



Management and Conjunctive Use of Surface and Ground Water Resources Using Scenario Development Technique, Case study: Dasht-Afzar in Fars Province

S. Sepehrifar¹, M.H. Golmohammadi²,
and H.R. Safavi^{3*}

Abstract

Nowadays, population growth and increasing the level of social welfare have led to increased and unpredictable demand for water resources that may disrupt the water resources availability. Therefore, conjunctive use based on the scenario planning method can increase the reliability of the water resources utilization in the presence of uncertainties. In this study, the outputs of three atmospheric-ocean general circulation models have been used to assess climate change effects on the Dasht-Afzar of Fars province. In this regard, the LARS-WG model has been applied to downscaling climate models under RCP4.5 scenario. Then to select the best scenario for groundwater resources reclamation, the WEAP model has been used to simulate possible and probable integrated management scenarios for the next 5 years. These scenarios were; 1) Continuation of the current condition, 2) Development of irrigation network, 3) Construction of artificial nutrition ponds, 4) Water transfer from Salman Farsi dam to neighboring cities, 5) Consumption management, 6) Construction of Kavar dam upstream Salman Farsi dam, and 7) Simultaneous implementation of scenarios 2 to 4 in the consumption management scenario conditions. Performance criteria as well as fuzzy sustainability index were employed to evaluate each scenario's outputs. The results indicated that climate change could not be considered as the main factor in the downward trend of groundwater level. Also, the only scenario that can stop that trend is a 35% reduction in agricultural consumption. In the consumption management scenario, the construction of the Kavar dam will be allowed to store a maximum of 30% of the average flow rate to the Salman dam. Because otherwise, the resource management problems and costs related to the Salman Farsi dam will be increased.

Keywords: Conjunctive Use, Scenario Development, WEAP Model, Uncertainty, Climate Change.

Received: May 4, 2021

Accepted: July 26, 2021

مدیریت و بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از تکنیک سناریونگاری، مطالعه موردی: دشت‌افزر - استان فارس

سعید سپهری فر^۱، محمدحسین گل محمدی^۲
و حمیدرضا صفوی^{۳*}

چکیده

امروزه رشد جمعیت و همچنین افزایش سطح رفاه اجتماعی موجب افزایش تقاضاهای مختلف و غیرقابل پیش‌بینی از منابع آب شده که ممکن است سبب اختلال در موجودیت منابع آبی شود؛ از این رو بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از روش سناریونگاری می‌تواند اطمینان‌پذیری استفاده از منابع آب را در شرایط وجود عدم قطعیت‌ها افزایش دهد. در این تحقیق از خروجی‌های سه مدل گردش عمومی جو- اقیانوس و ریزمقیاس‌سازی آن توسط مدل LARS-WG تحت سناریوهای RCP4.5 برای بررسی تغییرات آب و هوایی محدوده مطالعاتی دشت‌افزر در استان فارس استفاده شده و در نهایت با استفاده از مدل WEAP سناریوهای ممکن و محتمل مدیریت تلفیقی برای آینده ۵ ساله شبیه‌سازی شده است؛ تا بهترین سناریو جهت احیای منابع آب زیرزمینی انتخاب شود. این سناریوها شامل: ۱- ادامه روند موجود؛ ۲- توسعه شبکه آبیاری؛ ۳- احداث حوضچه‌های تغذیه مصنوعی؛ ۴- انتقال آب به شهرهای مجاور از سد سلمان فارسی؛ ۵- اجرای هم‌زمان سناریوهای ۲ تا ۴؛ ۶- مدیریت مصرف و ۷- احداث سد کوار در بالادست سد سلمان فارسی در شرایط سناریو مدیریت مصرف می‌باشد. خروجی هر یک از این سناریوها با استفاده از معیارهای عملکرد و شاخص پایداری فازی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج نشان داد که نمی‌توان تغییر اقلیم را به عنوان عامل اصلی روند نزولی سطح آب زیرزمینی دانست؛ همچنین از بین سناریوهای فوق، تنها سناریویی که می‌تواند باعث توقف روند نزولی سطح آب زیرزمینی شود، کاهش ۳۵ درصدی در مصرف کشاورزی می‌باشد. احداث سد کوار در شرایط سناریوی مدیریت مصرف، مجاز خواهد بود حداکثر ۳۰ درصد دبی متوسط ورودی از این نقطه به سد سلمان را در خود ذخیره کند؛ چرا که در غیر این صورت مشکلات مدیریت منابع و مصارف مربوط به سد سلمان فارسی، دوچندان خواهد شد.

کلمات کلیدی: بهره‌برداری تلفیقی، سناریونگاری، WEAP، عدم قطعیت، تغییر اقلیم.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۴

1- M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: saeid.ab91@gmail.com.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: m.golmohammadi@iut.ac.ir

3- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: hasafavi@iut.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.2.8.1](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.2.8.1)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

براساس برنامه‌ریزی کسری (FP)^۱ ارائه دادند. این مدل، آب‌های زیرزمینی و یک مدل هیدرولیکی را به هم متصل می‌کند. هدف از این مدل‌سازی به حداکثر رساندن خروج آب‌های زیرزمینی و در عین حال به حداقل رساندن کاهش ذخیره مخزن بود. محدودیت‌های مدل، تقاضای آب و تراز سطح آب زیرزمینی را شامل می‌گردد. اولین ارزیابی جامع از پیشرفت مدیریت تلفیقی آب در مقیاس قاره‌ای در سراسر ایالات و سرزمین‌های استرالیا توسط Ross (2018) انجام شد و رویکردی جدید برای غلبه بر موانع استفاده تلفیقی ارائه گردید. نتایج تحقیقات نشان داد که سیاست‌های جاری به‌طور مؤثر برای ذخیره آب سطحی و ذخیره و بازیابی سفره آب زیرزمینی در برخی حوضه‌ها برحسب برنامه صورت نمی‌گیرد. الگوی جدید برای مدیریت تلفیقی آب، مستلزم توجه سیستماتیک به یکپارچه‌سازی مفید منابع آب زیرزمینی و سطحی و دیگر منابع آب در طرح‌های آبی است. او نتیجه گرفت که برنامه‌ریزی برحسب مدیریت تلفیقی آب می‌تواند توسط شبکه‌ها شامل عوامل تغییر، سازمان‌های مرتبط و نهادهای مدیریت آب که توسط دولت‌ها حمایت می‌شود، ارتقاء یابد. Sepahvand et al. (2019) تحقیقی به منظور مدیریت تلفیقی آب مصرفی جهت رسیدن به دو هدف اصلی انجام دادند که شامل: (۱) کمینه‌کردن کمبود آب برای تقاضای آب آشامیدنی و (۲) حداکثر کردن سود حاصل از کشاورزی با استفاده از منابع آب زیرزمینی بود. برای پاسخگویی به این اهداف، ابتدا روش برنامه‌نویسی ژنتیکی (GP)^۲ برای شبیه‌سازی تعاملات آب سطحی و زیرزمینی استفاده شد. سپس، مدل شبیه‌سازی به الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA)^۳ به عنوان مدل بهینه‌سازی، با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی، مرتبط شد. به‌منظور بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی مختلف بر تخصیص بهینه آب و ارائه یک الگوی کشت مناسب برای هر دوره آب و هوایی، سه شرایط برنامه‌ریزی (مرطوب، نرمال و خشک)، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، نتایج اقتصادی حاصل از این مطالعه بدست آمد. هر کدام از پژوهشگران برای اهداف مختلف روش بهره‌برداری تلفیقی را به کار برده‌اند که این موضوع بیانگر اهمیت نگرش یکپارچه به منابع آبی است. در صورتی که طراحی و ساخت استراتژی‌های مدیریت قوی یا سیاست‌هایی برای دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی، شامل کاهش تنش آبی، بهبود کیفیت آب، حفظ اکوسیستم یک منطقه و مانند آن، از طریق سناریونگاری امکان‌پذیر است، ولی تاکنون از روش سناریونگاری استفاده زیادی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی نشده است (Dong et al., 2013). استفاده از نرم‌افزارهای مناسب در راستای مدیریت جامع منابع آب یکی از دغدغه‌ها و چالش‌های محققان در راستای مدل‌سازی مناسب است. یکی از نرم‌افزارهایی که در بین نرم‌افزارهای موجود به جهت کارایی بهتر مورد اقبال بیشتری قرار گرفته نرم‌افزار WEAP است که یک

تغییرات سریع و اغلب غیرقابل پیش‌بینی باعث می‌شود تا امروزه تصمیم‌گیری‌ها در شرایط نامطمئن و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، صورت گیرد. برای درک بهتر این شرایط، لازم است تا کارشناسان، مدیران و برنامه‌ریزان، تمام بخش‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاسی را در تصمیم‌گیری خود لحاظ کنند؛ مدیران منابع آب نیز از این قاعده مستثنی نیستند؛ چرا که تغییر اقلیم (دما، بارش، تبخیر)، تغییر در سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی (رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییرات کاربری آب و اراضی) و همچنین تغییر در سیستم‌های مدیریتی (تخصیص آب، استانداردهای قانونی و مداخلات سیاسی) به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر روی وضعیت منابع آبی تأثیر می‌گذارند (Dong et al., 2013). بنابراین وجود این عدم اطمینان در تخصیص و توسعه سیستم‌های آبی در آینده، باعث توسعه سناریوهای منابع آب می‌شود. از این رو بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از تکنیک سناریونگاری می‌تواند جنبه‌های مختلف استفاده از منابع آب برای رفع نیازهای آبی حوضه را مورد بررسی قرار دهد. تا سال ۱۹۵۰ منابع آب سطحی و زیرزمینی به عنوان منابع جداگانه و غیرمرتبط با یکدیگر در نظر گرفته می‌شدند. اما به مرور زمان اثرات نامطلوب این موضوع آشکار شده و مفهوم استفاده تلفیقی از منابع آب ابتدا توسط Burt (1964)، معرفی شد. ایشان پیشنهاد کردند که آب‌های سطحی و زیرزمینی باید دو عنصر مربوط به یک سیستم یکپارچه آب در نظر گرفته شوند. پس از آن با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات مختلفی درباره مدیریت و بهره‌برداری تلفیقی صورت گرفته شده است. اولین کسانی که مدل پارامتر گسترده بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از یک سیستم رودخانه - آبخوان را ارائه دادند Young and Bredehoeft (1972) بودند که برای رسیدن به حل بهینه از روش شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده کردند. در مدل آن‌ها اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی در حالی بررسی شد که برداشت از رودخانه، کانال‌های آبیاری و پمپاژ از آب زیرزمینی به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد. Safavi and Bahreini (2009) مدل شبیه‌سازی تعامل بین آب‌های سطحی و زیرزمینی در دشت نجف‌آباد را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در وضعیت زمین‌شناسی توسعه دادند. در مدل آن‌ها، جریان آب زیرزمینی و تعامل بین آب زیرزمینی و سطحی در شرایط جریان‌های پایدار و ناپایدار توسط مدل ModFlow شبیه‌سازی شد. همچنین از روش مونت کارلو در آنالیز عدم قطعیت استفاده شد. نتایج مدل نشان داد که جریان برگشتی از زمین‌های کشاورزی به آبخوان و نشت از رودخانه زاینده‌رود سهم قابل توجهی در بیلان آبی منطقه دارد. (Mani et al. 2016) برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از مخازن و پمپاژ آب زیرزمینی، یک مدل مدیریتی

و در ارتفاعات ۲۰/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نزولات آسمانی به صورت بارش باران اتفاق می‌افتد که به طور متوسط سالانه ۳۳۴/۶ میلی‌متر می‌باشد. این محدوده به لحاظ تولید محصولات کشاورزی شامل نخیلات و مرکبات، از جایگاه ویژه‌ای در کشور برخوردار است (Parab Fars Consulting Engineering Company, 2015).

۲-۱- منابع آب زیرزمینی

مهم‌ترین منابع آب زیرزمینی موجود در این محدوده یک آبخوان آبرفتی با ضریب ذخیره ۵ درصد و ظرفیت ذخیره سازی (دینامیک و استاتیک) ۵۳۳/۹ میلیون مترمکعب آب می‌باشد. در این محدوده تعداد کل چاه‌های بهره‌برداری ۸۹۲ حلقه می‌باشد که با کسر تعداد چاه‌های متروکه و فاقد آبدهی می‌توان گفت تعداد چاه‌های فعال در سطح محدوده ۶۵۲ حلقه و سایر منابع شامل ۱۶ رشته قنات و ۱۰ دهنه چشمه می‌باشد که عمدتاً از این منابع برای مصارف شرب و کشاورزی استفاده می‌شود. با استفاده از ۱۵ چاه پیزومتری موجود در این محدوده، وضعیت ذخیره آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Parab Fars Consulting Engineering Company, 2015).

۲-۲- منابع آب سطحی

عمده منابع آب سطحی این مناطق از بارندگی که در طول سال اتفاق می‌افتد ناشی می‌شود و همچنین شامل مسیل‌هایی است که از محدوده‌های مجاور، زهکشی بارندگی خود را در رودخانه عبوری از این محدوده تخلیه می‌کند. از بین منابع سطحی موجود، سد سلمان فارسی مهم‌ترین منبع سطحی به حساب می‌آید؛ که بر روی رودخانه قره‌آقاج احداث شده است؛ این سد حدود ۱/۴ میلیارد مترمکعب ظرفیت ذخیره‌سازی دارد. رودخانه قره‌آقاج که یک رودخانه دائمی است، پس از عبور از محل احداث سد سلمان فارسی وارد دشت‌های قیر، کارزین، علی‌آباد، شرف‌خلیل (افزر) و بخشی از دشت لاغر می‌گردد. جریان ورودی به محدوده دشت افزر از محدوده قیروکارزین می‌باشد که به طور متوسط سالانه حدود ۱۷ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. در جدول ۱ ضریب رواناب مربوط به سایر محدوده‌های مطالعاتی این تحقیق مشخص شده است (Parab Fars Consulting Engineering Company, 2015).

۲-۳- مصارف آب

در محدوده دشت افزر تعداد ۴ سردهنه و نهر با حجم مصرف ۲/۰۸۹ میلیون مترمکعب و ۱۸ حلقه موتور پمپ حاشیه رودخانه با حجم مصرف ۰/۶۹۸ میلیون مترمکعب جهت کشاورزی وجود دارد.

نرم‌افزار کاربر پسند می‌باشد که با رویکردی یکپارچه، به مدل‌سازی در برنامه‌ریزی منابع آب می‌پردازد (Golmohammadi, 2015). تحقیقات فراوانی با این نرم‌افزار در حوضه‌های آبریز با شرایط مختلف در راستای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب انجام شده است (Yates et al., 2005; Safavi et al., 2016; Schneider et al., 2019). باتوجه به توانایی‌های مدل WEAP، در این تحقیق با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی با استفاده از سه مدل گردش عمومی جو- اقیانوس که مربوط به گزارش پنجم (IPCC) منتشر شده در سال ۲۰۱۴ می‌باشد، به‌طور گسترده به توسعه سناریوهای ممکن و محتمل بهره‌برداری تلفیقی منابع آب موجود در محدوده مورد مطالعه دشت افزر واقع در استان فارس پرداخته شده است. با رشد جمعیت و تغییر سریع در سبک زندگی مردم، دیگر استفاده از یک روش و برنامه ثابت نمی‌تواند جوابگوی نیازهای مردم باشد، لذا مدیران و تصمیم‌گیران بخش‌های مختلف جامعه می‌بایست خود را برای یک آینده چندگانه آماده کنند که سناریونگاری می‌تواند آینده چندگانه‌ای را پیش روی مدیران و تصمیم‌گیران قرار دهد تا بر اساس آن از عواقب تصمیم خود پیش از اجرایی شدن مطلع شوند. از آنجایی که بر اساس مرور تحقیقات گذشته تا کنون به طور جامع در سطح کشور به این مهم پرداخته نشده و همچنین در سطح محدوده مورد مطالعه نیز چنین تحقیقی صورت نگرفته است، لذا از این رو می‌توان سناریونگاری و ترکیبی از سناریوهای ارائه شده برای این محدوده را به عنوان نوآوری این تحقیق در نظر گرفت. تا بر این اساس مدیران و تصمیم‌گیران منابع آبی در محدوده مورد مطالعه دشت افزر با داشتن دید کافی از وضعیت منابع آب این محدوده بر اساس سناریوهای مختلف، آینده چندگانه‌ای را متصور شده و تصمیمات را با دید روشن‌تری بگیرند. در نهایت نتایج حاصل از هریک از این سناریوها با استفاده از معیارهای عملکرد و شاخص پایداری فازی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

۲-۴- مطالعه موردی

دشت افزر بین طول شرقی ۵۲ درجه و ۴۱ دقیقه الی ۵۳ درجه و ۱۱ دقیقه و عرض شمالی ۲۸ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۳۶ دقیقه می‌باشد و در حوضه آبریز مند واقع شده است. این محدوده که مساحتی حدود ۷۷۲/۹ کیلومتر مربع دارد، از شمال و شمال غرب به محدوده مطالعاتی دهرم، از شمال شرق و شرق به محدوده قیروکارزین، از جنوب شرق با محدوده مطالعاتی سیف‌آبادلاغر، از جنوب و جنوب غرب به محدوده دژگاه- کورده و از غرب به محدوده مطالعاتی هنگام منتهی می‌شود. وسعت ارتفاعات ۶۱۹/۹ و مساحت دشت ۱۵۳ کیلومترمربع می‌باشد. حداکثر ارتفاعات برابر ۲۲۳۸ متر و حداقل ارتفاع آن ۶۱۶ متر است. متوسط دمای سالانه در نواحی دشت ۲۳/۳ درجه سانتی‌گراد

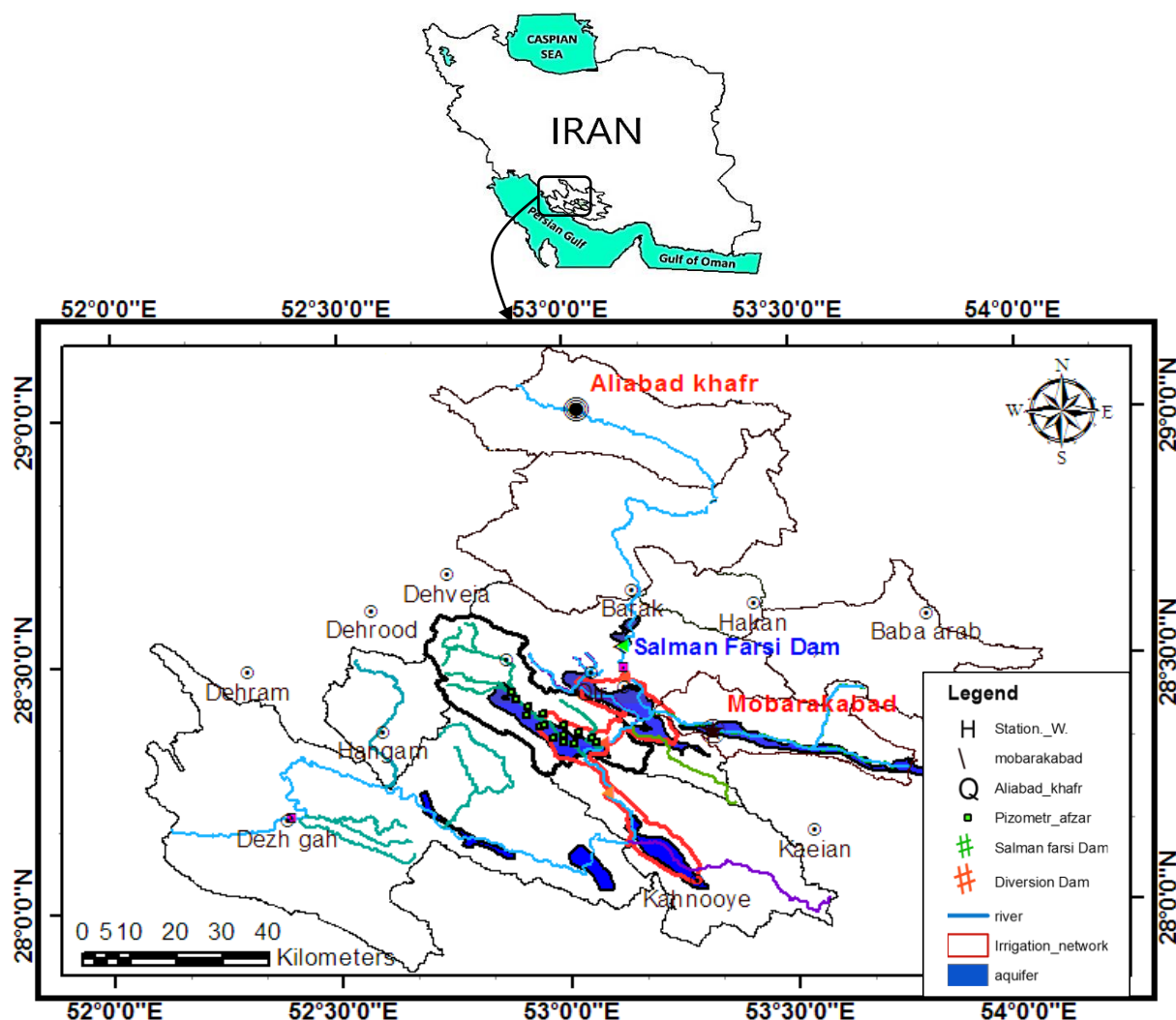


Fig. 1- Dasht-Afzar sub-basin and its specifications and location in Iran
 شکل ۱- محدوده مطالعاتی دشت افزر و موقعیت آن در ایران و مشخصات کلی آن

سال ۸۸ شروع به بهره‌برداری شده است، در منطقه تنگ کارزین می‌باشد؛ که از آن جهت برداشت برای تصفیه‌خانه آب شرب واقع در تنگ کارزین، اراضی دشت قیر، علی‌آباد و کارزین استفاده می‌شود. سد انحرافی بعدی که در مسیر رودخانه احداث گردیده است واقع در ورودی دشت افزر می‌باشد که برای انحراف آب به شبکه آبیاری دشت افزر ساخته شده است. از آنجایی که شبکه آبیاری دشت‌افزر هنوز احداث نشده است، برداشت‌های غیرمجاز با استفاده از تعداد زیادی از پمپ‌های شناسایی شده توسط اداره آبیاری شهرستان قیروکارزین جهت مصارف کشاورزی صورت می‌گیرد که این موضوع عدم‌قطعیت در برداشت از رودخانه را افزایش می‌دهد. بند انحرافی بعدی که واقع در دشت سیف‌آباد لاغر می‌باشد برای تخصیص آب به ۳۲ کیلومتر از شبکه آبیاری سمت چپ رودخانه احداث شده است که در حال حاضر ۲۴ کیلومتر آن تکمیل گردیده و عملیات ساخت و ساز ادامه پروژه متوقف

Table 1- Runoff coefficients
 جدول ۱- ضرایب رواناب

Name area	Runoff coefficient
Qirokarzin	3.94
Afzar	6.46
Seifabad- Laghar	6.4
kordeh- Dezhgah	8.25
Hangam	9.98
Mobarakabad Barus	8.93

برای تنظیم تراز آب جهت تخصیص به مصارف از سد سلمان فارسی، سه سازه بند انحرافی در پایاب سد احداث گردیده است. آب رهاسازی شده از سد سلمان فارسی، بعد از طی کردن حدود ۹ کیلومتر در مسیر رودخانه به بند انحرافی قیر می‌رسد. محل احداث بند انحرافی قیر که

۴- آب برگشتی از مصارف شرب و کشاورزی به آب زیرزمینی به ترتیب ۷۰ و ۲۵ درصد در نظر گرفته شده است؛
 ۵- آب نفوذی مربوط به هر ماه از سال، در همان ماه به سفره زیرزمینی می‌رسد.

۳-۱- مطالعات تغییر اقلیم

پیش‌بینی اقلیم آینده به مدل‌های عددی کامپیوتری متکی است؛ که امروزه معتبرترین ابزار برای این کار، مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوس (AOGCM)^۵ می‌باشند. این مدل‌ها توسط مؤسسه‌ای به نام هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) توسعه داده شده است. بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا تغییر اقلیم را با استفاده از فقط یک مدل پیشنهاد شده توسط IPCC پیش‌بینی کنند؛ که همواره عدم قطعیت را در پی داشته است. از آنجایی که این مدل‌ها پارامترهای مختلفی را پیش‌بینی می‌کنند؛ بنابراین استفاده از یک مدل به تنهایی نمی‌تواند تخمین خوبی از پارامترهای اقلیمی داشته باشد؛ بنابراین با استفاده از ترکیب مدل‌ها می‌توان این عدم قطعیت را کاهش داد. هیچ توصیه جامعی برای اینکه چه مدل‌هایی برای کدام مناطق دنیا مناسب هستند، وجود ندارد. بنابراین در این تحقیق با بررسی میانگین ماهانه داده‌های دوره تاریخی مربوط به مدل‌های اقلیمی و مقایسه آن با داده‌های ایستگاه زمینی در دوره مشابه با دوره مدل، سه مدل مناسب مربوط به گزارش پنجم IPCC برای بررسی تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد که مشخصات آن در جدول زیر آورده شده است.

شده است. در این مناطق عمده فعالیت‌های مردم در بخش کشاورزی است و هیچگونه صنعتی در این منطقه وجود ندارد. نیاز آبی محصولات کشاورزی از آب‌های سطحی و زیرزمینی تأمین می‌گردد. نیاز شرب که در اولویت اول تأمین نیاز آبی است، به طور کامل از آب زیرزمینی منطقه تأمین می‌شود و فقط نیاز شرب شهر لار که در خارج از محدوده مورد مطالعه می‌باشد، با آب رودخانه از محل سد انحرافی قیر تأمین می‌شود (Parab Fars Consulting Engineering Company,) (2015).

۳- روش تحقیق

شکل ۲ روندنمای تحقیق را به طور کلی نشان می‌دهد که در ادامه به ارائه توضیحات در هر بخش از آن پرداخته شده است. فرضیات به کار رفته در این تحقیق عبارتند از:
 ۱- مقدار خروجی از آبخوان (چاه- چشمه- قنات) و مقادیر تخصیص به نیاز شرب و کشاورزی براساس اطلاعات آماربرداری سراسری سال ۸۸ ثابت در نظر گرفته شده است؛
 ۲- مقدار تخصیص از سد سلمان فارسی به اراضی پایین دست، براساس مساحت توسعه شبکه آبیاری منطقه صورت گرفته شده است؛
 ۳- ضخامت اشباع آبخوان دشت افزر از سنگ کف تا سطح زمین در نظر گرفته شده است؛

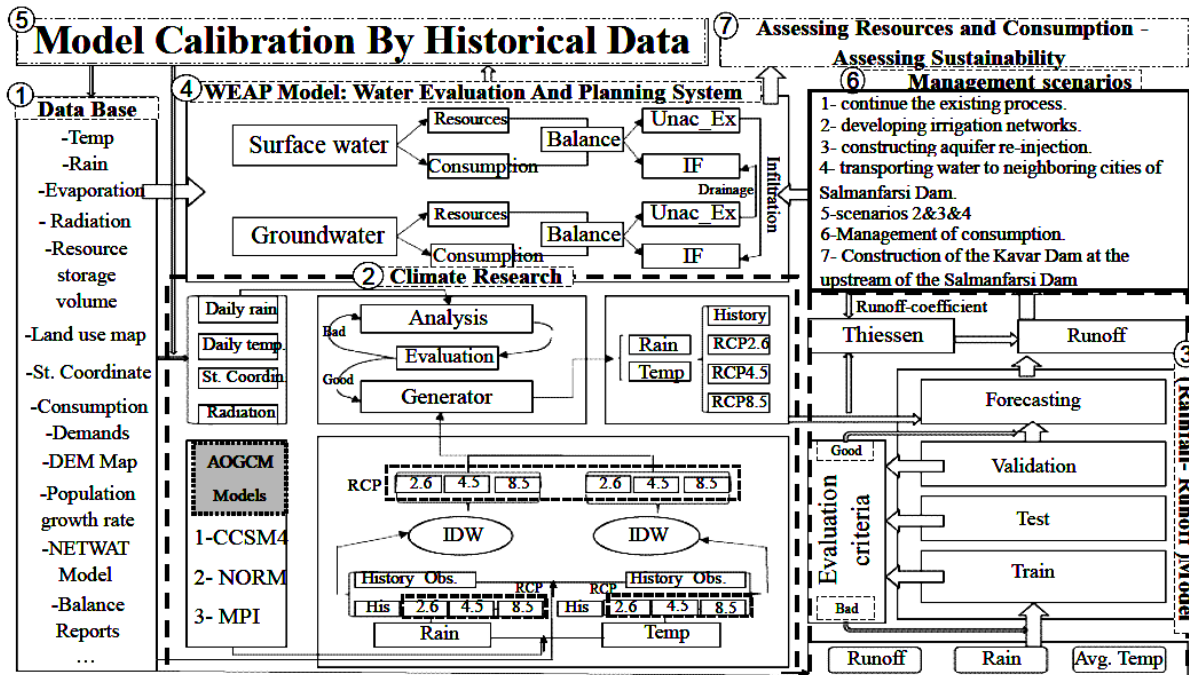


Fig. 2- Research flow chart

شکل ۲- فلوچارت تحقیق

Table 2- Specifications of climate change models used in this research (Pal and Eltahir, 2016)
جدول ۲- مشخصات مدل‌های تغییر اقلیم به کار رفته در این تحقیق (Pal and Eltahir, 2016)

Name of model	Resolution (km*km)	Abbreviation name	Institution/Country
CCSM4	288*192	National Center for Atmospheric Research (NCAR),	USA
NorESM1 – M	144*96	Norwegian Climate Centre,	Norway
MPI – ESM – M	192*96	Max Planck Institute for Meteorology (MPI21 MPI- M),	Germany

همبستگی بالا در بارندگی با سایر ایستگاه‌های موجود در منطقه استفاده شد.

۳-۳- مدل بارش- رواناب

با توجه به اینکه در این تحقیق به بررسی سناریوهای منابع و مصارف آینده ۵ ساله از مهرماه ۱۴۰۱ پرداخته می‌شود و از آنجایی که در آینده نزدیک تفاوتی در میزان پیش‌یابی بارش و دما در سناریوهای مختلف وجود ندارد، لذا در این مطالعه سناریو RCP4.5 به عنوان سناریو میانه در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور برآورد میزان رواناب حاصل از پارامترهای سناریو اقلیمی RCP4.5 از دو روش استفاده شد که عبارتند از:

- ۱- مدل شبکه عصبی مصنوعی
- ۲- روش تیسن‌بندی و اعمال ضریب رواناب

برای برآورد میزان رواناب ورودی به سد سلمان‌فارسی، از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. تابع fitnet روش MLP^۲ جهت آموزش و تست شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. آموزش و تست براساس ۳۵ سال داده ماهانه بارش ایستگاه علی‌آباد خفر و دما متوسط ایستگاه بند بهمن انجام شد. از این دو ایستگاه به دلیل نزدیکی بودن به یکدیگر و قرارگیری در حوضه آبریز سد سلمان‌فارسی و داشتن اطلاعات کافی، بدین منظور استفاده شده است. ۷۰ درصد داده‌ها جهت آموزش و ۳۰ درصد برای تست و صحت‌سنجی در نظر گرفته شده است. در این شبکه، بارش ماهانه ایستگاه علی‌آباد خفر و دمای متوسط ایستگاه بند بهمن به‌عنوان ورودی به مدل شبکه عصبی مصنوعی و رواناب ورودی به سد سلمان‌فارسی با کسر مقدار ثبت شده ایستگاه علی‌آباد خفر، پس از نرمال و استانداردسازی با استفاده از رابطه (۱) به‌عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شده است.

$$X_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

در این تحقیق از اطلاعات ثبت شده ایستگاه باران‌سنجی مبارک‌آباد که وابسته به وزارت نیرو می‌باشد، به دلیل نزدیکی به محدوده مورد مطالعه و داشتن اطلاعات کافی به عنوان نماینده مطالعات تغییر اقلیم استفاده شد.

همانطور که در شکل ۲ نیز مشخص است، از روش وزن‌دهی بر اساس معکوس فاصله (IDW)^۶ برای ترکیب سناریوهای اقلیمی استفاده شد که براساس آن، دقت هر یک از مدل‌ها با توجه به توانایی‌اشان در پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی تعیین می‌شود (Zareian et al., 2015). از اطلاعات بارش و دمای روزانه ایستگاه مبارک‌آباد برای دوره ۲۵ ساله از سال ۱۹۸۱ لغایت ۲۰۰۵ برای محاسبه دقت هر یک از مدل‌های اقلیمی استفاده شد به طوری که در ابتدا خطای مطلق هر یک از آن‌ها نسبت به داده‌های ثبت شده این ایستگاه برآورد گردید و سپس وزن هر یک از مدل‌ها در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی به روش IDW محاسبه شده و الگوی تولید اطلاعات بارش و دمای آینده با استفاده از ترکیب سناریوهای انتشار سه مدل فوق ساخته شد. برای مطالعه بیشتر این روش می‌توان به تحقیق Zareian et al. (2015) مراجعه کرد.

۳-۲- مدل ریزمقیاس‌سازی اقلیمی

مشکل عمده‌ای که عدم قطعیت در استفاده از مدل‌های AOGCM را افزایش می‌دهد، بزرگ مقیاس بودن آنهاست. در این تحقیق برای ریزمقیاس‌سازی الگوهای تولید شده حاصل از ترکیب وزنی مدل‌های AOGCM، از مدل LARS-WG استفاده شد. این مدل، یک مولد تولید آب و هوایی است که به صورت تصادفی می‌تواند الگوهای آب و هوایی روزانه شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید و همچنین تبخیر و تعرق پتانسیل را تولید کند (Semenov and Stratonovitch, 2010). برای ریزمقیاس‌سازی نیاز به حداقل ۲۵ الی ۳۰ سال داده روزانه دما، بارش و تشعشع خورشیدی ایستگاه زمینی می‌باشد که بدین منظور از آمار ثبت شده ایستگاه مبارک‌آباد به‌دلیل کامل بودن اطلاعات آن و همچنین دارا بودن ضریب

۳-۴- معیارهای عملکرد سیستم

برای ارزیابی نتایج مدل بر اساس سیاست‌های جایگزین با توجه به اهداف مشخص مدیریت آب، نیاز است از معیارهای عملکرد استفاده شود. پیچیدگی و عدم قطعیت در سیستم‌های آبی، باعث شد تا برای اولین بار (Safavi et al., 2016) به فازی‌سازی معیارهای عملکرد و شاخص پایداری پرداخته و روابط زیر را توسعه دهند. در این تحقیق، چهار معیار عملکردی استفاده شده است که شامل: (۱) قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان (Rel_{time})^۱؛ (۲) قابلیت اطمینان مبتنی بر حجم (Res_{Vol})^۲؛ (۳) انعطاف پذیری یا برگشت پذیری (Res)^۳؛ (۴) آسیب پذیری (Vul)^۴؛ که میانگین هندسی آن‌ها، شاخص پایداری (SI)^۵ را به وجود می‌آورد که بر اساس آن، مقایسه عملکرد و تصمیم‌گیری بین مسائل مختلف مدیریت منابع آب آسان‌تر صورت می‌گیرد رابطه شاخص پایداری برای اولین بار توسط Loucks Sandoval-Solis et al. (1997) توسعه داده شد و بعدها توسط (2011) اصلاح گردید. در موارد ذکر شده فوق، قابلیت اطمینان، برابر مقدار احتمالی است که آب تخصیص یافته به یک مصرف‌کننده، نیاز آن را تأمین کند که در این تحقیق هم از لحاظ حجم و هم از لحاظ زمان مورد بررسی قرار گرفته است. برگشت پذیری، احتمال بازگشت سیستم به حالت مطلوب پس از یک دوره شکست را مشخص کرده و آسیب پذیری نیز میزان بزرگی شکست را نشان می‌دهد (Safavi et al., 2016; Lane et al., 2015):

$$\% \text{Rel}_{\text{time}}^j = \frac{\sum_t \mu^j(x_t)}{N} * 100 \quad (۶)$$

$$\% \text{Rel}_{\text{Vol}}^j = \frac{\sum_{t=1}^N \text{supply}_t^j}{\sum_{t=1}^N \text{Demand}_t^j} * 100 \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (۷)$$

$$\% \text{Res}^j = \frac{\sum_t (\mu^j(x_t) - \mu^j(x_{t-1})) | \mu^j(x_t) > \mu^j(x_{t-1})}{\sum_t (1 - \mu^j(x_t))} * 100 \quad (۸)$$

$$\% \text{Vul}^j = \max_t (1 - \mu^j(x_t)) \quad (۹)$$

$$\text{SI}^j = \{ \text{Rel}_{\text{time}}^j * \text{Rel}_{\text{Vol}}^j * \text{Res}^j * (1 - \text{Vul}^j) \}^{1/4} \quad (۱۰)$$

در روابط فوق، $\mu^j(x_t)$ میزان مطلوبیت سیستم در تأمین نیاز مصرف‌کننده زام در گام زمانی t ام، N نشان‌دهنده تعداد کل گام زمانی دوره شبیه‌سازی و $(1 - \mu^j(x_t))$ میزان نامطلوب بودن عملکرد سیستم، Demand حد مطلوب وضعیت منابع و Supply حالت موجود مورد بررسی را نشان می‌دهد.

در این رابطه X_i نشانگر مقدار داده‌های نرمال بین صفر تا یک، x_i مقدار واقعی داده‌ها، x_{\min} نشانگر حداقل مقدار داده‌ها و x_{\max} حداکثر مقدار داده‌ها را نشان می‌دهد (Ghafari and Vafakhah, 2013). سه لایه مخفی برای شبیه‌سازی توسط شبکه عصبی در نظر گرفته شد که لایه اول دارای ۱۵ و لایه دوم و سوم هر کدام دارای ۲۰ نرون می‌باشند. برای لایه‌های مخفی از تابع محرک تانژانت سیگموئیدی و برای لایه خروجی از تابع محرک خطی استفاده شد. نتایج مربوط به مدل‌سازی دوره پایه با ۶۰۰ تکرار و با پنج بار اجرا و میانگین‌گیری از خطاها بدست آمد؛ واحد RMSE به دلیل نرمال و استاندارد شدن داده‌های ورودی به مدل شبکه عصبی، بدون بعد می‌باشد که این مقدار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

در این رابطه، RMSE متوسط ریشه مربع خطا، O_i دبی مشاهداتی، P_i دبی محاسباتی و n بیانگر تعداد داده‌ها می‌باشد (Ghafari and Vafakhah, 2013). از دیگر معیارهای خطای استفاده شده ضریب تعیین R^2 ، نش - ساتکلیف E و شاخص تطابق d می‌باشد که به صورت روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$R^2 = \left(\frac{\text{Cov}(O, P)}{\sigma_P \sigma_O} \right)^2 \quad (۳)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۴)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۵)$$

در روابط فوق O_i مقادیر مشاهداتی و P_i مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل در زمان i ، $\text{Cov}(O, P)$ کواریانس داده‌های مشاهداتی نسبت به داده‌های شبیه‌سازی شده و σ_P و σ_O به ترتیب نشان‌دهنده انحراف معیار استاندارد مجموعه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و \bar{O} نیز نشان‌دهنده میانگین مشاهداتی یا ثبت شده می‌باشد. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و نشانگر میزان همبستگی و واریانس داده‌های مشاهداتی به مقادیر شبیه‌سازی شده است (Legates and McCabe, 1999; Van Liew et al., 2003). مقدار E نشان می‌دهد که چقدر خط برآزش داده شده از مقادیر رسم شده داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مختصات کارترین با خط ۴۵ درجه اختلاف دارد. شاخص تطابق (d) که تناسب بین میانگین مربعات خطا و پتانسیل خطا را ارائه می‌دهد، به‌عنوان یک مقدار استاندارد شده از مرتبه خطای مدل شبیه‌ساز یا پیش‌بینی ارائه گردیده است. عدد یک برای این شاخص، بیانگر تطابق کامل و عدد صفر بیانگر آن است که هیچگونه تطابق بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نمی‌باشد (Willis et al., 1989; Van Liew et al., 2003).

۳-۵- فازی سازی معیارهای عملکرد

همه اطلاعات مربوط به یک مجموعه فازی توسط تابع عضویت آن توصیف می‌شود. تابع عضویت فازی، مقدار فازی بودن یک مجموعه فازی را نشان می‌دهد و معمولاً از حرف μ برای نشان دادن آن استفاده می‌شود. این توابع می‌تواند به شکل‌های مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق از تابع زنگوله‌ای به دلیل لحاظ کردن عدم قطعیت در کل بازه تأمین نیاز نسبت به دیگر توابع عضویت استفاده شد؛ این تابع به صورت زیر تعریف می‌گردد که در آن، x نشان‌دهنده درصد تأمین نیاز می‌باشد (Safavi et al., 2016):

$$\mu(x) = \text{bell}(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (11)$$

با تغییر پارامترهای a ، b و c می‌توان سطوح مختلف رضایت‌مندی را ایجاد نمود. این پارامترها می‌تواند بر اساس نظر کارشناسان خبره نیز تعیین گردد.

۳-۶- مدل برنامه‌ریزی حوضه آبریز دشت افزر

مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (WEAP 21) یک مدل مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) می‌باشد که منابع آب تولید شده از طریق فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبریز را با یک مدل مدیریت منابع آب براساس نیازهای آب و الزامات محیطی ادغام می‌کند. این نرم‌افزار مجموعه‌ای شفاف از ابزار و روش‌هایی را معرفی می‌کند که می‌تواند از طریق رویکرد مبتنی بر سناریو، طیف وسیعی از مسائلی که برنامه‌ریزان منابع آب با آن مواجه هستند را تجزیه و تحلیل کند. مدل WEAP دارای سابقه طولانی در زمینه توسعه و استفاده در عرصه برنامه‌ریزی آب است. (Raskina et al., 1992) اولین بار از این مدل برای مطالعه در دریای آرال استفاده کردند. در این تحقیق کالیبراسیون مدل به صورت دستی انجام گرفت به طوری که مجموعه‌ای از مقادیر ورودی و خروجی ثبت نشده بین ایستگاه‌های هیدرومتری، با در نظر گرفتن مقادیر ثبت شده از برداشت‌ها و جریان‌های ورودی رودخانه‌ها، با استفاده از موازنه جرمی بین ایستگاه‌های هیدرومتری تخمین زده شده (Lane et al., 2015) که براساس رابطه زیر برای هر ماه t محاسبه می‌شود:

$$\Delta S^t = Q_{in}^t - Q_{out}^t + (IF_{(-Unac_{EX})})^t \quad (12)$$

در این رابطه، ΔS موازنه جرمی، Q_{in} دبی ورودی، Q_{out} دبی خروجی و IF و $Unac_{EX}$ به ترتیب مقادیر برداشت به حساب نیامده و مقادیر ورودی ثبت نشده به منابع می‌باشد.

۴- توسعه سناریوها و نتایج

۴-۱- تغییر اقلیم و ریزمقیاس نمایی

خروجی‌های مدل LARS-WG نشان می‌دهد با توجه به اینکه در طی ۲۵ سال آینده دمای مینیمم و ماکزیمم در منطقه افزایش پیدا می‌کند، ولی این افزایش دما قابل ملاحظه نمی‌باشد (شکل‌های ۳ و ۴). همچنین، بررسی تغییرات بارندگی مطابق شکل ۵ نشان‌دهنده این است که تغییر اقلیم در ماه‌های پربارش میزان تغییرات بارندگی را نسبت به دوره پایه در محدوده صفر درصد نشان می‌دهد. این نمودار همچنین تغییرات بارش بالای ۲۰۰ درصد را در ماه‌های تابستان نشان می‌دهد و این بدیهی است؛ زیرا در این منطقه در ماه‌های تابستان بارندگی اتفاق نمی‌افتد بنابراین تغییر در مقدار اندکی بارش باعث تغییر زیاد در درصد بارش خواهد شد. پس می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که تغییر اقلیم نمی‌تواند تأثیر چندانی بر روی وضعیت منابع آبی آینده تا سال ۲۰۳۰ ایجاد کند.

۴-۲- بارش - رواناب

پیش‌بینی رواناب ورودی به سد سلمان فارسی، با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی صورت گرفت. سپس رواناب ایجاد شده در مابقی محدوده‌های مطالعاتی با استفاده از روش تیسن‌بندی در مدل GIS و اعمال ضریب رواناب محاسبه شد؛ زیرا در هیچ یک از این محدوده‌ها ایستگاه هیدرومتری برای ثبت رواناب خروجی وجود ندارد تا بتوان بر اساس اطلاعات آن، از روش شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرد. تیسن‌بندی برحسب موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در منطقه انجام گرفت و مقدار مساحت تحت تأثیر هر کدام از ایستگاه‌ها در هر محدوده مشخص شد و بر همین اساس مقدار بارندگی محدوده‌های مطالعاتی تعیین گردید. سپس با استفاده از ضرایب رواناب جدول ۱، مقادیر رواناب ایجاد شده از هر یک از این محدوده‌ها مشخص شد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی مدل بارش رواناب به صورت جدول ۳ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد شبکه عصبی مصنوعی در حد مطلوب دوره پایه را مدل‌سازی کرده است؛ همچنین نتایج آموزش و تست مدل شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس این شبکه، با در نظر گرفتن بارش و دمای مربوط به RCP4.5 مقدار دبی ورودی به سد سلمان فارسی بدست آمد.

۴-۳- توسعه سناریوها

در این تحقیق براساس نظر کارشناسان آب منطقه‌ای استان فارس و افراد خبره، حجم مطلوب برای سد سلمان فارسی ۴۵۰ میلیون مترمکعب و برای آب زیرزمینی دشت افزر ۲۹۰ میلیون متر مکعب

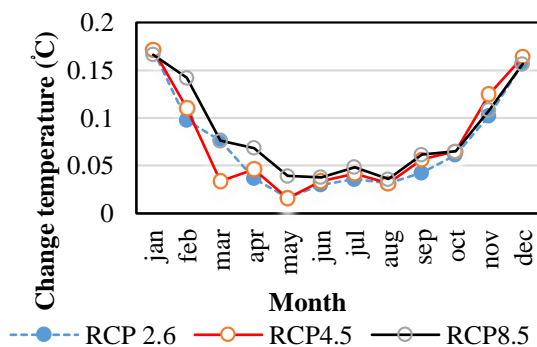


Fig. 4- Minimum temperature changes in the climate scenario

شکل ۴- تغییرات دمای حداقل در سناریو اقلیمی

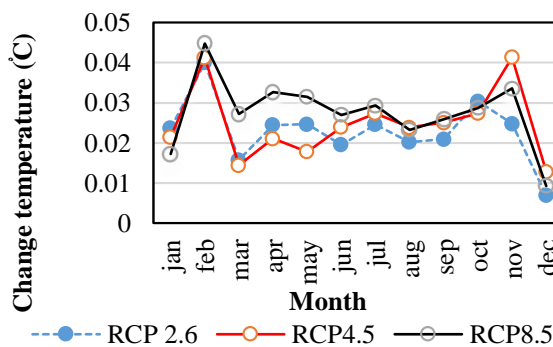


Fig. 3- Maximum temperature changes in the climate scenario

شکل ۳- تغییرات دمای حداکثر در سناریو اقلیمی

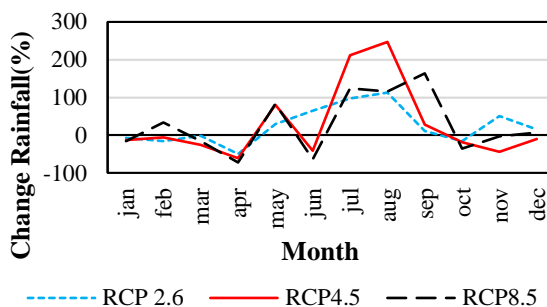


Fig. 5- Precipitation changes in the climate scenario

شکل ۵- تغییرات بارش در سناریو اقلیمی

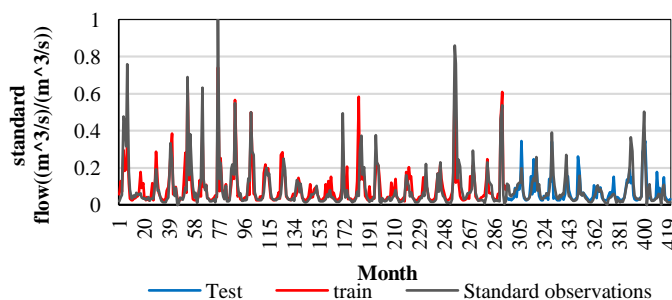


Fig. 6- Training and testing of the Artificial Neural Network

شکل ۶- آموزش و تست شبکه عصبی مصنوعی

Table 3- Evaluation criteria for rainfall-runoff model simulation

جدول ۳- معیارهای ارزیابی شبیه‌سازی مدل بارش- رواناب

	R ²	E	d	RMSE
All	0.65	0.65	0.99	0.07
Train	0.66	0.66	0.99	0.08
Test	0.54	0.52	0.99	0.054

آب منطقه‌ای استان فارس تعریف شده است؛ که به طور خلاصه در جدول ۴ آورده شده است.

سناریوی روند: این سناریو تحت عنوان سناریو ادامه روند موجود می‌باشد که براساس آن تمامی نیازها، نفوذ از آب‌های سطحی به سفره زیرزمینی و زهکشی از آب‌های زیرزمینی به آب‌های سطحی، آب‌های انتقالی، خروجی و برداشت از سفره آب زیرزمینی، برداشت از آب‌های سطحی توسط کانال‌های آبیاری و پمپاژ از حاشیه رودخانه و همچنین

در نظر گرفته شد. تابع زنگوله‌ای $bell(x,30,2,100)$ بر اساس رابطه (۱۱) به عنوان تابع عضویت در برآورد مقدار مطلوبیت تأمین نیازها و حجم‌های منابع در نظر گرفته شد که در این رابطه x به عنوان درصد تأمین مقادیر مطلوب به حساب می‌آید. که بر اساس این ضرایب، نمودار مربوط به این تابع به شکل ۷ می‌باشد.

سناریوهای توسعه یافته در این تحقیق براساس طرح‌های ممکن و محتمل اجرایی در این منطقه و همچنین نظر کارشناسان و خبرگان

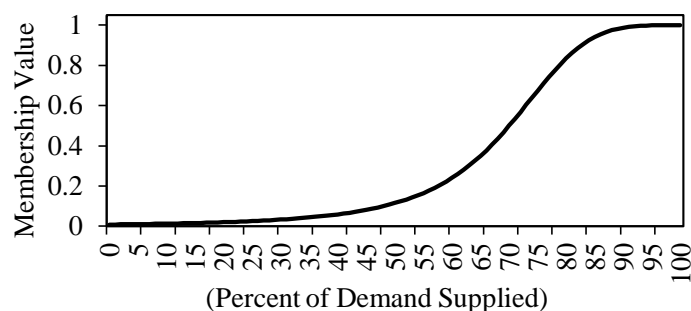


Fig. 7- Desirability function for evaluating water demands and water resources performance

شکل ۷- تابع عضویت زنگوله‌ای برای تعیین عدم قطعیت در وضعیت منابع و مصارف

سناریوی ۶: احداث سد کوار در بالا دست سد سلمان فارسی در شرایط سناریو مدیریت مصرف

رشد جمعیت، رشد تکنولوژی و رفاه اجتماعی همانند روند دوره پایه ادامه می‌یابد.

پس از اعمال فرضیات فوق در مدل برنامه‌ریزی و بررسی خروجی‌های مدل، تحلیل‌ها در دو بخش منابع و مصارف و تأثیر تصمیمات و فرضیات سناریوها انجام شد. نتایج نشان داد تا زمانی که منابع سطحی و زیرزمینی موجود باشد، این منابع می‌تواند نیازهای شرب و کشاورزی را به طور کامل و صد درصد تأمین کند. شکل‌های ۸ و ۹ نشانگر تأمین نیازهای موجود در حوضه در همه سناریوها می‌باشد.

سناریوی ۱: توسعه شبکه آبیاری سد سلمان فارسی به ۳۰ درصد سطح کشت فعلی (شامل دشت قیر، علی‌آباد، کارزین، افزر و سیف‌آباد لاغر)؛ سناریوی ۲: احداث طرح تغذیه مصنوعی در دشت افزر با استفاده از رواناب حاصل از بارش‌ها؛

سناریوی ۳: انتقال ۱۰۰ میلیون متر مکعب آب از سد سلمان فارسی به شهرهای مجاور (قیر و جهرم) و ۱/۱ میلیون متر مکعب به دشت افزر برای تأمین نیاز شرب؛

همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است، نتایج سناریوهای روند تا سناریوی ۴ نشان می‌دهد با توجه به اینکه هر یک از سناریوها به نحوی وضعیت آبخوان را نسبت به سناریو ادامه روند موجود بهبود می‌بخشد

سناریوی ۴: اجرای هم‌زمان سناریوهای ۱، ۲ و ۳؛ سناریوی ۵: سناریو مدیریت مصرف (کاهش ۳۵ درصدی مصرف کشاورزی دشت افزر)؛

Table 4- Scenarios and their assumptions

جدول ۴- سناریوها و فرضیات آنها

Scenarios	Scenario Description	Assumption
Baseline Scenario	Continue the existing policies	1. water demand trend same as current 2. Infiltration and use of surface water and groundwater as before 3. Drainage from groundwater to surface water as before 4. Water transfer as before
Scenario_1	Developing irrigation networks	1. Return flow to the aquifer is about 25%
Scenario_2	Constructing aquifer artificial recharge	1. Artificial recharge is done using rainwater 2. The storage capacity of the pond is 830000 cubic meters 3. The penetration rate into the aquifer is 3.895 cubic meters per day.
Scenario_3	Water transfer to neighboring cities of Salmanfarsi Dam	1. Recharge to the aquifer is about 70%
Scenario_4	Developing the irrigation networks; transferring water from Salman Dam and Aquifer artificial recharge	
Scenario_5	Management of consumption	1. Reducing the agricultural water use in Dasht-Afzar (plain) by 35%
Scenario_6	Construction of the Kavar Dam at the upstream of the Salmanfarsi Dam	1. In condition to consumption management scenario

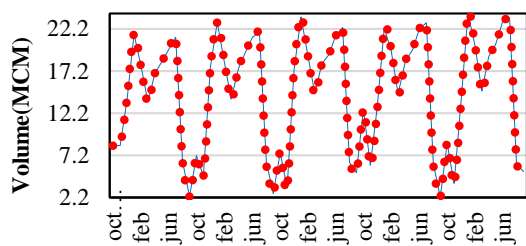


Fig. 9- Agriculture demand and demand supply for baseline scenario to scenario 4

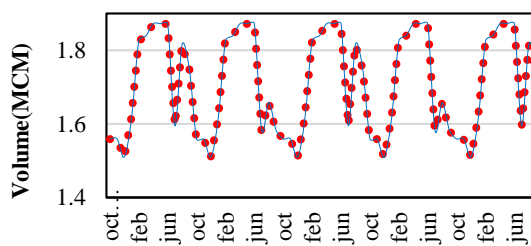


Fig. 8- Municipal demand and demand supply for baseline scenario to scenario 4

شکل ۸- نیاز و تأمین نیاز شرب سناریوهای روند تا سناریوی ۴ شکل ۹- نیاز و تأمین نیاز کشاورزی سناریوهای روند تا سناریوی ۴

Table 5- Performance criteria and consumption sustainability index for baseline scenario to scenario 4

جدول ۵- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری مصارف در سناریوهای روند تا سناریوی ۴

	Agriculture	Municipal
Reliability in time (%)	100	100
Reliability in Volume (%)	100	100
Resilience (%)	100	100
Vulnerability (%)	0	0
Sustainability Index (%)	100	100

برای آبخوان اتفاق بیافتد. در سناریوی ۴ می‌باشد. که پایداری ۱۹/۷۳ درصد و به ترتیب اطمینان‌پذیری در زمان و حجم ۳۶/۰۹ و ۶۵/۱۳ درصد را در پی خواهد داشت و بدترین حالت مربوط به سناریو ادامه روند با شاخص پایداری ۱۲/۹۹ درصد می‌باشد.

معیارهای عملکرد و شاخص پایداری برای وضعیت سد سلمان فارسی برای سناریوها ادامه روند موجود و سناریوهای ۱ تا ۴ نیز مورد بررسی قرار گرفت.

ولی هیچ یک نمی‌تواند باعث توقف روند افت سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت افزر شود. در این شکل با توجه به اینکه در سناریوهای تعریف شده مقادیر نیازها و به تبع آن مصارف از منابع در طول دوره شبیه‌سازی مقداری ثابت نبوده بلکه نرخ رشد ثابتی دارد؛ لذا از این رو در انتهای دوره سناریونگاری بر اساس این روندها مقادیر از هم فاصله گرفته و نمودار واگرا می‌شود.

جدول ۶ معیارهای عملکرد و شاخص پایداری مربوط به این سناریوها را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد بهترین وضعیتی که می‌تواند

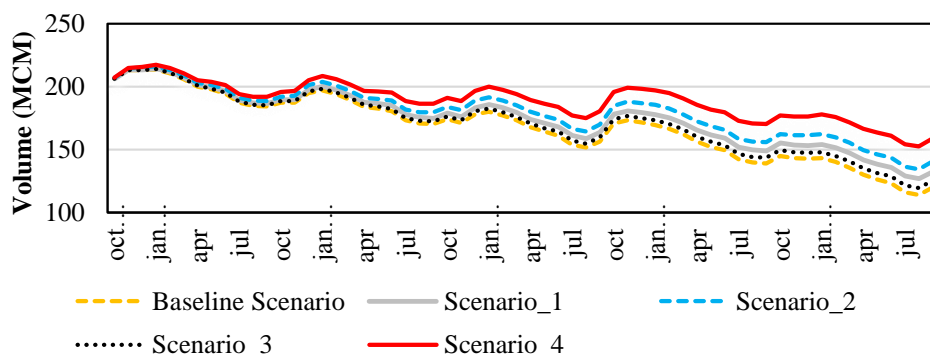


Fig. 10- The trend of change in groundwater volume in Dasht-Afzar (plain) for baseline scenario and scenario 1 to 4

شکل ۱۰- روند تغییر حجم آب زیرزمینی دشت افزر در سناریوهای روند و سناریو ۱ تا سناریوی ۴

Table 6- Performance criteria and sustainability index in Dasht-Afzar (plain) in the baseline scenario and scenario 1 to 4

جدول ۶- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری آبخوان دشت افزر در سناریوهای روند تا سناریوی ۴

Scenarios	Baseline Scenario	Scenario_1	Scenario_2	Scenario_3	Scenario_4
Reliability in time (%)	24.3	27.2	30.2	25.48	36.09
Reliability in Volume (%)	58	60.2	62	58.99	65.13
Vulnerability (%)	0.8	1.03	1.44	0.89	1.78
Resilience (%)	75.6	72.7	69.7	74.5	63.9
Sustainability Index (%)	12.99	14.65	16.91	13.62	19.73

مقایسه نتایج موجود در جداول ۶ و ۷ نشان می‌دهد باتوجه به بهره‌برداری تلفیقی صورت گرفته در این سناریوها، هیچ یک از این سناریوهایی که تحت عنوان سناریوهای صرفاً تأمین می‌باشند، نمی‌تواند نتایج مطلوبی برای بهره‌برداری تلفیقی ارائه دهد و همچنان یکی از اهداف مهم این تحقیق که کنترل روند نزولی سطح آب زیرزمینی دشت افزر می‌باشد، برآورده نخواهد شد. از این رو بهترین راه خروج از این وضعیت، پرداختن به مسئله مدیریت مصرف در این منطقه می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، سناریو ادامه روند نشانگر مطلوب‌ترین حالت و سناریو ۴ بدترین حالت در ذخیره‌سازی سد سلمان فارسی را نشان می‌دهد. به طوری که در سناریو ۴ شاخص پایداری به زیر ۱۰ درصد و به عدد ۶/۶۳ درصد خواهد رسید. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد در این سناریو اطمینان‌پذیری در زمان و حجم به شدت کاهش خواهد یافت و به ترتیب به مقادیر ۷/۵۸ و ۳۶/۹۴ درصد خواهد رسید. در صورتی که این مقادیر در سناریو ادامه روند موجود به ترتیب برابر ۸۸/۷۲ و ۱۰۰ درصد خواهد بود.

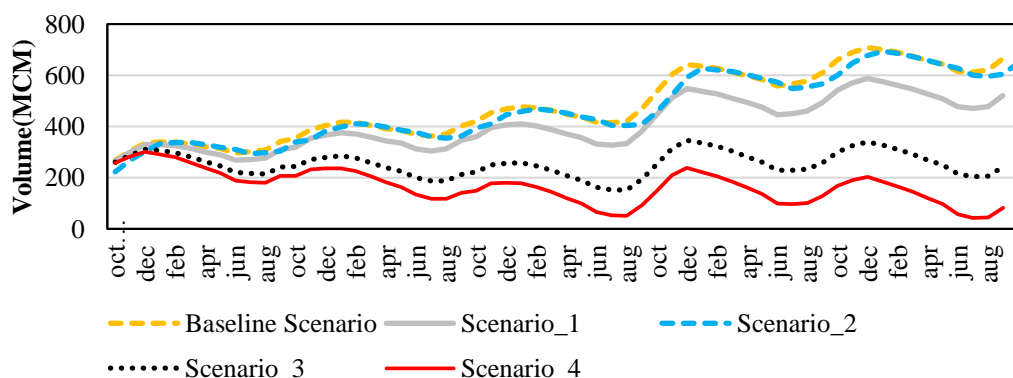


Fig. 11- The trend of storage volume in Salman Farsi Dam for baseline scenario and scenarios 1 to 4

شکل ۱۱- روند حجم ذخیره سد سلمان فارسی در سناریوهای روند و سناریو ۱ تا سناریو ۴

Table 7- Performance criteria and sustainability index of Dasht-Afzar (plain) in the baseline scenario and scenarios 1 to 4

جدول ۷- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری سد سلمان فارسی در سناریوهای روند تا سناریو ۴

Storage of Salman Farsi Dam (MCM)					
Scenarios	Baseline Scenario	Scenario_1	Scenario_2	Scenario_3	Scenario_4
Reliability in time (%)	88.72	78.31	87.98	23.01	7.58
Reliability in Volume (%)	100	90.4	100	56.21	36.94
Vulnerability (%)	18.7	16	18.51	4.12	0.91
Resilience (%)	11.27	21.68	12.01	76.98	92.41
Sustainability Index (%)	61.94	54.58	61.52	18.71	6.63

۴-۳-۱- سناریوی ۵

در سناریو ۵ که به عنوان سناریو مدیریت مصرف شناخته می‌شود، به بررسی کاهش ۳۵ درصدی در مصرف کشاورزی دشت افزر پرداخته شده است. مطابق شکل زیر با کاهش ۳۵ درصدی در مصرف کشاورزی، حجم آبخوان دشت افزر در آستانه برگشت پذیری قرار خواهد گرفت و شاخص پایداری آن از ۱۲/۹۹ به ۲۴/۹۱ درصد خواهد رسید. با افزایش اطمینان پذیری در زمان و حجم به ترتیب به مقدار ۲۲/۳۶ و ۱۱/۳ درصد، تا حدودی مشکلات مدیریتی آبخوان رفع خواهد شد. در این سناریو با افزایش ۲/۳۱ درصدی در شاخص پایداری ذخیره سد سلمان فارسی، تأثیر چندانی بر وضعیت عملکرد سد ایجاد نخواهد کرد.

نتایج سناریو ۵ نشان می‌دهد که این سناریو می‌تواند شرایط نرمال و مطلوبی را برای مدیریت و بهره‌برداری تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی محدوده مورد مطالعه بوجود آورد. احداث سد کوار در بالا دست سد سلمان فارسی، می‌تواند بر روی این نوع مدیریت تأثیرگذار باشد. بنابراین در سناریو ۶ به تأثیر احداث سد کوار در بالادست سد سلمان فارسی در شرایط مدیریت مصرف پرداخته شده است.

۴-۳-۲- سناریو ۶

احداث سد کوار در بالادست سد سلمان فارسی بر روی رودخانه قره‌آقاج یکی از محتمل‌ترین سناریوهای اجرایی در این منطقه می‌باشد. ایستگاه هیدرومتری علی‌آباد خفر که در نزدیکی محل احداث سد کوار می‌باشد، در دهه اخیر از سال ۸۳ تا سال ۹۲ به طور متوسط دبی برابر مقادیر جدول ۹ را ثبت کرده است؛ که نسبت به دبی میانگین ۳۰ ساله (Q30) گذشته (از سال ۱۳۶۳ تا سال ۱۳۹۲) کاهش محسوسی را نشان می‌دهد.

در این سناریو فرض شده که مقدار متوسط دبی ۱۰ ساله (Q10) ثبت شده توسط ایستگاه علی‌آباد خفر، بدون هیچگونه برداشتی در ادامه مسیر، وارد مخزن سد سلمان فارسی می‌گردد. در شکل (۱۳) بررسی معیارهای عملکرد و شاخص پایداری برای قرار گرفتن میزان ذخیره سد سلمان در شرایط مطلوب، نشان می‌دهد که با کاهش حداقل ۳۰ درصد دبی پایه میانگین ۱۰ ساله، موجب می‌شود تا پایداری سد برای تأمین حجم مطلوب (۴۵۰ میلیون متر مکعب) در طول دوره سناریو (۵ ساله) به زیر ۵۰ درصد کاهش یابد.

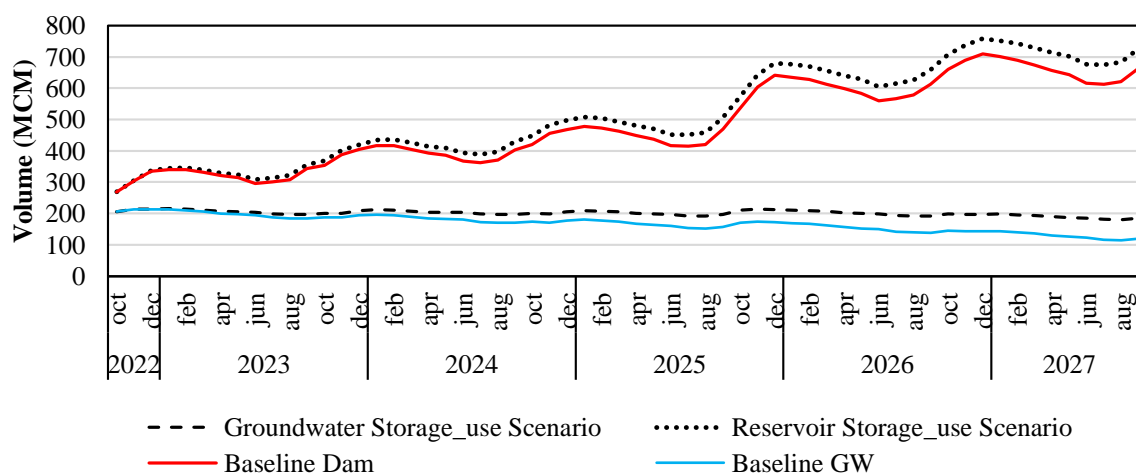


Fig. 12- Volume of aquifer storage and storage in Salman Farsi dam in consumption management scenario
 شکل ۱۲- حجم ذخیره آبخوان و سد سلمان فارسی در سناریو مدیریت مصرف

Table 8- Performance criteria and sustainability index of the aquifer and Salman Farsi Dam in the consumption management scenario

جدول ۸- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری آبخوان و سد سلمان فارسی در سناریو مدیریت مصرف

	Aquifer		Salman Farsi dam	
	Scenario_5	Change in Baseline	Scenario_5	Change in Baseline
Reliability in time (%)	46.66	22.36	90.87	2.15
Reliability in Volume (%)	69.30	11.3	100	0
Resilience (%)	2.5	1.7	20.64	1.94
Vulnerability (%)	53.33	-22.27	9.12	-2.15
Sustainability Index (%)	24.91	11.92	64.25	2.31

Table 9- Average monthly flow recorded by Aliabad-Khafr hydrometric station

جدول ۹- متوسط دبی ماهانه ثبت شده توسط ایستگاه هیدرومتری علی آبادخفر

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Q10	10.66	20.24	10.40	8.48	1.30	0.33	0.18	0.14	0.12	0.11	0.60	8.01
Q30	16.6	27.6	23.9	16.77	3.7	0.9	0.39	0.35	1.2	0.41	1.32	9.1

۵- جمع بندی

در این تحقیق از روش سناریونگاری برای بررسی سیاست‌های بهره‌برداری تلفیقی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند آینده چندگانه‌ای را پیش روی مدیران و برنامه‌ریزان منابع آبی قرار دهد تا مدیران از نتیجه تصمیم خود پیش از اجرایی شدن مطلع شوند. بنابراین، سناریوهای ممکن و محتمل اجرایی منابع و مصارف مورد بررسی قرار گرفت. مدل WEAP نشان داد که می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی یکپارچه منابع و مصارف مورد استفاده قرار گیرد و به سرعت به اعمال هر نوع سیاستی در حوضه پاسخ دهد. سناریوهای مختلفی در این مدل توسعه داده شد که هیچ یک از آنها به جز سناریو مدیریت مصرف (کاهش ۳۵ درصدی مصرف کشاورزی) نمی‌تواند روند نزولی آبخوان را کنترل کند.

بررسی کنترل دبی ورودی به سد سلمان با فاصله ده درصدی نشان داد، اطمینان‌پذیری تأمین حجم مطلوب آب سد سلمان فارسی هم در زمان و هم در حجم، به مرور کاهش می‌یابد. همچنین، روند نزولی معیار برگشت‌پذیری به حجم مطلوب، آسیب‌پذیری را افزایش می‌دهد. این موضوع باعث می‌شود تا پایداری تأمین حجم مطلوب برای سد، بعد از کاهش ۳۰ درصدی دبی پایه ورودی به آن، به ۴۹ درصد برسد. بنابراین سد کوار در بالادست سد سلمان فارسی، باید اجازه دهد تا حداقل ۷۰ درصد دبی تشریح شده در جدول ۹ از محل احداث این سد عبور کند؛ چرا که در غیر این صورت، تأمین نیازهای آبی وابسته به سد سلمان فارسی، به خطر خواهد افتاد و مشکلات مدیریت منابع و مصارف را در پی خواهد داشت. همچنین، شکل ۱۴ نشان می‌دهد، احداث سد کوار به طور مستقیم بر روی عملکرد و پایداری آبخوان دشت افزر تأثیر نخواهد گذاشت.

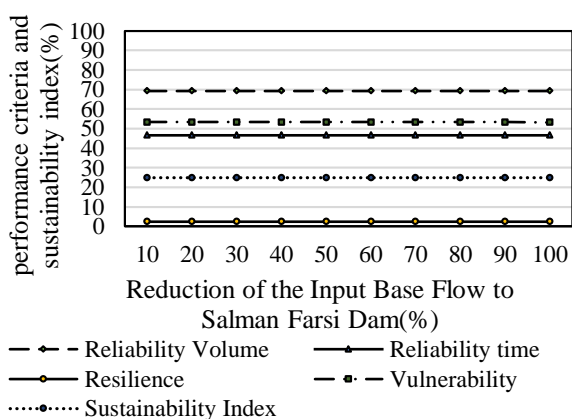


Fig. 14 - Performance criteria and fuzzy sustainability index of Dasht-Afzar aquifer with decreasing inflow to Salman Farsi dam with construction of Kavar dam

شکل ۱۴- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری فازی آبخوان دشت‌افزر با کاهش دبی ورودی به سد سلمان فارسی با احداث سد کوار

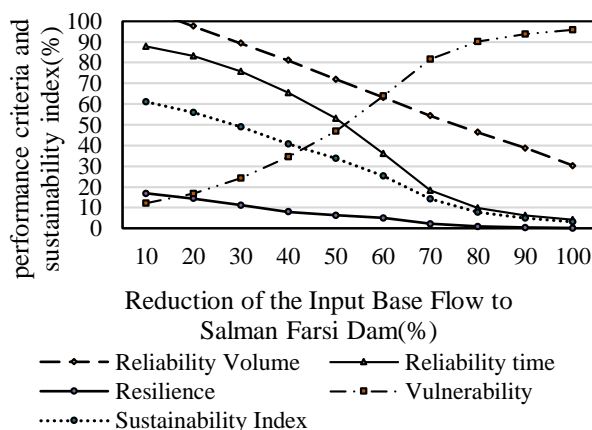


Fig. 13- Performance criteria and fuzzy sustainability index of Salman Farsi dam by reducing the inflow to Salman Farsi dam with the construction of Kavar dam

شکل ۱۳- معیارهای عملکرد و شاخص پایداری فازی سد سلمان فارسی با کاهش دبی ورودی به سد سلمان فارسی با احداث سد کوار

- Ghafari GA, Vafakhah M (2013) Simulation of rainfall-runoff process using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy interface system (Case study: Hajighoshan Watershed). *Journal of Watershed Management Research* 4(8):120-136 (In Persian)
- Golmohammadi MH (2015) Scenario analysis for Integrated Water Resources Planning and Management (IWRPM) in the Zayandehrud basin under uncertainty using fuzzy performance criteria and sustainability index. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (In Persian)
- Lane BA, Sandoval-Solis S, and Porse EC (2015) Environmental flows in a human-dominated system: Integrated water management strategies for the Rio Grande/Bravo Basin. *River Research and Applications* 31(9):1053-1065
- Legates DR and McCabe GJ (1999) Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1):233-241
- Loucks DP (1997) Quantification des tendances de la durabilité des systèmes. *Hydrological Sciences Journal* 42(4):513-530
- Mani A, Tsai FTC, Kao SC, Naz BS, Ashfaq M, and Rastogi D (2016) Conjunctive management of surface and groundwater resources under projected future climate change scenarios. *Journal of Hydrology, Elsevier B.V.* 540(4):397-411
- Pal JS and Eltahir EAB (2016) Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nature Climate Change* 6(2):197-200
- Parab Fars Consulting Engineering Company (2015) Update studies of water resources balance Study areas of Mand River catchment area and closed areas of Pyramid, Karian and Khanj ending in 2010-2011. Water Balance Report of Afzar sub-Basin (2622), Volume 5- Water Resources Assessment, Appendix 22 (In Persian)
- Parab Fars Consulting Engineering Company (2015) Update studies of water resources balance Study areas of Mand River catchment area and closed areas of Pyramid, Karian and Khanj ending in 2010-2011. Water Balance Report of Qirokarzin sub-Basin (2623), Volume 5- Water Resources Assessment, Appendix 22 (In Persian)
- Raskina P, Hansen E, Zhu Z, and Stavisky D (1992) Simulation of water supply and demand in the aral sea region. *Water International* 17(2):55-67
- Ross A (2018) Speeding the transition towards integrated groundwater and surface water
- همچنین باتوجه به اینکه تغییر اقلیم تا سال ۲۰۳۰ تأثیر چندانی بر روی وضعیت بارش و دما نخواهد داشت، بنابراین نمی‌توان آن را به عنوان عامل اصلی روند کاهش منابع آب زیرزمینی به حساب آورد بلکه عامل اصلی، شیوه ناصحیح و استفاده بیش از حد از این منابع می‌باشد. با مقایسه شاخص‌های پایداری مربوط به هر سناریو مشخص گردید با توجه به اینکه سناریو ۴ (اجرای هم زمان سناریوهای ۱، ۲ و ۳) با شاخص پایداری ۱۹/۷۳ درصد برای آبخوان دشت افزر می‌تواند سناریو نسبتاً خوبی برای آبخوان دشت افزر باشد، اما با در نظر گرفتن یکپارچگی به منابع آب، این سناریو نمی‌تواند سناریو مناسبی باشد، چرا که اجرای آن باعث می‌شود تا شاخص پایداری منابع آب سد سلمان فارسی به شدت کاهش یابد و به عدد ۶/۶۳ درصد برسد. نتایج این تحقیق بیانگر آن است که در بسیاری از حوضه‌های آبریز مدیریت تأمین، مشکلات کمبود منابع آبی را مرتفع نخواهد کرد و می‌بایست مدیریت مصرف همزمان با مدیریت تأمین در دستور کار مدیران و تصمیم‌گیران منابع آبی قرار گیرد. بنابراین سناریو ۵ با شاخص پایداری ۶۴/۲۵ درصد برای ذخیره سد سلمان فارسی و همچنین ۲۴/۹۱ درصد برای ذخیره آبخوان دشت افزر نسبت به سناریوهای دیگر می‌تواند تا حدود بسیار زیادی مشکلات مدیریتی حوضه را رفع کند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Fractional Programming
- 2- Genetic Programming
- 3- Multi-objective Genetic Algorithm
- 4- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 5- Atmosphere-Ocean General Circulation Model
- 6- Inverse Distance Weighting
- 7- Multilayer Perceptron
- 8- Time-Based Reliability
- 9- Volumetric Reliability
- 10- Resilience
- 11- Vulnerability
- 12- Sustainability Index
- 13- Integrated Water Resources Management

۶- مراجع

- Burt OR (1964) The economics of conjunctive use of ground and surface water. *Hilgardia* 36(2):31-111
- Dong C, Schoups G, and Van de Giesen N (2013) Scenario development for water resource planning and management: A review. *Technological Forecasting and Social Change* 80(4):749-761
- Fars Regional Water Organization Joint Stock Company (1985) Studies of the first phase of the plan for exploitation of water and soil resources of basin the Mundo and Shashpir dams. Report (In Persian)

- Sepahvand R, Safavi HR, and Rezaei F (2019) Multi-objective planning for conjunctive use of surface and ground water resources using genetic programming. *Water Resources Management* 33(6):2123–2137
- Van Liew MW, Arnold JG, Garbrecht JD (2003) Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the ASAE* 46(6):1539–1551
- Willis BR, Finney BA, and Zhang D (1990) Water resources management in north China plain. *Journal of Water Resources Planning and Management* 115(5):598–615
- Yates D, Sieber J, Purkey D, and Huber-Lee A (2005) WEAP21- A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International* 30(4):487–500
- Young RA and Bredehoeft JD (1972) Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water systems. *Water Resources Research* 8(3):533–556
- Zareian MJ, Eslamian S, and Safavi HR (2015) A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theoretical and Applied Climatology* 122(3–4):497–516
- management in Australia. *Journal of Hydrology* 567:e1–e10
- Safavi HR, Golmohammadi MH, and Sandoval-Solis S (2016) Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin. *Journal of Hydrology* 539:625–639
- Safavi HR and Golmohammadi MH (2016) Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. *Iran-Water Resources Research* 12(1):68–83 (In Persian)
- Sandoval-Solis S, McKinney DC, and Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(5):381–390
- Schneider P, Sander BO, Wassmann R, and Asch F (2019) Potential and versatility of WEAP model (Water Evaluation and Planning System) for hydrological assessments of AWD (Alternate Wetting and Drying) in irrigated rice. *Agricultural Water Management, Elsevier* 224(November 2018):105559
- Semenov MA and Stratonovitch P (2010) Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research* 41(1):1–14