نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۶، ص. ۴۴۸-۴۳۴

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 2, May.-Jun. 2017, p. 434-448

رویکرد چانه‌زنی چندهدفه و برنامه‌ریزی فازی به‌منظور تخصیص بهینه منابع آب با تأکید بر کم‌آبیاری

امید نصیری قیداری[۱] – صفر معروفی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۵

چکیده

با عنایت به رشد سریع جمعیت، طی سالیان اخیر مباحث منابع آبی بیشتر متأثر از مؤلفه‌های اقتصادی و اجتماعی بوده ولیکن روز به روز بر اهمّیت و نقش ملاحظات زیست‌محیطی در اینگونه طرح‌ها افزوده می‌شود. این تحقیق با هدف به‌تعادل‌رساندن نگرانی‌های زیست‌محیطی موجود در مباحث تخصیص منابع آب با مسائل درآمد اقتصادی، صورت پذیرفت. بدین منظور از مدل چانه‌زنی چندهدفه و رویکرد برنامه‌ریزی فازی به‌عنوان ابزاری جهت تحلیل استراتژی اثرات متقابل بین درآمد اقتصادی و حفاظت زیست‌محیطی استفاده شد. دو گروه از بازیگران، شامل بازیگر زیست‌محیطی با هدف به کمینه‌سازی بار آلودگی تخلیه‌شده به رودخانه و بازیگر اقتصادی با هدف به بیشینه‌سازی سود اقتصادی کل آب‌بران به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شدند. جهت لحاظ نمودن اثرات کم‌آبیاری، فرم خطی تابع تولید گیاه در تابع درآمد اقتصادی به کار گرفته شد. به‌منظور حصول توافق، بازیگران به‌تدریج در هر دور چانه‌زنی از مقدار هدف مورد انتظارشان کاستند. رویه توسعه‌یافته در این تحقیق در سیستم رودخانه‌ای دز–کارون به عنوان مطالعه موردی به کار گرفته شد. نتایج بیانگر آن بود که با کاهش انتظارات اقتصادی از ۵۵۳۶۳۶ به ۴۹۶۲۱۶ هزار دلار در سال و همینطور کاهش نگرانی های زیست‌محیطی از ۶۸۲۶۴ به ۸۷۲۵۱ تن در سال، می‌توان به توازن میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی دست یافت. همچنین نتایج رویکرد برنامه‌ریزی فازی نشان داد که آب تخصیصی به زیربخش‌های کشاورزی و کشت و صنعت سیستم به ترتیب ۷۶۳ و ۵۵۹۱ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود. مقایسه نتایج دو رویکرد بیانگر انطباق میان آنها بود. یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که چارچوب تدوین شده در این تحقیق می‌تواند موجب سهولت تصمیم‌گیری در شرایط وجود اهداف متضاد گردیده و به‌عنوان ابزار مدیریتی کارآ با کاربری ساده در مسائل کلان تخصیص آب با نگرش توسعه پایدار، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفه، تابع تولید گیاه، تخصیص آب، تعادل نش، کیفیت آب

مقدمه

کمبود آب ناشی از رشد جمعیت و نیز افزایش روزافزون تقاضای آب، یکی از تهدیدهای جامعه بشری و به‌عنوان عامل محدودکننده توسعه پایدار محسوب می‌گردد. اگرچه انجمن منابع آب امریکا (۲) لحاظ نمودن درآمداقتصادی و همچنین کیفیت محیطزیست را به‌عنوان دو هدف ضروری در آب و برنامه‌ریزی منابع خاک ذکر نموده، با این وجود در بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی تخصیص آب، بیشینه‌سازی سود اقتصادی به‌عنوان تنها تابع هدف در نظر گرفته‌شده است و به خاطر مشکلات کمّی‌سازی اهداف زیست‌محیطی، به این اهداف کمتر پرداخته می‌شود (۱۱). آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی می‌تواند بر روی منابع آب اثرات منفی جبران‌ناپذیری داشته باشد. تحت این شرایط، تخصیص بهینه منابع آب با مدنظر قرار دادن اهداف چندگانه مسائل کمیت و کیفیت آب، می‌تواند به سود پایدار و بهینه ذینفعان منجر شود.

ازآنجاکه ممکن است بین کسی که نگران درآمد اقتصادی و کسی که نگران مسائل زیست‌محیطی است، اختلاف‌نظر وجود داشته باشد، انتخاب رویه‌ای منطقی که موردقبول همه ذیمدخلان با دیدگاه‌ها و علایق متفاوت باشد، امری دشوار تلقی می‌گردد (۱۳). نظریه بازی‌ها که از پیشبرد کار فن‌نیومن و مورگنسن (۲۴). ناشی شده است، ابزاری ریاضی برای تحلیل و حل مسائل تخصیص مربوط به علایق متضاد است. این روش یک مدل ریاضی تعامل استراتژیک و یک پروسه تصمیم‌گیری تعاملی بوده که تلاش می‌نماید استراتژی بهینه تعادل فی‌مابین چند بازیگر (که تصمیماتشان علایق سایر بازیگران را تحت تأثیر قرار می‌دهد) را تشخیص دهد (۳).

از نظریه بازی‌ها در مباحث مختلفی از علوم آب نظیر مدیریت

۱ و ۲– دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب و استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
(*–نویسنده مسئول: (Email: smarofi@yahoo.com
DOI: 10.22067/jsw.v31i2.56243

منابع آب (۲۰)، مدیریت مسائل کیفی آب منطقه (۱)، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مشترک (۱۲)، بهره‌برداری از رودخانه مشترک (۱۶)، مدیریت انتقال آب بین‌حوضه‌ای (۱۵) و مدیریت تخصیص منابع آب و مدیریت کیفی رودخانه (۴) استفاده‌شده است. باوجودآنکه نظریه‌بازی‌ها در طیف گسترده‌ای از مسائل منابع آب به‌کار گرفته‌شده، همچنان برخی چالش‌ها نظیر لینک نمودن مدل‌های نظریه‌بازی مختلف به تحلیل سیستم‌های منابع آب باقی‌مانده است (۱۴).

مفهوم‌های نظریه بازی‌ها شامل بازی‌های غیرهمکارانه و بازی‌های همکارانه در زمینه منابع آب به کار گرفته‌شده است؛ ولیکن مفهوم تعادل نش[1] ناشی از مذاکرات و چانه‌زنی، به نسبت کمتر موردتوجه قرارگرفته است. رویکرد مدل نظریه بازی‌های چندهدفه اولین بار در تحقیق لی (۱۰) به‌منظور مدیریت به توازن رساندن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در مسائل مدیریت حوضه آبریز مخزن سد مورداستفاده قرار گرفت. ایشان کاربری اراضی به‌عنوان متغیر تصمیم مدلشان مدنظر قراردادند و نتایج حاکی از کارایی روش مورداستفاده بود.

در خصوص لحاظ نمودن مسئله کم‌آبیاری در توابع هدف تخصیص بهینه، رائو و همکاران (۲۲) مدلی با هدف بیشینه‌سازی درآمد ناشی از مصرف هر واحد آب ارائه نمودند. مدل ایشان قادر به تحلیل پیامدهای حاصل از تأثیرات تغییرات ذخایر آبی، شرایط اقلیمی، توزیع آب و شرایط اقتصادی بر تولید محصول بود. مقدسی و همکاران (۱۸) در تحقیق خود با لحاظ نمودن تابع هدف بیشینه‌سازی تولید و درآمد بر مبنای روابط کم‌آبیاری، مدل بهینه‌سازی تخصیص آب بین محصولات کشاورزی در پایین‌دست سد زاینده‌رود را ارائه نمودند.

رویکرد ترکیبی چانه‌زنی و بهینه‌سازی چندهدفه در کنار برنامه‌ریزی فازی به‌عنوان رهیافتی جدید مطرح بوده که امکان کاربرد در مسائل مربوط به تخصیص بهینه منابع آب را دارا می‌باشد. در این تحقیق با تأکید بر مسائل کیفیت آب و مدنظر قرار دادن تابع تولید گیاه و باهدف به تعادل رساندن مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی، به تخصیص بهینه منابع و مصارف آب در سیستم رودخانه‌ای دز-کارون پرداخته می‌شود. با عنایت به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم در مدل تخصیص بهینه، قیود و توابع هدف خطی مورداستفاده می‌تواند به کاهش پیچیدگی‌ها، سهولت اجرا و کاهش زمان انجام محاسبات کمک شایان توجهی نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

این مطالعه بر روی بخشی از سیستم رودخانه‌ای کارون-دز که بین سد گتوند، سد دز و شهر اهواز واقع‌شده است، صورت پذیرفت و جهت به‌کارگیری متدولوژی موردنظر، از رویه تحقیق‌های (۲۱ و ۷) استفاده شد. شکل ۱ منطقه موردمطالعه را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. حوضه رودخانه‌ای کارون-دز طیف ارتفاعی گسترده‌ای از جلگه‌های پست ساحلی تا مناطقی با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر را شامل می‌شود و مساحت آن تا مصب رودخانه در خلیج‌فارس در حدود ۶۷۰۰۰ کیلومترمربع است. آلودگی آب رودخانه‌ای ناشی از افزایش برداشت آب و تخلیه زه‌آب‌ها در این سیستم رودخانه‌ای، زندگی آبزیان این اکوسیستم مهم را با خطر مواجه نموده است. مقدار زیادی از آب تخصیصی به تقاضاهای کشاورزی به سیستم رودخانه بازگردانده می‌شوند. ازآنجاکه شوری آب مهم‌ترین مسئله زیست‌محیطی منطقه موردمطالعه است، کل جامدات محلول (TDS) به‌عنوان شاخص کیفی مدنظر قرار گرفته است.

دو رودخانه کارون و دز نقش حیاتی در تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف منطقه دارند. شکل۲ نیاز آبی سالانه مصرف‌کنندگان آب مختلف موردبررسی در این تحقیق را نمایش می‌دهد. الگوی کشت زیربخش‌های کشاورزی (A1 تا A3) منطقه مورد مطالعه در

جدول ۱ نمایش داده شده است و نیشکر تنها گیاه تحت کشت زیربخش‌های کشت‌وصنعت (I1 تا I8) می‌باشد. در میان آب‌بران کشاورزی و کشت‌وصنعت، آب‌بران I3 و I5 با تقاضای سالانه ۳۹۸۶ و ۳۴۷ میلیون متر مکعب، به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار نیاز آبی را دارند. میانگین بارش در حوضه آبریز کارون و دز از حدود ۱۵۰ میلی‌متر در سال در نواحی پست جلگه‌ای و تا حدود ۱۸۰۰ میلی‌متر در سال در ارتفاعات مجاور کوهرنگ برآورد شده است. میانگین سالانه دمای هوا در حوضه مورد نظر بین کمتر از ۷/۵ درجه در مناطق مرتفع کوهستانی تا بیش از ۲۵ درجه در جنوب حوضه متغیر است. بستر رودخانه کارون پس از الحاق به رودخانه دز به‌صورت عریض و عمیق می‌باشد که شکلی پیچانی دارد. قبل از پیوستن رودخانه دز به کارون در محل بند قیر، رودخانه بالارود و رودخانه شور که از مناطق کوه‌پایه‌ای کم ارتفاع سرچشمه می‌گیرند، به آن ملحق می‌شوند. در این تحقیق از داده‌های ماهانه متوسط درازمدت استفاده‌شده و همچنین فرض شد که نیاز آب شرب و زیست‌محیطی تحت هر شرایطی به‌صورت کامل تأمین می‌گردند و نسبت جریان برگشتی به آب تخصیص‌یافته برای مصارف کشاورزی و کشت و صنعت ۰/۳ و مصارف شرب ۰/۵ در نظر گرفته شد (۸).

مدل چندهدفه

یک مدل چندهدفه می‌تواند به‌صورت ذیل نوشته شود:

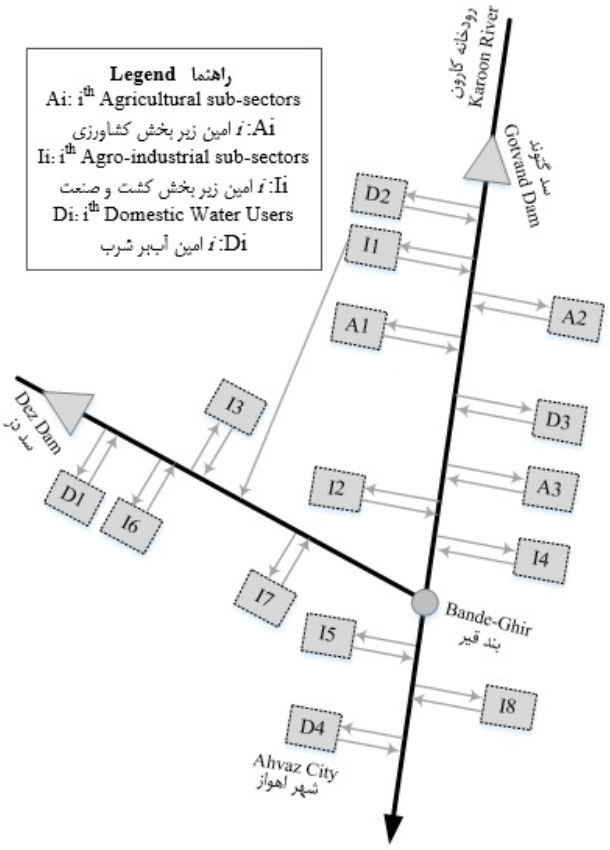
$$Max\ or\ Min\ E(x)=[E_1(x),E_2(x),...,E_v(x)] \qquad (۱)$$

s.t.

$$g_r(x)\le 0, r=1,2,...,p$$

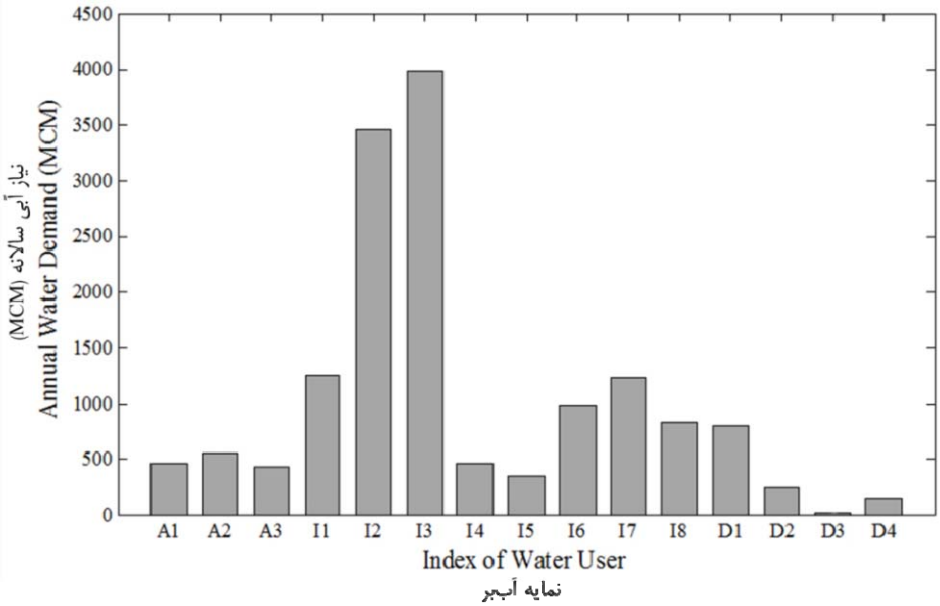
$$x_k \ge 0, k=1,2,...,h$$

1- Nash equilibrium



شکل ۱- موقعیت شماتیک بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه

Figure 1-The Schematic locations of different parts of study area



شکل۲- نیاز آبی سالانه آب‌بران مختلف آب در محدوده مورد مطالعه

Figure 2-The annual water demand of different water users in the study area

جدول ۱- الگوی کشت آب‌بران زیربخش‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه

Table 1-The crop patterns related to water users of agricultural subsectors

آب‌بر	گیاه Crop										
Water User	گندم Wheat	حبوبات Grain	ذرت Corn	نیشکر Sugarcane	چغندرقند Sugar beet	یونجه Alfalfa	غلات Cereal	پیاز Union	مرکبات Citrus	دانه‌های روغنی Oilseed	سایر گیاهان Other crops
A1	0.433	0.097	0.017	0.228	0.000	0.007	0.042	0.098	0.004	0.003	0.071
A2	0.444	0.114	0.012	0.085	0.038	0.018	0.042	0.139	0.035	0.013	0.062
A3	0.432	0.125	0.017	0.000	0.000	0.03	0.08	0.161	0.018	0.008	0.128

که در آن $E(x)=[E_1(x),E_2(x),...,E_v(x)]$ مجموعه‌ای از همه v توابع هدف، $g_r(x)$، r امین تابع قید، x_k k امین متغیر تصمیم، p تعداد تابع قید و h تعداد متغیر تصمیم می‌باشد. ازآنجاکه جواب مدل چندهدفه به‌صورت بهینه پارتو است، هدف پیداکردن راه‌حل‌های بهینه پارتو رابطه (۱) می‌باشد. اهداف دوگانه موردنظر در این تحقیق به‌صورت به کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی (EP[1]) و به بیشینه‌سازی تابع مطلوبیت درآمد اقتصادی (EI[2]) موردنظر می‌باشند. بنابراین برنامه‌ریزی دو هدفه با قیود ذکرشده در رابطه (۱) به شرح ذیل است:

$$E_1(x)=Min\ EP \qquad (۲)$$

$$E_2(x)=Max\ EI \qquad (۳)$$

نگرش نظریه بازی‌ها (چانه‌زنی) و رویکرد برنامه‌ریزی فازی به‌منظور حل این مدل دو هدفه استفاده می‌گردد.

نگرش چانه‌زنی

به‌منظور به‌کارگیری مدل نظریه بازی‌های چانه‌زنی بر مسئله توازن دو هدفه زیست‌محیطی-اقتصادی، دو گروه ذینفع به‌عنوان دو بازیگر شامل بازیگر ۱ (بازیگر زیست‌محیطی) و بازیگر ۲ (بازیگر اقتصادی) در نظر گرفته شدند که هدف بازیگر ۱ به کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی و هدف بازیگر ۲ به بیشینه‌سازی درآمد اقتصادی می‌باشد. به‌منظور محاسبه محدوده‌ی مذاکره بازی (که به‌عنوان پرداخت[3] تحلیل نظریه بازی محسوب می‌گردد)، مقادیر کمینه و بیشینه تابع هدف هر بازیگر به‌صورت جداگانه از طریق حل مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی خطی مرسوم محاسبه می‌گردد. به عبارت دیگر، مستقل از کمینه یا بیشینه بودن تابع هدف، هر تابع هدف یک بار کمینه‌سازی (به منظور حصول کران پایین) و یک بار بیشینه‌سازی (به منظور حصول کران بالا) می‌گردد. بنابراین محدوده مقادیر کمینه و بیشینه (EP,EI) برای هر بازیگر به‌صورت ذیل خواهد بود:

$$EP_{\min} \le E_1(x)=EP \le EP_{\max} \qquad (۴)$$:برای بازیگر اول

$$EI_{\min} \le E_2(x)=EI \le EI_{\max} \qquad (۵)$$:برای بازیگر دوم

زمانی که محدوده مشخص شد، دور اولیه چانه‌زنی آغاز می‌گردد و هر بازیگر مقادیر هدف EI_{max} و EP_{min} را به ترتیب به‌عنوان EI_{goal} و EP_{goal} لحاظ می‌نماید. مقادیر هدف هر بازیگر به‌عنوان قیدی برای بخش دیگر در روابط ذیل مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۰). برای بازیگر ۱ استراتژی به‌صورت ذیل می‌باشد:

$$E_1(x)=Min\ EP \qquad (۶)$$

s.t.

$$g_r(x)\le 0,\quad r=1,2,...,p$$
$$E_2(x)\ge EI_{goal}$$
$$x_k\ge 0,\quad k=1,2,...,h$$

و برای بازیگر ۲ استراتژی به‌صورت رابطه (۷) می‌باشد:

$$E_2(x)=Max\ EI \qquad (۷)$$

s.t.

$$g_r(x)\le 0,\quad r=1,2,...,p$$
$$E_1(x)\le EP_{goal}$$
$$x_k\ge 0,\quad k=1,2,...,h$$

در اولین دور چانه‌زنی دو بازیگر اقناع نشده و رضایتشان جلب نمی‌گردد، لذا دومین دور چانه‌زنی آغاز می‌شود. در این دور، بازیگر ۱ از میزان نگرانی زیست‌محیطی‌اش خواهد کاست و بازیگر ۲ درآمد اقتصادی مورد انتظارش را تقلیل خواهد داد. بنابراین، در هر مرحله از چانه‌زنی، از مقدار EI_{goal} کاسته و بر مقدار EP_{goal} افزوده می‌شود. به‌منظور محاسبه میزان امتیاز هر بازیگر، مقادیر بیشینه و کمینه EP و EI به بخش‌های مساوی کوچک تقسیم می‌شود و مقدار امتیاز[4] در هر مرحله افزایش می‌یابد (۲۳).

$$Cn\ 1=\frac{EP_{\max}-EP_{\min}}{f},\ Cn\ 2=\frac{EI_{\max}-EI_{\min}}{f} \qquad (۸)$$

در این رابطه f ضریبی است که منطقی‌ترین مقدار امتیازی را مهیا می‌نماید که رضایت دو بازیگر را کمتر تحت شعاع قرار دهد. به کمک رابطه (۸) مشخص می‌شود که در هر دور چانه‌زنی، چه میزان

1- Environmental Pollution
2- Economic Income
3- Payoff
4- Concession

از مقدار و هدف مورد انتظار (goal) توابع زیست‌محیطی و اقتصادی کاسته شود (به اندازه Cn). طی پروسه چانه‌زنی به‌مرور اختلاف بین استراتژی‌ها و نتایج کمتر می‌شود و این پروسه تا زمانی که حل نهایی به حد ذیل برسد ادامه خواهد داشت:

$$EP_{final} \le EP_{goal} \ , \ EI_{final} \ge EI_{goal} \qquad (۹)$$

مقادیر EP_{final} و EI_{final} به‌عنوان تعادل‌نش[1] شناخته می‌شوند (۶).

رویکرد برنامه‌ریزی فازی

رویکرد برنامه‌ریزی فازی تکنیکی پرکاربرد برای حل مسئله تصمیم‌گیری چندهدفه می‌باشد. در این تکنیک، هدف یافتن راه‌حل سازشی است که بعد از ساختن توابع عضویت اهداف، میزان رضایت همه توابع عضویت را بیشینه نماید. مقادیر کمینه و بیشینه اهداف (EI_{min} و EI_{max} و EP_{min} و EP_{max}) می‌توانند جهت تعریف نمودن توابع عضویت رابطه (۲) و (۳) استفاده شوند. در این مطالعه، تابع عضویت اثرات زیست‌محیطی به‌صورت ذیل ساخته‌شده است:

$$\mu_1(E_1(x)) = \begin{cases} 1 & ,if \ E_1(x) \le EP_{\min} \\ \dfrac{EP_{\max} - E_1(x)}{EP_{\max} - EP_{\min}} & ,if \ EP_{\min} \le E_1(x) \le EP_{\max} \\ 0 & ,if \ E_1(x) \ge EP_{\max} \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در آن $EP_{max} \neq EP_{min}$ می‌باشد. اگر $EP_{min}=EP_{max}$ آنگاه $\mu_1(E_1(x)) = 1$ است. به‌طور مشابه تابع عضویت درآمد اقتصادی به‌صورت ذیل ساخته‌شده است:

$$\mu_2(E_2(x)) = \begin{cases} 0 & ,if \ E_2(x) \le EI_{\min} \\ \dfrac{E_2(x) - EI_{\min}}{EI_{\max} - EI_{\min}} & ,if \ EI_{\min} \le E_2(x) \le EI_{\max} \\ 1 & ,if \ E_2(x) \ge EI_{\max} \end{cases} \qquad (۱۱)$$

که در آن $EI_{min} \neq EI_{max}$ می‌باشد. اگر $EI_{min}=EI_{max}$ آنگاه $\mu_2(E_2(x)) = 1$ است. با استفاده از عملگر کمینه زیمرمن[2] (۲۵) مدل دو هدفه به‌صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود:

$$\max \ \min \ \{\mu_1, \mu_2\} \qquad (۱۲)$$

s.t.

$$g_j \le 0 \ \ , j = 1,2,...,m$$

$$x_k \ge 0 \ \ , k = 1,2,...,n$$

با استفاده از متغیر کمکی λ، رابطه (۱۲) می‌تواند به یک مسئله معادل برنامه‌ریزی خطی مرسوم ذیل تبدیل شود:

$$\max \Leftrightarrow \lambda \qquad (۱۳)$$

s.t.

$$\mu_1 \ge \lambda \ , \ \mu_2 \ge \lambda$$

$$g_j(x) \le 0 \ \ , j = 1,2,...,m$$

$$x_k \ge 0 \ \ , k = 1,2,...,n$$

$$0 \le \lambda \le 1$$

بنابراین رابطه (۱۳) حل بهینه سازشی را برای مدل دو هدفه ایجاد می‌نماید.

چارچوب مدل

مدل بهینه‌سازی تابع هدف زیست‌محیطی که مجموع بار آلودگی تخلیه‌شده به رودخانه توسط آب‌بران را کمینه می‌کند، به‌صورت رابطه (۱۴) بیان می‌گردد:

$$Min \ \ E1 = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{t} \sum_{c=1}^{c_j} (Ca_{ij} \times c_{ij} \times x_{ijc}) \qquad (۱۴)$$

s.t.

$$\alpha \times d_{ijc} \le x_{ijc} \le d_{ijc} \ \ , \forall i,j,c$$

$$\beta \times Q_i \le \sum_{j=1}^{n} \sum_{c=1}^{c_j} x_{ijc} \le Q_i \ \ , \forall i$$

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{c=1}^{c_j} Pl_{ijc} \le \sum_{j=1}^{n} T_{ij} \ \ , \forall i$$

که در معادلات بالا، n تعداد آب‌برها، Ca_{ij} کیفیت زه‌آب بازگشتی متغیر کیفی TDS (mg/l) مربوط به jا، c_{ij} مقدار ضریب آب برگشتی به رودخانه آب‌بر jام در دوره زمانی i، x_{ijc} آب تخصیصی به گیاه c ام آب‌بر j ام در دوره زمانی i (میلیون مترمکعب)، d_{ijc} نیاز آبی گیاه c ام آب‌بر jام در دوره زمانی i، Pl_{ijc} مقدار بار آلودگی تخلیه‌شده توسط گیاه c ام آب‌بر j ام در دوره زمانی i (تن)، T_{ij} مقدار مجوز تخلیه بار آلودگی (

جدول ۲) آب‌بر j ام در دوره زمانی i (تن در ماه) (بر اساس رویه ۱۹)، Q_i جریان رودخانه در دوره زمانیi (میلیون مترمکعب)، α و β به ترتیب ضرایبی جهت مشخص نمودن کران‌های پایین نیاز آبی و جریان رودخانه (که مقدار این دو ضریب ۰/۴ فرض شده است) و t تعداد کل دوره‌های زمانی رشد در طول سال (۱۲ ماه) می‌باشد.

توابع تولید به روابطی اطلاق می‌گردد که مقدار کل تولید محصول را با در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان زمان انجام آبیاری و مقدار آب داده‌شده به گیاه، تخمین می‌زنند. نخستین رابطه در این زمینه توسط جنسن (۹) پیشنهاد گردید. مِیِر و همکاران (۱۷) تخمینی از رابطه تابع تولید گیاه مرسوم (فرم ضربی) را که در آن به‌جای نسبت

1- Nash Equilibrium
2- Zimmermann's minimum operator

تبخیر واقعی به تبخیر پتانسیل، از نسبت آب داده‌شده به گیاه به نیاز آبی گیاه در هر دوره استفاده‌شده است، ارائه نمودند. قهرمان و سپاسخواه (۵) فرم جمعی تابع تولید گیاه را به‌صورت معادل و جایگزین فرم ضربی مرسوم، به صورت رابطه (۱۵) پیشنهاد نمودند:

$$\frac{Y_a}{Y_p} = a + b\sum_{i=1}^{t}\left[1 - ky_i\left(1 - \frac{W_a}{W_p}\right)_i\right] \qquad (۱۵)$$

جدول ۲- مقدار مجوز تخلیه بار آلودگی آب‌بران در ماه i ام (تن در ماه)

Table 2-The amount of pollutant discharge permit of water users in month i (ton per month)

ماه	نمایه آب‌بر Index of Water User										
Month	A1	A2	A3	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
1	531	664	531	1672	4775	4532	531	319	1040	1337	798
2	753	980	786	2303	6613	3591	777	402	1043	879	983
3	561	676	596	1728	5023	2848	623	359	728	856	794
4	478	718	438	1515	4836	2999	558	283	589	845	681
5	630	630	378	1900	2378	1521	484	334	255	459	618
6	867	554	181	2297	2327	1401	443	306	176	331	551
7	943	659	142	2838	2078	1204	375	103	285	480	327
8	537	616	622	1145	2143	1603	568	352	521	698	702
9	625	563	422	527	2835	2452	502	277	578	733	628
10	497	673	520	1391	3889	4071	497	317	862	1237	825
11	541	574	510	1391	3598	3410	512	179	866	1138	442
12	460	540	458	1279	3836	3193	460	367	954	1111	957

که در آن i دوره رشد گیاه، ky_i ضریب عکس‌العمل گیاه به تنش آبی در دوره رشد i، W_a میزان آبیاری انجام‌شده (آب تخصیصی) و W_p نیاز آبی گیاه (تقاضا) در دوره رشد i ام و a و b ضرایبی هستند که با رگرسیون حاصل می‌شوند. فرم ضربی رابطه تابع تولید گیاه غیرخطی است و با عنایت به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم در مدل تخصیص بهینه، حل مدل غیرخطی غالباً زمان‌بر بوده و ممکن است به حل‌های بهینه محلی گرفتار شود. خطی بودن تابع هدف و قیود می‌تواند پیچیدگی‌ها و بار محاسباتی مدل‌ها را کاهش داده و کاربردی بودن مدل را افزایش دهد. لذا در این تحقیق از فرم جمعی (مدل خطی) رابطه مذکور در تابع هدف بهینه‌سازی استفاده گردید که بدین طریق، زمان‌بندی آبیاری برای دستیابی به تولید بیشینه و تخصیص بهینه آب به آب‌بران مختلف صورت پذیرفت.

مدل بهینه‌سازی درآمد اقتصادی که مجموع سود سالانه آب‌بران را بیشینه می‌کند، به‌صورت ذیل بیان می‌گردد:

$$Max\ \ E2 = \sum_{j=1}^{n}\sum_{c=1}^{c_j} A_{jc} B_{jc} Y_{pjc}\left(a + b\left(\sum_{i=1}^{t}[1 - ky_{ijc}(1 - \frac{x_{ijc}}{d_{ijc}})]\right)\right)$$

s.t.

$$\alpha \times d_{ijc} \le x_{ijc} \le d_{ijc} \quad \forall i,j,c$$

$$\beta \times Q_i \le \sum_{j=1}^{n}\sum_{c=1}^{c_j} x_{ijc} \le Q_i \quad ,\forall i \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{c=1}^{c_j} Pl_{ijc} \le \sum_{j=1}^{n} T_{ij} \quad ,\forall i$$

که در معادلات بالا ky_{ijc} فاکتور تابع تولید آب‌بر j ام در دوره زمانی i (ضریب حساسیت گیاه به کم‌آبیاری)، A_{jc} سطح زیر کشت گیاه c ام توسط آب‌بر j ام (هکتار)، c_j تعداد کل گیاه‌های کشت‌شده توسط آب‌بر j ام، B_{jc} سود خالص کشت گیاه c ام توسط آب‌بر j ام (دلار در تن) و Y_{pjc} پتانسیل تولید سالانه گیاه c ام توسط آب‌بر j ام (تن در هکتار) می‌باشد. فلوچارت روش مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به وجود روابط مربوط به کم‌آبیاری (وجود ضریب ky_{ijc} در متغیر تصمیم) در تابع هدف اقتصادی (رابطه (۱۶) که بیشینه‌سازی آن مد نظر است، آب تخصیصی به آب‌بران مختلف به نحوی تعیین می‌گردد که در ماه‌های مختلف، آب‌برانی که حساسیت محصولشان به کم‌آبیاری کم است، آب کمتر و آب‌برانی که حساسیت محصولشان به کم‌آبیاری زیاد است، آب بیشتری دریافت نمایند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن دوره رشد گیاه و همچنین مقدار آب در دسترس در تابع هدف، امکان برنامه‌ریزی آبیاری فراهم می‌گردد. این پروسه به نحوی صورت می‌پذیرد که در کل موجبات حصول سود بهینه سیستم با رعایت نمودن مسائل کیفی آب و توسعه پایدار گردد.

نتایج و بحث

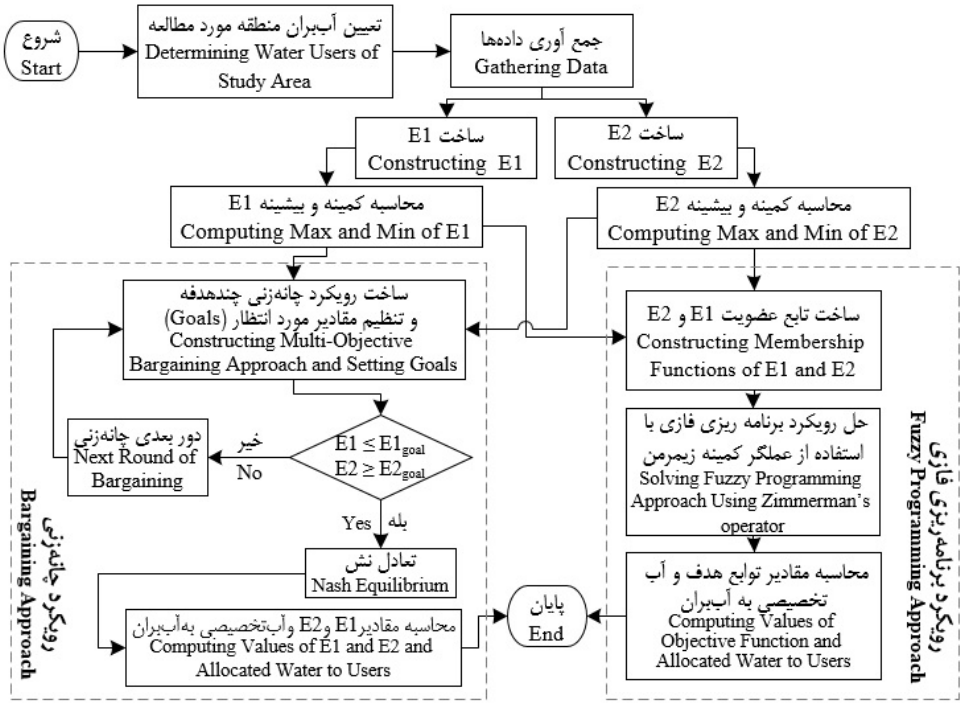
اهداف و استراتژی‌های اولیه

ابتدا به‌منظور محاسبه محدوده تغییرات هر تابع هدف جهت به‌کارگیری در فرآیند چانه‌زنی، هر بازیگر مقادیر کمینه و بیشینه تابع هدف خود را که از اجرای مجزای مدل بهینه‌سازی مربوطه به دست

می‌آید را تشخیص می‌دهد. شایان ذکر است که به دلیل خطی بودن توابع هدف و قیود مسئله، دست‌یابی به جواب نهایی و دقیق مسئله به سهولت میسر بود. محدوده اولیه دو هدف EP (تابع هدف بار آلودگی) و EI (تابع هدف اقتصادی) به‌صورت ذیل محاسبه گردید:

$$۱۶۳۱۹۷ \leq EP \leq ۶۸۲۶۴ \quad (۱۷)$$

$$۵۵۳۶۳۵ \leq EI \leq ۲۶۶۵۳۹ \quad (۱۸)$$



شکل ۳-فلوچارت رویه مورداستفاده در این تحقیق

Figure 3-The flowchart of the procedure used in this study

مقدار هدف اولیه برای بازیگر ۱ که بازیگر زیست‌محیطی است EP_{min}=۶۸۲۶۴ تن بار آلودگی در سال می‌باشد، درحالی‌که مقدار هدف اولیه برای بازیگر ۲ که بازیگر اقتصادی است EI_{max}=۵۵۳۶۳۵ هزار دلار می‌باشد. مقدار ۱۶۳۱۹۷ تن (EP_{max}) به‌دست‌آمده برای بازیگر ۱ بسیار بالاتر از هدف اولیه ۶۸۲۶۴ تن بوده و مقدار EI متناظر برای بازیگر ۲، ۲۶۶۵۳۹ هزار دلار در سال (EI_{min}) است که بسیار کمتر از ۵۵۳۶۳۵ مطلوب این بازیگر می‌باشد.

نتایج اولیه نظریه بازی‌های چندهدفه در جدول ۳ نمایش داده‌شده است. حالت ۱-۰* مربوط به دور اولیه (۰) چانه‌زنی بازیگر ۱ و ۲-۰* بیانگر دور اولیه چانه‌زنی (۰) بازیگر ۲ می‌باشد. در حالت ۱-۰* مقدار هدف اولیه بازیگر ۲ به‌صورت قید در تابع هدف بازیگر ۱ مدنظر قرار گرفت و طی آن مقدار تابع هدف ۱۵۳۳۲۶ تن بارآلودگی در سال محاسبه گردید که بیش از هدف اولیه بازیگر ۱ است. در حالت ۲-۰* نیز با مدنظر قرار دادن مقدار هدف اولیه بازیگر ۱، تابع هدف ۳۲۸۵۲۴ =E2 هزار دلار در سال محاسبه گردید که کمتر از هدف اولیه موردنظر (۵۵۳۶۳۵) می‌باشد.

جدول ۳- نتایج اولیه مدل نظریه بازی‌ها

Table 3- The initial results of game theory model

بازیگر-دور اولیه *	جواب‌ها Solutions	
*Initial Round-Player	E1 (ton yr^{-1})	E2 (10^3 USD yr^{-1})
*0-1	153326	553635
*0-2	68264	328524

پروسه چانه‌زنی

از آنجایی که با نتایج اولیه مدل نظریه بازی‌ها، رضایت هیچ بازیگری جلب نمی‌گردد، آن‌ها وارد یک پروسه چانه‌زنی می‌گردند که طی این پروسه، بازیگران اهداف مورد نظرشان را کاهش می‌دهند.

جدول ۴ استراتژی هر بازیگر در پروسه چانه‌زنی را نمایش می‌دهد که در آن استراتژی بازیگر ۱ برای حفاظت زیست‌محیطی از ۶۸۲۶۴ به ۸۷۲۵۱ افزایش و بازیگر ۲ برای درآمد اقتصادی از مقدار۵۵۳۶۳۶ به ۴۹۶۲۱۶ کاهش یافت. نتایج چهار دور چانه‌زنی در

جدول ۵ نمایش داده‌شده است. طی اولین پروسه، بازیگر ۱ با افزایش بار آلودگی از مقدار ۶۸۲۶۴ به ۷۳۰۱۱ تن در سال نگرانی زیست‌محیطی خویش را کاهش داده و بازیگر ۲ هدف درآمدیش را از مقدار ۵۵۳۶۳۶ به ۵۳۹۲۸۱ هزار دلار کاهش می‌دهد. هر دو هدف همچنان تقریباً نزدیک به هدف اولیه هستند و لذا پس از اولین دور چانه‌زنی، همچنان هیچ‌یک از بازیگران باهدف اصلاحی بازیگر دیگر ارضا نمی‌گردد. تحت تأثیر این تغییرات، در این دور، تابع هدف زیست‌محیطی ۱۲۳۶۹۳ تن در سال محاسبه گردید که همچنان بیشتر از هدف تعیین‌شده زیست‌محیطی بوده و تابع هدف اقتصادی ۴۲۶۵۹۳ هزار دلار نیز کمتر از هدف موردنظر (۵۳۹۲۸۱) می‌باشد. با افزایش دورهای چانه‌زنی و اصلاح مقدار هدف هر بازیگر بر اساس استراتژی‌های تعیین‌شده، به‌مرور مقدار اختلاف بین مقدار هدف هر بازیگر با نتایج واقعی‌اش نسبت به دور قبل کاهش می‌یابد. این پروسه تا زمانی که مقدار تابع هدف زیست‌محیطی کمتر از هدف تعیین‌شده آن و مقدار تابع هدف اقتصادی بیشتر از هدف موردنظر گردد، تکرار می‌گردد.

جدول ٤-استراتژی بازیگران در بازی برای منطقه موردمطالعه

Table 4- Strategy of players in the game for the case study

پروسه چانه‌زنی	هدف بازیگر ۱ برای آلودگی زیست‌محیطی (تن در سال)	هدف انتخابی بازیگر ۲ برای درآمد اقتصادی (هزار دلار در سال)
Bargaining Process	**Goal of Player 1 for EP (ton yr^{-1})**	**Goal of Player 2 for EI (10^3 USD yr^{-1})**
اولیه Initial	68264	553636
دور اول First Round	73011	539281
دور دوم Second Round	77757	524926
دور سوم Third Round	82504	510571
دور چهارم Fourth Round	87251	496216

جدول ۵- نتایج رویه چانه‌زنی برای مطالعه موردی تحقیق

Table 5- The results of bargaining procedure for the case study

دور چانه‌زنی	بازیگر- دور*	هدف	جواب‌ها Solutions	
Bargaining Round	***Round-Player**	**Goal**	**E1 (ton yr^{-1})**	**E2 (10^3 USD yr^{-1})**
دور اول	*1-1	E2=539281	123693	539281
First Round	*1-2	E1=73011	73011	426593
دور دوم	*2-1	E2=524926	106128	524926
Second Round	*2-2	E1=77757	77757	463930
دور سوم	*3-1	E2=510571	91388	510571
Third Round	*3-2	E1=82504	82504	488054
دور چهارم	*4-1	E2=496216	85583	496216
Fourth Round	*4-2	E1=87251	87251	501405

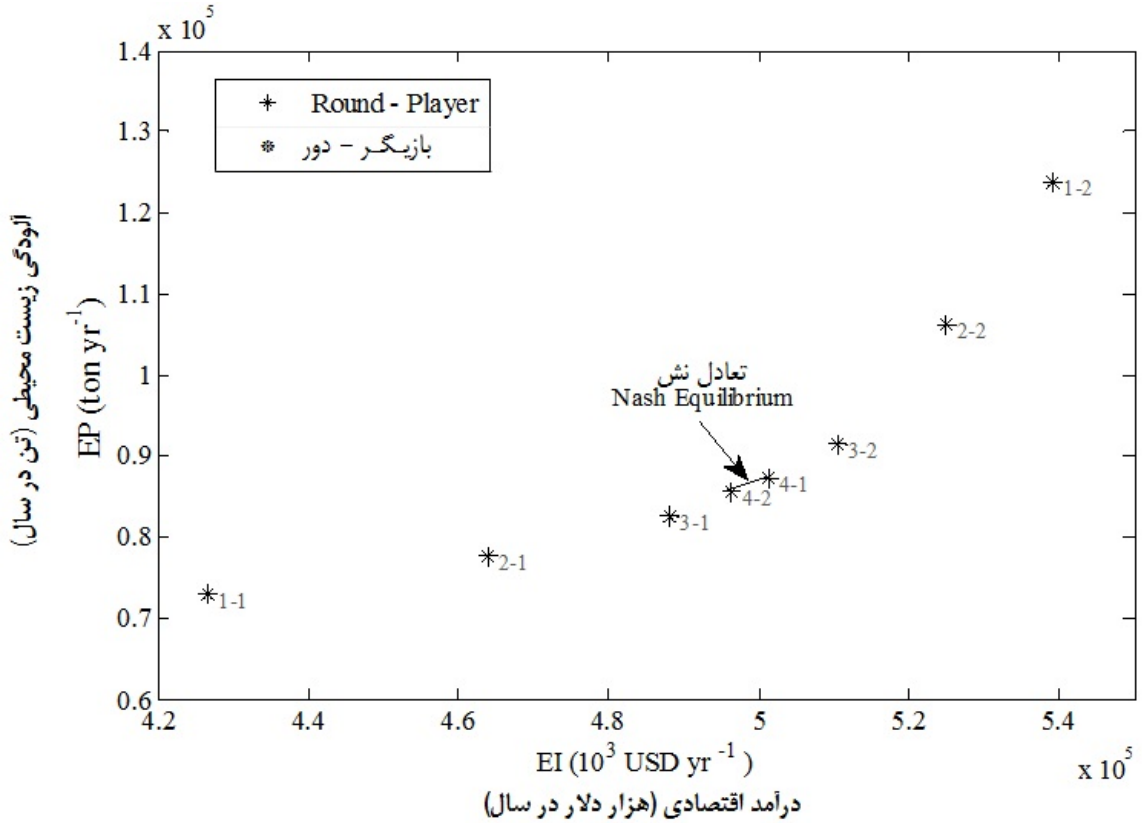
تعادل نش

مطابق جدول ۵ در دور چهارم چانه‌زنی، مقدار EP=۸۵۵۸۳ تن در سال محاسبه گردید که کمتر از هدف تنظیم‌شده (۸۷۲۵۱) بوده و مقدار EI=۵۰۱۴۰۵ هزار دلار در سال نیز بیشتر از هدف تنظیم‌شده (۴۹۲۱۶) می‌باشد. با این نتایج، رضایت هر دو بازیگر جلب گردیده و لذا تعادل نش حاصل‌شده است (رابطه (۹)).

نتایج دورهای چانه‌زنی در شکل ۴ نمایش داده‌شده است. ملاحظه می‌گردد که تعادل نش بین دو بازیگر در دور چهارم چانه‌زنی حاصل‌شده که در این حالت مقدار EP بین۸۵۵۸۳ و ۸۷۲۵۱ تن در سال و EI بین ۴۹۲۱۶ و ۵۰۱۴۰۵ هزار دلار در سال رنج شده است. این بازه باریک معادل جواب بهینه پارتو بوده و ذینفعان را قادر می‌سازد تا با سهولت بیشتر و اطمینان از مدنظر قرار دادن توأمان نگرانی‌های زیست‌محیطی و درآمد اقتصادی، در محدوده مذکور تصمیم‌گیری‌های لازم را اتخاذ نمایند.

همان‌طوری که مدنی (۱۴) عنوان نموده است و نظیر آنچه در این تحقیق ملاحظه گردید، نتایج نظریه بازی‌ها بهتر می‌تواند رفتار بازیگران دخیل برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه را منعکس نماید. همچنین، هر بازیگر می‌تواند بر روی هدف بهینه‌سازی مربوطه‌اش تمرکز نموده روابط (۶) و (۷) و بهتر می‌تواند تشخیص

دهد که چگونه اهداف دیگران هدف خودش را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ٤- نتایج رویه چانه‌زنی برای دستیابی به تعادل نش

Figure 4-Results of bargaining procedure to achieve Nash Equilibrium

جدول ۶ نتایج تخصیص آب به زیربخش‌های مختلف بر اساس روش چانه‌زنی چند هدفه مورداستفاده را نمایش می‌دهد. در این جدول آب تخصیصی به زیربخش‌های کشاورزی بیانگر مجموع آب تخصیصی سالانه به سه آب‌بر A1، A2 و A3 بوده و آب تخصیصی به زیربخش‌های کشت‌وصنعت از حاصل‌جمع آب تخصیصی به ۸ آب‌بر کشت‌وصنعت (I1 تا I8) به دست آمده است. ملاحظه می‌گردد که در تابع هدف زیست‌محیطی (*Min E1(x)*)، با افزایش دورهای چانه‌زنی به‌تدریج میزان آب تخصیص‌یافته به زیربخش‌های کشاورزی از ۱۰۴۶ به ۸۰۵ میلیون مترمکعب و برای زیربخش‌های کشت و صنعت از ۸۳۸۲ به ۵۳۱۸ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. علت این امر به دلیل وجود قید اقتصادی ($E2 \geq E2_{goal}$) در تابع هدف مربوطه بوده است که به‌تدریج با کاهش مقدار مورد انتظار قید اقتصادی ($E2_{goal}$)، تابع هدف به سمت استفاده کمتر از آب و درنتیجه تولید کمتر زه‌آب‌های بازگشتی کشاورزی حرکت نموده است. همچنین در جدول ۶ ملاحظه می‌گردد که در تابع هدف اقتصادی (*Max E2(x)*)، با افزایش دورهای چانه‌زنی، مقدار آلودگی ($E1_{goal}$ در قید زیست‌محیطی $E1 \leq E1_{goal}$) افزایش یافته و لذا میزان آب تخصیص‌یافته به زیربخش‌های کشاورزی از ۶۲۲ به ۷۲۳ میلیون مترمکعب و زیربخش‌های کشت‌وصنعت از ۴۰۸۶ به ۵۷۳۰ میلیون مترمکعب افزایش یافته است.

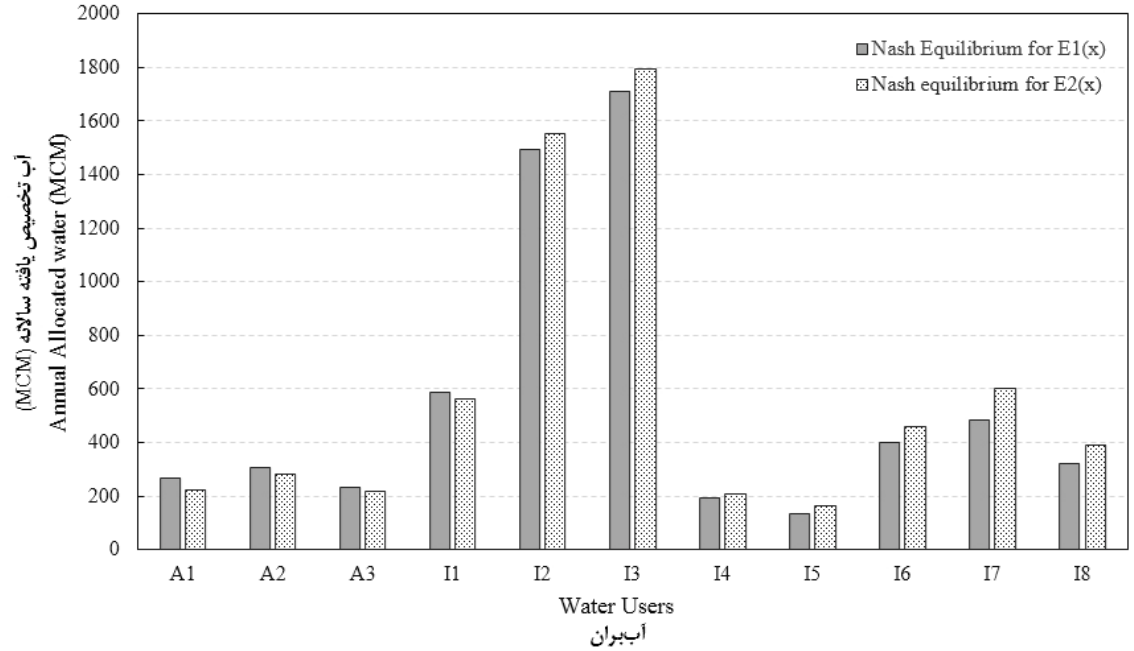
شکل ۵ آب تخصیصی سالانه به آب‌بران مختلف منطقه موردمطالعه در حالت تعادل نش برای توابع هدف زیست‌محیطی و اقتصادی را نمایش می‌دهد. مقایسه این شکل با شکل۲ حاوی این نکته است که این منطقه در تأمین نیاز آبی خود با چالش روبروست و لذا استفاده از روابط کم‌آبیاری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در شکل ۵ مقدار آب تخصیصی با تابع هدف زیست‌محیطی برای آب‌بران A1، A2، A3 و I1 بیشتر از مقدار آب تخصیصی به آن‌ها توسط تابع هدف اقتصادی است، درحالی‌که برای آب‌بران I2، I3، I4، I5، I6، I7 و I8 مقدار آب تخصیصی در حالت بیشینه‌سازی سود، بیشتر از حالت کمینه‌سازی بار آلودگی است. این امر بیانگر آن است که در مقایسه با سایر آب‌بران، A1، A2، A3 و I1 بار آلودگی کمتری تولید می‌نمایند ولیکن سود اقتصادی آن‌ها نیز به نسبت کمتر می‌باشد. به بیان دیگر، به این دلیل که زه‌آب بازگشتی زیربخش‌های کشاورزی (A1 و A2 و A3) در مقایسه با کشت‌وصنعت‌ها و صنایع جانبی آنها کمتر می‌باشد،

کمینه نمودن تابع هدف زیست‌محیطی (رابطه ۱۴) موجب شده تا به نسبت آب بیشتری به زیربخش‌هاش کشاورزی اختصاص داده شود، در حالی که به دلیل بالاتر بودن سود اقتصادی نسبی کشت‌وصنعت‌ها، بیشینه نمودن تابع هدف اقتصادی (رابطه ۱۶) موجب شده تا آب بیشتری به زیربخش‌های کشت‌وصنعت‌ها و آب به نسبت کمتری به زیربخش‌های کشاورزی اختصاص یابد. در مورد آب‌بر I1، به دلیل کیفیت آب مناسب‌تر بالادست رودخانه، نیاز آبی کم و همینطور عملکرد محصول به نسبت کم این آب‌بر، نتایج مشابه زیربخش‌های کشاورزی حاصل شده است.

جدول ٦- اهداف، قیود، جواب‌ها و آب تخصیصی به زیربخش‌ها در پروسه چانه‌زنی چندهدفه

Table 6-Objectives, constraints, solutions and allocated water to sub-sectors at bargaining process

هدف	قیود	جواب‌ها Solutions		آب تخصیصی به زیربخش کشاورزی ($MCM\ yr^{-1}$)	آب تخصیصی به زیربخش کشت و صنعت ($MCM\ yr^{-1}$)
Objective	Constraints	E1 ($ton\ yr^{-1}$)	E2 ($10^3 USD\ yr^{-1}$)	Allocated water to A Sub-sectors	Allocated water to AI Sub-sectors
Min E1	Eq. 14 & E2 ≥ 539281	123693	539281	1046	8382
	Eq. 14 & E2≥ 524926	106128	524926	1030	7379
	Eq. 14 & E2 ≥ 510571	91388	510571	851	5786
	Eq. 14 & E2 ≥ 496216	85583	496216	805	5318
Max E2	Eq. 16 & E1 ≤ 73011	73011	426593	622	4086
	Eq. 16 & E1 ≤ 77757	77757	463930	647	4429
	Eq. 16 & E1 ≤ 82504	82504	488054	698	5066
	Eq. 16 & E1 ≤ 87251	87251	501405	723	5730



شکل ٥- آب تخصیصی سالانه به آب‌بران مختلف منطقه موردمطالعه در حالت تعادل نش

Figure 5-Annual allocated water to different water users of study area at Nash equilibrium

نتایج E1 و E2 در حالت تعادل نش که در شکل ۵ نمایش داده شده است مشخص‌کننده بازه‌ی جواب مسئله و معادل جواب بهینه پارتو (شکل ۴) بوده و هر کدام بسته به نظر تصمیم‌گیرنده، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در حالت تعادل نش مدل چانه‌زنی چندهدفه،

بیشترین مقدار آب تخصیصی در سال، آب‌بر I3 با مقدار به ترتیب ۱۷۱۲ و ۱۷۹۳ میلیون متر مکعب برای توابع هدف زیست‌محیطی (E1) و اقتصادی (E2) بوده در حالی که کمترین مقدار آب تخصیصی مربوط به آب‌بر I5 به ترتیب با مقدار ۱۳۳ و ۱۶۵ میلیون متر مکعب برای E1 و E2 می‌باشد.

برنامه‌ریزی فازی

به‌منظور به‌کارگیری رویکرد برنامه‌ریزی فازی، ابتدا به کمک مقادیر بیشینه و کمینه EP و EI (روابط ۱۷ و ۱۸)، مقادیر توابع عضویت محاسبه گردید (رابطه ۱۹) و با استفاده از این توابع عضویت، مدل برنامه‌ریزی فازی برای مطالعه موردی این تحقیق (رابطه ۱۳) ساخته شد.

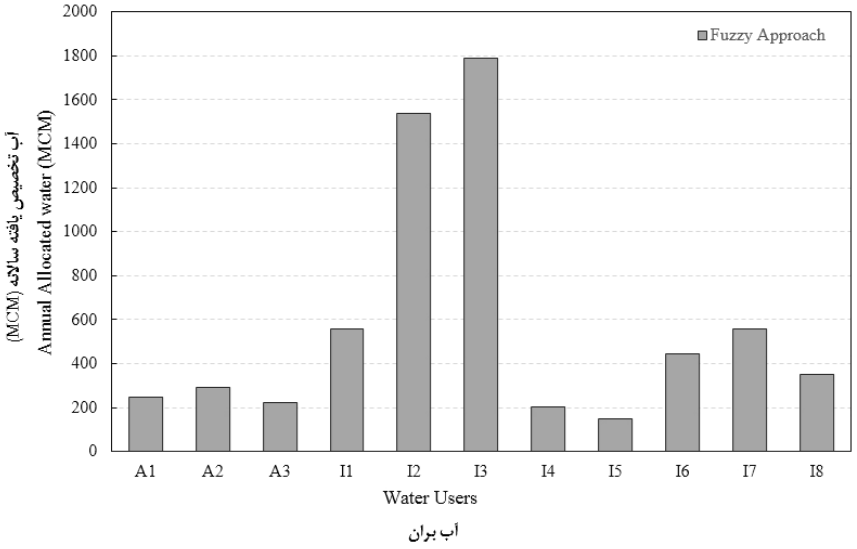
$$\mu\ (EP) = \frac{153326 - E1(x)}{153326 - 68264}$$
$$\mu\ (EI) = \frac{E2(x) - 328524}{553636 - 328524} \qquad (۱۹)$$

نتایج رویکرد برنامه‌ریزی فازی در جدول ۷ نمایش داده شده است. با استفاده از این رویکرد، مقدار ضریب مطلوبیت λ=۰/۸۶ حاصل گردید. تحت این شرایط مقادیر تابع هدف زیست‌محیطی ۸۶۰۱۹ تن در سال به دست آمد که در بازه جواب حاصل از چانه‌زنی چندهدفه قرار داشت (۸۵۵۸۳ تا ۸۷۲۵۱ تن در سال). این امر در خصوص تابع هدف اقتصادی نیز صادق بود و تابع هدف اقتصادی ۵۰۰۳۲۲ هزار دلار حاصل از رویکرد فازی در بازه ۴۹۶۲۱۶ تا ۵۰۱۴۰۵ هزار دلار در سال رویکرد چانه‌زنی چند هدفه واقع شد. مقدار آب تخصیصی به زیربخش‌های کشاورزی ۷۶۳ و زیربخش‌های کشت و صنعت ۵۵۹۱ میلیون مترمکعب در سال برآورد گردید که درون محدوده حاصل تعادل نش (بین ۷۲۳ تا ۸۰۵ میلیون متر مکعب زیربخش‌های کشاورزی و ۵۳۱۸ تا ۵۷۳۰ میلیون مترمکعب زیربخش‌های کشت‌وصنعت) واقع شده است که نشان از تطابق نتایج حاصل از دو رویکرد مورد استفاده در این تحقیق دارد.

جدول ۷-نتایج مربوط به رویکرد برنامه‌ریزی فازی

Table 7-Results of fuzzy programming approach

λ	E1 (ton yr^{-1})	E2 (10^{3}USD yr^{-1})	آب تخصیصی به زیربخش کشاورزی (MCM yr^{-1}) Allocated water to A sub-sectors	آب تخصیصی به زیربخش کشت‌وصنعت (MCM yr^{-1}) Allocated water to AI Sub-sectors
0.86	86019	500322	763	5591



شکل ٦-آب تخصیصی سالانه به آب‌بران مختلف با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی فازی

Figure 6-Annual allocated water to different water users using fuzzy programming approach

همچنین نتایج برنامه‌ریزی فازی مورد استفاده در این تحقیق بیانگر آن است که در حالت بهینه، سود اقتصادی حاصل (جدول ۷) نسبت به بیشترین سود ممکن (جدول ۳) به میزان ۵۳۳۱۴ هزار دلار در سال کمتر و مقدار بار آلودگی نیز به میزان ۶۷۳۰۷ تن در سال کمتر خواهد بود. به بیان دیگر، چنانچه به میزان ۵۳۳۱۴ هزار دلار در سال از بیشترین میزان سود اقتصادی ممکن صرف‌نظر گردد، شرایط برای به دستیابی به یک سود اقتصادی مطمئن و پایدار به نحوی که از بروز آسیب‌های جدی به محیط‌زیست جلوگیری شود، مهیا خواهد

بود. تحت این شرایط، مقدار زه‌آب کشاورزی تخلیه شده به رودخانه‌ها به‌میزان ۶۷۳۰۷ تن در سال کمتر خواهد بود.

همانگونه که در شکل ۴ ملاحظه گردید، در روش چانه‌زنی چندهدفه بازه‌ی باریکی به عنوان تعادل نش (جواب مسئله) مشخص گردید و مقادیر E1 و E2 در دور چهارم چانه‌زنی در شکل ۵ نمایش داده شد. بر این اساس در روش مذکور تصمیم‌گیرندگان می‌توانند انتخاب خود را در بازه مربوطه صورت دهند. این در حالی است که در روش برنامه‌ریزی فازی جواب نهایی سازشی مسئله به صورت واحد می‌باشد.

شکل ۶ توزیع آب تخصیصی سالانه بین آب‌بران مختلف با استفاده از رویکرد فازی را نمایش می‌دهد. مقایسه نتایج این شکل با شکل ۵ حاکی از تشابه نتایج دو رویکرد می‌باشد. برای مثال ملاحظه می‌گردد که در بین آب‌بران زیربخش‌های کشاورزی، بیشترین مقدار آب تخصیصی مربوط به آب‌بر A2 می‌باشد که در رویکرد برنامه‌ریزی فازی مقدار آن ۲۹۳ و در حالت چانه‌زنی چندهدفه بین ۲۸۲ و ۳۰۶ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد و کمترین مقدار آب تخصیصی به آب‌بر A3 با مقدار ۲۲۴ میلیون متر مکعب در سال در برنامه‌ریزی فازی و بین ۲۱۷ و ۲۳۳ میلیون مترمکعب در سال در چانه‌زنی چندهدفه، تعلق دارد.

نتیجه‌گیری کلی

تمرکز بر افزایش منافع اقتصادی فعالیت‌های کشاورزی در طرح‌های منابع آبی موجب غفلت از پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی آتی می‌گردد. در این تحقیق به کمک نظریه بازی‌ها، برنامه‌ریزی چندهدفه و برنامه‌ریزی فازی چارچوبی جهت پیدا کردن سازش بین درآمد بیشینه و بارآلودگی کمینه تدوین شد. جهت بررسی کارایی و تشخیص استراتژی‌های مدیریتی، روش‌های مورداستفاده در بخشی از سیستم رودخانه‌ای کارون–دز به کار گرفته شدند. رویه مورد استفاده قابلیت مد نظر قرار دادن اهداف کیفی و تنش آبی و عملکرد گیاه در مسائل تخصیص منابع آب را دارا می‌باشد. یافته‌های تحقیق نشان داد که با نتایج اولیه مدل نظریه بازی‌ها، رضایت هیچ یک از بازیگران جلب نمی‌گردد و تعادل نش پس از چهار دور چانه‌زنی و با کاهش انتظارات اقتصادی و نگرانی‌های زیست‌محیطی حاصل می‌شود. استفاده نمودن از فرم خطی کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه، موجب می‌گردد که مدل بهینه‌سازی از بار محاسباتی ناچیز، پیچیدگی کم و کارایی مناسب برخوردار گردد. بررسی‌های تحقیق نشان داد که استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی فازی همانند چانه‌زنی چندهدفه، امکان دستیابی به جواب بهینه میان اهداف متضاد اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم نموده و در این حالت مقادیر آب تخصیصی به آب‌بران درون محدوده جواب بهینه روش چانه‌زنی چندهدفه واقع می‌گردد. رویه مورداستفاده به دلیل لحاظ‌نمودن شرایط ذینفعان مختلف، موجبات شبیه‌سازی واقعی‌تر سیستم شده و می‌تواند به پذیرش اجتماعی بیشتری منجر شده و از شکست در اجرای سیاست انتخابی جلوگیری به عمل آورد. به‌کارگیری چارچوب تدوین شده در سایر مناطق و نیز در تهیه برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های کلان منابع آبی می‌تواند مثمر ثمر واقع گردد.

منابع

1- Bogardi I., and Szidarovsky F. 1976. Application of game theory in water management. Applied Mathematical Modelling, 1(1):16-20.
2- Council U.W.R. 1973. Principles and standards for planning water and related land resources. Federal Register, 38(174):24778.
3- Davila E., Chang N.B., and Diwakaruni S. 2005. Landfill space consumption dynamics in the Lower Rio Grande Valley by grey integer programming-based games. Journal of Environmental Management, 75(4):353-365.
4- Estalaki S.M., Abed-Elmdoust A., and Kerachian R. 2015. Developing environmental penalty functions for river water quality management: application of evolutionary game theory. Environmental Earth Sciences, 73(8):4201-4213.
5- Ghahraman B., and Sepaskhah A.R. 2004. Linear and non-linear optimization models for allocation of a limited water supply. Irrigation and Drainage, 53(1):39-54.
6- Gibbons R.S. 1997. An introduction to applicable game theory. The Journal of Economic Perspectives, 11,127–149.
7- Hakimi-Asiabar M., Ghodsypour S.H., and Kerachian R. 2010. Deriving operating policies for multi-objective reservoir systems: application of self-learning genetic algorithm. Applied Soft Computing, 10(4):1151-1163.
8- Jamab C.E. 2006. Current and future water resources status in Karoon river basin. Tehran, Iran (In Persian).
9- Jensen M.E. 1968. Water consumption by agricultural plants (Chapter 1). Water Deficits and Plant Growth, p. 1-22.
10- Lee C.S. 2012. Multi-objective game-theory models for conflict analysis in reservoir watershed management. Chemosphere. 87(6):608-613.
11- 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.
12- Loáiciga H.A. 2004. Analytic game-theoretic approach to ground-water extraction. Journal of Hydrology,

297(1):22-33.
13- Lund J.R., and Palmer R.N. 1997. Water resource system modeling for conflict resolution. Water Resources Update, 3(108):70-82.
14- Madani K. 2010. Game theory and water resources. Journal of Hydrology, 381(3):225-238.
15- Mahjouri N., and Ardestani M. 2010. A game theoretic approach for interbasin water resources allocation considering the water quality issues. Environmental monitoring and assessment, 167(1-4):527-544.
16- McKinney D., and Teasley R. 2007. Cooperative game theory for transboundary river basins: the Syr Darya basin. In Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, 15-19 May. 2007. Tampa, Florida, USA.
17- Meyer S.J., Hubbard K.G., and Wilhite D.A. 1993. A crop-specific drought index for corn: I. Model development and validation. Agronomy Journal, 85(2):388-395.
18- Moghaddasi M., Morid S., Araghinejad S., and Alikhani M.A. 2010. Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural drought losses: The 1999 drought in the Zayandeh Rud irrigation system (Iran). Irrigation and drainage, 59(4):377-387.
19- Nikoo M.R., Kerachian R., and Poorsepahy-Samian H. 2012. An interval parameter model for cooperative inter-basin water resources allocation considering the water quality issues. Water resources management, 26(11):3329-3343.
20- Parrachino I., Dinar A., and Patrone F. 2006. Cooperative game theory and its application to natural, environmental, and water resource issues: 3. application to water resources. World Bank Policy Research Working Paper, (4074).
21- Poorsepahy-Samian H., Kerachian R., and Nikoo M.R. 2012. Water and pollution discharge permit allocation to agricultural zones: application of game theory and min-max regret analysis. Water resources management, 26(14):4241-4257.
22- Rao N., Sarma P., and Chander S. 1990. Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water. Water Resources Research, 26(4):551-559.
23- Üçler N., Engin G.O., Köçken H., and Öncel M. 2015. Game theory and fuzzy programming approaches for bi-objective optimization of reservoir watershed management: a case study in Namazgah reservoir. Environmental Science and Pollution Research, 22(9):6546-6558.
24- Von Neumann J., and Morgenstern O. 1944. Game theory and economic behavior. Princeton University, Princeton.
25- Zimmermann H.J. 1991. Fuzzy set theory and its applications, revised edition. kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.

Journal of Water and Soil
Vol. 31, No. 2, May.-Jun. 2017, p. 434-448

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۱، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۶، ص. ۴۴۸-۴۳۴

A Multi-Objective Bargaining and Fuzzy Programming Approaches for Optimal Water Allocation with Emphasis on Deficit Irrigation

O. Nasiri-Gheidari[1]- S. Marofi[2*]

Received: 11-06-2016
Accepted: 15-08-2016

Introduction: Due to the rapid rate of population growth, water resource topics wasmainly affected by the economic and social components, however, the importance of environmental issues in such projects has gained more attention. As pollution loads are increasing, it has become more essential to incorporate water quality in water resource management issues. Under this condition, optimal water allocation by considering multiple objectives of water quality and quantity issues can lead to sustainable and optimal benefit of stakeholders. This study was done in order to balance environmental and economic concerns in water resource allocation.

Materials and Methods: Based on game theory concepts and fuzzy programming procedure, two new methodologies were developed for sustainable water resource allocation in river systems. The proposed methods which include a multi-objective bargaining and fuzzy programming approaches were utilized to analysis strategies of interaction between environmental protection and economical income. Two groups of players, consists of player 1 for environmental and player 2 for economic issues were considered in order to apply the developed models. As players will not be satisfied with the outcome of each other, they will begin the bargaining process. Throughout the bargaining rounds, players will reduce their expectations. After several negotiations, the interval between the reset goal values and outcomes will be decreased. The bargaining process will be finished if final solutions reach to the determined goals. In the study, the Total Dissolved Solids (TDS) were considered as water quality indicators of environmental objective function, since salinity is the important problem of the study area. Using crop production function in economic income objective function makes it possible to incorporate deficit irrigation in different crop growth stages. Since allocation problems include many decision variables, conventional (non-linear) crop production function will have high computational costs and linear form of it can reduce the complexity of the optimization model. Therefore,additive (linear) form of crop production function was taken into consideration instead of multiplicative form. Total pollution load discharged into the river (ton per year) and economical income of the system (thousand dollars per year) wasconsidered as environmental and economic values, respectively. During the fuzzy programming procedure, the purpose is to achieve a compromise solution. In this approach, the individual maximum and minimum values of objectives is used to define the membership function. This procedure will maximize the satisfaction degree of the constructed membership functions of the objectives. The presented methodology was illustrated in a part of Karoon-Dez river system between Gotvand dam, Dez dam and Ahvaz city, as a case study. The area of Karoon-Dez river basin is about 67000 square kilometers and it is located in the southwestern part of Iran. The selected area includes 8 agro-industrial and 3 traditional agricultural sub-sectors.

Results and Discussion: Using a linear form of crop production function for calculating the total benefit of the system leads to significant reduction in run-time of the optimization model and make irrigation programming possible by regarding crop growth stages and the available water amount. The results of this study showed that Nash equilibrium, which provides a base for decision makers to choose a strategy, was reached at the fourth round of bargaining process. Moreover, balance between economic and environmental objectives is available by reducing economical expectation and environmental concerns from 553636 to 496216 thousand dollars per year and from 68264 to 87251 tons per year, respectively. In these cases, the annual allocated water to environmental and economical player will be 6123 MCM (5318 to agro-industrial sub-sectors and 805 to agricultural sub-sectors) and 6453 MCM (5730 to agro-industrial sub-sectors and 723 to agricultural sub-sectors) respectively. The results of the fuzzy programming approach demonstrated that at optimal condition, environmental and economic objective function was 85999 tons per year 500422 thousand dollars per year, respectively and allocated water to water users are 6354 MCM per year (agricultural and agro-industrial sub-sectors of the system will be (763 and 5591 MCM per year). Agro-Industrial sub-sector 3 will take the maximum allocated annual water (1789 MCM per year) and Agro-Industrial sub-sector 5 will receive the minimum annual allocated water (151 MCM per year). Comparison of two investigated approaches showed that their results are in agreement with

1and 2- Ph.D. Candidate in Water Resource Engineering and Professor, Water Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan
(*- Corresponding Author Email: smarofi@yahoo.com)

each other.

Conclusions: Results of applying the developed methodology to the Karoon-Dez river system demonstrated that it is effective and applicable to determine sustainable water allocation policies. Finding of this study reveals that the proposed framework can facilitate decision-making process and optimize allocated water to different water users under conflicting objectives. Therefore, the developed procedure can be used as a managerial tool for optimal water allocation strategies, which is in accordance with sustainable development approach. It is easy to apply the presented methodology to other river systems with high pollution loads of agricultural return flows.

Keywords: Crop response function, Multi-objective optimization, Nash equilibrium, Water allocation, Water quality