

Analyzing the Natural and Human Causes of the Mashhad Flood and Ways to Prevent

Mohsen Hamidianpour ¹

1. Associate Professor, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: mhamidianpour@gep.usb.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The city of Mashhad, with a population of more than 3 million people, ranks as Iran's second-largest city. To enhance its resilience against environmental hazards, the adoption of new technologies is increasingly essential. On May 26, 1403, during a 48-minute rain due to the formation of a cumulonimbus cloud and the strengthening of its ascending conditions by a Trough on top of it, a flood occurred in the city of Mashhad led to heavy financial and human losses in different areas. This study aims to explore both natural and human factors contributing to the flood through a holistic approach. To analyze the synoptic meteorological causes, data from the ERA-5 and its maps were utilized in GrADS. Additionally, Landsat satellite imagery and digital elevation data were employed to identify waterways and canals. Google Earth and GEE software were also used to assess changes in the landscape. The results showed that in terms of intensity and duration of rainfall, the rainfall was unprecedented rainfall, and according to the threshold of 95% percentile, it is considered as extreme rainfall category (above 95% percentile). The results of this study clearly show that human encroachments, especially in urban construction and the expansion of urban roads and highways perpendicular to the seasonal and dry rivers of the city, have strongly affected the water flow pattern and increased the risk of floods. The neglect of urban geomorphology, including the destruction of natural water pathways, the construction of barriers against water flows ways like those in the Seyyedi region, and the expansion of roads perpendicular to these waterways, was intensified flooding issues in various areas in Mashhad city.
Article history: Received: 28 August 2024 Revised: 8 Octoberr 2025 Accepted: 23 October 2024 Published: 21 November 2025	
Keywords: Urban Flood, Enviromntal Hazards, Extream Events, Physical geography, Mashhad City.	

Cite this article: Hamidianpour, M (2025). Analyzing the natural and human causes of the Mashhad flood and ways to prevent. *Journal of Geography and Planning*, 31 (93), 151-169. <http://doi.org/10.22034/gp.2024.63109.3296>



© The Author(s).

Publisher: University of Tabriz.

DOI: <http://orcid.org/10.22034/gp.2024.63109.3296>

Introduction

Natural hazards are catastrophic phenomena originating from atmospheric, geological, and hydrological processes. These hazards encompass earthquakes, floods, volcanic eruptions, landslides, tsunamis, and droughts (Smith, 2009, Watson et al., 2007). Flooding and drought represent two extremes of a singular issue (Hamidianpour, 2012). Floods manifest when water levels in rivers, streams, dry canals, and underground conduits exceed their normative thresholds due to specific conditions, such as intense precipitation. When water surpasses the designed capacity of these systems and inundates anthropogenic areas, it results in damage or disruption to essential life-support systems. This may include temporary interruptions in transportation networks (such as roads, highways, and public thoroughfares), commercial activities, industrial operations, or even urban recreational spaces (Jha et al., 2011; Sayyad et al., 1400). Urban flooding presents a significant and escalating challenge for both developed and developing countries (Hossain and Meng, 2020 ;Josipovic and Viergutz, 2023 ; Nsangou et al., 2022). From 1990 to 2022, 4713 floods have been recorded in 168 countries; which has affected more than 2.3 billion people and has also caused the death of almost 200 thousand people and has been responsible for more than 1.3 trillion dollars in economic damage. Following the flood event on May 15, 2024, accompanied by substantial precipitation, the city of Mashhad demonstrated an inadequate capacity to manage the influx of rainfall. The urban flood management systems remain underdeveloped and vulnerable, leading to significant human and economic repercussions. This study aims to investigate the underlying factors contributing to this incident.

Materials and Methods

The geographical focus of this research is the city of Mashhad, situated between longitudes 59°15' to 60°36' and latitudes 35°43' to 37°8', within the Kashafrud River valley, bordered by the Binalood and Hezar Masjed mountain ranges. To fulfill the objectives of this investigation, daily meteorological data from the Mashhad synoptic weather station were analyzed for the statistical period from September 1951 to August 2024. In addition, Landsat 7 and 8 satellite data were utilized to analyze the historical development of construction in Mashhad. This analysis was conducted using programming within the Google Earth Engine environment, leveraging the database provided by Pesaresi and Politis (2023). To extract existing waterways and channels, a Digital Elevation Model (DEM) was created, and various algorithms available in ArcMap software were employed. The study adopted an analytical-descriptive and semi-experimental methodology, incorporating quantitative techniques through Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing. For drought evaluation, the Standardized Precipitation Index (Z normal) developed by Edwards and McKee (1997) was applied. Additionally, precipitation thresholds were determined using the 95th and 99th percentile methods. A rainy day was defined as any day with recorded precipitation exceeding 1 mm, as referenced by Hamidianpour (2014) and Alijani et al. (2014). To calculate the rainfall return period, EasyFit software was employed to fit over 50 statistical distributions to the data. Ultimately, the three-parameter Weibull distribution was identified as the most suitable model for this analysis. This comprehensive approach provides a robust framework for understanding the factors contributing to the flooding event in Mashhad and aids in developing strategies for improved urban flood management.

Results

The average annual rainfall in Mashhad is recorded at 244.54 mm. The highest rainfall was observed during the water year 1965 (Sep) - 66 (Aug), reaching 425.79 mm, while the lowest was only 92 mm in the water year 2014 (Sep) - 2015 (Aug). Recent years have seen significant drought conditions, particularly in the water years 2021 (Sep) - 2022 (Aug) and 2022 (Sep) - 2023 (Aug), with the most severe drought occurring in 1976 (Sep) - 77 (Aug). A significant flooding event took place on May 26, 1403, when heavy rain of 38 mm fell within just 45 minutes. This intense rainfall exceeds the 99th percentile threshold, categorizing it as an extreme weather event. The rainfall was attributed to the influx of convective clouds and Mediterranean weather systems, which brought high humidity into the region, particularly influenced by a cold front. This interaction resulted in the formation of thick cumulonimbus clouds, leading to increased precipitation intensity. Geographically, Mashhad's urban development has historically centered around the Kashafrud River and nearby villages, such as Sanabad and Noghan, as well as holy shrine of Imam Reza, located about 1.5 km from Sanabad. Over time, the city expanded from these initial settlements towards the southern foothills. Most urban construction has concentrated in areas 7, 8, 9, and 12, reflecting the city's growth trajectory and its relationship with surrounding waterways. The most important natural drain and drainage channel of Mashhad city is the Kashafrud River (290 km), which reduces the risk of flooding and water ponding in Mashhad city in particular. This river originates from the mountains of Hazar Masjed and Binalud, and after passing through Mashhad, it joins Harirud River. Due to the increase in population and the digging of unnecessary wells, this river has dried up and has water only during floods. The old canals of Mashhad have also undergone changes due to urban development and many of them have been removed or turned into concrete canals. As one of the most important culverts of the city, Iqbal culvert plays a vital role in collecting runoff and reducing the risk of flooding.

Based on field observations and reports disseminated through official media outlets, the locations and districts that experienced incidents, damage, and fatalities—specifically twelve individuals as reported by municipal authorities in Mashhad—during the flood include: Seyedi neighborhood, Enghelab Square, Televizion Square (Jumhuri), the terminal vicinity, Hor Street, Namazi Boulevard, the intersection of Jahad and Esteghlal, Shahid Kaveh Boulevard, Shahid Naseri Boulevard, and the Sarafrazan area.

Conclusion

The flood of May 1403 in Mashhad can be attributed to a combination of factors, primarily linked to urbanization and land use changes. Key contributors included:

1. Unauthorized Constructions: Many buildings were erected without proper oversight or adherence to regulations, particularly in vulnerable areas. These constructions often obstructed natural water flow.
2. Development on Riverbanks specially dry and seasonal rivers: Structures built along the edges of rivers (e.g. Roads) and other waterways disrupted their natural paths, increasing the risk of flooding when heavy rains occurred.
3. Poor Drainage Planning: Inadequate drainage systems and poor in underpasses. This lack of foresight exacerbated the flooding situation during intense rainfall events.
4. Blockage of Waterways: The obstruction of main waterways due to urban development further hindered the natural drainage processes, leading to accumulation of water and subsequent flooding.
5. Land Use and Land Cover Change (LULC): The rapid growth of urban areas transformed the landscape, reducing permeable surfaces and increasing runoff. This shift was identified as a significant factor contributing to the flooding.

Overall, the interplay between urbanization and environmental management practices played a critical role in the severity of the flood, highlighting the need for better planning and infrastructure to mitigate future risks. Addressing these issues through sustainable urban development and effective drainage systems is essential for reducing vulnerability to similar events in the future.

Keywords: Urban Flood, Environmental Hazards, Extreme Events, Physical Geography, Mashhad City.

واکاوی دلایل طبیعی و انسانی سیلاب شهر مشهد و راهکارهای پیشگیری

محسن حمیدیان پور^۱

۱. دانشیار، اقلیم شناسی در برنامه ریزی محیطی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران، زاهدان. رایانامه: mhamidianpour@gep.usb.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ کلیدواژه‌ها: سیلاب شهری، مخاطرات محیطی، رویدادهای فرین، جغرافیای طبیعی، شهر مشهد.	شهر مشهد با جمعیتی بیش از ۳ میلیون نفر دومین کلان شهر ایران محسوب می‌شود و جهت افزایش تاب‌آوری آن نسبت به مخاطرات محیطی نیاز به فن‌آوری‌های جدید بیشتر احساس می‌شود. در روز ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۳ طی بارش ۴۸ دقیقه‌ای در اثر تشکیل یک ابر کومولونیمبوس و تقویت شرایط صعودی آن توسط ناوهای بر گستره‌ی آن، در شهر مشهد سیل جاری شد و منجر به خسارت مالی و جانی سنگین در مناطق مختلف گردید. این مطالعه سعی دارد با رعایت اصل کل‌نگر دلایل طبیعی و انسانی آن را تشریح نماید. در این راستا جهت بررسی دلایل هواشناسی سینوپتیک از داده‌های شبکه ERA-5 و ترسیم نقشه‌های آن در گِردس (GRADS) استفاده شد. علاوه بر آن از تصاویر ماهواره‌ای لندست (LANDSAT) و داده‌های ارتفاع رقومی منطقه جهت استخراج آبراهه‌ها و مسیل بهره گرفته شد. همزمان از نرم‌افزار گوگل ارث و همچنین GEE جهت ارزیابی تغییرات نیز استفاده شد. نتایج نشان داد بارش مدنظر از لحاظ شدت و مدت بارندگی جزو بارش‌های بی‌سابقه بوده، ولی به لحاظ میزان بارندگی در دسته بارندگی‌های فرین (بالاتر از صدک ۹۵ درصد) محسوب می‌شود. نتایج این مطالعه به وضوح نمایانگر آن است که دخل و تصرف‌های انسانی، به ویژه در ساخت و سازهای شهری و گسترش جاده‌ها و اتوبان‌های شهری عمود بر بستر رودخانه‌های فصلی و خشک شهر، به شدت بر روی الگوی جریان آب تأثیر گذاشته و موجب افزایش خطر سیلاب‌های شهری شده است. بی‌توجهی به ژئومورفولوژی شهر از جمله تخریب مسیل‌ها، ایجاد موانع در برابر جریان‌های آب (مانند منطقه سیدی) و گسترش جاده‌های عمود بر این آبراهه‌ها، منجر به تشدید حوادث سیلاب در مناطق مختلف شهر مشهد شد.

استناد: حمیدیان پور، محسن (۱۴۰۴). واکاوی دلایل طبیعی و انسانی سیلاب شهر مشهد و راهکارهای پیشگیری. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۳۱ (۹۳)، ۱۶۹-۱۵۱.



<http://doi.org/10.22034/gp.2024.63109.3296>

© نویسنده‌گان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

بلایای طبیعی رویدادهای فاجعه‌باری با منشأ جوی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی هستند. این بلایا شامل زمین لرزه، سیل، فوران آتشفشان، رانش زمین، سونامی و خشکسالی است (اسمیت^۱، ۲۰۰۷، واتسون^۲ و همکاران، ۲۰۰۷؛ آقایی و همکاران، ۱۴۰۳). سیل و خشکسالی دو روی یک سکه‌اند (حمیدیان‌پور، ۱۳۸۲). سیلاب زمانی اتفاق می‌افتد که آب رودخانه‌ها، نهرها، مسیل‌های خشک و تونل‌های آبی تحت شرایط ویژه مانند بارندگی‌های سهمگین از شرایط عادی خود خارج شده، و آب از ظرفیت نرمال سیستم‌ها فراتر رود و در نهایت با سرازیر شدن آن در محوطه‌های انسان‌ساز، منجر به خسارت و یا اختلال در سیستم زندگی مانند قطعی موقت سامانه حمل‌ونقل (خیابان‌ها، بزرگراه‌ها و معابر عمومی)، تجارت، صنعت و یا حتی تفریحات شهری شود (جها^۳ و همکاران، ۲۰۱۱؛ صیاد و همکاران، ۱۴۰۰). سیل شهری یک چالش نگران‌کننده در حال رشد برای کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه است (نسانگو^۴ و همکاران، ۲۰۲۲؛ یوسیپویچ و ویرپوتس^۵، ۲۰۲۳؛ حسین و منگ^۶، ۲۰۲۰؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۱). به عنوان مثال بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱، رویدادهای فرین اقلیمی باعث خسارت تجمعی ۱۴۵ میلیارد یورویی در آلمان شد یعنی به طور متوسط هر ساله خسارتی در حدود ۶/۶ میلیارد یورو به آلمان وارد شده است (یوسیپویچ و ویرپوتس، ۲۰۲۳). از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۲، ۴۷۱۳ سیل در ۱۶۸ کشور ثبت شده که بیش از ۳/۲ میلیارد تن را تحت تاثیر قرار داده، باعث مرگ تقریباً ۲۰۰ هزار تن شده و مسئول بیش از ۱/۳ تریلیون دلار خسارت اقتصادی بوده است. منطقه اقیانوس آرام غربی بیشترین افراد آسیب دیده از سیل (بیش از ۲ میلیارد) را داشته است که ۶۳/۱۹٪ از کل جمعیت آسیب دیده را شامل می‌شود. منطقه جنوب‌شرق آسیا بیشترین مرگ و میر (۷۱۷۱۳ تن در حدود ۳۲/۸۴ درصد) را داشته است. مناطق آفریقا و شرق مدیترانه بیشترین تعداد افراد آسیب دیده و کشته شده توسط سیل را به ازای هر ۱۰۰۰۰۰ تن در سال ۲۰۲۲ داشتند. احتمال وقوع سیل که باعث مرگ بیش از ۵۰ تن شود در کشورهای کم‌درآمد به طور قابل توجهی (نسبت شانس تعدیل شده: ۱۴/۳۴) در فاصله اطمینان ۹۵٪ برابر است با ۷/۴۶ تا ۳۰/۰۴) در مقایسه با کشورهای با درآمد بالا بیشتر بود (لیو^۷ و همکاران، ۲۰۲۴). این موضوع درباره کشور ایران نیز مستثنی نیست. آنچه از آمار بیان شده در بالا دریافت می‌شود، بیانگر این مطلب است که بارش‌های سنگین به ویژه در کشورهای در حال توسعه به طور معمول حکم شمشیر دولبه را دارند، یعنی نمی‌توان گفت کدام لبه‌اش برنده است. بدین معنی که بارش‌های بهار امسال در بیشتر نقاط ایران (به استناد نظرات اغلب پژوهشگران) «خوب» و به تفسیری «حول و حوش میانگین دراز مدت» یا بیشتر از آن بوده‌اند. این همان لبه نخستین شمشیر است، یعنی چنین وضعیتی امیدبخش و خوش‌بینانه است و می‌توان به ذخیره آب در ذخیره‌گاه‌هایی مانند سدها و یا حتی ذخیره آب‌های زیرزمینی امیدوار بود. اما لبه تیز این شمشیر خطرناک است. در کشورهایی که نظام مدیریتی، قدرت و توانایی مدیریت منابع آب و خاک را ندارند یا ضعیف هستند، این قبیل بارش‌ها بیش از آن که مفید به فایده باشند، به پدیده‌هایی ویرانگر و غیرقابل استفاده تبدیل می‌شوند. حتی یک بارش ۳۰-۴۰ میلی‌متری می‌تواند در این کشورها زندگی را دچار مخاطره کند. خسارت ناشی از سیل در تجریش تهران (۴ مرداد ۱۳۶۶)، سیل گلستان (۲۰ مرداد ۱۳۸۰)، سیل شهر قم (۱۳۸۸)، آق‌قلا (۲۶ اسفند ۱۳۹۷)، پل دختر (۵ فروردین ۱۳۹۸)، حادثه رخ داده در ورودی شهر شیراز- دروازه قرآن (۵ فروردین ۱۳۹۸)، سیل در مورخ ۳۰ دی ۱۳۹۵ در سیستان و بلوچستان (رودخانه کاجو)، سیل در شمال غرب ایران در مورخ ۲۵ فروردین ۱۳۹۶، سیل در شمال و شمال شرق ایران در ۱۹ مرداد ۱۳۹۶ در ۵ استان، سیلاب تابستان ۱۴۰۱ در جنوب شرق ایران (بلوچستان) و نمونه‌های فاجعه‌بار آن طی سال‌های اخیر است.

1- Smith

2 Watson

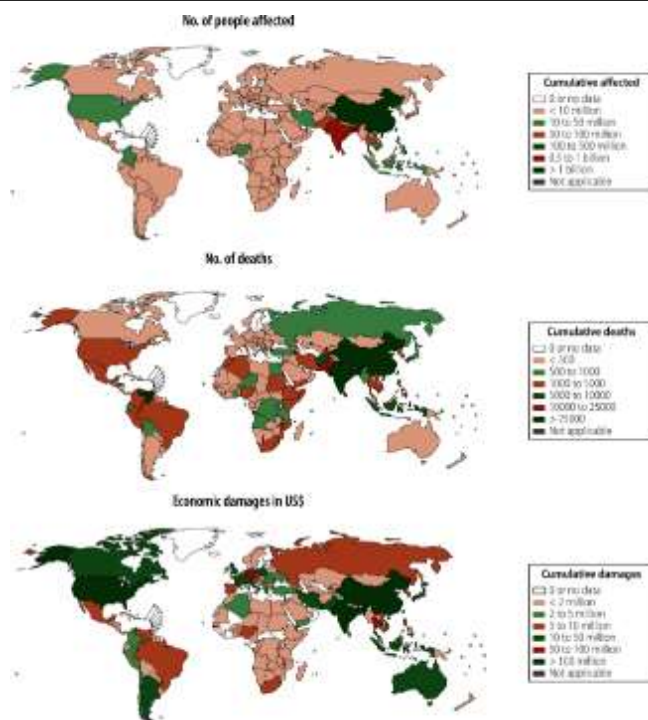
3 Jha

4-Nsangou

5- Josipovic and Viergutz

6-Hossain and Meng

7-Liu



شکل ۱. تأثیر تجمعی سیل‌های طبیعی بر اساس کشور، ۱۹۹۰-۲۰۲۲ (منبع: لیو و همکاران، ۲۰۲۴)

پیشینه پژوهش

در همین راستا بدینا (۲۰۲۳) علت غالب سیلاب شهری را عوامل انسانی می‌داند. یا در شهر دودولا^۱ (جنوب شرقی اتیوپی)، سیستم‌های زهکشی موجود نمی‌تواند خطرات سیل مورد انتظار ناشی از تغییر جزئی در شدت بارندگی آینده را مدیریت کند (بی‌بی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). این در حالی است که در کشورهای پیشرفته تقریباً هر روزه فن‌آوری پیشرفته در راستای مدیریت منابع و بهره‌گیری از انرژی‌ها یا منابع در بوتۀ آزمایش قرار می‌گیرد و نتایج آن در صورت مثبت بودن، به نفع مردم به کار گرفته می‌شود. به بیانی دیگر، برای کاهش سیل، شهرها باید استراتژی‌هایی را برای رسیدگی به علل انسانی، مانند اجرای سیستم‌های زهکشی پایدار، اجرای قوانین ساختمانی، و بهبود سیاست‌های برنامه‌ریزی شهری اولویت‌بندی کنند (بدینا^۳؛ ۲۰۲۳؛ تکلا^۴؛ ۲۰۱۴). راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت^۵ (NBS)، سیستم‌های زهکشی پایدار شهری^۶ (SUDS) و برداشت آب باران^۷ (RWH)، علاوه بر کاهش خسارت سیل دارای مزایای اقتصادی و افزایش ارزش اکولوژیکی نویدبخش است (ژانگ^۸؛ ۲۰۲۴؛ ژو^۹ و همکاران، ۲۰۲۴؛ جمالی و همکاران، ۲۰۱۹). NBS به ویژه برای رویدادهای بارندگی با فرکانس بالا موثر است و مزایای اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی بیشتری را ارائه می‌دهد (هوانگ^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰). سیستم‌های RWH می‌توانند خسارت سالانه مورد انتظار سیل را تا ۳۰ درصد در برخی مناطق کاهش دهند (جمالی و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین فن‌آوری‌های هوشمند مانند پایش بلادرنگ، مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده و سیستم‌های هشدار اولیه می‌توانند کنترل سیل را افزایش داده و خسارت را به حداقل برسانند (پیرو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۳). رزق‌الله^۱ و همکاران، (۲۰۲۳) با بهره‌گیری از فناوری خورشیدی-

1- Dodola

2- Bibi

3-Baddianaah

4-Thecla

5- Nature-Based Solutions (NBS)

6- Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)

7- RainWater Harvesting (RWH)

8- Zhang

9-Zhou

10-Huang

11-Piro

پیژوالکتریک و کشاورزی روی پشت بام سعی در معرفی روش‌های نوآورانه جهت تحقق شهرهای تاب‌آور در جلوگیری از سیل و کاهش بحران‌های غذایی می‌باشند. این چنین راه‌حل‌های سبز و طرح‌های نوآورانه می‌توانند مزایای گوناگونی از جمله کاهش خطر سیل، ذخیره آب و افزایش تنوع زیستی را به همراه داشته باشند (مندز، ۲۰۱۴). در ایران نیز مطالعاتی در این باره انجام شده است که هدف اصلی آن کاهش اثرات سیل‌های شهری است. به عنوان نمونه عرب و همکاران (۱۴۰۲)، اقدام به پیش‌بینی خطر سیل‌گیری شهر مشهد با استفاده از روش یادگیری ماشین جنگل تصادفی نمودند؛ نتایج آن‌ها نشان داد مدل مورد استفاده دارای دقت زیادی در تعیین مناطق حساس به وقوع سیل در حوضه شهر مشهد است. عبداللهیان و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از تحلیل فضایی نسبت به تبیین کاربری‌های آسیب‌پذیر در مقابله با بحران‌های غیرطبیعی شهر مشهد اقدام نمودند و بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته برخی پهنه‌های آسیب‌پذیر، وضعیت مناسبی از منظر معیارها مورد بررسی نداشتند. رستمی خلج و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند متغیره خط سیلاب را در شهرک امام علی شهر مشهد پهنه‌بندی می‌نمایند و ضمن تایید، روش چند متغیره آن‌ها نتیجه می‌گیرند که حدود ۲/۸ درصد از منطقه مورد مطالعه در پهنه پتانسیل خطر بیشتر قرار دارند. یا در همین باره، هزاره و باخزری قزلحصار (۱۳۹۷)، منطقه ۹ شهرداری مشهد را در برابر خطر سیل پهنه‌بندی می‌نمایند. طبق نتایج آن‌ها شش متغیر فاصله از ارتفاع، مسیل، تراکم جمعیتی، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی موثر بر خطر سیلاب شهری موثر هستند و توزیع جغرافیایی خطر سیلاب بیشتر در مناطق جنوب و جنوب غرب منطقه ۹ است، این مهم همراه با بافت فرسوده و حاشیه‌نشینی همراه است که خطر سیلاب را نیز افزایش می‌دهد. البته نباید از مشارکت مردم محلی و بسترهای اجتماعی در اولویت‌بندی عوامل موثر بر مدیریت قبل از وقوع سیلاب فراموش نماییم (مطیعی‌لنگرودی و همکاران، ۱۳۹۱). با وجود پژوهش‌های گوناگون، در پی وقوع سیلاب روز ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۳ و بارش لحظه‌ای، شهر مشهد نشان داد بار تحمل بارش سنگین را نداشته و همچنان مدیریت شهری درباره سیلاب ضعیف و شکننده است، به طوری که این بارش موجب خسارت جانی و مالی شد. این نوشتار در پی واکاوی دلایل این رخداد است. در واقع این پژوهش تلاش دارد با تحلیل یک رویداد رخ داده در گذشته به تحلیل و تفسیر آن بپردازد و علت و چرایی آن را مشخص نماید و نسبت به معرفی برخی از روش‌های نوین با استفاده از تجربه دیگر کشورها نسبت به کاهش خطرات احتمالی آینده گام بردارد. در این راستا پرسش‌های زیر مطرح است:

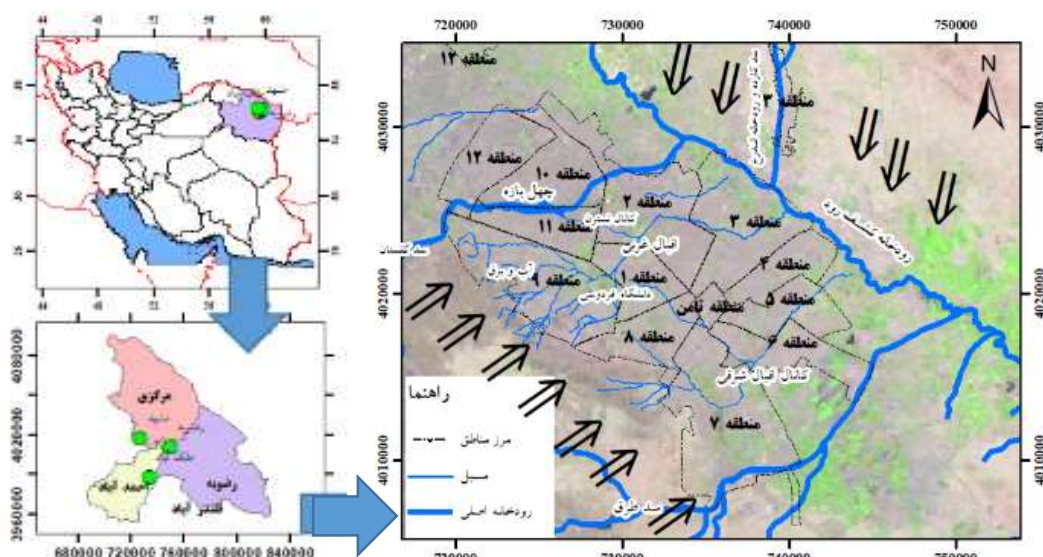
۱- آیا بارش اخیر جزو بارش‌های حدی محسوب می‌شوند؟ و بر اساس داده‌های دراز مدت آیا این بارش‌ها بی‌سابقه بوده‌اند یا خیر؟

۲- آیا خسارت ناشی از سیلاب با تغییرات کاربری اراضی و تخریب مراتع بالادست و همچنین بی‌توجهی به مسیل‌ها مرتبط است؟

۳- در شهرهای بزرگی مانند مشهد از چه زیرساخت‌هایی جهت افزایش تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات محیطی همچون سیل استفاده می‌شود؟

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شهر مشهد است. این شهر به عنوان مرکز شهرستان مشهد در استان خراسان رضوی در در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۸ دقیقه و در حوضه آبریز کشف‌رود قرار دارد (شکل ۱). مشهد با ۱۳ منطقه شهری و مساحت شهری ۳۴۳۴۵ هکتار، دومین شهر پهناور ایران پس از تهران (با ۷۳۵ کیلومتر مربع مساحت شهر) است. همچنین براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مشهد با ۳۰۶۲۴۲ تن جمعیت، دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران و نود و پنجمین شهر پر جمعیت دنیا به‌شمار می‌رود. این شهر به واسطه وجود حرم امام رضا^(ع) سالانه پذیرای بیش از ۲۷ میلیون زائر از داخل و دو میلیون زائر از خارج از کشور است (آمارنامه شهر مشهد، ۱۴۰۰).



شکل ۱. موقعیت شهر مشهد و مناطق ۱۲ گانه آن نسبت به رودخانه کشف‌رود و سرشاخه‌های فرعی، مسیل‌ها و کانال‌های موجود

روش پژوهش

جهت پاسخ به پرسش‌های پژوهش از داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مشهد طی دوره آماری ۱۳۳۰-۳۱ تا ۱۴۰۱ استفاده شد. جدول ۱ مختصری از وضعیت اقلیمی شهر مشهد را نشان می‌دهد. بر این اساس مشهد دارای اقلیم خشک و سرد است. افزون بر آن از داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ استفاده شد. جهت ترسیم روند توسعه تاریخی ساخت و ساز در شهر مشهد از برنامه‌نویسی در محیط گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) مبتنی بر بانک اطلاعاتی ارائه شده توسط پسارسی^۱ و پولیتیس^۲ (۲۰۲۳) استفاده شد. ضمن این‌که جهت استخراج آبراهه‌ها و مسیل‌های موجود از نقشه DEM و الگوریتم‌های موجود در نرم‌افزار ArcMap استفاده گردید.

روش مطالعه تحلیلی-توصیفی و نیمه‌تجربی است و برای تقویت روش مطالعه سعی شده است از روش‌های کمی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور استفاده شود. به منظور ارزیابی وضعیت خشکسالی از شاخص استاندارد بارش (Z نرمال) استفاده شد.

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که Z ضریب خشکسالی نرمال شده، X_i مقدار بارندگی سالانه در سال i ام است و $\bar{X}$ و σ به ترتیب نمایانگر متوسط درازمدت بارندگی و انحراف معیار آن طی دوره آماری است. مقادیر منفی نمایش دهنده خشکسالی می‌باشند (ادواردز و مک‌کی، ۱۹۹۷). جهت پاسخ به پرسش اول یعنی بررسی حدی بودن بارش، از روش تعیین آستانه ۹۵ و ۹۹ استفاده شد. در این بخش روز بارشی به روزی اطلاق شد که بارش بیشتر از ۱ میلی‌متر ثبت شده باشد (حمیدیان‌پور، ۱۳۹۵؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۹۳). صدک‌ها آستانه‌هایی هستند که دامنه تغییرات داده‌ها را به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم می‌نمایند. صدک (۱۰۰p) ام داده‌ای است از مجموعه داده‌ها که اگر آن‌ها را به ترتیب صعودی مرتب کرده باشیم، (۱۰۰p) درصد داده‌ها از آن کوچک‌تر و $[100(1-p)]$ درصد داده‌ها از آن بزرگ‌تر باشند (قانقرمه و همکاران، ۱۳۹۷). آستانه‌ها بر اساس روابط زیر محاسبه گردیدند (روحبخش و همکاران، ۱۳۹۷):

$$\text{Percentile} = N * P$$

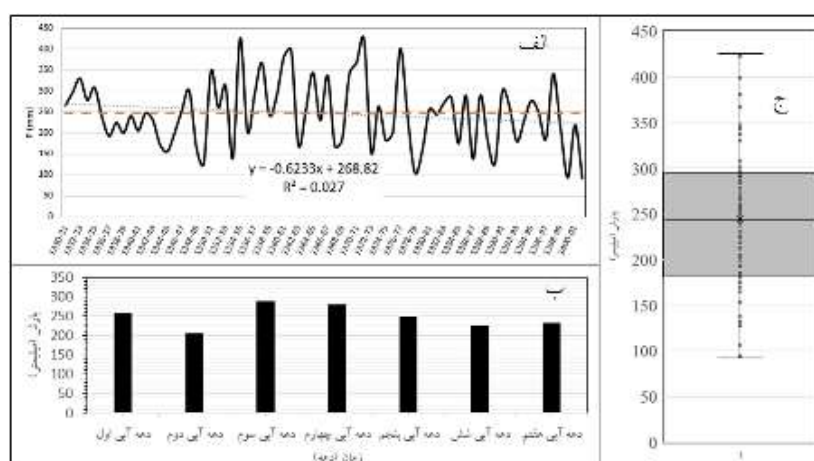
رابطه ۲

در این رابطه ۱، N برابر تعداد داده‌ها، P برابر با صدک ۹۵ (آستانه بارش فرین) می‌باشد.

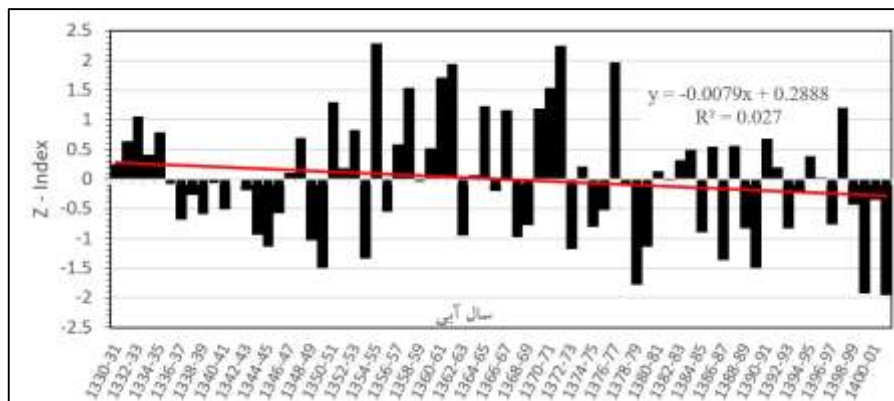
به منظور پاسخ به پرسش دوم همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های موجود در نرم افزار ArcGIS بهره برده شد و ضمن استخراج آبراهه‌ها و مسیل و رویهم‌اندازی با ساخت‌ها و سازه‌های دهه‌ی اخیر نسبت به خسارت پیش‌آمده و علت آن به صورت توصیفی به تفسیر پرداخته شد. جهت محاسبه دوره بازگشت بارندگی از نرم افزار EasyFit و برازش بیش از ۵۰ توزیع آماری استفاده شده است. در نهایت روش توزیع ویبول سه پارامتری به عنوان بهترین توزیع انتخاب شد.

نتایج

شکل (۲) ویژگی‌های آماری شهر مشهد را بر اساس ایستگاه سینوپتیک شهر مشهد نشان می‌دهد. شکل الف نمایانگر تغییرات سالیانه بارندگی مشهد طی یک دوره ۷۰ ساله (۱۴۰۰-۱ تا ۱۳۳۰-۳۱) است. بر این اساس بیشترین بارش دوره در سال آبی ۱۳۴۴-۴۵ با مقدار ۴۲۵/۷۹ میلیمتر (م.م) و کمترین بارش دوره در سال آبی ۱۳۹۲-۹۳ با مقدار ۹۲ م.م. باریده است. متوسط بارندگی شهر مشهد ۲۴۴/۵۴ م.م. محاسبه شده است (شکل ج.۲). البته ضریب تغییرات بارش حدود ۳۲ درصد (۰/۳۲) است. این بدین معنی است که بارش‌های سالیانه به طور متوسط حدود ۳۲ درصد میانگین بالاتر یا پایین‌تر از میانگین در نوسانند. منحنی تغییرات بارش سالانه یک دوره تناوبی تقریباً ۸ تا ۱۰ ساله را نشان می‌دهد و روند کاهش نسبتاً ضعیفی در مقدار بارش سالانه مشاهده می‌گردد. آنچه حائز اهمیت است مشاهده مقادیر بارشی کم طی سال‌های اخیر است. بر این اساس مجموع بارش‌ها به صورت دوره ۱۰ ساله جهت اینکه بتوان چشمانداز بهتری از روندها ترسیم نمود. بر این اساس از دهه ۶۰ به بعد بارش از روند کاهشی برخوردار بوده است. البته در دهه‌ی اخیر مقدار بارش نسبت به دهه‌ی قبل مقداری کمی افزایش نشان داده شده است. تمام این موارد بعضاً خود مسبب فراموشی میزان بارش به ویژه در برنامه‌ریزی‌های بی‌ضابطه می‌باشد. شکل ۳ به خوبی روند بارش را با استفاده از شاخص خشکسالی نمایش می‌دهد. بر اساس این شکل مشخص می‌گردد که منطقه مورد مطالعه دوره‌های خشکسالی و ترسالی متعدد را پشت سر گذاشته است. شدیدترین ترسالی مربوط به سال آبی ۱۳۵۴-۵۵ و شدیدترین خشکسالی در سال‌های اخیر مانند ۱۴۰۱-۰۲ و همچنین ۱۳۹۹-۰۰ رخ داده است. البته تقریباً از سال آبی ۱۳۷۹-۷۸ تا سال‌های اخیر منطقه مورد مطالعه عمده‌تاً دوره‌های خشکسالی را تجربه کرده است و از شدت بالاتری نسبت به دوره‌های گذشته برخوردار بوده است. این در حالی است که دوره‌های ترسالی نیز از شدت کمی برخوردار بوده‌اند. خط قرمز بر روی نمودار مربوطه مربوط به روند خطی این پدیده است. با توجه به شیب این خط نشان می‌دهد که شدت خشکسالی در منطقه رو به افزایش است. این موارد خود بر عدم آمادگی منطقه نسبت به بارش شدید و لحظه‌ای تشدید می‌کند.



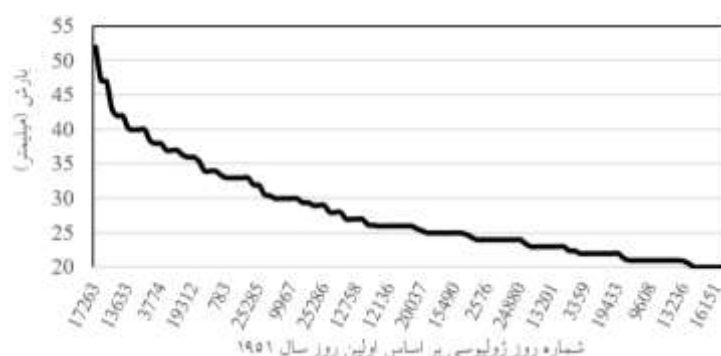
شکل ۲. ویژگی‌های آماری شهر مشهد بر اساس ایستگاه سینوپتیک مشهد



شکل ۳. سری زمانی خشکسالی بر اساس ایستگاه سینوتیک شهر مشهد (دوره آماری ۳۱-۱۳۳۰ تا ۱-۱۴۰۱)

بررسی تاریخی بارش و سیلاب در شهر مشهد

مقدار بارش اخیر طی ۴۵ دقیقه در حدود ۳۸ م.م. گزارش شده است. بر اساس داده‌های روزانه مقدار آستانه صدک ۹۵ و ۹۹ درصد به ترتیب حدود ۳۳ و ۱۹ م.م. محاسبه شد. این مقدار بارش از جمله بارش‌های شدید و حتی بالاتر از صدک ۹۹ درصد بوده است (یعنی اگر صد مورد داشته باشیم فقط یک مورد چنین بارشی داشته است). ضمن اینکه مدت زمان کوتاه آن را نیز باید در نظر داشته باشیم. اما نکته حائز اهمیت این است که شهر مشهد بر اساس داده‌های ثبت شده تجربه این مقدار بارش و حتی بیشتر را نیز داشته است. بر اساس داده‌های ۷۰ ساله ایستگاه هواشناسی مشهد، بیشترین بارش رخ داده روزانه حدود ۵۲ م.م. در سال ۱۹۹۸ (فروردین ۱۳۷۷) رخ داده است. شکل (۴) بارش‌های بالاتر از ۲۰ م.م. را برای شهر مشهد بر اساس ایستگاه مشهد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد این شهر شاهد بارش‌های بیشتر از ۳۸ م.م. طی یک روز بوده است. البته داده‌های هواشناسی در طول ۵۰ سال قابل بررسی است. لذا به منظور درک بهتر از شرایط بارشی دوره‌های بازگشت باران بر اساس بارندگی متوسط سالانه و همچنین بیشتر بارش ۲۴ ساعته نیز محاسبه شده است. نتایج در جدول (۱) آورده شده است. بر اساس شواهد و مستندات در سال‌های مانند ۱۳۲۹ سیلاب سنگین باعث خسارت زیاد به شهر مشهد شده است. خرداد ۱۳۲۹، سیلی از کوه‌های جنوبی که شهر در مقابلش است، شروع می‌شود و از ملک‌آباد در غرب به پایین‌خیابان و شرق مشهد می‌رسد و شهر را در هم می‌کوبد. روزنامه خراسان آن زمان می‌نویسد: «سیل مهیب قسمت وسیعی از شهر مشهد را ویران ساخت و هزاران نفر مصیبت‌زده، ویلان و سرگردان باقی گذاشته است. تاکنون این چنین وحشت و اضطراب و قهر طبیعت در مشهد دیده نشده بود و...». در گذشته خندق ایجاد شده در پیرامون شهر مانع خسارت ناشی از سیلاب می‌گردید. اما با افزایش جمعیت و توسعه شهری در دوره پهلوی و گسترش بافت شهر خارج از خندق موجب شد که با یک رگبار، خانه و هستی مردم در نواحی جنوب شهر، دستخوش سیل گردد. این موقعیت باعث می‌شده است هر یکی دو دهه یک بار سیل مشهد را تهدید کند؛ چنان‌که در طول یک قرن از دوره قاجار تا پایان دوره پهلوی دست‌کم پنج بار به‌علت نزول باران شدید، سیل در سال‌های ۱۳۰۳ قمری، ۱۲۹۳ خورشیدی، ۱۳۱۳ خورشیدی، ۱۳۲۹ خورشیدی، در شهر جاری و باعث وارد آمدن زیان به مردم و تأسیسات آن شده است. در نهایت ۲ سال بعد از این حادثه کانال اقبال توسط شهردار وقت احداث می‌گردد (روزنامه خراسان؛ ۱۳۲۹). در حال حاضر کانال اقبال یکی از معبرهای اصلی انتقال سیلاب به رودخانه کشف‌رود محسوب می‌گردد.



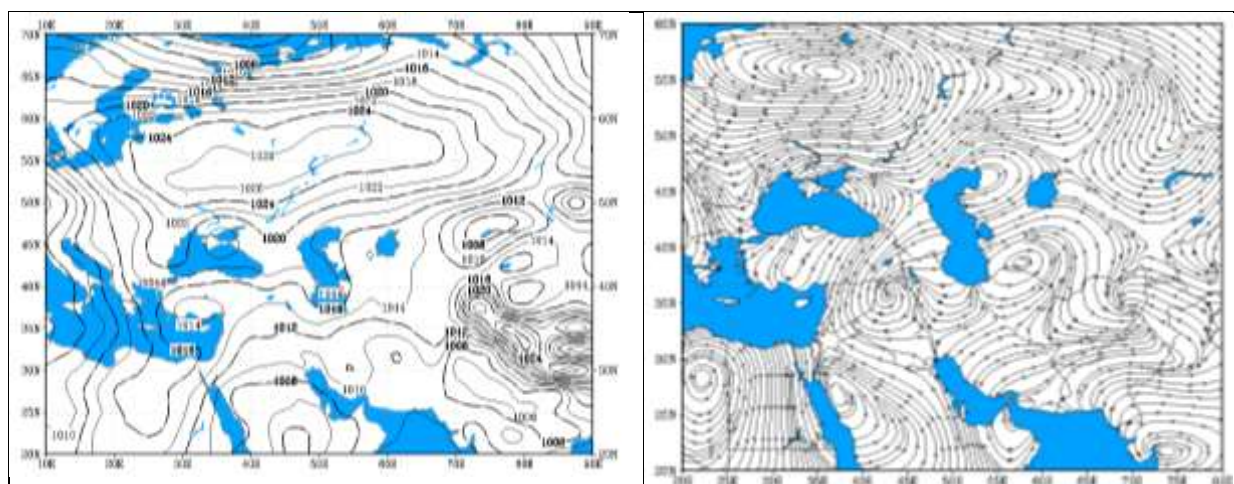
شکل ۴. رویدادهای بارشی بیشتر از صدک ۹۵ (اولین روز سال آبی ۳۱-۱۳۳۰ به عنوان شماره یک و روز آخر سال آبی ۱-۱۴۰۰ به عنوان شماره ۲۶۶۳۳ در نظر گرفته شده است)

جدول ۱. دوره بازگشت بارندگی بر اساس ایستگاه سینوپتیک مشهد طی دوره آماری مورد مطالعه

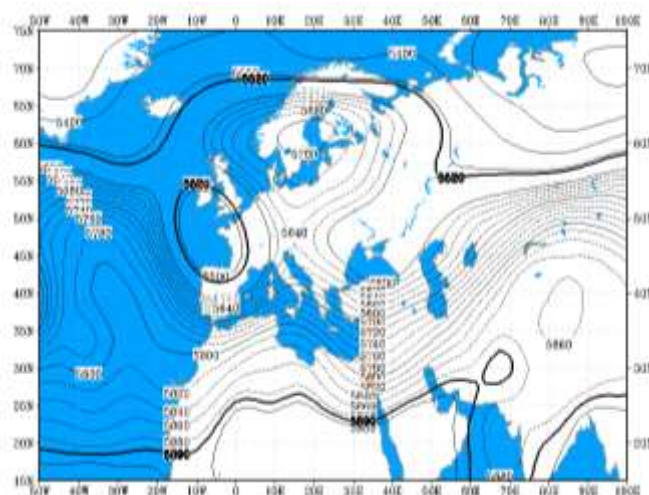
دوره بازگشت	بارندگی متوسط سالانه (م.م)	حداکثر بارش ۲۴ ساعته (م.م)
۲	۲۲۱/۴۴	۳۴/۱۰
۵	۲۹۷/۳۲	۴۱/۰۰
۱۰	۳۵۴/۷۲	۴۷/۹۰
۲۰	۴۱۲/۱۲	۵۰/۱۲
۲۵	۴۳۰/۶۰	۵۳/۴۷
۳۰	۴۴۵/۷۰	۵۷/۰۲
۵۰	۴۸۷/۰۰	۵۹/۶۳
۷۵	۵۲۱/۵۸	۶۱/۰۵
۸۵	۵۳۱/۹۴	۶۲/۳۰
۱۰۰	۵۴۵/۴۰	۶۳/۹۱

تحلیل سینوپتیک بارش ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۳

چهارشنبه ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۳ خیلی آرام و بدون هیچ‌گونه حادثه‌ای شروع شد. اما این روز آرام در طی چند ساعت تبدیل به روزی شد که طی کمتر از یک ساعت رویداد جوی جان ۷ هموطن را گرفت و خسارت زیادی به زیرساخت‌های شهری و سرمایه ساکنین در مناطق مختلف شهر مشهد وارد نمود. روز چهارشنبه به دلیل ورود ابرهای همرفتی به همراه امواج مدیترانه‌ای رطوبت زیادی به منطقه تزریق شد. این رطوبت به صورت یک جبهه سرد وارد بخش‌های شمال شرق ایران گردید. ویژگی جبهه‌های سرد وجود بارش‌های رگباری، شدید و درشت دانه است. در واقع توفان‌های تندری شدید بیشتر با بالا آمدن سریع آب همراه هستند. معمولاً این بارش‌ها از واماندگی و یا حرکت آهسته توفان‌های تندری می‌باشند که با بارش باران‌های سنگین بر فراز منطقه‌ای کوچک همراه می‌باشند. این رطوبت نیاز به صعود قویتر برای شدت یافتن نیاز داشت که توسط یک ناوه بسیار عمیق با یک حلقه بسته به صورت سردچال در قسمت راست یک سامانه بلاکنیگ امگا تامین گردید (شکل ۶). طول این ناوه عمیق تقریباً نیمی از ایران را تا نیمه‌های جنوبی آن در بر گرفته بود. منحنی بسته آن روی شمال غرب دریای خزر تشکیل شد. که موجب دو شاخه شدن بادهای غربی و ریزش هوای سرد به منطقه و به تبع افزایش شیب تغییرات دمایی شده است. جلوی ناوه (شرق سردچال) شرایط صعود هوا به سبب واگرایی بالایی مهیاست. پس سامانه همرفتی همراه با یک جبهه سرد توسط یک سامانه تراز بالایی حالت دینامیکی گرفته و شدت بیشتر برای صعود و ابرهای ضخیم کومولونیمبوس را فراهم نمود. شهر مشهد درست در قسمت منطقه PVA این سامانه قرار گرفته است.



شکل ۵. توزیع فشار تراز ۱۰۰۰ ه.پ. (سمت چپ) و خطوط جریان در تراز ۸۵۰ ه.پ. (سمت راست) در روز ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۳



شکل ۶. توزیع ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ ه.پ. در روز رخداد سیل ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۳

رودخانه کشف رود به عنوان زهکشی اصلی و طبیعی

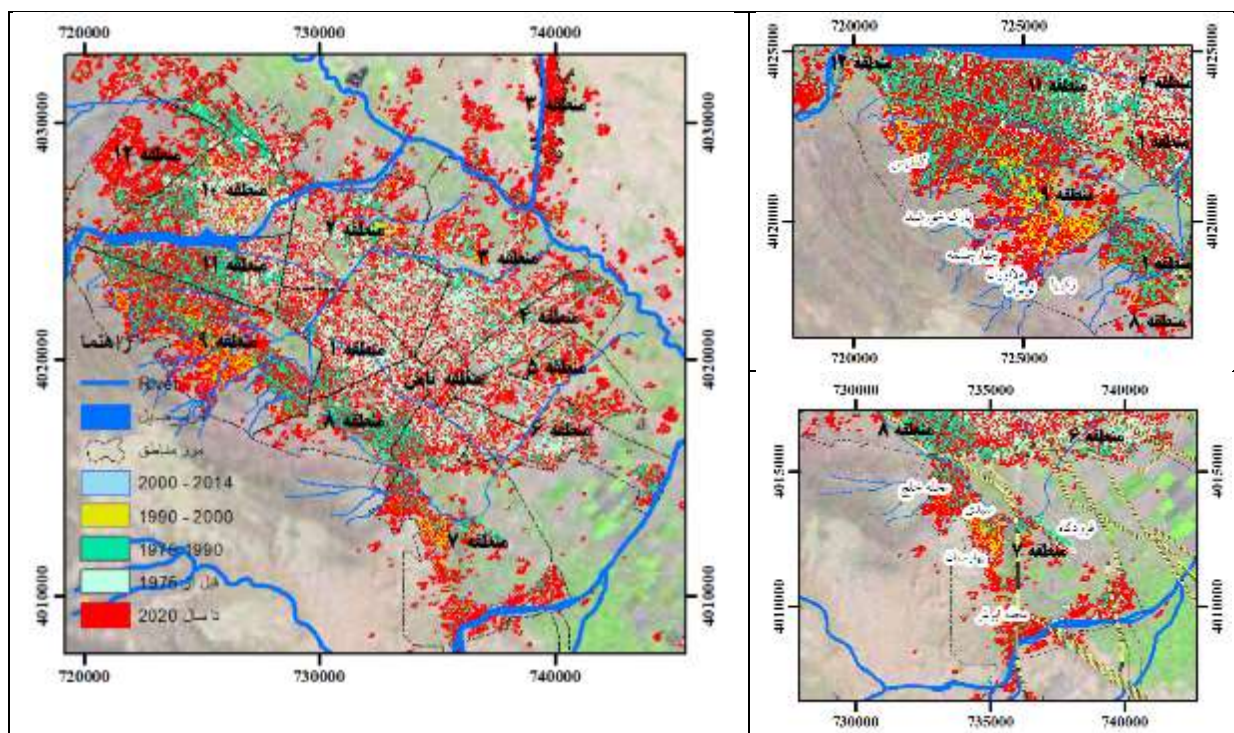
کشف‌رود، در میان دره‌ی کشف‌رود خراسان رضوی و در قسمت شمالی کلان شهر مشهد جاری است. طول رودخانه کشف رود ۲۹۰ کیلومتر است. این رودخانه از مشرق به شهر قوچان و از کوه‌های هزار مسجد، بینالود و کوه‌های قطار اولنگ فریمان سرچشمه می‌گیرد. شهرستان‌های گلپهر و چناران نیز در حوضه این رودخانه قرار دارند. این رود پس از عبور از مشهد، در محل پل خاتون سرخس، به رودخانه هریرود می‌پیوندد از تلاقی این دو رود، رود تجن شکل گرفته که این محل، مرز بین دو کشور ایران و ترکمنستان را تشکیل می‌دهد. پس از ادامه مسیر به سمت شمال و عبور از روستاهای شیرتپه، سنگر، نوروزآباد، دولت‌آباد و قوش سربزی، این رود وارد شهر سرخس می‌گردد و در شمال این شهر در پاسگاه جهانبانی از مرز ایران خارج شده و وارد خاک جمهوری ترکمنستان می‌شود و سرانجام در نزدیکی شهر تجن در ریگزارهای قره‌قوم فرو می‌ریزد (افشین، ۱۳۶۷؛ کیهان، ۱۳۱۱؛ خادمیان ۱۳۸۰). آنچه حائز اهمیت است رودخانه مذکور اکنون به دلایل افزایش جمعیت، حفر چاه‌های بی‌رویه، احداث سد و بعضاً خشکسالی خشک شده است و فقط در مواقع سیلاب دارای آب است و در طول سال پساب شهری در آن جاری است. که موضوع اخیر خود یکی از معضلات دیگر شهر مشهد است. از جمله سدهای مهم بر روی این رودخانه و سرشاخه‌های آن می‌توان به سد شورجه، اسجیل، گلستان، مادیان، اخمد، کارده، طرق و ارداک اشاره کرد که از آب این سدها برای کشاورزی و شرب استفاده می‌شود کشف‌رود به عنوان رودخانه‌ای طغیانی شناخته می‌شود که میزان آبدی سالانه آن بین ۶۷ تا ۷۲ میلیون متر مکعب در ثانیه می‌باشد (افشین، ۱۳۶۷؛ کیهان، ۱۳۱۱؛ خادمیان ۱۳۸۰). رودخانه کشف رود معبر طبیعی

خروج رواناب‌ها از سطح شهر را میسر می‌سازد و خطر سیلاب و مانداب آب در شهر مشهد را بطور ویژه کاهش می‌دهد. این امر بر اهمیت رودخانه کشف‌رود جهت کاهش خطر سیلاب در شمال و شمال‌شرق مشهد بسیار حیاتی است. قاعدتاً هر گونه دخل و تصرف و دست‌کاری بدون برنامه و شناخت رودخانه خطر سیلاب را در مناطق همجوار با رودخانه افزایش می‌دهد. رودخانه‌های فصلی همچون شاندیز، طرqbه، طرق و ... از ارتفاعات بینالود نیز با مسیری جنوب‌غربی - شمال‌شرقی به این رودخانه سرازیر می‌شوند و همین رویه یعنی افزایش خطر سیلاب در صورت دخل و تصرف درباره رودخانه‌های فصلی و همچنین مسیل‌های خشک نیز متصور است. باید یادآور شد که رودخانه‌های فرعی و مسیل‌های متصل به کشف‌رود به صورت فصلی و بعضاً خشکه‌رود محسوب می‌شوند. کلان شهر مشهد با وسعت ۲۲۰ کیلومترمربع، ۲۱ کانال و مسیل را در خود دارد و کانال‌های اصلی هدایت آب‌های سطحی هم در آن بالغ بر ۳۰ مورد است، که تقریباً همه آن‌ها از داخل شهر امروزی مشهد هم عبور می‌کردند که در سالیان گذشته و کمتر از دو دهه اخیر بسیاری از آن‌ها دیگر وجود خارجی ندارند و یا اگر وجود دارند هم به شکل چندپاره بوده و در عمل نمی‌توان تصور کرد شاهد عبور آب از همان مسیر قدیمی باشیم. در واقع با توجه به توسعه شهر، رودخانه‌ها و بعضاً مسیل‌ها تبدیل به کانال‌های خاکی یا بتنی و یا بعضاً حذف شده‌اند. از جمله مهم‌ترین مسیل‌های قدیمی مشهد می‌توان به مسیل آب و برق، اقبال شرقی و اقبال غربی، چهل بازه، قره خان، نهرنادری، کال دروی و مسیل نسترن اشاره کرد. از جمله بزرگ‌ترین مسیل‌های شهر مشهد که تأثیر بسزایی در جمع‌آوری و دفع رواناب‌های سطح مشهد و حاشیه آن دارد، مسیل اقبال است (شکل ۷). این مسیل بخش اعظم رواناب سطحی مسیل‌های فرعی و آبراهه‌های کوچک واقع در دامنه‌های ارتفاعات بینالود که به سمت شمال جریان دارند را جمع‌آوری می‌نماید. مسیل مذکور به صورت کمربندی ایمنی اطراف شهر مشهد را احاطه نموده و در حوالی کوهسنگی به دو شاخه شرقی و غربی تقسیم می‌شود. شاخه‌ای از این مسیل که از کوهسنگی به سمت شرق امتداد دارد به مسیل اقبال شرقی یا مسیل دور مشهد معروف است. مسیل اقبال شرقی با حوضه آبریزی در حدود ۱۳۸۵۰ هکتار یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین مسیل‌های کلان‌شهر در حال گسترش مشهد بوده که شامل هشت مسیل اصلی و ۲۱۳ زیرحوضه با تاسیسات متعدد شهری است (امینی یزدی و فغفورمغربی، ۱۴۰۲). علاوه بر آن می‌توان به مسیل آب و برق نیز اشاره کرد که شامل یک مسیر اصلی و چند شاخه فرعی است که یکی از این شاخه‌ها از نظر حوضه و طول مسیر نسبت به بقیه قابل توجه است. این شاخه اصلی از مسیر اصلی کال آب و برق از باغ‌های پاچنار در مجاورت اراضی برونسی سرچشمه گرفته و در طی مسیر خود در جنوب بلوار وکیل‌آباد - لادن - صیاد شیرازی - آب و برق - هفت تیر - هنرستان - هاشمیه و کوثر را قطع نموده و پس از عبور از بلوار شهید باهنر وارد اراضی دانشگاه فردوسی شده و با مسیل‌های اراضی نجفی و چهارچشمه در داخل دانشگاه ادغام می‌شود. پس از ورود به باغ ملک‌آباد در ابتدای بلوار خیام در مسیل اقبال غربی تخلیه می‌گردد که در نهایت کل دبی آن به کشف رود وارد می‌شود. مسیل اقبال غربی از ادغام مسیل‌های آب و برق - فرعی دانشگاه فردوسی - چهارچشمه و کوثر ۲۳ در محدوده اراضی دانشگاه فردوسی مشهد به وجود آمده که پس از عبور از باغ ملک‌آباد و بلوار ملک‌آباد در حاشیه بلوار خیام طی مسیر نموده و در مجاورت مسجد قبا با کال نسترن ادغام می‌شود و در جهت شمال شرقی و به موازات بلوار خیام امتداد یافته و در حوالی آپارتمان‌های مرتفع مسیل چهل بازه فرعی به آن متصل می‌شود و پس از عبور از عرض صد متری کمربندی و خیابان‌های خواجه‌ربیع و جاده سیمان در محدوده کوی دروی مجدد به سمت شمال‌شرق تغییر مسیر می‌دهد و در نهایت به کشف‌رود متصل می‌شود. مسیل نادری که تقریباً از میانه‌های دشت مشهد مانند بلوار قرنی تا حرم امام رضا^(۴) در جریان بوده است امروز به دلیل ساخت و سازهای شهری دیگر شاهد آن نباشیم. یکی دیگر از مهم‌ترین مسیل‌هایی که عمدتاً رواناب داخل محدوده شهر را جمع‌آوری می‌کند کال قره‌خان است. ابتدای کال قره‌خان در سال‌های گذشته از داخل باغ ملک‌آباد شروع می‌شده است، اما پس از پرشدن قسمت‌های ابتدایی آن و ساخت منازل مسکونی روی مسیل، اکنون کال قره‌خان از واسط خیابان فلسطین شروع شده و در امتداد جنوب‌شرقی به مسیر خود ادامه می‌دهد. اما همان‌گونه که ذکر شده، بخش‌هایی از این کانال دیگر وجود خارجی ندارد و قسمت‌های موجود در بخش‌هایی که تغییر کاربری پیدا کرده و به انبار یا هر چیز دیگری تبدیل

شده، دیگر کاربرد اصلی را ندارد و جای کانال قدیمی را ساختمان‌های چند طبقه گرفته است. مسیل چهل‌بازه یکی از مهم‌ترین مسیل‌های موجود در شمال و شمال غرب مشهد است. این مسیل در واقع آبراهه اصلی رودخانه‌های بالادست گلستان بوده و هم اکنون نیز غیر از جمع‌آوری و دفع رواناب‌های حاصل از بارندگی حوضه‌هایی از شهر مشهد، جریان خروجی از سرریز سد گلستان را نیز به رودخانه کشف‌رود هدایت می‌کند.

سیر تاریخی ساخت و سازها در مشهد

شکل (۷) روند ساخت و ساز را در شهر مشهد نمایش می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد هسته مرکزی شهر مشهد علاوه بر رودخانه کشف‌رود، وجود روستاهای همچون سناباد، نوغان و همچنین محل دفن امام رضا^(ع) در ۱/۵ کیلومتری روستای سناباد می‌باشد. در حال حاضر این منطقه تحت عنوان منطقه ثامن شناخته شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود سیر تاریخی شهر مشهد به صورت پیرامون این دو روستا شکل گرفته و در طول زمان به نواحی کوهپایه‌ای جنوبی رسیده است. بیشتر ساخت و سازهای شهری در مناطق ۹، ۸، ۱۲ و ۷ رخ داده است.



شکل ۷. توسعه شهر مشهد از سال ۱۹۷۶ تا دوره اخیر. شکل کوچک بالا برشی از منطقه ۹ و شکل پایین برشی از منطقه ۷ برای وضوح بهتر می‌باشد.

مکان‌های حادثه دیده و دچار خسارت

بر اساس مشاهدات میدانی و گزارشات منتشر شده در روزنامه‌های رسمی از جملات نقاط و محلاتی که در سیل مشهد دچار سانحه، خسارت و متاسفانه مرگ (۱۲ تن بر مبنای آخرین اخبار اعلام شده از سمت مدیران شهر مشهد) شدند عبارتند از: محله سیدی، میدان انقلاب، میدان تلویزیون (جمهوری)، محدوده ترمینال، خیابان حر، بلوار نمازی، تقاطع جهاد و استقلال، بلوار شهید کاوه و بلوار شهید ناصری، منطقه سرافرازان (شکل ۸).



شکل ۸. موقعیت شهر مشهد و پراکنش جاده‌ها، مسیل‌ها و مناطق آسیب دیده

میدان انقلاب

یکی از نقاط بحرانی سیل اخیر مشهد مربوط به میدان انقلاب حوالی ترمینال در جنوب شهر مشهد است. همانطور که در شکل (۹) دیده می‌شود خشک‌رودها (خطوط آبی) با رسیدن به بزرگراه شهید کلانتری قطع شده‌اند و هیچ راهی برای خروج و یا هدایت به سمت یک کانال هدایت کننده و در نهایت زهکش آنها به رودخانه کشف‌رود را ندارند. این خشک‌رودها در حالت عادی هیچ آبی ندارند ولی به هنگام بارش‌های شدید و لحظه‌ای مانند آنچه که در بارش اخیر متأسفانه مشاهده شد. بهترین معبر عبور و جاری شدن آب هستند. در این مکان موضوع دیگری نیز بر شدت فاجعه افزود و متأسفانه منجر به مرگ چند تن گردید. آب‌ها پس از سرریز شدن به سمت بزرگراه و عدم هدایت به کانال‌های زهکش و هدایت کننده، در زیرگذر منطقه جمع شدند و همین امر منجر به گیر افتادن شهروندان شده و در نهایت فاجعه غم‌انگیز رخ داد. در واقع علت اصلی فوت شهروندان در این منطقه عدم وجود یا نامناسب بودن زهکش‌ها، عدم سامانه هشدار دهنده و غافلگیر شدن افراد از سرریز شدن حجم زیادی از بارش در چند لحظه بوده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته حدود ۱۵ میلیون متر مکعب حجم آب باران برآورد شده است که عمدتاً بدلیل بارش ۵ میلی‌متری روز قبل و اشباع سطح زمین، بصورت رواناب جریان پیدا کرده است (نیکزاد و بیت‌اللهی، ۱۴۰۳).



شکل ۹. حوالی میدان انقلاب

بلوار شهید کاوه و بلوار شهید ناصری

بلوار شهید ناصری و پل روگذر بلوار شهید کلانتری نیز از جمله نقاط بحرانی بودند. بر اساس مشاهدات میدانی از کانال‌های اصلی و فرعی و تصاویر ماهواره‌ای مشخص گردید که کانال هدایت کننده رواناب شهری اقبال از جمله کانال‌های مهم جنوب

شهر مشهد محسوب می‌شود و وظیفه این کانال جمع‌آوری و هدایت رواناب مناطق جنوب و جنوب‌غرب مشهد را به عهده دارد، از حول و حوش کوه‌سنگی در امتداد بزرگراه کلانتری و سپس از زیر بلوار فرودگاه عبور کرده و در نهایت آب این کانال به کشف رود تخلیه می‌شود (شکل ۱۰). مناطق جنوبی مشهد در طول دهه‌های اخیر در معرض رشد شهرنشینی و به تبع افزایش خدمات شهری مانند جاده‌سازی بوده است. آنچه محرز است در بلوار شهید کاوه و بلوار شهید ناصری بعد از احداث جاده و بلوارهای عمود یا حتی بر روی مسیل‌ها، بنابراین مسیل‌های طبیعی جمع‌آوری آب‌های سطحی تخریب و حذف شده و هیچ کانال جایگزین هم برای هدایت آب‌های حاصل از سیلاب‌های ناگهانی نیز احداث نشده و بنابراین پس بارش ناگهانی، حجم زیادی آب از مسیر بلوار وارد بزرگراه شهید کلانتری شده است. هزاره و قزل‌الحصار (۱۳۹۷)، طی پژوهشی نشان داده‌اند که توزیع جغرافیایی خطر سیلاب بیشتر در جنوب و جنوب غرب منطقه ۹ است، و با توجه به جمعیت حاشیه‌نشین و همچنین بافت‌های فرسوده پتانسیل خطر سیل شدیدتر نیز است و به مدیران شهری جهت پیش‌گیری و آمادگی مراحل پیش از بحران آمادگی لازم در حوزه‌های مرتبط پیشنهاد و هشدار داده‌اند.

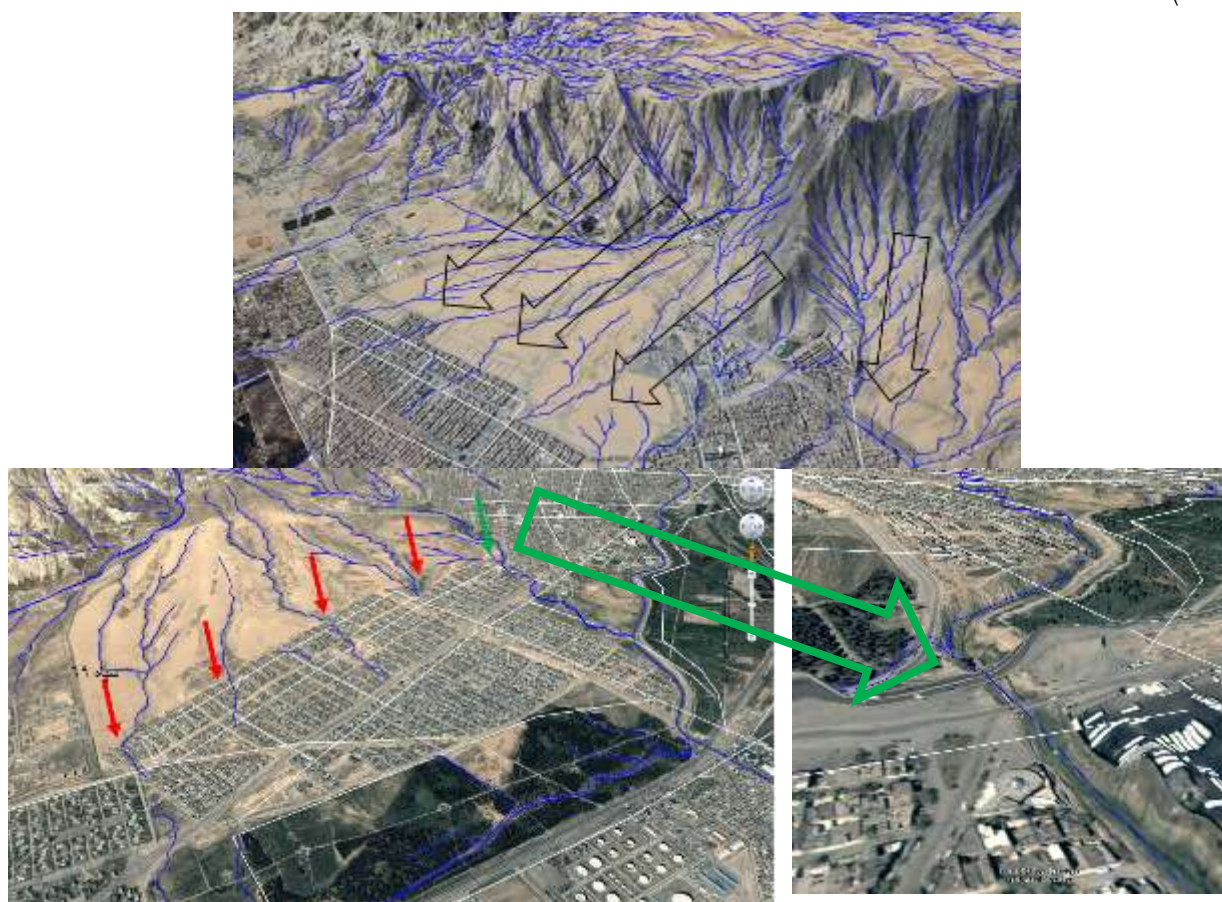


شکل ۱۰. انتهای بلوار نماز، بلوار شهید ناصری و بلوار کاوه

سیدی (بلوار سپاه)

بلندی‌های جنوب‌غرب مشهد تحت عنوان ارتفاعات خلیج و سنگر به طور طبیعی روان‌آب‌های حاصل از بارندگی را به دو مسیر زهکشی اصلی شامل طرّقه در شمال غرب و طرق در جنوب شرق (جنوب فرودگاه مشهد) هدایت به رودخانه کشف‌رود و نقش اساسی در کاهش خطر سیلابی شدن را ایفا می‌نمایند. حوضه آبریز کوچک ارتفاعات سنگر و خلیج (مشرف به شهر مشهد از سمت جنوب) که آسیب‌های وارده به محله سیدی ناشی از تجمع آب در بخشی از این حوضه می‌باشد، دارای مساحت تقریبی ۱۰۰ کیلومتر مربعی است. حوضه مشرف به کوی سیدی ۱۰۰۰ هکتار، حوضه کوچک مشرف به شهرک بهارستان (جنوب فرودگاه مشهد) ۷۰۰ هکتار، حوضه مشرف به میدان انقلاب ۳۰۰ هکتار و وسعت دارد (نیکزاد و بیت‌اللهی، ۱۴۰۳). شکل (۱۱) مربوط به سال ۲۰۰۴ است. درست در منطقه‌ای که سیلاب روانه شده، معبر آب‌های جاری ناشی از بارش‌های شدید است. برای درک بهتر رودخانه‌ها، مسیل‌ها و خشک‌رودها به رنگ آبی نیز روی آن نمایش داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود به جز رود اول (پیکان سبز رنگ کوچک) که به کانال وارد می‌شود؛ مابقی مسیرهای آب با سازه‌های انسانی روبه‌رو هستند. شدت این حجم از رواناب با توجه به دیوارکشی شدیدتر نیز شده است. آب پس از تجمع در پشت دیوار شیب زمین را به سمت آخرین رودخانه طی کرده است. در واقع در صورت نبودن دیوارکشی مربوط قاعداً آب از کوچه‌های مختلف جاری می‌شد و با حجم و سرعت بیشتر از یک مکان و به صورت تجمعی تخلیه نمی‌گردید. در واقع با توجه به مورفولوژی کلی مشهد و آبراهه‌های اصلی آن و موقعیت قرارگیری ارتفاعات سنگر و خلیج در جنوب شهر، اگر مسیر آبراهه‌های اصلی شهر با مستحذات و دخالت‌های

غیرکارشناسانه انسانی دچار انسداد و یا تنگی مسیر نمی‌شد خطر سیل سهمگین در مشهد منتفی می‌شد. (نیکزاد و بیت‌اللهی، ۱۴۰۳).



شکل ۱۱. رودخانه‌های خشک و مسیل‌ها (خطوط آبی)، بخشی از کانال اقبال شرقی در مسیر رودخانه و مسیل (شکل سمت چپ). فقط مسیل با کانال سبز دارای کانال خروجی می‌باشد.

البته اینها تمام ماجرا نیست ولی عوامل اصلی تشدید کننده بحران و مرگ هموطنانمان می‌تواند باشند. امید است با زنده دانستن محیط طبیعی و احترام به ساختار پویای آن چنین رویدادهای دیگر در هیچ کجای جهان و از جمله ایران پدیدار نگردد. بایسته است بیان گردد در گذشته به ویژه در خصوص سیل سال ۱۳۲۹ در کتاب «تاریخ اقتصادی مشهد» نوشته علی نجف‌زاده و جلیل قصابی‌گزکوه، درباره سیل به وضعیت جغرافیایی مشهد اشاره و نوشته شده است که شهر در جلگه‌ای واقع شده که نشیب آن از شمال غربی به جنوب شرقی است. همچنین واقع شدن شهر در مسیر حوزه آبریز رودخانه‌های کوچک دامنه شمالی بینالود، باعث قرارگرفتن در مسیر سیلاب‌های فصلی شده است. از طرفی فرازونشیب زمین در قسمت جنوبی شهر به گونه‌ای بود که با یک رگبار باران، سیل جاری می‌شد. البته در این کتاب هم بر موضوع دخالت عوامل انسانی بر تشدید ویرانگری سیل اشاره و عنوان شده است: «یکی از عوامل اصلی سیل، پدیده‌های دست‌ساز یعنی مسیل و پل‌های روی آن بود؛ چون پل روی مسیل، گنجایش سیل را نداشته و چوب‌های بزرگ به طول ۸ تا ۱۰ متر با خاشاک پل را مسدود کردند. سپس فشار سیل، سد را شکسته و وارد کال قره‌خان کرده که در امتداد مسیر سابق خود به خندق سمت جنوب شهر وارد و موجب خرابی شده است». این بدین معنی است که با توسعه فیزیکی شهر مشهد و همچنین سرعت پیشرفت سرسام‌آور فن‌آوری پس از گذشت سه موج توسعه (کشاورزی،

صنعتی و عصر الکترونیک) (تافلر، ۱۹۸۰) و رسیدن به عصر مجازی (مهرگان، ۱۳۹۴) یا حتی عصر هوش مصنوعی، ولی مدیریت شهر مشهد با جمعیت بیش از ۳ میلیون نفر (ثابت) هنوز مانند سال ۱۳۳۰ مدیریت می‌شود.

بحث و نتیجه گیری

در بررسی علل وقوع و تشدید سیل اردیبهشت ۱۴۰۳ مجموعه‌ای از عوامل تاثیرگذار بوده است که نشان می‌دهد سازه‌های احداث شده در مسیرهای طبیعی رودخانه‌ها و دخالت‌های غیر کارشناسانه و عدم درنظر گرفتن زهکش در زیرگذرها و انسداد آبراهه‌های اصلی شهر به طور قطع موجب سیل سهمگین مشهد بوده است. به بیانی تغییر کاربری و پوشش زمین (LULC) ناشی از رشد شهرنشینی، مهم‌ترین عامل و مسبب سیلاب شهر شناخته می‌شود. زیرا با رشد شهرنشینی و به تبع در اثر تغییر کاربری‌های نفوذپذیر به سطوح نفوذناپذیر، موجب اختلال در سامانه‌های هیدرولوژیکی شهری شده و در پی آن سیلاب‌های شهری جاری خواهد شد (لو و ژانگ، ۲۰۲۲). این در حالی است که با رشد شهر به عنوان نمونه می‌توان به راهکارهای شامل ایجاد زهکشی شهری و کنترل و هدایت طغیان رودخانه‌های شهری، سیستم تقلیل سطوح غیرقابل نفوذ شهری مانند افزایش سطوح سبز، باغچه‌های بارانی، سیستم‌های جمع‌آوری آب باران و تصفیه آن برای استفاده مجدد اشاره نمود. با استفاده از چنین سیستم‌های می‌توان حجم آب مازاد را کاهش داد و حتی آب را به جریان‌های آب شهری بازگرداند (توچی، ۲۰۰۷). اقلیم دارای دو نوع رویداد منظم و بی‌نظم است. کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت اقلیمی صحیح است. در این راستا دو رویکرد فکری تحت عنوان رویکرد یکنواختی در راستای برنامه‌ریزی اقلیمی و رویکرد کاتاستروفیسم جهت مدیریت برنامه‌ریزی وجود دارد (عساکره، ۱۳۹۶). معرفی و شناسایی دلایل خسارت ناشی از سیل و ارائه راهکار، با همین رویکرد یعنی کمک به برنامه‌ریزی و مدیریت اقلیمی انجام می‌شود. در حوضه آبخیز کشف‌رود با گسترش و توسعه شهر بسیاری از آبراهه ها و مسیرهای طبیعی روان‌آب تغییر کاربری و یا حذف شده‌اند و مورد مشاهده می‌گردد هیچ کانالی برای انتقال روان‌آب تعبیه نشده است. به عنوان نمونه در میدان تلویزیون، بلوار شهید کاوه و بلوار شهید ناصری بعد از احداث خیابان و بلوار، مسیرهای طبیعی جمع‌آوری روان‌آب‌های سطحی تخریب شده و کانال جایگزین نیز احداث نشده است. بنابراین حجم زیادی روان‌آب از مسیر بلوار وارد بزرگراه شده است. به این موضوع اگر شدت بالای بارندگی و تجمع آب حاصل را در مناطق فاقد زهکشی و غیره بیفزاییم. خطر سیلاب در برخی نقاط دیگر نیز افزایش می‌یابد به عنوان نمونه می‌توان به پل‌ها و زیرگذرهای (زیرگذر میدان جهاد) احداث شده در مناطق شهری اشاره نمود. عدم توجه به ژئومورفولوژی (جهت و شیب کوهپایه‌های جنوبی که در دهه‌های اخیر دستخوش تخریب و تغییر شدید قرار گرفته است) و عدم رعایت حریم رودخانه‌ها (اعم از فصلی، خشک‌رودها و ...) و توسعه جاده‌های شهری در کوهپایه‌ها به صورت عمود بر مسیر آب‌های جاری شده از باران بدون توجه به احداث کانال‌های خروجی (مانند بلوار نماز)، ساخت و ساز بر روی بستر رودخانه‌ها و مسیرها و دیوارکشی‌های عمود بر مسیر آب مانند آنچه در منطقه سپاه ۶۹ رخ داد و عواملی از این دست اشاره داشت. خشک‌رود یک نوع سیستم زهکشی است که برای جلوگیری از تراکم آب در سیلاب‌های شهری استفاده می‌شود. خشک‌رودها و رودخانه‌های فصلی در اطراف شهرها نقش مهمی در کنترل سیلاب‌ها دارند. وقتی باران زیادی ببارد، آب به سمت خشک‌رودها و رودخانه‌های فصلی جاری می‌شود. این خشک‌رودها و رودخانه‌ها به عنوان مسیرهای طبیعی برای جریان آب عمل می‌کنند و آب را به سمت مناطق پست و خشک‌تر هدایت می‌کنند. به بیانی این رودخانه‌ها و خشک‌رودها می‌توانند به عنوان سیستم‌های زهکشی طبیعی عمل کنند و به کنترل سیلاب‌ها و کاهش خطرات ناشی از آن‌ها کمک کنند. به همین دلیل، حفظ و بهینه‌سازی خشک‌رودها و رودخانه‌های فصلی در اطراف شهرها بسیار اهمیت دارد. با توجه به رشد شهرنشینی مشهد طی سال‌های اخیر و تخریب سیمای طبیعی محیط برای تامین محلی برای سکنی گزیدن موجب کور شدن یا دستکم تغییر این چنین کاربری‌های شده است. در مطالعات پیشین در این باره هشدار داده شده است همچون وفایی و همکاران (۱۴۰۱) به صورت موردی با هدف بررسی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد پژوهش شده است و نتایج

1 - Luo and Zhang

2 - Tucci

آنها نشان داد کانال‌های موجود در محدوده مورد مطالعه فقط توانایی انتقال سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲ و ۱۰ ساله را دارد، ولی دوره بازگشت ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به علت ارتفاع کم پل‌ها در برخی مقاطع ورودی و محدود شدن مقاطع خروجی، دچار آب‌گرفتگی می‌شود. بر این اساس در محدوده خروجی انتهایی پردیس و کانال آب و برق، به دلیل وجود موانع مختلف، سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال به بالا و در قسمت‌هایی از کانال پژوهش به دلیل انحنا، مسیل، سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال به بالا ایجاد خسارت می‌کند. یا مطالعه هزاره و باخزری قزالحصار (۱۳۹۷) به توزیع جغرافیایی خطر سیلاب بیشتر در مناطق جنوب و جنوب غرب منطقه ۹ اشاره داشته‌اند. با توجه به توپوگرافی منطقه و مکان‌های در دسترس، احداث حوضچه‌های تاخیری بر روی مسیل‌های مانند اقبال شرقی و آب و برق به منظور کاهش دبی اوج و افزایش زمان اوج سیلاب ضروری است (اسماعیل‌پور مطلق، ۱۳۹۳؛ امینی‌یزدی و فغفورمغربی، ۱۴۰۲). با توجه به حضور حوضچه‌های کنترل سیلاب، آنها قادرند دبی اوج سیلاب را بین ۸ تا ۱۰٪ کاهش داده و ۱۲/۳۵ مترمکعب در ساعت آب را نفوذ دهند (تاج‌بخش و خداشناسی ۱۳۹۱).

منابع

- آقایاری، لیلا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد و زینالی، بتول (۱۴۰۳). شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع مخاطره سیلاب در شهرستان گرمی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. شماره مجله و شماره صفحات doi: 10.22034/gp.2024.60493.3235
- اخوان عبداللہیان، محمدرضا؛ سیدالحسینی، سیدمسلم؛ خنایی، تکتیم و محمدنیای‌قرائی، فاطمه (۱۴۰۱). تحلیل فضایی و تبیین مدل مکانیابی کاربری‌های آسیب‌پذیر در مقابله با بحران‌های غیرطبیعی (نمونه موردی: شهر مشهد). *جغرافیای سرزمین*. ۷۶(۱۹): ۳۶-۱۹.
- اسماعیل‌پور مطلق، احسان (۱۳۹۳). بررسی روش بهینه جمع‌آوری رواناب‌های سطحی ناشی از بارندگی‌های لحظه‌ای شهر مشهد، مطالعه موردی: مسیل اقبال شرقی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، استاد راهنما: مهدی اژدری مقدم استاد راهنما: سیدامین‌آرمان هاشمی منفرد استاد مشاور: حسین غفاریان روح‌پرور
- امینی یزدی مهدی، فغفور مغربی محمود (۱۴۰۲). بررسی استفاده از حوضچه تأخیری بر شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌وسیله شبیه‌سازی (مطالعه موردی: کال اقبال شرقی مشهد). *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*. ۱۱ (۲): ۱-۱۶
- تاج بخش، محمد و خداشناس، سعیدرضا (۱۳۹۱). بازنگری شبکه زهکشی رواناب سطحی با استفاده از شبیه‌سازی و کاربرد حوضچه‌های تأخیری (مطالعه موردی: حوضه آبریز اقبال شرقی، مشهد). *دانش آب و خاک*. ۲۲ (۱): ۱۲۳-۱۰۹
- تافلر، آلوین (۱۳۷۸). موج سوم. ترجمه شهیندخت خوارزمی، تهران: انتشارات علم.
- حمیدیان پور، محسن (۱۳۸۶). تحلیل دوره‌های خشکسالی دشت مشهد و میزان تاثیر آن بر منابع آب. *فصلنامه جنگل و مرتع*، شماره ۷۵. صص ۴۴-۵۰.
- حمیدیان‌پور، محسن (۱۳۹۴). تحلیل تغییرات فضایی زمانی تداوم بارش در ایران. پنجمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران. رستمی خلج، محمد؛ حسامی، دانا؛ سلمانی، حسین؛ تیموریان، تیمور (۱۳۹۸). پهنه بندی خطر سیلاب شهری با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند متغیره (مطالعه موردی: شهرک امام علی، شهر مشهد)، *نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۱(۱۱)، ۱۷۳-۱۸۵.
- جعفری، عباس (۱۳۸۴). گیتاشناسی ایران: کوه‌ها و کوهنامه ایران (جلد ۱)، موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی. تعداد صفحات: ۶۴۸.
- جعفری، عباس (۱۳۸۴). گیتاشناسی ایران: رودها و رودنامه ایران (جلد ۲)، موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی. تعداد صفحات: ۵۶۰.
- روحبخش سیگارودی، حسین علی؛ کرمپور، مصطفی؛ قائمی، هوشنگ؛ مرادی، محمد؛ آزادی، مجید (۱۳۹۷). بررسی بی‌هنجاری‌های میانگین دمای کمینه و بیشینه ایران در دوره گرم سال به‌منظور شناسایی دوره گرم و سرد. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۷(۳)، ۱۶۱-۱۸۷.
- صیاد، دانیال؛ قضاوی، رضا و امیدوار، ابراهیم (۱۴۰۰). ارائه استراتژی‌های مناسب مدیریتی زیرساخت‌های شهری در برابر سیلاب از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از SWOT و QSPM (مطالعه موردی: شهر کاشان)، *نشریه مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۴۲-۵۲.
- عرب، نرگس؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ میکائیلی تبریزی، علیرضا و ویت، توما (۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل خطر سیل‌گیری با استفاده از روش یادگیری ماشین جنگل تصادفی (مطالعه موردی: شهر مشهد). *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۰(۱)، ۱-۱۵.
- عساکره، حسین (۱۳۹۶). مبانی پژوهش در آب و هواشناسی. دانشگاه زنجان، چاپ اول، ۶۶۰ ص..
- علیجانی، بهلول؛ محمودی، پیمان؛ محمدی، عبدالمجید؛ شاه‌زئی، عبدالرئوف (۱۳۹۳). بررسی تداوم روزهای بارش در ایران زمین. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*. ۲۵(۴)، ۱-۱۶.
- قانقرمه، عبدالعظیم؛ روشن، غلامرضا؛ شاه‌کویی، اسماعیل (۱۳۹۷). بازنگری در تعیین دمای پایه آسایش حرارتی مناطق اقلیمی متفاوت ایران به منظور محاسبه شاخص درجه-روز مورد نیاز سرمایشی و گرمایشی. *سپهر*، دوره ۲۷، شماره ۱۰۵، صص: ۱۲۷-۱۴۳
- کارکنان وزارت جنگ انگلستان مستقر در هندوستان (۱۳۸۰). فرهنگ جغرافیای ایران، خراسان، ترجمه کاظم خادمیان. ج ۱، ص ۷۹۲.
- آستان قدس رضوی. بنیاد پژوهش‌های اسلامی - مشهد مقدس - ایران.

- کرمی، فریبا؛ بیاتی خطیبی، مریم و رستمی همای علیا، نرگس (۱۴۰۱). بررسی تاب آوری نواحی روستایی پیراشهری در برابر سیلاب (مطالعه موردی: برخی روستاهای دهستان میدان چای)، *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶ (۸۰)، ۲۷۱-۲۵۱.
- کیهان، مسعود (۱۳۱۱). جغرافیای مفصل ایران، سه جلدی، ج ۱، تعداد صفحات ۱۴۴۰.
- مرکز آمار ایران. (۱۳۸۶). ج ۱، ص ۳۲۱.
- مطیعی لنگرودی، سیدحسن؛ قدیری معصوم، مجتبی؛ اسکندری چوبقلو، حافظ؛ طورانی، علی و خسروی مهر، حمیده (۱۳۹۴). بررسی نقش مدیریت مشارکتی در کاهش آثار سیل (مطالعه موردی: روستاهای حوضه رودخانه زنگمار ماکو). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۹ (۵۱)، ۳۳۹-۳۱۱.
- مهرگان، علی (۱۳۹۴). موج چهارم؛ مروری بر موج‌های سه‌گانه تافلر. روزنامه نگاری الکترونیک. سال اول، شماره اول، زمستان.
- نیکزاد مینا و بیت‌اللهی علی (۱۴۰۳)، بررسی سیل مرگبار مشهد، ۱۵ روز بعد از وقوع / تخلفات گسترده موجب تخریب منازل و مرگ انسان‌ها شد. رکن، کدخبر: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳/۱۰۰۳۰۲۱ ۱۲:۴۸:۴۱ تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶
- هزاره، وحید و باخرزی قزالحصار، سیدمحمد. (۱۳۹۷). پهنه بندی خطر سیلاب شهری در منطقه ۹ شهرداری مشهد. *جغرافیا و روابط انسانی*. ۱۱۴۰-۱۱۵۸، (۲)۱.
- وفایی، مسعود؛ دستورانی، محمدتقی و رستمی خلج، محمد (۱۴۰۱). ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و ارائه سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل HEC-RAS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. ۳ (۳)، ۲۳۹-۲۲۵.
- یدالله افشین (۱۳۷۴). رودخانه‌های ایران. شرکت مهندسین مشاور جاماب، وزارت نیرو، ج ۲، ۱۱۸۷.
- Baddianaah, I. (2023). We all share the blame: Analyzing the root causes of flooding in African cities with specific reference to Harper City, Liberia. *Environmental Challenges*. 13:100790. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100790>.
- Bibi, T.S., Reddytha, D., and Kebebew, A.S. (2023). Assessment of the drainage systems performance in response to future scenarios and flood mitigation measures using stormwater management model. *City and Environment Interactions*. 19.1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100111>.
- Edwards, D.C. and Mckee, T.B. (1997). Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales Climatology. Report Number 97-2, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. <http://hdl.handle.net/10217/170176>.
- Hossain, M.K., and Meng, Q. (2020). A thematic mapping method to assess and analyze potential urban hazards and risks caused by flooding. *Computers. Environment and Urban Systems*. 79, 101417. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.101417>.
- Huang, Y., Tian, Z., Ke, Q., Liu, J., Irannezhad, M., Fan, D., Hou, M., and Sun, L. (2020). Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. *WIREs Water*. 7(3). <https://doi.org/10.1002/wat2.1421>
- Jamali B, Bach PM, Deletic A. (2019). Rainwater harvesting for urban flood management - An integrated modelling framework. *Water Res.* 15; 171:115372. [doi: 10.1016/j.watres.2019.115372](https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115372).
- Jha, A.K., Bloch, R., Lamond, J.E., (2011). Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century. *The World Bank*. DOI: [10.1596/978-0-8213-8866-2](https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8866-2).
- Josipovic, N., and Viergutz, K. (2023). Smart solutions for municipal flood management: overview of literature, trends, and applications in German cities. *smart Cities* 2023, 6, 944-964. <https://doi.org/10.3390/smartcities6020046>.
- Liu Q, Du M, Wang Y, Deng J, Yan W, Qin C, Liu M, Liu J. (2024). Global, regional and national trends and impacts of natural floods, 1990-2022. *Bull World Health Organ*. 2024 Jun 1;102(6):410-420. doi: 10.2471/BLT.23.290243. Epub. Apr 17. PMID: 38812801; PMCID: PMC11132161.

- Luo, K., & Zhang, X. (2022). Increasing urban flood risk in China over recent 40 years induced by LUCC. *Landscape and Urban Planning*, 219, 104317.
- Mendez, N.L. (2014). Adaptaion to urban floods by planning and design: guidelines for an adaptive manahement to urban floods and storm water use taking as a case study the city of Bilbao. (Dissertation). Retrieved from <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-147008>
- Nsangou, D., Kpoumié, A., Mfonka, Z., Ngouh, A.N., Fossi, D.H., Jourdan, C., Mbele, H.Z., Mouncherou, O.F., Vandervaere, J.P., and Ngoupayou, J.R.N. (2022). Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau. *Scientific African*. 15, e01043. doi:10.1016/j.sciaf.2021.e01043.
- Pesaresi, M, and Politis, P. (2023): GHS-BUILT-S R2023A - GHS built-up surface grid, derived from Sentinel2 composite and Landsat, multitemporal (1975-2030). European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] doi: [10.2905/9F06F36F-4B11-47EC-ABB0-4F8B7B1D72EA](https://doi.org/10.2905/9F06F36F-4B11-47EC-ABB0-4F8B7B1D72EA) PID: <http://data.europa.eu/89h/9f06f36f-4b11-47ec-abb0-4f8b7b1d72ea>
- Piro, P., Saleh, M.M., Pirouz, B., Turco, M., and Palermo, S. A. (2023). "Smart and Innovative Systems for Urban Flooding Risk Management," 2023 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), Cosenza, Italy, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICT-DM58371.2023.10286951.
- Rizqullah, A., Tsurayya, B., Purba, P.A., Ginting, H., Putri Natandini, A., and Sembiring, D. (2023). NeoHada: Adaptive Urban Building based on Solar-Piezoelectric and Rooftop Farming to Realize Resilient Cities in Preventing Floods and Food Crises. *International Journal of Architecture and Urbanism*. 7(3):348-355
- Thecla, A. (2014). Determinants of Flooding in Port Harcourt Metropolis, Nigeria. *IOSR Journal of Humanities and Social Science*, 19, 64-72.
- Tucci, C.E.M. (2007). Urban Flood Management. Climate. Water WMO/TD - No. 137.
- Watson JT, Gayer M, Connolly MA. (2007). *Epidemics after natural disasters*. Emerg Infect Dis. Jan;13(1):1-5. <https://doi.org/10.3201/eid1301.060779> PMID:17370508.
- Zhang, Y. (2024). SUDS: New solution for urban flooding. *Applied and Computational Engineering*.
- Zhou, K., Kong, F., Yin, H. et al. (2024). Urban flood risk management needs nature-based solutions: a coupled social-ecological system perspective. *npj Urban Sustain*. 4, 25. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00162-z>.