Jouranl of Water and Wastewater, Vol. 30, No.2, pp: 24-35

Presenting a Cooperative Behavior Framework for Increasing the Resilience of Water and Wastewater Treatment Plants in Coastal Floods

M. Karamouz[1], P. Khalili[2]

1. Prof., Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
(Corresponding Author) Karamouz21@gmail.com
2. MSc Student of Civil and Water Resources Engineering,
University of Tehran, Tehran, Iran

(Received Nov. 9, 2017 Accepted Feb. 28, 2018)

To cite this article :
Karamouz, M., Khalili, P., 2019, "Presenting a cooperative behavior framework for increasing the resilience of water and wastewater treatment plants in coastal floods." Journal of Water and Wastewater, 30(2), 24-35
Doi: 10.22093/wwj.2018.105082.2531 (In Persian)

Abstract

Wastewater Treatment Plants that are constructed in the coastal regions need more attention since the flood occurrence may cause excessive loads on the infrastructures. These excessive loads may result in the system's failure and innumerable damages on the infrastructure. In this study, in order to reduce WWTPs' flood vulnerability, an index called Resiliency was developed to quantify system's characteristics. Later, two main approaches were considered to enhance the infrastructure performance: the "Resource allocation" and the "Cooperative behavior" method. The former method was applied employing those factors which were improvable with the investment of funds and financial allocations. They were utilized to make the system more robust. In addition, implementing some new agents with potential impacts on funding were described in order to have a more realistic vision. As for the latter method, the cooperative behavior approach, the cooperation was utilized to demonstrate joint operation among WWTPs and the way they interact. For this purpose, WWTPs' placement was analyzed to check if they could operate jointly. Thereafter, effectiveness of these two approaches was compared in order to make the best decision regarding different cases. The results showed that in three collaborations among Bowery Bay, Tallman Island, Newtown Creek, and Red Hook WWTPs, cooperation has had a significant effect on the resiliency index.

Keywords: Resiliency, Flood, Wastewater Treatment Plant, Resource Allocation, Cooperation.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۲، صفحه: ۳۵-۲۴

ارائه چارچوب فرایند همکارانه در افزایش تاب‌آوری تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب در مواجهه با سیلاب

محمد کارآموز[۱]، پویا خلیلی[۲]

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) Karamouz21@gmail.com
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- منابع آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت ۹۶/۸/۱۸ پذیرش ۹۶/۱۲/۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
کارآموز، م.،خلیلی، پ.، ۱۳۹۸، "ارائه چارچوب فرایند همکارانه در افزایش تاب‌آوری تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب در مواجهه با سیلاب"
مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۲)، ۳۵-۲۴. **Doi: 10.22093/wwj.2018.105082.2531**

چکیده

قرارگیری تصفیه‌خانه‌ها در مناطق ساحلی لزوم افزایش توجه به این زیرساخت‌ها را افزایش می‌دهد. وقوع سیلاب می‌تواند باعث آب‌گرفتگی اجزا و افزایش بار ورودی به تصفیه‌خانه شود که این امر موجب کاهش عملکرد قسمت‌های مختلف این زیرساخت و خسارت‌های هنگفت می‌شود. در این مطالعه، در راستای کاهش خطرپذیری تصفیه‌خانه‌ها در برابر سیل، به منظور کمّی‌سازی خصوصیات تصفیه‌خانه از شاخص تاب‌آوری استفاده شد. برای ارتقای عملکرد تصفیه‌خانه در مواجهه با سیل دو رویکرد اصلی رفتار همکارانه میان تصفیه‌خانه‌ها و تخصیص مالی میان بخش‌های قابل سرمایه‌گذاری درون هر تصفیه‌خانه مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور در رویکرد اول، خصوصیاتی از تصفیه‌خانه که با سرمایه‌گذاری مالی قابل بهبود هستند، شناسایی شدند و تخصیص بودجه در میان هریک به‌منظور ارتقای عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت. به‌علاوه، رویکردهای مدیریتی پیشنهادی برای درک دقیق‌تر سیستم نیز ارائه شد. در نتیجه، رویکرد بهره‌برداری توأمان بین تصفیه‌خانه‌ها و ارتقای عملکرد این زیرساخت‌ها با ایجاد ارتباط بین تصفیه‌خانه‌های مجاور محقق می‌شود. به‌منظور ایجاد این ارتباط و همکاری که مبنای کار مقاله می‌باشد، عملکرد تصفیه‌خانه‌های مجاور به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شد. در ادامه، نتایج رویکرد بهره‌برداری توأمان و میزان اثرگذاری آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در این پژوهش، سه همکاری شامل تصفیه‌خانه‌های Bowery Bay، Tallman، Newtown Creek و Red Hook تاب‌آوری را به میزان قابل توجهی بهبود داده است. چارچوب ارائه شده در این پژوهش برای به‌کارگیری در سایر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مناطق ساحلی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، سیل، تصفیه‌خانه، سرمایه‌گذاری، همکاری

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر وقایع حدی زیادی مانند سیلاب اتفاق افتاده است که لزوم شناخت هرچه بیشتر این وقایع و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها در هنگام مواجهه با آن‌ها را افزایش می‌دهد. برنامه‌ریزی و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها، مستلزم شناخت کافی از ویژگی‌های پدیده، زیرساخت و عوامل تأثیرگذار بر عملکرد زیرساخت به‌عنوان یک سیستم پیچیده است. به‌همین منظور، پژوهش‌های زیادی در زمینه شناخت فیزیکی سیل و اثرات آن بر روی زیرساخت‌های منابع آبی از جمله تصفیه‌خانه‌ها و رویکردهای مقاوم‌سازی سیستم‌ها صورت گرفته است. به‌طور مثال از نمونه‌های بی‌شمار طوفان در ایالات متحده که موجب خسارت‌های زیادی در قسمت‌های مختلف شهری از جمله زیرساخت‌های شهری شده است، می‌توان به طوفان کاترینا[۱] در سال ۲۰۰۵، طوفان سندی[۲] در سال

[1] Katrina
[2] Sandy

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.105082.2531

۲۰۱۲، طوفان آیک[1] در سال ۲۰۰۸، طوفان آیرین[2] در سال ۲۰۱۱ و طوفان ایرما[3] در سال ۲۰۱۷ اشاره کرد که طوفان کاترینا به‌عنوان پرخسارت‌ترین طوفان در ایالات متحده تا سقف ۱۰۸ میلیارد دلار خسارت به قسمت‌های مختلف شهری وارد کرده است (Karamouz et al., 2019).

آسیب ناشی از سیلاب برروی زیرساخت‌های شهری از جمله تصفیه‌خانه‌های فاضلاب که آسیب‌پذیری بسیار زیادی نسبت به این حالت حدی دارند، اثرات زیان‌بار شدیدی خواهند داشت. این تأثیرات به‌طور عمده سبب تخلیه فاضلاب تصفیه نشده یا فاضلابی که قسمتی از آن تصفیه شده است، می‌شود. این تأثیرات در مناطقی که سیستم‌های تخلیه فاضلاب چند منظوره[4] دارند، به‌دلیل ایجاد آلودگی آب، خطرپذیری بیشتری را به همراه خواهند داشت (Karamouz et al., 2016a). تمامی موارد بالا لزوم به‌کارگیری روشی برای مدیریت ریسک سیلاب را افزایش می‌دهد.

گیلارد و جیوان برای مدیریت ریسک سیلاب، ریسک را به دو قسمت اصلی خطرپذیری[5] شامل موارد اقتصادی-اجتماعی و خطر[6] که شامل ابعاد هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است، تقسیم کردند و با کمک مدل‌های هیدرولوژیکی به تعیین مقدار برای ریسک پرداختند (Gilard and Givone, 1997).

سایرز و همکاران نیز به بررسی روش‌های نوین تصمیم‌گیری بر پایه ریسک با نگاه سیستمی و یکپارچه پرداختند و با بررسی روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای و تلفیق این دو، روش‌های درنظرگیری سیستم‌ها به‌عنوان یک سیستم بزرگ و یکپارچه را بررسی کردند (Sayers et al., 2002).

کوکس و همکاران نیز با به‌کارگیری سه ترم خطرپذیری، در معرض بودن[7] و آسیب‌پذیری، به ارزیابی مدیریت ریسک سیلاب پرداختند (Koks et al., 2015).

خسارات وارده از سیلاب موجب از کار افتادن سیستم‌ها و زیرساخت‌های مختلف شهری می‌شود. تصفیه‌خانه‌ها از جمله زیرساخت‌های بسیار مهم شهری محسوب می‌شوند که آب را برای مصرف‌کنندگان قابل استفاده می‌کنند. در مناطق کم ارتفاع سیلاب‌های ساحلی می‌توانند موجب سرریز شدن فاضلاب شوند.

۱-۱- تاب‌آوری در برابر سیلاب و چگونگی کمّی‌سازی آن

تاب‌آوری به‌صورت جامع به معنای توانایی بهبود پس از مشکل، نقص و یا بازگشت به حالت اولیه است و در کتاب‌های علمی به معنای سرعت بازگشت از شکست به حالت پیش از آن است؛ این ترم به‌عنوان مهم‌ترین شاخص در مدیریت حوادث شناخته می‌شود (Karamouz et al., 2012). ایده تاب‌آوری دارای سابقه طولانی است و در ابتدا توسط هولینگ ارائه شده است ولی در مدیریت سوانح طبیعی از جمله سیل کاربرد جدیدی دارد (Holling, 1973).

برونئو تاب‌آوری را به چهار جزء اصلی سرعت در برگشت[8]، داشتن امکانات موازی[9]، داشتن تجهیزات بازسازی[10] و صلابت و توانایی ذاتی سیستم برای مقابله و بازگشت[11] (4Rs) تقسیم نموده است (Bruneau et al., 2003).

اُین و همکاران نیز با کارگیری مفهوم 4Rs و با درنظرگیری مفهوم تاب‌آوری به ارائه روشی نوین در توسعه شاخص‌های پیش‌هشدار[12] برای تعیین معیاری برای هشدار پرداختند. نتایج آنها نشان داده است که این سیستم توسعه داده شده می‌تواند مبتنی بر تاب‌آوری به تنهایی و یا همراه با مفاهیم و رویکردهای مختلف باشد (Qien et al., 2010).

کنگ و سیمونویچ به مدل‌سازی خیابان‌ها، سیستم‌های عرضه آب، شبکه‌های برق و زیرساخت‌های اطلاعاتی به‌عنوان سیستم‌هایی که برروی هم اثر می‌گذارند و از یکدیگر اثر می‌پذیرند و الگوهای این ارتباط پرداختند. تمرکز ایشان اندازه‌گیری تاب‌آوری شبکه زیرساختی مرتبط با سیستم زیرساختی بوده است (Kong and Simonovic, 2016).

به‌منظور تعیین اثر عوامل مختلف روی تاب آوری می‌توان از روش‌های وزن‌دهی و رتبه‌بندی استفاده کرد. کمّی‌سازی تاب‌آوری با درنظرگیری فاکتورهای مؤثر بر میزان آن که برگرفته از ویژگی‌های سیستم نیز باشند، تعریف می‌شود. در این پژوهش

[1] Ike
[2] Irene
[3] Irma
[4] Combined sewer systems
[5] Vulnerability
[6] Hazard
[7] Exposure

[8] Rapidity
[9] Redundancy
[10] Resourcefulness
[11] Robustness
[12] REWI

تاب آوری با ترکیب مقدار عددی فاکتورها و وزن آنها تعریف می‌شود.

برای انتخاب و رتبه‌بندی فاکتورهای مؤثر از روش‌های مختلفی مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره[1] استفاده می‌شود. ایلماز و هارمانچی‌اوگلو با استفاده از روش MCDM و تاپسیس[2] مدلی برای مدیریت منابع آب برای رودخانه گِدیز[3] در ترکیه، ارائه دادند (Yilmaz and Harmancioglu, 2010). ماتیکانگا و همکاران نیز از روش پرامیتی[4] نوع دوم که یکی از زیرمجموعه‌های MCDM است استفاده کرده و یک برنامه جامع برای مدیریت هدر رفت آب ارائه نمودند (Mutikanga et al., 2011).

داسیلوا و همکاران بر اساس شواهد و اطلاعات ۱۰ شهر، یک مدل موردی بر مبنای ویژگی‌های برگشت‌پذیر سیستم‌های شهری به‌منظور بهبود ظرفیت تطبیقی جوامع شهری ارائه کردند (Da Silva et al., 2012).

سیمونویچ و پِک چارچوبی برای کمّی‌سازی تاب‌آوری از طریق شبیه‌سازی پویایی سیستم‌های مکانی ارائه کردند؛ آنها ۵ فاکتور فیزیکی، اقتصادی، اجتماعی، سلامت و سازمانی را درنظر گرفتند (Simonovic and Peck, 2013). کارآموز و زحمتکش نیز با کمک‌گیری از مفهوم MCDM به توسعه شاخص تاب‌آوری در منطقه برانکس، واقع در نیویورک، با به‌کارگیری ۵۴ فاکتور تأثیرگذار پرداختند (Karamouz and Zahmatkesh, 2016b).

در این پژوهش به‌منظور کمّی‌سازی و بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌ها در مواجهه با سیلاب و با کمک‌گیری از مطالعات صورت‌گرفته در گذشته، شاخص تاب‌آوری توسعه داده شد و به‌منظور ایجاد بهبود در عملکرد آن‌ها دو رویکرد تخصیص‌مالی به بخش‌های مختلف تصفیه‌خانه و ایجاد رفتار همکارانه میان تصفیه‌خانه‌های مجاور مقایسه شدند، تا بهترین رویکرد مدیریتی اتخاذ شود.

۱-۲- مدل شبیه‌سازی رفتاری[5]

مدل‌های شبیه‌سازی رفتاری به‌منظور درک عمیق‌تر و دقیق‌تر سیستم در مدل کردن تمامی عوامل مؤثر در یک سیستم پیچیده به‌کار گرفته می‌شوند. ایدئولوژی اصلی این رویکرد نوظهور، عدم نگاه کامپیوتری و تکراری به مسائل آبی و در نظرگیری پیچیدگی‌های واقعی‌تر سیستم اعم از مسائل اجتماعی و تصمیم‌گیری‌های مختلف ذی‌نفعان است. در این روش مدل‌سازی، بخش‌های مختلف تأثیرگذار و تأثیرپذیر در یک سیستم آبی به‌عنوان عواملی خودمختار در نظر گرفته می‌شوند که هریک دارای رفتار و رویکرد مختص به خود در مواجهه با تغییرات هستند.

ادواردز و همکاران ارتباط استفاده از مدل‌های جمعی در مقابل یک مدل عامل‌محور در مصرف آب را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، افراد خانواده و کشاورزان با نیازهای آبی متفاوت مدل شدند و در نهایت وابستگی شدید مدل‌های عامل‌مبنا، به اطلاعات ورودی را مورد بررسی قرار دادند (Edwards et al., 2005).

اخباری و گریگ با استفاده از مدل توسعه داده شده توسط ادواردز و همکاران این مدل رفتاری را توسعه دادند. در این مدل، سه عامل اصلی زیست‌محیطی، کشاورزی و دولت، با درنظرگیری تأثیرگذاری و تأثیرپذیری از یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند. در این کار پس از شبیه‌سازی حوضه و بهینه‌سازی با سه هدف حداکثرسازی تخصیص به کشاورزان، حداقل‌سازی شوری و حداکثرسازی آب خروجی برای محیط‌زیست در یک مدل تکمیلی شبیه‌سازی رفتاری انجام گرفت. میزان آب تخصیص یافته به کشاورزان به‌عنوان مبنای کار قرار گرفت. بر این مبنا، نیازهای این بخش توسط فاکتورهایی مؤثر از قبیل مشوق‌ها، جریمه‌ها، آموزش و روابط اجتماعی تصحیح شد و نتایج تأثیرگذاری رویکرد، با شاخص‌های برگشت‌پذیری، خطرپذیری و قابلیت اطمینان با وضعیت کنونی مقایسه شد (Akhbari and Grigg, 2013).

در این پژوهش، در ابتدا با استفاده از روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) و با به‌کارگیری فاکتورهای توصیف‌کننده تاب‌آوری سیستم (در این‌جا تصفیه‌خانه‌های فاضلاب)، میزان شاخص تاب‌آوری در هریک از تصفیه‌خانه‌ها با استفاده از روش پرامیتی و مقایسه زوجی استخراج شد. پس از آن با استفاده از روش همکاری و در نظرگیری یکپارچگی تصفیه‌خانه‌های مجاور و استخراج مقادیر زیرمعیارها پس از همکاری برای هر تصفیه‌خانه، تاب‌آوری سیستم بازتولید شد و

[1] Multi-Criteria Decision Making (MCDM)
[2] TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)
[3] Gediz
[4] PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation)
[5] Agent-Based Modeling

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.105082.2531

میزان افزایش این شاخص مورد بررسی قرار گرفت. تخصیص مالی به تصفیه‌خانه‌ها از دیگر روش‌هایی است که موجب افزایش میزان تاب‌آوری سیستم می‌شود (Karamouz et al., 2017).

در استفاده از این روش با به‌کارگیری روش‌هایی مبتنی بر مدل‌سازی عامل‌مبنا و در نظرگیری هر تصفیه‌خانه به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار و تأثیرپذیر از میزان بودجه تخصیص یافته، می‌توان میزان افزایش تاب‌آوری را مورد ارزیابی قرار داد.

۲- مطالعه موردی

محدوده مطالعاتی این کار شهر نیویورک است به مساحت ۱۱۳۲۷ کیلومتر مربع که شامل پنج ناحیه برانکس، بروکلین، منهتن، کوییز و استاتن آیلند است. این شهر طوفان‌های عظیم بسیاری از جمله اِرنستو در سال ۲۰۰۶، آیرین در سال ۲۰۱۱ و سندی در سال ۲۰۱۲ را تجربه کرده که نمایانگر خطرپذیری بالای این شهر در برابر طوفان است.

طوفان سندی بزرگ‌ترین طوفان ثبت شده در اقیانوس اطلس است که موج‌هایی تا ارتفاع ۴/۳ متر را ایجاد کرده و موجب خسارات عظیمی در حدود ۱۵/۶ میلیارد دلار شده است. در این طوفان تمامی تصفیه‌خانه‌های شهر دچار آسیب جدی شدند و برخی اثرات آن‌ها همچنان پابرجا هستند. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نقش بسیار گسترده‌ای در کنترل سیلاب‌های شهری ایفا می‌کنند. سیستم تصفیه‌خانه فاضلاب شهر نیویورک شامل ۱۴ تصفیه‌خانه است که در حدود ۱/۳ بیلیون گالن فاضلاب شهری را در هر روز تصفیه می‌کند. در این راستا یکی از اولویت‌های اساسی دولت افزایش کارایی این زیرساخت‌ها در مواجهه با حالت‌های حدی همچون سیل است. مکان هریک از تصفیه‌خانه‌ها، اسم و فاصله آن‌ها از یکدیگر در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده‌اند.

هدف اساسی در این مطالعه به‌کارگیری روش‌های بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌ها می‌باشد.

با توجه به نقشه‌های هوایی و محاصره توسط بدنه‌های آبی، ایجاد همکاری میان تصفیه‌خانه‌های ۲، ۴، ۶ و ۱۴ امکان‌پذیر نیست، به‌همین منظور در ۱۰ تصفیه‌خانه باقیمانده با کمک نقشه‌های هوایی گوگل[1]، فاصله میان زیرساخت‌های مجاور ارزیابی شد.

[1] Google Earth

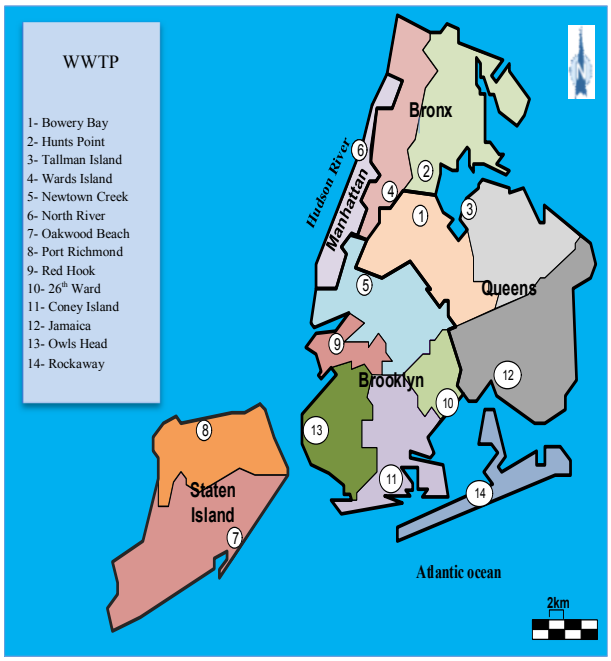

Fig. 1. 14 WWTPs' placements in New York City (Adapted from NYC DEP, 2013)

شکل ۱- محدوده مکانی چهارده تصفیه‌خانه نیویورک (برگرفته از NYC DEP, 2013)

جدول ۱- فاصله تصفیه‌خانه‌ها از یکدیگر در نیویورک

Table 1. WWTPs' distances from each other in New York City

WWTPs' distances (Km)			Number of coalition
Newtown Creek 6.7	Tallman Island 9.3	Bowery Bay	1,2
26th Ward 10.3	Red Hook 4.6	Newtown Creek	3,4
	Port Richmond 9.76	Oakwood Beach	5
	Owls Head 7.84	Red Hook	6
Jamaica 6.6	Coney Island 9	26th Ward	7,8

۳- مواد و روش‌ها

به‌منظور ارتقای عملکرد سیستمی تصفیه‌خانه‌ها و ارزیابی میزان آمادگی هر یک از این زیرساخت‌ها از شاخص تاب‌آوری استفاده شد. به این منظور، در ابتدا همان‌طور که در فلوچارت ارائه شده در

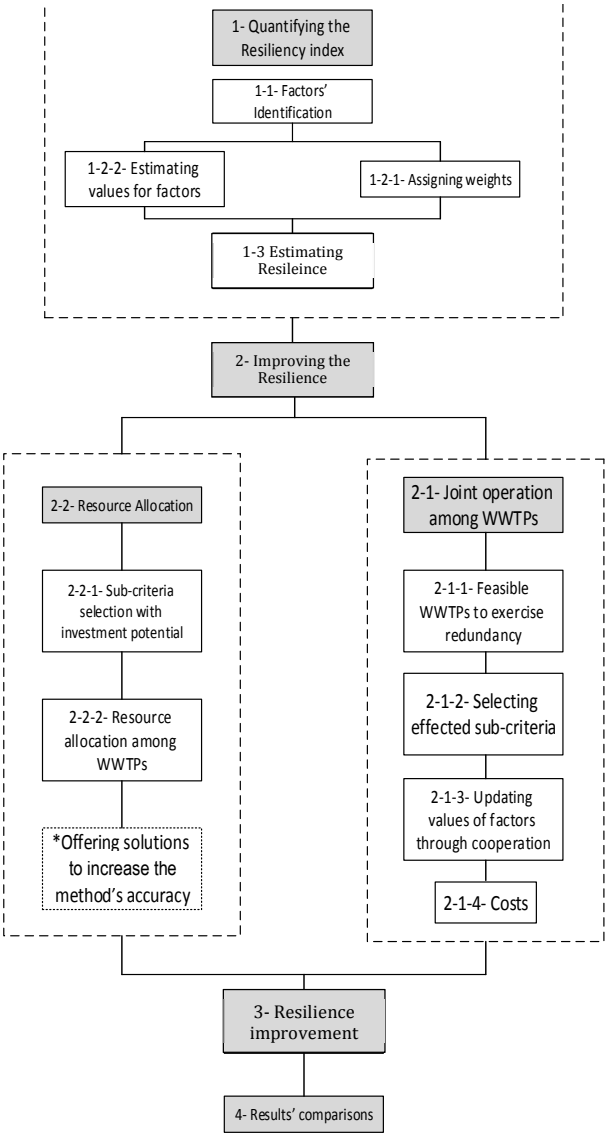

Fig. 2. The methodology algorithm for quantifying the Resilience index and its improvement

شکل ۲- الگوریتم روش به‌کار گرفته شده برای یافتن تاب‌آوری و افزایش آن

شکل ۲ نشان داده شده است، شاخص تاب‌آوری تعریف شده و در ادامه بر روی کمّی‌سازی آن تمرکز می‌شود. به‌منظور ارتقای عملکرد این شاخص، دو رویکرد تخصیص مالی و ایجاد فرایند همکارانه میان تصفیه‌خانه‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۳-۱- کمّی‌سازی تاب‌آوری

همانطور که در جدول ۲ مشخص است، به‌منظور کمّی‌سازی برگشت‌پذیری که شاخصی برای تشخیص نحوه عملکرد سیستم است عوامل مختلف هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی، اقتصادی و مسائل اجتماعی در نظر گرفته شدند. بر اساس کارایی هریک از زیرمعیارها در تصفیه‌خانه‌ها، این مقادیر در چهار دسته اصلی شامل سرعت در برگشت (Ra_1)، مقاومت ذاتی سیستم (Ra_2)، داشتن تجهیزات بازسازی (Ra_3) و داشتن امکانات موازی (Ra_4) قرار گرفتند و در قدم بعدی و به‌منظور نشان دادن تأثیرگذاری هر یک از عوامل، وزن‌دهی میان آن‌ها با استفاده از مقایسه زوجی[1] صورت گرفت.

کمّی‌سازی برگشت‌پذیری، فرصت مناسبی برای سرمایه‌گذاران ایجاد می‌کند که درک بهتری از نقاط ضعف و قوت سیستم داشته باشند و برای سرمایه‌گذاری هرچه کارآمدتر برروی بخش‌های مختلف سیستم به‌کار گیرند. به‌منظور رسیدن به این هدف، از رویکرد پرامیتی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد. در این روش به‌منظور یافتن بهترین گزینه از میان دیگر گزینه‌ها، مقایسه زوجی میان آن‌ها انجام گرفت. برای این منظور، قدم ابتدایی، یافتن تفاوت میان یک عامل در گزینه‌های (تصفیه‌خانه‌های) مختلف، در ادامه رتبه‌بندی گزینه‌ها است. در انتها، شاخص برگشت‌پذیری برای تصفیه‌خانه iام به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$Res_i = \left(\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{1}{M-1}\times\sum_{j=1}^{M}\left(\bar{D}_n(f_i,f_j) - \bar{D}_n(f_j,f_i)\right)\right)\times w_n + 1\right)\times 50 \quad (۱)$$

$$\bar{D}_n(f_i,f_j) = \frac{d_n(f_i,f_j) - d_{n,min}}{d_{n,max} - d_{n,min}} \quad \forall n \in N \text{ و } i,j \in M \quad (۲)$$

که در آن

Res_i برگشت‌پذیری تصفیه‌خانه iام، f مقدار زیرمعیار، i و j شماره تصفیه‌خانه، $d_{n,min}$ و $d_{n,max}$ کمترین و بیشترین اختلاف در یک زیرمعیار میان تصفیه‌خانه‌های مختلف، n شماره زیرمعیار، N و M به‌ترتیب تعداد زیرمعیارها و تصفیه‌خانه‌ها، w_n وزن زیرمعیار nام و $d_n(f_i,f_j)$ اختلاف f_i و f_j (f_i-f_j) است ثابت‌های ۲ و ۵۰ در معادله ۱ به‌منظور قرارگیری مقدار این شاخص بین ۰ و ۱۰۰ است.

۳-۲- تخصیص مالی به هر تصفیه‌خانه

یکی از روش‌های قابل به‌کارگیری به‌منظور افزایش تاب‌آوری در

[1] AHP (Analytical Hierarchy Process)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.105082.2531

جدول ۲- فاکتورهای درنظر گرفته‌شده به منظور تخمین تاب‌آوری

Table 2. Factors assumed for quantifying the Resilience index

Critera	Sub-criteria	Explanation about sub-criteria	Unit
Rapdity	Ra_1	Hurricane flood elevation	Meter
	Ra_2	Adverse environmental impacts	-
	Ra_3	Plant design capacity	Million cubic meters per day
	Ra_4	Post-stress recovery	hr
	Ra_5	Number of residents served by the WWTP	#
	Ra_6	Bypass or partially treated flows	Million cubic meter
Robustness	Ro_1	Additional load in time of flooding	Million cubic meters per day
	Ro_2	Critical flood elevation	Meter
	Ro_3	Maximum WWTPs inundation depth	Meter
	Ro_4	Percentage of equipment not-at-risk	٪
	Ro_5	DMR violations	٪
	Ro_6	Damage cost from the most severe historical hurricane to the WWTP	Dollar
Resourcefulness	Rs_1	Number of plant technical staff	#
	Rs_2	Availability of dewatering facilities	-
	Rs_3	Total risk avoided for every single dollar in 50 years	Dollar
Redundancy	Rd_1	Existence of underground tunnel systems	-
	Rd_2	Availability of WWTPs in the neighboring areas	Meter
	Rd_3	On-site storage	Cubic meters

تصفیه‌خانه‌ها به‌کارگیری روش تخصیص مالی است. پس از محاسبه مقدار شاخص تاب‌آوری و با هدف افزایش این شاخص در زمان وقوع سیل، با استفاده از نتایج کارآموز و همکاران تخصیص مالی به قسمت‌های مختلف زیرساخت صورت می‌گیرد. برای این کار از میان ۱۸ زیرمعیار در نظرگرفته‌شده، پنج زیرمعیار (Ra_3، Ro_4، Rs_1، Rs_2 و Rd_3) با خاصیت اقتصادی شناسایی شده است. در ادامه میزان سرمایه‌گذاری و افزایش مقدار تاب‌آوری به ازای هر واحد تخصیص مالی به هریک از این زیرمعیارها استخراج شد و در انتها با بهینه‌سازی و کمک‌گیری از نرم‌افزار MATLAB میزان بهینه تخصیص پول به هریک از زیرمعیارها در هر تصفیه‌خانه استخراج شد. اطلاعات دقیق‌تر از این روش توسط کارآموز و همکاران ارائه شده است (Karamouz et al., 2017).

۳-۳- همکاری تصفیه‌خانه‌ها

همکاری میان تصفیه‌خانه‌ها با در نظرگیری یکپارچگی میان تصفیه‌خانه‌هایی که وارد همکاری دو به دو شده‌اند، انجام پذیرفت. برای این منظور، در ابتدا فاصله مکانی ۱۴ تصفیه‌خانه از یکدیگر استخراج شد تا امکان برقراری ارتباط میان این زیرساخت‌ها بررسی شود. مهم‌ترین هدف در ایجاد همکاری‌ها و ائتلاف[1] میان تصفیه‌خانه‌ها بالابردن سطح رضایت و سود هر قسمت به‌طور مجزاست. هر ائتلاف به حداقل دو بازیگر (تصفیه‌خانه) برای شروع همکاری نیاز دارد. هدف اصلی هریک از آن‌ها شرکت در ائتلاف به‌منظور دریافت رضایت و سود بیشتر نسبت به حالت انفرادی است. فرض اساسی در این بخش این است که تصفیه‌خانه‌هایی که با یکدیگر همکاری می‌کنند، به‌صورت توأمان و یکپارچه کار می‌کنند و درنظر گرفته می‌شوند.

با باز تولید مقادیر تاب‌آوری با به‌کارگیری مقادیر زیرمعیارها و با استفاده از معادله تاب‌آوری اشاره شده (معادلات ۱ و ۲)، مقادیر تاب‌آوری در حالت همکاری میان تصفیه‌خانه‌ها قابل استخراج خواهند بود. از طرف دیگر، هزینه‌های تخمین زده شده مرتبط با ایجاد این همکاری و ارتباط می‌توانند قابل توجه باشند که این

[1] Coalition

هزینه‌های در نظرگرفته شده برای ایجاد ارتباط شامل ۱- هزینه‌های مرتبط با خاکبرداری ۲- هزینه مربوط به لوله‌ها درنظر گرفته شدند.

به‌علاوه، روش‌های مختلفی برای در نظرگیری مقادیر زیرمعیارها با توجه به خصوصیات ذاتی آن‌ها در زمان همکاری قابل تصور است؛ به‌همین دلیل، زیرمعیارها به دو دسته اصلی تقسیم شدند. دسته اول گروهی از زیرمعیارها هستند که با وجود استفاده از گزارش‌های مختلف مقادیر آن‌ها به‌صورت مطلق، معین نیست. این زیرمعیارها شامل؛ Ra_2، Ra_4، Ra_6، Ro_1، Ro_4، Ro_5 و Rs_3 می‌باشند. به‌طور مثال مقدار مشخصی برای مدت زمان بهبود پس از حادثه (Ra_4) در هنگام رفتار همکارانه تصفیه‌خانه‌ها وجود ندارد و بازه‌ای از مقادیر درنظر گرفته می‌شود. این زیر معیارها نیاز به تحلیل حساسیت دارند. دسته دوم گروهی از زیرمعیارها هستند که با استفاده از گزارش‌های مختلف مقادیرشان قابل تخمین است. زیرمعیارهای این دسته شامل باقی زیرمعیارهای اشاره نشده در گروه اول می‌باشند. به‌طور مثال ارتفاع سیلاب در تصفیه‌خانه (Ra_1) مقداری ثابت و مشخص دارد، چه رفتار همکارانه باشد چه غیرهمکارانه.

به‌کارگیری همکاری میان تصفیه‌خانه‌ها موجب ایجاد نتایج جدید و بهینه در افزایش تاب‌آوری می‌شود. برای در نظرگیری این همکاری، استفاده از سیستمی برای اتصال تصفیه‌خانه‌ها به یکدیگر مورد نیاز است. این سیستم به‌منظور انتقال آب توسط لوله‌های تعبیه شده درون زمین برای انتقال بار اضافی هریک از تصفیه‌خانه‌ها به تصفیه‌خانه مجاور در زمان سیلاب است.

۴- نتایج و بحث

در این قسمت در ابتدا نحوه استخراج نتایج تاب‌آوری به تفکیک ارائه شد و در ادامه نحوه مقایسه دو روش تخصیص مالی و درنظرگیری مشارکت و همکاری تصفیه‌خانه‌ها به‌منظور افزایش تاب‌آوری در زمان سیلاب که از مخاطرات طبیعی تهدید کننده مناطق ساحلی است، بررسی و کارایی هریک از روش‌ها در قسمت‌های مختلف ارزیابی شد. به‌طور کلی، روش‌های ارائه شده در این پژوهش، به‌منظور ارتقای سطح عملکرد زیرساخت‌های شهری در زمان سیلاب، زلزله و قطع برق قابل تعمیم است. روش‌های پیشنهادی ارائه شده، موجب افزایش تاب‌آوری سیستم‌های مختلف شهری از منظرهای مختلف در برنامه‌ریزی برای مقابله با بحران، پدافند غیرعامل و مخاطرات طبیعی می‌شود.

۴-۱- استخراج مقدار شاخص تاب‌آوری

مقادیر شاخص تاب‌آوری با در نظرگیری ۱۸ زیرمعیار جدول ۲ که ویژگی‌های سیستم را بیان می‌کنند با کمک‌گیری از نرم‌افزار متلب در روش PROMETHEE برای ۱۴ تصفیه‌خانه واقع در نیویورک قابل استخراج است. برای این منظور وزن‌های مختلف در نظر گرفته شده برای هریک از ۱۸ فاکتور در جدول ۳ نشان داده شده است.

به زیرمعیارهایی که با افزایش مقادیر آن‌ها تاب‌آوری افزایش می‌یابد، وزن مثبت و به زیرمعیارهایی که افزایش آن‌ها موجب کاهش مقدار شاخص تاب‌آوری می‌شود، وزن منفی تعلق می‌گیرد. با استفاده از مقادیر هریک از زیرمعیارها (استخراج شده از گزارش‌های دپارتمان حفاظت از محیط‌زیست نیویورک)، وزن‌های تخصیص یافته به هریک و روش پرامیتی نتایج نهایی شاخص تاب‌آوری در تصفیه‌خانه‌ها استخراج شد. در جدول ۴، نتایج این شاخص برای چهار تصفیه‌خانه مورد مطالعه آورده شده است.

جدول۳- وزن‌های معیارها و زیرمعیارها

Table 3. Weights of criteria and sub-criteria

Redundancy (Rd)		Resourcefulness (Rs)		Robustness (Ro)		Rapidity (Ra)	
W_{Rd}=0.136		W_{Rs}=0.13		W_{Ro}=0.341		W_{Ra}=0.395	
Weight	Sub-criterion	Weight	Sub-criterion	Weight	Sub-criterion	Weight	Sub-criterion
0.06	Rd_1	0.034	Rs_1	0.042	Ro_1	0.076	Ra_1
0.042	Rd_2	0.068	Rs_2	0.076	Ro_2	0.017	Ra_2
0.034	Rd_3	0.028	Rs_3	0.026	Ro_3	0.076	Ra_3
				0.034	Ro_4	0.068	Ra_4
				0.082	Ro_5	0.076	Ra_5
				0.081	Ro_6	0.082	Ra_6

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.105082.2531

جدول۴- شاخص تاب‌آوری در تصفیه‌خانه‌ها

Table 4. The resiliency index in WWTPs

The resiliency index's value (%)	WWTP	Number of the WWTP depicted in Figure 1
52.1	Bowery Bay	1
51.1	Tallman Island	3
52.6	Newtown Creek	5
55.1	Red Hook	9

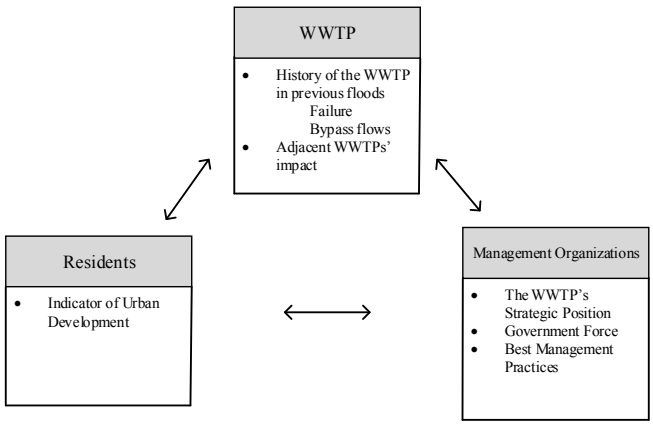

Fig. 3. Different agents with impacts on the resources allocated to each WWTP

شکل۳- عوامل محتمل تاثیرگذار بر روی بودجه قابل تخصیص به هر تصفیه‌خانه

۴-۲- تخصیص مالی به هر تصفیه‌خانه

همانطور که اشاره شد، یکی از روش‌هایی که به‌منظور ارتقای میزان شاخص تاب‌آوری در تصفیه‌خانه‌ها به‌کار گرفته می‌شود، اختصاص بودجه به بخش‌هایی از تصفیه‌خانه‌ها است که با صرف بودجه قابلیت بهبود این شاخص را دارند. با توجه به این موضوع که تخصیص بودجه به تصفیه‌خانه‌ها توسط دولت نباید تنها با دید افزایش تاب‌آوری تصفیه‌خانه به‌عنوان تنها هدف کار باشد و به‌منظور درنظرگیری دیگر عوامل دخیل و تأثیرگذار بر روی میزان بودجه قابل تخصیص، لازم است عواملی همچون مردم، دولت و سوابق تصفیه‌خانه‌ها در طوفان‌های گذشته در تعیین میزان تخصیص مالی به هر تصفیه‌خانه در نظر گرفته شوند (شکل ۳). در ادامه موارد اثرگذار به‌طور خلاصه تشریح شدند.

۴-۳- سابقه تصفیه‌خانه

سابقه تصفیه‌خانه شامل مواردی همچون میزان ساعت‌های خاموشی و از کار افتادگی این زیرساخت به‌علاوه میزان پساب تخلیه شده در بدنه‌های آبی در تجربه‌های قبلی تصفیه‌خانه است. در هنگام سیلاب سندی در سال ۲۰۱۲، به یازده تصفیه‌خانه از چهارده تصفیه‌خانه آسیب جدی وارد شد و در نتیجه آب تصفیه شده و یا نیمه تصفیه شده در بدنه‌های آبی تخلیه شد. از میان این تصفیه‌خانه‌ها، سه تصفیه‌خانه شامل Coney Island، North River و Rockaway در ساعت‌هایی از روز از کار افتادند. در مجموع، سابقه نوع برخورد تصفیه‌خانه با رویدادهای حدی گذشته به‌عنوان یک عامل اساسی تأثیرگذار در تخصیص بودجه به‌منظور بهبود وضعیت مطرح است.

۴-۴- تأثیرات اجتماعی تصفیه‌خانه‌های مجاور

تأثیرات اجتماعی تصفیه‌خانه‌های مجاور به‌عنوان یک عامل اثرگذار برروی میزان تخصیص بودجه مطرح است. این ترم، قدرت اثرگذاری تصفیه‌خانه‌های مجاور برروی یک تصفیه‌خانه را بازگو می‌کند. به این ترتیب که پس از تخصیص مالی اولیه میان تصفیه‌خانه‌ها، رضایت و یا عدم رضایت هر قسمت به‌طور مجزا با مقایسه مقدار تخصیص یافته و مقدار مورد نیاز تعیین می‌شود. تصفیه‌خانه‌هایی که از میزان تخصیص خود رضایت دارند، رفتاری همکارانه داشته و تصفیه‌خانه‌هایی که رضایت ندارند، رفتاری غیرهمکارانه خواهند داشت. رضایت و یا عدم رضایت همسایه‌ها از بودجه تخصیص‌یافته به بخش خود، بر روی رفتار تصفیه‌خانه مورد نظر و رضایت آن از بخشیدن بودجه خود به دیگر زیرساخت‌ها اثرگذار خواهد بود.

۴-۵- ویژگی‌های منطقه

ویژگی‌های منطقه شامل ویژگی‌های استراتژیکی است که هر تصفیه خانه در آن واقع شده است. این ویژگی‌ها توسط دولت که

تصمیم‌گیرنده نهایی است، تعیین می‌شوند. موقعیت استراتژیکی منطقه و اجبار دولت از شاخصه‌های اصلی این قسمت است. به این ترتیب که میزان اهمیت منطقه و در واقع سطح اطمینان برای عدم شکست می‌تواند متفاوت باشد. به‌علاوه دولت به‌عنوان تصمیم‌گیرنده نهایی توانایی تخصیص بودجه بدون توجه به دیگر مسائل را دارا است.

۴-۶- طرح‌های بهبود

این طرح ها که شامل طرح های مدیریتی مختلف است، با هدف کاهش خطر وارد عمل می‌شوند. به این ترتیب که با به‌کارگیری راهکارهای مختلف، می‌توان عمق آب گرفتگی مناطق را کاهش داد. تعبیه زمین‌های نفوذپذیر، کاشتن درختان و غیره می‌توانند از جمله این طرح ها باشند. نتیجه این طرح ها کاهش عمق آب‌گرفتگی و متعاقباً کاهش نیاز مالی تصفیه خانه برای مقابله با حالت های حدی است، زیرا از شدت این نوع وقایع کاسته می‌شود.

۴-۷- شاخص رشد جمعیت

این شاخص نیز به‌منظور ایجاد شرایط واقعی‌تر در در نظرگیری فاکتور زمانی به‌کار گرفته می‌شود. به این ترتیب که در هر بازه زمانی بنا به شاخص رشد شهری و جمعیتی هر ناحیه، مقدار بودجه قابل تخصیص می‌تواند دستخوش تغییرات شود.

در این میان با افزایش حداقلی جمعیت، به‌کارگیری طرح های مدیریتی به‌منظور بهبود وضعیت (کاهش عمق آب‌گرفتگی)، موقعیت استراتژیکی هریک از چهارده تصفیه خانه (واقع شدن در منطقه‌ای که از نظر استراتژیکی اهمیت کمتری داشته باشد)، سابقه خرابی هرچه کمتر در طوفان‌های گذشته و تأثیرات مثبت هر یک از تصفیه‌خانه‌های مجاور (رضایت هریک از همسایه‌ها از مبلغ تخصیص یافته به بخش خود) می تواند به کمتر شدن مبالغ دریافتی (تخصیص‌های مالی) کمک شایانی نماید.

۴-۸- میزان تأثیرگذاری همکاری

به‌منظور ارتقای سطح عملکرد تصفیه‌خانه‌ها و استفاده از گنجایش تصفیه‌خانه مجاور در مواقع بحرانی ارتباط میان تصفیه‌خانه‌ها برقرار می‌شود. تصفیه‌خانه‌هایی که در مجاورت یکدیگر هستند و امکان برقراری ارتباط میان آن‌ها وجود دارد در قسمت مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه و با در نظرگیری مقدار اولیه برای هریک از زیرمعیارها در حالت همکاری و همچنین هزینه‌های محتمل برای این کار همانطور که در جدول ۵ آمده است، به بررسی میزان تأثیرگذاری روش تخصیص مالی برروی زیرمعیارهای اقتصادی پرداخته شده است. مقادیر زیرمعیارها برگرفته از گزارش سازمان حفاظت محیط زیست، برخی گزارش‌های مرتبط دیگر و قضاوت‌های مهندسی برای ترکیب فاکتورها در تصفیه‌خانه‌ها است (Kenward et al., 2013, NYC DEP, 2013).

با باز تولید شاخص تاب‌آوری با استفاده از معادله ۱ (روش همکاری)، مقادیر تاب‌آوری در سه همکاری شامل تصفیه‌خانه‌های Bowery Bay و Tallman Island، Bowery Bay و Newtown Creek، Newtown Creek و Red Hook که بیشترین حد تغییرات را داشته‌اند، در جدول ۶ آورده شده‌اند. به‌علاوه، باتوجه به دسته‌بندی صورت گرفته، برای هفت زیرمعیار از

جدول ۵- هزینه‌های محتمل در نظرگیری همکاری (Krzys, 2010)

Table 5. Costs of joint operation (Krzys, 2010)

Newtown Creek and Bowery Bay				
Items	**Unit**	**Quantity**	**Unit price ($)**	**Estimated cost (M$)**
Excavation	Cubic meter	53.592	158.9207	8.52
24" pipe	Meter	6.698	675.2625	4.52
*Total				13.04
Tallman Island and Bowery Bay				
Items	**Unit**	**Quantity**	**Unit price ($)**	**Estimated cost (M$)**
Excavation	Cubic meter	74.390	158.9207	11.82
24" pipe	Meter	9.297	675.2625	6.28
Total				18.1
Red Hook and Newtown Creek				
Items	**Unit**	**Quantity**	**Unit price ($)**	**Estimated cost (M$)**
Excavation	Cubic feet	36.795	158.9207	5.85
24" pipe	Foot	4.598	675.2625	3.1
Total				8.95

* Other costs where ignored

dx.doi.org/10.22093/wwj.2018.105082.2531

جدول ۶- مقادیر تاب‌آوری پس از اعمال رویکرد همکارانه

Table 6. The resiliency index after cooperation

The resiliency's upper limit	The resiliency's lower limit	Resiliency index	WWTP
58.6	55.5	57.3	Bower Bay & Tallman Island
57.69	54.81	56.4	Bowery Bay & Newtown Creek
59.89	57.89	59	Newtown Creek & Red Hook

هجده زیرمعیار ارائه شده، نمی‌توان مقدار مطلقی درنظر گرفت. به‌همین منظور با استفاده از نظر کارشناسان، کمینه و بیشینه‌ای برای هریک از این موارد در نظر گرفته شده و میزان تاب‌آوری برای این مقادیر بازتولید می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌ها در ابتدا شاخص تاب‌آوری در هریک از این زیرساخت‌ها به تفکیک ارائه شد و در ادامه به بررسی روش‌های بهبود این شاخص پرداخته شد. در روش اول (تخصیص مالی) پس از استخراج زیر معیارهای اقتصادی و با کمک‌گیری از نرم‌افزار متلب، تخصیص مالی میان هریک از تصفیه‌خانه‌ها با هدف ایجاد بیشترین افزایش در این شاخص صورت پذیرفت. در روش دوم (همکاری) نیز برای ارتقای عملکرد تصفیه‌خانه‌ها در هنگام مواجهه با سیلاب به ایجاد ارتباط میان تصفیه‌خانه‌های مجاور پرداخته شد و مقدار افزایش تاب‌آوری در این حالت استخراج شد.

در این مقایسه از میان ده تصفیه‌خانه که شرایط برقراری ارتباط را داشتند، سه همکاری میان تصفیه‌خانه‌های Bowery Bay و Newtown Creek، Bowery Bay ،Tallman Island و Newtown Creek و Red Hook شرایطی به مراتب بهتر داشت.

در ادامه پیشنهاد می‌شود با انجام مطالعه دقیق‌تر از هریک از تصفیه‌خانه‌ها، مقدار وزن هریک از زیرمعیارها به‌طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد و تا حد امکان نحوه استخراج هزینه‌های جانبی بیشتر بررسی شود. همچنین بررسی دقیق‌تر دو روش توصیف شده تخصیص مالی، خصوصاً با به‌کارگیری مدل‌های عامل‌مبنا، و همکاری به‌منظور ارائه روشی جامع با کمک‌گیری هر دو رویکرد به‌منظور افزایش هرچه بیشتر کارآمدی آن انجام شود.

لازم به ذکر است که چارچوب ارائه شده قابل اعمال بر روی سایر تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و در حالت کلی زیر ساخت‌های آبی شهری ساحلی که در معرض خطر ریسک سیلاب هستند، می‌باشد. نکته مهم در استفاده از این روش شناسایی درست عوامل مؤثر مرتبط با زیرساخت و موجود بودن داده‌های مختلف هیدرولوژیکی منطقه و تأسیسات مورد مطالعه اعم از تجهیزات و سابقه عملکرد است.

۶- قدردانی

این پژوهش بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان "تخصیص منابع مالی براساس افزایش دوام و قوام زیرساخت‌های منابع آب" مصوب دانشکده فنی دانشگاه تهران است. به‌علاوه از همکاران محترم در دفتر تحقیقات منابع آب، جناب آقای علیایی و سرکارخانم طاهری تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

References

Akhbari, M. & Grigg, N. S. 2013. A framework for an agent-based model to manage water resources conflicts, *Water Resources Management*, 27(11), 4039-4052.

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

Da Silva, J., Kernaghan, S. & Luque, A. 2012. A systems approach to meeting the challenges of urban climate change. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 4(2), 125-145.

Edwards, M., Ferrand, N., Goreaud, F. & Huet, S. 2005. The relevance of aggregating a water consumption model cannot be disconnected from the choice of information available on the resource. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(4), 287-307.

Gilard, O. & Givone, P. 1997. Flood risk management: New concepts and methods for objective negotiations. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 239**,** 145-158.

Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1)**,** 1-23.

Karamouz, M., Nazif, S. & Falahi, M. 2012. *Hydrology and hydroclimatology: Principles and applications*, CRC Press.

Karamouz, M., Rasoulnia, E., Zahmatkesh, Z., Olyaei, M. A. & Baghvand, A. 2016a. Uncertainty-based flood resiliency evaluation of wastewater treatment plants. *Journal of Hydroinformatics*, 18(6)**,** 990-1006.

Karamouz, M. & Zahmatkesh, Z. 2016b. Quantifying resilience and uncertainty in coastal flooding events: Framework for assessing urban vulnerability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(1)**,** 04016071.

Karamouz, M., Rasoulnia, E., Olyaei, M.-A. & Zahmatkesh, Z. 2017. Financial resource allocation for wastewater treatment plants' resiliency improvement. *Journal of Infrastructure Systems*, 24 (4)**,** Article No. 040418021.

Karamouz, M., Taheri, M., Khalili, P. & Chen, X. 2019. Building infrastructure resilience in coastal flood risk management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, DOI: 10.10611 (ASCE) WR. 1943-5452. 0001043.

Kenward, A., Yawitz, D. & Raja, U. 2013. *Sewage overflows from hurricane sandy*, Climate Central, Princenton, N.J.

Koks, E. E., Jongman, B., Husby, T. G. & Botzen, W. J. 2015. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental Science and Policy*, 47**,** 42-52.

Kong, J. & Simonovic, S. P. 2016. *An original model of infrastructure system resilience*, NDM-515: *Resilience Infrastructure,* London.

Krzys, B. P. 2010. PVC Duct fittings & PVC Duct pipe List Price Catalog, <www.trenchless-technology.com/pdfs/2010_Pipe_Materials_Guide.pdf> (March 2017)

Mutikanga, H. E., Sharma, S. K. & Vairavamoorthy, K. 2011. Multi-criteria decision analysis: A strategic planning tool for water loss management. *Water Resources Management*, 25(14)**,** Article No. 3947.

NYC DEP. 2013. *NYC wastewater resiliency plan, climate risk assessment and adaptation 191 Study*, *Chapter 2: Wastewater treatment plants*, Department of Environmental Protection, 192 New York City.

Qien, K., Massaiu, S., Tinmannsvik, R. K. & Størseth, F. 2010. Development of early warning indicators based on resilience engineering. In *Submitted to PSAM10, International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference,* Seattle, Washington, USA.

Sayers, P. B., Hall, J. W. & Meadowcroft, I. C. 2002. Towards risk-based flood hazard management in the UK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 150 (5)**,** 36-42. Thomas Telford Ltd.

Simonovic, S. P. & Peck, A. 2013. Dynamic resilience to climate change caused natural disasters in coastal megacities quantification framework. *British Journal of Environmental and Climate Change*, 3(3)**,** 378-401.

Yilmaz, B. & Harmancioglu, N. 2010. Multi-criteria decision making for water resource management: A case study of the Gediz River Basin, Turkey, *Water SA*, 36(5)**,** 563-576.