

مدل حل اختلاف چندهدفه‌ی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر مبنای رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی

محمدصادق خورشیدی علی‌کردی^۱، معصومه حقیقت^۲، ناصر طالب‌بیدختی^{۳*}، محمدرضا نیکو^۴

چکیده

بهره‌برداری بهینه‌ی تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی یکی از موضوعات مهم در مدیریت منابع آب است. در این مقاله، دو روش‌شناسی بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی تدوین شده است. روش‌شناسی اول، شامل مدلی به هم پیوسته است که قادر است سیاست‌های مدیریت عرضه و تقاضای آب را به صورت توامان در نظر گرفته و تحلیل کند. در این مدل، تصمیم‌های بهینه برای بهره‌برداری از سامانه مخزن-رود-آبخوان در سطح آبخیز تعیین شده است. همچنین، نمایشنامه‌های مختلف تغییر اقلیم به منظور ارزیابی سامانه در شرایط مختلف در نظر گرفته شده است. در این مدل، آبخوان در دشت به صورت مدل مخزن یک-بعدی در نظر گرفته شده است. از مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II نیز به منظور تخصیص آب سطحی و زیرزمینی با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی چندهدفه و برای دوره‌ی ۱۰ ساله در شرایط مختلف اقلیمی، استفاده گردیده است. برای تحلیل نتایج مدل بهینه‌سازی، شاخص‌های عملکردی مختلف به منظور ارزیابی و رتبه‌بندی رویکردهای بهره‌برداری محاسبه گردیده است. در انتها، مناسب‌ترین جواب روی منحنی تعامل به دست آمده بین هدف‌های مختلف، با استفاده از روش امتیازدهی بردا، انتخاب گردیده است. در روش‌شناسی دوم، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر مبنای مدل MODFLOW توسعه یافته است. از مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی منبع آب زیرزمینی و از مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی در این مدل استفاده شده است. در مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی تدوین شده، علاوه بر نیازهای زیست‌محیطی، تأمین نیازهای دیگر نیز که از اهمیت ویژه‌ای برای سیاست‌گذاران بخش آب برخوردار است، لحاظ شده است. به نحوی که در برخی شرایط بحرانی، تأمین نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی از اولویت بیشتری نسبت به تأمین نیاز زیست‌محیطی برخوردار هستند. پس از واسنجی مدل شبیه‌سازی MODFLOW، به منظور کاهش زمان اجرای مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، فرا مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (MLP)، جایگزین مدل شبیه‌سازی MODFLOW گردیده است. در این مدل، افزون بر تعیین بهره‌برداری بهینه از سامانه مخزن-رود-آبخوان، منحنی‌های فرمان در بازه‌های زمانی ماهانه تا هفتگی ارائه شده است. بهترین جواب ممکن با استفاده از مدل چانه‌زنی بازگشتی و با حل توابع هدف ذی‌نفعان مختلف تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌سازی توزیعی رفتار آبخوان (به‌وسیله‌ی مدل MODFLOW) شبیه‌سازی دقیق‌تری از سامانه آب زیرزمینی منطقه مطالعه شده خواهد داشت. روش‌شناسی‌های پیشنهادی قادر هستند که راه‌حلی با بیشترین سازش ممکن را بین ذی‌نفعان مختلف ارائه کنند.

واژه‌های کلیدی: سیاست‌ها و قوانین بهره‌برداری تلفیقی، مدل شبیه‌سازی MODFLOW، مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II، مدل چانه‌زنی بازگشتی، روش امتیازدهی بردا.

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز.

^۲ دستیار پژوهشی، بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه شیراز.

^۳ استادتمام، بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

^۴ دانشیار، بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز.

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۷۱۱۷۹۴۰۷ ایمیل: taleb@shirazu.ac.ir

مقدمه

لزوم استفاده بهینه از منابع آب در بهره‌برداری تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی، امری ضروری است. چگونگی تخصیص بهینه‌ی منابع آب به عواملی مانند خصوصیات آب‌شناسی، اقتصادی و زیست‌محیطی بستگی دارد. وجود عدم قطعیت‌های مختلف در عوامل آب‌شناسی، اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین وجود ذی‌نفعان مختلف در یک حوضه باعث می‌شود که اعمال یک رویکرد جامع و پایدار در بهره‌برداری از منابع آبی آبخیز، امری پیچیده و دشوار باشد. از طرفی، قرارداداشتن کشور ایران در آب و هوای نیمه‌بیابانی و استان فارس در بخش نسبتاً کم‌آب کشور، در کنار مسائلی مانند تغییر اقلیم، رشد جمعیت و توسعه‌ی سامانه آبخیز و مشخصه‌های آب‌شناسی-اقتصادی-اجتماعی، نحوه‌ی تخصیص آب را به بخش‌های مختلف با تغییرات نسبتاً سریع مواجه ساخته است. این امر لزوم برنامه‌ریزی دقیق، پیش از بروز مشکلات شدیدتر را به عنوان یکی از ملزومات مدیریت موفق آبخیز، بیش از پیش روشن می‌سازد (مجرد، ۱۳۹۱).

با توجه به نیاز بخش کشاورزی، بیش از ۹۴ درصد از کل مصرف آب در آن بخش مصرف می‌شود. استان فارس یکی از مهمترین استان‌های کشور در تولید محصولات کشاورزی بوده و با توسعه‌ی کشاورزی در این استان، با توجه به نیاز هرچه بیشتر به آب، توجه سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران بخش آب بیش از پیش به سمت نحوه‌ی مدیریت منابع آب این استان جلب شده است (مجرد، ۱۳۹۱). سازمان آب منطقه‌ای فارس جهت مهار آب‌های سطحی در این منطقه و بهبود شرایط، سد مخزنی رودبال را بر روی رودخانه‌ای با همین نام احداث نموده است (مهندسین مشاور آب نیرو، ۱۳۹۰). حال با توجه به شرایط منطقه و اهمیت موضوع، تخصیص بهینه و مهارشده‌ی منابع آب در قالب سامانه بهره‌برداری بهینه تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی در دشت داراب با هدف تقویت منابع آب زیرزمینی در محدوده‌ی سد رودبال (با لحاظ سد ورودی آن) امری ضروری است.

با توجه به نکات ذکرشده، استفاده بهینه از جنبه‌های مختلف آبخیز، با توجه به محدودیت منابع آبی و امکان

اقتصادی برای توسعه‌ی آنها، کم‌هزینه‌ترین روش برای متعادل‌سازی منابع و مصارف در آبخیز است. جریان رود، ذخایر سدها و سفره‌های زیرزمینی از مهم‌ترین توان‌های آبخیز هستند. شایان ذکر است که علاوه بر بهره‌برداری تلفیقی برای متعادل‌سازی منابع و مصارف، مدیریت مصرف آب نیز در سطح حوضه، لازم است. پیچیده بودن فرایندهای فیزیکی حاکم، تعدد اهداف و متغیرهای تصمیم‌گیری و وجود عدم قطعیت‌های مختلف، تحلیل و برنامه‌ریزی کمی سامانه‌های منابع آب مخصوصاً استفاده تلفیقی از آن‌ها را بسیار پیچیده ساخته است. برنامه‌ریزی سیستم‌های منابع آب به طور خلاصه مسئله‌ای پیچیده و دارای متغیرهای تصمیم‌گیری قابل توجه است که برای رسیدن به نتایج مطلوب، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ضروری است. در تحقیقات پیشین، برای شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی از مدل آب زیرزمینی به-صورت مخزن و یا حد مجاز بهره‌برداری در مدل تلفیقی و یا از مدل‌های شبیه‌سازی عددی مختلف نظیر MODFLOW برای تدوین مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده گردیده است (مدوک^۱، ۱۹۷۴؛ سینگ^۲، ۲۰۰۲؛ الحسن و همکاران^۳، ۲۰۰۳؛ کارآموز و همکاران، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷؛ بازرگانی‌لاری و همکاران، ۲۰۰۹؛ صفوی و همکاران، ۲۰۱۰؛ کریمی و اردستانیان، ۲۰۱۱؛ رافعی‌پور و همکاران، ۲۰۱۴ و طاهری و کمالی، ۱۳۹۵). علت این بوده است که شبه‌سازی توامان مخازن، رودها و برداشت از سفره‌ی آب زیرزمینی صورت گرفته و قابل حل است. امروزه به دلیل کارایی بالای مدل‌های شبکه‌های عصبی برای تخمین مسائل غیرخطی و پیچیده، کاهش زمان محاسبات، محققان زیادی از این سامانه‌های هوشمند در زمینه بهره‌برداری تلفیقی در مدیریت منابع آب استفاده کرده‌اند (کارآموز و همکاران، ۲۰۰۷، صفوی و همکاران، ۲۰۱۰). در تحقیق حاضر، با توجه به اهمیت این موضوع، با استفاده از مدلسازی ریاضی، دو روش‌شناسی پیشنهاد شده است که سیاست‌های مدیریت عرضه و تقاضای آب را به صورت همزمان در نظر گرفته و برای تعیین و ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی به کار گرفته شده است. در روش‌شناسی اول،

³ Elhassan et al

¹ Maddock

² Singh

زیرزمینی در محدوده‌ی سد رودبال در شکل ۱ ارائه شده است. در این ساختار، گام‌های هر دو روش‌شناسی پیشنهادی بررسی می‌گردد. در گام اول، به جمع‌آوری اطلاعات پرداخته می‌شود. این اطلاعات و داده‌ها شامل مشخصات فیزیکی و آب‌شناسی آبخوان، برداشت از چاه‌ها، سطح ایستابی موجود، ضرایب آبی، تراز زمین، سنگ بستر، اطلاعات مربوط به آب‌های سطحی و اطلاعات مربوط به بارش و تبخیر، جریان رود رودبال در ایستگاه‌ها و مسیل‌های موجود در منطقه، موقعیت مناطق مصرف و مصرف صنایع هستند. اطلاعات مربوط به محدودیت‌های موجود در مصارف، مقدار مجاز نوسان‌های سطح ایستابی نیز تهیه گردیده اند. در گام دوم، نمایشنامه‌های شرایط اقلیمی مختلف به منظور ارزیابی مدل برای شرایط مختلف (خشکسالی، بهنجار و ترسالی) تعیین گردیده اند. در گام سوم، از شاخص عملکرد رواناب ملاک شده (SRI^۳) به منظور ارزیابی رویکرد لازم در بهره‌برداری تلفیقی استفاده شده است. از گام چهارم به بعد، رویکرد مورد استفاده شده برای دو روش‌شناسی پیشنهادی متفاوت است. در روش‌شناسی پیشنهادی اول، در گام چهارم، مدل بهینه-سازی چندهدفه‌ی NSGA-II براساس برنامه‌ریزی آرمانی و با لحاظ مدل مخزن آبخوان، توسعه داده شده است. در گام پنجم این روش‌شناسی، با استفاده از روش گزینش اجتماعی بردا، بهترین جواب از روی منحنی تعامل حاصل از اهداف مختلف، انتخاب گردیده و مدل بهینه‌سازی براساس این جواب تحلیل گردیده است. در روش‌شناسی پیشنهادی دوم، در گام چهارم، مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II تدوین شده براساس برنامه‌ریزی آرمانی، به فرامدل MLP متصل گردیده است. در گام آخر این روش‌شناسی، براساس روش چانه‌زنی بازگشتی، بهترین جواب از منحنی تعامل بین اهداف به دست آمده است. در ادامه به تفصیل درباره‌ی هر کدام از مدل‌ها و نحوه استفاده آن‌ها در این تحقیق، پرداخته می‌شود.

تصمیم‌های بهینه برای بهره‌برداری توامان از سامانه مخزن-رود-آبخوان با استفاده از مدل‌های مخزن و مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II، در سطح آبخیز در قالب قواعد بهره‌برداری در بازه‌ی زمانی ماهانه تا هفتگی ارائه گردیده است. در انتها، با استفاده از روش انتخاب اجتماعی بردا^۱، مناسب‌ترین نقطه از روی منحنی تعامل حاصله از اهداف گوناگون انتخاب گردیده است. در روش‌شناسی پیشنهادی دوم، یک مدل حل اختلاف چندهدفه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی بر مبنای روش چانه‌زنی بازگشتی تدوین شده است. در این روش‌شناسی، از مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی سفره‌ی آب زیرزمینی و مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II برای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده شده است. در این مدل، تصمیم‌های بهینه برای بهره‌برداری همزمان از سامانه مخزن-رود-آبخوان در سطح آبخیز تحت نمایشنامه‌های مختلف اقلیمی، توسعه‌ی سامانه تأمین آب و افزایش تقاضاها تعیین گردیده، در قالب قواعد بهره‌برداری و منحنی‌های فرمان در بازه زمانی ماهانه تا هفتگی ارائه شده است. به دلیل زمان اجرای بالای مدل شبیه‌سازی در این تحقیق، از فرامدل شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه (MLP^۲) برای اتصال به مدل بهینه-سازی چندهدفه استفاده گردیده است. در انتها، با استفاده از مدل چانه‌زنی بازگشتی، بهترین جواب از روی منحنی تعامل به دست آمده بین هدف‌های مختلف، انتخاب گردیده است. کارایی دو روش‌شناسی تدوین شده در این تحقیق با استفاده از اطلاعات موجود شرکت آب منطقه‌ای استان فارس در دشت داراب با هدف تقویت منابع آب زیرزمینی در محدوده‌ی آبگیر سد رودبال (با لحاظ سد و ورودی آن) ارزیابی شده است.

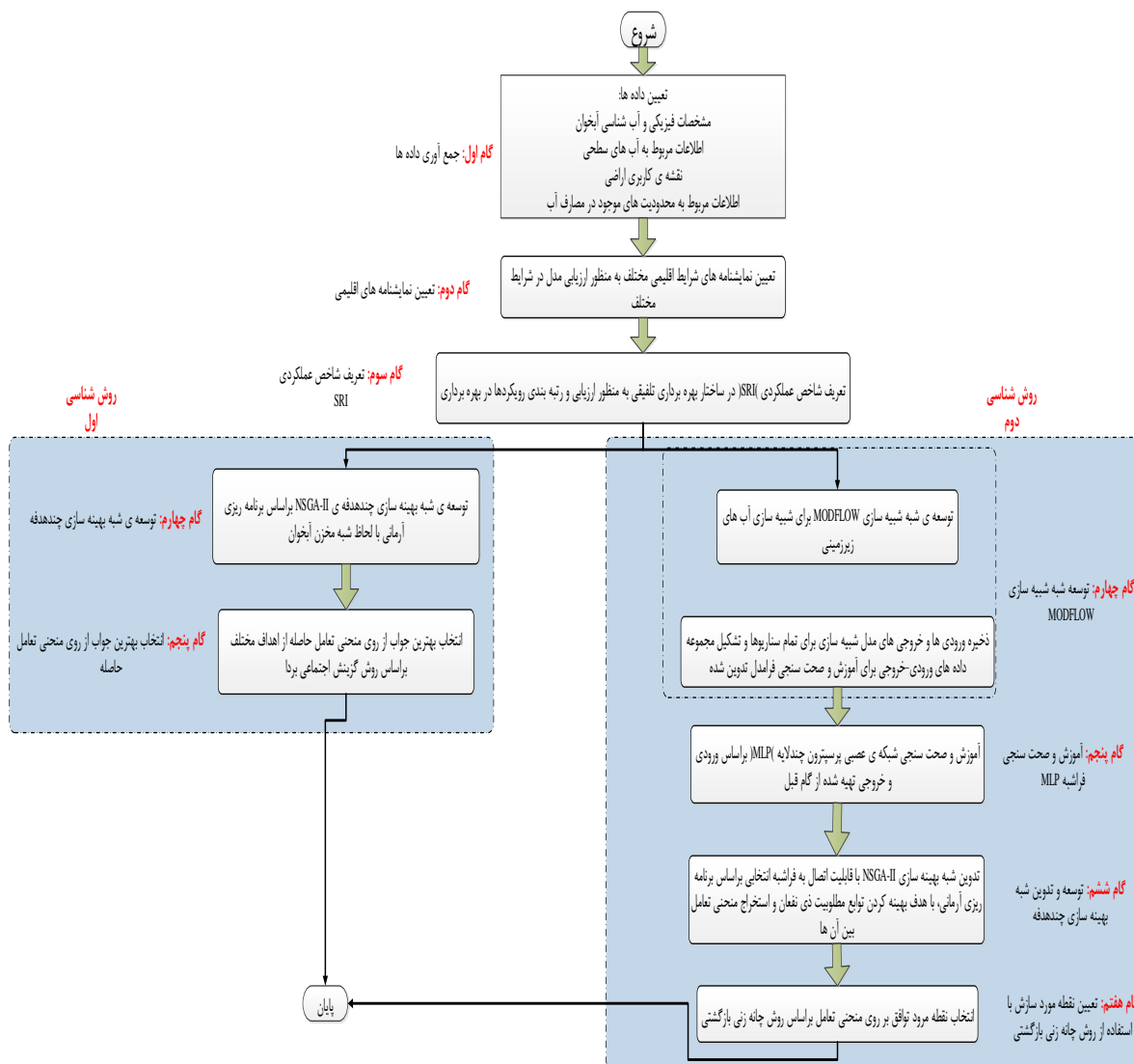
مواد و روش‌ها

ساختار مدل حل اختلاف چندهدفه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و

³ standardized runoff index (SRI)

¹ Borda count method

² multi-layer perceptron (MLP)



شکل ۱- ساختار مدل‌های حل اختلاف چندهدفه‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی

عنوان هسته‌ی اصلی، در خیلی از نرم‌افزارهای تجارتي و عمومی دیگر استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این مدل در دستگاه مختصات دکارتی نوشته شده و با کاربرد روش تفاضل محدود حل می‌شوند (گوا و همکاران^۱، ۲۰۱۸). در این تحقیق، برای شبیه‌سازی شرایط آبخوان در روش‌شناسی دوم، از مدل شبیه‌سازی مذکور استفاده می‌گردد. برای حل معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر آب‌های زیرزمینی به کمک روش عددی تفاضل محدود، منطقه مطالعه شده با استفاده از دو دسته خطوط موازی عمود بر هم به تعدادی سلول مستطیلی یا مربعی تقسیم می‌شود. معمولاً در شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی ابعاد سلول‌ها تا

مدل شبیه‌سازی MODFLOW

مدل MODFLOW از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی است که معادلات دیفرانسیلی مربوط به جریان آب زیرزمینی در محیط آبخوان در آن با کاربرد روش تفاضل محدود انجام می‌پذیرد. با توجه به تنوع ابزارهای مدل‌سازی در این نرم‌افزار، از جمله وجود شرایط مرزی مختلف، وجود امکانات گسترده برای مدل‌سازی چاه‌ها و وجود حل‌کننده‌های متفاوت برای حل معادلات ماتریسی، نرم‌افزار ذکر شده، تمامی امکانات لازم را برای مدل‌سازی سامانه‌های آبخوان دارا می‌باشد. از این مدل همچنین به

¹ Goa et al.

عصبی MLP به عنوان فرامدل جایگزین مدل شبیه‌سازی مذکور، آموزش و صحت‌سنجی گردیده است. افت تراز آبخوان بر اثر برداشت آب از آبخوان با استفاده از فرامدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی، محاسبه می‌گردد. میزان افت تراز سالانه آبخوان تابعی از برداشت آب در ماه‌های مختلف است. این میزان در هر سال نباید بیش‌تر از مقدار افت مجاز سالانه تراز آبخوان باشد. در این تحقیق، میزان افت مجاز تراز آبخوان در هر سال، معادل ۲ متر در نظر گرفته شده است.

مدل مخزن آبخوان

در این تحقیق، در روش‌شناسی پیشنهادی اول، با استفاده از اطلاعات مربوط به نیاز آبی هر بخش و آرمان‌های ذی‌نفعان، مدل بهینه‌سازی چندهدفه با فرض مخزن آبخوان تدوین گردیده است. مدل مخزن آبخوان، یک مدل پرکاربرد در زمینه برنامه‌ریزی منابع آب است که از آن در جهت ساده‌سازی مسائل پیچیده بهره‌برداری تلفیقی استفاده می‌شود. در این مدل، آبخوان به صورت یک مخزن آب فرض شده است که دارای قیود برداشت مجاز سالانه، همچنین برداشت مجاز ماهانه است. در مدل مذکور، سعی بر آن است که میزان حدود مجاز برداشت به نحوی تعیین گردد که سطح آب زیرزمینی در هر دوره‌ی یک‌ساله، افت محسوسی نداشته باشد، یا میزان افت آن در محدوده مجاز مورد نظر سیاست‌گزاران بهره‌برداری منابع آب منطقه قرار گیرد. طبیعتاً، از آنجا که تغذیه‌ی آبخوان در هر دوره، متأثر از شرایط اقلیمی آن دوره است، این حدود مجاز برای هر سناریوی اقلیمی متفاوت می‌باشد و در نمایشنامه‌های اقلیمی خشک کمتر از نمایشنامه‌های اقلیمی بهنجار و تر است. در مطالعه‌ی پیش رو، سه مقدار برای برداشت مجاز سالانه در سه نمایشنامه‌ی اقلیمی استخراج شده، در نظر گرفته شده و در جدول ۱ ارائه شده اند. مقادیر برداشت مجاز ماهانه نیز برای هر نمایشنامه، ۱/۵ برابر یک‌دوازدهم برداشت مجاز سالانه در نظر گرفته شده است.

شاخص رواناب ملاک شده (SRI)

در سال ۱۹۹۳ مکی و همکاران^۱ به منظور پایش خشکسالی اقلیمی شاخصی را با عنوان شاخص بارش ملاک‌شده (SPI^۲) ابداع کردند. به تجربه ثابت شده است

۲۰۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود که می‌توانند به صورت یکنواخت و یک اندازه و یا متغیر انتخاب گردند.

برای مدل‌سازی آبخوان آبرفتی داراب، از سلول‌هایی با ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ متر جهت ساختن شبکه‌ی اصلی استفاده گردید. انتخاب این ابعاد به دلیل تراکم زیاد چاه‌های موجود در منطقه و اهمیت آن‌ها در هدف اصلی شبیه‌سازی (استفاده در مدل بهینه‌سازی)، صورت گرفته است. در مرزهای آبخوان با سازند سخت، سلولی که بیش از نیمی از مساحت آن در محدوده‌ی آبخوان قرار دارد، فعال و در غیر این صورت غیرفعال در نظر گرفته شد. سلول‌های فعال، سلول‌هایی هستند که وارد محاسبات ریاضیاتی در مدل‌سازی می‌شوند و از نوع بار آبی ثابت یا بار آبی متغیر هستند.

مدل شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)

شبکه‌های عصبی از دسته مدل‌های هوش مصنوعی هستند که با پردازش برای داده‌های تجربی، قادرند دانش یا قانون نهفته در داده‌ها را حتی با درجه‌ی غیرخطی و پیچیدگی زیاد، به ساختار شبکه منتقل کنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از شبکه‌ی عصبی طبیعی از اجزائی به نام سلول عصبی تشکیل شده‌اند. این سلول‌ها بسته به نوع مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی به ترتیب خاصی با یکدیگر ارتباط دارند. یکی از متداول‌ترین این مدل‌ها، شبکه‌ی پرسپترون چند لایه (MLP) است که در آن سلول‌های عصبی در لایه‌های موازی قرار داشتند و هر سلول واقع در یک لایه با همه‌ی سلول‌های لایه بعد ارتباط دارد. شبکه‌ی پرسپترون چندلایه به ترتیب شامل یک لایه‌ی ورودی، یک یا چند لایه‌ی پنهان و یک لایه‌ی خروجی است (سعادت‌پور و همکاران، ۲۰۱۷). در حالت کلی، برای تعیین تعداد لایه‌های پنهان، تعداد سلول‌های عصبی قرار گرفته در هر لایه‌ی پنهان، نیز نوع تابع فعالیت، قاعده‌ی خاصی وجود نداشته و با استفاده از سعی و خطا و بررسی کارائی شبکه این فراسنج‌ها تعیین می‌گردد.

در این پژوهش، برای تدوین فرامدل جایگزین مدل شبیه‌ساز عددی MODFLOW، از مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون چهار لایه، ضمن اجرا و بررسی عملکرد شبکه‌های مختلف به منظور رسیدن به شبکه با بهترین عملکرد، استفاده شده است. شبکه‌ی

² standardized precipitation index (SPI)

¹ Mckee et al.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (2)$$

که به‌جای پیدا کردن مقادیر ضرائب α و β با استفاده از بهینه‌یابی، می‌توان از روابط تقریبی زیر استفاده کرد:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (3)$$

$$\beta = \frac{x}{\alpha} \quad (4)$$

که توزیع احتمال بارش در یک ایستگاه غالباً از تابع توزیع احتمال گاما پیروی می‌کند. تابع چگالی احتمال این توزیع به‌صورت زیر است:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

که در آن x مقدار متغیر، α فراسنج شکل و β فراسنج مقیاس توزیع و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است که رابطه‌ی آن به‌صورت زیر است:

جدول ۱- مقادیر برداشت مجاز سالانه از آبخوان داراب در شبه مخزن آبخوان در نمایشنامه‌های مختلف

شماره نمایشنامه	شرایط اقلیمی	میزان برداشت مجاز سالانه (میلیون مترمکعب)
۱	نسبتاً خشک	۳۵
۲	بهنجار	۴۵
۳	خیلی تر	۷۰

که در آن:

$$A = \ln(x) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (5)$$

n تعداد مشاهده‌های بارش است.

را در تعیین شرایط اقلیمی دارد و اطلاعات گروه زمانی بارش در یک منطقه الزاماً با اطلاعات گروه زمانی رواناب همخوانی ندارند. در مقاله‌ی یادشده مکی و همکاران (۱۹۹۳)، آب‌شناسی مانند رواناب نیز که ماهیتی تصادفی با تابع چگالی احتمال گاما دارند نیز می‌توان از همین روش استفاده کردند. شوکلا و وود^۱ (۲۰۰۸) نیز با استفاده از همین روش، شاخصی را برای دسته‌بندی شرایط اقلیمی براساس رواناب به نام شاخص رواناب ملاک‌شده (SRI) ارائه دادند. این محققان استدلال کردند که دسته‌بندی شرایط اقلیمی، که براساس مقادیر شاخص SPI صورت می‌پذیرد، برای شاخص SRI نیز قابل استفاده است. دسته‌بندی جدول ۲ به‌وسیله‌ی مکی و همکاران (۱۹۹۳) ارائه گردید که در تحقیق پیش رو از آن استفاده شده است.

برنامه‌ریزی آرمانی

برنامه‌ریزی آرمانی^۲ از جمله روش‌های اساسی برای مدل‌هایی است که تصمیم‌گیرنده هم‌زمان درصدد دستیابی به چندین هدف است. مسائل برنامه‌ریزی آرمانی مانند سایر مسائل می‌توانند به صورت خطی، غیر خطی و یا اعداد صحیح تنظیم شده و انواعی مختلفی از خانواده‌ی مدل‌های

برای محاسبه‌ی شاخص SPI، ابتدا یک توزیع گاما با فراسنج‌های محاسبه‌شده به اطلاعات بارش هر ایستگاه برازش داده می‌شود. فراسنج‌های α و β برای هر گروه بارش باید به طور جداگانه محاسبه شود. در محاسبه شاخص SPI از تابع توزیع احتمال تجمعی استفاده می‌شود، احتمال تجمعی از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

گام بعدی در محاسبه‌ی SPI، انتقال احتمال تجمعی از توزیع گامای به‌دست آمده به توزیع نرمال ملاک تجمعی با میانگین صفر و انحراف از معیار یک است. در واقع، SPI عبارت است از متغیری از تابع توزیع بهنجار ملاک که مقدار احتمال تجمعی آن با مقدار احتمال تجمعی متغیر منظور از تابع توزیع گامای به‌دست آمده مساوی باشد. از دشواری‌هایی که این روش یکی این است که در دسته‌بندی شرایط اقلیمی تنها بارش لحاظ شده است، درحالی که در برخی مطالعات مانند تحقیق پیش رو، رواناب نقش اساسی

² goal programming

¹ Shukla and Wood

در این حالت، مدل برنامه‌ریزی آرمانی به شکل زیر تنظیم می‌گردد:

$$\text{Minimize } d_i^- \quad (۸)$$

$$\text{Where } Z(x) = Z_g - d_i^+ + d_i^-$$

بنابر آنچه در این تحقیق پیشنهاد شد، در مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه، از برنامه‌ریزی آرمانی در هر دو روش‌شناسی استفاده گردیده است. آرمان‌ها نیز، به صورت میزان حداقلی تخصیص آب در شرایط اقلیمی مختلف تعریف شده‌اند. این آرمان‌ها به صورت تخصیص آب در دوره‌ی یک‌ساله بخش بر نیاز آبی در این دوره تعریف گردیده‌اند. مدل بهینه‌سازی نیز با هدف کمینه‌کردن اختلاف نسبت آب تخصیصی به نیاز آبی هر بخش و آرمان مربوطه تدوین گردیده است، بنابراین مقدار هر آرمان، عددی بین ۰ (عدم تخصیص آب) و ۱ (تأمین کامل نیاز آبی) است. این آرمان‌ها برای هر شرایط اقلیمی، مقداری متفاوت را با توجه به آن شرایط دارند. طبعاً برای شرایط اقلیمی خیلی تر (نمایشنامه‌ی ۳)، آرمان همه‌ی بخش‌های گرودار، تأمین کامل نیازهای آبی بوده و در نمایشنامه‌های دیگر با توجه به شرایط اقلیمی، این آرمان‌ها کمتر از تأمین کامل نیاز آبی می‌توانند باشند. مقدارهای آرمان‌های نیاز آبی شرب، صنعت، محیط‌زیست و کشاورزی در جدول ۳ ارائه شده است.

برنامه‌ریزی آرمانی را ارائه نمایند. اصول مدل‌سازی در برنامه‌ریزی آرمانی تفاوت معنی‌داری با رویه‌ی مدل‌سازی برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی نداشتند و تفاوت اساسی در اینجا مربوط به توضیح و تنظیم کردن اهداف، آرمان‌ها، اولویت‌ها و محدودیت‌های آن‌ها است (رومرو^۱، ۱۹۸۶). برنامه‌ریزی آرمانی، در واقع یک مدل بهینه‌سازی است که می‌تواند به صورت خطی یا غیر خطی تنظیم گردد. اگر تابع هدف در یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی به صورت $Z(x)$ تعریف شود که در آن x مجموعه متغیرهای مسئله برنامه‌ریزی بوده و آرمان تصمیم‌گیرنده با Z_g نمایش داده شود، آرمان می‌تواند به دو صورت تعریف و تنظیم شده گردد:

الف) احراز حداقلی یک سطح تمایل یا آرمان: در این حالت، پیشی‌گرفتن از آرمان یا سطح تمایل تعیین‌شده توسط تصمیم‌گیرنده، مطلوب‌تر از متوقف‌شدن در همان سطح تمایل ارزیابی می‌گردد:

$$\text{Maximize } d = d_i^+ - d_i^- \quad (۷)$$

$$\text{Where } Z(x) = Z_g - d_i^+ + d_i^-$$

ب) دست‌یافتن به آرمان: در این حالت، مطلوبیت پیشی‌گرفتن از آرمان درست به اندازه‌ی مطلوبیت رسیدن به خود آرمان است، در نتیجه، برای تصمیم‌گیرنده فرقی میان رسیدن به آرمان یا پیشی‌گرفتن از آن وجود ندارد.

جدول ۲- دسته‌بندی شرایط اقلیمی (مکی و همکاران، ۱۹۹۳)

وضعیت اقلیمی	بازه‌ی شاخص SRI
شدیداً تر	بیشتر از ۲
خیلی تر	۱/۵ تا ۱/۹۹
نسبتاً تر	۱ تا ۱/۴۹
نزدیک به بهنجار	۰/۹۹ تا -۰/۹۹
نسبتاً خشک	-۱/۴۹ تا -۱
خیلی خشک	-۲ تا -۱/۵
شدیداً خشک	کمتر از -۲

^۱ Romero

مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II

در سال ۲۰۰۰، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی موجود، به خاطر عدم استفاده از نخبه‌گرایی و نیاز به تعیین فراسنج اشتراکی، انتقاد شد. در سال ۲۰۰۲ دب و همکارانش مدل NSGA-II را ارائه دادند که در آن هر دو نقص فوق را برطرف کرده و از دو مفهوم رتبه‌بندی ناغالب و فاصله ازدحام استفاده کردند. پس از تعیین آرمان‌های هر بخش در نمایشنامه‌های مختلف اقلیمی، نوبت به تدوین مدل

بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه می‌رسد. در این مرحله، با استفاده از اطلاعات مربوط به نیاز آبی هر بخش و آرمان‌های ذی‌نفعان، مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه‌ی NSGA-II با استفاده از فراشبه شبکه‌ی عصبی مصنوعی آبخوان داراب تدوین می‌گردد. اهداف شبه بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی چندهدفه‌ی مذکور، کمینه‌کردن اختلاف آرمان نسبت تخصیص آب ماهانه به نیاز آبی ماهانه بخش‌های مختلف هستند.

جدول ۳- مقادیر حداقلی آرمان نسبت تخصیص آب به نیازهای آبی بخش‌های مختلف

ردیف	نوع نیاز آبی	شماره نمایشنامه	شرایط اقلیمی	مقادیر آرمان تخصیصی
۱	شرب	۱	نسبتاً خشک	۰/۸۵
		۲	بهنجار	۰/۹
		۳	خیلی تر	۱
۲	صنعت	۱	نسبتاً خشک	۰/۷۵
		۲	بهنجار	۰/۸۵
		۳	خیلی تر	۱
۳	محیط‌زیست	۱	نسبتاً خشک	۰/۴
		۲	بهنجار	۰/۷
		۳	خیلی تر	۱
۴	کشاورزی	۱	نسبتاً خشک	۰/۵
		۲	بهنجار	۰/۷
		۳	خیلی تر	۱

هستند. در ادامه، فرمولاسیون توابع هدف و قیود شبه بهینه‌سازی مذکور به اختصار ارائه شده است:

متغیرهای تصمیم در این مدل بهینه‌سازی، شامل نسبت رهاسازی ماهانه آب از مخزن سد رودبال به مجموع آب موجود در مخزن، نسبت تخصیص آب ماهانه به نیاز آبی برای آب‌بران کشاورزی، محیط‌زیست، شرب و صنعت

$$\text{Minimize} : \left\{ \begin{array}{l} d_{ag} = d_{ag}^+ - d_{ag}^- = G_{ag} - \frac{1}{120} \sum_{y=1}^{10} \sum_{m=1}^{12} r_{ag,y,m} \\ d_{dr} = d_{dr}^+ - d_{dr}^- = G_{dr} - \frac{1}{120} \sum_{y=1}^{10} \sum_{m=1}^{12} r_{dr,y,m} \\ d_{en} = d_{en}^+ - d_{en}^- = G_{en} - \frac{1}{120} \sum_{y=1}^{10} \sum_{m=1}^{12} r_{en,y,m} \\ d_{in} = d_{in}^+ - d_{in}^- = G_{in} - \frac{1}{120} \sum_{y=1}^{10} \sum_{m=1}^{12} r_{in,y,m} \end{array} \right. \quad (9)$$

Subject to :

۱- قیود تساوی:

(۱۰)

$$AllDam_{dr,y,m} = rdam_{dr,y,m} \times All_{dr,y,m} \quad \forall y = 1, \dots, 10 \ \& \ m = 3, \dots, 12$$

(۱۱)

$$FIUp_{ag_{y,m}}^3 = \frac{FIUp_{ag_{y,m}}^4}{eff_4^3} - RRe_3 \times AllRe_{ag_{y,m}}^3 + rdam_{ag_{y,m}}^3 \times AllRe_{ag_{y,m}}^3 \quad (12)$$

$$FIUp_{ag_{y,m}}^2 = \frac{FIUp_{ag_{y,m}}^3}{eff_3^2} - RRe_2 \times AllRe_{ag_{y,m}}^2 + rdam_{ag_{y,m}}^2 \times AllRe_{ag_{y,m}}^2 \quad (13)$$

$$FIUp_{ag_{y,m}}^1 = \frac{FIUp_{ag_{y,m}}^2}{eff_2^1} - RRe_1 \times AllRe_{ag_{y,m}}^1 + rdam_{ag_{y,m}}^1 \times AllRe_{ag_{y,m}}^1 \quad (14)$$

$$R_{y,m} = m_{y,m} \times [S_{y,m} + I_{y,m} + (Rain_{y,m} - Evap_{y,m}) \times A(S_{y,m})_{y,m} - S_{min}] \quad (15)$$

$$S_{y,m+1} = \min \{82, S_{y,m} + I_{y,m} + (Rain_{y,m} - Evap_{y,m}) \times A(S_{y,m})_{y,m} - R_{y,m}\} \quad (16)$$

$$SP_{y,m} = \max \{0, S_{y,m} + I_{y,m} + (Rain_{y,m} - Evap_{y,m}) \times A(S_{y,m})_{y,m} - R_{y,m}\}$$

۲- قیود نامساوی:

(۱۷)

$$S_{y,m} + I_{y,m} + (Rain_{y,m} - Evap_{y,m}) \times A(S_{y,m})_{y,m} - R_{y,m} \leq S_n + C_{SP} \quad (18)$$

$$\sum_{m=1}^{12} AllGr_{y,m}^{total} \leq Gr_{allowable} \quad \forall y = 1, \dots, 10 \quad (19)$$

$$DR(AllGr_{y,m}^{total}) \leq DR_{allowable} \quad \forall y = 1, \dots, 10, m = 1, \dots, 12$$

که در معادلات بالا:

نسبت تخصیص آب به نیاز آبی بخش کشاورزی، شرب، محیطزیست و صنعت در ماه m از سال y،

$AllDam_{dr_{y,m}}$:

اندازه ی آب رهاشده از سد برای مصارف شرب در ماه m از سال y،

$AllGr_{y,m}^{total}$:

کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به بخش کشاورزی در ماه m از سال y،

$AllRe_{ag_{y,m}}^i$:

اندازه ی آبی که به آب بر i ام بخش کشاورزی در ماه m از سال y می رسد که شامل آب زیرزمینی به همراه آب سد و نیز بازگشت آب آبران بالادست می شود،

$d_{ag}, d_{dr}, d_{en}, d_{in}$

اندازه ی متوسط اختلاف نسبت تخصیص به نیاز آبی بخش کشاورزی، شرب، محیطزیست و صنعت و آرمان های آن بخش ها به ترتیب زیر می باشند،

$d_{ag}^+, d_{dr}^+, d_{en}^+, d_{in}^+$:

اندازه ی متوسط پیشی گرفتن از آرمان بخش کشاورزی، شرب، محیطزیست و صنعت؛

$d_{ag}^-, d_{dr}^-, d_{en}^-, d_{in}^-$

اندازه ی متوسط عدم دستیابی به آرمان بخش کشاورزی، شرب، محیطزیست و صنعت؛

$r_{ag_{y,m}}, r_{dr_{y,m}}, r_{en_{y,m}}, r_{in_{y,m}}$

$Rain_{y,m}$:

اندازه‌ی بارش باران بر دریاچه پشت سد در ماه m از سال y بر حسب متر،

$Evap_{y,m}$:

اندازه‌ی تبخیر از سطح دریاچه پشت سد در ماه m از سال y بر حسب متر،

$A(S_{y,m})_{y,m}$:

مساحت دریاچه‌ی پشت سد بر حسب کیلومتر مربع در ماه m از سال y،

$Gr_{allowable}$:

اندازه‌ی حجم برداشت مجاز سالانه از آبخوان داراب،

$DR (AllGr_{y,m}^{total})$:

اندازه‌ی افت سطح آبخوان به متر در سال که تابعی از میزان برداشت آب از آبخوان است،

$DR_{allowable}$:

اندازه‌ی افت مجاز سطح آبخوان در سال به متر،

$G_{ag}, G_{dr}, G_{em}, G_m$:

اندازه‌ی هدف بخش‌های کشاورزی، شرب، زیست-

محیطی و صنعت.

در معادلات بالا، واحد تمامی احجام، میلیون مترمکعب است. در فرمولاسیون مدل فوق، معادله‌های ۹، توابع هدف مدل بهینه‌سازی چندهدفه را نمایش می‌دهند که به صورت آرمان حداقلی تعریف گردیده‌اند. معادلات ۱۰ تا ۱۶ شامل قیود تساوی و معادلات ۱۷ تا ۱۹ شامل قیود نامساوی مدل هستند. معادله‌ی ۱۰ نمایانگر میزان آبی هستند که از سد به بخش شرب تخصیص یافته‌اند. معادله‌های ۱۱ تا ۱۳ بیانگر مقدار جریان بالادست برای ۴ آبر بخش کشاورزی هستند. در این معادله‌های اثر کارایی شبکه انتقال آب و نیز زهاب بازگشتی از هر آبر کشاورزی دیده شده است. در نهایت آبی که به کل آبر بخش کشاورزی از محل سد تخصیص می‌یابد برابر مجموع اتلاف آب در شبکه و آبی که به دست آبر بخش کشاورزی می‌رسد منهای زهاب بازگشتی از هر آبر می‌باشد. معادله‌های ۱۴ تا ۱۶ معادله‌های تراز مخزن سد هستند و براساس وارد عمل شدن سرریز سد، این معادلات اصلاح شده‌اند. در نهایت، اندازه‌ی آبی که از سد رها می‌شود برابر با اندازه‌ی

$All_{dr,y,m}$:

اندازه‌ی آب سد و زیرزمینی که به بخش شرب در ماه m از سال y تخصیص یافته است،

$FIUp_{ag,y,m}^4, FIUp_{ag,y,m}^3, FIUp_{ag,y,m}^2, FIUp_{ag,y,m}^1$:

جریان آب بالادست آبر چهارم تا اول بخش کشاورزی در ماه m از سال y،

$eff_2^1, eff_3^2, eff_4^3$:

کارایی شبکه انتقال آب از منظر اتلاف آب به ترتیب از محل آبر اول، دوم و سوم تا آبر دوم، سوم و چهارم بخش کشاورزی،

RRe_1, RRe_2, RRe_3 :

نسبت زهاب بازگشتی از آبر اول تا سوم بخش کشاورزی به شبکه انتقال آب نسبت به آب تخصیص یافته به آن آبر،

$rdam_{ag,y,m}^1, rdam_{ag,y,m}^2, rdam_{ag,y,m}^3, rdam_{ag,y,m}^4$:

نسبت آبی که از سد تأمین می‌گردد به کل آب تخصیص یافته به آبر اول تا چهارم بخش کشاورزی در ماه m از سال y،

$rdam_{dr,y,m}$:

نسبت آبی که از سد تأمین می‌گردد به کل آب تخصیص یافته به آبر بخش شرب،

S_n :

حجم مخزن سد در تراز بهنجار،

$S_{y,m}$:

حجم آب موجود در مخزن سد در ماه m از سال y،

C_{sp} :

ظرفیت سرریز سد، حجم رواناب ورودی به مخزن سد در ماه m از سال y،

$I_{y,m}$:

حجم آب وارد شده به مخزن سد در ماه m از سال y،

$R_{y,m}$:

حجم آب ره‌اشده از دریچه‌های مخزن سد در ماه m از سال y،

$SP_{y,m}$:

اندازه‌ی آب سرریز شده از آبگیر سد در ماه m از سال y،

در واقع این روش، تعمیم یافته روش چانه زنی بازگشتی به هم آرائی^۱ (UFB) می باشد. در این روش، قوانین تصمیم گیری برای پذیرش یک گزینه به عنوان گزینه ی نهایی، که تصویب q چانه زن را نیاز دارد، که در آن q بین ۱ و n می باشد. در روش چانه زنی بازگشتی با تأیید q چانه زن، $q \leq \frac{(n+1)}{2}$ در نظر گرفته می شود اما نتایج برای هر q بین بازه ی $1 \leq q < n$ اعمال خواهد شد (شیخ محمدی و مدنی، ۲۰۰۸).

معرفی منطقه ی مطالعه شده

منطقه ی مطالعه شده در این تحقیق شامل آبخوان، آبگیر سد و رود رودبال است که در نزدیکی شهرستان داراب در شرق استان فارس، قرار دارد (شکل ۲). رود رودبال از ضلع جنوبی ارتفاعات مشرف به شهرستان نی ریز در منطقه ای به نام پهناوه سرچشمه گرفته، و پس از عبور از تنگ شهباز، درب قلعه و گلوتنگ وارد دشت داراب می گردد. این رود پس از عبور از تنگه خسویه وارد دشت خسویه شده، آب آن شور گشته و به نام رودخانه شور نامیده می شود. محدوده ی بین محل قرارگیری سد رودبال (بردنو) تا تنگه خسویه از آبخیز این رودخانه به عنوان منطقه ی مطالعاتی انتخاب شده است. وسعت آبخیز منطقه ی مطالعه شده تا تنگ خسویه، شامل کوهستان های اطراف آن، جمعاً ۳۳۲۰ کیلومترمربع است (مهندسین مشاور آب نیرو، ۱۳۹۰). ارتفاع متوسط دشت داراب در حدود ۱۱۰۰ متر (از سطح آزاد دریا) بوده، بلندترین نقطه آن در منطقه شرق به نام قلات در حدود ۳۱۲۶ متر و پست ترین نقطه آن در جنوب دشت با ارتفاع ۱۰۶۱ متر است. میانگین حداکثر و حداقل دمای سالانه ی ایستگاه داراب به ترتیب حدود ۳۶ و ۷/۶، حداقل مطلق ۵-، حداکثر مطلق ۴۵، و در ایستگاه بختاجرد (میانه دشت) میانگین حداکثر و حداقل دمای سالانه آن به ترتیب حدود ۳۴ و ۳ و میانگین حداقل ها ۳- درجه سانتیگراد است. بارندگی داراب به طور میانگین سالانه ۲۸۰ میلی متر است (مهندسین مشاور آب نیرو، ۱۳۹۰).

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج به دست آمده از دو روش شناسی پیشنهادی، ارائه می گردند. ابتدا دوره های اقلیمی

آب رهائده از دریچه ها و آب سرریز شده از سد است. معادله ی ۱۷ نشان می دهد که به هیچ عنوان نباید آب رهائده از سد، از گنجایش سرریز و نیز حجم مخزن سد بیشتر باشد. معادله های ۱۸ و ۱۹ میزان حدود مجاز برداشت آب سالانه و ماهانه از آبخوان داراب را نشان می دهند.

روش امتیازدهی بردا

در این تحقیق، استفاده از مدل بهینه سازی چندهدفه باعث ایجاد مجموعه جوابهای بهینه ای می گردد که هر کدام از آنها یک رویکرد تخصیص آب بوده و به خودی خود بهینه هستند. در حالی که، استفاده هم زمان از چند رویکرد میسر نیست. بنابراین، استفاده از روش های انتخاب اجتماعی برای حل اختلاف آب بران، امری غیر قابل اجتناب است. یکی از مرسوم ترین این روش ها، روش امتیازدهی بردا هست. در این روش، شرکت کنندگان به هر کدام از رویکردها امتیازی اختصاص می دهند. این امتیازدهی برحسب میزان مطلوبیتی است که هر یک از رویکردها برای آنها دارد. امتیازدهی می تواند به ترتیب اولویت، یا با استفاده از تابع مطلوبیت از دیدگاه شرکت کنندگان صورت گیرد. به طور مثال، برای امتیازدهی به ترتیب اولویت، اگر تعداد رویکردها برای تصمیم گیری را برابر با m فرض کنیم، هر شرکت کننده به رویکرد که بیشترین اولویت را برایش داشته باشد، امتیاز $m-1$ داده و به رویکرد که در اولویت دوم قرار می گیرد، امتیاز $m-2$ اختصاص داده، و به همین ترتیب به رویکردی که کمترین مطلوبیت را داشته باشد، امتیاز ۰ را اختصاص می دهد. آن رویکردی که در مجموع بیشترین نمره را کسب کند در این مدل تصمیم گیری مطلوبترین رویکرد است (شیخ محمدی و مدنی، ۲۰۰۸).

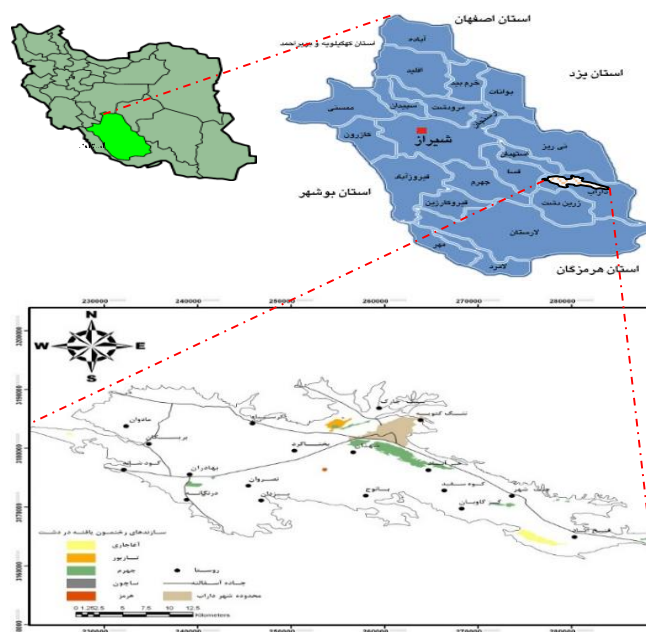
مدل چانه زنی بازگشتی

همان طور که پیش از این ذکر گردید، نتایج نهایی از مدل بهینه سازی چندهدفه، یک منحنی تعامل مابین توابع مطلوبیت گروداران است. به منظور کمک به تصمیم گیرندگان برای انتخاب راه حل بهینه مطلوب بین گروداران، از مدل چانه زنی بازگشتی نیز می توان برای پیدا کردن راه حل مناسب استفاده کرد. روش چانه زنی بازگشتی با تأیید q چانه زن از روش های نظری چانه زنی بازگشتی هست.

¹ unanimity Falback bargaining (UFB)

۱۳۹۵ با شاخص SRI برابر با ۱/۱-، دوره‌ی بهنجار، دوره‌ی شماره ۱ با شاخص SRI برابر با ۰/۰۶- و دوره‌ی خیلی تر، دوره‌ی شماره ۲۲ با شاخص SRI برابر با ۰/۶۹ است. بنابراین بهینه‌سازی تخصیص آب نیز برای این سه دوره به صورت جداگانه انجام خواهد شد و از این پس، دوره‌ی خشک را نمایشنامه‌ی ۱، دوره‌ی بهنجار را نمایشنامه‌ی ۲ و دوره‌ی ترسالی را نمایشنامه‌ی ۳ می‌نامیم.

خشکسالی، بهنجار و ترسالی با استفاده از شاخص رواناب ملاک شده SRI از اطلاعات رواناب ماهانه رود رودبال طی سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۷ به صورت دوره‌های زمانی ۱۰ ساله استخراج شده‌اند (جدول ۴). لازم به ذکر است که شروع هر دوره، شروع سال آبی است که از مهر هر سال تا شهریور سال بعد است. بدترین دوره‌ی خشک، دوره‌ی شماره ۳۸ از سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا سال آبی ۱۳۹۶-



شکل ۲- موقعیت قرارگیری منطقه‌ی مطالعه شده (گزارش وضعیت حقایقه‌بری، ۱۳۹۱)

در رویکردی شماره‌ی ۳ (دوره‌ی ترسالی)، پس از اجرای مدل بهینه‌سازی، ۲۸۰ مجموعه جواب به‌دست آمده است. از میان این رویکردها، با استفاده از روش امتیازدهی بردا، رویکرد شماره ۲۰ از دیدگاه بخش‌های مختلف دارای مقبولیت بیشتری است که در جدول ۵ مقادیر آرمان و تابع هدف این رویکردها نشان داده شده‌اند. نتایج ارائه شده در جدول ۵ به‌خوبی نشان‌دهنده این مسئله است که حجم سد رودبال (۸۲ میلیون مترمکعب) در تلفیق با سفره‌ی آب زیرزمینی حوضه سد مزبور، حتی در شرایط ترسالی با توجه به اقلیم منطقه، به‌خوبی قادر به برآورده کردن نیازهای پایین‌دست، به‌خصوص بخش کشاورزی نیست. این موضوع دور از انتظار هم نیست، چرا که میزان نیاز آبی پایین‌دست سد در مجموع ۱۴۹ میلیون مترمکعب است، در حالی که حجم مفید ذخیره مخزن در تراز بهنجار ۸۰ میلیون مترمکعب است. این بدان معناست که حتی در شرایط ترسالی، تأمین ۶۹ میلیون مترمکعب از نیاز آبی منطقه

نتایج روش‌شناسی پیشنهادی اول

در این بخش، نتایج به‌دست آمده از مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی NSGA-II با لحاظ مدل مخزن و برنامه‌ریزی آرمانی (روش‌شناسی اول)، ارائه گردیده است. برای نمایشنامه‌ی شماره ۱ (دوره خشکسالی)، مدل بهینه‌سازی به‌گونه‌ای که در بخش‌های قبیل شرح داده شد اجرا گردیده مجموعه جوابی شامل ۲۸۰ رویکرد تخصیص به‌دست آمده است. از میان این رویکردهای تخصیص، با استفاده از روش امتیازدهی بردا، رویکردی که از دیدگاه آب‌بران بخش کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست مطلوبیت بیشتری داشته، انتخاب گردیده است. این رویکرد، در واقع رویکرد شماره ۲۷۲ می‌باشد. در سناریوی شماره‌ی ۲ (دوره‌ی بهنجار)، پس از اجرای مدل بهینه‌سازی، ۲۸۰ مجموعه جواب به‌دست آمده است. از میان این رویکردها، با استفاده از روش امتیازدهی بردا، رویکرد شماره ۱۰۹ از دیدگاه بخش‌های مختلف دارای مقبولیت بیشتری است. همچنین،

بایستی از منابع آب زیرزمینی صورت گیرد که با توجه به زیرزمینی (با توجه به بحرانی بودن شرایط آبخوان)، محدودیت اعمال شده، میانگین افت مجاز سالانه سطح آب امکان پذیر نیست.

جدول ۴- مقادیر شاخص SRI برای دوره های ۱۰ ساله از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۸۷

SRI	سال پایان دوره	سال شروع دوره	شماره دوره ۱۰ ساله
-۰/۰۶	۵۹-۵۸	۵۰-۴۹	۱
۰/۱۵	۶۰-۵۹	۵۱-۵۰	۲
۰/۴۵	۶۱-۶۰	۵۲-۵۱	۳
۰/۴۷	۶۲-۶۱	۵۳-۵۲	۴
۰/۶۲	۶۳-۶۲	۵۴-۵۳	۵
۰/۶۱	۶۴-۶۳	۵۵-۵۴	۶
۰/۶۰	۶۵-۶۴	۵۶-۵۵	۷
۰/۴۷	۶۶-۶۵	۵۷-۵۶	۸
۰/۶۱	۶۷-۶۶	۵۸-۵۷	۹
۰/۵۴	۶۸-۶۷	۵۹-۵۸	۱۰
۰/۴۳	۶۹-۶۸	۶۰-۵۹	۱۱
۰/۲۳	۷۰-۶۹	۶۱-۶۰	۱۲
۰/۱۵	۷۱-۷۰	۶۲-۶۱	۱۳
۰/۱۱	۷۲-۷۱	۶۳-۶۲	۱۴
۰/۲۸	۷۳-۷۲	۶۴-۶۳	۱۵
۰/۳۱	۷۴-۷۳	۶۵-۶۴	۱۶
۰/۴۰	۷۵-۷۴	۶۶-۶۵	۱۷
۰/۶۲	۷۶-۷۵	۶۷-۶۶	۱۸
۰/۴۷	۷۷-۷۶	۶۸-۶۷	۱۹
۰/۵۲	۷۸-۷۷	۶۹-۶۸	۲۰
۰/۶۶	۷۹-۷۸	۷۰-۶۹	۲۱
۰/۶۹	۸۰-۷۹	۷۱-۷۰	۲۲
۰/۵۶	۸۱-۸۰	۷۲-۷۱	۲۳
۰/۴۷	۸۲-۸۱	۷۳-۷۲	۲۴
۰/۲۲	۸۳-۸۲	۷۴-۷۳	۲۵
۰/۲۶	۸۴-۸۳	۷۵-۷۴	۲۶
۰/۳۰	۸۵-۸۴	۷۶-۷۵	۲۷
۰/۰۷	۸۶-۸۵	۷۷-۷۶	۲۸
۰/۰۸	۸۷-۸۶	۷۸-۷۷	۲۹
-۰/۰۸	۸۸-۸۷	۷۹-۷۸	۳۰
-۰/۳۲	۸۹-۸۸	۸۰-۷۹	۳۱
-۰/۴۶	۹۰-۸۹	۸۱-۸۰	۳۲
-۰/۴۳	۹۱-۹۰	۸۲-۸۱	۳۳
-۰/۴۴	۹۲-۹۱	۸۳-۸۲	۳۴
-۰/۵۳	۹۳-۹۲	۸۴-۸۳	۳۵
-۰/۶۷	۹۴-۹۳	۸۵-۸۴	۳۶
-۰/۹۱	۹۵-۹۴	۸۶-۸۵	۳۷
-۱/۱	۹۶-۹۵	۸۷-۸۶	۳۸
-۰/۹۸	۹۷-۹۶	۸۸-۸۷	۳۹

جدول ۵- مقادیر آرمان و توابع هدف برای رویکرد برتر نمایشنامه‌های مختلف با لحاظ مدل مخزن (روش‌شناسی پیشنهادی اول)

میزان پیشی گرفتن از آرمان*	میزان عدم دست‌یابی به آرمان*	مقدار متوسط تخصیص بهینه*	آرمان*	بخش‌گرودار	شماره‌ی رویکرد	شماره نمایشنامه
۰	۰/۳	۰/۲	۰/۵	کشاورزی		
۰	۰/۵	۰/۳۵	۰/۸۵	شرب		
۰	۰/۳۳	۰/۴۲	۰/۷۵	صنعت	۲۷۲	نمایشنامه‌ی ۱ (دوره‌ی خشکسالی)
۰	۰/۰۱۰	۰/۳۹	۰/۴	محیط‌زیست		
۰	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۷	کشاورزی		
۰	۰/۱۰	۰/۸	۰/۹	شرب		
۰	۰/۱۰	۰/۷۵	۰/۸۵	صنعت	۱۰۹	نمایشنامه‌ی ۲ (دوره‌ی بهنجار)
۰/۱۷	۰	۰/۸۷	۰/۷	محیط‌زیست		
۰	۰/۳۲	۰/۶۸	۱	کشاورزی		
۰	۰/۰۲	۰/۹۸	۱	شرب	۲۰	نمایشنامه‌ی ۳ (دوره‌ی ترسالی)
۰	۰/۰۶	۰/۹۴	۱	صنعت		
۰	۰/۰۹	۰/۹۱	۱	محیط‌زیست		

* تمامی مقادیر به صورت متوسط نسبت تخصیص آب ماهانه به نیاز آبی ماهانه در دوره ۱۰ ساله هستند.

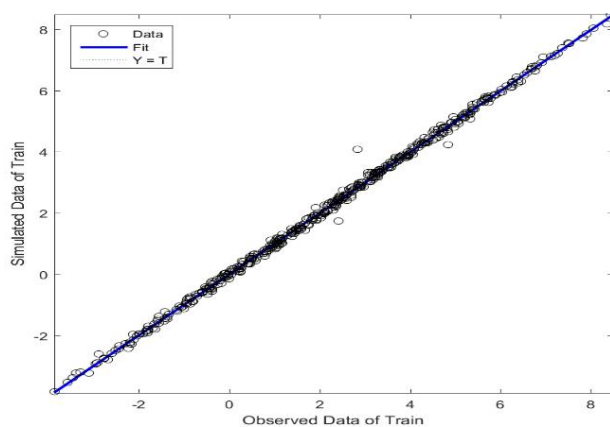
نتایج روش‌شناسی پیشنهادی دوم

در این بخش، نتایج به‌دست آمده از روش‌شناسی پیشنهادی دوم، شامل نتایج فرامدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی و مدل بهینه‌یابی ارائه می‌گردد. پس از توسعه و واسنجی شبه شبیه‌سازی آبخوان داراب در مدل MODFLOW، به‌دلیل زمان اجرای بالای این شبه، یک فرامدل هوشمند، جایگزین مدل اصلی در مدل‌های بهینه‌سازی گردیده است. برای این کار، در تحقیق حاضر از شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه (MLP) استفاده شده است. به این منظور، ابتدا چاه‌های آبخوان به چهار محدوده تقسیم گردید. سپس یک پایگاه داده متشکل از ۶۲۵ نمایشنامه‌ی برداشت از چاه‌های آبخوان تدوین شد. این نمایشنامه‌ها شامل برداشت دبی و برداشت از چاه‌ها از صفر تا ۳/۲ میلیون مترمکعب در ماه است.

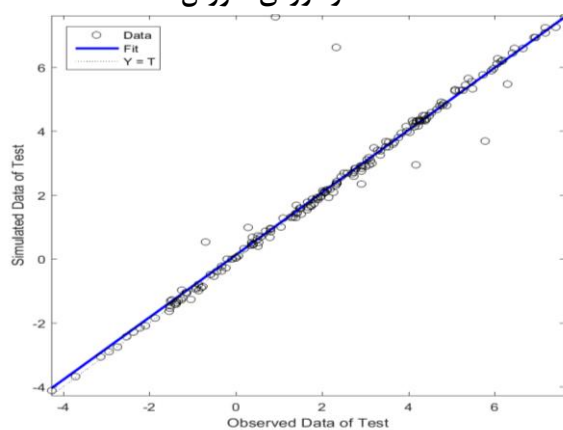
سپس به ازای تمامی این نمایشنامه‌ها مدل آبخوان اجرا شده و خروجی آن به صورت میانگین افت بار آبی آبخوان ذخیره‌سازی گردیدند. در ادامه، ۴۳۷ حالت (۰/۷۰٪) از ۶۲۵ نمایشنامه‌ی برداشت برای آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی و مابقی برای صحت‌سنجی آن انتخاب گردیده است. این داده‌ها به صورت تصادفی انتخاب گردیده‌اند، به صورتی که تا حد امکان انحراف از معیار و میانگین دو دسته داده برای آموزش و صحت‌سنجی به یکدیگر نزدیک بوده و برون‌یابی نیز صورت‌پذیرفته باشد. تعداد لایه‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی و تعداد نرون‌های هر لایه نیز با فرایند آزمون و خطا تعیین گردیده است. در نهایت، بهترین شبکه‌ی عصبی مصنوعی از میان تمامی شبکه‌های آموزش داده شده انتخاب گردیده که شامل یک شبکه‌ی چهار لایه با دو لایه میانی و هر لایه شامل چهار نرون است. شکل‌های ۳ و ۴ نتایج مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی را در

ضریب تبیین (R^2) فرامدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی ارائه داده شده اند. از فرامدل صحت‌سنجی شده در این مرحله، در مدل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده خواهد شد.

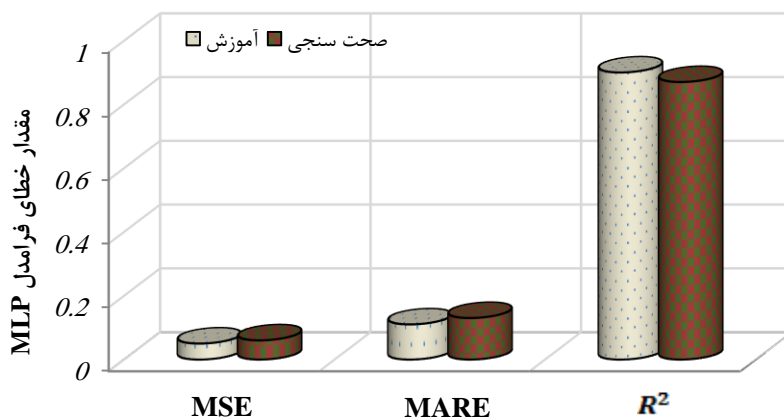
دوره‌های آموزش و صحت‌سنجی نشان داده است. در شکل ۵ سه شاخص خطای آماری شامل میانگین مربعات خطا^۱ (MSE)، میانگین قدر مطلق خطای نسبی^۲ (MARE) و



شکل ۳- مقادیر بهینه‌سازی شده‌ی میانگین افت (m) (بار آبی آبخوان) به وسیله‌ی مدل MLP در مقابل مقادیر مشاهده شده در دوره‌ی آموزش



شکل ۴- مقادیر بهینه‌سازی شده‌ی میانگین افت (m) (بار آبی آبخوان) به وسیله‌ی مدل MLP در مقابل مقادیر مشاهده شده در دوره‌ی صحت‌سنجی



شکل ۵- خطاهای دوره‌ی آموزش و صحت‌سنجی فرامدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه.

² mean absolute relative error

¹ mean square error

نمایشنامه‌ی ۳ (ترسالی)، ۲۸۰ مجموعه به‌دست آمده است. از میان این رویکردها، با استفاده از مدل چانه‌زنی بازگشتی، رویکرد شماره ۲۳۰ از دیدگاه بخش‌های مختلف دارای مقبولیت بیشتری است. جدول ۶ مقادیر آرمان و توابع هدف رویکردهای ذکر شده را نمایش داده است.

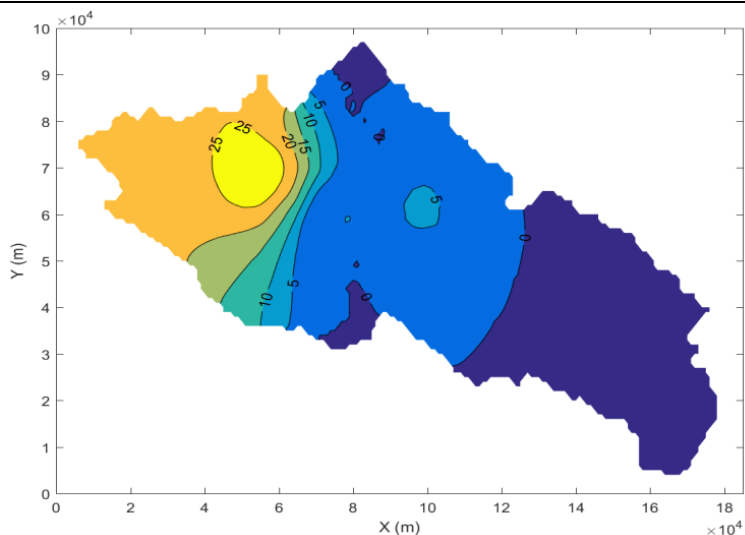
برای مشخص شدن وضعیت نقاط مختلف آبخوان سد رودبال، در هر یک از دوره‌های خشکسالی، بهنجار و ترسالی، آبخوان به صورت شکل‌های ۶ تا ۸ پهنه‌بندی گردیده است. این شکل‌ها، افت تراز سطح آبخوان را در پایان هر یک از رویکردها به ازای جواب بهینه انتخاب شده نشان داده است. در تمامی گزینه‌های فوق، افت تراز سطح آبخوان در هیچ‌کدام از سالهای افق طرح از میزان مجاز تعیین شده تجاوز نکرده است. همچنین، در قسمت میانی آبخوان به علت عبور رود رودبال، افت تراز آب زیرزمینی کمتر از سایر نقاط آبخوان بوده است. با فاصله گرفتن از رود، و با افزایش چاه‌های بهره‌برداری مجاز و غیر مجاز، افت تراز به شدت افزایش یافته است.

در ادامه، نتایج مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه متصل شده به فرامدل MLP (برای شبه‌سازی آبخوان) با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی آرمانی در سه نمایشنامه‌ی خشکسالی، بهنجار و ترسالی ارائه شده اند. برای نمایشنامه‌ی شماره‌ی ۱ (خشکسالی)، مدل بهینه‌سازی اجرا گردید و مجموعه‌ی جوابی شامل ۲۸۰ رویکرد تخصیص به‌دست آمدند. از میان این رویکردهای تخصیص، با استفاده از مدل چانه‌زنی بازگشتی، رویکردی که از دیدگاه آب‌بران بخش کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست مطلوبیت بیشتری داشته است، انتخاب گردید. این نمایشنامه، در واقع نمایشنامه (راه‌حل) شماره ۲۵۹ می‌باشد. پس از اجرای مدل بهینه‌سازی برای رویکرد ۲ (بهنجار)، مجموعه‌ی جواب‌های این رویکرد نیز شامل ۲۸۰ رویکرد گردیده است. از میان این رویکردها، با استفاده از مدل چانه‌زنی بازگشتی، رویکرد شماره ۵۶ از دیدگاه بخش‌های مختلف دارای مقبولیت بیشتری می‌باشد. همچنین، پس از اجرای مدل بهینه‌سازی برای

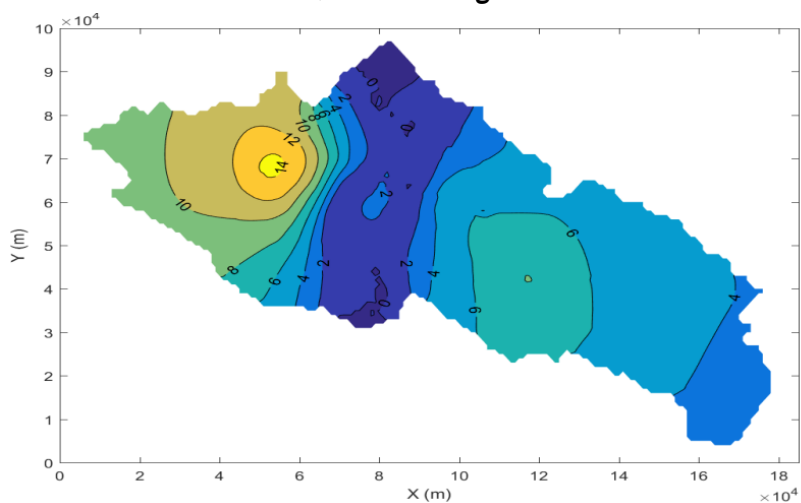
جدول ۶- مقادیر آرمان و توابع هدف برای رویکرد برتر نمایشنامه‌های مختلف با لحاظ مدل شبیه‌سازی MODFLOW (روش‌شناسی پیشنهادی دوم)

شماره نمایشنامه	شماره رویکرد	بخش گرودار	آرمان*	مقدار متوسط تخصیص بهینه*	میزان عدم دست‌یابی به آرمان*	میزان پیشی گرفتن از آرمان*
نمایشنامه‌ی ۱ (دوره‌ی خشکسالی)	۲۵۹	کشاورزی	۰/۵	۰/۲۳	۰/۲۷	۰
		شرب	۰/۸۵	۰/۲۸	۰/۵۷	۰
	صنعت	۰/۷۵	۰/۳۴	۰/۴۱	۰	
نمایشنامه‌ی ۲ (دوره‌ی بهنجار)	۵۶	کشاورزی	۰/۷	۰/۳۷	۰/۳۳	۰
		شرب	۰/۹	۰/۸۲	۰/۰۸	۰
		صنعت	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۰۱	۰
	محیط‌زیست	۰/۷	۰/۶۶	۰/۰۴	۰	
نمایشنامه‌ی ۳ (دوره‌ی ترسالی)	۲۳۰	کشاورزی	۱	۰/۵۷	۰/۴۳	۰
		شرب	۱	۰/۹۶	۰/۰۴	۰
	صنعت	۱	۰/۹۸	۰/۰۲	۰	

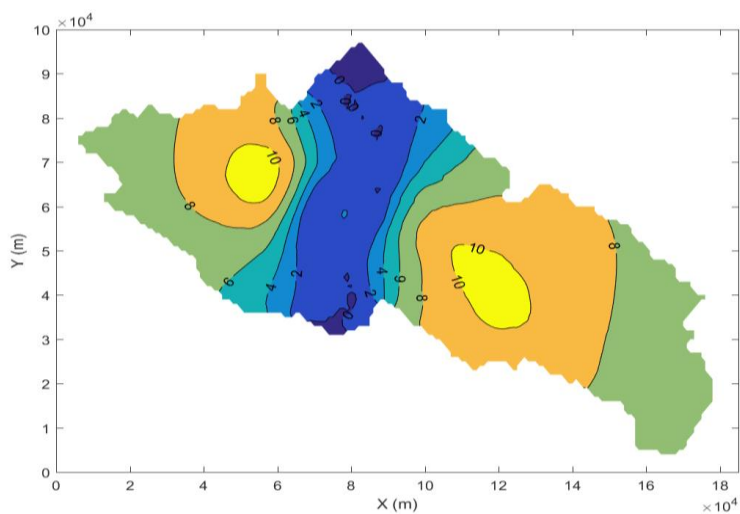
* تمامی مقادیر به صورت متوسط نسبت تخصیص آب ماهانه به نیاز آبی ماهانه در دوره ۱۰ ساله هستند.



شکل ۶- پهنه‌بندی آبخوان از منظر افت تراز آب زیرزمینی پس از افق ۱۰ ساله ی طرح در نمایشنامه‌ی خشکسالی (از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۸).



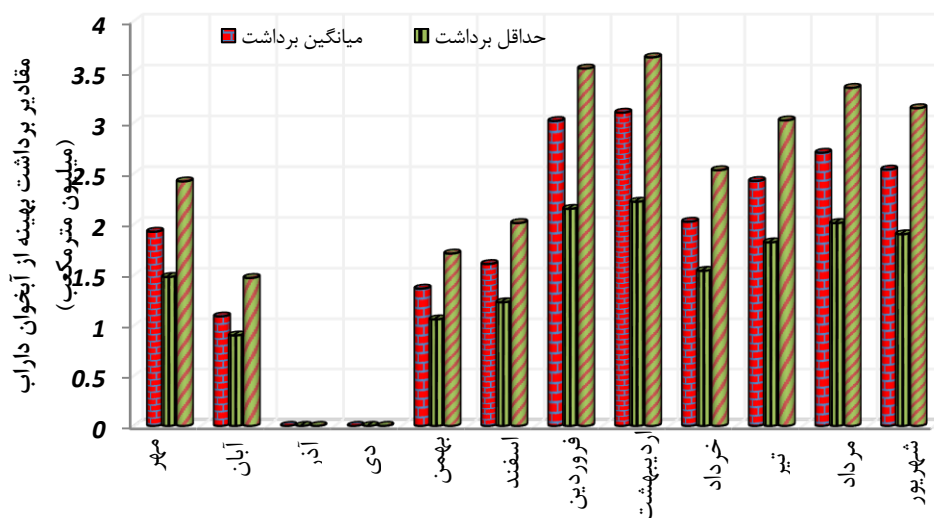
شکل ۷- پهنه‌بندی آبخوان از منظر افت تراز آب زیرزمینی پس از افق ۱۰ ساله ی طرح در نمایشنامه‌ی بهنجار (از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۵۶).



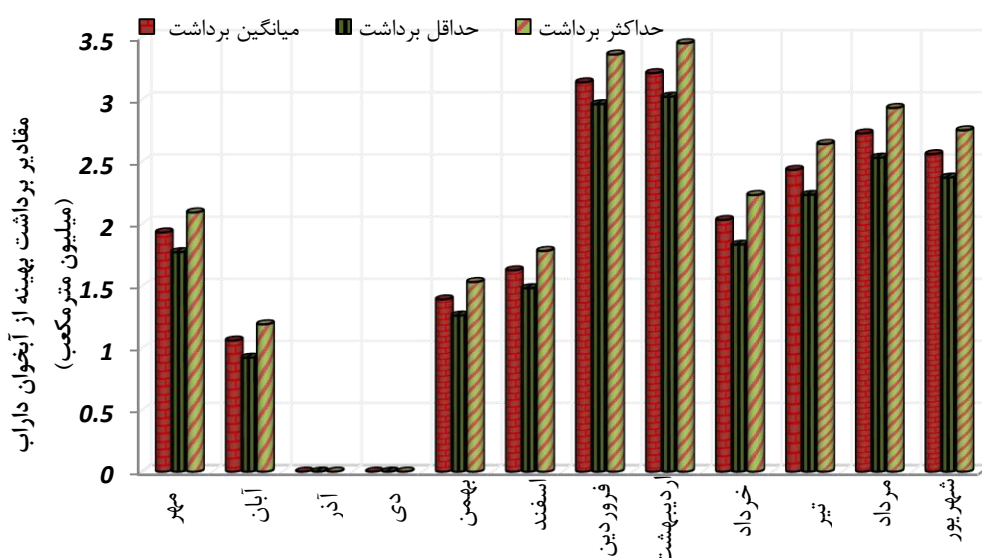
شکل ۸- پهنه‌بندی آبخوان از منظر افت تراز آب زیرزمینی پس از افق ۱۰ ساله ی طرح در نمایشنامه‌ی ترسالی (از سال ۱۳۵۷ تا ۱۳۶۸).

بهینه‌سازی، به ترتیب برای شرایط اقلیمی خشک، بهنجار و تر ارائه گردیده اند. همان‌طور که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌گردد، میزان تفاوت برداشت بهینه تعیین شده برای سال‌های مختلف و شرایط اقلیمی متفاوت بسیار نزدیک به هم هستند. به علت نزدیک بودن مقادیر تخصیص به یکدیگر، در دوره‌های مختلف اقلیمی، می‌توان چنین نتیجه گرفت که بهره‌برداری از مخزن سد، تأثیری بر نحوه‌ی بهره‌برداری از آبخوان نداشته و منحنی فرمان آبخوان باید به صورت مستقل در نظر گرفته شود.

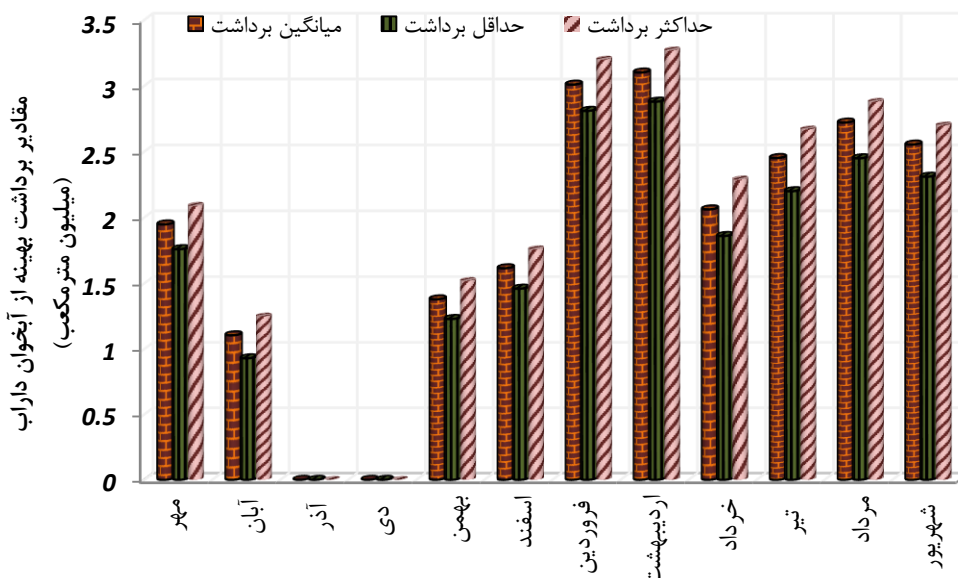
در ادامه، منحنی‌های فرمان آبخوان داراب، بر اساس نتایج مدل بهینه‌سازی با لحاظ فرامدل آبخوان ارائه گردیده اند. این منحنی‌های فرمان به تفکیک برای نمایشنامه‌های خشکسالی، بهنجار و ترسالی ارائه شده اند. طبق بررسی‌های محققین، منحنی فرمان حاصل شده برای برداشت از آب زیرزمینی برای هر سه نمایشنامه با تقریب خوبی (تفاوت ۰.۵٪ تا ۱.۵٪)، یکی بوده است. دلیل این موضوع، پایین بودن سطح آب زیرزمینی در آبخوان داراب، در حال حاضر و نیز مهارکننده بودن میزان افت تراز مجاز تعیین شده در مدل بهینه‌سازی است. در شکل‌های ۹ تا ۱۱ میزان برداشت بهینه تعیین شده به وسیله‌ی مدل



شکل ۹- مقدارهای میانگین، حداقل و حداکثر برداشت بهینه از آبخوان داراب برای ماه‌های مختلف در دوره‌ی ۱۰ ساله‌ی طرح (دوره‌ی خشکسالی)



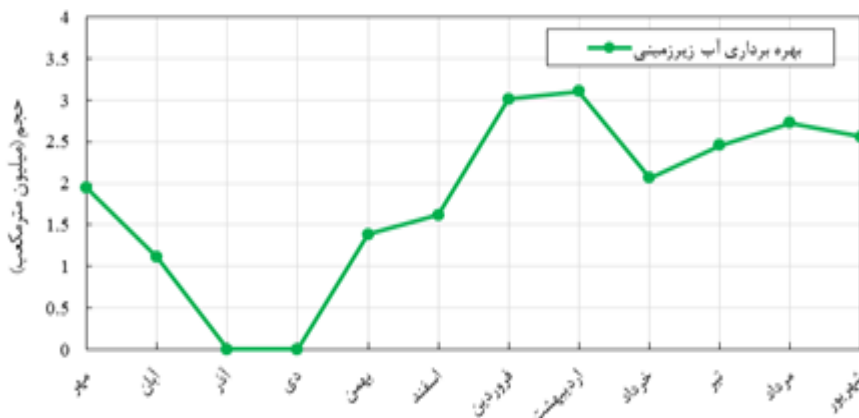
شکل ۱۰- مقدارهای میانگین، حداقل و حداکثر برداشت بهینه از آبخوان داراب برای ماه‌های مختلف در دوره‌ی ۱۰ ساله‌ی طرح (دوره‌ی بهنجار)



شکل ۱۱- مقدارهای میانگین، حداقل و حداکثر برداشت بهینه از آبخوان داراب برای ماه‌های مختلف در دوره‌ی ۱۰ ساله‌ی طرح (دوره‌ی ترسالی)

کشاورزی، در هر شرایط اقلیمی، سالانه تنها ۲۰ الی ۲۱ میلیون مترمکعب، سقف برداشت از آبخوان بایستی به وسیله‌ی آب منطقه‌ای استان برای منطقه تعریف گردد. توزیع ماهانه این مقدار (۲۰ میلیون مترمکعب) به صورت منحنی فرمان در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

در شکل ۱۲، این منحنی فرمان برای ماه‌های مختلف سال ارائه گردیده است. دلیل این امر، افت شدید سطح آب در آبخوان داراب طی سال‌های اخیر و محدودیت لحاظ شده برای افت مجاز سطح آبخوان است. لذا تأکید می‌شود که برای تخصیص آب از آب زیرزمینی به خصوص به بخش



شکل ۱۲- منحنی فرمان بهره‌برداری از آبخوان داراب، برای همه‌ی شرایط اقلیمی.

ارائه کردند. نتایج حاصله نشان می‌دهند که مدل‌سازی توزیعی رفتار آبخوان بر مبنای مدل MODFLOW (روش‌شناسی پیشنهادی دوم) برآورد بهتری را از شرایط سامانه آبی منطقه خواهد داشت. همچنین، برای رسیدن به یک برنامه‌ریزی کامل و بهینه برای منطقه، نیاز به رویکردهایی دیگر نیز وجود دارد، اما نکته‌ی اصلی در این تحقیق، تفاوت فاحش نتایج بین نیازهای آبی اعلام شده و توانایی منابع آب منطقه در برآورد این نیازها است. در نتایج

نتیجه‌گیری

همان‌طور که در این تحقیق ملاحظه شد، مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی، با فرض مخزن آبخوان (روش‌شناسی پیشنهادی اول) و با مدل‌سازی توزیعی آبخوان (روش‌شناسی پیشنهادی دوم)، تخصیص آب در سامانه رود-مخزن-آبخوان حوضه‌ی رود رودبال را با هدف افزایش کارایی بخش کشاورزی، و همچنین رعایت عدالت و حفظ پایداری،

- ۱) گزارش وضعیت حقابه‌بری، (۱۳۹۱). شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان فارس.
- ۲) طاهری تیزرو، ع و کمالی، م (۱۳۹۵)، "مدلسازی آبخوان دشت توپسرکانبا مدل MODFLOW و ارزیابی وضعیت هیدروژئولوژیکی تحت شرایط موجود و آینده". مجله منابع آب مرودشت. سال نهم.
- ۳) مجرد، م (۱۳۹۱). "بررسی ناحیه حفاظت از سرچاه برای یک مجموعه چاه از آبخوان دشت بیضا و زرقان" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.
- ۴) مهندسین مشاور آبنیرو، (۱۳۹۰)، بازنگری گزارش برنامه ریزی منابع آب و عملکرد سد رودبال براساس احجام آب تخصیص یافته در بخشهای مختلف مصرف. وزارت نیرو.
- 5) Bazargan-Lari, M.R., Kerachian R., and Mansoori A., 2009. A conflict-resolution model for The conjunctive use of surface and groundwater resources that considers water-quality issues: A case study. *Environmental Management*, 43: 470-482.
- 6) Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T., 2002. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. KANGAL Rep. No. 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India.
- 7) Elhassan A.M., Goto A. and Mizutani M., 2003. Effect of conjunctive use of water for paddy field irrigation on groundwater budget in an alluvial fan. *International Commission of Agricultural Engineering, the CIGR journal of scientific research and development*, 5.
- 8) Gao S, Zhu, Y and Yan ,K 2018. Simulation and prediction of groundwater pollution based on modflow model in a certain landfill. *Earth and Environmental Science* 189(2).
- 9) Karamouz M., Kerachian R. and Zahraie B., 2004. Monthly water resources and irrigation planning: A case study of conjunctive use of surface and groundwater resources. *ASCE, Journal of Irrigation and Drainage*, 130(5): 391-402.
- 10) Karamouz M., Tabari M.M. and Kerachian R., 2007. Application of artificial neural networks and generic algorithms in conjunctive use of surface

نهایی به‌خوبی واضح است که به علت پایین‌بودن سطح تراز آب زیرزمینی، و بحرانی بودن شرایط منابع آب منطقه، باید اقدامات جدی در زمینه‌ی عدم برداشت و احیای آب زیرزمینی شکل گیرد. لازم به ذکر است که حتی در شرایط ترسالی، آب زیرزمینی منطقه قادر به کارکردن به صورت تلفیقی با مخزن سد نیست و منحنی‌های فرمان آب زیرزمینی و سد را باید مستقل از یکدیگر تلقی کرد. آبخوان منطقه‌ی داراب، در مجموع توانایی برداشت بیش از ۲۰ میلیون مترمکعب در سال را دارا نیست. در باره‌ی مخزن سد رودبال نیز، به علت نیازهای بسیار زیاد پایین‌دست، به‌خصوص در بخش کشاورزی، نه تنها آبخوان منطقه، بلکه مخزن سد نیز قادر به تأمین نیازها، حتی در شرایط ترسالی نیست. چنان‌که حتی در شرایط ترسالی آبخوان و مخزن سد رودبال تنها قادر به تأمین ۱۱۰ میلیون مترمکعب آب هستند، در حالی‌که نیازهای پایین‌دست، ۱۵۰ میلیون مترمکعب است. بنابراین، اقداماتی نظیر عدم کاشت، اصلاح الگوی کشت، تغییر شیوه‌ی آبیاری و اقداماتی از این دست برای احیای آب زیرزمینی و فرونپاشیدن اقتصادان کشاورزی منطقه پایین‌دست سد رودبال حیاتی است. برای تحقیقات آتی می‌توان از روش‌های مختلف چانه‌زنی و گزینش اجتماعی مختلف برای پیدا کردن بهترین راه‌حل ممکن از بین مجموعه جواب‌ها استفاده کرد و با استفاده از روشی مناسب، بهترین روش را بر حسب نظر ذی‌نفعان مختلف برگزید.

تشکر و قدردانی

اطلاعات پایه برای بررسی جامع ارائه راهکارهای مناسب و موثر به منظور بهره‌برداری بهینه تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی در دشت داراب با هدف تقویت منابع آب زیرزمینی در محدوده سد رودبال (با لحاظ سد و ورودی آن) تا قبل از سد خسویه، از سازمان آب منطقه‌ای فارس اخذ شده است. بدین وسیله از کلیه کارشناسان و دست‌اندرکاران سازمان آب منطقه‌ای فارس بویژه بخش‌های منابع آب زیرزمینی و سد رودبال داراب قدردانی و تشکر می‌گردد. این پروژه تحقیقاتی با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس تحت قرارداد شماره ۴۰۰/۳۲۱۲۸ مورخ ۱۳۹۳/۰۴/۲۲ به انجام رسیده است.

technology center, Indian agricultural research institute, New Dehli-110012.

and groundwater resources. *Water International*, IWRA 32(1): 163-176.

11) Karimi A. and Ardakanian R., 2011. Development of a long-term water allocation model for agriculture and industry demands. *Water Resources Management*, Springer 24: 1717-1746.

12) Maddock T., 1974. The operation of a stream-aquifer system under stochastic demands. *Journal of Water Resources Research* 10(1): 1-10.

13) McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth conference on applied climatology. American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, 179-186

14) Rafipour-Langeroudi M. Kerachian M., Bazargan-Lari M.R., 2014. Developing operating rules for conjunctive use of surface and groundwater considering the water quality issues. *Journal of Civil Engineering*, 18(2): 454-461.

15) Romero C, 2001. Extended lexicographic goal programming: a unifying approach. *Omega* (29): 63–71.

16) Saadatpour M., Afshar A., Edinger JE., 2017. Meta-model assisted 2D hydrodynamic and thermal simulation model (CE-QUAL-W2) in deriving optimal reservoir operational strategy in selective withdrawal scheme. *Water Resource Management* 31(9): 2729–2744.

17) Safavi, H.R., Darzi, F. and Marino, M.A., 2010. Simulation-optimization modeling of conjunctive use of surface water and groundwater. *Water Resource Management* 24: 1968-1988.

18) Sheikhmohammady M. and Madani K., 2008. Bargaining over the Caspian sea-the largest lake on the earth, world environmental and water resources congress. ASCE, Honolulu, HI.

19) Shukla, S. and Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters* 35(2).

20) Singh D.K., 2002. Conjunctive use of surface and groundwater. *Water*

