فصلنامه‌ی زمین شناسی کاربردی
سال ۴ (۱۳۸۷)، شماره‌ی ۱ : ۶۴ ـ ۵۶
www.appliedgeology.ir

# به‌کارگیری روش‌های برسنجی در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان آب زیرزمینی با استفاده از کد کامپیوتری MODFLOW و PMWIN (مطالعه‌ی موردی، مدل‌سازی آبخوان دشت بهبهان)

نصرا... کلانتری[1]* و حمید رضا ماجدی[2]

۱) گروه زمین شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز
* عهده دار مکاتبات

## چکیده

عدم قطعیت در مدل‌های جریان آب زیرزمینی عمدتاً ناشی از خطاهای موجود در شبیه‌سازی مقادیر مدل می‌باشد. پس از تعیین پارامترهای آبخوان توسّط مسئله‌ی معکوس در اثنای برسنجی (واسنجی) مدل و اطمینان از منحصر به‌فرد بودن جواب‌ها پس از طی مرحله‌ی صحّت‌سنجی می‌توان به قابل اعتماد بودن مدل صحّه گذارد. برسنجی مدل به روش‌های دستی یا خودکار به کمک تکنیک‌های بهینه‌سازی اتوماتیک انجام می‌گیرد. در پایان مرحله‌ی صحت‌سنجی می‌توان از مدل شبیه‌سازی شده‌ی جریان آب جهت پیش‌بینی یا بهینه‌سازی منابع آب زیرزمینی سیستم آبخوان استفاده نمود. مجموعه‌ای از برنامه‌ریزی، طرّاحی یا سیاست‌های اجرایی در قالب سناریوهای متنوّع را می‌توان توسّط برّرسی پاسخگویی شبیه‌سازی آبخوان، مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. تحقیق فوق با ارائه‌ی مثال موردی آبخوان دشت بهبهان معایب و مزایای روش‌های برسنجی در کدهای نرم‌افزاری موجود را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** آبخوان، برسنجی (واسنجی)، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، صحّت‌سنجی

# Application of verification in groundwater flow simulation using PMWIN and MODFLOW computer codes (A case study of Behbehan plain aquifer modeling)

N. Kalantari[1] & H. R. Majedi[2]

1) Department of Geology, Shahid Chamran University, Ahvaz, I. R. Iran

## Abstract

Uncertainty in groundwater modeling is mainly occurs as a result of input data error. After deter-

**mination of aquifer parameters through inverse problem at the stage of model calibration and assurance about unique solution of answers in the processes of verification, it is possible to be confident about reliability of the model. Calibration is generally done with trial and error and automatic optimization. At the end stage of verification, this simulated flow model could be used for prediction, optimization of groundwater resources. óAssemblages of planning, designing, or execution policies in various scenarios could be interpreted based on assessment of simulated aquifer response. In this case study (Behbehan plain aquifer), advantages and disadvantages of calibration methods have been assessed with the available computer codes.**

**Key words:** Calibration, verification, simulation, aquifer, optimization.

## ۱- مقدّمه

برسنجی (Calibration) عبارت است از فرایند پیدا کردن مجموعه‌ای از شرایط مرزی، تنش‌ها و پارامترهای هیدروژئولوژیک که نتایج به‌دست آمده از آن به‌صورت بسیار نزدیکی بر اندازه‌گیری‌های بار هیدرولیکی و جریان‌های صحرایی همخوانی و برازش دارد. کیفیّت برسنجی به مقدار قابل اعتماد بودن داده‌های موجود بستگی دارد. برسنجی مدل را می‌توان برای شرایط ماندگار، غیرماندگار و یا هر دوی آن‌ها انجام داد. برسنجی به دو روش انجام می‌پذیرد:

الف) برسنجی دستی (سعی و خطا) (Manual trial and error)

ب) برسنجی خودکار (Automated calibration)

در برسنجی دستی، سازنده‌ی مدل با تغییر مقادیر پارامتر و تحلیل اثرات وابسته به آن تصوّر بهتری برای تهیّه‌ی مدل و مفروضاتی که طرّاحی مدل براساس آن صورت گرفته، ایجاد می‌کند. در اثنای برسنجی دستی شرایط مرزی، مقادیر پارامتر و تنش‌ها برای هر اجرای متوالی مدل تا رسیدن به برازش بارهای هیدرولیکی با اهداف برسنجی، تطبیق داده می‌شوند. در برسنجی خودکار کدهای رایانه‌ای مربوطه به دنبال مجموع پارامترهای بهینه‌ای هستند که مجموع مربّعات انحراف بین مقادیر محاسباتی و اندازه‌گیری شده در آن‌ها به یک حدّاقل کاهش یابد (Richard 2002).

آنالیز حسّاسیّت (Sensitivity analysis) عبارت است از ارزیابی کمّی تغییرات خروجی‌های مدل نسبت به تغییرات ورودی‌های آن و مشخّص‌کننده‌ی پارامترهایی است که باید به‌منظور تعیین صحیح و دقیق پیشگویی مدل تغییر داده شوند. در طّی آنالیز حسّاسیّت، مدل به دفعات متعدّدی اجرا می‌شود که در هر اجرا فقط یک پارامتر با درصد مشخّص تغییر می‌یابد و نوسانات مثبت و منفی آن مورد برّرسی قرار می‌گیرد. از آنالیز حساسیت می‌توان جهت توصیف و تفسیر مدل به‌وسیله‌ی تعریف ورودی‌های مورد نیاز کمک گرفت، به عنوان مثال آنالیز حسّاسیّت ممکن است نشان‌دهنده‌ی گسترش محدوده‌ی داده‌های هدایت هیدرولیکی موجود باشد به گونه‌ای که آزمون‌های پمپاژ بیشتری برای به‌دست آوردن سطح مطلوبی از دقّت، در نتایج مدل مورد نیاز باشد. به طورکلّی آنالیز حسّاسیّت باید حسّاسیّت بالای جریان آب زیرزمینی را نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی نشان دهد (Shafer et al. 2006).

## ۲- بحث

همان گونه که در مقدّمه اشاره گردید دو روش کلّی برای تخمین پارامترها (Parameter estimation) وجود دارد: روش سعی و خطا و روش اتوماتیک. در روش سعی و خطا مقادیر پارامترهای مدل در ابتدا به مدل داده می‌شود و پس از اجرای مدل و مقایسه‌ی سطح آب مشاهده‌ای و سطح آب محاسبه شده توسّط مدل، در صورتی که تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین این دو وجود داشته باشد، پارامترها با دید کارشناسی تصحیح شده و به مدل وارد و مدل اجرا می‌گردد. این عمل تا رسیدن به حدّاقل اختلاف، تکرار می‌شود تا نتایج قابل قبول به‌دست آید. به‌طورکلّی روش سعی و خطا مزایا و معایب زیر را دارد:

۱- روش سعی و خطا نیاز به یک برنامه‌ی کامپیوتری جدید ندارد و با همان برنامه اصلی می‌توان برسنجی را انجام داد.

۲- این روش باعث آشنایی بیشتر با منطقه می‌شود.

۳- زمان زیادی را می‌طلبد، به‌خصوص در حالتی که پارامترها، همبستگی زیادی با همدیگر داشته باشند.

۴- عدم یکتایی نتایج در آن به‌وضوح به‌دست می‌آید، یعنی مدل‌های برسنجه شده‌ی متفاوتی برای یک منطقه می‌توان به‌دست آورد.

روش دیگر تخمین پارامتر، روش اتوماتیک است که براساس تئوری وارونگی صورت می گیرد. تئوری وارونگی شامل استنباط در مورد سیستم‌های فیزیکی با استفاده از اندازه‌گیری‌هاست. دو دسته اندازه‌گیری وجود دارد: اندازه‌گیری‌های مستقیم و اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم.

در اندازه‌گیری‌های مستقیم، خاصیّت فیزیکی سیستم برّرسی شده مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود، در صورتی‌که در اندازه‌گیری غیرمستقیم با استفاده از روابط و شواهد موجود، خاصیّت فیزیکی سیستم، اندازه‌گیری می‌شود. در روش بهینه‌سازی مستقیم تعداد معادلات موجود بیشتر از تعداد مجهولات است، لذا از لحاظ ریاضی نمی‌تواند دارای یک جواب باشد. این روش نیاز به حل پیشرو معادلات ندارد و مسئله مستقیماً با حلّ یکسری از معادلات به‌دست می‌آید. در این روش پس از ورود پارامترها، اجرای مدل و ارزیابی پاسخ‌های مدل در صورت وجود اختلاف، تصحیح مقادیر پارامترها با استفاده از کمینه‌سازی تابع هدف انجام می‌شود. به عبارت دیگر روش غیر مستقیم، حلّ اتوماتیک روش دستی آزمون و خطا می‌باشد که در آن پارامترها به‌صورت تکراری تا رسیدن به جواب مطلوب تصحیح می‌شوند.این روش نسبت به روش‌های غیرمستقیم طولانی‌تر ولی جواب‌ها از نظر فیزیکی، منطقی‌تر می‌باشند. برای کمینه‌کردن تابع هدف به‌طور معمول از تئوری حدّاقل مربّعات یا حدّاکثر درست‌نمایی استفاده می‌شود که حلّ آن‌ها شامل دو روش زیر می‌باشد:

روش مبتنی بر الگوریتم گوس- نیوتن

روش مبتنی بر الگوریتم گرادیان

در روش غیرمستقیم، بهینه‌سازی پارامتری با استفاده از یک کد کامپیوتری مدل معکوس که براساس تئوری وارونگی است (Inversion theory)، انجام می‌شود. هدف مدل معکوس، استنباط از طریق اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم مدل می‌باشد. در روش‌های وارونگی تعیین ساختار سیستم یا حلّ مدل یک سیستم شامل چهار مرحله‌ی جداگانه می‌باشد، که عبارتند از: مرحله‌ی پیشرو مسئله، مرحله‌ی برآورد، مرحله‌ی ارزیابی نتایج و مرحله‌ی تصمیم‌گیری.

در مسائل معکوس آب‌های زیرزمینی پارامترهای مورد نظر برای تخمین‌زده شدن، عمدتاً پارامترهای هیدروژئولوژیکی و هیدرودینامیکی بوده و متغیّرهای وابسته اندازه‌گیری شده، کمیّت‌هایی مانند بار هیدرولیکی در چاه‌های مشاهدهای یا پیزومترها، هدایت هیدرولیکی، غلظت مواد، درجه‌ی حرارت و... می‌باشند. لازم به ذکر است که حلّ پیشرو معادلات دیفرانسیل از نظر ریاضی حالت مشخّصی دارد که یکی از شرایط شامل وجود جواب، یکتایی جواب و یا پایداری حاکم بر آن است. دلیل این امر آن است که در حلّ پیشرو، مسیر مشخّص است و نهایتاً مسئله به یک جواب خواهد رسید، ضمن این‌که جواب‌ها نیز پایدار هستند. درصورتی‌که روش بهینه‌سازی مستقیم از نظر ریاضی مبهم و ناشناخته است و ممکن است هرگز به جواب منطقی و قابل قبول از نظر فیزیکی نرسد و یا این‌که تعداد زیادی جواب در پارامترهای هیدرودینایکی آبخوان به‌دست آید. از طرف دیگر خطاهای کوچک در اندازه‌گیری سطح آب در روی زمین می‌تواند باعث ایجاد خطاهای بزرگ در برآورد پارامترها و در نتیجه ناپایداری حل شود .(Chen & Chen 2003a)

اکثر روش‌های معکوس شناسایی اتوماتیک پارامترهای مدل، برمبنای روش غیرمستقیم بنا شده، که طی آن کمینه‌سازی مقادیر تابع خطاها صورت می‌گیرد. تابع خطا معمولاً به‌عنوان مجموع مربّع خطای باقیمانده‌های وزن‌دار (S)، در تمام نقاط مشاهده‌ای و در تمام زمان‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i = \sum_{i=1}^{n} w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad (۱)$$

که در آن و به ترتیب متغیّرهای وابسته مشاهداتی و محاسباتی در نقطه‌ی مشاهده‌ای می‌باشند.خطای باقیمانده‌های وزن‌دار برای نقطه‌ی مشاهده‌ای(i) و (n) تعداد کلّ نقاط مشاهده‌ای می‌باشد. این گونه روش‌های معکوس به‌عنوان روش‌های حدّاقل مربّعات و یا رگرسیون غیرخطّی(test Square) نامیده می‌شوند.

مدل‌های جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی غالباً غیرخطّی هستند، در نتیجه متغیّرهای وابسته مدل توابع خطّی از پارامترهای مدل نمی‌باشند. به‌طورکلّی یک مدل غیرخطّی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$yi = f(x_i, y_i, z_i, t_i, \alpha_1, \ldots \alpha_m) + \varepsilon_i \qquad (۲)$$

که در آن $y_i$ متغیّر وابسته مشاهده‌ای است، $f_i$ مقدار محاسبه‌ای به ازای متغیّر وابسته است؛ t, z, y, x متغیّرهای مستقل (مکان و زمان در یک مدل)، $\alpha_i \ldots \alpha_m$ پارامترهای مدل و $\varepsilon_i$ باقی‌مانده می‌باشد.

تابع خطای مجموع مربّعات وزن‌دار برای مدل‌های غیرخطّی را به‌صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$S = \sum_{i=1}^{n} w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i-1}^{n} \omega_i [y_i - f_i]^2 \qquad (۳)$$

کمینه کردن مطالعه‌ی فوق برای دستیابی به مقادیر پارامتری بهینه می‌تواند به‌گونه‌ای مشابه به آنچه برای مدل‌های خطّی صورت می‌گیرد انجام شود. هرچند تفاوت‌های عمده‌ی فراوانی ممکن است وجود داشته باشد.

هدف یک مدل ریاضی، استفاده از داده‌های سیستم آب زیرزمینی برای تولید اعداد می‌باشد، که این اعداد آنچه را که یک سیستم طبیعی و یا ساختگی تحت رژیم واکنشی تحریک‌پذیر معیّن نشان می‌دهند، را پیش‌بینی می‌نمایند.

با توجّه به موارد گفته شده، روش‌های وارونگی به‌عنوان یک فرایند بهینه‌سازی (Optimization) مدّنظر قرار می‌گیرند که در آن مدلی که کمترین مقدار خطا را داشته باشد و به بهترین صورت مشاهدات را توضیح دهد، مورد جستجو قرار می‌دهند.

در این روش میزان برازش (Fitness) یا عدم برازش (Misfitness) بین داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به‌عنوان مقیاسی از سازگاری مدل ساخته شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های بهینه‌سازی بر اساس روشی که برای جستجوی مدل بهینه به‌کار می‌روند متفاوت می‌باشند (ساعت ساز ۱۳۸۲).

از جمله کدهای تخمین پارامتری (Parameter estimation) معمول مورد استفاده، نرم‌افزار مدفلو (MODFLOW) و نرم‌افزار یونی‌ورسال اینورس (Universal Inverse Modeling Code) می‌باشند (Harbaugh & Mc Donald 1996). برآورد پارامترهای غیرخطّی یک علم می‌باشد گرچه می‌توان آن را یک هنر دانست. این برآوردگرها می‌توانند فقط به تکمیل تلاش‌های ما در فهم یک سیستم و استنباط پارامترهای آن به‌کار برده شوند. در این تحقیق به‌دلیل مقایسه‌ی دو روش برسنجی، توضیحاتی درخصوص ویژال مدفلو (Visual MODFLOW) و پی ام وین (PMWIN) داده می‌شود. ویژال مدفلو نرم‌افزاری کامل و ساده برای استفاده در شبیه‌سازی، با محیط مدل‌سازی گرافیکی جریان سه بعدی آب زیرزمینی و انتقال آلودگی و در سطح تخصّصی می‌باشد. داده‌های ورودی و خروجی در این نرم‌افزار به‌صورت تمام صفحه یا به شکل مقاطع مختلف قابل نمایش می‌باشند. این نرم‌افزار ویژال مدفلو برای اوّلین بار در سال ۱۹۹۴ تهیّه گردید و در حال حاضر به‌طور گسترده‌ای در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه صحّت این نرم‌افزار با توجّه به استفاده‌ی گسترده‌ی آن مورد تأیید بوده و نقاط ضعف و قوّت آن مشخّص می‌باشد. زبان برنامه‌نویسی این نرم‌افزار فرُترن ۷۷ بوده و روش حل معادلات حاکم بر آبخوان در این نرم‌افزار تفاضل محدود با شبکه‌های مدلی مرکز بلوکی (Block Centered) می‌باشد. ساختار برنامه بسته‌ای (Modular) است، که شامل یک برنامه‌ی اصلی و یک سری از برنامه‌های فرعی (Subroutine) کاملاً مستقل می‌باشد که بسته (Modules) نامیده می‌شود. بسته‌ها به‌صورت بسته‌های گروه‌بندی شده هستند که هر بسته در ارتباط با قسمتی از سیستم هیدروژئولوژیکی است که باید شبیه‌سازی شود.

در نرم‌افزار ویژال مدفلو سه بسته‌ی اصلی وجود دارد که عبارتند از: ورودی‌های مدل (Input Module)، اجرای مدل (Run Module) و خروجی‌های مدل (Output Module). هنگامی که یک فایل فراخوانی و یا تولید می‌شود در واقع بین هر سه بسته جهت ورود داده‌ها، اجرای شبیه‌سازی و نمایش نتایج ارتباط برقرار می‌شود (Chen & Chen 2003b و سروری ۱۳۸۲).

نرم‌افزار پی ام وین (Processing MODFLOW 5.1.7) به دلیل قابلیّت‌های بیشتر آن که توانایی بهینه‌سازی (Optimization) به روش معکوس را دارد به‌عنوان نرم‌افزار دیگر جهت برسنجی و مقایسه‌ی نتایج برسنجی در دو حالت دستی و خودکار معرّفی می‌گردد. ساختار این نرم‌افزار نیز مدولی بوده و ویژگی آن داشتن بسته‌های نرم‌افزاری چون پست (Pest) ، یوکد (Ucod) و... می‌باشد که با بهره‌گیری از روش‌های وارونه توانایی برآورد پارامترهای بهینه را دارد. نرم‌افزار پی ام وین در سطح بسیار تخصّصی بوده که امکانات بسیار مناسبی برای شبیه‌سازی جریان و انتقال جرم در آن قرار داده شده است. از آنجایی که در نرم‌افزار ویژال مدفلو ۲/۶، امکان برسنجی خودکار وجود ندارد، با تشکیل یک فایل با پسوند nam (*.nam) مدل ساخته شده در این نرم‌افزار را می‌توان به یک مدل قابل شناسایی برای پی ام وین تبدیل نمود. بدیهی است این عمل به‌منظور جلوگیری از اتلاف وقت جهت وارد نمودن مجدّد تمامی داده‌های مدل مفهومی می‌باشد. در غیر این صورت می‌توان از قابلیّت‌های نرم‌افزاری پی ام وین جهت ورود و پردازش اطّلاعات استفاده کرد.

پست (Pest) یک بسته‌ی نرم‌افزاری برای برآورد پارامترهای غیرخطّی می‌باشد که می‌تواند کنترل یک مدل را در دست گرفته و آن‌چنان‌که برای نزدیکی کامل پارامترهای محاسباتی و مشاهده‌ای مورد نیاز باشد مدل را به دفعات زیاد اجرا کند تا این‌که به کمترین مربّعات وزن شده نائل گردد. با این عمل پست پارامترهای گوناگون و مقادیر مختلف آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داده و مدل‌های متنوّعی را ارائه می‌دهد و با همخوان کردن خود با شرایط حاکم بهترین مدل به‌دست آمده را انتخاب می‌نماید. این بسته‌ی نرم‌افزاری با اجرای یک واریانس قدرتمند و ویژه (Leven berg-Marquardt-Gauss) با روش برآورد غیرخطّی پارامترها می‌تواند آشفتگی‌ها و ناهمگنی‌های موجود و پیچیده را تقریب بزند و به‌دلیل ارتباط آسان آن با سایر نرم افزای‌های مدل‌ساز، نیازی به تهیّه‌ی مجدّد مدل و تعریف ساختار و شرایطی اولّیه ندارد، لذا از صرف وقت بیشتر جلوگیری می‌نماید.

آنچه که در پست ویژگی محسوب می‌شود این است که به کاربر اجازه می‌دهد با استفاده از نتایج آزمایشات، مشاهدات و تفسیر داده‌های اولّیه و تعریف آن‌ها برای مدل برآورد پارامترها و حدود تغییرات آن‌ها را کنترل نموده و مدلی منحصر به فرد ایجاد نماید.

سایر ویژگی‌هایی که برای پست می‌توان در نظر گرفت عبارتند از:

- پارامترهای مدل منحصر به‌فرد را به‌صورت پارامترهای قابل تنظیم، ثابت و یا در ارتباط با سایر پارامترها طرّاحی کرد و برای افزایش تأثیر بهینه‌سازی می‌توان پارامترهای قابل تنظیم را به حالت لگاریتمی تغییر شکل داد.

- با تحمیل حدود بالایی و پایینی تعریف شده برای پارامترها، مقادیر بهینه‌ی پارامترها را کنترل و منحصر به‌فرد نمود.

- اجرای پست را می‌توان در زمان‌های مختلف قطع نمود. این عمل برای بازرسی جزئیات در فایل‌های ثبت شده در هر اجرا مهم می‌باشد. سپس می‌توان پست را از آن زمانی که قطع شده است مجدداً اجرا نمود.

- تمامی بانک داده‌های پست دارای اختصاصات پویا می‌باشند. از این رو اندازه‌ی مسئله که شامل تعداد پارامترهای قابل تنظیم و اندازه‌ی داده‌های مشاهداتی است، فقط به‌وسیله‌ی مقدار حافظه‌ی نصب شده توسّط کاربر بر روی ماشین محدود می‌شود.

- وضعیّت حسّاسیّت پارامترها به‌طور پیوسته در هر بار تکرار ثبت می‌شوند که به کاربر اجازه می‌دهند به سادگی پارامترهای مشکل را مورد ارزیابی قرار دهد.

-کاربر می‌تواند در فرایند تخمین پارامترها دخالت نماید و پارامترهایی که تمایل به افزایش غیرواقعی را دارند ثابت نگه دارد.

- می‌توان پارامترها و مشاهدات را در زیرگروه‌های مجزایی تقسیم نمود. این عمل برای تخصیص متغیّرهای کنترل کننده‌ی محاسبات مشتقّات مدل و ارزیابی همخوانی مشاهدات گوناگون با تابع هدف کاربرد دارد.

- پست محاسبه‌ی آماری داده‌های مربوط به مقادیر پارامترهای بهینه شده را با ۹۵ درصد فاصله‌ی اطمینان همراه با کوواریانس پارامترها و ماتریس ضریب همبستگی انجام داده و در یک صفحه‌ی گسترده نمایش می‌دهد (Chen & Chen 2003b).

آن‌چنان‌که برآورد پارامترهای غیرخطّی یک علم می‌باشد می‌توان آن را یک هنر نیز دانست. پست یا هر برآوردکننده‌ی پارامتری می‌تواند فقط برای تکمیل تلاش‌های ما در فهم یک سیستم و استنباط پارامترهای آن به‌کار برده شود. اصولاً برنامه‌های مدل‌ساز نیاز به چهار نوع داده‌ی اصلی دارند که عبارتند از:

۱) داده‌های ثابت (Fixed data) که سیستم را تعریف می‌نمایند، مانند شکل آبخوان و هندسه‌ی آن

۲) پارامترها که خصوصیّات سیستم را بیان می‌نمایند، مانند هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره

۳) محرّک‌ها (Excitations) که سیستم را هدایت می‌نمایند، مانند داده‌های هواشناسی.

۴) داده‌های کنترل (Control data)، این داده‌ها وضعیّت روش حلّ عددی معادلات سیستم را در اختیار دارد.

در اغلب مدل‌ها تشخیص حدود این چهار نوع داده واضح نمی‌باشد. هدف مدل ریاضی استفاده از داده‌های ذکر شده برای تولید اعداد می‌باشد که این اعداد آنچه که یک سیستم طبیعی و یا ساختگی تحت رژیم تحریکاتی معیّن واکنش نشان می‌دهند را پیش‌بینی می‌نمایند. حال اگر مقادیر مشاهده‌ای یا نتایج آزمایشگاهی متناظر با اعداد تولید شده توسّط مدل وجود داشته باشند، پست می‌تواند پارامترهای مدل را تنظیم نماید و تنش‌های وارده را در نظمی که تفاوت بین اعداد تولید شده توسّط مدل و اندازه‌گیری‌های متناظر با آن‌ها به کمترین مقدار ممکن کاهش داده شوند به‌کار می‌برد. این

عمل به‌وسیله‌ی در دستگیری کنترل مدل و اجراهای زیاد آن به دفعات زیاد تا حدّ نیاز برای تنظیم و تعیین وضعیت بهینه‌ای از پارامترها و تنش ها انجام می شود.

اغلب یک مدل حقیقی را شبیه‌سازی می کنند که کاربر از آن حقیقت آگاهی کامل ندارد. در واقع مدل‌ها اغلب برای استنباط حقیقت از مقایسه‌ی اعداد تولید شده با اعداد به‌دست آمده از مشاهدات، استفاده می کنند که نتیجه‌ی آن رسیدن به مقادیر نزدیک به واقعیّت می باشد. پست در مورد تمام مدل‌های موجود برای استنباط جنبه‌هایی از واقعیّت که ممکن است تابع اندازه‌گیری‌های مستقیم نباشد استفاده می شود. به‌طورکلّی استفاده از این بسته در دو مقوله‌ی تفسیر سیستم و برسنجی آن می باشد.

مدل‌های خطّی مدل‌هایی هستند که در آن‌ها مشاهدات از پارامترهایی محاسبه می شوند که در معادله‌ی ماتریسی آن‌ها ضرایب پارامتری ثابت می باشند. بهینه‌سازی در این مدل‌ها می تواند در یک مرحله انجام داده شود. امّا برای مسائل غیرخطّی برآورد پارامترها یک فرایند تکرار می باشد. در شروع هر تکرار، ارتباط بین پارامترهای مدل و مشاهدات و نتایج به‌دست آمده با استفاده از فرموله کردن آن‌ها به‌صورت یک بسط تیلور برای بهتر کردن وضعیت پارامترهای جاری معادله، خطّی می گردد. بنابراین مشتقّ تمامی مشاهدات در ارتباط با تمامی پارامترها باید محاسبه شود. این مسئله‌ی خطّی شده، سپس برای بهترین وضعیت پارامترهای به‌دست آمده حل می شود و پارامترهای جدید به وسیله‌ی اجرای مجدّد مدل آزمایش می شوند. با مقایسه‌ی تغییرات پارامترها و بهبود تابع هدف به‌دست آمده از میان تکرارهای جاری با تکرارهای قبلی به‌دست آمده پست می تواند تشخیص دهد که آیا این جواب نسبت به سایر تکرارهای بهینه‌سازی شده با ارزش می باشد یا نه، در غیر این صورت تمامی فرایندهای ذکر شده مجدداً تکرار می گردد تا نتیجه‌ی مطلوب به‌دست آید (سروری ۱۳۸۲).

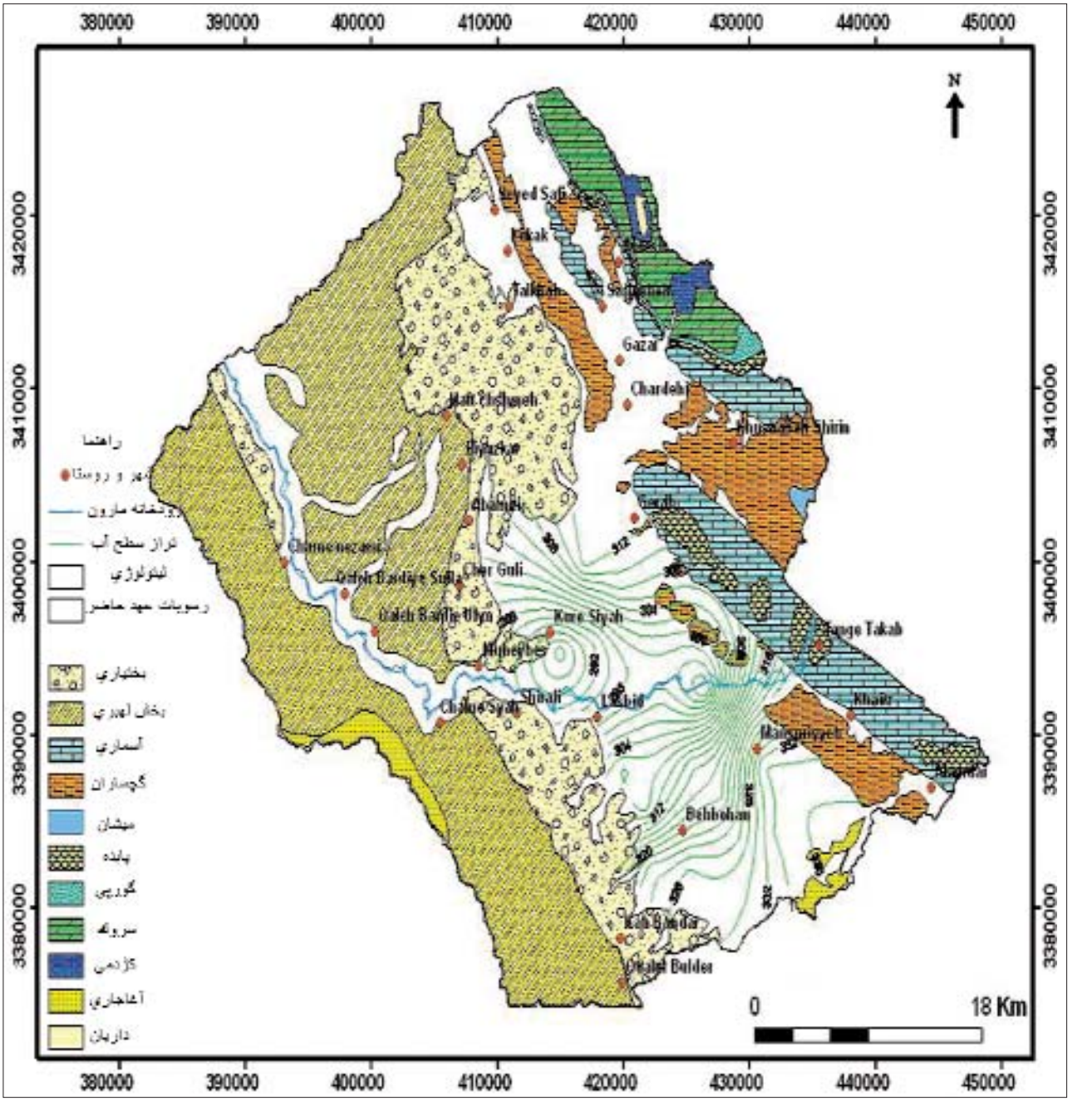
به منظور مقایسه‌ی دو حالت برسنجی در دو نرم‌افزار معرّفی شده، شبیه‌سازی دشت بهبهان در این مقاله ارائه می گردد.

هدف از انجام این مطالعه شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی محدوده‌ی مورد نظر جهت استفاده‌ی کاربردی و مدیریتی از پارامترهای محاسبه شده و قطعیّت داده شده‌ی آبخوان است. شناسایی مقدماتی واحدهای هیدرواستراتیگرافی محدوده نشان می دهد که منطقه در مجاورت تاقدیس خویز در زاگرس چین‌خورده قرار گرفته است و از رسوبات آبرفتی ناشی از فرسایش سازنده‌ای قدیمی‌تر و رخنمون یافته در محدوده‌ی منطقه که عمدتاً گروه فارس می باشند تشکیل شده است (کلانتری ۱۳۸۶). نقشه‌ی هیدروژئولوژی و تراز آب دشت بهبهان در تصویر ۱ نشان داده شده است.

مطالعات اولیّه با برّرسی لاگ‌های ۳۸۰ حلقه چاه و ۲۱ پیزومتر و تعدادی سونداژ ژئوفیزیکی در کلّ محدوده تکمیل گردید و در نهایت هندسه‌ی فیزیکی مدل و محدوده‌ی مرزی و نوع آبخوان شناسایی شد. وضعیّت توپوگرافی و سنگ کف در تصاویر ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

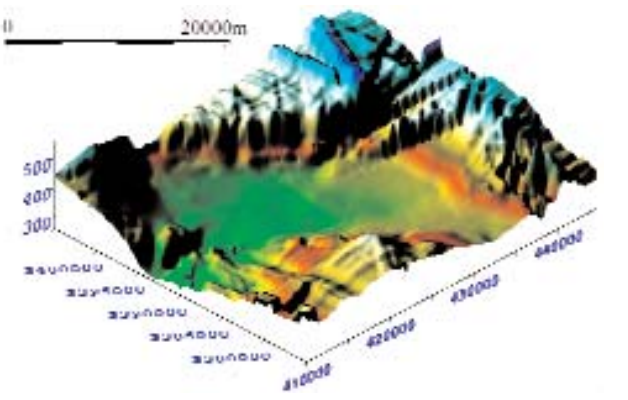
در این راستا واحدهای استراتیگرافی و مرزهای سیستم طی بازدیدهای صحرایی و آنالیز مقدماتی داده‌ها تفکیک و تعیین گردیدند. بسته‌ی نرم‌افزاری انتخابی به کمک معادله‌ی حاکم (Governing equation) و پس از ورود داده‌ها و طراحی شبکه‌ی مدل، انتخاب گام‌های زمانی و پریودها، همچنین مرزها و شرایط اولیّه، آماده‌ی برسنجی می گردد. در این تحقیق نرم‌افزار ویژال مدفلو (Visual MODFLOW v.2.8.2) در کنار پی ام وین که قابلیّت ویژه‌ای در بهینه‌سازی به روش معکوس را داراست جهت انجام همزمان برسنجی دستی و خودکار به‌کار گرفته شد. برسنجی خودکار به کمک بسته‌ی پست که قابلیّت برآورد پارامترهای غیرخطّی و اجراهای متوالی (Run) مدل برای رسیدن به تطابق پارامترهای محاسباتی و مشاهداتی و نیل به کمترین مربّعات وزن شده خطا را داراست انجام گرفت.

طرّاحی شبکه‌بندی تفاضل محدود (Finite differences) با ۶۰×۷۰ سلول مرکزدار (Block centered) با مساحت ۵۰۰ متر و غیرفعّال نمودن سلول‌های خارج مرز صورت گرفت. از سطح آب ۲۱ پیزومتر فعّال موجود در محدوده‌ی مرزی مدل جهت برآورد سطح آب اولیّه (Initial head) استفاده شد. انتخاب استرس پریود و گام زمانی نیز برای برسنجی و صحّت‌سنجی به کمک برّرسی هیدروگراف واحد پنج‌ساله که روند نسبتاً صعودی نشان می‌داد با انتخاب استرس پریودهای ماهانه (۷۲۰ روز) از مهر ۸۳ لغایت مهر ۸۵ صورت گرفت. نقشه‌ی محدوده‌ی مدل‌سازی شده پس از وارد نمودن کلّیه‌ی چاه‌ها در محیط مدفلو و نیز نقشه‌ی شماتیک منطقه‌بندی ضرایب هیدرودینامیک آبخوان پس از پایان برسنجی در محیط پی ام وین در تصویر ۴ ارائه شد.

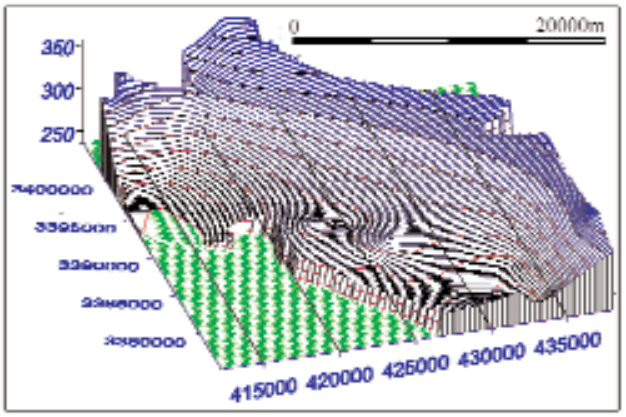



تصویر ۱- نقشه‌ی هم تراز جریان آب زیرزمینی آبخوان، فروردین ۸۵

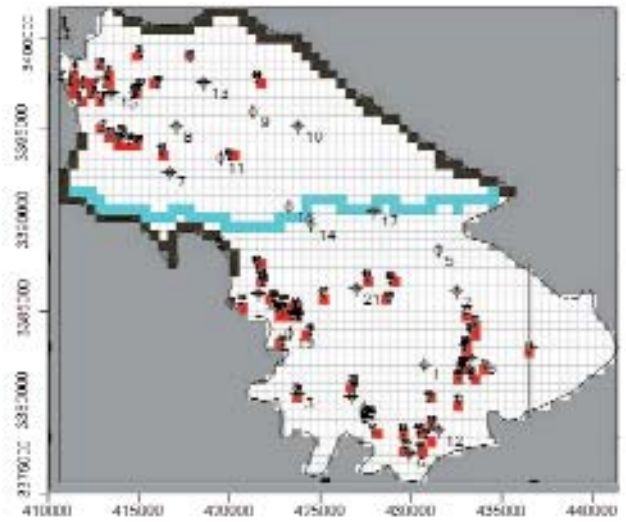
ضرایب هیدرودینامیک اولّیه‌ی آبخوان نیز که نتیجه‌ی تفسیر داده‌های آزمون پمپاژ در منطقه است در دوازده زون منطقه‌بندی گردید. حدّاقل هدایت هیدرولیکی ۰/۵m/day و حداکثر ۲۵m/day بوده و حدّاقل آبدهی ویژه‌ی ۱ و حدّاکثر ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین در محدوده‌ی مورد مطالعه درصد نفوذ ریزش‌های جوّی نیز ۲۲ درصد برآورد شد. قسمت‌های مرزی محدوده‌ی مدل نیز با اعمال شرط مرزی (GHB: Groundwater Head Boundary) و پس از محاسبه‌ی اولّیه‌ی میزان ورودی و خروجی در کانال‌های جریان در محدوده‌ی مدل و لحاظ نمودن مقادیر رسانایی (Conductance) و



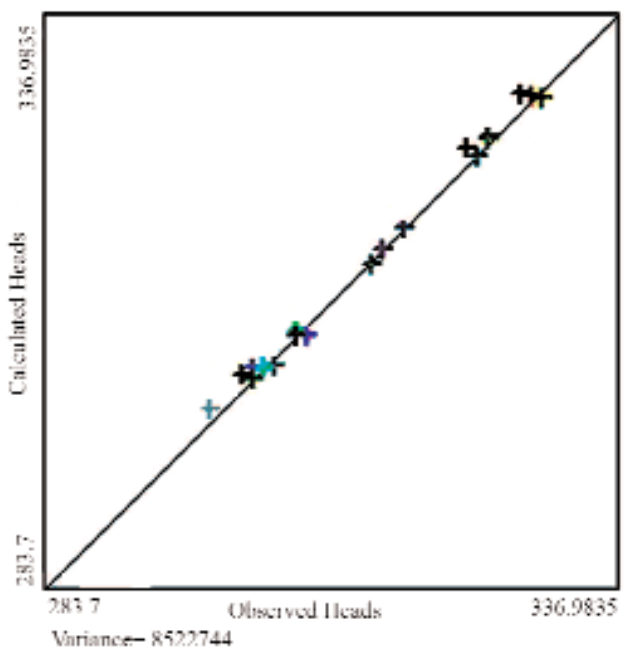

تصویر ۲- نقشه‌ی سه بعدی شبیه‌سازی شده‌ی ارتفاع مطلق سطح زمین در دشت مورد مطالعه




تصویر ۳- نقشه‌ی سه بعدی ارتفاع مطلق سنگ کف دشت



تصویر ۴- محدوده‌ی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار انتخابی (PMWIN)




تصویر ۵- برازش مقادیر بارهای محاسباتی و مشاهداتی مدل در انتهای دوره برسنجی

تراز آب موجود در بسته‌ی مرزی نرم‌افزاری انجام شد. پس از لحاظ نمودن سایر مقادیر تغذیه و تخلیه‌ی آبخوان مانند بارندگی و تبخیر، پارامترهای بیلان تعریف گردید و هر کدام به‌صورت فایل مناسب وارد نرم‌افزار شد و مدل آماده‌ی اجرا گردید. بدیهی است در این مرحله اجراهای متوالی دستی و آنالیز حسّاسیّت متنوّعی صورت می گیرد و همچنین انتخاب حدود مختلف پارامترها جهت برسنجی خودکار و برّرسی حالت های مختلف مدل تفهیمی انجام شده است تا بهترین برازش بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی سطح آب برقرار گردد. در این مرحله سعی گردید در طی مراحل برسنجی دستی حدود تغییر پارامترها به شکل منطقی آنالیز گردد تا در مراحل برسنجی اتوماتیک مدل های مفهومی منطقی حاصل گردد. با توجّه به این که خطای میانگین جذر مربّعات(RMS) در انتهای مرحله‌ی برسنجی قابل قبول به‌نظر رسید مدل وارد مرحله‌ی صحّت‌سنجی گردید. برای این مرحله یک پریود ۱۸۰ روزه در نظر گرفته شده بود و مدل برازش خوبی را در این مرحله نیز نشان داد و خطای واریانس میزان ۰/۸ را نشان داد. تصویر ۵ تطابق بارهای محاسباتی و مشاهداتی مدل در انتهای دوره‌ی برسنجی را نشان می دهد. در نهایت از مدل تهیّه شده جهت استفاده کاربردی و مدیریتی مانند محاسبه‌ی بیلان و برآورد سایر پارامترهای آبخوان استفاده گردید.

## ۳- نتیجه‌گیری

از مطالعه‌ی انجام گرفته در خصوص مراحل برسنجی و تهیّه‌ی مدل آبخوان دشت بهبهان نتایج ذیل حاصل گردید:

۱- استفاده از نرم‌افزار پی ام وین به کاربر اجازه می دهد در هنگام برسنجی، امکان برسنجی هم‌زمان دستی (سعی و خطا) و همچنین خودکار (اتوماتیک) را در اختیار داشته و مدل های مفهومی متفاوتی را در الگوریتم مدل، تصحیح (Feed Back) نماید.

۲- پارامتری که در مرحله‌ی واسنجی مدل سازی بیشتر از بقیه‌ی پارامترها مورد ارزیابی و آنالیز حسّاسیّت قرار گرفت هدایت هیدرولیکی بود چرا که آزمون های پمپاژ با وجود خوب بودن نتایج، ناکافی بوده و تعمیم پارامتر k و منطقه‌بندی را دشوار نموده است. در نهایت انتخاب دوره‌ی زمانی مناسب و تعداد استرس پریودهای زیاد ماهانه در مرحله‌ی برسنجی موجب قطعیّت مقادیر نهایی و تسریع نتیجه‌ی مناسب در مرحله‌ی صحّت سنجی گردید. پس از شبیه سازی

و قطعیّت بخشیدن به مقادیر پارامترهای مدل، ضرایب هیدرودینامیک نهائی آبخوان برآورد گردید. مقادیر درصد آبدهی ویژه از ۰/۲۵ تا ۰/۱ درصد و هدایت هیدرولیکی حداکثر ۲۵m/day و حداقل ۰/۵m/day تخمین زده شد. درصد نفوذ ریزش‌های جوّی نیز ۲۲درصد برآورد گردید.

## ۴- تقدیر و تشکّر

به این وسیله از مدیریت محترم مطالعات پایه‌ی سازمان آب و برق خوزستان جهت تأمین هزینه‌ی اجرای پروژه و در اختیار گذاردن اطلاعات پایه تشکّر و قدردانی می‌شود.

## مراجع

**ساعت‌ساز، م.، ۱۳۸۲،** "مطالعه‌ی استفاده توام از منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت رامهرمز جهت توسعه‌ی کشاورزی با استفاده از مدل ریاضی عددی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی دانشکده‌ی علوم دانشگاه شهید چمران.

**سروری، م.، ۱۳۸۲،** "شبیه‌سازی آبخوان دشت دوسلق با استفاده از مدل ریاضی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی دانشکده‌ی علوم، دانشگاه شهید چمران.

**کلانتری، ن.، ۱۳۸۶،** "مطالعات نیمه تفصیلی آب زیرزمینی دشت بهبهان"، گزارش شماره‌ی ۴۶، سازمان آب و برق خوزستان.

**Chen, X. H. & Chen, X., 2003a,** "Sensivity analysis and determination of stream bed leakage and aquifer hydraulic properties", *J. Hydrol., Vol. 284: 270-284.*

**Chen, X. H. & Chen, X., 2003b,** "Effect of aquifer anisotropy on the migration of infiltrate stream water to pumping well", *J. Hydraulic Eng., Vol. 8 (5): 287-293.*

**Harbaugh, A. W. & Mc Donald M. G., 1996,** "Users documentation for MODFLOW-96 an update to US Geological Survey modular finite- difference groundwater flow model", *USGS open file Report: 96- 485.*

**Richard, J. M., 2002,** "Groundwater modeling program", *Michigan department of environmental quality, 54p.*