نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال دوازدهم. شماره چهل و هشت . تابستان۱۴۰۱

ارزیابی روش سریع آب‌گرفتگی شهری مبتنی بر عوارض زمین: عمق، سطح و حجم آب‌گرفتگی

ابراهیم یوسفی مبرهن[۱*]، کریم سلیمانی[۲] ، قربان وهاب‌زاده[۳]

تاریخ ارسال:۱۳۹۹/۰۴/۱۴
تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۱۱/۲۷

مقاله پژوهشی

چکیده

مدل‌های رگبار-آبگرفتگی مبتنی بر هیدرولوژی و هیدرودینامیک به تعداد زیادی داده (جزئیات زمین، سیستم فاضلاب و داده کاربری اراضی) نیازمند است. در این مقاله به منظور تعیین سریع وضعیت آبگرفتگی تنها با چند داده ورودی و معمولا در دسترس، یک روش شبیه‌سازی رگبار- آبگرفتگی شهری (USISM) مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی ارائه شده است. روش USISM یک نوع مدل هیدرولوژیکی توزیعی ساده شده بر اساس مدل ارتفاع رقومی می‌باشد. در این روش، فرورفتگی‌ها در زمین به عنوان سطوح اصلی آبگرفتگی در نظر گرفته می‌شوند. مقدار آبی که می‌تواند در هر فرورفتگی ذخیره شود توزیع نهایی آبگرفتگی را نشان می‌دهد. سطح رواناب حوضه و حداکثر حجم ذخیره برای هر فرورفتگی و جهت جریان بین این فرورفتگی‌ها همه در شبیه‌سازی نهایی آبگرفتگی در نظر گرفته شده‌اند. روش سازمان حفاظت خاک امریکا برای محاسبه رواناب رگبار، و یک معادله بیلان‌آبی برای محاسبه ذخیره آب در هر فرورفتگی استفاده شده است. نتیجه نشان می‌دهد که در هر ۴ واقعه رگباری، متوسط خطاهای نسبی عمق در کلیه مکان‌های آب‌گیر کمتر از ۲۰٪ می‌باشد، در حالی‌که متوسط خطاهای نسبی مساحت و حجم بیش از ۶۰٪ هم می‌باشد لذا روش USISM قابلیت بالاتری در شبیه‌سازی عمق نهایی آب‌گرفتگی نسبت به سطح و حجم آب‌گرفتگی دارد همچنین روش USISM می‌تواند مکان‌های نهایی آبگرفتگی در منطقه شهری را تعیین و عمق و سطح آبگرفتگی را به سرعت محاسبه نماید و لذا در مدیریت بحران شهری نقش بسزایی را ایفا کند.

واژه‌های کلیدی: مدل ارتفاع رقومی، مدیریت بحران، روش شبیه سازی رگبار- آبگرفتگی شهری.

[۱] - (نویسنده مسئول) استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان. ایران. آدرس الکترونیکی: E.Yousefi.M@gmail.com

[۲] - استاد تمام، عضو هیئت علمی دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ایران. آدرس الکترونیکی: ksolaimani@sanru.ac.ir

[۳] - دانشیار، عضو هیئت علمی دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ایران. آدرس الکترونیکی: gh.vahabzadeh@sanru.ac.ir

مقدمه

شهری شدن فرآیندی است که در طی آن اراضی طبیعی و کشاورزی به مناطق ساخته دست بشر مبدل می‌شود. برنامه ریزی برای توسعه و گسترش شهرها در درجه اول نیازمند شناخت ویژگی‌های زیربنای شهری است. شکل مهمی از بلایای طبیعی در بسیاری از شهرها غرقابی شدن است، که چالش‌های دشواری را برای هیدرولوژیست‌ها به خاطر شدت قوی این وقایع و پاسخ زمانی کوتاه آن ایجاد می‌کند (Bonta, 2004; Apel et al., 2009; Cheng, 2010). پیچیدگی‌های مجود در محیط‌های شهری و زیرساخت‌های زهکشی حوضه‌های شهری تاثیری بالقوه بر رواناب طبیعی دارد (Chen et al., 2009; Yousefi Mobarahn and Karimi Sangchini, 2021).

آبگرفتگی در مناطق شهری در نتیجه ایجاد نقص و یا هر نوع ناکارآمدی در سیستم‌های زهکشی شهری، موجب وارد شدن خسارات زیادی به ساختمان‌ها و دیگر زیرساخت‌های عمومی و خصوصی می‌شود (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۵).

مدل‌سازی کارآمد سیلاب، یک ابزار سودمند در توسعه پایدار شهری برای پیش‌بینی فوری سیلاب و مدیریت منابع آب است. مدل‌های رگبار-آبگرفتگی شهری می‌تواند بر مبنای الگوریتم محاسبات، در سه گروه مدل‌های هیدرولوژیکی، هیدرودینامیکی و ساده شده طبقه‌بندی شود (Zhang and Pan., 2014).

در اغلب پژوهش‌ها، آب‌گرفتگی شهری با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی انجام گرفته است (Hsu et al., 2000; Jokic. and Maidment., 2004; Pradeep et al., 2006; Jang et al., 2007; Zhao et al., 2008; Sharifian et al., 2010; Wei et al., 2012; Gallo et al., 2013; Liu et al., 2013., Naulin et al., 2014; Miller et al., 2014., Deltares, 2017; XPSolutions, 2017) مدل LISFLOOD-FP (Betes and De Roo, 2000; Fewtrell et al., 2011) و مدل‌هایی بر مبنای "روش اتوماتیک همراه" (Dottori and Todini, 2011; Ghimire et al., 2013). متعلق به این دسته هستند. مزیت این مدل‌ها مبنای فیزیکی معین بوده و می‌تواند تغییرات زمانی و مکانی رواناب را تعیین کند در عوض دارای یک گام زمانی کوچک و به داده ورودی مفصل نیازمند است گرچه محدودیت کمتری نسبت به مدل‌های هیدرودینامیکی و هیدرولوژیکی دارد. دسته دوم شامل مدل‌هایی است که فقط مقدار نهایی آبگرفتگی را شبیه‌سازی می‌کند. الگوریتم‌های محاسباتی آنها بر مبنای بیلان آب است، و تبادل آب توسط گرانش و توپوگرافی انجام می‌شود. مدل‌های RFIM (Krupka et al., 2007), RFSM (Gouldby et al., 2008; Lhomme et al., 2008), ISIS FAST (CH2M HILL, 2013), GUFIM (Chen et al., 2009) and FCDC (Zhang et al., 2014a) و USISM (Zhang and Pan., 2014. Li et al., 2019) متعلق به این دسته‌اند. مزیت این مدلها سرعت بالای محاسبات و توانمندی کافی آنهاست همچنین این مدل‌ها (مدل‌های سریع آبگرفتگی) به طور خاص برای مطالعه مناطق بزرگ و مدل‌های تصادفی برای ارزیابی خطر احتمالی سیل مناسب هستند (Néelz and Pender, 2013; Teng et al., 2017).

محدویت‌های آنها عدم شبیه‌سازی فرآیند آبگرفتگی و جریان می باشد. اغلب مدل‌هایی که در این تحقیق به آنها اشاره شد، روی الگوریتم پخشیدگی جریان تمرکز می‌کنند. در این تحقیق، ما یک روش جدید شبیه‌سازی رگبار- آبگرفتگی شهری (USISM[1]) را برای چهار واقعه رگبار ارایه می‌دهیم. این روش، ساده شده‌ای از یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی است و شامل مولفه‌هایی از مدل‌های آبگرفتگی و رگبار-رواناب است. فرآیندهای تبخیر، نفوذ و زهکشی سیستم فاضلاب تا حدی ساده شده است، بطوری که USISM می‌تواند آبگرفتگی را با اطلاعات معمولا در دسترس و محدود، شبیه‌سازی کند.

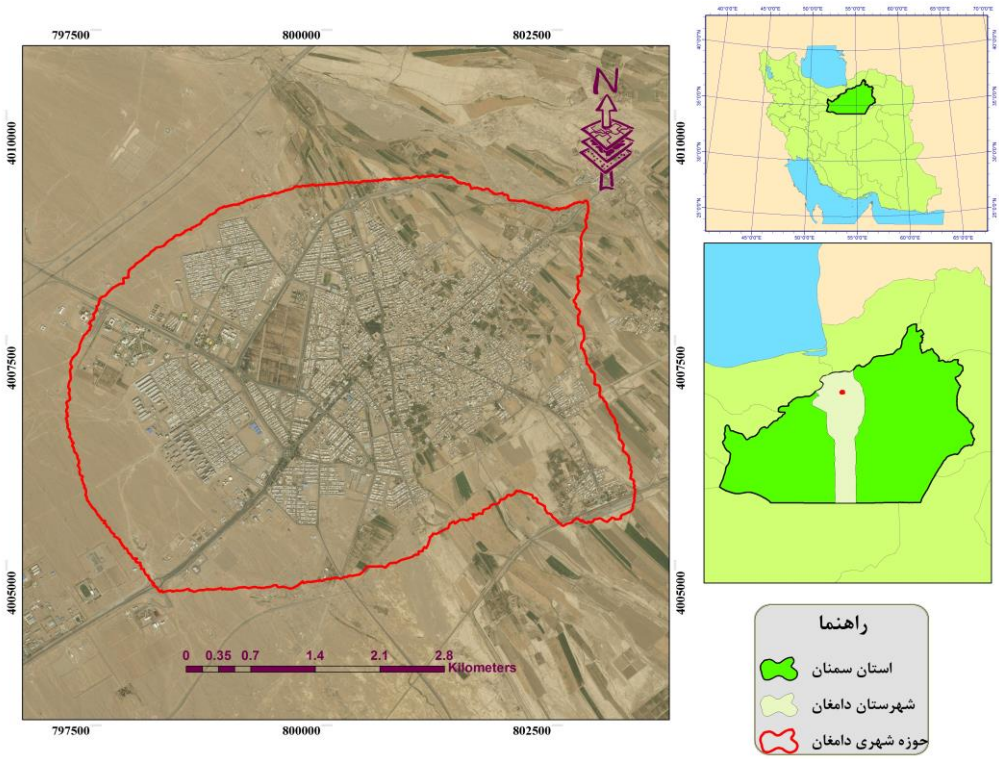
[1]- Urban Storm Inundation Simulation Method

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دامغان بین ۵۴ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۱ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. شهر دامغان در دامنه جنوبی البرز و در ۱۲۰ کیلومتری شرق سمنان و ۷۰ کیلومتری غرب شاهرود واقع شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نسبت به استان و کشور در شکل ۱ نشان داده شده است. قسمت اعظم مساحت شهرستان دامغان را دشت و قسمت دیگر را کوهستان تشکیل می‌دهد. شیب دشت دامغان از شمال غرب به جنوب شرق است که از چاه جام، به سمت دشت کویر باز هم از ارتفاع آن کاسته می‌شود تا اینکه کوه‌های کم‌ارتفاع واقع در جنوب، چاله یا دشت دامغان را از دشت کویر، جدا می‌کند. یکی از ویژگی‌های چنین مناطقی وقوع بارندگی‌هایی با تداوم کوتاه و شدت بالا می‌باشد بطوریکه کل بارندگی سالانه در عرض چند روز از سال در منطقه نازل می‌گردد. از طرف دیگر با توجه به پوشش‌گیاهی ضعیف منطقه و همچنین وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی وکاربری اراضی، وقوع بارندگی با شدت بالا منجر به جریان یافتن آب و ایجاد رواناب و آب‌گرفتگی در حوضه شهری می‌شود. متوسط بارش سالانه ۱۳۸ میلی‌متر است.

بطور کلی رژیم بارندگی محدوده مطالعاتی مدیترانه‌ای بوده و حداکثر بارندگی‌ها در فصل بهار می باشد که به طور متوسط ۳۸ درصد بارندگی سالانه را به خود اختصاص داده است. بخش اصلی حوضه شهری دامغان به علت بافت قدیمی و سنتی از ظرفیت زهکشی ناچیزی برخوردار بوده لذا رواناب سیستم فاضلاب نادیده گرفته می‌شود، بنابراین با بارش متوسط، آبگرفتگی جدی در شهر رخ می‌دهد. آمارها نشان می‌دهد که دامغان دارای ۸ مناطق غرقاب بزرگ با عمق آب ۱۰-۵۰ سانتیمتر که به مدت ۱-۳ ساعت طول می‌کشد وجود دارد. زمانی که باران متوسط یا سنگین رخ می دهد برخی از مناطق حوضه شهری دامغان مانند خیابان امام خمینی، خیابان جانباز، خیابان حرفه و فن، خیابان شریعتی، خیابان موسوی دامغانی، خیابان شهدا و خیابان محله که اغلب مناطق گسترده ای از آب گرفتگی هستند مشاهده می شود. بنابراین، حوضه شهری دامغان به عنوان منطقه مورد مطالعه برای شبیه‌سازی آب گرفتگی انتخاب شد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

با استفاده از USISM، شرایط نهایی آبگرفتگی به جای فرآیند سیل محاسبه می‌شود. بسته به نیروی گرانش آب، تمام مناطق سراشیب فقط می‌تواند جریان همگرایی داشته باشند و نمی‌تواند دچار آب‌گرفتی شود؛ فقط مناطق که دارای فرورفتگی هستند، می‌تواند دچار آبگرفتگی شود. برای بدست آوردن حجم، سطح و عمق آبگرفتگی در یک منطقه، سه مرحله باید دنبال شود.

مرحله اول: تعیین فرورفتگی‌ها از DEM در یک منطقه، محاسبه منحنی حجم، و به دست آوردن حداکثر حجم ذخیره سازی.

مرحله دوم: محاسبه رواناب ناشی از رگبار و پیدا کردن این‌که چگونه روانابهای بسیاری از منطقه به هر فرورفتگی جریان دارد.

مرحله سوم: تعیین جهت جریان از فرورفتگی‌ها و محاسبه سطح و عمق هر یک از فرورفتگی که دچار آب‌گرفتگی شده با استفاده از معادله بیلان آب.

محاسبه رواناب

بیلان آبی از واقعه رگبار میتواند به صورت معادله ۱ نشان داده شود:

$$R_s = R - S - E \quad (۱)$$

که در آن Rs: مقدار رواناب سطحی(میلی‌متر)

R: مقدار کل رواناب (میلیمتر)

S: مقدار از رواناب سیستم فاضلاب (میلی‌متر)

E: مقدار تبخیر (میلی‌متر)

بدلیل اینکه در محیط شهری، تبخیر نسبت به واحد سطح تقریبا ۰/۵ درصد حجم کل بارندگی رگبار سه روز است (Apirumanekul، 2001)، تبخیر نادیده گرفته می‌شود و معادله ۱ ساده شده و می‌تواند به صورت معادله ۲ بیان گردد:

$$R_s = R - S \quad (۲)$$

کل رواناب با روش SCS محاسبه می شود (Mccuen, 1982; Woodward et al., 2003).

$$R = \frac{(P - 0.2Sr)^2}{(P + 0.8Sr)} \qquad (۳)$$

$$Sr = (\frac{25400}{CN} - 254) \qquad (۴)$$

P : مقدار بارش (میلی‌متر)

Sr: پتانسیل نگهداری حداکثر رطوبت خاک (میلی-متر)

CN: شماره منحنی رواناب

رواناب سیستم فاضلاب (S) بخش مهمی از تعادل آب در مناطق شهری است، اما به دست آوردن مقدار دقیق این پارامتر در عمل بسیار دشوار است. دلیل اول این است که شبیه‌سازی یک جریان مخلوط از رواناب های سطحی و رواناب سیستم فاضلاب بسیار دشوار است. دلیل دوم این است که بدست آوردن اطلاعات دقیق سیستم فاضلاب بسیار سخت است. در برخی مناطق به‌دلیل شبکه زهکشی قدیمی این مقدار نادیده گرفته می‌شود.

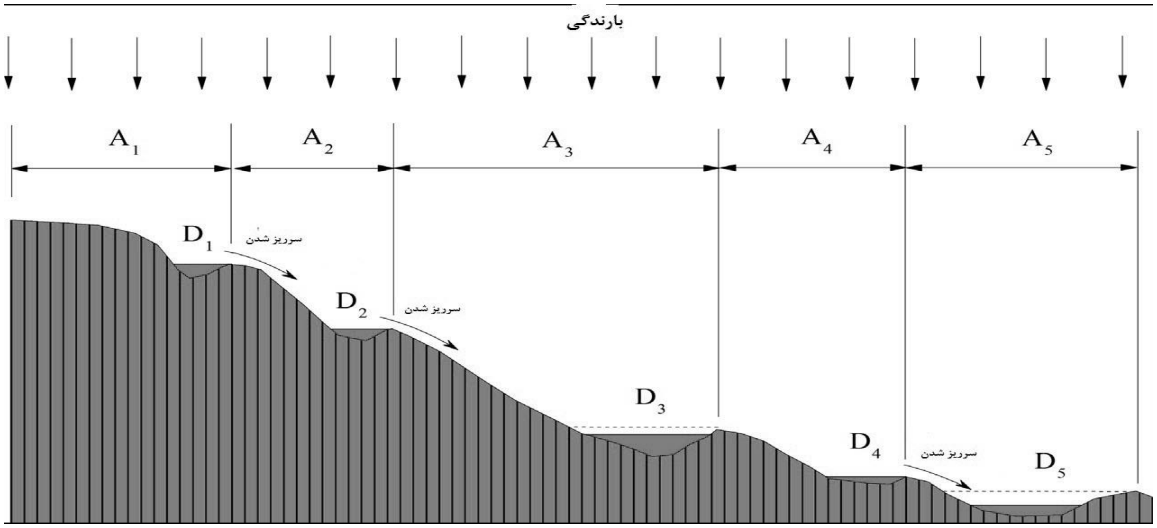
محاسبه آب‌گرفتگی

برای محاسبه شرایط آبگرفتگی از هر فرورفتگی، ابتدا باید حوضه هر فرورفتگی مشخص شود و پس از آن رواناب سطحی برای هر فرورفتگی محاسبه می-شود. سپس وضعیت "فرورفتگی با تراز بالا" (برخی از فرورفتگی‌ها به دلیل توپوگرافی محلی می‌توان دچار آبگرفتگی شود، اگر چه ارتفاع متوسط‌شان بالاتر از بقیه نقاط است) و اتصال فرورفتگی محاسبه می-شود(Yan et al., 2010).

رواناب‌های سطحی باید فرورفتگی‌های سطح فعلی اول را پر کند. اگر یک فرورفتگی از آب لبریز شود، آب اضافی به سمت فرورفتگی پایین دست جریان می‌یابد (شکل ۲). بنابراین، برای محاسبه آبگرفتگی، رابطه پیوستگی بین فرورفتگی‌ها نیز باید مشخص شود. سپس، فرورفتگی‌ها با استفاده از DEM پرشده منهای DEM اصلی، محاسبه می‌شود. در ادامه یک الگوریتم D8 (جهات هشت‌گانه ریزش هر نقطه) برای محاسبه جهت جریان و تقسیم حوضه آبخیز با توجه به رتبه، از بالادست به پایین دست استفاده خواهدشد.

حجم رواناب های سطحی برای هر فرورفتگی بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$V_i = R_S * A_i = (R - S) * A_i \qquad (۵)$$

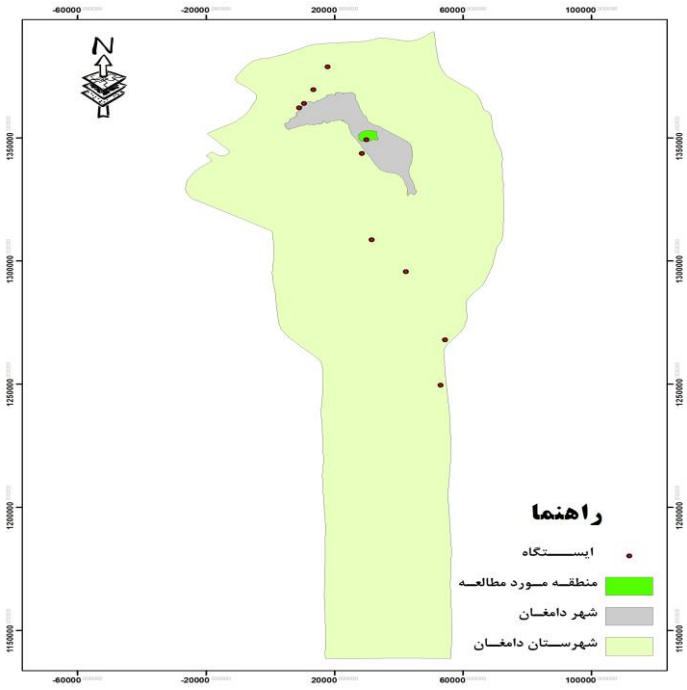


شکل (۲):فرآیند جابجایی آب بارندگی بین فرورفتگی‌ها D1, D2, D3, D4 و D5 فرورفتگی‌ها هستند؛ A1, A2, A3, A4 و A5به ترتیب حوضه‌های این فرورفتگی‌ها هستند. خط تیره ها حداکثر ذخیره فرورفتگی‌ها را نشان می‌دهد (Zhang and Pan., 2014).

حجم رواناب سطحی و سطح حوضه آبخیز برای هر فرورفتگی به ترتیب Vi و Ai می باشد. رواناب سیستم فاضلاب (S) را میتوان با سرعت متوسط زهکشی آب در مدت زمان رگبار برآورد کرد. ما حجم رواناب سطحی Vi هر یک از فرورفتگی را با حداکثر ذخیره‌سازی که فرورفتگی می‌تواند نگه دارد مقایسه می‌کنیم. اگر Vi کمتر از این حداکثر است، Vi حجم نهایی آبگرفتگی از فرورفتگی مربوطه خواهد بود، و سطح و عمق آبگرفتگی آن را می‌توان با استفاده از منحنی ذخیره سازی محاسبه کرد. در غیر این صورت، اگر Vi از حداکثر ذخیره آب تجاوز کند، فرورفتگی به طور کامل پرشده و آب اضافی را در امتداد مسیر شبکه به فرورفتگی بعدی منتقل می‌کند. لازم به ذکر است که مکان، عمق و سطح نهایی آبگرفتگی بر اساس الگوریتم محاسبات USISM (یوسفی و همکاران ،۱۳۹۹) انجام می‌گیرد.

داده های مورد استفاده

مجموعه‌ای از ایستگاه‌های هواشناسی متعلق به وزارت نیرو و سازمان هواشناسی کشور، شبکه ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه را تشکیل می‌دهند این مجموعه شامل ایستگاه‌های سینوپتیک، تبخیرسنجی و باران سنجی می‌باشد. در محدوده مطالعاتی و اطراف آن، بیش از ۱۱ ایستگاه هواشناسی واقع می‌باشد ارتفاع ایستگاه‌ها از ۸۸۶ متر در ایستگاه سینگ تا ۲۳۰۰ متر در ایستگاه شهمیرزاد متغیر است. نحوه پراکنش ایستگاه‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. برای تعیین حجم اصلی بارش از تنها ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه(دانشگاه آزاد) استفاده شده است. از چهار واقعه رگبار جهت بررسی کارایی روش USISM در شبیه‌سازی آبگرفتگی انتخاب شده است. این وقایع به مدت زمان حدود دو ساعت، با مقادیر بارش متفاوت در ساعت اول و در ساعت دوم است. از آنجا که دانشگاه آزاد تنها ایستگاه بارش در (۲۵۰۰ هکتار) این منطقه کوچک مورد مطالعه است، لذا بارش می‌تواند به عنوان بارش متوسط استفاده گردد. نقشه توپوگرافی ورودی، نقشه با مقیاس ۱/۲۰۰۰شهر دامغان است، ما نقشه خطوط تراز را به DEMمبتنی بر شبکه نامنظم مثلثی (TIN) تبدیل، و سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل سه بعدی نرم افزار (3D Analysis) DEM مبتنی بر TIN را به DEMشطرنجی(Raster) با رزولوشن ۲ متر تبدیل می‌کنیم. متوسط ارتفاعی منطقه مورد مطالعه ۱۱۵۸ متر از سطح دریا می‌باشد.



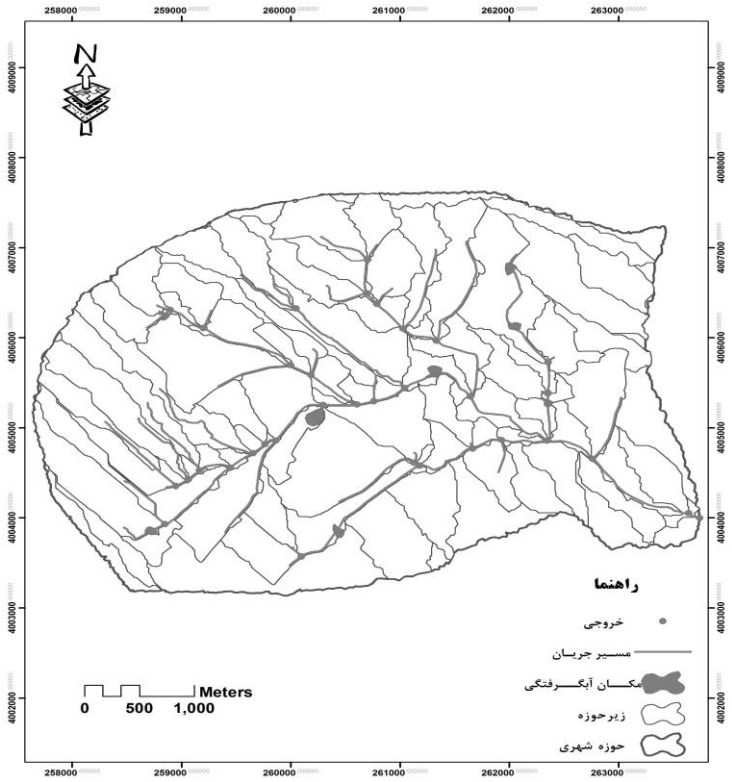
شکل (۳): موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده مطالعاتی

محاسبه آبگرفتگی

با توجه به روند USISM، آبگرفتگی حوضه شهری دامغان از رگبار انتخاب شده طی مراحل زیر محاسبه می‌شود:

۱- بر اساس DEM و GIS فرورفتگی‌ها و زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه را به دست می‌آوریم. تنظیم آستانه تجمع جریان به ۱٪ از حداکثر تجمع جریان (Zhang and Pan., 2014) و فرورفتگی‌هایی که تجمع جریان آنها بیشتر از آستانه است را به عنوان فرورفتگی‌های آب گرفتگی انتخاب می‌کنیم، در نتیجه تعیین سطح بالادست حوضه برای هر فرورفتگی و رتبه همگرایی بین این فرورفتگی‌ها تسهیل می‌شود. فرورفتگی‌های نهایی، زیر حوضه‌ها و جریان در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲- در این مرحله رواناب سطحی و رواناب کل منطقه مورد مطالعه را محاسبه می‌نماییم. با توجه به اینکه شماره منحنی (CN) حوضه شهری ۸۶ می‌باشد و حداکثر پتانسیل نگهداری رطوبت خاک(Sr) ۴۱.۳ میلی‌متر است. ۳-آبگرفتگی فرورفتگی از بالادست به پایین دست، همچنین مقدار آب در هر منطقه آبگرفته مطابق معادله (۵) محاسبه می‌شود. اگر فرورفتگی بالادست پر نشود، حوضه بالایی تنها رواناب برای فرورفتگی فعلی پشتیبانی می‌کند. اگر فرورفتگی بالادست پر شود، آب اضافی را به فرورفتگی پایین دست متصل به جریان به راه می‌افتد. در نهایت، مقدار آب در هر فرورفتگی را به دست می‌آوریم و عمق و سطح آبگرفتگی بر اساس منحنی ذخیره‌سازی فرورفتگی محاسبه می شود. شبیه‌سازی موقعیت، سطح و عمق آبگرفتگی واقعه رگبار مورد نظر با روش USISM در جدول(۱) ارایه شده است



شکل (۴): فرورفتگی‌ها، زیر حوضه‌ها و جریان محاسبه شده در منطقه مورد مطالعه

نتایج و بحث

عمق و سطح آبگرفتگی برای واقعه اول اندازه‌گیری و داده‌های شبیه‌سازی شده در جدول (۲) آمده است. هشت مکان ذکر شده در جدول زیر، با توجه به مشاهدات میدانی دچار آبگرفتگی می‌باشند. این مکان‌ها همه متعلق به سطوح فرورفته‌ای هستند که از شبیه‌سازی به دست آمده‌اند و نشان می‌دهد که روش USISM به طور موثر می‌تواند سطح آبگرفتگی را تعیین نماید. در جدول (۲)، عمق اندازه گیری شده، عمق متوسطی برای منطقه آبگرفتگی می باشد و حجم اندازه گیری شده از حاصلضرب عمق آبگرفتگی در سطح آبگرفتگی محاسبه می‌شود. نتیجه جدول ۳ حاکی از این است که در هر ۴ واقعه رگباری، متوسط خطاهای نسبی عمق در کلیه مکان‌های آب‌گیر کمتر از ۲۰٪ می‌باشد، در حالی‌که متوسط خطاهای نسبی مساحت و حجم بیش از ۶۰٪ هم می‌باشد لذا روش USISM قابلیت بالاتری در شبیه‌سازی عمق نهایی آب‌گرفتگی نسبت به سطح و حجم آب‌گرفتگی دارد. علاوه بر این، با بررسی جدول ۳ به این نتیجه دست می‌یابیم که نتایج شبیه‌سازی برای مناطقی با آب-گرفتگی بزرگ به‌دلیل کمتر بودن متوسط خطاهای نسبی (خیابان شریعتی) بهتر از مکان‌هایی با آبگرفتگی کوچک (خیابان حرفه‌وفن و موسوی دامغانی) هستند. یکی از دلایل اصلی این می‌باشد که عوارض زمینی در حجم و سطح فرورفتگی مخصوصا برای فرورفتگی‌های کوچک تحت تاثیر بیشتری نسبت به عمق آبگرفتگی هستند که این نتایج با نتایج حاصل از تحقیق (Zhang and Pan., 2014) و Li et al., (2019) مطابقت دارد.

جدول (۱): شبیه‌سازی موقعیت، سطح و عمق آبگرفتگی واقعه اول با روش USISM

مکان آبگرفتگی	مساحت زیر حوضه (مترمربع)	حجم رواناب سطحی فرورفتگی (مترمکعب)	حداکثر ذخیره فرورفتگی (مترمکعب)	حجم آبگرفتگی نهایی (مترمکعب)	عمق آبگرفتگی (سانتی‌متر)
خیابان امام خمینی	۲۱۷۲۸۰	۱۹۰۵.۵	۶۰۳۷	۱۹۰۵.۵	۳۵.۴
خیابان جانباز	۵۵۷۴۹۶	۴۸۸۹.۲	۳۹۷۴	۳۹۷۴	۵۰.۸
خیابان حرفه و فن	۱۸۰۸۱۲	۱۵۸۵.۷	۸۳۶۴۴	۱۵۸۵.۷	۶.۹
خیابان شریعتی	۷۲۶۵۲۸	۶۳۷۱.۷	۵۰۹۵	۵۰۹۵	۵۴.۴
خیابان شریعتی	۷۲۶۵۲۸	۶۳۷۱.۷	۴۹۹۱	۴۹۹۱	۶۰.۹
خیابان موسوی دامغانی	۱۹۵۳۲۰	۱۷۱۳	۹۱۰۴	۱۷۱۳	۱۲.۵
خیابان شهدا	۳۲۳۱۲۴	۲۸۳۳.۸	۱۹۹۱۰	۲۸۳۳.۸	۲۹.۱
خیابان محله	۱۴۲۲۱۶	۱۲۴۷.۲	۱۱۵۷۴	۱۲۴۷.۲	۲۱.۷

جدول (۲): مقایسه داده های اندازه گیری و شبیه سازی آب‌گرفتگی بارندگی اول

مکان‌های آبگرفتگی	عمق اندازه-گیری	عمق شبیه‌سازی	درصد خطای نسبی عمق	سطح اندازه‌گیری	سطح شبیه‌سازی	درصد خطای نسبی سطح	حجم اندازه‌گیری	حجم شبیه‌سازی	درصد خطای نسبی حجم
خ امام خمینی	۳۰	۳۵.۴	۱۸	۴۰۰۰	۵۳۸۴	۳۵	۱۲۰۰	۱۹۰۵.۵	۵۹
خیابان جانباز	۴۰	۵۰.۸	۲۷	۶۱۰۰	۷۸۲۸	۲۸	۲۴۴۰	۳۹۷۴	۶۳
خیابان حرفه‌وفن	۱۰	۶.۹	-۳۰	۳۸۶۰۰	۲۲۹۹۶	-۴۰	۳۸۶۰	۱۵۸۶	-۵۹
خیابان شریعتی	۴۵	۵۴.۴	۲۱	۷۹۰۰	۹۳۶۰	۱۸	۳۵۵۵	۵۰۹۵	۴۳
خیابان شریعتی	۵۰	۶۰.۹	۲۲	۷۰۰۰	۸۲۰۰	۱۷	۳۵۰۰	۴۹۹۱	۴۳
خ موسوی دامغانی	۱۵	۱۲.۵	-۱۶	۹۵۰۰	۱۳۶۶۸	۴۴	۱۴۲۵	۱۷۱۳	۴۰
خیابان شهدا	۳۰	۲۹.۱	-۳	۷۰۰۰	۹۷۲۴	۳۹	۲۱۰۰	۲۸۳۳.۸	۴۵
خیابان محله	۲۰	۲۱.۷	۹	۴۲۰۰	۵۷۳۶	۳۷	۸۴۰	۱۲۴۷.۲	۴۸

جدول (۳): متوسط درصد خطای نسبی وضعیت آبگرفتگی

بارندگی Rainfall	متوسط درصد خطای نسبی عمق Avrage Relative error of depth	متوسط درصد خطای نسبی سطح Avrage Relative error of area	متوسط درصد خطای نسبی حجم Avrage Relative error of volume
۱	۱۴.۲	۴۶.۶	۵۲.۷
۲	۱۳.۶	۵۴.۸	۶۸.۱
۳	۱۶.۹	۳۸.۶	۶۱.۲
۴	۹.۲	۴۴.۸	۵۶.۹

پس از تجریه و تحلیل وقایع بارندگی در حوضه شهری دامغان و محاسبه بارش مازاد ناشی از بارندگی با روش سازمان حفاظت خاک امریکا(SCS)، مقادیر عمق کل، سطح کل و حجم نهایی آب‌گرفتگی ناشی از هر چهار واقعه رخ داده شده استخراج و مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج این جدول حاکی از آن است با افزایش مقدار بارندگی از ۲۹ میلی‌متر در واقعه دوم به ۳۸ میلی‌متر در واقعه سوم؛ عمق، سطح و حجم نهایی آب‌گرفتگی به‌ترتیب ۳۵ درصد، ۱۲ درصد و ۵۳ درصد افزایش معناداری داشته است.

روش USISM وضعیت آب‌گرفتگی را بر اساس بیلان آبی برای هر فرورفتگی و زیرحوضه محاسبه می‌کند. بنابراین جهت شبیه‌سازی دقیق و درست، توانایی تشخیص فرورفتگی و تقسیم زیرحوضه بسیار مهم است. در روش فوق رعایت دو نکته حائز اهمیت است؛ اول: دقت عوارض زمین، که تاثیر زیادی بر شبیه‌سازی آبگرفتگی دارد، به‌ویژه برای مناطقی با آب‌گرفتگی کوچک. به طور کلی، مناطق آب‌گرفته در مقیاس بزرگ با تغییرات دقیق عوارض زمین، اختلاف زیادی وجود ندارد، در حالی‌که در مناطقی با مقیاس کوچک، اختلاف تا حد زیادی وجود دارد. همچنین، توانایی تشخیص پایین عوارض زمینی منتج به ناپدید شدن مناطق فعلی می‌شود. علاوه بر این، سطح بستر بزرگ‌راه و راه آهن در مناطق شهری و امکانات حائل کوچک مانند میکروتوپوگرافی، شبیه‌سازی سیلاب شهری را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

بنابراین، داده‌های توپوگرافی با قدرت تفکیک بالا به منظور بهبود صحت شبیه‌سازی مهم است. دوم، الگوریتم تقسیم زیرحوضه بر اساس الگوریتم D8 است، که در مناطق مسطح به‌خوبی کار نمی‌کند.

اگر منطقه شبیه‌سازی مسطح باشد و نتوان به‌درستی زیرحوضه را تقسیم نمود، برخی از روش‌های کمکی به منظور بهبود دقت و صحت شبیه‌سازی وجود دارد از جمله BURNING (1996، Maidment)، AGREE (1996، Hellweger) و WDGB (2014b، Zhang et al.) که می‌بایست برای ایجاد زیرحوضه مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه براساس مفروضات ساده‌شده خاصی است. اول، با توجه به پیچیدگی چاه آب شهری، خطوط لوله و دیگر امکانات زهکشی، در فرایند زهکشی تفاوت در شبیه‌سازی زهکشی در عمل با ظرفیت زهکشی یکپارچه (به تدریج باید ظرفیت زهکشی افزایش یابد) عملیات انتقال فاضلاب به عنوان یک نرخ جریان قابل انتقال دائم و ثابت برای واقعه رگبار در نظر گرفته شده است.

جدول (۴): تغییرات وضعیت آب‌گرفتگی در چهار واقعه

بارندگی Rainfall	مقدار بارندگی (میلی‌متر) Rainfall Amount (mm)	عمق نهایی آب‌گرفتگی (سانتی‌متر) Final Inundation Depth (cm)	سطح نهایی آب‌گرفتگی (مترمربع) Final Inundation Area (cm)	حجم نهایی آب‌گرفتگی (مترمکعب) Final Inundation Volume (m3)
۱	۳۲	۲۹۰	۳۷۷۱	۱۴۰۱
۲	۲۹	۲۵۹	۳۶۱۲	۱۱۹۳
۳	۳۸	۳۵۰	۴۰۴۵	۱۸۲۰
۴	۳۵	۳۱۷	۳۹۳۱	۱۵۹۹

این ساده‌سازی می‌تواند باعث بیش‌تخمینی انتقال فاضلاب در دوره معین از یک واقعه رگبار شود، همچنین درصورتی که مازاد جریان وجود داشته شود باعث کم تخمینی انتقال گردد. علاوه بر این، نادیده گرفتن توزیع مکانی فرایند زهکشی (به طور یکنواختی توزیع شده) خطای شبیه‌سازی تولید می‌کند. دوم، از بارش متوسط منطقه برای شبیه‌سازی آبگرفتگی منطقه مورد مطالعه استفاده شد، در حالی‌که منطقه مطالعه کوچک و بارش به طور یکنواخت توزیع شده باشد قابل قبول است. اگر شرایط رضایت‌بخش نباشد، به منظور بهبود دقت شبیه‌سازی به ایستگاه بارش بیشتری نیاز است و داده های متفاوت بارش باید برای محاسبه رواناب زیرحوضه‌های متفاوت مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این در منطقه مورد مطالعه، شماره منحنی CN به عنوان یک مقدار واحد در نظر گرفته شده است بخاطر اینکه منطقه مورد مطالعه کوچک و وضعیت سطح زمینه‌ای مشابه است قابل قبول می‌باشد، در غیر این صورت، بر اساس شرایط هر یک از زیرحوضه‌ها، CN باید دارای مقادیر مختلفی باشد. روش USISM وضعیت نهایی آبگرفتگی ناشی از یک رگبار را شبیه‌سازی می‌کند، بطوری که مدت و شدت آن جهت شبیه‌سازی آبگرفتگی بسیار مهم است. از آنجا که ظرفیت زهکشی در طول رگبار به طور یکنواخت در نظر گرفته شده است؛ اگر شدت بارندگی کمتر از ظرفیت زهکشی سیستم فاضلاب باشد باعث خطا شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین، درصورتی‌که رگبار به طور کلی(بدون گام زمانی) در نظر بگیریم، نتیجه شبیه‌سازی کمتر از مقدار واقعی خواهد بود. اگر بتوان سری زمانی داده‌های بارندگی را بدست آورد، آبگرفتگی باید با هر داده گام زمانی با استفاده از روش USISM محاسبه شود. اگر سری زمانی داده‌های بارندگی در دسترس نباشد، یک رگبار کوتاه مدت برای روش USISM مناسب‌تر است.

نتیجه‌گیری

روش شبیه‌سازی آبگرفتگی ناشی از رگبار، مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (USISM) جهت شبیه‌سازی سیلاب شهری معرفی شده است. در این تحقیق از حوضه شهری دامغان در استان سمنان به عنوان منطقه مورد مطالعه برای شبیه‌سازی موقعیت آبگرفتگی ناشی از رگبار استفاده شد. روش USISM، در مقایسه با مدل هیدرولوژیکی توزیعی و مدل هیدرودینامیکی دارای مزایای زیر است:

۱- به داده‌های ورودی کمی نیاز دارد بخصوص اطلاعات سیستم فاضلاب در منطقه شبیه‌سازی. ۲- زیرحوضه‌ها بر اساس DEM تقسیم و جریان بین فرورفتگی‌ها در نظر گرفته شده است. سرعت شبیه سازی سریع می باشدو نتیجه شبیه‌سازی با توجه به داده های اندازه گیری‌شده قابل قبول است. ۳- فرآیند شبیه سازی بسیار ساده است. اپراتورها بدون دانش قابل توجهی از هیدرولوژی و هیدرولیک می‌توانند آبگرفتگی ناشی از رگبار را با استفاده از USISM

محاسبه کنند. برخی از محدودیت‌ها که در این روش وجود دارد که شامل: ۱- روش USISM از مدل flatwater(آب در مسیر یکنواخت) به جای یک مدل دینامیکی مبتنی بر فیزیک استفاده می‌کند، بنابراین روش USISM می‌تواند تنها وضعیت نهایی آبگرفتگی از یک رگبار را محاسبه کند و نمی‌تواند روند آبگرفتگی را مشخص نماید. ۲- در شبیه‌سازی با روش USISM، پارامترهای زیادی مانند ظرفیت زهکشی سیستم فاضلاب و کاربری اراضی در مکان‌های مختلف ساده شده‌اند. تمام این پارامترها می‌توانند باعث خطاهایی در شبیه‌سازی آبگرفتگی شوند. به منظور بهبود برنامه مدل، واسنجی حساسیت پارامترهای مدل و کار صحت‌سنجی بیشتر باید در آینده انجام شود. با توجه به این مزایا و محدودیت‌ها، روش USISM برای استفاده تحت شرایط زیر توصیه می‌شود: (۱) فقدان داده سیستم فاضلاب دقیق برای منطقه شهری؛ (۲) در مناطقی که عمق و سطح آبگرفتگی بسرعت باید تخمین زده شود. (۳) رگباری که مدت زمان آن کوتاه و آبگرفتگی تنها با بارندگی ایجاد می‌شود، نه سیلاب رودخانه‌ای.

منابع

یوسفی مبرهن, ا, سلیمانی, ک, وهاب زاده, ق. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی رگبار- آب‌گرفتگی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه شهری دامغان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران, ۷(۱), ۳۹-۲۶.

یوسفی مبرهن, ا, سلیمانی, ک, وهاب زاده, ق. (۱۳۹۹). اثر تغییرات کاربری اراضی بر وضعیت آب‌گرفتگی شهری با روش USISM مطالعه موردی: حوزه شهری دامغان. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی، ۸(۲), ۲۵۱-۲۳۹.

Apel, H., G. T. Aronica, H. Kreibich and A. H. Thieken. 2009. Flood risk analyses–how detailed do we need to be? Nat. Hazards 49, 79–98.

Apirumanekul, C., 2001. Modeling of Urban Flooding in Dhaka City. Master Thesis No. WM-00-13, Asian Institute of Technology, Bangkok.

Bates, P. D and A. P. J De Roo. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. J. Hydrol. 236 (1): 54–77.

Bonta, J. V. 2004. Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts. Appl. Eng. Agric. 20 (5): 641–653.

Chen, J., A. A. Hill and L. D. Urbano. 2009. A GIS-based model for urban flood inundation. J. Hydrol. 373, 184–193.

Cheng, X.T. 2010. Urban water disasters and strategy of comprehensive control of water disaster. J. Catastrophol. 25 (s): 10–15.

CH2M HILL, 2013. ISIS FAST. <http://www.isisuser.com/isis/isisfast.asp.<

Dottori, F and E. Todini. 2011. Developments of a flood inundation model based on the cellular. : Testing different methods to improve model performance. Phys. Chem. Earth Parts ABC 36: 266–280.

Fewtrell, J. T., A. Duncan, C. C. Sampson, J. C. Neal, and P. D. Bates. 2011. Benchmrking urban flood models of varying complexity and scale using higt resolution terrestrial LIDAR data. Physics and Chemistry of the Earth. In press. DOI: 10. 10161j. pce. 2010. 12. 011.

Gallo, E. L., P. D. Brooks, K. A. Lohse and J. E. T. Mclain. 2013. Land cover controls on summer discharge and runoff solution chemistry of semi-arid urban. Catchments. J. Hydrol. 485: 37–53.

Ghimire, B., A. S. Chen, M. Guidolin, E. C. Keedwell, S. Djordjevic and D. A. Savic´. 2013. Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. J. Hydro inform. 15 (3): 676–686.

Gouldby, B., P. Sayers, J. Mulet-Marti, M. A. A. M. Hassan and D. Benwell. 2008. A methodology for regional-scale flood risk assessment. Proc. ICE-Water Manage. 161 (3): 169–182.

Hellweger, R. 1996. AGREE.aml. Center for Research in Water Resources, the University of Texas at Austin, Austin, TX.

Hsu, M. H., S. H. Chen, and T. J. Chang. 2000. Inundation simulation for urban drainage basin with storm drainage system. J. Hydrol. 234: 21–37.

Jang, S., M. Cho and J. Yoon. 2007. Using SWMM as s tool for hydrologic impact assessment. Desalination 212: 344–356.

Jokic, D. and D. Maidment. 2004. Terrain analysis for urban storm water modeling. Hydrological Processes. (5): 115-124.

Krupka, M., S. Wallis, S. Pender and S. Neélz. 2007. Some practical aspects of flood inundation modelling, Transport phenomena in hydraulics, Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, E-7 (401): 129–135.

Lhomme, J., P. Sayers, B. Gouldby, P. Samuels, M. Wills and J. Mulet-Marti. 2008. Recent Development and Application of a Rapid Flood Spreading Model, River Flow 2008, September. <http://eprints.hrwallingford.co.uk/223/1/HRPP361-Recent_development_and_application_of_a_rapid_flood_spreading_method.pdf.<

Liu, A., P. Egodawtta, A. Guan and A. Goonetilleke. 2013. Influnce of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. Scince of the Total Enviroment, 444: 255-262.

Liu, A., P. Egodawtta, A. Guan and A. Goonetilleke. 2013. Influnce of rainfall and catchment characteristics on urban stormwater quality. Scince of the Total Enviroment, 444: 255-262.

Deltares, 2017. SOBEK Suite.

Maidment, D. 1996. GIS and hydrological modelling: an assessment of progress. In: Third International Conference on GIS and Environmental Modelling, Santa Fe, NM, 20–25 January, 1996.

Meesuk, V., Z. Voinovich, A. E. Mynett and A. F. Abdullah. 2015. Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations. A. in Water Resources. 75: 105–117.

Miller, D.J., H. Kim, R. T. Kjeldsen, J. Packman, S. Grebby and R. Dearden. 2014. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. Journal of Hydrology, 515: 59–70.

Naulin, J.-P., O. Payrastre and E. Gaume. 2014. Spatially distributed flood forecasting in flash flood prone areas: Application to road network supervision in Southern France. J. Hydrol. 486: 88–99.

Néelz, S., Pender, G., 2013. Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages. SC120002, Environment Agency, Environment Agency.

Sharifian, R. A., A. Roshan, m. Afalatoni, A. Jahadi and M. Zolghadr. 2010. Uncertainty and sensitivity analysis of SWMM model in computation of manhole water depth and sub catchment peak flood. J. procedia social and bihavioral scinces. 2: 7739-7740.

Teng, J. et al., 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and Uncertainty analysis. Environmental Modelling & Software, 90: 201-216.

Wei, O.Y., B. B. Guo and F.H. Hao. 2012. Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing. J. Environ. Manage. 113: 467–473.

Woodward, D.E., R. H. Hawkins, R. Jiang, A. T. Hjelmfelt, J. A Van Mullem and Q. D. Quan. 2003. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction Ratio. In: Proc. ASCE Conf. Proc., Philadelphia, PA, vol. 118: p. 308.

XPSolutions, 2017. Complete Stormwater, Sewer and Floodplain Model.

Yan, J., Y. Zhang, J. Zhang and X. Yang. 2011. The method of urban rain- flood utilization based on environmental protection. Energy procedia. 5: 403-407.

Yousefi Mibarhan, E and E. Karimi Sangchini. 2021. Continuous Rainfall-Runoff Modeling Using HMS-SMA with Emphasis on the Different Calibration Scale. Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 52 (2): 112-119.

Zhang, SH., Pan, B. 2014. An urban storm-inundation simulation method based on GIS. Journal of Hydrology, 517, 260–268.

Zhang, S.H., T. W. Wang and B. H. Zhao. 2014a. Calculation and visualization of flood inundation based on a topographic triangle network. J. Hydrol. 509: 406–415.

Zhang, S.H., B. H. Zhao and Eho. D. E. 2014b. Watershed characteristics extraction and subsequent terrain analysis based on digital elevation model in flat region. J. Hydrol. Eng.

Zhao, D. Q., J. N. Chen and Q. Y Tong. 2008. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS. China Water Wastewater 24 (7): 88–91.

Assessment Rapid Urban Inundation Method Based on Urban Terrain: Depth, surface and volume of inundation

Ebrahim Yousefi Mobarhan[1], Karim Solaimani[2], Ghorban Vahabzadeh[3]

Abstract

Storm-inundation models based on hydrology and hydrodynamics require a large amount of input data (detailed terrain, sewer system and land use data). In this paper, in order to determine inundation conditions quickly with only a few usually available input data is proposed an urban storm-inundation simulation method (USISM) based on Geographic Information System (GIS). The USISM is a simplified method of distributed hydrological model based on DEM, in this method depressions in terrain are regarded as the basic inundated area. The amount of water that can be stored in a depression indicates the final inundation distribution. The runoff and maximum storage volume for each depression and the flow direction between these depressions are all considered in the final inundation simulation. The SCS method is used to calculate storm runoff and a water balance equation is used to calculate the water storage in each depression. The result shows that in all four-storm event, the average relative depth errors of depth in all inundation sites are less than 20%, while the average relative errors of area and volume are more than 60% Therefore, the USISM method has a higher ability to simulate the final depth of inundation than the surface and volume of inundation. The result reveals that the USISM method could find the inundation locations in the Damghan Urban Watershed and calculate inundation depth and area quickly and therefore display a significant role in the management of the urban crisis.

Keywords: Digital elevation model, Management of crisis, **urban storm-inundation simulation method.**

[1] - Assistance Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Semnan, Iran
[2] - Professor, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran
[3] - Associate Professor, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

Research Paper

Assessment Rapid Urban Inundation Method Based on Urban Terrain: Depth, surface and volume of inundation

Ebrahim Yousefi Mobarhan [1*], Karim Solaimani [2], Ghorban Vahabzadeh [3]

[1] Assistance Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Semnan, Iran
[2] Professor, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran
[3] Associate Professor, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University (SANRU), Sari, Iran

10.22125/iwe.2021.238060.1384

Received: **July.4.2020**
Accepted: **February.15.2021**
Available online: **June.01.2022**

Keywords:
Digital elevation model, Management of crisis, Urban storm-inundation simulation method.

Abstract

Storm-inundation models based on hydrology and hydrodynamics require a large amount of input data (detailed terrain, sewer system and land use data). In this paper, in order to determine inundation conditions quickly with only a few usually available input data is proposed an urban storm-inundation simulation method (USISM) based on Geographic Information System (GIS). The USISM is a simplified method of distributed hydrological model based on DEM, in this method depressions in terrain are regarded as the basic inundated area. The amount of water that can be stored in a depression indicates the final inundation distribution. The runoff and maximum storage volume for each depression and the flow direction between these depressions are all considered in the final inundation simulation. The SCS method is used to calculate storm runoff and a water balance equation is used to calculate the water storage in each depression. The result shows that in all four-storm event, the average relative depth errors of depth in all inundation sites are less than 20%, while the average relative errors of area and volume are more than 60% Therefore, the USISM method has a higher ability to simulate the final depth of inundation than the surface and volume of inundation. The result reveals that the USISM method could find the inundation locations in the Damghan

* **Corresponding Author:** Ebrahim Yousefi Mobarhan
Address: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Semnan, Iran
Email: E.Yousefi.M@gmail.com
Tel: +9823 33 44 19 45

Urban Watershed and calculate inundation depth and area quickly and therefore display a significant role in the management of the urban crisis.

1. Introduction

Efficient flood modeling is a useful tool in sustainable urban development for immediate flood forecasting and water resources management. urban storm-inundation models can be classified into three groups based on the calculation algorithm: hydrological, hydrodynamic and simplified models.

In this research, we present an Urban Storm Inundation Simulation Method (USISM) for simulation four storm events. This method is a simplification of a distributed hydrological model and includes components of flood and stormwater runoff models. Depressions of terrain are regarded as the basic inundation area, catchment area and depression connectivity are considered in USISM. the evaporation, infiltration, and drainage processes of the sewage system have been simplified to such an extent that USISM can simulate flooding with commonly available and limited information.

2. Materials and Methods

In the USISM, the final inundation condition is calculated instead of the flood process. Depending upon gravity of the water, all sloped areas can only have convergence flow and cannot be inundated; only depression areas can be inundated. To obtain inundation volume, area and depth in a region, three steps should be followed. First, determine depressions in a region from the DEM, calculate the volume curve, and obtain maximum storage volume. Second, calculate storm runoff and find how many areas runoffs flow to each depression. Third, determine flow direction of the depressions and calculate area and depth of each inundated depression using a water balance equation.

1. Runoff calculation

In terms of water balance, total precipitation consists of infiltration, evaporation, surface runoff and sewer system runoff. Among these, only surface runoff contributes to inundation of an urban area, because it is transformed into a certain amount of inundation at depressions and outfall of the basin.

2. Inundation calculation

As stated earlier, urban storm inundation is a case of non-source flooding. To calculate the inundation condition of each depression, the catchment of each depression should first be determined, and then the surface runoff for each depression calculated. Taking into account ‘‘high elevation depression’’ conditions (some depressions can be inundated because of local topography, although their average elevation is higher than others) and depression connectivity, surface runoff should fill depressions of the current area first. If a depression overflows, the excess water flows toward a downstream depression. Therefore, to calculate inundation, relationships of connection between the depressions should also be determined.

3. Results

In this study, eight locations are Inundation according to field observations. These sites all belong to the submerged surfaces obtained from the simulation and show that the USISM method can effectively determine the level of Inundation. The measured depth is an average for the inundation area, and the measured volume is calculated by the depth multiplied by the inundation area. The simulated volume is calculated using USISM, simulated area is calculated based on the storage curve of the depression and simulated volume, and simulated depth is determined by volume divided by area. Relative error is calculated as the difference between the measured and simulated data divides by the measured data. We see from Table 3 that the depth relative errors of all the inundation locations are below 20%, while some of the relative errors of area and volume are above 60%. In addition, simulated results of large inundation areas are better than those of small inundation locations. One of the main reasons is that terrain accuracy affects inundation area and volume more than inundation depth, especially for small depressions. After analyzing rainfall events in Damghan urban basin and calculating excess rainfall caused by the SCS method, the values of total depth, total surface and final volume of inundation caused

by all four occurrences were extracted and as shown in Table 4. The results of this table show that with increasing storm from 29 mm in the second event to 38 mm in the third event; The depth, surface and final volume of inundation increased significantly by 35%, 12% and 53%, respectively.

4. Discussion and Conclusion

USISM computes the inundation condition based on water balance of each depression and sub catchment, so precision of the depression and sub catchment division is very important to simulation accuracy. First, accuracy of the terrain has a great impact on inundation simulation, especially for small inundation areas. In general, there are not many changes to large-scale inundation and areas with terrain precision variations, whereas small-scale areas change greatly. Also, lower-precision terrain results in disappearance of the latter areas. In addition, highway and railway roadbeds within urban areas and small retaining facilities such as microtopography influence urban flooding simulation. Thus, high resolution topographic data is helpful to improve simulation accuracy. Second, the sub catchment division algorithm is based on the D8 algorithm, which does not work well in flat regions. If the simulation region is flat and cannot be divided into sub catchment correctly, some assisting methods should be used to create the sub catchment in order to improve simulation accuracy. USISM simulates the final inundation condition of a storm, so its duration and intensity are very important to inundation simulation. Because drainage capacity during the storm is treated as uniform, this will cause simulation error if rainfall intensity is lower than drainage capacity of the sewer system. Thus, if we treat the storm as a whole, the simulation result will be less than the actual one. If time series rainfall data can be obtained, inundation should be calculated with each time-step data using our method. If time-series rainfall data are unavailable, a short-duration storm is more suitable for USISM. Compared with the distributed hydrologic model and hydrodynamic model, USISM has the following advantages. (1) Few input data are required, especially sewer system data from the simulation area. (2) The sub catchment is divided based on the DEM, and flow between depressions is considered. Simulation speed is fast, and its result is acceptable with respect to the measured data. (3) The simulation process is very simple. Operators without significant knowledge of hydrology and hydraulics can calculate storm inundation using USISM.

5. Six important references

1. Teng, J. et al., 2017. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and Uncertainty analysis. Environmental Modelling & Software, 90: 201-216.

2. Zhang, SH., Pan, B. 2014. An urban storm-inundation simulation method based on GIS. Journal of Hydrology, 517, 260–268.

3. Zhang, S.H., B. H. Zhao and Eho. D. E. 2014b. Watershed characteristics extraction and subsequent terrain analysis based on digital elevation model in flat region. Journal of Hydrologic Engineering, 19 (11) 115–122.

4. Zhao, D. Q., J. N. Chen and Q. Y Tong. 2008. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS. China Water Wastewater 24 (7): 88–91.

5. Yousefi Mobarhan, E., Solaimani, K., vahabzadeh, G. (2016). Urban Storm-Inundation Simulation Based-on GIS In Damghan Urban Watershed. Irrigation and Water Engineering, 7(1), 26-39.

6. Yousefi Mobarhan, E., solaimani, K., vahabzadeh, G. (2021). Using USISM to Monitor Land Use Change and Its Effects on Urban Inundation (A Case Study of Damghan Urban Basin). Land Management Journal, 8(2), 239-251.

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.