شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در تخصیص بهینه منابع آب حوضه‌ای با احتساب معیارهای کارایی عملکرد و عدالت

شیما نبی‌نژاد [۱] سید جمشید موسوی [۲]

(دریافت ۹۰/۲/۱ پذیرش ۹۰/۹/۳۰)

چکیده

در این مطالعه با استفاده از تلفیق الگوریتم بهینه سازی PSO و مدل تخصیص منابع آب MODSIM، رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای مدلسازی مسئله تخصیص منابع آب حوضه‌ای توسعه داده شد. مدل پیشنهادی قادر به ارائه جواب برای یک مسئله بهره‌برداری و تخصیص آب حوضه‌ای، با احتساب معیارهای کارایی (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) و عدالت در تخصیص آب، از دسته شاخصهای پایداری، مستقیماً در تابع هدف مدل است. کاربرد این مدل در مسئله تخصیص منابع آب حوضه رودخانه اترک ارزیابی شد. مدل چند هدفه پیشنهادی به دسته جوابهای مناسب از منظر تمامی معیارهای کارایی عملکرد و عدالت، با تسامح و کاهش نسبتاً ناچیز در بهترین مقادیر ممکن از هر معیار در شرایط عدم توجه به دیگر معیارها، نائل شد.

واژه‌های کلیدی: تخصیص آب، حوضه رودخانه، شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، معیارهای کارایی

Simulation-optimization for Basin-wide Optimum Water Allocation Considering System's Performance and Equity Measures

Shima Nabi Nejad [1] *Seyed Jamshid Mousavi* [2]

(Received Apr. 20, 2011 Accepted Dec. 20, 2011)

Abstract

This paper presents a simulation-optimization model integrating MODSIM river basin model and Particle Swarm Optimization algorithm for basin-scale optimal water allocation considering system's performance and equity indexes. The proposed model considers reliability, resilience, vulnerability and equity indexes in water supply and allocation directly in its objective function through which the trade-off between different indexes and their influence on water allocation results can be assessed. The model has been applied in Atrak River Basin water allocation problem as a real case study, where there are serious competition and conflicts between upstream and downstream provinces in using the basin water resources. The model has been capable of presenting good solutions in terms of all objectives compared to the best possible values obtained for each objective when ignoring other objectives.

Keywords: Water Allocation, River Basin, Simulation-Optimization, Performance Indexes.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران منابع آب، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
۲- دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
(نویسنده مسئول) (۰۲۱) ۷۴۵۱۵۰۶ jmosavi@iust.ac.ir

1. M.Sc. Student of Water Resource Eng., Dept. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Tech., Tehran
2. Assoc. Prof. of Civil and Environmental Eng., Amirkabir University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 7451506 jmosavi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

رشد سریع جمعیت، صنعتی‌شدن جوامع بشری و به‌دنبال آن محدودیت منابع آب سبب شده است تا مدلسازی ریاضی و توسعه روشهای مبتنی برتحلیل سیستم با دو رویکرد اصلی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در مسائل مختلف منابع آب از جمله تحلیل سیستم‌های مخازن آب سطحی، سیستم‌های تلفیقی مخازن سطحی و زیرزمینی و سیستم‌های منابع آب حوضه‌ای مواجه شود [۱-۳]. در سیستم‌های منابع آب حوضه‌ای مورد تأکید در این مطالعه، شامل حل توأم مسائل بهره‌برداری از مخازن و تخصیص آب، مدل‌های متعددی نظیر MODSIM با کاربرد در سیستم‌های مختلف توسعه یافته است [۴-۷].

اغلب مدل‌های حوضه‌ای علی‌رغم قابلیت بسیار از نوع مدل‌های شبیه‌سازی هستند که از بهینه‌سازی تک‌دوره‌ای در هر گام زمانی برای حل مسئله تخصیص بهره می‌برند. علی‌رغم قابلیتهای بسیار، این مدل‌ها به سبب تک دوره‌ای بودن، امکان بهینه‌سازی مؤلفه‌های طراحی و بهره‌برداری بلند مدت را ندارند، ضمن آنکه در الگوریتم خطی تخصیص خود نیز با محدودیتهایی مواجه هستند [۸]. اتصال این مدل‌ها به الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی و توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی می‌تواند سودمند باشد. روشهای محاسبات تکاملی[1] و یا EC از مجموعه جواب به نام جمعیت استفاده می‌کنند. الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات[2]، به‌عنوان الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده در این مطالعه، یکی از روشهای الگوریتم هوش جمعی از نوع تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی سراسری و با سرعت همگرایی بالا است [۹]. یکی از مزایای این نوع روشها، به‌عنوان روشهای بهینه‌سازی بر مبنای شبیه‌سازی، امکان احتساب جنبه‌های مهم دیگر غیر از کارایی اقتصادی در درون مدل‌های بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب است. این مزیت از این جنبه اهمیت دارد که امروزه در کنار معیارهای عمدتاً ناظر بر جنبه‌های مختلف از کارایی اقتصادی، شاخصهای پایداری عملکرد نظیر مفاهیم عدالت و پایداری محیط‌زیستی نیز در توسعه راهکارها و سیاست‌ها مورد توجه و تأکید است.

کمیته براندتلند[3] مفاهیم توسعه پایدار[4] را در زمینه کاهش مشکلات ناشی از بحران آب مطرح کرد که در ادامه مورد توجه سازمان‌های بین‌المللی از جمله اتحادیه ملی[5] و بانک جهانی[6] قرار گرفت[۱۰]. جامعه مهندسان عمران آمریکا[7] سیستم پایدار منابع آب را سیستمی با یکپارچگی اکولوژیکی، محیط‌زیستی و هیدرولوژیکی و قادر به تأمین اهداف اجتماعی در زمان حال و آینده تعریف کرده است [۱۱]. میشل[8] و شراسل[9] مسئله پایداری در سیستم مدیریت منابع آب کانادا را مطرح نموده‌اند [۱۲]. بانک جهانی دیدگاه جامع در مدیریت پایدار منابع آب با تمرکز بر اقتصاد، استفاده بهینه از منابع آب و محافظت از محیط زیست را مبتنی بر تغییر رویکرد از توسعه منابع جدید آب[10] به مدیریت نیاز[11] نموده است [۱۳]. بیسواس[12] وجود مدیران قابل و توانا در اجرای قوانین و ضوابط حاکم را به‌عنوان امری ضروری مطرح نموده است [۱۴]. سازمان توسعه و همکاری اقتصادی[13] در ارتباط با مسائل مربوط به مدیریت پایدار منابع آب در زمینه کشاورزی برخی از ملاکهای ارزیابی مدیریت پایدار منابع آب را مطرح کرده است [۱۵]. لاکس و همکاران[14] معیارهای مختلف عملکرد مخازن را بررسی کرده‌اند[۱۶]. هاشیموتو و همکاران[15] اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را به‌عنوان مهم‌ترین معیارهای ارزیابی کارایی سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن معرفی نموده‌اند [۱۷]. می و همکاران[16] معیارهای کارایی را در تابع هدف مدل بهینه‌سازی چند هدفه از نوع مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط[17] در سیستم تک‌مخزنه تأمین آب در نظر گرفته‌اند [۱۸]. سیمونویچ[18] مفهوم ریسک و خطرپذیری را از منظر پایداری سیستم‌های منابع آب تشریح نموده است [۱۹].

بررسی سوابق نشان می‌دهد طبیعت غیرخطی و بعضاً گسسته روابط معرف معیارهای کارایی، سبب شده این معیارها عمدتاً در ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری از سیستم مخازن (نه حوضه‌ای شامل حل مسئله تخصیص) و در مدل‌های شبیه‌سازی (نه بهینه‌سازی) لحاظ شوند. به‌عبارت دیگر این معیارها کمتر مستقیماً در مدل‌های بهینه‌سازی حوضه‌ای (در مرحله تدوین سیاست‌های بهره‌برداری) و خصوصاً در کنار معیار عدالت در نظر گرفته شده است. برای مثال توسعه رویکرد استفاده شده در سیستم‌های چندمخزنه و خصوصاً حوضه‌ای در کنار احتساب عدالت به سبب افزایش تعداد متغیرهای دو مقداره و غیرخطی شدن مدل بسیار

[1] Evolutionary Computation(EC)
[2] Particle Swarm Optimization (PSO)
[3] Brundtland Commission
[4] Sustainable Development
[5] United Nations (UN)
[6] World Bank

[7] American Society of Civil Engineers (ASCE)
[8] Michell
[9] Shrusol
[10] Supply Focus
[11] Demand Focus
[12] Biswas
[13] OECD
[14] Loucks et al.
[15] Hashimoto et al.
[16] Moy et al.
[17] Mixed Integer Linear Programming (MILP)
[18] Simonovic

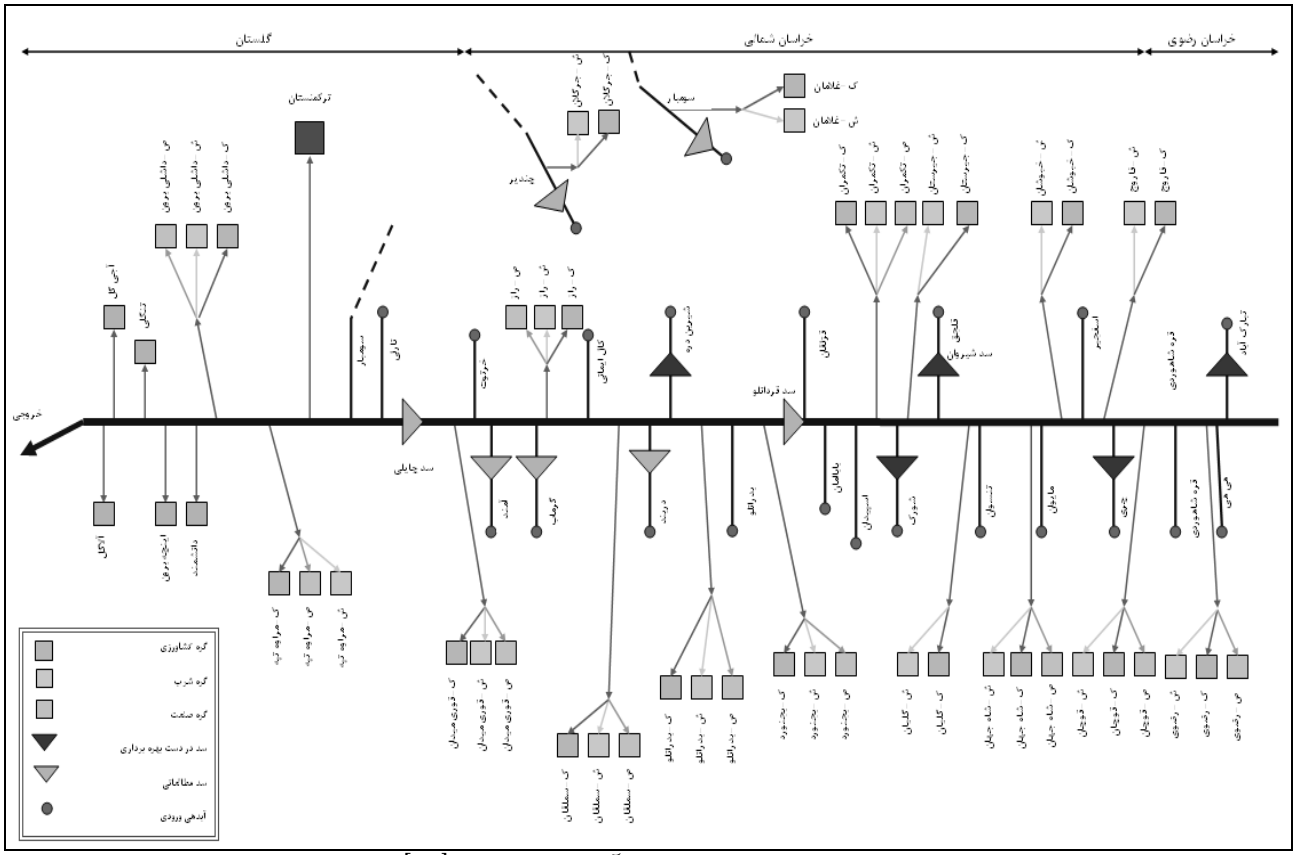
دشوار خواهد بود [۱۸]. از این رو تمرکز این مطالعه ترکیب روشهای شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در قالب توسعه مدل PSO-MODSIM، با مفاهیم کارایی و عدالت در قالب تابع هدف مدل در حل یک مسئله بزرگ مقیاس تخصیص منابع آب حوضه‌ای بود[۲۰].

۲- مطالعه موردی و مدل شبکه منابع و مصارف حوضه

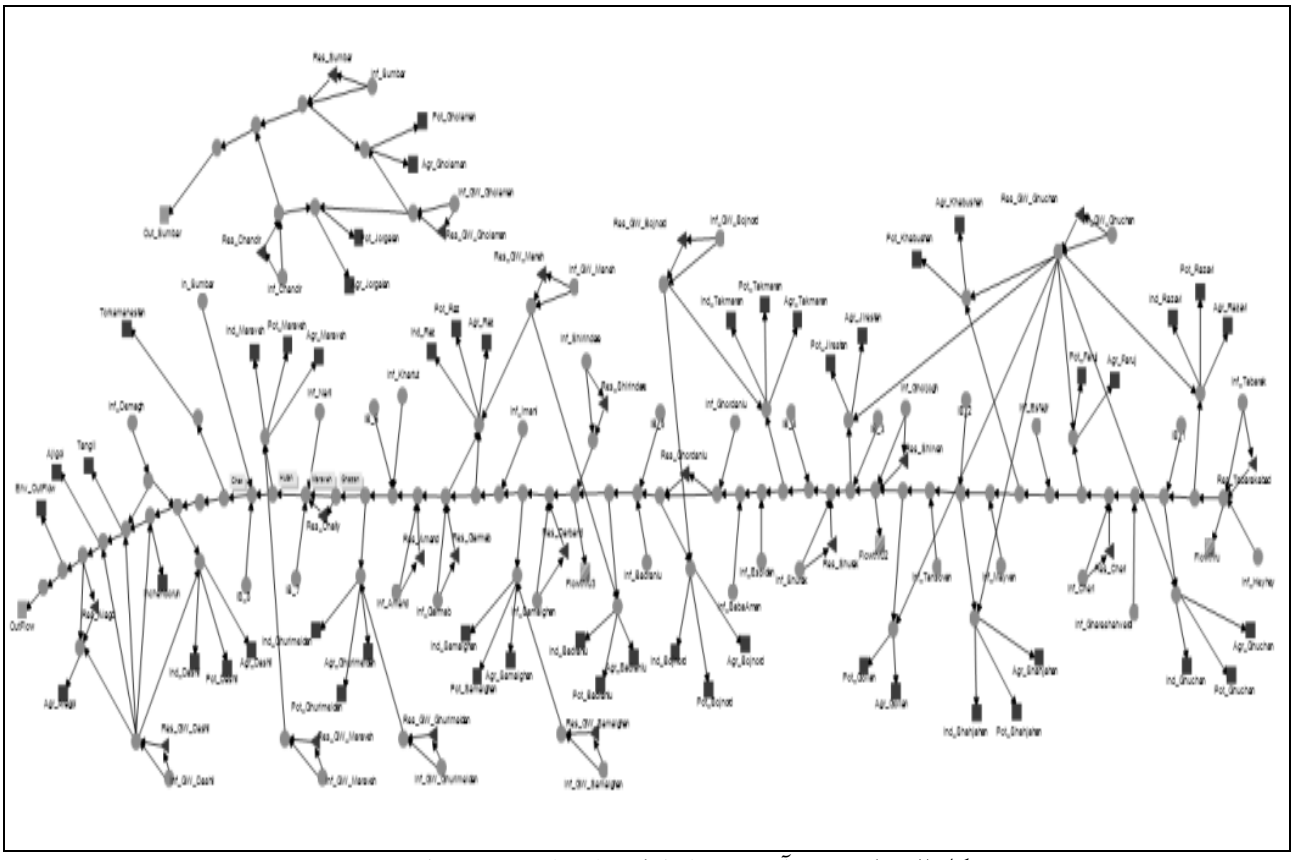
بخش اعظم حوضه آبریز رودخانه اترک در استان خراسان شمالی، بخش سراب حوضه در خراسان رضوی و بخش پایاب آن در استان گلستان قرار می‌گیرد. این حوضه از شمال به حوضه ترکمنستان، از جنوب به حوضه گرگانرود و کال شور، از شرق به حوضه قره‌قوم و از غرب به دریای مازندران منتهی می‌شود. مساحت کل حوضه آبریز اترک داخل ایران ۲۶۴۳۰ کیلومتر مربع است که استان خراسان رضوی ۱۸۵۲ کیلومتر مربع (۷ درصد)، خراسان شمالی ۱۶۴۱۸ کیلومتر مربع (۶۲ درصد) و گلستان ۸۱۶۰ کیلومتر مربع (۳۱ درصد) از سطح داخلی حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. حوضه شامل ۸ محدوده مطالعاتی به نامهای داشلی برون- اینچه برون، غلامان، مراوه تپه، مانه، قوری میدان، سملقان، بجنورد و قوچان شیروان است. سدهای تبارک آباد، شورک، آلاگل، شیروان، شیرین دره و چری شش سد در حال بهره‌برداری هستند. هشت مکان مربوط به آبهای زیرزمینی هم به‌صورت هشت مخزن با ظرفیت کافی مدل شده‌اند. توپولوژی شبکه حوضه آبریز رودخانه اترک در شکل ۱ و نمایش بزرگی حوضه، تعداد المان‌های تقاضا و منابع موجود در حوضه سیستم منابع و مصارف حوضه در MODSIM در شکل ۲ ارائه شده است.

گره‌های نیاز شامل گره‌های شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست هستند. اولویت تأمین گره‌های نیاز بر اساس اختصاص اولویت بالاتر به گره‌های نیاز از بالادست حوضه به پایین دست و اولویت بالاتر به‌ترتیب برای گره‌های محیط‌زیستی، شرب، صنعت و کشاورزی در نظر گرفته شد.

برای کالیبراسیون، نتایج رانش مدل شبیه‌ساز در سال مبنای ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۳ برای ۵ ایستگاه آبسنجی واقع بر رودخانه اترک بررسی شد. تطابق نسبی نتایج مدل با مقادیر آبدهی ماهانه اندازه‌گیری شده بیانگر صحت عملکرد مدل حوضه آبریز رودخانه اترک بوده است [۲۱]. در ادامه مدل شبیه‌سازی حوضه با الگوریتم بهینه‌ساز PSO ترکیب و شاخصهای عملکردی و عدالت در تابع هدف مدل بهینه‌سازی لحاظ شد.



شکل ۱- توپولوژی شبکه حوضه آبریز رودخانه اترک[۲۱]



شکل ۲- شبکه حوضه آبریز رودخانه اترک پیاده سازی شده در مدل MODSIM

۳- تابع هدف

در مدل PSO-MODSIM با معلوم شدن مقادیر متغیرهای تصمیم توسط الگوریتم PSO شامل احجام هدف مخازن و اعداد اولویت نسبی آنها، مدل MODSIM رفتار حوضه موردنظر را به‌منظور تخصیص آب به المان‌های سیستم به ازای مجموعه جوابهای تولید شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی PSO، شبیه‌سازی می‌کند. در شبیه‌ساز MODSIM، مسئله تخصیص در هر گام زمانی در قالب یک مدل بهینه‌سازی خطی شبکه‌ای تک زمانه[1] با تابع هدف حداقل کردن هزینه شبکه جریان فرمول‌بندی و حل می‌شود، به‌طوری‌که قیود تعادل حجمی جریان در گره‌ها و حدود بالا و پایین جریان در هر بازو برقرار باشد [۲۲]. الگوریتم بهینه‌سازی PSO نیز بر اساس تابع هدف چند دوره‌ای[2] بلند مدت شامل معیارهای کارایی و عدالت و قیود در برگیرنده حداقل و حداکثر متغیرهای تصمیم در جواب نقش دارد. بنابراین مدل تلفیقی دارای توابع هدف تو در تو بلندمدت کوتاه‌مدت است که با بهینه شدن هر دو، متغیرهای تصمیم مسئله و تخصیص منابع آب حوضه به نیازهای مختلف، تعیین می‌شوند. متغیرهای احجام هدف مخازن و عدد اولویت آنها از جنس متغیرهای بهره‌برداری هستند. تعیین متغیرهای تراز هدف مخازن به نوعی بهینه‌سازی منحنی فرمان این مخازن است. کمتر یا بیشتر شدن عدد اولویت تراز هدف یک مخزن نیز نسبت به عدد اولویت نیاز پایین دست آن، امکان رهاسازی و یا عدم رهاسازی از مخزن حتی در شرایط امکان برآورده کردن نیاز پایین‌دست در همان دوره به‌منظور تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی را برای الگوریتم شبکه جریان مدل MODSIM فراهم می‌آورد. به‌عبارت دیگر انتخاب این نوع از متغیرهای تصمیم با توجه به ویژگی مدل MODSIM، که یک مدل شبیه‌سازی با بهینه‌ساز تک دوره‌ای است، شرایط انجام بهینه‌سازی چنددوره‌ای در اتصال به الگوریتم PSO را فراهم می‌کند.

آنچه در این مطالعه به‌عنوان معیارهای کارایی در تخصیص حوضه‌ای آب بر مبنای اطلاعات موجود مورد استفاده قرار گرفت، معیارهای اعتمادپذیری[3]، برگشت‌پذیری[4] (زمان لازم برای بازگشت سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب)، آسیب‌پذیری[5] (شدت شکست سیستم) و عدالت[6] (توزیع یکنواخت‌تر زمانی و

[1] Single Period
[2] Multi Period
[3] Reliability
[4] Reversibility
[5] Vulnerability
[6] Equity

مکانی منابع آب) بود. این معیارها براساس کار کای[1] مطابق با روابط زیر، کمّی شده‌اند [۲۳]

$$RIA_i^t = (\frac{supply}{demand})_i^t \quad (۱)$$

که در آن
RIA اساس نسبت نیاز تأمین شده در گره i در گام زمانی t است.

۳-۱- اعتمادپذیری

برای هر گره تقاضا i در گام زمانی t به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$REL_i = (\Sigma_{t=1}^{T} RIA_I^t)/T \quad (۲)$$

که در آن
RELi اعتمادپذیری است که نشان دهنده احتمال موفقیت سیستم در طول دوره بهره‌برداری است.
اعتمادپذیری کل سیستم عبارت است از

$$\sum_{i=1}^{N}(\frac{REL_i}{N}) \quad (۳)$$

که در آن
T تعداد کل گامهای زمانی و N نشان دهنده تعداد گره‌های تقاضا در حوضه آبریز است. البته تعریف اعتمادپذیری مطابق فوق منطبق بر تعریف معمول ناظر بر تعداد شکست‌ها نبوده و مطابق با تعریف ارائه شده است [۲۳]. این نوع تعریف قابل استفاده برای مدل‌های تخصیص حوضه‌ای است که در آنها امکان اختصاص آب به گره‌های نیاز حداکثر برابر نیاز آبی است.

۳-۲- برگشت‌پذیری

در رابطه ۴، REVi برگشت‌پذیری بیان کننده سرعت بازگشت سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب است. در این مطالعه این شاخص برای هر گره i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$REV_i = YF_i / M \quad (۴)$$

و برگشت‌پذیری کل حوضه در دوره بهره برداری عبارت است از

$$REV = \Sigma_{i=1}^{N}(\frac{REV_i}{N}) \quad (۵)$$

که در این روابط
YF_i نشان دهنده تعداد گامهای زمانی متوالی است که در آنها نسبت نیاز تأمین شده گره i از α درصد کمتر باشد. در این مطالعه α برابر ۸۰ درصد فرض شده‌است و در معیار برگشت‌پذیری سیستم زمانی دارای شرایط نامطلوب است که نسبت نیاز تأمین شده گره مورد نظر از ۸۰ درصد کمتر باشد و M تعداد دوره‌های شکست است.

۳-۳- آسیب‌پذیری

آسیب‌پذیری نشان دهنده شدت بزرگی شکست سیستم است. این شاخص به روشهای مختلفی قابل تعریف است. در این مطالعه، شاخص آسیب‌پذیری برای گره تقاضا i به‌صورت حداکثر مقدار کمبود آن گره در طول دوره بهره‌برداری محاسبه می‌شود

$$\max(1 - RIA)_i^t \quad (۶)$$

و آسیب پذیری سیستم در طول دوره بهره‌برداری عبارت است از

$$VUL = \sum_{i=1}^{N}(\frac{VUL_i}{N}) \quad (۷)$$

که در این رابطه
N تعداد گره‌های تقاضا در حوضه آبریز و VUL آسیب‌پذیری نشان دهنده شدت بزرگی شکست سیستم است.

۳-۴- عدالت

منابع آبی در مکان و زمان دارای توزیع غیر یکنواخت است. از این‌رو معیاری که بتواند سبب توزیع عادلانه منابع آب شود رضایت‌مندی مصرف کنندگان را فراهم می‌آورد. بنابراین معیار عدالت زمانی توزیع در قالب انحراف معیار نرخ تغییرات نسبت تأمین نیاز هر گره تقاضای i بین گامهای زمانی متوالی مطابق زیر تعریف می‌شود

$$\gamma_i^t = \frac{RIA_i^t - RIA_i^{t-1}}{RIA_i^{t-1}} \quad (۸)$$

$$\bar{\gamma}_i = (\sum_{t=2}^{T}\gamma_i^t)/(T-1) \quad (۹)$$

$$EQ_i = \sqrt{\frac{\sum_{t=2}(\gamma_i^t - \bar{\gamma}_i)^2}{T-2}} \quad (۱۰)$$

در ادامه عدالت مکانی توزیع نیز با جمع معیار مذکور روی گره‌های مختلف (مکان) مدل می‌شود

$$EQ = \sum_{i=1}^{N}(\frac{EQ_i}{N}) \quad (۱۱)$$

که در این روابط
γ_i^t نرخ تغییرات نسبت تأمین نیاز گره، i بین دو گام زمانی متوالی، $\bar{\gamma}_i$ متوسط نرخ تغییرات و EQ_i شاخص عدالت است. همچنین در کلیه روابط، T تعداد کل گام‌های زمانی بهره‌برداری است.

برای دستیابی به عملکرد مطلوب لازم است معیار اعتمادپذیری حداکثر و سایر معیارها حداقل شوند. با ترکیب این معیارها می‌توان

[1] Cai

تابع هدف مدل بهینه‌سازی را توسعه داد و مجموعه جواب به‌دست آمده از مدل PSO-MODSIM را بررسی نمود. یکی از مزایای مدل پیشنهادی، امکان احتساب صریح معیارهای مذکور در قالب تابع هدف الگوریتم PSO است. بنابراین در تابع هدف (OBJ) مدل مجموع وزنی، چهار معیار اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و عدالت انتخاب شده است [۲۰]

$$OBJ=> \begin{matrix} w_{rel} \times (1-REL) + w_{rev} \times REW + w_{vul} \\ \times VUL + w_{EQ} \times EQ \end{matrix} \quad (۱۲)$$

که در این رابطه مقادیر وزنی، بیان کننده ترجیحات تصمیم گیران در رابطه با هر کدام از شاخص است. این مسئله در سوابق مطالعاتی مربوط به تصمیم‌گیری چند هدفه[1] مفصلاً مورد بحث قرار گرفته است [۲۴].

۴- نتایج

مدل PSO-MODSIM به ازای ۵ ترکیب از ضرایب وزنی در رابطه بالا بررسی شده است. بسته به مقادیر ضرایب، مدل در سناریوهای مختلف، ابتدا هر بار با احتساب صرفاً یکی از شاخصها در تابع هدف (وزن بقیه صفر لحاظ شده است) و نهایتاً در قالب یک تابع وزنی شامل تمامی اهداف که در آن وزن هر عبارت بر اساس یک فرایند مبتنی بر سعی و خطا به گونه‌ای که عبارتهای مختلف از منظر بزرگی و اندازه[2] نزدیک و نتایج به تغییر مقادیر حساس باشد، انجام شد. برخی از متغیرهای تصمیم به‌دست آمده از مدل به ازای توابع هدف شامل شاخصهای مختلف در جدول ۱ گزارش شده است.

متوسط سالانه آب تأمین شده استان‌ها و حوضه مورد مطالعه به ازای توابع هدف مختلف در جدول ۲ و درصد تأمین نیاز آبی آنها در شکل ۳

[1] Multiple-Objective Decision Making

[2] Order of Magnitude

جدول ۱- مقادیر تراز هدف مخازن حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی به ازای توابع هدف مختلف

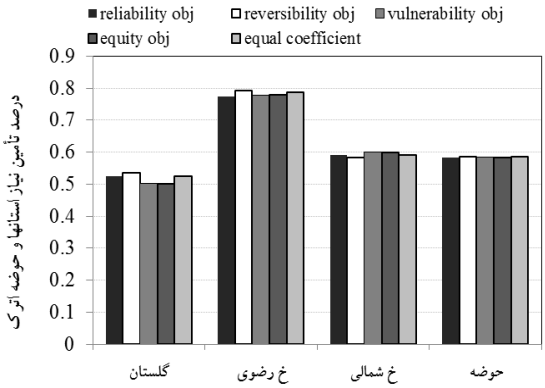
متغیر تصمیم	مقدار تراز هدف مخازن (MCM)			
	تابع هدف اعتمادپذیری	تابع هدف برگشت‌پذیری	تابع هدف آسیب‌پذیری	تابع هدف عدالت
تراز هدف تبارک‌آباد	۱۵۲۵۲	۱۹۱۸۷	۲۹۳۸۸	۲۴۰۴۱
تراز هدف چری	۱۱۴۳	۱۲۷۲	۸۵۵	۱۵۲۷
تراز هدف شیروان	۱۵۰۲۲	۳۳۱۶۰	۷۰۳۰۳	۸۴۲۲۸
تراز هدف شورک	۳۲۳۳	۳۴۴۷	۱۴۱۸	۳۱۶۲
تراز هدف شیرین دره	۹۰۷۴۱	۷۹۷۷۲	۳۱۶۹۰	۸۷۵۰۱
تراز هدف الاگل	۵۱۷۷۶	۴۸۰۸۸	۷۳۰۴۴	۷۵۳۹۵
تراز هدف سامبر	۵۳۶۸	۴۴۲۸	۳۷۲۱	۷۷۷۹
تراز هدف چندیر	۹۱۸۶	۱۲۲۴۴	۱۱۵۴۷	۶۸۵۴
تراز هدف چیلی	۴۲۹۷۵۸	۲۰۱۳۷۰	۶۵۵۰۵۲	۶۴۳۹۷۲
تراز هدف امند	۱۶۳۱۹	۱۹۴۹۲	۲۳۳۴۴	۲۶۳۱۷
تراز هدف گرماب	۱۱۹۳۳	۱۸۵۱۰	۱۸۲۰۱	۱۵۵۰۳
تراز هدف دربند	۱۰۷۶۲	۱۲۳۸۰	۲۲۳۶۸	۲۴۲۱۴
تراز هدف گردانلو	۲۰۳۵۵۲	۱۲۹۱۹۸	۶۷۶۵۶	۱۶۵۳۰۸
تراز هدف قوچان	۴۹۹۹۷۰	۷۱۴۶۴	۴۸۸۵۵۶	۹۳۴۵۴۸
تراز هدف بجنورد	۵۴۴۴۴	۹۱۶۲۵۴	۴۰۷۰۶۰	۴۷۹۷۷۶
تراز هدف سملقان	۹۹۵۶۹۹	۵۱۱۷۵۰	۱۲۶۶۴۹	۸۸۲۴۱۸
تراز هدف مانه	۷۰۹۹۶۱	۲۵۴۵۹۹	۹۲۵۳۵۲	۷۷۹۲۲۵
تراز هدف قوری میدان	۷۶۸۶۱۸	۴۰۴۶۱۶	۵۶۵۴	۱۸۴۰۶
تراز هدف مراوه	۷۰۷۳۴۲	۹۵۹۱۱۵	۱۸۶۴۶۱	۷۷۰۸۲۶
تراز هدف دشلی	۷۲۰۱۶۷	۶۵۷۰۵۱	۳۲۴۰۴۴	۶۸۵۷۰۰
تراز هدف غلامان	۷۱۱۰۸۸	۷۶۹۳۶۰	۵۰۲۶۰	۸۶۷۶۰۱

جدول ۲- متوسط سالانه آب تأمین شده استان‌ها و حوضه به ازای توابع هدف مختلف

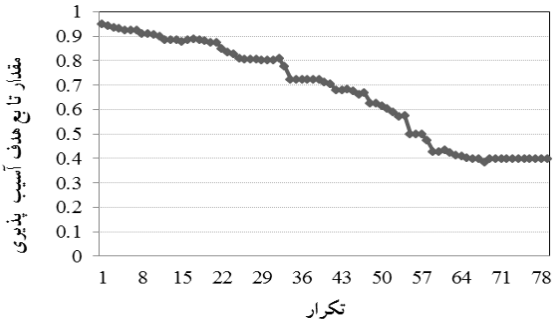
	متوسط نیاز سالانه	متوسط سالانه آب تأمین شده (میلیون متر مکعب در سال)				
		تابع هدف اعتمادپذیری	تابع هدف برگشت پذیری	تابع هدف آسیب پذیری	تابع هدف عدالت	تابع هدف مجموع وزنی شاخصها
خ رضوی	۶۳	۳۳	۳۳/۷	۳۱/۷	۳۱/۴۴	۳۳
خ شمالی	۱۲۱۶	۹۴۱	۹۶۱/۸	۹۴۶/۸	۹۴۷/۴	۹۵۶/۸
گلستان	۵۱۵	۳۰۳/۸	۳۰۰/۴	۳۰۹/۴	۳۰۷/۴	۳۰۴
حوضه	۱۷۹۴	۱۲۷۷	۱۲۹۶	۱۲۸۷/۷	۱۲۸۶/۳	۱۲۹۳/۷

ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ و شکل ۳ مشاهده می‌شود متوسط سالانه آب تأمین شده به ازای توابع هدف ارائه شده متفاوت است. اما تابع هدف، در برگیرنده تمام شاخصها نیاز آبی حوضه و استان‌ها را به‌طور نسبی تأمین می‌نماید.

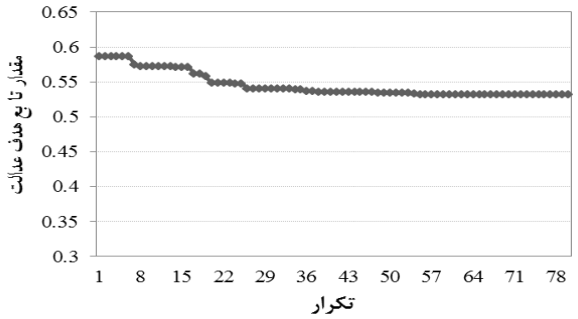
روند همگرایی بهترین ذره در کل مجموعه به ازای توابع هدف در برگیرنده شاخصهای کارایی و عدالت در الگوریتم تلفیقی PSO-MODSIM و به ازای توابع هدف مختلف به‌ترتیب در شکلهای ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. در این مدل‌ها حداکثر کردن معیار اعتمادپذیری و حداقل کردن سایر توابع مد نظر بوده است که روند تغییرات معیارها در این شکلها موید آن است.



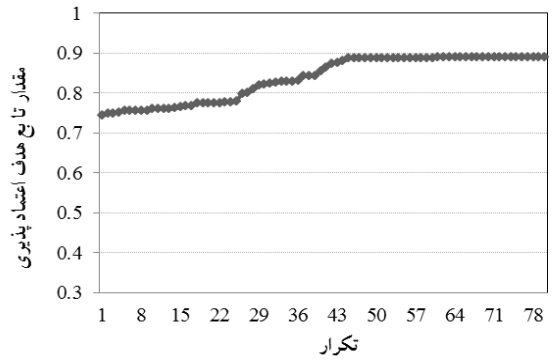
شکل ۳- درصد تأمین نیاز آبی استان‌ها و کل حوضه اترک به ازای توابع هدف مختلف



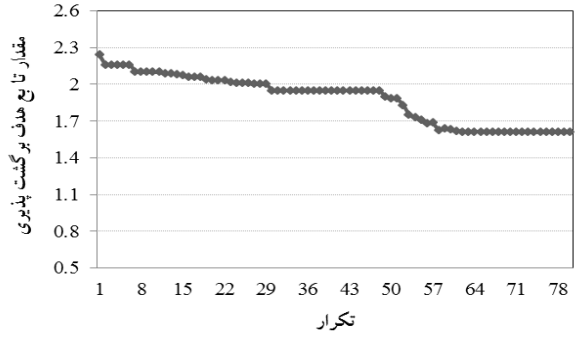
شکل ۴- روند همگرایی مدل با تابع هدف اعتمادپذیری



شکل ۵- روند همگرایی مدل با تابع هدف برگشت‌پذیری



شکل ۶- روند همگرایی مدل با تابع هدف آسیب‌پذیری

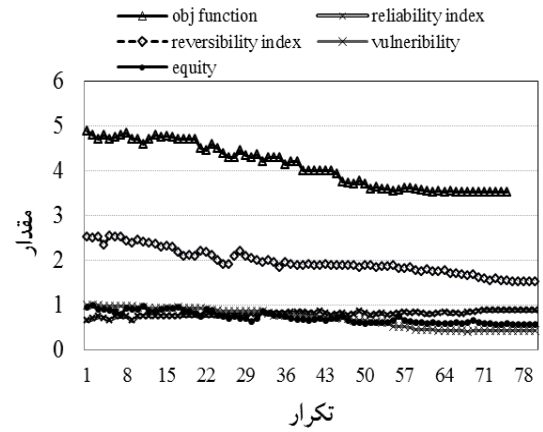


شکل ۷- روند همگرایی مدل با تابع هدف عدالت

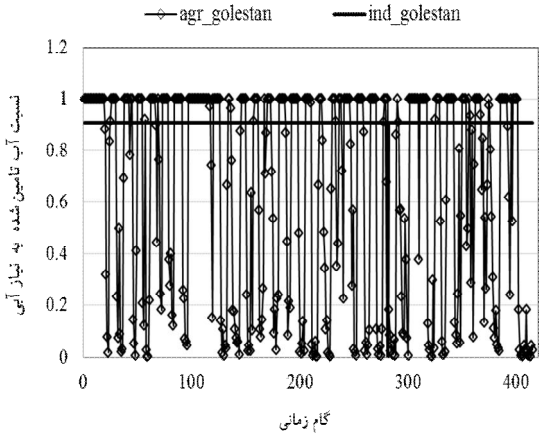
همچنین روند همگرایی معیارها و تابع هدف بر مبنای مجموع وزنی آنها در شکل ۸ ارائه شده است.

در شکل ۹ نسبت تأمین مربوط به گره تقاضای کشاورزی و صنعت استان گلستان در طول دوره بهره‌برداری به‌عنوان نمونه ارائه شده است. مشاهده می‌شود برخلاف گره تقاضای صنعت، نیاز گره کشاورزی در طول دوره دارای نوسانات مربوط به کمبود است که علت آن کمتر بودن اولویت نیاز کشاورزی، علی‌رغم بیشتر بودن مقدار آن است.

مقادیر معیارهای کارایی و عدالت به ازای ۵ سناریوی ارائه شده در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سناریو با تابع هدف برابر مجموع وزنی معیارها، مقدار معیار اعتمادپذیری ۱/۱ درصد و مقادیر معیارهای برگشت‌پذیری، عدالت و آسیب‌پذیری به‌ترتیب ۰/۶، ۶ و ۷ درصد در مقایسه با بهترین مقدار آنها در مدل‌های تک‌هدفه بدتر شده است، گرچه جواب حاصل از منظر تمام معیارها مناسب‌تر است. همچنین در مدل با تابع هدف شامل تمامی معیارها، مجموعه جوابهایی قابل حصول است که دارای تابع هدف برابر و بعضاً نزدیک به هم هستند. این مسئله در واقع به طبیعت مسائل چند هدفه و وجود دسته جوابهای غیر پست مربوط است. در جدول ۴، سه دسته از مجموعه جوابهای مذکور ارائه شده‌است.



شکل ۸- روند همگرایی شاخصهای عملکرد سیستم و تابع هدف برابر مجموع وزنی شاخصها



شکل ۹- نسبت نیاز آب تأمین شده گره کشاورزی و صنعت در استان گلستان

جدول ۳- مقادیر شاخصهای عملکردی موردنظر به ازای توابع هدف مختلف

معیارها	تابع هدف وزنی شامل تمامی معیارها	تابع دربرگیرنده عدالت	تابع دربرگیرنده آسیب‌پذیری	تابع در برگیرنده برگشت‌پذیری	تابع دربرگیرنده اعتمادپذیری
اعتمادپذیری	۸۸۴/۰	۰/۸۸۵	۰/۸۸۲	۰/۸۸۴	۰/۸۹
ریسک	۰/۱۱۶	۰/۱۴۵	۰/۱۷۷	۰/۱۱۶	۰/۱۱
برگشت‌پذیری	۱/۵۳۵	۲/۲۰۶	۱/۶۲۷	۱/۵۲۶	۱/۶۲۳
عدالت	۰/۵۶۲	۰/۵۳۲	۰/۵۴۸	۰/۵۹	۰/۵۸
آسیب‌پذیری	۰/۴۲۴	۰/۵۱۶	۰/۳۹۸	۰/۴۲۴	۰/۴۱۲

جدول ۴- مجموعه جواب بهینه به ازای تابع هدف وزنی شامل تمامی معیارها

	دسته جواب ۱	دسته جواب ۲	دسته جواب ۳
مقدار تابع هدف	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۵
کمبود کل	۲۶۵۶۱۵۲۴	۲۶۵۵۸۰۷۹	۲۶۵۴۷۹۰۴
معیار اعتمادپذیری	۰/۸۸۳۹	۰/۸۸۴	۰/۸۸۳۹
ریسک	۰/۱۱۶	۰/۱۱۵۹	۰/۱۱۶
معیار برگشت‌پذیری	۱/۵۴۱	۱/۵۳۴۸	۱/۵۲۶
معیار عدالت	۰/۵۶۱۹	۰/۵۶۱۷	۰/۵۸۹۷
معیار آسیب‌پذیری	۰/۴۲۴۲	۰/۴۲۴۲	۰/۴۲۴۲

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار تابع هدف این سه دسته جواب بهینه بسیار نزدیک است اما مقادیر معیارها متفاوت است. هر سه دسته جواب مقدار آسیب‌پذیری برابر به سیستم تحمیل می‌کنند. دسته جواب دوم از نظر معیارهای اعتمادپذیری و عدالت بر دو جواب دیگر اولویت دارد. دسته جواب سوم از نظر برگشت‌پذیری بر دو دسته جواب دیگر ارجح است در حالی که از منظر معیار عدالت مناسب نیست. با استفاده از مدل مذکور دسته جوابهای غیر پست دیگری نیز قابل تولید است که بنابر اهمیت و ترجیح تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان قابل انتخاب خواهند بود.

۵- نتیجه‌گیری

احتساب مستقیم معیارهای کارایی عملکرد در مدل‌های بهینه‌سازی خصوصاً چندمخزنه به‌دلیل طبیعت غیرخطی و گسسته روابط معرف معیارهای مذکور منجر به توسعه یک مدل بهینه سازی MINLP بسیار دشوار برای حل می‌شود. این مهم در مدل‌های در مقیاس حوضه رودخانه[1] که علاوه بر مسئله بهره‌برداری از مخازن حوضه شامل حل مسئله تخصیص نیز است، مشکل‌تر بوده و مستلزم استفاده از رویکردهای شبیه‌سازی (حوضه‌ای)- بهینه‌سازی است.

در این مطالعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، با مزایای بهینه‌سازی چنددوره‌ای[2] و تابع هدف شامل معیارهای کارایی و عدالت، از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی PSO و مدل شبیه‌ساز MODSIM در حل مسئله تخصیص بهینه منابع آب حوضه رودخانه اترک توسعه داده شد. نتایج کاربرد مدل به ازای ترکیبهای مختلف از درجه اهمیت هر یک از معیارهای کارایی اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و معیار عدالت (در قالب انحراف معیار متغیرهای نسبت تأمین نیاز روی زمان و مکان) ارائه و ارزیابی گردید. ملاحظه شد که مدل با تابع هدف شامل تمام معیارها می‌تواند به جوابی منجر شود که در آن گرچه مقادیر هر معیار از بهترین جواب حاصل از مدل‌های تک‌هدفه شامل فقط یکی از معیارهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، عدالت و آسیب‌پذیری به‌ترتیب ۱، ۰/۶،۱/۱، ۶ و ۷ درصد بدتر است، از منظر مجموع معیارها مطلوب است. همچنین با توجه به ماهیت چندهدفه بودن مدل ملاحظه گردید که جوابهای مختلف با تابع هدف وزنی یکسان ولی با مقادیر معیارهای متفاوت موجود است که بسته به ترجیح تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان قابل بهره‌برداری خواهند بود.

[1] River Basin

[2] Multi Period

۶- مراجع

1- Darian, A., and Moradi, A. (2010). "Application of ant-colony based algorithms to multi-reservoir water resources problems." *J. of Water and Wastewater*, 76, 81-91. (In Persian)

2- Rastegaripour, F., and Sabouhi, M. (2010). "An optimization model for kardeh reservoir operation using intervalparmeter mulit-stage, stochastic programming." *J. of Water and Wastewater*, 75, 88-98. (In Persian)

3- Alimohammadi, S., and Hosseinzadeh, H. (2010). "Conjunctive use of surface water and groundwater resources in Abhar river basin." *J. of Water and Wastewater*, 75, 88-98. (In Persian)

4- Graham, L., Labadie, J., Hutchison, I., and Ferguson, K. (1986). "Allocation of augmented water supply under a priority water rights system." *J. Water Resources Research*, 22(7),1083-1094.

5- Law, J., and Brown, M. (1989). "Development of a large network model to evaluate yield of a proposed reservoir." *Proc. Computerized Decision Support Systems for Water Managers, ACSE*., New York, 621-631.

6- Frevert, D.K., Labadie, J.W., Larson, R.K., and Parker, N.L. (1994). "Integration of water rights and network flow modeling in the upper Snake river basin." *Proc. 21st Annual Conf., Water Resour. Plng. And Mgmt. Div. ASCE*, Denver, Colo.

7- Marques, M., Lund, J., Leu, M., Jenkins, M., Howitt, R., Harter, T. Hatchett, S., Ruud, N., and Burke S. (2006). "Economically driven simulation of regional water systems: Friant-Kern, California." *J. of Water Resources Planning and Management*, 132(6), 468-479.

8- Ilich, N. (2008). "Shortcomings of linear programming in optimizing river basin allocation." *J. of Water Resour.Res*., 44 (2), w9242, doi: 1029/2007 WR006192.

9- Parsopulos, K.E., and Vrahatis, M.N. (2002). "Recent approaches to global optimization problems through Particle Swarm Optimization." *J. Natural Computing*, 1, 235-306.

10- World Commission on Environmental and Development. (1987). *Our Common Future*, The Brundtland Report, WCED, Oxford University Press, U.K.
11- ASCE and working group, UNESCO/IHP, (1998). *Sustainability criteria for water resources systems, Task Committee on Sustainability Criteria*, Sustainability criteria for water resources systems, American Society of Civil Engineers, USA.
12- Michell, B., and Shrubsole, D. (1994). "Reorienting to achieve sustainability in Canadian water management." *J. of Canadian Water Resources Association*, 19(4), 335-347.
13- Serageldin, I. (1994). *Valuing the environment: Proceedings of the first annual international conference on environmentally sustainable development*, World Bank Pub., Washington, D.C.
14- Biswas, A. K. (1996). "Capacity building for water management: Some personal thoughts." *J. Wat. Resour. Development*, 12(4), 399-405.
15- OECD. (1998). *Sustainable management of water in agriculture: Issues and policies*, Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), The Athens Workshop.
16- Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water resource systems planning and analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
17- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance." *J. Water Resour.* Res., 18(1), 14-20.
18- Moy, W-S., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S. (1986). "A programming model for analysis of there reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir." *J. Water Resour.* Res., 22(4), 489-498.
19- Simonovic, S. P. (1997). "Risk in sustainable water resources management in sustainability of water resources under increasing uncertainties." *IAHS. Publ*., 240, 3-17.
20- Shourian, M., Mousavi, S. J., and Tahershamsi, A. (2008). "Basin-wide water allocation planning by integrating PSO algorithm and MODSIM." *J. Water Resources Management*, 22, 1347-1366.
21- Water Research Institute. (2010). *Report of planning of water resource of attrak basin*, Department of Water Resources Research, USA.
22- Labadie, J. W. (2004). *MODSIM river basin simulation model, User manual*, Colorado State University.
23- Cai, X. (1999). "Modeling framework for sustainable water resources management." Ph.D. Thesis Univ. of Tex., Austin.
24- Chankong, V., and Haimes, Y. Y. (1983). *Multiobjective decision making: Theory and methodology*, North-Holland, New York.