

Groundwater Infiltration and Rainfall-Derived Inflow and Infiltration Assessment in Separate Sewer Systems (Case Study: Tehran Urban Area)

M. Rezaee¹, M. Tabesh²

1. Former Graduated Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
(Corresponding Author) mtabesh@ut.ac.ir

(Received May 19, 2021 Accepted Aug. 29, 2021)

To cite this article:

Rezaee, M., Tabesh, M. 2022. "Groundwater infiltration and rainfall-derived inflow and infiltration assessment in separate sewer systems (case study: Tehran urban area)" Journal of Water and Wastewater, 32(6), 130-141.
Doi: 10.22093/wwj.2021.287018.3146. (In Persian)

Abstract

Separate sewer networks are designed and built to collect foul sewage from buildings and convey it to wastewater treatment plants (WWTPs). However, due to some holes and cracks on the pipes or unsealed pipe joints, a volume of ground or subsurface water that is placed in saturated or unsaturated zones intrudes sewers and WWTPs. In a condition that the wastewater level in the sewer stands higher than the groundwater level, wastewater leaks into the soil and groundwater and this phenomenon is called sewer exfiltration. Moreover, during a rain event, a part of the precipitation gets into the sewer system through the illicit connection of the yard drains and roof downspouts to the building's lateral, and this part of the flow is called rainfall-derived inflow and infiltration (RDII). In this research, infiltration, exfiltration, and RDII were evaluated in a 16-month period to show the range of inflow and infiltration in the sewer network under the service of the South Tehran WWTP. Results show that the infiltration constitutes the major volume of the total inflow and infiltration. But the RDII leads to more operational problems due to its nature as an intense flow. After calculating the range of inflow and infiltration, results show that the average infiltration rate that entered the WWTP in the year 2014 was 0.0175 L/s/ha that is much less than the values mentioned in Criterion No. 118. Furthermore, total inflow and infiltration in five hours of the study period crossed the upper limit of the inflow and infiltration range (0.6 L/s/ha) in Criterion No. 118 that shows the high percentage of illicit connections in Tehran and a high volume of rainfall that enters the sewer network. Accordingly, the inflow and infiltration range in the Criterion No. 118 seems to be an unsound range and it needs some revisions.

Keywords: Infiltration, Rainfall-Derived Inflow and Infiltration, Separate Sewer System, Sewer Exfiltration, Wastewater Treatment Plant.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۶، صفحه: ۱۴۱-۱۳۰

ارزیابی نشتاب و آب باران نفوذی در سامانه‌های فاضلاب مجزا (مطالعه موردی: شهر تهران)

محسن رضائی^۱، مسعود تابش^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران،
پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی،
دانشگاه تهران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) mtabesh@ut.ac.ir

(دریافت ۱۴۰۰/۲/۲۹ پذیرش ۱۴۰۰/۶/۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

رضائی، م.، تابش، م.، ۱۴۰۰، "ارزیابی نشتاب و آب باران نفوذی در سامانه‌های فاضلاب مجزا (مطالعه موردی: شهر تهران)"

مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۶)، ۱۳۰-۱۴۱. Doi: 10.22093/wwj.2021.287018.3146

چکیده

شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب مجزا برای دریافت فاضلاب خام ساختمان‌ها و انتقال ایمن آن به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب طراحی و ساخته می‌شوند. اما به دلیل وجود اجتناب‌ناپذیر ترک، سوراخ یا اتصالات آب‌بندی نشده، قسمتی از آب زیرزمینی یا زیرسطحی که در لایه اشباع و نیمه‌اشباع خاک قرار گرفته وارد شبکه شده و به تصفیه‌خانه منتقل می‌شود. همچنین در شرایطی که تراز فاضلاب از آب زیرزمینی اطراف لوله بیشتر باشد، فاضلاب داخل لوله به خاک و آب زیرزمینی اطراف لوله نشت می‌کند که به آن نشت فاضلاب می‌گویند. در زمان بارش نیز قسمتی از آب باران از طریق آبرو کف حیاط یا بام ساختمان‌ها که به انشعاب فاضلاب ساختمان متصل شده‌اند وارد شبکه فاضلاب شده و جریان فاضلاب را افزایش می‌دهد که به آن آب باران نفوذی گویند. در این پژوهش، نشتاب، نشت فاضلاب و آب باران نفوذی در بازه‌های ۱۶ ماهه برای شبکه فاضلاب زیر پوشش تصفیه‌خانه جنوب تهران تحلیل شده و محدوده ورود آنها به شبکه و تصفیه‌خانه مشخص شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده آن است که نشتاب نسبت به آب باران نفوذی قسمت بیشتری از جریان وارد شده به تصفیه‌خانه را تشکیل می‌دهد. ولی آب باران به دلیل ماهیت خود که جریانی لحظه‌ای است، دشواری‌های بیشتری در بهره‌برداری از شبکه به وجود می‌آورد. با محاسبه محدوده آبهای نفوذی در شهر تهران برای سال ۱۳۹۳، نشتاب به‌طور متوسط با نرخ 0.175 لیتر بر ثانیه بر هکتار وارد تصفیه‌خانه شده که از مقدار توصیه شده در ضابطه شماره ۱۱۸ بسیار کمتر است. همچنین، آبهای نفوذی در ۵ ساعت از روزهای تر در سال ۱۳۹۳، مقداری بیش از 0.6 لیتر بر ثانیه بر هکتار بیان شده در ضابطه شماره ۱۱۸ را داشته‌اند که نشان‌دهنده اتصال غیرمجاز تعداد زیادی از ساختمان‌های شهر تهران و ورود قسمت زیادی از باران به شبکه فاضلاب است. بنابراین محدوده موجود در ضابطه شماره ۱۱۸ محدوده‌ای نامطمئن به نظر رسیده و نیاز به بازنگری دارد.

واژه‌های کلیدی: نشتاب، آب باران نفوذی، شبکه فاضلاب مجزا، نشت فاضلاب، تصفیه‌خانه فاضلاب

۱- مقدمه

شبکه‌های فاضلاب را می‌توان به دو دسته شبکه‌های درهم و مجزا تقسیم کرد. این شبکه‌ها که از انشعاب ساختمان‌ها، فاضلابروهای اصلی و فرعی، خطوط انتقال فاضلاب و آدروها تشکیل می‌شوند، در انتها به تصفیه‌خانه‌های فاضلاب رسیده و سامانه‌های فاضلاب را تشکیل می‌دهند. وظیفه یک سامانه فاضلاب مجزا، دریافت فاضلاب خام از انشعاب ساختمان‌ها و انتقال آن به تصفیه‌خانه برای تصفیه و رهاسازی ایمن پساب است؛ با این وجود، معمولاً آبهای نفوذی که خود از دو جزء نشتاب آب زیرزمینی^۱ و آب باران نفوذی^۲ تشکیل می‌شوند قسمتی از جریان وارد شده به تصفیه‌خانه را تشکیل می‌دهند. همچنین، نشت فاضلاب^۳ و بالازدگی^۴ (به‌عنوان قسمت‌هایی از جریان که از شبکه خارج می‌شوند) را می‌توان از اجزای اصلی جریان فاضلاب برشمرد (Rezaee, 2020).

نشتاب آب زیرزمینی، جریان وارد شده به فاضلابروها از طریق اتصال‌های آب‌بندی نشده و ترک و سوراخ‌های روی لوله‌ها است که در اثر اختلاف تراز آب زیرزمینی و فاضلاب درون لوله‌ها اتفاق می‌افتد (Belhadj et al., 1995). نشتاب می‌تواند از لایه نیمه‌اشباع خاک^۵ یا آبهای زیرسطحی وارد شبکه شود (Rezaee, 2020, Thorndahl et al., 2016).

آب باران نفوذی شامل قسمتی از بارش است که از طریق اتصال غیرمجاز آبرو حیاط یا ناودان ساختمان‌ها به انشعاب فاضلاب ساختمان وارد شده و جریان فاضلاب را افزایش می‌دهد (Pawlowski et al., 2014).

همچنین قسمتی از جریان باران که از طریق دریچه آدروهای قرار گرفته در خیابان‌ها وارد شبکه می‌شود می‌تواند جزئی از آب باران نفوذی را تشکیل دهد (Ellis, 2001). آب باران نفوذی را می‌توان به دو جزء نفوذ مستقیم آب باران و نشتاب ناشی از بارش تقسیم کرد تا محاسبه اجزای جریان دقیق‌تر انجام شود. نفوذ مستقیم آب باران به جریانی گفته می‌شود که هنگام بارش باران به‌طور مستقیم وارد شبکه می‌شود و جریان فاضلاب را به‌شدت افزایش می‌دهد. نشتاب ناشی از بارش نیز برابر قسمتی از آب باران یا ذوب

برف است که پس از اتمام بارش به‌شکل نشتاب وارد شبکه می‌شود (Wittenberg and Aksoy, 2010).

آبهای نفوذی دشواری‌ها و هزینه‌های مختلفی را در بهره‌برداری از سامانه‌های فاضلاب به‌وجود می‌آورند. از آن جمله می‌توان به بالازدگی و پس‌زدگی فاضلاب (Jiang et al., 2019, Zhang, 2005) اضافه بار هیدرولیکی در شبکه (Bareš et al., 2012)، کاهش کارایی تصفیه‌خانه (Vaes et al., 2005)، افزایش مصرف برق تصفیه‌خانه و ایستگاه‌های پمپاژ (Rödel et al., 2017)، آب شستگی خاک اطراف لوله‌ها و ورود خاک به داخل فاضلابروها (Parcher, 1997)، افزایش جریان کنارگذر تصفیه‌خانه و افزایش ردپای آب آبی و خاکستری سامانه فاضلاب اشاره کرد (Paterson et al., 2015, Rezaee, 2020).

به علاوه، خروج آب زیرزمینی و باران از منطقه و انتقال این دو منبع آب شیرین به نقاط دور دست با اصول طراحی شهرهای آب محور و همچنین اهداف سازمان ملل متحد در توسعه پایدار در بخش آب پاک و فاضلاب (SDG 6) در تضاد است (Nasrin et al., 2017).

هنگامی که تراز فاضلاب درون فاضلابرو از تراز آب زیرزمینی اطراف لوله بالاتر باشد، نشت فاضلاب از ترک و سوراخ روی لوله‌ها و نقاط اتصال معیوب فاضلابروها به خاک اطراف لوله رخ می‌دهد. این رخداد باعث کاهش جریان در طول مسیر و آلودگی خاک و آب زیرزمینی منطقه می‌شود. مقدار نشت فاضلاب تابع سه متغیر اختلاف تراز بین آب زیرزمینی و فاضلاب درون لوله، وضعیت سازه‌ای و سطح تر فاضلابرو است (Bertrand-Krajewski et al., 2006) برحسب این سه متغیر، درصدی از جریان فاضلاب را می‌توان به‌عنوان جریان خارج شده از شبکه در نظر گرفت.

روش‌های گوناگونی برای تعیین مقدار نشتاب آب زیرزمینی، آب باران نفوذی و نشت فاضلاب در طول سالیان گذشته به‌وجود آمده‌اند. از این میان می‌توان به روش‌های تولید فاضلاب، ضریب حداقل جریان، استیونز-شوتزباخ^۷، مثلثی، گراف آلودگی، ایزوتوپ پایدار، DTS^۸، روش‌های مبتنی بر قانون دارسی و مدل‌های

¹ Groundwater Infiltration

² Rainfall-Derived Inflow and Infiltration (RDII)

³ Sewer Exfiltration

⁴ Sewer Overflow

⁵ Vadose Zone

⁶ Sustainable Development Goal 6 (SDG6)

⁷ Stevens-Schutzbach Method

⁸ Distributed Temperature Sensing (DTS)

طراحی شبکه‌های فاضلاب جدید استفاده می‌کنند. بنابراین وجود پژوهش‌هایی بر روی مقدار آبهای نفوذی در شبکه‌های فاضلاب در شهرهای ایران ضروری به نظر می‌رسد.

نوآوری اصلی به‌کار گرفته شده در این پژوهش، استفاده از داده‌های خروجی مخزن آب به‌عنوان نشانگری برای مصرف آب شهری و استفاده از آن برای تعیین ضریب نسبت تولید فاضلاب شبانه در روش تولید فاضلاب بود که برای استفاده از این داده‌ها معادله ۲ ارائه شد. در پژوهش‌های مشابه که میزان نشتاب پایه^۱ در شبکه فاضلاب توسط روش تولید فاضلاب تعیین شده، نسبت تولید فاضلاب شبانه به میانگین روزانه به‌صورت فرضی مشخص شد. همچنین تا به امروز ارزیابی جامعی بر نشتاب، آب باران نفوذی و نشت فاضلاب در شبکه‌های فاضلاب کشور انجام نشده است که این پژوهش با اندازه‌گیری این مقدار در شبکه فاضلاب شهر تهران می‌تواند مبنایی برای انجام پژوهش‌های مشابه در شهرهای دیگر باشد. هدف نهایی این پژوهش نیز ارزیابی مقدار آبهای نفوذی بیان شده در ضابطه شماره ۱۱۸ است.

در این پژوهش پس از ارائه مقدمه‌ای در زمینه آبهای نفوذی و نشت فاضلاب، مطالعه موردی و روش منتخب برای ارزیابی آبهای نفوذی معرفی شد. سپس با ارائه نتایج حاصل از مطالعه موردی، محدوده آبهای نفوذی در شبکه و تصفیه‌خانه محاسبه و با مقدار بیان شده در ضابطه شماره ۱۱۸ مقایسه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- توصیف مطالعه موردی

کلان‌شهر تهران که وسیع‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران محسوب می‌شود برای مطالعه موردی این پژوهش برگزیده شد. محدوده موردنظر برای ارزیابی آبهای نفوذی شامل تمام محدوده زیر پوشش تصفیه‌خانه جنوب تهران بود که از سال ۱۳۸۹ عملیات دریافت و تصفیه فاضلاب شهری را بر عهده دارد. محدوده زمانی مدنظر نیز بازه‌ای ۱۶ ماهه از تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۱۱ تا ۱۳۹۴/۰۲/۰۲ (۲۰۱۴/۰۱/۰۱ تا ۲۰۱۵/۰۴/۲۲) بود که داده‌های دبی ورودی به تصفیه‌خانه را شامل می‌شود. این داده‌ها با دقت ۱ ساعت و به‌صورت پیوسته وجود دارند.

تطبیقی بارش رواناب برای محاسبه آبهای نفوذی و روش‌های ردیاب، فشارسنجی و بالانس آب در حوضه برای محاسبه نشت فاضلاب اشاره کرد (Beheshti et al., 2015, Rezaee, 2020, Rutsch et al., 2008).

هر یک از این روش‌ها برحسب امکانات و اطلاعات موجود در سامانه فاضلاب و خروجی موردنیاز قابل استفاده‌اند.

پژوهش‌ها و بررسی‌های مختلف، مقدار آبهای نفوذی در شبکه‌های فاضلاب مجزا را در شهرهای مختلف تعیین کرده‌اند. این مقدار حجم بسیار اندک آبهای نفوذی در شبکه‌هایی با سن کم، بهره‌برداری مناسب و شرایط آب و هوایی خشک و همین‌طور حجم بسیار زیاد آبهای نفوذی در شبکه‌هایی با سن زیاد، بهره‌برداری ضعیف و آب و هوای تر را نشان می‌دهند. برای نمونه، پس از بررسی آبهای نفوذی در قسمت‌های مختلف شبکه فاضلاب شهر سولوم پرتغال، محدوده نشتاب برای منطقه‌ای که فاضلاب‌بروهای جدید با جنس PVC داشت، ۰/۱ تا ۰/۲ مترمکعب بر سانتی‌متر قطر لوله بر کیلومتر طول لوله محاسبه شده است؛ در حالی که در منطقه‌ای دیگر از شهر با فاضلاب‌بروهای قدیمی متشکل از لوله‌های سفالی، مقدار ۰/۴ تا ۰/۸ مترمکعب بر سانتی‌متر قطر لوله بر کیلومتر به‌عنوان مقدار نشتاب محاسبه شده است (Diogo et al., 2018).

به‌همین دلیل آیین‌نامه‌های مرتبط با طراحی شبکه‌های فاضلاب، محدوده‌های بزرگی از آبهای نفوذی را برای طراحی شبکه و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب توصیه می‌کنند. این مقدار به‌صورت حجم آبهای نفوذی بر مساحت زیر پوشش شبکه، طول فاضلاب‌برو یا قطر لوله‌های شبکه و یا ترکیبی از این موارد بیان می‌شوند (Safavi et al., 2016).

ضابطه شماره ۱۱۸ (مبانی و ضوابط طراحی شبکه‌های فاضلاب و آبهای سطحی ۱۳۹۵) که به‌عنوان مرجعی برای طراحی شبکه‌های فاضلاب در ایران تهیه شده، محدوده ۰/۴ تا ۰/۶ لیتر بر ثانیه بر هکتار را به‌عنوان محدوده ورود آبهای نفوذی به شبکه‌های فاضلاب مجزا تعیین کرده است (IRIPBO, 2017). این ضابطه دو مقدار ۰/۰۵ و ۰/۱۵ لیتر بر ثانیه بر هکتار را نیز به‌عنوان حدود نشتاب برای طراحی تصفیه‌خانه توصیه می‌کند. با توجه به اینکه این مقدار از مراجعی قدیمی و مناسب کشورهای اروپایی و آمریکایی اقتباس شده‌اند، بسیاری از مهندسان مشاور از مقداری دیگر برای

¹ Base Infiltration (BI)

آب زیرزمینی و سایر نشتاب‌ها (از جمله نشتاب لایه نیمه‌اشباع خاک و آبهای زیرسطحی) در آن به‌عنوان BI تحلیل می‌شود. تحلیل مقدار آب باران نفوذی در بازه‌های تر انجام می‌شود. یک بازه تر شامل دو بازه ۶ ساعته برای محاسبه مقدار نفوذ مستقیم آب باران و چهار بازه ۶ ساعته برای محاسبه مقدار نشتاب ناشی از بارش است که پس از بازه ۶ ساعته وقوع بارش باران قرار می‌گیرند. در صورتی که بارش دیگری در این محدوده زمانی رخ دهد، بازه‌های اندازه‌گیری دیگری به بازه تر افزوده شده و تحلیل مقدار آب باران نفوذی به‌ازای مجموع بارش انجام می‌شود.

۲-۳- محاسبه BI

برای محاسبه BI، روش تولید فاضلاب که از داده‌های پایین دست شبکه (در این پژوهش دبی ورودی تصفیه‌خانه) برای محاسبه مقدار BI استفاده می‌کند به‌کار گرفته می‌شود. معادله ۱ بازنویسی دو معادله اصلی روش تولید فاضلاب است که نحوه محاسبه BI را نشان می‌دهد (Mitchell et al., 2007)

$$BI = (MDF - r \cdot ADF) / (1 - r) \quad (1)$$

که در آن

MDF دبی حداقل جریان فاضلاب روزانه، ADF^2 میانگین جریان روزانه فاضلاب و r ضریب نسبت تولید فاضلاب شبانه و بدون واحد است. مقدار MDF و ADF از داده‌های اندازه‌گیری شده در تصفیه‌خانه گرفته و ضریب r برحسب منطقه مورد مطالعه فرض می‌شوند.

با اشاره به این نکته که نسبت تولید شبانه فاضلاب به میانگین تولید روزانه فاضلاب در ماه‌های مختلف سال متفاوت است، مقدار r در هر بازه خشک باید به‌شکل منحصر به فرد تعیین شود. برای این کار بزرگترین بازه خشک در بازه زمانی مورد مطالعه به‌عنوان بازه مرجع تعیین و مقدار r در آن مشخص می‌شود. سپس با کمک داده‌های دبی خروجی از مخزن آب و استفاده از معادله ۲، مقدار ضریب r در سایر بازه‌های خشک محاسبه می‌شود

برای تفکیک بازه‌های خشک و تر در محدوده زمانی موردنظر، از داده‌های دما و بارش باران در ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران و داده‌های بارش برف در ایستگاه ژئوفیزیک تهران استفاده شد. دقت داده‌های بارش ۶ ساعت بوده و عمق بارش در یک بازه ۶ ساعته را نشان می‌دهد. برای بررسی مصرف آب در محدوده مورد مطالعه نیز از داده‌های خروجی یکی از مخزن‌های آب شرب شهر تهران که جمعیتی معادل ۱۲۲ هزار نفر را زیر پوشش قرار داده استفاده شد. داده‌های این مخزن به‌صورت دبی، در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای در طول بازه زمانی مطالعه موردی بود.

۲-۲- جداسازی بازه‌های خشک و تر

تعیین مقدار نشتاب آب زیرزمینی باید در روزهای خشک انجام شود تا تأثیر بارش باران و ذوب برف در آن دیده نشود. مقدار آب باران نفوذی نیز در بازه‌های تحت تأثیر بارش اندازه‌گیری می‌شود تا افزایش جریان در اثر ورود بارش به شبکه فاضلاب مشخص شود. بنابراین جداسازی بازه‌های خشک و تر برای محاسبه مقدار آبهای نفوذی ضروری است.

در این پژوهش یک روز خشک به‌عنوان روزی با بارش باران کمتر از ۰/۵ میلی‌متر در هر بازه اندازه‌گیری ۶ ساعته تعریف می‌شود. همچنین بارش باران در دو بازه پیش و پس از این بازه باید صفر بوده و هیچ بارش برفی در روز موردنظر و ۲ روز قبل از آن رخ نداده باشد. به‌علاوه، روز قبل از روز خشک نباید در محدوده یک بازه تر قرار گرفته باشد.

با توجه به اینکه دمای هوا و زمین به‌طور مستقیم در ورود آب باران به شبکه فاضلاب مؤثر است، برای تعیین قیدهای حداقل بارش در یک روز تر باید به منطقه مورد مطالعه توجه شود (Beheshti and Sægrov, 2018). قید حداقل بارش برای محاسبه مقدار آب باران نفوذی در شهر تهران را می‌توان به‌صورت حداقل بارش ۲ میلی‌متر باران در یک بازه اندازه‌گیری ۶ ساعته عنوان کرد. تراز آب زیرزمینی و وضعیت سازه‌ای شبکه در یک دوره زمانی بدون بارش شامل روزهای خشک تغییر چندانی نمی‌کند، بنابراین با توجه به ماهیت نشتاب می‌توان مقدار نشتاب آب زیرزمینی در یک بازه زمانی شامل روزهای خشک را ثابت فرض کرد. در این پژوهش، یک بازه خشک به‌عنوان بازه‌ای شامل روزهای خشک و بدون وقوع بارشی بیش از ۲ میلی‌متر تعریف شده و مجموع نشتاب

¹ Minimum Daily Flow (MDF)

² Average Daily Flow (ADF)

این افزایش نشت را می‌توان به صورت ۴ برابر افزایش درصد نشت در شرایطی که جریان روز تر به ۱۰ برابر حداکثر جریان اندازه‌گیری شده در روز خشک مشابه برسد در نظر گرفت (Rezaee, 2020). مقدار افزایش درصد نشت در شرایطی که افزایش جریان بین صفر تا ۱۰ برابر حداکثر جریان روز خشک مشابه باشد به صورت خطی بین صفر تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد. پس از محاسبه مقدار نشت فاضلاب در بازه‌های تر و خشک محدوده زمانی مطالعه، با افزودن مقدار نشت فاضلاب به جریان‌های وارد شده به تصفیه‌خانه می‌توان مقدار جریان وارد شده به شبکه را تعیین و محدوده دقیق‌تری از آبهای نفوذی ارائه کرد.

۳- بحث و نتایج

بازه زمانی مورد مطالعه شامل ۴۷۷ روز است که پس از جداسازی روزهای خشک و تر، به ۱۳ بازه خشک و ۲۳ بازه تر تقسیم می‌شود. شکل ۱ جریان وارد شده به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران در محدوده زمانی مطالعه را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان تأثیر بارش باران بر افزایش جریان فاضلاب را مشاهده کرد.

۳-۱- محاسبه مقدار BI

ششمین بازه خشک که شامل ۸۵ روز مناسب تحلیل نشت است به‌عنوان بازه مرجع انتخاب می‌شود. روزهای تعطیل و روزهای ماه رمضان که الگوی متفاوت مصرف شبانه آب دارند از روزهای تحلیل کنار گذاشته شدند.

ضریب r برای محاسبه BI در معادله ۱ باید به‌نحوی انتخاب شود که کمترین نوسان در مقدار نشتاب در روزهای تحلیل مشاهده شود. بنابراین از مقدار مختلف r استفاده شده و انحراف از معیار در مجموعه مقدار BI محاسبه می‌شود. با تغییر r از ۰/۱۷۰ تا ۰/۲۸۰ با فاصله‌های ۰/۰۰۵، کمترین انحراف از معیار به‌ازای r برابر ۰/۲۴۰ در بازه مرجع مشاهده شد. برحسب این مقدار و استفاده از معادله ۲، مقدار r در تمام بازه‌های خشک قابل‌محاسبه است. جدول ۱ خلاصه‌ای از محاسبات BI را در اختیار قرار می‌دهد.

همان‌طور که تغییرات دبی نشتاب در بازه‌های مختلف نشان می‌دهد، مقدار نشتاب از تابستان (بازه خشک شماره ۶) تا زمستان

$$r_i = r_{ref} \left(\frac{n_{ref}}{n_i} \right) \left(\sum_{j=1}^{n_i} \left(\frac{MNOF}{ADOF} \right)_j \right) / \left(\sum_{k=1}^{n_{ref}} \left(\frac{MNOF}{ADOF} \right)_k \right) \quad (2)$$

که در آن

MNOF حداقل جریان خارج شده از مخزن آب در شب و ADOF میانگین جریان خارج شده از مخزن آب در یک شبانه‌روز است. همچنین i نشان‌دهنده شماره بازه خشک و ref نشان‌دهنده بازه خشک مرجع است. n نیز تعداد روزهای موجود در هر بازه خشک را نشان می‌دهد.

پس از محاسبه r در هر بازه خشک می‌توان با استفاده از معادله ۱ مقدار BI در هر یک از روزهای بازه را محاسبه کرد. سپس با کسر مقدار نشتاب از جریان فاضلاب وارد شده به تصفیه‌خانه، مقدار فاضلاب خام وارد شده به تصفیه‌خانه محاسبه می‌شود.

۲-۴- محاسبه آب باران نفوذی

پس از محاسبه مقدار نشتاب و فاضلاب خام در روزهای خشک، با کسر مقدار جریان روز خشک از روز تر، مقدار اضافه بار ناشی از ورود آب باران به شبکه تعیین می‌شود. این کار با کسر میانگین جریان در دو روز مختلف پیش و پس از بازه تر از جریان روز تر انجام می‌شود تا دقت کار افزایش یابد. برای انتخاب روزهای خشکی که در این میانگین‌گیری ایفای نقش می‌کنند باید روزهایی با مشخصات زمانی مشابه با روز تر انتخاب شوند؛ به‌گونه‌ای که اگر بازه تر در دو روز کاری ادامه یابد، روزهای خشک نیز از دو روز غیر تعطیل انتخاب شوند.

۲-۵- نشت فاضلاب

دبی نشت فاضلاب در بازه‌های خشک به‌طور مستقیم تابعی از جریان موجود در فاضلاب‌روها است. بنابراین درصدی ثابت از جریان روز خشک به‌عنوان جریان خارج شده از لوله در نظر گرفته می‌شود. این مقدار را می‌توان برحسب عمر شبکه و کیفیت ساخت آن تخمین زد.

مقدار نشت فاضلاب در شرایط خاص مانند زیر فشار قرار گرفتن لوله هنگام افزایش شدید جریان در اثر بارش و شسته شدن رسوب کف لوله‌ها پس از بارش افزایش محسوسی می‌یابد (Karpf et al., 2011, Vollertsen and Hvitved-Jacobsen, 2003)

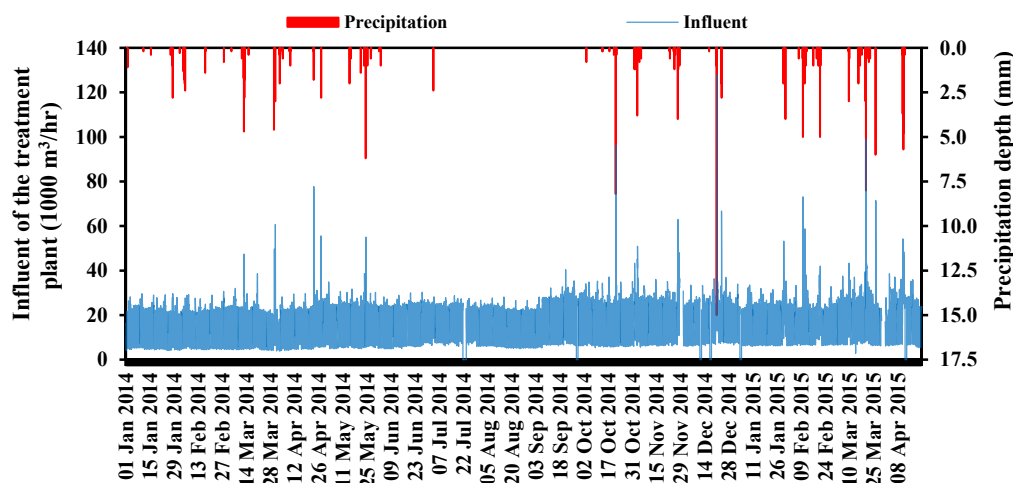


Fig. 1. The South Tehran WWTP influent in the study period

شکل ۱- دبی فاضلاب وارد شده به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران در محدوده زمانی مطالعه موردی

جدول ۱- میانگین نرخ و درصد نشتاب در هر بازه خشک

Table 9. Average infiltration rate and percentage calculated in each dry-weather period

Dry-weather period	Date	Number of days suitable for BI calculation	MNOF/ADOF	r	Average ADF ($10^3 \text{ m}^3/\text{hr}$)	Average BI ($10^3 \text{ m}^3/\text{hr}$)	Infiltration percentage
1	02/01/2014 to 27/01/2014	20	data is not available	-	17.33	-	-
2	08/02/2014 to 10/03/2014	25	data is not available	-	17.47	-	-
3	14/03/2014 to 29/03/2014	9	0.426	0.224	15.72	1.39	8.8
4	10/04/2014 to 22/04/2014	11	0.390	0.205	17.28	1.76	10.2
5	28/04/2014 to 13/05/2014	12	0.401	0.211	19.37	1.71	8.8
6 (reference period)	03/06/2014 to 20/10/2014	85	0.456	0.240	19.09	1.74	9.1
7	23/10/2014 to 01/11/2014	7	0.435	0.229	20.34	1.83	9.0
8	06/11/2014 to 24/11/2014	14	0.439	0.231	20.54	2.11	10.3
9	01/12/2014 to 19/12/2014	13	0.443	0.233	19.53	2.63	13.5
10	25/12/2014 to 28/01/2015	29	0.428	0.225	19.23	3.00	15.6
11	22/02/2015 to 09/03/2015	14	0.403	0.212	19.74	3.10	15.7
12	27/03/2015 to 10/04/2015	6	0.411	0.216	19.24	2.61	13.5
13	14/04/2015 to 22/04/2015	8	0.407	0.214	19.80	2.56	12.9

انتخاب شده علاوه بر مشابهت زمانی باید الگوی مشابهی نیز داشته باشد، از داده‌های مصرف آب برای اطمینان از مشابهت بازه‌ها استفاده شد. به نحوی که اگر مصرف آب در بازه تر و بازه خشک مشابه بیش از ۴ درصد اختلاف داشته باشند، مقدار دبی در روز خشک به کمک داده‌های خروجی از مخزن آب اصلاح می‌شود. از میان ۲۳ بازه تر مورد مطالعه، ۴ بازه که در مناسبت‌های خاصی از سال (مانند نوروز) قرار گرفته بودند نیاز به اصلاح پیدا کردند. در میان ۲۳ بازه مورد بررسی، بازه شماره ۲ که در آن بارش برف و دمای کمتر از صفر رخ داده، به نحوی متفاوت بررسی شده است.

محاسبه آب باران نفوذی در این بازه، از محدوده‌ای ۷۲ ساعته پس از بارش برای کسر جریان روز خشک از روز تر استفاده شده تا تمام آثار ذوب برف و یخ در افزایش جریان فاضلاب دیده شود. نتایج محاسبه مقدار آب باران نفوذی نشان می‌دهد که هم‌بستگی خوبی ($R^2=0.737$) بین حجم آب باران نفوذی و عمق بارش در بازه‌های تر وجود دارد. شکل ۳ حجم آب باران نفوذی به ازای مجموع بارش در هر یک از بازه‌های تر را نشان می‌دهد. در این شکل خط برازش داده‌های موجود و معادله آن در نرم‌افزار اکسل رسم شده است.

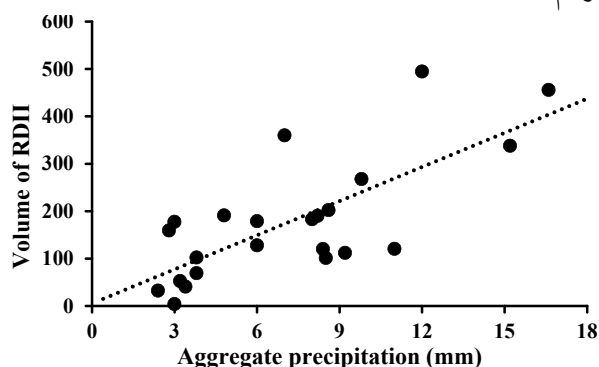


Fig. 3. Volume of RDII in each wet-weather period

شکل ۳- حجم آب باران نفوذی در هر یک از بازه‌های تر

همان طور که در شکل ۳ مشخص است، بسیاری از داده‌های حجم آب باران نفوذی روی شکل با خط برازش فاصله‌ای محسوس داشته که دلیل آن را می‌توان در عدم قطعیت‌های موجود در روش کسر جریان خشک از تر دید (Zhang, 2005). از جمله این عدم قطعیت‌ها می‌توان به عدم قطعیت‌هایی در مقدار و الگوی مصرف آب و تولید فاضلاب، تغییرات شدت بارش در بازه‌های ۶ ساعته

(بازه خشک شماره ۱۰) افزایشی ۷۲ درصدی داشته است. دلیل این افزایش را می‌توان در تغییرات تراز آب زیرزمینی شهر تهران در طول سال دید. داده‌های تغییرات تراز آب زیرزمینی شهر تهران در طول بازه‌ای ۳۰ ساله نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در زمستان، ۱ تا ۲ متر بالاتر از سطح آب زیرزمینی در تابستان قرار می‌گیرد (Karimi et al., 2019).

جدا از تأثیر تراز آب زیرزمینی بر تغییر حجم نشتاب در فصل‌های مختلف سال، افزایش طول شبکه بر افزایش مقدار آب‌های نفوذی تأثیری اجتناب‌ناپذیر دارد. طول شبکه فاضلاب قرار گرفته در مدار بهره‌برداری تا انتهای سال ۱۳۹۲ برابر ۳۵۴۶ کیلومتر بوده که تا انتهای سال ۱۳۹۴ به ۴۴۶۴ کیلومتر رسیده است (Mahab Ghods Co., 2018). مقدار بیان شده در جدول ۱ نیز افزایش تدریجی مقدار متوسط فاضلاب وارد شده به تصفیه‌خانه و BI را نشان می‌دهد.

۲-۳- محاسبه مقدار آب باران نفوذی

با جداسازی بازه‌های تر و بازه‌های خشک مشابه برای محاسبه مقدار آب باران نفوذی، حجم آب باران نفوذی به ازای مجموع بارش در هر یک از بازه‌های تر محاسبه شده است. نمونه‌ای از دبی روز تر و دبی در بازه‌های خشک مشابه برای بازه تر شماره ۹ در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه جریان خشکی که برای کسر از جریان تر

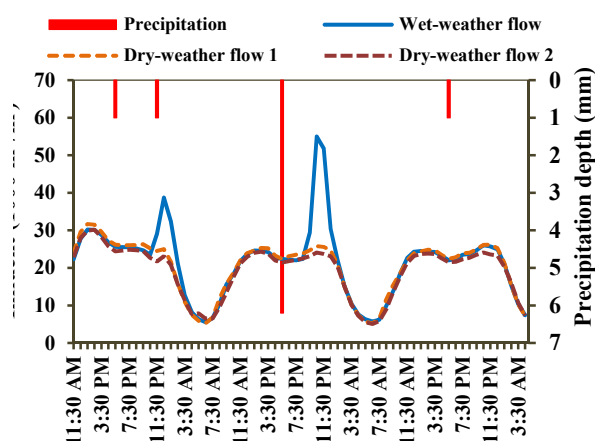


Fig. 2. Wet and dry-weather influences of the WWTP in a wet-weather period

شکل ۲- جریان ورودی تصفیه‌خانه در روز تر و روزهای خشک مشابه در یک بازه تر

خام وارد شده به تصفیه‌خانه و نشت فاضلاب خارج شده از شبکه در سال ۱۳۹۳ محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- حجم جریان‌های وارد شده به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران و نشت از شبکه فاضلاب تهران در بازه زمانی یک ساله مطالعه (میلیون مترمکعب)

Table 2. Volume of the South Tehran WWTP influent and exfiltration of the Tehran sewerage network in the one-year study period (million cubic meter)

Total WWTP influent	Foul sewage volume	Infiltration volume	RDII volume	Volume of sewer exfiltration
169.568	147.674	18.584	3.310	10.267

طول شبکه و محدوده زیر پوشش آن در سال ۱۳۹۳ به ترتیب برابر ۳۶۰۵ کیلومتر و ۳۳۷ کیلومتر مربع است که برای محاسبه محدوده ورود نشتاب و آب باران نفوذی استفاده می‌شود. جدول ۳ محدوده ورود نشتاب به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران در سال ۱۳۹۳ را مشخص می‌کند.

بر اساس مقدار مشخص شده در جدول ۳، بیشینه نشتاب وارد شده به تصفیه‌خانه در سال ۱۳۹۳ برابر ۰/۰۲۵۶ لیتر بر ثانیه بر هکتار است که از حداقل مقدار توصیه شده در ضابطه شماره ۱۱۸ (۰/۰۵ لیتر بر ثانیه بر هکتار) بسیار کمتر است.

با توجه به اینکه آب باران نفوذی ماهیتی متفاوت از نشتاب داشته و اثر آن به صورت لحظه‌ای و شدید است، باید از حداکثر جریان‌های ثبت شده در بازه‌های تر در سال ۱۳۹۳ برای تعیین محدوده آب باران نفوذی در شبکه استفاده کرد. طبق محاسبات انجام شده، بیشترین حجم روزانه آب باران نفوذی برابر ۵۳۷ هزار مترمکعب و بیشینه ساعتی آب باران نفوذی وارد شده به شبکه فاضلاب برابر ۱۱۸/۱ هزار مترمکعب به‌ازای بارشی ۱۶/۶ میلی‌متری است. با افزودن دبی BI بر آب باران نفوذی، محدوده آبهای نفوذی را می‌توان مشخص کرد. جدول ۴ مقدار آبهای نفوذی وارد شده به شبکه را در سال ۱۳۹۳ نشان می‌دهد.

بر اساس مقدار بیان شده در جدول ۴، نرخ ورود آبهای نفوذی به شبکه در شرایطی که میانگین سالانه یا حداکثر روزانه مدنظر قرار داده شود، بسیار کمتر از مقدار بیان شده در ضابطه شماره ۱۱۸ (۰/۴ تا ۰/۶ لیتر بر ثانیه بر هکتار) است، ولی طراحی شبکه باید

اندازه‌گیری، وقوع بالازدگی در طول مسیر و خطا در اندازه‌گیری دبی و بارش اشاره کرد.

۳-۳- محاسبه نشت فاضلاب در بازه‌های خشک و تر

شبکه فاضلاب شهر تهران در سال ۱۳۹۳ که عمده محاسبات در آن سال انجام می‌شود، کمتر از ۱۰ سال عمر داشته و شبکه‌ای جوان به حساب می‌آید. با این وجود، به دلیل مشکلات ساخت و کیفیت پایین در گرفتن انشعاب‌ها، مقدار قابل توجهی از فاضلاب از شبکه خارج و وارد خاک و آب زیرزمینی می‌شود. درصد نشت فاضلاب برای شرایط آب و هوایی خشک در شهر تهران برابر ۶ درصد جریان وارد شده به تصفیه‌خانه در نظر گرفته می‌شود که برحسب الگوی بیان شده در بخش ۲-۵ از این پژوهش، می‌تواند در روزهای تر تا ۲۴ درصد افزایش یابد. شکل ۴ تغییرات درصد نشت فاضلاب در بازه تر شماره ۹ (مشابه شکل ۲) را نشان می‌دهد.

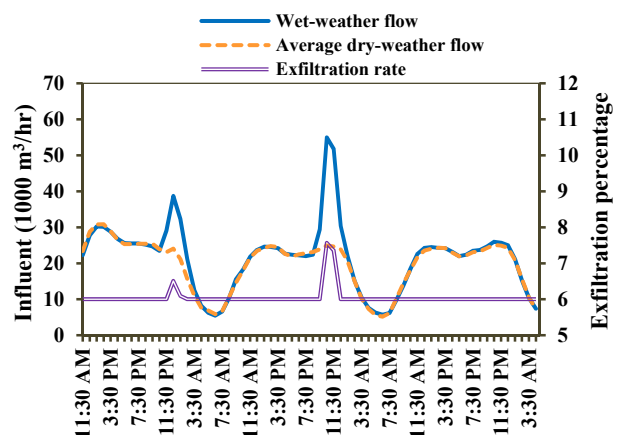


Fig. 4. Changes in exfiltration percentage in a wet-weather period

شکل ۴- تغییرات درصد نشت فاضلاب در یک بازه تر

با محاسبه مقدار نشت فاضلاب و افزودن آن به دبی وارد شده به تصفیه‌خانه می‌توان مقدار فاضلاب خام، نشتاب و آب باران نفوذی وارد شده به شبکه در هر ساعت را مشخص کرده و محدوده ورود آبهای نفوذی به شبکه را تعیین کرد.

۳-۴- محدوده آبهای نفوذی در شبکه و تصفیه‌خانه

برای تعیین محدوده آبهای نفوذی، بازه‌ای یک ساله شامل تمام روزهای سال ۱۳۹۳ انتخاب می‌شود. حجم آبهای نفوذی، فاضلاب

جدول ۳- محدوده ورود نشتاب به تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب تهران

Table 3. Infiltration rate in the South Tehran WWTP

Infiltration	Discharge (m ³ /hr)	Discharge per length of pipeline (m ³ /day/km)	Discharge per service area (L/s/ha)
Minimum	1391	9.29	0.0115
Maximum	3104	20.72	0.0256
Average	2121	14.16	0.0175

جدول ۴- محدوده ورود آبهای نفوذی به شبکه فاضلاب شهر تهران

Table 4. Total inflow and infiltration rate in the Tehran sewerage network

Inflow and infiltration	Discharge (m ³ /hr)	Discharge per length of pipeline (m ³ /day/km)	Discharge per service area (L/s/ha)
Annual average	2660	17.71	0.0219
Daily maximum	25361	168.84	0.2090
Hourly maximum	120899	804.88	0.9965

شرایطی که امکان کاهش تعداد اتصالات غیرمجاز فراهم نباشد می‌توان از روش‌هایی برای به تاخیر انداختن ورود جریان به شبکه و تصفیه‌خانه استفاده کرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به ایجاد مخازن ذخیره موقت آب باران، پشت‌بام‌های سبز و سلول‌های زیست‌تأخیری اشاره کرد. جدا از روش‌های اشاره شده، تنظیم و آب‌بندی دریچه‌های آدروها در خیابان‌ها و عدم ورود آبهای سطحی به آدروها در زمان بارش ضروری است.

۴- نتیجه‌گیری

با وجود اینکه وظیفه اصلی شبکه‌های فاضلاب مجزاکه متداول‌ترین نوع شبکه فاضلاب در ایران هستند، دریافت و انتقال فاضلاب خام است. همواره نشتاب و آب باران نفوذی قسمتی از جریان فاضلاب منتقل شده به تصفیه‌خانه را تشکیل می‌دهند. ضابطه شماره ۱۱۸ که برای طراحی شبکه‌های فاضلاب ایران نوشته شده است، محدوده ۰/۴ تا ۰/۶ لیتر بر ثانیه بر هکتار را به‌عنوان محدوده ورود آبهای نفوذی به شبکه‌های فاضلاب مجزا در ایران معرفی می‌کند. در این پژوهش پس از محاسبه حجم نشتاب و آب باران نفوذی در شهر تهران، محدوده آبهای نفوذی در سال ۱۳۹۳ در شبکه فاضلاب شهر تهران بین ۰/۱۲۲ تا ۰/۹۹۶۵ لیتر بر ثانیه بر هکتار به‌دست آمد. مقدار حداقل این بازه در شرایط ورود

به‌نحوی انجام شود تا تعداد بالازدگی و پس‌زدگی در اثر ورود آبهای نفوذی به حداقل برسد. در بازه زمانی یک ساله مورد بررسی، در ۵ ساعت از بازه‌های تر، مقدار آبهای نفوذی از حد بالای بیان شده در ضابطه شماره ۱۱۸ فراتر رفته است. این به آن معناست که در شرایط رسیدن به دوره طرح و وقوع بارش‌هایی مشابه سال ۱۳۹۳، شبکه فاضلاب شهر تهران در چندین ساعت از سال با مشکل جدی اضافه بار هیدرولیکی و بالازدگی همراه خواهد بود. به‌علاوه، در شرایط وقوع بارش‌هایی با عمق یا شدت بیشتر، این مشکلات بیشتر نمایان خواهند شد.

با مشاهده مقدار دو جدول ۳ و ۴ می‌توان به این نتیجه رسید که اختلاف چشمگیری بین دبی آبهای نفوذی در شرایط آب و هوایی خشک و تر در شبکه فاضلاب تهران وجود دارد که دلیل اصلی آن را می‌توان در اتصال غیرمجاز آبرو حیاط و بام بسیاری از ساختمان‌ها به شبکه فاضلاب دانست. در صورتی که برنامه‌ای مناسب برای کاهش تعداد این اتصالات در سال‌های بهره‌برداری از سامانه فاضلاب وجود نداشته باشد، هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی ناشی از ورود آب باران نفوذی به شبکه در سال‌های انتهای دوره طرح بسیار زیاد خواهد شد.

نظر بر آنکه محدوده آبهای نفوذی به‌ازای جریان حداکثر روزانه بسیار کمتر از مقدار آن در حداکثر ساعتی است (جدول ۴)، در

هزینه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی را به‌همراه خواهد داشت. همچنین بازه ۰/۴ تا ۰/۶ لیتر بر ثانیه بر هکتار بیان شده در ضابطه شماره ۱۱۸، بازه‌ای نامطمئن به حساب آمده و در شهرهایی با بارش‌های بیش از آنچه در این پژوهش بررسی شد، ظرفیت فاضلاب‌بروها جواب‌گوی بار هیدرولیکی ناشی از آب باران نفوذی نخواهد بود.

۵- قدردانی

این پژوهش هیچ حامی مالی یا معنوی نداشته و توسط نویسندگان انجام شده است.

نشتاب آب زیرزمینی در آب و هوای خشک و حداکثر این بازه در اثر ورود آبهای نفوذی به‌ازای بارشی ۱۶/۶ میلی‌متری رخ داده که از مقدار حداکثر بیان شده در ضابطه شماره ۱۱۸ بیشتر است. با مقایسه مقدار حداقل و حداکثر در محدوده آبهای نفوذی می‌توان نتیجه گرفت که گرچه نشتاب حجم بیشتری از آبهای نفوذی در سال را شامل می‌شود، ولی آب باران نفوذی تأثیر جدی‌تری بر شبکه فاضلاب داشته و در صورت جلوگیری نکردن از اتصال غیرمجاز آبروی حیاط و بام ساختمان‌ها به انشعاب‌های فاضلاب، دشواری‌های گوناگونی مانند بالازدگی و پس‌زدگی فاضلاب در اثر افزایش جریان در سال‌های انتهایی دوره طرح به وجود آمده و

References

- Bareš, V., Stránský, D. & Sýkora, P. 2012. Evaluation of sewer infiltration/inflow using COD mass flux method: case study in Prague. *Water Science and Technology*, 66, 673-680.
- Beheshti, M. & Sægrov, S. 2018. Quantification assessment of extraneous water infiltration and inflow by analysis of the thermal behavior of the sewer network. *Water*, 10, 1070.
- Beheshti, M., Sægrov, S. & Ugarelli, R. 2015. Infiltration/inflow assessment and detection in urban sewer system. *Vann Journal*, 1(1), 24-34.
- Belhadj, N., Joannis, C. & Raimbault, G. 1995. Modelling of rainfall induced infiltration into separate sewerage. *Water Science and Technology*, 32, 161-168.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Cardoso, M., Ellis, B., Frehmann, T., Giulianelli, M., Gujer, W., et al., 2006. Towards a better knowledge and management of infiltration and exfiltration in sewer systems: the APUSS project. *Water Practice Technology*, 1(1), No. 22.
- Diogo, A. F., Barros, L. T., Santos, J. & Temido, J. S. 2018. An effective and comprehensive model for optimal rehabilitation of separate sanitary sewer systems. *Science of the Total Environment*, 612, 1042-1057.
- Ellis, J. B. 2001. Sewer infiltration/exfiltration and interactions with sewer flows and groundwater quality. *2nd International Conference Interactions Between Sewers, Treatment Plants and Receiving Waters in Urban Areas-Interurba II*, Citeseer, Lisbon, Portugal. 19-22.
- IRIPBO (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization), 2017. *Guidelines for Design of Wastewater Collection Systems* (Publication No.118). (In Persian)
- Jiang, A. Z., Mcbean, E. A., Binns, A. & Gharabaghi, B. 2019. Quantifying rainfall-derived inflow from private foundation drains in sanitary sewers: case study in London, Ontario, Canada. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24, 05019023.
- Karimi, L., Motagh, M. & Entezam, I. 2019. Modeling groundwater level fluctuations in Tehran aquifer: results from a 3D unconfined aquifer model. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 439-449.
- Karpf, C., Hoefl, S., Scheffer, C., Fuchs, L. & Krebs, P. 2011. Groundwater infiltration, surface water inflow and sewerage exfiltration considering hydrodynamic conditions in sewer systems. *Water Science and Technology*, 63, 1841-1848.
- Mahab Ghods Co., 2018. A report on the Tehran wastewater collection system description. Tehran, Iran. (In Persian)

- Mitchell, P. S., Stevens, P. L. & Nazaroff, A. 2007. A comparison of methods and a simple empirical solution to quantifying base infiltration in sewers. *Water Practice*, 1, 1-20.
- Nasrin, T., Sharma, A. K. & Muttill, N. 2017. Impact of short duration intense rainfall events on sanitary sewer network performance. *Water*, 9, 225.
- Parcher, M. J. 1997. *Wastewater Collection System Maintenance*, CRC Press. Lancaster, Pennsylvania, USA.
- Paterson, W., Rushforth, R., Ruddell, B. L., Konar, M., Ahams, I. C., Gironás, J., et al., 2015. Water footprint of cities: a review and suggestions for future research. *Sustainability*, 7, 8461-8490.
- Pawlowski, C., Rhea, L., Shuster, W. & Barden, G. 2014. Some factors affecting inflow and infiltration from residential sources in a core urban area: case study in a Columbus, Ohio, Neighborhood. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140, 105-114.
- Rezaee, M. 2020. Evaluation of extraneous water in separate sewer systems with concentration on rainfall-derived inflow. MSc. Thesis, University of Tehran. Tehran, Iran. (In Persian)
- Rödel, S., Günthert, F. & Brüggemann, T. 2017. Investigating the impacts of extraneous water on wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 75, 847-855.
- Rutsch, M., Rieckermann, J., Cullmann, J., Ellis, J. B., Vollertsen, J. & Krebs, P. 2008. Towards a better understanding of sewer exfiltration. *Water Research*, 42, 2385-2394.
- Safavi, H. R., Sattari, F., Soleimani, M., Homayouni, N., Yaraghi, P. & Kazemi, K. 2016. *Sewer Networks Design and Construction*, Manii Publication. Isfahan, Iran. (In Persian)
- Thorndahl, S., Balling, J. D. & Larsen, U. B. B. 2016. Analysis and integrated modelling of groundwater infiltration to sewer networks. *Hydrological Processes*, 30, 3228-3238.
- Vaes, G., Willems, P. & Berlamont, J. 2005. Filtering method for infiltration flow quantification. *Proceedings 10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen, Denmark.
- Vollertsen, J. & Hvitved-Jacobsen, T. 2003. Exfiltration from gravity sewers: a pilot scale study. *Water Science and Technology*, 47, 69-76.
- Wittenberg, H. & Aksoy, H. 2010. Groundwater intrusion into leaky sewer systems. *Water Science and Technology*, 62, 92-98.
- Zhang, Z. 2005. Flow data, inflow/infiltration ratio, and autoregressive error models. *Journal of Environmental Engineering*, 131, 343-349.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).