

استخراج طرح‌های بهینه مدیریت سیلاب بادر نظر گرفتن خطر تلفات جانی به کمک الگوریتم ژنتیک دو هدفه

جعفر یزدی^۱، سیدعلی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-آب، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۰۳

چکیده - اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب یکی از مسائل مهم در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است. در این پژوهش، الگوریتمی برای طراحی بهینه اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای تسکین سیلاب در سطح حوضه آبریز بر اساس رویکرد بهینه‌سازی و برپایه‌ی شبیه‌سازی ارائه شده است. مدل هیدرودینامیکی MIKE-11 برای محاسبه خطر تلفات انسانی و خسارات بالقوه حالت‌های مختلف سیلاب در ترکیب‌های مختلف روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای استفاده شد. این مدل به مدل بهینه‌سازی چند هدفه NSGA-II وصل شد تا جواب‌های بهینه پارتو با در نظرگیری دو هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعیین تبعات منفی سیلاب در سطح حوضه تعیین شود. در نهایت، مدل ارائه‌شده برای یک حوضه آبریز کوچک در استان تهران به کار گرفته شد و منحنی تعامل بین هزینه و خسارت برای حالت‌های مختلف سیلاب در این حوضه رسم شد. با استفاده از این منحنی‌های تعامل، در هر سطح از سرمایه‌گذاری، تصمیم‌گیران می‌توانند طرح ترکیبی بهینه اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای را با توجه به معیارهای مورد نظر انتخاب کنند.

واژگان کلیدی - سیلاب، خطر، تلفات انسانی، اقدامات سازه‌ای، غیرسازه‌ای، بهینه‌سازی، پارتو.

۱ - مقدمه

سیلاب وجود دارد. تجربه‌های به دست آمده از سیل‌های تاریخی نشان داده است که اقدامات سازه‌ای به تنهایی برای بازرسی و مدیریت سیلاب کافی نیست و باید روش‌های غیرسازه‌ای به عنوان مکمل روش‌های سازه‌ای، هم‌زمان به کار گرفته شود (Lund, 2002, Ahmad and Simonovic 2011). روش استاندارد برای برآورد خسارات سیلاب، تخمین عمق جریان در سیلاب‌دشت و محاسبه خسارات با استفاده از منحنی‌های تراز-خسارت کاربری‌های مختلف واقع در پهنه‌های سیلابی است.

در دهه‌های نزدیک رشد جمعیت و شهرسازی، فشار وارد شده بر نواحی سیل‌گیر را افزایش داده و باعث تشدید مرگ و میرهای ناشی از سیل، تخریب زمین‌های کشاورزی، دارایی‌ها و زیرساخت‌ها شده است. مدیریت سیلاب از اقدامات اساسی در برنامه‌ریزی منابع آب است که برای کمینه کردن خسارات بالقوه و رسیدن به توسعه پایدار جوامع به کار می‌رود. دو دسته رویکرد یا اقدام شامل اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای مدیریت

مدل‌های هیدرودینامیکی احساس می‌شود. هدف این مقاله، ارائه الگوریتمی بر پایه‌ی ترکیب مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی برای تعیین ترکیبات بهینه اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای تسکین آثار سیلاب است. بنابر این تلاش شده است که با به کارگیری یک الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی چندهدفه و تلفیق آن با یک مدل عددی روندیابی جریان، بیشتر ضعف‌های مدل‌های پیشین برطرف شود. از آن‌جا که سطح سرمایه‌گذاری در پروژه‌های مدیریت سیلاب محدود است، استفاده از یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه، امکان تعیین طراحی بهینه سامانه‌های ترکیبی بازرسی سیلاب را در هر سطح سرمایه‌گذاری فراهم می‌کند. همچنین در این پژوهش با استفاده از یک روش مناسب، تعداد تلفات انسانی سیلاب هم در برآورد تبعات منفی سیلاب در نظر گرفته شده است. استفاده از یک مدل هیدرودینامیکی جریان به عنوان مدل شبیه‌ساز در این پژوهش ابزاری انعطاف‌پذیر برای ترکیب عملکرد روش‌های مختلف به صورت پویا در بازه‌های بالادست و پایین‌دست آبراهه‌های اصلی حوضه است. این موضوع در مباحث مدیریت جامع سیلاب، اهمیت زیادی دارد (WMO, 2009).

۲- مدل شبیه‌سازی

در این پژوهش، مدل MIKE-11 برای شبیه‌سازی حالت‌های سیلاب در رودخانه‌های حوضه مطالعه شده به کار رفت. مدل هیدرودینامیک گفته شده، معادلات حاکم بر جریان را که معادلات "سنت ونان" نامیده می‌شود در شبکه محاسباتی، تشکیل شده از آبراهه‌های اصلی حوضه حل می‌کند. این مدل برای استفاده در این پژوهش، با استفاده از هیدروگراف‌های ثبت‌شده در محل ایستگاه‌های آب‌سنجی

با وجود تحقیقات فراوان درباره‌ی کاربرد روش‌های کاهش خسارت سیل، مطالعات انجام‌شده در باره‌ی طراحی بهینه این روش‌ها با هدف کمینه‌سازی خسارات سیل در سیلاب‌دشت محدود است. مجموعه‌ای از روش‌های بهینه‌یابی که تاکنون در مطالعات مرتبط، آزمایش شده عبارت است از: ۱- برنامه‌ریزی خطی برگشتی (Day, 1990)، ۲- برنامه‌ریزی خطی (Loucks, 1978 و Bialas)، ۳- برنامه‌ریزی پویا (Morin et al., 1989)؛ ۴- برنامه‌ریزی خطی دومرحله‌ای (Lund 2002) و ۵- الگوریتم ژنتیک (Karamouz et al., 2009). با توجه به پیچیده بودن و غیرمحدب بودن تابع هدف (تابع خسارت) و فضای مسئله بهینه‌سازی (که از حل معادلات دیفرانسیل جزئی سنت ونان و منحنی‌های تراز-خسارت به دست می‌آید)، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بر پایه شیب، نظیر برنامه‌ریزی خطی در حل این مسائل (طراحی سامانه‌های ترکیبی کنترل سیلاب) امکان‌پذیر نیست. همچنین استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا (DP) برای مسائل با تصمیم‌گیری پیاپی مناسب است و استفاده از این روش در مسائل واقعی نیازمند برقراری اصل بهینگی بلمن است که در مسئله این پژوهش چنین اصلی برقرار نیست. یکی دیگر از ضعف‌های مهم مطالعات قبلی، نبود مدل شبیه‌سازی مناسب برای محاسبه خسارت سیلاب در حالات مختلف طراحی روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای است. برای نمونه، در مسائل واقعی با ضرایبی مانند x و k ماسکینگام (که در برخی از تحقیقات پیشین استفاده شده است) نمی‌توان آثار روش‌های مختلف مانند مخازن و سد‌ها را در روندیابی سیلاب، مدل‌سازی کرد و نیاز به مدل‌های مناسب مانند

امین محل از بازه I ام است. $c_{l,j,i}$ خسارت کاربری نوع l در i امین محل از بازه I ام است. $c_{l,j,i}$ تابعی از عمق جریان $y_{l,i}$ است (منحنی‌های تراز خسارت). روابط ۳ شرط مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

Subject to :

$$\text{Cost } D_k = f(H_{D_k}, W_{S_k})$$

$$\text{Cost Wall} = f(H_w)$$

$$\text{Cost W.P.} = f(y_{Hk})$$

$$\text{Cost Warning} = \text{Const.}$$

$$\text{Cost W.M.M} = \text{Const.}$$

$$\frac{M_{RD_k}}{M_{DD_k}} \geq S.F_M, \frac{F_{RD_k}}{F_{DD_k}} \geq S.F_F \quad (3)$$

$$\frac{M_{Rw}}{M_{Dw}} \geq S.F_M, \frac{F_{Rw}}{F_{Dw}} \geq S.F_F$$

$$y_{x,t} = f\left(Q_{x,t}, \frac{\partial Q_{x,t}}{\partial t}, \frac{\partial Q_{x,t}}{\partial x}, \dots\right)$$

$$H_{D_{k \min}} \leq H_{D_k} \leq H_{D_{k \max}}$$

$$H_{w \min} \leq H_w \leq H_{w \max}$$

$$X_{iR}, X_{im}, X_{warning} = \begin{cases} 1, & \text{if implemented} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Cost } D_k$, Cost Wall , Cost W.P. , Cost Warning و Cost W.M.M. به ترتیب هزینه ساخت مخزن k ام، دیوار سیل‌بند، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر سیل، به کارگیری سامانه هشدار سیل و اقدامات آبخیزداری است.

H_{D_k} , W_{S_k} , H_w و y_{Hk} به ترتیب ارتفاع سازه مخزن k ام، عرض مقطع رودخانه در محل سازه مخزن k ام، ارتفاع دیوار سیل‌بند و عمق آب‌گرفتگی کاربری مسکونی یا تجاری k ام در سیلاب‌دشت است. M_{RD_k} و M_{Rw} ممان مقاوم و M_{DD_k} و M_{Dw} ممان‌های واژگونی سازه‌های مخزن k ام و دیوار سیل‌بند تحت بارگذاری است. F_{RD_k} و F_{Rw} نیروهای مقاوم و F_{DD_k} و F_{Dw} نیروهای محرک وارد بر سازه‌های مخزن k ام و دیوار سیل‌بند است. $S.F_M$

حوضه واسنجی شده و هیدروگراف سیلاب زیرحوضه‌ها با دوره‌های بازگشت مختلف به کمک مدل هیدرولوژیکی کالیبره شده حوضه، برآورد شد (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۹۰) و به عنوان شرط مرزی در مدل شبیه‌سازی MIKE-11 به کار رفت.

۳- مدل بهینه‌سازی

با یک سطح سرمایه‌گذاری ثابت می‌توان مقدار خسارت سیلاب را (با یک طرح بهینه) به مقدار مشخصی کاهش داد. کاهش بیشتر آن، نیازمند افزایش سطح سرمایه‌گذاری است. در این مطالعه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و خسارات بالقوه سیلاب به‌عنوان دو هدف جداگانه و در رقابت با یکدیگر در مدل بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته شده است. فرمول‌بندی کلی توابع هدف به صورت زیر است:

$$\text{Min } F_1 = \sum_{l=1}^m \text{Cost}_l \quad (1)$$

$$\text{Min } F_2 = \sum_{l=1}^m \text{Damage}_l \quad (2)$$

$$= \sum_{l=1}^m \left(R \times C_1 + \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^n c_{l,j,i} (y_{l,i}) \right)$$

m تعداد بازه‌ها، Cost_l هزینه گزینه ترکیبی X_l در بازه l ، Damage_l خسارت سیلاب در بازه l است اگر گزینه ترکیبی X_l به کار رود. X_l ترکیبی از اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای است که $X_l = \{x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{ln}\}$ ، R نرخ دیه برای هر نفر و C_1 تعداد تلفات انسانی در بازه l ام است. چگونگی محاسبه C_1 در بخش روش گفته شده است. t و n به ترتیب تعداد کاربری‌های در نظر گرفته شده برای آنالیز خسارت سیل و تعداد گسسته‌سازی‌های بازه l ام بر اساس کاربری‌های قرار گرفته در آن است. $y_{l,i}$ عمق آب در i

است (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۹۰). روش‌های سازه‌ای پیشنهاد شده مانند گزینه‌های مخازن تأخیری و دیوار سیل‌بند و روش‌های غیرسازه‌ای مانند گزینه‌های هشدار سیل، مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و ایجاد پوشش گیاهی در چند زیرحوضه بوده است. در شکل ۱، همچنین گزینه‌های پیشنهاد شده در زیرحوضه‌های مختلف دیده می‌شود. به طور کوتاه می‌توان گفت برای یک حالت سیلاب، خسارت بالقوه، متناظر با یک طرح ترکیبی در ساختار مدل ارائه شده با تغییر شرایط مرزی و پیکربندی مدل شبیه‌سازی رودخانه یا درست کردن منحنی‌های ترازخسارت و یا هر دو اتفاق می‌افتد.

در این پژوهش همچنین از روش ارائه شده به وسیله‌ی Pening-Rowcell و همکاران (۲۰۰۵) برای برآورد تعداد تلفات انسانی احتمالی استفاده شده است. در این روش، برآوردی از تعداد تلفات و مجروحین برای یک رخداد مجزای سیلاب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$N(I) = N.(H_R.V_L).V_p \quad (4)$$

$N(I)$ تعداد تلفات و مجروحین، N تعداد جمعیت سیلاب دشت، H_R درجه خطر، V_L میزان آسیب‌پذیری منطقه و V_p درصدی از جمعیت در معرض خطر است که دچار مرگ یا جراحات شدید خواهند شد.

درجه خطر هر ناحیه را می‌توان به عمق سیلاب، سرعت جریان و میزان واریزه جریان وابسته دانست. تابعی به شکل زیر برای بیان درجه خطر سیلاب پیشنهاد شده است (Pening-Rowcell et al., 2005):

$$H_R = d(v+1.5) + DF \quad (5)$$

H_R درجه خطر، d عمق سیلاب، v سرعت جریان و DF فاکتور میزان واریزه جریان می‌باشد. مقدار DF برای احتمال زیاد وقوع جریان‌های واریزه‌ای ۲، برای احتمال متوسط ۱ و برای

$S.F_F$ ضرایب ایمنی در برابر واژگونی و لغزش سازه است. نیروها و ممان‌های محرک و مقاوم وارد بر هر سازه با توجه به ابعاد سازه با استفاده از آنالیز پایداری در برابر لغزش و واژگونی محاسبه می‌شوند. $y_{x,t}$ تابعی از $Q_{x,t}$ ، زمان، مکان و ترم‌های مشتقات جزئی است که به صورت ضمنی از حل معادلات دیفرانسیل جزئی سنت‌ونان به دست می‌آید. $H_{D_{k_{max}}}$ و $H_{D_{k_{min}}}$ به ترتیب کمینه و بیشینه ارتفاع سازه مخزن k ام و $H_{w_{min}}$ و $H_{w_{max}}$ به ترتیب کمینه و بیشینه ارتفاع دیوار سیل‌بند است. X_{IR} ، X_{im} ، $X_{warning}$ به ترتیب متغیرهای تصمیم برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، اقدامات آبخیزداری و سامانه هشدار سیل است.

در این مطالعه، مدل بهینه‌سازی NSGA-II برای استخراج جواب‌های بهینه پارتو بین دو هدف متضاد هزینه-های ساخت و خسارت وارد بر سامانه ناشی از سیلاب در منطقه مطالعه شده به کار رفت. NSGA-II مدل بهینه‌سازی چندهدفه نخبه‌گرای سریع بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک است که در سال ۲۰۰۰ به وسیله‌ی دب و همکاران ارائه شده است. این مدل در مسائل گوناگون بهینه‌سازی به وسیله‌ی محققین مختلف به کار رفته است.

۵- مطالعه موردی و روش پژوهش

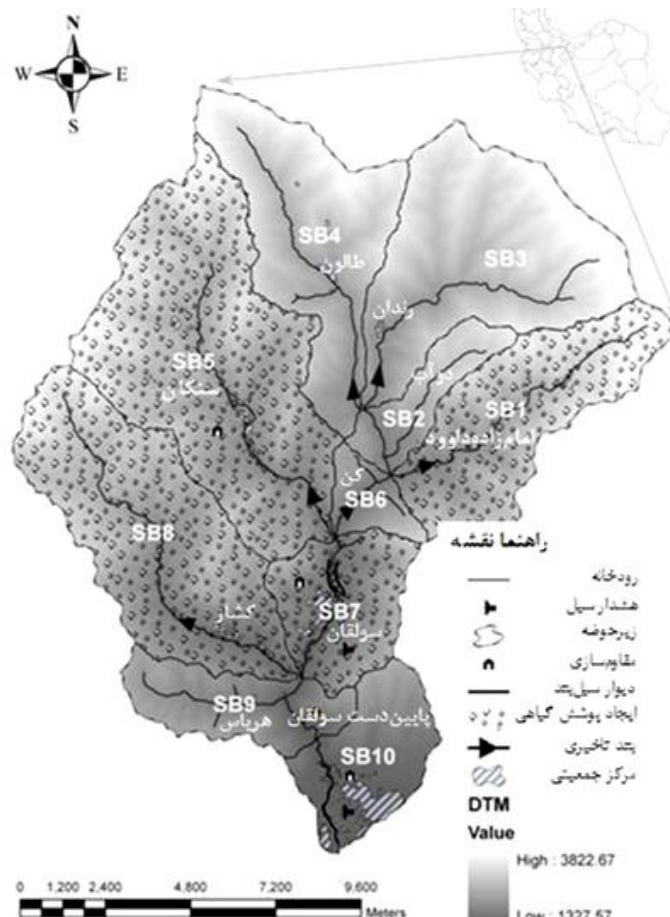
حوضه آبریز کن با مساحت 216 km^2 در شمال استان تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد (شکل ۱). در این حوضه، پوشش زمین بیشتر کوهستانی و مرتع بوده و در دره‌ها و مناطق کم ارتفاع، بیشتر باغ‌های میوه وجود دارد. مساحت نواحی مسکونی حوضه، برابر ۲۸۰ هکتار است. شکل ۱، زیرحوضه‌های حوضه آبریز کن و رودخانه‌های اصلی آن را نشان می‌دهد. براساس مطالعات انجام‌شده، بعضی از روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای کنترل سیلاب در این حوضه پیشنهاد و هزینه‌های آن‌ها برآورد شده

کرد (Pening-Rowcell et al., 2005). پارامتر V_p مجموع دو پارامتر افراد بسیار مسن (P1) و افرادی که به خاطر ناتوانی و بیماری در معرض خطر قرار دارند (P2) است (Rowcell et al., 2005). برای به دست آوردن P1 و P2 برای منطقه کن از اطلاعات مرکز آمار ایران استفاده شده است. با ضرب نرخ تلفات (FR) در تعداد مجموع تلفات و مجروحین، تعداد تلفات سیل به دست می آید. نرخ تلفات (FR) دو برابر درجه خطر (HR) در نظر گرفته می شود (Pening-Rowcell et al., 2005). به بیان دیگر:

$$FR = (2H_R) / 100 \quad (6)$$

$$C = FR \cdot N(I)$$

احتمال صفر، صفر است. با توجه به کوهستانی بودن منطقه کن و گنجایش بالای ایجاد جریان واریزه‌ای، ضریب DF برای این منطقه ۲ در نظر گرفته شد. پارامترهای v و d با توجه به نتایج مدل هیدرودینامیکی در هر بار اجرا تعیین می شود. جمعیت سیلاب دشت N، با توجه به مطالعات اجتماعی و تعداد منازل مسکونی دچار آب گرفتگی (برای هر حالت سیلاب در هر بار اجرای مدل هیدرودینامیکی تعیین می شوند) برآورد می شود. در گام بعد، میزان آسیب پذیری ناحیه (V_L) تعیین می گردد. میزان آسیب پذیری ناحیه به عواملی مانند وجود هشدار سیلاب، سرعت یورش سیلاب، طبیعت منطقه سیلابی و زمان وقوع سیلاب بستگی دارد. میزان آسیب پذیری هر ناحیه را می توان براساس عوامل گفته شده و به صورت عددی بین ۳ و ۹ بیان



شکل (۱) حوضه آبریز کن به همراه زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های اصلی آن (مؤسسه تحقیقات، ۱۳۹۰)

FR نرخ تلفات و C تعداد تلفات است. به این ترتیب با استفاده از روابط ۴ تا ۶، تعداد تلفات انسانی برای هر حالت سیلاب برآورد می‌شود. بهتر است گفته شود که هر روش سازه‌ای یا غیرسازه‌ای با تغییر یکی از پارامترهای رابطه ۴، بر تعداد تلفات انسانی سیلاب اثر می‌گذارد. برای نظر گرفتن تلفات انسانی در تابع هدف از نرخ دیه برای هر نفر استفاده شده است.

افزون بر در نظر گرفتن تلفات انسانی، در ارزیابی خسارات حوضه کن، سه نوع کاربری (۱) ساختمان‌های مسکونی؛ (۲) رستوران‌ها و (۳) باغات میوه در نظر گرفته شده است. در مطالعات انجام شده، منحنی‌های تراز-خسارت این کاربری‌ها برای منطقه کن استخراج شده است (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۹۰). همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد این منحنی‌ها، ورودی‌های مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی است.

اجرای مدل شبیه‌سازی و تعیین تراز آب در بازه‌های مختلف، خسارت وارد شده به کل حوضه به ازای هر کروموزوم (گزینه ترکیبی) به دست می‌آید. تابع هزینه (رابطه ۱) در هر کروموزوم از جمع هزینه تک‌تک گزینه‌ها در آن کروموزوم به دست می‌آید. بعد از کامل شدن محاسبات هزینه و خسارت برای همه‌ی کروموزوم‌ها، مجموعه جواب‌های غیرپست^۱ به وسیله‌ی الگوریتم بهینه‌سازی از میان آن‌ها استخراج می‌شود. این جواب‌ها برای تولید نسل جدیدی از کروموزوم‌ها به کار می‌رود و محاسبات بالا برای نسل جدید تا رسیدن به جواب‌های غیرپست جدید تکرار می‌شود. این روند محاسبات تا دستیابی به معیار همگرایی مدلی بهینه‌سازی ادامه می‌یابد. معیار همگرایی، بهبود نیافتن جواب‌ها پس از چند نسل پیاپی در نظر گرفته شده است.

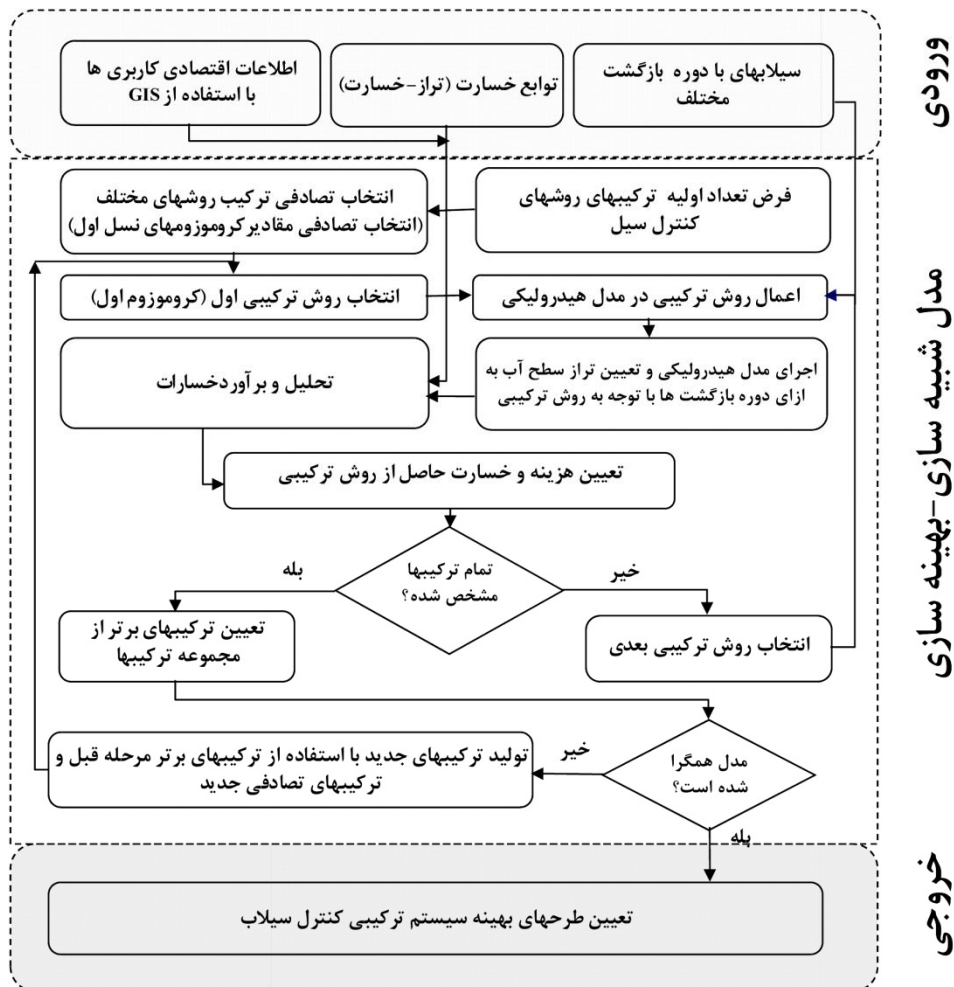
۵- نتایج و بحث

ترکیبات مختلف گزینه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای در منطقه مطالعه شده شامل موارد زیر است:

- مخازن تأخیری در پنج زیرحوضه امامزاده داوود، رندان، طالون، سنگان و کن در سه تراز ارتفاعی ۱۰متر، ۲۰متر و ۳۰متر.
- دیوار سیل‌بند در سه تراز طراحی بر اساس دوره بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله برای بخشی از روستای سولقان.
- ایجاد و تقویت پوشش گیاهی در چهار زیرحوضه امامزاده داوود، سنگان، سولقان و کشار (مساحت دارای توانایی ایجاد پوشش گیاهی و آسیب‌پذیری در این زیرحوضه‌ها بیشتر از دیگر زیرحوضه‌ها بوده است).
- مقاوم‌سازی در سه تراز طراحی بر اساس سیلاب با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال برای بازه‌های سنگان، سولقان و پایین دست آن.

۴- الگوریتم پیشنهادی

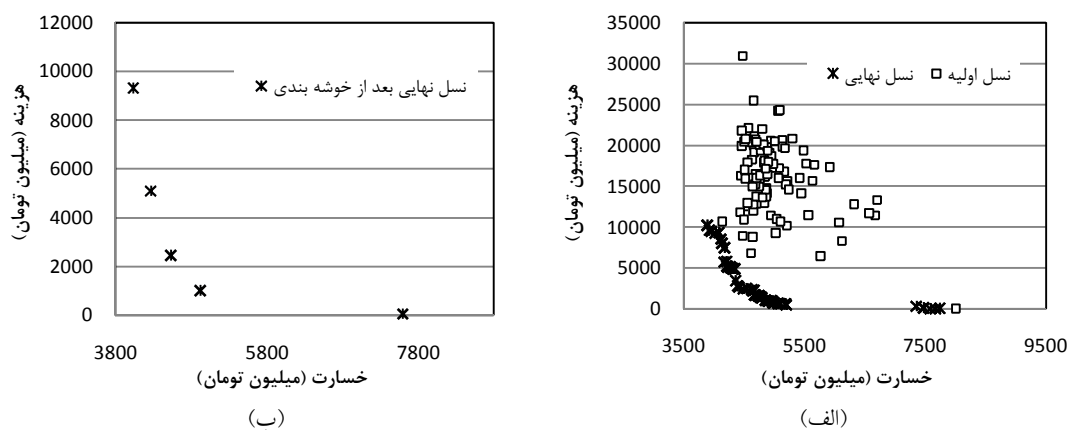
الگوریتم پیشنهاد شده بر تولید تصادفی ترکیبات مختلف گزینه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای استوار است. در این الگوریتم، هزینه هر گزینه مقابله با سیل، هیدروگراف‌های سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف، توابع تراز-خسارت و اطلاعات اقتصادی کاربری‌ها در سیلاب‌دشت، ورودی‌های مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی است. تابع هدف-خسارت (رابطه ۲) برای هر گزینه ترکیبی، با اجرای مدل شبیه‌سازی و تعیین تراز آب در بازه‌های مختلف و سرانجام تعیین خسارت کاربری‌ها با استفاده از منحنی‌های تراز-خسارت به دست می‌آید. شکل ۲ مراحل اجرای الگوریتم پیشنهاد شده را نشان می‌دهد. در این الگوریتم، همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، ابتدا تعدادی کروموزوم به عنوان جمعیت اولیه به صورت تصادفی، تولید و در مدل شبیه‌سازی تعریف می‌شوند. در حقیقت هر کروموزوم یک گزینه ترکیبی است. بعد از



شکل (۲) الگوریتم پیشنهادی در مدل شبیه سازی - بهینه سازی

مختلف سیلاب، اجرا و برای هر حالت ترکیب بهینه گزینه های سازه ای و غیرسازه ای استخراج شد. برای نمونه، هزینه ها و خسارات بالقوه برای نسل اول و نهایی الگوریتم ژنتیک برای حالت سیلاب ۱۰۰ ساله در شکل ۳-الف نشان داده شده است. هر نقطه در این شکل نشانگر یک ترکیب بهینه از گزینه های سازه ای و غیرسازه ای است. در حقیقت هر نقطه در مجموعه جواب های بهینه پارتو یک ترکیب بهینه است که هزینه ویژه دارد. پس تصمیم گیرنده می تواند ترکیب بهینه اقدامات تسکین سیلاب را برای هر سطح سرمایه گذاری تعیین کند.

• هشدار سیل برای منطقه سولقان و پایین دست آن (به خاطر بیشتر بودن زمان پیش هشدار و آسیب پذیری بیشتر این مناطق).
مقادیر پارامترهای مدل بهینه سازی NSGA-II پس از حساسیت سنجی: جمعیت اولیه ۲۵۰ کروموزوم، احتمال تزویج، ۰/۹ و احتمال جهش، ۱/n است که n تعداد نسل ها است. از آنجا که مدل به تغییرات دیگر پارامترها حساسیتی نشان نداد، از مقادیر پیش فرض آنها استفاده شد. تعداد نسل ها، ۱۰۰ نسل در نظر گرفته شد، ولی نتایج به دست آمده نشان داد که مدل قبل از رسیدن به نسل های نهایی همگرا می شود. سرانجام، مدل بهینه سازی برای حالت های



شکل (۳) الف- جوابهای نامغلوب در جمعیت اولیه و جمعیت نهایی، ب- جوابهای نامغلوب نسل نهایی بعد از خوشه بندی

منشاء می‌گیرد. بنابراین ذخیره سیلاب در بازه سنگان تأثیر زیادی بر خسارات پایین دست ندارد. همچنین نبود مخزن تأخیری SB6 (زیرحوضه کن) در ترکیبات بهینه جدول ۱ نشان می‌دهد ساخت این مخزن نیز توجهی ندارد و کنترل سیلاب در سرشاخه‌های بالادست آن از نظر اقتصادی و فنی برتری دارد. برای انتخاب طرح بهینه سازه‌ای و غیرسازه‌ای، تصمیم‌گیرنده ابتدا باید سیلاب طرح را انتخاب کند؛ سپس طرح بهینه با استفاده از منحنی تعامل هزینه- خسارت و بر اساس معیارهای تصمیم‌گیری که می‌تواند سطح سرمایه‌گذاری، آثار زیست‌محیطی طرح‌ها، محدودیت‌های اجتماعی و غیره باشد، انتخاب می‌شود.

۷- جمع بندی

در این مقاله، الگوریتمی برای تعیین طرح‌های بهینه سازه‌ای و غیرسازه‌ای بر اساس یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، ارائه شده است. مدل بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II به مدل هیدرودینامیکی MIKE11 متصل شد تا جواب‌های بهینه پارتو که نشان‌دهنده تعامل بین اهداف متضاد کمینه‌سازی خسارت و هزینه است، فراهم شود. مدل ارائه شده برای یک حوضه آبریز کوچک به عنوان مطالعه موردی به کار گرفته شد و طرح‌های بهینه برای حالت‌های

به خاطر تعداد زیاد جواب‌های بهینه پارتو، تعداد آن‌ها برای تصمیم‌گیری، با استفاده از یک روش خوشه‌بندی بر اساس فاصله اقلیدسی، کاهش داده شد. شکل ۳-ب جواب‌های نهایی را بعد از خوشه‌بندی برای حالت‌های مختلف سیلاب نشان می‌دهد. ترکیبات بهینه برای حالت‌های مختلف سیلاب در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول هزینه‌ها با در نظر گرفتن دوره بهره‌برداری ۵۰ سال و نرخ تورم ۵ درصد، به صورت سالیانه ارائه شده است. همچنین در این جدول، منظور از سود مورد انتظار، کاهش خسارت مورد انتظار سیلاب (ناشی از کاربرد سامانه ترکیبی کنترل سیلاب در سطح حوضه) نسبت به حالت طبیعی (بدون هیچ گزینه سازه‌ای و غیرسازه‌ای) است. خسارت مورد انتظار سالیانه با توجه به احتمال حالت‌های مختلف سیلاب و خسارت متناظر آن‌ها به دست آمده است. همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، برای همه‌ی ترکیبات بهینه به دست آمده، نسبت سود به هزینه (B/C) چشمگیر است و توجه اقتصادی دارد. بر اساس نتایج جدول، ساخت مخزن تأخیری زیرحوضه SB5 (زیرحوضه سنگان) در ترکیبات بهینه ظاهر نشده است که نشان‌دهنده نداشتن توجه فنی و اقتصادی این گزینه است؛ چرا که بار سیلاب ایجادکننده خسارت در بازه‌های پایین دست، از شاخه‌های امام‌زاده، رندان و طالون

دارایی‌ها) و هشدار سیل (برای کاهش تلفات جانی سیلاب) برای حوضه مورد نظر، مناسب است. با توجه به نتایج به دست آمده، گزینه‌های غیرسازه‌ای تقویت پوشش گیاهی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها برابر سیلاب، تقریباً در همه‌ی طرح‌های بهینه وجود دارد. اگر سطح سرمایه‌گذاری پایین باشد، انتخاب ترکیبی از این دو روش در اولویت قرار دارد. همه‌ی طرح‌های بهینه استخراج شده، نسبت سود به هزینه بالادارد و از نظر اقتصادی قابل توجیه است. یکی از دلایل بزرگ بودن این نسبت، در نظر گرفتن خطرتلفات انسانی افزون بر خسارات مستقیم سیلاب در الگوریتم پیشنهاد شده است.

گوناگون سیلاب تعیین شد. با کاربرد مدل ارائه شده می‌توان هزینه‌های سرمایه‌گذاری پروژه‌های کنترل سیلاب را تا چندین برابر کاهش داد و خسارات سیلاب را در پهنه‌های سیل‌گیر کمینه کرد. استفاده از مدل هیدرودینامیکی در ساختار مدل پیشنهاد شده، افزون بر ایجاد امکان مدل‌سازی هر یک از اقدامات کنترل سیلاب، ابزارهای انعطاف‌پذیر برای در نظر گرفتن اندرکنش این اقدامات در بازه‌های مختلف است. در طرح‌های بهینه استخراج شده برای منطقه مطالعه شده، گزینه دیوار سیل‌بند همراه گزینه هشدار سیل، پیشنهاد شده است که نشان می‌دهد عملکرد هم‌زمان دیوار سیل‌بند (برای کاهش خسارات وارد شده به

جدول (۱) ترکیبات بهینه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب تحت سناریوهای سیلاب با دوره‌های بازگشت مختلف

دوره بازگشت (سال)	شماره ترکیب	هزینه سالیانه، C (میلیون تومان)	سود مورد انتظار سالیانه، B (میلیون تومان)	B/C	بند تاخیری (SB1)	بند تاخیری (SB3)	بند تاخیری (SB4)	بند تاخیری (SB6)	بند تاخیری (SB5)	تغییر کاربری (SB1)	تغییر کاربری (SB5)	تغییر کاربری (SB7)	تغییر کاربری (SB8)	دیوار سیل بند (SB7)	مقاوم سازی (SB5)	مقاوم سازی (SB7)	هشدار سیل	
۵	(۱)	۴۵۸	۲۲۱۱	۵	H=10m	H=10m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	100 yr	✓	
	(۲)	۲۴۰	۲۵۰۴	۱۰	H=10m	H=10m	H=10m	-	-	-	-	-	-	-	-	100 yr	-	
	(۳)	۱	۳۹۸	۳۷۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(۴)	۱۲۵	۲۲۸۱	۱۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	✓	
	(۵)	۶	۵۲۹	۹۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰	(۱)	۳	۹۴	۳۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(۲)	۴۱۳	۲۵۵۶	۶	H=20m	H=10m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	200 yr	-	-	
	(۳)	۳۴	۱۹۵۷	۵۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	-	-	
	(۴)	۲۸۴	۲۴۶۳	۹	H=20m	H=10m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	100 yr	50 yr	-	
	(۵)	۱۲۹	۲۰۷۷	۱۶	H=10m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	-	-	
۲۵	(۱)	۴	۳۵۲	۸۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(۲)	۲۳۵	۲۵۸۷	۱۱	H=10m	H=10m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	-	-	-	
	(۳)	۵۳	۲۳۱۹	۴۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	100 yr	50 yr	-	
	(۴)	۳۷۶	۲۶۷۰	۷	H=10m	H=10m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	✓	
	(۵)	۴۳۵	۲۷۲۷	۶	H=20m	H=20m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	-	
۵۰	(۱)	۲۸۰	۲۱۰۳	۸	H=20m	H=10m	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	-	
	(۲)	۴۳	۲۰۱۰	۴۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200 yr	-	-	-	
	(۳)	۱۵۲	۲۱۶۳	۱۴	H=20m	-	H=20m	-	-	-	-	-	-	200 yr	-	-	-	
	(۴)	۴۷۰	۲۵۷۹	۶	H=20m	H=20m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	-	
	(۵)	۴	۱۷۶	۴۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	-	-	
۱۰۰	(۱)	۳	۷۰	۲۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	(۲)	۱۳۳	۲۱۸۱	۱۶	H=10m	-	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	✓	
	(۳)	۵۴	۱۹۸۹	۳۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200 yr	50 yr	-	-	
	(۴)	۲۸۰	۲۳۷۸	۹	H=20m	H=10m	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	-	-	
	(۵)	۵۰۹	۲۵۰۲	۵	H=20m	H=20m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	-	-	-	
۲۰۰	(۱)	۴۳۸	۲۴۲۹	۵/۵	H=20m	H=20m	H=10m	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	-	
	(۲)	۲۲۰	۲۲۲۰	۱۰	H=10m	-	-	-	-	-	-	-	-	50 yr	50 yr	50 yr	✓	
	(۳)	۵۲	۲۱۵۰	۴۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100 yr	50 yr	-	-	
	(۴)	۶	۳۲۸	۵۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	(۵)	۵۶۴	۲۶۴۱	۴/۷	H=10m	H=10m	H=10m	-	-	-	-	-	-	100 yr	100 yr	-	-	

۸- مراجع

- [5] Lund, J.R., (2002), "Floodplain planning with risk-Based optimization", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 128: 3(202).
- [6] Morin TL, Meier WL, and Nagaraj KS (1989) Dynamic programming for flood control planning: the optimalmix of adjustments to flood. In: Esogbue AO (ed) *Dynamic programming for optimal water resources systems analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp 286-306
- [7] Pening-Rowell, E., Floyd, P., Ramsbottom, D. and Surendran, S. (2005), "Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework". *Journal of Natural Hazard*, 36: 43-64.
- [8] WMO (2009), "Integrated flood management", concept paper, World Meteorological Organization, WMO-No. 1047, Switzerland.
- [۹] موسسه تحقیقات آب (۱۳۹۰) گزارشات فنی "پروژه مدیریت جامع سیلاب (IFM)، حوضه آبریز کن"
- [1] Ahmad, S.S. and Simonovic, S.B. (2011), "A three-dimensional fuzzy methodology for flood risk analysis", *Journal of Flood Risk Management*, DOI:10.1111/j.1753-318X. 2011. 01090.x
- [2] Correia FN, Sarvaiva MG, Silva FN, and Ramos I (1999) "Floodplain management in urban developing areas, Part I. Urban growth scenarios and land-use controls". *J Water Resour. Manage.* 13: 1-21. doi:10.1023/A:1008097403587
- [3] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meyarivan, T. (2000). "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II". KANGALRep. No. 200001.
- [4] Karamouz, M, Imani, M., Ahmadi, A. and Moridi, A. (2009), "Optimal flood management options with probabilistic optimization: a case study", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, Vol. 33, No. B1, pp 109-121

«Research Note»

Optimal Designs of Flood Mitigation Measures Considering Loss of Lives Using a Bi-Objective Genetic Algorithm

J. Yazdi¹, S.A.A. Salehi Neyshabouri^{2*}

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil and Env. Eng., Tarbiat Modares Uni., Tehran, Iran.

2- Professor, Faculty of Civil and Env. Eng. and Water Eng. Res. Inst., Tarbiat Modares Uni., Tehran, Iran.

salehi@modares.ac.ir

Abstract:

Using structural and nonstructural measures for flood damage reduction is a long-standing problem in water resources planning and management. In present study, an algorithm is presented to optimal design of flood mitigation measures in the watershed scale by simulation based optimization approach. To do so, the numerical model of MIKE-11 was used to calculate the risk of death and the physical damages of flood scenarios under different combinations of structural and non-structural flood mitigation measures. The number of death depends on the flood characteristics (the intensity of hazard) obtained by run of numerical model in each round, the vulnerability of population and the vulnerability of properties in flood-prone areas. Each of flood mitigation measures changes one of these three factors and affects on the number of death in flood events. As likewise, each measure may affect on physical damages by altering the magnitude of floods or vulnerability of land uses. In fact for a flood scenario, the physical damages in each combined option are computed using the change of geometry of rivers in model and its boundary conditions or modifying the damage-elevation curves or both. The numerical model was coupled with the NSGA-II multi-objective optimization model to provide the optimal Pareto front solutions considering two conflict objectives of minimizing the investment costs and the potential flood damages in the watershed. Finally, the presented model was applied for a small watershed in the center of Iran as a case study and the optimal trade-off solutions were calculated for different flood scenarios. Results showed by application of presented approach the investment costs may decrease several times and at the same time potential flood damages are minimized. Using a numerical model in the structure of proposed framework provides a flexible tool to consider the interaction of different measures in different reaches of watershed. For example model can dynamically predict in which rivers there is a need to build dam and what is the optimal height of dams in various branches to prevent the synchronizing the flood peaks of branches or detention dams with which measures must be applied to minimize the total cost and flood damages. For the study area, flood wall option just proposed by flood warning option in obtained optimal designs. This shows "flood wall" option to reduce damages on properties with "flood warning" option to reduce the loss of lives is an effective flood mitigation strategy for the study area. Also, if the investment level is low, the application of two non-structural measures of "waterproofing" and "watershed management measures" have a priority than the other measures for the study area. Using the obtained trade-offs, for each level of funding, decision makers can assign the optimal combined option considering the decision criteria.

Keywords: Flood, Risk, Loss of life, Structural, Non-structural, Optimization, Pareto