

Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.7, pp: 90-101

# Reliability-Based Design of Conjunctive Use Water Resources Systems: Comparison of Cyclic and Non-Cyclic Approaches

M. Khosravi<sup>1</sup>, A. Afshar<sup>2</sup>, A. Molajou<sup>3</sup>

1. PhD Candidate, Dept. of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) [mina.khosravi100@gmail.com](mailto:mina.khosravi100@gmail.com)
2. Prof., Dept. of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
3. PhD Candidate, Dept. of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received Sep. 11, 2019 Accepted June 5, 2020)

#### To cite this article:

Khosravi, M., Afshar, A., Molajou, A. 2021. "Reliability-based design of conjunctive use water resources systems: comparison of cyclic and non-cyclic approaches". Journal of Water and Wastewater, 31(7), 90-101.  
Doi: 10.22093/wwj.2020.201234.2924. (In Persian)

## Abstract

Conjunctive use of surface and groundwater has received growing attention since the introduction of sustainable development of water resources. Cyclic storage system is an extension to conjunctive use of surface and groundwater in which the surface water bodies and groundwater aquifer(s) satisfy the prespecified demands in an interactive loop. Cyclical exchange of regulated water between groundwater aquifer and surface reservoir is the key element of a cyclic storage system that differentiates it from the conjunctive use of surface and groundwater systems as usually practiced. In the present study, reliability-based design of the cyclic and non-cyclic storage systems models is formulated as a multi-objective programming and intends to minimize the construction and operation costs and maximize the reliability of water allocation to the agricultural sector. Results show that the performance of cyclic storage system significantly improves by more efficient storing of surface water in a groundwater basin in wet seasons (years) and using it during dry periods. So, in order to fully meet the present demands in cyclic strategy, we had to pay just under 90.4 billion rials, compared to the non-cyclic strategy. It is also shown that, for any given cost, the reliability with cyclic strategy well exceeds that of non-cyclic strategy. In addition, the cyclic design of the system implicitly reduces the probability of flooding downstream significantly rather than the non-cyclic strategy.

**Keywords:** Sustainable Development, Conjunctive Use, Cyclic Storage System, Non-Cyclic Storage System, Reliability-Based Design.

مجله آب و فاضلاب، دوره 31، شماره 7، صفحه: 90-101

## طراحی سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی منابع آب بر مبنای اعتمادپذیری: مقایسه رویکردهای سیکلی و غیرسیکلی

مینا خسروی<sup>۱</sup>، عباس افشار<sup>۲</sup>، امیر مولاجو<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) [mina.khosravi100@gmail.com](mailto:mina.khosravi100@gmail.com)

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(دریافت ۹۸/۷/۲۰ پذیرش ۹۹/۳/۱۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

خسروی، م.، افشار، ع.، مولاجو، ا.، ۱۳۹۹، "طراحی سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی منابع آب بر مبنای اعتمادپذیری: مقایسه رویکردهای سیکلی و غیرسیکلی" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۷)، ۹۰-۱۰۱. Doi: 10.22093/wwj.2020.201234.2924

### چکیده

بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی از زمان معرفی توسعه پایدار منابع آب مورد توجه زیادی قرار گرفته است. سیستم ذخیره سیکلی، گونه‌ای از سیستم‌های تلفیقی منابع آب است که در آن دو زیرسیستم آب سطحی و زیرزمینی ضمن تأمین نیازهای تعهد شده، یک حلقه تعاملی بینابینی را به وجود می‌آورند. تبادل سیکلی آب تنظیم شده بین مخزن سطحی و زیرزمینی، عنصر اصلی سیستم ذخیره سیکلی است که آن را از بقیه سیستم‌های تلفیقی رایج منابع آب که در این پژوهش از آن تحت عنوان سیستم غیرسیکلی یاد شده است، متمایز می‌کند. در این پژوهش، مدل‌های طراحی بر مبنای اعتمادپذیری سیستم‌های ذخیره سیکلی و غیرسیکلی با اهداف کمینه کردن هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری و ماکسیمم کردن اعتمادپذیری تخصیص آب به بخش کشاورزی فرموله شدند. نتایج نشان داد که عملکرد سیستم ذخیره سیکلی با ذخیره مؤثر آب در آبخوان در فصل (سال)‌های مرطوب و استفاده از آن در دوره‌های خشکسالی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. به طوری که به منظور برآورده ساختن کامل نیاز آبی، هزینه طراحی سیستم با استراتژی سیکلی، ۹۰/۴ میلیارد ریال نسبت به استراتژی غیرسیکلی کاهش می‌یابد. همچنین با صرف هزینه مشخص، اعتمادپذیری در استراتژی سیکلی نسبت به استراتژی غیرسیکلی به صورت چشمگیری بهبود می‌یابد. علاوه بر این طراحی سیکلی سیستم در مقایسه با طراحی غیرسیکلی آن، به طور ضمنی احتمال وقوع سیل در پایین دست را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** توسعه پایدار، بهره‌برداری تلفیقی، سیستم ذخیره سیکلی، سیستم ذخیره غیرسیکلی، طراحی بر مبنای اعتمادپذیری

## ۱- مقدمه

در رویکرد توده‌ای برخلاف رویکرد توزیعی، توزیع مکانی تمام مؤلفه‌های هیدرولیکی در مدل لحاظ نمی‌شود و مخزن زیرزمینی مانند مخزن سطحی شبیه‌سازی می‌شود (Afshar et al., 2008, Ostadrahimi, 2013)

سیستم‌های ذخیره سیکی، گونه‌ای از بهره‌برداری تلفیقی فعال از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی هستند که در آنها زیرسیستم‌های رودخانه، آبخوان، سد و عوامل تغذیه مصنوعی حضور فعالی دارند (Afshar et al., 2010, Afshar et al., 2008). تبادل سیکی آب تنظیم شده بین مخزن سطحی و زیرزمینی، عنصر اصلی سیستم‌های ذخیره سیکی است که آن را از بقیه سیستم‌های تلفیقی رایج منابع آب که در این پژوهش از آن تحت عنوان سیستم‌های غیرسیکی یاد شده است، متمایز می‌کند (Alimohammadi, 2005).

در سیستم ذخیره غیرسیکی (سنتی)، رهاسازی از مخزن سطحی صرفاً به منظور تأمین نیازهای پایین دست اعم از محیط‌زیستی، شهری و کشاورزی در نظر گرفته می‌شود (Afshar et al., 2019). در این سیستم‌ها، تغذیه مصنوعی آبخوان فقط در مواقع سرریز آب از مخزن سطحی با هدف کاهش هزینه‌ها و هدررفت آب از حوضه با انحراف رودخانه انجام می‌شود (Li and Gong, 2002, Sekar and Randhir, 2007, Hamamouche et al., 2017)

در حقیقت در رویکرد غیرسیکی این باور وجود دارد که استفاده از آب تنظیم شده به عنوان 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 (Dahan et al., 2008, Hashemi et al., 2015, Macewan et al., 2017, Pavelic et al., 2012)

در اکثر پژوهش‌های پیشین انجام شده، سیستم‌های ذخیره سیکی با هدف کمینه کردن ارزش حاضر هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری به منظور تأمین نیازهای موجود، طراحی کردند (Afshar et al., 2008, Alimohammadi, 2005, Alimohammadi et al., 2009, Jahanpour et al., 2013)

اخیراً افشار و همکاران، بهره‌برداری از سیستم‌های ذخیره سیکی و غیرسیکی را با هدف ماکسیم کردن شاخص پایداری ارائه داده‌اند. آنها در این پژوهش نشان دادند که بهره‌برداری سیکی از سیستم ۱۷ درصد شاخص پایداری را نسبت به رویکرد

منابع تأمین‌کننده نیاز آبی بخش کشاورزی به دو دسته منابع آب سطحی و زیرزمینی تقسیم می‌شوند. در برداشت از این منابع آب، توجه به چند نکته ضروری است: از یک طرف، نوسان یا عرضه تصادفی منابع آب سطحی موجب شده است که این منابع علی‌رغم حجم زیاد، نتوانند به عنوان منبع مطمئن برای تأمین آب موردنیاز برای آبیاری محصولات کشاورزی به‌شمار آیند (Paydar and Qureshi, 2012, Nayak et al., 2018, Rahmati et al., 2019). بنابراین استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌تواند عرضه آب را مطمئن‌تر کند (Fuchs et al., 2019, Schoups et al., 2006, Rezaei et al., 2017)

از طرف دیگر، عدم تخصیص پایدار منابع آب در بخش کشاورزی، بحران‌های آبی شدیدی را پدید می‌آورد که دارای تبعات اجتماعی، اقتصادی و سیاسی خواهد بود. در این راستا، معیارهای عملکردی که فاکتورهای مختلف ارزیابی سیستم‌اند، ارائه شده‌اند. معیارهای اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری از جمله معیارهای عملکرد سیستم‌های منابع آب هستند که تصویر روشن تری از وضعیت و عملکرد سیستم‌ها در دوره‌های شکست که سیستم توانایی تأمین بخشی از تقاضا را دارد، ارائه می‌کنند (Sandoval-Solis et al., 2011)

با توجه به موضوعات مطرح شده، طراحی و بهره‌برداری مناسب سیستم استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی که بتواند پایداری برداشت از منابع و تخصیص آنها به بخش کشاورزی را تضمین کند، امری لازم و ضروری است (Wang et al., 2016). در این راستا طراحی سیستم‌های منابع آب بر مبنای اعتمادپذیری از زمان‌های دور تا به حال استقبال زیادی از آن شده است (Agarwal, 2004, Afshar et al., 2015, Afshar et al., 2020)

سیستم‌های تلفیقی منابع آب بر اساس انواع روش‌های تغذیه و شبیه‌سازی آبخوان به ترتیب در دسته‌های فعال/غیرفعال و توده‌ای/توزیعی قرار داده می‌شوند. در سیستم تلفیقی غیرفعال، تغذیه آبخوان‌ها به صورت غیرعمدی از طریق تعامل رودخانه و آبخوان، نفوذ عمقی آب در آبخوان به واسطه آبیاری منطقه کشاورزی انجام می‌شود. حال آنکه در بهره‌برداری تلفیقی فعال، در فصول پر آب، بخشی از آب‌های سطحی به صورت عمدی به آبخوان‌ها تزریق می‌شوند (Ostadrahimi, 2013).

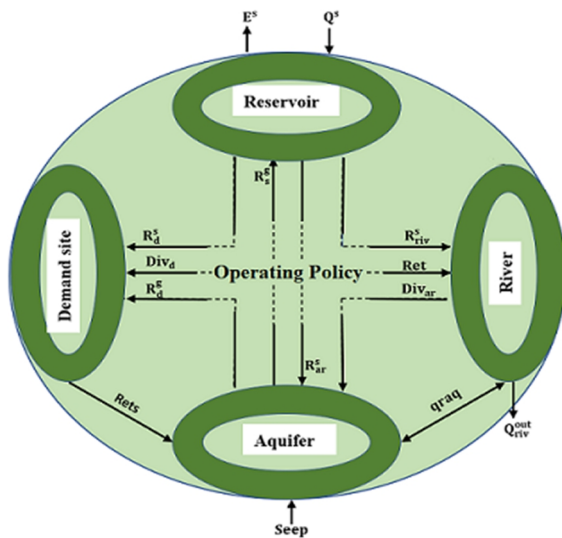


Fig. 1. The main components of a cyclic storage system and interactive loops between them

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

تغذیه آبخوان علاوه برسد، 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 منطقه نیاز به واسطه آبیاری ( $Rets$ ) انجام شود آب در رودخانه، علاوه بر دبی خروجی از سد، به واسطه بارش باران ( $Pr$ )، جریان برگشتی از منطقه نیاز ( $Retr$ ) و تعامل فیزیکی آبخوان و رودخانه ( $qraq$ ) جاری است. همچنین لازم به ذکر است که دبی خروجی از رودخانه با  $Q_{riv}^{out}$  نمایش داده شده است.

در سیستم‌های غیرسیکلی، علاوه بر عدم تعامل دو طرفه آبخوان و سد، نقش تغذیه آبخوان از طریق سیستم‌های انحراف از رودخانه نیز بسیار کم‌رنگ است و فقط در فصول پرآب، به‌منظور جلوگیری از هدررفت آب سرریز شده از سد انجام می‌شود (Afshar et al., 2019).

## ۲-۲- منطقه مورد مطالعاتی

در این پژوهش از داده‌های مربوط به سد کینه ورس و دشت پایین‌دست آن واقع در حوضه آبریز رودخانه ابهر استفاده شد. نیازهای طرح، شامل نیازهای شهری و کشاورزی است که مجموعاً برابر با ۲۶ میلیون مترمکعب در سال است. همچنین در پایین‌دست رودخانه لازم است حقایبه محیط‌زیستی رودخانه تأمین شود. این

غیرسیکلی افزایش می‌دهد. اما این ذهنیت می‌تواند برای همگان ایجاد شود که شاید افزایش پایداری همراه با مصرف منبع دیگری همچون هزینه همراه بود. علاوه بر این با توجه به نیازهای آبی رو به رشد، بررسی پایداری سیستم‌های تلفیقی با دو رویکرد سیکلی و غیرسیکلی تحت سناریوهای نیاز آبی متفاوت ضروری به‌نظر می‌رسد. موضوعاتی که این پژوهشگران به آنها هیچ توجهی نکردند. از این رو در این پژوهش، مقایسه طراحی بر مبنای اعتمادپذیری سیستم‌های سیکلی و غیرسیکلی با اهداف کاهش هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری و ماکسیم کردن اعتمادپذیری تخصیص آب به بخش کشاورزی انجام شده و با ارائه و تحلیل نتایج حاصله، عملکرد سیستم‌های تلفیقی منابع آب تحت این دو استراتژی بررسی شدند. همچنین، نتایج طراحی این دو سیستم بر مبنای شاخص پایداری به‌منظور تأمین نیازهای افزایشی مختلف ارائه شده‌اند (Afshar et al., 2019).

به‌منظور شبیه‌سازی آبخوان و جاسازی تابع پاسخ آن در مدل‌های بهینه‌سازی طراحی سیکلی و غیرسیکلی از روش تعمیم ماتریس پاسخ واحد استفاده شده است (Afshar et al., 2019). این مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه که در دسته مسائل برنامه‌ریزی ریاضی غیرمحدب و غیرخطی مختلط به عدد صحیح هستند، با استفاده از روش  $\epsilon$ -Constrain حل شدند. جبهه پارتوهای حاصله می‌توانند به برنامه‌ریزان آب در تدوین برنامه‌های مدیریتی و طراحی سیستم‌های منابع آب با انتخاب رویکرد مناسب کمک کنند.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- سیستم‌های ذخیره سیکلی و غیرسیکلی

سیستم ذخیره سیکلی از چهار زیرسیستم اصلی تشکیل شده است که عبارت‌اند از: ۱- سد، ۲- آبخوان، ۳- رودخانه و ۴- منطقه نیاز، که در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، جریان ورودی ( $Q^S$ )، تبخیر ( $E^S$ )، حجم ذخیره سد ( $S^S$ )، خروجی سد به رودخانه ( $R_{riv}^S$ )، خروجی سد به منطقه نیاز ( $R_d^S$ )، خروجی سد به آبخوان برای تغذیه مصنوعی آن ( $R_{ar}^S$ ) و انتقال از آبخوان به سد ( $R_s^G$ ) اجزای بالانس حجمی مخزن سطحی را تشکیل می‌دهند. در این سیستم نیاز آبی منطقه کشاورزی علاوه بر سد، می‌تواند از طریق پمپاژ آب از چاه‌های آب زیرزمینی ( $R_d^G$ ) و یا انحراف رودخانه به منطقه نیاز ( $Div_d$ ) نیز تأمین شود. مطابق شکل ۱،

اعتمادپذیری یا قابلیت اطمینان با این مفهوم تعریف می‌شود که با چه احتمالی آب اختصاص یافته به مصرف‌کننده، نیاز آن را تأمین خواهد کرد. این معیار عملکرد، طبق معادله ۲ از تقسیم تعداد گام‌های زمانی موفق به تعداد کل گام‌های زمانی (NT) محاسبه می‌شود (Alfonso et al., 2009).

لازم به ذکر است که چنانچه آب عرضه شده به کاربر، کمتر از آب موردنیاز آن باشد، اصطلاحاً سیستم دچار شکست شده و هرگاه مقدار آب عرضه شده به کاربر برابر با مقدار نیاز آن باشد، سیستم موفق عمل کرده است. اساساً معیار آسیب‌پذیری شدت شکست‌های سیستم را بیان می‌کند و با محدود کردن مقدار کمبود در دوره‌های شکست (معادله ۳)، می‌توان این معیار را کنترل کرد. لازم به ذکر است که هرچه مقدار  $a$  به یک نزدیکتر باشد، سیستم آسیب‌پذیرتر می‌شود (Afshar et al., 2015, Agarwal, 2004, Afshar et al., 2020)

$$Rel = \frac{NOS}{NT} \quad (2)$$

$$Def(t) \leq a \times Demand(t); \quad 0 \leq a \leq 1 \quad (3)$$

مقدار همراه با توزیع فصلی نیازها در جدول ۱ منعکس شده است. با بررسی سری زمانی ۳۱ ساله جریان ورودی به مخزن سد، از یک دوره شاخص ۱۰ ساله به صورت فصلی که شامل سال‌های خشک و مرطوب است، استفاده شد (جدول ۲). سایر اطلاعات موردنیاز از پایان‌نامه دکتری علی‌محمدی قابل استخراج است (Alimohammadi, 2005).

هزینه‌ها شامل هزینه‌های ساخت زیرسیستم‌ها و بهره‌برداری از آنها است. 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 است (Alimohammadi, 2005).

### ۲-۳- معیارهای عملکرد منابع آب

با تعریف مقدار کمبود آب در هر گام زمانی ( $Deficit(t)$ ) از معادله ۱ که بیانگر تفاضل مقدار نیاز آبی ( $Demand(t)$ ) و آب عرضه شده در همان گام ( $Supply(t)$ ) است، می‌توان معیارهای عملکرد اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری را تعریف کرد (Loucks, 1997)

$$Difict(t) = Demand(t) - Supply(t) \quad (1)$$

جدول ۱- نیازهای شهری، کشاورزی و حبابه محیط‌زیستی طرح برحسب میلیون مترمکعب (Alimohammadi, 2005)

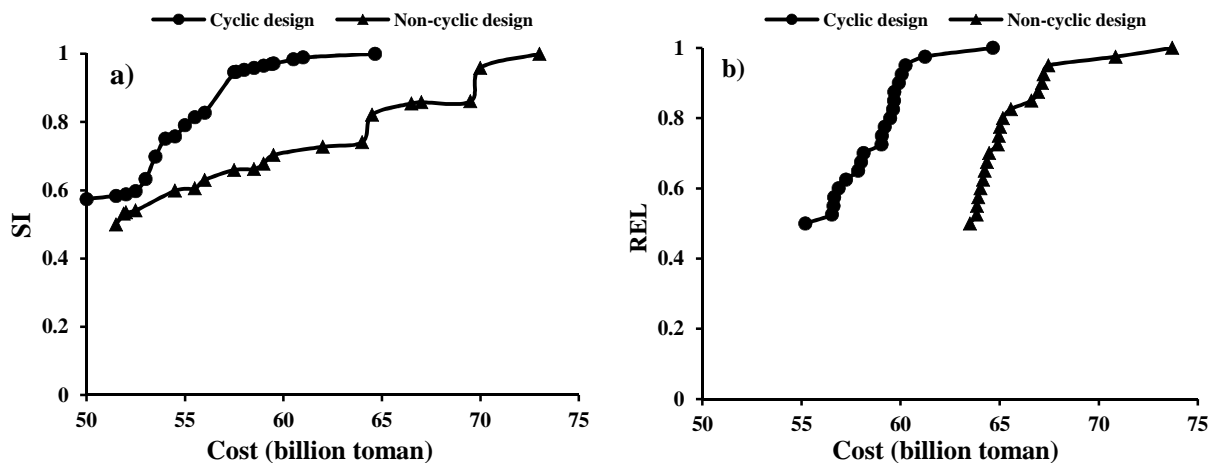
Table 1. Urban, agricultural and environmental demands (MCM) (Alimohammadi, 2005)

Season	Urban	Agriculture	Summation	Seasonal percentage	Environmental
Fall	2.056	0.834	2.890	11.100	0.262
Winter	1.464	0.000	1.464	5.600	0.262
Spring	2.850	8.169	11.019	42.400	0.542
Summer	4.030	6.597	10.627	40.900	0.542
Annual	10.400	15.600	26.000	100.000	1.608

جدول ۲- جریان فصلی ورودی به مخزن سد برحسب میلیون مترمکعب (Alimohammadi, 2005)

Table 2. Seasonal inflow to the reservoir (MCM) (Alimohammadi, 2005)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sum	Percentage
Fall	2.34	2.85	3.59	5.15	15.84	4.96	4.95	3.96	2.77	1.84	48.25	15.27%
Winter	6.54	5.96	8.63	15.70	13.60	11.75	7.89	10.41	5.51	5.17	91.16	28.88%
Spring	7.37	33.59	9.48	15.32	19.58	49.20	6.17	17.85	2.57	5.80	166.93	52.88%
Summer	0.58	1.16	0.87	0.94	1.76	1.45	0.91	0.93	0.52	0.24	9.36	2.97%



**Fig. 2.** Pareto front of a) sustainability index (SI)-operational and construction costs, b) reliability-operational and construction costs in cyclic and non-cyclic designs  
 (شکل ۲- جبهه پارتو a) شاخص پایداری - هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری (میلیارد تومان).  
 b) اعتمادپذیری - هزینه ساخت و بهره‌برداری در طراحی‌های سیکلی و غیرسیکلی

لازم به ذکر است که از شاخص پایداری ارائه شده توسط سندوال سولیس و همکاران برای رسم جبهه پارتو شاخص پایداری - هزینه استفاده شد (Sandoval-Solis et al., 2011).

همچنین جبهه پارتوهای حاصله در رویکرد طراحی بر مبنای اعتمادپذیری، برای اعتمادپذیری‌های بیشتر از ۰/۵ تهیه شد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، به منظور طراحی سیکلی سیستم با قابلیت اطمینان (شاخص پایداری) برابر با طراحی غیرسیکلی آن، باید هزینه بسیار بیشتری صرف کرد. در ادامه به منظور مقایسه جامع و دقیق تر طراحی سیکلی و غیرسیکلی سیستم بر مبنای قابلیت اطمینان (شاخص پایداری)، مشخصات زیرسیستم‌ها و نمودار متغیرهای مختلف سیستم برای اعتمادپذیری (شاخص پایداری) ۱۰۰ درصد ارائه و تجزیه و تحلیل می‌شوند.

جدول ۳ مشخصات زیرسیستم‌ها و متغیرهای مختلف سیستم برای اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد در طراحی سیکلی و غیرسیکلی نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، با وجود بیش از دو برابر بودن ظرفیت سیستم انحراف رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی در طراحی غیرسیکلی نسبت به طراحی سیکلی، ولی بهره‌برداری از این زیرسیستم در طول دوره شبیه‌سازی، در طراحی غیرسیکلی کمتر از طراحی سیکلی است. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد در رویکرد غیرسیکلی، این زیرسیستم فقط در مواقع سرریز آب از مخزن

### ۲-۴- طراحی سیستم‌های ذخیره سیکلی و غیرسیکلی بر مبنای اعتمادپذیری

بهینه‌سازی طراحی بر مبنای قابلیت اطمینان<sup>۱</sup>، به منظور دستیابی به یک طرح بهینه با احتمال شکست مشخص است. این روش طراحی امکان ایجاد مصالحه بین افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه را فراهم می‌کند. در این پژوهش، بهینه‌سازی طراحی سد کینه ورس و زیرسیستم‌های مختلف آن با اهداف ماکسیم کردن اعتمادپذیری تخصیص آب به منطقه کشاورزی و مینیم کردن هزینه‌های ساخت زیرسیستم‌های مختلف و بهره‌برداری از آنها با دو رویکرد سیکلی و غیرسیکلی مورد توجه قرار گرفت. همچنین به منظور کنترل شدت کمبود و آسیب‌پذیری در طول دوره‌های شکست، مقدار کمبود آبرسانی از ۰/۳ نیاز آبی کمتر در نظر گرفته شد. محدودیت‌های مختلفی تابع هدف بهینه‌سازی طراحی سیکلی و غیرسیکلی را مقید می‌سازند. این روابط و محدودیت‌ها به‌طور کامل بیان و تشریح شده‌اند (Afshar et al., 2019).

### ۳- نتایج و بحث

با اجرای مدل چند هدفه طراحی در بهینه‌ساز با دو رویکرد سیکلی و غیرسیکلی، جبهه پارتو اعتمادپذیری - هزینه و نیز جبهه پارتو شاخص پایداری - هزینه به صورت شکل ۲ قابل دستیابی است.

<sup>1</sup> Reliability Based Design Optimization (RBDO)



جدول ۳- خلاصه نتایج حل مدل RBDO برای اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد در طراحی‌های سیکلی و غیرسیکلی

**Table 3.** Results of solving RBDO model with 100% reliability in cyclic and non-cyclic designs

	CSS	NCSS	CSS	NCSS	CSS	NCSS
Component	Capacity	Capacity	Construction cost	Construction cost	Operating cost	Operating cost
Reservoir	10.14	11.68	43.30	46.21	2.60	2.77
Reservoir to demand area	2.89	2.64	5.42	4.95	1.60	1.35
Reservoir to artificial recharge area	0.27	0.00	0.25	0.00	0.07	0.00
River diversion to demand area	1.79	5.67	2.51	7.95	1.21	2.38
River diversion to artificial recharge area	1.30	2.95	0.93	2.07	0.62	0.59
Aquifer to reservoir	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumping	-	-	-	-	4.13	3.94
Artificial recharge	-	-	-	-	1.89	1.48
Total	-	-	52.41	61.18	12.12	12.51
Variables	CSS			NCSS		
$\sum q_{riv}^{out}(z, t)$	130.75			128.93		
$\sum R_{ar}^s(t)$	8.240			0.00		
$\sum Div_{ar}^{riv}(t)$	36.40			35.70		
$S^g(1) - S^g(41)$	0.00			0.00		
$\sum R_d^g(t)$	137.00			124.00		
$\sum Div_d^{riv}(t)$	28.70			55.87		
$\sum R_d^s(t)$	94.30			80.13		

در طراحی غیرسیکلی، سیستم تغذیه مصنوعی فقط از طریق سیستم انحراف رودخانه انجام می‌شود و فقط در فصول سرریز می‌تواند آبخوان را تغذیه کند.

در این نوع طراحی نسبت به طراحی سیکلی، آب کمتری در آبخوان ذخیره می‌شود. بنابراین در طراحی غیرسیکلی، به‌منظور پایداری منابع آب‌های زیرزمینی، حجم آب پمپاژ شده به منطقه نیاز، بسیار کمتر از طراحی سیکلی است (لغو راهکار ۱). پس تنها دو راهکار دیگر می‌تواند به‌منظور جلوگیری از هدررفت آب و تأمین کامل نیاز، استفاده شود. با توجه به ناچیز بودن هزینه سیستم انحراف رودخانه نسبت به هزینه ساخت سد، بزرگ ساختن این زیرسیستم، مقرون‌به‌صرفه نیست (لغو راهکار ۲). بنابراین به‌منظور جلوگیری از هدررفت آب در فصولی که سرریز رخ نمی‌دهد می‌توان نیاز بیشتری را از طریق رودخانه تأمین کرد و به‌این ترتیب

سطحی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. این امر مؤید بهره‌برداری کمتر از این زیرسیستم در رویکرد غیرسیکلی نسبت به رویکرد سیکلی است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در طراحی غیرسیکلی، ظرفیت سیستم انحراف رودخانه به منطقه نیاز بیش از ۳ برابر ظرفیت در طراحی سیکلی است. از دلایل این امر می‌توان به فعال بودن سیستم ظرفیت تغذیه مصنوعی فقط در مواقع سرریز در طراحی غیرسیکلی اشاره کرد. به‌عبارت دیگر، سه راهکار برای تأمین کامل نیاز وجود دارد: ۱- ذخیره آب در آبخوان در فصول پرآب و استفاده از آن در فصول خشک ۲- ذخیره آب در پشت سد و استفاده از آن در فصول خشک ۳- بزرگتر ساختن سیستم‌های متکی به آب سطحی (زیرسیستم‌های انتقال از سد و انحراف رودخانه به منطقه نیاز) و استفاده حداکثری از آنها در فصولی که نیاز قابل توجه است و تأمین مابقی نیاز از ذخیره آبخوان.

این شکل تأمین ناچیز نیاز از طریق زیرسیستم‌های متکی به آب سطحی (زیرسیستم‌های انتقال از سد و انحراف رودخانه به منطقه نیاز) و بیشتر بودن پمپاژ از آبخوان، در دو سال آخر نسبت به سال‌های قبل از آن است. با توجه به ناچیز بودن آورد رودخانه در این ۲ سال، دلیل این امر، رهاسازی ناچیز از سد به رودخانه و تأمین ناچیز نیاز از ذخیره مخزن سطحی، برای رساندن حجم ذخیره سد به حجم اولیه آن در پایان گام شبیه‌سازی است ( $S^s(41) \geq S^s(1)$ ). به همین دلیل، ترجیح مدل در سال‌های اول، تأمین نیاز حداکثری از طریق دو زیرسیستم متکی به آب سطحی و تغذیه آبخوان (شکل ۴) و در دو سال آخر، استفاده از آب ذخیره‌شده در آبخوان در ۸ سال

از دسترس خارج شدن آب از بازه دوم رودخانه را به حداقل رساند. حال آنکه در ادامه نشان داده شده است که در طراحی سیکلی، راهکار ۱ نقش مؤثری در تأمین کامل نیاز دارد.

شکل ۳-ا نمودارهای تأمین نیاز از زیرسیستم‌های مختلف در طراحی سیکلی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، روند تأمین نیاز در ۸ سال اول تقریباً به صورت متناوب تکرار شده است و اولویت مدل برای تأمین نیاز، از طریق سد و رودخانه است.

به عبارت دیگر، زیرسیستم‌های انحراف رودخانه و انتقال از سد به منطقه نیاز با حداکثر ظرفیت خود، نیاز آبی را تأمین کرد و مابقی نیاز از پمپاژ آب‌های زیرزمینی ارضا می‌شود. از نکات قابل توجه

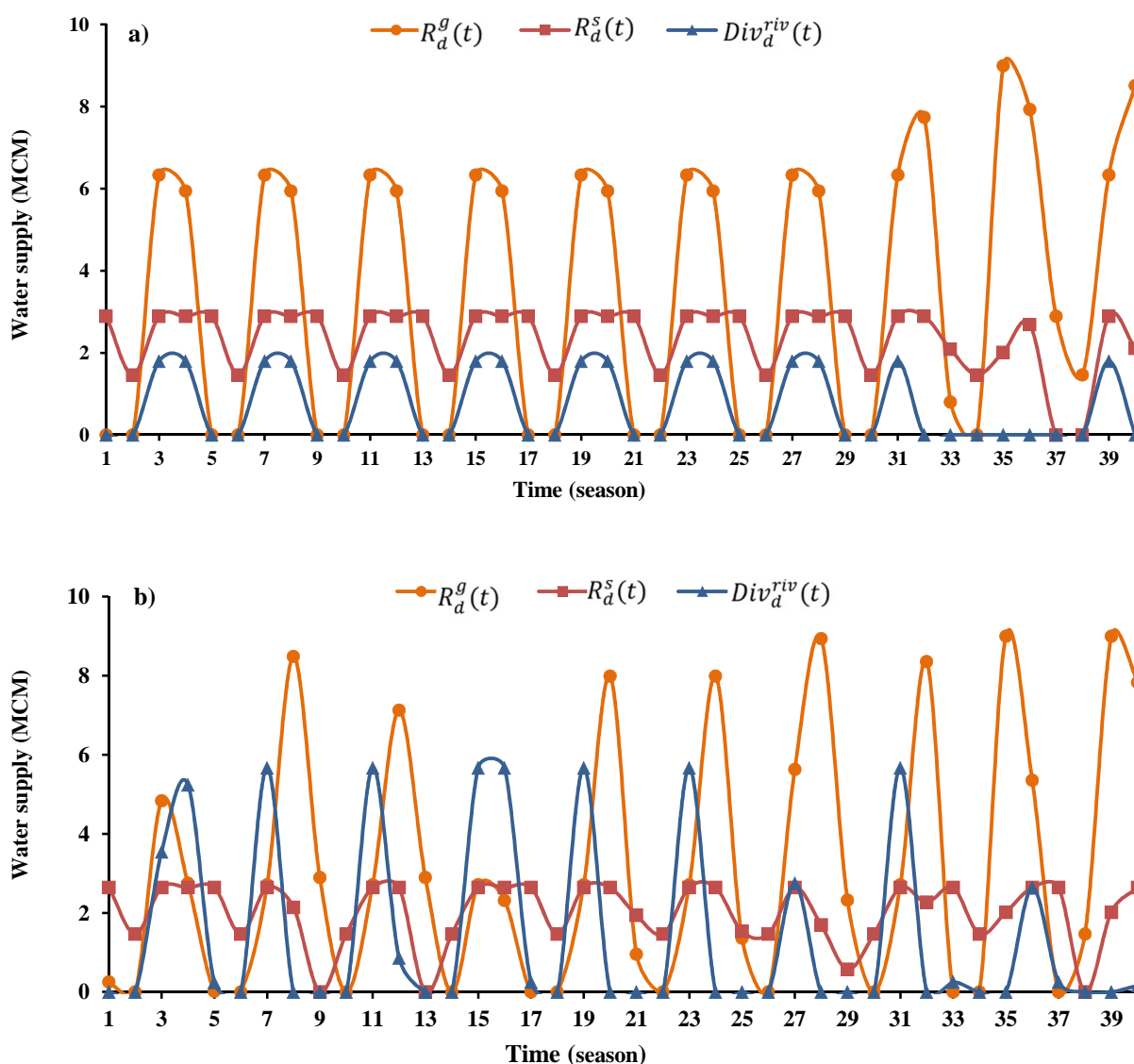


Fig. 3. Water supply graphs by different subsystems in a) cyclic and b) non-cyclic designs  
 شکل ۳- نمودارهای عرضه آب از زیرسیستم‌های مختلف در (a) طراحی‌های سیکلی و (b) غیرسیکلی



توسط سد و عمدۀ نیاز فصل‌های بهار و تابستان توسط پمپاژ آب‌های زیرزمینی و انحراف رودخانه تأمین می‌شود. حال آنکه در طراحی سیکلی، عمدۀ عرضه آب در فصل‌های پرتقاضای بهار و تابستان از پمپاژ آب‌های زیرزمینی است.

شکل ۵ نمودارهای حجم ذخیره و تغییرات حجم ذخیره مخزن سطحی را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲، آورد رودخانه در فصول خشک مانند تابستان کمتر از ۳ درصد کل آورد درازمدت رودخانه را تشکیل می‌دهد. به همین دلیل در فصل‌های تابستان، مقدار آورد رودخانه کمتر از مقدار خروجی از سد بوده و قرار گرفتن نمودار تغییرات حجم ذخیره مخزن در زیر محور افقی، نشان‌دهنده این امر است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در طراحی سیکلی، ۲۰ بار و در طراحی غیرسیکلی، ۱۵ بار مقدار خروجی از سد بیشتر از مقدار آورد رودخانه است. همچنین مجموع مقدار  $\Delta S^s(t)$  در این گام‌های زمانی در طراحی سیکلی  $-71/7$  و در طراحی غیرسیکلی  $-46/9$  است. بنابراین در طراحی سیکلی در

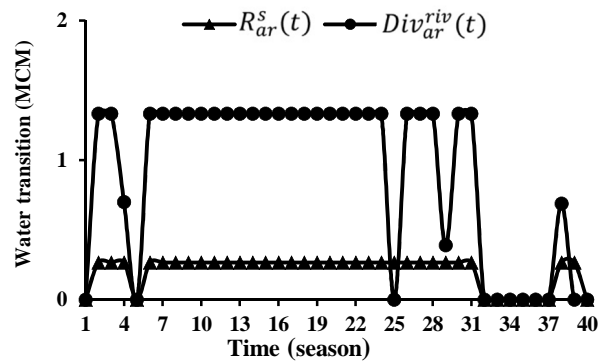


Fig. 4. Graphs of transition from dam and river diversion to the artificial recharge area in cyclic design

شکل ۴- نمودارهای انتقال از سد و انحراف رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی در طراحی سیکلی

اول است. با توجه به شکل ۳-b، نظم کمتری در تأمین نیاز از طریق زیرسیستم‌های مختلف در طراحی غیرسیکلی دیده می‌شود. به طوری که نیاز فصل زمستان (به غیر از سال آخر) و عمدۀ نیاز فصل پاییز،

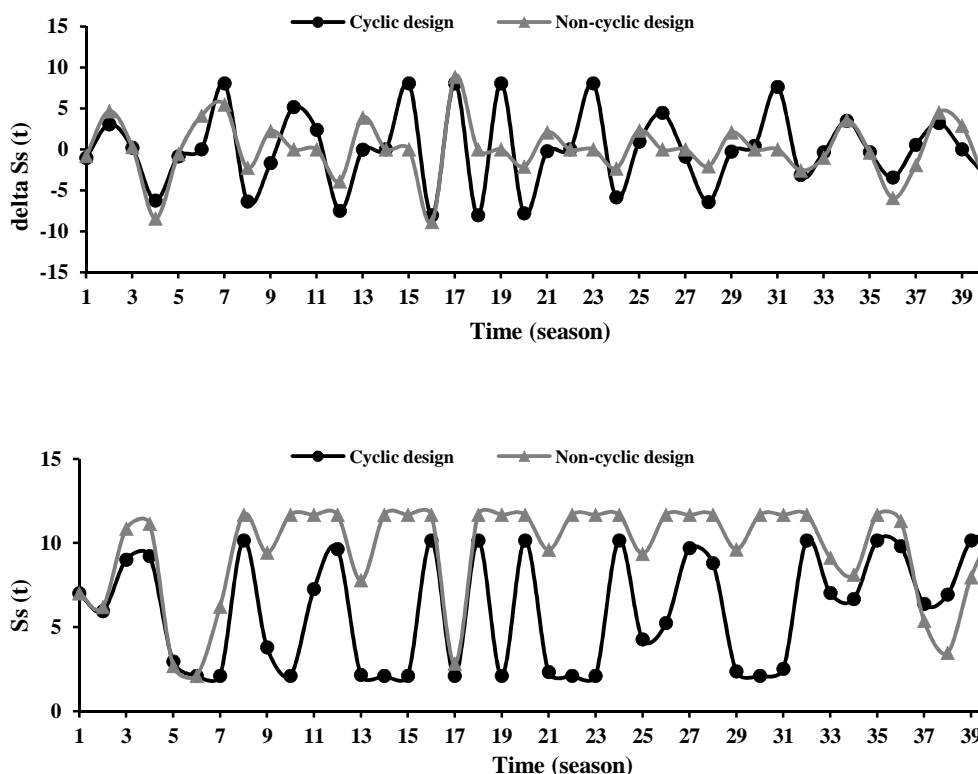


Fig. 5. Reservoir storage volume  $S^s(t)$  and reservoir storage volume changes  $\Delta S^s(t)$  in cyclic and non-cyclic designs

شکل ۵- حجم ذخیره و تغییرات حجم ذخیره مخزن سطحی در طراحی‌های سیکلی و غیرسیکلی

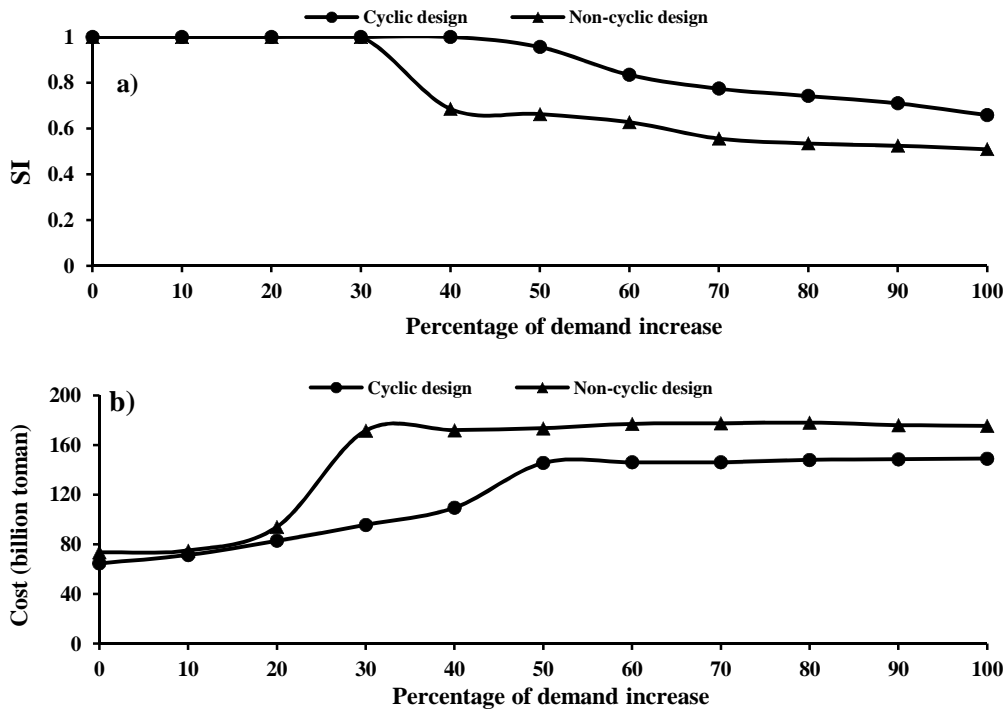


Fig. 6. The graphs of sustainability index and construction and operational costs for various demands in cyclic and non-cyclic designs

شکل ۶- نمودارهای شاخص پایداری - هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری به ازای نیازهای مختلف در طراحی‌های سیکلی و غیرسیکلی

مذکور، نمودارهای مربوطه استخراج شدند. شکل ۶ گزینه‌های پارتویی هزینه - شاخص پایداری را به ازای نیازهای متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش نیاز نیز، سیستم ذخیره سیکلی بسیار بهتر از سیستم ذخیره غیرسیکلی عمل می‌کند. به عنوان مثال با اتخاذ رویکرد سیکلی به جای رویکرد غیرسیکلی به منظور تأمین ۱/۵ برابر نیاز فعلی، مقدار هزینه ساخت و بهره‌برداری سیستم از ۱۷۳/۵ میلیون تومان به ۱۴۵/۵۷ میلیون تومان کاهش و شاخص پایداری آن از ۰/۶۶ به ۰/۹۶ افزایش می‌یابد. علاوه بر این در طراحی سیکلی تا افزایش ۴۰ درصدی نیاز می‌توان سیستم بزرگتری برای تأمین صددرصدی نیاز ساخت، حال آنکه در طراحی غیرسیکلی این مقدار به ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۶ به نظر می‌رسد که با بیشتر شدن نیاز آبی، مقدار بهبود رویکرد سیکلی رو به کاهش و عملکرد سیستم ذخیره سیکلی به سیستم ذخیره غیرسیکلی نزدیکتر می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نتایج طراحی سیستم‌های تلفیقی سیکلی و

مقایسه با طراحی غیرسیکلی، مخزن سطحی به مقدار قابل توجهی جریان رودخانه را تنظیم می‌کند. نکته قابل توجه دیگر این است که ذخیره مخزن سطحی در طراحی سیکلی ۹ بار و در طراحی غیرسیکلی ۲۰ بار، در ماکسیمم ظرفیت خود قرار داشته است و حجم ذخیره مخزن در ۸۵ درصد مواقع در رویکرد غیرسیکلی بیشتر از رویکرد سیکلی است. همچنین، با وجود اینکه ظرفیت سد در حالت سیکلی کمتر از غیرسیکلی است، ولی حجم خالی مخزن در طی ۴۰ فصل در طراحی غیرسیکلی ۸۲/۵۴ میلیون مترمکعب و در طراحی سیکلی ۱۶۴/۴ میلیون مترمکعب است. بنابراین احتمال خطرات جانی و مالی ناشی از سیلاب در طراحی سیکلی بسیار کمتر از طراحی غیرسیکلی است.

#### ۳-۱- افزایش نیاز

در این بخش، سناریوهای افزایش نیاز و هزینه ساخت و بهره‌برداری در طراحی سیکلی و غیرسیکلی، مطرح و تجزیه و تحلیل شدند. به این منظور با افزایش ۱۰، ۲۰، ۳۰ تا ۱۰۰ درصدی نیاز و اجرای مدل طراحی بر شاخص پایداری به ازای نیازهای متفاوت

تومان) برای تأمین صد درصدی نیاز ساخت، حال آنکه در طراحی غیرسیکلی این مقدار به ۳۰ درصد کاهش (با پرداخت ۱۷۱/۵ میلیارد تومان) می‌یابد. اگرچه در این پژوهش نشان داده شد که طراحی سیستم‌های منابع آب با رویکرد سیکلی به‌طور ضمنی به مقدار قابل توجهی خطر سیل در پایین دست را کاهش می‌دهد، ولی طراحی آنها تحت این دو رویکرد با هدف کنترل سیلاب برای پژوهش‌های آینده به‌منظور تکمیل این پژوهش می‌تواند بررسی شود.

### ۵- قدردانی

نویسندگان این پژوهش از حمایت‌های بنیاد ملی نخبگان برای انجام این پژوهش که در چارچوب گرانت ۱۰۱۷۵۰۹۶۰ انجام شده است، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنند.

غیرسیکلی بر مبنای اعتمادپذیری مقایسه شدند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که اتخاذ رویکرد غیرسیکلی در طراحی سیستم‌های منابع آب، به‌دلیل عدم توجه به پتانسیل ظرفیت بالقوه آبخوان، به مقدار قابل توجهی پایداری سیستم‌های منابع آب را کاهش و هزینه‌ها (۹۰/۰۴ میلیارد ریال به ازای تأمین کامل نیاز) را افزایش می‌دهد. علاوه بر این در طراحی سیکلی، حجم خالی مخزن در طول دوره شبیه‌سازی ۸۱/۸۶ میلیون مترمکعب بیشتر از رویکرد غیرسیکلی است و در صورت نیاز می‌تواند برای کنترل سیلاب استفاده شود و هزینه‌ها را کاهش دهد.

در این پژوهش، نتایج مدل‌های طراحی سیکلی و غیرسیکلی بر مبنای شاخص پایداری به ازای نیازهای متفاوت ارائه شدند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که در طراحی سیکلی تا افزایش ۴۰ درصدی نیاز می‌توان سیستم بزرگتری (با پرداخت ۱۰۹/۵ میلیارد

### References

- Afshar, A., Khosravi, M. & 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. & Afshar, A. 2020. Reliability-based multi-objective optimum design of nonlinear conjunctive use problem; cyclic storage system approach. *Journal of Hydrology*, 588, 125109.
- Afshar, A., Masoumi, F. & Solis, S. S. 2015. Reliability based optimum reservoir design by hybrid ACO-LP algorithm. *Water Resources Management*, 29, 2045-2058.
- Afshar, A., Ostadrahimi, L., Ardeshtir, A. & Alimohammadi, S. 2008. Lumped approach to a multi-period-multi-reservoir cyclic storage system optimization. *Water Resources Management*, 22, 1741-1760.
- Afshar, A., Zahraei, A. & Mariño, M. A. 2010. Large-scale nonlinear conjunctive use optimization problem: decomposition algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 59-71.
- Agarwal, H. 2004. Reliability Based Design Optimization: Formulations and Methodologies, PhD Thesis, University of Notre Dame. India.
- Alfonso, L., Jonoski, A. & Solomatine, D. 2009. Multiobjective optimization of operational responses for contaminant flushing in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136, 48-58.
- Alimohammadi, S. 2005. Optimum design and operation of joint surface and groundwater systems cyclic storage approach, PhD Thesis, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran. (In Persian)
- Alimohammadi, S., Afshar, A. & Mariño, M. A. 2009. Cyclic storage systems optimization: semidistributed parameter approach. *Journal-American Water Works Association*, 101, 90-103.
- Dahan, O., Tatarsky, B., Enzel, Y., Kulls, C., Seely, M. & Benito, G. 2008. Dynamics of flood water infiltration and ground water recharge in hyperarid desert. *Groundwater*, 46, 450-461.

- Fuchs, E. H., King, J. P. & Carroll, K. C. 2019. Quantifying disconnection of groundwater from managed - ephemeral surface water during drought and conjunctive agricultural use. *Water Resources Research*, 55, 5871-5890.
- Hamamouche, M. F., Kuper, M., Riaux, J. & 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. & Persson, M. 2015. Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modelling in arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 60, 336-350.
- Jahanpour, M. A., Afshar, A. & Alimohammadi, S. 2013. Optimum management of cyclic storage systems: a simulation-optimization approach. *Journal-American Water Works Association*, 105, E671-E683.
- Li, X. Y. & Gong, J. D. 2002. Compacted microcatchments with local earth materials for rainwater harvesting in the semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 257, 134-144.
- Loucks, D. P. 1997. Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42, 513-530.
- Macewan, D., Cayar, M., Taghavi, A., Mitchell, D., Hatchett, S. & Howitt, R. 2017. Hydroeconomic modeling of sustainable groundwater management. *Water Resources Research*, 53, 2384-2403.
- Nayak, M. A., Herman, J. D. & Steinschneider, S. 2018. Balancing flood risk and water supply in California: policy search integrating short-term forecast ensembles with conjunctive use. *Water Resources Research*, 54, 7557-7576.
- Ostadrahimi, L. 2013. Optimal design and operation of cyclic storage system using a hybrid multi-swarm PSO-LP algorithm, PhD Thesis, University of California, Davis, USA.
- Pavelic, P., Srisuk, K., Saraphirom, P., Nadee, S., Pholkern, K., Chusanathas, S., et al. 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.
- Paydar, Z. & Qureshi, M. 2012. Irrigation water management in uncertain conditions-application of modern portfolio theory. *Agricultural Water Management*, 115, 47-54.
- Rahmati, O., Golkarian, A., Biggs, T., Keesstra, S., Mohammadi, F. & Daliakopoulos, I. N. 2019. Land subsidence hazard modeling: machine learning to identify predictors and the role of human activities. *Journal of Environmental Management*, 236, 466-480.
- Rezaei, F., Safavi, H. R. & Zekri, M. 2017. A hybrid fuzzy-based multi-objective PSO algorithm for conjunctive water use and optimal multi-crop pattern planning. *Water Resources Management*, 31(4), 1139-1155.
- Sandoval-Solis, S., Mckinney, D. C. & Loucks, D. P. 2011. Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137, 381-390.
- Schoups, G., Addams, C. L., Minjares, J. L. & Gorelick, S. M. 2006. Sustainable conjunctive water management in irrigated agriculture: model formulation and application to the Yaqui Valley, Mexico. *Water Resources Research*, 42, W10417.
- Sekar, I. & Randhir, T. 2007. Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology*, 334, 39-52.
- Wang, C., Li, Y., Huang, G. H. & Zhang, J. 2016. A type-2 fuzzy interval programming approach for conjunctive use of surface water and groundwater under uncertainty. *Information Sciences*, 340, 209-227.