

Cyclic Storage Systems Optimization; Design Model Fundamentals and Formulation

S. Alimohammadi^{1*} and A. Afshar²

Abstract

A cyclic storage system integrates a surface water subsystem (i.e., river and surface reservoir) with a groundwater subsystem (i.e., aquifer) in an interactive loop to satisfy prespecified demands. Modeling these systems need to consider the hydraulic relationship between all components. This paper presents an optimization model for design and operation of a cyclic storage system. A generalized and modified unit response matrix method is developed and embedded into the optimization model to develop design and operation parameters. This method were also used to create the link between the groundwater simulation model and the system optimization model to compute system responses to different excitations. Solution to the proposed model, in addition to the design parameters, provides the optimal operation for the defined cyclic storage system. The Abhar River and Aquifer, Iran, were used as case study. One of the key results of this study is that the release from the surface reservoir does not necessarily follow a storage rule curve as might be expected in a single reservoir system.

Keywords: Cyclic storage system, Conjunctive use, Artificial recharge, Distributed parameter optimization, Nonlinear programming.

Received: December 7, 2008

Accepted: January 18, 2012

بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره سیکی؛ مبانی و فرمول‌بندی مدل طراحی

سعید علیمحمدی^{۱*} و عباس افشار^۲

چکیده

سیستم ذخیره سیکی، سیستمی است ترکیبی، متشکل از دو زیرسیستم آب سطحی و آب زیرزمینی که تأمین نیازهای تعهد شده را با تشکیل یک حلقه تعاملی بینابینی به وجود می‌آورد. جهت مدل سازی این سیستم‌ها لازم است ارتباط هیدرولیکی بین کلیه مؤلفه‌های آن مد نظر قرار گیرد. در این مقاله مبانی و فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم ارائه گردیده است. بهینه‌سازی پارامتر گسترده طراحی سیستم ذخیره سیکی مورد توجه قرار گرفته و از فرم اصلاح شده و تعمیم یافته روش ماتریس پاسخ واحد جهت اتصال مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، به مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم استفاده شده است. در سیستم ذخیره سیکی حاضر علاوه بر تعامل طبیعی و فیزیکی بین دو زیرسیستم آب سطحی و زیرزمینی، رابطه دیگری نیز از طریق یک فرمان بهره‌برداری بهینه بین این دو زیرسیستم برقرار می‌باشد. جهت آزمون مدل ارائه شده، از یک سیستم ذخیره سیکی ساده فرضی استفاده شده است. در ادامه براساس اطلاعات رودخانه و آبخوار دشت ابهر، مطالعه موردی انجام گرفته است. جهت حل مدل از نرم‌افزار LINGO استفاده گردیده است. حل مدل ضمن تعیین سطح بهینه توسعه هر بخش از سیستم، اندرکنش و تعامل بخش‌های مختلف را جهت تعیین نیازهای متفاوت نتیجه می‌دهد. نکته قابل توجه اینکه نتایج بهره‌برداری بهینه در برخی از بخش‌های سیستم با رویکرد بهره‌برداری معمول متفاوت است.

کلمات کلیدی: سیستم ذخیره سیکی، بهره‌برداری تلفیقی، تغذیه مصنوعی، بهینه‌سازی پارامتر گسترده، برنامه‌ریزی غیرخطی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۷ آذر ۱۳۸۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۸ دی ۱۳۹۰

1- Assistant Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Power and Water University of Technology, Tehran, Iran, Email: alimohammadi@pwut.ac.ir

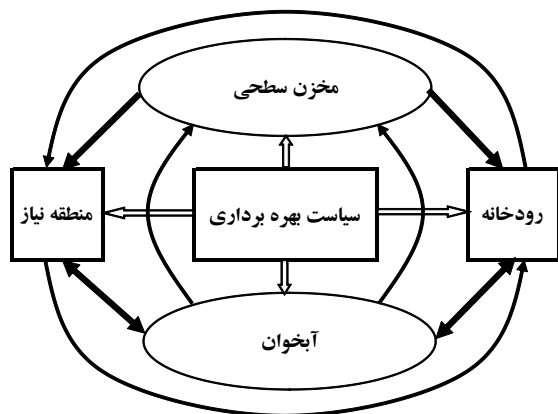
2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: a_afshar@iust.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست- دانشگاه صنعت آب و برق- تهران- ایران.

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران.

*- نویسنده مسئول



شکل ۱- حلقه تعاملی بین اجزای اصلی سیستم ذخیره سیکلی

مطابق شکل ۲ در این سیستم، جریان ورودی $(Q_s(t))$ ، تبخیر $(E_s(t))$ ، بارش $(P_s(t))$ ، حجم ذخیره $(S^s(t))$ ، خروجی مخزن برای تامین نیاز $(R^s_d(t))$ ، خروجی مخزن برای تغذیه مصنوعی $(R^s_{ar}(t))$ ، و خروجی به رودخانه $(R^s_{riv}(t))$ ، اجزای بالانس حجمی مخزن را تشکیل می دهند. در صورتی که اهداف طرح ایجاب نماید، باز گرداندن آب از آبخوان به مخزن سطحی $(R^s_s(t))$ نیز می تواند صورت پذیرد. بخشی از نیاز آبی منطقه، از مخزن سطحی، بخشی دیگر از طریق انحراف جریان رودخانه $(Div_d(t))$ و مابقی از طریق پمپاژ چاهها $(R^g_d(t))$ از آبخوان، تأمین می گردد. بعلاوه می توان بخشی از جریان رودخانه را جهت تغذیه مصنوعی آبخوان منحرف نمود $(Div_{ar}(t))$. بخشی از بارش منطقه $(Prc(t))$ که به آبخوان نفوذ می نماید $(Seep(t))$ ، منبع دیگری از ورودی به آبخوان است. آبی که به منطقه نیاز فرستاده شده، پس از مصرف به چند صورت ظاهر می گردد. بخشی از آن به صورت تبخیر و سایر تلفات $(Loss(t))$ از سیستم خارج می شود. بخش دیگر در آبخوان نفوذ نموده $(Retg(t))$ و بخش دیگری هم به صورت رواناب (پس از تصفیه)، وارد رودخانه می شود $(Retr(t))$. در طول مسیر، همواره بین رودخانه و آبخوان اندرکنش وجود دارد. حاصل این اندرکنشها $(q_{raq}(t))$ به صورت نفوذ آب رودخانه به آبخوان، یا تراوش جریان از آبخوان به رودخانه، ظاهر می گردد. جریان خروجی رودخانه $(q_{riv}^{out}(t))$ ، از ترکیب جریان ورودی رودخانه $(q_{riv}^{in}(t))$ و ورودی ها و خروجی ها در طول مسیر آن به دست می آید. متأسفانه در اغلب طرح های اجرایی بهره برداری تلفیقی و تغذیه مصنوعی، به این اندرکنشها توجه نمی گردد.

نخستین مدل های پارامتر گسترده بهینه سازی بهره برداری تلفیقی، توسط Maddock (1972) Bredehoeft and Young (1972) و Morel-Seytoux et al. (1975) ارائه گردید. از طرفی Thomas (1978) مطالعه سیستم های ذخیره سیکلی را از منظر

در رویکرد مدیریت جامع منابع آب، بهره برداری تلفیقی آب های سطحی و زیرزمینی اهمیت فراوانی دارد. زیرا توسعه بهره برداری از آب های زیرزمینی در مقایسه با سدسازی دارای مزایای متعددی بوده و مشکلات به مراتب کمتری دارد. از این میان می توان به هزینه کمتر، عدم وجود مشکل رسوب و تبخیر، مشکلات کیفی کمتر و عدم وجود مشکلات اجتماعی و فرهنگی اشاره نمود (Coe, 1990). یکجانبه نگری و محدود کردن توسعه منابع آب در سد سازی و یا آبخوان داری یکی از چالش های بالقوه در امر سیاست گذاری است. حقیقت این است که این دو گزینه تنها دو حالت حدی از حالت های فراوان و امکان پذیری است که جهت توسعه طرح های تأمین آب می توان متصور شد. یقیناً همواره یک سطح بهینه از توسعه برای هر یک از این اجزا وجود خواهد داشت. این سطح بهینه با نگرش جامع به کل سیستم (اعم از سطحی و زیرزمینی)، شناخت ارتباط بین آنها و بهره برداری تلفیقی بهینه آب های سطحی و زیرزمینی حاصل می گردد. ذخیره سیکلی نمونه ای از رویکردهایی است که می تواند در تأمین اهداف فوق و تسهیل مشکلات مذکور تأثیرگذار باشد.

بنا به تعریف، سیستم ذخیره سیکلی، سیستمی است ترکیبی، متشکل از دو زیر سیستم اصلی آب سطحی (شامل مخزن سطحی و رودخانه)، و آب زیرزمینی (مخزن زیرزمینی یا آبخوان)، که ضمن تأمین نیازهای تعهد شده، یک حلقه تعاملی بینابینی را به وجود می آورند (شکل ۱). اصلی ترین ویژگی سیستم ذخیره سیکلی در این است که علاوه بر تعامل طبیعی و فیزیکی بین دو زیرسیستم آب سطحی و زیرزمینی، رابطه تنگاتنگ دیگری نیز از طریق اعمال فرمان بهره برداری از پیش طراحی و برنامه ریزی شده، بین این دو زیرسیستم برقرار می باشد. بدین ترتیب سطح مطلوب توسعه مخزن سطحی و آبخوان زیرزمینی (احجام ذخیره)، همراه با ارائه برنامه انتقال بین دو زیر سیستم، و بهره برداری مشترک از آنها به منظور تأمین اهداف طرح، ویژگی های سیستم ذخیره سیکلی را تبیین می نماید.

لذا در یک سیستم ذخیره سیکلی، ضمن تعیین سطح توسعه مخزن سطحی و زیرزمینی (ظرفیت مخزن و سیستم های انتقال، پمپاژ و تغذیه به آبخوان)، باید میزان آب انتقالی بین دو زیرسیستم، به صورت متغیرهای تصمیم و برای دوره های زمانی مختلف، تعیین و در مرحله بهره برداری اعمال شود. در این رهگذر، طبیعی است که نباید از تعامل طبیعی و فیزیکی بین دو زیرسیستم فوق، غافل ماند. در این سیستم رودخانه با آبخوان دارای ارتباط هیدرولیکی است.

جنبه‌های حقوقی و فنی آن‌ها، انجام داد. متعاقباً Lettenmaier and Burges (1982) عملکرد یک سیستم ذخیره سیکلی ساده فرضی را با تولید داده‌های مصنوعی مورد ارزیابی قرار دادند.

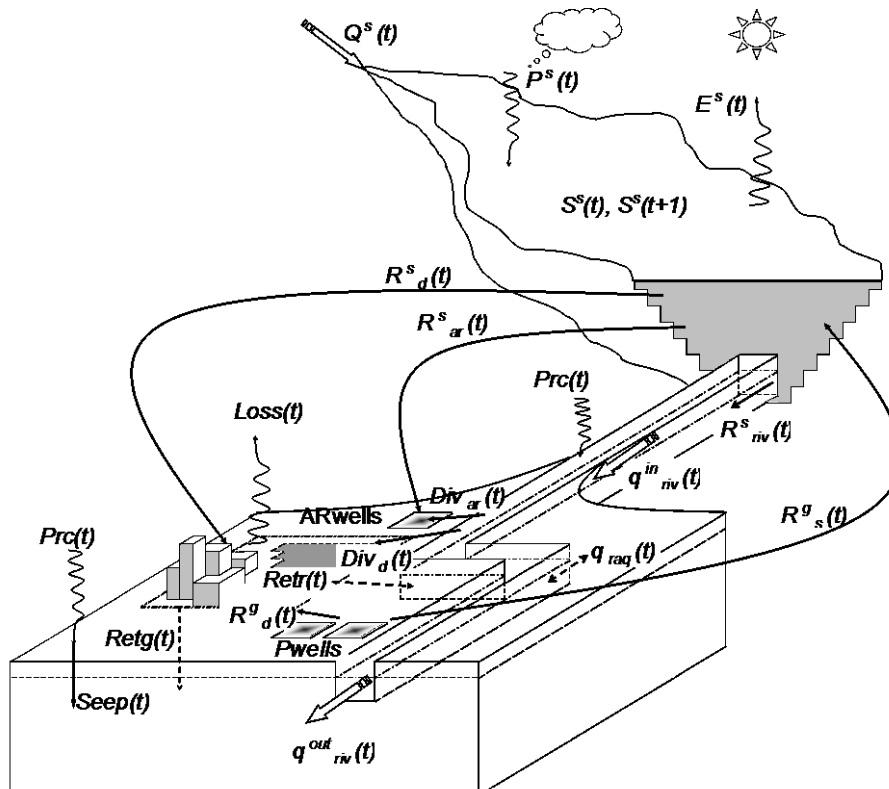
از میان مطالعات مهم مربوط به بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی می‌توان به مطالعات (Peralta (1995), Matsukawa (1992), Nishikawa (1998), Lall (1995), Richard (1995), Basagaoglu et al. (1999), Barlow et al. (2003), Miller et al. (2003) اشاره نمود. مطالعه شاخص انجام شده در این میان توسط Basagaoglu et al. (1999) به انجام رسیده است. آن‌ها یک مدل پارامتر گسترده را جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم تلفیقی شامل سد و مخزن سطحی، رودخانه، آبخوان، و چاه‌های پمپاژ و تغذیه، با در نظر گرفتن اندرکنش بین آبخوان و رودخانه، توسعه دادند.

عمده تحقیقات بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره سیکلی توسط نگارندگان و همکارانشان بوده است. معرفی، مبانی، فرمول‌بندی و تحلیل این سیستم‌ها توسط علیمحمدی (۱۳۸۴) صورت گرفته است. Alimohammadi and Afshar (2005, a, b) به معرفی و تشریح

سیستم‌های ذخیره سیکلی و جایگاه آن در مدیریت منابع آب پرداختند. استاد رحیمی و همکاران (۱۳۸۵)، یک ویرایش پارامتر توده‌ای از این سیستم را جهت بهره‌برداری تلفیقی ارائه نمودند. Afshar et al. (2008) مدل بهینه‌سازی توده‌ای ارائه شده را به کمک الگوریتم ژنتیک حل کرده و نتایج را مورد بررسی قرار دادند. Alimohammadi et al. (2009) بهینه‌سازی سیستم‌های ذخیره سیکلی با رویکرد نیمه گسترده ارائه نمودند. رویکرد نیمه گسترده (semidistributed) به رویکردی اطلاق می‌گردد که در عمل شبیه رویکرد گسترده است اما به دلیل محدودیت‌های محاسباتی، گام‌های زمانی یا المان‌های مکانی، بزرگ‌تر از میزانی است که در مدل‌های شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

۲- فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم

در این مطالعه جهت بهینه‌سازی پارامتر گسترده طراحی سیستم ذخیره سیکلی، از فرم اصلاح شده روش ماتریس پاسخ واحد استفاده گردیده است (علیمحمدی، ۱۳۸۴). در تهیه مدل‌های این مطالعه فرض گردیده است که جریان در رودخانه یکنواخت بوده و در آبخوان تابع قانون داری است و فرض دوپویی - فورکهایمر معتبر است.



شکل ۲- یک سیستم ذخیره سیکلی و اجزای آن

از جریان در لایه غیر اشباع آبخوان، نشت و تلفات جریان در مخزن سد و در طول سیستم‌های انتقال آب صرفنظر شده است. سیستم تغذیه مصنوعی از نوع چاه‌های تحت فشار می‌باشد، و میزان تحریک اعمال شده به سیستم در طول هر دوره زمانی ثابت است. جزئیات بیشتر در علیمحمدی (۱۳۸۴) و Alimohammadi et al. (2009) موجود است. در ادامه روابط مدل ارائه گردیده است.

الف - تابع هدف: تابع هدف مدل، کمینه سازی هزینه کل توسعه و بهره‌برداری سیستم جهت تأمین حجم مشخصی از نیاز سالانه می‌باشد. هزینه‌های سیستم شامل هزینه‌های ثابت اولیه (هزینه‌های اجرایی)، و هزینه‌های جاری (هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری) می‌باشد. ساختار تابع هدف به صورت زیر است:

$$\text{Minimize PVC} \quad (1)$$

$$PVC = PVC(\text{Construction}) + PVC(\text{OMR}) \quad (2)$$

$$PVC(\text{Construction}) = CD + CCD + CCAR + CDivD + CDivAR + CP \quad (3)$$

$$PVC(\text{OMR}) = CW + CAR + CDEF + COMRD + COMRCD + COMRCAR + COMRDivD + COMRDivAR + COMRP \quad (4)$$

$$CD = f(\text{CapD}) \quad (5)$$

$$CCD = f(\text{CapCD}) \quad (6)$$

$$CCAR = f(\text{CapCAR}) \quad (7)$$

$$CDivD = f(\text{CapDivD}) \quad (8)$$

$$CDivAR = f(\text{CapDivAR}) \quad (9)$$

$$CP = f(\text{CapP}) \quad (10)$$

در روابط فوق، PVC : ارزش حاضر کل هزینه توسعه و بهره‌برداری سیستم، $PVC(\text{Construction})$: ارزش حاضر هزینه‌های ثابت و اجرایی سیستم، $PVC(\text{OMR})$: ارزش حاضر هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سیستم می‌باشد. CD و $COMRD$ به ترتیب هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سد؛ CCD و $COMRCD$ به ترتیب هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سیستم انتقال از سد به منطقه نیاز؛ $CCAR$ و $COMRCAR$ به ترتیب هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سیستم انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی؛ $CDivD$ و $COMRDivD$ به ترتیب هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سیستم انحراف جریان رودخانه به منطقه نیاز؛ $CDivAR$ و $COMRDivAR$ به ترتیب هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سیستم انحراف جریان رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی؛ و CP و $COMRP$ به ترتیب هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری سیستم انتقال از آبخوان به سد می‌باشد. CAR ، CW ، $CDEF$ نیز به ترتیب هزینه‌های معادل سالانه پمپاژ چاه، تغذیه مصنوعی و کمبود آبرسانی می‌باشد.

روابط (۵) تا (۱۰) نشان می‌دهند که هزینه‌های اجرایی سد، سیستم‌های انتقال آب، و سیستم‌های انحراف آب به صورت توابعی از ظرفیت هر بخش می‌باشند. در این روابط $CapD$: ظرفیت (حجم) مخزن سد، $CapCD$: ظرفیت سیستم انتقال آب از سد به منطقه نیاز، $CapCAR$: ظرفیت سیستم انتقال آب از سد به منطقه تغذیه مصنوعی، $CapDivD$: ظرفیت سیستم انحراف آب از رودخانه به منطقه نیاز، $CapDivAR$: ظرفیت سیستم انحراف آب از رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی، $CapP$: ظرفیت سیستم انتقال آب از آبخوان به سد می‌باشد. تمامی ظرفیت‌ها دارای واحد حجم می‌باشند.

هزینه پمپاژ از چاه، توابعی از حاصل ضرب دبی پمپ شده در ارتفاع مکش آب از چاه است. همچنین هزینه تغذیه مصنوعی بستگی به نوع سیستم تغذیه دارد. در اینجا فرض شده که تغذیه از نوع چاه‌های تحت فشار می‌باشد؛ لذا هزینه آن توابعی از حجم تغذیه در هر دوره می‌باشد.

ب - محدودیت‌ها: محدودیت‌های مختلفی، تابع هدف رابطه (۱) را مقید می‌سازد. جهت تمایز بین متغیرها از بالا نویس‌های s برای مخزن سطحی و g برای آبخوان، و زیرنویس‌های d برای منطقه نیاز، ar برای تغذیه مصنوعی، w برای چاه (پمپاژ)، و riv برای رودخانه استفاده شده است:

۱- محدودیت‌های پیوستگی و ظرفیت سیستم‌ها:

$$S^s(t+1) = S^s(t) + Q^s(t) + R_s^g(t) - E^s(t) - R_d^s(t) - R_{ar}^s(t) - R_{riv}^s(t) ; \forall t \quad (11)$$

$$S^s(NT+1) \leq S^s(1) ; t = 1, 2, 3, \dots, NT \quad (12)$$

$$A^s(t) = a_0 + a_1 S^s(t) ; \forall t \quad (13)$$

$$E^s(t) = ep(t).kev(A^s(t) + A^s(t+1))/2 ; \forall t \quad (14)$$

$$S^s(t) \leq CapD ; \forall t \quad (15)$$

$$R_d^s(t) \leq CapCD ; \forall t \quad (16)$$

$$R_{ar}^s(t) \leq CapCAR ; \forall t \quad (17)$$

$$R_s^g(t) \leq CapP ; \forall t \quad (18)$$

در روابط فوق S^s : حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره، Q^s : حجم جریان ورودی از رودخانه به مخزن سد، R_s^g : حجم جریان ورودی از آبخوان به مخزن سد، E^s : حجم تبخیر از سطح مخزن، R_d^s : حجم تخصیص خروجی مخزن به منطقه نیاز، R_{ar}^s : حجم تخصیص خروجی از مخزن جهت تغذیه مصنوعی، R_{riv}^s : حجم تخلیه مخزن

به رودخانه (شامل سرریز) می‌باشد. همچنین a_0 و a_1 ضرایب رابطه خطی بین سطح و حجم مخزن و kev ضریب تبدیل واحد می باشد.

۲- محدودیت تأمین نیاز، و کمبودها:

$$R_d^s(t) + R_d^g(t) + DivD(t) = \eta(t) \cdot ANDM - def(t) ; \forall t \quad (19)$$

در رابطه فوق

$R_d^g(t)$: حجم تخصیص نیاز از آبخوان در دوره t ، $DivD(t)$: حجم تخصیص نیاز از رودخانه در دوره t ، $\eta(t)$ ضریب توزیع فصلی نیاز، $ANDM$: نیاز سالانه سیستم، و $def(t)$: کمبود در تأمین نیاز در دوره t می‌باشد.

۳- محدودیت‌های پمپاژ و تغذیه آبخوان:

$$\sum_{k=1}^{NK} q_w(k,t) = R_d^s(t) + R_s^g(t) ; \forall t \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^{NL} q_{ar}(l,t) = R_{ar}^s(t) + DivAR(t) ; \forall t \quad (21)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} \sum_{k=1}^{NK} q_w(k,t) < \sum_{t=1}^{NT} \sum_{l=1}^{NL} q_{ar}(l,t) + \sum_{t=1}^{NT} \sum_{r=1}^{NR} q_{raq}(r,t) / kqv(t) + \sum_{t=1}^{NT} y(t).rets(t) + \sum_{t=1}^{NT} prc(t).seep(t).AQA/1000 \quad (22)$$

$$q_w^{\min}(k,t) \leq q_w(k,t) \leq q_w^{\max}(k,t) ; \forall k,t \quad (23)$$

$$q_{ar}^{\min}(l,t) \leq q_{ar}(l,t) \leq q_{ar}^{\max}(l,t) ; \forall l,t \quad (24)$$

در روابط فوق $DivAr$: حجم انحراف از رودخانه برای تغذیه مصنوعی، q_{raq} : مقدار دبی مبادله شده بین بازه r رودخانه و سلول (سلول‌های) آبخوان در برگرفته آن، ret : ضریبی است که نشاندهنده جزئی از آبرسانی است که در منطقه نیاز در آبخوان نفوذ می‌نماید. prc : ارتفاع بارش (به میلی‌متر)، $seep$: ضریب نفوذ بارش در سطح دشت می‌باشند. رابطه (۲۲) جهت ایجاد شرایط پایدار در آبخوان می‌باشد. این رابطه تضمین می‌نماید که مجموع خروجی از آبخوان بیشتر از جریان‌های ورودی به آن در طول دوره برنامه‌ریزی نباشد.

۴- رابطه بین تحریکات و پاسخ‌ها در سیستم

این محدودیت‌ها جهت محاسبه نوسانات تراز آب در گستره آبخوان و اندرکنش رودخانه و آبخوان به کار می‌روند. برای هر دوره t :

$$R(x,n) = \sum_{y \in \{E\}} \sum_{t=1}^n \sum_{j_y=1}^{NJY} m_y(x, j_y, n-t+1) \quad (25)$$

$$\beta_y(x, j_y, n-t+1) \cdot E_y(j_y, t)$$

در رابطه فوق $R(x,n)$: میزان پاسخ عامل تحریک شونده x در انتهای دوره زمانی n به تحریک عوامل تحریک کننده j_y در دوره t ، $m_y(x, j_y, n-t+1)$: ضریب اصلاحی بین عامل تحریک شونده x و عامل تحریک کننده j_y در دوره t ، $\beta_y(x, j_y, n-t+1)$: ضریب پاسخ واحد که عبارتست از مقدار پاسخ عامل تحریک شونده x در انتهای دوره زمانی n در اثر تحریک واحد عامل تحریک کننده j_y در طی دوره زمانی t و $E_y(j_y, t)$: عبارتست از میزان تحریک عامل تحریک کننده j_y در دوره t . رابطه فوق فرم اصلاح شده روش ماتریس پاسخ واحد است.

در سیستم شکل ۲ هر یک از مؤلفه‌ها تحت تأثیر تحریکات مختلفی هستند و رابطه (۲۵) برای تعیین نوسانات تراز آب در چاه‌های پمپاژ ($s_w(k,n)$)، چاه‌های تغذیه ($s_{ar}(l,n)$)، و تبادل جریان بین رودخانه و آبخوان ($s_{riv}(r,n)$) بایستی بسط یابد (علیمحمدی، ۱۳۸۴).

۵- اندرکنش رودخانه و آبخوان

حاصل این اندرکنش جریانی است که بین رودخانه و آبخوان مبادله می‌شود (McDonald and Harbough, 1988).

$$q_{raq}(r,t) = C_{riv}(r) \cdot (h_{riv}^s(r,t) - h_{riv}^g(r,t)); \quad (26)$$

$$\text{if } h_{riv}^g(r,t) > h_{riv}^{bot}(r) , \forall r,t$$

$$q_{raq}(r,t) = C_{riv}(r) \cdot (h_{riv}^s(r,t) - h_{riv}^{bot}(r)); \quad (27)$$

$$\text{if } h_{riv}^g(r,t) \leq h_{riv}^{bot}(r) , \forall r,t$$

$$C_{riv}(r) = K(r)L(r)W(r)/M(r) , \forall r \quad (28)$$

$$h_{riv}^g(r,t) = h_{riv}^g(r,0) - s_{riv}(r,t) , \forall r,t \quad (29)$$

$$h_{riv}^s(r,t) = h_{riv}^{bot}(r) + M(r) + h_{riv}(r,t), \forall r,t \quad (30)$$

$$G5(q_{raq}, C_{riv}, h_{riv}^s, h_{riv}^g, h_{riv}^{bot}) = 0 \quad (31)$$

در روابط فوق q_{raq} : مقدار دبی مبادله شده بین رودخانه و سلول آبخوان در برگرفته آن است. $C_{riv}(r)$: ضریب انتقال، h_{riv}^s : تراز آب در بازه r رودخانه (نسبت به یک سطح مبنا)، h_{riv}^g : تراز آب آبخوان در سلول (یا میانگین سلول‌های) در برگرفته بازه r رودخانه

h_{riv}^{bot} : تراز (میانگین) کف لایه کم تراوا در بازه r رودخانه، ارتفاع آب در بازه r رودخانه h_{riv}^g : تراز اولیه (میانگین) آبخوان در سلول‌های در برگرفته بازه r رودخانه می‌باشد.

۶- پیوستگی، هیدرولیک جریان و محدودیت‌های دبی رودخانه

$$(q_{riv}^{in}(r,t) + ql_{riv}(r,t) - q_{riv}^{out}(r,t)) \cdot kqv(t) = \Delta S_{riv}(r,t) ; \forall r,t \quad (32)$$

جریان رودخانه به صورت یک سری زمانی در جدول ۱ نمایش داده شده است که شامل دو سال (۸ فصل) است. سال اول پر آب و سال دوم کم آب می‌باشد. نیاز سالانه سیستم نیز ۴۰ میلیون متر مکعب فرض شده است.

آبخوان دارای وسعت ۸۰ کیلومتر مربع می‌باشد و بجز در ورودی و خروجی رودخانه دارای مرز نفوذ ناپذیر است. آبخوان همگن بوده و در آن $S=0.14$ و $K=0.0009 \text{ m/s}$ می‌باشد. فرض شده است که تراز آب زیرزمینی در کلیه نقاط آبخوان ۱۰ متر پایین‌تر از سطح زمین است. رودخانه به صورت یک مجرای مستطیلی با عرض کف ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. ضریب زبری مانینگ رودخانه ۰/۰۲ و شیب کف آن ۰/۰۰۰۱ می‌باشد. رابطه دبی - اشل به صورت $Q=3h$ می‌باشد که در آن Q دبی رودخانه به متر مکعب بر ثانیه و h ارتفاع جریان به متر است. سیستم آبخوان از طریق یک لایه کم تراوا به ضخامت ۲ متر از رودخانه جدا شده است. هدایت هیدرولیکی این لایه 10^{-6} متر بر ثانیه می‌باشد. منطقه نیاز در ناحیه میانی سیستم قرار دارد. نیاز این منطقه از سه منبع قابل تأمین است: انتقال مستقیم از مخزن سد، پمپاژ از آبخوان، و انحراف جریان رودخانه. مقادیر جریان ورودی، توزیع زمانی نیاز (ضرایب η_i) و بارش میانگین برای چهار فصل سال همراه با اطلاعات دیگر در جدول ۱ آمده است. در هر فصل ۵٪ از بارندگی دشت در آبخوان نفوذ می‌نماید. همچنین ۱۰٪ از آب ورودی به منطقه نیاز در آبخوان نفوذ نموده و ۱۰٪ دیگر نیز (پس از تصفیه) وارد بازه دوم رودخانه شده و مابقی به مصرف رسیده و از سیستم خارج می‌شود. گرچه برخی از فرضیات بالا ممکن است در عمل چندان معمول نباشد، لیکن برای نمایش جامعیت مدل و لحاظ نمودن هر نوع تحریک (که در فرمولاسیون مدل پیش بینی شده است)، این امکانات در مدل لحاظ شده است.

جهت حصول اطمینان از جواب بهینه مطلق در این مثال، کلیه هزینه‌ها اعم از اجرایی و بهره‌برداری به صورت خطی در نظر گرفته شده‌اند. هزینه‌های اجرایی به صورت ضریبی از ظرفیت هر بخش منظور شده است. همچنین ارتفاع مکش پمپاژ در تابع هزینه پمپاژ ثابت در نظر گرفته شده است. کلیه ضرایب هزینه‌ها در جدول ۲ خلاصه شده‌اند. جدول ۳ نیز حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم و نیز پارامترهای هزینه پمپاژ را نمایش می‌دهد. به عنوان شرایط آغازین فرض گردیده که تراز آب زیرزمینی مساوی تراز آب در رودخانه است.

$$q_{riv}^{in}(1,t) = R_{riv}^s(t) / kqv(t) ; \forall t \quad (33)$$

$$q_{riv}^{out}(r,t) = q_{riv}^{in}(r+1,t) ; \forall r,t \quad (34)$$

$$h_{riv}^{in}(r,t) = f_r(q_{riv}^{in}(r,t)) ; \forall r,t \quad (35)$$

$$h_{riv}^{out}(r,t) = f_r(q_{riv}^{out}(r,t)) ; \forall r,t \quad (36)$$

$$dh_{riv}(r,t) = h_{riv}(r,t) - h_{riv}(r,t-1); \forall r,t \quad (37)$$

$$h_{riv}(r,0) = h_{riv}^0(r) ; \forall r \quad (38)$$

$$\Delta S_{riv}(r,t) = Area(r).dh_{riv}(r,t) ; \forall r,t \quad (39)$$

$$h_{riv}(r,t) + h_{riv}(r,t+1) = \quad (40)$$

$$h_{riv}^{in}(r,t) + h_{riv}^{out}(r,t) ; \forall r,t \quad (41)$$

$$h_{riv}^{\min}(r) < h_{riv}^{in}(r,t) < h_{riv}^{\max}(r) ; \forall r,t \quad (42)$$

$$h_{riv}^{\min}(r) < h_{riv}^{out}(r,t) < h_{riv}^{\max}(r) ; \forall r,t \quad (43)$$

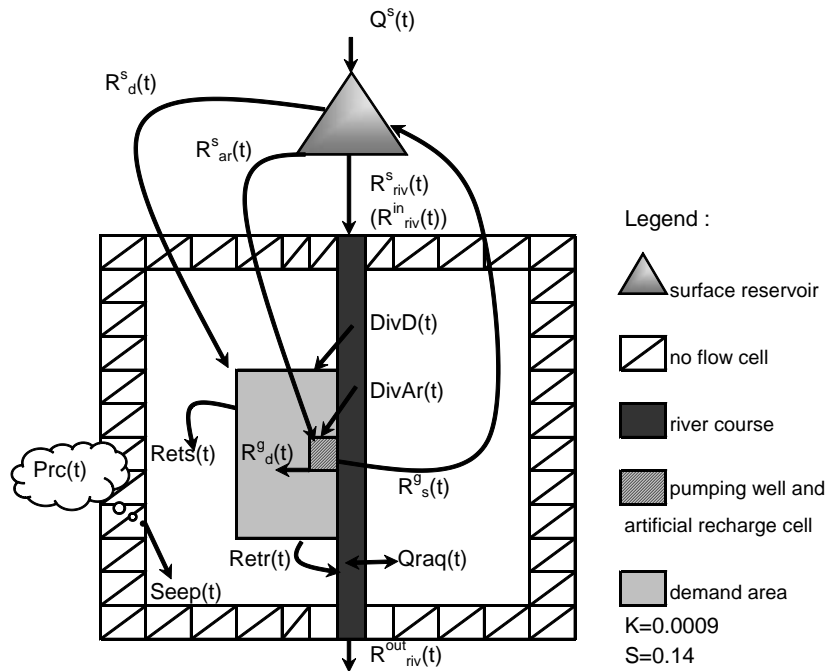
$$q_{riv}^{out,\min}(r,t) \leq q_{riv}^{out}(r,t) \leq q_{riv}^{out,\max}(r,t); \forall r,t \quad (44)$$

در روابط فوق $q_{riv}^{in}, q_{riv}^{out}$: به ترتیب دبی جریان در ورودی و خروجی بازه r, q_{riv} : مجموع جریان‌های ورودی یا خروجی جانبی در طول بازه $r, \Delta S_{riv}$: تغییر در ذخیره رودخانه در بازه $r, h_{riv}^{in}, h_{riv}^{out}$: به ترتیب تراز جریان در ورودی و خروجی بازه r, h_{riv} : تراز متوسط جریان در بازه $r, q_{riv}^{out,\min}$ و $q_{riv}^{out,\max}$ به ترتیب حدود پایین و بالای دبی رودخانه در خروجی بازه r می‌باشد.

روابط (۱) تا (۴۴) مدل بهینه‌سازی طراحی پارامترگسترده سیستم ذخیره سیکلی را ارائه می‌دهند. در این مدل امکان در نظر گرفتن انواع تحریک‌ها از قبیل پمپاژ و تغذیه به چاه‌ها، نفوذ به آبخوان، ورود و خروج جریان از رودخانه، و غیره وجود دارد. بعلاوه از فرم واحدی برای فرمولبندی کلیه پاسخ‌ها استفاده شده و فرم معمول رابطه روش ماتریس پاسخ نیز اصلاح گردیده است. همچنین اندرکنش رودخانه-آبخوان و هیدرولیک جریان رودخانه نیز در فرمولبندی وارد شده است.

۳- آزمون مدل

جهت آزمون مدل از یک سیستم ساده فرضی مطابق شکل ۳ استفاده شده است. جهت حصول این منظور ترکیبات متعددی از داده‌های ورودی به مدل داده شده و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این شکل، یک مخزن، یک سیستم رودخانه - آبخوان که به صورت هیدرولیکی بهم مرتبطند، منطقه نیاز، ۱ چاه (سلول) پمپاژ که در عین حال در حکم چاه تغذیه نیز می‌باشد، منظور شده است.



شکل ۳- جانمایی اجزای سیستم در مسئله مورد بررسی

مدل بهتر مورد ارزیابی قرار گیرد. جدول ۴ و شکل ۴ نتیجه حل مدل بهینه‌سازی را به تفکیک بخش‌های مختلف نمایش می‌دهند (در شکل ۴ واحد محورهای افقی زمان به فصل و محورهای عمودی حجم به میلیون متر مکعب است).

همچنین از حجم مرده مخزن و تبخیر از سطح مخزن صرف‌نظر شده است. در مقایسه با سیستم‌های واقعی، ارقام هزینه‌ها ممکن است متفاوت از آنچه در اینجا در نظر گرفته شده باشند. علت انتخاب این مقادیر این بوده که اکثر بخش‌های سیستم فعال گردند تا عملکرد

جدول ۱- مقادیر فصلی جریان ورودی، بارش، توزیع نیاز و نیاز پایین دست رودخانه

مشخصه	پاییز	زمستان	بهار	تابستان	سالانه
جریان ورودی (MCM)	8	12	30	10	60
بارش (mm)	60	72	150	18	300
نیاز پایین دست (MCM)	1.56	1.54	1.61	1.61	6.32
توزیع نیاز سیستم	0.2	0.1	0.3	0.4	1.0

جدول ۲- ضرایب هزینه‌های بخش‌های مختلف

ترم هزینه	CD	CCD	CCAR	CP	CDivD	CDivAR	Cdef	ranl
ثابت و اجرایی	1.50	0.50	0.30	1.00	0.50	0.30	-	0.08
بهره برداری و نگهداری	0.05	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	3.00	

جدول ۳- حدود متغیرها و پارامترهای هزینه پمپاژ

پارامتر	qw	qar	sw	qrivout	lw	ucen	efp	uelif
ماکزیمم	0	0	-10	0.2	10	7.78E-06	0.75	2.8
می نیمم	3	3	10	5				

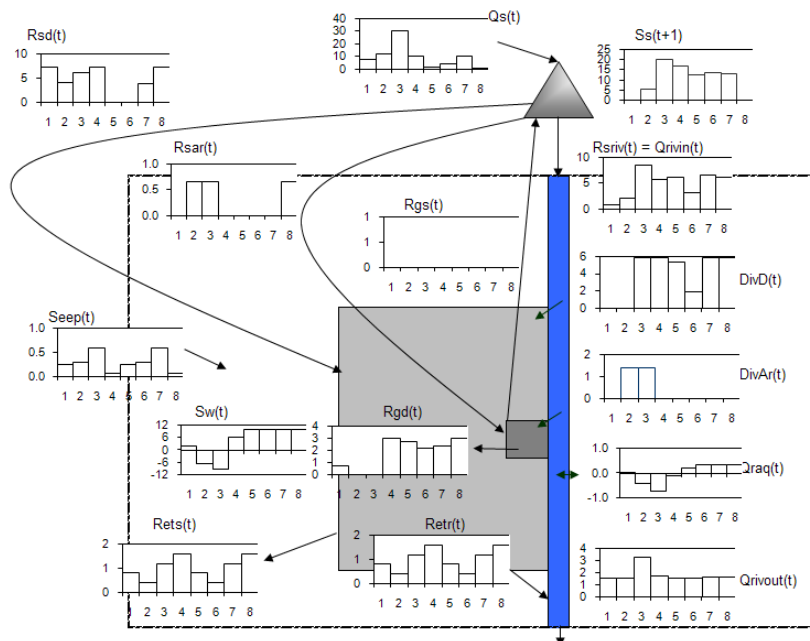
تأمین نماید و در سال دوم از آبخوان. بنابراین حجم آب موجود در آبخوان جهت مصرف در دوره‌های بعدی ذخیره می‌گردد. بدین ترتیب عمده نیاز فصل اول از مخزن تأمین شده است. نیاز خروجی رودخانه در فصل اول مطابق جدول ۱ برابر $1/56$ MCM می‌باشد. $8/$ MCM از این مقدار از آب برگشتی از منطقه نیاز (۱۰٪ آبرسانی این فصل) و مابقی که برابر $0/76$ MCM می‌باشد از طریق تخلیه مخزن به رودخانه تأمین گردیده است. با توجه به اینکه جریان ورودی در فصل اول 8 MCM بوده لذا دقیقاً به میزانی که از مخزن به رودخانه رها شده است ($0/76$ MCM)، از آبخوان به منطقه نیاز منتقل گردیده است.

ملاحظه می‌گردد که نیاز سیستم کاملاً تأمین شده و هزینه کل توسعه و بهره‌برداری سیستم برابر $43/9$ میلیارد تومان حاصل گردیده است. در شکل ۴ جهت سادگی مقادیر نفوذ بارندگی در آبخوان، نفوذ در منطقه نیاز به آبخوان، و ورود جریان برگشتی به رودخانه به ترتیب با $Seep(t)$ ، $Rets(t)$ و $Retr(t)$ نشان داده شده است. مطابق شکل، ملاحظه می‌گردد که دامنه ۱ تا ۳۰ میلیون متر مکعب (MCM) جریان ورودی به دامنه ۴ تا ۱۵ MCM در خروجی کاهش یافته است. چنانچه ملاحظه می‌گردد مخزن در ابتدای دوره‌های اول و دوم خالی بوده است. علت این امر این است که سال اول جریان سطحی بالا بوده و سال دوم این جریان کاهش محسوسی دارد؛ لذا سیستم ترجیح می‌دهد، در سال اول حتی الامکان نیازها را ابتدا از مخزن

جدول ۴- خلاصه نتایج حل مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم (هزینه‌ها به میلیارد تومان است)

بخش	هزینه ثابت	هزینه جاری	ظرفیت *
سد (مخزن)	29.855	1.493	19.9 (MCM)
انتقال از سد به منطقه نیاز	3.619	0.663	7.238
انتقال از سد به تغذیه مصنوعی	0.196	0.018	0.652
انتقال از آبخوان به مخزن	0.000	0.000	0.000
انحراف از رودخانه به منطقه نیاز	2.881	0.544	5.762
انحراف از رودخانه به تغذیه مصنوعی	0.413	0.026	1.376
پمپاژ	-	3.693	3.000
تغذیه مصنوعی	-	0.502	0.652
کمبود	-	0.000	-

* : (MCM/season)



شکل ۴- نتیجه حل مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم ذخیره سیکلی فرضی (احجام به MCM)

۳-۱- بررسی رفتار سیستم در اثر تغییر در داده‌های ورودی جهت ارزیابی بیشتر مدل و رفتار آن در این قسمت نتایج حل مدل با تغییر در برخی پارامترها ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. در کلیه اجراها، تمامی ورودی‌ها مشابه مثال قبلی است (که آنرا حل پایه می‌نامیم) بجز ترمی که به آن اشاره شده است. (در شکل‌های ۵ الی ۱۲ واحد محورهای افقی زمان به فصل و واحد محورهای عمودی حجم به میلیون متر مکعب است).

- افزایش هزینه انحراف رودخانه به منطقه نیاز

شکل ۵ نتیجه حل مدل را به ازای افزایش هزینه انحراف رودخانه به منطقه نیاز به میزان ۳ برابر نشان می‌دهد. در مقایسه با حل پایه ملاحظه می‌گردد که ظرفیت سد تقریباً ثابت مانده ولی ظرفیت سیستم‌های انتقال از سد به منطقه نیاز و تغذیه مصنوعی به میزان قابل توجهی افزایش، و سیستم انحراف از رودخانه حذف گردیده و انتقال آب فقط از سد صورت گرفته است. پمپاژ از آبخوان نیز تقریباً ثابت مانده است، زیرا اصولاً این پارامتر بیش از هر چیز از جریان سطحی تبعیت می‌نماید و در حالیکه هیچ هزینه‌ای نداشته باشد نیز تغییری در الگوی برداشت از آبخوان ایجاد نمی‌گردد. چنانکه گفته شد با کاهش هزینه پمپاژ، تغییری در رفتار سیستم، ایجاد نمی‌گردد، اما چنانچه در شکل ۹ آمده است با افزایش آن، از میزان ظرفیت و حجم پمپاژ کاسته شده و به میزان ظرفیت سد و انتقال از مخزن سد افزوده گردیده است.

- کاهش هزینه کمبود

شکل ۶ تغییرات جریان‌ها در سیستم را به ازای کاهش ضریب هزینه کمبود از ۳ به ۱/۸ نمایش می‌دهد. در این حالت، ظرفیت سد کاهش یافته اما توزیع حجم ذخیره و جریان خروجی به منطقه نیاز تقریباً ثابت مانده است. در دوره‌های ۴ و ۸ که نیاز ماکزیمم است (۱۶ MCM) نیاز تأمین شده به ترتیب برابر ۱۵ و ۱۴/۳۳ MCM، لذا به ترتیب ۱ و ۱/۶۷ MCM کمبود ایجاد گردیده است. به همین دلیل نیازی به انتقال از سد به منطقه تغذیه نبوده است و این سیستم حذف شده است زیرا با پذیرش این کمبودها نیازی به تغذیه بیشتر نمی‌باشد.

- افزایش افت مجاز و ظرفیت پمپاژ مجاز آبخوان

شکل ۷ رفتار سیستم را به ازای افزایش افت مجاز آبخوان از ۱۰ به ۱۵ متر، و افزایش ظرفیت پمپاژ از ۳ به ۵ MCM در فصل نمایش می‌دهد. ظرفیت سد کاهش یافته اما ظرفیت انحراف از رودخانه

در فصل دوم نیاز سیستم برابر ۴ و نیاز خروجی رودخانه برابر ۱/۵۴ MCM می‌باشد. با توجه به ورودی ۱۲ MCM به مخزن، طبیعی است که تمامی این نیاز از مخزن تأمین گردد. خروجی سد به رودخانه برابر ۲/۱۰۱ MCM بوده است. از این میزان ۱/۳۷۶ MCM برای تغذیه آبخوان از رودخانه منحرف شده است و مابقی (۰/۷۲۴ MCM) همراه ۰/۴ MCM آب برگشتی از منطقه نیاز و ۰/۴۰۳ MCM تراوش آبخوان به رودخانه و اندک جریان ناشی از بارش مستقیم روی رودخانه، نیاز خروجی رودخانه را تأمین نموده است. با توجه به ورود جریان از آبخوان به رودخانه، بایستی تراز آبخوان در این دوره بالا باشد.

تغییرات آبرسانی به منطقه نیاز از منابع مختلف نشان می‌دهد که عمده نیازها از سد (به طور مستقیم یا پس از تخلیه به رودخانه و انحراف به محل نیاز) تأمین گردیده است. نکته حائز اهمیت این است که در این مثال هزینه انتقال مستقیم از سد به منطقه نیاز و هزینه رهاسازی به رودخانه و انحراف به محل نیاز با هم برابر است. علت تمایل سیستم به انتقال از طریق رودخانه در برخی دوره‌ها اولاً ظرفیت محدود انتقال مستقیم از سد، و دوماً این است که پس از دوره سوم تراز آبخوان در اطراف چاه مطابق شکل شروع به کاهش می‌نماید. بخشی از این کاهش می‌تواند از طریق نشت از رودخانه جبران گردد و هر قدر تراز آب در رودخانه بیشتر باشد، این میزان بیشتر است.

مطابق شکل ۴ در دوره‌های ۲ و ۳ تغذیه مصنوعی هم از مخزن و هم از رودخانه صورت گرفته است. این دو دوره پرآب‌ترین دوره‌ها بوده‌اند. از طرفی دقیقاً در همین دو دوره هیچ پمپاژی از آبخوان صورت نگرفته اما در دوره آخر با وجود اینکه یک دوره کم آب است مجدداً از مخزن به آبخوان تغذیه صورت گرفته است. علت آن است که نیاز دوره آخر برابر ۱۶ واحد است. ظرفیت انتقال از مخزن و انحراف از رودخانه به منطقه نیاز، به ترتیب برابر ۷/۲۳۸ و ۵/۷۶۲ MCM در دوره می‌باشند که مجموع آن برابر ۱۳ MCM خواهد شد. بنابراین مابقی نیاز یعنی ۳ واحد بایستی از آبخوان تأمین شود. از طرفی آبخوان در ابتدای این دوره در حداکثر افت می‌باشد. بنابراین تغذیه انجام شده همراه نفوذ جریان در منطقه نیاز و نفوذ از رودخانه، این برداشت را جبران می‌نمایند.

تغییرات جریان خروجی رودخانه نیز نشان می‌دهد که بجز در دوره سوم که حجم جریان سطحی بسیار بالاست، در سایر دوره‌ها خروجی سیستم دقیقاً برابر نیاز پایاب بوده است.

منطقه تغذیه و نیز میزان این انتقال افزایش یافته است. نکته قابل توجه در این حالت کاهش ناگهانی پمپاژ در دوره هفتم است. علت آن این است که تراز آبخوان در چاه در دوره ششم در حداکثر افت بوده است.

- تغییر توزیع نیاز سیستم

شکل ۸ رفتار سیستم را در وضعیتی که توزیع نیاز سیستم تغییر یابد را نشان می‌دهد. در این حالت ضریب توزیع نیاز برای ۴ فصل سال به ترتیب برابر ۰/۴، ۰، ۰، و ۰/۶ در نظر گرفته شده است. چنانچه انتظار می‌رود، حجم ذخیره مخزن افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. سایر اجزای سیستم نیز به سبب این افزایش، تغییر نموده‌اند. نکته قابل توجه فعال شدن سیستم انتقال از آبخوان به مخزن است. این سیستم در دوره‌های ۶ و ۷ آب را به مخزن فرستاده است. با توجه به اینکه در این دوره‌ها نیاز صفر بوده و جریان ورودی به مخزن نیز بیش از نیاز پایین دست بوده است، لذا تنها توجیه این انتقال، استفاده از این حجم جهت تأمین نیاز دوره هشتم می‌باشد زیرا با توجه به محدودیت ظرفیت پمپاژ در هر دوره (حداکثر ۳ MCM)، امکان تأمین نیاز در دوره هشتم از مخزن سطحی و آبخوان وجود نداشته، و لذا تنها گزینه، استفاده از ظرفیت بالقوه پمپاژ در دوره‌های ۶ و ۷ بوده است که سبب بازگرداندن آب از آبخوان به مخزن سطحی شده است.

- افزایش هزینه پمپاژ و تغذیه

شکل ۹ تغییرات جریان در سیستم را به ازای افزایش هزینه‌های پمپاژ و تغذیه به میزان ۱۰ برابر نمایش می‌دهد. این تغییر باعث افزایش ظرفیت سد (۲۲/۲٪) و انحراف از رودخانه به منطقه نیاز (۱۶/۲٪) و کاهش قابل توجه حجم پمپاژ به این منطقه (۴۳/۱٪) گردیده است. از طرفی تغذیه به آبخوان به دلیل افزایش هزینه آن و کاهش پمپاژ، حذف شده است. به تبع این تغییرات، هزینه‌های سیستم نیز تغییر نموده‌اند به نحویکه هزینه کل سیستم ۵۴/۴٪ افزایش یافته است.

- افزایش هزینه اجرایی سد

شکل ۱۰ تغییرات رفتار سیستم را به ازای افزایش هزینه اجرایی سد به میزان ۱۰ برابر نمایش می‌دهد (هزینه کمبود نیز جهت عدم وقوع کمبود، افزایش یافته است). جالب توجه است که ظرفیت سد، تقریباً ثابت مانده است. این وضعیت به خاطر محدود بودن میزان پمپاژ از آبخوان می‌باشد. ظرفیت انتقال از سد به منطقه نیاز (۴۵/۳٪) کاهش، و ظرفیت انتقال از رودخانه به این منطقه (۶۷/۹٪) افزایش یافته

است. در عین حال ظرفیت انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی (۲۴۰٪) افزایش یافته و سیستم انحراف از رودخانه به این منطقه حذف گردیده است. نظر به اینکه در حالت پایه (شکل ۴) از حداکثر ظرفیت آبخوان استفاده گردیده، لذا تغییر محسوسی در میزان پمپاژ و تغذیه مصنوعی روی نداده است.

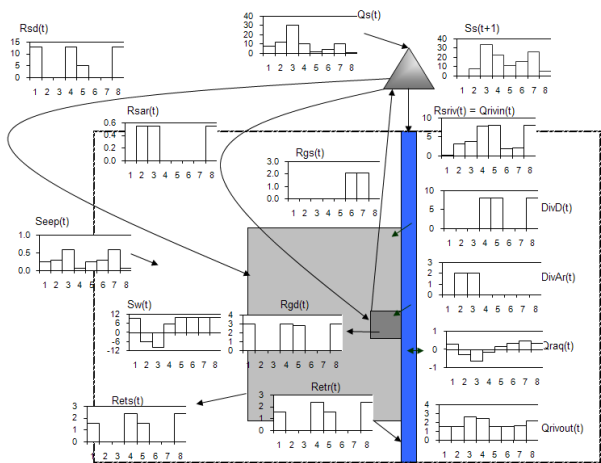
- تغییر ناگهانی در هزینه اجرایی سد

شکل ۱۱ تغییرات رفتار سیستم را به ازای افزایش ناگهانی در هزینه اجرایی سد متناظر با حجم ذخیره ۱۴ MCM به میزان ۱۰ برابر نمایش می‌دهد. بدین منظور هزینه سد با دو قطعه خطی نمایش داده شده است. همانگونه که انتظار می‌رود، حجم ذخیره سد برابر ۱۴ MCM شده است. ظرفیت سیستم انتقال از سد به منطقه نیاز تغییری نموده و سیستم انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی حذف شده است. از طرفی ظرفیت انتقال از رودخانه به این مناطق افزایش یافته است. انحراف از رودخانه به منطقه نیاز کاهش ولی به منطقه تغذیه افزایش یافته است. به دلیل کاهش ظرفیت مخزن در این وضعیت کمبود قابل توجهی در تأمین نیاز روی داده است. چنانچه انتظار می‌رود این کمبود در فصل‌های ۴ و ۸ که نیاز سیستم بالا بوده روی داده است.

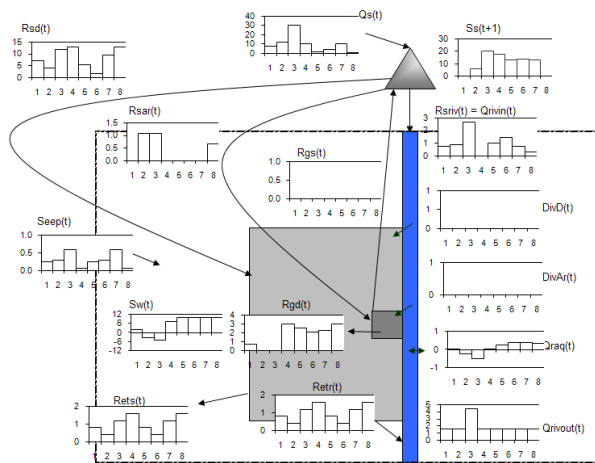
- تغییر توزیع جریان ورودی به سد

شکل ۱۲ تغییرات رفتار سیستم را به ازای تغییر توزیع جریان ورودی به مخزن سد نمایش می‌دهد که در آن جریان ورودی به مخزن در سال دوم با سال اول جابجا شده است. ظرفیت مخزن تغییر چندانی ننموده اما تغییرات حجم ذخیره مخزن در دوره‌های مختلف قابل توجه است. در حالیکه در حل پایه مخزن در ابتدا و انتهای دوره خالی بوده در این وضعیت مخزن در اواسط دوره خالی شده است. ظرفیت سیستم انتقال از سد به منطقه نیاز ۸۰٪ افزایش یافته است. این افزایش باعث حذف سیستم انحراف از رودخانه به منطقه نیاز گردیده است.

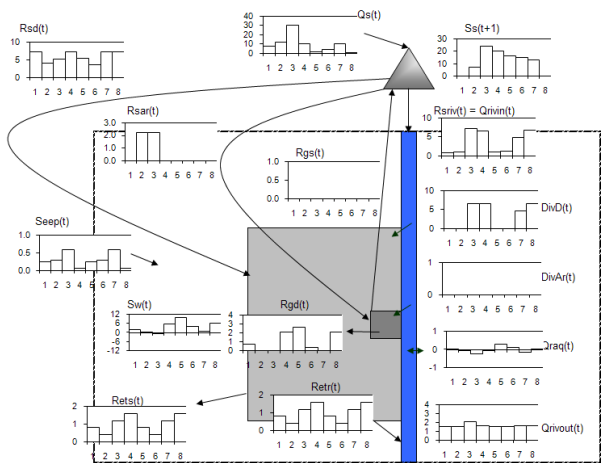
از طرفی حذف این سیستم باعث کاهش قابل توجه ورودی از سد به رودخانه شده است. تغذیه مصنوعی تنها از طریق انحراف جریان رودخانه انجام گرفته است. تغییر الگوی پمپاژ متناسب با تغییر جریان سطحی صورت گرفته و ملاحظه می‌گردد که برخلاف حل پایه که پمپاژ از آبخوان بیشتر در سال دوم انجام گرفته بود، در اینجا به سال اول منتقل شده است. در مورد تغییرات افت تراز آبخوان نیز همین وضعیت دیده می‌شود.



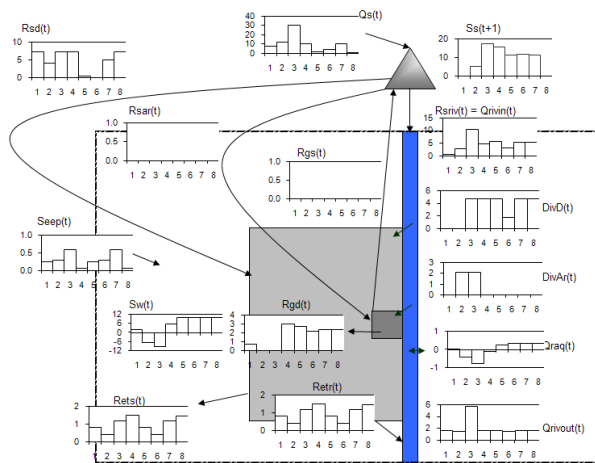
شکل ۸- تغییر توزیع نیاز



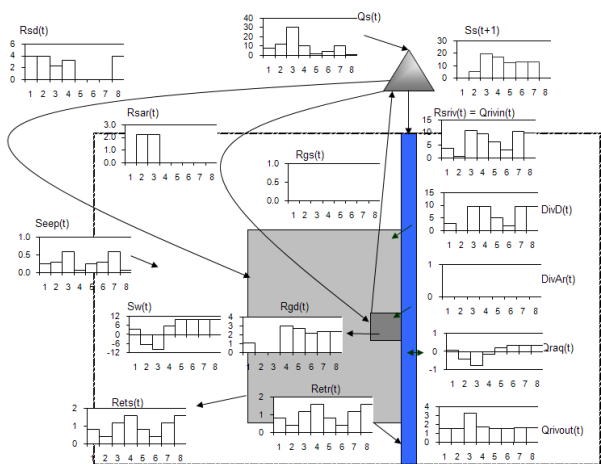
شکل ۵- افزایش هزینه انحراف رودخانه به منطقه نیاز



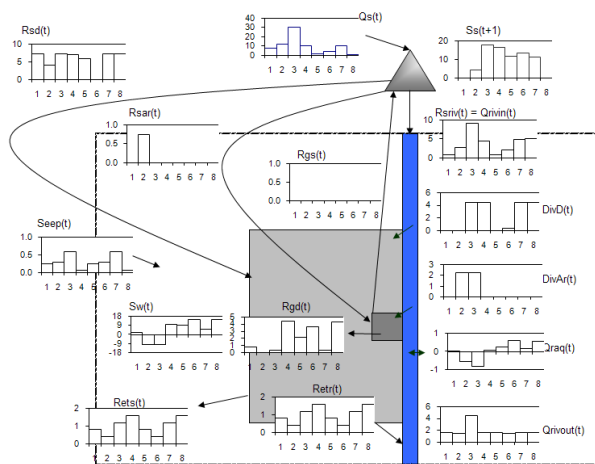
شکل ۹- افزایش هزینه‌های پمپاژ و تغذیه



شکل ۶- کاهش هزینه کمبود



شکل ۱۰- افزایش هزینه اجرای سد



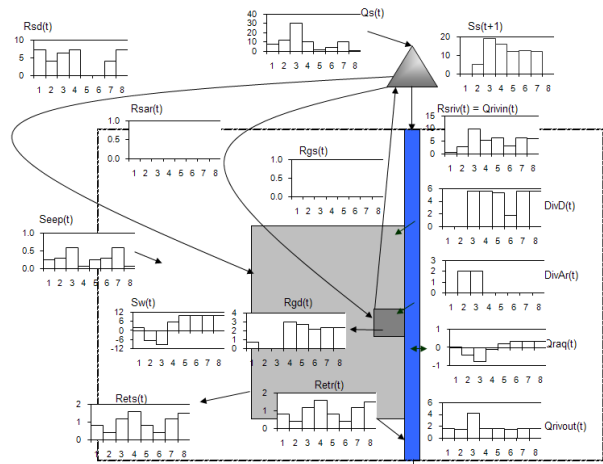
شکل ۷- افزایش افت مجاز و ظرفیت پمپاژ

هزینه‌های اجرایی و ضرایب هزینه‌های بهره‌برداری را نمایش می‌دهد. در این روابط، ظرفیت سد به میلیون متر مکعب (MCM)، ظرفیت دیگر سیستمها به MCM در فصل، و هزینه‌ها به میلیارد تومان است.

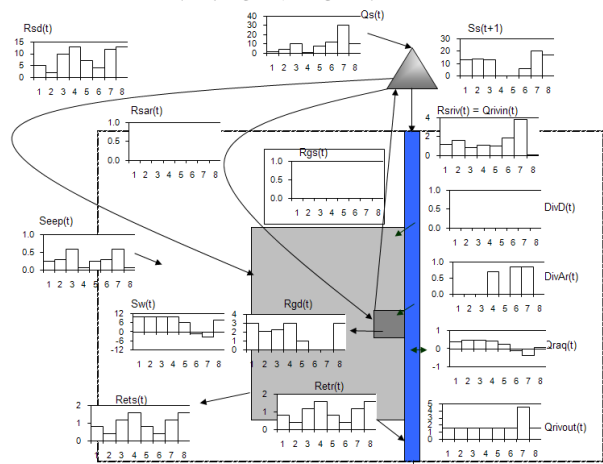
با بررسی سری زمانی ۳۱ ساله جریان ورودی به مخزن سد، از یک دوره شاخص ۱۰ ساله به صورت فصلی استفاده شده است. جریان ورودی به مخزن در این دوره، علاوه بر اینکه شامل سال‌های خشک و مرطوب می‌باشد، میانگین آن نیز نزدیک میانگین آمار موجود ۳۱ ساله است. بر اساس منحنی سطح - حجم - ارتفاع مخزن سد، رابطه بین سطح و حجم مخزن سد کینه ورس به صورت $A(Km^2) = 0.0455 \times S(mcm) + 0.2864$ به دست آمده است. بر اساس مطالعات رسوب، حجم مرده مخزن برابر ۲/۱ میلیون متر مکعب (MCM) حاصل گردیده است. نیازهای طرح شامل نیازهای شهری و کشاورزی می‌باشد که مجموعاً برابر ۲۶ MCM در سال می‌باشد. همچنین در پایین دست رودخانه لازم است حبابه زیست محیطی رودخانه تأمین گردد. این مقادیر همراه با توزیع فصلی نیازها در جدول ۶ منعکس گردیده‌اند.

محدوده آبخوان مساحتی حدود ۸۰ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد که به صورت مستطیلی به ابعاد ۸ کیلومتر در ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. ناحیه کشاورزی و شهری (منطقه نیاز) بر روی هم مساحتی برابر ۵ کیلومتر مربع (۵۰۰ هکتار) را دارا می‌باشند. ۱۰٪ از آبی که به این منطقه وارد می‌شود به صورت نفوذ عمقی، وارد آبخوان می‌شود. شکل ۱۴-الف موقعیت آبخوان، منطقه نیاز، رودخانه و چاه‌های (سلول‌های) سیستم را نشان می‌دهد. آبخوان در جهت عمودی به فواصل ۱ کیلومتری و در جهت افقی به فواصل ۱ و ۰/۵ کیلومتری گسسته شده است.

تغییرات مکانی ضریب ذخیره و هدایت هیدرولیکی آبخوان مطابق شکل‌های ۱۴-ب و ۱۴-ج (در این شکل واحد K متر بر ثانیه است) می‌باشد. در آغاز بهره‌برداری، اختلاف ارتفاع سطح زمین و تراز آب چاه‌ها، ۱۰ متر بوده است. ماکزیمم افت و خیز تراز آب در چاه‌ها ۱۰ متر و حداکثر پمپاژ از هر چاه ۳ میلیون متر مکعب در هر فصل در نظر گرفته شده است. رودخانه در اینجا به صورت یک مقطع مستطیلی به عرض ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. ضریب مانینگ و شیب رودخانه نیز به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۲ می‌باشد. ضخامت لایه کم تراوای زیرین رودخانه ۳ متر و نفوذپذیری آن 5×10^{-6} متر در ثانیه در بازه پایین دست و 7×10^{-6} متر در ثانیه در بازه پایین دست می‌باشد. در محل تقاطع دو بازه رودخانه، محلی برای احداث یک بند



شکل ۱۱- افزایش ناگهانی در هزینه سد



شکل ۱۲- تغییر توزیع جریان ورودی

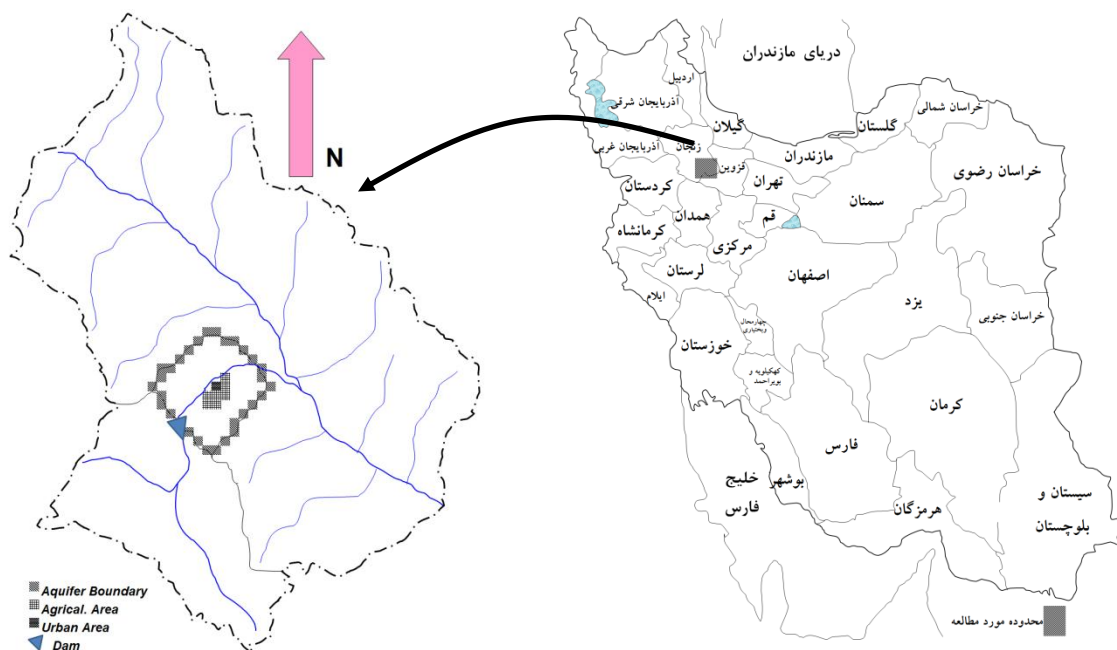
۴- مطالعه موردی

جهت نمایش کاربرد عملی مدل، در این بخش از داده‌های مربوط به سد کینه ورس و دشت پایین دست آن، که در حوضه آبریز رودخانه ابهر در استان زنجان قرار دارد، استفاده شده است. شکل ۱۳ موقعیت منطقه طرح و محدوده مدل را در حوضه ابهر رود نمایش می‌دهد. مطالعات طراحی سد کینه ورس توسط مهندسين مشاور آبن در سال ۱۳۷۹ انجام گردیده و مبنای داده‌های مربوط به برآورد هزینه‌ها می‌باشد. همچنین مطالعات بهره‌برداری تلفیقی دشت ابهر توسط مهندسين مشاور آبخوان (۱۳۸۳) به انجام رسیده است که سایر اطلاعات از این مطالعات استخراج شده است.

در مورد سیستم‌هایی که هزینه آن‌ها در این مطالعات نیامده، هزینه‌های آن‌ها بر اساس طرح‌های مشابه و به تناسب هزینه‌های سد کینه ورس، در نظر گرفته شده است. توابع هزینه اجرایی با برازش روابط مختلف بر داده‌ها به دست آمده‌اند. جدول ۵ توابع

در سیستم مورد مطالعه ۱۰ عامل تحریک کننده وجود دارد که عبارتند از: ۶ عامل تحریک نقطه‌ای (۳ چاه پمپاژ و ۳ سلول تغذیه)، ۲ عامل تحریک خطی (۲ بازه رودخانه)، و ۲ عامل تحریک گسترده (بارندگی روی دشت و نفوذ در منطقه نیاز). همچنین ۳ سلول (پمپاژ و تغذیه)، و ۲ بازه رودخانه مجموعه عوامل پنجگانه تحریک شونده را تشکیل می‌دهند (فصل سوم). در مرحله اول تحریک‌های واحدی برای کلیه عوامل فوق در نظر گرفته شده و مدل شبیه‌سازی (MODFLOW) اجرا گردید.

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. ایستگاه هیدرومتری کینه‌ورس در نزدیکی محل تقاطع این دو بازه قرار دارد. ۱۰٪ از آب منتقل شده به منطقه نیاز به صورت جریان‌های برگشتی وارد بازه دوم رودخانه می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده بهترین منطقه جهت تغذیه مصنوعی، در همان محدوده چاهها می‌باشد. بر همین اساس این سه سلول حکم چاه‌های تغذیه را نیز دارند. ماکزیمم تغذیه به هریک از آن‌ها نیز ۳ میلیون متر مکعب در هر فصل در نظر گرفته شده است.



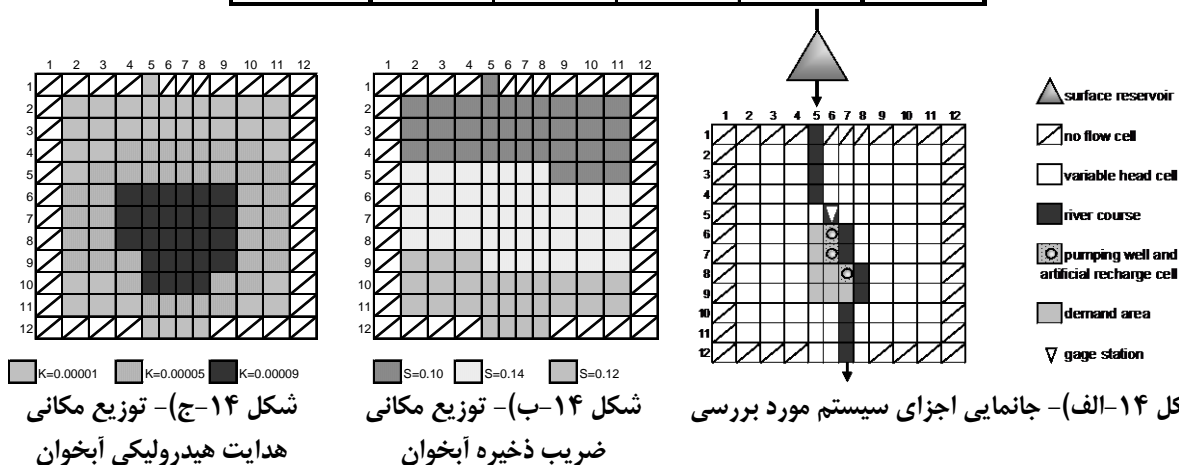
شکل ۱۳- موقعیت کلی منطقه طرح و محدوده مدل (آبخوان) در حوضه آبریز ابهر

جدول ۵- توابع هزینه‌های اجرایی و بهره‌برداری در نظر گرفته شده در سیستم مورد مطالعه

بخش یا سیستم	تابع هزینه اجرایی	ضریب هزینه بهره‌برداری
سد	$CD = 0.0054(CapD)^3 - 0.1972(CapD)^2 + 3.7618(CapD) + 21.908$	$ucd = 0.06$
انتقال از سد به منطقه نیاز	$CCD = -0.1022(CapCD)^2 + 4.026(CapCD)$	$uccd = 0.02$
انتقال از سد به منطقه تغذیه	$CCAR = -0.0511(CapCAR)^2 + 2.013(CapCAR)$	$uccar = 0.01$
انتقال از آبخوان به سد	$CP = -0.2043(CapP)^2 + 8.052(CapP)$	$ucp = 0.05$
انحراف رودخانه به منطقه نیاز	$CDivD = -0.0469(CapDivD)^2 + 2.6279(CapDivD)$	$ucdivd = 0.05$
انحراف رودخانه به تغذیه مصنوعی	$CDivAR = -0.0234(CapDivAR)^2 + 1.3139(CapDivAR)$	$ucdivar = 0.02$
تغذیه مصنوعی	$ucar = 0.05$	
پمپاژ	$ucen = 1 \times 10^{-6}; efp = 0.75; uelif = 0.0028$	
کمبود	$f_1(def(t)) = 15.def(t)^2$	

جدول ۶- نیازهای شهری، کشاورزی، و حقایقه‌های زیست محیطی طرح (MCM)

ماه	شهری	کشاورزی	مجموع	توزیع	زیست محیطی
پاییز	2.056	0.834	2.890	0.111	0.262
زمستان	1.464	0.000	1.464	0.056	0.262
بهار	2.850	8.169	11.019	0.424	0.542
تابستان	4.030	6.597	10.627	0.409	0.542
سالانه	10.400	15.600	26.000	1.000	1.610



داده‌های اشاره شده در بالا تهیه و اجرا گردیده است. تابع هدف (هزینه کل) برابر ۸۵/۱۷ میلیارد تومان است. جدول ۷ و شکل ۱۵ نتیجه حل مذکور را نمایش می‌دهند (در شکل ۱۵ واحد محورهای افقی زمان به فصل و واحد محورهای عمودی حجم به میلیون متر مکعب است). ملاحظه می‌گردد که در این سیستم، به علت هزینه بالای انتقال مستقیم از سد به مناطق نیاز و تغذیه مصنوعی (که به دلیل فاصله آن تا مقصد می‌باشد)، این انتقال‌ها از رودخانه صورت گرفته است. در واقع جریان پس از تنظیم در سد به رودخانه رها می‌گردد تا در پایین دست به سمت مناطق نیاز و تغذیه مصنوعی منحرف گردد.

پاسخها به صورت افت یا خیز تراز آب زیرزمینی در چاه‌های (سلول‌های) ۱ تا ۳ و بازه‌های ۱ و ۲ رودخانه (میانگین تراز آب زیرزمینی در سلول‌های دربرگیرنده بازه‌های رودخانه)، و نیز نشت از رودخانه به آبخوان در بازه‌های ۱ و ۲ رودخانه می‌باشند. در ادامه جهت به دست آوردن ضرایب اصلاحی m مضاربی از تحریکات واحد به سیستم اعمال گردیده و این ضرایب نیز محاسبه شدند.

۱-۴- حل مدل و تحلیل نتایج

مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم، براساس روابط ارائه شده و

جدول ۷- خلاصه نتایج حل مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم

بخش	هزینه ثابت	هزینه جاری	ظرفیت
سد	55.964	3.358	17.321
انتقال از سد به منطقه نیاز	0.000	0.000	0.000
انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی	0.000	0.000	0.000
انتقال از آبخوان به سد	0.000	0.000	0.000
انحراف رودخانه به منطقه نیاز	5.089	2.054	2.009
انحراف رودخانه به تغذیه مصنوعی	6.744	1.627	5.714
پمپاژ	-	5.811	9.000
تغذیه مصنوعی	-	4.067	5.714
کمبود	-	0.453	-

هزینه‌ها به میلیارد تومان ظرفیت‌ها به MCM در فصل (ظرفیت سد به MCM)

همچنین نیاز سیستم بیشتر از آب زیر زمینی تأمین شده به گونه‌ای که تأمین از این منبع تقریباً دو برابر منبع آب سطحی است. با توجه به تغییرپذیری بالای جریان ورودی به مخزن سد (شکل ۱۵)، این وضعیت طبیعی خواهد بود.

اجرای مدل نشان داد که صرفنظر کردن از هزینه‌های بهره‌برداری در مدل بهینه‌سازی طراحی باعث بروز خطا در مدل گردیده و رفتار مدل را غیرمنطقی می‌نماید.

علیرغم حجم محدود (حجم مفید سد برابر $MCM\ 15/22$ می‌باشد)، مخزن توانسته است به میزان قابل توجهی جریان را تنظیم نماید. وقوع سه سال نسبتاً پر آب متوالی (سال‌های ۴ و ۵ و به خصوص ۶) سبب گردیده که ذخیره مخزن در ۵ سال دوم بیشتر از ۵ سال اول باشد. بخشی از جریان ورودی از سد به رودخانه، در انتهای بازه اول به سمت مناطق نیاز و تغذیه مصنوعی منحرف می‌گردد. بجز در زمستان که نیاز کمتر از $MCM\ 2$ (ظرفیت انحراف از رودخانه) بوده، در سایر فصل‌ها انحراف از رودخانه برابر ظرفیت آن به منطقه نیاز، صورت رفته است، بجز سال‌های خشک (مانند سال‌های اول و آخر) که انحراف کمتری صورت گرفته است. این در حالی است که انحراف به منطقه تغذیه، بیش از هر چیز به تراز آبخوان در سلول‌های تغذیه و جریان رودخانه بستگی دارد. مثلاً در سال اول تغذیه در بهار و تابستان صورت گرفته است. علت این امر این بوده که در سال نخست حجم جریان پایین است و در دو فصل اول تغذیه‌ای صورت نگرفته است. نیاز بهار و تابستان به ترتیب برابر $11/019$ و $10/627$ MCM (جدول ۵-۴) می‌باشد. در بهار و تابستان سال اول، $2/009$ MCM در هر دو فصل که برابر ظرفیت سیستم انحراف رودخانه به منطقه نیاز است، به این منطقه فرستاده شده است. مابقی نیاز که به ترتیب برابر $9/01$ و $6/573$ MCM است، می‌بایست از آبخوان تأمین گردد. اما آبخوان در طول این دو فصل در ماکزیمم افت خود قرار داشته و تنها با ورود جریان تغذیه مصنوعی توانسته است این نیاز را تأمین نماید. البته اندکی نیز کمبود ایجاد شده است. اصولاً تغذیه به آبخوان هنگامی صورت گرفته است که یا افت تراز آبخوان در حداقل یکی از سلولها به حداکثر رسیده یا نزدیک به آن بوده باشد (مانند دوره‌های ۳، ۴، ۷، ۸، ۳۵ و ۳۶)، و/یا حجم جریان سطحی بیشتر از نیاز بوده است که در این دوره‌ها، انحراف جریان به هر دو منطقه صورت گرفته است (مانند دوره‌های ۶، ۹، ۱۰، و ۱۳ تا ۱۵). در سایر دوره‌ها تغذیه‌ای صورت نگرفته است.

یکی از نکات قابل توجه، چگونگی تخصیص منابع موجود، به تأمین نیاز و تغذیه سفره است. برخلاف انتظار و عرف موجود در بهره‌برداری

از مخازن سطحی، علیرغم اینکه در ۴ سال اول، بجز در یک دوره، مخزن هیچگاه پر نبوده و حجم ذخیره آن اغلب پایین بوده، معهداً رها کردن آب به رودخانه و انحراف قسمتی از آن برای تغذیه آبخوان و ذخیره کردن آن برای بهره‌برداری‌های بعدی، انجام قرار گرفته است. ملاحظه می‌شود که بیشتر نیاز از آبخوان تأمین گردیده است. همچنین چنانکه ذکر گردید، بجز در زمستان‌ها که نیاز کمتر از ظرفیت انحراف بوده و نیز در دوره‌های کم آب، انحراف از رودخانه برابر ظرفیت آن (حدود $MCM\ 2$) بوده است. خاطر نشان می‌گردد که انحراف از رودخانه بدین ترتیب، تنها با تنظیم جریان در مخزن سد امکانپذیر بوده است.

میزان پمپاژ از چاه‌ها نزدیک به هم بوده است. بهر حال این میزان در سلول شماره ۲ اندکی بیشتر و در سلول شماره ۳ اندکی کمتر از دو سلول دیگر است. همین وضعیت اما با اختلاف خیلی بیشتری در مورد تغذیه به سلول‌ها دیده می‌شود. به گونه‌ای که میزان تغذیه به سلول شماره ۲ بیشتر و به سلول شماره ۳ بسیار کمتر از دو سلول دیگر است. این وضعیت مربوط به موقعیت سلول‌هاست. سلول شماره ۲ به دلیل قرار داشتن در میان دو سلول دیگر به ازای میزان پمپاژ مساوی، افت تراز بیشتری خواهد داشت. جهت کاهش این افت، تغذیه به آن بیشتر است. از طرفی سلول‌های شماره ۱ و ۳ به گونه‌ای واقع شده‌اند که اندرکنش آن‌ها با رودخانه بیش از سلول شماره ۲ است بنابر این در صورت افت تراز، جریان بیشتری از رودخانه به سمت آن‌ها گسیل می‌گردد. در این میان به علت واقع شدن سلول‌های بهره‌برداری در بازه دوم و افزایش اندرکنش رودخانه و آبخوان در این بازه سلول شماره ۳ نسبت به سلول شماره ۱ جریان بیشتری را از رودخانه می‌گیرد. دلیل دیگر این امر تأثیر کمتر تغذیه به این سلول در افزایش تراز دو سلول دیگر، در مقایسه با تغذیه به دو سلول دیگر می‌باشد؛ لذا تغذیه به آن کمتر بوده است.

حجم تغذیه به آبخوان در دوره‌های پرآب، بیشتر از دیگر دوره‌هاست. این وضعیت باعث افزایش تراز سطح آب در سلول‌ها در این دوره‌ها گردیده است. به طور کلی بین جریان سطحی و افت تراز آب آبخوان رابطه معکوس و معنی داری وجود دارد. توزیع اندرکنش رودخانه-آبخوان در دو بازه رودخانه مشابه است. در بازه دوم به دلیل مجاورت سلول‌های بهره‌برداری، حجم این تبادل افزایش یافته است. همچنین هماهنگی کاملی بین نوسانات این جریان و تغییرات تراز آب در چاه‌های بهره‌برداری دیده می‌شود. به همین علت، چون میزان افت تراز آبخوان در مقایسه با خیز آن (نسبت به سطح تراز اولیه) بیشتر بوده، جهت جریان نیز بیشتر از رودخانه به سمت آبخوان بوده است. بخش قابل توجهی از جریان بین رودخانه و آبخوان مبادله می‌شود.

این حجم مسلماً در عملکرد مدل تأثیر محسوسی خواهد داشت که مؤلفه‌های سیستم را هم در طراحی و هم در بهره‌برداری، تحت تأثیر قرار می‌دهد. متأسفانه در اغلب مطالعات، از این بخش مهم صرف‌نظر می‌گردد. از طرفی تنها در صورت وجود مدل‌هایی با جزئیات حاضر است که می‌توان این قبیل موارد را مشخص نمود.

چنانچه دیده می‌شود بین اجزای مختلف سیستم ذخیره سیکلی مورد بررسی، ارتباط معنی داری وجود دارد. این ارتباطها در قالب روابط ریاضی در مدل بهینه‌سازی قرار گرفته و مسلماً چنانچه به درستی شناخته و تعریف نشوند، جواب مدل نیز صحیح نخواهد بود. مثلاً در اغلب مطالعات از اندرکنش بین رودخانه و آبخوان صرف‌نظر می‌گردد. مسلماً این کار باعث بروز خطا در محاسبات خواهد گردید. این خطا در رودخانه‌هایی که دارای بستری با نفوذ پذیری بالا می‌باشند، بیشتر می‌باشد. در این گونه سیستم‌ها، میزان تغذیه (طبیعی) آبخوان از رودخانه می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای داشته و نقش تغذیه مصنوعی را کمتر نماید.

۴-۲- شبیه‌سازی نتایج

یکی دیگر از روش‌های کنترلی صحت مدل، شبیه‌سازی نتایج است. این کار مکمل سایر آزمون‌ها محسوب می‌گردد. برای این منظور، از آنجائیکه مقادیر تغییرات تراز چاه‌ها و میزان نشت از بازه‌های رودخانه تأثیرپذیرترین عوامل رفتاری سیستم هستند که در مدل بهینه‌سازی محاسبه می‌گردند، نتایج مدل بهینه‌سازی از قبیل مقادیر پمپاژ چاه‌ها و تغذیه به آن‌ها، تغییرات تراز آب رودخانه، و جریان‌های برگشتی به رودخانه و نفوذ به آبخوان، به مدل شبیه‌سازی (MODFLOW) داده شد تا تغییرات تراز آب چاه‌ها و نیز جریان مبادله شده بین رودخانه و آبخوان در طول دوره بهینه‌سازی محاسبه، و با مقادیر نظیر در مدل بهینه‌سازی مقایسه شود. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نتیجه این تحلیل را نشان می‌دهند.

چنانچه از این شکل‌ها مشخص است، تطابق کامل و معقولی بین نتایج دو مدل دیده می‌شود. ضریب همبستگی بین نتایج مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در همگی موارد بیش از ۰.۹۹۵ می‌باشد. منشأ خطاهای اندک ایجاد شده را می‌توان در این موارد دانست: اول اینکه در مدل بهینه‌سازی جهت سادگی و کاهش حجم مدل، رودخانه به دو بازه تقسیم شده است. حال آنکه در مدل شبیه‌سازی تعداد بازه‌ها ۱۲ تاست (یعنی به تعداد سلول‌های در برگیرنده رودخانه در شکل ۳-۵). دوم اینکه محدوده مجاز تغییرات تراز آبخوان، نسبت به ابعاد آن، محدوده وسیعی است (۲۰ متر). هر قدر این میزان بیشتر

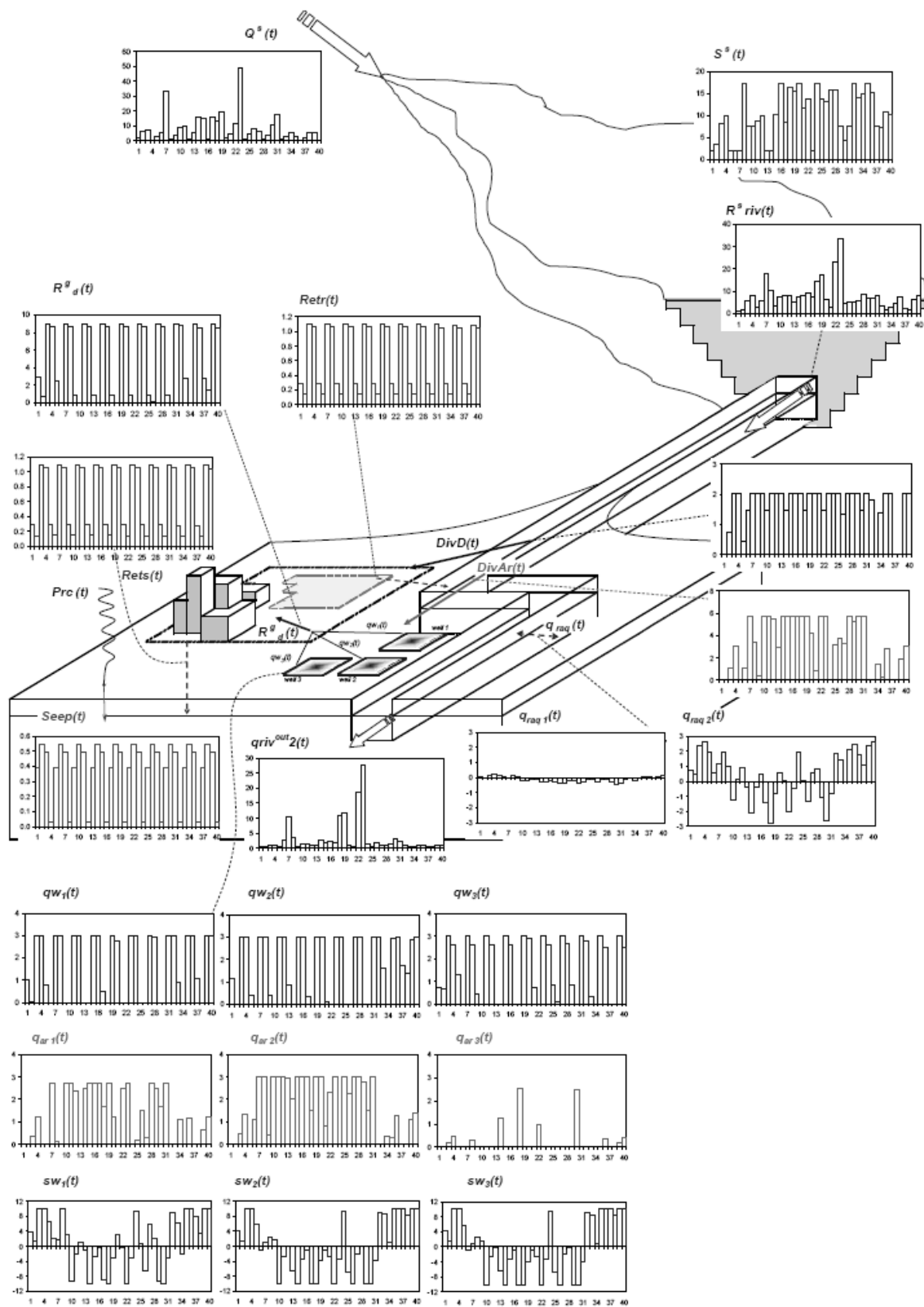
باشد، رفتار سیستم به رفتار غیرخطی نزدیکتر شده و از محدوده اعتبار روش ماتریس پاسخ (URM) بیشتر فاصله می‌گیرد. استفاده از روش ماتریس پاسخ اصلاح شده (MURM)، تا حدودی محدوده اعتبار را افزایش می‌دهد، اما به هر حال این روش نیز دارای محدودیت است.

نتیجه مهم و کاربردی که از این بحث می‌توان گرفت این است که در مدل بهینه‌سازی، می‌توان چند سلول رودخانه را با هم ترکیب نموده و از یک بازه به جای آن‌ها استفاده نمود بدون آنکه تقریب زیادی وارد مدل شود. اینکار به میزان قابل توجهی از قیدهای مدل بهینه‌سازی و زمان اجرای آن می‌کاهد. همچنین استفاده از روش MURM و فرمولبندی به کار رفته در مدل به گونه‌ای است که امکان مدل‌سازی سیستم را در حالتیکه تغییرات تراز آبخوان قابل توجه باشد (در اینجا ۲۲٪ ضخامت لایه اشباع) نیز فراهم می‌نماید. این در حالی است که در مطالعات قبلی استفاده از روش URM محدود به مسائلی بوده که در آن‌ها تغییرات تراز آبخوان کمتر از ۱۰٪ ضخامت لایه اشباع باشد (Fredericks et al., 1998).

اگرچه با حل مدل بهینه‌سازی مقادیر بهینه ابعاد و خروجی‌ها مشخص می‌گردد، اما هیچ تضمینی وجود ندارد که در فاز بهره‌برداری سیستم نیز بتوان عیناً همین خروجی‌ها را اعمال نمود و مسلماً انحرافات (که گاه می‌تواند بسیار زیاد باشد) از خروجی‌های بهینه به وجود خواهد آمد. این وضعیت باعث کاهش سود خالص سیستم خواهد شد. بنابراین بسیار به جاست که همراه مدل طراحی سیستم، مدل سیاست بهره‌برداری بهینه آن نیز ارائه شود. این سیاست پس از تعریف شدن، می‌تواند در مدل بهینه‌سازی قرار گیرد تا با حل مدل، علاوه بر تعیین ابعاد بهینه، سیاست بهره‌برداری از سیستم نیز مشخص گردد (جهت آشنایی با مدل بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری سیستم ذخیره سیکلی به علیمحمدی ۱۳۸۴ مراجعه شود).

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرمولبندی مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم ذخیره سیکلی ارائه گردید. مدل حاصل در حالت کلی به فرم برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) می‌باشد. جهت ارزیابی و آزمون مدل ارائه شده از یک سیستم ذخیره سیکلی فرضی ساده شده با روابط خطی به عنوان مثال استفاده گردیده و براساس داده‌های این سیستم، مدل‌های بهینه‌سازی اجرا و نتایج حاصل مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه را می‌توان به ترتیب زیر خلاصه نمود:



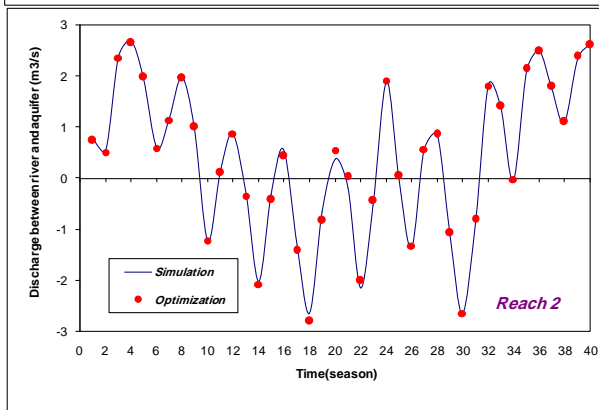
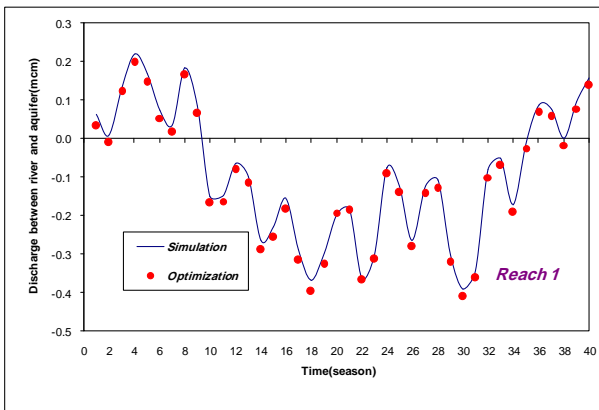
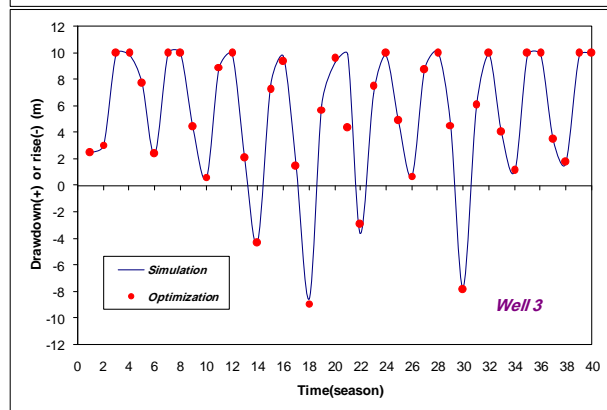
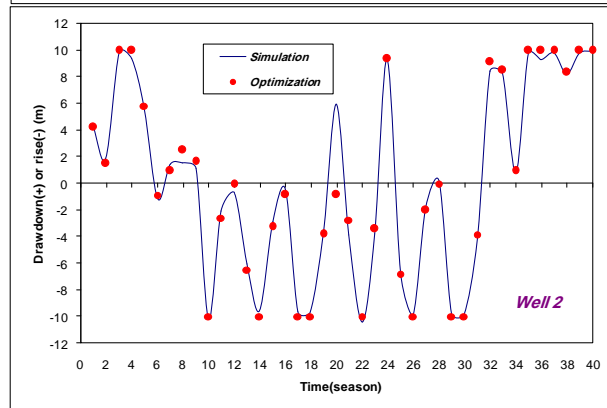
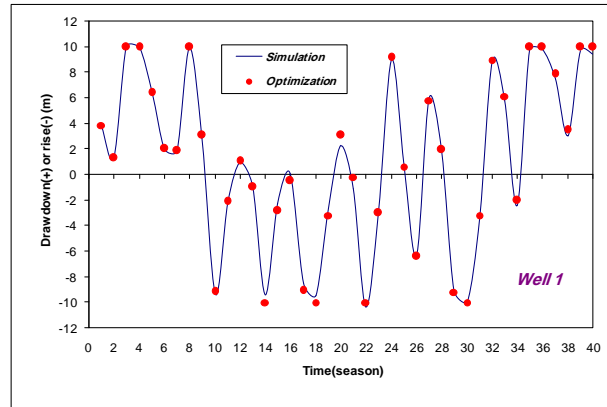
شکل ۱۵- نتیجه حل مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم ذخیره سیکلی (احجام به MCM)

بلند جهت تنظیم بیشتر آن می‌باشد.

- تغذیه به آبخوان در وضعیت‌هایی صورت گرفته است که یا افت تراز آبخوان در حداقل یکی از سلولها به حداکثر رسیده یا نزدیک به آن بوده است و یا حجم جریان سطحی بیشتر از نیاز بوده است. که در این دوره‌ها، انحراف جریان به هر دو منطقه نیاز و تغذیه صورت گرفته است. در سایر دوره‌ها تغذیه‌ای به آبخوان صورت نگرفته است.

- یکی از نکات قابل توجه، چگونگی تخصیص منابع موجود، به تأمین نیاز و تغذیه سفره است. برخلاف انتظار و عرف موجود در بهره‌برداری از مخازن سطحی، علیرغم اینکه در سال‌های اول، حجم ذخیره مخزن اغلب پایین بوده است، معهدا رها کردن آب به رودخانه و انحراف قسمتی از آن برای تغذیه آبخوان و ذخیره کردن آن برای بهره‌برداری‌های بعدی، در دستور کار قرار گرفته است.

- میزان پمپاژ از سلولها، و تغذیه به سلول‌های سیستم تابعی از موقعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر و نسبت به رودخانه بوده است.



شکل ۱۶- مقایسه تغییرات تراز آب در چاه‌های سیستم در مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی

- منبع آب زیرزمینی (آبخوان)، همانند پشتیبانی برای منبع آب سطحی (مخزن سد) عمل می‌نماید. حتی در صورت پایین بودن هزینه بهره‌برداری، این منبع در دوره‌های پر آبی کمتر تأمین نیاز نموده، در عوض در دوره‌های کم آبی به خوبی کمبود آب سطحی را جبران می‌نماید.

- علیرغم اینکه حجم میانگین سالانه جریان سطحی بیش از نیاز سالانه سیستم می‌باشد، عمده نیاز سیستم از آبخوان تأمین گردیده است. علت این امر نوسانات شدید جریان سطحی و هزینه بالای سد

شکل ۱۷- مقایسه تغییرات جریان تبادلی بین رودخانه و آبخوان در مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی

and SCIENTIFIC COMPUTATION, Malta, September 15-17.

Alimohammadi, S. and Afshar, A. (2005b), Optimum Design of Cyclic Storage Systems; Distributed Parameter Approach: 2- Model Solution Methodology and Analysis of Results, *Proceedings of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on SYSTEMS THEORY and SCIENTIFIC COMPUTATION*, Malta, September 15-17.

Alimohammadi, S., Afshar, A. and Marino, M. A. (2009), Cyclic Storage Systems Optimization: Semi-Distributed Parameter Approach, *Journal of American Water Works Association*. Vol.101, No. 2.

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, 1741-1760, Springer Netherlands

Barlow, P.M., Ahlfeld, D. P. and Dickerman, D. C. (2003), Conjunctive - management models for sustained yield of stream-aquifer systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129,1, pp. 35-48.

Basagaoglu, H., Marino, M.A. and Shumway, R.H. (1999), δ -Form approximating problem for a conjunctive water resource management model, *Advances in Water Resources*, 23, pp. 69-81.

Bredehoeft, J.D. and Young, R.A. (1972), The temporal allocation of ground water - A simulation approach" *Water Resources Research*, Vol.6, No.1, pp. 3-21.

Coe, J.J. (1990), Conjunctive use-advantages, constraints, and examples, *Journal of Irrigation and Drainage*, ASCE, 116, 3, pp. 427-443.

Fredericks, J. W., Labadie, J. W. and Altenhofen, J. M. (1998), Decision support system for conjunctive stream-aquifer management, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124, 2, pp. 69-78.

Lall, U. (1995). "Yield model for screening surface and ground-water development, *Journal of Water Resources planning and Management*, ASCE, 121, 1, pp. 9-21.

Lettenmaier, D. P. and S. J. Burges (1982), Cyclic storage: a preliminary analysis, *Ground Water*, 20, 3, pp. 278-288.

Maddock III, T. (1972), Algebraic technological function from a simulation model, *Water Resources Research*, 8, 1, pp. 129-134.

Matsukawa J., Finney, B. A. and Willis, R. (1992), Conjunctive-use planning in mad river basin,

- شبیه‌سازی نتایج مدل بهینه‌سازی حاکی از تطابق کامل و معقولی بین نتایج دو مدل (شبیه‌سازی و بهینه‌سازی) بود. منشأ خطاهای اندک ایجاد شده در این بود که اولاً در مدل بهینه‌سازی جهت سادگی و کاهش حجم مدل، رودخانه به دو بازه تقسیم شده است. حال آنکه در مدل شبیه‌سازی تعداد بازه‌ها ۱۲ تاست (یعنی به تعداد سلول‌های دربرگیرنده رودخانه در شکل ۱۴). دوماً محدوده مجاز تغییرات تراز آبخوان، نسبت به ابعاد آن، محدوده وسیعی است (۲۰ متر). هر قدر این میزان بیشتر باشد، رفتار سیستم به رفتار غیرخطی نزدیکتر شده و از محدوده اعتبار روش ماتریس پاسخ (URM) بیشتر فاصله می‌گیرد.

- در مدل بهینه‌سازی، می‌توان چند سلول رودخانه را با هم ترکیب نموده و از یک بازه به جای آن‌ها استفاده نمود بدون آنکه تقریب زیادی وارد مدل شود. اینکار به میزان قابل توجهی از قیدهای مدل بهینه‌سازی و زمان اجرای آن می‌کاهد.

- استفاده از روش MURM و فرمولبندی به کار رفته در مدل به گونه‌ای است که امکان مدل‌سازی سیستم را در حالتی که تغییرات تراز آبخوان قابل توجه باشد (در اینجا ۲۲٪ ضخامت لایه اشباع) نیز فراهم می‌نماید. این در حالی است که در مطالعات قبلی استفاده از روش URM محدود به مسائلی بوده که در آن‌ها تغییرات تراز آبخوان کمتر از ۱۰٪ ضخامت لایه اشباع باشد.

۶- مراجع

علیمحمدی، س. (۱۳۸۴)، بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری تلفیقی سیستم‌های منابع آب سطحی و زیرزمینی- رویکرد ذخیره سیکلی، پایان نامه جهت اخذ مدرک دکتری در مهندسی عمران. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

استادرحیمی، ل.، افشار، ع. و اردشیر، ع. (۱۳۸۵)، طراحی و بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره سیکلی توده‌ای، مجله آب و فاضلاب، شماره ۶۰، صص ۴۱-۵۴.

مهندسين مشاور آیفن، گزارش مطالعات طرح سد کینه ورس و سازه‌های وابسته، تهران، ۱۳۷۹.

مهندسين مشاور آبخوان، گزارش مطالعات طرح بهره‌برداری تلفیقی دشت ابر، تهران، ۱۳۸۳.

Alimohammadi, S., and A. Afshar (2005a), Optimum Design of Cyclic Storage Systems; Distributed Parameter Approach: 1- System Definition and Model Formulation, *Proceedings of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on SYSTEMS THEORY*

- Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124, No.5, pp. 252-263.
- Peralta, R. C., Contiller, R. R. A. and Terry, J. E. (1995), Optimal large-scale conjunctive water-use planning : case study, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121, 6, pp. 471-478.
- Richard, E. G. (1995), Groundwater-surface water management with stochastic surface water supplies: simulation-optimization approach, *Water Resources Research*, 31, 11, pp. 2845-2865.
- Thomas, H. E. (1978), Cyclic Storage, where are you now? *Ground Water*, 16, 1, pp. 12-17.
- California, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 11, 2, pp. 115-132.
- Miller, S. A., Johnson, G. S., Cosgrove, D. M. and Larson, R. (2003), Regional scale modeling of surface and ground water interaction in the Snake river basin, *Journal of American Water Resources Association*, 39, 3, pp. 517-528.
- Morel-Seytoux, H.J. (1975), A simple case of conjunctive surface-groundwater management, *Ground Water*, 13(6), pp. 506-515.
- Nishikawa, T. (1998), Water resources optimization model for Santabarbara, California, *Journal of*