

## بررسی کارایی جذب زیستی پوست انار در بهبود شاخص های آلودگی پساب صنعتی و بهینه سازی فرآیند با

### روش سطح پاسخ

نسرین هاشمی<sup>۱</sup>، مسعود هنرور<sup>۲\*</sup>، الهه قره خانی<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی علوم و صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲-دانشیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳-استادیار گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، ساوه، ایران

### چکیده

بحران آب و آلودگی محیط زیست ناشی از پساب های صنعتی باعث ایجاد توجه ویژه به تصفیه و استفاده مجدد از پساب های صنعتی شده است. در این پژوهش تأثیر پوست انار پودر شده به عنوان جاذب زیستی ارزان قیمت جهت بررسی شاخص های کدورت، غلظت جامدات معلق (TSS)، سختی (TDS)، اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) و اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD) استفاده شد. اندازه گیری شاخص های آلودگی در شرایط  $pH=8-4$ ، زمان ۱۰۰-۲۰ دقیقه، دما ۵۰-۲۰ درجه سانتیگراد و غلظت جاذب ۷-۱ گرم بر لیتر انجام شد. نتایج این پژوهش از طریق نرم افزار دیزاین اکسپرت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج بررسی نشان داد که اثر دما روی کل مواد جامد معلق بیشتر از سایر پارامترهای دیگر است؛ درحالیکه اکسیژن خواهی شیمیایی و  $pH$  دارای بیشترین اثر روی اکسیژن خواهی بیولوژیکی هستند. علاوه بر این، عملکرد روش سطح پاسخ برای داده های اکسیژن خواهی بیولوژیکی بهتر از داده های کل مواد جامد معلق بود. در کاهش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی و کل جامدات محلول از محلول،  $pH$  بیشترین اثرگذاری را داشت؛ به گونه ای که در  $pH$  معادل ۴ کمترین میزان اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی و کل جامدات محلول مشاهده شد (اکسیژن خواهی شیمیایی ۵۴۳، اکسیژن خواهی بیولوژیکی ۲/۲۴۵ و کل جامدات محلول ۱۴۸ میلی گرم در لیتر). آنچه از نتایج مشخص است، میزان اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی بیولوژیکی به صورت چشمگیری کاهش داشت اما میزان کل جامدات محلول نسبت به پساب خام افزایش داشت. همچنین با افزایش جاذب، افزایش اکسیژن خواهی شیمیایی و

اکسیژن خواهی بیولوژیکی مشاهده شد. تاثیر هر یک از پارامترها بر روی شاخص‌های آلودگی اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن خواهی شیمیایی، کل جامدات محلول، کل مواد جامد معلق، کدورت و مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ نشان می دهد که مدل، معنی دار بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی آب، جذب زیستی، تصفیه فاضلاب، پوست انار

آب همواره یکی از منابع راهبردی و حیاتی بوده که توجه زیادی در هر عصری به خود معطوف کرده است. همانطور که آمارها نشان می‌دهد حجم آب مصرفی سالیانه در کشور ایران ۳/۵ میلیارد متر مکعب است که ۵۰ تا ۷۰٪ آن به صورت پساب به محیط زیست باز می‌گردد. تخلیه پساب‌های غیر استاندارد صنعتی و استفاده از آنها در کشاورزی و یا تخلیه به آب‌های سطحی، مخاطرات بهداشتی و زیست محیطی زیادی را به دنبال خواهد داشت. به منظور جلوگیری از تهدید بهداشت عمومی، آلوده شدن خاک، ورود آلاینده‌ها به منابع آب و آلودگی محصولات کشاورزی، کنترل کیفی پساب و شناسایی ترکیبات آن به منظور انتخاب روش مناسب تصفیه، اهمیت بسیار زیادی دارد (۳). روش‌های مختلفی برای حذف آلاینده‌ها از پساب وجود دارد که در این میان فرآیند جذب سطحی به‌عنوان جایگزینی مناسب نسبت به سایر روش‌های گران قیمت تصفیه پساب شناخته شده است (۱). قانعیان و همکاران در مطالعه‌ای از پودر هسته انار در حذف کروم ۶ ظرفیتی از محیط آبی استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش جرم جاذب و زمان تماس منجر به افزایش راندمان حذف و افزایش pH و غلظت اولیه کروم منجر به کاهش راندمان حذف می‌گردد. مطابق با نتایج، بهترین راندمان حذف در pH اسیدی رخ داده و جذب در زمان ۱۲۰ دقیقه به تعادل رسید. در جرم جاذب 0.6 g/100 ml، pH=2، و غلظت 2mg/L کروم شش ظرفیتی، راندمان حذف برابر با ۹۹/۵٪ به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که پودر هسته انار، جاذب طبیعی مناسبی برای حذف کروم شش ظرفیتی می‌باشد (۲). هادی گل و همکاران (۱۳۹۸) از زغال فعال پوست انار به عنوان جاذب رنگ و فلزات دو و سه ظرفیتی در محیط‌های مایع استفاده کردند که نتایج نشان داد که بیشترین جذب فلزات در شرایط pH=3.5، در زمان ۲۰۰ دقیقه و غلظت ماده جاذب ۵/۲ گرم در لیتر روی می‌دهد. در شرایط بهینه، جذب فلزات سنگین سرب، جیوه و آرسنیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که جاذب، باعث کاهش ۸۰ درصدی این یون‌ها می‌شود. در مرحله بعد توانایی رنگبری و کاهش فلزات سنگین زغال فعال تولیدی در محیط روغن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد این جاذب توانایی خوبی برای رنگبری و پایداری اکسیداسیون روغن دارد. در رابطه با کاهش فلزات سنگین روغن نیز ماده جاذب تولیدشده از پوست انار عملکرد بهتری نسبت به خاک رنگبر تجاری نشان داد (۴). در تحقیقی پتانسیل استفاده از پوست انار را به‌عنوان یک محلول اقتصادی و سازگار با محیط زیست برای حذف کروم (VI) از محلول آبی توسط گیری<sup>۱</sup> (۲۰۲۱) بررسی شد و ویژگی‌های جذب آن مورد مطالعه قرار گرفت.

---

<sup>1</sup> Giri

مواد تهیه شده با استفاده از طیف‌سنجی قرمز تبدیل فوریه<sup>۱</sup> و میکروسکوپ الکترونی روبشی با آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس<sup>۲</sup> مشخص شد. راندمان حذف پوست انار و تأثیر پارامترهای تجربی بر جذب کروم (VI) از طریق آزمایش‌های پیوسته ارزیابی شد. راندمان حذف آلاینده‌ها توسط پوست انار به pH محلول کروم (VI) وابسته است و pH=2 بهینه است. علاوه بر این، مشاهده شد که حذف کروم (VI) با افزایش مقدار جاذب، دما، زمان تماس و سرعت هم‌زدن افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش pH، غلظت‌های اولیه و قدرت یونی کاهش می‌یابد. ظرفیت حذف عالی (۹۶٪) در pH=۶، مقدار ۳۰۰ میلی‌گرم جاذب و زمان تماس ۳۰ دقیقه مشاهده شد. سینتیک جذب کروم (VI) به خوبی با مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم مطابقت داشت و ظرفیت جذب محاسبه شده مدل مطابقت خوبی با مقادیر تجربی نشان داد. ایزوترم لانگمویر مکانیسم جذب کروم (VI) را بر روی پوست انار توصیف کرد که نشان‌دهنده جذب تک لایه کروم (VI) با ظرفیت جذب (qmax) معادل ۲۰/۸۷ میلی‌گرم بر گرم است. مطالعات ترمودینامیکی بیشتر جذب خود به خودی و گرماگیر بودن کروم (VI) روی سطح جاذب را نشان داد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که پوست انار می‌تواند به‌عنوان یک جاذب زیستی کارآمد، سازگار با محیط زیست و کم هزینه برای حذف کروم (VI) از پساب آلوده استفاده شود (۱۳). در مطالعه‌ای توسط بهاتی و همکاران (۲۰۱۵) از زیست توده‌های مختلف کشاورزی ذرت، باگاس نیشکر، چوب پنبه، آفتابگردان و پوسته بادام زمینی در حذف آلاینده‌های پساب کارخانجات نساجی استفاده شد. پارامترهای مختلف مانند مقدار جاذب، سرعت هم‌زدن و دما بهینه‌سازی شدند. برای حذف رنگ، زیست توده ذرت بهترین جاذب می‌باشد که راندمان حذف آن ۷۹٪ است. راندمان حذف جاذب‌ها در شرایط ۰/۳ گرم در ۵۰۰ میلی‌لیتر جاذب، سرعت هم‌زدن ۱۲۰ دور بر دقیقه و دمای ۳۰۰°K، حداکثر می‌باشد. همچنین مطالعات ترمودینامیکی تغییرات انرژی آزاد گیبس<sup>۳</sup>، آنتالپی<sup>۴</sup> و آنتروپی<sup>۵</sup> انجام شد که نتایج نشان داد فرآیند زیستی گرمازا است. در حذف رنگ پساب با استفاده از جاذب ذرات در مقدارهای ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۳ گرم، راندمان حذف در ۰/۳ گرم ۴۰/۴ درصد بیشترین مقدار است در حالی که در جاذب نیشکر میزان راندمان حذف ۱۴/۴ درصد گزارش شده است (۷).

<sup>1</sup> Fourier Transform Infrared Spectrometer(FT-IR)

<sup>2</sup> Scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectroscopy (SEM-EDX)

<sup>3</sup> Gibbs free energy changes( $\Delta G^\circ$ )

<sup>4</sup> standard enthalpy of reaction( $\Delta H^\circ$ )

<sup>5</sup> Entropy Change( $\Delta S^\circ$ )

شرفی نسب و همکاران (۲۰۲۱) حذف نیاز شیمیایی اکسیژن<sup>۱</sup> از فاضلاب کارخانه زیتون را با استفاده از باگاس نیشکر بررسی کردند. یک طرح فاکتوریل از آزمایش‌ها برای به دست آوردن شرایط بهینه برای هر پارامتری که بر فرآیند جذب تأثیر می‌گذارد، استفاده شد. تأثیر غلظت باگاس نیشکر، pH محلول، زمان واکنش، دما و سرعت هم زدن بر درصد حذف اکسیژن خواهی شیمیایی در نظر گرفته شد. راندمان حذف بالای ۵۵/۰۷٪ حذف نیاز شیمیایی اکسیژن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار جاذب ۱۰ گرم در لیتر، pH=۱۲، زمان تماس یک ساعت و سرعت هم زدن ۸۰ دور در دقیقه اتفاق افتاد (۲۳).

در مطالعه‌ای توسط ربانی و همکاران (۲۰۲۳) ترکیبی از زغال چوب (۶۰ درصد) و خاک آبرفتی (۴۰ درصد) مخلوط با آنزیم لاکاز برای کاهش بار پساب صنعت خمیر و کاغذ استفاده شد. مخلوط جاذب زغال چوب (۶۰٪) و خاک آبرفتی (۴۰٪) برای جذب اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی<sup>۲</sup>، نیاز شیمیایی اکسیژن، رنگ و لیگنین پساب مورد استفاده قرار گرفت. تأثیر pH، دما، غلظت جاذب و زمان جذب بر روی روش حذف مورد مطالعه قرار گرفت. تعادل جذب پس از ۵۰ دقیقه با سرعت هم زدن ۵۰۰ دور در دقیقه در pH معادل ۶/۰ در ۲۵ درجه به دست آمد. نتایج نشان داد که نیاز شیمیایی اکسیژن، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، رنگ و لیگنین به ترتیب ۸۶، ۸۰، ۶۰ و ۶۲ درصد حذف شدند. علاوه بر این، آنزیم لاکاز نیز کاهش این پارامترها را به‌عنوان نیاز شیمیایی اکسیژن ۹۵٪، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی ۹۳٪، رنگ ۸۳٪ و لیگنین ۷۵٪ افزایش داد. جذب تعادل دسته‌ای تجربی برای نیاز شیمیایی اکسیژن و اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی توسط مدل‌های فروندلیچ و لانگمویر و سینتیک‌ها نیز با شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم مورد بحث قرار گرفت. نتایج پارامترهای ترمودینامیک تغییرات انرژی آزاد گیبس، آنتالپی و آنتروپی نشان داد که فرآیند جذب، گرماگیر و غیر خود به خودی است. در نتیجه، استفاده از آنزیم لاکاز در ترکیب با یک مخلوط جاذب، نتایج امیدوارکننده‌ای را ارائه می‌دهد و قابل اجرا است (۲۰).

پوست انار دارای مزیت‌هایی مانند ارزان قیمت و در دسترس بودن، سازگار با محیط زیست، دارای پکتین و پلی‌ساکارید است و به دلیل دارا بودن بار منفی یون‌های مثبت را به خود جذب می‌کند. همچنین تأثیر مثبتی بر روی انواع آلاینده‌ها دارد. بنا به دلایل ذکر شده در این پژوهش از پوست انار به‌عنوان جاذب زیستی استفاده گردید.

<sup>1</sup> chemical oxygen demand (COD)

<sup>2</sup> Biochemical oxygen demand(BOD)

## ۲- مواد و روش ها

در این پژوهش برای کاهش شاخص های آلودگی فاضلاب از پوست انار به عنوان جاذب زیستی استفاده گردید. مواد مورد استفاده دارای خلوص تجزیه‌ای بوده که این مواد از شرکت مرک تهیه شده بود. لیست مواد مورد استفاده به شرح ذیل می‌باشد:

سدیم هیدروکسید، اسید سولفوریک غلیظ، سولفات جیوه، سولفات نقره، فتانترولین، سولفات آهن آمونیاکی، پتاسیم هیدروژن فتالات پوست انار جمع آوری شده از کارخانه کنسانتره گیری میوه جات، شستشو داده شد و پس از خشک شدن به وسیله دسیکاتور (رطوبت ۰.۰۱۹٪) با دستگاه آسیاب گلوله‌ای ماهواری شرکت امین آسیا فناور پارس مدل NARYA.MPM-2\*250 H آسیاب شد و در شرایط مختلف دما، زمان، pH و جاذب با غلظت ۷-۱ گرم بر لیتر به پساب اضافه گردید. با روش های استاندارد میزان شاخص های کدورت، غلظت جامدات معلق<sup>۱</sup>، سختی کل جامدات محلول، اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی بیولوژیکی قبل و بعد از افزودن جاذب اندازه گیری شد.

### ۲-۱- تهیه جاذب

پس از تهیه جاذب به صورت پودر، پودر جمع آوری شده چند بار با آب مقطر تا زمان بی رنگ شدن محلول شسته شد و سپس در دمای اتاق خشک گردید. سپس ۱۰۰ گرم از پوست انار خشک شده با ۵۰ میلی لیتر محلول سدیم هیدروکسید ۰/۵۰ مولار درون یک بشر در دمای اتاق به مدت یک روز همزده شد تا سطح آن فعال شود (۱۳).

### ۲-۲- اندازه گیری اکسیژن خواهی بیولوژیکی

اندازه گیری اکسیژن خواهی بیولوژیکی نمونه‌ها به واسطه استفاده از دستگاه اکسیژن خواهی بیولوژیکی متر WTW مدل (BSB-620-T) انجام گرفت. جهت اندازه گیری اکسیژن خواهی بیولوژیکی ابتدا نمونه به اندازه‌ای که قابل اندازه گیری توسط دستگاه باشد رقیق شد. ۱۶۴ میلی لیتر محلول رقیق شده در ظروف مخصوص آزمایش اکسیژن خواهی بیولوژیکی ریخته و سپس دو عدد کریستال سدیم هیدروکسید، در جای مخصوص بالای ظرف قرار داده شد. نشانگر، روی عدد صفر تنظیم گردید. دستگاه را به مدت ۵ دقیقه روشن کرده در حالی که اتصالات شل هستند. پس از سپری شدن زمان، اتصالات، محکم شده و درپوش دستگاه گذاشته شد. بعد از ۵ روز، اکسیژن خواهی بیولوژیکی یادداشت گردید (۲۱).

---

1 Total suspended solids (کل مواد جامد معلق)

## ۲-۳- اندازه گیری اکسیژن خواهی شیمیایی

جهت اندازه گیری اکسیژن خواهی شیمیایی، لوله‌های شیشه‌ای و سرپوش‌ها پیش از استفاده با اسید سولفوریک ۲۰٪ شستشو داده تا از آلودگی جلوگیری شود. جهت دقت بیشتر، از وسایل حجمی اندازه گیری با کلاس A استفاده گردید. نمونه در لوله شیشه‌ای ریخته و محلول هاضم به آن اضافه گردید. با دقت، محلول اسیدسولفوریک داخل لوله اضافه شد به طوری که لایه اسید در زیر محلول هاضم نمونه تشکیل گردید. لوله‌ها در محفظه هضم دستگاه Photometer مدل AL100 که از قبل تا ۱۵۰ درجه گرم شده است قرار داده و برای ۲ ساعت فرآیند هضم انجام شد. ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی لیتر (۱ تا ۲ قطره) شناساگر فروئین به محلول اضافه نموده و همراه با هم زدن به وسیله یک همزن مغناطیسی تیتراسیون با محلول سولفات آهن آمونیاکی استاندارد FAS ۰/۱ مولار انجام گردید. به روش مشابه یک محلول شاهد که دارای حجمی از آب مقطر به اندازه حجم نمونه است و تمام واکنشگرها به آن اضافه شده‌اند هضم و تیتراژ گردید (۲۱).

$$\text{COD as mg O}_2/\text{L} = \frac{(B-A) \times M \times 8000}{\text{mL Sample}} \quad (1)$$

A: حجم FAS مصرفی برای شاهد

B: حجم FAS مصرفی برای نمونه

M: مولاریته FAS

۸۰۰۰ = میلی اکی‌والان اکسیژن × ۱۰۰۰ میلی لیتر بر لیتر

## ۲-۴- اندازه گیری کل جامدات محلول

برای اندازه گیری کل مواد محلول به مدت یک ساعت، ظرف تبخیر (Plate) در آون در درجه حرارت  $180 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد خشک گردید و در دسیکاتور قرار داده شد. سپس وزن یادداشت شد. حجم نمونه برای تعیین کل جامدات محلول به صورتی انتخاب شد که بین ۱۰ تا ۲۰۰ میلی گرم باقی مانده خشک حاصل گردد. نمونه بعد از اختلاط کامل، صاف و سه مرتبه با آب مقطر شست و شو داده شد. سپس زمان داده تا هر بار شستن تکمیل گردد و در نهایت سه دقیقه بعد از تکمیل فیلتراسیون، مجدد زمان داده شد. محلول صاف شده وارد ظرف خشک شده و بر روی حمام بخار خشک قرار داده شد. سپس ظرف تبخیر (Plate) حداقل یک ساعت در آون در درجه حرارت  $180 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد قرار داده و در دسیکاتور گذاشته شد تا دما ثابت گردد و وزن یادداشت گردید (۲۱).

$$\text{TSS} \left( \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(A-B)}{V} * 1000 \quad (2)$$

A=وزن ظرف و مواد معلق

B=وزن ظرف

V=حجم نمونه (میلی لیتر)

## ۲-۵- اندازه گیری کل مواد جامد معلق<sup>۱</sup>

ابتدا کاغذ صافی در آون با دمای ۱۰۵-۱۰۳ درجه سانتی گراد خشک شد و برای رسیدن به وزن ثابت، داخل دسیکاتور گذاشته شد. نمونه را از کاغذ صافی عبور داده سپس کاغذ صافی حاوی مواد معلق به مدت یک ساعت در آون با دمای ۱۰۵-۱۰۳ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا خشک شود. پس از قرار دادن نمونه در دسیکاتور و ثابت شدن دما، وزن کاغذ صافی و رسوب یادداشت گردید (۲۱).

$$\text{TSS} \left( \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(A-B)}{V} * 1000 \quad (3)$$

A=وزن کاغذ صافی و مواد معلق

B=وزن کاغذ صافی

V=حجم نمونه (میلی لیتر)

## ۲-۶- اندازه گیری کدورت

جهت تعیین میزان کدورت پساب از دستگاه spectronic-۲۰ به همراه سل های استاندارد استفاده گردید. به این منظور، سل دستگاه کدورت سنج با آب مقطر شسته، ۱ یا ۲ بار نمونه مورد نظر که از قبل به شدت مخلوط شده بود تا خط نشانه درون سل ریخته شد و اطراف سل خشک گردید. همین کار ابتدا با آب مقطر درون یک سل تمیز برای کالیبره کردن دستگاه انجام شد. سل حاوی آب مقطر درون دستگاه قرار داده شد. سپس دستگاه روی طول موج ۴۵۰ نانومتر تنظیم گردید و میزان کدورت پس از گذشت ۱۵ ثانیه یادداشت شد. سپس همین کار بعد از کالیبره شدن دستگاه با نمونه انجام گردید (۲۱).

## ۲-۷- اندازه گیری pH

<sup>1</sup> Total suspended solids(TSS)



تنظیم دستگاه با استفاده از محلول های تامپون، معمولاً ۴، ۷ و ۹ صورت گرفت. سپس pH محلول مورد آزمایش با قرار دادن الکترودها درون محلول به صورت یک عدد که بر روی صفحه pH سنج مشخص شد، یادداشت گردید (۲۱).

## ۲-۸- تجزیه و تحلیل آماری

جهت طراحی آزمایش و بررسی نتایج، از نرم افزار دیزاین اکسپرت نسخه ۱۳ (DESIGN EXPERT ۱۳/۰ USA) استفاده گردید. روش سطح پاسخ (RSM) یک تکنیک ریاضی و آماری برای طراحی آزمایشها است. هدف از طراحی آزمایش بهینه سازی پاسخی است که تحت تأثیر چندین متغیر مستقل است و اینکه کدامیک از متغیرها اثر بیشتری بر پاسخ خواهند داشت. بسیاری از محققان از روش سطح پاسخ برای بهینه سازی پارامترهای فرآیند استفاده کرده اند و یک معادله رگرسیون را برای پیش بینی پاسخ توسعه داده اند که به صورت معادله زیر ارائه می گردد (۸):

$$S = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1, j \neq i}^k a_{ij} x_i x_j$$

که در آن S پاسخ،  $a_0$  میانگین پاسخها است.  $a_i$ ،  $a_{ii}$  و  $a_{ij}$  ضرایب پاسخ هستند. عبارت های دوم، سوم و چهارم به ترتیب بیانگر اثر خطی، مرتبه بالاتر و اثر متقابل می باشد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- طراحی آزمایش

در این پژوهش از طراحی مرکب مرکزی (CCD<sup>1</sup>)، برای مطالعه تاثیر متغیرهای pH، دما، زمان و غلظت مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱- سطوح و بازه متغیرها

پارامتر	نماد	واحد	سطوح پارامترهای مستقل				
			(-۲)	-۱	۰	+۱	(+۲)
pH	A	-	۴	۵	۶	۷	۸

<sup>1</sup> Central Composite Designs

زمان	B	min	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰	۱۰۰
دما	C	°C	۲۰	۲۷/۵	۳۵	۴۲/۵	۵۰
غلظت	D	g/lit	۱	۲/۵	۴	۵/۵	۷

طراحی آزمایش در نرم افزار دیزاین اکسپرت به روش سطح پاسخ به صورت کامل تصادفی و در سه تکرار انجام شد. جهت بررسی آنالیز واریانس از روش تحلیل آماری ANOVA طرح فاکتوریل استفاده شد.

### ۳-۲- بررسی آنالیز واریانس نتایج بدست آمده برای هر پاسخ

با توجه به جدول ۱ تا ۵ و مدل فاکتوریل، مقادیر p-value کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده معنی دار بودن مدل و سطح اثرگذاری پارامترهایی است که از این قانون تبعیت می کنند. اگر اثرهای بی اهمیت زیادی وجود داشته باشد که از این قاعده تبعیت نکند، حذف آن‌ها ممکن است مدل را بهبود بخشد. اما در این حالت نیاز به حذف این برهمکنش نمی باشد، زیرا مقدار و تعداد آن اندک است. همچنین با توجه به معنی دار بودن مدل می توان نتیجه گرفت که سیستم از کفایت کافی برخوردار است. همچنین مقادیر بالای F-value برای هر پارامتر و یا برهمکنش متغیرها، نشان از اثرگذاری بیشتر آن متغیر یا برهمکنش بر پاسخ می باشد.

از دیگر مواردی که می توان اثبات کرد که مدل دارای برازش مناسبی است، شاخص ضریب همبستگی است ( $R^2$ ) که هر چقدر به ۱ نزدیکتر باشند، مدل از برازش رگرسیونی مناسب تری برخوردار می باشد. از همین جهت ضریب همبستگی برای اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، کل جامدات محلول، کل مواد جامد معلق و کدورت به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸۵، ۰/۹۹۸۷، ۰/۹۹۷۸ و ۰/۹۸۹۰ بود که نشان از برازش بسیار مناسب نتایج و مدل های پیشنهادی است.

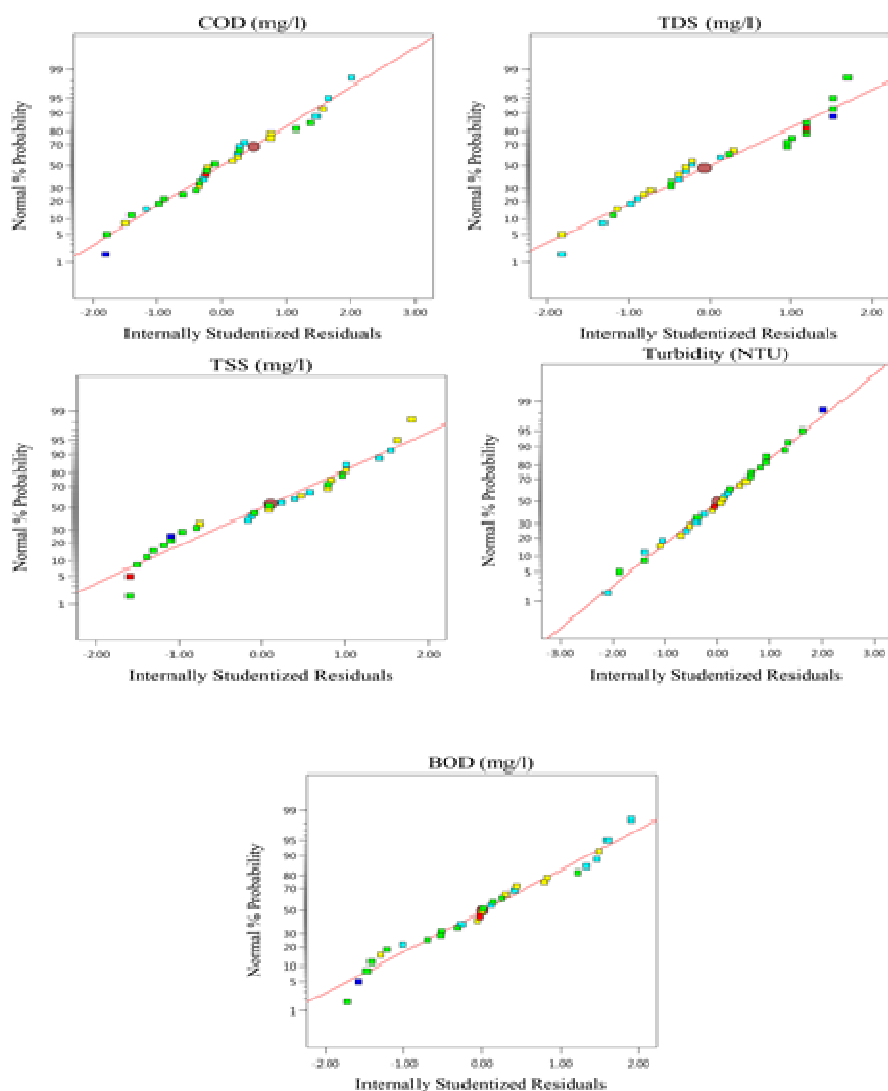
### جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس پاسخ ها

Source	اکسیژن خواهی شیمیایی		اکسیژن خواهی بیولوژیکی		کل جامدات محلول		کل مواد جامد معلق		کدورت	
	Mean squar	p-value	Mean squar	p-value	Mean squar	p-value	Mean squar	p-value	Mean squar	p-value
<b>Model</b>	5.239E+06	< 0.0001	1.104E+06	< 0.0001	1950.37	< 0.0001	18571.18	< 0.0001	94.32	< 0.0001
A-pH	2.047E+07	< 0.0001	4.315E+06	< 0.0001	21360.67	< 0.0001	1.470E+05	< 0.0001	0.4788	0.1034
B-Time	22570.67	0.1031	3915.79	0.1798	42.67	0.0006	42.67	0.3121	3.38	0.0001
C-Temperature	2.185E+05	< 0.0001	42117.88	0.0001	704.17	< 0.0001	1700.17	< 0.0001	1.72	0.0037
D-NPs Dosage	2.468E+05	< 0.0001	55261.45	< 0.0001	2562.67	< 0.0001	58806.00	< 0.0001	371.70	< 0.0001
<b>Residual</b>	7884.69		2056.48		2.32		39.00			

Lack of Fit	9103.52	0.1115	2402.49	0.0813	2.74	0.2540	48.35	0.1752	0.8605
Pure Error	3009.37		672.43		1.47		20.30		

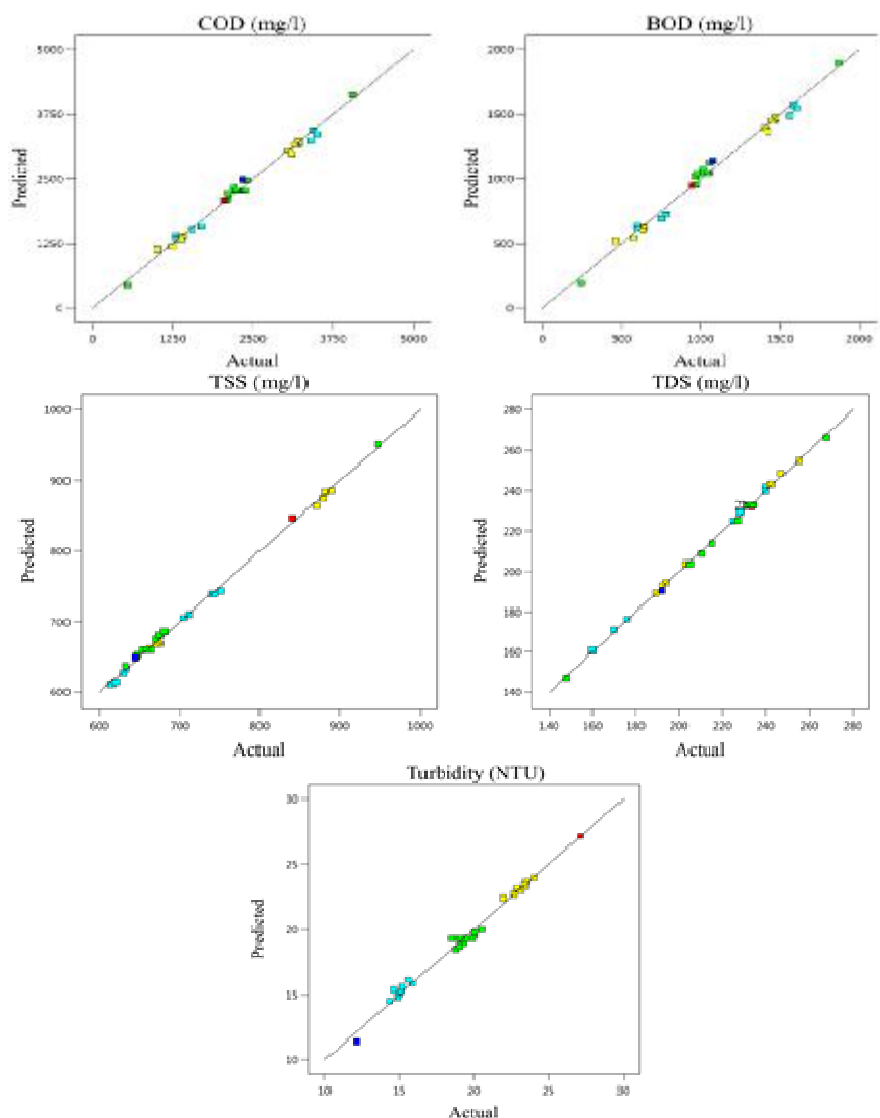
### ۳-۳- بررسی و آنالیز نتایج نمودارهای احتمال

نمودار احتمال نرمال یک تکنیک گرافیکی برای ارزیابی توزیع معمول داده ها می باشد (۸). داده ها در برابر توزیع نرمال تئوری به گونه ای رسم می شوند که نقاط باید یک خط مستقیم تقریبی را تشکیل دهند که نتایج پژوهش از این قاعده تبعیت می نمایند و تأیید می کنند که خطاها به طور نرمال با ثابت میانگین و واریانس صفر اما نامشخص توزیع شده اند (شکل ۱) (۱۹)، همچنین انحراف از این خط مستقیم نشان دهنده خروج از حالت نرمال است.

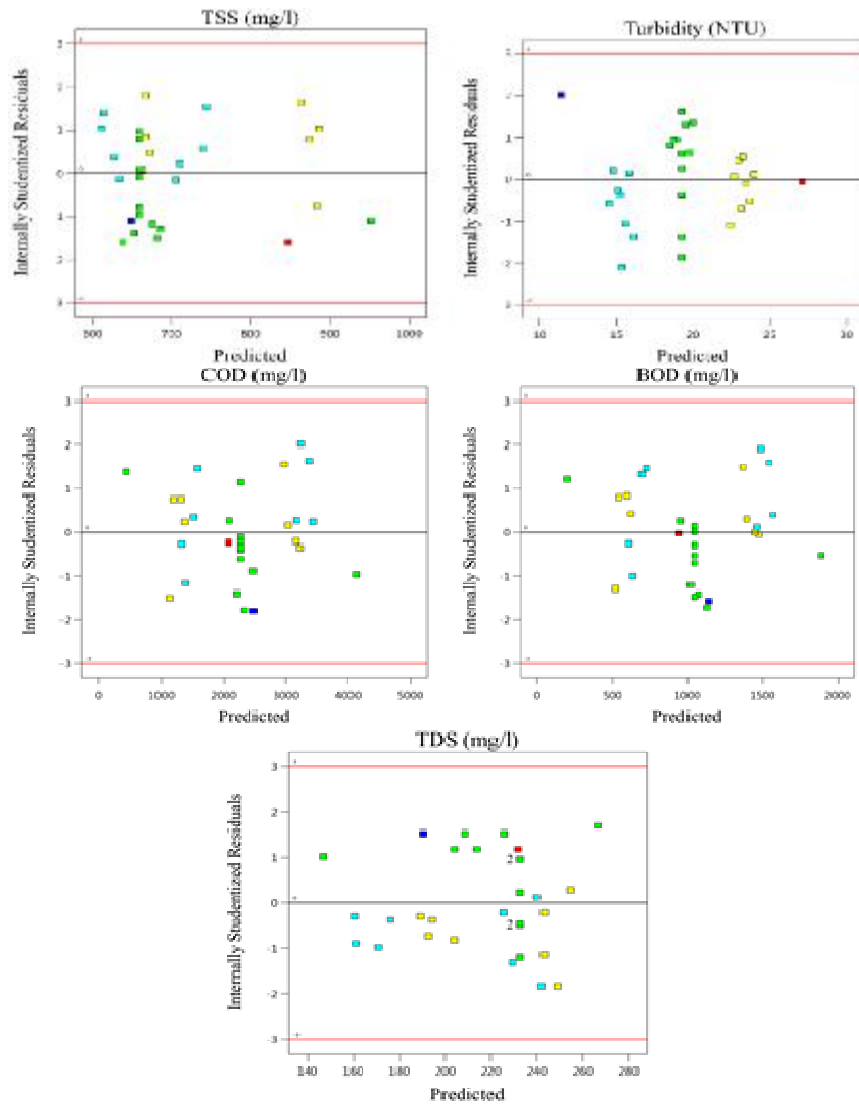


شکل ۱- نمودارهای احتمال نرمال از نتایج بررسی شده در پژوهش

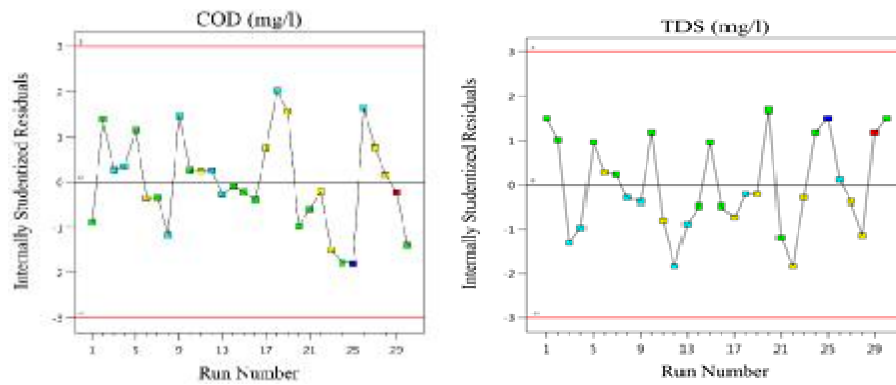
شکل ۲ نشان می‌دهد که نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با نتایج تجربی (واقعی) همبستگی مناسبی دارند؛ همچنین رفتار خطی نقاط نیز نشان‌دهنده تطابق کافی بین داده‌های واقعی و به دست آمده است (۲۲). همانطور که مشخص است، باقیمانده‌های حداقل مربعات ابزار مهمی برای بررسی کیفیت مدل‌ها هستند. در این شکل‌ها، توزیع تصادفی نقاط بالا و پایین محور X بین  $+3$  و  $-3$  بدون هیچ روند خاصی قابل مشاهده است. شکل (۳) نیز ثابت می‌کند که مقادیر باقیمانده نسبت به هر آزمایش از الگوی قابل پیش‌بینی تبعیت نمی‌کنند (۱۹).

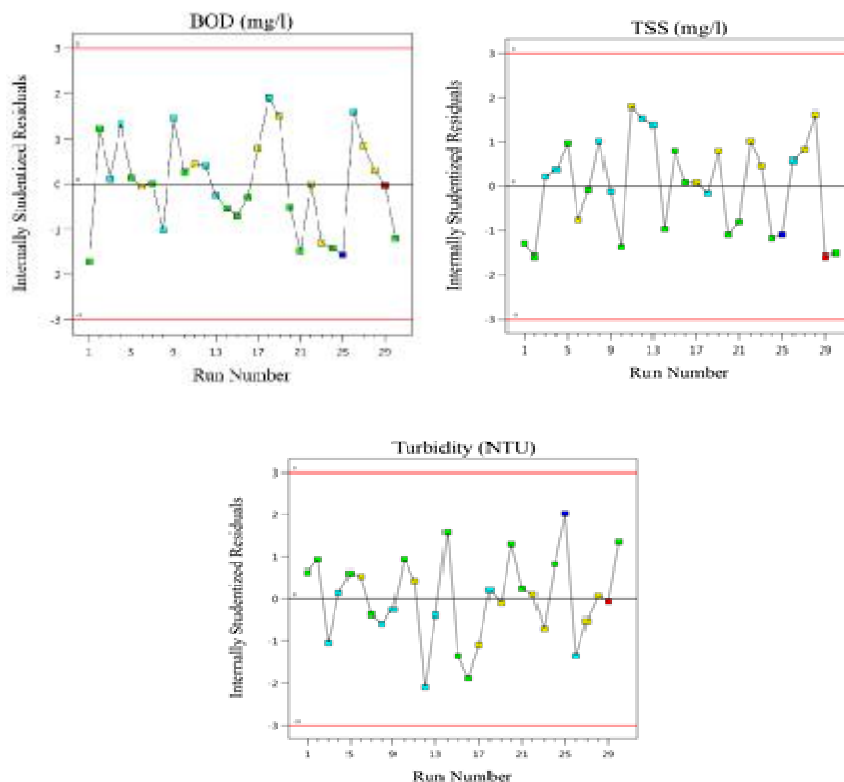


شکل ۲- نمودار مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر تجربی (واقعی)



شکل ۳- نمودار مقادیر باقیمانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده





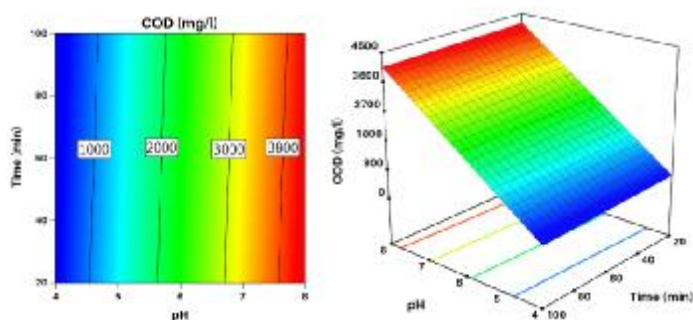
شکل ۴- نمودار باقیمانده ها نسبت به هر پاسخ

### ۳-۴- تاثیر متغیر ها بر میزان اکسیژن خواهی شیمیایی

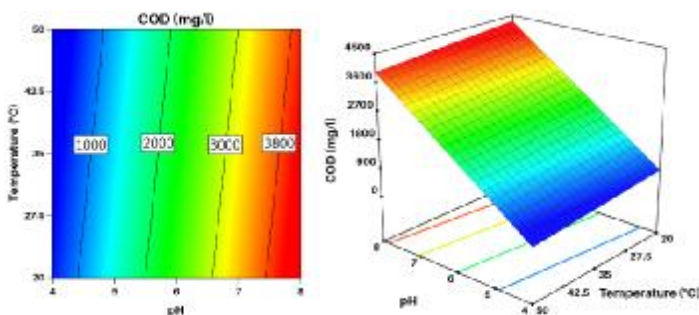
با توجه به اینکه کاهش میزان اکسیژن خواهی شیمیایی از اهداف این پروژه است، بنابراین در شکل های ۵، ۶ و ۷ بخش های آبی رنگ نمودارها مورد بحث و بررسی نتایج است. آنچه در این شکل ها بیش از هر چیزی جلب توجه می نماید، اثر بسیار زیاد افزایش pH بر افزایش درصد اکسیژن خواهی شیمیایی می باشد که اثر قابل ملاحظه ای داشت. در  $pH=4$ ، افزایش زمان (شکل ۵)، دما (شکل ۶) و پودر جاذب (شکل ۷)، سبب کاهش چشمگیر درصد اکسیژن خواهی شیمیایی شدند. همچنین در بر همکنش زمان با دما (شکل ۸) و مقدار پودر جاذب (شکل ۹)، در همه دما ها با افزایش دما و میزان پودر جاذب، درصد اکسیژن خواهی شیمیایی نیز کاهش یافت. در بر همکنش میان مقدار پودر جاذب و دما (شکل ۱۰)، با افزایش همزمان دما و میزان پودر جاذب، درصد اکسیژن خواهی شیمیایی نیز بسیار کاهش می باید، به گونه ای که در  $NPS=vg/lit$  و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد، کمترین میزان اکسیژن خواهی شیمیایی در دسترس است.

زیاد<sup>۱</sup> و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۹ با بررسی جاذب کربن فعال اصلاح شده با نانوذرات  $Fe_3O_4$  دریافتند که افزایش مقدار جاذب، به دلیل افزایش سطح تماس و وجود سایت‌های بیشتر، افزایش راندمان حذف اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی بیولوژیکی را در پی دارد (۱۷).

افزایش دما، تأثیر مثبتی بر فرآیند حذف داشت و سبب افزایش حذف اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی بیولوژیکی شد. این اثر را می‌توان به دلیل تحرک بیشتر آلاینده‌ها و در نتیجه تماس بیشتر با سطح جاذب دانست که در مطالعه انجام شده توسط قاسمی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ نیز گزارش شده است و جاذب مگنیت اکسید آهن/کربن فعال، افزایش راندمان حذف را با افزایش دما (تا محدوده مشخصی) نشان داد (۱۲).

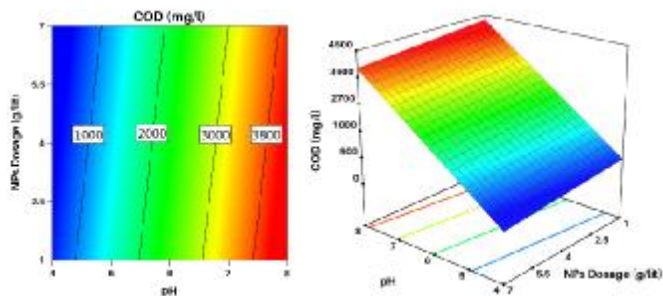


شکل ۵- بر همکنش زمان-pH بر حذف اکسیژن خواهی شیمیایی به صورت سه بعدی و دو بعدی

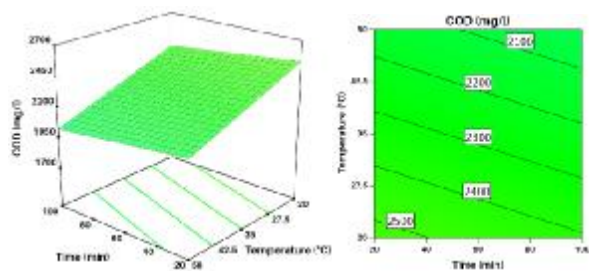


شکل ۶- بر همکنش دما-pH بر حذف اکسیژن خواهی شیمیایی به صورت سه بعدی و دو بعدی

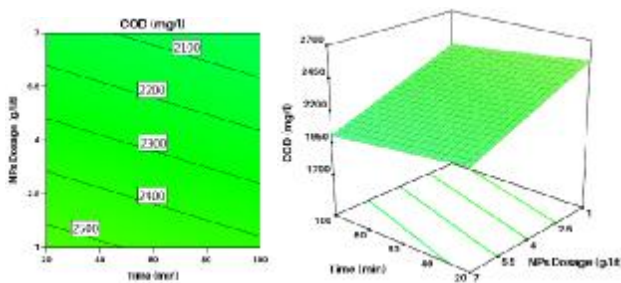
<sup>1</sup> Xiaoduo



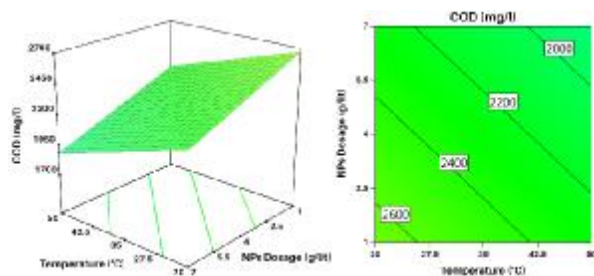
شکل ۷- بر همکنش میزان پودر جاذب-pH بر حذف اکسیژن خواهی شیمیایی به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۸- بر همکنش دما-زمان بر حذف اکسیژن خواهی شیمیایی به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۹- بر همکنش میزان پودر جاذب-زمان بر حذف اکسیژن خواهی شیمیایی به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۱۰- بر همکنش میزان پودر جاذب-دما بر حذف اکسیژن خواهی شیمیایی به صورت سه بعدی و دو بعدی



### ۳-۵- تاثیر متغیرها بر میزان اکسیژن خواهی بیولوژیکی

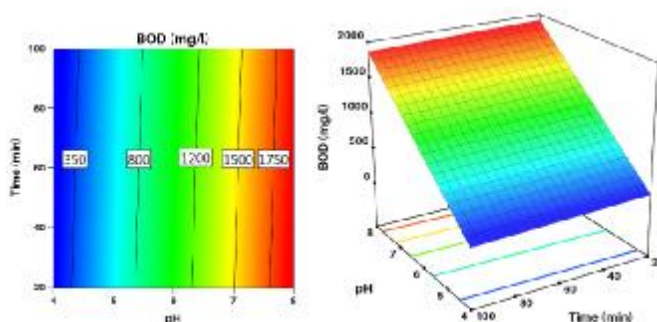
با توجه به اینکه هدف از این پژوهش کاهش میزان اکسیژن خواهی بیولوژیکی بود، بنابراین در شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ بخش های آبی رنگ نمودارها مورد تحلیل و بررسی نتایج قرار داده شد. آنچه در این شکل ها بیش از هر چیزی جلب توجه می نماید، اثر بسیار زیاد کاهش pH بر کاهش درصد اکسیژن خواهی بیولوژیکی می باشد. به گونه ای که در  $pH=4$ ، افزایش زمان (شکل ۱۱)، دما (شکل ۱۲) و پودر جاذب (شکل ۱۳)، سبب کاهش چشمگیر درصد اکسیژن خواهی بیولوژیکی شد (البته روند افزایش زمان بر کاهش درصد اکسیژن خواهی بیولوژیکی تقریباً یکسان می باشد). همچنین در بر همکنش زمان با دما (شکل ۱۴) و مقدار پودر جاذب (شکل ۱۵)، در همه دما ها با افزایش دما و میزان پودر جاذب، درصد اکسیژن خواهی بیولوژیکی نیز کاهش یافت؛ به صورتی که در بالاترین مقدار از هر متغیر، کمترین درصد اکسیژن خواهی بیولوژیکی مشهود بود. در بر همکنش میان مقدار پودر جاذب و دما (شکل ۱۶)، با افزایش همزمان دما و میزان پودر جاذب، درصد اکسیژن خواهی بیولوژیکی نیز به شدت کاهش یافت، به گونه ای که در  $NPS=vg/lit$  و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد، کمترین میزان اکسیژن خواهی بیولوژیکی مشاهده شد و بیانگر اثر مستقیم این دو پارامتر بر یکدیگر می باشد.

همانطور که مشاهده می شود بیشترین میزان حذف اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی در  $pH=4$  اتفاق افتاد و با افزایش بیشتر pH درصد جذب کاهش یافت. در حقیقت می توان این گونه تفسیر کرد که به دلیل قلیایی بودن محیط و سطح مثبت جاذب، جذب سطحی کم است و زمانی که pH پساب کاهش می یابد؛ جاذبه الکتروستاتیک بین جاذب و آلاینده های موجود در پساب بوجود می آید و حذف اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی بیولوژیکی بالاتری مشاهده می شود (۱۴). جذب با افزایش زمان افزایش یافت. در ابتدا جذب سریع بود و با گذشت زمان آهسته تر شد تا زمانی که جاذب، اشباع شود. از این لحظه به بعد با افزایش زمان تماس، تغییر قابل ملاحظه ای در ظرفیت جذب جاذب پدید نمی آید و در واقع شرایط تعادل برقرار می شود. برای توجیه این روند می توان این گونه اظهار نمود که در مراحل اولیه، تعداد زیادی از سایت های سطحی برای جذب در دسترس هستند اما با گذشت زمان، سایت های جذبی باقیمانده به دلیل دفعه بین مولکول های حل شونده و فاز جامد به سختی اشغال می شود. در این حالت جذب آلاینده از سایت های سطحی به سایت های درونی جاذب نفوذ می کند (۲۰). این نتایج در مطالعات بسیاری مانند استوار و همکاران (۲۰۱۹) مشاهده و مورد تایید قرار گرفته است و افزایش زمان تماس، به عنوان عاملی مثبت در جهت افزایش راندمان حذف با افزودن آلاینده و جاذب

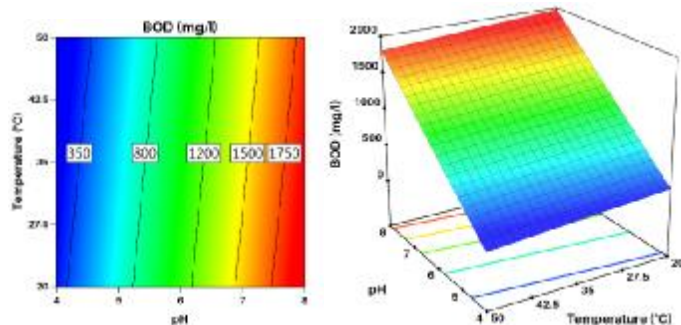
تعیین شده است (۱۸). داس و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر زمان بر جذب یون‌های سرب (II) توسط خاک آبرفتی را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که میزان حذف در ابتدا سریع بوده و سپس به تدریج با گذشت زمان کاهش یافت تا زمانی که به تعادل رسید و افزایش قابل توجهی در حذف مشاهده نشد.

افزایش مقدار جاذب، به دلیل افزایش مساحت سطح و در دسترس بودن سایت‌های جذبی، حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی را افزایش داده است. اما با افزایش بیشتر مقدار جاذب، جذب آلاینده تقریباً ثابت می‌ماند. برخلاف آن، ظرفیت جذب جاذب با افزایش مقدار جاذب، کاهش چشمگیری پیدا می‌کند که به این دلیل است که با افزایش مقدار جاذب تعدادی از سایت‌های جذبی در طول فرآیند جذب، غیر اشباع باقی می‌مانند (۱۰). شیائودو و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی جاذب کربن فعال اصلاح‌شده با نانوذرات  $Fe_3O_4$  دریافتند که افزایش مقدار جاذب، به دلیل افزایش سطح تماس و وجود سایت‌های بیشتر، افزایش راندمان حذف را در پی دارد (۱۷).

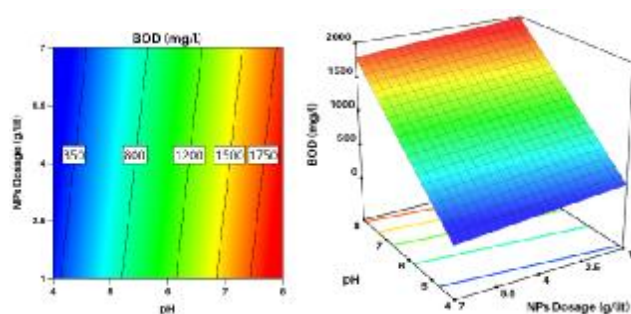
افزایش دما، تأثیر مثبتی بر فرآیند حذف داشت و سبب افزایش حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی شد. این اثر را می‌توان به دلیل تحرک بیشتر آلاینده‌ها و در نتیجه تماس بیشتر با سطح جاذب دانست که در مطالعه انجام شده توسط قاسمی و همکاران (۲۰۱۸) نیز به تأیید رسید و جاذب مگنیت اکسید آهن/کربن فعال، افزایش راندمان حذف با افزایش دما (تا محدوده مشخصی) را نشان داد (۱۲).



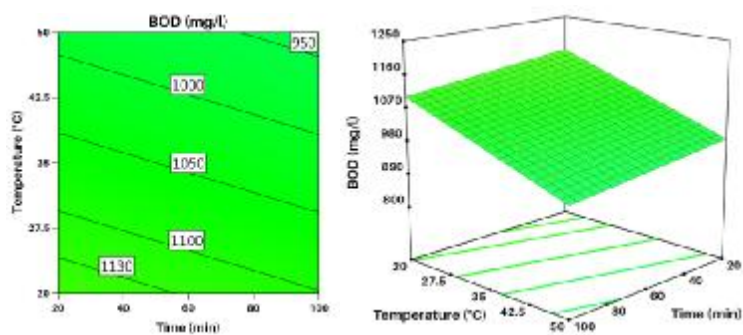
شکل ۱۱- بر همکنش زمان-pH بر حذف اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی به صورت سه بعدی و دو بعدی



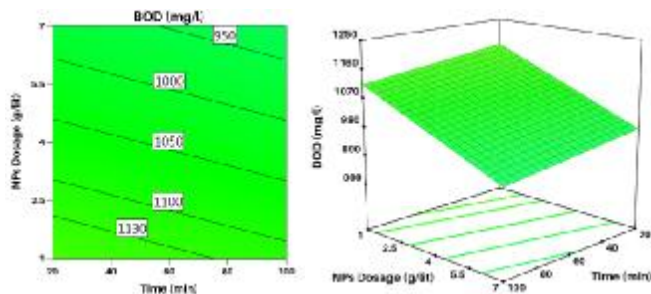
شکل ۱۲- بر همکنش دما-pH بر حذف اکسیژن خواهی بیولوژیکی به صورت سه بعدی و دو بعدی



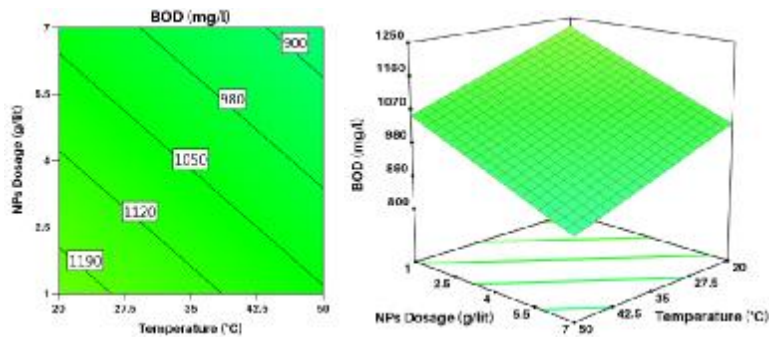
شکل ۱۳- بر همکنش میزان پودر جاذب-pH بر حذف اکسیژن خواهی بیولوژیکی به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۱۴- بر همکنش دما-زمان بر حذف اکسیژن خواهی بیولوژیکی به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۱۵- بر همکنش میزان پودر جاذب-زمان بر حذف اکسیژن خواهی بیولوژیکی به صورت سه بعدی و دو بعدی



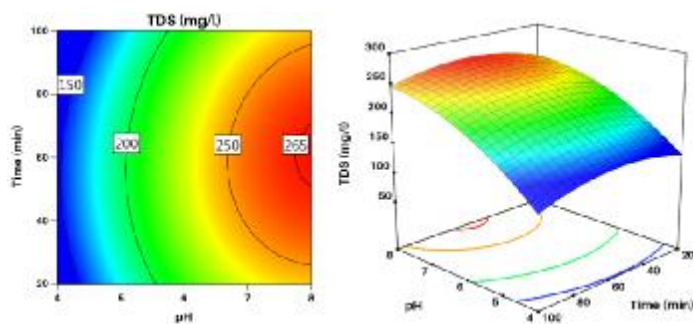
شکل ۱۶- بر همکنش میزان پودر جاذب-دما بر حذف اکسیژن خواهی بیولوژیکی به صورت سه بعدی و دو بعدی

### ۳-۶- تاثیر متغیرها بر میزان کل جامدات محلول

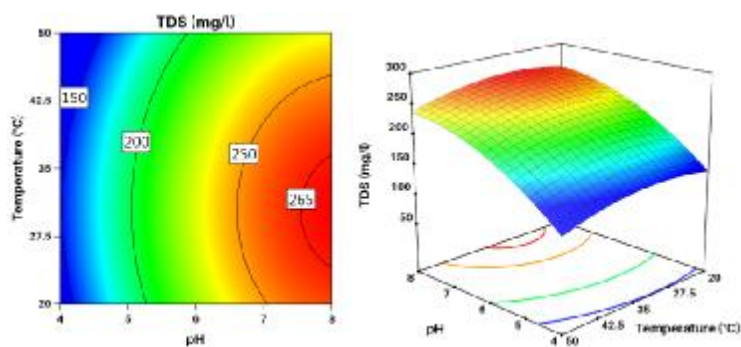
در این بخش نیز، هدف پژوهش، دسترسی به کمترین میزان کل جامدات محلول بود. بنابراین هر عاملی که سبب افزایش این پارامتر گردد از مطلوبیت کمتری برخوردار است. در بر همکنش های میان pH با زمان (شکل ۱۷) و دما (شکل ۱۸)، با کاهش pH و افزایش زمان و دما، درصد کل جامدات محلول به پایین ترین حد ممکن رسید تا آنجایی که میزان کل جامدات محلول در pH=4، زمان ۱۰۰ دقیقه و دمای ۵۰ درجه سانتی گراد، کمترین حد ممکن بود. کاهش pH در برهمکنش با مقدار پودر جاذب نیز تاثیر بسیار زیادی دارد، به گونه ای که با کاهش همزمان pH و مقدار پودر جاذب، روند نزولی کل جامدات محلول شدت گرفته و بیانگر اثر مستقیم این دو پارامتر بر یکدیگر است (شکل ۲۰). از بر همکنش های زمان با دما و میزان پودر جاذب مشخص است که عکس یکدیگر عمل می کنند، بدین صورت که افزایش زمان و دما باعث کاهش کل جامدات محلول، اما افزایش میزان پودر جاذب باعث افزایش کل جامدات محلول شد (شکل ۲۰). همچنین (شکل ۲۲)، بر همکنش و اثر مستقیم و قابل تأمل دما بر میزان پودر جاذب برای کاهش کل جامدات محلول را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در  $NPs=1$  (g/lit) با افزایش دما از ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد، کاهش مقدار کل جامدات محلول شدیداً نزولی می باشد که این مهم، بیانگر اثر بسیار زیاد دما بر کاهش کل جامدات محلول در حضور پودر جاذب است.

جات بلوچ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه ای تاثیر پوست موز، پرتقال و ساپوریلای بر پساب صنعتی را بررسی کردند که نتایج نشان داد راندمان حذف کل جامدات محلول با کاهش دزاج جاذب افزایش می یابد که این نتیجه منطبق با نتایج حاصل از این پژوهش می باشد (۶).

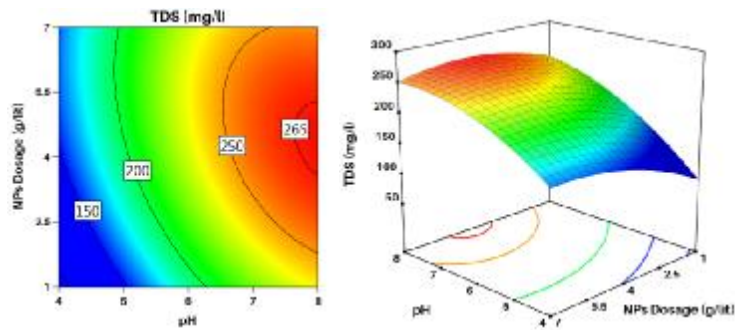
ابراهیم خلیل و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه ای تاثیر جاذب های پوست انار، هسته خرما و نانو ذره نقره بر پساب کارواش را بررسی کردند که نتایج نشان داد بعد از نانو ذره نقره، پوست انار باعث افزایش کل جامدات محلول شد (۱۶).



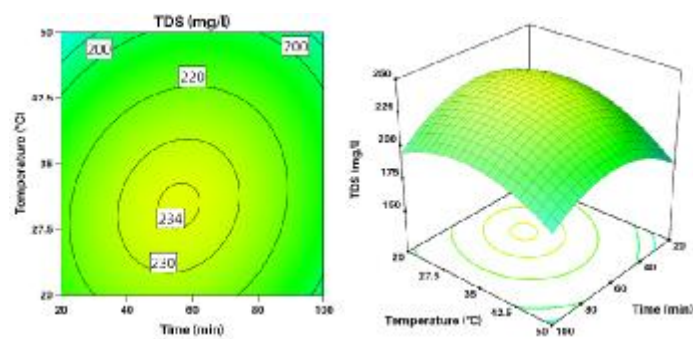
شکل ۱۷- بر همکنش زمان-pH بر حذف کل جامدات محلول به صورت سه بعدی و دو بعدی



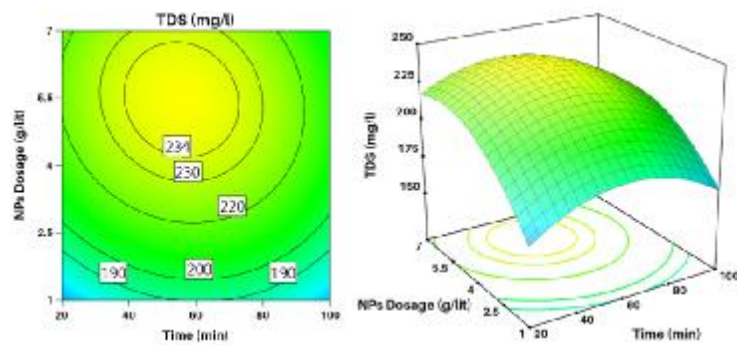
شکل ۱۸- بر همکنش دما-pH بر حذف کل جامدات محلول به صورت سه بعدی و دو بعدی



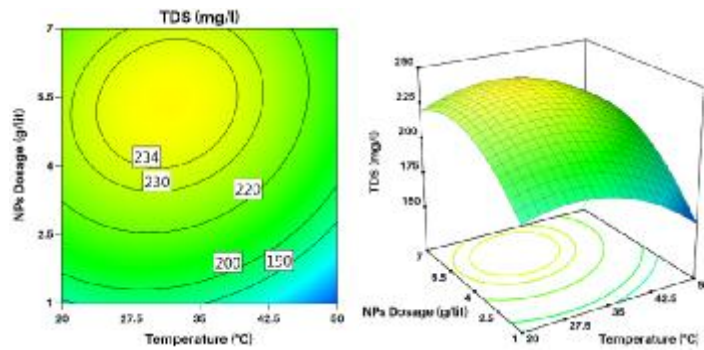
شکل ۱۹- بر همکنش میزان پودر جاذب-pH بر حذف کل جامدات محلول به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۲۰- بر همکنش دما-زمان بر حذف کل جامدات محلول به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۲۱- بر همکنش میزان پودر جاذب-زمان بر حذف کل جامدات محلول به صورت سه بعدی و دو بعدی

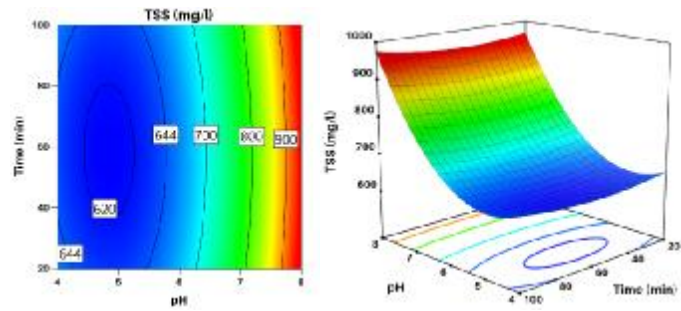


شکل ۲۲- بر همکنش میزان پودر جاذب-دما بر حذف کل جامدات محلول به صورت سه بعدی و دو بعدی

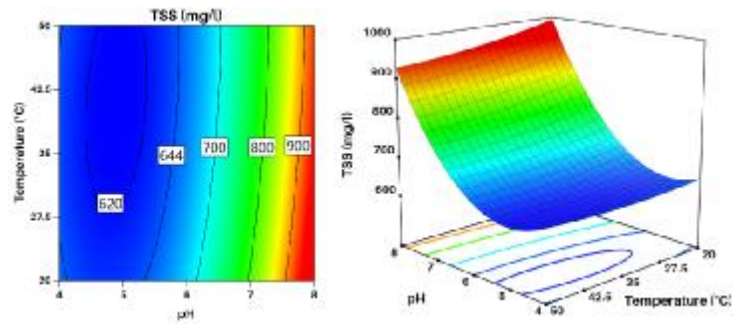
### ۳-۷- تاثیر متغیر ها بر میزان کل مواد جامد معلق

در بررسی کاهش میزان کل مواد جامد معلق، از اثر بر همکنش متغیر pH با زمان، دما و دوز پودر جاذب مشخص است بهترین بازه pH برای کاهش کل مواد جامد معلق، بین ۴-۵ می باشد که در pH=۵، افزایش زمان از ۱۰۰-۲۰ (دقیقه) موجب کاهش کل مواد جامد معلق شد (شکل ۲۳). همین روند در خصوص بر همکنش pH-دما نیز صادق است، با این تفاوت که در بازه دمایی ۳۵-۲۷/۵ (درجه سانتی گراد)، میزان کل مواد جامد معلق حداقل بود (شکل ۲۴). در بر همکنش pH با میزان پودر جاذب (شکل ۲۵)، با افزایش همزمان پارامترهای مذکور ابتدا روندی نزولی و سپس صعودی داشت که در pH=4-5.5 و  $NP_6=4$  (g/lit)، میزان کل مواد جامد معلق به حداقل می رسد. در بر همکنش زمان با دما و میزان پودر جاذب، در بازه دمایی ۶۰-۵۰ (درجه سانتی گراد)، افزایش دما و کاهش میزان پودر جاذب (شکل ۲۸) سبب کاهش کل مواد جامد معلق می گردد. اثر بر همکنش دما با پودر جاذب، بیانگر این است که کاهش پودر جاذب و افزایش دما، سبب کاهش کل مواد جامد معلق می شود (شکل ۲۸).

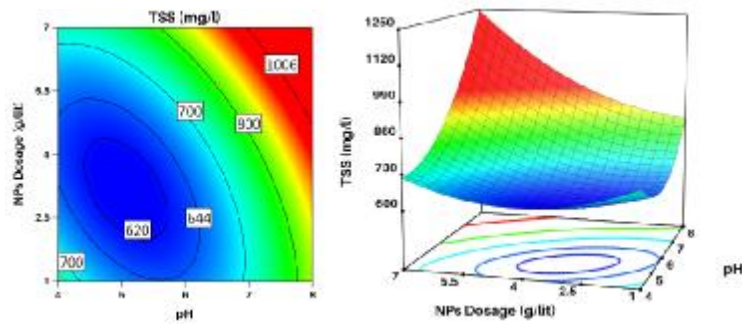
جات بلوچ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه ای تاثیر پوست موز، پرتقال و ساپوریللا بر پساب صنعتی را بررسی و گزارش کردند راند مان حذف کل مواد جامد معلق با کاهش دزاج جاذب افزایش می یابد که این نتیجه منطبق با نتایج حاصل از این پژوهش می باشد (۶). ابراهیم خلیل و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه ای تاثیر جاذب های پوست انار، هسته خرما و نانو ذره نقره بر پساب کارواش را بررسی کردند که نتایج نشان داد پس از نانو ذره نقره، در پوست انار با افزایش دزاج جاذب، افزایش کل مواد جامد معلق مشاهده شد (۱۶).



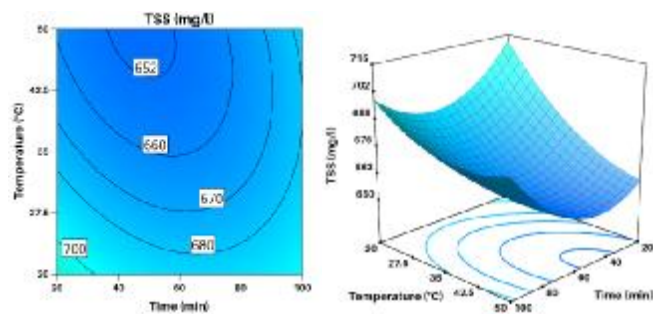
شکل ۲۳- بر همکنش زمان-pH بر حذف کل مواد جامد معلق به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۲۴- بر همکنش دما-pH بر حذف کل مواد جامد معلق به صورت سه بعدی و دو بعدی

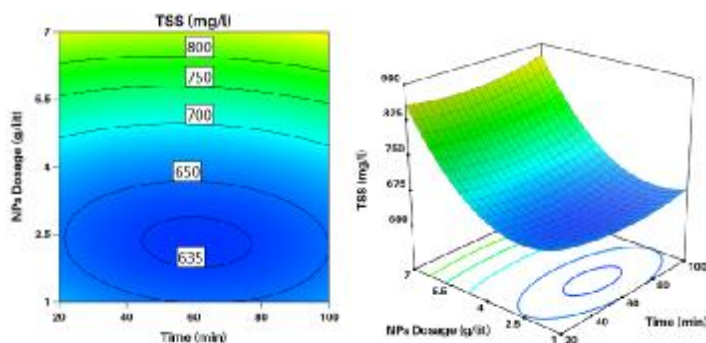


شکل ۲۵- بر همکنش میزان پودر جاذب-pH بر حذف کل مواد جامد معلق به صورت سه بعدی و دو بعدی

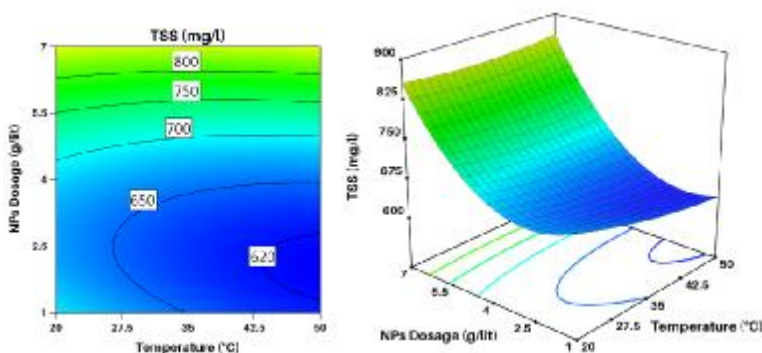




شکل ۲۶- بر همکنش دما-زمان بر حذف کل مواد جامد معلق به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۲۷- بر همکنش میزان پودر جاذب-زمان بر حذف کل مواد جامد معلق به صورت سه بعدی و دو بعدی

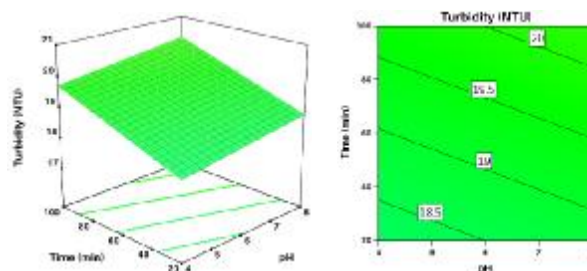


شکل ۲۸- بر همکنش میزان پودر جاذب-دما بر حذف کل مواد جامد معلق به صورت سه بعدی و دو بعدی

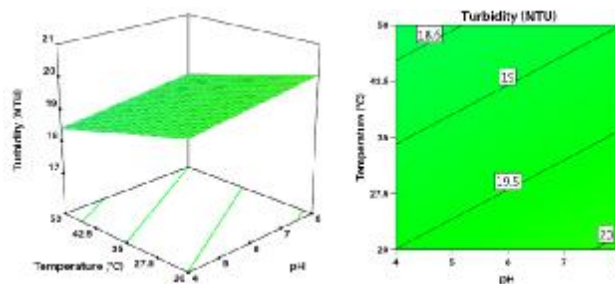
### ۳-۸- تاثیر متغیرها بر میزان کدورت

در این بخش نیز همانند چهار پاسخ گذشته، هدف پژوهش، دستیابی به کمترین مقدار کدورت می باشد. در همین خصوص بر همکنش متغیرها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت که مشخص گردید کاهش pH و زمان، بر کاهش کدورت اثر مستقیم دارد و روند آن به شدت نزولی است (شکل ۲۹). اثر pH و دما بر کاهش کدورت این گونه استنباط می شود که کاهش pH و افزایش دما سبب کاهش میزان کدورت می گردد (شکل ۳۰). در بر همکنش pH با پودر جاذب، کاهش پودر جاذب در تمامی pHها سبب کاهش کدورت می گردد و هنگامی که پودر جاذب و pH در حداقل میزان ممکن باشند، میزان کدورت نیز به حداقل می رسد (شکل ۳۱). اثر کاهش زمان و افزایش دما نیز سبب کاهش کدورت می شود و اثر کاهش زمان نسبت به دما بیشتر بود (شکل ۳۲). روند و تحلیل بر همکنش

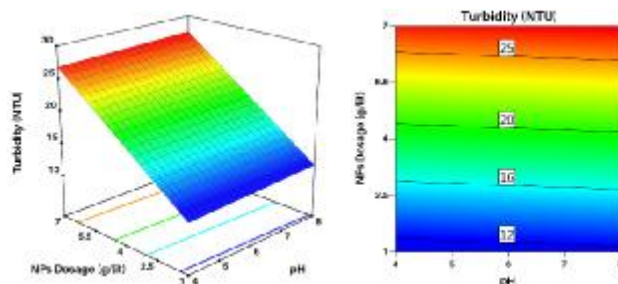
میان زمان و پودر جاذب، مانند شکل ۳۳ می باشد. در نهایت بر همکنش دما با میزان پودر جاذب بر کاهش کدورت نشان می دهد در حداقل مقدار ممکن از پودر جاذب، با افزایش دما از ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد، کدورت به حداقل می رسد (شکل ۳۴). ابراهیم خلیل و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه ای تاثیر جاذب های پوست انار، هسته خرما و نانو ذره نقره را بر پساب کارواش، بررسی و گزارش کردند. پس از نانو ذره نقره، پوست انار بیشترین میزان حذف را دارد که با کاهش کدورت همراه است. اما در این پژوهش به دلیل شرایط آزمایشگاهی و عدم فیلتراسیون کامل، افزایش کدورت مشاهده شد (۱۶).



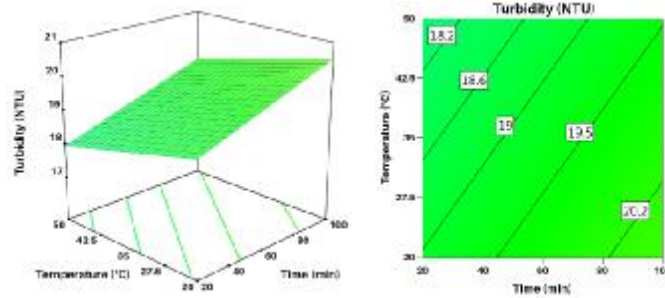
شکل ۲۹- بر همکنش زمان-pH بر حذف کدورت به صورت سه بعدی و دو بعدی



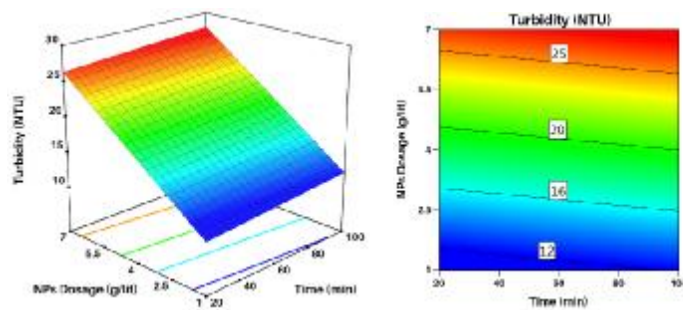
شکل ۳۰- بر همکنش دما-pH بر حذف کدورت به صورت سه بعدی و دو بعدی



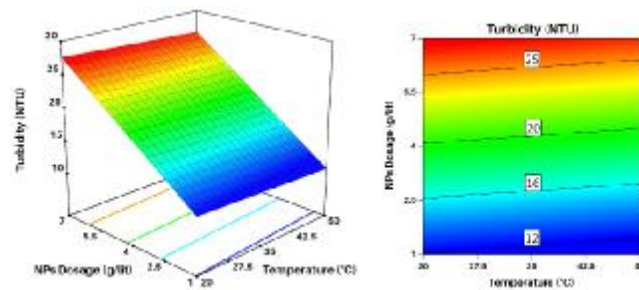
شکل ۳۱- بر همکنش میزان پودر جاذب-pH بر حذف کدورت به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۳۲- بر همکنش دما-زمان بر حذف کدورت به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۳۳- بر همکنش میزان پودر جاذب-زمان بر حذف کدورت به صورت سه بعدی و دو بعدی



شکل ۳۴- بر همکنش میزان پودر جاذب-دما بر حذف کدورت به صورت سه بعدی و دو بعدی

### ۹-۳- بهینه یابی نتایج (بهینه سازی)

هدف این بخش یافتن مقادیر بهینه از متغیرهای pH، زمان، دما و مقدار پودر جاذب برای دستیابی به کمترین مقدار اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، کل جامدات محلول، کل مواد جامد معلق و کدورت می باشد. بنابراین همین اهداف با توجه به بازه اثرگذاری هر متغیر که در بخش تحلیل های نمودارهای سه بعدی و دو بعدی مشخص گردید برای نرم افزار تعریف شد (جدول ۳).

جدول ۳- بازه ها و اهمیت هر پارامتر جهت بهینه یابی

متغیرها	هدف	حد پایین	حد بالا	اهمیت
pH	minimize	۴	۷	۳
Time	is in range	۴۰	۸۰	۳
Temperature	minimize	۲۷/۵	۴۲/۵	۳
NPs Dosage	is in range	۲/۵	۵/۵	۳

پاسخها	هدف	حد پایین	حد بالا	اهمیت
اکسیژن خواهی شیمیایی	minimize	۵۴۳	۴۰۵۰	۵
اکسیژن خواهی بیولوژیکی	minimize	۲۴۵/۲	۱۸۷۱	۵
کل جامدات محلول	minimize	۱۴۸	۲۶۸	۵
کل مواد جامد معلق	minimize	۶۱۵	۹۴۷	۵
کدورت	minimize	۱۲/۱۲	۲۷/۱	۵

مطابق با اهدافی که برای هر فاکتور و پاسخ در نظر گرفته می شود، نرم افزار یک نمودار گرافیکی از آن ها و یک جدول بهینه ارائه می دهد (جدول ۵). ضریب مطلوبیت برای رسیدن به اهداف با توجه به مقادیر بهینه هر متغیر ۸۸/۵ درصد بود که برای دستیابی به اهداف مناسب است. طبق شرایط بهینه در جدول ۴ که توسط نرم افزار تعریف شده است، آزمایش ها تکرار شدند که نتایج تجربی

آزمایش‌ها برای اکسیژن خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، کل جامدات محلول، کل مواد جامد معلق و کدورت به ترتیب برابر با ۲/۴۲٪، ۰/۸۵٪، ۳/۷۲٪، ۱/۵۵٪ و ۰/۵٪ بود (جدول ۵). این امر بیانگر تشخیص صحیح نرم‌افزار جهت بهینه‌یابی نتایج می‌باشد.

جدول ۵- نتایج بهینه‌یابی توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و نتایج تجربی حاصل از بهینه‌یابی

شماره	pH	زمان	دما	مقدار پودر جاذب	اکسیژن خواهی		کل مواد جامد		کدورت	مطلوبیت
					شیمیایی	بیولوژیکی	محلول	معلق		
۱	۴	۵۴/۸	۲۷/۵	۳/۷	۵۵۵/۵۱	۲۵۰/۱۱	۱۴۵/۲	۶۴۴/۸۱	۱۸/۳۸	۰/۸۸۶
۱	۴	۵۴/۸	۲۷/۵	۳/۷	۵۴۲	۲۴۸	۱۴۰	۶۳۵	۱۷/۵	

#### ۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر پوست انار به‌عنوان یک جاذب ارزان با دسترسی بسیار آسان در کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی، کل جامدات محلول، کل مواد جامد معلق و کدورت از پساب صنعتی انجام شد. نتایج نشان داد پوست انار به‌عنوان یک زیست توده طبیعی با فرآیند جذب کارآمد، کم هزینه و سازگار با محیط زیست است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش pH موجب کاهش اکسیژن خواهی بیولوژیکی شد و افزایش زمان، دما و مقدار پودر جاذب موجب کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی بیولوژیکی و افزایش pH موجب افزایش اکسیژن خواهی شیمیایی شد. همچنین کاهش pH، افزایش زمان و دما موجب کاهش کل جامدات محلول و با کاهش pH و زمان و افزایش دما موجب کاهش کدورت گردید.

با افزودن جاذب به پساب، میزان کل جامدات محلول و کل مواد جامد معلق نیز افزایش یافت که به علت ذرات نامحلول جاذب در پساب می‌باشد. همچنین افزودن جاذب به محلول سبب افزایش کدورت شد. ضمناً افزایش جاذب به میزان ۷ (g/lit)، موجب کاهش

اکسیژن خواهی شیمیایی و اکسیژن خواهی بیولوژیکی شد.

#### ۵- سپاسگزاری

مقاله حاضر نتایج طرح تحقیقاتی بوده است که در دانشگاه علوم و تحقیقات تهران در سال ۱۴۰۲ به تصویب رسیده است. لذا نویسندگان این مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه در این طرح، کمال تشکر را دارند.

## ۶- منابع

۱. توکلی محدثه. ارزیابی جاذب‌های طبیعی در تصفیه آب و فاضلاب. پژوهش و فناوری محیط زیست. ۱۳۹۹؛ ۵(۷): ۵۴-۳۹. doi:

<https://doi.org/10.29252/.5.7.39>

۲. قانعان محمد تقی، جمشیدی بهزاد، امرالهی محسن، دهواری محبوبه، تقوی محمود. کاربرد فرآیند جذب زیستی توسط پودر هسته

انار در حذف کروم شش ظرفیتی از محیط آبی. مجله علوم پزشکی دانشگاه سمنان (کومش). ۱۳۹۲؛ ۱۵(۲): ۲۱۱-۲۰۶.

۳. معزی پور بیتا، احمدی محمد، معزی پور آیدا، عبدالخانی علی. بررسی کیفیت و میزان آلودگی حاصل از فرایند بازیافت ضایعات ام

دی اف. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۱۳۹۸؛ ۲۱(۹): ۱۷۰-۱۶۱.

۴. نرگس هادی گل، فهیم دانش مریم، حسینی سپیده. بررسی پتانسیل زغال فعال تولیدی از پوست انار به عنوان جاذب رنگ و فلزات

دو و سه ظرفیتی در محیط های مایع. نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران. ۱۳۹۸؛ ۱۵(۲): ۳۸۰-۳۶۳. doi:

<https://doi.org/10.22067/ifstrj.v15i4.68925>

5. Abbasi Z, Alikarami M, Homafar A. Adsorption study on pomegranate peel: removal of Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution and Co<sup>2+</sup>. *Inorganic Chemistry*. 2009; 3:3-6

۶. Baloch M, Mangi S. Treatment of Synthetic Greywater by Using Banana, Orange and Sapodilla Peels as a Low Cost Activated Carbon. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2019; 10(10): 966-986

۷. Bhatti H, Sadaf S, Aleem A. Treatment of textile effluents by low cost agricultural wastes: Batch biosorption study. *J. Anim. Plant Sci*. 2015; 25: 284-289

۸. Chelladurai SJS, Murugan K, Ray AP, Upadhyaya M, Narasimhataj V, Gnanasekaran S. Optimization of process parameters using response surface methodology: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 37: 1301-1304. doi: <https://doi.org/10.30498/ijb.2023.330285.3288>

۹. Erabee I, Ahsan A, Jose B, Aziz MMA, Ng A, Idrus S. Adsorptive treatment of landfill leachate using activated carbon modified with three different methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018; 22(4): 1083-1095. doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1430-z>

١٠. Esdaki Z, Ansari R, Ostovar F. Removal of Nickel (II) ions from aqueous solutions using Iron (III) oxide nanoparticles: study of kinetic, isotherm and thermodynamic models. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2019; 12(3): 383-396
١١. Fan S, Pei S, Shen T, Xu G, Li Y, Fan W. Fabrication of Superhydrophobic Magnetic Sawdust as Effective and Recyclable Oil Sorbents. *Materials*. 2019; 12(20): 3432. doi: <https://doi.org/10.3390/ma12203432>
١٢. Ghasemi M, Mashhadi S, Azimi-Amin J. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/AC nanocomposite as a novel nano adsorbent for effective removal of cationic dye: *Process optimization based on Taguchi design method, kinetics, equilibrium and thermodynamics*. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*. 2018; 3(4): 321-336. doi: <https://doi.org/10.22090/jwent.2018.04.005>
١٣. Giri R, Kumari N, Behera M, Sharma A, Kumar S, Kumar N. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution using pomegranate peel as low-cost biosorbent. *Environmental Sustainability*. 2021; 4: 401-417. doi: <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00192-8>
١٤. Guo R, Meng Q, Zhang H, Zhang X, Li B, Cheng Q. Construction of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/exfoliated graphite composite and its high efficient treatment of landfill leachate by activation of potassium persulfate. *Chemical Engineering Journal*. 2019; 355: 952-962. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.168>
١٥. Kataria N, Garg V. Application of EDTA modified Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/sawdust carbon nanocomposites to ameliorate methylene blue and brilliant green dye laden water. *Environmental research*. 2019; 172: 43-54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.002>
١٦. Khaleel E, Samarrai Gh, Husain A. Comparison Effective Powder Of Pomegranate Peel And Date Kernel With Nanoparticles Silver In Reuse Car Wash Effluent. *Nat. Volatiles & Essent. Oils*. 2021; 8(4): 13312-13324
١٧. Liu X, Tian J, Li Y, Sun N, Mi S, Xie Y. Enhanced dyes adsorption from wastewater via Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles functionalized activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*. 2019; 373: 397-407. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.103>
١٨. Moafi H, Ansari R, Ostovar F. Ag<sub>2</sub>O/Sawdust nanocomposite as an efficient adsorbent for removal of hexavalent chromium ions from aqueous solutions. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2016; 7(6): 2051-2068
١٩. Pashaei H, Ghaemi A, Nasiri M, Karami B. Experimental modeling and optimization of CO<sub>2</sub> absorption into piperazine solutions using RSM-CCD methodology. *ACS omega*. 2020; 5: 8432-8448. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03363>

٢٠. Rabbani J, Ahmad SR, Iqbal MK. Conjugative effect of low cost adsorbent with laccase enzyme for reduction of pulp and paper effluent load, its kinetics and thermodynamics. *Pakistan Journal of Science*. 2022; 74(3). doi: <https://doi.org/10.57041/pjs.v74i3.786>
٢١. Rice, E.W., Baird, R.B., Eaton, A.D. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater, *American public health association, American water works association, water environment federation*.
٢٢. Saeed MO, Azizli K, Isa MH, Bashir MJ. Application of CCD in RSM to obtain optimize treatment of POME using Fenton oxidation process. *Journal of Water Process Engineering*. 2015; 8: 7-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.11.001>
٢٣. Sharafinasab H, Ostovar F. Evaluation of the Iron (III) oxide/sawdust nanocomposite efficiency in COD removal from landfill leachate: optimization and evaluation of adsorption isotherms. *Journal of Environmental Research and Technology*. 2021; 8(8):75. doi: <https://doi.org/10.29252/.5.8.75>





# **Assessing the efficiency of pomegranate peel biomass adsorption in improving industrial wastewater pollution indices and optimizing the process using the response surface method**

**Hashemi, N.<sup>1</sup>, Honarvar, M.\*<sup>2</sup>, Gharekhani, E<sup>3</sup>.**

- 1- M.Sc. Graduated of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran**
- 2- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran**
- 3- Assistant Professor, Department of Chemistry, Islamic Azad University, Saveh Branch, Saveh, Iran**

## **Abstract**

The water crisis and environmental pollution caused by industrial wastewater have led to special attention to the treatment and reuse of industrial effluents. In this research, the impact of powdered pomegranate peel as a low-cost biosorbent was studied for the examination of turbidity, total suspended solids (TSS), hardness (TDS), chemical oxygen demand (COD), and biological oxygen demand (BOD) indices. Pollution indices were measured under conditions of pH=4-8, time 20-100 minutes, temperature 20-50 degrees Celsius, and adsorbent concentration of 1-7 grams per liter. The results of this study were analyzed using the Design Expert software. The analysis showed that the temperature had the most significant effect on TSS (total suspended solids) compared to other parameters, while COD (chemical oxygen demand) and pH had the highest impact on BOD (biological oxygen demand). Furthermore, the response surface method performed better for BOD data than TSS data. The reduction in chemical oxygen demand, biological oxygen demand, and total dissolved solids from the solution, as well as pH, had the most significant effects. The lowest levels of chemical oxygen demand, biological oxygen demand, and total dissolved solids were observed at pH 4 (543, 2.245, and 148 mg/L, respectively). The results indicate a significant reduction in chemical oxygen demand and biological oxygen demand, while total dissolved solids increased compared to raw wastewater. Additionally, an increase in the adsorbent led to an increase in chemical oxygen demand and biological oxygen demand. The impact of each parameter on pollution indices (BOD, COD, TDS, TSS, Turbidity) and p-values less than 0.05 demonstrate the significance of the model.

**Keywords:** Water pollution, Biosorption, Wastewater treatment, Pomegranate peel

\* Corresponding Autor: [M-honarvar@hotmail.com](mailto:M-honarvar@hotmail.com)