Archive of SID.ir

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Urban flood susceptibility prediction using a Fuzzy-Delphi hybrid model in Sanandaj City

Behnam Shirzadi[1]*, Farzad Vaisi[2], Mohammad Sedigh Ghorbani[3], Ataollah Shirzadi[4], Himan Shahabi[5]

[1] Former M.Sc. Student, Department of Geography and Urban Planning, Faculty of Geography, Payame Noor University, Kurdistan, Bijar, Iran
[2] Associate Professor, Departments of Geomorphology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
[3] Assistant Professor, Department of Geography, Departments of Law and Social Sciences, Payam Noor University, Tehran, Iran
[4] Assistant Professor, Departments of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
[5] Professor, Departments of Geomorphology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

Although a flood is an extreme and exceptional flow, every exceptional flow will not turn into a destructive flood, different factors must be changed in nature to cause destruction, damage, and casualties. In general, floods can be divided into four groups flash floods, river floods, urban floods, and coastal floods. Urban floods usually cause fewer casualties and mainly create damage caused by flooding, disruption of traffic, interruption in socio-economic activities, and problems of this kind. The damage caused by non-urban floods is often heavy and sometimes accompanied by high and catastrophic casualties. According to the Mediterranean climate, Iran is the seventh country in the world in terms of flooding. The flood-prone areas of the country are estimated to be around 91 MHA. In other words, 55% of the country's surface has contributed to the production of surface runoff, of which about 42 MHA have moderate to very high flood intensity. The review of sources shows the development of knowledge-based methods, statistical methods, and artificial intelligence algorithms in predicting flood-prone areas in urban and non-urban watersheds in different regions worldwide. However, a hybrid method of the Fuzzy, Delphi, and Analytic Hierarchy Processes (FDAHP) in urban flood susceptibility has not been used. Regarding the questions, what are the most important factors in urban flood occurrence? Is it possible to determine flood-prone areas in urban areas using the FDAHP hybrid model?, this study aims to identify the factors influencing the occurrence of floods and predict flood-prone areas in Sanandaj City.

Materials and Methods

In this study, which has a descriptive-analytical-comparative approach, to predict floods in Sanandaj City, the FDAHP was used. First, each of the conditioning factors (14 factors) was scored by flood experts and completed using the scores obtained from other stages of the FDAHP model. After collecting the opinions, the relative weights of the indicators were determined using the hybrid model, and finally, the flood susceptibility map of Sanandaj City was prepared using ArcGIS 10.5 software. The different stages of modeling with the FDAHP method are as follows: 1) experts' opinions, First, with the help of experts (technical and executive experts of the Kurdistan Province and Sanandaj Municipality's Natural Resources and Watershed Administration) the decision-making parameters according to their importance qualitatively or, if possible, quantitatively they rate. (Opinion scales are: very important with a nine score, importance with a seven score, average importance with a five score, low importance with a three score, and no importance with a one score). 2) Calculation of fuzzy numbers. After the preliminary stage, which includes a survey of experts in the form of a qualitative or quantitative questionnaire, fuzzy numbers were calculated based on the results of this survey. 3) Forming the matrix of fuzzy pairwise comparisons. 4) Calculating the fuzzy weight of the parameters. 5) De-fuzzification of model parameters. 6) Evaluation of the accuracy of the output of the spatial flood prediction model.

Results and Discussion

The findings showed that slopes of less than 10% (flat), areas with an elevation of fewer than 1400 m above sea level, slope aspect and curvature (flat), urban land use with high building density, rainfall of more than 369 mm and rock type Qt2 (Quaternary alluvium) have the highest susceptibility to floods compared to other types in

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Sanandaj City. Also, the results show that, on the one hand, increasing the distance from the residential areas, the distance from the roads, and the distance from the waterways decreases the susceptibility to urban flooding. On the other hand, with the increase in building density, the density of roads and the density of waterways in Sanandaj increases the susceptibility to flooding. These results are consistent with the other studies that concluded the residential areas with the largest area have the highest risk of vulnerability. Our findings indicated that the density of the waterway, the slope, and the distance from the waterway have the most influence on the occurrence of floods in Sanandaj City. Rainfall, road density, building density, distance from residential areas, distance from roads, flow accumulation, elevation, land use, lithology, and slope curvature are the next priorities in terms of importance in the occurrence of floods in Sanandaj City.

Conclusion

The flood prediction map showed that a large part of Sanandaj City including the City's northern, western, southern, and center, which is crowded, has more potential for urban flooding. For example, the old and dilapidated buildings of the City center are highly susceptible to floods, but the border areas around the City have less exposure to this phenomenon. Therefore, as the distance from the City center and the residential regions increases, the potential for flooding decreases. Based on the value of 80.56% of the area under the curve, the validation results indicated that 80.56% of the areas where urban flooding is visible have been correctly predicted. The FDAHP hybrid model had a high ability to estimate the areas prone to urban flooding and, therefore it can be tested and evaluated as a management tool to identify urban floods in other similar areas. Since our aim concerning the occurrence of floods is more on flood mitigation, according to the mentioned theoretical bases and the existing views in the field of flood prediction maps, it can be stated that the ruined canals and the network of waterways, unauthorized constructions, high density, and elevation of buildings, old and dilapidated buildings and the irregularity of the canals have aggravated the urban flooding. Overall, it can be said that obtaining an accurate and reasonable urban flood prediction map can help City managers and planners identify flood-prone areas to manage the urban flood crisis.

Keywords: Natural hazards, River density, Multi-criteria decision-making (MCDM), Kurdistan province.

Article Type: Research Article

Acknowledgment

The spiritual support of Payam Noor University and the University of Kurdistan in carrying out this research is hereby appreciated.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

All data generated during the manuscript analysis are included in the article. Further datasets are available upon reasonable request from the corresponding author.

Authors' contribution

Behnam Shirzadi: Performing software/statistical analysis, writing the initial version of the article, controlling the results; **Farzad Vaisi:** Guiding, editing and revising the article, controlling the results; **Mohammad Sedigh Ghorbani:** Editing and revising the article; **Ataollah Shirzadi:** Editing and revising the article; **Himan Shahabi:** Editing and revising the article.

*Corresponding Author, E-mail: behnam.sh6565@gmail.com

Citation: Shirzadi, B., Veisi, F., Ghorbani, M.S., Shirzadi, A., & Shahabi, H. (2024). Urban flood susceptibility prediction using a Fuzzy-Delphi hybrid model in Sanandaj City. *Water and Soil Management and Modeling, 4*(3), 143-158.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12866.1285

Received: 09 May 2023, Received in revised form: 24 May 2023, Accepted: 26 May 2023, Published online: 26 May 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 3, pp. 143-158
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

پیش‌بینی حساسیت‌پذیری سیلاب شهری با استفاده از مدل ترکیبی فازی-دلفی در شهر سنندج

بهنام شیرزادی[1*]، فرزاد ویسی[2]، محمد صدیق قربانی[3]، عطاالله شیرزادی[4]، هیمن شهابی[5]

[1] دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکدهٔ جغرافیا، دانشگاه پیام نور مرکز بیجار، کردستان، ایران

[2] دانشیار، گروه ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

[3] استادیار، گروه جغرافیا، دانشکدهٔ حقوق و علوم اجتماعی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

[4] استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

[5] استاد، گروه ژئومورفولوژی، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

چکیده

در اکثر کشورهای جهان سیلاب شهری به یکی از چالش‌های جدی محیط زیستی تبدیل شده است. هدف از انجام این پژوهش پیش‌بینی حساسیت‌پذیری سیلاب شهر سنندج با استفاده از روش ترکیبی فازی-دلفی-تحلیل سلسله مراتبی (Fuzzy-Delphi-AHP: FDAHP) است. در ابتدا ۱۴ عامل مؤثر بر وقوع سیلاب شهری شامل زاویهٔ شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب، تجمعی جریان، کاربری ارضی، سنگ‌شناسی، بارندگی، فاصله از تراکم ساختمانی، فاصله از معابر، فاصله از آبراهه‌ها، تراکم ساختمانی، تراکم معابر و تراکم آبراهه‌ها شناسایی و جهت مدل‌سازی انتخاب شدند. سپس، بر اساس تکمیل پرسش‌نامه توسط متخصصین و کارشناسان امر سیلاب شهری، امتیازها به این عوامل اختصاص داده شدند. با استفاده از مدل ترکیبی، وزن‌های فازی و غیرفازی عوامل به‌دست آمده و با اعمال آن‌ها به هر کدام از لایه‌های عوامل مؤثر، نقشهٔ پیش‌بینی مکانی سیلاب شهر سنندج تهیه شد. صحت‌سنجی مدل ترکیبی با معیارهای آماری حساسیت (Sensitivity)، شفافیت (SpecifiCity) و دقت (Accuracy) انجام شد. نقشهٔ پیش‌بینی سیلاب شهری تهیه شده با استفاده از معیارهای درصد مساحت زیرمنحنی (AUC) و تراکم سیلاب (فراوانی سیلاب‌های مشاهده‌ای در هر کلاس از نقشهٔ حساسیت‌پذیری وقوع سیلاب) ارزیابی شد. نتایج حاکی از نقش مهم فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، بارندگی و تراکم ساختمانی بر وقوع سیلاب شهر سنندج در مقایسه با سایر عوامل است. نتایج نشان داد که روش ترکیبی فازی-دلفی-سلسله مراتبی با توجه به مقادیر ۱۰۰ درصد، ۷۵/۷ درصد و ۸۷/۸ درصد به‌ترتیب برای حساسیت، شفافیت و دقت طبقه‌بندی مورد تأیید قرار گرفت. هم‌چنین، نتایج نشان داد که نقشهٔ به‌دست آمده با مدل ترکیبی ارائه شده و نیز با توجه به مقدار درصد مساحت زیرمنحنی (۸۰/۵۶ درصد)، از صحت بالایی برخوردار است. بنابراین، روش ارائه شده در این پژوهش را می‌توان در نواحی شهری دیگر حساس به‌وقوع سیل، برای شناسایی و مدیریت آن‌ها مورد آزمایش و استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: استان کردستان، تراکم آبراهه، تصمیم‌گیری چندمعیاره،، مخاطرات طبیعی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: behnam.sh6565@gmail.com

استناد: شیرزادی، بهنام، ویسی، فرزاد، قربانی، محمدصدیق، شیرزادی، عطاالله، و شهابی، هیمن (۱۴۰۳). پیش‌بینی سیلاب شهر سنندج با استفاده از روش ترکیبی فازی-دلفی در شهر سنندج. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۳)، ۱۴۳-۱۵۸.
DOI: 10.22098/mmws.2023.12866.1285

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۱۴۳ تا ۱۵۸
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱- مقدمه

سیلاب یکی از شایع‌ترین مخاطرات طبیعی یا به‌عبارتی بلایای طبیعی است که هر ساله موجب تلفات انسانی و خسارت به ساختمان‌ها، تأسیسات، باغات، کشت‌زارها و منابع طبیعی می‌شود (Kazemi and Jafarpour, 2022). اختلالات ناشی از حوادث سیل، موانع اساسی برای رسیدن به توسعهٔ پایدار اقتصاد و جامعه را فراهم می‌سازد (Ye et al., 2019). سیل به‌عنوان یک بلای طبیعی مکرر، ویرانگر و پرهزینه در نتیجه تقابل تأثیرات تغییرات آب و هوایی جهانی و فعالیت‌های انسانی در دههٔ اخیر فراوان‌تر و شدیدتر شده‌اند (Moon et al., 2024)، به‌ویژه در مناطق شهری با وجود دارایی‌های مادی زیاد، نفوذپذیری ضعیف آب‌های سطحی و سامانه‌های زهکشی غیرقابل تحمل (Anni et al., 2020).

امروزه، شهرنشینی زمان تمرکز زهکش‌ها را کاهش و حداکثر طغیان رودخانه‌ها را افزایش می‌دهد. با توسعهٔ شهری، جابه‌جایی و از بین رفتن پوشش گیاهی، سطوح سنگ‌فرش و آسفالت و کانال‌های رودخانه‌ای نیز تغییر می‌کنند. در نتیجه، عمل نفوذ آب به زمین متوقف و منجر به افزایش سرعت حجم بیش‌تر آب و خطر وقوع رواناب و سیل می‌شود (Mohammadi et al., 2006). به‌عبارت دیگر مناطق شهری به‌دلیل جمعیت متراکم و توسعهٔ سطح خود به‌ویژه در برابر تغییرات اقلیم آسیب‌پذیر و شرایط برای سیلاب‌های شهری بیش‌تر مهیا می‌شود. روند مدرن شهرنشینی مناظر را تغییر داده و شهرهای بزرگی را نیز ایجاد کرده است که اکنون به‌دلیل این تغییرات آب و هوایی با خطر شدید سیل روبه‌رو هستند. این رشد سریع شهری، همراه با تغییرات کاربری زمین، فرآیندهای هیدرولوژیکی طبیعی را تغییر داده، سطوح نفوذپذیر را کاهش و رواناب را افزایش داده است (Dharmarathne et al., 2024).

طبق تعریف، سیل یک جریان شدید و استثنایی است، هرچند که هر جریان استثنایی به سیل ویرانگر و مخرب تبدیل نخواهد شد، بلکه عوامل مختلفی بایستی در طبیعت تغییر یابند تا تخریب و خسارت و تلفات به همراه داشته باشد (Asghari Moghadam, 1998). افزایش وقوع و تکرار سیل‌ها رابطهٔ مستقیمی با پیشرفت فن‌آوری و تصرف اراضی دارد (Asghari Moghadam, 1998). به‌طورکلی سیلاب‌ها را می‌توان به چهار گروه، ناگهانی، رودخانه‌ای، شهری و ساحلی تقسیم‌بندی نمود. سیلاب‌های شهری معمولاً تلفات جانی کم‌تری به‌همراه دارند و عمدتاً باعث بروز خسارات ناشی از آبگرفتگی، اختلال در عبور و مرور، وقفه در فعالیت‌های اجتماعی- اقتصادی و مشکلاتی از این قبیل می‌شوند. در حالی‌که خسارت ناشی از سیلاب‌های برون شهری غالباً سنگین و گاه همراه با تلفات زیاد و فاجعه‌آمیز است (Rahmani et al., 2014).

پهنه‌بندی سیل بیان‌گر تعیین میزان پیشروی سیلاب، ارتفاع و خصوصیات آن در دوره بازگشت‌های مختلف می‌باشد. در پهنه‌بندی سیلاب سعی بر آن است که تمامی نواحی اطراف رودخانه و سیلاب دشت‌ها به‌منظور کنترل کاربری و توسعهٔ اراضی، به قسمت‌هایی با خطرپذیری مختلف تقسیم شود تا در تعیین کاربری اراضی، شناسایی ناحیه در بیمهٔ سیل و ایجاد محدودیت‌های اجباری در مناطق خطرپذیر استفاده شود (Gravandi, 2011). یکی از روش‌های اصلی در مدیریت و کاهش خسارت‌های سیلاب، پیش‌بینی قبل از وقوع آن می‌باشد. از این‌رو، با توجه به اهمیت موضوع دست‌یابی به راه‌های مقابله با خسارت این خطر طبیعی به‌شدت احساس می‌شود. بنابراین، با اعمال مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز از طریق شناسایی مناطق مستعد به‌وقوع سیلاب می‌توان تا حدود زیادی خسارت‌های مالی و جانی این بلای طبیعی را کاهش داد (Zeraatkar, 2011). شناسایی مناطق مستعد سیلاب در شهرها کمک شایانی در بررسی و تعیین مناطق با احتمال خسارت زیاد را داشته و می‌توان تمهیدات کنترل سیلاب را در نظر گرفته و مسیرهای مطمئن برای امدادرسانی و مکان‌های امن برای اسکان مردم را شناسایی کرد (Rahmani et al., 2014). نقشهٔ پهنه‌بندی حساسیت سیلاب می‌تواند به‌منزلهٔ ابزاری کارآمد در برنامه‌ریزی مسیر توسعهٔ آیندهٔ شهر، شناخت نواحی که توسعهٔ زیرساخت‌های تخلیه و زهکشی سیلاب مورد نیاز است، استفاده شود (Büchele et al., 2006).

کشور ایران با توجه به اقلیم مدیترانه‌ای به‌لحاظ سیل‌خیزی هفتمین کشور دنیا است. سطح مناطق سیل‌خیز کشور حدود ۹۱ میلیون هکتار برآورد شده است. به‌عبارتی دیگر ۵۵ درصد از سطح کشور در تولید رواناب مستقیم و سریع نقش داشته که حدود ۴۲ میلیون هکتار آن دارای شدت سیل‌خیزی متوسط تا خیلی زیاد است (Ahmadi Iikhchi et al., 2003). رویارویی با بحران‌های محیط شهری یکی از موضوعاتی است که بیش‌تر شهرها با آن روبه‌رو هستند. سیل به‌عنوان یکی از بلایا، سالانه حدود ۱۹۶ میلیون نفر در بیش از ۹۰ کشور در معرض خطر آن قرار دارند. حدود ۱۷۰ نفر به‌وسیلهٔ سیل‌هایی که در کل دنیا درحدود سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۷۰ اتفاق اُفتاده است، کشته شده‌اند (UNDP, 2004). سیلاب شهری منشأ محلی و موضعی داشته و مسائلی مانند آلودگی جدی آب را به‌همراه دارد. سیلاب‌های شهری ناگهانی بوده و روی سطوح شهری (خیابان‌ها، پارک‌ها، پارکینگ‌ها) و در انهار کوچک شهری که آب را به داخل محل‌های جمع‌آوری آب تخلیه می‌کنند، رخ می‌دهد (Moghadamnia and Vafakhah, 2018). رشد روزافزون جمعیت، توسعهٔ شهرها و به‌تبع آن تجاوز به بستر و حریم رودخانه‌ها و سیلاب دشت‌ها برای احداث اعیانی و افزایش سطوح غیرقابل نفوذ باعث شده که در سال‌های اخیر روند تعداد و بزرگی سیل‌ها در کشور به‌شدت افزایش یافته و هر ساله خسارات فراوانی به دولت و مردم تحمیل کند (Zeraatkar, 2011).

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

اولین گام در طرح‌های مدیریتی سیلاب تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی سیل[1] است (Wang et al., 2018). برای تهیهٔ این نقشه‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد. گسترش خسارات سیلاب و پیامدهای ناشی از آن اهمیت و لزوم اعمال مدیریت سیلاب‌ها را هر چه بیش‌تر آشکار می‌سازد. در این میان، تعیین محدودهٔ پیشروی سیلاب و ارتفاع آن نسبت به مسیل اصلی و تعیین مشخصات سیلاب در دوره‌های بازگشت مختلف که تحت عنوان پهنه‌بندی سیلاب انجام می‌شود، حائز اهمیت فراوان است (Vafaei et al., 2022). امروزه استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی[2] این امکان را فراهم می‌آورد. نخستین فعالیت‌ها در مورد کاربرد سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی در مطالعهٔ پدیدهٔ سیلاب در اوایل دههٔ ۱۹۸۰ میلادی انجام شده که اولین کارها در این زمینه با تحلیل مدل ارتفاعی رقومی برای هیدرولوژیکی شروع شد؛ اما ارتباط مدل‌های هیدرولوژیکی و ArcGIS از اوایل دههٔ ۱۹۹۰ شروع شده و مورد استفاده قرار گرفته است (Sadeghi et al., 2003). سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی نوع خاصی از سامانه‌های اطلاعاتی هستند که قادرند داده‌های مکانی را مورد پردازش و تحلیل قرار دهند. لذا سامانهٔ اطلاعاتی جهت نیل به اهدافش نیاز به مجموعه‌ای از توابع دارد که این مجموعه طیفی از پردازش‌ها از انجام مشاهدات و اندازه‌گیری گرفته، تا پیش‌بینی و اخذ تصمیم، را تحت پوشش قرار می‌دهد. در یک نگرش ساده، ArcGIS یک سامانهٔ اطلاعات کامپیوتری است که به‌منظور نمایش رقومی پدیده‌های جغرافیایی موجود در روی سطح زمین و تحلیل حوادثی که اتفاق می‌اُفتد به‌کار می‌رود. در این سامانه می‌توان داده‌های غیرمکانی را به‌گونه‌ای منطقی به داده‌های مکانی ارتباط داد. هر داده باید زمین مرجع شود که این نکتهٔ اساسی جهت مرتبط نمودن پایگاه داده‌ها به داده‌های گرافیکی است (Rasouli, 1998). به‌طورکلی، هر مسأله در تصمیم‌گیری مکانی را می‌توان در سه فاز مهم سازماندهی کرد: ۱) فاز هوشمندی که مسأله یا فرصت تغییر را آزمایش می‌کند، ۲) فاز طراحی که گزینه‌ها را تعیین می‌کند و ۳) فاز انتخاب که بهترین گزینه را انتخاب می‌نماید. قابلیت‌های ArcGIS در ذخیرهٔ داده‌ها، مدیریت و تحلیل به‌عنوان مهم‌ترین دست‌یار در رویکرد تصمیم‌گیری مکانی مطرح است. روش‌های مبتنی بر ArcGIS به‌طور مؤثری داده‌های مکانی و توصیفی را تبدیل به استنتاج تصمیم‌گیری می‌نماید. از آن‌جا که تحلیل چندمعیارهٔ مکانی شامل اجزاء جغرافیایی صریح است، تفاوت‌های زیادی در این تکنیک‌ها وجود دارد (Malczewski, 2004).

با توسعهٔ روز افزون مناطق شهری و تغییر هیدرولوژی محیط‌ها، مناطق غیرقابل نفوذ توسعه یافته است که این حالت موجب افزایش حجم و ارتفاع رواناب ناشی از بارش در حوضه‌های شهری می‌شود. جریان جاری شده در حوضه‌های شهری به‌دلیل عبور از مناطق مختلف در سطح شهر دارای کیفیت نامناسب بوده و همراه خود مقدار زیادی آلودگی حمل می‌نماید. در صورت عدم زهکشی مناسب رواناب ناشی از بارش‌های شهری امکان بروز سیلاب در سطح شهر افزایش می‌یابد. به‌دلیل اثرات مخرب ناشی از سیلاب در حوضه‌های شهری، چگونگی انتقال، مدیریت و تخلیهٔ رواناب‌های ایجاد شده در سطح شهر مورد توجه پژوهش‌گران و سازمان‌های مربوطه از جمله شهرداری‌ها قرار گرفته است (Shabani Langrani, 2011). به‌عنوان مثال، Ghahrodi Tali (2007) به مدیریت سیلاب‌های شهری با طراحی پایگاه داده در شهر نور استان مازندران پرداخته و به‌این نتیجه رسیده است که مدیریت سیلاب‌های شهری بدون ساختار یکپارچه از داده‌های مکانی امکان‌پذیر نیست. در پژوهش دیگری، Fernández et al. (2010) به پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری در ایالت توکومان، آرژانتین، با استفاده از ArcGIS و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره[3] پرداختند. آن‌ها از پنج عامل مؤثر بر وقوع سیل شامل فاصله از کانال‌های زهکشی، توپوگرافی (ارتفاع و شیب)، عمق جداول آب سطحی و کاربری ارضی شهری استفاده نمودند. نتایج مطالعهٔ آن‌ها نشان داد که قسمت جنوب شرقی سانتیاگو دوتوکومان دارای بالاترین خطر سیلاب روی یک منطقهٔ گسترده به‌دلیل وجود زمین‌های پست با شیب کم‌تر از ۰/۶ درصد و حضور کانال‌های شهری با برنامهٔ تعمیر و نگهداری ضعیف است. این مدل با استفاده از روش انتشار خطا و تحلیل حساسیت برای ارزیابی عدم قطعیت و اهمیت نسبی عوامل ورودی مدل مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین، Allahveisi et al. (2013) عوامل شهری مؤثر در خطر سیلاب‌های شهر سنندج را شناسایی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها که با بررسی متغیرهای توپوگرافی، کاربری ارضی و شبکهٔ معابر شهر سنندج به‌دست آمده است، نشان داد که به‌دلیل طراحی شبکهٔ معابر و تفکیک ارضی بدون توجه به شیب عمومی زمین، در بسیاری از مناطق پای‌کوه (شیب ۳۰-۲۰ درصد)، شبکهٔ زهکشی طبیعی زمین برهم خورده و غالباً با مسأله سیلاب‌های شهری مواجه هستند. در ادامه، Sowmya et al. (2015) برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سیلاب شهری در شهر کوچین واقع در ساحل جنوب غربی اقیانوس هند، از سنجش از دور و ArcGIS استفاده کردند. آن‌ها دریافتند در میان سه منطقهٔ آسیب‌پذیر، مناطق آسیب‌پذیر بسیار بالا و بالا با هم ۸/۶ درصد از کل مساحت شهرستان را تشکیل می‌دهد و عمده‌ترین عوامل تأثیرگذار انسداد

[1] Flood mapping
[2] Geographic information system (GIS)
[3] Multi-criteria decision making (MCDM)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کانال‌های زهکشی و نزدیکی به آب‌های ساحلی است که در آن تأثیر جزر و مد وجود دارد.

از سایر پژوهش‌ها، Ahmadzade et al. (2015) به بررسی و پهنه‌بندی مناطق مستعد به‌وقوع سیل باتأکید بر سیلاب‌های شهری در شهر ماکو پرداختند. ویژگی‌های فیزیوگرافی محدودهٔ مورد مطالعه (درجهٔ شیب، کاربری ارضی، نوع خاک، پوشش گیاهی و ارتفاع رواناب) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، توابع تحلیلی ArcGIS و WMS تهیه شدند. نتایج نشان داد که توپوگرافی زیاد، ضخامت کم عناصر منفصل روی سنگ بستر و ظرفیت ناچیز آن‌ها برای نگهداشت آب، نبود پوشش گیاهی مناسب، تجاوز به حریم سیلاب‌ها و تبدیل آن‌ها به سطوح نفوذناپذیر، شرایط را برای جریان سیل‌های مخرب به‌ویژه هنگام وقوع بارش‌های رگباری در ماه‌های خشک سال مهیا می‌سازد. در پژوهشی، Azadtalab et al. (2020) اقدام به پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر سنندج با استفاده از مدل‌های ترکیبی شاخص آماری و تابع شواهد قطعی نمودند. آن‌ها از عوامل درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، تجمع جریان، کاربری ارضی، انحنای شیب، لیتولوژی، فاصله از معابر، تراکم معابر، فاصله از ساختمان، تراکم ساختمان و میزان بارندگی استفاده نمودند. نتایج آن‌ها بیان‌گر برتری مدل ترکیبی نسبت به مدل‌های منفرد است و نیز بیان کردند که عوامل تراکم ساختمانی و تراکم معابر بیش‌ترین اثرگذاری بر وقوع سیلاب شهری در شهر سنندج را دارند. هم‌چنین، Sayyad et al. (2022) اقدام به ارائهٔ راهبردهای مناسب مدیریتی زیرساخت‌های شهری در برابر سیلاب از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از QSPM و SWOT در شهر کاشان نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که از بین عوامل داخلی (قوت‌ها و ضعف‌ها) و عوامل خارجی (تهدیدها و فرصت‌ها) به‌ترتیب عامل قرارگیری تأسیسات زیرساخت شهری در مسیر و سابقهٔ سیل و ایجاد خسارت در گذشته مهم‌ترین ضعف و تهدید در منطقه هستند. امتیاز نهایی عوامل داخلی و خارجی نشان از غالب بودن نقاط ضعف و تهدیدهای جدی در منطقه است. در نهایت، Ahmadi et al. (2023) اقدام به پهنه‌بندی سیلاب شهر سنندج با روش فازی نمودند. آن‌ها از شش عامل مؤثر زاویهٔ شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب، تراکم زهکشی، کاربری ارضی و فاصله از آبراهه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که عامل فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه به‌ترتیب بیش‌ترین اثرگذاری بر وقوع سیلاب شهری داشتند.

اگرچه مرور منابع نشان‌دهندهٔ بسط و توسعهٔ روش‌های دانش مبنا، روش‌های آماری و الگوریتم‌های هوش مصنوعی[1] در مکان‌یابی مناطق مستعد به‌وقوع سیلاب در حوزه‌های آبخیز شهری و غیرشهری در مناطق مختلف در دنیا است، اما روشی که در آن ترکیبی از روش فازی، دلفی و تحلیل سلسله مراتبی سامانه‌ها (روش دانش–مبنا[2]) در پهنه‌بندی سیلاب شهری باشد تاکنون انجام نشده است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، شناسایی عوامل تأثیرگذار بر وقوع سیلاب و پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب در شهر سنندج به‌منظور مدیریت این مناطق در مواقع بحرانی با استفاده از ترکیب روش‌های فازی–دلفی–تحلیل سلسله مراتبی سامانه‌ها است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

شهر سنندج بین ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقهٔ عرض جغرافیایی شمالی و ۴۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲ دقیقهٔ طول جغرافیایی شرقی در مرکز استان کردستان میان رشته‌کوه‌های زاگرس قرار گرفته است. محل جغرافیایی شهر در درهٔ نسبتاً وسیعی است که به‌وسیلهٔ کوه‌های مرتفع محصور شده است (شکل ۱). شهر سنندج با توجه به نزدیکی به رودخانهٔ قشلاق و بافت شهری و تأثیرات محیط شهری در معرض هر دو نوع سیلاب شهری و برون‌شهری است. میزان بارندگی سالانه در شهر سنندج حدود ۴۹۱ میلی‌متر است. علی‌رغم این مقدار بارندگی، آن‌چه اقلیم سنندج را نیمه‌خشک می‌سازد توزیع نامناسب بارش آن است. در مجموع ۹۹ درصد بارش سالانهٔ سنندج در ماه‌های سرد سال؛ یعنی اکتبر (مهر) و آوریل (فروردین) و تنها ۱۱ درصد آن در ایام گرم سال حاصل می‌شود. در حالی‌که از تبخیر–تعرق بالقوهٔ سنندج، ۱۹ درصد در ماه‌های مهر و فروردین و ۸۱ درصد آن در ایام گرم سال صورت می‌پذیرد (Allahveisi et al., 2012).

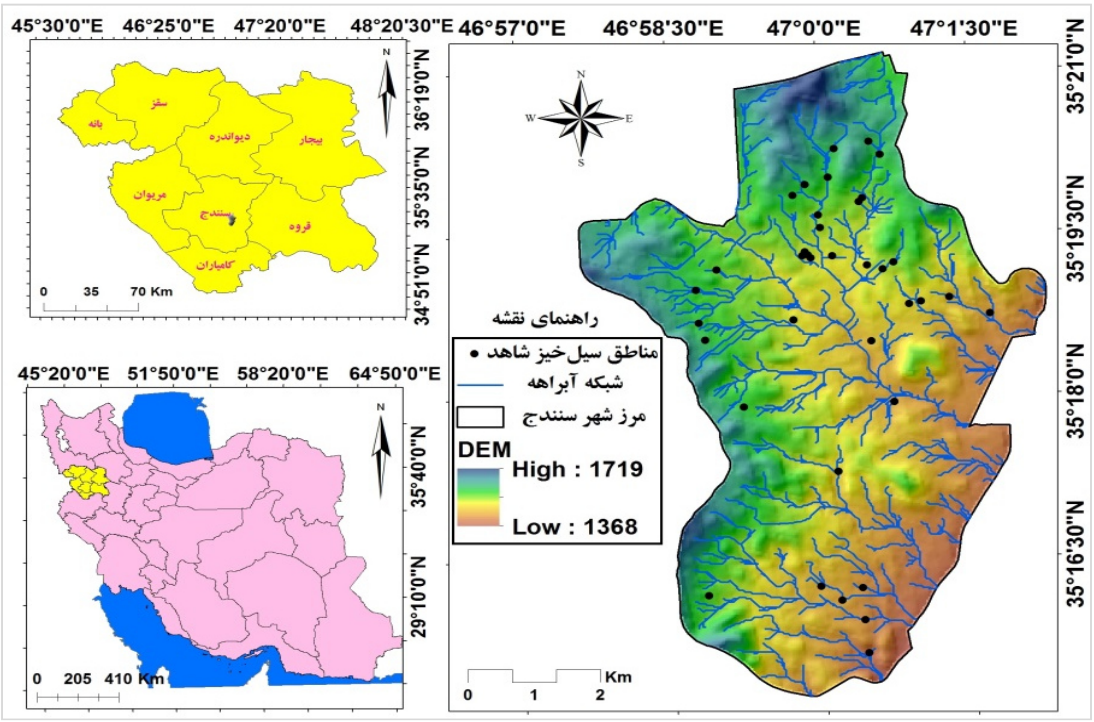
۲-۲- نقشهٔ پراکنش سیلاب‌های منطقهٔ مورد مطالعه

شناسایی مناطقی که سیلاب در آن‌جا اتفاق اُفتاده‌اند، برای صحت‌سنجی نقشهٔ نهایی سیلاب شهری بسیار حائز اهمیت است. برای این منظور از کارشناسان و متخصصان و مصاحبهٔ محلی و بررسی‌های میدانی در سطح شهر سنندج جهت شناسایی این مناطق استفاده شد. بر این اساس، ۳۷ نقطه توسط دستگاه سامانهٔ موقعیت‌یاب جهانی[3] شناسایی و ثبت شدند. بیش‌تر این مناطق نزدیک به مناطق با تراکم مسکونی زیاد و زهکش‌هایی است که در اثر ساخت و ساز شهری قطع شده‌اند. شکل ۲ برخی از سیلاب‌های اتفاق افتاده را در سطح شهر سنندج نشان می‌دهند.

[1] Artificial intelligence algorithms (AI)
[2] Expert-knowledg method
[3] Global position system (GPS)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه در ایران و استان کردستان

Figure 1- Location of the study area in Iran and Kurdistan Province



شکل ۲- نمونه‌ای از سیلاب‌های اتفاق افتاده در سطح شهر سنندج (https://tn.ai/1979671)

Figure 2- Examples of the floods in Sanandaj City (https://tn.ai/1979671)

۲-۳- عوامل مؤثر و مرتبط با وقوع سیلاب شهری

نخستین مرحله در تهیهٔ نقشهٔ پیش‌بینی مکانی سیلاب شهری، تبدیل لایه‌های وکتوری به لایه‌های رستری است. قدرت تفکیک مکانی[1] تمامی لایه‌ها ۲۰×۲۰ متر است که برای قرار گرفتن خصوصیات مکانی سیلاب‌ها کوچک مناسب بوده و به‌اندازهٔ کافی برای کاهش پیچیدگی محاسبات بزرگ است. پژوهش حاضر در ابتدا بر اساس نقشهٔ موقعیت جغرافیایی سیلاب‌های ثبت شده توسط کارشناسان فنی و اجرایی شهرداری شهرستان سنندج و مصاحبهٔ محلی در منطقهٔ وقوع سیل، آغاز شد. سپس ۱۴ عامل در ارتباط با وقوع سیلاب‌های شهر سنندج شناخته شدند. بر این اساس، با استفاده از نقشهٔ مدل رقومی ارتفاع، نقشهٔ رقومی زمین‌شناسی شهرستان سنندج با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برگرفته از سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه‌های درجهٔ شیب، ارتفاع از سطح دریا، انحنای شیب[2] و تجمعی جریان[3] از نقشهٔ رقومی ارتفاع در محیط ArcGIS 10.5 ساخته شدند. نقشهٔ کاربری ارضی سال ۱۳۹۰ منطقهٔ مورد مطالعه از ادارهٔ مسکن و شهرسازی استان

[1] Resolution
[2] Profile curvature
[3] Flow accumulation

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

کردستان، نقشه‌های سنگ‌شناسی از نقشهٔ زمین‌شناسی شهرستان سنندج با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشهٔ بارندگی (خطوط هم‌باران) بر اساس رابطهٔ رگرسیونی بین ارتفاع و میانگین بلندمدت سالانهٔ بارندگی ایستگاه‌های باران‌سنجی اطراف محدودهٔ مورد مطالعه، نقشه‌های فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه بر اساس شبکهٔ آبراهه‌های منطقهٔ مورد مطالعه، نقشهٔ فاصله از معابر و تراکم معابر نیز بر اساس نقشهٔ معابر شامل خیابان و پیاده‌روهای سطح شهر، نقشهٔ فاصله از مناطق مسکونی و تراکم ساختمانی نیز بر اساس نقشهٔ مناطق مسکونی سطح شهر، تهیه شدند. جدول ۱ طبقه‌بندی این عوامل را نشان می‌دهد.

جدول ۱- عوامل اثرگذار بر وقوع سیلاب شهر سنندج و کلاس‌های آن‌ها (منبع: نویسندگان)

Table 1- Influencing factors on floods in Sanandaj City and their classification (Source: Authors)

عوامل مؤثر	طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف عوامل مؤثر
زاویهٔ شیب (درصد)	(1) 0-10, (2) 10-20, (3) 20-30, (4) 30-40, (5)>40
جهت شیب (آزیموت)	شمال غرب (9) غرب (8) جنوب غرب (7) جنوب(6) جنوب شرق (5) شرق (4) شمال شرق (3) شمال (2) مسطح (1)
ارتفاع (متر)	(1)1368-1400, (2)1400-1500, (3)1500-1600, (4)1600-1700, (5)>1700
انحنای شیب	{(3.471) – (- 0.225)} محدب (3) ,{(- 0.225) – (- 0.2655)} فلات (2) ,{(- 0.265) – (- 3.099)} مقعر (1)
تجمعی جریان	(1) 0 – 1343, (2) 1343 – 5915.282, (3) 5915.282 – 11113.560, (4) 11113.560 – 14698.580, (5)14698.580 - 45709
کاربری ارضی	سایر کاربری‌ها (4) مناطق مسکونی (3) فضای سبز شهری (2) معابر شهری(1)
تراکم ساختمانی (متر بر کیلومتر مربع)	(1) 0 - .0.0156, (2) 0.0156 – 0.0438, (3) 0.0438 – 0.0771, (4) 0.0771 – 0.113, (5) 0.113 – 0.180
فاصله از مناطق مسکونی (متر)	(1)0 – 50, (2) 50 – 100, (3) 100 – 150, (4) 150 – 200, (5) > 200
تراکم معابر (متر بر کیلومتر مربع)	(1) 0 – 0.00769, (2) 0.00769 – 0.0134, (3) 0.0134 – 0.0178, (4) 0.0178 – 0.0223, (5) 0.0223 – 0.0363
فاصله از معابر (متر)	(1)0 – 50, (2) 50 – 100, (3) 100 – 150, (4) 150 – 200, (5) > 200
بارندگی (میلی‌متر)	(1)282 – 311, (2) 311 – 330, (3) 330 – 349, (4) 349 – 369, (5) 369 – 412
سنگ‌شناسی	(1) K2sh (2) Qt2 (3) Kul (4) Kvc
تراکم آبراهه (متر بر کیلومتر مربع)	(1) 0– 0.00186, (2) 0.00186- 0.00388, (3) 0.00388 – 0.00574, (4) 0.00574 – 0.00792, (5) 0.00792 – 0.0139
فاصله از آبراهه (متر)	(1)0 – 50, (2) 50 – 100, (3) 100 – 150, (4) 150 – 200, (5) > 200

۲-٤- مدل ترکیبی فازی-دلفی-تحلیل سلسله مراتبی

در پژوهش حاضر که دارای رویکردی توصیفی، تحلیلی، مقایسه‌ای است، به‌منظور پیش‌بینی سیلاب در شهر سنندج از روش ترکیبی FDAHP استفاده شد. ابتدا توسط کارشناسان متخصص در امر سیلاب به هرکدام از متغیرها (۱۴ متغیر) امتیازدهی انجام و با استفاده از امتیازات حاصله سایر مراحل مدل مذکور اجرا شد. پس از جمع‌آوری نظرات وزن‌های نسبی شاخص‌ها، با استفاده از فرآیند فازی-دلفی-تحلیل سلسله مراتبی تعیین شدند. در نهایت، نقشهٔ پیش‌بینی وقوع سیلاب شهر سنندج با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد.

۲-٤-۱- نظرسنجی از متخصصان

ابتدا به‌کمک متخصصان، (کارشناس‌های فنی و اجرایی ادارهٔ کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان و شهرداری سنندج) پارامترهای مؤثر بر تصمیم را با توجه به میزان اهمیت آن‌ها به‌صورت کیفی و یا در صورت امکان به‌صورت کمی امتیازدهی می‌کنند. (مقیاس‌های نظرسنجی عبارتند از: بسیار با اهمیت برابر نُه، با اهمیت برابر هفت، اهمیت متوسط برابر پنج، کم اهمیت برابر سه، بدون اهمیت برابر یک).

۲-٤-۲- محاسبهٔ اعداد فازی

پس از مرحلهٔ مقدماتی که شامل نظرسجی از کارشناسان در قالب پرسشنامه‌ای کیفی یا کمّی است، محاسبهٔ اعداد فازی بر اساس نتایج این نظرسنجی صورت گرفت. در این حالت اعداد فازی مثلثی به‌صورت روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{a}_{ij} = (a_{ij} + \delta_{ij} + y_{ij}) \quad (۱)$$

$$a_{ij} = \mathrm{Min}(\beta_{ijk}). k = 1. \ldots . n \quad (۲)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k}^{n} = 1\beta_{ijk} \right)^{\frac{1}{n}} . k = 1. \ldots . n \quad (۳)$$

$$y_{ij} = \mathrm{Max}(\beta_{ijk}). k = 1. \ldots . n \quad (۴)$$

در روابط فوق، β_{ijk} نشان‌دهندهٔ اهمیت نسبی i بر j از دیدگاه کارشناس kام است. هم‌چنین، yij و aij به‌ترتیب حد بالا و حد پایین نظرات کارشناسان و δij میانگین نسبی نظرهای آنان را نشان می‌دهند.

۲-٤-۳- تشکیل ماتریس مقایسه‌های زوجی فازی

پس از تشکیل اعداد فازی فوق، ماتریس مقایسهٔ زوجی فازی بین مؤلفه‌های مختلف به‌شرح زیر تشکیل می‌شود:

$$\tilde{A} = \lfloor \tilde{a}_{ij} \rfloor . a_{ij} \times a_{ij} \approx 1. \forall_i . j = 1. \ldots . n \quad (۵)$$

نمایش دیگر از رابطهٔ فوق به این شکل است:

(۶)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1.1.1) & (a_{12}.\delta_{12}.y_{12}) & (a_{13}.\delta_{13}.y_{13}) \\ \left(\frac{1}{a_{12}}.\frac{1}{\delta_{12}}.\frac{1}{y_{12}}\right) & (1.1.1) & (a_{23}.\delta_{23}.y_{23}) \\ \left(\frac{1}{a_{13}}.\frac{1}{\delta_{13}}.\frac{1}{y_{13}}\right) & \left(\frac{1}{a_{23}}.\frac{1}{\delta_{23}}.\frac{1}{y_{23}}\right) & (1.1.1) \end{bmatrix}$$

۲-٤-٤- محاسبهٔ وزن فازی پارامترها

وزن فازی نسبی پارامترها نیز از دو رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{z}_i = [\tilde{a}_{i1} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{\frac{1}{m}} \quad (۷)$$

$$\tilde{w}_i = \tilde{z}_i \oslash (\tilde{z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{z}_n) \quad (۸)$$

در آن $\tilde{a}_x \otimes \tilde{a}_y = (a_x \times a_y.\delta_x \times \delta_y.y_x \times y_y)$ و $\tilde{a}_x \oslash \tilde{a}_y = (a_x/a_y.\delta_x/\delta_y.y_x/y_y)$ بوده و $\tilde{w}_i$ یک بردار سطری است که وزن فازی پارامتر iام را نشان می‌دهد.

۳-٤-٥- غیرفازی کردن پارامترهای مدل

در نهایت، برای غیرفازی کردن وزن پارامترهای مدل از رابطهٔ میانگین هندسی زیر ستفاده می‌شود که وزن پارامترها در قالب عدد قطعی به‌دست می‌آید:

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^{3} w_{ij}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (۹)$$

۲-٥- ارزیابی صحت خروجی مدل پیش‌بینی مکانی سیلاب

ارزیابی عملکرد مدل ترکیبی پیش‌بینی مکانی سیلاب توسط معیارهای دقت، حساسیت، شفافیت و صحت بررسی شد (Chapi et al., 2017). بر این اساس، در مدلی که مقادیر معیارهای اشاره شده به سمت یک تمایل داشته باشند، مدل مناسبی شناخته می‌شود (Bui et al., 2015). نتیجهٔ معیارهای مدل‌سازی در مناطق با حضور یا عدم‌حضور سیلاب به‌صورت دوگانهٔ مثبت و منفی می‌باشند.

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۱۰)$$

$$\text{SpecifiCity} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (۱۱)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (۱۲)$$

این طبقه‌بندی منجر به ایجاد چهار حالت TP، TN، FP و FN می‌شود که به‌ترتیب تعداد نقاط سیلاب‌هایی که به‌درستی به‌عنوان سیلاب طبقه‌بندی شده‌اند، تعداد نقاط سیلاب‌هایی که به اشتباه به‌عنوان غیرسیلابی طبقه‌بندی شوند، تعداد نقاط غیرسیلابی که به‌درستی به‌عنوان مناطق غیرسیلابی طبقه‌بندی شده‌اند، FP تعداد نقاط غیرسیلابی که به اشتباه به‌عنوان مناطق سیلابی طبقه‌بندی شده‌اند، می‌باشد (Tsangaratos and Benardos, 2014). در نهایت، بهترین نتیجه از این چهار حالت زمانی است که مقدار TP زیاد و مقدار FP کم باشد (Umar et al., 2014).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- وزن عوامل مؤثر

نتایج نهایی امتیازدهی در روش ترکیبی فازی-دلفی-سلسله مراتبی در جدول ۲ نشان داده شده است. یافته‌ها نشان داد که شیب‌های کم‌تر از ۱۰ درصد (مسطح)، مناطق با ارتفاع از سطح دریای کم‌تر از ۱۴۰۰ متر، جهت شیب و دامنه‌های بدون انحنای (مسطح)، کاربری ارضی شهری با تراکم ساختمانی، بارندگی‌های بیش‌تر از ۳۶۹ میلی‌متر و جنس سنگ از نوع Qt2 (آبرفت‌های دوران کواترنر) دارای بیش‌ترین حساسیت نسبت به‌وقوع سیلاب نسبت به انواع دیگر جنس سنگ‌ها در شهر سنندج است (جدول ۲). هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد، از یک طرف با افزایش فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از معابر و فاصله از آبراهه‌ها از حساسیت به‌وقوع سیلاب شهری کاسته می‌شود. از طرف دیگر با افزایش مقدار تراکم ساختمانی، ترکم معابر و تراکم آبراهه‌ها در شهر سنندج به‌میزان حساسیت به‌وقوع سیلاب افزوده می‌شود. این نتایج با نتایج Rahmani et al., (2014) که بیان کردند مناطق مسکونی با بیش‌ترین مساحت، بیش‌ترین خطر آسیب‌پذیری را دارد، مطابقت دارد. هم‌چنین، در شکل ۳ اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب در شهر سنندج بر اساس وزن‌های غیرفازی را نشان می‌دهند. بر این اساس نتایج حاکی از آن است که تراکم آبراهه، زاویهٔ شیب و فاصله از آبراهه بیش‌ترین تأثیرگذاری را در وقوع سیلاب شهر سنندج داشته‌اند. بارندگی، تراکم معابر، تراکم ساختمانی، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از معابر، تجمعی جریان، ارتفاع، کاربری ارضی، سنگ‌شناسی و انحنای شیب از نظر اهمیت در وقوع سیلاب شهر سنندج در اولویت‌های بعدی قرار دارند. این نتایج با نتایج Azadtalab et al. (2020) که بیان کردند تراکم ساختمانی تقش مهمی در وقوع سیلاب های شهر سنندج دارند مطابقت دارد. هم‌چنین، با نتایج مطالعهٔ Ahmadi et al. (2023) که نشان دادند فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب شهری هستند هم‌سو می‌باشد.

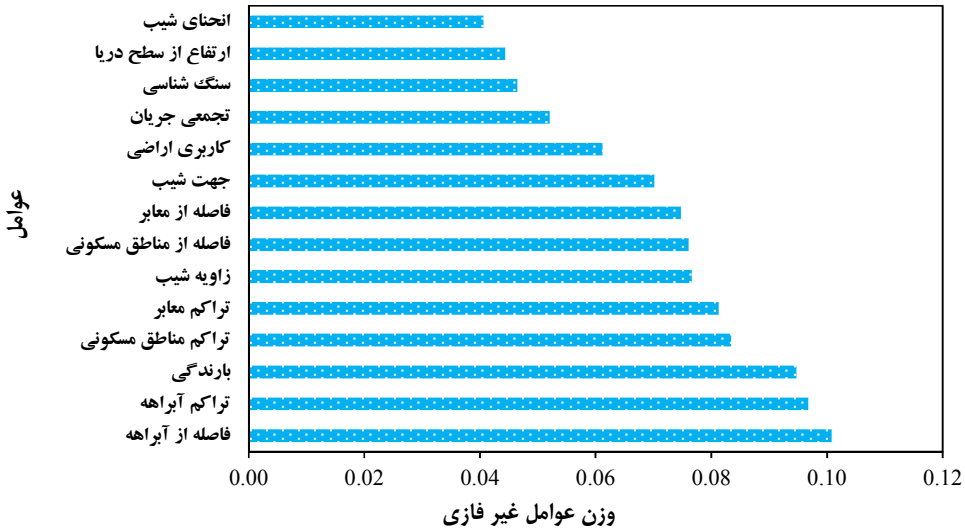
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول ۲- وزن‌های غیرفازی عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب شهر سنندج

Table 2- Non-fuzzy weights of influencing factors on the occurrence of floods in Sanandaj City

طبقات عوامل مؤثر	زاویهٔ شیب	جهت شیب	ارتفاع	انحنای شیب	تجمعی جریان	کاربری اراضی	فاصله از مناطق مسکونی	تراکم مناطق مسکونی	فاصله از معابر	تراکم معابر	بارندگی	سنگ‌شناسی	تراکم آبراهه	فاصله از آبراهه
1	0.318	0.342	0.291	0.466	0.106	0.365	0.279	0.122	0.302	0.096	0.086	0.348	0.081	0.292
2	0.236	0.281	0.237	0.274	0.131	0.303	0.228	0.157	0.233	0.138	0.134	0.272	0.117	0.23
3	0.203	0.208	0.202	0.260	0.183	0.199	0.204	0.203	0.216	0.208	0.174	0.221	0.202	0.199
4	0.147	0.169	0.160	-	0.262	0.133	0.166	0.236	0.139	0.262	0.257	0.159	0.279	0.156
5	0.095	-	0.110	-	0.316	-	0.123	0.282	0.109	0.293	0.348	-	0.320	0.123
وزن	0.077	0.07	0.044	0.041	0.052	0.061	0.076	0.083	0.075	0.081	0.095	0.046	0.097	0.101



شکل ۳- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب شهر سنندج با روش ترکیبی فازی-دلفی-تحلیل سلسله مراتبی

Figure 3- Prioritization of factors affecting the occurrence of floods in Sanandaj City with the Fuzzy-Delphi-AHP hybrid model

۳-۲- ارزیابی کارایی مدل ترکیبی FDAHP

جدول ۳ نتایج ارزیابی مدل‌سازی با مدل ترکیبی FDAHP بر اساس موقعیت سیلاب‌های شاهد را نشان می‌دهد. یافته‌های این جدول نشان داد که مقادیر حساسیت، شفافیت و صحت به‌ترتیب یک، ۰/۷۵۷ و ۰/۸۷۸ به‌دست آمدند. مقدار ۱۰۰ درصد برای حساسیت به‌این معنی است که این مدل توانسته است تمامی مناطقی که سیلاب در آن‌جا حضور داشته‌اند را به‌درستی به‌عنوان مناطق سیلابی پیش‌بینی نماید. هم‌چنین، مقدار ۰/۷۵۷ برای شفافیت نشان‌دهندهٔ این موضوع است که ۷۵/۷ درصد از مناطقی که در آن‌جا سیلابی اتفاق نیافتاده است به‌درستی به‌عنوان مناطق غیرسیلابی طبقه‌بندی شده‌اند. این در حالی است که صحت کلی طبقه‌بندی هم مناطق سیلابی و غیرسیلابی در کل ۸۷/۸ درصد توسط مدل ترکیبی استفاده شده پیش‌بینی شده است.

جدول ۳- معیارهای ارزیابی صحت مدل ترکیبی FDAHP

Table 3- Criteria for evaluating the accuracy of the combined FDAHP model

پارامترها	مدل ترکیبی FDAHP
True positive (TP)	37
True negative (TN)	28
False positive (FP)	9
False negative (FN)	0
Sensitivity	1
SpecifiCity	0.757
Accuracy	0.878

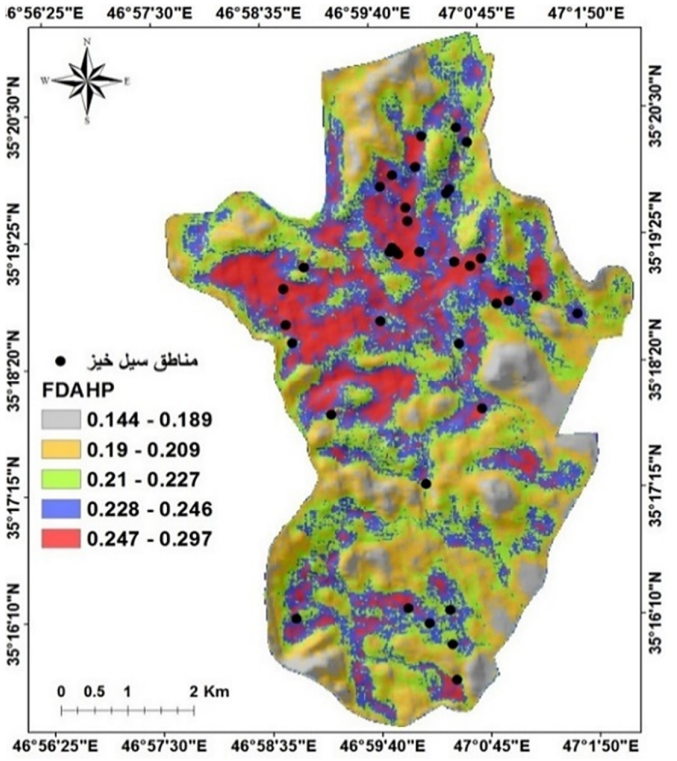
۳-۳- نقشهٔ پیش‌بینی سیلاب شهر سنندج

با استفاده از روش ترکیبی فازی- دلفی-سلسله مراتبی، در ابتدا بر اساس نظرسنجی متخصصان، اعداد فازی با استفاده از روابط (۱) تا (۴) محاسبه شد. سپس با تشکیل ماتریس مقایسه‌ای زوجی فازی توسط روابط (۵) و (۶)، وزن فازی پارامترها با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه شد. در نهایت، وزن‌های غیرفازی با استفاده از رابطهٔ (۹) محاسبه و به هر کدام از عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب در منطقهٔ مورد مطالعه اعمال شد. بر این اساس، نقشهٔ حساسیت سیلاب شهری با روش Quantile در محیط ArcGIS

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تهیه و به پنج کلاس حساسیت خیلی کم (۰/۱۸۹–۰/۱۴۴)، حساسیت کم (۰/۲۰۹–۰/۱۹۰)، حساسیت متوسط (۰/۲۲۷–۰/۲۱۰)، حساسیت بالا حساسیت (۰/۲۴۶–۰/۲۲۸) و حساسیت خیلی بالا (۰/۲۹۷–۰/۲۴۷) طبقه‌بندی و تهیه شد. شکل ۴ نقشهٔ پیش‌بینی مکانی مناطق با پتانسیل‌های مختلف سیلاب شهری در شهر سنندج را نشان می‌دهد. با مشاهدهٔ شکل ۴ نشان می‌دهد که مناطق پای‌کوهی و مناطقی که تراکم ساختمان زیاد است، به‌دلیل افزایش درصد ارضی غیرقابل نفوذ پتانسیل بالاتری برای وقوع سیل دارند (رنگ قرمز در شکل ۴). این نتیجه با نتایج مطالعهٔ Allahveisi et al. (2012) مطابقت دارد. این در حالی است که مناطق با حساسیت خیلی کم و کم در نوک کوه‌ها و مناطقی که تحت پوشش فضای سبز شهری با ظرفیت بالای نفوذپذیری و کاهش رواناب ناشی از بارندگی‌های رگباری به‌خصوص در فصل بهار و اوایل تابستان (رگبارهای تند فرسایشی) قرار دارند، واقع شده‌اند.



شکل ٤- نقشهٔ پیش‌بینی سیلاب شهر سنندج با استفاده از مدل ترکیبی FDAHP

Figure 4- Urban flood prediction of Snandaj City by FDAHP hybrid model

۳-٤- ارزیابی صحت نقشهٔ پیش‌بینی سیلاب شهری

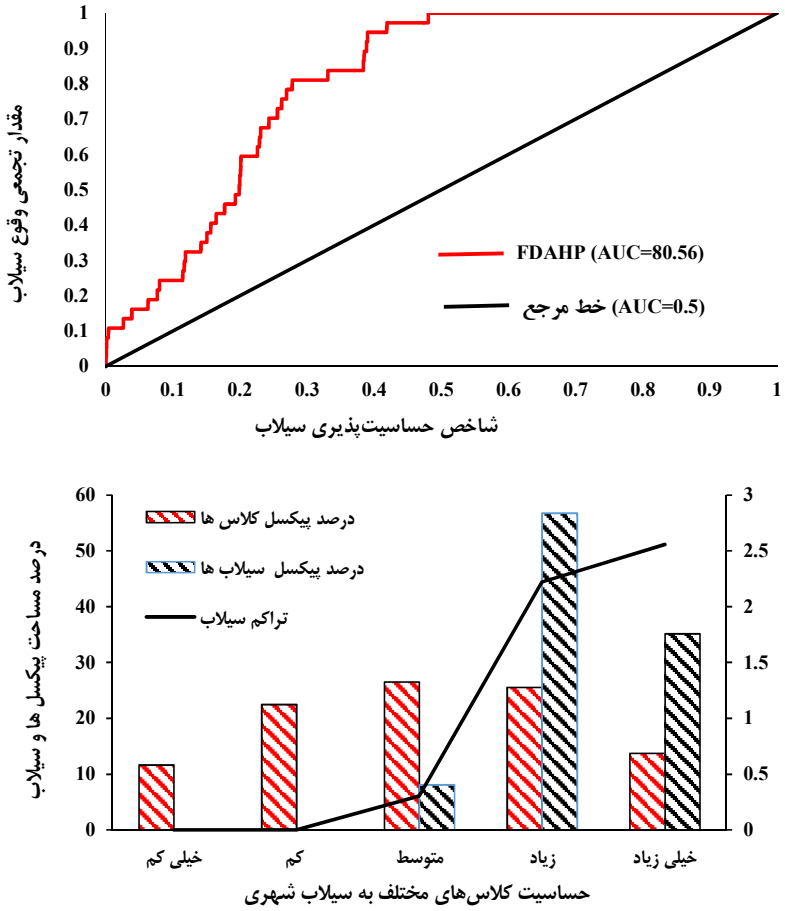
به‌منظور ارزیابی صحت نقشهٔ پیش‌بینی سیلاب به‌دست آمده از منحنی نرخ موفقیت[1] استفاده شد. برای این منظور از ترسیم نمودار مقایسه‌ای برای موقعیت مکانی وقوع سیلاب‌ها با نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت سیلاب استفاده شد (شکل ۵). ارزیابی صحیح بیان‌گر این است که مقادیر برآورد شده تا چه مقدار با سیلاب‌های پیش‌بینی شده، مطابقت دارند (Shirzadi et al., 2017). هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که در مدل ترکیبی فازی–دلفی–تحلیل سلسله مراتبی، درصد مساحت زیرمنحنی (AUC) مقدار ۸۰/۵۶ به‌دست آمد (شکل ۵). به این معنی که این مدل ترکیبی ۸۰/۵۶ درصد توانایی پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع سیلاب شهری را داشته است. علاوه‌بر شاخص PRC برای ارزیابی صحت نقشه از شاخص تراکم سیلاب در کلاس‌های مختلف حساسیت نیز استفاده شد (شکل ۵–بالا). بر این اساس، افزایش شاخص تراکم سیلاب از سمت کلاس با حساسیت خیلی کم به سمت کلاس با حساسیت خیلی زیاد، صحت نقشه به‌دست آمده را نشان می‌دهد. هم‌چنین، این شکل درصد پیکسل‌های تحت پوشش هر کلاس حساسیت و درصد پیکسل‌های تحت پوشش سیلاب‌ها در هر کلاس از حساسیت را نشان می‌دهند. نتایج توزیع مناطق شاهد سیلابی در کلاس‌های حساسیت نشان

[1] Prediction Rate Curve (PRC)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

داد که مناطق با حساسیت به‌وقوع سیل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به‌ترتیب دارای صفر، ۸/۱۰، ۵۶/۷۵ و ۳۵/۱۳ درصد از نظر درصد فراوانی وقوع سیلاب در هر کلاس بودند.



شکل ۵- منحنی نرخ پیش‌بینی سیلاب شهری (بالا) و تراکم سیل (پایین)

Figure 5- Prediction rate curve of urban flooding (top) and flood density (bottom)

٤- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش پیش‌بینی وقوع سیلاب شهر سنندج با مدل ترکیبی FDAHP است. از چهارده عامل مؤثر در ابتدا برای مدل‌سازی استفاده شد. وزن‌های فازی و غیرفازی بر اساس روش دلفی و فازی تهیه شدند. نتایج مدل‌سازی با سه شاخص حساسیت، شفافیت و دقت کلی طبقه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس وزن‌های غیرفازی از ماتریس زوجی هر عامل و ماتریس زوجی تمامی عوامل نقشهٔ پیش‌بینی مکانی تهیه و از طریق درصد مساحت زیرمنحنی و شاخص تراکم سیلاب شهری مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، بارندگی و تراکم ساختمانی به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیرگذاری را در وقوع سیلاب شهر سنندج داشتند.

مشاهدهٔ نقشهٔ پیش‌بینی مکانی سیلاب نشان داد که بخش زیادی از شهر سنندج شامل نیمهٔ شمالی و بخشی از نیمهٔ غربی و مرکز شهر که در برگیرندهٔ نقاط پرتراکم شهر از نظر جمعیت انسانی و تراکم ساختمانی نیز می‌باشند و بخشی از نیمهٔ جنوبی شهر که ناحیهٔ ویژه و پرجمعیت شهرک بهاران را شامل می‌شود، حساسیت به وقوع سیلاب زیاد و خیلی زیاد دارند و مناطق حاشیهٔ مرزی اطراف شهر کم‌تر در معرض این پدیده قرار دارند. بنابراین، با افزایش فاصله از مرکز شهر و نقاط مسکونی به‌سمت حاشیه‌ها، پتانسیل وقوع سیلاب کم‌تر می‌شود. از طرفی مشخص شد که بیش‌ترین مساحت کل محدودهٔ شهر در خطر متوسط و زیاد است که این امر نشان‌دهندهٔ پتانسیل زیاد وقوع سیلاب در سطح وسیعی از شهر سنندج است. بر اساس مقدار ۸۰/۵۶ درصد مساحت زیر منحنی، نتایج صحت‌سنجی حاکی از این است که ۸۰/۵۶ درصد

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

از مناطقی که سیلاب شهری در آن مناطق قابل مشاهده هستند، به‌درستی پیش‌بینی شده‌اند. هم‌چنین، نتایج صحت‌سنجی نقشهٔ پیش‌بینی مکانی سیلاب شهری با روش تراکم سیلاب نشان داد که از سمت کلاس سیلاب با پتانسیل مکانی خیلی کم به‌سمت کلاس‌های زیاد و خیلی زیاد مقدار سیلاب مشاهده شده افزایش یافته است که نشان از تأیید و صحت نقشهٔ به‌دست آمده را دارد.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از مدل ترکیبی FDAHP، این مدل توانایی خوبی در شناسایی مناطق مستعد به‌وقوع سیلاب شهری را دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار برای شناسایی این مخاطرهٔ طبیعی در مناطق دیگر نیز آزمایش و ارزیابی شود. از آن‌جاکه دیدگاه ما در رابطهٔ با وقوع سیلاب بیش‌تر حول محور پیش‌گیری از سیل است. بنابراین، با توجه به مبانی نظری ذکر شده و دیدگاه‌های موجود در زمینهٔ آسیب‌پذیری سیل می‌توان گفت که قرارگیری این منطقه روی حوضه‌هایی که شیب به سمت منطقه دارند، عدم رعایت مسیل‌ها و شبکهٔ عبوری آبراهه‌ها، ساخت و سازهای غیر مجاز، تراکم بالای ساخت و ساز متمرکز در مرکز شهر، بافت قدیمی و فرسوده ساختمان‌ها و طراحی نامناسب و نامتناسب کانال‌های انتقال آب سطح شهر باعث تشدید این آسیب‌پذیری شده‌اند. در پایان، می‌توان گفت که دست‌یابی به یک نقشهٔ پیش‌بینی مکانی دقیق و معقول می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان شهری در شناسایی مناطق حساس به‌وقوع سیل جهت مدیریت بحران سیلاب شهری کمک شایانی نماید.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های معنوی دانشگاه پیام نور و دانشگاه کردستان در انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسندهٔ مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

بهنام شیرزادی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخهٔ اولیهٔ مقاله، کنترل نتایج؛ **فرزاد ویسی:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **محمد صدیق قربانی:** ویرایش و بازبینی مقاله؛ **عطاالله شیرزادی:** ویرایش و بازبینی مقاله؛ **هیمن شهابی:** ویرایش و بازبینی مقاله.

منابع

احمدزاده، حسین، سعیدآبادی، رشید، و نوری، الهه (۱۳۹۴). بررسی و پهنه‌بندی مناطق مستعد به‌وقوع سیل با تأکید بر سیلاب‌های شهری (مطالعه موردی: شهر ماکو)، *هیدروژئومورفولوژی*، ۲(۲)، ۱-۲۴. dor:20.1001.1.23833254.1394.2.2.1.0

احمدی ایلخچی، عباس، حاج عباسی، محمد علی، و جلالیان، احمد (۱۳۸۱). اثر تغییر کاربری زمین‌های مرتعی و دیم‌کاری بر تولید رواناب، هدر رفت و کیفیت خاک در منطقه دوراهان، چهارمحال و بختیاری. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۶(۴)، ۱۰۳-۱۱۵. dor:20.1001.1.22518517.1381.6.4.9.7

اصغری مقدم، محمدرضا (۱۳۷۸). جغرافیای طبیعی شهر: هیدرولوژی و سیل‌خیزی شهر. چاپ اول، انتشارات مسعی تهران، ۲۰۰ صفحه.

آزادطلب، مهناز، شهابی، هیمن، شیرزادی، عطاالله، و چپی، کامران (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری در شهر سنندج با استفاده از مدل‌های ترکیبی شاخص آماری و تابع شواهد قطعی. *مطالعات شهری*، ۳۶، ۲۷-۴۰. doi:10.34785/J011.2021.801

رحمانی، محمد، عبوری، مهدی، و ملاآقاجانزاده، ساره. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری با استفاده از روش‌های همپوشانی ترکیب خطی وزنی (WLC) و سناریوهای میانگین وزنی مرتب شده (OWA) مطالعه موردی: شهر ساری، مازندران، ایران. کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در علوم کشاورزی و محیط زیست.https://civilica.com/doc/436043

رسولی، علی‌اکبر (۱۳۷۷). ضرورت ایجاد گرایش سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در گروه‌های جغرافیایی کشور. *رشد آموزش جغرافیا*، ۴۶، ۱-۶. https://journals.tabrizu.ac.ir/article_1914_3b9582a735ab42d15e03984bd5487925.pdf

زراعتکار، زهرا (۱۳۹۱). پهنه‌بندی سیلاب رودخانه‌های شاهرود و پلباغ در شهر بیرجند با استفاده از HEC-RAS و ARC-GIS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل.

شعبانی لنگرانی، مصطفی (۱۳۹۱). کاربرد تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در کنترل سیلاب‌های شهری (مطالعه موردی: شمال شهر تبریز). دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

شیرزادی، عطاالله، سلیمانی، کریم، حبیب نژاد روشن بها، محمود، کاویان، عطاالله، و چپی، کامران (۱۳۹۶). معرفی یک مدل جدید ترکیبی الگوریتم مبنا به‌منظور پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش‌های سطحی اطراف شهر بیجار. *جغرافیا و توسعه*، ۴۶، ۲۲۵-۲۴۶. doi:10.22111/GDIJ.2017.3076

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

صادقی، سیدحمیدرضا، جلالی‌راد، رامین، و علی محمدی سراب، عباس علی (۱۳۸۲). پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی (مطالعهٔ موردی؛ حوضهٔ آبریز شهری دارآباد تهران). *علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر*، ۱(۲)، ۳۴-۴۷. https://magiran.com/p163705

صیاد، دانیال، قضاوی، رضا، و امیدوار، ابراهیم (۱۴۰۱). راهبردهای مناسب مدیریتی زیرساخت‌های شهری در برابر سیلاب از منظر پدافند غیرعامل با استفاده از SWOT و QSPM (مطالعه موردی: شهر کاشان). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۱)، ۴۲-۵۴. doi:10.22098/MMWS.2022.9651.1055

قهرودی تالی، منیژه (۱۳۸۶). پیش‌بینی زیر ساختار داده‌های مکانی در حوضه‌های رودها در ایران. سومین همایش سیستم‌های اطلاعات مکانی، https://sid.ir/paper/811136/fa

کاظمی، محمد، و جعفرپور، عاطفه (۱۴۰۱). شناسایی آستانه متغیرهای تأثیرگذار بر پهنه‌های سیلاب با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین (مطالعه موردی: حوزه انتهایی کارون بزرگ). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۲۱۴-۲۳۲. doi: 10.22098/mmws.2023.12285.1220

گراوندی، یوسف (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری با استفاده از آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره مطالعه (MCDA) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: شهر کرمانشاه). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

الله‌ویسی، مسلم، حسینی، بشیر، احمدی‌توانا، بهمن، و جهدی، نیما (۱۳۹۲). شناسایی عوامل شهری مؤثر در خطرپذیری سیلاب-های شهری (مطالعه موردی: شهر سنندج)، کنفرانس ملی مدیریت سیلاب، دبیرخانه دایمی کنفرانس ملی مدیریت سیلاب، تهران، https://civilica.com/doc/207377

محمدی، حسین، مقصودی، مهران، و روشن، غلامرضا (۱۳۸۵). جایگاه و نقش سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیلاب در کاهش اثرات مخرب سیل. *مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی (چشم انداز جغرافیایی سابق)*، ۱(۳)، ۸۷-۱۰۱. http://noo.rs/JS5dK

مسعود، وفایی، محمد تقی، دستورانی، رستمی خلج، محمد (۱۴۰۱). ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و ارائه سناریوهای مدیریتی مربوطه با استفاده از مدل HEC-RAS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۲۲۵-۲۳۹. doi: 10.22098/mmws.2022.11815.1173

مقدم‌نیا، ع، و وفاخواه، م (۱۳۹۸). کنترل سیلاب. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، چاپ دوم، ۴۱۱ صفحه.

References

Ahmadi Iikhchi, A., Hajabbassi, M.A., & Jalalian. A. (2003). Effects of converting range to dry-farming land on runoff and soil loss and quality in Dorahan, Chaharmahal & Bakhtiari Province. *Journal of Crop Production and Processing*, *6*(4),103-115. dor:20.1001.1.23833254.1394.2.2.1.0 [In Persian]

Ahmadi, S., Amjadi, H., Chapi, K., Soodmand Afshar, R., & Ebrahimi, B. (2023). Fuzzy flash flood risk and vulnerability assessment for the City of Sanandaj, Kurdistan Province, Iran. *Natural Hazards*, *115*(1), 237-259. doi:10.1007/s11069-022-05552-z

Ahmadzade, H., Saiid Abadi, R., & Noori, A. (2015). A Study and zoning of the areas prone to flooding with an emphasis on Urban Floods (Case Study: City of Maku). *Hydrogeomorphology*, *2*(2), 1-24. dor:20.1001.1.23833254.1394.2.2.1.0 [In Persian]

Allahveisi, M., Hosseini, B., Ahmadi Tawana, B., & Jahdi, N. (2012). Identification of urban factors affecting the vulnerability of urban floods (case study: Sanandaj City). National Conference on Flood Management, Permanent Secretariat of National Conference on Flood Management, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/207377. [In Persian]

Anni, A.H., Cohen, S., & Praskievicz, S. (2020). Sensitivity of urban flood simulations to storm water infrastructure and soil infiltration. *Journal of Hydrololgy, 588*, 125028. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125028

Asghari Moghadam, M. (1998). Natural geography of the City: hydrology and flooding of the City, 1th Edition, Masai Publishing House Tehran, 200 pages. [In Persian]

Azadtalab, M., Shahabi, H., Shirzadi, A., & Chapi, K. (2020). Flood hazard mapping in Sanandaj using combined models of statistical index and evidential belief function. Motaleate Shahri, *9*(36), 27-40. doi: 10.34785/J011.2021.801. [In Persian]

Büchele, B., Kreibich, H., Kron, A., Thieken, A., & Ihringer, J. (2006). Flood-risk mapping, contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *6*, 485-503. doi:10.5194/nhess-6-485-2006

Bui, D.T., Pradhan, B., Revhaug, I., Nguyen, D.B., Pham, H.V., Bui, Q.N. (2015). A novel hybrid evidential belief function-based fuzzy logic model in spatial prediction of rainfall-induced

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

shallow landslides in the Lang Son City area (Vietnam). *Geomatics, Natural Hazards Risk*, *6*(3), 243e271. doi:10.1080/19475705.2013.843206

Chapi, K., Singh, V, P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Tien Bui, D., Pham, B.T., & Khosravi, K.H. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software, 95*, 229-245. doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.012

Dharmarathne, G., Waduge, A.O., Bogahawaththa, M., Rathnayake, U., & Meddage, D.P.P. (2024). Adapting cities to the surge: A comprehensive review of climate-induced urban flooding. *Results in Engineering*, p.102123.doi:10.1016/j.rineng.2024.102123

Fernández, D.S., & Lutz, M.A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology, 111*, 90–98. doi:10.1016/j.enggeo.2009.12.006

Ghahrodi Tali, M. (2007). Forecasting the substructure of spatial data in river basins in Iran, the third conference on spatial information systems, https://sid.ir/paper/811136/fa [In Persian]

Gravandi, Y. (2011). Urban flood risk mapping using multi-criteria decision analysis (MCDA) and geographic information system (GIS) (Case study: Kermanshah City). Master's Thesis, Sari University of Natural Resources, Iran. [In Persian]

Kazemi, M., & Jafarpour, A. (2022). Identifying the threshold of variables affecting flood zones using machine learning technique (Case study: Karun Bozor End Basin). *Soil And Water Modeling And Management*, *4*(1), 214-232. doi:10.22098/mmws.2023.12285.1220. [In Persian]

Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress Planning*. *62*(1), 3–65. doi:10.1016/j.progress.2003.09.002

Moghadamnia, A., and Wafakhah, M. (2018). Flood control. Publications of Tarbiat Modares University, 2th Edition:, 411 pages.

Mohammadi, H., Maghsoudi, M., & Roshan, G.H. (2006). The position and role of flood forecasting and warning systems in reducing the destructive effects of floods. *Geographical Perspective*, *1*(3), 87-101. http://noo.rs/JS5dK [In Persian]

Moon, H.T., Kim, J.S., Chen, J., Yoon, S.K., & Moon, Y.I. (2024). Mitigating urban flood Hazards: Hybrid strategy of structural measures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *108*, 104542. doi:10.1016/j.ijdrr.2024.104542

Rahmani, M., Tarari, M., & Molla Aghajanzadeh, S. (2014). Urban flood risk mapping using weighted linear combination (WLC) and ordered weighted average (OWA) scenarios (Case study: Sari City, Mazandaran, Iran), International Conference on Modern Research in Sciences Agriculture and Environment, Karin Conference Excellence Institute. https://sid.ir/paper/862056/fa [In Persian]

Rasouli, A. (1998). The necessity of creating the geographic information systems in the geographical groups of the country. *Geography Education Development*, *29*, 1-8. [In Persian]

Sadeghi, S.H.R., Jalalirad, R., & Mohammadi Sarabi, A. (2003). Flood mapping using HEC-RAS software and geographic information system (Case study; Darabad urban catchment of Tehran). *Caspian Agricultural Sciences and Natural Resources Research Journal*, *1*(2), 34-47. [In Persian]

Sayyad, D., Ghazavi, R., & Omidvar, E. (2022). Appropriate urban infrastructure management strategies against floods from the perspective of passive defense using SWOT and QSPM (Case study: Kashan City). *Water and Soil Management and Modelling*, *2*(1), 42-52. doi: 10.22098/mmws.2022.9651.1055. [In Persian]

Shabani Langrani, M. (2011). Application of remote sensing techniques and geographic information system in urban flood control (Case study: North of Tabriz City), Master's thesis, University of Tabriz, Tabriz, Iran. [In Persian]

Shirzadi, A., Chapi, K., Shahabi, H., Solaimani, K., Kavian, A., & Ahmad, B.B. (2017). Rock fall susceptibility assessment along a mountainous road: an evaluation of bivariate statistic, analytical hierarchy process and frequency ratio. *Environmental Earth Sciences*, *76*(4), 152. doi:10.1007/s12665-017-6471-6

Sowmya, K., & John, C.M. (2015). Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, Southwest coast of India, using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, *75*(2). doi:10.1007/s11069-014-1372-4

Tsangaratos, P., & Benardos A. (2014). Estimating landslide susceptibility through an artificial neural network classifier. *Natural Hazards, 74*(3), 1489-1516. doi:10.1007/s11069-014-1245-x

Umar, Z., Pradhan, B., Ahmad, A., NeamahJebur, M., & Shafapour Tehrany, M. (2014). Earthquake

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

induced landslide susceptibility mapping using an integrated ensemble frequency ratio and logistic regression models in West Sumatera Province, Indonesia. Catena, *118*, 124-135. doi:10.1016/j.catena.2014.02.005

United Nations Development Programme (UNDP), (2004). A global report reducing disaster risks a challenge for development. *267*, 2541-2553.

Vafaei, M, Dastorani, M., & Rostami khalaj, M. (2022). Flood risk assessment in Ferdowsi University of Mashhad campus and presentation of related management scenarios using HEC-RAS model. *Water and Soil Modeling and Management*, 3(3), 225-239. doi: 10.22098/mmws.2022.11815.1173. [In Persian]

Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Pamučar, D., Gigović, L., Drobnjak, S., Tien Bui, D., & Duan, H. (2018). A hybrid GIS multi-criteria decision-making method for flood susceptibility mapping at Shangyou, China. *Remote Sensing*, *11*(1), 62. doi:10.3390/rs11010062

Ye, M.Q., Wu, J.D., Wang, C.L., & He, X. (2019). Historical and future changes in asset Society. *Weather, Climate, and Society*, *11*(2), 307–319.

Zeraatkar, Z. (2011). Flood mapping of Shahroud and Pelbagh rivers in Birjand using HEC-RAS and ARC-GIS. M.Sc. Thesis, University of Zabul, Iran. [In Persian]

Archive of SID.ir