طراحی و بهره‌برداری بهینه از سیستم ذخیره سیکلی توده‌ای

لیلا استاد رحیمی [۱] عبداله اردشیر [۲] عباس افشار [۳]

(دریافت ۸۵/٤/۱۰ پذیرش ۸۵/۹/۹)

چکیده

بهره‌برداری تلفیقی از آبهای سطحی و زیرزمینی، رویکردی برتر در مدیریت منابع آب است. در مقایسه با ساخت سد، استفاده از آبهای زیرزمینی دارای مزایایی می‌باشد. معمولاً، هزینه کمتر، کاهش تبخیر و رسوب گذاری، کاهش مشکلات کیفی آب و کاهش مشکلات اجتماعی و فرهنگی برخی از این مزایا می‌باشند. به منظور کاهش مشکلات اساسی مخازن سطحی بزرگ، سیستم ذخیره سیکلی به عنوان یک انتخاب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. سیستم ذخیره سیکلی، سیستمی ترکیبی است، متشکل از دو زیر سیستم آب سطحی (شامل مخزن سطحی و رودخانه) و آب زیرزمینی (مخزن زیرزمینی یا آبخوان)که همراه با تغذیه مصنوعی قادر به تأمین نیاز منطقه با قابلیت اعتماد نسبتاً بالایی می‌باشد. به منظور بهینه‌سازی در این سیستم‌ها، روابط هیدرولیکی بین تمام اجزای سیستم باید در نظر گرفته شود که متأسفانه در بسیاری از مطالعات از آن صرفنظر می‌شود. در این تحقیق مدلی جهت طراحی و بهره‌برداری به همراه فرمان بهره‌برداری بهینه با رویکرد توده‌ای تهیه شده است. مدل بهینه‌سازی حاصل به شکل یک مدل غیرخطی است. به منظور ارزیابی مدل، نتایج حاصل از این مدل با نتایج حل مدل با رویکرد توزیعی مقایسه شده است و بدین ترتیب کارآیی مدل‌های توده‌ای در حل مسائل سیستم‌های ذخیره سیکلی مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: *سیستم ذخیره سیکلی، بهره‌برداری تلفیقی، آب زیرزمینی، آب سطحی، مدل توده ای.*

Optimum Design and Operation of Cyclic Storage Systems; Lumped Approach

Leila Ostadrahimi [1] Abdolah Ardeshir [2] Abbas Afshar [3]

(Received July 1, 2006 Accepted Nov. 30, 2006)

Abstract

Conjunctive use of surface and groundwater resources is a preferred approach in water resources management. Compared to dam construction, groundwater has certain advantages, among which are less costs, less sedimentation and evaporation, fewer water quality problems, and less social and cultural problems. To reduce the major problems associated with the development of large-scale surface impoundment systems, cyclic storage systems can be used as an alternative. A cyclic storage system (CYCS) is an integrated interactive system consisting of two subsystems of surface water storage (reservoir) and groundwater; this system together with artificial recharge is able to satisfy the predefined demands with rather high reliability. In order to optimize these systems, one must consider the hydraulic interactions between all the components, but unfortunately it has been neglected in many studies. In this article, a nonlinear optimization model for design and operation of cyclic storage systems has been developed using the lumped approach. In order to evaluate the model, its results have been compared with the results of a model in which distributed approach had been deployed, and so the efficiency of lumped models to solve the problems of cyclic storage systems has been investigated.

Keywords: *Cyclic Storage Systems, Conjunctive Use, Groundwater, Surface Water, Lumped Model.*

۱- کارشناس ارشد مهندسی مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران،
a_afshar@iust.ac.ir

1-Grad. Student of Water Resources Management, Amirkabir University of Technology
2-Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology
3-Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, a_afshar@iust.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

گرچه از اوایل دهه ۷۰ تا اواخر دهه ۸۰ میلادی (۱۹۶۰-۱۹۸۰) مطالعات گسترده‌ای توسط چادهری[1]، بوراس[2]، اشت و بیتینگر[3]، و نیسوومد و گرنستورن[4] در زمینه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی انجام شده است، لکن اولین مطالعات ذخیره سیکلی به دهه ۹۰ بر می‌گردد [۱، ۲، ۳، ۴ و ۵].

درسال ۱۹۸۲ لتنمایر و برگز[5] مقاله‌ای در زمینه انعطاف‌پذیری سیستم‌های ذخیره سیکلی منتشر نمودند. آنها به کمک یک مدل شبیه‌سازی توده‌ای، ترکیبات مختلفی از مشخصه‌های اصلی سیستم مانند ظرفیت مخزن، ظرفیت تغذیه و مشخصه‌های جریان ورودی را در نظر گرفته و برای هر حالت با یک مدل ARMA، ۵۰۰ سری جریان سالانه هر یک به طول ۴۰ سال تولید نموده و پس از اجرای مدل، توزیع احتمالاتی پارامترهای خروجی سیستم را به دست آوردند [۵]. تام لینسُن و راشتون[6] در سال ۱۹۸۲، یک مدل شبیه‌سازی برای استفاده توأمان از سیستم ذخیره سطحی و آبخوان با بستر سنگ آهکی ارائه دادند. در این تحقیق، پنج حالت عملکردی برای سیستم در نظر گرفته شد که تعیین می‌کرد در چه زمانی پمپاژ باید از مخزن سطحی و در چه زمانی از مخزن زیرزمینی صورت گیرد [۶]. کُو و فلو[7] در سال ۱۹۹۰ استفاده همزمان از سیستم آب‌سطحی و زیرزمینی و مزایا و معایب آن را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این سیستم‌ها باعث افزایش کارآیی و کاهش هزینه نسبت به استفاده از تعداد بیشتری سد و مخزن که به صورت منفرد عمل می‌کنند می‌شود [۷]. فیلبریک و کیتاندیس[8] در سال ۱۹۹۸، یک مدل برنامه‌ریزی پویای پارامتر توده‌ای را جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم تلفیقی سد- آبخوان همراه با تغذیه مصنوعی، ارائه نمودند. گام زمانی مدل آنها سالانه بوده و مدل به صورت قطعی[9] ارائه شده است. آنها معادلاتی را جهت محاسبه جریمه کمبود، هزینه بهره‌برداری از آبخوان و هزینه تغذیه مصنوعی به آبخوان ارائه نمودند [۸]. در سال ۱۹۹۹، باساگاگلو و همکاران[10] یک مدل پارامتر توزیعی جامع جهت بهره‌برداری از سیستم‌های تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی شامل مؤلفه‌های مخزن سطحی و تغذیه مصنوعی، ارائه دادند که فاقد مؤلفه طراحی و تعیین ابعاد سیستم بود و بیشتر بر چگونگی بهره‌برداری تأکید داشت [۹]. در سال ۲۰۰۵، علیمحمدی یک مدل ذخیره سیکلی با رویکرد توده‌ای در زمینه طراحی و بهره‌برداری بهینه تلفیقی از سیستم آبهای سطحی و زیرزمینی ارائه کرد که مرجع اصلی تحقیقات ارائه شده در این مقاله می‌باشد[۱۰].

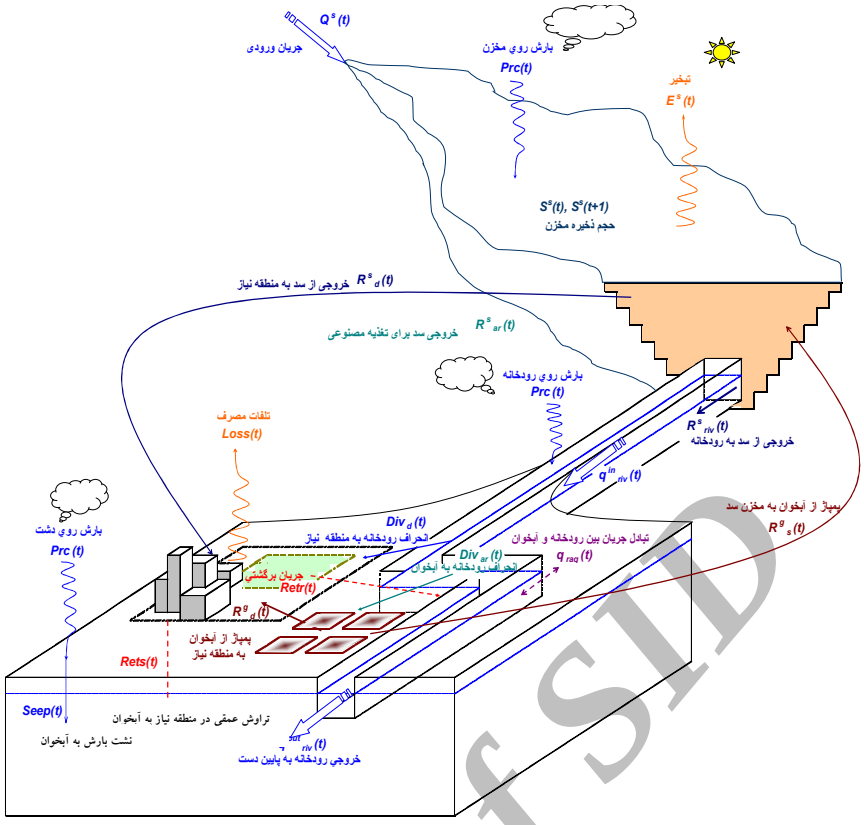
بهره‌برداری تلفیقی بسته به اجزای سیستم مورد بهره‌برداری می‌تواند به چند طریق صورت پذیرد. سیستمی که در این تحقیق از آن با عنوان "سیستم ذخیره سیکلی" یاد می‌شود، به صورت مجموعه بسته‌ای متشکل از رودخانه- آبخوان- سد و اجزای تغذیه مصنوعی با الگو و فرمان دراز مدت تعریف شده است. در یک سیستم ذخیره سیکلی بین تمام اجزای سیستم ارتباطی تنگاتنگ برقرار است. به بیان دیگر، علاوه بر اندر کنشی که بین رودخانه و مخزن آب زیر زمینی وجود دارد، از طریق اعمال فرمان بهره‌برداری اجزای مختلف سیستم به منظور تأمین نیاز با یکدیگر مرتبط می‌باشند. در این سیستم، رودخانه با آبخوان در تمام طول مسیر رودخانه دارای ارتباط هیدرولیکی کامل است. سیستم انتقال آب، جهت انتقال آب از مخزن سطحی به محل نیاز، از مخزن سطحی به آبخوان و بالعکس و از آبخوان به محل نیاز در نظر گرفته شده است. همچنین بخشی از آب رودخانه به محل نیاز و بخشی به آبخوان منحرف می‌شود. مطابق شکل ۱ بخشی از نیاز آبی منطقه، از منبع سطحی (سد)، بخشی از رودخانه و مابقی از طریق پمپاژ از چاهها (آبخوان) تأمین می‌گردد. آبی که به منطقه نیاز فرستاده شده، پس از مصرف به چند صورت ظاهر می‌گردد. بخشی از آن به صورت تبخیر و سایر تلفات از سیستم خارج می‌شود. بخش دیگر، (عمدتاً در ناحیه کشاورزی) در آبخوان نفوذ می‌نماید و بخش دیگری هم (عمدتاً در ناحیه شهری)، به صورت جریانهای برگشتی وارد رودخانه می‌شود. نکته مهم و کلیدی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده مانند سیستم‌های ذخیره سیکلی، توجه کافی به این ارتباطات و شناخت و تشریح روابط بین آنهاست.

با رعایت کلیه اصول مدیریتی و قیودات و محدودیتهای فنی، کیفی، و اجتماعی- اقتصادی ، تأمین نیازها از مخزن آب سطحی می‌تواند از اولویت بالاتری برخوردار باشد . این بدان معنی است که در صورت وجود ذخیره کافی در مخزن سطحی و رعایت قیودات حاکم بر سیستم ، به دلیل هزینه بهره‌برداری کمتر، عملاً تأمین نیاز از آبهای سطحی صورت خواهد گرفت . در همان حال، با توجه به فرمان بهره‌برداری پیشنهادی امکان دارد که درصدی از ذخیره سطحی برای افزایش ذخیره دراز مدت به مخزن زیر زمینی منحرف و هدایت شود. با چنین اقدامی می‌توان مخزن سطحی را برای

---

[1] Chaudhry
[2] Buras
[3] Eshett and Bittinger
[4] Neiswomd and Granstorm
[5] Lettenmaier and Burges
[6] Tomlinson and Rashton
[7] Coe and Fellow
[8] Philbrick and Kitanidis
[9] Deterministic
[10] Basagaoglu et al.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱- یک سیستم ذخیره سیکلی و اجزای آن [۱۰]

پذیرش و ذخیره جریانهای سیلابی دوره‌های آتی آماده و تا حد امکان از سرریز شدن سیلابها کاست. فرمان بهره برداری باید بتواند با رعایت کلیه موارد فوق تعامل معقول و منطقی بین مخزن سطحی و زیرزمینی و منطقه نیاز و آورد رودخانه فراهم آورد. در فصول کم آبی که ذخیره مخزن سطحی و آورد رودخانه نمی‌تواند پاسخگوی نیاز منطقه باشد، از ذخیره موجود در مخزن آب زیرزمینی استفاده می‌شود. سیستم بهره برداری ذخیره سیکلی از هدر رفتن آب به صورت سیلاب و ایجاد خسارات ناشی از آن تا حد زیادی جلوگیری می‌کند. ضمن آنکه هزینه ساخت سدهای بزرگ برای مهار آب را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

۲- ساختار و فرمولاسیون مدل پیشنهادی

مدل بهینه سازی طراحی سیستم ذخیره سیکلی یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) است که به صورت کلی زیر قابل ارائه است

$$\text{Minimize PVC} \quad (۱)$$

$$\text{PVC} = \text{PVC(Construction)} + \text{PVC(OMR)} \quad (۲)$$

$$\text{PVC(Construction)} = \text{CD} + \text{CCD} + \text{CCAR} + \text{CDivD} + \text{CDivAR} + \text{CP} \quad (۳)$$

$$\text{PVC(OMR)} = \text{CW} + \text{CAR} + \text{CDEF} + \text{COMRD} + \text{COMRCD} + \text{COMRCAR} + \text{COMRDivD} + \text{COMRDivAR} + \text{COMRP} \quad (۴)$$

$$\text{CD} = f(\text{CapD}); \text{CCD} = f(\text{CapCD}); \text{CCAR} = f(\text{CapCAR}); \text{CDivD} = f(\text{CapDivD}); \text{CDivAR} = f(\text{CapDivAR}); \text{CP} = f(\text{CapP}) \quad (۵)$$

در این روابط،

PVC: ارزش حاضر کل هزینه توسعه و بهره‌برداری سیستم، PVC(Construction): ارزش حاضر هزینه‌های ثابت و اجرایی سیستم، PVC(OMR): ارزش حاضر هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سیستم، 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

Archive of SID

www.SID.ir

منطقه تغذیه مصنوعی ، و CP و COMRP : بـه ترتیـب هزینـه‌هـای اجرایی و بهره‌برداری سیستم انتقال از آبخوان به سد می‌باشند.

رابطه ۵ نشان می‌دهد که هزینه‌هـای اجرایـی سـد، سیسـتم‌هـای انتقال آب، و سیستم‌های انحراف آب به صـورت تـابعی از ظرفیـت هر بخش می‌باشند. در این روابط :

CapD : ظرفیت مخزن سد، CapCD : ظرفیـت سیـستم انتقـال آب از سد به منطقه نیاز، CapCAR : ظرفیت سیـستم انتقـال آب از سد به منطقه تغذیه مصنوعی، CapDivD : ظرفیت سیـستم انحـراف آب از رودخانـه بـه منطقـه نیـاز، CapDivAR : ظرفیـت سیـستم انحراف آب از رودخانه به منطقه تغذیه مـصنوعی و CapP : ظرفیـت سیستم انتقال آب از آبخوان به سد می‌باشد.

قیودات موجود در مدل را می‌توان به صورت روابط زیر نوشت

$$G1(S^s, Q^s, R^g_s, E^s, R^s_d, R^s_{ar}, R^s_{riv}, CapD, CapCD, CapP) = 0 \quad (۶)$$

در رابطـه فـوق، S^s : حجـم ذخیـره مخـزن، Q^s : حجـم جریـان ورودی از رودخانـه بـه مخـزن سـد، R^g_s : حجـم جریـان ورودی از آبخوان به مخزن سد ، E^s : حجم تبخیر از سطح مخـزن، R^s_d : حجـم تخـصیص خروجـی مخـزن بـه منطقـه نیـاز، R^s_{ar} : حجـم تخـصیص خروجی از مخزن جهت تغذیه مصنوعی و R^s_{riv} : حجم تخلیـه مخـزن به رودخانه(شامل سرریز) می‌باشد.

$$G2(R^s_d, R^g_d, DivD, ANY, DEF) = 0 \quad (۷)$$

در رابطه فوق، R^s_d : حجم تأمین نیاز از مخزن سـد، R^g_d : حجـم تأمین نیاز از آبخوان ، DivD : حجم تأمین نیاز از رودخانه ، ANY : نیاز سالانه و DEF : حجم کمبود در تأمین نیاز می باشد.

$$G3(q_w, R^g_d, R^g_s) = 0 \quad (۸)$$

$$G4(q_{ar}, R^s_{ar}, DivD) = 0 \quad (۹)$$

$$G5(q_w, q_{ar}, q_{raq}, rets, seep) = 0 \quad (۱۰)$$

که در آن :

qw : حجم آب پمپاژ شده، qar : حجم آب تغذیه شـده، q_{raq} : مقدار دبی مبادله شده بین رودخانه و آبخوان ، seep : ضریب نشت بارش در سطح دشـت و rets : درصـد تـراوش آب منتقـل شـده بـه منطقه نیاز در آبخوان می‌باشد.

$$G6(q_{raq}, C_{riv}, h^s_{riv}, h^g_{riv}, h^{bot}_{riv}) = 0 \quad (۱۱)$$

که در آن :

C_{riv} : ضریب انتقـال[1]، h^s_{riv} : تـراز آب در رودخانـه (نـسبت بـه یک سطح مبنـا)، h^g_{riv} : تـراز آب آبخـوان در رودخانـه، h^{bot}_{riv} : تـراز (میانگین) کف لایه کم تراوا در رودخانه است.

$$G7(q^{in}_{riv}, ql_{riv}, q^{out}_{riv}, \Delta S_{riv}, h^{in}_{riv}, h^{out}_{riv}, h_{riv}, dh_{riv}, h^{out,min}_{riv}, h^{out,max}_{riv}) = 0 \quad (۱۲)$$

در رابطه فوق q^{out}_{riv} ، q^{in}_{riv} : به ترتیـب دبـی جریـان در ورودی و خروجـی رودخانـه؛ ql_{riv} : مجمـوع جریانهـای ورودی یـا خروجـی جـانبی[2] رودخانـه ؛ ΔS_{riv} : تغییـر در ذخیـره رودخانـه (نامحـدود در علامت)؛ h^{out}_{riv} ، h^{in}_{riv} : به ترتیب تراز جریـان در ورودی و خروجـی؛ h_{riv} : تراز متوسط جریان در رودخانـه؛ و $h^{out,min}_{riv}$ و $h^{out,max}_{riv}$ بـه ترتیب حدود پایین و بالای تراز آب رودخانه می‌باشند.

۳- کاربرد مدل

مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم، براسـاس داده هـای مربـوط بـه سـد کینه ورس و دشت پایین دست آن که در حوزه آبریـز رودخانـه ابهـر در استان زنجان قرار دارد، اجرا گردیده است. اطلاعـات مربـوط بـه سد کینه وَرس در جدول ۱ موجود است[۱۱]. مـدل بهینـه‌سـازی بـه صورت غیرخطی می‌باشد که دارای ۱۷۱۵ قید با ۱۶۹ قید غیرخطی و ۲۴۵۰ متغیر با ۴۸۶ متغیر غیرخطی می‌باشد. بـرای حـل مـدل از نـرم افـزار لینگـو[3] کـه قابلیـت حـل مـدل‌هـای خطـی، غیرخطـی و برنامه‌ریزی ترکیبی عـدد صـحیح و غیـر خطـی را داراسـت اسـتفاده می‌شود. حل ارائه شده، نتیجه به کار گیری قابلیـت جـستجوی بهینـه مطلق در نرم افزار لینگو می‌باشد. تابع هدف (هزینه کـل) حاصـل از این اجرا، برابر ۸۷/۷۱ میلیارد ریـال اسـت. جـداول ۲ الـف و ۲ب نتایج حل مدل با رویکرد توده‌ای را با نتـایج حـل مـدل بـا رویکـرد توزیعی(علیمحمدی، ۱۳۸۴) مقایسه می‌کنـد. بررسـی ایـن مقایـسه نشان از کارآیی قابل قبول مدل تـوده‌ای در فـاز برنامـه‌ریـزی دارد. شکل ۲ نیز نتیجه حـل مـدل مـذکور را نمـایش مـی‌دهنـد. ملاحظـه می‌گردد که در این سیستم، به علت هزینـه بـالای انتقـال مـستقیم از سد به مناطق نیاز و تغذیه مصنوعی، این انتقالها از رودخانه صـورت گرفته است.

۴- تحلیل نتایج

شکل ۳ تغییرات جریانهای ورودی و خروجی و حجم ذخیـره مخـزن را نمایش می‌دهد. علی‌رغم ظرفیت محدود (ظرفیت مفید سـد برابـر ۱۴/۱۲ میلیون مترمکعب می‌باشد)، مخزن توانسته اسـت بـه میـزان قابل توجهی جریان را تنظیم نمایـد. وقـوع سـه سـال نـسبتاً پـر آب متوالی (سالهای ۴ و ۵ و بـه خـصوص ۶) سـبب گردیـده کـه ذخیـره مخزن در ۵ سال دوم بیشتر از ۵ سال اول باشد.

بخشی از جریان ورودی از سد به رودخانه، در انتهـای بـازه اول بـه سمت مناطق نیاز و تغذیه مصنوعی منحرف مـی‌گردد. شکـل ۴

[1] Conductance

[2] Lateral Discharges

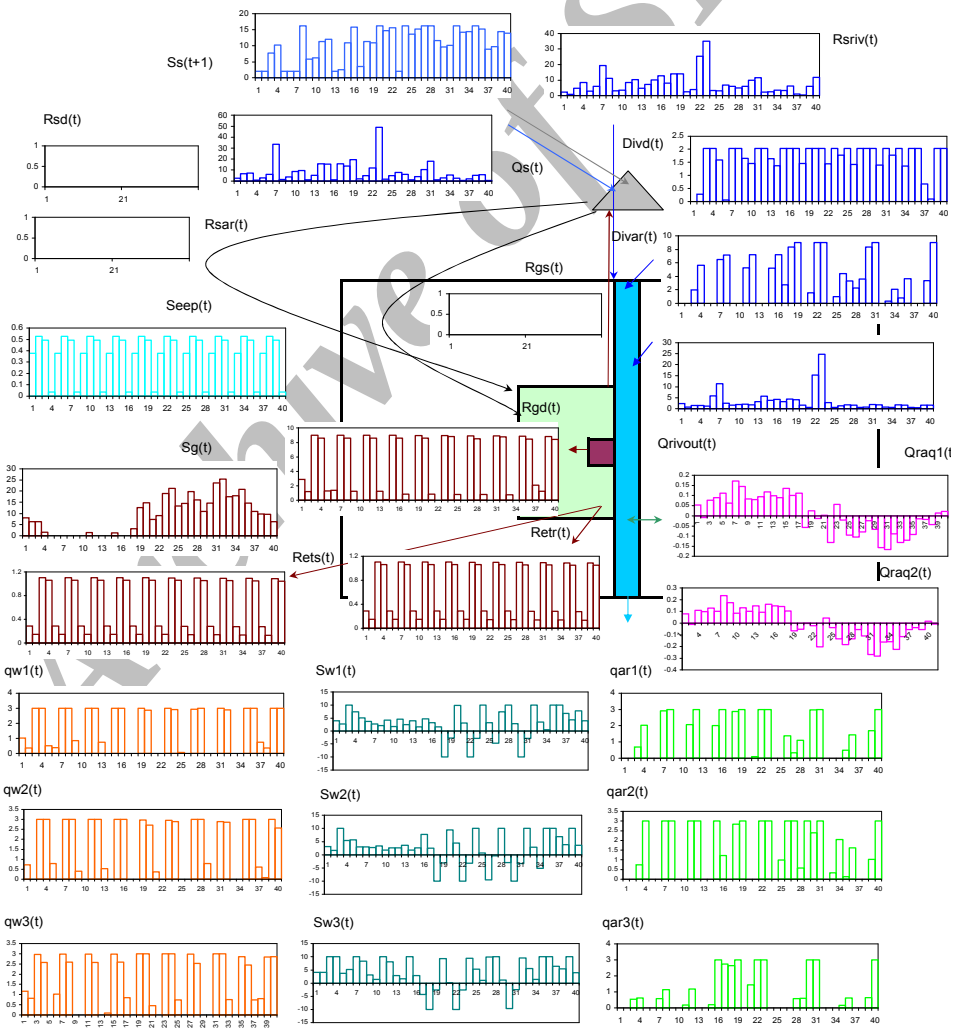
[3] LINGO

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- اطلاعات مربوط به سد کینه ورس [۱۱]

سال	زمستان (میلیون مترمکعب)	بهار (میلیون مترمکعب)	تابستان (میلیون مترمکعب)	پاییز (میلیون مترمکعب)	سالانه
۱۹۹۰-۱۹۹۱	۶/۵۴	۷/۳۷	۰/۵۸	۲/۳۴	۱۶/۸۳
۱۹۹۱-۱۹۹۲	۵/۹۶	۹/۵۹	۱/۱۶	۲/۸۵	۴۳/۵۷
۱۹۹۲-۱۹۹۳	۸/۶۳	۹/۴۸	۰/۸۷	۳/۵۹	۲۲/۵۸
۱۹۹۳-۱۹۹۴	۱۵/۷	۱۵/۳۲	۰/۹۴	۵/۱۵	۳۷/۱۲
۱۹۹۴-۱۹۹۵	۱۳/۶	۴۹/۵۸	۱/۷۶	۱۵/۸۴	۵۰/۷۸
۱۹۹۵-۱۹۹۶	۱۱/۷۵	۴۹/۲	۱/۴۵	۴/۹۶	۶۷/۳۵
۱۹۹۶-۱۹۹۷	۷/۸۹	۶/۱۷	۰/۹۱	۴/۹۵	۱۹/۹۲
۱۹۹۷-۱۹۹۸	۱۰/۴۱	۱۷/۸۵	۰/۹۳	۳/۹۶	۳۳/۱۵
۱۹۹۸-۱۹۹۹	۵/۵۱	۲/۵۷	۰/۵۲	۲/۷۷	۱۱/۳۶
۱۹۹۹-۲۰۰۰	۵/۱۷	۵/۸	۰/۲۴	۱/۸۴	۱۳/۰۶
میانگین(میلیون‌مترمکعب)	۹/۱۲	۱۶/۶۹	۰/۹۴	۴/۸۳	۳۱/۵۷
بارش(میلی‌متر)	۷۷/۱	۳۴۸/۵	۷۱۷/۱	۱۸۵/۵	۱۳۲۸/۲
تبخیر(میلی‌متر)	۱۳۶/۵۲	۱۲۳	۵/۸۵	۹۶/۹۱	۳۶۵
ضریب توزیع نیاز	۰/۰۵۶	۰/۴۲۴	۰/۴۰۹	۰/۱۱۱	۱



شکل ۲- نتیجه حل مدل بهینه سازی طراحی سیستم ذخیره سیکلی

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲ (الف)- مقایسه نتایج حل مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم با رویکرد توده‌ای و رویکرد توزیعی- ظرفیتها و هزینه‌ها

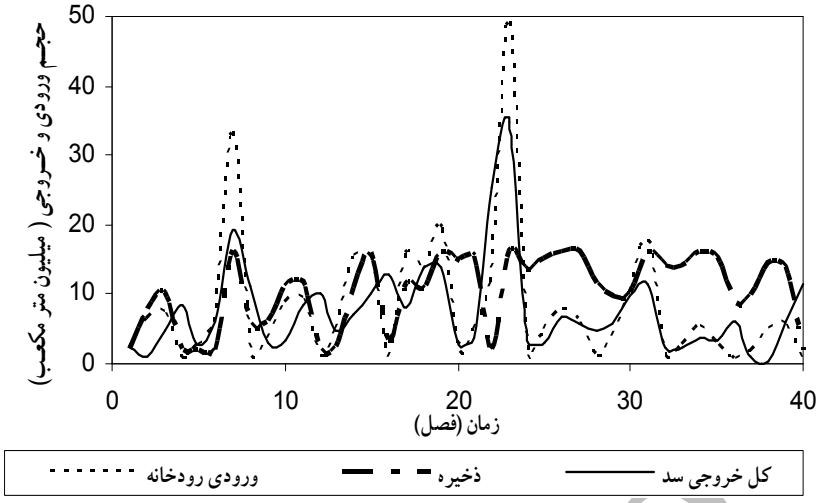
بخش	هزینه ثابت (میلیارد ریال)		هزینه جاری (میلیارد ریال)		ظرفیت (میلیون مترمکعب)	
	مدل توزیعی	مدل توده‌ای	مدل توزیعی	مدل توده‌ای	مدل توزیعی	مدل توده‌ای
سد	۵۵/۹۶۴	۵۴/۰۸	۳/۳۵۸	۳/۲۴	۱۷/۳۲۱	۱۶/۲۲
انتقال از سد به منطقه نیاز	۰	۰	۰	۰	۰	۰
انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی	۰	۰	۰	۰	۰	۰
انتقال از آبخوان به سد	۰	۰	۰	۰	۰	۰
انحراف رودخانه به منطقه نیاز	۵/۰۸۹	۵/۱۵	۲/۰۵۴	۲/۰۶	۲/۰۰۹	۲/۰۳
انحراف رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی	۶/۷۴۴	۹/۹۳	۱/۶۲۷	۱/۶۹	۵/۷۱۴	۹
پمپاژ	-	-	۵/۸۱۱	۶/۱۴	۹	۹
تغذیه مصنوعی	-	-	۴/۰۶۷	۴/۲۳	۵/۷۴	۹
کمبود	-	-	۰/۴۵۳	۱/۱۷	-	-
کل هزینه	۶۷/۷۹۷	۶۹/۱۶	۱۷/۳۷	۱۸/۵۳		

جدول ۲ (ب)- مقایسه نتایج حل مدل بهینه‌سازی طراحی سیستم با رویکرد توده‌ای و رویکرد توزیعی- مقادیر رهاسازی

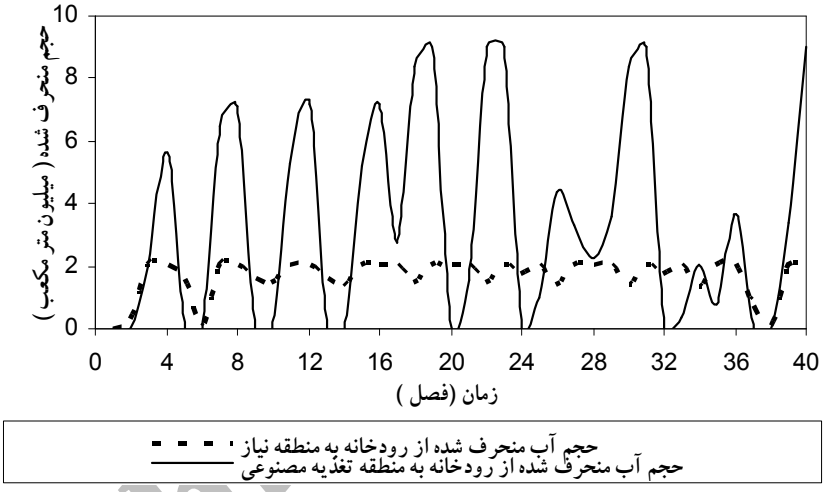
میانگین سالانه مقادیر (میلیون مترمکعب)	مدل توزیعی	مدل توده‌ای
ورودی رودخانه به سد	۳۱/۵۷۱	۳۱/۵۷۱
انتقال از آبخوان به سد	۰	۰
انتقال از سد به منطقه نیاز	۰	۰
انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی	۰	۰
خروجی سد به رودخانه	۳۰/۵۲۹	۳۰/۵۱۸
تبخیر از مخزن سد	۱/۰۴۳	۱/۰۴۳
ورودی رودخانه به سد	۳۰/۵۲۹	۰/۵۱۸
انحراف رودخانه به منطقه نیاز	۰/۴۶۹	۶/۶۲
انحراف رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی	۱۲/۷۵۲	۱۳/۶۸
جریان برگشتی به رودخانه	۲/۵۸۹	۲/۵۸۹
ورودی رودخانه از بارندگی	۰/۰۸۸	۰/۰۸۸
نشت از رودخانه به آبخوان	۳/۵۲۲	۰/۳۸۳
نشت از آبخوان به رودخانه	۲/۳۱۱	۰/۳۷۹
خروجی رودخانه (سیستم)	۱۲/۷۲۱	۱۲/۸۲
تغییر در ذخیره رودخانه	۰/۰۵۲	۰/۰۰۲۸
کل آبرسانی	۲۶	۲۶
کمبود آبرسانی	۲۵/۸۹۱	۰/۱۸
آبرسانی از سد به منطقه نیاز	۰/۱۰۹	۰
آبرسانی از آبخوان به منطقه نیاز	۱۹/۴۲۲	۱۹/۱۹
آبرسانی از رودخانه به منطقه نیاز	۶/۴۶۹	۶/۶۲
کل پمپاژ از آبخوان	۱۹/۴۲۲	۱۹/۱۹۴
پمپاژ از آبخوان به منطقه نیاز	۱۹/۴۲۲	۱۹/۱۹۴
پمپاژ از آبخوان به مخزن سد	۰	۰
نشت از رودخانه به آبخوان	۳/۵۲۲	۰/۳۸۳
نشت از آبخوان به رودخانه	۲/۳۱۱	۰/۳۷۹
کل تغذیه مصنوعی به آبخوان	۱۲/۷۵۲	۱۳/۶۸۸
ورودی به آبخوان از بارندگی	۲/۹۲	۲/۹۲
نفوذ به آبخوان در منطقه نیاز	۲/۵۸۹	۲/۵۸۹
اختلاف ورودی و خروجی آبخوان	-۰/۰۵۱	۰/۰۰۷

Archive of SID

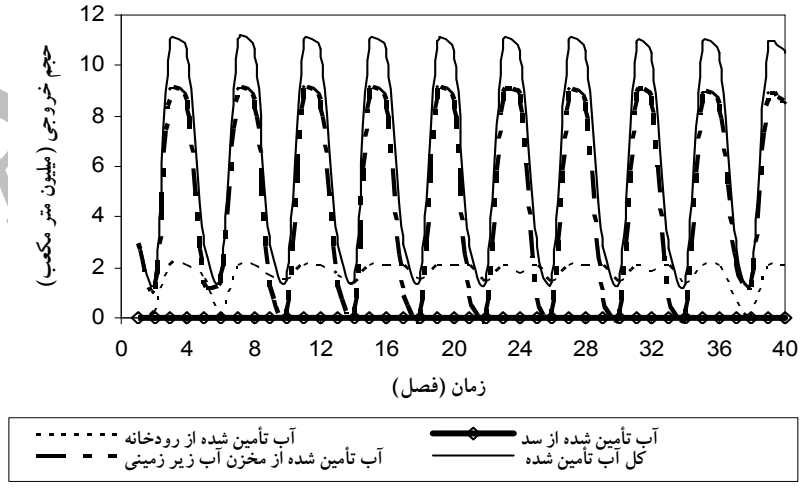
www.SID.ir



شکل ۳- تغییرات جریانهای ورودی، خروجی و حجم ذخیره مخزن سد



شکل ۴- تغییرات جریان منحرف شده از رودخانه به مناطق نیاز و تغذیه مصنوعی

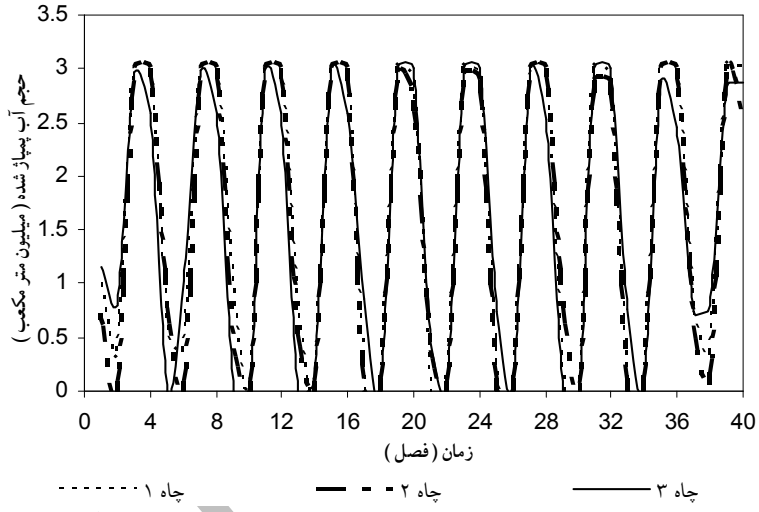


شکل ۵- تغییرات فصلی آبرسانی از منابع مختلف

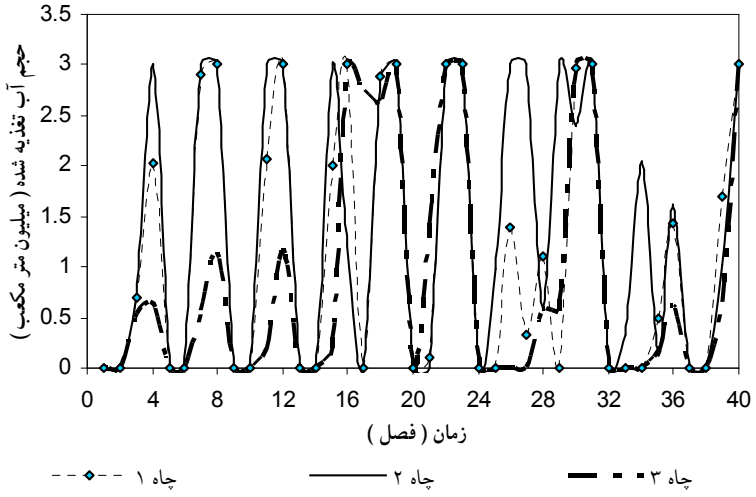
www.SID.ir

تغییرات این جریانها را نمایش می‌دهد. بجز در زمستان که نیاز کمتر از ۲ میلیون مترمکعب (ظرفیت انحراف از رودخانه) بوده، در سایر فصلها انحراف از رودخانه برابر ظرفیت آن به منطقه نیاز، صورت گرفته 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 چهار سال اول، بجز در یک دوره، مخزن هیچگاه پر نبوده و حجم ذخیره آن اغلب پایین بوده است (شکل ۳)، با این وجود 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 (شکل ۴). شکل ۵ تغییرات آبرسانی از منابع مختلف را نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که عمده نیاز از آبخوان تأمین گردیده است. همچنین چنان که 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 ۲ میلیون مترمکعب) بوده است.

شکلهای ۶ تا ۸ به ترتیب تغییرات فصلی میزان پمپاژ، تغذیه، و نوسانات سطح آب زیرزمینی را در چاههای سیستم نمایش می‌دهند. در شکل ۶ دیده می‌شود که حجم تغذیه به آبخوان در دوره‌های پرآب، بیشتر از دیگر دوره‌هاست. این وضعیت باعث افزایش تراز سطح آب در چاهها مطابق شکل ۷ در این دوره‌ها گردیده است. به طور کلی بین جریان سطحی و افت تراز آب آبخوان رابطه معکوس و معنی‌داری وجود دارد.

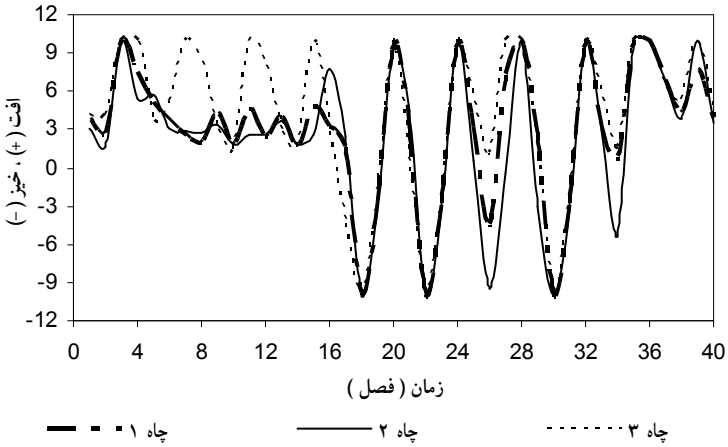


شکل ۶- تغییرات فصلی میزان پمپاژ از چاهها



شکل ۷- تغییرات فصلی میزان تغذیه به چاهها

www.SID.ir



شکل ۸- تغییرات فصلی نوسانات تراز سطح آب در چاهها

۵- ساختار مدل بهینه سازی طراحی و بهره برداری سیستم ذخیره سیکلی

مدل توأمان طراحی و بهره‌برداری سیستم ذخیره سیکلی از ترکیب مدل طراحی مطرح شده به همراه سیاستهای بهره برداری برای

پارامتر های

$$R_d^s(t), R_{ar}^s(t), R_{riv}^s(t), R_s^g(t), Divd(t), Di\ var(t)$$

طبق رابطه ۱۳ منظور شده است [۱۰]

$$R_d^s(t) = f_{rsd}(t) = a_{rsd}(t) + b_{rsd}(t)S^s(t) + c_{rsd}(t)Q^s(t) + \sum_{m=1}^{NM} d_{rsd}^m(t)H_w^{obs}(m,t-1) + \sum_{r=1}^{NR} e_{rsd}^r(t)H_{riv}^{st}(r,t-1)) \quad (۱۳)$$

برای اجرای این مدل همان داده‌های سد کینه ورس مورد استفاده قرار گرفت. این مدل بهینه‌سازی غیر خطی می‌باشد که دارای ۱۹۹۰ قید (۳۲۹ قید غیر خطی) ، و ۲۳۹۸ متغیر (۶۲۳ متغیر غیر خطی) است. حل ارائه شده، نتیجه به کارگیری قابلیت جستجوی بهینه مطلق در نرم افزار لینگو می‌باشد. تابع هدف (هزینه کل) حاصل از این اجرا ، برابر ۹۳/۲ میلیارد ریال بود. جدول ۳ نتایج حل مدل طراحی با اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه و بدون آن در رویکرد توده‌ای و جدول ۴ نتایج حل مدل طراحی با اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه و بدون آن در رویکرد توزیعی را نشان می‌دهد. نتایج حل مدل طراحی- بهره‌برداری سیستم با رویکرد توده‌ای نیز در شکل ۹ با جزئیات بیشتری بررسی شده است.

جدول ۳- مقایسه حل مدل بهینه‌سازی طراحی با اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه و بدون آن (طراحی و طراحی- بهره‌برداری) در رویکرد توده‌ای

هزینه‌ها (میلیارد ریال)	با سیاست بهره برداری		بدون سیاست بهره‌برداری	
	اجرایی	بهره‌برداری	اجرایی	بهره‌برداری
سد	۵۷/۱۸	۳/۴۳	۵۴/۰۸	۳/۲۴
سیستم انتقال از سد به منطقه نیاز	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از آبخوان به سد	۰	۰	۰	۰
سیستم انحراف رودخانه به منطق نیاز	۱۶/۳۲	۴/۳۹	۵/۱۵	۲/۰۶
سیستم انحراف رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی	۴/۶۹	۰/۷۶	۹/۹۳	۱/۶۹
پمپاژ	-	۳/۹	-	۶/۱۴
تغذیه مصنوعی	-	۱/۸۹	-	۴/۲۳
کمبود	-	۰/۶۳	-	۱/۱
کل هزینه (اجرا و بهره‌برداری)	۹۳/۲۲		۸۷/۱۷	

Archive of SID

www.SID.ir

ادامه جدول ۳-

ظرفیتها و میانگین سالانه مقادیر *	با سیاست بهره برداری		بدون سیاست بهره‌برداری	
	ظرفیت	میانگین	ظرفیت	میانگین
سد	۱۷/۹۷	–	۱۶/۲۲	–
سیستم انتقال از سد به منطقه نیاز	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از آبخوان به سد	۰	۰	۰	۰
انتقال از آبخوان به منطقه نیاز	–	۱۱/۸۴	–	۱۹/۱۹
خروجی سد به رودخانه	–	۳۰/۵۳	–	۳۰/۵۱۸
سیستم انحراف رودخانه به منطقه نیاز	۷/۱۱	۱۴/۰۱	۲/۰۳	۶/۶۲
سیستم انحراف رودخانه به تغذیه مصنوعی	۳/۸۳	۶/۳۴	۹	۱۳/۶۸
پمپاژ	–	۱۱/۸۴	۹	۱۹/۱۹۴
تغذیه مصنوعی	–	۶/۳۴	۹	۱۳/۶۸۸

* ظرفیتها به میلیون مترمکعب در فصل و میانگین سالانه مقادیر به میلیون مترمکعب

جدول ۴- مقایسه حل مدل بهینه‌سازی طراحی با اعمال سیاست بهره‌برداری بهینه و بدون آن (طراحی و طراحی- بهره‌برداری) در رویکرد توزیعی

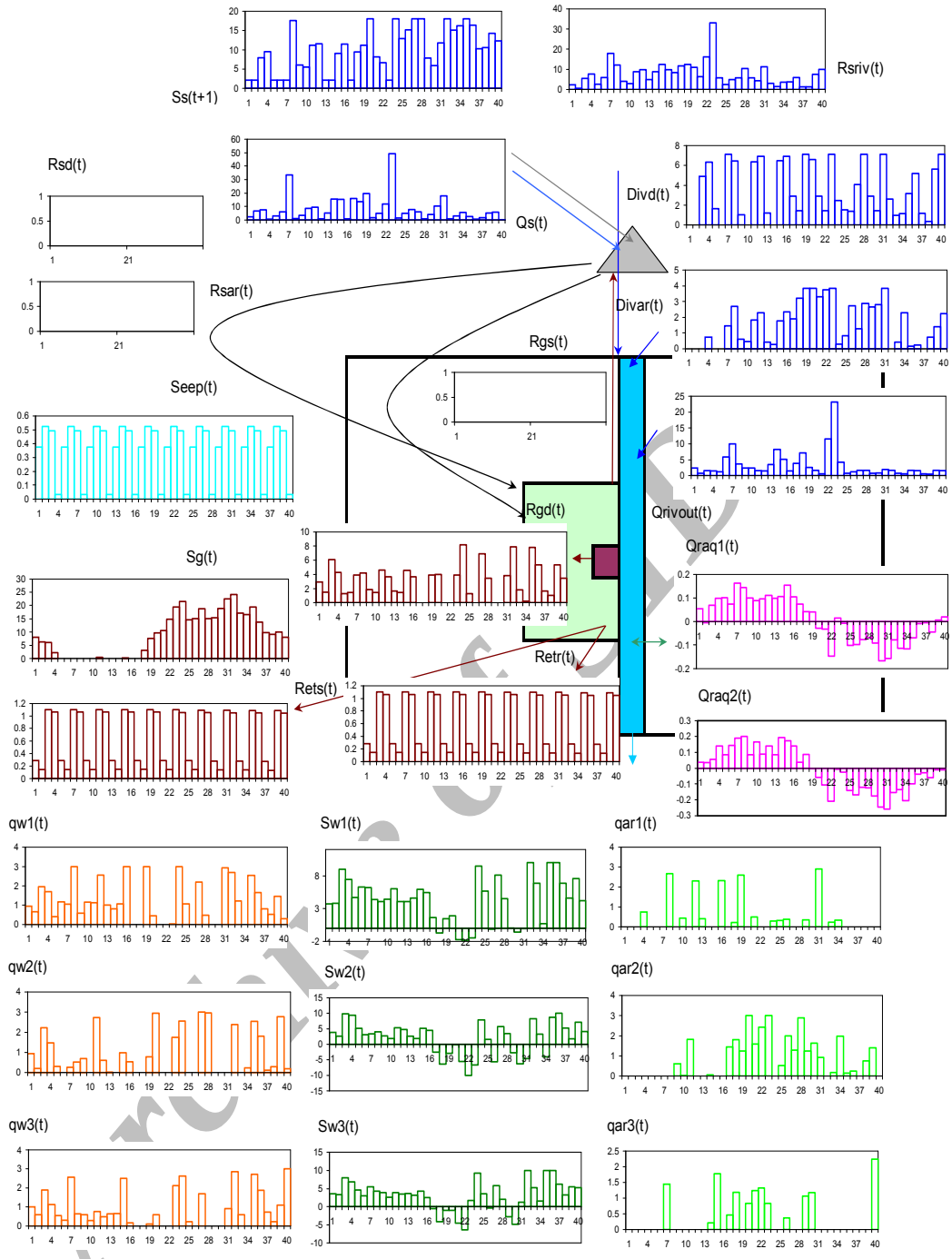
هزینه‌ها	با سیاست بهره برداری		بدون سیاست بهره‌برداری	
	اجرایی	بهره‌برداری	اجرایی	بهره‌برداری
سد	۵۶/۹۹۷	۳/۴۲	۵۵/۹۶۴	۳/۳۵۸
سیستم انتقال از سد به منطقه نیاز	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از آبخوان به سد	۰	۰	۰	۰
سیستم انحراف رودخانه به منطق نیاز	۷/۱۹۳	۲/۲۳۹	۵/۰۸۹	۲/۰۵۴
سیستم انحراف رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی	۶/۲۷۵	۱/۶۱۸	۶/۷۴۴	۱/۶۲۷
پمپاژ	–	۵/۵۸۶	–	۵/۸۱۱
تغذیه مصنوعی	–	۴/۰۴۴	–	۴/۰۶۷
کمبود	–	۰/۳۸۴	–	۰/۴۵۳
کل هزینه (اجرا و بهره‌برداری)	۸۷/۷۵۵		۸۵/۱۶۷	

ظرفیتها و میانگین سالانه مقادیر *	با سیاست بهره برداری		بدون سیاست بهره‌برداری	
	ظرفیت	میانگین	ظرفیت	میانگین
سد	۱۷/۸۸۲	–	۱۷/۳۲۱	–
سیستم انتقال از سد به منطقه نیاز	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از سد به منطقه تغذیه مصنوعی	۰	۰	۰	۰
سیستم انتقال از آبخوان به سد	۰	۰	۰	۰
انتقال از آبخوان به منطقه نیاز	–	۱۸/۸۱۹	–	۱۹/۴۲۲
خروجی سد به رودخانه	–	۳۰/۵۵۲	–	۳۰/۵۲۹
سیستم انحراف رودخانه به منطقه نیاز	۲/۸۸۶	۷/۰۶۴	۲/۰۰۹	۶/۴۶۹
سیستم انحراف رودخانه به تغذیه مصنوعی	۵/۲۷	۱۲/۶۲۶	۵/۷۱۴	۱۲/۷۵۲
پمپاژ	۹	۱۸/۸۱۹	۹	۱۹/۴۲۲
تغذیه مصنوعی	۲۷۵	۱۲/۶۲۶	۵/۷۱۴	۱۲/۷۵۲

* ظرفیتها به میلیون مترمکعب در فصل و میانگین سالانه مقادیر به میلیون مترمکعب

Archive of SID

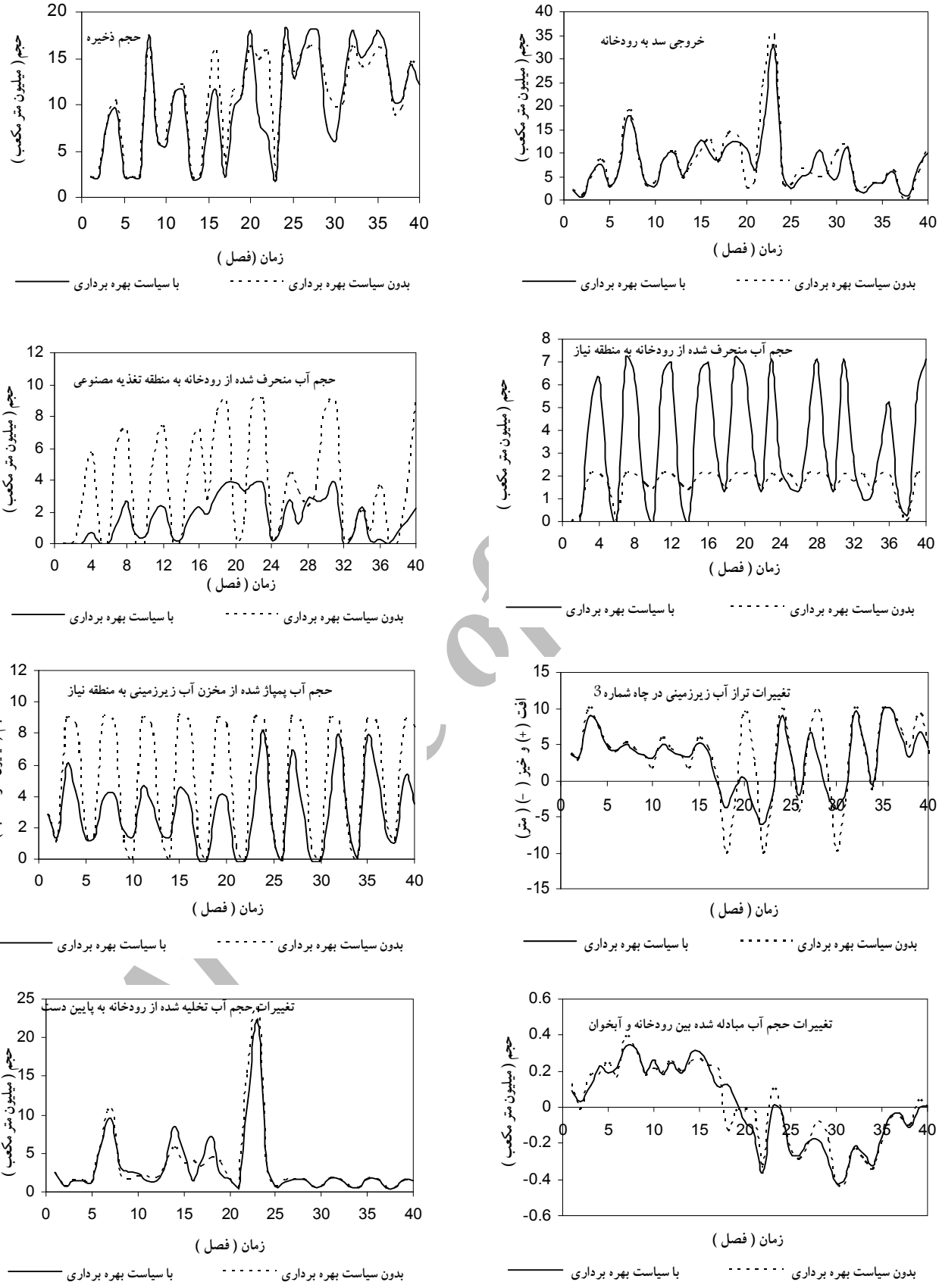
www.SID.ir



شکل ۹- نتیجه حل مدل بهینه سازی طراحی سیستم با اعمال سیاست بهره برداری

شکل ۱۰ جهت مقایسه بهتر تغییرات مؤلفه‌های مهم سیستم در دو مدل، رسم شده است. تنها تغییر محسوس در میزان انحراف از رودخانه به منطقه نیاز و پس از آن به منطقه تغذیه مصنوعی می‌باشد که در اولی سبب افزایش و در دومی سبب کاهش ظرفیت انحراف از رودخانه به این مناطق بوده است. همچنین به دلیل افزایش انحراف از رودخانه به منطقه نیاز مشاهده می‌شود که میزان انتقال از آبخوان به منطقه نیاز نیز کاهش یافته است. تغییر در دیگر مشخصه‌ها قابل ملاحظه نمی‌باشد . نتیجه اینکه مدل سیاست بهره‌برداری بهینه با اعمال کمترین تغییرات در مشخصه‌های طراحی و بهره‌برداری سیستم، سیاست بهینه را نتیجه داده است. با استفاده از این سیاستها در هر دوره می‌توان میزان بهینه هر یک از خروجیها را تعیین نمود.

www.SID.ir



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات خروجیهای سیستم در مدل‌های بهینه سازی با اعمال سیاست بهره برداری و بدون آن

www.SID.ir

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ساختاری به منظور طراحی بهینه یک سیستم ذخیره سیکلی با رویکرد توده‌ای و نیز سیاست بهره‌برداری بهینه به منظور استفاده مطلوب از زیر سیستم آبهای سطحی و زیرزمینی به منظور تأمین نیازهای تعریف شده با قابلیت اعتماد مشخص ارائه شده است.

در این راستا مدل طراحی و طراحی- بهره‌برداری از یک سیستم ذخیره سیکلی با رویکرد توده‌ای با همین مدل با رویکرد توزیعی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت و کارآیی مدل‌های توده‌ای در این مسائل بررسی شد. اگرچه استفاده از فرمانهای بهره‌برداری هزینه‌ای را به سیستم تحمیل کرده است که "هزینه فرمان" [1] نامیده شده و مقدار آن تابعی از تغییرات زمانی- مکانی ورودیهای زیر سیستم‌ها و مشخصه‌ها و مؤلفه‌های طراحی است، لکن استفاده از فرمانهای بهره‌برداری، تیم بهره‌برداری را قادر می‌سازد که میزان انتقالها و انحرافات از اجزای مختلف سیستم را به خوبی و در هر مرحله زمانی تعیین کند.

مدل‌های توده‌ای به دلیل سهولت استفاده در فاز برنامه‌ریزی و نیز کارآیی مناسبی که در این نوع مسائل دارند می‌توانند جایگزین مناسبی برای مدل‌های توزیعی در حل مسائل دراز مدت باشند. این در حالی است که مدل‌های توزیعی به سادگی قادر به حل سیستم‌های با سری زمانی دراز مدت نمی‌باشند.

[1] Rule Cost

۷- مراجع

1- Chaudhry, M. T., Labadie, J. W., Hall, W. A., and Albertson, M. L. (1974). "Optimal conjunctive use model for Indus basin." *J. Hydraul. Div., ASCE*, 100 (5), 667-687.

2- Buras, N. (1963). "Conjunctive operation of dams and aquifers." *J. Hydraul. Div., ASCE*, 89 (6), 111-131.

3- Eshett, A., and Bittinger, M. W. (1965). "Stream-aquifer system analysis." *J. Hydraul. Div., ASCE*, 91 (6), 153-164.

4- Neiswand, G. H., and Granstrom, M. L. (1971). "A chance-constrained approach to conjunctive use of surface waters and groundwater." *Water Resour. Res.,* 7 (6), 1425-1436.

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

6- Rashton, K .R., and Tomlinson, L. M. (1981). "Operation policies for a surface groundwater system." *Water Res. Bull.*, 17 (3), 406-413.

7- Coe, J. J. (1990). "Conjunctive use-advantages, constraints, and examples." *J. Irr. Drain. Eng., ASCE*, 116 (3), 427-443.

8- Philbrick, C. R., and Kitanidis, P. K. (1998). "Optimal conjunctive-use operations and plans." *Water Resour. Res.,* 34 (5), 1307-1316.

9- 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, 69-81.

۱۰- علیمحمدی، س. (۱۳۸۴). "طراحی و بهره برداری بهینه تلفیقی از سیستم آبهای سطحی و زیر زمینی- رویکرد ذخیره سیکلی." پایان نامه برای دریافت مدرک دکترا در مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران، تهران.

۱۱- مهندسین مشاور آبفن. (۱۳۷۹). *گزارش مطالعات طرح سد کینه ورس و سازه های وابسته*، تهران.

Archive of SID

www.SID.ir

۸- ضمیمه

توابع هزینه اشاره شده در متن مقاله دارای ساختار زیر می‌باشند :

$$CD = 0.0054\,(CapD)^3 - 0.1972\,(CapD)^2 + 3.7618\,(CapD) + 21.908 \quad (۱۴)$$

$$CCD = -0.1022\,(CapCD)^2 + 4.026\,(CapCD) \quad (۱۵)$$

$$CCAR = -0.0511\,(CapCAR)^2 + 2.013\,(CapCAR) \quad (۱۶)$$

$$CP = -0.2043\,(CapP)^2 + 8.052\,(CapP) \quad (۱۷)$$

$$CDivD = -0.047\,(CapDivD)^2 + 2.628\,(CapDivD) \quad (۱۸)$$

$$CDivAR = -0.0234\,(CapDivAR)^2 + 1.3139\,(CapDivAR) \quad (۱۹)$$

$$f_t(def(t)) = 15.def(t)^2 \quad (۲۰)$$

$$CDEF = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{l=1}^{NL}\frac{f_t(def(t))}{(1+r_s)^t} \quad (۲۱)$$

$$COMRD = ucd.CD \quad (۲۲)$$

$$COMRCD = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{l=1}^{NL}\frac{uccd(t).R_d^s(t)}{(1+r_s)^t} \quad (۲۳)$$

$$COMRCAR = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{l=1}^{NL}\frac{uccar(t).R_{ar}^s(t)}{(1+r_s)^t} \quad (۲۴)$$

$$COMRDivD = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{l=1}^{NL}\frac{ucdivd(t).DivD(t)}{(1+r_s)^t} \quad (۲۵)$$

$$COMRDivAR = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{l=1}^{NL}\frac{ucdivar(t).DivAR(t)}{(1+r_s)^t} \quad (۲۶)$$

$$COMRP = \sum_{t=1}^{NT}\sum_{l=1}^{NL}\frac{ucp(t).R_s^g(t)}{(1+r_s)^t} \quad (۲۷)$$

$$ucd = 0.06 \quad uccd = 0.02 \quad uccar = 0.01 \quad ucp = 0.05 \quad ucdivd = 0.05 \quad ucdi\,var = 0.02$$

$$ucp = 0.05 \quad ucdivd = 0.05 \quad ucdi\,var = 0.02 \quad (۲۸)$$

$$CW = \left\{\sum_{t=1}^{NT}\sum_{k=1}^{NK}\frac{m_w(t)}{(1+r_s)^t}\left[l_w(k) + \bar{s}_w(k,t)\right]\cdot q_w(k,t)\right\} \quad (۲۹)$$

$$CAR = \left\{\sum_{t=1}^{NT}\sum_{k=1}^{NK}\frac{m_{ar}(t)}{(1+r_s)^t}\left[l_{ar}(l) + s_{ar}(l,t)\right]\cdot q_{ar}(l,t)\right\} \quad (۳۰)$$

$$m_w(t) = (uelif.ucen/efp/1000)(Q2V(t)) \quad (۳۱)$$

$$m_{ar}(t) = (ueinj.ucen/efi/1000)(Q2V(t)) \quad (۳۲)$$

$$ucen = 1\times10^{-6}\,; efp = 0.75; uelif = 0.0028; ueinj = 0.0028 \quad (۳۳)$$

هزینه کمبود به صورت تابعی از حجم کمبود در هر دوره در نظر گرفته می شود. این هزینه با رابطه ۲۱ نمایش داده شده است. در این رابطه def(t) حجم کمبود در تأمین نیاز در دوره t است که در رابطه ۲۰ نمایش داده شده است . ucd، uccd، uccar، ucdivd، ucdivar و ucp : به ترتیب هزینه واحد (واحد حجم / هزینه) سد ، انتقال آب از سد به منطقه نیاز، از سد به منطقه تغذیه مصنوعی ، از رودخانه به منطقه نیاز، از رودخانه به منطقه تغذیه مصنوعی و از آبخوان به سد می باشند.

هزینه پمپاژ از چاه، تابعی از حاصل‌ضرب دبی پمپ شده در ارتفاع مکش آب از چاه است. همچنین هزینه تغذیه مصنوعی تابعی از حجم تغذیه در هر دوره می باشد. این هزینه‌ها در روابط ۲۹ و ۳۰ آمده‌اند [۱۰]. در این روابط ،NT : تعداد دوره های زمانی، NK : تعداد چاههای پمپاژ، NL : تعداد چاههای تغذیه، $l_w(k)$: افت اولیه (اختلاف تراز اولیه آب زیرزمینی از سطح زمین) چاههای پمپاژ، $\bar{s}_w(k,t)$: میانگین تغییر در تراز آب زیرزمینی در چاه پمپاژ k در دوره t، $q_w(k,t)$: حجم آب پمپاژ شده از چاه پمپاژ k در دوره t، $q_{ar}(l,t)$: حجم آب تغذیه شده در چاه تغذیه l در دوره زمانی t و $u_{ar}(l,t)$ هزینه تغذیه یک واحد حجمی (یک میلیون متر مکعب) آب در سلول تغذیه l، می‌باشد.

همچنین $m_w(t)$ عبارت است از هزینه واحد پمپاژ یک واحد حجمی آب از چاه به ارتفاع یک متر که از رابطه ۳۱ محاسبه می شود. در این رابطه ، uelif: انرژی واحد مورد نیاز جهت پمپاژ یک متر مکعب بر ثانیه آب به ارتفاع یک متر در یک ثانیه و ueinj: انرژی واحد مورد نیاز جهت تغذیه یک متر مکعب بر ثانیه آب به عمق یک متر در یک ثانیه می باشد. ucen: قیمت واحد انرژی (مثلاً به Rls/Kwh) ، efp : راندمان پمپاژ و Q2V (t) : ضریب تبدیل دبی به حجم می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir