



Sustainable Conjunctive Operation of Water Resources in Agriculture Sector: Cyclic Storage Approach

A. Afshar¹, M. khosravi^{2*}, and A. Molajou³

Abstract

The agricultural sector is the largest consumer of water resources. Therefore, Sustainable water allocation to this sector is more essential. Surface and groundwater are both important sources for agriculture water supply. Previous studies have emphasized that the conjunctive water use of surface and groundwater can reduce the risks associated with uncertain surface water supplies and their fluctuations. The cyclic and noncyclic (traditional) storage systems are two main kinds of conjunctive water use systems. The main difference between these storage systems is their method of artificial recharge which in the noncyclic storage system, the artificial recharge only occurs during the spill, but in the cyclic storage system, the artificial recharge can occur any time. In other words, the regulated water is not allocated to artificial recharge area in noncyclic method. In the current study it was tried to quantize and compare Sustainability of water allocation in the agriculture sector with cyclic and noncyclic approaches. The results indicated that in the noncyclic operation of the system, the aquifer is recharged in wet season and its storage used in dry season. Therefore, by management and regulation of surface water in cyclic operation compared with noncyclic operation, the sustainability index increases from 0.69 to 0.86, respectively.

Keywords: Agriculture, Conjunctive Operation, Cyclic Operation, Noncyclic Operation, Sustainability Index.

Received: August 25, 2019

Accepted: December 27, 2019

بهره‌برداری تلفیقی پایدار از منابع آب در بخش کشاورزی: رویکرد ذخیره سیکلی

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

چکیده

بخش کشاورزی، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب است. بنابراین تخصیص پایدار آب به این بخش، امری لازم و ضروری است. منابع تأمین‌کننده نیاز آبی بخش کشاورزی منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌باشند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌تواند عرضه آب را مطمئن‌تر کرده و عدم قطعیت‌های آن را به شدت کاهش دهد. از رویکردهای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، می‌توان به دو رویکرد بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی (سنتی) اشاره نمود. تفاوت اصلی این دو رویکرد در شیوه تغذیه مصنوعی آن‌ها است، به طوری که در سیستم‌های ذخیره غیرسیکلی، تغذیه مصنوعی فقط در مواقع سرریز آب از مخزن سطحی رخ می‌دهد و در مقابل در سیستم‌های ذخیره سیکلی، تغذیه مصنوعی می‌تواند در هر زمانی صورت پذیرد. به عبارت بهتر، در سیستم‌های غیرسیکلی، آب تنظیم شده هیچ‌گاه به سمت مناطق تغذیه مصنوعی هدایت نمی‌گردد. در این مطالعه، ضمن ارائه مفهوم و مدل برنامه ریاضی بهره‌برداری غیرسیکلی، پایداری تخصیص آب به بخش کشاورزی با رویکردهای سیکلی و غیرسیکلی کمی و مقایسه گشتند. نتایج نشان داد که در بهره‌برداری سیکلی از سیستم، با تغذیه آبخوان در فصول تر و استفاده از ذخیره آن در فصول خشک، به میزان قابل توجهی از هدررفت آب جلوگیری می‌شود. لذا با مدیریت و تنظیم بیشتر آب سطحی در بهره‌برداری سیکلی در مقایسه با بهره‌برداری غیرسیکلی، شاخص پایداری از ۰/۶۹ به ۰/۸۶ افزایش یافت.

کلمات کلیدی: کشاورزی، بهره‌برداری تلفیقی، بهره‌برداری سیکلی، بهره‌برداری غیرسیکلی، شاخص پایداری.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۶/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۶

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

2- M.Sc. Student of Water Resources Engineering, Iran University of Science and Technology. Email: Mina.khosravi100@gmail.com

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

*- Corresponding Author

۱- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۳- کاندیدای دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

(Azaiez, 2002; Liu et al., 2013). به این دلیل امروزه، مدیریت جامع منابع آب با تأکید بر بهره‌برداری مشترک یا تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، در دستور کار اغلب سازمان‌های بهره‌برداری قرار گرفته است. با توجه به اهمیت موضوع و کاربردی بودن آن، مطالعات گسترده‌ای در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام شده است (Wang et al., 2016; Safavi and Falsafioun, 2017; Li et al., 2018). سیستم‌های ذخیره سیکی گونه‌ای از بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشند که در آن‌ها زیرسیستم‌های رودخانه، آبخوان، سد و عوامل تغذیه‌ی مصنوعی حضور فعالی دارند (Alimohammadi and Afshar, 2012). اصلی‌ترین ویژگی سیستم ذخیره سیکی در این است که علاوه بر تعامل طبیعی و فیزیکی بین دو زیرسیستم آب سطحی و زیرزمینی، رابطه‌ی تنگاتنگ دیگری نیز از طریق اعمال فرمان بهره‌برداری از پیش برنامه‌ریزی شده، بین این دو زیرسیستم برقرار می‌باشد. با توجه به کارایی سیستم‌های ذخیره‌ی سیکی مطالعات فراوانی در راستای آن‌ها صورت پذیرفته است که اولین مطالعات صورت گرفته به دهه‌ی ۹۰ میلادی برمی‌گردد (Alimohammadi et al., 2009; Lettenmaier and Burges, 1982). از گونه‌های دیگر بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌توان به سیستم‌های ذخیره غیرسیکی اشاره نمود که در آن‌ها، نقش تغذیه مصنوعی بسیار کمرنگ‌تر از سیستم‌های ذخیره سیکی است. به عبارت بهتر در بهره‌برداری غیرسیکی یا سنتی از سیستم، رهاسازی آب از سد به رودخانه، صرفاً به منظور تأمین حقایق‌های پایین‌دست اعم از زیست‌محیطی، کشاورزی و شهری صورت می‌پذیرد و سفره‌های آب زیرزمینی، فقط در مواقع سرریز آب از مخزن سطحی، به منظور جلوگیری از هدررفت آب، تغذیه می‌گردند. سیستم‌های بهره‌برداری تلفیقی اعم از سیستم ذخیره‌ی سیکی و غیرسیکی ممکن است در طول دوره‌ی بهره‌برداری‌شان تحت دامنه‌ی وسیعی از تقاضاها و شرایط مختلف هیدرولوژیکی از قبیل خشک‌سالی و ترسالی قرار بگیرند. به همین دلیل یکی از بحث‌های مهم در بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره سیکی، توصیف عملکرد احتمالی این سیستم‌ها در آینده، تحت شرایط مختلف تقاضا و حالت‌های هیدرولوژیکی ممکن در طول دوره‌ی بهره‌برداری آن‌ها می‌باشد. در اکثر مطالعات پیشین صورت گرفته، عملکرد احتمالی سیستم‌های تلفیقی اعم از سیستم ذخیره سیکی بر اساس میانگین و واریانس سود و ضرر و یا بعضی از پارامترهای بهره‌برداری، توصیف شده است (Alimohammadi, 2005b). حال آن‌که در این مطالعه سعی شده است که پایداری سیستم ذخیره‌ی سیکی و نیز غیرسیکی در طول دوره بهره‌برداری مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور ضمن تبیین مفهوم بهره‌برداری غیرسیکی و ارائه برنامه ریاضی آن، با کمی‌سازی

تأمین آب موردنیاز کشاورزی برای دستیابی به امنیت غذایی به دلیل رشد جمعیت و حفظ معیشت امری لازم و حیاتی است (Singh, 2012a; Singh and Panda, 2012a; Singh and Panda, 2012b). این موضوع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که از منابع آب جهت توسعه اقتصادی استفاده می‌کنند اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند. در بسیاری از این مناطق، بخش کشاورزی به دلیل کمبود آب ناشی از خشک‌سالی، سوء مدیریت و افزایش رقابت برای منابع آب کم، تهدید می‌شود (Tilman et al., 2002). از این رو، تمایل برای کنترل هر چه بیشتر جریان رودخانه‌ها و کاهش اثرات زیان‌بار سیلاب و خشک‌سالی‌های احتمالی در فصول کم‌آب، گرایش‌های زیادی را برای ساختن مخازن بزرگ سطحی پدید آورده است. امروزه ساخت سدهای بزرگ به دلیل اثرات نامطلوب زیست‌محیطی از یک‌طرف و محدودیت روزافزون مکان‌های مناسب برای ساخت سدهای بزرگ، دیگر به بهترین راهکار برای تحقق اهداف فوق تلقی نمی‌گردد (Afshar et al., 2009). در حال حاضر در اغلب حوضه‌های آبریز کشور، در اکثر ساخت‌گاه‌های مناسب یا سدی ساخته شده است و یا در دست احداث می‌باشد. این در حالی است که نه تنها درصد قابل توجهی از پتانسیل آب‌های سطحی بدون کنترل از دست می‌رود، بلکه بسیاری از مناطق کشور نیز از مشکل کم‌آبی و خشک‌سالی رنج می‌برند. با توجه به محدودیت‌های ساخت سدهای بزرگ، استفاده از سفره‌های آب زیرزمینی می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. استفاده از ذخایر آب زیرزمینی دارای مزایای فراوانی است که از آن جمله می‌توان به هزینه‌ی کمتر، کاهش مشکلات تبخیر، تجمع رسوب، تغذیه‌گرایی، آلودگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، مغروق شدن اراضی و مکان‌های تاریخی و غیره اشاره نمود (Coe, 1990). با این حال افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی برای آبیاری ممکن است اثرات منفی از جمله هزینه‌های تولید بالاتر نسبت به مخازن سطحی را داشته باشند. این موضوع زمانی که سطح آب‌های زیرزمینی به‌طور قابل توجهی کاهش یافته باشد، پررنگ‌تر می‌گردد (Addams, 2005). علاوه بر این استفاده بی رویه از مخازن آب زیرزمینی موجب کاهش کیفیت این منابع و تمام شدن آن‌ها برای استفاده در آینده می‌گردند (Lefkoff and Gorelick, 1990). لذا توازن میان تغذیه و برداشت از منابع آب زیرزمینی اهمیت بسیاری دارد. بدیهی است با توجه به نقاط قوت و ضعف استفاده از مخازن سطحی و زیرزمینی به‌طور جداگانه، استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، با کاهش ریسک همراه با عدم قطعیت در عرضه آب‌های سطحی، نه تنها می‌تواند مشکل کمبود آب را حل می‌کند، بلکه باعث افزایش بهره‌وری استفاده از آب و پوشش نقاط ضعف مذکور می‌گردد

پایین دست رودخانه لازم است حقا به زیست محیطی تأمین گردد. این مقادیر همراه با توزیع فصلی نیازها در جدول ۱ منعکس گردیده‌اند. 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 می‌باشد، استفاده شده است. محدوده‌ی آبخوان به صورت مستطیلی به ابعاد ۸ کیلومتر در ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. ۱۰ درصد از آب عرضه شده به منطقه نیاز، به صورت نفوذ عمقی، وارد آبخوان می‌گردد. طبق گزارشات مهندسی مشاور آبخوان، در آغاز بهره‌برداری، اختلاف ارتفاع سطح زمین و تراز آب چاه‌ها ۱۰ متر بوده است. بر اساس مطالعات انجام شده، بهترین منطقه جهت تغذیه مصنوعی، همان چاه‌های پمپاژ می‌باشد. ماکزیمم افت و خیز تراز آب چاه‌ها ۱۰ متر و حداکثر پمپاژ از هر چاه و تغذیه به آن‌ها، ۳ میلیون مترمکعب در فصل در نظر گرفته شده است.

رودخانه به صورت یک مقطع مستطیلی به عرض ۲۰ متر و طول ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. ضریب مانینگ و شیب رودخانه نیز به ترتیب برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۰۱ می‌باشد. ضخامت لایه‌ی کم تراوی زیرین رودخانه ۳ متر است. در محل تقاطع دو بازه رودخانه، محلی برای احداث یک بند انحرافی و انتقال جریان رودخانه به منطقه نیاز و نیز چاه‌های تغذیه وجود دارد. به همین دلیل رودخانه (در مدل بهینه‌سازی) به دو بازه تقسیم شده است. ۱۰ درصد از آب عرضه شده به منطقه‌ی نیاز به صورت جریان‌های برگشتی وارد بازه‌ی دوم رودخانه می‌شود. برداشت آب از رودخانه با هدف تغذیه مصنوعی و تأمین نیاز، از بازه‌ی دوم رودخانه صورت می‌پذیرد.

پایداری تخصیص آب به بخش کشاورزی با استفاده از شاخص پایداری که تابعی از معیارهای عملکرد اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری است، نتایج بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب با دو رویکرد سیکی و غیرسیکی (سنتی) ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است که مدل‌سازی سیستم‌های بزرگ مقیاسی همچون سیستم ذخیره‌ی سیکی و غیرسیکی، به دلیل پیچیدگی‌های آن نیازمند بکارگیری روش‌های مطالعاتی خاصی است که این روش‌ها بسته به نوع رویکرد اتخاذی (توده‌ای، گسترده) متفاوت می‌باشند (Alimohammadi and Afshar, 2005a; Afshar et al., 2008). از این رو در این مطالعه با اتخاذ رویکرد گسترده و نیز با استفاده از روش تعمیم ماتریس پاسخ واحد به منظور اعمال رفتار سیستم آب‌های زیرزمینی، به بهره‌برداری تلفیقی پایدار از آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه‌ی آبریز اهررود (سد کینه‌ورس) با دو رویکرد سیکی و غیرسیکی (سنتی) پرداخته شده است (Alimohammadi et al., 2005).

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این مقاله از داده‌های مربوط به سد کینه‌ورس و دشت پایین دست آن واقع در حوضه آبریز رودخانه اهررود استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه‌ی طرح و محدوده‌ی مدل را در حوضه‌ی اهررود نشان می‌دهد.

نیازهای طرح، شامل نیازهای شهری و کشاورزی می‌باشند که مجموعاً برابر با ۲۶ میلیون مترمکعب (م^۳) در سال است. همچنین در

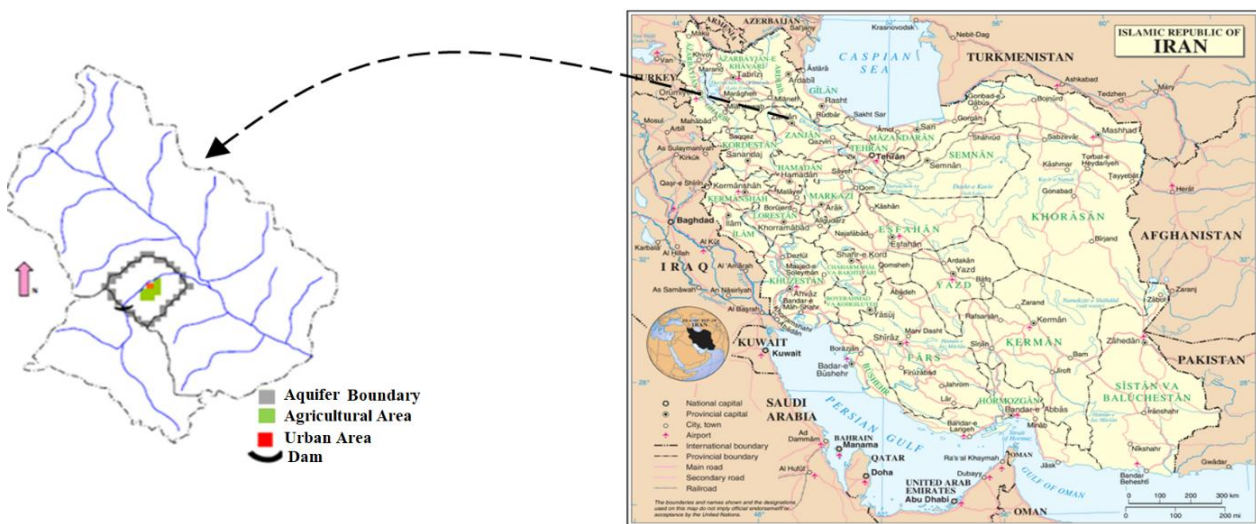


Fig. 1- Location of the study area

شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Table 1- Urban, agricultural and environmental demands (MCM)

Season	Urban	Agriculture	Summation	Seasonal percent	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 ۱- نیازهای شهری، کشاورزی و حبابه زیست محیطی طرح (م.م.م)

منطقه‌ی نیاز $(Div_d(t))$ نیز تأمین گردد. مطابق شکل ۳، تغذیه‌ی آبخوان علاوه بر سد، می‌تواند از طریق آب منحرف شده از رودخانه $(Div_{ar}(t))$ ، نفوذ عمقی باران در منطقه‌ی نیاز $(Seep(t))$ ، تعامل فیزیکی آبخوان و رودخانه $(Q_{raq}(t))$ و نفوذ آب در منطقه‌ی نیاز به واسطه آبیاری $(Rets(t))$ صورت می‌پذیرد. آب در رودخانه علاوه بر جریان خروجی از سد، از طریق بارش باران $(Prc(t))$ ، جریان برگشتی از منطقه‌ی نیاز $(Retr(t))$ و تعامل فیزیکی آبخوان و رودخانه $(Q_{raq}(t))$ جاری است. همچنین لازم به ذکر است که دبی خروجی از رودخانه با $Q_{riv}^{out}(t)$ نمایش داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که هرگاه هد هیدرولیکی آبخوان بیشتر از رودخانه باشد آب از آبخوان به سمت رودخانه در جریان است.

سیستم‌های ذخیره غیرسیکلی نیز همانند سیستم‌های ذخیره سیکلی گونه‌ای از بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشند. امروزه، بهره‌برداری از اکثر سیستم‌های تلفیقی به صورت غیرسیکلی (ستتی) صورت می‌پذیرد.

۲-۲- سیستم‌های ذخیره سیکلی و غیرسیکلی

سیستم ذخیره‌ی سیکلی، سیستمی است متشکل از دو زیر سیستم آب سطحی و آب زیرزمینی که تأمین نیازهای تعهد شده را با تشکیل یک حلقه تعامل بینابینی به وجود می‌آورد. همان‌طور که در بخش مقدمه نیز به آن اشاره شد، در بهره‌برداری سیکلی از سیستم علاوه بر تعامل طبیعی و فیزیکی بین دو زیر سیستم آب سطحی و زیرزمینی، رابطه دیگری نیز از طریق اعمال فرمان بهره‌برداری بهینه بین این دو زیر سیستم برقرار می‌باشد (شکل ۲). جهت مدل‌سازی این سیستم لازم است ارتباط هیدرولیکی بین کلیه مؤلفه‌های آن مد نظر قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است جریان ورودی $(Q^s(t))$ ، تبخیر $(E^s(t))$ ، حجم ذخیره سد $(S^s(t))$ ، خروجی سد به رودخانه $(R_{riv}^s(t))$ ، خروجی سد به منطقه نیاز $(R_d^s(t))$ ، خروجی سد به آبخوان جهت تغذیه مصنوعی آن $(R_{ar}^s(t))$ و انتقال از آبخوان به سد $(R_s^g(t))$ ، اجزای بالانس حجمی مخزن سطحی را تشکیل می‌دهند. در این سیستم نیاز آبی منطقه‌ی نیاز علاوه بر سد، می‌تواند از طریق پمپاژ آب از چاه‌های آب زیرزمینی $(R_d^g(t))$ و یا انحراف رودخانه به

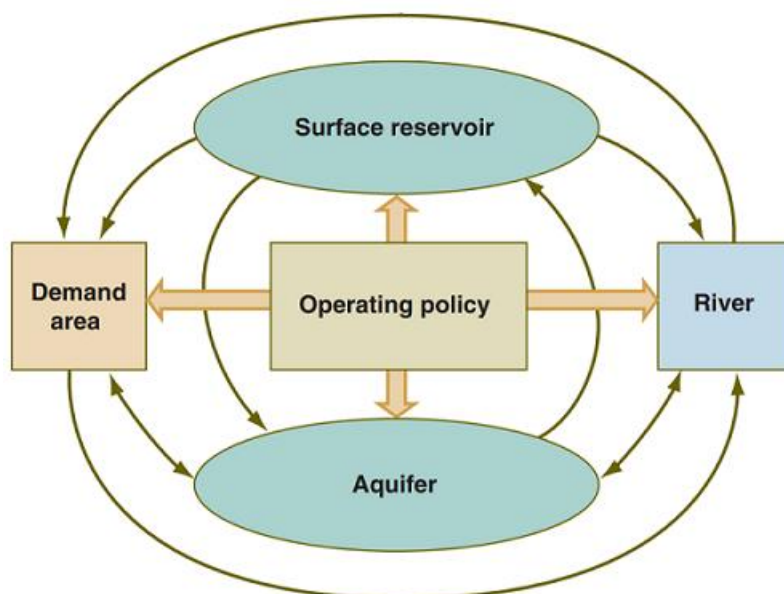


Fig. 2- Interactive loop between the main components of a cyclic storage system (Alimohammadi, 2005)

شکل ۲- حلقه‌ی تعاملی بین اجزای اصلی سیستم ذخیره‌ی سیکلی (Alimohammadi, 2005)

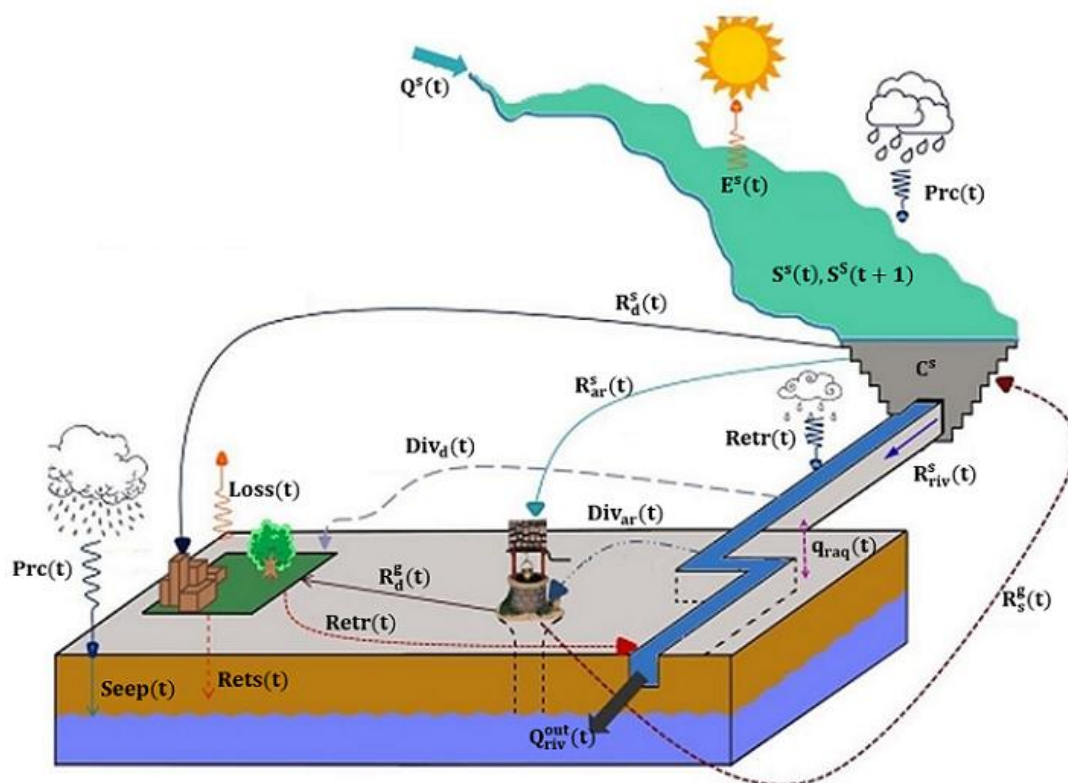


Fig. 3- Cyclic storage system elements
 شکل ۳- سیستم ذخیره‌ی سیکلی و اجزای آن

رابطه‌ی ۱، معادله اصلی روش ماتریس پاسخ واحد را نشان می‌دهد که از حل تحلیلی معادله‌ی دیفرانسیلی جزئی جریان سه‌بعدی در یک آبخوان ناهمگن و غیر همسان‌گرد (معادله‌ی بوسینسک) برای منابع نقطه‌ای به دست می‌آید (Maddock, 1972):

$$s(k, n) = \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^{NK} \beta_k(k, j, n - t + 1) \cdot q(j, t) \quad (1)$$

که در این رابطه $s(k, n)$: میزان تغییر تراز (افت یا خیز) در چاه k در انتهای دوره زمانی n ، $\beta_k(k, j, n - t + 1)$: ضریب پاسخ واحد عبارت است از تغییر تراز در چاه k در انتهای دوره‌ی زمانی n در اثر تحریک نقطه‌ای (پمپاژ یا تغذیه) واحد در چاه j در دوره‌ی زمانی t ، $q(j, t)$: میزان تحریک (پمپاژ یا تغذیه) چاه j در دوره‌ی زمانی t و NK : تعداد چاه‌ها می‌باشد.

در این روش با به دست آوردن ضرایب پاسخ واحد، به راحتی می‌توان تغییر تراز آبخوان را در زمان و نقاط مختلف بر اثر تحریک (پمپاژ یا تغذیه) در نقاط و زمان‌های مختلف آبخوان به دست آورد. روش معمول تولید ضرایب پاسخ، استفاده مکرر از یک مدل شبیه‌سازی پارامتر گسترده است. به عبارت بهتر، ابتدا مدل شبیه‌ساز سیستم‌های آب زیرزمینی مانند MODFLOW، با استفاده از داده‌های میدانی سیستم

در بهره‌برداری غیرسیکلی از سیستم، رهاسازی از سدهای احداث شده به رودخانه‌ها صرفاً جهت تأمین حقایقه‌های پایین دست اعم از زیست‌محیطی، شهری و کشاورزی می‌باشد و آب تنظیم شده هیچ‌گاه به سمت مناطق تغذیه مصنوعی هدایت نمی‌گردد. در سیستم‌های غیرسیکلی، علاوه بر عدم تغذیه مصنوعی آبخوان از طریق سد، نقش تغذیه آن از طریق سیستم‌های انحراف از رودخانه نیز، بسیار کم‌رنگ بوده و فقط در فصول پرآب، به منظور جلوگیری از هدررفت آب سرریز شده از سد، صورت می‌پذیرد.

۳-۲- تعمیم ماتریس پاسخ واحد

به‌منظور اعمال رفتار سیستم آب‌های زیرزمینی در مدل‌های پارامتر گسترده سیستم‌های تلفیقی، از روش‌های متنوعی همچون درون‌گذاری، ماتریس پاسخ واحد و تعمیم روش ماتریس پاسخ واحد استفاده می‌شود. در روش درون‌گذاری، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر آبخوان با استفاده از روش‌های عددی به مجموعه‌ای از معادلات جبری همزمان تبدیل شده و این معادلات به صورت قیدهایی به طور مستقیم در مدل بهینه‌سازی وارد می‌گردند (Aguado and Remson, 1974). بدین ترتیب در مسائل واقعی، حجم مدل حاصل بسیار بزرگ شده و لذا کاربرد روش محدود می‌گردد (Gorelick, 1983).

ماتریس پاسخ واحد جهت وارد نمودن رفتار آبخوان به بهینه‌ساز استفاده گردد که در این صورت از یک ضریب اصلاحی بدون بعد مطابق رابطه‌ی ۳ استفاده می‌شود و با اعمال آن، رابطه‌ی ۱ به صورت رابطه‌ی ۴ اصلاح می‌گردد (Alimohammadi et al., 2005).

$$m = \left(\frac{r}{U_r}\right) / \left(\frac{e}{U_e}\right) \quad (3)$$

$$s(k, n) = \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^{NK} m_k(k, j, n - t + 1) \cdot \beta_k(k, j, n - t + 1) \cdot q(j, t) \quad (4)$$

که در روابط فوق $\frac{r}{U_r}$: پاسخ آبخوان به پاسخ واحد و $\frac{e}{U_e}$: تحریک به تحریک واحد، $m_k(k, j, n - t + 1)$: ضریب اصلاحی چاه یا سلول تحریک‌شونده‌ی k در اثر پمپاژ چاه‌ها یا سلول‌های تحریک‌کننده j هستند.

۲-۴- شاخص پایداری

جهت کمی‌سازی پایداری سیستم‌های منابع آب شاخص‌های متنوعی ارائه شده است. شاخص ریسک خشکسالی، شاخص جامع خشکسالی و شاخص برگشت از جمله شاخص‌هایی هستند که به طور خاص برای منابع آب به کار گرفته شده‌اند (Zongxue et al., 1998; Safavi et al., 2014; Fanai and Burn, 1997). اولین بار شاخصی را تحت عنوان شاخص پایداری (SI)، که از حاصل ضرب سه معیار عملکرد اعتمادپذیری (Rel)، برگشت‌پذیری (Res) و آسیب‌پذیری (Vul) تشکیل شده است، برای کمی کردن پایداری سیستم‌های منابع آب توسعه داد. (Sandoval-Solis et al., 2011) ضمن تبیین برخی از اشکالات شاخص توسعه داده شده، با استفاده از میانگین هندسی معیارهای عملکرد به جای ضرب آن‌ها، به اصلاح این شاخص پرداخت. رابطه‌ی ۵ شاخص پیشنهادی اصلاح‌شده‌ی Sandoval-Solis et al. (2011) را نشان می‌دهد:

$$SI = [Rel * Res * (1 - Vul)]^{1/3} \quad (5)$$

با تعریف مقدار کمبود آب در هر گام زمانی (Def(t)) از رابطه‌ی ۶ که بیانگر تفاضل مقدار نیاز آبی (Demand(t)) و آب عرضه شده به منطقه نیاز در همان گام زمانی (Supply(t)) می‌باشد، می‌توان معیارهای عملکرد را تعریف نمود:

$$Def(t) = \begin{cases} Demand(t) - Supply(t) & \text{if } Demand(t) > Supply(t) \\ 0 & \text{if } Demand(t) = Supply(t) \end{cases} \quad (6)$$

اعتمادپذیری یا قابلیت اطمینان با این مفهوم تعریف می‌شود که با چه احتمالی آب اختصاص یافته به مصرف‌کننده، نیاز آن را تامین خواهد نمود. این معیار عملکرد، طبق رابطه‌ی ۷، از تقسیم تعداد گام‌های زمانی موفق (NOS) به تعداد کل گام‌های زمانی (NT) محاسبه

مورد بررسی، کالیبره می‌شود. نتیجه این کالیبراسیون تعیین خصوصیات یا ضرایب هیدرودینامیک در گستره مکانی آبخوان می‌باشد. سپس یک بار مدل شبیه‌سازی بدون اعمال هیچ‌گونه تحریکی اجرا شده و پاسخ‌ها ثبت می‌گردند (شرایط صفر). این کار برای در نظر گرفتن اندرکنش‌های طبیعی بین اجزای سیستم انجام می‌شود تا پاسخی که به دست می‌آید فقط ناشی از تحریک (مصنوعی) اعمال شده به سیستم باشد. آنگاه هر بار تحریک واحدی برای یکی از عوامل تحریک‌کننده در نظر گرفته شده و مدل شبیه‌سازی مجدداً اجرا می‌شود. در هر اجرا، پاسخ عامل (یا عوامل) تحریک‌شونده به ازای تحریک واحد اعمال شده ثبت می‌گردد. این پاسخ عبارت است از تغییر در تراز آب زیرزمینی در دوره‌های متوالی. پاسخ خالص حاصل از تحریک موردنظر به‌تنهایی، از تفاضل این مقدار و مقدار نظیر در شرایط صفر حاصل می‌شود. ماتریس پاسخ هر عامل تحریک‌شونده، از کنار هم گذاشتن پاسخ خالص تک‌تک عوامل تحریک‌کننده، حاصل می‌گردد.

با بررسی انواع تحریکات مشاهده می‌شود که دو گروه تحریکات خطی (نواری) و گسترده (سطحی) نیز وجود دارند. تغییر تراز (دبی) آب رودخانه (با فرض همگنی در طول) در گروه تحریکات خطی و بارندگی و نفوذ آب به‌واسطه آبیاری (با فرض یکنواختی بارش و همگنی در سطح) در گروه تحریکات گسترده قرار می‌گیرند. با فرض وجود هر سه گروه کلی تحریک‌کننده، رابطه ۱ به‌صورت رابطه ۲ اصلاح می‌گردد که در این رابطه $\beta_{riv}(k, j, n - t + 1)$: ضریب پاسخ واحد بین چاه تحریک‌شونده k و بازه رودخانه تحریک‌کننده j ، $\beta_a(k, n - t + 1)$: ضریب پاسخ واحد بین چاه تحریک‌شونده k و عامل گسترده تحریک‌کننده، $dh_{riv}(r, t)$: میزان تغییر در تراز آب در بازه r رودخانه در دوره‌ی زمانی t ، $P_a(t)$: میزان تحریک بار گسترده در دوره زمانی t ، NR و NA : به ترتیب تعداد بازه‌های رودخانه و بار گسترده و اندیس r و a اندیس‌های بازه رودخانه و بار گسترده می‌باشد.

$$S(k, n) = \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^{NK} \beta_k(k, j, n - t + 1) \cdot q(j, t) + \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^{NR} \beta_{riv}(k, j, n - t + 1) \cdot dh_{riv}(j, t) + \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^{NA} \beta_a(k, j, n - t + 1) \cdot P_a(j, t) \quad (2)$$

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که در اغلب آبخوان‌ها چنانچه میزان تغییرات تراز در برابر ضخامت لایه‌ی اشباع، زیاد نباشد می‌توان با دقت قابل قبولی از روش ماتریس پاسخ واحد استفاده نمود (Alimohammadi et al., 2005). در صورتی که تغییرات تراز آبخوان در برابر ضخامت لایه اشباع، زیاد باشد، می‌بایست از تعمیم روش

$$Res = \frac{NSF}{NOF} \quad (12)$$

$$Vul = \frac{SUF/NOF}{\sum_{t=1}^4 DemandAgri(t)} \quad (13)$$

$$Supply(t) = R_d^s(t) + R_d^g(t) + Div_d(t); \sqrt{t} \quad (14)$$

$$Demand(t) = Supply(t) + Def(t); \sqrt{t} \quad (15)$$

$$Demand(t) = DemandAgri(t) + DemandUrb(t); \sqrt{t} \quad (16)$$

$$Def(t) \leq Demand(t) - DemandUrb(t); \sqrt{t} \quad (17)$$

که در روابط فوق، DemandAgri(t): نیاز آبی منطقه کشاورزی در گام زمانی tام، DemandUrb(t): نیاز آبی منطقه شهری در گام زمانی tام می‌باشد. لازم به ذکر است که از آنجایی که یکی از اهداف این مطالعه، تخصیص پایدار آب به بخش کشاورزی است، بدیهی است که با تأمین کامل نیاز شهری با لحاظ قید ۱۷، بخش کشاورزی متحمل کمبود آب در هر گام زمانی خواهد بود.

محدودیت‌های مختلفی تابع هدف مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری سیکلی را مقید می‌سازد 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 پایین‌دست رودخانه می‌باشند. این محدودیت‌ها در پایان‌نامه دکتری علی‌محمدی به طور کامل ذکر و تشریح شده‌اند (Alimohammadi, 2005). لازم به ذکر است که مقادیر تخصیص آب از سد، رودخانه و آبخوان به منطقه نیاز، مقادیر انحراف رودخانه و انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی، میزان رهاسازی از سد به رودخانه، متغیرهای تصمیم؛ ظرفیت سد، حجم زیرسیستم‌های مختلف اعم از زیرسیستم انحراف رودخانه به منطقه نیاز، زیرسیستم انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی، مقادیر باران، آورد رودخانه و غیره پارامترهای این مسأله بهینه‌سازی می‌باشند.

۲-۵-۲- مدل بهره‌برداری غیرسیکلی

همانند مدل بهره‌برداری سیکلی، تابع هدف مدل، ماکزیمم کردن شاخص پایداری ارائه شده توسط Sandoval-Solis et al. (2011) به منظور تخصیص پایدار آب در بخش کشاورزی می‌باشد.

با توجه به اینکه مدل‌های بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی، دارای قیودات مشترک می‌باشند، روابط و محدودیت‌هایی که به طور اخص به منظور فرمول‌بندی برنامه ریاضی مدل بهره‌برداری غیرسیکلی به کار برده می‌شوند، به صورت زیر ارائه می‌گردند:

می‌گردد. لازم به ذکر است که چنانچه آب عرضه شده به کاربر، کمتر از آب مورد نیاز آن باشد، اصطلاحاً سیستم دچار شکست شده و هرگاه میزان آب عرضه شده به کاربر برابر با مقدار نیاز آن باشد، سیستم موفق عمل کرده است (Hashimoto et al., 1982). برگشت‌پذیری نیز به این معنی است که با چه احتمالی، سیستم پس از شکست به حالت مطلوب (موفقیت) خود برمی‌گردد. طبق رابطه ۸، معیار برگشت‌پذیری از تقسیم تعداد گام‌های زمانی که در طول دوره‌ی شبیه‌سازی، سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب تغییر کرده است (NSF) به تعداد کل گام‌های زمانی که در آن‌ها سیستم با کمبود مواجه بوده است (NOF) به دست می‌آید (Ashofteh et al., 2014).

$$Rel = \frac{NOS}{NT} \quad (7)$$

$$Res = \frac{NSF}{NOF} \quad (8)$$

آسیب‌پذیری یکی دیگر از معیارهای عملکرد می‌باشد که در واقع شدت شکست‌های سیستم را نشان می‌دهد. طبق رابطه ۹، آسیب‌پذیری به صورت نسبت مجموع کل کمبودها (SUF) به تعداد گام‌هایی که در آن‌ها کمبود اتفاق افتاده (NOF) تقسیم بر کل نیاز سالانه سیستم (ANDM) تعریف می‌گردد (Mendoza et al., 1997).

$$Vul = \frac{SUF/NOF}{ANDM} \quad (9)$$

۲-۵-۲- فرمول‌بندی مدل‌های بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی از سیستم

به منظور مقایسه دقیق پایداری بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی، می‌بایست ظرفیت‌های زیرسیستم‌های مختلف مشخص و در هر دو رویکرد بهره‌برداری یکسان باشند. لذا با فرض یکسان و معلوم بودن ظرفیت بخش‌های مختلف سیستم در هر دورویکرد بهره‌برداری، مدل‌های بهره‌برداری سیکلی (با ۴۰ گام زمانی شامل ۶۶۲ متغیر غیر خطی، ۲۳۰۲ متغیر خطی، ۴۰ متغیر عدد صحیح و ۲۰۲۳ تکرار) و غیرسیکلی (با ۴۰ گام زمانی شامل ۴۵۷ متغیر غیر خطی، ۲۶۳۱ متغیر خطی، ۴۰ متغیر عدد صحیح و ۱۷۳۶ تکرار) به صورت زیر قابل ارائه‌اند.

۲-۵-۱- مدل بهره‌برداری سیکلی

تابع هدف مدل، ماکزیمم کردن شاخص پایداری ارائه شده توسط Sandoval-Solis et al. (2011) به منظور تخصیص پایدار آب در بخش کشاورزی می‌باشد:

$$Maximize SI = [Rel * Res * (1 - Vul)]^{1/3} \quad (10)$$

$$Rel = \frac{NOS}{NT} \quad (11)$$

غیرسیکلی، رهاسازی آب توسط کارفرما صرفاً به منظور تامین نیازهای پایین دست صورت می‌پذیرد (قید ۲۵). همچنین در این نوع بهره‌برداری، تغذیه آبخوان از طریق سد و انتقال آب از آبخوان به سد، انجام نمی‌گیرد. روابط ۲۲ و ۲۳ بدین منظور ارائه شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

با در نظر گرفتن ظرفیت‌های معلوم و فرضی ارائه شده در جدول ۲، مدل‌های بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی در بهینه‌ساز اجرا گشتند. در این جدول ظرفیت‌ها برحسب میلیون مترمکعب می‌باشند.

جدول ۳ و شکل ۴ نتیجه حل مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی را نمایش می‌دهند.

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌کنید در بهره‌برداری سیکلی، سیستم شکست‌های کمتری را متحمل می‌گردد. با اینکه در این نوع از بهره‌برداری تعداد برگشت‌ها از حالت شکست به مطلوب، کمتر رویکرد دیگر بهره‌برداری است، لیکن برگشت‌پذیری سیستم بیشتر از بهره‌برداری غیرسیکلی شده است. چرا که برگشت‌پذیری معیاری است که تمایل سیستم برای برگشت از تعداد شکست‌ها را ارزیابی می‌کند. با توجه به نمودار کمبود آب‌رسانی نمایش داده شده در شکل ۴، بزرگای شکست در بهره‌برداری غیرسیکلی بسیار بیشتر از بهره‌برداری سیکلی است. به گونه‌ای که در گام زمانی ۳۹، کل نیاز کشاورزی نتوانسته تامین گردد. لذا آسیب‌پذیری تخصیص آب به بخش کشاورزی در این نوع بهره‌برداری، تقریباً دو برابر بهره‌برداری سیکلی است.

$$S^s(t+1) = S^s(t) + \Delta S^s(t) - \text{Spill}(t); \sqrt{t} \quad (18)$$

$$\text{Storage}(t) = S^s(t) + \Delta S^s(t); \sqrt{t} \quad (19)$$

$$\Delta S^s(t) = Q^s(t) + R_s^g(t) - E^s(t) - R_d^s(t) - R_{ar}^s(t) - R(t); \sqrt{t} \quad (20)$$

$$\text{Spill}(t) = \begin{cases} \text{Storage}(t) - \text{CapD} & \text{if Storage}(t) > \text{CapD}; \sqrt{t} \\ 0 & \text{if Storage}(t) \leq \text{CapD}; \sqrt{t} \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{CapCAR} = 0 \quad (22)$$

$$\text{CapP} = 0 \quad (23)$$

$$R_{riv}^s(t) = R(t) + \text{Spill}(t); \sqrt{t} \quad (24)$$

$$R(t) \leq \text{Div}_d(t) + \text{CapEnvironmental}(t); \sqrt{t} \quad (25)$$

$$\text{Div}_{ar}(t) \leq \text{Spill}(t); \sqrt{t} \quad (26)$$

که در روابط فوق، $\text{Spill}(t)$: حجم آب سرریز شده از مخزن در گام زمانی t ، $\text{Storage}(t)$: حجم آب مجازی (غیرواقعی) موجود در مخزن قبل از سرریز از آن در گام زمانی t ، CapD : ظرفیت سد، $R(t)$: حجم آب عمدی رها شده از مخزن توسط کارفرما به منظور تامین نیازهای شهری و کشاورزی در گام زمانی t ، $\text{CapEnvironmental}(t)$: نیاز زیست محیطی در پایین دست بازه‌های رودخانه، CapCAR : ظرفیت سیستم انتقال آب از سد به منطقه تغذیه مصنوعی و CapP : ظرفیت سیستم انتقال آب از آبخوان به سد می‌باشند. لازم به ذکر است که با محاسبه‌ی حجم آب سرریز شده از مخزن سطحی با لحاظ قیودات ۱۸ تا ۲۱، تغذیه مصنوعی توسط رودخانه با اعمال رابطه ۲۶، فقط به مواقع سرریز آب از سد محدود می‌گردد. همان‌طور که قبلاً بیان شد، در بهره‌برداری

Table 2- Hypothetical capacities of different subsystems

جدول ۲- ظرفیت‌های فرضی زیرسیستم‌های مختلف

Component	Capacity
Reservoir	10.457
Transfer from reservoir to demand area	2.889
Transfer from reservoir to artificial recharge area	0
Transfer from aquifer to reservoir	0
Diversion from river to demand area	1.775
Diversion from river to artificial recharge area	1.215

Table 3- The values of performance criteria and sustainability index for cyclic and noncyclic operations

جدول ۳- مقادیر معیارهای عملکرد و شاخص پایداری حاصل از حل مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی

	No. of successes	No. of failures	No. of returns	Reliability	Resilience	Vulnerability	Sustainability Index
Cyclic	35	5	4	0.875	0.8	0.103	0.86
Noncyclic	27	13	8	0.675	0.615	0.203	0.69

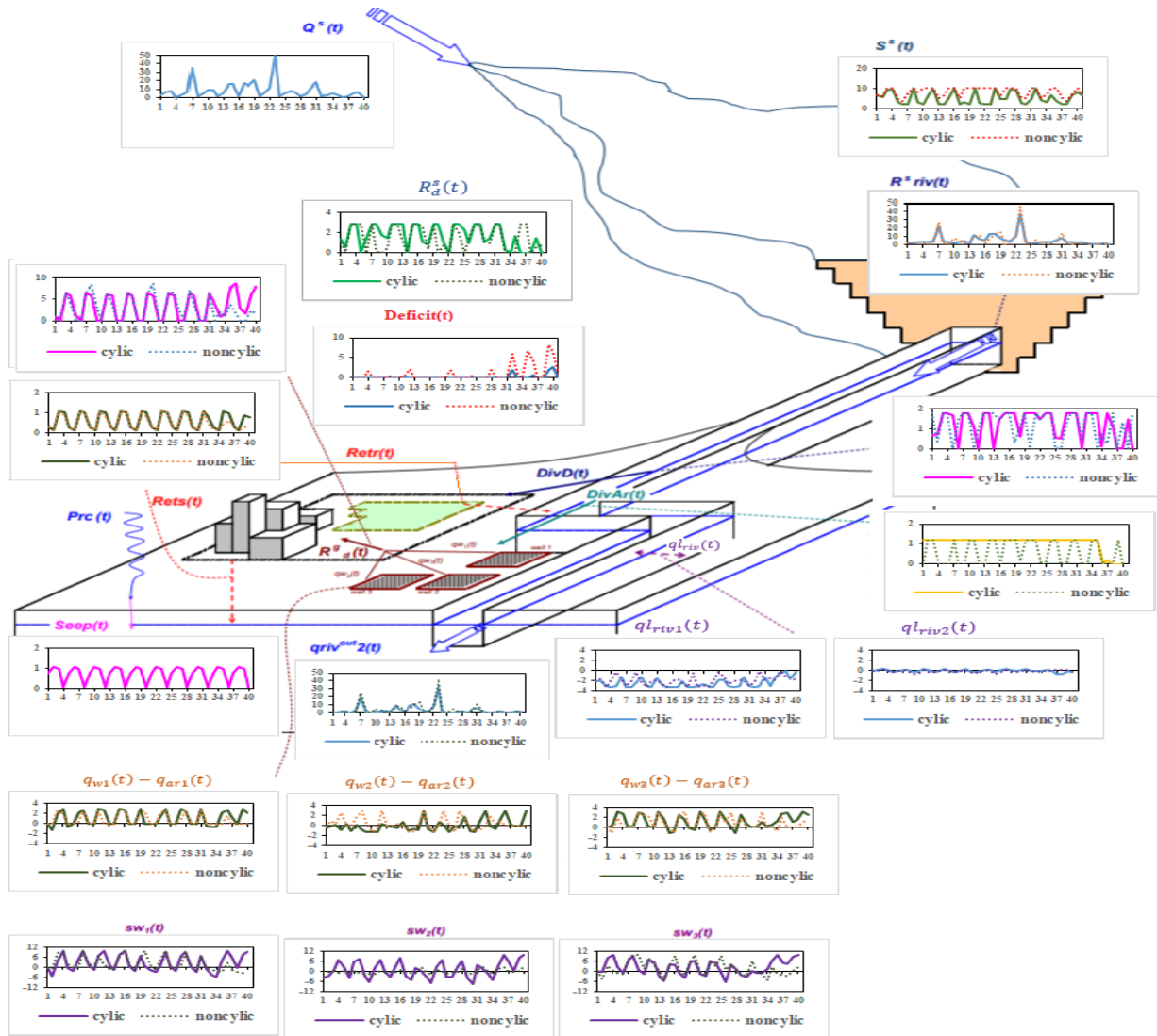


Fig. 4- Result of solving the cyclic and noncyclic operation optimization models
 شکل ۴- نتیجه حل مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی (م.م.م)

۳-۱-۱- مخزن سطحی

شکل ۵ تغییرات جریان ورودی، جریان خروجی و حجم ذخیره سد و اختلاف مقادیر آورد و رهاسازی از رودخانه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در گام‌های زمانی که آورد رودخانه زیاد بوده، رهاسازی از مخزن حجم قابل توجهی را به خود اختصاص داده است.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌کنید مجموع آورد رودخانه در فصول تر (بهار) بیش از ۵۲ درصد و در فصول خشک (تابستان) کمتر از ۳ درصد کل آورد درازمدت رودخانه را تشکیل می‌دهد. از این رو با توجه به قانون پیوستگی مخزن $S^s(t+1) = S^s(t) + Q^s(t) - R_d^s(t)$ در اکثر مواقع، پیک حجم ذخیره مخزن در طول یک سال،

در ادامه، به منظور بررسی بیشتر نتایج حاصل از بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی، خروجی‌های سیستم ذخیره سیکلی و غیرسیکلی در دو بخش مجزا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ضمن اینکه شکل ۴ به گونه‌ای تنظیم شده است که ارزیابی کلی جریان‌ها و ارتباط آن‌ها امکان‌پذیر باشد.

۳-۱- تحلیل نتایج بهره‌برداری سیکلی

در این بخش، نتایج بهره‌برداری سیکلی در چهار جز اصلی سیستم ذخیره سیکلی اعم از مخزن سطحی، مخزن زیرزمینی، رودخانه و منطقه نیاز مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند.

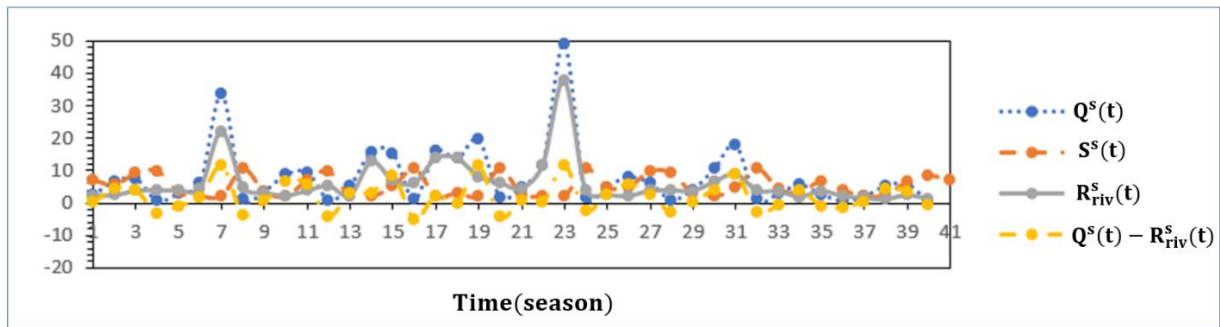


Fig. 5- Inflow, outflow, dam storage volume and $Q^s(t)$ minus $R^s_{riv}(t)$ in cyclic operation (MCM)

شکل ۵- تغییرات جریان ورودی، جریان خروجی، حجم ذخیره سد و اختلاف مقادیر آورد و رهاسازی از رودخانه در بهره‌برداری سیکلی (م.م.م)

در فصل‌های تابستان (بلافاصله بعد از فصل بهار) و مینیمم آن در فصل‌های پاییز (بلافاصله بعد از تابستان) رخ می‌دهد. با وجود ناچیز بودن آورد رودخانه در فصول تابستان، به دلیل زیاد بودن نیاز در این فصول، رهاسازی از سد در این گام‌ها به‌منظور تأمین نیاز صورت پذیرفته است. قرار گرفتن نمودار اختلاف مقادیر آورد و رهاسازی از رودخانه ($Q^s(t) - R^s_{riv}(t)$) در زیر محور افقی مبین این امر است. این موضوع بدان معنی است که مخزن سطحی توانسته است به میزان قابل‌توجهی جریان رودخانه را تنظیم نماید. به عبارت بهتر، علی‌رغم کم بودن آورد در فصول تابستان و با توجه به بالا بودن نیاز در این فصل (۱۰/۶۲۷ م.م.م)، مخزن سطحی آب را در فصول تر برای استفاده در فصول خشک ذخیره نموده است.

۳-۱-۳- منطقه نیاز

شکل ۶ نمودار کمبود و تأمین نیاز از طریق زیرسیستم‌های مختلف اعم از زیرسیستم‌های متکی به آب سطحی (زیرسیستم‌های انتقال از سد و انحراف رودخانه به منطقه نیاز) در بهره‌برداری سیکلی نشان می‌دهد.

با توجه به این شکل، روند تأمین نیاز در ۸ سال اول تقریباً به‌صورت متناوب تکرار شده است و اولویت مدل برای تأمین نیاز در فصل‌های پرتقاضا (بهار و تابستان)، از طریق سد و رودخانه می‌باشد. به عبارت بهتر، در این فصول، زیرسیستم‌های انحراف رودخانه و انتقال از سد به منطقه نیاز با حداکثر ظرفیت خود، نیاز آبی را تأمین نموده و مابقی نیاز از پمپاژ آب‌های زیرزمینی ارضاء می‌گردد. به‌علاوه، تمایل تأمین نیاز از طریق زیرسیستم‌های متکی به آب سطحی (زیرسیستم‌های انتقال از سد و انحراف رودخانه به منطقه نیاز) در فصول پاییز و زمستان نیز دیده می‌شود. این امر بیانگر استفاده بهینه از زیرسیستم‌ها، به‌منظور حداکثر کردن پایداری سیستم است.

۳-۱-۲- رودخانه

همواره انتظار می‌رود در فصول تر که رهاسازی از سد قابل توجه است رودخانه نیز پر آب باشد. با توجه به شکل ۴ این انتظار برآورده گشته است. با توجه به نمودارهای انحراف از رودخانه به سمت مناطق نیاز و تغذیه مصنوعی، به‌غیر از سال‌های آخر، در فصل‌های تابستان و زمستان که نیاز به اوج خود می‌رسد، تأمین نیاز با حداکثر ظرفیت سیستم انحراف رودخانه صورت می‌پذیرد. به‌منظور جلوگیری از هدررفت آب، در اکثر اوقات، تغذیه مصنوعی نیز با حداکثر ظرفیت سیستم انحراف

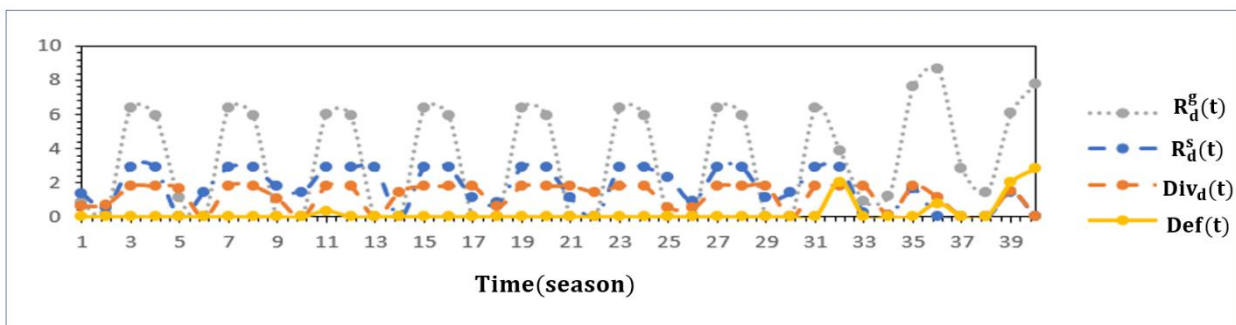


Fig. 6- Deficit and supply graphs by different subsystems in cyclic operation (MCM)

شکل ۶- نمودار کمبود و تأمین نیاز از طریق زیرسیستم‌های مختلف در بهره‌برداری سیکلی (م.م.م)

در نیم‌سال اول هر سال روند صعودی و در نیم سال دوم همان سال روند نزولی را در پیش گرفته است. لیکن، به دلیل بیشتر بودن حجم تغذیه به آبخوان نسبت به تخلیه از آن در هر سال، حجم ذخیره مخزن زیرزمینی در ۸ سال اول شبیه‌سازی روند صعودی را در پیش گرفته است. با عنایت به اینکه هدف از بهره‌برداری، ماکزیمم کردن شاخص پایداری است به نظر می‌رسد که نزول حجم ذخیره آبخوان در ۲ سال آخر تا رسیدن به حجم اولیه آن منطقی باشد. حجم ذخیره آبخوان در گام زمانی ۴۱ با حجم ذخیره اولیه آن برابر است. این بدان معنی است که آبخوان در طی این مدت به صورت پایدار بهره‌برداری گشته است.

۳-۲- نتایج بهره‌برداری غیرسیکلی

شکل ۸ نمودار تغییرات آورد رودخانه، حجم ذخیره مخزن، رهاسازی عمودی از سد و سرریز از آن را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌کنید، فصولی که آورد رودخانه قابل توجه است، آب مازاد به صورت سرریز از مخزن خارج می‌گردد.

با توجه به شکل ۹ که مقدار تغذیه مصنوعی از طریق انحراف رودخانه و تغییرات حجم ذخیره آبخوان را نسبت به حجم اولیه آن را نشان می‌دهد، در اکثر مواقع، به منظور جلوگیری از هدررفت آب در فصول سرریز، تغذیه مصنوعی از طریق این زیرسیستم با حداکثر ظرفیت آن صورت می‌پذیرد. تفاوت اصلی ذخیره آبخوان در بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی در نحوه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. به عبارت بهتر، در بهره‌برداری غیرسیکلی، برخلاف بهره‌برداری سیکلی، در اکثر فصول حجم ذخیره مخزن پایین‌تر از حجم اولیه آن نیز شده است. حال آن‌که در بهره‌برداری سیکلی، ذخیره آبخوان در سال‌های اولیه روند صعودی داشته و سپس در آخرین گام زمانی، به حجم اولیه خود می‌رسد. دلیل این امر را می‌توان در تفاوت تغذیه مصنوعی از طریق سیستم انحراف رودخانه در دو رویکرد بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی جستجو نمود.

چراکه مدل سعی بر آن دارد تا مقدار هدررفت رواناب را با تأمین نیاز از سد و رودخانه به حداقل برساند. لازم به ذکر است که تأیید تنظیم شدن جریان توسط مخزن سطحی با توجه این نمودار نیز امکان‌پذیر است. چرا که تأمین نیاز از طریق سیستم انتقال از سد به منطقه تقاضا در فصول خشک (تابستان) نیز اتفاق افتاده است. از نکات قابل توجه این شکل تأمین ناچیز نیاز از طریق زیرسیستم‌های متکی به آب سطحی 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، جهت رساندن حجم ذخیره‌ی آن به حجم اولیه 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 آورد (زیرسیستم‌های انتقال از سد و انحراف رودخانه به منطقه نیاز) و تغذیه آبخوان، و در سال آخر، استفاده از آب ذخیره شده در آبخوان در سال‌های اول است.

۳-۱-۴- مخزن زیرزمینی

شکل ۷ نمودار مقادیر تغذیه به آبخوان، تخلیه از آن و نمودار حجم ذخیره آن را نسبت به مبنای مشخصی ($S^g(1)$) نشان می‌دهد. با توجه به تقاضای زیاد آب در فصول تابستان و بهار برخلاف فصول پاییز و زمستان، میزان تخلیه از آبخوان بیشتر از تغذیه به آن است. به همین دلیل پیک نمودار ذخیره در فصل‌های بهار و مینیمم نسبی در فصل‌های پاییز رخ می‌دهد. به عبارت بهتر، با توجه به بالا بودن نیاز در فصل‌های بهار و تابستان، تأمین نیاز از طریق پمپاژ آب‌های زیرزمینی، حجم قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. لذا در فصل پاییز، ذخیره آب زیرزمینی به شدت پایین می‌آید. از طرفی، با توجه به ناچیز بودن نیاز در فصل‌های پاییز و زمستان و تأمین آن از طریق زیرسیستم‌های انتقال آب از سد و انحراف رودخانه به منطقه نیاز (شکل ۶)، آبخوان فرصت تجدید پیدا کرده و حجم ذخیره آن در فصل بهار در بیشترین مقدار خود قرار خواهد گرفت. لذا حجم ذخیره آبخوان

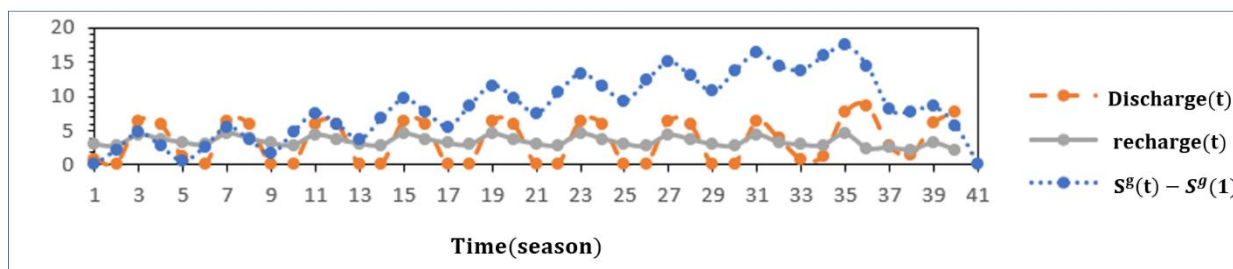


Fig. 7- Values of recharge, discharge and the aquifer storage volume in cyclic operation (MCM)

شکل ۷- مقادیر تغذیه به آبخوان، تخلیه از آن، نمودار حجم ذخیره آبخوان نسبت به مبنای مشخصی ($S^g(1)$) در بهره‌برداری سیکلی (م.م.م)

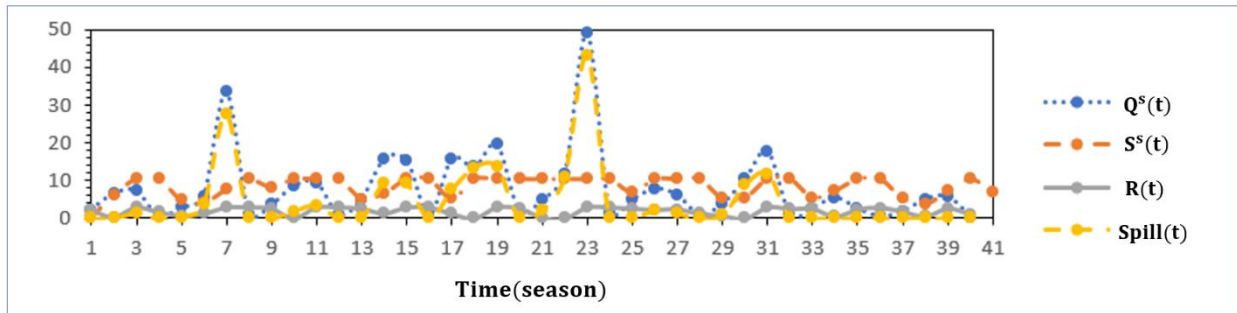


Fig. 8- Inflow, outflow and dam storage volume changes in noncyclic operation (MCM)

شکل ۸- تغییرات آورد رودخانه، حجم ذخیره مخزن، رهاسازی عمدی از سد و سرریز از آن در بهره‌برداری غیرسیکلی (م.م.م)

حدود ۲۰۵/۵ میلیون مترمکعب و در بهره‌برداری غیرسیکلی ۷۶/۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. این امر بیانگر افزایش احتمال وقوع سیلاب (در پایین دست) در بهره‌برداری غیرسیکلی از سیستم و کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از سیلاب در بهره‌برداری سیکلی از آن است.

یکی از تفاوت‌های اصلی بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی، در مقدار تغذیه مصنوعی از طریق سیستم انحراف رودخانه است. در بهره‌برداری غیرسیکلی از سیستم، تغذیه مصنوعی فقط در مواقع سرریز رخ می‌دهد. لذا همان‌طور که در جدول زیر نیز مشهود است، حجم تغذیه مصنوعی و به تبع آن حجم آب پمپاژ شده در این نوع از بهره‌برداری بسیار کمتر از بهره‌برداری سیکلی است. به همین دلیل بهره‌برداری سیکلی از سیستم، منجر به ذخیره‌سازی بیشتر آب در آبخوان و استفاده آن در سال‌های خشک می‌شود. از این رو در بهره‌برداری سیکلی شاخص پایداری به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. لازم به ذکر است که در بهره‌برداری سیکلی به منظور جلوگیری از هدررفت آب، زیرسیستم‌های متکی به آب سطحی (انتقال از سد و انحراف رودخانه به منطقه نیاز) حجم آب بیشتری را نسبت به بهره‌برداری غیرسیکلی به منطقه نیاز منتقل می‌کنند.

همان‌طور که در بخش قبلی نیز بیان شد، در بهره‌برداری سیکلی، به‌منظور جلوگیری از هدررفت آب، بیش از ۸۷ درصد مواقع، سیستم انحراف رودخانه به تغذیه مصنوعی با حداکثر ظرفیت خود در کار است. حال آن‌که در بهره‌برداری غیرسیکلی، فقط در مواقع سرریز، تغذیه مصنوعی از طریق این زیرسیستم صورت می‌پذیرد. لذا در بعضی از فصول، حجم آبخوان کمتر از حجم اولیه آن خواهد شد.

۳-۳- مقایسه بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی

به‌منظور بررسی دقیق‌تر دو رویکرد بهره‌برداری و جمع‌بندی مطالب ذکر شده در بخش‌های قبلی، جدول ۵ تهیه گشته است. با توجه به جدول زیر، در بهره‌برداری سیکلی، علاوه بر رها کردن کمتر آب از سد به رودخانه، مقدار آب کمتری از بازه دوم رودخانه نسبت به بهره‌برداری غیرسیکلی، از دسترس خارج شده است. این موضع بیانگر مدیریت و تنظیم بیشتر آب و جلوگیری از هدررفت آن است. علاوه بر این در بهره‌برداری غیرسیکلی، حجم ذخیره مخزن، بیش از ۴/۵ برابر بهره‌برداری سیکلی در ماکزیمم ظرفیت خود قرار دارد. همچنین حجم فضای خالی مخزن در طول دوره شبیه‌سازی در بهره‌برداری سیکلی

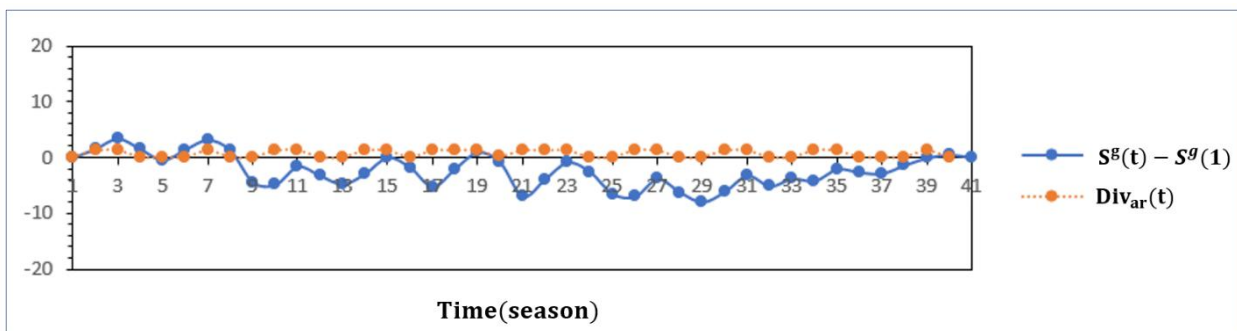


Fig. 9- Graphs of river diversion to the artificial recharge and aquifer storage volume changes in noncyclic operation (MCM)

شکل ۹- نمودارهای تغذیه مصنوعی از طریق سیستم انحراف رودخانه و تغییرات حجم ذخیره آبخوان در بهره‌برداری غیرسیکلی (م.م.م)

Table 5- Comparison of values of different variables in cyclic and noncyclic operations

Variables	Cyclic operation	Noncyclic operation
$\sum R_{riv}^s(t)$	240	247.2
$\sum q_{riv}^{out}(2, t)$	137.5	162.5
$\sum Div_{ar}(t)$	42.7	24.5
$\sum R_d^g(t)$	135	112.6
$(S^g(41) - S^g(1))$	0	0
$\sum Div_d(t)$	48.8	46.6
$\sum R_d^s(t)$	68.2	59.5
No. of times $S^S(t) = CapD$	23	5
Sustainability Index	0.86	0.69

جدول ۵- مقایسه مقادیر متغیرهای مختلف در بهره‌برداری‌های سیکلی و غیرسیکلی

۱- در بهره‌برداری غیرسیکلی از سیستم که امروزه در بسیاری از نقاط کشور رایج است، با کم‌توجهی به پتانسیل بالقوه ظرفیت آبخوان‌ها، پایداری سیستم‌های منابع به شدت کاهش می‌یابد.

۲- بهره‌برداری سیکلی از سیستم، موجب کاهش هدررفت آب به میزان قابل توجه می‌شود. در این نوع از بهره‌برداری، با ذخیره آب در آبخوان در فصول پر آب و استفاده آن در فصول خشک تا حد زیادی از اتلاف منابع آبی جلوگیری می‌گردد.

۳- در بهره‌برداری سیکلی از سیستم، مخزن به میزان قابل توجهی جریان رودخانه را تنظیم می‌کند. به عبارت بهتر، در این نوع بهره‌برداری، مخزن سطحی آب را در فصول تر به منظور استفاده در فصول خشک ذخیره می‌نماید.

۴- در بهره‌برداری سیکلی، علاوه بر رها کردن کمتر آب از سد به رودخانه، مقدار آب کمتری از بازه دوم رودخانه نسبت به بهره‌برداری غیرسیکلی، از دسترس خارج شده است. این موضع بیانگر مدیریت و تنظیم بیشتر آب و جلوگیری از هدررفت آن است.

۵- در بهره‌برداری سیکلی از سیستم در طول دوره شبیه‌سازی، ذخیره آبخوان همواره بیشتر از ذخیره اولیه آن است و در پایان گام شبیه‌سازی به منظور حداکثر رساندن پایداری تخصیص آب، به حجم اولیه خود می‌رسد. حال آنکه در بهره‌برداری غیرسیکلی، ذخیره آبخوان در اکثر فصول، کمتر از ذخیره اولیه آن است.

۴- نتیجه‌گیری

بخش کشاورزی، بزرگترین مصرف کننده منابع آب کشور می‌باشد و بیش از ۹۰ درصد مصارف آب کشور را شامل می‌شود. لذا پایداری منابع آب به طور قابل توجهی به مدیریت مناسب و استفاده مؤثر از آب در بخش کشاورزی دارد (Fasakhodi et al., 2010). منابع تأمین کننده نیاز آبی بخش کشاورزی به دودسته منابع آب سطحی و زیرزمینی تقسیم می‌شوند. با توجه به نقاط ضعف و قوت استفاده جداگانه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، استفاده تلفیقی از این منابع، می‌تواند بهترین راهکار تأمین آب مورد نیاز این بخش باشد. بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی (سنتی) دو رویکرد بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشند. با توجه به اینکه، اکثراً، رهاسازی از سدهای احداث شده به رودخانه‌ها صرفاً جهت تأمین حقایق پایین دست اعم از زیست محیطی، شهری و کشاورزی است و رهاسازی بیشتر از سد به صورت سرریز رخ می‌دهد و به عبارتی بهره‌برداری از سدهای موجود به صورت غیرسیکلی صورت می‌پذیرد؛ هدف اصلی این مطالعه، کمی‌سازی پایداری تخصیص آب به بخش کشاورزی با استفاده از شاخص پایداری Sandoval-Solis et al. (2011) در دو رویکرد بهره‌برداری سیکلی و غیرسیکلی و تبیین کارایی بهره‌برداری تلفیقی سیکلی در مقایسه با بهره‌برداری تلفیقی غیرسیکلی از آب‌های سطحی و زیرزمینی است. نکات زیر به صورت فهرست‌وار از این مطالعه استخراج گشتند:

- Alimohammadi S, Afshar A (2005b, September) Optimum design of cyclic storage systems; distributed parameter approach: 2-model solution methodology and analysis of results. In: Proc. of the 5th WSEAS/IASME International Conference on Systems Theory and Scientific Computation, 15-17 September, Malta, 243-248
- Alimohammadi S, Afshar A (2012) Cyclic Storage Systems Optimization; Design Model Fundamentals and formulation. Iran-Water Resources Research 7(3):1-20 (In Persian)
- Alimohammadi S, Afshar A, Ghaheri A (2005) Unit response matrix coefficients Development: ANN approach. In: Proc. of the 5th WSEAS/IASME International Conference on Systems Theory and Scientific Computation World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS-2005), 15-17 September, Malta, 17-25
- Alimohammadi S, Afshar A, Mariño MA (2009) Cyclic storage systems optimization: Semidistributed parameter approach. Journal of American Water Works Association 101(2):90-103
- Ashofteh PS, Haddad OB, Akbari-Alashti H, Marino MA (2014) Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 141(4):1-12
- Azaiez MN (2002) A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity costs. European Journal of Operational Research 143(3):611-624
- Coe JJ (1990) Conjunctive use-advantages, constraints, and examples. Journal of Irrigation and Drainage, ASCE, 116(3):427-443
- Fasakhodi AA, Nouri SH, Amini M (2010) Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems; a multi-objective fractional goal programming approach. Water Resources Management 24(15):4639-4657
- Fanai N, Burn DH (1997) Reversibility as a sustainability criterion for project selection. The International Journal of Sustainable Development World Ecology 4(4):259-273
- Gorelick SM (1983) A review of distributed parameter groundwater management modeling methods. Water Resources Research 19(2):305-319
- Hashimoto T, Loucks DP, Stedinger JR (1982) Reliability, resiliency, robustness, and vulnerability criteria for water resource systems. Water Resources Research 18(1):14-26
- ۶- به منظور بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره سیکلی و غیرسیکلی می‌بایست عمده نیاز به ترتیب توسط آب زیرزمینی و آب سطحی تأمین گردد.
- ۷- با توجه به اینکه رهاسازی از سد در بهره‌برداری غیرسیکلی به اندازه تأمین نیازهای پایین‌دست صورت می‌پذیرد و در اکثر فصول به‌ویژه فصول پرآب، مخزن سطحی انباشته از آب است و حجم خالی آن در طول یک دوره‌ی بلندمدت بسیار کمتر از بهره‌برداری سیکلی است، خطرات ناشی از سیلاب در این نوع بهره‌برداری افزایش می‌یابد. حال آنکه در بهره‌برداری سیکلی از سیستم، ذخیره آب در سد در اکثر اوقات در حداکثر ظرفیت خود نبوده و این موضوع باعث بیشتر شدن امنیت جانی و مالی ناشی از خطر سیلاب احتمالی می‌گردد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های بنیاد ملی نخبگان برای انجام این تحقیق که در چارچوب گرانت شماره 96010175 انجام شده است صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنند.

۶- مراجع

- Addams CL (2005) Water resource policy evaluation using a combined hydrologic-economic-agronomic modeling framework: Yaqui Valley Sonora, Mexico. Ph.D. Thesis: Stanford, California, Stanford University, 354 p
- 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(12):1741-176
- Afshar A, Zahraei A, Mariño MA (2010) Large-scale nonlinear conjunctive use optimization problem: Decomposition algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management 136(1):59-71
- Aguado E, Remson I (1974) Ground-water hydraulics in aquifer management. Journal of the Hydraulics Division 100(1):103-118
- 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 (2005a) Optimum design of cyclic storage systems; distributed parameter approach: 1- system definition and model formulation. In: Proc. of the 5th WSEAS/IASME International Conference on Systems Theory and Scientific Computation, 15-17 September, Malta, 249-256

- deficit irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(2)
- Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(5):381-390
- Singh A (2012a) Optimal allocation of resources for the maximization of net agricultural return. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(9):830-836
- Singh A, Panda SN (2012) Integrated salt and water balance modeling for the management of waterlogging and salinization. I: Validation of SAHYSMOD. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(11):955-963
- Singh A, Panda SN (2012) Integrated salt and water balance modeling for the management of waterlogging and salinization. II: Application of Sahysmod. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(11):964-971
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(6898):671-677
- Wang CX, Li YP, Huang GH, Zhang JL (2016) A type-2 fuzzy interval programming approach for conjunctive use of surface water and groundwater under uncertainty. *Information Sciences* 340:209-227
- Zongxue X, Jinno K, Kawamura A, Takesaki S, Ito K (1998) Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Water Resources Management* 12(1):13-30
- Lefkoff, LJ, Gorelick SM (1990) Benefits of an irrigation water rental market in a saline stream-aquifer system. *Water Resources Research* 26(7):1371-1381
- Lettenmaier DP, Burges SJ (1982) Cyclic storage: A preliminary assessment. *Groundwater* 20(3):278-288
- Li P, Qian H, Wu J (2018) Conjunctive use of groundwater and surface water to reduce soil salinization in the Yinchuan Plain, North-West China. *International Journal of Water Resources Development* 34(3):337-353
- Liu L, Cui Y, Luo Y (2013) Integrated modeling of conjunctive water use in a canalwell irrigation district in the lower Yellow River Basin, China. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 139(9):775-784
- Loucks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal* 42(4):513-530
- Maddock III T (1972) Algebraic technological function from a simulation model. *Water Resources Research* 8(1):129-134
- Mendoza VM, Villanueva EE, Adem J (1997) Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research* 9(1-2):139-145
- Safavi HR, Esfahani MK, Zamani AR (2014) Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrood River Basin, Iran. *Water resources management* 28(6):1671-1688
- Safavi HR, Falsafioun M (2017) Conjunctive use of surface water and groundwater resources under