



Journal of Urban Environmental Planning and Development

Vol 3, No 11, Autumn 2023

p ISSN: 2981-0647 - e ISSN: 2981-1201

Journal Homepage: <http://juep.iaushiraz.ac.ir/>

Research Paper

Analysis of the Role of Sponge City Components in Enhancing Urban Resilience to Flood Hazards (Case Study: Zanjan City)

Hossein Tahmasebi Moghaddam: Assistant Professor, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Majid Hazrati: PhD Candidate in Geography and Urban Planning, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Received: 2025/07/04 PP 39-56 Accepted: 2025/09/18

Abstract

Rapid urban development and the increase in impervious surfaces in Zanjan City, as in many other urban areas, have reduced resilience to flood hazards and placed significant strain on traditional drainage systems. Given the increasing trend of extreme weather events and their disproportionate impacts on vulnerable communities, purely engineering-based approaches are no longer sufficient to address the challenges posed by climate change. In this context, the principles of sponge cities—offering multifunctional environmental, ecological, social, and economic benefits—are considered effective tools for enhancing urban resilience against floods and other climate-related hazards. This article employs an analytical-exploratory method to examine the role of sponge city components in enhancing urban resilience to flood hazards in Zanjan City. Data collection was carried out through field surveys and library research. The statistical population was selected using a fuzzy Delphi analysis involving 30 urban planning experts from academic institutions. Data analysis was conducted using Structural Equation Modeling (SEM) and path analysis in SmartPLS software. The results indicate that the highest factor loadings among sponge city indicators are: rainwater infiltration into the ground (0.911), rainwater filtration (0.962), reduction of peak river flow (0.922), and preservation of natural hydrological processes (0.936). Regarding urban resilience, the highest factor loadings correspond to population at risk (0.979), ratio of large to small businesses (0.919), shelter capacity (0.979), and urban environmental health (0.974). Moreover, based on the structural equation model, green spaces, restoration of natural waterways, and permeable pavements have the most significant and positive impacts on urban resilience. Additionally, social and institutional-infrastructure resilience dimensions exhibit the highest levels of influence.

Keywords: Resilience, Sponge City, Hazards; Flood, Zanjan.



Citation: Tahmasebi Moghaddam, H., & Hazrati, M. (2025). Analysis of the Role of Sponge City Components in Enhancing Urban Resilience to Flood Hazards (Case Study: Zanjan City). *Journal of Urban Environmental Planning and Development*, 5(19), 39-56.

<https://doi.org/10.82109/juep.2025.1211071>



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Shiraz

Extended Abstract

Introduction

Rapid urban development and the expansion of impervious surfaces—such as asphalt and concrete—have significantly reduced the land's natural ability to absorb and store rainwater. This situation has increased surface runoff, overburdened traditional drainage systems, and elevated the risk of urban flooding. Additionally, urbanization has amplified the vulnerability of cities to climate change impacts. Zanzan city, like many others, suffers from traditional grey infrastructure that cannot sufficiently handle the growing frequency and intensity of extreme weather events. In this context, the concept of the “sponge city” has emerged as a multifunctional and resilient approach that manages rainwater through absorption, storage, filtration, and reuse. This study aims to identify the most effective sponge city components in enhancing Zanzan's urban resilience against flood hazards.

Methodology

This research is applied in purpose and mixed in method, combining qualitative and quantitative approaches. In the qualitative phase, influential sponge city components were identified through literature review and a fuzzy Delphi method involving 30 urban planning experts. For sampling, availability and expertise criteria were considered. In the quantitative phase, the structural equation modeling (SEM) technique and path analysis were employed using SmartPLS software to evaluate causal relationships between components and urban resilience. The reliability of the instruments was confirmed by Cronbach's alpha coefficients above 0.7. Across two Delphi rounds, 33 sponge city components were validated with fuzzy weights above the 0.7 threshold, and their impacts on social, economic, institutional-infrastructure, and environmental resilience were analyzed.

Results and Discussion

Confirmatory factor analysis showed that components such as green spaces and natural stream restoration (impact coefficient = 0.556), permeable pavements (0.466), artificial wetlands and ponds (0.366), and biological

retention systems (0.239) have the most significant positive and meaningful effects on urban resilience. Specifically, green infrastructure features—such as preserving hydrological processes, maintaining runoff, and providing recreational spaces—played a crucial role in resilience building. Among urban resilience indicators, the most influential social variables were “population at risk” (0.979) and “family structure” (0.914). In the institutional-infrastructure domain, “shelter capacity” (0.979) and “arterial road network density” (0.949) had high factor loadings. Economic resilience was mainly influenced by “large-to-small business ratio” (0.919) and “access to reconstruction loans” (0.904), while environmental resilience was most affected by “urban environmental health” (0.974) and “public participation in sanitation” (0.962). All path coefficients between sponge city components and urban resilience were positive and statistically significant ($p < 0.05$). Among the dimensions of resilience, social ($\beta = 0.500$) and institutional-infrastructure ($\beta = 0.446$) resilience were the most affected by sponge city elements.

Conclusion

This study confirms that integrating sponge city principles into urban planning provides an effective strategy for enhancing resilience against climate-related hazards, especially floods. Key findings indicate that expanding green infrastructure, restoring waterways, implementing permeable surfaces, and utilizing natural filtration systems significantly improve resilience. Furthermore, strengthening social and institutional dimensions—such as community awareness, education, family support systems, and emergency infrastructure—proves essential in urban adaptation. Policymakers are recommended to prioritize sponge city principles in development plans to support long-term climate resilience and sustainable water management. Emphasis on decentralized, eco-friendly solutions can complement large-scale infrastructure, reduce urban vulnerability, and improve overall livability, public health, and environmental sustainability.



فصلنامه برنامه ریزی و توسعه محلی شهری

دوره ۵، شماره ۱۹، پاییز ۱۴۰۴

شاپا چاپی: ۲۹۸۱-۰۶۴۷ شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۱۲۰۱

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/journal/juep/>

مقاله پژوهشی

تحلیل نقش مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل (مطالعه موردی: شهر زنجان)

حسین طهماسبی مقدم*: استادیار گروه جغرافیا، جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

مجید حضرتی: دانشجوی دکتر جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۳ صص ۵۶-۳۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۲۷

چکیده

توسعه شهری شتابان و افزایش سطوح نفوذناپذیر در شهر زنجان، همانند بسیاری از شهرهای دیگر، تاب‌آوری در برابر مخاطرات سیل را کاهش داده و سیستم‌های زهکشی سنتی را تحت فشار قرار داده است. با توجه به روند افزایشی رویدادهای اقلیمی شدید و تأثیرات نامتناسب آن بر جوامع آسیب‌پذیر، رویکردهای صرفاً مهندسی محور پاسخگوی چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی نیستند. در این راستا، اصول شهر اسفنجی با ارائه مزایای چندمنظوره زیست‌محیطی، اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی، ابزاری کارآمد برای ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر سیلاب و سایر مخاطرات اقلیمی محسوب می‌شود. این مقاله با روش تحلیلی-اکتشافی به بررسی نقش مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات سیل در شهر زنجان می‌پردازد. گردآوری داده‌ها با مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای انجام شد. جامعه آماری در قالب تحلیل دلفی فازی با مشارکت ۳۰ متخصص رشته برنامه‌ریزی شهری در دانشگاه انتخاب گردید. تحلیل داده‌ها نیز با استفاده از مدل تحلیل معادلات ساختاری و روش تحلیل مسیر در نرم‌افزار SmartPLS انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص اجازه نفوذ آب باران به زمین با ضریب ۰/۹۱۱؛ فیلتر کردن آب باران با ضریب ۰/۹۶۲؛ کاهش اوج جریان رودخانه با ضریب ۰/۹۲۲؛ و حفظ فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی با ضریب ۰/۹۳۶ است. در زمینه تاب‌آوری شهری بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص تعداد جمعیت در خطر با ضریب ۰/۹۷۹؛ نسبت کسب و کار بزرگ به کوچک با ضریب ۰/۹۱۹؛ ظرفیت پناهگاه‌ها با ضریب ۰/۹۷۹؛ و بهداشت محیط شهری با ضریب ۰/۹۷۴ است. همچنین، طبق مدل معادلات ساختاری، فضاهای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی و سنگفرش‌های نفوذپذیر، بیشترین تأثیر مثبت و معنادار را بر تاب‌آوری شهری دارند. همچنین، تاب‌آوری اجتماعی و نهادی-زیرساختی از بالاترین سطح تأثیرپذیری برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، شهر اسفنجی، مخاطرات سیل، شهر زنجان.

استناد: طهماسبی مقدم، حسین، و حضرتی، مجید. (۱۴۰۴). تحلیل نقش مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل: مطالعه موردی شهر زنجان. فصلنامه برنامه‌ریزی و توسعه محلی شهری، ۵(۱۹)، ۳۹-۵۶.

<https://doi.org/10.82109/juep.2025.1211071>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز

© نویسنده‌گان



مقدمه

گسترش سریع شهرنشینی و افزایش سطوح نفوذناپذیر (مانند آسفالت و بتن) در مناطق شهری، توانایی طبیعی زمین برای جذب آب را به شدت کاهش می‌دهد. (Wu, 2016) این مسئله منجر به افزایش رواناب سطحی و وارد آمدن فشار مضاعف بر سیستم‌های زهکشی موجود می‌شود و در نتیجه، پدیده آب‌گرفتگی و وقوع سیلاب‌های شهری را تشدید می‌کند. (Li et al., 2022) این وضعیت، چرخه‌ای از بازخورد منفی میان شهرنشینی و تغییرات اقلیمی ایجاد می‌کند؛ به طوری که توسعه شهری به افزایش آسیب‌پذیری‌ها منجر می‌شود و تغییرات اقلیمی نیز با شدت بخشیدن به رویدادها، این آسیب‌پذیری‌ها را آشکارتر می‌سازد. علاوه بر این، برآیند سطوح نفوذناپذیر شکل‌گیری پدیده جزیره حرارتی شهری است که می‌تواند امواج گرما را تشدید کرده و فشار بیشتری بر سیستم‌های شهری وارد کند. (Yu, 2015) این نشان می‌دهد که مدل‌های سنتی توسعه شهری ذاتاً در مواجهه با تغییرات اقلیمی پایدار نیستند و صرفاً واکنش نشان دادن به مخاطرات کافی نیست؛ بلکه برنامه‌ریزی شهری باید به طور اساسی بازنگری شود تا تاب‌آوری ذاتی ایجاد شود.

مخاطرات اقلیمی طیف وسیعی از پدیده‌های شدید آب‌وهوایی را شامل می‌شود که شدت، مدت و گستره فضایی آن‌ها رو به افزایش است (Citaristi, 2022). این مخاطرات شامل امواج گرما، بارندگی‌های شدید، خشکسالی و طوفان‌های گرمسیری هستند و تأثیرات این رویدادها بر شهرها گسترده و مخرب است (RamYar & Shamsoddini, 2025)؛ از تلفات جانی و تخریب ساختمان‌ها و تأسیسات گرفته تا اختلال در سامانه حمل‌ونقل، آلودگی منابع آب و وارد آمدن خسارات جدی به بخش کشاورزی (Environmental Protection Agency, 2016) به عنوان نمونه، سیلاب‌های ناشی از بارندگی‌های شدید در ایران، مانند سیل فروردین ۱۳۹۸ در شیراز، خسارات جانی و مالی قابل توجهی به همراه داشت. در سطح جهانی نیز، ۴۴ درصد از کل بلایای طبیعی به سیلاب‌ها مربوط می‌شود و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ تعداد شهرهایی که در معرض پدیده‌های شدید آب‌وهوایی قرار می‌گیرند، سه برابر شود (Optimize Sponge Cities, 2025). علاوه بر این، تأثیرات اقلیمی به طور یکنواخت توزیع نمی‌شوند. شهرهای سراسر جهان، به‌ویژه آن‌هایی که دارای جوامع فقیر شهری هستند، با چالش‌های بلندمدت در تأمین رفاه ساکنان خود مواجه‌اند (Jardine & Long, 2014). رویدادهای مکرر و شدید آب‌وهوایی تأثیرات نامتناهی بر جمعیت‌های آسیب‌پذیرتر دارند (Annex, 2014). این مسئله به بعد عدالت اجتماعی در تاب‌آوری اقلیمی اشاره دارد و بر این نکته تأکید می‌کند که راهبردهای مؤثر تاب‌آوری شهری باید به طور صریح آسیب‌پذیری‌ها و نابرابری‌های موجود در میان جمعیت‌های شهری را در نظر گرفته و برای رفع آن‌ها اقدام کنند تا از تشدید ناخواسته نابرابری‌های اجتماعی جلوگیری شود. تاب‌آوری شهری به ظرفیت یک شهر برای بازگرداندن، سازگاری و شکوفایی در مواجهه با شوک‌ها و استرس‌های مختلف اشاره دارد (Ahadnejad Reveshty et al, 2022). این مفهوم شامل توانایی شهر در جذب، بازایی و تغییر در برابر چالش‌هایی مانند بلایای طبیعی، رکود اقتصادی و چالش‌های اجتماعی است، در حالی که عملکردهای اساسی خود را حفظ کرده و رفاه ساکنانش را تضمین می‌کند (Tahmasebi Moghaddam et al, 2021) تاب‌آوری اقلیمی شهری (UCCR) به طور خاص، اقدامات سازگاری با تغییرات اقلیمی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش خطر بلایا را در بر می‌گیرد (Asian Cities, 2011). این رویکرد بر شهرها به عنوان سیستم‌های دینامیک تأکید دارد که قادر به تکامل و سازگاری برای بقا و حتی شکوفایی در مواجهه با شوک‌ها یا استرس‌های ناپایدار هستند (Network, 2013) بنابراین شهر اسفنجی، تاب‌آوری لازم را برای سازگاری با تغییرات محیطی و مقابله با بلایای طبیعی ناشی از بارندگی برای شهرها فراهم می‌کند (Li et al., 2024). علاوه بر این، شهر اسفنجی به عنوان یک سرمایه‌گذاری چندمنظوره مطرح است. مؤلفه‌های شهر اسفنجی مزایایی فراتر از پیشگیری از سیلاب فراهم می‌کنند؛ از جمله بهبود کیفیت آب، کاهش دمای شهری، افزایش تنوع زیستی، گسترش فضاهای سبز، ارتقای کیفیت هوا و ایجاد فرصت‌های تفریحی (One Click LCA, 2025). این رویکرد در پی تأمین آینده‌ای پایدار و همچنین ارائه مزایای چندگانه در ابعاد زیست‌محیطی، اکولوژیکی، اجتماعی و فرهنگی است (Deng et al, 2022). همین ماهیت چندمنظوره موجب می‌شود سرمایه‌گذاری در شهرهای اسفنجی نه صرفاً به عنوان هزینه‌ای برای کاهش بلایا، بلکه به عنوان یک سرمایه‌گذاری چندوجهی در ارتقای زیست‌پذیری شهری، سلامت عمومی، کیفیت محیط زیست و پایداری اقتصادی بلندمدت تلقی شود.

در این چارچوب، شهر زنجان به عنوان یکی از شهرهای مرکزی استان زنجان دارای زیرساخت‌های خاکستری و سنتی آبرسانی نظیر سدها و خطوط لوله برای تأمین آب شرب شهروندان است. با این حال، تداوم خشکسالی‌های گسترده و مشکلات شناخته‌شده در سامانه زهکشی شهری - که در زمان بارندگی موجب آب‌گرفتگی و وقوع سیلاب‌های شهری می‌شود - نشان‌دهنده یک شکاف اساسی در زیرساخت‌های موجود است. زیرساخت‌های سنتی که عمدتاً با هدف تأمین یا دفع آب طراحی شده‌اند، غالباً فاقد ظرفیت انطباق‌پذیری ذاتی برای ایجاد تاب‌آوری در برابر افزایش فراوانی و شدت رویدادهای شدید اقلیمی همچون سیلاب‌های ناگهانی یا خشکسالی‌های طولانی‌مدت هستند. این وضعیت نشان می‌دهد که رویکردهای صرفاً مهندسی‌محور به تنهایی دیگر پاسخگوی شرایط اقلیمی در حال تغییر نیستند. بنابراین، راهبرد زیرساختی کنونی شهر زنجان، در حالی که نیازهای فوری تأمین آب را تأمین می‌کند، ممکن است برای تضمین تاب‌آوری بلندمدت اقلیمی

کافی نباشد. در این میان، ادغام اصول شهر اسفنجی می‌تواند به شکلی مؤثر پروژه‌های بزرگ‌مقیاس موجود را با مدیریت آب در سطح محلی و غیرمتمرکز تکمیل کرده و با کاهش فشار بر سامانه‌های مرکزی، تقویت تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و ایجاد چرخه‌ای پایدارتر و انطباق‌پذیرتر از مدیریت آب شهری در زنجان، اثربخشی و پایداری کلی مدیریت منابع آبی را ارتقاء بخشد. بنابراین این پژوهش بر آن است به این سوال پاسخ دهد که کدام مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقاء تاب‌آوری شهری زنجان در برابر مخاطرات اقلیمی اثرات بیشتری دارد؟

پیشینه و مبانی نظری تحقیق

در مواجهه با چالش‌های فزاینده اقلیمی، مفهوم «شهر اسفنجی» به‌عنوان رویکردی جامع و نوظهور در مدیریت پایدار آب شهری (Nguyen et al, 2019) و رویکردی جامع برای حل چالش‌های آبی و زیست‌محیطی مطرح شده است و این مدل برنامه‌ریزی شهری، که نخستین‌بار توسط کونگ‌جیان یو در چین پیشنهاد شد، بر پیاده‌سازی زیرساخت‌های هیدرو-اکولوژیکی و راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت^۱ تأکید دارد و در مقابل، وابستگی صرف به سیستم‌های زهکشی سنتی را کاهش می‌دهد (Xia et al, 2017; Zevenbergen et al, 2018). فلسفه اصلی شهر اسفنجی، تقلید از عملکرد یک اسفنج طبیعی است: جذب، ذخیره و تصفیه آب باران در محل، کاهش سرعت جریان آن و انتشار تدریجی یا استفاده مجدد از آن در زمان نیاز (Yu, 2017). این رویکرد به‌طور اساسی با زیرساخت‌های خاکستری سنتی (مانند لوله‌ها، سدها و کانال‌ها) که هدفشان متمرکز کردن و تخلیه سریع آب است، در تضاد قرار دارد (Yu, 2017). شهر اسفنجی، تاب‌آوری لازم را برای شهرها فراهم می‌کند تا با تغییرات محیطی سازگار شوند و در برابر بلایای طبیعی ناشی از بارندگی مقاومت کنند (Li et al, 2024). این مدل بخشی از یک جنبش جهانی است که در مناطق مختلف با نام‌های متفاوتی شناخته می‌شود: از جمله «زیرساخت سبز» در اروپا و «طراحی شهری حساس به آب» در استرالیا. با این حال، شهر اسفنجی با ادغام مفاهیم اکولوژیکی و فنی، فراتر از صرفاً کاهش سیلاب، به بهبود کیفیت آب، ایجاد زیستگاه و افزایش تنوع زیستی نیز می‌پردازد (Wang et al., 2020). اجرای این الگو، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، می‌تواند دستاوردهای چشمگیری در زمینه مدیریت آب شهری به همراه داشته باشد.

علاوه بر این، شهر اسفنجی به عنوان یک سرمایه‌گذاری چندمنظوره مطرح است. مؤلفه‌های شهر اسفنجی مزایایی فراتر از پیشگیری از سیلاب ارائه می‌دهند، از جمله بهبود کیفیت آب، خنک‌سازی شهری، افزایش تنوع زیستی، افزایش فضاها سبز، بهبود کیفیت هوا و فرصت‌های تفریحی (Sun et al, 2020; Zhao et al, 2014; European Environmental Agency, 2021). این رویکرد به دنبال تأمین آینده‌ای پایدار و همچنین ایجاد مزایای چندگانه در حوزه‌های زیست‌محیطی، اکولوژیکی، اجتماعی و فرهنگی است (Deng et al, 2022). این ماهیت چندمنظوره، سرمایه‌گذاری در شهرهای اسفنجی را نه تنها به عنوان هزینه‌ای برای کاهش بلایا، بلکه به عنوان یک سرمایه‌گذاری چندوجهی در زیست‌پذیری شهری، سلامت عمومی، کیفیت محیط زیست و پایداری اقتصادی بلندمدت قرار می‌دهد. این امر جذابیت و توجیه چنین پروژه‌هایی را گسترش می‌دهد و به طور بالقوه دینفعان و منابع مالی متنوعی را فراتر از بودجه‌های سنتی کنترل سیل جذب می‌کند. نکته قابل توجه در فلسفه شهر اسفنجی، الهام گرفتن آن از حکمت باستانی است. این مفهوم از «حکمت باستانی سازگاری با چالش‌های اقلیمی، به ویژه در مناطق موسمی جنوب شرقی چین» و «حکمت و استراتژی‌های دیرینه که هزاران سال در سراسر چین به کار گرفته شده‌اند» نشأت می‌گیرد.^۸ به عنوان مثال، ایده کونگ‌جیان یو از مدیریت آب کشاورزی باستانی چین، مانند تراس‌های برنج، الهام گرفته شده است (Uzoqov et al, 2024). این نشان می‌دهد که «نوآوری» شهر اسفنجی نه در اختراع فناوری‌های کاملاً جدید، بلکه در بازتطبیق اصول مبتنی بر طبیعت و آزمون‌شده در بستر شهری مدرن است. این امر پتانسیل ادغام دانش اکولوژیکی سنتی در برنامه‌ریزی شهری معاصر را برجسته می‌کند و رویکردی پایدارتر و از نظر فرهنگی همخوان‌تر از راه‌حل‌های صرفاً فنی ارائه می‌دهد. چنین راه‌حلی به دلیل همسویی ذاتی با فرآیندهای طبیعی، ممکن است در بلندمدت سازگارتر و مقاوم‌تر باشند.

مؤلفه‌های شهر اسفنجی با تقلید از فرآیندهای طبیعی، به طور چشمگیری به افزایش تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات اقلیمی کمک می‌کنند. این نقش چندوجهی شامل کاهش سیلاب، مدیریت منابع آب، کاهش اثر جزیره حرارتی و افزایش کیفیت زندگی است.

کاهش سیلاب و مدیریت رواناب

یکی از مهمترین کارکردهای مؤلفه‌های شهر اسفنجی، توانایی آن‌ها در جذب و نگهداری آب باران است که به طور مستقیم به کاهش سیلاب و مدیریت رواناب کمک می‌کند. سنگفرش‌های نفوذپذیر، بام‌های سبز، باغ‌های باران و تالاب‌های شهری همگی به عنوان سطوح جاذب عمل

¹ Nature-Based Solutions - NBS

می‌کنند که آب باران را به جای اینکه اجازه دهند به سرعت به سمت سیستم‌های زهکشی جاری شود، در خود نگه می‌دارند (Uzoqov et al, 2024). این فرآیند باعث کاهش قابل توجه رواناب سطحی و اوج جریان سیلاب می‌شود (Twyman, 2025). برخلاف زیرساخت‌های خاکستری سنتی که آب را به سرعت از مناطق شهری خارج می‌کنند و اغلب منجر به سرریز شدن سیستم‌ها می‌شوند^۸، شهر اسفنجی آب را در منبع خود مدیریت می‌کند. این رویکرد به شهرها اجازه می‌دهد تا در برابر بارندگی‌های شدید، انعطاف‌پذیری بیشتری داشته باشند. مطالعات نشان داده‌اند که طراحی شهرهای اسفنجی می‌تواند اوج جریان رودخانه را تا ۶۵ درصد کاهش دهد (Nguyen et al, 2019) چین با هدف گذاری بلندپروازانه، قصد دارد تا سال ۲۰۳۰، ۸۰ درصد از مناطق شهری خود را قادر سازد تا حداقل ۷۰ درصد از آب باران را جذب و دوباره استفاده کنند (Ix & George, 2022) این هدف نشان‌دهنده پتانسیل عظیم این رویکرد در مقابله با سیلاب‌های شهری است.

مدیریت منابع و بهبود کیفیت آب

مؤلفه‌های شهر اسفنجی نقش حیاتی در مدیریت پایدار منابع آب ایفا می‌کنند. آنها با تسهیل نفوذ طبیعی آب باران به زمین، به تغذیه آب‌های زیرزمینی کمک می‌کنند (Fletcher et al, 2014; Dresden, 2024) این فرآیند نه تنها ذخایر آب زیرزمینی را پر می‌کند، بلکه وابستگی شهرها به منابع آب خارجی را کاهش می‌دهد، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک. علاوه بر این، سیستم‌های شهر اسفنجی به طور موثری کیفیت آب را بهبود می‌بخشند. پوشش گیاهی و خاک در باغ‌های باران، تالاب‌های شهری و فضاهای سبز، به عنوان فیلترهای طبیعی عمل می‌کنند. آنها آلاینده‌ها و رسوبات موجود در رواناب آب باران را جذب و تصفیه می‌کنند (Uzoqov et al, 2024). این تصفیه طبیعی، کیفیت آب ورودی به آبرها و منابع آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد و نیاز به فرآیندهای تصفیه پرهزینه را کاهش می‌دهد (Liang et al, 2020) به عنوان مثال، یک هکتار فضای سبز اسفنجی می‌تواند حدود ۸۰۰ متر مکعب آب را تصفیه کند (Liu et al, 2013; Shi et al, 2015) جمع‌آوری آب باران نیز یکی دیگر از مؤلفه‌های مهم است که امکان استفاده مجدد از آب تصفیه شده برای آبیاری، مصارف خانگی و سایر نیازها را فراهم می‌کند.

کاهش اثر جزیره گرمایی شهری

سطوح نفوذناپذیر در شهرها، مانند آسفالت و بتن، گرما را جذب و ذخیره می‌کنند و منجر به افزایش دمای شهری، پدیده‌ای که به عنوان "اثر جزیره گرمایی شهری" شناخته می‌شود، می‌گردند (Zhao et al, 2014) مؤلفه‌های شهر اسفنجی با افزایش پوشش گیاهی و سطوح نفوذپذیر، به طور موثری این پدیده را کاهش می‌دهند (Optimize sponge cities for floods, 2025). بام‌های سبز، پارک‌ها و فضاهای سبز، از طریق فرآیند تعرق (تبخیر آب از گیاهان)، اثر خنک‌کنندگی ایجاد می‌کنند (Uzoqov et al, 2024). این فرآیند به کاهش دمای هوا در مناطق شهری کمک می‌کند. به عنوان مثال، بام‌های سبز می‌توانند دمای هوا را ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند. در وهله‌ای شهر اسفنجی منجر به کاهش دمای بیش از ۳ درجه سانتی‌گراد شده‌اند علاوه بر این، سطوح نفوذپذیر مانند سنگفرش‌های نفوذپذیر، با تغییر ساختار سطح زیرین و افزایش محتوای آب، توزیع انرژی شهری را تحت تأثیر قرار داده و تجمع گرما را سرکوب می‌کنند (What is a sponge city, 2025). کاهش اثر جزیره گرمایی شهری نه تنها به بهبود آسایش حرارتی ساکنان کمک می‌کند، بلکه مصرف انرژی برای تهویه مطبوع را نیز کاهش می‌دهد و به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند (Optimize sponge cities for floods, 2025).

با توجه به پیشینه مطالعاتی شهر اسفنجی، در سال‌های اخیر توجه بیشتری را به خود معطوف کرده، که منجر به توسعه حوزه تحقیقاتی شهر اسفنجی و تبدیل آن به یک موضوع در حوزه پژوهش‌های شهری شده است بنابراین در این ارتباط پژوهش‌های متعددی در زمینه موضوع شهر اسفنجی انجام و منتشر شده است که در بیشتر این مقالات به بررسی تأثیر برنامه‌های شهر اسفنجی بر مطالعات مخاطرات محیطی، زیست محیطی و محورهای مهم توسعه پایدار شهری پرداخته شده است (Yin et al, 2021; Yang et al, 2022; Guan et al, 2021; Köster et al, 2023; Helmreich, 2021; Szela et al, 2022) به عنوان مثال هوی لی و همکاران در مقاله‌ای با عنوان ساخت شهر اسفنجی در چین: بررسی چالش‌ها و فرصت‌ها پرداخته‌اند (Li et al, 2017) تیوی نگوین و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مقاله با عنوان یک چارچوب مدل جدید برای پیاده سازی شهر اسفنجی: چالش‌های در حال ظهور و تحولات آینده و همچنین تیوی نگوین و همکاران در سال ۲۰۱۹ در مقاله با عنوان اجرای طرح ویژه مدیریت آب شهری - شهر آفتاب پرده‌اند (Nguyen et al, 2020; 2019) و خیاجون و همکاران در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۷ در مقاله‌ای با عنوان فرصت‌ها و چالش‌های ساخت شهر اسفنجی در ارتباط با مسائل آب شهری در چین را بررسی کردند (XIA et al, 2017). بنابراین پژوهش‌های گذشته بیشتر بر زیرساخت‌های فنی و مهندسی تمرکز داشتند؛ در حالی که این تحقیق با بهره‌گیری از ضریب مسیر و مدل تحلیل عاملی تأییدی (CFA) هم مؤلفه‌های زیست‌محیطی و کالبدی (مانند سنگفرش‌های نفوذپذیر،

فضاهای سبز و احیای آبراهه‌ها) و هم مؤلفه‌های اجتماعی - نهادی (مانند ظرفیت پناهگاه‌ها و جمعیت در معرض خطر) را در چارچوب تاب‌آوری شهری بررسی کرده است.

مواد و روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف از نوع کاربردی و از نظر ماهیت و روش پژوهش از نوع ترکیبی کیفی-کمی است. بخش کیفی شامل شناسایی مؤلفه‌های تأثیرگذار شهر اسفنجی بر تاب‌آوری شهر زنجان در برابر مخاطرات اقلیمی در شهر زنجان از طریق بررسی مبانی نظری و تئوریک پژوهش و انجام تحلیل دلفی فازی با مشارکت ۳۰ متخصص رشته برنامه‌ریزی شهری در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی به عنوان اعضای پانل است. برای نمونه‌گیری از کارشناسان و نخبگان، از شیوه در دسترس شامل تجربه علمی، تمایل و توانایی مشارکت در پژوهش استفاده شده است. سپس مؤلفه‌های تاب‌آوری شهری با روش دلفی فازی تعیین شده است. در بخش کمی با استفاده از مدل تحلیل معادلات ساختاری و روش تحلیل مسیر در نرم‌افزار PLS نوع مؤلفه‌ها با توجه به اثرگذاری و اثرپذیری بر سایر مؤلفه‌ها مشخص شده است. جهت بررسی روایی و پایایی پرسشنامه در این پژوهش از دو روش اعتبار پرسشنامه با استفاده از دو روش صوری و اعتبار سازه (عاملی) به منظور ارزیابی قابلیت اعتماد پرسشنامه از آزمون آلفای کرونباخ استفاده شده است که نتایج حاکی از آن است که پرسشنامه از پایایی بالا برخوردار است. آلفای کرونباخ برای دو ساختار از ۰/۷ بالاتر است که بالاتر از ۰/۵ می‌باشد. در نتیجه از روایی همگرا برخوردار است.

جدول ۱. مؤلفه‌های اصلی و زیرمؤلفه‌های شهر اسفنجی

مؤلفه اصلی شهر اسفنجی	زیر مؤلفه‌ها	منابع
سنگفرش‌های نفوذپذیر	- اجازه نفوذ آب باران به زمین - کاهش رواناب سطحی - تغذیه آب‌های زیرزمینی - کاهش اثر جزیره حرارتی شهر از طریق خنک‌سازی - بهبود سلامت و کیفیت زندگی - کاهش خطر سیلاب - جذب آلاینده‌های آلی	Imran et al, 2013 Uzoqov, 2024 Blunt, 2025 Liu et al, 2017 Chan et al, 2018
تاسیسات نگهدارنده و تصفیه کننده بیولوژیکی	- فیلتر کردن آب باران - تسهیل نفوذ طبیعی - بهبود کیفیت آب - کاهش اثر جزیره حرارتی شهر - بهبود کیفیت هوا - افزایش تنوع زیستی - بهبود کیفیت محیط زیست - افزایش تنوع زیستی - بازسازی پوشش گیاهی - افزایش امکان پیاده سازی کشاورزی شهری - بام‌های سبز و باغ‌های باران	Uzoqov, 2024 Hora & Sales, 2019 Blunt, 2025 Liu et al, 2017
تالاب ها و دریاچه های مصنوعی	- ذخیره سازی در مقیاس بزرگ برای آب باران - جمع‌آوری و استفاده مجدد از آب باران - تأمین آب در زمان خشکسالی - کاهش اوج جریان رودخانه - ظرفیت ذخیره آب - افزایش نرخ مجدد استفاده از آب - ایجاد تالاب های مصنوعی	Uzoqov, 2024 Chan et al, 2018 Hora & Sales, 2019 Hamidi et al, 2021 Liu et al, 2017
فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی	- جذب آب باران و گرما - نگهداری رواناب - کمک به افزایش آب‌های زیرزمینی - حفظ فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی - کاهش فرسایش - ایجاد فضاهای تفریحی - ایجاد زیستگاه حیات وحش - بوستان و فضاهای سبز میان معابر سواره رو و عابر پیاده	Uzoqov, 2024 Hora & Sales, 2019 Hamidi et al, 2021 Liu et al, 2017 Ma et al, 2023 Chan et al, 2018

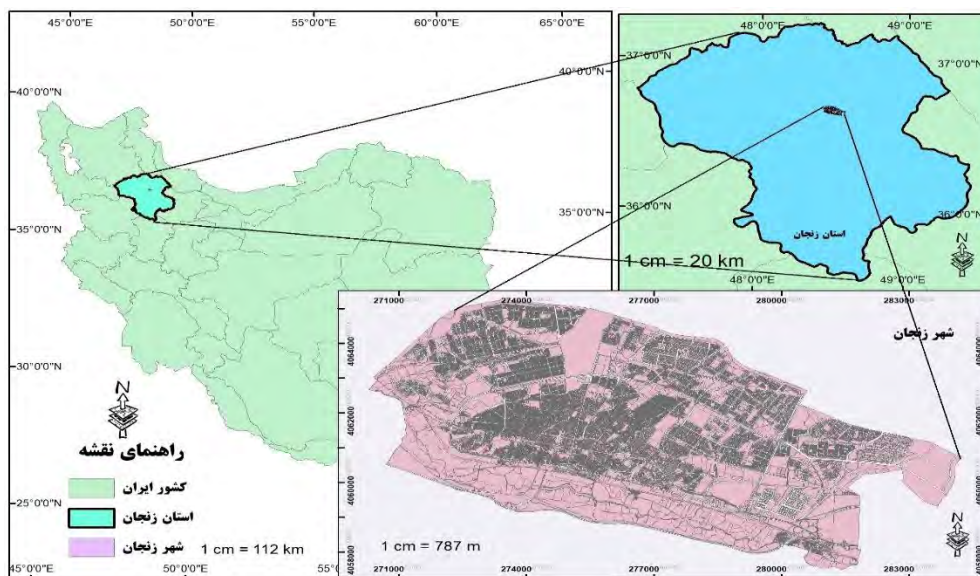
جدول ۲. مؤلفه‌های اصلی و زیرمؤلفه‌های تاب‌آوری شهری

مؤلفه اصلی تاب‌آوری شهری	زیر مؤلفه‌ها	منابع
تاب‌آوری اجتماعی	تعداد جمعیت در خطر	Tahmasebi Moghaddam et al, 2021 Ahadnejad Reveshty et al, 2022 Cutter et al, 2010 Aldrich & Meyer, 2015
	روش‌های ایمنی و اقدامات پیشگیرانه در هنگام وقوع سیلاب	
	پوشش سلامت	
	ساختار خانواده	

منابع	زیر مولفه‌ها	مؤلفه اصلی تاب‌آوری شهری
Shahpari Sani et al, 2022 Tahmasebi Mogaddam, 2022	برگزاری کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی برای شهروندان در مورد نحوه مدیریت بحران	
	درصد خانوارهای شرکت‌کننده در فعالیت‌ها و رویدادهای اجتماعی	
	درصد خانوارهای (افراد) شرکت‌کننده در کار داوطلبانه	
	درصد خانوارهایی که تحصیلات یا مهارت‌های مربوط به خطرات محلی، آماده‌سازی و حفاظت را کسب کرده‌اند.	
	درک و آگاهی مردم محلی از مخاطرات	
	تعهد و مسئولیت‌پذیری در هنگام مخاطرات	
	نسبت کسب و کار بزرگ به کوچک	تاب‌آوری اقتصادی
Cutter et al, 2010 Norris et al, 2008 Rose, 2007 Hallegatte, 2014	عدم وابستگی به اشتغال تک بخشی	
	دسترسی به منابع مالی و وجود سیستم‌های متنوع بیمه	
	نرخ رشد اقتصادی شهر	
	میزان اعتبارات اعطایی بانک‌ها به بازسازی یا مقاوم‌سازی بعد از سیل	
	تعداد واحدهای مسکونی تحت پوشش بیمه	
Cutter et al, 2010 Adger et al, 2005	میزان هزینه شهری به زیرساخت‌ها	تاب‌آوری نهادی و زیرساختی
	نسبت جمعیت به خدمات بهداشتی و درمانی	
	آمادگی نهادها در در حین و بعد از مخاطره	
	ظرفیت پناهگاه‌ها	
	تعداد مسیرهای اصلی در هر کیلومتر مربع	
	تعداد هتل‌ها و مسافرخانه در هر کیلومتر	
	تعداد ساختمان‌های زیر ۳۰ سال نسبت به کل ساختمان‌ها	
	درصد سطح شبکه‌ی معابر با عملکرد شریانی	
Cutter et al, 2010 Norris et al, 2008 Adger et al, 2005	بهداشت محیط شهری	تاب‌آوری زیست محیطی
	مشارکت مردم در بهداشت محیط شهری	
	مدیریت پسماند خانگی و ساختمانی	
	کیفیت منابع آب	
	مدیریت آلودگی‌ها	
	سرانه فضای سبز	
	تصفیه آب	

محدوده مورد مطالعه

شهر زنجان به‌عنوان اولین و بزرگ‌ترین نقطه‌ی شهری استان و شهرستان زنجان، یکی از شهرهای میانی کشور در رده‌ی جمعیتی ۲۵۰ تا ۵۰۰ هزارنفری و مرکز سیاسی، اداری استان محسوب می‌شود (۱۳۹۵). این شهر در فاصله‌ی ۳۳۰ کیلومتری تهران و ۲۹۳ کیلومتری تبریز واقع شده است. موقعیت جغرافیایی شهر منطبق بر ۱۴ دقیقه و ۴۸ درجه الی ۴۴ دقیقه و ۴۸ درجه طول شرقی و ۳۴ دقیقه و ۳۶ درجه الی ۴۸ دقیقه و ۳۶ درجه عرض شمالی می‌باشد که در مجموعه‌ای از ارتفاعات از طرف شمال، شمال شرق، جنوب و جنوب غرب و در ارتفاع متوسط ۱۶۶۰ متر از سطح دریا واقع گردیده است. (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه شهر زنجان

بحث و ارائه یافته‌ها

بررسی ساختاری نقش مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل

در این پژوهش جهت تبیین نقش مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل، مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر شهر اسفنجی در ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل، با استفاده مطالعه مبانی نظری جمع‌آوری و سپس به صورت پرسشنامه در قالب روش دلفی فازی مورد تحلیل قرار گرفت. اعضای پانل خبرگان (۳۵ نفر) قرار داده شده‌اند و از آنها خواسته شده با استفاده از متغیرهای کلامی (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم) نظر خود را در مورد هر کدام از مؤلفه‌ها اعمال نمایند. در این میان جهت فازی کردن متغیرهای کلامی از اعداد فازی مثلثی که در جدول شماره ۳ مشاهده می‌شود، بهره گرفته شده است.

بر اساس جدول شماره ۳ و یافته‌های حاصل از پرسشنامه در دور اول دلفی و با توجه به اینکه آستانه تحمل مقدار ۰/۷ در نظر گرفته شده است، از ۳۳ مؤلفه‌ای که در اختیار کارشناسان قرار گرفته شده است، در مجموع مقدار عددی فازی شده ۲۷ مؤلفه‌ی شعر اسفنجی بالاتر از ۰/۷ به دست آمده است و به عنوان مؤلفه‌های تاثیرگذار در ارتقای تاب‌آوری شهر زنجان مورد تأیید قرار گرفته شده‌اند و ۶ مؤلفه مقداری کمتر از ۰/۷ به دست آورده که نشان از عدم تأیید این مؤلفه‌ها توسط کارشناسان به عنوان عامل مهم در تاب‌آوری شهری می‌باشند در ادامه عوامل مستخرج شده از پرسشنامه‌ها و نتایج بررسی داده‌ها در مرحله اول دلفی فازی در جدول شماره ۳ بیان شده است.

جدول ۳. مؤلفه‌ها و دیدگاه خبرگان مرتبط با مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقای تاب‌آوری شهری در شهر زنجان (نظرسنجی مرحله اول)

مؤلفه اصلی	زیرمؤلفه‌های شهر اسفنجی	کرانه بالا	کرانه وسط	کرانه پایین	میانگین سه کرانه	وضعیت
سنگفرش‌های نفوذپذیر	اجازه نفوذ آب باران به زمین	۰/۹۲	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۷۰	تأیید شده
	کاهش رواناب سطحی	۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳	تأیید شده
	تغذیه آب‌های زیرزمینی	۰/۸۳	۰/۶۷	۰/۴۲	۰/۶۵	تأیید نشده
	کاهش اثر جزیره حرارتی شهر از طریق خنک‌سازی	۰/۹۳	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۵	تأیید شده
	بهبود سلامت و کیفیت زندگی	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۴	تأیید شده
	کاهش خطر سیلاب	۰/۹۰	۰/۶۸	۰/۴۳	۰/۷۱	تأیید شده
	جذب آلاینده‌های آلی	۰/۸۸	۰/۶۷	۰/۴۲	۰/۷۰	تأیید شده
تاسیسات نگهدارنده و تصفیه کننده بیولوژیکی	فیلتر کردن آب باران	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۶۵	۰/۸۶	تأیید شده
	تسهیل نفوذ طبیعی	۰/۹۲	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲	تأیید شده
	بهبود کیفیت آب	۰/۹۵	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تأیید شده
	کاهش اثر جزیره حرارتی شهر	۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳	تأیید شده
	بهبود کیفیت هوا	۰/۸۷	۰/۶۵	۰/۴۰	۰/۶۴	تأیید نشده
	افزایش تنوع زیستی	۰/۹۰	۰/۶۸	۰/۵۱	۰/۷۰	تأیید شده

مؤلفه اصلی	زیرمؤلفه‌های شهر اسفنجی	کرانه بالا	کرانه وسط	کرانه پایین	میانگین سه کرانه	وضعیت
تالاب ها و دریاچه های مصنوعی	بهبود کیفیت محیط زیست	۰/۹۳	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲	تأیید شده
	افزایش تنوع زیستی	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تأیید شده
	بازسازی پوشش گیاهی	۰/۸۰	۰/۶۵	۰/۴۰	۰/۶۳	تأیید نشده
	افزایش امکان پیاده سازی کشاورزی شهری	۰/۹۵	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲	تأیید شده
	بام‌های سبز و باغ‌های باران	۰/۹۵	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۶	تأیید شده
	ذخیره سازی در مقیاس بزرگ برای آب باران	۰/۹۵	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تأیید شده
	جمع‌آوری و استفاده مجدد از آب باران	۰/۹۰	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۶۹	تأیید نشده
	تأمین آب در زمان خشکسالی	۰/۹۲	۰/۸۰	۰/۵۵	۰/۷۷	تأیید شده
	کاهش اوج جریان رودخانه	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۶	تأیید شده
	ظرفیت ذخیره آب	۰/۹۵	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۷۹	تأیید شده
فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی	افزایش نرخ مجدد استفاده از آب	۱	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۸۰	تأیید شده
	ایجاد تالاب های مصنوعی	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تأیید شده
	جذب آب باران و گرما	۰/۹۲	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۶۹	تأیید نشده
	نگهداری رواناب،	۰/۸۲	۰/۵۸	۰/۳۳	۰/۷۳	تأیید شده
	کمک به افزایش آب‌های زیرزمینی	۰/۸۸	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۷۵	تأیید شده
	حفظ فرایندهای هیدرولوژیکی طبیعی	۰/۹۲	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۷۰	تأیید شده
	کاهش فرسایش	۰/۸۸	۰/۶۸	۰/۵۲	۰/۷۰	تأیید شده
	ایجاد فضاهای تفریحی	۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳	تأیید شده
	ایجاد زیستگاه حیات وحش	۰/۸۷	۰/۶۵	۰/۴۰	۰/۶۴	تأیید نشده
	بوستان و فضاهای سبز میان معابر سواره رو و عابر پیاده	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۳۷	۰/۷۱	تأیید شده
مؤلفه اصلی	زیرمؤلفه‌های تاب‌آوری شهری	کرانه بالا	کرانه وسط	کرانه پایین	میانگین سه کرانه	وضعیت
تاب‌آوری اجتماعی	تعداد جمعیت در خطر	۰/۹۳	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۷۱	تأیید شده
	روش‌های ایمنی و اقدامات پیشگیرانه در هنگام وقوع سیلاب	۰/۸۷	۰/۸۰	۰/۵۲	۰/۷۳	تأیید شده
	پوشش سلامت	۰/۹۰	۰/۶۸	۰/۴۳	۰/۶۷	تأیید نشده
	ساختار خانواده	۰/۸۳	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۷۳	تأیید شده
	برگزاری کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی برای شهروندان	۰/۹۷	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۸۰	تأیید شده
	درصد خانوارهای شرکت‌کننده در فعالیتهای و رویدادهای اجتماعی	۰/۹۳	۰/۸۰	۰/۵۵	۰/۷۸	تأیید شده
	درصد خانوارهای (افراد) شرکت‌کننده در کار داوطلبانه	۰/۸۷	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۷۵	تأیید شده
	درصد خانوارها با تحصیلات یا مهارت‌های مربوط به خطرات محلی	۰/۸۵	۰/۶۳	۰/۳۸	۰/۶۳	تأیید نشده
	درک و آگاهی مردم محلی از مخاطرات	۰/۸۸	۰/۶۵	۰/۴۰	۰/۷۲	تأیید شده
تاب‌آوری اقتصادی	نسبت کسب و کار بزرگ به کوچک	۰/۸۵	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۷۳	تأیید شده
	عدم وابستگی به اشتغال تک بخشی	۰/۹۵	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۳	تأیید شده
	دسترسی به منابع مالی و وجود سیستم‌های متنوع بیمه	۰/۹۸	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۳۳	تأیید شد
	نرخ رشد اقتصادی شهر	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۷۰۱	تأیید شد
	میزان اعتبارات اعطایی بانک‌ها به بازسازی یا مقاوم سازی بعد از سیل	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۷۰۰	تأیید شد
تاب‌آوری نهادی و زیرساختی	تعداد واحدهای مسکونی تحت پوشش بیمه	۰/۹۷	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۷۱۷	تأیید شد
	میزان هزینه شهری به زیرساخت‌ها	۰/۸۰	۰/۶۹	۰/۷۲	۰/۷۳	تأیید شده
	نسبت جمعیت به خدمات بهداشتی و درمانی	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۵۷	۰/۷۴۴	تأیید شد
	آمادگی نهادهای در در حین و بعد از مخاطره	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳۳	تأیید شد
	ظرفیت پناهگاه‌ها	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۶۲	۰/۸۴۲	تأیید شد
	تعداد مسیرهای اصلی در هر کیلومتر مربع	۰/۹۰	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۱۹	تأیید شد
	تعداد هتل‌ها و مسافرخانه در هر کیلومتر	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳۳	تأیید شد
	تعداد ساختمان‌های زیر ۳۰ سال نسبت به کل ساختمان‌ها	۰/۷۵	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۵۶۱	تأیید نشده
	درصد سطح شبکه‌ای معابر با عملکرد شریانی	۰/۸۲	۰/۷۳	۰/۵۳	۰/۷۱۴	تأیید شد
	کاهش آلودگی‌ها	۰/۸۸	۰/۷۸	۰/۵۵	۰/۷۶۱	تأیید شد

مؤلفه اصلی	زیرمؤلفه‌های شهر اسفنجی	کرانه بالا	کرانه وسط	کرانه پایین	میانگین سه کرانه	وضعیت
تاب‌آوری زیست محیطی	بهداشت محیط شهری	۰/۹۲	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۵۰	تائید شد
	مشارکت مردم در بهداشت محیط شهری	۰/۸۸	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۴۴	تائید شد
	مدیریت پسماند خانگی و ساختمانی	۰/۸۷	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۴۲	تائید شد
	کیفیت منابع آب	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۷۰۳	تائید شد
	میزان تغییرات کاربری اراضی	۰/۸۲	۰/۷۲	۰/۴۸	۰/۶۹۴	تائید نشده
	سرانه فضای سبز	۰/۸۷	۰/۸۰	۰/۵۷	۰/۷۷۲	تائید شد
	تصفیه آب	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۶۳	۰/۸۳۶	تائید شد

در مرحله دوم از روش دلفی فازی ۳۳ مؤلفه تائید شده از سوی کارشناسان از مرحله اول، در قالب پرسشنامه‌ای دیگر و جهت شروع فاز دوم روش دلفی فازی در اختیار کارشناسان قرار گرفته شده است. در این مرحله پس از تحلیل‌های انجام گرفته و مقایسه آن با نتایج دوره اول، باید اختلاف خبرگان نسبت به مرحله قبل از حد آستانه ۰/۲ کمتر باشد تا فرایند نظرسنجی متوقف گردد. با مقایسات صورت گرفته مجموع اختلاف نظر خبرگان در دو مرحله کمتر از ۰/۲ بوده است بنابراین دلفی در دور دوم متوقف می‌شود. مطابق جدول شماره ۴، با توجه به مقدار عددی فازی شده در مرحله دوم، تعداد ۳۳ مؤلفه، مقداری بالاتر از ۰/۷ به دست آورده‌اند و مورد تائید خبرگان قرار گرفته شده‌اند.

جدول ۴. مؤلفه‌ها و دیدگاه خبرگان مرتبط با مؤلفه‌های شهر اسفنجی در ارتقای تاب‌آوری شهری در شهر زنجان (نظرسنجی مرحله دوم)

مؤلفه اصلی	زیرمؤلفه‌ها	کرانه بالا	کرانه وسط	کرانه پایین	میانگین سه کرانه	وضعیت
سنگفرش‌های نفوذپذیر	اجازه نفوذ آب باران به زمین	۰/۹۲	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲	تائید شده
	کاهش رواناب سطحی	۰/۹۵	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۷	تائید شده
	کاهش اثر جزیره حرارتی شهر از طریق خنک‌سازی	۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۶	تائید شده
	بهبود سلامت و کیفیت زندگی	۰/۹۲	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۷۱	تائید شده
	کاهش خطر سیلاب	۰/۹۳	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲	تائید شده
	جذب آلاینده‌های آلی	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تائید شده
تاسیسات نگهدارنده و تصفیه کننده بیولوژیکی	فیلتر کردن آب باران	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۷۰	تائید شده
	تسهیل نفوذ طبیعی	۰/۹۵	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۳	تائید شده
	بهبود کیفیت آب	۰/۹۲	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲	تائید شده
	کاهش اثر جزیره حرارتی شهر	۰/۹۵	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تائید شده
	افزایش تنوع زیستی	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۷	تائید شده
	بهبود کیفیت محیط زیست	۰/۹۰	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲	تائید شده
	افزایش تنوع زیستی	۰/۹۳	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۴	تائید شده
	افزایش امکان پیاده سازی کشاورزی شهری	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۴	تائید شده
	بام‌های سبز و باغ‌های باران	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۷	تائید شده
	ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ برای آب باران	۰/۹۵	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۶	تائید شده
تالاب ها و دریاچه های مصنوعی	تأمین آب در زمان خشکسالی	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۶۵	۰/۸۷	تائید شده
	کاهش اوج جریان رودخانه	۱	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۸۱	تائید شده
	ظرفیت ذخیره آب	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تائید شده
	افزایش نرخ مجدد استفاده از آب	۰/۹۳	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۴	تائید شده
	ایجاد تالاب های مصنوعی	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۵۸	۰/۸۱	تائید شده
	نگهداری رواناب،	۰/۹۳	۰/۷۸	۰/۵۳	۰/۷۷	تائید شده
	کمک به افزایش آب‌های زیرزمینی	۰/۹۵	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۸۰	تائید شده
آبراهه‌های طبیعی	حفظ فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۷۹	تائید شده
	کاهش فرسایش	۰/۹۵	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۶	تائید شده
	ایجاد فضاها برای تفریحی	۰/۹۳	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۵	تائید شده

مؤلفه اصلی	زیر مؤلفه‌ها	کرانه بالا	کرانه وسط	کرانه پایین	میانگین سه کرانه	وضعیت
	بوستان و فضاهای سبز میان معابر سواره رو و عابر پیاده	۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۴	تأیید شده
مؤلفه اصلی	زیر مؤلفه‌ها	کرانه بالا	کرانه وسط	کرانه پایین	میانگین سه کرانه	وضعیت
تاب آوری اجتماعی	تعداد جمعیت در خطر	۰/۹۲	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۴	تأیید شده
	روش‌های ایمنی و اقدامات پیشگیرانه در هنگام وقوع سیلاب	۰/۹۵	۰/۷۷	۰/۵۲	۰/۷۶	تأیید شده
	ساختار خانواده	۰/۹۱	۰/۷۹	۰/۵۳	۰/۷۶۴	تأیید شد
	برگزاری کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی برای شهروندان	۰/۸۹	۰/۷۴	۰/۵۰	۰/۷۱۲	تأیید شد
	درصد خانوارهای شرکت‌کننده در فعالیت‌ها و رویدادهای اجتماعی	۰/۸۸	۰/۷۷	۰/۵۵	۰/۷۵۰	تأیید شد
	درصد خانوارهای (افراد) شرکت‌کننده در کار داوطلبانه	۰/۹۵	۰/۸۰	۰/۵۵	۰/۷۸۳	تأیید شد
	درصد خانوارها با تحصیلات یا مهارت‌های مربوط به خطرات محلی	۰/۸۳	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۷۳۱	تأیید شد
تاب آوری اقتصادی	درک و آگاهی مردم محلی از مخاطرات	۰/۸۷	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۱۴	تأیید شد
	نسبت کسب و کار بزرگ به کوچک	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۴۸	۰/۷۰۶	تأیید شد
	عدم وابستگی به اشتغال تک بخشی	۰/۸۸	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۱۷	تأیید شد
	دسترسی به منابع مالی و وجود سیستم‌های متنوع بیمه	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۵۰	۰/۷۰۸	تأیید شد
	نرخ رشد اقتصادی شهر	۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۲۸	تأیید شد
	میزان اعتبارات اعطایی بانک‌ها به بازسازی یا مقاوم سازی بعد از سیل	۰/۸۸	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۷۰۳	تأیید شد
	تعداد واحدهای مسکونی تحت پوشش بیمه	۰/۹۵	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۷۹۷	تأیید شد
تاب آوری نهادی و زیرساختی	میزان هزینه شهری به زیرساخت‌ها	۰/۹۰	۰/۸۳	۰/۶۰	۰/۸۰۶	تأیید شد
	نسبت جمعیت به خدمات بهداشتی و درمانی	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳۳	تأیید شد
	آمادگی نهاده‌ها در در حین و بعد از مخاطره	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳۳	تأیید شد
	ظرفیت پناهگاه‌ها	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳۳	تأیید شد
	تعداد مسیرهای اصلی در هر کلومتر مربع	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳۳	تأیید شد
	تعداد هتل‌ها و مسافرخانه در هر کیلومتر	۰/۹۵	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۲۸	تأیید شد
	درصد سطح شبکه‌ی معابر با عملکرد شریانی	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۴۲	تأیید شد
تاب‌آوری زیست محیطی	کاهش آلودگی‌ها	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۵۷	۰/۷۹۴	تأیید شد
	بهداشت محیط شهری	۰/۹۸	۰/۷۳	۰/۴۸	۰/۷۳۳	تأیید شد
	مشارکت مردم در بهداشت محیط شهری	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۷۰۱	تأیید شد
	مدیریت پسماند خانگی و ساختمانی	۰/۹۵	۰/۷۰	۰/۴۵	۰/۷۰۰	تأیید شد
	کیفیت منابع آب	۰/۹۷	۰/۷۲	۰/۴۷	۰/۷۱۷	تأیید شد
	سرانه فضای سبز	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۵۷	۰/۷۴۴	تأیید شد
	تصفیه آب	۰/۹۰	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۷۳۳	تأیید شد

ماخذ: یافته‌های پژوهش

تحلیل جامع روابط علی و قدرت تبیین‌کنندگی مدل در پژوهش (بررسی میزان اهمیت و نحوه اثرگذاری و اثرپذیری مؤلفه‌های شناسایی شده)

در راستای ارزیابی دقیق میزان اهمیت و چگونگی تأثیرگذاری مؤلفه‌های شناسایی شده در این فاز از تحقیق، رویکردی چندوجهی اتخاذ گردید. پس از محاسبه وزن‌های عاملی به منظور سنجش قدرت ارتباط بین مفاهیم یا سازه‌های پنهان (که مستقیماً قابل مشاهده نیستند) و شاخص‌های ظاهری (که قابل اندازه‌گیری مستقیم هستند) وابسته به آن‌ها، تمرکز بر تحلیل عمق و معناداری این روابط قرار گرفت. بدین منظور، شدت رابطه و سطح اطمینان به این روابط از طریق آزمون‌های آماری مشخص مورد بررسی قرار گرفت تا اطمینان حاصل شود که ارتباطات مشاهده‌شده صرفاً ناشی از تصادف نیستند. علاوه بر این، جهت و ماهیت روابط بین متغیرها با دقت کالبدشکافی شد. این مهم از طریق تحلیل اثرات مستقیم و ضرایب مسیر در مدل صورت پذیرفت. به منظور کمی‌سازی میزان توانایی متغیرهای مستقل در تبیین تغییرات مشاهده‌شده در متغیر وابسته، از ضریب تعیین استفاده گردید. این شاخص نشان می‌دهد که چه درصدی از نوسانات یا تغییرات متغیر وابسته، توسط متغیرهای مستقلی که در مدل گنجانده شده‌اند، پیش‌بینی یا تبیین می‌شود. در نهایت، برای ارزیابی جامع عملکرد کلی مدل و میزان انطباق آن با داده‌های تجربی، تحلیل نیکویی برازش با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های استاندارد برازش انجام پذیرفت. این شاخص‌ها، که

معیارهایی برای سنجش میزان همخوانی مدل مفهومی با ساختار واقعی داده‌ها هستند، تصویری جامع از میزان سازگاری مدل پیشنهادی با داده‌ها ارائه می‌دهند و به محقق اطمینان می‌دهند که مدل مورد نظر به خوبی داده‌ها را بازنمایی می‌کند.

تحلیل عاملی تأییدی: ارزیابی ساختار عاملی و روابط متغیرها (سنجش بارهای عاملی)

در چارچوب تحلیل عاملی تأییدی، فرض بنیادین بر این استوار است که هر سازه یا عامل پنهان، با مجموعه‌ای مشخص و محدود از متغیرهای مشاهده‌پذیر که به عنوان شاخص‌های آن سازه عمل می‌کنند، ارتباط دارد. این ارتباطات به طور نظری از پیش تعیین شده و بر اساس مبانی نظری پژوهش شکل می‌گیرند. در جدول ۵، جزئیات مربوط به متغیرهای مورد استفاده در این پژوهش ارائه شده است. این جدول شامل نام هر متغیر، گویه‌های اختصاصی از ابزار سنجش پژوهش که هر متغیر را تشکیل می‌دهند، و همچنین بارهای عاملی محاسبه‌شده برای هر یک از این متغیرها است. این مقادیر بارهای عاملی، نتیجه اجرای تحلیل عاملی تأییدی با استفاده از نرم‌افزار تخصصی SmartPLS است که یکی از ابزارهای رایج در مدل‌سازی معادلات ساختاری محسوب می‌شود. تحلیل نتایج این نرم‌افزار به ما امکان می‌دهد تا اعتبار ساختاری ابزار اندازه‌گیری و سازه‌های نظری پژوهش را ارزیابی کنیم.

بررسی داده‌های جدول ۵ نشان می‌دهد ضرایب تمامی بارهای عاملی گویه‌ها بالاتر از ۰/۵ است که برای محاسبه متغیرهای پنهان مدل مقیاس بسیار قابل قبولی به حساب می‌آیند. مقدار بار عاملی بین ۰/۲ تا ۰/۳ نشان‌دهنده مقیاس ضعیف است و احتمالاً باید از مدل حذف شود. بارهای عاملی بین ۰/۳ تا ۰/۵ نشان می‌دهد متغیر مشاهده شده دارای مقیاس نسبتاً ضعیفی بوده، ولی در عین حال برای ادامه آنالیز کفایت می‌کند. مقادیر بزرگتر از ۰/۵ نیز نشان می‌دهند متغیر مشاهده‌پذیر مقیاس قابل اطمینانی برای محاسبه متغیر پنهان است.

براساس نتایج به‌دست آمده از مدل تحلیل عاملی تأییدی، تمامی شاخص‌های آشکار رابطه قوی بین متغیر پنهان خود دارند؛ به‌طوریکه در متغیر سنگفرش‌های نفوذپذیر بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص اجازه نفوذ آب باران به زمین با ضریب ۰/۹۱۱؛ و شاخص کاهش رواناب سطحی با ضریب ۰/۹۲۶ است. در متغیر تاسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کننده بیولوژیکی بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص فیلتر کردن آب باران با ضریب ۰/۹۶۲؛ و شاخص تسهیل نفوذ طبیعی با ضریب ۰/۹۷۴؛ و شاخص بهبود کیفیت محیط زیست با ضریب ۰/۹۴۹ است. در متغیر تالاب‌ها و دریاچه‌های مصنوعی بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص کاهش اوج جریان رودخانه با ضریب ۰/۹۲۲؛ و شاخص افزایش نرخ مجدد استفاده از آب با ضریب ۰/۹۴۹ است. در متغیر فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص حفظ فرایندهای هیدرولوژیکی طبیعی با ضریب ۰/۹۳۶؛ و شاخص بوستان و فضاهای سبز میان معابر سواره رو و عابر پیاده با ضریب ۰/۹۱۵ است.

در زمینه موضوع تاب‌آوری شهری نیز، چهار عامل تاب‌آوری اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی و نهادی-زیرساختی مورد بررسی و وزن دهی قرار گرفت. در این رابطه، بررسی‌ها نشان داد که در متغیر تاب‌آوری اجتماعی بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص تعداد جمعیت در خطر با ضریب ۰/۹۷۹؛ و شاخص ساختار خانواده با ضریب ۰/۹۱۴ است. در متغیر تاب‌آوری اقتصادی بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص نسبت کسب و کار بزرگ به کوچک با ضریب ۰/۹۱۹؛ و شاخص میزان اعتبارات اعطایی بانکها به بازسازی یا مقاوم سازی بعد از سیل با ضریب ۰/۹۰۴ است. در متغیر تاب‌آوری نهادی و زیرساختی بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص ظرفیت پناهگاه‌ها با ضریب ۰/۹۷۹؛ و شاخص درصد سطح شبکه معابر با عملکرد شربانی با ضریب ۰/۹۴۹ است. در متغیر تاب‌آوری زیست محیطی بیشترین میزان بار عاملی مربوط به شاخص بهداشت محیط شهری با ضریب ۰/۹۷۴؛ و شاخص کیفیت منابع آب با ضریب ۰/۹۴۹؛ و شاخص مشارکت مردم در بهداشت محیط شهری با ضریب ۰/۹۶۲ است.

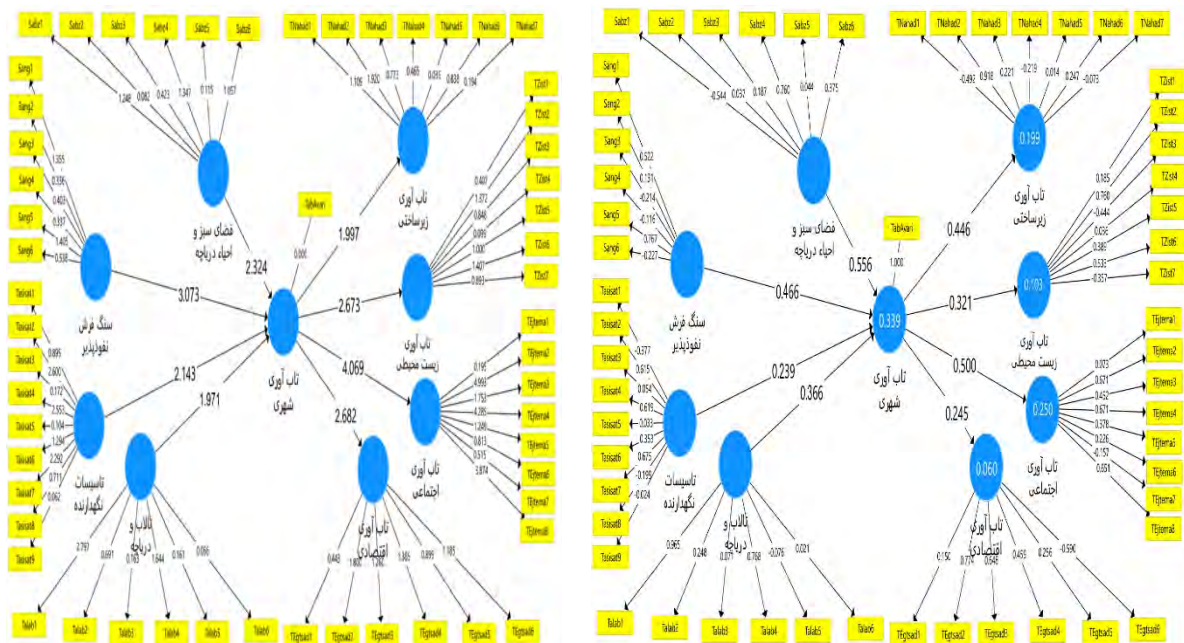
جدول ۵. نتایج بارهای عاملی

متغیر	شاخص	بارعاملی	متغیر	شاخص	بارعاملی
سنگفرش‌های نفوذپذیر	اجازه نفوذ آب باران به زمین	۰/۹۱۱	تاب‌آوری اجتماعی	تعداد جمعیت در خطر	۰/۹۷۹
	کاهش رواناب سطحی	۰/۹۳۶		روش‌های ایمنی و اقدامات پیشگیرانه در هنگام وقوع سیلاب	۰/۸۸۸
	بهبود سلامت و کیفیت زندگی	۰/۸۷۰		ساختار خانواده	۰/۹۱۴
	کاهش اثر جزیره حرارتی شهر از طریق خنک‌سازی	۰/۸۷۹		برگزاری کارگاه‌ها و دوره‌های آموزشی برای شهروندان	۰/۸۵۷

۰.۸۶۰	درصد خانوارهای شرکت‌کننده در فعالیت‌ها و رویدادهای اجتماعی		۰.۸۱۷	کاهش خطر سیلاب	
۰.۸۷۸	درصد خانوارهای (افراد) شرکت‌کننده در کار داوطلبانه		۰.۸۷۴	جذب آلاینده‌های آلی	
۰.۸۱۶	درصد خانوارها با تحصیلات یا مهارت‌های مربوط به خطرات محلی		۰.۹۶۲	فیلتر کردن آب باران	
۰.۸۴۲	درک و آگاهی مردم محلی از مخاطرات		۰.۹۷۴	تسهیل نفوذ طبیعی	
۰.۹۱۹	نسبت کسب و کار بزرگ به کوچک		۰.۸۴۲	بهبود کیفیت آب	
۰.۸۹۹	عدم وابستگی به اشتغال تک بخشی		۰.۹۰۴	کاهش اثر جزیره حرارتی شهر	
۰.۸۸۱	دسترسی به منابع مالی و وجود سیستم‌های متنوع بیمه	تاب آوری اقتصادی	۰.۸۲۰	افزایش تنوع زیستی	تاسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کننده بیولوژیکی
۰.۸۹۵	نرخ رشد اقتصادی شهر		۰.۹۴۹	بهبود کیفیت محیط زیست	
۰.۹۰۴	میزان اعتبارات اعطایی بانک‌ها به بازسازی یا مقاوم سازی بعد از سیل		۰.۹۰۲	افزایش امکان پیاده سازی کشاورزی شهری	
۰.۸۵۶	تعداد واحدهای مسکونی تحت پوشش بیمه		۰.۹۱۵	افزایش تنوع زیستی	
۰.۸۴۴	میزان هزینه شهری به زیرساخت‌ها		۰.۹۴۵	بام‌های سبز و باغ‌های باران	
۰.۸۷۲	نسبت جمعیت به خدمات بهداشتی و درمانی	تاب آوری زیرساختی	۰.۹۱۱	ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ برای باران	
۰.۸۷۷	آمادگی نهادها در در حین و بعد از مخاطره		۰.۷۹۵	تأمین آب در زمان خشکسالی	تالاب ها و دریاچه های مصنوعی
۰.۹۷۹	ظرفیت پناهگاه‌ها		۰.۹۲۲	کاهش اوج جریان رودخانه	
۰.۸۶۰	تعداد مسیرهای اصلی در هر کلومتر مربع		۰.۸۹۴	ظرفیت ذخیره آب	
۰.۸۷۶	تعداد هتل‌ها و مسافرخانه در هر کیلومتر		۰.۹۴۹	افزایش نرخ مجدد استفاده از آب	
۰.۹۴۹	درصد سطح شبکه‌ی معابر با عملکرد شریانی		۰.۸۵۳	ایجاد تالاب های مصنوعی	
۰.۸۹۹	کاهش آلودگی‌ها		۰.۸۷۲	نگهداری رواناب	
۰.۹۷۴	بهداشت محیط شهری	تاب‌آوری زیست محیطی	۰.۸۹۷	کمک به افزایش آب‌های زیرزمینی	فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی
۰.۸۶۲	سرانه فضای سبز		۰.۹۳۶	حفظ فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی	
۰.۸۲۳	مدیریت پسماند خانگی و ساختمانی		۰.۹۱۰	کاهش فرسایش	
۰.۹۴۹	کیفیت منابع آب		۰.۸۸۵	ایجاد فضاهای تفریحی	
۰.۹۶۲	مشارکت مردم در بهداشت محیط شهری		۰.۹۱۵	بوستان و فضاهای سبز میان معابر سواره رو و عابر پیاده	
۰.۸۵۱	تصفیه آب				

ضریب مسیر و معناداری

ضریب مسیر بیان‌کننده وجود رابطه علی خطی و شدت و جهت این رابطه میان دو متغیر پنهان است. درحقیقت همان ضریب رگرسیون در حالت استاندارد است که در مدل‌های ساده‌تر رگرسیون ساده و چندگانه مشاهده می‌شود. عددی بین ۰- تا +۰ است که ضرایب مسیر مثبت نشان‌دهنده روابط مستقیم و ضرایب مسیر منفی نشان‌دهنده روابط معکوس بین متغیرهای پنهان مستقل و وابسته است و اگر برابر با صفر شوند، نشان‌دهنده نبود رابطه علی خطی بین دو متغیر پنهان است. این مقدار از نظر بزرگی نشان‌دهنده قدرت رابطه است که با برقرار شدن روابط غیرمستقیم از میزان بزرگی یک ضریب بتا کاسته می‌شود؛ به همین منظور برخی محققان بر ضرورت اثرات کلی که ترکیبی از اثر مستقیم (ضریب مسیر یا بتا) و غیرمستقیم است تأکید دارند. ضرایب مسیر اثرات مستقیم و مقدار t متناظر با آن از نرم‌افزار Smart-PLS استخراج شده است. نتایج این تحلیل در جدول ۵ و شکل ۶ و ۷ به تفصیل نشان داده شده است. شکل ۷ میزان آماره T را در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که اگر در سطح معناداری ۰/۵ از مقدار بحرانی ۱/۹۶ بزرگتر باشد، نشان‌دهنده معنادار بودن ضریب مسیر به‌دست‌آمده است. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده در تمامی متغیرهای مستقل پژوهش بالاتر از حد بحرانی و نشان‌دهنده معنادار بودن ضرایب مسیر در تمامی متغیرهاست.

شکل ۷. نتایج آماره t شاخص‌ها در مدل معادلات ساختاری

شکل ۶. نتایج بتای استاندارد شاخص‌ها با تحلیل عاملی تاییدی

با توجه به اینکه آماره T بزرگتر از $1/96$ است، در سطح معناداری ۹۵ درصد ضرایب مسیر و روابط مفروض در مدل ساختاری پژوهش تأیید می‌شود و روابط میان مؤلفه‌ها معنادار است. با توجه به جدول متغیرهای مستقل پژوهش شامل سنگفرش‌های نفوذپذیر با ضریب تأثیر ۰.۴۶۶؛ تأسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کننده بیولوژیکی با ضریب تأثیر ۰.۲۳۹؛ تالاب‌ها و دریاچه‌های مصنوعی با ضریب تأثیر ۰.۳۶۶؛ و فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی با ضریب تأثیر ۰.۵۵۶، در سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ بر متغیر وابسته تاب‌آوری شهری تأثیر مثبت و معناداری داشته است که در میان شاخص‌های بررسی‌شده بیشترین تأثیر با ضریب ۰/۵۵۶ مربوط به متغیر فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی و پس از آن متغیر سنگفرش‌های نفوذپذیر با ضریب تأثیر ۰.۴۶۶ قرار دارد؛ بدین ترتیب برای تقویت تاب‌آوری شهری باید بر مولفه‌های فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی تأکید بیشتری گردد. این مولفه‌ها شامل نگهداری رواناب؛ کمک به افزایش آب‌های زیرزمینی؛ حفظ فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی؛ کاهش فرسایش؛ ایجاد فضاهای تفریحی؛ بوستان و فضاهای سبز میان معابر سواره‌رو و عابر پیاده می‌باشد. همچنین با توجه به سطح معناداری ۵ درصد و سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌توان نتیجه گرفت، بین متغیر مستقل و وابسته تحقیق ارتباط معناداری وجود دارد. بررسی بیشترین تأثیر پذیری مولفه‌های تاب‌آوری از متغیرهای مستقل تحقیق، نتایج جدول ۶ و شکل ۶ و ۷ نشان می‌دهد که تاب‌آوری اجتماعی با ضریب تأثیر پذیری ۰/۵۰۰ و تاب‌آوری نهادی و زیرساختی با ضریب تأثیر پذیری ۰/۴۴۶ در رتبه اول و دوم هستند. لذا در زمینه تقویت تاب‌آوری شهری باید بر تاب‌آوری اجتماعی و تاب‌آوری نهادی-زیرساختی تأکید بیشتری گردد.

جدول ۶. محاسبه اثرات مستقیم مولفه‌های شهر اسفنجی بر تاب‌آوری شهری

مسیر مستقیم	ضریب مسیر	T-value	P-value	رد/تایید در سطح ۰/۰۵
سنگفرش‌های نفوذپذیر--> تاب‌آوری شهری	۰.۴۶۶	۳۰.۷۳	۰.۰۰۰	تایید
تأسیسات نگهدارنده و تصفیه‌کننده بیولوژیکی--> تاب‌آوری شهری	۰.۲۳۹	۲.۱۴۳	۰.۰۰۵	تایید
تالاب‌ها و دریاچه‌های مصنوعی--> تاب‌آوری شهری	۰.۳۶۶	۱.۹۷۱	۰.۰۲۹	تایید
فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی--> تاب‌آوری شهری	۰.۵۵۶	۲.۳۳۴	۰.۰۰۰	تایید
تاب‌آوری شهری--> تاب‌آوری اجتماعی	۰.۵۰۰	۴۰.۰۶۹	۰.۰۰۴	تایید
تاب‌آوری شهری--> تاب‌آوری اقتصادی	۰.۲۴۵	۲.۶۸۲	۰.۰۰۰	تایید
تاب‌آوری شهری--> تاب‌آوری نهادی و زیرساختی	۰.۴۴۶	۱.۹۹۷	۰.۰۰۰	تایید
تاب‌آوری شهری--> تاب‌آوری زیست‌محیطی	۰.۳۲۱	۲.۶۷۳	۰.۰۰۱	تایید

برازش نیکویی مدل

باتوجه به رویکرد مدل معادلات ساختاری، در حداقل مربعات جزئی (PLS)، معیار نیکویی برازش به عنوان یک سنجۀ ارزیابی جامع معرفی شده است. این شاخص، با در نظر گرفتن همزمان ابعاد اندازه‌گیری و ساختاری مدل، نقشی حیاتی در تعیین میزان کفایت و اعتبار کلی مدل ایفا می‌کند. به منظور ارزیابی جامع مدل، میانگین مقادیر اشتراکی متغیرهای مدل با استفاده از خروجی الگوریتم PLS در بخش شاخص‌های کیفی استخراج و در جدول ۷ ارائه گردیده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که تمامی شاخص‌های بررسی شده در خصوص نیکویی برازش مدل، مورد تایید قرار گرفته‌اند. این یافته حاکی از همخوانی مطلوب میان داده‌های تجربی حاصل از پژوهش و مدل مفهومی و نظری تحقیق است که اعتبار و پایایی مدل را به اثبات می‌رساند.

جدول ۷: نیکویی برازش مدل

نوع شاخص	مدل استاندارد	مدل تخمینی	مقدار قابل تأیید	نتیجه
ریشه میانگین استاندارد شده مجذور باقیمانده	SRMR	۰.۱۵۳	نزدیک به صفر	تایید آزمون
مربع فاصله اقلیدسی	d_uls	۰.۷۵۲	کمتر از ۰/۹۵	تایید آزمون
فاصله هندسی	d_g	۰.۸۰۴	کمتر از ۰/۹۵	تایید آزمون
کای اسکوئر	Chi-Square	۷۰.۹۴۵	بیش از ۵۰	تایید آزمون
شاخص برازش هنجار شده	NFI	۰.۹۷۱	بیش از ۰/۹	تایید آزمون

بنابراین یافته‌های پژوهش در مجموع نشان داد که مؤلفه‌های شهر اسفنجی نه تنها در کاهش مستقیم خطر سیلاب، بلکه در ارتقاء ابعاد اجتماعی، اقتصادی، نهادی و زیست‌محیطی تاب‌آوری شهر زنجان نقش اساسی دارند. در این میان، شاخص‌هایی چون سنگفرش‌های نفوذپذیر، تالاب‌ها و دریاچه‌های مصنوعی، کیفیت منابع آب و ظرفیت اجتماعی خانوارها بار عاملی بالاتری به خود اختصاص دادند و نشان دادند که تاب‌آوری شهری بیش از آنکه صرفاً وابسته به اقدامات کالبدی و فنی باشد، از تلفیق سازه‌های طبیعی و مصنوعی با ظرفیت‌های اجتماعی و نهادی حاصل می‌شود. این یافته‌ها هم‌راستا با مطالعات پیشین در سطح ملی و بین‌المللی است. برای نمونه، نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش‌های Tahmasebi Moghaddam et al, 2021 و Ahadnejad Reveshty et al, 2022 مطابقت دارد که بر اهمیت ظرفیت اجتماعی، آموزش‌های پیشگیرانه و سازمان‌یافتگی خانوارها در کاهش آسیب‌پذیری سیلاب تأکید کرده بودند. همچنین، میان نتایج این مطالعه و پژوهش‌های بین‌المللی مطابقت وجود دارد؛ چنان‌که یافته‌ها با مطالعات Zevenbergen et al, 2018 و Li et al, 2018 در چین مطابق است. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که طراحی شهرهای اسفنجی از طریق ایجاد تالاب‌ها، آبراهه‌های طبیعی و زیرساخت‌های سبز، یکی از کلیدی‌ترین رویکردها برای مدیریت رواناب شهری و ارتقاء تاب‌آوری در برابر بارش‌های شدید به شمار می‌رود. از سوی دیگر، بُعد اقتصادی این پژوهش نیز هم‌راستا با مطالعات Meerow و همکاران (۲۰۱۶) بود که در بررسی تاب‌آوری اقتصادی شهری بر نقش متنوع‌سازی فعالیت‌ها و دسترسی به اعتبارات مالی تأکید کرده‌اند. بدین ترتیب می‌توان گفت که افزایش ظرفیت اقتصادی، در کنار سازوکارهای نهادی و اجتماعی، یکی از پایه‌های اصلی بازگشت‌پذیری شهرها پس از بحران به شمار می‌آید. در نهایت، یافته‌های زیست‌محیطی این پژوهش با نتایج Zhang و همکاران (۲۰۱۹) مشابهت دارد. آنها نیز بر این نکته تأکید داشتند که شهر اسفنجی نه تنها رویکردی برای مدیریت بحران و کاهش خطر سیلاب است، بلکه می‌تواند به عنوان مدلی جامع برای ارتقاء کیفیت محیط زیست و افزایش زیست‌پذیری شهری عمل کند. بنابراین، نتایج حاضر نشان می‌دهد که مفهوم شهر اسفنجی در بستری همچون شهر زنجان نیز قابلیت اجرا دارد و می‌تواند به‌طور همزمان ابعاد گوناگون تاب‌آوری شهری آن را تقویت نماید.

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

توسعه شهری شتابان و افزایش سطوح نفوذناپذیر در شهر زنجان، همانند بسیاری از شهرهای دیگر، تاب‌آوری در برابر مخاطرات سیل را کاهش داده و سیستم‌های زهکشی سنتی را تحت فشار قرار داده است. با توجه به روند افزایشی رویدادهای اقلیمی شدید و تأثیرات نامتناسب آن بر جوامع آسیب‌پذیر، رویکردهای صرفاً مهندسی‌محور پاسخگوی چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی نیستند. در این راستا، اصول شهر اسفنجی با ارائه مزایای چندمنظوره زیست‌محیطی، اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی، ابزاری کارآمد برای ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر سیلاب و سایر مخاطرات اقلیمی محسوب می‌شود. ادغام این مؤلفه‌ها با زیرساخت‌های موجود شهر زنجان می‌تواند ضمن تکمیل پروژه‌های سنتی، مدیریت آب شهری را بهبود بخشیده، فشار بر سامانه‌های مرکزی را کاهش دهد و گامی مؤثر در جهت ایجاد شهری پایدارتر و تاب‌آورتر در برابر بحران‌های آینده باشد. بدین ترتیب، باتوجه به ضرورت گذار از زیرساخت‌های سنتی مدیریت آب به سوی رویکردهای نوین، باید بر

نقش حیاتی مفهوم «شهر اسفنجی» در ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات اقلیمی، به ویژه سیل، تاکید گردد. شهر اسفنجی با الهام از طبیعت، به جای تمرکز صرف بر دفع سریع آب، بر جذب، ذخیره، تصفیه و انتشار تدریجی آن تأکید دارد و از این طریق، با کاهش فشار بر سیستم‌های زهکشی سنتی و تقلید از فرآیندهای طبیعی، تاب‌آوری شهر را در برابر تغییرات محیطی و رویدادهای شدید اقلیمی افزایش می‌دهد. این رویکرد نه تنها به مدیریت بهتر سیلاب، بلکه به بهبود کیفیت آب، خنک‌سازی شهری، افزایش فضاهاى سبز و تنوع زیستی، و در نهایت ارتقای زیست‌پذیری کلی شهر و پایداری اقتصادی بلندمدت کمک می‌کند. بنابراین، ادغام مؤلفه‌های شهر اسفنجی، سرمایه‌گذاری چندمنظوره‌ای است که ضمن پرداختن به چالش‌های آبی و اقلیمی، منافع گسترده‌ای را در ابعاد زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی به همراه دارد و رویکردی پایدارتر و از نظر فرهنگی همخوان‌تر از راه‌حل‌های صرفاً فنی ارائه می‌دهد.

براساس یافته‌های مدل تحلیل عاملی تأییدی، مؤلفه‌های شهر اسفنجی نقش موثری در ارتقاء تاب‌آوری شهری در مقابل مخاطرات سیل در شهر زنجان ایفا می‌کنند، به طوری که شاخص‌های مرتبط با نفوذپذیری، نگهداری و تصفیه آب، و توسعه فضاهاى سبز بیشترین تأثیر را بر این متغیر دارند. به‌طور کمی، مؤلفه‌های فضای سبز و احیای آبراهه‌های طبیعی با ضریب تأثیر ۰.۵۵۶، و سنگفرش‌های نفوذپذیر با ضریب ۰.۴۶۶ بیشترین اثر را در تقویت تاب‌آوری نشان می‌دهند، که نشان‌دهنده اهمیت این مؤلفه‌ها در کاهش رواناب سطحی، حفظ فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی و بهبود کیفیت زیستی است. همچنین، در حوزه تاب‌آوری اجتماعی و نهادی، شاخص‌های تعداد جمعیت در خطر و ظرفیت پناهگاه‌ها با ضریب تأثیر ۰.۹۷۹ و ۰.۹۷۹، به طور قابل ملاحظه‌ای بر پایداری و انعطاف‌پذیری شهر اثرگذار هستند. این نتایج، هم به صورت کمی و هم کیفی، تأکید می‌کنند که اقتضای استراتژیک توسعه شهری در زنجان باید بر ترویج و تقویت مؤلفه‌های مبتنی بر طبیعت و فاکتورهای اجتماعی و زیرساختی باشد تا تاب‌آوری کلی در مواجهه با سیلاب و بلایای طبیعی افزایش یابد.

بر اساس یافته‌های تحقیق چند پیشنهاد کاربردی برای ارتقاء تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات سیل با رویکرد شهر اسفنجی در شهر زنجان ارائه می‌شود:

۱. توسعه و ترویج فضاهاى سبز و نفوذپذیر از طریق افزایش سرانه فضای سبز؛ استفاده گسترده از سنگفرش‌های نفوذپذیر؛ و احیای و بهسازی آبراهه‌های طبیعی و مسیل‌ها
۲. پیاده‌سازی زیرساخت‌های مدیریت آب مبتنی بر طبیعت (SuDS) از قبیل ساخت مخازن ذخیره و تصفیه‌کننده بیولوژیکی و تشویق به جمع‌آوری آب باران در ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی.
۳. تقویت تاب‌آوری اجتماعی از طریق افزایش آگاهی عمومی و آموزش؛ و تقویت ساختار خانواده و شبکه‌های اجتماعی محلی؛ و گسترش سیستم‌های هشدار اولیه سیل با قابلیت اطلاع‌رسانی سریع و موثر به شهروندان.
۴. ارتقاء تاب‌آوری نهادی و زیرساختی از طریق بازنگری و به‌روزرسانی طرح‌های جامع و تفصیلی شهری؛ و تقویت زیرساخت‌های حیاتی؛ و سهیل فرآیندهای اداری و اعطای تسهیلات.

References

- Ahadnejad Reveshty, M., Tahmasebi Moghaddam, H., & Heydari, M. T. (2022). Analysis of factors affecting the enhancement of urban communities' resilience against the COVID-19 pandemic with a community-centered crisis management approach: A case study of Zanjan city. *Amayesh-e Mohit*, 15(59), 159–186. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2676783.1401.15.59.8.3>. [in Persian].
- Tahmasebi Moghaddam, H., Ahadnejad Reveshty, M., Heydari, M. T., & Shoghli, A. (2021). Explaining factors influencing social resilience against biological hazards with an emphasis on COVID-19: A case study of Zanjan city. *Geography and Environmental Hazards*, 10(1), 1–19. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.67234.0>. [in Persian].
- Malek Hosseini, O. (2020). Natural hazards in Iran. *Roshd-e Amoozesh-e Joghrafia*, 34(3). <https://www.roshdmag.ir>. [in Persian].
- Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R., & Rockstrom, J. (2005). Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 309(5737), 1036–1039. <https://doi.org/10.1126/science.1112122>
- Aldrich, D. P., & Meyer, M. A. (2015). Social capital and community resilience. *American behavioral scientist*, 59(2), 254–269. <https://doi.org/10.1177/0002764214550299>
- Annex II, I. P. C. C. (2022). Glossary [Möller, VR van Diemen, JBR Matthews, C. Méndez, S. Semenov, JS Fuglestedt, A. Reisinger. Climate change, 2897–2930. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf
- Asian Cities Climate Change Resilience Network. (2011). Surat City Resilience Strategy, The Rockefeller Foundation, Surat Municipal Corporation, The Southern Gujarat Chamber of Commerce and Industry, TARU Leading Edge. <https://resiliencetrata.org/uploads/pdf/77D5DAE4-0403-4966-B646-809EF2C3E68A.pdf>

- Blunt, L. F. (2025). Selling the Sponge City: Copenhagen's Strategy for Cloudburst Management. <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9193475>
- Chan, F. K. S., Griffiths, J. A., Higgitt, D., Xu, S., Zhu, F., Tang, Y. T., ... & Thorne, C. R. (2018). "Sponge City" in China—a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land use policy*, 76, 772-778. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>
- Citaristi, I. (2022). World Meteorological Organization—WMO. In *The Europa Directory of International Organizations 2022* (pp. 399-404). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003292548>
- Cities Are Becoming More Like Sponges - Reasons to be Cheerful, accessed June 12, 2025, <https://reasonstobecheerful.world/sponge-cities-china-climate-change-resilience/>
- Cutter, S. L., Burton, C. G., & Emrich, C. T. (2010). Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions. *Journal of homeland security and emergency management*, 7(1). <https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732>
- Deng, Y., Deng, J., & Zhang, C. (2022). Sponge City and Water Environment Planning and Construction in Jibu District in Changde City. *Sustainability*, 15(1), 444. <https://doi.org/10.3390/su15010444>
- Dresden (2024). Environmental protection. [online] www.dresden.de. Cited 24 May 2024. Available at: <https://www.dresden.de/en/living/environment/EnvironmentalProtection.php>
- Environmental Protection Agency. (2016). Climate Change Indicators: Weather and Climate. <https://www.epa.gov/climate-indicators/weather-climate>
- European Environmental Agency. 2021. Water resources across Europe — confronting water stress: an updated assessment — European Environment Agency. [online] Cited 18 March 2024. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe-confronting>.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, 12(7), 525-542. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Guan, X., Wang, J. and Xiao, F. 2021. Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. *Journal of Cleaner Production*, 303(303) (2021) 127022, p.127022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127022>.
- Hallegatte, S. (2014). Economic resilience: definition and measurement. *World bank policy research working paper*, (6852). <https://ssrn.com/abstract=2432352>
- Hamidi, A., Ramavandi, B., & Sorial, G. A. (2021). Sponge City—An emerging concept in sustainable water resource management: A scientometric analysis. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, 100028. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100028>
- Helmreich, B. 2021. Rainwater Management in Urban Areas. *Water*, 13(8), p.1096. <https://doi.org/10.3390/w13081096>.
- Hora, K. E. R., & Sales, M. M. (2019). For more sponge cities. In *Planning Cities with Nature: Theories, Strategies and Methods* (pp. 251-263). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01866-5>
- Imran, H. M., Akib, S., & Karim, M. R. (2013). Permeable pavement and stormwater management systems: a review. *Environmental technology*, 34(18), 2649-2656. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.782573>
- Ix, F. M., & George, E. H. (2022). Review on sponge city construction for flood management. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 10(1), 109-117. <http://dx.doi.org/10.7770/safer-V10N1-art2537>
- Jardine, A., & Long, J. (2014). Synopsis of climate change. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-247. Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station: 71-81. Chap. 1.4, 247, 71-81. <https://research.fs.usda.gov/treearch/46955>
- Köster, S., Hadler, G., Opitz, L. and Thoms, A. 2023. Using Stormwater in a Sponge City as a New Wing of Urban Water Supply—A Case Study. *Water*, 15(10), p.1893. doi: Cited 1 May 2024. Available at: <https://doi.org/10.3390/w15101893>
- 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. doi: Cited 8 March 2024. Available at: <https://doi.org/10.3390/w9090594>
- Li, H., Ishidaira, H., Wei, Y., Souma, K., & Magome, J. (2022). Assessment of sponge city flood control capacity according to rainfall pattern using a numerical model after multi-Source validation. *Water*, 14(5), 769. <https://doi.org/10.3390/w14050769>
- Li, L., Li, C., Wang, H., & Xu, F. (2024). Precondition Study of a Sponge City: Comprehensive Assessment of the Vulnerability of an Urban Rainwater System. *Sustainability*, 16(10), 3897. <https://doi.org/10.3390/su16103897>
- Liang, C., Zhang, X., Xia, J., Xu, J., & She, D. (2020). The effect of sponge city construction for reducing directly connected impervious areas on hydrological responses at the urban catchment scale. *Water*, 12(4), 1163. <https://doi.org/10.3390/w12041163>

- Liu, H., Jia, Y., & Niu, C. (2017). "Sponge city" concept helps solve China's urban water problems. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6652-3>
- Ma, J., Liu, D., & Wang, Z. (2023). Sponge city construction and urban economic sustainable development: an ecological philosophical perspective. *International journal of environmental research and public health*, 20(3), 1694. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031694>
- Network, A. C. C. C. R. (2013). ACCCRN city projects. Bangkok: Asian Cities Climate Change Resilience Network (ACCCRN). <https://www.acccrn.net/>
- Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Wang, X. C., Ren, N., Li, G., ... & Liang, H. (2019). Implementation of a specific urban water management-Sponge City. *Science of the Total Environment*, 652, 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>
- Nguyen, T.T., Ngo, H.H., Guo, W. and Wang, X.C. 2020. A new model framework for sponge city implementation: Emerging challenges and future developments. *Journal of Environmental Management*, 253(253 (2020) 109689), p.109689. doi: Cited 22 June 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109689>
- 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(652 (2019) 147–162), pp.147–162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>
- Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F., & Pfefferbaum, R. L. (2008). Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American journal of community psychology*, 41(1), 127-150. <https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6>
- One Click LCA. (2025, June 12). Optimize sponge cities for floods | ENVI-met. Retrieved from <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/microclimate-modeling-to-optimize-sponge-cities-for-flood-resilience>
- Optimize sponge cities for floods | ENVI-met from One Click LCA, accessed June 12, 2025, <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/microclimate-modeling-to-optimize-sponge-cities-for-flood-resilience>
- Optimize sponge cities for floods | ENVI-met from One Click LCA, accessed June 12, 2025, <https://oneclicklca.com/en/resources/articles/microclimate-modeling-to-optimize-sponge-cities-for-flood-resilience>
- RamYar, M., & Shamsoddini, A. (2025). Future study of socio-economic indicators affecting the resilience of Region 6 of Shiraz metropolis in the face of flooding. *Geography and Regional Future Studies*, 3(2), 16-33. <https://doi.org/10.30466/grfs.2025.55894.1085>
- Rose, A. (2007). Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions. *Environmental hazards*, 7(4), 383-398. <https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.10.001?scroll=top>
- Shahpari Sani, D., Heidari, M. T., Tahmasebi Mogaddam, H., Nadizadeh Shorabeh, S., Yousefvand, S., Karmpour, A., & Jokar Arsanjani, J. (2022). An assessment of social resilience against natural hazards through multi-criteria decision making in geographical setting: a case study of Sarpol-e Zahab, Iran. *Sustainability*, 14(14), 8304. <https://doi.org/10.3390/su14148304>
- Sun, Y., Deng, L., Pan, S.-Y., Sable, S., & Shah, K. 2020. Integration of green and gray infrastructure for sponge city: water and energy nexus. *Water-Energy Nexus*, 3 (n.d), 29–30. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.03.003>
- Szeląg, B., Łagód, G., Musz-Pomorska, A., Widomski, M.K., Stránský, D., Sokáč, M., Pokrývková, J. and Babko, R. 2022. Development of Rainfall-Runoff Models for Sustainable Stormwater Management in Urbanized Catchments. *Water*, 14(13), p.1997. doi: Cited 14 July 2024. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14131997>
- Tahmasebi, H. , Heydari, M. T. , Vaezi, M. and Rasoulzade, Z. (2022). Explain The role of NGOs in increasing social resilience against the Corona pandemic(Case study: Tabriz city). *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 9(4), 1079-1102.[in persian] <https://doi.org/10.22059/jurbangeo.2021.322716.151>
- Twyman, B. (2025). Sponge Cities: A Comparison of Urban Stormwater and Flood Management Programs in China and the United States (Master's thesis, Tufts University). <https://www.scitepress.org/Papers/2024/133373/133373.pdf>
- Uzoqov, B. (2024). Application of Sponge City concept to address the issues of stormwater management in urban areas: Prohlis, Dresden. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2024091925364>
- Wang, J., Zhou, L., Han, P., & Li, G. (2020). The impact of urbanization and LID technology on hydrological effect. *Journal of Coastal Research*, 104(SI), 14-22. <https://doi.org/10.2112/jcr-si104-004.1>
- What is a sponge city? - Internet Geography, accessed June 12, 2025, <https://www.internetgeography.net/what-is-a-sponge-city/>

- Wu, Y. G. (2016). *Sponge City Design: Concept, Technology & Case Study*. Jiangsu. Phoenix Science Press. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479858.031>
- Xia, J., Zhang, Y., Xiong, L., He, S., Wang, L., & Yu, Z. (2017). Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China. *Science China Earth Sciences*, 60, 652-658. <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-016-0111-8>
- Yang, D., Zhao, X. and Anderson, B.C. 2022. Integrating Sponge City Requirements into the Management of Urban Development Land: An Improved Methodology for Sponge City Implementation. *Water*, 14(7), p.1156. Cited 18 July 2024. Available at: <https://doi.org/10.3390/w14071156>
- Yin, D., Chen, Y., Jia, H., Wang, Q., Chen, Z., Xu, C., Li, Q., Wang, W., Yang, Y., Fu, G. and Chen, A.S. 2021. Sponge city practice in China: A review of construction, assessment, operational and maintenance. *Journal of Cleaner Production*, 280(280 (2021) 124963), p.124963. Cited 04 July 2024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124963>
- Yu, K. (2015). "Sponge City": Theory and Practice. *City Planning Review*. 39 (6): 26–36. Retrieved 2020-12-15. <https://www.turenscape.com/topic/en/spongecity/index.html>
- Yu, K. (2017). Green infrastructure through the revival of ancient wisdom. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*, 70(4), 35-39. <https://scispace.com/pdf/green-infrastructure-through-the-revival-of-ancient-wisdom-3mxzjhgfvcv.pdf>
- Zevenbergen, C., Fu, D., & Pathirana, A. (2018). Transitioning to sponge cities: Challenges and opportunities to address urban water problems in China. *Water*, 10(9), 1230. <https://doi.org/10.3390/w10091230>
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R.B. and Oleson, K. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, [online] 511(7508), pp.216–219. Cited 2 June 2024. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature13462>

