



Research Paper

## **Technical, Environmental, and Managerial Assessment of the Urban Wastewater System in Ilam with Emphasis on Infrastructure and Operational Challenges**

Yaghoub Moradi\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geography and Urban Planning, University of Payame Noor, Tehran, Iran.

### **Keywords**

Urban wastewater Ilam  
urban infrastructure  
wastewater treatment  
environmental pollution  
effluent management  
cold climate



### **A B S T R A C T**

This study aims to evaluate the technical, environmental, and managerial aspects of the urban wastewater system in Ilam, with an emphasis on infrastructural and operational challenges. Due to population growth, rapid urban development, deterioration of parts of the collection network, limited wastewater treatment capacity, and Ilam's cold climatic conditions, urban wastewater management in the city faces significant challenges. The findings indicate that low temperatures reduce the efficiency of biological treatment processes, particularly BOD removal, while the aging sewer network increases the risk of wastewater leakage and contamination of surface and groundwater resources. Moreover, the combined sewer system and the inflow of stormwater during heavy rainfall place additional pressure on transmission lines and treatment facilities. The study proposes solutions such as rehabilitation of deteriorated sewer networks, application of cold-resistant treatment technologies, separation of wastewater from stormwater, implementation of smart monitoring systems, and reuse of treated effluent for agriculture and urban green spaces. Overall, improving wastewater infrastructure and adopting integrated management approaches can significantly reduce pollution, protect water resources, and support sustainable urban development in Ilam.

\*Corresponding Author.

Email Adresses: [moradi.y@pnu.ac.ir](mailto:moradi.y@pnu.ac.ir)

Moradi, Y. (2026). Technical, Environmental, and Managerial Assessment of the Urban Wastewater System in Ilam with Emphasis on Infrastructure and Operational Challenges. *Human Ecology*, 4(13), 1958-1973.



Doi: <https://doi.org/10.22034/he.2026.243147>



شاپای الکترونیکی: ۹۲۵۵-۳۰۴۱

فصلنامه اکولوژی انسانی

[http:// www.landscapeecologyjournals.ir](http://www.landscapeecologyjournals.ir)



مقاله پژوهشی

## ارزیابی فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام با تأکید بر چالش‌های زیرساختی و بهره‌برداری

یعقوب مرادی\*

۱ گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

### واژگان کلیدی

فاضلاب شهری ایلام  
زیرساخت شهری تصفیه  
فاضلاب آلودگی  
زیست‌محیطی مدیریت  
پساب اقلیم سرد.



### چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام و شناسایی چالش‌های زیرساختی و بهره‌برداری آن انجام شده است. با توجه به رشد جمعیت، توسعه سریع شهری، فرسودگی بخشی از شبکه جمع‌آوری، ظرفیت محدود تصفیه‌خانه و شرایط اقلیمی سرد ایلام، مدیریت فاضلاب شهری در این شهر با مسائل جدی روبه‌رو است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که کاهش دما موجب افت راندمان فرایندهای بیولوژیکی تصفیه، به‌ویژه حذف BOD، شده و فرسودگی شبکه نیز خطر نشست فاضلاب و آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی را افزایش می‌دهد. همچنین ترکیبی بودن سیستم فاضلاب و ورود رواناب‌های سطحی در زمان بارندگی، فشار مضاعفی بر خطوط انتقال و تصفیه‌خانه وارد می‌کند. در این پژوهش، راهکارهایی مانند نوسازی شبکه‌های فرسوده، استفاده از فناوری‌های مقاوم در برابر سرما، جداسازی فاضلاب از آب‌های سطحی، بایش هوشمند شبکه و استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده برای مصارف کشاورزی و فضای سبز پیشنهاد شده است. در مجموع، ارتقای زیرساخت‌ها و مدیریت یکپارچه فاضلاب می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آلودگی، حفاظت از منابع آب و تحقق توسعه پایدار شهری در ایلام داشته باشد.

ارجاع به این مقاله: مرادی، یعقوب. (۱۴۰۴). ارزیابی فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام با تأکید بر چالش‌های زیرساختی و بهره‌برداری. اکولوژی انسانی، ۱۳(۴)، ۱۹۵۸-۱۹۷۳.

## ۱. مقدمه

مدیریت فاضلاب شهری در دهه‌های اخیر از یک خدمت زیرساختی صرف به یکی از محورهای اصلی تاب‌آوری شهری، امنیت آبی، سلامت عمومی و توسعه پایدار تبدیل شده است. رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی، افزایش مصرف آب، ورود آلاینده‌های نوظهور و تشدید اثرات تغییر اقلیم باعث شده است که سیستم‌های جمع‌آوری، انتقال و تصفیه فاضلاب تحت فشار فنی و مدیریتی فزاینده‌ای قرار گیرند. مطالعات جدید نشان می‌دهند که دسترسی به آب سالم، کنترل آلودگی و استفاده مجدد از پساب، در شرایط تنش آبی و افزایش تقاضای شهری، به یکی از اولویت‌های اصلی مدیریت منابع آب تبدیل شده است؛ به‌گونه‌ای که بازچرخانی فاضلاب می‌تواند فشار بر منابع آب طبیعی را کاهش دهد و بخشی از نیازهای غیرشرب شهری، صنعتی و کشاورزی را تأمین کند (Silva-Rodríguez, 2023; Christou et al., 2024; Negi & Chandel, 2024).

همچنین مرورهای جدید بر فناوری‌های تصفیه فاضلاب نشان می‌دهند که سیستم‌های متعارف، به‌تنهایی برای پاسخ‌گویی به چالش‌هایی مانند آلاینده‌های نوظهور، هزینه انرژی، تولید لجن و الزامات سخت‌گیرانه زیست‌محیطی کافی نیستند و نیاز به ترکیب فناوری‌های پیشرفته، پایش بلادرنگ و رویکردهای اقتصاد چرخشی وجود دارد (Shamshad & Rehman, 2025; Tarpani & Azapagic, 2023). شواهد اخیر نیز نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه‌ها دیگر نباید تنها به‌عنوان واحدهای حذف آلاینده در نظر گرفته شوند، بلکه می‌توانند به مراکز بازیافت آب، انرژی، مواد مغذی و منابع ارزشمند تبدیل شوند.

در سیستم مورد مطالعه، یعنی فاضلاب شهری ایلام، این چالش‌ها به دلیل ویژگی‌های اقلیمی، ساختار شهری و وضعیت زیرساختی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. بر اساس متن پروژه، سیستم فاضلاب ایلام با مسائلی مانند فرسودگی بخشی از شبکه جمع‌آوری، ظرفیت محدود تصفیه‌خانه، ترکیبی بودن بخشی از سیستم فاضلاب و تأثیر شرایط آب‌وهوایی سرد بر راندمان تصفیه مواجه است؛ همچنین ورود رواناب‌های سطحی در زمان بارندگی می‌تواند سبب افزایش بار هیدرولیکی، کاهش کیفیت عملکرد تصفیه و افزایش خطر سرریز شود. در منابع جدید نیز تأکید شده است که ورود آب‌های اضافی ناشی از نفوذ و جریان ورودی به شبکه فاضلاب، بار انتقال و تصفیه را افزایش داده و می‌تواند احتمال سرریز، نشست زمین، خرابی شبکه و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری را بالا ببرد (Zhang et al., 2025). علاوه بر این، مطالعات مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای از شبکه‌های فاضلاب نشان می‌دهند که ویژگی‌های هیدرولیکی، دمایی، کیفیت فاضلاب و وضعیت زیرساخت می‌توانند بر تولید و انتشار گازهایی مانند متان و اکسید نیتروژن اثرگذار باشند (Chen et al., 2024). در شهر ایلام، سردسیر بودن منطقه، رشد جمعیت و توسعه شهری، احتمال بروز ناپایداری عملکردی را افزایش می‌دهد و ضرورت توجه هم‌زمان به ابعاد فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی را برجسته می‌سازد.

از این‌رو، ارزیابی جامع سیستم‌های فاضلاب شهری باید فراتر از بررسی ظرفیت تصفیه‌خانه یا طول شبکه باشد و شاخص‌هایی مانند وضعیت فیزیکی خطوط، نفوذ و نشست، بار آلی و هیدرولیکی، کیفیت پساب، انرژی مصرفی، پایداری اقتصادی، ریسک زیست‌محیطی و امکان بازچرخانی پساب را دربر گیرد. در سال‌های اخیر، روش‌هایی مانند مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، پایش هوشمند، سنسورهای کم‌هزینه، اینترنت اشیا، یادگیری ماشین، تحلیل چرخه عمر و تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی و بهینه‌سازی سیستم‌های فاضلاب توسعه یافته‌اند. برای مثال، مدل هیدروگراف واحد فاضلاب می‌تواند جریان پایه، نفوذ آب زیرزمینی و ورودی ناشی از بارندگی را تفکیک کند و در تحلیل سرریز و مدیریت جریان مؤثر باشد (Perez et al., 2024). همچنین سامانه‌های پایش بلادرنگ مبتنی بر IoT می‌توانند انسداد، بالا آمدن سطح فاضلاب و خطر سرریز را پیش از وقوع بحران شناسایی کنند (Faris et al., 2024). از سوی دیگر، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره امکان مقایسه گزینه‌های نوسازی، ارتقای تصفیه و مدیریت پساب را بر اساس معیارهای فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی فراهم می‌کنند (Vasilaki & Katsou, 2024).

با وجود پیشرفت‌های گسترده در مطالعات اخیر، هنوز شکاف‌های قابل توجهی در ارزیابی سیستم‌های فاضلاب شهری، به‌ویژه در شهرهای سردسیر و در حال توسعه، وجود دارد. بسیاری از پژوهش‌ها یا بر تصفیه‌خانه متمرکز هستند یا صرفاً شبکه انتقال را بررسی می‌کنند و کمتر مطالعه‌ای به‌صورت یکپارچه، ارتباط میان فرسودگی شبکه، اقلیم سرد، ظرفیت تصفیه، ریسک آلودگی منابع آب، کیفیت پساب و امکان استفاده مجدد را بررسی کرده است. همچنین در بسیاری از مدل‌های ارزیابی، شرایط محلی مانند بافت چندگانه شهری، قدمت شبکه، مناطق دارای نشی، ورود رواناب‌های سطحی و محدودیت‌های مدیریتی به‌صورت ساده‌سازی شده در نظر گرفته می‌شوند. مطالعات جدید درباره نفوذ و جریان ورودی نشان می‌دهند که منشأ مکان‌یابی و کنترل آب‌های اضافی در شبکه فاضلاب پیچیده است و نیاز به داده‌های مکانی، زمانی و می‌دانی دارد (Zhang et al., 2025). از طرف دیگر، مطالعات مرتبط با LCA و ارزیابی پایداری نشان می‌دهند که انتخاب فناوری‌های پیشرفته تصفیه و بازیافت لجن، بدون تحلیل پیامدهای اقتصادی، انرژی و زیست‌محیطی، ممکن است به جابه‌جایی بار آلودگی یا افزایش

هزینه منجر شود (Tarpani & Azapagic, 2023; Negi & Chandel, 2024). بنابراین، خلأ اصلی در مطالعات موجود، نبود چارچوبی بومی و چندبعدی برای تحلیل هم‌زمان عملکرد زیرساختی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب در شرایط اقلیمی خاص است. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام با تأکید بر چالش‌های زیرساختی و بهره‌برداری است. این پژوهش تلاش می‌کند با تکیه بر داده‌های موجود، مطالعات می‌دانی و ادبیات جدید، وضعیت شبکه جمع‌آوری و انتقال، عملکرد تصفیه‌خانه، اثرات اقلیم سرد، پیامدهای زیست‌محیطی و قابلیت استفاده مجدد از پساب را به‌صورت یکپارچه بررسی کند. اهداف اختصاصی پژوهش عبارت‌اند از: (۱) تحلیل وضعیت زیرساختی شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب ایلام، (۲) بررسی اثر شرایط اقلیمی سرد بر کارایی فرآیندهای تصفیه، (۳) ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از نشت، سرریز و کیفیت پساب، (۴) بررسی ظرفیت استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی و فضای سبز، و (۵) ارائه راهکارهای فنی و مدیریتی شامل نوسازی شبکه، پایش هوشمند، جداسازی فاضلاب از رواناب، ارتقای تصفیه و مدیریت پایدار لجن. چنین رویکردی می‌تواند به کاهش آلودگی منابع آب، افزایش تاب‌آوری زیرساختی، ارتقای بهره‌وری تصفیه‌خانه و حرکت به سمت مدیریت پایدار فاضلاب شهری در ایلام کمک کند.

## ۲. ادبیات نظری پژوهش

### ۲.۱. سیستم فاضلاب شهری به‌عنوان زیرساخت حیاتی شهری

سیستم فاضلاب شهری یکی از اصلی‌ترین زیرساخت‌های حیاتی در مدیریت شهرهای معاصر است که وظیفه جمع‌آوری، انتقال، تصفیه و دفع یا استفاده مجدد از فاضلاب‌های خانگی، تجاری، صنعتی و بخشی از رواناب‌های شهری را بر عهده دارد. این سیستم از منظر بهداشت عمومی، حفاظت از منابع آب، کاهش آلودگی محیط زیست و پشتیبانی از توسعه پایدار شهری اهمیت بنیادین دارد. در ادبیات جدید، فاضلاب شهری دیگر صرفاً به‌عنوان یک جریان زائد تلقی نمی‌شود، بلکه به‌عنوان منبعی بالقوه برای بازیابی آب، انرژی، مواد مغذی و کاهش فشار بر منابع طبیعی شناخته می‌شود (Silva-Rodríguez, 2023; Liu et al., 2023; Negi & Chandel, 2024). از این رو، کارایی سیستم‌های فاضلاب شهری رابطه مستقیمی با تاب‌آوری شهری، امنیت آبی و کیفیت زیست‌محیطی شهرها دارد. در دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت، گسترش شهرنشینی، افزایش مصرف آب، فرسودگی زیرساخت‌ها و تغییرات اقلیمی سبب شده‌اند که سیستم‌های فاضلاب شهری در بسیاری از شهرها با فشار فزاینده‌ای مواجه شوند. مطالعات جدید نشان می‌دهند که افزایش بار هیدرولیکی و آلودگی ورودی، در کنار محدودیت ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها، می‌تواند موجب کاهش راندمان تصفیه، افزایش سرریز فاضلاب و تشدید آلودگی منابع آب شود (Perez et al., 2024; Zhang et al., 2025; Chen et al., 2024). بنابراین، ارزیابی فاضلاب شهری باید با رویکردی چندبعدی انجام شود؛ رویکردی که هم ابعاد فنی و زیرساختی و هم پیامدهای زیست‌محیطی و مدیریتی را در نظر بگیرد (Tarpani & Azapagic, 2023; Vasilaki & Katsou, 2024).

### ۲.۲. ابعاد فنی سیستم فاضلاب شهری

از منظر فنی، سیستم فاضلاب شهری شامل شبکه جمع‌آوری، خطوط انتقال، ایستگاه‌های پمپاژ، منهول‌ها، مخازن تنظیم جریان، تجهیزات کنترلی و تصفیه‌خانه فاضلاب است. عملکرد مناسب هر یک از این اجزا وابسته به طراحی اصولی، ظرفیت کافی، نگهداری مستمر و بهره‌برداری صحیح است. در صورتی که شبکه جمع‌آوری دچار فرسودگی، شکستگی، گرفتگی یا نشت شود، عملکرد کل سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرد و ممکن است بار اضافی به تصفیه‌خانه تحمیل شود (Yang et al., 2025; Goodarzi & Vazirian, 2024). همچنین، خرابی خطوط فاضلاب می‌تواند پیامدهایی مانند نشست زمین، آلودگی آب زیرزمینی، افزایش هزینه‌های تعمیرات و کاهش اعتماد عمومی به خدمات شهری را به همراه داشته باشد (Zhang et al., 2025).

یکی از مهم‌ترین چالش‌های فنی در شبکه‌های فاضلاب شهری، پدیده نفوذ و جریان ورودی اضافی یا Infiltration/Inflow است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که آب‌های زیرزمینی، رواناب بارندگی یا اتصالات غیرمجاز وارد شبکه فاضلاب شوند. ورود این آب‌های اضافی موجب افزایش دبی جریان، کاهش ظرفیت انتقال، افزایش بار هیدرولیکی تصفیه‌خانه و افزایش احتمال سرریز می‌شود (Perez et al., 2024; Zhang et al., 2025). در این زمینه، مدل‌های هیدرولیکی و هیدروگراف واحد فاضلاب به‌عنوان ابزارهایی مؤثر برای شناسایی، کمی‌سازی و مدیریت جریان‌های اضافی در شبکه مطرح شده‌اند (Perez et al., 2024; Zhang et al., 2025).

### ۲.۳. فرسودگی شبکه و چالش‌های زیرساختی

فرسودگی شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب یکی از مسائل رایج در بسیاری از شهرهای در حال توسعه و حتی شهرهای توسعه‌یافته است. لوله‌های قدیمی، طراحی نامتناسب با رشد جمعیت، استفاده از مصالح کم‌دوام، نبود برنامه نگهداری پیشگیرانه و افزایش بار ترافیکی و ساختمانی از جمله عواملی هستند که می‌توانند عمر مفید شبکه را کاهش دهند. مطالعات جدید نشان می‌دهند که شکست یا خرابی لوله‌های فاضلاب تابعی از سن شبکه، جنس لوله، شرایط خاک، بارگذاری سطحی، نوسانات دما، خوردگی و کیفیت بهره‌برداری است (Yang et al., 2025).

روش‌های نوین یادگیری ماشین و تحلیل داده در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی خرابی لوله‌ها، مکان‌یابی نقاط آسیب‌پذیر و اولویت‌بندی تعمیر و نوسازی شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Goodarzi & Vazirian, 2024; al. , 2025). روش‌های نوین یادگیری ماشین و تحلیل داده در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی خرابی لوله‌ها، مکان‌یابی نقاط آسیب‌پذیر و اولویت‌بندی تعمیر و نوسازی شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Goodarzi & Vazirian, 2024; Wang et al. , 2024; Fernández et al. , 2025). این رویکردها نسبت به روش‌های سنتی، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر و کاهش هزینه‌های نگهداری را فراهم می‌کنند. به‌ویژه در شهرهایی که بودجه نوسازی محدود است، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی خرابی می‌تواند به مدیریت دارایی‌های فاضلاب و تخصیص بهینه منابع کمک کند (Yang et al. , 2025; Shi et al. , 2025).

#### ۲.۴. سیستم‌های فاضلاب ترکیبی و سرریز فاضلاب

سیستم‌های فاضلاب شهری از نظر طراحی به دو دسته کلی مجزا و ترکیبی تقسیم می‌شوند. در سیستم‌های مجزا، فاضلاب بهداشتی و رواناب سطحی از طریق شبکه‌های جداگانه منتقل می‌شوند؛ اما در سیستم‌های ترکیبی، فاضلاب و رواناب بارندگی در یک شبکه مشترک جریان دارند. هرچند سیستم‌های ترکیبی ممکن است از نظر هزینه اولیه اجرا مقرون‌به‌صرفه‌تر باشند، اما در زمان بارندگی‌های شدید با افزایش ناگهانی دبی مواجه می‌شوند و در صورت ناکافی بودن ظرفیت شبکه یا تصفیه‌خانه، پدیده سرریز فاضلاب رخ می‌دهد (Perez et al. , 2024; Zhang et al. , 2025).

سرریز فاضلاب ترکیبی می‌تواند موجب ورود فاضلاب تصفیه‌نشده یا نیمه‌تصفیه‌شده به رودخانه‌ها، آب‌های سطحی و محیط‌های شهری شود. این مسأله از نظر بهداشتی و زیست‌محیطی بسیار مهم است؛ زیرا باعث افزایش بار آلی، پاتوژن‌ها، مواد مغذی و آلاینده‌های شیمیایی در محیط می‌شود (Chen et al. , 2024; Yalin et al. , 2023). در سال‌های اخیر، استفاده از پایش هوشمند، سنسورهای سطح آب، مدل‌های پیش‌بینی جریان و سامانه‌های هشدار سریع برای مدیریت سرریز فاضلاب ترکیبی مورد توجه قرار گرفته است (Faris et al. , 2024; Sitzenfrei et al. , 2024; Annus et al. , 2023).

#### ۲.۵. تصفیه فاضلاب شهری و شاخص‌های عملکرد

تصفیه فاضلاب شهری شامل مجموعه‌ای از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی است که با هدف کاهش بار آلودگی، حذف مواد آلی، کاهش مواد معلق، حذف عوامل بیماری‌زا، کاهش مواد مغذی و کنترل آلاینده‌های نوظهور انجام می‌شود. مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها شامل BOD، COD، TSS، نیتروژن، فسفر، کلیرفم مدفوعی، کدورت و کیفیت پساب خروجی هستند. مطالعات جدید نشان می‌دهند که فناوری‌های متعارف تصفیه، در بسیاری از موارد برای حذف آلاینده‌های نوظهور، میکروآلاینده‌ها و ترکیبات مقاوم کافی نیستند و نیاز به استفاده از فرآیندهای پیشرفته‌تر وجود دارد (Antonelli et al. , 2025; Shamshad & Rehman, 2025; Ghernaout & Elboughdiri, 2024).

در کنار فرآیندهای متعارف، فناوری‌هایی مانند غشاها، اکسیداسیون پیشرفته، بیوراکتورهای غشایی، سیستم‌های بیوفیلمی، تصفیه چهارم، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس برای ارتقای کیفیت پساب مطرح شده‌اند (Antonelli et al. , 2025; Shamshad & Rehman, 2025). با این حال، انتخاب فناوری مناسب باید بر اساس کیفیت فاضلاب خام، استانداردهای پساب، هزینه انرژی، هزینه بهره‌برداری، تولید لجن و شرایط اقلیمی انجام شود (Tarpani & Azapagic, 2023; Vasilaki & Katsou, 2024). بنابراین، ارزیابی عملکرد تصفیه‌خانه باید فقط بر مبنای راندمان حذف آلاینده‌ها نباشد، بلکه باید شاخص‌های پایداری، انرژی و اقتصاد چرخه عمر را نیز شامل شود.

#### ۲.۶. اثر شرایط اقلیمی بر عملکرد سیستم فاضلاب

شرایط اقلیمی یکی از عوامل اثرگذار بر طراحی و بهره‌برداری سیستم فاضلاب شهری است. دما، شدت و الگوی بارش، یخبندان، تغییرات فصلی و رویدادهای حدی می‌توانند عملکرد شبکه و تصفیه‌خانه را تحت تأثیر قرار دهند. در مناطق سردسیر، کاهش دما می‌تواند فعالیت میکروارگانیسم‌های دخیل در تصفیه زیستی را کاهش داده و موجب افت راندمان حذف مواد آلی و مواد مغذی شود (Ali et al. , 2025; Zhang & colleagues, 2025). همچنین، یخبندان و تغییرات دمایی می‌توانند بر تجهیزات مکانیکی، خطوط انتقال، ایستگاه‌های پمپاژ و فرآیندهای هوادهی اثرگذار باشند.

از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی با افزایش شدت بارش‌های کوتاه‌مدت، تغییر الگوهای رواناب و افزایش وقوع سیلاب‌های شهری، فشار بیشتری بر شبکه‌های فاضلاب وارد می‌کند (Zhang & colleagues, 2025; Perez et al. , 2024). در چنین شرایطی، سیستم‌های فاضلاب ترکیبی بیش از سایر سیستم‌ها در معرض سرریز و اختلال عملکرد قرار دارند. بنابراین، ارزیابی سیستم فاضلاب در شهرهایی مانند ایلام که دارای اقلیم سرد و بارندگی‌های فصلی هستند، باید هم اثر دمای پایین بر تصفیه زیستی و هم اثر بارش بر ظرفیت شبکه را در نظر بگیرد (Ali et al. , 2025; Zhang et al. , 2025).

### ۲.۷. پیامدهای زیست‌محیطی عملکرد نامناسب فاضلاب شهری

عملکرد نامناسب سیستم‌های فاضلاب شهری می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای ایجاد کند. نشت فاضلاب از شبکه‌های فرسوده، سرریز در زمان بارندگی، دفع نامناسب لجن، گندزدایی ناکافی و تخلیه پساب با کیفیت نامطلوب می‌تواند موجب آلودگی آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، خاک و اکوسیستم‌های طبیعی شود (Chen et al. , 2024; Yalin et al. , 2023). افزون بر این، ورود مواد آلی، نیترژن، فسفر و پاتوژن‌ها به منابع آبی می‌تواند باعث اوتریفیکاسیون، کاهش اکسیژن محلول و تهدید سلامت انسان و موجودات آبی شود. یکی دیگر از ابعاد زیست‌محیطی سیستم‌های فاضلاب، انتشار گازهای گلخانه‌ای است. مطالعات جدید نشان می‌دهند که شبکه‌های فاضلاب و تصفیه‌خانه‌ها می‌توانند منابع انتشار متان، دی‌اکسید کربن و اکسید نیترژن باشند. این انتشارها تحت تأثیر شرایط بی‌هوازی، دما، زمان ماند، کیفیت فاضلاب و ویژگی‌های هیدرولیکی شبکه قرار دارند (Chen et al. , 2024). بنابراین، ارزیابی زیست‌محیطی سیستم فاضلاب باید علاوه بر کیفیت پساب، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی و اثرات چرخه عمر را نیز شامل شود (Tarpani & Azapagic, 2023; Rodriguez-Gomez et al. , 2025).

### ۲.۸. بازچرخانی پساب و مدیریت پایدار منابع آب

بازچرخانی پساب یکی از مهم‌ترین راهبردهای مدیریت پایدار منابع آب در شرایط کم‌آبی و رشد تقاضای شهری است. پساب تصفیه‌شده می‌تواند برای آبیاری فضای سبز، کشاورزی غیرخوراکی، مصارف صنعتی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و برخی کاربردهای شهری غیرشرب استفاده شود. مطالعات جدید نشان می‌دهند که استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه‌شده می‌تواند فشار بر منابع آب شیرین را کاهش داده و تاب‌آوری سیستم‌های آب شهری را افزایش دهد (Christou et al. , 2024; Liu et al. , 2023; Abd-Elaty et al. , 2024).

با این حال، بازچرخانی پساب نیازمند رعایت استانداردهای کیفی، کنترل پاتوژن‌ها، حذف آلاینده‌های نوظهور، مدیریت ریسک بهداشتی و پذیرش اجتماعی است (Yalin et al. , 2023; Antonelli et al. , 2025). در صورتی که پساب بدون تصفیه کافی مورد استفاده قرار گیرد، ممکن است موجب تجمع آلاینده‌ها در خاک، انتقال بیماری‌ها و اثرات منفی بر محصولات کشاورزی شود. از این رو، مطالعات جدید بر ضرورت ارزیابی چرخه عمر، تحلیل ریسک و انتخاب فناوری مناسب برای بازچرخانی پساب تأکید دارند (Negi & Chandel, 2024; Tarpani & Azapagic, 2023; Christou et al. , 2024).

### ۲.۹. آلاینده‌های نوظهور و ضرورت تصفیه پیشرفته

در سال‌های اخیر، توجه زیادی به آلاینده‌های نوظهور در فاضلاب شهری شده است. این آلاینده‌ها شامل داروها، محصولات مراقبت شخصی، هورمون‌ها، میکروپلاستیک‌ها، ترکیبات صنعتی، مواد مقاوم و برخی آلاینده‌های آلی پایدار هستند. بسیاری از این ترکیبات در فرآیندهای متعارف تصفیه به‌طور کامل حذف نمی‌شوند و می‌توانند در پساب خروجی باقی بمانند (Gheraout & Elboughdiri, 2024; Antonelli et al. , 2025). ورود این آلاینده‌ها به محیط زیست می‌تواند اثرات بلندمدت بر سلامت انسان، اکوسیستم‌های آبی و کیفیت منابع آب داشته باشد.

در پاسخ به این چالش، فناوری‌های تصفیه پیشرفته مانند اکسیداسیون پیشرفته، کربن فعال، غشاهای نانوفیلتراسیون، ازن‌زنی و فرآیندهای ترکیبی مورد توجه قرار گرفته‌اند (Shamshad & Rehman, 2025; Antonelli et al. , 2025). با این حال، استفاده از این فناوری‌ها با هزینه انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری و پیچیدگی بهره‌برداری همراه است. بنابراین، انتخاب فناوری تصفیه پیشرفته باید بر اساس رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل پایداری انجام شود (Vasilaki & Katsou, 2024; Tarpani & Azapagic, 2023).

### ۲.۱۰. مدیریت لجن و اقتصاد چرخشی در تصفیه فاضلاب

لجن فاضلاب یکی از محصولات جانبی اصلی تصفیه‌خانه‌هاست و مدیریت آن یکی از چالش‌های مهم بهره‌برداری محسوب می‌شود. دفع نامناسب لجن می‌تواند موجب آلودگی خاک، انتشار بو، انتقال آلاینده‌ها و افزایش هزینه‌های مدیریتی شود. در مقابل، در چارچوب اقتصاد چرخشی، لجن فاضلاب می‌تواند به‌عنوان منبعی برای تولید بیوگاز، بازیابی فسفر، تولید کود آلی و بازیابی انرژی مورد استفاده قرار گیرد (Tarpani & Azapagic, 2023; Rodriguez-Gomez et al. , 2025).

مطالعات جدید نشان می‌دهند که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب می‌توانند از واحدهای صرفاً مصرف‌کننده انرژی به مراکز بازیابی منابع تبدیل شوند، مشروط بر آنکه طراحی فرآیند، مدیریت لجن و بهره‌برداری انرژی محور به‌درستی انجام گیرد (Liu et al. , 2023; Negi & Chandel, 2024). بنابراین، ارزیابی سیستم فاضلاب شهری باید شامل مدیریت لجن، مصرف انرژی، بازیابی منابع و پیامدهای زیست‌محیطی دفع یا استفاده مجدد از لجن باشد (Tarpani & Azapagic, 2023; Rodriguez-Gomez et al. , 2025).

### ۲.۱۱. پایش هوشمند و مدیریت داده‌محور شبکه فاضلاب

تحول دیجیتال در مدیریت زیرساخت‌های شهری باعث شده است که سیستم‌های فاضلاب نیز به سمت پایش هوشمند و مدیریت داده‌محور حرکت کنند. استفاده از حسگرهای IoT، سامانه‌های پایش بلادرنگ، مدل‌های یادگیری ماشین، تحلیل داده‌های مکانی و سیستم‌های هشدار سریع می‌تواند نقش مهمی در بهبود بهره‌برداری و کاهش بحران‌های شبکه داشته باشد (Sitzenfrei et al. , 2024; Annus et al. , 2024; Faris et al. , 2023). این فناوری‌ها امکان تشخیص زودهنگام انسداد، افزایش سطح جریان، نفوذ آب‌های اضافی، خرابی لوله‌ها و خطر سرریز را فراهم می‌کنند.

مطالعات جدید نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های حسگری، مدل‌های پیش‌بینی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند برای پیش‌بینی گرفتگی شبکه، رسوب‌گذاری، خرابی لوله و وقوع سیلاب شهری مورد استفاده قرار گیرد (Wang et al. , 2024; Shi et al. , 2025). همچنین، سنسورهای کم‌هزینه می‌توانند پایش پیوسته کیفیت و کمیت جریان را در شبکه‌های فاضلاب و زهکشی شهری ممکن سازند (Hamel et al. , 2024; Wang et al. , 2024). بنابراین، مدیریت نوین فاضلاب شهری نیازمند گذار از رویکرد واکنشی به رویکرد پیشگیرانه و پیش‌بینانه است.

### ۲.۱۲. ارزیابی پایداری و تصمیم‌گیری چندمعیاره

ارزیابی سیستم‌های فاضلاب شهری باید بر پایه شاخص‌های پایداری انجام شود. این شاخص‌ها شامل ابعاد فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و مدیریتی هستند. تحلیل چرخه عمر یا LCA یکی از روش‌های مهم برای ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی گزینه‌های مختلف تصفیه، بازچرخانی و مدیریت لجن است (Negi & Chandel, 2024; Tarpani & Azapagic, 2023; Rodriguez-Gomez et al. , 2025). این روش می‌تواند اثراتی مانند مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف مواد شیمیایی و تولید لجن را در کل چرخه سیستم ارزیابی کند.

در کنار LCA، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره یا MCDM برای انتخاب گزینه‌های مناسب در شرایطی که معیارهای متعدد و گاه متعارض وجود دارند، کاربرد گسترده‌ای دارند. برای نمونه، انتخاب بین نوسازی کامل شبکه، تعمیر موضعی، ارتقای تصفیه‌خانه، استفاده از فناوری‌های پیشرفته یا اجرای سامانه‌های پایش هوشمند نیازمند تحلیل هم‌زمان هزینه، کارایی، ریسک، پیامد زیست‌محیطی و قابلیت اجراست (Vasilaki & Katsou, 2024). بنابراین، ترکیب LCA، MCDM، پایش هوشمند و داده‌های می‌دانی می‌تواند چارچوبی مناسب برای ارزیابی جامع سیستم فاضلاب شهری فراهم کند.

### ۲.۱۳. حکمرانی، مدیریت بهره‌برداری و الزامات نهادی

مدیریت سیستم فاضلاب شهری تنها به طراحی و اجرای زیرساخت محدود نمی‌شود، بلکه شامل برنامه‌ریزی، تأمین مالی، بهره‌برداری، نگهداری، نظارت، آموزش عمومی، رعایت استانداردهای زیست‌محیطی و هماهنگی نهادی است. ضعف در هر یک از این بخش‌ها می‌تواند موجب کاهش عمر مفید شبکه، افزایش هزینه‌های تعمیرات، افت کیفیت پساب و تشدید ریسک‌های زیست‌محیطی شود (Vasilaki & Katsou, 2024; Abd-Elaty et al. , 2024). از این رو، حکمرانی مؤثر فاضلاب شهری باید مبتنی بر داده، مشارکت نهادی، استانداردهای کیفی و برنامه‌ریزی بلندمدت باشد.

در سطح بین‌المللی نیز بازنگری مقررات فاضلاب شهری، سخت‌گیرانه‌تر شدن الزامات حذف آلاینده‌ها و توجه به بازچرخانی آب نشان می‌دهد که مدیریت فاضلاب وارد مرحله‌ای جدید شده است (European Parliament and Council of the European Union, 2025; Antonelli et al. , 2024). بنابراین، سیستم‌های فاضلاب شهری باید از رویکرد سنتی دفع فاضلاب به سمت مدیریت یکپارچه منابع، کنترل آلودگی، کاهش انتشار و بازیابی منابع حرکت کنند (Liu et al. , 2023; Christou et al. , 2024).

### ۲.۱۴. جایگاه نظری پژوهش حاضر

بر اساس ادبیات نظری، سیستم فاضلاب شهری یک سامانه پیچیده، چندبعدی و وابسته به شرایط محلی است. عملکرد این سامانه تحت تأثیر عواملی مانند وضعیت فیزیکی شبکه، ظرفیت تصفیه‌خانه، ویژگی‌های هیدرولیکی، کیفیت فاضلاب خام، شرایط اقلیمی، فناوری تصفیه، کیفیت بهره‌برداری، مدیریت لجن، امکان بازچرخانی پساب و چارچوب‌های مدیریتی قرار دارد (Tarpani & Azapagic, 2023; Negi & Chandel, 2024; Vasilaki & Katsou, 2024). بنابراین، ارزیابی سیستم فاضلاب شهری ایلام باید از رویکردی یکپارچه استفاده کند که در آن ابعاد فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی به‌صورت هم‌زمان بررسی شوند.

در شهر ایلام، وجود اقلیم سرد، توسعه شهری، ترکیبی بودن بخشی از سیستم، خطر ورود رواناب‌های سطحی، فرسودگی شبکه و محدودیت ظرفیت تصفیه‌خانه، ضرورت چنین ارزیابی جامعی را افزایش می‌دهد. ادبیات موجود نشان می‌دهد که برای چنین شرایطی، استفاده از چارچوب‌های ترکیبی شامل ارزیابی زیرساخت، تحلیل عملکرد تصفیه، پایش هوشمند، تحلیل ریسک زیست‌محیطی، بازچرخانی پساب و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند مبنای مناسبی برای ارائه راهکارهای مدیریتی و فنی باشد (Perez et al. , 2024; Zhang et al. , 2024).

سیستم فاضلاب شهری ایلام، بخشی از شکاف مطالعاتی موجود در زمینه تحلیل هم‌زمان چالش‌های زیرساختی، بهره‌برداری، اقلیمی و زیست‌محیطی را پوشش دهد.

### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳.۱. محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش، سیستم فاضلاب شهری ایلام در محدوده کالبدی و خدماتی شهر ایلام است. شهر ایلام به‌عنوان مرکز استان ایلام در غرب ایران و در محدوده غرب زاگرس قرار دارد. این شهر از نظر طبیعی در ناحیه‌ای کوهستانی و دامنه‌ای واقع شده و به دلیل قرارگیری در میان ارتفاعات، برخورداری از شیب‌های طبیعی، بافت‌های متنوع شهری و توسعه کالبدی در سال‌های اخیر، دارای شرایط ویژه‌ای در استقرار و بهره‌برداری از زیرساخت‌های شهری، از جمله شبکه فاضلاب است. شبکه فاضلاب شهری ایلام، بخش‌هایی از مناطق مسکونی، تجاری، خدماتی و سایر کاربری‌های شهری را پوشش می‌دهد و فاضلاب جمع‌آوری شده از طریق شبکه جمع‌آوری و خطوط انتقال به تأسیسات تصفیه فاضلاب منتقل می‌شود. از نظر فضایی، نواحی قدیمی‌تر، پرتراکم، حاشیه‌ای و بخش‌هایی از شهر که در پهنه‌های شیب‌دار یا دارای توسعه نامتوازن قرار گرفته‌اند، به دلیل احتمال فرسودگی شبکه، گرفتگی، نشست، ورود رواناب‌های سطحی و دشواری‌های بهره‌برداری، از اهمیت بیشتری در ارزیابی برخوردارند. همچنین شرایط اقلیمی و توپوگرافی شهر ایلام، از جمله بارش‌های فصلی، شیب طبیعی اراضی، قرارگیری در دامنه‌های کوهستانی و گسترش کالبدی شهر در محدوده‌های مختلف، می‌تواند بر نحوه جمع‌آوری، انتقال، تصفیه و مدیریت پساب اثرگذار باشد. بنابراین، محدوده مطالعه از نظر زیرساختی، زیست‌محیطی و مدیریتی دارای اهمیت ویژه‌ای است و بررسی آن می‌تواند به شناسایی چالش‌های اصلی سیستم فاضلاب شهری ایلام و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد، کاهش آلودگی و مدیریت پایدار پساب کمک کند.

#### ۳.۲. روش کار

روش کار این پژوهش بر پایه رویکرد توصیفی - تحلیلی و با هدف ارزیابی فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام انجام شده است. در مرحله نخست، اطلاعات پایه مربوط به محدوده مطالعه، شامل ویژگی‌های جمعیتی، کالبدی، اقلیمی و وضعیت موجود شبکه فاضلاب از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، اسناد سازمانی، گزارش‌های شرکت آب و فاضلاب و منابع مرتبط گردآوری شد. سپس شاخص‌های اصلی ارزیابی شامل وضعیت شبکه جمع‌آوری و خطوط انتقال، ظرفیت و عملکرد تصفیه‌خانه، میزان پوشش خدمات فاضلاب، چالش‌های بهره‌برداری، اثر شرایط اقلیمی سرد، احتمال نشست و سرریز، کیفیت پساب و پیامدهای زیست‌محیطی شناسایی و تحلیل گردید. در ادامه، با استفاده از مشاهدات میدانی، بررسی نقاط بحرانی شبکه و مقایسه وضعیت موجود با معیارهای فنی و زیست‌محیطی، نقاط ضعف و ظرفیت‌های سیستم مشخص شد. در نهایت، بر اساس نتایج تحلیل‌ها و با بهره‌گیری از رویکرد مدیریت پایدار فاضلاب شهری، راهکارهایی مانند نوسازی شبکه‌های فرسوده، ارتقای فرآیندهای تصفیه، جداسازی فاضلاب از رواناب‌های سطحی، پایش هوشمند و استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده ارائه شد.

#### ۴. یافته‌های پژوهش

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که سیستم فاضلاب شهری ایلام به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های اصلی شهر، از نظر فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی با مجموعه‌ای از چالش‌های به‌هم‌پیوسته مواجه است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، شبکه فاضلاب شهری ایلام شامل اجزای اصلی شبکه جمع‌آوری، خطوط انتقال و تصفیه‌خانه است و بخش قابل توجهی از جمعیت شهری را تحت پوشش قرار می‌دهد؛ با این حال، رشد جمعیت، توسعه کالبدی شهر، فرسودگی بخشی از شبکه، ترکیبی بودن سیستم فاضلاب، ورود رواناب‌های سطحی در زمان بارندگی و شرایط اقلیمی سرد، عملکرد مطلوب این سیستم را تحت تأثیر قرار داده است. داده‌های موجود نشان می‌دهد که حجم فاضلاب جمع‌آوری شده در ایلام حدود ۱۱۹۲۶۶ مترمکعب در شبانه‌روز و طول شبکه جمع‌آوری فاضلاب حدود ۱۴۰۸.۵۴ کیلومتر است، در حالی که ظرفیت اسمی و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها نیازمند تقویت و توسعه برای پاسخ‌گویی به نیازهای آتی شهر است. همچنین تنها یک تصفیه‌خانه در مدار بهره‌برداری قرار دارد و این موضوع نشان‌دهنده وابستگی بالای سیستم به ظرفیت محدود تصفیه موجود است.

#### جدول ۱. مشخصات فنی اصلی سیستم فاضلاب شهری ایلام

شاخص	مقدار / وضعیت	واحد	تحلیل یافته
جمعیت تحت پوشش تأسیسات فاضلاب	۵۵۳۹۴۶	نفر	پوشش نسبتاً گسترده، اما نیازمند توسعه متناسب با رشد شهری
درصد جمعیت تحت پوشش	۵۷.۶۵	درصد	نشان‌دهنده باقی‌ماندن بخشی از جمعیت خارج از پوشش کامل فاضلاب

تعداد مشترکین خانگی فاضلاب	تعداد مشترکین غیرخانگی فاضلاب	تعداد کل مشترکین فاضلاب	حجم فاضلاب جمع‌آوری شده	طول شبکه جمع‌آوری فاضلاب	طول خطوط انتقال فاضلاب	تعداد تصفیه‌خانه‌های در مدار بهره‌برداری	ظرفیت در دست بهره‌برداری تصفیه‌خانه	ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه	ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه‌های در دست اجرا
۱۸۵۱۲۷	۲۲۴۳۲	۲۰۷۵۹۹	۱۱۹۲۶۶	۱۴۰۸۵۴	۵۶۸۷	۱	۱۰۴۳۲	۶۶۹۰	۱۳۵
غلبه مصرف خانگی در بار ورودی شبکه	وجود سهم قابل توجه فعالیت‌های خدماتی و تجاری	گسترده‌گی شبکه خدمات‌رسانی در سطح شهر	بار هیدرولیکی قابل توجه بر شبکه و تصفیه‌خانه	گسترده‌گی بالا و نیازمند نگهداری و پایش مستمر	اهمیت خطوط انتقال در پایداری عملکرد کل سیستم	وابستگی سیستم به یک مرکز اصلی تصفیه	نیازمند مقایسه مستمر با بار واقعی ورودی	نشان‌دهنده فشار بالقوه بر ظرفیت طراحی	ظرفیت توسعه‌ای مناسب در صورت تکمیل پروژه‌ها
فقره	فقره	فقره	مترمکعب در شبانه‌روز	کیلومتر	کیلومتر	واحد	هزار مترمکعب در شبانه‌روز	هزار مترمکعب در شبانه‌روز	هزار مترمکعب در شبانه‌روز

از نظر زیرساختی، یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش، وجود فرسودگی در بخش‌هایی از شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب است. مناطق مرکزی و شمالی ایلام، به دلیل قدمت بیشتر لوله‌ها و تراکم بالاتر جمعیت، بیشترین آسیب‌پذیری را از نظر نشتی، گرفتگی و کاهش کارایی انتقال نشان می‌دهند. در متن پروژه ذکر شده است که نرخ نشتی در برخی مناطق قدیمی به حدود ۳۵ درصد می‌رسد و استفاده از لوله‌های جدید مانند HDPE در پروژه‌های پایلوت توانسته است نشتی را تا حدود ۹۰ درصد نسبت به لوله‌های بتنی کاهش دهد. این یافته بیانگر آن است که نوسازی هدفمند شبکه، به‌ویژه در نقاط بحرانی، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش هدررفت، جلوگیری از آلودگی منابع آب و افزایش عمر مفید شبکه داشته باشد.

جدول ۲. مهم‌ترین چالش‌های زیرساختی سیستم فاضلاب ایلام

مؤلفه زیرساختی	وضعیت مشاهده شده	پیامد احتمالی	راهکار پیشنهادی
شبکه جمع‌آوری فاضلاب	فرسودگی در بخش‌هایی از شبکه، به‌ویژه مناطق قدیمی	نشت فاضلاب، آلودگی آب زیرزمینی، افزایش هزینه تعمیرات	نوسازی مرحله‌ای و اولویت‌بندی بر اساس قدمت و میزان نشتی
خطوط انتقال	وابستگی بالا به عملکرد صحیح خطوط اصلی	اختلال در انتقال فاضلاب به تصفیه‌خانه	پایش دوره‌ای، تعمیر پیشگیرانه و افزایش ظرفیت در نقاط بحرانی
سیستم ترکیبی فاضلاب و رواناب	ورود آب باران به شبکه در زمان بارندگی	افزایش دبی، سرریز، کاهش راندمان تصفیه	جداسازی تدریجی فاضلاب از رواناب سطحی
تصفیه‌خانه	محدودیت ظرفیت و وابستگی به یک تصفیه‌خانه فعال	فشار بهره‌برداری و کاهش کیفیت پساب در دوره‌های پربار	تکمیل ظرفیت‌های در دست اجرا و ارتقای فرآیند تصفیه
ایستگاه‌های پمپاژ و تجهیزات	نیازمند نگهداری مستمر	اختلال در انتقال و افزایش ریسک پس‌زدگی فاضلاب	نگهداری پیشگیرانه و پایش هوشمند تجهیزات

از نظر عملکرد تصفیه، یافته‌ها نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی سرد ایلام یکی از عوامل مهم اثرگذار بر راندمان تصفیه فاضلاب است. کاهش دمای هوا به کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد موجب افت فعالیت میکروارگانیسم‌های مؤثر در فرآیندهای بیولوژیکی شده و در نتیجه راندمان حذف BOD در سیستم‌های متعارف کاهش می‌یابد. در متن پروژه آمده است که کاهش دما می‌تواند باعث کاهش ۳۵ تا ۴۰ درصدی راندمان حذف BOD در سیستم‌های متعارف شود؛ در مقابل، سیستم‌های اصلاح‌شده مانند MBBR پوشش‌دار توانسته‌اند در بازه دمایی -۱۰ تا ۵ درجه سانتی‌گراد راندمان تصفیه را در محدوده ۷۵ تا ۸۵ درصد حفظ کنند. این یافته نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های سازگار با اقلیم سرد، یکی از الزامات اصلی ارتقای تصفیه‌خانه فاضلاب ایلام است.

جدول ۳. اثر اقلیم سرد بر عملکرد تصفیه فاضلاب

عامل اقلیمی / فنی	اثر مشاهده شده	پیامد عملکردی	نتیجه تحلیلی
کاهش دما به زیر ۵ درجه سانتی‌گراد	کاهش فعالیت میکروبی	افت راندمان حذف BOD	ضرورت اصلاح فرآیندهای زیستی
استفاده از سیستم‌های متعارف	کاهش ۳۵ تا ۴۰ درصدی راندمان حذف BOD	کاهش کیفیت پساب خروجی	ناکافی بودن فناوری‌های متعارف در فصل سرد
استفاده از MBBR پوشش‌دار	حفظ راندمان ۷۵ تا ۸۵ درصد در دمای پایین	پایداری بیشتر تصفیه	مناسب برای اقلیم سرد ایلام
نوسانات فصلی دما	تغییر بار و عملکرد تصفیه‌خانه	نیاز به تنظیم بهره‌برداری	ضرورت مدیریت فصلی فرآیند تصفیه

از منظر زیست‌محیطی، مهم‌ترین یافته پژوهش آن است که نارسایی در عملکرد شبکه و تصفیه‌خانه می‌تواند منجر به آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، آلودگی خاک، تهدید سلامت عمومی و تغییر در اکوسیستم‌های محلی شود. به‌ویژه در بخش‌هایی که شبکه فرسوده است یا احتمال سرریز فاضلاب ترکیبی وجود دارد، خطر ورود فاضلاب خام یا نیمه‌تصفیه‌شده به محیط افزایش می‌یابد. همچنین، در صورت ناکافی بودن گندزدایی پساب، امکان انتقال عوامل بیماری‌زا وجود دارد. در متن پروژه تأکید شده است که تخلیه نامناسب فاضلاب می‌تواند موجب انتقال بیماری‌ها، کاهش کیفیت منابع آب، آلودگی خاک و تخریب اکوسیستم‌ها شود.

#### جدول ۴. پیامدهای زیست‌محیطی شناسایی شده

نوع پیامد	منشأ اصلی	اثرات احتمالی	سطح اهمیت
آلودگی منابع آب زیرزمینی	نشست از شبکه فرسوده	کاهش کیفیت آب و تهدید سلامت عمومی	زیاد
آلودگی رودخانه‌ها و آب‌های سطحی	سرریز فاضلاب ترکیبی یا تخلیه پساب ناکافی	افزایش بار آلی، پاتوژن‌ها و مواد مغذی	زیاد
آلودگی خاک	نشست یا دفع نامناسب فاضلاب و لجن	کاهش کیفیت خاک و خطر انتقال آلاینده‌ها	متوسط تا زیاد
انتقال بیماری‌ها	وجود عوامل میکروبی در فاضلاب	تهدید سلامت شهروندان	زیاد
تغییر اکوسیستم	ورود آلاینده‌ها به محیط طبیعی	آسیب به گیاهان، جانوران و تعادل اکولوژیک	متوسط تا زیاد

از نظر مدیریتی و بهره‌برداری، یافته‌ها نشان می‌دهد که مدیریت پایدار سیستم فاضلاب ایلام نیازمند برنامه‌ریزی یکپارچه، پایش مستمر، نوسازی تدریجی، توسعه ظرفیت تصفیه‌خانه و استفاده از فناوری‌های نوین است. یکی از نکات مهم، ضرورت اولویت‌بندی مداخلات بر اساس شاخص‌هایی مانند قدمت شبکه، تراکم جمعیتی، نزدیکی به منابع آب حساس و بیشترین میزان مشکلات گزارش شده است. همچنین استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری فضای سبز و کشاورزی غیرخوراکی، در صورت تکمیل فرآیند گندزدایی و رعایت استانداردهای زیست‌محیطی، می‌تواند به کاهش فشار بر منابع آب کمک کند. در پروژه، افزودن مرحله گندزدایی UV و رعایت استاندارد کلیفرم مدفوعی برای استفاده ایمن از پساب پیشنهاد شده است.

#### جدول ۵. جمع‌بندی یافته‌ها بر اساس ابعاد فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی

بعد ارزیابی	یافته اصلی	پیامد	پیشنهاد کلیدی
فنی	فرسودگی بخشی از شبکه و محدودیت ظرفیت تصفیه	نشست، سرریز و فشار بر تصفیه‌خانه	نوسازی شبکه و توسعه ظرفیت تصفیه
اقلیمی	کاهش راندمان تصفیه در دمای پایین	افت کیفیت پساب در فصول سرد	استفاده از فناوری‌های مقاوم در برابر سرما
زیست‌محیطی	خطر آلودگی آب، خاک و اکوسیستم‌ها	تهدید سلامت عمومی و منابع آب	کنترل نشست، ارتقای گندزدایی و پایش کیفیت پساب
بهره‌برداری	ورود رواناب سطحی به سیستم ترکیبی	افزایش بار هیدرولیکی و احتمال سرریز	جداسازی فاضلاب از آب‌های سطحی
مدیریتی	نیاز به پایش و برنامه‌ریزی یکپارچه	افزایش هزینه و کاهش کارایی در صورت نبود مدیریت مناسب	پایش هوشمند، نگهداری پیشگیرانه و اولویت‌بندی مداخلات
استفاده مجدد	امکان بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده	کاهش مصرف آب شیرین	استفاده در کشاورزی غیرخوراکی و فضای سبز پس از گندزدایی

در مجموع، یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که سیستم فاضلاب شهری ایلام در وضعیت گذار از یک سیستم سنتی و متکی بر زیرساخت‌های موجود به سمت یک سیستم نیازمند نوسازی، هوشمندسازی و مدیریت پایدار قرار دارد. مهم‌ترین مسائل شناسایی شده شامل فرسودگی شبکه، ظرفیت محدود تصفیه‌خانه، اثر اقلیم سرد بر فرآیندهای زیستی، خطر آلودگی منابع آب، ورود رواناب‌های سطحی، و ضرورت استفاده مجدد از پساب است. بنابراین، بهبود عملکرد این سیستم مستلزم ترکیب راهکارهای فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی است؛ به‌گونه‌ای که هم کیفیت خدمات فاضلاب شهری افزایش یابد و هم آثار منفی آن بر محیط زیست و سلامت عمومی کاهش پیدا کند.

#### ۵. بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که مسأله اصلی سیستم فاضلاب شهری ایلام، صرفاً محدود به یک بخش منفرد مانند شبکه جمع‌آوری یا تصفیه‌خانه نیست، بلکه مجموعه‌ای از عوامل فنی، اقلیمی، زیست‌محیطی و مدیریتی به‌صورت هم‌زمان بر عملکرد آن اثر می‌گذارند. در این مطالعه مشخص شد که بخش‌هایی از شبکه فاضلاب شهری ایلام به دلیل قدمت، تراکم جمعیتی، ترکیبی بودن سیستم و ورود رواناب‌های سطحی، با خطر نشست، افزایش بار هیدرولیکی و کاهش پایداری بهره‌برداری مواجه‌اند. این نتایج با هدف اصلی پژوهش، یعنی ارزیابی فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام، هم‌راستا است و نشان می‌دهد که فرض اولیه پژوهش مبنی بر وجود چالش‌های زیرساختی و بهره‌برداری در این سیستم قابل تأیید است. داده‌های پروژه نیز نشان می‌دهد که سیستم فاضلاب ایلام دارای شبکه گسترده،

خطوط انتقال، یک تصفیه‌خانه در مدار بهره‌برداری، و چالش‌هایی مانند فرسودگی شبکه، ظرفیت محدود تصفیه‌خانه، اقلیم سرد و خطر آلودگی منابع آب است.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های پژوهش، نقش فرسودگی شبکه و ورود جریان‌های اضافی به سیستم فاضلاب است. در مناطق قدیمی‌تر شهر، فرسودگی لوله‌ها می‌تواند موجب نشت فاضلاب، افزایش نفوذ آب‌های زیرزمینی و ورود رواناب‌های سطحی شود. این مسأله با مطالعات Perez et al. (۲۰۲۴) همخوانی دارد که نشان داده‌اند مدل‌سازی جریان فاضلاب و تفکیک جریان پایه، نفوذ آب زیرزمینی و رواناب ورودی، برای پیش و کنترل سرریزهای فاضلابی اهمیت زیادی دارد. همچنین Zhang et al. (۲۰۲۵) تأکید کرده‌اند که ورود آب‌های اضافی به شبکه فاضلاب، علاوه بر افزایش بار انتقال و تصفیه، می‌تواند خطر سرریز، اختلال بهره‌برداری و حتی آسیب زیرساختی را تشدید کند. بنابراین، یافته‌های پژوهش حاضر از نظر جهت‌گیری کلی با ادبیات جدید همسو است و نشان می‌دهد که در ایلام نیز کنترل نفوذ، نشت و رواناب باید یکی از اولویت‌های اصلی مدیریت شبکه باشد.

از منظر تصفیه و بهره‌برداری، یافته‌ها نشان داد که شرایط اقلیمی سرد ایلام یکی از عوامل مؤثر در کاهش راندمان فرآیندهای بیولوژیکی تصفیه است. کاهش دما می‌تواند فعالیت میکروارگانیسم‌ها را محدود کند و در نتیجه حذف مواد آلی، به‌ویژه BOD، کاهش یابد. این نتیجه با فرضیه پژوهش مبنی بر کاهش راندمان سیستم‌های متعارف در دماهای پایین همخوان است. در عین حال، یافته‌های پروژه نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های اصلاح‌شده مانند MBBR پوشش‌دار می‌تواند راندمان تصفیه را در دماهای پایین در سطح قابل قبول‌تری حفظ کند. این موضوع از نظر نظری نیز با مطالعات جدید درباره تاب‌آوری سیستم‌های تصفیه در برابر اختلالات هیدرولیکی و محیطی قابل مقایسه است؛ زیرا پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که ساختارهای زیستی پایدارتر، مانند بیوفیلم‌ها، می‌توانند در برابر تغییرات محیطی مقاومت بیشتری داشته باشند. بنابراین، برای ایلام، تکیه صرف بر فرآیندهای متعارف کافی نیست و ارتقای فناوری تصفیه با توجه به شرایط اقلیمی ضروری به نظر می‌رسد.

از نظر زیست‌محیطی، نتایج پژوهش نشان داد که نشت از شبکه‌های فرسوده، سرریز احتمالی فاضلاب ترکیبی و ناکافی بودن ظرفیت تصفیه می‌تواند منابع آب سطحی و زیرزمینی را در معرض خطر قرار دهد. این یافته با مطالعات Chen et al. (۲۰۲۴) قابل مقایسه است که نشان داده‌اند شبکه‌های فاضلاب شهری نه‌تنها مسیر انتقال فاضلاب هستند، بلکه در صورت مدیریت نامناسب می‌توانند منبع انتشار آلودگی و حتی گازه‌های گلخانه‌ای باشند. افزون بر این، در پژوهش‌های مرتبط با آب‌های اضافی در شبکه فاضلاب نیز تأکید شده است که ورود جریان‌های غیرمجاز و نفوذی، فشار بر تصفیه‌خانه را افزایش داده و کیفیت عملکرد زیست‌محیطی سیستم را کاهش می‌دهد. در مورد ایلام، این موضوع اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا نزدیکی برخی مناطق به منابع آبی حساس و وجود بافت‌های قدیمی، ریسک آلودگی را افزایش می‌دهد. بنابراین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت فاضلاب ایلام باید از نگاه صرفاً فنی خارج شده و با رویکرد حفاظت از منابع آب و کنترل ریسک زیست‌محیطی دنبال شود.

یکی دیگر از یافته‌های مهم، ظرفیت بالقوه استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده در مصارف غیرشرب، به‌ویژه کشاورزی و فضای سبز شهری است. این یافته با فرضیه سوم پژوهش همسو است که بیان می‌کند در صورت تکمیل فرآیند گندزدایی، پساب تصفیه‌شده می‌تواند برای آبیاری محصولات غیرخوراکی یا فضای سبز ایمن‌تر مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات Negi and Chandel (۲۰۲۴) نیز نشان داده‌اند که استفاده مجدد از فاضلاب در سیستم‌های آب شهری می‌تواند راهبردی مهم برای پایداری منابع آب باشد، اما انتخاب نوع بازچرخانی باید با ارزیابی چرخه عمر و پیامدهای زیست‌محیطی همراه باشد. همچنین Tarpani and Azapagic (۲۰۲۳) تأکید کرده‌اند که فناوری‌های پیشرفته تصفیه و بازیابی لجن، اگر بدون ارزیابی پایداری انتخاب شوند، ممکن است پیامدهای ناخواسته‌ای از نظر انرژی، هزینه و اثرات زیست‌محیطی ایجاد کنند. بنابراین، در ایلام نیز استفاده مجدد از پساب باید به‌صورت کنترل‌شده، استانداردمحور و همراه با پایش کیفیت میکروبی و شیمیایی انجام شود، نه صرفاً به‌عنوان راهکاری برای جبران کمبود آب.

در مقایسه با مطالعات مشابه، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که چالش ایلام تا حد زیادی با مسائل رایج سیستم‌های فاضلاب شهری در بسیاری از شهرها همخوان است، اما دو ویژگی محلی آن را متمایز می‌کند: نخست، اقلیم سرد و اثر آن بر تصفیه زیستی؛ دوم، ساختار ترکیبی و چندبافتی شهر که مدیریت شبکه را پیچیده‌تر می‌کند. در بسیاری از مطالعات بین‌المللی، تأکید اصلی بر کنترل نفوذ و جریان ورودی، کاهش سرریز، استفاده از پایش هوشمند و بازچرخانی پساب است؛ در حالی که در ایلام، این موضوعات باید با ملاحظات اقلیمی، فرسودگی شبکه و محدودیت ظرفیت تصفیه‌خانه ترکیب شوند. به همین دلیل، راهکارهای عمومی مانند توسعه تصفیه‌خانه یا نوسازی شبکه، اگر بدون اولویت‌بندی مکانی و اقلیمی اجرا شوند، ممکن است کارایی لازم را نداشته باشند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مناطق قدیمی، پرتراکم و نزدیک به منابع آب حساس باید در اولویت مداخله قرار گیرند.

توضیح احتمالی برای بخشی از نتایج به ساختار کالبدی و تاریخی شهر ایلام بازمی‌گردد. شهر ایلام دارای بافت‌های متنوع از جمله بافت قدیمی، نیمه‌ارگانیک، منظم و حاشیه‌ای است و همین تنوع، یکنواختی شبکه فاضلاب را کاهش می‌دهد. در چنین شرایطی، شبکه در برخی مناطق ممکن است قدیمی‌تر، کم‌ظرفیت‌تر یا آسیب‌پذیرتر باشد. از سوی دیگر، ترکیبی بودن بخشی از سیستم فاضلاب باعث می‌شود که در زمان بارندگی، حجم زیادی از رواناب وارد شبکه شود و ظرفیت انتقال و تصفیه را تحت فشار قرار دهد. این مسأله با مبانی نظری سیستم‌های فاضلاب ترکیبی سازگار است؛ زیرا در این نوع سیستم‌ها، بارندگی شدید می‌تواند موجب افزایش ناگهانی دبی، کاهش زمان ماند، افت کیفیت تصفیه و افزایش احتمال سرریز شود. بنابراین، بخشی از مشکلات بهره‌برداری در ایلام را می‌توان نتیجه هم‌زمان فرسودگی شبکه، رشد شهر، ورود رواناب و محدودیت ظرفیت تصفیه‌خانه دانست.

با وجود این، تعمیم نتایج این پژوهش به سایر شهرها باید با احتیاط انجام شود. نتایج به شرایط خاص ایلام، از جمله اقلیم سرد، ساختار فضایی شهر، داده‌های موجود، نوع سیستم فاضلاب و ظرفیت فعلی تصفیه‌خانه وابسته است. در شهرهایی با اقلیم گرم‌تر، سیستم مجزای فاضلاب و رواناب، یا تصفیه‌خانه‌های چندگانه و پیشرفته‌تر، شدت و نوع چالش‌ها ممکن است متفاوت باشد. همچنین، بخشی از تحلیل‌ها مبتنی بر داده‌های موجود و گزارش‌های پروژه است و در صورت انجام پایش بلندمدت دبی، کیفیت پساب، نشت شبکه و عملکرد فصلی تصفیه‌خانه، می‌توان نتایج دقیق‌تری به دست آورد. بنابراین، محدودیت اصلی پژوهش، کمبود داده‌های پیوسته و زمان‌مند درباره عملکرد واقعی شبکه و تصفیه‌خانه در دوره‌های مختلف سال است.

از نظر پیامدهای کاربردی، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت فاضلاب ایلام باید بر چند محور اصلی متمرکز شود: نوسازی هدفمند شبکه‌های فرسوده، جداسازی تدریجی فاضلاب از رواناب سطحی، افزایش ظرفیت و پایداری تصفیه‌خانه، استفاده از فناوری‌های سازگار با اقلیم سرد، گنزدایی پیشرفته برای استفاده مجدد از پساب، و استقرار سامانه‌های پایش هوشمند. اهمیت پایش هوشمند از آن جهت است که بسیاری از مشکلات شبکه، مانند افزایش ناگهانی دبی، انسداد، نشت یا سرریز، در صورت شناسایی زودهنگام قابل کنترل هستند. مطالعات جدید نیز نشان می‌دهند که ابزارهای مدل‌سازی و پایش می‌توانند در تفکیک جریان‌های ورودی، مدیریت نفوذ و کنترل سرریز نقش مهمی داشته باشند.

در نهایت، برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود که عملکرد سیستم فاضلاب ایلام با داده‌های می‌دانی دقیق‌تر و در بازه‌های زمانی فصلی بررسی شود. پایش هم‌زمان دبی ورودی، کیفیت فاضلاب خام، کیفیت پساب خروجی، دمای محیط، عملکرد واحدهای تصفیه، میزان نشت و نقاط سرریز احتمالی می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت سیستم ارائه دهد. همچنین استفاده از مدل‌های هیدرولیکی، GIS، تحلیل چرخه عمر و تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به اولویت‌بندی نوسازی شبکه و انتخاب گزینه‌های بهینه تصفیه و بازچرخانی پساب کمک کند. در سطح کاربردی نیز پیشنهاد می‌شود مطالعات پایلوت برای استفاده از فناوری‌های مقاوم در برابر سرما، مانند سیستم‌های بیوفیلمی پوشش‌دار، و نیز پایلوت بازچرخانی پساب برای آبیاری فضای سبز شهری انجام شود. چنین پژوهش‌هایی می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری دقیق‌تر برای ارتقای سیستم فاضلاب شهری ایلام و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی آن باشند.

## ۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی ابعاد فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام، با تأکید بر چالش‌های زیرساختی و بهره‌برداری انجام شد. در این راستا، وضعیت شبکه جمع‌آوری و انتقال فاضلاب، ظرفیت و عملکرد تصفیه‌خانه، محدودیت‌های اقلیمی، خطرات زیست‌محیطی و الزامات مدیریتی مورد بررسی قرار گرفت تا تصویری یکپارچه از وضعیت موجود و مسیرهای بهبود این سیستم ارائه شود. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم فاضلاب شهری ایلام تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل به‌هم‌پیوسته شامل فرسودگی بخشی از زیرساخت‌ها، محدودیت ظرفیت تصفیه، فشار هیدرولیکی ناشی از جریان‌های ترکیبی و اثرات اقلیم سرد بر فرآیندهای تصفیه زیستی قرار دارد. نتایج حاکی از آن است که فرسودگی شبکه جمع‌آوری می‌تواند خطر نشت فاضلاب، آلودگی منابع آب زیرزمینی و کاهش کارایی بهره‌برداری را افزایش دهد؛ در حالی که ورود رواناب‌های سطحی در زمان بارندگی، بار هیدرولیکی سیستم را تشدید کرده و پایداری عملکرد شبکه و تصفیه‌خانه را کاهش می‌دهد. همچنین، شرایط سرد اقلیمی ایلام می‌تواند کارایی فرآیندهای بیولوژیکی متعارف را محدود کند و ضرورت استفاده از فناوری‌ها و راهبردهای بهره‌برداری سازگار با دماهای پایین را برجسته سازد.

در مجموع، نتایج پژوهش بیانگر آن است که مدیریت پایدار فاضلاب شهری ایلام نیازمند رویکردی یکپارچه است و نمی‌توان آن را صرفاً از طریق مداخلات فنی پراکنده بهبود داد. این مطالعه از نظر علمی نشان می‌دهد که ارزیابی سیستم‌های فاضلاب شهری، به‌ویژه در شهرهای سردسیر و دارای شبکه‌های فرسوده، باید هم‌زمان ابعاد زیرساختی، عملکرد تصفیه، ریسک‌های زیست‌محیطی، شرایط اقلیمی و ظرفیت مدیریتی را در بر گیرد. از نظر کاربردی نیز نتایج پژوهش نشان می‌دهد که نوسازی هدفمند بخش‌های فرسوده شبکه، جداسازی تدریجی

فاضلاب از رواناب سطحی، ارتقای فرآیندهای تصفیه، گندزدایی پیشرفته، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده و استقرار سامانه‌های پایش هوشمند می‌تواند به افزایش تاب‌آوری عملیاتی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی کمک کند.

در چارچوب گسترده‌تر مدیریت پایدار زیرساخت‌های شهری، تجربه ایلام بازتاب‌دهنده چالش‌هایی است که در بسیاری از شهرهای در حال رشد، به‌ویژه شهرهای دارای اقلیم سرد یا شبکه‌های فاضلاب قدیمی، مشاهده می‌شود. پژوهش‌های آینده می‌توانند با تمرکز بر پایش فصلی و بلندمدت کیفیت فاضلاب ورودی و پساب خروجی، رفتار هیدرولیکی شبکه، الگوهای نشت و نفوذ، و عملکرد واقعی فناوری‌های تصفیه سازگار با سرما، دقت تحلیل‌ها را افزایش دهند. همچنین استفاده از تحلیل مکانی مبتنی بر GIS، ارزیابی چرخه عمر و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند در اولویت‌بندی سناریوهای نوسازی و بررسی امکان‌پذیری زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده مجدد از پساب مؤثر باشد. با این حال، تفسیر نتایج این مطالعه باید با توجه به برخی محدودیت‌ها انجام شود. بخشی از تحلیل‌ها بر داده‌های موجود سازمانی، گزارش‌های پروژه و ارزیابی توصیفی - می‌دانی استوار بوده و داده‌های پیوسته و بلندمدت درباره تغییرات دبی، بار آلاینده‌ها، راندمان فصلی تصفیه و میزان واقعی نشت شبکه محدود بوده است. با وجود این محدودیت‌ها، پژوهش حاضر مبنایی منسجم برای شناخت مهم‌ترین چالش‌های فنی، زیست‌محیطی و مدیریتی سیستم فاضلاب شهری ایلام فراهم می‌کند. در نهایت، بهبود این سیستم مستلزم اتخاذ راهبردی هماهنگ، اقلیم‌محور و مبتنی بر پایداری است که نوسازی زیرساخت‌ها را با حفاظت محیط زیست و بهره‌برداری بهینه از پساب پیوند دهد.

## ۷. منابع

1. Ali, P. , Xu, G. , Carlson-Stadler, R. , Vela, J. D. , Liu, L. , Shaw, A. , & Stadler, L. B. (2025). Resilience in function, microbial community structure, and nitrifier composition of bench-scale biofilm reactors during wet weather disturbances. *ACS ES&T Water*. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00524>
2. Antonelli, M. , Ianes, J. , Piraldi, S. , & Cantoni, B. (2025). Micropollutants removal, residual risk, and costs for quaternary treatments in the framework of the Urban Wastewater Treatment Directive. *Water Research X*, 29, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100334>
3. Christou, A. , Beretsou, V. G. , & colleagues. (2024). Sustainable wastewater reuse for agriculture. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00560-y>
4. Chen, J. , Wang, H. , Yin, W. , Wang, Y. , Lv, J. , & Wang, A. (2024). Deciphering carbon emissions in urban sewer networks: Bridging urban sewer networks with city-wide environmental dynamics. *Water Research*, 256, 121576. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121576>
5. Faris, N. , Zayed, T. , Aghdam, E. , Fares, A. , & Alshami, A. (2024). Real-time sanitary sewer blockage detection system using IoT. *Measurement*, 226, 114146. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114146>
6. Hamel, P. , Ding, N. , Cherqui, F. , Zhu, Q. , Walcker, N. , Bertrand-Krajewski, J. L. , Champrasert, P. , & colleagues. (2024). Low-cost monitoring systems for urban water management: Lessons from the field. *Water Research X*, 22, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2024.100212>
7. Liu, L. , Zhou, X. , Dueñas-Osorio, L. , Stadler, L. , & Li, Q. (2023). Hybrid wastewater treatment and reuse enhances urban water system resilience to disruptive incidents. *Nature Water*. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00166-6>
8. Negi, R. , & Chandel, M. K. (2024). Life cycle assessment of wastewater reuse alternatives in urban water system. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107469. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107469>
9. Perez, G. , Gomez-Velez, J. D. , & Grant, S. B. (2024). The sanitary sewer unit hydrograph model: A comprehensive tool for wastewater flow modeling and inflow-infiltration simulations. *Water Research*, 249, 120997. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120997>

10. Shamshad, J. , & Rehman, R. U. (2025). Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: A comprehensive exploration of conventional and emerging technologies. *Environmental Science: Advances*. <https://doi.org/10.1039/d4va00136b>
11. Silva-Rodríguez, J. A. (2023). Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: A systematic literature review. *Water*, 15(17), 3064.<https://doi.org/10.3390/w15173064>
12. Sitzenfrei, R. , Annus, I. , Langeveld, J. , Rieckermann, J. , & Rauch, W. (2024). Developments and applications of IoT-based sensors for wastewater and drainage systems. *Water Science and Technology*, 89(4), iii–v. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.058>
13. Tarpani, R. R. Z. , & Azapagic, A. (2023). Life cycle sustainability assessment of advanced treatment techniques for urban wastewater reuse and sewage sludge resource recovery. *Science of the Total Environment*, 869, 161771.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161771>
14. Vasilaki, V. , & Katsou, E. (2024). Indicator-based multi-criteria decision support systems for wastewater treatment plants. *Science of the Total Environment*, 912, 168761. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.168761>
15. Yalin, D. , Anzaldua, G. , Schwesig, D. , & colleagues. (2023). Mitigating risks and maximizing sustainability of treated wastewater reuse for irrigation. *Water Research X*, 21, 100203.<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2023.100203>
16. Yang, J. , Zayed, T. , Arimiyaw, D. , & Xiao, R. (2025). A comprehensive review of influential factors and predictive techniques of time to failure for sewer pipes. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 157, 106357.<https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106357>
17. Zhang, H. , Jia, H. , Mels, A. , Rijnaarts, H. , & Chen, W. -S. (2025). Extraneous water in sewer systems: A comprehensive review on sewer infiltration and inflow quantification, localization and mitigation. *Water Research X*, 29, 100426.<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100426>
18. Zhang, Y. , & colleagues. (2025). A review of climate change impact assessment and methodologies for urban sewer networks. *Environmental and Sustainability Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100702>
19. Faris, N. , Zayed, T. , Aghdam, E. , Fares, A. , & Alshami, A. (2024). Sewer blockage and overflow management using real-time IoT monitoring. *Measurement*, 226, 114146.<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114146>
20. Wang, M. , Shi, B. , Catsamas, S. , Kolotelo, P. , & McCarthy, D. (2024). A compact, low-cost, and low-power turbidity sensor for continuous in situ stormwater monitoring. *Sensors*, 24(12), 3926.<https://doi.org/10.3390/s24123926>
21. Shamsad, J. , & Rehman, R. U. (2025). Conventional and emerging technologies for sustainable wastewater treatment. *Environmental Science: Advances*. <https://doi.org/10.1039/d4va00136b>
22. Christou, A. , Beretsou, V. G. , & colleagues. (2024). Treated wastewater reuse for irrigation: Benefits, risks and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00560-y>
23. Liu, L. , Zhou, X. , Dueñas-Osorio, L. , Stadler, L. , & Li, Q. (2023). Hybrid wastewater treatment and reuse for urban water resilience. *Nature Water*. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00166-6>

24. Tarpani, R. R. Z. , & Azapagic, A. (2023). Advanced wastewater treatment and sludge recovery under life cycle sustainability assessment. *Science of the Total Environment*, 869, 161771.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161771>
25. Perez, G. , Gomez-Velez, J. D. , & Grant, S. B. (2024). Wastewater flow modeling and inflow-infiltration simulation using a sanitary sewer unit hydrograph model. *Water Research*, 249, 120997.<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120997>
26. Zhang, H. , Jia, H. , Mels, A. , Rijnaarts, H. , & Chen, W. -S. (2025). Sewer infiltration and inflow quantification, localization and mitigation. *Water Research X*, 29, 100426.<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100426>
27. Chen, J. , Wang, H. , Yin, W. , Wang, Y. , Lv, J. , & Wang, A. (2024). Carbon emissions in urban sewer networks and city-wide environmental dynamics. *Water Research*, 256, 121576.<https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121576>
28. Negi, R. , & Chandel, M. K. (2024). Environmental impacts of wastewater reuse alternatives in urban water systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107469.<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107469>
29. Silva-Rodríguez, J. A. (2023). Wastewater reclamation and reuse as a solution for future cities. *Water*, 15(17), 3064.<https://doi.org/10.3390/w15173064>
30. Ianes, J. , Piraldi, S. , Cantoni, B. , & Antonelli, M. (2025). Quaternary treatment for micropollutant elimination under the revised Urban Wastewater Treatment Directive. *Water Research X*, 29, 100334.<https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100334>
31. Abd-Elaty, I. , Zelenakova, M. , & colleagues. (2024). Water reuse and sustainable urban water management under water scarcity. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w16031837>
32. Ghernaout, D. , & Elboughdiri, N. (2024). Emerging pollutants and advanced water treatment technologies. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w16131837>
33. Rodriguez-Gomez, S. , Medellín-Castillo, N. A. , Herrera-Orozco, I. , Ávila-Galarza, A. , Castro-Larragoitia, S. A. , Aguilera-Flores, M. M. , & Ávila-Vázquez, V. (2025). Life cycle assessment of a wastewater treatment plant in an urban area using the environmental footprint method. *Environment, Development and Sustainability*, 27, 9145–9163.<https://doi.org/10.1007/s10668-023-04273-y>
34. Karpouzoglou, T. , & colleagues. (2025). Treatment wetlands in the framework of the revised European Union Urban Wastewater Treatment Directive. *Nature-Based Solutions*. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2025.100111>
35. Goodarzi, S. , & Vazirian, M. (2024). A machine learning approach for predicting and localizing the failure and damage point in sewer networks due to pipe properties. *Journal of Water and Health*. <https://doi.org/10.2166/wh.2024.023>
36. Shi, Y. , & colleagues. (2025). Optimizing monitoring strategies for urban drainage systems via bilayer clustering and unsupervised machine learning. *Water Science and Technology*, 91(12), 1307–1322.<https://doi.org/10.2166/wst.2025.079>
37. Wang, X. , & colleagues. (2024). Sewer sediment deposition prediction using a two-stage machine learning model. *Journal of Hydroinformatics*, 26(4), 727–744.<https://doi.org/10.2166/hydro.2024.144>

38. Annus, I. , Sitzenfrei, R. , & colleagues. (2023). Monitoring and control of smart urban drainage systems using NB-IoT communication. Water Science and Technology, 88(2), 339–352.<https://doi.org/10.2166/wst.2023.222>
39. Fernández, M. , & colleagues. (2025). Integrating dynamic features into machine learning models for sewer blockage and flooding prediction. Urban Water Journal. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2025.2589081>
40. European Parliament and Council of the European Union. (2024). Directive (EU) 2024/3019 concerning urban wastewater treatment. Official Journal of the European Union. <https://doi.org/10.5040/9781509968308.0005>

