

شبیه‌سازی دوبعدی جریان‌های سیلابی شهری با مدل CCHE2D (مطالعه موردی: شهر آق‌قلا)

نازیلا کاردان^۱، یوسف حسن زاده^۲، ابوالفضل ارزنلو^۳

n.kardan@azaruniv.ac.ir

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده

مردم در سراسر جهان همه روزه با وقایعی روبرو می‌شوند که منجر به مرگ، آسیب، تخریب اموال و اختلال در فعالیت‌های روزانه می‌شود. سیل نیز به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی از دیرباز جوامع روستایی و شهری را مورد تهدید و هجوم قرار داده است و جوامع شهری فارغ از هرگونه پیشرفت در زمینه‌های مختلف همواره دغدغه‌ی تهدیدات سیلاب را به عنوان چالشی بزرگ پیش رو داشته‌اند. با توجه به مسائل مطرح شده توجه ویژه به مبحث مدیریت بحران سیلاب در تعامل با سایر دانش‌ها و علوم بنیادین و کاربردی امری اجتناب ناپذیر می‌نماید. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار CCHE2D به بررسی بازتاب رفتار هیدرولیکی شهر آق‌قلا در برخورد با سیلاب‌های ۱۰۰ ساله رودخانه‌ی گرگان‌رود پرداخته شده و با استفاده از شاخص مخاطره ورودی لازم برای تدوین برنامه واکنش سریع، مدیریت بحران، بیمه سیلاب استخراج گردیده است. نتایج حاکی از آن می‌باشد که با توجه به الگوی جریان شکل گرفته در سیلاب مذکور و نقشه‌های شاخص مخاطره، تخلیه کلی شهر امری ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی با توجه به مساحت پهنه پرخطر، میزان خسارات وارده سنگین خواهد بود.

واژگان کلیدی: مدیریت بحران، سیلاب‌های شهری، شبیه‌سازی عددی، شاخص مخاطره، شهرستان آق‌قلا.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۵/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۶/۰۴/۰۷

۱- مقدمه

گزارشات سازمان‌های بین‌المللی امداد رسانی و مقابله با حوادث غیرمترقبه حاکی از آن است که سیل یکی از جدی‌ترین مخاطرات طبیعی به شمار رفته و در صدر فهرست عوامل تهدید کننده حیات جمعی قرار دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد علیرغم هزینه‌های هنگفتی که برای مقابله با سیلاب صرف می‌شود، خسارات سالانه آن در سطح بین‌المللی روبه افزایش است [۱]، به عنوان نمونه در کشور ما یک رشد ۲۵۰ درصدی داشته و ۷۰ درصد اعتبارات سالانه ستاد حوادث غیرمترقبه صرف جبران خسارات سیل می‌گردد. ایران طی ۵۰ سال گذشته شاهد ۲۴۰۰ مورد سیل سهمگین بوده که منجر به آب‌گرفتگی بیش از ۴۸۰ هزار دستگاه واحد مسکونی و بی‌خانمانی تعدادی زیاد و خسارت‌های جدی مالی و جانی گردیده است. خسارات مالی طی سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۳۰، ۷۳۱۰ میلیارد ریال برآورد گردیده است [۲].

مدیریت سیلاب و ارزیابی خسارات مورد انتظار سالیانه برای کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب و به حداقل رساندن خسارت و کنترل آن در محیط شهری امری ضروری بوده که به دلیل توسعه شهری از پیچیدگی‌های خاص برخوردار است [۳]. امروزه روش‌های مختلفی برای کنترل سیلاب وجود دارد که بسته به شرایط هیدرولیکی مورد توجه قرار می‌گیرند. استفاده از خاکریزهای طولی ساحلی، انحراف جریان، مدیریت حوضه آبریز و غیره از جمله روش‌های مورد توجه طراحان شهری می‌باشد [۴]. در این میان تاکنون استفاده از نرم افزارهای مختلف همانند GIS و HEC-RAS توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. ارشادی فارسانی و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی مطالعات هیدرولیک مسیل مهرانه رود که از شریان‌های مهم زهکشی سطحی شهر تبریز می‌باشد را به کمک مدل ریاضی مورد توجه قرار داده و پس از پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر تبریز، مناطق آسیب پذیر آن بر اساس نوع کاربری زمین، سازه‌ها و ساختمان‌های کنار رودخانه را تعیین نمودند. در ادامه با استفاده از نرم افزار تحلیل گر HEC-FDA خسارات مورد انتظار سالیانه ناشی از سیلاب‌های این رودخانه برآورد و در نهایت راهکارهای مدیریتی جهت مهار و کاهش خطرات سیل با توجه به رژیم رودخانه و شرایط منطقه و کاربری اراضی مورد توجه قرار دادند [۵]. مدنی و همکاران (۱۳۹۱) با تفکیک بحران طبیعی به سه بخش (قبل، حین، پس از بحران) در هر یک

از این مقاطع زمانی عملکردهای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در کاهش ریسک بحران سیل را مورد بررسی قرار داده و به تعیین مکان‌های امن و پایدار برای فعالیت‌های مختلف و تأسیسات حساس و استراتژیک پرداختند [۶].

کردپور و همکاران (۱۳۹۲) به مکان‌یابی عرصه‌های پخش سیلاب در حوزه آبخیز دشت ذهاب استان کرمانشاه پرداختند. ایشان بدین منظور از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدل‌های همپوشانی شاخص‌ها (IO) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده نمودند. در این پژوهش ابتدا شش لایه اطلاعاتی مؤثر در فرآیند پخش سیلاب شامل ژئومورفولوژی، ارتفاع از سطح دریا، شیب، زمین‌شناسی، نفوذپذیری و کاربری اراضی شناسایی گردیده و سپس لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از دو مدل یاد شده تلفیق و مناطق مناسب جهت اجرای عملیات پخش سیلاب مشخص گردید [۷]. جعفری و بختیاری (۱۳۹۲) به تهیه نقشه پتانسیل سیل‌خیزی و پهنه‌بندی سیلاب در منطقه مطالعاتی دشت کهنوج پرداختند. ایشان از بین عوامل گوناگونی که در سیل‌خیزی یک منطقه دارای اهمیت هستند شش عامل شیب، بارندگی، پوشش گیاهی، نفوذپذیری خاک، تراکم شبکه زهکشی و کاربری اراضی را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و برای طبقه‌بندی پارامترهای مؤثر در پتانسیل سیل‌خیزی از منطق فازی استفاده کردند. همچنین در این تحقیق جهت تحلیل حساسیت مدل به‌دست آمده، دو روش تحلیل حساسیت تک پارامتری و حذف پارامتر به کار برده شده است [۸]. کمالی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیق خود سیلاب حوزه شهری قزوین را با استفاده از GIS در ترکیب با مدل‌های بارش رواناب مطالعه نمودند. ایشان پس از تهیه اطلاعات رقومی منطقه با استفاده از نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای، وضعیت کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک در حوزه مورد مطالعه را تعیین و سپس نقشه شبیه‌سازی شده سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف حوزه را تهیه نمودند [۹].

محمدنژاد و همکاران (۱۳۹۳) به صورت عددی انتشار موج سیلاب ناشی از شکست سد را به صورت دوبعدی قائم‌شبهه‌سازی نمودند. در این مطالعه، تحلیل امواج با استفاده از نرم افزار فلونت انجام گرفته و در آن انواع مدل‌های آشفستگی مورد بررسی قرار گرفته است. از بررسی چهار مدل آشفستگی

پرخاطر اطلاعات جامعی از رفتار آسیب‌زای یک سیلاب استخراج شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مورد مطالعه

استان گلستان از مناطق سیل‌خیز ایران است. طی سال‌های اخیر چندین مورد سیل مخرب در استان گلستان رخ داده که موجب تلفات انسانی و خسارات اقتصادی فراوانی گردیده است. رودخانه گرگان‌رود یکی از مهم‌ترین شاخه‌های سیل‌خیز استان گلستان می‌باشد. این رودخانه با طول حدود ۳۰۰ کیلومتر و با حوضه آبریزی به وسعت ۱۰۲۵۰ کیلومتر مربع از دامنه‌های شمالی البرز شرقی و دامنه‌های غربی ارتفاعات استان خراسان شمالی سرچشمه می‌گیرد. جهت جریان آب این رودخانه‌ها از شرق به غرب می‌باشد و شاخه‌های آن از رشته کوه البرز سرچشمه گرفته و از جنوب به شمال جریان دارند و پس از عبور از شهرهای گنبد کاووس و آق‌قلا در غرب خواجه‌نفس با تشکیل دلتای بزرگی به دریای خزر می‌ریزد. متوسط آبدهی سالانه آن حدود ۹۲۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که حدود ۴۲۰ میلیون مترمکعب آن به مصرف کشاورزی می‌رسد. شهرستان آق‌قلا بین ۵۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی در شمال استان گلستان و در دو طرف رودخانه گرگان‌رود واقع شده است و با جمعیتی در حدود ۱۰۹ هزار نفر، یک هزار و ۷۶۳ کیلومترمربع وسعت دارد [۱۳]. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

۲-۲- مدل عددی CCHE2D

مدل CCHE2D یک مدل دو بعدی توانمند در تحلیل سلاب می‌باشد که توسط موسسه NCCHE توسعه یافته و قادر است اطلاعات مکانی و زمانی را محدودی وقوع سیلاب مدل‌سازی نماید. زمانی که اطلاعات مربوط به منطقه مورد نظر محدود باشد، این مدل به سرعت نتایج مکانی مربوط به عمق سیلاب، سرعت سیلاب و مدت زمان پیمایش سیل در محدوده مورد مطالعه را محاسبه نموده و به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. مدل CCHE2D بر مبنای معادلات حاکم بر

$k-\omega$ نتیجه گرفته است که مدل به لحاظ دارا بودن کمترین خطای نسبی مناسب‌ترین مدل در شبیه‌سازی تلاطم‌های جریان می‌باشد [۱۰]. کمالی و همکاران (۱۳۹۴) از مدل HEC-HMS برای اولویت‌بندی مناطق مولد سیل در حوضه آبخیز براجین شهر قزوین استفاده کرده و نشان دادند که نوع کاربری اراضی، نوع واحدهای هیدرولوژیکی خاک و بالا بودن میانگین وزنی CN حاکی از خطر بالای تولید سیل در حوضه است. همچنین، بیان کردند زیرحوضه‌های با شیب زیاد در این منطقه با داشتن کاربری اراضی نامناسب اولویت اول را در کنترل سیل دارند [۱۱]. رفیعی و همکاران (۱۳۹۴) در حوضه آبخیز بالادست سد کرج با تکرار حذف انفرادی زیرحوضه‌ها به تعیین میزان مشارکت آن‌ها در سیل خروجی این حوضه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که زیرحوضه سپهسالار بیشترین و زیرحوضه ولایت‌رود کمترین سهم را در پتانسیل سیل‌خیزی دارد [۱۲].

امروزه تمام سازمان‌هایی که در کاهش و یا جلوگیری از بحران‌ها نقش دارند، اذعان می‌دارند با پیشرفت تکنولوژی و فناوری اطلاعات دیگر قادر نیستند از روش‌های سنتی در مقابل بحران‌ها موفق باشند بلکه اجرای مراحل مدیریت بحران (کاهش، آمادگی، پاسخ، بازگشت و بازسازی) نیازمند داشتن دانش متناسب با هر اقدامی می‌باشد. رویکرد مدیریت دانش با تلفیق فناوری‌مداری و انسان‌مداری این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان در مواجهه با بحران‌ها مؤثرتر و کارآمدتر عمل نمود. در موضوع مدیریت بحران سیلاب شهری، یکی از مسایل مهم و کلیدی زمانی نمود پیدا می‌کند که سیلاب رخ داده باشد. حال اگر بتوان رفتار یک سیلاب را با دقتی قابل قبول پیش‌بینی کرد مسائل مدیریتی و واکنش سریع دست‌آویز قدرتمندی برای ارائه برنامه‌های خود خواهند داشت.

در تحقیق حاضر به بررسی رفتار سیلاب ۱۰۰ ساله رخ داده در رودخانه گرگان‌رود پرداخته و اثرات آن در محدوده شهر آق‌قلا که رودخانه گرگان‌رود از میان آن می‌گذرد، مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی عددی از مدل عددی دوبعدی CCHE2D برای مدل‌سازی جریان سیلاب استفاده شده و گستره‌ی سیل‌گیر به هنگام وقوع سیلاب تعیین شده است. همچنین با تعریف شاخص مخاطره و دسته‌بندی مناطق به مناطق کم خطر، خطر متوسط و

روش upwind بوده که به این منظور یک شبکه رستری مستطیلی استفاده می‌گردد.

استفاده از شبکه رستری این امکان را به مدل عددی می‌دهد تا به راحتی از داده‌های توپوگرافی رستری استفاده نماید. متغیرهای بقایی مورد نظر در مرکز سلول‌ها محاسبه شده و بیانگر مقدار متوسط آن متغیر در هر سلول هستند [۱۶]. با انتگرال‌گیری از معادله (۱) بر روی سلول‌های شبکه و اعمال تئوری گرین^۴، معادله به فرم زیر گسسته می‌شود [۱۶]:

$$U_{ij}^{n+1} = U_{ij}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (F_{i+1/2,j} - F_{i-1/2,j}) - \frac{\Delta t}{\Delta y_j} (G_{i,j+1/2} - G_{i,j-1/2}) + \Delta t S_{ij} \quad (3)$$

که $F_{i+1/2,j}$ ، $F_{i-1/2,j}$ ، $G_{i,j+1/2}$ و $G_{i,j-1/2}$ بیانگر میزان شار بر روی سطوح مشترک سلول‌ها می‌باشند. داده‌های اولیه مورد نیاز برای اجرای این مدل، داده‌های شبکه‌بندی شده عوارض زمین، مختصات منطقه، تراز اولیه سطح آب رودخانه قبل از وقوع سیلاب، ضریب زبری مانینگ بستر رودخانه در محدوده مورد بررسی، دامنه و محدوده مورد نظر جهت انجام محاسبات، پارامترهای کنترل مدل مانند زمان کل شبیه‌سازی و اختلاف زمانی فایل‌های خروجی را شامل می‌شوند. هم‌چنین برخی پارامترها نیز به عنوان ورودی به سیستم باید تخمین زده شوند که عبارت از تخمین شیب بستر اصلی رودخانه و شیب زمین‌های اطراف آن است [۱۶].

جریان بوده و از روش عددی حجم محدود^۱ برای حل معادلات بقای جرم و مومنتم استفاده می‌نمایند [۱۴]. این مدل از سلول‌های مستطیلی و مثلثی برای شبکه‌بندی بستر و محدوده‌ی رودخانه استفاده می‌کند. از این‌رو امکان استفاده از داده‌های GIS نظیر مدل‌های ارتفاعی رقومی^۲ و داده‌های ارتفاعی عوارض زمین^۳ فراهم می‌گردد [۱۵]. فرم بقایی معادلات دوبعدی آب‌های کم عمق به صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = S(U) \quad (1)$$

در رابطه فوق، U ، F ، G و $S(U)$ به ترتیب، بردار متغیر بقایی، مقدار شار در جهت x و y و منبع خارجی می‌باشند که به ترتیب به فرم زیر تعریف می‌شوند:

$$U = \begin{bmatrix} h \\ h_u \\ h_v \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} h_u \\ h_{uu} \\ h_{uv} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} h_v \\ h_{vu} \\ h_{vv} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z}{\partial x} - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2} \\ -gh \frac{\partial z}{\partial y} - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2} \end{bmatrix}$$

که h عمق جریان، u سرعت جریان در راستای x ، v سرعت جریان در راستای y ، g شتاب ثقل، z رقوم سطح آب و c ضریب شزی می‌باشد. گسسته‌سازی معادله (۱) به



شکل (۱) محدوده مورد مطالعه در پیرامون رودخانه آق قلا.

³ DTED

⁴ Green

¹ Finite Volume

² DEM

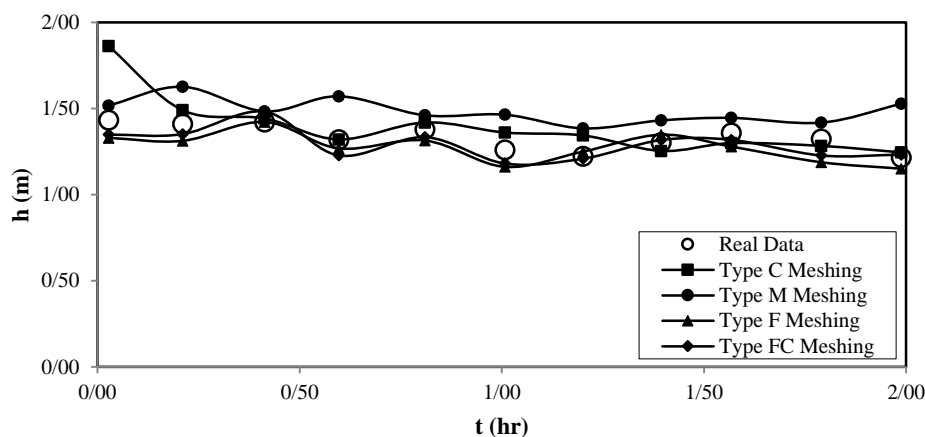
$$\varepsilon = \mu_t \frac{\overline{\partial u_i'}}{\partial x_i} \cdot \frac{\overline{\partial u_i'}}{\partial x_j} \quad (5)$$

۲-۴- گسسته‌سازی میدان حل

محدوده مورد مطالعه شامل رودخانه عبوری از شهر آق‌قلا و مناطق مسکونی در جناح‌های چپ و راست رودخانه، به وسعت تقریبی ۱۷/۵ کیلومتر مربع می‌باشد. با توجه به وجود مناطق مسکونی و حساسیت مطالعات، اندازه المان‌ها در مدل عددی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. لذا تعداد چهار نوع المان درشت، متوسط، ریز و بسیار ریز برای گسسته‌سازی میدان حل استفاده شده و حساسیت نتایج خروجی به اندازه المان‌ها سنجیده شده است. مشخصات شبکه‌بندی برای چهار حالت فوق در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات چهار نوع شبکه‌بندی میدان محاسباتی.

تعداد کل گره‌ها	(Δy) (متر)	(Δx) (متر)	نوع شبکه‌بندی
۱۲۵۶۰۰	۱/۲	۰/۸	درشت C
۱۳۴۸۰۰	۱	۰/۶	متوسط M
۱۴۶۸۰۰	۰/۶	۰/۴	ریز F
۱۵۴۲۰۰	۰/۵	۰/۳	بسیار ریز FS



شکل (۲) ارزیابی نتایج مدل عددی بر حسب نوع شبکه‌بندی برای ایستگاه هیدروگرافی در ورودی شهر آق‌قلا.

برای انتخاب شبکه‌بندی مناسب، شرایط عادی جریان رودخانه مدل‌سازی گردیده و عمق جریان حاصل شده در هر نوع از شبکه‌بندی با داده‌های موجود برای عمق جریان در شرایط عادی، و نیز برای ایستگاه هیدروگرافی در ورودی شهر آق‌قلا مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۲) مقایسه نتایج

از اساسی‌ترین خروجی‌های مدل CCHE2D عمق و سرعت موج سیلاب در طول رودخانه می‌باشند. فایل‌های خروجی، پارامترهای عمق و سرعت جریان تخمینی در هر سلول از شبکه محاسباتی را بر حسب واحدهای متر و متر بر ثانیه مشخص می‌کنند [۱۶].

۲-۳- معادلات آشفتگی

برای شبیه‌سازی اثر آشفتگی بر الگوی جریان از مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ بهره گرفته شده است. در این مدل بیانگر انرژی جنبشی آشفتگی و ε بیانگر نرخ پراکندگی انرژی آشفتگی می‌باشد. در ذیل معادلات مربوط به این مدل ترکیبی آمده است [۱۷ و ۱۸]:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (4)$$

جدول (۲) مقدار خطای $RMSE$ برای چهار نوع شبکه‌بندی میدان محاسباتی.

خطای $RMSE$	نوع شبکه‌بندی
۰/۱۰۴	درشت C
۰/۰۹۶	متوسط M
۰/۰۷۸	ریز F
۰/۰۷۷	بسیار ریز FS

شکل (۳) شبکه‌بندی نوع F بخشی از مسیر رودخانه گرگان-رود (قبل از ورودی به شهر آق‌قلا) را نمایش می‌دهد.

۲-۵- هیدروگراف سیلاب گرگان‌رود

با توجه به گستردگی سیلاب‌های رخ داده در محدوده مورد مطالعه هم به لحاظ شدت هم به لحاظ زمان وقوع، هیدروگراف‌های سیل رودخانه گرگان‌رود که در محل ایستگاه آب‌سنجی آق‌قلا با دوره بازگشت‌های مختلف استخراج شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۴). تعیین دوره بازگشت سلاب بستگی به سرمایه‌گذاری دولت برای حفظ جان مردم و حفاظت تأسیسات و همچنین اقتصاد ملی دارد [۱۹]. مهم‌ترین مساله در تعیین دوره بازگشت سیل آن است که هر چه جمعیت انسانی و سرمایه‌گذاری برای منطقه‌ای بیشتر باشد، سیل با دوره بازگشت بیشتری انتخاب و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای حفاظت اراضی کشاورزی، سیل با دوره ۷-۱۰ سال و برای حفاظت روستاها سیل با دوره بازگشت ۲۰-۵ سال مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین گزینه به لحاظ شرایط اقتصادی مهار نمودن سیل با دوره بازگشت ۱۰۰-۶۰ ساله است که برای این منظور سیل با دوره بازگشت مورد نظر برآورده شده و سازه‌های مهار سیلاب بر اساس آن طراحی می‌گردند [۲۰]. به لحاظ وجود اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی و تأسیسات صنعتی گسترده در پیرامون رودخانه گرگان‌رود و نیز با توجه به توضیحات ذکر شده، هیدروگراف سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله برای شبیه‌سازی سیلاب مورد استفاده قرار گرفته است.

برای ایستگاه ۱^۱ را نمایش می‌دهد. در جدول (۲) مقادیر خطا بر حسب اندازه سلول‌های شبکه و بر اساس معیار خطای RMSE^۲ ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (6)$$

که در آن x_i مقادیر واقعی و \hat{x}_i مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی و N تعداد داده‌ها می‌باشد. در مقایسه نمودارهای تغییرات عمق جریان آشکار است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با شبکه‌بندی نوع F اختلاف بسیار اندکی با داده‌های واقعی دارد. در استفاده از شبکه‌بندی نوع FS نتایج حاصله اختلاف ناچیزی با نتایج شبکه‌بندی نوع F دارد. براین اساس می‌توان نتیجه گرفت کاهش ابعاد سلول‌های شبکه موجب بهبود نتایج مدل عددی می‌گردد؛ لیکن کاهش ابعاد به بیش از یک مقادیر معین نه تنها موجب بهتر شدن نتایج نمی‌گردد بلکه مدت زمان شبیه‌سازی را نیز افزایش می‌دهد. در جدول (۳) اطلاعات گسسته سازی میدان حل آورده شده است.

جدول (۳) مشخصات گسسته‌سازی میدان حل.

۱۲۵۱۳۰	تعداد المان‌های موجود در کل میدان
۱/۱۱	متوسط ضریب نرمی شبکه‌بندی
$k - \varepsilon$	مدل آشفتگی
۶۰۰۰۰۰ ثانیه	زمان واقعی حل
۵ ثانیه	گام‌های زمانی حل معادلات
۵۶ ساعت	زمان لازم برای حل معادلات حاکم



شکل (۳) شبکه‌بندی بخشی از رودخانه قبل از ورودی به شهر آق‌قلا.

² Root Mean Square Error (RMSE)

^۱ ایستگاه ۱ در ورودی شهر آق‌قلا می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- الگوی جریان

شکل شماره ۵ نشان دهنده الگوی جریان شکل گرفته ناشی از سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله می باشد. با نزدیک شدن سیلاب به مناطق مسکونی و افزایش عمق و سرعت جریان، سیلاب در مناطقی فرصت خروج از مسیر رودخانه را پیدا کرده و وارد زمین های کشاورزی و مناطق شهری می شود.

بعد از گذشت نزدیک به ۵۰ ساعت از زمان سیلاب و رسیدن به نقطه پیک هیدروگراف، جریان سیلاب با شدت بیشتری مناطق مسکونی جناح راست رودخانه را احاطه می کند. از طرفی ارتفاع ساختمان های مسکونی و سایر تأسیسات بخصوص در قسمت متمرکز شهر در مقابل سیلاب مقاومت می کنند ولی آنچه اتفاق افتاده نشان می دهد که این سیلاب در زمان پیک خود و ساعاتی پس از آن نیز مسیر خود را از خیابان های اصلی و فرعی شهر باز کرده و تقریباً بیشتر تأسیسات شهری را در بر می گیرد. بحرانی ترین وضعیت از حدود ۲/۵ روز بعد از سیلاب شروع شده و به مدت ۳۵ ساعت ادامه پیدا می کند. آنچه مشاهدات نشان می دهد بحرانی ترین شرایط از لحاظ آب گرفتگی و سرعت جریان در روز چهارم سیلاب روی می دهد.

۳-۲- شاخص مخاطره

عمق و سرعت جریان از مهم ترین فاکتورهای مورد نیاز برای بررسی اثرات یک سیلاب می باشد. با توجه به این که شاخص مخاطره تابعی از این دو پارامتر می باشد برای تخمین مقدار کمی آن، تعیین عمق و سرعت جریان در هر نقطه ای از

محدوده مورد مطالعه ضروری می باشد. تعاریف گوناگونی برای شاخص مخاطره وجود دارد که معمولاً به صورت زیر تعریف می شود [۲].

$$HR = f(h, V) \quad USA \quad (7)$$

$$HR = f(h, v^2 / 2g) \quad Austria \quad (8)$$

$$HR = f(h, v \times h) \quad Switzerland \quad (9)$$

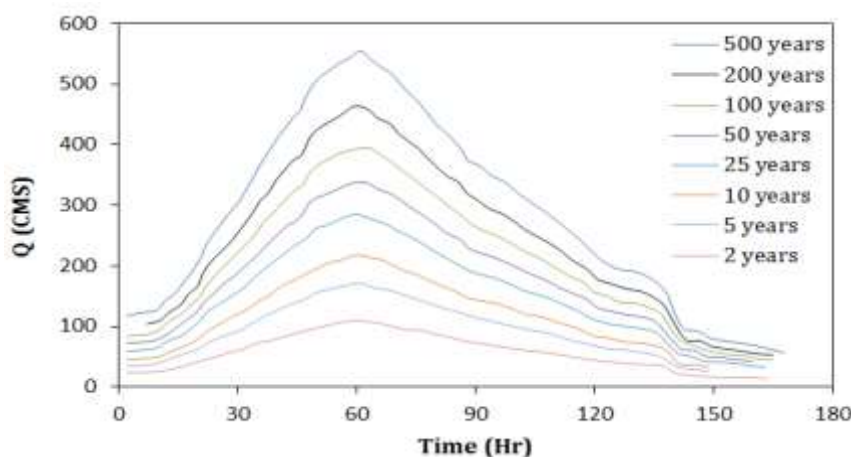
به منظور تلفیق دو متغیر سرعت جریان و عمق آب گرفتگی در بررسی نقشه های پهنه بندی سیلاب، در سال ۱۹۸۸، USBR اقدام به ارائه منحنی هایی نمود که میزان مخاطره در آن را مشخص می کرد [۲۱]. در استفاده از این منحنی ها، منطقه مورد نظر به سه ناحیه خطر به شرح ذیل تقسیم می گردد:

ناحیه کم خطر) اگر ترکیب سرعت جریان و عمق آب گرفتگی در این ناحیه قرار گیرد، میزان مخاطره در این منطقه کم می باشد.

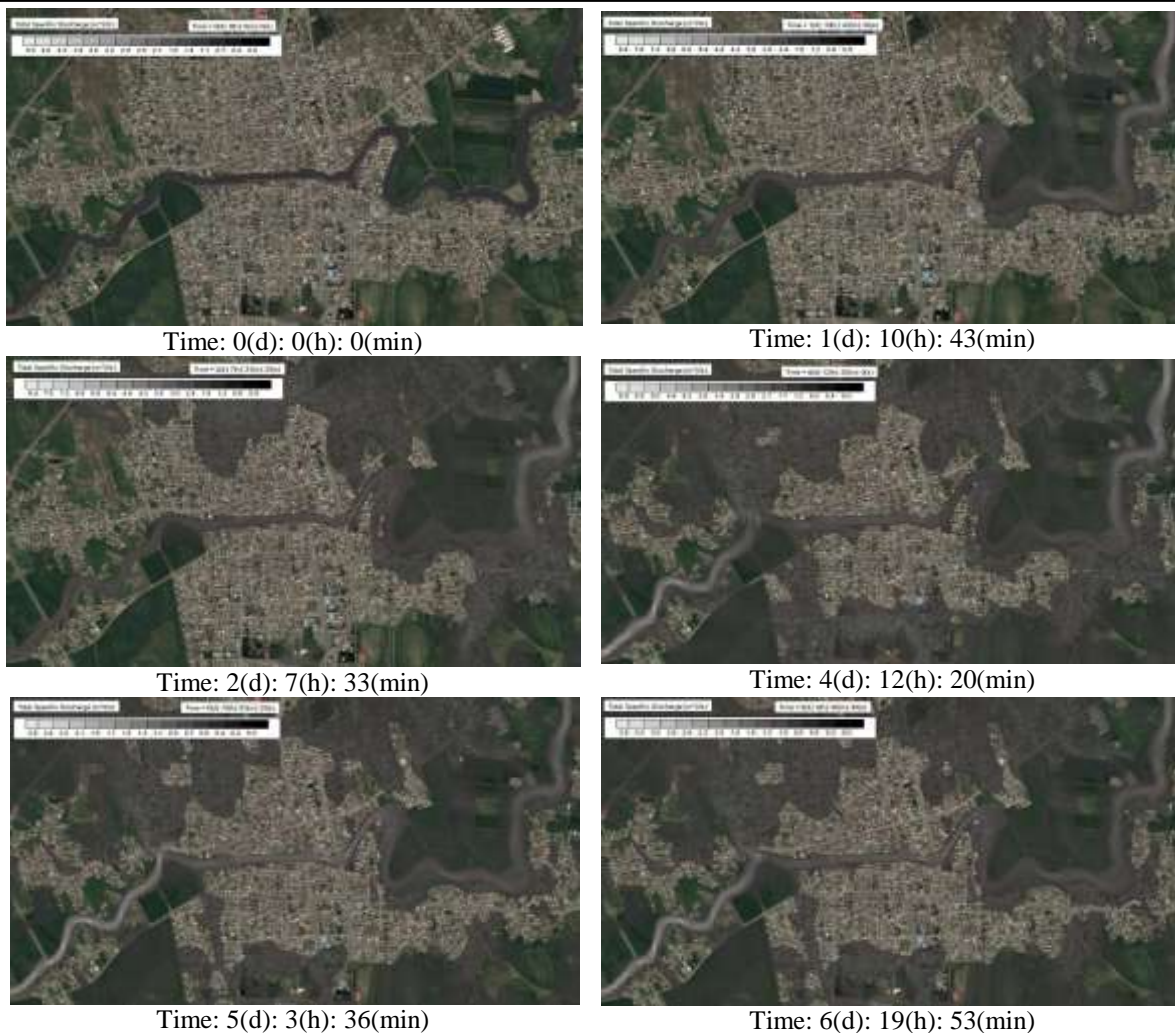
ناحیه پرخطر) اگر ترکیب سرعت جریان و عمق آب گرفتگی در این ناحیه واقع گردد، کلیه مناطق مورد نظر در معرض خطر جدی قرار خواهند داشت.

ناحیه داوروی) دو ناحیه پرخطر و کم خطر نشان دهنده حد بالا و حد پایین میزان خطر را برای نواحی پایین دست مشخص می کند. ناحیه ای که در این بین قرار می گیرد، از نظر میزان مخاطره نامعلوم است.

زیرا هر سیلابی مشخصات خاص خود را دارد و چنانکه ترکیب سرعت و عمق آب گرفتگی در این ناحیه قرار گیرد، محاسبه پارامترهایی که سبب ایجاد مخاطره در مناطق پایین دست می شود عملاً غیر ممکن می شود.



شکل (۴) هیدروگراف های سیل رودخانه گرگان رود در محل ایستگاه آب سنجی آق قلا.



شکل (۵) الگوی سیلاب شکل گرفته در شهر آق قلا با کاننورهای دبی.

رودخانه را تحت تأثیر قرار داده، در نواحی دور از رودخانه نیز شرایط بحرانی ایجاد کرده است، به طوری که در حدود ۳۲٪ درصد نواحی مسکونی و صنعتی محدوده مطالعه سرعت جریان به ۱ متر بر ثانیه رسیده و در بحرانی ترین حالت قرار دارند.

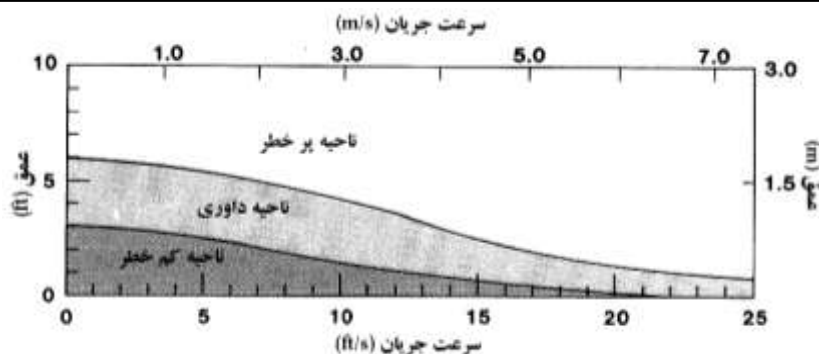
جدول (۴) دسته بندی شاخص مخاطره [۲۱].

عمق (متر) و سرعت جریان (متر بر ثانیه)	شرط	بیشینه عمق جریان (متر)	شاخص مخاطره
$1/5 < Vh$ متر	یا	$1/5 < h$ متر	بالا
$0/5 < Vh < 1/5$ متر	یا	$1/5$ متر	متوسط (داوری)
$0/1 < Vh < 0/5$ متر	و	$0/5$ متر	کم

لذا در این شرایط میزان مخاطره منطقه مورد نظر کاملاً بستگی به قضاوت مهندسی کاربر دارد [۲۲]. در جدول ۴ دسته بندی شاخص مخاطره و در شکل ۶ شاخص مخاطرات برای ساختمان های متصل به پی بر اساس مطالعات USBR نشان داده شده است. در حالت کلی برای آگاهی از میزان مخاطره USBR تعریفی از شاخص مخاطره برای دسته بندی مذکور ارائه کرده است که در جدول (۵) آورده شده است.

در شکل (۷) سرعت جریان ایجاد شده در زمان ۴ روز و ۸ ساعت پس از رخداد سیلاب ۱۰۰ ساله نشان داده شده است. همانگونه که از شکل شماره ۷ مشخص می باشد، علاوه بر مسیل رودخانه سرعت های بالایی از جریان در نواحی خارج از مسیل رودخانه رخ داده است.

سرعت سیلاب در تمامی مسیر رودخانه بیش از ۰/۵ متر بر ثانیه می باشد، این سیلاب علاوه بر آن که نواحی اطراف



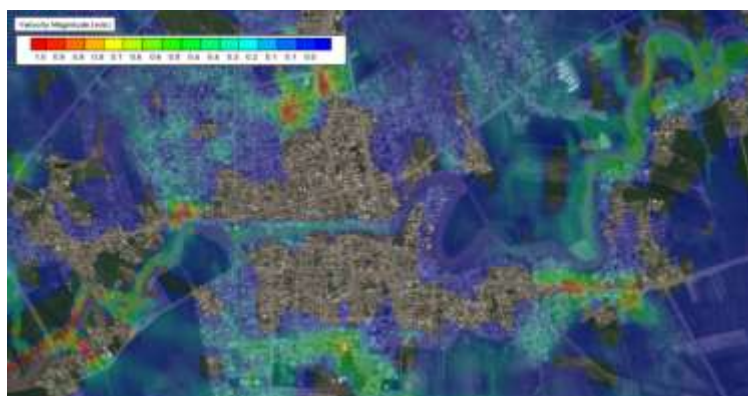
شکل (۶) رابطه عمق-سرعت جریان و سطح خطر برای ساختمان‌های متصل به پی.

جدول (۵) تعریف شاخص مخاطره بر اساس دسته بندی انجام شده [۲۱].

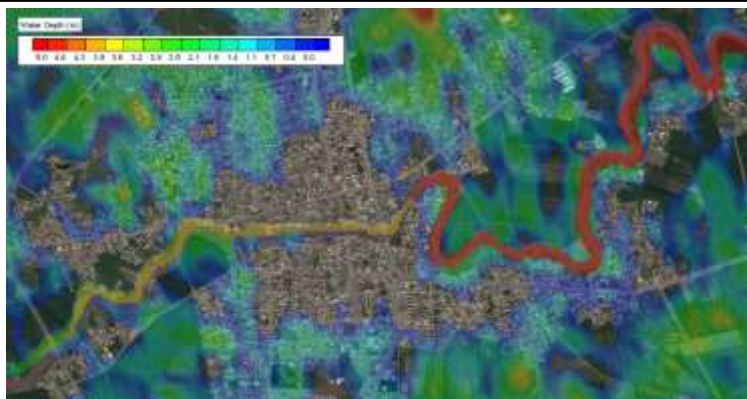
تعریف	رنگ اختصاص یافته	شاخص مخاطره
افراد چه در داخل و چه در خارج از مناطق مسکونی در خطر می‌باشند. تاسیسات مسکونی در معرض تخریب قرار دارند.	قرمز	زیاد
افراد در خارج از مناطق مسکونی در خطر می‌باشند. تاسیسات مسکونی بسته به ساختار آنها در معرض آسیب قرار دارند.	نارنجی	متوسط
افراد چندان در معرض خطر نمی‌باشند. تاسیسات مسکونی ممکن است به صورت محدودی دچار آسیب شوند.	زرد	کم

پیرامون رودخانه کشیده می‌شود. این گستردگی تا ۵/۵ کیلومتری از خط میانی رودخانه دیده می‌شود به گونه‌ای که در ۱ کیلومتری از خط میانی عمق سیلاب ۳/۶ متر، در فاصله ۲/۲ کیلومتری عمق آن ۴ متر و در ۲ کیلومتری خط میانی عمق سیلاب به ۰/۸ متر رسیده است. آن چه که بدیهی است ورود سیلابی با سرعت کمینه ۰/۵ متر بر ثانیه و عمق متوسط ۲/۵ متر به درون شهر منجر به وقوع خسارات جانی و مالی بسیار فراوانی می‌گردد و احتمال می‌رود شاخص مخاطره برای کل محدوده بسیار بالا باشد. شاخص مخاطره برای محدوده مورد مطالعه و در زمان ۴ روز و ۸ ساعت و ۱۰ دقیقه پس از شروع سیلاب ۱۰۰ ساله بر اساس دسته‌بندی جداول شماره ۴ و ۵ به صورت شکل ۹ می‌باشد.

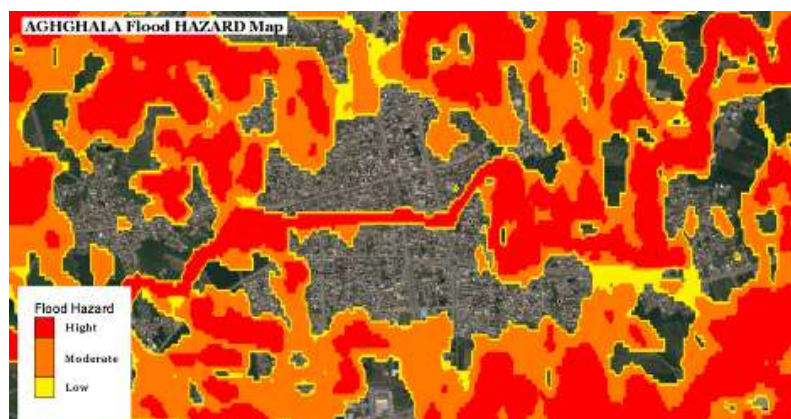
این نواحی نسبت به سایر محدوده سیل گرفته در معرض بیشترین خطرات و تخریب می‌باشند. در شکل ۸ کانتورهای عمق سیل در محدوده مورد مطالعه در زمان ۴ روز و ۸ ساعت پس از رخداد سیلاب ۱۰۰ ساله ارائه شده است. با توجه به شکل، بیشینه عمق جریان ۶ متر می‌باشد که از محل ورود رودخانه به شهر آق‌قلا تا نصف مسیر رودخانه (وسط شهر) امتداد دارد. از وسط مسیر رودخانه در شهر تا انتهای آن عمق جریان رو به کاهش بوده و از ارتفاع ۴/۸ متر در میانه مسیر تا ارتفاع ۳/۷ متر در خروجی شهر گسترده شده است. بدیهی است با ارتفاع و عرض موجود برای مسیر رودخانه امکان عبور سیلابی با این سرعت و ارتفاع فراهم نمی‌گردد و به یقین گستردگی سیلاب به مناطق مسکونی



شکل (۷) سرعت جریان ایجاد شده در زمان ۴ روز و ۸ ساعت و ۱۰ دقیقه پس از شروع سیلاب.



شکل (۸) عمق جریان ایجاد شده در زمان ۴ روز و ۸ ساعت و ۱۰ دقیقه پس از شروع سیلاب.



شکل (۹) شاخص مخاطره در زمان ۴ روز و ۸ ساعت و ۱۰ دقیقه پس از شروع سیلاب.

جانی در حدود ۲۲٪ باشد. برای مناطق دور از ورودی رودخانه زمان فرار برای ساکنین زیاد بوده و تلفات جانی در مناطق انتهایی شهر به حداقل خواهد رسید.

۴- نتیجه‌گیری کلی

مدیریت بحران سیلاب‌های شهری، توسعه پایدار و دانش درباره سیلاب‌های شهری ارتباط بسیار نزدیکی با هم دارند. مدیریت سیلاب‌های شهری نه تنها باعث امنیت و رفاه شهروندی می‌شود که در مسیر سیلاب‌ها قرار دارند بلکه با پیش‌بینی این سیلاب‌ها، جهت پیشروی آن‌ها و نیز میزان اثرات آن‌ها، می‌توان با استفاده از روش‌های پیشگیری مناسب، از خطرات جانی، اقتصادی و آسیب رسیدن به تأسیسات مهم شهری جلوگیری نمود و امنیت نسل‌های آینده را تضمین کرد.

با توجه به توضیحات بیان شده، در دست داشتن اطلاعات دقیق در ارتباط با سیلاب‌های شهری اهمیت خود را نشان می‌دهد. اطلاعاتی که نه تنها شامل تعیین پهنه‌ی یک سیلاب

همان‌طور که انتظار می‌رفت کل محدوده مورد بررسی دارای شاخص مخاطره بسیار بالایی می‌باشد. بر اساس جدول ۵ در شاخص مخاطره بالا افراد چه در داخل و چه در خارج از مناطق مسکونی در خطر بوده و تأسیسات مسکونی در معرض تخریب قرار دارند. بنابراین پیش‌بینی می‌شود در صورت وقوع سیلابی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله کل منطقه در معرض تخریب بالا بوده و تلفات مالی نیز زیاد باشد. نتایج بررسی‌ها نشان داده است چنانچه زمان فرار برای مناطق در خطر در حدود ۹۰ دقیقه باشد، میزان تلفات به ۰/۰۲ درصد محدود می‌شود و این درحالی است که با کاهش این زمان به ۱۵ دقیقه میزان این تلفات به ۵۰ درصد افزایش می‌یابد [۱۹].

بر اساس شکل ۵ (ب) در زمان ۱ روز پس از گسترش سیلاب، حدود ۵۵٪ منطقه تحت تأثیر سیلاب بوده و بیشینه عمق آب در این مناطق ۲/۴ متر بوده است. بررسی زمان‌های کمتر در طی روز اول نشان می‌دهد که ساکنین منطقه حدود ۳۵ دقیقه زمان برای ترک مناطق مسکونی نزدیک منطقه دارند و پیش‌بینی می‌شود در طی این زمان میزان تلفات

ژئوتکنیکی تخصصی به بررسی میزان خسارات وارده پرداخت و نظامنامه‌ای معقول برای تدوین بیمه‌نامه سیلاب (به عنوان یکی از روش‌های نرم مدیریت بحران) تهیه کرد.

۵- مراجع

[1] Jongman, B., Hochrainer-Stigler, S., Feyen, L., Aerts, J.C.J.H., Mechler, R., Botzen, W.J.W., Bouwer, L.M., Pflug, G., Rojas, R., Ward, P.J.. "Increasing Stress on Disaster-Risk Finance Due to Large Floods". *Nature Climate Change*, Vol.4, pp.264-268, 2014.

[۲] بی نام. گزارش مطالعات تعیین حد بستر و حریم رودخانه گرگانرود از سد وشمگیر تا محل اتصال به دریای خزر، مطالعات هیدرولوژی، شرکت مهندسی مشاور سازه پردازی ایران. ۱۳۸۶.

[3] Gallien, T.W., Schubert, J.E., Sanders, B.F. Predicting Tidal Flooding of Urbanized Embayments: A Modelling Framework and Data Requirements, *Coastal Engineering*, Vol.58, No.6, pp.567-577, 2011.

[4] Haltas, I., Tayfur, G., Elci, S. Two-dimensional Numerical Modeling of Flood Wave Propagation in an Urban Area Due to Urkmez Dam-Break", *Izmir, Turkey, Natural Hazards*, Vol.81, No.3, pp.2103-2119, 2011.

[۵] ارشادی فارسانی، م.، نظری‌ها، م.، باغوند، ا.، داننده مهر، ارزیابی خسارات سیل شهر تبریز و راهکارهای مدیریت آن. مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی مدیریت سیلاب‌های شهری، دانشگاه تهران، تهران، ۹ صفحه، ۱۳۸۹.

[۶] مدنی، ف.، مدنی، ل.، صفوی، م.ب. بررسی مدیریت بحران سیل در مناطق شهری با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دومین همایش مدیریت بحران در صنعت ساختمان، شریان‌های حیاتی و سازه‌های زیر زمینی، مرکز پژوهشی مهندسی بحران های طبیعی شاخص سازان، اصفهان، ۸ صفحه، ۱۳۹۱.

[۷] کردپور، ف.، مقدم‌پور، س.م.، دارابی، ع.ا.، سلیمانی کوشان، ح. تلفیق مدل‌های همپوشانی شاخص‌های (IO) و Binary Evidence با تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در مکان‌یابی عرصه‌های پخش سیلاب (مطالعه موردی حوزه آبخیز دشت ذهاب استان کرمانشاه)، کنفرانس ملی مدیریت سیلاب، تهران، ۸ صفحه، ۱۳۹۲.

[۸] جعفری، ر.، بختیاری، ب. تهیه نقشه پتانسیل سیل‌خیزی با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: دشت کهنوج)، کنفرانس ملی مدیریت سیلاب، تهران، ۸ صفحه، ۱۳۹۲.

بوده بلکه دارای خروجی‌هایی برای تعیین شاخص‌های مخاطره بوده و ابزاری مناسب در اختیار قرار می‌دهند تا به تدوین برنامه واکنش سریع، میزان تقریبی خسارات وارده و تدوین بیمه نامه سیلاب پرداخت. در این تحقیق محدوده شهر آق قلا که در مسیر یکی از سیل خیزترین رودخانه‌های کشور قرار دارد، بر اساس هیدروگراف سیلاب ۱۰۰ ساله بررسی شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- استفاده از مدل‌های عددی دو بعدی پیشرفته به جای مدل‌های یک‌بعدی می‌تواند نتایج بهتری را برای مدیریت سیلاب‌های شهری و تدوین برنامه واکنش سریع در اختیار قرار دهد.

- با توجه به اهمیت توسعه شهرها در مبحث توسعه پایدار و رابطه آن با سیلاب‌های شهری، در صورت گسترش مناطق شهری، توسعه شهر آق قلا به صورت عرضی و نه در جهت مسیل رودخانه امری ضروری به نظر می‌رسد.

- با توجه به الگوی سیلاب شکل گرفته در محدوده شهر آق قلا، یک سری نواحی در امتداد مسیر رودخانه پس از ورود سیلاب به سرعت تحت تأثیر قرار گرفته و سیلاب از این نواحی به مسیر فرعی وارد می‌شود. احداث سازه‌هایی مانند دایک و دیواره‌های سیل‌بند می‌تواند از خروج جریان در زمان سیل از این نواحی جلوگیری کند.

- با توجه به نقشه‌های شاخص مخاطره در محدوده شهر آق قلا، غالب مناطق متأثر از سیلاب، در وضعیت پرخطر قرار دارند. این مناطق به شدت دچار آسیب شده و برای شهروندان نیز بسیار خطرناک می‌باشند. تخلیه سریع این مناطق می‌تواند از اولویت‌های تدوین برنامه واکنش سریع و مدیریت بحران باشد.

- یکی از مسایل مهم دیگر دسترسی به مناطق سیل زده می‌باشد. با مشاهده نقشه‌های شاخص مخاطره می‌توان مناطق دسترسی را تعیین و اقدامات ضروری را به انجام رساند.

- با توجه به الگوی جریان شکل گرفته در سیلاب مذکور و نقشه‌های شاخص مخاطره تخلیه کلی شهر امری ضروری به نظر می‌رسد.

- در گام‌های بعدی می‌توان با در دست داشتن اطلاعات حاصل از این مطالعه و بررسی‌های سازه‌ای و

- [9] کمالی، م.، سلیمانی، ک.، شاهدهی، ک.، گمرکچی، ا.، شناسایی مناطق مولد سیل در حوضه آبخیز رودخانه براجین با استفاده از GIS، کنفرانس ملی مدیریت سیلاب، تهران، ۸ صفحه، ۱۳۹۲.
- [10] محمدنژاد، ب.ع.، م.ا. فاطمی کیا، ج. بهمنش، م. منتصری. شبیه سازی عددی انتشار موج ناشی از شکست سد به صورت دو بعدی قائم، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، سال ۴۴، شماره ۳، صفحه ۴۷-۵۹، ۱۳۹۳.
- [11] کمالی، م.، سلیمانی، ک.، شاهدهی، ک.، نوشهری، ا.، گمرکچی، ا. تعیین نقاط سیل خیز و اولویت بندی زیرحوضه ها در حوضه آبخیز اراجین شهر قزوین با استفاده از تلفیق مدی HMS-HEC و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشریه علوم و مهندسی آب خیزداری ایران، سال ۹، شماره ۲۹، صفحه ۲۷-۳۴، ۱۳۹۴.
- [12] رفیعی ساردویی، ا.؛ خلیقی سیکارودی، ش.؛ آذره، ع.؛ رستمی خلج، م. کاربرد مدی HMS-HEC در اولویت بندی پتانسیل سیل خیزی حوضه ی آبخیز بالادست سد کرم، نشریه علوم و مهندسی آب خیزداری، سال ۹، شماره ۲۸، صفحه ۵۳-۵۶، ۱۳۹۴.
- [13] اداره آب منطقه ای استان گلستان، آدرس سایت: <http://www.gsrw.ir>
- [14] Ying, X., Wang, S.S.Y., Khan, A.A. 2003. Numerical Simulation of Flood Inundation Due to Dam and Levee Breach. Proceeding of ASCE World Water & Environmental Resources Congress (CDROM), Philadelphia, USA, 2003.
- [15] Ying, X., Khanand, A. Wang, S.S.Y. Upwind conservative scheme for the Saint Venant equation, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130, No.10, pp.977-987, 2004.
- [16] Jorgeson, J., Ying, X. Wardlaw, W.. "Two Dimensional Modelling of Dam Breach Flooding". US-CHINA workshop on Advanced Computational Modelling in Hydroscience and Engineering, Oxford, Mississippi, USA, 2004.
- [17] Wu, W. "Two-Dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model For Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed (Version 2.1)", Tech Report No. NCCHE- TR- 2001-3. NCCHE, University of Mississippi, 2009.
- [18] Zhang, Y., Jia, Y. Wang, S.Y. "A Conservative Multi-block Algorithm for Two-dimensional Numerical". International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering, Vol.1, No.14, pp.43-55, 2007.
- [19] حسن زاده، ی. و. نورانی، و. سپهری، ه. دل افروز، م. حسن زاده، و ف. الماس پور. ۱۳۹۴. تحلیل امواج ناشی از شکست سد و پهنه بندی دشت سیلابی با استفاده از مدل ریاضی (مطالعه موردی: سد ونیار)، نشریه دانش آب و خاک، سال ۲۵، شماره ۴، صفحه ۱۵-۱.
- [20] ارزنلو، ا. بررسی شکست سد خاکی شهرچای ارومیه ناشی از روگذری جریان و پهنه بندی سیلاب با استفاده از مدل HEC-RAS و GIS، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز و ۱۳۹۴.
- [21] The U.S. Bureau of Reclamation identifies Hazard as a Combination of Depth and Velocity and Differentiates These for Adults, Cars, and Houses, 1988.
- [22] ارزنلو، ا.، ی. حسن زاده، و ن. کردان. شبیه سازی عددی شکست سد و پهنه بندی سیلاب به منظور استفاده در تهیه برنامه واکنش سریع (مطالعه موردی: سد شهرچای ارومیه)، نشریه دریافنون، سال سوم، شماره ۶، ۱۳۹۵ (زیر چاپ).