تحلیل حساسیت تراز آب زیرزمینی دشت زرین‌گل به ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان
با استفاده از مدل ریاضی

فرزانه ابارشی[1*]، مهدی مفتاح هلقی[2]، امیراحمد دهقانی[3]، عبدالرضا کابلی[4]، مهدی رحیمیان[5]

1- **دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی منابع طبیعی گرگان**

2- **دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان**

3- **استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان**

4- **کارشناس ارشد آب منطقه‌ای استان گلستان**

5- **کارشناس ارشد آب منطقه‌ای استان سمنان**

*farzaneh_abareshi@yahoo.com

چکیده

مدل آب زیرزمینی وسیله‌ای برای شبیه‌سازی سیستم جریان آب زیرزمینی به شکلی ساده‌تر از شرایط صحرایی است. مدل ریاضی، جریان آب زیرزمینی را توسط یک معادلهٔ حاکم به همراه یک سری معادلات که بار هیدرولیکی و جریان را در امتداد مرزهای مدل توصیف می‌کنند، به طور غیرمستقیم شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق به منظور بررسی حساسیت پارامترهای مهم شبیه‌سازی آب زیرزمینی دشت زرین‌گل، در استان گلستان، از نرم افزارGMS7.1 استفاده شده است. برای این منظور، پس از تهیه مدل مفهومی منطقه مورد مطالعه، مدل در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار شبیه‌سازی شده است. در حالت ماندگار، به منظور کالیبره نمودن ضریب هدایت هیدرولیکی، واسنجی مدل در یک دوره‌زمانی یک‌ماهه (اردیبهشت 89)، و در شرایط غیرماندگار با هدف بهینه‌سازی ضریب آبدهی ویژه، مدل به مدت 5 سال با تنش‌های فصلی اجرا شد و سطح ایستابی شبیه‌سازی شده در چاه‌های مشاهداتی با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در آنها مقایسه شدند و معیار جذر میانگین مربعات خطا 0/98 محاسبه شد. پس از کالیبراسیون، به منظور بررسی حساسیت تراز آب زیرزمینی به ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان منطقه مورد مطالعه، پارامترهای مذکور در سطوح مختلف تغییر داده شدند و میزان خطا در کل دشت و هم‌چنین در محل هریک از چاههای مشاهداتی محاسبه گردید. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که مدل آب زیرزمینی دشت زرین‌گل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی از حساسیت بالایی برخوردار است و این حساسیت در قسمت‌های مرکزی و شمالی دشت بیشتر است.

کلمات کلیدی: مدل آب زیرزمینی، دشت زرین‌گل، GMS7.1، مدل مفهومی.

1- مقدمه

آبهای زیرزمینی همواره به عنوان یک منبع مهم تأمین آب شیرین جایگاه ویژه‌ای در مطالعات منابع آب دارد. مدیریت منابع آب زیرزمینی در مرحله اول نیاز به شناخت و عملکرد آبخوان در شرایط طبیعی دارد. در بیشتر مسائل هیدرولوژیک و مطالعات منابع آب زیرزمینی، در دسترس بودن آمار و اطلاعات زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. در سال‌های اخیر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از یک‌سو و فعالیت در جهت تأمین غذا از سوی دیگر باعث لطمات جبران‌ناپذیری به این منابع از نقطه‌نظر کمی و کیفی گردیده است. به‌منظور ارزیابی اثرات ناشی از توسعه در شرایط موجود و ارائه روش‌های مدیریتی بر منابع آب زیرزمینی، چه از نقطه نظر کمی و چه کیفی، شبیه‌سازی ریاضی و کامپیوتری این منابع، ابزاری قوی در بهره‌برداری بهینه از این منابع محسوب می‌گردد (هاشمی م.، 1378).

در واقع مدل ریاضی آب زیرزمینی مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل می‌باشد که چگونگی جریان آب زیرزمینی را تحت حاکمیت خود دارد. به‌کار بردن مدل و کنترل نتایج حاصل از آن را اصطلاحاً شبیه‌سازی گویند (Prikett T.A., 1975). اولین افرادی که از قانون دارسی جهت مدلسازی آب‌زیرزمینی استفاده نمودند، دوپیت[1]، تیم[2]، بوسینسکیو[3] و فرشهایمر[4] هستند که از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی استفاده کردند(Zheng C. & Bennett G.D., 2002).

(اعتباری ب. و همکاران، 1387) بررسی مدل مفهومی آبخوان دشت تبریز را با استفاده از نرم‌افزار GMS انجام دادند. پس از کالیبره نمودن نتایج حاصل از مدل به دو روش مستقیم و معکوس، نتایج مشخص نمود که تفاوت اندکی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط مدل وجود دارد. (ملکی ر. و همکاران، 1390) مدلسازی جریان آب زیرزمینی دشت شاهرود را با استفاده از نرم‌افزار GMS برای یک دوره یک‌ساله انجام دادند و ضرایب هیدرودینامیک دشت شاهرود را اصلاح کردند.

با توجه به سوابق مطالعاتی انجام شده، تاکنون مدلسازی آب زیرزمینی در محدوده دشت زرین‌گل به انجام نرسیده است. لذا این تحقیق با هدف شناخت آبخوان زرین‌گل و بررسی حساسیت مدل به خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان منطقه، انجام شده است.

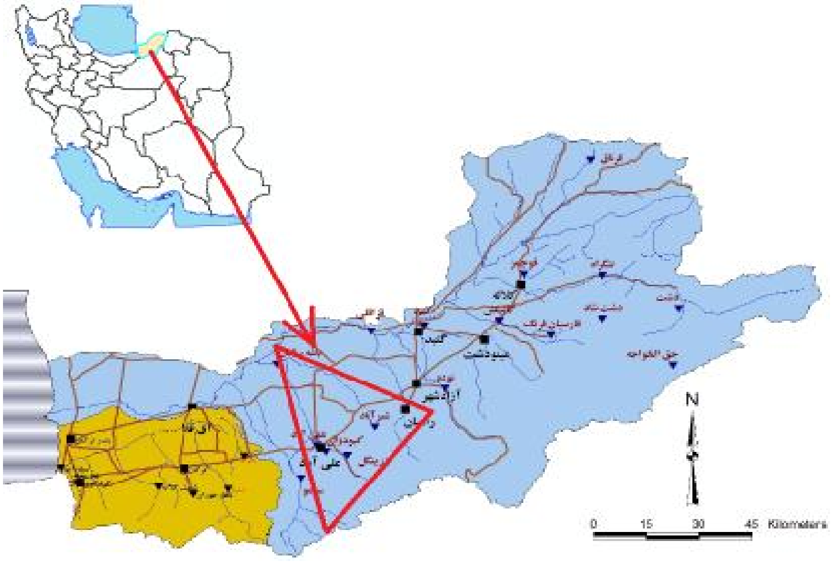
2- مواد وروش‌ها

2-1- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه‌آبریز گرگانرود در استان گلستان، به نام دشت زرین‌گل می‌باشد، که طبق طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، جزء مناطق نیمه‌خشک معتدل تا مرطوب نیمه‌معتدل محسوب می‌شود(شکل 1). اصلی‌ترین رودخانه موجود در دشت، رودخانه دائمی زرین‌گل به طول حدوداً 24 کیلومتر می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه در دشت برابر 709 میلی‌متر و متوسط دمای سالانه حدود 17 درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. وسعت آبخوان مورد مطالعه حدود 365 کیلومترمربع بوده و از لحاظ موقعیت جغرافیایی بین طول‌های ´41 °54 تا ´5 °55 شرقی و عرض‌های ´51 °36 تا ´12 °37 شمالی واقع شده است.

---

[1] Dupit
[2] Theim
[3] Boussinesq
[4] Forchheimer



شکل1- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران

2-2- مدلسازی آبخوان دشت زرین‌گل

برای تهیه مدل جریان آب زیرزمینی دشت زرین‌گل از نرم‌افزار GMS 7.1 استفاده شده است. GMS محیطی جامع و گرافیکی برای شبیه‌سازی‌های جریان آب زیرزمینی است که شامل یک انترفاز (interface) کارتوگرافیکی کاربر دوست (برنامه GMS) و تعدادی کدهای تحلیلی مستقل نظیر MODFLOW، MT3DMS، MODPATH، SEEP2D، و غیره می‌باشد. در ادامه به چگونگی انجام مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار GMS می‌پردازیم.

2-2-1- معادله حاکم

معادله عمومی حاکم بر جریان آب زیرزمینی(با چگالی ثابت) که در نرم‌افزار MODFLOW به‌کار رفته عبارت است از:

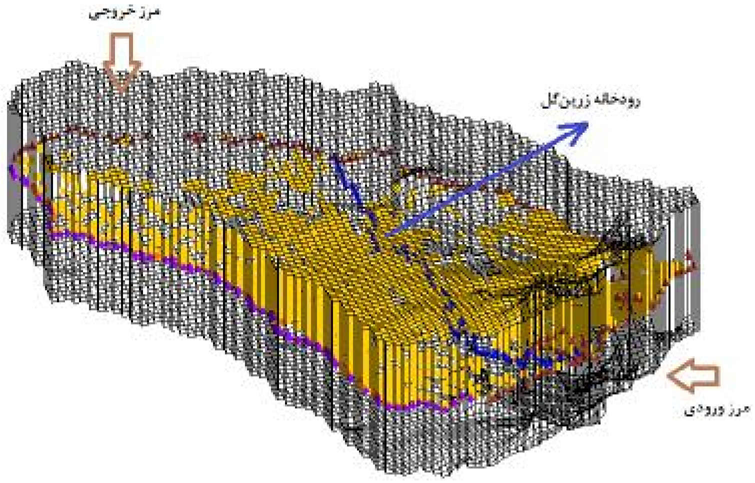
$$\frac{\partial}{\partial x}\left[K_{xx}\,h\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[K_{yy}\,h\frac{\partial h}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K_{zz}\,h\frac{\partial h}{\partial z}\right]-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (1)$$

در معادله فوق K_{xx}، K_{yy} و K_{zz} مقادیر هدایت هیدرولیکی در راستای z,y,x و h هد آب زیرزمینی، w شار حجمی جریان در واحد حجم(بیانگر چشمه و چاهک جریان)، S_s ضریب ذخیره ویژه آبخوان و t زمان می‌باشد.

2-2-2- تهیه مدل مفهومی آبخوان

یکی از مهم‌ترین مراحل در مدلسازی، تهیه مدل مفهومی مناسب با توجه به طبیعت سفره می‌باشد. در این مرحله لایه‌های آبخوان و سیستم مرز آبخوان و همچنین اطلاعات محل مورد نظر شامل اطلاعات موازنه (بیلان) آب، پارامترهای آبخوان و تنش‌های هیدروژئولوژیکی تعیین می‌شوند(شکل2). با توجه به قابلیت بالای GMS در توانایی ارتباط با نرم‌افزار GIS، در این مرحله، کلیه اطلاعات مربوط به ساخت مدل مفهومی با استفاده از نرم‌افزار GIS فراخوانی شدند. شایان ذکر است که به هنگام ساخت مدل

مفهومی بایستی اطلاعات مربوطه به صورت بسته‌های[1] مختلف، از قبیل بسته تغذیه، بسته تبخیرتعرق، بسته چاه مشاهده‌ای، و غیره به مدل وارد شود.



شکل2- مدل مفهومی منطقه مورد مطالعه و مرزهای مدل

2-2-2-1- مرزهای آبخوان

در غرب و شمال‌غربی منطقه، رودخانه کبودوال با جریان شمالی- جنوبی مرز غربی مدل را تشکیل داده است. این مرز با عنوان مرز با بار ثابت[2] در نظر گرفته شده است. مرز جنوبی منطقه که ارتفاعات و سازندهای زون زمین‌شناسی البرز است، جبهه ورودی آبخوان زرین‌گل می‌باشد و به عنوان مرز با بار عمومی[3] در مدل تعریف شده است. مرز شرق و شمال‌شرقی مدل نیز به موازات رودخانه سیاه‌جوی در نظر گرفته شد، که با توجه به تبادل جریان آب زیرزمینی با آبخوان مجاور، به عنوان مرز با بار عمومی در مدل تعریف گردید.

2-2-2-2- عوامل تغذیه کننده آبخوان زرین‌گل

- تغذیه آبخوان ناشی از ریزش‌های جوی در سطح دشت
- تغذیه ناشی از نفوذ آب‌های جاری در دشت
- تغذیه از آب برگشتی کشاورزی و پساب شرب و صنعت
- تغذیه از طریق جریان‌های زیرزمینی ورودی

تغذیه سطحی معمولاً بر اساس حاصل جمع لایه‌هایی در مدل اعمال می‌گردد که بر مبناء مدل تفهیمی تعریف و مشخص شده‌اند و می‌تواند در برگیرنده درصدی از بارندگی، آب برگشتی حاصل از پساب شرب و صنعت و هم‌چنین کشاورزی در منطقه و بالاخره آب نفوذی از طریق مسیل‌ها تعریف و اعمال گردد. برای این منظور هر یک از بسته‌ها به صورت جداگانه بر مدل اعمال گردید. به عنوان مثال، برای تهیه بسته مربوط به ریزش‌های جوی، پس از تهیه پلی‌گون‌های تیسن ایستگاه‌های باران‌سنجی، مقادیر مربوط به 10 درصد بارندگی، به عنوان تغذیه آبخوان، به هر یک از پلی‌گون‌ها اعمال گردید. ضرایب 15 و 75 درصد نیز به ترتیب

---

[1] Coverage
[2] Specific head
[3] General head

به عنوان آب برگشتی حاصل از پساب کشاورزی، شرب و صنعت به پلی‌گون‌های مناطق زراعی، مسکونی و صنعت اعمال گردید. لازم به ذکر است که ضرایب 10، 15و 75 درصد، از مطالعات اطلس منابع آب گرگانرود استخراج شده است.

2-2-3- *عوامل تخلیه کننده آبخوان زرین‌گل*

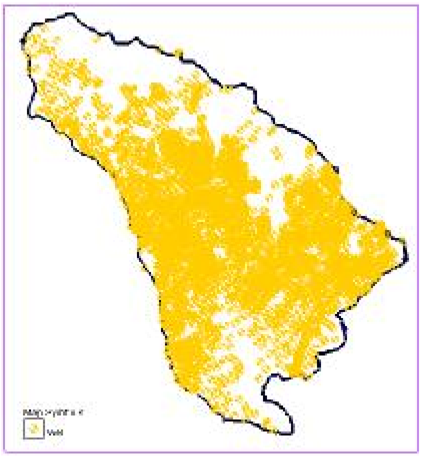
- تخلیه آبخوان از طریق تبخیر و تعرق
- تخلیه از آبخوان از طریق چاه، چشمه و قنات
- تخلیه آبخوان از طریق زهکشی
- تخلیه آبخوان از طریق جریان‌های زیرزمینی خروجی

تخلیه از آبخوان نیز عمدتاً از طریق 3560 حلقه چاه بهره برداری، که در سرتاسر منطقه توزیع شده اند و 3 قنات و 1 چشمه موجود در دشت، به صورت یک لایه در ساختار GIS بر مدل اعمال گردید (شکل 3). تبخیر تعرق نیز، به عنوان عامل دیگری که موجب هدر رفت آب، از آبخوان زرین‌گل می‌گردد، در مدل اعمال شد. از این رو سه پارامتر سطح زمین معادل توپوگرافی، عمق تأثیر تبخیر معادل 5 متر و تبخیر ماکزیمم معادل تبخیر از تشت، در مدل مقداردهی شد.

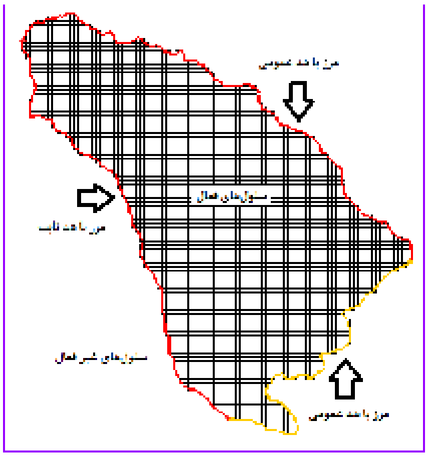
2-2-3- *طراحی مدل*

در این مرحله مدل مفهومی به شکل مناسب و قابل استفاده برای مدل سازی تبدیل می‌گردد (منفصل سازی می‌شود). این مرحله شامل طراحی شبکه مدل، انتخاب پریودها و گامهای زمانی لازم، تعیین شرایط اولیه و شرایط مرزی و مقدار دهی کلیه پارامترهای فیزیکی و هیدرودینامیکی به شبکه منفصل ایجاد شده می‌باشد.

با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی، نقشه‌های هم‌پتانسیل و وسعت منطقه مورد مطالعه، شبکه‌ای با سلول‌هایی به ابعاد 300×300 مترمربع شامل 96 سطر و 104ستون، برای محدوده مورد نظر تهیه شده است. از این رو شبکه‌بندی مدل مجموعاً شامل 9984 سلول می‌باشد که تعداد 4059 سلول در داخل محدوده مورد نظر (دشت زرین‌گل) به صورت سلول‌های فعال مورد بررسی قرار می‌گیرند(شکل 4).



شکل3- شبکه چاه‌های بهره‌برداری موجود در دشت زرین‌گل



شکل4- شبکه بندی و مرزهای مدل

3- بحث و نتایج

مدل ریاضی دشت زرین‌گل در دو حالت پایدار و ناپایدار، برای یک آبخوان آزاد تک لایه تهیه شده است. در شرایط پایدار، برای یک دوره تنش یک ماهه (اردیبهشت 89) و در شرایط ناپایدار، با توجه به آمار و اطلاعات موجود، برای یک دوره 5 ساله (سال آبی 88-1383) با تنش‌های فصلی تهیه شده است و تغییرات تنش‌ها در طول هر دوره به شکل ثابت یا خطی فرض شدند.

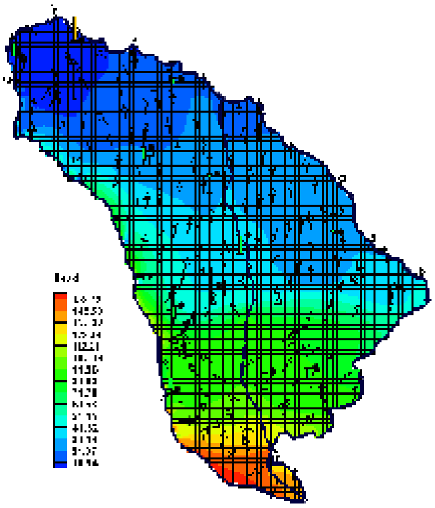
با توجه به در نظر گرفتن اردیبهشت ماه 89، برای مدل نمودن در حالت پایدار، اطلاعات مربوط به تراز سطح آب در فروردین‌ماه 89، به عنوان شرایط اولیه[1] به مدل وارد شد. در حالت غیرماندگار نیز، اطلاعات مربوط به تراز سطح آب در ماه قبل، شهریور ماه سال83، نیز به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی گردید.

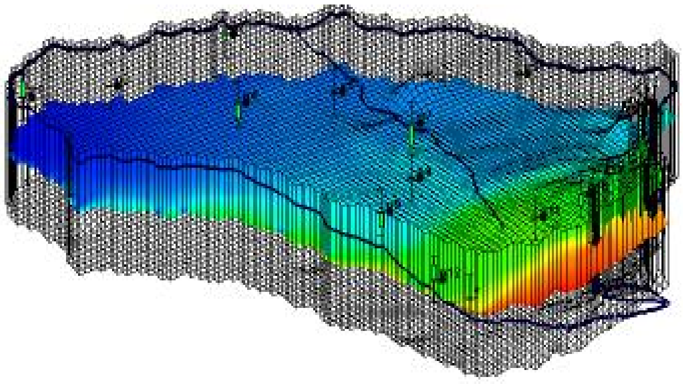
3-1- واسنجی مدل آب زیرزمینی دشت زرین‌گل

واسنجی یا کالیبراسیون را می‌توان تغییر و تنظیم پارامترها و خصوصیات اختصاص داده شده به مدل منفصل عددی در یک چهارچوب معقول نامید به گونه‌ای که حداکثر انطباق ممکن بین مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیری که مشاهده شده است، حاصل گردد. واسنجی خود بر دو نوع است و می‌تواند به روش آزمون و خطا انجام شود یا توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری مربوطه به صورت خودکار انجام گیرد.

- حالت ماندگار

در مرحله ماندگار تمرکز اصلی بر روی مقادیر مربوط به هدایت هیدرولیکی بوده است و پس از اولین اجرای مدل، پارامتر k در طول اجراهای مجدد بصورت سعی و خطا تغییر داده شده است. پارامترهای دیگر مدل، نظیر سنگ کف، تغذیه و شرایط مرزی نیز در طول چندین ده مرتبه اجرای مدل تغییر داده شدند تا برازش مناسبی بین بار هیدرولیکی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده حاصل شود. شکل(5) نتایج حاصل از واسنجی مدل را در رژیم پایدار، در قلمرو مدل نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، در بیشتر پیزومترها خطای باقیمانده کم و دقت نتایج بیشتر از هدف واسنجی است. در این مرحله، معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، 0/486 متر محاسبه شده است. در برخی از پیزومترها میله رنگی با طول بیشتر، نشانگر خطای بیشتری در شبیه‌سازی بار هیدرولیکی در آن مناطق از دشت می‌باشد.





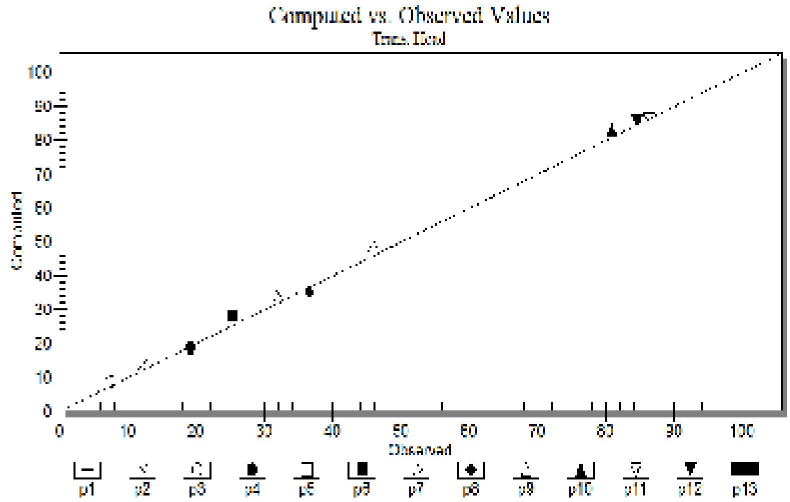
---

[1] starting head

شکل5- نقشه سطح ایستابی شبیه‌سازی شده برای حالت پایدار و جهت جریان و نمای سه بعدی دشت

- حالت غیرماندگار

در حالت غیر ماندگار، مدل با هدف کالیبره نمودن مقادیر مربوط به آبدهی ویژه، مقادیر تغذیه آبخوان، به صورت دستی واسنجی گردید. در این مرحله نیز مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای 5 سال کمتر از 0/98 بدست آمد که نشانگر دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی وضعیت آبخوان است. همان‌گونه که در شکل (6) دیده می‌شود برازش مناسبی بین بارهای هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی به‌دست آمد.

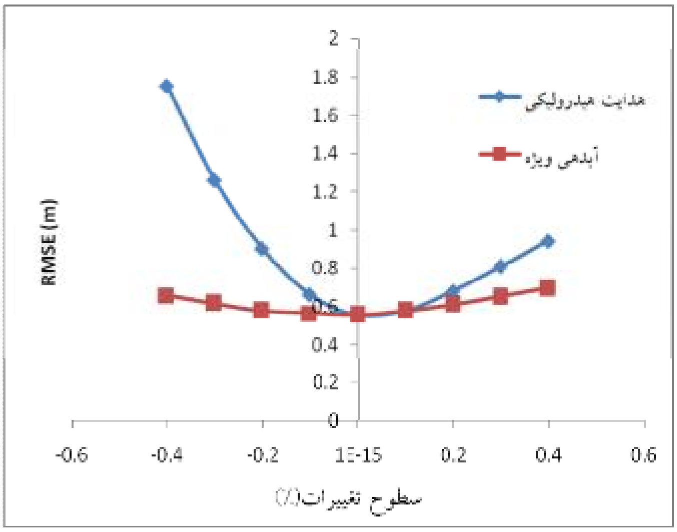


شکل6- برازش بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل در حالت غیر ماندگار

3-2- تحلیل حساسیت

هدف از آنالیز حساسیت به کمیت درآوردن عدم قطعیت‌های موجود در مدل واسنجی شده، ناشی از عدم قطعیت در تخمین پارامترهای آبخوان، تنش‌ها و شرایط مرزی می‌باشد. در طی آنالیز حساسیت، پارامترهای مختلف مدل به طور سینماتیک در دامنه معقولی تغییر داده می‌شوند(Andeson M. P. & Wossener W. W., 1992).

در این مطالعه، حساسیت مدل جریان آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه، نسبت به ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان سنجیده شده است. برای این منظور هریک از پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، در سطوح 10، 20 و 30 درصد تغییر داده شدند و مقدار جذر میانگین مربعات خطا در مدل محاسبه گردید شکل(7). با توجه به نمودار مشاهده گردید که حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی بیشتر از ضریب آبدهی ویژه می‌باشد. هم‌چنین حساسیت مدل جریان نسبت به کاهش میزان هدایت هیدرولیکی بیشتر از مقادیر افزایشی آن می‌باشد.

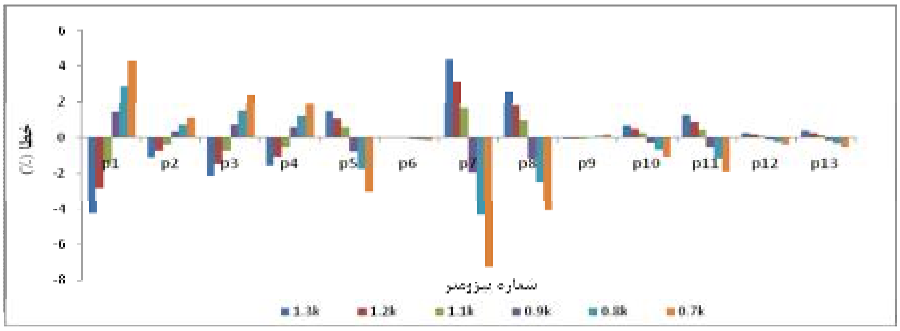


شکل7 -آنالیز حساسیت اثر تغییرات هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه بر مقدار خطای RMSE

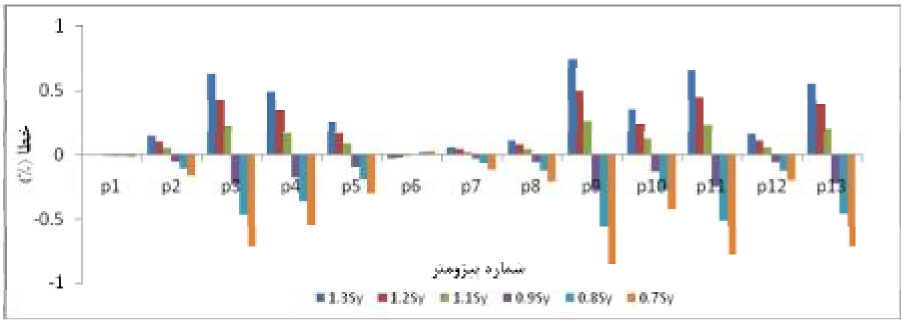
از سویی دیگر، به منظور بررسی حساسیت نواحی مختلف آبخوان به تغییرات ضرایب هیدرودینامیکی، مقدار خطا در محل هریک از چاه‌های مشاهداتی با استفاده از رابطه (2) محاسبه گردید.

(2) 100 î هد وضعیت مبنا / (هد وضعیت جدید - هد وضعیت مبنا) = درصد تغییرات

با توجه به شکل(8) ملاحظه می‌گردد که مقدار خطا ناشی از تغییرات هدایت هیدرولیکی در محل چاه‌های مشاهداتی(7)، (8) و (1) بیشتر از سایر نقاط دشت می‌باشد، که این نقاط مربوط به نواحی مرکزی و شمالی دشت هستند. در مورد حساسیت مدل نسبت به ضریب آبدهی ویژه نیز، این پارامتر در سطوح مختلف تغییر داده شد و مقادیر خطا در محل هریک از چاه‌ها محاسبه گردید. با توجه به شکل(9) ملاحظه می‌گردد، که مقدار خطا ناشی از تغییرات ضریب آبدهی ویژه، در محل چاه‌های (3)، (4)، (9)، (11) و (13) بیشتر از سایر نقاط در دشت می‌باشد، که نقاط مذکور مربوط به نواحی جنوبی و تقریباً نواحی شمالی دشت می‌باشند.



شکل8- آنالیز حساسیت ضریب هدایت هیدرولیکی در سطوح 10، 20 و 30 درصد در چاه‌های مشاهداتی مختلف



شکل9- آنالیز حساسیت ضریب آبدهی ویژه در سطوح 10، 20 و 30 درصد در چاه‌های مشاهداتی مختلف

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی حساسیت ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان دشت زرین‌گل، از مدل GMS7.1 استفاده شد. پس از تهیه مدل آبخوان مورد مطالعه در دوحالت ماندگار و غیر ماندگار، ضرایب هیدرودینامیکی بهینه مدل استخراج گردید. سپس به منظور بررسی حساسیت مدل نسبت به ضرایب فوق‌الذکر، پارامترها در سطوح مختلف تغییر داده شدند و مقدار خطا در کل محدوده مورد مطالعه و هم‌چنین در محل هریک از چاه‌های مشاهداتی محاسبه گردید. نتایج حاصل از تحقیق مشخص نمود که مدل آب زیرزمینی دشت زرین‌گل نسبت به ضریب هدایت هیدرولیکی از حساسیت بالاتری نسبت به آبدهی‌ویژه برخوردار است و این حساسیت در مناطق مرکزی و شمالی دشت بیشتر است. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که توجه ویژه‌ای به اندازه‌گیری پارامتر هدایت هیدرولیکی در دشت شود و این اندازه‌گیری‌ها در مناطق مرکزی و شمالی دشت دقیق‌تر صورت گیرد.

منابع

اعتباری ب.، یعقوب‌زاده م.، شهابی‌فرد ف. و عادلی ح.، (1387). "اهمیت تهیه مدلهای مفهومی در تهیه مدل ریاضی آبخوان‌ها (مطالعه موردی دشت تبریز)"، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی).

ملکی ر.، کرمی غ.، دولتی اردجانی ف.، حسینی ح. و اسدیان ف.، (1390). "بهینه‌سازی ضرایب هیدرودینامیک دشت شاهرود با استفاده از مدل GMS6.0"، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

هاشمی م.، (1378). "اتوماسیون فرآیند تخمین پارامتر در مدل آب زیرزمینی PTC (Princeton Transport Code)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.

Andeson, M.P. and Wossener, W.W., (1992). “Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport”, San Diago, CA.

Prikett, T.A. (1975)., “Modeling techniques for groundwater resource evaluation”, Journal of Advance in Hydroscience, Vol. 10, pp. 1-143.

Zheng, C. and Bennett, G.D., (2002). “Applied Contaminant Transport Modeling” , John Wiley & Sons, New York.