Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۵، زمستان ۱۳۹۷
Volume 14, No. 5, Winter 2019 (IR-WRR)
۲۰۵-۲۱۸

بهینه‌سازی تخصیص منطقه‌ای منابع آب در حوضه آبریز سفیدرود با رویکرد عدالت اجتماعی

رضا ایوبی کیا[۱]، سمیه جنت‌رستمی[۲*]، افشین اشرف‌زاده[۳] و بهنام شفیعی ثابت[۴]

چکیده

افزایش تقاضا و منابع آب ناکافی دلیل اصلی افزایش مناقشات بین ذینفعان حوضه‌های آبریز به خصوص حوضه آبریز سفیدرود شده است. در این تحقیق، تخصیص پایدار منابع آب با دیدگاه بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت اجتماعی انجام شده است که می‌تواند در کاهش درگیری‌های بین ذینفعان مفید واقع شود. پایداری در تخصیص آب به معنای تأمین حداقل نیازهای زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی‌های منابع آب است که از محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی است. در این مطالعه، مدل بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص منابع آب برای تأمین حداقل نیازهای بخش محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی در حوضه سفیدرود توسعه داده شده است که هدف اول آن حداکثرسازی میانگین بهره‌وری اقتصادی و هدف دوم آن حداکثرسازی برقراری عدالت در تخصیص آب است. برای اندازه‌گیری عدالت از ضریب جینی استفاده شده است. برای حل مدل بهینه‌سازی چندهدفه توسعه یافته از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شده است که از بین مجموعه جواب‌های بهینه بدست آمده، بهترین جواب با نگرش تعادلی انتخاب می‌گردد؛ زیرا این نگرش همزمان با بررسی سود اقتصادی ایجاد شده در هر یک از استان‌های ذینفع، برقراری عدالت در بین استان‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. در ادامه، برای ارزیابی مدل بهینه‌سازی توسعه‌یافته، سناریوهایی بر اساس پارامترهای مقدار آب در دسترس و درصد تلفات انحراف آب تعریف شده است، که بر اساس نتایج، این پارامترها تأثیر قابل توجهی در میزان بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت در بین ذینفعان و در برنامه‌ریزی منابع آب حوضه دارند. در این راستا، کاهش میزان آب در دسترس بر روی میزان برقراری عدالت بیشترین تأثیر را دارد، اما بر میزان بهره‌وری اقتصادی تأثیر کمتری را نشان می‌دهد. از اینرو در اعمال سیاست‌های صرفه‌جوئی در مصارف آب با توجه به شرایط بحرانی منابع آب کشور، لازم است این نکته مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: تخصیص آب، بهره‌وری اقتصادی، ضریب جینی، حوضه سفیدرود.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۵/۵

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.
۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Optimization of Regional Water Resources Allocation in Sefidroud River Basin by Social Equity Approach

R. Ayoubikia [1], S. Janatrostami [2], A. Ashrafzadeh [3] and B. Shafiei Sabet [4]*

Abstract

Increasing water demands and insufficient water resources has became the main reasons of raising water conflicts among stakeholders in Sefidroud basin, Iran. Sustainable allocation of water resources with viewpoint of economic efficiency and social equity is necessary to reduce these conflicts which is assessed in this study. Setting the sustainability of water allocation as the model constraint guarantees the minimum environmental requirements in water resource planning. In this study, a multi-objective programming model was developed to supply the requirements of the environmental, industrial and agricultural sectors in Sefidroud basin. The objectives of the model were to maximize the economic benefit efficiency for the development of improved water allocation strategies as well to maximize the water allocation equity (measured by using of the Gini coefficient). NSGA-II algorithm was used to solve the developed multi-objective programming model. The best solution among pareto front was selected according to equilibrium viewpoint due to considering economic efficiency and social equity among stakeholders simultaneously. Additionally, two scenarios were defined in terms of the rate of water loss and available water to assess the developed multi-objective programming model. The results showed that river basin authorities should decrease the rate of water loss and increase the available water to improve water allocation efficiency and equity. Additionally, the decrease in available water had highest impact on water allocation equity, but it had least impact on economic benefit efficiency. Furthermore, it should be considered for implementing water-saving policies according to critical conditions of water resources.

Keywords: Water Allocation, Economic Efficiency, Gini Coefficient, Sefidrud Basin.

Received: April 9, 2018
Accepted: July 27, 2018

1- M.Sc. Graduate in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
2-Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: janatrostami@guilan.ac.ir
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در تخصیص منابع آب یک حوضه یا منطقه خاص رعایت سه اصل اساسی بهره‌وری، عدالت و پایداری، مطابق با قوانین بازار اقتصادی و منابع آب ضروری است. در این راستا، با استفاده از بهره‌وری، بیش‌ترین سود حاصل از تولید منابع کمیاب تعریف می‌شود، عدالت، بر توزیع عادلانه ثروت در بین اقشار جامعه اشاره دارد و با استفاده از پایداری، وابستگی بین منافع اقتصادی و محیط‌زیست تعریف می‌شود. بنابراین، درک صحیح مفاهیم بهره‌وری اقتصادی، عدالت و پایداری اکولوژیکی برای ارائه مدل تخصیص کارآمد مورد نیاز است (Malghan, 2010). در طول چند دهه اخیر، پژوهش‌ها در تخصیص منابع آب بر روش‌های عادلانه، کارآمد و استفاده پایدار از منابع آب متمرکز شده است (Cai et al., 2001; Kathleen et al., 2010; Li and Guo, 2014; Garcia and Pargament, 2015; Banihabib et al., 2017; Mohsenizadeh and Shourian, 2018).

مدیران حوضه، به منظور تأمین نیازهای اقتصادی ذینفعان حوضه و حفاظت از محیط زیست، اهداف تخصیص را با توجه به قوانین آب و زیرساخت‌ها، کنترل و مدیریت می‌کنند (Dong et al., 2013 and Cai et al., 2016). یکی از بهترین روش‌ها برای تأمین منابع کمیاب برای مصرف‌کننده، استفاده از مفهوم بهره‌وری است (Daubert and Young, 1981)، استفاده از این مفهوم در تخصیص منابع آب باعث ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا می‌شود (Divakar et al., 2011). در حالت ایده‌آل، تخصیص آب بین بخش‌های مصرفی یک حوضه باید از نظر اقتصادی، کارآمد، از نظر فنی، عملی و از نظر اجتماعی، عادلانه باشد. تخصیص کارآمد از نظر اقتصادی به توزیع آب برای به حداکثر رساندن بهره‌وری سود اقتصادی، تخصیص با عدالت اجتماعی به توزیع متوازن آب برای حفظ منافع و تخصیص عادلانه آب به گروه‌هایی که از نظر اقتصادی کم‌درآمد و ضعیف هستند، گرایش دارد (Babel, 2005). حل مسائل مربوط به عدالت بسیار دشوار است و اجرای عدالت در تخصیص منابع آب بین بخش‌های محیط زیست و نیازهای مصرفی ساکنان یک منطقه امری ضروری است (Syme et al., 1999). با توجه به اینکه استانداردهای قضاوت عادلانه همیشه به صورت فردی در نظر گرفته می‌شود، نگرش عادلانه در مقایسه با بهره‌وری، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است (Tsur and Dinar, 1995). عدالت تا حد زیادی به طرز تفکر اشخاص بستگی دارد و نمی‌توان آن را به صورت علمی تحلیل نمود، زیرا در جامعه تعاریف مختلفی برای عدالت وجود دارد (Young, 1994 and Wang et al., 2015).

در تخصیص عادلانه منابع آب، عدم تعادل بین اهداف عدالت و بهره‌وری باعث افزایش ناپایداری‌ها می‌شود، در این راستا، Neumayer (2011)، مدل برنامه‌ریزی چندهدفه را برای ایجاد تعادل بین این اهداف توسعه داد. Roozbahani et al. (2014)، برای بهینه‌سازی توازن و سود در تخصیص آب و همچنین Roa-García (2014) و Roozbahani et al. (2015)، برای بهینه‌سازی اهداف اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در تخصیص منابع آب از مدل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده کردند، که هیچ یک از این مطالعات، به برقراری عدالت در تخصیص آب تاکید نداشتند. در ادامه، Hu et al. (2016)، به منظور ارتقای مدیریت آب به صورت عادلانه، یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه با اهداف حداکثر کردن سود اقتصادی و حداکثر کردن عدالت بین ذینفعان ارائه نمودند، که برای اندازه‌گیری عدالت، از ضریب جینی استفاده کردند. ضریب جینی، ضریبی است که معمولاً برای اندازه‌گیری توزیع عادلانه یک منبع استفاده می‌شود و شامل مقایسه همه متغیرها است، بنابراین یک راه حل مؤثر برای اندازه‌گیری عدالت در تخصیص منابع آب است (Gini, 1921). Cullis and Van Koppen (2007)، ضریب جینی را برای اندازه‌گیری عدالت در تخصیص منابع آب پیشنهاد کردند. در ادامه، Zhang and Shao (2010)، در توزیع عادلانه آب شهری، Seekell et al. (2011)، در تعیین اثر انتقال آب مجازی برای اصلاح نابرابری تخصیص آب در کشورهای مختلف و همچنین Wang et al. (2012)، در برقراری عدالت در تأمین آب شرب در حوضه آبریز رودخانه زرد از ضریب جینی استفاده کردند.

منطقه مورد بررسی در این مطالعه، حوضه آبریز سفیدرود واقع در ایران است. این حوضه، حوضه‌ای در حال توسعه است که همه ذینفعان آن برای توسعه بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت سعی دارند آب مورد نیاز خود را افزایش دهند. بنابراین، رقابت شدیدی بین ذینفعان این حوضه به خصوص بین ذینفعان بالادست و پایین‌دست برای استفاده بیشتر آب وجود دارد. از طرفی، در نظر نگرفتن عدالت و بهره‌وری اقتصادی باعث تشدید این درگیری‌ها بین ذینفعان این حوضه بزرگ شده است، بنابراین لازم است مطالعات جدیدی با اهداف بالا بردن عدالت و بهره‌وری اقتصادی برای جلوگیری از مناقشات بیشتر در حوضه سفیدرود انجام شود (Roozbahani et al., 2014). Roozbahani et al. (2014,2015a)، به منظور برقراری عدالت و رسیدن به سود اقتصادی و پایداری اکولوژیکی در حوضه آبریز سفیدرود، یک مدل تخصیص آب چند هدفه ارائه کردند که نیازهای چهار بخش مختلف کشاورزی، شرب، صنعت و زیست محیطی را شامل می‌شد. تابع هدف آن‌ها حداکثر کردن سود حاصل از تخصیص

www.SID.ir

Archive of SID

آب به هر یک از ذینفعان بود که عدالت به صورت درصدی از بیشترین سود برای همه ذینفعان تعریف شد. در ادامه، Roozbahani et al. (2015b)، یک مدل چند هدفه برای تخصیص پایدار منابع آب بین ذینفعان حوضه آبریز سفیدرود ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آب به صورت عادلانه‌تری نسبت به مطالعات قبلی بین ذینفعان توزیع می‌شود. لازم به ذکر است که روزبهانی و همکاران در تحقیقات خود تاکیدی در مورد برقراری عدالت در تخصیص آب نداشتند و تنها تعادلی بین تخصیص آب از نظر اقتصادی- اجتماعی و زیست محیطی ایجاد نمودند.

با توجه به مطالعات انجام شده در حوضه آبریز سفیدرود، در این تحقیق سعی گردید سیستم تخصیص آب حوضه مورد نظر، به صورت یک مدل تصمیم‌گیری چندهدفه با هدف حداکثر کردن میانگین بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت اجتماعی در منطقه با استفاده از ضریب جینی توسعه داده شود. در مدل مورد بررسی تقاضا در چهار بخش کشاورزی، صنعت، شرب و نیاز اکولوژیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای حل مدل چندهدفه توسعه یافته از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II استفاده می‌شود و نتایج بدست آمده با توجه به سناریوهای تعریف شده ارزیابی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سفیدرود بخشی از حوضه آبریز دریای خزر محسوب شده و در محدوده تلاقی رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس و مرکزی در ایران قرار گرفته است. این حوضه آبریز از لحاظ مختصات جغرافیایی در طول شرقی '۲۷-°۴۶ تا '۱۱-°۵۱ و عرض شمالی '۵۳-°۳۴ تا '۵۶-°۳۷ واقع شده است (شکل ۱). مساحت این محدوده ۵۹۲۵۱/۱ کیلومتر مربع است که حدود ٪۷۵/۴ آن را مناطق کوهستانی و ٪۲۴/۶ مابقی را دشت و کوهپایه تشکیل می‌دهد. از نظر تقسیمات سیاسی، حوضه آبریز سفیدرود در برگیرنده بخش‌هایی از ۸ استان گیلان، آذربایجان‌شرقی، اردبیل، زنجان، کردستان، همدان، قزوین و تهران است، که به ترتیب ۶/۸، ۱۹/۵، ۶/۸، ۳۰/۹، ۲۳/۳، ۳/۴، ۷/۴ و ۱/۹ درصد از مساحت حوضه آبریز سفیدرود را شامل می‌شود. رودخانه شاهرود و قزل‌اوزن دو سر شاخه اصلی و مهم رودخانه سفیدرود هستند که منبع تأمین بخشی از نیازهای ۸ استان واقع شده در حوضه سفیدرود می‌باشند. دو رودخانه شاهرود و قزل‌اوزن در شهر منجیل به هم می‌پیوندند و با تشکیل رودخانه سفیدرود به سد بزرگ سفیدرود می‌ریزند.

۲-۲- جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات

بر اساس آمار سال ۱۳۸۵، مجموع آب در دسترس در حوضه آبریز سفیدرود با مساحت بیش از ۵۹۲۵۱/۱ کیلومترمربع، جمعیت ۲۰۹۱۴۱۰ نفر و سطح زیر کشت ۳۳۵۱۲۳ هکتار، تقریبا ۵۳۰۰ میلیون مترمکعب است که از طریق منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. با توجه به اینکه حوضه آبریز سفیدرود در ۸ استان واقع شده است، بنابراین برای مدیریت و تخصیص بهتر منابع آب در این حوضه،

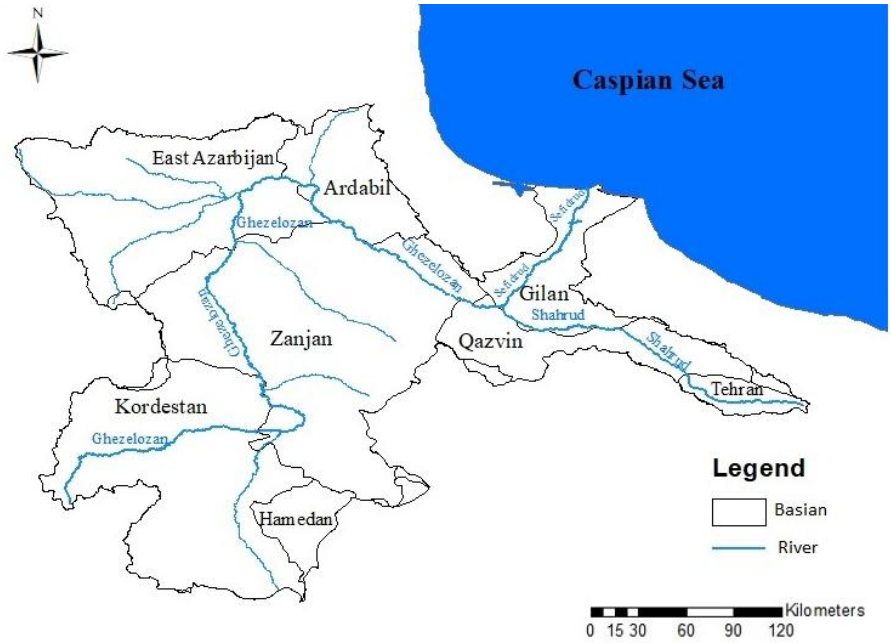

Fig. 1- Location of the Sefidroud River basin and provinces sharing it

شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز سفیدرود و تقسیمات استانی

www.SID.ir

Archive of SID

شناخت کافی از نوع منابع و مصارف هر یک از استان‌ها ضروری است. برای این منظور، دو بخش اصلی مصارف و منابع آب در تمامی استان‌ها تعریف می‌شود. منابع آبی هر استان به دو بخش منابع آب سطحی و زیرزمینی تقسیم می‌شوند و مصارف اصلی آن‌ها در چهار بخش مصارف خانگی، محیط زیست، صنعت و کشاورزی تقسیم‌بندی می‌شود. مقادیر مصارف بخش‌های مختلف در استان‌های ذینفع حوضه سفیدرود در جدول ۱ آورده شده است. برای تعیین حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه سفیدرود از روش Tennant (1976)، استفاده شد. این روش، حداقل میزان برآورد نیاز زیست‌محیطی را به‌صورت درصد معینی از متوسط دبی سالانه رودخانه برای انواع جریان طبقه‌بندی شده محاسبه می‌کند که سطح قابل قبول این درصدها با توجه به دستورالعمل ابلاغ شده وزارت نیرو معادل ۳۰ درصد دبی متوسط سالانه برای فروردین تا شهریور و ۱۰ درصد دبی متوسط سالانه برای مهر تا اسفند است (Vpsps, 2011). جزئیات داده‌ها و پارامترهای مورد نیاز مدل تخصیص منابع آب به تفکیک استان‌های ذینفع نیز در جدول‌های ۲ و ۳ اورده شده است. شایان ذکر است که، مقادیر جدول‌های ۱، ۲ و ۳ از گزارشات و داده‌های موجود در دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا استخراج شده است.

۳- روش تحقیق

در حوضه آبریز سفیدرود با توجه به عرضه و تقاضای نامتعادل باید مدلی نوشته شود که همزمان با حداقل کردن مناقشات بین ذینفعان و خسارت وارده به محیط زیست، میزان بهره‌وری اقتصادی و عدالت اجتماعی را حداکثر کند. یک مدل تخصیص آب برای عرضه و تقاضای متعادل بین ذینفعان حوضه، زمانی اجرایی می‌شود که شناخت کافی از ویژگی‌های منحصر به فرد حوضه آبریز و منابع و مصارف آن وجود داشته باشد. بنابراین پس از برآورد و جمع‌آوری اطلاعات اولیه مانند میزان آب در دسترس (مجموع منابع موجود سطحی و زیرزمینی) و میزان تقاضا برای هر یک از استان‌های ذینفع حوضه سفیدرود، مدل مانند فلوچارت شکل ۲ توسعه داده شد. لازم به ذکر است که، تخصیص منابع آب بین ذینفعان این حوضه در مدل مدیریتی به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است.

Table 1- Water use for the different sectors of stockholder provinces in Sefidrud River basin (unit:×10^6 m^3)

جدول ۱- مقادیر مصارف بخش‌های مختلف در استان‌های ذینفع حوضه آبریز سفیدرود (برحسب میلیون مترمکعب)

Province	Domestic		Industrial		Agricultural		Environmental	Total
	GW	SW	GW	SW	GW	SW		
Guilan	20.4	3.1	2.8	1.5	59.6	777.5	555.5	1420.4
East Azarbaijan	21.5	1.0	0.1	0	111.4	257.0	330.4	721.4
Ardabil	8.7	0	0.1	0	47.1	81.3	164.2	301.4
Zanjan	57.1	1.2	11.2	0	634.0	314.2	487.3	1505.0
Kordestan	21.6	0	0.6	0	443.8	144.4	186.7	797.1
Hamedan	2.5	0.02	0.2	0	52.7	6.4	39.9	101.7
Qazvin	2.6	0.3	0.8	0	158.6	119.1	367.4	648.8
Tehran	1.7	0	0.3	0	47.6	31.2	34.3	115.1
Total	136.1	5.6	15.4	1.5	1554.9	1731.2	2165.7	5610.4

Table 2- Average economic benefit per unit of water consumption in the industry and agriculture sectors (unit: Rials/m^3)

جدول ۲- میانگین سود اقتصادی به ازای هر واحد آب مصرفی در بخش‌های صنعت و کشاورزی (واحد: ریال بر مترمکعب)

Province	Industrial	Agricultural
Guilan	8363	**1559**
East Azarbaijan	17302	**1423**
Ardabil	17302	**1328**
Zanjan	12535	**1336**
Kordestan	66705	**1343**
Hamedan	13694	**1481**
Qazvin	69698	**3194**
Tehran	26158	**2829**

www.SID.ir

Archive of SID

Table 3- Minimum and maximum water demand for the basin stakeholder (unit:×10^6 m^3)
جدول ۳- حداقل و حداکثر تقاضای آب ذینفعان حوضه (برحسب میلیون مترمکعب)

Province	Allocation		Agricultural		Industrial		Environmental
	d_i^{max}	d_i^{min}	d_{i1}^{max}	d_{i1}^{min}	d_{i2}^{max}	d_{i2}^{min}	
Guilan	1207.3	778.9	1201	777.5	6.3	1.5	**555.5**
East Azarbaijan	1083.4	256.9	1083	256.9	0.4	0	**330.4**
Ardabil	265.4	81.3	265	81.3	0.4	0	**164.2**
Zanjan	2110.3	314.2	2085	314.2	25.3	0	**487.3**
Kordestan	1368.5	144.4	1367	144.4	1.5	0	**186.7**
Hamedan	124.6	6.4	124	6.4	0.6	0	**39.9**
Qazvin	574.3	119.1	574	119.1	0.3	0	**367.4**
Tehran	159.8	31.2	159	31.2	0.8	0	**34.3**
Total	6893.5	1732.2	6858	173.5	35.5	1.5	**2165.7**

Note: d^{max}, d^{min} are maximum and minimum demands of the water use

در ابتدا با توجه به مقادیر تقاضا و آب در دسترس حوضه، مدل ساده‌ای تهیه می‌شود که این مدل تقاضاهای حوضه را در دو بخش تقاضای حداکثر و حداقل طبقه‌بندی می‌کند. دو شرط اساسی برای مدیریت تخصیص منابع آب در مدل اولیه نظر گرفته می‌شود. با توجه به شرط اول، اگر آب در دسترس بیش‌تر از حداکثر تقاضا بخش‌های مصرفی باشد، تمامی نیاز بخش‌های مصرفی در استان‌ها تأمین می‌شود و آب مازاد حوضه در صورت امکان صرف ذخیره‌سازی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌های حوضه، توسعه و پیشرفت منطقه می‌شود. در شرط دوم، اگر آب در دسترس کم‌تر از حداکثر تقاضای آبی حوضه باشد، مجموع حداقل تقاضای آبی را در نظر گرفته و با مقدار آب در دسترس حوضه مقایسه می‌شود. اگر آب در دسترس، کم‌تر از مجموع حداقل تقاضای حوضه باشد منطقه دچار کمبود آب می‌شود و مسئولان و مدیران تخصیص باید بر اساس الویت‌های مورد نظرشان (تنش، عدالت، سیاست و غیره) آب را به بهترین شکل بین ذینفعان تقسیم کنند تا کم‌ترین آسیب به بخش‌های مختلف وارد شود. هم‌چنین، اگر آب در دسترس بیش‌تر از حداقل تقاضا در بخش‌های مصرفی باشد می‌توان نتیجه گرفت که به احتمال زیاد، حداقل نیاز بخش‌های مصرفی تأمین خواهد شد و باید آب در دسترس بین بخش‌های مصرفی به صورت بهینه تخصیص شود (شکل ۲).

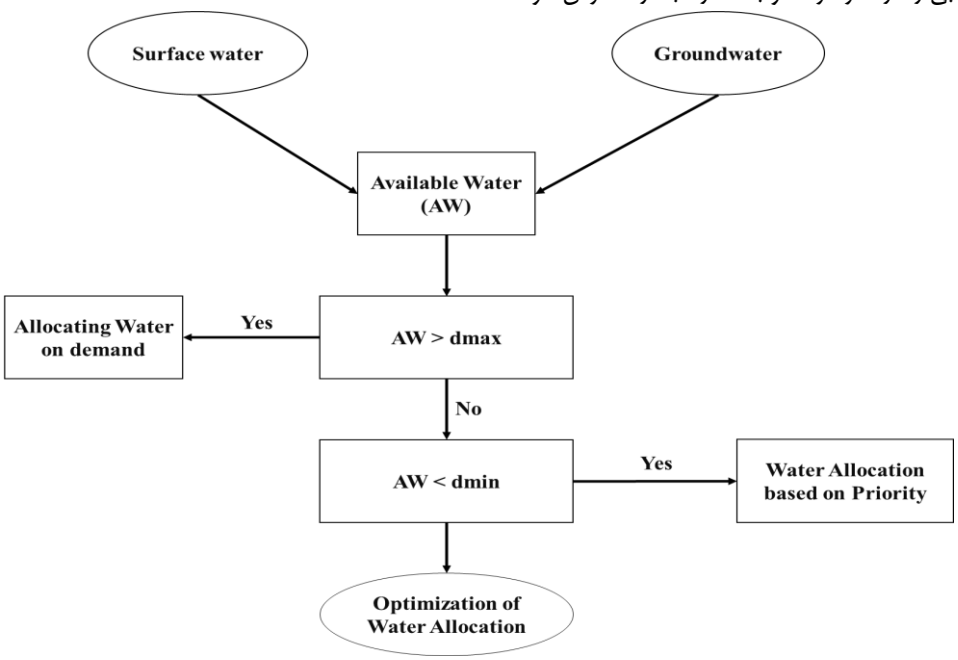

Fig. 2- Conceptual framework for water management of the basin
شکل ۲– فلوچارت مدیریت آب در حوضه

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۱- توابع هدف

توابع هدف شامل دو تابع هدف زیر می‌باشد:

تابع هدف اول: حداکثر کردن بهره‌وری اقتصادی

برای به دست آوردن سود اقتصادی در بخش‌های مصرفی استان‌های ذینفع حوضه آبریز باید میانگین سود اقتصادی از تخصیص هر واحد آب در هر بخش مصرفی را در مقدار آب مصرفی همان بخش ضرب نمود (Divakar et al., 2011).

$$EB_{ij}(q_{ij}) = AEB_{ij} \cdot q_{ij} \qquad \forall i,j \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، i، تعداد استان‌های حوضه؛ j، بخش‌های مصرفی شامل صنعت و کشاورزی؛ EB_{ij}، سود اقتصادی هر بخش در استان‌های ذینفع حوضه؛ AEB_{ij}، میانگین سود اقتصادی هر بخش مصرفی در استان‌ها و q_{ij}، حجم آب مصرفی برای هر بخش مصرفی در استان است.

امروزه بهره‌وری به دلیل محدود بودن منابع در اکثرکشورها، توسعه‌ی چشم‌گیری پیدا کرده و افزایش بهره‌وری به عنوان یک اصل مهم برای رسیدن به رفاه جامعه مطرح شده است. به علت محدود بودن منابع آب می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش بهره‌وری سود اقتصادی در کنار بهینه‌سازی تخصیص منابع آب به نفع ذینفعان منطقه خواهد بود. بهره‌وری اقتصادی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Hu et al., 2016):

$$EBE = \sum_{i=1}^{m} \frac{\sum_{i=1}^{n}(AEB_{ij} \cdot q_{ij})}{AEB_{i\,max}((1-\alpha^{loss})Q_{i+}WS_i)} \qquad (۲)$$

WS_i، منابع آب زیرزمینی دو بخش صنعت و کشاورزی؛ $AEB_{i\,max}$، حداکثر میانگین سود اقتصادی هر بخش مصرفی در استان‌ها و α^{loss}، متوسط نرخ تلفات انتقال در حوضه است که با توجه به آمار موجود در سازمان‌های مربوطه، میزان تلفات انحراف و انتقال آب در اکثر مناطق حوضه آبریز سفیدرود برابر با ۳۵ درصد در نظر گرفته شد.

برای محاسبه حداکثر میانگین بهره‌وری اقتصادی در سطح حوضه باید مجموع بهره‌وری سودهای اقتصادی استان‌ها را بر تعداد آن‌ها تقسیم کرد. با توجه به این روابط می‌توان دریافت که متغیر تصمیم q (آب تخصیص یافته به بخش مصرفی) هر چقدر بزرگ‌تر باشد و Q (آب سطحی تخصیص یافته به استان) هر چقدر کوچک‌تر باشد جواب‌های بزرگتری برای بهره‌وری اقتصادی به‌دست می‌آید.

$$\max \overline{EBE} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} EBE_i = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{\sum_{i=1}^{n}(AEB_{ij} \cdot q_{ij})}{AEB_{i\,max}((1-\alpha^{loss})Q_{i+}WS_i)} \qquad (۳)$$

تابع هدف دوم: حداکثر کردن عدالت

ضریب جینی یک شاخصه اقتصادی برای برآورد توزیع ثروت در میان یک ملت است، پایین بودن این ضریب در بین کشورها اغلب به‌عنوان شاخص توزیع برابر درآمد بین اقشار جامعه و کم بودن اختلاف طبقاتی در کشور در نظر گرفته می‌شود. در علم ریاضی ضریب جینی معمولاً بر اساس منحنی لورنز استفاده می‌شود. در منحنی لورنز محور Y بیانگر درصدی از کل درآمد جامعه است که توسط X درصد فقیرتر جامعه به‌دست می‌آید. در این منحنی خط ۴۵ درجه به‌عنوان خط توزیع برابری کامل درآمدها در نظر گرفته می‌شود. ضریب جینی را می‌توان با توجه به شکل ۲ نسبت مساحت بین خط برابری و منحنی لورنز به مساحت کل زیر خط برابری در نظر گرفت به‌عبارت دیگر، ضریب جینی برابر با $Gini = A/(A+B)$ است (Johan, 2012).

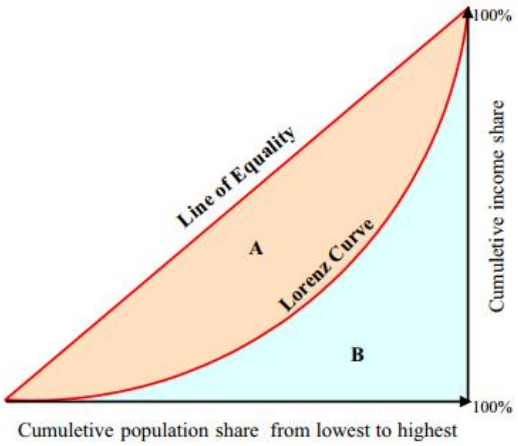

Fig. 3- Graphical representation of the Gini coefficient

شکل ۳- نمایش گرافیکی ضریب جینی

Gini (1921) ضریب جینی را برای اندازه‌گیری توزیع ارائه کرد، که به‌طور کلی از ضریب جینی برای اندازه‌گیری نابرابری درآمدها استفاده می‌شود، این ضریب در اندازه‌گیری نابرابری زمین و مصرف آب کاربرد دارد (Cullis and Koppen, 2007). مقدار این ضریب با استفاده از معادله ۴، از تفاوت میانگین نسبی بدست می‌آید (Cullis and Koppen, 2007; Gini, 1921).

$$Gini = \frac{1}{2N^2\bar{y}}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}|y_i - y_j| \qquad (۴)$$

که y، مقادیر اندازه‌گیری شده منفرد و N، تعداد اندازه‌گیری‌ها است. مقدار ضریب جینی معمولاً به صورت درصد یا عددی بین صفر و یک بیان می‌شود که عدد صفر بیانگر برابری کامل و منطبق شدن منحنی لورنز با خط ۴۵ درجه است و افزایش این ضریب، افزایش نابرابری را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

در این مطالعه، نابرابری توزیع آب در سطح حوضه آبریز با استفاده از ضریب جینی تعریف می‌شود. با توجه به موارد ذکر شده، هر چه مقدار ضریب جینی به صفر نزدیک‌تر باشد توزیع آب تخصیص یافته با برابری بیش‌تری همراه بوده و آب به صورت عادلانه‌تری در سطح حوضه توزیع می‌شود. عدالت تخصیص آب با توزیع عادلانه حجم آب مصرفی در واحد سود اقتصادی ایجاد شده اندازه‌گیری می‌شود. مقدار ضریب جینی در تخصیص آب با توجه به معادله ۴ با استفاده از معادله ۵ اندازه‌گیری می‌شود، که با حداقل کردن مقدار این ضریب، عدالت حداکثر می‌شود (Hu et al., 2016):

$$\min G = \frac{1}{2m\sum_{i=1}^{m}\frac{Q_i}{EB_i}}\sum_{l=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|\frac{Q_l}{EB_l} - \frac{Q_k}{EB_k}\right| \quad (۵)$$

که l و k شمارنده استان‌های ذینفع حوضه؛ EB_i، مجموع سودهای اقتصادی بخش کشاورزی و صنعت هر استان و $\frac{Q_i}{EB_i}$ نیز نسبت مقدار آب تخصیص یافته به هر استان را در واحد سود اقتصادی آن نشان می‌دهد.

۳-۲- محدودیت‌ها

در مسائل بهینه‌سازی همواره محدودیت‌هایی بخاطر ویژگی‌های مدل یا منابع در دسترس اعمال می‌شود. پس از تعیین اهداف، با بررسی شرایط حوضه آبریز مورد بررسی، محدودیت‌های مدل شناسایی و در مدل بهینه‌سازی تخصیص در نظر گرفته شد. در ادامه جزئیات هر یک از محدودیت‌های مدل آورده شده است.

۱- محدودیت منابع آب سطحی در دسترس

آب در دسترس (AW)، باید از مجموع آب تخصیص یافته به استان‌ها بیش‌تر یا مساوی باشد در غیر این صورت استان‌های حوضه در بخش‌های مصرفی با کمبود آب مواجه خواهند بود.

$$\sum_{i=1}^{m} Q_i \le AW \quad (۶)$$

۲- تأمین حداقل نیاز زیست محیطی

مدل باید حداقل نیاز زیست‌محیطی را برای رسیدن به پایداری اکولوژیکی (WEC_i^{min}) تأمین کند. مقدار نیاز زیست‌محیطی با توجه به روش تنانت، حداقل ۱۰ درصد از میزان منابع سطحی در هر استان برآورد شده است. تأمین تخصیص نیاز زیست‌محیطی باعث رونق بخش‌های تفریحی و حیات ماهیان رودخانه و حیات‌وحش خواهد شد. به این ترتیب، نیاز بخش زیست‌محیطی از مقادیر منابع آب در دسترس کم می‌شود و محدودیت تأمین حداقل نیاز زیست‌محیطی با محدودیت در دسترس بودن آب ادغام می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{m} Q_i \le AW - WEC_i^{min} \quad (۷)$$

۳- محدودیت آب مصرفی

مجموع آب مصرفی در بخش‌های مختلف هر استان باید کوچک‌تر یا مساوی آب تخصیص یافته با کسر تلفات و منابع آب زیرزمینی دو بخش صنعت و کشاورزی (WS_i) شود.

$$\sum_{j=1}^{n} q_{ij} \le (1-\alpha^{loss})\, Q_i + WS_i \quad (۸)$$

۴- تأمین حداقل آب مصرفی بخش‌های ویژه

حداقل نیاز آبی بخش‌های ویژه به عنوان محدودیتی درنظر گرفته شده که باید تأمین گردد. منظور از بخش‌های ویژه، بخش‌های با حساسیت بالای اجتماعی مانند مصارف خانگی و شرب است. برای تأمین این نیاز می‌بایست مجموع مقدار آب تخصیص یافته با کسر تلفات و منابع آب زیرزمینی برداشت شده جهت مصارف خدمات بیش‌تر از حداقل نیاز این بخش باشند. WS_{Ts}، مصارف بخش‌های ویژه؛ Ts، تعداد بخش‌های ویژه و k شمارنده بخش های ویژه است.

$$(1-\alpha^{loss})\, Q_i + WS_{Ts} \ge \sum_{k=1}^{Ts} d_{ik}^{min} \quad (۹)$$

۵- محدودیت تقاضای آب

آب مصرفی که برای هر بخش مصرفی تخصیص داده می شود باید بین حداقل تقاضا (d_{ij}^{min}) و حداکثر تقاضای آب مصرفی (d_{ij}^{max}) آن بخش در نظر گرفته شود. حداقل تقاضای هر بخش برابر با مقدار مصرف منابع آب سطحی آن بخش بوده و مقادیر حداکثر نیاز برابر با بیش‌ترین نیاز هر بخش که برای تأمین این نیازها از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌شود.

$$d_{ij}^{min} \le q_{ij} \le d_{ij}^{max} \quad (۱۰)$$

۶- محدودیت فنی

آب تخصیص یافته به هر استان باید با توجه به حداکثر و حداقل مجموع تقاضای بخش‌های مختلف (Z_i^{min} و Z_i^{max}) تعیین شود. اگر مقدار آب تخصیص یافته کم‌تر از حد پایین این محدودیت باشد، باعث می‌شود که از آبخوان‌های حوضه مقادیر بیش‌تری برداشت شود و اگر مقدار آب تخصیص یافته بیش‌تر از حد بالای این محدودیت باشد، به دلیل اینکه حداکثر تقاضا تأمین می‌شود، آب اضافی تلف می‌شود.

$$Z_i^{min} \le Q_i \le Z_i^{max} \quad (۱۱)$$

لازم به ذکر است که در مدل تخصیص آب پیشنهاد شده، حداقل نیاز دو بخش مصارف خانگی و محیط زیست تأمین می‌شود.

۳-۳- مدل بهینه‌سازی چندهدفه

پس از تعیین توابع هدف، پارامترها و محدودیت‌های مدل، مدل بهینه‌سازی چندهدفه تخصیص منـــابع آب حوضه آبریز سفیدرود به

www.SID.ir

Archive of SID

صورت زیر بدست آمد:

$$\max \overline{EBE} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} EBE_i$$
$$= \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \frac{\sum_{i=1}^{n}(AEB_{ij} \cdot q_{ij})}{AEB_{i\,max}((1-\alpha^{loss})Q_{i+}WS_i)}$$
$$\min G = \frac{1}{2m\sum_{i=1}^{m}\frac{Q_i}{EB_i}}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|\frac{Q_i}{EB_i} - \frac{Q_k}{EB_k}\right| \quad (۱۲)$$

$$\text{subject to:} \begin{cases} \sum_{i=1}^{m} Q_i \le AW - WEC_i^{min} \\ \sum_{j=1}^{n} q_{ij} \le (1-\alpha^{loss})\,Q_i + WS_i \\ AW + WS_{Ts} \ge \sum_{k=1}^{Ts} d_{ik}^{min} \\ d_{ij}^{min} \le q_{ij} \le d_{ij}^{max} \\ Z_i^{min} \le Q_i \le Z_i^{max} \\ i = 1,2,\dots,m \text{ and } j = 1,2,\dots,n \end{cases}$$

۳-۴- حل مدل

روش‌های مختلفی مانند روش وزندهی[۱]، روش محدودیت[۲]، روش آرمانی[۳] و الگوریتم‌های فراکاوشی چندهدفه[۴] برای حل مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه وجود دارد. در این مطالعه به دلیل برتری الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه نسبت به روش‌های ریاضی در مسائل پیچیده با تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و پارامترها، از الگوریتم فراکاوشی چندهدفه NSGA-II استفاده شد. این الگوریتم توسط Deb et al. (2000) برای حل برخی از ضعف‌های الگوریتم ژنتیک کلاسیک مانند حجم بالای محاسبات در هر تکرار و عدم ذخیره تعدادی از جواب‌های برتر در طول اجرای مدل پیشنهاد گردید. مراحل اجرای مدل بهینه‌سازی چندهدفه به صورت زیر است:

۱- تولید نسل والد
۲- مرتب کردن نسل والد بر اساس جواب‌های غیرپست
۳- در نظر گرفتن رتبه‌ایی متناسب با تراز غیرپست برای هر جواب غیرپست (۱ برای بهترین تراز، ۲ برای بهترین تراز بعد از ۱ و غیره)
۴- تولید نسل فرزندان با استفاده از عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش
۵- با توجه به نسل اول فرزندان که شامل کروموزم‌های والد و فرزندان می‌باشد، نسل جدید به صورت زیر تولید می‌شود:
- ترکیب کروموزم‌های والد و فرزندان و تولید نسل جدید،
- مرتب کردن نسل جدید بر اساس روش دسته‌بندی غیرپست و شناسایی جبهه‌های غیرپست[۵]،
- تولید نسل والد برای تکرار بعد با استفاده از جبهه‌های غیرپست تولید شده،
- اعمال عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش بر روی نسل والد جدید و تولید فرزندان جدید

۶- تکرار مرحله ۵ تا اتمام تعداد تکرارهای موردنظر

در این مطالعه، کد الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی مدل چندهدفه در محیط MATLAB-2014a با توجه به توابع هدف و محدودیت‌های مدل تهیه و اجرا شد.

۴- نتایج و بحث

همانطور که در بخش قبل ذکر گردید، برای تعیین مجموعه جواب بهینه از الگوریتم NSGA-II استفاده شد. در استفاده از این الگوریتم، مقادیر اندازه جمعیت، نرخ تقاطع، نرخ جهش و تکرار، مقدار هر یک از پارامترها به ترتیب برابر با ۷۰، ۰/۸، ۰/۰۲ و ۲۴۰ در نظر گرفته شد. پس از اجرای مدل، نتایج حاصل به صورت مجموعه جواب بدست آمد که در شکل ۴ نشان داده شده است. مجموعه جواب بدست آمده نشان داده شده در این شکل بیانگر این است که نقاط جواب از همگرایی خوبی برخوردار است.

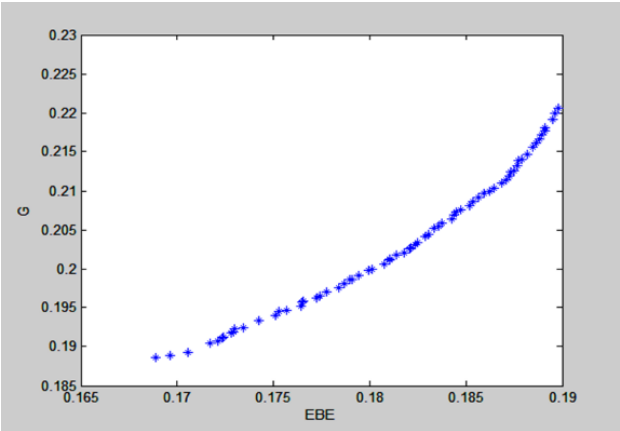

Fig. 4- The pareto front of NSGA-II algorithm
شکل ۴- مجموعه جواب حاصل از اجرای مدل با الگوریتم NSGA-II

مهمترین مزیت مجموعه جواب بدست آمده از مدل بهینه‌سازی این است که مدیران حوضه می‌توانند با توجه به آن، استراتژی مورد نظر خود را انتخاب کنند. در صورتی‌که هدف برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب در حوضه، افزایش بهره‌وری اقتصادی در راستای برقراری عدالت باشد گزینه ۱ می‌تواند جواب مناسبی باشد که جزییات تخصیص آن

www.SID.ir

Archive of SID

برای هر یک از استان‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در این گزینه هر یک از اهداف بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت با یکدیگر در تعادل هستند، در واقع تصمیم‌گیرنده در این گزینه بین توابع هدف trade-off ایجاد می‌کند. مقادیر تابع هدف میانگین بهره‌وری اقتصادی و ضریب جینی در این گزینه به ترتیب با ۰/۱۸۵ و ۰/۲۰۸ برابر است، که یکی از نقاط میانی مجموعه جواب شکل ۴ است. در جدول ۴، مقادیر متغیرهای تصمیم شامل مقادیر مصارف کشاورزی و صنعت و همچنین مقادیر تخصیص آب سطحی آورده شده است. مصارف کشاورزی و صنعت در این حوضه، به صورت تلفیقی از طریق منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود، به این صورت که پس از تخصیص منابع آب سطحی در صورت نیاز از منابع آب زیرزمینی استفاده خواهد شد. مقایسه نتایج بدست آمده در جدول ۴ نشان می‌دهد که استان زنجان دارای بیش‌ترین مقدار مصرف کشاورزی است، که مقدار آن از مقدار آب سطحی تخصیص داده شده به این استان بیش‌تر است، بنابراین مابقی آب موردنیاز از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. به طور کلی، بیشترین مقادیر بهینه مصارف کشاورزی به ترتیب در استان‌های زنجان، گیلان، کردستان، آذربایجان شرقی، قزوین، اردبیل، همدان و تهران بدست آمد. به طور مشابه، بیشترین مقادیر بهینه مصارف صنعت به ترتیب در استان‌های زنجان، گیلان، کردستان، تهران، همدان، اردبیل، آذربایجان‌شرقی و قزوین بدست آمد.

نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی مقادیر بدست آمده در گزینه ۱ در جدول ۵ آورده شده است. مقایسه مقادیر سود اقتصادی بدست آمده در شرایط بهینه و فعلی در هر یک از استان‌ها نشان می‌دهد که در استان‌های همدان، کردستان، قزوین و اردبیل سود کشاورزی افزایش یافته به طوری که بیشترین سود در استان کردستان است. همچنین استان‌های گیلان، آذربایجان شرقی، زنجان، قزوین و تهران سود کشاورزی کاهش یافته است و استان گیلان دارای بیشترین کاهش سود است.

Table 4- The values of decision variables in option 1 (unit: Mm^3)

جدول ۴- مقادیر متغیرهای تصمیم در گزینه ۱

province	Surface allocation	Q agricultural	Q industrial
Guilan	1099.1	799.7	4.5
East Azarbaijan	486.6	359.6	0.3
Ardabil	136.7	147.7	0.3
Zanjan	456.4	863.1	13.2
Kordestan	448.8	645.9	0.9
Hamedan	33.1	85.2	0.6
Qazvin	402.3	275.3	0.2
Tehran	92.2	65.5	0.8
Total	3155.2	3242.0	20.8

مقایسه مقادیر سود اقتصادی ناشی از فعالیت‌های صنعتی نشان می‌دهد که استان‌های زنجان و گیلان به ترتیب دارای بیشترین و کمترین افزایش سود هستند.

در صورتی‌که مدیران حوضه، صرف‌نظر از برقراری عدالت، به دنبال بالاترین بهره‌وری اقتصادی در سطح حوضه باشند، گزینه ۲ می‌تواند بهترین جواب باشد که مقادیر تابع هدف میانگین بهره‌وری اقتصادی و ضریب جینی در این گزینه به ترتیب برابر است با ۰/۱۹۰ و ۰/۲۲۱. مقادیر تخصیص هر یک از استان‌های ذینفع حوضه و مقادیر سود اقتصادی در صورت اجرای این گزینه در جدول ۶ آورده شده است.

Table 5- Economic evaluation of option 1

جدول ۵- ارزیابی اقتصادی جواب‌های بدست آمده در گزینه ۱

province	cultivated area (ha)	Value	sum of economic benefit (million rials)	agricultural benefit		industrial benefit (million rials)
				million rials	million rials/ha	
Guilan	83230	current	1340646.4	1304953.2	15.7	35693.3
		optimum	1284267.7	1246793.1	15.0	37474.6
East Azarbaijan	46039	current	526754.8	524246.0	11.4	2508.8
		optimum	517244.8	511690.9	11.1	5553.9
Ardabil	14093	current	172118.36	170180.5	12.1	1937.8
		optimum	202129.4	196177.5	13.9	5951.9
Zanjan	95402	current	1405143.1	1266801.9	13.3	138341.3
		optimum	1318804.4	1153104.3	12.1	165700.2
Kordestan	60055	current	830477.5	789987.5	13.2	40489.9
		optimum	928060.6	867559.2	14.4	60501.4
Hamedan	5590	current	89378.9	87023.6	15.6	2355.4
		optimum	134050.1	126258.2	22.6	7791.9
Qazvin	24028	current	890892.5	885386.4	36.8	5506.1
		optimum	896250.6	879244.3	36.6	17006.3
Tehran	6685	current	231332.6	223066.7	33.4	8265.9
		optimum	205002.8	185279.7	27.7	19723.1

www.SID.ir

Archive of SID

Table 6- the values of decision variables and economic benefit in option 2
جدول ۶- مقادیر متغیرهای تصمیم و سود اقتصادی در گزینه ۲

province	Unit: Mm^3			Unit: Million Rials	
	Surface allocation	Q agricultural	Q industrial	EB agri	EB indus
Guilan	1098.6	799.2	3.8	1245887.3	31879.8
East Azarbaijan	487.1	359.7	0.3	511814.7	5848.1
Ardabil	137.4	147.6	0.3	196020.8	5813.5
Zanjan	435.8	863.4	13.5	1153526.4	168884.1
Kordestan	450.7	647.4	0.9	869407.2	59834.4
Hamedan	33.0	85.2	0.6	126179.7	7819.3
Qazvin	360.6	275.8	0.2	880930.8	16518.4
Tehran	84.4	65.9	0.8	186397.2	19749.3
Total	3087.6	3244.1	20.4	5170164.0	316346.7

اگر شرایطی در منطقه حاکم باشد که مدیران تنها به دنبال برقراری عدالت باشند در این صورت در مدل تخصیص بدست آمده تنها عدالت بررسی می‌شود که بیشترین عدالت با استفاده از کمترین ضریب جینی تعریف می‌شود. در این دیدگاه، گزینه ۳ انتخاب می‌شود که مقادیر تابع هدف میانگین بهره‌وری اقتصادی و ضریب جینی در این گزینه به ترتیب برابر است با ۰/۱۶۹ و ۰/۱۸۹. تخصیص‌های بدست آمده در این گزینه در جدول ۷ آورده شده است.

با مقایسه شرایط گزینه ۲ و ۳، برنامه‌ریزان و مدیران باید ۱۶/۹ درصد عدالت را برای رسیدن به بالاترین سود اقتصادی از دست دهند تا میزان بهره‌وری اقتصادی ۱۲/۴ درصد افزایش یابد. همچنین مدیران حوضه باید از ۱۱/۱ درصد سود اقتصادی که در گزینه ۲ بدست می‌آورند، صرف‌نظر کنند تا بیشترین عدالت مطابق با گزینه ۳ در میان ذینفعان حوضه برقرار شود.

یکی از معیارهای ارزیابی عدالت در یک جامعه کاهش اختلاف بین حداکثر و حداقل سود در آن جامعه است، بنابراین برای ارزیابی این معیار این اختلاف‌ها در گزینه‌های در نظر گرفته شده، مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه مقادیر سود اقتصادی ذینفعان حوضه در هر یک از گزینه‌ها نشان می‌دهد که در صورت اجرای گزینه ۱، ۲ و ۳، تفاوت بین حداکثر و حداقل سود اقتصادی به ترتیب تقریبا با ۱۱۸۴۷۵۴، ۱۱۸۸۴۱۱ و ۱۱۶۴۸۶۱ میلیون ریال برابر است. همانطور که انتظار می‌رود، این اختلاف در گزینه ۳ که گزینه‌ای عدالت محور است کمترین مقدار را دارد. بررسی مقادیر تخصیص‌های هر یک از ذینفعان حوضه در دو گزینه ۲ و ۳ نشان می‌دهد که برای رسیدن به این میزان عدالت، مقادیر تخصیص استان‌های همدان، زنجان، قزوین و تهران به ترتیب ۲۵/۸، ۱۳/۴، ۱۲/۴ و ۱۱ درصد نسبت به گزینه ۲ تغییر یافت، در حالی‌که سایر استان‌های واقع در این حوضه تغییرات قابل توجهی نداشتند. مقایسه مقادیر سود فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی در اجرای گزینه‌های ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد که در هنگام برقراری عدالت سود فعالیت‌های صنعتی استان زنجان بیشترین تغییرات کاهشی و استان همدان دارای کمترین تغییرات افزایشی است. همچنین در هنگام برقراری سود فعالیت‌های کشاورزی استان قزوین بیشترین تغییرات کاهشی و استان همدان کمترین تغییرات افزایشی را دارد.

Table 7- The values of decision variables and economic benefit in option 3
جدول ۷- مقادیر متغیرهای تصمیم و سود اقتصادی در گزینه ۳

province	Unit: Mm^3			Unit: Million Rials	
	Surface allocation	Q agricultural	Q industrial	EB agricultural	EB industrial
Guilan	1099.5	800.5	4.6	1248004.4	38419.6
East Azarbaijan	486.2	358.4	0.3	509960.5	5553.9
Ardabil	136.6	146.6	0.3	194679.5	5727.0
Zanjan	494.2	862.4	11.6	1152119.6	145932.5
Kordestan	438.3	642.4	1.2	862727.1	79645.8
Hamedan	41.5	84.7	0.6	125399.2	7791.9
Qazvin	405.3	276.6	0.2	883402.9	17285.1
Tehran	93.6	64.9	0.6	183684.1	16244.1
Total	3195.2	3236.4	19.5	5159977.4	316599.9

www.SID.ir

Archive of SID

به طور کلی، گزینه ۲ شرایط ناعادلانه‌ای را در حوضه ایجاد می‌کند و باعث ایجاد درگیری بیشتری بین ذینفعان حوضه در راستای توسعه نسبت به گزینه ۳ می‌شود. گزینه ۳ به برقراری عدالت در برنامه‌ریزی تخصیص آب تاکید دارد که این می‌تواند فرصت‌هایی را برای ذینفعان استان‌های زنجان، قزوین و همدان فراهم کند. اگرچه در صورت اجرای این گزینه عدالت تا حد زیادی اصلاح می‌شود اما میزان بهره‌وری اقتصادی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در حالی‌که اقتصاد نقش مهمی در توسعه یک منطقه دارد و مدیران نمی‌توانند به طور کامل آن را نادیده بگیرند. از طرف دیگر برای اصلاح توسعه در حوضه آبریز سفیدرود مدیران نباید فقط عدالت را در نظر بگیرند. بنابراین بهتر است گزینه ۱ برای برنامه‌ریزی انتخاب شود زیرا نگرش متعادل این گزینه همزمان با بررسی سود اقتصادی هر یک از ذینفعان برقراری عدالت را نیز در بین آن‌ها در نظر می‌گیرد.

آنالیز حساسیت: بررسی وضعیت آبی حوضه آبریز سفیدرود نشان می‌دهد که در بعضی از دوره‌ها مقدار آب در دسترس افزایش و در بعضی از دوره‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به اینکه میزان آب در دسترس عامل اصلی استراتژی تخصیص و مدیریت آب در سطح حوضه است، بهتر است مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده در این مطالعه برای شرایط مختلف آب در دسترس تحت عنوان سناریو ۱ نیز اجرا شود. به این ترتیب، در سناریوی ۱ افزایش و کاهش ۱۵ درصدی آب دردسترس مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین هنگام انحراف آب به استان‌های ذینفع، بخشی از آب به صورت تلفات آب از دست می‌رود که به نوع مدیریت حوضه بستگی دارد. در ادامه، برای بررسی پارامتر میزان تلفات حوضه سناریوی ۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد که در این سناریو، میزان تلفات ۱۰ درصدی و ۴۰ درصدی ارزیابی می‌شود. تخصیص‌های مربوط به گزینه ۱ که در آن میزان تلفات انحراف آب ۳۵ درصد است، به عنوان سناریوی مرجع در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از اجرای سناریوها در جدول‌های ۸ و ۹ آورده شده است.

مقایسه شرایط سناریوی ۱ با سناریوی مرجع نشان می‌دهد که هر چه مقدار آب در دسترس بیشتر شود میزان سود بهره‌وری و عدالت افزایش می‌یابد و بالعکس. همچنین مقایسه مقادیر تخصیص هر یک از استان‌های ذینفع در شکل ۸ نشان می‌دهد که در هنگام افزایش یا کاهش مقدار آب در دسترس، مقدار آب تخصیص یافته بین ذینفعان نیز به نسبت حداکثر نیاز آبی و میانگین سود اقتصادی استان مربوطه افزایش یا کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۸ اگر آب در دسترس ۱۵ درصد کاهش یابد بهره‌وری اقتصادی و عدالت به ترتیب ۳/۸ و ۳۰/۳ درصد نسبت به شرایط سناریوی مرجع کاهش می‌یابد و برعکس اگر مقدار آب در دسترس ۱۵ درصد افزایش یابد، بهره‌وری اقتصادی و عدالت به ترتیب ۱۸/۹ و ۱۷/۳ درصد نسبت به شرایط سناریوی مرجع افزایش می‌یابد.

مقایسه شرایط سناریوی ۲ با سناریوی مرجع نشان می‌دهد که هر چه میزان درصد تلفات انحراف آب بیشتر شود میزان سود بهره‌وری و عدالت کاهش می‌یابد و بالعکس. همچنین مقایسه مقادیر تخصیص هر یک از استان‌های ذینفع در شکل ۹ نشان می‌دهد که در هنگام افزایش ۵ درصدی و کاهش ۲۵ درصدی تلفات انحراف آب نسبت به شرایط سناریوی مرجع، مقدار آب تخصیص یافته بین ذینفعان نیز به نسبت حداکثر نیاز آبی و میانگین سود اقتصادی استان مربوطه به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. اگر درصد تلفات انحراف آب ۱۰ درصد در نظر گرفته شود، بهره‌وری اقتصادی و عدالت به ترتیب ۱۶/۸ و ۶/۲ نسبت به شرایط سناریوی مرجع افزایش می‌یابد و اگر درصد تلفات انحراف آب ۴۰ درصد در نظر گرفته شود، میزان بهره‌وری اقتصادی و عدالت به ترتیب ۹/۲ و ۲۸/۸ نسبت به شرایط سناریوی مرجع کاهش می‌یابد. جزئیات مربوط به ارزیابی اقتصادی در جدول ۹ آورده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای رسیدن به عدالت و بهره‌وری اقتصادی، مدل برنامه‌ریزی تخصیص آب چندهدفه در حوضه آبریز سفیدرود به منظور کاهش درگیری‌های آبی بین استان‌های ذینفع در این حوضه توسعه داده شد. در این مدل بهینه‌سازی، عدالت، بهره‌وری و همچنین پایداری زیست‌محیطی به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفت. برای حل مدل بهینه‌سازی چندهدفه از الگوریتم فراکاوشی NSGA-II استفاده شد.

Table 8- The values of objective functions in Defined scenarios
جدول ۸- مقادیر توابع هدف در سناریوهای تعریف شده

Objective Function	baseline	1.15AW	0.85AW	10%Loss Rate	40% Loss Rate
G	0.208	0.202	0.281	0.209	0.272
EBE	0.185	0.220	0.184	0.281	0.170

www.SID.ir

Archive of SID

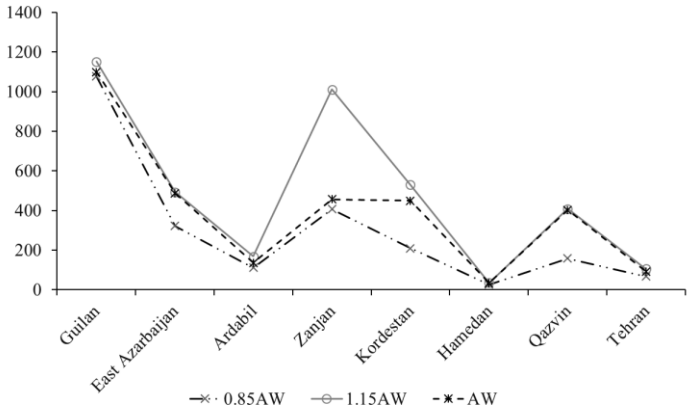

Fig. 8- The values of water allocation in scenarios of available water
شکل ۸- مقادیر تخصیص آب در سناریوهای آب در دسترس

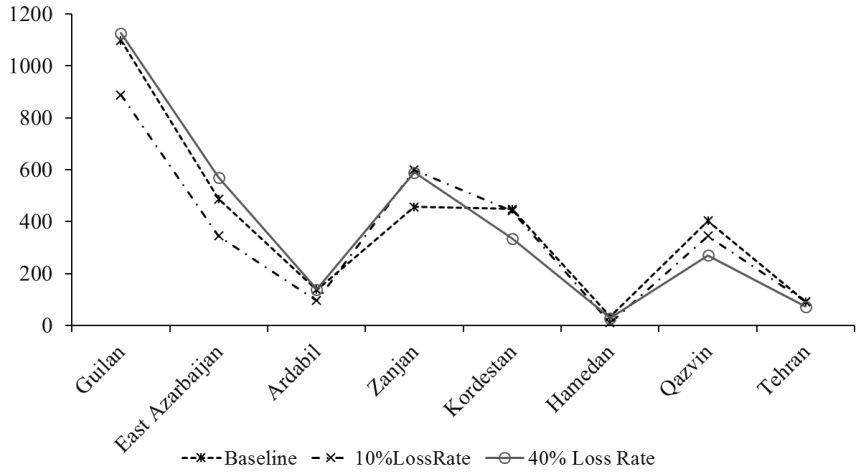

Fig. 9- The values water allocation in scenarios of water diversion loss rates
شکل ۹- مقادیر تخصیص آب در سناریوهای درصد تلفات انحراف آب

Table 9- Comparison of economic evaluation in defined scenarios
جدول ۹- مقایسه ارزیابی اقتصادی سناریوهای تعریف شده

province	optimal economic benefit ($\times 10^6$ **Milion rials**)				
	baseline	1.15AW	0.85AW	10%Loss Rate	40%Loss Rate
Guilan	1.3	1.3	1.2	1.4	1.2
East Azarbaijan	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5
Ardabil	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
Zanjan	1.3	1.5	1.1	1.2	1.2
Kordestan	0.9	0.7	0.6	0.8	0.8
Hamedan	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Qazvin	0.9	1.0	0.6	0.8	0.7
Tehran	0.1	0.3	0.2	0.2	0.2
Total	5.4	5.7	4.4	5.2	4.9

سپس برای ایجاد تعادل بین بهره‌وری اقتصادی و میزان برقراری عدالت از بین مجموعه جواب‌های بدست آمده از مدل بهینه‌سازی، بهترین جواب انتخاب گردید. ارائه نتایج مدل بهینه‌سازی به صورت مجموعه جواب، تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان حوضه آبریز مورد بررسی را یاری می‌رساند تا بر اساس شرایط حوضه و اولویت‌های مورد نظر بتوانند بهترین تخصیص را با توجه به معیارهای بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت در بین ذینفعان حوضه و همچنین با توجه به شرایط توسعه کشاورزی و صنعتی استان‌های ذینفع در نظر بگیرند.

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به اینکه هدف تخصیص آب در این مطالعه، افزایش بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت بود بنابراین در انتخاب بهترین جواب بهینه از بین مجموعه جواب‌های بدست آمده باید این دو معیار به صورت تعادلی در نظر گرفته شود. به این ترتیب، گزینه ۱ از بین سه گزینه پیشنهادی به عنوان بهترین جواب انتخاب شد؛ زیرا این گزینه همزمان با بررسی سود اقتصادی ایجاد شده در هر یک از استان‌های ذینفع، برقراری عدالت در بین استان‌ها را نیز در نظر می‌گیرد.

نتایج بدست آمده در بخش آنالیز حساسیت مدل بهینه‌سازی نشان داد که پارامترهای مقدار آب در دسترس و درصد تلفات انحراف آب پارامترهای مهمی هستند. در صورت افزایش ۱۵ درصدی مقدار آب در دسترس، میزان بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت به ترتیب ۱۸/۹ و ۱۷/۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش ۱۵ درصدی مقدار آب در دسترس، میزان بهره‌وری اقتصادی ۳/۸ درصد کاهش و میزان برقراری عدالت ۳۰/۳ درصد کاهش می‌یابد. به عبارتی با کاهش ۱۵ درصدی مقدار آب، میزان بهره‌وری اقتصادی کاهش قابل توجهی ندارد در حالی‌که میزان برقراری عدالت با اختلاف فاحشی نزول می‌یابد. با توجه به اینکه در شرایط کنونی منابع آب کشور حالت بحرانی دارد، صرفه جوئی در مصارف آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده در این مطالعه، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که می‌توان با اعمال سیاست‌های حاکمیتی (تشویقی یا تنبیهی) به برقراری عدالت در سناریوی کاهش آب دست یافت، بدون آنکه بهره‌وری اقتصادی دچار لطمه محسوسی گردد. تغییر درصد تلفات انحراف آب سطحی در سناریوها نیز نشان داد که بیشترین تأثیر افزایش تلفات انحراف آب در میزان برقراری عدالت بین ذینفعان است. با توجه به نتایج بدست آمده در این سناریو و اینکه در حال حاضر میزان تلفات آب در حوضه سفیدرود قابل توجه است، در نظر گرفتن کاهش تلفات انحراف آب در مدیریت حوضه ضروری است. لازم به ذکر است که در راستای امکان اجرایی شدن تخصیص‌های بهینه بدست آمده در این مطالعه، نظرسنجی از مدیران آب استان‌های ذینفع می‌تواند موضوع مطالعه بعدی باشد.

پی‌نوشت‌ها

1- Weighted Sum Method
2- Epsilon-Constraint Method
3- Goal Attainment Method
4- Multi-Objective Evolutionary Algorithms
5- Non-Dominated Fronts

۵- مراجع

Babel MS, Gupta DA, Nayak DK (2005) A model for optimal allocation of water to competing demands. Water Resources Management 19:693-712

Banihabib ME, Mohammad Rezapour Tabari M, Mohammad Rezapour Tabari M (2017) Development of integrated multi-objective strategy for reallocation of water resources in agriculture systems; Case study: Zarinehrood Basin. Iran-Water Resources Research 13(1):38-52 (In Persian)

Cai X, McKinney DC, Lasdon LS, Watkins DW (2001) Solving large nonconvex water resources management models using generalized Benders decomposition. Operation Reservior 49(2):235-245

Cai Y, Yue W, Xu L, Rong Q (2016) Sustainable urban water resources management considering life-cycle environmental impacts of water utilization under uncertainty. Resources, Conservation and Recycling 108:21-40

Cullis J, Koppen BV (2007) Applying the Gini Coefficient to measure inequality of water use in the Olifants river water management area, South Africa. International Water Management Institute, Report 113

Daubert JT, Young RA (1981) Recreational demands for maintaining instream flows: a contingent valuation approach. American Journal of Agricultural Economics 63(4):666-676

Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T (2002) A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. IEEE Trans, Evolutionary Computation 6(2):182-197

Divakar L, Babel MS, Perret SR, Gupta AD (2011) Optimal allocation of bulk water supplies to competing use sectors based on economic criterion-an application to the Chao Phraya River Basin, Thailand. Journal of Hydrology 401(1):22-35

Dong CL, Schoups G, van de Giesen N (2013) Scenario development for water resource planning and management: a review. Technological Forecasting and Social Change 80(4):749-76

Dwaf A (2005) A draft position paper for water allocation reform in South Africa. Towards a Framework for Water Allocation Planning. Discussion Document. Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, South Africa

Garcia X, Pargament D (2015) Reusing wastewater to cope with water scarcity: economic, social and environmental considerations for decision-making. Resources, Conservation and Recycling 101:154–166

www.SID.ir

Archive of SID

transboundary river water allocation. Water Resources Management 28(15):5447-5463

Roozbahani R, Schreider S, Abbasi B (2015b) Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social, and economic preferences. Environmental Modelling and Software 64:18–30

Seekell DA, D'Odorico P, Pace ML, Dodorico P (2011) Virtual water transfers unlikely to redress inequality in global water use. Environmental Research Letters 6(2):024017

Syme GJ, Nancarrow BE, McCreddin JA (1999) Defining the components of fairness in the allocation of water to environmental and human uses. Environment Management 57(1):51-70

Tennant DL (1976) In stream flow regimes for Fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries 1:6-10

Tsur Y, Dinar A (1995) Efficiency and equity considerations in pricing andallocating irrigation water. Policy Research Working Paper 1460:37-40

Wang X, Zhang J, Shahid S, ElMahdi A, He R, Wang X, Ali M (2012) Gini coefficient to assess equity in domestic water supply in the Yellow River. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 17: 65-75

Wang YD, Lee JS, Agbemabiese L, Zame K, Kang SG (2015) Virtual water management and the water–energy nexus: a case study of three Mid-Atlantic states. Resources, Conservation and Recycling 98:76-84

Vpsps (2011) Guideline for finding aquatic ecosystems environmental water requirement. Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision 557, 127p (In Persian)

Zhang Z, Shao Y (2010) Inequality and polarization analysis of urban water use in the Yangtze River Delta area, China. Water Science and Technology 62:300-310

Peyton Young H (1994) Equity: in Theory and Practice. Princeton University Press, ISBN: 9780691044644

Gini C (1921) Measurement of inequality of incomes. Economic 31(121):124-126

Hu Zh, Chen Y, Yao L, Weib CH, Li CH (2016) Optimal allocation of regional water resources: From aperspective of equity– efficiency tradeoff. Resources, Conservation and Recycling 109:102-113

Johan F (2012) Estimation of Gini coefficients using Lorenz curves. Journal of Economic Methodology 1(2):31-38

Kathleen BA, Raymond RT, Alvin BC, Jose BC (2010) Bi-level fuzzy optimization approach for water exchange in eco-industrial parks. Process Safety and Environmental Protection 88(1):31-40

Li M, Guo P (2014) A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties. Applied Mathematical Modelling 38(19):4897-4911

Malghan D (2010) On the relationship between scale, allocation, and distribution. Ecological Economics 69(11):2261-2270

Mohsenizadeh E, Shourian M (2018) Optimum water resources allocation planning at basin scale by integrating MODSIM and Cuckoo optimization algorithm. Iran-Water Resources Research 13(4):1-16 (In Persian)

Neumayer E (2011) Sustainability and inequality in human development. Human Development Research Paper No. 4. United Nations Development Programme-Human Development Reports, New York

Roa-García MC (2014) Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: trade-offs in a full world. Water Alternatives 7(2):298-319

Roozbahani R, Abbasi B, Schreider S (2015a) Optimal allocation of water tocompeting stakeholders in a shared watershed. Annals of Operations Research 229(1):657-676

Roozbahani R, Abbasi B, Schreider S, Ardakani A (2014) A multi-objective approach for

www.SID.ir