

Research Paper

Investigating the Use of the Sponge City Concept for the City of Sanandaj for Flood Prevention, Storage and Optimal Allocation of Water

Erfan Rostami ¹, Mohsen Isari ², Ehsan Jafari Nodoushan ^{3*}, Jamil Bahrami ⁴

¹. M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: e.rostami@uok.ac.ir

². Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: m.isari@uok.ac.ir

^{3*}. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Campus of Bijar, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: ehsan.jafari@uok.ac.ir*

⁴. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. Email: jbahrami@uok.ac.ir



10.22125/iwe.2024.459447.1810

Received:
July 15, 2024
Accepted:
September 23, 2024
Available online:
December 26, 2024

Keywords:
Sponge city concept, runoff amount, optimal water allocation, WEAP software.

Abstract

Due to climate change and facing water scarcity, especially in developing countries, the need for managing this valuable resource is more important than ever. The main aim of this research is to optimize water allocation, store water resulting from rainfall, and reduce flooding. Considering the increase in population, these problems and challenges are becoming more apparent. Therefore, in this study, using the concept of a sponge city, flood-prone areas of Sanandaj city were identified, and the necessary steps, preliminary studies, and research for implementing this concept were carried out. Based on this, in this research, the topographic status of the area under study was investigated using Digital Elevation Model (DEM), and then, water catchment areas and low-lying areas were identified using GIS software. Subsequently, the infiltration rate of water in the soil of Sanandaj city for different soil types was calculated, and the amount of precipitation was estimated. Using the NDVI map and land use map, buildings and roads were determined by QGIS software, and the Curve Number (CN) was calculated along with the volume of runoff resulting from rainfall. Furthermore, the amount of runoff obtained from precipitation in 2021 in the urban area has been allocated to various urban- industrial, groundwater and agricultural uses using the WEAP model.

1) Introduction

As impervious levels in cities rise, the risk of financial and life damage due to flooding in urban areas also increases. Moreover, the shifting rainfall patterns due to climate change may lead to water scarcity in regions like Iran, prompting the need to consider and implement new approaches for water storage and management as a viable solution. Rainfall is the cause of water sources. In this matter, it is crucial

* **Corresponding Author:** Ehsan Jafari Nodoushan

Email: ehsan.jafari@uok.ac.ir
Tel: 09182743080

Address: Department of Civil Engineering, Campus of Bijar, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Erfan Rostami, Mohsen Isari, Ehsan Jafari Nodoushan, Jamil Bahrami. Investigating the Use of the Sponge City Concept for the City of Sanandaj for Flood Prevention, Storage and Optimal Allocation of Water

to identify low-lying, low-altitude, and flood-prone areas, therefore this study was conducted to categorize such areas.

2) Materials and Methods

Digital elevation map (DEM) of Sanandaj city was used to identify areas at higher risk of flooding, with spatial resolutions of 10 and 30 meters. Through determining the soil type, water infiltration rate, referencing the CN table, and measuring precipitation, the SCS method was utilized to calculate urban runoff volume. This helped identify ideal areas for implementing projects in line with the sponge city concept. Furthermore, employing NDVI and utilizing QGIS to map buildings and roads led to the identification of various land-use types. The WEAP software was used to distribute runoff from precipitation in urban areas to various sectors like urban-industrial, agricultural, and groundwater recharge, with the year 2021 as the base year. The urban and industrial sectors were prioritized first, with the agricultural and groundwater sectors following as second and third priorities.

3) Results

According to the NDVI map of Sanandaj city, 9.97 percent of the area is composed of natural pastures with moderate coverage, where Sanandaj city's parks and green spaces are situated. Roads and dirt areas cover 19.04 percent of the area, while the majority of the region, 70.98 percent, consists of streets and buildings in Sanandaj city. By 2032, the percentage of agricultural needs met according to WEAP software will drop from 37.74% in 2021 to 22.64%, eventually reaching zero. Urban and industrial demands will be completely met from 2021 to 2030, decreasing to 96.60% by 2032. In January of 2033, the coverage rate reaches 20.82% before dropping to zero. According to the data, the water supply will not be sufficient to meet the demand after 2032. The reliability and certainty levels for meeting demand in urban-industrial, agricultural, and underground water supply sectors are 45.45%, 0%, and 54.55%, respectively. The total water requirement for three sectors, namely urban-industrial, agriculture and groundwater were estimated using WEAP software at 20739.05353 million cubic meters, and the total water demand for this sector was also estimated.

4) Discussion and Conclusion

It can be concluded that the concept of sponge city offers a practical method for managing urban flooding, as well as storing water and replenishing groundwater. This project not only enhances permeable and water-absorbing areas but also expands green spaces and recreational environments, all without negative impacts on the environment. GIS software was utilized to pinpoint ideal locations for constructing water storage and control facilities, reducing errors in site selection for these infrastructures. This study also determined the levels of water scarcity in Sanandaj across various sectors, such as urban-industrial, agricultural, and underground water. By assessing water consumption in these different areas, researchers can gain insight into the overall water consumption and scarcity, providing a useful reference for future studies. It was inferred that the agricultural sector receives the majority of water shortage allocation, followed by the urban-industrial sectors and underground water supply.

5) Six important references

- 1) Jiang, Y., Qiu, L., Gao, T. and Zhang, S., 2022. Systematic application of sponge city facilities at community scale based on SWMM. *Water*, 14(4), p.591.
- 2) Li, X., Li, J., Fang, X., Gong, Y. and Wang, W., 2016. Case studies of the sponge city program in China. In *World Environmental and Water Resources Congress 2016* (pp. 295-308).
- 3) Lin, T., Liu, X., Song, J., Zhang, G., Jia, Y., Tu, Z., Zheng, Z. and Liu, C., 2018. Urban waterlogging risk assessment based on internet open data: A case study in China. *Habitat International*, 71, pp.88-96.
- 4) Luo, K., Wang, Z., Sha, W., Wu, J., Wang, H. and Zhu, Q., 2021. Integrating sponge city concept and neural network into land suitability assessment: evidence from a satellite town of shenzhen metropolitan area. *Land*, 10(8), p.872.

5) Nguyen, T.T., Ngo, H.H., Guo, W., Wang, X.C., Ren, N., Li, G., Ding, J. and Liang, H., 2019. Implementation of a specific urban water Management-Sponge City. *Science of the Total Environment*, 652, pp.147-162.

6) Qi, Y., Chan, F.K.S., Thorne, C., O'Donnell, E., Quagliolo, C., Comino, E., Pezzoli, A., Li, L., Griffiths, J., Sang, Y. and Feng, M., 2020. Addressing challenges of urban water management in Chinese sponge cities via nature-based solutions. *Water*, 12(10), p.2788.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

بررسی استفاده از مفهوم شهر اسفنجی برای شهر سنندج برای پیشگیری از سیلاب، ذخیره و تخصیص بهینه آب

عرفان رستمی^۱، محسن ایثاری^۲، احسان جعفری ندوشن^{۳*}، جمیل بهرامی^۴

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲

مقاله پژوهشی

چکیده

به دلیل تغییرات آب و هوایی و مواجه شدن با کمبود آب مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه، نیاز به مدیریت این منبع با ارزش بیش از پیش اهمیت دارد. هدف اصلی این تحقیق بهینه سازی تخصیص آب، ذخیره آب ناشی از بارندگی و کاهش سیلاب است با توجه به افزایش جمعیت این مشکلات و چالش ها بیشتر نمایان می شوند لذا در این تحقیق با استفاده از مفهوم شهر اسفنجی مناطق سیل خیز شهر سنندج مشخص، و اقدامات لازم و مطالعات و تحقیقات اولیه برای اجرای این مفهوم انجام گردیده است. بر این اساس در این تحقیق با استفاده از نقشه‌ی رقومی ارتفاع (DEM) وضعیت توپوگرافی منطقه مورد بررسی قرار گرفته و سپس، با استفاده از نرم افزار GIS مناطق آبرگیر و کم ارتفاع مشخص گردید. سپس میزان سرعت نفوذ آب در خاک غالب شهر سنندج برای خاک‌های مختلف محاسبه و میزان بارندگی محاسبه شده است و با استفاده از نقشه‌ی NDVI و نقشه‌ی جایگیری ساختمان‌ها و جاده‌ها توسط نرم‌افزار QGIS عدد CN محاسبه شد و میزان حجم رواناب ناشی از بارندگی محاسبه گردید. در ادامه نیز با استفاده از نرم‌افزار WEAP میزان رواناب حاصل از بارش در سال ۲۰۲۱ در سطح منطقه‌ی شهری به مصارف مختلف شهری- صنعتی، کشاورزی و آب زیرزمینی اختصاص داده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین سهم کمبود آب به بخش کشاورزی و بعد از آن به ترتیب به بخش‌های شهری- صنعتی و تغذیه آب زیرزمینی اختصاص دارد. اما می‌توان مشاهده کرد که در سالی که بارندگی به آن اختصاص داده شده است یعنی سال ۲۰۲۱، نه تنها نیاز آبی خود را بر طرف می‌کند بلکه می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ نیازهای دو بخش شهری- صنعتی و تغذیه آب زیرزمینی را بر طرف کند.

واژه‌های کلیدی: مفهوم شهر اسفنجی، میزان رواناب، تخصیص بهینه آب، نرم‌افزار WEAP

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران e.rostami@uok.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران m.isari@uok.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، پردیس بیجار، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران ehsan.jafari@uok.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۴ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران jbahrami@uok.ac.ir



هزینه^۶ (B/C) از ۱ بیشتر است، این مفهوم تأثیرگذار و کاربردی است.

در سال‌های اخیر، سیستم‌های زهکشی توسعه و پیشرفت زیادی پیدا کرده‌اند که این پیشرفت‌ها به صورت آزمون و خطا بوده و بعد از پیاده‌سازی این سیستم‌ها و به دلیل پیچیدگی عوامل تأثیرگذار بر این سیستم مانند بارش و نوع خاک، این عوامل بررسی و اصلاحات لازم برای بهبود سیستم صورت گرفته است (ثو تو و همکاران ۲۰۱۹).

علاوه بر این موارد، ساخت و سازهایی که در پی اسکان جمعیت مردم روستایی که به شهرها مهاجرت می‌کنند، باعث تخریب زیرساخت‌های طبیعی مانند مناطق جنگلی و آبگیرهای طبیعی شده‌اند که وظیفه نگهداری آب و تغذیه آب‌های زیرزمینی را دارند (ثو تو و همکاران ۲۰۱۹).

با توجه به تغییرات اقلیمی و آب و هوا، امکان وقوع سیل و کمبود آب یک خطر جدی به حساب می‌آید. خطر وقوع سیل و کمبود منابع آبی کشورهای در حال توسعه را بیش از پیش تهدید می‌کند و دلیل این مشکل عدم انجام کارهای حفاظتی و مدیریتی در کنترل سیلاب است و از طرف دیگر، با افزایش جمعیت نیاز به منابع آبی بیشتر از قبل احساس می‌شود (آستانه و همکاران ۲۰۱۹).

مفهوم شهر اسفنجی از لحاظ معنایی بیان‌کننده اقداماتی است که دولت چین برای مدیریت آب‌های سطحی به کار برده است که این مفهوم شباهت زیادی با دیگر روش‌ها و تکنیک‌های کنترل و مدیریت سیلاب دارد. صفت آبی-سبز^۸ در مفهوم شهر اسفنجی، ترکیبی از فضاهای آبی (دارای آب) و سبز (دارای پوشش گیاهی) است (یونگ و همکاران ۲۰۱۸، میشل و همکاران ۲۰۲۰، جیمز و همکاران ۲۰۲۰).

مفهوم شهر اسفنجی برای اولین بار در سال ۲۰۱۲ توسط رییس جمهور چین، شی جین پینگ، مطرح شد و بعد از شناسایی چند شهر توسط اداره کنترل سیلاب و خشکی کشور چین، این مفهوم در ماه دسامبر سال ۲۰۱۳ به طور رسمی در دستور کار قرار گرفت (جیمز و همکاران ۲۰۲۰).

مقدمه

گسترش شهری در چند دهه گذشته سطوح غیرقابل نفوذ را رشد داده و جنگل‌ها، مراتع، دریاچه‌ها و تالاب‌های متعددی را که قادر به ذخیره منابع آب هستند، دگرگون کرده است. همچنین، روش‌ها و استراتژی‌های ضعیف مدیریتی در دشت‌های سیلابی و کم ارتفاع باعث بروز مشکلات محیط زیستی و افزایش سیلاب هستند (شیائونینگ و همکاران ۲۰۱۶، داشنگ ۲۰۱۶، هوی و همکاران ۲۰۱۷).

مدیریت منابع آبی یکی از مسائل مهم در توسعه برنامه‌های شهری است که مشکلات مربوط به این برنامه‌ها (توسعه شهری) باعث بروز ناآرامی‌ها و نگرانی‌هایی در میان دولت‌ها شده است (مارلو و همکاران ۲۰۱۷).

نگوین و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقات خود به طور انتقادی روش‌های مرسوم مدیریت منابع آب را بررسی کردند و سپس مفهوم شهر اسفنجی^۱ و اعمال و اجرای آن و همچنین محدودیت‌ها و فرصت‌های آن را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که این مفهوم دارای چهار اصل شامل: منابع آب شهری، مدیریت زیست‌محیطی آب، زیرساخت‌های سبز و پیاده‌روهای نفوذپذیر است.

همچنین، توسعه شهری و استفاده از مصالح غیرقابل نفوذ در ساخت و سازها مانع از جذب آب باران در خاک شده است (لین و همکاران ۲۰۱۸).

فن و ماتسوموتو (۲۰۱۹) در منطقه نانگانگ در شهر هاربین، میزان تأثیرپذیری مفهوم شهر اسفنجی را با استفاده از تحلیل سود و هزینه ۲ بر پایه GIS و شبیه‌سازی سیل شهری بررسی کردند. در این تحقیق تحلیل سود و هزینه ۳ از جنبه‌های اجتماعی ۴ و خصوصی ۵ بررسی شده است. نتایج این محققین نشان داد که جنبه خصوصی این مفهوم به دلیل هزینه‌های ناشی از نگهداری، پس از مدتی از سود آن بیشتر می‌شود و به همین دلیل اجرای این مفهوم تأثیرپذیر نیست، اما از جنبه اجتماعی چون نسبت سود^۶ به

⁶ Benefit

⁷ Cost

⁸ Blue-Green

¹ Sponge City

² Cost-Benefit Analysis

³ Cost-Benefit Analysis

⁴ Social Perspective

⁵ Private Perspective

کنترل سیلاب دارد و ۱۹/۸۵ درصد آن هم مناسب ایجاد سازه‌های اکولوژیکی است.

یو و همکاران (۲۰۲۲) کاربرد ترکیبی اقدامات LID (توسعه کم تأثیر) و حوضچه‌های نگهداری را در جامعه مورد مطالعه قرار دادند و سپس در مورد عملی بودن کاربرد تکنیک‌های شهر اسفنجی در ساخت سیستم‌های زهکشی بحث کردند. آن‌ها با استفاده از مدل SWMM اثرات تکنیک‌های مختلف LID را بر رواناب در شش دوره بازگشت ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۵۰ سال و با در نظر گرفتن چهار سناریو مختلف که شامل سناریوی زهکشی سنتی، سناریوی LID و سناریوی حوضچه نگهداری می‌شود، شبیه‌سازی کردند. آن‌ها متوجه شدند که اقدامات LID اثرات مشهودی بر کاهش رواناب دارند که به شدت تحت تأثیر دوره بازگشت هستند. همچنین متوجه شدند که حوضچه‌های نگهداری تأثیر محسوسی بر رواناب ندارند، اما مقدار پیک خروجی را کاهش می‌دهند و کمتر تحت تأثیر دوره بازگشت قرار می‌گیرند. ترکیب LID و حوضچه نگهدارنده می‌تواند مزایای آن‌ها را ترکیب کند و سرعت دبی اوج منطقه را به طور پایدار کاهش داده و فشار سیستم زهکشی شهری را کاهش دهد.

مو و همکاران (۲۰۲۳) با توسعه چارچوبی بر اساس ارزیابی فضایی و ماهواره‌ای تجهیزات شهر اسفنجی موجود، قرارگیری مکان‌های در معرض خطر سیل و آسیب‌پذیری اجتماعی-اقتصادی مدلی را برای تحلیل رابطه عرضه و تقاضا برای ایجاد تجهیزات شهر اسفنجی ارائه کردند. این مدل نشان داد که مناطق با تراکم بالا که در مرکز شهر گوانگژو قرار دارند بیشتر در معرض سیل قرار دارند و تقاضا برای ساخت تجهیزات شهر اسفنجی در آن‌ها بیشتر است. نتایج مطالعات آن‌ها یک دید کلی را در مورد توسعه یک روش تعمیم‌یافته و قابل تکرار ایجاد می‌کند که می‌تواند برای رسیدن به تعادل بین عرضه و تقاضا در برنامه‌ریزی مشارکتی، استراتژیک و چند منظوره ساخت تجهیزات شهر اسفنجی در بافت‌ها و شرایط مختلف شهری مورد استفاده قرار گیرد.

سپس، در سال ۲۰۱۴ کشور چین توسط اداره توسعه شهری-روستایی و مسکن مقاله‌ای را با عنوان "راهنمای ساخت شهر اسفنجی" به چاپ رساند (گریفیث جیمز و همکاران ۲۰۲۰).

در سال ۲۰۱۸، اداره توسعه شهری-روستایی و مسکن ۱ (MOHURD) مقاله‌ای تحت عنوان "تشخیص و تعیین استانداردهای لازم برای ساخت شهر اسفنجی" را به چاپ رساند (جیمز و همکاران ۲۰۲۰).

چی یونفی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود توسعه تکنیک‌های شهر اسفنجی^۲ (SCP) را بررسی کردند که بر جنبه‌های ساخت و طراحی تمرکز می‌کند و در مورد چگونگی استفاده از راه‌حلی که پایه طبیعی^۳ (NBS) دارند، تمرکز کردند. این روش که از اروپا نشأت گرفته است، ایده کلی آن در نظر گرفتن گزینه‌های گسترده‌تر و ترکیبی است.

چی یونفی و همکاران (۲۰۲۰) به این نتیجه رسیدند که نه تنها این کار، چالش‌های آب شهری، بلکه طیف گسترده‌ای از چالش‌های اجتماعی و زیست‌محیطی، از جمله سلامت انسان، آلودگی (از طریق مواد مغذی، فلزات، رسوبات، پلاستیک و غیره)، خطر سیل و تنوع زیستی را شامل می‌شود. علاوه بر این، در نظر گرفتن این عوامل می‌تواند به بهبود شیوه‌های فعلی SCP کمک کند. NBS همچنین راه‌حل‌های ترکیبی مقرون به صرفه‌ای (یعنی ترکیب چند نوع از تکنیک‌های شهر اسفنجی با هم) را ارائه می‌دهد که ممکن است به توسعه SCP کمک کند.

کیو و همکاران (۲۰۲۱) با تلفیق سیستم شبکه عصبی و مفهوم شهر اسفنجی و با کمک نرم‌افزار GIS در شهر شنژن، میزان پخش و توزیع یک سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ سال را با طول بارش ۱ ساعته شبیه‌سازی کردند. طی تحقیقات آن‌ها مشخص شد که ۵۹/۷۳ درصد از کل ناحیه مورد مطالعه مناسب اجرای این مفهوم است، ۳/۲۵ درصد از این ناحیه بیشترین آسیب‌پذیری را دارد، ۳/۳ درصد آن نیز که در کنار رودخانه قرار دارد نیاز به ساخت و سازه‌های

³ Nature-Base Solutions

¹ Ministry of Housing and Urban-Rural Development

² Sponge City Practices



دلیل تغییر اقلیم و افزایش شهرنشینی و افزایش سطوح نفوذ ناپذیری، مقابله با این عوامل اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق سعی شده است با استفاده از محیط GIS، مناطق کم ارتفاع و در معرض سیل شهر سنندج شناسایی شود و همچنین با استفاده از نرم افزار QGIS، مناطق تحت پوشش جاده‌ها و ساختمان‌ها مشخص و سپس با استفاده از شاخص NDVI^۵ نواحی تحت پوشش گیاهان نیز ناحیه‌بندی و اندازه‌گیری شود. در ادامه، با استفاده از معادله SCS میزان حجم رواناب ناشی از بارندگی محاسبه گردد و در نهایت، با استفاده از نرم افزار WEAP^۴، میزان رواناب حاصله محاسبه شده و حاصل از بارش در سال ۲۰۲۱ در سطح منطقه شهری به مصارف مختلف شهری، صنعتی و کشاورزی اختصاص داده شود.

مواد و روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهر سنندج می‌باشد. این شهر واقع در غرب کشور و مرکز استان کردستان است. بنابر آخرین سرشماری انجام شده جمعیت شهر سنندج حدود ۴۱۴۰۶۹ نفر اعلام شده است و ارتفاع این شهر نسبت به سطح دریا بین ۱۴۵۰ و ۱۵۳۸ متر در مناطق مختلف متغییر است. شهر سنندج از نظر جغرافیایی در محدوده‌ی ۱۴ درجه و ۳۵ دقیقه‌ی عرض شمالی و ۴۶ درجه طول شرقی از نصف النهار مبدا قرار دارد. موقعیت توپوگرافی این شهر به گونه‌ای است که از اطراف توسط کوه‌های آبدرد، سراج الدین و شیخ معروف محاصره شده است، که همین موضوع باعث شده است تراکم جمعیت آن، بیشتر به بخش‌های مرکزی محدود شود. بسیاری از بخش‌های این شهر نیز بر روی تپه‌ها قرار دارند و توپوگرافی این شهر باعث شده که بخش مرکزی سنندج به صورت طبیعی در یک دره به نسبت مسطح، استقرار یابد.

هونگ لین سان و همکاران (۲۰۲۴) با انتخاب شهر چانگچون به عنوان شهر مورد مطالعه خود، با در نظر گرفتن مفهوم شهر اسفنجی در توسعه شهری، یک رویکرد تحلیلی برای کنترل حجم رواناب با توجه به گسترش شهری و تاثیر ساختار کاربری زمین با استفاده از GeoSOS-FLUS پیشنهاده کردند. هونگ لین سان و همکاران حجم ذخیره‌سازی را برای طرح‌های توسعه کم اثر (LID) با استفاده از داده‌های سطح زمین در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۳۵ محاسبه کردند. هدف آن‌ها کنترل حجم رواناب به میزان ۸۰٪ تا سال ۲۰۳۵ بود. با استفاده شبیه‌سازی مونت کارلو^۱ و تجزیه و تحلیل حساسیت^۲، آن‌ها تأثیر انواع مختلف کاربری زمین^۳ را بر محاسبات حجم ذخیره‌سازی^۴ ارزیابی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که زمین‌های صنعتی به طور قابل توجهی بر حجم ذخیره سازی در روش LID تأثیر می‌گذارد. مطالعه آن‌ها نشان داد که بررسی ویژگی زمین‌های صنعتی و ساختار سطح در برنامه ریزی شهر اسفنجی برای تجزیه و تحلیل دقیق تر کنترل حجم رواناب در شهر چانگچون، امری ضروری در پیاده سازی مفهوم شهر اسفنجی است. همچنین نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که حجم ذخیره‌سازی بر اساس داده‌های کنونی ممکن است اهداف بلندمدت پیاده سازی شهر اسفنجی را به دلیل افزایش سطوح نفوذ ناپذیر و در نتیجه آن تغییر ضریب رواناب، در طول شهرنشینی برآورده نکنند. احمد هور گیلانی و همکاران (۲۰۲۴) با ادغام زیرساخت‌های سبز، از جمله مسیرها و پیاده‌روهای نفوذپذیر، بام‌های سبز، باغ‌های بارانی و حوضچه‌های نگهداری متوجه اثربخشی قابل توجهی در کاهش و کنترل رواناب سطحی شدند، در حالی که به طور همزمان تاب آوری و پایداری شهری را افزایش می‌دهد. همچنین، استفاده از روش‌هایی که پایه‌ی زیست محیطی دارد نه تنها رواناب را کنترل می‌کند، بلکه به بهبود زیبایی شهری، تنوع گیاهی و جانوری کمک شایانی می‌کند. هدف اصلی از ارائه و آماده‌سازی این تحقیق، مقابله با سیلاب، ذخیره آب و تغذیه آب‌های زیرزمینی است که به

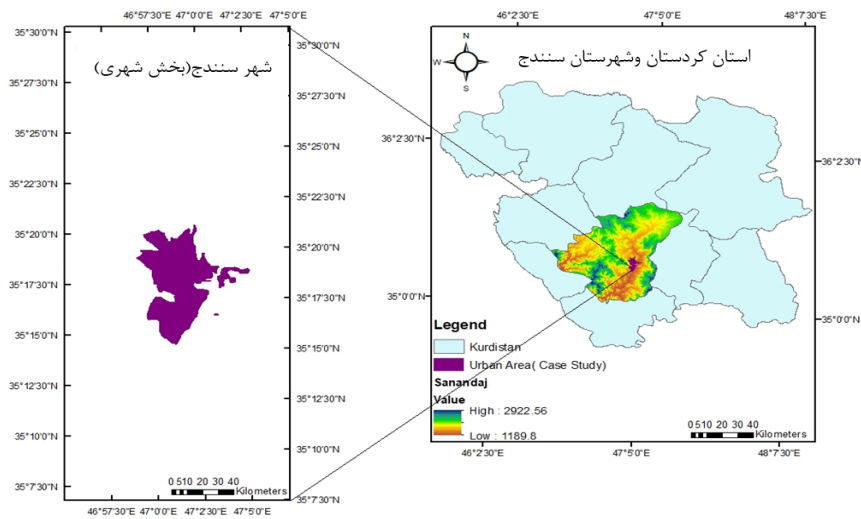
⁴ Storage volume

⁵ Normalized Difference Vegetation Index

¹ Monte Carlo simulation

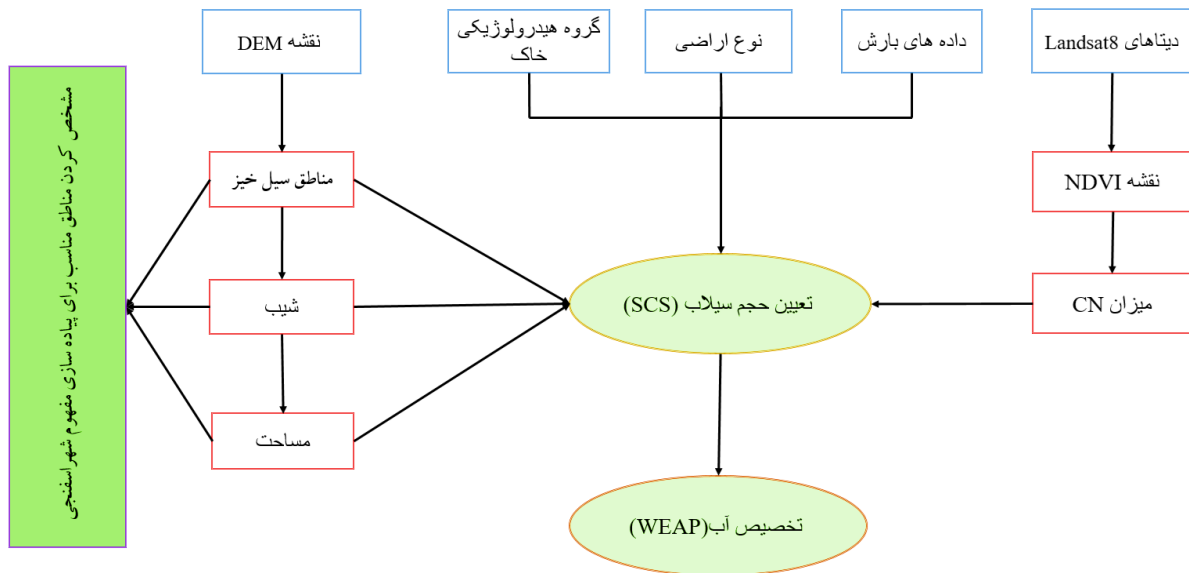
² Sensitivity analysis

³ land-use types



شکل (۱) موقعیت شهر سنندج

فلوچارت زیر مراحل کلی از محاسبه حجم رواناب ناشی از بارش جهت تخصیص منابع آب به طور کامل نشان می‌دهد.



شکل (۲) نمای کلی از روند تعیین حجم سیلاب

کشور، استان، شهر، محل قرارگیری رودهای اصلی و فرعی سنندج، توپوگرافی منطقه و محل قرارگیری روستاهای شهر سنندج می‌باشد که این نقشه‌ها و موقعیت‌ها به شکل

نقشه ارتفاعی منطقه‌ی مورد مطالعه (سنندج):

داده‌های مورد نیاز از این بخش از یک سری نقشه‌ی رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۱۰ و ۳۰ متر تشکیل شده است که هدف آن‌ها مرزبندی و پهنه‌بندی مناطق مختلف ناحیه‌ی مورد نظر است. این داده‌های DEM شامل: نقشه‌ی



و دبی ایجاد شده بر اثر مقدار مشخصی از بارندگی می‌باشد که داده‌ها و متغیرهای ورودی این معادله شامل: میزان بارش در یک بازه‌ی زمانی مشخص (P)، شماره‌ی منحنی رواناب حوضه (CN)، حداکثر پتانسیل نگهداشت رطوبت پس از شروع بارندگی (S) و تلفات اولیه‌ی بارش می‌شود (I_a). در فرمول زیر Q_d ارتفاع رواناب می‌باشد که در برخی از کتاب‌ها با R نیز نشان داده شده است. (علیزاده ۲۰۰۸)

$$Q_d = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

تلفات اولیه‌ی بارش شامل آب جذب شده توسط چالاب‌ها و یا میزان برگاب است که این تلفات همچنین شامل میزان نفوذ و تبخیر و تعرق نیز می‌شود که برای شرایط کلی این پارامتر به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

حداکثر پتانسیل نگهداشت رطوبت بستگی به نوع خاک، پوشش گیاهی و ویژگی‌های حوضه‌ی مورد مطالعه دارد که مقدار آن در سیستم متریک به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

زمان تمرکز حوضه نیز از دیگر پارامترهای مهم در بحث اندازه‌گیری حجم رواناب حوضه می‌باشد که مقدار آن با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود. در این فرمول L نشان دهنده‌ی طول آبراهه‌ی اصلی بر حسب متر (m)، CN شماره‌ی منحنی و S متوسط شیب حوضه بر حسب $\frac{M}{M}$ می‌باشد و همچنین واحد زمان تمرکز ساعت (hr) است.

$$T_c = \frac{L^{0.8} \left[\left(\frac{1000}{CN} - 9 \right) \right]^{0.7}}{4470 \times S} \quad (4)$$

پس از محاسبه‌ی زمان تمرکز باید زمان رسیدن دبی به اوج محاسبه شود که این مقدار وابسته به مقدار زمان تمرکز است و از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

فایل‌های رستر^۱ و شیب فایل^۲ با کمک نرم افزار Google Earth تهیه شده‌اند که از قبل در سایت www.GPS Visualizer.com داده‌های ارتفاعی آن تصحیح شده‌اند. با داشتن این نقشه می‌توان با استفاده از قسمت هیدرولوژی در نوار ابزار برنامه‌ی ArcMap، دستورهای هیدرولوژیکی حوضه‌ی مورد نظر را، که از جمله‌ی آن‌ها رده‌ی رودخانه، زیرحوضه‌ها، قسمت‌های آبریز حوضه و غیر است را مشخص کنیم. هدف از این کار این است که در مسیر انجام پژوهش یک نمای کلی از وضعیت و شرایط منطقه مورد نظر داشته باشیم و همچنین در قسمت‌های بعد که قرار است مناطق سیل خیز و شیب مشخص شود، داشتن DEM منطقه ضروری است. علاوه بر این توضیحات این نقشه در تولید نقشه‌ی توپوگرافی و مشخص کردن رودخانه‌های اصلی و فرعی که در ادامه توضیح داده می‌شود، کاربرد دارد.

نقشه‌ی قرارگیری رودخانه‌های اصلی و فرعی

مشخص کردن موقعیت رودخانه‌ها به این دلیل است که به ما یک دید کلی در مورد کلیه‌ی اماکنی که رودخانه از آن‌ها عبور می‌کند، می‌دهد. و نشان می‌دهد که مناطق اطراف رودخانه‌ها در هنگام بارش‌های شدید از دیگر مناطق، بیشتر در معرض سیل و در نتیجه خسارت‌های جانی و مالی قرار دارند.

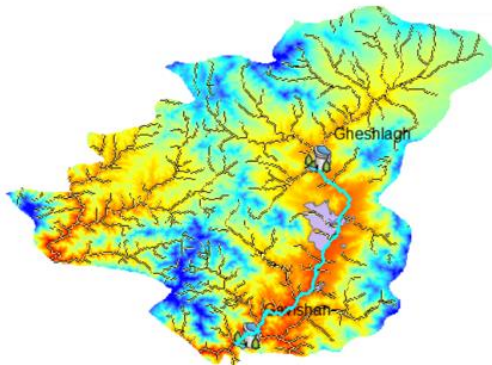
نقشه‌ی شیب منطقه: هدف از این کار شناسایی مناطق کم ارتفاع و مشخص کردن جهت جریان است، و از این جهت دارای اهمیت است که در هنگام بارندگی و وقوع سیل، رواناب حاصله از آن در مناطق پست و کم ارتفاع جمع می‌شود. همچنین در ادامه که قرار است اقدامات مدیریتی و حفاظتی اجرا شود، تسلط بر شیب منطقه امری ضروری است، به این دلیل که بخشی از مفهوم شهر اسفنجی بررسی و ارزیابی امکان پذیری اجرای آن است، شیب یکی از فاکتورهای مهمی است که باید بررسی شود.

محاسبه‌ی دبی سیل با روش SCS

معادله‌ی SCS که توسط سازمان خاک آمریکا پیشنهاد شده است، روشی است تجربی که بیانگر مقدار حجم رواناب

² Shape File

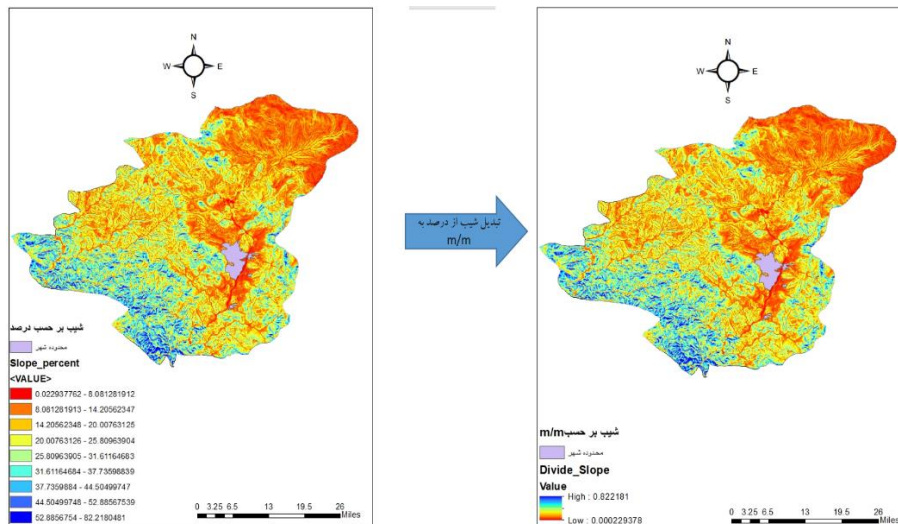
¹ Raster



شکل (۳) موقعیت آبراهه‌ی اصلی و طول آن

میانگین شیب حوضه

در این تحقیق میزان شیب حوضه توسط نرم‌افزار GIS تعیین شده است (شکل ۴) که در آن شیب حوضه بر حسب درجه تعیین شده است. در شکل ۴ شیب حوضه بر حسب واحد $\frac{m}{m}$ نشان داده شده است که ابتدا به درصد تبدیل شده و سپس به واحد $\frac{m}{m}$. از روی شکل می‌توان تشخیص داد که تقریباً مقدار شیب در محدوده‌ی شهری و رودخانه‌ی اصلی در بین بازه‌ی ۰/۰۲ و ۲۵ است در نتیجه در این تحقیق میزان شیب را به طور میانگین ۱۲/۵ درصد در نظر گرفته شده است که بر حسب واحد $\frac{m}{m}$ برابر ۰/۱۲۵ است.



کل (۴) شیب حوضه بر حسب m/m

نتایج به دست آمده از نقشه NDVI شهرسندج با استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای نوع Landsat 8 و همچنین

$$T_p = 0.6T_c + \sqrt{T_c} \quad (5)$$

برای تعیین شماره‌ی منحنی (CN) نیز باید ابتدا گروه هیدرولوژیکی خاک منطقه و یا سرعت نفوذ آن مشخص شود، سپس با در نظر گرفتن خصوصیات پوششی حوضه مقدار این پارامتر محاسبه می‌شود.

هدف از محاسبه‌ی این فرمول‌ها به دست آوردن پارامترهای لازم برای فرمول زیر است، که با استفاده از آن میزان حجم رواناب بر حسب $\frac{M^3}{S}$ محاسبه می‌شود. در این فرمول مساحت حوضه بر حسب هکتار می‌باشد.

$$Q_p = \frac{0.0208 \times A \times Q_d}{T_p} \quad (6)$$

طول آبراهه‌ی اصلی

در شکل ۳ طول رودخانه اصلی واقع در حوضه نشان داده شده است در بین دو سد گاویشان و قشلاق قرار گرفته دارد که طول آن توسط نرم‌افزار GIS، ۵۷۵۰۶ متر محاسبه شده است. در این شکل قسمت بنفش رنگ نشان دهنده‌ی منطقه‌ی شهری سندج می‌باشد.

انواع مختلف پوشش منطقه و میزان مساحت آن‌ها برای تعیین عدد CN



(ب)

شکل (۵) الف) نقشه‌ی محل قرارگیری جاده‌ها و ساختمان‌ها و
ب) نقشه‌ی NDVI

پتانسیل نگهداشت رطوبت (S)

در این بخش با توجه به اینکه نوع پوشش غالب سطح حوضه مراتع طبیعی با پوشش متوسط، خیابان‌ها و جاده‌های آسفالتی و مسیرهای خاکی است و همچنین حوضه در گروه هیدرولوژیکی A و C قرار دارد، میزان پتانسیل نگهداشت رطوبت محاسبه و در قالب یک جدول به صورت زیر ارائه گردیده است.

جدول (۱) پتانسیل نگهداشت رطوبت براساس فرمول (۳)

A	B	C	D	پتانسیل نگهداشت رطوبت (S)
۴۵/۱۶	۱۶/۹۳	۹/۳۹	۶/۷۵	پوشش جنگلی پراکنده
۲۰	۷۸	۸۹	۷/۵۹	پوشش جنگلی متراکم
۲۲/۴۴	۱۱/۴۱	۶/۷۵	۴/۸۴	مراتع با پوشش پراکنده
۳۹/۷۳	۱۶/۲۴	۸/۹۲	۶/۳۵	مراتع با پوشش متراکم
۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	پارکینگ‌ها و بام‌ها
۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	۰/۵۲	سطوح سخت (آسفالت و خیابان‌ها)
۹/۸۸	۵/۵۸	۳/۸	۳/۱۴	جاده‌های خاکی

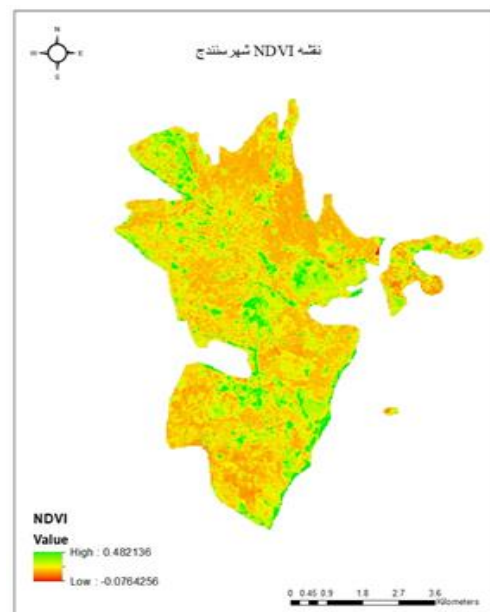
زمان تمرکز و زمان (Tc) رسیدن به نقطه‌ی اوج (Tp)

با توجه به فرمول (۴)، پس از مشخص شدن میزان نگهداشت و طول آبراهه‌ی اصلی (شکل ۳) مقادیر زمان تمرکز در حوضه در قالب جدول ۲ ارائه شده است. با داشتن این مقادیر با استفاده از فرمول (۵) زمان رسیدن دبی به نقطه اوج نیز محاسبه شده و در قالب جدول ۳ نشان داده شده است.

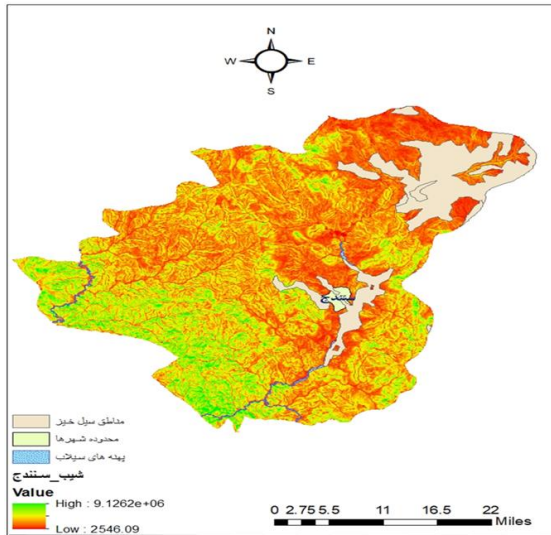
نقشه‌ی قرارگیری خیابان‌ها و ساختمان‌ها توسط نرم‌افزار QGIS که در شکل ۵ نشان داده شده است، نشان دهنده‌ی این است که ۹/۹۷ درصد (۳۹۵ هکتار) از این منطقه توسط مراتع طبیعی با پوشش متوسط پوشیده شده که بیشتر محل قرارگیری پارک‌ها و فضاهای سبز شهر سنندج می‌باشد، ۱۹/۰۴ درصد (۷۵۴ هکتار) از این منطقه توسط مسیرها و مناطق خاکی پوشیده شده و دیگر مناطق که ۷۰/۹۸ درصد (۲۸۱۰ هکتار) منطقه را شامل می‌شود محل قرارگیری خیابان‌ها و ساختمان‌های شهر سنندج می‌باشد.



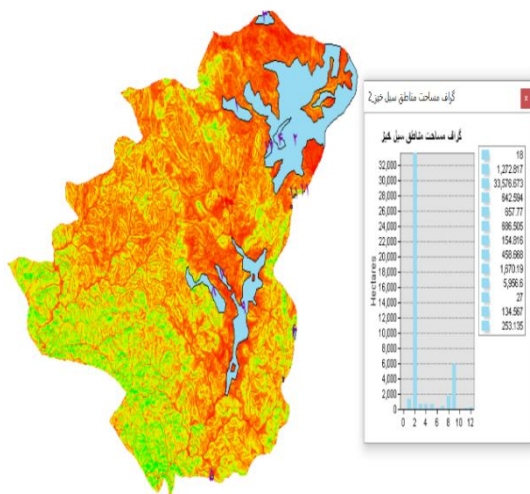
الف



سیلاب کل شهر سنندج، به این دلیل که امکان رخداد سیل در این نواحی بیشتر است و ارتفاع و شیب کمتری دارد، به عنوان بهترین مناطق برای پیاده سازی مفهوم شهر اسفنجی در نظر گرفته شده است و در قالب شکل (۶) نمایش داده شده است. برای پیاده سازی این مفهوم نیازمند اقدامات سازه‌ای نیز هستیم که در این رابطه با مشخص شدن مناطق سیل خیز می‌توانیم میزان مساحت و محیط این نواحی را که در شکل (۷) توسط نرم‌افزار GIS ترسیم شده به دست آوریم و در نتیجه هزینه پیاده سازی مفهوم شهر اسفنجی را با توجه به تکنیک‌های کنترل سیلاب و ذخیره‌ی آب شهری که قرار است انجام دهیم، برآورد کنیم.



شکل (۶) نقشه‌ی مناطق سیل خیز و پهنه‌های سیلاب شهر سنندج



(الف)

جدول (۲) مقادیر زمان تمرکز

A	B	C	D	زمان تمرکز (hr)
۹۰/۸۳	۴۸/۵۲	۳۴/۴۴	۲۸/۹	پوشش جنگلی پراکنده
۱۲۹/۰۲	۵۵/۰۵	۳۷/۴	۳۰/۷	پوشش جنگلی متراکم
۶۴/۰۸	۳۸/۴۲	۲۸/۹	۲۴/۵۹	مراتع با پوشش پراکنده
۸۳/۴۷	۴۷/۳	۳۳/۴۸	۲۸/۰۲	مراتع با پوشش متراکم
۱۳/۲۷	۱۳/۲۷	۱۳/۲۷	۱۳/۲۷	پارکینگ‌ها و بام‌ها
۱۳/۲۷	۱۳/۲۷	۱۳/۲۷	۱۳/۲۷	سطوح سخت (آسفالت و خیابان‌ها)
۳۵/۴۱	۲۲/۶	۲۲/۱	۲۰/۴۸	چاده‌های خاکی

جدول (۳) مقادیر زمان رسیدن به اوج

A	B	C	D	زمان رسیدن به اوج (hr)
۶۴/۰۳	۳۶/۰۷	۲۶/۵۳	۲۲/۷۲	پوشش جنگلی پراکنده
۸۸/۷۷	۴۰/۴۵	۲۸/۵۵	۲۳/۹۶	پوشش جنگلی متراکم
۴۶/۴۵	۲۹/۲۵	۲۲/۷۲	۱۹/۷۱	مراتع با پوشش پراکنده
۵۹/۲۲	۳۵/۲۶	۲۵/۸۷	۲۲/۱۱	مراتع با پوشش متراکم
۱۱/۶۱	۱۱/۶۱	۱۱/۶۱	۱۱/۶۱	پارکینگ‌ها و بام‌ها
۱۱/۶۱	۱۱/۶۱	۱۱/۶۱	۱۱/۶۱	سطوح سخت (آسفالت و خیابان‌ها)
۲۷/۱۹	۲۰/۹	۱۷/۹۶	۱۶/۸۱	چاده‌های خاکی

مشخص کردن مناطق سیل خیز

در این بخش از پژوهش با استفاده از نرم‌افزار GIS و داشتن نقشه‌ی رقوم ارتفاعی مناطق سیل خیز و پهنه‌های

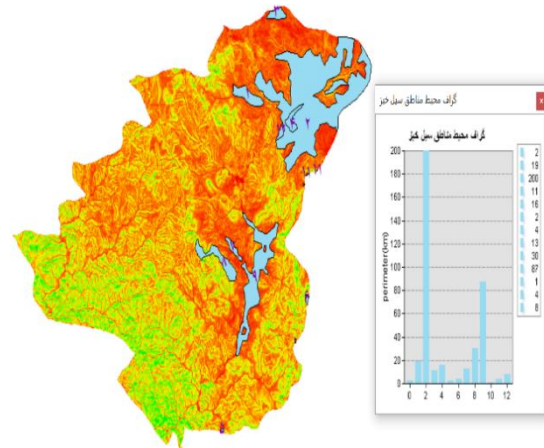


شکل (۸) نمودار رشد جمعیت

داده‌های مربوط به نرم‌افزار WEAP شامل مقدار حجم آب تولید شده توسط رواناب حاصل از بارش، جمعیت، سطح زیر کشت کشاورزی و تغذیه‌ی آب زیر زمینی می‌باشد که جمعیت شهر سنندج ۴۱۴۰۶۹ نفر در نظر گرفته شده که در این سناریوی انتخاب شده در این پژوهش با نرخ رشد ۳ درصد به طور سالانه افزایش می‌یابد و با در نظر گرفتن این که مصرف سالانه هر فرد طبق سایت پایگاه اطلاع رسانی وزارت نیرو، ۱۵۷ متر مکعب در نظر گرفته شده است. در ادامه نیز مساحت کل زمین‌های کشاورزی را ۱۲۶۰۰۰ هکتار در نظر گرفته‌ایم که به هر هکتار از آن در سال ۵۵۰۰ متر مکعب آب اختصاص داده شده است و با نرخ ۱ درصد به طور سالانه مقدار این اراضی افزایش پیدا می‌کند. برای تغذیه‌ی مصنوعی آب زیرزمینی نیز ۲۰۰۰ هکتار زمین اختصاص داده شده است که سالانه ۱۰۰ متر مکعب در هکتار آب دریافت می‌کند که البته این مقدار در صورت برآورده شدن نیازهای شهری-صنعتی و کشاورزی بیشتر هم می‌شود (آب مازاد به این بخش اضافه می‌شود). لازم به ذکر است که بخشی از نیازهای این سه بخش (مختلف شهری-صنعتی، کشاورزی و تغذیه‌ی آب زیرزمینی) توسط آبخوانی که ظرفیت کلی آن ۴۰۰۰ مترمکعب در نظر گرفته شده است تامین می‌شود.

تحلیل نتایج نرم افزار WEAP

این پژوهش نخستین تلاش برای استفاده و تحلیل مدل WEAP به عنوان یک روش برای حل مسائل تخصیص آب در شهر سنندج است. در این مطالعه سیستم ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP) برای شبیه‌سازی منابع آب حاصل از باران و ارزیابی تخصیص آب در منطقه تا سال ۲۰۴۲ توسعه یافته است. به طور خلاصه هدف کلی این پژوهش این است که بتوان با استفاده از مفهوم شهر اسفنجی، میزان کل رواناب حاصل از بارندگی سال ۲۰۲۱ را محاسبه کند و به بخش‌های مختلف شهری-صنعتی، کشاورزی و تغذیه‌ی آب زیرزمینی اختصاص دهد. در ادامه این بخش داده‌ها و نتایج حاصله از این پژوهش، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است که در قالب چند بخش در ادامه توضیح داده می‌شوند. بیشتر سعی شده است پتانسیل عملی بودن این مفهوم (شهر اسفنجی) را در قالب جنبه‌های

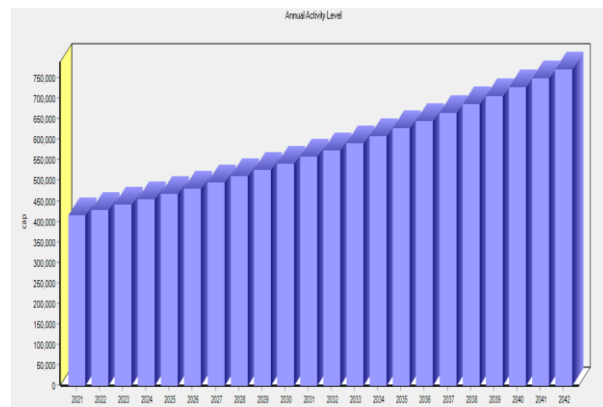


(ب)

شکل (۷) (الف) زون بندی مناطق سیل خیز و مساحت و (ب) محیط آن‌ها

محاسبه‌ی میزان آب پوشش یافته و میزان تقاضای آب با استفاده از نرم افزار WEAP

هدف از استفاده از این نرم‌افزار در این پژوهش، اختصاص آب ناشی از رواناب حاصله از بارندگی به سه قسمت شهری و صنعتی، کشاورزی و تغذیه‌ی آب زیرزمینی است. اولویت بندی میزان تخصیص آب به این صورت است که اولویت اول به قسمت شهری و صنعتی اختصاص داده شده است و در اولویت دوم و سوم به ترتیب بخش‌های کشاورزی و تغذیه‌ی آب زیرزمینی بررسی شده‌اند. در این نرم‌افزار داده‌های مربوط به درصد رشد جمعیت سالانه که ۳ درصد فرض شده است در شکل (۸) نمایش داده شده است. در ادامه نیز نمودارهای مربوط به میزان درصد پوشش، میزان تقاضای برطرف نشده، کل میزان آب مورد نیاز و سطح اطمینان در بر طرف کردن تقاضا در قالب چند شکل نمایش داده شده است.



میزان تقاضای برطرف نشده (کمبود آب)

بر اساس خروجی‌های نرم‌افزار WEAP که در شکل (۱۰) هم نشان داده شده است، در بخش‌های شهری-صنعتی، کشاورزی و تغذیه آب زیرزمینی میزان کمبود آب در قالب یک جدول به صورت زیر می‌باشد. با توجه به جدول ۴، در بخش کشاورزی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۲، کمبود آب به تدریج افزایش پیدا کرده و مجموع آن به ۱۶۲۴۲ میلیون متر مکعب رسیده است. در بخش‌های شهری-صنعتی و تغذیه آب زیرزمینی در سال‌های اولیه (۲۰۲۱ تا ۲۰۳۳) کمبود آبی وجود ندارد، اما در سال‌های بعدی کمبود آب افزایش می‌یابد که مجموع مقادیر آن‌ها به ترتیب ۸۲۷/۳ و ۱/۷ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. جدول (۴) میزان تقاضای برطرف نشده (داده‌ها بر حسب

میلیون متر مکعب می‌باشند)

سال	کشاورزی	شهری-صنعتی	آب زیرزمینی
۲۰۲۱	۴۳۱/۴۷۴	.	.
۲۰۲۲	۵۱۲/۱۵۰۳۲	.	.
۲۰۲۳	۵۲۶/۳۵۸۴۹	.	.
۲۰۲۴	۵۴۰/۳۲۰۷۳	.	.
۲۰۲۵	۵۵۵/۶۴۰۷	.	.
۲۰۲۶	۵۷۰/۷۲۴۱۴	.	.
۲۰۲۷	۵۸۶/۱۱۰۷۶	.	.
۲۰۲۸	۶۰۱/۲۷۳۶۳	.	.
۲۰۲۹	۶۱۷/۸۱۶۹	.	.
۲۰۳۰	۶۳۴/۵۱۱۲	.	.
۲۰۳۱	۶۵۰/۸۱۲۶۹	.	.
۲۰۳۲	۶۶۷/۲۷۶۰۸	.	.
۲۰۳۳	۶۸۵/۱۴۷۱۳	.	.
۲۰۳۴	۸۰۱/۰۲۲۶۷	۳۶/۴۹۹۵۳۶	۱/۱۰۰۸۲۲
۲۰۳۵	۹۱۵/۶۵۴۶۴۸	۸۸/۹۳۵۵۶	۰/۲
۲۰۳۶	۹۳۴/۰۵۹۳۰۴	۹۱/۶۰۳۶۷۴	۰/۲
۲۰۳۷	۹۵۲/۸۳۳۸۶۴	۹۴/۳۵۱۸۴۵	۰/۲
۲۰۳۸	۹۷۱/۹۸۵۸۵۶	۹۷/۱۸۲۴۵۲	۰/۲
۲۰۳۹	۹۹۱/۵۲۲۷۶	۱۰۰/۰۹۷۹۷	۰/۲
۲۰۴۰	۱۰۱۱/۴۵۲۳۹	۱۰۳/۱۰۰۹۷	۰/۲
۲۰۴۱	۱۰۳۱/۷۸۲۵۷	۱۰۶/۱۹۴۰۵	۰/۲
۲۰۴۲	۱۰۵۲/۵۲۱۴۲	۱۰۹/۳۷۹۹۲	۰/۲
مجموع	۱۶۲۴۲/۰۹۲۲۶	۸۲۷/۳۴۵۹۹	۱/۷۰۰۸۲۲

مختلف و قابلیت استفاده از آب جمع‌آوری شده برای مصارف مختلف شهری-صنعتی، کشاورزی و تغذیه‌ی آب زیرزمینی بررسی شود.

میزان درصد تقاضای برآورده شده (پوشش داده شده)

با توجه به شکل (۹) و داده‌های خروجی نرم‌افزار WEAP مشاهده می‌شود که در بخش کشاورزی در سال ۲۰۲۱، ۳۷/۷۴ درصد از نیازهای این بخش پوشش یافته است. از سال ۲۰۲۲ تا سال ۲۰۳۲ به ترتیب این درصدها: ۲۷/۵۵، ۲۷/۰۱، ۲۶/۵۵، ۲۵/۹۶، ۲۵/۴۴، ۲۴/۹۴، ۲۴/۵۲، ۲۳/۹۷، ۲۳/۵۰، ۲۳/۰۳ و ۲۲/۶۴ می‌باشد و از سال ۲۰۳۲ به بعد این مقدار به صفر می‌رسد و نشانگر این است که این مقدار آب جوابگوی تقاضا نیست.

در بخش نیازهای شهری و صنعتی از سال ۲۰۲۱ تا سال ۲۰۳۰ میزان تقاضای پوشش یافته ۱۰۰ درصد می‌باشد و در سال‌های ۲۰۳۱ و ۲۰۳۲ به ترتیب میزان درصد پوشش ۹۹/۲۳ و ۹۶/۶۰ به دست آمده است. در ماه اول سال ۲۰۳۳ یعنی ماه ژانویه این مقدار به ۲۰/۸۲ درصد رسیده و پس از آن مقدار پوشش تقاضا در این بخش هم به صفر می‌رسد.

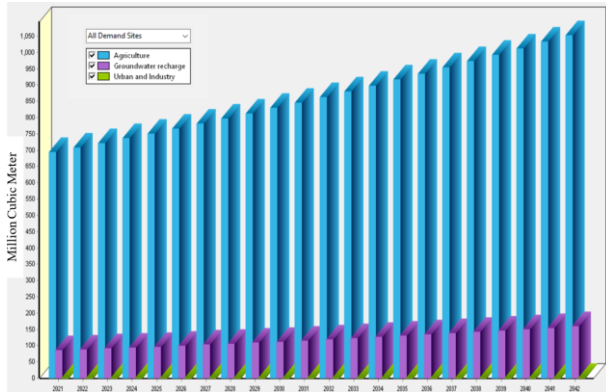
برای مقدار آب اختصاص یافته شده به تغذیه‌ی آب زیرزمینی نیز از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۲ میزان درصد پوشش تقاضا در این بخش ۱۰۰ می‌باشد ولی از سال ۲۰۳۲ به بعد این مقدار به صفر رسیده است.



شکل (۹) نمودار میزان درصد پوشش آب



۲۰۴۱	۱۰۳۱/۷۸۲۵۷	۱۰۶/۱۹۵۳۶	۰/۲
۲۰۴۲	۱۰۵۲/۵۲۱۴۲	۱۰۹/۳۸۱۲۲	۰/۲
مجموع	۱۸۹۳۹/۱۵۸۱	۱۷۹۵/۴۹۵۴	۴/۴

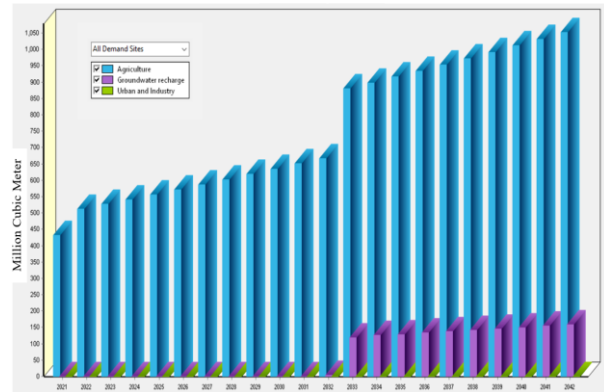


شکل (۱۱) نمودار کل میزان آب مورد نیاز

در این جدول مشاهده می‌شود که میزان کمبود آب سنندج در بخش‌های مختلف شهری- صنعتی، کشاورزی و تغذیه آب زیرزمینی به چه مقدار است و با داشتن این مقادیر در بخش‌های مختلف می‌توان یک دید کلی در مورد میزان آب مصرفی و کمبود آب را داشت که می‌توان از آن در پژوهش‌های بعدی به عنوان یک مرجع استفاده کرد. همان طور که از جدول ۵ مشخص است، میزان آب مورد نیاز در بخش‌های کشاورزی و شهری- صنعتی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۲ با افزایش تقاضای آبی مواجه هست به این صورت که مجموع آن‌ها تا پایان سال ۲۰۴۲ به ترتیب ۱۸۹۳۹/۱ و ۱۷۹۵/۴ میلیون متر مکعب محاسبه شده است.

میزان سطح اطمینان

میزان قابل اعتماد بودن و سطح اطمینان برای برطرف کردن تقاضا در بخش‌های شهری- صنعتی، کشاورزی و تغذیه آب زیرزمینی به ترتیب، ۴۵/۴۵، ۰، و ۵۴/۵۵ درصد می‌باشد. که این مقدار نشان دهنده‌ی این است که با میزان بارندگی که در سال ۲۰۲۱ رخ می‌دهد، می‌توان با این مقادیر از سطح اطمینان، نیاز آبی شهر سنندج را تا سال ۲۰۴۲ تامین کند.



شکل (۱۰) نمودار میزان تقاضای برطرف نشده (کمبود آب)

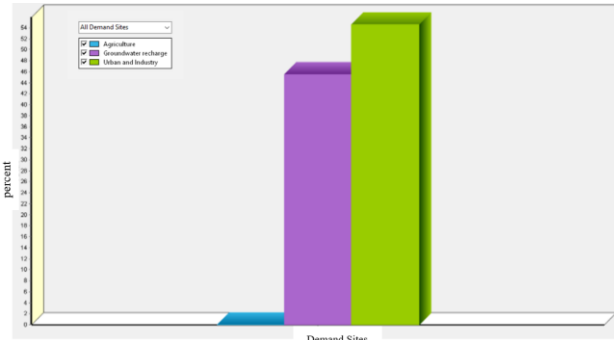
کل میزان آب مورد نیاز

داده‌هایی که در بخش قبل محاسبه شد، میزان کمبود آب شهر سنندج را نشان می‌دهد اما مقدار آب مورد نیاز برای برطرف کردن نیاز این سه بخش با در نظر گرفتن هدررفت بیشتر است که در قالب جدول زیر این مقادیر نشان داده شده‌اند.

جدول (۵) کل میزان آب مورد نیاز (داده‌ها بر حسب میلیون متر مکعب می‌باشند)

سال	کشاورزی	شهری- صنعتی	آب زیرزمینی
۲۰۲۱	۶۹۳	۵۸/۷۹۷۷۹۸	۰/۲
۲۰۲۲	۷۰۶/۹۲۹۳۲	۶۰/۵۶۱۷۳	۰/۲
۲۰۲۳	۷۲۱/۱۳۸۵۹	۶۲/۳۷۸۵۸۴	۰/۲
۲۰۲۴	۷۳۵/۶۳۳۴۶	۶۴/۳۴۹۹۴۲	۰/۲
۲۰۲۵	۷۵۰/۴۱۹۷	۶۶/۱۷۷۴۳۸	۰/۲
۲۰۲۶	۷۶۵/۵۰۳۱۴	۶۸/۱۶۲۷۶۲	۰/۲
۲۰۲۷	۷۸۰/۸۸۹۷۶	۷۰/۲۰۷۶۴۵	۰/۲
۲۰۲۸	۷۹۶/۵۸۵۶۳	۷۲/۳۱۳۸۷۴	۰/۲
۲۰۲۹	۸۱۲/۵۹۷۰۱	۷۴/۴۸۳۲۹	۰/۲
۲۰۳۰	۸۲۸/۰۹۳۰۱۸	۷۶/۷۱۷۷۹۱	۰/۲
۲۰۳۱	۸۴۵/۵۹۱۶۹	۷۹/۰۱۹۳۲۲	۰/۲
۲۰۳۲	۸۶۲/۵۸۸۰۷	۸۱/۳۸۹۹۰۴	۰/۲
۲۰۳۳	۸۷۹/۹۲۶۱	۸۳/۸۳۱۶	۰/۲
۲۰۳۴	۸۹۷/۶۱۲۶۳	۸۶/۳۴۶۵۴۸	۰/۲
۲۰۳۵	۹۱۵/۶۵۴۶۴۸	۸۸/۹۳۶۴۷	۰/۲
۲۰۳۶	۹۳۴/۰۵۹۳۰۴	۹۱/۶۰۵۰۵۴	۰/۲
۲۰۳۷	۹۵۲/۸۳۳۸۶۴	۹۴/۳۵۳۲۰۶	۰/۲
۲۰۳۸	۹۷۱/۹۷۵۸۵۶	۹۷/۱۸۳۷۹۹	۰/۲
۲۰۳۹	۹۹۱/۵۲۲۷۶	۱۰۰/۰۹۹۳۱	۰/۲
۲۰۴۰	۱۰۱۱/۴۵۲۳۹	۱۰۳/۱۰۲۲۶	۰/۲

توانسته تا سال ۲۰۳۰ هم نیازهای دو بخش شهری- صنعتی و تغذیه آب زیرزمینی را نیز برطرف کند. در کشاورزی سطح قابل توجهی از تقاضای روبه‌افزایش وجود دارد زیرا در این تحقیق اولویت اول تامین آب برای استفاده خانگی می‌باشد. زمین‌های کشاورزی در سنندج بسیار وسیع هستند، اما تامین آب برای آن محدود است. این فضا باعث افزایش تقاضا بر منابع آبی می‌شود که منجر به استخراج زیاد آب زیرزمینی و مشکلات مربوطه می‌شود. در نظر گرفتن این وضعیت بسیار اهمیت دارد، به این دلیل که این باعث می‌شود تمرکز بیشتری بر ایجاد تعادل بین تقاضای فعلی آب و تامین آن داشته باشیم. علاوه بر این، ترویج روش‌های کشاورزی موثر و عملکرد جمع‌آوری آب باران در شهر سنندج اهمیت ویژه‌ای دارد. ارتقا برخی جنبه‌ها در این تحقیق به منظور رفع یک سری از ایرادات امری ضروری تلقی می‌شود و می‌توان آن را در کارهای آینده مورد بحث قرار داد، مانند: عملکرد مؤثر سیستم‌های فاضلاب و زهکشی شهری، برنامه‌ریزی جاده‌های شهری و سایر تجهیزات انتقال در کاهش تأثیر طوفان‌های باران و غرقابی بسیار مهم است. این تحقیق همچنین به میزان رواناب تولیدی توجه کرده و این آب را به سه بخش اختصاص داد تا تقاضا و کمبود آب در یک دوره ۲۱ ساله مصرف آب مورد ارزیابی قرار گیرد که امکان این وجود دارد که به صورت دقیق تر این بخش‌ها را از هم تفکیک کرد و همچنین به سادگی می‌توان تغییراتی را به منظور بهبود کیفیت نرم افزار WEAP انجام داد، مانند افزودن سناریوی هزینه آب به منظور تجزیه و تحلیل مزایای صرفه جویی در آب یا با تعیین حد برداشت بهینه و تعیین یک مقدار آب به منظور تغذیه طبیعی برای شارژ مجدد آب‌های زیرزمینی که البته این کار نیازمند مطالعات آب زیرزمینی منطقه است.



شکل (۱۲) نمودار سطح اطمینان

نتیجه گیری

در این تحقیق مناطق پرخطر شهر سنندج که در معرض خطر سیل قرار دارند با استفاده از GIS مشخص گردید همچنین مناطق مستعد سیل را با استفاده از ArcMap مشخص شد و به عنوان عامل مهمی در هنگام تعیین آرایش ایده‌آل ساخت و ساز زمین برای شهرهای اسفنجی در نظر گرفته شد. در انتها از مدل SCS برای مشخص کردن حجم سیلاب استفاده شد با این هدف که به صورت بهینه این حجم سیلاب بین سه بخش مختلف شهری- صنعتی، کشاورزی و تغذیه آب زیرزمینی اختصاص داده شود. با استفاده از نرم افزار WEAP کل آب مورد نیاز برای برآورده کردن نیازهای سه بخش قبل از تخصیص آب حاصل از رواناب، $20739/05353$ میلیون مترمکعب تخمین زده شد و کل تقاضای آب (کمبود آب) برای این سه بخش پس از تخصیص آب، $17071/13908$ میلیون مترمکعب محاسبه شد. با توجه به اولویت اختصاص داده شده به هر یک از بخش‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین سهم کمبود آب به بخش کشاورزی و بعد از آن به ترتیب به بخش‌های شهری- صنعتی و تغذیه آب زیرزمینی اختصاص دارد. اما می‌توان مشاهده کرد که در سالی که بارندگی به آن اختصاص داده شده است یعنی سال ۲۰۲۱، نه تنها نیاز آبی خود را برطرف کرده، بلکه

منابع

- آستانه، م، تقی پور، ف، دوازده امامی، ح. (۱۳۹۸). تدوین الگو به منظور ظرفیت‌سازی اجتماعی و جامعه‌پذیری بحران آب. پژوهش‌های راهبردی مسائل اجتماعی ۸(۲)، ۱۳۸-۱۰۷. doi: 10.22108/srsp.2020.121105.1492.

- Ahmed, H.G., Aziz, S.Q., Wu, B., Ahmed, M.S., Jha, K., Wang, Z., Nie, Y. and Huang, T., 2024. Application of Sponge City for Controlling Surface Runoff Pollution. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(9), pp.1-23.
- Alizadeh, A., 2008. *Principals of Applied Hydrology.*, Mashhad: Emam Reza University.
- Eckart, K., McPhee, Z. and Bolisetti, T., 2017. Performance and implementation of low impact development—A review. *Science of the Total Environment*, 607, pp.413-432.
- Fan, X. and Matsumoto, T., 2019. GIS-based social cost–benefit analysis on integrated urban water management in China: a case study of sponge city in Harbin. *Sustainability*, 11(19), p.5527.
- Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.L. and Mikkelsen, P.S., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, 12(7), pp.525-542.
- Griffiths, J., Chan, F.K.S., Shao, M., Zhu, F. and Higgitt, D.L., 2020. Interpretation and application of Sponge City guidelines in China. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 378(2168), p.20190222.
- Jiang, Y., Zevenbergen, C. and Ma, Y., 2018. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China’s challenges and “sponge cities” strategy. *Environmental science & policy*, 80, pp.132-143.
- Jiang, Y., Qiu, L., Gao, T. and Zhang, S., 2022. Systematic application of sponge city facilities at community scale based on SWMM. *Water*, 14(4), p.591.
- Lancia, M., Zheng, C., He, X., Lerner, D.N., Andrews, C. and Tian, Y., 2020. Hydrogeological constraints and opportunities for “Sponge City” development: Shenzhen, southern China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, p.100679.
- Li, H., Ding, L., Ren, M., Li, C. and Wang, H., 2017. Sponge city construction in China: A survey of the challenges and opportunities. *Water*, 9(9), p.594.
- Liu, D., 2016. China's sponge cities to soak up rainwater. *Nature*, 537(7620), pp.307-307.
- Lin, T., Liu, X., Song, J., Zhang, G., Jia, Y., Tu, Z., Zheng, Z. and Liu, C., 2018. Urban waterlogging risk assessment based on internet open data: A case study in China. *Habitat International*, 71, pp.88-96.
- Li, X., Li, J., Fang, X., Gong, Y. and Wang, W., 2016. Case studies of the sponge city program in China. In *World Environmental and Water Resources Congress 2016* (pp. 295-308).
- Luo, K., Wang, Z., Sha, W., Wu, J., Wang, H. and Zhu, Q., 2021. Integrating sponge city concept and neural network into land suitability assessment: evidence from a satellite town of shenzhen metropolitan area. *Land*, 10(8), p.872.
- Marlow, D.R., Moglia, M., Cook, S. and Beale, D.J., 2013. Towards sustainable urban water management: A critical reassessment. *Water research*, 47(20), pp.7150-7161.
- Nguyen, T.T., Ngo, H.H., Guo, W., Wang, X.C., Ren, N., Li, G., Ding, J. and Liang, H., 2019. Implementation of a specific urban water Management-Sponge City. *Science of the Total Environment*, 652, pp.147-162.2
- Qi, Y., Chan, F.K.S., Thorne, C., O'Donnell, E., Quagliolo, C., Comino, E., Pezzoli, A., Li, L., Griffiths, J., Sang, Y. and Feng, M., 2020. Addressing challenges of urban water management in Chinese sponge cities via nature-based solutions. *Water*, 12(10), p.2788.
- Sun, H., Wu, S., Dong, Q., Zhou, X., Yang, J. and Li, G., 2024. Research on Runoff Management of Sponge Cities under Urban Expansion. *Water*, 16(15), p.2103.
- Wang, M., Yuan, H., Zhang, D., Qi, J., Rao, Q., Li, J. and Tan, S.K., 2023. Supply-demand measurement and spatial allocation of Sponge facilities for Sponge city construction. *Ecological Indicators*, 148, p.110141.



Yang, W., Brüggemann, K., Seguya, K.D., Ahmed, E., Kaeseberg, T., Dai, H., Hua, P., Zhang, J. and Krebs, P., 2020. Measuring performance of low impact development practices for the surface runoff management. *Environmental Science and Ecotechnology*, 1, p.100010.