

تأثیر احداث سد زیرزمینی بر آبدهی قنات با استفاده از مدل MODFLOW (مطالعه موردی صوفی - ماکو)

بابک واحد دوست^۱، حسین رضایی^۲، جواد بهمنش^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۰۹

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- هیدرولیک و منابع آب، دانشگاه صنعتی استانبول

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: j.behmanesh@urmia.ac.ir

چکیده

امروزه به دلیل خشک‌سالی‌های متوالی و افزایش جمعیت، مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب نقش مهمی در توسعه پایدار دارد. یکی از روش‌های توسعه منابع آب، استفاده از سدهای زیرزمینی می‌باشد. سدهای زیرزمینی با تقویت میزان ذخیره‌سازی آبخوان، شرایط مناسبی را برای عملکرد بهتر قنات فراهم می‌آورند. در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های سه حلقه چاه مشاهداتی، دو رشته قنات و با کمک نرم‌افزار MODFLOW تغییرات سطح آب زیرزمینی در زیر بستر رودخانه صوفی، واقع در منطقه روستای صوفی از توابع استان آذربایجان غربی مورد مطالعه قرار گرفت. بعد از واسنجی مدل و مدل‌سازی با در نظر گرفتن سد زیرزمینی، سطح آب در چاه‌های مشاهداتی پیش‌بینی شد. سپس تأثیر ساخت سد زیرزمینی بر روی قنات و بیلان آبی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان داد که داده‌های حاصل از مدل تطابق قابل قبولی را با داده‌های مشاهداتی در یک سال بعد از ساخت سد زیرزمینی دارد. همچنین مقایسه داده‌های مشاهداتی و برآوردی در دو چاه بالادست سد زیرزمینی نشان داد که اختلاف بین آنها در چند سانتی‌متر محدود شده است که متوسط درصد مربعات خطا برای حالت ماندگار با $4/34$ و در حالت غیرماندگار $7/37$ بود.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، سد زیرزمینی، قنات، واسنجی، MODFLOW

Effect of Underground Dam Construction on Discharge of Qanats, Using MODFLOW Model (Case Study: Soofi - Makoo)

B Vaheddoost¹, H Rezaie², J Behmanesh^{2*}

Received: 11 May 2013 Accepted: 30 August 2016

1-Ph.D. Student, Dept. of Civil Engin., Hydraulics and Water Resources, Istanbul Technical Univ., Turkey

2-Assoc. Prof. Dept. of Water Engin., Univ. of Urmia, Iran

*Corresponding Author, Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir

Abstract

Today, because of consecutive droughts and population increase, management and optimum use of water resources play an important role in sustainable development. One of the methods in water resources management is to use underground dams. Underground dams cause to reinforce aquifer water storage and consequently, this reinforcement leads to better performance of Qanat. In the present study, the changes of the located ground water table below the bed of Soofi river (located in Soofi village in west Azerbaijan) were studied using water table data of three observed wells, two drainage systems (QANAT) and MODFLOW software. After calibration of the model and modeling with underground dam construction, water level in observed wells was predicted. Then, the effect of underground dam construction on Qanats and water balance was investigated. The results showed that the obtained data from modeling had acceptable accordance with observed data in a year after the construction of underground dam. Also, the comparison of the observed and predicted data in two upstream wells showed that, the difference between the two the observed wells was limited to a few centimeters and the percentage mean square error was 4.34 and 7.37 for steady and unsteady conditions, respectively.

Keywords: Calibration, Ground water, MODFLOW, Qanat, Underground dam

مقدمه

مانند قنات می‌باشند. اهمیت این موضوع زمانی آشکار می‌گردد که در بسیاری از نقاط کشور همچنان از سیستم قنات استفاده می‌گردد. در نتیجه تقویت این سیستم‌های سنتی با کمک سدهای زیرزمینی راه حل میان مدت مناسبی، جهت توسعه منابع آب به‌نظر می‌رسد. بدین منظور بررسی و مدل‌سازی تغذیه و تخلیه آب‌های زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و تاکنون محققان بسیاری در مورد ترویج و توسعه مدل‌های مذکور تحقیقاتی را انجام داده‌اند. در

احداث سدهای زیرزمینی یکی از روش‌های قدیمی جهت مدیریت و کنترل منابع آب زیرزمینی می‌باشد. این سازه‌ها دارای توانایی خوبی در زمینه ذخیره‌سازی و کنترل منابع آب زیرزمینی بوده و در گذشته، از این سازه‌ها به‌طور عموم جهت ترویج و گسترش منابع آب کشاورزی استفاده شده است. سدهای زیرزمینی با توجه به خاصیت مذکور قادر به تقویت آبخوان مورد نیاز برای سیستم‌های زهکشی

تحقیق حاضر نرم‌افزار MODFLOW به دلیل به روز بودن، رایگان بودن^۱ و قدرت پردازش دقیق، انتخاب گردید.

اگرچه مدل‌سازی سدهای زیرزمینی با کمک این نرم‌افزار پیشینه دیرپایی ندارد، لیکن در این زمینه می‌توان به مطالعه یاکروبیچ و همکاران (۱۹۹۸) اشاره کرد که با کمک مدل PMWIN اقدام به مدل‌سازی و بررسی نحوه ورود آب شور دریا به سفره آب زیرزمینی در منطقه خان‌یونس نموده و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سدهای زیرزمینی در این مورد بسیار مهم و ضروری است. بیلماز (۲۰۰۳) نیز با استفاده از MODFLOW نحوه عملکرد سدهای زیرزمینی را در مقابل نفوذ آب شور مورد بررسی قرار داد. آرچویچایی و همکاران (۲۰۰۵) با کمک نرم‌افزار MODFLOW اقدام به ظرفیت‌سنجی احداث سدهای زیرزمینی در منطقه شمال تایلند نمودند. هوناه و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW درباره مدیریت نفوذ آب شور به آب زیرزمینی و رودخانه‌های ساحلی بر اثر امواج دریا در دلتای مکنگ^۲ به بررسی سناریوهای محتمل اقدام نموده‌اند. از طرفی دیگر اپتینگ و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی روش‌های عددی محاسبه نفوذ آب شور به داخل سفره آب‌های زیرزمینی در مناطق شهری با استفاده از نرم‌افزار مذکور پرداخته و نتیجه گرفتند که استفاده از سدهای زیرزمینی، روش مؤثری در جلوگیری از نفوذ آب شور به سفره آب زیرزمینی در مناطق شهری نزدیک سواحل است. خو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW اقدام به بررسی مدل دینامیکی تغذیه و تخلیه آب در آبخوانهای زیرزمینی کم‌عمق نموده‌اند. نتایج بررسی آنها حاکی از تطابق خوب نتایج مدل با داده‌های حاصل از برداشت‌های میدانی بوده است. الحمس (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار

MODFLOW اقدام به بررسی رابطه بین زمان و افزایش ارتفاع آب در پشت سدهای زیرزمینی نمود که نتایج مدل ایجاد شده همخوانی خوبی با داده‌های مشاهداتی داشته است. همچنین، لاله زاری و طباطبایی (۲۰۱۵) با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW اقدام به مدل‌سازی یک سد زیرزمینی در آبخوانی در نزدیکی شهرکرد نمودند و با استفاده از این مدل الگوی آلودگی آبخوان توسط نیترات را نیز بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که سد زیرزمینی تأثیر به‌سزایی در نگهداری و تامین آب در فصل‌های خشک سال دارد. دولت‌آبادی و زمردیان (۲۰۱۶) نیز با استفاده از مدل MODFLOW و SWAT^۳ اقدام به مدل‌سازی توأم آب سطحی و آب زیرزمینی در حوضه آبریز فیروزآباد نمودند که نتایج مدل به دست آمده حاکی از تطابق خوب بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی بود.

با توجه به اهمیت احداث سد زیرزمینی و تأثیر آن بر روی سطح آب زیرزمینی در منطقه صوفی ماکو، در این مطالعه با ساخت مدل آب زیرزمینی و واسنجی شرایط محیطی، اقدام به پیش‌بینی سطح آب در داخل مخزن سد زیرزمینی در زیر بستر رودخانه گردید.

مواد و روش‌ها

در تقسیمات کشوری روستای صوفی مرکز دهستان قره‌قویون شمالی واقع در شهرستان ماکو از استان آذربایجان غربی می‌باشد. از نظر موقعیت جغرافیایی صوفی در ۱۳ کیلومتری جاده ترانزیت ایران-اروپا و ۱۵ کیلومتری جنوب غرب شهرستان شوط واقع شده است. محل تحقیق بر روی مسیلی با همین نام (صوفی) که از میان روستا می‌گذرد، قرار دارد (شکل ۱) و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ۴۲°۴۹'۳۳" طول شرقی و ۳۹°۰۷'۲۸" عرض شمالی واقع شده است.

^۱ <http://water.usgs.gov/ogw/modflow/MODFLOW.html>

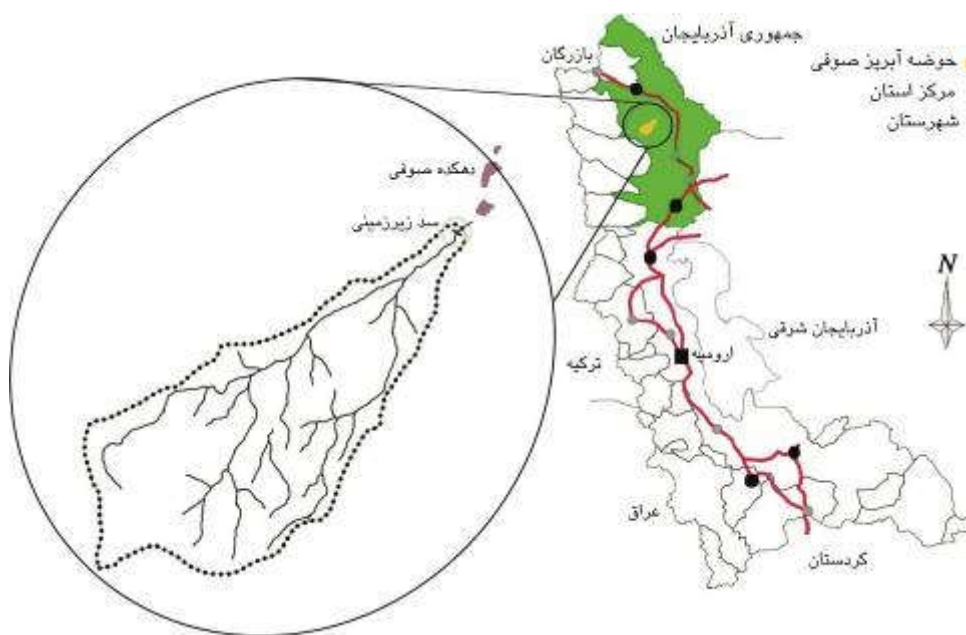
^۲ Mekong Delta, Vietnam

^۳ Soil and Water Assessment Tool

این دو عامل باعث تشکیل رخساره دامنه منظم با خاک نسبتاً ضخیم و واریزه‌های دامنه‌ای ریز و عمق نسبتاً زیاد است که عدم وجود شیب توپوگرافی زیاد باعث پایداری شیب دامنه و عدم حرکت‌های دامنه‌ای شده است (جعفری ۱۳۸۲). از نظر گروه‌های هیدرولوژیکی خاک‌های زیر حوضه از دو گروه B (با پتانسیل تولید هرزآب نسبتاً کم تا متوسط، حدود ۸۵ درصد حوضه) و C (با پتانسیل تولید هرزآب نسبتاً زیاد، حدود ۱۵ درصد حوضه) بوده و خصوصیات سطح حوضه از نوع مراتع طبیعی با پوشش متوسط می‌باشد (جعفری ۱۳۸۲).

در ادامه مطالعه و با کمک نقشه توپوگرافی (مقیاس ۱:۲۰۰)، مکان ۳ حلقه چاه مشاهداتی و دو رشته قنات به نام‌های امیرکهریزی و دیرسک بر روی نقشه اولیه مدل به دقت مشخص گردید (شکل ۲).

بارش سالانه حوضه آبراهه صوفی، ۳۲۸ میلی‌متر و متوسط تبخیر سالانه ۱۴۳۷ میلی‌متر برآورد گردیده است. دمای متوسط سالانه در محل پروژه ۱۰ درجه سلسیوس و تعداد روزهای یخبندان ۱۲۲ روز و اقلیم حوضه در روش دومارتن نیمه‌خشک می‌باشد (جعفری ۱۳۸۲). زیر حوضه عمدتاً شامل سازندهای قم و الیکا و سازند قرمز بالایی و آهک‌های کرتاسه است که مساحت زیادی از آن‌را سازند الیکا تشکیل می‌دهد جهت شیب توپوگرافی در جناح راست احداث سد، تقریباً جنوبی بوده و دامنه‌ها به دلیل عدم رطوبت کافی و عمل تخریب فیزیکی به صورت رخساره بیرون‌زدگی سنگی و واریزه‌های ریزدانه‌ای که دارای ضخامت زیادی نیستند، تشکیل گردیده است. در جناح چپ محل احداث سد، شیب توپوگرافی این نقطه در مقایسه با دامنه روبرو نسبتاً کم و جهت آن نیز تقریباً شمالی بوده و هماهنگی



شکل ۱- محل قرارگیری حوضه صوفی.

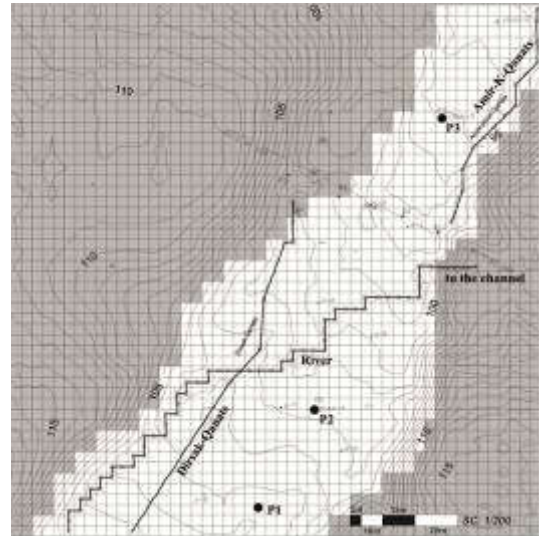
$P1$ و $P2$ و چاه پایین‌دستی سد با نام $P3$ نام‌گذاری شدند (شکل ۲). قدم اول پس از مشخص کردن شرایط مرزی در مدل‌سازی، تعریف شرایط اولیه^۷ و سپس واسنجی مدل می‌باشد (چیانگ ۲۰۰۵). شکل معادله حاکم بر حرکت آب‌های زیرزمینی در حالت سه‌بعدی به صورت معادله ریچاردز در فرمول ۱ ارائه شده است (سریواستاوا و جیم یه ۱۹۹۲، چیانگ ۲۰۰۵، بوتروس و همکاران ۲۰۱۲):

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

که در آن K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} ضرایب هدایت هیدرولیکی آب‌خوان به ترتیب درجهت‌های x و y و z بر حسب متر بر روز می‌باشد. همچنین h ، W ، S_s و t به ترتیب ارتفاع سطح آب (متر)، مقدار دبی تغذیه یا تخلیه در واحد سطح (متر مکعب بر روز بر متر مربع)، ضریب ذخیره مخصوص محیط متخلخل و زمان (روز) می‌باشند.

در نرم‌افزار مورد استفاده، برای بررسی مقادیر مجهول و به دست آوردن ارتفاع سطح آب از شکل تقاضات متناهی پسرو^۸ در معادله ۲ برای مرکز یک سلول با موقعیت (i, j, k) در یک شبکه‌بندی سه‌بعدی استفاده گردید:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h^m_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + \\ & CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h^m_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + \\ & CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h^m_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + \\ & CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h^m_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + \\ & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h^m_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + \\ & CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h^m_{i,j,k} - h^m_{i,j,k}) + \\ & P_{i,j,k} \times H^M_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = \\ & SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \times \left(\frac{h^m_{i,j,k} - h^{m-1}_{i,j,k}}{t^m - t^{m-1}} \right) \end{aligned} \quad [2]$$



شکل ۲- مدل مفهومی اولیه قبل از احداث سد زیرزمینی و تعیین محل چاه‌ها، قنات و رودخانه.

به منظور مدل‌سازی شرایط طبیعی و تطابق بهتر با شرایط توپوگرافی، محیطی و همخوانی بیشتر با داده‌ها، از شبکه‌بندی^۴ همسان با ابعاد پنج متر در پنج متر استفاده شد که به عنوان شبکه‌بندی با ابعاد کوچک شناخته می‌شود (ووس ۱۹۸۴، چیانگ و کینزل باخ ۲۰۰۱، چیانگ ۲۰۰۵، هاردلاف و همکاران ۲۰۰۷). سلول‌های شرکت کننده در محاسبات با عنوان سلول‌های فعال در مدل و با کد مثبت یک و سلول‌های غیر فعال در محدوده مدل (محدوده فیزیکی مدل) با کد صفر مشخص شدند. پس از بررسی مقاطع ژئوالکتریک و پس از آنکه مشخص شد، منطقه دارای یک ورودی و یک خروجی بوده و هیچ‌گونه سفره تحت فشار در منطقه وجود ندارد و با توجه به عمق متوسط محاسبه شده از طریق مقاطع ژئوالکتریک، جهت مدل‌سازی محل از یک مدل تک لایه با خاصیت آب‌خوان غیرمحصور^۵ یکنواخت استفاده شد (جعفری ۱۳۸۲). برای مدل‌سازی چاه‌های مشاهداتی از بسته الحاقی چاه مشاهداتی^۶ استفاده گردید که چاه‌های بالادستی مخزن با نامهای

⁷ Initial conditions

⁸ Backward

⁴ Mesh generation

⁵ Unconfined aquifer

⁶ Head observation well

که در آن، Δc_i و Δr_j به ترتیب اعداد سلول‌های شبکه در جهت ردیف و ستون، Δv_k ضخامت سلول‌ها در لایه k ام و CV و CC ، CR به ترتیب حاصل ضرب هدایت هیدرولیکی در سطح مقطع جریان تقسیم بر طول جریان بین مرکز دو سلول مجاور در جهت‌های سطر، ستون و ارتفاع می‌باشد.

با توجه به اینکه مقادیر سطح آب در داخل چاه‌های مشاهداتی و دبی قنات در بالادست و پایین‌دست سد به صورت ماهانه اندازه‌گیری شده بود، لذا گام زمانی ماهانه جهت واسنجی و مدل‌سازی انتخاب گردید. آمار مربوط به چاه‌ها و قنات در ابتدا بررسی شد و آمار ناقص به وسیله روش درون‌یابی و نرمال‌سازی به دست آمد و به صورت گام زمانی ماهانه وارد مدل گردید. از آنجا که محدوده برداشت‌های رقوم سطح آب توسط جهاد کشاورزی استان آذربایجان غربی از شهریور ۱۳۸۳ تا مرداد ۱۳۸۶ بوده و در این بازه، سد در سال ۱۳۸۵ ساخت شده است، لذا از شهریور ماه ۱۳۸۳ تا مرداد ۱۳۸۴، (۱۲ ماه) جهت واسنجی مدل (سال آبی ۱۳۸۴) و از شهریور ۱۳۸۵ تا مرداد ۱۳۸۶ (سال آبی ۱۳۸۵) به عنوان سال پیش‌بینی در نظر گرفته شد و داده‌های مشاهداتی با داده‌های پیش‌بینی شده مورد مقایسه قرار گرفت (کلاً ۲۴ ماه). به طور خلاصه می‌توان اجزاء بیلان سفره را دو رشته قنات و سد زیرزمینی دانست که در بیلان سفره دخیل می‌باشند که هیچ‌گونه چاه کشاورزی به صورت مستقیم از مخزن سد برداشت ندارد.

مقادیر دبی قنات نیز برای ماه‌های واسنجی با وارد شدن به مدل و واسنجی با سطح چاه‌های مشاهداتی به عنوان ناظر وارد مدل شدند. انجام عمل واسنجی در مرحله ماندگار با کمک رسم نمودار حساسیت سنجی مدل نسبت به تغییرات مقادیر آب در چاه‌ها و تعیین مقادیر هدایت هیدرولیکی برای تعریف مقادیر اولیه به مدل و پس از واسنجی با ترسیم نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی انجام پذیرفت. اجرای

مراحل فوق جهت تعیین عوامل دخیل در معادلات حاکم و انجام واسنجی اولیه برای یک ماه، با کمک بسته الحاقی $PEST^9$ انجام گردید. با توجه به اینکه پیش‌فرض برنامه بر روی تحلیل به روش $PCG2^{10}$ استوار بود، انجام و کنترل اتوماتیک تمامی مراحل به وسیله خود نرم‌افزار انجام گرفت (چیانگ و کینزل باخ ۲۰۰۱، چیانگ ۲۰۰۵). همچنین جهت ردیابی و اطمینان از عدم وجود خطا، خطوط دستور^{۱۱} در قسمت فایل خروجی در هر مرحله کنترل گردید. جهت تعریف تنش‌های وارد بر آب‌خوان مقادیر بارش، رواناب، تبخیر-تعرق و نفوذ در دوره‌های تنش ماهانه وارد مدل گردیدند. جهت محاسبه تبخیر-تعرق، از رابطه ترنت‌وایت و برای محاسبه مقدار نفوذ از معادله بیلان آبی یعنی بارندگی منهای تبخیر-تعرق و روان‌آب استفاده گردید. مقدار روان‌آب نیز از طریق روابط اداره حفاظت خاک آمریکا^{۱۲} محاسبه شد. در قدم نهایی بعد از کنترل نهایی مقادیر ورودی، اجرای مدل انجام گرفت. بعد از انجام مراحل مذکور و به دست آوردن مدل واسنجی شده برای یک ماه در حالت ماندگار، با افزودن مقادیر زمانی^{۱۳} به مقدار ۳۶۵ روز و با تفکیک روزهای متناسب برای هرماه (۲۹، ۳۰ و ۳۱ روز) اقدام به ایجاد گام‌های زمانی^{۱۴} ۱۲^{۱۵} گانه به صورت ماهانه شد و در این مرحله به علت تغییر شرایط محاسبات از حالت ماندگار به حالت غیر ماندگار و دخیل نمودن گام‌های زمانی، جهت واسنجی و محاسبه مقادیر آب باقیمانده از هر مرحله و تأثیر آن بر روی مرحله‌های دیگر از تغییرات آبدی و ویژه^{۱۵} استفاده شد. جهت نیل به این هدف و با کمک رابطه^۳ (آهوچا و همکاران ۱۹۸۴) مقادیر اولیه آبدی ویژه برای شروع محاسبات تفاضلات محدود به دست آمد:

⁹ Parameter estimation

¹⁰ Preconditioned conjugate gradient

¹¹ Command lines

¹² SCS (Soil Conservation Service)

¹³ Time period

¹⁴ Time steps

¹⁵ Specific yield

همان‌طور که در قبل اشاره شد، مقادیر مربوط به تبخیر-تعرق و نفوذ هر ماه به‌طور جداگانه وارد مدل شده و محاسبه تبخیر-تعرق، از رابطه ترنت وایت به‌عمل آمد (علیزاده ۱۳۹۲):

$$PET = 16 \times N_m \left(\frac{10T_m}{I} \right)^a \quad [4]$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} i_m \quad [5]$$

$$a = (6.75 \times 10^{-7}) I^3 - (7.71 \times 10^{-5}) I^2 + (1.792 \times 10^{-2}) I + 0.492 \quad [6]$$

$$i_m = \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.51} \quad [7]$$

که در آن PET مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل، N_m مقدار ضریب اصلاحی هر ماه برای عرض شمالی ۳۹ درجه، T_m متوسط دمای هوا ($^{\circ}C$) در ماه مورد نظر، i_m نمایه حرارتی هر ماه، I نمایه حرارتی سالانه و a مطابق فرمول ۶، به‌عنوان ضریب فرمول تبخیر-تعرق وارد معادله گردید. همچنین مقدار نفوذ از معادله بیلان آبی یعنی بارندگی منهای تبخیر-تعرق و روان‌آب محاسبه گردید. مقدار روان‌آب نیز از طریق روابط اداره حفاظت خاک آمریکا محاسبه شد (علیزاده ۱۳۹۲):

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad [8]$$

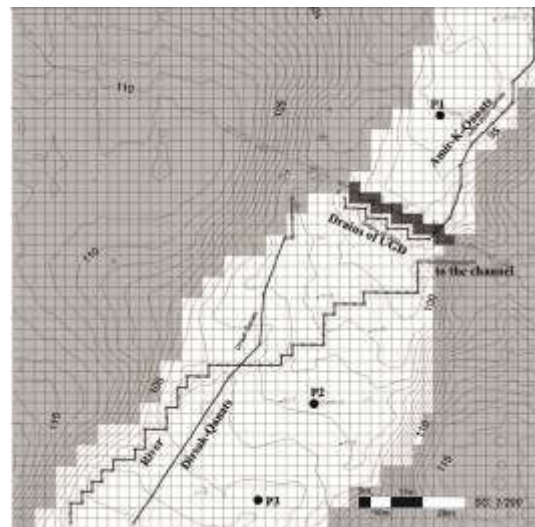
$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad [9]$$

که در آن R ارتفاع روان‌آب بر حسب اینچ، P ارتفاع بارندگی (اینچ)، S عامل مربوط به نگهداشت سطحی و CN شماره منحنی مربوط به نفوذ آب در حوضه می‌باشد که با در نظر گرفتن پوشش سطح حوضه و درصد طبقه‌بندی خاک (B, C)، مقدار CN از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$CN = 0.85(B) + 0.15(C) \quad [10]$$

$$S_y = 4.364L_n(k) + 9.6294 \quad [3]$$

که در این رابطه، k هدایت هیدرولیکی آبخوان (متر بر روز) و L_n لگاریتم طبیعی می‌باشد. در ادامه با رسم نمودار حساسیت‌سنجی مدل نسبت به تغییرات آبدهی ویژه، مقادیر اولیه جهت واسنجی به مدل داده شد و سپس نقشه پهنه‌بندی آبدهی ویژه رسم گردید. مرحله مذکور با واسنجی مجدد و انجام تغییرات جزئی در مقادیر آبدهی ویژه دنبال گردید. در این مرحله، بعد از کنترل مقادیر ارتفاع آب در مدل با برداشت‌های میدانی انجام یافته در هر مرحله و حصول اطمینان از صحت واسنجی انجام یافته، با انجام تغییرات جزئی در کد سلولها اقدام به ایجاد سناریوی سد زیرزمینی در محدوده مدل (با کمک کد منفی یک) و توسعه زهکش افقی سد گردید. از آن‌جا که سد زیرزمینی به‌صورت سنگ‌ریزه‌ای با چند لایه آب‌بندی در قسمت رویه‌ای سد و محافظ بتنی اجرا شده بود (جعفری ۱۳۸۲)، مدل‌سازی سد به‌صورت ناتراوا انجام گرفته شد و جهت معرفی محل سد از سلول‌های با بار آبی ثابت^{۱۶} استفاده گردید (شکل ۳).

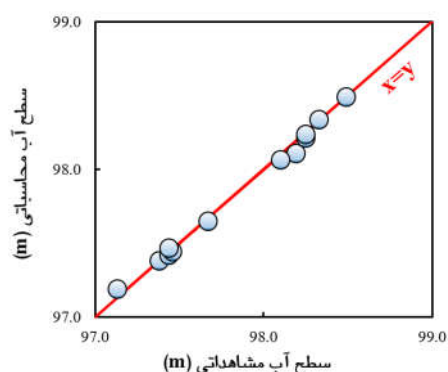


شکل ۳- مدل مفهومی بعد از احداث سد زیرزمینی و گسترش زهکش پشت سد.

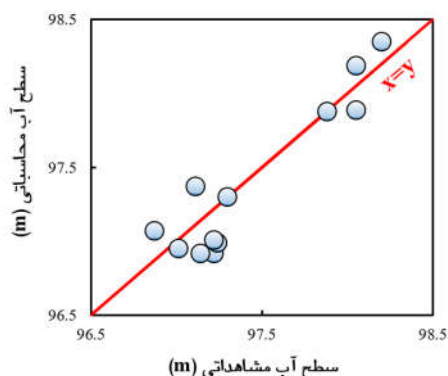
¹⁶ Constant head cells

نتایج و بحث

در مرحله ماندگار همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۴ مشاهده می‌گردد، سطح آب محاسبه شده توسط مدل و سطح آب واقعی در چاه‌های مشاهداتی به‌صورت مقایسه‌ای آورده شده است. با در نظر گرفتن شرایط طبیعی و تأمل بر این مساله که دقت سلول‌ها با ابعاد همسان پنج‌متری در مدل اختیار شده است، می‌توان گفت که دقت مذکور قابل قبول می‌باشد (۴/۳۴ درصد خطا). در شرایط غیر ماندگار نیز چاه‌های داخل مخزن سد نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند (جدول ۲ و شکل ۵).



شکل ۴- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی سطح آب در چاهک P2 در شرایط ماندگار.



شکل ۵- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی سطح آب در چاهک P2 در شرایط غیرماندگار.

در این مرحله با جاگذاری مقادیر از جدول مقادیر CN (علیزاده ۱۳۹۲) مقدار تقریبی CN عدد ۷۰ و در نهایت مقدار CN اصلاح شده برای خاک مرطوب مقدار ۸۷ به دست می‌آید. پس از وارد کردن شرایط اولیه، شرایط مرزی (سلول‌های فعال، غیر فعال و بار آبی ثابت) و واسنجی مدل با استفاده از روش تفاضلات متناهی پسرو (معادله ۲)، برای شرایط پیش از احداث سد زیرزمینی در هر دو شرایط ماندگار و غیرماندگار انجام گرفت که نتایج قابل قبولی داشت (جدول‌های ۱ و ۲ و شکل‌های ۴ و ۵). سپس سناریوی احداث سد زیرزمینی و توسعه قنات پایین‌دستی سد زیرزمینی، وارد مدل شد (با کمک سلول‌های بار آبی ثابت و توسعه شبکه قنات) و مدل برای شرایط بعد از احداث سد زیرزمینی اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- مقایسه سطح متوسط آب مشاهداتی و محاسباتی در شرایط ماندگار.

چاه	جذر میانگین مربعات خطا ^۲ (m)	میانگین مربعات درصد خطا ^۱ (%)
P1	۰/۶۴۰۲	۴/۹۳۵
P2	۰/۰۳۵۰	۴/۴۶۳
P3	۰/۸۳۱۴	۳/۶۳۳
متوسط	۰/۵۰۲۲	۴/۳۴

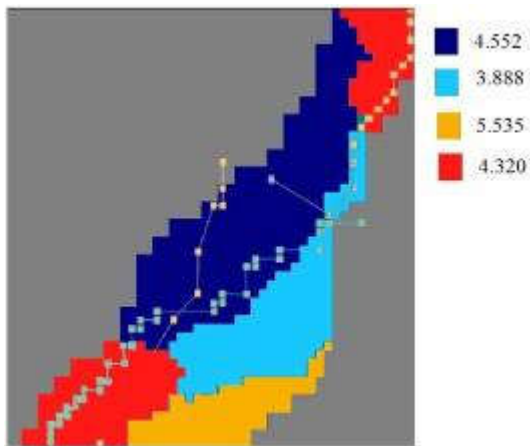
جدول ۲- مقایسه سطح متوسط آب مشاهداتی و محاسباتی در شرایط غیرماندگار.

چاه	جذر میانگین مربعات خطا (m)	میانگین مربعات درصد خطا (%)
P1	۰/۳۱۸۱	۸/۰۲۴
P2	۰/۱۸۷۹	۹/۹۱۹
P3	۰/۷۴۷۳	۴/۱۸۲
متوسط	۰/۵۸۵۱	۷/۳۷

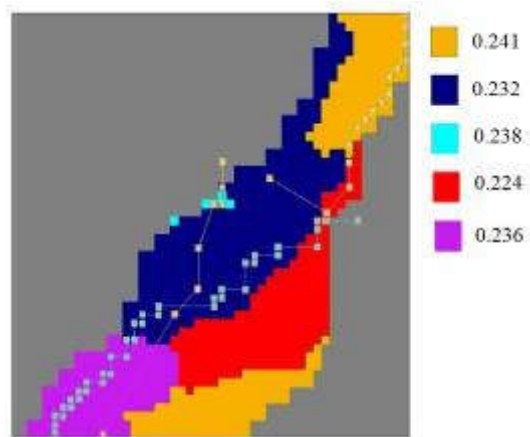
^۱ Mean Squared Percentage Error (MSPE)

^۲ Root Mean Squared Error (RMSE).

پیش‌بینی رقوم سطح آب زیرزمینی استفاده شد. همانطور که در دو شکل مذکور مشاهده می‌گردد پهنه‌بندی ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان تطابق خوبی با پهنه‌بندی آبدهی ویژه دارد که نشان‌دهنده این مطلب است که رابطه این دو نقشه با هم دارای کمینه خطای ممکن می‌باشد.



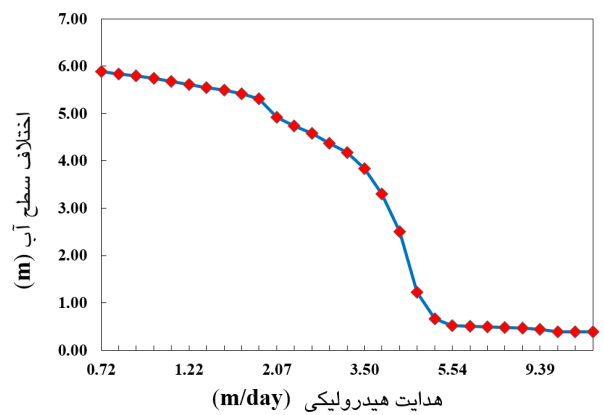
شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی هدایت هیدرولیکی مدل.



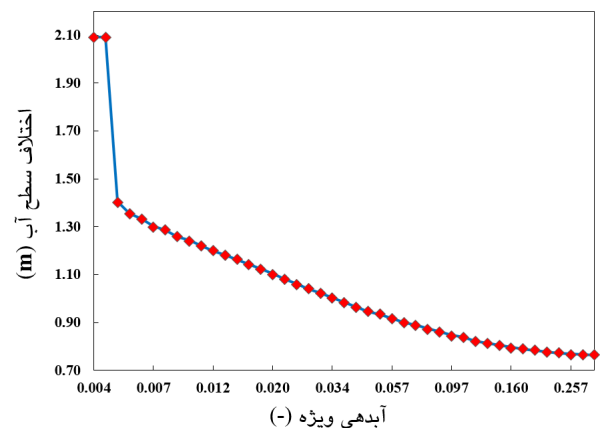
شکل ۹- نقشه پهنه‌بندی آبدهی ویژه مدل.

شکل‌های ۱۰، ۱۱ و جدول ۳ نیز، میزان خطاهای محاسباتی آبدهی قنات امیر کهیزی و دیرسک را در منطقه مورد مطالعه بعد از احداث سد زیرزمینی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ دیده می‌شود میزان دبی محاسباتی هم‌خوانی خوبی با داده‌های محاسباتی داشته و در مورد بیشینه خطای

برای حصول مقادیر فوق در طی مدل‌سازی و از آنجا که تعیین مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به مدل جهت حساسیت‌سنجی مدل نسبت به تغییرات مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، نقش تعیین‌کننده‌ای در واسنجی در حالت ماندگار و غیرماندگار داشت، لذا نمودار تغییرات این دو متغیر در مقابل تغییرات مقادیر اختلاف ارتفاع آب رسم شدند (شکل ۶ و ۷).

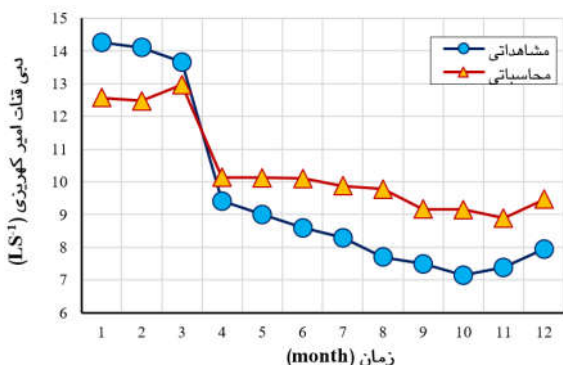


شکل ۶- نمودار حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار.



شکل ۷- نمودار حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب آبدهی ویژه در حالت غیر ماندگار.

شکل‌های ۸ و ۹ نیز نشان‌دهنده پهنه‌بندی ضرایب هدایت هیدرولیکی آبخوان و آبدهی ویژه در محدوده منطقه می‌باشند که از ضرایب مذکور در



شکل ۱۳- مقایسه دبی محاسباتی و مشاهداتی در قنات امیر کهریزی پس از احداث سد زیرزمینی.

علاوه بر مطالب فوق، نتایج مدل حاکی از ۴/۵ برابر شدن میزان ذخیره مخزن داشت (جدول ۴) که به علت نبود داده مشاهداتی تعیین درصد خطا ممکن نبود. لیکن به دلیل درصد خطای قابل قبول مدل در محاسبات سطح آب و همچنین دبی تخلیه مخزن توسط قنات، خطای مذکور در حدود ۱۰ درصد تخمین زده می‌شود. که این نتایج حاکی از قابل قبول بودن مدل MODFLOW در شبیه‌سازی شرایط موجود است.

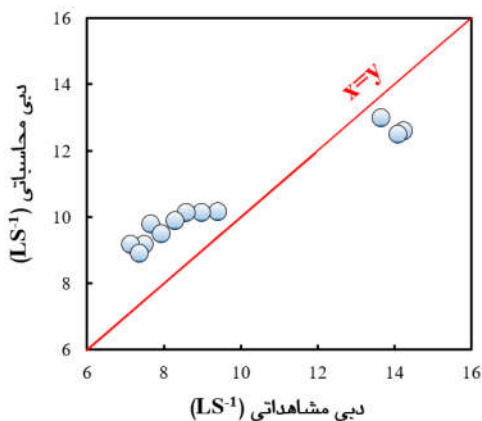
جدول ۴- مقایسه مقادیر آب ذخیره شده در مخزن، قبل و بعد از احداث سد زیرزمینی.

مقدار آب ذخیره شده	مقدار آب ذخیره شد در مخزن قبل از احداث سد زیرزمینی ($m^3 yr^{-1}$)	مقدار آب ذخیره شده در مخزن بعد از احداث سد زیرزمینی ($m^3 yr^{-1}$)
درصد افزایش	۶۱/۸۵	۴۵۰

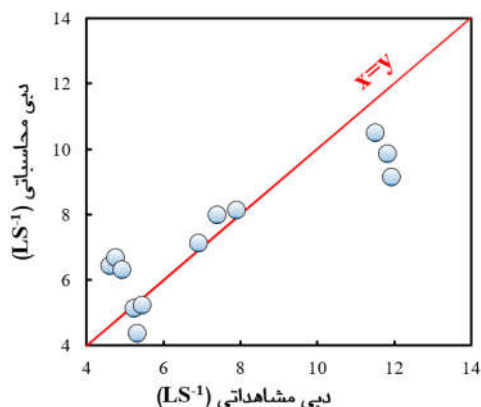
جدول ۳- مقایسه میزان خطا در محاسبه میزان آبدهی قنات امیرکهریزی و دیرسک پس از احداث سد زیرزمینی.

قنات	میانگین مربعات جذر میانگین مربعات خطا (m)	میانگین مربعات درصد خطا (%)
دیرسک	۱/۵۸	۶/۷۰
امیرکهریزی	۲/۱۱	۷/۷۱
متوسط	۱/۸۴۵	۷/۲۰

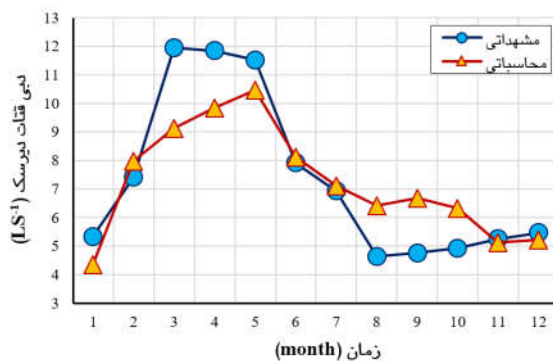
۷/۷۱ درصد امیر کهریزی نیز می‌توان گفت که با توجه به طبیعت موضوع و وجود عوامل ناشناخته احتمالی همچنان خطای قابل قبولی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی دبی آبدهی قنات امیر کهریزی بعد از احداث سد زیرزمینی.



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهداتی دبی آبدهی قنات دیرسک بعد از احداث سد زیرزمینی.



شکل ۱۲- مقایسه دبی محاسباتی و مشاهداتی در قنات دیرسک پس از احداث سد زیرزمینی.

تشکر و قدردانی

جعفری باری که با در اختیار گذاشتن داده‌های لازم و راهنمایی‌های بی‌دریغ ما را یاری نمودند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

بدینوسیله از سازمان جهاد کشاورزی، اداره هواشناسی استان آذربایجان غربی و آقای مهدی

منابع مورد استفاده

جعفری باری م، ۱۳۸۲. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی بررسی کاربرد سدهای زیرزمینی در مدیریت آب قنوات، مطالعه موردی مسیل روستای صوفی-ماکو. وزارت جهاد کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش کشاورزی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری.

علیزاده ا، ۱۳۹۲. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ بیست و سوم. مشهد: دانشگاه امام رضا (ع). ۶ الف/ع/۸/۲/۶۶۱.GB. کتابخانه ملی: ۲۷۵۱۳-۸۲م.

- Ahuja LR, Naney JW, Green RE and Nielsen DR, 1984. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. *Soil Science Society of America Journal* 48(4): 699-702.
- Archwichai L, Mantapan K and Srisuk K, 2005. Approachability of subsurface dams in the Northeast Thailand. Pp. 28-30. *International Conference on Geology, Geo-Technology and Mineral Resources of Indochina (GEOINDO 2005)*. Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand.
- Botros FE, Onsoy YS, Ginn TR and Harter T, 2012. Richards's equation-based modeling to estimate flow and nitrate transport in a deep alluvial vadose zone. *Vadose Zone Journal* 11(4): 1-16.
- Chiang WH, 2005. *3D Groundwater Modeling With PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Process*. Springer, Heidelberg, Germany.
- Chiang WH and Kinzelbach W, 2001. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN*. Springer 46. Berlin, Germany.
- Dowlatabadi S and Zomorodian SA, 2016. Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad watershed. *KSCCE Journal of Civil Engineering* 20(1): 485-496.
- El-Hames AS, 2012. Determination of the transient water table rise behind constructed underground dams. *Arabian Journal of Geosciences* 5(6): 1359-1366.
- Epting J, Romanov D, Huggenberger P and Kaufmann G, 2009. Integrating field and numerical modeling methods for applied urban karst hydrogeology. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 1163-1184.
- Hardelauf H, Javaux M, Herbst M, Gottschalk S, Kasteel R, Vanderborght J and Vereecken H, 2007. PARSWMS: A parallelized model for simulating three-dimensional water flow and solute transport in variably saturated soils. *Vadose Zone Journal* 6(2): 255-259.
- Hoanh CT, Phong ND, Gowing JW, Tuong TP, Ngoc NV and Hien NX, 2009. Hydraulic and water quality modeling: a tool for managing land use conflicts in inland coastal zones. *Water Policy* 11(S1): 106-120.
- Lalehzari R and Tabatabaei SH, 2015. Simulating the impact of subsurface dam construction on the change of nitrate distribution. *Environmental Earth Sciences* 74(4): 3241-3249.
- Srivastava R and Jim Yeh TC, 1992. A three-dimensional numerical model for water flow and transport of chemically reactive solute through porous media under variably saturated conditions. *Advances in Water Resources* 15(5): 275-287.
- Voss CI, 1984. A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. USGS 84, No. 4369.
- Xu X, Huang G, Zhan H, Qu Z and Huang Q, 2012. Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. *Journal of Hydrology* 412: 170-181.
- Yakirevich A, Melloul A, Sorek S, Shaath S and Borisov V, 1998. Simulation of seawater intrusion into the Khan Yunis area of the Gaza Strip coastal aquifer. *Hydrogeology Journal* 6(4): 549-559.
- Yilmaz M, 2003. Control of groundwater by underground dams. Ph.D. dissertation, Middle East Technical University-Department of Civil Engineering, Ankara, Turkey.