

## بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آبهای سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز رودخانه ابهر

سعید علیمحمدی<sup>۱</sup> حجت حسین‌زاده<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۷/۱۱/۲۰ پذیرش ۸۸/۱۲/۱۶)

### چکیده

بهره‌برداری تلفیقی منابع آبهای سطحی و زیرزمینی در مقایسه با بهره‌برداری جداگانه این منابع، منجر به افزایش اعتمادپذیری و کاهش کمبودها و هزینه‌های بهره‌برداری می‌گردد. در این تحقیق دو گزینه بهره‌برداری از آب زیرزمینی و بهره‌برداری تلفیقی منابع آب حوضه ابهر مورد توجه قرار گرفت. به این منظور دو مدل بهینه‌سازی پارامتر گسترده به نامهای GWOpt و CONJ به ترتیب برای بهره‌برداری آب زیرزمینی و بهره‌برداری تلفیقی آبهای سطحی و زیرزمینی، هر دو با هدف حداقل‌سازی افت تراز آبخوان ارائه شد. بالا بودن حجم محاسبات مدل‌های بهینه‌سازی گسترده در سیستم‌های واقعی، محدودیتهای مختلفی در پی داشته است. در این راستا، به منظور توسعه مدل‌ها از رویکرد ماتریس پاسخ واحد استفاده شد. مدل‌های بالا در قالب برنامه‌ریزی خطی تهیه گردید. در این رویکرد ابتدا رفتار آب زیرزمینی به کمک مدل شبیه‌سازی MODFLOW در قالب ماتریس‌های پاسخ واحد مشخص شد و این مقادیر در مدل بهینه‌سازی قرار گرفت. نتیجه حل مدل بهینه‌سازی نشان داد که میزان افت تراز میانگین برای مدل CONJ از مدل GWOpt کمتر است. همچنین در مقایسه با مدل شبیه‌سازی که بیانگر شرایط بهره‌برداری واقعی است، با لحاظ نمودن محدودیتهای مختلف، در مجموع شش درصد کاهش افت به دست آمد. به منظور کاربرد عملی مدل پیشنهادی، یک نرم‌افزار که در حکم یک سیستم تصمیم یار بود، توسعه یافت.

**واژه‌های کلیدی:** بهره‌برداری تلفیقی، ماتریس پاسخ واحد، بهینه‌سازی پارامتر گسترده، شبیه‌سازی

## Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater Resources in Abhar River Basin

Saeid Alimohammadi<sup>1</sup>

Hojjat Hosseinzadeh<sup>2</sup>

(Received Feb. 9, 2009 Accepted March 7, 2010)

### Abstract

Conjunctive use of surface and ground-water resources, compared to disjunctive operation of these systems, increases system reliability and decreases water deficits and operational costs. In this study, the two alternatives of groundwater (GWOpt model) operation and conjunctive use of surface and groundwater resources (CONJ model) are considered for Abhar river basin in Iran. In both models, the objective function is minimization of mean groundwater drawdown. The vast amount of calculations needed for distributed parameter optimization models is a major limitation in real systems. However, the above two models are linear and the unit response matrix approach is utilized. The first step in this approach is to calculate the unit response matrices (as the behavior of the groundwater system) using a simulation model, such as MODFLOW. The next step involves incorporating these matrices into the optimization model. The results obtained from the solution of the optimization model indicate that the mean drawdown in the CONJ model is less than that in the GWOpt model. In addition, a decrease of only 6% decrease was observed in the mean drawdown when compared to the simulation model. A decision support system has also been developed that enables the model to be used in real situations.

**Keywords:** Conjunctive Use, Unit Response Matrix, Distributed Parameter Optimization, Simulation.

1. Assist. Prof., Dept. of Water Resources Eng., University of Water and Power Technology, Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 77312780 alimohammadi@iust.ac.ir
2. Ph.D Student of Civil Eng., Iran University of Science and Technology, Member of Water Resources Research Center, Water Research Institute, Tehran

- ۱- استادیار دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران (نویسنده مسئول) ۷۷۳۱۲۷۸۰ (+۹۸ ۲۱) alimohammadi@iust.ac.ir
- ۲- دانشجوی دکترای مهندسی عمران آب، دانشگاه علم و صنعت ایران، همکار پژوهشکده منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب

مد<sup>۱۱</sup> ارائه دادند [۷]. تأکید آنها در این مدل بیشتر بر تغییرات روزانه تراز آب رودخانه بود. پeralta و همکاران<sup>۱۲</sup> در سال ۱۹۹۵ یک مدل بهینه‌سازی را برای بهره‌برداری تلفیقی در دشت آبرفتی می‌سی‌سی‌پی ارائه نمودند [۸]. آنها از روش درونگذاری<sup>۱۳</sup> جهت حل مدل بهینه‌سازی و فرمول‌بندی آن استفاده کردند.

ریچارد<sup>۱۴</sup> در سال ۱۹۹۵ از یک مدل پارامتر گسترده، برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم رودخانه-آبخوان، با در نظر گرفتن احتمالات جریان سطحی استفاده نمود [۹]. وی از روش ماتریس پاسخ واحد برای اتصال مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده کرد. لال<sup>۱۵</sup> در سال ۱۹۹۵ از یک مدل بهینه‌سازی برای غربال‌گزینه‌های آب سطحی و زیرزمینی استفاده نمود [۱۰]. وی از مدل آبدهی برای بهینه‌سازی سیستم استفاده کرد و نشان داد که بیشترین سود هنگامی حاصل می‌شود که از سیاست بهره‌برداری مشترک استفاده گردد.

باشاقاوغلو و همکاران<sup>۱۶</sup> در سال ۱۹۹۹ یک مدل جامع پارامتر گسترده را برای بهره‌برداری سیستم‌های تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی ارائه نمودند [۱۱]. آنها با توجه به محدودیت محاسباتی، مدل را فقط برای یک سال اجرا نمودند. میلر و همکاران<sup>۱۷</sup> در سال ۲۰۰۳ بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی را در مقیاس منطقه‌ای مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. آنها از مدل MODFLOW به منظور محاسبه ضرایب ماتریس پاسخ واحد و از مدل MODSIM به عنوان مدل بهینه‌سازی سیستم استفاده نمودند.

در مطالعات علیمحمدی و همکاران روش ذخیره سیکلی<sup>۱۸</sup> به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی آبهای سطحی و زیرزمینی به صورت پارامتر گسترده، توسعه داده شد [۱۳-۱۶]. به این منظور از روش ماتریس پاسخ تعمیم یافته استفاده شد. تحقیقات نشان داد که این روش در مقایسه با حالت معمول آن، منجر به افزایش دقت و یا افزایش محدوده کاربرد روش می‌گردد. همچنین افشار و علیمحمدی در سال ۱۳۸۴ از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تولید ضرایب پاسخ استفاده نمودند [۱۷].

در تحقیق حاضر مدل‌های مورد استفاده در بهینه‌سازی آب زیرزمینی بررسی شد و یک مدل پارامتر گسترده برای بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب حوضه رودخانه ابهر مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه آمار و اطلاعات ورودی مورد نیاز اجرای مدل

بهره‌برداری تلفیقی یکی از روشهای مفید در برنامه‌ریزی منابع آب است. این روش به طور همزمان به استفاده بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی توجه دارد. بهترین روش برای رسیدن به یک برنامه بهره‌برداری تلفیقی بهینه، استفاده از رویکرد سیستماتیک و استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی است. یک سیستم تلفیقی منابع آب، از دو زیرسیستم آب سطحی و آب زیرزمینی تشکیل می‌شود. در این میان مدل‌سازی زیرسیستم آب زیرزمینی به دلیل ناهمگنی، خروجی‌ها و ورودی‌های متعدد آن، به مراتب پیچیده‌تر از مدل‌سازی زیرسیستم آب سطحی است. به همین دلیل معمولاً بخش اصلی یک مدل تلفیقی، ساختار مدل آب زیرزمینی آن است. البته در برخی مواقع بسته به دقت مورد نیاز، ممکن است از مدل‌های ساده‌تری نیز استفاده شود. به طور کلی اگر سیستم آب زیرزمینی به صورت همگن در نظر گرفته شود، مدل را توده‌ای<sup>۱</sup> و چنانچه تغییرپذیری مکانی مشخصه‌های هیدرودینامیکی آبخوان در مدل مورد توجه قرار گیرد، مدل را پارامتر گسترده یا توزیعی<sup>۲</sup> می‌نامند.

بوراس<sup>۳</sup> در سال ۱۹۶۷ یکی از نخستین مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی را منتشر نمود [۱]. او یک مدل توده‌ای را به این منظور توسعه داد و از برنامه‌ریزی پویا برای حل مدل بهینه‌سازی حاصل، استفاده کرد. یانگ<sup>۴</sup> و بردهوف<sup>۵</sup> در سال ۱۹۷۲ نخستین مدل پارامتر گسترده بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم رودخانه-آبخوان را ارائه دادند و برای رسیدن به حل بهینه از تکنیک شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده نمودند [۲]. آنها مطالعه خود را در سالهای بعد برای در نظر گرفتن ریسک تکمیل نمودند [۳].

مداک<sup>۶</sup> در سال ۱۹۷۲ روش ماتریس پاسخ واحد<sup>۷</sup> را برای بهینه‌سازی پارامتر گسترده بهره‌برداری از سیستم‌های آب زیرزمینی ارائه داد [۴]. مورل-سیتو<sup>۸</sup> در سال ۱۹۷۵ و مورل-سیتو و دالی<sup>۹</sup> در سال ۱۹۷۵، روش ماتریس پاسخ واحد را برای سیستم‌های رودخانه-آبخوان توسعه دادند [۵ و ۶].

ماتسوکاوا و همکاران<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۰ یک مدل بهینه‌سازی را برای بهره‌برداری از یک سیستم سد-آبخوان در حوضه رودخانه

1 Lumped Parameter Model  
2 Distributed Parameter Model  
3 Buras  
4 Young  
5 Bredehoeft  
6 Maddock  
7 Unit Response Matrix  
8 Morel-Seytoux  
9 Dally  
10 Matsukawa et al.

11 Mad  
12 Peralta et al.  
13 Embedding Approach  
14 Richard  
15 Lall  
16 Basagaoglu et al.  
17 Miller et al.  
18 Cyclic Storage

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm Q = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

که در این رابطه

$h$  تراز سطح آب زیرزمینی از یک مینا،  $Q$  ترم جریان‌های ورودی و خروجی به آبخوان،  $S$  ضریب ذخیره،  $T$  قابلیت‌گذردهی،  $t$  اندیس زمان و  $z, y, x$  اندیس‌های مکان هستند. با توجه به شرایط اولیه سیستم که به صورت  $h(x, y, z, t) = h(x, y, z, 0) = h_0(x, y, z)$  است، می‌توان به جای  $h$  از مقدار افت که با  $s$  نمایش داده می‌شود استفاده نمود. افت تراز آبخوان در یک نقطه مشخص و در یک زمان مشخص از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$s(x, y, z, t) = h(x, y, z, t) - h_0(x, y, z) \quad (2)$$

مداک در سال ۱۹۷۲ با استفاده از تابع گرین<sup>۱</sup> رابطه زیر را برای افت آبخوان تحت فشار ارائه نمود:

$$s(k, n) = \sum_{j=1}^{NK} \sum_{t=1}^n \beta(k, j, n-t+1) \cdot q(j, t) \quad (3)$$

در این رابطه که رابطه اصلی روش ماتریس پاسخ واحد است، متغیرها عبارت‌اند از:

$s(k, n)$  مقدار افت در چاه یا سلول  $k$  در انتهای دوره زمانی  $n$ ،  $q(j, t)$  دبی پمپاژ از چاه یا سلول  $j$  در طی دوره زمانی  $n$ ،  $\beta(k, j, n-t+1)$  ضریب پاسخ واحد سیستم که عبارت است از مقدار افت واحد در سلول  $k$  در انتهای دوره زمانی  $n$  در اثر پمپاژ واحد از چاه یا سلول  $j$  (که ممکن است مساوی  $k$  باشد) در طی دوره زمانی  $t$  ( $t \leq n$ ).

در واقع این رابطه میزان افت در یک نقطه مشخص و یک زمان مشخص از آبخوان را با میزان تخلیه چاههای پمپاژ در زمان‌ها و مکان‌های مختلف مرتبط می‌سازد و رابطه حاصل به صورت خطی است. حسن این رابطه در این است که می‌توان در مدل‌های بهینه‌سازی خطی از آن استفاده نمود. بهر حال رابطه داده شده برای آبخوان‌های تحت فشار کاملاً صادق است. اما بررسی‌ها نشان داده است که در آبخوان‌های آزاد نیز اگر نسبت افت حداکثر به ضخامت لایه اشباع آبخوان کم باشد یا به عبارتی رفتار سیستم خطی باشد، می‌توان از این رابطه استفاده نمود. علیمحمدی در سال ۱۳۸۴ روشی را برای گسترش محدوده کاربرد این روش ارائه نموده است. مفهوم ضریب پاسخ واحد در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل، چاه مشاهداتی می‌تواند خود چاه پمپاژ دیگری باشد.

بهینه‌سازی در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول ضرایب پاسخ واحد سیستم که ماتریس پاسخ واحد را تشکیل

بهینه‌سازی و نتایج مدل شبیه‌سازی ارائه شد. از مدل شبیه‌سازی برای تهیه ماتریس‌های پاسخ واحد و تهیه مینای واحد مقایسه‌ای برای مدل‌های بهینه‌سازی استفاده شد. در این مطالعه، فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری آب زیرزمینی و فرمول‌بندی مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی ارائه شد و نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تلفیقی مقایسه شدند.

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- روشهای بهینه‌سازی پارامتر گسترده سیستم‌های آب زیرزمینی

بهینه‌سازی پارامتر گسترده سیستم‌های آب زیرزمینی معمولاً به دو روش درون‌گذاری و ماتریس پاسخ واحد انجام می‌گردد [۱۸ و ۱۹]. روش درون‌گذاری توسط آگاد<sup>۱</sup> و رمسون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۴ ارائه شد [۲۰]. در این روش معادله جریان در محیط متخلخل آبخوان با توجه به شرایط مرزی و شرایط اولیه و خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از روشهای عددی مانند اجزای محدود<sup>۳</sup> یا تفاضلهای محدود<sup>۴</sup> به یکسری معادله جبری همزمان تبدیل شده و این معادلات مستقیماً وارد مدل بهینه‌سازی می‌شوند. ویلس<sup>۵</sup> و یه<sup>۶</sup> در سال ۱۹۸۷ مثالهای متعددی از کاربرد این روش را در مسائل بهینه‌سازی سیستم‌های آب زیرزمینی ارائه نموده‌اند [۲۱]. در مسائل واقعی، تعداد قیدها و معادلات در این روش به اندازه‌ای زیاد می‌شود که عملاً حل آن با نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای متعارف امکان‌پذیر نیست. از طرفی ممکن است برخی قیدها به فرم غیرخطی باشند که این خود بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید.

روش ماتریس پاسخ واحد ابتدا در بهره‌برداری از حوضه‌های نفتی مورد استفاده قرار گرفت [۲۲]. مداک در سال ۱۹۷۲ برای نخستین بار از این روش برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم آب زیرزمینی استفاده نمود. این روش سپس توسط مورل-سیتو دالی در سال ۱۹۷۵ به سیستم‌های تلفیقی توسعه پیدا کرد. به علاوه حیدری در سال ۱۹۸۲ و یازیسگیل<sup>۷</sup> در سال ۱۹۹۰ این روش را به منظور استفاده در مسائل واقعی بهره‌برداری از سیستم آبهای زیرزمینی بسط دادند [۲۳ و ۲۴]. در این روش معادله جریان در محیط متخلخل به یک تابع خطی تبدیل می‌شود. معادله دیفرانسیلی جریان سه بعدی در محیط متخلخل به شکل زیر است:

<sup>1</sup> Aguado

<sup>2</sup> Remson

<sup>3</sup> Finite Elements

<sup>4</sup> Finite Differences

<sup>5</sup> Willis

<sup>6</sup> Yeh

<sup>7</sup> Yazicigil

<sup>8</sup> Green Function

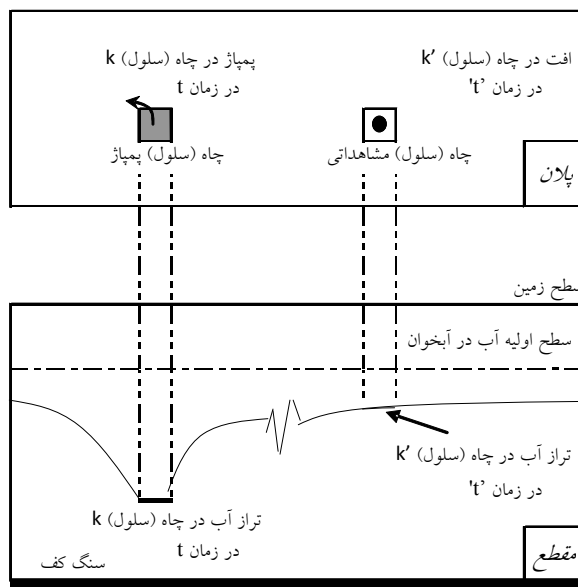
در سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده<sup>۴</sup> در سالهای ۱۹۸۴، ۱۹۸۶ و ۱۹۸۸ تهیه گردید [۲۵]. در سالهای اخیر سازمان‌های مختلف ویرایش‌های تحت ویندوز این نرم‌افزار را ارائه نموده‌اند. در این مطالعه مجموعه نرم‌افزاری Visual MODFLOW از شرکت هیدروژئولوژی واترلو<sup>۵</sup> مورد استفاده قرار گرفت [۲۶].

## ۲-۲- منطقه مورد مطالعه

بهررود یکی از رودخانه‌های حوضه دریاچه نمک است. این رودخانه از شرق زنجان سرچشمه گرفته و با گذر از سلطانیه و صائین قلعه وارد شهرهای خرمدره و ابهر شده و پس از عبور از روستای قروه در پایین‌دست آن به دشت تاکستان وارد می‌شود [۲۷]. شکل ۲ حوضه آبریز ابهر که بخشی از حوضه اصلی دریاچه نمک است را همراه با محدوده دشت و نیز محدوده بیلان که بخش عمده چاهها و مصارف در آن قرار دارد، نمایش می‌دهد. رودخانه کینه‌ورس مهم‌ترین شاخه فرعی این رودخانه است و سد کینه‌ورس با هدف اصلی تأمین آب شرب شهرهای خرمدره و ابهر و آبیاری اراضی پایاب سد، بر روی این شاخه احداث شده است [۲۸ و ۲۹]. سیستم آب زیرزمینی دشت ابهر (آبخوان ابهر) یک سیستم کاملاً ناهمگن است به گونه‌ای که آزمایش‌های پمپاژ انجام شده بر روی ۴ چاه اکتشافی بیانگر تغییرات ضریب ذخیره S از ۰/۰۰۸ تا ۰/۳ و تغییرات هدایت هیدرولیکی K از ۴/۵ تا ۱۰۸ متر در روز بود [۳۰].

با احداث سد کینه‌ورس یک منبع آبی مناسب برای تأمین مطمئن‌تر نیازها فراهم شده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پس از احداث سد در درازمدت، ۵۷ درصد نیاز شهری و ۲۴ درصد نیاز کشاورزی پایاب از این منبع تأمین خواهد شد [۳۱]. به‌طور کلی تعداد ۵۸۰ چاه فعال در محدوده بیلان وجود دارد که از این میزان ۵۵ چاه دارای مصرف شهری، ۱۴ چاه دارای مصرف صنعتی، ۴۶۲ چاه دارای مصرف کشاورزی و ۴۹ چاه دو منظوره (کشاورزی و شهری یا کشاورزی و صنعتی) هستند. براین اساس، سالانه ۲۴/۰۸ میلیون مترمکعب از چاههای شرب، ۱/۱۶ میلیون مترمکعب از چاههای صنعتی، ۱۹۲/۲۱ میلیون مترمکعب از چاههای کشاورزی و ۶/۰۹ میلیون مترمکعب از چاههای دو منظوره و در مجموع ۲۲۳/۵۴ میلیون مترمکعب از طریق کلیه چاهها، تخلیه صورت می‌گیرد. به‌منظور تعیین موقعیت، میزان برداشت، ظرفیت و توزیع ماهانه برداشت چاههای پمپاژ محدوده مطالعات، از نتایج مربوط به آماربرداری سال ۱۳۸۲ محدوده دشت استفاده گردید [۳۰].

می‌دهند، تولید می‌گردد. در مرحله بعد این ضرایب در قالب رابطه ماتریس پاسخ واحد در مدل بهینه‌سازی، به‌صورت مجموعه‌ای از قیدها وارد می‌شوند. برای تولید ضرایب پاسخ واحد لازم است از یک مدل شبیه‌سازی پارامتر گسترده استفاده گردد. در واقع مدل شبیه‌سازی ابتدا با استفاده از داده‌های میدانی، کالیبره شده و سپس از آن برای تولید این ضرایب استفاده می‌گردد.



شکل ۱- مفهوم ضریب پاسخ واحد

روش عمل به این ترتیب است که هر بار یک چاه، فعال شده و یک دبی واحد مثلاً ۱۰۰۰۰ مترمکعب در روز برای دوره زمانی نخست مثلاً ماه اول برای آن در نظر گرفته می‌شود. دبی واحد در دوره اول تحریک<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. پس از اعمال این دبی در چاه مورد نظر، مدل شبیه‌سازی اجرا می‌شود و اثر این تحریک که به‌صورت افت در همان سلول و سلول‌های دیگر در انتهای همان دوره و دوره‌های دیگر است، ثبت می‌گردد. این ارقام، ضرایب ماتریس تحریک واحد سلول مورد نظر را تشکیل می‌دهند. این فرایند باید برای کلیه سلول‌هایی که در آنها چاه پمپاژ وجود دارد تکرار شده و ماتریس‌های تحریک تمامی سلول‌های فعال محاسبه گردند. بدیهی است، هنگام محاسبه این ضرایب باید اثر روند تغییرات طبیعی آبخوان یعنی شرایط بدون پمپاژ مورد توجه قرار گیرد. سپس ماتریس پاسخ هر چاه از ماتریس‌های تحریک محاسبه شده، به‌دست می‌آید.

در این مطالعه از نرم‌افزار MODFLOW برای شبیه‌سازی سیستم استفاده گردید. این نرم‌افزار ابتدا توسط مکدونالد<sup>۲</sup> و هاربو<sup>۳</sup>

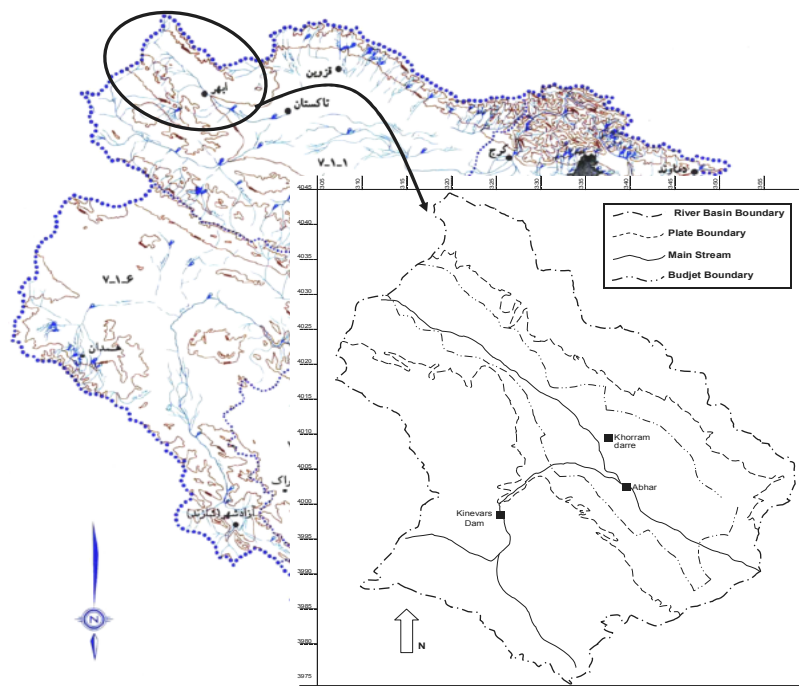
<sup>3</sup> Harbough

<sup>4</sup> United States Geological Survey (USGS)

<sup>5</sup> Waterloo Hydrogeologic Inc.

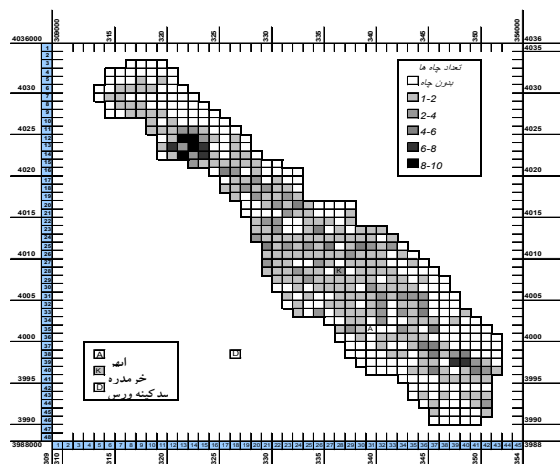
<sup>1</sup> Excitation

<sup>2</sup> McDonald



شکل ۲- حوضه آبریز رودخانه ابهر، محدوده دشت و محدوده بیلان

آمدند و با داده‌های آماربرداری متفاوت بودند. اطلاعات نادرست که ممکن است توسط مالکین چاهها در هنگام بهره‌برداری ارائه شده باشد، وجود چاههایی که دارای مجوز نیستند و وجود منابع تغذیه‌کننده و تخلیه‌کننده ناشناخته می‌تواند دلیل این اختلاف باشد. با توجه به اینکه داده‌های مدل شبیه‌سازی براساس میزان افت مشاهداتی تراز آب زیرزمینی دشت محاسبه گردیده‌اند، لذا این داده‌ها به‌عنوان مبنا مورد استفاده قرار گرفتند. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره که از کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی حاصل گردیدند را در محدوده مدل نمایش می‌دهد [۳۲].



شکل ۳- شبکه مدل و تعداد چاههای واقع هر سلول از محدوده شبکه

### ۲-۳- مدل‌های بهینه‌سازی

برای آماده‌سازی داده‌های ورودی مدل بهینه‌سازی، لازم است ابتدا محدوده بیلان شبکه‌بندی شده و چاهها در محدوده شبکه‌بندی مشخص گردد. به عبارتی باید مشخص شود که کدام چاه یا چاهها در کدام سلول شبکه قرار دارند. شکل ۳ شبکه‌بندی مدل و تعداد چاههای واقع در سلول‌های شبکه را نشان می‌دهد. به‌طور کلی مجموعاً تعداد ۲۶۸ سلول فعال در محدوده مدل وجود دارد. تعداد چاهها در شبکه دشت از یک تا ده متغیر است. مشخصات عمومی سلول‌های مورد مطالعه عبارت است از: مختصات جغرافیایی سلول، تراز سطح زمین در سلول مورد نظر، میانگین عمق چاههای موجود در سلول، تعداد چاههای موجود در سلول، نوع نیاز سلول (با توجه به اینکه ممکن است چند چاه در یک سلول وجود داشته باشند، لذا سلول‌هایی با نیاز مرکب وجود خواهد داشت)، ظرفیت سلول (که برابر است با مجموع ظرفیت چاههای موجود در سلول)، مجموع ساعات کارکرد سالانه سلول (که برابر است با میانگین ساعات کارکرد چاههای سلول) و تخلیه سالانه (که برابر با مجموع تخلیه چاههای هر سلول). تمامی این داده‌ها برای تمام سلول‌های مدل استخراج گردید [۳۱].

گام بعدی، شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل و تولید ضرایب پاسخ سیستم است. در فرایند شبیه‌سازی براساس کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، مقادیر تخلیه سلول‌های شبکه آبخوان تدقیق گردیدند. این مقادیر بر اساس نتایج مدل شبیه‌سازی به‌دست

تابع هدف عبارت است از حداقل سازی مجموع افت در تمام سلول ها و در تمام دوره های زمانی

$$\min Z = \sum_{k=1}^{NW} \sum_{n=1}^N s_W(k, n) \quad (4)$$

محدودیت های مدل عبارت اند از:

الف- محدودیت دبی پمپاژ شده از سلول ها

$$\sum_{k=1}^{NW} \sum_{n=1}^N Q_w(k, n) = \sum_{k=1}^{NW} \sum_{n=1}^N Q_w^0(k, n) \quad (5)$$

ب- محدودیت حد پایین و بالای پمپاژ از هر سلول

$$Q_w^{\min}(k, n) \leq Q_w(k, n) \leq Q_w^{\max}(k, n); \quad \forall k, \forall n \quad (6)$$

که در این روابط

$Q_w(k, n)$  و  $Q_w^0(k, n)$  به ترتیب دبی پمپاژ از سلول  $k$  در دوره زمانی  $n$  در مدل های شبیه سازی و بهینه سازی و  $Q_w^{\min}(k, n)$  و  $Q_w^{\max}(k, n)$  به ترتیب حداقل و حداکثر برداشت مجاز از سلول  $k$  در دوره  $n$  است. مقادیر حداقل و حداکثر برداشت مجاز به ترتیب برابر  $0/8$  و  $1/2$  برابر برداشت فعلی انتخاب گردیدند. به عبارتی فرض شد که  $80$  درصد برداشت با الگوی فعلی حفظ گردد و نیز در هر سلول، سطح توسعه بتواند تا  $20$  درصد افزایش یابد. گرچه این مقادیر محدودیت زیادی برای مدل ایجاد نمود اما با توجه به وضعیت منطقه و مذاکره با مسئولان محلی، تغییرات بیش از این مقدار، واقع بینانه نبود. به هر حال برای تعیین دقیق این مقادیر لازم است مطالعات کشاورزی از لحاظ خاک شناسی، تعیین الگوی کشت بهینه و سطح اراضی قابل کشت، انجام گردد. بدیهی است هر قدر دامنه تغییرات این ضرایب بیشتر باشد، اختلاف نتایج مدل شبیه سازی و مدل بهینه سازی بیشتر خواهد بود.

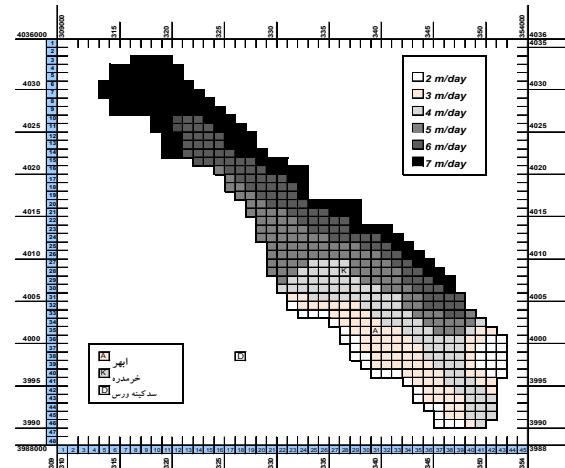
پ- محاسبه افت و محدودیت افت تراز در سلول ها

$$s_W(k, n) = \sum_{j=1}^{NW} \sum_{t=1}^N \beta(k, j, n-t+1) \cdot Q_w(j, t) \quad (7)$$

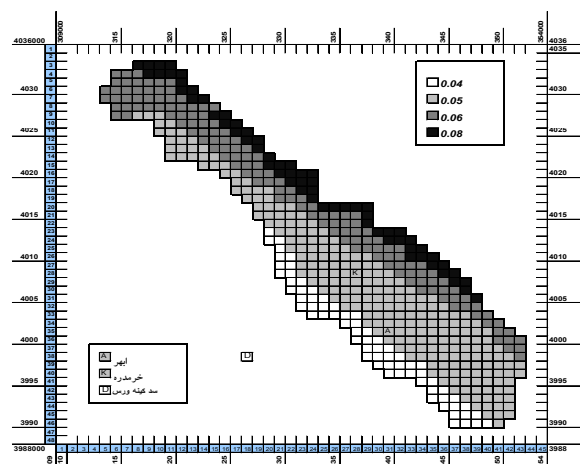
$$s_W(k, n) \leq s_W^{\max}(k); \quad \forall k, \forall n \quad (8)$$

که در این روابط

$s_W(k, n)$  مقدار افت تراز آب در سلول  $k$  در انتهای دوره زمانی  $n$ ،  $Q_w(j, t)$  مقدار پمپاژ از سلول  $j$  در دوره زمانی  $t$ ،  $\beta(k, j, n-t+1)$  ضریب پاسخ واحد چاه  $k$  در اثر پمپاژ چاه  $j$ ، زانندیس سلول،  $NW$  مجموعه کل سلول های فعال شبکه ( $268$  سلول) و  $s_W^{\max}(k)$  حداکثر افت مجاز سلول است.  $s_W^{\max}(k)$  معادل حداکثر افت محاسبه شده در مدل شبیه سازی یعنی برابر  $17$  متر منظور شد. باید توجه شود که در فرمول بندی حاصل، اثر جریان های برگشتی سلول ها در نظر گرفته



شکل ۴- تغییرات هدایت هیدرولیکی در محدوده مدل



شکل ۵- تغییرات ضریب ذخیره در محدوده مدل

### ۲-۳-۱- مدل بهینه سازی بهره برداری آب زیرزمینی (مدل GWOpt)

با توجه به محدود بودن منابع آب سطحی حوضه ابهر، ابتدا بهینه سازی بهره برداری از آب های زیرزمینی به تنهایی مورد توجه قرار گرفت. در این مدل لازم بود ضرایب پاسخ واحد سلول های شبکه با استفاده از مدل شبیه سازی MODFLOW تولید و سپس مدل بهینه سازی اجرا شود. برای تولید ماتریس های پاسخ هر یک از سلول های سیستم (شبکه)، لازم بود مدل شبیه سازی به تعداد سلول های فعال شبکه که در اینجا  $268$  سلول بود، اجرا گردد و ضرایب حاصل، از فایل خروجی آن استخراج شود. ماتریس حاصل برای هر سلول، یک ماتریس  $12 \times 268$  با  $3216$  المان بود و در مجموع  $268$  ماتریس حاصل شد. در این مدل، بهره برداری از آبخوان با هدف حداقل سازی مجموع افت در محدوده شبکه دشت ابهر مورد توجه قرار گرفت. در این راستا لازم بود نیازهای آبی دشت تأمین گردند. فرمول بندی مدل در ادامه ارائه شده است [۳۱]:

$$S(1) = S^0(1) \quad (16)$$

$$S_{\min} \leq S(n) \leq S_{\max} \quad ; \quad \forall n \quad (17)$$

$$A(n) = a_0 + a_1.S(n) \quad (18)$$

$$E(n) = \left( \frac{A(n) + A(n+1)}{2000} \right) \times e(n) \quad (19)$$

$$SP(n) \leq Z(n).M \quad (20)$$

$$Z(n) = \frac{S(n+1)}{S_{\max}} \quad (21)$$

Z(n) is a binary (0,1) variable

که در این روابط

S(n) و S(n+1) به ترتیب حجم ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره n، Q<sup>S</sup>(n) حجم جریان ورودی به مخزن سد در دوره n، R<sub>d</sub><sup>S</sup>(n) حجم جریان خروجی مخزن برای مصارف شهرهای ابهر و خرمدره در دوره n، R<sub>f</sub><sup>S</sup>(n) حجم جریان خروجی مخزن برای مصارف کشاورزی پایاب سد در دوره n، R<sub>e</sub><sup>S</sup>(n) حجم جریان خروجی مخزن برای نیازهای زیست محیطی پایاب در دوره n، E(n) حجم تبخیر از سطح مخزن در دوره n، SP(n) حجم سرریز از مخزن در دوره n، S<sup>0</sup>(1) حجم ذخیره مخزن در شروع بهره برداری، S<sub>max</sub> حجم ذخیره حداکثر مخزن، S<sub>min</sub> حجم ذخیره حداقل مخزن، A(n) سطح مخزن در ابتدای دوره n بر حسب کیلومتر مربع، a<sub>1</sub> و a<sub>0</sub> ضرایب رابطه خطی بین حجم و سطح مخزن، e(n) ارتفاع تبخیر از سطح آزاد آب مخزن در دوره n (میلی متر)، Z(n) متغیر باینری (صفر و یک) و M یک عدد خیلی بزرگ مثلاً 10<sup>10</sup> است. لازم به توضیح است که تمامی حجمها بر حسب میلیون مترمکعب است.

رابطه ۱۵، رابطه توازن جرمی مخزن سد است. رابطه ۱۶ شرایط آغازین را مشخص می نماید. رابطه ۱۷ حجم ذخیره بین احجام حداقل و حداکثر آن که برای مخزن سد کینه ورس به ترتیب معادل ۲/۱ و ۱۶/۰۴ میلیون مترمکعب است را محدود می نماید. در رابطه ۱۸ سطح مخزن متنظر با حجم آن محاسبه می شود. برای تعیین این سطح، بین سطح و حجم مخزن با استفاده از ارقام منحنی سطح - حجم - ارتفاع مخزن، یک رابطه خطی به صورت زیر برقرار شد:

$$(22)$$

$$A(n) = 0.2407 + 0.052.S(n) \quad ; \quad R^2 = 0.995$$

در ادامه با استفاده از رابطه ۱۹، حجم تبخیر از سطح مخزن در طی دوره n محاسبه شد. روابط ۲۰ و ۲۱ برای کنترل عدم سرریز از مخزن در مواقعی که مخزن نبود، استفاده شد.

شد. به عبارتی مقدار Q<sub>w</sub>(k,n) سلولها، مقدار خالص آنها بود. مقدار جریانهای برگشتی سلولها بسته به نوع نیاز آنها متغیر است. این میزان براساس مطالعات هیدروژئولوژی برای سلولهای کشاورزی ۲۲ درصد، شهری ۵۰ درصد و صنعتی ۳۰ درصد منظور گردیده است.

ت- محدودیت تأمین نیازهای شهری و صنعتی:

در مورد سلولهایی که آب آنها برای مصارف شهری یا صنعتی پمپاژ می شود، لازم است که نیاز تعهد شده تأمین گردد، لذا:

$$Q_w(k, n) \geq Q_w^0(k, n); \forall k, \forall n; \quad k \in \{MU\}, \{IN\} \quad (9)$$

که در این رابطه

Q<sub>w</sub><sup>0</sup>(k, n) نیاز تعهد شده سلول k در دوره زمانی n و {MU} و {IN} به ترتیب مجموعه چاههای (سلولهای) با نیاز شهری و صنعتی در شبکه دشت است.

۲-۳-۲- مدل بهینه سازی بهره برداری تلفیقی (مدل CONJ)

مدل بهینه سازی بهره برداری تلفیقی از آبهای سطحی و زیرزمینی، با هدف حداقل سازی میزان افت در سراسر آبخوان ارائه شد. در این مدل سد کینه ورس نیز به سیستم اضافه گردید. فرمول بندی مدل در ادامه آمده است:

تابع هدف، مدل حداقل سازی میزان افت در سراسر آبخوان است:

$$\min Z = \sum_{k=1}^{NW} \sum_{n=1}^N s_w(k, n) \quad (10)$$

محدودیت های مدل عبارتند از:

الف- ثابت ماندن برداشت کل از محدوده شبکه و حدود بالا و پایین پمپاژ از سلولها

$$\sum_{k=1}^{NW} \sum_{n=1}^N Q_w(k, n) = \sum_{K=1}^{NW} \sum_{n=1}^N Q_w^0(k, n) \quad (11)$$

$$Q_w^{\min}(k, n) \leq Q_w(k, n) \leq Q_w^{\max}(k, n); \forall k, \forall n \quad (12)$$

ب- محدودیت های افت تراز سلولها

$$s_w(k, n) = \sum_{j=1}^{NW} \sum_{t=1}^N \beta(k, j, n-t+1).Q_w(j, t) \quad (13)$$

$$s_w(k, n) \leq Q_w^{\max}(k) \quad (14)$$

پ- بالانس آب در مخزن سد

$$(15)$$

$$S(n+1) = S(n) + Q^s(n) - R_d^s(n) - R_f^s(n) - R_e^s(n) - E(n) - SP(n)$$

ت- تأمین نیاز شهرهای ابهر و خرمدره

(۲۳)

$$R_d^s(n) + \sum_k Q_w(k, n) \geq D_{ab}(n) + D_{kh}(n) \quad k \in \{UAK\}$$

که در این رابطه

{UAK} مجموعه چاههایی (سلول‌ها) است که از آب آنها برای تأمین نیاز شهرهای ابهر و خرمدره استفاده می‌شود،  $D_{ab}(n)$  و  $D_{kh}(n)$  نیز به ترتیب نیاز شهرهای ابهر و خرمدره در طی دوره زمانی n است.

(۲۴)

$$R_f^s(n) + \sum_k Q_w(k, n) \geq Dagkin(n) \quad k \in \{AgKin\}$$

که در این رابطه

{AgKin} مجموعه چاههایی (سلول‌هایی) است که از آب آنها برای تأمین نیاز کشاورزی دشت پایاب سد کینه‌ورس استفاده می‌شود.

ج- جریان سطحی خروجی حوضه

$$Q_{qor}(n) = Q_{qor}^0(n) - Q^s(n) + R_e^s(n) + SP(n) \quad (25)$$

که در این رابطه

$Q_{qor}(n)$  حجم جریان در خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری قروه) در طی دوره n، و  $Q_{qor}^0(n)$  حجم جریان در خروجی حوضه در شرایط عدم احداث سد است. مقدار  $Q_{qor}^0(n)$  با توجه به اطلاعات اندازه‌گیری ماهانه و ارتباط آن با ایستگاه هیدرومتری کینه‌ورس به دست آمد.

با بررسی مقادیر تخصیص یافته خروجی مخزن به نیازهای شهری و کشاورزی، ملاحظه گردید که در طی دوره بهره‌برداری، عمده خروجی مخزن به نیاز کشاورزی اختصاص یافته است و نیاز شهری عمدتاً از چاهها تأمین شده است. علت این امر آن است که هیچ قیدی برای اولویت دادن تأمین نیازها در مدل وارد نگردید، لذا مدل با توجه به تابع هدف آن، به گونه‌ای عمل نمود که افتها را حداقل نماید. این هدف با کاهش برداشت از چاههای کشاورزی محدوده دشت پایاب سد کینه‌ورس حاصل شد. برای وارد نمودن اولویت تأمین نیازهای زیست‌محیطی، شهری و کشاورزی دو راه حل موجود بود: راه حل اول حل مکرر مدل بهینه‌سازی بود به گونه‌ای که در بار اول فقط تأمین نیازهای شهری از مخزن در قیدها وارد گردد. پس از حل مدل و تعیین مقادیر  $R_d^s(n)$ ، این مقادیر به صورت معلوم به مدل داده شده و بار دیگر مدل با قید تأمین نیاز زیست‌محیطی اجرا می‌گردد. با معلوم شدن مقادیر  $R_e^s(n)$ ، به طور مشابه مدل برای تأمین مقادیر  $R_f^s(n)$

اجرا می‌گردد. این روش را روش برنامه‌ریزی اولویت‌دار گویند. این روش گرچه یک راه حل منطقی است اما اجرای آن مستلزم تکرارهای متوالی حل مدل بهینه‌سازی است. به علاوه ممکن است برخی قیدها کاملاً ارضا نگردد. مثلاً پس از تخصیص تأمین نیازهای شهری، نیاز زیست‌محیطی ممکن است به طور کامل تأمین نشود، لذا حل مدل با مشکل مواجه خواهد شد.

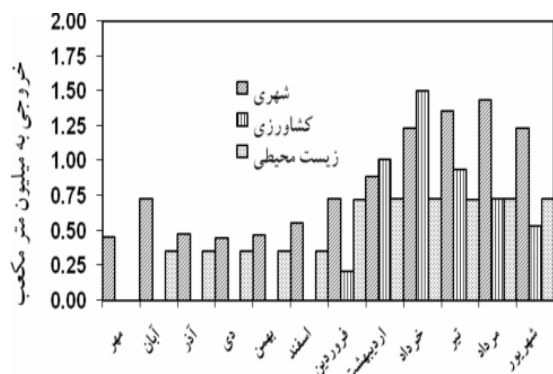
راه حل دیگری که در این مورد به کار گرفته شد تهیه منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن با استفاده از مدل آبدهی<sup>۱</sup> و نیز لحاظ نمودن نتایج مدل آب زیرزمینی در داخل آن بود [۳۳]. در ادامه براساس منحنی فرمان حاصل، مقادیر تخصیص‌های مخزن به نیازهای شهری، زیست‌محیطی و کشاورزی مشخص شد. این مقادیر در ادامه به صورت پارامترهای معلوم در مدل بهینه‌سازی تلفیقی وارد شدند. بدیهی است مخزن سد به تنهایی برای تأمین نیازهای شهری و کشاورزی کافی نیست، لذا باقیمانده نیازها، طبق روابط ۲۳ و ۲۴ از آب زیرزمینی تأمین خواهند شد. این رویه دارای مزیت‌های متعددی به صورت زیر است: اول آنکه مدل بهره‌برداری از مخزن دارای یک سیاست بلندمدت است که در آن، جیره‌بندی آب مخزن به خاطر خاصیت مدل آبدهی و تابع هدف آن، وجود دارد. دوم آنکه این رویه با هدف مدل تلفیقی که حداقل سازی افت تراز آبخوان است نیز سازگار است زیرا برای تأمین نیازها، ابتدا آب مخزن استفاده می‌شود، سپس کمبود آنها از آب زیرزمینی تأمین می‌گردد، لذا برداشت از آب زیرزمینی حداقل خواهد شد. بهر حال نظر به اختلاف افق زمانی مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از آب سطحی و بهره‌برداری از آب زیرزمینی، استفاده از این رویه گریزناپذیر است. شکل ۶ منحنی فرمان بهره‌برداری بهینه از مخزن سد را به منظور تأمین نیاز پایاب نمایش می‌دهد.

### ۳- نرم افزار مدل بهره‌برداری تلفیقی

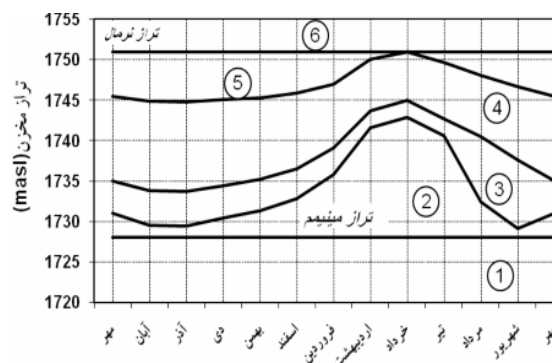
براساس آمار و اطلاعات دشت ابهر و نیز مدل بهره‌برداری تلفیقی (CONJ)، یک نرم افزار کاربر دوست برای مدیریت داده‌ها، استفاده عملی از نتایج مطالعات و امکان ایجاد تغییرات مورد نیاز در آن و همچنین به روز رسانی اطلاعات، تهیه گردید. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌های مدیریت پروژه، مدیریت داده‌ها، مدیریت مدل، مدیریت نمایش، برنامه‌ها یا مدل‌ها و راهنما بود و امکان استفاده از آن به عنوان یک سیستم تصمیم یار به منظور بهره‌برداری تلفیقی حوضه ابهر وجود داشت. شکل ۷ فضای نرم‌افزار را نشان می‌دهد. دسترسی به این نرم‌افزار از طریق سازمان آب منطقه‌ای تهران امکان‌پذیر است [۳۴].

<sup>1</sup> Yield Model





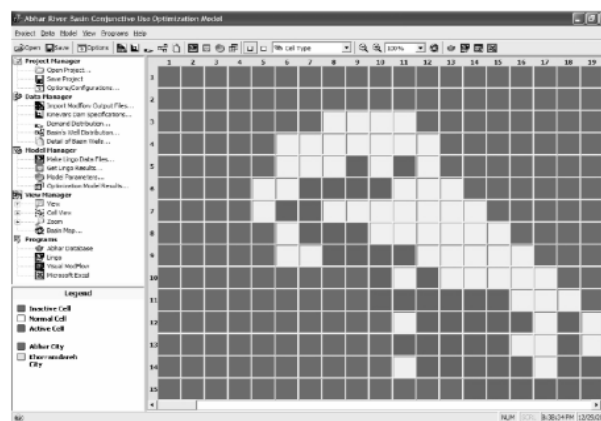
شکل ۸- مقادیر خروجی از مخزن سد کینه ورس برای نیازهای مختلف در سال ۸۰-۸۱



شکل ۶- منحنی فرمان بهره‌برداری از مخزن سد کینه ورس

یک از نیازهای شهری و کشاورزی نشان می‌دهد. براساس این مقادیر ملاحظه می‌گردد که از مجموع ۱۷/۴ میلیون مترمکعب نیاز سالانه شهرهای ابهر و خرمدره، ۱۰/۰ میلیون مترمکعب آن یعنی ۵۷/۴ درصد از طریق سد کینه‌ورس و ۷/۴ میلیون مترمکعب آن یعنی ۴۲/۶ درصد از طریق آب زیرزمینی تأمین شده است. از طرفی از مجموع ۱۹ میلیون مترمکعب نیاز اراضی پایاب کینه‌ورس، ۴/۹۲ میلیون مترمکعب آن یعنی ۲۶ درصد از مخزن سد کینه‌ورس و ۱۴/۰۸ میلیون مترمکعب آن که معادل ۷۴ درصد بود از طریق آب زیرزمینی تأمین شده است. علت پایین‌تر بودن سهم کشاورزی پایاب از سد کینه‌ورس نیاز نسبتاً بالای زیست محیطی است که برای پایاب سد در نظر گرفته شده است.

شکل ۹ پراکنندگی مکانی افت تراز آبخوان براساس نتایج مدل بهینه‌سازی تلفیقی (CONJ) در انتهای شهریور ماه را نمایش می‌دهد. میزان افت تراز میانگین در تمام سلول‌ها و در تمام ماهها در مدل تلفیقی برابر ۲/۰۸۷ متر حاصل شد که از افت میانگین مدل GWopt که برابر ۲/۱۱ متر بود، کمتر است. به عبارتی می‌توان گفت میزان افت مدل تلفیقی کمتر از مدل بهینه‌سازی آب زیرزمینی بود. به این ترتیب در مقایسه با مدل شبیه‌سازی، در مجموع ۶ درصد کاهش افت وجود داشت. علت این امر آن است که اولاً با توجه به فرمول‌بندی ارائه شده، امکان تغییرات محدودی در میزان پمپاژ سلول‌ها وجود داشت (±۲۰ درصد) و لذا تغییرات افت نیز محدود بود. ثانیاً با توجه به تابع هدف مدل، میزان کاهش افت بیشتر در مقادیر حدی (ماکسیمم) بود. این وضعیت را می‌توان در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده کرد. در شکل ۱۰ تغییرات افت تراز میانگین در سلول‌های شبکه در دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ارائه گردیده است. ملاحظه می‌گردد که مدل شبیه‌سازی دارای مقادیر افت ماکسیمم (پیک‌ها در شکل) بیشتری نسبت به مدل بهینه‌سازی است. همچنین در شکل ۱۱ تغییرات افت ماکسیمم



شکل ۷- صفحه اصلی نرم افزار بهره‌برداری تلفیقی به‌عنوان یک سیستم تصمیم یار

#### ۴- نتایج و بحث

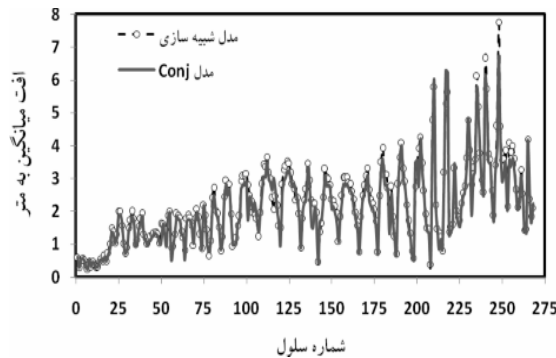
مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از اطلاعات دشت ابهر و سد کینه ورس اجرا گردید (روابط ۱۰ تا ۲۵). نتیجه اجرای اولیه مدل حاکی از کاهش افت تراز آبخوان به میزان مشابه در دو مدل GWopt و CONJ بود. علت این امر کم بودن حجم جریان سطحی در مقایسه با حجم جریان آب زیرزمینی است (حجم جریان سطحی ورودی به مخزن حدود ۱۰ درصد حجم برداشت از آبخوان بود). لذا در ادامه نتایج مدل تلفیقی CONJ ارائه گردید.

شکل ۸ مقادیر خروجی از مخزن برای نیازهای مختلف شهری، زیست محیطی و کشاورزی در سال ۸۰-۸۱ که از شبیه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد کینه ورس با استفاده از منحنی فرمان شکل ۶ حاصل گردیده است را نشان می‌دهد. چنانچه ذکر گردید از این مقادیر در مدل بهینه‌سازی استفاده شد.

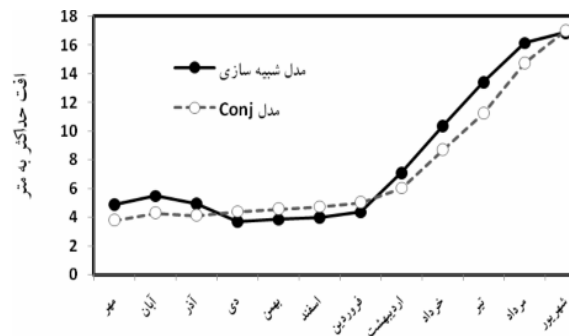
با حل مدل بهینه‌سازی، مقادیر پمپاژ بهینه و افت تراز حاصل در هر یک از سلول‌های شبکه در ماههای مختلف، حاصل می‌گردد. جدول ۱ مقادیر تخصیص آبهای سطحی و زیرزمینی را به هر

جدول ۱- مقادیر تخصیص آبهای سطحی و زیرزمینی به نیازهای شهری و کشاورزی پایاب سد کینه ورس

ماه	شهری				کشاورزی			
	تقاضا		تخصیص		تقاضا		تخصیص	
	آبهر	خرمدره	جمع	سد کینه ورس	آب زیرزمینی	دشت کینه ورس	سد کینه ورس	آب زیرزمینی
مهر	۰/۷۹	۰/۶۴	۱/۴۳	۰/۴۵	۰/۹۸	۰/۶۸	۰/۰۰	۰/۶۸
آبان	۰/۶۷	۰/۵۵	۱/۲۲	۰/۷۳	۰/۴۹	۰/۱۹	۰/۰۰	۰/۱۹
آذر	۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۸۰	۰/۴۸	۰/۳۲	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۱۴
دی	۰/۴۱	۰/۳۴	۰/۷۵	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
بهمن	۰/۴۳	۰/۳۵	۰/۷۸	۰/۴۷	۰/۳۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
اسفند	۰/۵۱	۰/۴۱	۰/۹۲	۰/۵۵	۰/۳۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
فروردین	۰/۶۷	۰/۵۵	۱/۲۲	۰/۷۳	۰/۴۹	۰/۷۶	۰/۲۱	۰/۵۵
اردیبهشت	۰/۸۲	۰/۶۶	۱/۴۸	۰/۸۸	۰/۶۰	۳/۶۹	۱/۰۱	۲/۶۸
خرداد	۱/۱۴	۰/۹۳	۲/۰۷	۱/۲۴	۰/۸۳	۵/۵۰	۱/۵۰	۴/۰۰
تیر	۱/۲۵	۱/۰۲	۲/۲۷	۱/۳۶	۰/۹۲	۳/۴۴	۰/۹۴	۲/۵۰
مرداد	۱/۳۲	۱/۰۸	۲/۴۰	۱/۴۲	۰/۹۷	۲/۶۵	۰/۷۳	۱/۹۲
شهریور	۱/۱۴	۰/۹۳	۲/۰۷	۱/۲۴	۰/۸۳	۱/۹۵	۰/۵۳	۱/۴۲
سالانه	۹/۶۰	۷/۸۰	۱۷/۴۰	۹/۹۹	۷/۴۱	۱۹/۰۰	۴/۹۲	۱۴/۰۸
درصد				۵۷/۵۱	۴۲/۵۹	۳۷/۳۲	۲۵/۸۹	۲۴/۱۱

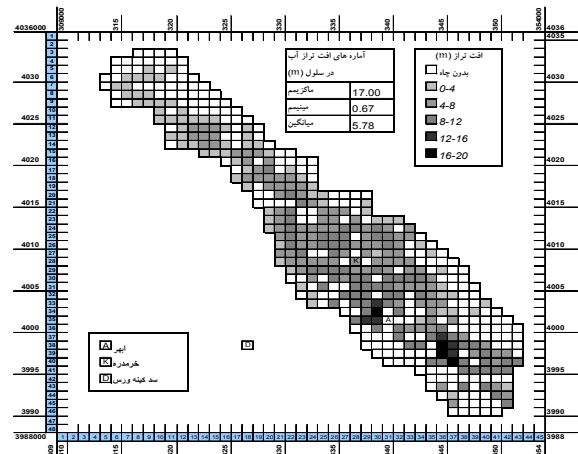


شکل ۱۰- تغییرات افت تراز میانگین در سلولهای شبکه در مدل های شبیه سازی و بهینه سازی



شکل ۱۱- تغییرات افت ماکزیم ماهانه در سلولهای شبکه در مدل های شبیه سازی و بهینه سازی

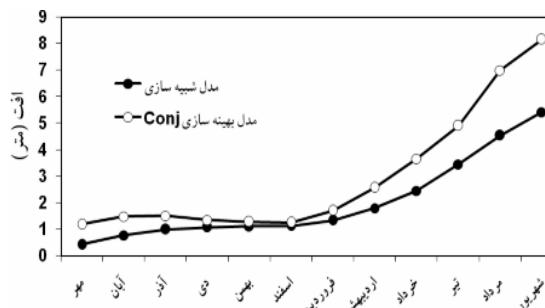
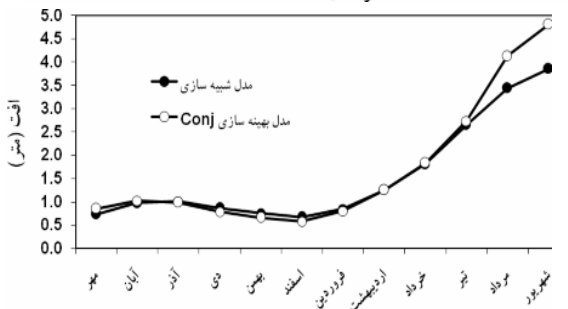
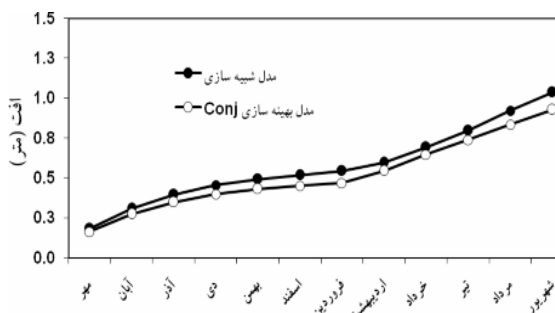
شکلهای ۱۲ و ۱۳ به ترتیب میزان پمپاژ و افت تراز را در طی دوره یک ساله در سه سلول شبکه به عنوان نمونه نمایش می دهند.



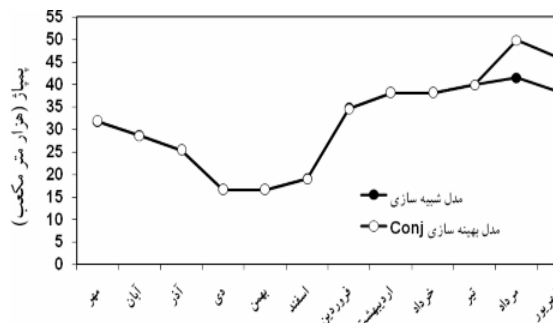
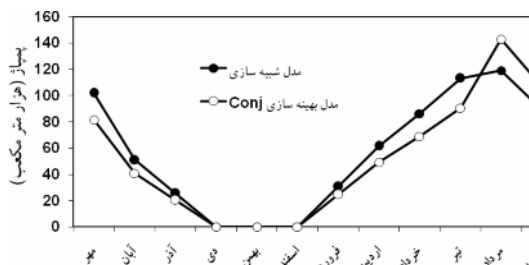
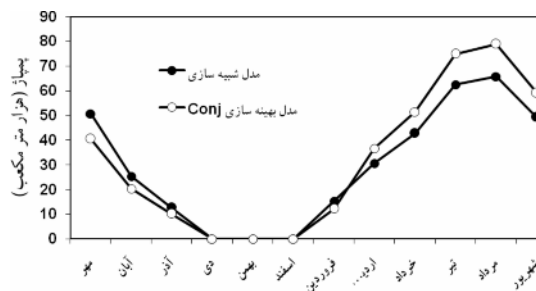
شکل ۹- پراکنده مکانی افت تراز سلولهای شبکه براساس نتایج مدل بهینه سازی تلفیقی در انتهای شهریورماه

ماهانه در سلولهای شبکه در دو مدل نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که در ماههایی که برداشت و لذا افت زیاد است (اردیبهشت تا شهریور)، این میزان در مدل شبیه سازی به طور معنی داری بیشتر بوده است.

براساس مدل بهینه سازی تلفیقی توسعه یافته، مقادیر پمپاژ بهینه از سلولهای شبکه مدل حاصل گردید. بررسی نتایج حاکی از آن است که در برخی سلولها میزان پمپاژ افزایش و در برخی کاهش یافته و در معدودی از آنها نیز تغییرات اندکی حاصل گردیده است.



شکل ۱۳- تغییرات میزان افت تراز در سه سلول نمونه در مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی



شکل ۱۲- تغییرات میزان پمپاژ از سه سلول نمونه در مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بهینه‌سازی پارامترگسترده بهره‌برداری سیستم آب زیرزمینی و بهره‌برداری تلفیقی منابع آب ابهر ارائه شد. با توجه به اینکه در حال حاضر آبخوان ابهر با مشکل افت تراز آب مواجه است لذا تغییر شرایط فعلی الگوی برداشت از دشت و تطابق آن با شرایطی که از مدل بهره‌برداری تلفیقی (CONJ) حاصل شده، ضروری به نظر می‌رسد. زیرا ادامه روند فعلی باعث افت بیش از پیش در آبخوان خواهد شد.

ملاحظه گردید که با توجه به نتایج مدل CONJ، مقدار افت در سراسر آبخوان کاهش می‌یابد. این در حالی است که نیازهای آب شرب و صنعت کاملاً تأمین می‌گردد. اشاره به این نکته ضروری است که مدل‌های بهینه‌سازی تحت تأثیر قیدهای محدود کننده زیر بودند که اولاً در پمپاژ چاههای شرب و صنعت، هیچ کاهشی صورت نگیرد، ثانیاً کاهش و افزایش مجاز در چاههای کشاورزی به میزان ۲۰ درصد وضع موجود باشد و بالاخره مجموع برداشت از کل دشت ثابت بماند. این قیدها به این خاطر در نظر گرفته شدند که

از نظر کاربردی و به‌طور واقعی نتایج مدل بهینه‌سازی قابل حصول باشد. به عبارتی این امکان وجود دارد که با تغییر ضرایب در مدل بهینه‌سازی به نتایج بسیار بهتری دست یافت. مثلاً چنانچه حد پایین پمپاژ از چاهها برابر صفر در نظر گرفته شود، افت متوسط چاهها ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت. اگر پمپاژ کل آبخوان نیز به ۸۰ درصد میزان فعلی کاهش داده شود، افت متوسط چاهها بیش از ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. به هر حال آنچه در این مقاله ارائه شد، تنها یک گزینه محتمل است. گزینه‌های دیگر بسته به شرایط آینده، می‌تواند تعریف و بررسی شوند و الگوی بهره‌برداری بهینه از دشت بر اساس آنها حاصل گردد.

## ۶- پیشنهادها

به منظور رسیدن به حداکثر کارایی و نظر به اینکه دشت ابهر، یک دشت کشاورزی است، لازم است مطالعات اقتصاد کشاورزی و خاک‌شناسی در محدوده حوضه آبریز انجام شود تا با تلفیق آن با

اطلاعات در طرحهای بهره‌برداری است. بررسی‌های حاضر نشان می‌دهد که شبکه پیزومتری دشت ابهر نیاز به بازسازی و ترمیم دارد، چرا که برخی از پیزومترها، مسدود شده و آمار ارائه شده آنها، تقریبی است. به علاوه لازم است یک ایستگاه هیدرومتری درجه یک به جای ایستگاه فعلی در ورودی سد کینه‌ورس و همچنین یک ایستگاه تبخیرسنجی کامل در سایت سد احداث گردد. تنها به مدد وجود اطلاعات کامل و دقیق است که می‌توان به نتیجه مطلوب در بهره‌برداری رسید.

نتایج حاصل از این مطالعات، نتیجه دقیق‌تری حاصل گردد. از طرفی بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که دره‌های ابهررود و زنجان‌رود از یک تشکیلات زمین‌شناسی برخوردارند و آبخوان واحدی را تشکیل می‌دهند، هرچند حوضه‌های آبریز آنها روی سطح زمین جدا از هم است. بنابراین برای تکمیل این تحقیقات و در نظر گرفتن ارتباط هیدرولیکی موجود بین دو آبخوان مذکور، مطالعات مشابهی را می‌توان در سطح این دو حوضه آبریز انجام داد. نکته مهم و اساسی که اشاره به آن لازم به نظر می‌رسد، اهمیت آمار و

## ۷- مراجع

- 1- Buras, N. (1967). "Conjunctive operation of dams and aquifers." *J. Hydraul. Div.*, 89 (6), 111-131.
- 2- Young, R. A., and Bredehoeft, J. D. (1972). "Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water system." *Water Resour. Res.*, 8 (3), 533-556.
- 3- Bredehoeft, J. D., and Young, R. A. (1983). "Conjunctive use of groundwater and surface water for irrigated agriculture: Risk aversion." *Water Resour. Res.*, 19 (5), 1111-1121.
- 4- Maddock, T. (1972). "Algebraic technological function from a simulation model." *Water Resour. Res.*, 8 (1), 129-134.
- 5- Morel-Seytoux, H. J. (1975). "A simple case of conjunctive surface-groundwater management." *J. of Groundwater*, 13(6), 506-515.
- 6- Morel-Seytoux, H. J., and Dally, C. J. (1975). "A discrete kernel generator for stream aquifer studies." *Water Resour. Res.*, 11 (2), 253-260.
- 7- Matsukawa, J., Finney, B. A., and Willis, R. (1990). "Conjunctive-use planning in mad river basin, California." *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 11 (2), 115-132.
- 8- Peralta, R. C., Contiller, R. A., and Terry, J. E. (1995). "Optimal large-scale conjunctive water-use planning: Case study." *J. Water Res. Plan. Manag.*, 121 (6), 471-478.
- 9- Richard, E. G. (1995). "Ground water-Surface water management with stochastic surface water supplies: Simulation-optimization approach." *Water Resour. Res.*, 31 (11), 2845-2865.
- 10- Lall, U. (1995). "Yield model for screening surface- and ground water development." *J. Water Res. Plan. Mang.*, 121 (1), 9-21.
- 11- 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.
- 12- Miller, S., and Labadie, J. (2003). "A decision support system for optimal planning of conjunctive use progress." *J. of American Water Resources Association*, 39(3), 517-528.
- 13- Alimohammadi, S. (2005). "Optimum design and planning of surface water and groundwater system-cyclic storage approach." Ph.D. Thesis in Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran. (In Persian)
- 14- Alimohammadi, S., and Afshar, A. (2005), "Optimum design of cyclic storage systems; distributed parameter approach: 1- system definition and model formulation, 2- model solution methodology and analysis of results." *Proc. of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on SYSTEMS THEORY and SCIENTIFIC COMPUTATION*, Malta, 243-256.
- 15- Afshar, A., Ostadrahimi, L., Ardeshir, A., and Alimohammadi, S. (2008). "Lumped approach to a multi-period-multi-reservoir cyclic storage system optimization" *Water Resources Management*, 22, 1741-1760.
- 16- Alimohammadi, S., Afshar, A., and Marino, M. A. (2009). "Cyclic storage systems optimization: Semi-distributed parameter approach." *J. of American Water Works Association*, 101 (2), 90-103.

- 17- Afshar, A., and Alimohammadi, S. (2007). "Aquifer response generation using artificial neural networks." *Int. J. of Science and Engineering*, 18 (2), 65-75.
- 18- Gorelick, S. M. (1983). "A review of distributed parameter groundwater management modeling methods." *J. of Water Resources Research*, 19 (2), 305-319.
- 19- Mays, L. W., and Tung, Y. K. (1992). *Hydrosystems engineering and management*, McGraw-Hill Inc, New York.
- 20- Aguado, E., and Remson, I. (1974). "Groundwater hydraulic in aquifer management." *J. Hydraul. Div.*, 100 (1), 103-118.
- 21- Willis, R., and Yeh, W. W-G. (1987). *Groundwater systems planning and management*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- 22- Lee, A. S., and Aronofsky, J. S. (1958). "A linear programming model for scheduling crude oil production." *J. of Petroleum*, 213, 21-54.
- 23- Heidari, M. (1982). "Application of linear systems theory and linear programming to groundwater management in Kansas." *Water Res. Bull.*, 18 (6), 1003-1012.
- 24- Yazicigil, H. (1990), "Optimal planning of multi aquifer system." *J. Water Resour. Plann. Manage. Div.*, 113, 257-273.
- 25- McDonald, M. G., and Harbough, A. W. (1988). *A modular three- dimensional finite difference groundwater flow model*, United States Geological Survey, Book 6 of Modeling Techniques, USA.
- 26- Waterloo Hydro Geologic Inc. (1996). "Visual MODFLOW." Software, and Technical Documentations, User's Manual.
- 27- Abkhan Consulting Engineers. (2003). *Project of conjuctive use of Abhar Plain, Vol 3: Hydrology*, Tehran. (In Persian)
- 28- Abkhan Consulting Engineers. (2003). *Project of conjuctive use of Abhar Planin, Vol 10: Surface water resources operation*, Tehran. (In Persian)
- 29- Abfan Consulting Engineers. (2000). *Project of Kinevars dam. Water resources planning and economic assessments report*, Tehran. (In Persian)
- 30- Abkhan Consulting Engineers. (2003). *Project of conjuctive use of Abhar plain, Vol 4: Hydrogeology*, Tehran. (In Persian)
- 31- Abkhan Consulting Engineers. (2003). *Project of conjuctive use of Abhar plain, Vol 11: Groundwater and conjuctive use optimization model*, Tehran. (In Persian)
- 32- Abkhan Consulting Engineers. (2003). *Project of conjuctive use of Abhar plain, Vol 9: Groundwater simulation model*, Tehran. (In Persian)
- 33- Loucks, D. P., and Van Beek, E. (2005). *Water resources systems planning and management, An introduction to methods, models and applications*, UNESCO Publishing, Paris.
- 34- Abkhan Consulting Engineers. (2003). *Project of conjuctive use of Abhar plain, Vol 12: Abhar- RBcoum software user's manual*, Tehran. (In Persian)