

تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از روش GLUE (مطالعه موردی: دشت بجنورد)

مریم عابدینی¹، علی نقی ضیایی^{2*}، مجتبی شفیع³، بیژن قهرمان⁴، حسین انصاری⁵، جواد مشکینی⁶

تاریخ دریافت: 1394/6/1 تاریخ پذیرش: 1395/7/26

چکیده

تحلیل عدم قطعیت، مرحله‌ای جدانشدنی در فرآیند مدل‌سازی‌های هیدرولوژی می‌باشد. ارزیابی کمی عدم قطعیت در خروجی‌های مدل شبیه‌سازی و تخمین پارامترهای آن، موجب افزایش اطمینان در نتایج مدل‌سازی و شناخت درستی از منابع عدم قطعیت می‌شود. با توجه به رشد روز افزون کاربرد مدل‌های آب زیرزمینی در مدیریت و پیش‌بینی رفتار آبخوان‌ها، این پژوهش به دنبال تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی کمی آبخوان آبرفتی دشت بجنورد در خراسان شمالی است. آبخوان آبرفتی بجنورد با مساحت 65/2 کیلومترمربع، از جمله آبخوان‌های پیچیده از لحاظ مدل‌سازی آب زیرزمینی است که با مشکل بالا آمدن سطح ایستابی به دلیل توسعه شهر در برخی نقاط آن مواجه است. بنابراین پیش‌بینی با درصد اعتماد بالا در این آبخوان از اهمیت زیادی برخوردار است. بر همین اساس، مدل‌سازی در مقیاس ماهانه و واسنجی آبخوان بجنورد بر اساس مدل مفهومی تولید شده برای یک دوره ده ساله (1380-1390) با استفاده از 11 چاه مشاهداتی انجام شد. جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل آبخوان بجنورد از روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) استفاده شد. در این راستا، توابع توزیع احتمالی پیشین پارامترهای مدل شامل تغذیه و هدایت هیدرولیکی به صورت تابع توزیع یکنواخت تعیین شد و با استفاده از آمار سطح آب در چاه‌های مشاهداتی واسنجی مدل و استخراج توابع توزیع پسین انجام شد. نتایج نشان داد که پارامتر تغذیه نسبت به سایر پارامترها از قابلیت تشخیص کم‌تری در فرآیند واسنجی برخوردار بوده (به عبارتی تابع توزیع پسین آن نسبت به تابع توزیع پیشین تغییر زیادی نکرده است) و دارای عدم قطعیت بیش‌تری است. از طرف دیگر پارامتر هدایت هیدرولیکی عدم قطعیت آن در فرآیند واسنجی به طور موثری کاهش یافته است. همچنین نتایج تحلیل عدم قطعیت در نتایج پیش‌بینی سطح آب مدل نشان داد که 73% از مقادیر مشاهداتی سطح ایستابی در بازه اطمینان 95% در محدوده اطمینان قرار گرفته و نتایج واسنجی رضایت‌بخش می‌باشد. بنابراین می‌توان از مدل ریاضی آب زیرزمینی آبخوان بجنورد با اطمینان در سایر پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌ها استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: محدوده اطمینان، مونت کارلو، واسنجی، Modflow

مقدمه

محدودیت منابع آب سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از

آبخوان‌ها باعث وارد آمدن خسارت‌های جبران ناپذیری به منابع طبیعی کشور در سال‌های گذشته شده است. علاوه بر افت شدید سطح آب در آبخوان‌ها، فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری، آلاینده‌های مختلفی را به آبخوان‌ها تحمیل می‌کنند. از طرفی دیگر در آبخوان‌های واقع در بستر شهرهای بزرگ، تامین آب از منابع خارج حوضه آبریز و عدم توسعه شبکه جمع‌آوری فاضلاب باعث کاهش کیفیت آب زیرزمینی و حتی بالا زدگی سطح آب گردیده است که آبخوان بجنورد از آن جمله می‌باشد. برای جلوگیری از ادامه آسیب‌های کمی و کیفی، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به عنوان اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد. در این رابطه، مدل ریاضی می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در اختیار مدیران قرار گیرد. در این راستا تحلیل عدم قطعیت مدل، سطح اعتماد تصمیم‌های مبتنی بر نتایج مدل‌سازی را آشکار می‌سازد.

- 1- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 3- عضو هیئت علمی، گروه هیدروانفورماتیک، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق و کارشناس بخش منابع آب شرکت مهندسی مشاور هیدروتک توس
 - 4- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 5- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
 - 6- مدیر دفتر مطالعات منابع آب شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی
- * - نویسنده مسئول: (Email: an-ziaei@um.ac.ir)

اساس توزیع‌های احتمالاتی پیشین² به صورت تصادفی تولید می‌شوند. سپس مدل شبیه‌سازی شده بر اساس روش مونت کارلو اجرا شده و نتایج به دست آمده با استفاده از معیاری از سنجش کارایی، بر اساس میزان اعتمادشان وزن‌دهی شده و با اعمال آستانه پذیرش توزیع پسین³ یا توزیع احتمالاتی پارامترهای مدل محاسبه می‌شوند.

تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی علوم آب بسیار مورد توجه محققان بوده است. تاکنون مطالعات زیادی در این زمینه در مورد انواع مدل‌های ریاضی انجام شده است. از میان مطالعات گسترده تحلیل عدم قطعیت، مانند عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (Vrugt et al., 2003)، مدل‌سازی بارش-رواناب (Kanso et al., 2008)، برآورد دبی جریان رودخانه (Dotto et al., 2012) و مدل‌سازی رسوب (Talebizadeh et al., 2010)، سهم مطالعاتی که به تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های آب زیرزمینی پرداخته باشند کم‌تر می‌باشد. از جمله تحقیقاتی که بر عدم قطعیت شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی با دیدگاه آماری صورت گرفته است، توسط (Pohll et al., 1981) (Dettinger and Wilson., 2002) ارائه شده است. ایشان استفاده از روش‌های آماری در کنار روش‌های مبتنی بر مونت کارلو را پیشنهاد دادند که می‌تواند ابزار مفیدی در تحلیل عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی آینده عدم قطعیت داده‌ها ارائه کند. از بین روش‌های تحلیل عدم قطعیت در زمینه تحلیل عدم قطعیت مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌توان به الگوریتم مونت کارلو-زنجیر مارکوف (Blasone et al., 2009; Hassan et al., 2008) و الگوریتم‌های مشابه آن مانند bMcMC⁴ (Gomez-Hernandez and Fu, 2009) و Keating et al., 2010; Sepulveda and Doherty., 2015) و N-McMC⁶ (GLUE⁷) روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (Hassan et al., 2008; Rojas et al., 2008) و ساختار بی‌زی⁸ اشاره کرد. در ایران نیز اخیراً مطالعات متعددی در مورد مسئله تحلیل عدم قطعیت در کاربرد مدل‌ها انجام شده است. از جمله تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب (پور رضا و همکاران، 1391؛ شفیعی و همکاران، 1392؛ بهروز و همکاران، 1393)، تحلیل عدم قطعیت در مدل‌های آگرو-هیدرولوژی (Shafiei et al., 2014)؛ شفیعی و همکاران، 1393) و همچنین مدل‌های هیدرولوژیکی (خوشخو و همکاران، 1392؛ نصرتی، 1390؛ حسینی و جهانگیری 1390) اشاره کرد. اما از طرف دیگر مطالعات بسیار محدودی در مورد بررسی عدم قطعیت در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی انجام شده است

عدم قطعیت را می‌توان به صورت رخداد پدیده‌هایی که از اختیار پژوهشگر خارج است، تعریف نمود. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی همواره با عدم قطعیت ناشی از دانش ناقص از سیستم فیزیکی مورد مطالعه، ساختار مدل، تغییرپذیری مکانی و زمانی احاطه شده است (Mirzaei al., 2015). زیرا داده‌هایی که بر اساس آن‌ها مدل‌های ریاضی تهیه می‌شوند معمولاً کافی نبوده و همچنین الگوریتمی که برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود با آنچه در طبیعت اتفاق می‌افتد دقیقاً یکسان نیست. به‌علاوه در تبدیل الگوریتم به نرم افزار فرض‌هایی وجود در نظر گرفته می‌شود. حتی در مدل‌های خیلی پیچیده با واسنجی خوب، اطلاعات ورودی مدل دارای عدم قطعیت‌هایی می‌باشند (Rojas et al., 2010). بنابراین ارائه عدم قطعیت در پیش‌بینی نتایج یا شبیه‌سازی آینده هر مدل با توجه به اهداف خاص آن الزامی است. عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی آینده نیز ناشی از عدم قطعیت در مدل واسنجی شده می‌باشد و به همین دلیل هیچگاه نمی‌توان پیش‌بینی دقیقی را در مورد زمان وقوع رخدادهای آینده، میزان کارایی و اطمینان‌پذیری مدل در شبیه‌سازی رخدادهای مختلف که در آینده رخ خواهند داد را ارزیابی نمود. در صورتی که مدل مفهومی و داده‌های اولیه از دقت خوبی برخوردار بوده و واسنجی به درستی انجام پذیرفته باشد، عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی آینده به حداقل خواهد رسید. روش‌های متعددی برای کمی نمودن عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی آینده وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های آماری و روش‌های مبتنی بر مونت کارلو¹ اشاره کرد (Johnson, 2010). هر یک از این روش‌ها دارای نقاط ضعف و قوت متفاوتی بوده و دارای مفروضات متفاوتی می‌باشند و هر یک مجموعه‌ای از منابع خطا را در نظر می‌گیرند. در این بین یکی از اولین و محبوب‌ترین روش‌های مبتنی بر مونت کارلو که به طور گسترده جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل هیدرولوژیکی که دارای ساختاری شبیه بی‌زی و بر اساس اصل برابری نتایج است، روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (Beven et al., 2001; Beven and Binley., 1992) ارائه شد. این روش تا امروز از دو منظر صحت و سهولت شبیه‌سازی عدم قطعیت در مدل‌سازی با سایر روش‌ها در رقابت بوده و با وجود سادگی، از مزایای زیادی برخوردار است. اول این‌که، تاثیر عدم قطعیت پارامترهای مدل و همچنین روش محاسبات مورد استفاده در آن از جمله مشخصه‌هایی است که به طور ضمنی و غیر مستقیم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های روش GLUE می‌توان به فرض عدم وجود پارامتر بهینه منحصر به فرد اشاره کرد، به این ترتیب که مجموعه پارامترهای مدل بر

2- Prior distributions

3- Posterior distributions

4- Monte Carlo Markov Chain

5- Blocking Monte Carlo Markov Chain

6- Null Space Monte Carlo Markov Chain

7- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

8- Bayesian Approach

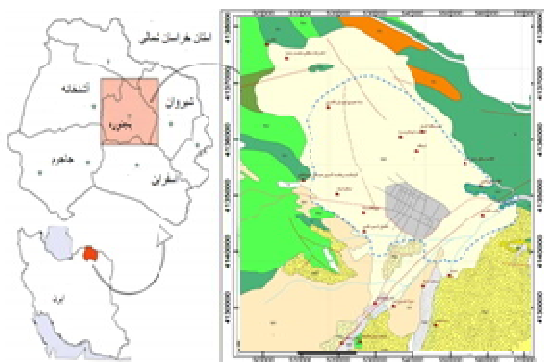
1- Monte Carlo based methods

در ادامه ابتدا ویژگی‌های دشت بجنورد و آبخوان آن ارائه شده است. سپس روند تهیه مدل مفهومی، مدل ریاضی آبخوان بجنورد، واسنجی آن، روش تحلیل عدم قطعیت و در نهایت نتایج و بحث عدم قطعیت پارامترها و خروجی مدل آب‌زیرزمینی ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت بجنورد در مرکز استان خراسان شمالی و در حد فاصل طول جغرافیایی 8° و 57' تا 25' و 57° و عرض جغرافیایی 13' و 37° و 21' واقع شده است (شکل 1). وسعت این حوضه در حدود 1265/8 کیلومتر مربع می‌باشد که 105/6 کیلومتر مربع آن را دشت و بقیه را ارتفاعات و آبرفت‌های میان ارتفاعات تشکیل می‌دهد. ارتفاع متوسط آن از سطح دریا 1544/2 متر می‌باشد. این حوضه دارای اقلیمی خشک بوده و متوسط بارندگی 30 ساله (1360-1390) آن، 300/7 میلی‌متر، میانگین دمای سالانه حوضه 11/2 درجه سانتی‌گراد و تبخیر-تعرق سالانه آن 284/9 میلی‌متر می‌باشد.



شکل 1- موقعیت حوضه آبریز و آبخوان دشت بجنورد در استان خراسان شمالی

خروجی این دشت نیز در بخش شرقی آن و در محل روستای بابا امان می‌باشد. آبراه‌های سطحی و مسیل‌های موجود در این محدوده، پس از عبور از ارتفاعات جنوبی و شمالی وارد آبخوان آبرفتی دشت بجنورد شده و از آنجا در جهت شرق این محدوده را ترک و به رود اترک می‌پیوندند. آبخوان آبرفتی دشت بجنورد با مساحت 65/2 کیلومتر مربع یکی از کوچک‌ترین آبخوان‌های آبرفتی در استان خراسان شمالی می‌باشد. ضخامت آبخوان آبرفتی این دشت در نقاط مختلف یکسان نبوده و از کم‌تر از 10 متر (در مجاورت ارتفاعات) تا بیش از 75 متر (در نواحی مرکزی آبخوان آبرفتی) تغییر می‌نماید (بی‌نام، 1392). جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت از جنوب

که اغلب آن‌ها در مورد تحلیل حساسیت پارامترهای مدل‌ها و تحلیل شاخص‌های آماری بوده است، از جمله چیت سازان و همکاران (1387) که با استفاده از روش مشخصه‌های آماری به تحلیل عدم قطعیت مدل ریاضی آبخوان دشت کازرون به‌بود قابل توجهی در معیارهای برآزش مدل مشاهده نمودند و همچنین موسوی و رسول-زاده (1387) به بررسی عدم اطمینان در برآورد پارامترهای مدل آب زیرزمینی دشت ارسنجان با استفاده از الگوریتم لونیبرگ¹ که نوعی روش معکوس می‌باشد، پرداخته و ابراز داشتند با اینکه سطح آب زیر زمینی شبیه‌سازی شده با مشاهده‌ای تطابق نسبتاً خوبی در مرحله واسنجی دارند، اما به علت همبستگی بالای بعضی پارامترها به یکدیگر پارامترهای برآورد شده منحصر به فرد نبوده و از عدم اطمینان بالایی برخوردار هستند.

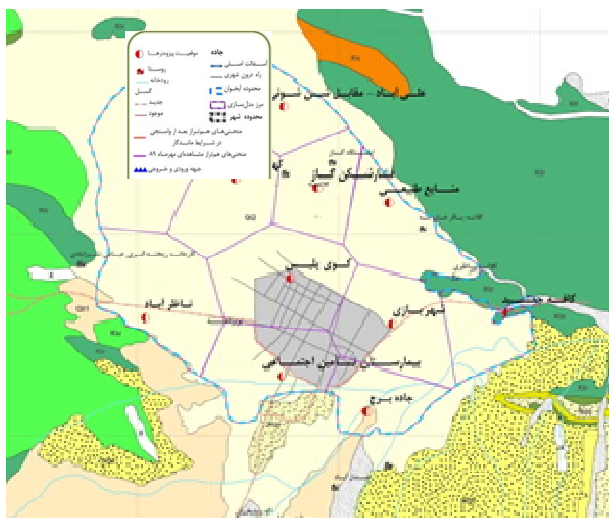
تاکنون استفاده از روش GLUE در تحلیل عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی مدل‌های آب زیرزمینی محدود بوده است. Buckley et al. (1995) با استفاده از این روش به بررسی انتقال آلودگی، Feyen et al. (2001) Morse et al., (2003) به مطالعه عدم قطعیت شبیه‌سازی ناحیه تاثیر چاه (Hassan et al., 2008) به بررسی عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی ناحیه تداخل آب شور و شیرین پرداختند. در این بین توجه کم‌تری به تحلیل عدم قطعیت موجود در پیش بینی نتایج مدل‌سازی و پارامترهای یک آبخوان با استفاده از روش GLUE معطوف شده است و تنها می‌توان به تحقیقات (Rojas et al., 2008) و (Rojas and Kahunde., 2010) اشاره کرد.

بنابراین هدف این مطالعه کاربرد روش تحلیل عدم قطعیت GLUE در مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت بجنورد می‌باشد. این امر با توجه به مقادیر بالای عدم قطعیت در داده‌های مرتبط با آب زیرزمینی و کمبودهایی که در زمینه تحلیل عدم قطعیت مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و همچنین اهمیت آبخوان دشت بجنورد و لزوم شناخت جامع از فرایندها و عوامل خطا در مدل‌سازی این آبخوان انجام شده است. آبخوان آبرفتی دشت بجنورد با مساحت 65/2 کیلومتر مربع یکی از کوچک‌ترین آبخوان‌های آبرفتی در استان خراسان شمالی می‌باشد. شهر بجنورد که در چند سال گذشته مرکز استان نیز شده است، بخش وسیعی از آبخوان آبرفتی را پوشش می‌دهد. یکی از مشکلاتی که در این آبخوان بر خلاف اغلب آبخوان‌های کشور وجود دارد، بالازدگی سطح آب در اثر گسترش شهر به بخش عمده‌ای از دشت، و ورود آب خارج حوضه‌ای برای تامین آب شرب (از منابع کارستی و سد شیرین دره) می‌باشد. از آنجا که بخش اعظم دشت به کاربری مسکونی اختصاص یافته است، مدل‌سازی آبخوان بجنورد و تحلیل عدم قطعیت نتایج به منظور مدیریت آب مازاد اهمیت فوق‌العاده‌ای یافته است.

1- Levenberg-Marquart

در محدوده مدل تعداد 343 چاه بهره‌برداری وجود دارد که تخلیه سالانه آن‌ها بالغ بر 23/02 میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. آب استحصال از این چاه‌ها به مصارف شرب، کشاورزی، صنعت و خدمات می‌باشد (ضیایی و همکاران، 1394).

و جنوب‌غربی به سمت شمال و شمال شرقی است. به منظور انجام بررسی‌های کمی و اندازه‌گیری نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان ابرفتی دشت بجنورد 11 حلقه چاه مشاهده‌ای فعال وجود دارد و اندازه‌گیری سطح آب به صورت ماهیانه در آن‌ها صورت می‌گیرد. موقعیت این چاه‌ها در شکل 2 قابل مشاهده می‌باشد (بی‌نام، 1392).



شکل 2- توزیع مکانی چاه‌های مشاهداتی در آبخوان بجنورد

افزار رایانه‌ای به منظور تهیه مدل ریاضی و شبیه‌سازی جریان آب- زیرزمینی با استفاده از مدل سه بعدی تفاضلات محدود (Harbaugh, 2005) ¹ MODFLOW-2005 در محیط نرم افزار GMS7.1.10 به عنوان رابط گرافیکی صورت گرفت (بی‌نام، 1393).

آبخوان از نوع آزاد و یک لایه در نظر گرفته شد. جریان دو بعدی در محیط اشباع در شرایط غیرهمگن و همروند فرض و اندازه سلول‌ها در کل محدوده مورد مطالعه 250×250 متر انتخاب گردید (شکل 3).

مرز فیزیکی آبخوان با توجه به اطلاعات مدل مفهومی تعیین شد. با توجه به این که ورودی‌های آب سطحی در جنوب و خروجی آن در قسمت جنوب شرقی آبخوان وجود داشت، قسمت‌هایی از مرز که در این مکان‌ها واقع شده بود برای مدل عددی مرز با آبی ثابت در نظر گرفته شد. در شمال آبخوان هم از آنجا که اطلاعات مربوط به چگونگی جریان‌های سطحی و زیرزمینی و تاثیرگذاری آن‌ها بر آبخوان اندک بود، مرز تا محل پیزومترهای علی‌آباد و لنگر پیش آورده شد و به عنوان مرز مدل‌سازی در مدل عددی به کار گرفته شد تا از تاثیر عدم قطعیت در شرایط مرزی کاسته شود. سایر مرزها نیز به صورت مرز بدون جریان لحاظ شد. برای شرایط اولیه

به‌طور کلی فاصله سطح آب زیرزمینی از سطح دشت بجنورد اندک بوده و بخش وسیعی از سطح دشت (از جمله شهر بجنورد) دارای عمقی کم‌تر از 15 متر می‌باشد. کاهش عمق سطح آب زیرزمینی از سطح زمین در بخش مرکزی دشت بجنورد می‌تواند به دلایل بالا بودن سنگ کف، توپوگرافی سطح زمین و آب‌های برگشتی از مصارف شرب شهری و کشاورزی باشد (بی‌نام، 1393).

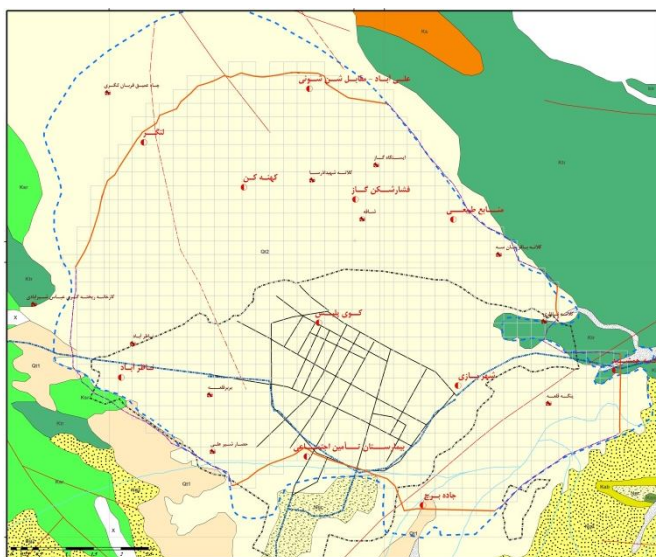
عمق سطح آب زیرزمینی از سطح زمین از شمال شرق به سمت جنوب، جنوب‌غرب و غرب کاهش می‌یابد. حداقل عمق سطح آب زیرزمینی در چاه مشاهده‌ای کوی پلیس در مرکز آبخوان ابرفتی (داخل شهر بجنورد) برابر 7/2 متر و حداکثر عمق سطح آب نیز در چاه مشاهده‌ای لنگر واقع در شمال غرب آبخوان برابر 42/8 متر اندازه‌گیری شده است (بی‌نام، 1393).

مدل عددی آب زیرزمینی

در این مطالعه به منظور تهیه مدل ریاضی آبخوان، سه گام اساسی شامل تهیه مدل مفهومی، ایجاد مدل ریاضی و واسنجی و صحت‌سنجی صورت پذیرفت. در این پژوهش برای تهیه مدل مفهومی از چارچوب پیشنهادی (Izady et al., 2013) شامل گردآوری کلیه داده‌ها و اطلاعات مرتبط، تدوین مشاهدات کنترل‌کننده، تبیین هندسه مخزن و برآورد ضرایب هیدرودینامیک و تغذیه بهره گرفته شده است. پس از تهیه مدل مفهومی، انتقال آن به نرم

1- Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model

نیز در مدل‌سازی ماندگار و غیر ماندگار سطح آب مشاهده شده در مهرماه 80 پس از پهنه‌بندی در تمام سلول‌ها لحاظ شد (بی‌نام،



شکل 3- مرزهای مدل‌سازی و شبکه محاسباتی به همراه شرایط مرزی

الگوریتم عدم قطعیت

در این مطالعه از روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) (Beven and Binley., 1992) جهت تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل استفاده شده است. در این روش تحلیل، وزن‌دهی سری‌های مختلف مجموعه پارامترهای بهینه به جای پارامترهای منحصر به فرد بهینه بر اساس نیکویی برازش¹ انجام شد (Stow et al., 2007) و با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در هر مجموعه پارامتر با استفاده از توابع درست‌نمایی، میزان عدم قطعیت محاسبه و بر اساس آن توابع توزیع احتمالاتی پسین استخراج گردید. در تحقیق حاضر بررسی عدم قطعیت در شبیه‌سازی آبخوان بجنورد با استفاده از روش عمومی GLUE صورت پذیرفت که در ادامه به مراحل آن پرداخته شد.

ابتدا محدوده‌های اولیه یا توزیع پیشین پارامترهای تغذیه و هدایت هیدرولیکی به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت، تعیین می‌شود. در این جا به دلیل عدم وجود داده کافی و توزیع اولیه، پارامترهای واسنجی مدل به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است (Beven 2001; Muleta and Nicklow., 2005; and Chaubey., 2008) Migliaccio. اطمینان از دامنه اولیه بزرگ، حد پایین و بالای دامنه به ترتیب به صورت $p-2\sigma$ و حد بالای دامنه به صورت $p+2\sigma$ در نظر گرفته شده

از آنجایی که آبخوان دشت بجنورد از نوع آزاد می‌باشد، سطح زمین، قسمت فوقانی آبخوان را تشکیل می‌دهد. بنابراین با استفاده از نقشه ارتفاعی رقومی SRTM (<http://earthexplorer.usgs.gov>)، توپوگرافی سطح آبخوان تهیه گردید. عمق سنگ کف نیز با توجه به مطالعات ژئوالکتریک انجام شده در محدوده دشت و همچنین لاگ‌های حفاری، چاه‌های مشاهداتی و بهره برداری تعیین شد و پهنه‌بندی گردید. سپس نقشه هم‌تراز سنگ کف نیز تهیه و وارد مدل گردید. ضرایب هیدرودینامیک آبخوان نیز با توجه به جمیع اطلاعات موجود در دشت اعم از مطالعات ژئوالکتریک، لاگ‌های حفاری، آزمایش‌های اکتشافی و آزمون‌های پمپاژ در چاه‌های بهره‌برداری در مدل مفهومی تهیه شده، پهنه بندی شد.

از دوره ده ساله (1380-1390) برای مدل‌سازی دشت بجنورد و دوره 2 ساله (1390-1392)، به منظور صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. گام‌های زمانی یک ماهه انتخاب و سطح ایستابی مهر 1380 به عنوان بار هیدرولیکی اولیه در سلول‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی هیدروگراف واحد دشت، نشانگر نوعی رفتار تعادلی در آبخوان است (بی‌نام، 1392). بنابراین می‌توان شرایط متوسطی برای تغذیه، تخلیه و تراز آب در نظر گرفت. برای این منظور از متوسط 120 ماهه (از مهر 80 تا شهریور 90) تخلیه، تغذیه، شرایط مرزی، و تراز آب برای مدل‌سازی و ارزیابی شرایط ماندگار استفاده گردید. در این مقاله صرفاً به نتایج تحلیل عدم قطعیت در شرایط ماندگار پرداخته شد.

1- Goodness-of-fit

خصوصیات آماری و توزیع پسین⁵ پارامترها و همچنین دامنه بهینه مقادیر واسنجی شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور معمول میانه به عنوان خروجی قطعی و میزان عدم قطعیت در سطح اطمینان 5% (بازه اطمینان 95%) از تابع توزیع ذکر شده تخمین زده می‌شود (Shafiei et al., 2014). در نهایت میزان عدم قطعیت در خروجی سطح آب زیرزمینی توسط وزن‌های درست‌نمایی⁶ محاسبه می‌گردد. محاسبات عدم قطعیت خروجی های مدل توسط وزن‌های درست-نمایی پارامترهای قابل قبول، به شرح رابطه 2 صورت می‌پذیرد:

$$P_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (2)$$

که P_i احتمال یا وزن درست‌نمایی مربوط به i امین مجموعه پارامتر می‌باشد و N تعداد مجموعه پارامترهای قابل قبول است. مجموع این وزن‌ها برابر با یک بوده و این مقادیر تشکیل یک تابع توزیع احتمال⁷ (pdf) را می‌دهند. با استفاده از توزیع احتمال بدست آمده، بازه اطمینان 95%⁸ برای خروجی شبیه‌سازی شده مدل استخراج می‌شود (شکل 4). محدوده عدم قطعیت به‌دست آمده در روش GLUE تقریبی از تمامی انواع منابع خطا در فرآیند مدل‌سازی را منعکس ساخته و عدم قطعیت‌های مربوطه در پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد (Rojas et al., 2008).

معیارهای استفاده شده در این تحقیق بر اساس دو معیار تعریف شده توسط (Abbaspour et al., 2004) جهت کمی نمودن و ارزیابی میزان عدم قطعیت می‌باشند. معیار p-factor درصد قرارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده بازه اطمینان 95% نشان می‌دهد. همچنین d-factor حاصل تقسیم میانگین ضخامت محدوده بازه اطمینان 95% را بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقدار ایده‌آل p-factor زمانی است که تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده باند عدم قطعیت قرار بگیرند (100%). مقادیر p-factor کم‌تر از 50% نشان دهنده واسنجی ضعیف مدل و خطای زیاد در داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. از طرف دیگر بزرگی d-factor نشان‌دهنده بزرگ بودن عدم قطعیت است و مناسب‌ترین مقدار برای آن زمانی است که به صفر نزدیک باشد (به عبارتی $d < 1$ factor). از آنجایی که همیشه عدم قطعیت وجود دارد هیچ وقت این معیار صفر نخواهد شد و بزرگ بودن آن نشان دهنده وجود عدم قطعیت زیاد در ساختار مدل می‌باشد (Abbaspour et al., 2004).

است که در آن p میانگین و σ انحراف معیار مقادیر پارامترهای حاصل از واسنجی می‌باشند.

سپس N مجموعه پارامتر تصادفی بر اساس دامنه اولیه و روش‌های مبتنی بر مونت کارلو تولید می‌شود که در این تحقیق از روش نمونه‌گیری مربع لاتین¹ (LHS) استفاده شده است. در این روش توزیع احتمالی برای هر یک از متغیرهای ورودی به m بازه مساوی (4 بازه در این تحقیق) تقسیم می‌شود که هر یک از این بازه‌ها دارای احتمال رخداد برابر با $\frac{1}{m^2}$ می‌باشد (Hardynto and Merkel., 2006). مقادیر تصادفی متغیرهای اولیه هر یک از بازه‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شوند که نمونه‌گیری فقط یکبار صورت می‌گیرد (Helton and Davis., 2003). در این مرحله 100،000 نمونه یا مجموعه پارامتر تولید می‌شود.

در ادامه مدل MODFLOW 2005 اجرا شده و نتایج مدل سازی پس از هر بار شبیه‌سازی ذخیره می‌شود.

سپس به منظور نمایش نحوه عملکرد مجموعه پارامترها با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده سطح ایستابی توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده از آبخوان، مقدار درست‌نمایی² (L) محاسبه می‌شود. در این تحقیق از رابطه معکوس واریانس خطا به عنوان معیار درست‌نمایی استفاده شد (Beven and Binely, 1992).

$$L = \left(\frac{\sum_{j=1}^n (O_j - Y(\theta_i))^2}{n - 2} \right)^{-1} \quad (1)$$

که در آن θ_i مجموعه پارامتر نام، O_j مقادیر تراز آب اندازه‌گیری شده، $Y(\theta_i)$ خروجی مدل (تراز آب) به ازای هر مجموعه پارامتر n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. مقادیر بزرگ‌تر درست‌نمایی نشان دهنده تطابق بیش‌تر بین تراز آب شبیه‌سازی شده و واقعی می‌باشد.

در انتها با انتخاب یک مقدار آستانه قابل پذیرش³ (ASR)، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، به دو دسته قابل قبول و غیر قابل قبول دسته بندی می‌شوند. این آستانه یا به صورت میزان اختلاف مجاز از حداکثر درست‌نمایی در نمونه و یا درصد خاصی از تعداد کل شبیه‌سازی تعریف می‌شود. در این مطالعه آستانه قابل پذیرش به صورت 1% از تعداد کل نمونه‌گیری‌ها در نظر گرفته شده است (Vrugt et al., 2008). سپس مقادیر درست‌نمایی پاسخ‌های انتخاب شده (مجموعه پارامترهای قابل قبول⁴) برای استخراج تابع توزیع احتمال،

5- Posterior distribution

6- Likelihood weight

7- Probability Density Function

8- 95% Confidence Interval

1- Latin Hypercube Sampling

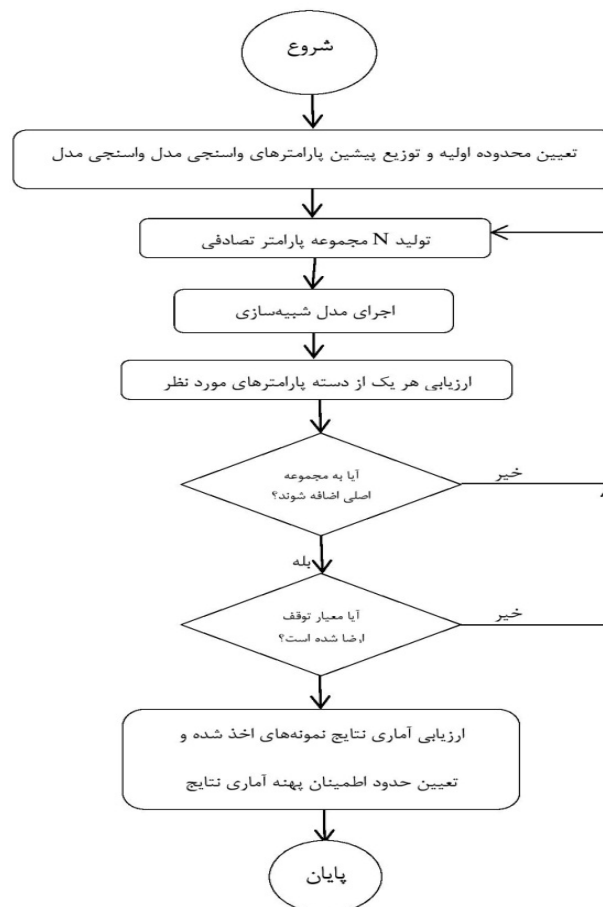
2- Likelihood Function

3- Acceptable Sample Rate

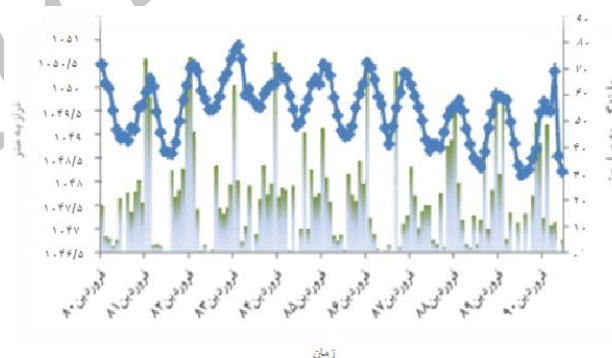
4- Behavioral parameter sets

ذخیره شد. محاسبات گام چهارم انجام، 1000 مجموعه پارامتر قابل قبول از بقیه پارامترها جدا شده و توابع توزیع پسین با استفاده از توابع توزیع فراوانی استخراج شدند.

برای انجام مراحل فوق، مدل MODFLOW همراه با کدی جانبی در محیط MATLAB تهیه و پس از هر بار اجرای برنامه برای هر 100,000 مجموعه پارامتر تولید شده در گام دوم، خروجی



شکل 4- الگوریتم تشخیص عدم قطعیت مدل‌سازی به روش GLUE



شکل 5- هیدروگراف واحد دشت بجنورد طی دوره مدل‌سازی (1380-1390)

چاه مشاهده‌ای اطلاعات سطح آب ماهیانه برای دوره مدل‌سازی (مهر 80 تا شهریور 90) میانگین‌گیری شده و به عنوان مقدار اندازه‌گیری پس از این مورد اشاره قرار می‌گیرند. در جدول 1 مقادیر میانگین در دوره‌ی آماری نشان داده شده است. هیدروگراف واحد دشت نیز که

نتایج و بحث

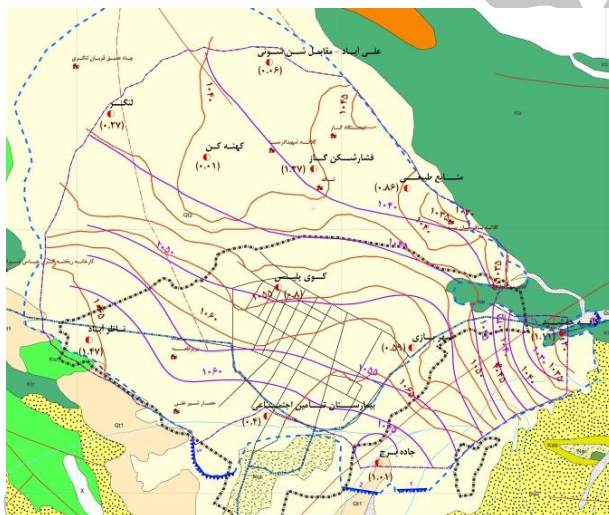
به منظور انجام بررسی‌های کمی و اندازه‌گیری نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان ابرفتی دشت بجنورد در شرایط ماندگار، 11 حلقه

بارندگی ماهانه به منظور مشاهده تاثیرپذیری نوسانات سطح آب از بارش نیز نشان داده شده است.

برایند کلی آبخوان نیز می باشد در شکل 5 ارایه شده است که حاکی از تعادل آبخوان می باشد (بی نام، 1392). در این شکل تغییرات

جدول 1- میزان خطای چاه های مشاهداتی در دوره مدل سازی پس از واسنجی

| چاه مشاهداتی | سطح آب مشاهده ای (m) | سطح آب برآورد شده (m) | RMSE (m) |
|---------------|----------------------|-----------------------|----------|
| کوی پلیس | 1052/40 | 1053/19 | 1/312 |
| شهربازی | 1056/09 | 1056/68 | 1/124 |
| منابع طبیعی | 1040/88 | 1040/01 | 0/753 |
| علی آباد | 1038/96 | 1038/90 | 0/300 |
| تامین اجتماعی | 1063/47 | 1063/07 | 0/584 |
| ناظرآباد | 1068/80 | 1065/26 | 1/401 |
| کافه جمشید | 1024/00 | 1025/53 | 0/881 |
| جاده برج | 1072/88 | 1071/86 | 1/532 |
| فشارشکن گاز | 1040/61 | 1039/34 | 1/026 |
| جاده لنگر | 1042/37 | 1042/36 | 0/516 |
| کهنه کن | 1038/24 | 1038/22 | 1/049 |



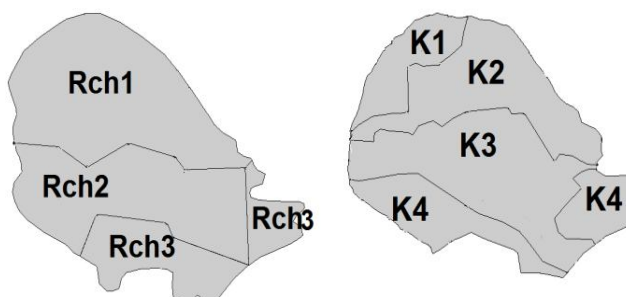
شکل 6- منحنی های هم تراز عمق سطح آب بعد از واسنجی در شرایط ماندگار

سایر پارامترهای مدل در مقادیر پیش فرض شان نگه داشته اند. در تحلیل عدم قطعیت موجود مدل، با در نظر گرفتن این واقعیت که بخش عوامل تغذیه در دشت بجنورد که ناشی از برگشت مصرف، تغذیه از بستر رودخانه و برگشت آب کشاورزی می باشد نواحی تغذیه انتخاب گردیدند (شکل 7). با توجه به مدل مفهومی توسعه یافته برای آبخوان بجنورد و همچنین واسنجی در شرایط ماندگار مدل عددی برای بررسی عدم قطعیت مدل نواحی هدایت هیدرولیکی و تغذیه به ترتیب به چهار و سه ناحیه تقسیم بندی گردید. این پارامترها و دامنه عدم قطعیت های انتخاب شده برای آن ها در جدول 2 آورده شده است.

نتایج حالت مدل ماندگار پس از واسنجی در شکل 6 نشان داده شده و خطای به دست آمده در هر یک از پیژومترها نیز در جدول 1 آمده است. در ادامه به بررسی عدم قطعیت نتایج حاصل از این مدل سازی پرداخته می شود.

پهنه بندی اولیه هدایت هیدرولیکی و تغذیه

نظر به این که مدل ریاضی MODFLOW دارای پارامترهای متعددی می باشد، در نظر گرفتن همه این پارامترها برای تحلیل عدم قطعیت ناممکن است، در این پژوهش دو پارامتر تغذیه و هدایت هیدرولیکی که در تحقیقات (Hassan et al., 2008) و چیت سازان و همکاران (1387) موثر تشخیص داده شده اند، انتخاب گردیدند و



شکل 7- پهنه بندی پارامترهای تغذیه و هدایت هیدرولیکی (به ترتیب از راست) مورد استفاده در الگوریتم تحلیل عدم قطعیت

جدول 2- دامنه اولیه تعیین شده پارامترهای شبیه‌سازی

| پارامتر | پهنه | مقدار متوسط | حد پایین | حد بالا |
|----------------------------------|------|-------------|----------|---------|
| هدایت هیدرولیکی (m/day) | 1 | 35/20 | 26/5 | 43/9 |
| | 2 | 36/90 | 30/9 | 42/91 |
| | 3 | 3/30 | 1/34 | 5/27 |
| | 4 | 26/30 | 7/67 | 44/93 |
| تغذیه (m ³ /month) | 1 | 0/0015 | 0/0001 | 0/00322 |
| | 2 | 0/0015 | 0/0001 | 0/00322 |
| | 3 | 0/0015 | 0/0001 | 0/00322 |

مقایسه توابع توزیع پسین و پیشین در شکل 8 نشان می‌دهد که دامنه پارامترهای هدایت هیدرولیکی به طور معنی‌داری نسبت به کران بالا و پایین توزیع پیشین (جدول 1) کوچک‌تر شده و سایر پارامترهای تغذیه در نواحی چهار گانه تغییر قابل توجهی نداشته‌اند که این امر نشان دهنده مقادیر عدم قطعیت بالا در تخمین این پارامتر و همچنین قابلیت تشخیص پذیری¹ کم‌تر آن می‌باشد و با توجه به شکل هیدروگراف واحد دشت (شکل 5) و نوسانات سطح آب و هم‌خوانی آن با الگوی بارندگی، تغذیه در این آبخوان ماهیت غیرماندگار داشته و ضریب پراکندگی قابل ملاحظه آن نسبت به هدایت هیدرولیکی (جدول 3) قابل توجه می‌باشد.

از مقایسه شکل توابع پسین می‌توان گفت مقادیر هدایت هیدرولیکی در نواحی 1، 2، و 4 به سمت مقادیر بیش‌تر دامنه اولیه میل کرده و تابع توزیع پسین پارامتر هدایت هیدرولیکی در ناحیه 3 به سمت یک مقدار مشخص همگرا شده است.

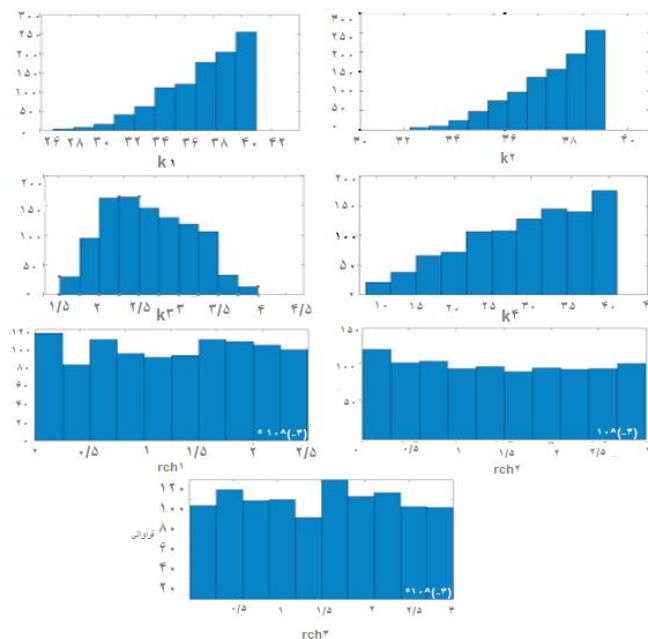
در جدول 3 نیز خصوصیات آماری مربوط به توزیع های پسین پارامترها آمده است. ضریب تغییرات پارامترهای مدل یکی از عامل-های مهم می‌باشد که برای مقایسه پارامترها می‌توان از آن استفاده کرد که مقادیر کم‌تر آن بیانگر دقیق‌تر بودن پارامتر تخمین زده شده می‌باشد.

عدم قطعیت پارامترهای هیدروژئولوژیکی

هدف اصلی از تحلیل عدم قطعیت، تشخیص ویژگی‌های آماری خروجی‌های مدل بر اساس روابط موجود بین پارامترهای ورودی است. از این گذشته، این تجزیه و تحلیل، شناختی راجع به سهم هر یک از پارامترهای ورودی بر خطای ظاهر شده در خروجی مدل ارائه می‌دهد (پوررضا بیلندی و همکاران، 1391). فهم چنین مطلبی کمک می‌کند تا پارامترهایی که تاثیر بیش‌تری بر روی نتایج خروجی دارند تشخیص داده شوند و دقت بیش‌تری در برآورد آن‌ها به عمل آید که بدین وسیله می‌توان از خطای حاصل در مقادیر خروجی کاست (پوررضا بیلندی و همکاران، 1393). در حقیقت می‌توان گفت عدم قطعیت یک مرحله مهم هم‌زمان با واسنجی پارامترهای مدل است.

برای انجام واسنجی و تحلیل عدم قطعیت در این مطالعه طبق روش GLUE ابتدا دامنه اولیه (توزیع پیشین) پارامترها استخراج شد (جدول 1). پس از تعیین توابع توزیع پیشین طبق روش GLUE و تنظیمات انجام شده آن (بخش مواد و روش‌ها) مدل MODFLOW که توسط کد نرم افزار مطلب به روش تحلیل عدم قطعیت متصل شد، به تعداد 100 هزار بار اجرا گردید و بعد از استخراج پارامترهای قابل قبول (براساس یک درصد بهترین عملکرد) توابع توزیع پسین پارامترها محاسبه شدند (شکل 8).

1- Identifiability



شکل 8- توزیع پسین پارامترهای دارای عدم قطعیت در مدل شبیه‌سازی (برای نمایش بهتر محور افقی هر نمودار مطابق با حدود بالا و پایین دامنه تغییرات پارامترها ترسیم شده است)

جدول 3- مشخصات آماری توابع توزیع پسین بدست آمده پارامترهای دارای عدم قطعیت

| پارامتر | پهنه | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات |
|----------------------------------|------|----------|--------------|--------------|
| 1 | 1 | 34/9756 | 4/462 | 0/127 |
| هدایت هیدرولیکی (m/day) | 2 | 36/9176 | 2/995 | 0/0811 |
| 3 | 3 | 3/3145 | 0/982 | 0/2962 |
| 4 | 4 | 26/3091 | 9/315 | 0/354 |
| 1 | 1 | 0/001512 | 0/000859 | 0/568 |
| تغذیه (m ³ /month) | 2 | 0/001494 | 0/000866 | 0/579 |
| 3 | 3 | 0/001495 | 0/000861 | 0/575 |

قطعیت نتایج مدل باشد. از این رو، تلاش برای کاهش عدم قطعیت این پارامترها می‌تواند گام مهمی در کاهش عدم قطعیت کل مدل باشد.

به طور کلی پارامترهای دارای ضریب تغییرات کم‌تر از 0/25 به عنوان پارامتر حساس شناخته شده و عدم قطعیت مدل را کاهش می‌دهند (Mein and Brown., 1978). بنابراین پارامترهای هدایت هیدرولیکی به خصوص در ناحیه 2 بیش‌ترین حساسیت را دارا می‌باشند. چیت سازان و همکاران (1387) نیز طی تحلیل عدم قطعیت با مشخصه‌های آماری اعلام کردند هدایت هیدرولیکی دارای بالاترین حساسیت بوده و در کاهش عدم قطعیت موثر است که با نتایج (Hardyanto and Merkel., 2007) و (Morse et al., 2003) تطابق دارد.

با مقایسه مقادیر ضریب تغییرات هر کدام از توابع پسین پارامترها می‌توان درجه حساسیت نسبی پارامترها را بررسی کرد (Shafiei et al., 2014). تابع توزیعی که یکنواخت‌تر بوده و دامنه تغییرات آن به دامنه اولیه نزدیک‌تر باشد حساسیت آن کم‌تر خواهد بود و ضریب تغییرات بیش‌تری دارد. بزرگ‌تر بودن مقدار انحراف توزیع پسین یک پارامتر از توزیع یکنواخت پیشین آن نشانگر حساسیت بالاتر مدل نسبت به آن پارامتر می‌باشد. شناسایی پارامترهای حساس مدل ابزاری مفید جهت برنامه‌ریزی برای تعیین متغیرهایی که اندازه‌گیری آن‌ها می‌تواند به تعیین دقیق‌تر این پارامترها و ارتقا شبیه‌سازی‌های مدل بیانجامد، باشد (خوشخو و همکاران، 1392). بنابراین با توجه به جدول 3 پارامتر تغذیه با بیش‌ترین ضرایب تغییرات دارای کم‌ترین حساسیت است. حساسیت مدل به پارامترها بدین معنی است که وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل می‌تواند منشا بخش مهمی از عدم

های ورودی و یا داده‌های مشاهداتی ناشی از خطای دیده‌بانی و خطا در ثبت داده‌ها باشد (خوشخو و همکاران، 1392) به عنوان مثال هیدروگراف‌های پیژومترهای فشارشکن گاز و منابع طبیعی دارای روند تغییرات سینوسی در اغلب بازه‌های زمانی مختلف بوده و همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود وابستگی تراز آب و بارندگی ماهانه به خوبی مشهود بوده و با نوسانات سطح آب هماهنگی دارد. از آنجا که جریان آب زیرزمینی مستقیماً از تغذیه تأثیر می‌پذیرد ماهیت آن غیر ماندگار بوده و ثابت در نظر گرفتن آن طی دوره مدل‌سازی خود نوعی از عدم قطعیت را وارد مدل‌سازی کرده است، با این وجود از مقدار کم d-factor می‌توان نتیجه گرفت که عدم قطعیت ناشی از پارامترهای مدل MODFLOW به خوبی توسط الگوریتم GLUE شناسایی شده است.

نتیجه‌گیری

عدم قطعیت داده‌های ورودی و ساختار مدل جز جدا ناپذیر مدل‌های ریاضی می‌باشند و هیچ شبیه‌سازی عاری از خطا نمی‌باشد. خطای مذکور معمولاً اشکالاتی را در به کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی و اعمال تصمیم‌گیری و ارزیابی مدیریتی ایجاد می‌کند. بنابراین بررسی و کمی نمودن عدم قطعیت به نحوی که اطمینان کافی را در به کارگیری مدل ایجاد کند از اهمیت بالایی برخوردار است.

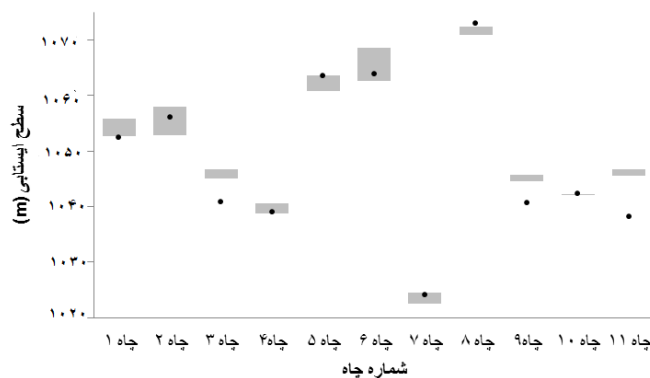
عدم قطعیت در برآورد سطح ایستابی شبیه‌سازی شده

تحلیل عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌های خروجی مدل توسط فواصل اطمینان 95% بیان می‌شود که در واقع بیان‌گر دقت واسنجی مدل و همچنین نشان‌دهنده میزان عدم قطعیت در خروجی مدل در دوره شبیه‌سازی شده می‌باشد. در شکل 9 بازه‌های عدم قطعیت 95% شبیه‌سازی به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده در 11 حلقه چاه مشاهداتی (نقاط) ارائه گردیده است.

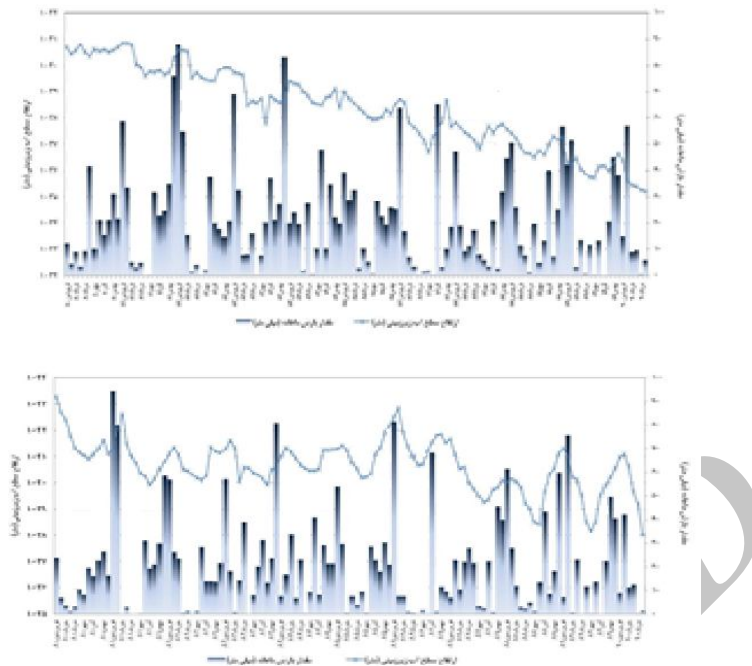
همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود 73% مقادیر مشاهداتی در بازه اطمینان 95% قرار می‌گیرند و تنها تعداد کمی از نقاط خارج از این محدوده قرار گرفته‌اند که مربوط به چاه‌های کهنه کن، فشارشکن گاز و چاه منابع طبیعی می‌باشد. همان‌طور که در شکل شماره 10 نیز مشاهده می‌گردد هیدروگراف پیژومتر کهنه کن دارای روند نزولی بوده و جریان یکنواختی ندارد. روند نزولی در این پیژومترها که در محدوده کشاورزی دشت حاکم هستند، حاکی از برداشت آب توسط چاه‌های آب کشاورزی و کم بودن تغذیه نسبت به برداشت می‌باشد و از آنجا که مقدار میانگین ده ساله سطح ایستابی در مدل اعمال و محاسبات اعمال می‌شود منجر به بیش‌تر برآورد شدن باند عدم قطعیت آن شده است. همچنین مقادیر باندهای عدم قطعیت در دو چاه مشاهداتی دیگر نیز بیش برآورد شده‌اند که با افزایش دامنه پارامتر هدایت هیدرولیکی نیز در نتایج بهبودی حاصل نشد. این امر می‌تواند ناشی از سایر منشاهای عدم قطعیت مانند وجود خطا در داده-

جدول 4- مقادیر معیارهای سنجش عدم قطعیت

| معیارهای سنجش عدم قطعیت | |
|-------------------------|------|
| p-factor | 73% |
| d-factor | 0/18 |



شکل 9- بازه اطمینان 95% سطح ایستابی شبیه‌سازی شده مدل MODFLOW و نقاط اندازه‌گیری شده



شکل 10 - سطح آب زیرزمینی مشاهداتی در طول دوره مدل‌سازی در چاه‌های کهنه کن، فشارشکن گاز

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیریت شرکت مهندسی مشاور هیدروتک توس و نیز از مسئولین محترم دفتر مطالعات منابع آب شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی که داده‌های مورد نیاز را تامین کرده‌اند، تشکر نمایند.

منابع

بهروز، م، علی محمدی، س و عطاری، ج. 1393. تحلیل حساسیت عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی در طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب، تحقیقات منابع آب ایران. 2: 81-69.

بی‌نام. 1392. گزارش مدل مفهومی حوضه بجنورد، شرکت هیدروتک توس، مشهد.

بی‌نام. 1393. گزارش مدل ریاضی حوضه بجنورد، شرکت هیدروتک توس، مشهد.

پوررضایی‌بندی، م، آخوندعلی، م و قهرمان، ب. 1391. تحلیل عدم قطعیت در برآورد پارامترهای مدل توزیعی بارش-رواناب با کاربرد الگوریتم مونت کارلو-زنجیره مارکف، مجله پژوهش آب ایران. 6: 173-165.

پوررضایی‌بندی، م، آخوندعلی، م، قهرمان، ب و تلوری، ع. 1393.

در این مطالعه که به منظور تحلیل عدم قطعیت موجود در شبیه‌سازی آینده و همچنین پارامترهای آبخوان بجنورد صورت گرفت، مدل مفهومی محدوده دشت بجنورد و مدل ریاضی جریان آب زیرزمینی تهیه گردید و شبیه‌سازی و واسنجی جریان آب زیرزمینی در نهایت تحلیل عدم قطعیت انجام شد. با انجام تحلیل عدم قطعیت به روش GLUE، بهبود قابل توجهی در میزان عدم قطعیت مدل آب‌های زیرزمینی دشت بجنورد حاصل شد. با استخراج توابع پسین و مقایسه با پیشین آن، پارامتر هدایت هیدرولیکی، حساس شناخته شد. نتایج نشان داد پارامتر هدایت هیدرولیکی از قابلیت تشخیص بالاتری برخوردار بوده و نسبت به پارامتر تغذیه، تخمین مناسب‌تری داشته است که می‌توان گفت به دلیل ماهیت غیرماندگار بودن تغذیه و همچنین تغییرات آن در طی دوره مدل‌سازی، پارامتر تغذیه قابلیت تشخیص کمتری داشته است، بنابراین به نظر می‌رسد که بررسی عدم قطعیت مدل‌سازی در شرایط غیرماندگار به درک بیش‌تر منابع آب زیرزمینی منجر شود. علاوه بر آن بهبود مدل مفهومی به‌ویژه در مناطق مجاور پیرومترهای کهنه کن، فشارشکن و منابع طبیعی با کاستی‌هایی مواجه است. با توجه به محدوده اطمینان به دست آمده و مقایسه آن با مقادیر مشاهداتی می‌توان گفت عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل آبخوان بجنورد، با تخمین مناسبی توسط الگوریتم GLUE به کمیت در آمده و سطح اعتماد نتایج مدل‌سازی برای کاربرد در پروژه‌های مدیریت منابع آب قابل قبول می‌باشد.

- hydrological modeling?, Hydrology and Earth System Sciences. 5.1:1-12.
- Beven, K.J. 2006. A manifesto for the equifinality thesis, *Journal of Hydrology*, 320. 1-2:18-36.
- Beven, K.J. and Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6.3:279-298.
- Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Rosberg, D., Robinson, B.A., Zyvoloski, G.A. 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling, *Advances in Water Resources*. 31:630-648.
- Buckley, K.M., Binley, A.M and Beven, K.J. 1995. Calibration and predictive uncertainty estimation of groundwater quality models: Application to the Twin Lake Tracer Test, in *Groundwater quality Management*. 220: 205-214.
- Dettinger, M.D and Wilson, J.L. 1981. First Order Analysis of Uncertainty in Numerical Models of Groundwater Flow. Part 1. Mathematical Development, *Water Resources Research*. 17.1:149-161.
- Dotto, C.B.S., Mannina, G., Kleidorfen, M., Vezzaro, L., Henrichs, M., McCarthy, D.T., Freni, G., Rauch, W and Deletic, A. 2012. Comparison of different uncertainty techniques in urban stormwater quantity and quality modeling, *Water Research*. 46.8:2545-2558.
- Feyen, L., Beven, K.J., Smedt, F.D and Freer, J. 2001. Stochastic capture zone delineation within the generalized likelihood uncertainty estimation methodology: Conditioning on head observation. *Water Resources Research*. 37.3: 625-638.
- Fu, J and Gomez-Hernandez, J.J. 2009. Uncertainty Assessment and data worth in groundwater flow and mass transport modeling using a blocking markov chain monte carlo method, *Journal of Hydrology*. 364:328-341.
- Harbaugh, A. 2005. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model- the Groundwater Flow Process, Techniques and methods 6-a16, United States Geological Survey, Reston, Virginia, USA.
- Hardyanto, W and Merkel, B. 2007. Introducing Probability and Uncertainty in groundwater modeling with FEMWATER_LHS, *Journal of Hydrology*. 332.
- Hassan, A.E., Bekhit, H.B and Chapmann, J.B. 2008. Uncertainty assessment of a stochastic groundwater flow model using GLUE analysis, *Journal of Hydrology*. 362:89-109.
- Hassan, A.E., Bekhit, H.B and Chapmann, J.B. 2009. ارزیابی دو الگوریتم مختلف مونت کارلو زنجیر مارکف در تحلیل صدک قطعیت پارامترهای مدل توزیعی هیدرولوژیکی، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. 21. 5: 1-26.
- چیت‌سازان، م، عابدینی، م. ج و سالک، م. 1387. بررسی و کمی‌سازی عدم قطعیت در مدل آب زیرزمینی آبخوان دشت کازرون به کمک مشخصه‌های آماری، *مجله علوم دانشگاه شهید چمران*. 19. 17-33.
- خوشخوی، ایران نژاد، پ، خلیلی، ع، رحیمی، ح، لیاقت، ع و جانسن، پ. 1392. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل COUP برای شبیه‌سازی دمای خاک در ایستگاه سینوپتیک همدان، *نشریه آب و خاک*. 27. 5: 928-939.
- رسول‌زاده، ع و موسوی، س. ع. ا. 1387. استفاده از روش معکوس WTF بررسی عدم اطمینان در برآورد پارامترهای مدل آب زیر زمینی، هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، 13-21 آبان، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.
- حسینی، س. م، جهانگیری، م. 1390. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و حساسیت روابط برآورد عامل‌های جریان در محیط سنگ‌ریزه، *مجله علوم مهندسی و آب‌خیزداری ایران*. 5. 14: 61-70.
- شفیعی، م، انصاری، ح، داوری، ک، و قهرمان، ب. 1392. واسنجی و تحلیل عدم قطعیت یک مدل نیمه‌توزیعی در یک منطقه نیمه-خشک، *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، آب و خاک*. 17. 64: 137-148.
- شفیعی، م، قهرمان، ب، ثقفیان، ب، داوری، ک، و وظیفه دوست، م. 1393. تحلیل عدم قطعیت در برآورد مولفه‌های بیلان آب در دو مزرعه فاریاب در منطقه خشک، *نشریه آب و خاک*. 28. 25: 909-917.
- ضیایی، ع، داوری، ک، مشکینی، ج، قلی‌زاده، ش، ایزدی، ع، جودوی، ع، بهرامی، ر، جعفری، ز و مجیدی، م. 1394. شبیه‌سازی جریان و محاسبه بیلان آب زیرزمینی در دشت بجنورد با استفاده از کد MODFLOW، اولین کنفرانس ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، 23-24 اردیبهشت، مشهد، (مجموعه مقالات).
- نصرتی، ک. 1390. منشایابی رسوب بر اساس برآورد عدم قطعیت، *مجله پژوهش آب ایران*. 5. 9: 51-60.
- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., Genuchten, M.T. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty, fitting procedure, *Journal of Vadose Zone*. 3:1340-1352.
- Beven, K.J. 2001. How far can we go in distributed

- Journal of Hydrology, 306: 127-145.
- Pohl, G., Pohlmann, K., Hassan, A., Chapman, J. Mihvec, T. 2002. Assessing groundwater model uncertainty for the central Nevada test area. Spectrum 2002.
- Rojas, R., Kahunde, S. 2010. Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modeling, Journal of Hydrology, 394(3):416-435.
- Rojas, R., Feyen, L. and Dassargues, A. 2008, Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: Combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging, Water Resources Research. W12418 44.12:619- 624.
- Sepúlveda, N. and Doherty, J. 2015. Uncertainty Analysis of a Groundwater Flow Model in East-Central Florida, Groundwater, 53.3:464-474.
- Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., Davary, K., Pande, S., Vazifedoust, M. 2014. Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: A case study in a dry region, Agricultural Water Management. 146: 324-334.
- Stow, C.A., Reckhow, K.H., Qian, S.S., Conrad, E. 2007. Approaches to evaluate water quality model parameter uncertainty for adaptive TMDL implementation, Journal of the American Water Resources Association. 43.6:1499-1507.
- Talebzadeh, M., Morid, S., Ayyoubzadeh, S.A., Ghazemzadeh, M. 2009. Uncertainty Analysis in Sediment Load Modeling Using ANN and SWAT Model, Water Resources Management, 24.9:1747-1761.
- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W. and Sorooshian, S. 2003. A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters, Water Resources Research. 39.8:1-12.
- Vrugt, J.A., Braak, C.J.F., Gupta, H.V., Robinson, B.A. 2008. Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 23: 1011-1026.
- Yoon, H., Hart, D.B., McKenna, S.A. 2013. Parameter estimation and predictive uncertainty in stochastic inverse modeling of groundwater flow: Comparing null-space Monte Carlo and multiple starting point methods, Water Resources Research. 49:536-553.
- Using Markov Chain Monte Carlo to quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model, Environmental modeling and software. 24.6:749-763.
- Helton, J.C. and Davis, F.J. 2003. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems, Reliability Engineering & System Safety. 81.1:23-69.
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., Alipoor, A., Joodavi, A. and Brusseau, M.L. 2013. A framework toward developing a groundwater conceptual model, Arabian Journal of Geosciences. 7.9: 3611-3631.
- Johnson, J. 2010. Framework to effectively quantify and communicate groundwater model uncertainty to management and client, U.S. department of the Interior Bureau Of Reclamation. Pacific Northwest Regional Office Boise, Idaho, U.S.A.
- Kanso, A., Chebbo, G. and Tassin, B. 2004. Application of MCMC-GSA model calibration method to urban runoff quality modeling, Reliability Engineering & System Safety. 91.10-11:1398-1405.
- Keating, E.H., Doherty, J., Vrugt, J.A. and Kang, Q. 2010. Optimization and uncertainty assessment of strongly non-linear groundwater models with high parameter dimensionality, Water Resources Research. W10517(46).
- Mein, R.G. and Brown, B.M. 1978. Sensitivity of optimized parameters in watershed models, Water Resources Research. 14:299-303.
- Migliaccio, K.W. and Chaubey, I. 2008. Spatial distributions and stochastic parameter influences on SWAT flow and sediment predictions, Journal of Hydrological Engineering-ASCE. 13:258-269.
- Mirzaei, M., Huang, Y.F. and El-Shafie, A. 2015. Application of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) approach for assessing uncertainty in hydrological models: A review, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 29.5: 1265-1273.
- Morse, B.S., Pohl, G., Huntington, J. and Rodrigues-Castillo, R. 2003. Stochastic capture zone analysis of arsenic-contaminated well using the generalized likelihood uncertainty estimator (GLUE) methodology, Water Resources Research. 39.6:1151.
- Muleta, M.K., Nicklow, J.W. 2005. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model,

Uncertainty Assessment of Groundwater Flow Modeling by Using Generalized Likelihood Uncertainty Estimation Method (Case Study: Bojnourd Plain)

M. Abedini¹, A.N. Ziai^{*2}, M. Shafiei³, B. Ghahraman⁴, H. Ansari⁵, J. Meshkini⁶

Received: Avg.23, 2015

Accepted: Oct.17, 2016

Abstract

Parameter uncertainty arises uncertainty in the result of model performance and prediction of a system behavior. Therefore uncertainty estimation into modeling is inevitable. This study aimed to analyze and quantify amounts of uncertainty in model parameters of Bojnourd aquifer with an area of 65.2 km² due to the highly uncertain available data and the increasing importance of Bojnourd aquifer caused by the expansion of its urban areas to the plains. A steady-state groundwater flow model of Bojnourd aquifer was developed and calibrated employing ten years of data (1380-1390) and 11 observation wells. The prior distributions of model parameters including hydraulic conductivity and recharge were assumed uniform and uncertainty bounds and posterior distributions were derived within the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) framework. The results showed high amounts of uncertainty in recharge parameters. The pre and posterior distributions does not showed a significant change. Hydraulic conductivity as the most sensitive parameters, reduced the uncertainty of the model output. Most of the observed head values fall within 95% confidence interval and only a few number of points were out of it. It can be concluded that the GLUE approach has been successfully applied to Bojnourd MODFLOW model and the modeling results are reliable to decision makers for water resources management projects.

Keywords: GLUE, Inverse modeling, MODFLOW

1, 2, 4, 5 M.Sc. , Assistant Professor, Professor and Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- ph.D. Hydroinformatic Group, East Water and Environmental Research Institute (EWERI) and Hydrotech toos Consulting Engineers Company

6- Northern Khorasan Regional Water, Office of Research Affair

(* Corresponding Author: an-ziaei@um.ac.ir)