

تدوین مدل بهینه‌سازی فازی برای بهره‌برداری تلفیقی از آب سطحی و آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت آستانه-کوچصفهان)

سامی قوردویی میلان^۱، عباس روزبهانی^{۲*}، محمدابراهیم بنی‌حبیب^۳، سامان جوادی^۲

۱. کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۹/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۱۵)

چکیده

در تحقیق حاضر، مدل بهینه‌سازی تماماً فازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها برای برداشت تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی برای تأمین نیاز کشاورزی ارائه شده است. تراز آب زیرزمینی دشت آستانه-کوچصفهان با نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی و نتایج آن به صورت روابط رگرسیونی افت - برداشت به عنوان قید مدل بهینه‌سازی استفاده شد. در ادامه، مدل بهینه‌سازی فازی به دو روش کومار و جایالاکیشمی ابتدا به حالت صریح تبدیل شده و با نرم‌افزار GAMS اجرا شد. نتایج بیشترین افت را در هر دو روش ۱/۲۵ متر در ماه فروردین برای ناحیه راست کانال سنگر و برای ناحیه چپ آن ۱/۲۵ متر در ماه مرداد نشان داد. بیشترین کمبود در روش کومار، در ناحیه چپ سنگر مربوط به سال ۱۳۸۱ بود که ۵۹/۸۲ درصد از نیازها تأمین شد، در حالی که در ناحیه راست ۵۶/۷۶ درصد از نیازها در سال ۱۳۹۳ تأمین شد. در روش جایالاکیشمی در بدترین شرایط، بیشترین کمبود در سال ۱۳۷۷ و ۱۳۹۳ بود که ۶۶/۵ و ۶۰/۹۶ درصد از نیازها به ترتیب برای ناحیه چپ و راست سنگر تأمین شد و نیز در روش کومار، در شرایط بیشترین کمبود مجموع چپ و راست سنگر در سال ۱۳۷۷، تأمین نیازها معادل حدود ۶۵/۹ درصد بود. در حالی که، در روش جایالاکیشمی این مقدار ۶۶/۵ درصد در سال ۱۳۷۷ بوده و در وضع موجود این درصد تأمین در بدترین شرایط ۵۴ درصد است. مدل بهینه‌سازی فازی ارائه شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها نسبت به مدل‌های کلاسیک برتری دارد و می‌تواند برای مدیریت تلفیقی تأمین آب کشاورزی به کار رود.

کلیدواژگان: روش جایالاکیشمی، روش کومار، سفیدرود، شبیه‌سازی آب زیرزمینی، MODFLOW.

مقدمه

در مناطقی که استفاده تلفیقی از سفره آب زیرزمینی و رودخانه صورت می‌گیرد، سفره آب زیرزمینی در مواقع کم‌آبی رودخانه به عنوان گزینه مناسبی برای بهره‌برداری از منابع آب محسوب می‌شود. اما بهره‌برداری غیراصولی و بیش از حد از آبخوان‌ها در دو دهه اخیر سبب افت شدید سطح آب و کاهش کیفیت آب سفره‌های زیرزمینی در بیشتر نقاط کشور شده است [۱]. برای جلوگیری از وقوع این فاجعه، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌ها قرار گیرد. از آنجا که در چرخه هیدرولوژی، منابع آب سطحی و زیرزمینی بر هم اثر متقابل دارند و کاهش یکی بر دیگری تأثیر سوء می‌گذارد، باید برای مدیریت منابع آب این دو منبع در کنار یکدیگر در نظر گرفته شوند [۱]. بنابراین، در چند دهه گذشته در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب، مدل‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. Buras اولین مطالعات در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را ارائه کرد [۲]. به همین منظور و با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط، که Abadi و همکارانش در دشت آستانه-کوچصفهان در استان گیلان استفاده کردند، مدل بهینه‌سازی خطی آنها حداکثرسازی اعتمادپذیری برداشت از آب سطحی و زیرزمینی با محدودیت حد مجاز افت آب زیرزمینی بود [۳]. کارآموز و همکارانش، کراچیان و همکارانش، رضاپور طبری و همکارانش و رادمنش و همکارانش از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل بهینه‌سازی تلفیقی استفاده کردند [۴-۷]. آنها رفتار آبخوان نسبت به جواب‌های بهینه را از طریق ارتباط مدل‌سازی آب زیرزمینی و مدل بهینه‌سازی مشاهده و تجزیه و تحلیل کردند. صفوی و علیجانیان بهینه‌سازی تلفیقی به صورت برنامه‌ریزی پویای فازی روی آبخوان مد نظر با هدف حداقل کردن اختلاف بین نیاز آبی و منابع آب قابل تخصیص را انجام دادند [۸]. همچنین، صفوی و همکارانش در نجف‌آباد، از الگوریتم هارمونیک و الگوریتم مورچگان برای حل مدل بهینه‌سازی تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده کردند، به این صورت که در مدل مدیریتی از ترکیب مدل بهینه‌سازی داده‌محور (شبکه عصبی) و الگوریتم جست‌وجوی هارمونیک بهره بردند [۹].

و [۱۰]. به این منظور رضاپور طبری عدم قطعیت در پارامترهای آبخوان که شامل ضریب ذخیره، هدایت هیدرولیکی میزان تغذیه و تخلیه طبیعی آبخوان بود را تحقیق کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد هرچه در مدل تلفیقی، شرایط عدم قطعیت سیستم منابع آب منظور شود، میزان اطمینان‌پذیری سیستم در تأمین نیازهای آبی قابلیت بهتری خواهد داشت [۱۱]. Chang و همکارانش بهره‌برداری تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی را با سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی در تایوان انجام دادند. تابع هدف آنها تخصیص آب سطحی (شامل دو مخزن) و منابع آب زیرزمینی بود. آنها دو مدل بهینه‌سازی شامل مدل بهینه‌سازی قطعی، بهینه‌سازی-شبیه‌سازی، بهره‌برداری در حالت فعلی و بهره‌برداری تلفیقی با سیستم استنتاج فازی را ارائه دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد استفاده از سیستم فازی در بهره‌برداری از آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند جایگزین مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شود [۱۲]. رضایی و همکارانش در دشت نجف‌آباد، یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید چندهدفه به نام F-MOPSO ارائه دادند. پژوهش آنها نشان داد الگوریتم پیشنهاد شده نتایج رضایت‌بخش‌تری در کمبود نیازها و حداقل کردن تغییرات سطح آب زیرزمینی نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دارد [۱۳]. صفوی و رضایی در دشت نجف‌آباد با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به بهره‌برداری تلفیقی در این ناحیه پرداختند. آنها از ترکیب سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی مصنوعی برای در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی مختلف و کاهش عدم قطعیت موجود در پارامترها و داده‌ها برای قسمت شبیه‌سازی استفاده کردند [۱۴]. همچنین، آنها از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک نیز برای قسمت بهینه‌سازی استفاده کردند. رضایی و همکارانش از بهره‌برداری تلفیقی به منظور رسیدن به الگوی کشت بهینه محصولات مختلف بهره بردند. تابع بهینه‌سازی چندهدفه آنها، کمینه‌کردن کمبود، به حداکثر رساندن پایداری منابع آب زیرزمینی و بیشترین سود خالص بود. آنها از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه F-MOPSO که مبتنی بر الگوریتم PSO و Fuzzy بود، برای حل مدل چندهدفه استفاده کردند. در نهایت، الگوی

صرفه‌جویی بیشتری در مصرف آب به میزان ۸۸/۲۲ درصد منجر می‌شود [۲۰].

در بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینه بهره‌برداری تلفیقی بهینه عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته نمی‌شد. همچنین، با توجه به وضعیت محدوده مطالعاتی، با وجود منابع آب سطحی زیاد، در برخی سال‌ها به نیازها با درصد بیشتری پاسخ داده نمی‌شود. از سوی دیگر، چون از منابع آب سطحی و زیرزمینی موجود به صورت تلفیقی بهینه استفاده نمی‌شود، شاهد تبخیر و زهکشی از آب زیرزمینی در برخی نواحی آبخوان هستیم. با توجه به نقص و کمبود در داده‌های نیاز آبی، آب سطحی موجود، ظرفیت کانال آبرسانی و اطلاعات هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی، داده‌های پایه در بهره‌برداری تلفیقی با عدم قطعیت‌هایی همراه است که در نظر گرفتن و اعمال این عدم قطعیت‌ها پژوهش را به واقعیت نزدیک‌تر و در مدیریت بهتر یاری می‌کند. از این رو، در پژوهش حاضر برای نخستین بار از بهینه‌سازی خطی تماماً فازی در بهره‌برداری تلفیقی بهینه با هدف حداقل کردن کمبود آب مورد نیاز و برای تأمین نیاز آبی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها استفاده شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

دشت آستانه-کوچصفهان در استان گیلان و روی مخروط‌افکنه رودخانه سپیدرود در ۴۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱۱ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی تشکیل شده که مساحت آن حدود ۱۱۰۰ کیلومترمربع است [۲۱]. در این منطقه، بیشتر نیاز آبی توسط سد سفیدرود تأمین می‌شود. به این صورت که حجم خروجی از سد سفیدرود بعد از برداشت از طریق تونل فومن که به ناحیه فومنات و مقدار آبی که از طریق سد انحرافی گله‌رود به خارج ناحیه منحرف می‌شود. در بالادست سد انحرافی سنگر و از طریق کانال راست سنگر حدود ۷۰ درصد جریان به محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان و باقی به ناحیه لاهیجان و فومنات منحرف می‌شود. از سد انحرافی سنگر و از طریق کانال چپ سنگر حجم آبی نیز برای تأمین دیگر نیاز آبی محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان و بخشی از ناحیه فومنات منحرف می‌شود (این نسبت نیز حدود ۷۰ درصد

کشت بهینه و غالب محصولات گندم و برنج بود [۱۵]. کراچیان و همکارانش از شبکه بی‌زین به‌منظور تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی در زمان واقعی از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده کردند. اهداف تحقیق آنها شامل تعیین سطح پوشش بهینه، کمینه‌کردن غلظت آلاینده نترات در آب زیرزمینی، کمینه‌کردن بیشترین مقدار بالارفتن آب، هزینه پمپاژ و بیشینه‌کردن درصد تأمین نیاز آب در منطقه کشاورزی بود [۱۶]. Chin-Wen Chen و همکارانش در مخروط‌افکنه Chiu-Shui در کشور تایوان به توسعه مدل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در بزرگ‌مقیاس پرداختند. هدف آنها به حداکثر رساندن تأمین تقاضای آب عمومی و آبیاری با در نظر گرفتن افت سطح ایستابی آبخوان بود. آنها از برنامه‌ریزی خطی برای حل مدل بهینه‌سازی و از کد Modflow برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی و برای لینک کردن آب زیرزمینی و مدل بهینه‌سازی از شبکه مصنوعی (ANN) استفاده کردند. مدل بهینه‌سازی آنها همراه با دو سناریو برای جلوگیری از فرونشست زمین و کاهش افت سطح آب زیرزمینی در آن منطقه بود [۱۷]. از مدل‌های بهینه‌سازی فازی در تحقیقات بهره‌برداری تلفیقی استفاده نشده است، اما کارایی این مدل‌ها در دیگر شاخه‌های علوم آب و کشاورزی اثبات شده است. از جمله می‌توان به تحقیقات تعیین الگوی کشت بهینه و آبیاری، برنامه‌ریزی مخازن سدها و... اشاره کرد. محققانی مانند Sahoo و همکارانش و Li و همکارانش از بهینه‌سازی فازی برای الگوی کشت بهینه و تخصیص آب آبیاری استفاده کرده‌اند [۱۸ و ۱۹]. Li و همکارانش یک مدل بهینه‌سازی فازی را برای تخصیص آب آبیاری ارائه دادند. مدل تدوین آنها برای تخصیص منابع آب سطحی و زیرزمینی برای دوره مختلف کشت برنج بود [۱۹]. اسعدی مهربانی و همکارانش از برنامه‌ریزی خطی تماماً فازی برای بهینه‌کردن الگوی کشت استفاده کردند. آنها همچنین مدل قطعی مد نظر را نیز اجرا کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده افزایش سود خالص به میزان ۲/۵۳ درصد نسبت به بهینه‌سازی قطعی و افزایشی معادل ۳۶/۳۴ درصد نسبت به الگوی کشت فعلی از طریق کاهش سطوح زیر کشت محصولات با سود خالص کم و افزایش سطح زیر کشت محصولات با درآمد بالاست. همچنین، استفاده از برنامه‌ریزی خطی تماماً فازی به

استخراج و به دو قسمت ناحیه چپ و راست رودخانه سفیدرود تقسیم شده است.

ساختار مدل پیشنهادی

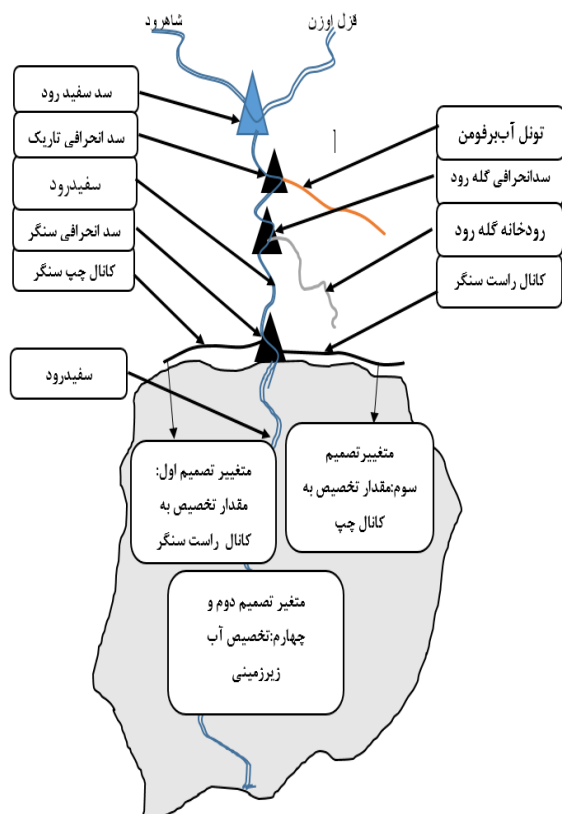
ساختار این تحقیق به صورت شکل ۲ آورده شده است. در این ساختار ابتدا مدل عددی آب زیرزمینی مدل سازی شده و سپس مدل بهینه سازی فازی تهیه شده است. در ادامه، مدل بهینه سازی با مدل عددی از طریق رگرسیون فازی لینک و رفتار آبخوان نسبت به جواب های بهینه سازی ارزیابی شده است.

برای محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان است. بخشی از نیاز آبی نیز که آب سطحی قادر به تأمین نیست از طریق آب زیرزمینی تأمین می شود. کمبود منابع آب سطحی در فصل کشاورزی و بالابودن سطح آب زیرزمینی که موجب تبخیر و زهدار شدن اراضی می شود نیاز است تا بهره برداری تلفیقی در این محدوده صورت گیرد (شکل ۱-ب) [۲۲]. در شکل (۱-الف) موقعیت محدوده مطالعاتی قابل مشاهده است. نیاز آبی بخش شرب، صنعت و کشاورزی، در محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان به صورت جدول ۱ است. این نیاز آبی به صورت ماهانه

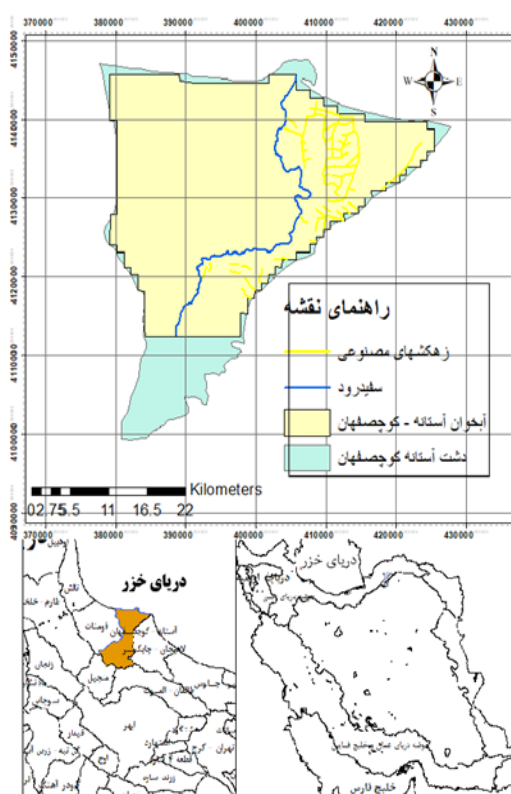
جدول ۱. نیاز آبی (شرب، صنعت و کشاورزی) در محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان*

ماه های کشاورزی					ماه های غیر کشاورزی		ناحیه
مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	مهر، آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند و شهریور		
۷۹	۱۰۹/۳	۱۰۸/۵	۱۹۸/۴	۷۷	۷/۵	چپ سنگر	
۳۷/۵	۵۲	۵۱/۳	۹۴/۲	۳۶/۶	۱	راست سنگر	

* مرجع: مهندسان مشاور پندام، (۱۳۸۳). «مطالعات بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود گیلان». جلد چهارم [۲۲].

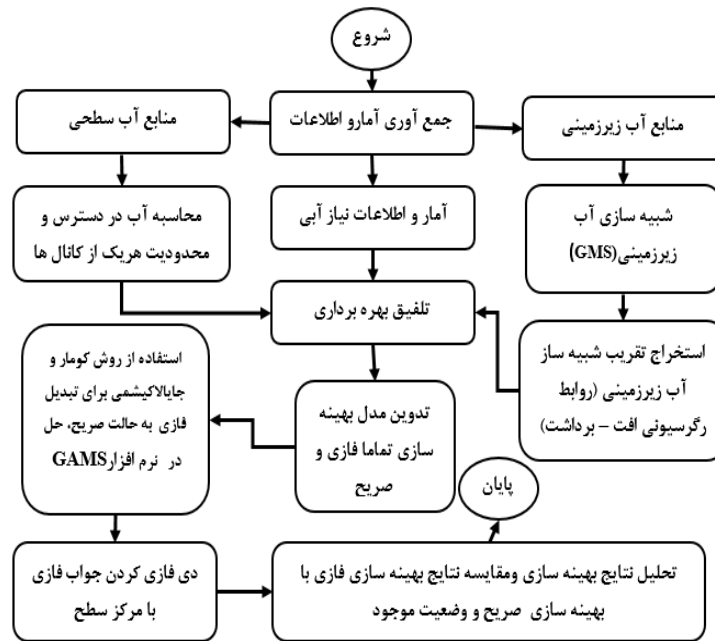


ب) منابع تأمین نیاز آبی و متغیرهای تصمیم



الف) موقعیت محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان

شکل ۱. محدوده مطالعاتی آستانه - کوچصفهان و شماتیک بهره برداری تلفیقی



شکل ۲. ساختار متدولوژی پیشنهادی

روش انجام کار

شبیه‌سازی آب زیرزمینی

برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی از کد MODFLOW-2000 تحت نرم‌افزار GMS استفاده شده است. کد MODFLOW از معتبرترین و پرکاربردترین کدهای شبیه‌سازی کمی آب‌های زیرزمینی است که بر اساس روش تفاضلات محدود، جریان‌های زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند [۲۳]. با توجه به آمار موجود، مهرماه ۱۳۸۹ به عنوان زمان شروع مدل‌سازی در نظر گرفته شد. ابتدا مدل برای حالت پایدار ساخته و کالیبره شد. سپس، مدل‌سازی برای دو سال و به صورت ماهانه برای حالت ناپایدار انجام شد.

تابع عضویت فازی

همه اطلاعات مربوط به یک مجموعه فازی به وسیله تابع عضویت آن توصیف و در همه کاربردها و مسائل تئوری مجموعه‌های فازی از آن استفاده می‌شود. تابع عضویت مقدار فازی بودن یک مجموعه فازی را مشخص می‌کند، تابع عضویت در یک مجموعه فازی متعلق بازه بسته بین صفر و یک بوده و تابع عضویت آن مثلثی است (رابطه ۱) [۲۴ و ۲۵]:

$$\mu_A(x): x \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

بهینه‌سازی تماماً فازی

در مدل برنامه‌ریزی خطی تماماً فازی، همه اجزای مدل، یعنی مقادیر کلیه پارامترها شامل ضرایب تابع هدف، ضرایب متغیرها در محدودیت‌ها و مقادیر سمت راست و نیز مقادیر متغیرهای تصمیم و در نتیجه مقدار تابع هدف، فازی هستند که فرم عمومی نمایش آن به صورت رابطه ۲ است.

$$\begin{aligned} \text{Max (or Min)} \tilde{Z} &= \sum_{j=1}^n (\tilde{c}_j \otimes \tilde{x}_j) \\ \text{s.t: } \sum \tilde{a}_{ij} \otimes x_{ij} &(\leq) \tilde{b}_{ij}, \forall i=1,2,3,\dots,m \quad (2) \\ \tilde{x} &\geq 0. \end{aligned}$$

در تحقیق حاضر برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از اطلاعات و مدل بهینه‌سازی، از بهینه‌سازی تماماً فازی استفاده شده است. بنابراین، تابع هدف حداقل کردن کمبود از دو منبع آب سطحی و زیرزمینی است. مقدار تخصیص آب سطحی از پشت سد انحرافی سنگر به دو کانال راست و چپ سنگر منحرف شده و از هر یک از کانال‌ها نیز حدود ۳۰ درصد حجم آب به ناحیه لاهیجان و فومنات منتقل می‌شود [۲۲].

تابع هدف

$$\tilde{S}w_{ijk} \leq \tilde{C}p_{ijk}, \forall (i, j, k) \quad (6)$$

$\tilde{C}p_{ijk}$ بیشترین ظرفیت کانال‌ها (MCM) در سال i ، ماه j و در ناحیه k (MCM). مجموع آبی که به کانال چپ و راست سنگر تخصیص داده می‌شود نباید از منابع آب پست سد سنگر بیشتر باشد، بنابراین می‌توان محدودیت مجموع آب در دسترس برای مجموع دو کانال را در نظر گرفت (رابطه ۷).

$$\sum_{k=1}^r \tilde{S}w_{ijk} \leq \tilde{A}w_{ij}, \forall (i, j) \quad (7)$$

$\tilde{A}w_{ij}$ حجم آب در دسترس پشت سد انحرافی سنگر در سال i ، ماه j و در ناحیه k . آخرین محدوده (رابطه ۸)، مجموع حجم آب تخصیص داده شده به کانال چپ (راست) و منابع آب زیرزمینی چپ سنگر (راست سنگر) نباید بیشتر از نیاز آبی در ماه و سال مد نظر باشد.

$$\tilde{S}w_{ijk} + \tilde{G}w_{ijk} \leq \tilde{D}_{ijk}, \forall (i, j, k) \quad (8)$$

مدل بهینه‌سازی تماماً فازی ابتدا به روش کومار و جایالاکیشمی و با توجه به باندهای چپ، وسط و راست فازی، به سه تابع هدف صریح تبدیل و در نرم‌افزار GAMS حل می‌شود. بنابراین، جواب متغیرهای تصمیم برای هر باند فازی به دست می‌آید. در نهایت، از رابطه غیرفازی ساز مرکز سطح به کمیت قطعی تبدیل می‌شود.

روش‌های حل مدل بهینه‌سازی تماماً فازی خطی

در سال ۲۰۱۰ کومار و همکارانش روش جدیدی برای حل مدل بهینه‌سازی تماماً فازی خطی ارائه دادند که برای حل آن نیاز بود تابع هدف به مانند جدول ۲ رتبه‌بندی شود و نامساوی‌های موجود در محدودیت مدل بهینه‌سازی به کمک متغیر کمکی به مساوی تبدیل شود و سپس با کمک عملگرهای جدول ۲ ابتدا به حالت صریح تبدیل و سپس با نرم‌افزارهای بهینه‌سازی حل شود [۲۶]، [۲۷]. جایالاکیشمی و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۲ به روش جدیدی در حل مسائل در این زمینه پرداختند که در روش آنها دیگر نیازی به رتبه‌بندی تابع هدف و افزودن متغیر کمکی نیست [۲۸]. در هر دو روش حل، اعداد فازی از نوع مثلثی و عملگرها و رتبه‌بندی فازی برای دو عدد فازی A, B به صورت جدول ۲ است.

تابع هدف که حداقل شدن کمبود در هر سال است، برای دوره ۲۰ ساله و در گام ماهانه و نیز در دو ناحیه چپ و راست کانال سنگر به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$\text{Min } \tilde{Z} = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^r |\tilde{D}_{ijk} - \tilde{S}w_{ijk} - \tilde{G}w_{ijk}| \quad (3)$$

i تعداد سال‌های دوره بهینه‌سازی، j تعداد ماه در هر سال و k شمارنده نواحی (راست و چپ سنگر) است. \tilde{D}_{ijk} حجم نیاز آبی در سال i و در ماه j و در ناحیه k (MCM)، $\tilde{S}w_{ijk}$ حجم برداشت از آب سطحی (MCM) و $\tilde{G}w_{ijk}$ حجم برداشت از آب زیرزمینی (MCM).

محدودیت‌ها (قیود)

محدودیت مقدار مجاز افت ناشی از برداشت آب زیرزمینی (رابطه ۴) است. مقدار افت نباید از حد مجاز تجاوز کند چرا که در این صورت موجب کمبود حجم آبخوان شده و آبخوان از حالت تعادل خارج می‌شود. درخور یادآوری است که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی آب زیرزمینی که به صورت روابط رگرسیونی استخراج شده، در محدودیت‌های افت‌وخیز در روابط ۴ و ۵ جایگزین خواهد شد.

$$\tilde{a}_{ijk} \otimes \tilde{G}w_{ijk} \leq \tilde{h}_{ijk}, \forall (i, j, k) \quad (4)$$

\tilde{h}_{ijk} مقدار مجاز افت تراز آب زیرزمینی در سال i ، ماه j و در ناحیه k (m)، ضریب رگرسیونی فازی در رابطه افت-برداشت. محدودیت ناشی از خیز سطح آب زیرزمینی (رابطه ۵)، خیز یا بالآمدگی سطح آب زیرزمینی را نیز باید کنترل کرد. در غیر این صورت اگر خیز از حد مجاز تجاوز کند، موجب زه‌دار شدن اراضی و آسیب رساندن به ریشه گیاهان می‌شود.

$$\tilde{a}_{ijk} \otimes \tilde{G}w_{ijk} \geq \tilde{h}'_{ijk}, \forall (i, j, k) \quad (5)$$

\tilde{h}'_{ijk} مقدار مجاز خیز سطح آب زیرزمینی در سال i ، ماه j و در ناحیه k (m). همچنین، محدودیت بیشترین ظرفیت کانال‌ها را داریم (رابطه ۶)، هر یک از کانال چپ و راست سنگر بیشترین ظرفیت آب‌رسانی را دارند که هنگام تخصیص نباید از این ظرفیت تجاوز کند.

جدول ۲. رتبه‌بندی و عملگرهای جمع و ضرب در اعداد فازی

عملگرهای فازی برای دو عدد مثلثی A,B	رتبه‌بندی فازی برای عدد فازی A
$\tilde{B} = (d, e, f), \tilde{A} = (a, b, c)$	$\tilde{A} = (a, b, c)$
$\tilde{A} + \tilde{B} = (a + d, b + e, c + f)$	$R(\tilde{A}) = 0.25(a + 2b + c)$
$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (ad, be, cf)$	

وضعیت چاه‌های مشاهداتی بعد از کالیبره و واسنجی در حالت ناپایدار و نیز تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. تراز آب زیرزمینی از ۳۰ متر در نزدیک مخروط‌افکنه سفیدرود شروع شده و هر چه به دریای خزر نزدیک می‌شود کمتر شده و تا ۲۵- متر می‌رسد. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه کالیبره‌شده را نشان می‌دهند. مقادیر هدایت هیدرولیکی در نقاط مختلف آبخوان از نقشه‌های قابلیت انتقال و ضخامت اشباع آبخوان به دست آمد و به عنوان مقادیر اولیه به مدل داده شده و در نهایت نیز کالیبره شد. دامنه تغییرات هیدرولیکی آبخوان از سه متر در روز تا ۲۷ متر متغیر است. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی در ابتدای آبخوان و در بستر رودخانه است و چون این نواحی درشت‌دانه هستند، مقادیر هدایت هیدرولیکی نیز بیشتر از سایر نواحی است. بیشترین مقدار آبدهی ویژه آبخوان نیز ۲۵ درصد و در نواحی‌ای است که مقدار هدایت هیدرولیکی بیشترین مقدار را دارد. کمترین مقدار آبدهی ویژه نیز حدود ۵ درصد است.

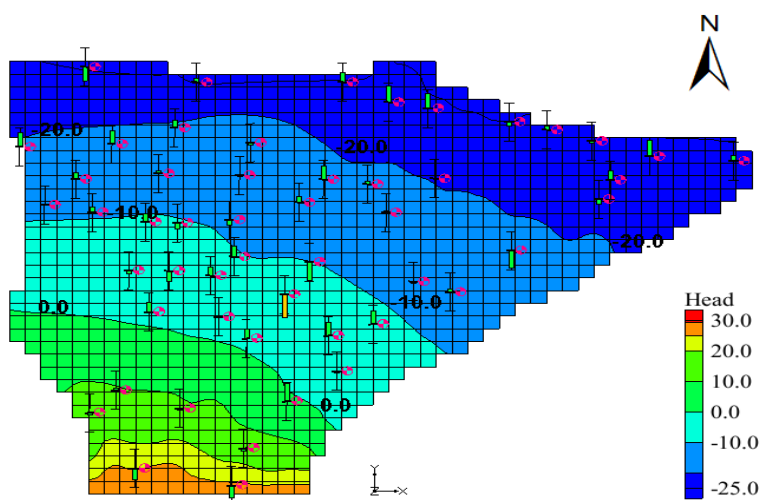
برای تجزیه و تحلیل‌های فازی لازم است نتایج به حالت کلاسیک معمولی تبدیل شوند. روش‌های مختلفی برای تبدیل کمیت فازی به کمیت قطعی وجود دارد، روش غیرفازی ساز مرکز سطح رایج‌ترین روش تبدیل کمیت فازی به کمیت قطعی است. مقدار x^* در این روش با استفاده از رابطه ۹ به دست می‌آید.

$$x^* = \frac{\int \mu_{\tilde{A}}^-(x).x.dx}{\int \mu_{\tilde{A}}^-(x).dx} \quad (9)$$

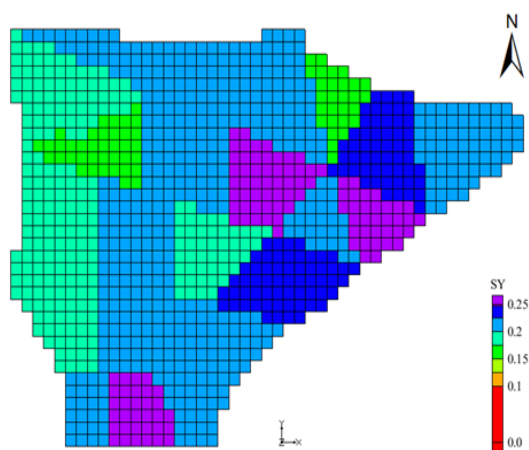
نتایج و بحث

مدل ریاضی کمی آبخوان آستانه-کوچصفهان

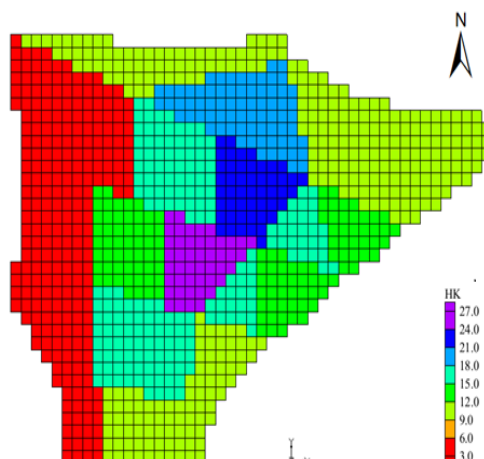
نوسانات سطح ایستابی آبخوان دشت آستانه-کوچصفهان توسط تعدادی نقاط کنترل، که چاه مشاهده‌ای هستند، تعیین می‌شود. چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان ۵۱ حلقه هستند که در همه محدوده سفره آب زیرزمینی پراکنده شده‌اند. شبیه‌سازی آب زیرزمینی در هر دو حالت پایدار و ناپایدار اجرا شده و مقادیر هدایت هیدرولیکی در حالت پایدار و آبدهی ویژه در حالت ناپایدار کالیبره شد. شکل ۳



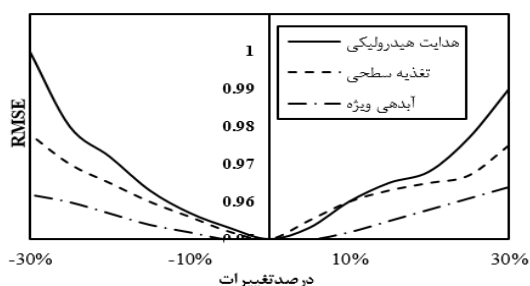
شکل ۳. وضعیت چاه‌های مشاهداتی کالیبره‌شده و تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در حالت ناپایدار



شکل ۵. مقادیر آبدهی ویژه کالیبره شده



شکل ۴. مقدار هدایت هیدرولیکی کالیبره شده



شکل ۶. تحلیل حساسیت مدل آب زیرزمینی

در ادامه، برای صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی ۱۲ گام زمانی ماهانه دیگر از مهر ۱۳۹۲ تا شهریور ۱۳۹۳ انتخاب شده و برای آنالیز به مدل اعمال شد. نتایج ارزیابی دقت مدل در دو حالت ماندگار و ناماندگار به همراه صحت‌سنجی در جدول ۳ آمده است. ملاحظه می‌شود که مدل در سه حالت یادشده دقت کافی دارد.

جدول ۳. معیارهای ارزیابی برای بررسی دقت مدل آب زیرزمینی

حالت مدل	MAE	RMSE
پایدار	۰/۸۵	۰/۹
ناپایدار	۰/۹۳	۰/۹۵
صحت‌سنجی	۰/۹۶	۱/۲۲

از پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی و آبدهی ویژه برای تحلیل حساسیت مدل استفاده شد. با توجه به شکل ۶ دیده می‌شود که مدل به پارامتر هدایت هیدرولیکی نسبت به دیگر پارامترها حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. همچنین، کمترین حساسیت مدل به پارامتر آبدهی ویژه است.

جدول ۴. نتایج رابطه رگرسیونی افت آبخوان-پمپاژ در ۱۲ ماه

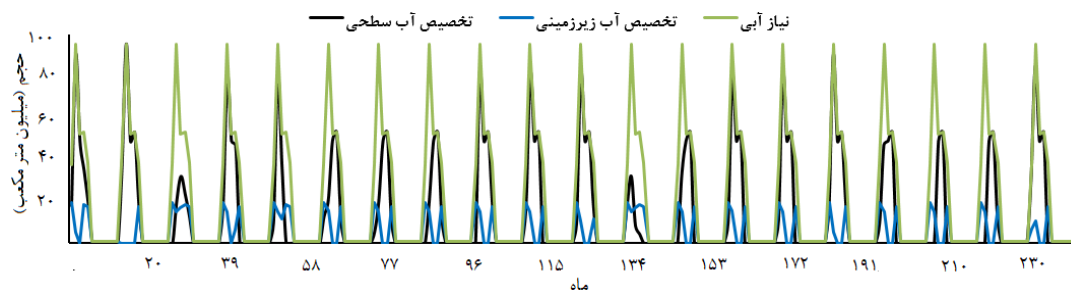
ماه	روابط رگرسیونی	R ²	ماه	روابط رگرسیونی	R ²
مهر	$H_1 = (-0.1510) * Q_{qw1} + 0.270$	۰/۹۹	فروردین	$H_7 = (-0.0892) * Q_{qw7} + 0.477$	۰/۹۹
آبان	$H_2 = (-0.0579) * Q_{qw2} + 0.103$	۰/۹۹	اردیبهشت	$H_8 = (-0.1262) * Q_{qw8} + 0.680$	۰/۹۹
آذر	$H_3 = (-0.0536) * Q_{qw3} + 0.094$	۰/۹۹	خرداد	$H_9 = (-0.1210) * Q_{qw9} + 0.654$	۰/۹۹
دی	$H_4 = (-0.0552) * Q_{qw4} + 0.095$	۰/۹۹	تیر	$H_{10} = (-0.1105) * Q_{qw10} + 0.772$	۰/۹۲
بهمن	$H_5 = (-0.0544) * Q_{qw5} + 0.093$	۰/۹۹	مرداد	$H_{11} = (-0.1203) * Q_{qw11} + 0.840$	۰/۹۹
اسفند	$H_6 = (-0.0573) * Q_{qw6} + 0.000$	۰/۹۹	شهریور	$H_{12} = (-0.1207) * Q_{qw12} + 0.846$	۰/۹۹

نتایج به دست آمده از روابط رگرسیونی نشان داد می‌توان از روابط رگرسیونی بین افت برداشت از آب زیرزمینی در مدل بهینه‌سازی استفاده کرد (جدول ۴). روابط رگرسیونی استخراج شده به صورت اسکالر است. برای اینکه از قیدهای مدل بهینه‌سازی به منظور کنترل افت و خیز سطح آب زیرزمینی استفاده شود، باید قیدها به کمیت فازی تبدیل شوند. بنابراین، با توجه به مقدار افت به سه حد پایین، متوسط و بالا، مقادیر شیب رگرسیون و عرض از مبدأ رگرسیون خطی نیز به کمیت فازی تبدیل شدند.

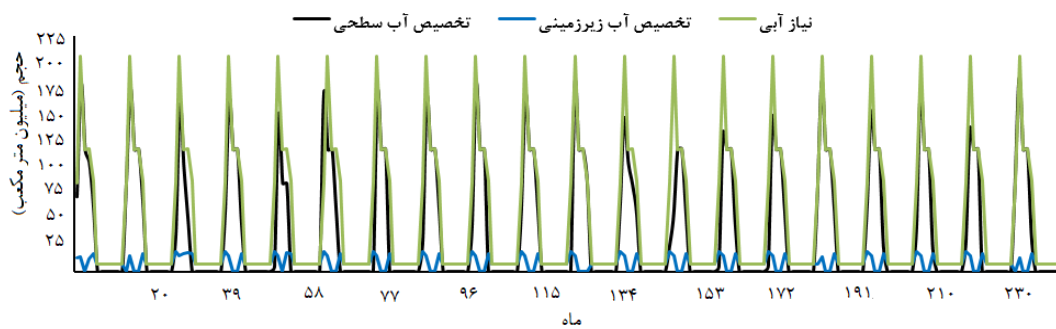
در جدول ۴، H_i افت یا خیز ناشی از برداشت آب زیرزمینی (m) و Q_{qwi} مقدار برداشت آب زیرزمینی (MCM) برای در نظر گرفتن عدم قطعیت است. مقادیر نیاز آبی ۲۰ درصد کم و زیاد شدند تا باندهای چپ و راست عضویت فازی نیاز آبی به دست آید. با توجه به اینکه حدود ۷۰ درصد از کل آب پشت سد انحرافی چپ و راست سنگر به محدوده مد نظر اختصاص دارد، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت حداکثر، حداقل و میانگین ۲۰ سال آب موجود و با توجه به ۷۰ درصد اختصاص داده شده به محدوده مطالعاتی، حدهای فازی آب سطحی موجود استخراج شد.

مدل بهینه‌سازی فازی تلفیقی
مدل بهینه‌سازی ابتدا به صورت تماماً فازی و برای دوره ۱۰ قابل مشاهده است.

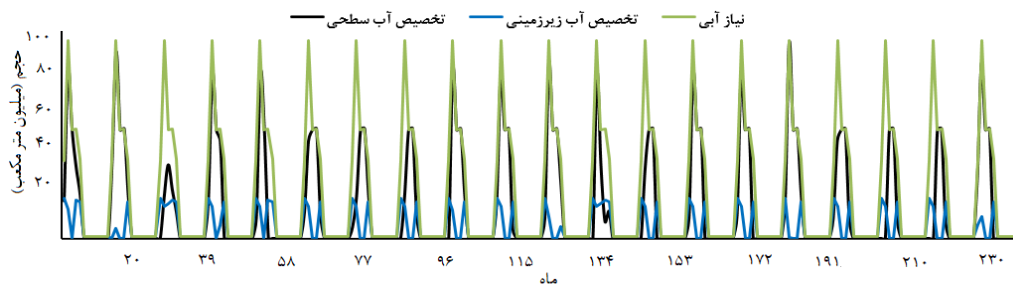
۲۰ ساله (۱۳۷۵-۱۳۷۶ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۵) اجرا شد. دوره ۲۰ ساله، چنان انتخاب شده است که شامل دوره ترسالی و خشکسالی باشد. سپس، مدل بهینه‌سازی فازی تدوین شده با روش حل کومار و جایالاکیشمی به حالت صریح به سه تابع هدف بهینه‌سازی برای هر باند فازی تبدیل و با نرم‌افزار GAMS حل شد. نتایج به صورت فازی و برای دوره ۲۰ ساله، به صورت ماهانه برای نواحی چپ و راست سنگر استخراج شد. در ادامه، به کمک رابطه مرکز سطح به حالت غیر فازی تبدیل شد. نتایج به دست آمده از مدل بهینه‌سازی برای نواحی راست و چپ سنگر به روش کومار و جایالاکیشمی و به صورت صریح در شکل‌های ۷-۱۰ قابل مشاهده است.



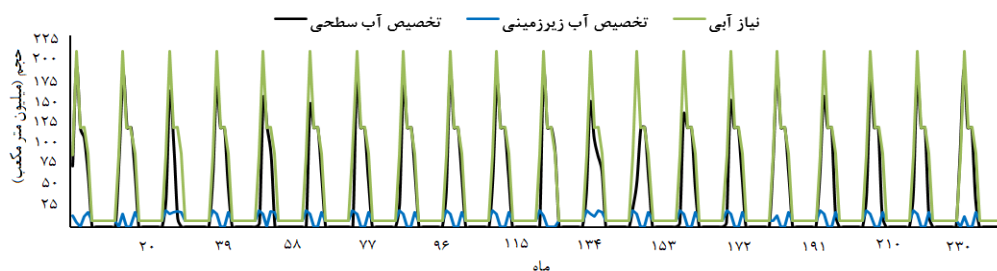
شکل ۷. تخصیص بهینه به روش کومار برای ناحیه راست سنگر



شکل ۸. تخصیص بهینه به روش کومار برای ناحیه چپ سنگر



شکل ۹. تخصیص بهینه به روش جایالاکیشمی برای ناحیه راست سنگر



شکل ۱۰. تخصیص بهینه به روش جایلاکیشمی برای ناحیه چپ سنگر

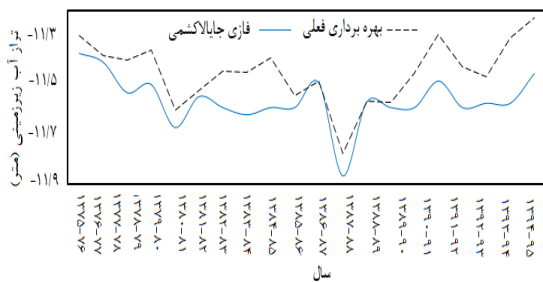
جدول ۵. مقادیر برداشت از آب زیرزمینی در مدل بهینه‌سازی تلفیقی

مقدار برداشت (MCM)			مقدار برداشت (MCM)			مقدار برداشت (MCM)		
کومار	جایلاکیشمی	سال	کومار	جایلاکیشمی	سال	کومار	جایلاکیشمی	سال
۱۶۴	۱۶۴	۱۳۹۰ - ۱۳۸۹	۱۶۴	۱۶۴	۱۳۸۳ - ۱۳۸۲	۱۷۸	۱۷۸	۱۳۷۶ - ۱۳۷۵
۱۴۰	۱۳۵	۱۳۹۱ - ۱۳۹۰	۱۶۴	۱۶۴	۱۳۸۴ - ۱۳۸۳	۱۱۰	۱۱۵	۱۳۷۷ - ۱۳۷۶
۱۶۴	۱۶۴	۱۳۹۲ - ۱۳۹۱	۱۶۴	۱۶۴	۱۳۸۵ - ۱۳۸۴	۲۳۵	۲۳۵	۱۳۷۸ - ۱۳۷۷
۱۶۴	۱۶۴	۱۳۹۳ - ۱۳۹۲	۱۳۶	۱۲۸	۱۳۸۶ - ۱۳۸۵	۱۷۰	۱۷۱	۱۳۷۹ - ۱۳۷۸
۱۶۴	۱۶۴	۱۳۹۴ - ۱۳۹۳	۲۲۹	۲۳۰	۱۳۸۷ - ۱۳۸۶	۲۱۳	۲۲۵	۱۳۸۰ - ۱۳۷۹
۱۲۵	۱۲۵	۱۳۹۵ - ۱۳۹۴	۱۶۴	۱۶۴	۱۳۸۸ - ۱۳۸۷	۱۶۴	۱۶۴	۱۳۸۱ - ۱۳۸۰
			۱۶۴	۱۶۴	۱۳۸۹ - ۱۳۸۸	۱۶۴	۱۶۴	۱۳۸۲ - ۱۳۸۱

بهینه‌سازی بیشتر است. دلیل شدت این افت در واقع اجازه برداشتی است که با در نظر گرفتن افت مجاز در مدل بهینه‌سازی داده شده است. در سه سال یادشده مقادیر آب سطحی نسبت به سال‌های دیگر کمتر است، به طوری که در سال ۱۳۷۷ - ۱۳۷۸ منابع آب سطحی ۳۹۳ میلیون مترمکعب است. در سال یادشده حدود ۶۵/۹ درصد نیازها تأمین شد که سهم آب زیرزمینی در تأمین نیازها حدود ۲۵ درصد بود. در سال ۱۳۷۹ - ۱۳۸۰ نیز حدود ۴۹۳ میلیون مترمکعب آب سطحی موجود بود. در این سال حدود ۷۰ درصد نیازها تأمین شد. با برداشت ۲۲۵ میلیون مترمکعب از آب زیرزمینی، میزان کارکرد آب زیرزمینی در تأمین این نیازها ۲۴ درصد بود. در سال ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷ نیز حدود ۲۳۰ میلیون مترمکعب از آب زیرزمینی برداشت شد که ۲۴/۵ درصد نیازها از آب زیرزمینی تأمین شد. در نتیجه، در هر دو روش در سال یادشده مقدار افت بیشتری نسبت به سال‌های دیگر دیده می‌شود. در مقایسه با تراز در حالت بهره‌برداری فعلی نیز متوسط افت بیشتری در آبخوان مشاهده می‌شود، اما مقدار سالانه آن از نیم متر بیشتر نمی‌شود. همچنین، در بهره‌برداری تلفیقی بالآمدگی آب زیرزمینی نسبت به حالت بهره‌برداری فعلی کمتر شده است، بنابراین با این تخصیص برخی مشکلات زهدار شدن اراضی و تبخیر از سطح آب

بیشترین مقدار آب در هر دو روش از طریق آب سطحی تأمین می‌شود و آب زیرزمینی به عنوان منبع کمکی در کنار آب سطحی به نیازها پاسخ می‌دهد. پس از اجرای مدل بهینه تلفیقی، میزان برداشت از آب زیرزمینی در بهره‌برداری تلفیقی به دست آمد (جدول ۵). در سال‌های آبی ۱۳۷۷ - ۱۳۷۸ و ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷ به دلیل کمبود در آب سطحی بیشترین برداشت از آبخوان طی دوره بهینه‌سازی انجام شده است که در سال ۱۳۷۷ - ۱۳۷۸، ۲۹/۹ و ۳۴ درصد از نیازها به ترتیب در روش کومار و جایلاکیشمی تأمین نشد. این مقدار در وضع موجود و بدون بهره‌برداری تلفیقی ۴۶ درصد است. برای سال ۱۳۷۹ - ۱۳۸۰ نیز در روش کومار ۳۰ درصد و روش جایلاکیشمی ۲۶/۳ درصد از نیازها تأمین نشد که در وضع موجود این مقدار ۳۷ درصد در سال مد نظر است. با توجه به مقدار تخصیص آب زیرزمینی، میزان افت سطح آب زیرزمینی به صورت سالانه به هر دو روش استخراج شد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). در سال‌های ۱۳۷۶ - ۱۳۷۷، ۱۳۷۸ - ۱۳۷۹ و ۱۳۸۶ - ۱۳۸۷ در نمودار افت بیشتری نسبت به سایر سال‌ها ایجاد شده است. البته، این افت هم در روش مدل‌های بهینه‌سازی و هم در بهره‌برداری فعلی بوده است، اما شدت افت در روش مدل‌های

در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ است که ۴۳/۲۴ درصد از نیازها بی‌پاسخ ماندند. در روش جایلاکیشمی نیز بیشترین کمبود در ناحیه چپ به مقدار ۲۲۵/۱۱ در سال ۱۳۷۷-۱۳۷۸ که ۳۳/۹۸ درصد از نیازها بدون پاسخ ماندند. این مقدار در ناحیه راست برای سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۳ و ۱۳۹۳-۱۳۹۴ بود که حدود ۳۹/۰۴ درصد از نیازها تأمین نشد. همچنین، در ناحیه راست سنگر سه سال آبی ۱۳۷۵-۱۳۷۶، ۱۳۷۶-۱۳۷۷ و ۱۳۹۰-۱۳۹۱ به ۱۰۰ درصد نیازها پاسخ داده شد.

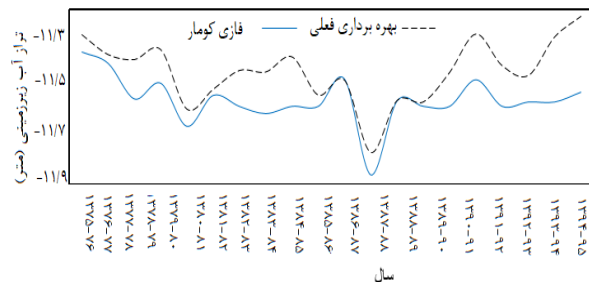


شکل ۱۲. تغییرات تراز آب زیرزمینی در بهره‌برداری فعلی و بهره‌برداری تلفیقی (روش جایلاکیشمی)

زیرزمینی در نواحی‌ای که تراز آب زیرزمینی بالا است، حل می‌شود.

مقادیر کمبود منابع آبی

مقادیر کمبود تأمین آب به صورت سالانه برای نواحی چپ و راست به هر دو روش استخراج شد. با توجه به جدول ۶ بیشترین کمبود در روش کومار و در ناحیه چپ سنگر مربوط به سال ۱۳۸۰-۱۳۸۱ و به مقدار ۲۶۶ میلیون مترمکعب است که به ۴۰/۱۸ درصد از نیازها پاسخ داده نشد. در ناحیه راست سنگر نیز بیشترین کمبود ۱۲۲/۴۵



شکل ۱۱. تغییرات تراز آب زیرزمینی در بهره‌برداری فعلی و بهره‌برداری تلفیقی (روش کومار)

جدول ۶. مقادیر کمبود سالانه به تفکیک نواحی و به روش کومار و همکارانش، جایلاکیشمی و همکارانش

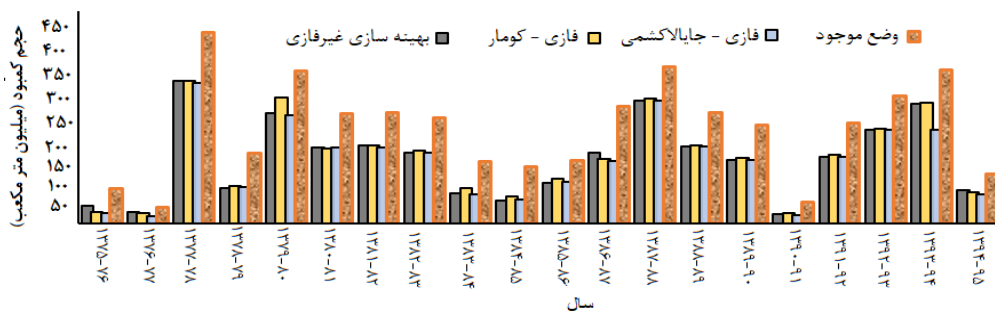
روش جایلاکیشمی				روش کومار				سال
کمبود (درصد)		کمبود منابع آبی (MCM)		کمبود (درصد)		کمبود منابع آبی (MCM)		
راست سنگر	چپ سنگر	راست سنگر	چپ سنگر	راست سنگر	چپ سنگر	راست سنگر	چپ سنگر	
۰	۳/۳۱	۰	۲۲/۰۶	۲/۱۳	۳	۶/۰۵	۱۹/۴۹	۱۳۷۵-۱۳۷۶
۰	۲/۲۵	۰	۱۴/۹۲	۲/۱۳	۲/۶۸	۶/۰۵	۱۷/۷۹	۱۳۷۶-۱۳۷۷
۳۴/۰۸	۳۳/۹۸	۹۶/۶۴	۲۲۵/۱۱	۳۵/۳۶	۳۳	۱۰۰/۱۶	۲۲۲	۱۳۷۷-۱۳۷۸
۷/۴۱	۹/۰۵	۲۱	۵۹/۹۴	۸/۷۸	۹/۰۵	۲۴/۸۶	۵۹/۹۸	۱۳۷۸-۱۳۷۹
۲۲/۴۴	۲۷/۹۶	۶۳/۵۶	۱۸۵/۲	۲۳/۷۱	۳۲/۸۲	۶۷/۱۶	۲۱۷/۴۲	۱۳۷۹-۱۳۸۰
۱۶/۸۱	۱۸/۶۶	۴۷/۶۳	۱۲۳/۶۴	۲۷/۴۹	۴۰/۱۸	۷۷/۸۶	۲۶۶/۱۷	۱۳۸۰-۱۳۸۱
۲۵/۴۲	۱۵/۱۴	۷۲/۰۰	۱۰۰/۳۱۸	۳۰/۱۰	۲۳/۳۵	۸۵/۲۴	۱۵۴/۷	۱۳۸۱-۱۳۸۲
۳۰/۷۳	۱۰/۹۷	۸۷/۰۵	۷۲/۶۵	۳۲/۰۱	۱۰/۹۶	۹۰/۶۷	۷۲/۶۴	۱۳۸۲-۱۳۸۳
۶/۳۴	۷	۱۸	۴۶/۴۱۳	۸/۵	۱۵/۷۷	۲۴/۰۳	۱۰۴/۵۰	۱۳۸۳-۱۳۸۴
۵/۸۷	۵/۵۶	۱۶/۶۲	۳۶/۸۲	۸/۶۴	۵/۶۰	۲۴/۵	۳۷/۰۲	۱۳۸۴-۱۳۸۵
۵	۱۱/۹۳	۱۴/۱۶	۷۹/۰۲	۸/۱۸	۱۱/۵۴	۲۳/۲	۷۶/۴۶	۱۳۸۵-۱۳۸۶
۱۸/۴۲	۱۳/۳۹	۵۲/۱۸	۸۸/۷۰	۱۷	۳۴/۶۷	۴۶/۴۲	۹۷/۰	۱۳۸۶-۱۳۸۷
۳۰/۳۷	۲۸/۸۴	۸۶	۱۹۱/۰۵	۳۱/۶۵	۲۸/۸۵	۸۹/۶۵	۱۹۱/۱۳۲	۱۳۸۷-۱۳۸۸
۱۰/۲۵	۲۱/۶۶	۲۹	۱۴۳/۵	۱۱/۴۸	۲۱/۶۷	۳۲/۵۱	۱۴۲/۰۰	۱۳۸۸-۱۳۸۹
۹/۸۴	۱۷/۴۲	۲۷/۸۸	۱۱۵/۴۳	۱۱/۰۷	۱۷/۴۱	۳۱/۳۶	۱۱۵/۳۳	۱۳۸۹-۱۳۹۰
۰	۲/۸۳	۰	۱۸/۷۶	۲/۱۳	۲/۴۴	۶/۰۵	۱۶/۱۹۷	۱۳۹۰-۱۳۹۱
۱۸/۷۰	۱۴/۶۵	۵۲/۹۷	۹۷/۰۲	۲۳/۲۱	۱۳/۲۸	۶۵/۷۴	۸۷/۹۶	۱۳۹۱-۱۳۹۲
۳۹/۰۴	۱۵/۰۵	۱۱۰/۶۵	۹۹/۷	۴۳/۲۴	۱۳/۸۱	۱۲۲/۴۵	۹۱/۵۱	۱۳۹۲-۱۳۹۳
۳۹/۰۴	۱۵/۰۵	۱۱۰/۵۶	۹۹/۷	۳۸/۸۴	۲۴/۶۸	۱۰۹/۹۹	۱۶۳/۴۷	۱۳۹۳-۱۳۹۴
۷/۴۱	۶/۸۳	۲۱	۴۵/۲۴	۸/۶۴	۶/۸۳	۲۴/۵۰	۴۵/۲۸	۱۳۹۴-۱۳۹۵

قطعی نتایج بهتری از وضع موجود ارائه دادند طوری که در همه سال‌های مد نظر کمبودها در هر سه روش کمتر از بهره‌برداری فعلی است. دلیل آن را نیز می‌توان اجازه برداشت از آب زیرزمینی با در نظر گرفتن مقدار افت مجاز و بهره‌برداری تلفیقی بهینه دانست.

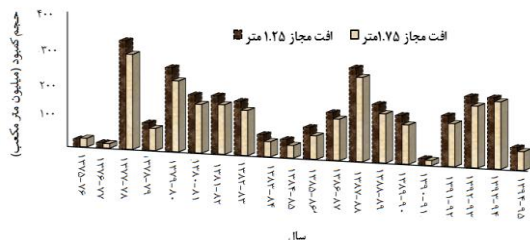
تحلیل حساسیت مقدار مجاز افت

با توجه به شرایط آب و هوایی محدوده مطالعاتی، بالا بودن تراز آب زیرزمینی که سبب تبخیر از سطح آب زیرزمینی می‌شود و همچنین بالآمدگی سطح آبی زیرزمینی در بخش‌هایی از آبخوان که موجب زه‌دار شدن اراضی کشاورزی و به دنبال آن ایجاد زه‌کش از آبخوان می‌شود، می‌توان با توجه به میزان افت در شرایط ترسالی یا خشکسالی از منابع آب زیرزمینی به مقدار بیشتری برداشت کرد. بنابراین، در سناریوی موجود میزان حد افت آبخوان را که در حالت اول ۱/۲۵ متر بود را به ازای ۵۰ سانتی‌متر افزایش داده که با تکیه بر آبخوان و در نظر گرفتن افت به شرطی که آبخوان از حالت تعادل خارج نشود با درصد بیشتری به نیازها می‌توان پاسخ داد؛ بنابراین پس از اجرای مدل بهینه‌سازی نتایج کمبود منابع آبی به صورت سالانه در مجموع نواحی در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به هر دو روش آمده است.

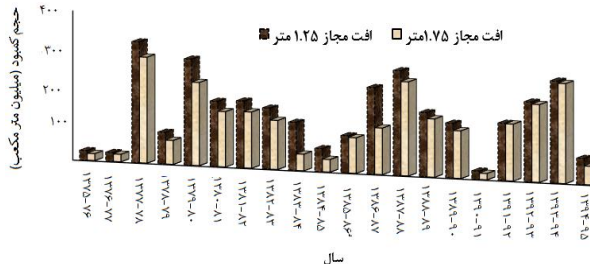
مدل بهینه‌سازی تدوین شده، به حالت قطعی نیز اجرا شد. در حالت بهره‌برداری فعلی نیز از آمار و ارقام موجود استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۳ در بهره‌برداری فعلی در سال ۱۳۷۷-۱۳۷۸ بیشترین کمبود در مجموع نواحی را شاهد بودیم که حدود ۴۱۳ میلیون مترمکعب کمبودها و ۴۶ درصد از نیازها تأمین نشد. این مقدار در روش جایالاکیشمی، کومار و بهینه‌سازی قطعی به ترتیب برابر با ۳۱۷، ۳۲۵، ۳۲۳ میلیون مترمکعب بود که ۳۳/۶، ۳۴/۱ و ۳۴ درصد از نیازها تأمین نشد. در سال ۱۳۹۰-۱۳۹۱ نیز طی بهره‌برداری فعلی ۴۷ میلیون مترمکعب کمبود مشاهده شد که پنج درصد از نیازها تأمین نشد. این مقدار ۱۵، ۲۳ و ۲۱ میلیون مترمکعب به ترتیب برای روش جایالاکیشمی، کومار و بهینه‌سازی قطعی بود که حدود ۱/۶، ۲/۳۵ و ۲/۲۴ از نیازها به ترتیب برای هریک از روش‌ها تأمین نشد. در میانگین درازمدت نیز (طول دوره ۲۰ ساله مد نظر)، متوسط کمبود در حالت بهره‌برداری فعلی، روش جایالاکیشمی و همکارانش، کومار و همکارانش و بهینه‌سازی غیر فازی به ترتیب برابر ۲۱۵، ۱۳۸، ۱۴۸، ۱۴۵ میلیون مترمکعب هرسال به ترتیب حدود ۲۲، ۱۴/۶، ۱۵/۷ و ۱۵/۳ درصد از نیازها تأمین نشده است (شکل ۱۳). با توجه به شکل ۱۳، روش حل کومار و جایالاکیشمی و بهینه‌سازی



شکل ۱۳. حجم کمبود سالانه آب به روش کومار، جایالاکیشمی و بهینه‌سازی غیر فازی



شکل ۱۵. حجم کمبود تأمین آب سالانه در تحلیل حساسیت افت سطح آب زیرزمینی (روش جایالاکیشمی)



شکل ۱۴. حجم کمبود تأمین آب سالانه در تحلیل حساسیت افت سطح آب زیرزمینی (روش کومار)

بهینه‌سازی غیر فازی به ترتیب برابر ۲۱۵، ۱۳۸، ۱۴۸، ۱۴۵ میلیون مترمکعب هر سال به ترتیب حدود ۲۲، ۱۴/۶، ۱۵/۷ و ۱۵/۳ درصد از نیازها تأمین نشده است؛ اما در مبحث افت تراز آب زیرزمینی، بیشترین افت در هر دو روش ۱/۲۵ متر در ماه فروردین برای ناحیه راست سنگر و برای ناحیه چپ سنگر ۱/۷۸ متر در ماه مرداد به دست آمد. با اعمال تحلیل حساسیت مقدار مجاز افت به روش‌های کومار و جایالاکیشمی، بیشترین کمبود تأمین آب در روش کومار ۳۲۴ میلیون مترمکعب بود که با اعمال تحلیل حساسیت به مقدار ۲۸۴ میلیون مترمکعب رسید. در روش جایالاکیشمی نیز این مقدار ۳۲۱ میلیون مترمکعب بود که به مقدار ۲۸۱ میلیون مترمکعب کاهش یافت، ضمن آنکه در شرایط خشکسالی مقادیر کمبود منابع آب کمتر از حالت بدون اعمال تحلیل حساسیت شده و آبخوان نیز افت مجاز داشته و و از حالت تعادل نیز خارج نشده است. با تحلیل حساسیت درصد تأمین نیاز آبی در حدود یک تا هشت درصد در سال‌های مختلف نسبت به حالت بدون تحلیل حساسیت افزایش یافت. نتایج نشان داد در روش جایالاکیشمی کمبود منابع آب به نسبت روش کومار کمتر است که در هر دو روش نیز درصد تأمین آب بیشتر از حالت فعلی و بدون بهره‌برداری تلفیقی است. با اجرای مدل بهینه‌سازی قطعی خطی، مدل بهینه‌سازی فازی در مقایسه با مدل بهینه‌سازی قطعی برتری نسبی داشت. یادآوری نکته آخر ضروری است که مدل بهینه‌سازی فازی ارائه شده را می‌توان برای سایر محدوده‌های مطالعاتی که متشکل از آب سطحی (سد یا رودخانه) و آب زیرزمینی باشد به کار برد و عدم قطعیت‌های ناشی از اطلاعات پایه و مدل بهینه‌سازی را تا حدودی کاهش داد تا مدیریتی بهتر در منابع آب سطحی و زیرزمینی داشته باشیم و کمبود نیازها به کمترین حد برسد.

منابع

- [1]. Todd KD, Mays LW. Groundwater hydrology. John Wiley & Sons, Inc, NJ. 2005.
- [2]. Buras N. Conjunctive operation of dams and aquifers. Journal of the Hydraulics Division. 1963; 89(6):111-31.
- [3]. Abadi A, Kholghi A, Bozorg Hadad O, Mohammadi K. Providing operational rules for real-time management of surface water and underground water resources. MSc Thesis. 2010. University of Tehran, Pardis-Karaj. [Persian]

بیشترین کمبود تأمین آب در روش کومار ۳۲۲ میلیون مترمکعب بود که با اعمال تحلیل حساسیت به ۲۸۴ میلیون مترمکعب رسید. مقادیر افت نیز حداکثر ۱/۷۸ متر در اعمال تحلیل حساسیت بود. در روش جایالاکیشمی نیز این مقدار ۳۲۱ میلیون مترمکعب به مقدار ۲۸۱ میلیون مترمکعب کاهش یافت. در ضمن، طی شرایط خشکسالی مقادیر کمبود منابع آب کمتر از حالت بدون اعمال تحلیل حساسیت شده است، آبخوان نیز افت مجاز داشته و از حالت تعادل نیز خارج نشده است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در اطلاعات و ورودی مدل بهینه‌سازی است. با استفاده از اطلاعات موجود و شرایط فیزیکی آبخوان و همچنین منابع آب سطحی مدل کمی آب زیرزمینی در دو حالت پایدار و ناپایدار اجرا و کالیبره شد. مدل‌سازی با کد MODFLOW در نرم‌افزار GMS انجام شد. سپس، برای پاسخ گرفتن وضعیت و تراز آب زیرزمینی نسبت به جواب بهینه‌سازی از نتایج مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی روابطی در قالب رگرسیون بین مقدار برداشت و میزان افت و خیز نسبت به آن در هر ماه استخراج شد. این روابط به صورت قیده‌ها در مدل بهینه‌سازی فازی به کار برده شدند. همه اطلاعات در مدل بهینه‌سازی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و تطابق با واقعیت به صورت فازی و با تابع عضویت مثلثی درآمدند. مدل بهینه‌سازی تماماً فازی به روش کومار و جایالاکیشمی در نرم‌افزار GAMS حل شد. برای تحلیل نتایج بهینه‌سازی نیاز بود کمیت فازی به حالت صریح تبدیل شود، بنابراین از روش غیرفازی‌ساز مرکز سطح استفاده شد. در نتایج، بیشترین کمبود در روش کومار و در ناحیه چپ سنگر مربوط به سال ۱۳۸۰-۱۳۸۱ بود که ۵۹/۶۴ درصد از نیازها و در ناحیه راست ۵۶/۷۶ درصد از نیازها در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ تأمین شد. در روش جایالاکیشمی در بدترین شرایط بیشترین کمبود در سال ۱۳۷۷-۱۳۷۸ و ۱۳۹۳-۱۳۹۴ بود که ۶۶/۵ و ۶۰/۹۶ درصد از نیازها به ترتیب برای نواحی چپ و راست سنگر تأمین شد. از دیگر نتایج و در بررسی کمبود سالانه در میانگین درازمدت نیز (طول دوره ۲۰ ساله مد نظر)، متوسط کمبود در حالت بهره‌برداری فعلی، روش جایالاکیشمی و همکارانش، روش کومار و همکارانش و

- [4]. Bazargan-Lari, MR, Kerachian R, Mansoori A. A Conflict-Resolution Model for the Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources that Considers Water-Quality Issues: A Case Study. *Environmental management*. 2009; 43(3):470-82.
- [5]. Karamouz M, Tabari. MMR, Kerachian R. Application of genetic algorithms and artificial neural networks in conjunctive use of surface and groundwater resources. *Water International*. 2007; 32(1):163-176.
- [6]. Mohammad Rezapour Tabari M, Ebadi T, Maknon R. Development of a Smart Model for Groundwater Level Prediction Based on Aquifer Dynamic Conditions. *Water and Wastewater Journal*. 2010; Volume: 21(4): 70-80. [Persian]
- [7]. Azari, A, Radmanesh F. Simulation-Multi-Purpose Optimization for Integrated Water Resources Management in Surface Water and Underground Water Interactions Using Genetic Algorithm (Case Study: Dasht Daz), MSc Thesis. 2013; Shahid Chamran University of Ahvaz. [Persian]
- [8]. Safavi H.R, Alijanian M.A. Optimal Crop Planning and Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater Resources Using Fuzzy Dynamic Programming. *Journal of irrigation and drainage engineering* © ASCE. 2011; 383-397.
- [9]. Safavi HR, Chakraei I, Kabiri-Samani A, Golmohammadi MH. Optimal reservoir operation based on conjunctive use of surface water and groundwater using neuro-fuzzy systems. *Water resources management*. 2013; 27(12):4259-75.
- [10]. Safavi HR, Enteshari S. Conjunctive use of surface and ground water resources using the ant system optimization. *Agricultural Water Management*. 2016; 173:23-34.
- [11]. Tabari MMR. Conjunctive Use Management under Uncertainty Conditions in Aquifer Parameters. *Water Resources Management*. 2015; 29(8):2967-86.
- [12]. Chang L-C, Chu H-J, Chen Y-W. A fuzzy inference system for the conjunctive use of surface and subsurface water. *Advances in Fuzzy Systems*. 2013; 2013:2.
- [13]. Rezaei F, Safavi HR, Mirchi A, Madani K. F-MOPSO: an alternative multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use management. *Journal of Hydro-environment Research*. 2017; 14:1-18.
- [14]. Safavi H, Rezaei F. Conjunctive use of surface and ground water using fuzzy neural network and genetic algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*. 2015; 39(C2):365.
- [15]. Rezaei F, Safavi HR, Zekri M. A hybrid fuzzy-based multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use and optimal multi-crop pattern planning. *Water Resources Management*. 2017; 31(4):1139-55.
- [16]. Langeroudi M.R, Kerachian R. .Developing Operating Rules for Conjunctive Use of Surface and Groundwater Considering the Water Quality Issues. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2014; 18(2):454-461.
- [17]. Chen, Y. W., Chang, L. C., Huang, C. W. and Chu, H. J. Applying genetic algorithm and neural network to the conjunctive use of surface and subsurface water. *Water resources management*. 2013; 27: 4731-4757.
- [18]. Sahoo, B., Lohani, A. K. and Sahu, R. K. Fuzzy multiobjective and linear programming based management models for optimal land-water-crop system planning. *Water resources management*. 2006; 20: 931-948.
- [19]. Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., Ma, M. and Liu, X. An intuitionistic fuzzy multi-objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*. 2017;
- [20]. Asaadi Mehrabani, M. Banihabib, M. Roozbahany A. Fuzzy Linear Programming Model for the Optimization of Cropping Pattern in Zarrinehroud Basin. *Iran Water Resources Research*. 2018; 14(1), 13-24. [Persian]
- [21]. Continuation of the study of the plains with a quantitative and qualitative quantitative and qualitative study network of Astaneh-Kochi Esfahan 1389-1390, [Persian]
- [22]. Pandam Consulting Engineers. Improvement of irrigation and drainage network in Gilan aquifer. 1383; Volume Four. [Persian]
- [23]. Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model. 2000; Report No. 00-92, U.S. Geological Survey, Denver.
- [24]. Klir GJ, Yuan B. Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers by Lotfi A. Zadeh: World Scientific Publishing Co., Inc.; 1996.

- [25]. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. J. of Information and Control, 1965; 8(3), 338-353.
- [26]. Kumar A, Kaur J, Singh P. Fuzzy optimal solution of fully fuzzy linear programming problems with inequality constraints. 2010.
- [27]. Kumar A, Kaur J, Singh P. A new method for solving fully fuzzy linear programming problems. Applied Mathematical Modelling. 2011; 35(2):817-23.
- [28]. Jayalakshmi M, Pandian P. A new method for finding an optimal fuzzy solution for fully fuzzy linear programming problems. International Journal of Engineering Research and Applications. 2012; 2(4):247-54.