

## مدل‌سازی تأثیر کانال زئولیت بر پساب خروجی از تصفیه‌خانه شهرک صنعتی بزرگ

## شیراز

سحر شیبانی<sup>۱\*</sup>، بهروز ابولپور<sup>۲</sup> و امیر اسکندری<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری اکرواکولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

۲. استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس (abolpour@yahoo.com)

۳. کارشناس ارشد زمین‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز (Amireskandari61@gmail.com)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۰

## چکیده

در این مطالعه مدل‌های ریاضی ارتباط بین متغیرهای فاضلاب ورودی و خروجی تعیین شد. نتایج آزمون ضریب همبستگی چند متغیره نشان داد که دو متغیر (TSS, TDS) بهترین ارتباط را با COD و EC خروجی دارد و ضرایب همبستگی ارتباط بین COD با TDS و TSS به ترتیب برابر با ۸۳ و ۹۰ درصد است. نتایج روابط خودهمبستگی میانگین متحرک جامع نشان داد گام زمانی یک روز بهترین رابطه را نسبت به سایر مدل‌ها در تخمین COD دارد. لذا، با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی و کلاس‌بندی تغییرات با داده‌های نرمال و غیرنرمال مقادیر روزانه COD از مقادیر روز قبل TSS و TDS تخمین زده شد. اما ضرایب همبستگی به دست آمده رضایت‌بخش نبود. در نهایت، از انطباق سیستم‌های فازی استفاده شد که مدل شبیه‌سازی حاصل مطابقت خوبی ( $R^2=0.76$ ) نشان داد. نتایج نشان داد که منحنی تغییرات COD(t) نسبت به TDS(t-1) نقطه عطفی دارد که در TDS(t-1) برابر ۱۷۴۶ ppm اتفاق می‌افتد. در این مقدار TDS توان پالایش زئولیت معادل COD برابر ۵۲ خواهد بود. این نقطه آستانه تأثیرپذیری زئولیت بر تصفیه آب در خصوص COD است. برای مدیریت تصفیه فاضلاب میزان آلاینده‌های ورودی به ایستگاه، همچنین حجم فاضلاب عبوری از کانال زئولیت باید به‌طور هم‌زمان کنترل شود.

## کلیدواژه

بهینه‌سازی، زئولیت، شبیه‌سازی فازی، فاضلاب صنعتی.

## ۱. سرآغاز

فاضلاب مورد نیاز است (Filippidis et al., 2015a). امروزه، استفاده از فرایندهای جذب در تصفیه پساب‌های صنعتی به دلیل آسانی برپایی سیستم تصفیه، هزینه کمتر، همچنین بازیابی و استفاده مجدد از جاذب‌ها نسبت به سایر روش‌های تصفیه برتری ویژه‌ای دارد (Da'na & Sayari, 2011). برای جلوگیری از زیان‌های محیط‌زیستی لازم است از تخلیه فاضلاب‌ها در آب‌های پذیرنده جلوگیری شود. برای حذف این آلاینده‌ها، تکنیک‌های متعددی در

در طول چند دهه گذشته، رشد سریع جمعیت و توسعه صنعتی سبب افزایش قابل توجه مصرف آب شیرین و تولید فاضلاب شده است. تقاضای آب شیرین در حال حاضر بیش از عرضه است، بنابراین در اغلب موارد برای به دست آوردن آب آشامیدنی مورد نیاز با کیفیت بالا، همچنین تولید پساب سازگار با محیط‌زیست استفاده از روش‌های مقرون به صرفه تصفیه پساب در حوزه ذخایر آب و

سبب شده است که از زئولیت‌ها به‌عنوان جاذب فلزات سنگین، رنگ‌ها، سورفکتانت‌ها و سایر ترکیبات آلاینده استفاده شود (شهبازی، ۱۳۹۴).

استفاده از زئولیت‌ها به‌دلیل کم‌هزینه بودن، در دسترس بودن در نقاط مختلف جهان، خواص مکانیکی و حرارتی خوب، و ظرفیت جذب بالا به‌سرعت گسترش پیدا کرده است (Misaelides, 2011). استفاده از مواد جاذب در فرایند تصفیه سبب افزایش کارایی آن از طریق افزایش حذف فلزات سنگین می‌شود. برای مثال، استفاده از فیلترهای زئولیت به‌عنوان جاذب در حذف آلاینده‌ها از پساب سبب کاهش آثار محیط‌زیستی و استفاده مجدد از آب می‌شود (Wang & Peng, 2010).

انتخاب کاتیون‌ها با استفاده از زئولیت برای تعویض کاتیونی فلزات سنگین در فاضلاب اهمیت زیادی دارد. محققان دریافتند که Pb بیشترین گرایش تعویض کاتیونی برای اکثر زئولیت‌ها را دارد. لازم به ذکر است که اولویت در انتخاب تعویض کاتیونی به غلظت یون و pH محلول نیز بستگی دارد. به‌علاوه، در جذب فلزات سنگین با استفاده از زئولیت باید در سینتیک تعویض یونی نیز در نظر گرفته شود (Wang & Peng, 2010). برای مثال، تصفیه فاضلاب ناحیه صنعتی تسالونیک با pH حدود ۷/۷ با استفاده از ۶/۴ گرم زئولیت سبب حذف بو و کاهش pH و رسیدن آن به حدود ۷/۳ می‌شود. علاوه‌بر آن، افزایش کیفیت آب از طریق ۷۰ درصد کاهش  $\text{NO}_3^-$ ، ۷۶ درصد کاهش COD، ۹۷ درصد کاهش  $\text{P}_2\text{O}_5$ ، ۵۰ درصد کاهش Pb و ۸۸ درصد کاهش Cr حاصل شد. همچنین، رسوب زئولیت بی‌بو و منسجم و برای دفع مناسب است (Filippidis et al., 2015b).

نتایج حاصل از تحقیقات انجام‌شده نشان‌دهنده این واقعیت است که در صورت تماس فاضلاب‌های رقیق با زئولیت‌ها در مدت زمان مطلوب، زئولیت‌ها قادر است غلظت کاتیون‌های مزاحم در این فاضلاب‌ها را حتی به پایین‌تر از سطح مورد نظر استانداردهای تخلیه فاضلاب به

سال‌های اخیر در نقاط مختلف جهان به‌کار گرفته شده است که می‌توان جذب سطحی، بیوتکنولوژی، فرایندهای کاتالیزوری، فرایندهای هسته‌ای، فرایندهای تابش (تجزیه یونی)، و فرایندهای استفاده از مواد مغناطیسی را نام برد. در حال حاضر اعتقاد بر این است که فرایند جذب روش ساده و مؤثری در تصفیه به‌شمار می‌رود. از جمله جاذب‌ها می‌توان کربن فعال، مواد معدنی خاک رس و زئولیت را نام برد. اعتبار جایگزین کردن زئولیت‌های طبیعی و مصنوعی در فرایند تصفیه فاضلاب‌ها در حال بررسی است. به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد زئولیت از جمله تبادل کاتیونی بالا، در دسترس بودن و هزینه‌های نسبتاً کم، به‌طور گسترده‌ای جاذب در فرایندهای جداسازی و خالص‌سازی در دهه‌های گذشته استفاده شده است (Filippidis et al., 2015b).

فاضلاب با منشأ صنعتی ممکن است حاوی انواع ترکیبات معلق، محلول، کلوئیدی یا امولسیون آلی و معدنی مضر باشد، که برخی از آن‌ها را می‌توان با موفقیت با استفاده از زئولیت‌های با کیفیت بالا از هم جدا کرد. زئولیت‌های طبیعی از دسته کانی‌های رسی میان‌حفره با ابعاد حفره میکرومتری ( $10-3 \text{ \AA}$ ) است که از دیرباز جاذب طبیعی به‌کار می‌رفته است (Kim et al., 2012). در حال حاضر، بیش از چهل نوع کانی زئولیت طبیعی کشف و بیش از ۱۵۰ نوع زئولیت مصنوعی با ویژگی‌های فیزیکی (اندازه منفذ، اندازه بلور، ظرفیت تبادل یونی و ظرفیت جذب) و ترکیب شیمیایی منحصربه‌فرد ساخته شده است (مالکی، ۱۳۹۰؛ Kim et al., 2012). ساختار متخلخل زئولیت‌ها، حضور برخی کاتیون‌های فلزی قلیایی و قلیایی خاکی در ساختار آن به‌همراه مقاومت بالای مکانیکی و شیمیایی آن و ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند خصوصیات جذبی، تعویض کاتیونی، غربال مولکولی و خواص کاتالستی را به‌وجود آورده است. استفاده از زئولیت‌ها، به‌خصوص زئولیت‌های طبیعی، در تصفیه پساب‌های صنعتی نه‌تنها به‌لحاظ کارایی آن بسیار بااهمیت است، بلکه از نظر اقتصادی نیز بسیار مقرون‌به‌صرفه است. این امر

مباحث آلودگی محیط‌زیست به‌واسطه پیچیدگی سیستم، اعتبار بالا و قابل‌اعتماد بودن توصیه کردند.

همچنین، Chan و همکاران (۲۰۰۱) فرایندهای تصفیه فاضلاب صنعتی را به‌کمک مدل تحلیلی سه مرحله‌ای تلفیقی شامل منطق فازی، الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی مدل‌سازی کردند. مدل مذکور برای نمونه‌ای مطالعاتی در تایوان با موفقیت استفاده شد. Pai و همکاران (۲۰۰۷) برای پیش‌بینی پارامترهای کیفی پساب خروجی از تصفیه‌خانه بیمارستانی در تایوان از هر دو روش شبکه مصنوعی و سیستم فازی استفاده و با استفاده از مشخصه‌های pH، دما، املاح جامد (SS) و COD فاضلاب در ورودی مدل، COD و SS پساب را پیش‌بینی کردند. نتایج آنان نیز مبین کارایی مناسب شبکه عصبی طراحی شده و سامانه‌های فازی به‌کار برده شده بود. Yalpir و Yel (۲۰۱۱) با استفاده از سیستم استنتاج فازی مام‌دینی موفق به پیش‌بینی عوامل کیفی پساب از تصفیه‌خانه‌های شهری در ترکیه شدند. آنان از مشخصه‌های pH، COD، BOD، و SS فاضلاب در ورودی سیستم فازی مام‌دینی برای پیش‌بینی COD، BOD، pH و SS پساب بهره گرفتند. زارع‌ایبانه و همکاران (۱۳۹۱) نیز در ارزیابی کارایی تصفیه‌خانه اکباتان با استفاده از پارامترهای pH، COD، BOD، TSS، و SS به نتیجه مطلوبی (۹۲ درصد) دست یافتند.

مدل‌های فازی به‌دلیل ویژگی عدم قطعیت آ اهمیت و کاربرد دارد (Abolpour and Javan, 2007). کاربرد این مدل‌ها می‌تواند زمینه ارتقای بهره‌وری از پساب تصفیه‌خانه‌ها را فراهم و امکان بهره‌وری منطقی و اقتصادی از منابع آبی نامتعارف و برنامه‌ریزی برای استفاده تلفیقی بهینه از این آب‌ها را میسر سازد. اهمیت کاربرد این مدل‌ها با توجه به محدودیت منابع آب و مشکلات محیط‌زیستی ضروری است (شکری و همکاران، ۱۳۹۳). لذا، در این تحقیق نیاز اکسیژن شیمیایی (COD) و مقادیر هدایت الکتریکی (EC) خروجی از تصفیه‌خانه شهرک صنعتی بزرگ شیراز بر اساس سایر فاکتورهای اندازه‌گیری پساب

محیط‌زیست برساند. راهبری صحیح تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از مهم‌ترین عوامل مدیریتی در بخش آب و فاضلاب کشور به‌شمار می‌آید (رفعت متولی و همکاران، ۱۳۹۱). تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تابعی از عوامل مختلف کیفی فاضلاب، شرایط مدیریتی تصفیه‌خانه و مسائل محیط‌زیستی است. دفع فاضلاب با مشخصه‌های کیفی قابل‌قبول به انواع منابع پذیرنده یکی از مشکلات محیط‌زیستی است که جوامع امروزی با آن مواجه‌اند (زارع‌ایبانه و همکاران، ۱۳۹۱). بنابراین، استفاده از روش‌هایی که بتواند عملکرد و کارایی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب را، به‌خصوص بر اساس تغییرات کمی و کیفی فاضلاب ورودی، پیش‌بینی کند اهمیت ویژه‌ای دارد.

مدل‌های عددی به‌لحاظ نیاز به داده‌های فراوان، وقت‌گیر بودن فرایند کالیبره‌کردن، به‌هزینه زیادی نیاز دارد (Nadiri et al., 2013). علاوه بر این در مدل‌های عددی، محدودیت‌هایی به‌لحاظ کالیبره‌کردن ضرایب واکنش‌ها و صحت‌سنجی آن وجود دارد که با افزایش تعداد مشخصه‌ها و تأثیرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر، دقت پیش‌بینی رفتار کیفی فاضلاب کاهش می‌یابد. این در حالی است که در مدل‌های هوش مصنوعی بدون در نظر گرفتن معادلات پیچیده، می‌توان دینامیک حاکم بر سیستم را استخراج و از این طریق، خروجی‌های مدل را پیش‌بینی کرد (Hamed et al., 2004).

تصفیه فاضلاب شامل عملیات عمده و پیچیده فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است. بیشتر این فرایندها رفتار غیرخطی دارد که با مدل‌های خطی ریاضی به‌سختی تشریح می‌شود (رفعت متولی و همکاران، ۱۳۹۱). لذا، در سال‌های اخیر، مطالعات فراوانی درباره بررسی رفتاری تصفیه‌خانه‌ها بر اساس معیارهای کیفی پساب با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی مانند منطق فازی و شبکه‌های عصبی صورت گرفته است (Sahoo et al., 2005; Pai et al., 2009; Erdirencelebi & Yalpir, 2011). به‌طوری که Chan و Huang (۲۰۰۳) استفاده از این روش‌ها را در

Wetland است. نخستین مرحله تصفیه بیولوژیکی در لاگون‌های بی‌هوازی است که عمل تثبیت فاضلاب در آن انجام می‌شود و باکتری‌ها نخست گاز و بعد از آن متان تولید می‌کنند. در این مرحله، بارآلودگی کاسته می‌شود و مقدار COD کاهش می‌یابد. برای اینکه فاضلاب به زمان ماند مناسب دست‌یابد و فرصت کافی برای انجام واکنش بیولوژیکی فراهم شود، دو عدد لاگون و یک حوضچه آرامش بین لاگون‌ها طراحی شد که از نوع Plug flow reactor و به صورت مارپیچی است. این سیستم باعث کاهش مصرف انرژی و هزینه بهره‌برداری می‌شود. عمق لاگون‌ها ۵ تا ۶ متر و عمق حوضچه آرامش ۱۲۰ cm است. فاضلاب نخست وارد لاگون شماره ۱ می‌شود و پس از گذشتن از حوضچه آرامش به لاگون شماره ۲ می‌ریزد. در حوضچه آرامش فاضلاب فرصت (زمان ماند) کافی برای تکمیل فرایند بیولوژیکی را پیدا می‌کند و لجن تولیدی در طول مسیر ته‌نشین می‌شود و به واحد بعدی منتقل نمی‌شود. تخلیه لجن از لاگون‌ها هفته‌ای یک بار انجام می‌گیرد.

ورودی مانند pH، دما، کل مواد معلق در آب (TSS)، کل مواد جامد محلول (TDS) تخمین زده شد. در این صورت مقادیر شاخص‌های فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه چون pH، دما، TSS و TDS، به‌عنوان مقادیر معلوم و EC و COD به‌عنوان مقادیر مجهول در نظر گرفته شد. در ادامه، مدل ریاضی ارتباط بین این پارامترها تعیین شد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. تصفیه‌خانه مورد مطالعه

ایستگاه تصفیه مورد مطالعه در شهرک صنعتی بزرگ شیراز در استان فارس قرار دارد (شکل ۱). فاضلاب ۱۱۰۰ واحد صنعتی کوچک و متوسط از طریق شبکه فاضلاب جمع‌آوری و در این ایستگاه تصفیه شد. ظرفیت این تصفیه‌خانه ۲۵۰۰ مترمکعب در روز و در حال حاضر ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمکعب در روز ورودی تصفیه‌خانه است. روش تصفیه کاملاً بیولوژیکی است و از هیچ ماده شیمیایی‌ای در راکتورها استفاده نمی‌شود. واحدهای تصفیه‌خانه شامل لاگون و حوضچه آرامش با سیستم بی‌هوازی، سیستم UABR، UASB، سلکتور، SBR و



شکل ۱. موقعیت ایستگاه تصفیه مورد مطالعه

سنجش کیفیت پساب و ارزیابی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب معمولاً از سنجش و ثبت پارامترهای دما (T)، اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD)، کل جامدات معلق (TSS) و pH در خروجی تصفیه‌خانه و مقایسه آن با مقادیر ورودی

### ۲.۲. داده‌ها

تحقیق حاضر با هدف مدل‌سازی تأثیر کانال زئولیت بر فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه شهرک صنعتی بزرگ شیراز به‌منظور بهبود و تکمیل فرایند تصفیه انجام شد. در

ضریب همبستگی و مقادیر P (با بازه ۹۵ درصد) از آزمون همبستگی چندمتغیره حاصل شد (جدول ۱).

برای تعیین مشخصات آماری داده‌ها (جدول ۲) به‌ویژه چولگی و کشیدگی استاندارد که در تعیین نحوه توزیع داده‌ها به‌کار می‌رود از روش تجزیه و تحلیل آماری مرسوم استفاده شد. مجموعه داده‌های خام به‌دست‌آمده از طریق پایش فاضلاب در تحلیل آماری و بدون هرگونه پردازشی در آزمون ضریب همبستگی برای پیش‌بینی پارامترهای کیفی فاضلاب استفاده شد. این آزمون برای تعیین ضریب همبستگی بین COD، EC فاضلاب خروجی و سایر فاکتورهای فاضلاب ورودی به‌کاررفت. سپس، از مجموع مدل‌های خطی و غیرخطی در آزمون منحنی تطبیقی برای شبیه‌سازی این همبستگی استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی در مرحله آزمون، همچنین نتایج حاصل از آن در مرحله صحت‌سنجی در انتخاب مدل مناسب استفاده شد. عملکرد مدل‌ها با توجه به ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بررسی شد. سپس، از مدل‌های سری زمانی مانند (ARIMA) استفاده گردید. همچنین، برای دستیابی به مدل شبیه‌سازی برتر، از داده‌های نرمال‌شده COD روزانه خروجی و TDS روز قبل استفاده شد. برای نرمال‌کردن داده‌ها از رابطه (۱) استفاده شد.

$$(X_{\max} - X_i) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$X_{\max}$  و  $X_{\min}$  مقادیر حداکثر و حداقل متغیر X است. مجدداً با بهره‌گیری از مدل‌های موجود در روش منحنی تطبیقی (curve fitting)، از مدل‌های خطی و غیرخطی متعددی برای برقراری ارتباط بین داده‌های نرمال‌شده COD خروجی روزانه و TDS ورودی یک روز قبل استفاده شد. در نهایت، برای بهبود شبیه‌سازی این ارتباط از روش تلفیقی خوشه‌بندی (clustering) و سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده شد.

استفاده می‌شود (میرانزاده و بابامیر، ۱۳۸۲). اهمیت مشخصه pH به‌علت ارتباط با فعالیت‌های بیولوژیکی و مشخصه دما به‌علت تأثیرگذاری در سرعت نیتروفیکاسیون است (ذوقی و همکاران، ۱۳۸۹). مشخصه‌های BOD و COD به‌منزله ترکیبات آلی قابل تجزیه بیولوژیکی پیش‌ساز اسیدهای چرب فرار توصیف شده است که در افزایش بازده آلاینده‌های ازت و فسفر فاضلاب نقش دارد (بینا و همکاران، ۱۳۸۴). کاربرد این مشخصه‌ها را در مدل‌سازی عملکرد تصفیه محققان مختلف گزارش کرده‌اند (محو و همکاران، ۱۳۸۸؛ Pai et al., 2007).

در این راستا، پس از انجام مراحل تصفیه پساب خروجی، برای تکمیل و بهبود تصفیه از کانال‌های زئولیت عبور داده شد. تغییرات صورت‌گرفته در پساب قبل و بعد از عبور از این کانال با نمونه‌برداری منظم (۹۰ نمونه‌برداری در سه ماه اسفند، فروردین و اردیبهشت) در آزمایشگاه مرجع محیط‌زیست بر اساس شاخص‌های مورد نظر اندازه‌گیری شد. فاکتورهای pH، دما، TSS، TDS، EC، و COD فاضلاب ورودی و خروجی به کانال زئولیت اندازه‌گیری شد. فاکتورهای اندازه‌گیری‌شده و روش اندازه‌گیری آن در فاضلاب ورودی و خروجی مشابه بود.

### ۳.۲. مراحل مدل‌سازی

به‌منظور مدل‌سازی تأثیر کانال زئولیت بر خصوصیات فاضلاب در قدم نخست بررسی‌های جامعی از چگونگی ارتباط بین مقادیر روزانه هدایت الکتریکی (EC) برحسب میکروزیمنس و نیاز اکسیژن شیمیایی COD فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه شهرک صنعتی بزرگ شیراز پس از عبور از کانال زئولیت بر اساس سایر فاکتورهای اندازه‌گیری‌شده فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه بررسی شد. به این منظور، مقادیر شاخص‌هایی چون pH، دما، TSS، TDS، از فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه مقادیر معلوم و فاکتورهایی چون EC، COD مقادیر مجهول در نظر گرفته شد. با استفاده از بیش از ۱۰۰ روز آمار اندازه‌گیری از این متغیرها، مقادیر

جدول ۱. نتایج آزمون ضریب همبستگی چند متغیره

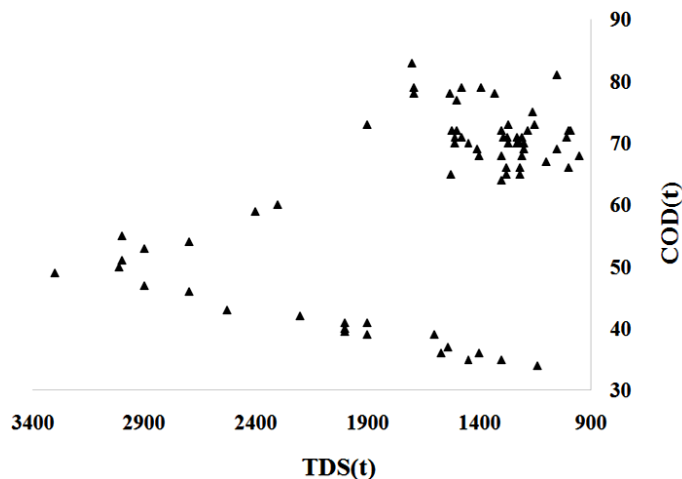
TSS	TEM	TDS	pH	EC	COD	EC	COD	
ورودی	ورودی	ورودی	ورودی	ورودی	ورودی	خروجی	خروجی	
۰/۳۹	۰/۱۶-	۰/۴۷-	۰/۱۶-	۰/۴۱-	۰/۴۷	۰/۸۲		COD خروجی
۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰		
۰/۵۳	۰/۳۶-	۰/۴۶-	۰/۲۱-	۰/۳۵-	۰/۲۰		۰/۸۲	EC خروجی
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۹		۰/۰۰	
۰/۰۵-	۰/۲۱	۰/۰۹-	۰/۰۹-	۰/۳۶-		۰/۲۰	۰/۴۷	COD ورودی
۰/۶۴	۰/۰۶	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۰۰		۰/۰۹	۰/۰۰	
۰/۰۱-	۰/۱۱	۰/۸۴	۰/۱۹		۰/۳۶-	۰/۳۵-	۰/۴۱-	EC ورودی
۰/۳۹	۰/۳۲	۰/۰۰	۰/۱۰		۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۲۸		۰/۱۹	۰/۰۹-	۰/۲۱-	۰/۱۶-	pH ورودی
۰/۸۴	۰/۹۹	۰/۰۱		۰/۱۰	۰/۴۴	۰/۰۷	۰/۱۷	
۰/۲۱-	۰/۲۳		۰/۲۸	۰/۸۴	۰/۰۹-	۰/۴۶-	۰/۴۷-	TDS ورودی
۰/۰۷	۰/۰۴		۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۰	
۰/۳۰-		۰/۲۳	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۳۶-	۰/۱۶-	TEM ورودی
۰/۰۱		۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۳۳	۰/۰۶	۰/۰۰	۰/۱۵	
	۰/۲۸-	۰/۲۱-	۰/۰۲	۰/۱۰-	۰/۰۵-	۰/۵۳	۰/۳۹	TSS ورودی
	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۸۴	۰/۳۹	۰/۶۴	۰/۰۰	۰/۰۰	

جدول ۲. خلاصه نتایج آماری متغیرها

COD	EC	COD	EC	pH	TDS	TEM	TSS	
خروجی	خروجی	ورودی	ورودی	ورودی	ورودی	ورودی	ورودی	
۶۲/۵۸	۱۵۰۷/۵۹	۹۸/۲۱	۲۳۶۸/۰۴	۸/۶۰	۱۵۶۶/۷۴	۱۹/۱۱	۵۱/۲۶	متوسط
۱۳/۸۱	۱۵۲/۴۵	۱۹/۵۹	۵۶۹/۴۵	۰/۲۷	۵۹۰/۳۶	۰/۵۳	۶/۳۷	انحراف معیار
%۲۲/۰۷	%۱۰/۱۱	%۱۹/۹۵	%۲۴/۰۵	%۳/۱۴	%۳۷/۶۸	%۲/۸۰	%۱۲/۴۴	ضریب واریانس
۳۴/۰۰	۱۲۰۰/۰۰	۸۰/۰۰	۱۶۹۰/۰۰	۸/۰۰	۸۵۰/۰۰	۱۸/۰۰	۴۰/۰۰	حداقل
۸۳/۰۰	۱۷۵۰/۰۰	۱۸۰/۰۰	۴۰۰۰/۰۰	۹/۰۰	۳۳۰۰/۰۰	۲۱/۰۰	۷۲/۰۰	حداکثر
۴۹/۰۰	۵۵۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۲۳۱۰/۰۰	۱/۰۰	۲۴۵۰/۰۰	۳/۰۰	۳۲/۰۰	دامنه تغییرات
۲/۹۸-	۱/۴۹-	۸/۷۳	۴/۰۰	۱/۳۷-	۴/۸۶	۲/۴۶	۳/۴۷	چولگی استاندارد
۱/۱۱-	۱/۴۵-	۱۰/۹۸	۰/۸۳	۰/۱۰-	۱/۹۳	۲/۰۰	۱/۹۵	کورتیس استاندارد

طرفی، مقادیر COD خروجی بهترین سطح ارتباط را با مقادیر TDS ورودی روزانه نشان داد (شکل ۲).

بر اساس نتایج به دست آمده از این آزمون، بهترین ارتباط چه از نظر ضریب همبستگی و چه از نظر مقادیر P بین EC خروجی و TSS ورودی روزانه مشاهده شد. از



شکل ۲. مقادیر COD(t) خروجی و TDS(t) ورودی به تصفیه خانه

از آنجا که در فرایند تصفیه عموماً زمان ماند از عوامل کلیدی و اثرگذار در شاخص های کیفی پساب است، تحلیل و مدلسازی این روند بر تصفیه مؤثر است. لذا، در ادامه برای تعیین ارتباط بین متغیرهای ورودی چون TSS و TDS از توابع سری های زمانی همچون روش ARIMA یک تا سه روزه استفاده شد. پنج مدل زمانی برای انتخاب بهترین مدل مقایسه شد (جدول ۳).

در این صورت برای شبیه سازی مقادیر COD و EC خروجی بر اساس مقادیر TDS و TSS از توابع زیر استفاده شد.

$$COD_E(t) = F(TDS_L(t)) \quad (2)$$

$$EC_E(t) = F(TSS_L(t)) \quad (3)$$

با توجه به اینکه ضرایب همبستگی بین COD با TDS و TSS اختلاف معناداری با هم ندارد، رابطه (۲) به دلیل سهولت اندازه گیری TDS نسبت به TSS برای تخمین میزان COD استفاده می شود.

جدول ۳. نتایج آنالیز سری زمانی مقادیر TDS ورودی

Model	RMSE	MAE	MAPE	ME	MPE	AIC
ARIMA(1,0,0)	۳/۷۶	۲/۹۲	۵/۶۶	۰/۰۰	۰/۴۹-	۲/۷۰
ARIMA(2,0,0)	۳/۷۸	۲/۸۷	۵/۵۷	۰/۰۱	۰/۴۸-	۲/۷۳
ARIMA(1,0,1)	۳/۷۸	۲/۸۸	۵/۵۹	۰/۰۱	۰/۴۸-	۲/۷۳
ARIMA(1,0,2)	۳/۷۵	۲/۷۹	۵/۴۴	۰/۰۵	۰/۳۷-	۲/۷۴
ARIMA(0,1,0)	۳/۹۵	۲/۹۶	۵/۷۵	۰/۰۸-	۰/۴۶-	۲/۷۵

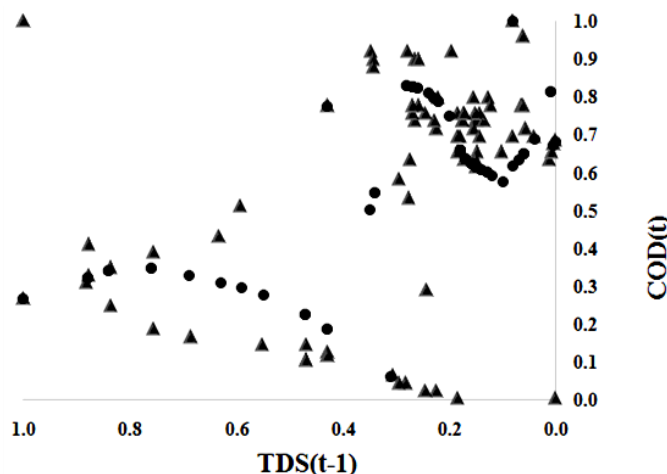
$$COD_E(t) = F(TDS_L(t-1)) \quad (4)$$

$$EC_E(t) = F(TSS_L(t-1)) \quad (5)$$

با توجه به اینکه  $TSS(t)$  با  $TSS(t-1)$  و  $TDS$  با  $TDS(t-1)$  ارتباط خوبی نشان داد، در فرایند مدل‌سازی از این نتایج استفاده شد. در مرحله بعد، ارتباط بین مقادیر  $COD(t)$  و  $TDS(t-1)$  تعیین شد. در شکل ۳،  $COD(t)$  به ازای مقادیر  $TDS(t-1)$  ارائه شده است. در این شکل پراکندگی و ارتباط ضعیف بین این دو متغیر مشاهده می‌شود.

(RMSE) the root mean squared error  
(MAE) the mean absolute error  
(MAPE) the mean absolute percentage error  
(ME) the mean error  
(MPE) the mean percentage error

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز توابع سری‌های زمانی، مشاهده شد که رابطه خودهمبستگی میانگین متحرک جامع (ARIMA) با گام‌های زمانی یک روز بهترین رابطه را با سایر مدل‌ها داراست. بنابراین، روابط (۱) و (۲) که تنها ارتباط روزانه  $COD$  و  $EC$  خروجی را نسبت به  $TSS$  و  $TDS$  همان روز نشان می‌داد به روابط زیر برای تعیین همبستگی بین متغیرها در روز قبل تغییر یافت.



شکل ۳. مقادیر  $COD(t)$  خروجی و مقادیر  $TDS(t-1)$  ورودی و مقادیر تخمینی  $COD(t)$  (نقاط مثلثی) بر اساس  $TDS(t-1)$  (نقاط دایره‌ای) با مدل فازی مام‌دینی

جدول ۴. نتایج خوشه‌بندی مقادیر  $TDS$  و  $TSS$  ورودی روز قبل و مقادیر  $COD$  و  $EC$  خروجی همان روز

Cluster	COD	TDS
۱	۰/۸۶	۰/۳۰
۲	۰/۳۳	۰/۷۷
۳	۰/۰۷	۰/۳۶
۴	۰/۷۵	۰/۱۷
۵	۰/۶۴	۰/۱۲
Cluster	TSS	EC
۱	۰/۶۴	۰/۸۳
۲	۰/۳۰	۰/۶۶
۳	۰/۲۵	۰/۲۷

با توجه به ارتباط ضعیف بین  $COD(t)$  و  $TDS(t-1)$ ، در مدل‌سازی این تغییرات از مدل‌های خطی و غیرخطی موجود در آزمون منحنی تطبیقی (curve fitting) استفاده شد. در بهترین شرایط، ضریب رگرسیون ۰/۵ برای این تغییرات حاصل شد. بنابراین، در مرحله بعدی، به منظور بررسی دلایل این امر از تحلیل خوشه‌بندی تغییرات بر اساس روش متوسط (K-means) و داده‌های نرمالیزه‌شده  $COD(t)$  و  $TDS(t-1)$  استفاده شد (جدول ۴).



۳. اگر  $TDS(t-1)$  کم باشد، آنگاه  $COD(t)$  زیاد است.

۴. اگر  $TDS(t-1)$  نرمال باشد، آنگاه  $COD(t)$  خیلی زیاد است.

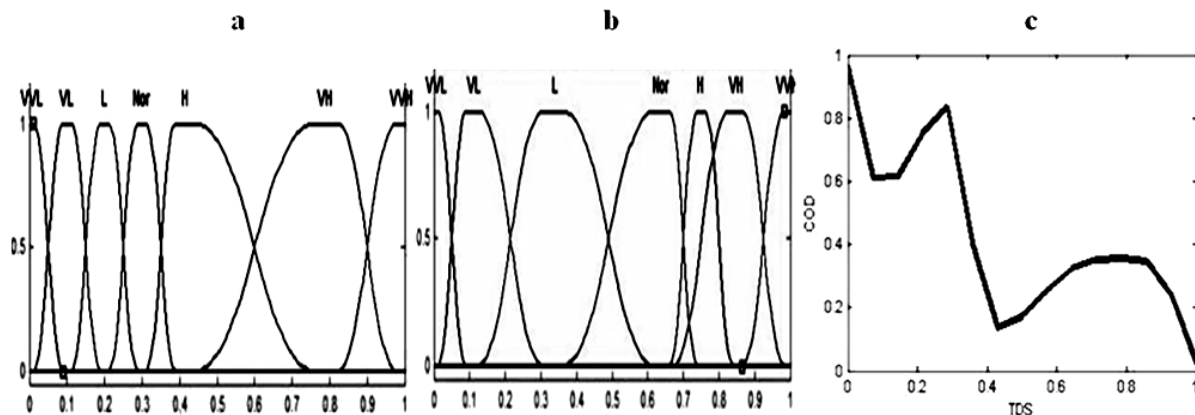
۵. اگر  $TDS(t-1)$  زیاد باشد، آنگاه  $COD(t)$  خیلی کم است.

۶. اگر  $TDS(t-1)$  خیلی زیاد باشد، آنگاه  $COD(t)$  کم است.

۷. اگر  $TDS(t-1)$  خیلی زیاد باشد، آنگاه  $COD(t)$  خیلی خیلی کم است.

شکل این توابع عضویت زنگوله‌ای در نظر گرفته شد.

مقادیر ۰ تا ۱ مقادیر  $TDS(t-1)$  به مدل وارد و مقادیر  $COD(t)$  از مدل محاسبه شد (شکل ۴). در مرحله بعد، به منظور صحت‌سنجی مدل، از داده‌های اندازه‌گیری متغیر ورودی  $TDS(t-1)$  استفاده و مدل بر اساس این مقادیر اجرا شد.



شکل ۴. توابع عضویت مقادیر  $TDS(t-1)$  ورودی (a) و  $COD(t)$  خروجی (b) و نتایج مدل فازی با روش مام‌دینی (c)

میانگین متحرک جامع (ARIMA) با گام‌های زمانی یک روز بهترین رابطه را با سایر مدل‌ها دارد. به عبارتی می‌توان میزان تغییرات روزانه  $TSS$  و  $TDS$  را بر اساس مقادیر آن در روز قبل پیش‌بینی کرد. از سوی دیگر، با توجه به اینکه زمان ماند در پروسه استفاده از زئولیت یک روزه بوده است، با استفاده از این مدل می‌توان مقادیر  $COD$  و  $EC$  خروجی از تصفیه‌خانه را بر اساس مقادیر  $TSS$  و  $TDS$  هر

در مرحله بعد، با استفاده از روش خودآموز مام‌دینی و نتایج خوشه‌بندی اقدامات زیر انجام شد. نخست، بر اساس میانگین هر کلاس توابع عضویت متغیر ورودی  $TDS(t-1)$  و متغیر خروجی  $COD(t)$  تعریف شد. در این صورت ۵ کلاس خیلی کم، کم، نرمال و زیاد و خیلی زیاد برای هر دو متغیر ایجاد شد. و دو تابع خیلی خیلی کم برای شرایط صفر و خیلی خیلی زیاد برای مقدار یک در هر دو متغیر تعریف گردید. بنابراین، به طور کلی، هفت تابع عضویت برای هر کدام از متغیرهای ورودی  $TDS(t-1)$  و خروجی  $COD(t)$  به دست آمد. قوانین فازی بین این توابع در ادامه آمده است.

۱. اگر  $TDS(t-1)$  خیلی خیلی کم باشد، آنگاه  $COD(t)$  خیلی خیلی زیاد است.

۲. اگر  $TDS(t-1)$  خیلی کم باشد، آنگاه  $COD(t)$  نرمال است.

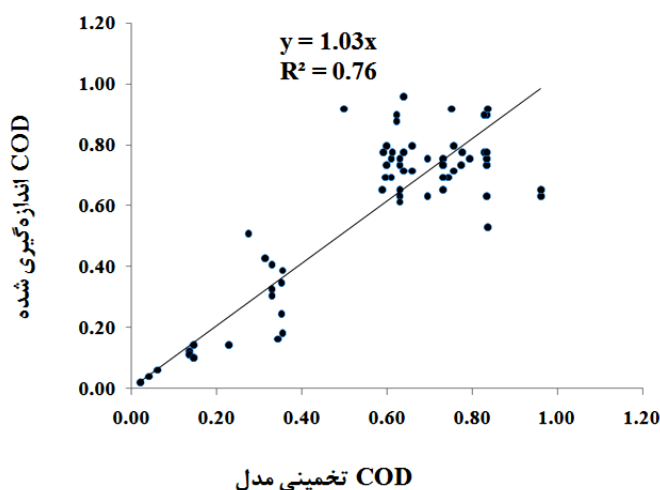
### ۳. نتایج

نتایج آزمون ضریب همبستگی چند متغیره (جدول ۱) نشان داد که دو متغیر  $(TSS, TDS)$  بهترین ارتباط را با  $COD$  و  $EC$  خروجی داراست و ضرایب همبستگی ارتباط بین  $COD$  با  $TDS$  و  $TSS$  به ترتیب ۸۳ و ۹۰ درصد است. علاوه بر این، بر اساس نتایج حاصل از آنالیز توابع سری‌های زمانی مشاهده شد که رابطه خودهمبستگی

نتایج مدل مقادیر محاسبه شده  $COD(t)$  از این مدل با مقادیر اندازه‌گیری آن مقایسه شد (شکل ۵). در شکل ۵، پراکندگی دو مقدار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده  $COD(t)$  نسبت به خط ۱:۱ نمایش داده شده است و ضریب رگرسیون  $R^2=0.76$  به دست آمد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که فرض رفتار فازی و سایر فرضیات در خصوص تعداد و شکل توابع عضویت متغیرها برای روند تغییرات  $COD(t)$  و  $TDS(t-1)$  صحیح است.

روز پیش‌بینی کرد. در نتیجه، برنامه‌ریزان می‌توانند از راهبرد عملی تغییر ظرفیت شبکه جمع‌آوری یا تغییر ظرفیت تبادل یونی ژئولیت در بهینه‌سازی میزان تصفیه استفاده کنند.

به‌منظور صحت‌سنجی مدل فازی از داده‌های اندازه‌گیری متغیر ورودی  $TDS(t-1)$  استفاده و مدل بر اساس این مقادیر اجرا شد (شکل ۳). نتایج نشان داد مدل شبیه‌سازی مطابقت خوبی با پراکندگی داده‌های اندازه‌گیری  $COD(t)$  و  $TDS(t-1)$  دارد. بنابراین، برای بررسی صحت



شکل ۵. مقادیر تخمینی و مشاهده شده  $COD$  خروجی

ورودی، ژئولیت نتوانست نقش تبادل یونی خود را به خوبی ایفا کند. در نتیجه، عملکرد آن در تصفیه نسبت به زمانی که حجم کمتری از فاضلاب و در نتیجه غلظت بیشتر  $TDS$  ورودی وجود داشت کاهش نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای مدیریت ایستگاه تصفیه فاضلاب میزان آلاینده‌های ورودی به ایستگاه، همچنین حجم فاضلاب عبوری از کانال ژئولیت باید به‌طور هم‌زمان کنترل شود.

در ادامه، از چند مدل خطی و غیرخطی در شبیه‌سازی تغییرات بین مقادیر  $EC$  خروجی با  $TSS$  ورودی استفاده شد که ضریب رگرسیون در بهترین شرایط  $0.5$  برای این تغییرات به دست آمد. در مرحله بعد، این فرایند با داده‌های نرمال و غیرنرمال در تعیین تابع بین  $EC$  خروجی فعلی با

همان‌طور که در شکل ۳ و قسمت c شکل ۴ دیده می‌شود، زمانی که  $TDS$  ورودی کم یا زیاد بود،  $COD$  خروجی زیاد یا کم و نزدیک به میزان استاندارد بود. این نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت پالایش ژئولیت ممکن است تحت تأثیر عوامل دیگری قرارگیرد. مقادیر کم  $TDS$  ورودی زمانی مشاهده شد که در منطقه بارندگی اتفاق افتاده بود. بنابراین، حجم فاضلاب ورودی، همچنین غلظت  $TDS$  ورودی تحت تأثیر هرزآب ناشی از باران قرارگرفت. به‌عبارت دیگر، با افزایش حجم فاضلاب ورودی، غلظت املاح کاهش یافت.

در این شرایط میزان حجم فاضلاب ورودی بیش از ظرفیت روزانه کانال ژئولیت بود. با وجود اینکه میزان  $TDS$  ورودی کم بود، به دلیل حجم بالای فاضلاب

شد که ارتباط معناداری نیز بین TSS روزانه با روزهای قبل وجود دارد. این مطلب نیز در مورد متغیر ورودی TDS نیز صادق بود. نرمالیزه‌سازی داده‌های ورودی نقش زیادی در بهتر شدن ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی و حتی در سری‌های زمانی نداشت. آزمون منحنی تطبیقی نیز نشان داد که ارتباط بین متغیرهای ورودی TDS و TSS با متغیرهای COD و EC خروجی ضعیف است و نمی‌توان رابطه خطی یا غیرخطی مناسبی برای شبیه‌سازی آنان به دست آورد. این نتیجه حتی در مورد داده‌های نرمالیزه شده یا ارتباط بین متغیرهای ورودی روزهای قبل با COD و EC هر روز نیز صادق بود. با توجه به عدم انطباق مدل‌های خطی و غیرخطی با داده‌های اندازه‌گیری، این فرض دنبال شد که شرایط حاکم بر تغییرات متغیرهای ورودی و خروجی در فرایند تصفیه از رفتاری فازی برخوردار است و نیاز است با بهره‌گیری از روش‌های دگرآموزی (supervisor) چون روش مام‌دینی این روند تغییرات را مدل کرد.

از نتایج خوشه‌بندی در تعریف میانگین و دامنه تغییرات توابع عضویت متغیرهای ورودی  $TDS(t-1)$  و خروجی  $COD(t)$  استفاده شد. از ارتباط بین کلاس‌های تغییرات ورودی و خروجی قوانین فازی تعریف شد. نتایج مدل فازی حاصل با مقادیر خروجی  $COD$  اندازه‌گیری شده مقایسه شد و مطابقت خوبی به دست آمد ( $R^2=0.76$ ). بنابراین، فرض وجود رفتار فازی بر دامنه تغییرات متغیر ورودی  $TDS(T-1)$  و متغیر خروجی  $COD(t)$  تأیید شد. در نتیجه، این مدل در شبیه‌سازی ارتباط بین این دو متغیر به کار رفت. در خاتمه، بر اساس نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی مشاهده شد که روند تغییرات  $COD(t)$  کاهش و ظرفیت پالایش کانال ژئولیت دارای محدودیت است و تا میزان معینی از  $TDS(t-1)$  توان پایش پساب و کاهش  $COD$  را داراست. در این تحقیق مشاهده شد که منحنی تغییرات  $COD(t)$  نسبت به  $TDS(t-1)$  نقطه عطفی دارد که در  $TDS(t-1)$  برابر ۱۷۴۶ میلی‌گرم در لیتر اتفاق می‌افتد.

TSS ورودی روز قبل استفاده شد. این روش نیز نتوانست ضریب رگرسیون تابع خطی و غیرخطی را بهبود بخشد. بر اساس نتایج خوشه‌بندی، EC خروجی روز فعلی و TSS ورودی روز قبل در سه گروه اصلی طبقه‌بندی شد. برای شبیه‌سازی ارتباط بین  $COD(t)$  و  $TDS(t-1)$  از روش مام‌دینی استفاده گردید. مدل شبیه‌سازی استنتاج فازی نیز انطباق مناسبی با نحوه توزیع داده‌های اندازه‌گیری و مشاهده شده EC خروجی روز فعلی نشان داد.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، در فرایند تصفیه مدل‌سازی نقش بسیار مهمی دارد. با داشتن مدلی از نحوه ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی می‌توان تصمیمات بهینه‌ای در خصوص ادامه فعالیت آن گرفت. علاوه بر این، با چنین مدل‌هایی می‌توان به‌طور لحظه‌ای ارزیابی از عملکرد فرایند تصفیه داشت. در این تحقیق، در مرحله نخست مشاهده شد که بین متغیرهای ورودی TDS و TSS با متغیرهای خروجی EC و COD ارتباط معناداری وجود دارد و این نتیجه از تحلیل‌های ضرایب همبستگی چند متغیره به دست آمد. هر چند این دو متغیر (TSS, TDS) بهترین ارتباط را با COD و EC خروجی داراست، این مطلب صرفاً اتفاقی نیست و ممکن است به دلایل زیر باشد. با توجه به اینکه مقادیر EC خروجی با TSS ورودی ارتباط خوبی دارد، می‌توان نتیجه گرفت که بخش عمده‌ای از شوری خروجی تصفیه‌خانه به دلیل وجود مواد محلول در آب است و تحت تأثیر ژئولیت بر آن چشمگیر نبوده است. این عامل دلایل متعدد و خاص خود را دارد. با این حال، با بررسی‌های انجام شده و بازدیدهای میدانی مشخص شد که تعدادی کارگاه‌های کوچک فرآوری صنایع غذایی در بالادست تصفیه‌خانه وجود دارد که با تخلیه پساب آنان در شبکه جمع‌آوری تجمع بسیار زیاد املاح ورودی به تصفیه‌خانه اتفاق می‌افتد که ممکن است بیشتر از توان جذب ژئولیت باشد. بر اساس نتایج تحلیل‌های سری‌های زمانی مشخص

TDS ورودی بیشتر است. به عبارتی، همواره انتظار می‌رود که در فرایند تصفیه در شرایطی که ورودی TDS کم است، میزان COD نیز کم و به میزان استاندارد نزدیک‌تر باشد. دلایل این امر را می‌توان به صورت زیر توضیح داد.

ورودی کم TDS در شرایطی بود که بارندگی در سطح منطقه چندین بار اتفاق افتاد. همچنین، به دلیل تعطیلی در این دوره زمانی، واحدهای صنعتی در شرایط حداقل فعالیت بود. بنابراین، هر چند مقادیر ورودی در واحد حجم آب ورودی کم بود، حجم آب ورودی بیش از ظرفیت ۱۵۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز تصفیه‌خانه بود. به عبارتی، در این دوره زمانی حجم بار ورودی به تصفیه‌خانه با TDS کم، زیاد بود. در این صورت کانال ژئولیت توان تصفیه مفید را نداشت. اما، در شرایطی که حجم بار ورودی به تصفیه‌خانه با TDS زیاد، کم بود نقش ژئولیت در تصفیه فاضلاب بهتر بود. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که حجم بار ورودی یا میزان آن به‌تنهایی شاخص‌های خوبی در تصمیم‌گیری نیست.

در این مقدار TDS توان پالایش ژئولیت در تصفیه آب به‌گونه‌ای است که معادل COD برابر ۵۲ خواهد بود. در واقع، این نقطه حد یا آستانه تأثیرپذیری ژئولیت بر تصفیه آب در خصوص COD است.

در تحقیقات گذشته، همواره در تعیین میزان ژئولیت بر روند تصفیه و پالایش آب تلاش شده است. اما در این تحقیق مشاهده شد که میزان آلودگی ورودی به تصفیه‌خانه به‌خصوص شاخص TDS نقش مهم‌تری در اثربخش بودن ژئولیت داراست. به عبارتی، ممکن است که با تغییر در درصد ژئولیت در فرایند تصفیه بتوان COD یا BOD بهتری به دست آورد، اما این مسئله تابع میزان املاح محلول در آب نیز است. بنابراین، توصیه می‌شود که علاوه بر بررسی ظرفیت ژئولیت استفاده‌شده در تصفیه به حد بحرانی این کانی نسبت به تغییرات TDS و TSS نیز توجه شود. به‌طور کلی، در فرایند تصفیه باید با افزایش TDS میزان COD نیز افزایش یابد یا در حدی استاندارد ثابت باشد. اما، در این تحقیق دیده شد که در مقادیر کم TDS ورودی میزان COD خروجی بیش از شرایطی است که

## منابع

- بینا، ب.، موحدیان، ح.، و پورزمانی، ح. ر. ۱۳۸۴. بررسی تأثیر نسبت Cod/N ورودی بر سرعت نیتروفیکاسیون در تصفیه فاضلاب با استفاده از یک راکتور پالوت در مقیاس آزمایشگاه. آب و فاضلاب، ۱۶(۱): ۳۰-۳۶.
- ذوقی، م. ج.، ذوقی، ت. و سعیدی، م. ۱۳۸۹. پیش‌بینی غلظت آمونیم و مواد آلی فاضلاب دفن‌گاه زباله با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. آب و فاضلاب، ۷۴: ۵۲-۶۰.
- رفعت متولی، ف. دانش، ش. و رجبی‌مشهدی، ح. ۱۳۹۱. بررسی امکان مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیمه‌مکانیکال. همایش ملی سنجش و مدل‌سازی محیط، دانشگاه تهران.
- زارع‌ایبانه، ح. بیات‌ورکشی، م. و بیات‌ورکشی، ج. ۱۳۹۱. کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در ارزیابی تصفیه‌خانه فاضلاب اکباتان. محیط‌شناسی، ۳۸(۳): ۸۵-۹۸.
- شکری، س.، اصغری‌مقدم، ا. و ندیری، ع. ۱۳۹۳. بررسی کارایی تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی. محیط‌شناسی، ۴۰(۴): ۸۴۴-۸۲۷.
- شهبازی، ا. ۱۳۹۴. مقایسه کارایی ژئولیت‌های سنتزی و طبیعی در حذف سورفکتانت تریتون ایکس ۱۰۰ از پساب صنعتی: مطالعه ایزوترم و سینتیک. مجله سلامت و محیط‌زیست، ۸(۳): ۳۰۸-۲۹۷.

مالکی، ا. ۱۳۹۰. بررسی توانایی زئولیت اصلاح شده با اسید برای جذب کادمیم در محیط آبی. مجله دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ۲۱(۸۶): ۷۵-۸۴.

مجوی، ا.ح.، رجبی زاده، ا.، احمدیان، م.، و فاتحی زاده، ع. ۱۳۸۸. بررسی وضعیت تصفیه فاضلاب و کیفیت پساب خروجی بیمارستان‌های استان کرمان در سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۸۶. دوازدهمین همایش بهداشت محیط ایران، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده بهداشت. میران زاده، م.ب. و بابامیر، ش. ۱۳۸۲. بررسی کارایی تصفیه خانه فاضلاب شهرک اکباتان تهران طی سال‌های ۱۳۷۹-۸۰. فصلنامه علمی-پژوهشی فیض، ۲۵: ۴۰-۴۷.

Abolpour, B. and Javan, M. 2007. Optimization model for allocating water in a river Basin 509 during a drought. J. Irrigation. Drain Engineering, 133(6): 559-572.

Chan, C.W. and Huang, G.H. 2003. Artificial intelligence for management and control of pollution minimization and mitigation processes. J. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16(2): 75-90.

Chan, C.W., Chang, N.B. and Shieh, W.K. 2001. Advanced hybrid fuzzy- neural controller for industrial wastewater treatment. J. Environmental Engineering, 127(11): 1048-1050.

Da'na, E. and Sayari, A. 2011. Adsorption of copper on amine functionalized SBA-15 prepared by co-condensation: equilibrium properties. J. Chemical Engineering, 166(1): 445-53.

Erdirencelebi, D. and Yalpir, S. 2011. Adaptive network fuzzy inference system modeling for the input selection and prediction of anaerobic digestion effluent quality. J. Applied Mathematical Modelling, 35(8): 3821-3832.

Filippidis, A. Tziritis, E. Kantiranis, N. Tzamos, E. Gamaletsos, P. Papastergios, G. Filippidis, S. 2015a. Application of hellenic natural zeolite in Thessaloniki industrial area wastewater treatment. J. Desalination and Water Treatment: 1-11.

Filippidis, A. Papastergios, G. Kantiranis, N. Filippidis, S. 2015b. Neutralization of dyeing industry wastewater and sludge by fixation of pollutants in very high quality HEU-type zeolitic tuff. J. Global Ecology and Environment, 2(4): 221-226.

Hamed, M., Khalafallah, M.G. and Hassanein, E.A. 2004. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural network. J. Environmental Modeling and Software, 19(10): 919-928.

Kim, J.O. Kim, S. and Park, N.S. 2012. Performance and modeling of zeolite adsorption for ammonia nitrogen removal. J. Desalination and Water Treatment, 43(1-3): 113-17.

Misaelides, P. 2011. Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review. Microporous and Mesoporous materials, 144: 15-18.

Nadiri, A., Moghaddam, A., Tsai, F.C. and Fijani, E. 2013. Hydrogeochemical analysis for Tasuj plain aquifer, Iran. J. Earth System Science, 122(4): 1091-105.

Pai, T.Y., Wan, T.J., Hsu, S.T., Chang, T.C. and Tsai, Y.P. 2009. Using fuzzy inference system to improve neural network for predicting hospital wastewater treatment plant effluent. J. computers and Chemical Engineering, 33(7): 1272-1278.

Pai, T.Y., Tsai, Y.P., Lo, H.M., Tsai, C.H. and Lin, C.Y. 2007. Grey and neural network prediction of suspended solids and chemical oxygen demand in hospital wastewater treatment plant effluent. J. Computers and Chemical Engineering, 31(10): 1272-1281.

Sahoo, G.B., Ray, C. and Wade, H.F. 2005. Pesticide prediction in ground water in North Carolina domestic wells using artificial neural networks. J. Ecological Modelling, 183(1): 29-46.

Wang, S. and Peng, Y. 2010. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. J. Chemical Engineering, 156: 11-24.

Yel, E. and Yalpir, S., 2011. Prediction of primary treatment effluent parameters by Fuzzy Inference System (FIS) approach. J. Procedia Computer Science, 3: 659-665.