

قیمت‌گذاری بهینه پساب شهری با رویکرد تحلیل هزینه چرخه عمر

مطالعه موردی: سامانه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر مشهد

فرزانه احمدیان یزدی*^۱، آرش سالاری^۲

۱- استادیار اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، نویسنده

مسئول، ایمیل: f.ahmadian@um.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد اقتصاد، گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران،

ایمیل: a.salari@mail.um.ac.ir

چکیده

تشدید بحران آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده را از یک گزینه فنی به ضرورتی راهبردی در حکمرانی پایدار منابع آب تبدیل کرده است. شهر مشهد، به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی تنش آبی در ایران، با افت مستمر منابع آب زیرزمینی، رشد فزاینده تقاضای شهری و صنعتی، و محدودیت دسترسی به منابع متعارف آب مواجه است. در چنین شرایطی، نبود یک چارچوب علمی و اقتصادی برای قیمت‌گذاری پساب، موجب تضعیف سیگنال‌های قیمتی، افزایش ناعلمانی سرمایه‌گذاری، و نادیده گرفتن ارزش زیست‌محیطی و اقتصادی بازچرخانی آب می‌شود. این پژوهش با هدف تعیین قیمت بهینه عرضه هر مترمکعب پساب در سامانه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر مشهد، از رویکرد تحلیل هزینه چرخه عمر (Life Cycle Cost Analysis) استفاده می‌کند. بدین منظور، ۹ سناریو بر پایه ترکیب سه نرخ تنزیل ۵، ۸ و ۱۰ درصد و سه دوره بهره‌برداری ۱۵، ۲۰ و ۲۵ ساله طراحی و ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد هزینه تمام‌شده هر مترمکعب پساب در کل سامانه تصفیه‌خانه‌های مشهد بین ۲۹۹,۴۸۳ تا ۴۶۶,۰۲۳ ریال متغیر است. این مقدار برای تصفیه‌خانه‌های جدید با کاربری غالب صنعتی بین ۳۱۲,۸۴۹ تا ۴۸۵,۵۶۵ ریال و برای تصفیه‌خانه‌های قدیمی با کاربری غالب کشاورزی بین ۲۵۷,۰۷۷ تا ۴۰۳,۹۹۶ ریال برآورد شد. یافته‌ها نشان می‌دهد اتخاذ نظام قیمت‌گذاری یکنواخت برای پساب، فاقد کارایی اقتصادی و مدیریتی لازم است و گذار تدریجی به یک نظام قیمت‌گذاری اقتصادی، تفکیکی و مبتنی بر هزینه واقعی خدمت، می‌تواند ضمن بهبود پایداری مالی زیرساخت‌های فاضلاب، زمینه تخصیص بهینه منابع و ارتقای بهره‌وری بازچرخانی آب را فراهم سازد.

کلیدواژه‌ها: قیمت‌گذاری پساب، تحلیل هزینه چرخه عمر، تصفیه‌خانه‌های مشهد، برنامه هفتم توسعه، حکمرانی آب.

۱. مقدمه

بحران آب در دهه‌های اخیر به یکی از بنیادی‌ترین چالش‌های توسعه پایدار تبدیل شده است. افزایش تقاضای جهانی آب، تغییر اقلیم، رشد جمعیت، توسعه شهری و صنعتی و الگوهای ناپایدار مصرف، ظرفیت منابع آب تجدیدپذیر را در بسیاری از مناطق جهان محدود کرده است. این بحران در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران و به‌ویژه حوضه‌های شرقی کشور، شدت بیشتری دارد؛ زیرا کاهش بارش، افت سطح آبخوان‌ها و رقابت فزاینده میان بخش‌های شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست، مدیریت آب را از یک موضوع صرفاً فنی به یک مسئله اقتصادی، اجتماعی و نهادی تبدیل کرده است (UNESCO, 2024; World Bank, 2016).

در چنین زمینه‌ای، پساب تصفیه‌شده دیگر نباید به عنوان محصول جانبی فاضلاب یا منبعی کم‌ارزش تلقی شود. پساب، در رویکردهای نوین اقتصاد چرخشی، یک منبع راهبردی است که می‌تواند بخشی از نیازهای غیرشرب، صنعتی، فضای سبز، کشاورزی غیرخوراکی و حتی تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها را تأمین کند. استفاده مجدد از پساب علاوه بر کاهش فشار بر منابع سطحی و زیرزمینی، امکان بازیابی بخشی از هزینه‌های زیرساختی، کاهش آلودگی منابع آبی و افزایش تاب‌آوری شهرها در برابر خشکسالی را فراهم می‌کند (UNEP, 2023).

اهمیت موضوع در شهر مشهد دوچندان است. این شهر، با جمعیتی تقریباً ۳ میلیون و ۷۰۰ هزار نفر و جایگاه زیارتی، خدماتی و صنعتی، با محدودیت شدید منابع آب متعارف روبه‌رو است. داده‌های آمارنامه آب مشهد نشان می‌دهد سرانه آب در دسترس این شهر حدود ۲۰۳ مترمکعب به ازای هر نفر در سال است؛ رقمی که در مقایسه با میانگین استانی (۵۰۲ مترمکعب)، ملی (۱۲۰۰ مترمکعب) و جهانی (۶۵۰۰ مترمکعب) فاصله قابل توجهی دارد. همچنین کسری مخزن درازمدت آب‌های زیرزمینی این شهر ۸۴۳ میلیون مترمکعب و برداشت از چاه‌های مجاز و غیرمجاز حدود ۷۵۹۶۷ میلیون مترمکعب در سال گزارش شده است (Khorasan Razavi Regional Water Company, 2025). این ارقام نشان می‌دهد ادامه اتکا به منابع متعارف آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی پایدار نیست.

موضوع اصلی که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود آن است که اگر پساب تصفیه‌شده می‌بایست به منبعی پایدار برای تأمین بخشی از تقاضای آب در صنعت، کشاورزی و فضای سبز تبدیل شود، قیمت آن باید چگونه تعیین شود؟ قیمت بسیار پایین، هرچند در کوتاه‌مدت پذیرش مصرف‌کننده را افزایش می‌دهد، اما موجب ناپایداری مالی تصفیه‌خانه‌ها، کاهش انگیزه سرمایه‌گذاری و تعویق تعمیر و نوسازی زیرساخت‌ها می‌شود. از سوی دیگر، قیمت بسیار بالا ممکن است تقاضا را کاهش دهد و مصرف‌کنندگان را به ویژه در بخش کشاورزی به برداشت از منابع متعارف و ارزان‌تر، اما ناپایدار، سوق دهد. بنابراین مسئله اصلی، یافتن نقطه‌ای است که در آن قیمت پساب هم بازتاب‌دهنده هزینه واقعی خدمت باشد و هم امکان شکل‌گیری بازی بازار پایدار پساب را فراهم کند.

اهمیت اقتصادی این بحث با الزامات قانون برنامه پنج‌ساله هفتم پیشرفت جمهوری اسلامی ایران پیوند مستقیم دارد. ماده ۳۷ این قانون بر مدیریت یکپارچه منابع آب، توسعه استفاده از منابع نامتعارف، از جمله پساب، و واقعی‌سازی قیمت خدمات آب و فاضلاب تأکید دارد. مطابق اهداف کمی برنامه، بخشی از تأمین آب کشور باید از منابع نامتعارف مانند پساب و آب دریا صورت گیرد و کاهش کسری مخازن آب زیرزمینی در دستور

کار قرار گیرد (Seventh Development Plan Law, 2024). تحقق چنین هدفی بدون قیمت‌گذاری علمی و قابل دفاع برای پساب امکان‌پذیر نیست.

هدف اصلی این پژوهش، تدوین چارچوبی اقتصادی برای تعیین قیمت بهینه عرضه پساب در شهر مشهد با استفاده از روش تحلیل هزینه چرخه عمر است. این هدف کلی در چند هدف اختصاصی دنبال می‌شود: شناسایی و طبقه‌بندی هزینه‌های سرمایه‌ای، بهره‌برداری و نگهداری، نوسازی و بازسازی؛ محاسبه هزینه تمام‌شده هر مترمکعب پساب در سناریوهای مختلف نرخ تنزیل و دوره بهره‌برداری؛ مقایسه ساختار هزینه در تصفیه‌خانه‌های قدیمی و جدید؛ و ارائه توصیه سیاستی برای گذار از قیمت‌گذاری یکنواخت و اداری به نظام تعرفه‌گذاری تفکیکی، تدریجی و مبتنی بر هزینه واقعی خدمت.

شکاف پژوهش در این است که بیشتر مطالعات داخلی یا بر جنبه‌های کیفی، مدیریتی و فنی استفاده از پساب تمرکز داشته‌اند یا قیمت‌گذاری را از منظر تقاضا و تمایل به پرداخت بررسی کرده‌اند. در مقابل، مطالعات کمتری در ایران وجود دارد که با اتکا به داده‌های واقعی تصفیه‌خانه‌ها، مرز سامانه عرضه پساب را تعریف کرده و هزینه چرخه عمر آن را در قالب سناریوهای اقتصادی محاسبه کرده باشد. مطالعه Tahami-Pour Zarandi & Vahdati (2024) گام مهمی در تحلیل روش‌های قیمت‌گذاری پساب در ایران برداشته است، اما مسئله قیمت عرضه در مقیاس شهری و با تفکیک فناوری و کاربری تصفیه‌خانه‌ها همچنان نیازمند توسعه تحلیلی است.

نوآوری مقاله در سه سطح قابل توضیح است. نخست، مقاله روش تحلیل هزینه چرخه عمر را برای شرایط خاص مشهد و با توجه به داده‌های عملیاتی و مالی تصفیه‌خانه‌های موجود و در حال توسعه بومی‌سازی می‌کند. دوم، قیمت پساب نه به صورت یک عدد ثابت، بلکه در قالب ۹ سناریو و با توجه به نرخ‌های تنزیل و افق‌های بهره‌برداری متفاوت محاسبه می‌شود و به این ترتیب علاوه بر تعیین قیمت پساب، تحلیل حساسیت برای نتایج به دست آمده به تفکیک تصفیه‌ها با توجه به کاربری آنها صورت می‌گیرد. سوم، مقاله میان دو گروه تصفیه‌خانه‌های قدیمی با کاربری غالب کشاورزی و تصفیه‌خانه‌های جدید با کاربری صنعتی و زیست‌محیطی تمایز قائل می‌شود و نشان می‌دهد که تعرفه یکنواخت برای همه واحدها و همه مصرف‌کنندگان از نظر اقتصادی کارا نیست.

روش کار برای تحقق این نوآوری مبتنی بر تعریف مرز سامانه عرضه، گردآوری داده‌های واقعی هزینه، تبدیل جریان‌های هزینه به ارزش فعلی، محاسبه هزینه سالانه معادل و تقسیم آن بر حجم قابل عرضه پساب است. در این چارچوب، نرخ تنزیل نماینده هزینه فرصت سرمایه و ریسک اقتصادی و دوره بهره‌برداری نماینده افق زمانی توزیع هزینه‌های سرمایه‌ای است. استفاده از این روش به جای محاسبه ساده هزینه متوسط، امکان تحلیل پویاتر و واقع‌بینانه‌تر پایداری مالی سامانه‌های بازچرخانی را فراهم می‌کند (Ilyas et al., 2021).

مزیت روش تحلیل هزینه چرخه عمر در آن است که تمام هزینه‌های مرتبط با طراحی، احداث، بهره‌برداری، نگهداری، نوسازی و پایان عمر دارایی را در یک چارچوب واحد جمع می‌کند. این روش، برخلاف تعرفه‌گذاری ساده و ایستا، می‌تواند اثر تورم، تغییر نرخ تنزیل، طول عمر طرح

و ظرفیت بهره‌برداری را در قیمت نهایی نشان دهد. به همین دلیل، خروجی آن برای سیاستگذار، سرمایه‌گذار و نهاد تنظیم‌گر قابل دفاع‌تر است و می‌تواند مبنای قراردادهای بلندمدت فروش پساب قرار گیرد.

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، قیمت بهینه پساب در شهر مشهد را نمی‌توان با یک تعرفه ثابت و دستوری تعیین کرد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که قیمت واقعی عرضه پساب به نرخ تنزیل، افق بهره‌برداری، سطح فناوری و نوع کاربری بستگی دارد و لازم است برای مصرف‌کنندگان صنعتی و کشاورزی ساختار قیمت‌گذاری متفاوت با توجه به توان پرداختی متفاوت آنها طراحی شود. این نتیجه از نظر سیاستی به معنای ضرورت اصلاح تدریجی قیمت پساب، جایگزینی یارانه پنهان با حمایت هدفمند و تقویت شفافیت مالی در نهادهای مرتبط است.

در ادامه، بخش دوم مقاله ادبیات تحقیق مرتبط با قیمت‌گذاری پساب را مرور می‌کند. بخش سوم داده‌ها، متغیرها، مرز سامانه و روش محاسبات را توضیح می‌دهد. بخش چهارم یافته‌های سناریویی و مقایسه‌ای پژوهش را ارائه می‌کند و بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستی را جمع‌بندی می‌نماید.

۲. ادبیات تحقیق

۲-۱. پساب به مثابه منبع اقتصادی و زیست‌محیطی

در ادبیات سنتی مدیریت آب، فاضلاب شهری و صنعتی غالباً به عنوان پسماندی تلقی می‌شد که باید جمع‌آوری، تصفیه و دفع شود. اما در رویکردهای جدید اقتصاد چرخشی، تصفیه‌خانه فاضلاب به «مرکز بازیابی منابع» تبدیل می‌شود؛ مرکزی که علاوه بر تولید آب قابل استفاده مجدد، می‌تواند انرژی، مواد مغذی و ارزش زیست‌محیطی ایجاد کند. این تغییر نگاه از دفع پسماند به بازیابی منبع، مبنای نظری قیمت‌گذاری نوین پساب است (UNEP, 2023).

پساب بر حسب منبع تولید به شهری، صنعتی و کشاورزی تقسیم می‌شود. پساب شهری عمدتاً شامل مواد آلی، پاتوژن‌ها و ترکیبات قابل تجزیه است؛ پساب صنعتی بسته به نوع صنعت ممکن است حاوی فلزات سنگین، مواد شیمیایی و آلاینده‌های ویژه باشد؛ و پساب کشاورزی معمولاً با نیترات، فسفات، سموم و املاح همراه است. کیفیت اولیه پساب، سطح فناوری موردنیاز برای تصفیه و هزینه نهایی تولید آب بازیافتی را تعیین می‌کند. بنابراین، قیمت‌گذاری پساب بدون توجه به نوع و کیفیت آن، از نظر فنی و اقتصادی ناقص خواهد بود (Asano et al., 2007; Metcalf & Eddy et al., 2014).

از منظر توسعه پایدار، استفاده مجدد از پساب سه نوع منفعت ایجاد می‌کند. نخست، منفعت اقتصادی ناشی از جایگزینی آب متعارف و کاهش هزینه تأمین آب برای بخش‌های غیرشرب؛ دوم، منفعت زیست‌محیطی ناشی از کاهش تخلیه آلاینده‌ها و کاهش فشار بر آبخوان‌ها؛ و سوم، منفعت اجتماعی ناشی از تقویت تاب‌آوری شهری، حفظ اشتغال بخش‌های وابسته به آب و کاهش تعارض میان مصرف‌کنندگان. این منافع بخشی از ارزش واقعی پساب را تشکیل می‌دهند و باید در سیاست‌گذاری منعکس شوند (Fagundes & Marques, 2023).

۲-۲. اصول اقتصادی قیمت‌گذاری پساب

قیمت گذاری خدمات آب و فاضلاب بر سه اصل بازیابی هزینه، کارایی تخصیص و عدالت اجتماعی استوار است. اصل بازیابی هزینه تأکید دارد که تعرفه باید حداقل هزینه های سرمایه ای، جاری، نگهداری و نوسازی را پوشش دهد تا تداوم خدمت رسانی امکان پذیر باشد. اصل کارایی تخصیص بیان می کند که قیمت باید سیگنال کمیابی و هزینه فرصت را به مصرف کننده منتقل کند. اصل عدالت اجتماعی نیز اقتضا می کند که بار مالی اصلاح قیمت به شکل نامتناسب بر گروه های کم درآمد یا مصرف کنندگان آسیب پذیر تحمیل نشود (Khashaei & Davoodabadi, 2017; Berbel & Expósito, 2020).

در چارچوب اقتصاد آب، سه مفهوم هزینه نهایی، هزینه فرصت و ارزش محیطی نقش محوری دارند. هزینه نهایی بیانگر هزینه تولید یک واحد اضافی پساب تصفیه شده است. هزینه فرصت نشان می دهد منابع به کاررفته در تولید یا مصرف پساب در بهترین جایگزین چه ارزشی می توانستند داشته باشند. ارزش محیطی نیز بیانگر منافع است که در بازار به طور مستقیم قیمت گذاری نمی شوند؛ مانند کاهش آلودگی، حفظ آبخوان ها، کاهش فرونشست زمین و حفاظت از اکوسیستم ها (Warford, 2003; Frör, 2007).

اگر قیمت پساب تنها بر اساس هزینه عملیاتی کوتاه مدت تعیین شود، بخش مهمی از هزینه های سرمایه ای، نوسازی و کمیابی منابع نادیده می ماند. در این حالت، تقاضا بیش از حد تحریک می شود و مصرف کننده سیگنال درستی از ارزش اقتصادی آب دریافت نمی کند. در مقابل، اگر همه هزینه ها بدون ملاحظه توان پرداخت و آثار اجتماعی به مصرف کننده منتقل شود، احتمال شکست سیاستی افزایش می یابد. بنابراین قیمت بهینه، بیش از آنکه یک عدد صرف باشد، نتیجه موازنه میان هزینه واقعی، ارزش اقتصادی و قابلیت اجرا است.

یکی از بحث های مهم نظری، تمایز میان قیمت اقتصادی و قیمت اجرایی است. قیمت اقتصادی، هزینه واقعی و کامل تأمین خدمت را نشان می دهد و به عنوان معیار مرجع برای تصمیم گیری کاربرد دارد. قیمت اجرایی، قیمتی است که سیاستگذار با توجه به محدودیت های اجتماعی، نهادی و سیاسی تعیین می کند. مقاله حاضر نیز قیمت محاسبه شده بر اساس هزینه چرخه عمر را «کف اقتصادی عرضه» و «مرجع سیاستی» تلقی می کند، نه لزوماً قیمتی که باید بلافاصله و بدون گذار تدریجی اجرا شود.

تجربه کشورهای پیشرو نشان می دهد که توسعه بازار پساب بدون ترکیب همزمان سه عنصر امکان پذیر نیست: استانداردهای کیفی روشن، قراردادهای بلندمدت و قیمت گذاری مبتنی بر هزینه واقعی. اتحادیه اروپا با مقرر ۲۰۲۰/۷۴۱ حداقل الزامات کیفیت، پایش و ملایمیت ریسک را برای استفاده مجدد از آب تعیین کرده است. این چارچوب نشان می دهد که قیمت گذاری پساب نمی تواند از موضوع کیفیت و اعتماد مصرف کننده جدا باشد (European Union, 2020; Global Commission on the Economics of Water, 2024).

در اسپانیا، بازاستفاده از پساب به ویژه در بخش کشاورزی مدیریتانه ای اهمیت بالایی دارد. مطالعات مربوط به این کشور نشان می دهد هزینه آب بازیافتی بسته به فناوری و موقعیت مکانی متغیر است و زمانی استفاده از پساب اقتصادی می شود که ارزش محیطی کاهش برداشت از منابع زیرزمینی نیز لحاظ گردد (Molinos-Senante et al., 2022; Expósito et al., 2024). ساختار تعرفه در بسیاری از پروژه ها دو بخشی است: بخشی برای پوشش هزینه های ثابت و بخشی برای مصرف حجمی.

تجربه سنگاپور در برنامه NEWater نشان می‌دهد که توسعه بازار پساب و آب بازیافتی تنها به فناوری تصفیه یا تعیین قیمت وابسته نیست، بلکه نیازمند تلفیق فناوری پیشرفته، پایش مستمر کیفیت، اعتمادسازی عمومی و مدیریت نهادی منسجم است. در این برنامه، پساب شهری پس از تصفیه متعارف، با استفاده از فرایندهای پیشرفته‌ای مانند میکروفیلتراسیون، اسمز معکوس و گندزدایی فرابنفش به آب بازیافتی با کیفیت بالا تبدیل می‌شود و بخش عمده آن برای مصارف صنعتی و غیرشرب، به‌ویژه صنایع نیازمند آب با خلوص بالا، مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، تجربه سنگاپور نشان می‌دهد که پایداری بازار پساب مستلزم پیوند هم‌زمان میان کیفیت قابل اتکا، پذیرش اجتماعی، حکمرانی یکپارچه و سیاست‌گذاری اقتصادی شفاف است (PUB Singapore, n.d.; Tortajada et al., 2013).

در ایالات متحده، سامانه تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی اورنج کانتی کالیفرنیا یکی از نمونه‌های برجسته بازچرخانی پیشرفته است. این تجربه نشان می‌دهد که پروژه‌های بزرگ بازچرخانی، به دلیل سرمایه‌بر بودن، نیازمند قراردادهای بلندمدت، حکمرانی چندسطحی، اعتماد عمومی و مدل قیمت‌گذاری مبتنی بر هزینه چرخه عمر هستند (USEPA, 2012).

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که قیمت‌گذاری پساب تحت تأثیر عواملی همچون کیفیت پساب، فناوری تصفیه، هزینه چرخه عمر، نوع مصرف‌کننده و الزامات زیست‌محیطی قرار دارد. با وجود توسعه ادبیات تحقیق در این حوزه، هنوز پژوهش‌های محدودی به بررسی هم‌زمان تحلیل هزینه چرخه عمر، سناریوهای نرخ تنزیل و تفاوت ساختار هزینه تصفیه‌خانه‌ها در مقیاس یک کلان‌شهر پرداخته‌اند. در ادامه، مهم‌ترین مطالعات داخلی و خارجی مرتبط با موضوع پژوهش بررسی می‌شود.

Tahami-Pour Zarandi & Vahdati (2024) در پژوهشی با عنوان «بررسی و تحلیل روش‌های قیمت‌گذاری پساب و پیشنهاد روش مناسب برای ایران» رویکردهای مختلف قیمت‌گذاری پساب را ارزیابی کردند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که نظام تعرفه‌گذاری موجود در ایران فاصله قابل توجهی با هزینه واقعی عرضه پساب دارد و ادامه قیمت‌گذاری اداری می‌تواند مانع توسعه سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های بازچرخانی آب شود. آنان پیشنهاد کردند قیمت‌گذاری پساب در ایران به سمت مدل‌های مبتنی بر بازیابی هزینه و تفکیک مصرف‌کنندگان حرکت کند.

Mirmohammadsadeghi et al. (2024) با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، عوامل مؤثر بر قیمت پساب تخصیص‌یافته به صنعت در استان اصفهان را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد هزینه انتقال، فاصله صنایع از تصفیه‌خانه، کیفیت پساب، هزینه انرژی و حجم تقاضا از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده قیمت پساب صنعتی هستند. این مطالعه همچنین نشان داد که قیمت‌گذاری یکنواخت برای صنایع مختلف نمی‌تواند بازتاب‌دهنده هزینه واقعی خدمت باشد.

Expósito et al. (2024) در مطالعه‌ای درباره قیمت واقعی آب بازیافتی در کشورهای مدیترانه‌ای اروپا نشان دادند که هزینه تمام‌شده پساب علاوه بر فناوری تصفیه، به کیفیت موردنیاز مصرف‌کننده، فاصله انتقال و ساختار نهادی بازار آب وابسته است. نتایج پژوهش آنان بیان می‌کند که سیاست‌های قیمت‌گذاری یکنواخت نمی‌توانند کارایی اقتصادی لازم را ایجاد کنند و تعرفه‌های تفکیکی بر اساس نوع مصرف و کیفیت پساب ضروری است.

Fagundes & Marques (2023) در مطالعه‌ای پیرامون ارزش اقتصادی بازچرخانی آب، تأکید کردند که استفاده مجدد از پساب تنها به تأمین آب محدود نمی‌شود، بلکه ابزاری برای حفاظت از آبخوان‌ها، کاهش آلودگی و ارتقای پایداری محیط‌زیستی است. آنان نشان دادند که بخش مهمی از منافع اقتصادی بازچرخانی آب در قالب منافع غیرمستقیم و محیط‌زیستی ظاهر می‌شود؛ منافعی که معمولاً در قیمت بازار آب منعکس نمی‌شود.

Molinos-Senante et al (2022) در پژوهشی درباره هزینه استفاده مجدد از پساب در آبیاری کشاورزی اسپانیا، با استفاده از رویکرد بازایی کامل هزینه نشان دادند که قیمت نهایی پساب به شدت تحت تأثیر مقیاس پروژه، فناوری تصفیه و دوره بهره‌برداری قرار دارد. یافته‌های این مطالعه بیانگر آن است که افزایش طول عمر پروژه و افزایش حجم مصرف، موجب کاهش هزینه متوسط هر مترمکعب پساب می‌شود. آنان نتیجه گرفتند که تحلیل هزینه چرخه عمر ابزار مناسبی برای طراحی نظام قیمت‌گذاری پایدار در پروژه‌های بازچرخانی آب است.

Khashaei & Davoodabadi (2017) در کتاب اصول اقتصاد آب و فاضلاب بر اهمیت بازایی کامل هزینه در خدمات آب و فاضلاب تأکید کرده‌اند. آنان نشان می‌دهند که پایین نگه داشتن مصنوعی تعرفه‌ها در بلندمدت موجب کاهش کیفیت خدمات، فرسودگی زیرساخت‌ها و افزایش وابستگی به یارانه‌های دولتی می‌شود. این دیدگاه، مبنای نظری مهمی برای تحلیل اقتصادی قیمت‌گذاری پساب و ضرورت اصلاح تدریجی تعرفه‌ها در ایران فراهم می‌کند.

Metcalf & Eddy et al (2014) در مرجع کلاسیک مهندسی فاضلاب، تصفیه و بازایی منابع، ساختار فنی و اقتصادی سامانه‌های تصفیه فاضلاب را بررسی کرده‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، انرژی، نگهداری و بازسازی تجهیزات از مهم‌ترین اجزای هزینه چرخه عمر تصفیه‌خانه‌ها هستند. همچنین بیان می‌شود که انتخاب فناوری تصفیه، کیفیت پساب خروجی و هزینه تمام‌شده هر مترمکعب آب بازیافتی را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد.

Dolnicar et al (2011) در مطالعه‌ای درباره عوامل مؤثر بر پذیرش عمومی آب بازیافتی و آب شیرین‌شده نشان دادند که پذیرش اجتماعی منابع آب جایگزین صرفاً به فناوری تصفیه یا قیمت وابسته نیست، بلکه عواملی مانند ریسک ادراک‌شده، اعتماد به نهادهای مسئول، شفافیت اطلاعات، کیفیت، نوع کاربرد نهایی و میزان تماس انسانی با آب بازیافتی نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. نتایج این پژوهش بیان می‌کند که پذیرش عمومی برای کاربردهای غیرشرب و کم‌تماس، مانند فضای سبز و صنعت، معمولاً بیشتر از کاربردهای شرب یا پرتماس است. بنابراین، توسعه بازار پایدار پساب نیازمند ترکیب هم‌زمان قیمت‌گذاری اقتصادی، تضمین کیفیت، اطلاع‌رسانی شفاف و اعتمادسازی نهادی است.

Asano et al (2007) در کتاب بازچرخانی آب، مسائل، فناوری‌ها و کاربردها، استفاده مجدد از پساب را یکی از مهم‌ترین راهکارهای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق کم‌آب معرفی کردند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد کیفیت پساب، سطح فناوری تصفیه و نوع مصرف نهایی، سه عامل اصلی تعیین‌کننده هزینه و قیمت آب بازیافتی هستند. این پژوهش همچنین تأکید می‌کند که قیمت‌گذاری پساب باید علاوه بر هزینه‌های مالی، الزامات بهداشتی و زیست‌محیطی را نیز در نظر بگیرد.

۳. داده‌ها و روش‌شناسی

۱-۳. داده‌ها (محدوده و مرز سامانه)

قلمرو مکانی پژوهش، شهر مشهد و سامانه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری آن است. مرز تحلیلی سامانه از خروجی تصفیه‌خانه‌ها تا عرضه پساب برای مصارف صنعتی، کشاورزی، فضای سبز و تخلیه ایمن به آب‌های سطحی تعریف شده است. این مرز شامل هزینه‌های مرتبط با احداث و ارتقای تصفیه‌خانه، شبکه جمع‌آوری، خطوط انتقال، پمپاژ، تجهیزات کنترل، گندزدایی، بهره‌برداری و نگهداری، نوسازی و بازسازی می‌شود. قلمرو زمانی داده‌ها سال پایه ۱۴۰۴ است و افق تحلیل در سه دوره ۱۵، ۲۰ و ۲۵ ساله تعریف شده است. انتخاب این افق‌ها با هدف بررسی حساسیت قیمت نسبت به طول عمر اقتصادی پروژه و قابلیت مقایسه با قراردادهای معمول بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری انجام شده است.

واحدهای مورد بررسی در سه گروه طبقه‌بندی شده‌اند: نخست، کل سامانه تصفیه‌خانه‌های موجود شهر مشهد به عنوان میانگین شهری؛ دوم، تصفیه‌خانه‌های قدیمی شامل پرکندآباد ۱، پرکندآباد ۲ و اولنگ که عمدتاً برای تأمین پساب کشاورزی استفاده می‌شوند؛ سوم، تصفیه‌خانه‌های جدید شامل ارتقای پرکندآباد ۲، التیمور و خین‌عرب که برای تولید پساب با کیفیت بالاتر، کاربری صنعتی و تخلیه ایمن به آب‌های سطحی طراحی شده‌اند.

داده‌های پژوهش از نهاد رسمی شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، استفاده از پروژه‌های مشابه در دسترس و مصاحبه با کارشناسان خبره گردآوری شده است. داده‌ها پس از پالایش و تعدیل به قیمت ثابت سال ۱۴۰۴ در مدل هزینه چرخه عمر وارد شده‌اند. تمرکز داده‌ای مقاله بر هزینه‌های واقعی و قابل اتکای سامانه عرضه پساب است و بنابراین تخمین‌های کلی یا تعرفه‌های اداری در این پژوهش مورد نظر محققین نمی‌باشد^۱.

متغیرهای اصلی پژوهش شامل هزینه سرمایه‌ای، هزینه بهره‌برداری و نگهداری، هزینه نوسازی و بازسازی، حجم سالانه پساب قابل عرضه، نرخ تنزیل و دوره بهره‌برداری است. هزینه سرمایه‌ای دربرگیرنده مخارج احداث یا ارتقای تصفیه‌خانه، سازه‌ها، تجهیزات مکانیکی و الکتریکی، مخازن و خطوط انتقال است. هزینه بهره‌برداری و نگهداری شامل انرژی، مواد شیمیایی، نیروی انسانی، تعمیرات دوره‌ای، پایش کیفیت و مدیریت لجن است.

لازم به ذکر است، با توجه به ماهیت داده‌های مالی در دسترس و به‌منظور یکسان‌سازی مبنای محاسبات، فرض شده است که هزینه‌های سرمایه‌ای در سال پایه (۱۴۰۴) تحقق یافته‌اند. بنابراین، هزینه سرمایه‌ای به‌عنوان یک جریان نقدی در زمان صفر در نظر گرفته شده و تنزیل

^۱ به دلیل محرمانه بودن اطلاعات هزینه‌ای زیرساخت‌های تصفیه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب، امکان انتشار داده‌های خام و جداول تفصیلی هزینه وجود ندارد. داده‌های مورد استفاده از اسناد و اطلاعات فنی و مالی در اختیار تیم تحقیق استخراج شده و پس از پردازش، در چارچوب مدل تحلیل هزینه چرخه عمر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تمامی مفروضات و مراحل محاسبات در این پژوهش به‌طور کامل تشریح شده‌اند تا قابلیت ارزیابی روش‌شناسی فراهم باشد.

جداگانه برای سال‌های مختلف اجرای پروژه اعمال نشده است. همچنین، مطابق رویه متداول در تحلیل هزینه چرخه عمر، فرض شده است که هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری و هزینه‌های نوسازی و بازسازی در پایان هر سال مالی تحقق می‌یابند و بر همین مبنا تنزیل شده‌اند.

حجم سالانه پساب قابل عرضه، مخرج اصلی محاسبه هزینه واحد است. افزایش حجم پایدار و قابل فروش پساب موجب کاهش هزینه ثابت سرانه و بهبود اقتصاد مقیاس می‌شود. نرخ تنزیل نیز نماینده هزینه فرصت سرمایه و ریسک اقتصادی پروژه است. در این پژوهش سه نرخ ۵، ۸ و ۱۰ درصد برای پوشش شرایط خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه تأمین مالی در نظر گرفته شده است.

همانطور که بیان شد در این پژوهش، تمامی هزینه‌های سرمایه‌ای، بهره‌برداری و نگهداری و نوسازی ابتدا به قیمت‌های ثابت سال ۱۴۰۴ تبدیل شده‌اند. از این رو، تحلیل هزینه چرخه عمر بر مبنای قیمت‌های ثابت انجام شده است. در چنین شرایطی، مطابق اصول ارزیابی اقتصادی پروژه‌های سرمایه‌ای، استفاده از نرخ تنزیل واقعی ضروری است و لحاظ هم‌زمان نرخ تورم در فرآیند تنزیل، منجر به دوباره‌شماری^۱ اثر تورم خواهد شد. بر این اساس، نرخ‌های تنزیل واقعی ۵، ۸ و ۱۰ درصد، مطابق دامنه پیشنهادی در دستورالعمل‌های ارزیابی اقتصادی پروژه‌های حوزه آب و فاضلاب، برای تحلیل حساسیت و بررسی سناریوهای مختلف هزینه فرصت سرمایه انتخاب شدند.

Table 1- Main Variables of the Life Cycle Cost Analysis Model

جدول ۱ - متغیرهای اصلی مدل تحلیل هزینه چرخه عمر

نماد	تعریف	واحد	توضیح/منبع
P	قیمت یا کف هزینه اقتصادی هر مترمکعب پساب	ریال/مترمکعب	متغیر خروجی مدل
CAPEX	هزینه سرمایه‌ای احداث، توسعه و تجهیزات	ریال	داده‌های پروژه و فهرست‌بها
OPEX	هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه	ریال/سال	داده‌های بهره‌برداری
REN	هزینه نوسازی و بازسازی تجهیزات	ریال/سال	برآورد چرخه عمر بر مبنای هزینه‌های پروژه‌های مشابه در کشور
Q	حجم سالانه پساب قابل عرضه	مترمکعب/سال	اطلاعات بهره‌برداری

¹ Double Counting

r	نرخ تنزیل و نماینده هزینه	درصد	سناریوهای ۵، ۸ و ۱۰ درصد
	فرصت سرمایه		
n	دوره بهره‌برداری	سال	سناریوهای ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سال
EUAC	هزینه سالانه معادل	ریال/سال	خروجی تبدیل ارزش فعلی

منبع: محاسبات پژوهش

۳-۲. روش شناسی

۳-۲-۱. مدل‌های قیمت‌گذاری پساب

مدل‌های قیمت‌گذاری پساب را می‌توان در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی کرد: مدل‌های مبتنی بر هزینه، مدل‌های مبتنی بر ارزش محیطی، مدل‌های مبتنی بر تقاضا و مدل‌های ترکیبی. مدل مبتنی بر هزینه بر این فرض استوار است که قیمت باید هزینه واقعی تولید و عرضه پساب را پوشش دهد. ساده‌ترین شکل این رویکرد، هزینه متوسط است؛ یعنی تقسیم مجموع هزینه‌ها بر حجم پساب تولیدی. با این حال، روش هزینه متوسط معمولاً ارزش زمانی پول، ریسک سرمایه‌گذاری و تغییرات آتی هزینه‌ها را به درستی منعکس نمی‌کند.

مدل مبتنی بر هزینه نهایی و هزینه فرصت حاشیه‌ای تلاش می‌کند قیمت را به هزینه تولید واحد اضافی و ارزش کاربردهای جایگزین آب مرتبط کند. در این مدل، قیمت واقعی می‌تواند به صورت مجموع هزینه تأمین، هزینه فرصت و هزینه‌های خارجی زیست‌محیطی تعریف شود. مزیت این مدل، نزدیکی آن به مفهوم کارایی اقتصادی است، اما اجرای آن به داده‌های دقیق و قابل اتکا درباره هزینه‌های محیطی و فرصت‌های جایگزین نیاز دارد.

مدل مبتنی بر تقاضا، بر تمایل به پرداخت مصرف‌کنندگان تمرکز دارد. در این رویکرد، قیمت تا جایی قابل افزایش است که مصرف‌کننده صنعتی، کشاورزی یا شهری همچنان استفاده از پساب را نسبت به گزینه‌های جایگزین اقتصادی بداند. این مدل برای تحلیل رفتار مصرف‌کننده مفید است، اما اگر تنها مبنای قرار گیرد ممکن است به قیمتی کمتر از هزینه واقعی خدمت برسد و پایداری مالی سامانه را تهدید کند.

مدل‌های ترکیبی، تلاش می‌کنند مزایای رویکردهای فوق را ادغام کنند. در این مدل‌ها، بخشی از تعرفه برای پوشش هزینه‌های ثابت و سرمایه‌ای و بخشی دیگر برای هزینه‌های متغیر، کیفیت پساب، فصل مصرف یا سطح کمیابی تعیین می‌شود. تعرفه دوبخشی و قیمت‌گذاری پلکانی یا فصلی از نمونه‌های این رویکرد هستند. بسیاری از کشورها برای جلوگیری از فشار ناگهانی بر مصرف‌کنندگان و هم‌زمان حفظ پایداری مالی، از همین مدل‌های ترکیبی استفاده می‌کنند (Expósito et al., 2024).

۲-۳. تحلیل هزینه چرخه عمر در پروژه‌های بازچرخانی آب

تحلیل هزینه چرخه عمر یکی از ابزارهای اصلی اقتصاد مهندسی برای ارزیابی مالی پروژه‌های زیرساختی است. در این روش، همه هزینه‌های مرتبط با دارایی از مرحله طراحی و احداث تا بهره‌برداری، نگهداری، نوسازی و پایان عمر در افق زمانی مشخص محاسبه و به ارزش فعلی تبدیل می‌شوند. سپس با استفاده از عامل بازیافت سرمایه، هزینه سالانه معادل محاسبه می‌شود. این روش برای پروژه‌های بازچرخانی آب اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا این پروژه‌ها معمولاً سرمایه‌بر هستند و بخش مهمی از هزینه‌ها در سال‌های نخست ایجاد می‌شود. (Ilyas et al., 2021)

مزیت اصلی تحلیل هزینه چرخه عمر در مقایسه با محاسبه هزینه متوسط ساده، توجه به ارزش زمانی پول و ریسک اقتصادی است. نرخ تنزیل در این روش، نماینده هزینه فرصت سرمایه، ریسک سرمایه‌گذاری و شرایط تأمین مالی است. افزایش نرخ تنزیل، به دلیل افزایش هزینه فرصت سرمایه، موجب رشد هزینه سالانه معادل و در نتیجه افزایش قیمت نهایی خدمت می‌شود؛ در مقابل، افزایش دوره بهره‌برداری باعث سرشکن شدن هزینه‌های سرمایه‌ای در بازه زمانی طولانی‌تر و کاهش هزینه متوسط هر واحد محصول خواهد شد (Ilyas et al., 2021; Molinos-Senante et al., 2022)

در مطالعات بین‌المللی، تحلیل هزینه چرخه عمر برای مقایسه فناوری‌های تصفیه، ارزیابی پایداری مالی پروژه‌ها و طراحی قراردادهای بلندمدت فروش پساب استفاده شده است. Expósito et al. (2024) نشان می‌دهند که پروژه‌های بازچرخانی آب تنها زمانی از نظر مالی پایدارند که تعرفه‌ها بتوانند هزینه‌های چرخه عمر و ریسک‌های عملیاتی را پوشش دهند.

در ایران، اهمیت این روش با محدودیت منابع مالی، نرخ تورم بالا، ریسک‌های نهادی و نیاز به مشارکت بخش خصوصی افزایش می‌یابد. اگر قیمت پساب صرفاً بر اساس هزینه جاری یا تعرفه اداری تعیین شود، سرمایه‌گذار امکان بازیابی هزینه‌های سرمایه‌ای و نوسازی را نخواهد داشت. در نتیجه توسعه زیرساخت‌های بازچرخانی به تعویق می‌افتد. بنابراین تحلیل هزینه چرخه عمر، نه فقط یک روش محاسباتی، بلکه ابزاری برای طراحی بازار پایدار پساب است.

روش منتخب پژوهش، تحلیل هزینه چرخه عمر از دیدگاه عرضه‌کننده است. در گام نخست، جریان هزینه‌ها در طول عمر پروژه شناسایی و به ارزش فعلی تبدیل می‌شود. رابطه کلی هزینه چرخه عمر بر مبنای مطالعه Kneifel (2024) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$LCC = CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t + REN_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

در این رابطه، C_t هزینه سال t ، r نرخ تنزیل و n دوره بهره‌برداری است. در گام دوم، هزینه چرخه عمر به هزینه سالانه معادل تبدیل می‌شود:

$$EUAC = LCC \times [r(1+r)^n / ((1+r)^n - 1)] \quad (2)$$

در گام سوم، قیمت یا کف هزینه عرضه هر مترمکعب پساب از تقسیم هزینه سالانه معادل بر حجم سالانه پساب قابل عرضه به دست می‌آید:

$$P = EUAC / Q \quad (3)$$

این قیمت، حداقل نرخ اقتصادی لازم برای پوشش هزینه‌های واقعی عرضه پساب است. بنابراین خروجی مدل، به معنای قیمت اجرایی فوری نیست؛ بلکه شاخص مرجع برای سنجش شکاف میان تعرفه موجود و هزینه واقعی خدمت محسوب می‌شود.

۳-۳. سناریوهای تحلیل حساسیت

برای سنجش حساسیت نتایج نسبت به شرایط اقتصادی و نهادی، ۹ سناریو تعریف شده است که ترکیبی از سه نرخ تنزیل و سه دوره بهره‌برداری است. این سناریوها از شرایط کم‌ریسک و بلندمدت تا شرایط پرریسک و کوتاه‌مدت را پوشش می‌دهند و امکان بررسی پایداری نتایج را فراهم می‌کنند.

Table 2 - Wastewater Pricing Scenarios Based on Discount Rate and Operational Lifetime

جدول ۲. سناریوهای قیمت‌گذاری پساب بر اساس نرخ تنزیل و دوره بهره‌برداری

Scenario	Discount Rate	Operational Lifetime
15 year	5%	S1
20 year	5%	S2
25 year	5%	S3
15 year	8%	S4
20 year	8%	S5
25 year	8%	S6
15 year	10%	S7
20 year	10%	S8
25 year	10%	S9

منبع: محاسبات پژوهش

منطق اقتصادی سناریوها روشن است: افزایش نرخ تنزیل، هزینه سالانه معادل و قیمت تمام‌شده را افزایش می‌دهد؛ در مقابل، افزایش دوره بهره‌برداری، هزینه‌های سرمایه‌ای را در افق طولانی‌تری توزیع کرده و قیمت واحد را کاهش می‌دهد. از این رو، ترکیب نرخ تنزیل پایین و دوره بهره‌برداری بلندمدت مطلوب‌ترین وضعیت اقتصادی و ترکیب نرخ تنزیل بالا و دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت پرهزینه‌ترین وضعیت محسوب می‌شود.

۴. یافته‌های پژوهش

۴-۱. نتایج کل سامانه تصفیه‌خانه‌های مشهد

نتایج مدل برای کل سامانه تصفیه‌خانه‌های مشهد نشان می‌دهد که قیمت تمام‌شده هر مترمکعب پساب در بازه‌ای نسبتاً گسترده قرار دارد. حداقل قیمت در سناریوی S^۳، یعنی نرخ تنزیل ۵ درصد و دوره بهره‌برداری ۲۵ سال، برابر ۲۹۹,۴۸۳ ریال و حداکثر قیمت در سناریوی S^۷، یعنی نرخ تنزیل ۱۰ درصد و دوره بهره‌برداری ۱۵ سال، برابر ۴۶۶,۰۲۳ ریال است. این دامنه نشان می‌دهد که قیمت پساب به شدت به شرایط تأمین مالی و افق بهره‌برداری وابسته است.

در نرخ تنزیل ثابت، افزایش دوره بهره‌برداری از ۱۵ به ۲۵ سال باعث کاهش محسوس هزینه تمام‌شده می‌شود. برای مثال، در نرخ تنزیل ۵ درصد، قیمت از ۳۹۴,۱۹۲ ریال در دوره ۱۵ ساله به ۲۹۹,۴۸۳ ریال در دوره ۲۵ ساله کاهش می‌یابد. در نرخ تنزیل ۱۰ درصد نیز قیمت از ۴۶۶,۰۲۳ ریال به ۳۹۶,۱۴۵ ریال کاهش پیدا می‌کند. بنابراین اثر کاهنده طول دوره بهره‌برداری پایدار است، اما در نرخ‌های تنزیل بالاتر شدت آن محدودتر می‌شود.

Table 3 - Results of the Life Cycle Cost Model for the Existing Wastewater Treatment System of Mashhad

جدول ۳ - نتایج مدل برای کل سامانه تصفیه‌خانه‌های مشهد

Cost of Reclaimed Wastewater (IRR/m ³)	Operational Lifetime	Discount Rate	Scenario
394,192	15 year	5%	S1
334,137	20 year	5%	S2
299,483	25 year	5%	S3
434,795	15 year	8%	S4
383,519	20 year	8%	S5
355,536	25 year	8%	S6
466,023	15 year	10%	S7
420,059	20 year	10%	S8
396,145	25 year	10%	S9

منبع: محاسبات پژوهش

۴-۲. نتایج تصفیه‌خانه‌های جدید با کاربری صنعتی و تخلیه ایمن

تصفیه‌خانه‌های جدید شامل ارتقای پرکندآباد ۲، التیمور و خین‌عرب به دلیل استفاده از فناوری پیشرفته‌تر، کنترل کیفی دقیق‌تر و الزامات سخت‌گیرانه‌تر برای کاربری صنعتی و تخلیه ایمن، هزینه تمام‌شده بالاتری نسبت به میانگین کل سامانه دارند. دامنه قیمت در این گروه از ۳۱۲,۸۴۹ تا ۴۸۵,۵۶۵ ریال به ازای هر مترمکعب متغیر است.

هزینه بالاتر این گروه را نباید صرفاً به عنوان ناکارایی تلقی کرد. بخشی از این هزینه بازتاب ارزش افزوده‌ای است که از طریق تولید پساب با کیفیت بالاتر، کاهش خطر آلودگی آب‌های سطحی، کاهش ریسک بهداشتی و ایجاد منبع پایدار برای صنایع حاصل می‌شود. از منظر سیاست‌گذاری، این یافته نشان می‌دهد صنایع بزرگ و آب‌بر باید سهم بیشتری از هزینه واقعی خدمت را بپردازند؛ زیرا هم توان پرداخت بالاتری دارند و هم بهره‌برداری از پساب برای آنها جایگزینی راهبردی در برابر کمبود آب متعارف است.

Table 4 - Results of the Life Cycle Cost Model for New Wastewater Treatment Plants in Mashhad

جدول ۴- نتایج مدل برای تصفیه‌خانه‌های جدید مشهد

Cost of Reclaimed Wastewater (IRR/m ³)	Operational Lifetime	Discount Rate	Scenario
411,424	15 year	5%	S1
348,918	20 year	5%	S2
312,849	25 year	5%	S3
453,337	15 year	8%	S4
400,012	20 year	8%	S5
370,911	25 year	8%	S6
485,565	15 year	10%	S7
437,792	20 year	10%	S8
412,935	25 year	10%	S9

منبع: محاسبات پژوهش

۴-۳. نتایج تصفیه‌خانه‌های قدیمی با کاربری کشاورزی

تصفیه‌خانه‌های قدیمی شامل پرکندآباد ۱، پرکندآباد ۲ و اولنگ، به دلیل ساختار عملیاتی تثبیت‌شده، فناوری ساده‌تر و الزامات کیفی متناسب با مصرف کشاورزی، کمترین هزینه تمام‌شده را در میان گروه‌های مورد بررسی دارند. دامنه قیمت در این گروه از ۲۵۷,۰۷۷ تا ۴۰۳,۹۹۶ ریال به ازای هر مترمکعب متغیر است.

از منظر اقتصادی، پایین‌تر بودن هزینه تمام‌شده این گروه فرصتی برای جایگزینی بخشی از برداشت آب زیرزمینی در مصارف کشاورزی ایجاد می‌کند. با توجه به محدودیت توان پرداخت کشاورزان، تعرفه این گروه باید به گونه‌ای طراحی شود که ضمن پوشش هزینه‌های بهره‌برداری و

نگهداری، انگیزه استفاده از پساب را حفظ کند. بنابراین سیاست تعرفه‌گذاری کشاورزی باید با حمایت هدفمند همراه باشد و از انتقال کامل و ناگهانی هزینه‌ها به بهره‌برداران خرد پرهیز کند.

Table 5 - Results of the Life Cycle Cost Model for Old Wastewater Treatment Plants in Mashhad

جدول ۵. نتایج مدل برای تصفیه‌خانه‌های قدیمی مشهد

Cost of Reclaimed Wastewater (IRR/m ³)	Operational Lifetime	Discount Rate	Scenario
339,528	15 year	5%	S1
287,246	20 year	5%	S2
257,077	25 year	5%	S3
375,957	15 year	8%	S4
331,179	20 year	8%	S5
306,742	25 year	8%	S6
403,996	15 year	10%	S7
363,775	20 year	10%	S8
342,848	25 year	10%	S9

منبع: محاسبات پژوهش

۴-۴. مقایسه گروه‌ها و تحلیل حساسیت

مقایسه نتایج سه گروه نشان می‌دهد رابطه کلی هزینه به صورت زیر است: تصفیه‌خانه‌های جدید < کل سامانه < تصفیه‌خانه‌های قدیمی. این الگو در همه سناریوها برقرار است و نشان می‌دهد سطح فناوری و نوع کاربری، نقش تعیین‌کننده‌ای در قیمت تمام‌شده پساب دارند. تصفیه‌خانه‌های جدید به دلیل کیفیت بالاتر پساب و الزامات زیست‌محیطی، هزینه بیشتری دارند؛ در حالی که تصفیه‌خانه‌های قدیمی برای کاربرد کشاورزی با استانداردهای ساده‌تر، قیمت پایین‌تری تولید می‌کنند.

نتیجه مهم سیاستی این مقایسه آن است که تعرفه واحد برای همه تصفیه‌خانه‌ها و همه مصرف‌کنندگان، از نظر اقتصادی فاقد کارایی است. اعمال تعرفه مشابه برای صنعت و کشاورزی می‌تواند یا فشار غیرقابل تحمل بر کشاورزی وارد کند یا در صورت پایین نگه داشتن قیمت، مانع بازیابی هزینه در پروژه‌های صنعتی و پیشرفته شود. بنابراین قیمت‌گذاری باید به تفکیک نوع تصفیه‌خانه، کیفیت پساب و نوع مصرف‌کننده طراحی شود.

تحلیل حساسیت نشان می‌دهد نرخ تنزیل اثر غالب بر قیمت تمام‌شده دارد. افزایش نرخ تنزیل از ۵ به ۱۰ درصد حتی در دوره‌های بهره‌برداری طولانی، قیمت را به شکل معناداری افزایش می‌دهد. این یافته بیانگر آن است که ثبات محیط سرمایه‌گذاری، کاهش ریسک نهادی، دسترسی

به تأمین مالی بلندمدت و طراحی قراردادهای قابل پیش‌بینی می‌تواند به کاهش قیمت عرضه پساب کمک کند. در واقع، بخشی از قیمت بالای پساب ناشی از ریسک اقتصادی و نه صرفاً هزینه فنی تصفیه است.

از طرف دیگر، طولانی‌تر شدن دوره بهره‌برداری همواره اثر کاهنده دارد، اما نمی‌تواند اثر نرخ تنزیل بالا را کاملاً خنثی کند. بنابراین سیاستگذار برای کاهش قیمت تمام‌شده باید همزمان دو مسیر را دنبال کند: نخست، افزایش افق قراردادها و اطمینان بخشی به سرمایه‌گذار؛ دوم، کاهش ریسک اقتصادی از طریق شاخص‌بندی قراردادها، تضمین خرید، شفافیت تعرفه و حمایت نهادی از پروژه‌های بازچرخانی.

Table 6. Summary of the Cost Range for Reclaimed Wastewater in the Studied Systems

جدول ۶. جمع‌بندی دامنه هزینه تمام‌شده بر حسب گروه تصفیه‌خانه

گروه	حداقل هزینه (ریال/مترمکعب)	حداکثر هزینه (ریال/مترمکعب)	برداشت سیاستی
مناسب برای کشاورزی و نیازمند تعرفه حمایتی هدفمند	۴۰۳,۹۹۶	۲۵۷,۰۷۷	تصفیه‌خانه‌های قدیمی
مبنای مرجع برای سیاست قیمت‌گذاری شهری	۴۶۶,۰۲۳	۲۹۹,۴۸۳	کل سامانه
مناسب برای صنعت و تخلیه ایمن؛ نیازمند بازیابی بیشتر هزینه	۴۸۵,۵۶۵	۳۱۲,۸۴۹	تصفیه‌خانه‌های جدید

منبع: محاسبات پژوهش

۴-۵. دلالت‌های یافته‌ها برای برنامه هفتم توسعه

یافته‌های مقاله نشان می‌دهد تحقق اهداف ماده ۳۷ برنامه هفتم در زمینه توسعه استفاده از پساب، مستلزم گذار از رویکرد اداری و دستوری به رویکرد اقتصادی و مبتنی بر هزینه واقعی است. اگر قیمت پساب به صورت مزمن پایین‌تر از هزینه واقعی باقی بماند، توسعه ظرفیت تصفیه و بازچرخانی به دلیل کمبود منابع مالی با محدودیت روبه‌رو خواهد شد. اگر قیمت به صورت ناگهانی و کامل واقعی شود، احتمال مقاومت اجتماعی و کاهش تقاضا افزایش می‌یابد. بنابراین راه‌حل سیاستی، اصلاح تدریجی و تفکیکی قیمت است.

بر اساس نتایج، قیمت بهینه محاسبه‌شده در این مقاله باید به عنوان شاخص راهنما برای طراحی مسیر اصلاح قیمت استفاده شود. این شاخص نشان می‌دهد فاصله میان قیمت فعلی و هزینه واقعی خدمت چقدر است و کدام گروه مصرف‌کننده یا کدام نوع تصفیه‌خانه نیازمند اصلاح سریع‌تر یا حمایت بیشتر است. چنین رویکردی می‌تواند هم شفافیت مالی شرکت‌های آب و فاضلاب و آب منطقه‌ای را افزایش دهد و هم سرمایه‌گذاری بخش خصوصی را امکان‌پذیرتر کند.

از منظر حکمرانی آب، قیمت‌گذاری پساب صرفاً ابزار درآمدی نیست؛ بلکه ابزاری برای مدیریت تقاضا، حفاظت از آبخوان‌ها و تغییر الگوی مصرف است. وقتی قیمت، کمیابی آب و هزینه واقعی عرضه را منعکس کند، مصرف‌کننده برای بهبود بهره‌وری، تغییر فناوری و استفاده هدفمند از پساب انگیزه بیشتری خواهد داشت. بنابراین سیاست قیمت‌گذاری درست، بخشی از سیاست حفاظت منابع آب است.

۴-۶. اعتبارسنجی نتایج و مقایسه با قیمت‌های جاری و مطالعات مشابه

به‌منظور ارزیابی قابلیت اتکای نتایج حاصل از تحلیل هزینه چرخه عمر، قیمت‌های برآوردشده در این پژوهش با قیمت‌های جاری فروش پساب در استان خراسان رضوی و همچنین شواهد گزارش‌شده در مطالعات بین‌المللی مقایسه شد. بررسی وضعیت موجود نشان می‌دهد که قیمت فروش پساب در استان خراسان رضوی در اغلب قراردادهای موجود به طور متوسط، کمتر از ۵۰ هزار ریال (۵ هزار تومان) به ازای هر مترمکعب است؛ درحالی‌که نتایج این پژوهش هزینه واقعی عرضه هر مترمکعب پساب را بین ۲۵۷,۰۷۷ تا ۴۸۵,۵۶۵ ریال برآورد می‌کند. این اختلاف قابل توجه نشان می‌دهد که قیمت‌های جاری فروش پساب در استان، هزینه واقعی ایجاد، بهره‌برداری، نگهداری و نوسازی زیرساخت‌های تصفیه را پوشش نمی‌دهد و بنابراین امکان بازیابی کامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری را فراهم نمی‌کند.

یکی از مهم‌ترین دلایل این شکاف، ساختار تقاضای پساب در استان خراسان رضوی است. در این استان، سهم صنایع بزرگ و آب‌بر در مصرف پساب نسبتاً محدود بوده و بخش عمده تقاضا مربوط به مصارف کشاورزی است. در نتیجه، قیمت فروش پساب بیش از آنکه بر مبنای هزینه واقعی تولید تعیین شود، تحت تأثیر محدودیت تقاضا و ملاحظات اجرایی قرار دارد. استمرار این وضعیت می‌تواند موجب کاهش جذابیت اقتصادی سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بازچرخانی آب، افزایش ریسک مالی سرمایه‌گذاران و تضعیف توسعه زیرساخت‌های استفاده مجدد از پساب شود. در مقابل، در برخی استان‌های کشور که دارای صنایع بزرگ و آب‌بر هستند، به دلیل تقاضای بالاتر، قراردادهای فروش پساب با قیمت‌هایی نزدیک‌تر به هزینه واقعی و در برخی موارد بالاتر از آن منعقد می‌شود که نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده شرایط بازار در ارزش اقتصادی پساب است.

همچنین، نتایج این پژوهش با رویکردهای بین‌المللی قیمت‌گذاری پساب نیز همخوانی دارد. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهند که در بسیاری از کشورها، قیمت‌گذاری پساب بر پایه اصل بازیابی هزینه‌ها^۱ یا بازیابی کامل هزینه‌ها^۲ انجام می‌شود؛ به گونه‌ای که هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، نگهداری و نوسازی در تعیین قیمت عرضه لحاظ می‌شود (Molinós-Senante et al., 2011; UNESCO, 2024). از این منظر، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با اصول پذیرفته‌شده ارزیابی اقتصادی پروژه‌های بازچرخانی آب سازگار بوده و می‌تواند مبنای مناسبی برای اصلاح تدریجی نظام قیمت‌گذاری پساب در کشور باشد. علاوه بر اصلاح نظام قیمت‌گذاری، ارتقای بهره‌وری شرکت‌های آب و فاضلاب از طریق نوآوری در مدل کسب‌وکار و بهبود فرآیندهای مدیریتی نیز می‌تواند به کاهش هزینه‌های چرخه عمر و افزایش پایداری مالی سامانه‌های بازچرخانی آب کمک کند. یافته‌های پژوهش Nimjerdi et al. (2026) نیز بر نقش نوآوری سازمانی در بهبود بهره‌وری شرکت‌های آب و فاضلاب تأکید دارد. لازم به ذکر است که قیمت‌های برآوردشده در این پژوهش صرفاً بر مبنای هزینه‌های مالی داخلی سامانه عرضه پساب و با استفاده از روش

¹ Cost Recovery

² Full Cost Recovery

تحلیل هزینه چرخه عمر محاسبه شده‌اند. بنابراین، این قیمت‌ها بیانگر هزینه اقتصادی عرضه پساب هستند و نه قیمت کامل اجتماعی آن. در صورت لحاظ منافع و هزینه‌های خارجی زیست‌محیطی، از جمله کاهش آلودگی منابع آب، جلوگیری از افت سطح آب‌های زیرزمینی و بهبود کارایی زیست‌محیطی، ارزش اجتماعی استفاده مجدد از پساب می‌تواند بیش از مقادیر برآوردشده در این مطالعه باشد. در این زمینه، مطالعات اخیر بر اهمیت تلفیق شاخص‌های کارایی زیست‌محیطی با ارزیابی‌های اقتصادی برای دستیابی به برآورد جامع‌تر ارزش منابع تأکید کرده‌اند (Nimjerdi, 2026a).

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستی

این مقاله با استفاده از داده‌های سال ۱۴۰۴ و بهره‌گیری از روش تحلیل هزینه چرخه عمر به برآورد قیمت بهینه عرضه پساب در شهر مشهد پرداخت. یافته‌ها همچنین بیانگر آن است که تصفیه‌خانه‌های جدید شامل ارتقای پرکندآباد ۲، التیمور و خین‌عرب، به دلیل استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌تر برای مصارف صنعتی و تخلیه به آب‌های سطحی، دارای هزینه تمام‌شده بالاتری بوده و قیمت پساب در آن‌ها بین ۳۱۲,۸۴۹ تا ۴۸۵,۵۶۵ ریال به ازای هر مترمکعب برآورد شد. در مقابل، تصفیه‌خانه‌های قدیمی شامل پرکندآباد ۱، پرکندآباد ۲ و اولنگ که عمدتاً در بخش کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، هزینه‌ای بین ۲۵۷,۰۷۷ تا ۴۰۳,۹۹۶ ریال به ازای هر مترمکعب دارند.

جمع‌بندی اصلی پژوهش آن است که تداوم قیمت‌گذاری یکنواخت، با الزامات پایداری مالی، حفاظت از منابع آب و اهداف برنامه هفتم توسعه سازگار نیست. با این حال، واقعی‌سازی قیمت نیز نباید به صورت ناگهانی و بدون توجه به آثار اجتماعی انجام شود. قیمت بهینه محاسبه‌شده باید به عنوان مرجع اقتصادی و شاخص سیاستی برای طراحی مسیر اصلاح تدریجی به کار رود. این مسیر باید میان بازیابی هزینه، توان پرداخت مصرف‌کنندگان، جذابیت سرمایه‌گذاری و حفاظت از آبخوان‌ها توازن برقرار کند. بنابراین، قیمت‌گذاری پساب در مشهد باید از یک تصمیم تعرفه‌ای ساده به ابزار حکمرانی آب ارتقا یابد.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهادهای سیاستی زیر را می‌توان ارائه کرد:

- طراحی نظام تعرفه‌گذاری تفکیکی: تعرفه پساب باید بر اساس نوع تصفیه‌خانه، کیفیت پساب و نوع مصرف‌کننده تعیین شود. صنعت، کشاورزی و فضای سبز نباید با یک نرخ واحد مواجه شوند.
- اصلاح تدریجی قیمت: حرکت به سمت هزینه واقعی خدمت باید در قالب برنامه‌ای چندساله، شفاف و قابل پیش‌بینی اجرا شود تا شوک قیمتی و مقاومت اجتماعی کاهش یابد.
- جایگزینی یارانه پنهان با حمایت هدفمند: حمایت از کشاورزی و بهره‌برداران خرد باید به صورت یارانه مستقیم یا قراردادهای حمایتی شفاف انجام شود، نه از طریق پایین نگه داشتن عمومی قیمت پساب.

- شاخص‌بندی قراردادهای فروش پساب: قراردادهای بلندمدت باید نسبت به تورم، هزینه انرژی، تغییرات نرخ تنزیل و هزینه تعمیرات شاخص‌بندی شوند تا ریسک سرمایه‌گذاری کاهش یابد.
 - تقویت بازار صنعتی پساب: صنایع بزرگ آب‌بر باید به عنوان مشتریان اصلی پساب با کیفیت بالاتر شناسایی شوند و قراردادهای خرید بلندمدت با آنها منعقد شود.
 - ارتقای بهره‌وری و نوآوری در سامانه‌های تصفیه‌خانه: اصلاح نظام قیمت‌گذاری باید هم‌زمان با برنامه‌های ارتقای بهره‌وری عملیاتی و توسعه نوآوری‌های مدیریتی و فناوریانه در شرکت‌های آب و فاضلاب اجرا شود. استفاده از سامانه‌های هوشمند پایش، مدیریت دارایی‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی، تعمیرات و نگهداری پیشگویانه و توسعه همکاری با مراکز پژوهشی و بخش خصوصی می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌ای و بهره‌برداری را در بلندمدت کاهش داده و پایداری مالی سامانه‌های بازچرخانی آب را تقویت کند (Nimjerdi, 2026b).
 - تقویت حکمرانی نوآورانه در مدیریت پساب: سیاست‌های قیمت‌گذاری پساب باید در چارچوبی فراتر از اصلاح تعرفه‌ها و با رویکرد حکمرانی یکپارچه طراحی شوند. توسعه نوآوری باز، افزایش تعامل میان شرکت‌های آب و فاضلاب، آب منطقه‌ای، دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و بخش خصوصی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین می‌تواند ضمن ارتقای بهره‌وری منابع، زمینه کاهش هزینه‌های چرخه عمر و توسعه پایدار بازار پساب را فراهم سازد (Nimjerdi, 2026b).
 - ایجاد پایگاه داده ملی هزینه پساب: ثبت منظم داده‌های هزینه سرمایه‌ای، بهره‌برداری، کیفیت، حجم فروش و نوع مصرف‌کننده برای همه تصفیه‌خانه‌ها می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری دقیق‌تر و قابل مقایسه را فراهم کند.
 - افزایش شفافیت و اعتماد عمومی: انتشار گزارش‌های کیفیت پساب، هزینه واقعی و منافع زیست‌محیطی بازچرخانی، شرط لازم برای افزایش پذیرش اجتماعی استفاده از پساب است.
 - همسویی با برنامه هفتم توسعه: نتایج مدل باید به عنوان ابزار اجرایی ماده ۳۷ برنامه هفتم در توسعه منابع نامتعارف و کاهش فشار بر آبخوان‌های مشهد به کار گرفته شود.
- تحقق اثربخش پیشنهاد‌های سیاستی فوق، مستلزم استقرار سازوکارهای مناسب برای پایش و ارزیابی مستمر عملکرد است. صرف تدوین سیاست‌های قیمت‌گذاری، بدون وجود شاخص‌های قابل سنجش، امکان ارزیابی میزان موفقیت اجرای آنها را فراهم نمی‌کند. از این رو، پیشنهاد می‌شود اجرای سیاست‌های ارائه‌شده با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی عملکرد¹ به‌صورت دوره‌ای پایش شود تا ضمن سنجش میزان تحقق اهداف، امکان اصلاح و بهبود تدریجی سیاست‌ها نیز فراهم گردد. همچنین، بهره‌گیری از چارچوب‌های مدیریت عملکرد یکپارچه می‌تواند اثربخشی اجرای سیاست‌های قیمت‌گذاری و مدیریت سامانه‌های بازچرخانی آب را افزایش دهد (Nimjerdi, 2025).

¹ Key Performance Indicators (KPI)

Table 7. Proposed KPIs for Monitoring Wastewater Pricing Policies

جدول ۷. شاخص‌های پیشنهادی برای پایش اجرای سیاست‌های قیمت‌گذاری پساب

پیشنهاد سیاستی	شاخص کلیدی عملکرد (KPI)	دوره پایش
طراحی نظام تعرفه‌گذاری تفکیکی	درصد قراردادهای مبتنی بر تعرفه تفکیکی	سالانه
اصلاح تدریجی قیمت	نسبت قیمت فروش پساب به هزینه تمام‌شده	سالانه
شاخص‌بندی قراردادها	درصد قراردادهای دارای بند تعدیل قیمت	سالانه
تقویت بازار صنعتی پساب	سهم فروش پساب به صنایع از کل فروش	سالانه
ارتقای بهره‌وری و نوآوری	کاهش هزینه بهره‌برداری به ازای هر مترمکعب پساب	سالانه
ایجاد پایگاه داده ملی	درصد تصفیه‌خانه‌های دارای ثبت کامل اطلاعات	سالانه
افزایش شفافیت	تعداد گزارش‌های عمومی منتشرشده	سالانه

اجرای موفق نظام قیمت‌گذاری اقتصادی پساب، مستلزم استقرار سازوکارهای پایش و ارزیابی مستمر است. استفاده از شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) امکان ارزیابی میزان تحقق اهداف، شناسایی انحراف‌ها و اصلاح تدریجی سیاست‌ها را فراهم می‌کند. از این رو، پیشنهاد می‌شود اجرای سیاست‌های ارائه‌شده در این پژوهش با استقرار یک نظام پایش عملکرد مبتنی بر شاخص‌های کمی همراه باشد. همچنین، بهره‌گیری از چارچوب‌های مدیریت عملکرد یکپارچه می‌تواند به افزایش اثربخشی و شفافیت فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت سامانه‌های بازچرخانی آب کمک کند (Sajadifar et al., 2025).

- Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H. L., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water reuse: Issues, technologies, and applications*. McGraw-Hill.
- Berbel, J., & Expósito, A. (2020). The theory and practice of water pricing and cost recovery in the Water Framework Directive. *Water Alternatives*, 13(3), 660–674.
- Dehghaghi, M., Karimi, G., Mobarqa'i Dinan, N., & Abbaspour, M. (2020). Estimating the environmental economic value of wastewater reuse in agriculture using the contingent valuation method (CVM). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(4), 81–95. [In Persian]
- Dolnicar, S., Hurlimann, A., & Grün, B. (2011). What affects public acceptance of recycled and desalinated water? *Water Research*, 45(2), 933–943. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.030>
- European Union. (2020). Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse. *Official Journal of the European Union*.
- Expósito, A., Berbel, J., & Molinos-Senante, M. (2024). How much does reclaimed wastewater cost? A comprehensive analysis for irrigation uses in the European Mediterranean context. *Water Reuse*, 14(3), 434–447. <https://doi.org/10.2166/wrd.2024.040>
- Fagundes, L., & Marques, R. C. (2023). The potential of wastewater reuse and the role of economic valuation in the pursuit of sustainability. *Sustainability*, 15(1), 843. <https://doi.org/10.3390/su15010843>
- Frör, O. (2007). Rationality concepts in environmental valuation. *Ecological Economics*, 60(4), 724–736.
- Global Commission on the Economics of Water. (2024). *The economics of water: Valuing the hydrological cycle as a global common good*. Global Commission on the Economics of Water.
- Ilyas, S., Srivastava, R. R., & Kim, H. (2021). Life cycle cost analysis of wastewater treatment: A systematic review of literature. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127549. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127549>
- Khashaei, M., & Davoodabadi, N. (2017). *Principles of water and wastewater economics: Fundamentals of tariff setting*. Tehran: National Water and Wastewater Engineering Company Press. [In Persian]
- Khorasan Razavi Regional Water Company. (2025). *Water resources statistical yearbook of Mashhad Plain, water year 2024–2025*. Mashhad: Planning and Management Improvement Office. [In Persian]
- Kneifel, J. D. (2024). Energy price indices and discount factors for life-cycle cost analysis–2024: Annual supplement to NIST Handbook 135.
- Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mirmohammadsadeghi, M., Ebrahimi, B., Nazifi Naeini, M., & Nakhaei, S. (2024). Investigating the factors affecting the price of wastewater allocated to industry in Isfahan Province using artificial neural networks. *Water and Wastewater Journal*, 34(2). [In Persian]

- Molinos-Senante, M., Maziotis, A., & Sala-Garrido, R. (2022). Assessing the cost of water reuse for agricultural irrigation in Spain: A full cost recovery perspective. *Agricultural Water Management*, 262, 107389. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107389>
- Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F., & Sala-Garrido, R. (2011). Cost-benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes: A case study for Spanish wastewater treatment plants. *Journal of environmental management*, 92(12), 3091-3097.
- Nimjerdi, A. H., Sajadifar, S., Toopkanloo, M. I., Jafari, S., Shamloei, A., & Sami, A. (2026). The Impact of Business Model Innovation on Productivity in Iranian Water and Wastewater Companies. *World Water Policy*, 12(1), e70056.
- Nimjerdi, A. H. (2026a). Assessing eco-efficiency in the European Union: integrating dynamic two-stage network SBM and spatial Durbin model to unravel regional heterogeneity. *Sustainable Futures*, 11, 101942.
- Nimjerdi, A. H. (2026b). The impact of open innovation on municipal waste recycling rate and resource productivity in the European Union countries: The moderating role of environmental regulations. *Sustainable Environment*, 12(1), 2655489.
- PUB Singapore. (n.d.). *NEWater*. Singapore's National Water Agency.
- Sajadifar, S., Farajollahi, A., Mogouie, H., & Nimjerdi, A. H. (2025). A Combination of Balanced Scorecard, System Dynamics and Game Theory to Design Performance Measurement System. *Journal of Optimization and Supply Chain Management*, 2(1), 16-32.
- Seventh Development Plan Law of the Islamic Republic of Iran. (2024). Approved by the Islamic Consultative Assembly. Tehran: Official Gazette of the Islamic Republic of Iran. [In Persian]
- Tahami-Pour Zarandi, M., & Vahdati, F. (2024). Analysis and evaluation of wastewater pricing methods and proposing an appropriate method for Iran. *Iranian Water Resources Research*, 20(4), 1–16. [In Persian]
- Tortajada, C., Joshi, Y. K., & Biswas, A. K. (2013). *The Singapore water story: Sustainable development in an urban city-state*. Routledge.
- UNEP. (2023). *Wastewater: Turning problem to solution: A UNEP rapid response assessment*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- UNESCO. (2024). *The United Nations world water development report 2024: Water for prosperity and peace*. Paris: UNESCO.
- United States Environmental Protection Agency. (2012). *Guidelines for water reuse* (EPA/600/R-12/618). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Warford, J. J. (2003). The marginal opportunity cost of water. In *Pricing water: Economics, environment and society*. European Commission.
- World Bank. (2016). *High and dry: Climate change, water, and the economy*. Washington, DC: World Bank.

Optimal Pricing of Urban Reclaimed Wastewater Using the Life Cycle Cost Analysis Approach: A Case Study of the Wastewater Treatment System of Mashhad City

Abstract

The intensifying water crisis in arid and semi-arid regions has transformed reclaimed wastewater reuse from a technical option into a strategic necessity for sustainable water resource governance. Mashhad, as one of Iran's major water-stressed metropolitan areas, is facing continuous groundwater depletion, rapidly increasing urban and industrial water demand, and severe limitations in access to conventional water resources. Under such conditions, the absence of a scientific and economically grounded wastewater pricing framework weakens price signals, increases investment uncertainty, and undermines the environmental and economic value of water reuse. This study aims to determine the optimal supply price of reclaimed wastewater per cubic meter in the wastewater treatment system of Mashhad using the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) approach. To this end, nine scenarios were designed and evaluated based on the combination of three discount rates (5%, 8%, and 10%) and three operational periods (15, 20, and 25 years). The findings indicate that the total cost of reclaimed wastewater across the entire treatment system ranges from 299,483 to 466,023 IRR per cubic meter. For newly established treatment plants with predominantly industrial applications, the estimated cost ranges from 312,849 to 485,565 IRR per cubic meter, while for older treatment plants mainly serving agricultural purposes, the estimated cost varies between 257,077 and 403,996 IRR per cubic meter. The results reveal that a uniform pricing policy for reclaimed wastewater lacks the required economic and managerial efficiency. Therefore, a gradual transition toward an economically efficient, differentiated, and cost-based pricing system is essential to enhance the financial sustainability of wastewater infrastructure, improve resource allocation efficiency, and strengthen the long-term sustainability of water reuse practices.

Keywords: Wastewater Pricing. Life Cycle Cost Analysis. Reclaimed Wastewater. Wastewater Treatment Plants of Mashhad. Seventh Development Plan. Water Governance.