

# تصفیه محلول چهار جزئی آب / اتانول / استالدهید / استیک اسید با بستر کربن فعال

پریچهر شهنوازی<sup>۱</sup>، کبرا پور عبدالله<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران

پیام نگار: pourabdollah@ccerci.ac.ir

## چکیده

جذب سطحی با داشتن هزینه پایین، سادگی عملیات، ماهیت عمومی و بازدهی بالا یکی از رایج‌ترین و کارآمدترین روش‌های جداسازی شناخته شده است؛ از این رو در این پژوهش، روش جذب سطحی با استفاده از کربن فعال، به عنوان جاذب، برای جداسازی سه آلاینده اتانول، استالدهید و استیک اسید از محلول آبی استفاده شد. این محلول شامل ۵ درصد وزنی اتانول، ۱/۵ درصد وزنی استیک اسید و ۰/۲ درصد وزنی استالدهید بود و در این فرایند سه اثر زمان ماند، دمای محلول و مقدار جاذب بررسی شد. همچنین آزمایش‌ها با استفاده از روش RSM طراحی و بهینه‌سازی شد و مقدار بهینه زمان ماند، دمای محلول و مقدار جاذب به ترتیب ۴ ساعت، ۳۰°C و ۲/۸ گرم جاذب به ازای هر سی‌سی محلول به دست آمد. بیشترین میزان جداسازی برای اتانول، استیک اسید و استالدهید به ترتیب ۶۵، ۸۵ و ۸۵ درصد و ظرفیت جذب آن‌ها نیز به ترتیب ۱۴۴/۴، ۶۴/۲ و ۷/۶ میلی‌گرم جذب‌شونده به ازای هر گرم جاذب حساب شد.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۱۱

شماره صفحات: ۶۳ تا ۷۳

**کلیدواژه‌ها:** جذب سطحی،

محلول چهار جزئی، کربن فعال،

طراحی آزمایش

## ۱. مقدمه

در حال حاضر کیفیت منابع آب به دلیل افزودن مداوم مواد شیمیایی نامطلوب، روزبه‌روز کاهش یافته است [۱]. از این رو قوانین زیست‌محیطی دفع پساب واحدهای صنعتی در کشورهای صنعتی کاملاً اجرا و مطالعات جامعی در خصوص روش‌های بهبود تصفیه پساب‌ها و کنترل غلظت آلایندها انجام می‌شود [۲]. طبق بررسی‌ها، آلاینده‌های آب از نظر ماهیت به سه گروه مواد هیدروکربنی، مواد معدنی و عوامل فیزیکی تقسیم می‌شوند؛ از جمله آلاینده‌های

هیدروکربنی آب می‌توان به مواد شوینده، پساب صنایع غذایی، حشره‌کش‌ها و علف‌کش‌ها، مواد نفتی و سایر مواد هیدروکربنی فرار اشاره کرد [۳]. با توجه به آلودگی آب به مواد هیدروکربنی و مشکلات حاصل از آن؛ از قبیل ایجاد طعم و بوی نامطبوع و تشکیل فراورده‌های جانبی گندزدایی، ضرورت دارد تا روش‌های حذف این مواد در آب، بررسی شود.

امروزه روش‌های گوناگونی برای تصفیه و حذف آلاینده‌های هیدروکربنی آب به کار گرفته می‌شود، هر کدام از این روش‌ها برتری‌ها و کاستی‌هایی دارند. به‌طور کلی این روش‌ها بر اساس

\* تهران، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، پژوهشکده نفت

به کار گرفت. این پژوهشگر، نخستین شرح اصولی را از قدرت جذب کربن در فاز مایع ارائه داد. در سال‌های بعد، لایو<sup>۵</sup> از کربن برای حذف مزه و بوی بد آب استفاده کرد. [۵]. همچنین در سال ۱۹۹۶ گانگولی<sup>۶</sup> و همکارانش به‌وسیله کربن فعال اصلاح‌شده با هیدروکلریک اسید با مساحت  $(m^2/g)$  ۱۰۸۰ موفق شدند استیک-اسید را از پساب یک پتروشیمی به میزان  $mol/gr$  ۲/۸m بازیابی کنند [۱۰]. یحیی السید<sup>۷</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۰ جذب استالدهید به‌وسیله سه نوع کربن با منشأ تولید متفاوت و اصلاح‌شده را با نیتریک‌اسید در فاز گاز بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که جذب استالدهید در کربن فعال به‌شدت به توزیع اندازه منافذ جاذب‌ها و شیمی سطح کربن بستگی دارد و اکسایش سطوح کربن منجر به افزایش مقدار استالدهید جذب‌شده در شرایط اشباع می‌شود؛ همچنین چگالی کم گروه‌های سطحی می‌تواند گرمای جذب را افزایش دهد، در حالی که اکسایش با چگالی بالا منجر به کاهش مقاومت نیروهای جذب می‌شود [۱۱]. جوینز<sup>۸</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۹ حذف اتانول از آب با جاذب کربن فعال را با نام تجاری F-600 و مساحت  $m^2/g$  ۹۰۰ در سه سامانه ناپیوسته مخلوط، بستر فشرده در حال گردش و بستر ثابت مطالعه کردند و به حداکثر میزان جذب  $120 mg/g ads$  دست یافتند [۱۲].

در سال ۲۰۱۴ رومرو-آنا<sup>۹</sup> و همکارانش جذب اتانول را بر روی انواع مختلف کربن فعال کرووی و تأثیر تخلخل و وجود گروه‌های اکسیژن سطح جاذب را بررسی کردند. همچنین گروه‌های اکسیژن سطح با استفاده از نیتریک‌اسید و فسفریک‌اسید در محلول و یا با عملیات حرارتی در حضور نیتروژن و هوا تغییر داده شد؛ نتایج نشان داد که نوع اکسیدکننده استفاده شده به میزان چشمگیری، تعداد و عملکرد گروه‌های اکسیژن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین ماده اولیه ظرفیت جذب متوسطی دارد و نمونه‌های اصلاح‌شده به‌وسیله اسید و نمونه‌های حرارت داده شده به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر جذب را نشان دادند. لازم به ذکر است که فرایند آهکینگی اکسیژن سطحی کربن فعال را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که در میان اصلاح سطح به‌وسیله اسیدها، اکسایش با نیتریک‌اسید مولار، بهترین عملکرد را به دنبال دارد. همچنین اصلاح سطح

قابلیت بازیابی ترکیبات به روش‌های بازیابی و روش‌های تخریب، تقسیم می‌شوند. روش‌های بازیابی شامل جذب، جذب سطحی و جداسازی غشاست و روش‌های تخریب شامل سوزاندن، اکسایش فوتوکاتالیستی، اکسایش کاتالیزوری ازن، کاتالیزوری پلاسما و تخریب زیست‌شناختی و غیره است. بر اساس مطالعات، جذب سطحی با داشتن هزینه پایین، سادگی عملیات، ماهیت عمومی و بازدهی بالا یکی از متداول‌ترین و کارآمدترین روش‌های جداسازی شناخته شده است [۴].

کربن فعال یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین جاذب‌های حذف آلاینده‌های هیدروکربنی و معدنی در تصفیه آب و پساب است که در حذف ترکیبات هیدروکربنی نسبت به فلزات و دیگر آلاینده‌های معدنی کارایی بهتری دارد [۵]. همچنین کربن فعال با داشتن مساحت زیاد سطح، ساختار متخلخل، ظرفیت زیاد جذب، قابلیت بازیابی مجدد، طیف گسترده‌ای از گروه‌های عاملی موجود در سطح و قیمت پائین، منحصر به فرد است و کاربردهای فراوانی دارد؛ اما به‌طور عمده در زمینه محیط‌زیست، مثلاً در فرایندهای تصفیه پساب، آب، گاز، حذف رنگ، بو و آلودگی‌های هیدروکربنی در شکل‌های کروی، گرانولی، پودری، نانولوله‌ها<sup>۱</sup>، نانوفیبرها<sup>۲</sup>، مونولیت‌های کربنی<sup>۳</sup> به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود [۸-۵].

در سال‌های اخیر بهبود سطح کربن‌های اصلاح‌شده با استفاده از مواد شیمیایی و روش‌های مناسب، مطالعه و برآماده‌سازی سطح آن‌ها تأکید شده است [۵]. به‌طور کلی، اصلاح سطح کربن فعال، پس از مرحله فعال‌سازی انجام می‌شود و شامل اکسایش و ایجاد پیوند بیشتر بر روی سطح به‌وسیله روش‌های اسیدی، تلقیح، پلاسما، ماکروویو، ازن و زیست‌شناختی است [۶]. همچنین اصلاح سطح کربن فعال، در فاز مایع می‌تواند با استفاده از نیتریک‌اسید ( $HNO_3$ )، آب اکسیژنه ( $H_2O_2$ ) یا پرسولفات آمونیوم ( $(NH_4)_2S_2O_8$ )، یا در فاز گاز، با دی‌اکسیدکربن، بخار یا هوا انجام شود. مطالعات نشان می‌دهد که اکسایش به روش‌های متفاوتی، باعث ایجاد گروه‌های عاملی با طبیعتی مختلف می‌شود [۹]. خواص ویژه جذب کربن را نخستین بار شیل<sup>۴</sup> در سال ۱۷۷۳ برای تصفیه گازها و پس از آن برای رنگ‌زدایی محلول‌ها در سال ۱۷۸۶

5. Lowitz  
6. Ganguly  
7. Yehya El-Sayed  
8. R. A. Jones  
9. A.J. Romero-Anaya

1. Nanotubes  
2. Nano Fibers  
3. Monoliths  
4. Scheele

بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. سرعت همزن در تمامی آزمایش‌های جذب بر روی ۲۵۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. پس از اتمام زمان آزمایش، نمونه با استفاده از پمپ خلأ از کاغذ صافی عبور داده شد. ظرف محلول جمع‌آوری شده از آزمایش، به وسیله پارافیلیم پوشانده شد و داخل حمام یخ نگهداری و میزان آلاینده‌های باقی‌مانده در نمونه، با دستگاه سوانگاری گازی (GC) تعیین شد.

### ۲-۳ ساخت محلول با غلظت مشخص

محلول پساب مورد استفاده شامل ۵٪ وزنی اتانول، ۱۱/۵٪ وزنی استیک اسید و ۲٪ وزنی استالدهید بود، بنا بر این غلظت محلول استفاده‌شونده در تمامی آزمایش‌ها ثابت است و تغییری نمی‌کند.

### ۲-۴ تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر فرایند جذب

فرایند جذب به مؤلفه‌هایی مانند دما، زمان ماند، غلظت اولیه، سرعت سیال و غیره بستگی دارد. به منظور تعیین مؤلفه‌ها و سطوح آن‌ها از مطالعات گذشته و آزمایش‌های اولیه استفاده شد. با توجه به غلظت اولیه ثابت پساب، در این پژوهش مؤلفه‌های دما، زمان ماند و مقدار جاذب مصرفی به عنوان مؤلفه‌های تأثیرگذار انتخاب شدند. در آزمایش‌های اولیه تنها یک مؤلفه متغیر و دو مؤلفه دیگر ثابت هستند، همچنین سرعت همزن مؤلفه دیگری است که در فرایند جذب تأثیرگذار است؛ اما به دلیل اینکه دبی جریان ورودی به فرایند جذب ثابت است مقدار عدد رینولدز آن حساب شد و بر اساس آن سرعت همزن ثابت در نظر گرفته شد. بنا بر این براساس داده‌ها، عدد رینولدز برابر ۱۳۵۰۰ حساب شد که با در نظر گرفتن مشخصات ظرف همزن دار، سرعت همزن برابر ۲۵۰ rpm حساب شد که در تمامی آزمایش‌ها بر روی این مقدار تنظیم شد.

### ۳. نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش پیش به آن اشاره شد، مؤلفه‌هایی نظیر دما، زمان ماند و مقدار جاذب بر بازدهی جذب مؤثرند که در ادامه تأثیر این مؤلفه‌ها بررسی شد.

سپس بر اساس آن، محدوده مناسب تغییر آن‌ها تعیین و بر اساس طراحی آزمایش RSM<sup>۱</sup> آزمایش‌ها انجام و در پایان بهینه‌سازی شرایط عملیاتی انجام می‌شود.

1. Response Surface Methodology (RSM)

کربن به وسیله روش حرارت‌دهی با هوا، باعث ایجاد گروه‌های عاملی فنول‌ها و کربونیل‌ها می‌شود و اکسایش سطح با نیتریک اسید عامل ایجاد گروه‌های کربوکسیل است. در غلظت‌های بالای اتانول نیز، ظرفیت جذب تنها تابع تخلخل و مستقل از شیمی سطح است که این موضوع با ۱۴ نمونه انتخاب‌شده تأیید شد [۹]. در سال ۲۰۱۹، حاجی‌لری و همکارانش جذب اتانول را از محلول آبی بر روی کربن فعال تجاری در دو سامانه جذب ناپیوسته و بستر ثابت بررسی کردند و نتایج جذب سامانه ناپیوسته نشان داد که جذب اتانول بر روی کربن فعال با مقاومت نفوذ، کنترل می‌شود و افزایش غلظت اولیه اتانول، کاهش مقدار جاذب و اندازه منافذ کوچکتر باعث افزایش انتقال جرم و میزان جذب می‌شود [۱۴ و ۱۳].

در این پژوهش، فرایند جذب سطحی مخلوط سه‌تایی اتانول، استیک اسید و استالدهید از آب بر روی کربن فعال به‌عنوان جاذب بررسی شده است؛ بسیاری از مطالعات بر روی جداسازی مخلوط دوتایی این آلاینده‌ها در آب، متمرکز بوده است.

## ۲. تجربی

### ۲-۱ مواد

مواد مورد استفاده در تهیه محلول آبی شامل اتانول تجاری (۹۶ wt.% C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)، استیک اسید (۹۹ wt.% CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>H) از شرکت فولکا (Fluka)، استالدهید (۹۹ wt.% CH<sub>3</sub>CHO) از شرکت مرک (Merck) و نمونه کربن فعال ساخت کشور آلمان تهیه شد. مشخصات این کربن در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات کربن فعال.

حجم کل منافذ (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	قطر متوسط منافذ (nm)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )
۱/۰۰۶۲	۳/۶۵	۱۸۶۰

### ۲-۲ روش آزمایش

برای انجام فرایند جذب سطحی به روش ناپیوسته ابتدا ۱۰ سی‌سی از محلول اولیه با غلظت مشخص درون بالن ریخته و سپس مقدار مشخصی از جاذب به آن اضافه شد. برای جلوگیری از تبخیر نمونه‌ها به دلیل پایین بودن نقطه جوش استالدهید، دهانه بالن به وسیله پارافیلیم کاملاً مسدود شد و نمونه درون حمام آب با دمای مشخص

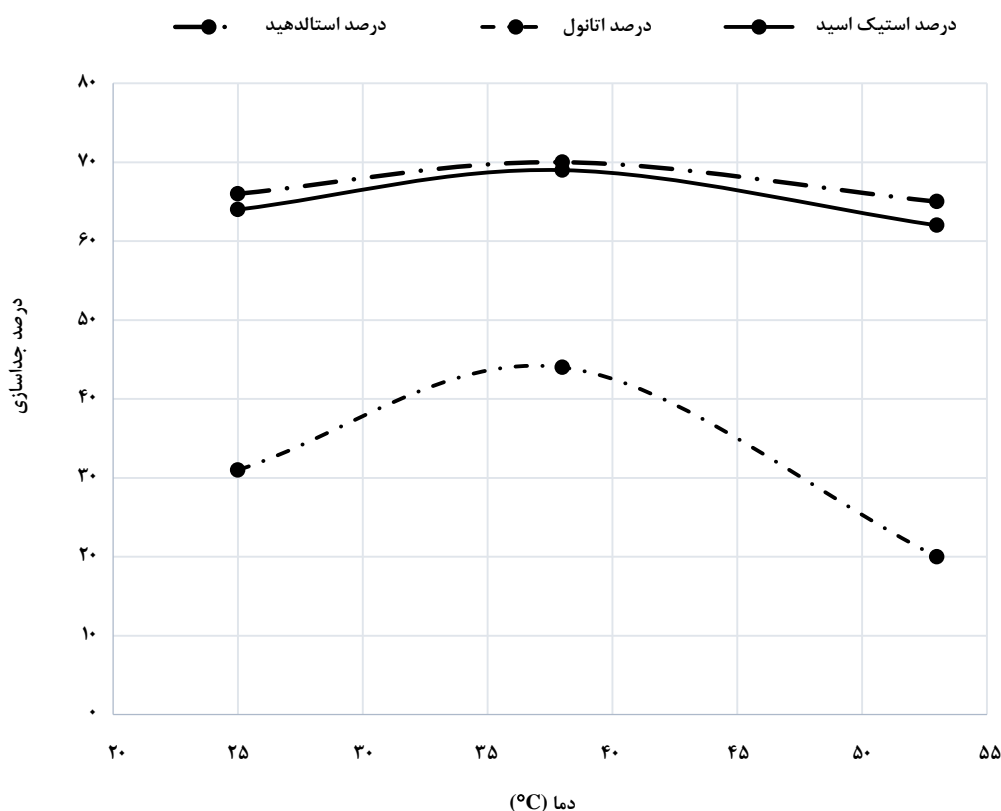
## ۱-۳ بررسی اثر مؤلفه‌ها بر میزان جداسازی

در این بخش مؤلفه‌های مختلف مؤثر بر فرایند جداسازی نظیر دما، زمان ماند و مقدار جاذب مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۱-۱ اثر دما

به منظور بررسی تأثیر دما بر روی فرایند جذب، سه آزمایش با شرایط یکسان زمان ماند ۶ ساعت و مقدار جاذب برابر ۱/۵ گرم به ازای ۱۰ سی سی محلول در دماهای ۲۵، ۳۸ و ۵۴°C انجام شد. نتایج حاصل از تجزیه GC بر روی نمونه‌ها در شکل (۱) ارائه شده است. با توجه به آن، با افزایش دما ابتدا درصد جداسازی تا دمای ۳۸°C افزایش و پس از این دما، کاهش یافته و مناسب‌ترین دما برای جذب مواد از آب، دمای ۳۸°C حاصل شده است. می‌توان

گفت با افزایش دما انرژی جنبشی مواد افزایش یافته، برخورد آن‌ها با سطح بیشتر شده، مولکول‌ها بیشتر درون منافذ قرار می‌گیرند؛ اما افزایش دما به بیش از ۳۸°C باعث می‌شود که برخی از مولکول‌ها که در سطح جاذب جذب شده‌اند، از روی سطح جدا شوند و در نتیجه مقدار جذب کاهش یابد. همچنین می‌توان افزایش جذب تا دمای ۳۸°C را به کاهش لایه مرزی انتقال جرم در اطراف جاذب نسبت داد؛ به طوری که مقاومت انتقال جرم کاهش می‌یابد که نتیجه تحرک مولکول‌ها است [۱۷-۱۵]. لازم به ذکر است برای جداسازی استیک اسید و استالدهید با وجود اینکه بالاترین مقادیر جذب مربوط به دمای ۳۸°C است؛ اما به دلیل اختلاف کم میزان جذب، دما تأثیر به‌سزایی در این بازه‌ها ندارد.



شکل ۱. اثر دما بر درصد جداسازی اتانول، استیک اسید و استالدهید از محلول آبی.

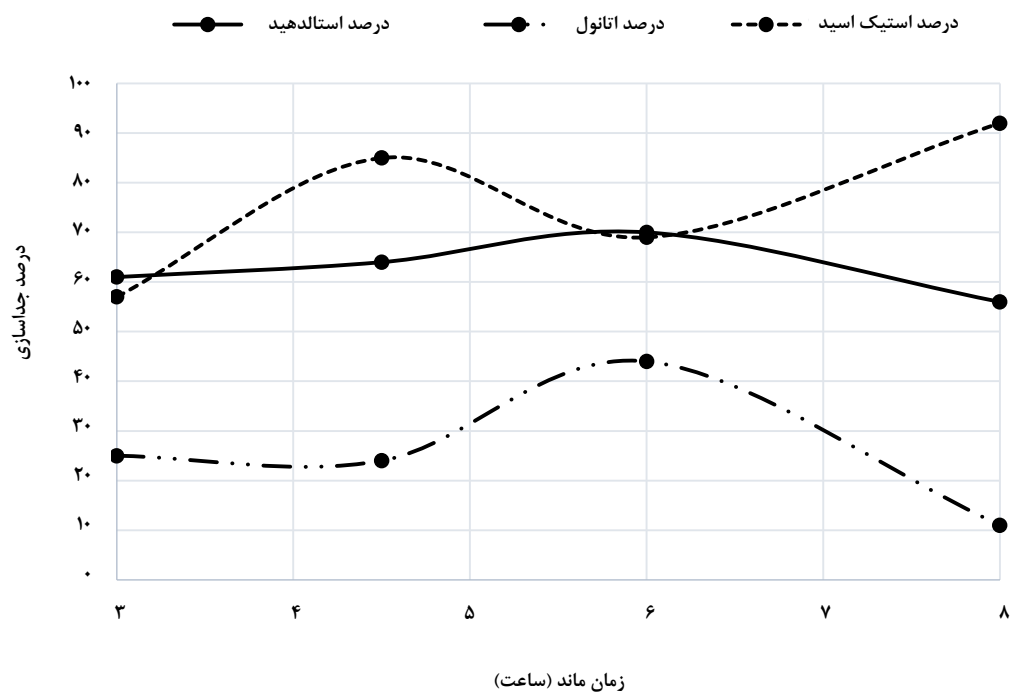
### ۳-۱-۲ اثر زمان ماند

به منظور مشاهده تأثیر زمان ماند بر روی جذب مواد، ۴ آزمایش در زمان‌های متفاوت ۳، ۴/۵، ۶ و ۸ ساعت در دمای  $38^{\circ}\text{C}$  و مقدار جاذب ۰/۱۵ گرم جاذب در سی‌سی انجام شد؛ با توجه به نتایج این آزمایش‌ها که در شکل (۲) نشان داده شده است، همانند تأثیر دما، برای دو ماده اتانول و استالدهید در یک نقطه بیشینه میزان جذب انجام می‌گیرد و پس از آن کاهش می‌یابد؛ بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، بالاترین مقدار جذب این دو ماده در زمان ماند ۶ ساعت مشاهده می‌شود و افزایش زمان ماند بعد از ۶ ساعت تأثیری منفی بر روی جذب دارد که به دلیل وجود منافذ و مکان‌های فعال در دسترس و سطح تماس بالا برای جزء جذب‌شونده در زمان‌های ابتدایی فرایند است که باعث افزایش سرعت جذب با افزایش گرادیان غلظت انتقال جرم می‌شود. با سپری شدن زمان، تعداد محل‌های فعال اشغال نشده کاهش می‌یابد و متعاقباً سرعت جذب کم می‌شود؛ همچنین بیشترین میزان جداسازی برای

استیک اسید در مدت زمان ماند ۸ ساعت است و با افزایش زمان ماند درصد جداسازی آن افزایش می‌یابد؛ بنابراین، هنگامی که میزان جذب اتانول و استالدهید کاهش یافته، استیک اسید جذب بالایی دارد و در محل‌های فعال جاذب قرار گرفته است [۱۹-۱۵].

### ۳-۱-۳ اثر مقدار جاذب

با هدف تعیین مقدار مناسب جاذب، ۲ آزمایش در دمای  $38^{\circ}\text{C}$  و زمان ماند ۶ ساعت انجام شد؛ در این آزمایش‌ها مقدار جاذب با توجه به مطالعات گذشته ۰/۱۵ و ۰/۱ گرم جاذب برای هر سی‌سی محلول تعیین شد. نتایج تجزیه GC این آزمایش‌ها در جدول (۲) ارائه شده است؛ نمونه با میزان دوز جاذب ۰/۱۵ گرم جاذب در هر سی‌سی، میزان جداسازی بالاتری را نشان می‌دهد و می‌توان نتیجه گرفت با افزایش مقدار جاذب میزان جداسازی آلاینده‌ها افزایش یافته است.



شکل ۲. اثر زمان ماند بر میزان جداسازی اتانول، استیک اسید و استالدهید از محلول آبی.

جدول ۲. بررسی تأثیر مقدار جاذب بر درصد جداسازی اتانول، استیک اسید و استالدهید از محلول آبی.

مقدار جاذب (gr ads/ml)	درصد جداسازی استالدهید	درصد جداسازی استیک اسید	درصد جداسازی اتانول
۰/۱	۷۱	۵۱	۲۳
۰/۱۵	۷۰	۶۹	۴۴

### ۲-۳ تحلیل نتایج طراحی آزمایش

نتایج آن در جدول (۴) ارائه شد. لازم به ذکر است درصد جداسازی هر یک از آلاینده‌ها به‌عنوان پاسخ در نظر گرفته شده است؛ پاسخ‌های به دست آمده به روش تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) بررسی و نتایج در جدول (۵) ارائه شد.

برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و همچنین لحاظ کردن برهمکنش عوامل مستقل بر روی پاسخ، آزمایش‌ها با نرم‌افزار Design Expert 11 طراحی و روش آماری پاسخ سطح (RSM) از نوع مکعب مرکزی<sup>۱</sup> استفاده شد. مؤلفه‌های انتخابی در ۳ سطح مختلف بررسی شد. با توجه به مطالعات گذشته و نتایج آزمایش‌های اولیه که در بالا به آن پرداخته شد؛ محدوده مؤلفه‌ها تعیین و در جدول (۳) ارائه شد؛ همچنین درصد جداسازی مواد به‌عنوان پاسخ در نظر گرفته شد و برای پیش‌بینی درصد جداسازی مواد، مدل کاهش یافته<sup>۲</sup> درجه ۲ استفاده شد. پس از تعیین محدوده دقیق‌تر مؤلفه‌ها، طراحی آزمایش بر اساس RSM انجام شد؛ درصد جداسازی هر یک از ترکیبات مشخص و

### جدول ۳. محدوده مؤلفه‌های انتخابی در نرم‌افزار طراحی آزمایش.

متغیر	محدوده تغییرات
دما (°C)	۲۵-۵۴
زمان ماند (hr)	۳-۶
مقدار جاذب (grads/cc)	۰/۰-۱۵/۳

### جدول ۴. شرایط انجام آزمایش‌ها و نتایج جداسازی.

آزمایش	دوز جاذب (grads/cc)	دما (°C)	زمان ماند (hr)	درصد جداسازی		
				استالدهید	استیک اسید	اتانول
۱	۰/۲۲۵	۳۸	۴/۵	۷۵	۸۴	۶
۲	۰/۲۲۵	۳۸	۴/۵	۸۵	۸۵	۶۵
۳	۰/۲۲۵	۳۸	۴/۵	۷۶	۸۰	۶۱
۴	۰/۱۵	۳۸	۴/۵	۷۲	۸۷	۳۸
۵	۰/۳۰	۳۸	۴/۵	۸۵	۹۷	۵۵
۶	۰/۲۲۵	۵۱	۴/۵	۷۷	۸۸	۵۶
۷	۰/۲۲۵	۲۵	۴/۵	۸۳	۹۵	۵۰
۸	۰/۲۲۵	۳۸	۳/۰	۷۷	۸۹	۵۴
۹	۰/۲۲۵	۳۸	۶/۰	۸۱	۹۰	۵۵
۱۰	۰/۱۸	۴۶	۵/۴	۶۸	۷۴	۴۸
۱۱	۰/۲۷	۴۶	۵/۴	۷۷	۸۳	۵۱
۱۲	۰/۱۸	۳۰	۵/۴	۷۹	۸۰	۴۸
۱۳	۰/۲۷	۳۰	۵/۴	۷۵	۸۱	۵۷
۱۴	۰/۱۸	۳۰	۳/۶	۷۲	۴۵	۴۵
۱۵	۰/۲۷	۳۰	۳/۶	۸۵	۹۰	۶۲
۱۶	۰/۱۸	۴۶	۳/۶	۶۸	۸۲	۴۸
۱۷	۰/۲۷	۴۶	۳/۶	۷۹	۸۲	۵۶

مناسبی استفاده شده و با نتایج آزمایشگاهی انطباق بالایی دارد  
 (R<sup>2</sup>=0.94) که در معادله (۱) این الگو برای درصد جداسازی اتانول  
 ارائه شده است که در آن، A: زمان ماند (hr)، B: مقدار جاذب  
 (gr ads/ml) و C: دمای واکنش (°C) است.

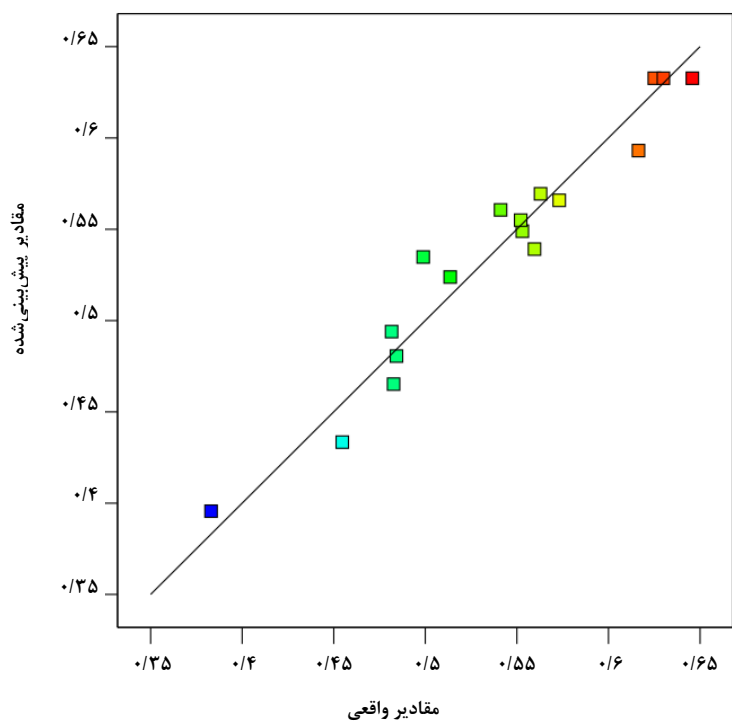
با توجه به نتایج ANOVA برای اتانول، مقدار P-value برای مؤلفه  
 مقدار جاذب، کمتر از ۰/۰۵ بوده و نشان می‌دهد که این مؤلفه تأثیر  
 معناداری بر روی نتایج و تابع هدف دارد. همان‌گونه که در شکل (۳)  
 نشان داده شده است، همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده  
 و همچنین پیروی آن‌ها از یک خط راست نشان داد که از الگوی

$$\% \text{ Ethanol} = + 0.6272 - (0.0035 \times A) + (0.0474 \times B) + (0.0013 \times C) - (0.0148 A \times B) - (0.0046 A \times C) - (0.0177 B \times C) - (0.0257 A^2) - (0.0538 B^2) - (0.0320 C^2) \quad (1)$$

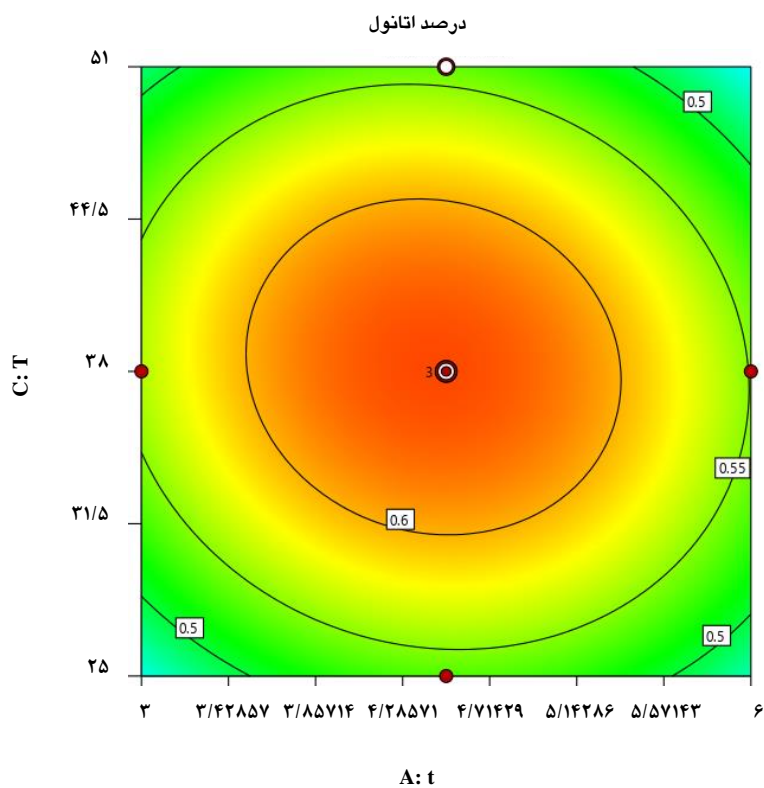
همچنین در شکل‌های (۴) تا (۶)، اثرات مؤلفه‌ها به‌صورت هم‌زمان بر روی درصد جداسازی اتانول ارائه شده است.

جدول ۵. تحلیل نتایج درصد جداسازی اتانول با استفاده از تجزیه واریانس.

منبع	مجموع مربعات	dF	مربع میانگین	شاخص F	شاخص P	درجه اهمیت
الگو	۰/۰۷۰۱	۹	۰/۰۰۷۹	۴۶/۱۲	۰/۰۰۱۶	اهمیت بالا
A-t	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۰/۲۵۶۳	۰/۶۲۸۲	
B-gr	۰/۰۳۰۷	۱	۰/۰۳۰۷	۴۸/۰۸	۰/۰۰۰۲	
C-T	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۲۵۳	۰/۸۵۶۳	
AB	۰/۰۰۱۷	۱	۰/۰۰۱۷	۲/۷۳	۰/۱۴۲۵	
AC	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۰/۲۶۴۱	۰/۶۲۳۱	
BC	۰/۰۰۲۵	۱	۰/۰۰۲۵	۳/۹۳	۰/۰۸۸۰	
A <sup>2</sup>	۰/۰۰۷۴	۱	۰/۰۰۷۴	۱۱/۶۴	۰/۰۱۱۳	
B <sup>2</sup>	۰/۰۳۱۵	۱	۰/۰۳۲۶	۵۱/۰۷	۰/۰۰۰۲	
C <sup>2</sup>	۰/۰۱۱۵	۱	۰/۰۱۰۸	۱۸/۰۴	۰/۰۰۳۸	
باقیمانده	۰/۰۰۴۵	۷	۰/۰۰۰۶			
تصحیح نهایی	۰/۰۷۶۰	۱۶				

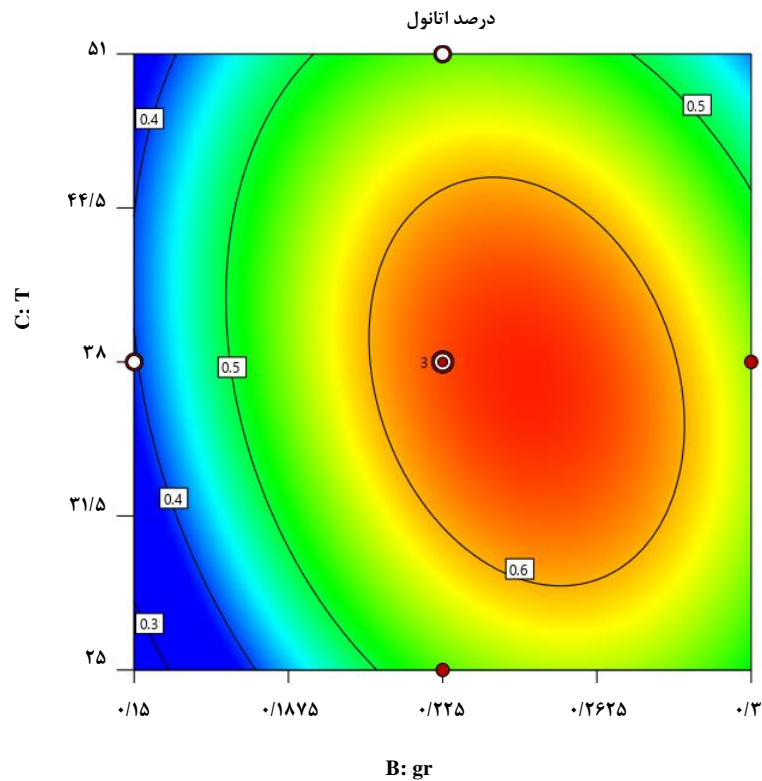


شکل ۳. همبستگی مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده درصد جداسازی اتانول از محلول آبی.

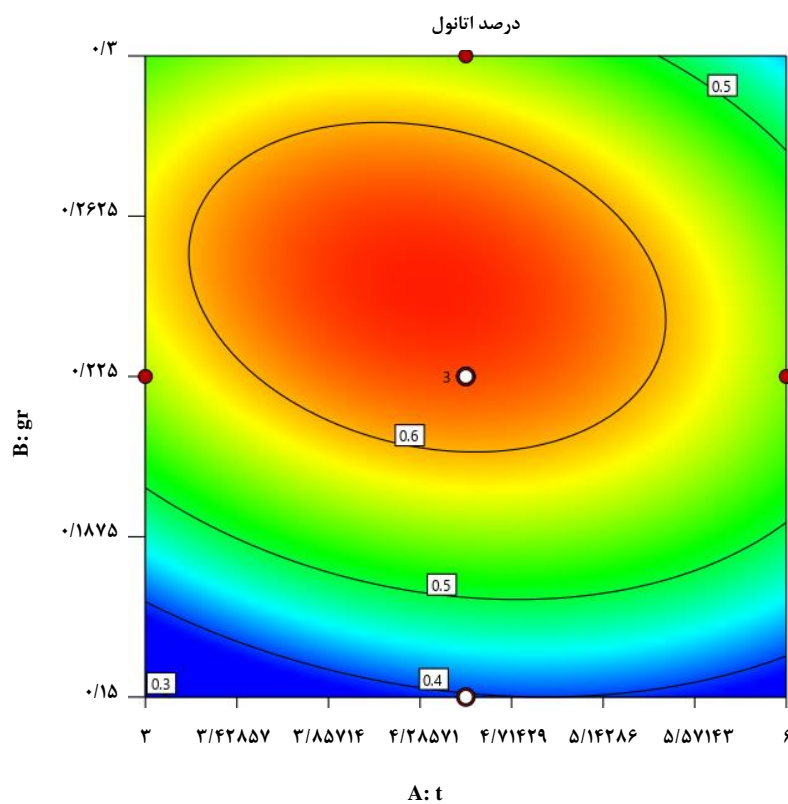


شکل ۴. اثر مؤلفه دما و زمان ماند بر روی درصد جداسازی اتانول از محلول آبی.





شکل ۵. اثر مؤلفه دما و میزان جاذب بر روی درصد جداسازی اتانول از محلول آبی.



شکل ۶. اثر مؤلفه زمان ماند و میزان جاذب بر جداسازی اتانول از محلول آبی.

جدول ۷. مقایسه داده‌های تجربی و نظری در شرایط بهینه.

درصد جداسازی اتانول	درصد جداسازی استیک اسید	درصد جداسازی استالدهید	موارد
۵۸/۰۰	۹۶/۵۹	۸۴/۵۳	پیش‌بینی نرم‌افزار
۵۸/۳۳	۹۲/۹۳	۸۱/۳۲	داده تجربی
۰/۵۶	۳/۷۸	۳/۷۹	درصد خطا

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، فرایند جذب سطحی مخلوط سه‌تایی اتانول، استیک اسید و استالدهید از آب بر روی کربن فعال به‌عنوان جاذب، بررسی و مؤلفه‌های مؤثر بر این فرایند و محدوده تغییرات آن‌ها مشخص شد و سپس بر اساس طراحی آزمایش RSM آزمایش‌هایی انجام شد که نتایج آن در زیر ارائه می‌شود:

۱. با افزایش دما، ابتدا درصد جداسازی تا دمای  $38^{\circ}\text{C}$  افزایش و پس از این دما، کاهش می‌یابد؛ با افزایش مقدار جاذب، درصد جداسازی افزایش یافته است. همچنین افزایش زمان ماند تا زمان ۶ ساعت، برای مواد اتانول و استالدهید باعث افزایش و پس از آن باعث کاهش میزان جذب شده است.

۲. در مورد استیک اسید با افزایش زمان ماند، میزان جذب نیز افزایش می‌یابد؛ مولکول‌های استیک اسید کمی بزرگتر از مولکول‌های اتانول هستند؛ بنابراین ظرفیت جذبشان پایین‌تر از مولکول‌های اتانول بود.

۳. بر اساس نتایج جدول ANOVA مؤلفه اصلی برای جذب سطحی، مقدار جاذب است که با افزایش آن تا مقدار بهینه  $0.28 \text{ g ads/cc}$  میزان جداسازی افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دما به جذب استیک اسید کمک می‌کند؛ اما برای اتانول و استالدهید این‌گونه نیست.

۴. با توجه به بهینه‌سازی مؤلفه‌ها، مقدار بهینه مؤلفه‌ها در دمای  $38^{\circ}\text{C}$ ، زمان ماند ۴ ساعت و مقدار جاذب برابر  $0.28 \text{ g}$  گرم به ازای هر سی‌سی محلول تعیین شد.

۵. مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی فرایند جذب با الگوی پیشنهادی RSM نشان داد که الگوی پیش‌بینی شده از دقت بالایی برخوردار است.

با توجه به شکل (۴)، با افزایش دما در یک زمان ثابت درصد جداسازی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و با افزایش زمان ماند در یک دمای ثابت درصد جداسازی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین در شکل (۵)، اثر مؤلفه دما و مقدار جاذب ارائه شده که با توجه به آن، با کاهش دما و افزایش مقدار جاذب تا  $0.26 \text{ g}$  گرم جاذب در هر سی‌سی، میزان جذب بیشتری به دست می‌آید. با توجه به اثر دو مؤلفه زمان ماند و میزان جاذب که در شکل (۶) ارائه شده است، با افزایش زمان ماند در میزان جاذب ثابت، درصد جداسازی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ بنابراین محدوده بهینه‌ای برای مؤلفه‌ها به‌منظور رسیدن به حداکثر درصد جداسازی وجود دارد.

#### ۳-۳ بهینه‌سازی فرایند جذب

پس از بررسی تأثیر مؤلفه‌های مختلف بر روی میزان جذب اتانول، استیک اسید و استالدهید لازم است که شرایط فرایند جذب بهینه‌سازی شود تا در زمان و هزینه صرفه‌جویی شود. همچنین الگوی پیشنهادی به‌وسیله طراحی آزمایش با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد تا صحت طراحی آزمایش مشخص شود؛ لذا در بهینه‌سازی فرایند جذب، مقادیر ۳ پاسخ (درصد جداسازی استیک اسید، استالدهید و اتانول) هم‌زمان با یکدیگر بیشینه شد تا فرایند جذب در حالت بهینه انجام شود که شرایط بهینه پیشنهادی روش RSM فرایند در جدول (۶) و مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی در جدول (۷) ارائه شده است. طبق این نتایج خطای الگوی پیشنهادی نرم‌افزار با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده کمتر از ۵ درصد است؛ در نتیجه می‌توان گفت این الگو از دقت خوبی برخوردار است و با استفاده از آن می‌توان مقادیر درصد جداسازی را برای فرایند جذب پیش‌بینی کرد.

جدول ۶. مقایسه داده‌های تجربی و نظری در شرایط بهینه.

میزان مطلوبیت <sup>۱</sup>	دما ( $^{\circ}\text{C}$ )	زمان ماند (hr)	مقدار جاذب ( $\text{gr ads/cc}$ )
۰/۹۰	۳۰	۴	۰/۲۸

1. Desirability

- [1] Imran, A., Mohd, A., Tabrez, A., "Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater", *Environmental Management*, 113: pp. 170-183, (2012).
- [2] Vallack, H. W., Bakker, D. J., Brandt, I., Broström-Lundén, E., Brouwer, A., Bull, K. R., Gough, C., Guardans, R., Holoubek, I., Jansson, B., Koch, R., Kuylenstierna, J., Lecloux, A., Mackay, D., McCutcheon, P., Mocarelli, P., Taalman, R. D. F., "Controlling persistent organic pollutants—what next?", *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 6: pp. 143-175, (1998).
- [3] Zhang, X., Gao, B., Creamer, A. E., Cao, C., "Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials", *Hazardous Materials*, 338: pp. 120-123, (2017).
- [4] Riga, A., Soutsas, K., Ntampeglitis, K., Karayannis, V., Papapolymerou, G., "Effect of system parameters and of inorganic salts on the decolorization and degradation of Procion H-exl dyes. Comparison of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, Fenton, UV/Fenton, TiO<sub>2</sub>/UV and TiO<sub>2</sub>/UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes", *Desalination*, 211: pp. 72-86, (2007).
- [5] Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., Sillanpää, M., "An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications", *Chemical Engineering Journal*, 219: pp. 499-511, (2013).
- [6] Wu, J., "Modeling adsorption of organic compounds on activated carbon: A multivariate approach", PhD Thesis. Kemi, pp. 21-22, (2004).
- [7] Duong, D. D., "Adsorption analysis: equilibria and kinetics", Imperial college press, London, Vol. 2, pp. 5-7, (1998).
- [8] Lillo-Rodenas, M. A., Cazorla-Amoros, D., Linares-Solano, A., "Behaviour of activated carbons with different pore size distributions and surface oxygen groups for benzene and toluene adsorption at low concentrations", *Carbon*, 43: pp. 1758-67, (2005).
- [9] Lillo-Rodenas, M. A., Linares-Solano, A., "Factors governing the adsorption of ethanol on spherical activated carbons", *Carbon*, 83 pp. 240-249, (2015).
- [10] Ganguly, S. K., Goswami, A. N., "Surface diffusion kinetics in the adsorption of acetic acid on activated carbon", *Separation science and technology*, 31.9: pp. 1267-1278, (1996).
- [11] Yehya, E. S., Bandosz, T. J., "A study of acetaldehyde adsorption on activated carbons", *Journal of Colloid and Interface Science*, 242: pp. 44-51, (2001).
- [12] Jones, R. A., Thibault, J., Tezel., F. H., "Simulation and validation of ethanol removal from water in an adsorption packed bed: Isotherm and mass transfer parameter determination in batch studies", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88: pp. 889-898, (2010).
- [13] Hajilari, M., Shariati, A., Mohammadreza, K., "Mass transfer determination of ethanol adsorption on activated carbon: kinetic adsorption modeling", *Heat and Mass Transfer*, 55: pp. 2165-2171, (2019).
- [14] Hajilari, M., Shariati, A., Mohammadreza, K., "Equilibrium and Dynamic Adsorption of Bioethanol on Activated Carbon in the Liquid Phase", *Chemical Engineering and Technology*, 42: pp. 343-354, (2019).
- [15] Yahya, S., El-Barghouthi, M. I., El-Sheikh, A. H., Walker, G. M., "Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon", *Dyes and pigments*, 77: pp. 16-23, (2008).
- [16] Jain, C. K., Singhal, D. C., Sharma, M. K., "Adsorption of zinc on bed sediment of River Hindon: adsorption models and kinetics", *Journal of hazardous materials*, 114: pp. 231-239, (2004).
- [17] Aksu, Z., Ayşe, T., Özlem, T., "A comparative adsorption/biosorption study of Acid Blue 161: Effect of temperature on equilibrium and kinetic parameters", *Chemical Engineering Journal*, 142: pp. 23-39, (2008).
- [18] Morad, M., Hilali, M., Bazzi, L., Chaouay A., "Adsorption of organic molecule (acetic acid) on activated carbon in aqueous", *Moroccan Journal of Chemistry*, 2: pp. 2-5, (2014).
- [19] Ebrahimi, A., Ehteshami, M., Dahrazma, B., "Isotherm and kinetic studies for the biosorption of cadmium from aqueous solution by Alhaji maurorum seed", *Process Safety and Environmental Protection*, 98: pp. 374-382, (2015).