Orginal Article
Journal of Natural Environment 75(1): 89-103 (2022)
Print ISSN: 2008-7764/Online ISSN: 2423-7817
https://jne.ut.ac.ir/

مقاله کامل
نشریه محیط زیست طبیعی
دوره ۷۵، شماره ۱: ۸۹-۱۰۳ (۱۴۰۱)

استفاده از روش سطح‌پاسخ (RSM) به‌منظور ارائه مدل بهینه‌سازی مشخصات خاک برای طراحی فیلتر طبیعی تصفیهٔ پساب (مطالعهٔ شرکت پتروشیمی شهید تندگویان)

سینا سبحانی نیکو[۱]، احمد جعفرنژاد چقوشی[۱]، سید حسین رضوی حاجی آقا[۲]، محسن آرمین[۳]*

[۱]گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲]گروه مدیریت، دانشکده مدیریت و مالی، دانشگاه خاتم، تهران، ایران
[۳]گروه مهندسی منابع طبیعی- آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶**

چکیده

در فرآیندهای تولید صنعت پتروشیمی مواد شیمیایی سمی و خطرناکی وجود دارد که امروزه باعث شده تصفیهٔ پساب صنایع پتروشیمی یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی جهان باشد. بنابراین در این تحقیق ، اقدام به ارائه مدل بهینه‌سازی مشخصات خاک به‌منظور طراحی فیلتر طبیعی تصفیهٔ پساب شرکت پتروشیمی شهید تندگویان با بکارگیری روش سطح‌پاسخ (RSM) شد. بدین منظور، پس از انتخاب خاک‌های مورد نظر در شهرستان بهمئی استان کهگیلویه و بویراحمد و نمونه‌برداری از آن‌ها، مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد تحقیق شامل اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، درصد مادهٔ آلی (OM) و درصد رس (Clay) تعیین شد. در مرحلهٔ بعد اقدام به طراحی ۱۲ فیلتر طبیعی خاک در ابعاد کوچک در محیط آزمایشگاهی شد و پس از تهیهٔ پساب از شرکت پتروشیمی تندگویان اقدام به انجام آزمایش‌های فیلتراسیون پساب شد. چهار پارامتر اسیدیته (pH)، کل مواد جامدمعلق (TSS)، مقدار آهن (Fe) و مقدار منگنز (Mn) پساب خروجی از فیلترها به‌عنوان متغیرهای پاسخ تعیین شدند. سپس به روش سطح‌پاسخ هیستوریکال بین چهار پارامتر خاک (متغیرهای مستقل) و هرکدام از پارامترهای پساب (متغیرهای پاسخ) با استفاده از نرم‌افزار آماری Design-Expert مدل‌های رگرسیونی برازش داده شد. مدل‌های رگرسیونی به‌منظور رسیدن به‌مقدار بهینه پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک با هدف بهترین خروجی پساب با کمترین میزان آلودگی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه شدند. نتایج نشان داد که، پارامترهای اسیدیته، هدایت الکتریکی، مادهٔ آلی و درصد رس زیاد خاک باعث افزایش اسیدیته و کاهش کل مواد جامدمعلق ، آهن و منگنز موجود در پساب خواهند شد و از این طریق در تصفیهٔ پساب پتروشیمی نقش مؤثری دارند. نتایج الگوریتم بهینه‌سازی نیز نشان داد که، هدایت الکتریکی ۳ دسی‌زیمنس بر متر، اسیدیته ۷/۹، درصد مادهٔ آلی ۲/۹۵ و میزان رس ۵۰ درصد بهینه‌ترین مقادیر پارامترهای خاک هستند که پارامترهای خروجی پساب آن‌ها شامل مقادیر اسیدیته خنثی بالای ۷، کل مواد جامدمعلق ۹۰ ، آهن ۱ و منگنز ۲/۳ میلی‌گرم بر لیتر است. نتایج این تحقیق می‌تواند به ساخت یک فیلتر طبیعی خاک در ابعاد بزرگ کمک کند.

کلید واژگان: بهینه‌سازی، فیلتر خاکی، روش سطح‌پاسخ، پساب صنعتی، پتروشیمی شهید تندگویان

*نویسنده مسئول mohsenarmin2007@gmail.com

مقدمه

توسعهٔ مداوم صنایع فرایندی هیدروکربنی و بکارگیری وسیع مشتقات نفت و گاز در اغلب صنایع بزرگ مانند پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، صنایع اتومبیل‌سازی و غیره، خطر آلودگی‌های نفتی را در طبیعت افزایش داده است (Linner, 1970). پساب پتروشیمی منبع اصلی آلودگی صنعتی است که انواع آلاینده‌های آلی نسوز و سمی را تولید می‌کند که برای جانوران و گیاهان در آب‌های طبیعی مضر است (Tian *et al.*, 2019). در فرآیندهای تولیدی پتروشیمی مواد شیمیایی سمی و خطرناکی وجود دارد که باعث شده امروزه تصفیهٔ پساب پتروشیمی‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی جهان باشد (Gong *et al.*, 2022). روش‌های مختلفی برای تصفیهٔ پساب خروجی از صنایع مختلف وجود دارد که زیست‌پالایی یا به‌عبارتی حذف زیستی این نوع آلاینده‌ها یک راهکار مناسب نسبت به سایر روش‌های فیزیکی و شیمیایی پالایش می‌باشد (Naeth *et al.*, 2005). در فیلترکردن آلاینده‌های پساب، روش‌های شیمیایی هزینه‌بر و دارای عمر محدود هستند درحالی که سیستم‌های طبیعی مهندسی شده دارای طول عمر بیشتر و صرف هزینه کمتری هستند (Kadam *et al.*, 2008). روش‌شناسی سطح‌پاسخ[1] یا به صورت اختصاری RSM توسط Box و Wilson در دههٔ پنجاه میلادی ارائه شده است (Box and Wilson, 1951). این عبارت از اصطلاحی که از نقطه نظر جغرافیایی، پس از تناسب مدل ریاضی ایجاد شده، نشأت گرفته است و کاربرد آن در سطح گسترده‌ای در متون مرتبط با حوزهٔ محاسبات شیمی مشاهده شده است. RSM یک مجموعه از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف از طرح‌های روش سطح‌پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که وابسته به چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. در این روش تغییرات در متغیرهای ورودی به‌منظور تعیین علل تغییرات در متغیر پاسخ ایجاد می‌شوند. کاربرد RSM برای بهینه‌سازی، در کاهش هزینه روش‌های تحلیل گران‌قیمت و بی‌نظمی‌های عددی مرتبط با آن‌ها می‌باشد. در واقع هدف از روش سطح‌پاسخ، ایجاد پیش‌بینی‌های آماری و بهینه‌سازی است که می‌تواند به‌خوبی در شرایطی که چندین متغیر تأثیر دارند، بکار رود (Mao *et al.*, 2018). قبل از بکار بردن روش سطح‌پاسخ، انتخاب یک طرح آزمایشی مناسب ضروری است تا مشخص شود که چه آزمایش‌هایی باید برای مطالعهٔ مورد نظر انجام شود. برای این هدف ماتریس‌های آزمایشی بسیاری وجود دارد. طرح‌های آزمایشی برای مدل‌های درجهٔ اول (مانند طرح‌های فاکتوریل) هنگامی مورد استفاده قرار می‌گیرند که روند داده‌ها غیرخطی است. با این حال جهت برآورد یک تابع پاسخ برای داده‌های آزمایشی که توسط توابع خطی توصیف نمی‌شوند، باید از طرح‌های آزمایشی سطح‌پاسخ درجهٔ دوم مانند طرح‌های فاکتوریل سه‌سطحی، باکس بنکن[2]، مرکب مرکزی[3] و دوهلرت[4] استفاده کرد. بهینه‌سازی الگوی ازدحام ذرات[5] (PSO) یکی از روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است که برای حل مسائل بهینه‌سازی عددی با فضای جستجوی بسیار بزرگ، بدون نیاز به اطلاع از گرادیان تابع هدف ابداع شده است. این روش اولین بار در سال ۱۹۹۵ مطرح شد (Kennedy and Eberhart, 1995). در این الگوریتم که با الهام‌گیری از زندگی گروهی جانوران، به‌ویژه پرندگان و ماهی‌ها، ابداع شده است برای حل یک مسألهٔ بهینه‌سازی، جمعیتی از جواب‌های مختلف با استفاده از یک فرمول ساده به‌طور تصادفی در دامنهٔ مسأله به حرکت آورده شده و آن را با هدف یافتن جواب‌های بهینه سراسری مورد بررسی قرار می‌دهند. در الگوریتم ازدحام ذرات هر یک از این جواب‌ها را اصطلاحاً یک ذره می‌نامند و هر ذره به‌عنوان مثال متناظر با یکی از پرندگان موجود در یک دسته پرنده در حال پرواز است. الگوریتم ازدحام ذرات

[1] Response Surface Methodology
[2] Box-Behnken designs
[3] Central Composite Design
[4] Doehlert
[5] Particle Swarm Optimization

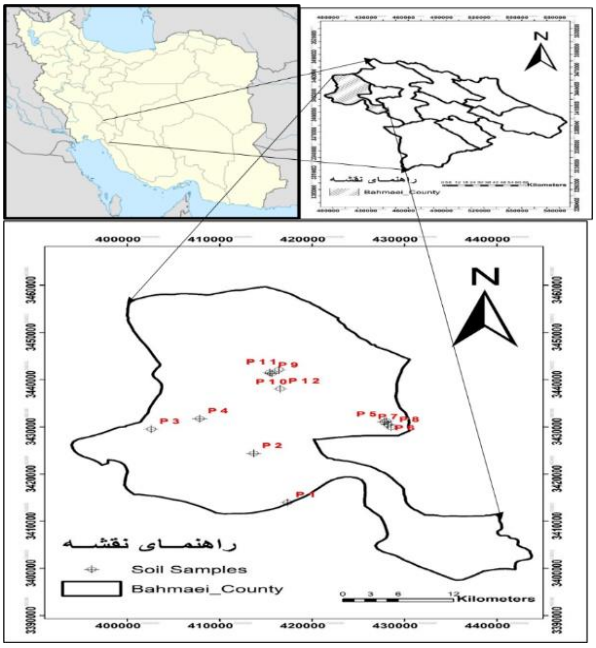
از این نظر که جمعیت اولیه‌ای از جواب‌ها به طور تصادفی توسط الگوریتم تولید شده و با حرکت در دامنهٔ مسأله به‌دنبال پاسخ می‌گردند، مشابه الگوریتم ژنتیک است. در تحقیق ای برای بهینه‌سازی فرآیند فوتوکاتالیستی حذف آفت‌کش دیازینون از محلول‌های آبی و ارزیابی سمیت پساب از روش سطح‌پاسخ در قالب طرح مرکب مرکزی از سه متغیر مستقل و یک متغیر پاسخ استفاده شد. نتایج نشان داد که فرآیند مربوطه در حذف دیازینون کارایی بالایی دارد (Toolabi *et al*., 2019). تصفیهٔ پساب صنعت چغندرقند با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی و بهینه‌سازی پارامترها با روش سطح‌پاسخ مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش از طرح Box-Behnken استفاده شده است و روابط بین چهار متغیر مستقل و یک متغیر پاسخ با استفاده از معادلهٔ درجهٔ دوم توصیف شده است. این روش با کارایی ۶۵ درصد موفق در حذف آلودگی‌ها عمل کرد (Simsik and Sharma, 2020). جذب یون‌های توریم توسط نانو مواد ZnO با یون فلزی تهیهٔ شده با سنتز احتراق با استفاده از طرح مرکب مرکزی به روش سطح‌پاسخ با ضریب تبیین بالای ۹۸ درصد مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد (Kaynar *et al*., 2021). در پژوهش حاضر، مدل بهینه‌سازی مشخصات خاک برای طراحی فیلتر طبیعی تصفیهٔ پساب شرکت پتروشیمی شهید تندگویان با بکارگیری روش سطح‌پاسخ مورد بررسی قرار گرفته است که شناسایی و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مهم موجود در خاک که برکاهش آلایندگی پساب خروجی از فیلتر مؤثرند، هدف اصلی موضوع مورد بررسی است.

مواد و روش ها

مجتمع پتروشیمی شهید تندگویان در سال ۱۳۷۷ در ضلع شمال‌غرب خلیج فارس در استان خوزستان، در مکان چهار منطقهٔ ویژه اقتصادی پتروشیمی بندرامام خمینی و در زمینی به مساحت ۳۴ هکتار جهت تولید محصولات مهم اسید ترفتالیک خالص (PTA) و پلی اتیلن ترفتالات (PET) احداث گردید. در این تحقیق تعیین منطقهٔ مورد تحقیق برای نمونه‌برداری خاک، نمونه‌برداری از خاک و انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک، تهیهٔ پساب از شرکت پتروشیمی شهید تندگویان، طراحی فیلتر طبیعی خاک، انجام آزمایش‌های فیلتراسیون، تعیین پارامترهای پساب خروجی از فیلترها و مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها گام‌هایی بود که به ترتیب برای رسیدن به هدف تحقیق یعنی به‌دست آوردن میزان بهینه هرکدام از متغیرهای موجود در خاک برای رسیدن به کمترین میزان آلاینده‌ها در پساب عبوری از فیلتر طی شد.

تعیین منطقه مورد تحقیق برای نمونه‌برداری خاک: منطقهٔ مورد تحقیق جهت نمونه‌برداری از خاک شهرستان بهمئی در استان کهگیلویه و بویراحمد است که به دو بخش کلی بهمئی سردسیری و بهمئی گرمسیری تقسیم می‌شود. دلیل انتخاب این منطقه هم به لحاظ تنوع در انواع خاک‌ها و هم نزدیک‌تر بودن به استان خوزستان برای تهیهٔ پساب پتروشیمی بوده است. در شکل ۱ موقعیت شهرستان بهمئی در استان کهگیلویه و بویراحمد و کشور ایران نشان داده شده است.

نمونه‌برداری از خاک و انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک: تهیهٔ نقشه مرز جغرافیایی شهرستان بهمئی در قالب یک Shapefile در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تهیهٔ نقشهٔ سازندهای زمین‌شناسی شهرستان بهمئی (استخراج از نقشهٔ زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ کشور) که به نوعی الگویی از تنوع خاک‌های تشکیل شده در منطقهٔ بهمئی هستند، تهیهٔ فایل KML از مرز جغرافیایی شهرستان بهمئی و و انداختن آن بر روی تصاویر Google Earth، انتخاب نقاط نمونه‌بردای خاک بر اساس تنوع سازندهای زمین‌شناسی و تیپ‌های مختلف خاک در منطقهٔ بهمئی، نمونه‌برداری از خاک‌ها و انجام آزمایش‌های فیزیکی و



شکل ۱- موقعیت شهرستان بهمئی در استان کهگیلویه و بویراحمد و کشور ایران.

شکل ۲- نقاط نمونه‌برداری خاک در محدودهٔ شهرستان بهمئی بر روی تصاویر Google Earth.

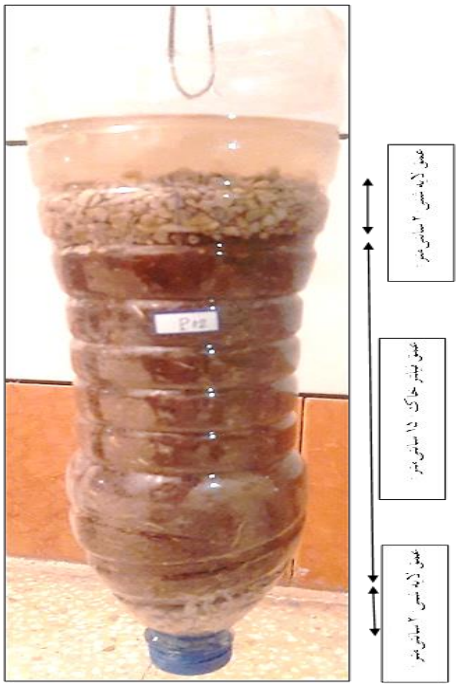
شیمیایی نمونه‌های خاک در این گام از تحقیق طی شد. در شکل ۲ نقاط نمونه‌برداری خاک در محدوده شهرستان بهمئی بر روی تصاویر GoogleEarth نشان داده شده است.

نقاط نمونه‌برداری خاک نشان‌داده شده در شکل ۲ به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که به نوعی بیانگر همه سازندهای زمین‌شناسی یا تیپ خاک‌های موجود در شهرستان بهمئی باشد. در جدول ۱ موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری خاک ارائه شده است. پس از نمونه‌برداری از خاک‌ها، جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها، ابتدا نمونه‌های خاک هوا خشک شد و سپس از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. با بررسی تحقیقات گذشته و مرور منابع مربوطه، از بین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، پارامترهای هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) به روش گل اشباع، درصد مادهٔ آلی (OM) به روش اکسیداسیون مرطوب و درصد رس (Clay) به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شده است.

تهیهٔ پساب از شرکت پتروشیمی شهید تندگویان: با نظر کارشناس بخش مربوطه شرکت، از خروجی شماره ۱۳،

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری خاک.

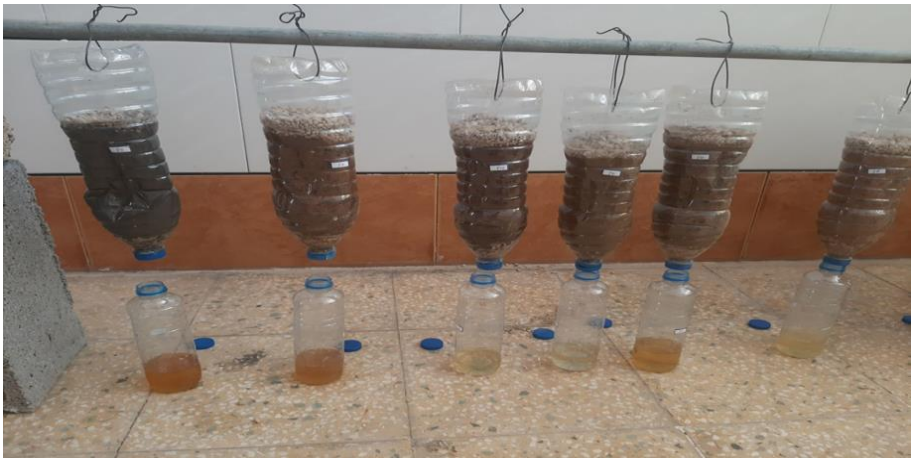
نام محل نمونه‌برداری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
P1	۵۰° ۸' ۷"	۳۰° ۵۱' ۲۲"	۶۲۱
P2	۵۰° ۵' ۴۶"	۳۰° ۵۶' ۵۸"	۷۸۱
P3	۴۹° ۵۸' ۴۶"	۳۰° ۵۹' ۴۲"	۵۳۸
P4	۵۰° ۲' ۳"	۳۱° ۰' ۵۶"	۶۲۲
P5	۵۰° ۱۴' ۳۸"	۳۰° ۰' ۳۹"	۱۰۷۵
P6	۵۰° ۱۴' ۴۵"	۳۰° ۰' ۴۴"	۱۰۸۳
P7	۵۰° ۱۴' ۵۲"	۳۰° ۰' ۲۱"	۱۰۸۸
P8	۵۰° ۱۵' ۴"	۳۰° ۰' ۲"	۱۰۷۸
P9	۵۰° ۶' ۴۷"	۳۱° ۶' ۱۵"	۱۲۳۷
P10	۵۰° ۶' ۵۴"	۳۱° ۶' ۸"	۱۲۲۸
P11	۵۰° ۷' ۲۴"	۳۱° ۶' ۳۵"	۱۲۳۰
P12	۵۰° ۷' ۳۰"	۳۱° ۴' ۲۴"	۱۳۷۰



شکل ۳- طراحی فیلتر خاکی.

اقدام به جمع‌آوری پساب شد. از آنجایی‌که نمونه‌های دریافت‌شده از پساب باید به‌عنوان نمایندهٔ واقعی و کاملاً شبیه به کل پساب تولید شده در آن مجموعه باشد، نمونه‌گیری از پساب در یک بازهٔ زمانی دو ساعته و به فاصله هر نیم ساعت یک بار در ظروف شیشه‌ای کاملاً تمیزی که با آب مقطر شسته شده بودند، انجام شد و سپس همه این چهار نمونه جمع‌آوری شده در یک ظرف بزرگ‌تر مخلوط شد و نمونهٔ نهایی به میزان لازم از آن تهیهٔ شد. همچنین با هدف رعایت استانداردهای نگهداری از نمونهٔ پساب، نمونه‌ها بلافاصله به محیط آزمایشگاه منتقل و آزمایش فیلتراسیون آن‌ها در فیلترهای از قبل آمادهٔ شده انجام گردید.

طراحی فیلتر طبیعی خاک: مقداری از نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از الک پنج میلی‌متر رد شد و سپس مقداری از خاک رد شده از الک (به حجم تقریبی ۴۵۰ سانتی‌متر مکعب با ارتفاع عمق خاک ۱۵ سانتی‌متر) بین دو لایه فیلتر



شکل ۴- انجام فیلتراسیون و نمونه‌برداری از پساب خروجی از فیلتر.

جدول ۲- متغیرهای مستقل و وابسته.

متغیرهای وابسته	متغیرهای مستقل
pH	EC
TSS	pH
Fe	OM
Mn	Clay

شنی به ارتفاع دو سانتی‌متر در یک ظرف یک و نیم لیتری قرار داده شد (شکل ۳). لازم به ذکر است که فیلترهای شنی به‌منظور آرام کردن سرعت جریان پساب و توزیع یکنواخت آن در تمام سطح لایه‌ی خاک مورد استفاده قرار گرفتند.

انجام آزمایش‌های فیلتراسیون: پس از ساخت فیلترهای خاکی و استقرار آن‌ها بر روی یک پایهٔ فلزی، نیم لیتر از پساب با یک دبی ثابت به هر کدام از فیلترها اضافه شد و سپس اقدام به نمونه‌برداری از پساب خروجی از فیلترها شد. در شکل ۴، انجام آزمایش فیلتراسیون نشان داده شده است.

تعیین پارامترهای پساب خروجی از فیلترها: پس از جمع‌آوری پساب خروجی از فیلترها، نمونه‌ها بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شد. به‌توصیه کارشناس مسئول شرکت پتروشیمی شهید تندگویان با اطلاع از محتوی احتمالی پساب، چهار پارامتر TSS با استفاده از فیلتر تصفیهٔ آب، pH با استفاده از pH سنج و آهن و منگنز به روش طیف‌سنجی برای هر نمونه اندازه‌گیری شد.

مدل‌سازی و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها: روش سطح‌پاسخ (RSM): در این پژوهش تیمارهای فرایند با روش سطح‌پاسخ هیستوریکال برای چهار متغیر عددی (EC، pH، OM و Clay) (جدول ۲) انجام شد. نتایج با استفاده از نرم‌افزار آماری (Design-Expert version 11) با روش سطح‌پاسخ (RSM) آنالیز شد و هر یک از متغیرهای پاسخ در قالب مدل رگرسیون چند جمله‌ای به‌صورت تابعی از متغیرهای مستقل ارائه شدند (رابطه ۱).

رابطهٔ (۱)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ij} x_i^{\,2} + \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=i+1}^{3} \beta_{ij} x_i x_j$$

که در آن Y عبارت است از متغیر تابع یا پاسخ، X1، X2، X3 و X4 سطوح کدبندی شده متغیرهای مستقل، β0 مقدار ثابت (مقدار پاسخ در حالتی که متغیرهای مستقل در نقطه مرکزی یعنی صفر قرار دارند). با استفاده از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) معنی‌دار بودن اثرات خطی، درجهٔ دوم و متقابل ضرایب مدل رگرسیون برای هر پاسخ در سطوح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ بررسی گردید.

بهینه‌یابی شرایط فرایند تصفیهٔ پساب پتروشیمی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات: در این پژوهش داده‌های اولیه داده شده به الگوریتم به‌منظور بهینه‌یابی داده-های مدل‌های پیش‌بینی شده از طرح هیستوریکال بودند. از

جدول ۳- پارامترهای بهینه‌یابی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات.

نام عامل	پارامترهای خاک (هدایت الکتریکی، اسیدیته، درصد مادهٔ آلی و درصد رس)
تابع هدف	مدل منتخب از طرح سطح‌پاسخ (هیستوریکال)
تعداد متغیرها	چهار متغیر ۱. (x1) EC ۲. (x2) pH ۳. (x3) OM ۴. (x4) Clay
بازه تغییر متغیرها	x1= ۰/۳۱ تا ۴/۹۴ x2= ۷/۱۷ تا ۷/۹۳ x3= ۰/۳۷ تا ۲/۹۵ x4= ۱۹/۶ تا ۵۰
ماکزیمم تعداد تکرارها (Maximum Number of Iterations)	با توجه به همگرایی ۵۰
تعداد ذرات (Number of particles)	با توجه به مدلهای موجود ۱۰
ضریب اینرسی (w1)	۱
ضریب یادگیری شخصی (c1)	۲
ضریب یادگیری کلی (c2)	۱/۵
نوع الگوریتم بهینه سازی	مبتنی بر جهش گاوسی
شرط خاتمه	سپری شدن تعداد معینی از تکرارها بدون مشاهده بهبود خاصی در نتیجه

آنجایی که عملکرد این الگوریتم به شدت وابسته به پارامترهای مرتبط با آن‌ها است، بنابراین لازم بود ابتدا مناسب‌ترین مقادیر پارامترهای مرتبط با الگوریتم تعیین شود. در بسیاری از مطالعات مختلف، پارامترهای هر الگوریتمی به‌صورت تجربی و یا با استفاده از تجربیات مطالعات پیشین تعیین می‌شود (Bergh and Engelbrecht, 2001). اما بدیهی است که پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات به‌شدت وابسته به نوع تابع هدف می‌باشند و شناخت اثر و تعیین دقیق هر یک از آن‌ها بر اساس شرایط مسئله بسیار حائز اهمیت است. پارامترهای بهینه‌یابی خصوصیات فرایند با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات در جدول ۳ خلاصه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، مهمترین پارامترهای مرتبط با الگوریتم ازدحام ذرات از جمله تعداد تکرار، تعداد ذرات، ضریب اینرسی (W1)، ضریب یادگیری شخصی (c1) و ضریب یادگیری کلی (c2) پس از بررسی اثر هر یک بر توابع هدف تعیین شدند. در این پژوهش تعداد تکرار و ذرات به‌ترتیب ۱۰ و ۱۰ تعیین شدند.

بهینه‌یابی عددی: پس از بررسی و تعیین پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات بهینه‌یابی توابع هدف انجام شدند. لازم به ذکر است در بهینه‌یابی فرآیند تصفیهٔ پساب، تلاش بر این بود که برای بهبود خصوصیات نمونه‌ها تا حد امکان pH به‌عنوان تابع هدف افزایش و TSS، Fe و Mn کاهش یابند. برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها در مسأله پیشنهادی نیز از تکرارپذیری، همگرایی و زمان اجرای الگوریتم‌ها استفاده شد.

نتایج

بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد تحقیق و پارامترهای پساب خروجی از فیلترها: در جدول ۴ نتایج بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد تحقیق نشان داده شده است. در جدول ۵ آماره‌های ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد تحقیق نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول ۵، دامنهٔ هدایت الکتریکی (EC) خاک‌ها از ۰/۳۱ تا ۴/۹۴

جدول ٤- نتایج بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد تحقیق.

فیلترها	پارامترهای خاک			
	هدایت الکتریکی (dS/m)	اسیدیته	درصد مادهٔ آلی	درصد رس
P1	۰/۴۶۷	۷/۵۷	۰/۵۸۵	۳۰
P2	۰/۵۶۸۴	۷/۹۳	۰/۸۹۷	۳۲
P3	۲/۴۲	۷/۷۳	۰/۳۷۰۵	۵۰
P4	۰/۴۵۵۴	۷/۹۱	۱/۶۵۷۵	۲۶
P5	۴/۹۴	۷/۵۴	۲/۹۵	۳۴
P6	۳/۰۷	۷/۴۳	۱/۸۹	۳۶
P7	۲/۵۷	۷/۳	۰/۵۲	۱۹/۶
P8	۳/۵۲	۷/۱۷	۱/۱	۲۱/۶
P9	۰/۳۱۱	۷/۴۵	۱/۵۸	۲۴
P10	۰/۴۴۸	۷/۵۲	۱/۲۲	۲۶
P11	۰/۳۳۵	۷/۷	۱/۰۵	۳۶
P12	۰/۳۴۶	۷/۶۳	۱/۹۴	۴۶

جدول ٥- آماره‌های ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد تحقیق.

آماره‌ها	ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک			
	هدایت الکتریکی (dS/m)	اسیدیته	درصد مادهٔ آلی	درصد رس
میانگین	۱/۶۲	۷/۵۷	۱/۲۳	۳۱/۷۶
حداکثر	۴/۹۴	۷/۹۳	۲/۹۵	۵۰
حداقل	۰/۳۱	۷/۱۷	۰/۳۷	۱۹/۶
انحراف معیار	۱/۶	۰/۲۲	۰/۷۵	۹/۳۲
ضریب تغییرات (درصد)	۹۸/۷	۲/۹	۶۰/۹	۲۹/۳

دسی‌زیمنس بر متر بودند که نشان می‌دهد نمونه‌های خاک از شور تا غیر شور را شامل می‌شدند، البته به‌دلیل اینکه هدایت الکتریکی بیشتر نمونه خاک‌ها بالاتر از ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر بود، بنابراین خاک‌ها غالباً شور بودند. دامنهٔ pH از ۷/۱۷ تا ۷/۹۳ بود که نشان می‌دهد نمونه‌های خاک نسبتاً قلیایی بودند. دامنهٔ OM از ۰/۳۷ تا ۲/۹۵ بودند که نشان می‌دهد نمونه‌های خاک از درصد مادهٔ آلی کم تا زیاد یعنی از ساختمان‌های ناپایدار و ضعیف تا ساختمان‌های محکم و پایدار را شامل می‌شدند. دامنهٔ Clay از ۱۹/۶ تا ۵۰ بودند که نشان از درصد رسی بودن کم تا زیاد خاک‌ها بود، البته به‌دلیل اینکه درصد رس بیشتر نمونه خاک‌ها بالاتر از ۲۵ درصد بود، بنابراین نمونه خاک‌های انتخاب شده غالباً رسی بودند. بنابراین با توجه به میانگین پارامترهای ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها می‌توان گفت که نمونه خاک‌های انتخاب شده شور، نسبتاً قلیایی با درصد مادهٔ آلی و درصد رس متوسطی بودند که می‌توان بیان کرد که خاک‌های انتخاب شده به لحاظ تنوع ویژگی‌ها شاخص و معرفی از خاک‌های موجود در شهرستان بهمئی هستند. در جدول ۶ نتایج بررسی پارامترهای پساب خروجی از فیلترها نشان داده شده است. در جدول ۷ آماره‌های پارامترهای پساب خروجی از فیلترها نشان داده شده است.

جدول ٦- نتایج بررسی پارامترهای پساب خروجی از فیلترها.

فیلترها	پارامترهای پساب عبوری از فیلتر			
	منگنز (mg/l)	آهن (mg/l)	مواد جامدمعلق (mg/l)	اسیدیته
P1	۴/۸۸	۰/۶۸	۹۲	۶/۶۱
P2	۴/۱۲	۰/۳	۴۱	۷/۰۶
P3	۴/۵۱	۰/۱۹	۳۷	۶/۶۷
P4	۴	۰/۲۷	۳۶	۶/۸۴
P5	۰/۹۶	۰/۳۴	۶۷	۶/۹۷
P6	۴/۲۸	۰/۱۳	۱۲۲	۶/۷۶
P7	۴	۰/۵۳	۱۹۲	۶/۷۴
P8	۴/۲۹	۰/۸۶	۲۹۶	۶/۴۹
P9	۴/۷۹	۰/۳۷	۲۲۳	۶/۸۳
P10	۴/۹۷	۰/۳۳	۱۹۲	۶/۶۶
P11	۵/۲۴	۰/۱۹	۲۳	۶/۸۳
P12	۴/۹۶	۰/۲۳	۲۰	۶/۴۹
پساب اولیه	۳/۷۵	۳/۸	۵۱	۵/۱۵

جدول ۷-آماره‌های پارامترهای پساب خروجی از فیلترها.

آماره‌ها	پارامترهای پساب			
	منگنز (mg/l)	آهن (mg/l)	مواد جامدمعلق (mg/l)	اسیدیته
میانگین	۴/۲۵	۰/۳۶	۱۱۱/۷۵	۶/۷۴
حداکثر	۵/۲۴	۰/۸۶	۲۹۶	۷/۰۶
حداقل	۰/۹۶	۰/۱۳	۲۰	۶/۴۹
انحراف معیار	۱/۱۱	۰/۲۱	۹۲/۶	۰/۱۷
ضریب تغییرات (درصد)	۲۶/۱	۵۸/۳	۸۲/۸	۲/۵

مدل سازی بین هر یک از پارامترهای پساب خروجی از فیلترها و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها با استفاده از روش سطح‌پاسخ (RSM) : مدل رابطهٔ بین اسیدیته پساب خروجی از فیلترها و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در رابطه ۲ نشان داده شده است.

رابطهٔ (۲)

$$pH = -0.177+0.101*EC+0.928*PH-0.103OM-0.003*Clay$$

$$r^2=0.65$$

در جدول ۸ تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۲ نشان داده شده است. در شکل‌های ۵ الف و ب به ترتیب تأثیر pH و EC و تأثیر OM و Clay بر pH نمونه‌های پساب خروجی از فیلتر با توجه به ضرایب مدل رابطهٔ ۲ نشان داده شده است. مدل رابطهٔ بین مجموع مواد جامدمعلق پساب خروجی از فیلترها و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در رابطهٔ ۳ نشان داده شده است.

رابطهٔ (۳)

$$TSS = 2317.086-0.752*EC-271.490*PH-19.47*OM-3.905*Clay$$

$$r^2=0.87$$

در جدول ۹ تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۳ نشان داده شده است. در شکل‌های ۶ الف و ب به ترتیب تأثیر pH و EC و تأثیر OM و Clay بر TSS نمونه‌های پساب خروجی از فیلتر با توجه به ضرایب مدل رابطهٔ ۳ نشان داده شده است. مدل رابطهٔ بین مقدار آهن پساب خروجی از فیلترها و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در رابطهٔ ۴ نشان داده شده است.

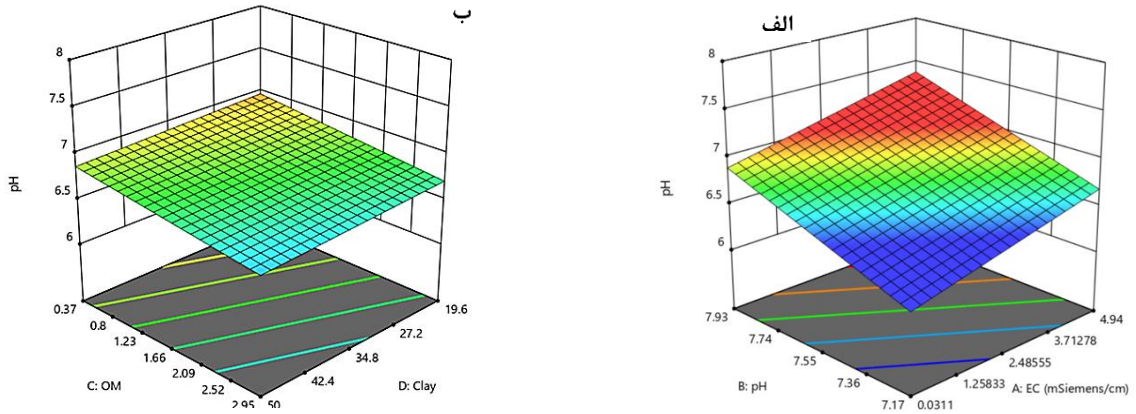
رابطهٔ (۴)

$$Fe = -2.42834+1.118*EC+0.225*PH-3.415*OM+0.330*Clay-0.0983*EC*PH+0.094*EC*OM-0.0160*EC*Clay+0.498*PH*OM-0.0374*PH*Clay-0.021*OM*Clay$$

$$r^2=0.87$$

جدول ۸- تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۲.

منشاء تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	
مدل	۰/۲۱۵۴	۴	۰/۰۵۳۸	۲/۸۶	۰/۱۲۱۱	عدم معناداری
هدایت الکتریکی	۰/۰۶۹۵	۱	۰/۰۶۹۵	۳/۶۹	۰/۱۰۳۱	
اسیدیته	۰/۱۹۹۶	۱	۰/۱۹۹۶	۱۰/۵۹	۰/۰۱۷۴	
درصد مادهٔ آلی	۰/۰۱۴۹	۱	۰/۰۱۴۹	۰/۷۹۰۱	۰/۴۰۸۳	
درصد رس	۰/۰۰۳۴	۱	۰/۰۰۳۴	۰/۱۸۱۷	۰/۶۸۴۸	
باقی‌مانده	۰/۱۱۳۱	۶	۰/۰۱۸۸			
مجموع	۰/۳۲۸۴	۱۰				



شکل ۵- تأثیر pH و EC بر PH (الف)، تأثیر OM و Clay بر PH (ب) نمونه‌های پساب خروجی از فیلتر.

جدول ۹- تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۳

منشاء تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	
مدل	۸۲۷۴۷/۵۰	۴	۲۰۶۸۶/۸۸	۱۲/۵۰	۰/۰۰۲۶	معنادار
هدایت الکتریکی	۸/۲۶	۱	۸/۲۶	۰/۰۰۵۰	۰/۹۴۵۶	
اسیدیته	۲۱۱۵۴/۶	۱	۲۱۱۵۴/۶	۱۲/۷۹	۰/۰۰۹۰	
درصد مادهٔ آلی	۱۷۱۹/۴	۱	۱۷۱۹/۴	۱/۰۴	۰/۳۴۱۹	
درصد رس	۱۰۷۵۴/۳۳	۱	۱۰۷۵۴/۳۳	۶/۵۰	۰/۰۳۸۱	
باقی‌مانده	۱۱۵۸۰/۷۵	۷	۱۶۵۴/۳۹			
مجموع	۹۴۳۲۸/۲۵	۱۱				

در جدول ۱۰ تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۴ نشان داده شده است. در شکل‌های ۷ الف و ب به ترتیب تأثیر pH و EC و تأثیر OM و Clay بر Fe نمونه‌های پساب خروجی از فیلتر با توجه به ضرایب مدل رابطهٔ ۴ نشان داده شده است. مدل رابطه بین مقدار منگنز پساب خروجی از فیلترها و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در رابطهٔ ۵ نشان داده شده است.

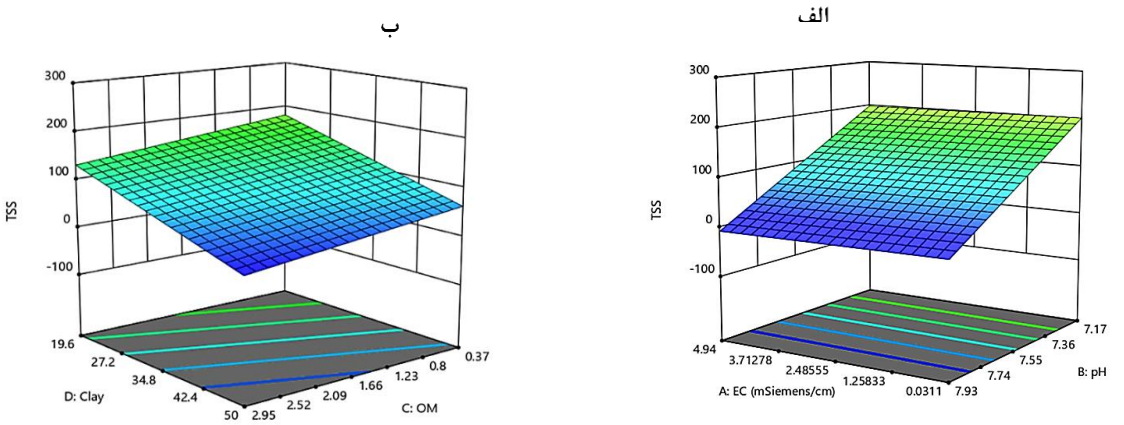
رابطهٔ (۵)

$$Mn = +24.40-0.608*EC-2.62*PH-0.473*OM+0.04*Clay$$

$r^2=0.86$

در جدول ۱۱ تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۵ نشان داده شده است. در جدول ۱۱ تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۵ نشان داده شده است.

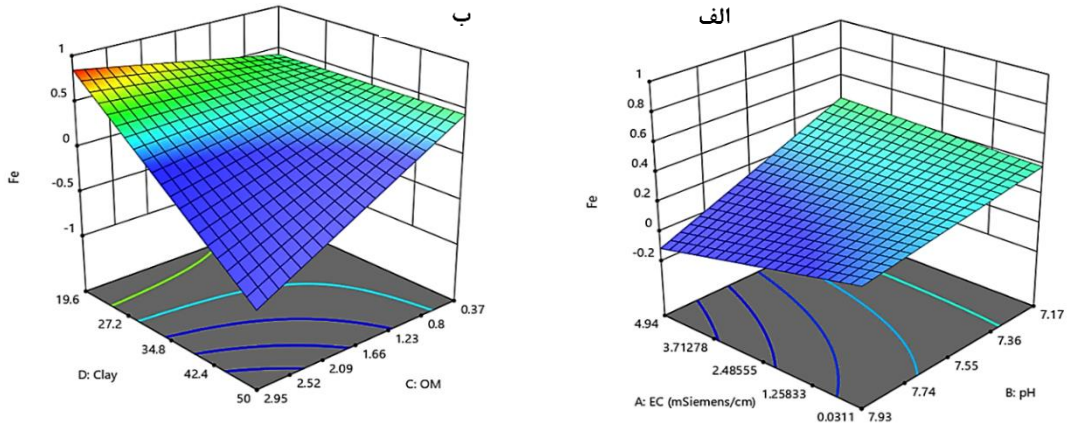
در شکل‌های ۸ الف و ب به ترتیب تأثیر pH و EC و تأثیر OM و Clay بر Mn نمونه‌های پساب خروجی از فیلتر با توجه به ضرایب مدل رابطهٔ ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اثرات متقابل پارامترها در همه مدل‌های فوق بررسی گردید، اما از آنجایی‌که هیچکدام از این اثرات



شکل ٦- تأثیر pH و EC بر TSS (الف)، تأثیر OM و Clay بر TSS (ب) نمونه‌های پساب خروجی از فیلترها.

جدول ۱۰- تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ٤.

منشاء تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	
مدل	۰/۲۹۱۸	۴	۰/۰۷۲۹	۲/۲۳	۰/۱۶۷۵	عدم معناداری
هدایت الکتریکی	۰/۰۰۶۸	۱	۰/۰۰۶۸	۰/۲۰۸۶	۰/۶۶۱۷	
اسیدیته	۰/۰۲۵۹	۱	۰/۰۲۵۹	۰/۷۹۱۸	۰/۴۰۳۱	
درصد مادهٔ آلی	۰/۰۲۶۰	۱	۰/۰۲۶۰	۰/۷۹۴۴	۰/۴۰۲۴	
درصد رس	۰/۰۷۱۱	۱	۰/۰۷۱۱	۲/۱۷	۰/۱۸۴۳	
باقی‌مانده	۰/۲۲۹۴	۷	۰/۰۳۲۸			
مجموع	۰/۵۲۱۲	۱۱				



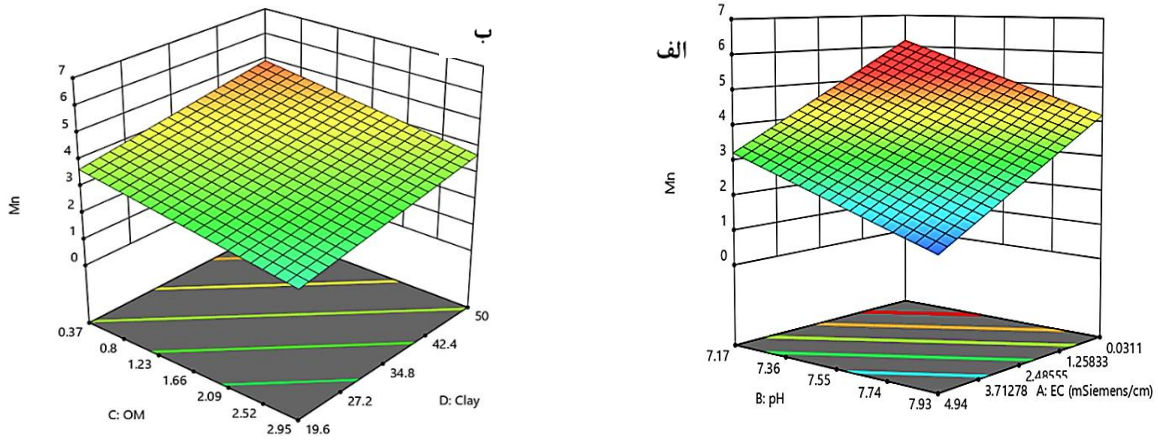
شکل ۷- تأثیر pH و EC بر Fe (الف)، تأثیر OM و Clay بر Fe (ب) نمونه‌های پساب خروجی از فیلترها.

معنی‌دار نبودند، از ارائه نتایج آن‌ها خودداری گردید.

بهینه‌سازی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک با هدف کارایی بهتر فیلتر در جهت بهبود مقادیر پارامترهای پساب خروجی از فیلتر با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO): جدول ۱۲ نتایج بهینه EC، pH، OM و Clay و نتایج توابع هدف (PH، TSS، Fe و Mn) و زمان اجرای الگوریتم را در شرایط تعداد پاسخ-های مورد ارزیابی ۵۰۰ نشان می‌دهد. در شکل‌های ۹ الف و ب به ترتیب نمودار همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات در بهینه‌یابی فرایند تصفیهٔ پساب با توجه به تعداد پاسخ و زمان نشان داده شده است.

جدول ۱۱- تجزیه واریانس برای مدل خطی رابطهٔ ۵.

منشاء تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره F	آماره P	
مدل	۱۱/۹۰	۴	۲/۹۸	۱۱/۴۳	۰/۰۰۳۴	معنادار
هدایت الکتریکی	۵/۴۰	۱	۵/۴۰	۲۰/۷۵	۰/۰۰۲۶	
اسیدیته	۱/۹۸	۱	۱/۹۸	۷/۶۱	۰/۰۲۸۱	
درصد مادهٔ آلی	۱/۰۲	۱	۱/۰۲	۳/۹۰	۰/۰۸۸۹	
درصد رس	۱/۲۱	۱	۱/۲۱	۴/۶۶	۰/۰۶۷۸	
باقی‌مانده	۱/۸۲	۷	۰/۲۶۰۵			
مجموع	۱۳/۷۳	۱۱				



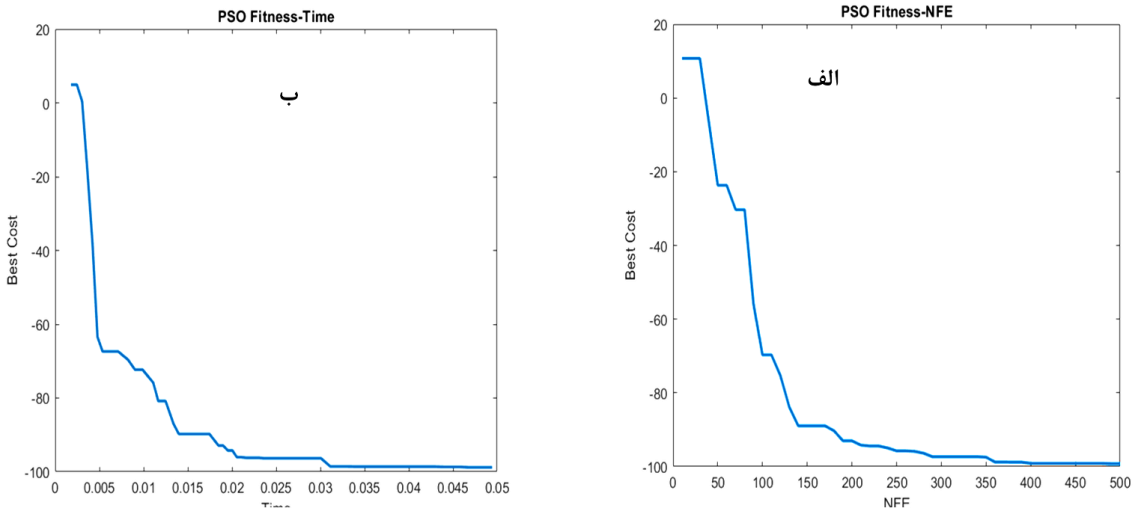
شکل ۸- تأثیر pH و EC بر Mn (الف)، تأثیر OM و Clay بر Mn (ب) نمونه‌های پساب خروجی از فیلترها

جدول ۱۲- نتایج بهینه EC، pH، OM و Clay و نتایج توابع هدف (PH، TSS، Fe و Mn) و زمان اجرای الگوریتم ازدحام ذرات در شرایط تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی ۵۰۰.

پارامترهای خاک و پساب خروجی از فیلتر		تعداد پاسخ‌های مورد ارزیابی= ۵۰۰		
		تکرار ۱	تکرار ۱	تکرار ۱
	EC	۲/۸۴	۳/۲۷	۳/۱۳
	pH	۷/۹۳	۷/۹۳	۷/۹۳
	OM	۲/۹۵	۲/۹۵	۲/۹۵
	Clay	۵۰	۵۰	۵۰
الگوریتم ازدحام ذرات	PH	۷/۰۱	۷/۰۵	۷/۰۴
	TSS	۹۰/۶۵	۹۰/۹۷	۹۰/۸۷
	Fe	۱/۰۱	۱/۰۹	۱/۰۷
	Mn	۲/۴۹	۲/۲۳	۲/۳۲
	زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)	۰/۰۲۹	۰/۰۷۹	۰/۰۵۱

بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان داد که فقط اثر خطی pH در سطح ۹۵ درصد بر pH پساب خروجی از فیلترها معنی‌دار بود که این موضوع در مدل چند جمله‌ای رابطهٔ ۲ نشان داده شده است. با افزایش pH و EC خاک‌ها، PH پساب‌های خروجی از فیلترها افزایش و به نوعی به حد خنثی می‌رسد (شکل ۵ الف)، می‌توان نتیجه گرفت که خاک هرچه به سمت شوری و قلیایی بودن پیش برود در بهبود اسیدیته پساب مؤثرتر است. شکل ۵ ب نیز نشان می‌دهد که تغییرات OM و Clay خاک‌ها اثر چندانی بر pH پساب‌های خروجی از فیلترها



شکل ۹- نمودار همگرایی الگوریتم ازدحام ذرات با توجه به تعداد پاسخ (الف)، با توجه به زمان (ب) در بهینه‌یابی فرآیند تصفیهٔ پساب.

ندارد. مدل چند جمله‌ای رابطهٔ ۳ نشان داد که اثر خطی pH و اثر خطی Clay در سطح ۹۵ درصد بر TSS پساب فیلترها معنی‌دار بود. با توجه به شکل ۶ الف می‌توان دریافت با افزایش pH خاک، TSS پساب خروجی از فیلترها کاهش می‌یابد در حالی که تغییرات EC اثر چندانی بر TSS پساب خروجی از فیلترها ندارد. مطابق شکل ۶ ب با افزایش Clay ، TSS پساب خروجی از فیلترها کاهش می‌یابد درحالی که تغییرات OM اثر چندانی بر TSS پساب خروجی از فیلترها ندارد. می‌توان نتیجه گرفت خاک‌های قلیایی و رسی بیشترین تأثیر را در کاهش کل مواد جامدمعلق پساب دارند. مدل چند جمله‌ای رابطهٔ ۴ نشان داد که اثرات هیچ کدام از پارامترهای EC، pH، OM و Clay بر Fe پساب خروجی از فیلترها معنی‌دار نبودند. مدل چند جمله‌ای رابطه ۵ نشان داد که اثر خطی pH و اثر خطی EC در سطح ۹۵ درصد بر Mn نمونه پساب‌ها معنی‌دار بودند. با توجه به شکل ۸ الف می‌توان دریافت با افزایش pH و EC خاک‌ها، Mn نمونه پساب‌ها کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۸ ب، نیز با افزایش OM خاک‌ها، Mn نمونهٔ پساب‌ها کاهش ولی با افزایش Clay خاک‌ها، Mn نمونهٔ پساب‌ها افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که خاک‌های قلیایی و شور و خاک‌های با مادهٔ آلی زیاد تأثیر چشم‌گیری در کاهش منگنز نمونه پساب‌ها دارند و رسی بودن خاک‌ها تأثیر منفی و غیر قابل قبولی بر منگنز نمونه‌ها داشت و آن را افزایش داد. به‌طور کلی در درجهٔ اول هرچه خاک‌ها pH بالاتری داشته باشند و رو به قلیایی بودن پیش بروند در تصفیهٔ آلودگی‌های پساب مؤثرترند، در درجه‌های بعدی به‌ترتیب شوری خاک، بالا بودن مادهٔ آلی و رسی بودن خاک‌ها در تصفیهٔ پساب‌های صنعتی آلوده مؤثرند. پس از بررسی و تعیین پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات بهینه‌یابی توابع هدف انجام شدند. لازم به ذکر است در بهینه‌یابی فرآیند تصفیهٔ پساب پتروشیمی تلاش بر این بود که برای بهبود خصوصیات نمونه پساب‌ها تا حد امکان pH به‌عنوان تابع هدف افزایش و TSS، Fe و Mn کاهش یابند. برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌ها در مسأله پیشنهادی نیز در این تحقیق از تکرارپذیری، همگرایی و زمان اجرای الگوریتم‌ها استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۱۲ مشاهده می‌شود با توجه به اینکه در الگوریتم نقاط بهینهٔ به‌دست آمده در تکرارهای مختلف تقریباً یکسان است، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم از تکرارپذیری بالایی برخوردار است و به‌خوبی توانسته‌اند نقاط بهینهٔ مسئله را تعیین نماید. بررسی زمان اجرای الگوریتم نیز نشان می‌دهد که الگوریتم از سرعت بسیار بالایی در تعیین نقاط بهینه برخوردار است. همان‌طور

که در شکل ۹ الف مشاهده می‌شود نمودار الگوریتم ازدحام ذرات پس از ارزیابی حدود ۳۵۰ پاسخ به همگرایی رسیده است. بنابراین می‌توان دریافت که الگوریتم تنها با ارزیابی ۳۵۰ پاسخ، نقاط بهینهٔ مناسب مسئله را تعیین کرده‌است، که نشان‌دهندهٔ توانایی بالای این الگوریتم در قابلیت اکتشاف و استخراج نقاط بهینهٔ فضای مسئله است.

همچنین مطابق شکل ۹ ب نیز مشاهده می‌شود نمودار الگوریتم ازدحام ذرات در زمان بسیار کوتاهی ارزیابی فضای مسئله را اغاز کرده است و در زمان حدود ۰/۰۳ ثانیه به همگرایی رسیده است. با توجه با آزمایش‌های این تحقیق و خروجی الگوریتم می‌توان نتیجه گرفت که EC ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر، اسیدیته ۷/۹، درصد مادهٔ آلی ۲/۹۵ و میزان رس ۵۰ درصد، بهینه‌ترین مقادیر پارامترهای خاک هستند که پارامترهای خروجی پساب آن‌ها شامل مقادیر اسیدیته خنثی بالای ۷، TSS ۹۰ ، آهن ۱ و منگنز ۲/۳ میلی‌گرم بر لیتر بودند. Tedoldi و همکاران (۲۰۱۶) معتقدندکه قلیایی شدن خاک باعث حذف فلزات سنگین از پساب عبوری خواهد شد (Tedoldi *et al*., 2016). نتایج این پژوهش منطبق بر پیش‌بینی Eslami و همکاران (۲۰۱۸) است که ممکن است میزان و تغییر سطوح پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک بر کیفیت پساب عبوری از خاک تأثیر داشته باشد (Eslami *et al*., 2018).

Abdullaو همکاران (۲۰۲۰) بعد از مطالعهٔ حذف آهن از پساب با استفاده از یک فیلتر ترکیبی به این نتیجه رسیدند که افزایش pH محیط تا حدود ۶ باعث افزایش نرخ حذف آهن خواهد شد و برای بالای ۶ این نرخ کاهش می‌یابد (Abdulla *et al*., 2020). نتایج پژوهش Abdulla و همکاران (۲۰۲۰)، منطبق بر نتایج تحقیق حاضر و تحقیق Tedoldiو همکاران (۲۰۱۶) نیست. بر خلاف باور Abdulla و همکاران (۲۰۲۰)، که معتقدند افزایش غلظت جاذب کربن آلی باعث افزایش نرخ حذف آهن خواهد شد، در تحقیق حاضر رابطهٔ معنی‌داری بین درصد مادهٔ آلی و آهن یافت نشد، Nusrati و همکاران (۲۰۱۹)، عنوان کردند که تغییرات هدایت الکتریکی در خاک باعث تغییرات در میزان کل مواجد جامد محلول پساب خواهد شد، هرچند که مواد جامد محلول به‌عنوان یک پارامتر پاسخ در این تحقیق در نظر گرفته نشد (Nusrati *et al*., 2019). اما با توجه به نتایج این پژوهش هیچ رابطه‌ای بین هدایت الکتریکی و میزان کل مواد جامدمعلق وجود نداشت. بر اساس تحقیق Efeovbokhan و همکاران (۲۰۱۹)، که از خاک رس و خاک اره به‌عنوان فیلتر برای تصفیهٔ پساب استفاده کردند که در نتیجهٔ آن میزان مواد جامد محلول به حد مجاز قابل پذیرش سازمان بهداشت جهانی رسید (Efeovbokhan *et al*., 2019). این رابطه بین میزان مواد جامدمعلق و درصد رس خاک در تحقیق حاضر نیز معنی‌دار است و با افزایش درصد رس میزان TSS کاهش پیدا می‌کند. مطابق تحقیقات Efeovbokhan و همکاران (۲۰۱۹)، فیلتر ترکیبی خاک رس و خاک اره باعث بهبود و افزایش pH از ۴/۵ به ۷/۰۲ شده است که در این پژوهش هیچ رابطه‌ای بین میزان درصد رس و اسیدیته پساب یافت نشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً خاک اره در بهبود اسیدیته تأثیر داشت و یا اینکه محیط آن فیلتر ترکیبی قلیایی بود که منجر به کاهش اسیدیته پساب شد.

References

Abdulla, G., Kareem, M.M., Hashim, K. S., Muradov, M., 2020. Removal of iron from wastewater using a hybrid filter Removal of iron from wastewater using a hybrid filter. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 888(2020), 012035.

Box, G.E.P., Wilson, K.B., 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. Journal of the Royal Statistical Society, Series B 13(1), 1-45.

Bergh, F., Engelbrecht, A.P., 2001. Effects of swarm size on cooperative particle swarm optimizers. Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation July 2001, 892-899.

Efeovbokhan, V.E., Olurotimi, O.O., Yusuf,

E.O., Abatan, O.G., 2019. Production of Clay Filters for Waste Water Treatment Production of Clay Filters for Waste Water Treatment 1378(3): 20-28.

Eslami, H., Khosravi, R., Peirovi, R., Taghavi, M., 2018. Assessment of Groundwater Quality in Yazd-Ardakan Plain for Agricultural Purposes Using Geographic Information System (GIS). Journal of Health and Hygiene 8(500429), 575-586. (In Persian).

Gong, C., Ren, X., Han, J., Wu, Y., Gou, Y., Zhang, Z., He, P., 2022. Toxicity reduction of reverse osmosis concentrates from petrochemical wastewater by electrocoagulation and Fered-Fenton treatments. Chemosphere 286(P1), 131582.

Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle Swarm Optimization". Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV. pp: 1942-1948.

Kadam, A. M., Oza, G.H., Nemade, P.D., Shankar, H. S., 2008. Pathogen removal from municipal wastewater in Constructed Soil Filter. Ecological Engineering 33(1), 37-44.

Kadam, A., Oza, G., Nemade, P., Dutta, S., Shankar, H., 2008. Municipal wastewater treatment using novel constructed soil filter system. Chemosphere 71(5), 975-981.

Kaynar, U.H., Kaynar, S.Ç., Karali, E.E., Ayvacıkli, M., Can, N., 2021. Adsorption of thorium (IV) ions by metal ion doped ZnO nanomaterial prepared with combustion synthesis: Empirical modelling and process optimization by response surface methodology (RSM). Applied Radiation and Isotopes 178, 109955.

Linnér, E., 1970. Microsurgical trabeculectomy “ab externo” in glaucoma. Transactions of the Ophthalmological Societies of the United Kingdom 89, 475-479.

Mao, N., Song, M., Pan, D., Deng, S., 2018. Comparative studies on using RSM and TOPSIS methods to optimize residential air conditioning systems. Energy 144, 98-109.

Nusrati, K., Rajabi, A., Sayadi, M., 2020. The effect of physical and chemical properties of soil on quantitative and qualitative parameters of groundwater in villages of Mallard city, Tehran province 73(1), 169-183.

Naeth, J., di Primio, R., Horsfield, B., Schaefer, R. G., Shannon, P.M., Bailey, W.R., Henriet, J.P., 2005. Hydrocarbon seepage and carbonate mound formation: A basin modelling study from the Porcupine Basin (offshore Ireland). Journal of Petroleum Geology 28(2), 147-166.

Sharma, S., Simsek, H., 2020. Sugar beet industry process wastewater treatment using electrochemical methods and optimization of parameters using response surface methodology. Chemosphere 238, 124669.

Tedoldi, D., Chebbo, G., Pierlot, D., Kovacs, Y., Gromaire, M.C., 2016. Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review. Science of the Total Environment 569–570, 904-926.

Tian, X., Song, Y., Shen, Z., Zhou, Y., Wang, K., Jin, X., Han, Z., Liu, T., 2019. A comprehensive review on toxic petrochemical wastewater pretreatment and advanced treatment. Journal of Cleaner Production 118692.

Toolabi, A., Malakootian, M., Ghaneian, M.T., Esrafili, A., Ehrampoush, M.H., AskarShahi, M., Tabatabaei, M., Khatami, M., 2019. Optimizing the photo catalytic process of removing diazinon pesticide from aqueous solutions and effluent toxicity assessment via a response surface methodology approach. Rendiconti Lincei 30(1), 155-165.