بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه فاضلاب شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک بسیارهدفه NSGA-III (مطالعه موردی: تصفیه‌خانه شهر قزوین)

مریم پرهیزکاری[1]، حامد مازندرانی‌زاده[2*] و سیدمحمدکاظم صدر[3]

۱- دانشجو دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
(mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir)

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه اگزتر انگلستان.

دریافت: بازنگری: پذیرش:

چکیده

با افزایش روزافزون جمعیت شهری و رشد مداوم نیازهای آب مصرفی، مدیریت بهینه فاضلاب شهری به یکی از چالش‌های اساسی در توسعه پایدار شهری تبدیل شده است. در این پژوهش، با هدف انتخاب بهترین ترکیب فرایندهای تصفیه فاضلاب شهری برای تصفیه‌خانه شهر قزوین، روشی نوین مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی بسیارهدفه NSGA-III توسعه داده شده است. ابتدا ۴۳ فرایند مختلف تصفیه فاضلاب که در مراحل مقدماتی، اولیه، دوم، سوم و ضدعفونی دسته‌بندی شده‌اند، به همراه داده‌های مربوط به شاخص‌هایی نظیر هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه نگهداری، میزان مصرف انرژی، تولید لجن، تعداد نیروی انسانی مورد نیاز و مساحت زمین مورد استفاده برای هر فرایند، گردآوری و تحلیل شد. با استفاده از ماتریس سازگاری بین فرایندها، ترکیب‌های نامناسب حذف و مجموعه‌ای از ترکیب‌های سازگار انتخاب شد. سپس الگوریتم‌های NSGA-III و NSGA-II به منظور یافتن جبهه پارتوی راه‌حل‌های بهینه اجرا شدند و برای انتخاب بهترین گزینه از میان راه‌حل‌های بهینه، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS با وزن‌های مساوی برای تمامی اهداف به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که الگوریتم NSGA-II نسبت به NSGA-III از نظر زمان اجرا و همگرایی بهینه عملکرد بهتری داشته است، اما NSGA-III تنوع بیشتری در راه‌حل‌ها ارائه می‌دهد که برای شرایطی که گستردگی گزینه‌ها اهمیت دارد، مزیت محسوب می‌شود. علاوه بر این، بررسی‌های تطبیقی نشان داد که سیستم تصفیه فعلی قزوین که مبتنی بر لاگون‌ها و روش‌های سنتی ضدعفونی است، در مقایسه با راه‌حل‌های بهینه پیشنهاد شده، از نظر بهره‌وری انرژی، زمان تصفیه و کیفیت خروجی در سطوح پایین‌تری قرار دارد. از این رو، پیشنهادی مبنی بر افزودن مرحله سوم تصفیه شامل فیلترهای سطحی یا میکرو و استفاده از گندزدایی با دی اکسید کلر مطرح شد که می‌تواند با حفظ ساختار لاگون‌های موجود، کیفیت آب تصفیه شده را بدون افزایش چشمگیر هزینه‌ها بهبود بخشد.

کلیدواژه‌ها: آلودگی آب، تصمیم‌گیری بسیار هدفه، محیطزیست، مدیریت منابع آب.

مقدمه

امروزه با توسعه روزافزون جوامع شهری و افزایش جمعیت شهرها و درنتیجه افزایش نیاز آبی، میزان تولید فاضلاب شهری رشد چشمگیری داشته است. از طرفی، افزایش آگاهی عمومی نسبت به مشکلات آلودگی آب، تصویب قوانین جدید و سخت‌گیرانه زیست-محیطی را در خصوص تخلیه فاضلاب در پی داشته که این موضوع سبب افزایش سرعت ساخت و نصب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری شده است (Tortajada, 2020). یکی از مهم‌ترین موضوعات قبل از طراحی و ساخت هر تصفیه‌خانه فاضلاب، انتخاب بهترین فرایند تصفیه است (Yahya et al., 2020). در سال‌های گذشته مطالعه‌ها و مدل‌های بهینه‌سازی زیادی برای یافتن بهترین فرایند تصفیه فاضلاب ارائه شده است که اکثر آن‌ها فقط به معیارهای هزینه‌ای و فنی توجه کرده‌اند درحالی‌که همواره بهترین گزینه تصفیه، ارزان‌ترین گزینه نیست، بلکه معیارهای فنی، زیست‌محیطی، هزینه بهره‌برداری و مدیریتی باید به‌طور جامع در نظر گرفته شود؛ لذا تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب فرایند بهینه تصفیه فاضلاب شهری مسئله‌ای مهم، پیچیده و چندبعدی است (Carlos and Noroña, 2021).

گرچه بسیاری از شهرهای کشور در حال حاضر مجهز به شبکه جمع‌آوری و تصفیه‌خانه فاضلاب هستند؛ اما شهرهایی نیز وجود دارند که هنوز مجهز به سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری نشده‌اند و در آینده نزدیک باید سیستم تصفیه فاضلاب در آن‌ها اجرا شود. بدیهی است چنانچه انتخاب فرایند تصفیه فاضلاب در ابتدای تأسیس تصفیه‌خانه‌ها به‌درستی و بادقت بالا صورت نگیرد هزینه‌ها و مشکلات زیادی برای شرکت‌های آب‌وفاضلاب، محیطزیست، شهروندان به وجود خواهد آورد که برخی از مهم‌ترین موارد عبارت‌اند

از افزایش هزینه‌های سرمایه‌ای، افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، افزایش هزینه‌های نیروی انسانی، افزایش برق مصرفی، بروز نارضایتی شهروندان به علت بوی نامطبوع و افزایش احتمال آلودگی آب، خاک و هوای شهر؛ بنابراین انجام چنین تحقیقی برای شهرهایی که قرار است در آینده مجهز به شبکه جمع‌آوری فاضلاب شوند از اهمیت زیادی برخوردار است، لذا هدف از این مقاله انتخاب بهترین فرایند تصفیه فاضلاب برای شهر قزوین با در نظرگیری معیارهای مختلف است که روش و نتایج این تحقیق می‌تواند مورد توجه و استفاده سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران شرکت آب‌وفاضلاب استان قزوین و نیز سایر استان‌ها قرار گیرد.

در همین راستا، در تحقیق .Sadr et al (2018) یک بسته نرم‌افزاری کاربرپسند به نام Wastewater Decision Support Optimizer (WiSDOM) معرفی شده است که با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه و تجزیه و تحلیل تصمیم، در فرایند فرمول‌بندی و پیکربندی سیستم‌های فاضلاب در کشورهایی مانند هند نقش مؤثری ایفا می‌کند. این ابزار با در نظرگرفتن ابعاد فنی، زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی قادر است به ذی‌نفعان کمک کند تا تصمیمات آگاهانه‌تری اتخاذ کنند؛ همچنین آزمایش‌های صورت‌گرفته در سه سناریوی متفاوت نشان داده است که WiSDOM می‌تواند به‌طور خودکار استراتژی‌های تصفیه متمایزی را باتوجه‌به محدودیت‌های تعریف‌شده توسط کاربر ارائه دهد.

استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه ترکیبی در مکزیکوسیتی با ارائه جبهه پارتو و اجرای تحلیل MCDM به کمک M-TOPSIS، توانسته است بهترین راه‌حل بهینه را برای ایجاد تعادل بین جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی شناسایی کند (Padrón-Páez et al., 2020). به دنبال آن، مطالعه Sadr et al. (2020) ابزاری جدید در حوزه پشتیبانی تصمیم (DST) پیشنهاد کرده است که از تجمیع روش‌های تجزیه‌وتحلیل تصمیم چندمعیاره (MCDA) و بهینه‌سازی چندهدفه (MOO) بهره می‌برد. این رویکرد ادغام، امکان تولید راه‌حل‌های عملی تصفیه آب آشامیدنی را تسهیل کرده و فرایند تصمیم‌گیری را در شرایط مختلف منابع آب خام و مقیاس‌های اجرای سیستم بهبود می‌بخشد.

در ادامه، مقاله .Niu et al (2022) استراتژی کنترل بهینه‌سازی دینامیکی مبتنی بر ترکیب بهینه‌سازی بر اساس رفتار شکارچیان و اجتماعی شیرها (DMOALO) و الگوریتم یادگیری عمیق را پیشنهاد کرده است که از یک سو مصرف انرژی(EC) و از سوی دیگر کیفیت فاضلاب (EQ) را به‌طور همزمان بهینه می‌کند؛ نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این استراتژی کنترل، مصرف انرژی را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد درحالی‌که استانداردهای مربوط به پارامترهای کیفیت فاضلاب برآورده می‌شود. در مقاله Zhou et al. (2023)، الگوریتم تکاملی قدرت پارتو بهبود یافته (SPEA2) بر مبنای جستجوی چگالی شبکه و راهنمایی نخبگان (GDSEG-SPEA2) برای بهینه‌سازی عملیات چندهدفه Wastewater Treatment) WWTP Plant) معرفی شده است. آزمایش‌های کنترل بهینه‌سازی عملکرد WWTP نشان می‌دهد که این الگوریتم می‌تواند کیفیت تصفیه آب را بهبود بخشد و مصرف انرژی را کاهش دهد درحالی‌که اطمینان حاصل می‌کند کیفیت فاضلاب مطابق استانداردهای تخلیه باقی بماند، عملکردی که نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی برتری قابل‌مشاهده دارد. در تحقیق Aparna و Swarnalatha (2023) یک سیستم کنترل بهینه‌سازی پویا بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته چندهدفه مبتنی بر مرتب‌سازی غیرغالب (NSMOCS) معرفی شده است. در این مطالعه دو مجموعه اهداف شامل شاخص کیفیت فاضلاب (EQI) و شاخص هزینه عملیاتی (OCI) از یک سو و کاهش غلظت نیتروژن و آمونیاک در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از سوی دیگر مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشانگر کاهش درصدی در شاخص‌های مرتبط با آلودگی و هزینه عملیاتی در شرایط مختلف آب‌وهوایی هستند.

با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه پویا مبتنی بر فاصله ازدحام (DMOPSO-CD) برای دست‌یابی به راه‌حل‌های بهینه برای تعادل بین مصرف انرژی (EC) و کیفیت فاضلاب (EQ) در فرایندهای تصفیه فاضلاب با ترکیب چندین الگوریتم مرسوم ازجمله جستجوی فاخته چند هدفه و الگوریتم NSGA-II و بهبود یافته الگوریتم تکاملی پارتو، روشی جدید برای تصمیم‌گیری بهینه طراحی تصفیه‌خانه فاضلاب ارائه شده است (Dai et al., 2023).

مطالعه .Kumar et al (2025) یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه ترکیبی با ادغام NSGA-III و تکامل تفاضلی چند هدفه (MODE) برای تولید راه‌حل‌های بهینه پارتو که اهداف متضاد را در ساخت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب متعادل می‌کند، پیشنهاد می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی NSGA-III و MODE از روش‌های بهینه‌سازی سنتی بهتر عمل می‌کند و راه‌حل‌های متنوع و با توزیع مناسب پارتو را تولید می‌کند.

تحقیقات اخیر ابزارها و روش‌های جدیدی برای بهینه‌سازی و استراتژی‌های پیشرفته‌ای برای بهبود کیفیت فاضلاب معرفی کرده‌اند که می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر در طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کمک کند.

در این تحقیق، به بررسی و بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه فاضلاب شهری شهر قزوین با استفاده از الگوریتم NSGA-III پرداخته شده است و نتایج آن با الگوریتم NSGA-II مقایسه شده است. در نهایت با استفاده از روش TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (Multi-Criteria Decision Making - MCDM) است بهترین گزینه انتخاب شده است. این رویکرد نوآورانه به‌ویژه در زمینه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب در ایران، با درنظرگرفتن شش هدف کلیدی شامل هزینه

سرمایه‌گذاری، هزینه تعمیرات و نگهداری، مصرف انرژی، تولید لجن، نیروی انسانی و مساحت زمین، به تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های تصفیه فاضلاب می‌پردازد. این تصفیه‌خانه در حال حاضر متشکل از چهار مرحله اصلی آشغال‌گیر، لاگون بی‌هوازی، لاگون هوازی و گندزدایی با آب‌ژاول بوده و هدف پژوهش، ارزیابی مجدد و شناسایی بهترین ترکیب فرایندها در طراحی اولیه و همچنین پیشنهاداتی برای توسعه و ارتقای آن با افزودن مراحل تصفیه به تعداد شش، هفت و هشت مرحله است. این ویژگی به پژوهشگران و مدیران امکان می‌دهد تا به‌طور هم‌زمان به مسائل اقتصادی، ملاحظات زیست‌محیطی و نیروی انسانی توجه کنند. علاوه بر این، این تحقیق روی یک مطالعه موردی مشخص در ایران تمرکز دارد که می‌تواند به‌عنوان یک الگو برای سایر شهرها و مناطق کشور مورداستفاده قرار گیرد و تأثیرات مثبتی روی سیاست‌گذاری‌های مدیریت منابع آب در آینده داشته باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

تصفیه‌خانه فارسیان واقع در شهرستان البرز استان قزوین که در سال ۱۳۷۸ تأسیس شده است، با مساحت ۱۷۰ هکتار، ظرفیت ۳۸۰۰۰ مترمکعب در روز، جمعیتی بالغ بر ۵۲۰ هزار نفر از جمعیت شهر قزوین را پوشش می‌دهد. موقعیت جغرافیایی تصفیه‌خانه در حدود عرض جغرافیایی ۳۶/۱۵۱۲۵۶ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۹/۹۵۵۶۶۳ درجه شرقی قرار دارد. شکل (۱) موقعیت کلی تصفیه‌خانه را نشان می‌دهد. مراحل تصفیه در تصفیه‌خانه با میانگین دبی خروجی در سال ۱۳۹۹، بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمکعب بر ساعت، به‌صورت زیر است:

۱. آشغال‌گیر (Bar Screen): آب فاضلاب وارد این مرحله می‌شود تا آشغال‌های بزرگ‌تر جدا شوند.

۲. لاگون بی‌هوازی (Stabilization pond: anaerobic ponds): فاضلاب پس از پمپاژ وارد لاگون بی‌هوازی می‌شود تا مواد آلی در شرایط بی‌هوازی تجزیه شوند.

۳. لاگون هوازی (Stabilization pond: aerobic ponds): در این مرحله، فاضلاب وارد سه لاگون هوازی می‌شود که در آن‌ها فرایند تصفیه با استفاده از هوا و میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود.

۴. گندزدایی: درنهایت، فاضلاب تصفیه‌شده وارد مرحله گندزدایی می‌شود. در این مرحله، از آب‌ژاول (Sodiom Hypochlorite: NaClO) برای ازبین‌بردن میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا استفاده می‌شود.

این مجموعه فرایندی، علی‌رغم کارایی قابل‌قبول و اقتصادی‌بودن به‌ویژه باتوجه‌به فضای گسترده موجود، دارای محدودیت‌هایی ازجمله زمان طولانی تصفیه و احتمال تولید محصولات جانبی کلردار در مرحله گندزدایی است. به‌منظور ارتقای عملکرد تصفیه و بهبود کیفیت فاضلاب خروجی، بهینه‌سازی سیستم موردتوجه قرار گرفته است. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در تصفیه پیشرفته، امکان کاهش نرخ آلودگی‌های باقیمانده و کاهش اثرات زیست‌محیطی را فراهم آورده و درنتیجه می‌تواند پاسخ‌گوی استانداردهای سخت‌گیرانه‌تر زیست‌محیطی در آینده باشد.

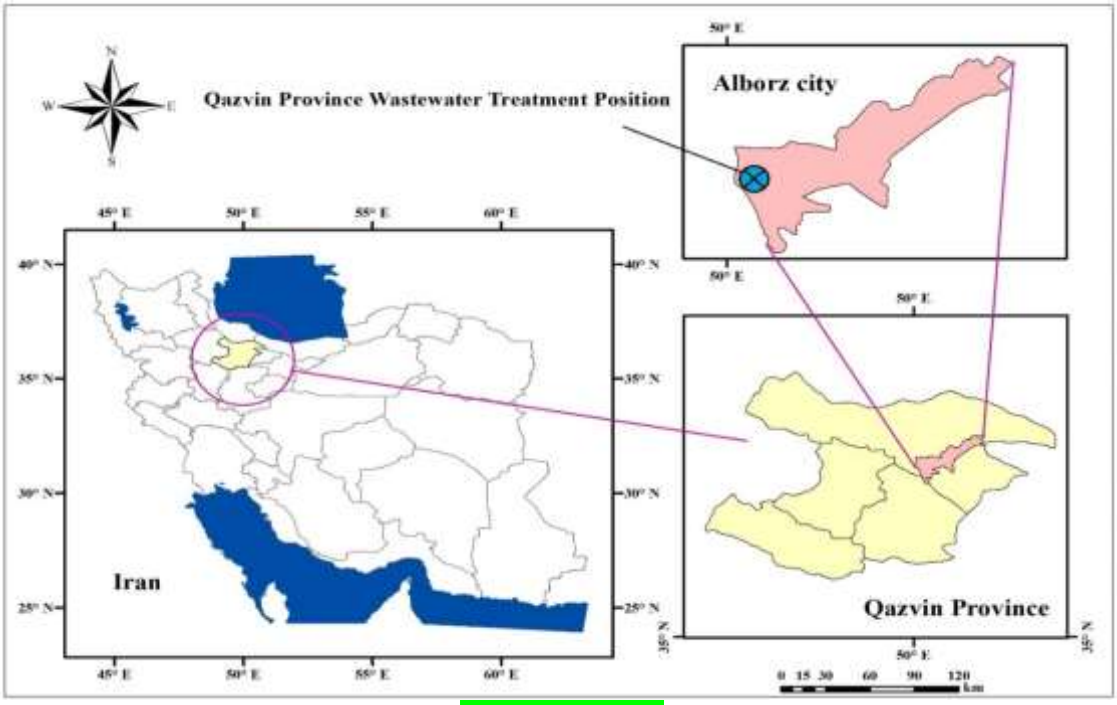


Fig. 1- Study area

شکل ۱- منطقه موردمطالعه

جدول (۱) پارامترهای فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه برای سال ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد که از شرکت آب‌وفاضلاب قزوین استخراج شده و مقدار حداکثر، حداقل و میانگین آن محاسبه شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی بسیار هدفه NSGA-III مبتنی بر نقطه مرجع

با گسترش روزافزون پیچیدگی سیستم‌ها و مسائل مهندسی، نیاز به حل مسائل بهینه‌سازی با اهداف متعدد بیش از پیش احساس می‌شود. درحالی‌که الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه (EMO) در حل مسائل با دو یا سه هدف موفقیت قابل‌توجهی داشته‌اند، اما برای مدیریت مؤثر مسائل با تعداد اهداف بیشتر همچنان چالش‌های جدی وجود دارد. در این مقاله، یک الگوریتم تکاملی بسیارهدفه جدید مبتنی بر نقطه مرجع باعنوان NSGA-III پیشنهاد شده است. این الگوریتم با الهام از چارچوب موفق NSGA-II، بر حفظ تنوع جمعیت و همگرایی به جبهه پارتو بهینه تمرکز دارد. الگوریتم‌های NSGA-II و NSGA-III هر دو از روش‌های تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه هستند؛ اما الگوریتم NSGA-II معمولاً در مسائل تا چهار هدف عملکرد خوبی دارد و در مسائل با اهداف بیشتر، ممکن است کارایی آن کاهش یابد، الگوریتم NSGA-III به طور خاص برای مسائل با تعداد اهداف بیش از چهار هدف طراحی شده است که با معرفی مفهوم نقاط مرجع، قادر است به‌طور مؤثر مسائل با تعداد اهداف بیشتر را مدیریت کند (Deb and Jain, 2013). شکل (۲) فلوچارت الگوریتم NSGA-III را نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای فاضلاب ورودی به تصفیه‌خنه شهر قزوین سال ۱۳۹۹

Table 1- Parameters of influent wastewater to Qazvin city treatment plant in 2020

Parameter	Unit	Maximum	Minimum	Average
Biochemical Oxygen Demand (5-day) (BOD)	mg/L	280	130	197.14
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	518	223	384.29
Total Suspended Solids (TSS)	mg/L	264	156	208.86
Total Nitrogen (TN)	mg/L	70	45.6	56
Total Phosphorus (TP)	mg/L	6.4	4.6	5
Faecal Coliforms (FC)	No/100mL	93000000	15000000	36000000

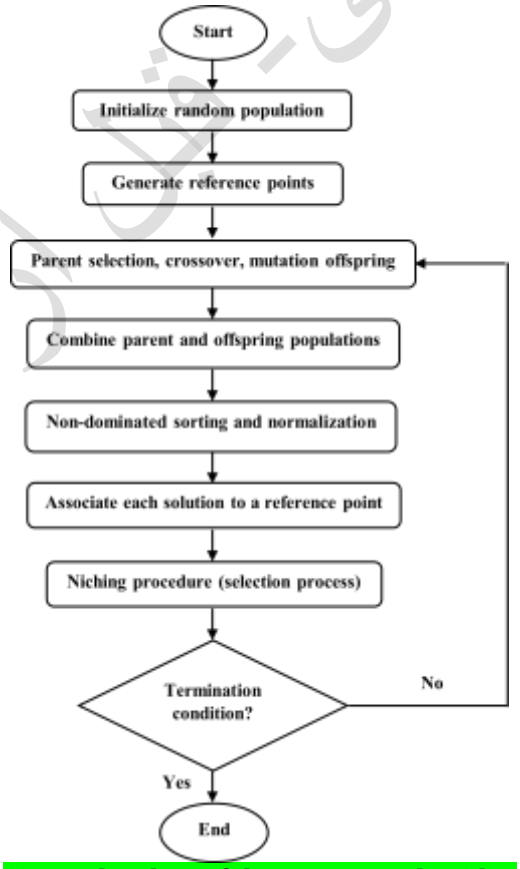


Fig. 2- Flowchart of the NSGA-III Algorithm

شکل ۲- فلوچارت الگوریتم NSGA-III

همان‌طور که اشاره شد، الگوریتم NSGA-III برای حفظ تنوع در پاسخ‌های بهینه، از یک مجموعه از نقاط مرجع استفاده می‌کند. این نقاط مرجع می‌توانند به‌صورت ساختارمند و از پیش تعیین‌شده باشند یا توسط کاربر ارائه شوند. در صورت عدم وجود هرگونه اطلاعات، معمولاً از روش ساختارمند استفاده می‌شود. در این مقاله، روش سیستماتیک Das و Dennis (1998) به کار گرفته شده است. این روش نقاط مرجع را بر روی یک ابرصفحه نرمال‌شده (normalized hyper-plane) قرار می‌دهد (یک ابرصفحه M-1 بعدی که طول اضلاع آن معادل یک است)، اگر تعداد تقسیم‌بندی برابر با p در هر هدف فرض شود، تعداد کل نقاط مرجع (H) در یک مسئله M بعدی برابر با فرمول (۱) است.

$$H = \binom{M+p-1}{p} \qquad (۱)$$

برای مثال، در مسئله‌ای با سه هدف (M=3) و چهار بخش‌بندی (p=4)، نقاط مرجع روی مثلثی با رأس‌های (0,0,1)، (0,1,0) و (1,0,0) قرار می‌گیرند و تعداد کل نقاط مرجع برابر با ۱۵ خواهد بود. این نقاط به‌صورت یکنواخت روی ابر صفحه نرمال‌شده توزیع می‌شوند. ازآنجاکه این نقاط مرجع به‌طور گسترده روی ابر صفحه توزیع شده‌اند، پاسخ‌های بهینه به‌دست‌آمده نیز به‌طور یکنواخت‌تری در نزدیکی جبهه بهینه پارتو پراکنده خواهند شد. در صورت ارائه مجموعه‌ای از نقاط مرجع توسط کاربر، الگوریتم به سمت یافتن پاسخ‌های بهینه نزدیک به آن نقاط متمایل شده و این رویکرد می‌تواند کاربرد تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی بسیارهدفه را به شکل ترکیبی پشتیبانی کند (Deb and Jain, 2013).

مدل بهینه‌سازی پیشنهادی

اهداف این مسئله عبارت‌اند از:

۱. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (CC): شامل هزینه ساخت تأسیسات، تجهیزات و زیرساخت‌های تصفیه‌خانه.

برای محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای برخی از فرایندهای تصفیه، از پروژه‌های ساخت تصفیه‌خانه در سال‌های گذشته استفاده شده است. در این محاسبه، نرخ تورم و نوسانات ارزی نیز مدنظر قرار گرفته‌اند. همچنین به‌منظور تعیین برخی هزینه‌ها، فهرست‌بهای تجهیزات آب‌وفاضلاب سال ۱۳۹۹ که توسط سازمان برنامه‌وبودجه کشور ارائه شده است به‌عنوان مبنای محاسبه در نظر گرفته شده است. هزینه سرمایه‌گذاری بر اساس دبی حداکثر (کیلووات ساعت) (Qpeak) تخمین زده می‌شود، به‌عنوان مثال هزینه سرمایه‌گذاری (ریال) فرایند آشغال‌گیر میله‌ای (Bar Screen) به‌صورت فرمول (۲) است.

$$CC = 3\times10^{8}\times Q_{peak}^{0.29} \qquad (۲)$$

۲. هزینه تعمیرات و نگهداری (OMC): شامل هزینه‌های جاری برای حفظ و نگهداری تجهیزات و تأسیسات.

بر اساس نظر کارشناسان و به‌صورت تجربی، بستگی به فرایند موردنظر بین پنج تا ۱۵ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در سال در نظر گرفته شده است.

۳. مصرف انرژی (EnC): شامل انرژی مصرفی در فرایندهای مختلف تصفیه.

۴. تولید لجن (SlP): مقدار لجن تولیدی در فرایند تصفیه.

۵. نیروی انسانی (LbR): تعداد کارگران و نیروی کار مورد نیاز برای بهره‌برداری از تصفیه‌خانه.

باتوجه‌به اینکه تعداد کارگران در ایران به‌صورت کلی برای کل تصفیه‌خانه محاسبه می‌شود، تعداد کارگران برای هر فرایند به‌صورت تجربی توسط نظر کارشناسان باتوجه‌به ظرفیت تصفیه‌خانه تخمین زده شده است.

۶. مساحت زمین (LaR): مساحت زمین موردنیاز برای احداث تصفیه‌خانه.

در این تحقیق، اطلاعت مربوط به مصرف انرژی، تولید لجن و مساحت زمین برای هر فرایند از شرکای درگیر در پروژه (AQUAREC) که اطلاعات را از تجربه خود در ساخت و راه‌اندازی سیستم‌های تصفیه فاضلاب در اروپا جمع‌آوری کردند، استفاده شده است (Joksimovic 2006). برای نمونه مصرف انرژی (کیلووات ساعت)، تولید لجن (تن در سال) و مساحت زمین (هکتار) فرایند فیلتر ریزدانه (Fine screen) به ترتیب به صورت فرمول‌های (۳)، (۴) و (۵) است:

$$EnC = 0.2\times PE \qquad (۳)$$

$$SlP = 75\times10^{-9}\times TSS\times Q_{avg}\times 24 \qquad (۴)$$

$$LaR = 0.0006\times Q_{peak}^{0.404} \qquad (۵)$$

که PE جمعیت تحت پوشش (نفر)، TSS مواد جامد معلق (میلی‌گرم بر لیتر)، Q_{avg} دبی متوسط (مترمکعب در ساعت) و Q_{peak} دبی حداکثر (مترمکعب در ساعت) است.

به‌منظور بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه فاضلاب شهری، ۴۳ فرایند مختلف تصفیه انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. مراحلی که معمولاً در تصفیه فاضلاب شهری استفاده می‌شود عبارت‌اند از (Visanji et al., 2017):

۱. تصفیه مقدماتی: این مرحله فاضلاب خام را برای تصفیه بیشتر با حذف کف‌های روغنی، بقایای شناور و شن که می‌تواند به تجهیزات آسیب برساند یا فرایندهای بیولوژیکی را مهار کند، آماده می‌کند. این مرحله شامل فرایندهایی مانند آشغال‌گیر میله‌ای ،واحد دانه‌گیر ، آشغال‌گیر درشت است.

۲. مرحله نخســـت: هدف حذف مواد جامد در طول عملیات فیزیکی اسـت، معمولاً مخازن ته‌نشـینی که امکان ته‌نشـین شـدن ذرات را با نیروی جاذبه ساکن فراهم می‌کند. این فرایند تصفیه ۶۰ درصــد مواد جامد معلق (TSS)، ۳۰ تا ۴۰ درصــد نیاز بیولوژیکی اکسیژن (BOD)، ۲۰ درصد فسفر (P) و ۷۰ درصد کدورت را حذف می‌کند. مرحله نخسـت شـامل فرایندهایی مانند آشـغال‌گیر ریز، ته‌نشـینی با یا بدون ماده منعقدکننده، شـناورسـازی به کمک هوا محلول، اســتفاده از راکتور UASB، برکه تثبیت بی‌هوازی است.

۳. مرحله دوم: در این مرحله از میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه مولکول‌های پرانرژی استفاده می‌شود. دو رویکرد برای تصفیه بیولوژیکی وجود دارد: راکتورهای رشد معلق و فرایندهای رشد فعال. در این مرحله از فرایندهایی مانند صافی بیولوژیکی دوار، بیوراکتور غشایی، فیلترهای هوادهی‌شده مستغرق و غیره استفاده می‌شود.

۴. مرحله سوم: این مرحله به بهبود فاضلاب خروجی از مرحله قبل با اعمال ترکیبی از فرایندها برای حذف بیشتر مواد جامد معلق و سایر آلاینده‌ها می‌پردازد. در این مرحله از فرایندهایی مانند اولترا فیلتراسیون، نانو فیلتراسیون، اسمز معکوس، اکسیداسیون پیشرفته و غیره استفاده می‌شود.

۵. ضدعفونی: هدف از این مرحله اطمینان از حذف ارگانیسم‌های بیماری‌زا برای تولید فاضلاب بدون هیچ‌گونه خطری برای سلامتی انسان یا محیط زیست است. این مرحله برای تصفیه موثر فاضلاب حیاتی است. دراین‌مرحله ضدعفونی و گندزدایی از طریق تزریق ازن، افزودن پراستیک اسید، افزودن دی‌اکسیدکلر، کلرزنی و استفاده از اشعه فرابنفش صورت می‌گیرد.

جدول (۲) فرایندهای مورداستفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که تصفیه مقدماتی شامل سه گزینه، مرحله نخست شامل شش گزینه، مرحله دوم شامل ۱۴ گزینه، مرحله سوم شامل ۱۵ گزینه و مرحله ضدعفونی شامل پنج گزینه است. برای هریک از این فرایندها، پارامترهای کلیدی شامل مقدار انرژی مصرفی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، تعداد نیروی انسانی موردنیاز، مقدار لجن تولیدی و مساحت زمین موردنیاز محاسبه شد (Joksimovic, 2006). سپس تعداد مراحل تصفیه (ترکیب فرایندها) به تفکیک، پنج، شش، هفت و هشت مرحله‌ای به‌روش شمارش (enumeration) محاسبه شد. به‌طوری‌که ترکیب پنج مرحله‌ای شامل انتخاب یک فرایند از هر مرحله اصلی (Preliminary, Primary, Secondary, Tertiary, Disinfection) است. به‌عنوان نمونه، فضای جستجو برای ترکیب پنج مرحله‌ای برابر با حاصل‌ضرب تعداد فرایندهای هر مرحله (۵×۱۵×۱۴×۶×۳) معادل ۱۸۹۰۰ ترکیب ممکن است. درحالی‌که در ترکیبات شش، هفت و هشت مرحله‌ای، امکان تکرار یکی یا چند مرحله از فرایندها برای انعطاف بیشتر در طراحی درنظر گرفته شده است.

به‌طور مثال، ترکیب شش مرحله‌ای ممکن است شامل تکرار مرحله مقدماتی یا اول یا سایر مراحل باشد، که با افزایش مراحل، تعداد ترکیبات به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد.

در مرحله بعد، سازگاری و همپوشانی هر یک از این فرایندها با یکدیگر با درنظرگرفتن ماتریس سازگاری Marian et al. (2003) بین فرایندها ارزیابی شد و همه فرایندها دوبه‌دو با هم بررسی شدند تا امکان ترکیب آن‌ها در سیستم‌های فاضلاب شهری فراهم شود و ترکیب‌های نامناسب حذف شوند. به‌طورکلی از پنج قانون در ماتریس سازگاری استفاده شده است: ۱- آیا دو فرایند می‌توانند به‌صورت همزمان در یک ترکیب تصفیه وجود داشته باشند. ۲- آیا فرایند مورد نظر می‌تواند قبل از فرایند دیگر در یک ترکیب تصفیه قرار بگیرد. ۳- آیا فرایند مورد نظر می تواند بلافاصله قبل از فرایند دیگر در یک دسته قرار بگیرد. ۴- آیا فرایند مورد نظر می‌تواند بعد از فرایند دیگر در یک ترکیب تصفیه قرار بگیرد. ۵- آیا فرایند مورد نظر می تواند بلافاصله بعد از فرایند دیگر در یک دسته قرار بگیرد. به‌طور مثال یک فرایند بیوراکتور غشایی (MBR) یا حوضچه تثبیت نباید در ترکیب تصفیه‌ای که از قبل شامل فرایند لجن فعال است، در نظر گرفته شوند. به‌عنوان نمونه، در ترکیب پنج‌تایی با تعداد ۱۸۹۰۰ ترکیب ۴۲۶۶ ترکیب سازگار وجود دارد. در ترکیب شش‌تایی با تکرار مرحله سوم (Tertiary)، ۲۸۳۵۰۰ ترکیب با ۶۹۳ ترکیب سازگار وجود دارد. البته تعداد مراحل نه و بیشتر نیز بررسی شد که ترکیب سازگاری بین آنها وجود نداشت. به‌طور مثال ترکیب شش‌تایی با تکرار مرحله گندزدایی (Preliminary, Primary, Secondary, Tertiary, Disinfection, Disinfection) نیز هیچ ترکیب سازگاری ندارد.

برای یافتن بهترین ترکیب فرایندها و بهینه‌سازی سیستم تصفیه، از الگوریتم چندهدفه NSGA-III استفاده و با الگوریتم NSGA-II مقایسه شد. این الگوریتم این امکان را می‌دهد که مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه در قالب منحنی پارتو به دست آید که نمایانگر تعادل میان اهداف مختلف است. این نتایج می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای انتخاب و طراحی سیستم‌های تصفیه فاضلاب شهری کارآمد و پایدار مورداستفاده قرار گیرند.

در این پژوهش، شبیه‌سازی الگوریتم‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (R2022b) انجام شده است. کدهای مورد استفاده مربوط به الگوریتم‌های NSGA-II و NSGA-III از منبع معتبر (https://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/EMOO/EMOOsoftware.html) استخراج شده است. شبیه‌سازی‌ها روی رایانه‌ای با مشخصات Intel(R) Core(TM) i5-4200M CPU @ 2.50GHz انجام شده است.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی

مطالعه حاضر به‌منظور بهینه‌سازی ترکیب فرایندهای تصفیه فاضلاب شهری در تصفیه‌خانه شهر قزوین انجام‌شده است. این تصفیه‌خانه در حال حاضر شامل فرایندهای آشغال‌گیر به‌عنوان

جدول ۲- نام و مخفف فرایندهای تصفیه موردنظر در پنج مرحله تصفیه شهری

Table 2- The names and abbreviations of the treatment processes considered in the five stages of municipal wastewater treatment

Category	Unit Processes Name	Abbreviation
Preliminary	Bar Screen	BScr
	Grit Chamber	GrCh
	Coarse Screen	CScr
Primary	Fine Screen	FScr
	Sedimentation w/o Coagulant	Sed
	Sedimentation w/ Coagulant	SedC
	DAF w/ Coagulant	DAF
	Membrane Filtration	DMF
	Stabilization Pond: Anaerobic	SPAnbc
Secondary	High Loaded Activated Sludge + Sec. Sedim.	HLAs
	Low Loaded Activated Sludge w/o de-N + Sec. Sedim.	LLAs
	Low Loaded Activated Sludge w/ de-N + Sec. Sedim.	LLAsN
	Trickling Filter + Secondary Sedimentation	TF
	Rotating Biological Contactor	RBC
	Submerged Aerated Filter	SAF
	Stabilization Pond: Aerobic	SPAbc
	Stabilization Pond: Aerated	SPAer
	Stabilization Pond: Facultative	SPFac
	Constructed wetland: Free-Water-Surface Flow	WetFWS
	Constructed wetland: Subsurface Water Flow	WetSUB
	Membrane bioreactor	MBR
	Excess Biological Phosphorus Removal	EBPR
	Phosphorus Precipitation	Ppre
Tertiary	Filtration over fine porous media	MedF
	Surface filtration	SurF
	Micro filtration	MF
	Ultra filtration	UF
	Nano filtration	NF
	Reverse osmosis	RO
	Granular Activated Carbon	GAC
	Powdered Activated Carbon	PAC
	Ion exchange	IE
	Advanced oxidation – UV/O3	AOO3
	Advanced oxidation – UV/H2O2	AOH2O2
	Soil Aquifer Treatment	SAT
	Maturation pond	MP
	Constructed wetland - polishing	WetPOL
	Flocculation	Floc
Disinfection	Ozone	O3
	Paracetic acid	PA
	Chlorine dioxide	ClO2
	Chlorine gas	ClG
	Ultraviolet radiation	UV

تصفیه مقدماتی (Preliminary)، لاگون‌های بی‌هوازی به‌عنوان تصفیه اولیه (Primary)، لاگون هوازی به‌عنوان تصفیه ثانویه (Secondary) و استفاده از آب‌ژاول به‌عنوان مرحله گندزدایی (Disinfection) است.

در این پژوهش، ۴۳ فرایند مختلف تصفیه فاضلاب، متعلق به مراحل مختلف تصفیه شامل تصفیه مقدماتی، مرحله نخست، مرحله دوم، مرحله سوم و مرحله ضدعفونی بررسی شده‌اند. داده‌های جمع‌آوری‌شده برای هر فرایند شامل پارامترهای متعددی ازجمله تعداد نیروی انسانی موردنیاز، سطح زمین مورداستفاده، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه های تعمیر و نگهداری، مصرف انرژی و میزان تولید لجن است. فرایندهای مذکور در قالب ترکیب‌های پنج، شش، هفت و هشت فرایندی با روش شمارش (enumeration) به‌طور کامل بررسی شدند تا همه ترکیب‌های ممکن از فرایندها برای تصفیه‌خانه موردتوجه قرار گیرند. در این بین، ماتریس سازگاری تعریف‌شده بین فرایندها برای حذف ترکیب‌های ناسازگار به‌کار گرفته‌شد تا فقط ترکیب‌های سازگار مورد بررسی نهایی قرار گیرند.

پس از تعیین ترکیب‌های سازگار و اهداف، الگوریتم های NSGA-II و NSGA-III برای هریک از ترکیب های پنج‌تایی تا هشت‌تایی اجرا شد. در نهایت، با استفاده از روش TOPSIS، یکی از گزینه‌های بهینه انتخاب شد که بهترین عملکرد را نسبت به سایر گزینه‌ها داشت.

به‌طور خلاصه مراحل انجام پژوهش: ۱- تعیین ترکیب فرایندها ۲- بررسی سازگاری ۳- محاسبه ۶ تابع هدف ۴- بهینه سازی و ۵- انتخاب بهترین گزینه است.

نتایج به‌دست‌آمده شامل مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه برای هریک از ترکیب‌ها است که مقدار اهداف، تعداد نیروی انسانی (تعداد نیروی انسانی در ماه)، هزینه سرمایه‌گذاری (میلیارد ریال)، مقدار انرژی مورد نیاز (مگاوات ساعت در سال)، هزینه تعمیرات و نگهداری (میلیارد ریال در سال)، زمین مورد نیاز (هکتار) و مقدار لجن تولیدی (تن در سال) ارائه شده است، همچنین شامل ترکیب قرارگیری فرایندها در مراحل مختلف تصفیه است که برای تصفیه بهتر می‌توان مراحل تصفیه را بیشتر کرد.

جدول‌های (۳) و (۴) به‌ترتیب نتایج بهینه‌سازی ترکیب‌های پنج‌تایی سازگار، NSGA-II و NSGA-III را نشان می‌دهند. این جدول، ده راه‌حل بهینه پارتو را نشان می‌دهد که هریک، ترکیب متفاوتی از فرایندهای تصفیه را در مراحل مقدماتی (Preliminary)، نخست (Primary)، دوم (Secondary)، سوم (Tertiary) و ضدعفونی (Disinfection) به‌همراه مقادیر متناظر شش هدف بهینه‌سازی (نیروی کار، هزینه سرمایه‌گذاری، مصرف انرژی، هزینه تعمیر و نگهداری، مساحت زمین و میزان تولید لجن) ارائه می‌دهد.

جدول ۳- نتایج بهینه‌سازی در پنج مرحله تصفیه شهری به‌روش NSGA-II

Table 3- The optimization results in the five stages of municipal wastewater treatment using the NSGA-II method

No.	ID	Labour (personH/M)	CAPEX (billion rials)	Energy (Megawatt-hours/yr)	OPEX (billion rials/yr)	Land (ha)	Sludge (Tonnes/yr)	Preliminary	Primary	Secondary	Tertiary	Disinfection
1	592	32	150	8900	15	0.5	46	BScr	FScr	RBC	MedF	PA
2	1285	26	170	4200	17	0.7	25	BScr	DMF	Ppre	MedF	ClO2
3	1365	32	160	36000	16	0.1	38	CScr	FScr	SAF	SurF	ClO2
4	1485	26	180	40000	20	0.1	37	CScr	FScr	SAF	MF	ClO2
5	1486	29	200	40000	22	0.2	67	BScr	Sed	SAF	MF	ClO2
6	1513	21	180	3800	20	0.2	9	BScr	FScr	Ppre	MF	ClO2
7	1738	29	350	39000	48	0.2	0.5	BScr	FScr	MBR	NF	ClO2
8	1824	30	310	76000	50	0.1	37	CScr	FScr	SAF	RO	ClO2
9	1936	32	310	14000	39	0.4	0.5	BScr	FScr	MBR	GAC	ClO2
10	2320	30	160	9000	16	2.3	46	BScr	FScr	TF	MedF	ClG

جدول ٤- نتایج بهینه‌سازی در پنج مرحله تصفیه شهری به روش NSGA-III

Table 4- The optimization results in the five stages of municipal wastewater treatment using the NSGA-III method

No.	ID	Labour (personH/M)	CAPEX (billion rials)	Energy (Megawatt-hours/yr)	OPEX (billion rials /yr)	Land (ha)	Sludge (Tonnes/yr)	Preliminary	Primary	Secondary	Tertiary	Disinfection
1	424	28	300	33000	42	0.3	0.5	BScr	FScr	MBR	IE	O3
2	432	29	320	36000	44	0.6	16	CScr	DMF	MBR	IE	O3
3	1116	36	170	11000	17	2.3	46	CScr	FScr	TF	SAT	PA
4	1286	28	180	4000	18	0.7	25	GrCh	DMF	Ppre	MedF	ClO2
5	1355	42	190	8000	19	0.4	94	GrCh	SedC	RBC	SurF	ClO2
6	1365	32	160	37000	16	0.1	38	CScr	FScr	SAF	SurF	ClO2
7	1371	40	190	37000	20	0.2	85	CScr	SedC	SAF	SurF	ClO2
8	1380	32	190	500	20	0.7	16	CScr	FScr	EBPR	SurF	ClO2
9	1396	30	180	200	18	0.3	40	BScr	Sed	Ppre	SurF	ClO2
10	1413	28	230	17000	28	2.2	485	CScr	Sed	HLAs	MF	ClO2

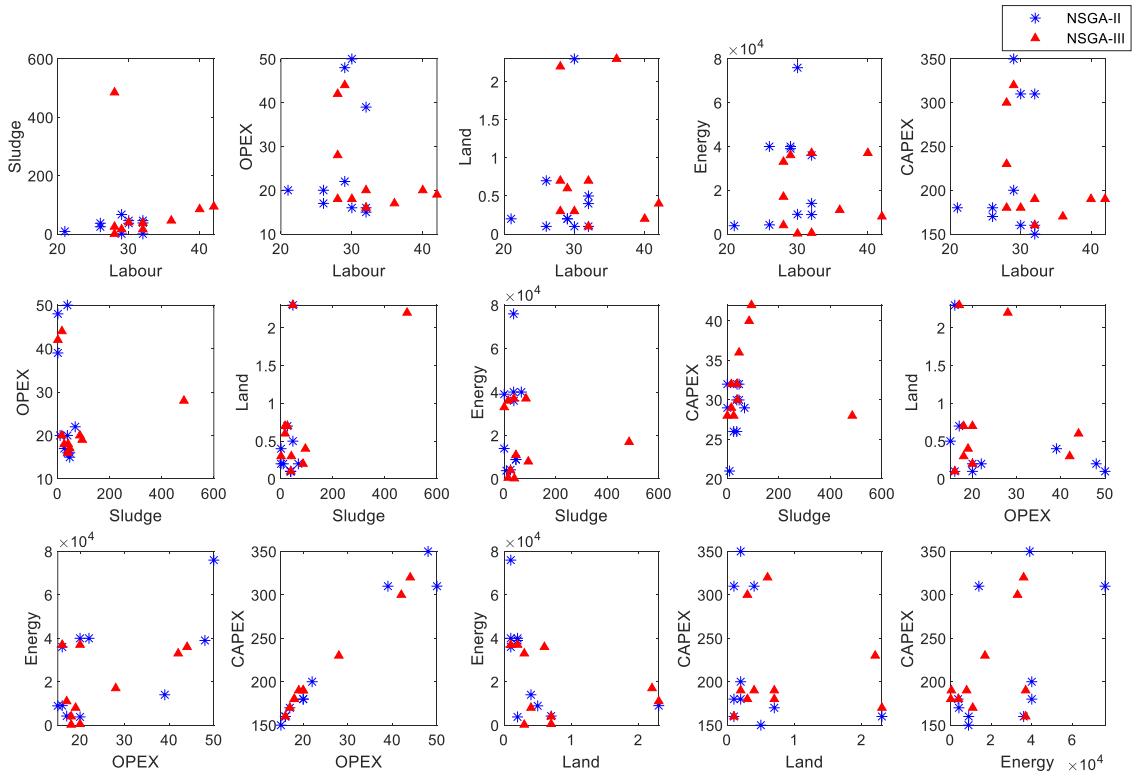


Fig. 3- Pareto front of NSGA-II and NSGA-III algorithms for combinations of five

شکل ۳- جبهه پارتو الگوریتم‌های NSGA-II و NSGA-III برای ترکیب‌های پنج‌تایی

شکل (۳) جبهه پارتو الگوریتم‌های مذکور را روی نمودارهای دوبعدی برای ترکیب‌های پنج‌تایی نمایش می‌دهد.

در این مطالعه، از روش TOPSIS برای انتخاب بهترین راه‌حل از میان جبهه پارتو استفاده شده است. در فرایند تصمیم‌گیری با این روش، وزن‌های تمامی شش هدف به طور یکسان در نظر گرفته شدند تا ارزیابی بدون اولویت‌دهی به هیچ یک از معیارها انجام شود. این رویکرد امکان مقایسه جامع و بی‌طرفانه راه‌حل‌ها را فراهم می‌آورد و نتیجه آن انتخاب راه‌حلی است که بهترین تعادل میان

تمامی اهداف را ارائه می‌دهد که نتایج حاصل از روش TOPSIS در جداول مربوطه با استفاده از رنگ‌بندی متمایز به نمایش درآمده‌اند. جدول‌های (۵) و (۶) یک نمونه از ترکیب‌های شش‌تایی را نشان می‌دهند که در این ترکیب مرحله سوم تصفیه، تکرار شده است تا کارایی کل سیستم افزایش یابد، این جدول‌ها ده راه‌حل بهینه پارتو را برای ترکیب‌های شش‌تایی فرایندهای تصفیه (شامل مراحل مقدماتی، نخست، دوم، دو مرحله سوم و ضدعفونی) به همراه مقادیر شش هدف بهینه‌سازی (نیروی انسانی، هزینه سرمایه‌گذاری، مصرف انرژی، هزینه تعمیر و نگهداری، مساحت زمین و میزان تولید لجن) نمایش می‌دهد.

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی در شش مرحله تصفیه شهری به روش NSGA-II

Table 5- The optimization results in the six stages of municipal wastewater treatment using the NSGA-II method

No.	ID	Labour (personH/M)	CAPEX (billion rials)	Energy (Megawatt-hours/yr)	OPEX (billion rials /yr)	Land (ha)	Sludge (Tonnes/yr)	Preliminary	Primary	Secondary	Tertiary1	Tertiary2	Disinfection
1	48	38	380	40000	50	0.5	0.5	CScr	FScr	MBR	GAC	IE	O3
2	115	44	250	25000	27	0.7	46	BScr	FScr	RBC	GAC	SAT	O3
3	132	44	260	54000	29	0.5	37	CScr	FScr	SAF	GAC	SAT	O3
4	133	47	280	54000	30	0.6	67	BScr	Sed	SAF	GAC	SAT	O3
5	145	44	370	25000	47	0.6	0.5	BScr	FScr	MBR	GAC	SAT	O3
6	154	30	340	49000	46	2.2	455	BScr	FScr	HLAs	MF	NF	UV
7	514	35	280	20000	35	2.4	455	BScr	FScr	HLAs	MF	SAT	UV
8	559	36	240	15000	29	2.4	45	BScr	FScr	TF	MF	SAT	UV
9	602	39	260	47000	32	0.7	52	GrCh	DMF	SAF	MF	SAT	UV
10	681	39	270	49000	34	0.4	37	CScr	FScr	SAF	UF	SAT	UV

جدول ٦- نتایج بهینه‌سازی در شش مرحله تصفیه شهری به روش NSGA-III

Table 6- The optimization results in the six stages of municipal wastewater treatment using the NSGA-III method

No.	ID	Labour (personH/M)	CAPEX (billion rials)	Energy (Megawatt-hours/yr)	OPEX (billion rials /yr)	Land (ha)	Sludge (Tonnes/yr)	Preliminary	Primary	Secondary	Tertiary1	Tertiary2	Disinfection
1	1	37	380	45000	50	2.4	455	BScr	FScr	HLAs	GAC	IE	O3
2	34	41	250	60000	27	5	381	BScr	Sed	LLAsN	GAC	IE	O3
3	55	43	260	30000	29	2.5	455	BScr	FScr	HLAs	GAC	SAT	O3
4	102	44	280	25000	30	2.5	45	CScr	FScr	TF	GAC	SAT	O3
5	116	46	370	25000	47	0.7	45	GrCh	FScr	RBC	GAC	SAT	O3
6	147	44	340	25000	46	0.6	0.5	CScr	FScr	MBR	GAC	SAT	O3
7	154	30	280	49000	46	2.2	455	BScr	FScr	HLAs	MF	NF	UV
8	186	31	240	63000	45	4.8	351	CScr	FScr	LLAsN	MF	NF	UV
9	215	33	260	44000	40	0.4	46	GrCh	FScr	RBC	MF	NF	UV
10	226	32	270	47000	42	0.6	61	BScr	DMF	RBC	MF	NF	UV

شکل (۴) جبهه پارتو الگوریتم‌های مذکور را روی نمودارهای دوبعدی برای ترکیب‌های شش‌تایی با تکرار مرحله سوم (Tertiary)، نمایش می‌دهد.

مقایسه و تحلیل نتایج

جدول‌های (۷) و (۸) پارامترهای الگوریتم‌ها و معیارهای کمی ارزیابی برای دو روش NSGA-II و NSGA-III در حالت پنج و همه حالت‌های شش مرحله‌ای با تکرار مراحل مختلف را نشان می‌دهند.

الگوریتم NSGA-II نسبت به NSGA-III در تمامی حالت‌ها زمان اجرای کمتری دارد که این موضوع نشان‌دهنده کارایی بالاتر آن در کاهش زمان پردازش است؛ به‌طوری که زمان اجرای NSGA-II در بازه ۱۹۴ تا ۲۵۳ ثانیه قرار دارد، در حالی که NSGA-III بین ۲۶۸ تا ۳۶۷ ثانیه زمان می‌برد. پارامترهای اصلی هر دو الگوریتم مانند تعداد نسل‌ها، اندازه جمعیت، نرخ جهش و نرخ تقاطع یکسان است، بنابراین این تفاوت زمانی عمدتاً به ساختار الگوریتم‌ها باز می‌گردد. همچنین شاخص IGD (Inverted Generational Distance) که میزان همگرایی به جبهه پارتوی واقعی را نشان می‌دهد برای NSGA-II در همه حالات کمتر یا تقریبا برابر با NSGA-III است که نشان‌دهنده همگرایی بهتر و نزدیکی بیشتر به پارتو است.

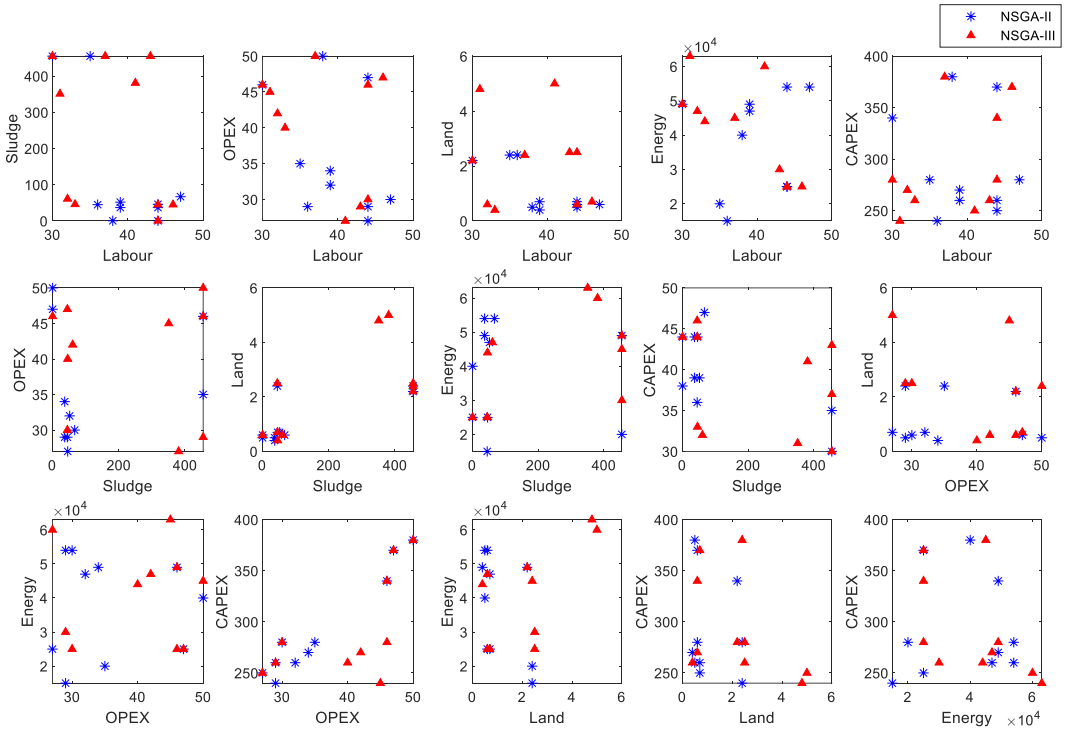


Fig. 4- Pareto front of NSGA-II and NSGA-III algorithms for combinations of six by repeating the Tertiary stage

شکل ٤- جبهه پارتو الگوریتم‌های NSGA-II و NSGA-III برای ترکیب‌های شش‌تایی با تکرار مرحله سوم

جدول ۷- پارامترها و معیارهای ارزیابی الگوریتم NSGA-II

Table 7- Parameters and performance evaluation metrics of NSGA-II algorithm

Parameters	5 Stages	6 Stages (Preliminary)	6 Stages (Primary)	6 Stages (Secondary)	6 Stages (Tertiary)
Number of Generation (Stopping Criterion)	100	100	100	100	100
Population Size	10	10	10	10	10
Mutation Rate	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Crossover Rate	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Time (Seconds)	194	194	225	245	253
IGD	0.72	0.79	0.77	0.97	0.95
HV	10.93	9.52	10.65	7.53	11.29

جدول ۸- پارامترها و معیارهای ارزیابی الگوریتم NSGA-III

Table 8- Parameters and performance evaluation metrics of NSGA-III algorithm

Parameters	5 Stages	6 Stages (Preliminary)	6 Stages (Primary)	6 Stages (Secondary)	6 Stages (Tertiary)
Number of Generation (Stopping Criterion)	100	100	100	100	100
Population Size	10	10	10	10	10
Mutation Rate	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Crossover Rate	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Time (Seconds)	305	268	302	362	367
IGD	0.76	0.88	0.79	1	0.97
HV	20.66	5.76	11.89	6.92	8.91

در معیار HV (Hyper Volume) که نمایانگر تنوع و گستردگی فضای پاسخ‌ها است، NSGA-III در برخی موارد عملکرد بهتری دارد؛ به عنوان مثال در حالت پنج مرحله‌ای مقدار HV تقریبا دو برابر مقدار در NSGA-II است. با این حال، در دیگر حالت‌ها، NSGA-II نتایج بهتری ارائه داده است. مجموع این داده‌ها نشان می‌دهد که NSGA-II برای مسائلی با محدودیت زمانی مناسب‌تر بوده و به دلیل همگرایی دقیق‌تر گزینه بهتری برای یافتن راه‌حل‌ها است؛ در حالی که NSGA-III با ارائه تنوع بیشتر در پاسخ‌ها، برای کاربردهایی که کیفیت و گستردگی تنوع راه‌حل اهمیت دارد، اولویت دارد.

مقایسه مراحل تصفیه‌خانه قزوین با ترکیب‌های بهینه

همان‌طور که ذکر شد، تصفیه‌خانه قزوین در حال حاضر شامل فرایندهای آشغال‌گیر به‌عنوان تصفیه مقدماتی (Preliminary)، لاگون‌های بی‌هوازی به‌عنوان تصفیه اولیه (Primary)، لاگون هوازی به‌عنوان تصفیه ثانویه (Secondary) و استفاده از آب‌ژاول به‌عنوان مرحله گندزدایی (Disinfection) است. این مراحل به‌طور مؤثری برای کاهش آلودگی و بهبود کیفیت آب طراحی شده‌اند. بااین‌حال، بررسی فرایندهای سازگار نشان می‌دهد که مراحل موجود در تصفیه‌خانه قزوین به طور کامل با این ترکیب‌ها همخوانی ندارند. ترکیب‌های پنج مرحله‌ای بهینه حاصل از TOPSIS همان‌طور که در جدول‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است از فرایندهای پیشرفته‌تر نظیر فیلترهای سطحی و میکرو (MF, SurF) و دی اکسید کلر (ClO2) به‌عنوان گندزدایی استفاده می‌کنند در حالی که در تصفیه‌خانه قزوین از روش‌های سنتی‌تر به کار می‌رود. لاگون‌ها علی‌رغم سادگی و هزینه سرمایه‌گذاری پایین‌تر، زمان تصفیه طولانی‌تر ، مصرف زمین بیشتر و کنترل محدودتر بر حذف آلاینده‌ها را به همراه دارند. از آنجایی که جایگزینی لاگون‌ها با فرایندهای دیگر به‌دلیل اقتصادی نبودن، امکان‌پذیر نیست، لذا پیشنهاد می‌شود که تصفیه‌خانه قزوین جهت ارتقاء عملکرد خود، با افزودن مرحله سوم (Tertiary) شامل میکرو فیلترها یا فیلترهای سطحی و به‌کارگیری گندزدایی با دی اکسید کلر را مورد بررسی و اجرا قرار دهد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه فاضلاب شهری قزوین با بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-IIو NSGA-III انجام شد و بهترین گزینه‌ها با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از معیارهای اقتصادی، فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی نظیر هزینه سرمایه‌گذاری، مصرف انرژی، تولید لجن، نیروی انسانی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و مساحت زمین، امکان شناسایی ترکیب‌های بهینه وجود دارد که علاوه بر بهبود کیفیت تصفیه، به بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند. الگوریتم NSGA-II به‌دلیل زمان اجرای کمتر و همگرایی بهتر، برای کاربردهایی که محدودیت زمانی مهم است، مناسب‌تر است؛ در حالی که NSGA-III با تنوع بالاتر پاسخ‌ها، گزینه‌ای مطلوب برای پژوهش‌هایی با تمرکز بر گستردگی راه‌حل‌ها محسوب می‌شود. با توجه به وضعیت فعلی تصفیه‌خانه فارسیان قزوین که مبتنی بر فرایندهای سنتی شامل آشغال‌گیر، لاگون‌های بی‌هوازی و هوازی و گندزدایی با آب‌ژاول است، پیشنهاد شده است که به منظور ارتقای عملکرد و افزایش کارایی کل سیستم، مراحل تصفیه پیشرفته‌تر مانند مرحله سوم (Tertiary) با استفاده از میکروفیلترها یا فیلترهای سطحی و گندزدایی با دی‌اکسید کلر افزوده شوند. این تغییر ضمن بهبود کیفیت آب تصفیه‌شده، کاهش میزان لجن و بهینه‌سازی مصرف انرژی را به‌همراه خواهد داشت. در نهایت، یافته‌های این پژوهش به عنوان مرجعی قابل استناد برای مدیران و سیاست‌گذاران حوزه آب و فاضلاب استان قزوین و سایر استان‌ها می‌تواند زمینه‌ساز اتخاذ تصمیم‌های بهتر و توسعه زیرساخت‌های پایدار در مدیریت فاضلاب شهری باشد.

با توجه به محدودیت‌های موجود در دسترسی به داده‌های جامع و دقیق، انجام تحلیل‌های عدم قطعیت و حساسیت در این مطالعه مقدور نبوده است. نبود اطلاعات کافی درباره نوسانات پارامترهایی مانند لجن تولیدی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انرژی مصرفی، و همچنین عدم وجود داده‌های کمی درباره پراکندگی و وابستگی متغیرها، انجام این تحلیل‌ها را با چالش مواجه کرده است. توصیه می‌شود در تحقیقات آینده با جمع‌آوری داده‌های گسترده‌تر و دقیق–

تر، تحلیل‌های عدم قطعیت و حساسیت انجام شده تا به شفاف‌تر شدن روند تصمیم‌گیری کمک نماید.

تشکر و قدردانی

از کارشناسان تصفیه‌خانه آب‌وفاضلاب شهر قزوین که در راستای انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مریم پرهیزکاری، نگارش مقاله، اجرای مدل ها.
نویسنده دوم : حامد مازندرانی زاده، بررسی و تایید صحت نتایج.
نویسنده سوم: سید محمد کاظم صدر، تجزیه و تحلیل داده ها.

References

1- Aparna, K. G., and Swarnalatha, R., 2023. Dynamic optimization of a wastewater treatment process for sustainable operation using multi-objective genetic algorithm and non-dominated sorting cuckoo search algorithm. *Journal of Water Process Engineering*, 53:103775. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103775.

2- Carlos, N. B., and Noroña, M. I., 2021. Selection of a Sustainable Municipal Wastewater Treatment Technology: A Multi-Criteria Decision Analysis Approach Using AHP and TOPSIS with Fuzzy Sets. https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672808.

3- Das, I., and Dennis, J.E., 1998. Normal-boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. *SIAM journal on optimization*, 8(3):631-657. https://doi.org/10.1137/S1052623496307510.

4- Dai, H., Zhao, J., Wang, Z., Chen, C., Liu, X., Guo, Z., Chen, Y., Zhang, Sh., Li, G., Geng, H., and Wang, X., 2023. Optimal control of sewage treatment process using a dynamic multi-objective particle swarm optimization based on crowding distance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2):109484. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109484.

5- Deb, K., and Jain, H., 2013. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 18(4):577-601. https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535.

6- Joksimovic, D., 2006. Decision support system for planning of integrated water reuse projects: Thesis, *University of Exeter*. United Kingdom. http://hdl.handle.net/10036/29964.

7- Kumar, V., Gautam, L., and Dahiya, R., 2025. A hybrid multi-objective optimization approach for wastewater treatment plant construction: balancing time, cost, environmental impact, energy efficiency, and land use using NSGA-III and MODE. *Asian Journal of Civil Engineering*, 26 (5):2005-2021. https://doi.org/10.1007/s42107-024-01211-1.

8- Marian, R. M., Luong, L. H. S., and Abhary, K., 2003. Assembly sequence planning and optimisation using genetic algorithms Part I. Automatic generation of feasible assembly sequences. *Applied Soft Computing*, 2(3), 223-253. https://doi.org/10.1016/S1568-4946(02)00075-1.

9- Niu, G., Li, X., Wan, X., He, X., Zhao, Y., Yi, X., Chen, Ch., Xujun, L., Ying, G., and Huang, M., 2022. Dynamic optimization of wastewater treatment process based on novel multi-objective ant lion optimization and deep learning algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131140. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131140.

10- Padrón-Páez, J. I., Almaraz, S. D. L., and Román-Martínez, A., 2020. Sustainable wastewater treatment plants design through multiobjective optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 140:10685. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106850.

11- Sadr, S. M. K., Johns, M. B., Memon, F. A., Duncan, A., Gordon, J., Gibson, R., Chang, H. J. F., Morley, M., Savić, D. A., and Butler, D., 2020. Development and Application of a Multi-Objective-Optimization and Multi-Criteria-Based Decision Support Tool for Selecting Optimal Water Treatment Technologies in India. *Water*, 12(10), 2836. https://doi.org/10.3390/w12102836.

12- Sadr, S. M. K., Johns, M. B., Memon, F. A., Morley, M., and Savić, D., 2018. Development and Application of a User-Friendly Decision Support Tool for Optimization of Wastewater Treatment Technologies in India. *International Hydroinformatics Conference*. https://easychair.org/publications/paper/f8m4.

13- Visanji, Z., Sadr, S.M., and Memon, F.A., 2017. Sustainable Treatment of Emerging Pollutants in the Context of India. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3082-6_26.

14- Tortajada, C., 2020. Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. *NPJ Clean Water*, 3(1)22. https://doi.org/10.1038/s41545-020-0069-3.

15- Yahya, M. N., Gökçekuş, H., Ozsahin, D. U., and Uzun, B., 2020. Evaluation of wastewater treatment technologies using TOPSIS. *Desalination Water Treatment*, 177:416-422. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25172.

16- Zhou, P., Li, H., and Chai, T., 2023. SPEA2 based on grid density search and elite guidance for multi-objective operation optimization of wastewater treatment process. *Applied Soft Computing*, 144, 110529. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110529.

EXTENDED ABSTRACT

Optimization of Urban Wastewater Treatment Processes Using the NSGA-III Many-Objective Genetic Algorithm (Case Study: Qazvin City Wastewater Treatment Plant)

M. Parhizkari[1], H. Mazandarani Zadeh[2*] and S. M. K. Sadr[3]

1- PhD Student in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Corresponding Author, Associated professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir)*

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Exeter, United Kingdom.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received:
Revised:
Accepted:
Available online:

Keywords:
Water pollution, decision making, Environment, Water resource management..

TO CITE THIS ARTICLE:

Abstract

Considering the increasing urban population and the growing water needs, wastewater management has become a fundamental challenge in urban sustainable development. This study investigates the optimal combination of wastewater treatment processes in Qazvin and develops a method based on the NSGA-III optimization algorithm. A total of 43 different treatment processes were collected and analyzed, with unsuitable combinations eliminated. The NSGA-III and NSGA-II algorithms were implemented to find optimal solutions, and the TOPSIS method was employed to select the best option. The results indicated that NSGA-II offered better performance in terms of execution time and optimization efficiency, while NSGA-III provided greater diversity in solutions. Furthermore, the current wastewater treatment system in Qazvin ranked lower in energy efficiency and output quality compared to the proposed optimal solutions. To enhance water quality, it has been suggested to add a third treatment stage and utilize chlorine dioxide for disinfection.

Introduction

With the rapid growth of urban populations and increasing water demand, the production of municipal wastewater has risen significantly, thereby intensifying the need for the construction and expansion of wastewater treatment plants (Tortajada, 2020). Selecting the optimal treatment process before construction is a critical and complex task that requires comprehensive consideration of not only costs but also technical, environmental, and managerial criteria (Yahya et al., 2020; Carlos and Noroña, 2021). Given that some cities in the country still lack wastewater collection systems, making optimal decisions for these areas is especially important to prevent excessive costs and environmental problems.

Additionally, tools such as WiSDOM, which integrate multi-objective optimization with decision analysis, assist stakeholders in making better decisions in the design and configuration of wastewater systems (Sadr et al., 2018).

In this study, a wastewater treatment plant consisting of four main stages—Bar Screen, Stabilization pond: anaerobic ponds, Stabilization pond: aerobic ponds, and Disinfection with

Sodium Hypochlorite—has been reassessed, and the addition of five to eighth stages is proposed to identify the best combination of processes. This case study conducted in Iran is designed to address not only economic aspects but also environmental and human resource considerations, aiming to provide a suitable model for other cities and to influence future policymaking in water resource management.

Materials and Methods

Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach: NSGA-III

The NSGA-III algorithm is a many-objective evolutionary optimization method designed to handle optimization problems with more than four objectives. Unlike NSGA-II, which performs well on problems with two to four objectives, NSGA-III utilizes the concept of reference points to maintain population diversity and convergence to the Pareto-optimal front. It can effectively solve more complex and many-objective problems. This algorithm guides the solution population towards the reference points to ensure both diversity and quality of the solutions (Deb and Jain, 2013).

Proposed Optimization Model

This many-objective optimization model aims to reduce initial investment cost, operation and maintenance costs, energy consumption, sludge production, required manpower, and land area. To optimize urban wastewater treatment processes, 43 different processes were examined across five main stages (preliminary treatment, primary stage, secondary stage, tertiary stage, and disinfection). Each stage includes several process options, and for each option, key parameters such as energy consumption, costs, manpower, sludge production, and land area were calculated. Various combinations of processes, ranging from 5 to 8 stages, were then analyzed using an enumeration method. In the 6-, 7-, and 8-stage combinations, repetition of one or more stages was allowed to provide greater design flexibility. This approach enables the selection of the most optimal process combinations considering economic, technical, and environmental aspects.

At this stage, the compatibility and overlap of different processes were evaluated using a compatibility matrix to eliminate unsuitable combinations, leaving only viable options for urban wastewater treatment systems. For example, out of 18,900 five-stage combinations, about 2,000 compatible combinations were identified. Additionally, stages with nine or more steps were examined, but no compatible combinations were found; for instance, a six-stage combination with two repetitions of the disinfection stage also had no compatible combinations.

To find the optimal combination of processes and optimize the treatment system, the many-objective NSGA-III algorithm was employed. This algorithm enables obtaining a set of optimal solutions in the form of a Pareto front, representing a balance among different objectives. The results can serve as a basis for selecting and designing efficient and sustainable urban wastewater treatment systems.

Results and Discussions

The obtained results consist of a set of optimal solutions for each configuration, presenting values for multiple objectives including labor demand (person-months), capital investment cost (billion Iranian Rials), energy consumption (MWh/year), operation and maintenance expenses (billion Iranian Rials/year), land requirement (hectares), and sludge production (tons/year). Additionally, these solutions detail the arrangement of processes across different treatment stages, where increasing the number of stages could potentially enhance treatment quality.

In this study, the TOPSIS method was employed to select the best solution from the Pareto front. During the decision-making process, equal weights were assigned to all six objectives to ensure an unbiased evaluation without prioritizing any specific criterion. This approach enabled a comprehensive and neutral comparison of solutions, resulting in the selection of an option that provides the best balance among all objectives. The tuned parameters and quantitative evaluation criteria for both algorithms are presented in Tables (1) and (2).

Table 1- Parameters and performance evaluation metrics of NSGA-II algorithm

Parameters	5 Stages	6 Stages (Preliminary)	6 Stages (Primary)	6 Stages (Secondary)	6 Stages (Tertiary)
Number of Generation (Stopping Criterion)	100	100	100	100	100
Population Size	10	10	10	10	10
Mutation Rate	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Crossover Rate	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Time (Seconds)	194	194	225	245	253
IGD	0.72	0.79	0.77	0.97	0.95
HV	10.93	9.52	10.65	7.53	11.29

Table 2- Parameters and performance evaluation metrics of NSGA-III algorithm

Parameters	5 Stages	6 Stages (Preliminary)	6 Stages (Primary)	6 Stages (Secondary)	6 Stages (Tertiary)
Number of Generation (Stopping Criterion)	100	100	100	100	100
Population Size	10	10	10	10	10
Mutation Rate	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Crossover Rate	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Time (Seconds)	305	268	302	362	367
IGD	0.76	0.88	0.79	1	0.97
HV	20.66	5.76	11.89	6.92	8.91

The NSGA-II algorithm demonstrates shorter execution times compared to NSGA-III across all scenarios, indicating higher efficiency in reducing processing time. Specifically, NSGA-II's execution time ranges from 194 to 253 seconds, whereas NSGA-III requires between 268 and 367 seconds. The main parameters for both algorithms, including the number of generations, population size, mutation rate, and crossover rate, are identical; therefore, this difference in execution time is primarily attributable to the algorithms' structural distinctions.

Moreover, the IGD (Inverted Generational Distance) metric, which reflects the convergence to the true Pareto front, is consistently lower or approximately equal for NSGA-II across all cases, indicating better convergence and closer proximity to the Pareto front. Regarding the HV (Hypervolume) metric, which represents the diversity and extent of the solution space, NSGA-III outperforms NSGA-II in certain instances; for example, in the 5-stage scenario, the HV value for NSGA-III is roughly twice that of NSGA-II. However, in other multi-stage cases, NSGA-II delivers superior results.

Collectively, the data suggest that NSGA-II is more suitable for problems with computational time constraints and offers more precise convergence for solution finding, while NSGA-III, by providing greater diversity in solutions, is preferable for applications where the quality and breadth of solution variety are of higher importance.

Result

In this study, the optimization of urban wastewater treatment processes in Qazvin was carried out using the multi-objective optimization algorithms NSGA-II and NSGA-III, and the best solutions were evaluated using the multi-criteria decision-making method TOPSIS. The results demonstrated that by considering a set of economic, technical, environmental, and managerial criteria—such as investment cost, energy consumption, sludge production, labor requirements, maintenance costs, and land area—it is possible to identify optimal process combinations that not only enhance treatment quality but also optimize resource use and reduce costs. Due to its shorter execution time and better convergence, NSGA-II is more suitable for applications where time constraints are critical, whereas NSGA-III, offering greater solution diversity, is a preferable choice for studies focused on exploring a wide range of potential solutions.

Acknowledgments

We would like to express our gratitude and appreciation to the experts at the Qazvin Water and Wastewater Treatment Plant for their cooperation in conducting this research.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

First Author: Maryam Parhizkari, Conceptualization, Methodology, Software, Writing – Original Draft Preparation

Second Author: Hamed Mazandarani Zadeh, Supervision, Validation.

Third Author: Seyed Mohammad Kazem Sadr, Formal analysis, Data Curation.

Reference

1- Carlos, N. B., and Noroña, M. I., 2021. Selection of a Sustainable Municipal Wastewater Treatment Technology: A Multi-Criteria Decision Analysis Approach Using AHP and TOPSIS with Fuzzy Sets. https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672808.

2- Deb, K., and Jain, H., 2013. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints. *IEEE transactions on evolutionary computation,* 18(4):577-601. https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535.

3- Sadr, S. M. K., Johns, M. B., Memon, F. A., Morley, M., and Savić, D., 2018. Development and Application of a User-Friendly Decision Support Tool for Optimization of Wastewater Treatment Technologies in India. *International Hydroinformatics Conference.* https://easychair.org/publications/paper/f8m4.

4- Tortajada, C., 2020. Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. *NPJ Clean Water,* 3(1)22. https://doi.org/10.1038/s41545-020-0069-3.

5- Yahya, M. N., Gökçekuş, H., Ozsahin, D. U., and Uzun, B., 2020. Evaluation of wastewater treatment technologies using TOPSIS. *Desalination Water Treatment,* 177:416-422. https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25172.