

## Investigating the Prediction of the Amount of Coagulant Injection in the Drinking Water Purification Process Using Fuzzy Regression Analysis (Case Study: Mashhad Water Treatment Plant No.3)

Z. Vakili<sup>1</sup>, E. Alamatian<sup>2\*</sup>, M. Zanguee<sup>3</sup>

1- MSc of Environmental Engineering & Assistant Professor, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran. 3- Ph.D. Student in Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\* (Corresponding Author Email: Alamatian\_e@khavaran.ac.ir)

Received: 10-05-2023

Revised: 07-10-2023

Accepted: 14-10-2023

Available Online: 11-03-2024

## بررسی پیش‌بینی میزان تزریق ماده منعقدکننده در فرآیند تصفیه آب شرب با استفاده از تحلیل رگرسیون فازی (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه شماره سه آب مشهد)

زینب وکیلی<sup>۱</sup>، ابراهیم علامتیان<sup>۲\*</sup>، محمد زنگویی<sup>۳</sup>

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد عمران-محیط‌زیست و استادیار گروه عمران، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران. ۳- دانشجوی دکتری تخصصی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\* (نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: Alamatian\_e@khavaran.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

### Abstract

Surface waters have various impurities. Aggregation of particles and their transformation from dispersed and fine states to coarse state is done by a process called coagulation process. This process is one of the basic processes in drinking water treatment plants. The purpose of this research is to provide a suitable relationship for determining the amount of chlorophric coagulant injection in the coagulation and flocculation process using fuzzy regression in drinking water treatment plant No. 3 of Mashhad. Temperature, pH, turbidity, electrical conductivity and TDS of raw and purified water have been used as primary data to determine the appropriate equation to predict the amount of coagulant injection in the purification process. Appropriate coefficients for different linear, power, exponential and quadratic models were determined in two types of least squares and regression. According to the results obtained in this research, the exponential-regression model with RMSE equal to 0.68 It has been introduced as a desirable model.

**Keywords:** Fuzzy regression, Coagulant, Drinking Water, Coagulation.

### چکیده

آب‌های سطحی دارای ناخالصی‌های مختلفی می‌باشند. تجمع ذرات و تبدیل آنها از حالت‌های پراکنده و ریز به حالت درشت، توسط فرآیند انعقاد انجام می‌شود. این فرآیند یکی از فرآیندهای اساسی در تصفیه‌خانه‌های آب شرب است. هدف از این تحقیق، ارائه رابطه مناسب برای تعیین میزان تزریق ماده منعقدکننده کلروفریک در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از رگرسیون فازی در تصفیه‌خانه آب شرب شماره سه مشهد است. دما، PH، کدورت، هدایت الکتریکی و TDS آب خام و تصفیه شده به عنوان داده اولیه برای تعیین معادله مناسب، جهت پیش‌بینی میزان تزریق منعقد کننده در فرآیند تصفیه استفاده شده است. ضرایب مناسب برای مدل‌های مختلف خطی، توانی، نمایی و درجه دو در دو نوع کمترین مربعات و رگرسیون تعیین گردید. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، مدل نمایی- رگرسیون با RMSE برابر ۰/۶۸ به عنوان مدل مطلوب معرفی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** رگرسیون فازی، منعقدکننده، آب شرب، انعقاد.

که حداکثر بهره‌وری حذف در تصفیه‌خانه، مربوط به آلاینده TSS بوده است. Zabaleta و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل تحلیل پوششی داده‌های فازی<sup>۷</sup> برای ایجاد شاخص‌های ترکیبی بر اساس سری‌های زمانی، تحت رویکرد فشار-وضعیت-پاسخ (PSR)<sup>۸</sup> به منظور ارزیابی امنیت آب در ۱۰ نقطه داغ امنیت آب اروپا ارائه نمودند. ایشان ابتدا، ۹ شاخص را در چارچوب PSR شناسایی نمودند. سپس شاخص‌ها را در هر مجموعه PSR با استفاده از مدل فازی DEA جمع‌آوری کرده و در نهایت، نتایج PSR را تحت سناریوهای بدبینانه، خوش‌بینانه و خنثی، مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که در مجموع، بلغارستان بهترین عملکرد فشار، وضعیت و پاسخ را به دست آورد (Zabaleta و همکاران، ۲۰۲۲). Pai و همکاران (۲۰۱۱) از سه نوع سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی (ANFIS)<sup>۹</sup> و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۱۰</sup> برای پیش‌بینی مواد جامد معلق پساب، میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی فاضلاب و pH از یک تصفیه‌خانه فاضلاب در شهرک صنعتی استفاده نمودند. نتایج نشان داد که ANFIS از نظر آماری از ANN از نظر پیش‌بینی مشخصات پساب بهتر است. رحمتی و همکاران (۱۳۹۹) از سه مدل رگرسیون خطی چندمتغیره، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی جهت تخمین TSS فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب غرب اهواز (چینیبه) استفاده کرده‌اند. در این مطالعه ترکیبات مختلفی از پارامترهای کیفی فاضلاب، طی دوره آماری ۸ ساله به عنوان ورودی مدل‌ها در دو حالت روزانه و ماهانه، مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس نتایج این تحقیق، مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر روی TSS ماهانه فاضلاب خروجی به ترتیب شامل میانگین ماهانه متغیرهای COD و TSS حوضچه ته‌نشینی اولیه، SVI<sup>۱۱</sup>، کدورت ورودی و حوضچه ته‌نشینی اولیه می‌باشند. Ruan و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه بهبود بهره‌وری اکسیژن محلول با استفاده از یک سیستم کنترل آنلاین بر اساس الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. در این تحقیق یک سیستم کنترل هوشمند ترکیبی آنلاین و مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای کنترل اکسیژن محلول در فرآیند بی‌هوازی تصفیه فاضلاب ارائه شده است. این سیستم کنترل پیشنهادی می‌تواند، رفتار پویا و روابط متقابل پیچیده‌ای را بین متغیرهای مختلف عملیاتی استخراج کند. نتایج دربرگیرنده رویکرد ترکیبی پیشنهادی، به عنوان یک ابزار کنترل اکسیژن محلول قوی و مؤثر شناخته شده است. از این رو نه تنها کیفیت مناسب پساب را به‌دست می‌آورد، بلکه تقاضای انرژی را نیز به حداقل می‌رساند. این رویکرد ترکیبی پیشنهادی به‌راحتی در سیستم کنترل برای اهداف مدیریت هزینه ادغام می‌شود. زنگویی و همکاران (۱۳۹۵) مدل‌سازی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی توسط روش‌های استنتاج عصبی-فازی تطبیقی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون فازی را انجام داده‌اند که طبق تحقیق ایشان، بهترین راندمان سیستم در شرایط بهره‌برداری با کدورت اولیه ۱۶۰ NTU، pH معادل ۸،

اهمیت آب و نقش حیاتی آن در زندگی انسان در کنار حفظ محیط‌زیست، بر کسی پوشیده نیست. تصفیه آب به مجموعه‌ای از اقدامات و عملیات مورد نیاز جهت تأمین کیفیت مورد نظر آب‌های شرب گفته می‌شود. منابع آب مورد استفاده در تصفیه‌خانه‌های آب شامل آب‌های زیرزمینی و سطحی، رودخانه‌ها، آب پشت سدها و دریاچه‌ها، چشمه‌ها و در موارد خاص منابع آب شور می‌باشند. منابع آب سطحی معمولاً دارای ناخالصی بوده و مواد آلی و معدنی محلول و معلق در آنها وجود دارند که باعث ایجاد کدورت می‌شوند. فرآیند انعقاد، فرآیند اصلی مجتمع‌کردن ذرات ریز و تبدیل آنها به ذرات درشت‌تر است. معمولاً به کمک مواد شیمیایی چون کلوروفریک، سولفات آلومینیوم و سولفات فریک که مواد منعقدکننده نامیده می‌شوند، فرآیند انعقاد و لخته‌سازی انجام می‌شود. با گسترش علم و ضرورت تصفیه آب، ضرورت پیش‌بینی میزان کدورت آب پس از فرآیند انعقاد، برای مدیریت مطلوب تأسیسات بعدی نیز احساس گردیده است. در حال حاضر در کشور ایران برای بررسی فرآیند انعقاد در شرایط مختلف آب خام، از آزمایش جار استفاده می‌گردد. با توجه به پرهزینه بودن و زمان‌بر بودن و دخالت انسانی در این روش، استفاده از روش‌های علمی و کاربردی که برطرف‌کننده مشکلات مذکور باشد، امری ضروری است.

مجموعه فازی را اولین بار لوکا سیویچ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۰ ارائه نمود و از آن زمان تاکنون نظریه فازی رشد و گسترش زیادی در تمام سطوح علمی پیدا کرده است. کاربردهای عملی این نظریه یعنی تولید محصولات صنعتی، خصوصاً در زمینه الکترونیک، کنترل و سیستم‌های عصبی، رو به گسترش است. Nadiri و همکاران (۲۰۱۸)، کارایی مدل‌های هوش مصنوعی مانند فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی را برای مدل‌سازی رفتار تصفیه‌خانه فاضلاب، بررسی نموده‌اند. ایشان در این تحقیق، به مطالعه تصفیه‌خانه فاضلاب تبریز پرداخته و قابلیت تصفیه آن را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه با مبنا قراردادن مشخصه‌های کیفی اندازه‌گیری شده در ورودی تصفیه‌خانه، مقدار متناظر این مشخصه‌ها در خروجی تصفیه‌خانه پیش‌بینی و از مدل‌های فازی ممدانی (MFL)<sup>۲</sup> و ساجنو (SFL)<sup>۳</sup> و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است. داده‌های ورودی شامل دما، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD)<sup>۴</sup>، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)<sup>۵</sup>، کل جامدات معلق (TSS)<sup>۶</sup> و pH فاضلاب و داده‌های خروجی شامل مشخصه BOD، COD و TSS است. بر اساس نتایج ارائه شده، هر سه مدل شبکه عصبی مصنوعی، فازی ممدانی و ساجنو نتایج قابل قبولی ارائه دادند و مدل فازی ساجنو، بهترین مدل شناخته شد. همچنین با محاسبه درصد بازده حذف آلاینده‌ها در خروجی تصفیه‌خانه، مشخص شد

منعقدکننده (PAC)<sup>۱۳</sup> نوع I با دوز ۱۹ mg/L و با راندمان ۹۹/۵ درصد تعیین شد. Moreira و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر غلظت بالای مواد جامد معلق بر فرآیند انعقاد و لخته‌سازی در تصفیه آب، با استفاده از منعقدکننده‌های مختلف آهن‌دار و پلیمری را بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج ایشان در مقادیر بالای TSS آب خام (بیش از ۲۰۰۰۰ mg/L)، استفاده از پیش‌تصفیه ضروری است و همچنین توصیه نمودند که به منظور جلوگیری از کدورت بالای آب خروجی، از اولترافیلتراسیون استفاده شود. در تحقیق Khedher و همکاران (۲۰۲۳) امکان استفاده از شاخص لخته‌سازی (FI)<sup>۱۴</sup>، به دست آمده از یک تحلیل گر پراکندگی نورسنجی (PDA)<sup>۱۴</sup> در طول لخته‌سازی، به عنوان یک پارامتر کنترلی برای بهینه‌سازی حذف کدورت بررسی شد. در تحقیق ایشان پنج نمونه آب، با سطوح کدورت مختلف (از ۶ تا ۱۲۰ NTU) برای مطالعه اثرات دوزهای مختلف آلوم بر ویژگی‌های لخته استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که FI می‌تواند به عنوان یک پارامتر جایگزین برای بهینه‌سازی فرآیند انعقاد استفاده شود. Bagastyo و همکاران (۲۰۲۳) نقش هوادهی و پیش‌کلرزی قبل از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی در تصفیه آب را بررسی کرده‌اند. ایشان مطالعه خود را برای یک تصفیه‌خانه در اندونزی انجام دادند و نتیجه گرفتند که اعمال فرآیندهای هوادهی و پیش‌کلرزی، باعث کاهش حدود ۶۰ درصدی دوز منعقدکننده می‌شود.

با توجه به سوابق تحقیقاتی موجود، مشاهده می‌گردد که برای تعیین میزان مناسب ماده منعقدکننده، بایستی از نتایج آزمایشگاهی استفاده نمود. این کار علاوه بر هزینه‌بر بودن، نیاز به صرف زمان قابل توجه دارد. در صورتی که بتوان از روش‌های تحلیلی برای تعیین دوز مناسب ماده منعقدکننده استفاده نمود، صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و هزینه خواهد شد. به منظور ارائه رابطه مناسب جهت تعیین میزان دوز تزریق ماده منعقدکننده، بایستی عوامل موثر مختلف در نظر گرفته شوند. در این تحقیق با توجه به دسترس بودن داده‌های PH، EC، TDS، دما، کدورت و غلظت منعقدکننده، از تحلیل رگرسیون فازی به منظور ارائه رابطه مناسب جهت تعیین غلظت ماده منعقدکننده کلروفوریک در تصفیه‌خانه شماره سه آب مشهد استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

### • نظریه فازی

روش‌های مرسوم در کامپیوترها (منطق صفر و یک) در پیروی از پیچیدگی فکر و سیستم عصبی بشری عاجزاند. با توجه به پیچیدگی زیاد سیستم‌های انسانی، در مواردی که در تصمیم‌گیری‌ها، آرای انسانی دخالت دارند، دقت کاهش می‌یابد. در استنتاج‌های آماری مرسوم، مدل‌های رگرسیون معمولی به طور گسترده در

پیدا کردن رابطه بین چند متغیر در یک سیستم به کار می‌روند و بدین ترتیب به کمک متغیرهای مشاهده شده، سایر متغیرها را پیش‌بینی می‌کنند. به طور خلاصه، اگر در سیستم مورد بررسی، متغیرها تصادفی و داده‌ها قطعی نباشند، تحلیل رگرسیون فازی می‌تواند ابزار مناسب‌تری از تحلیل رگرسیون معمولی باشد. به طور عمومی، رگرسیون فازی را می‌توان به دو مقوله اصلی تقسیم کرد؛ الف- رگرسیون فازی زمانی که روابط بین متغیرها فازی باشد. ب- رگرسیون فازی زمانی که خود متغیرها فازی هستند. با توجه به تحقیقات انجام شده در خصوص رگرسیون فازی، می‌توان تقسیم‌بندی دیگری نیز راجع به دیدگاه‌های رگرسیون فازی ارائه داد؛ الف- آنالیز رگرسیون احتمالی که بر اساس مفهوم احتمالات بنا شده است. ب- روش کمترین مربعات برای کمینه کردن خطای ناشی از تخمین خروجی‌ها. جزئیات روش مورد استفاده، در مرجع Tanaka (۱۹۸۷) ارائه شده است.

توصیف حالت‌های بیان شده در بالا از دیدگاه‌های مختلفی مورد توجه واقع شده است. بنابراین دیدگاه‌های مفهومی مختلفی راجع به رگرسیون فازی وجود دارد، بطوری که در هر دیدگاه بیشتر به یک حالت خاص بیان شده در بالا برای رسیدن به یک مدل رگرسیون مناسب توجه شده است. رگرسیون فازی توانایی برازش داده‌های فازی و داده‌های قطعی را تحت یک مدل دارد. رگرسیون فازی، به عنوان یک روش غیر پارامتری زمانی که داده‌های در دسترس محدود و نادقیق بوده و متغیرها به صورت کیفی و نامعین بر یکدیگر اثر داشته باشند، ابزاری کاملاً مفید به حساب می‌آید. علاوه بر آن، عموماً رگرسیون معمولی با فرضیاتی در مورد داده‌های مشاهده شده، محدود می‌شود؛ به این معنا که ترم خطای محاسباتی باید مستقل و دارای توزیع مشخصی باشد. بنابراین این مدل‌ها دارای محدودیت کاربردی نیز هستند؛ زیرا فقط زمانی می‌توانند بکار برده شوند که داده‌ها، توزیعی مطابق مدل داشته و همانگونه که بیان شد رابطه بین  $x$  و  $y$ ، یک رابطه قطعی باشد (Zadeh و Aliev، ۲۰۱۸).

### • منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد به حدود هشت متر مکعب بر ثانیه آب شرب نیاز دارد که از منابع آب زیرزمینی و سطحی تأمین می‌شود. بخشی از آب شرب مشهد از ۴۰۰ حلقه چاه تأمین می‌شود. آب این چاه‌ها از نظر بهداشتی سالم است و نیاز به تصفیه ندارد و فقط عملیات کلرزی روی آنها انجام می‌شود. بخش دیگر آب، از منابع سطحی و از سه سد و سه تصفیه‌خانه تأمین می‌شود. دو سد طرق و کارده با آبدهی خیلی کم و سد دوستی به تنهایی حدود ۲۰ برابر دو سد دیگر آبدهی دارد. این سد به تنهایی حدود ۵۰ درصد آب شرب مورد نیاز مشهد را می‌تواند تأمین کند. آب از سد دوستی پس از گذر از ۴ ایستگاه پمپاژ، وارد تصفیه‌خانه شماره ۳ مشهد

می‌شود. ابتدا کلر و آب آهک به آب اضافه می‌شود. بعد از این مرحله آب وارد دریچه‌های تقسیم می‌شود. آب از دریچه‌های تقسیم وارد واحدهای اختلاط سریع می‌شود. در این بخش ابتدا ماده منعقدکننده کلروفوریک به آب اضافه می‌شود. پس از واحد اختلاط سریع، آب وارد قسمت‌های انعقاد و لخته‌سازی می‌گردد. در این تصفیه‌خانه از سیستم زلال‌ساز سوپر پولساتور<sup>۱۵</sup> استفاده شده است (سروآب، ۱۳۹۲).

#### • داده‌های مورد استفاده و روش تحلیل

داده‌های این تحقیق از آزمایشگاه تصفیه‌خانه آب شماره سه مشهد استخراج گردیده است. داده‌های مورد استفاده مربوط به اول مرداد سال ۱۳۹۹ تا آبان ماه سال ۱۴۰۱ است و برای نویسندگان دسترسی به داده‌های سنوات قبل از آن امکان‌پذیر نبوده است. علاوه بر این، در این بازه زمانی، داده‌های ۲۶ روز نیز ناقص بوده و از روند تحلیل حذف شده‌اند. در نتیجه کل داده‌های مورد استفاده، ۷۹۶ گروه داده بوده است. لازم به ذکر است که در تصفیه‌خانه شماره سه آب شرب مشهد، تزریق ماده منعقدکننده به صورت پیوسته انجام می‌گردد و به این دلیل در این تحقیق از متوسط روزانه آن‌ها، استفاده شده است. اطلاعات موجود شامل مقادیر مربوط به پارامترهای ورودی تصفیه‌خانه آب شرب شماره سه مشهد، از قبیل دبی آب، دما، PH، کدورت ورودی، هدایت الکتریکی، TDS و کلروفوریک تزریقی، می‌باشد. انتخاب این متغیرهای مستقل بر اساس مطالعات پیشین بوده است (jiang, ۲۰۱۵). مقادیر مربوط

به ورودی توسط سنسورهای نصب شده، مشخص گردیده است. علامت اختصاری داده‌های دریافت شده برای استفاده در روابط، در جدول (۱) آورده شده است.

برای تحلیل داده‌ها و بدست آوردن روابط نهایی از نرم‌افزار FuReA استفاده می‌شود. برازش مدل رگرسیون فازی بین مقادیر دوز تزریق منعقدکننده و متغیرهای مستقل، انجام می‌گردد. مدل‌های مورد استفاده شامل «مدل خطی»، «مدل درجه دو»، «مدل توانی» و «مدل نمایی» است. در روش‌های رگرسیون فازی، یک متغیر خروجی (در این تحقیق دوز تزریق کلروفوریک)، از روی سایر متغیرها، پیش‌بینی می‌شود. درحقیقت با استفاده از مجموعه متغیرها، تابعی ایجاد می‌شود که داده‌های مستقل را به متغیر هدف، نگاشت می‌کند. رگرسیون فازی از روش‌های یادگیری نظارت شده می‌باشد. از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش (تولید معادلات) و از ۳۰ درصد داده‌ها برای آزمایش، استفاده شده است. برای جلوگیری از سوگیری<sup>۱۶</sup> در انتخاب داده‌های آموزش مدل، از روش تصادفی<sup>۱۷</sup> برای تقسیم‌بندی داده‌ها (برای تولید داده‌ها و آزمایش آنها) استفاده شده است. در روش تصادفی، کلیه داده‌ها از احتمال مساوی برای انتخاب شدن برخوردار هستند؛ درنتیجه، داده‌های انتخاب شده به این روش برای تولید مدل، می‌توانند نماینده کل داده‌ها باشند. درنهایت پس از ساخت معادلات در هر مدل، نمودار داده‌های واقعی و نمودار داده‌های شبیه‌سازی شده (مستخرج از معادله تولید شده) رسم می‌گردد و میزان شاخص خطا محاسبه می‌شود (Nadiri و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۱- علامت اختصاری اطلاعات دریافتی از تصفیه‌خانه آب شرب شماره سه مشهد برای استفاده در نرم‌افزار

اطلاعات دریافتی	دبی آب (m <sup>3</sup> /d)	دما (C)	PH	کدورت ورودی (NTU)	هدایت الکتریکی (µmho/cm)	TDS (ppm)	کلروفوریک تزریقی (۴۰ درصد (t)
علامت اختصاری	x <sub>۶</sub>	x <sub>۵</sub>	x <sub>۴</sub>	x <sub>۳</sub>	x <sub>۲</sub>	x <sub>۱</sub>	y

$$y = 3.609 + 0.01406 x_1 - 0.009705 x_2 + 0.2104 x_3 - 0.08413 x_4 + 0.07584 x_5 + 7.664e^{-6} x_6 \quad (۱)$$

#### - مدل خطی، رگرسیون:

مدل خطی رگرسیون، به صورت معادله (۲) برازش شده است. همچنین مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از مدل مربوط به میزان تزریق منعقدکننده در تصفیه‌خانه شماره سه شهرستان مشهد، در مقایسه با مقادیر موجود در داده‌های آماری در شکل (۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر مدل خطی- رگرسیون برازش شده، تقریباً هم فاز داده‌های واقعی است، ولی از نظر دامنه عموماً بیشتر از مقادیر واقعی می‌باشند و می‌توان گفت که مدل خطی- رگرسیون عموماً بیش تخمین می‌باشد.

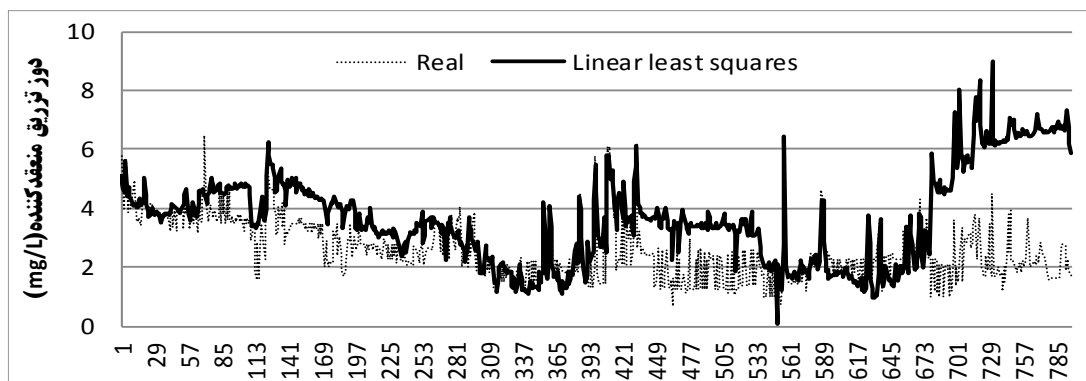
$$y = 4.935 + 0.01486 x_1 - 0.005921 x_2 + 0.3445 x_3 - 0.6232 x_4 + 0.1046 x_5 + 3.861e^{-6} x_6 \quad (۲)$$

#### نتایج

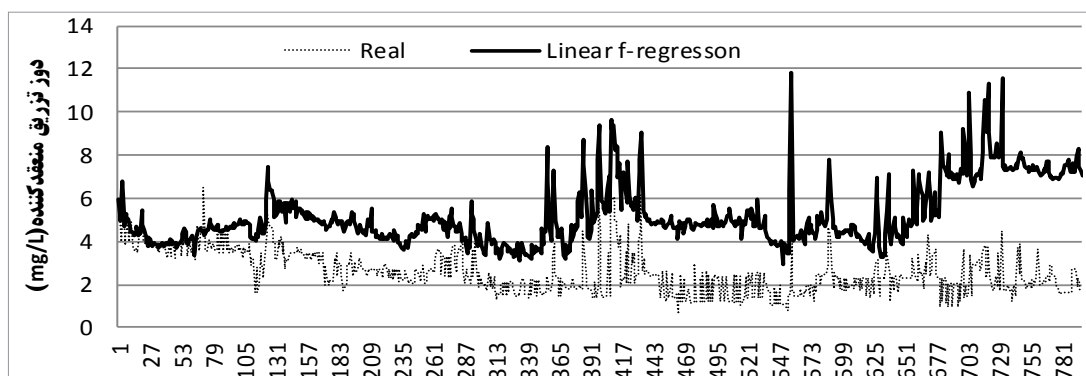
##### ۱- مدل خطی

##### - مدل خطی، حداقل مربعات:

مدل خطی حداقل مربعات، به صورت معادله (۱) برازش شده است. همچنین مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به میزان تزریق منعقدکننده در تصفیه‌خانه شماره سه شهرستان مشهد، حاصل از مدل در مقایسه با مقادیر موجود در داده‌های آماری، در شکل (۱) نشان داده شده است که محور افقی نشان‌دهنده روزهای تزریق ماده منعقدکننده و محور قائم نشان‌دهنده دوز تزریق منعقدکننده (mg/L) است. مشاهده می‌شود که مدل خطی نتوانسته است از نظر دامنه، پیش‌بینی مناسبی ارائه نماید. به نحوی که میزان حداکثر دوز تزریق ماده منعقدکننده در مدل واقعی زیر، ۵ mg/L می‌باشد که این عدد در مدل خطی به حدود ۱۰ mg/L می‌رسد.



شکل ۱- برازش مدل خطی- حداقل مربعات



شکل ۲- برازش مدل خطی- رگرسیون

## ۲- مدل توانی

- مدل توانی، حداقل مربعات:

مدل توانی حداقل مربعات، با استفاده از نرم افزار، به صورت معادله (۳) برازش شده است. همچنین مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از مدل مربوط به دوز تزریق منعقدکننده در تصفیه‌خانه شماره سه آب شرب مشهد، در مقایسه با مقادیر موجود در داده‌های آماری در شکل (۳) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که همخوانی مدل و داده‌های واقعی نسبت به مدل‌های خطی مناسب‌تر می‌باشد، ولی مدل در بازه‌هایی تخمین بیشتری از واقعیت ارائه می‌کند و در بازه‌هایی دیگر تخمین کمتری ارائه می‌نماید. با توجه به شکل می‌توان گفت که مدل با داده‌های واقعی هم‌فاز می‌باشد.

$$y = 0.03001 x_1^{1.019} \times x_2^{-1.535} \times x_3^{0.07983} \times x_4^{-0.2368} \times x_5^{0.2813} \times x_6^{0.6977} \quad (3)$$

- مدل توانی، رگرسیون:

مدل توانی رگرسیون، با استفاده از نرم افزار، به صورت معادله (۴) برازش شده است. همچنین مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از مدل مربوط به میزان تزریق منعقدکننده در تصفیه‌خانه شماره سه شهرستان مشهد، در مقایسه با مقادیر موجود در داده‌های آماری در شکل (۴) نشان داده شده است. مدل توانی رگرسیون نسبت به مدل‌های برازش شده پیشین همخوانی مناسب‌تری را در روزهای انتهایی نشان می‌دهد،

هر چند که این مدل در روزهای ابتدایی با خطای زیادی همراه است.

$$y = 0.003259 x_1^{-3.823} \times x_2^{3.997} \times x_3^{0.1382} \times x_4^{-1.333} \times x_5^{0.4404} \times x_6^{0.3387} \quad (4)$$

## ۳- مدل نمایی

- مدل نمایی، حداقل مربعات:

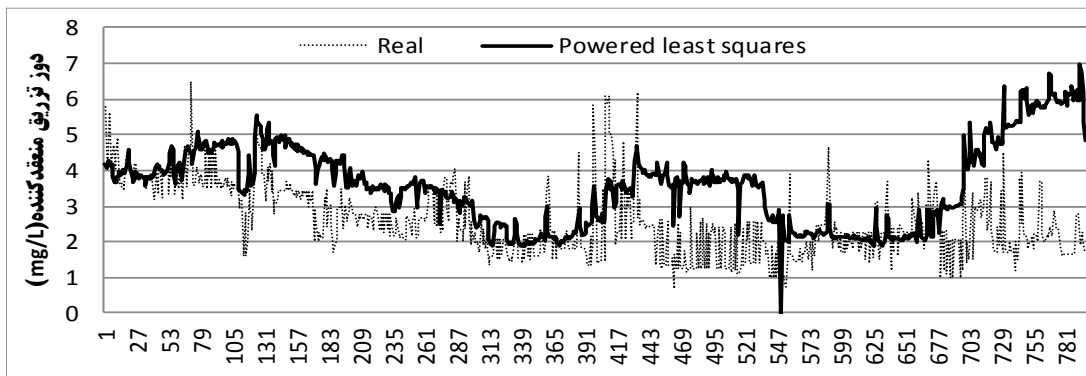
مدل نمایی حداقل مربعات، با استفاده از نرم افزار، به صورت معادله (۵) برازش شده است. ملاحظه می‌گردد که تا ۶۰۰ روز ابتدایی مدل نمایی حداقل مربعات با داده‌های واقعی همخوانی مناسبی را نشان می‌دهد، ولی پس از آن دچار بیش تخمینی شده است.

$$y = 3.868 \times \text{Exp}(0.003258 x_1 - 0.00228 x_2 + \dots - 0.0477 x_3 - 0.02361 x_4 + 0.01836 x_5 + 1.758e^{-6} x_6) \quad (5)$$

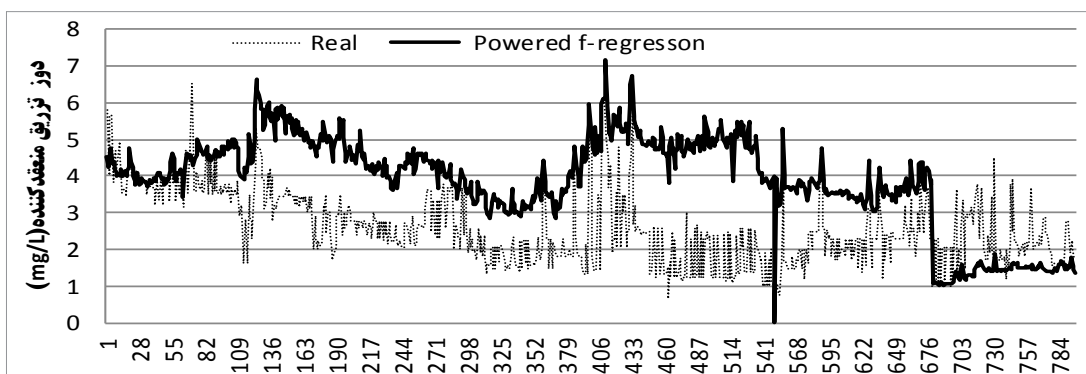
- مدل نمایی، رگرسیون:

مدل نمایی رگرسیون، با استفاده از نرم افزار، به صورت معادله (۶) برازش شده است. مشاهده می‌شود که مدل نمایی رگرسیون به خوبی توانسته است با داده‌های واقعی از نظر فاز و دامنه همخوان باشد و پیش‌بینی مناسب‌تری را نسبت به سایر مدل‌های استفاده شده در این تحقیق، ارائه نماید.

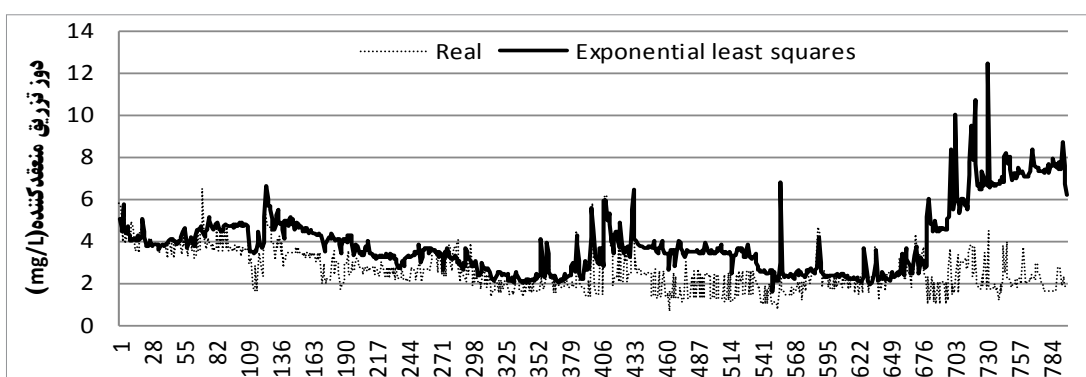
$$y = 6.638 \times \text{Exp}(0.004268 x_1 - 0.002015 x_2 + \dots - 0.07134 x_3 - 0.1496 x_4 + 0.02489 x_5 + 9.551e^{-7} x_6) \quad (6)$$



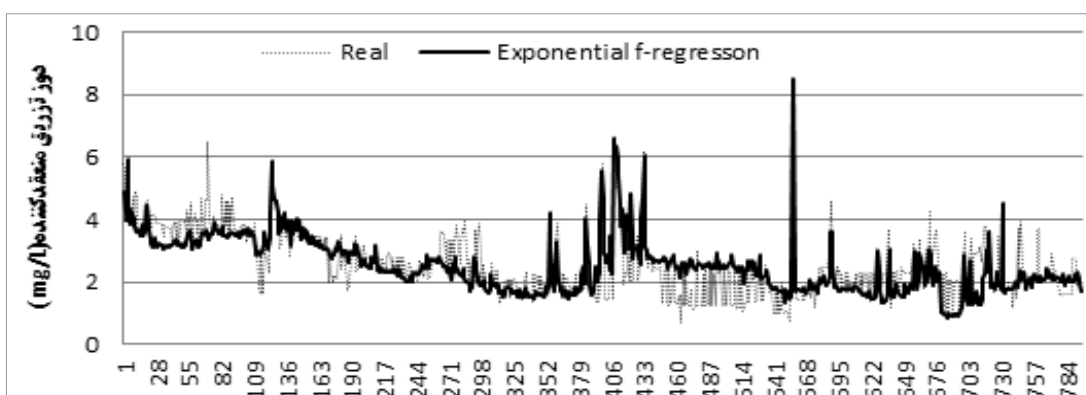
شکل ۳- برازش مدل توانی- حداقل مربعات



شکل ۴- برازش مدل توانی- رگرسیون



شکل ۵- برازش مدل نمایی- حداقل مربعات



شکل ۶- برازش مدل نمایی- رگرسیون

علاوه بر مدل‌های ارائه شده در این تحقیق، مدل‌های درجه دو- رگرسیون و حداقل مربعات نیز برازش داده شده که نتایج نشان‌دهنده عدم موفقیت این مدل‌ها در پیش‌بینی صحیح بود. همان‌گونه که در شکل‌های (۱) تا (۶) نشان داده شده است، پیش‌بینی معادلات بدست آمده از روش‌های مختلف رگرسیون، با داده‌های واقعی کاملاً مساوی نیستند. به عبارت دیگر، در یک روز خاص، بین دوز کلروفوریک واقعی و پیش‌بینی مدل‌های مختلف برای این دوز، اختلاف دیده می‌شود. این اختلاف بین نتایج مدل و داده‌های واقعی، جزء ذات مدل‌های یادگیری ماشین می‌باشد و درحقیقت مدل یادگیری ماشین با دقت کامل (مساوی بودن مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی در همه نقاط) وجود ندارد. مدلی که در آن اختلاف بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی مدل (مقدار خطا)، کمتر باشد، مناسب‌ترین مدل می‌باشد. به این دلیل و به منظور بررسی دقیق‌تر هر یک از مدل‌های استفاده شده، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۱۸</sup> برای حالت‌های مختلف معادلات پیشنهادی محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. ملاحظه می‌گردد که مدل نمایی رگرسیون کمترین میزان شاخص خطا را نشان می‌دهد. در تحقیق زنگویی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی و پیش‌بینی میزان کدورت پس از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از مدل‌های عصبی-فازی و روش‌های مختلف رگرسیون پرداخته و با استفاده از ۲۳۶ داده در مقیاس آزمایشگاهی، نشان داده مدل‌های مورد استفاده ایشان برای این کار مناسب می‌باشند. تحقیق حاضر، ضمن استفاده از ۷۹۶ داده در مقیاس میدانی، نتایج مشابهی را ارائه می‌دهد.

جدول ۲- نتایج برازش خطای RMSE برای حالت‌های مختلف معادلات پیشنهادی

مدل	مجذور میانگین مربعات خطا	
خطی	۱/۸۴۳	حداقل مربعات
	۳/۰۵۹	رگرسیون
درجه دو	۷۶۲/۰۶۵	حداقل مربعات
	۴۶۷/۹۶۶	رگرسیون
توانی	۱/۵۸۴	حداقل مربعات
	۱/۸۴۲	رگرسیون
نمایی	۲/۰۷۷	حداقل مربعات
	۰/۶۸۴	رگرسیون

## نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و امکان‌سنجی جایگزینی روش‌های معتبر مدل‌سازی با روش‌های سنتی جهت تعیین دوز تزریق مناسب

ماده منعقدکننده کلروفوریک در تصفیه‌خانه شماره سه آب شرب مشهد، پرداخته شده است. در این پژوهش از ۷۹۶ دسته داده میانگین روزانه شامل پارامترهای ورودی تصفیه‌خانه آب شرب شماره سه مشهد شامل دبی آب، دما، PH، کدورت ورودی و خروجی، هدایت الکتریکی، TDS و دوز کلروفوریک تزریقی استفاده شد. برازش مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار FuReA انجام و معادلات پیشنهادی شامل معادلات خطی، درجه دو، توانی و نمایی برای دو حالت کمترین مربعات و رگرسیون بررسی و ضرایب آنها تعیین شد. بر اساس نتایج بدست آمده مدل نمایی- رگرسیون با کمترین مقدار مجذور مربعات خطا (۰/۶۸) مناسب‌ترین معادله شناخته شد.

## پی‌نوشت‌ها

- 1-Lukasiewicz
- 2-Mamdani fuzzy logic
- 3-Sugeno Fuzzy logic
- 4-Biological Oxygen Demand (BOD)
- 5-Chemical Oxygen Demand (COD)
- 6-Total Suspended Solid (TSS)
- 7-Fuzzy-DEA
- 8-pressure-support-response (PSR)
- 9-adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS)
- 10-Artificial neural network (ANN)
- 11-Sludge Volume Index
- 12-Poly Aluminum Chloride (PAC)
- 13-Flocculation Index (FI)
- 14-Photometric Dispersion Analyzer (PDA)
- 15-SuperPulsator Clarifier
- 16-Bias
- 17-Randomize
- 18-Root-Mean-Square Error (RMSE)

## منابع

- شرکت مهندسی مشاور سروآب. (۱۳۹۲). گزارش مطالعات تصفیه‌خانه شماره ۳ آب مشهد. مشهد. ایران.
- زنگویی، حسین، دلنواز، محمد، و اسداله فردی، غلامرضا. (۱۳۹۵). مدل‌سازی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی توسط روش‌های استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون فازی. مهندسی عمران مدرس، ۱۶(۳)، ۷۳-۸۵. URL: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-2112-fa.html>

- on a genetic algorithm evolving FWNN software sensor. *Journal of Environmental Management*, 187, 550–559. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.056>
- Tanaka, H. (1987). Fuzzy data analysis by possibility linear models, *Fuzzy Sets and Systems*, 24(3), 363- 375. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90033-9](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90033-9)
- Zabaleta, A., Pascual Fernandez, P., Prados-Castillo, J., and Castro-Pardo, M. (2022). Constructing fuzzy composite indicators to support water policy entrepreneurship, *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 1(3), 100022. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100022>
- Zadeh, L.A. & Aliev, R.A. (2018). Fuzzy logic theory and applications: part I and part II. World Scientific Publishing. <https://doi.org/10.1142/10936>
- قائدرحمتی، مجتبی، معاضد، هادی، و تیشه‌زن، پروانه. (۱۳۹۹). تخمین TSS خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب اهواز با استفاده از مدل‌های هوشمند. *مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۹)، ۲۴۷-۲۵۱  
<https://doi.org/10.22034/JEST.2019.37718.4377>
- Bagastyo, A.Y., Nurhayati, E., Manah, S.P.H., Iswari, A.A.W.R., Yulikasari, A., Warmadewanthi, I.D.A.A. & Lin, T.F. (2023). The role of aeration and pre-chlorination prior to coagulation-flocculation process in water treatment: A laboratory and field research in Indonesia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100352. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100352>
- Jiang, J.Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>
- Khedher, M., Awad, J., Donner, E., Drigo, B., Fabris, R., Harris, M., Braun, K. & Chow, C.W. (2023). Using the Flocculation Index to optimise coagulant dosing during drinking water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103394. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103394>
- Moreira, V.R., Guimaraes, R.N., Moser, P.B., Santos, L.V., de Paula, E.C., Lebron, Y.A., Silva, A.F.R., Casella, G.S. & Amaral, M.C. (2023). Restrictions in water treatment by conventional processes (coagulation, flocculation, and sand-filtration) following scenarios of dam failure. *Journal of Water Process Engineering*, 51, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103450>
- Nadiri A., Shokri S., Tsai F. & Moghaddam A. (2018). Prediction of Effluent Quality Parameters of a Wastewater Treatment Plant Using a Supervised Committee Fuzzy Logic Model. *Journal of Cleaner Production*, 180, 539-549. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.139>
- Pai, T. Y., Yang, P. Y., Wang, S. C., Lo, M. H., Chiang, C. F., Kuo, J. & LChang, Y.H. (2011). Predicting effluent from the wastewater treatment plant of industrial park based on fuzzy network and influent quality. *Applied Mathematical Modelling*, 35(8), 3674-3684. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.01.019>
- Ruan, J., Zhang, C., Li, Y., Li, P., Yang, Z., Chen, X., & Zhang, T. (2017). Improving the efficiency of dissolved oxygen control using an on-line control system based