$ ثابت سرعت واکنش درجه اول بر حسب $1/min$ و $K_2$ ثابت سرعت واکنش درجه دوم برحسب g/mg.min می‌باشند(3).

*تعیین ایزوترم*

جهت تعیین ایزوترم های جذب از سه مدل لانگمویر، فروندلیچ و دابینین_رادوشکویچ (Dubinin–Radushkevich)(D-R) استفاده شد در جدول شماره 2 نشان داده شده‌اند.

**جدول شماره 2:** معادلات ایزوترمی در فرآیند جذب

| معادلات ایزوترمی | |
|---|---|
| $\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{bQ_m} + \frac{C}{Q_m}$ | مدل لانگمویر |
| $\text{Log}\, Q_e = \text{Log}\, K_f + \frac{1}{n}\text{Log}\, C_e$ | مدل فروندلیچ |
| $\text{Log}\, Q_e = \text{Log}\, Q_m - \beta\varepsilon^2$ | مدل D-R |

در مدل لانگمویر، $q_e$ مقدار جزء جذب شده در واحد جرم جسم جاذب برحسب mg/g، $C_e$ غلظت تعادلی ماده جذب شده در محلول بعد از جذب سطحی بر حسب mg/L، b ثابت لانگمویر و $q_m$ ظرفیت جذب می‌باشد. در مدل فروندلیچ، $q_e$ ظرفیت جذب در زمان تعادل بر حسب mg/g، $C_e$ غلظت تعادلی بر حسب mg/L، k و n ثابت‌های فروندلیچ می‌باشند. در مدل

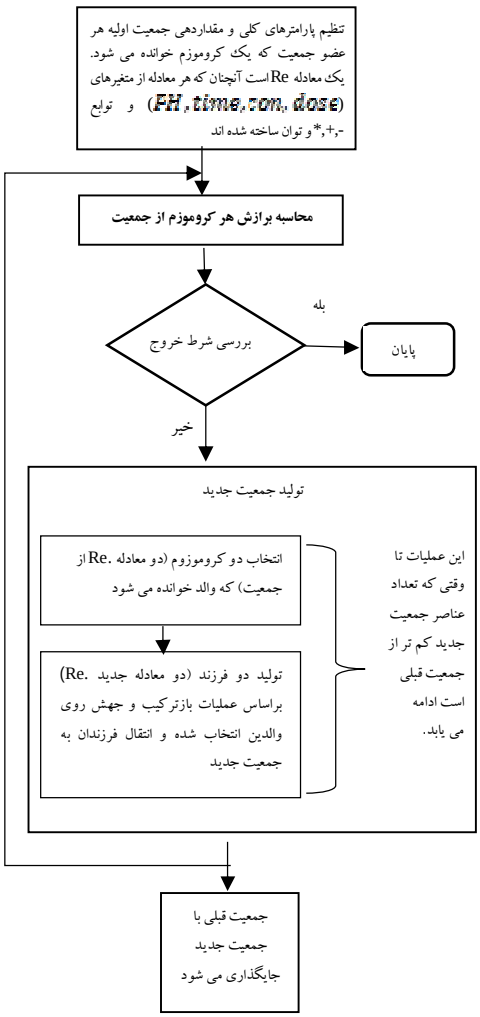
[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

دابینین - رادوشکویچ، $\varepsilon$ پتانسیل پولانی، $\beta$ انرژی جذب بر حسب کیلو ژول بر مول و $q_m$ ظرفیت جذب بر حسب mg/g می‌باشد(13).

*تئوری مدلسازی*

*برنامه نویسی ژنتیک*

یکی از زمینه‌های پرکاربرد برنامه نویسی ژنتیکی در درون‌یابی است. در این مسایل، مجموعه‌ای از داده‌ها ارائه شده (هر داده می‌تواند دارای چندین بخش ورودی و خروجی باشد) و هدف، یافتن بهترین معادله متناسب با داده‌ها می‌باشد. فلوچارت شماره 1 روند اجرای این الگوریتم را نشان می‌دهد.




**فلوچارت شماره 1:** روند اجرای الگوریتم برنامه نویسی ژنتیک

الگوریتم ژنتیک براساس فلوچارت شماره 1 دارای مراحل زیر است:

- یک مجموعه (جمعیت) از معادلات برای Re براساس متغیرهای ورودی و به‌صورت تصادفی ایجاد می‌شوند. به این مجموعه جمعیت اولیه گفته می‌شود.

- براساس معیار MAE در معادله شماره 1، میزان خطای هر یک از معادلات جمعیت برای داده های آموزشی که 80 درصد مجموعه داده واقعی است، محاسبه می‌شود. به این مقدار، برازش (fitness) آن معادله یا کروموزم گفته می‌شود. اگر کروموزمی دارای حداقل برازش مورد انتظار باشد و یا تعداد تولید نسل جمعیت به حد نصاب برسد الگوریتم خاتمه می‌یابد.

$$MAE = \left(1/n\right) \sum_{i=1}^{n} |Re_{GP} - Re_{Obs}| \quad (1):$$

در این مرحله، براساس جمعیت فعلی جمعیتی جدید ساخته می شود. در یک فرایند تکراری هر بار بر اساس برازش کروموزم‌ها و براساس احتمال، دو کروموزم به عنوان والد انتخاب می‌شوند و براساس عملیات Xover و mutation با هم ترکیب شده و دو فرزند ایجاد می‌کنند. تولید فرزندان (معادلات جدید) تا زمانی که تعداد آن‌ها به اندازه جمعیت قبلی برسد ادامه خواهد یافت. جمعیت جدید جایگزین جمعیت قبلی شده و الگوریتم از بخش دوم مجدد ادامه پیدا می‌کند.

*شبکه عصبی*

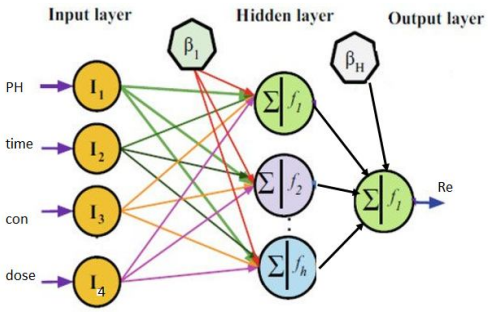
شبکه ای که دارای یک لایه ورودی، یک لایه مخفی و یک لایه خروجی است، توانایی یادگیری سیستم پیچیده‌ای دارد به شرط آن که تعداد نورون‌های لایه مخفی به درستی تنظیم شوند. ساختار مورد استفاده در تصویر شماره 1 آمده است. تعداد نورون‌های لایه ورودی به تعداد متغیرهای ورودی و برابر با چهار (تصویر شماره 1) است.

تعداد نورون‌های لایه خروجی به تعداد متغیرهای خروجی و برابر با یک تنظیم شده است. برای پیدا کردن



[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

تعداد بهینه نورون‌های لایه میانی یا مخفی آزمایش‌های متعددی انجام شده و حالت بهینه آن هشت به‌دست آمده است. توابع فعال‌سازی در لایه ورودی همانی و در لایه مخفی و خروجی از نوع سیگموید هستند. لایه مخفی و خروجی دارای نورون بایاس می‌باشند.

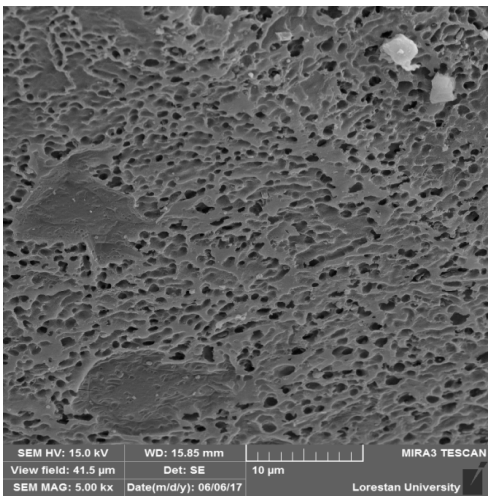


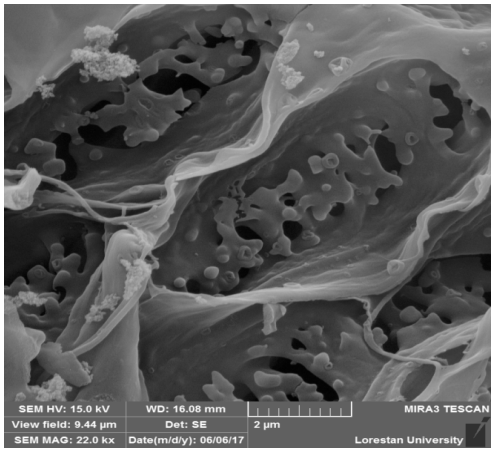

**تصویر شماره 1:** ساختار شبکه عصبی

## یافته ها

*مشخصات جاذب*

مورفولوژی سطح جاذب با SEM در تصویر شماره2 (الف و ب) آمده است. سطح AC سنتز شده با روش فیزیکی تقریبا همگن و متخلخل بوده که می‌تواند ظرفیت جذب خوبی را برای حذف رنگ فراهم نماید.

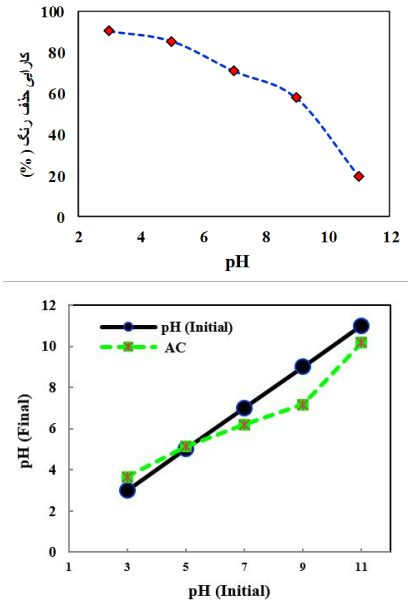



**تصویر شماره 2:** تصاویر SEM از AC تولیدی در بزرگ نمایی‌های مختلف

*بررسی تاثیر pH*

یکی از پارامترهای مهم تاثیرگذار در فرآیند جذب سطحی، pH واکنش می‌باشد. جهت بررسی تاثیر pH و تعیین مقدار بهینه، 0/04 گرم جاذب در50 mL محلول، غلظت رنگ 50 mg/L و زمان تماس 60min، pH واکنش در بازه 11-3 بررسی شد (نمودار شماره 1-الف). pHzpc جاذب در نمودار شماره 1-ب آمده است.



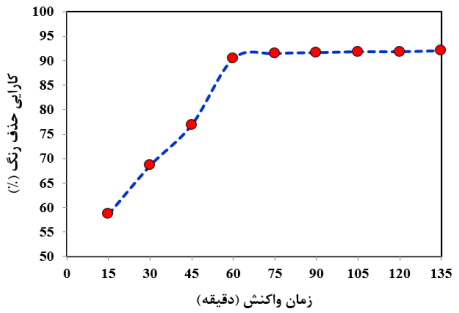

**نمودار شماره1:** الف) تاثیرpH برکارایی حذف رنگ ب) pHzpc جاذب



[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

*بررسی اثر زمان واکنش و سینتیک جذب*

زمان واکنش نقش کلیدی در فرآیند جذب دارد. آزمایش‌های جذب رنگ AO7 توسط AC تولیدی در زمان‌های مختلف (15، 30، 45، 60، 75، 90، 105، 120، 135) دقیقه انجام گرفت (نمودار شماره 2). تمامی آزمایش‌ها در pH بهینه (3) و غلظت اولیه رنگ 50mg/L و با مقدار اولیه جاذب 0/04 گرم در 50 mL محلول انجام شد. به منظور تهیه اطلاعاتی در مورد عوامل موثر بر سرعت واکنش، ارزیابی سینتیک ضروری می‌باشد. نتایج مربوط به معادلات سینتیکی شبه درجه اول و دوم در جدول شماره 3 نشان داده شده است.



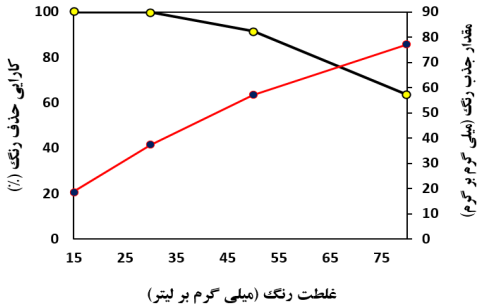

**نمودار شماره 2:** تاثیر زمان تماس بر کارایی حذف رنگ

**جدول شماره 3:** پارامترهای مدل های سینتیکی جذب رنگ

| نوع رنگ | مدل شبه درجه اول | | | مدل شبه درجه دوم | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $K_1$ | $q_e(\frac{mg}{g})$ | $R^2$ | $K_2$ | $q_e(\frac{mg}{g})$ | $R^2$ |
| AO7 | 0/08 | 156/9614 | 0/89 | 0/0009063 | 68/965517 | 0/98 |

*بررسی تاثیر غلظت اولیه رنگ و ایزوترم های جذب*

صنایع نساجی فاضلاب‌هایی با غلظت های مختلف رنگی تولید می‌کنند. بنابراین، جهت بررسی عملکرد AC تولیدی در غلظت‌های رنگ در محدوده 15-100mg/L بررسی شد. آزمایش‌ها در pH بهینه، زمان تماس 75 min و مقدار اولیه جاذب 0/04گرم در 50mL صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده در نمودار شماره 3 نشان داده شده است. یکی از فاکتورهای مهم در فرآیند جذب سطحی، بررسی ایزوترم‌های جذب می‌باشد. در جدول شماره 4 پارامترهای مدل‌های ایزوترمی جذب آلاینده (رنگ) براساس مدل لانگمویر، فروندلیچ و دابینین - رادوشکویچ (D-R) نمایش داده شده است.



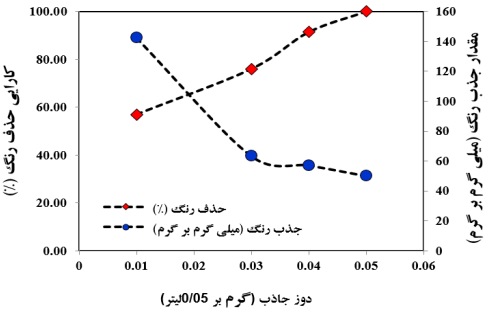

**نمودار شماره 3:** تاثیر غلظت رنگ اولیه بر کارایی حذف و ظرفیت جذب رنگ AO7

**جدول شماره 4:** پارامترهای مدل های ایزوترمی جذب رنگ

| نوع رنگ | ایزوترم لانگمویر | | | ایزوترم فروندلیچ | | | ایزوترم D-R | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $q_{max}(\frac{mg}{g})$ | $(\frac{1}{mg})$ b | $R^2$ | $K_f(\frac{l}{mg})$ | n | $R^2$ | $q_m(\frac{mg}{g})$ | $(\frac{kJ}{mol})$ E | $R^2$ |
| AO7 | 78/125 | 2/0317 | 0/99 | 44/7011 | 7/3529 | 0/98 | 69/4078 | 4/6625 | 0/83 |

*اثر دوز جاذب*

اثر دوز جاذب می‌تواند به شکل ویژه‌ای بر کارایی فرآیندهای جذب اثرگذار باشد زیرا مقدار آن می‌تواند سایت‌های فعالی را برای جذب آلاینده‌ها فراهم‌کند. جهت بررسی تاثیر غلظت اولیه جاذب بر جذب سطحی، تغییر در غلظت اولیه جاذب در محدوده 0/01-0/05گرم در 50 mL محلول صورت گرفت. آزمایش‌ها در pH بهینه و با غلظت اولیه رنگ 50mg/L و زمان تماس 75 min که در نمودار شماره 4 آمده است، انجام گرفت.

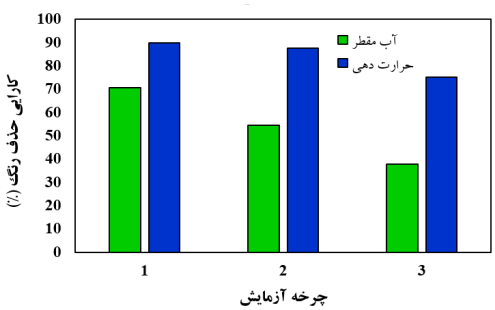



**نمودار شماره 4:** تاثیر مقدار اولیه جاذب بر کارایی حذف رنگ

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

*ارزیابی قابلیت بازیابی جاذب*

از نظر اقتصادی استفاده مجدد در فرآیندهای مهندسی تصفیه آب و فاضلاب از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین بعد از اتمام زمان واکنش، جاذب با استفاده از کاغذ صافی از سیستم جدا گردید. سپس، بازیابی و احیای جاذب با استفاده از دو روش حرارت‌دهی (200°C به مدت 60 min) و شستشو با آب مقطر (4 مرتبه و خشک کردن در دمای 80°C) انجام گرفت. نمودار شماره 5 میزان جذب رنگ را در 3 چرخه در شرایط pH=3، غلظت رنگ 50 mg/L و 0/04گرم جاذب در 50 mL محلول در زمان 75 min نشان می‌دهد.




**نمودار شماره 5:** ارزیابی کارایی 3 چرخه استفاده مجدد از جاذب

*برنامه نویسی ژنتیک*

مجموعه داده مورد استفاده در این تحقیق دارای 23 داده است. پارامترهای برنامه نویسی ژنتیک به صورت جدول شماره 5 تنظیم شده اند:

**جدول شماره 5:** پارامترهای برنامه نویسی ژنتیک

| نام پارامتر | مقدار |
|---|---|
| اندازه جمعیت | 100 |
| حداکثر تعداد تولید نسل یا جمعیت | 7000 |
| نوع انتخاب | Tournament |
| اندازه تورنومنت | 3 |
| نام توابع مورد استفاده در ساخت کرومزوم ها | Times, minus, plus, divide,sqrt,log,square,sin,cos, exp |

نتایج پیاده‌سازی GP، یافتن معادله (2) برای مجموعه داده این مطالعه است:

(2): $Re = 73.0540020404986 + 133.911358479916 * PH * time * dose^2 - 6.74290674149847e-6 * PH * time^3 - 1519065.95716644 * PH * dose^4 - 8.67516507319098e-6 * PH^2 con^3$

این معادله براساس معیارهای متعددی ارزیابی شد که نتایج آن‌ها در ادامه آمده است. ضریب تشخیص که براساس معادله شماره 3 محاسبه می‌شود:

(3): $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Re_{obs} - Re_{GP})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Re_{obs} - \overline{Re_{obs}})^2}$

در معادله شماره 3، n تعداد داده‌ها، $Re_{obs}$ مقدار Re مشاهده شده در آزمایشگاه و $Re_{GP}$ مقدار محاسبه شده توسط معادله به‌دست آمده با برنامه‌نویسی ژنتیک است. معادله دارای R^2 برابر با 0/9859است که مقداری راضی‌کننده است. حداکثر مقدار خطایی که برای داده‌ها توسط GP تولید شده است 1/8095261 می‌باشد. می‌دانیم که مقدار Re تا حدود 90 نیز وجود دارد بنابراین، این میزان خطا قابل قبول است. مقدار میانگین مربعات خطا از رابطه شماره 4 برابر با 1/6783884 است.

(4): $MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Re_{GP} - Re_{Obs})^2}{n}$

و مقدارمیانگین قدرمطلق خطا از رابطه شماره 5 برابر با 1/0397031 است.

(5): $MAE = (1/n)\sum_{i=1}^{n}|Re_{GP} - Re_{Obs}|$

*نتایج* MSE و MAE نشان می‌دهند که معادله به‌دست آمده توسط برنامه‌نویسی ژنتیک قابلیت پیش‌بینی مقدار *Re* با دقت قابل قبولی را دارد.

*شبکه عصبی*

در شبکه عصبی داده‌ها به دو بخش آموزشی (80 درصد) و تست (20 درصد) تقسیم شدند. بعد از آموزش شبکه نتایج در جدول شماره 6 حاصل شده است.

دقت شبکه براساس معیارهای معرفی شده در بخش GP برای داده‌های تست، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار R^2، MSE و MAE برای داده‌های تست به‌ترتیب 0/9998، 0/0628و 0/1428 به‌دست آمد. این

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

میزان خطا نشان‌دهنده دقت بالای شبکه آموزش دیده شده در پیش‌بینی Re است. مقدار 0/1428 برای MAE بدین معنا است که مقدار Re به طور متوسط دارای این میزان خطاست که کاملا راضی‌کننده است. نتایج نشان می‌دهدکه شبکه عصبی آموزش دیده دارای دقت بالاتری نسبت به معادله به‌دست آمده توسط GP است. جدول شماره 7 میزان اختلاف آن‌ها را نشان می‌دهد.

**جدول شماره 6:** وزن اتصالات شبکه عصبی

| وزن های بین لایه ورودی و لایه مخفی | | | | | | وزن های بین لایه مخفی و لایه خروجی | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شماره نورون در لایه مخفی | PH | dose | time | con | bias | شماره نورون در لایه مخفی | Output neuron |
| 1 | -0/8887 | 0/1333 | -0/6491 | -1/3318 | 3/3767 | 1 | -1/6185 |
| 2 | 1/6653 | 0/2596 | -0/5736 | 2/3646 | -1/8698 | 2 | -1/8190 |
| 3 | -1/1772 | -0/0054 | 0/8204 | 1/0906 | 1/7848 | 3 | 0/9741 |
| 4 | -1/3712 | 0/1327 | 1/5576 | -1/1850 | 0/5297 | 4 | -0/4575 |
| 5 | -0/4463 | -0/8608 | -2/3912 | -1/3944 | -0/3661 | 5 | 0/3823 |
| 6 | -0/0887 | 1/1675 | -0/1249 | 0/9107 | -0/5942 | 6 | 0/3718 |
| 7 | -1/3692 | -0/0396 | -0/9773 | 1/8530 | -2/1845 | 7 | -1/0166 |
| 8 | 1/0101 | -1/9923 | -2/2450 | 0/6049 | 1/5750 | 8 | -0/5337 |
| | | | | | | bias | -0/9868 |

**جدول شماره 7:** مقایسه نتایج برنامه نویسی ژنتیک و شبکه عصبی

| | MSE | MAE |
|---|---|---|
| ANN | 0/0628 | 0/1425 |
| GP | 1/6783884 | 1/0397031 |
| درصد کاهش خطا ANN نسبت به GP | 96/26 | 86/27 |

## بحث

در سال‌های اخیر، تولید AC از پیش ماده‌های گوناگون و روش‌های فعال‌سازی مختلف توسط محققین بررسی شده است. در این‌جا، تولید AC از دور ریز چوب‌گون با روش فیزیکی گاز نیتروژن در دمای 700°C جهت عدم مصرف مواد شیمیایی و کاهش هزینه تولید بررسی شد. منافذ موجود در ساختار و مکان‌های فعال جذب بر روی جاذب در نمودار شماره 2 به وضوح قابل مشاهده هستند که می‌توانند نقش موثری در جذب آلاینده‌ها ایفاء کنند. از عکس‌های SEM نیز مشخص است که سطح AC تولیدی با روش فیزیکی تقریبا همگن و متخلخل بوده که می‌تواند ظرفیت جذب خوبی را برای حذف رنگ فراهم نماید. نتایج آنالیز BET نشان داد که مساحت سطح ویژه $774\ m^2/g$ و حجم کلی حفرات $181/49\ m^3/g$ می‌باشد که دارای حداکثر ظرفیت جذب رنگ AO7 است. مطالعه دیگری در رابطه با تولید AC از چوب‌گون صورت گرفت که از روش شیمیایی با فعال‌ساز اسید فسفریک استفاده شد و مساحت سطح ویژه آن را $565 m^2/g$ گزارش کردند(13). این مقایسه نشان می‌دهد که فعال سازی با روش فیزیکی با گاز نیتروژن در 700°C باعث می‌شود که از یک طرف AC تولید شود که سطح ویژه بالاتری داشته باشد و از طرف دیگر مواد شیمیایی کم‌تر و در نتیجه هزینه تولید آن کاهش یابد.

pH یکی از پارامترهای مهم در جذب رنگ می باشد. براساس نمودار شماره 1 بیش‌ترین درصد حذف AO7 در pH=3 و به میزان 90/4 درصد به‌دست آمد. در pH های بالاتر درصد حذف رنگ کاهش یافته و در pH=11 به 19/9درصد می‌رسد. در نمودار شماره 1 ب pHzpc جاذب 5 به‌دست آمد که نشان می‌دهد بار سطحی جاذب در pH بالاتر از 5 منفی و در pH پایین‌تر از 5 مثبت می‌باشد. از طرفی دیگر ملکول‌های AO7 در محلول در اثر یونیزه شدن، بار منفی می گیرند در نتیجه در pH کم‌تر از 5 که سطح جاذب مثبت شده، ملکول‌های AO7 به‌دلیل نیروی جاذبه الکتروستاتیک تمایل زیادی برای جذب روی سطح جاذب دارندکه بالاترین درصد حذف در pH= 3 به‌دست آمد. بنابراین pH بهینه برای این ملکول رنگی 3 انتخاب شد و هرچه محیط انجام واکنش اسیدی‌تر باشد حذف رنگ بهتر صورت می گیرد (نمودار شماره 1).

در واکنش‌هایی که حذف آلاینده‌ها براساس جذب سطحی باشد یک زمان تماس بهینه وجود دارد. زمان تماس بهینه یا زمان تعادلی را می‌توان زمان ثابت شدن مقدار جذب آلاینده تعریف کرد، به‌طوری‌که بعد از این زمان هر چه میزان تماس بیش‌تر شود مقدار جذب آلاینده بسیار کم و تقریباً تغییری در آن مشاهده نمی‌شود. براساس نمودار شماره 2، با افزایش زمان تماس، میزان

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

جذب سطحی افزایش و زمان تعادل (بهینه) در این مطالعه 75 min (جذب 57/125 mg/g) می‌باشد. جذب رنگزا در دقایق اولیه با سرعت زیادی انجام می‌شود و با افزایش زمان مقدار جذب کاهش می‌یابد. این موضوع به‌دلیل کاهش غلظت رنگزا در محیط و کاهش سایت‌های فعال در سطح جاذب است. در جدول شماره 3 نتایج بررسی مدل‌های سینتیکی شبه درجه اول و دوم را نمایش می‌دهد. با توجه به ضریب همبستگی خطی ($R^2$)، سینتیک حذف رنگ به وسیله AC از معادله شبه درجه دوم پیروی می‌کند ($R^2$=0/98).

غلظت اولیه آلاینده یکی دیگر از عواملی است که بر بازده جذب تاثیر گذار است. نمودار شماره 3 نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اولیه رنگ، راندمان جذب رنگ روی جاذب کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش غلظت اولیه رنگ از 15 mg/L به 100mg/L، درصد حذف رنگ از 100 درصد به 23/29 درصد کاهش پیدا می‌کند. این پدیده به این دلیل است که با افزایش غلظت ملکول‌های رنگزا، سایت‌های جذب بر روی جاذب ثابت بوده و با افزایش غلظت رنگ، راندمان جذب کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش غلظت از 15 به 100، مقدار رنگ جذب شده در واحد جرم جاذب از 18/75 به 77/05 mg/g افزایش می‌یابد. افزایش غلظت رنگ باعث می‌شود که نیروی محرکه مهمی به علت افزایش برخورد بین ملکول‌های رنگ و جاذب برای غلبه بر مقاومت انتقال جرم به‌وجود آید (تسریع انتقال جرم). این شرایط باعث افزایش برداشت ملکول رنگ توسط ذرات جاذب و در نتیجه افزایش ظرفیت جذب می‌شود. در مطالعات مربوط به جذب سطحی، تعیین ایزوترم‌های جذب به منظور بیان چگونگی تعادل قسمت جذب شونده بین فاز جامد و فاز سیال می‌باشد. در جدول شماره 4 پارامترهای معادلات ایزوترمی براساس مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و دابینین_ رادوشکویچ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب همبستگی خطی ($R^2$) در معادله لانگمویر از سایر معادلات بیش‌تر است ($R^2$=0/99). بنابراین جذب رنگ AO7 با AC در این مطالعه، از مدل ایزوترمی لانگمویر پیروی می‌کند. براساس نتایج نمودار شماره 4، با افزایش دوز جاذب میزان حذف رنگ افزایش می‌یابد، به‌طوری که با افزایش میزان دوز جاذب از 0/01 گرم به 0/05گرم، میزان حذف رنگ از57 درصد به 100درصد افزایش می‌یابد. دلیل افزایش حذف رنگ با افزایش جاذب، افزایش میزان مساحت و نقاط جذبی موجود در سطح AC می‌باشد. طبق نمودار شماره 4، با افزایش جاذب، راندمان حذف رنگ افزایش یافته و از غلظت رنگ کاسته می‌شود ولی با افزایش میزان جاذب از 0/01گرم به 0/05 گرم، میزان رنگ جذب شده در واحد جرم جاذب از 142/5 mg/g به 50mg/g کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار جاذب، درصد حذف رنگ AO7 افزایش، غلظت رنگ باقیمانده در پساب کاهش و میزان رنگ جذب شده در واحد جرم جاذب کاهش می‌یابد. در چرخه اول استفاده از جاذب با استفاده از هر دو روش راندمان سیستم در جذب رنگ مطلوب بود (90 درصد برای حرارت‌دهی و 70/68 درصد برای شستشو با آب) (نمودار شماره 5). بعد از چرخه سوم کارایی فرآیند جذب برای هر دو روش کم‌تر شد ولی کماکان میزان حذف رنگ با استفاده از روش حرارت دهی در شرایط قابل قبولی قرار دارد و میزان حذف در چرخه سوم در 75 دقیقه واکنش، 75/2 درصد بود. این کاهش می‌تواند به دلیل مسدود شدن و غیر فعال شدن سطح جاذب با ملکول‌های رنگ باشد که در طول 3 چرخه تجمع یافته‌اند.

شبکه عصبی به‌عنوان یک جعبه سیاه (Black Box) رفتار می‌کند و با تنظیم درست وزن‌ها توانایی تطبیق با هر سیستم پیچیده‌ای را دارد منتهی شبکه آموزش دیده قابل تفسیر نیست. در مقابل GP براساس داده‌های آموزشی سعی می‌کند معادله‌ای شامل توابع، متغیرهای مساله و اعداد را بیابد که رفتار مناسبی بر روی داده‌ها داشته باشد. به‌دلیل این‌که کاربر دید دقیقی به توابعی‌که معادله

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

می‌تواند شامل آن‌ها باشد، ندارد و به‌صورت کاملا تصادفی آن‌ها را انتخاب می‌کند و همچنین دقتی که در تعیین اعداد و ضرایب به‌کار می‌رود، احتمال یافتن معادله‌ای که کاملا بر داده ها منطبق باشد به‌صورت صد درصد وجود ندارد. ولی با دقت قابل قبولی می‌توان این معادلات را یافت.

در پایان می‌توان نتیجه‌گیری کرد که AC تولیدی با سطح ویژه 774 $m^2/g$ و حجم کلی حفرات 181/49 $m^3/g$ کارایی بالایی در جذب رنگ AO7 از محلول‌های آبی دارد. این مطالعه نشان داد که حذف رنگ در محیط‌هایی با pH پایین‌تر (اسیدی) بهتر صورت می گیرد. زمان تعادل در این مطالعه 75 دقیقه بوده و مقدار رنگ جذب شده در واحد جرم جاذب در این زمان 57/125 mg/g می‌باشد. این مطالعه بیان کرد که با افزایش میزان غلظت رنگ، راندمان حذف کاهش پیدا می‌کند. غلظت بهینه رنگ 50 mg/L است که راندمان حذف در این غلظت، 91/4 درصد حاصل گردید. جذب رنگ روی AC براساس ضرایب همبستگی ($R^2$)، از مدل ایزوترمی لانگمویر و معادله سینتیکی شبه درجه دوم به دلیل بالاتر بودن این ضریب تبعیت می‌کند. همچنین قابلیت استفاده مجدد از جاذب با استفاده از روش حرارت دهی نشان داد که جاذب سنتز شده می‌تواند برای 3 بار استفاده مجدد کارایی قابل قبولی داشته باشد.

## سپاسگزاری

مقاله حاصل برگرفته از طرح نوآورانه مصوب مرکز رشد دانشگاه علوم پزشکی ایلام با کد 99R001/25 و کد اخلاق (IR.MEDILAM.REC.1398.205) بوده که حامی مالی پژوهش حاضر است. هیچکدام از نویسندگان این مقاله تعارض منافعی برای انتشار این مقاله ندارند. نویسندگان این مقاله نهایت تشکر و قدردانی خود را از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه اعلام می‌دارند.

## References

1. Akazdam S, Chafi M, Yassine W, Gourich B. Removal of Acid Orange 7 Dye from Aqueous Solution Using the Exchange Resin Amberlite FPA-98 as an Efficient Adsorbent: Kinetics, Isotherms, and Thermodynamics Study. JMES 2017; 8(8): 2993-3012.
2. Silva JP, Sousa S, Rodrigues J, Antunes H, Porter JJ, Gonçalves I, et al. Adsorption of acid orange 7 dye in aqueous solutions by spent brewery grains. Sep Purif Technol 2004; 40(3): 309-315.
3. Tsai F-C, Xia Y, Ma N, Shi J-J, Jiang T, Chiang T-C, et al. Adsorptive removal of acid orange 7 from aqueous solution with metal–organic framework material, iron (III) trimesate. Desalin Water Treat 2016; 57(7): 3218-3226.
4. Mittal A, Jhare D, Mittal J. Adsorption of hazardous dye Eosin Yellow from aqueous solution onto waste material De-oiled Soya: Isotherm, kinetics and bulk removal. J Mol Liq 2013; 179: 133-140.
5. Jaafarzadeh N, Baboli Z, Noorimotlagh Z, Silva Martínez S, Ahmadi M, Alavi S, et al. Efficient adsorption of bisphenol a from aqueous solutions using low-cost activated carbons produced from natural and synthetic carbonaceous materials. Desalin Water Treat 2019; 154: 177-187.
6. Mirzaee SA, Bayati B, Valizadeh MR, Gomes HT, Noorimotlagh Z. Adsorption of diclofenac on mesoporous activated carbons: Physical and chemical activation, modeling with genetic programming and molecular dynamic simulation. Chem Eng Res Des 2021; 167: 116-128.
7. Noorimotlagh Z, Ravanbakhsh M, Valizadeh MR, Bayati B, Kyzas GZ, Ahmadi M, et al.

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]

Optimization and genetic programming modeling of humic acid adsorption onto prepared activated carbon and modified by multi-wall carbon nanotubes. Polyhedron 2020; 179: 114354.

8. Seyedi Z, Amooey AA, Amouei A, Tashakkorian H. Pentachlorophenol removal from aqueous solutions using Montmorillonite modified by Silane & Imidazole: kinetic and isotherm study. J Environ Heal Sci Eng 2019; 17(2): 989-999.
9. Amooey AA, Amouei A, Tashakkorian H, Mohseni SN. Performance of clinoptilolite zeolite in removal of dexamethasone from aqueous solutions. J Mazandaran Univ Med Sci 2016; 25(133): 128-137 (Persian).
10. Gholami Borujeni F, Mahvi AH, Nejatzadeh-Barandoozi F. Removal of heavy metal ions from aqueous solution by application of low cost materials. Fresen Env Bull 2013; 22(3): 655-658.
11. Naghipoura D, Amoueib A, Ghasemid KT, Taghavie K. Removal of cefixime from aqueous solutions by the biosorbent prepared from pine cones: kinetic and isotherm studies. Environment. Desalination and Water Treatment 2020; 201: 219-227.
12. Noorimotlagh Z, Darvishi Cheshmeh Soltani R, Shams Khorramabadi G, Godini H, Almasian M. Performance of wastewater sludge modified with zinc oxide nanoparticles in the removal of methylene blue from aqueous solutions. Desalin Water Treat 2016; 57(4): 1684-1692.
13. Noorimotlagh Z, Shahriyar S, Darvishi Cheshmeh Soltani R, Tajik R. Optimized adsorption of 4-chlorophenol onto activated carbon derived from milk vetch utilizing response surface methodology. Desalin Water Treat 2016; 57(30): 14213-14226.
14. Choma J, Marszewski M, Osuchowski L, Jagiello J, Dziura A, Jaroniec M. Adsorption properties of activated carbons prepared from waste CDs and DVDs. ACS Sustain Chem Eng 2015; 3(4): 733-742.
15. Koza JR. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. London: England; 1992. p. 836.
16. Hosseini SH, Valizadeh M, Olazar M, Altzibar H. Minimum spouting velocity of draft tube conicalspoutedbeds using the neural networkapproach. Chem EngTechnol 201740(6): 1132-1139.

[ Downloaded from jmums.mazums.ac.ir on 2026-11-09 ]