Archive of SID

بررسی و کمی‌سازی عدم قطعیت در مدل آب زیرزمینی آبخوان دشت کـازرون به کمک مشخصه‌های آمـاری

منوچهر چیت‌سازان*[۱]، محمدجواد عابدینی[۲] و منصور سالک[۳]

پست الکترونیکی: chitsazan_m@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۸۳/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۸۶/۱/۷

چکیده

کارآیی مدل‌های معکوس در رسیدن به اهداف مدیریتی و به‌دست آوردن پارامترهای بهینه و دقیق ثابت گردیده و بر انجام استفاده از آن برای بررسی و ارزیابی عدم قطعیت برای افزایش کارآیی مدل و تخمین هرچه صحیح‌تر پارامترهای هیدروژئولوژیکی، مورد تأکید قرار گرفته است. در این تحقیق با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی منطقه، مدل جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت کازرون به منظور بهینه‌سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان تهیه گردیده و روش واسنجی خودکار مورد ارزیابی و تأثیر آنالیز حساسیت و تجزیه و تحلیل مشخصه‌های آماری در کمی‌سازی عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تعیین هدف از تهیهٔ مدل فرآیند تهیهٔ مدل آب زیرزمینی کازرون با تحلیل داده‌های ورودی و پیرو آن تهیهٔ مدل مفهومی آغاز گردید و سپس با توجه به توانائی‌های مدل MODFLOW2000 در ارائهٔ مشخصه‌های آماری ارزشمند به‌صورت خروجی، بهینه‌سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی، روند مدل‌سازی با توجه به کمی‌سازی عدم قطعیت داده‌ها و پارامترهای مدل صورت گرفت. در مرحلهٔ طراحی مدل، محدودهٔ مورد مطالعه به شبکه‌های منظم تقسیم‌بندی گردیده، و شرایط اولیه و همچنین شرایط مرزی مشخص شد. پس از مشخص کردن پارامترهای هیدروژئولوژیکی مجهول، برای تعیین مقادیر بهینه این پارامترها از روش واسنجی خودکار استفاده و برای بالا بردن کیفیت واسنجی، از حساسیت‌های محاسبه شده، ضریب همبستگی، و فواصل اطمینان استفاده شد. حساسیت مرکب مقیاس‌بندی شده نیز برای مشخص کردن این که کدام پارامتر را می‌توان با دقت بالاتری تخمین زد مؤثر واقع شد. مشخصه‌های آماری مذکور را نمی‌توان با استفاده از روش واسنجی دستی سعی و خطا به‌دست آورد و در نتیجه چنان‌چه مدل ساخته شده در این تحقیق به روش سعی و خطا واسنجی می‌گشت، از قابلیت اعتماد کم‌تری برخوردار می‌بود.

واژه‌های کلیدی: *کمی‌سازی، عدم قطعیت، مدل مادفلو ۲۰۰۰، آبخوان کازرون، مشخصه‌های آماری*

* ۱- دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- دانشیار گروه عمران دانشگاه شیراز

۳- دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید چمران اهواز

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته

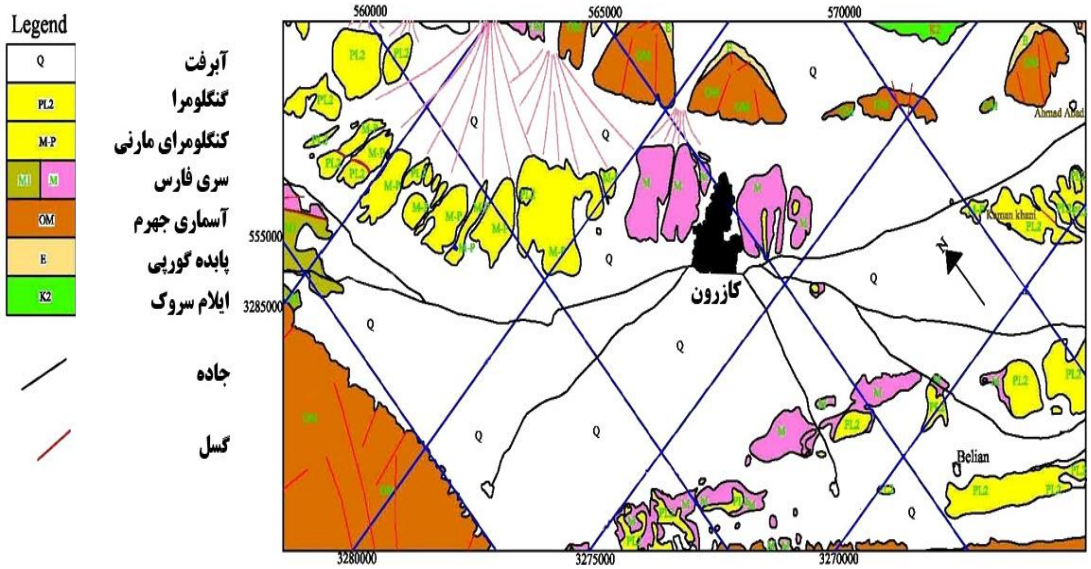
با توجه به متفاوت بودن نحوهٔ طراحی مدل، تعیین پارامتر و غیره توسط مدل‌سازان مختلف، نتایج به‌دست آمده نیز یکسان نخواهد بود. در این‌حالت، برای تصمیم‌گیران[1] و کاربرانی که بر دانش مورد نیاز مدل‌سازی احاطه ندارند این سؤال پیش می‌آید که کدامیک از مدل‌های تهیه شده بهترین مدل است؟ در حقیقت مفید و کارا بودن مدل آب زیرزمینی را می‌توان با ارزیابی عدم قطعیت ۷ مدل‌سازی به‌عنوان معیاری برای تعیین میزان معلوم بودن خروجی‌های مدل بررسی کرد، و این کار مستلزم کمی‌سازی کیفیت خروجی‌ها و فراهم کردن چارچوبی مناسب برای کاربر جهت تفسیر آن می‌باشد. در واقع، میزان دقت و صحت مدل بایستی به حدی برای تصمیم‌گیران واضح باشد که بتوانند به مدل تهیه شده برای اعمال تصمیم‌های آتی اطمینان کنند؛ مطرح کردن عدم قطعیت به‌صورت کمی، آن‌ها را از میزان صحت مدل مطلع می‌سازد. از طرفی، عدم قطعیت داده‌های ورودی و ساختار مدل جزء لاینفک مدل‌های ریاضی می‌باشند و هیچ شبیه‌سازی آبخوانی عاری از خطا نمی‌باشد. خطای مذکور معمولاً اشکالاتی را در به‌کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی و اعمال تصمیم‌گیری و ارزیابی‌های مدیریتی ایجاد می‌کند. لذا بررسی و کمی‌سازی عدم قطعیت به نحوی که اطمینان کافی را از استفاده از مدل‌ها ایجاد کند از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های متعددی برای کمی‌سازی عدم قطعیت به طرق مختلفی صورت می‌گیرند و می‌تواند با انجام آنالیز حساسیت (در طول فرآیند واسنجی و یا پس از آن) و با به‌کارگیری و بررسی مشخصه‌های آماری صورت گیرد. اهمیت مطالعه عدم قطعیت در علوم مختلف از جمله هیدروژئولوژی و در تهیهٔ مدل‌های آب زیرزمینی برای به‌دست آوردن نتایج بهینه و معقول توسط دانشمندان متعددی از جمله [۱-۷] بررسی شده است؛ این مطالعات به حدی مهم تلقی شده‌اند که آن را برای انجام تصمیم‌گیری‌های حیاتی و آنالیزهای مدیریتی لازم می‌دانند [۸]. در ایران، به‌کارگیری مدل‌های ریاضی مستقیم به سال ۱۹٦۷ میلادی برمی‌گردد و اولین آبخوانی که مدل آن تهیه گردید، آبخوان ورامین (جنوب شرقی تهران) بوده است [۹]. اما به‌کارگیری مسائل معکوس در مدل‌سازی به علت مشکلات موجود در به‌کارگیری روش حل معکوس، بسیار محدود بوده است. از جمله تحقیقات معدود بعمل آمده می‌توان به [۱۰] اشاره کرد که کد کامپیوتری PEST را به مدل آب‌های زیرزمینی دشت خفر فارس مرتبط ساخته است و از این راه به پارامترهای بهینهٔ مربوطه دست یافته است [۱۱] از دو روش تصادفی و تعیینی به طور همزمان داریان فارس استفاده کرده‌اند و نتایج مطلوبی را از این راه به‌دست آورده‌اند. [۱۲ و ۱۳] از مدل VisualMODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت دوسلق استفاده کرده و پس از واسنجی مدل به روش دستی سعی و خطا و به‌دست آوردن مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به مقادیر مشاهده‌ای، از نرم‌افزار PMWIN برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی دشت استفاده کرده است. عدم قطعیت از نقطه‌نظر خطا (اختلاف بین مقادیر مشاهدات و محاسبات) و حساسیت (معیاری از عکس‌العمل مدل به تغییرات اعمال شده) تعریف می‌گردد، به همین دلیل برای افزایش کیفیت شبیه‌سازی همواره باید سعی گردد که خطا و حساسیت هر دو کاهش داده شوند. علاوه بر این، فاکتور هزینه نیز یک عامل مهم و تأثیرگذار در انتخاب مدل برتر می‌تواند باشد. در این تحقیق، بررسی و کمی‌سازی عدم قطعیت مدل به کمک آنالیز حساسیت و

1- Decision-makers

www.SID.ir

Archive of SID

با تجزیه و تحلیل مشخصه‌های آماری که به صورت خروجی از اجرای مدل MODFLOW-2000 به‌دست می‌آیند صورت گرفته است.



شکل ۱– نقشهٔ زمین‌شناسی و موقعیت محدودهٔ مورد مطالعه

موقعیت منطقه مورد مطالعه و زمین‌شناسی

دشت کازرون در ۱۰۰ کیلوکتری غرب شهر شیراز بین طول‌های جغرافیایی ′۳۱/۵ °۵۱ و ′۵۸/۵ °۵۱ و عرض‌های جغرافیایی ′۲۹ °۲۶ و ′۴۸ °۲۹ قرار دارد. مساحت کلی دشت در حدود ۱۳۶ کیلومتر مربع می‌باشد که از این مساحت کلی حدود ۸۰ کیلومتر مربع از این دشت، مدل شده است. این دشت متشکل از رسوبات واقع در یک ناودیس می‌باشد که در بین دو تاقدیس بزرگ و موازی به نام‌های دشتک و سربالش قرار دارد (شکل ۱). رسوبات آبرفتی مذکور به‌وجود آورندهٔ آبخوان دشت کازرون می‌باشند که در نواحی مرکزی مسطح و به تدریج به‌طرف ارتفاعات حاشیهٔ دشت ناهموار می‌گردند. دشت کازرون در جنوب رشته کوه‌های زاگرس (در منطقهٔ چین‌خوردهٔ ساده زاگرس)، از شمال به جنوب مابین دو تاقدیس بزرگ و موازی به نام‌های دشتک و سربالش واقع شده است و در ناودیس احاطه شده توسط دو تاقدیس مذکور قرار گرفته است که قسمت زیادی از آن توسط رسوبات آبرفتی دوران چهارم پر شده است. این رسوبات آبرفتی به‌وجود آورندهٔ سفرهٔ آب زیرزمینی در دشت می‌باشد که در نواحی مرکزی مسطح و به تدریج به طرف ارتفاعات حاشیهٔ دشت ناهموار می‌گردد. ارتفاعات محدود کنندهٔ حوزهٔ مورد مطالعه متشکل از سازند آهکی دوران سوم (آهک آسماری) می‌باشد. خط‌الرأس این کوه‌ها با محور تاقدیس‌ها غالباً منطبق بوده و هماهنگی وضع مورفولوژی و توپوگرافی را با چین‌خوردگی‌های طبقات زمین ظاهر می‌سازد. محدودهٔ مورد مطالعه براساس شرایط هیدروژئولوژیکی و داده‌های در دسترس و نیز شکل مرزهای آبخوان، آبخوان کازرون به ۲۴ ستون و ۱۳ ردیف تقسیم شده است [۱۴].

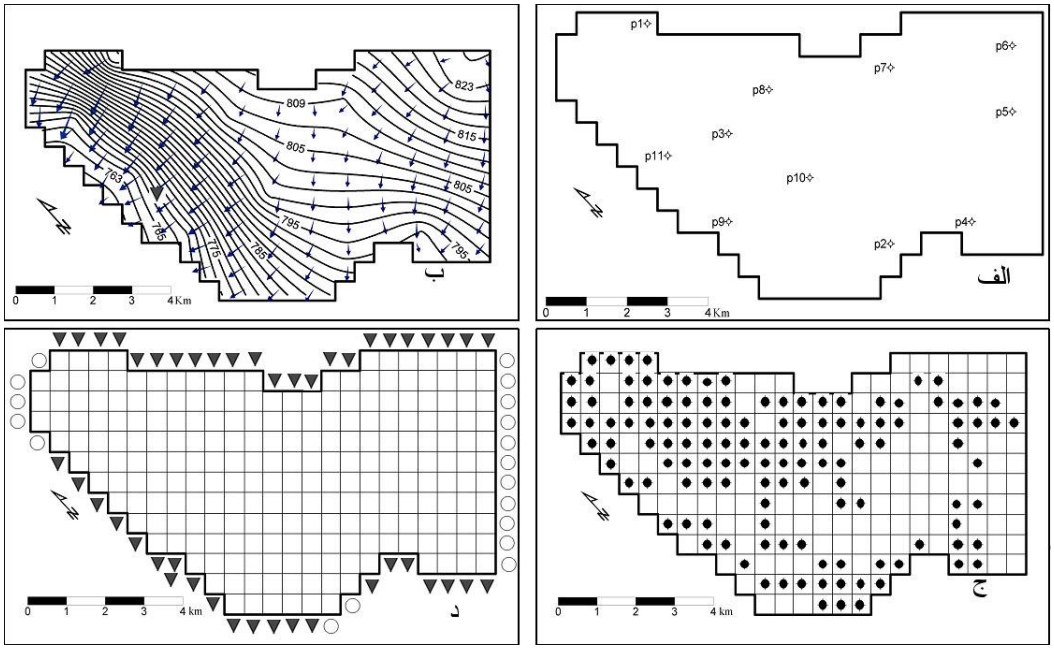
www.SID.ir

Archive of SID

طراحی مدل

گسسته‌سازی

بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی و داده‌های پیزومترهای موجود در دشت (شکل ۲- الف) نقشهٔ تراز آب زیرزمینی ترسیم (شکل ۲- ب) و آبخوان به ۲٤ ستون و ۱۳ ردیف گسسته‌سازی مکانی گردید و به این ترتیب تعداد ۳۱۲ سلول تفاضلی محدود که ۲۲۱ سلول آن‌ها فعال است حاصل گردید. (شکل ۲- ج) به منظور گسسته‌سازی زمانی با توجه به داده‌های در دسترس بار هیدرولیکی پیزومترها در یک ماه به عنوان یک دورهٔ تنش در مدل درنظر گرفته شده است که در طی آن تنش‌های هیدرولوژیکی ثابت فرض می‌شود و هر ماه فقط دارای یک گام زمانی می‌باشد. اطلاعات کافی در مورد زون چاه‌ها و زون آب برگشتی پس از ماه خرداد در دسترس نمی‌باشد. به همین دلیل برای کاهش تعداد پارامترها و عدم قطعیت در پارامترهای بهینه شده، یک پریود شامل ٦ ماه (از آبان ۷۷ الی فروردین ۷۸) برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدورلیکی همانند هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره انتخاب شده است.



شکل ۲- گسسته‌سازی مکانی و شرایط مرزی آبخوان دشت کازرون. الف: پیزومترهای موجود در دشت. ب: نقشهٔ تراز آب زیرزمینی. ج: گسسته‌سازی مکانی منطقه مورد مطالعه. د: شرایط مرزی آبخوان. در شکل فوق علامت *p1-p10* نشان‌دهندهٔ چاه‌های مشاهداتی، O نشان‌دهندهٔ مرز بدون جریان، ▼ مرزهای ورودی و خروجی را نشان می‌دهد

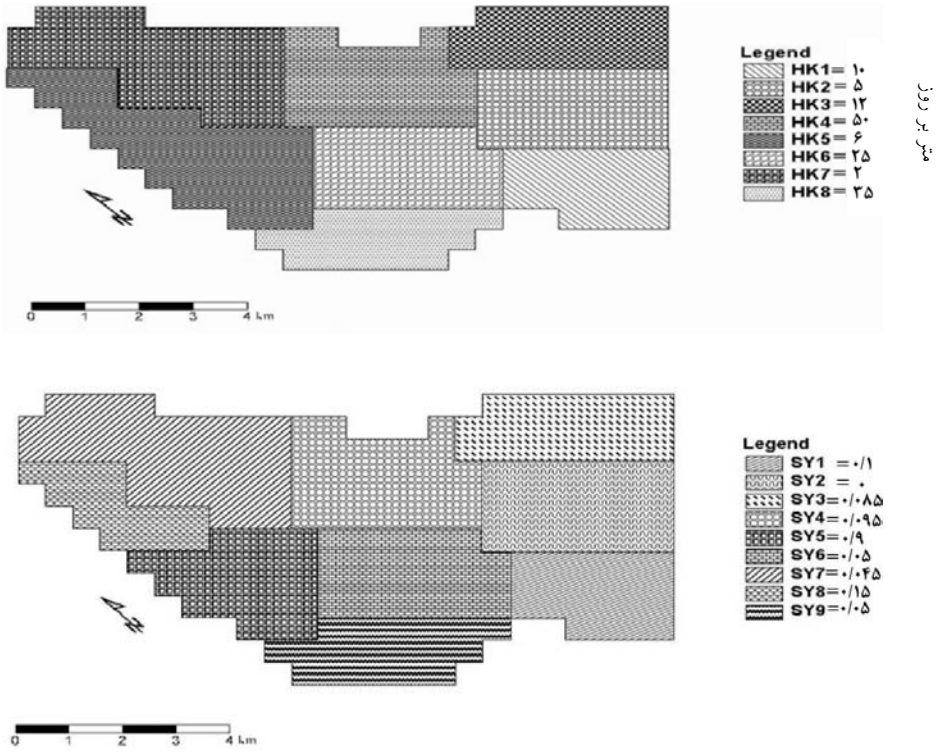
شرایط مرزی مدل

براساس داده‌های سطح آب زیرزمینی به‌دست آمده از ۱۱ پیزومتر موجود در دشت کازرون مطابق (شکل ۲- د) در حالت پایدار مرزهای اطراف محدودهٔ مدل مشخص شده‌اند. مرزهای شمالی و جنوبی محدودهٔ مدل، مرزهای هیدرولیکی فاقد جریان می‌باشند. مرز شرقی و غربی دشت، مرزهای از نوع *Dirichlet* است. بعضی

www.SID.ir

Archive of SID

قسمت‌هایی از مرز غربی به عنوان مرز فاقد جریان در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- الف و ب– منطقه‌بندی اولیهٔ پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه

پارامترهای هیدروژئولوژیکی

براساس اطلاعات موجود در لاگ حفاری چاه‌های پیزومتری، اکتشافی و نیز تعدادی از چاه‌های بهره‌برداری و همچنین با توجه به تراکم چاه‌های بهره‌برداری و با استفاده از روش ناحیه‌بندی[1]، ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی دشت به صورت پارامتر تعریف شده‌اند. ناحیه‌بندی انجام شده برای پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در شکل‌های ۳- الف و ب نشان داده شده است. مقادیر اولیهٔ این پارامترها براساس لاگ‌های حفاری تعیین و در طی فرآیند واسنجی مقدار بهینهٔ آن‌ها به‌دست آمده است.

روش تحقیق

در این تحقیق بررسی و کمی‌سازی عدم قطعیت مدل با بررسی مشخصه‌های آماری خروجی از MODFLOW-2000، از جمله حساسیت مقیاس‌بندی شده مرکب[2]، حساسیت مقیاس‌بندی‌شده بدون بعد[3]، حساسیت مقیاس‌بندی‌شده یک‌درصدی[4]، واریانس خطا، خطای معیار، آمارهای AIC و BIC، انحراف معیار، ضریب تغییرات، ضریب همبستگی و فواصل اطمینان خطی [۱۵] (Hill, 1998) صورت گرفته است (جدول ۱). شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان کازرون به کمک مدل MODFLOW-2000 [۱۶] که یک مدل

1- Zonation

2- Composite Scaled Sensitivity
3- Dimensionless Scaled Sensitivity
4- One Percent Scaled Sensitivity

www.SID.ir

Archive of SID

معکوس است و از روش خودکار برای واسنجی استفاده می‌کند، صورت گرفته است. در این کد رایانه‌ای، تخمین پارامترها با به حداقل رساندن تابع هدف (حداقل مربعات وزن‌دار) و از طریق به‌کارگیری رگرسیون غیرخطی صورت می‌گیرد. حداقل‌رسانی با روش تعدیل شدهٔ گوس- نیوتن انجام می‌شود و داده‌های اولیه در رگرسیون به صورت پارامتر وارد می‌شوند.

مراحل واسنجی مدل دشت کازرون به روش خودکار

چنان‌چه از روش‌های تخمین-پارامتر برای به‌دست آوردن مقادیر پارامترهای بهینه استفاده شود، در این صورت انجام فرآیند واسنجی به مراتب نیاز به اعمال دقت بیش‌تر و آگاهی کامل از نحوه فرآیند تخمین- پارامتر دارد. در ابتدای فرآیند واسنجی لازم است که پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی تعریف شوند (پارامتربندی)[1]. تعیین پارامتر در مدل‌سازی معکوس برای محدود کردن تعداد پارامترها اهمیت زیادی دارد. برای این کار، از روش ناحیه‌بندی[2] جهت تخصیص هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه به نواحی مختلف بهره‌گیری مؤثری به عمل آمده است (۳ الف و ب). هندسی و شکل ناحیه‌ها بر اساس ساختارهای زمین‌شناسی و مشاهدات صحرایی مشخص شده‌است. مؤلفه‌های متعددی از دشت کازرون دارای عدم قطعیت هستند ولی نمی‌توان تمام آن‌ها را به صورت پارامتر تعریف و با استفاده از رگرسیون تخمین زد. وارد کردن تمامی این پارامترها در رگرسیون در ابتدای واسنجی منجر به ناکارائی مدل در تخمین این پارامترها خواهد شد. دلیل این ناکارائی را می‌توان در انتخاب نامناسب حدس اولیه پارامترها، عدم حساسیت تابع هدف به دامنه وسیعی از پارامترها، همبستگی بین پارامترها و غیره جستجو نمود. معیارهای ضریب همبستگی[3] و حساسیت مرکب مقیاس‌بندی شده، شاخص‌های مناسبی برای انتخاب پارامترهایی می‌باشند که باید وارد رگرسیون شوند. (شکل ٤) مقدار حساسیت مرکب مقیاس‌بندی شده را برای پارامترهای اولیه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل پارامترهای هدایت هیدرولیکی HK1، HK2، HK4، HK5، HK6، HK7، HK8 دارای حساسیت بالائی بوده در حالی که پارامترهای Qbah، Qazar، Qfar (پمپاژ بهمن، پمپاژ آذر، پمپاژ فروردین)، SY2، SY7 (آبدهی ویژه ۲ و ۷) پارامترهای کم‌حساسیت محسوب می‌شوند و رگرسیون بـا وجود این پارامترها همگرا نخواهد شد. در ابتدای فرآیند واسنجی، پارامترهای غیر حساس از رگرسیون خارج و مابقی پارامترها تخمین زده شده‌اند. با تغییر کردن مقادیر پارامترهای تخمین زده شده، مقدار حساسیت پارامترها نیز تغییر خواهد کرد. این امر ناشی از سرشت غیرخطی تبدیل متغیرهای ورودی به خروجی و مشکلات ناشی از مقاس‌بندی[4] به ازای مجموعه پارامترهای مختلف می‌باشد.

1 Parameterization
2- Zonation
3- Correlation coefficient
4- Scaling

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱– پارامترهای آماری مربوط به آنالیز حساسیت و برازش کلی مدل

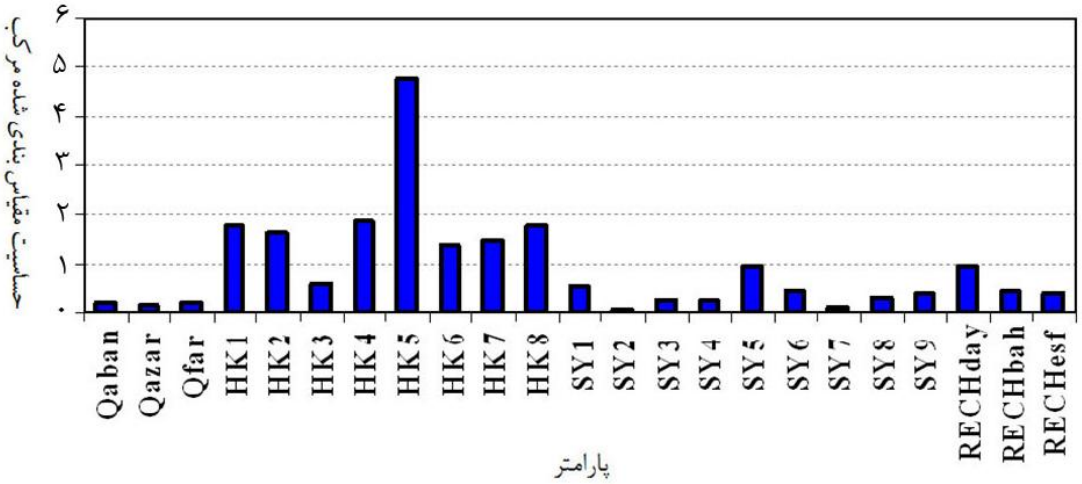
نام پارامتر آماری	فرمول	توضیحات
حساسیت مقیاس بدون بعد (ss)	$ss_{ij} = \left[\frac{\partial y_i'}{\partial b_j}\right] b_j w_{ij}^{1/2}$	y_i' مقادیر شبیه‌سازی‌شدهٔ مربوط به مشاهدهٔ iام است، b_j پارامتر برآورد شدهٔ j ام و $\frac{\partial y_i'}{\partial b_j}$ حساسیت مقادیر شبیه‌سازی‌شدهٔ مشاهدهٔ i ام نسبت به پارامتر j ام و w_{ij} وزن مشاهده iام است
حساسیت مقیاس‌بندی شده ترکیبی (css)	$css_j = \left[\frac{\sum_{i=1}^{ND}(ss_{ij})^2 \mid b}{ND}\right]^{1/2}$	ND تعداد مشاهدات در رگرسیون، b برداری است که شامل آن دسته از مقادیر پارامتری است که حساسیت آن‌ها برآورد شده است
حساسیت مقیاس‌بندی شده ۱ درصدی (dss)	$dss_{ij} = \frac{\partial y_i'}{\partial b_j} \times \frac{b_j}{100}$	که در آن b_j پارامتر تخمین زده شده مدل است
باقی‌ماندهٔ وزنی و غیر وزنی (wr)	$wr = (y_i - y_i')w_i \qquad r = y_i - y'$	y_i مشاهدهٔ iام و y' مقدار شبیه‌سازی‌شدهٔ مشاهدهٔ i است
مقدار تابع هدف(S(b))	$s(b) = \sum_{i=1}^{ND} w_i\left[y_i - y_i'(b^2)\right]^2 + \sum_{p=1}^{npr} w_p\left[p_p - p'_p(b)\right]^2$	p_p مقدار مورد انتظار، p'_p مقدار تخمین زده شده پارامتر، w_p وزن مربوط به مقادیر مورد انتظار پارامتر است
واریانس خطا (S^2)	$S^2 = \frac{s(b)}{ND + NPR - NP}$	$S(b)$ مقدار تابع هدف حداقل مربعات وزن‌دار، ND تعداد مشاهدات ، NPR تعداد اطلاعات پیشین و NP تعداد پارامترهای برآورد شده است
آمار AIC	$AIC = (b') = s'(b') + 2*NP$	$s'(b')$ مقدار تابع هدف وزن دار است
آمار BIC	$BIC(b') = s'(b') + NP*\ln(ND + NPR)$	
حدود اطمینان	$b_j \pm t\left(n, 1-\frac{\alpha}{2}\right) sb_j$	که در آن $t\left(n, 1-\frac{\alpha}{2}\right)$ نشان دهنده آمار student به ازاء درجه آزادی n و سطح معنی دار α می باشد

در این راستا، با محاسبهٔ مقادیر بهینهٔ پارامترهای انتخابی در مرحلهٔ قبل، مجدداً حساسیت مجموعهٔ پارامترها با رویداشت به مقادیر بهینه تعدادی از آن‌ها محاسبه و تنها پارامترهای حساس به‌دست آمده در این مرحله وارد فرآیند رگرسیون گردیدند. به عبارتی دیگر، با تجزیه و تحلیل شاخص‌های آماری در مقاطع مختلف و حذف پارامترهای مشکل‌زا، ابتدا مقادیر بهینهٔ سایر پارامترها به صورت محلی تعیین و سپس با معرفی مقادیر بهینه پارامترها به‌عنوان تخمین اولیه، مجدداً مدل با مجموعه پارامتری متفاوتی مورد واسنجی قرار گرفت که در نتیجه

www.SID.ir

Archive of SID

اندرکنش پارامترها با یکدیگر، بهبود قابل توجهی در شاخص‌های برازندگی، کاهش عدم قطعیت پارامتری و نهایتاً بهبود مقادیر بهینه پارامترها گردید [۱۳]. در طی مراحل فرآیند واسنجی ماتریس همبستگی بین پارامترها محاسبه گشته و با اعمال محدودیت‌هایی، موجبات تقلیل همبستگی بین پارامترها (از حد معینی) فراهم گردید. این فرآیند آنقدر ادامه یافت تا این که تمام پارامترهایی که مدل قادر به تخمین آن‌ها است بهینه گردیدند. با وارد کردن پارامتر SY2 در رگرسیون، همبستگی بین اکثر پارامترها به جز پارامترهای Qaban و HK1 و HK5 افزایش یافته، در نتیجه این پارامتر از رگرسیون خارج و به صورت دستی بهینه گردید. با وارد کردن پارامتر HK7 فرآیند تخمین به هیچ وجه همگرا نمی‌گشت. این پارامتر دارای حساسیت پائین نبود، بلکه با رگرسیون ناسازگار بود. وارد کردن همهٔ این پارامترهای ناسازگار در رگرسیون، باعث می‌شد تا مدل همگرا نشود. به همین جهت پارامترهای SY2 , HK7 پارامترهای معلوم درنظر گرفته شده‌اند.



شکل ٤- مقادیر حساسیت مرکب مقیاس‌بندی‌شده برای مقادیر اولیه پارامترها

به همین جهت، این پارامترها که پارامترهای برآوردنشده[1] نامیده می‌شوند [۱۵] و بر اساس جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان به صورت دستی در طی فرآیند واسنجی بهینه شدند. پس از این مرحله بایستی نتایج حاصل از بهینه‌سازی توسط مدل با بهره‌گیری از مشخصه‌های آماری مورد ارزیابی قرار گیرد. حساسیت‌های محاسبه شده برای مقادیر پارامتری بهینه برای محاسبهٔ ماتریس ضرایب همبستگی به کار گرفته می‌شوند. در هر اجرای مدل، این ماتریس تشخیص پارامترهای دارای همبستگی مورد توجه قرار گرفت. ماتریس ضرایب همبستگی مقادیر بهینه در این‌جا آورده نشده ولی بزرگ‌ترین همبستگی بین پارامترهای SY1 و RECHesf (تغذیهٔ اسفند) به اندازهٔ ۰/۰۷۹۲ به‌دست آمد. با وارد کردن پارامتر SY2 به رگرسیون، همبستگی بین اکثر پارامترها از ۰/۹۵ تجاوز می‌کرد. جدول ۲ مقادیر پارامترهای بهینه شده در مدل اصلی دشت را نشان می‌دهد. بررسی مقادیر بهینه شدهٔ پارامترها در این مدل نشان می‌دهد که پارامترهای بهینه شده به مقادیر واقعی و قابل قبول نزدیک هستند.

1- Unestimated

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲- مقادیر پارامترهای بهینه شده در مدل اصلی دشت

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Qaba	٪۲/۵	SY1	۰/۰۹
Qazar	٪۱۲	SY2	*۰/۱۷
Qfar	٪۱۱	SY3	۰/۰٦
HK1	٤/٤	SY4	۰/۰۵
HK2	۲/۳	SY5	۰/۱۲
HK3	٦/٦	SY6	۰/۰۵
HK4	٤۲/۷	SY7	۰/۱۱
HK5	۳/۳	SY8	۰/۰۹
HK6	۲۷/۹	SY9	۰/۰۵
HK7	۰/٤٦	RECHday	۱mm *
HK8	۲۸/۱۸	RECHbah	۳mm
*پارامترهایی که وارد رگرسیون نشده‌اند و به صورت دستی کالیبره شده‌اند.		RECHesf	۵mm

همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود پارامترهای HK5,SY2,Qfar و RECHday (تغذیهٔ دی ماه) به دلیل حساسیت کم، به وسیلهٔ مدل تخمین زده نشده‌اند و به صورت دستی مقادیر بهینهٔ آن‌ها به‌دست آمده است. تقریباً تمامی پارامترها با شرایط واقعی حاکم بر سیستم همخوانی خوبی دارند. مقدار تابع هدف محاسبه شده برای واسنجی ۹/۳۷ m2، خطای واریانس ۰/۱۹۹۳٤ m2، خطای استاندارد ۰/٤٤٦٤۷ می‌باشد. مقدار کمیت آماری AIC[1] ۱٦۸/٦۷ و کمیت BIC[2] ۲۱۰/۲۷ می‌باشد. مقادیر کم‌تر از هر یک از این پارامترها بیان‌گر انطباق بهتر مدل و صحت مدل تهیه شده می‌باشند و با استفاده از آن‌ها می‌توان نسخه‌های پارامتری گوناگون یک مدل را با یکدیگر مقایسه کرد. مدلی که BIC و AIC آن کوچک‌تر است، صحیح‌تر می‌باشد. در شکل ۵ مقادیر شبیه‌سازی‌شده بار هیدرولیکی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده (چاه‌های مشاهداتی در دورهٔ واسنجی) نشان داده شده است. در حالت ایده‌آل مقادیر شبیه‌سازی‌شده نزدیک به مقادیر مشاهدات خواهد بود یعنی انتظار می‌رود که نمودار حاصل از انطباق این دو بر روی خطی قرار می‌گیرد که دارای شیب ۱ و عرض از مبدأ صفر است و در این حالت ضریب همبستگی باید بیش از ۰/۹ باشد [۱۵] شکل ۵ نشان می‌دهد که ضریب همبستگی به‌دست آمده در یک حد مناسب و درست می‌باشد.

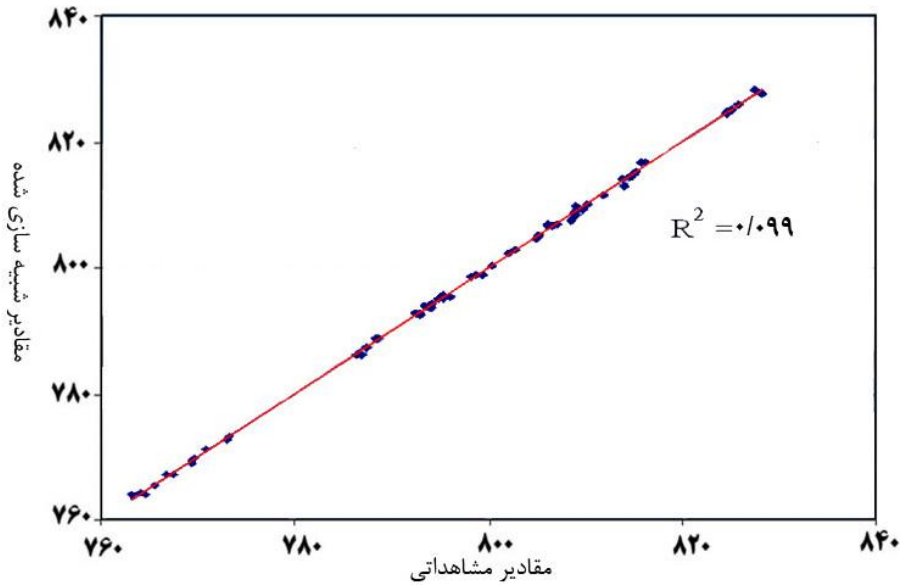
در شکل ٦ نمودار توزیع نرمال مقادیر باقی‌مانده‌ها[3] نشان داده شده است. در حالت ایده‌آل باید خطاهای ایجاد شده به صورت تصادفی بوده و دارای توزیع نرمال باشند. در این نمودار در صورتی که داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند بر روی یک خط راست قرار می‌گیرند.

1- Akaike Information criterion
2- Bayesian Information criterion

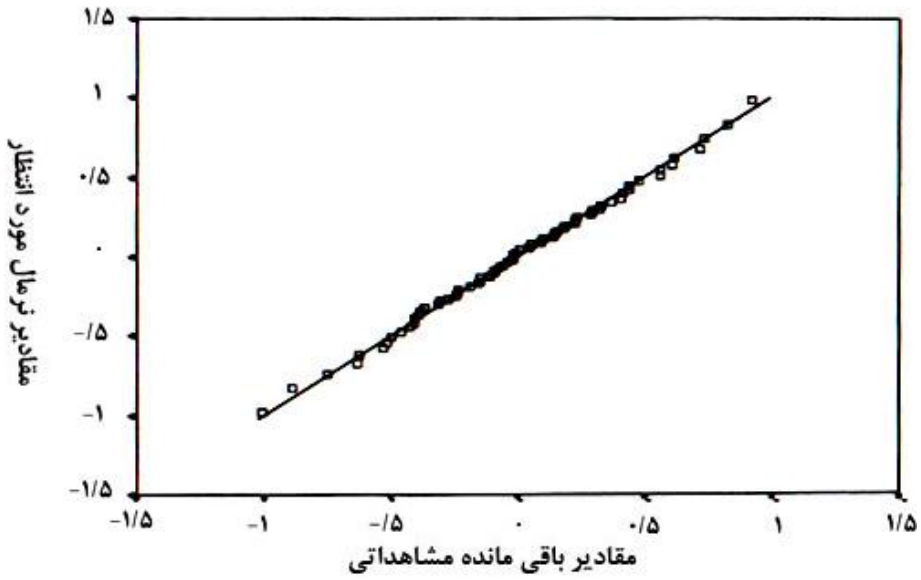
3- تفاوت بارهای هیدرولیکی مشاهداتی و بارها هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل

www.SID.ir

Archive of SID



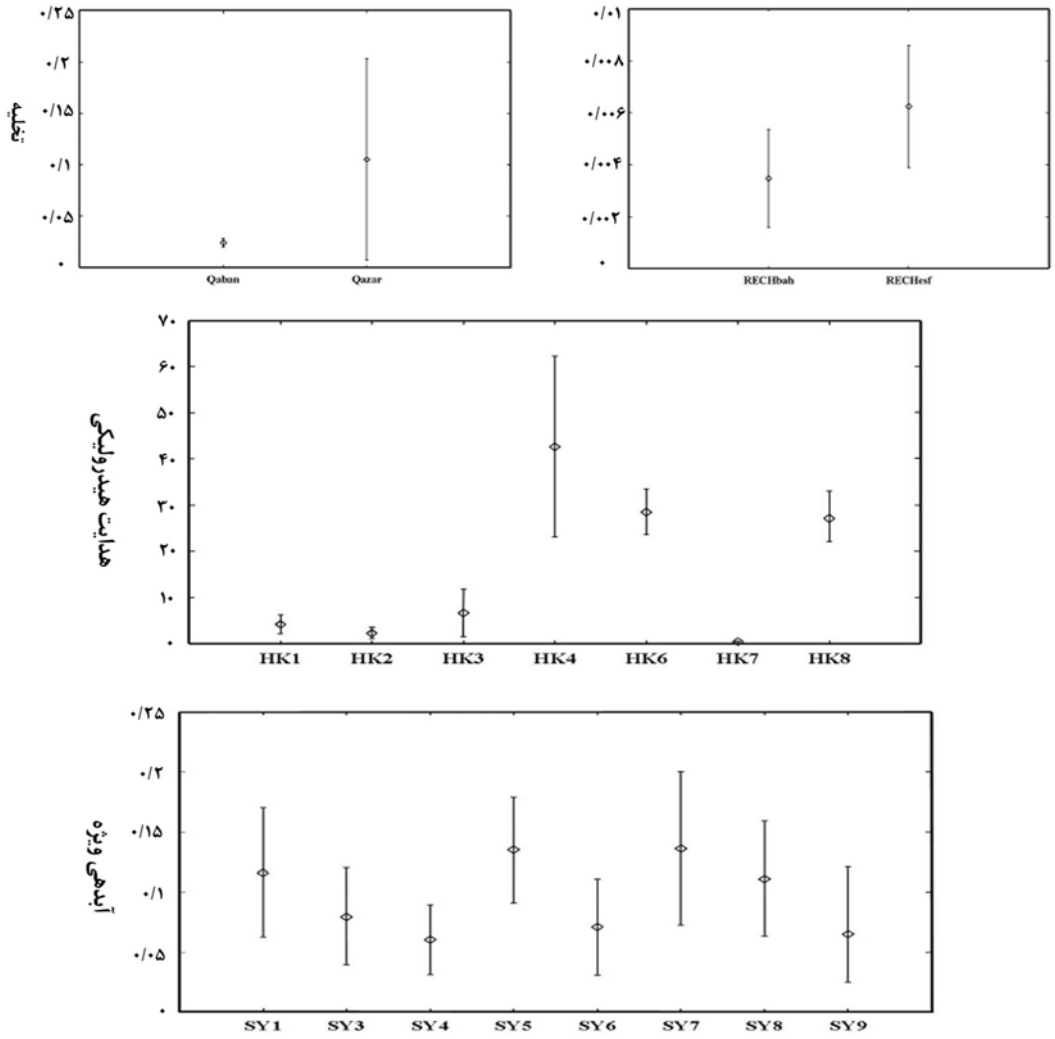
شکل ۵- مقادیر شبیه‌سازی شده بار هیدرولیکی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهداتی در دوره واسنجی



شکل ٦- نمودار توزیع نرمال مقادیر باقی‌مانده‌ها در مدل اصلی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷– فواصل اطمینان ۹۵٪ برای پارامترهای بهینه شده در مدل اصلی

فواصل اطمینان خطی پارامترها از عوامل مهم در آنالیز صحت پارامترهای بهینه مدل می‌باشد. پارامترهای حساس، دارای فواصل اطمینان کوچک هستند، در حالی‌که پارامترهای غیر حساس درای فواصل اطمینان بزرگ‌تر می‌باشند. در واقع پارامترهای با فاصلهٔ اطمینان کوچک‌تر، قابل اطمینان‌تر هستند در شکل ۷ فواصل اطمینان[1] ۹۵٪ برای پارامترهای بهینه شده در مدل اصلی دشت نشان داده شده است. با توجه به این شکل تمامی پارامترها در این بازه قرار دارند و درست تخمین زده شده‌اند. فواصل اطمینان ۹۵٪ علاوه بر این که بیان‌گر صحت و واقعی بودن پارامترهای تخمین زده می‌باشند، در ساده‌سازی مدل نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر اساس [۱۵] در صورتی که فواصل اطمینان دو پارامتر هم نوع مثلاً دو پارامتر هدایت هیدرولیکی انطباق زیادی داشته باشند احتمالاً این دو پارامتر باید به صورت یک پارامتر در مدل در نظر گرفته شوند. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است پارامترهای هدایت هیدرولیکی در ناحیه‌های ٦ و ٨ (HK6 ,HK8) و پارامترهای آبدهی

1- Confidence Intervals

www.SID.ir

Archive of SID

ویژه به ترتیب در ناحیه‌های ٦ و ۹ (SY6,SY9) و ناحیه‌های ۵ و ۸ (SY5,SY8) دارای فواصل اطمینان خطی تقریباً یکسانی می‌باشند و این شش پارامتر را می‌توان به صورت ۳ پارامتر در مدل در نظر گرفت. با انجام این تغییر در مدل، آخرین مدل ساخته شده از دشت با اعمال این تغییرات با عنوان مدل نهایی شناخته شد و بعد از واسنجی مدل آن، نتایج به‌دست آمده با نتایج مدل اصلی دشت مقایسه گردید (جدول ۳).

جدول ۳- مقایسهٔ تعدادی از کمیت‌های آماری در مدل اصلی و مدل نهائی دشت

کمیت آماری	مدل اصلی	مدل نهائی
خطای معیار رگرسیون	۰/٤٤٦٤٧	۰/٤۳۱٦۵
واریانس خطای محاسبه‌شده	۰/۱۹۹۳٤	۰/۱۸٦۳۳
تابع هدف حداقل مربعات	۹/۳۷	۹/۱۳
تعداد باقی‌مانده برابرو یا بزرگ‌تر از صفر	۳۵	۳۱
تعداد باقی‌مانده کوچک‌تر از صفر	۳۱	۳۵
حداکثر باقی‌مانده وزنی	۰/۸۰۱	۰/۸۰۹
حداقل باقی‌مانده وزنی	-۱/۰۱	-۰/۷۵٦
میانگین باقی‌مانده وزنی	۰/۰۱٤۵	۰/۰۳۱
آمار AIC	۱٦۸/٦۷	۱٦۵/۱۹
آمار BIC	۲۱۰/۲۷	۲۰۲/٤۲

در جدول ٤ مقادیر بهینه شده پارامترهای دو مدل اصلی و نهایی با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود در اکثر موارد مقادیر این آمارها کم می‌باشند و نسبت به مدل اولیه که در آن حدس اولیه پارامترها تعریف شده‌اند این مقادیر بسیار کم‌تر شده‌اند که بیانگر مناسب و معقول بودن مدل تهیه شده برای دشت می‌باشد.

فواصل اطمینان ۹۵٪ در مدل نهایی دشت در شکل ۸ نشان داده شده است. با مقایسهٔ شکل ۷ و ۸ فواصل اطمینان ۹۵٪ در مدل اصلی، بازه این فاصله برای اغلب پارامترهای هیدرولیکی خصوصاً پارامترهای HK2، HK3، HK4 کوچک‌تر ولی برای برخی پارامترهای آبدهی ویژه افزایش یافته است. ولی ضریب تغییرات مدل [۱۵] یکی از فاکتورهای مهم می‌باشد که برای مقایسهٔ دو مدل از آن می‌توان استفاده کرد. ضریب تغییرات مدل برای هر پارامتر برابر انحراف معیار پارامتر تقسیم بر میانگین پارامتر می‌باشد که مقادیر کم‌تر آن بیان‌گر دقیق‌تر بودن پارامتر تخمین زده شده می‌باشند. مقایسهٔ بین ضریب تغییرات برای پارامترهای مختلف در مدل اصلی و در مدل نهایی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود تقریباً در بیش‌تر پارامترها ضریب تغییرات کاهش یافته است.

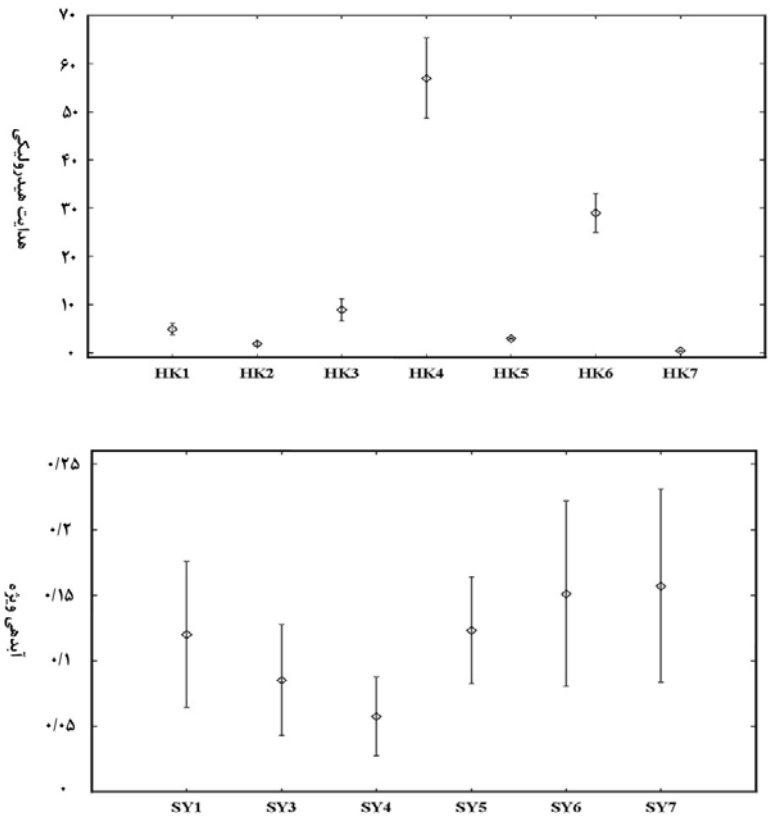
پائین‌ترین ضریب تغییرات و کوچک‌ترین فاصله اطمینان در مدل نهایی مربوط به پارامتر HK7 می‌باشد که از حساسیت بالایی برخوردار است. ضریب تغییرات میانگین برای مدل‌های اولیه و نهایی به ترتیب برابر ۰/۲۵و ۰/۱۸ می‌باشد که این مقدار پائین نشان‌دهندهٔ دقت بالای برآورد پارامترهاست.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤- مقایسه مقادیر بهینه شدهٔ پارامترها در مدل اصلی و مدل نهایی

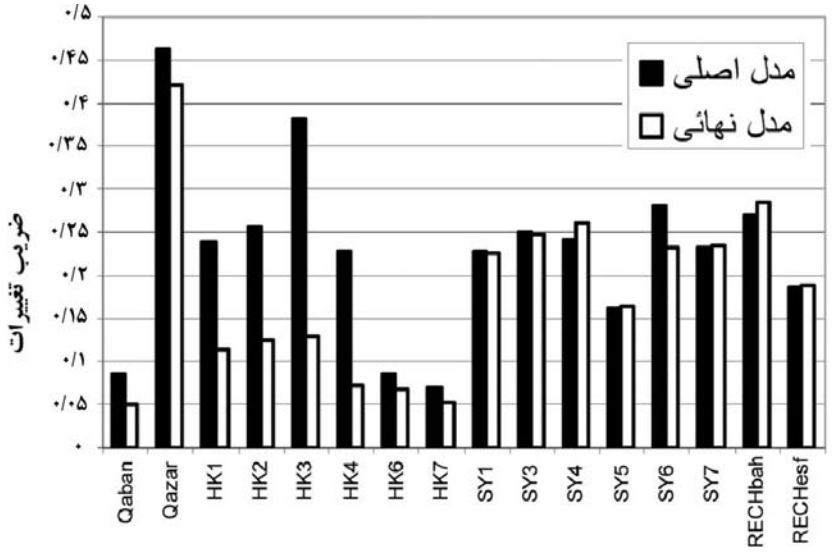
پارامتر	مدل اصلی	پارامتر	مدل نهائی	پارامتر	مدل اصلی	پارامتر	مدل نهائی
Qaban	٪۲	Qaban	٪۲	SY1	/۱۲	SY1	۰/۱۲
Qazar	٪۱۱	Qazar	٪۹	SY2	۰/۱۷	SY2	۰/۱۷
HK1	٤/۲۲	HK1	٤/۹۳	SY3	۰/۰۸	SY3	۰/۰۸
HK2	۲/۳۵	HK2	۱/۸۹	SY4	۰/۰٦	SY4	۰/۰٦
HK3	٦/٦۸	HK3	۸/۹۲	SY5	۰/۱٤	SY5	۰/۱۲
HK4	٤۲/٦۰	HK4	٥٦/۹۰	SY6	۰/۰۷	SY6	۰/۱٥
HK5	۳/۳	HK5	۲/۹۸	SY7	۰/۱٤	SY7	۰/۱٦
HK6	۲۸/٥	HK6	۲۹	SY8	۰/۱۱	SY8=SY6	
HK7	۰/٤٦	HK7	۰/٥٤	SY9	۰/۰۷	SY9=SY6	
HK8	۲۷/۱	HK8=HK6		RECHbah	۳ mm	RECHbah	٤ mm
				RECHesf	٦ mm	RECHesf	٦ mm



شکل ۸- فواصل اطمینان ۹۵٪ برای پارامترهای بهینه شده در مدل نهائی دشت

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹- مقایسهٔ ضریب تغییرات پارامترها در مدل اصلی و مدل نهائی

حساسیت مقیاس‌بندی شده ۱ درصدی

حساسیت مقیاس‌بندی‌شده ۱ درصدی حساسیت بدون بعد می‌باشد و برای مقایسهٔ اهمیت مشاهدات مختلف در پارامترهای تخمین‌زده‌شده به‌کار می‌رود و نحوهٔ محاسبهٔ آن در جدول ۱ نشان داده شده است از این پارامترهای آماری برای تهیهٔ نقشهٔ حساسیت پارامترهای مختلف و تعیین نقاطی که در آن‌ها افزودن مشاهدات به آن‌ها بیش‌ترین تأثیر را در تخمین پارامترها خواهد داشت استفاده می‌شود. با توجه به این که پارامترهای تغذیه ناشی از بارندگی دارای مقادیر ضریب تغییرات بالایی هستند که نشان‌دهندهٔ غیر حساس بودن این پارامترها و تخمین‌زده نشدن با دقت کافی آن‌ها می‌باشد، نقشهٔ میانگین حساسیت ۱ درصدی مربوط به مشاهدات نسبت به هر یک از پارامترهای تغذیه ناشی بارندگی رسم شد (شکل ۱۰).

این نقشه‌ها موقعیت‌های حساس به ازاء پارامترهای تغذیه ناشی از بارندگی را نمایان می‌سازد و نشان‌دهندهٔ میزان تغییر مقادیر شبیه‌سازی شده به ازاء یک درصد افزایش تغذیه ناشی از بارندگی می‌باشد. مطابق شکل ۱۰ نواحی شمالی دشت به استثنای منطقهٔ شمال غربی، دارای بیش‌ترین حساسیت می‌باشند و افزودن تعداد پیزومترها و انجام آزمایشات نفوذ در این مناطق می‌تواند دقت تخمین پارامترهای مدل را افزایش دهد. از طرفی مقایسهٔ نقشه‌های مذکور با ناحیه‌بندی پارامترهای آب‌دهی ویژه شکل ۳ ب نشان می‌دهد که مناطق حساس منطبق بر مناطق SY2, SY3, SY4 و بخشی از منطقه SY7 می‌باشد که دارای آبدهی ویژه کمی می‌باشند و از آن‌جا که پیزومترهای P6 ,P7, P8 در این مناطق واقع هستند، کاهش فواصل زمانی اندازه‌گیری سطح آب در این چاه‌ها پیشنهاد می‌گردد. همچنین در فصل تر که بهره‌برداری از چاه‌ها وجود ندارد، اندازه‌گیری سطح آب در چاه‌های بهره‌برداری این مناطق پیشنهاد می‌گردد. بر اساس [۱۷] از میان تعدادی از مدل‌های ساخته شده برای یک دشت، مدلی بیان‌گر صحیح‌تر و درست‌تر از شرایط واقعی می‌باشد که،

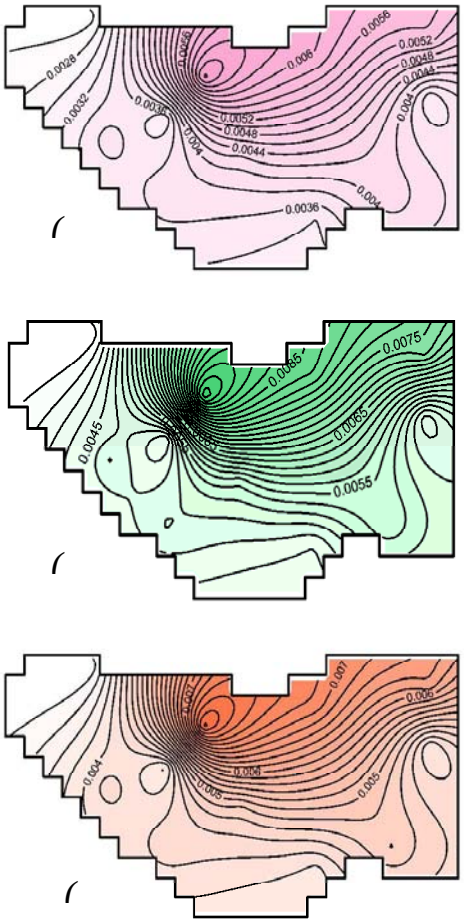
- مقادیر مشاهده شده را به خوبی تولید کند.

www.SID.ir

Archive of SID

- دارای باقی‌مانده‌هایی باشد که به صورت نرمال توزیع شده‌اند.
- مقادیر پارامترهای بهینه شده واقعی‌تر باشد.
- پارامترهای تخمین‌زده‌شدهٔ فواصل اطمینان کوچک‌تری داشته باشند.

تقریباً تمامی این موارد در مدل نهائی دشت بهتر از مدل اصلی می‌باشد و با توجه به این موارد مدل نهائی تهیه شده از دشت به عنوان مدل برتر ارائه شده است.



شکل ۱۰- نقشهٔ کنتوری حساسیت یک‌درصدی میانگین (a) پارامتر RECHbah (b) پارامتر RECHesf (c) پارامترهای RECHbah و RECHesf

نتیجه‌گیری

عدم قطعیت یک خصوصیت جدانشدنی در فرآیند مدل‌سازی می‌باشد و مطالعه، بررسی و کمی‌سازی آن برای بالا بردن قابلیت اعتماد مدل مفید واقع می‌شود و این امر با به کارگیری مدل معکوس و واسنجی مدل به روش خودکار میسر می‌شود. در این تحقیق با انجام آنالیز عدم قطعیت به کمک مشخصه‌های آماری، بهبود قابل توجهی در معیارهای برازش مدل آب‌های زیرزمینی دشت کازرون

www.SID.ir

Archive of SID

حاصل گردیده است و واسنجی خودکار رگرسیون غیر خطی علاوه بر سرعت بخشیدن به فرایند بهینه‌سازی و کاهش چشم‌گیر هزینه‌ها، آمارها و ارقام زیادی را فراهم نمود که از مجموع آن‌ها در جهت بررسی صحت ساختار مدل، ارزیابی فرآیند بهینه‌سازی و شناسایی منابع مختلف عدم قطعیت استفاده گردید. مجموع این موارد منجر به ساخت یک مدل بهتر، کارآمدتر و نزدیک‌تر به واقعیت گردید. علاوه بر این در این تحقیق بهره‌گیری از واسنجی خودکار منجر به مقایسهٔ کمی منابع مختلف عدم قطعیت پیشنهاد تکمیل داده‌های مشاهداتی در مناطق حساس گردید. به طور خلاصه به‌کارگیری روش خودکار واسنجی منجر به تعدیل و بررسی مشکلات متعددی نظیر عدم حساسیت به یک پارامتر خاص، همبستگی بین پارامترها، اریب بودن خطاها و نواقص موجود در مدل‌های مفهومی گردید، که در عمل توسل جستن به واسنجی به روش سعی و خطا امکان انجام این بررسی‌ها میسر نمی‌گردد.

مراجع

[1] McElwee, C.D., Sensitivity Analysis and the Ground-Water Inverse problem. Ground Water, 6 (1982) 723-735.

[2] Beck, M.B., Water Quality Modeling: A review of the Analysis of Uncertainty. Water Resources Research, 23 (1987) 1393-1442.

[3] Summers, J.K., Wilson, H.T. and Kou., J., A method for quantifying the prediction uncertainties associated with water quality models. Ecological modeling, 65 (1993) 161-176.

[4] Minsker, B.S. and C.A., Shoemaker quantifying the effects of uncertainty on optimal groundwater bioremediation policies. Water Resources Research, 12(1998) 3615-3625.

[5] Christensen, S. and Cooley., R.L., Evaluation of prediction intervals for expressing uncertainties in groundwater flow model predictions. Water Resources Research, 9 (1999) 2627-2639.

[6] Snowling, S.D. and Kramer, J.R., Evaluating Modeling Uncertainty for model selection, Ecological Modeling. 38 (2001) 17-30.

[7] Brewer, K., Fogle, T., Stieve, A. and Barr, C., Uncertainty., Analysis with Site-Specific Groundwater Models: Experiences and Observations. Available online: (2003) http://www.osti.gov/bridge

[8] Morgan, M.G., A guide to dealing with uncertainty in quantitative and policy analysis. Cambridge University press, 5(2003) 332.

[9] Ghossemi, f., mathematical model appellation in groundwater studies of Iran, J of groundwater. 17 (1979) 349-365.

[۱۰]هاشمی، م، ر، اتوماسین فرآیند تخمین پارامترها در مدل آب‌های زیرزمینی، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد دانشگاه شیراز، ۱۳۷۸.

[11]Yoosefi Naghani., B. and Abedini, M.G., modflow parameter optimization using nonlinear regreion and genetic algorithm methods, modflow and more. IGWMC conference proceeding. 2 (2003) 648-652.

www.SID.ir

Archive of SID

[۱۲] سروری، م، ر، هیدروژئولوژی و شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی دشت دوسلق چنانه، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۲.

[۱۳] ساعت‌ساز، م، مدیریت آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت رامهرمز با استفاده از مدل‌های ریاضی، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۲.

[۱٤]سالک، منصور؛ چیت‌سازان، منوچهر، عابدینی، محمد جواد، بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی دشت کازرون با استفاده از مدل تفاضل معین MODFLOW2000، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۳.

[15]Hill, M.C., Method and Guidelines for effective model calibration: U. S. Geological Survey water-Resources Investigation Report 98-4005, (1998).

[16]Hill, M.C., Banta, E.R., Harbaugh, A.W. and Anderman, E.R., MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model, User Guide to the observation, sensitivity and parameter estimation processes and three post-processing program, Open File Report 00-184 (2000) 210.

[17]Poeter, E.P. and Hill, M.C., Inverse Models: A Necessary next step in ground-water modeling, Ground Water, 35, 2 (1997) 250-260.

www.SID.ir