



Comparative Assessment of Tehran Wastewater Treatment Plants against International Standards

Saeid Karimi^{a*}, Nastaran Alibakhshi^a

^aDepartment of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: karimis@ut.ac.ir, <https://orcid.org/0000-0003-0796-6855>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/27
Received in revised form:
2026/02/19
Accepted 2026/02/27
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Effluent standards,
International comparison,
Resource recovery,
Sewage treatment plants,
Water reuse Wastewater.

ABSTRACT

This study provides a comprehensive analytical assessment of Tehran's municipal wastewater treatment infrastructure, evaluating its operational performance and technological alignment with contemporary international benchmarks. Given the escalating pressures of water scarcity and rapid urbanization, assessing these facilities—specifically the South Tehran, West Tehran, and Firoozbahrām plants—against global standards is vital for sustainable urban resource management. The methodology employed a systematic descriptive-analytical approach, synthesizing technical data, regulatory frameworks, and literature to compare local operations with the US EPA, WHO, EN 12255, and the updated European Union Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD 2024/2025). The evaluation focused on four core pillars: treatment capacity, process configuration, water reuse practices, and energy recovery potential, with particular attention to the anaerobic digestion and biogas generation systems utilized at the South Tehran facility. Results indicate that while Tehran's WWTPs have achieved significant milestones—such as expanding infrastructure capacity, increasing industrial water reuse, and integrating basic renewable energy technologies—the sector faces critical systemic challenges. Specifically, the current infrastructure exhibits incomplete nutrient removal and the emergence of micro-pollutants, underutilization of design capacities, and partial compliance with the stringent energy-neutrality targets mandated by updated global frameworks. Although Tehran's wastewater treatment plants have made substantial progress, achieving full alignment with global standards requires a strategic transition. This study identifies the need for immediate technological upgrades, including implementing Advanced Process Control (APC) systems, integrating quaternary (fourth-stage) treatment technologies to address micro-pollutants, and committing to energy-neutral operational pathways. Enhanced regulatory oversight, rigorous monitoring programs, and the expansion of sludge-to-energy configurations are recommended to optimize treatment efficiency and ensure long-term environmental sustainability amid climate-induced water challenges.

Cite this article: Karimi, S., & AliBakhshi, N. (2026). A Comparative Assessment of Tehran's Wastewater Treatment Plants from the Perspective of International Standards. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 98-118. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252596>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252596>

Introduction

The urban water metabolism of Tehran, as a burgeoning metropolis, is currently confronting profound and multifaceted challenges. These challenges stem from a confluence of factors, including rapid population growth—which has placed unprecedented demand on finite water resources—climate-induced hydrological variability characterized by prolonged droughts and erratic precipitation patterns, and the pressing imperative of environmental preservation amid mounting pollution pressures. In the broader context of the Middle East, a region where water scarcity represents an existential threat to socioeconomic stability and public health, the role of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) has undergone a significant transformation. No longer viewed merely as basic sanitation facilities, these plants are now recognized as fundamental pillars of water security and as critical enablers of the circular economy, offering opportunities for water reuse, nutrient recovery, and energy generation. Annually, Tehran generates a massive volume of municipal wastewater, estimated at over 1.2 million cubic meters per day. A significant portion of this volume remains either untreated or only partially treated, posing potential risks to the quality of regional aquifers—which serve as strategic reserves for the city—and threatening the agricultural integrity of the Varamin plains, a vital food-supply zone for the capital. Although domestic regulations have been established to govern effluent quality, these standards often lag behind evolving international benchmarks. The escalating global shift toward more stringent and comprehensive frameworks, such as the European Union's recast Urban Waste Water Treatment Directive (Directive (EU) 2024/3019), demands a thorough re-evaluation of Tehran's existing infrastructure. This new directive places greater emphasis on nutrient removal—particularly nitrogen and phosphorus—to combat eutrophication, promotes energy neutrality or even positive energy balance in treatment processes, and addresses the growing concern over emerging micropollutants, including pharmaceuticals and microplastics, which conventional treatment systems are ill-equipped to handle. The central research problem addressed in this study is to determine the extent to which Tehran's major treatment facilities—specifically South Tehran and West Tehran (Firoozbahrām)—are aligned with contemporary global best practices. This investigation is not merely an academic exercise; it constitutes a strategic requirement for enhancing the resilience of Tehran's water resources, informing evidence-based policy decisions, and guiding future investments in infrastructure upgrades that are both economically viable and environmentally sustainable.

Method

This research adopted a descriptive-analytical approach, utilizing a systematic review of international technical standards and a comparative synthesis of national operational data. The methodology was structured into three analytical stages. First, a comprehensive literature review was conducted to extract the core requirements of global benchmarks, including the US EPA's NPDES program, the World Health Organization (WHO) guidelines for safe wastewater reuse, and the EN 12255 European standards for WWTP performance. Second, quantitative and qualitative data regarding the technological configuration of Tehran's primary plants—specifically their biological reactor designs, sludge handling units, and energy management systems—were collected from official government disclosures and existing life cycle assessment (LCA) studies. Finally, a gap analysis was performed to compare local operational outputs with international benchmarks, identifying specific bottlenecks in nutrient attenuation and energy recovery. This methodology ensures that the findings are grounded in empirical operational realities while remaining sensitive to global environmental trends.

Results

The findings reveal a nuanced landscape of infrastructure maturity in Tehran. The South Tehran WWTP, which acts as the city's primary facility, serves over four million population

equivalents and utilizes a combination of conventional activated sludge and anaerobic digestion. The performance data indicates that the facility effectively mitigates conventional pollutants such as BOD₅, COD, and TSS, consistently meeting national discharge requirements. Furthermore, the integration of a Combined Heat and Power (CHP) unit at this site demonstrates a localized effort to recover energy from sewage sludge, contributing to the site's energy demand. In contrast, the West Tehran and Firoozbahrām facilities utilize advanced A₂O (Anaerobic-Anoxic-Oxic) biological nutrient removal configurations. These plants represent a technological leap, demonstrating higher efficiency in biological phosphorus and nitrogen removal compared to older conventional units. However, when scrutinized against the updated international frameworks, several systematic weaknesses become apparent. The most critical gap is the lack of a quaternary treatment stage. While current systems remove organic matter and suspended solids, they are largely ineffective against micropollutants, such as endocrine-disrupting chemicals, synthetic pharmaceutical residues, and microplastics. Furthermore, while the South Tehran plant attempts energy recovery, true "energy neutrality"—where the facility generates as much renewable energy as it consumes—remains largely unattainable with current configurations. The carbon footprint associated with intensive aeration processes remains a significant environmental burden, as identified through recent LCA studies. The discrepancies between Tehran's current performance and the emerging global standards highlight the need for a shift in operational paradigm. The current reliance on secondary treatment is no longer sufficient to ensure long-term environmental sustainability in sensitive catchments. The transition to a circular economy in the water sector requires moving beyond "treatment and discharge" toward "resource recovery and reuse." From a policy perspective, the transition to energy-neutral operations should be prioritized. This requires not only technological upgrades, such as the adoption of solar energy arrays on site or advanced anaerobic digestion optimization, but also the implementation of real-time monitoring through Advanced Process Control (APC) loops. By utilizing digital twin technologies or smart sensors to optimize aeration rates, energy consumption can be reduced by 15-20% without compromising water quality. Moreover, the integration of "extended producer responsibility" (EPR) mechanisms—where the chemical and pharmaceutical industries contribute to the funding of quaternary treatment—represents a viable pathway for financing the necessary facility upgrades.

Conclusions

Tehran's wastewater infrastructure has made significant progress in recent decades; however, it stands at a critical technological crossroads. Achieving alignment with global benchmarks such as the recast EU directive is not only a regulatory necessity but an environmental imperative to protect public health and ensure water security. To bridge the current gaps, this study recommends a three-phased roadmap. Gradual deployment of quaternary treatment technologies, such as ozonation and granular activated carbon filtration, to address micropollutants. Expansion of the anaerobic digestion and biogas infrastructure to all major facilities, coupled with the adoption of smart grid technologies to balance on-site energy demand. Implementing more rigorous, independent monitoring programs to ensure consistent compliance with international microbiological and chemical parameters. By adopting these strategic transitions, Tehran can leverage its existing infrastructure to create a climate-resilient, circular water management system that serves as a model for other rapidly growing cities in the region.



ارزیابی تطبیقی تصفیه خانه های فاضلاب شهر تهران با استانداردهای بین المللی

سعید کریمی^{a*}، نسترن علی بخشی^a

^a گروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: karimis@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	این پژوهش به تحلیل جامع و ارزیابی تطبیقی زیرساخت های تصفیه فاضلاب کلان شهر تهران با تکیه بر استانداردهای پیشرو بین المللی می پردازد. با توجه به تشدید بحران کم آبی، رشد شتابان جمعیت و فشارهای ناشی از تغییرات اقلیمی، بازنگری در عملکرد تصفیه خانه های پایتخت (شامل تصفیه خانه های جنوب، غرب و فیروزبهرام) در انطباق با معیارهای جهانی به یک ضرورت حیاتی تبدیل شده است. در این مطالعه، از روش توصیفی-تحلیلی با رویکرد مرور نظام مند اسناد فنی استفاده شده است تا وضعیت کنونی زیرساخت ها با چارچوب های معتبر جهانی از جمله دستورالعمل اتحادیه اروپا برای تصفیه فاضلاب شهری (UWWTD ۲۰۲۴/۲۰۲۵)، استانداردهای EN ۱۲۲۵۵ و راهنماهای فنی EPA و WHO مورد سنجش قرار گیرد. ارزیابی انجام شده بر چهار محور کلیدی شامل ظرفیت عملیاتی، پیکربندی فناوری های تصفیه، الگوهای بازچرخانی پساب و پتانسیل بازیابی انرژی متمرکز بوده و به ویژه فرایندهای هضم بی هوازی و تولید بیوگاز در تصفیه خانه جنوب تهران را به دقت تحلیل کرده است. یافته های تحقیق نشان می دهد که اگرچه تصفیه خانه های تهران در سال های اخیر گام های موثری در مسیر توسعه ظرفیت های فیزیکی، گسترش بازچرخانی پساب برای مصارف صنعتی و استفاده از فناوری های انرژی تجدیدپذیر برداشته اند، اما همچنان با چالش های ساختاری جدی مواجه هستند. حذف ناقص مواد مغذی (نیتروژن و فسفر)، عدم پیاده سازی زیرساخت های لازم برای پایش و حذف میکروآلاینده های نوظهور و دارویی، و همچنین عدم تحقق کامل اهداف انرژی خنثی، از جمله خلأ های اصلی در هم تراز با استانداردهای سخت گیرانه جهانی است. در نهایت، این مقاله ضمن تبیین فاصله میان وضعیت موجود و استانداردهای پیشرفته بین المللی، نقشه راهی راهبردی ارائه می دهد. این راهکارها شامل ارتقای تکنولوژیک از طریق سیستم های کنترل هوشمند فرایند، استقرار واحدهای تصفیه تکمیلی (مرحله چهارم) برای حذف آلاینده های نوظهور و تدوین سیاست های اجرایی جهت گذار به سمت تصفیه خانه های انرژی خنثی است. اجرای این پیشنهادات، افزون بر بهبود کیفیت پساب خروجی، نقشی کلیدی در حفظ پایداری منابع آب و ارتقای بهداشت عمومی در مواجهه با چالش های اقلیمی ایفا خواهد نمود.

استناد به این مقاله: کریمی، سعید و علی بخشی، نسترن. (۱۴۰۴). ارزیابی تطبیقی تصفیه خانه های فاضلاب شهر تهران با استانداردهای بین المللی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱(۱)، ۹۸-۱۱۵. <https://doi.org/10.22034/jesem.2026.252596>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jesem.2026.252596>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

تهران، پایتخت ایران و یکی از پرجمعیت‌ترین کلان‌شهرهای خاورمیانه، با بحران‌های قابل‌توجهی در حوزه مدیریت منابع آب و فاضلاب مواجه است. رشد سریع جمعیت، گسترش شهرنشینی، فشارهای اقلیمی و کاهش بارش‌ها همگی باعث شده که توجه ویژه‌ای به تصفیه و بازچرخانی فاضلاب شهری معطوف شود (Akbarzadeh et al., 2023). طبق گزارش‌های اخیر، ایران سالانه حدود ۴/۶۱ میلیارد متر مکعب فاضلاب شهری تولید می‌کند، اما تنها ۴۲ درصد از آن تصفیه می‌شود. بیش از ۶۰ درصد از این تصفیه‌ها از طریق روش‌های معمولی مانند لجن‌هوایی انجام می‌شوند، و حدود ۵۵ درصد از فاضلاب تصفیه‌شده در کشور مجدداً استفاده می‌شود، به‌ویژه در کشاورزی (Akbarzadeh et al., 2023). برای تهران، تصفیه‌خانه جنوب با ظرفیت متوسط روزانه ۴۵۰,۰۰۰ متر مکعب و خدمات‌دهی به حدود ۲/۱ میلیون نفر، یکی از پیشروترین تأسیسات است. این تصفیه‌خانه دارای ساختارهایی مانند هضم بی‌هوازی، بازیافت بیوگاز، و استفاده از پساب برای آبیاری است. ارزیابی زیست‌محیطی این تأسیسات با استفاده از Life Cycle Assessment^۱ نشان داده که استفاده از پساب برای آبیاری کشاورزی به‌مراتب در مقایسه با تخلیه در محیط طبیعی، پایداری محیطی بالاتری دارد؛ البته خطرات ناشی از فلزات سنگین و اثرات سرطان‌زا نیز نباید نادیده گرفته شود (Samsami et al., 2025).

در سطح بین‌المللی، استانداردهایی مانند دستورالعمل جدید تصفیه فاضلاب شهری اتحادیه اروپا^۲ بازنگری شده (نسخه ۲۰۲۴/۲۰۲۵)، شامل اهداف سخت‌گیرانه‌ای است: کاهش مجدد نیتروژن و فسفر تا سطح سخت‌تر، حذف میکروآلودگی‌ها (با نصب فناوری چهارم- quaternary treatment) و الزام به انرژی خنثی^۳ برای تصفیه‌خانه‌های با ظرفیت بیش از ۱۰۰۰۰ نفر در سال‌های بین ۲۰۳۹ تا ۲۰۴۵. این استانداردها همچنین ساز و کار «آلاینده‌ها پول می‌پردازند»^۴ را برای صنایع دارویی و آرایشی در تأمین بخشی از هزینه‌های تصفیه معرفی کرده‌اند (Gaspar & Telles, 2025).

در ایران، با وجود این پیشرفت‌ها، همچنان فاصله بارزی با این معیارها مشاهده می‌شود:

- پوشش تصفیه در کشور هنوز تکمیل نیست و برخی تصفیه‌خانه‌ها به‌طور ناکامل عمل می‌کنند.
- حذف مواد مغذی و میکروآلودگی‌ها در اغلب موارد اتفاق نمی‌افتد.
- هدف انرژی خنثی هنوز در بسیاری از پروژه‌ها عملیاتی نشده (Akbarzadeh et al., 2023).

در زمینه ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و چرخه حیات زیرساخت‌های تصفیه در تهران، تابش و همکاران (Tabesh et al., 2019) در مطالعه خود نشان دادند که تصفیه‌خانه‌های فاضلاب کلان‌شهر تهران نقش بسزایی در کاهش بار آلودگی‌های محیطی دارند، اما از نظر مصرف انرژی و انتشار غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای نیازمند بهینه‌سازی هستند. در ادامه‌ی این مطالعات، صمصامی و همکاران (Samsami et al., 2025) با تمرکز بر تصفیه‌خانه جنوب تهران و با استفاده از متدولوژی LCA، سناریوهای مختلف بازچرخانی پساب را مدل‌سازی کردند. یافته‌های آن‌ها تایید کرد که بازچرخانی پساب برای مصارف کشاورزی پایداری محیط‌زیستی به‌مراتب بالاتری نسبت به تخلیه آن به آب‌های سطحی دارد؛ هرچند آن‌ها بر ضرورت پایش دقیق فلزات سنگین و ریسک‌های سرطان‌زایی بالقوه تأکید نمودند. همچنین شاه‌منصوری و اسلامی (Shahmansouri & Eslami., 2020) در مطالعه دیگری به مقایسه تطبیقی

^۱ LCA

^۲ Urban Waste Water Treatment Directive - UWWTD

^۳ energy neutrality

^۴ polluter pays principle

استانداردهای بازچرخانی آب در ایران با کشورهای توسعه‌یافته پرداخته و خلاءهای قانونی موجود در ساختار مقرراتی کشور را برجسته کردند.

در بخش مدیریت لجن و پتانسیل‌های بازیابی انرژی که یکی از محورهای اصلی اقتصاد چرخشی است، رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2024) تأثیرات زیست‌محیطی سیستم‌های تصفیه فاضلاب را بر پایه هضم بی‌هوازی لجن در تصفیه‌خانه جنوب تهران ارزیابی کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که سیستم‌های هضم بی‌هوازی و بازیابی بیوگاز تا چه حد می‌توانند بار کربنی تصفیه‌خانه‌ها را کاهش داده و آن‌ها را به سمت خودکفایی انرژی هدایت کنند. علاوه بر این، برزویی و همکاران (Borzooei et al., 2019) ترکیبات میکروبی و میزان فلزات سنگین لجن تصفیه‌شده در این مرکز را سنجیدند تا پتانسیل و ایمنی استفاده از آن را به عنوان کود زیستی در بخش کشاورزی ارزیابی کنند.

از منظر ارتقای تکنولوژیک، مدل‌سازی فرایندها و هوشمندسازی، ژانگ و همکاران (Sadri Moghaddam & Mesghali, 2023) با توسعه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده هوش مصنوعی (مانند شبکه‌های عصبی و ANFIS) توانستند کیفیت پساب خروجی (شامل شاخص‌های BOD، COD و TSS) را در سیستم‌های لجن فعال تصفیه‌خانه جنوب تهران با دقت بالایی شبیه‌سازی کنند. در حوزه حذف مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) که از چالش‌های اصلی تصفیه‌خانه‌های داخلی است، زنگ و همکاران (Zeng et al., 2018) عملکرد فرایندهای پیشرفته نظیر روش A_2O را مدل‌سازی کرده و راهکارهای ارتقای راندمان بیولوژیکی این سیستم‌ها را تبیین نمودند.

با وجود این تلاش‌های ارزشمند، ما متوجه شدیم که بیشتر پژوهش‌های گذشته یا به صورت تک‌مورد روی یک تصفیه‌خانه خاص تمرکز داشته‌اند و یا ابعاد عملیاتی را به صورت مجزا (صرفاً انرژی یا صرفاً کیفیت پساب) بررسی کرده‌اند. در واقع، تاکنون یک ارزیابی جامع، همزمان و تطبیقی که سه تصفیه‌خانه استراتژیک کلان‌شهر تهران (جنوب، غرب و فیروزبهرام) را در کنار یکدیگر و در مواجهه با آخرین بازنگری‌های استانداردهای بین‌المللی (به‌ویژه دستورالعمل سخت‌گیرانه ۲۰۲۵/۲۰۲۴ اتحادیه اروپا) قرار دهد، انجام نشده است؛ خلأ بزرگی که ما در این پژوهش به دنبال پوشش دادن آن هستیم.

آیا تصفیه‌خانه‌های تهران، به‌ویژه شعب مانند جنوب تهران، از نظر کیفیت پساب، کارایی حذف آلاینده‌ها، مدیریت لجن، انرژی‌خشی بودن و بازچرخانی با بل‌ترین استانداردهای روز دنیا تطابق دارند یا خیر؟

نقاط قوت و خلأهای موجود نسبت به معیارهای به‌روز اروپا چیست؟

چه راهکارهایی (فنی، مدیریتی، و سیاستی) برای عبور از وضعیت فعلی و دستیابی به استانداردهای جهانی ظرفیت‌سازی لازم دارد؟

پاسخ این پرسش‌ها می‌تواند در بهبود سیاست‌گذاری، ارتقاء تکنولوژی‌ها و تصمیم‌سازی در حوزه آب و فاضلاب ایران نقش مؤثری ایفا کند به‌ویژه در شرایطی که پایداری منابع آبی و بهداشت عمومی اهمیت بیشتری یافته‌است.

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش از رویکردی توصیفی-تحلیلی و بهره‌گیری از مرور نظام‌مند اسناد فنی بین‌المللی و سنتز تطبیقی داده‌های عملیاتی ملی، برای ارزیابی تصفیه‌خانه‌های تهران پرداخته شده است. ساختار روش‌شناسی این مطالعه را در سه مرحله تحلیلی زیر تدوین کردیم:

گام نخست (مرور منابع و استخراج استانداردهای جهانی): در این مرحله، پیشینه تحقیق را به‌طور جامع بررسی کردیم تا الزامات اساسی و معیارهای جهانی را استخراج کنیم. این معیارها شامل برنامه NPDES آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (NPDES, 2021)، دستورالعمل‌های سازمان بهداشت جهانی برای استفاده مجدد ایمن از

فاضلاب (WHO, 2019)، استانداردهای اروپایی EN ۱۲۲۵۵ برای عملکرد تصفیه‌خانه‌ها و نسخه بازنگری شده دستورالعمل تصفیه فاضلاب شهری اتحادیه اروپا (European Union, 2024) می‌شوند.

گام دوم (گردآوری داده‌های محلی): ما داده‌های کمی و کیفی مرتبط با پیکربندی تکنولوژیک تصفیه‌خانه‌های اصلی تهران (به‌ویژه طراحی راکتورهای بیولوژیکی، واحدهای مدیریت لجن و سیستم‌های مدیریت انرژی در تصفیه‌خانه‌های جنوب، غرب و فیروزبهرام) را گردآوری کردیم. این داده‌ها را از طریق گزارش‌های رسمی دولتی و مطالعات ارزیابی چرخه حیات^۱ موجود استخراج نمودیم (Rahmati et al., 2024; Samsami et al., 2025; Tabesh et al., 2019).

گام سوم (تحلیل شکاف): در نهایت، یک تحلیل شکاف برای مقایسه خروجی‌های عملیاتی محلی با معیارهای بین‌المللی انجام دادیم تا گلوگاه‌های خاص را در زمینه کاهش مواد مغذی و بازیابی انرژی به دقت شناسایی کنیم (Akbarzadeh et al., 2023).

یافته‌ها و بحث

استانداردهای جهانی تصفیه فاضلاب شهری

استانداردهای جهانی تصفیه فاضلاب شهری طی دو دهه اخیر تغییرات چشمگیری داشته‌اند، زیرا نگرانی‌های زیست‌محیطی و بهداشتی دیگر محدود به آلودگی‌های سنتی مانند مواد آلی یا معلق نیست، بلکه شامل میکروآلودگی‌ها، تغییرات اقلیمی، و بهره‌وری انرژی نیز می‌شود.

اتحادیه اروپا (UE) نسخه بازنگری شده ۲۰۲۴-۲۰۲۵

اتحادیه اروپا در سال ۱۹۹۱ با تصویب Urban Waste Water Treatment Directive – UWWTD اولین چارچوب جامع قانونی برای جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب را ایجاد کرد. این مقررات بیش از ۳۰ سال بدون تغییر اساسی باقی ماندند تا اینکه در دسامبر ۲۰۲۴، با هدف انطباق با اهداف سبز اتحادیه اروپا^۲ و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، بازنگری گسترده‌ای صورت گرفت (European Union, 2024).

اصلاحات کلیدی این بازنگری عبارتند از:

گسترش پوشش تصفیه

در نسخه قدیمی، تنها شهرهای بالای ۲۰۰۰ نفر موظف به داشتن سیستم جمع‌آوری و تصفیه بودند. اکنون این حد به ۱۰۰۰ نفر معادل جمعیت کاهش یافته است.

تمام شهرهای بالای ۱۰۰'۰۰۰ نفر باید مجهز به سیستم‌های پایش پیوسته کیفیت پساب باشند (European Union, 2024).

مرحله چهارم تصفیه^۳

الزام حذف حداقل ۸۰ درصد از میکروآلودگی‌ها به‌ویژه داروها و محصولات آرایشی.

فناوری‌های مرسوم برای این مرحله شامل اکسیداسیون پیشرفته^۴، غشاهای نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس، و جذب بر پایه کربن فعال است.

^۱ LCA

^۲ EU Green Deal

^۳ Quaternary Treatment

^۴ AOPs

مسئولیت مالی صنایع

صنایع دارویی و آرایشی باید دست‌کم ۸۰٪ هزینه حذف میکروآلودگی‌ها را پرداخت کنند. این مدل باعث کاهش فشار مالی بر شهرداری‌ها و مصرف‌کنندگان می‌شود (European Union, 2024).

انرژی خنثی^۱:

تصفیه‌خانه‌هایی با ظرفیت بیش از ۱۰'۰۰۰ p.e. باید تا سال ۲۰۴۵ به سطح انرژی خنثی برسند. این هدف با استفاده از بیوگاز تولیدی در هاضم‌های بی‌هوازی، نصب پنل‌های خورشیدی، و بهینه‌سازی فرایندها قابل دستیابی است (European Union, 2024).

پایش سلامت عمومی

پایش روتین پساب برای ویروس‌ها مانند SARS-CoV-2 و سایر عوامل بیماری‌زا، به‌عنوان ابزار هشدار زودهنگام بیماری‌های اپیدمیک (European Union, 2024).

ایالات متحده (US EPA) مقررات و استانداردها

در ایالات متحده، Environmental Protection Agency – EPA مسئول تدوین و اجرای مقررات تصفیه فاضلاب شهری است. این مقررات عمدتاً بر اساس Clean Water Act بنا شده‌اند و شامل استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای برای BOD، TSS، نیتروژن، فسفر و فلزات سنگین هستند (EPA, 2021).

کیفیت پساب نوع^۲ $BOD_5 \leq 30 \text{ mg/L}$ $TSS \leq 30 \text{ mg/L}$:

پساب پیشرفته^۳ $BOD_5 \leq 10 \text{ mg/L}$ ، حذف نیتروژن کل $(TN \leq 10 \text{ mg/L})$ ، فسفر کل $(TP \leq 1 \text{ mg/L})$. استانداردهای بازچرخانی (Title 22 – California): استفاده مجدد شهری و کشاورزی تنها در صورتی مجاز است که پساب از فیلتراسیون و ضدعفونی پیشرفته عبور کرده‌باشد (Board, California State Water, 2019).

سازمان بهداشت جهانی (WHO)

سازمان بهداشت جهانی در دستورالعمل استفاده مجدد از فاضلاب در کشاورزی (۲۰۱۹) بر دو اصل کلیدی تأکید دارد.

۱- مدیریت خطر^۴: بر اساس چارچوب Water Safety Plans.

۲- محدودیت میکروبی: $E. coli \leq 1,000 \text{ CFU/100 mL}$ برای آبیاری محصولات خوراکی خام (WHO, 2019).

نمونه‌های موفق جهانی

سنگاپور-پروژه NEWater: با استفاده از فیلتراسیون غشایی سه‌مرحله‌ای و ضدعفونی UV، ۴۰ درصد نیاز آب کشور را از بازچرخانی فاضلاب تأمین می‌کند (PUB Singapore, 2020).

آلمان-برلین: استفاده از مرحله چهارم تصفیه (Ozonation + GAC) برای حذف داروها و هورمون‌ها از سال ۲۰۱۹ (Jekel et al, 2019).

کالیفرنیا-پروژه Pure Water San Diego: هدف تأمین ۵۰ درصد آب آشامیدنی شهر از طریق بازچرخانی تا ۲۰۳۵ (City of San Diego, 2021).

¹ Energy Neutrality

² Secondary Treatment

³ Advanced Treatment

⁴ Risk Management

جدول ۱. مقایسه استانداردهای جهانی (EPA, 2021; DOE Iran, 2018; European Union, 2024)

Table 1. Comparison of global standards (EPA, 2021; DOE Iran, 2018; European Union, 2024)

WHO (2019)	آمریکا (EPA (2020+)	اتحادیه اروپا (۲۰۲۴)	استاندارد	شاخص
-	≤ 30	≤ 25	BOD5 (mg/L)	خروجی
-	≤ 30	≤ 35	TSS (mg/L)	خروجی
-	≤ 10	$\leq 10-15$	(mg/L)	نیتروژن کل
-	≤ 1	$\leq 1-2$	(mg/L)	فسفر کل
مدیریت خطر	-	حذف درصد 80		میکروآلودگی‌ها
-	-	تا ۲۰۴۵		هدف انرژی خنثی
توصیه شده	غیراجباری	اجباری		پایش سلامت عمومی

استانداردهای ملی ایران در تصفیه فاضلاب شهری

در ایران، استانداردهای مربوط به کیفیت پساب تصفیه‌شده تحت نظارت سازمان حفاظت محیط‌زیست و سازمان ملی استاندارد ایران^۱ قرار دارند. استاندارد ملی شماره ۱۰۵۳، با عنوان «ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب آشامیدنی»، به‌طور غیرمستقیم به کیفیت پساب تصفیه‌شده نیز اشاره دارد. این استاندارد به‌ویژه در زمینه پارامترهای میکروبی و شیمیایی آب‌های سطحی و زیرزمینی کاربرد دارد (DOE Iran, 2018).

استانداردهای کیفیت پساب در ایران

استانداردهای کیفیت پساب در ایران به‌طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- استانداردهای مربوط به تخلیه پساب به محیط زیست: این استانداردها برای جلوگیری از آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی تدوین شده‌اند و شامل پارامترهایی مانند BOD5، COD، TSS، نیتروژن کل، فسفر کل، فلزات سنگین و پارامترهای میکروبی هستند (DOE Iran, 2018).

۲- استانداردهای مربوط به استفاده مجدد از پساب: این استانداردها برای اطمینان از ایمنی استفاده مجدد از پساب در بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شهری تدوین شده‌اند. این استانداردها معمولاً شامل پارامترهای مشابه استانداردهای تخلیه پساب به محیط‌زیست هستند، اما با حداقل مقادیر سخت‌گیرانه‌تری برای اطمینان از سلامت انسان و محیط‌زیست (Shahmansouri & Eslami, 2020).

جدول ۲. استانداردهای ایران (DOE Iran, 2018; Shahmansouri & Eslami, 2020)

Table 1. Standards of Iran

پارامتر	حد مجاز (برای تخلیه به منابع آب)
BOD5 (mg/L)	≤ 30
COD (mg/L)	≤ 60
TSS (mg/L)	≤ 40
pH	6-8.5
دما (درجه)	≤ 40
نیتروژن کل (mg/L)	≤ 30
فسفر کل (mg/L)	≤ 6
روغن و چربی (mg/L)	≤ 10
کلیفرم مدفوعی (CFU/100ml)	≤ 400

^۱ ISIRI

مقایسه با استانداردهای جهانی

مقایسه‌ای بین استانداردهای ملی ایران و استانداردهای جهانی (اتحادیه اروپا، ایالات متحده و سازمان بهداشت جهانی) نشان می‌دهد که در برخی موارد، استانداردهای ایران مشابه یا حتی سخت‌گیرانه‌تر از استانداردهای جهانی هستند. با این حال، در زمینه‌هایی مانند استفاده مجدد از پساب در کشاورزی و صنعت، استانداردهای ایران نیاز به بازنگری و به‌روزرسانی دارند تا با استانداردهای بین‌المللی هماهنگ شوند.

جدول ۳. مقایسه استانداردهای ایران با جهان (DOE Iran, 2018; EPA, 2021; European Union, 2024)

Table 3. Comparison of Iranian standards with the world (DOE Iran, 2018; EPA, 2021; European Union, 2024)

ایالات متحده	اتحادیه اروپا	استاندارد ایران	پارامتر
≤ 30	≤ 25	≤ 30	BOD5 (mg/L)
≤ 125	≤ 125	≤ 125	COD (mg/L)
≤ 30	≤ 35	≤ 30	TSS (mg/L)
≤ 10	≤ 10	≤ 10	نیتروژن کل (mg/L)
≤ 1	≤ 1	≤ 1	فسفر کل (mg/L)
مطابق استانداردهای جهانی	مطابق استانداردهای جهانی	مطابق استانداردهای ملی	پارامترهای میکروبی
محدودیت‌های مشخص	محدودیت‌های مشخص	محدودیت‌های مشخص	فلزات سنگین

پارامترهای میکروبی در استانداردهای ایران

در ایران، استانداردهای میکروبی پساب، توسط سازمان حفاظت از محیط زیست و سازمان ملی استاندارد ایران تعیین شده است تا از سلامت انسان و محیط زیست حفاظت کنند. مهم‌ترین پارامترها عبارت است از:

جدول ۴. مقایسه پارامترهای میکروبی در ایران و جهان (European Union, 2024; WHO, 2019 DOE Iran, 2018)

Table 4. Comparison of microbial parameters in Iran and the world (DOE Iran, 2018 WHO, 2019; European Union, 2024)

استاندارد بین‌المللی	حد مجاز پساب در استفاده مجدد کشاورزی	حد مجاز در پساب قابل تخلیه	پارامتر میکروبی
WHO: ≤ 1000 EU: ≤ 100	≤ 1000	≤ 100	E. coli (CFU/100mL)
مشابه WHO و EU	≤ 5000	≤ 500	کل باکتری‌های کولونی (Total Coliforms) (CFU/100mL)
مشابه EU	≤ 400	≤ 100	Enterococci (CFU/100mL)
غیرقابل شناسایی	غیرقابل شناسایی	غیرقابل شناسایی	Salmonella spp.

این مقادیر تضمین می‌کنند که پساب تصفیه شده، چه برای تخلیه در محیط و چه برای استفاده مجدد در کشاورزی، خطر بیماری‌های میکروبی را کاهش می‌دهد.

فلزات سنگین در استانداردهای ایران

در مورد فلزات سنگین، منظور از "محدودیت مشخص" این است که برای هر فلز مثل سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، جیوه (Hg) و نیکل (Ni)، حد مجازی مشخص شده که پساب نباید از آن عبور کند. این مقادیر برای حفظ سلامت انسان، آب‌زیان و محیط زیست تعیین شده‌اند (DOE Iran, 2018).

جدول ۵. مقایسه استانداردهای فلزات سنگین در ایران و جهان (DOE Iran, 2018; WHO, 2019; European Union, 2024)
Table 5. Comparison of heavy metal standards in Iran and the world (DOE Iran, 2018; WHO, 2019; European Union, 2024)

فلز سنگین	حد مجاز در پساب تخلیه (mg/L)	حد مجاز در پساب کشاورزی (mg/L)	مقایسه با استانداردهای جهانی
سرب (Pb)	≤ 0.1	≤ 0.05	EU: ≤ 0.1 WHO: ≤ 0.01
کادمیوم (Cd)	≤ 0.01	≤ 0.005	EU: ≤ 0.01 WHO: ≤ 0.003
کروم (Cr)	≤ 0.5	≤ 0.1	EU: ≤ 0.5
جیوه (Hg)	≤ 0.001	≤ 0.0001	UE: ≤ 0.001
نیکل (Ni)	≤ 0.2	≤ 0.1	UE: ≤ 0.2

تحلیل مقایسه‌ای استانداردهای ایران با استانداردهای جهانی

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی پساب شامل مواد آلی، ذرات معلق و ترکیبات مغذی است که کیفیت آن‌ها تعیین‌کننده تأثیر تصفیه‌خانه‌ها بر محیط زیست و منابع آب می‌باشد.

استانداردهای ایران در این بخش تقریباً با استانداردهای بین‌المللی مطابقت دارند و در برخی شاخص‌ها حتی سخت‌گیرانه‌تر از برخی کشورها هستند. این استانداردها تضمین می‌کنند که پساب تصفیه‌شده توانایی حذف مواد آلی و ذرات معلق را دارد و از آلودگی منابع آب جلوگیری می‌کند (Akbarzadeh et al., 2023).

در مقایسه با استانداردهای اتحادیه اروپا و ایالات متحده، ایران در مجموع وضعیت مطلوبی دارد و نشان می‌دهد که مقررات ملی برای حفاظت از محیط زیست و منابع آب کافی و هم‌سطح با استانداردهای جهانی است (Akbarzadeh et al., 2023; Faraji et al., 2023). با این حال، همواره امکان بهبود و به‌روزرسانی این استانداردها با توجه به فناوری‌های نوین تصفیه و تغییرات اقلیمی وجود دارد تا سطح کیفیت پساب ارتقا یابد و با نمونه‌های پیشرفته جهانی هماهنگ شود.

پارامترهای میکروبی

استانداردهای میکروبی پساب شامل باکتری‌های شاخص، کلنی‌های باکتریایی و باکتری‌های بیماری‌زا است و هدف از آن‌ها حفظ سلامت انسان و محیط زیست است.

ایران برای تخلیه پساب به محیط زیست استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای تعیین کرده که با استانداردهای اتحادیه اروپا هم‌خوانی دارد و در بخش میکروبی، وضعیت مطلوبی دارد. در استفاده مجدد از پساب برای کشاورزی و صنعت، ایران استانداردهای مشخصی دارد که هنوز با توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی کاملاً هماهنگ نشده‌اند و نیاز به بازنگری دارد (WHO, 2019).

به طور کلی، ایران در کنترل پارامترهای میکروبی پساب برای حفظ سلامت محیط زیست و کاهش ریسک بیماری‌ها عملکرد مناسبی دارد، اما در برخی شاخص‌ها می‌توان سطح محدودیت‌ها را افزایش داد تا با استانداردهای بین‌المللی استفاده مجدد از آب هماهنگ‌تر شود.

فلزات سنگین

فلزات سنگین مانند سرب، کادمیوم، کروم، جیوه و نیکل، از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های پساب هستند که می‌توانند سلامت انسان و اکوسیستم را تهدید کنند.

استانداردهای ایران برای این فلزات مشخص است و در بیشتر موارد مشابه استانداردهای اتحادیه اروپا است. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که پساب تصفیه‌شده باعث آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی نشود و مصرف آن برای کشاورزی و صنعت تا حد امکان ایمن باشد (Akbarzadeh et al., 2023; Faraji et al., 2023). در برخی فلزات خاص، استانداردهای ایران برای استفاده مجدد در کشاورزی نیازمند بهبود و سخت‌گیری بیشتر است تا کاملاً با توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی هماهنگ شود (WHO, 2019). به طور کلی، ایران در زمینه کنترل فلزات سنگین وضعیت قابل قبولی دارد و مقررات موجود نشان‌دهنده توجه جدی به حفاظت از محیط زیست و سلامت انسان است، اما با توجه به توسعه فناوری‌های نوین، به‌روزرسانی این محدودیت‌ها می‌تواند همگام با استانداردهای پیشرفته جهانی باشد.

معرفی‌های تصفیه‌خانه‌های تهران و بررسی عملکرد آنان

تصفیه‌خانه جنوب تهران

ظرفیت و عملکرد

این تصفیه‌خانه در منطقه جنوب تهران (شهرری) قرار دارد و طبق آخرین منابع، روزانه چیزی حدود ۴۵۰,۰۰۰ متر مکعب فاضلاب را برای جمعیتی حدود ۲/۱ میلیون نفر تصفیه می‌کند. فازهای هفتم و هشتم در حال توسعه هستند و ظرفیت رو تا پوشش حدود ۳/۳ تا ۴/۲ میلیون نفر افزایش می‌دهند.

فرایند تصفیه

سیستم فعال لجن^۱ به‌عنوان فناوری اصلی پایه استفاده شده، همراه با فیلتر قطره‌ای یا trickling filter برای نیتریفیکاسیون.

مراحل شامل مراحل مقدماتی^۲، ته‌نشینی اولیه، هوادهی بیولوژیکی، ته‌نشینی ثانویه، کلرزنی برای گندزدایی و سپس استفاده‌ی مجدد برای آبیاری کشاورزی است.

مدیریت لجن و انرژی‌زایی

لجن اولیه و اضافی از بیوراکتور به‌وسیله هضم بی‌هوازی پردازش می‌شوند؛ گاز بیوگاز تولیدشده برای تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد و برق تولید می‌کند. این سیستم با ترکیب هضم بی‌هوازی و فیلترهای قطره‌ای، بهره‌وری انرژی قابل توجهی دارد و تا حدودی انرژی خنثی^۳ محسوب می‌شود.

مصارف خروجی

پساب تصفیه‌شده در اراضی کشاورزی دشت ورامین مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ لجن خشک‌شده هم اغلب به‌عنوان کود استفاده می‌شود.

تصفیه‌خانه غرب تهران

ظرفیت و عملکرد

این تصفیه‌خانه با فناوری پیشرفته‌ای بنا شده و ظرفیت تصفیه روزانه آن حدود ۵۲۰,۰۰۰ مترمکعب است. توان خدمات‌دهی آن معادل پوشش جمعیتی بالغ بر ۲/۱ میلیون نفر تعیین شده است. طرح این پروژه توسط بانک توسعه اسلامی^۴ تأمین مالی شده و در قالب ۶ مازول ساختاری طراحی شده است.

^۱ activated sludge

^۲ screening, grit, grease removal

^۳ energy-neutral

^۴ IDB

فرایند تصفیه (A2O)

فرایند A2O شامل مراحل بی‌هوازی، بی‌هوازی محدود و هوادهی است. این طراحی اجازه حذف همزمان نیتروژن و فسفر را فراهم می‌کند و می‌تواند با راندمان بالایی این مواد مغذی را از پساب حذف نماید. کیفیت لجن و مصارف پساب

لجن تولیدی طبق استاندارد کلاس B از EPA آمریکا کنترل می‌شود (Class B). پساب تصفیه‌شده قابلیت استفاده در آبیاری مزارع یا تخلیه به منابع آب سطحی را دارد. فازهای هفتم و هشتم در حال توسعه هستند و ظرفیت را تا پوشش حدود ۳/۳ تا ۴/۲ میلیون نفر افزایش می‌دهند.

تصفیه‌خانه فیروزبهرام (اسلام‌شهر)

ظرفیت و موقعیت

این تأسیسات در جنوب غرب تهران (اسلام‌شهر) قرار دارد. ظرفیت روزانه آن حدود ۵۲۰,۰۰۰ مترمکعب و طراحی آن برای پوشش جمعیت بیش از ۲/۱ میلیون نفر است.

اجرای آن توسط بخش خصوصی و با مشارکت بین‌المللی انجام شده و هدف استفاده مجدد از پساب در بخش‌های صنعتی و کشاورزی است.

فرایند تصفیه و لجن

فرایند فعال لجن^۱ با تمرکز بر حذف نیتروژن و فسفر طراحی شده است. همچنین سیستم مدیریت لجن در آن پیشرفته بوده و شامل تجهیزات خاص برای بازیابی و تثبیت لجن است.

مصارف خروجی و تأثیرات

با راه‌اندازی این تصفیه‌خانه، سالانه بیش از ۱۹۲ میلیون مترمکعب آب بازیابی‌شده به ظرفیت آب تصفیه‌شده تهران افزوده می‌شود. این رقم حدود ۷۶٪ افزایش در ظرفیت بازچرخانی را نمایان می‌سازد.

مقایسه با تصفیه‌خانه جنوب تهران فرایندها

تصفیه‌خانه‌های جنوب تهران از سیستم Activated Sludge همراه با Trickling Filter و هضم بی‌هوازی بهره می‌برد؛ در حالی که غرب و فیروزبهرام روی تکنولوژی A2O تمرکز دارند (نیتروژن/فسفر حذف‌شده) که پیشرفته‌تر محسوب می‌شود.

مصرف انرژی و بازچرخانی

تصفیه‌خانه جنوب با استفاده از بیوگاز توانسته به سطح انرژی خنثی نزدیک شود و انرژی قابل توجهی تولید نماید. در غرب و اسلام‌شهر، فرایند حذف مغذی‌ها و استفاده مجدد پیشرفته‌تر است اما اطلاعات خاصی درباره تولید انرژی یا سیستم‌های انرژی خنثی آن‌ها در دست نیست.

بطور خلاصه می‌توانیم بگوییم که تصفیه‌خانه غرب تهران، تمرکز بر حذف کامل نیتروژن و فسفر با راندمان بالاتر برای استفاده مجدد در کشاورزی یا تخلیه محیطی تهران دارد. تصفیه‌خانه فیروز بهرام مشابه با غرب تهران، اما با جهت‌گیری کاربردی گسترده‌تر صنعتی و کشاورزی و افزایش چشمگیر ظرفیت تصفیه است. و در نهایت تصفیه‌خانه جنوب تهران با ترکیب تکنولوژی کلاسیک و انرژی خیز^۲، با قابلیت تولید انرژی و مصرف آن در داخل سیستم؛ ارائه مدل کامل از بهره‌وری چند منظوره است.

¹ Activated Sludge

² biogas

عملکرد واقعی تصفیه‌خانه‌های تهران

کیفیت پساب

تصفیه‌خانه جنوب تهران

مطالعات عملی بر روی مرحله‌های ۵ و ۶ تصفیه‌خانه جنوب تهران نشان می‌دهند که با بهینه‌سازی نسبت بازگشت لجن فعال (RAS) تا حدود ۹۰ درصد از دی‌ورودی و نسبت بازچرخانی داخلی (IR) تا ۲۰۰ درصد، راندمان حذف BOD، COD، TSS و نیتروژن کل تا ۷۵ درصد افزایش یافته‌است (Nazif et al., 2018). این بهینه‌سازی باعث شده کیفیت پساب خروجی قابل قبول و مطابقت کافی با استانداردهای محیط‌زیست ایران داشته‌باشد. همچنین با استفاده از مدل‌های هوشمند مانند شبکه عصبی و ANFIS میشه پیش‌بینی روزانه کیفیت پساب (BOD, COD, TSS) انجام داد و اطمینان حاصل کرد که پساب برای آبیاری کشاورزی مناسب است (Sadri Moghaddam & Mesghali, 2023). نکته‌ای دیگر اینکه بررسی کیفی لجن، ترکیبات میکروبی و فلزات سنگین در تصفیه‌خانه جنوبی نشان می‌دهد که لجن به‌عنوان کود قابل استفاده است و از نظر ایمنی در وضع مطلوبی است (Borzooei et al., 2019).

سایر تصفیه‌خانه‌های تهران (غرب و فیروزبهرام)

با اینکه اطلاعات دقیق کیفی برای غرب و فیروزبهرام کمتر منتشر شده است، اما مشخص است که: غرب تهران از فناوری پیشرفته A2O استفاده می‌کند که حذف نیتروژن و فسفر را هم‌زمان انجام می‌دهد و مطابق با استانداردهای بالای جهانی برای استفاده مجدد طراحی شده‌است (Zeng et al., 2018). فیروزبهرام نیز با همین فناوری طراحی شده است و بخشی از ظرفیت اضافی تصفیه‌خانه جنوب محسوب می‌شود. این پروژه افزایش چشمگیری در حجم آب بازچرخانی شده ایجاد کرده‌است (Fahameh Industrial Engineering Company, 2021).

با توجه به این اطلاعات، می‌توانیم الگوهای عملکردی این تصفیه‌خانه‌ها را مقایسه کنیم تا مشخص شود که در کدام موارد نقاط قوت ما است و کدام موارد نیاز به بهبود دارند:

جدول ۶. مقایسه تصفیه‌خانه‌های تهران

Table 6. Comparison of Tehran wastewater treatment plants

تصفیه‌خانه	فناوری اصلی	پتانسیل حذف الاینده‌ها	کاربرد پساب	هوشمندسازی کنترل کیفیت
جنوب	Activated sludge + Optimization (RAS/IR)	بالا (با بهینه‌سازی: TSS, TN, BOD, COD)	عمدتاً کشاورزی و بازچرخانی	پیشرفته (ANN/ANFIS)
غرب	A02O - حذف مغذی‌ها	مؤثر برای نیتروژن و فسفر	کشاورزی و تخلیه محیطی	ممکن است توسعه یابد
فیروزبهرام	A2O - حذف مغذی‌ها	بالا برای کاهش نیتروژن و فسفر	کشاورزی و صنعتی	اطلاعات محدود

(Zeng et al., 2018; Sadri Moghaddam & Mesghali, 2023; Borzooei, et al., 2019; Nazif et al., 2018)

جنوب تهران: با بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی، کیفیت پساب به طور قابل توجهی بهبود یافته و مناسب استفاده مجدد در کشاورزی است. همچنین بهره‌مندی از مدل‌های هوشمند موجب کنترل دقیق‌تری روی خروجی شده است (Nazif et al., 2018).

غرب تهران: فناوری A2O گزینه‌ای قدرتمند برای حذف مغذی‌ها است؛ اگرچه داده دقیقی از کیفیت پساب منتشر نشده، اما طراحی جهت‌دار به استانداردهای استفاده مجدد در راستای کشاورزی دارد (Zeng et al., 2018).

فیروزبهرام: با ظرفیت مشابه غرب، توانسته حجم کل بازچرخانی را به شدت افزایش دهد؛ احتمالاً خروجی آن هم برای مصارف کشاورزی/ صنعتی مناسب است، هرچند داده‌های مستند کمتری موجود است (Fahameh Industrial Engineering Company, 2021).

انرژی، بازیافت منابع و LCA تصفیه‌خانه‌های تهران

جنوب تهران: تصویر دقیق از چرخه عمر

مطالعه‌ی تازه‌ی LCA روی جنوب تهران (داده‌های عملیاتی سال ۲۰۲۲، تحلیل با SimaPro و روش ReCiPe) نشان می‌دهد بیشترین سهم اثرات محیط‌زیستی عموماً از سه گلوگاه می‌آید: برق فرایندی (به‌ویژه هوادهی)، مواد شیمیایی گندزدا/انعقاددهنده، و مدیریت لجن. در سناریوهای مقایسه‌ای، بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای مدیریت لجن بیشترین کاهش اثر را ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، راه‌اندازی نیروگاه بیوگاز در واحدهای ۵ و ۶ جنوب تهران تولید هم‌زمان برق و حرارت را ممکن کرده و انتشار متان دفع‌شده از لجن را به برق جایگزین تبدیل می‌کند؛ گزارش‌ها اثر کاهنده‌ی قبل توجهی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان می‌دهند (۲ تا ۳ منبع خبری همسو (Samsami, et al., 2025; Rahmati et al., 2024)). تازه‌ترین کار پژوهشی داده‌محور هم دقیقاً روی پیش‌بینی بازده بیوگاز از هضم بی‌هوازی لجن جنوب تهران تمرکز کرده و نشان می‌دهد تنظیم خودکار^۱ مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند بهره‌برداری را بهینه و تولید انرژی را پایدارتر کند (Rahmati et al., 2024; Samsami, et al., 2025).

کاهش بار برق هوادهی با کنترل پیشرفته DO، هوادهی ناپیوسته و نیتریفیکاسیون-دنیتریفیکاسیون هدفمند → کاهش ردپای کربن چرخه‌عمر (Rahmati et al., 2024).

افزایش بازیافت انرژی از بیوگاز CHP، بازیافت حرارت برای گرم‌کردن هاضم/ساختمان‌ها + نگاهداشت بهینه هاضم‌ها → خنثی‌تر شدن انرژی (Rahmati et al., 2024).

مدیریت لجن: پایدارسازی/آبگیری بهتر و مسیرهای استفاده‌ی نهایی با ریسک پایین (کمپوست کنترل‌شده، کاربرد کشاورزی تحت پایش فلزات) → کاهش اثرات اکوسیستمی (Rahmati et al., 2024).

غرب تهران طراحی مغذی‌زدا و پتانسیل انرژی

غرب تهران با فرایند A2/O (بی‌هوازی-بی‌اکسیژن-هوازی) برای حذف هم‌زمان نیتروژن و فسفر طراحی شده است؛ ظرفیت طراحی روزانه حدود ۵۲۰ هزار مترمکعب، پوشش بیش از ۲/۱ میلیون نفر، و استاندارد خروجی قابل استفاده برای کشاورزی/تخلیه گزارش شده است. هرچند LCA اختصاصی منتشرشده برای غرب در دسترس نیست، اما بر اساس تجربه‌ی جهانی و داده‌های طراحی، پروفایل اثر چنین سامانه‌هایی معمولاً تحت تأثیر هوادهی واحد اکسیک، برگشت لجن، کربن بیرونی (اگر مصرف شود) و مدیریت لجن است. با توجه به ماهیت مغذی‌زدا، کاهش دوز شیمیایی حذف فسفر با بهینه‌سازی بیولوژیک و کنترل بلادرنگ NOx/DO می‌تواند هم انرژی را کم کند هم کیفیت را پایدار نگه دارد (Tabesh et al., 2019).

کنترل پیشرفته فرایند: حسگرهای آن‌لاین $4^3\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-/\text{PO}_4^{3-}$ برای setpoint بهینه‌ی هوادهی و برگشت داخلی → کاهش مصرف برق و مواد (همسو با بهترین رویه‌های EU) (Tabesh et al., 2019).

بازیافت انرژی از لجن: افزودن/تقویت هضم بی‌هوازی و CHP همانند جنوب → نزدیک‌شدن به اهداف انرژی خنثی (Tabesh et al., 2019).

¹ auto-tuning

مسیرهای بازچرخانی: با توجه به طراحی برای استفاده کشاورزی/تخلیه، پایش روتین میکروآلودگی‌ها مطابق روند اروپا (مرحله‌ی چهارم) برای آینده‌ی نزدیک توصیه می‌شود (Tabesh et al., 2019).

فیروزبهرام (اسلام‌شهر) افزایش ظرفیت بازچرخانی و اثر شبکه

تأسیسات فیروزبهرام با مقیاسی مشابه غرب تهران، شکاف ظرفیت تصفیه/بازچرخانی را در جنوب غرب پر می‌کند و در مقیاس شهری اثر شبکه‌ای دارد: کاهش رهاسازی به آب‌های پذیرنده، افزایش آب قابل استفاده کشاورزی/صنعتی و کاهش برداشت از منابع متعارف. گزارش‌ها از افزایش چشمگیر حجم آب بازیافتی سالانه پس از بهره‌برداری حمایت می‌کنند (افزایش سهم بازچرخانی تهران/ملی در راستای اهداف گردشی آب). در نبود LCA اختصاصی منتشرشده، می‌توان با تکیه بر مطالعات LCA فرایندهای پیشرفته‌ی ثالث/چهارم (برای پساب جنوب تهران) نقطه‌های حساس مشابه را فرض کرد: مصرف انرژی، مواد شیمیایی واحدهای پیشرفته و لجن (Rahmati et al., 2024). تنظیم بهینه‌ی نسبت‌های برگشت (RAS/IR و DO) برای تعادل کیفیت/انرژی (Tabesh et al., 2019).

- نقشه راه انرژی: ارزیابی امکان‌سنجی هضم لجن و CHP و خورشیدی روی بام/محوطه، با هدف نزدیک‌شدن به الگوی انرژی‌خنی (Tabesh et al., 2019).

- هم‌راستاسازی با بازچرخانی ملی: کمک به ارتقای سهم بازاستفاده از فاضلاب تصفیه‌شده (شاخص ملی بازیافت/بازاستفاده هنوز جای رشد دارد) (Tabesh et al., 2019).

سنجش با خط‌کش جهانی (EU 2024 Recast) و مسیر ارتقا

بازنگری ۲۰۲۴ دستورالعمل فاضلاب شهری اتحادیه‌ی اروپا هدف انرژی‌خنی برای تأسیسات بزرگ، پایش سلامت عمومی و حذف میکروآلودگی‌ها (مرحله‌ی چهارم) را پررنگ کرده است (European Union, 2024).
با تطبیق این خط‌کش روی تهران:

انرژی‌خنی: جنوب تهران با بیوگاز یک گام جلوست؛ توسعه CHP و بهینه‌سازی هوادهی می‌تواند شکاف را کمتر کند. غرب و فیروزبهرام با افزودن/تقویت AD+CHP و بهینه‌سازی APC می‌توانند به هدف نزدیک شوند (Environmental Research Center of Iran, 2016).

میکروآلودگی‌ها: حرکت به سمت خطوط ازن + کربن فعال دانه‌ای (GAC) یا دیگر AOPها در مدول‌های منتخب (براساس ریسک‌سنجی محل دریافت/کاربری پساب) می‌تواند گام هم‌راستایی با EU باشد (European Environment Agency, 2023).

LCAهای منتشرشده برای گزینه‌های ثالث/چهارم جنوب نشان می‌دهد انتخاب تکنولوژی با کمینه‌سازی اثر چرخه‌عمر ممکن و ضروری است (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

بازچرخانی: با وجود رشد ظرفیت در تهران، سهم بازاستفاده ملی هنوز پایین‌تر از سقف‌های بالقوه‌ی اقلیمی-شهری است؛ سیاست‌های تشویقی و اتصال پایدار به مصرف‌کنندگان نهایی (کشاورزی/صنعت) توصیه می‌شود (DOE, Iran, 2019).

نقشه راه پیشنهادی

هوادهی هوشمند در هر سه تأسیسات: کنترل DO مبتنی بر بار لحظه‌ای، سنسورهای N/P، و الگوریتم‌های APC → کاهش محسوس kWh/m^3 (Environmental Research Center of Iran, 2016)

گسترش هضم بی‌هوازی + CHP: تعمیم الگوی جنوب به غرب/فیروزبهرام؛ نگهداشت دمایی/اختلاط برای بیشینه‌سازی متان (European Parliament, 2023).

انتخاب‌گری مرحله‌ی چهارم: شروع در مدول‌های پریسک با LCA فناوری‌های ازن، GAC یا AOP تا کم‌اثرترین گزینه انتخاب شود (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

پایش چرخه‌عمر سالانه: یک LCA کوتاه‌دوره‌ی تکرارشونده برای هر سه سایت، تا اثر اقدامات صرفه‌جویی/ارتقای سنجش‌پذیر شود (European Environment Agency, 2023).

سنجش هر تصفیه‌خانه بطور مجزا

تصفیه‌خانه جنوب تهران

انطباق با استانداردهای ایران

با توجه به فرایند لجن فعال + واحدهای کلاسیک (ته‌نشینی اولیه/ثانویه و گندزدایی) و تجربه عملیاتی، خروجی این تصفیه‌خانه برای BOD، COD، TSS و همچنین حذف بخشی از نیتروژن/فسفر به‌طور معمول در محدوده‌های مورد انتظار استانداردهای ملی برای تخلیه/استفاده کشاورزی قرار می‌گیرد؛ به‌ویژه که بهینه‌سازی بهره‌برداری (تنظیم RAS/IR و DO) در سال‌های اخیر گزارش شده است (DOE Iran, 2019).

لجن با هضم بی‌هوازی پایدار می‌شود و با مدیریت مناسب، ریسک‌های میکروبی/فلزی در کاربرد نهایی کاهش می‌یابد.

انطباق با استانداردهای جهانی (Environmental Research Center of Iran, 2016).

از منظر الزامات کلاسیک EU و US (کیفیت ثانویه/پیشرفته)، جنوب تهران در چارچوب قابل قبولی عمل می‌کند؛ اما با بازنگری ۲۰۲۴ اتحادیه اروپا، دو فاصله‌ی اصلی دیده می‌شود:

هدف «انرژی خنثی» برای تأسیسات بزرگ؛ جنوب شروع خوبی با بیوگاز CHP + دارد، ولی برای رسیدن به انرژی خنثی نیاز به بسته‌ی کامل بهینه‌سازی انرژی دارد (European Union, 2024).

حذف میکروآلودگی‌ها (مرحله چهارم) مانند داروها/مواد آرایشی که در EU جدید به‌صورت سیستماتیک برای تأسیسات بزرگ مطرح است و در جنوب تهران هنوز فراگیر نیست (European Environment Agency, 2023).

پیشنهادهای ارتقا

→ هوادهی هوشمند و APC: کنترل $\text{DO}/\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ برخط، setpoint گذاری پویا، و هوادهی تناوبی (۹۸) کاهش 3 kWh/m^3 و پایدارسازی کیفیت (Environmental Research Center of Iran, 2016).

→ گسترش CHP و بازیافت حرارت از بیوگاز (به‌ویژه برای گرمایش هاضم‌ها) + بهینه‌سازی اختلاط/دمای هاضم نزدیک‌شدن به انرژی خنثی (European Parliament, 2023).

مرحله‌ی چهارم انتخابی: ماژول‌های ازن + GAC یا AOP در خطوط با ریسک بالاتر (مصرف‌کنندگان حساس/آب‌پذیرنده) با ارزیابی LCA برای انتخاب کم‌اثرترین گزینه (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

پایش میکروآلودگی/ویروسی مطابق روند EU برای هشدار بهداشت عمومی و شفافیت داده‌ها.

تصفیه‌خانه غرب تهران

انطباق با استانداردهای ایران

طراحی با فرایند A2/O برای حذف هم‌زمان نیتروژن و فسفر، امکان دستیابی پایدار به حدود ملی برای TN/TP و شاخص‌های آلی/معلق را فراهم می‌کند. طراحی کاربرد پساب برای کشاورزی/تخلیه نیز با چارچوب ملی هم‌خوان است (Environmental Research Center of Iran, 2016).

لجن مطابق الزامات سلامت محیطی مدیریت می‌شود و امکان دستیابی به کلاس قابل قبول برای کاربردهای مجاز وجود دارد (DOE Iran, 2019).

انطباق با استانداردهای جهانی

از منظر EU/US، داشتن خط EBPR + دنیتریفیکاسیون نقطه‌قوت است و با استانداردهای مغذی‌زدا هم‌راستاست (European Union, 2024).

فاصله‌ها: (الف) همانند جنوب، مرحله‌ی چهارم برای میکروآلودگی‌ها هنوز پیش‌فرض طراحی نیست؛ (ب) انرژی‌خشی در EU جدید هدف‌گذاری شده اما اطلاعات عمومی از CHP/بیوگاز در غرب کم‌تر است (European Union, 2024).

پیشنهادهای ارتقا

APC و حسگرهای آنالین $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-/\text{PO}_4^{3-}$ برای تنظیم هم‌زمان برگشت داخلی/هوادهی/نرخ کربن خارجی → کیفیت پایدارتر با انرژی و مواد شیمیایی کمتر (Environmental Research Center of Iran, 2016).

افزودن هضم بی‌هوازی + CHP برای لجن (الگوی جنوب) + بررسی PV روی بام/محوطه → حرکت به سمت انرژی‌خشی (European Parliament, 2023).

آغاز مرحله چهارم در مدول‌های منتخب (ازن یا GAC) بر اساس ریسک‌سنجی کاربری پساب/آب‌پذیرنده و LCA گزینه‌ها (Iran Water and Wastewater Research Institute, 2018).

کاهش I/I شبکه (نفوذ آب باران/زیرسطحی) برای تثبیت بار هیدرولیکی و کاهش انرژی (European Environment Agency, 2023).

تصفیه‌خانه فیروزبهرام (اسلام‌شهر)

انطباق با استانداردهای ایران

با ظرفیت مقیاس‌بالا و فناوری هم‌تراز غرب (A2/O)، این سایت شکاف ظرفیت و بازچرخانی را در غرب/جنوب‌غرب تهران پوشش می‌دهد و برای خروجی کشاورزی/صنعتی طراحی شده است؛ انطباق با حدود ملی آلی/معلق/مغذی هدف‌گذاری فرایندی پروژه بوده است (DOE Iran, 2019).

توسعه ظرفیت بازچرخانی، همسو با سیاست‌های ملی استفاده مجدد از پساب است (Environmental Research Center of Iran, 2016).

انطباق با استانداردهای جهانی

از دید EU/US، معماری فرایندی برای TN/TP مناسب است. مانند دو سایت دیگر، برای انطباق با EU ۲۰۲۴ دو محور اصلی باقی می‌ماند: کارایی انرژی تا سطح خنثی و کنترل میکروآلودگی‌ها (European Union, 2024).

پیشنهادهای ارتقا

نقشه‌ی راه انرژی: امکان‌سنجی AD + CHP برای لجن + بهینه‌سازی هوادهی/RAS/IR → کاهش محسوس انرژی ویژه (kWh/m^3) (European Parliament, 2023).

پایش پیشرفته کیفیت و راه‌اندازی مرحله‌ی چهارم تدریجی در مدول‌های پرریسک با ارزیابی LCA (European Environment Agency, 2023).

یکپارچگی با مصرف‌کنندگان نهایی (کشاورزی/صنعت): قراردادهای تضمین خرید، پایش مشترک کیفیت، و مدیریت هوشمند توزیع برای پایداری اقتصادی/محیط‌زیستی (European Environment Agency, 2023).

ایران: در شاخص‌های کلاسیک (BOD/COD/TSS و TN/TP)، هر سه سایت با طراحی/بهره‌برداری فعلی می‌توانند الزامات ملی را تأمین کنند.

جهانی: برای هم‌راستایی کامل با EU ۲۰۲۴ باید به‌صورت مرحله‌ای به سمت انرژی‌خشی و حذف میکروآلودگی‌ها (مرحله چهارم) رفت.

نسخه ارتقا: APC + AD/CHP + آغاز مرحله چهارم براساس LCA.

نتیجه‌گیری

بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که تصفیه‌خانه‌های اصلی تهران، شامل جنوب، غرب و فیروزبهرام، از نظر شاخص‌های کیفی متداول نظیر BOD، COD، TSS و همچنین کنترل نسبی مغذی‌ها (نیتروژن و فسفر)، به‌طور کلی با استانداردهای ملی ایران همخوانی دارند. در مقایسه با استانداردهای جهانی، به‌ویژه الزامات جدید اتحادیه اروپا (۲۰۲۴) و ایالات متحده، این تأسیسات در بخش‌های کلاسیک تصفیه عملکرد قابل قبولی داشته، اما در دو حوزه کلیدی هنوز فاصله وجود دارد:

دستیابی به انرژی‌خشی و بهینه‌سازی کامل مصرف انرژی در فرایندها.

پایه‌سازی مرحله چهارم تصفیه جهت حذف میکروآلودگی‌ها شامل داروها، هورمون‌ها و سایر ترکیبات نوظهور. در عین حال، وجود زیرساخت‌های نسبتاً مدرن در تصفیه‌خانه‌های غرب و فیروزبهرام، و تجربه عملیاتی طولانی‌مدت در جنوب تهران، فرصت ارزشمندی برای ارتقا فراهم کرده است. اجرای راهکارهایی چون کنترل پیشرفته فرایند (APC)، استفاده گسترده‌تر از هضم بی‌هوازی و تولید انرژی از لجن (CHP)، و استقرار فناوری‌های نوین حذف آلاینده‌های نوظهور، می‌تواند همسطح انطباق با استانداردهای بین‌المللی را ارتقا دهد و هم پایداری محیط‌زیستی و اقتصادی را تضمین کند.

در نهایت، مسیر آینده تصفیه‌خانه‌های تهران باید بر سه محور اصلی استوار باشد: بهبود کارایی انرژی، ارتقای کیفیت خروجی به سطح استانداردهای جهانی، و توسعه استفاده مجدد ایمن و پایدار از پساب. این رویکرد، علاوه بر حفاظت از منابع آبی و محیط زیست، می‌تواند الگویی برای سایر شهرهای ایران و منطقه در مدیریت جامع فاضلاب شهری ارائه دهد.

References

- Akbarzadeh, A., Valipour, A., Hadi Meshkati, S. M., & Hamnabard, N. (2023). Municipal wastewater treatment in Iran: Current situation, barriers and future policies. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 11(1), 60–71. <https://doi.org/10.34172/jaehr.2023.0>
- Borzooei, S., Campo, G., Cerutti, A., Meucci, L., Panepinto, D., Ravina, M., & Scibilia, G. (2019). Optimization of the wastewater treatment plant: From energy saving to environmental impact mitigation. *Science of the Total Environment*, 691, 1182–1189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.210>
- California State Water Resources Control Board. (2019). Title 22, California Code of Regulations: Recycled water criteria. California State Water Resources Control Board.
- City of San Diego. (2021). Pure Water San Diego program. Public Utilities Department.
- Department of Environment of Iran. (2018). Wastewater effluent standards for discharge and reuse. Islamic Republic of Iran. [In Persian]
- Department of Environment of Iran. (2019). Wastewater quality standards in Iran. Department of Environment of Iran. [In Persian]
- Environmental Protection Agency. (2021). Effluent Guidelines Program Plan 14. EPA.
- Environmental Research Center of Iran. (2016). Assessment of the quality of effluents discharged from Tehran municipal wastewater treatment plants. Research Institute of Biotechnology and Environmental Sciences. [In Persian]

European Environment Agency. (2023). Urban wastewater treatment: A guide for EU utilities. European Environment Agency.

European Parliament. (2023). Urban wastewater treatment: Recast. European Parliament.

European Union. (2024). Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast). Official Journal of the European Union.

Faraji, F., Ghaffari, H. R., & Miri, M. (2023). Systematic review investigation of heavy metals contamination in the soil of landfill sites in Iran. *Journal of Environmental Health Science*. <https://doi.org/10.1007/s40201-023-00854-4>

Fahameh Industrial Engineering Company. (2021). Firoozbahram-Samshahr wastewater treatment project (West of Tehran). <https://fahameh.com> [In Persian]

Gaspar, D., & Telles, L. R. (2025). The impact of wastewater directive on pharmaceuticals and cosmetics. Cuatrecasas. <https://www.cuatrecasas.com/en/portugal/public-law/art/the-impact-of-wastewater-directive-on-pharmaceuticals-and-cosmetics>

Iran Water and Wastewater Research Institute. (2018). Life cycle assessment (LCA) in municipal wastewater treatment plants. Iran Water and Wastewater Research Institute. [In Persian]

Jekel, M., et al. (2019). Removal of micropollutants in wastewater treatment in Berlin. *Water Science and Technology*, 79(4), 798–806. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.098>

Nazif, S., Forouzanmehr, F., & Khatibi, Y. (2018). Tehran South UWTP, case study Iran. In *Proceedings of the 12th International Conference on Wastewater Treatment and Reuse* (pp. 123–130). [In Persian]

PUB Singapore. (2020). NEWater: A Singapore success story. Singapore's National Water Agency.

Rahmati, M., Rasouli, M., Haji Agha Alizadeh, H., & Ataeiyan, B. (2024). Impact evaluation of wastewater treatment based on the anaerobic digestion of sewage sludge using the life cycle assessment method: A case study of South Tehran. *International Journal of Chemical Engineering*, 2024, 5991815. <https://doi.org/10.1155/2024/5991815>

Sadri Moghaddam, S., & Mesghali, H. (2023). A new hybrid ensemble approach for the prediction of effluent total nitrogen from a full-scale wastewater treatment plant using a combined trickling filter-activated sludge system. *Environmental science and pollution research international*, 30(1), 1622–1639. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22340-0>

Samsami, Z., Jafari, A. J., Delnavaz, M., Naderi, A., Barati Rashvanlou, R., Movassagh Inchehboroun, B., & Dehghanifard, E. (2025). Environmental impact assessment of southern Tehran wastewater treatment plant using life cycle assessment (LCA). *Scientific Reports*, 15, 294. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84674-7>

Shahmansouri, A., & Eslami, H. (2020). Wastewater reuse standards and guidelines in Iran compared with developed countries. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 7(3), 155–163. <https://doi.org/10.34172/EHEM.2020.19>

Tabesh, M., Feizee Masooleh, M., Roghani, B., & Motevallian, S. S. (2019). Life-cycle assessment (LCA) of wastewater treatment plants: A case study of Tehran, Iran. *International Journal of Civil Engineering*, 17(7), 1155–1169. <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0374-2>

U.S. Environmental Protection Agency. (2021). National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) permit program: Secondary treatment regulation. U.S. Environmental Protection Agency.

World Health Organization. (2019). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater: Wastewater Use in Agriculture. WHO.

Zeng, W., Li, W., Wang, G., & Zhang, L. (2018). A modeling understanding on the phosphorous removal performances of A2/O wastewater treatment processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(30), 30339–30347. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3013-x>