

رویکردی برای ارزیابی خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های شهری با مدل مدیریت سیلاب

میلاد مرادی^{۱*} و صابره دربندی^۲

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان و ^۲ استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷

چکیده

آب‌گرفتگی شهری یک چالش جدی است که به‌طور فزاینده‌ای ساکنین بسیاری از شهرها و همچنین سیاست‌گذاران با آن مواجه هستند. از این‌رو، ارزیابی آب‌گرفتگی به مساله بسیار مهمی در سراسر جهان تبدیل شده است. این ارزیابی جامع شامل شاخص‌های متعددی در حوضه‌های شهری می‌شود، اما بعدها زیاد و رابطه غیرخطی بین شاخص‌ها و خطر آب‌گرفتگی، یک چالش بزرگ برای ارزیابی دقیق می‌باشد. در این پژوهش، یک رویکرد برای ارزیابی کمی و کیفی خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های زهکشی شهری بخشی از غرب شهر کرمان بر اساس مدل SWMM، روش پیگیری پروژه، روش کریجینگ معمولی و خوشه‌بندی K-means به‌کار گرفته شد. خطر آب‌گرفتگی در سیستم زهکشی منطقه مورد مطالعه، تحت سناریوهای مختلف بارش ارزیابی و پارامترهای مورد نیاز مدل با استفاده از نقشه کاربری اراضی، DEM منطقه و بازدیدهای میدانی محاسبه شد. برای واسنجی و ارزیابی مدل، رواناب متناظر در سه نقطه مشاهداتی مختلف اندازه‌گیری شد و با رواناب شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، می‌تواند عوامل محرکه اصلی مدت زمان سیلاب، بزرگ‌ترین جریان آب و میزان سیلاب کلی در منطقه مورد بررسی را شناسایی کند. همچنین، خطر آب‌گرفتگی هر گره مورد تجزیه و تحلیل کمی قرار گرفت، به‌طوری که به‌ترتیب سه، ۱۰، ۱۳، ۲۳، ۳۰ و ۳۳ گره در دوره بازگشت‌های دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال در معرض خطر آب‌گرفتگی قرار داشتند. این پژوهش، یک رویکرد جدید و موفق برای ارزیابی خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های زهکشی شهری پیشنهاد می‌کند و رهنمودهایی را برای بهبود سیستم‌های زهکشی شهری و آمادگی برای مقابله با آب‌گرفتگی ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم زهکشی شهری، روش پیگیری پروژه، کرمان، مدل مدیریت سیلاب، SWMM

مقدمه

بسیار مهم باشد (Zhou و همکاران، ۲۰۱۲). علت توجه بسیار به مساله مدیریت سیلاب این است که در سال‌های اخیر، بارش‌های شدید و سیل‌آسا زندگی مردم را در بسیاری از شهرها فلج کرده است که منجر به زیان‌های عظیم اقتصادی، صدمات و مرگ و میر شده است (Chen و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور مرسوم، تحقیقات پیرامون بررسی بار

تعداد زیادی از رخدادهای ویران‌گر بارش که منجر به شکستن رکوردهایی نیز شده است در دو دهه اخیر اتفاق افتاده است. در نتیجه، کنترل سیلاب و سیستم‌های زهکشی شهری باید توانایی غلبه بر چالش‌های قابل توجه را داشته باشند که در پاسخ به افزایش خطر آب‌گرفتگی، مدیریت سیلاب می‌تواند

می‌شود (Cherqui و همکاران، ۲۰۱۵). استفاده ترکیبی از هر چهار رویکرد اتفاقی بسیار نادر است. به‌عنوان مثال، خطرات آب‌گرفتگی در سیستم‌های زهکشی شهری با گره‌های مختلف دارای ویژگی‌ها و شدت‌های مختلفی است که تجزیه و تحلیل‌های کمی و کیفی اثرات آب‌گرفتگی باید در نظر گرفته شود (Ahmadisharaf و همکاران، ۲۰۱۵). در پرداختن به این چالش (Kazakis و همکاران، ۲۰۱۵) یک سیستم شاخص ارزیابی و مدل‌های هیدرولوژیکی، برای تشخیص و پیش‌بینی مکانی خطر سیلاب در بافت شهری راه یک‌دیگر پیوند دادند. به عبارت دیگر، با توجه به تغییرات مکانی محل آب‌گرفتگی، مدل‌های عددی و تحلیل‌های چند معیاره به یک‌دیگر جفت می‌شوند. مدیریت ریسک آب‌گرفتگی چند وجهی و پیچیده است و تحت تاثیر عوامل مختلفی همچون؛ عوامل متفاوت زیستی و پیشنهاد‌های رقابتی است (Radmehr و Araghinejad، ۲۰۱۵). بسیاری از روش‌های سنتی و مرسوم ارزیابی سیلاب مانند فرایند تحلیلی سلسله مراتبی و ارزیابی جامع فازی، توسط عوامل ساختگی یا همگن تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در چنین شرایطی، روش پیگیری پروژه می‌تواند با فراهم آوردن یک ارزیابی جامع و اصولی سیلاب را با این عامل‌های پیچیده مدیریت کند (Kazakis و همکاران، ۲۰۱۵).

با این حال، Ahmadisharaf و همکاران (۲۰۱۵)، نشان دادند که برخی از ویژگی‌های سیلاب (همچون مدت زمان و سرعت)، با وجود این‌که برای فهم اثرات آب‌گرفتگی بسیار مهم هستند، اغلب نادیده گرفته می‌شوند و این معیارها در ارزیابی استراتژی‌های مدیریت سیلاب به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است.

این پژوهش یک رویکرد را برای تشخیص خطر آب‌گرفتگی سیستم‌های زهکشی شهری در شرایط کنونی ارائه می‌دهد. در این رویکرد، یک مدل مدیریت توفان (SWMM) و یک سیستم چند شاخصه برای محاسبه تغییرات مکانی خطر آب‌گرفتگی مجراها، به یک‌دیگر جفت شدند. سیستم چند شاخصه شامل مدت زمان، سرعت، زهکش و شاخص زیست‌محیطی است که وزن هر شاخص با استفاده از روش پیگیری

سیلاب و خطر آب‌گرفتگی سیستم‌های زهکشی شهری در چهار نوع رویکرد عمده مطرح می‌شود. ۱- سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS¹) و فناوری سنجش از راه دور (RS²): از GIS و روش RS به‌منظور ارزیابی خطر سیلاب در مناطق شهری و تامین پشتیبانی فنی برای بررسی خطر سیلاب استفاده می‌شود (Tanavud و همکاران، ۲۰۰۴). با این حال، توسعه فناوری‌های مختلف به هزینه‌های بالا و عدم دقت کافی محدود شده است. ۲- روش آمار ریاضیاتی بلای تاریخی: توالی‌های طولانی مدت سیلاب تاریخی، باید یکی از مهمترین منابع برای ارزیابی خطر سیلاب باشد. اگرچه ارزیابی نتایج به‌طور کلی منعکس کننده وضع کامل منطقه مورد بررسی است، اما یک مقدار قابل توجه اطلاعات نمی‌تواند به‌طور دقیق تغییرات مکانی را منعکس کند (Nott، ۲۰۰۶). ۳- تجزیه و تحلیل چند معیاره: این رویکرد به‌طور کلی می‌تواند شرایط خطرناک منطقه‌ای را اندازه‌گیری کند و نتایج را در بحث‌ها منعکس کند. خطر فاجعه سیلاب شهری با ساخت یک سیستم شاخص ارزیابی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج رضایت‌بخشی را نیز به‌دست آمد (Jiang و همکاران، ۲۰۰۹). اما این روش دارای اشکالاتی است که از جمله آن می‌توان به تاثیر عوامل درونی اشاره کرد. ۴- سناریو تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی در دوره آنالیزهای خطر سیلاب‌های فجیع و ارزیابی سناریوهای مختلف در مقیاس‌های مختلف (Willems، ۲۰۱۳). این روش شامل داده‌های ژئومورفولوژی، توپوگرافی و داده‌های سیستم زهکشی شهری است. روش‌های متعددی در مطالعات قبلی به‌کار گرفته شده است (Tripathi و همکاران، ۲۰۱۴؛ Chang و همکاران، ۲۰۱۵).

قطعا این چهار رویکرد از مهمترین روش‌ها برای تشخیص و مدیریت خطر سیلاب هستند، اما روش‌های کمی و کیفی برای ارزیابی مناطق یا نقاط طغیان (بحرانی) و ارتباط بین خطر آب‌گرفتگی و موقعیت مکانی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ارزیابی ریسک سیلاب اغلب از یکی روش‌ها برای شناسایی نقاط بحرانی یا مناطق نزدیک به بحران استفاده

¹ Geographical Information System

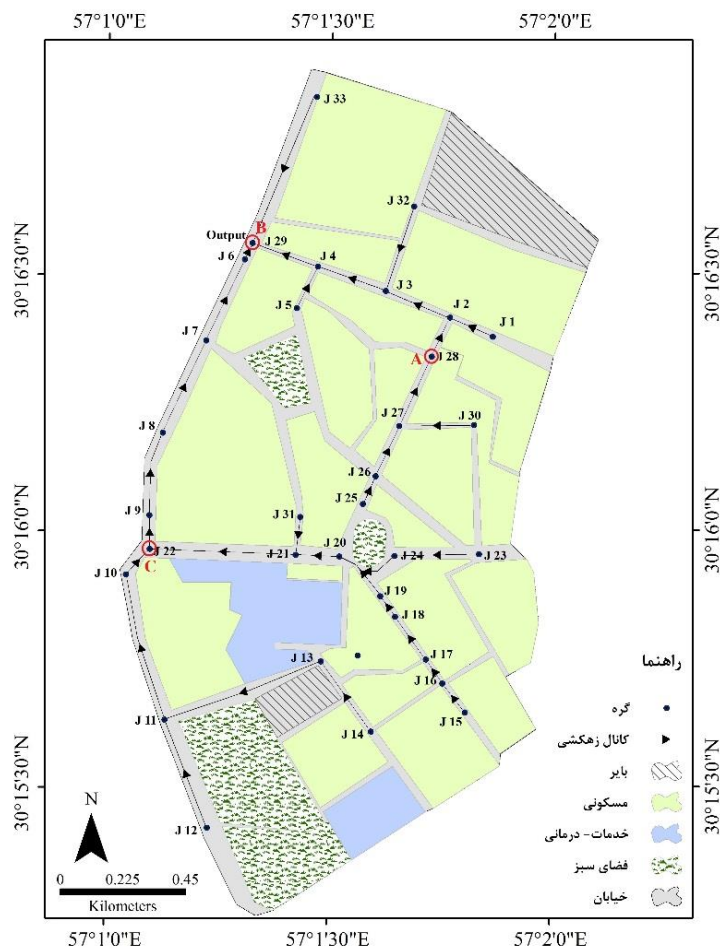
² Remote Sensing

پروژه محاسبه شد. این روش برای اهداف زیر توسعه داده شده است: (۱) شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ سیستم زهکشی به سناریوهای مختلف بارش، (۲) آنالیز عوامل محرک اصلی و سنجش خطر برای هر مجرا، تحت سناریوهای مختلف بارش، (۳) ارزیابی و تحلیل مشخصه‌های توزیع مکانی خطرات آب‌گرفتگی و (۴) توسعه یک مدل که بتواند رابطه علیت بین شدت بارش و بزرگ‌ترین ناحیه تحت تاثیر آب‌گرفتگی را برای پیش‌بینی مناطق سیلابی تحت سناریوهای مختلف بارش، منعکس کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش و داده‌های مورد استفاده: در این پژوهش، بخشی از ناحیه غربی شهر کرمان با مساحت ۲۵۳ هکتار (معادل ۲/۵۳ کیلومتر مربع) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). جمع‌آوری آب‌های سطحی این منطقه توسط شبکه‌ای از کانال‌های روباز

واقع در کنار خیابان‌ها، بلوارها و بزرگراه‌ها صورت می‌پذیرد. بر اساس تحقیقات محلی، آب‌گرفتگی قابل توجهی تاکنون از این مناطق گزارش نشده است اما در پایین‌دست زیرحوضه (محل خروجی) و برای بارش‌هایی با شدت بالا، آب‌گرفتگی گزارش شده است. به‌منظور بررسی رابطه بین رواناب و بارش در این منطقه، سه نقطه (A، B و C) برای نظارت بر رواناب انتخاب شدند. همچنین، در این مطالعه از داده‌های ایستگاه هواشناسی استفاده شده است. این ایستگاه از نوع ایستگاه‌های سینوپتیک است که در غرب شهر کرمان واقع شده و نزدیک‌ترین ایستگاه به محدوده مورد مطالعه می‌باشد. فاصله ایستگاه هواشناسی تا منطقه مطالعاتی نزدیک به شش کیلومتر است و دارای اطلاعات طولانی مدت بارش است. داده بارش و رواناب به‌صورت هم‌زمان ثبت شده و فاصله زمانی بین اندازه‌گیری سه ساعت می‌باشد.



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی و سیستم زهکشی منطقه مورد مطالعه

قوانین معادله حرکت (مومن‌توم) و جرم است (Burger و همکاران، ۲۰۱۴). این مدل برای طراحی، آنالیز و برنامه‌ریزی سیستم‌های زهکشی و همچنین شبیه‌سازی کمیت و کیفیت رواناب در مناطق شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rossman، ۲۰۱۰). علاوه بر این، SWMM می‌تواند کمیت و کیفیت رواناب ایجاد شده در هر حوضه را از طریق هر یک از مجراها در طول یک دوره شبیه‌سازی کند. در مقایسه با سایر مدل‌ها، نتایج مدل SWMM نشان‌دهنده آن است که جریان رواناب در مدت زمان کوتاه‌تری به نقطه اوج می‌رسد و مقادیر محاسبه شده به مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک است. بنابراین، SWMM به‌عنوان یکی از بهترین مدل‌های هیدرولوژیکی مطرح شده است (Lowe، ۲۰۱۰).

معیارهای ارزیابی مدل

شاخص نش-ساتکلیف: این شاخص بر اساس مربع خطای میانگین مدل می‌باشد (Pushpalatha و همکاران، ۲۰۱۲) که به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

که در آن، S_i مقدار شبیه‌سازی در زمان i ، O_i مقدار مشاهده شده در زمان i ، \bar{O} متوسط مقادیر مشاهده شده و n تعداد داده‌ها می‌باشد. اگر مقدار NSE برابر با یک باشد، مقدارهای شبیه‌سازی شده برابر با مقدارهای مشاهده شده است. به‌طور کلی عملکرد مدل در بازه صفر تا یک قابل قبول است، ولی برای مقادیر NSE کمتر یا مساوی با صفر غیر قابل قبول خواهد بود (Moriasi و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین میزان NSE بزرگ‌تر یا مساوی با ۰/۵ نیز رضایت‌بخش می‌باشد (Yang و همکاران، ۲۰۱۳).

شاخص Kling-Gupta: این شاخص بر روی سه بعد تمرکز دارد: (۱) ضریب همبستگی خطی بین جریان‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (r)، (۲) نسبت انحراف استاندارد بین جریان‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (α) و (۳) خطای وزن‌های بین جریان مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (β) (Kling و همکاران، ۲۰۱۲؛ Gupta و همکاران، ۲۰۰۹). در مقایسه با دیگر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل، تناسب سراسری بین جریان‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی

تعیین مرز زیرحوضه‌ها: بر اساس سیستم زهکشی، شرایط هیدرولوژیکی و نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی به ۲۸ زیرحوضه تقسیم شد که به‌وسیله ۳۴ مجرا جریان رواناب سطحی به تنها خروجی حوضه منتقل می‌شود (شکل ۱). برای بستن مرز زیرحوضه‌ها در مناطق شهری به اطلاعاتی از منطقه نیاز است که تنها با بررسی میدانی به‌دست می‌آید. این اطلاعات شامل جهت حرکت آب در هر زیرحوضه، تشخیص خروجی هر زیرحوضه و تشخیص خروجی کل حوضه به‌نحوی که در نهایت رواناب هر زیرحوضه به یک خروجی مشخص ختم شود. با توجه مطالعات و بررسی‌های انجام شده، خروجی زیرحوضه را قسمت شمال غربی حوضه در نظر گرفته و تمامی رواناب سطحی را به این منطقه هدایت کردیم.

در این مطالعه، هر زیرحوضه (مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر) به‌عنوان یک مخزن غیرخطی در نظر گرفته شده که بارش خالص آن به‌صورت سرریز به دیگر زیرحوضه‌ها وارد می‌شود. بارشی که در طول زمان تغییر می‌کند با ترکیب معادله پیوستگی و معادله مانینگ به‌دست آمده است. با توجه به شرایط خاص منطقه مورد مطالعه، میزان نفوذ با استفاده از معادله هورتون محاسبه شد. برای محاسبات هیدرولیکی شبکه لوله‌ها، روش موج دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت، علت این انتخاب جریان فشار و ذخیره سیستم زهکشی بود.

رویکرد مورد نظر برای ارزیابی خطر آب‌گرفتگی در منطقه مورد بررسی به سه فاز اولیه تقسیم می‌شود. در فاز اول، شبیه‌سازی بارش-رواناب بر اساس یک مدل بارش-رواناب با دقت بالا در منطقه مورد بررسی است. در مرحله دوم، روش پیگیری پروژه برای محاسبه وزن شاخص‌های ارزیابی به‌منظور تعیین عوامل محرکه اصلی به‌کار برده می‌شود. در فاز سوم، مشخصه‌های توزیع سیلاب با استفاده از روش پیگیری پروژه، روش کریجینگ معمولی و روش خوشه‌بندی K-means مورد تحلیل قرار می‌گیرند (Bock، ۲۰۰۷).

مدل مدیریت سیلاب^۱ (SWMM): این مدل یک مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب پویا است که بر اساس

¹ Storm Water Management Model

علمی و دقیق محاسبه شود. اگرچه روش‌های سنتی و مرسوم نمی‌توانند یک ارزیابی هدفمند را در این باره انجام دهند، ولی روش پیگیری پروژه می‌تواند این مشکل را برطرف کند (Friedman, ۱۹۸۷). در این مطالعه، روش پیگیری پروژه بر اساس بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۱) و تبدیل بعدهای فضایی به بعدهای کمتر با استفاده از بهترین مسیر پروژه انجام پذیرفت. این روش محاسباتی در زیر توضیح داده شده است (Zhao و همکاران، ۲۰۱۴).

نرمال‌سازی هر شاخص: برای یک ارزیابی مجموعه شاخص برابر است با $x^* = \{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p\}$ که در این جا x_{ij} برابر با زامین مقدار از زامین نمونه، n اندازه نمونه و p تعداد شاخص می‌باشد. زمانی که شاخص همبستگی مثبت را نشان می‌دهد، از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j \min}}{x_{j \max} - x_{j \min}} \quad (3)$$

با این حال، هنگامی که شاخص همبستگی منفی را نشان می‌دهد، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$X_{ij} = \frac{x_{j \max} - x_{ij}}{x_{j \max} - x_{j \min}} \quad (4)$$

که در آن، X_{ij} شاخص ارزیابی مجموعه پس از نرمال‌سازی، $x_{j \max}$ بیشینه مقدار زامین شاخص و $x_{j \min}$ کمینه مقدار زامین شاخص است.

ساختار تابع شاخص پروژه: قاعده کلی پروژه Z_i برابر با α بوده که $\alpha = \{a_j | j = 1 \sim p\}$ همچنین، مقدار Z_i از طریق زیر به دست می‌آید.

$$Z_i = \sum_{j=1}^p a_j x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

سپس، تابع شاخص پروژه می‌تواند به صورت زیر شرح داده شود.

$$\max Q(\alpha) = S_Z D_Z \quad (6)$$

$$D_Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (R - r_{ij}) \cdot u(R - r_{ij}) \quad (7)$$

که در آن، S_Z برابر با انحراف استاندارد Z_i تراکم (چگالی) موضعی Z_i پنجره شعاعی تراکم موضعی، $r_{ij} = |Z_{(i)} - Z_{(j)}|$ ، $R = 0.1 S_Z$ و

شده وجود دارد. شاخص KGE به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (2)$$

مقدار KGE بین $-\infty$ تا یک می‌تواند متغیر باشد، مقدار KGE برابر با یک نشان دهنده تطبیق بسیار بالای جریان‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است و با نزدیک شدن این مقدار به $-\infty$ از تناسب بین جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده شده می‌شود. همچنین مقادیر شبیه‌سازی شده با میزان KGE برابر یا بزرگ‌تر از $0/6$ می‌تواند نتایج رضایت‌بخشی را به دنبال داشته باشد (Patil و Stieglitz، ۲۰۱۵).

ساختار سیستم شاخص ارزیابی: با توجه به پژوهش حاضر و با پیروی از اصول جامعیت (علمی و عملی)، مدت زمان آب‌گرفتگی، بزرگ‌ترین جریان آب، میزان کل سیلاب، ضریب رواناب، مساحت سطح نفوذناپذیر، مساحت حوضه و توانایی انتقال مجرای پایین‌دست هر زیرحوضه از جمله شاخص‌های ارزیابی خطر آب‌گرفتگی انتخاب شدند. این شاخص‌ها برای مشخصه‌های بارش، سیستم‌های زهکشی شهری و آب‌گرفتگی در هر مجرا محاسبه می‌شود. شاخص‌ها می‌توانند به سه گروه مختلف؛ شاخص‌های هیدرولیکی، شاخص‌های زیست‌محیطی و شاخص زهکشی تقسیم‌بندی شوند.

شاخص‌های هیدرولیکی بار گره‌ها را تحت سناریوهای مختلف بارش نشان می‌دهند. شاخص‌های زیست‌محیطی نشان دهنده اثرات سطوح و عوامل اقلیمی بر آسیب‌پذیری ناحیه سیلابی است. شاخص زهکشی هم ظرفیت آب عبوری و ساختار سیستم زهکشی را نشان می‌دهد. این شاخص‌ها شامل مقادیر رواناب، مدت و حجم کل می‌باشد و منعکس کننده مشخصه‌های سیلابی هر مجرا است.

روش پیگیری پروژه: آنالیز خطر آب‌گرفتگی سیستم‌های زهکشی شهری شامل تعدادی از عوامل غیرخطی است که نشان دهنده مشکلاتی در تجزیه و تحلیل داده‌هایی با بعدهای بالا می‌باشد. برای شناسایی عوامل محرک اصلی که خطر آب‌گرفتگی را تعیین می‌کنند، بایستی وزن هر شاخص به صورت

¹ Particle Swarm Optimization

$$E[\bar{Z}(x_i)] - \sum_{i=1}^n w_i E[Z(x_i)] = 0 \quad (11)$$

(ب) مجموع وزن تمام داده‌ها برابر با یک باشد.

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (12)$$

(ج) کمینه‌سازی تابع جریمه هزینه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Var}[\bar{Z}(x_j) - Z(x_j)] \\ = \text{Cov}\{\bar{Z}(x_j), \bar{Z}(x_j)\} \\ - 2\text{Cov}\{\bar{Z}(x_j) \\ - Z(x_j)\} \\ + \text{Cov}\{Z(x_j), Z(x_j)\} \end{aligned} \quad (13)$$

نتایج و بحث

واسنجی پارامترها: از آنجا که حوضه مورد مطالعه کوچک است، پارامترها با استفاده از روش سعی و خطا کالیبره می‌شوند و توصیه می‌شود برای این منظور از منابع مربوطه استفاده شود (Zhang و Li، ۲۰۱۵). پارامترها بر اساس چهار رخداد بارش-رواناب ثبت شده در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۳ واسنجی شدند (جدول ۱ و جدول ۴). در این مطالعه از خطای اوج نسبی (RPE)^۱، KGE و NSE برای اندازه‌گیری‌های نکویی برازش بین سری زمانی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و همچنین، ارزیابی صحت مدل استفاده شده است. برای نقاط مشاهداتی A، B و C نتایج نشان می‌دهند که مقادیر شاخص‌های KGE و NSE بین سری‌های زمانی رواناب مشاهده شده و داده‌های شبیه‌سازی شده برای رخدادهای بارش متفاوت تا ۰/۷۵ متغیر است، ولی میزان خطای اوج نسبی کمتر از ۱۰ درصد بود (جدول ۴).

آنالیز اعتبارسنجی مدل: برای تشخیص مقادیر منطقی مدل و پارامترها، از چهار رخداد بارش-رواناب دیگر استفاده شد. نتایج نشان دادند که مقدار شاخص‌های KGE و NSE برای چهار رخداد بیشتر از ۰/۷، و مقدار خطای اوج نسبی نیز کمتر از هشت درصد بوده است (جدول ۴). پارامترهایی که بر اساس شدیدترین بارش ثبت شده کالیبره شده (C₁)، برای شبیه‌سازی سناریوهای بارش طرح مورد استفاده قرار گرفت و رواناب حاصل از پارامترهای C₁ به وسیله مدل

$u(R - r_{ij})$ تابع گام یک‌هستند. هنگامی که $R - r(i, j) \geq 0$ باشد، مقدار برابر با یک و در غیر این صورت $u(R - r(i, j)) = 0$ خواهد بود (Li و همکاران، ۲۰۱۱).

بهینه‌سازی تابع شاخص پروژه: تابع شاخص پروژه تنها زمانی تغییر می‌کند که مجموعه شاخص ارزیابی برای تغییرات مسیر پروژه، آماده باشد. بهترین مسیر پروژه، بهترین مشخصه‌ها و ساختار درونی داده‌هایی با ابعاد بالا را آشکار می‌سازد و این مساله با استفاده از حل بیشینه مقدار تابع شاخص پروژه تعیین می‌شود. تابع هدف و محدودیت‌ها در معادله‌های (۸) و (۹) آورده شده است.

$$\max Q(\alpha) = S_Z D_Z \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad (9)$$

روش پیگیری پروژه یک روش بهینه‌سازی غیرخطی است و از α به عنوان متغیر استفاده می‌شود که توسط حل روش PSO در این مطالعه به کار گرفته شده است (Kennedy، ۲۰۱۰).

برآورد خطر آب‌گرفتگی: ارزش پروژه هر گره و درجه همراهی هر شاخص را می‌توان با به کار بستن بهترین مسیر پروژه در معادله (۵) محاسبه کرد. مقادیر بزرگ‌تر پروژه، دارای وزن و خطر آب‌گرفتگی بیشتری هستند. روش کریجینگ معمولی به طور عمده برای علوم جغرافیایی و به عنوان بهترین روش پیش‌بینی خطی به کار برده می‌شود. این روش می‌تواند برای پیش‌بینی یک منطقه ناشناخته و بر پایه مقادیر داده همسایه، با استفاده از توابع تغییر و آنالیز ساختاری مورد استفاده قرار گیرد (Lloyd و Atkinson، ۲۰۰۱). برای داده نمونه‌برداری شده x_j ($j=1, 2, \dots, n$) مناطق و مقدارهای متناظر آن‌ها در $Z(x_j)$ هستند. برآوردهای خطی $Z(x_j)$ می‌تواند به صورت زیر تعریف شود.

$$\bar{Z}(x_i) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (10)$$

که در آن، w_i وزن $Z(x_i)$ است و w_i بایستی بتواند شرایط زیر را فراهم کند.

الف) امید ریاضی \bar{Z} برابر با صفر باشد، بنابراین:

¹ Relative Peak Error

SWMM پیش‌بینی شدند (شکل ۳). خطای اوج نسبی نقاط مشاهده شده A، B و C کمتر از شش درصد، و خطاهای زمان اوج سیلاب تقریباً برابر با صفر بودند. با ترکیب این نتایج با یافته‌های قبلی، مدل برای شبیه‌سازی رابطه بین بارش و رواناب مناسب می‌شود.

جدول ۱- مقادیر و محدوده پارامترهای مدل بارش-رواناب

پارامتر	محدوده پارامترهای پیشنهاد شده (Rossman, ۲۰۱۰)	محدوده پارامترهای مدل برای پژوهش حاضر
نفوذناپذیری	۰-۱۰۰ درصد	(۹۸-۱۲) درصد
ضریب زبری مانینگ (نفوذناپذیر)	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲-۰/۰۱۶
ضریب زبری مانینگ (نفوذپذیر)	۰/۴	۰/۲۱-۰/۷۵
عمق ذخیره (نفوذناپذیر)	۱ میلی‌متر	(۰/۲۵-۱/۷۵) میلی‌متر
عمق ذخیره (نفوذپذیر)	(۱۰-۱۱) میلی‌متر	(۵-۱۴) میلی‌متر
بیشینه سرعت نفوذ هورتون	(۱۲۷-۲۵/۴) میلی‌متر بر ساعت	(۲۰-۱۱۰) میلی‌متر بر ساعت
کمینه سرعت نفوذ هورتون	(۰/۲۵-۳۰) میلی‌متر بر ساعت	(۰-۱۵) میلی‌متر بر ساعت

جدول ۲- رابطه توفان طرح برای دوره بازگشت‌های مختلف

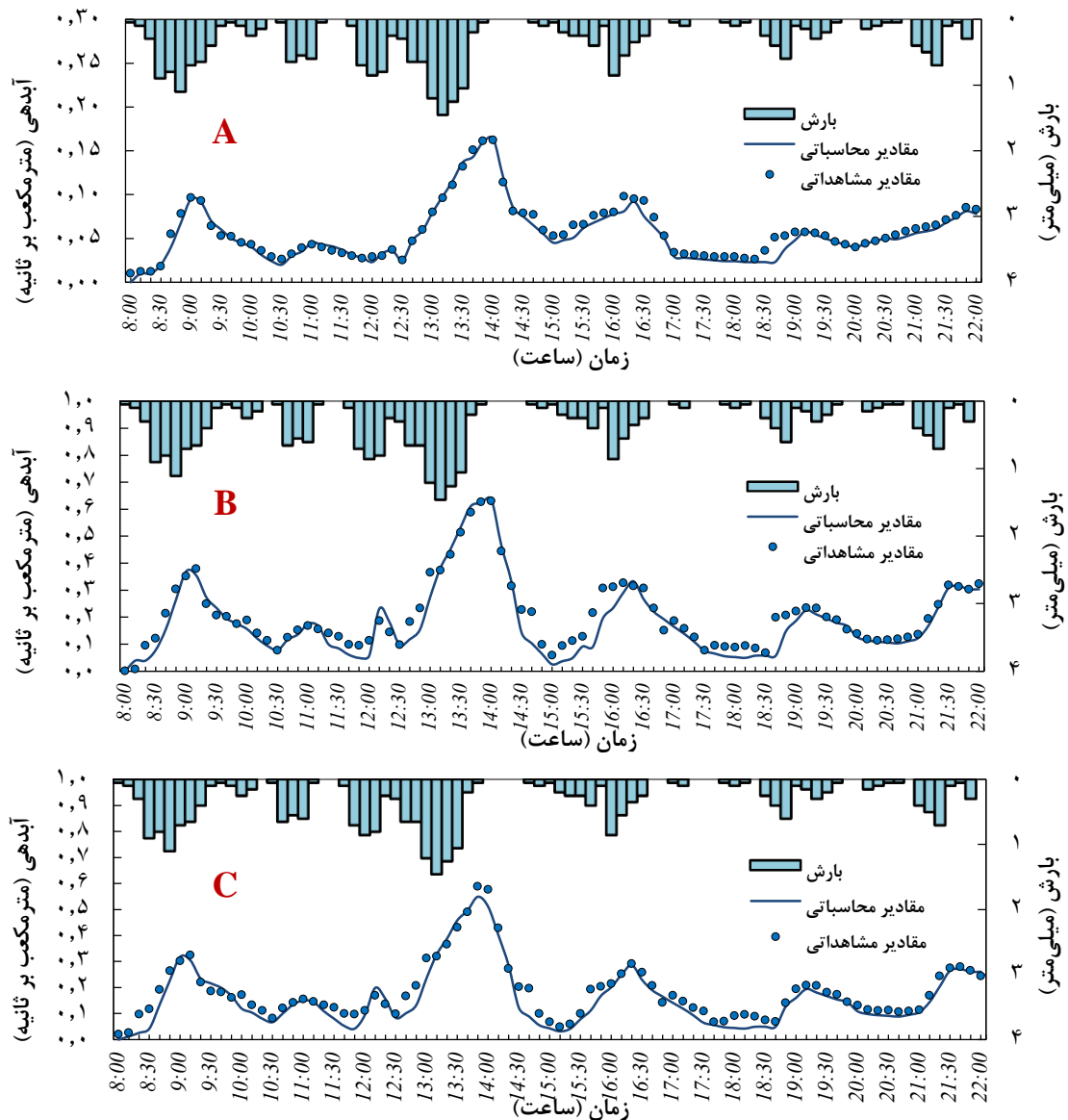
دوره بازگشت بارش	فرمول شدت توفان (i)
۲ سال	$\frac{219/85}{(t + 2/8)^{0.726}}$
۵ سال	$\frac{246/31}{(t + 2/8)^{0.726}}$
۱۰ سال	$\frac{268/42}{(t + 2/8)^{0.726}}$
۲۵ سال	$\frac{300/71}{(t + 2/8)^{0.726}}$
۵۰ سال	$\frac{327/07}{(t + 2/8)^{0.726}}$
۱۰۰ سال	$\frac{357/12}{(t + 2/8)^{0.726}}$

طراحی سناریوهای بارش مختلف: در این پژوهش از دوره بازگشت‌های بارش دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال استفاده شد (جدول ۲). دوره بازگشت‌های توفان مختلف با توجه به الگوی بارش نزدیک به شرایط واقعی و با استفاده از مدل هیدروگراف شیکاگو تعیین شدند (شکل ۳) (Keifer و Chu, ۱۹۵۷). مشخصه‌های بارش طرح شامل افزایش سریع نرخ شدت توفان قبل از رسیدن به اوج و کاهش تدریجی نرخ شدت توفان پس از رسیدن به اوج است که برای ایجاد بار قابل توجه بر سیستم زهکشی ترکیب شدند (Ren, ۲۰۰۴).

آنالیز شاخص ارزیابی خطر آب‌گرفتگی: برای آنالیز خطر آب‌گرفتگی هر گره، روش پیگیری پروژه بر اساس روش PSO، به‌منظور کاهش بعد داده‌های سیستم شاخص ارزیابی و به‌دست آوردن مولفه مسیر پروژه سیستم شاخص ارزیابی تحت سناریوهای مختلف بارش انجام شد. مولفه مسیر پروژه اثرات شاخص‌های آن‌ها بر آب‌گرفتگی را نشان می‌دهد. مقدار بهینه تابع شاخص پروژه نشان دهنده همگرایی تابع است. بهترین مولفه‌های مسیر پروژه، سهم بیشتری در خطر آب‌گرفتگی دارند. تحت دوره بازگشت‌های مختلف بارش، تاثیر هر شاخص بر

سطح نفوذناپذیر، مساحت حوضه و توانایی همگرایی جریان پایین‌دست) نیز به صفر نزدیک بودند (جدول ۳).

آب‌گرفتگی متفاوت است. بهترین مولفه‌های مسیر پروژه برای مدت زمان آب‌گرفتگی، بزرگ‌ترین جریان آب و شاخص‌های مقدار سیلاب کل و بزرگ‌ترین مقدار آن‌ها بودند. چهار شاخص دیگر (ضریب رواناب،



شکل ۳- هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در نقطه‌های مشاهداتی A، B و C

جدول ۳- شاخص‌ها تحت دوره بازگشت‌های مختلف بارش

دوره بازگشت بارش (سال)	مدت زمان آب‌گرفتگی (دقیقه)	بزرگ‌ترین جریان آب (مترمکعب بر ثانیه)	میزان کل سیلاب (مترمکعب بر ثانیه)	ضریب رواناب
۲	۲۶	۰/۵۷۲	۰/۲۴۲	۰/۶۵۱
۵	۴۳	۰/۵۹۹	۰/۳۰۲	۰/۷۲۴
۱۰	۸۱	۰/۶۲۱	۰/۳۵۲	۰/۶۷۷
۲۵	۹۵	۰/۶۶۵	۰/۳۷۵	۰/۶۰۷
۵۰	۱۱۴	۰/۶۹۳	۰/۳۹۵	۰/۵۱۳
۱۰۰	۱۲۶	۰/۷۲۶	۰/۴۱۱	۰/۵۸۱

نتایج ارزیابی مدل: با ترکیب هفت شاخص از بهترین مولفه مسیر پروژه و روش پیگیری پروژه، ارزش پروژه هر گره تحت سناریوهای مختلف بارش در شکل ۴ آورده شده به دست آمد. به طوری که با افزایش مقدار پروژه، خطر

آب گرفتگی گره نیز افزایش یافت. ارزش پروژه هر گره تحت سناریوهای مختلف بارش در شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۴- نکویی برازش برای رخدادهای کالیبره شده و اعتبارسنجی شده تحت سناریوهای مختلف بارش

رخداد	مدت (دقیقه)	بارش (میلی متر)	نقطه مشاهداتی A			نقطه مشاهداتی B			نقطه مشاهداتی C		
			RPE (%)	KGE	NSE	RPE (%)	KGE	NSE	RPE (%)	KGE	NSE
C1	۲۱۰	۱۰/۶	۴/۷۱	۰/۸۰	۰/۷۹	۳/۹۱	۰/۷۷	۰/۷۹	۴/۴۶	۰/۷۸	
C2	۶۰	۴/۷	۴/۴۰	۰/۸۰	۰/۸۳	۵/۳۷	۰/۸۱	۰/۷۹	۵/۱۹	۰/۸۲	
C3	۸۴۰	۳۶/۱	۶/۸۰	۰/۶۹	۰/۶۹	۷/۶۶	۰/۶۸	۰/۶۶	۶/۹۳	۰/۶۵	
C4	۵۱۰	۲۲/۷	۴/۷۷	۰/۷۶	۰/۸۰	۴/۹۳	۰/۷۵	۰/۷۸	۶/۰۷	۰/۷۹	
V1	۳۳۰	۹/۸	۵/۷۱	۰/۷۹	۰/۸۰	۵/۹۷	۰/۷۸	۰/۸۰	۵/۹۰	۰/۷۹	
V2	۱۹۰	۱۲/۳	۵/۱۰	۰/۷۶	۰/۷۴	۵/۱۴	۰/۷۵	۰/۷۱	۴/۳۶	۰/۸۱	
V3	۴۲۰	۲۴/۱	۶/۸۸	۰/۷۳	۰/۷۱	۶/۵۴	۰/۶۷	۰/۶۹	۶/۲۲	۰/۷۳	
V4	۲۵۰	۱۴/۶	۳/۵۱	۰/۷۹	۰/۸۲	۳/۱۲	۰/۸۰	۰/۸۲	۳/۸۷	۰/۸۱	

همچنین، از روش کریجینگ معمولی برای رسم نقشه توزیع خطر آب گرفتگی در منطقه مورد بررسی استفاده شد، نتایج آن‌ها در شکل ۵ آورده شده است. مدل‌های نیمه‌متغیر^۱ برای دوره بازگشت‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. معیار تعیین نوع کریجینگ عبارتند از: (۱) مربع میانگین ریشه (RMS^2) که کمینه است، (۲) میانگین استاندارد شده (MS^3) که به صفر نزدیک هستند، (۳) مربع میانگین ریشه استاندارد شده ($RMSS^4$) و میانگین استاندارد خطا (ASE^5) که به یک نزدیک است. نتایج اعتبارسنجی نمایی (که معقول‌ترین نوع آن‌ها است) آماره‌های RMS ، MS ، $RMSS$ و ASE در جدول ۵ آورده شده است. بنابراین نوع نمایی روش کریجینگ معمولی برای ارزیابی توزیع مکانی مشخصه‌های خطر آب گرفتگی تحت سناریوهای مختلف بارش مورد استفاده قرار گرفت.

شکل‌های ۴ و ۵ خطر آب گرفتگی سیستم زهکشی و را نشان می‌دهد که تعداد گره‌های تحت تاثیر

آب گرفتگی با افزایش دوره بازگشت بارش افزایش یافته است. در دوره بازگشت دو سال گره‌ها به خوبی توانایی انتقال رواناب ایجاد شده در حوضه را داشتند به طوری که تنها سه گره با خطر بسیار کم مواجه بودند، این در حالی است که تعداد ۱۰ گره در دوره بازگشت پنج سال خطر آب گرفتگی داشتند که گره شماره ۲۹ ($J29$) بیشتر در معرض این خطر قرار داشت. علاوه بر این، خطر آب گرفتگی در بالادست گره‌های $J5$ و $J7$ و در مجاورت $J28$ بیشتر از دوره بازگشت دو سال بود. برای دوره بازگشت‌های ۱۰ و ۲۵ سال، به ترتیب ۱۳ و ۲۳ گره در معرض خطر آب گرفتگی قرار داشتند. در میان این گره‌ها، خطر سیلابی شدن در گره‌های $J9$ ، $J6$ و $J29$ بیش از سایر گره‌ها بود. در دوره بازگشت‌های ۵۰ سال و ۱۰۰ سال نیز به ترتیب ۳۰ و ۳۳ گره سیلابی دیده شد که خطر در مجاورت گره‌های $J19$ و $J29$ در حال افزایش بود. با افزایش دوره بازگشت بارش، آب گرفتگی به سمت مناطق بالادست $J29$ و در مجاورت گره‌های $J5$ ، $J6$ ، $J7$ و $J28$ گسترش می‌یابد. به طور کلی، گره‌های $J29$ ، $J6$ و $J28$ خطر آب گرفتگی بالاتری را از خود نشان دادند. ارزش پروژه گره $J29$ در دوره بازگشت‌های دو، پنج و ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال به ترتیب برابر با ۰/۴۱، ۱/۰۴، ۱/۱۱، ۱/۲۶، ۱/۳۱ و ۱/۴۲ بودند. به دلیل

¹ Semivariogram

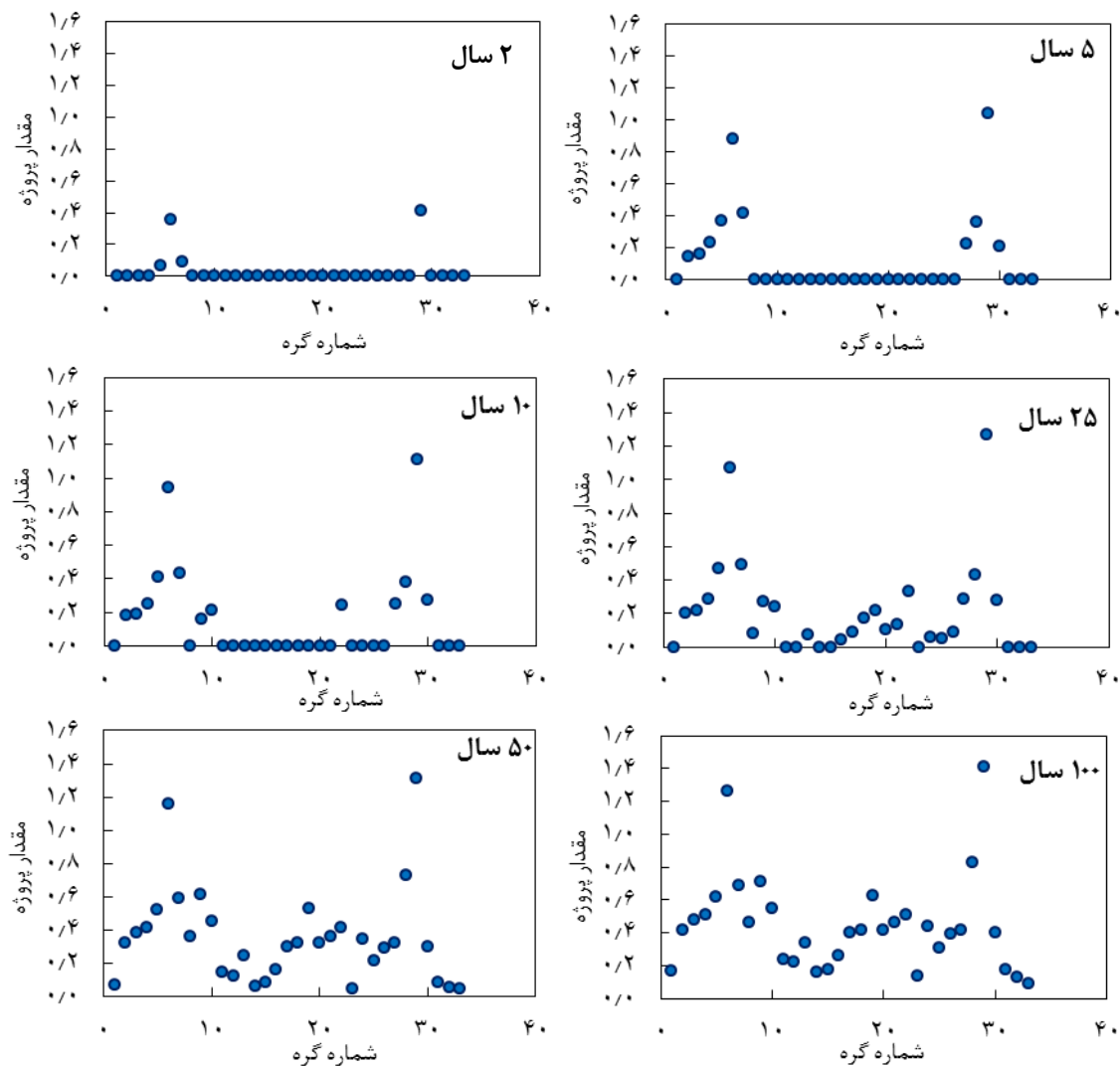
² Root Mean Square

³ Mean Standardized

⁴ Root Mean Square Standardized

⁵ Average Standard Error

سیستم زهکشی ضعیف در بالادست، خطر آب‌گرفتگی در گره J29 با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد.



شکل ۴- مقدار پروژّه هر گره به ازای دوره بازگشت‌های مختلف

جدول ۵- مدل نیمه‌متغیر و اعتبارسنجی متقابل برای دوره بازگشت‌های مختلف

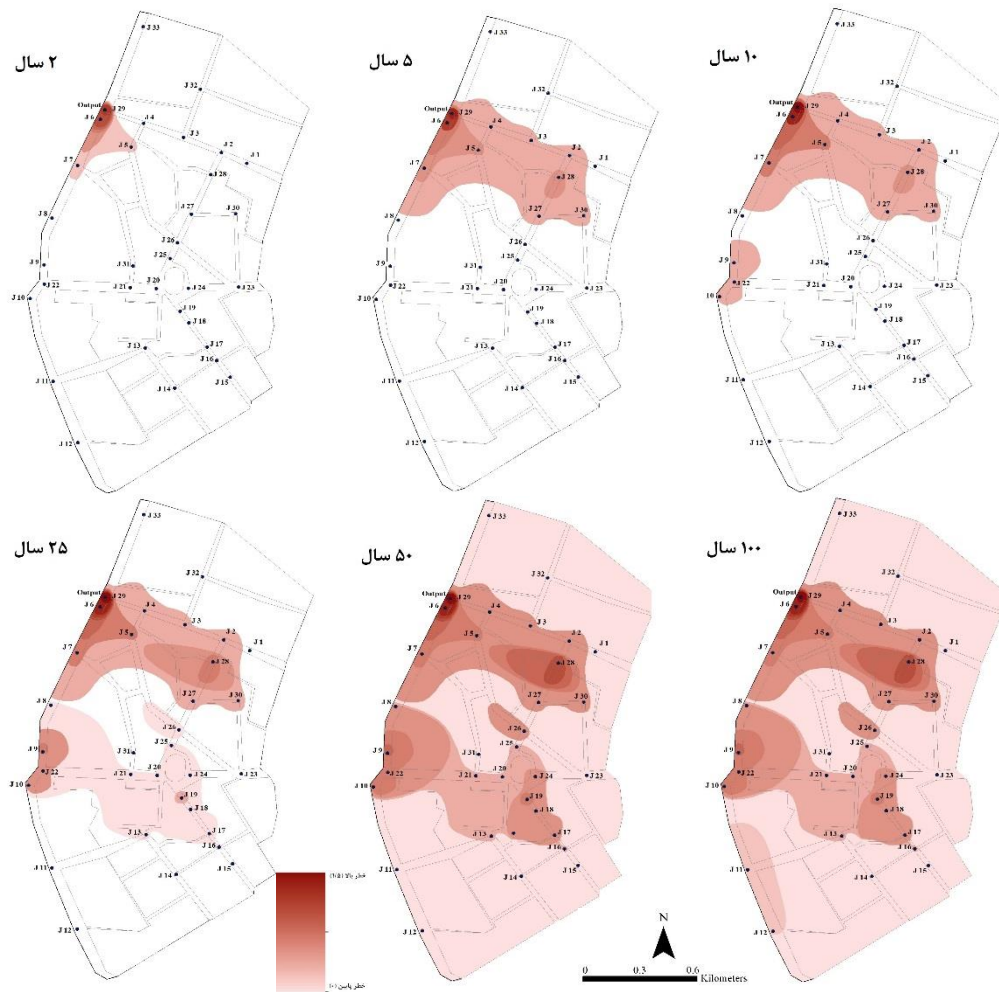
ASE	RMSS	MS	RMS	مدل نیمه متغیر	دوره بازگشت
۰/۸۱	۱/۴۲۳	-۰/۰۷۴	۰/۲۹۹	$\gamma = ۰/۱۰۴e^{۳۱۰/۷۵}$	۲
۰/۸۶	۱/۳۰۶	۰/۰۴۷	۰/۵۱۴	$\gamma = ۰/۱۹۸e^{۲۰۴/۹۴}$	۵
۰/۸۵	۱/۳۲۰	۰/۰۴۳	۰/۸۳۷	$\gamma = ۰/۲۰۸e^{۱۹۴/۰۱}$	۱۰
۰/۸۴	۱/۳۴۳	۰/۰۲۹	۰/۵۶۰	$\gamma = ۰/۲۲۱e^{۲۰۴/۹۴}$	۲۵
۰/۸۵	۱/۳۴۳	۰/۰۱۶	۰/۵۸۱	$\gamma = ۰/۲۳۴e^{۱۹۴/۰۱}$	۵۰
۰/۸۴	۱/۳۴۳۶	-۰/۰۱۸	۰/۶۰۹	$\gamma = ۰/۲۴۰e^{۱۹۴/۰۱}$	۱۰۰

(Outlet) می‌رساند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم زهکشی فعلی توانایی کافی برای عبور جریان رواناب در دوره بازگشت‌های بالا را نداشته و خطر آب‌گرفتگی

با توجه به تحقیقات انجام شده بر روی منطقه، گره J29 تمامی جریان پایین‌دست حوضه را در خود جمع‌آوری کرده و در نهایت به خروجی حوضه

پنج سطح طبقه‌بندی شد و حد بالای هر سطح به‌عنوان آستانه برای سطح بالاتر به‌کار گرفته شد (جدول ۶). سطح‌های بالاتر میزان خطرپذیری بالاتر آب‌گرفتگی را نشان می‌دهند، بنابراین، سطح یک کمترین خطر و سطح پنج بیشترین خطر را نمایش می‌دهد.

در پایین‌دست منطقه بسیار بالا است. ویژگی‌های توزیع آب‌گرفتگی: به‌منظور مطالعه ویژگی‌های توزیع سطوح مختلف آب‌گرفتگی و بزرگ‌ترین منطقه تحت تاثیر سیلاب، از روش خوشه‌بندی K-means برای طبقه‌بندی سطوح مختلف خطر آب‌گرفتگی استفاده شد. خطر آب‌گرفتگی در



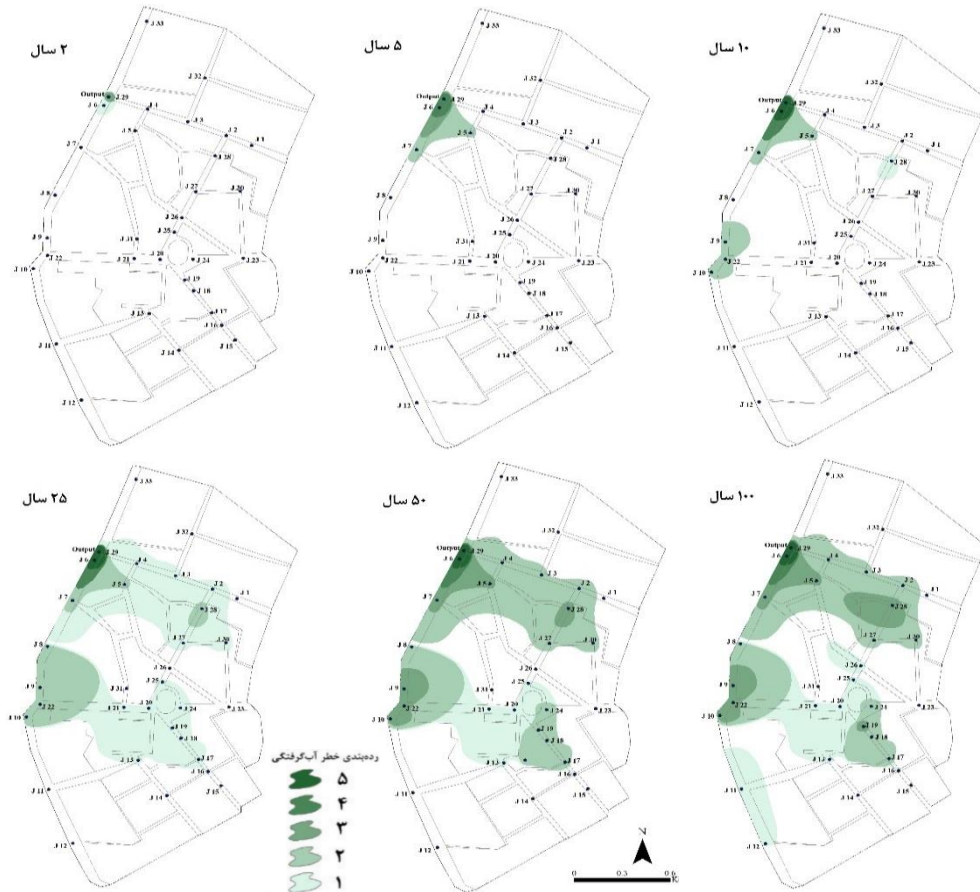
شکل ۶- مشخصه‌های توزیع مکانی خطر آب‌گرفتگی تحت سناریوهای مختلف بارش

جدول ۶- نتایج خوشه‌بندی مقادیر پروژه تحت شدت‌های مختلف بارش

رتبه‌بندی آستانه خطر					سطح خطر
سطح ۵	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	
۱/۴۱۶	۰/۸۴۹	۰/۵۶۶	۰/۱۹۲	۰/۰۰۱	آستانه حد پایین
۱/۸۵۵	۱/۴۱۶	۰/۸۴۹	۰/۵۶۶	۰/۱۹۲	آستانه حد بالا

افزایش در دوره بازگشت بارش ارتباط مستقیمی با افزایش مناطق سیلابی دارد (جدول ۷ و شکل ۷).

مشخصه‌های توزیع سطوح مختلف خطر آب‌گرفتگی تحت سناریوهای مختلف بارش و بر اساس آستانه هر سطح رسم شد (شکل ۶). به‌طور کلی،



شکل ۷- مشخصه‌های توزیع سطوح مختلف خطر آب‌گرفتگی تحت سناریوهای مختلف بارش

لگاریتمی ساخته شد.

$$S = 0.5058 \ln a - 0.6244 \quad (R^2 = 0.9036)$$

که در آن، S بزرگ‌ترین منطقه تحت تاثیر سیلاب و a ($a \geq 1$) دوره بازگشت بارش است (شکل ۸). بزرگ‌ترین منطقه تحت تاثیر سیلاب با استفاده از شدت بارش تخمین زده می‌شود، که می‌تواند به‌سرعت و به‌منظور اقدامات پیش‌گیرانه برای بررسی خطر آب‌گرفتگی مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی برای ارزیابی خطر سیلابی شدن سیستم‌های فعلی زهکشی شهری توسعه داده شدند، این در حالی است که تنها برخی از روش‌ها

به‌ترتیب با افزایش دوره بازگشت به ۲۵ و ۵۰ سال، مساحت سطح یک و سطح دو کاهش می‌یابد. مساحت سطح سه و سطح چهار با افزایش دوره بازگشت بارش افزایش یافت. برای دوره بازگشت بارش بین دو سال تا ۱۰۰ سال، مساحت منطقه سیلابی در سطح پنج با نرخ کندی در حال افزایش است. این نتایج نشان می‌دهد که نسبت مساحت سیلابی به مساحت کل حوضه در دوره بازگشت‌های دو، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال به‌ترتیب برابر است با ۰/۴۳، ۰/۲۲۵، ۰/۱۰۴، ۰/۵۵۵، ۰/۱۸۱ و ۰/۵۴۶۷ درصد که نشان دهنده خطر بالای آب‌گرفتگی در این منطقه می‌باشد.

به‌منظور بررسی رابطه بین شدت بارش و بزرگ‌ترین منطقه سیلابی، مدلی بر اساس یک تابع

بسیار با ارزش است. این روش نه تنها می‌تواند نقش شاخص‌های مختلف در یک رخداد قطعی سیلاب را برآورد نماید بلکه توانایی تعیین کانون سیلاب را نیز به صورت کمی و کیفی دارد. بنابراین، به مدیریت سیلاب در سیستم زهکشی شهری از دیدگاه‌های هیدرولوژیکی و اجرایی کمک می‌کند.

مزیت عمده روش پیشنهادی توانایی شناسایی کانون گره‌های بحرانی و ارزیابی مناطق مستعد خطر آب‌گرفتگی است که به‌طور موفقیت‌آمیزی نقش شاخص‌های ارزیابی در منطقه مورد مطالعه به‌کار گرفته شد. از آن‌جا که مشخصه‌های منطقه‌ای مانند سطح هیدرولوژیکی مورد بررسی و شرایط اقلیمی متفاوت است، نقش شاخص‌ها در سناریوهای مختلف یا مساحت سیلابی نیز ممکن است متفاوت باشد. رویکرد پیشنهادی می‌تواند برای ارزیابی خطر آب‌گرفتگی در سناریوهای مختلف یا مناطق دیگر نیز کاربرد داشته باشد و بدیهی است که شاخص‌های ارزیابی سیلاب با توجه به شرایط محلی می‌توانند اضافه یا حذف شوند.

در این پژوهش رویکردی جدید برای ارزیابی کمی و کیفی خطرات آب‌گرفتگی شهری پیشنهاد شد. رویکرد ارزیابی خطر آب‌گرفتگی بر اساس یک مدل SWMM، روش پیگیری پروژه، روش کریجینگ معمولی و داده بارش و رواناب مشاهداتی صورت پذیرفت. از این‌رو، روش ارائه شده در این مطالعه یک رویکرد جدید را برای برآورد خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های زهکشی شهری با شرایط موجود پیشنهاد می‌کند. با استفاده از این رویکرد، مناطق تحت تاثیر سیلاب می‌توانند در مقیاس‌های متفاوت به‌دست آیند که این را می‌توان برای مقیاس‌های دیگر و بدون محدودیت‌های مواد و روش‌ها نیز به‌کار برد. چند مزیت ویژه این رویکرد در زیر آورده شده است.

۱- ارزیابی کمی و کیفی عامل‌های محرک اصلی: در مقایسه با سنجش عامل‌های محرک مرسوم که در آن عامل‌های محرک اصلی به‌صورت درونی و همگن محاسبه می‌شود، روش پیشنهادی از اثرات عامل درونی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، عامل‌های محرک اصلی می‌توانند به‌صورت کمی و کیفی تحت سناریوهای مختلف بارش مورد ارزیابی قرار بگیرند.

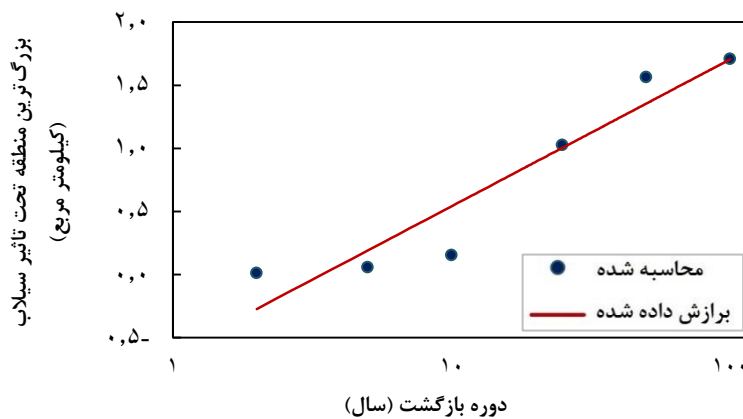
به‌صورت ترکیبی، کمیت و کیفیت عامل‌های محرکه اصلی را برای گره‌های بحرانی و بزرگ‌ترین سطح تحت تاثیر آب‌گرفتگی با استفاده از سناریوهای مختلف بارش در نظر گرفتند. به‌منظور بهبود روش ارزیابی، رویکرد سنجش خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های زهکشی شهری در این مطالعه مطرح شد که می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید برای ارزیابی تاثیر ویرانگر سیلاب‌ها به‌کار گرفته شود. مشخصه‌های سیلاب، مانند مدت زمان و سرعت، که اغلب نادیده گرفته می‌شوند، به‌منظور کمک به تحلیل‌های انجام شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج به‌دست آمده در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که مدت زمان و سرعت رخداد‌های سیلاب در سیستم‌های زهکشی، باید در ارزیابی‌های خطر سیلاب در نظر گرفته شوند (جدول ۵). هر دو مشخصه مدت زمان و سرعت سیلابی شدن باعث فرسایش خاک، مختل شدن زندگی روزمره مردم و گسترش بیماری‌های واگیردار می‌شوند (Hammond و همکاران، ۲۰۱۵).

با این حال، در ارزیابی‌های خطر آب‌گرفتگی ممکن است خطاهایی ایجاد شود، علت این خطاها آن است که شاخص‌های متفاوت تاثیرهای مختلفی بر آب‌گرفتگی می‌گذارند (Wang, ۲۰۱۰). برای شناسایی عامل‌های محرکه اصلی و تعیین وزن آن‌ها، بایستی روش‌های مرسوم نامتناسب با استفاده از عامل‌های درونی و در طول ارزیابی خطر آب‌گرفتگی در سیستم‌های زهکشی شهری، تحت تاثیر قرار بگیرند. برای پرداختن به این کمبود، روش پیگیری پروژه در تحلیل وزن موثر مورد استفاده قرار گرفت. دلایل عمده به‌کارگیری روش پیگیری پروژه در ارزیابی آب‌گرفتگی، توانایی این روش برای تبدیل مسائل غیرخطی به قالب قابل تشخیص و منطقی است، و همچنین، برای یک ارزیابی هدفمند بدون تاثیر عامل‌های هم‌جنس شاخص‌های برآورد شده اجرا شد. علاوه بر این، اطلاعات چند بعدی با استفاده از روش پیگیری پروژه می‌تواند در قالب اطلاعات یک بعدی بیان شود (شکل ۴).

علاوه بر مطالب گفته شده، Kazakis و همکاران (۲۰۱۵)، معتقد بودند که روش پیگیری پروژه برای شبیه‌سازی سیلاب تحت سناریوهای مختلف بارش

جدول ۷- مناطق آب‌گرفتگی به ازای سطوح خطر مختلف

نسبت منطقه سیلابی به مساحت کل	بزرگ‌ترین منطقه سیلابی (کیلومتر مربع)	سطح ۵	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	دوره بازگشت بارش
٪ ۰/۴۳	۰/۱۱	۰	۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۷	۲
٪ ۲/۲۵	۰/۰۵۷	۰	۰/۰۵۲	۰/۰۱۴	۰/۰۴۳	۰/۰۱۸	۵
٪ ۶/۰۴	۰/۱۵۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰۳	۰/۰۴۱	۰/۰۲۶	۰/۰۱۶	۱۰
٪ ۴۰/۵۵	۱/۰۲۶	۰/۰۰۹	۰/۰۱۰	۰/۲۵۸	۰/۰۲۵	۱/۰۰۹	۲۵
٪ ۶۱/۸۱	۱/۵۶۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	۰/۱۳۹	۰/۲۳۶	۰/۲۳۹	۵۰
٪ ۶۷/۵۴	۱/۷۰۹	۰/۰۱۸	۰/۰۷	۰/۳۳۶	۱/۱۱۱	۰/۴۶۴	۱۰۰



شکل ۸- رابطه بین بزرگ‌ترین منطقه سیلابی و دوره بازگشت بارش

مناطق تحت تاثیر سیلاب: با توجه به این رویکرد، توزیع خطر آب‌گرفتگی در منطقه مورد بررسی قابل محاسبه است و بر اساس اختلاف در مقادیر خطر آب‌گرفتگی به چندین سطح تقسیم‌بندی می‌شوند. این سطوح می‌توانند برای تشخیص خطر آب‌گرفتگی و بزرگ‌ترین منطقه تحت تاثیر سیلاب مورد استفاده قرار گیرند.

۴- مشخص ساختن رابطه بین شدت بارش و منطقه تحت تاثیر سیلاب: این مدل برای پیش‌بینی رابطه بین شدت بارش و منطقه تحت تاثیر سیلاب ساخته شده و می‌تواند پیش‌بینی را برای هر دوره بازگشتی در محدوده دو تا ۱۰۰ سال انجام دهد.

۲- شناسایی مشخصه‌های خطر سیلاب هر گره تحت سناریوهای مختلف بارش: با تغییرات در سناریو بارش، مشخصه خطر آب‌گرفتگی در هر گره پاسخ‌های مختلفی را نشان می‌دهد. تعداد زیادی از ارزیابی‌های خطر آب‌گرفتگی مرسوم که برای محاسبه خطر آب‌گرفتگی در هر گره استفاده می‌شود، از سناریوهای معین بارش انتخاب شده‌اند. با این حال، با وجود رویکرد ارائه شده خطر آب‌گرفتگی در گره تحت هر سناریو بارشی می‌تواند به صورت کمی و کیفی مورد سنجش قرار بگیرد و گره‌های بحرانی شناسایی شوند. در منطقه مورد مطالعه، با افزایش دوره بازگشت بارش، میزان خطر سیلاب نیز در مجراها افزایش می‌یابد.

۳- شناسایی سطوح مختلف خطر آب‌گرفتگی و

منابع مورد استفاده

- Ahmadisharaf, E., A.J. Kalyanapu and E.S. Chung. 2015. Evaluating the effects of inundation duration and velocity on selection of flood management alternatives using multicriteria decision making. *Water Resources Management*, 29(8): 2543–2561.
- Bock, H.H. 2007. Clustering methods: A history of K-means algorithms/selected contributions in data

- analysis and classification. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 161–172.
3. Burger, G., R. Sitzenfrei, M. Kleidorfer and W. Rauch. 2014. Parallel flow routing in SWMM 5. *Environmental Modelling and Software*, 53: 27–34.
 4. Chang, T.J., C.H. Wang and A.S. Chen. 2015. A novel approach to model dynamic flow interactions between storm sewer system and overland surface for different land covers in urban areas. *Journal of Hydrology*, 524: 662–679.
 5. Chen, S.Y., Z.C. Xue, M. Li and X. Zhu. 2013. Variable sets method for urban flood vulnerability assessment. *Science China Technological Sciences*, 56(12): 3129–3136.
 6. Cherqui, F., A. Belmeziti, D. Granger, A. Sourdriil and P. Le Gauffre. 2015. Assessing urban potential flooding risk and identifying effective risk-reduction measures. *Science of the Total Environment*, 514: 418–425.
 7. Friedman, J.H. 1987. Exploratory projection pursuit. *Journal of the American Statistical Association*, 82(397): 249–266.
 8. Gupta, H.V., H. Kling, K.K. Yilmaz and G.F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1): 80–91.
 9. Hammond, M.J., A.S. Chen, S. Djordjević, D. Butler and O. Mark. 2015. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12(1): 14–29.
 10. Jiang, W., L. Deng, L. Chen, J. Wu and J. Li. 2009. Risk assessment and validation of flood disaster based on fuzzy mathematics. *Progress in Natural Science: Materials International*, 19(10): 1419–1425.
 11. Kazakis, N., I. Kougias and T. Patsialis. 2015. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and analytical hierarchy process: application in Rhodope–Evros region, *Science of the Total Environment*, 538: 555–563.
 12. Keifer, C.J. and H.H. Chu. 1957. Synthetic storm pattern for drainage design. *Journal of the Hydraulics Division*, 83(4): 1–25.
 13. Kennedy, J. 2010. Particle swarm optimization/Encyclopedia of Machine Learning, Springer, 10: 760–766.
 14. Kling, H., M. Fuchs and M. Paulin. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424: 264–277.
 15. Li, X., C. Zhao, B. Wang and G. Feng. 2011. Regional partitioning of agricultural non-point source pollution in China using a projection pursuit cluster model. *Journal of Arid Land*, 3(4): 278–284.
 16. Lloyd, C.D. and P.M. Atkinson. 2001. Assessing uncertainty in estimates with ordinary and indicator kriging. *Nature Geoscience*, 27(8): 929–937.
 17. Lowe, S.A. 2010. Sanitary sewer design using EPA storm water management model (SWMM). *Computer Applications in Engineering Education*, 18(2): 203–212.
 18. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Liew, R.L. Binger, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE*, 50(3): 885–900.
 19. Nott, J. 2006. Extreme events: a physical reconstruction and risk assessment. Cambridge University Press, 125 pages.
 20. Patil, S.D. and M. Stieglitz. 2015. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*, 525: 409–417.
 21. Pushpalatha, R., C. Perrin, N. Le Moine and V. Andréassian. 2012. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420: 171–182.
 22. Radmehr, A. and S. Araghinejad. 2015. Flood vulnerability analysis by fuzzy spatial multi criteria decision making. *Water Resources Management*, 29(12): 4427–4445.
 23. Ren, B.Z. 2004. Study on the Urban Design Rainstorm and rainfall runoff calculation model, Chongqing University.
 24. Tanavud, C., C. Yongchalerchai, A. Bennui and O. Densreeserekul. 2004. Assessment of flood risk in Hat Yai municipality, Southern Thailand, using GIS. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(1): 1–14.
 25. Tripathi, R., S.K. Sengupta, A. Patra, H. Chang and I.W. Jung. 2014. Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA. *Applied Geography*, 46: 137–146.
 26. Wang, L. 2010. The research on urban drainage network inundation evaluation and control based on modeling technology. Beijing University of Technology, Beijing.
 27. Willems, P. 2013. Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*, 496: 166–177.
 28. Yang, X., B. Zhu, Y. Li and K. Hua. 2013. Simulation of nonpoint source nitrogen transport in two

- separated catchments in the hilly area of purple soil. *Journal of Hydraulic Engineering*, 44(10): 1197–1203.
29. Zhang, W. and T. Li. 2015. The influence of objective function and acceptability threshold on uncertainty assessment of an urban drainage hydraulic model with generalized likelihood uncertainty estimation methodology. *Water Resources Management*, 29(6): 2059–2072.
30. Zhao, J., J. Jin, Q. Guo, L. Liu, Y. Chen and M. Pan. 2014. Dynamic risk assessment model for flood disaster on a projection pursuit cluster and its application. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(8): 2175–2183.
31. Zhou, Q., P.S. Mikkelsen, K. Halsnæs and K. Arnbjerg-Nielsen. 2012. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. *Journal of Hydrology*, 414: 539–549.

Approach for appraising spate risks in urban drainage systems using stormwater management model

Milad Moradi^{*1} and Sabere Darbandi²

¹MSc, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran and ²Assistant Professor, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

Received: 17 August 2016

Accepted: 26 November 2016

Abstract

Urban inundation is a serious challenge that increasingly face the residents of many cities, as well as policymakers. Accordingly, inundation assessment is becoming increasingly momentous around the world. This comprehensive evaluation involves numerous indices in urban catchments, but the high-dimensional and non-linear relationship between the indices and the risk presents a tremendous challenge for accurate evaluation. In this study a project based on Stormwater Management Model (SWMM), Kriging and k-means clustering was used for quantitative and qualitative flooding risk assessment in urban drainage system over the western part of Kerman city. Flooding risk in the drainage system over the study area was evaluated by various precipitation scenarios and required parameters were calculated by land use map, DEM and field study. For calibration and assessment of model, calculated runoff in 3 point was measured and was compared with simulated runoff. Results show that, the proposed approach can identify the main driving factors, i.e., inundation duration, largest water flow and total flood amount in this study area. The inundation risk of each node can be qualitatively analyzed and quantitatively calculated. There are 3, 10, 13, 23, 30, and 33 node at risk under the return periods of 1-year, 5-years, 10-years, 20-years, 50-years and 100-years, respectively. This study proposes a novel and successful approach to assessing risk in urban drainage systems and provides guidance for improving urban drainage systems and inundation preparedness.

Key words: Inundation risk, Kerman, Projection pursuit method, SWMM, Urban drainage system

* Corresponding Author: milad_uok@yahoo.com