

## استفاده از مدل برنامه‌ریزی توافقی در تصمیم‌گیری بهینه مدیریت سیلاب

محمد ابراهیم بنی‌حبیب<sup>۱\*</sup> و نسترن چیت‌ساز<sup>۲</sup>

### چکیده

در این مقاله، برای مدیریت سیلاب در حوضه گرگان‌رود، از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره برنامه‌ریزی توافقی برای رتبه‌بندی گزینه‌های مدیریت سیلاب شامل حفظ شرایط طبیعی، بهره‌برداری از سد گلستان، احداث گوره، احداث کانال انحراف، سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل، بیمه سیل و گزینه ترکیبی سامانه پیش‌بینی و هشدار سیل با بیمه سیل، استفاده شده است. گزینه‌ها براساس ۱۱ معیار شامل تلفات جانی مورد انتظار، نرخ بازیابی، نرخ تدریج، خسارت مورد انتظار سالانه، احساس امنیت مردم، نرخ اشتغال‌زایی، مشارکت مردمی، حفظ و بهبود مناظر طبیعی، حفاظت از زیستگاه حیات‌وحش، حفاظت از کیفیت آب و امکان‌پذیری فنی گزینه‌ها، رتبه‌بندی شده‌اند. سپس نتایج رتبه‌بندی گزینه‌ها در مدل برنامه‌ریزی توافقی با نتایج رتبه‌بندی مدل وزن‌دهی ساده مقایسه شده است. نتایج نشان داد که مدل برنامه‌ریزی توافقی در مقایسه با مدل وزن‌دهی ساده به معیار فنی نرخ بازیابی و معیارهای اجتماعی تلفات جانی و احساس امنیت مهم‌تر بوده است. همچنین تحلیل حساسیت مدل‌ها که براساس تغییر وزن معیارها صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل برنامه‌ریزی توافقی حساسیت کمتری به تغییر وزن معیارها داشته و به دلیل در نظر گرفتن فاصله از حل ایده‌آل، بین معیارهای مورد بررسی تمایز ایجاد کرده است. در این مدل با افزایش مقدار پارامتر توافقی، میزان اهمیت فاصله از حالت ایده‌آل معیارهای اقتصادی، فنی و اجتماعی مهم‌تر هستند. در حالیکه مدل وزن‌دهی ساده با وجود حساس بودن نسبت به تغییر وزن معیارها، تمایز مشخصی بین معیارها ایجاد نمی‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل حساسیت، تصمیم‌گیری چندمعیاره، مدیریت سیلاب، مدل برنامه‌ریزی توافقی.

ارجاع: بنی‌حبیب م. ا. و چیت‌ساز ن. ۱۳۹۴. استفاده از مدل برنامه‌ریزی توافقی در تصمیم‌گیری بهینه مدیریت سیلاب. مجله پژوهش آب ایران. ۱۸: ۸۷-۷۹

۱- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

\* نویسنده مسئول: [banihabib@ut.ac.ir](mailto:banihabib@ut.ac.ir)

## مقدمه

استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با توجه به وجود سناریوهای مدیریتی و لزوم ارزیابی با معیارهای مختلف، برای تصمیم‌گیری بهینه ضروری است. تصمیم‌گیری در مسائل منابع آب به دلیل لزوم در نظر داشتن توأم عامل‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پیچیده بوده ولی استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند تا حدی از این پیچیدگی کم کند. در گذشته تصمیم‌گیری‌ها فقط مبتنی بر یک هدف اصلی (بیشینه نمودن نسبت سود به هزینه) انجام می‌شده، اما امروزه با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تمامی معیارهای کیفی، کمی و معیارهای متضاد را در کنار هم بررسی کرد (پکار و رماچندران، ۲۰۰۴). وانگ و همکاران (۲۰۰۵) از مدل‌های چندمعیاره برای بهینه‌سازی مخزن استفاده کرده و انواع توابع به کار برده شده در مدل بهینه‌سازی را مطرح کردند. یکی از پرکاربردترین مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مدل وزن‌دهی ساده ( $SAW^1$ ) است (افشاری و همکاران، ۲۰۱۰). این مدل توسط هوانگ و یون (۱۹۸۱) ارائه شده است. اساس این مدل جمع وزنی معیارهای هر گزینه است. چانگ و یه (۲۰۰۱) این مدل را با سایر مدل‌های تصمیم‌گیری مقایسه کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که به دلیل ساده بودن و داشتن نتایجی مشابه سایر مدل‌ها می‌تواند مدل مناسبی به شمار آید. مدل برنامه‌ریزی توافقی ( $CP^2$ ) که از دیگر مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است، توسط کوچران و زلنی (۱۹۷۳) ارائه شد. در این مدل، فاصله گزینه‌ها از جواب ایده‌ال تعیین می‌شود و گزینه بهینه، گزینه‌ای است که حداقل فاصله را نسبت به جواب ایده‌ال داشته باشد (آتوال و چارابری، ۲۰۱۲). از پژوهش‌های انجام شده در این مدل می‌توان پژوهش‌های بالستر و همکاران (۲۰۰۳)، پرز گلادیش و همکاران (۲۰۰۶) را نام برد که در زمینه مسائل اقتصادی هستند ولی نتیجه کار آن‌ها خیلی موفقیت‌آمیز نبوده و شاید به این دلیل باشد که این مدل با مسائل بهینه‌سازی اقتصادی وجوه مشترک ندارد. به همین دلیل، پژوهش‌های اخیر بیشتر در جهت مقایسه مدل‌های بهینه‌سازی مرسوم با مدل برنامه‌ریزی توافقی هستند. با توجه به وجود معیارهای مختلف فنی، اقتصادی،

اجتماعی و زیست‌محیطی مؤثر در انتخاب گزینه برتر مدیریت سیلاب، ارزیابی مدل‌های چندمعیاره تصمیم‌گیری مانند مدل برنامه‌ریزی توافقی در این زمینه می‌تواند مفید باشد. بنابراین توانایی آن بایستی بررسی شود. از آنجا که در پژوهش‌های گذشته، بررسی‌های کمی در زمینه مقایسه مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره برنامه‌ریزی توافقی و تعیین توانایی‌های این مدل در زمینه‌های مختلف فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی انجام شده است، در این مقاله گزینه‌های مدیریت سیلاب با مدل برنامه‌ریزی توافقی رتبه‌بندی شده و نتایج آن با مدل وزن‌دهی ساده که یکی از رایج‌ترین مدل‌ها مقایسه شد.

## مواد و روش‌ها

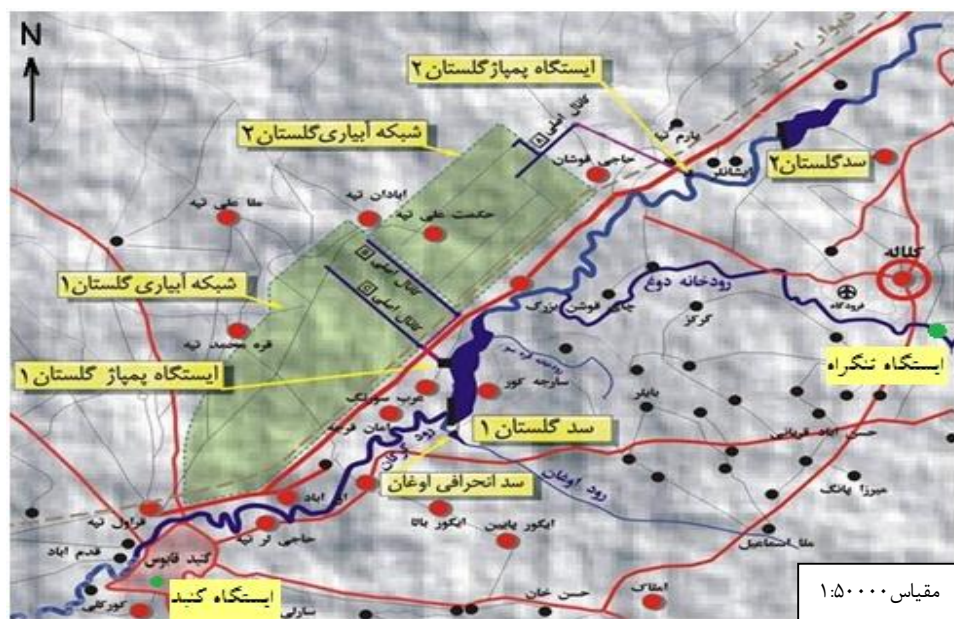
این پژوهش، گزینه‌های مدیریت سیلاب براساس معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برنامه‌ریزی توافقی و وزن‌دهی ساده برای کاهش خسارت سیل در بازه‌ای از رودخانه گرگان‌رود، در استان گلستان بررسی شده است. بازه مورد نظر از سد گلستان یک شروع شده و تا پایین‌دست شهر گنبد ادامه دارد که به صورت شکل ۱ است.

## گزینه‌های مدیریت سیلاب

گزینه‌های مدیریت سیلاب به دو دسته سازه‌ای و غیرسازه‌ای طبقه‌بندی می‌شود. گزینه‌هایی مانند استفاده از سدها و مخازن مهار سیلاب، کانال انحراف سیلاب، گورها و اصلاح مسیر و مقاطع رودخانه از دسته گزینه‌های سازه‌ای کاهش خسارت سیل محسوب می‌شود (کندزیس، ۲۰۰۱). گزینه‌های دیگری که مستقیم بر روی جریان سیل اثر نمی‌گذارند مانند سامانه پیش‌بینی و هشدارسیلاب، بیمه سیل و نظیر آن‌ها از دسته گزینه‌های غیرسازه‌ای محسوب می‌شوند. با توجه به شرایط فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی محدوده طرح گزینه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای زیر برای مدیریت سیل در بازه مورد مطالعه پیشنهاد شده‌اند (یزدان دوست و بزرگی، ۲۰۰۸).

1- Simple Additive Weighting

2- Compromise Programming



شکل ۱- محدوده حوضه آبریز گرگان رود

است. گزینه چهارم از کانال انحراف سیلاب به عمق ۳ متر و عرض ۱۰۰ متر و به موازات رودخانه در شمال محدوده طرح استفاده می‌کند. گزینه پنجم از سامانه پیش‌بینی و هشدار سیلاب برای کاهش خسارت سیل در محدوده مورد مطالعه استفاده می‌کند. در این گزینه تغییر فیزیکی در محدوده طرح ایجاد نشده و شرایط طبیعی آن حفظ می‌شود. گزینه ششم از بیمه سیل برای جبران خسارت سیل استفاده می‌کند که شرایط طبیعی محدوده طرح حفظ شده و فقط با پرداخت خسارت وارده به بیمه شدگان، نسبت به جبران خسارت سیلاب اقدام می‌شود و گزینه هفتم ترکیبی از گزینه‌های پنجم و ششم است.

#### معیارهای ارزیابی گزینه‌های مدیریت سیلاب

معیارهای مورد استفاده این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

این معیارها از نظر فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به چهار گروه و از جهت کمی و کیفی بودن به دو گروه تقسیم می‌شوند. معیارهای کمی شامل: خسارت مورد انتظار سالانه<sup>۱</sup> (EAD) و تلفات جانی مورد انتظار سالانه<sup>۲</sup> (EANC) و نرخ تدریج است. برآورد معیارهای خسارت و تعداد تلفات مورد انتظار سالانه به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) است (دبروین، ۲۰۰۵).

گزینه اول، (A۱) شرایط طبیعی، گزینه دوم (A۲)، استفاده از ظرفیت مهار سیلاب سد گلستان، گزینه سوم (A۳)، احداث گوره، گزینه چهارم (A۴)، احداث کانال انحراف، گزینه پنجم (A۵)، پیش‌بینی و هشدار سیلاب، گزینه ششم (A۶) استفاده از بیمه سیل و گزینه هفتم (A۷)، ترکیب گزینه‌های پنجم و ششم. گزینه‌های دوم تا چهارم سازه‌ای است و گزینه‌های پنجم تا هفتم غیرسازه‌ای هستند. گزینه اول برای مقایسه نتایج گزینه‌های دیگر با شرایط طبیعی رودخانه مطرح شده است. گزینه دوم بر استفاده از ظرفیت مهار سیلاب سد گلستان یک تأکید دارد. سد گلستان یک هم اکنون احداث شده و در این گزینه فرض بر این بوده که هنگام رخداد سیلاب سطح آب مخزن سد در تراز نرمال بوده و حجم ذخیره مازاد بر تراز نرمال، به‌عنوان حجم ذخیره سیلاب در روندیابی سیل استفاده می‌شود. پس هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری سد گلستان و نیز پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیلاب خروجی از آن در ارزیابی این گزینه استفاده شده است. گزینه سوم از گوره خاکی برای محدودسازی سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال استفاده می‌کند. ارتفاع گوره‌ها بر مبنای شبیه‌سازی یک بعدی جریان سیلاب در رودخانه بین ۱ تا ۳/۵ متر تعیین شده و مجموع طول گوره‌های مورد نیاز این گزینه، در طرفین رودخانه برابر با ۴۱۱۵۰ متر است. عرض تاج گوره ۵ متر و شیب شیروانی طرفین آن ۱ قائم و ۲ افقی طرح شده

1- Expected Annual Damage (EAD)

2- Expected Average Number of Casualties Per Year (EANC)

که در آن:

$$\Delta Q'_n = \left[ \frac{100(Q_n - Q_{\min})}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right] - \left[ \frac{100(Q_{n-1} - Q_{\min})}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right]$$

$$\Delta D'_n = \left[ \frac{100(D_n - D_{\min})}{D_{\max} - D_{\min}} \right] - \left[ \frac{100(D_{n-1} - D_{\min})}{D_{\max} - D_{\min}} \right]$$

در روابط (۱) تا (۳)،  $Q$  دبی (مترمکعب بر ثانیه)،  $Q_{\max}$  دبی با دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله،  $Q_{\min}$  بالاترین مقدار  $Q$  که به ازای آن  $D=0$  است،  $D$  خسارت نسبی به‌عنوان تابعی از  $Q$ ،  $D_{\max} = D(Q_{\max})$  و  $n$  رتبه دبی است (دبروین، ۲۰۰۵).

$$EAD = \frac{P(D=0)}{1/10000} \int PD(P) dp \quad (۱)$$

$$EANC = \frac{P(D=0)}{1/10000} \int PC(P) dp \quad (۲)$$

که در این روابط EAD میانگین خسارت مورد انتظار در سال،  $P$  احتمال رخداد سیلاب،  $D(p)$  خسارت مورد انتظار تابعی از احتمال رخداد سیلاب،  $C(p)$  تعداد تلفات مورد انتظار تابعی از احتمال رخداد سیلاب و EANC میانگین مورد انتظار قربانیان در سال است. برآورد نرخ تدریج به‌صورت رابطه (۳) است (دبروین، ۲۰۰۵).

$$\text{نرخ تدریج} = 1 - \sum_{n=1}^{n=N} \frac{|\Delta Q'_n - \Delta D'_n|}{200} \quad (۳)$$

جدول ۱- معیارهای ارزیابی گزینه‌های مدیریت سیلاب

معیار	گروه‌بندی معیار	معیار	توضیح
I۱	اقتصادی	خسارت مورد انتظار سالانه	میانگین خسارت مورد انتظار سالانه است که برای ارزیابی دامنه عکس‌العمل به کار می‌رود (دبروین، ۲۰۰۵).
I۲	فنی	نرخ بازبایی	نرخ بازگشت از وضعیت که آثار سیلاب در آن مشهود است به وضعیت عادی یا به وضعیت بهتر از شرایط قبل از وقوع سیل
I۳	فنی	تدریج	افزایش عکس‌العمل سیستم با افزایش دبی را نشان می‌دهد که بیانگر افزایش میزان خسارت با افزایش دبی اوج سیل است (دبروین، ۲۰۰۵).
I۴	کمی	اجتماعی	تلفات جانی مورد انتظار
I۵	اجتماعی	احساس امنیت مردم	میانگین تلفات انسانی مورد انتظار در سال است که برای ارزیابی دامنه عکس‌العمل به کار می‌رود (دبروین، ۲۰۰۵).
I۶	اجتماعی	نرخ اشتغال‌زایی	احساس امنیت مردم در اثر اجرای یک گزینه مدیریت سیلاب، که به پایداری اجتماعی یک منطقه کمک می‌کند.
I۷	اجتماعی	مشارکت مردمی	اشتغال یکی از عامل‌های مهم در رضایتمندی عمومی و پایداری اجتماع محسوب می‌شود. میزان مشارکت مردمی در اجرای یک گزینه نشانگر خوبی از رضایتمندی عمومی و پایداری اجتماعی است.
I۸	زیست‌محیطی	حفظ و بهبود مناظر طبیعی	حفظ و بهبود مناظر طبیعی در یک گزینه شاخصی است از پایداری زیست‌محیطی
I۹	کیفی	زیست‌محیطی	حفاظت از زیستگاه حیات‌وحش در یک گزینه نقش آن را در توسعه پایدار زیست‌محیطی ارزیابی می‌کند.
I۱۰	زیست‌محیطی	حفاظت از زیستگاه حیات‌وحش	حفاظت از کیفیت آب در مقابل آلاینده‌ها، به بهبود منابع آب و محیط‌زیست کمک می‌کند.
I۱۱	فنی	حفاظت از کیفیت آب امکان‌پذیری فنی و سرعت اجرا	محدودیت‌های مالی و تکنولوژی در جوامع در حال توسعه بر امکان‌پذیری فنی و سرعت اجرای گزینه اثر گذاشته و گزینه‌ها را در امکان‌پذیری اقتصادی و رضایتمندی عمومی متفاوت می‌کند.

### مدل وزن‌دهی ساده

در این مدل امتیاز گزینه‌ها از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (افشاری و همکاران، ۲۰۱۰ و آتوال و چاکرابری، ۲۰۱۲)

$$A^* = \{A_j | \max_i \sum_{j=1}^m W_j r_{ij}\} \quad (۴)$$

که در آن  $r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\max_i \{X_{ij}\}}$  درایه‌های ماتریس بی‌بعد شده،  $X_{ij}$  عملکرد گزینه  $i$  در معیار  $j$  و  $W_j$  وزن معیار  $j$  است.

## مدل برنامه‌ریزی توافقی

مدل برنامه‌ریزی توافقی بر مبنای فاصله از حالت ایده‌آل، گزینه‌ها را رتبه‌بندی می‌کند. جواب ایده‌آل  $f_j^*$  برای معیارها به صورت  $f_j^* = \max_i f_{ij}$  و جواب ضدایده‌آل  $f_j^- = \min_i f_{ij}$  به صورت  $f_j^- = \min_i f_{ij}$  است. برای تعیین گزینه برتر، رتبه گزینه‌ها براساس ترتیب صعودی  $L_p(A_j)$  مطابق رابطه (۵) تعیین می‌شود:

$$L_p(A_j) = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \mu_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right)^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (5)$$

در این رابطه  $L_p(A_j)$  فاصله از جواب ایده‌آل است. کسر  $(f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)$  نرخ فاصله از حالت ایده‌آل معیار  $\mu_j$  و وزن معیار  $\mu_j$  است. پارامتر  $P$  از ۱ تا بی‌نهایت تغییر می‌کند که به نظر تصمیم‌گیرنده بستگی دارد. به ازای  $P=1$  مقدار فاصله از حالت ایده‌آل برابر با میانگین نرخ فواصل از حالت ایده‌آل برای تمام معیارها است و با افزایش آن، میزان اهمیت به معیارهایی که مقادیر بزرگتری در فاصله از حالت ایده‌آل دارند بیشتر می‌شود، به طوری که برای  $P=\infty$  فقط معیاری که بزرگترین نرخ فاصله از حالت ایده‌آل را دارد در محاسبات وارد می‌شود، در نتیجه رابطه ۵ به رابطه ۶ تبدیل خواهد شد:

$$L_p(A_j) = \max \left[ \mu_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (6)$$

## تحلیل حساسیت

برای تحلیل حساسیت مدل با تغییر در وزن معیارها، وزن هر یک از معیارها را به مقادیر حداکثر و حداقل ممکن آن معیار رسانده و تغییرات رتبه‌بندی‌ها بررسی شده است. وزن‌های به کار رفته در مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، وزن نسبی است و مجموع وزن‌ها برابر یک است. بنابراین با تغییر در وزن هر معیار به حداکثر و حداقل مقدار آن، وزن سایر معیارها از رابطه (۷) پیروی کرده تا مجموع وزن‌ها برابر یک شود.

$$W_j' = \frac{1 - W_i'}{1 - W_i} \times W_j \quad (7)$$

که در آن  $W_i'$  حداکثر (حداقل) مقدار معیار  $W_i$ ، وزن قبلی معیار  $W_j$ ، وزن قبلی معیار  $W_j'$  و  $W_j'$  وزن جدید معیار  $W_j$  است.

## نتایج و بحث

در این مقاله وزن معیارها و امتیاز هر گزینه در برآورده کردن معیارها (ماتریس تصمیم)، براساس نظرخواهی از سی نفر از متخصصین و کارشناسان آب منطقه‌ای استان گلستان به دست آمد که به صورت جدول ۲ است. نتایج حاصل از رتبه‌بندی مدل برنامه‌ریزی توافقی به ازای مقادیر مختلف پارامتر  $P$  و مدل وزن‌دهی ساده در جدول ۳ آورده شده است. تغییرات رتبه‌بندی به ازای مقادیر مختلف  $P$  به صورت جدول ۴ آورده شده است. مقادیر  $(f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)$  برابر ضرب نرخ فاصله از حالت ایده‌آل معیارها در وزن معیار است. ستون آخر جدول ۴ مقادیر فاصله از حالت ایده‌آل گزینه‌ها  $(L_p(A_j))$ ، به ازای مقادیر مختلف  $P$  است. تغییرات رتبه‌بندی به طوری است که با افزایش پارامتر  $P$  از ۱ به ۲، رتبه گزینه سد در مقابل گزینه کانال و همچنین گزینه گوره در مقابل گزینه بیمه سیل برتری یافته‌اند. زیرا همان‌طور که گفته شد، به ازای  $P=1$  تمام مقادیر فاصله از حالت ایده‌آل معیارها در هر گزینه میانگین‌گیری شده اما با افزایش مقدار پارامتر  $P$  به ۲ و بی‌نهایت، میزان اهمیت به معیارهایی که فاصله از حالت ایده‌آل آن‌ها بزرگتر است بیشتر شده است. بنابراین به ازای  $P=2$  در گزینه سد فاصله از حالت ایده‌آل معیارهای  $I_2$  نرخ بازیابی و  $I_6$  خسارت سالانه و برای گزینه کانال معیارهای  $I_2$  نرخ بازیابی و  $I_5$  احساس امنیت اهمیت بیشتری در جواب نهایی نسبت به سایر معیارها داشته‌اند.

همچنین با توجه به وزن این معیارها در جدول ۲، وزن معیارهای احساس امنیت (۰/۱۷۹) و نرخ بازیابی (۰/۱) بیشتر از معیار خسارت سالانه (۰/۰۹) است و گزینه سد در معیارهای احساس امنیت و نرخ بازیابی امتیاز بیشتری نسبت به کانال داشته، بنابراین برتری یافتن سد به کانال در روش برنامه‌ریزی توافقی قابل توجیه است. همچنین از مقایسه گوره و بیمه سیل مشابه مورد قبل، نتیجه می‌گیریم که معیارهای تلفات جانی و احساس امنیت مهم‌تر شده و گزینه گوره امتیاز بالاتری داشته و رتبه آن

این سه گزینه در برآورده کردن این معیارها به صورت گزینه هشدارسیل، سد و کانال بوده است. برای گزینه‌های بیمه سیل و گوره نیز معیار تلفات جانی مهم‌تر شده که گزینه گوره امتیاز بالاتری از گزینه بیمه سیل داشته است. جهت تحلیل حساسیت مدل‌ها، حداقل و حداکثر مقدار برای وزن معیارهای مطرح شده در نظرسنجی‌ها، به صورت جدول ۵ به دست آمده است.

معیارهایی که تغییرات وزن آن‌ها باعث ایجاد تغییرات در رتبه‌بندی شده‌اند به صورت جدول ۶ آورده شده است. با توجه به جدول ۶ مدل وزندهی ساده نسبت به تغییر وزن در بیشتر معیارها حساس بوده و در میزان حساسیت‌پذیری به تغییر وزن معیارها، تفکیکی برای معیارهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قائل نشده است. مدل برنامه‌ریزی توافقی تغییرات در رتبه‌بندی به ازای پارامتر  $P=\infty$  حساسیت بیشتری نسبت به سایر مقادیر پارامتر داشته، بنابراین از بیان نتایج تحلیل حساسیت سایر مقادیر پارامتر  $P$  در این مقاله صرف‌نظر شده است. با توجه به تغییرات رتبه‌بندی مدل برنامه‌ریزی توافقی بر طبق جدول ۶ آورده، معیارهای فنی انعطاف‌پذیری، نرخ بازیابی و سرعت اجرا، معیار اقتصادی خسارت سالانه، معیارهای اجتماعی اشتغال‌زایی و معیار زیست‌محیطی کیفیت آب سبب تغییر در رتبه‌بندی این مدل شده‌اند.

ارتقا یافته است. در این جدول با مقایسه رتبه‌بندی به ازای  $P=2$  و  $P=\infty$ ، رتبه گزینه هشدارسیل ارتقا یافته و هم‌تراز با گزینه سامانه هشدار توأم با بیمه سیل شده و گزینه شرایط طبیعی نیز ارتقا یافته و هم‌تراز با گزینه بیمه شده است. در هر دو گزینه هشدارسیل و سامانه هشدار توأم با بیمه سیل به ازای  $P=\infty$ ، فقط فاصله از حالت ایده‌ل معیار  $I_6$  (خسارت سالانه) در تعیین جواب نهایی فاصله از حالت ایده‌ل گزینه نقش داشته که هر دو گزینه یک امتیاز را کسب کرده‌اند و هم‌رتبه بودن منطقی است. در گزینه‌های شرایط طبیعی و بیمه سیل معیار تلفات جانی اهمیت بیشتری داشته که به دلیل یکسان بودن امتیاز هر دو گزینه رتبه آن‌ها نیز یکسان شده است. در مقایسه مدل وزندهی ساده با مدل برنامه‌ریزی توافقی بر طبق جدول ۳، رتبه بندی مدل وزندهی ساده شباهت بیشتری به مدل توافقی به ازای پارامتر  $P=1$  داشته ولی با افزایش آن به  $P=2$  اختلاف رتبه‌بندی افزایش یافته است، که به دلیل تغییر در میزان اهمیت به فاصله از حالت ایده‌آل بوده است.

از مقدار  $P=2$  به بعد مدل برنامه‌ریزی توافقی، گزینه کانال را بعد از گزینه‌های هشدارسیل و سد و گزینه بیمه سیل را بعد از گزینه گوره قرار داده است. در فاصله از حالت ایده‌آل گزینه‌های کانال هشدار سیل و سد، معیارهای احساس امنیت و نرخ بازیابی مهم‌تر شده که ترتیب امتیاز

جدول ۲- مقادیر ماتریس تصمیم و وزن معیارها

معیارها	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	W
I1	11792	17767	12574	2865	12083	11792	12083	0.09
I2	5/7	6	5/7	5/7	6/3	6/7	6/7	0.11
I3	0.183	0.18	0.173	0.194	0.186	0.183	0.183	0.05
I4	4/4	1/9	3.8	2/2	2	4/4	2	0.31
I5	1	4	3	3/5	4	2/5	5	0.175
I6	1	0.16	0.19	5/8	0.14	1	0.14	0.03
I7	2	3	3	3	3/5	2/5	4	0.05
I8	3	5	1	2	4	3	4	0.02
I9	4	2	2	2	4	4	4	0.065
I10	1	5	2/8	3	2	2	2	0.07
I11	4	2	3	2/5	4	3/5	3	0.03

جدول ۳- نتایج مدل‌های وزن‌دهی ساده و برنامه‌ریزی توافقی

گزینه‌ها	رتبه مدل برنامه‌ریزی توافقی						رتبه مدل وزن‌دهی ساده
	p=۱	p=۲	p=۵	p=۱۰	p=۲۰	p=∞	
A۱	۷	۷	۷	۷	۶	۵	
A۲	۴	۳	۳	۳	۳	۲	
A۳	۶	۵	۵	۵	۵	۴	
A۴	۳	۴	۴	۴	۴	۳	
A۵	۲	۲	۲	۲	۲	۱	
A۶	۵	۶	۶	۶	۶	۵	
A۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱	

جدول ۴- مقادیر نرخ فاصله از حالت ایده‌آل معیارها و گزینه‌ها

پارامتر P	گزینه	مقادیر حاصل از ضرب نرخ فاصله از حالت ایده‌آل در وزن معیارها											$L_p(A_j)$
		I۱	I۲	I۳	I۴	I۵	I۶	I۷	I۸	I۹	I۱۰	I۱۱	
P=۱	A۱	۰/۰۵۳	۰/۱	۰/۰۲۸	۰/۳۰۸	۰/۱۷۹	۰/۰۲۶	۰/۰۴۹	۰/۰۱۱	۰	۰/۰۷۴	۰	۰/۸۳
	A۲	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۳۶	۰	۰/۰۴۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴	۰	۰/۰۶۴	۰	۰/۰۲۹	۰/۳۸
	A۳	۰/۰۵۸	۰/۱	۰/۰۵۴	۰/۰۲۳	۰/۰۸۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۶۴	۰/۰۴۰	۰/۰۱	۰/۷۳
	A۴	۰	۰/۱	۰	۰/۰۳۶	۰/۰۶۷	۰	۰/۰۲۴	۰/۰۱۷	۰/۰۶۴	۰/۰۳۷	۰/۰۲۱	۰/۳۶۸
	A۵	۰/۰۵۵	۰/۰۴	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۴	۰/۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۵۵	۰	۰/۲۷۶
	A۶	۰/۰۵۳	۰	۰/۰۲۸	۰/۳۰۸	۰/۱۱۱	۰/۰۲۶	۰/۰۳۶	۰/۰۱۱	۰	۰/۰۵۵	۰/۰۰۷	۰/۶۳۹
	A۷	۰/۰۵۵	۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱۲	۰	۰/۰۳	۰	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۵۵	۰/۰۱۴	۰/۲۰۲
P=۲	A۱	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۰۸	۰/۰۹۴	۰/۰۳۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲	۰	۰	۰/۰۰۵	۰	۰/۳۸۶
	A۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۶	۰	۰/۰۰۴	۰	۰/۰۰۰۸	۰/۱۵
	A۳	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۵۴	۰/۰۰۸	۰	۰	۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰	۰/۲۹۴
	A۴	۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰	۰	۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰	۰/۱۵
	A۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰	۰	۰/۰۰۲	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۳	۰	۰/۱۰۶
	A۶	۰/۰۰۲	۰	۰	۰/۰۹۴	۰/۰۱۲	۰	۰/۰۰۱	۰	۰	۰/۰۰۳	۰	۰/۳۴۱
	A۷	۰/۰۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۳	۰	۰/۰۹
P=∞	A۱	۰/۰۵۳	۰/۱	۰/۰۲۸	۰/۳۰۸	۰/۱۷۹	۰/۰۲۶	۰/۰۴۹	۰/۰۱۱	۰	۰/۰۷۴	۰	۰/۳۰۸
	A۲	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۳۶	۰	۰/۰۴۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۴	۰	۰/۰۶۴	۰	۰/۰۲۹	۰/۰۹
	A۳	۰/۰۵۸	۰/۱	۰/۰۵۴	۰/۲۳۴	۰/۰۸۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۶۴	۰/۰۴	۰/۰۱۴	۰/۲۳۴
	A۴	۰	۰/۱	۰	۰/۰۳۶	۰/۰۶۷	۰	۰/۰۲۴	۰/۰۱۷	۰/۰۶۴	۰/۰۳۷	۰/۰۲۱	۰/۱
	A۵	۰/۰۵۵	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۴۴	۰/۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۵۵	۰	۰/۰۵۵
	A۶	۰/۰۵۳	۰	۰/۰۲۸	۰/۳۰۸	۰/۱۱۱	۰/۰۲۶	۰/۰۳۶	۰/۰۱۱	۰	۰/۰۵۵	۰/۰۰۷	۰/۳۰۸
	A۷	۰/۰۵۵	۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱۲	۰	۰/۰۳	۰	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۵۵	۰/۰۱۴	۰/۰۵۵

جدول ۵- مقادیر حداقل و حداکثر مقدار برای وزن معیارها

معیارها	حداکثر مقدار وزن معیار	حداقل مقدار وزن معیار
I۱	۰/۱۸	۰/۰۲۱
I۲	۰/۱۹	۰/۰۲۳
I۳	۰/۱۶	۰/۰۲۱
I۴	۰/۳۶	۰/۱۱
I۵	۰/۳	۰/۱
I۶	۰/۱	۰/۰۱۲
I۷	۰/۱۹	۰/۰۱۲
I۸	۰/۰۸	۰/۰۱۳
I۹	۰/۱۹	۰/۰۲
I۱۰	۰/۱۵	۰/۰۲
I۱۱	۰/۱	۰/۰۱۲

جدول ۶- تغییرات رتبه‌بندی مدل برنامه‌ریزی توافقی براساس تغییر وزن معیارها

رتبه‌بندی مدل برنامه‌ریزی توافقی							
رتبه‌بندی مدل برنامه‌ریزی توافقی	رتبه گزینه	رتبه گزینه	رتبه گزینه	رتبه گزینه	رتبه گزینه	رتبه گزینه	رتبه گزینه
تغییر در وزن معیارها	A <sub>۱</sub>	A <sub>۲</sub>	A <sub>۳</sub>	A <sub>۴</sub>	A <sub>۵</sub>	A <sub>۶</sub>	A <sub>۷</sub>
بدون تغییر وزن معیار	۵	۲	۴	۳	۱	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۱</sub>	۵	۳	۴	۱	۲	۵	۲
حداکثر وزن I <sub>۲</sub>	۶	۳	۵	۴	۲	۷	۱
حداقل وزن I <sub>۲</sub>	۵	۳	۴	۲	۱	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۳</sub>	۶	۴	۵	۳	۱	۷	۲
حداکثر وزن I <sub>۶</sub>	۵	۲	۴	۱	۳	۵	۳
حداکثر وزن I <sub>۱۰</sub>	۵	۱	۴	۲	۳	۵	۳
حداکثر وزن I <sub>۱۱</sub>	۵	۳	۴	۲	۱	۵	۱
رتبه‌بندی مدل وزن‌دهی ساده							
بدون تغییر وزن معیار	۷	۴	۶	۲	۳	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۱</sub>	۷	۴	۶	۱	۳	۵	۲
حداقل وزن I <sub>۱</sub>	۷	۲	۶	۴	۳	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۲</sub>	۷	۴	۶	۳	۲	۵	۱
حداقل وزن I <sub>۲</sub>	۷	۳	۵	۲	۴	۶	۱
حداقل وزن I <sub>۳</sub>	۷	۳	۶	۲	۴	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۴</sub>	۷	۲	۶	۴	۳	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۵</sub>	۷	۳	۵	۴	۲	۶	۱
حداکثر وزن I <sub>۶</sub>	۷	۳	۶	۱	۴	۵	۲
حداقل وزن I <sub>۶</sub>	۷	۳	۶	۴	۲	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۷</sub>	۷	۴	۵	۳	۲	۶	۱
حداقل وزن I <sub>۷</sub>	۷	۳	۶	۲	۴	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۸</sub>	۷	۲	۶	۴	۳	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۹</sub>	۶	۴	۷	۳	۲	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۱۰</sub>	۷	۱	۵	۳	۴	۶	۲
حداقل وزن I <sub>۱۰</sub>	۷	۴	۶	۳	۲	۵	۱
حداکثر وزن I <sub>۱۱</sub>	۷	۴	۶	۳	۲	۵	۱
حداقل وزن I <sub>۱۱</sub>	۷	۳	۶	۲	۴	۵	۱

### نتیجه‌گیری

توأم با بیمه سیل و سیستم هشدارسیلاب را در رتبه اول قرار داده است. با تغییر در مقدار پارامتر P میزان اهمیت به مقادیر فاصله از حالت ایده‌ال معیارها تغییر کرده و رتبه‌بندی نیز تغییر یافته است. در این پژوهش با افزایش پارامتر P از ۱ به ۲، میزان اهمیت به معیارهای نرخ بازیابی و احساس امنیت بیشتر شده که سبب ارتقا رتبه گزینه سد و گوره شده است. همچنین با مقایسه رتبه‌بندی به ازای  $P=2$  و  $P=\infty$ ، رتبه گزینه هشدارسیل هم‌تراز با گزینه سامانه هشدار توأم با بیمه سیل شده و گزینه شرایط طبیعی و هم‌تراز با گزینه گوره شده است. این تغییرات نیز به دلیل اهمیت بالای معیارهای خسارت سالانه و تلفات جانی بوده است.

در این مقاله هفت گزینه مدیریت سیلاب در حوضه آبخیز گرگان‌رود بررسی شد و با مدل‌های برنامه‌ریزی توافقی و وزن‌دهی ساده اولویت‌بندی شد. در هر دو مدل کسب پایین‌ترین رتبه توسط گزینه شرایط طبیعی نشان دهنده تأکید برانجام پروژه مدیریت سیلاب است. رتبه‌بندی مدل برنامه‌ریزی توافقی براساس نزدیکترین گزینه به حالت ایده‌ال است و علاوه بر در نظرگیری وزن معیارها و امتیاز گزینه‌ها، فاصله معیارهای هر گزینه از حالت ایده‌ال را نیز مبنای رتبه‌بندی قرار داده است. مدل برنامه‌ریزی توافقی با افزایش حساسیت به حداکثر انحراف از حالت ایده‌ال در محاسبات، گزینه‌های غیرسازه‌ای سامانه هشدارسیلاب



5. Cochrane James L. and Milan Z. 1973. Multiple criteria decision making. University of South Carolina Press. 195 p.
6. De Bruijn K. M. 2005. Resilience and flood risk management, A systems approach applied to lowland rivers. 216 p.
7. Hwang C. L. and Yoon K. 1981. Multiple Attribute Decision Making Method and Applications. A State-of-the-Art Survey. Springer, Verlag, New York. 355 p.
8. Kundzewicz Zbigniew W. 2002. Non-structural flood protection and sustainability. Water International. 27(1): 3-13.
9. P'erez-Gladish B. Jones D. F. Tamiz M. and Bilbao-Terol, A. 2006. An interactive three-stage model for mutual funds portfolio selection. Omega. 35(1): 75-88.
10. Pohekar S. D. and Ramachandran M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning A review. Renew Sustain Energy. 8(1): 365-381.
11. Wang Y. C. Yoshitani J. and Fukami K. 2005. Stochastic multi-objective optimization of reservoirs in parallel. Hydrological Processes. 19(18): 3551-3567.
12. Yazdandoost F. and Bozorgy B. 2008. Flood risk management strategies using multi-criteria analysis. Processes of the Inst of Civil Engineering Water Management. 161(5): 261-266.

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که در مدل برنامه‌ریزی توافقی با افزایش مقدار پارامتر  $P$  به ترتیب معیارهای نرخ بازیابی، خسارت سالانه، احساس امنیت و تلفات جانی مهم‌تر شده که معیارهای اقتصادی، فنی و اجتماعی بوده‌اند.

مدل وزندهی ساده در رتبه‌بندی نسبت به روش‌های ساده‌ای و غیرساده‌ای برتری قائل نشده و رتبه‌بندی تنها براساس وزن اختصاص داده شده به هر معیار بوده است. با توجه به تغییرات رتبه‌بندی این دو مدل نتیجه گرفته شد که مدل برنامه‌ریزی توافقی در مقابل مدل وزندهی ساده به معیار فنی بازیابی و معیارهای اجتماعی تلفات جانی و احساس امنیت اهمیت بیشتری داده است. مدل توافقی در تحلیل حساسیت نسبت به تغییر وزن معیارها، در مقایسه با مدل وزندهی ساده حساسیت کمتری داشته است. این مدل به معیارهای اجتماعی، فنی و اقتصادی اهمیت بیشتری داده و نسبت به معیارهای اقتصادی و فنی حساسیت بالایی داشته است و به معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی حساسیتی نشان نداده است. بنابراین مدل برنامه‌ریزی توافقی به دلیل اهمیت دادن به معیارهای اجتماعی و حساسیت کم به تغییر وزن این معیارها، نتایج خوبی ارائه داده است. این مدل نسبت به معیارهای اقتصادی حساسیت بالایی داشته و مطابق با نتایج سایر پژوهش‌های انجام شده، برای بررسی مسائلی که معیارهای اقتصادی مهم‌تر هستند پیشنهاد نمی‌شود.

#### منابع

1. Afshari A. Mojahed M. and Yusuff R. M. 2010. Simple Additive Weighting approach to Personnel Selection problem. International Journal of Innovation Management and Technology. 1(5): 511-515.
2. Athawale V. M. and Chakraborty S. 2012. A comparative study on the ranking performance of some multi-criteria decision-making methods for industrial robot selection. International Journal of Industrial Engineering. 2(4): 831-850.
3. Ballester E. Anton J. M. and Bielza C. 2003. Compromise-based approach to road project selection in Madrid metropolitan area. J Opns Res Soc Japan. 46(1): 99-122.
4. Chang Y. H. and Yeh C. H. 2001. Evaluating airline competitiveness using multi-attribute decision making. Omega. 29(5): 405-415.

