تأثیر تغییرات اقلیمی بر شدت و فراوانی سیلاب‌های شهری

مهرداد سوری [1*] ، عرفان میرزاخانی نافچی[2].

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه شهید بهشتی تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست، آب و فاضلاب دانشگاه شهید بهشتی تهران

چکیده

سیلاب‌های شهری یکی از مشکلات جدی شهرهای امروزی هستند که با تشدید تغییرات اقلیمی، شدت و فراوانی آن‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر سیلاب‌های شهری می‌پردازد و نشان می‌دهد که گرمایش زمین، ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند سوزاندن سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی، باعث شده جو زمین رطوبت بیشتری نگه دارد. به ازای هر درجه سلسیوس افزایش دما، ظرفیت رطوبت جو حدود ۷ درصد بیشتر می‌شود که منجر به بارش‌های شدیدتر و سیلاب‌های مکررتر می‌گردد. این مطالعه با استفاده از روش‌های علمی مانند مدل‌های اقلیمی CMIP6، مدل هیدرولوژیکی SWMM، تحلیل آماری (آزمون من-کندال) و بررسی موردی شهرهایی مانند تهران، شانگهای، لاگوس و میامی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که تا سال ۲۰۵۰، فراوانی سیلاب‌ها در آفریقا تا ۳۵ درصد و در آسیا تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد، در حالی که خسارات اقتصادی ممکن است به ۱ تریلیون دلار برسد. این سیلاب‌ها نه تنها اقتصاد و زیرساخت‌ها را تهدید می‌کنند، بلکه به گروه‌های آسیب‌پذیر و محیط زیست نیز آسیب می‌رسانند. راهکارهایی مانند بهبود سیستم‌های زهکشی، استفاده از بام‌های سبز، ساخت مخازن آب و برنامه‌ریزی شهری پایدار برای کاهش این اثرات پیشنهاد شده‌اند. این پژوهش بر ضرورت اقدامات فوری برای مدیریت سیلاب‌های شهری و سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید دارد.

کلمات کلیدی: سیلاب شهری، تغییرات اقلیمی، بارش شدید، مدیریت روان‌آب، شهرنشینی، زیرساخت شهری، بام سبز، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، GIS.

۱. مقدمه و بیان مسئله

سیلاب‌های شهری از مهم‌ترین چالش‌های زیرساختی در کلان‌شهرهای امروزی به شمار می‌آیند. وقوع بارش‌های شدید یا ذوب ناگهانی برف می‌تواند منجر به تجمع آب در معابر، مناطق مسکونی و محلات گردد و خسارات قابل‌توجهی در پی داشته باشد. شواهد نشان می‌دهد که این پدیده در سال‌های اخیر شدت یافته است، زیرا تغییرات اقلیمی موجب افزایش فراوانی و شدت رخدادهای بارشی شده است. تغییرات اقلیمی عمدتاً نتیجه فعالیت‌های انسانی نظیر مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تخریب پوشش جنگلی است. در این مقاله تلاش می‌شود تأثیر تغییرات

*Mehrdadsouri13800201@gmail.com

اقلیمی بر شدت و بسامد سیلاب‌های شهری مورد بررسی قرار گیرد. هدف اصلی آن است که با زبانی روشن و در عین حال علمی، ابعاد این مسئله به گونه‌ای تبیین شود که برای طیف گسترده‌ای از مخاطبان قابل‌فهم باشد [۱].

در نخستین گام، لازم است مفهوم سیلاب شهری تعریف شود. در محیط‌های شهری، بخش عمده سطح زمین با مصالح نفوذناپذیر همچون آسفالت، بتن و سازه‌های ساختمانی پوشیده شده است. این سطوح امکان جذب آب را ندارند و در نتیجه هنگام وقوع بارش‌های شدید، رواناب ناشی از آن بر سطح زمین باقی مانده یا در شبکه‌های محدود زهکشی جریان می‌یابد و پدیده سیلاب را رقم می‌زند. با توجه به آنکه در حال حاضر بیش از نیمی از جمعیت جهان در شهرها سکونت دارند ــ و پیش‌بینی می‌شود این رقم تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۷۰ درصد افزایش یابد ــ افزایش فراوانی یا شدت سیلاب‌های شهری می‌تواند میلیون‌ها نفر را تحت تأثیر قرار دهد. این پیامدها دامنه‌ای گسترده دارند؛ از تهدید امنیت سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌های حیاتی گرفته تا آسیب‌های اقتصادی و مخاطرات سلامت عمومی [۱].

سؤال اساسی این است که تغییرات اقلیمی چگونه می‌تواند بر تشدید پدیده سیلاب‌های شهری اثرگذار باشد. با افزایش میانگین دمای زمین، ظرفیت هوا برای نگه‌داری بخار آب افزایش می‌یابد؛ به‌طور تقریبی، به ازای هر یک درجه سلسیوس افزایش دما، جو قادر است حدود ۷ درصد رطوبت بیشتری در خود ذخیره کند. این پدیده منجر به وقوع بارش‌هایی با شدت بیشتر و در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر می‌شود. مستندات علمی، از جمله گزارش‌های «هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم» (IPCC)، نشان می‌دهند که از دهه ۱۹۵۰ میلادی به این سو، بسامد و شدت بارش‌های سنگین در بسیاری از مناطق جهان افزایش یافته است. به بیان دیگر، رخدادهایی که پیش‌تر در بازه‌ای حدود یکصد سال محتمل بودند، اکنون می‌توانند هر یک یا دو دهه یک‌بار اتفاق بیفتند [۲].

برای درک بهتر ابعاد موضوع، مرور نمونه‌های موردی درسطح جهان می‌تواند روشنگر باشد. به‌عنوان نمونه، در سال ۲۰۲۱ وقوع سیلاب‌های گسترده در آلمان و بلژیک منجر به مرگ بیش از ۲۰۰ نفر و بروز خسارات اقتصادی در حدود ۴۰ میلیارد یورو شد. تحلیل‌های علمی نشان دادند که شدت این رویداد ارتباط مستقیمی با تغییرات اقلیمی و افزایش بارش‌های حدی داشته است [۳]. در قاره آسیا نیز کلان‌شهرهایی نظیر بمبئی در هند [۴] و شانگهای در چین [۵] به‌طور مستمر با خطر سیلاب‌های شهری مواجه‌اند. برای مثال، بارش‌های موسمی سال ۲۰۲۳ در دهلی موجب آوارگی هزاران نفر و از دست رفتن گسترده سکونتگاه‌های مسکونی گردید [۶]. در ایران نیز سیلاب‌های سال ۱۳۹۸ در استان‌هایی همچون فارس (شهر شیراز)، خوزستان (اهواز) و لرستان خسارات قابل‌ملاحظه‌ای برجای گذاشت و بیش از ۷۰ نفر جان خود را از دست دادند [۷،۸،۹].

این چالش به کشورهای ثروتمند محدود نمی‌شود، بلکه در کشورهای در حال توسعه با شدت بیشتری بروز می‌یابد. در کشورهایی نظیر پاکستان و نیجریه که زیرساخت‌های شهری از جمله سیستم‌های فاضلاب و شبکه‌های زهکشی از کارآمدی کمتری برخوردارند، خسارات ناشی از سیلاب‌ها به مراتب سنگین‌تر است. به‌عنوان نمونه، سیلاب‌های گسترده سال ۲۰۲۲ در پاکستان زندگی بیش از ۳۳ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار داد و بخش قابل‌توجهی از این رخداد به تغییرات اقلیمی نسبت داده شد. مطابق گزارش‌های «هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم» (IPCC)، شهرهای کم‌برخوردار، به‌ویژه در قاره

آفریقا و آمریکای لاتین، در معرض آسیب‌پذیری بیشتری قرار دارند؛ زیرا جمعیت زیادی در مناطق کم‌ارتفاع و پرخطر این شهرها سکونت دارند [۱۰].

پرسش کلیدی این است که چرا بررسی سیلاب‌های شهری اهمیت دارد؟ سیلاب‌ها به چند دلیل زندگی را سخت می‌کنند:

خسارات اقتصادی: سیلاب‌های شهری می‌توانند منجر به تخریب گسترده زیرساخت‌ها و اموال شوند. واحدهای مسکونی، شبکه‌های حمل‌ونقل و مراکز تجاری در معرض آسیب جدی قرار می‌گیرند. برای نمونه، سیلاب‌های سال ۲۰۲۴ در ایالات متحده بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی برجای گذاشتند [۱۱].

مشکلات اجتماعی: گروه‌های آسیب‌پذیر شامل اقشار کم‌درآمد، سالمندان و کودکان، بیش از دیگران در معرض پیامدهای سیلاب‌های شهری قرار دارند. این افراد غالباً در مناطق پرخطر سکونت دارند و دسترسی محدودی به خدمات امدادی و منابع حمایتی دارند [۱۲].

آسیب‌های زیست‌محیطی: سیلاب‌های شهری می‌توانند اثرات مخربی بر محیط زیست داشته باشند. جریان رواناب، زباله‌ها، مواد شیمیایی و آلاینده‌ها را به رودخانه‌ها، تالاب‌ها و مناطق دریایی منتقل می‌کند و موجب آلودگی منابع طبیعی و تخریب اکوسیستم‌ها می‌شود.

از منظر تاریخی، از زمان انقلاب صنعتی، یعنی حدود ۲۰۰ سال پیش، استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی نظیر زغال‌سنگ، نفت و گاز موجب افزایش دمای زمین شده است. تا سال ۲۰۲۵، میانگین دمای کره زمین حدود ۱.۲ درجه سلسیوس نسبت به دوران پیش از انقلاب صنعتی افزایش یافته است. این گرمایش جهانی منجر به تغییر الگوهای آب و هوایی شده و شدت رخدادهای هیدرولوژیکی را افزایش داده است. برای نمونه، پدیده موسوم به «رودخانه‌های اتمسفری» (Atmospheric Rivers)، جریان‌های هوایی غنی از بخار آب هستند که بارش‌های شدید و ناگهانی را ایجاد می‌کنند. سیلاب‌های سال ۲۰۲۳ در ایالت کالیفرنیا نمونه‌ای بارز از اثرات این پدیده محسوب می‌شوند [۱۳].

گسترش شهرنشینی و توسعه زیرساخت‌های شهری می‌تواند شدت سیلاب‌های شهری را تشدید کند. با بزرگ‌تر شدن شهرها، زمین‌های طبیعی مانند جنگل‌ها و مزارع جای خود را به سطوح نفوذناپذیر شامل آسفالت و بتن می‌دهند. این تغییرات موجب کاهش نفوذ آب به زمین و افزایش سریع رواناب سطحی و در نتیجه تشدید سیلاب‌ها می‌شود [۱۴].

چشم‌انداز آینده

مدل‌های علمی پیش‌بینی می‌کنند که تا پایان قرن جاری، شدت بارش‌های شدید بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش یابد. این امر ضرورت آمادگی و برنامه‌ریزی جامع شهری را دوچندان می‌کند، زیرا عدم آماده‌سازی می‌تواند به خسارات بسیار گسترده‌تری منجر شود. به‌ویژه در شهرهای ساحلی مانند میامی و توکیو، ترکیب بارش‌های شدید با افزایش سطح دریا خطر سیلاب‌ها را به‌طور قابل‌توجهی تشدید می‌کند [۱۵]. مطابق گزارش سازمان C40 Cities، تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۸۰۰ میلیون نفر در شهرهای ساحلی جهان در معرض خطر سیلاب خواهند بود.

در این مطالعه، تلاش شده است به مجموعه‌ای از سؤالات کلیدی پیرامون تأثیرات تغییرات اقلیمی بر سیلاب‌های شهری پاسخ داده شود:

- تغییرات اقلیمی به‌طور دقیق چگونه بر شدت و فراوانی سیلاب‌های شهری اثر می‌گذارند؟
- چه روش‌ها و ابزارهایی برای تحلیل و پیش‌بینی این اثرات مورد استفاده قرار می‌گیرند؟
- نتایج حاصل از مطالعات موجود چه پیامدها و الگوهایی را نشان می‌دهند؟
- چه راهکارهایی می‌تواند برای کاهش اثرات منفی سیلاب‌های شهری و ارتقای تاب‌آوری شهری به کار گرفته شود؟

برای روشن‌تر شدن ابعاد موضوع، چند نمونه ملموس تر ذکر می‌شود. در شهر توکیو، طوفان‌های شدید زیرساخت‌های شهری را تهدید می‌کنند [۱۶]. در شهر روبه‌تاون در اتیوپی، مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب رشد شهرنشینی و تغییرات اقلیمی شدت سیلاب‌ها را افزایش داده است [۱۷]. این نمونه‌ها تأکید می‌کنند که سیلاب‌های شهری یک چالش جهانی هستند و هر شهر نیازمند راهکارهای منطبق با شرایط خاص خود می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

برای فهمیدن اینکه تغییرات اقلیمی چگونه سیلاب‌های شهری را شدیدتر و پرتکرارتر کرده‌اند، از روش‌های علمی مختلفی استفاده می‌کنیم. این روش‌ها شامل جمع‌آوری اطلاعات، استفاده از مدل‌ها وشبیه سازی به کمک نرم‌افزارها، تحلیل‌های آماری و بررسی مطالعات انجام شده روی شهرهای خاص است.

۲.۱. مواد مورد نیاز

داده‌های مورد نیاز:

داده‌های اقلیمی: برای تحلیل تأثیر تغییرات اقلیمی بر سیلاب‌های شهری، دسترسی به داده‌های دقیق اقلیمی ضروری است. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به دما، بارش و باد می‌باشند و از منابع معتبر مانند گزارش‌های هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) و مدل‌های اقلیمی CMIP6 تأمین می‌شوند. مدل CMIP6 قادر است سناریوهای مختلفی را برای آینده آب و هوا شبیه‌سازی کند؛ از جمله سناریوی متوسط کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSP2-4.5) و سناریوی بدبینانه بدون کنترل گازها (SSP5-8.5) [۱۸]. همچنین، داده‌های بارش از طریق ایستگاه‌های هواشناسی و ماهواره‌هایی مانند TRMM و GPM جمع‌آوری می‌شوند تا تحلیل‌های دقیق و منطقه‌ای امکان‌پذیر گردد.

داده‌های شهری: تحلیل سیلاب‌های شهری نیازمند دسترسی به داده‌های جامع شهری است. این داده‌ها شامل نقشه‌های شهری، مشخصات خاک، سیستم‌های زهکشی (لوله‌ها و کانال‌های هدایت آب) و اطلاعات جمعیتی می‌باشند. جمع‌آوری و پردازش این داده‌ها معمولاً با استفاده از ابزارهای پیشرفته‌ای مانند سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام می‌شود. GIS امکان تحلیل توزیع ارتفاع، شناسایی مناطق کم‌ارتفاع و تعیین مناطق پرخطر در برابر سیلاب‌ها را فراهم می‌آورد [۱۹].

داده‌های تاریخی: برای تحلیل دقیق سیلاب‌های شهری و شناسایی روندها، دسترسی به داده‌های تاریخی ضروری است. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به رخدادهای گذشته سیلاب، میزان بارش و جمع‌آوری آب، و خسارات مالی و انسانی ناشی از هر رویداد می‌باشند [۲۰].

۲.۲. روش‌های مطالعه

برای تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر سیلاب‌های شهری، استفاده از روش‌های علمی گام‌به‌گام ضروری است. این روش‌ها همانند ابزارهایی عمل می‌کنند که امکان درک دقیق‌تر و جامع‌تر ابعاد مشکل را فراهم می‌آورند.

۲.۳. تحلیل داده‌های گذشته:

یکی از روش‌های پایه برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر سیلاب‌های شهری، تحلیل داده‌های تاریخی بارش است. در این روش، داده‌های بارش از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۵ مورد بررسی قرار می‌گیرند تا تغییرات در شدت و فراوانی بارش‌های شدید شناسایی شود. به‌عنوان مثال، تعداد روزهایی که میزان بارش بیش از ۵۰ میلی‌متر بوده، محاسبه می‌شود. برای تحلیل روند تغییرات از آزمون آماری «من-کندال» (Mann-Kendall) استفاده می‌شود که مشخص می‌کند آیا تعداد بارش‌های شدید در طول زمان افزایش یافته است یا خیر. در این آزمون، اگر مقدار S (امتیاز آزمون) مثبت باشد، نشان‌دهنده افزایش بارش‌های شدید است؛ S به‌صورت تعداد دفعاتی تعریف می‌شود که میزان بارش در سال‌های بعدی از سال‌های قبل بیشتر باشد. این روش به‌طور مؤثری میزان تأثیر تغییرات اقلیمی از گذشته تاکنون را بر شدت بارش‌ها نشان می‌دهد [۲۰].

۲.٤. مدل‌سازی آینده:

برای پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی بر سیلاب‌های شهری در آینده، از مدل‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. در گام نخست، مدل‌های اقلیمی جهانی (GCM) مانند HadGEM یا CESM مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند تا تغییرات کلی بارش‌ها در سطح جهان در اثر گرمایش زمین مشخص شود. از آنجایی که این مدل‌ها مقیاس جهانی دارند و جزئیات شهری را نشان نمی‌دهند، برای دقت بیشتر از مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCM) استفاده می‌شود. مدل‌های RCM امکان پیش‌بینی تغییرات بارش در شهرهای مشخص، مانند تهران یا بمبئی، تا سال ۲۰۵۰ را فراهم می‌آورند [۲۱].

برای تحلیل سیلاب‌های شهری، از مدل SWMM (Storm Water Management Model) استفاده می‌شود. این مدل همانند یک چارچوب محاسباتی پیشرفته عمل می‌کند که جریان رواناب ناشی از بارش را در محیط شهری شبیه‌سازی می‌نماید؛ اعم از حرکت آب در خیابان‌ها، شبکه لوله‌کشی و کانال‌های طبیعی. اساس این مدل بر معادله‌ای ساده استوار است:

مقدار آب روی زمین= بارش– میزان نفوذ آب به زمین

با استفاده از SWMM می‌توان تعیین کرد که در صورت وقوع بارشی با شدت ۱۰۰ میلی‌متر، کدام مناطق شهری دچار آبگرفتگی خواهند شد. برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی، داده‌های حاصل از مدل‌های اقلیمی جهانی (GCM) و مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (RCM) به SWMM وارد می‌شوند تا سناریوهای آینده سیلاب‌ها پیش‌بینی گردد [۲۲].

۲.۵. مطالعات موردی:

برای افزایش دقت و واقع‌گرایی نتایج، چند شهر مشخص مورد بررسی قرار می‌گیرند، از جمله تهران (Tehran, Iran)، شانگهای (Shanghai, China) و میامی (Miami, USA). برای هر شهر، داده‌های محلی شامل نقشه‌ها، نوع خاک و سیستم‌های زهکشی به مدل SWMM وارد می‌شوند. سپس سناریوهای مختلف اقلیمی، مانند افزایش شدت بارش‌ها، شبیه‌سازی می‌گردند. به‌عنوان مثال، در شانگهای، مدل نشان داد که افزایش ۲۰ درصدی بارش‌ها می‌تواند حجم رواناب سیلاب را تا ۲۵ درصد افزایش دهد. در تهران، افزایش بارش به میزان ۵۰ میلی‌متر موجب آبگرفتگی شدید در محله‌های پایین‌دست شهر، به‌ویژه جنوب تهران، خواهد شد [۲۳,۲۴,۲۵].

۲.۶. نقشه‌برداری خطر:

با استفاده از ابزار(GIS (Geographic Information System ، نقشه‌هایی تهیه می‌شوند که میزان خطر سیلاب را در مناطق مختلف شهری نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، محله‌هایی که در نزدیکی رودخانه‌ها یا در زمین‌های کم‌ارتفاع قرار دارند، در معرض خطر بیشتری هستند. برای تهیه این نقشه‌ها، داده‌های بارش، ارتفاع زمین و تراکم جمعیت با یکدیگر ترکیب می‌شوند [۱۹]. ریسک سیلاب به‌طور ساده با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

ریسک=خطر (بارش شدید)×آسیب‌پذیری (زیرساخت ضعیف)×مواجهه (تعداد جمعیت در منطقه)

این نقشه‌ها به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا مناطقی که بیشترین نیاز به تقویت و اقدامات پیشگیرانه دارند، شناسایی شوند [۲۶].

۲.۷. استفاده از فناوری‌های جدید:

در سال‌های اخیر، از فناوری‌های هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (Machine Learning) برای پیش‌بینی سیلاب‌های شهری استفاده شده است. به‌عنوان مثال، الگوریتم‌های کامپیوتری قادرند تصاویر ماهواره‌ای را تحلیل کنند و مناطقی که احتمال وقوع سیلاب در آن‌ها بیشتر است را شناسایی نمایند. این روش‌ها نسبت به مدل‌های سنتی سریع‌تر و کارآمدتر هستند و به ویژه در مدیریت سیلاب در شهرهای بزرگ و پرجمعیت کاربرد قابل توجهی دارند [۱۵].

۲.۸. روش‌های کیفی:

علاوه بر داده‌های کمی و مدل‌های شبیه‌سازی، برای درک بهتر اثرات سیلاب‌های شهری، از روش‌های کیفی نیز استفاده می‌شود. این روش‌ها شامل مصاحبه و تعامل با ساکنان شهر است تا تجربه‌های واقعی آن‌ها از سیلاب‌ها و پیامدهای

اجتماعی آن ثبت شود. به‌عنوان نمونه، در شهرهای اهواز (Ahvaz, Iran) و کارون (Karun, Iran)، ساکنان گزارش داده‌اند که سیلاب‌ها باعث تعطیلی مغازه‌ها و محدودیت دسترسی کودکان به مدارس شده است. این اطلاعات به تحلیل جامع‌تر تأثیرات اجتماعی سیلاب‌ها کمک می‌کند [۲۷].

۲.۹. جزئیات فنی

برای اطمینان از دقت مدل‌ها، آن‌ها با داده‌های واقعی تطبیق داده می‌شوند. به‌عنوان مثال، اگر مدل SWMM پیش‌بینی کند که در سال ۲۰۲۰ میزان رواناب در تهران (Tehran, Iran) حدود ۱۰ سانتی‌متر بوده است، این پیش‌بینی با داده‌ها و گزارش‌های واقعی مقایسه می‌شود. در صورتی که اختلاف بین مدل و داده‌های واقعی کم باشد (مثلاً کمتر از ۱۰ درصد)، می‌توان اطمینان داشت که مدل قابل اعتماد است [۲۲].

در مدلSWMM ، چند پارامتر را حساب می‌کنیم:

روان‌آب: این پارامتر نشان می‌دهد چه میزان آب روی زمین جاری می‌شود. فرمول ساده آن این است:

روان‌آب = (بارش − آبی که زمین جذب می‌کند)^2 / (بارش + ظرفیت زمین).

این معادله به پیش‌بینی مقدار آب جمع‌شده در خیابان‌ها کمک می‌کند.

جریان در شبکه‌های لوله‌ای: ظرفیت لوله‌های فاضلاب و کانال‌ها برای حمل رواناب بررسی می‌شود [۳۰]. در صورت افزایش حجم آب، لوله‌ها پر شده و خطر سیلاب افزایش می‌یابد.

راهکارهای سبز: استفاده از بام‌های سبز، مخازن ذخیره آب باران و سایر فناوری‌های سبز، میزان رواناب سطحی و شدت سیلاب را کاهش می‌دهد [۲۸]. برای نمونه، در یک مطالعه در کانبرا (Canberra, Australia)، نصب بام‌های سبز موجب کاهش سیلاب‌ها تا حدود ۲۰ درصد شد.

۲.۱. سناریوهای پیش‌بینی آینده:

سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6) : در صورتی که انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد، شدت و فراوانی سیلاب‌ها به میزان قابل توجهی کمتر خواهد بود.

سناریو بدبینانه (SSP5-8.5) : در صورتی که هیچ اقدام کنترلی صورت نگیرد، شدت و بسامد سیلاب‌ها به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد.

برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و کاهش خطا، از ترکیب چند مدل استفاده می‌شود (روش ensemble). به‌عنوان مثال، میانگین نتایج ۲۰ مدل CMIP6 برای تولید پیش‌بینی دقیق‌تر در نظر گرفته می‌شود [۱۸].

۲.۲. استفاده از معادلات هیدرودینامیک

در برخی مطالعات پیشرفته، برای شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان آب شهری از معادلات هیدرودینامیک استفاده می‌شود. به‌عنوان نمونه، معادله Saint-Venant جریان آب در شبکه‌های لوله‌ای را به‌طور دقیق‌تر مدل می‌کند. فرمول ساده این معادله به شکل زیر است:

جریان آب=سطح مقطع لوله×سرعت جریان آب

استفاده از این معادلات به تحلیلگران امکان می‌دهد تا سرعت و حجم حرکت آب در شبکه‌های شهری را با دقت بالاتری پیش‌بینی کنند و برنامه‌ریزی مؤثرتری برای کاهش اثرات سیلاب انجام دهند [۲۹].

۲.۳. مثال‌های عملی

برای روشن شدن موضوع، چند مثال می‌آوریم:

در شانگهای (Shanghai, China)، مدل SWMM نشان داد که در صورت افزایش ۳۰ درصدی بارش‌ها، تا نیمی از مناطق شهری ممکن است دچار آبگرفتگی شوند، مگر آنکه سیستم‌های زهکشی بهبود یابند [۵].

در تهران (Tehran, Iran)، مطالعات نشان دادند که محله‌های جنوبی شهر به دلیل زمین‌های کم‌ارتفاع و شبکه‌های زهکشی قدیمی، در معرض خطر بیشتری قرار دارند [۲۳].

ترکیب این روش‌ها، شامل استفاده از داده‌های گسترده، مدل‌های دقیق و مطالعات موردی واقعی، تصویری جامع از مشکل سیلاب‌های شهری ارائه می‌دهد و اطمینان حاصل می‌کند که نتایج تحلیل‌ها قابل اعتماد و کاربردی هستند.

۳. نتایج

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی به‌طور ملموسی شدت و بسامد سیلاب‌های شهری را افزایش داده است. برای ارائه واضح و سازمان‌یافته، نتایج در چند بخش اصلی ارائه می‌شوند:

- ❖ افزایش شدت و فراوانی بارش‌ها
- ❖ خسارات اقتصادی و اجتماعی
- ❖ تأثیرات زیست‌محیطی
- ❖ راهکارهای پیشنهادی برای کاهش اثرات سیلاب‌ها

برای هر بخش، از داده‌های واقعی، آمار عددی، جداول و نمودارها استفاده می‌شود تا پیامدها و الگوهای مشاهده‌شده به‌طور کامل و شفاف به مخاطب منتقل گردد.

۳.۱. افزایش شدت و فراوانی سیلاب‌ها

مطالعات علمی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی منجر به افزایش فراوانی بارش‌های شدید شده است. بر اساس تحلیل‌های حاصل از مدل‌های CMIP6 و SWMM، تعداد روزهایی که میزان بارش بیش از ۵۰ میلی‌متر بوده است، در بسیاری از شهرها بین ۱۰ تا ۳۰ درصد افزایش یافته است [۱۸,۲۲]. این افزایش، نشان‌دهنده آن است که سیلاب‌ها نه تنها بیشتر رخ می‌دهند، بلکه شدت آن‌ها نیز افزایش یافته است. به‌عنوان مثال:

در اروپا، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، فراوانی سیلاب‌ها حدود ۲۰ درصد و شدت آن‌ها حدود ۱۵ درصد افزایش یابد. به‌عنوان مثال، در برلین (Berlin, Germany)، بارش‌های شدید موجب آبگرفتگی سریع‌تر خیابان‌ها و فشار بیشتر بر شبکه‌های زهکشی شهری شده است [۳۱].

در آسیا، فراوانی سیلاب‌ها حدود ۳۰ درصد و شدت آن‌ها حدود ۲۵ درصد افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در شانگهای (Shanghai, China)، مدل‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهند که حجم رواناب سیلاب تا سال ۲۰۴۰ ممکن است تا ۲۵ درصد افزایش یابد [۳۲].

در آمریکای شمالی، شهرهایی مانند نیویورک (New York, USA) و هیوستون (Houston, USA) شاهد افزایش حدود ۲۵ درصدی در فراوانی و ۲۰ درصدی در شدت سیلاب‌ها بوده‌اند [۳۳].

در آفریقا، با توجه به ضعف زیرساخت‌ها، فراوانی سیلاب‌ها تا حدود ۳۵ درصد و شدت آن‌ها تا ۳۰ درصد افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در لاگوس (Lagos, Nigeria)، سیلاب‌های سال ۲۰۲۲ خسارات گسترده‌ای به زیرساخت‌ها و زندگی مردم وارد کردند [۳۴].

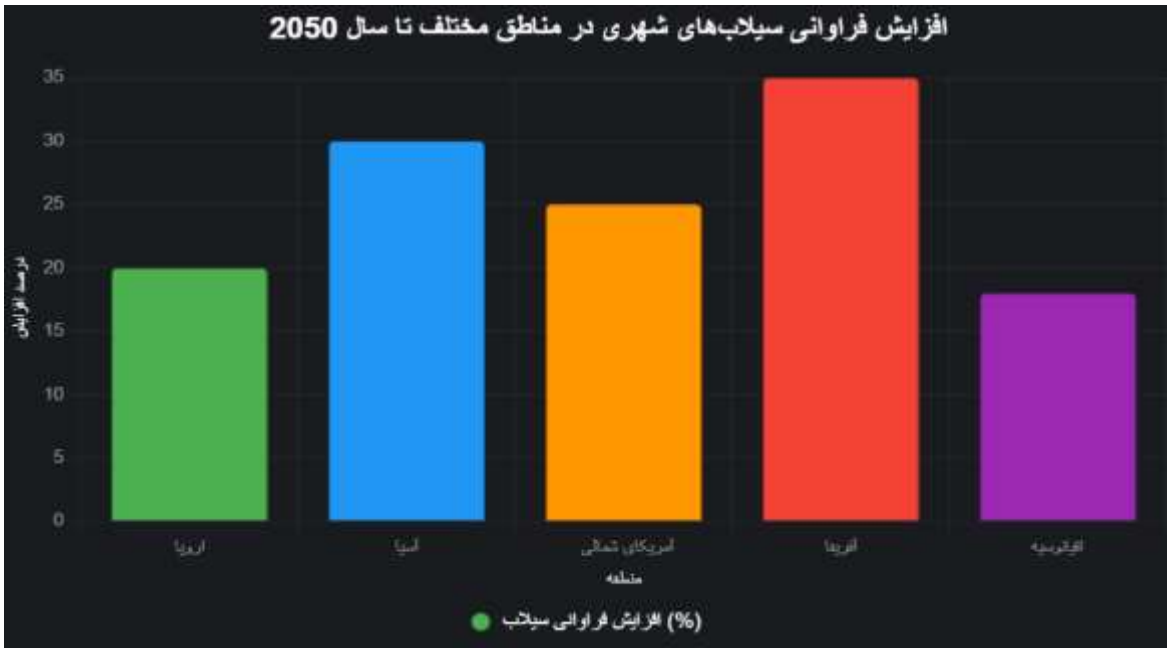
در اقیانوسیه، میزان افزایش سیلاب‌ها نسبت به سایر مناطق کمتر است؛ فراوانی حدود ۱۸ درصد و شدت حدود ۱۲ درصد افزایش یافته است. به‌عنوان مثال، در سیدنی (Sydney, Australia)، بارش‌های شدید نسبت به آسیا کمتر است، اما همچنان می‌توانند مشکلات قابل توجهی برای زیرساخت‌ها و مدیریت شهری ایجاد کنند [۳۵].

جدول ۱- برای نشان دادن این اعداد، جدول زیر را داریم

منطقه	افزایش فراوانی(%)	افزایش شدت(%)	شهرهای نمونه
اروپا	20	15	برلین، آمستردام
آسیا	30	25	شانگهای، بمبئی
آمریکای شمالی	25	20	نیویورک، هیوستون
آفریقا	35	30	لاگوس، نایروبی
اقیانوسیه	18	12	سیدنی، ملبورن

این جدول میانگین نتایج مدل‌های شبیه‌سازی و داده‌های واقعی را نمایش می‌دهد. به‌عنوان نمونه، در ژاپن، مطالعات نشان داده‌اند که سیلاب‌ها در توکیو (Tokyo, Japan) حدود ۱.۲۵ برابر افزایش یافته‌اند، زیرا بارش‌های شدید با طوفان‌های اقیانوسی ترکیب می‌شوند و فشار بیشتری بر شبکه‌های شهری وارد می‌کنند.

برای بهتر نشان دادن این تغییرات، نمودار زیر فراوانی سیلاب‌ها را در مناطق مختلف مقایسه می‌کند:



شکل ۱ – این نمودار نشان می‌دهد که آفریقا بیشترین افزایش را دارد، در حالی که اقیانوسیه کمترین است.

۳.۲. خسارات اقتصادی و اجتماعی

سیلاب‌های شهری پیامدهای گسترده‌ای برای اقتصاد و زندگی مردم دارند. بر اساس گزارش بانک جهانی، پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۵۰، خسارات سالانه ناشی از سیلاب‌ها به حدود ۱ تریلیون دلار برسد. این خسارات شامل تخریب خانه‌ها، مسدود شدن جاده‌ها، توقف فعالیت‌های کسب‌وکار و هزینه‌های بازسازی و تعمیر زیرساخت‌ها می‌باشد. به‌منظور روشن‌تر شدن ابعاد این خسارات، چند مثال برای درک بهتر عمق فاجعه ارائه می‌شود:

- ✓ در آلمان (Germany) در سال ۲۰۲۱، سیلاب‌ها موجب خسارتی بالغ بر ۴۰ میلیارد یورو و جان‌باختن حدود ۲۰۰ نفر شدند [۳].
- ✓ در ایران در سال ۱۳۹۸، سیلاب‌ها در شهرهای شیراز و اهواز خسارات چند میلیارد دلاری برجای گذاشته و جان حدود ۷۰ نفر را گرفتند [۷،۸].
- ✓ در چین (China) در سال ۲۰۲۱، سیلاب‌ها در ژنگژو (Zhengzhou) حدود ۳۰۰ نفر را به کام مرگ کشانده و شبکه مترو را دچار آبگرفتگی شدید کردند [۳۶]

از نظر اجتماعی، سیلاب‌ها بیشترین آسیب را به افراد فقیر و گروه‌های آسیب‌پذیر وارد می‌کنند. محله‌های کم‌درآمد معمولاً در زمین‌های پایین و نزدیک رودخانه‌ها قرار دارند [۳۷]. به‌عنوان مثال، در لاگوس (Lagos, Nigeria)، سیلاب‌ها باعث شدند بسیاری از افراد فقیر خانه و مشاغل خود را از دست بدهند. گزارش‌ها نشان می‌دهند که تا سال ۲۱۰۰، تعداد افرادی که در معرض خطر سیلاب قرار دارند از حدود ۱.۶ میلیارد به ۱.۹ میلیارد نفر افزایش خواهد یافت.

برای نمایش خسارات سیلاب‌های شهری، جدول زیر خلاصه‌ای ساده از خسارات وارد شده ارائه می‌دهد و اطلاعات کلیدی درباره پیامدهای اقتصادی و اجتماعی را به‌طور روشن نشان می‌دهد، داریم که:

جدول ۲- شرح حال ساده ای از خسارات

شهر	سال	خسارت (میلیارد دلار)	تعداد کشته‌ها
آلمان	2021	40	200
ایران	1398	2-3	70
چین (ژنگژو)	2021	15	300
پاکستان	2022	30	1700

۳.۳. تأثیرات زیست‌محیطی

سیلاب‌های شهری نه تنها به انسان‌ها و زیرساخت‌ها آسیب می‌رسانند، بلکه اثرات مخربی بر محیط زیست نیز دارند. جریان آب ناشی از سیلاب می‌تواند زباله‌ها، مواد شیمیایی و فاضلاب را به رودخانه‌ها و دریاها منتقل کند، که منجر به آلودگی آب و تهدید حیات موجودات زنده مانند ماهی‌ها می‌شود. به‌عنوان مثال، در بمبئی (Mumbai, India)، سیلاب‌ها کیفیت آب رودخانه‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش داده‌اند. علاوه بر این، سیلاب‌ها موجب آسیب به پارک‌ها و فضاهای سبز شهری می‌شوند که زیستگاه حیوانات و گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تهران، سیلاب‌ها فرسایش خاک را افزایش داده و زمین‌های کشاورزی پیرامون شهر را تخریب می‌کنند [۱,۲].

۳.٤. راهکارهای پیشنهادی

نتایج نشان می‌دهند که اقدامات فوری و مؤثر برای کاهش اثرات سیلاب‌های شهری ضروری هستند. چند راهکار عملی و قابل اجرا عبارتند از:

بهبود سیستم‌های زهکشی شهری: توسعه و بهینه‌سازی شبکه‌های لوله و کانال‌های آب برای تخلیه سریع‌تر رواناب.

بام‌های سبز: ایجاد پوشش گیاهی روی پشت‌بام‌ها برای جذب آب باران و کاهش رواناب سطحی.

مخازن آب: ساخت مخازنی برای جمع‌آوری آب باران و استفاده بعدی آن در کشاورزی یا آبیاری.

برنامه‌ریزی شهری: طراحی شهرها به‌گونه‌ای که زمین‌های طبیعی بیشتری حفظ شوند و نفوذ آب به زمین آسان‌تر گردد.

آموزش مردم: آموزش ساکنان درباره رفتار ایمن در زمان سیلاب، از جمله جابه‌جایی وسایل به مکان‌های امن و اقدامات پیشگیرانه دیگر.

۳.۵. بحث

نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی یک چالش جهانی جدی است، اما با برنامه‌ریزی مناسب، اقدامات پیشگیرانه و استفاده از فناوری‌های نوین می‌توان اثرات آن را مدیریت و کاهش داد. نکته کلیدی این است که هر شهر نیازمند راهکارهای متناسب با شرایط محلی خود می‌باشد. به‌عنوان مثال، تهران به بهبود شبکه‌های زهکشی، بازسازی کانال‌ها و مدیریت رواناب نیاز دارد، در حالی که میامی (Miami, USA) علاوه بر بارش‌های شدید، باید با تهدید افزایش سطح دریا و طوفان‌های شدید نیز مقابله کند.

در صورت عدم اقدام پیشگیرانه، خسارات تا سال ۲۱۰۰ می‌تواند چندین برابر افزایش یابد و هزینه‌های بازسازی در شهرهای بزرگ به تریلیون‌ها دلار برسد. علاوه بر پیامدهای اقتصادی، پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی نیز قابل توجه هستند؛ از جمله آسیب به جمعیت‌های آسیب‌پذیر، فرسایش خاک، آلودگی منابع آب و کاهش تنوع زیستی شهری.

این موضوع برای ایران اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا شهرهایی مانند تهران، مشهد و اهواز به‌طور مرتب با سیلاب مواجه هستند. دولت، سازمان‌های شهری و جامعه مدنی باید با همکاری یکدیگر زیرساخت‌ها را تقویت کرده، سیستم‌های هشدار سریع را بهبود دهند و برنامه‌های آموزش و آمادگی عمومی را اجرا کنند.

همچنین، سیاست‌گذاری بلندمدت و استفاده از راهکارهای سبز شهری، مانند بام‌های سبز، مخازن ذخیره آب باران و حفظ زمین‌های طبیعی، می‌تواند نقش مهمی در کاهش شدت و فراوانی سیلاب‌ها داشته باشد. ترکیب اقدامات مهندسی، مدیریتی و آموزشی، بهترین روش برای کاهش آسیب‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سیلاب‌های شهری در دهه‌های آینده است.

٤. مراجع

[۱] پناهی, قاسم و اسماعیلی, کاظم . (۱۳۹۷). توصیه رویکردهای نوین در مدیریت سیلاب شهری .*فصلنامه آب و توسعه پایدار* https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i1.62583

[۲] پناهی, عبدالحافظ , جانباز قبادی, غلامرضا , متولی, صدرالدین و خالدی, شهریار . (۱۴۰۳). بررسی تغییر اقلیم و دگرگونی مؤلفه‌های طبیعی با تأکید بر سیلاب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود) .*جغرافیا و مخاطرات محیطی*.,(3)*13*,213-184 https://geoeh.um.ac.ir/article_44575.html

[3] Fekete, A., & Sandholz, S. (2021). Here Comes the Flood, but Not Failure? Lessons to Learn after the Heavy Rain and Pluvial Floods in Germany 2021. *Water*, *13*(21), 3016. https://doi.org/10.3390/w13213016

[4] Yadav, N., Wu, J., Banerjee, A., Pathak, S., Garg, R. D., & Yao, S. (2024). Climate uncertainty and vulnerability of urban flooding associated with regional risk using multi-criteria analysis in Mumbai, India. Environmental Research, 244, 117962. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117962

[5] Xu, H., Ragno, E., Jonkman, S. N., Wang, J., Bricker, J. D., Tian, Z., & Sun, L. (2024). Combining statistical and hydrodynamic models to assess compound flood hazards from rainfall and storm surge: A case study of Shanghai. Hydrology and Earth System Sciences, 28(16), 3919–3930. https://doi.org/10.5194/hess-28-3919-2024

[6] Chalakkal, J. B., & Mohan, M. (2024). An assessment of Indian Summer Monsoon (ISM) characteristics observed in continuous radiosonding from New Delhi, National Capital Region (NCR-Delhi). Atmospheric Research, 304, 107414. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107414

[۷] سهرابی, مهدی , ذوالقدر, مسیح و کارگر, محمدرضا . (۱۴۰۴). شبیه سازی دو بعدی سیلاب و بررسی تاثیر سازه های کنترلی بر خصوصیات هیدرولیکی جریان در حوضه دروازه قرآن شیراز با استفاده از داده های پهپاد و ماهواره .*نشریه هیدرولیک* . https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.459974.1705, *20*(2), 117-129

[۸] عبدالهی بروجنی, اعظم , محمدی, اصغر و نوابخش, مهرداد . (۱۴۰۲). بررسی تأثیر وقوع سیلاب بر کیفیت زندگی و امید به زندگی (مطالعه موردی: سیل‌زدگان استان خوزستان در سال ۱۳۹۸) .*توسعه اجتماعی* .182-159 ,(2)*18* , https://doi.org/10.22055/qjsd.2022.34982.2288

[۹] بهرامی, اردشیر و روشن پور, امین . (۱۴۰۳). تحلیل پیامدها و مسائل اجتماعی سیلاب لرستان در ۱۳۹۸ (مورد مطالعه: پلدختر) .*توسعه محلی (روستائی-شهری)* :doi .461-478 ,(2)*16* , https://doi.org/10.22059/jrd.2025.391766.668910

[10] Abdullah, M. A., Shaikh, B. T., Sikander, A., & Sarwar, B. (2024). Public Health and Health System's Responsiveness During the 2022 Floods in Pakistan: What Needs to Be Done? *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, *17*, e567. https://doi.org/10.1017/dmp.2023.224

[11]Kim, H., Villarini, G. Higher emissions scenarios lead to more extreme flooding in the United States. *Nat Commun* **15**, 237 (2024) . https://doi.org/10.1038/s41467-023-44415-4

[۱۲]حسینی رستمی, سپیده سادات , ذاکرحقیقی, کیانوش و ذبیحی, حسین . (۱۴۰۴). تحلیل اجتماعی سیلاب شهرستان آق‌قلا بر مبنای چارچوب توسعه و تحلیل نهادی سیاسی .(PIAD) *مخاطرات محیط طبیعی*.110-79 ,(43)14 , https://doi.org/10.22111/jneh.2024.48894.2048

[۱۳]کرمپور، مصطفی و خاموشیان صحنه، یگانه و ابراهیمی، زهره و حیدری، حامد،۱۴۰۴،بررسی همبستگی شاخص NAO با رخداد ARsایران، https://civilica.com/doc/2224340/

[۱٤] باقلانی، میلاد، رستمی، نورالدین، و توکلی، محسن. (۱۳۹۸). شناسایی عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری در حوزه آبخیز شهر ایلام. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۲)، ۵۲۳-۵۳۶. SID. https://sid.ir/paper/234848/fa

[15] He, Y., Wen, Y., Tao, R., Zhu, Z., Li, W., Zhang, J., Yue, S., Duan, Q., Lü, G., & Chen, M. (2025). Advancing river flood forecasting with a collaborative integrated modeling method. Journal of Environmental Management, 373, 123677. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123677

[16] Ha, S., Tatano, H., Mori, N. *et al.* Cost–benefit analysis of adaptation to storm surge due to climate change in Osaka Bay, Japan. *Climatic Change* **169**, 23 (2021). https://doi.org/10.1007/s10584-021-03282-y

[17] Beshir, A.A., Song, J. Urbanization and its impact on flood hazard: the case of Addis Ababa, Ethiopia. *Nat Hazards* **109**, 1167–1190 (2021). https://doi.org/10.1007/s11069-021-04873-9

[18] Dong, T., Dong, W. Evaluation of extreme precipitation over Asia in CMIP6 models. *Clim Dyn* **57**, 1751–1769 (2021). https://doi.org/10.1007/s00382-021-05773-1

[۱۹]حسینی, سید محمد , قنبری نسب, علی , عسگری, امید و هاشمی فسایی, ابراهیم . (۱۴۰۱). ارزیابی آسیب‌پذیری شهری در برابر خطر سیلاب با استفاده از روش بهترین و بدترین مبتنی بر GIS. *مدیریت بحران*. 1-10 ,(2)11 , https://www.joem.ir/article_702014_e000f008a9a021f5d2f356d1842c36a7.pdf

[۲۰]پاریزی, اسماعیل و حسینی, سید موسی . (۱۴۰۱). تحلیل فراوانی سیلاب ۱۰۰ساله در حوضه‌های آبریز ایران و بررسی عوامل تأثیرگذار بر آن .*جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*. 38-19 ,(2)33 , https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085362.1401.33.2.5.5

[۲۱]تنهاپور, میترا و بنی حبیب, محمد ابراهیم . (۱۴۰۰). مروری بر روش‌های پیش‌بینی و هشدار سیلاب واریزه‌ای .*مدیریت آب و آبیاری* https://doi.org/10.22059/jwim.2021.329769.914

[۲۲]هاشمی, حمید رضا , ایلدرمی, علیرضا و فرخزاده, بهنوش . (۱۴۰۴). تعیین مهم‌ترین پارامترهای موثر بر سیلاب شهری خرم‌آباد با استفاده از مدل .(e224982) SWMM. *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمّی*,() , https://www.geomorphologyjournal.ir/article_224982.html

[۲۳]یاراحمدی, یزدان , قضاوی, رضا و قاسمیه, هدی . (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی شبکه و گره‌های زهکشی سطحی به‌منظور مهار رواناب شهری با استفاده از نرم‌افزار SWMM در غرب منطقه شش تهران .*پژوهش های آبخیزداری*.120-104 ,(2)36 , https://doi.org/10.22092/wmrj.2022.359788.1489

[24] Zhao L, Zhang T, Fu J, Li J, Cao Z, Feng P. Risk Assessment of Urban Floods Based on a SWMM-MIKE21-Coupled Model Using GF-2 Data. *Remote Sensing*. 2021; 13(21):4381. https://doi.org/10.3390/rs13214381

[25] J. Brennen# M. Schmidt# C. Bennett# J. Goldman. *How the City of Miami is Using Technology to Help Plan for Management of Urban Flooding in the Face of Sea Level Rise.* Water Environment Federation, 2022. Web. 29 Aug. 2025. https://www.accesswater.org?id=-10080291

[۲۶] موسوی پارسایی, سید محمد , توکلی, مرتضی و پورطاهری, مهدی . (۱۴۰۳). شناسایی و سنجش اهمیت شاخص‌های سیاست‌گذاری فضایی مدیریت ریسک سیلاب روستایی .*جغرافیا و مخاطرات محیطی* ,*13*(1), 63-86. https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76633.1222

[۲۷] همنی, سجاد و محمدی ده چشمه, مصطفی . (۱۴۰۲). مطالعه جامعه‌شناختی چالش مدیریت آب‌های سطحی و تأثیر آن بر زندگی روزمره شهروندان اهوازی (مطالعه موردی: حادثه سیلاب شهری و بالازدگی فاضلاب در شهرهای اهواز و کارون سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰) .*توسعه اجتماعی*, *18*(1), 227-250. https://doi.org/10.22055/qjsd.2023.41990.2734

[۲۸] اوشک سرایی لیلا، اکبری امین نوشین. ارزیابی تاثیرگذاری بام سبز گسترده در کاهش رواناب شهری (مطالعه موردی: ساختمان‌های مسکونی منطقه ۶ تهران). سامانه‌های سطوح آبگیر باران. ۱۳۹۵; ۴ (۲) :۱۱-۲۴ http://jircsa.ir/article-1-139-fa.html

[29] Karimian Kakoli, R., Sadatinejad, S. J., Honarbakhsh, A., Najafi Hajivar, M., & Doodkanloe, K. (2013). Comparison of the kinematic wave and dynamic wave techniques for flood routing and constructing a downstream hydrograph in a reach of the Doab Samsami River. Water Engineering, 6(17), 15–24.https://sid.ir/paper/169439/en

[۳۰] پارسایی, مهدی و تابش, مسعود . (۱۴۰۴). ارزیابی تاب‌آوری شبکه جمع‌آوری فاضلاب تحت اثر سیلاب احتمالی؛ رویکرد منحنی‌های جریمه (مطالعه موردی: شهر هندیجان) .*نشریه هیدرولیک* , *20*(1), 73-90. https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.430994.1688

[31] Tügel, F., Nissen, K. M., Steffen, L., Zhang, Y., Ulbrich, U., and Hinkelmann, R.: Extreme precipitation and flooding in Berlin under climate change and effects of selected grey and blue-green measures, EGUsphere [preprint], https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-445 , 2025 .

[32] Sun, X., Li, R., Shan, X., Xu, H., & Wang, J. (2021). Assessment of climate change impacts and urban flood management schemes in central Shanghai. International Journal of Disaster Risk Reduction, 65, 102563. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102563

[33]Cons, J. (2017). Global Flooding. *Anthropology Now*, *9*(3), 47–52. https://doi.org/10.1080/19428200.2017.1390365

[34] Abu, I.-O., & Ibebuchi, C. C. (2025). Risk Assessment of the 2022 Nigerian Flood Event Using Remote Sensing Products and Climate Data. *Remote Sensing*, *17*(11), 1814. https://doi.org/10.3390/rs17111814

[35] Ayat, H., Evans, J.P., Sherwood, S.C. *et al.* An object-based climatology of precipitation systems in Sydney, Australia. *Clim Dyn* **60**, 1669–1688 (2023). https://doi.org/10.1007/s00382-022-06404-z

[36] Guo, X., Cheng, J., Yin, C., Li, Q., Chen, R., & Fang, J. (2023). The extraordinary Zhengzhou flood of 7/20, 2021: How extreme weather and human response compounded to the disaster. Cities, 134, 104168. https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104168

[37] Krishna, R. N., Ronan, K., Spencer, C., & Alisic, E. (2021). The lived experience of disadvantaged communities affected by the 2015 South Indian floods: Implications for disaster risk reduction dialogue. International Journal of Disaster Risk Reduction, 54, 102046. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102046