



Assessing Sustainable Groundwater Management Strategies for Climate Change Adaptation: Comparison of Cyclic and Non-Cyclic Conjunctive Use Approaches

S. Moghim¹, M. Khosravi^{2*}, A. Molajou³,
and A. Afshar⁴

Abstract

Climate change and its effect on droughts has led to overuse of groundwater resources and endangered the sustainability of these resources. Climate change studies shows that the recent attempts are not solely concentrated on "impact assessment" and "adaptation" is winning more focus in the studies. Accordingly, presenting appropriate strategies is of importance for increasing of surface and groundwater conjunctive use system adaptability with adverse effects of this phenomenon. In the present study, the adaptability of cyclic and non-cyclic conjunctive use systems with the aim of increasing groundwater sustainability while reducing costs and water shortage have been compared by considering climate change scenarios. In this regard, in order to simulate climate change in the Basin of Abhar River, precipitation and temperature variables are extracted from the results of three global atmospheric circulation models under RCP2.6 and RCP8.5 greenhouse gas emission scenarios in the period 2021-2031. Data spatial downscaling was performed using the M5 decision tree algorithm. In the next step, the Wavelet-M5 hybrid model was used to predict runoff values for rainfall-runoff modeling. The Kharrufa method has also been used to calculate evaporation in future seasons. In the next step, these values were provided as input to the cyclic and non-cyclic multi-objective optimization models. Results showed that, CSS operation strategy improves the conjunctive use system adaptability, compared to the optimal operation strategy which employs the NCSS approach, so that in the cyclic approach, the sustainability of the groundwater resources is guaranteed by about 18% more than of the same in the non-cyclic approach.

Keywords: Climate Change, Adaptation, Sustainability of Groundwater Resources, Cyclic and Non-Cyclic Approaches.

Received: September 23, 2020

Accepted: January 12, 2021

ارزیابی استراتژی‌های مدیریت پایدار آب زیرزمینی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی: مقایسه رویکردهای بهره‌برداری تلفیقی سیکلی و غیرسیکلی

ساناز مقیم^۱، مینا خسروی^{۲*}، امیر مولاجو^۳ و عباس افشار^۴

چکیده

تغییر اقلیم و اثر آن بر خشک‌سالی‌ها موجب استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی شده است و پایداری این منابع را به خطر انداخته است. مطالعات تغییر اقلیم نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، جهت‌گیری محورهای مطالعاتی این مبحث از صرف "ارزیابی اثرات" به "سازگاری" گرایش قابل توجهی داشته است. از این رو ارائه راهکارهای مناسب برای افزایش سازگاری سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در مقابل اثرات نامطلوب این پدیده حائز اهمیت شده است. در مطالعه حاضر، با در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم، سازگاری سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی منابع آب تحت دو رویکرد سیکلی و غیر سیکلی با هدف افزایش پایداری آب‌های زیرزمینی ضمن کاهش هزینه‌ها و کمبود آبی مقایسه گشته‌اند. در این راستا به منظور شبیه‌سازی تغییرات اقلیم حوضه آبریز ابهر رود، متغیرهای بارش و دما از نتایج سه مدل گردش کلی جو تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۱ استخراج شده‌اند و ریزمقیاس‌سازی مکانی داده‌های موجود با استفاده از الگوریتم M5 درخت تصمیم صورت پذیرفته است. در گام بعدی برای پیش‌بینی مقادیر رواناب از مدل ترکیبی Wavelet-M5 برای مدل‌سازی بارش-رواناب و همچنین از روش Kharrufa برای محاسبه میزان تبخیر در فصول آینده استفاده شده است تا این مقادیر در گام بعدی به عنوان ورودی در اختیار مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه سیکلی و غیر سیکلی قرار داده شوند. نتایج نشان می‌دهند که اتخاذ رویکرد سیکلی به جای رویکرد رایج غیر سیکلی به طور قابل توجهی سازگاری سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی منابع آب را افزایش می‌دهد. به گونه‌ای که در رویکرد سیکلی حدود ۱۸ درصد پایداری منابع آب زیرزمینی بیشتر از رویکرد غیر سیکلی تضمین می‌گردد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، سازگاری، پایداری منابع آب زیرزمینی، رویکردهای سیکلی و غیر سیکلی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۷/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۲۳

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. Email: moghim@sharif.edu

2- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: mina.khosravi100@gmail.com

3- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: amolajou@yahoo.com

4- Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: a_afshar@iust.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۳- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۴- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

*- نویسنده مسئول

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

به‌منظور شبیه‌سازی نمودن توده‌ای و یا توزیعی آبخوان و بهینه‌سازی اهداف تحقیق به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (MacEwan et al., 2017).

در رویکرد توده‌ای برخلاف رویکرد توزیعی، توزیع مکانی تمام مؤلفه‌های هیدرولیکی در مدل لحاظ نمی‌گردد و مخزن زیرزمینی همانند مخزن سطحی شبیه‌سازی می‌شود (Afshar et al., 2008). در مدل‌های مبتنی بر رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به‌منظور شبیه‌سازی توزیعی آبخوان عمدتاً از سه رویکرد می‌توان بهره برد: ۱- جاگذاری نمودن معادلات حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی در مدل بهینه‌سازی (Willis and Liu, 1984)؛ ۲- تبادل تکراری داده‌ها بین مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی و مدل بهینه‌ساز (Medellín-Azuara et al., 2015) و ۳- استخراج تابع پاسخ آبخوان با استفاده از روش‌هایی همچون ماتریس پاسخ واحد یا رگرسیون چند متغیره و جاگذاری آن در مدل بهینه‌سازی (Alimohammadi, 2005; MacEwan et al., 2017).

یکی از اقدامات مدیریت عرضه به‌منظور دستیابی به مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی است. سیستم ذخیره سیکیلی^۱ و غیر سیکیلی^۲ دو نوع از سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی منابع آب می‌باشند (Afshar et al., 2020). بهره‌برداری تلفیقی آب تنظیم‌شده بین مخزن سطحی و زیرزمینی، عنصر اصلی سیستم‌های ذخیره سیکیلی است که آن را از بقیه سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی رایج منابع آب که در این مقاله از آن تحت عنوان سیستم‌های غیر سیکیلی یاد شده است، متمایز می‌کند (Afshar et al., 2010; Khosravi et al., 2020). در سیستم ذخیره غیر سیکیلی (سنتی)، رهاسازی از مخزن سطحی صرفاً به‌منظور تأمین نیازهای پایین‌دست اعم از زیست‌محیطی، شهری و کشاورزی در نظر گرفته می‌شود. در این سیستم‌ها، تغذیه مصنوعی آبخوان فقط در مواقع سرریز آب از مخزن سطحی (و یا فراوانی جریان سطحی و رودخانه‌ای) باهدف کاهش هزینه‌ها و هدر رفت آب از حوضه با تسخیر سیلاب صورت می‌پذیرد (Hamamouche et al., 2017; Sekar and Randhir, 2007). در حقیقت در رویکرد غیر سیکیلی این باور وجود دارد که استفاده از آب تنظیم‌شده به‌عنوان منبعی برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها اقتصادی نیست و در بسیاری از مناطق، تغذیه مصنوعی از طریق تسخیر سیلاب یکی از مؤلفه‌های اصلی استراتژی مدیریت آب‌های زیرزمینی است (Hashemi et al., 2015; Pavelic et al., 2012).

در حال حاضر گرمایش جهانی و به دنبال آن تغییر اقلیم از مهم‌ترین نگرانی‌های جوامع بشری محسوب شده و در صورت وقوع خشک‌سالی‌های شدید و طولانی‌مدت، آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع قابل‌اطمینان برای تأمین آب شرب محسوب می‌شود که در متون علمی با لقب «ذخیره استراتژیک آب زیرزمینی» از آن یاد شده است (Bloomfield et al., 2019). تاکنون استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در برخی از مناطق خسارات جبران‌ناپذیری از جمله فرونشست زمین، نفوذ آب‌شور به آبخوان‌ها، کاهش این منابع برای استفاده در آینده و غیره شده است (Rahmati et al., 2019). از این رو تدوین و پیاده‌سازی طرح مدیریت پایدار آب زیرزمینی همچون طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی کشور با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی پیش‌رو اجتناب‌ناپذیر است (Sayed et al., 2020).

بررسی ادبیات تغییر اقلیم نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، جهت گیری محورهای مطالعاتی این مبحث از صرف "ارزیابی اثرات" به "سازگاری" گرایش قابل توجه داشته است (Ansari, 2018; Jeyrani et al., 2019). راهبردهای سازگاری شامل طیف گسترده‌ای از مداخلات می‌باشند که منعکس‌کننده ماهیت چندوجهی آن است. یکی از راهبردهای سازگاری "پیشگیری از زیان" می‌باشد. این راهبرد شامل مجموعه‌ای از اقدامات سازگاری به کار گرفته شده برای حذف یا کاهش اثرات نوسانات و تغییر در اقلیم می‌باشد (Nourani et al., 2020). درواقع با توجه به طیف گسترده اثرات بالقوه تغییر اقلیم و درعین حال عدم قطعیت ذاتی آن‌ها، بایستی طرح‌های سازگاری از جمله طرح‌های مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی به شکلی تدوین گردند که دارای حداکثر انعطاف‌پذیری باشند. در این راستا به‌منظور انتخاب بهترین طرح، ابتدا گزینه‌های موجود نسبت به تغییرات آبی مورد بررسی قرار می‌گیرند و سپس با استفاده از روش تجزیه و تحلیل چند معیاره انتخاب می‌گردند (Golfam et al., 2019).

مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی به استفاده از این منابع برای تأمین نیازهای موجود ضمن حفظ آن‌ها برای نسل‌های آینده و عدم پیامدهای نامطلوب اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی اشاره دارد (Miro and Famiglietti, 2019). در مطالعات پیشین صورت گرفته عمدتاً دستیابی به شرایط آب زیرزمینی پایدار می‌تواند نتیجه‌ای از اقدامات مدیریت تقاضا (مانند حفاظت و کاهش مصرف آب زیرزمینی از طریق دستیابی به الگوی کشت بهینه) و مدیریت عرضه (مانند افزایش شارژ مصنوعی و فرصت‌های استفاده تلفیقی) باشد (Fang et al., 2019; Sikdar, 2018). در این راستا مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

۱۱۰-۳۶ می‌باشد. نیازهای طرح، شامل نیازهای شهری و کشاورزی می‌باشد که مجموعاً برابر با ۲۶ میلیون مترمکعب (م^م) در سال است. همچنین در پایین دست رودخانه لازم است حقایق زیست‌محیطی رودخانه تأمین گردد. محدوده‌ی آبخوان مساحتی حدود ۸۰ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد که به صورت مستطیلی به ابعاد ۸ در ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. در آغاز بهره‌برداری، اختلاف ارتفاع سطح زمین و تراز آب چاه‌ها ۱۰ متر و حجم آب موجود در آبخوان مطالعاتی ۲۲۴ میلیون مترمکعب بوده است. حداکثر افت و خیز تراز آب چاه‌ها ۱۰ متر و حداکثر پمپاژ از هر چاه ۳ میلیون مترمکعب در هر فصل در نظر گرفته شده است. رودخانه در اینجا به صورت یک مقطع مستطیلی به عرض ۲۰ متر (عرض متوسط رودخانه) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که ضریب مانینگ و شیب رودخانه نیز به ترتیب برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۰۰۱ می‌باشد. همچنین در این مطالعه فرض شده است که ۱۰ درصد از باران و ۱۰ درصد آبیاری وارد آبخوان می‌شود، ۱۰ درصد از آبیاری به صورت آب برگشتی به رودخانه برمی‌گردد (Alimohammadi, 2005).

هزینه‌ها شامل هزینه‌های ساخت زیرسیستم‌ها و بهره‌برداری از آن‌ها می‌باشد. هزینه ساخت هر زیرسیستم تابعی از ظرفیت آن زیرسیستم و هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه‌های پمپاژ، تغذیه مصنوعی و ضریبی از حجم آب منتقل شده توسط زیرسیستم‌های مختلف انتقال می‌باشد.

۲-۲- سیستم‌های ذخیره سیکی و غیر سیکی

سیستم ذخیره سیکی از چهار زیرسیستم اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از (شکل ۱): ۱- سد، ۲- آبخوان، ۳- رودخانه و ۴- منطقه نیاز. با توجه به شکل ۱، جریان ورودی (Q^S)، تبخیر (E^S)، حجم ذخیره سد (S^S)، خروجی سد به رودخانه (R_{riv}^S)، سرریز از مخزن سطحی (Spill)، خروجی سد به منطقه نیاز (R_d^S)، خروجی سد به آبخوان جهت تغذیه مصنوعی آن (R_{ar}^S) و انتقال از آبخوان به سد (R_s^S) مؤلفه‌های تعادلی حجمی مخزن سطحی را تشکیل می‌دهند. در این سیستم نیاز آبی منطقه‌ی کشاورزی علاوه بر سد (R_d^S)، می‌تواند از طریق پمپاژ آب از چاه‌های آب زیرزمینی (R_d^G) و یا انحراف رودخانه به منطقه‌ی نیاز (Div_d) نیز تأمین گردد (Afshar et al., 2020, 2019). مطابق شکل ۱، تغذیه آبخوان علاوه بر سد، می‌تواند از طریق آب منحرف شده از رودخانه (Div_{ar})، نفوذ آب باران در منطقه نیاز (Seep)، تعامل فیزیکی آبخوان و رودخانه (qraq) و نفوذ آب در منطقه‌ی نیاز به واسطه آبیاری (Rets) صورت پذیرد. آب در رودخانه، علاوه بر دبی خروجی از سد، به واسطه بارش باران (Prc)، جریان برگشتی از منطقه نیاز

اکثر مطالعات پیشین انجام شده به مدل‌سازی تک‌هدفه توده‌ای (Afshar et al., 2008) و یا توزیعی (Alimohammadi et al., 2009; Alimohammadi and Afshar 2011; Jahanpour et al., 2013) سیستم ذخیره سیکی با روش‌های حل مختلف محدود می‌شوند. اخیراً (Afshar et al., 2020) ضمن ارائه مدل چندهدفه طراحی بر مبنای اعتمادپذیری سیستم ذخیره سیکی، نشان دادند که تا افزایش ۳۰ درصدی نیاز، سیستم آب را با اعتمادپذیری بالایی به مناطق نیاز تخصیص خواهد داد. همچنین نشان دادند که در صورت استفاده از سیستم ذخیره سیکی، هزینه تنظیم جریان با فرکانس‌های بسیار کم به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. هرچند که چندین مطالعه به مقایسه رویکردهای سیکی و غیر سیکی پرداخته‌اند (Afshar et al., 2010, 2019)، لیکن هیچ‌یک از این مطالعات اثر تغییر اقلیم را بر پایداری منابع آب زیرزمینی کشور مورد بررسی قرار نداده است. برای نمونه (Afshar et al., 2019) نشان دادند که با مدیریت و تنظیم بیشتر آب سطحی در بهره‌برداری سیکی در مقایسه با بهره‌برداری غیر سیکی، شاخص پایداری از ۰/۶۹ به ۰/۸۶ افزایش می‌یابد.

از این رو تمرکز اصلی مقاله حاضر بر دستیابی به پایداری آب‌های زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم با انتخاب سازگارترین رویکرد مدیریت عرضه اعم از سیکی و غیر سیکی است. در این راستا نتایج طراحی چندهدفه سیستم‌های سیکی و غیر سیکی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی با اهداف حداقل کردن هزینه‌ها، کمینه کردن کمبود آبی و بیشینه نمودن ذخیره استراتژیک آب زیرزمینی مقایسه گشته‌اند. به منظور شبیه‌سازی نمودن آبخوان از روش ماتریس پاسخ واحد استفاده شده است. سناریوهای اقلیمی از داده‌های مدل‌های گردش عمومی CMCC-CMS، Ensemble، MRI-CGCM3 و استخراج گشته به منظور ریزمقیاس نمودن داده‌های اقلیمی از الگوریتم M5 درخت تصمیم استفاده شده است. تخمین رواناب و تبخیر آینده حوضه مورد مطالعه به ترتیب با استفاده از مدل هیبریدی Wavelet-M5 و مدل Kharrufa صورت پذیرفته است. مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه که در دسته مسائل برنامه‌ریزی ریاضی غیر محدب و غیرخطی مختلط به عدد صحیح می‌باشند، با استفاده از روش ϵ -Constrain حل گشته‌اند. جبهه پارتوهای حاصله می‌توانند به برنامه‌ریزان آب در تدوین برنامه‌های مدیریتی و طراحی سیستم‌های منابع آب با انتخاب رویکرد مناسب کمک شایانی نماید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه موردی

منطقه مطالعاتی سد کینه‌ورس و دشت پایین دست آن واقع در حوضه آبریز رودخانه اهر به ترتیب با طول و عرض جغرافیایی ۳۹-۰۷ و

همان‌طور که در بخش ۲-۲ به آن اشاره شد، بارش در منطقه نیاز، رواناب ورودی به سد و تبخیر از سد سه متغیر حالت ورودی به مدل‌های بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره سیکلی و غیر سیکلی می‌باشند. در مطالعه حاضر بارش به‌طور مستقیم و رواناب و تبخیر به‌طور غیرمستقیم به ترتیب از مدل‌های بارش-رواناب و دما-تبخیر وارد این مدل‌های بهینه‌سازی می‌گردند. لیکن به دلیل قدرت کم تفکیک مکانی مدل‌های گردش عمومی جو، سری‌های زمانی بارش و دمای تولیدشده توسط این مدل‌ها برای استفاده مستقیم در مدل‌های بهینه‌سازی سیکلی و غیر سیکلی مناسب نمی‌باشند و نیاز به تکنیک‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی مکانی دارند. الگوریتم M5 درخت تصمیم یکی از این تکنیک‌هاست که با کلاسه‌بندی کردن محیط متغیرهای دما و بارش به ارائه یک مدل رگرسیونی در هر کلاس می‌پردازد.

۲-۳-۲- مدل دما-تبخیر

به‌منظور محاسبه تبخیر روابط تجربی فراوانی ارائه شده‌اند که عمدتاً در سه دسته معادلات دمایی، تشعشعی و رطوبتی تقسیم می‌گردند. (Ghamarnia and Lorestani, 2018) به این باور رسیدند که روش Karrufa در عین سادگی در مقایسه با سایر روش‌های تجربی، نتایج نسبتاً مناسب‌تری را ارائه می‌دهد (Ghamarnia and Lorestani, 2018). از این رو در این مطالعه برای محاسبه ارتفاع تبخیر از مخزن سطحی از روش Karrufa که بر پایه درجه حرارت هوا می‌باشد، استفاده شده است (Kharrufa, 1985) (رابطه ۱):

$$ET = 0.34 \times p \times T_a^{1.3} \quad (1)$$

که در این رابطه ET تبخیر پتانسیل Karrufa برحسب میلی‌متر در ماه بوده و p درصد سالانه تابش آفتاب در ماه می‌باشد که به‌صورت روزانه توصیف می‌شود (متوسط ساعات‌های روشنایی هرروز در ماه موردنظر تقسیم‌بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰). همچنین T_a متوسط درجه حرارت برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

۲-۳-۳- مدل بارش-رواناب

فرآیند بارش-رواناب از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین پدیده‌ها در چرخه هیدرولوژی بوده لذا در مدل‌سازی آن، دیدگاه‌های متفاوتی برای توسعه و بهبود مدل‌های پیش‌بینی کننده ارائه گردیده است. در این مطالعه از مدل ترکیبی Wavelet-M5 که متشکل از چهار مرحله می‌باشد، جهت مدل‌سازی بارش-رواناب استفاده شده است (Nourani et al., 2019a). در گام نخست این مدل ترکیبی، داده‌های مربوط به فرآیند هیدرولوژیکی بارش-رواناب منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری می‌شود. مرحله دوم، پیش‌پردازش داده‌ها می‌باشد، چراکه ممکن است به دلیل

(Ret) و تعامل فیزیکی آبخوان و رودخانه (qraq) جاری است. همچنین لازم به ذکر است که در این مطالعه مقدار آب از دسترس خارج‌شده از رودخانه با Q_{riv}^{out} نمایش داده شده است.

در سیستم‌های غیر سیکلی، علاوه بر عدم تعامل دوطرفه آبخوان و سد، نقش تغذیه آبخوان از طریق سیستم‌های انحراف از رودخانه نیز بسیار کم‌رنگ بوده و فقط در فصول پرآب (به‌منظور جلوگیری از هدر رفت آب سرریز شده از سد) با تسخیر سیلاب صورت می‌پذیرد.

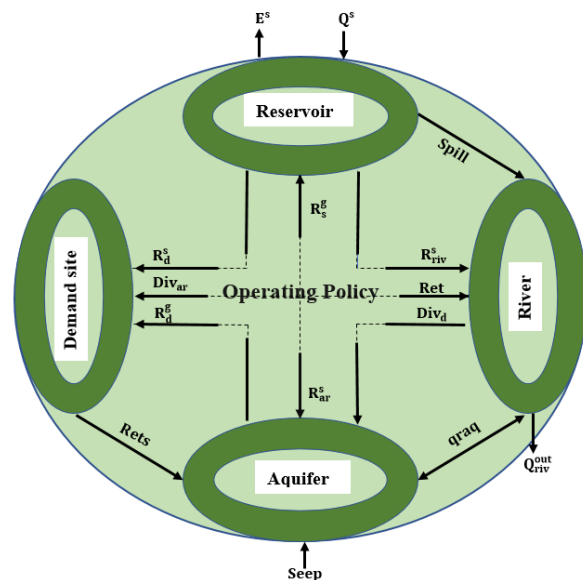


Fig. 1- The main components of CSS and interactive loops between them

شکل ۱- مؤلفه‌های اصلی سیستم ذخیره سیکلی و حلقه‌های تعاملی بین آن‌ها

۲-۳-۲- تولید سناریوهای اقلیمی در دوره آتی

۲-۳-۲-۱- استخراج داده‌های اقلیمی و ریزمقیاس‌سازی

در تحقیق حاضر از نتایج مدل Ensemble برای شبیه‌سازی تاریخی بارش و دما در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۰) و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۰-۲۰۳۰) تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 در مقیاس زمانی ماهانه استفاده شده است (Her et al., 2016; Tegegne et al., 2019). با توجه به اینکه Abbasian et al. (2018) نشان داده‌اند که مدل‌های CMCC-CM5 و MRI-CGCM3 به ترتیب بهترین مدل برای برآورد دما و بارش در کشور ایران می‌باشند، به‌منظور استناد کردن به نتایج دقیق، خروجی‌های حاصل از داده‌های این مدل‌ها نیز ارائه شده‌اند (Abbasian et al., 2019).

۳- بحث و نتایج

همان‌طور که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد از الگوریتم M5 درخت تصمیم جهت ریزمقیاس‌سازی داده‌های مدل گردش عمومی جو استفاده شد. بدین منظور ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش (Train) مدل و ۲۵ درصد مابقی به منظور صحت‌سنجی (Verify) مدل در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۱ دقت ریزمقیاس‌سازی دوره پایه برای متغیرهای بارش و دما ارائه شده است. با دقت در جدول ۱ مشاهده می‌شود که همان‌طور که مطالعات پیشین نیز به آن اشاره داشته‌اند، الگوریتم M5 درخت تصمیم کارایی مطلوبی در ریزمقیاس‌سازی داده‌های بارش و دمای سناریوهای مدل‌های گردش عمومی جو دارد (Nourani et al., 2019b, 2020).

در ادامه با توجه به اینکه داده‌های رواناب بایستی به‌عنوان ورودی در اختیار مدل‌های بهینه‌سازی سیکلی و غیر سیکلی قرار بگیرند از مدل ترکیبی Wavelet-M5 برای استخراج مدل بارش-رواناب استفاده گردید. در این راستا با استفاده از داده‌های بارش و رواناب مشاهداتی به ارائه این مدل پرداخته شد و فرض بر این است که این مدل برای داده‌های آینده نیز قابل کاربرد است. در نهایت به منظور استخراج مدل بارش-رواناب با استفاده از مدل ترکیبی موجک-درخت تصمیم، ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۲۵ درصد مابقی به منظور صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر (CC) و RMSE برای داده‌های آزمایش به ترتیب حدود ۰/۹۵ و (mcm) ۵/۰۸ به دست آمدند. با توجه به اینکه این مقادیر برای داده‌های آموزش بهتر گردیده‌اند، لذا مدل Wavelet-M5 مدل بسیار خوبی برای پیش‌بینی بارش-رواناب به نظر می‌رسد. در گام بعدی، مقادیر بارش، رواناب و تبخیر پیش‌بینی‌شده برای دوره ۲۰۳۱-۲۰۲۱ به صورت ۴۰ گام زمانی فصلی به‌عنوان ورودی در اختیار مدل‌های سیکلی و غیر سیکلی قرار داده شدند. شکل ۲ مقادیر رواناب و ارتفاع تبخیر پیش‌بینی‌شده برای دوره آتی ۲۰۳۱-۲۰۲۱ را نشان می‌دهد.

توزیع‌های گوناگون مکانی و زمانی داده‌ها، تغییراتی در فرآیندهای هیدرولوژیکی وجود داشته باشد که انجام یک پیش‌پردازش مناسب می‌تواند باعث بهبود کارایی روش‌های داده محور گردد. تحلیل موجک یکی از روش‌های پیشنهادی جهت انجام پیش‌پردازش بر روی داده‌ها می‌باشد. به منظور دسته‌بندی داده‌ها به گروه‌های همگن و همچنین بهینه‌سازی ساختار مدل در مرحله سوم، داده‌ها بایستی خوشه‌بندی شوند. از این رو از مدل درختی M5 که بر اساس روش طبقه‌بندی درختی به ایجاد رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته می‌پردازد، استفاده شده است. در آخرین مرحله از مدل ترکیبی موجک-درخت تصمیم نیز، الگوهای مکرری که در بین داده‌ها وجود دارند، کشف و استخراج شده است تا با توجه به آن‌ها در نهایت مدل‌های رگرسیونی درختی برای هر یک از خوشه‌ها ارائه گردند. جزییات بیشتر راجع به این مدل ترکیبی در مقالات ارائه شده است (Nourani et al., 2019a, 2019c).

۴-۲- مدل بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره آب سیکلی و غیرسیکلی

تابع هدف این مدل‌ها پیشینه کردن ذخیره آب زیرزمینی در پایان گام شبیه‌سازی (S_{final}^g)، کمینه کردن مقدار کمبود آبی در کل دوره شبیه‌سازی (SumDef)، حداقل کردن هزینه‌ها (Cost) است. لازم به ذکر است که هزینه‌ها شامل هزینه ساخت زیرسیستم‌های مختلف، بهره‌برداری از آن‌ها، هزینه پمپاژ آب زیرزمینی و تغذیه آبخوان می‌باشد. محدودیت‌های مختلفی تابع هدف مدل‌های بهینه‌سازی سیکلی و غیر سیکلی را مقید می‌سازند که شامل روابط پیوستگی مخزن سطحی و زیرزمینی، محدودیت‌های تأمین نیاز و کمبودها، محدودیت‌های پمپاژ و تغذیه آبخوان، اندرکنش رودخانه و آبخوان، پیوستگی، هیدرولیک جریان و محدودیت‌های دبی رودخانه و تأمین نیازهای زیست‌محیطی در پایین دست رودخانه می‌باشند. همچنین در توسعه مدل‌های بهینه‌سازی سیکلی و غیر سیکلی فرضیات ساده‌کننده‌ای در نظر گرفته شده است (Afshar et al., 2019; Alimohammadi, 2005).

Table 1- Performance of the decision tree in the baseline period (1990-2000)

جدول ۱- عملکرد مدل درخت تصمیم در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۰۰)

	Precipitation				Temperature			
	CC*		RMSE** (normalized)		CC		RMSE (normalized)	
	Train	Verify	Train	Verify	Train	Verify	Train	Verify
Ensemble Model	0.74	0.66	0.129	0.143	0.96	0.91	0.056	0.071
MRI-CGCM3 Model	0.81	0.73	0.112	0.134				
CMCC-CMS Model					0.98	0.93	0.054	0.069

* Correlation Coefficient (CC)

** Root Mean Square Error (RMSE)

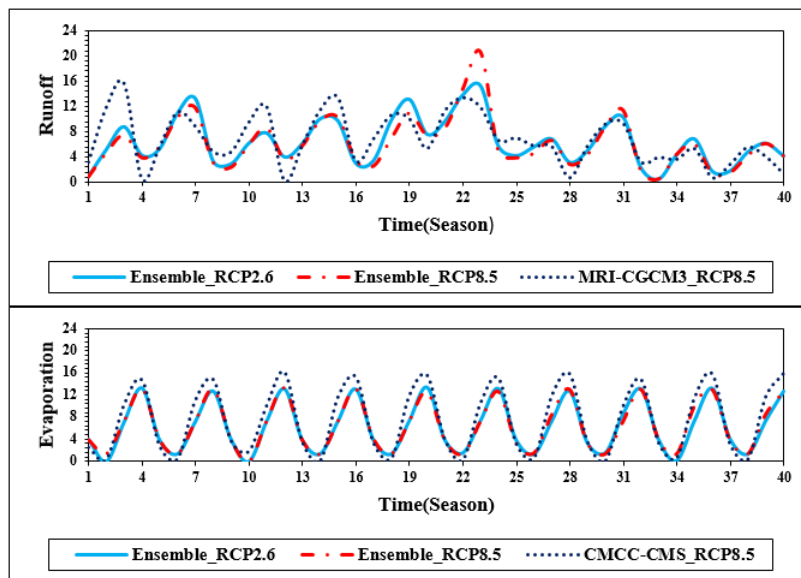


Fig. 2- Seasonal values of (a) Runoff (mcm) and (b) Evaporation (mm) in the 2021-2031
 شکل ۲- مقادیر فصلی (الف) رواناب (م.م.م) و (ب) تبخیر (میلی متر) در ۲۰۲۱-۲۰۳۱

کمبود آبی برحسب هزینه در هر دو رویکرد سیکلی و غیر سیکلی در ابتدا زیاد و رفته رفته کم می‌گردد؛ بنابراین با ساخت سیستم‌های کوچک با هر دو رویکرد سیکلی و غیر سیکلی، افزایش ناچیز هزینه می‌تواند عملکرد سیستم را به طور قابل توجهی بهبود ببخشد. این در حالی است که به منظور بهبود عملکرد سیستم‌های بزرگ می‌بایست هزینه‌های بسیار بیشتری را صرف نمود؛ اما در هر صورت، طراحی سیستم‌های منابع آب بر اساس جواب‌های پارتویی مستخرج شده از رویکرد سیکلی منجر به نتایج مطلوب‌تری نسبت به رویکرد دیگر طراحی می‌گردد.

پس از حل مدل‌های بهینه‌سازی سیکلی و غیر سیکلی با استفاده از روش ϵ -Constrain، جواب‌های پارتویی به ازای سناریوهای تغییر اقلیمی متفاوت به صورت شکل ۳ به دست آمدند. با توجه به شکل ۳ تعداد جواب‌های پارتویی و راه‌حل‌های ممکن برای سناریو سیکلی به طور قابل توجهی بیشتر از رویکرد غیر سیکلی است. علاوه بر این در رویکرد سیکلی با صرف هزینه بیشتر می‌توان مقدار کمبود آبی را کاهش و پایداری آب‌های زیرزمینی را افزایش داد. این در حالی است که در رویکرد غیر سیکلی این قابلیت به طور قابل توجهی محدود می‌گردد. با توجه به شکل ۳ به ازای یک S_{final}^g ، شیب تغییرات نمودار

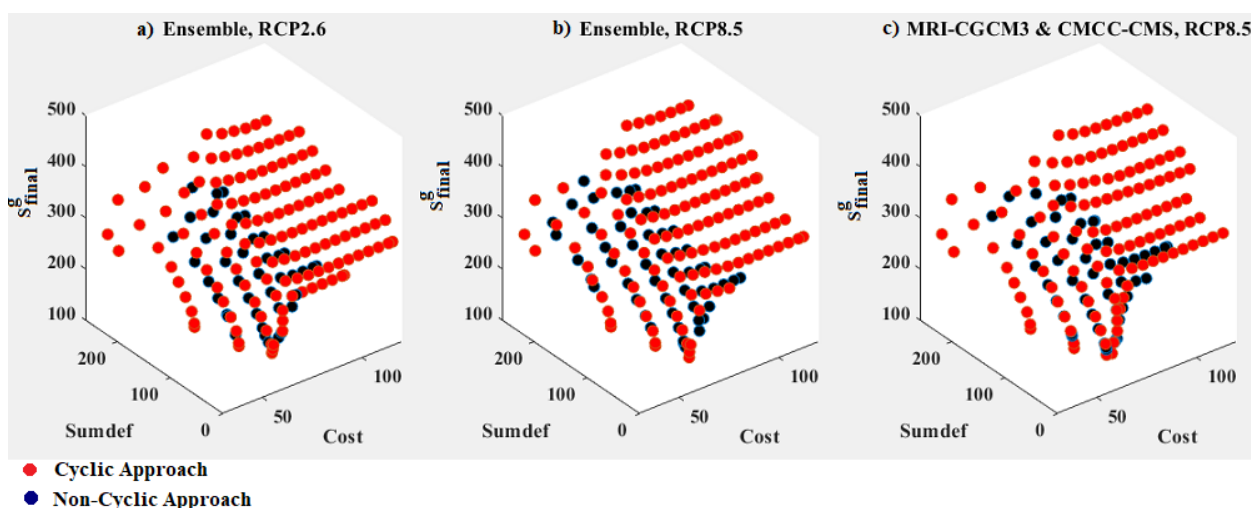


Fig. 3- Pareto solutions of (a) Ensemble_RCP2.6, (b) Ensemble_RCP8.5 and (c) MRI-CGCM3 & CMCC-CMS_RCP8.5

شکل ۳- نقاط پارتویی (الف) Ensemble_RCP2.6، (ب) Ensemble_RCP8.5 و (پ) CMCC-CMS & MRI-CGCM3_RCP8.5

به نتایج می‌توان پی برد که در رویکرد سیکلی مقدار از دسترس خارج شدن آب از رودخانه، حدود ۴۰ میلیون مترمکعب کمتر از رویکرد غیر سیکلی شده و این مقدار آب صرف تغذیه آبخوان شده است. از این روست که به ازای یک هزینه و کمبود آبی مشخص، S_{final}^g در رویکرد سیکلی بیشتر از رویکرد دیگر طراحی می‌گردد. با توجه به اینکه در رویکرد غیر سیکلی تغذیه مصنوعی صرفاً در مواقع سرریز آب از مخزن سطحی صورت می‌پذیرد، بنابراین حجم تغذیه آبخوان نسبت به رویکرد سیکلی کمتر بوده و به منظور افزایش پایداری آبخوان‌ها به ازای یک $Cost$ و $Sumdef$ مشخص، نمی‌توان برداشت زیادی از آبخوان‌ها داشت. از این روست که در رویکرد غیر سیکلی تأمین نیاز از طریق سیستم انحراف رودخانه بسیار بیشتر از رویکرد سیکلی صورت می‌پذیرد. از دیگر نکات شکل ۴-ت آن است که در رویکرد سیکلی تراز آبخوان بسیار بیشتر از رویکرد غیر سیکلی است و این امر می‌تواند مقدار انرژی مصرفی توسط پمپاژ را بشدت کاهش دهد.

۳-۲- تغییر اقلیم

بر مبنای داده‌های سه مدل گردش کلی جو (Ensemble, CMCC-) در منطقه مورد مطالعه در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۳۱ می‌گردد. طبق داده‌های تغییر اقلیمی مدل Ensemble، با فرض انتشار کربن با نرخ پیشنهادی سناریو RCP2.6 در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۳۱، مقدار بارش و رواناب کمتر از زمانی می‌گردد که نرخ تولید کربن با سناریو RCP8.5 تطابق داشته باشد. با بررسی عملکرد سیستم‌های ذخیره سیکلی و غیر سیکلی تحت سناریوهای مدل Ensemble (شکل ۵)، در صورت وقوع RCP2.6 در مقایسه با RCP8.5، رویکرد سیکلی عملکرد بهتری را خواهد داشت.

در واقع همان‌طور که ذکر شد، مدل‌های سیکلی و غیر سیکلی بر اساس سه تابع هدف حداقل کردن کمبود آبی، بیشینه نمودن ذخیره آبخوان در پایان بهره‌برداری و کمینه کردن هزینه‌ها طراحی گشته‌اند. حال با ثابت در نظر گرفتن دو تابع هدف از سه تابع مورد نظر، تابع هدف سوم در طراحی بر مبنای رویکرد سیکلی مقادیر مطلوب‌تری را نتیجه می‌دهد.

۳-۱- پایداری منابع آب زیرزمینی

هدف از این بخش آن است که نشان داده شود با صرف هزینه مشخص و تحمیل کمبود آبی مساوی، حجم ذخیره آبخوان در پایان دوره شبیه‌سازی (S_{final}^g) در رویکرد سیکلی بسیار بیشتر از رویکرد غیر سیکلی می‌گردد. بدین منظور از مجموعه جواب‌های پارتویی نشان داده‌شده در شکل ۳-الف، دو جواب پارتویی سیکلی و غیر سیکلی انتخاب و نتایج آن‌ها مقایسه می‌گردند. نقاط پارتو انتخابی در رویکرد سیکلی و غیر سیکلی به ترتیب $(Cost = 60, Sumdef = 0, S_{final}^g = 255)$ و $(Cost = 60, Sumdef = 0, S_{final}^g = 215)$ می‌باشند. در دو جواب پارتو انتخابی، مقدار کمبود آبی و هزینه صرف شده برابر، لیکن اتخاذ رویکرد سیکلی منجر به افزایش ۱۸ درصدی حجم ذخیره نهایی آبخوان نسبت به اتخاذ رویکرد غیر سیکلی شده است. جدول ۲ و شکل ۴ مقایسه بهتری از این دو جواب انتخابی نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید با صرف هزینه مشخص و تحمیل یک مقدار مشخص کمبود آبی به منطقه نیاز، در رویکرد سیکلی می‌توان پایداری آب‌های زیرزمینی را بیشتر تضمین نمود. این در حالی است که این سطح از پایداری به دلیل برداشت کمتر از آبخوان‌ها نبوده، بلکه در رویکرد سیکلی چیزی حدود ۷۱ میلیون مترمکعب نیز آب بیشتر از آبخوان استخراج شده است. با نگاه اجمالی

Table 2- Results for Pareto solutions ($Cost = 60, Sumdef = 0, S_{final}^g = 255$) and ($Cost = 60, Sumdef = 0, S_{final}^g = 215$)

جدول ۲- نتایج برای جواب‌های پارتویی ($Cost = 60, Sumdef = 0, S_{final}^g = 255$) و ($Cost = 60, Sumdef = 0, S_{final}^g = 215$)

Component	CSS	NCSS	Variables	CSS	NCSS
	Capacity	Capacity		Volume	Volume
Reservoir	7.00	7.00	$\sum Q_{riv}^{out}$	50.23	90.22
Reservoir to demand area	2.89	2.89	$\sum R_d^s(t)$	96.85	92.48
Reservoir to artificial recharge area	0.00	0.00	$\sum R_{ar}^s(t)$	0.00	0.00
River diversion to demand area	0.00	4.79	$\sum Div_d(t)$	0.00	74.94
River diversion to artificial recharge area	3.80	0.08	$\sum Div_{ar}(t)$	99.17	1.09
Aquifer to reservoir	0.00	0.00	$\sum R_d^g(t)$	163.15	92.58

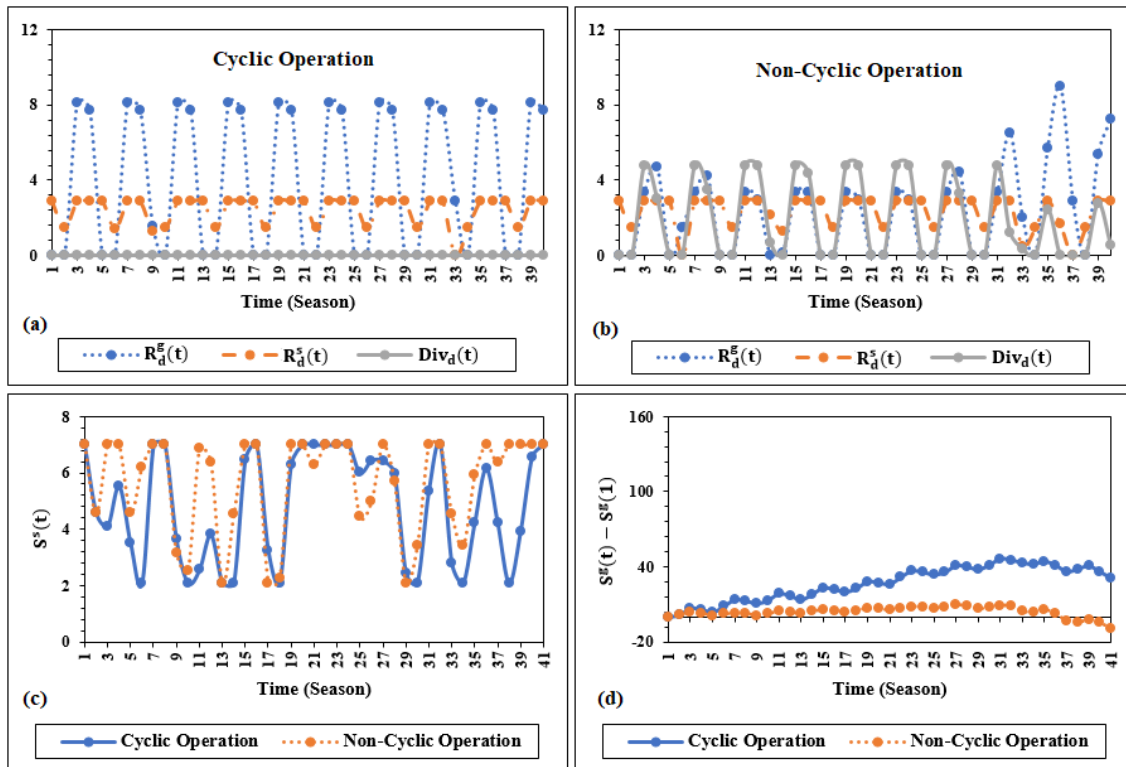


Fig. 4- Results for Pareto solutions (Cost = 60, Sumdef = 0, $S_{final}^g = 255$) and (Cost = 60, Sumdef = 0, $S_{final}^g = 215$)

شکل ۴- نتایج برای جواب‌های پارتویی (Cost = 60, Sumdef = 0, $S_{final}^g = 255$) و (Cost = 60, Sumdef = 0, $S_{final}^g = 215$)

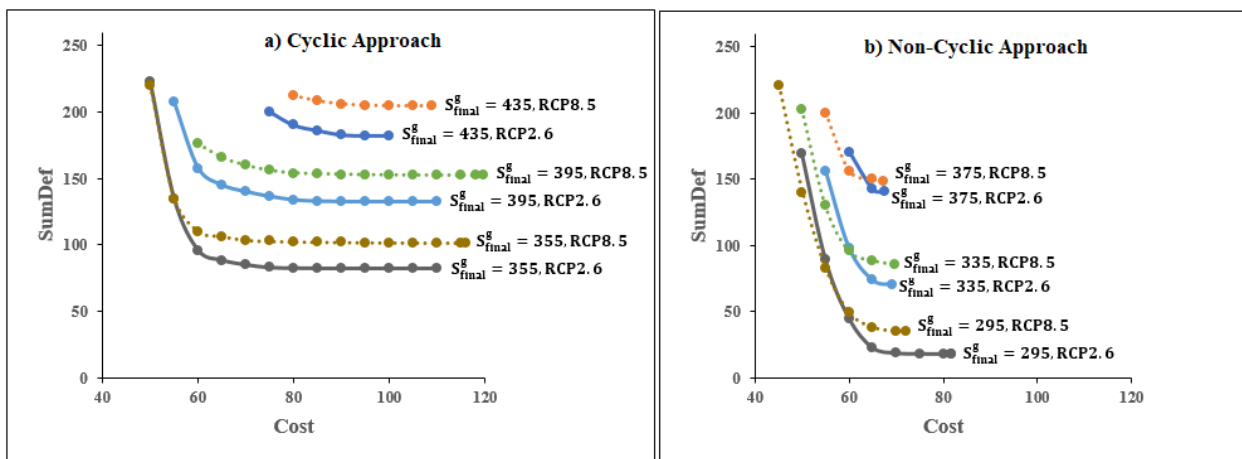


Fig. 5- Performance (a) CSS and (b) NCSS under RCP2.6 and RCP8.5 (Ensemble model)
شکل ۵- عملکرد (الف) CSS و (ب) NCSS تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 (مدل Ensemble)

نمی‌گردد و توزیع زمانی رواناب است که نقش تعیین‌کننده در جواب نهایی دارد. در رویکرد سیکلی به دلیل تبادل سیکلی آب بین مخزن سطحی و زیرزمینی، آب در فصول/سال‌های تر در آبخوان ذخیره می‌گردد و در فصول خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این‌رو در سیستم‌های ذخیره سیکلی، افزایش کل رواناب در کل دوره شبیه‌سازی، منجر به بهبود عملکرد سیستم می‌گردد. حال آنکه در

این در حالی است که در رویکرد غیر سیکلی، این امر در سیستم‌های بزرگ (پرهزینه) رخ می‌دهد. به عبارت دیگر در سیستم‌های غیر سیکلی کوچک (کم‌هزینه) در صورت وقوع RCP8.5 و در سیستم‌های غیر سیکلی بزرگ (پرهزینه) در صورت وقوع RCP2.6، عملکرد سیستم بهبود خواهد یافت. در توجیه این امر می‌بایست توجه نمود که لزوماً افزایش کل رواناب در دوره شبیه‌سازی، منجر به بهبود عملکرد سیستم

پی‌نوشت‌ها

- 1- Cyclic Storage System (CSS)
- 2- Non-Cyclic Storage System (NCSS)

۶- مراجع

- Abbasian M, Moghim S, and Abrishamchi A (2019) Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 135(3-4):1465-1483
- Afshar A, Khosravi M, and Molajou A (2019) Sustainable conjunctive operation of water resources in agriculture sector: cyclic storage approach. *Iran-Water Resources Research* 15(4):381-395 (In Persian)
- Afshar A, Khosravi M, Ostadrahimi L, and Afshar A (2020) Reliability-based multi-objective optimum design of nonlinear conjunctive use problem; cyclic storage system approach. *Journal of Hydrology* 125109
- Afshar A, Ostadrahimi L, Ardeshtir A, and Alimohammadi S (2008) Lumped approach to a multi-period-multi-reservoir cyclic storage system optimization. *Water Resources Management* 22(12):1741-1760
- Afshar A, Zahraei A, and Mariño MA (2010) Large-scale nonlinear conjunctive use optimization problem: Decomposition algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(1):59-71
- Alimohammadi S (2005) Optimum design and operation of joint surface and groundwater systems cyclic storage approach. Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (In Persian)
- Alimohammadi S, Afshar A, and Mariño MA (2009) Cyclic storage systems optimization: Semidistributed parameter approach. *American Water Works Association* 101(2):90-103
- Alimohammadi S and Afshar A (2011) Cyclic storage systems optimization; design model fundamentals and formulation. *Iran-Water Resources Research* 7(3):1-20 (In Persian)
- Ansari S, Massah BA, and Bagheri A (2019) Evaluation of adaptation strategies to climate change based on social, economic and environmental water security indicators. *Iran-Water Resources Research* 14(5):237-253 (In Persian)
- Bloomfield JP, Marchant BP, and McKenzie AA (2019) Changes in groundwater drought associated with

رویگرد غیر سیکلی، آبخوان صرفاً در فصول پر آب و با تسخیر سیلاب تغذیه می‌گردد. با دقت به نتایج شکل ۵ می‌توان به این موضوع پی برد که با بزرگ‌تر شدن سیستم، رویکرد سیکلی و غیر سیکلی عملکرد نزدیک‌تری به هم دارند. در واقع بزرگ‌تر شدن سیستم به معنای کم شدن کمبود آبی و تأمین بخش بیشتر نیاز آبی است. این بدان معنی است که در هر گام زمانی بخش بیشتر آب سطحی به سمت منطقه نیاز هدایت‌شده و نقش ذخیره خشک‌سالی آبخوان کمرنگ‌تر شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر نتایج مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه سیکلی و غیرسیکلی باهدف بیشینه نمودن ذخیره آب‌های زیرزمینی در پایان دوره بهره‌برداری، حداقل کردن کمبود آبی و هزینه‌ها (شامل هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از زیرسیستم‌های مختلف، هزینه پمپاژ و تغذیه مصنوعی آبخوان) ارائه شده‌اند. حل این مدل‌ها با استفاده از روش ϵ -Constrain منجر به جواب‌های پارتویی در فضای سه‌بعدی شد که توزیع مکانی این جواب‌ها بیانگر برتری اتخاذ رویکرد سیکلی به‌جای رویکرد غیر سیکلی در مدیریت عرضه منابع آب سطحی و زیرزمینی است. طبق داده‌های اقلیمی مدل Ensemble، با فرض انتشار کربن با نرخ پیشنهادی سناریو RCP2.6 در دوره آتی ۲۰۳۱-۲۰۲۱، مقدار بارش و رواناب کمتر از زمانی می‌گردد که نرخ تولید کربن با سناریو RCP8.5 تطابق داشته باشد. با بررسی عملکرد سیستم‌های ذخیره سیکلی و غیر سیکلی تحت سناریوهای مدل Ensemble در صورت وقوع RCP2.6 در مقایسه با RCP8.5، رویکرد سیکلی عملکرد بهتری را خواهد داشت. این در حالی است که در رویکرد غیر سیکلی، این امر صرفاً در سیستم‌های بزرگ (پرهزینه) رخ می‌دهد. در توجیه این امر، نتایج نشان دادند که تبادل سیکلی آب بین مخزن سطحی و زیرزمینی و به عبارتی اتخاذ رویکرد سیکلی منجر به مدیریت و کنترل بیشتر منابع آبی می‌گردد. با توجه به اینکه تغییر اقلیم علاوه بر خشک‌سالی می‌تواند شدت و فرکانس پدیده‌های حدی همچون سیل را افزایش دهد، بررسی سازگاری سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی منابع آب باهدف کنترل سیلاب تحت دو رویکرد سیکلی و غیر سیکلی برای مطالعات آتی به‌منظور تکمیل این مطالعه می‌تواند موردبررسی قرار گیرد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های بنیاد ملی نخبگان برای انجام این تحقیق که در چارچوب گرانت ۹۶۰۱۰۱۷۵ انجام شده است، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنند.

- sustainable groundwater management. *Water Resources Research* 53(3):2384-2403
- Maddock III T (1972) Algebraic technological function from a simulation model. *Water Resources Research* 8(1):129-134
- Medellín-Azuara J, MacEwan D, Howitt RE, Koruakos G, Dogrul EC, Brush CF, and ... & Lund JR (2015) Hydro-economic analysis of groundwater pumping for irrigated agriculture in California's Central Valley, USA. *Hydrogeology Journal* 23(6):1205-1216
- Miro ME and Famiglietti JS (2019) A framework for quantifying sustainable yield under California's Sustainable Groundwater Management Act (SGMA). *Sustainable Water Resources Management* 5(3):1165-1177
- Nourani V, Davanlou Tajbakhsh A, Molajou A, and Gokcekus H (2019a) Hybrid wavelet-M5 model tree for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineers* 24(5):1-14
- Nourani V, Razzaghzadeh Z, Baghanam AH, and Molajou A (2019b) ANN-based statistical downscaling of climatic parameters using decision tree predictor screening method. *Theoretical and Applied Climatology* 137(3-4):1729-1746
- Nourani V, Rouzegari N, and Molajou A (2020) An integrated simulation-optimization framework to optimize the reservoir operation adapted to climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 587:2-19
- Nourani V, Tajbakhsh AD, and Molajou A (2019c) Data mining based on wavelet and decision tree for rainfall-runoff simulation. *Hydrology Research* 50(1):75-84
- Pavelic P, Srisuk K, Saraphirom P, Nadee S, Pholkern K, Chusanathas S, Munyou S, Tangsutthinon T, Intarasut T, and Smakhtin V (2012) Balancing-out floods and droughts: Opportunities to utilize floodwater harvesting and groundwater storage for agricultural development in Thailand. *Journal of Hydrology* 470:55-64
- Rahmati O, Golkarian A, Biggs T, Keesstra S, Mohammadi F, and Daliakopoulos IN (2019) Land subsidence hazard modeling: Machine learning to identify predictors and the role of human activities. *Journal of Environmental Management* 236:466-480
- Sayed E, Riad P, Elbeih SF, Hassan AA, and Hagraas M (2020) Sustainable groundwater management in arid regions considering climate change impacts in Moghra region, Egypt. *Groundwater for Sustainable Development* 100385
- anthropogenic warming. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(3):1393-1408
- Fang C, Sun S, Jia S, and Li Y (2019) Groundwater level analysis using regional Kendall test for trend with spatial autocorrelation. *Groundwater, Wiley Online Library* 57(2):320-328
- Ghamarnia H and Lorestani M (2018) Evaluating the efficiency of temperature empirical based methods for estimating evapotranspiration in different climate conditions (case study of Iran). *Water and Irrigation Management* 8(2):303-319
- Golfam P, Ashofteh PS, Rajaei T, and Chu X (2019) Prioritization of water allocation for adaptation to climate change using Multi-Criteria Decision Making (MCDM). *Water Resources Management* 33(10):3401-3416
- Hamamouche MF, Kuper M, Riaux J, and Leduc C (2017) Conjunctive use of surface and ground water resources in a community-managed irrigation system-The case of the Sidi Okba palm grove in the Algerian Sahara. *Agricultural Water Management* 193:116-130
- Hashemi H, Berndtsson R, and Persson M (2015) Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modelling in arid Iran. *Hydrological Sciences Journal* 60(2):336-350
- Her Y, Yoo S, Seong C, Jeong J, Cho J, and Hwang S (2016) Comparison of uncertainty in multi-parameter and multi-model ensemble hydrologic analysis of climate change. *Science of the Total Environment* 1-44
- Jahanpour MA, Afshar A, and Alimohammadi S (2013) Optimum management of cyclic storage systems: A simulation-optimization approach. *American Water Works Association* 105(11):E671-E683
- Jeyrani F (2018) Review of concepts and principals of climate change adaptation plans. *Iran-Water Resources Research* 14(4):263-268 (In Persian)
- Kharrufa NS (1985) Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beiträge zur Hydrologie* 5(1):39-47
- Khosravi M, Afshar A, Molajou A (2020) Reliability-based design of conjunctive use water resources systems: comparison of cyclic and non-cyclic approaches. *Journal of Water and Wastewater (In Persian)*
- MacEwan D, Cayar M, Taghavi A, Mitchell D, Hatchett S, and Howitt R (2017) Hydroeconomic modeling of

Tegegne G, Kim Y, and Lee J (2019) Spatiotemporal reliability ensemble averaging of multimodel simulations. *Geophysical Research Letters* 46(21):12321-12330

Willis R and Liu P (1984) Optimization model for ground-water planning. *Journal of Water Resources Planning and Management* 110(3):333-347

Sekar I and Randhir TO (2007) Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology* 334(1-2):39-52

Sikdar PK (2018) *Groundwater development and management: Issues and challenges in South Asia*. Springer, 529p