Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Vol. 20, No. 1, PP. 73-90, Spring 2025

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.430994.1688

Evaluating the Resilience of the Wastewater Collection Network under the Effect of a Possible Flood: Penalty Curves Approach (Case Study: Hendijan City)

Mahdi Parsaei[1], Massoud Tabesh[2*]

1- Graduate Student, MSc, Water and Wastewater Engineering, College of Environmental Engineering, University of Tehran, Iran.
2- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

[*] **mtabesh@ut.ac.ir**

Received: 19 December 2023
Accepted: 17 July 2024
Discussion: 22 June 2025

J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Nowadays, wastewater collection networks play a crucial role in the collection, transportation, and disposal of various wastewater types, primarily due to their vulnerability to flooding and need to prevent future health, environmental, and economic problems. In recent decades, researchers have been exploring ways to address the uncertainties associated with floods in these networks. An assessment of resilience and its components is an effective means of reducing vulnerability and increasing sustainability. This article presents an innovative approach to quantify resilience based on the penalty curves. This approach, based on the hydraulic performance curve, allows the user to explore main components of resilience and to better understand the performance, strengths and weaknesses of the sewer network during floods, providing a more realistic assessment of resilience in the operation phase. Despite the overall damage to the network's performance caused by floods, the resilience assessment indicates that performance can be enhanced during the initial and final hours of floods. Furthermore, considering the importance of surface water networks in increasing resilience, a hypothetical implementation was proposed for Hendijan City, despite the absence of such a network in the case study, to absorb runoff. This network resulted in an average increase in resilience of approximately 9.86% and a decrease in resilience loss of approximately 17.3% on average, making it an appropriate urban infrastructure for flash floods.

Methodology: To assess the resilience of the wastewater collection network under the potential impact of floods, a resilience framework is employed. This model consists of three sub-models: hydraulic, hydrological, and resilience. The hydraulic sub-model pertains to the physical characteristics of the sewage network and the amount of generated wastewater. The hydrological sub-model is related to the characteristics of watershed sub-basins, precipitation patterns, and determines the amount of runoff generated by floods. Finally, the resilience sub-model is created using specified relationships, utilizing the output of the hydraulic-hydrological model of the wastewater collection network and hydraulic performance indices based on flow velocity penalty curves and conduit filling percentage. In this framework, these sub-models are integrated to establish a comprehensive evaluation of wastewater collection network resilience to floods.

Results and Discussion: The wastewater collection network has a critical line consisting of

26 sewage conduits, representing the highest combined flow of runoff resulting from both floods and generated wastewater. During a 24-hour simulation, these conduits exhibit the highest percentage of filling (h/d) and velocity (v). With an increase in the rainfall return period in each main scenario, the resilience decreases, and the resilience loss increases. In 25-year and 50-year rainfall return periods, the reduction in resilience and the increase in resilience loss are less compared to the 5-year and 10-year rainfall return periods. These are because the input floods into the network mainly affect the time required to discharge these runoff flows. In the hydraulic performance curve, the robustness index, rapidity in response, and rapidity in recovery decrease with an increase in the rainfall return. However, the application of a stormwater network as a resourcefulness index has a significant effect on improving other indices.

Conclusion: In this article, the resilience of the wastewater collection network after the flood simulation was calculated using the Critical Performance Curve. The area under this performance curve indicates the level of resilience. Using the penalty curve method, the network's performance was determined based on actual conditions, unlike other performance calculation equations that assume the ideal performance level (HPI=1) for the beginning of the simulation period. Therefore, this method results in a lower error in resilience calculation and appears to be more realistic. Furthermore, considering the resilience components that each cover a whole of the performance curve, a better understanding and clearer insight into the strengths and weaknesses of the network can be obtained. By identifying the hydraulic performance of the network at each moment, appropriate strategies can be implemented based on the available resources and budget to enhance the network resilience. In this article, using a resource fulness indices, in addition to the direct impact on robustness and rapidity indices, resilience increased by 9.86%, and resilience loss decreased by 17.3%, respectively. It was also observed that using the penalty curve method, which calculates resilience based on the analysis of wastewater collection network flow, consistently results in reduced performance and a decreased resilience throughout the simulation period.

Keywords: Wastewater Collection Networks, Resilience Evaluation and Enhancement, Urban Flooding, Penalty Curves, Hydraulic Performance Index, PCSWMM Software.

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک
سال ۲۰، شماره ۱، صفحات ۷۳-۹۰، بهار ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.430994.1688

ارزیابی تاب‌آوری شبکه جمع‌آوری فاضلاب تحت اثر سیلاب احتمالی؛ رویکرد منحنی‌های جریمه (مطالعه موردی: شهر هندیجان)

مهدی پارسایی[۱] و مسعود تابش[۲*]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* **mtabesh@ut.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: امروزه، شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب به‌دلیل آسیب‌پذیری در برابر سیل، نقش کلیدی در جمع‌آوری، انتقال و دفع انواع فاضلاب با هدف جلوگیری از مشکلات آتی بهداشتی، محیط‌زیستی و اقتصادی دارد. در دهه‌های اخیر، محققین به‌دنبال راه‌کارهایی برای مقابله این شبکه‌ها با عدم‌قطعیت‌های احتمالی در زمان وقوع سیل بوده‌اند. ارزیابی تاب‌آوری و اجزای آن، یک راه‌کار مناسب برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش پایداری است. در این مقاله، تاب‌آوری با رویکرد جدید استفاده از منحنی‌های جریمه ارزیابی می‌شود. این رویکرد بر اساس منحنی عملکرد هیدرولیکی امکان بررسی جزءهای اصلی تاب‌آوری و درک بهتری از عملکرد و نقاط قوت و ضعف شبکه فاضلاب را در طی وقوع سیل به کاربر می‌دهد و میزان تاب‌آوری را نزدیک‌تر به واقعیت در فاز بهره‌برداری نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی تاب‌آوری بیانگر این مورد است که وقوع سیل علیرغم آسیب کلی به عملکرد شبکه، ممکن است باعث افزایش عملکرد در ساعات ابتدایی و انتهایی رخداد نیز شود. هم‌چنین برای درنظر گرفتن اهمیت شبکه آب سطحی در افزایش تاب‌آوری، علی‌رغم عدم وجود این شبکه در منطقه مورد مطالعه (شهر هندیجان)، این شبکه به‌صورت فرضی با هدف جذب رواناب درنظر گرفته شد. نتایج نشان داد شبکه آب سطحی می‌تواند میزان تاب‌آوری را به‌طور میانگین حدوداً ۹/۸۶٪ افزایش و میزان افت تاب‌آوری را حدوداً ۱۷/۳٪ کاهش دهد است، لذا می‌تواند یک زیرساخت شهری مناسب در برابر سیلاب ناگهانی باشد.

کلیدواژگان: شبکه جمع‌آوری فاضلاب، ارزیابی و ارتقای تاب‌آوری، سیلاب شهری، منحنی جریمه، شاخص عملکرد هیدرولیکی (HPI)، نرم‌افزار PCSWMM.

۱- مقدمه

تاب‌آوری[۱] پدیده‌ای پیچیده، پویا و چندبعدی است که توانایی سازگاری سامانه‌ها در برابر تغییرپذیری‌ها، بدون فروپاشی در زمان بحران است و بیانگر نوعی آینده‌نگری است که پویا بودن واکنش جامعه در برابر مخاطره‌ها را به‌همراه دارد (Parsaei and Tabesh, 2023). مفهوم تاب‌آوری دارای تاریخچه‌ای درازمدت است. در آغاز، تاب‌آوری در دهه ۱۹۷۰ میلادی در حوزه زیست‌شناسی[۲] معرفی شد. جایی‌که در آن تاب‌آوری با عنوان ظرفیت یک بوم‌سامانه برای بقا، سازگاری و رشد در رویارویی با تغییرهای پیش‌بینی‌نشده، اطلاق شد (Holling, 1973). واژه تاب‌آوری از واژه‌های لاتین "مقاوم[۳] و مقاومت[۴]" سرچشمه می‌گیرد که به معنای توانایی بازگشت به عقب یا عقب پریدن است (Dalziell & Mcmanus, 2004). در پژوهشی، Bruneau et al. (2003) تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سامانه برای کاهش احتمال یک تکانه، جذب یک تکانه در صورت رخ دادن (کاهش ناگهانی عملکرد) و بازیابی سریع پس از آن تکانه (برقراری دوباره عملکرد

1. Resilience
2. Ecology
3. Resilire
4. Resilio

طبیعی) معرفی کردند که در شکل ۱ به‌صورت نمودار درصد کیفیت سامانه-زمان نشان داده شده‌است.

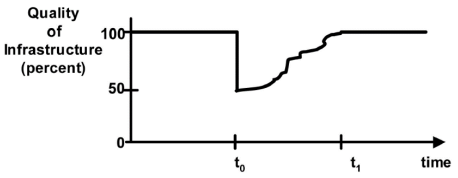

Fig. 1 Resilience assessment - conceptual definition
شکل ۱ ارزیابی تاب‌آوری - تعریف مفهومی

میزان تاب‌آوری با آسیب‌پذیری متفاوت است، زیرا آسیب‌پذیری سامانه بر مبنای یک پیامد یا آسیب اندازه‌گیری می‌شود ولی تاب‌آوری، استحکام سامانه و بازیابی آن به حالت عادی بر اثر یک مخاطره را بررسی و تبیین می‌کند. همچنین ارتباط تاب‌آوری و پایداری بدین‌گونه است که برای افزایش تاب‌آوری، باید اثرهای بالقوه مثبت و منفی بر پایداری سامانه را که با توجه به شرایط آینده می‌تواند به میزان قابل‌توجهی متفاوت باشد، مدنظر قرار داد (Sweetapple et al., 2019). اجزای تاب‌آوری در پژوهشی توسط Bruneau & Reinhorn (2006) برای هر دو سامانه فیزیکی و اجتماعی به‌گونه‌ای تعریف شد که شامل ویژگی‌های زیر باشد. در بیشتر مقاله‌های، ترکیبی از اجزای تاب‌آوری انتخاب شده‌است و از آن ترکیب به‌عنوان مفهوم تاب‌آوری در بررسی‌ها به‌کار رفته است:

۱- استحکام[1]: قدرت یا توانایی عنصرهای سامانه و دیگر معیارهای تجزیه و تحلیل برای مقاومت در برابر سطح مشخصی از تنش‌ها و تقاضا بدون تخریب یا افت عملکرد؛

۲- افزونگی[2]: حدی که در آن عنصرهای سامانه یا دیگر معیارهای تجزیه و تحلیل وجود دارند که قابل جایگزین نیستند؛ یعنی قادر به انجام الزام‌های عملکردی در صورت اختلال، تخریب و یا از دست دادن کارکرد هستند؛

۳- کاردانی[3]: توانایی برای شناسایی مسئله‌ها، تعیین اولویت‌ها و بسیج منبع‌های موجود در شرایطی که اختلال، برخی عناصر سامانه یا سایر معیارهای تجزیه و تحلیل را تهدید می‌کند. این منبع‌ها را می‌توان به‌صورت ترکیبی از توانایی به‌کارگیری مواد (مادی، فیزیکی، فناورانه و اطلاعاتی) و منبع‌های انسانی در فرآیند بازیابی سامانه برای دستیابی به اولویت‌ها و هدف‌ها، تصور کرد؛

۴- سرعت در پاسخ و بازیابی[4]: ظرفیت سامانه در برآورده کردن اولویت‌ها و رسیدن به هنگام به هدف‌ها به‌منظور جلوگیری از هدررفت، بازیابی کارایی و جلوگیری از اختلال در آینده سامانه.

در پژوهش‌های اخیر، روش‌های متفاوتی برای ارزیابی تاب‌آوری سامانه زهکشی شهری و سامانه‌های آب و فاضلاب ارائه شده‌است. برای نمونه، Wang et al. (2021) تاب‌آوری شبکه زهکشی شهری در مبنای سیلاب را بر مبنای دیدگاه کاری انجام ندادن و با اصلاح روش تاب‌آوری جامع که توسط Mugume et al. (2015) مطرح شد، محاسبه کردند. در این تحقیق میانگین مدت زمان سیلاب گرهی با توجه به تفاوت در شمار گره‌های سیل زده اصلاح شد و با افزایش شمار مخازن ذخیره، تاب‌آوری افزایش یافت. در تحقیق دیگری برای ارزیابی شاخص تاب‌آوری شبکه فاضلاب در برابر فروپاشی زمین، از چهار جزء اصلی شاخص تاب‌آوری و ساختار سلسله مراتبی جدید برای محاسبه وزن‌های نسبی هر معیار بر مبنای ادبیات موجود فاضلاب و مصاحبه با کارشناسان فاضلاب و در نهایت از یک روش جمع وزنی استفاده شد (Zhang et al., 2022). Wang et al. (2019) از یک نمودار قابلیت‌اطمینان- شدت بارندگی برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه زهکشی شهری در برابر طوفان‌های ساختگی کوتاه مدت و باران‌های واقعی پایدار استفاده کردند که سطح زیر این نمودار میزان تاب‌آوری را مشخص می‌کند و هر چقدر سطح زیر نمودار بیشتر باشد، شبکه تاب‌آورتر است. در پژوهش دیگری نیز تاب‌آوری سازه‌ای شبکه فاضلاب تحت تغییرپذیری‌های آب و هوایی شدید با استفاده از چهار مدل خطرپذیری، شکست، پاسخ و بازسازی بر مبنای سطح عملکرد شبکه در طول رخداد رخداد بررسی شد (Zamanian et al., 2020).

Klise et al. (2017) یک چارچوب جامع را برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب به‌نام WNTR توسط زبان

1. Robustness
2. Redundancy
3. Resourcefulness
4. Rapid in Response and Recovery

برنامه‌نویسی پایتون ارائه کردند که این چارچوب ترکیبی از شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی و کیفی شبکه آب توسط نرم‌افزار EPANET با مدل‌های شکست ناشی از زلزله یا دیگر رویدادها، معیارهای تاب‌آوری و راهبردهای بازیابی سامانه برای ارزیابی تأثیر آسیب‌های ناشی از این رخدادها است.

تا به امروز، به‌رغم بررسی شاخص عملکرد هیدرولیکی، ارزیابی تاب‌آوری شبکه فاضلاب و به‌ویژه اجزای آن در طی رخداد سیل زیاد فراگیر نشده‌است. در پژوهش‌های پیشین، منحنی‌های جریمه یک روش عددی برای محاسبه عملکرد لحظه‌ای شبکه‌های آب یا فاضلاب بوده است. همچنین به‌دلیل پیش نیاز بودن شناسایی کلی عملکرد برای ارزیابی تاب‌آوری، تاب‌آوری نیز تا به امروز با چارچوب‌ها و روش‌های دیگری نیز بررسی شده‌است. امّا در این پژوهش، میزان این شاخص و اجزای آن به‌طور دقیق در مرحله بهره‌برداری با رویکرد جدیدی بر مبنای منحنی‌های جریمه سرعت جریان و درصدپرشدگی مجرا با استفاده از منحنی عملکرد هیدرولیکی شبکه فاضلاب اندازه‌گیری می‌شود تا گامی کاربردی به‌منظور درک بهتر از عملکرد هیدرولیکی شبکه فاضلاب در طول مدت زمان رخداد سیل ناگهانی برداشته شود.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق بندر هندیجان واقع در جنوب شرقی استان خوزستان، در ۷۰ کیلومتری جنوب شرقی بندر ماهشهر و در ۹۰ کیلومتری شمال خلیج فارس قرار گرفته است (شکل ۲). بندرهندیجان بندری است که در°۲۴/۳۰ شمالی و °۷۱/۴۹ شرقی قرار دارد و ارتفاع میانگین این شهر از سطح دریا به ۵ متر می‌رسد. همچنین این شهر از رودخانه بزرگی موسوم به هندیجان یا زهره عبور می‌کند که آن‌را به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می‌کند (شکل ۳). جانگاری منطقه به‌کلی مسطح است و دارای سطح آب زیرزمینی بالا (مجاورت با خلیج فارس) و شرایط ژئوتکنیکی ضعیف است (Zahediasl et al., 2021). حوضه آبریز رودخانه زهره در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران جزء حوضه آبریز خلیج فارس است. جمعیت انتهای دوره طرح شهر هندیجان در سال ۱۴۳۰ بر مبنای روش رشد هندسی حدود ۶۰ هزار نفر محاسبه شده‌است. با اعمال قیود طراحی نیز که در جدول ۱ نشان داده شده، شبکه فاضلاب شهر هندیجان با قطر فاضلابرو کمینه ۲۰۰ و بیشینه ۸۰۰ میلی‌متر با جنس پلی‌اتیلن موجدار با چگالی بالا برای انتقال فاضلاب تولیدی از پیش شبیه‌سازی شده‌است.

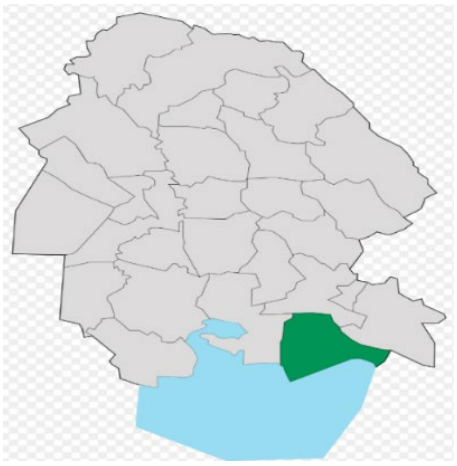

Fig. 2 Hendijan City-general view of Khuzestan province
شکل ۲ شهرستان هندیجان از دید کلی در استان خوزستان

Fig. 3 Satellite map of Hendijan City
شکل ۳ نقشه ماهواره ای شهر هندیجان

جدول ۱ محدودیت‌های طراحی در شبیه‌سازی مطالعه موردی

Table 1 Design limitations for case study simulations (IR of Iran, Plan and Budget Organization, 2016)

Parameter	Parameter Value
Maximum Velocity (V_{max})	4.5 m/s
Minimum Velocity (V_{min})	0.6 m/s
Maximum Slope (S_{max})	0.01
Minimum Slope (S_{min})	0.003 (if $Q < 15\ Lit/s$)
Maximum Conduit Filling Percentage ($(\frac{h}{d})_{max}$)	0.75
Minimum Cover (C_{min})	1.2

۳- مواد و روش‌ها

برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه گردآوری فاضلاب تحت اثر سیلاب احتمالی از یک چارچوب کلّی تاب‌آوری استفاده می‌شود که برای ایجاد این چارچوب، به سه زیرمدل هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و تاب‌آوری نیاز است. زیرمدل هیدرولیکی مربوط به ویژگی‌های فیزیکی شبکه فاضلاب و تعیین میزان فاضلاب تولیدی و زیرمدل هیدرولوژیکی نیز مربوط به ویژگی‌های زیرحوضه‌های آبریز، آب‌نگار بارش و تعیین میزان رواناب تولیدی ناشی از سیلاب است. در آخر، زیرمدل تاب‌آوری توسط رابطه‌های مشخص شده با استفاده از خروجی مدل هیدرولیکی-هیدرولوژیکی شبکه فاضلاب و شاخص عملکرد هیدرولیکی که بر مبنای منحنی‌های جریمه[1] سرعت جریان و درصد پرشدگی مجرا به‌دست می‌آید، ایجاد می‌شود.

۳-۱- زیرمدل هیدرولیکی

شبکه فاضلاب متشکل از لوله‌های اصلی و فرعی تحت دو مفهوم هیدرولیکی جریان لوله و جریان آبراهه باز کار می‌کند و مدلی که شبکه فاضلاب را شبیه‌سازی می‌کند باید ظرفیت شبیه‌سازی هر دو فرآیند را داشته باشد. برای تهیه این زیر مدل هیدرولیکی، از نرم‌افزار SewerGems استفاده شده که داده‌های ورودی به این نرم‌افزار، جانمایی مجراها و چاهک‌های بازرسی، ویژگی‌های طول مجراها و تراز ارتفاعی چاهک‌ها است. این اطلاعات به‌صورت فایل اتوکد برای شهر هندیجان دریافت شده و بیانگر وضع موجود شبکه فاضلاب این شهر است (Zahediasl et al., 2021). مقدار رواناب سطحی بسته به سطح فرهنگ مردم و شکل ساختمانی شبکه فاضلاب خانگی درهم بین ۱۰ تا ۳۰ درصد تغییر می‌کند (Monzavi, 1999). امّا در این پژوهش به‌دلیل مجزا بودن شبکه فاضلاب خانگی شهر هندیجان و نبود شبکه آب سطحی، رواناب به‌طور کامل به درون شبکه فاضلاب سرریز می‌شود و در نرم‌افزار شبیه‌ساز سیلاب جداگانه به سامانه فاضلاب اعمال خواهد شد. مقدار نشتآب نیز، با توجه به بالاتر بودن سطح آب زیرزمینی نسبت به مجرای فاضلاب در شهر هندیجان، ۹۰ درصد بیشینه جریان فاضلاب در محاسبه‌ها درنظر گرفته شده‌است (Monzavi, 1999; IR of Iran, Plan and Budget Organization, 2016).

گراف پایه شبکه گردآوری فاضلاب وضع موجود (شکل ۸) دارای ۶۴ حلقه ، ۲۰۱ مجرا و ۱۳۷ چاهک بازرسی است. اطلاعات یا داده‌های موجود شبکه فاضلاب هندیجان نیز دارای کاستی‌هایی بود که قابلیت استفاده مناسب در این پژوهش را نداشت (مانند نبود دسترسی به ویژگی‌های ایستگاه‌های پمپاژ یا عدم پوشش استانداردهای طراحی در میزان شیب مجرا، پوشش خاک و سرعت جریان)؛ بنابراین در این تحقیق برای تأیید استانداردهای طراحی، وضع موجود با هدف دسترسی و نزدیکی به شبکه واقعی، دوباره شبیه‌سازی شده و هیچ‌گونه بهینه‌سازی در طراحی انجام نشده‌است (فاز بهره‌برداری).

۳-۲- زیرمدل هیدرولوژیکی

برای تهیه زیر مدل هیدرولوژیکی از نرم‌افزار PCSWMM استفاده شده که یک نسخه تجاری نرم‌افزار SWMM است. این نرم‌افزار از یک مدل پویایی بارندگی-رواناب بهره می‌گیرد تا شبیه‌سازی هیدرولوژیکی یک رویداد مانند سیلاب یا شبیه‌سازی بلندمدت کمّی و کیفی یک رواناب در منطقه‌های شهری را ایجاد و مدل‌سازی کند (CHI, 1974). همچنین یک نقطه قوت کلیدی این نرم‌افزار همانند دیگر نرم‌افزارها، دسترسی رایگان و آزاد عموم به کد موتور شبیه‌ساز آن است (Bibi et al., 2023).

برای شبیه‌سازی سیلاب، افزون بر فراخوانی فیزیک و ساختار شبکه فاضلاب که شامل اطلاعات طول، قطر، شیب، پوشش مجراها و تراز ارتفاعی زمین و کف چاهک‌ها است، به مدل‌سازی زیرحوضه‌های آبریز[2] و ایجاد رواناب با استفاده از آب‌نگار بارش نیز نیاز است. هر زیرحوضه آبریز با توجه به فیزیک منطقه بر مبنای فراسنجه‌های مساحت، عرض معادل، درصد شیب و درصد نفوذناپذیری خود، یک آب‌نگار رواناب تولید می‌کند که به سمت چاهک پایین‌دست خود هدایت می‌شود. در این پژوهش از نرم‌افزار ArcMap برای پیاده‌سازی زیرحوضه‌های آبریز و مرز آبگیری حوضه اصلی شهر استفاده شده‌است. برای ایجاد آب‌نگار بارش، میزان بارندگی بر مبنای شدت بارش در طول زمان برای دوره بازگشت‌های ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله ثبت شده‌است (Bakhshipour et al., 2021). برای در نظر گرفتن پیش‌فرض‌های بارندگی، از دو پیش‌فرض اصلی

1. Penalty Curves

2. Watershed Sub-basin

وجود شبکه آب سطحی[1] فرضی (با فرض جذب ۵۰٪ رواناب تولیدی) و نبود شبکه آب سطحی[2] (وضعیت موجود) برای چهار دوره بازگشت بارندگی ذکر شده، استفاده می‌شود. در نهایت آب‌نگار بارش در نرم‌افزار PCSWMM، در طی ۶ ساعت با فواصل زمانی ۱۵ دقیقه برای دو پیش‌فرض اصلی (شامل ۴ دوره بازگشت بارندگی) اعمال می‌شود (بر مبنای داده‌های موجود).

قابل ذکر است که اگر سهم هر چاهک در جریان ورودی فاضلاب در SewerGems از روش منحنی‌های تیسن محاسبه شود، اطلاعات دبی چاهک به نرم‌افزار PCSWMM منتقل خواهد شد. اما با توجه به این که در این پژوهش، دبی چاهک‌ها از پیش قابل دسترس بوده و به‌صورت دستی در SewerGems وارد شده‌است، دبی به PCSWMM منتقل نمی‌شود و باید به‌طور جداگانه در این نرم‌افزار به هر چاهک اختصاص داده شود که در طول شبیه‌سازی سیلاب، مقدار فاضلاب به‌طور ثابت به هر چاهک وارد شده و تا آخر شبیه‌سازی تغییر نکند و تنها رواناب تولیدی ناشی از بارش متغیر باشد که در انتها از شبکه خارج شود. برای تخصیص دبی ثابت فاضلاب به‌طور جداگانه به هر چاهک در نرم‌افزار PCSWMM از روش آب زیرزمینی استفاده شده‌است. همچنین استفاده از دیگر روش (جریان پایه[3]) برای هر چاهک در این نرم‌افزار، نتایج دقیق و قابل‌قبولی را به‌همراه نداشت. لازم به یادآوری است که استفاده از آب زیرزمینی در این نرم‌افزار تنها به‌منظور اعمال دبی فاضلاب تخصیصی در نرم‌افزار SewerGems به هر چاهک است و از تأثیر خود آب زیرزمینی به‌دلیل اعمال پیشین به‌عنوان نشتاب، بر میزان رواناب تولیدی صرف‌نظر شده‌است. مقدار آب زیرزمینی توسط رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$Q_{GW} = A_1(H_{GW} - H^*)^{B_1} - A_2(H_{SW} - H^*)^{B_2} + A_3(H_{GW}H_{SW}) \quad (1)$$

که Q_{GW}: میزان آب زیرزمینی برحسب $\frac{m^3}{s.ha}$، H_{GW}: ارتفاع ناحیه اشباع بالای کف آبخوان برحسب متر، H_{SW}: ارتفاع رواناب در چاهک بالای کف آبخوان برحسب متر و H^*: آستانه ارتفاع آب زیرزمینی برحسب متر است که برای محاسبه آن از تراز کف چاهک استفاده می‌شود. A_1، A_2، $A3$، B_1 و B_2: ضرایب معادله هستند.

برای ایجاد دبی دائمی فاضلاب به هر چاهک در طول شبیه‌سازی سیلاب ($H_{GW} > H_{SW}$) با توجه به شکل ۴، ضریب A1 برحسب دبی فاضلاب هر چاهک و با ضرب در مساحت زیرحوضه آبریز مرتبط با چاهک، محاسبه شده و بقیه ضریب‌ها صفر درنظر گرفته می‌شود (SWMM5, 2016).

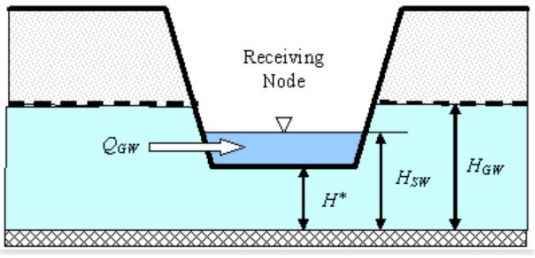

Fig. 4 Effective parameters in the amount of groundwater
شکل ۴ فراسنجه‌های موثر در میزان آب زیرزمینی

پس از مدل‌سازی زیرحوضه‌های آبریز، ایجاد پیش‌فرض‌های بارندگی و تخصیص دبی فاضلاب با استفاده از آب زیرزمینی به هر چاهک، شبکه گردآوری فاضلاب در اثر رخداد سیلاب به مدت ۲۴ ساعت، شبیه‌سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی، از روندیابی موج پویایی برای درنظر گرفتن ذخیره آبراهه‌ها، برگشت آب، هدررفت انرژی، جریان معکوس و جریان تحت‌فشار استفاده می‌شود. همچنین برای مدیریت ترم‌های اینرسی در معادله سَنت‌ونانت از روش Dampen استفاده شده و با انتخاب گزینه Allow Ponding در درون نرم‌افزار، حجم سرریز شده رواناب در بالای چاهک ذخیره شده و در صورت وجود ظرفیت در سامانه به مدل باز می‌شود.

۳-۳- زیرمدل تاب‌آوری

پس از ایجاد زیرمدل‌های هیدرولیکی- هیدرولوژیکی شبکه گردآوری فاضلاب و انجام شبیه‌سازی سیلاب توسط نرم‌افزار PCSWMM، از نتایج تجزیه و تحلیل جریان به‌دست آمده از جمله میزان ارتفاع جریان در مجراها (درصد پرشدگی) و میزان سرعت جریان، برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه گردآوری فاضلاب استفاده می‌شود. ارزیابی تاب‌آوری نیازمند مرحله‌ها و اجزایی است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. ابتدا مفهوم عملکرد هیدرولیکی و چگونگی تعیین شاخص قابلیت عملکرد هیدرولیکی ارزیابی می‌شود که این شاخص بر مبنای دو

1. Storm Water Network (SWN)
2. Lack of Storm Water Network (LSWN)
3. Baseline Flow

منحنی جریمه درصد پرشدگی جریان و سرعت جریان محاسبه می‌شود. سپس این شاخص به کل شبکه تعمیم داده می‌شود و منحنی شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه به‌دست خواهد آمد. در آخر با توجه به منحنی شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه، تاب‌آوری شبکه گردآوری فاضلاب که معادل سطح زیر این منحنی است محاسبه می‌شود.

۳-۳-۱- عملکرد هیدرولیکی[1]

عملکرد یک سامانه گردآوری فاضلاب شهری به‌عنوان توانایی آن در انتقال فاضلاب و رواناب بدون اضافه بار هیدرولیکی و ایجاد کمترین اثرگذاری‌های محیط‌زیستی و حفظ یکپارچگی ساختاری تعریف می‌شود (Tabesh, 2016). عملکرد هیدرولیکی یکی از فراسنجه‌های مهم برای تجزیه و تحلیل سطح سرویس سامانه‌های گردآوری فاضلاب است. در واقع این عملکرد به ابعاد لوله، زوال ساختاری، انسداد، فروپاشی و انتقال رسوب وابسته است که بر ظرفیت انتقال فاضلاب شهری و رواناب ناشی از سیلاب تأثیر می‌گذارد (Tabesh and Madani, 2006). بنابراین با درک بهتر از عملکرد سامانه، می‌توان راهبردهای سازگاری و کاهش بالقوه خطرها را با هدف ارائه سطح‌های مناسب خدمات به مشتریان، آزمایش و اولویت‌بندی کرد.

با توجه به شکل ۵، منحنی عملکرد هیدرولیکی سامانه نظریه‌ای را ارائه می‌دهد که در آن شاخص استحکام و شکست سامانه به‌عنوان تابع‌های مستقل زمانی از عملکرد سامانه و شاخص پاسخ و بازیابی سامانه، هم به‌عنوان عملکرد سامانه و هم به‌عنوان تابع‌های وابسته به زمان درنظر گرفته می‌شوند. در شکل ۵، P_0 سطح عملکرد اصلی (وضعیت پایدار) پیش از اضافه بار سامانه و آغاز سیلاب سطحی است و P_a کمترین سطح قابل‌قبول عملکرد سامانه است که مربوط به نبود سیلاب احتمالی است. P_f سطح شکست سامانه است که مرتبط با میزان عمق سیلاب است، t_{fs} زمان آغاز کاهش عملکرد سامانه، t_f زمان شکست سامانه و t_r زمان بازگشت سامانه به عملکرد اصلی است (Henry and Ramirez-Marquez, 2012).

۳-۳-۲- شاخص عملکرد هیدرولیکی کل سامانه[2]

در این تحقیق با استفاده از نتایج مدل شبیه‌سازی PCSWMM از شاخص قابلیت عملکرد هیدرولیکی استفاده می‌شود که این شاخص توسط دو فراسنجه میزان سرعت جریان و درصد پرشدگی هر مجرا که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری است، به‌دست خواهد آمد و در طی دو گام به انجام می‌رسد:

۱- استفاده از استانداردهای منحنی جریمه به‌منظور محاسبه شاخص عملکرد هیدرولیکی عنصرهای شبکه؛

۲- تعمیم شاخص عملکرد هیدرولیکی محاسبه شده در گام پیش، به کل شبکه گردآوری فاضلاب توسط تابع‌های تعمیم.

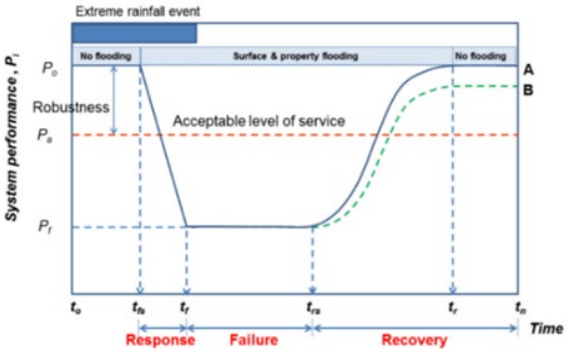

Fig. 5 Theoretical system performance curve (Henry and Ramirez-Marquez, 2012)

شکل ۵ منحنی عملکرد سامانه نظری

در گام اول، از منحنی‌های جریمه پیشنهاد شده توسط Tabesh and Madani (2006) در چارچوب شبکه گردآوری فاضلاب استفاده می‌شود. در این پژوهش، منحنی‌های جریمه سرعت جریان و درصد پرشدگی مجرا بر مبنای نشریه ۱۱۸ توسعه یافته است. در واقع عملکرد هیدرولیکی شبکه گردآوری فاضلاب با تغییرپذیری این فراسنجه‌ها بر مبنای معیارهای موجود در کدهای استاندارد ارزیابی می‌شود.

در شکل‌های ۶ و ۷، به‌ترتیب منحنی‌های جریمه سرعت جریان و درصدپرشدگی در هر سطح مجرای شبکه گردآوری فاضلاب نشان داده شده‌است. در این دو منحنی، شاخص عملکرد نشان داده شده در محور عمودی، به چهار بخش از صفر تا یک با ۰/۲۵ افزایش تقسیم می‌شود. صفر به معنای نبود عملکرد است که به‌کلی ناپذیرفتنی است، ۰/۲۵ مربوط به سطح نامطلوب عملکرد، ۰/۵ به معنای کمترین سطح قابل‌قبول عملکرد، ۰/۷۵ نشان‌دهنده سطح قابل‌قبول عملکرد و ۱ نشان دهنده عملکرد عالی سامانه است. محور افقی نیز میزان سرعت جریان یا درصد

1. Performance Index (PI)
2. Hydraulic Performance Index (HPI)

پرشدگی مجرا است.

بر مبنای نوشته نشریه ۱۱۸ (Islamic Republic of Iran, Plan and Budget Organization, 2016)، منحنی جریمه اول که بیانگر سرعت جریان در مجراست، در شکل ۶ نشان داده شده‌است. سرعت بین $0.7\ m/s$ (سرعت شستشو) و $4.5\ m/s$ (بیشینه سرعت مطلوب) به‌ترتیب به‌عنوان بهینه‌ترین سطح و بیشینه سطح قابل‌قبول درنظر می‌شود و در این حالت شاخص عملکرد برابر با یک است. بر مبنای Metcalf et al. (1991) و داوری مهندسی، حداقل سرعت مورد نیاز برای جلوگیری از رسوب $0.6\ m/s$ است و کمترین سطح عملکرد قابل‌قبول عملکرد را نشان می‌دهد. بنابراین PI برای این میزان سرعت برابر با ۰/۵ و در حالتی که سرعت کمتر از $0.6\ m/s$ است، عملکرد سامانه ناپذیرفتنی است. بیشینه مقدار سرعت نیز برای جلوگیری از فرسایش یا جابه‌جایی لوله‌ها در اثر نیروی ناشی از جریان، $6\ m/s$ درنظر گرفته می‌شود و این میزان سرعت ممکن است بر مبنای نوع لوله و ویژگی‌های هر شبکه متفاوت باشد. باید توجه شود که مقدار سرعت بیشتر از $6\ m/s$ منجر به عملکرد ناپذیرفتنی در سامانه می‌شود که می‌تواند باعث تنش برشی بیشتر، ساییدگی، خوردگی دیواره لوله و کاهش طول عمر آن شود (Tabesh and Madani, 2006).

در شکل ۷ که نشان‌دهنده درصد پرشدگی یا درصد نسبت عمق جریان به قطر مجرا ($\frac{h}{d}$) است، بر مبنای نوشته نشریه ۱۱۸ هنگامی که $0.65 \le (\frac{h}{d}) \le 0.75$ سامانه بالاترین سطح عملکرد را دارد و هنگامی که $\left(\frac{h}{d}\right) = 0.75$ جریان درون مجرا دارای حداکثر سرعت ممکن است. بنابراین، شاخص عملکرد برای این محدوده از عمق جریان، برابر با ۱ درنظر گرفته می‌شود. همچنین هنگامی که $\frac{h}{d}$ از ۰/۶۵ به صفر کاهش می‌یابد، سطح عملکرد فاضلاب نیز کاهش می‌یابد و منجر به کاهش سرعت جریان می‌شود که ممکن است باعث ایجاد رسوب در مجرا شده و سرعت شستشو طراحی را برآورده نکند. در این حالت PI به‌صورت خطی از ۰/۶۵ تا صفر در طی دو مرحله کاهش می‌یابد. همچنین سامانه تا سطح عملکرد ۰/۵ حداقل سطح قابل‌قبول را دارا است ($\frac{h}{d} = 1$) و برای میزان‌های کمتر از ۰/۵ سطح عملکرد به‌دلیل سرعت کم و خطر ایجاد رسوب، غیر قابل‌قبول است. در قسمت انتهایی نمودار نیز، سطح فاضلاب هنگامی که $\frac{h}{d} > 0.75$ است، در معرض نوسان و تغییر عمق نرمال است. همچنین هنگامی که $\frac{h}{d} = 1$ می‌شود، اضافه بار هیدرولیکی در سامانه رخ می‌دهد و شبکه گردآوری فاضلاب تحت فشار قرار می‌گیرد که ممکن است به‌دلیل انسداد مجرا یا رخداد سیل منجر به جریان برگشتی به سمت چاهک‌ها شود. آن‌گاه پس از مدتی جریان از طریق چاهک به سطح زمین می‌رسد که باعث آب‌گرفتگی خیابان‌ها می‌شود. در این وضعیت سامانه معیارهای طراحی را برآورده نمی‌کند امّا عملکرد آن قابل‌قبول و قابل مدیریت بوده و شبکه فاضلاب می‌تواند پس از آب‌گرفتگی و پایان سیلاب به وظیفه خود ادامه دهد. لازم به یادآوری است که منحنی‌های جریمه معرفی شده، کلّی بوده و برای شبکه‌های فاضلاب جداگانه و درهم قابل اعمال است.

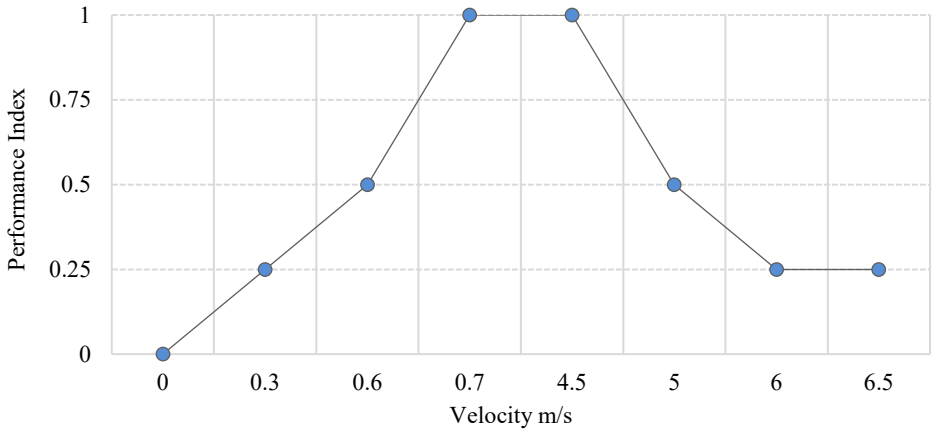

Fig. 6 Penalty curve for flow velocity in network's conduit (V)

شکل ۶ منحنی جریمه برای سرعت جریان در مجرای شبکه (V)

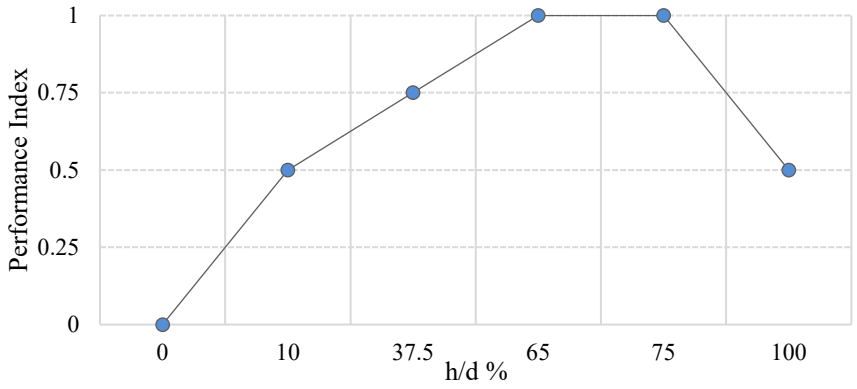

Fig. 7 Penalty curve for conduit filling percentage (h/d)

شکل ۷ منحنی جریمه برای درصد پر شدگی مجرا (h/d)

در گام دوم، شاخص عملکرد هیدرولیکی به کل شبکه فاضلاب تعمیم داده می‌شود. بیان ریاضی تابع تعمیم که برای تعمیم شاخص عملکرد هیدرولیکی به کل شبکه به‌کار می‌رود، در حالت کلی به‌صورت رابطه (۲) است.

$$PI = W(PIE_j) \tag{2}$$

که PI: مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه، PIE_j: شاخص عملکرد عنصر شماره j شبکه (مجرا یا گره) و W: عملگری است که شاخص عملکرد عنصرهای شبکه را به کل شبکه تعمیم می‌دهد (تابع تعمیم).

شاخص‌های عملکردی که از منحنی‌های جریمه ناشی می‌شوند، مربوط به عنصرهای شبکه گردآوری فاضلاب هستند. در مرحله بعد، عملکرد هر مجرا بر مبنای درصد پرشدگی و سرعت جریان به کل شبکه تعمیم داده می‌شود. شاخص قابلیت عملکرد کل شبکه توسط جمع وزنی با استفاده از رابطه‌های (۳) تا (۵) محاسبه می‌شوند:

$$PIV = W_1(PIVE_{ij}) = \frac{\sum_{j\in N_P} V_{ij} \times (PIVE_{ij})}{\sum_{j\in N_P} V_{ij}} \tag{3}$$

$$PID = W_2(PIDE_{ij}) = \frac{\sum_{j\in N_P} V_{ij} \times (PIDE_{ij})}{\sum_{j\in N_P} V_{ij}} \tag{4}$$

$$V_{ij} = \frac{\pi \times {D_{ij}}^2 \times L_{ij}}{4} \tag{5}$$

که PIV: شاخص عملکرد سرعت جریان در شبکه گردآوری فاضلاب، PID: شاخص عملکرد عمق جریان (درصد پرشدگی مجرا)، N_P: شمار مجراهای شبکه گردآوری فاضلاب، $PIVE_{ij}$: شاخص عملکرد سرعت مجرای j و $PIDE_{ij}$: شاخص عملکرد عمق جریان مجرای j هستند. با توجه به رابطه (۵)، V_{ij} که ثابت وزنی رابطه‌های (۳) و (۴) است، حجم مجرای j است و D_{ij} و L_{ij} نیز به‌ترتیب قطر و طول مجرای j هستند (Tabesh & Madani, 2006).

در مرحله بعد، با توجه به پویایی متغیرهای هیدرولیکی در شبکه گردآوری فاضلاب، شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه توسعه می‌یابد. در مدل PCSWMM به‌دلیل تغییرپذیری عمق و سرعت در طول زمان شبیه‌سازی، PIV و PID در هر گام زمانی تغییر می‌کنند. از آن‌جایی که این شاخص‌ها به عمق و حجم مورد نیاز مجراها وابسته هستند، عملکرد هیدرولیکی کل سامانه را به‌طور کامل نشان نمی‌دهند. بنابراین، شاخص HPI که به عمق و سرعت میانگین سامانه فاضلاب در مدل PCSWMM وابسته است، معرفی می‌شود تا متغیرهای هیدرولیکی کل سامانه و اجزای شبکه گردآوری فاضلاب (مجراها، گره‌ها) را ترکیب کند. HPI توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Hajibabaei et al., 2019):

$$HPI = \frac{\left(1-\frac{\alpha+\beta}{N_P}\right)\times PID + \left(1-\frac{\gamma+\delta}{N_P}\right)\times PIV}{2} \tag{6}$$

که، HPI: شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه، PIV: شاخص عملکرد سرعت جریان در شبکه گردآوری

فاضلاب، PID: شاخص عملکرد عمق جریان (درصد پرشدگی) در شبکه گردآوری فاضلاب، N_P: شمار کل مجراهای شبکه گردآوری فاضلاب، α: شمار مجراهای دارای عمق جریان کمتر از ۰/۶۵ و β: شمار مجراهایی است که دارای عمق جریان برابر یک (انسداد مجرا) است. γ: شمار مجراهای است که دارای سرعت کمتر از $0.7\ m/s$ و δ: شمار مجراهایی است که دارای سرعت بیشتر از $5\ m/s$ است. این ضریب‌ها نیز بر مبنای میانگین عمق و سرعت جریان در شبکه گردآوری فاضلاب محاسبه می‌شوند.

۳-۳-۳- محاسبه کمی تاب‌آوری هیدرولیکی شبکه گردآوری فاضلاب

تاب‌آوری سامانه‌های زیرساختی به‌عنوان توانایی سامانه در کاهش خطرها، جذب اثرگذاری آن‌ها و به‌حداقل رساندن زمان بازیابی پس از حادثه تعریف می‌شود. همچنین سطح عملکرد سامانه بر مبنای آسیب‌پذیری و بازیابی سامانه‌های در معرض خطر، ممکن است تغییر کند (Bruneau et al., 2003). تاب‌آوری سامانه بر مبنای منحنی شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه (HPI) در طول شبیه‌سازی سیلاب به‌صورت کمّی اندازه‌گیری می‌شود. میزان تاب‌آوری توسط رابطه (۷) که بیانگر سطح زیر منحنی شاخص قابلیت عملکرد هیدرولیکی (مجموع محاسبه عنصرهای سطحی ذوزنقه‌ای زیرمنحنی عملکرد) و افت تاب‌آوری توسط رابطه (۸) محاسبه می‌شوند (Zamanian et al., 2020).

$$R(T) = \frac{\int_0^T HPI(t)dt}{\int_0^T dt} = \frac{1}{T} \times \int_0^T HPI(t)dt \qquad (7)$$

$$RL(T) = \int_0^T \big(HPI(0) - HPI(t)\big)dt \qquad (8)$$

که $R(T)$ و $RL(T)$ به‌ترتیب بیانگر میزان تاب‌آوری و افت تاب‌آوری، T: کل مدت زمان شبیه‌سازی، $HPI(0)$: میزان عملکرد هیدرولیکی کل شبکه در زمان صفر و $HPI(t)$: میزان عملکرد هیدرولیکی کل شبکه در زمان t هستند.

برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه گردآوری فاضلاب در برابر سیلاب ناگهانی باید وابستگی این زیرساخت را نیز با شبکه گردآوری آب سطحی درنظر گرفت. زیرا بود یا نبود شبکه آب سطحی بر میزان رواناب ورودی به شبکه گردآوری فاضلاب و در نهایت میزان تاب‌آوری این زیرساخت تأثیرگذار خواهد بود. در واقع اگر ظرفیت شبکه آب سطحی توان بالقوه جذب همه رواناب تولیدی را داشته باشد، روانابی از طریق چاهک‌ها وارد شبکه فاضلاب نخواهد شد. هرچه ظرفیت این شبکه برای جذب رواناب کمتر باشد، میزان رواناب مازاد به درون شبکه فاضلاب جداگانه ورود خواهد کرد. برای لحاظ تأثیر شبکه آب سطحی فرضی بر شبکه گردآوری فاضلاب در این پژوهش، دو پیش‌فرض بود شبکه آب سطحی و نبود شبکه آب سطحی در ۴ دوره بازگشت بارندگی در ۸ پیش‌فرض درنظر گرفته شده و تاب‌آوری شبکه گردآوری فاضلاب ارزیابی و مقایسه خواهد شد.

همه محاسبه‌های بندهای ۳-۳-۲ و ۳-۳-۳، در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک اجرا و پیاده‌سازی شده‌است. در این محیط حلقه‌های مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، محاسبه‌های میزان شاخص عملکرد هیدرولیکی و میزان تاب‌آوری ایجاد می‌شود تا تاب‌آوری شبکه بر مبنای این پیش‌فرض‌های بارندگی مقایسه شود. در واقع کاربرد این زبان برنامه‌نویسی برای ایجاد تابع‌ها و ترکیب‌بندی‌های جدید، اجرای دستورکارها و عملیات‌های تکراری به شمار دفعه‌های مورد نیاز و همچنین افزایش قابلیت‌های محاسبه‌شده‌ها است.

۴- نتایج و یافته‌ها

با توجه به شکل ۸، شبکه گردآوری فاضلاب شهر و زیرحوضه‌های آبریز هندیجان دارای یک خط بحرانی است که شامل ۲۶ مجراست و این شهر را به دو بخش شرقی غربی تقسیم کرده و دربرگیرنده فاضلاب اصلی کل شهر در خود است. بدیهی است که این خط دارای بیشترین میزان جریان ترکیبی رواناب ناشی از سیلاب و فاضلاب تولیدی است و در طول ۲۴ ساعت شبیه‌سازی نیز، این ۲۶ مجرا دارای بیشترین درصد پرشدگی (h/d) و سرعت (v) هستند. بنابراین برای ارزیابی و اجرای زیرمدل تاب‌آوری شبکه فاضلاب شهر هندیجان، خط بحرانی شبکه به‌عنوان

نماینده کل شبکه فاضلاب هندیجان درنظر گرفته شده است. شکل ۹ (پیش‌فرض بارندگی ۵۰ ساله و نبود شبکه آب سطحی) نشان‌دهنده بحرانی‌ترین پیش‌فرض موجود است که بیانگر میزان تغییرپذیری‌های سرعت جریان (جریان معکوس) و ظرفیت مجراهای خط بحرانی (پر شدن کامل) در طی رخداد ۶ ساعته سیلاب ناگهانی است.

Fig. 8 A view of the Hendijan wastewater collection network and its critical line

شکل ۸ نمایی از شبکه گردآوری فاضلاب هندیجان و خط بحرانی آن

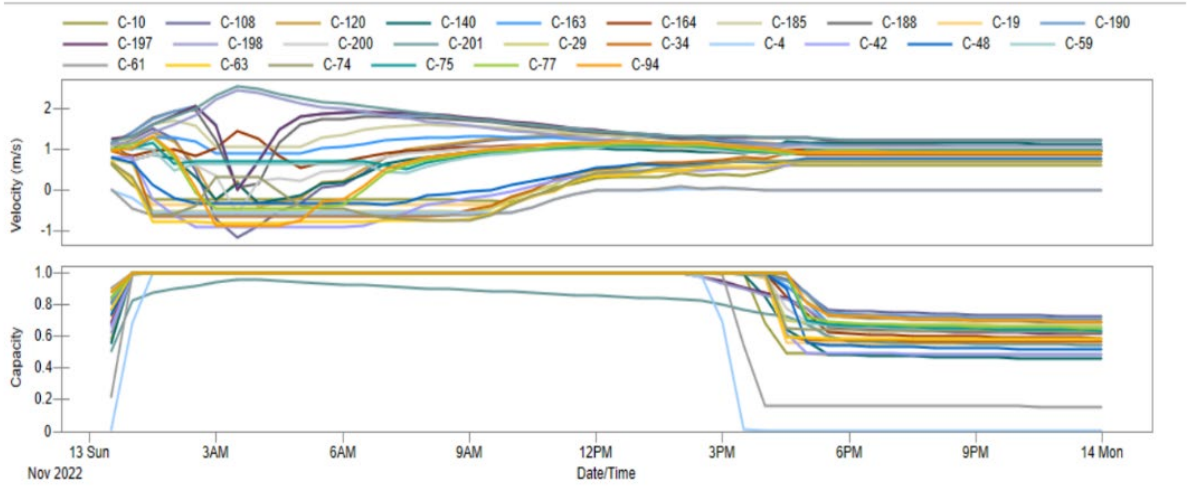

Fig. 9 Changes in flow rate and filling percentage of critical conduits under the critical scenario

شکل ۹ تغییرپذیری‌های سرعت جریان و درصد پرشدگی مجراهای بحرانی در پیش‌فرض بحرانی

شاخص عملکرد هیدرولیکی هر مجرا در هر فاصله زمانی که یک عدد از صفر تا یک است، بر مبنای میزان سرعت جریان و درصد پرشدگی هر مجرا با توجه به منحنی جریمه مربوط به خود به‌دست می‌آید. هر دو منحنی جریمه شامل چند معادله خط است که با داشتن میزان‌های سرعت و درصد پرشدگی، مقدار شاخص عملکرد (PI) محاسبه می‌شود. با اجرای این کدنویسی، می‌توان مقدار PI را برای هر ۲۶ مجرای خط بحرانی در

هر ۸ پیش‌فرض و در طول ۲۴ ساعت زمان شبیه‌سازی به‌دست آورد. در ادامه پس از به‌دست آوردن PI هر مجرا، با توجه به رابطه‌های (۳) و (۴)، باید یک شاخص عملکرد هیدرولیکی کلی برای سرعت جریان و درصد پرشدگی هر ۲۶ مجرای بحرانی به‌دست آورد. ثابت وزنی این رابطه‌ها نیز حجم هر مجراست که بر مبنای رابطه (۵) قابل محاسبه است. در نهایت، با استفاده از رابطه (۶) و با تعریف ضریب‌های α، β، γ و δ، میزان شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه در هر گام زمانی به‌دست می‌آید.

با استفاده از رابطه‌های یاد شده، میزان سرعت جریان و درصد پرشدگی مجرای فاضلاب که در طراحی به‌دست آمد، می‌توان مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی ۲۶ مجرای خط بحرانی را پیش و پس از پایان رخداد سیل به‌دست آورد که برابر ۰/۵۳۸۷ است. با درنظر گرفتن سه گام زمانی پیش و پس از رخداد سیل و میزان شاخص عملکرد هیدرولیکی (HPI) کل شبکه در هر گام زمانی (۳۰ دقیقه) در طی ۲۴ ساعت شبیه‌سازی سیلاب، منحنی عملکرد هیدرولیکی شبکه گردآوری فاضلاب برای پیش‌فرض‌های تعریف شده (۸ پیش‌فرض) به‌دست آمد (شکل ۱۰). در ادامه با استفاده از رابطه‌های (۶) و (۷)، میزان تاب‌آوری و اُفت آن ارزیابی می‌شود که در واقع تاب‌آوری، مساحت زیر منحنی شاخص عملکرد هیدرولیکی است و برای محاسبه میزان اُفت آن، مقدار تاب‌آوری از میزان عملکرد هیدرولیکی ابتدایی شبکه فاضلاب کم خواهد شد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز نمودار تاب‌آوری و افت تاب‌آوری برای دو پیش‌فرض اصلی نشان داده شده‌است.

با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، مشاهده می‌شود که در هر پیش‌فرض اصلی، با افزایش دوره بازگشت بارندگی میزان تاب‌آوری کاهش و میزان افت تاب‌آوری افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که در دوره بازگشت‌های بارندگی ۲۵ و ۵۰ ساله میزان کاهش تاب‌آوری نسبت به دوره بازگشت‌های بارندگی ۵ و ۱۰ ساله کمتر و میزان افزایش افت تاب‌آوری نیز کمتر شده است. در واقع شیب کاهش تاب‌آوری و افزایش اُفت آن کمتر شده‌است (شکل ۱۳). در واقع هنگامی که میزان رواناب ورودی به درون شبکه به‌حدی برسد که باعث پرشدگی کامل مجرا و افزایش سرعت جریان شود، میزان عملکرد شبکه با توجه به منحنی‌های جریمه عدد ثابتی دارد و افزایش بیشتر شدت بارندگی در میزان عملکرد شبکه تأثیر به‌سزایی را ندارد و تأثیر عمده آن بر میزان زمان صرف شده برای تخلیه این رواناب است. بنابراین دلیل اصلی کاهش در افزایش تاب‌آوری و اُفت تاب‌آوری با افزایش دوره بازگشت بارندگی، این مورد یاد شده است. در طی زمانی که بارندگی به بیشترین میزان شدت خود می‌رسد، در شماری از مجراهای خط بحرانی، میزان سرعت جریان و دبی منفی می‌شود که بیانگر ایجاد جریان معکوس یا برگشت جریان است (شکل ۹). در واقع به‌دلیل منفی شدن گرادیان هیدرولیکی، جهت جریان تغییر کرده و پس‌زدگی رخ می‌دهد و در طی این مدت زمان، تاب‌آوری در پایین‌ترین مقدار خود قرار دارد. لازم به یادآوری است که درنظر گرفتن شاخص عملکرد هیدرولیکی برابر با عدد ۱، حالت مطلوب است و در واقعیت، تا حدودی احتمال دستیابی به این میزان شاخص برای شبکه فاضلاب، کم است؛ چراکه با توجه به میزان بالا یا پایین بودن جمعیت و میزان فاضلاب تولیدی، مقدار اولیه شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه متفاوت است. در این پژوهش، مقدار اولیه این شاخص از کمترین سطح قابل‌قبول عملکرد بالاتر است (HPI>0.5). در شکل ۱۰، منحنی عملکرد شبکه فاضلاب در دو پیش‌فرض اصلی و در ۴ دوره بازگشت بارندگی نشان داده شده‌است. در علت‌های اولیه شبیه‌سازی چنانچه در شکل مشخص است، پیش‌فرض وجود فرضی شبکه آب سطحی دارای شاخص استحکام بیشتری نسبت به پیش‌فرض دیگر است و زمان بیشتری را برای شکست سامانه تحمل کرده است. این مورد در شاخص بازیابی و رسیدن به حالت پایه و نرمال در این پیش‌فرض نیز قابل مشاهده است. در پیش‌فرض SWN سامانه با سرعت بازیابی بیشتری از نقطه اوج سیلاب (پایین‌ترین میزان عملکرد) در هر ۴ دوره بازگشت بارندگی نسبت به پیش‌فرض LSWN به حالت نرمال رسیده است و هر قدر شدت بارندگی کمتر باشد، سرعت بازیابی سامانه نیز بیشتر است.

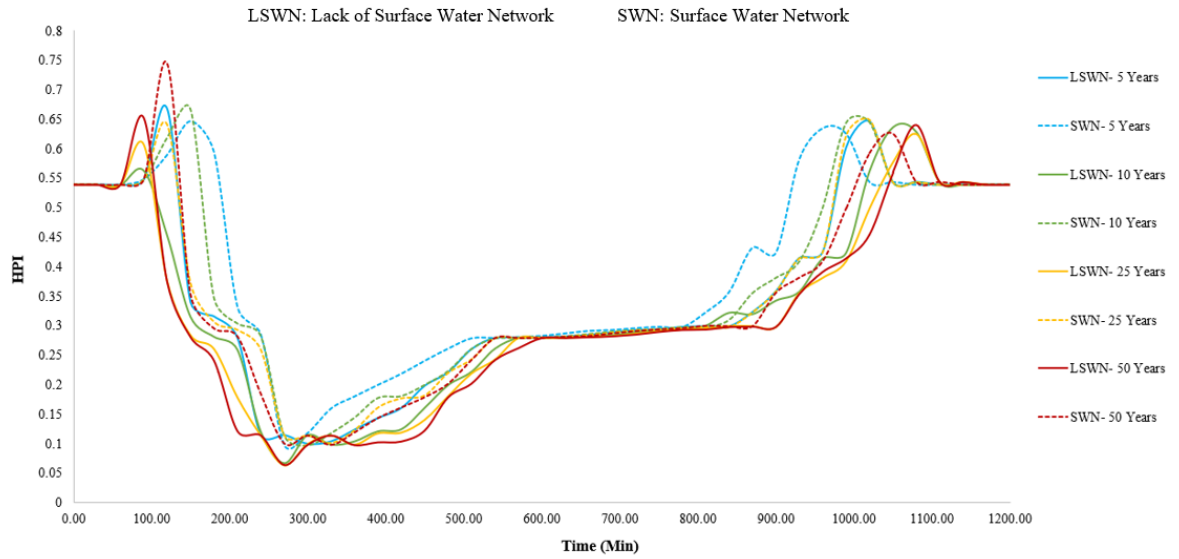

Fig. 10 Hydraulic performance index curve of the entire sewer network under different rainfall return periods for two main scenarios

شکل ۱۰ منحنی شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه فاضلاب تحت دوره بازگشت های بارندگی مختلف برای دو پیش‌فرض اصلی

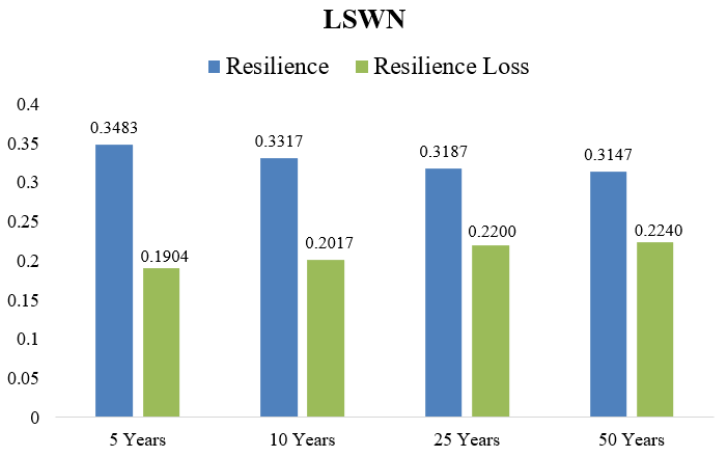

Fig. 11 The level of resilience and its decline in the scenario of no surface water network

شکل ۱۱ میزان تاب‌آوری و اُفت آن در پیش‌فرض نبود شبکه آب سطحی

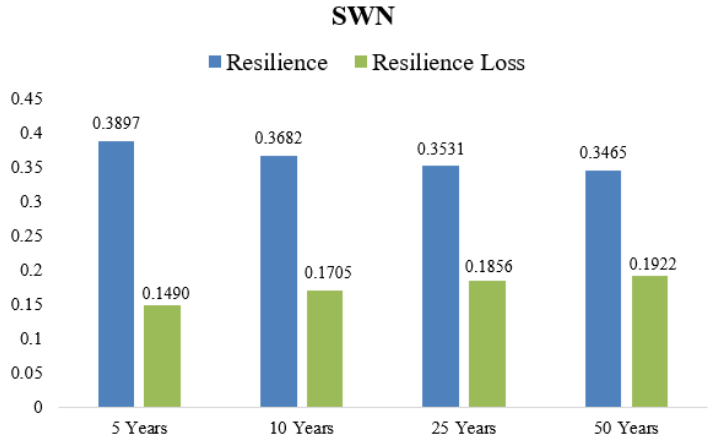

Fig. 12 The level of resilience and its decline in the scenario of the presence of storm water network

شکل ۱۲ میزان تاب‌آوری و اُفت آن در پیش‌فرض وجود فرضی شبکه آب سطحی

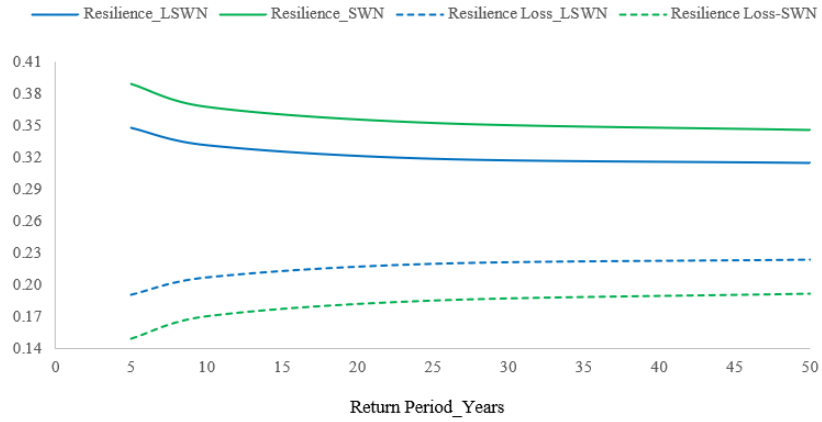

Fig. 13 Changes in resilience and its decline under defined scenarios

شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های میزان تاب‌آوری و اُفت آن در پیش‌فرض‌های تعریف شده

با توجه به شکل ۱۴، مشاهده می‌شود که برای هر ۴ دوره بازگشت بارندگی، در ابتدا و انتهای شبیه‌سازی، برخلاف انتظار رخداد سیل باعث بهبود عملکرد شبکه فاضلاب شده‌است. پیش از رخداد سیل، میزان شاخص عملکرد هیدرولیکی برابر با ۰/۵۳۸۷ است (حالت پایه). در لحظه ابتدایی رخداد سیل (یک ساعت پس از حالت پایه)، میزان بارندگی با توجه به داده‌های بارش، شدت کمتری را دارد و رواناب تولیدی اولیه با فاضلاب جمع می‌شود که در نهایت باعث افزایش سرعت جریان و درصد پرشدگی مجرا خواهد شد و عملکرد شبکه را با توجه به منحنی‌های جریمه بهبود می‌بخشد. امّا پس از ساعت اول، شدت بارندگی زیادتر می‌شود که منجر به پرشدگی کامل مجراها خواهد شد و تکانه اصلی رخداد سیل در این لحظه به شبکه فاضلاب وارد شده و باعث کاهش شدید عملکرد خواهد شد. در ساعت پایانی شبیه‌سازی نیز، با کاهش شدت بارندگی و تخلیه رواناب تولیدی، به‌مرور عملکرد شبکه بهبود می‌یابد و هنگامی‌که بخش عمده رواناب خارج شده باشد، بخش کم باقی‌مانده رواناب در مجرا همراه با فاضلاب تولیدی، باعث افزایش عملکرد شبکه نسبت به حالت پایه می‌شود. در نهایت با تخلیه کامل رواناب، میزان شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه برابر با حالت پایه خواهد شد. دلیل این افزایش عملکرد هیدرولیکی شبکه در آغاز و پایان شبیه‌سازی، استفاده از روش منحنی‌های جریمه برای محاسبه عملکرد هیدرولیکی است. بدیهی است که اگر از روش‌های دیگر برای محاسبه عملکرد هیدرولیکی استفاده شود، رفتار منحنی به شکل دیگری خواهد بود.

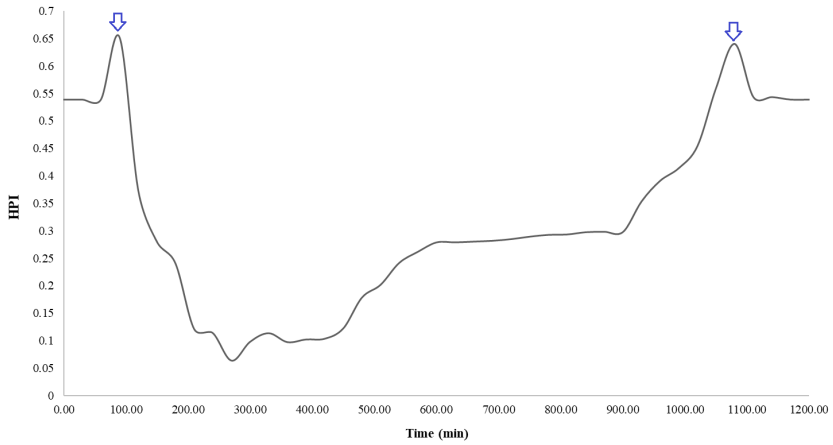

Fig. 14 The time range when the performance of the sewage network is higher than the base state

شکل ۱۴ محدوده زمانی که عملکرد شبکه فاضلاب نسبت به حالت پایه بیشتر است

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، تاب‌آوری از اجزای مختلفی برای ارزیابی تشکیل شده‌است که در این پژوهش اجزای استحکام، سرعت در پاسخ، سرعت در بازیابی و کاردانی بحث می‌شوند. در منحنی شاخص عملکرد هیدرولیکی، میزان این اجزای تاب‌آوری باتوجه به تغییر در دوره بازگشت بارندگی و بود یا نبود شبکه آب سطحی متغیر است. در شکل ۵، جانمایی هر کدام از این اجزا در منحنی عملکرد شبکه مشخص شده و با الگو گرفتن از آن می‌توان اجزای تاب‌آوری منحنی عملکرد شبکه فاضلاب در شکل ۱۰ را با یکدیگر مقایسه کرد.

۱- استحکام شبکه، میزان تغییرپذیری‌های عملکرد تا کمترین سطح قابل‌قبول عملکرد ($HPI = 0.5$) افزون بر میزان زمان صرف شده برای شکست این سطح عملکرد است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در پیش‌فرض نبود شبکه آب سطحی، هرقدر دوره بازگشت بارندگی افزایش پیدا می‌کند، تغییرپذیری‌های عملکرد هیدرولیکی بیشتر خواهد شد ولی میزان زمان صرف شده برای شکست کمترین سطح قابل‌قبول عملکرد کمتر می‌شود که در واقع برخلاف شکل ۵، این جزء تاب‌آوری (استحکام) مستقل از زمان نیست. همچنین در پیش‌فرض وجود فرضی شبکه آب سطحی، مشاهده می‌شود در هر ۴ دوره بازگشت بارندگی، نسبت به حالتی‌که شبکه آب سطحی وجود ندارد، میزان زمان صرف شده و تغییرپذیری‌های عملکرد بیشتر است و در نتیجه وجود شبکه آب سطحی، استحکام شبکه فاضلاب را بیشتر خواهد کرد.

۲- سرعت در پاسخ، در واقع میزان زمان صرف شده از لحظه تکانه سیلاب تا نقطه اوج سیلاب است که شامل کاهش شدید عملکرد شبکه افزون بر زمان شکست سامانه است. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش دوره بازگشت بارندگی در دو پیش‌فرض اصلی، مجموع زمان صرف‌شده برای پاسخ و تحمل شکست سامانه، بیشتر می‌شود. پس هرقدر زمان صرف شده برای پاسخ سامانه به پیش آمدن رویداد کمتر باشد، سامانه از سرعت پاسخ بیشتری بهره‌مند است که در نهایت منجر به افزایش تاب‌آوری نیز می‌شود.

۳- سرعت در بازیابی، در واقع میزان زمان صرف شده از نقطه انتهای شکست شبکه تا برگشت شبکه به حالت عادی است. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش دوره بازگشت بارندگی در هر دو پیش‌فرض اصلی، زمان صرف‌شده سامانه برای بازیابی به حالت عادی بیشتر است. پس هرقدر زمان صرف‌شده برای بازیابی سامانه کمتر باشد، سامانه از سرعت بازیابی بیشتری بهره‌مند است که درنهایت منجر به افزایش تاب‌آوری نیز می‌شود.

۴- کاردانی، بسیج منبع‌های موجود (اطلاعات، فناوری و مادی) یا منبع‌های انسانی برای دستیابی به اولویت‌ها و هدف‌ها است. دیگر هدف این تحقیق، بهبود تاب‌آوری شبکه فاضلاب، کاهش زمان بازیابی یا افزایش سرعت در بازیابی و پاسخ سامانه به رخداد سیلاب است. درنظر گرفتن وجود فرضی شبکه آب سطحی برای جذب ۵۰ درصد رواناب تولیدی، یک جزء کاردانی تاب‌آوری است که با توجه به شکل ۱۰ باعث کاهش شکست سامانه و افزایش سرعت در بازیابی شده‌است. همچنین درنظر گرفتن یک جزء کاردانی، باعث بهبود دیگر اجزای تاب‌آوری مانند استحکام و سرعت در پاسخ نیز می‌شود. در واقع اجزای تاب‌آوری مانند کاردانی و افزونگی می‌توانند بر دیگر جزءهای تاب‌آوری مانند استحکام، پاسخ، بازیابی و خطرپذیری تأثیر مستقیم بگذارند.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاب‌آوری شبکه گردآوری فاضلاب بر مبنای منحنی شاخص عملکرد هیدرولیکی تحت تأثیر سیلاب ناگهانی محاسبه شد. با استفاده از روش منحنی‌های جریمه، عملکرد شبکه بر مبنای وضع موجود به‌دست آمد که برخلاف دیگر رابطه‌های محاسبه عملکرد، در آغاز هیچ‌گاه میزان عملکرد فرض حالت مطلوب را ندارد (HPI=1). بنابراین با استفاده از این روش، میزان تاب‌آوری نزدیک‌تر به واقعیت ارزیابی شده و با توجه به بررسی اجزای تاب‌آوری که هر کدام قسمتی از منحنی عملکرد را پوشش می‌دهند، می‌توان درک و دید بهتری نسبت به

نقطه‌های قوت و ضعف شبکه به‌دست آورد. با شناسایی لحظه به لحظه عملکرد هیدرولیکی شبکه، چگونگی پاسخ و رفتار شبکه نسبت به رخداد سیل، می‌توان راهبردهای مناسبی را با توجه به امکانات و بودجه در دسترس درنظر گرفت و تاب‌آوری شبکه را بهبود بخشید. در این پژوهش، شاخص کاردانی (پیش‌فرض بودن شبکه آب سطحی)، افزون بر تأثیر مستقیم بر شاخص استحکام و سرعت، تاب‌آوری را به میزان ۹/۸۶٪ افزایش و اُفت تاب‌آوری را به میزان ۱۷/۳٪ کاهش داده است. در واقع با استفاده از روش منحنی‌های جریمه که تاب‌آوری را بر مبنای تحلیل جریان شبکه فاضلاب محاسبه می‌کند، به‌رغم تأثیرهای زیان‌بار پیوسته سیلاب، مشاهده شد که در ساعت آغازین و پایانی رخداد سیل، عملکرد شبکه افزایش پیدا کرد، که این موضوع اهمیت و کاربردی بودن روش منحنی جریمه را برای ارزیابی تاب‌آوری نشان می‌دهد.

۶- منبع‌ها

Bakhshipour, A.E., Hespen, J., Haghighi, A., Dittmer, U. & Nowak, W. (2021). Integrating structural resilience in the design of urban drainage networks in flat areas using a simplified multi-objective optimization framework. *Water*, *13*(3), 269, https://doi.org/10.3390/w13030269.

Bibi, T.S., Kara, K.G., Bedada, H.J. & Bededa, R.D. (2023). Application of PCSWMM for assessing the impacts of urbanization and climate changes on the efficiency of stormwater drainage systems in managing urban flooding in Robe town, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *45*, 101291, https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101291.

Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, *19*(4), 733-752.

Bruneau, M. & Reinhorn, A. (2006). Overview of the resilience concept. 8th US National Conference on Earthquake Engineering 2006, 6(2040), 3168–3176.

Dalziell, E.P. & McManus, S.T. (2004). Resilience, vulnerability, and adaptive capacity: implications for system performance, Doctoral dissertation, University of Canterbury.

Islamic Republic of Iran, Plan and Budget Organization (2016). Guidelines for Design of Wastewater Collection Systems (No. 118), Supersedes Publications No. 118-3 & 163. (In Persian)

Hajibabaei, M., Nazif, S. & Sitzenfrei, R. (2019). Improving the performance of water distribution networks based on the value index in the system dynamics framework. *Water*, *11*(12), 2445, https://doi.org/10.3390/w11122445.

Henry, D. & Ramirez-Marquez, J.E. (2012). Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. *Reliability Engineering & System Safety*, *99*, 114–122.

Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual review of ecology and systematics*, *4*(1), 1-23.

Klise, K.A., Bynum, M., Moriarty, D. & Murray, R. (2017). A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. *Environmental Modelling and Software*, *95*, 420–431.

Metcalf, L., Eddy, H.P. & Tchobanoglous, G. (1991). Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse (Vol. 4). McGraw-Hill New York.

Monzavi, M.T. (1999). Municipal Sewage Collection System. University of Tehran Press, 256p. (In Persian)

Mugume, S.N., Gomez, D.E., Fu, G., Farmani, R. & Butler, D. (2015). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. *Water Research*, *81*, 15-26.

Parsaei, M. & Tabesh, M. (2023). A review on resilience assessment of water and sewer networks, and urban drainage under the effect of possible flood. 21st Iranian Hydraulic Conference, Ahvaz.

PCSWMM. (1974). Computational Hydraulics International (CHI). https://www.pcswmm.com/

Sweetapple, C., Fu, G., Farmani, R. & Butler, D. (2019). Exploring wastewater system performance under future threats: Does enhancing resilience increase sustainability? *Water Research*, *149*, 448–459.

SWMM5. (2016). Environmental Protection Agency (EPA). https://swmm5.org/

Tabesh, M. & Madani, S. (2006). A Performance Indicator for Wastewater Collection Systems. *Water Practice and Technology*, *1*(4), wpt2006079, https://doi.org/10.2166/wpt.2006.079.

Haghighi, A. (2021). Toward decentralised sanitary sewage collection systems: A multiobjective approach for cost-effective and resilient designs. *Water*, *13*(14), 1886, https://doi.org/10.3390/w13141886.

Zamanian, S., Rahimi, M., & Shafieezadeh, A. (2020). Resilience of sewer networks to extreme weather hazards: Past experiences and an assessment framework. Proceedings, Pipelines 2020, 50–59.

Zhang, C., Oh, J. & Park, K. (2022). Evaluation of sewer network resilience index under the perspective of ground collapse prevention. *Water Science and Technology*, *85*(1), 188–205.

Tabesh, M. (2016). Advanced modeling of urban water distribution networks. University of Tehran Press, 604p. (In Persian)

Wang, M., Fang, Y. & Sweetapple, C. (2021). Assessing flood resilience of urban drainage system based on a 'do-nothing' benchmark. *Journal of Environmental Management*, *288*, 112472, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112472.

Wang, S., Fu, J. & Wang, H. (2019). Unified and rapid assessment of climate resilience of urban drainage system by means of resilience profile graphs for synthetic and real (persistent) rains. *Water Research*, *162*, 11–21.

Zahediasl, A., Bakhshipour, A.E., Dittmer, U. &

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.