

توسعه‌ی روشی برای شبیه‌سازی آب‌گرفتگی‌های شهری منطبق بر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب

هانیه جعفری* - دانشجوی کارشناسی ارشد، سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS)، دانشکده‌ی مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی؛ H_jafari861@yahoo.com

علی اصغر آل‌شیخ - استاد، گروه سیستم‌های اطلاعات مکانی (GIS)، دانشکده‌ی مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین

طوسی

تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۱

چکیده

با گسترش فرایند شهری شدن، وضعیت سطح زمین و آب و هوا دچار تغییر شده است. از نتایج این تغییر، وقوع آب‌گرفتگی‌های مکرر در مناطق شهری است. مدل‌سازی آب‌گرفتگی ابزاری مناسب برای تصمیم‌گیری‌های سریع و تسهیل مدیریت این نوع بحران است. این مقاله به شبیه‌سازی آب‌گرفتگی ناشی از بارندگی می‌پردازد. روش پیشنهادی از داده‌های ورودی، که عموماً در دسترس است، بهره‌جسته است تا به سرعت به تخمین وضعیت آب‌گرفتگی برسد. روش پیشنهادی از مدل‌های هیدرولوژیکی اقتباس شده و بر مبنای سامانه‌های اطلاعات مکانی است. تأثیر زیرساخت‌های سطحی و زیرسطحی جمع‌آوری سیلاب در محاسبات آب‌گرفتگی لحاظ شد. فرورفتگی‌های سطح زمین به منزله‌ی مناطق اصلی دارای پتانسیل آب‌گرفتگی در نظر گرفته شدند. مقدار رواناب سطحی که از حوزه‌ی بالادست هر فرورفتگی به آن وارد می‌شود، میزان آب‌گرفتگی را تعیین می‌کند. بیشینه‌ی مقدار ذخیره‌ی آب، جهت و ترتیب حرکت جریان بین فرورفتگی‌ها همگی در شبیه‌سازی آب‌گرفتگی لحاظ شدند. منطقه‌ی مورد مطالعه بخشی از منطقه‌ی ۲۲ شهر تهران انتخاب گردید. نتایج نشان داد که روش به کار گرفته شده می‌تواند موقعیت آب‌گرفتگی‌ها در مناطق شهری را بیابد و حجم و عمق آن‌ها را با در نظرگیری تأثیر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب محاسبه کند. در مقایسه با مدل USISM مجموع حجم و عمق شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱۳/۹ و ۱۲/۷ درصد کاهش داشت که علت آن می‌تواند در نظر نگرفتن تأثیرات نوع کاربری و زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب در مدل USISM باشد. روش پیشنهادی می‌تواند برای ایجاد سامانه‌های پیش‌بینی بحران آب‌گرفتگی به منزله‌ی راهکاری غیرسازه‌ای برای کاهش پیامدهای بحران به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌گرفتگی، رواناب، مدیریت بحران، شبیه‌سازی، رگبار

Developing an Urban Inundation Simulation Model by Considering Storm water Infrastructures

Haniye Jafari^{1*} Ali Asghar Alesheikh²

Abstract

The climate change issue is dramatically risen by developing of urbanization. This matter of change resulted in more frequent flooding and inundation problems in the urban areas. The urban flood inundation modeling act as an efficient way to rapidly address these challenges by helping disaster managers. This paper introduces a new simulation model of urban storm-inundation. The proposed method uses commonly available input data to estimate the conditions of inundation quickly. The method is based on hydrologic models and geographic information systems. The effects of storm water infrastructures were also considered in inundation calculation. Terrain depressions are regarded as initial inundated area. The amount of surface runoff, the maximum storage volume, the flow direction and the water flow order between these depressions are all considered in the final inundation simulation. A part of region 22 of Tehran was chosen as study area. The results revealed that the proposed method could find inundation locations in the urban area. It can also calculate inundation depth and its volume while considering the effects of storm water infrastructures. A comparison of our proposed model with the USISM showed that the simulated amount of total volume and total depth in our methodology are reduced about 9.13 and 7.12 percent respectively. The lack of consideration of the effects of land-use type and stormwater infrastructures in USISM model is attributed to this difference. The proposed method can be used to create forecasting system for disaster management of flood inundation and helps managers reduce the effects of stormwater disasters.

Keywords: *Inundation, Runoff, Disaster management, Simulation, Storm*

1 MSc Student, Department of GIS, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran; Email: H.jafari861@yahoo.com.

2 Professor, Department of GIS, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.



مقدمه

با تغییرات جهانی در وضعیت آب و هوا و گسترش فرایند شهری شدن^۱، فراوانی و شدت بحران‌های طبیعی و خسارات ناشی از آن روند افزایشی یافته است. سیل و آب‌گرفتگی یکی از بحران‌های طبیعی در بسیاری از شهرها است که به علت شدت و وجود زمان کم برای واکنش، چالش‌های زیادی را ایجاد کرده است [۱، ۲، ۳]. در مناطق شهری، سطح زمین اغلب با کاربری‌های نفوذناپذیر پوشیده شده است و به همین علت سرعت حرکت رواناب بالا و میزان نفوذ آب باران به خاک اندک است. بنابراین رگبار شدید در یک منطقه‌ی شهری می‌تواند موجب ایجاد سیلاب و آب‌گرفتگی شود [۴]. برای مثال بارندگی ۴۰ ساعته‌ی روزهای ۲۵، ۲۶ و ۲۷ فروردین ۱۳۹۱ در تهران موجب آب‌گرفتگی شدیدی شد. حجم بارندگی در ۵۰ سال گذشته بی‌سابقه بود و مناطق ۱، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۱۵ شهرداری با مشکلاتی جدی روبه‌رو شدند. در برخی خیابان‌ها آب نهرها به اندازه‌ی ۳۰ سانتی‌متر در مسیر سواره بالا آمد و تردد شهروندان و اتومبیل‌ها را متوقف کرد. همچنین سیلاب به درون تونل در حال ساخت خط ۴ مترو نفوذ کرد و حرکت قطارهای این خط را به طور کامل مختل کرد. سیلاب در برخی ایستگاه‌ها ۵ متر بالا آمد و به شبکه‌های الکتریکی، مخابراتی، پایشی و راهبری آسیب رساند [۵، ۶]. نتیجه آنکه لزوم توجه به بحران سیل و آب‌گرفتگی‌های شهری در سال‌های اخیر بیشتر مطرح شده است. مدیریت بحران عبارت است از ایجاد آمادگی و فراهم کردن تمهیدات و تدارکات لازم برای رویارویی با بحران و به حداقل رساندن آثار تخریبی آن [۷]. مدیریت بحران تمامی جنبه‌های مقابله با بحران، شامل فعالیت‌های قبل و بعد از وقوع بحران را در بر می‌گیرد [۸]. یکی از ارکان اصلی مدیریت بحران، واکنش به وقوع بحران است. هدف از واکنش، به حداقل رساندن میزان خسارت‌ها با انجام یک رشته اقدامات فوری است [۹]. برای واکنش به بحران سیل و آب‌گرفتگی‌های شهری، شبیه‌سازی ابزاری مناسب برای پیش‌بینی و تعیین وضعیت موجود بدون نیاز به اندازه‌گیری، تصمیم‌گیری سریع و اجرای عملیات مربوط به پدافند غیرعامل است.

مدل‌های رگبار - آب‌گرفتگی^۲ شهری را می‌توان بر اساس الگوریتم محاسباتی به سه دسته تقسیم کرد: مدل‌های هیدرولوژیکی، هیدرودینامیکی و مدل‌های ساده‌شده [۱۰]. مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی به داده‌های دقیق توپوگرافی، جزئیات شبکه‌ی جمع‌آوری سیلاب و وضعیت نفوذ آب به زمین نیاز دارند که برخی از این داده‌ها به سهولت در دسترس نیستند [۱۱، ۱۲]. برای مثال، اغلب مشکلات بسیاری در جمع‌آوری داده‌های مربوط به موقعیت، عمق و قطر لوله‌های به‌کاررفته در شبکه‌ی فاضلاب، به‌منزله‌ی شبکه‌ی جمع‌آوری سیلاب، وجود دارد. علاوه بر این، محاسبات مربوط به شبیه‌سازی رگبار - آب‌گرفتگی پیچیده است و اجرای آن زمان‌بر است. در نتیجه مدل‌های سریع سیلاب‌گرفتگی^۳ توسعه یافتند که آب‌گرفتگی‌های شهری را به صورت ساده‌شده شبیه‌سازی می‌کنند.

مدل‌های ساده‌شده‌ی سیلاب‌گرفتگی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. دسته‌ی اول شامل مدل‌هایی است که گسترش تدریجی سیلاب را بر اساس یک الگوریتم هیدرولیکی ساده‌شده شبیه‌سازی می‌کنند. مدل LISFLOOD-FP و مدل ۲ بعدی CA^۴ مینا به این دسته تعلق دارند. مدل LISFLOOD-FP یک مدل شبکه‌مبنا است که مناسب شبیه‌سازی سیلاب‌های رودخانه‌ای^۵ است. این مدل پیشرفت سیلاب را به صورت زمانی - مکانی شبیه‌سازی می‌کند و در هر گام زمانی محدوده‌ی آب‌گرفتگی را به همراه عمق آن مشخص می‌کند [۱۳]. مدل ۲ بعدی CA مینا مناسب شبیه‌سازی سیلاب‌های ناشی از بارندگی^۶ است. این مدل زمان لازم برای شبیه‌سازی را تا حد زیادی کاهش داد، اما تلفات هیدرولوژیکی مانند نفوذ آب به زمین در آن در نظر گرفته نشده است [۱۴]. مدل LISFLOOD-FP و مدل CA مینا هر دو به داده‌های ورودی با جزئیات بالا نیاز دارند. با این حال این مدل‌ها محدودیت‌های کمتری نسبت به مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی دارند. دسته‌ی دوم شامل مدل‌هایی است که تنها وضعیت نهایی آب‌گرفتگی را شبیه‌سازی می‌کنند. مدل‌های GUFIM^۷، RFSM^۸ و FCDC^۹ به این دسته تعلق دارند. GU-FIM مدلی GIS^{۱۰} مینا و شامل دو زیر مدل رگبار - رواناب و آب‌گرفتگی است. این مدل مناسب مناطق نسبتاً همواری است که پستی و بلندی‌های کمی دارند. زمانی که داده‌های توپوگرافی با جزئیات بالا در دسترس نیست، این مدل کارآمد است. همچنین با توجه به سرعت بالای شبیه‌سازی در آن، برای تعیین سریع وضعیت بحران مناسب است. محدودیت این مدل عدم کارکرد آن در مناطق ناهموار است [۱۵]. مدل FCDC با هدف افزایش کارایی مدل‌های شبیه‌سازی آب‌گرفتگی در مناطقی که توپوگرافی پیچیده دارند، ایجاد شده است. این مدل از شبکه‌ی نامنظم مثلثی استفاده می‌کند و پیوستگی جریان را در نظر می‌گیرد. همچنین سرعت بالایی در شبیه‌سازی سیلاب‌های دارای منشأ^{۱۱} مانند سیلاب‌های رودخانه‌ای و یا سیلاب‌های ناشی از شکست سد دارد [۱۶]. RFSM مدل هیدرولیکی ساده‌شده‌ی دیگری است که میزان تخلیه‌ی آب به سیلاب دشت را به‌منزله‌ی ورودی دریافت می‌کند و با توجه به توپوگرافی، پخش آب در سیلاب دشت را شبیه‌سازی می‌کند. خروجی این مدل عمق آب در تمام سیلاب دشت است. مزیت این مدل نیز زمان کوتاه اجرای آن است [۱۷]. با وجود کارآمدی مدل‌های RFSM و FCDC در مناطق با توپوگرافی پیچیده، این دو مدل بر انتشار جریان تمرکز دارند و به علت عدم بررسی نحوه‌ی ایجاد رواناب، مناسب شبیه‌سازی آب‌گرفتگی‌های رودخانه‌ای هستند تا بارانی. در این میان مدل USISM^{۱۲} [۱۰] از مدل‌های هیدرولوژیکی ساده‌شده و قادر به شبیه‌سازی آب‌گرفتگی‌های ناشی از بارندگی است. این مدل بر مبنای GIS است و سرعت بالایی در اجرای شبیه‌سازی دارد؛ در نتیجه قادر به تعیین سریع وضعیت آب‌گرفتگی است. در این مدل برای برآورد مشخصه‌های هیدرولوژیکی مانند جهت جریان^{۱۳} و انباشت جریان^{۱۴} تأثیر عوارض دست‌ساز بشر در نظر گرفته نشده است. وجود زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب^{۱۵} مشخصه‌های

هیدرولوژیکی شهر را دچار تغییر می‌کند. از این رو باید تأثیر این عوارض را در تحلیل‌های هیدرولوژیکی DEM^{۱۸} مینا وارد کرد [۱۸]. در این مقاله روش شبیه‌سازی آب‌گرفتنی منطبق بر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب (ASIISM)^{۱۷} ارائه شده است. این روش بر مبنای شبکه‌های اطلاعات مکانی و روش ساده‌شده‌ای از مدل‌های هیدرولوژیکی است که وضعیت نهایی آب‌گرفتنی را محاسبه می‌کند. مشارکت تحقیق در این است که برای نزدیک کردن نتیجه‌ی شبیه‌سازی به واقعیت، تأثیر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب در تحلیل‌های هیدرولوژیکی شبکه‌مبنا در نظر گرفته شده است. فرایندهای تبخیر، نفوذ آب به زمین و زهکشی زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب در تعیین میزان رواناب سطحی دخالت دارند و با ورود داده‌های غالباً در دسترس، شبیه‌سازی انجام می‌شود. در این شیوه به جزئیات زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب نیاز نیست و وجود اطلاعات مربوط به جهت جریان در زیرساخت‌های سطحی زهکش و نقاط ورودی^{۱۸} و خروجی^{۱۹} آب به عوارض زیرسطحی و ظرفیت آن‌ها، برای شبیه‌سازی آب‌گرفتنی کفایت می‌کند. با اجرای این روش در شرایط اضطراری می‌توان شبیه‌سازی سریعی از وضعیت آب‌گرفتنی داشت و از نتایج شبیه‌سازی برای بررسی وضعیت بحران و انجام اقدامات لازم برای مدیریت بحران استفاده کرد.

تأثیر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب در تحلیل‌های هیدرولوژی

زهکش طبیعی، در طبیعت، آب را از بالادست به پایین دست هدایت می‌کند و این امر سبب تشکیل تدریجی شبکه‌های زهکش به صورت کانال‌های روباز می‌گردد. اما الگوهای زهکشی در شهر به دلیل وجود عوارض مصنوعی می‌توانند بسیار پیچیده‌تر باشند [۱۹].

زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب در شهرها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: دسته‌ی اول شبکه‌های جمع‌آوری سیلاب سطحی شامل مسیرهای زهکشی، جوی‌های کنار جاده‌ای و کانال‌ها و دسته‌ی دوم سامانه‌ی هدایت سیلاب زیرسطحی شامل تأسیسات انتقال که تونل‌ها، ورودی‌ها و خروجی‌های آب به تونل‌ها از این دسته هستند. از آنجا که زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب می‌تواند سبب تشکیل جریان‌های مصنوعی بر سطح زمین شود، که کاملاً مخالف جریان طبیعی آب است، پیچیدگی بیشتری به تحلیل‌های هیدرولوژیکی شبکه‌مبنا اضافه می‌گردد [۲۰].

مدل ارتفاعی رقومی نقش مهمی در استخراج خودکار اطلاعات هیدرولوژیکی ارزشمندی همچون جهت جریان، انباشت جریان، مرزبندی حوزه‌ها و محاسبه‌ی رواناب دارد [۲۱]. در بسیاری از مطالعات انجام شده در حوزه‌ی رواناب شهری برای تحلیل‌های هیدرولوژیکی شبکه‌مبنا، از نرم‌افزارهای تجاری مانند ArcGIS و IDRISI استفاده شده است [۲۲، ۲۱، ۱۰]. از آنجا که الگوریتم‌های مورد استفاده در این نرم‌افزارها ناتوان از در نظر گرفتن جریان آب در سامانه‌های هدایت سیلاب هستند، باید الگوریتم‌های مناسب مناطق شهری به کار گرفته شود.

محاسبه‌ی رواناب سطحی

مبنای محاسبه‌ی رواناب در این تحقیق معادله‌ی تعادل آب است. بارش کلی شامل رواناب سطحی، نفوذ در خاک، تبخیر و رواناب زهکشی شده توسط شبکه‌ی فاضلاب است. در این میان تنها رواناب سطحی است که در ایجاد آب‌گرفتنی شرکت می‌کند. رابطه‌ی ۱، رابطه‌ی تعادل آب یک رویداد رگبار را نشان می‌دهد [۱۰].

$$R_S = P - I - E - S \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه جم رواناب سطحی، P حجم بارش کلی، I میزان نفوذ به زمین، E حجم آب تبخیر شده و S حجم رواناب زهکشی شده توسط شبکه‌ی فاضلاب است. از آنجایی که در مناطق شهری میزان تبخیر در واحد سطح تقریباً برابر با ۰/۰۵ درصد کل حجم بارش در یک رویداد سه روزه‌ی بارش [۲۴] و قابل صرف نظر کردن است، رابطه‌ی ۱ می‌تواند به صورت زیر ساده شود.

$$R_S = P - I - S \quad \text{رابطه ۲}$$

برای به دست آوردن حجم تجمعی بارش، داده‌های تاریخی بارش به دست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی قابل استفاده هستند.

رواناب شبکه‌ی فاضلاب بخش مهمی از معادله‌ی تعادل آب در مناطق شهری است. اما در عمل به دست آوردن مقدار دقیق این عامل بسیار دشوار است. نخستین علت آن این است که شبیه‌سازی جریان ترکیبی حاصل از رواناب سطحی و رواناب فاضلاب بسیار پیچیده است و بررسی تعاملات بین آن‌ها خارج از حوزه‌ی این تحقیق است. علت دوم آن دشواری اکتساب داده‌های جزئی مربوط به این شبکه است. در این تحقیق فرض بر این است که در طول رگبار، از حداکثر ظرفیت طراحی شده برای شبکه‌های زهکشی استفاده می‌شود. از آنجایی که رواناب شبکه‌ی فاضلاب با سرعت زهکشی آب در لوله‌ها متناسب است [۱۰]، از سرعت متوسط زهکشی برای محاسبه‌ی این رواناب استفاده شد.

الگوریتم ارائه شده برای شبیه‌سازی آب‌گرفتنی و تعیین مناطق بحرانی

تصویر ۱ الگوریتم محاسباتی ASIISM را نمایش می‌دهد. برای تعیین مناطق آب‌گرفته، به دست آوردن حجم و عمق آب‌گرفتنی و شناسایی مناطق بحرانی با توجه به میزان بارش، یازده مرحله مطابق با تصویر ۱ باید انجام شود. این مراحل و نحوه‌ی انجام آن‌ها به شرح زیر است.

مرحله‌ی اول (استخراج فرورفتگی‌ها)^{۲۰}: با توجه به نیروی گرانش وارد بر آب تنها فرورفتگی‌ها می‌توانند آب‌گرفتنی داشته باشند. برای یافتن نواحی فرورفته از ابزار Fill در ArcGIS و اختلاف DEM پر شده و DEM اصلی استفاده شد. نحوه‌ی عمل این ابزار چنین است که اگر تمامی همسایگان یک سلول، ارتفاعی بیشتر از ارتفاع سلول در حال بررسی داشته باشند، سلول در حال بررسی به اندازه‌ای که هم‌تراز کم‌ارتفاع‌ترین سلول همسایه شود،

جدول ۱: ضریب رواناب برای کاربری های مختلف [۲۸]

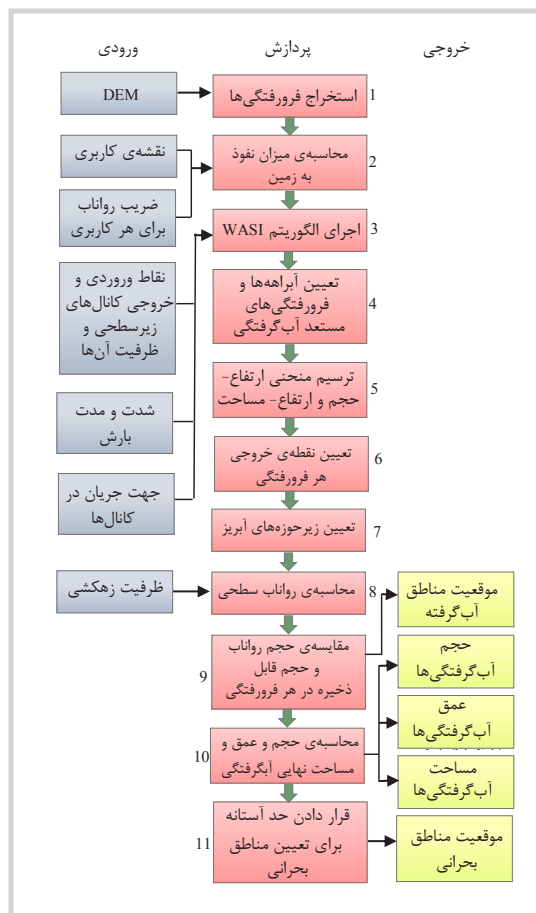
ضریب رواناب	نوع کاربری
۰/۸۵-۰/۹۵	راه های دارای روسازی آسفالت یا بتنی
۰/۷۵-۰/۸۵	سطوح ساختمانی
۰/۵۵-۰/۶۵	راه های سنگ فرش شده با خرده سنگ
۰/۲۵-۰/۳۵	مناطق پوشیده شده با خاک
۰/۱۰-۰/۲۰	فضای سبز
.	مسیل، رودخانه و دریاچه

مرحله ی سوم (محاسبه ی مشخصه های هیدرولوژیکی جهت و انباشت جریان: WASI) الگوریتم نوینی است که قادر به مدل سازی مشخصه های هیدرولوژیکی مناطق شهری، با احتساب تأثیر زیرساخت های جمع آوری سیلاب سطحی و زیرسطحی است [۱۸، ۱۹]. این الگوریتم ۹ داده ی ورودی به شرح زیر را قبول می نماید، که در صورت در دسترس نبودن هر کدام از موارد ۲ تا ۹، الگوریتم مقدار پیش فرض را جایگزین می نماید: ۱. DEM پر شده؛ ۲. جهت جریان در راستای زیرساخت های سطحی جمع آوری سیلاب؛ ۳. نقاط ورودی آب به زیرساخت های زیرسطحی جمع آوری سیلاب؛ ۴. نقاط خروجی آب از زیرساخت های زیرسطحی؛ ۵. میزان بارش؛ ۶. میزان تبخیر و تعرق به علاوه نفوذ در خاک؛ ۷. مدت زمان بارش؛ ۸. عمق جذب اولیه به زمین؛ ۹. ارتباط بین نقاط ورودی و خروجی. با اجرای الگوریتم عوامل هیدرولوژیکی جهت و انباشت جریان به دست می آید.

مرحله ی چهارم (تعیین آبراهه ها^{۲۳} و انتخاب فرورفتگی های دارای پتانسیل آب گرفتگی): با قرار دادن حد آستانه روی انباشت جریان حاصل از الگوریتم WASI، آبراهه ها قابل استخراج هستند. فرورفتگی هایی که آبراهه ها به آن ها وارد می شوند، پتانسیل آب گرفتگی را دارند؛ اما فرورفتگی هایی که بر روی آبراهه قرار ندارند، حذف می شوند، زیرا جریان آب کمی به آن ها وارد می شود و به ندرت دچار آب گرفتگی می شوند.

مرحله ی پنجم (ترسیم منحنی ارتفاع - حجم و ارتفاع - مساحت برای هر فرورفتگی): برای هر یک از فرورفتگی های انتخاب شده با به کارگیری ابزار Surface volume در ArcGIS و ورود صفحات مینا با ارتفاعات مختلف منحنی ارتفاع - حجم و ارتفاع - مساحت ترسیم شد و حداکثر حجم قابل ذخیره در هر فرورفتگی تعیین شد.

مرحله ی ششم (تعیین نقطه ی خروجی^{۲۴} هر فرورفتگی): نقطه ی خروجی هر فرورفتگی، سلول مرزی است که کم ارتفاع ترین سلول همسایه ی خارجی در همسایگی این سلول مرزی قرار داشته باشد. نقطه ی خروجی یک فرورفتگی در واقع خروجی زیرحوزه ی آبریز^{۲۵} شامل آن فرورفتگی است و از طریق آن رواناب سطحی به زیرحوزه ی پایین دست منتقل می شود.



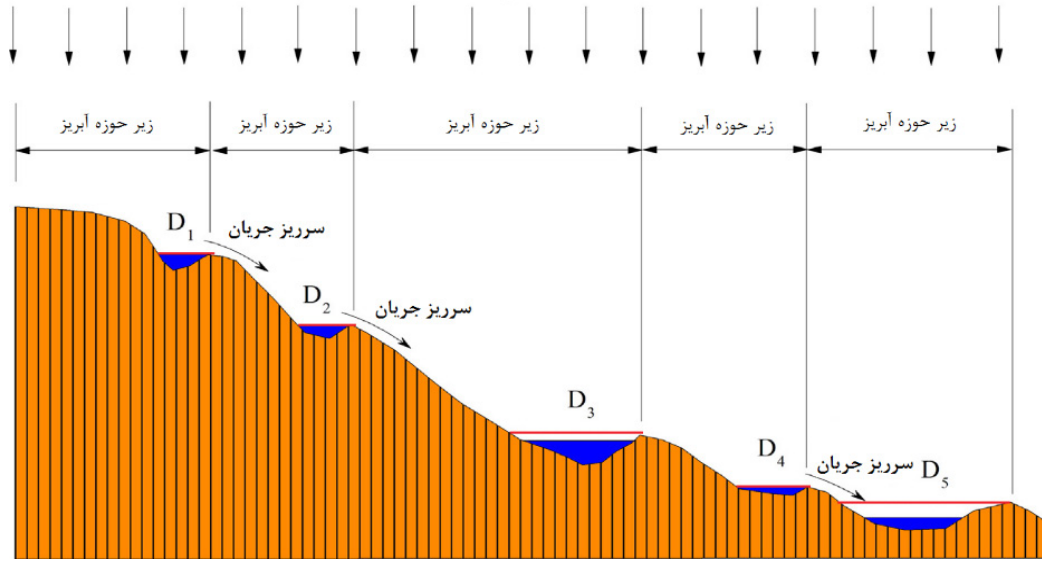
تصویر ۱: الگوریتم پیشنهادی برای شبیه سازی آب گرفتگی و تعیین مناطق بحرانی

بلا می آید. فرض شده است که DEM پر شده ۲۱ مشابه وضعیتی است که جریان تمام فرورفتگی ها را پر کرده است. بنابراین با کم کردن DEM، پر شده از DEM اصلی، فرورفتگی ها قابل اکتساب هستند.

مرحله ی دوم (محاسبه ی میزان نفوذ آب به زمین برای هر کاربری): سطوح مختلف شهری ظرفیت های جذب متفاوتی دارند. برای محاسبه ی میزان نفوذ به زمین غالباً از روش هایی استفاده شده است که بر روی نحوه ی نفوذ آب به خاک تمرکز دارند [۲۵، ۲۶، ۲۷]، در حالی که سطح زمین در مناطق شهری اغلب پوشیده از سطوح نفوذناپذیر است. استفاده از ضریب رواناب تجربی جایگزین مناسبی برای این روش ها در راستای ساده سازی محاسبه ی حجم نفوذ به زمین است [۲۸]. میزان نفوذ به زمین برای هر کاربری (I) با استفاده از رابطه ی ۳ قابل محاسبه است [۲۸].

P میزان بارش و ϕ ضریب رواناب با توجه به نوع کاربری زمین است. ضریب رواناب تجربی برای کاربری های مختلف مطابق جدول ۱ است. از آنجایی که مقادیر این جدول به طور تقریبی برابر با میانگین مقادیر ضرایب تجربی رواناب در حوزه های مختلف شهری است، از این جدول استفاده شده است. مقادیر میانگین ضرایب تجربی، مقادیر تقریبی هستند که در حوزه های شهری مختلف قابل استفاده اند [۲۹].

بارندگی



تصویر ۲: فرایند حرکت جریان بین فرورفتگی‌ها. D1 تا D5: فرورفتگی‌ها، خطوط قرمز: حداکثر ظرفیت هر فرورفتگی [۱۰]

جدول ۲: مقایسه‌ی مدل‌های مختلف ساده‌شده، هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی آب‌گرفتگی و مدل ارائه‌شده در این مقاله

نام / نوع مدل	واحد گسسته‌سازی	الگوریتم انتشار جریان	نوع سیل	ورودی مدل	خروجی مدل
RFSM [۱۷]	پهنه‌های تأثیر	انتشار حجم سیل با پر کردن و ورود آب مازاد (IZs) پهنه‌های تأثیر به پهنه‌های تأثیر همسایه	سیلاب رودخانه‌ای	کل حجم سیلاب، نقطه‌ی، DEM، ورودی سیلاب	میزان نهایی آب‌گرفتگی
FCDC [۱۶]	شبکه‌ی مثلثی سطح زمین	انتشار سیلاب بر اساس ارتفاع آب، توپوگرافی و پیوستگی جریان	سیلاب رودخانه‌ای	سطح آب، نقطه‌ی ورودی، DEM، سیلاب	میزان نهایی آب‌گرفتگی
USISM [۱۰]	زیرحوزه‌ی آبریز با نقطه‌ی خروجی فرورفتگی	انتشار جریان بر اساس ترتیب جریان محاسبه‌شده توسط الگوریتم‌های ArcGIS نرم‌افزار	سیلاب ناشی از بارش	بارش، درصد مناطق، DEM، نفوذناپذیر، متوسط سرعت زهکشی	میزان نهایی آب‌گرفتگی
GUFIM [۱۵]	حوزه‌های مستقل	انتشار سیلاب بین حوزه‌ها و شروع شبیه‌سازی از نقاط ورودی جریان به سیلاب دشت	سیلاب ناشی از بارش	شدت رگبار، ویژگی‌های، DEM، خاک، رطوبت خاک، نرخ انتقال شبکه‌ی فاضلاب	میزان نهایی آب‌گرفتگی
CA مدل ۲ بعدی [مبتنا ۱۴]	DEM سلول	جریان توسط شیب بین سلول‌ها منتقل شده و عوامل هیدرولیکی برای حرکت آن محدودیت ایجاد می‌کنند.	سیلاب ناشی از بارش	بارش، سطح ارتفاع اولیه‌ی، DEM، آب، گام‌های زمانی	تغییرات مکانی - زمانی رواناب
LISFLOOD-FP [۱۳]	DEM سلول	جریان با استفاده از معادله‌ی Saint Venant ساده‌شده می‌شود. محاسبه می‌شود.	سیلاب رودخانه‌ای	تخلیه‌ی جریان، هیدروگراف، DEM، رودخانه و سیلاب دشت	تغییرات مکانی - زمانی رواناب
ASIISM (ارائه‌شده در این تحقیق)	زیرحوزه‌ی آبریز با نقطه‌ی خروجی فرورفتگی	انتشار جریان بر اساس ترتیب جریان و منطبق بر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب و محاسبه‌شده توسط الگوریتم WASI	سیلاب ناشی از بارش	بارش، کاربری، جهت جریان، DEM، در کانال‌های روباز، نقاط ورودی و خروجی آب به زیرساخت‌های زیرسطحی	میزان نهایی آب‌گرفتگی

WASI تأثیر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب در مرزبندی زیرحوزه‌ها در نظر گرفته شد. به این ترتیب برای هر فرورفتگی زیرحوزه‌ی بالادست به دست می‌آید. مرحله‌ی هشتم (محاسبه‌ی رواناب سطحی در هر زیرحوزه): برای هر زیرحوزه مجموع حجم رواناب کلی سلول‌ها محاسبه می‌شود. رواناب کلی شامل حجم بارش کلی است که حجم آب نفوذ

مرحله‌ی هفتم (تعیین زیرحوزه‌های آبریز): برای محاسبه‌ی وضعیت آب‌گرفتگی در هر فرورفتگی، باید زیرحوزه‌ی آبریز هر فرورفتگی تعیین شود و سپس رواناب سطحی برای هر زیرحوزه محاسبه گردد. تقسیم‌بندی زیرحوزه‌ها با توجه به نقاط خروجی فرورفتگی‌ها و جهت جریان و ابزار Watershed در ArcGIS صورت گرفت. با محاسبه‌ی جهت جریان با استفاده از الگوریتم

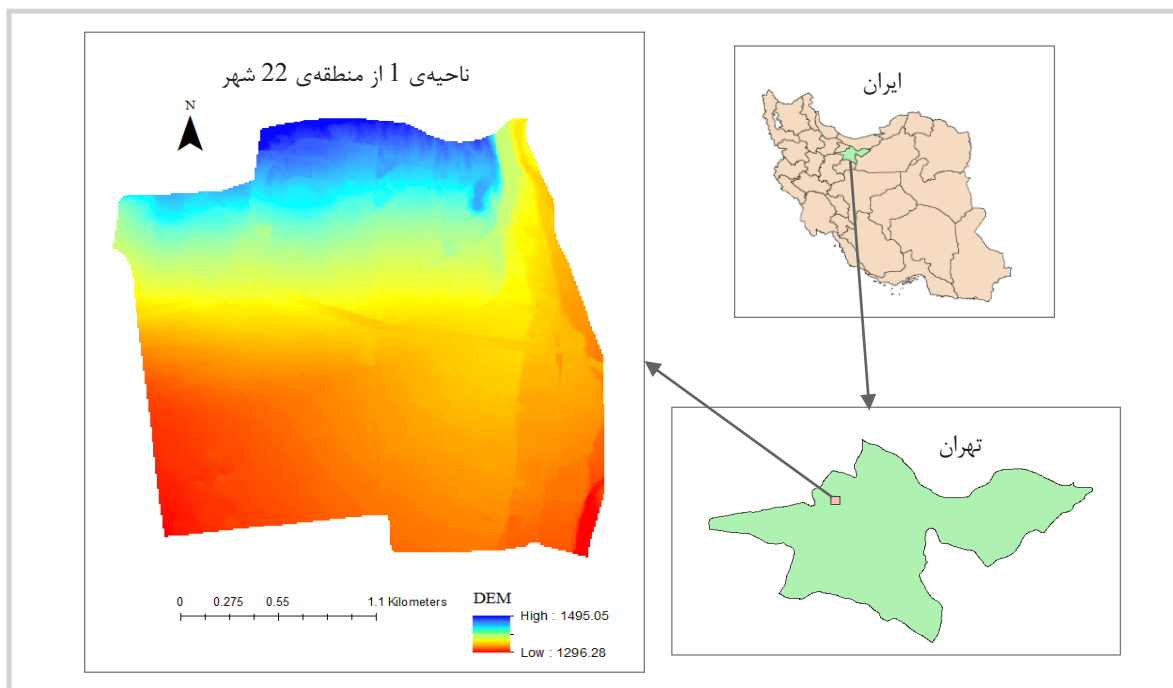
داده شده به زمین از آن کم شده است. رواناب شبکه‌ی فاضلاب با ضرب متوسط سرعت زهکشی آب در مدت زمان رگبار قابل برآورد است. میزان سرعت طراحی شده‌ی حمل آب توسط سیستم فاضلاب، برای برآورد سرعت متوسط زهکشی در طول یک رویداد بارش استفاده می‌شود. با ضرب این مقدار در مساحت زیرحوزه، حجم آب زهکشی شده به دست می‌آید. به این ترتیب با توجه به رابطه‌ی ۲ حجم رواناب سطحی برای هر زیرحوزه به دست آمد. در برخی از فرورفتگی‌ها به علت توپوگرافی محلی آب‌گرفتگی ایجاد می‌شود؛ اگر چه ارتفاع متوسط آن‌ها نسبت به سایر فرورفتگی‌ها بیشتر است. رواناب سطحی حوزه‌ی بالادست هر فرورفتگی ابتدا باید آن فرورفتگی را پر کند. اگر یک فرورفتگی دچار سرریز جریان شود، آب اضافی به سمت فرورفتگی پایین دست حرکت می‌کند. بنابراین ارتباط بین فرورفتگی‌ها و ترتیب حرکت جریان در آن‌ها، در محاسبه‌ی میزان آب‌گرفتگی، تأثیرگذار است. تصویر ۲ نحوه‌ی حرکت جریان بین فرورفتگی‌ها و انتقال از حوزه‌های بالادست به حوزه‌های پایین‌تر را نشان می‌دهد.

مرحله‌ی نهم، دهم و یازدهم (مقایسه‌ی حجم رواناب و حداکثر حجم قابل ذخیره در هر فرورفتگی، محاسبه‌ی مقادیر حجم، عمق و مساحت آب‌گرفتگی و تعیین مناطق بحرانی): حجم رواناب سطحی در زیرحوزه‌ی بالادست هر فرورفتگی، با حداکثر آبی که می‌تواند ذخیره کند، مقایسه می‌شود. اگر این حجم کمتر از مقدار حداکثر باشد، حجم نهایی آب‌گرفتگی در آن فرورفتگی را نشان می‌دهد و عمق و مساحت آب‌گرفتگی با منحنی‌های ارتفاع - حجم و ارتفاع - مساحت قابل محاسبه است. در صورتی که حجم رواناب سطحی از مقدار حداکثر بیشتر باشد، فرورفتگی به طور کامل از آب پر می‌شود و آب اضافی مطابق با جهت جریان به فرورفتگی بعدی منتقل می‌شود و عمق و حجم فرورفتگی، وضعیت

آب‌گرفتگی آن را مشخص می‌کند. تعیین مناطق وقوع بحران آب‌گرفتگی با قرار دادن حد آستانه بر عمق مناطق آب‌گرفته انجام می‌شود. در صورتی که عمق به دست آمده از مقدار آستانه بیشتر باشد، موقعیت جاری به منزله‌ی موقعیت وقوع بحران شناسایی می‌شود. به این ترتیب مناطق بحرانی برای انجام اقدامات، استقرار نیروهای متخصص و تجهیزات لازم برای تخفیف خسارات ناشی از بحران مشخص می‌شوند.

مفاهیم این رویکرد جدید نیست و شیوه‌های مشابهی در تحقیقات پیشین استفاده شده است [۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. با وجود تشابهات کلی، تفاوت‌هایی بین ASIISM و دیگر شیوه‌های پیش‌بینی آب‌گرفتگی وجود دارد که در جدول ۲ خلاصه شده است. فرایند گسسته‌سازی حوزه، مشابه مدل‌های هیدرولوژیکی DEM مینا مانند مدل استفاده‌شده در افزونه‌ی ArcSWAT است؛ با این تفاوت که جهت و انباشت جریان ورودی در فرایند گسسته‌سازی بر مبنای الگوریتم‌های مورد استفاده در نرم‌افزار ArcGIS نیست و در محاسبه‌ی آن‌ها از الگوریتم نوین WASI استفاده شده است و به این ترتیب تأثیر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب در نظر گرفته شده است. همچنین ASIISM ترتیب انتقال جریان را در حوزه‌ها در نظر می‌گیرد و برای شبیه‌سازی سیلاب‌های بارانی مناسب است [۲۸].

این الگوریتم با دریافت اطلاعات مربوط به پیش‌بینی‌های بارندگی، نقاط آب‌گرفته، عمق، مساحت و حجم آب‌گرفتگی را مشخص می‌کند و مناطقی که وضعیت آب‌گرفتگی آن‌ها بحرانی است، تعیین می‌کند. از این رو قادر به پیش‌بینی نقاط وقوع بحران است و امکان تمرکز امکانات و نیروهای متخصص را در مناطق بحرانی برای جلوگیری از گسترش بحران فراهم می‌کند. همچنین



تصویر ۳: DEM مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت این منطقه در استان تهران و کشور

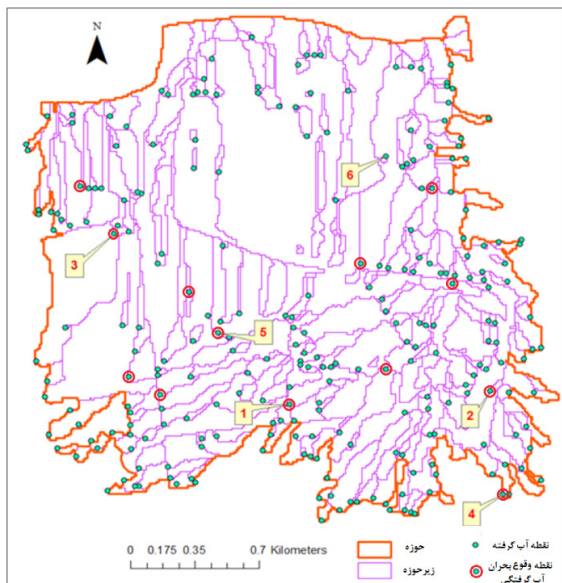
نیاز به اندازه‌گیری‌های حین وقوع بحران برای بررسی ابعاد بحران را مرتفع می‌کند.

منطقه‌ی مورد مطالعه

شهر تهران در ۵۱ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۶ دقیقه‌ی طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه‌ی عرض شمالی قرار گرفته است و ارتفاع آن از ۲۰۰۰ متر در مرتفع‌ترین نقاط شمال تا ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است. میانگین بارش سالیانه در این شهر ۲۳۳ میلی‌متر و طول خطوط شبکه‌ی جمع‌آوری و انتقال فاضلاب جمعاً ۸۴۰ کیلومتر است. شهر تهران، به طور پیوسته، در معرض خطر سیل و آب‌گرفتگی قرار دارد. از دلایل اصلی این موضوع، می‌توان اختلاف ارتفاع زیاد، شرایط اقلیمی خاص، وجود رودخانه‌هایی مانند کن و وردیج و مسیل‌های متعدد و قرار گرفتن شهر تهران در پای کوه را نام برد. منطقه‌ی ۲۲ شهرداری تهران، با وسعتی حدود ۶۰۰۰ هکتار محدوده‌ی شهری و ۱۸۰۰۰ هکتار حریم شهر، یک هفتم مساحت شهر تهران را تشکیل می‌دهد. این منطقه در قسمت شمال غربی شهر تهران و در پایین‌دست حوزه‌ی آبریز رودخانه‌ی کن و وردیج واقع شده است. منطقه‌ی مورد مطالعه‌ی این پژوهش ناحیه‌ی ۱ از منطقه‌ی ۲۲ است. تصویر ۳، DEM این ناحیه و موقعیت آن را در استان تهران و کشور نمایش می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده

از داده‌های ایستگاه هواشناسی مهرآباد تهران برای به دست آوردن حجم بارش استفاده شد. یک رویداد بارش با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال برای شبیه‌سازی آب‌گرفتگی انتخاب شد. این رویداد یک بارندگی ۱ ساعته با مقدار بارش ۱۵/۷۴ میلی‌متر است. داده‌های توپوگرافی استفاده شده، DEM منطقه است که ارتفاع ساختمان‌ها در آن لحاظ نشده است. سرعت طراحی شده‌ی انتقال آب توسط سیستم فاضلاب ۱۲ میلی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شد. از نقشه‌ی کاربری اراضی برای تعیین میزان نفوذپذیری کاربری‌های مختلف استفاده شد. همچنین نقشه‌های شبکه‌ی جمع‌آوری آب‌های سطحی، نقاط ورودی و خروجی آب به کانال‌های زیرسطحی و



تصویر ۴: نقاط آب‌گرفته، نقاط وقوع بحران آب‌گرفتگی، زیرحوزه‌های آبریز و حوزه‌ی مربوط به ناحیه‌ی ۱ از منطقه‌ی ۲۲ شهر تهران

ظرفیت جریان در آن‌ها برای تأمین ورودی‌های مورد نیاز الگوریتم WASI، به کار گرفته شد. این داده‌ها از بخش‌های مختلف سازمان شهرداری تهران و سازمان هواشناسی جمع‌آوری شدند.

محاسبه‌ی آب‌گرفتگی

مطابق با الگوریتم مورد استفاده در ASIISM، میزان آب‌گرفتگی ناشی از رگبار انتخاب شده، محاسبه شد. فرورفتگی‌ها با استفاده از DEM استخراج شد. میزان نفوذ به زمین با توجه به نقشه‌ی کاربری به دست آمد. با استفاده از نرم‌افزار ارائه شده توسط طراح الگوریتم WASI، جهت و انباشت جریان با در نظرگیری تأثیر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب محاسبه شد. حد آستانه‌ی ۱ درصد بیشترین مقدار، بر روی انباشت جریان قرار گرفت و فرورفتگی‌هایی که انباشت جریان ورودی به آن‌ها بیشتر از مقدار آستانه بود، به منزله‌ی فرورفتگی‌های مستعد آب‌گرفتگی

جدول ۳: مقایسه‌ی عمق، حجم و مساحت به دست آمده از مدل USISM و روش ارائه شده

موقعیت آب‌گرفتگی	عمق به دست آمده از مدل (USISM) (cm)	عمق شبیه‌سازی شده (cm)	حجم به دست آمده از مدل (USISM) (m ³)	حجم شبیه‌سازی شده (m ³)	مساحت به دست آمده از مدل (USISM) (m ²)	مساحت شبیه‌سازی شده (m ²)
۱	۴۱	۳۱	۱۱۹	۱۰۵	۶۰۴	۵۳۱
۲	۵۳	۲۵	۱۶۵	۸۹	۷۰۹	۲۳۰
۳	۱۷	۴۲	۵۵	۹۸	۵۰۴	۸۳۴
۴	۳۱	۲۴	۱۰۷	۹۰	۶۲۱	۵۴۷
۵	۳۴	۳۲	۱۷۶	۱۵۸	۱۱۰۵	۸۸۵
۶	۲۰	۱۷	۱۱۲	۱۰۲	۱۷۱۲	۱۱۲۳

انتخاب شدند. تقسیم‌بندی زیرحوزه‌های آبریز بر اساس جهت جریان و نقاط خروجی فرورفتگی‌ها انجام و رواناب سطحی در هر یک از آن‌ها محاسبه شد. در مرحله‌ی بعد میزان آب‌گرفتگی فرورفتگی‌ها از بالادست به پایین دست، محاسبه شد. اگر ظرفیت دریافت یک فرورفتگی برابر و یا بیشتر از حجم رواناب سطحی حوزه‌ی بالادست باشد، رواناب سطحی به حوزه‌های پایین دست منتقل نمی‌شود. اما اگر فرورفتگی دارای سرریز جریان باشد، آب اضافی با توجه به ترتیب جریان به فرورفتگی پایین دستی، جاری می‌شود. با توجه به این مفهوم حجم آب در هر فرورفتگی به دست آمد و عمق آب‌گرفتگی و مساحت آن تعیین شد. در مرحله‌ی بعدی آب‌گرفتگی‌هایی که دارای عمق بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر بودند، به منزله‌ی مناطق وقوع بحران آب‌گرفتگی تعیین شدند.

نتایج و بحث

تصویر ۴ نقاط آب‌گرفته در اثر رگبار انتخاب شده، نقاط وقوع بحران آب‌گرفتگی، زیرحوزه‌های آبریز و حوزه‌ی ۲۶ مربوط به ناحیه‌ی ۱ از منطقه‌ی ۲۲ شهر تهران را نمایش می‌دهد. نقاط وقوع بحران آب‌گرفتگی، نقاط آب‌گرفته‌ای هستند که عمق آب‌گرفتگی آن‌ها بیش از ۲۰ سانتی‌متر است. تعیین این نقاط به عنوان خروجی نهایی می‌تواند مدیریت بحران آب‌گرفتگی را تسهیل نماید. به این ترتیب که شیوه‌ی پیشنهادی قبل از وقوع بحران با توجه به پیش‌بینی‌های بارندگی قادر به پیش‌بینی مناطق وقوع بحران آب‌گرفتگی است؛ همچنین حین وقوع بحران نیاز به اندازه‌گیری‌های محیطی را رفع می‌کند و می‌تواند مبنای انجام اقدامات لازم برای مدیریت بحران آب‌گرفتگی قرار گیرد.

برای ارزیابی نتایج از مدل USISM استفاده شده است. این مدل مناسب شبیه‌سازی آب‌گرفتگی‌های ناشی از بارندگی است و با توجه به رویکرد مشابه به روش ارائه شده در این مقاله، برای مقایسه انتخاب شد. ویژگی‌های این مدل در جدول ۲ قابل رؤیت است. شش موقعیت آب‌گرفتگی مشخص شده در تصویر ۴ برای مقایسه‌ی روش ارائه شده با مدل USISM انتخاب شد. عمق، مساحت و حجم آب‌گرفتگی شبیه‌سازی شده با هر دو روش برای رویداد بارش مورد استفاده، در جدول ۳ آمده است.

مجموع حجم و عمق شبیه‌سازی با روش ASIISM به ترتیب ۱۳/۹ درصد و ۱۲/۷ درصد کمتر از مقادیر حاصل از مدل USISM است که علت آن در نظر نگرفتن تأثیر نوع کاربری و پوشش سطح زمین در مدل USISM می‌تواند باشد. در این مدل تمام سطح زمین در یک منطقه‌ی شهری نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود، اما در روش ارائه شده میزان نفوذپذیری هر سلول متأثر از نوع کاربری آن سلول است. علاوه بر این در روش ارائه شده، تحلیل‌های هیدرولوژیکی شبکه‌ی مینا با توجه به تأثیر زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب سطحی و زیرسطحی انجام می‌شود، اما در مدل USISM این تأثیر در محاسبات وارد نمی‌شود.

ASIISM وضعیت آب‌گرفتگی را بر اساس تعادل آب هر فرورفتگی و زیرحوزه‌ی بالادست آن محاسبه می‌کند؛ در نتیجه دقت تعیین فرورفتگی‌ها و تقسیم‌بندی زیرحوزه‌ها در درستی

شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری‌های مربوط به مدیریت بحران بسیار مؤثر است. بنابراین دقت DEM تأثیر بسیار زیادی بر شبیه‌سازی آب‌گرفتگی به‌ویژه در فرورفتگی‌های با مساحت کم دارد. به طور کلی برای مناطق آب‌گرفته با وسعت بالا، تغییر دقت سطح زمین تأثیر چندانی ندارد، اما در مناطقی که وسعت آن کم است، تغییر قدرت تفکیک مکانی DEM، بر شبیه‌سازی حجم و مساحت آب‌گرفتگی شدیداً مؤثر است. همچنین دقت پایین DEM موجب پنهان ماندن آب‌گرفتگی‌های با وسعت کم می‌شود. به علاوه سطح بزرگراه‌ها، خیابان‌ها و راه‌آهن در مناطق شهری و همچنین عوارض شهری که تغییرات کوچکی در توپوگرافی ایجاد می‌کنند، در شبیه‌سازی سیلاب‌های شهری مؤثر هستند. بنابراین داده‌های توپوگرافی با قدرت تفکیک بالا و استفاده از DEM شهری به افزایش درستی شبیه‌سازی کمک می‌کنند. الگوریتم تقسیم‌بندی زیرحوزه‌ها بر اساس الگوریتم D8 است که در مناطق مسطح به خوبی کار نمی‌کند. بنابراین اگر منطقه‌ی شبیه‌سازی مسطح باشد و تقسیم‌بندی زیرحوزه‌ها میسر نباشد، باید روش‌های کمکی برای ایجاد زیرحوزه‌ها به کار گرفته شود تا درستی شبیه‌سازی افزایش یابد.

این تحقیق بر اساس فرضیات ساده‌سازی مشخصی است. اول اینکه عوارض مربوط به زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب تنها در تعیین خصوصیات هیدرولوژیکی منطقه‌ی مورد مطالعه وارد شده و در محاسبه‌ی میزان آب‌گرفتگی از ظرفیت متوسط طراحی شده برای زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب استفاده شده است. این ساده‌سازی می‌تواند گاهی ظرفیت زهکشی را دست بالا و گاهی دست کم بگیرد. به علاوه در نظر نگرفتن توزیع مکانی فرایند زهکشی خطاهایی را در شبیه‌سازی ایجاد می‌کند. همچنین ASIISM وضعیت نهایی رویداد رگبار را شبیه‌سازی می‌کند، بنابراین شدت و مدت بارش در شبیه‌سازی آب‌گرفتگی بسیار اهمیت دارد. در مدیریت بحران سیلاب و آب‌گرفتگی، از اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌توان بهره برد. ایجاد شبکه‌های پیش‌بینی بحران یکی از راهکارهای غیرسازه‌ای ضروری برای کاهش پیامدهای بحران است. توسعه‌ی شبکه‌ای که با شبیه‌سازی رویداد آب‌گرفتگی قادر به پیش‌بینی وضعیت آب‌گرفتگی با توجه به میزان بارش باشد، از جمله اقدامات مؤثر در مدیریت بحران آب‌گرفتگی است. روش ارائه شده در این تحقیق امکان شبیه‌سازی آب‌گرفتگی را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌ها و انجام اقدامات عملی در حداقل زمان ممکن به کار گرفته شود. برای مثال یکی از اقدامات لازم برای مدیریت بحران آب‌گرفتگی اختصاص نیروهای کمک‌رسان و متخصص به مناطق آب‌گرفته است. معمولاً این نیروها زمانی وارد عمل می‌شوند که شهر را آب گرفته باشد و تنها پس از متوقف شدن بارش و کاهش حجم آب به امدادرسانی مشغول می‌شوند؛ در حالی که با استفاده از روش شبیه‌سازی پیشنهادی مناطق بحرانی مشخص می‌شود و امکان تجهیز این مناطق به امکاناتی مانند دستگاه‌های تخلیه و مکنده برای تخلیه‌ی آب و استقرار نیروهای امدادی از دقایق

نخست پیش بینی وقوع بحران سیلاب و آب‌گرفتگی فراهم می‌شود.

پی‌نوشت

1. Urbanization
2. Storm-inundation models
3. Rapid flood Inundation models
4. Cellular Automata
5. Fluvial flood
6. Pluvial Flood
7. GIS-based Urban Flood Inundation Model
8. Rapid Flood Spreading Method (RFSM)
9. Flood-Connected Domain Calculation
10. Geospatial Information Systems
11. Source flooding
12. Urban Storm Inundation Simulation Method
13. Flow direction
14. Flow accumulation
15. Stormwater Infrastructure
16. Digital Elevation Model
17. Adaptive Stormwater Infrastructure Inundation Simulation Method
18. Inlets
19. Outfalls
20. Depressions
21. Fill DEM
22. Weighted Adaptive Stormwater Infrastructure
23. Stream
24. Outlet
25. Sub-Catchment
26. Basin

منابع

1. Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thielen, A. H. (2009). Flood risk analyses how detailed do we need to be. *Natural Hazards*, 49(1), 79-98.
2. Bonta, J. V. (2004). Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts. *Applied engineering in agriculture*, 20(5), 641-656.
3. Cheng, X. T. (2010). Urban water disasters and strategy of comprehensive control of water disaster. *Journal of Catastrophol*, 25, 10-15.
4. Smith, M. B. (2006). Comment on Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 317(3), 355-363.
5. www.khabaronline.ir/detail/208176/society/urban.
6. www.dolat.ir/NSite/FullStory/News/?Serv=10&Id=2166.
7. بهرام‌پور، مهدی؛ بمانیان، محمدرضا (۱۳۹۱). تبیین الگوی جانمایی پایگاه‌های مدیریت بحران با استفاده از GIS، نمونه‌ی موردی: شهر تهران منطقه‌ی ۲. نشریه‌ی مدیریت بحران، ۱۱(۳)، ۵۹-۵۱.
8. پرهیزکار، اکبر (۱۳۷۶). ارائه‌ی الگوی مناسب مکانگزینی مراکز خدمات شهری با تحقیق در مدل‌ها و GIS شهری. پایان‌نامه‌ی دکتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
9. اسدی نظری، مهرنوش (۱۳۸۳). برنامه‌ریزی و مکان‌یابی اردوگاه‌های اسکان موقت بازماندگان زلزله. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
10. Zhang, S., & Pan, B. (2014). An urban storm-inundation simulation method based on GIS. *Journal of Hydrology*, 517, 260-268.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه روشی برای شبیه‌سازی رگبار - آب‌گرفتگی در مناطق شهری با در نظرگیری زیرساخت‌های جمع‌آوری سیلاب بر مبنای شبکه‌ی اطلاعات مکانی ارائه شد. بخشی از منطقه‌ی ۲۲ شهری تهران، به منزله‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه، انتخاب گردید تا وضعیت آب‌گرفتگی در آن شبیه‌سازی شود. مزایای روش ارائه‌شده را می‌توان به این صورت خلاصه کرد: ۱. تأثیر زیرساخت‌های سطحی و زیرسطحی جمع‌آوری سیلاب در تعیین مشخصه‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در شبیه‌سازی آب‌گرفتگی در نظر گرفته شده است. این زیرساخت‌ها جهت و انباشت جریان را در مناطق شهری شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. استفاده از الگوریتم WASI به مثابه‌ی جایگزین الگوریتم‌های مورد استفاده در نرم‌افزارهای تجاری نتایج شبیه‌سازی را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. ۲. این روش بدون نیاز به جزئیات شبکه‌ی زهکش شهری مانند قطر لوله‌ها و عمق لوله‌های زیرسطحی قادر به شبیه‌سازی آب‌گرفتگی است. ۳. فرایند شبیه‌سازی ساده است. اپراتورهایی که دانش کافی نسبت به هیدرولوژی و هیدرولیک ندارند، می‌توانند با استفاده از روش پیشنهادی آب‌گرفتگی را محاسبه کنند. همچنین محدودیت‌های روش ارائه‌شده شامل این موارد است: ۱. ASI-ISM تنها می‌تواند وضعیت نهایی آب‌گرفتگی را محاسبه کند و قادر به شبیه‌سازی حرکت رواناب و ایجاد تدریجی آب‌گرفتگی نیست. ۲. در محاسبه‌ی میزان رواناب جذب‌شده توسط سیستم زهکش مصنوعی از ظرفیت متوسط طراحی‌شده برای این سیستم استفاده شده و توزیع مکانی آن در نظر گرفته نشده است که می‌تواند خطاهایی را در شبیه‌سازی آب‌گرفتگی ایجاد کند. ۳. خروج آب از فرورفتگی‌ها و انتقال به فرورفتگی پایین دست تک‌جهتی در نظر گرفته شده است؛ درحالی‌که ممکن است سرریز جریان از یک فرورفتگی به دو زیرحوزه اتفاق بیفتد. با در نظر گرفتن این مزایا و محدودیت‌ها استفاده از ASIISM در این شرایط پیشنهاد می‌گردد: ۱. داده‌های مربوط به جزئیات سیستم زهکش شهری در دسترس نباشد؛ ۲. در شرایطی که عمق و محدوده‌ی آب‌گرفتگی باید سریعاً تخمین زده شود؛ ۳. رگبار کوتاه مدت باشد و آب‌گرفتگی ناشی از بارندگی باشد. ایجاد شبکه‌های پیش‌بینی بحران یکی از راهکارهای ضروری برای کاهش پیامدهای بحران است. این روش می‌تواند برای پیش‌بینی وضعیت آب‌گرفتگی، با توجه به میزان بارش، به کار گرفته شود و مناطق وقوع بحران را مشخص کند و از این طریق با فراهم‌سازی امکان تصمیم‌گیری و انجام اقدامات بی‌درنگ برای تخفیف پیامدهای آب‌گرفتگی، راهکاری برای کمک به مدیریت بحران آب‌گرفتگی محسوب می‌شود.

- distributed flood inundation model integrating with rainfall-runoff processes using GIS and remote sensing data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(4).
24. Apirumanekul, C., & Mark, O. (2001, June). Modeling of urban flooding in Dhaka City. In *4th DHI software conference*, Helsingør, Denmark.
 25. Mays, L. W. (2010). *Water resources engineering*. John Wiley & Sons.
 26. Holtan, H. N. (1945). Time-condensation in hydrograph-analysis. *Transactions, American Geophysical Union*, 26, 407-413.
 27. Sharp, A. L., & Holtan, H. N. (1942). Extension of graphic methods of analysis of sprinkled-plots hydrographs to the analysis of hydrographs of control-plots Small Homogeneous watersheds. *Transactions, American Geophysical Union*, 23, 578-593.
 28. Li, Z., Wu, L., Zhu, W., Hou, M., Yang, Y., & Zheng, J. (2014). A New Method for Urban Storm Flood Inundation Simulation with Fine CD-TIN Surface. *Water*, 6(5), 1151-1171.
۲۹. صفوی، ح. (۱۳۸۵). هیدرولوژی مهندسی. انتشارات ارکان.
11. Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., De Roo, A. P. J., & Werner, M. G. (2005). Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(4), 412-430.
 12. Schumann, G. J. P., Neal, J. C., Mason, D. C., & Bates, P. D. (2011). The accuracy of sequential aerial photography and SAR data for observing urban flood dynamics, a case study of the UK summer 2007 floods. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2536-2546.
 13. Bates, P. D., & De Roo, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, 236(1), 54-77.
 14. Ghimire, B., Chen, A. S., Guidolin, M., Keedwell, E. C., Djordjević, S., & Savić, D. A. (2013). Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 676-686.
 15. Chen, J., Hill, A. A., & Urbano, L. D. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *Journal of Hydrology*, 373(1), 184-192.
 16. Zhang, S., Wang, T., & Zhao, B. (2014). Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network. *Journal of Hydrology*, 509, 406-415.
 17. Gouldby, B., Sayers, P., Mulet-Marti, J., Hassan, M. A. A. M., & Benwell, D. (2008). A methodology for regional-scale flood risk assessment. *Proceedings of the ICE-Water Management*, 161(3), 169-182.
 18. Choi, Y. (2012). A new algorithm to calculate weighted flow-accumulation from a DEM by considering surface and underground stormwater infrastructure. *Environmental Modelling & Software*, 30, 81-91.
 19. Choi, Y., Yi, H., & Park, H. D. (2011). A new algorithm for grid-based hydrologic analysis by incorporating stormwater infrastructure. *Computers & Geosciences*, 37(8), 1035-1044.
۲۰. شاه حیدری، محمد (۱۳۹۲). مدیریت رواناب در مناطق شهری با استفاده از زیرساخت سبز. پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
21. Jana, R., Reshmidevi, T. V., Arun, P. S., & Eldho, T. I. (2007). An enhanced technique in construction of the discrete drainage network from low-resolution spatial database. *Computers & geosciences*, 33(6), 717-727.
 22. Zhang, S., & Zhao, B. (2014). Watershed characteristics extraction and subsequent terrain analysis based on digital elevation model in flat region. *Journal of Hydrologic Engineering*.
 23. Zheng, N., Tachikawa, Y., & Takara, K. (2008). A