نشریه علمی
پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران
جلد ۳، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۵صص ۷۳ الی ۸۹
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۵/۱۰-
تاریخ تصویب مقاله: ۱۳۹۵/۱/۳۰
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

مدیریت سیلاب در حوضه آبریز رودخانه کن با رویکرد شبیه‌سازی و بهینه سازی

فرهاد هوشیاری پور[1*]، جعفر یزدی[2]، مرتضی افتخاری[3]، فاطمه جوادی[3] و سارا شش‌انگشت[3]

[1] **استادیار، گروه مهندسی عمران**، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

[2] **استادیار**، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، تهران، ایران

[3] پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، تهران، ایران

Hooshyarypor@srbiau.ac.ir

چکیده: در مقاله حاضر تلاش شده است با در نظر گرفتن این رویکرد جدید، برنامه‌ای برای مدیریت سیل رودخانه کن در شمال تهران، ارائه گردد. نکته کلیدی در این رویکرد، توجه به مسائل اجتماعی و آسیب پذیری اجتماعی و ترکیب بهینه روش‌های مختلف است به نحوی که بتوان با حداقل سرمایه گذاری بیشترین کاهش خسارت را داشت. لذا به منظور شبیه سازی جریان سیلاب در آبراهه‌ها دو سناریو تعریف گردید و برای هر یک از سناریوها ترکیب‌های بهینه مختلفی از روش‌های قابل اجرا پیشنهاد شد. با توجه به این رویکرد، مدل شبیه‌ساز MIKE-11 به منظور شبیه سازی سیلاب به همراه الگوریتم ژنتیک برای حداقل کردن خسارت‌ها استفاده و ترکیب بهینه روش‌های مختلف با در نظر گرفتن سطوح مختلف سرمایه گذاری ارائه گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد از میان روش‌های سازه‌ای، دیوار سیل بند و بند تاخیری و از بین روش‌های غیر سازه‌ای، آبخیزداری، مقاوم سازی و هشدار سیل بیشترین تاثیر را بر مدیریت موثر سیلاب داشته‌اند. ترکیب بهینه این روش‌ها در نقاط مختلف حوضه، توانسته است بین ۲ تا ۵۰ درصد دبی پیک سیلاب را در پایین دست حوضه کاهش دهد. بعلاوه مطابق نتایج بدست آمده، سرمایه گذاری تا ۱۰ هزار میلیون تومان در حوضه کن خواهد توانست بیش از ۳۰٪ کاهش خسارت سیلاب را به همراه داشته باشد.

کلمات‌کلیدی: مدیریت جامع سیلاب، روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای، آسیب‌پذیری، مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، حوضه کن.

Flood Management in Kan River Basin Using a Simulation-Optimization Approach

F. Hooshyaripor, J. Yazdi, M. Eftekhari, F. Javadi and S. Sheshangosht

***Abstract*:** Weaknesses of the conventional flood management approach, lack of integrated view to the basin, no attention to the social impact, and low level of non-structural measure considerations, have the reason for a new approach to integrated flood management. Applying the new approach, this paper proposes an effective plan for flood management in the Kan River basin, north of Tehran. The main challenges in the study are quantification of social vulnerability and selection of optimal combination of feasible measures such a way that maximum potential of damage reduction be achieved while the least funding be spent. Therefore, flood flow with 100 yr and 200 yr return periods was simulated applying MIKE11 coupling with NSGA-II to minimize the implementation cost. Based on the prepared model, various combinations of applicable methods were proposed considering different level of fund allocations. Results showed that out of structural measures flood wall and retention dam and out of non-structural measures watershed management, reinforcement, and flood warning have been the most effective measures. The optimal combination of these measures can reduce 2 to 50 percent of flood peak discharge at downstream. Moreover, the obtained results showed that about 100 billion Rials investment in the basin would reduce up to 30% flood damage.

***Keywords*:** Integrated Flood Management, Structural and non-Structural Methods, Vulnerability, Simulation-Based Optimization Model, Kan Basin.

۱- مقدمه

سیل یکی از حوادث طبیعی مخربی است که سالانه خسارات زیادی را به جوامع بشری تحمیل می‌کند. بر اساس تحقیقات انجام شده سالانه حدود ۴۰ سیل بزرگ و کوچک در ایران رخ می‌دهد که اکثر آنها در مناطق جنوب غرب و جنوب شرق کشور به وقوع می‌پیوندد [۱]. مشاهدات و اندازه گیری‌ها در ایران نشان داده است که در سال‌های اخیر فراوانی وقوع سیل از ۱۷۹ مورد در دهه ۳۰ به ۲۰۵۳ مورد در دهه ۷۰ رسیده است [۲]. همچنین گزارش شده است که خسارت ناشی از سیل در همین دوره از ۱۲۰ میلیارد ریال به ۱۵۰۰ میلیارد ریال افزایش یافته [۲] که معادل بیش از ۱۲۰ درصد افزایش است.

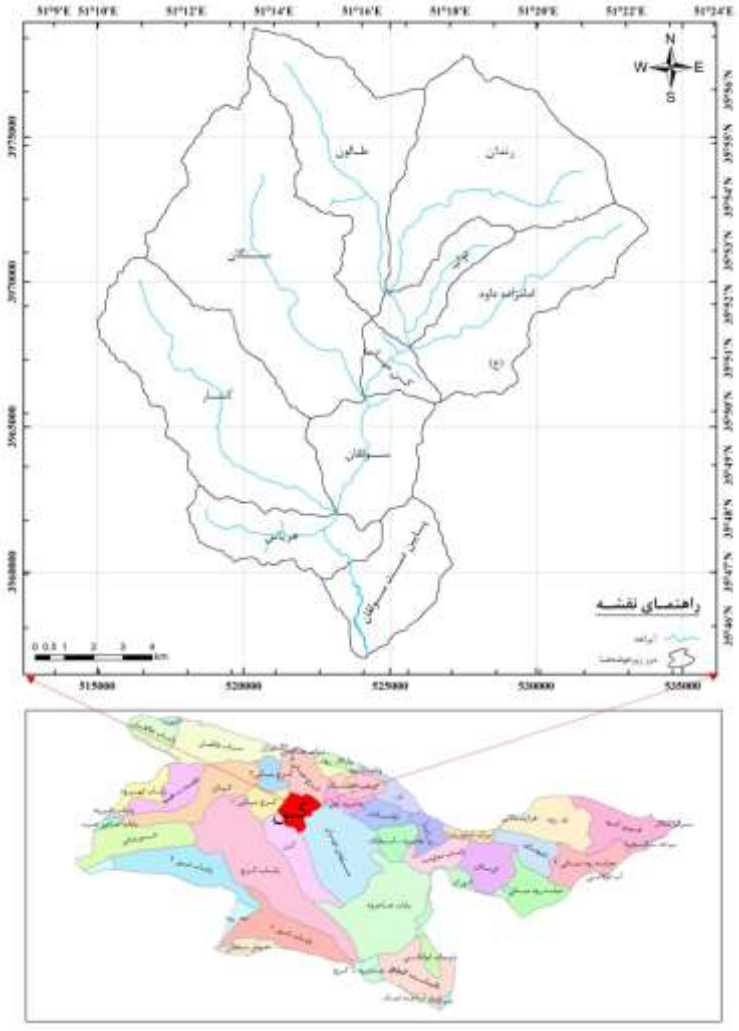
تحقیقات انجام شده در سطح جهان نشان داده است که علیرغم سرمایه‌گذاری‌های زیاد جهت توسعه روش‌های سازه‌ای، خسارات سیل همچنان رو به افزایش است [۲-۴]. مهم‌ترین مسائلی که سبب این روند افزایشی شده است عبارت است از تمرکز بر روش‌های سازه‌ای مهار سیل و عدم توجه به روش‌های غیر سازه‌ای به عنوان مکمل روش‌های سازه‌ای و نگاه نقطه‌ای به سیلاب و فقدان برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیل در حوضه آبریز [۴]. به عبارت دیگر در برنامه‌های مدیریت سیل به شکل سنتی، مدیران همواره به دنبال مهار سیل هستند و برای انجام این کار عموماً طرح‌های مختلف سازه‌ای را در نقاط مختلف حوضه به اجرا می‌گذارند بدون اینکه تاثیر اجرای این طرح‌ها بر یکدیگر و بر کل حوضه تحلیل و ارزیابی شود. این مسأله سبب کاهش کارایی طرح‌های پیشین و جدید گردیده و متعاقباً منجر به عدم موفقیت برنامه‌های مدیریت سیل می‌شود. امروزه اهمیت استفاده از روش‌های غیر سازه‌ای نظیر سیستم پیش بینی و هشدار سیل، در کنار روش‌های سازه‌ای بیش از پیش آشکار شده [۴-۷] و در نتیجه استفاده از روش‌های ترکیبی سازه‌ای و غیر سازه‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۸-۱۱]. روش‌های غیر سازه‌ای علاوه بر توجیه بالای اقتصادی با محیط زیست نیز سازگار می‌باشند که خود موجب شده است که تحقیقات زیادی در رابطه با آنها در دهه اخیر انجام شود [۱۲]. تحقیقات نشان داده است که موثر واقع شدن روش‌های سازه‌ای در جهت کاهش خسارات جانی و مالی، کاملاً وابسته به اجرای روش‌های غیر سازه‌ای در کنار آنها است [۴]. اما اینکه از چه روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای و با چه ترکیبی در کل حوضه استفاده شود، سوالی است که همواره پژوهشگران به دنبال پاسخ آن هستند. ترکیبی که قادر باشد با حداقل هزینه، بیشترین تأثیر را در کاهش خسارات سیل داشته باشد، به عنوان ترکیب بهینه شناخته می‌شود. هرچند در زمینه بهره‌برداری بهینه از سد و مخزن در شرایط سیلابی که یک روش غیر سازه‌ای مدیریت سیلاب محسوب می‌شود، مطالعات متعددی انجام شده است، لیکن تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین ترکیب بهینه نسبتاً اندک است [۳و۱۳]. دی [۶] و بیلاس و لوکاس [۱۴] از مدل برنامه ریزی خطی و لاند [۱۱] از مدل برنامه ریزی خطی دو مرحله‌ای برای تعیین ترکیب بهینه استفاده کردند، بعضی از محققین از روش برنامه ریزی پویا بهره برده‌اند [۱۵ و ۱۶] و برخی نیز از روش الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند [۱۷]. محدودیتی که همه این روش‌ها داشته‌اند این است که برای محاسبه عمق آب از مدل‌های شبیه ساز هیدرولیکی استفاده نکرده‌اند در حالی که تعیین دقیق عمق آبگرفتگی به منظور محاسبه خسارات سیل در مسائل واقعی بسیار اساسی است [۱۸]. همچنین به کمک این مدل‌ها می‌توان تأثیر روش‌های کنترل سیل بر کاهش خسارات را نیز ارزیابی کرد در حالی که مدل‌های هیدرولوژیک در این زمینه محدودیت‌های بسیاری دارند. بر این اساس در مقاله حاضر به منظور تعیین ترکیب بهینه روش‌های مختلف سازه‌ای و غیر سازه‌ای در محدوده مطالعاتی از مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و تلفیق آن با مدل شبیه سازی MIKE11 استفاده می‌شود. مدل تهیه شده برای سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله اجرا می‌گردد و در هر مورد ترکیب بهینه، هزینه اجرای آن و پتانسیل کاهش خسارت مربوط به هر روش، ارائه می‌شود.

۱- مواد و روش‌ها

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

به منظور انجام این تحقیق، حوضه آبریز رودخانه کن که یکی از حوضه‌های شمالی حوضه تهران است به عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شد. موقعیت جغرافیایی این حوضه در حد فاصل طول جغرافیایی '۱۰ °۵۱ تا '۲۳ ۵۱ و عرض جغرافیایی '۴۵ °۳۵ تا '۵۸ °۳۵ قرار دارد. این حوضه با مساحت ۲۱۶ کیلومتر مربع به ۱۰ زیرحوضه کوچک به نام‌های امامزاده داود (ع)، طالون، رندان، سنگان، کشار، سولقان، کن میانی، دوآب، هریاس و پایین‌دست سولقان قابل تقسیم است. موقعیت جغرافیایی این حوضه و تقسیمات آن در شکل ۱ آمده است.

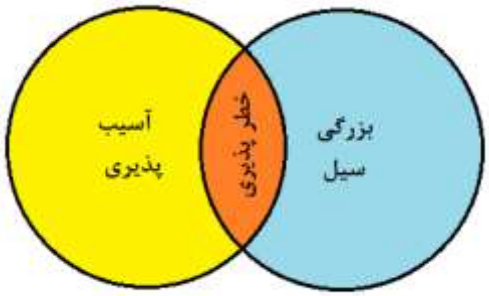
آبراهه اصلی این حوضه، رودخانه کن-سولقان است که از سر شاخه امامزاده داود (ع) در غرب و سر شاخه‌های رندان و طالون در شمال و شمال غربی حوضه از ارتفاعات البرز سرچشمه می‌گیرند و در محل ایستگاه آبسنجی دوآب (کیگا) بهم پیوسته و رودخانه کن-سولقان را به وجود می‌آورند. سرشاخه سنگان در شرق، از ارتفاعات کوه‌های چال‌ناجی، کوه کرکو، کوه قدم چال سرچشمه گرفته و در بالادست سولقان به رودخانه کن‌سولقان می‌پیوندد و سرشاخه کشار در شرق از کوه‌های پهنه حصار و لیچه و سرشاخه هریاس در شرق حوضه، از کوه‌های لیزان، دیمالیز و ولهی سرچشمه گرفته و در پایین‌دست روستای سولقان به رودخانه اصلی می‌رسند و در محل پل اتوبان شهید همت از حوضه مطالعاتی این تحقیق خارج می‌شود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه کن در حوضه تهران

۲-۲- روش تحقیق

در مقاله حاضر، با رویکرد کاهش خطر پذیری[1] سیل، ترکیب بهینه روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای امکان-پذیر در حوضه آبریز رودخانه کن مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۲، خطرپذیری ترکیبی از بزرگی و شدت سیل و آسیب پذیری عناصر و افراد در معرض سیل است. هرچه شدت سیل و میزان آسیب پذیری بیشتر باشد، خطر پذیری نیز بیشتر خواهد بود.



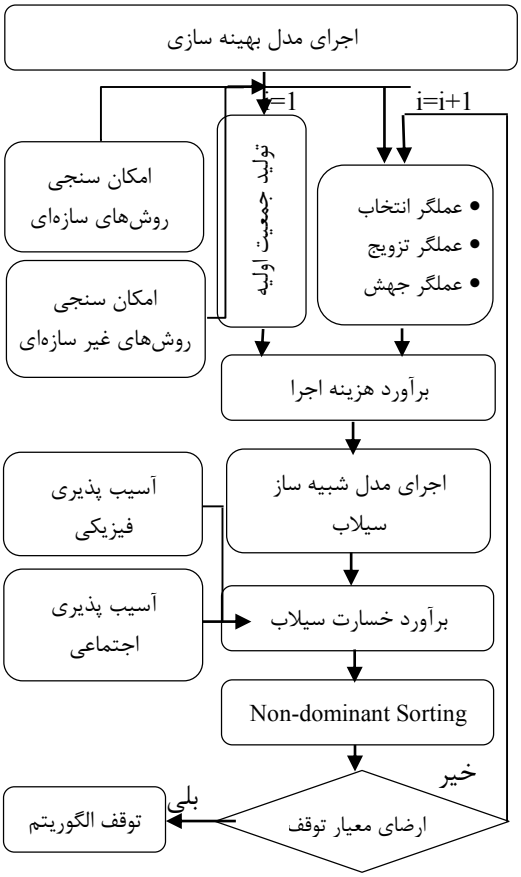
شکل ۲: خطرپذیری سیل و فاکتورهای ایجاد کننده آن [۴]

در حقیقت اقدامات لازم به منظور کاهش خطرپذیری سیل باید با هماهنگ سازی دو مؤلفه فوق انجام پذیرد به صورتی که حد بهینه کاهش شدت سیل و کاهش آسیب پذیری با توجه به پارامترهای اقتصادی و اجتماعی، مشخص گردد. برای کاهش شدت سیل و آسیب پذیری از روش‌های مختلف سازه‌ای و غیر سازه‌ای می‌توان استفاده کرد. اولین گام در برنامه ریزی مدیریت سیل در حوضه، امکان سنجی روش‌های مختلف در نقاط مختلف حوضه می‌باشد. امکان سنجی روش‌ها با استفاده از معیارهای فنی و مهندسی و شرایط جغرافیایی، توپولوژیکی و زمین شناسی منطقه قابل انجام است [۲۰-۱۹]. در این تحقیق پس از بازدیدهای میدانی متعدد و مطالعه ضوابط فنی مربوط به شرایط مناسب اجرای هر یک از روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای مدیریت سیل مشخص گردید که از میان روش‌های سازه‌ای، دیوار سیل‌بند و بند و مخازن تاخیری و از میان روش‌های غیرسازه‌ای، روش‌های بیمه سیل، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، هشدار سیل و اقدامات آبخیزداری مناسب و قابل اجرا در حوضه می‌باشند.

در گام بعد می‌بایست از میان این روش‌ها بهترین ترکیبی که بتواند با حداقل هزینه، بیشترین پتانسیل کاهش خسارت را داشته باشد (ترکیب بهینه)، استخراج شود. برای ارزیابی خسارت ناشی از سیل با دوره بازگشت معین و پتانسیل هر یک از روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای در کاهش خسارت، دو مؤلفه آسیب‌پذیری فیزیکی (خسارت به اراضی کشاورزی و ساختمان‌های تجاری و مسکونی) و آسیب‌پذیری اجتماعی (خسارات روحی و روانی به ساکنین حوضه و توان برگشت پذیری منطقه) تعریف شد [۲۳-۲۱]. با این تعاریف ترکیب مختلف روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای برای هر سیلاب با دوره بازگشت مشخص به صورت سناریوهای مختلف، پتانسیل کاهش خسارات متفاوتی را در حوضه بر جای خواهد گذاشت. لذا تعیین پتانسیل کاهش خسارت در هر سناریو مستلزم این است که جریان سیل در آبراهه‌ها با فرض اجرای روش‌های مختلف مدیریت سیل، شبیه سازی شود. در این مقاله برای شبیه سازی جریان سیلاب از نرم افزار MIKE11 و برای یافتن ترکیب بهینه روش‌ها به صورتی که بیشترین کاهش خسارت را به دنبال داشته باشد، از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در شکل ۳ فلوچارت انجام تحقیق نشان داده شده است.

۳- تحلیل آسیب‌پذیری

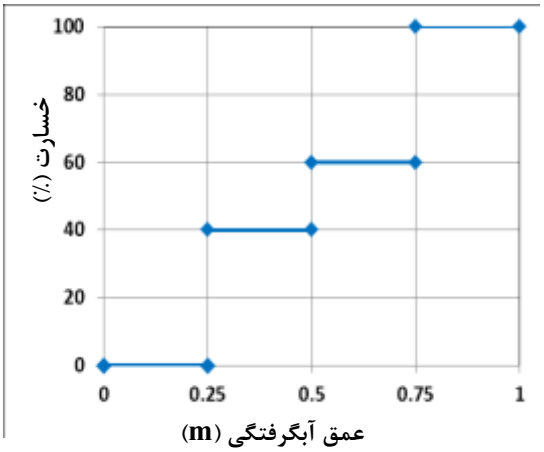
تحلیل آسیب‌پذیری کاربری‌ها و جوامع یکی از مؤلفه‌های اصلی تحلیل خطرپذیری سیل می‌باشد. همانطور که ذکر شد، در این مقاله جهت تحلیل آسیب‌پذیری با توجه به اطلاعات موجود، هر دو نوع آسیب‌پذیری فیزیکی و اجتماعی در نظر گرفته شده است. جهت برآورد آسیب پذیری فیزیکی عناصر در معرض خطر از منحنی‌های آسیب پذیری (بر اساس میزان خسارت نسبی و عمق سیلاب) کاربری‌های مختلف در منطقه، نظیر خانه‌های مسکونی و زمین‌های کشاورزی استفاده گردید [۲۵-۲۴]. لازم به ذکر است منحنی‌های آسیب‌پذیری بدست آمده در این مرحله به منظور برآورد خسارت در مدل شبیه سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳: فلوچارت اجرای مدل شبیه سازی – بهینه‌سازی

کاربری‌های اصلی واقع در سیلابدشت حوضه آبریز کن شامل کاربری کشاورزی (عمدتاً محصولات باغی)، کاربری مسکونی و کاربری تجاری (عمدتاً رستوران) می‌باشد که برای هر یک از این کاربری‌ها باید منحنی-های آسیب پذیری مربوطه استخراج گردد. بدین منظور از منحنی‌های آسیب پذیری و برنامه ریزی بازدیدهای متعدد محلی و برآورد کارشناسی، منحنی‌های آسیب پذیری فیزیکی متناسب با کاربری حوضه استخراج شده است.

در کاربری کشاورزی، با توجه به بازدیدهای میدانی و مذاکرات انجام شده با اهالی کن و مسوولین محلی، گیلاس، سیب و توت مهمترین محصول باغی حوضه می‌باشد. به همین منظور در توسعه منحنی آسیب پذیری فیزیکی مربوطه این درختان به عنوان مبنای برآورد خسارت در نظر گرفته شده است. در این مقاله خسارت تابعی از تراکم کاشت، نوع درخت، سن و ارزش مالی آن و وجود سازه احتمالی در باغ و ارزش ادوات کشاورزی موجود در آن در نظر گرفته شده است. موارد مذکور طی بازدیدهای میدانی، تهیه پرسشنامه و مذاکره با مردم و مسوولین محلی تخمین زده شده‌اند. به عنوان نمونه در شکل ۴ منحنی آسیب‌پذیری بدست آمده برای درخت گیلاس نشان داده شده است.

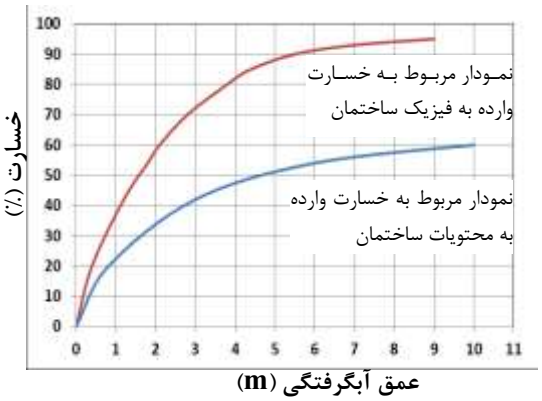


شکل ۴: منحنی آسیب‌پذیری کاربری کشاورزی برای درخت گیلاس

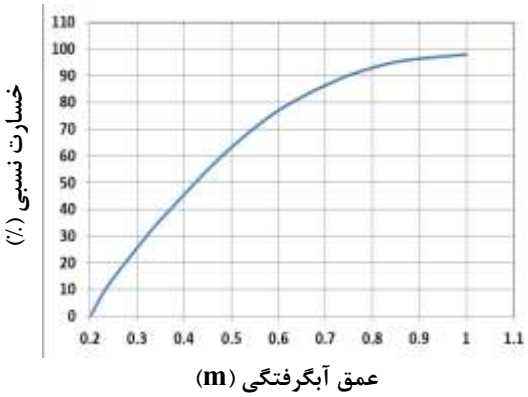
برای برآورد خسارت بالقوه سیل به کاربری مسکونی از متدولوژی بیمه فدرال ایالات متحده استفاده گردید [۲۶]. در این روش خسارت‌هایی که ممکن است در اثر سیل به کاربری مسکونی وارد شود به دو دسته خسارت به خود ساختمان و خسارت به محتویات ساختمان تقسیم می‌شود. به همین ترتیب خسارت وارده به کاربری تجاری نیز شامل دو بخش خسارت به محتویات ساختمان و خسارت به خود ساختمان می‌باشد. در این مقاله مطابق بازدیدهای انجام شده، خسارات مربوط به ساختمان‌های تجاری مشابه کاربری مسکونی در نظر گرفته شد و نمودارهای تراز-خسارت مربوطه تهیه گردید (شکل ۵).

۵

بعلاوه برای محاسبه خسارت وارده به محتویات رستوران‌ها، با توجه به بازدید میدانی و مذاکره با مدیران و مالکین رستوران‌ها، نمودار شکل ۶ استخراج و استفاده گردید.



شکل ۵: نمودار میزان خسارت وارده به ساختمان‌ها و محتویات آن



شکل ۶: نمودار میزان خسارت به محتویات رستوران‌ها

تحلیل آسیب‌پذیری اجتماعی معمولاً با تعیین شاخص‌های متناسب، وزن‌دهی آنها و در نهایت ترکیب کردن آنها صورت می‌گیرد. شاخص‌ها پارامترهایی هستند که به نوعی بیانگر شدت حساسیت یک جامعه و یا اجزای آن نظیر دارایی‌ها و زیرساخت‌ها نسبت به سیل می‌باشند. در این مقاله به منظور تحلیل آسیب‌پذیری اجتماعی حوضه کن، هشت شاخص شامل جمعیت ثابت در معرض خطر، جمعیت متحرک در معرض خطر، تخریب کاربری مسکونی، تخریب کاربری تجاری، تخریب کاربری کشاورزی، میزان جمعیت آسیب‌پذیر یعنی افراد با سن کمتر از ۶ سال و بیشتر از ۶۵ سال، سواد و تعداد افراد خانوار در نظر گرفته شد و پس از بررسی اطلاعات موجود، شاخص‌ها محاسبه و کمی شدند. سپس در هر زیرحوضه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) شاخص‌ها با یکدیگر ترکیب شده و در نهایت یک شاخص مرکب (I_v) برای مقایسه و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری زیرحوضه‌های مختلف محاسبه شد. لازم به ذکر است که شاخص‌های مرکب حاصله در هر زیر حوضه، یک عدد بین صفر و یک خواهد بود. در جدول ۱ شاخص‌های مورد استفاده، وزن هر شاخص و نحوه محاسبه شاخص مرکب آسیب پذیری در هر زیرحوضه آمده است. در این جدول ستون سوم، نشان دهنده وزن هر شاخص از نظر درجه اهمیت در تحلیل سلسله مراتبی است. شاخص مرکب نشان دهنده درجه آسیب پذیری اجتماعی هر زیر حوضه در کل حوضه مطالعاتی است. با توجه به این شاخص می‌توان تشخیص داد که کدامیک از زیرحوضه‌ها از نظر شاخص‌های تعریف شده، آسیب پذیرتر از دیگری هستند. به عنوان مثال زیرحوضه سنگان با شاخص مرکب ۰/۲۰ از زیرحوضه‌های هریاس، کشار، رندان و طالون آسیب پذیری اجتماعی بیشتری دارد. این علاوه بر این با توجه به این شاخص مدیران می‌توانند نسبت به اولویت بندی اجرای طرح‌های مدیریت سیل در حوضه تصمیم گیری کنند.

۴- مدل شبیه سازی و بهینه سازی

شبیه سازی جریان در آبراهه‌های حوضه مورد مطالعه توسط نرم افزار MIKE11 انجام گردید. به کمک این نرم افزار عمق (h) و سرعت (v) و دبی (Q) جریان سیلاب در هر نقطه از آبراهه تعیین گردید. معادلات حاکم در MIKE11 شامل دو سری معادلات پیوستگی و مومنتوم است که به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A}{\partial t}=q \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{aQ^2}{A}\right)+gA\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gQ|Q|}{C^2AR}=0 \qquad (۲)$$

که در آن t= زمان، A= سطح مقطع جریان، a= ضریب اصلاح انرژی جنبشی، g= شتاب جاذبه، R= شعاع هیدرولیکی و C ضریب شزی می‌باشد.

جدول ۱: مقدار شاخص‌ها و شاخص مرکب (I_v) هر زیر حوضه

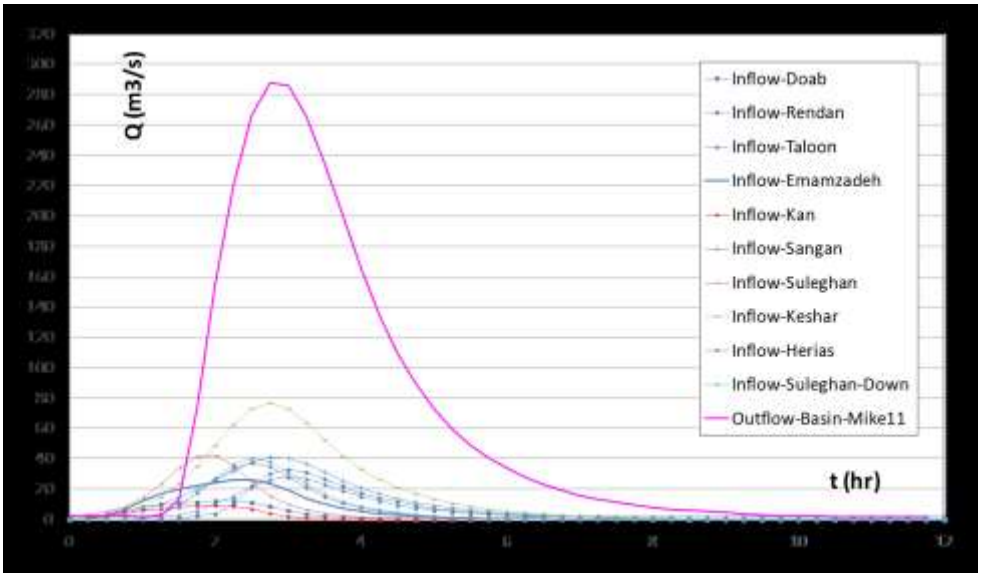
ردیف	زیرحوضه / شاخص (I_v)	وزن	کشار	سنگان	هریاس	رندان	طالون	امامزاده داود	سولقان
۱	جمعیت ثابت در معرض	۰/۲۷	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰	۰/۰۲	۰/۲۱	۰/۰۶	۰/۰۱
۲	جمعیت متحرک در معرض	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۶۰	۰/۰	۰/۰۵	۰/۰۵	۱/۰	۰/۹۰
۳	تخریب مسکونی	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۱
۴	تخریب تجاری	۰/۰۲	۰/۰	۰/۱۷	۰/۶۷	۰/۰	۰/۰	۰/۲۵	۰/۰۳
۵	کشاورزی در معرض	۰/۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۵
۶	جمعیت آسیب پذیر	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۰	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۲۰
۷	بی سوادی	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۰	۰/۳۸	۰/۸۶	۰/۳۹	۰/۳۳
۸	اعضای خانوار	۰/۰۶	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۰	۰/۳۴	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۳۵
	شاخص مرکب	**۰/۰۸**	**۰/۲۰**	**۰/۰۴**	**۰/۰۹**	**۰/۱۷**	**۰/۲۷**	**۰/۲۳**	

بعد از تعیین شدن عمق آب در نقاط مختلف آبراهه، پهنه‌بندی سیلاب به کمک نرم افزار GIS انجام شد. به طور کلی شبیه‌سازی جریان و پهنه بندی سیلاب به ترتیب زیر انجام شده است:

- بازدید از منطقه و بررسی وضعیت موجود آبراهه‌ها و سازه‌های تقاطعی موجود
- تهیه نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۰۰۰، ۱:۱۰۰۰ و ۱:۵۰۰ از مسیر آبراهه‌ها [۱]
- شبیه سازی هیدرولیکی رودخانه‌ها در نرم افزار MIKE11 با توجه به سیل با دوره بازگشت مشخص. اطلاعات هیدرولوژیکی که به عنوان شرایط مرزی به مدل وارد می‌شود، از گزارش بازنگری طرح جامع آبهای سطحی تهران استخراج شده است[۱].
- تحلیل حساسیت مدل با توجه به ضرایب زبری مختلف، واسنجی مدل و بررسی نتایج حاصل از مدل هیدرولیکی به خصوص در محل سازه‌های تقاطعی [۱۳]
- پهنه‌بندی سیلاب با دوره بازگشت مشخص با استفاده از نتایج مدل شبیه سازی در محیط GIS

نتایج شبیه‌سازی جریان شامل هیدروگراف‌های روندیابی سیلاب (با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله) در نقاط مختلف حوضه شامل هیدروگراف تولید شده در هر زیر حوضه که وارد شاخه اصلی می‌گردد (Inflow) و هیدروگراف سیل در محل خروجی حوضه مطالعاتی (Outflow) در شکل ۷ آمده است. در این شکل می‌توان تقدم و تاخر وقوع دبی پیک سیلاب تولید شده در حوضه را مشاهده نمود. همانطور که دیده می‌شود، زیرحوضه‌های کشار، سولقان، سنگان، پایین دست سولقان، هریاس، رندان، طالون، امامزاده داود، دواب و کن میانی به ترتیب بیشترین دبی پیک را تولید کرده اند. از نظر زمان وقوع دبی پیک نیز به ترتیب سولقان، کن میانی، دواب، امامزاده داود، پایین دست سولقان، هریاس، سنگان، کشار، رندان و طالون سریع ترین زمان وقوع پیک را تجربه کرده اند. مقایسه دبی و زمان پیک نشان می‌دهد که سولقان از این نظر در شرایط پر خطر تری نسبت به سایر زیرحوضه‌ها قرار دارد؛ ضمن اینکه سولقان-پر جمعیت ترین نقطه حوضه- در پایین دست حوضه کن قرار گرفته و سیلاب بالادست نیز به سیل تولید شده در خود زیرحوضه اضافه می‌شود و می‌تواند منجر به خطرپذیری زیاد در این بخش از حوضه کن گردد.

دبی پیک، مدت زمان حرکت موج سیلاب در بازه‌های مورد مطالعه و سرعت جریان در رودخانه‌های حوضه، در شرایط فعلی حوضه مطابق جدول ۲ می‌باشد. در این جدول منظور از Δt مدت زمان عبور سیلاب از ابتدای بازه تا نقطه هدف مورد نظر می‌باشد.



شکل ۷: هیدروگراف سیلاب ۱۰۰ ساله زیرحوضه‌ها و هیدروگراف روندیابی شده آنها در خروجی حوضه

جدول ۲: اطلاعات مربوط به موج سیلاب در نقاط شاخص حوضه آبریز کن، سیلاب ۱۰۰ ساله

موقعیت	طول شبیه‌سازی آبراهه (m)	سرعت متوسط (m/s)	دبی اوج خروجی (m^3/s)	Δt (min)
خروجی زیرحوضه رندان	۴۱۶۵	۳/۵۸	۳۳/۲	۶
خروجی زیرحوضه طالون	۶۱۹۰	۳/۸۸	۲۸	۷
خروجی زیرحوضه دوآب	۱۹۶۳	۴/۳۴	۶۹/۹	۷
بالادست امامزاده داود (ع)	۹۵۷	۳/۷۶	۲۶	۱۶
روستای کیگا	۴۶۱۷	۵/۰۶	۲۶	۲۲
خروجی زیرحوضه امامزاده داود	۷۷۵۵	۴/۴۳	۲۶	۲۹
پایین‌دست اتصال آبراهه‌های دوآب و امامزاده داود	۸۰۴۴	۴/۱۵	۹۵/۹	۲۶
خروجی زیرحوضه کن میانی	۱۰۱۹۳	۴/۱	۱۰۰/۶	۳۰
خروجی زیرحوضه سنگان	۵۰۱۱	۳/۲۹	۴۰/۷	۲۳
پایین‌دست اتصال آبراهه‌های کن میانی و سنگان	۱۰۳۳۶	۳/۲۹	۱۳۷/۱	۳۸
روستای سولقان	۱۱۱۲۷	۴/۰۹	۱۷۰/۵	۳۱
خروجی زیرحوضه سولقان	۱۴۷۳۵	۵/۳۷	۱۷۰/۲	۴۲
روستای کشار سفلی	۳۷۷۴	۵	۷۶/۸	۷
خروجی زیرحوضه کشار	۵۱۷۷	۴/۹۲	۷۶/۹	۹
اتصال آبراهه‌های کشار و سولقان	۱۵۱۲۹	۵/۳۷	۲۴۶/۶	۴۰
خروجی کل حوضه	۲۰۶۴۳	۵/۳	۳۰۷/۲	۵۴

در ادامه برای تعیین ترکیب بهینه گزینه‌های سازه‌ای-غیر سازه‌ای به منظور مدیریت سیلاب، با در نظر گرفتن معیارهای خسارت و هزینه، مدل شبیه سازی موجود با یک مدل بهینه سازی تلفیق گردید. در طراحی ترکیب روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریت سیل، تعیین ترکیبی از روش‌ها که به موجب آن کم‌ترین خسارت به حوضه وارد آید، هدف اصلی و نهایی است.

در این مطالعه، هزینه و عملکرد روش‌های سازه‌ای (بعد از طراحی اولیه) و روش‌های غیرسازه‌ای منتخب برای حوضه آبریز کن، برآورد شد. سپس با توجه به هزینه روش‌های ترکیبی و پتانسیل کاهش خسارت متناظر آنها در کاربری‌های مختلف، ترکیب‌های بهینه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای با به‌کارگیری مدل شبیه سازی - بهینه‌سازی استخراج گردید. در این راستا از مدل بهینه سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک استفاده شد. الگوریتم ژنتیک یک تکنیک جستجو بر پایه انتخاب تصادفی است که برای یافتن جواب تقریبی مسائل بهینه‌سازی و جستجو است. این الگوریتم نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است و برای اولین بار توسط جان هلند [۲۷] معرفی و توسط گلدبرگ [۲۸] تکامل یافته است. الگوریتم ژنتیک از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول بهینه جهت پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کند [۲۸]. در مساله حاضر که یک مساله دو هدفه است، اهداف عبارتند از کمینه‌کردن میزان سرمایه گذاری و کمینه‌کردن خسارات سیل.

قیود مساله نیز عبارتند از هزینه ساخت سد تاخیری (C_D) تابعی از ارتفاع سد (H_D) و عرض رودخانه (B_R) در نظر گرفته شده است. بعلاوه پایداری سازه‌ای سد نیز با اعمال ضریب اطمینان واژگونی (SF_O) برابر نسبت گشتاور مقاوم (M_O) به گشتاور آستانه واژگونی (M_{TO}) و ضریب اطمینان لغزش (SF_S) برابر نیروی مقاوم (F_S) به نیروی آستانه لغزش (F_{TS}) منظور شده است. هزینه ساخت دیوار سیل‌بند (C_W) تابعی از ارتفاع دیوار (H_W) و هزینه مقاوم سازی (C_R) نیز تابعی از ارتفاع آب (h) در نظر گرفته شده است که ارتفاع آب در نقطه مورد نظر از مدل هیدرودینامیک بدست می‌آید. همچنین هزینه سیستم هشدار سیل (C_{WS}) و اجرای طرح‌های آبخیزداری (C_{WM}) نیز ثابت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که هزینه ساخت و اجرای هر یک از گزینه‌های مورد بررسی با توجه به فهرست بهای مختلف ارائه شده توسط معاونت برنامه ریزی و نظارت کاربردی ریاست جمهوری محاسبه گردیده است [۲۹-۳۲]. خسارت وارده به سیستم نیز با توجه به تراز آب و منحنی‌های تراز-خسارت شکل ۴ تا ۶ تعیین می‌شود.

$$Min: A_1 = \sum_{i=1}^{n} Cost_i$$

$$Min: A_2 = \sum_{j=1}^{m} \left(I_{vj} \times Damage_j \right)$$

S.t:

$$Damage_j = f_0(h)$$

$$Cost_i = C_D + C_W + C_R + C_{WS} + C_{WM}$$

$$C_D = f_1(H_D, B_R)$$

$$C_W = f_2(H_W)$$

$$C_R = f_3(h)$$

$$C_{WS} = Const.$$

$$C_{WM} = Const. \qquad (۳)$$

$$\frac{M_O}{M_{TO}} \geq SF_O \quad and \quad \frac{F_S}{F_{TS}} \geq SF_S$$

$$h = f\left(x, t, C, A, Q, \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right)$$

با توجه به تابع هدف و قیود مساله برای حل مساله و تعیین جبهه پارتو از الگوریتم NSGA-II استفاده گردید. از این الگوریتم به طور موفقیت آمیزی در زمینه‌های مختلف مهندسی آب استفاده شده است به عنوان نمونه ردی و کومار [۳۳] برای بهینه سازی تخصیص آب مخزن به مصارف مختلف؛ آتیکوزمان و همکاران [۳۴] به منظور طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب؛ نیک سخن و همکاران [۳۵] برای تخصیص بهینه بار آلودگی در رودخانه و راسخ و همکاران [۳۶] برای تعیین بهینه سازه‌های کنترل سیلاب از این الگوریتم بهره برده‌اند.

از آنجا که پروژه‌های اجرایی عموماً با محدودیت‌های مالی روبرو هستند، ترکیب‌های بهینه مختلفی با هدف کاهش سطح سرمایه گذاری (هزینه) مورد نیاز پروژه و همچنین کاهش میزان خسارات احتمالی ناشی از وقوع سیلاب، ارائه شده است. با توجه به این رویکرد در مدل شبیه سازی - بهینه‌سازی تهیه شده برای هر سیل با دوره بازگشت مشخص، سطوح مختلفی از سرمایه گذاری فرض گردید و متعاقباً برای هر یک از شرایط

فرض شده، یک ترکیب بهینه متناظر ارائه شد. این ترکیبات بهینه می‌تواند اطلاعات سودمندی را در رابطه با مصالحه میان سطح سرمایه گذاری و خسارات وارده به حوضه در اختیار تصمیم گیران قرار دهد؛ به این صورت که مدیران ذی‌ربط با استفاده از این نتایج با توجه به سطح بودجه مالی در اختیار (سطح سرمایه‌گذاری) می‌توانند ترکیب بهینه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای را با لحاظ معیارهای مورد نظر انتخاب نمایند.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- امکان سنجی روش‌های مختلف

امکان سنجی اولیه گزینه‌های مختلف سازه‌ای و غیر سازه‌ای، بر اساس شاخص‌های کیفی و کمی متناسب هر روش که در آیین نامه‌های کشور و مراجع علمی ارائه گردیده و همچنین با توجه به نتایج بازدیدهای متعدد میدانی انجام شده است. به منظور امکان سنجی مخازن تاخیری که عملکرد قابل توجهی در تعویق دبی پیک سیلاب در رودخانه دارند، سه معیار مقاومت خاک، فرسایش پذیری و توپوگرافی زمین در زیرحوضه‌های مورد بررسی در نظر گرفته شد. همچنین دیوار سیل بند که با محدود کردن جریان سیلاب در یک طول معین باعث جلوگیری از پخش و گسترش سیلاب در زمین‌های اطراف می‌شود، بر اساس تراز سیل، ارزش زمین و تراکم جمعیتی در هر زیرحوضه امکان سنجی گردید. به منظور طراحی، در مراحل اولیه احداث دیوارهای سیل‌بند، انتخاب ارتفاع آزاد بر مبنای تجربیات و مقادیر پیش‌فرض طراحی و بصورت یک تخمین اولیه می‌باشد. مقادیر ارتفاع آزاد پیشنهادی بر اساس دبی سیل طرح برابر ۰/۸ متر از راهنمای طراحی دیوار سیل‌بند انتخاب شد[۲۰]. در ادامه کنترل‌های مربوط به پایداری دیوار و میزان تنشها در سازه دیوار نیز در طراحی مورد توجه قرار گرفته است (معادله ۳). لازم به ذکر است با توجه به مصالح و منابع قرضه در محل، مخازن تاخیری و دیوار سیل بند از نوع سنگی- ملاتی پیشنهاد گردید و هزینه اجرای هر یک از گزینه‌ها و نگهداری از آنها از نشریه ۲۱۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور استخراج گردید[۱۹]. در مقاوم سازی با توجه به عمق آبگرفتگی ساختمان‌هایی که در پهنه سیلاب دشت قرار می‌گیرند و نوع ساختمان‌های منطقه تصمیم به اتخاذ این روش‌ها گرفته خواهد شد. از دیگر روش‌های مدیریت سیلاب عملیات آبخیزداری است که شامل روش‌های ایجاد، تقویت و نگهداری پوشش گیاهی است که در مقاله حاضر، روش‌های کپه‌کاری، بذرکاری، بوته‌کاری، بذرپاشی، قرق و تراس‌بندی مورد بررسی قرار گرفتند. معیار انتخاب هر یک از این روش‌ها شیب زمین، جنس خاک و فرسایش پذیری آن و پوشش گیاهی بومی منطقه بوده است. امکان استفاده از سیستم هشدار سیل به جمعیت ساکن در سیلاب دشت، زمان پیش هشدار و امکانات، تجهیزات و دانش موجود وابسته است که در این تحقیق با توجه به تجهیزات و دانش موجود استفاده از سیستم‌های زمان واقعی مورد توجه قرار گرفته اند. واضح است که زمان پیش هشدار در استفاده از اینگونه سیستم ها، نقش تاثیر گذاری خواهند داشت. هزینه اجرای سیستم هشدار سیل با توجه به تجربیات اجرایی موسسه تحقیقات آب در طرح ملی ایجاد سامانه‌های هشدار دهنده سیل برآورد شده و به مدل وارد شده است.

مطالعات امکان سنجی نشان داد که از میان روش‌های موجود، گزینه‌های زیر با مشخصات فنی ارائه شده مناسب اجرا در نقاط مشخصی از حوضه مطالعاتی هستند.

- مخازن تأخیری در سه شکل طراحی با ارتفاع H=۱۰m، H=۲۰m و H=۳۰m در زیرحوضه‌های امامزاده داود (ع)، رندان، طالون، کن میانی و سنگان.
- آبخیزداری در زیرحوضه‌های امامزاده داود (ع)، سنگان، سولقان و کشار (این زیرحوضه‌ها به دلیل اهمیت بیشتر از نظر آسیب‌پذیری، جهت انجام عملیات آبخیزداری انتخاب شدند).
- ساخت دیوار سیل‌بند بر اساس طراحی با دوره بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ (۵۰yr، ۱۰۰yr و ۲۰۰yr) سال برای منطقه سولقان پایین.

- مقاوم‌سازی ساختمان‌ها به صورت خشک (انجام اقدامات و استفاده از تجهیزاتی که مانع از ورود آب به داخل ساختمان می‌گردد) بر اساس طراحی با دوره بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال برای بازه‌های سنگان، سولقان و پایین‌دست آن.
- سیستم هشدار سیل برای زیرحوضه‌های سولقان و پایین‌دست آن.

در شکل ۸ محل امکان سنجی شده برای اجرای گزینه-های فوق در محدوده مطالعاتی نشان داده شده است. اجرای مدل بهینه سازی مشخص می‌کند که با سطوح مختلف سرمایه گذاری چه ترکیبی از این طرح‌ها بر کاهش خسارت سیل موثرتر است. بر اساس متدولوژی اتخاذ شده، انتخاب ترکیب بهینه نهایی از بین ترکیبات بهینه ارائه شده، به مدیران واگذار شده است تا با توجه به سطح بودجه‌های در دسترس، یکی از ترکیب‌های پیشنهادی را تصویب نمایند.

۲-۵- اعمال آسیب پذیری در مدل

به منظور اعمال اثر آسیب پذیری اجتماعی در تصمیم گیری، از نتایج مطالعات آسیب پذیری و شاخص مرکب ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردید. بدین صورت که با توجه به شاخص مرکب هر زیر حوضه، درصدی متناظر به خسارات فیزیکی محاسبه شده اضافه گردید (به عنوان نمونه آسیب پذیری فیزیکی زیرحوضه امام‌زاده داود در ۱/۲۳ ضرب گردید و به همین ترتیب برای زیرحوضه‌های دیگر).

۳-۵- ترکیب بهینه روش‌ها

نتایج حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی و ترکیب‌های بهینه بدست آمده برای سیلاب‌های مختلف سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله در جدول ۳ آمده است. در این جدول ستون اول شماره ترکیب برای هر یک از سناریوها را نشان می‌دهد. ستون دوم مقدار هزینه یا سطح سرمایه‌ای است که برای اجرای ترکیب حاصله به آن نیاز است. ستون سوم میزان پتانسیل کاهش خسارتی است که در صورت اجرای ترکیب مورد نظر، بدست خواهد آمد. ستون‌های چهارم تا شانزدهم نیز نشان دهنده انتخاب یا عدم انتخاب اجرای روش سازه‌ای و یا غیر سازه‌ای متناسب با هر ستون است که در مواردی که گزینه‌های متفاوتی برای آن وجود داشته است، گزینه مورد نظر (مثلاً H=۱۰) قرار داده شده است.

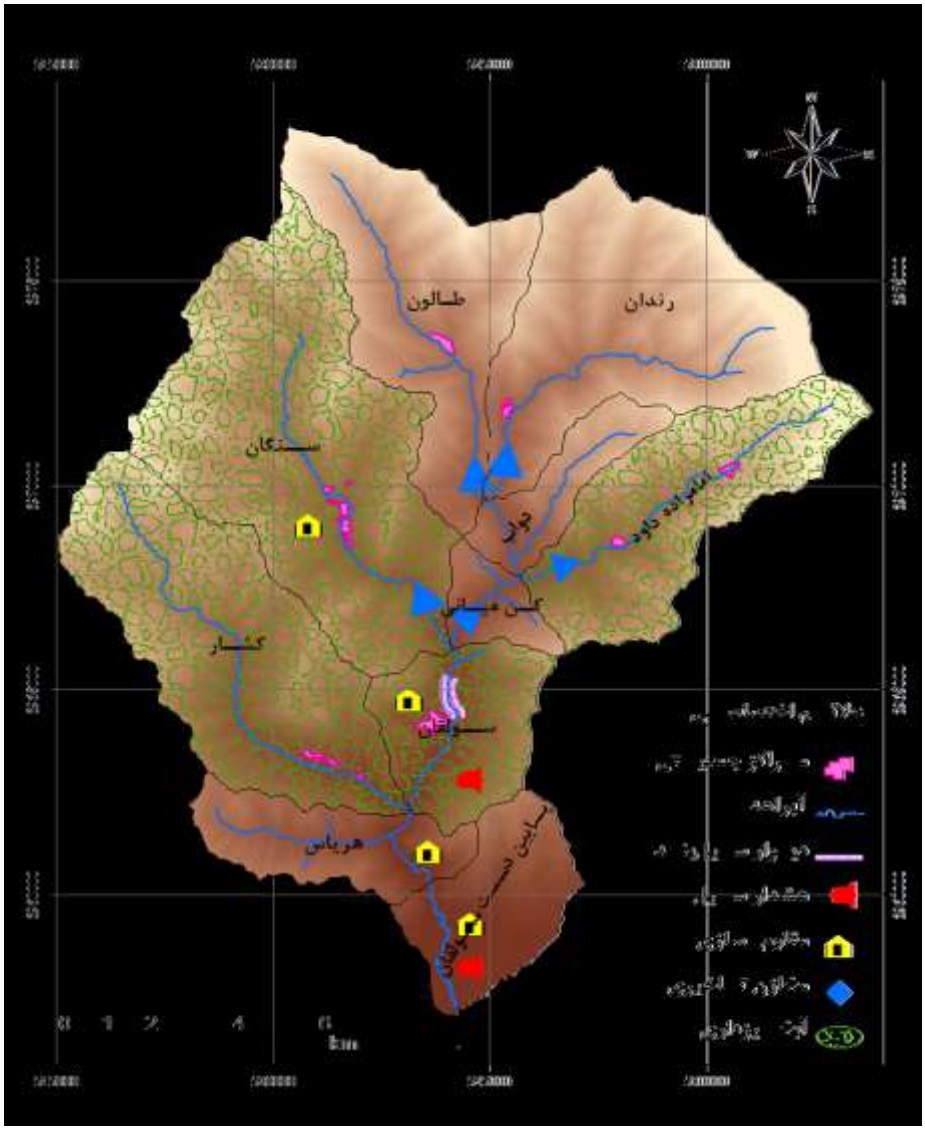
با توجه به شماره ترکیب بهینه (۱) تا (۵) جدول فوق، در سطوح سرمایه گذاری کمتر مدل بهینه روش‌های غیر سازه‌ای را برای اجرا انتخاب کرده است، زیرا با هزینه کمتر، منجر به کاهش خسارت بیشتری می‌شوند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با در اختیار داشتن منابع مالی کمتر، استفاده از روش‌های غیر سازه‌ای آبخیزداری، سیستم هشدار سیل و مقاوم سازی ساختمان‌ها تاثیر بیشتری را در کاهش خسارات خواهند داشت. این نتیجه صحت مدعای مطلوبیت روش‌های غیر سازه‌ای در مدیریت جامع سیل را به درستی تایید می‌نماید. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح سرمایه گذاری در مدیریت و انتخاب ترکیب پرهزینه‌تر، در کنار روش‌های غیر سازه‌ای بهره‌گیری از گزینه سازه‌ای دیوار سیل‌بند از اولویت بیشتری برخوردار بوده است. در این شرایط مدل ترجیح داده است که با حذف (مثل ترکیب شماره (۵) مدل ۱۰۰ ساله) و یا منظور کردن روش‌های غیر سازه‌ای (مثل ترکیب شماره (۵) مدل ۲۰۰ ساله)، روش‌های پرهزینه‌تر سازه‌ای را نیز در نظر بگیرد. نتایج نشان می-دهد که در بیشتر ترکیب‌های بدست آمده، اجرای دیوار سیل‌بند با طراحی برای سیل ۵۰ ساله اقتصادی‌تر از اجرای دیوار سیل‌بند برای سیل طراحی ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله است.

با توجه به نتایج جدول ۳ در هیچ‌یک از مدل‌های اجرا شده، بند تاخیری در زیرحوضه‌های کن میانی و سنگان به عنوان گزینه مطلوب انتخاب نشده است زیرا اجرای بند تاخیری در سنگان باعث می‌شود که سیلاب این حوضه با تاخیر به سیلاب شاخه اصلی برسد و در نتیجه این تاخیر پیک سیلاب هر دو حوضه بر هم منطبق شده و در پایین دست شاهد سیلاب بزرگتری می‌شویم که کنترل خسارات آن نیاز به بودجه بیشتری دارد. همین مساله در رابطه با بند تاخیری زیر حوضه کن

میانی نیز اتفاق می‌افتد؛ لذا در برخی زیرحوضه‌ها، مدل از این روش سازه‌ای در ترکیبات بهینه استفاده نکرده است. این پیش بینی یکی از قابلیت‌های مفید مدل شبیه سازی- بهینه سازی توسعه داده شده در مطالعه حاضر است که می‌تواند از هزینه‌های بی حاصل و گاهاً خسارت‌زا جلوگیری کند.

در نهایت بررسی جدول ۳ مشخص می‌نماید در مواقعی که سطح سرمایه‌گذاری افزایش می‌یابد، اضافه بر موارد قبلی، اجرای بند تاخیری ۱۰ و ۲۰ متری به ترتیب در زیرحوضه‌های امام زاده داود و رندان توجیه اقتصادی خواهد داشت و به همین ترتیب با هزینه بیشتر می‌توان بند تاخیری ۳۰ متری را نیز در زیرحوضه طالون به عنوان گزینه‌ای مناسب در نظر گرفت.

در انتخاب ترکیب بهینه طی فرایند تصمیم‌گیری لازم است ابتدا سناریوی مورد نظر توسط تصمیم‌گیران تعیین و بر اساس آن ترکیب بهینه با توجه به سطح سرمایه‌گذاری و در نظر گرفتن معیارهای مختلف توسط گروه تصمیم‌گیر انتخاب گردد. لازم به ذکر است که اهمیت اعمال ترکیب مناسب روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای با توجه به قرارگیری اماکن مذهبی و تفریحی حوضه و با عنایت به جمعیت متحرک قابل توجه آن، علاوه بر کاهش خسارت‌های مستقیم سیلاب موجب کاهش تلفات و مرگ و میرهای انسانی نیز خواهد شد.



شکل ۸: روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای امکان سنجی شده در حوضه کن

جدول ۳: ترکیب بهینه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای سیلاب با دوره بازگشت مختلف (به قیمت پایه سال ۱۳۹۰)

شماره ترکیب بهینه	سرمایه گذاری (میلیون تومان)	خسارت (میلیون تومان)	بند تاخیری (m)					آبخیزداری				دیوار سیل بند سولقان	مقاوم سازی		هشدار سیل
			امام زاده داود	رندان	طالون	کن میانی	سنگان	امام زاده داود	سنگان	سولقان	کشار		سنگان	سولقان	
سیلاب ۱۰۰ ساله															
(۱)	۶۱/۶۲	۵۶۰۵	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	۵۰yr	-	✓
(۲)	۷۱۸/۹	۴۷۶۹	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	۵۰yr	-	۵۰yr	-
(۳)	۲۲۸۳/۸	۴۴۹۸	-	-	-	-	-	✓	✓	-	✓	۵۰yr	۱۰۰yr	۱۰۰yr	✓
(۴)	۵۱۱۴/۸	۴۱۱۳	H=۱۰	H=۲۰	-	-	-	-	✓	-	✓	-	۵۰yr	۵۰yr	-
(۵)	۹۲۵۲/۴	۳۹۲۳	H=۱۰	H=۲۰	H=۳۰	-	-	✓	-	-	-	-	۵۰yr	-	-
سیلاب ۲۰۰ ساله															
(۱)	۱۹۱	۶۰۱۳	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	✓
(۲)	۷۴۰	۵۱۶۵	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	۱۰۰yr	-	-
(۳)	۲۰۸۲	۴۸۵۹	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	۵۰yr	۵۰yr	۵۰yr	-
(۴)	۴۷۳۲	۴۶۱۶	H=۱۰	H=۲۰	-	-	-	-	✓	-	✓	-	۱۰۰yr	-	-
(۵)	۱۰۴۹۷	۴۱۷۶	H=۱۰	H=۲۰	H=۳۰	-	-	-	✓	-	✓	-	۵۰yr	۵۰yr	-

به عبارت دیگر ترکیب‌های بهینه بدست آمده علاوه بر کاهش خسارات فیزیکی، جراحات و مرگ و میرهای ناشی از سیلاب را نیز در سطح حوضه کاهش می‌دهد که لازم است در اتخاذ تصمیم نهایی مد نظر قرار گیرد.

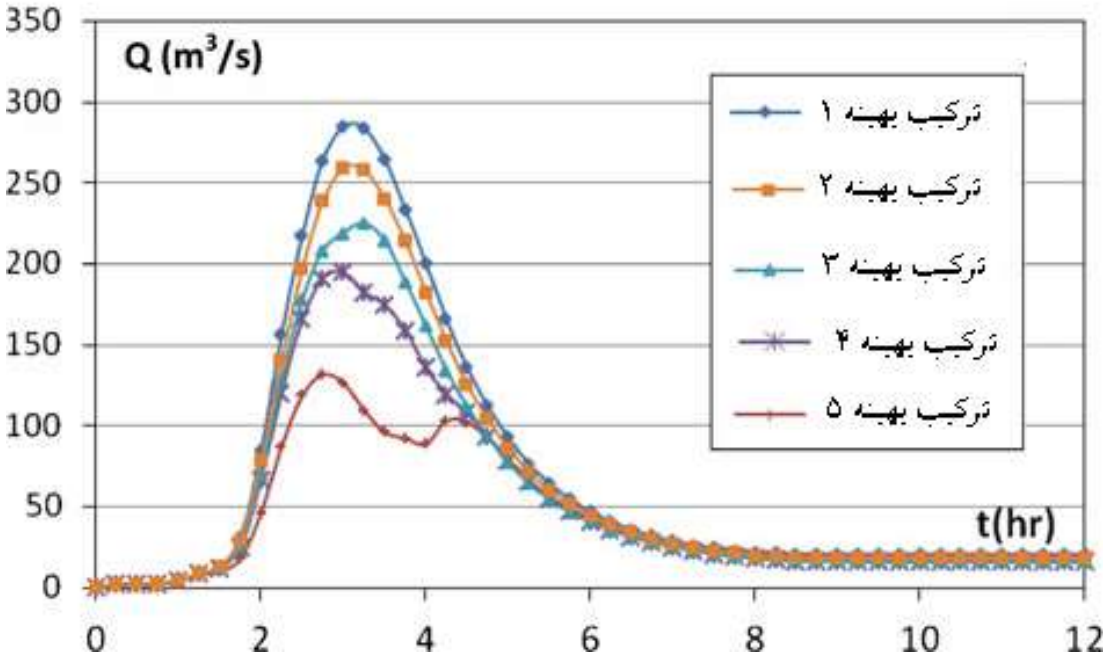
۴-۵- تاثیر هیدرولیکی اجرای ترکیب بهینه

شکل ۹ تاثیر هیدرولیکی اجرای هر یک از ترکیبات بهینه (سناریو سیلاب ۱۰۰ ساله) بر هیدروگراف سیل در پایین دست را نشان می‌دهد.

مطابق این شکل اجرای روش‌های مدیریت سیلاب ارائه شده، می‌تواند دبی پیک سیلاب را در پایین دست حوضه به طور موثری کاهش دهد. به عنوان نمونه دبی پیک سیلاب مربوط به ترکیب بهینه شماره (۴) و (۵) به ترتیب حدوداً ۲۹٪ و ۵۰٪ کمتر از شرایطی است که هیچ طرحی در حوضه اجرا نشود.

۶- نتیجه گیری

عواملی نظیر رشد جمعیت، توسعه زندگی اجتماعی و شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به مسکونی به ویژه در حریم رودخانه‌ها موجب تشدید خسارات ناشی از سیل گردیده است. البته اگرچه به منظور کنترل و کاهش خسارات سیل در رودخانه‌های کشور، اقدامات متعددی صورت گرفته است، لیکن با توجه به ماهیت فرابخشی سیل، عملاً مدیریت سیل به طور کامل موفق نبوده است. به نظر می‌رسد مشکلات اصلی و اساسی موجود در این زمینه مربوط به نگرش منفی به سیل، دید فنی و مهندسی محدود، محدودیت ابزار مورد استفاده و تصمیم‌گیری‌های غیر جامع در حوضه باشد.



شکل ۹: هیدروگراف سیلاب ۱۰۰ ساله در خروجی حوضه بعد از اجرای طرح‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای

در این مقاله ابتدا روش‌های مختلف سازه‌ای و غیر سازه‌ای موجود جهت مدیریت سیل، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و با توجه به بازدیدهای به عمل آمده از حوضه آبریز رودخانه کن در شمال غرب تهران و در نظر گرفتن معیارهای فنی، امکان اجرای آنها در حوضه بررسی شد. روش‌های برگزیده سازه‌ای شامل ساخت دیوار سیل‌بند در محدوده سولقان و ساخت بندهای تاخیری در سرشاخه‌های بالادست حوضه و روش‌های برگزیده غیرسازه‌ای شامل بیمه سیل، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، هشدار سیل و اقدامات آبخیزداری شدند.

از میان روش‌های قابل اجرا، تعیین بهترین ترکیب به گونه‌ای که با صرف حداقل هزینه، بیشترین پتانسیل کاهش خسارت را داشته باشد، یک چالش و سوال اساسی در مدیریت سیل حوضه است که در مقاله حاضر مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور هزینه اجرای هر یک از طرح‌ها با توجه به فهرست بهای مصوب محاسبه گردید و میزان خسارت سیل نیز با توجه به آسیب‌پذیری فیزیکی (خسارت به اراضی کشاورزی و ساختمان‌های تجاری و مسکونی) و آسیب-پذیری اجتماعی (خسارات روحی و روانی به ساکنین حوضه و توان برگشت پذیری منطقه) ناشی از سیل با دوره بازگشت معین محاسبه شد. در محاسبه مقدار آسیب پذیری فیزیکی از منحنی‌های آسیب پذیری (میزان خسارت نسبی در برابر عمق سیلاب) برای کاربری‌های مختلف استفاده گردید. از آنجا که ممکن است اجرای روش‌های پیشنهادی با محدودیت مالی روبرو شوند، برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله، ترکیب‌های بهینه مختلفی با فرض هزینه‌کردهای متفاوت، پیشنهاد شد. با توجه به این رویکرد، با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه و تلفیق آن با مدل شبیه‌ساز MIKE-11، ترکیبات بهینه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای حوضه کن انتخاب شدند. این ترکیبات بهینه می‌تواند اطلاعات سودمندی را در رابطه با توازن بین میزان هزینه و پتانسیل کاهش خسارات وارده به سیستم در اختیار تصمیم گیران قرار دهد. تصمیم‌گیران و مدیران ذی‌مدخل می‌توانند با استفاده از این نتایج و با توجه به منابع مالی موجود (مقدار سرمایه اختصاص داده شده)، ترکیب بهینه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای را با لحاظ معیارهای مورد نظر انتخاب نمایند. نتایج این مطالعه نشان داد که صرف هزینه بیشتر لزوماً به معنای کاهش بیشتر پتانسیل خطر سیل در حوضه نیست. به عنوان مثال احداث بند تاخیری در خروجی زیرحوضه سنگان (همچنین کن میانی) نه تنها خسارت سیل را کاهش نمی‌دهد بلکه موجب می‌شود که پیک هیدروگراف خروجی این زیر حوضه با پیک هیدروگراف سیل دیگر زیرحوضه‌ها بر هم منطبق شود و سیلاب مخرب‌تری را بوجود آورد که در نتیجه آن خسارت سیل به روستاهای پایین دست افزایش می‌یابد. بر این اساس مطالعات مدیریت سیل در حوضه‌های آبریز باید به شکل یکپارچه انجام شود تا بیشترین تاثیر را در کاهش خسارت سیل داشته باشد. از طرف دیگر مطالعه حاضر نشان داد که روش‌های غیرسازه‌ای تاثیر زیادی بر کاهش خسارت وارده به حوضه دارند و لذا در کنار مزیت اقتصادی، اجرای آنها در کنار روش‌های سازه‌ای بسیار می‌تواند به مدیریت سیل حوضه و کاهش خسارات مالی و به خصوص جانی ناشی از سیل موثر باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از موسسه تحقیقات آب به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز منطقه مطالعاتی، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

پی نوشت

[1] Risk

مراجع

[۱] شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس؛ *بازنگری طرح جامع آبهای سطحی تهران، مطالعات پایه جلد دوم*، سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، شهرداری تهران، ***۱۳۸۸***.

[۲] دفتر استانداردها و معیارهای فنی شرکت مدیریت منابع آب ایران؛ *راهنمای ارزیابی خسارت سیلاب*، نشریه شماره ۲۹۶- الف، ***۱۳۸۵***.

[۳] بیات، ب. *بهره برداری بهینه از کوتاه مدت از سیتم های چند مخزنه در شرایط سیلابی*، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ***۱۳۹۱***.

[4] WMO, "*Integrated flood Management Concept paper*", Associated Programme on Flood Management (APFM). Flood Management Policy Series. (WMO-No. 1047) Geneva. Switzerland, ***2009***. http://www.apfm.info/pdf/concept-paper-e.pdf.

[5] Carsell, K. M., Pingel, N. D., Ford, D. T., "*Quantifying the Benefit of a Flood Warning System*", Natural Hazards Review, Vol. 5(3), p.p. 131-140, ***2004***.

[6] Day, J. C., "*A recursive programming model for non-structural flood damage control*", J. Water Resour. Res., vol. 4(5), p.p. 1262–1271, ***1970***.

[7] U.S. Army Corps of Engineers (USACE), "*Framework for estimating national economic development benefits and other beneficial effects of flood warning and preparedness systems*", Institute for Water Resources, Alexandra, Va, ***1994***.

[8] Ahmad, S. S., Simonovic, S. B., "*A three-dimensional fuzzy methodology for flood risk analysis*", J flood Risk Manage. Vol. 4, p.p. 53-47, ***2011***.

[9] Correia, F. N., Sarvaiva, M. G., Silva, F. N., Ramos, I., "*Floodplain management in urban developing areas, part I. Urban growth scenarios and land-use controls*", J. Water Resour. Manag., 13, 1–21, ***1999a***.

[10] Correia, F. N., Sarvaiva, M. G., Silva, F. N., Ramos, I., "*Flood plain management in urban developing areas, part II. GIS-based flood analysis and urban growth modeling*", J. Water Resour. Manag., vol. 13, p.p. 23–37, ***1999b***.

[11] Lund, J. R., "*Floodplain Planning with Risk-Based Optimization*", J. Water Resour. Plann. Manag., vol. 128(3), p.p. 202-207, ***2002***.

[12] UNEP, "*Early warning, Forecasting and operational flood risk monitoring in Asia (Bangladesh, China and India)",* A technical report of project (GT/1010-00-04): Division of early warning and assessment (DEWA), United Nations Environment Program (UNEP), P.O. Box 30552, Nairobi, Kenya, ***2002***.

[۱۳] بیات، ح. و هیلو، م.ع.؛ *"ارائه روشی نوین برای تخمین ضریب زبری در رودخانه‌های کوهستانی"*، هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران، ***۱۳۸۸***.

[14] Bialas, W. F., Loucks, D. P., "*Nonstructural floodplain planning*", Water Resour. Res. 14(1), 67–74, ***1978***.

[15] Morin, T. L., Merier, W. L., Nagaraj, K. S., "Dynamic programming for flood dynamic programming for optimal water systems analysis", In: Esogbue AO (ed) Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp 286–306, ***1989***.

[16] Travis, Q. B., Mays, L. W., "Optimizing retention basin networks", J. Water Resour. Plann. Manag., vol. 134(5), p.p. 432–439, ***2008***.

[17] Karamouz, M., Abesi, O., Moridi, A., Ahmadi, A., "*Development of optimization schemes for floodplain management; a case study*", J. Water Resour. Plann. Manag., vol. 23, p.p. 1743–1761, ***2009***.

[18] Davis, D., Faber, B. A., Stedinger, J. R., "*USACE Experience in Implementing Risk Analysis for Flood Damage Reduction Projects*", J. Contemporary Water Res., vol. 140, p.p. 3–14, ***2008***.

[۱۹] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور؛ *مبانی محاسبات اقتصادی طرح‌های توسعه منابع آب*، نشریه شماره ۲۱۵، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، وزارت نیرو، ***۱۳۸۰***.

[۲۰] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری؛ *راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری دیوار سیل‌بند*، نشریه ۵۱۹. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، ***۱۳۸۸***.

[21] Birkmann, J., "*Measuring Vulnerability to Natural Hazards*", United Nations University. Institute for Environment and Human Security, ***2005***.

[22] Cutter, L., Boruff, B. J., Shirley, W., "*Social Vulnerability to Environmental Hazards*", Social Science Quarterly. Vol. 84(2), p.p. 242–261, ***2003***.

[23] Weichselgartner, J., "*Disaster mitigation: The concept of vulnerability revisited*", Disaster Prevention and Management, vol. 10(2), p.p. 85–94, ***2001***.

[24] KGS Group, "*Red River Basin-stage-damage curves update and preparation of flood damage maps*", Report prepared for International Joint Commission, Winnipeg, Manitoba, Canada, ***2000***.

[25] Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., Veen, D., "Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and models", Sixth Framework Programme for European Research and Technological Development, Integrated Project Flood site, Document Reference T09-06-01, ***2007***.

[26] US Federal Insurance, http://www.treasury.gov/about/organizationa

l-structure/offices/Pages/Federal-Insurance.aspx.

[27] Holland, J. H., *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press, Cambridge, Mass, ***1975***.

[28] Goldberg, D. E., *Genetic algorithms in search optimization and machine learning*, Addision-Wesley, Reading, Mass, ***1989***.

[۲۹] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت کاربردی ریاست جمهوری، *فهرست بهای واحد پایه رشته ابنیه*، رسته ساختمان و ساختمان صنعتی، ***۱۳۸۸***.

[۳۰] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت کاربردی ریاست جمهوری، *فهرست بهای واحد پایه رشته سدسازی*، رسته مهندسی آب، ***۱۳۸۸***.

[۳۱] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت کاربردی ریاست جمهوری، *فهرست بهای واحد پایه رشته آبیاری و زهکشی*، رسته مهندسی آب، **۱۳۸۸**.

[۳۲] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت کاربردی ریاست جمهوری، *فهرست بهای واحد*، تهران، **۱۳۸۸**.

[33] Reddy, M. J., Kumar, D. N., "*Multi-objective differential evolution with application to reservoir system optimization*", J. Comput. Civ. Eng., vol. 21(2), p.p. 136–146, **2007**.

[34] Atiquzzaman, M., Liong, S-Y., Yu, X., "*Alternative decision making in water distribution network with NSGA-II*", J Water Resour. Plann. Manag. Vol. 132(2), p.p. 122–126, **2006**.

[35] Niksokhan, M. H., Kerachian, R., Amin, P., "*A stochastic conflict resolution model for trading pollutant discharge permits in river systems*", Environ. Monit. Assess., vol. 154, p.p. 219–232, ***2009***.

[36] Rasekh, A., Afshar, A., Afshar, M. H., "*Risk-cost optimization of hydraulic structures: methodology and case study*", Water Resour. Manag., doi:10.1007/s11269-010-9582-3, ***2010***.