Vol 14, No. 3, Autumn 2024

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

The effect of return period discharge in applying one of the natural flood management measures on flood risk reduction

Soodeh Kalami[1] | **Mohammad Mahdi Ahmadi**[2]✉ | **Reza Hasanzade**[3]

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. E-mail: soodehkalami@agr.uk.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. E-mail: ahmadi_mm@uk.ac.ir
3. Department of Ecology, Institute of Sciences and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. E-mail: r.hassanzadeh@kgut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 February 2024
Received in revised form
25 March 2024
Accepted 25 April 2024
Published online 23 November 2024

Keywords:
Expected Annual Damage (EAD)
Damage Reduction
Natural Flood Management (NFM)
Meander

ABSTRACT

In this study, the amount of flood risk reduction due to applying one of natural flood management measures, in alluvial fans, was investigated. Usually, flood management is done by common structural and non-structural methods, which are expensive and short-lived. Flood damage reduction and using more stable and flexible solutions for flood management, have been received more attention from researchers in recent years. Using natural flood management (NFM) is considered stable methods of flood management, and in this study by presenting a natural solution in the form of increasing the length of the river by creating a meander, to investigate its effect on the expected flood damage compared to the base mode is paid. The method of conducting this study is based on modeling, which uses three models: HEC-HMS, HEC-RAS 2D and ArcMap. The study area is Abbakhsha River catchment located in Bardsir city, Kerman province, with an area of 1136 square kilometers, has the state of an alluvial fan that numerous floods have occurred. Topography, precipitation and discharge are the most important data required for this study. According to the results of this research, creating a meander in the river reduces the expected annual damage (EAD) by 15.5%. The results of this research can be effective in the planning and policy making of optimal flood management solutions in the region.

Cite this article: Kalami, S., Ahmadi, M. M., & Hasanzade, R. (2024). The effect of return period discharge in applying one of the natural flood management measures on flood risk reduction. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (3), 601-613. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.372165.1144

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.372165.1144

دوره چهاردهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۳

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

اثر دوره بازگشت دبی در اعمال یکی از اقدامات طبیعی مدیریت سیل بر کاهش ریسک سیلاب

سوده کلامی[۱] | محمدمهدی احمدی[۲]✉ | رضا حسن‌زاده[۳]

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: soodehkalami@agr.uk.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: ahmadi_mm@uk.ac.ir

۳. گروه پژوهشی اکولوژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. رایانامه: r.hassanzadeh@kgut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

کلیدواژه‌ها:

خسارت مورد انتظار سیل (EAD)

کاهش خسارت

مدیریت طبیعی سیل (NFM)

مئاندر

چکیده

در این پژوهش میزان کاهش ریسک سیل در اثر پیاده‌سازی یکی از روش‌های مدیریت طبیعی سیل در یک منطقه مخروط‌افکنه موردبررسی قرار گرفته است. مدیریت سیل به روش‌های متداول سازه‌ای و غیرسازه‌ای انجام می‌شود که هزینه اجرای آن‌ها زیاد و عمر این پروژه‌ها کوتاه است. کاهش خسارت ناشی از سیل و استفاده از روش‌هایی به‌منظور مدیریت پایدار و انعطاف‌پذیرتر سیل در سال‌های اخیر بیش‌تر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. استفاده از رویکردهای طبیعی کنترل سیل (NFM) یکی از روش‌های مدیریت پایدار سیل محسوب شده که در این پژوهش با ارائه یک راه‌کار طبیعی در قالب افزایش طول مسیر رودخانه با ایجاد خم در مسیر اصلی به بررسی اثرگذاری آن بر میزان خسارت مورد انتظار سیلاب نسبت به حالت اصلی پرداخته می‌شود. روش انجام این پژوهش بر پایه مدل‌سازی بوده که از سه مدل HEC-HMS، HEC-RAS 2D و ArcMap استفاده شده است. منطقه موردمطالعه حوضه آبریز رودخانه آبخشاء واقع در شهرستان بردسیر، استان کرمان به وسعت ۱۱۳۶ کیلومترمربع، دارای حالت مخروط‌افکنه که سیل‌های متعددی در آن اتفاق افتاده است. داده‌های توپوگرافی، بارش و دبی از مهم‌ترین داده‌های موردنیاز این پژوهش محسوب می‌شوند. براساس نتایج این پژوهش ایجاد خم در مسیر رودخانه باعث کاهش ۱۵/۵ درصدی خسارت موردانتظار سالیانه (EAD) می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری راه‌کارهای بهینه مدیریت سیلاب در منطقه مؤثر باشد.

استناد: کلامی، سوده؛ احمدی، محمدمهدی و حسن‌زاده، رضا (۱۴۰۳). اثر دوره بازگشت دبی در اعمال یکی از اقدامات طبیعی مدیریت سیل بر کاهش ریسک سیلاب. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴ (۳)، ۶۰۱-۶۱۳. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2024.372165.1144

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

ریسک سیل به پتانسیل بالقوه سیل در ایجاد آسیب و خسارت به جان انسان‌ها و متعلقات مادی یا خدمات اشاره دارد که در نتیجه پوشاندن حاشیه رودخانه‌ها توسط سیل اتفاق می‌افتد و به شدت، مدت و فراوانی یا احتمال خاصی بستگی دارد (Herrero *et al.*, 2009). سیل‌های فاجعه‌بار باعث مرگ میلیون‌ها نفر در قرن بیستم و ده‌ها میلیارد دلار خسارت مستقیم اقتصادی در هر سال شده‌اند (Merze *et al.*, 2021). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ریسک سیل با تغییرات آب‌وهوایی، رشد جمعیت و افزایش دارایی‌های اقتصادی افزایش می‌یابد و به‌طور مداوم با تغییرات شرایط زیربنایی تغییر می‌کند (Lai *et al.*, 2020). بنابراین، مدیریت سیل به‌عنوان یک روش مؤثر برای کاهش پیامدهای نامطلوب و مقابله با افزایش ریسک سیل ضرورت دارد.

افزایش فراوانی وقوع سیل ارتباط مستقیمی با تغییر اقلیم و گرمایش جهانی دارد. مدیریت این رخداد طبیعی باید به روش‌هایی صورت گیرد که منجر به افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای نگردد. روند پژوهش‌ها در این زمینه نشان می‌دهد که مدیریت سیل از رویکردهای سنتی به سمت مدیریت پایدار و انعطاف‌پذیر پیش می‌رود (Wang *et al.*, 2022). رویکردهای سنتی که بر پایه مهندسی سخت عمل می‌کنند به‌دلیل استفاده زیاد از مصالحی که انرژی زیادی در تولید آن‌ها استفاده شده است و تغییر سیمای منطقه (Gilvear *et al.*, 2012) باعث تنزل اکوسیستم طبیعی می‌شوند (Everard and Moggridge, 2012). کنترل سیلاب با مدیریت همزمان آب و زمین منجر به نتایج مفیدی در سطح حوضه و جوامع درگیرخواهد شد. مهم‌ترین نکته در این روش مدیریت سیل به‌کارگیری روش‌های طبیعی است. روش‌های طبیعی کنترل سیل (Natural Flood Management, NFM) یک مدیریت پایدار سیل می‌باشد که منجر به کاهش ریسک سیلاب می‌گردد (Ngai *et al.*, 2017). به‌عنوان مثال، نتایج اقدامات مدیریت طبیعی رودخانه در حوضه رودخانه Chiese نشان داد، مدیریت سیل براساس این روش‌ها بسیار پایدارتر، مقاوم‌تر و انعطاف پذیرتر است (Nardini and Pavan, 2012). مدیریت طبیعی سیل مجموعه‌ای از تکنیک‌های مورفولوژیکی و هیدرولوژیکی است که هدف اصلی آن‌ها کمک به کاهش سرعت و ذخیره آب است (Ngai *et al.*, 2017).

این نوع مدیریت سیلاب علاوه بر کاهش ریسک سیل می‌تواند منجر به تقویت ماهی‌گیری، احیای زیستگاه‌ها و حفاظت از تنوع زیستی گردد (Gilvear *et al.*, 2012; Wohl *et al.*, 2015)، اما نقش آن در کاهش ریسک سیلاب علاوه بر تحقق زیستگاه و تنوع زیستی و دیگر اهداف در گذر زمان بیش‌تر مشخص می‌شود (Wharton and Gilvear 2007; Nardini and Pavan 2012; Forbes *et al.*, 2015).

مورفولوژی منطقه و مشخصات هیدرولیکی رودخانه، وضعیت اکولوژی و زیست‌محیطی و پارامترهای طبیعی دیگر تأثیر زیادی بر نحوه مدیریت طبیعی سیل می‌گذارند. پژوهش Acreman *et al.* (2003) در اطراف رودخانه Cherwell تأثیر خاکریزها در اطراف رودخانه را بر دبی پیک سیلاب پایین‌دست مدل‌سازی کرده و نشان داد حضور این خاکریزها در اطراف رودخانه که منجر به قطع اتصال کانال رودخانه از سیلاب‌دشت شده است باعث افزایش ۵۰ تا ۱۵۰ درصدی پیک سیلاب و حذف خاکریزها منجر به کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی پیک سیلاب خواهد داشت. نتایج پژوهش Liu *et al.* (2004) نشان داد، پیچان‌رودی ساختن بازه‌ای از رودخانه و تغییرات ضریب زبری با استفاده از مدل توزیعی هیدرولوژیکی را بررسی و کاهش ۱۴ درصدی دبی اوج را به‌طور متوسط نشان می‌دهد. بازسازی شکل‌هایی از بستر بر روی ارتفاع سطح آب در رودخانه‌ای واقع در دشت با بستر شنی با استفاده از مدل‌سازی توسط Sear and Newson (2004) انجام شده و نتایج آن‌ها نشان داد در دبی پیک، تراز سطح آب افزایش چندانی (۰/۰۵ متر به‌طور متوسط) نسبت به قبل از بازسازی رودخانه نداشته است. *Sear et al.* (2006) با نظارت بر سه سایت بازسازی رودخانه در حوضه New Forest، قبل و بعد از احیای رودخانه (ایجاد مئاندر و کاهش ظرفیت کانال) به‌مدت سه سال، دریافتند که مدت و فراوانی پهنه سیل در سیلاب‌دشت‌ها افزایش یافته است. Kitts (2010) با استفاده از داده‌های مشاهداتی حاصل از احیای یک رودخانه (افزایش ۲۱ درصدی طول رودخانه و انباشتگی ۱۴۲ درصدی تنه درختان

بریده‌شده در رودخانه) به نتایج کاهش ۲۱ درصدی در دبی پیک سیلاب و افزایش ۳۳ درصدی زمان تأخیر برای دبی‌های کم‌تر از یک مترمکعب بر ثانیه دست یافتند. کاهش ۴۱ درصدی سرعت جریان برای دبی با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در نتیجه افزایش پوشش گیاهی گزارش شده است (Keesstra *et al.*, 2012). مدیریت طبیعی سیل به‌عنوان مؤثرترین راه مقابله با سیل‌های کوچک در رودخانه Chindwin توسط Lallemant *et al.* (2021) عنوان شده است.

با توجه به اندرکنش مختلف محیط با جریان سیلاب تصمیم‌سازی و بررسی سناریوهای مدیریت طبیعی نسبت به روش‌های متداول مهندسی سخت، پیچیده‌تر بوده و بررسی روش‌ها و سناریوهای مدیریت طبیعی سیل برای منطقه با ویژگی‌های خاص خود احتیاج به مدل سازی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی دقیق دارد (Ngai *et al.*, 2017). در این پژوهش اثر اعمال یکی از روش‌های طبیعی مدیریت سیل بر روی خسارت مورد انتظار سالیانه یک منطقه دارای حالت مخروطافکنه و هم‌چنین تأثیر دوره بازگشت دبی بر پارامتر مذکور بررسی شده است. به بیان دیگر هدف از انجام این پژوهش بررسی عکس‌العمل منطقه بر خسارت مورد انتظار سالیانه سیل در دبی‌های مختلف رودخانه در اثر اعمال یک روش طبیعی مدیریت سیل می‌باشد. روش طبیعی کنترل سیل در بستر نرم‌افزار GIS توسعه داده شده و با استفاده از دو مدل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی HEC-HMS و HEC-RAS 2D، پس از کالیبراسیون آن‌ها، خسارت مورد انتظار سالیانه محاسبه شد.

۲. مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه ۳۳ کیلومتر از رودخانه آببخشاء و نواحی اطراف آن، واقع در شهرستان بردسیر، استان کرمان می‌باشد. حوضه آبریز این رودخانه با وسعت ۱۱۳۶ کیلومترمربع دارای شش ایستگاه باران‌سنجی معمولی و دو ایستگاه آب‌سنجی دبی روزانه و ماهانه می‌باشد. بازه رودخانه موردمطالعه از ایستگاه هیدرومتری گدارزارچوئیه به طول و عرض جغرافیایی ۵۶/۵۶ درجه شمالی و ۲۹/۷۲ درجه شرقی شروع و تا انتهای حوضه به طول و عرض جغرافیایی ۵۶/۶۱ درجه شمالی و ۲۹/۹۱ درجه شرقی ختم می‌شود. شکل (۱) حوضه آبریز منطقه موردمطالعه، محل استقرار ایستگاه‌های باران‌سنجی و آب‌سنجی و بازه رودخانه موردمطالعه را نشان می‌دهد. داده‌های دبی و بارش روزانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی منطقه موردمطالعه، توپوگرافی رودخانه و اطراف آن و کاربری اراضی از جمله داده‌های موردنیاز تحقیق حاضر می‌باشند. همان‌طور که تصویر هوایی منطقه موردمطالعه نشان می‌دهد، رودخانه آببخشاء از مناطق کوهستانی شروع شده و پس از عبور از نواحی مخروطافکنه، دشت و مناطق کشاورزی از شهر بردسیر عبور می‌کند. ترکیبی از کوهستان، مخروطافکنه و دشت بودن منطقه موردمطالعه و جامعیت داشتن مدل ایجادشده، در این مطالعه از مدل دو بعدی هیدرولیکی برای شبیه‌سازی سناریوهای ایجادشده استفاده شده است. مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS برای مدل‌سازی انتخاب شده است. این مدل به‌دلیل استفاده از مفهوم Subgrid Variability برای مش‌بندی در بین نرم‌افزارهای هیدرولیکی دیگر از محبوبیت بسیاری برخوردار است.

۲. ۱. آماده‌سازی و کالیبراسیون مدل هیدرولیکی

مدل هیدرولیکی مورداستفاده ابتدا باید برای حوضه خاص موردمطالعه آماده‌سازی، کالیبره و صحت‌سنجی شود (Dixon, 2016). برای آماده‌سازی مدل هیدرولیکی برای منطقه خاص موردمطالعه ابتدا باید گام مکانی (ابعاد مش)، گام زمانی و فاکتور وزنی θ مشخص شود (Brunner, 2016). با توجه به ویژگی Subgrid Variability مدل دوبعدی HEC-RAS، انتخاب گام مکانی محدودیتی نداشته اما شامل ضوابطی است که با توجه به ضوابط آن ۵۰ متر انتخاب شده است. گام زمانی آن نیز بر طبق محدودیت عدد کورانت و ضوابط مربوطه ۳۰ ثانیه و فاکتور وزنی θ پس از تست پایداری همان مقدار پیش‌فرض مدل گذاشته شده است.

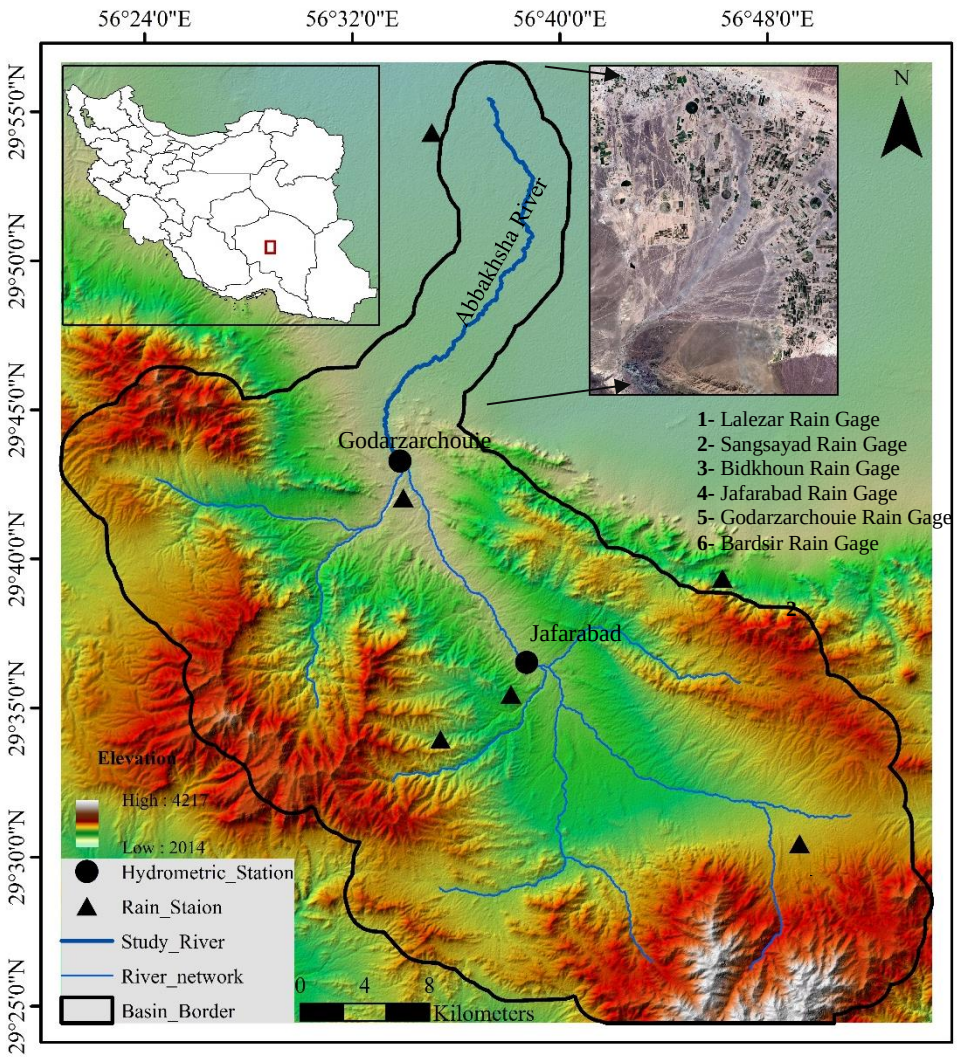

Figure 1. Location of study area and its catchment area

فرایند کالیبراسیون مدل HEC-RAS در صورت وجود یا عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری‌شده در چند حالت انجام می‌شود که عبارتند از ۱- تراز سطح آب اندازه‌گیری‌شده، ۲- داده‌های دبی اندازه‌گیری‌شده، ۳- علائم بالا آمدن آب (داغاب) و ۴- مناطقی که داده‌های ثبت شده در آن وجود ندارد. در بسیاری از مطالعات بخش قابل‌توجهی از منطقه فاقد ایستگاه اندازه‌گیری بوده، لذا دبی در این مناطق را می‌توان با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و یا استفاده از داده‌های ثبت شده در حوضه‌های مشابه و تعمیم به منطقه موردمطالعه به‌دست آورد. با توجه به عدم وجود ایستگاه هیدرومتری در منطقه هدف موردمطالعه از مدل هیدرولوژیکی جهت تولید داده‌های مشاهداتی استفاده شد. جهت انجام این کار، چند رویداد خاص باید که رنج کاملی از جریان کم به زیاد و برگشت به جریان کم را در بر داشته باشد، در نظر گرفته شود (Brunner, 2016). در این مطالعه از سه رویداد بارش و هیدروگراف ثبت‌شده برای انجام فرایند کالیبراسیون استفاده شد. ملاک انتخاب رویدادها وجود همزمان داده‌های بارش و هیدروگراف سیل به وقوع پیوسته و رنج کاملی از جریان‌ها (کم به زیاد و برگشت به جریان کم) بوده است.

یکی از پارامترهایی که در طول کالیبراسیون مدل هیدرولیکی تنظیم می‌شود، مقدار ضریب‌زبری مانینگ است، زیرا

این متغیر اغلب بیش‌ترین عدم قطعیت و تغییر را در بین ورودی HEC-RAS دارد. ضریب‌زبری مانینگ پارامتری است که برای کالیبراسیون مدل هیدرولیکی رودخانه استفاده می‌شود و فرایند کالیبراسیون نباید با مقادیر غیرواقعی ضریب‌زبری مانینگ انجام شود. برای کالیبراسیون مدل هیدرولیکی با تغییر ضریب زبری مانینگ در یک مساحت محدود، داده‌های ایستگاه محاسباتی و مشاهداتی (مکان ایستگاه مشاهداتی در ۳۰ کیلومتری بازه از بالادست قرار دارد) با هم موردمقایسه قرار گرفته، تا جایی‌که اختلاف بین هیدروگراف مشاهداتی (حاصل از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS) و محاسباتی به حداقل خود برسد (Brunner, 2016).

۲. ۲. مدل هیدرولوژیکی

همان‌طورکه بیان گردید با توجه به عدم وجود داده‌های هیدرومتری در محل موردمطالعه و لزوم کالیبره‌نمودن مدل هیدرولیکی، از مدل هیدرولوژی HEC-HMS به‌منظور اخذ هیدروگراف در محل موردنظر استفاده شد. با توجه به اطلاعات موجود در منطقه موردمطالعه، روش SCS برای محاسبه نفوذ، هیدروگراف واحد کلارک برای محاسبه میزان بارش مازاد و روش ماسکینگام برای روندیابی جریان رودخانه مورداستفاده قرار گرفت. نقشه شماره منحنی CN با تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیک خاک منطقه حاصل شد. باتوجه به وجود شش ایستگاه باران‌سنجی در داخل و مجاور این حوضه وجود دارد، از پلیگون تیسن برای وزن‌دهی به هر ایستگاه باران‌سنجی استفاده شد.

این مدل نیز قبل از استفاده باید کالیبره شود. پارامترهای جذب اولیه، زمان تمرکز، شماره منحنی (CN) و ضرایب x و k روش ماسکینگام موجود در توابع محاسبه نفوذ، تبدیل بارش به رواناب و روندیابی جریان پس از محاسبه مقادیر اولیه آن‌ها در روابط مربوطه با استفاده از روش بهینه‌سازی موجود در مدل HEC-HMS، در سه رخداد مذکور سیل کالیبره شدند. هیدروگراف‌های خروجی از مدل بارش–رواناب به‌عنوان داده‌های مورداستفاده در کالیبراسیون مدل هیدرولیکی استفاده شد.

سه رویداد سیل انتخاب‌شده عبارتند از سیل بهمن‌ماه سال ۱۳۹۵، سیل فروردین‌ماه سال ۱۳۸۱ و سیل اسفندماه سال ۱۳۷۷ که هر کدام از آن‌ها باعث به وقوع پیوستن خسارت‌های زیادی در شهر پایین‌دست خود شده‌اند. به‌منظور آماده‌سازی و کالیبراسیون مدل HEC-HMS، مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۱۲/۵ متر به نرم‌افزار معرفی و زیرحوضه‌ها و رودخانه اصلی و آبراهه‌ها شناسایی شدند. از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری گدارزارچوئیه برای کالیبره‌نمودن مدل استفاده شد. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دو واقعه در ایستگاه گدارزارچوئیه در شکل (۲) آورده شده‌اند. همان‌طورکه ملاحظه می‌گردد در سه رویداد دو پارامتر مهم دبی اوج و زمان رسیدن به اوج که در مطالعات سیلاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند ب خوبی شبیه‌سازی شده‌اند، مضافاً آنکه قانون بقای جرم نیز در همه موارد برقرار بوده است.

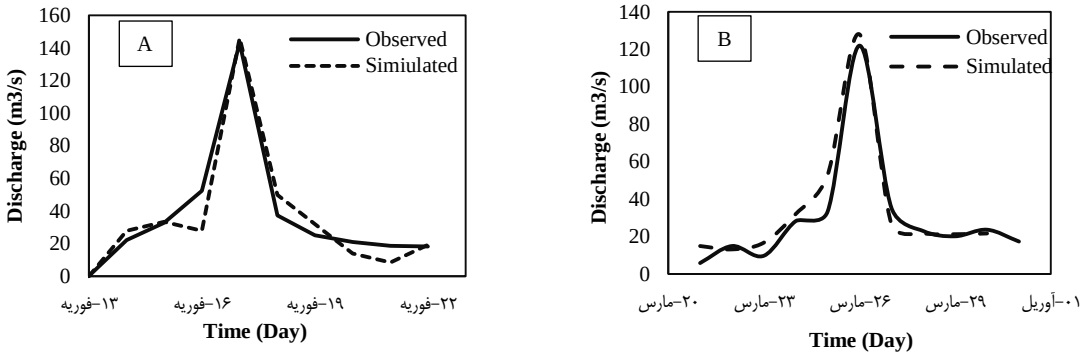

Figure 2. HEC-HMS calibration. A) February 2017 flood, B) March 2002 flood

۲. ۳. ایجاد خم در مسیر رودخانه

اقداماتی که در مدیریت سیلاب به‌روش طبیعی به‌منظور کاهش ریسک سیلاب انجام می‌گیرد به سه اقدام کلی تقسیم می‌شود؛ ۱- کاهش سرعت جریان در رودخانه از طریق بازگرداندن ویژگی‌های طبیعی رودخانه مانند افزایش طول کانال یا ایجاد موانع چوبی سر راه جریان، ۲- ذخیره‌سازی آب در سیلاب‌دشت‌ها از طریق افزایش اتصال کانال اصلی رودخانه و سیلاب‌دشت‌ها، ۳- نفوذ بیش‌تر و ذخیره‌سازی آب در خاک از طریق افزایش پوشش گیاهی (Ngai *et al.*, 2017). در این پژوهش روش اول (ایجاد خم در مسیر رودخانه) به‌منظور ارزیابی ریسک سیلاب در بستر نرم‌افزار ArcMap توسعه داده شد. به این منظور یک خم کمکی در کنار مسیر اصلی رودخانه به طول پنج کیلومتر بر روی مدل رقومی دیجیتال منطقه (با استفاده از ابزارهای موجود در نرم‌افزار ArcMap) ایجاد و برای شبیه‌سازی هیدرولیکی به نرم‌افزار HEC-RAS 2D معرفی شد. شکل (۳) محل تعبیه این خم کمکی را نشان می‌دهد. به‌منظور درک بهتر موضوع، حالت ایجاد خم در مسیر رودخانه، سناریوی شماره (۱) و حالت پایه و بدون تغییر، سناریوی پایه نامگذاری شده است.

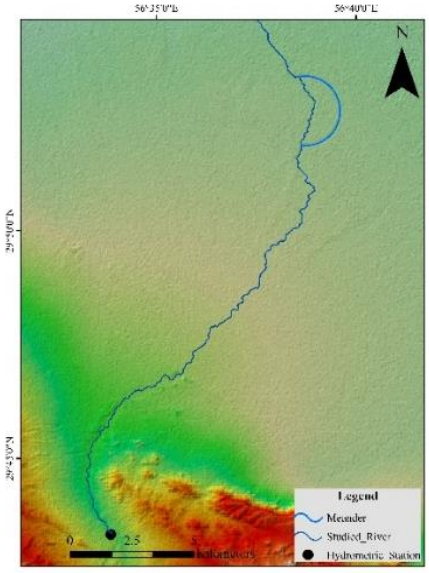

Figure 3. The location of applied meander

۲. ۴. تحلیل فراوانی

برای استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی ابتدا باید ماهیت داده‌ها از نظر همگنی و تصادفی‌بودن آن‌ها تأیید شود. آزمون‌هایThe Pettitt's test و Run test به‌منظور بررسی همگنی و تصادفی‌بودن داده‌های دبی ماکزیمم روزانه به‌ترتیب استفاده شدند. نتایج حاصل با توجه به مقدار P-Value برابر با ۰/۱۳۶ و ۱/۸۶- =Z در سطح اطمینان ۹۵ درصد، این داده‌ها مربوط به یک جامعه آماری و تصادفی هستند. نتایج تحلیل فراوانی با استفاده از نرم‌افزار Easyfit نشان می‌دهد که توزیع Log-Pearson 3 با تأیید سه آزمون نکویی Kolmogorov Smirnov، Anderson Darling و Chi-squared به‌عنوان بهترین توزیع‌ها انتخاب شدند و دبی در دوره بازگشت‌های مختلف اخذ شدند. با توجه به اینکه مدل دوبعدی HEC-RAS تنها در حالت غیرماندگار اجرا می‌شود، لذا نتایج حاصل از دبی در دوره بازگشت‌های مذکور با استفاده از روش هیدروگراف واحد SCS، به هیدروگراف تبدیل شدند (شکل ۴).

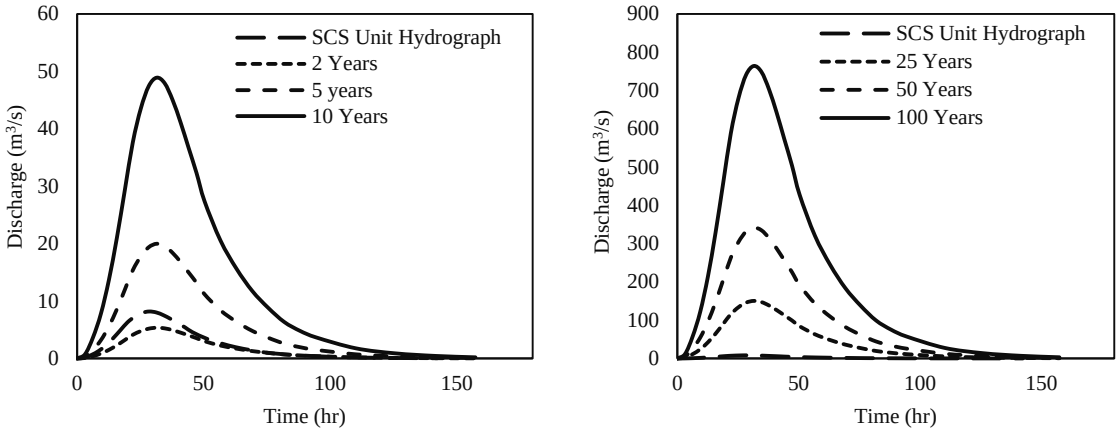

Figure 4. Flood hydrograph for different return periods and SCS unit hydrograph

۲. ۵. محاسبه ریسک سیل

ارزیابی ریسک سیل علاوه بر ایجاد زمینه‌های منطقی برای طراحی اقدامات سیل، مدیریت اصولی و سازمان‌دهی‌شده را فراهم می‌کند (Tariq, 2013). تعاریف مختلفی برای ریسک سیل وجود دارد. تلفات موردانتظار سیل، متداول‌ترین تعریف ریسک سیل است (UDHA, 1992; Sayers, 2002; Kron, 2005). با توجه به اینکه سیل و خسارت ناشی از آن رویدادهای احتمالاتی هستند (Yoe, 1994; Tariq, 2013) و شدت سیل و آسیب‌پذیری اجتماعی به‌طور یکنواخت در منطقه وجود ندارد، لذا منحنی‌های خسارت بیان واضحی از توزیع ریسک را ارائه می‌کنند. منحنی‌های خسارت، الگوی توزیع خسارت را در برابر سیل‌های احتمالی مختلف نشان می‌دهد (Tariq *et al.*, 2014). EAD نیز به‌عنوان یک پارامتر تصمیم‌گیری برای مدیریت سیل محسوب می‌شود که از حاصل جمع تخمین‌های وزنی خسارت احتمالی (روابط ۱ و ۲) به‌دست می‌آید (Ayyub *et al.*, 2009).

$$EAD = \sum_{i=1}^{m} D_i \times \Delta P_i$$ رابطه ۱)

$$\Delta P_i = \frac{P_{i-1}+P_i}{2}$$ رابطه ۲)

در این روابط، D خسارت و P احتمال رخداد آن می‌باشد. تصمیم‌هایی که بر مبنای EAD و منحنی‌های خسارت در مدیریت و کنترل سیل گرفته می‌شوند، نسبت به بقیه روش‌های متعارف، ارجحیت دارند (Tariq, 2013). به‌منظور برآورد خسارت سیلاب روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از مدل‌های Hydro Economic که میزان خسارت وارده و در نهایت EAD را محاسبه می‌کنند (Yi *et al.*, 2010). اما به‌دلیل اینکه شرایط جریان، آسیب‌پذیری اجتماعی، کاربری زمین در حال تغییر است، استفاده از این مدل‌های آماده مناسب در چنین شرایطی مناسب نیست (Tariq, 2013). با پیشرفت در پردازش رایانه‌ها و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در تجزیه و تحلیل داده‌ها، استفاده از بستر GIS و توابع Damage-Stage روشی مناسب جهت محاسبه خسارت‌های ناشی از سیل، توصیه شده است (Yi *et al.*, 2010; Levy, 2005).

توابع Damage-Stage روابطی هستند که برای محاسبه درصد خسارت وارده به هر کاربری اراضی و جمعیت استفاده می‌شوند. به بیان دیگر این توابع الگوی خسارت را در برابر سیل‌های احتمالی مختلف نشان می‌دهند (Tariq *et al.*, 2014). براساس مطالعه مؤسسه JCR (2017)، این توابع براساس هر کاربری در هر کشور توسعه داده شده‌اند (Huizinga, 2017). در این مطالعه از نتایج این مؤسسه برای محاسبه خسارت کاربری کشاورزی منطقه آسیا استفاده شده است.

۳. بحث و نتایج

۳. ۱. مساحت پهنه سیلابی

به‌منظور تحقق اهداف پژوهش حاضر، لایه توپوگرافی منطقه موردمطالعه در حالت پایه (بدون ایجاد تغییراتی در آن) و در حالت ایجاد خم در مسیر رودخانه، به بستر نرم‌افزار HEC-RAS 2D معرفی شده و نقشه عمق آب و پهنه سیلابی و سایر پارامترهای هیدرولیکی در دوره بازگشت‌های پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال در آن موردمحاسبه قرار گرفتند. شکل‌های (۵) و (۶) نقشه عمق آب و میزان پهنه سیلابی را در دوره بازگشت‌های ۲۵ و ۱۰۰ سال به‌عنوان نمونه در دو حالت پایه و ایجاد خم در مسیر رودخانه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) مساحت پهنه سیلابی در همه دوره بازگشت‌های موردبررسی در حالت ایجاد خم نسبت به حالت پایه کم‌تر است.

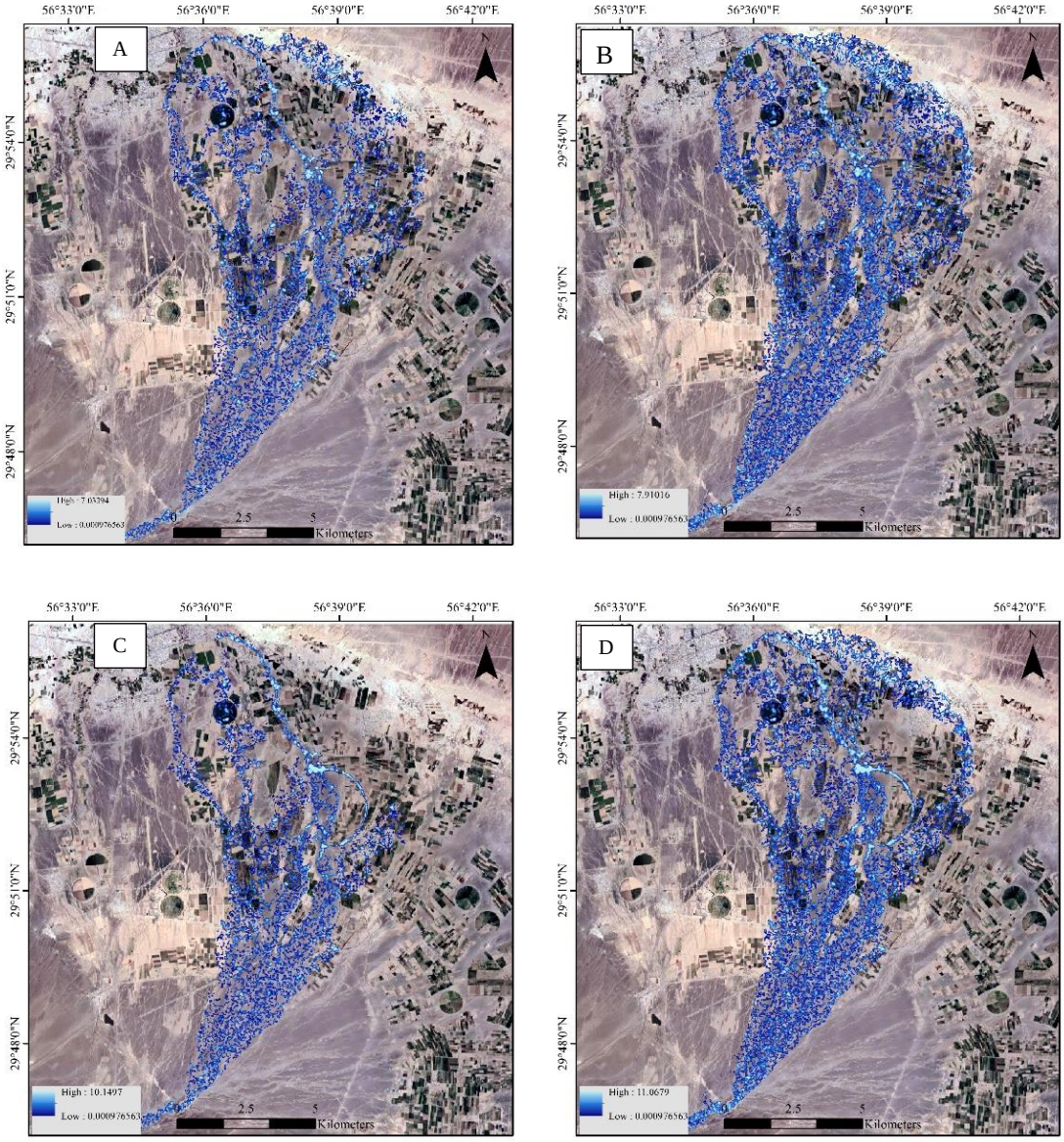

Figure 5. Flood extent map. A, B) The base scenario of 25 and 100 year return periods. C, D) The first scenario of 25 and 100 year return periods

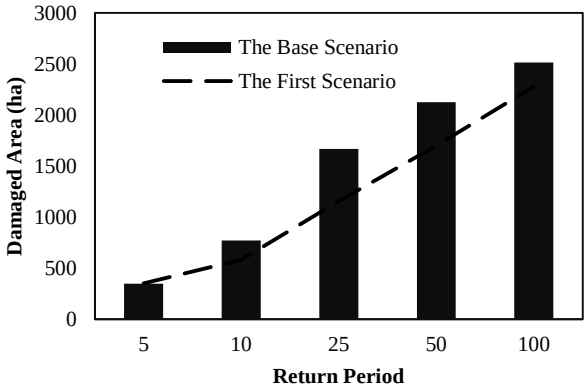

Figure 6. The area of flood extent in both scenario

۳. ۲. خسارت سیل

میزان خسارت کاربری کشاورزی با توجه به تابع مربوطه در هر سناریو و دوره بازگشت در بستر نرم‌افزار ArcMap موردمحاسبه قرار گرفت. به‌عنوان نمونه در شکل (۷) خسارت کاربری کشاورزی در دوره بازگشت ۲۵ سال آورده شده است. برآورد خسارت متأثر از دو پارامتر میانگین خسارت وارده و مساحت تحت آسیب بوده زیرا خسارت وارده دارای توزیع مکانی یکسانی نیست. با توجه به روابط (۱) و (۲) میزان خسارت سالیانه از حاصل جمع مساحت آسیب‌دیده در میانگین خسارت وارده در هر دوره بازگشت به‌دست می‌آید. در شکل (۸–الف) این مقدار در هر دوره بازگشت آورده شده است. با توجه به شکل میزان تأثیر ایجاد خم در دوره بازگشت‌های مختلف دبی متفاوت است. در دوره بازگشت‌های کم میزان این تأثیر کم بوده که دلیل آن کم‌بودن دبی و نرسیدن سیل به خم کمکی است و در دوره بازگشت‌های نزدیک به ۱۰۰ سال نیز این تأثیر کم‌تر شده که به‌علت پرشدن گنجایش خم کمکی بوده است. به‌منظور درک بهتر اثر این خم کمکی پارامتر خسارت موردانتظار سالیانه در هر دو سناریو با استفاده از روابط (۱) و (۲) موردمحاسبه قرار گرفت و در شکل (۸–ب) آورده شده است. با توجه به این شکل خسارت موردانتظار سالیانه در حالت ایجاد خم در مسیر رودخانه ۱۵/۵ درصد نسبت به حالت پایه کم‌تر است. این بدان معناست که در حوضه‌های بزرگ با وسعت بیش از هزار کیلومترمربع و مناطقی که دارای خصوصیت مخروط‌افکنه‌ای هستند، روش‌های طبیعی کنترل سیل می‌تواند باعث کاهش ریسک سیلاب شود.

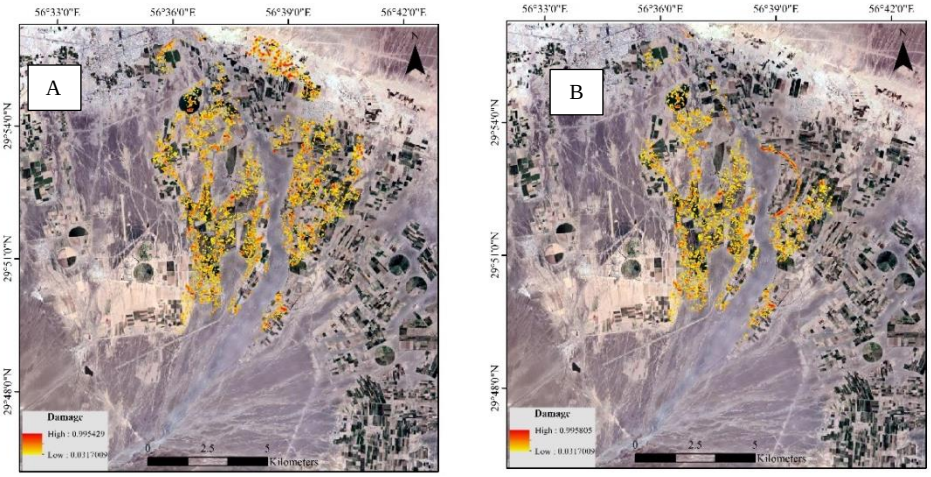

Figure 7. Flood Damage on agricultural land use of 25-year return period, A) The Base scenario, B) The First scenario

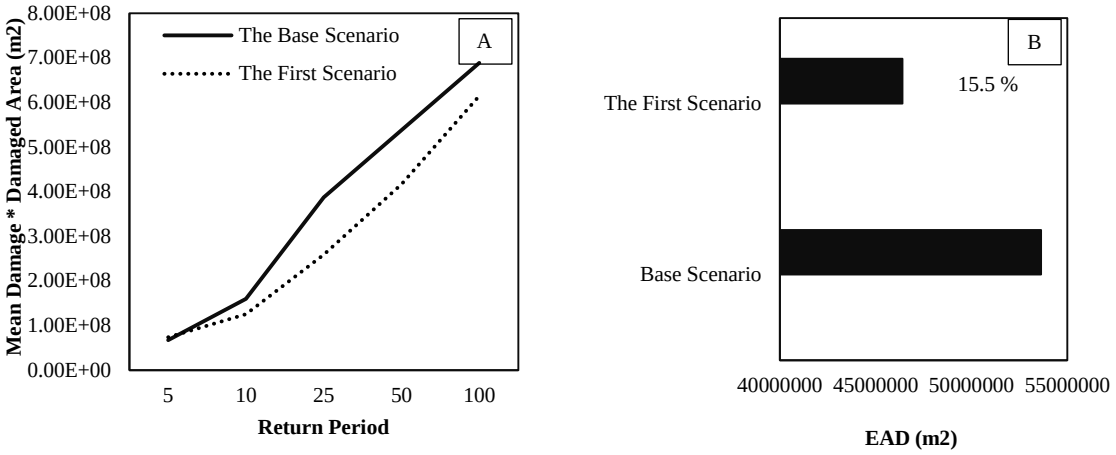

Figure 8. Expected annual agricultural land use damage in both scenario

۴. نتیجه‌گیری

استفاده از راه‌حل‌های طبیعی کنترل سیل در سال‌های اخیر بسیار موردتوجه متخصصان مدیریت سیل قرار گرفته است. با استفاده از راه‌حل‌های طبیعی، از سیل که یک تهدید برای جوامع محسوب می‌شود، می‌توان یک فرصت کم‌نظیر برای حفظ و تقویت محیط‌زیست، ذخیره آب و البته کاهش خسارت‌های ناشی از سیلاب را به‌وجود آورد. روش‌های طبیعی کنترل سیل در حقیقت به هر عمل مبتنی بر طبیعت که باعث کاهش سرعت جریان، کاهش دبی ماکزیمم، کاهش پهنه سیل و در نهایت کاهش ریسک سیلاب شود اطلاق می‌گردد. اثربخشی هر روش به خصوصیات منطقه موردمطالعه، وسعت حوضه آبریز و البته به وسعت اجرای عملیات وابسته است. در هر پروژه کنترل طبیعی سیل لازم است قبل از انجام عملیات اجرایی، مدل آن توسعه داده شود تا از ضررهای احتمالی جلوگیری شود. این پژوهش در گام اول یک مدل بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی و شبیه‌سازی دوبعدی هیدرولیکی ارائه داده که اثربخشی راه‌حل‌های طبیعی کنترل سیل را موردارزیابی قرار می‌دهد و ریسک سیلاب متناسب با آن روش را محاسبه می‌کند. در گام دوم پس از کالیبراسیون مدل ارائه‌شده، حوضه آبریزی به وسعت ۱۱۳۶ کیلومترمربع و دارای خصوصیت مخروط‌افکنه‌ای را در نظر گرفته شد و یک روش از راه‌حل‌های طبیعی کنترل سیل را بر روی بازه‌ای از رودخانه آن اجرا شد.

یافته‌ها حاکی از آن است که نتایج استفاده از خم یا مئاندر به‌عنوان یک راه‌حل طبیعی کنترل سیل در مناطق مخروط‌افکنه با وسعت حوضه آبریز بالای هزار کیلومترمربع، در دبی‌ها با دوره بازگشت‌های زیر ۱۰۰ سال که در این پژوهش به آن پرداخته شده، مؤثر بوده و می‌تواند باعث کاهش مساحت پهنه سیل‌گیر، کاهش میانگین خسارت وارده و در نهایت کاهش ریسک سیلاب شود. میزان تأثیر در دبی با دوره بازگشت‌های مختلف متفاوت بوده و در دبی‌ها با دوره بازگشت کم‌تر از ۲۵ سال، به‌دلیل کم‌بودن میزان دبی و در دبی‌های با دوره بازگشت‌های حدود ۱۰۰ سال نیز به‌دلیل پرشدن ظرفیت مئاندر میزان تأثیر خم کمکی در خسارت سیلاب کم‌تر می‌شود.

اما به‌طور کلی بر طبق نتایج حاصله می‌توان گفت این راه‌حل طبیعی می‌تواند تا دبی با دوره بازگشت حدود ۱۰۰ سال مؤثر باشد و باعث کاهش خسارت موردانتظار سالیانه شود. اثر آن در دبی‌ها با دوره بازگشت‌های کم‌تر، بیش‌تر بوده و می‌توان از آن‌ها جهت جلوگیری از خسارات سیل استفاده نمود و از مزایای راه‌حل‌های طبیعی کنترل سیل بهره جست. در این پژوهش با توجه به خصوصیات منطقه موردمطالعه و ابعاد خم کمکی به‌کاررفته، استفاده از این راه‌حل طبیعی باعث

کاهش ۱۵/۵ درصدی ریسک سیلاب می‌شود. لازم به ذکر است که در این مناطق، استفاده از راه‌حل‌های طبیعی بیش‌تر بر روی وسعت پهنه سیلابی مؤثر بوده تا میانگین خسارت وارده. می‌توان مدل اقتصادی برای ارزیابی استفاده از این راه‌حل‌های طبیعی توسعه داد تا میزان سود و هزینه آن‌ها بهتر مشخص شود و به تصمیم‌گیری استفاده از کدام راه‌حل کمک کند. فراهم‌نمودن ادوات اجرای طرح، خرید محدوده زمین اجرای طرح در صورتی‌که مالک شخصی داشته باشد و هزینه‌های اجرای آن از جمله محدودیت‌های طرح حاضر به‌شمار می‌رود.

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. منابع

Herrero, A. D., Huerta, L. L., & Isidro, M. L. (2009). A handbook on flood hazard mapping methodologies (Vol. 2). IGME.

Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J.C., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U., & Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, *2*(9), 592-609.

Lai, C., Chen, X., Wang, Z., Yu, H., & Bai, X. (2020). Flood risk assessment and regionalization from past and future perspectives at basin scale. *Risk analysis*, *40*(7), 1399-1417.

Wang, L., Cui, S., Li, Y., Huang, H., Manandhar, B., Nitivattananon, V., Fang, X., & Huang, W. (2022). A review of the flood management: from flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11).

Everard, M., & Moggridge, H. L. (2012). Rediscovering the value of urban rivers. *Urban Ecosystems*, *15*, 293-314.

Gilvear, D. J., Casas-Mulet, R., & Spray, C. J. (2012). Trends and issues in delivery of integrated catchment scale river restoration: lessons learned from a national river restoration survey within Scotland. *River Research and Applications*, 28(2), 234-246.

Ngai, R., Wilkinson, M., Nisbet, T., Harvey, R., Addy, S., Burgess-Gamble, L., Rose, S., Maslen, S., Nicholson, A., Page, T., Jonczyk, J., & Quinn, P. (2017).Working with natural processes–Evidence directory appendix 2: Literature review.

Nardini, A., & Pavan, S. (2012). River restoration: not only for the sake of nature but also for saving money while addressing flood risk. A decision-making framework applied to the C hiese R iver (P o basin, I taly). *Journal of Flood Risk Management*, *5*(2), 111-133.

Wohl, E., Lane, S. N., & Wilcox, A. C. (2015). The science and practice of river restoration. *Water Resources Research*, *51*(8), 5974-5997.

Forbes, H., Ball, K., & McLay, F. (2015). Natural flood management handbook, Scottish Environment Protection Agency.

Wharton, G., & Gilvear, D. J. (2007). River restoration in the UK: Meeting the dual needs of the European Union Water Framework Directive and flood defence?. *International Journal of River Basin Management*, *5*(2), 143-154.

Acreman, M. C., Riddington, R., & Booker, D. J. (2003). Hydrological impacts of floodplain restoration: a case study of the River Cherwell, UK. *Hydrology and Earth System Sciences*, *7*(1), 75-85.

Liu, Y. B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2004). Simulation of flood reduction by natural river rehabilitation using a distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, *8*(6), 1129-1140.

Sear, D. A., & Newson, M. D. (2004). The hydraulic impact and performance of a lowland rehabilitation scheme based on pool–riffle installation: the River Waveney, Scole, Suffolk, UK. *River Research and Applications*, *20*(7), 847-863.

Sear, D., Kitts, D., & Millington, C. E. (2006). New Forest LIFE-III Monitoring Report: the geomorphic and hydrological response of New Forest streams to river restoration.

Kitts, D. R. (2010). *The hydraulic and hydrological performance of large wood accumulation in a low-order forest stream* (Doctoral dissertation, University of Southampton).

Keesstra, S. D., Kondrlova, E., Czajka, A., Seeger, M., & Maroulis, J. (2012). Assessing riparian zone impacts on water and sediment movement: a new approach. *Netherlands Journal of Geosciences*, *91*(1-2), 245-255.

Lallemant, D., Hamel, P., Balbi, M., Lim, T. N., Schmitt, R., & Win, S. (2021). Nature-based solutions for flood risk reduction: A probabilistic modeling framework. *One Earth*, *4*(9), 1310-1321.

Dixon, S. J., Sear, D. A., Odoni, N. A., Sykes, T., & Lane, S. N. (2016). The effects of river restoration on catchment scale flood risk and flood hydrology. *Earth Surface Processes and Landforms*, *41*(7), 997-1008.

Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System. 2D Modeling User's Manual. Version 5.0. Davis, CA: US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.

Tariq, M. A. U. R. (2013). Risk-based flood zoning employing expected annual damages: the Chenab River case study. *Stochastic environmental research and risk assessment*, *27*, 1957-1966.

DHA, U. (1992). Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management. *UN DHA (United Nations Department of Humanitarian Affairs), Geneva*.

Kron, W. (2005). Flood risk= hazard• values• vulnerability. *Water international*, *30*(1), 58-68.

Sayers, P. B., Gouldby, B., Simm, J. D., Hawkes, P. J., Ramsbottom, D. M., Meadowcroft, I. C., & Hall, J. W. (2002). Risk, performance and uncertainty in flood and coastal defence-a review.

Yoe, C. E. (1994). *Framework for estimating national economic development benefits and other beneficial effects of flood warning and preparedness systems* (p. 116). US Army Corps of Engineers, Water Resources Support Center, Institute for Water Resources.

Tariq, M. A., Hoes, O. A., & Van de Giesen, N. C. (2014). Development of a risk-based framework to integrate flood insurance. *Journal of Flood risk management*, *7*(4), 291-307.

Ayyub, B. M., Foster, J., & McGill, W. L. (2009). Risk analysis of a protected hurricane-prone region. I: Model development. *Natural Hazards Review*, *10*(2), 38-53.

Yi, C. S., Lee, J. H., & Shim, M. P. (2010). GIS-based distributed technique for assessing economic loss from flood damage: pre-feasibility study for the Anyang Stream Basin in Korea. *Natural hazards*, *55*, 251-272.

Levy, J. K. (2005). Multiple criteria decision making and decision support systems for flood risk management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *19*, 438-447.

Huizinga, J., De Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines* (No. JRC105688). Joint Research Centre (Seville site).