تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۲، خرداد و تیر ۱۳۹۸ (ص۳۱۲-۲۹۷) DOI: 10.22059/ijswr.2018.258049.667913

Equitable Allocation of Water Resources Using Shannon Entropy Theory in Compromise Programming Method

REZA, AYOUBI KIA[1], SOMAYE JANATROSTAMI[2*], AFSHIN ASHRAFZADEH[3], BEHNAM SHAFIEI SABET[4]

1. M.Sc. Graduate of water resources engineering, Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran
2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran.
4. Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Guilan, Rasht.

(Received: May. 22, 2018- Revised: Aug. 11, 2018- Accepted: Sep. 16, 2018)

ABSTRACT

Because of the significant impact of water on economic development, social stability and ecological balance, the allocation of water resources has become a worldwide issue. In this paper, a multi-objective planning model consist of two objective functions was developed for water allocation to maximize the productivity of economical benefit and the equity of water allocation in Sefidroud basin located in Iran. A Compromise Programming method was applied to trade off both the objective functions. The different weights of the objective functions and the definitions of TDS, DSA and DSB schemes were investigated in terms of equity, economical benefit productivity and equity establishment. The results showed that TDS is the best scheme for balancing the target functions. With the except of TDS, surface water allocation and economical benefit do not follow a particular pattern in other weights of target functions, so that decision makers are confused to choose the best weights of the objective functions. Shannon Entropy theory is a suitable solution for selecting the best weights of the objective functions. The results obtained by applying the Shannon Entropy theory showed that the best weights of the objective functions for the productivity of economical benefit and water allocation equity according to the decision maker's priority were 0.35 and 0.65, respectively. Generally, the results of this study showed that if decision maker's priorities were not clear, Shannon Entropy theory and Compromise Programming method could be used to determine the weights of each objective functions in order to make a balance among the objective functions.

Keywords: Efficiency, Equity, Water resources, Management, Sefidroud basin.

*Corresponding Author's Email: janatrostami@guilan.ac.ir

تخصیص عادلانه منابع آب با کاربرد تئوری آنتروپی شانون در روش برنامه‌ریزی سازشی

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

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۴. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱/ ۳/ ۱۳۹۷- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۵/۲۰- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۶/۲۵)

چکیده

با توجه به تأثیر قابل‌ملاحظه آب در توسعه اقتصادی، اجتماعی و تعادل زیست‌محیطی، تخصیص منابع آب به یک مسئله جهانی تبدیل شده است. در این مطالعه، یک مدل برنامه‌ریزی تخصیص آب چندهدفه در حوضه آبریز سفیدرود ارائه گردید که شامل دو هدف حداکثر کردن بهره‌وری سود اقتصادی و عدالت در تخصیص آب است. برای حل مدل توسعه‌یافته و ایجاد برهم‌کنش مناسب بین دو هدف بهره‌وری سود و عدالت از روش برنامه‌ریزی سازشی استفاده شد. وزن‌های مختلف توابع هدف، به همراه تعریف طرح‌های TDS، DSA و DSB به ترتیب با نگرش تعادلی، بهره‌وری سود اقتصادی و برقراری عدالت بررسی شد که نتایج نشان داد طرح TDS، بهترین طرح از دیدگاه برقراری تعادل بین توابع هدف است. به‌استثنای TDS، نتایج نشان داد که مقادیر تخصیص آب سطحی و سود اقتصادی در سایر وزن‌های توابع هدف از روند خاصی پیروی نمی‌کند، به‌طوری‌که برنامه‌ریز در انتخاب بهترین وزن توابع هدف دچار مشکل می‌شود. استفاده از تئوری آنتروپی شانون راه‌حل مناسبی برای انتخاب بهترین وزن‌های توابع هدف است. نتایج حاصل از کاربرد این تئوری در روش برنامه‌ریزی سازشی نشان داد که بهترین جواب با در نظر گرفتن اولویت برنامه‌ریزان منطقه با استفاده از وزن‌های ۰/۳۵ برای هدف بهره‌وری سود و ۰/۶۵ برای هدف عدالت تخصیص بدست می‌آید. به‌طورکلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد در شرایطی که اولویت‌های برنامه‌ریزان آب در منطقه مشخص نباشد، می‌توان هم‌زمان با کاربرد روش برنامه‌ریزی سازشی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه از تئوری آنتروپی شانون برای تعیین وزن هر یک از توابع هدف استفاده نمود تا تعادلی بین توابع هدف برقرار شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری، عدالت، منابع آب، مدیریت، حوضه آبریز سفیدرود.

مقدمه

تخصیص منابع آب در شرایط ایده‌آل باید به‌گونه‌ای باشد تا از نظر اقتصادی کارآمد، از نظر فنی قابل‌اجرا و از نظر اجتماعی دارای توزیعی عادلانه باشد. تخصیص کارآمد از نظر اقتصادی به معنای توزیع آب برای به حداکثر رساندن سود اقتصادی و تخصیص با عدالت اجتماعی به معنای توزیع متوازن آب به‌منظور حفظ منافع و تخصیص عادلانه آب به بخش‌های کم‌درآمد است. بنابراین با توجه به مواردی که ذکر شد، در تخصیص منابع آب نیاز به یک تخصیص کارآمد که در آن، آب به‌عنوان یک کالای اجتماعی و اقتصادی برای توسعه در نظر گرفته شود، امری ضروری است (Babel *et al*., 2005). در این فرآیند، توزیع و نگرش عادلانه، دیدگاهی مفید و اجتناب‌ناپذیر است (Cullis and Van Koppen, 2007). بهره‌برداری معقول و منطقی منابع آب در یک جامعه می‌تواند اساسی برای از بین‌بردن فقر و پیشرفت قابل‌توجه اقتصادی آن منطقه باشد (Dwaf, 2005). حل مسائل مربوط به عدالت بسیار دشوار است و اجرای عدالت در تخصیص منابع آب بین بخش‌های محیط‌زیست و نیازهای مصرفی ساکنان یک منطقه امری ضروری است (Syme *et al*., 1999). با توجه به اینکه استانداردهای قضاوت عادلانه همیشه به‌صورت فردی در نظر گرفته می‌شود، نگرش عادلانه در مقایسه با بهره‌وری، کم‌تر موردتوجه قرارگرفته است (Tsur and Dinar, 1995). عدالت تا حد زیادی به طرز تفکر اشخاص بستگی دارد و نمی‌توان آن را به‌صورت علمی تحلیل نمود زیرا در افراد یک جامعه تعاریف مختلفی برای عدالت وجود دارد (Young, 1994; Wang *et al*., 2015). تاکنون مطالعات زیادی در زمینه برقراری عدالت در برنامه‌ریزی‌ها و تخصیص منابع آب انجام شده است

* نویسنده مسئول: janatrostami@guilan.ac.ir

(Hu *et al*., 2016; Roozbahani *et al*., 2015a)، زیرا در نظر نگرفتن عدالت در تخصیص منابع آب باعث ایجاد درگیری‌ها و مناقشات بین ذینفعان و سهامداران مختلف خواهد شد. یکی از روش‌هایی که معمولاً برای اندازه‌گیری عدالت استفاده می‌شود، ضریب جینی است (Hu *et al*., 2016). ضریب جینی، ضریبی است که برای اندازه‌گیری توزیع عادلانه یک منبع استفاده می‌شود و شامل مقایسه همه متغیرهای آن منبع است. بنابراین، می‌توان آن را یک راه‌حل مؤثر برای اندازه‌گیری عدالت در تخصیص منابع آب در نظر گرفت (Gini,1921). Cullis and Van Koppen (2007) استفاده از ضریب جینی را برای اندازه‌گیری نابرابری مصرف آب در حوضه مدیریتی رودخانه‌ای در آفریقای جنوبی پیشنهاد کردند. پس از آن در مطالعات زیادی، از این ضریب برای اندازه‌گیری عدالت استفاده شد که نتایج آن‌ها نشان داد، ضریب جینی معیار مناسبی برای اندازه‌گیری عدالت در یک جامعه است (Zhang and Shao, 2010; Seekell *et al*., 2011; Wang *et al*., 2012). در ادامه چند مورد از مطالعاتی که اخیراً در این راستا انجام شده، ذکر شده است. Iftekhar and Fogarty (2017) عدالت را در سیاست‌های تخصیص مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از ضریب جینی اندازه‌گیری کردند. Yuan *et al*., (2017) برای محاسبه مقادیر حد مجاز دبی تخلیه فاضلاب شهرها در کشور چین بر اساس رویکرد عدالت اقتصادی-اجتماعی از ضریب جینی استفاده کردند و همچنین، Dai *et al*., (2018) بر اساس ضریب جینی یک مدل بهینه‌سازی استوکستیک برای اندازه‌گیری برابری و سود حاصل از تخصیص آب در حوضه دریاچه دیانچی توسعه دادند.

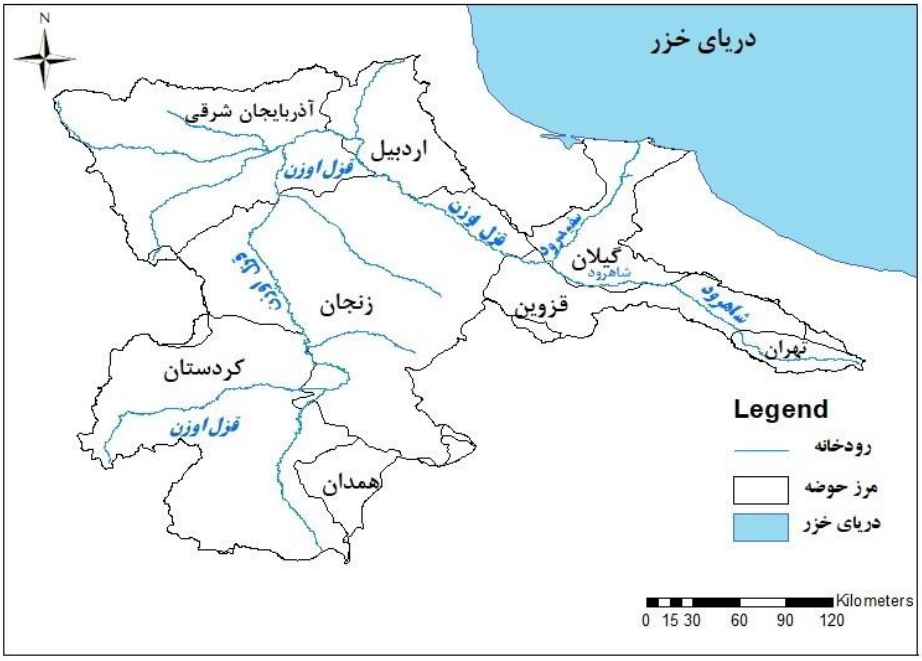
برای تخصیص توزیع عادلانه و بهره‌وری در منابع آب، استفاده از مدل مدیریتی چندهدفه، راه‌حل مناسبی است (Hu *et al*., 2016). با توجه به اینکه، عدم تعادل تا حد زیادی منجر به افزایش ناپایداری‌ها در تخصیص منابع می‌شود، مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای تعادل عدالت و بهره‌وری منابع توسعه داده شد (Neumayer, 2011). یکی از روش‌هایی که کاربرد زیادی در بدست آوردن جواب‌های مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه به‌خصوص در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب دارد، روش برنامه‌ریزی سازشی است. Zeleny, (1973) استفاده از روش برنامه‌ریزی سازشی را برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد کرد. بررسی مطالعات گذشته، کاربرد گسترده این روش را در حل مسائل چندهدفه، به‌خصوص در مسائل مربوط به مدیریت تخصیص منابع آب نشان می‌دهد (Mimi and Sawalhi, 2003; Han *et al*., 2011; Hu *et al*., 2016). به عنوان مثال، Fattahi and Fayyaz (2010) و Zarghami *et al*. (2008) در برنامه‌ریزی و مدیریت آب شهری و همچنین Higgins *et al*. (2008) و Hu *et al*., (2016) در تخصیص آب از این روش استفاده کردند. انتخاب بهترین جواب در روش برنامه‌ریزی سازشی تا حد زیادی به انتخاب وزن هر یک از توابع هدف بستگی دارد که معمولاً این وزن‌ها را با توجه به اولویت برنامه‌ریزان آب منطقه تعیین می‌کنند. اما هنگامی‌که این اولویت‌ها در برنامه‌ریزی به‌صورت شفاف مشخص نباشد، انتخاب وزن‌ها در تعیین جوابی که برهم‌کنش مناسبی بین اهداف داشته باشد، دارای اهمیت است. استفاده از تئوری آنتروپی شانون در روش برنامه‌ریزی سازشی، راه‌حلی مناسب برای تعیین بهترین وزن‌ها برای رسیدن به بهترین برهم‌کنش می‌باشد. در این راستا، Sun *et al*., (2013) در انتخاب بهترین شاخص برای تخصیص، Monghasemi *et al*., (2015) در بهینه‌سازی چند هدفه پروژه‌های سازه‌ای، Wang *et al*., (2017) در انتخاب بهترین وزن‌ها در روش TOPSIS، Akhooni Pourhosseini and Ghorbani (2017) برای تعیین مؤثرترین پارامتر شیمیایی در کیفیت آب‌های سطحی و Xavier *et al*., (2018) به‌منظور حل روش برنامه‌ریزی آرمانی در انتخاب بهترین شاخص پایداری کشاورزی از تئوری آنتروپی شانون استفاده کردند. با توجه به ویژگی‌های این تئوری، در این مطالعه از تئوری آنتروپی شانون در انتخاب بهترین وزن‌های روش برنامه‌ریزی سازشی برای رسیدن به تخصیص عادلانه در حوضه آبریز سفیدرود استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه موردمطالعه

حوضه آبریز سفیدرود بخشی از حوضه آبریز دریای خزر است که با مساحت تقریبی ۵۹۲۵۱ کیلومترمربع در شمال‌غربی ایران واقع شده است. از نظر تقسیمات سیاسی کشور، این حوضه شامل ۸ استان گیلان، آذربایجان‌شرقی، اردبیل، زنجان، کردستان، همدان، قزوین و تهران است که به‌عنوان ذینفعان حوضه به شمار می‌آیند. حوضه آبریز سفیدرود از دو رودخانه اصلی قزل‌اوزن و شاهرود تشکیل یافته است که در محل سد سفیدرود به هم می‌پیوندند و رودخانه سفیدرود را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). با توجه به آمار سال ۱۳۸۵، جمعیت این حوضه تقریباً ۲/۱ میلیون نفر بوده است. در جدول (۱) مساحت و جمعیت هر یک از استان‌های ذینفع حوضه آورده شده است. بیش‌ترین مقدار بارش سالانه مربوط به استان گیلان است، به‌طوری‌که به بیش از ۱۷۰۰ میلی‌متر می‌رسد، درحالی‌که مقدار بارش سالانه در استان‌های دیگر این حوضه بین ۴۰۰-۲۰۰

میلی‌متر است. بیشترین و کمترین درجه حرارت ۵۳ و ۳۸- درجه سانتی‌گراد است که به ترتیب در ماه تیر در ایستگاه گیلوان استان گیلان و ماه بهمن در ایستگاه بیجار استان کردستان اندازه‌گیری شده است.



شکل ۱- حوضه آبریز سفیدرود

جدول ۱- مساحت و جمعیت استان‌های واقع در حوضه سفیدرود (آمار سال ۱۳۸۵)

استان	جمعیت		مساحت	
	درصد	نفر	درصد	هکتار
گیلان	۲۱/۷	۴۵۳۰۹۶	۶/۸	۴۰۲۹
آذربایجان شرقی	۱۴/۷	۳۰۷۹۹۹	۱۹/۵	۱۱۵۵۴
اردبیل	۵/۸	۱۲۱۷۵۴	۶/۸	۴۰۲۹
زنجان	۳۴/۶	۷۲۳۸۸۵	۳۰/۹	۱۸۳۰۹
کردستان	۱۷/۵	۳۶۶۳۱۶	۲۳/۳	۱۳۸۰۵
همدان	۲/۱	۴۲۵۲۱	۳/۴	۲۰۱۵
قزوین	۲/۴	۵۰۰۴۰	۷/۴	۴۳۸۵
تهران	۱/۲	۲۵۷۹۹	۹/۹	۱۱۲۶
مجموع	۱۰۰	۲۰۹۱۴۱۰	۱۰۰	۵۹۲۵۱

بر اساس آمار سال ۱۳۸۵، مجموع آب در دسترس در حوضه آبریز سفیدرود با سطح زیر کشت ۳۳۵۱۲۳ هکتار، تقریباً 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، 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 شرب، محیط‌زیست، صنعت و کشاورزی تقسیم می‌شود که مقادیر مصارف شرب، صنعت و کشاورزی در استان‌های ذینفع حوضه سفیدرود در جدول (۲) آورده شده است. همچنین، در جدول‌های (۳ و ۴)، مقادیر میانگین سود اقتصادی و مقادیر حداقل و حداکثر تقاضای آب در هر بخش مصرفی به تفکیک استان‌های ذینفع ارائه شده است. شایان‌ذکر است که مقادیر جدول‌های (۱ تا ۴) از گزارش‌ها و داده‌های موجود در دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا استخراج شده است.

جدول ۲- مقادیر مصارف بخش‌های مختلف در استان‌های ذینفع حوضه آبریز سفیدرود (برحسب میلیون مترمکعب)

استان	شرب			صنعت			کشاورزی			مجموع
	مجموع مصارف	درصد سطحی	درصد زیرزمینی	مجموع مصارف	درصد سطحی	درصد زیرزمینی	مجموع مصارف	درصد سطحی	درصد زیرزمینی	
گیلان	۲۳/۵	۱۳	۸۷	۴/۳	۳۴/۹	۶۵/۱	۸۳۷/۱	۹۲/۹	۷/۱	۸۶۴/۹
آذربایجان شرقی	۲۲/۵	۴/۵	۹۵/۵	۰/۱	۰	۱۰۰	۳۶۸/۴	۶۹/۸	۳۰/۲	۳۹۱/۰
اردبیل	۸/۷	۰	۱۰۰	۰/۱	۰	۱۰۰	۱۲۸/۴	۶۳/۳	۳۶/۷	۱۳۷/۲
زنجان	۵۸/۳	۲	۹۸	۱۱/۲	۰	۱۰۰	۹۴۸/۲	۳۳/۱	۶۶/۹	۱۰۱۷/۷
کردستان	۲۱/۶	۰	۱۰۰	۰/۶	۰	۱۰۰	۵۸۸/۲	۲۴/۵	۷۵/۵	۶۱۰/۴
همدان	۲/۵	۰/۸	۹۹/۲	۰/۲	۰	۱۰۰	۵۹/۱	۱۰/۸	۸۹/۲	۶۱/۸
قزوین	۲/۹	۱۰/۳	۸۹/۷	۰/۸	۰	۱۰۰	۲۷۷/۷	۴۲/۹	۵۷/۱	۲۸۱/۴
تهران	۱/۷	۰	۱۰۰	۰/۳	۰	۱۰۰	۷۸/۸	۳۹/۶	۶۰/۴	۸۰/۸
مجموع	۱۴۱/۸			۱۶/۹			۳۲۸۶/۱			۳۴۴۴/۷

جدول ۳- میانگین سود اقتصادی در بخش‌های صنعت و کشاورزی (واحد: ریال بر مترمکعب)

استان	صنعت	کشاورزی
گیلان	۸۳۶۳	**۱۵۵۹**
آذربایجان شرقی	۱۷۳۰۲	**۱۴۲۳**
اردبیل	۱۷۳۰۲	**۱۳۲۸**
زنجان	۱۲۵۳۵	**۱۳۳۶**
کردستان	۶۶۷۰۵	**۱۳۴۳**
همدان	۱۳۶۹۴	**۱۴۸۱**
قزوین	۶۹۶۹۸	**۳۱۹۴**
تهران	۲۶۱۵۸	**۲۸۲۹**

جدول ۴- حداقل و حداکثر تقاضای آب ذینفعان حوضه

استان	تخصیص آب		کشاورزی		صنعت	
	d_i^{max}	d_i^{min}	d_{i1}^{max}	d_{i1}^{min}	d_{i2}^{max}	d_{i2}^{min}
گیلان	۱۲۰۷/۳	۷۷۸/۹	۱۲۰۱	۷۷۷/۵	۶/۳	۱/۵
آذربایجان‌شرقی	۱۰۸۳/۴	۲۵۶/۹	۱۰۸۳	۲۵۶/۹	۰/۴	۰
اردبیل	۲۶۵/۴	۸۱/۳	۲۶۵	۸۱/۳	۰/۴	۰
زنجان	۲۱۱۰/۳	۳۱۴/۲	۲۰۸۵	۳۱۴/۲	۲۵/۳	۰
کردستان	۱۳۶۸/۵	۱۴۴/۴	۱۳۶۷	۱۴۴/۴	۱/۵	۰
همدان	۱۲۴/۶	۶/۴	۱۲۴	۶/۴	۰/۶	۰
قزوین	۵۷۴/۳	۱۱۹/۱	۵۷۴	۱۱۹/۱	۰/۳	۰
تهران	۱۵۹/۸	۳۱/۲	۱۵۹	۳۱/۲	۰/۸	۰
مجموع	۶۸۹۳/۵	۱۷۳۲/۲	۶۸۵۸	۱۷۳/۵	۳۵/۵	۱/۵

درگیری بین ذینفعان حوضه آبریز سفیدرود

حوضه آبریز سفیدرود، حوضه‌ای در حال توسعه است که همه ذینفعان آن سعی دارند سهم آب خود را در جهت توسعه بیشتر بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب افزایش دهند. بنابراین، رقابت شدیدی بین ذینفعان به‌خصوص بین ذینفعان واقع در بالادست و پایین‌دست این حوضه برای استفاده بیشتر آب در استان خودشان وجود دارد. از نظر توپوگرافی، کوه‌ها در بالادست و دشت‌های مسطح در پایین‌دست حوضه آبریز سفیدرود واقع

شده‌اند و ذینفعان پایین‌دست برای تأمین نیازهای آبی خود به‌شدت به آب انتقال‌یافته از مناطق بالادست حوضه وابسته هستند. از طرفی، ذینفعان بالادست برای توسعه بیشتر به دنبال استفاده از آب بیشتر هستند که در این صورت مقدار آب دریافتی ذینفعان پایین‌دست کاهش می‌یابد و این ذینفعان برای تأمین نیازهای آبی خود با مشکل مواجه می‌شوند. در حال حاضر، این رقابت‌ها، تبدیل به درگیری بین استان‌های ذینفع این حوضه شده است، به‌طوری‌که حتی مدیران و برنامه‌ریزان آب منطقه نیز درگیر این مسئله هستند. در این شرایط، مدیران آب به‌منظور تخصیص آب و سرمایه بیشتر برای توسعه بیشتر هر یک از ذینفعان تحت‌فشارهای اجتماعی و سیاسی هستند، درحالی‌که بیشتر اوقات برای تأمین همه نیازهای آبی این حوضه، آب کافی در دسترس نیست. علاوه بر این، ذینفعان این حوضه، اولویت کمی برای تأمین نیازهای زیست‌محیطی در نظر می‌گیرند به‌طوری‌که در کل حوضه، محیط‌زیست با کمبود آب مواجه است (Roozbahani *et al*., 2015b).

برآورد نیاز زیست‌محیطی

آثار طبیعی ملی و مناطق تحت مدیریت و حفاظت بسیار مهمی مانند تالاب کیاشهر، پناهگاه حیات‌وحش انگوران، مناطق حفاظت‌شده سیاه‌رود رودبار و غیره در حوضه آبریز سفیدرود وجود دارد. متأسفانه خشکسالی‌های پیاپی، مصارف زیاد آب برای بخش کشاورزی و احداث سدهای متعدد در سال‌های اخیر منجر به کاهش و حذف حقابه موردنیاز رودها، تالاب‌ها و سامانه‌های مرتبط شده است. معمولاً در ماه‌های فصل زمستان، حقابه موردنیاز زیست‌محیطی از طریق سیلاب‌ها تأمین می‌شود، اما در فصول تابستان و پاییز، حجم بسیار زیادی از آب رهاشده در رودخانه قزل‌اوزن برای مصارف کشاورزی برداشت می‌شود که باعث می‌شود جریان آب در مناطق پایین‌دست به‌شدت کاهش یابد. عدم تأمین آب موردنیاز بخش زیست‌محیطی منجر به خشکی و آسیب فراوان به ارزش‌های زیستگاهی و اکولوژیکی حوضه سفیدرود شده است. بنابراین، تعیین نیازهای زیست‌محیطی رودخانه و برنامه‌ریزی برای تخصیص آب لازم برای این منظور در منطقه موردمطالعه از اهمیت زیادی برخوردار است.

در این مطالعه، نیاز زیست‌محیطی در هر یک از استان‌ها با استفاده از روش هیدرولوژیکی تنانت برآورد شده است. این روش، نیاز زیست‌محیطی را بدون در نظر گرفتن اکولوژی، هیدرولیک، اقتصاد یا جامعه و تنها با استفاده از هیدروگراف رودخانه محاسبه می‌کند. روش مونتانا یا تنانت (Tennant, 1976)، از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های تعیین نیاز زیست‌محیطی است که به‌منظور برآورد حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه‌های ایالت مرکزی و غربی آمریکا توسعه یافت. این روش، حداقل میزان برآورد نیاز زیست‌محیطی را به‌صورت درصد معینی از متوسط دبی سالانه رودخانه برای انواع جریان طبقه‌بندی‌شده محاسبه می‌کند (جدول ۵). سطح قابل‌قبول از این روش با توجه به دستورالعمل ابلاغ‌شده 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). نکته‌ای‌که باید توجه کرد این است که در این روش تغییرات روزانه، فصلی یا سالانه در نظر گرفته نمی‌شود (Smakhtin *et al*., 2001).

جدول ۵- درصدهای دبی پیشنهادی روش تنانت

نوع جریان	درصدی از متوسط جریان سالانه	
	مهر- اسفند	فروردین- شهریور
شست‌وشوی سریع	۲۰۰	۲۰۰
محدوده بهینه	۶۰۰-۱۰۰	۶۰۰-۱۰۰
بسیار عالی	۴۰	۶۰
عالی	۳۰	۵۰
خوب	۲۰	۴۰
قابل‌قبول	۱۰	۳۰
ضعیف	۱۰	۱۰
تخریب شدید	۱۰-۰	۱۰-۰

تعیین مدل مدیریتی منطقه

در حوضه سفیدرود با توجه به عرضه و تقاضای نامتعادل باید مدلی توسعه داده شود که بیش‌ترین میزان بهره‌وری سود اقتصادی و عدالت اجتماعی، کم‌ترین مناقشات در بین ذینفعان و کم‌ترین میزان خسارت به محیط‌زیست را ایجاد کند. بنابراین، ابتدا مدل ساده‌ای از حوضه توسعه داده می‌شود که تقاضاهای حوضه را به دو بخش تقاضای حداکثر و حداقل طبقه‌بندی می‌کند. با توجه به مدل اولیه، دو شرط اساسی برای مدیریت تخصیص منابع آب در نظر گرفته می‌شود، شرط اول بیان می‌کند که اگر آب در دسترس بیش‌تر از حداکثر تقاضای بخش‌های مصرفی باشد، نیاز آبی بخش‌های مصرفی تأمین می‌شود و آب مازاد حوضه در صورت امکان صرف ذخیره‌سازی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌های حوضه، توسعه و پیشرفت منطقه می‌شود. شرط دوم نیز بیان می‌کند اگر آب در دسترس، کم‌تر از حداکثر تقاضای آبی حوضه باشد، مجموع حداقل تقاضای آبی با مقدار آب در دسترس مقایسه می‌شود. اگر آب در دسترس، کم‌تر از مجموع حداقل تقاضای حوضه بود منطقه دچار کمبود آب است

و باید مسئولان و مدیران تخصیص بر اساس اولویت‌های موردنظرشان (تنش، عدالت، سیاست و غیره) آب را به بهترین شکل بین ذینفعان تقسیم کنند تا کم‌ترین آسیب به بخش‌های مختلف وارد شود. اما اگر آب در دسترس بیش‌تر از حداقل تقاضا باشد، با توجه به اولویت‌های تخصیص بین بخش‌های مصرفی به‌صورت بهینه تخصیص داده می‌شود.

تعیین توابع هدف

در این مطالعه، یک مدل تخصیص آب ارائه می‌شود کـه در چارچوب مدیریت یکپارچه، تعامل عرضه و تقاضای آب را با توجه به عوامل اقتصادی با رویکردی عادلانه در نظر می‌گیرد. در فرآیند مدل‌سازی تخصیص آب، مدیران عرضه‌کننده آب عواملی همچون محدودیت‌های منطقه‌ای، حداکثرسازی سود حاصل از تأمین آب و عدالت در تخصیص برای ذینفعان را باید در نظر بگیرند. بنابراین، یکی از اهداف مهم حوضه آبریز سفیدرود حداکثرسازی بهره‌وری سود اقتصادی حاصل از تخصیص آب بین بخش‌های مصرفی هر استان می‌باشد. برای تحقق این هدف می‌بایست مقادیر تخصیص را تا حد امکان و ظرفیت بخش‌های مصرفی را افزایش داد. با توجه به کلیدی بودن آب در مسئله پیشرفت و توسعه در هر منطقه، مدیران استان‌های ذینفع به دنبال تأمین حداکثری نیاز بخش‌های مصرفی خود بدون توجه به نیاز سایر استان‌ها هستند. منابع محدود آب در حوضه سفیدرود و زیاده‌خواهی مدیران استانی منجر به مشکلات متعددی در روند تخصیص آب شده است. توجه بیش‌ازحد به موضوع سود اقتصادی در حوضه توسط مدیران و جامعه باعث شده که دو اصل عدالت و پایداری زیست‌محیطی کم‌تر اهمیت داده شوند و حوضه موردمطالعه تنها به اولویت‌های اقتصادی توجه ویژه‌ای داشته باشد. مطالعات اولیه نشان داد که توزیع درآمد حاصل از تخصیص آب در بین استان‌ها نابرابر بوده است. بنابراین می‌توان موضوع عدالت در تخصیص را به‌عنوان یکی دیگر از اهداف اصلی مدل تعیین نمود تا در راستای رسیدن به رفاه اجتماعی، درآمد حاصل از آب به‌صورت عادلانه بین استان-های ذینفع تقسیم شود. در حوضه آبریز سفیدرود گونه‌های گیاهی و جانوری متنوعی وجود دارد که برای حفاظت از آن‌ها باید توجه ویژه‌ای به بخش محیط‌زیست شود. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش طرح‌های منابع آب و افزایش سدها بر روی رودخانه‌های حوضه، حقابه زیست‌محیطی به‌شدت تحت تأثیر قرار گرفته و این بخش با اهمیت را به شدت مورد آسیب قرار داده است. با توجه به اهمیت پایداری این بخش، تأمین حقابه زیست‌محیطی به‌عنوان یکی از محدودیت‌های مدل تخصیص آب تعیین می‌شود تا سه اصل تخصیص آب در مدل رعایت شود. ساخت مدلی که بتواند تأثیر این عوامل را به‌صورت هم‌زمان در تخصیص منابع آب در سطح حوضه به کار گیرد، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای اقدام به ساخت مدل تخصیص باید داده‌های موردنیاز، توابع هدف، متغیرهای تصمیم و محدودیت‌ها در سطح حوضه مشخص شوند.

تابع هدف اول: حداکثرسازی بهره‌وری سود اقتصادی. برای به دست آوردن سود اقتصادی در هر بخش مصرفی در استان‌های زیر حوضه 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).

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

در این رابطه، i، تعداد استان‌های حوضه است که شامل ۸ استان به ترتیب شامل گیلان، آذربایجان‌شرقی، اردبیل، زنجان، کردستان، همدان، قزوین و تهران می‌باشد؛ 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 اکثر کشورها، توسعه‌ی چشم‌گیری پیدا کرده و افزایش بهره‌وری به‌عنوان 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. بنابراین، بهره‌وری سود اقتصادی از رابطه (۲) محاسبه می‌شود

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

در این رابطه، 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 است.

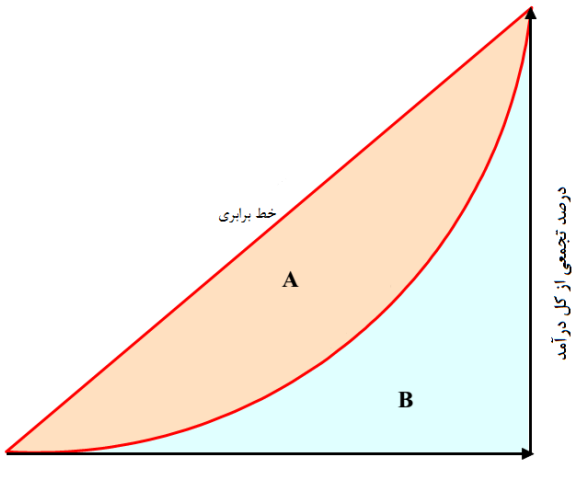
در ادامه، برای به‌دست آوردن حداکثر میانگین بهره‌وری سود اقتصادی در سطح حوضه باید مجموع بهره‌وری سودهای اقتصادی استان‌ها را بر تعداد آن‌ها تقسیم کرد. با توجه به این روابط می‌توان دریافت که متغیر تصمیم q (آب تخصیصی به بخش‌های مصرفی هر استان) هرچقدر بزرگ‌تر باشد و Q (آب تخصیص‌یافته به هر استان) هر چقدر کوچک‌تر باشد جواب‌های

بزرگتری برای بهره‌وری سود اقتصادی به‌دست می‌آید.

(رابطه ۳)

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

تابع هدف دوم: حداکثر کردن عدالت. به منظور تخصیص متعادل آب بین ذینفعان حوضه موردمطالعه، عدالت در تخصیص را نیز باید در نظر گرفت. عدالت یک مفهوم مبهم است زیرا معنای آن با توجه به نحوه اندازه‌گیری آن تغییر می‌کند (Tsur and Dinar, 1995). جینی (Gini, 1921) برای اندازه‌گیری توزیع، ضریب جینی را ارائه کرد. به‌طورکلی از ضریب جینی برای اندازه‌گیری نابرابری درآمدها استفاده می‌شود، درحالی‌که از آن زمان به بعد در نابرابری زمین و اندازه‌گیری نابرابری مصرف آب مورداستفاده قرار گرفت. در علم ریاضی ضریب جینی معمولاً بر اساس منحنی لورنز استفاده می‌شود (شکل ۲). در این منحنی خط ۴۵ درجه به‌عنوان خط توزیع برابری کامل درآمدها در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل (۲)، ضریب جینی را می‌توان نسبت مساحت بین خط برابری و منحنی لورنز به مساحت کل زیر خط برابری در نظر گرفت. به‌عبارت‌دیگر، ضریب جینی برابر است با منطقه A در منحنی به مجموع مناطق A و *B*. بنابراین، با استفاده از ضریب جینی می‌توان یک معیار نابرابری توزیع آب برای سطح حوضه آبریز تعریف کرده و با توجه به میانگین‌های به‌دست‌آمده، مقادیر آب تخصیص‌یافته برای حوضه سفیدرود را مورد بررسی قرار داد. با توجه به تعاریف فوق هر چه مقدار ضریب جینی به صفر نزدیک‌تر باشد توزیع آب تخصیص‌یافته با برابری بیش‌تری همراه بوده و در واقع آب به صورت عادلانه در سطح حوضه، توزیع شده است.



شکل ۲- نمایش گرافیکی ضریب جینی

با توجه به موارد ذکرشده، مقدار این ضریب در تخصیص آب به‌صورت تابع هدف زیر بیان می‌شود (Hu *et al.*, 2016):

(رابطه ۴)

$$\min G = \frac{1}{2m\sum_{i=1}^{m}\frac{Q_i}{EB_i}}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|\frac{Q_i}{EB_i}-\frac{Q_k}{EB_k}\right|$$

محدودیت‌های مدل

در مسائل بهینه‌سازی همواره محدودیت‌هایی به دلیل ویژگی‌های مدل یا منابع در دسترس اعمال می‌شود. پس از تعیین اهداف، با بررسی شرایط حوضه آبریز موردبررسی، محدودیت‌های مدل، شناسایی و در مدل بهینه‌سازی تخصیص در نظر گرفته شد. در ادامه جزئیات هر یک از محدودیت‌های مدل آورده شده است. لازم به ذکر است که در مدل تخصیص ارائه‌شده، حداقل نیاز دو بخش مصارف شرب و محیط‌زیست تأمین می‌شود.

محدودیت منابع آب سطحی در دسترس

آب در دسترس (AW)، در واقع مجموع منابع آب قابل‌برداشت از رودخانه‌ها برای مصارف، حقابه‌های زیست‌محیطی و برداشت‌های مصرفی از سدهای حوضه آبریز است. این مقدار باید از مجموع آب تخصیص‌یافته به استان‌ها ($\mathrm{Q_i}$) بیش‌تر یا مساوی باشد در غیر این صورت استان‌های حوضه در بخش‌های مصرفی با کمبود آب مواجه خواهند بود.

(رابطه ۵)

$$\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{m}} \mathrm{Q_i} \le \mathrm{AW}$$

۲- تأمین حداقل نیاز زیست‌محیطی

برای رسیدن به پایداری اکولوژیکی، باید حداقل نیاز زیست‌محیطی در هر استان ($\mathrm{WEC_i^{min}}$) تأمین شود. همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، مقدار نیاز زیست‌محیطی با استفاده از روش تنانت، در هر استان برآورد شده است و سپس با استفاده از محدودیت رابطه (۶) در مدل تخصیص اعمال می‌شود.

(رابطه ۶)

$$\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{m}} \mathrm{Q_i} \le \mathrm{AW} - \mathrm{WEC_i^{min}}$$

۳- محدودیت آب مصرفی

مجموع آب مصرفی در بخش‌های مختلف هر استان باید کوچک‌تر یا مساوی آب تخصیص‌یافته با کسر تلفات و منابع آب زیرزمینی دو بخش صنعت و کشاورزی ($\mathrm{WS_i}$) باشد.

(رابطه ۷)

$$\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{q_{ij}} \le \left(1-\alpha^{\mathrm{loss}}\right)\mathrm{Q_i} + \mathrm{WS_i}$$

۴- تأمین حداقل آب مصرفی بخش‌های ویژه

حداقل نیاز آبی بخش‌های ویژه به‌عنوان محدودیتی در نظر 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 در دسترس و منابع آب زیرزمینی برداشت‌شده برای مصارف

خدمات بیش‌تر از حداقل نیاز این بخش باشند. WS_{Ts}، مصارف بخش‌های ویژه؛ Ts، تعداد بخش‌های ویژه، d_{ik}^{min}، حداقل تقاضا و k شمارنده بخش‌های ویژه است.

$$\left(1-\alpha^{loss}\right) Q_i + WS_{Ts} \geq \sum_{k=1}^{Ts} d_{ik}^{min} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

۵- محدودیت تقاضای آب

آب مصرفی که برای هر بخش مصرفی تخصیص داده می‌شود 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 با مقدار مصرف منابع آب سطحی آن بخش برابر است و مقادیر حداکثر نیاز با بیش‌ترین نیاز هر بخش که برای تأمین این نیازها از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌شود، برابر است.

$$d_{ij}^{min} \leq q_{ij} \leq d_{ij}^{max} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

۶- محدودیت فنی

آب تخصیص‌یافته 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 تخصیص‌یافته کم‌تر از حد پایین این محدودیت باشد، باعث می‌شود که از آبخوان‌های حوضه مقادیر بیش‌تری برداشت شود و اگر مقدار آب تخصیص‌یافته بیش‌تر از حد بالای این محدودیت باشد، به دلیل اینکه حداکثر تقاضا تأمین می‌شود، آب اضافی تلف می‌شود.

$$Z_i^{min} \leq Q_i \leq Z_i^{max} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

حل مدل

معمولاً از روش برهم‌کنش، در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌کنند که در آن یک جواب مطلوب با افزایش یک جواب مطلوب دیگر کاهش می‌یابد. در این مطالعه، به‌منظور برهم‌کنش بین عدالت و بهره‌وری آب از روش برنامه‌ریزی سازشی استفاده شده است.

برنامه‌ریزی سازشی

برنامه‌نویسی سازشی در بسیاری از موارد در سال‌های اخیر استفاده شده است (Zeleny, 1973) و به دنبال بهینه کردن مدل‌های کاربردی برنامه‌نویسی چندهدفه است که برخی از آن‌ها برای مشکلات منابع آب توسعه یافته است. در این روش اولویت‌بندی و ارزش دادن به گزینه‌ها، بر اساس فاصله‌ی آن‌ها از نقطه نامطلوب انجام می‌شود. مطلوبیت با $D(x)$ نشان داده شده است که برای یک مدل از n تابع هدف، فاصله متریک برای برنامه‌سازشی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{minimize } D(x) = \left[\sum_{b=1}^{n} w_b^k \left(\frac{Z_b^{opt} - Z_b(x)}{Z_b^{opt} - Z_b^{inf}}\right)^k\right]^{1/k} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

در این رابطه x، برداری از متغیرهای تصمیم؛ b، شاخصی از تابع هدف؛ w_b^k، وزن تابع b که نشان‌دهنده اولویت‌های تصمیم‌گیرندگان برای اهمیت هدف است؛ $Z_b(x)$، مقدار محاسبه‌شده برای تابع هدف؛ Z_b^{opt}، مقدار مطلوب برای معیار b در بین تمام مقادیر ممکن برای گزینه‌ها؛ Z_b^{inf}، مقدار نامطلوب برای معیار b در بین تمام مقادیر ممکن برای گزینه‌ها و k، پارامتری است که حساسیت تصمیم‌گیرنده به فاصله از نقطه نامطلوب را ازنظر هر یک از هدف‌ها نشان می‌دهد. هنگامی‌که $k \in [0,1]$ باشد، رابطه (۱۱) به معیاری که وزن کمتری دارد، اهمیت بیشتری می‌دهد که بیانگر دیدگاه بدبینانه در تصمیم‌گیری است و تصمیم‌گیرنده‌ای که این دیدگاه را انتخاب می‌کند، ریسک‌پذیر است. زمانی که، مقادیر k بزرگتر از یک باشد، هدف با وزن بیشتر، اهمیت بیشتری دارد و اگر $k \to \infty$ تنها هدف با وزن بیشتر در نظر گرفته می‌شود که این حالت بیانگر دیدگاه خوش‌بینانه نسبت به مسئله است (Zarghami and Szidarovszky, 2010).

در این مطالعه، k=۱ در نظر گرفته شده است که در این حالت روش برنامه‌ریزی سازشی به روش جمع وزنی ساده تبدیل می‌شود و با توجه به توابع هدف، معادله اصلی برای برنامه‌ریزی سازشی به‌صورت زیر خواهد شد.

(رابطه ۱۲)

$$\text{Min } D(x) = W_1 \left(\frac{\overline{EBE}^{opt} - \overline{EBE}(Q,q)}{\overline{EBE}^{opt} - \overline{EBE}^{inf}}\right) + W_2 \left(\frac{\overline{G}^{opt} - \overline{G}(Q,q)}{\overline{G}^{opt} - \overline{G}^{inf}}\right)$$

در این معادله، G^{opt} و G^{inf} به ترتیب مقدار مطلوب و نامطلوب ضریب جینی و $\overline{EBE}^{opt}$ و $\overline{EBE}^{inf}$ به ترتیب مقدار مطلوب و نامطلوب بهره‌وری سود اقتصادی هستند.

مدل سازشی مورداستفاده در این مطالعه، درواقع برهم‌کنشی بین توابع هدف تخصیص آب در حوضه آبریز سفیدرود ایجاد می‌کند. این مدل بر اساس معیارهای موردنظر مدیران حوضه وزن‌دهی خواهد شد، بنابراین اگر وزن یک تابع هدف را افزایش دهیم مقدار آن تابع هدف نیز افزایش خواهد یافت. در این مدل، دو وزن W_1 و W_2 به ترتیب وزن‌های توابع هدف میانگین بهره‌وری سود اقتصادی و ضریب جینی را نشان می‌دهد. مقادیر وزن‌دهی به توابع هدف در بازه [۱ ۰] است، به‌طوری‌که مجموع وزن‌ها باید برابر با یک باشد ($W_1 + W_2 = 1$).

تئوری آنتروپی شانون

آنتروپی در نظریه اطلاعات، میزان اطلاعات یا میزان تصادفی بودن یک متغیر تصادفی را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. این تئوری در علوم مهندسی معیاری از میزان ابهام یا بی‌نظمی است که اولین بار توسط Shannon (1948) ارائه گردید. از تئوری آنتروپی می‌توان به‌عنوان شاخصی برای کمی کردن میزان عدم

آگاهی و دانش نسبت به مشخصات یک سامانه استفاده کرد. ایده اصلی این روش بر این پایه استوار است که هر چه پراکندگی در مقادیر یک معیار یا شاخص بیشتر باشد، آن معیار از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای محاسبه وزن آنتروپی ω از معادله ۱۳ استفاده می‌شود:

$$\omega_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n} 1-e_j} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

پارامتر e، مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه، آنتروپی انتقال اطلاعات نوعی از آنتروپی است که برابر با تفاضل مجموع آنتروپی مرزی و آنتروپی مشترک است، هرچقدر مقدار آنتروپی کمتر باشد، تأثیر j بیشتر خواهد بود. آنتروپی انتقال اطلاعات بین دو متغیر i و j به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m} P_{ij} \ln P_{ij} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

با توجه به اینکه پارامترهای ورودی دارای واحدهای یکسانی هستند، معمولاً با استفاده از تابع نرمال‌سازی، داده‌ها آماده‌سازی می‌شوند. این تابع، به‌صورت رابطه (۱۵) است:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}-(x_{ij})_{min}}{(x_{ij})_{max}-(x_{ij})_{min}} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

ماتریس داده‌های خام پس از نرمال‌سازی به‌صورت ماتریس زیر می‌شود:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

نسبت مقدار شاخص پارامتر j در نمونه i بر اساس رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$P_{ij} = y_{ij}/\sum_{i=1}^{m} y_{ij} \quad \text{(رابطه ۱۷)}$$

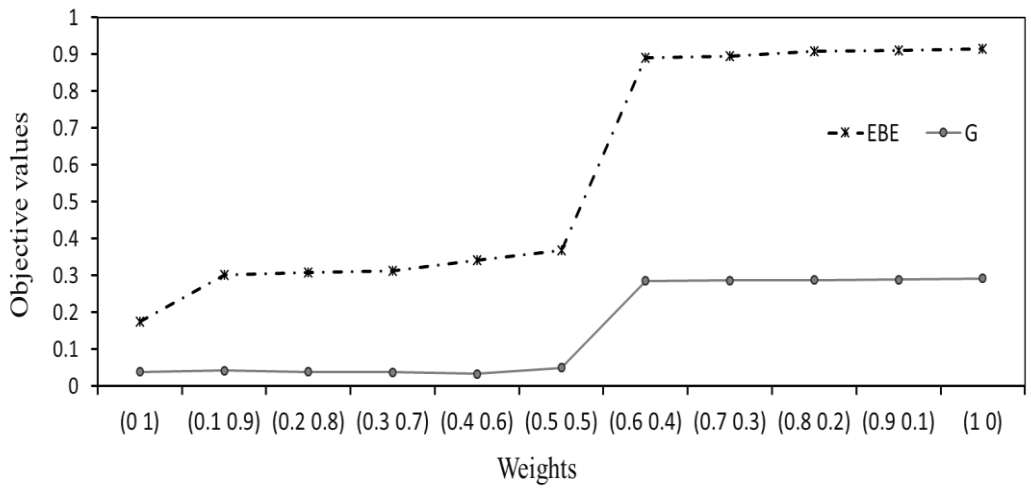
نتایج و بحث

برای مدیریت درگیری‌های حوضه آبریز سفیدرود، مدل بهینه-سازی چندهدفه توسعه داده شد که در این بخش بهره‌وری و عدالت در مدل توسعه داده‌شده موردبررسی قرارگرفته است. همان‌طور که اشاره شد، تأمین نیاز زیست‌محیطی در مدل برنامه‌ریزی به‌صورت یک محدودیت وارد شده است و برای محاسبه مقادیر نیاز زیست‌محیطی از روش تنانت استفاده شد که نتایج حاصل از این روش به‌صورت جدول (۶) ارائه شده است.

برای حل مدل چندهدفه این حوضه از روش برنامه‌ریزی سازشی استفاده شده است. با توجه به وزن‌های هر یک از توابع هدف در مدل چندهدفه، هنگامی‌که مدل حل می‌شود می‌توان جواب‌ها را برای بهترین و بدترین حالت هر یک از توابع هدف محاسبه نمود. به‌این‌ترتیب، رابطه (۱۲) را با استفاده از برنامه-ریزی سازشی برای برخی از وزن‌های معمول حل نموده که نتایج به‌صورت جدول (۷) و شکل (۳) ارائه شده است. شایان‌ذکر است که وزن‌های W_1 و W_2 به‌صورت (W_1, W_2) است.

جدول ۶. نیاز زیست‌محیطی برآورد شده از روش تنانت (برحسب میلیون مترمکعب)

استان‌ها	گیلان	آذربایجان‌شرقی	اردبیل	زنجان	کردستان	همدان	قزوین	تهران	مجموع
نیاز زیست‌محیطی	۵۵۵/۴۶	۳۳۰/۴۴	۱۶۴/۲۰	۴۸۷/۳۱	۱۸۶/۷۳	۳۹/۹۵	۳۶۷/۳۹	۳۴/۲۶	۲۱۶۵/۷۳



شکل ۳- مقادیر توابع هدف برای مجموعه وزن‌های مختلف

جدول ۷ . نتایج مدل برنامه‌ریزی سازشی برای مجموعه وزن‌های مختلف (دبی تخصیص برحسب میلیون مترمکعب و EB برحسب میلیون ریال)

وزن		(۰،۱)	(۰/۱،۰/۹)	(۰/۲،۰/۸)	(۰/۳،۰/۷)	(۰/۴،۰/۶)	(۰/۵،۰/۵)
دبی تخصیص	گیلان	۱۰۷۸/۹	۱۰۷۹/۰	۱۰۷۹/۰	۱۰۷۹/۱	۱۰۷۹/۰	۱۰۸۱/۲
	آذربایجان شرقی	۳۰۶/۹	۳۰۰/۴	۳۰۲/۶	۲۹۴/۲	۲۶۴/۸	۲۶۳/۴
	اردبیل	۹۹/۶	۹۷/۴	۹۸/۲	۹۵/۵	۸۶/۰	۸۶/۰
	زنجان	۷۴۱/۶	۷۲۵/۲	۷۳۰/۷	۷۱۰	۶۳۸/۰	۴۸۱/۸
	کردستان	۴۶۲/۴	۴۵۲/۵	۴۵۵/۹	۴۴۳/۷	۳۹۹/۰	۳۹۹/۷
	همدان	۵۰/۹	۴۹/۸	۵۰/۳	۴۸/۸	۴۳/۸	۴۲/۹
	قزوین	۳۹۰/۳	۳۹۰/۲	۳۹۰/۲	۳۹۰/۲	۳۹۰/۲	۴۵۱/۷
	تهران	۱۳۰/۶	۱۲۷/۷	۱۲۸/۷	۱۲۵/۲	۱۱۲/۷	۱۱۲/۷
	$\overline{EBE}$	۰/۱۷۴	۰/۳۰۲	۰/۳۰۸	۰/۳۱۳	۰/۳۴۲	۰/۳۶۸
	G	۰/۰۳۷	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۳۹	۰/۰۴۰	۰/۰۵۰
	EB	۵۵۵۷۷۶۲	۶۴۸۴۰۱۸	۶۴۹۹۹۶۳	۶۴۵۳۴۵۵	۶۳۱۵۶۰۹	۶۳۰۳۹۵۷

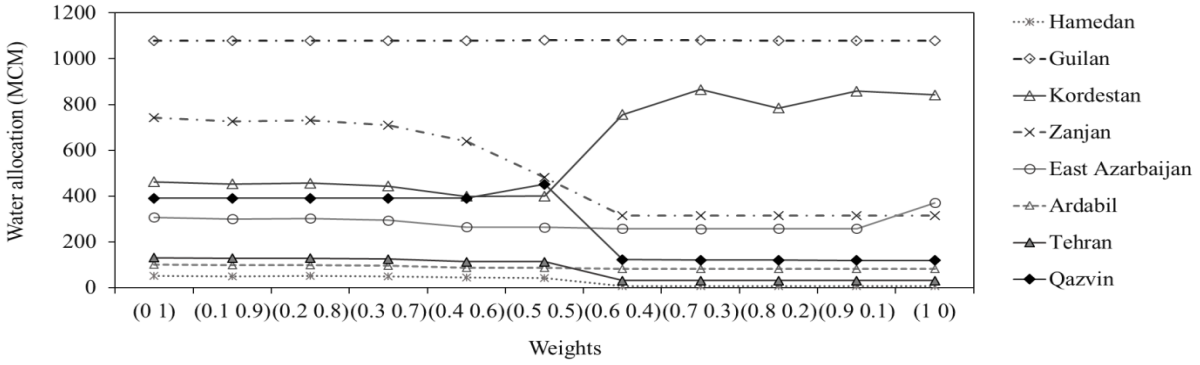
وزن		(۰/۶،۰/۴)	(۰/۷،۰/۳)	(۰/۸،۰/۲)	(۰/۹،۰/۱)	(۱،۰)	
دبی تخصیص	گیلان	۱۰۸۰/۱	۱۰۸۰/۱	۱۰۷۹/۴	۱۰۷۹/۲	۱۰۷۸/۹	
	آذربایجان شرقی	۲۵۷/۲	۲۵۷/۰	۲۵۷/۱	۲۵۷/۳	۳۷۰/۸	
	اردبیل	۸۱/۳	۸۱/۳	۸۱/۳	۸۱/۳	۸۱/۳	
	زنجان	۳۱۴/۳	۳۱۴/۲	۳۱۴/۳	۳۱۴/۳	۳۱۴/۳	
	کردستان	۷۵۵/۸	۸۶۵/۴	۷۸۴/۰	۸۵۷/۹	۸۴۱/۳	
	همدان	۶/۴	۶/۴	۶/۴	۶/۴	۶/۴	
	قزوین	۱۲۲/۴	۱۱۹/۶	۱۱۹/۵	۱۱۹/۳	۱۱۹/۲	
	تهران	۳۱/۲	۳۱/۲	۳۱/۲	۳۱/۲	۳۱/۲	
	$\overline{EBE}$	۰/۹۸۲	۰/۸۹۴	۰/۹۰۸	۰/۹۱۱	۰/۹۱۵	
	G	۰/۲۸۶	۰/۲۸۷	۰/۲۸۷	۰/۲۸۸	۰/۲۹۲	
	EB	۵۵۶۸۹۱۹	۵۲۳۸۳۴۶	۵۶۳۲۱۶۷	۵۵۱۶۵۳۹	۵۴۳۰۸۷۴	

با توجه به نتایج مطالعات Gini (1921)، هنگامی‌که ضریب جینی کمتر از ۰/۳ و یا دارای میانگین نسبی بین ۰/۱ و ۰/۲ است، توزیع از تعادل بالایی برخوردار است. مقادیر جینی بدست آمده در جدول (۶)، بین ۰/۰۳۴ و ۰/۲۹۲ و دارای میانگین ۰/۱۵۳ است، بنابراین توزیع عدالت دارای تعادل بالایی است و هر چه مقدار تابع هدف ضریب جینی کمتر بدست آید به این معناست که منابع آب با عدالت بیشتری تخصیص یافته است. اما مقادیر $\overline{EBE}$ بدست آمده بین ۰/۱۷۴ و ۰/۹۸۲ است که نشان می‌دهد در صورت برقراری و عدم برقراری عدالت در حوضه، مقادیر بهره‌وری اقتصادی مصرف منابع آب به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای کم و زیاد می‌شود. با توجه به این نتایج، ارتباط بین دو تابع هدف مشخص می‌شود، به‌این‌ترتیب که با افزایش وزن یکی از توابع هدف، تابع هدف دیگر نیز افزایش می‌یابد، اما مقادیر مطلوب هر تابع هدف در جهت مخالف یکدیگر هستند. به‌عنوان‌مثال، هنگامی‌که وزن $\overline{EBE}$ افزایش می‌یابد، مقدار عدالت کاهش و مقدار ضریب جینی افزایش می‌یابد.

شکل کلی سیاست‌های تخصیص آب در استان‌های ذینفع حوضه سفیدرود برای مجموعه وزن‌های مختلف در شکل (۴) آورده شده است. هنگامی‌که وزن عدالت از یک حدی بیشتر می‌شود تا زمانی که به بیشترین وزن$(0,1)$ می‌رسد، برنامه‌ریزان هر یک از استان‌های ذینفع در حوضه، سیاست تخصیص آب را برای رسیدن به برقراری عدالت در منطقه تغییر نمی‌دهند. اما هنگامی‌که وزن بهره‌وری اقتصادی به‌تدریج از یک حدی افزایش می‌یابد، برنامه‌ریزان منطقه، مقادیر تخصیص را با توجه به شرایط تغییر می‌دهند و عدالت را با توجه به تغییرات ایجادشده در تخصیص آب مورد بررسی قرار می‌دهند.

شکل (۴)، میزان تغییرات تخصیص بهینه منابع آب به استان‌های ذینفع حوضه را با اعمال وزن‌های مختلف نشان می‌دهد. استان‌های حوضه آبریز را با توجه به میزان وابستگی وزن توابع هدف، می‌توان به دو بخش استان‌های حساس و غیر-

حساس طبقه‌بندی کرد. با توجه به وزن‌های مختلف توابع هدف، آب تخصیص‌یافته به استان‌های غیرحساس (گیلان و اردبیل) نوسانی کمتر از ۲۰ درصد دارند، درحالی‌که برای استان‌های حساس (آذربایجان شرقی، زنجان، کردستان، همدان، قزوین و تهران) این نوسانات بیشتر از ۲۰ درصد بدست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که درگیری‌های آب در حوضه عمدتاً در مناطق حساس اتفاق می‌افتد و استان‌های دیگر درگیری چندانی در مورد تخصیص آب ندارند. واریانس آب تخصیص داده‌شده به استان‌های آذربایجان شرقی، زنجان، کردستان، همدان، قزوین و تهران به ترتیب ۱۱۳، ۴۲۷/۳، ۴۶۶/۴، ۴۴/۹، ۳۳۲/۵ و ۹۹/۴ است که به ترتیب، حساسیت استان‌های کردستان، زنجان و قزوین از سایر استان‌ها بیشتر است. غیرحساس بودن استان‌های گیلان و اردبیل به دلیل سود اقتصادی بخش‌های مصرف و منابع تأمین آب موردنیاز هر یک از بخش‌ها است.



شکل ۴- مقادیر تخصیص آب برای مجموعه وزن‌های مختلف

بدیهی است که نتیجه تخصیص آب در مدل برنامه‌ریزی سازشی به تصمیم مدیران حوضه آبریز در اولویت قرار دادن بهره‌وری سود اقتصادی و عدالت بین ذینفعان بستگی خواهد داشت. مدیران، وزن نهایی مدل برنامه‌ریزی سازشی را با توجه به فعالیت‌ها و گزارش‌ها آبی شرکت‌های مشاور و شرایط حوضه آبریز در نظر خواهند گرفت. اگر مدیران بهره‌وری سود اقتصادی را به‌عنوان اولویت اصلی در سطح حوضه در نظر بگیرند باید وزن مربوط به تابع هدف آن را افزایش دهند. بنابراین، عدالت در بین ذینفعان حوضه کم‌تر موردتوجه قرار خواهد گرفت، درحالی‌که نمی‌توان عدالت را در برنامه‌ریزی‌ها نادیده گرفت.

با توجه به جدول (۶)، هنگامی‌که وزن تابع بهره‌وری اقتصادی افزایش می‌یابد، میانگین بهره‌وری سود اقتصادی ($\overline{EBE}$) نیز افزایش می‌یابد، اما مقادیر سودهای اقتصادی (EB) نوسانات را در وزن‌های مختلف نشان می‌دهد، به‌طوری‌که ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به‌عنوان‌مثال، مقایسه مقادیر $\overline{EBE}$ و EB در وزن‌های (۰/۲،۰/۸) و (۱،۰) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار $\overline{EBE}$، EB کاهش می‌یابد. جزییات تخصیص هر یک از این وزن‌ها در جدول (۸ و ۹) آورده شده است. لازم به ذکر است که، مقادیر EB در جدول‌ها بر حسب میلیون ریال است. همان‌طور که در این جدول‌ها مشاهده می‌شود، مقادیر تخصیص آب سطحی در وزن (۰/۲،۰/۸)، در اکثر استان‌ها بیشتر از وزن (۱،۰) است، زیرا با افزایش وزن تابع عدالت، با توجه به رابطه (۴) برای حداقل کردن ضریب جینی باید مقادیر تخصیص را به‌خصوص در استان‌هایی با بهره‌وری کمتر افزایش داد. بنابراین به‌صورت کلی، مقادیر تخصیص و EB در این حالت نسبت به حالت وزن (۱،۰) افزایش می‌یابد. از طرفی، برای حداقل کردن $D(x)$ در رابطه (۱۲) برای حالتی که وزن W_2، صفر است، مقدار عبارت مربوط به بهره‌وری اقتصادی حداقل می‌شود که برای رسیدن به این هدف، باید $\overline{EBE}(Q,q)$ حداکثر شود. ازآنجاکه مقادیر Q به دلیل صفر بودن وزن مربوط به تابع عدالت کاهش یافته با توجه به رابطه (۳) باید نسبت q به Q در مقادیر AEB افزایش یابد، بنابراین استان‌هایی که EB بیشتری دارند تخصیص بیشتری در بخش کشاورزی و صنعت خواهند داشت که با توجه به محدودیت حداکثر تخصیص آب در هر یک از بخش‌های مصرفی و حداقل تخصیص آب سطحی به دلیل صفر بودن وزن تابع هدف عدالت، مقدار Q و EB کمتری نسبت به وزن (۰/۲،۰/۸) دارد.

با توجه به موارد ذکرشده، مدیران و برنامه‌ریزان می‌توانند وزن‌های مختلفی را برای هر یک از توابع هدف انتخاب کنند. در اینجا وزن‌های متعادل $(W_1 = W_2 = 0.5)$ به‌عنوان مرجع انتخاب شد که به آن طرح تصمیم میانه[1] (TDS) می‌گویند زیرا در این حالت، با توجه به شکل (۴) مقادیر بهره‌وری اقتصادی و عدالت به میانگین مقدار خود می‌رسند. جزییات تخصیص‌های بدست آمده در این وزن در جدول (۱۰) ارائه شده است.

1 .trade-off decision scheme

جدول ۸- سیاست‌های تخصیص برای ترکیب وزنی (۰/۲،۰/۸)

استان	مقادیر تخصیص			سود اقتصادی			EB	G	$\overline{EBE}$
	آب سطحی	کشاورزی	صنعت	کشاورزی	صنعت	EB_i			
گیلان	۱۰۷۹/۰	۷۸۵/۲	۶/۲	۱۲۲۴۱۲۷	۵۱۸۵۱	۱۲۷۵۹۷۷			
آذربایجان شرقی	۳۰۲/۶	۲۷۷/۰	۰/۴	۳۹۴۱۷۱	۶۹۲۱	۴۰۱۰۹۲			
اردبیل	۹۸/۲	۱۲۳/۶	۰/۴	۱۶۴۱۴۱	۶۹۲۱	۱۷۱۰۶۲			
زنجان	۷۳۰/۷	۱۰۶۲/۲	۲۵/۳	۱۴۱۹۰۹۹	۳۱۷۱۳۶	۱۷۳۶۲۳۵			
کردستان	۴۵۵/۹	۶۷۴/۱	۱/۴	۹۰۵۳۱۶	۹۳۳۸۷	۹۹۸۷۰۳	۶۴۹۹۹۶۳	۰/۰۳۸	۰/۳۰۸
همدان	۵۰/۳	۱۲۴/۰	۰/۶	۱۸۳۶۴۴	۸۲۱۶	۱۹۱۸۶۰			
قزوین	۳۹۰/۲	۴۱۵/۰	۰/۲	۱۳۲۵۵۱۰	۱۳۹۴۰	۱۳۳۹۴۵۰			
تهران	۱۲۸/۷	۱۲۸/۹	۰/۸	۳۶۴۶۵۸	۲۰۹۲۶	۳۸۵۵۸۵			
مجموع	۳۲۳۵/۶								

جدول ۹- سیاست‌های تخصیص برای ترکیب وزنی (۱،۰)، (طرح DSA)

استان	مقادیر تخصیص			سود اقتصادی			EB	G	$\overline{EBE}$
	آب سطحی	کشاورزی	صنعت	کشاورزی	صنعت	EB_i			
گیلان	۱۰۷۸/۹	۷۸۵/۲	۶/۱	۱۲۲۴۱۲۷	۵۱۳۴۹	۱۲۷۵۴۷۶			
آذربایجان شرقی	۳۷۰/۸	۳۲۰/۶	۰/۱	۴۵۶۲۱۴	۸۶۵	۴۵۷۰۷۹			
اردبیل	۸۱/۳	۱۱۲/۷	۰/۴	۱۴۹۶۶۶	۶۲۲۹	۱۵۵۸۹۴			
زنجان	۳۱۴/۳	۸۰۰/۱	۲۵/۳	۱۰۶۸۹۳۴	۳۱۷۱۳۶	۱۳۸۶۰۶۹			
کردستان	۸۴۱/۳	۶۸۰/۱	۱/۲	۹۱۳۳۷۴	۸۲۰۴۷	۹۹۵۴۲۱	۵۴۳۰۸۷۴	۰/۲۹۲	۰/۹۱۵
همدان	۶/۴	۱۰۴/۲	۰/۶	۱۵۴۳۲۰	۷۸۰۶	۱۶۲۱۲۶			
قزوین	۱۱۹/۲	۲۴۲/۴	۰/۲	۷۷۴۲۲۶	۱۴۶۳۷	۷۸۸۸۶۲			
تهران	۳۱/۲	۶۷/۰	۰/۸	۱۸۹۵۴۳	۲۰۴۰۳	۲۰۹۹۴۶			
مجموع	۲۸۴۲/۸								

جدول ۱۰- سیاست‌های تخصیص برای ترکیب وزنی (۰/۵،۰/۵)، (طرح TDS)

استان	مقادیر تخصیص			سود اقتصادی			EB	G	$\overline{EBE}$
	آب سطحی	کشاورزی	صنعت	کشاورزی	صنعت	EB_i			
گیلان	۱۰۸۱/۲	۷۸۵/۲	۶/۱	۱۲۲۴۱۲۶	۵۱۲۶۵	۱۲۷۵۳۹۲			
آذربایجان شرقی	۲۶۳/۴	۲۵۹/۵	۰/۴	۳۶۹۲۶۸	۶۰۵۶	۳۷۵۳۲۴			
اردبیل	۸۶/۰	۱۱۵/۸	۰/۴	۱۵۳۷۸۲	۶۲۲۹	۱۶۰۰۱۱			
زنجان	۴۸۱/۸	۹۰۵/۵	۲۵/۳	۱۲۰۹۷۴۸	۳۱۶۷۵۹	۱۵۲۶۵۰۷			
کردستان	۳۹۹/۷	۶۳۸/۲	۱/۴	۸۵۷۱۰۲	۹۵۳۸۸	۹۵۲۴۹۱	۶۳۰۳۹۵۷	۰/۰۵۰	۰/۳۶۸
همدان	۴۲/۹	۱۲۳/۹	۰/۶	۱۸۳۴۹۶	۷۶۶۹	۱۹۱۱۶۴			
قزوین	۴۵۱/۷	۴۵۴/۱	۰/۲	۱۴۵۰۳۹۵	۱۶۷۲۸	۱۴۶۷۱۲۳			
تهران	۱۱۲/۷	۱۱۸/۷	۰/۸	۳۳۵۸۰۲	۲۰۱۴۲	۳۵۵۹۴۴			
مجموع	۲۹۱۹/۴								

درصورتی‌که مدیران حوضه، صرف‌نظر از برقراری عدالت، به دنبال بالاترین بهره‌وری سود اقتصادی در سطح حوضه باشند، طرح تصمیم A (DSA) با ترکیب وزنی (۱،۰) می‌تواند بهترین جواب باشد، زیرا در این طرح مقدار تابع هدف بهره‌وری

اقتصادی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. سیاست‌های تخصیص مربوط به این طرح در جدول (۸) آورده شده است. حال 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، طرح تصمیم B (DSB) با ترکیب وزنی (۰،۱) به‌عنوان بهترین جواب انتخاب می‌شود. تخصیص‌های بدست آمده در این طرح در جدول (۱۱) آورده شده است.

جدول ۱۰- سیاست‌های تخصیص برای ترکیب وزنی (۰،۱)، (طرح DSB)

استان	مقادیر تخصیص			سود اقتصادی			EB	G	$\overline{EBE}$
	آب سطحی	کشاورزی	صنعت	کشاورزی	صنعت	EB_i			
گیلان	۱۰۷۸/۹	۷۸۵/۲	۳/۸	۱۲۲۴۱۲۷	۳۱۷۷۹	۱۲۵۵۹۰۶			
آذربایجان شرقی	۳۰۶/۹	۲۷۹/۸	۰/۲	۳۹۸۱۵۵	۳۴۶۰	۴۰۱۶۱۶			
اردبیل	۹۹/۶	۱۲۴/۵	۰/۲	۱۶۵۳۳۶	۳۴۶۰	۱۶۸۷۹۶			
زنجان	۷۴۱/۶	۱۰۵۲/۰	۹/۴	۱۴۰۵۴۷۲	۱۱۷۸۲۹	۱۵۲۳۳۰۱			
کردستان	۴۶۲/۴	۶۷۸/۵	۰/۶	۹۱۱۲۲۶	۴۰۰۲۳	۹۵۱۲۴۸	۵۵۵۷۷۶۲	۰/۰۳۹	۰/۱۷۴
همدان	۵۰/۹	۵۳/۹	۰/۳	۷۹۸۲۶	۴۱۰۸	۸۳۹۳۴			
قزوین	۳۹۰/۳	۲۹۷/۳	۰/۱	۹۴۹۵۷۶	۶۹۷۰	۹۵۶۵۴۶			
تهران	۱۳۰/۶	۷۲/۸	۰/۴	۲۰۵۹۵۱	۱۰۴۶۳	۲۱۶۴۱۴			
مجموع	۳۲۶۱/۲								

با مقایسه شرایط طرح‌های TDS و DSA، برنامه‌ریزان و مدیران باید ۴۸۴ درصد عدالت را برای رسیدن به بالاترین سود اقتصادی از دست دهند تا میزان بهره‌وری سود اقتصادی ۱۴۸ درصد افزایش یابد. همچنین مدیران حوضه باید از ۵۲/۷ درصد سود اقتصادی که در طرح TDS بدست می‌آورند، صرف‌نظر کنند تا مطابق با طرح DSB میزان عدالت را ۲۲ درصد افزایش دهند که در این طرح بیشترین عدالت در میان ذینفعان حوضه برقرار می‌شود.

همان‌طور که نتایج نشان داد که به‌استثنای طرح TDS که دارای وزن‌های متعادل است، سایر وزن‌های انتخاب‌شده توسط برنامه‌ریزان، نتایج متفاوتی را در مقادیر تخصیص آب سطحی و سود اقتصادی ارائه داد، به‌طوری‌که انتخاب بهترین سناریو در این مطالعه با چالش روبرو می‌شود. در ادامه، برای حل این مشکل و تعیین بهترین وزن‌های توابع هدف از تئوری آنتروپی شانون استفاده شد. با اجرای آنتروپی، بهترین وزن توابع هدف به‌صورت (۰/۳۵،۰/۶۵) بدست آمد که جزییات تخصیص‌های بدست آمده در این وزن در جدول (۱۲) آورده شده است.

جدول ۱۲- سیاست‌های تخصیص برای بهترین وزن آنتروپی

استان	مقادیر تخصیص			سود اقتصادی			EB	G	$\overline{EBE}$
	آب سطحی	کشاورزی	صنعت	کشاورزی	صنعت	EB_i			
گیلان	۱۰۷۹/۰	۷۸۵/۲	۶/۲	۱۲۲۴۱۲۷	۵۱۸۵۰	۱۲۷۵۹۷۷			
آذربایجان شرقی	۲۸۴/۸	۲۶۵/۷	۰/۴	۳۷۸۰۹۱	۶۹۲۰	۳۸۵۰۱۲			
اردبیل	۹۱/۱	۱۱۸/۹	۰/۴	۱۵۷۸۹۹	۶۹۲۰	۱۶۴۸۲۰			
زنجان	۶۶۵/۰	۱۰۱۹/۲	۲۵/۲	۱۳۶۱۶۵۱	۳۱۵۸۸۲	۱۶۷۷۵۳۳			
کردستان	۴۱۲/۰	۶۴۶/۱	۱/۴	۸۶۷۷۱۲	۹۳۳۸۷	۹۶۱۰۹۹	۶۳۶۰۶۸۵	۰/۰۳۵۳	۰/۳۲۸
همدان	۴۵/۸	۱۲۴/۰	۰/۶	۱۸۳۶۴۴	۸۲۱۶	۱۹۱۸۶۰			
قزوین	۳۹۰/۲	۴۱۵/۰	۰/۲	۱۳۲۵۵۱۰	۱۳۹۳۹	۱۳۳۹۴۵۰			
تهران	۱۱۸/۳	۱۲۱/۶	۰/۸	۳۴۴۰۰۶	۲۰۹۲۶	۳۶۴۹۳۳			
مجموع	۳۰۸۶/۲								

گاهی اوقات ممکن است بهترین وزن محاسبه‌شده از روش آنتروپی، اختلاف زیادی با وزن‌های ترجیحی برنامه‌ریزان منطقه داشته باشد که در این صورت با توجه به مطالعات Yue *et al.*, 2010، از میانگین وزنی وزن‌ها استفاده می‌شود. نتایج جزئی طرح‌های پیشنهادی ممکن نشان داد که طرح TDS که دارای وزن‌های (۰/۵،۰/۵) است، نتایج معقول‌تری نسبت به بقیه وزن‌ها می‌دهد و می‌تواند به‌نوعی ترجیح برنامه‌ریزان در منطقه باشد. بنابراین با توجه به اینکه، با بکارگیری تئوری آنتروپی بهترین وزن‌ها، (۰/۳۵،۰/۶۵) بدست آمد، با محاسبه میانگین وزنی دو وزن مربوط به TDS و تئوری آنتروپی، وزن (۰/۳۵،۰/۶۵) به‌عنوان بهترین وزن‌های توابع هدف که در آن تابع هدف عدالت دارای وزن بیشتری (۰/۶۵) نسبت به تابع هدف بهره‌وری سود اقتصادی (۰/۳۵) است، معرفی می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، به‌منظور کاهش درگیری‌های آبی بین استان‌های ذینفع حوضه آبریز رودخانه سفیدرود، یک مدل برنامه‌ریزی تخصیص آب چندهدفه با اهداف افزایش بهره‌وری اقتصادی و برقراری عدالت توسعه داده شد. در این مدل بهینه‌سازی، توسعه در راستای پایداری زیست‌محیطی به‌صورت یک محدودیت مدل در نظر گرفته شده است. برای حل مدل بهینه‌سازی چندهدفه از روش برنامه‌ریزی سازشی استفاده شد. جواب مدل بهینه‌سازی در روش برنامه‌ریزی سازشی به تعیین وزن هر یک از توابع هدف بستگی دارد، بنابراین می‌توان با تغییر وزن‌ها، بهترین و بدترین حالت هر یک از توابع هدف را موردبررسی قرار داد و در نهایت بعد از بررسی همه وزن‌های ممکن برای توابع هدف بهره‌وری اقتصادی و میزان برقراری عدالت، بهترین جواب را انتخاب کرد. ارائه نتایج مدل بهینه‌سازی با توجه به انتخاب وزن‌های توابع هدف، کمک می‌کند تا تصمیم‌گیرندگان و برنامه‌ریزان منطقه موردمطالعه، بر اساس شرایط حوضه و اولویت‌های موردنظر 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.

بررسی وزن‌های مختلف توابع هدف مدل بهینه‌سازی و همچنین تعریف طرح‌های TDS، DSA و DSB نشان داد که روش برنامه‌ریزی سازشی در حل مدل‌های چندهدفه انعطاف-پذیری بالایی دارد و با توجه به اینکه هر دو تابع هدف بهره‌وری و سود و برقراری عدالت در تخصیص آب بسیار ضروری است، بهتر است، برنامه‌ریزان هر دو هدف را در برنامه‌ریزی‌های و تصمیمات آبی منطقه اعمال کنند. با تغییر وزن توابع هدف و عملکرد آن‌ها در مقادیر تخصیص آب هر یک از استان‌های ذینفع حوضه آبریز سفیدرود، استان‌ها را تنها می‌توان به استان-های حساس و غیرحساس تقسیم نمود که مدیران منطقه می-توانند با توجه به اولویت‌های خود، سیاست مربوط به هر یک از استان‌ها را اتخاذ نمایند. همچنین، با توجه به نتایج، افزایش وزن مربوط به تابع هدف میانگین بهره‌وری سود اقتصادی، لزوماً افزایش سود اقتصادی را تضمین نمی‌کند. به‌این‌ترتیب، طرح TDS، بهترین طرح از دیدگاه برقراری تعادل بین توابع هدف است که در آن وزن توابع هدف به‌صورت ۰/۵ و ۰/۵ است. به‌استثنای طرح TDS، مقادیر تخصیص آب سطحی و سود اقتصادی بدست آمده در سایر وزن‌های توابع هدف از روند خاصی پیروی نمی‌کند، به‌طوری‌که برنامه‌ریز در انتخاب بهترین وزن دچار مشکل می‌شود. استفاده از تئوری آنتروپی شانون، راه‌حل مناسبی در تعیین بهترین وزن‌های توابع هدف است که با اجرای آن، بهترین وزن توابع هدف به‌صورت (۰/۳۵،۰/۶۵) محاسبه شد. به‌طورکلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که در شرایطی که اولویت‌های برنامه‌ریزان آب در منطقه مشخص نباشد، می‌توان برای تعیین وزن هر یک از توابع هدف در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه از تئوری آنتروپی شانون در روش برنامه‌ریزی سازشی استفاده نمود تا بین توابع هدف، تعادل برقرار شود.

REFERENCES

Akhooni Pourhosseini F. and Ghorbani, M. A. (2017). Application of Shannon Entropy in Determining the Most Effective Chemical Parameter in Surface Water Quality (Case Study: Sofi Chay Watershed). *Journal of Environmental Water Engineering*, 2(4), 322 -332. (In Farsi)

Babel, M.S. Gupta, A. D. and Nayak, D.K. (2005). A Model for Optimal Allocation of Waterto Competing Demands. *Water resources management*, 19(6), 693-712.

Cullis, J. and Koppen, B.V. (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.

Dai, C. Qin, X.S. Chen, Y. and Guo, H.C. (2018). Dealing with equality and benefit for water allocation in a lake watershed: A Gini-coefficient based stochastic optimization approach. *Journal of Hydrology*, 561, 322-334.

Dwaf, A. (2005). White Paper on a National Water Policy for South Africa. Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria.

Fattahi, P. and Fayyaz, S. (2010). A compromise programming model to integrated urban water management. *Water Resources Management*,

24(6), 1211–1227.

Gini, C. (1921). Measurement of inequality of incomes. *The Economic Journal*, 31(121), 124–126.

Han, Y. Huang, Y.F. Wang, G.Q. and Maqsood, I. (2011). A multi-objective linear programming model with interval parameters for water resources allocation in Dalian city. *Water Resources Management*, 25, 449–463.

Higgins, A. Archer, A. and Hajkowicz, S. (2008). A stochastic non-linear programming model for a multi-period water resource allocation with multiple objectives. *Water Resources Management*, 22(10), 1445–1460.

Hu, Z. Chen, Y. Yao, L. Wei, C. and Li, C. (2016). Optimal allocation of regional water resources: From aperspective of equity–efficiency trade off. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 102–113.

Iftekhar, M.S. and Fogarty, J. (2017). Impact of water allocation strategies to manage groundwater resources in Western Australia: Equity and efficiency considerations. *Journal of Hydrology*, 548, 145-156.

Mimi, Z. and Sawalhi, B.I. (2003). A decision tool for allocating the waters of the Jordan river basin between all riparian parties. *Water Resources Management*, 17, 447–461.

Monghasemi, S. Nikoo, M.R. Khaksar Fasaee, M.A. and Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time-cost-quality trade-off problems in construction projects. *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3089–3104.

Neumayer, E. (2011). Sustainability and inequality in human development. *UNDP-HDRO Occasional Papers* Vol (4). New York.

Roozbahani, R. Abbasi, B. and Schreider, S. (2015a). Optimal allocation of water to competing stakeholders in a shared watershed. *Annals of Operations Research*, 229(1), 657–676.

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

Seekell, D.A. D'Odorico, P. Pace, M.L. and Dodorico, P. (2011). Virtual water transfers unlikely to redress inequality in global water use. *Environmental Research Letters*, 6(2), 024017.

Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379- 423.

Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, 147-186.

Sun, T. Zhang, H. and Wang, Y. (2013). The application of information entropy in basin level water waste permits allocation in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 70, 50-54.

Syme, G. J. Nancarrow, B. E. and McCreddin, J. A. (1999). Defining the components of fairness in the allocation of water to environmental and human uses. *Journal of Environmental Management*, 57(1), 51–70.

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

Tsur, Y. and Dinar, A. (1995). Efficiency and Equity Considerations in Pricing andAllocating Irrigation Water. *policy Research Working Paper* (vol.1). (pp. 37-40).

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

Wang, E. Alp, N. Shi, J. Wang, C. Zhang, X. and Chen, H. (2017). Multi-criteria building energy erformance benchmarking through variable clustering based compromise TOPSIS with objective entropy weighting. Energy, 125, 197-210.

Wang, X. Zhang, J. Shahid, S. ElMahdi, A. He, R. Wang, X. and 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, Y. D. Lee, J. S. Agbemabiese, L. Zame, K. and Kang, S. G. (2015). Virtual water management and the water–energy nexus: a case study of three Mid-Atlantic states. *Resources, Conservation and Recycling*, 98, 76–84.

Xavier, A. Freitas, M.B.S. Fragoso, R. and Rosário, M.S. (2018). A regional composite indicator for analysing agricultural sustainability in Portugal: A goal programming approach. *Ecological Indicators*, 89, 84-100.

Young, H.P. (1994). Equity: in theory and practice. *Princeton University Press*, 238p.

Yuan, Q. McIntyre, N. Wu, Y. Liu, Y. and Liu, Y. (2017). Towards greater socio-economic equality in allocation of wastewater discharge permits in China based on the weighted Gini coefficient. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 196-205.

Yue, L. P. Hui, Q. and Hua, W. (2010). Groundwater Quality Assessment Based on Improved Water Quality Index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. *Journal of Chemistry*, 7(1), 209-216.

Zarghami, M. Abrishamchi, A. and Ardakanian, R. (2008). Multi-criteria decision making for integrated urban water management. *Water Resources Management*, 22(8), 1017–1029.

Zarghami, M. and Szidarovszky, F. (2010). On the relation between compromise programming and the ordered weighted averaging operator. *Information Sciences*, 180(11), 2239-2248.

Zeleny, M. (1973). Compromise programming. In: Multiple Criteria Decision Making. *University of South Carolina Press, Columbia*, 263–301.

Zhang, Z. and 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.