

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین

گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست‌محیطی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان بهاباد با استفاده از مدل

عددی

کبری خطیبی‌نیا

استاد راهنما:

دکتر هادی جعفری

بهمن ۱۳۹۴

تقدیر

به پدرمهربانم

به مادرفداکارم

یاران مهربان همیشگیام

تقدیر

به همسر و برادران عزیزم

بهترین مشوقان زندگیام

تشکر و قدردانی

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربتست و به شکر اندرش مزید نعمت، هر نفسی که فرو میرود حمد حیانتست و چون برمی آید مفرح ذات پس در هر نفسی دو نعمت موجودست و بر هر نعمت شکر واجب.

گرچه قلم قاصر است از بیان مطلب، اما بر خود وظیفه می دانم که از زحمات بی دریغ و ارزشمند جناب آقای دکتر هادی جعفری، استاد گرانقدرم که افتخار راهنمایی این پایان نامه را از جانب ایشان داشته کمال تشکر را بنمایم.

در ادامه از زحمات بی شاعبه آقای عابدیان و خانم باقری و پرهیزکار و غلامی تشکر ویژه می نمایم.

از گنجینه های زندگی، پدر و مادر عزیزم که دعای خیرشان همواره نجات بخش من بوده کمال تشکر و سپاس بیکران دارم .

چکیده

شهر بهاباد در ۸۰ کیلومتری شهر بافق در استان یزد قرار دارد. در این تحقیق با هدف شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح ایستابی در آبخوان بهاباد با استفاده از مدل GMS به بررسی گزینه‌های مختلف مدیریتی جهت بهبود وضعیت آبخوان در طی ۵ سال آینده پرداخته شده است. مدل برای شرایط پایدار در یک دوره تنش یک ماهه (مهر ۱۳۸۷) و در شرایط ناپایدار مدل برای یک دوره یک ساله (فروردین تا اسفند ۱۳۸۸) با ۴ گام زمانی و ۱۲ دوره یک ماهه اجرا و واسنجی شد. تحلیل حساسیت مدل نشان‌دهنده بیش‌ترین حساسیت نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی می‌باشد. در پایان مراحل واسنجی مدل، مقادیر بهینه شده هدایت هیدرولیکی آبخوان از ۰/۰۰۶ تا ۳۵/۵ متر در روز و مقادیر بهینه شده آبدهی ویژه از ۰/۰۱ تا ۰/۰۹۵ تعیین شده است. صحت‌سنجی مدل بر اساس اطلاعات فروردین ۱۳۹۱ تا اسفند ۱۳۹۳ انجام و اعتبار آن مورد تایید قرار گرفته است. پیش‌بینی صورت گرفته بر اساس مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده آبخوان مورد مطالعه برای سال‌های آینده (فروردین ۹۴ تا اسفند ۹۹) نشان می‌دهد که با ادامه روند کنونی برداشت آب، سطح آب زیرزمینی در انتهای دوره مورد پیش‌بینی به ویژه در نواحی با تمرکز زیاد چاه‌های بهره‌برداری، با افت شدیدی (۲/۳ متر در طول پنج سال) مواجه خواهد شد. بررسی سناریوهای مختلف مرتبط با تغییرات اقلیمی و مدیریتی در آبخوان بهاباد نشان‌دهنده تایید و اصلاح کنترل برداشت در تغییرات سطح ایستابی آبخوان می‌باشد. به دلیل کم بودن تغذیه مستقیم آبخوان افزایش یا کاهش بارش‌ها تاثیر زیادی در بیلان دشت و تغییرات سطح ایستابی ندارند. سناریوی کاهش برداشت از آب زیرزمینی تا حد مجاز چاه‌های بهره‌برداری اثرات واضح در تغییرات سطح ایستابی را نشان می‌دهد، لیکن بیلان هنوز منفی می‌باشد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد به منظور برقراری تعادل در آبخوان بهاباد، مجموع برداشت از آبخوان بایستی به ۸/۵۸ میلیون متر مکعب در سال کاهش یابد.

کلمات کلیدی: دشت بهاباد، شبیه‌سازی ریاضی، MODFLOW، GMS

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق.....	۱
۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.....	۲
۳-۱- ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه.....	۳
۴-۱- آب و هوای منطقه.....	۳
۵-۱- زمین‌شناسی منطقه.....	۶
۱-۵-۱- چینه‌شناسی منطقه.....	۷
۱-۵-۱- رسوبات پرکامبرین بالایی.....	۷
۱-۵-۱-۲- پرکامبرین بالایی و کامبرین زیرین.....	۹
۱-۵-۱-۳- نهشته‌های پالئوزوئیک.....	۹
۱-۵-۱-۴- مزوزوئیک.....	۹
۱-۵-۱-۵- سنوزوئیک.....	۱۱
۱-۵-۲- زمین‌شناسی ساختاری.....	۱۲
۱-۶- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی دشت بهاباد.....	۱۲
۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی.....	۱۵
۱-۲- مقدمه.....	۱۵
۲-۲- انواع مدل‌های جریان آب زیرزمینی.....	۱۶
۱-۲-۲- مدل‌های فیزیکی (Physical models).....	۱۶
۲-۲-۲- مدل‌های آنالوگ.....	۱۶
۳-۲-۲- مدل‌های هیبرید (Hybrid models).....	۱۷
۴-۲-۲- مدل‌های ریاضی (Mathematical models).....	۱۷
۱-۴-۲-۲- مدل‌های تحلیلی (Analytical models).....	۱۸
۲-۴-۲-۲- مدل‌های عددی (Numerical models).....	۱۸
۳-۲- پروتکل مدل‌سازی (Modeling protocol).....	۲۱
۱-۳-۲- تعیین هدف.....	۲۱
۲-۳-۲- تهیه مدل مفهومی (Conceptual model).....	۲۲

۲۳	انتخاب حل تحلیلی یا عددی
۲۳	انتخاب کد کامپیوتری و نرم‌افزار
۲۳	تعریف کد کامپیوتری
۲۴	معرفی نرم‌افزار (Groundwater Modeling System) GMS
۲۵	طراحی و اجرای مدل
۲۵	شبکه‌بندی (Mesh study)
۲۶	تقسیم‌بندی زمانی
۲۶	شرایط مرزی (Boundary condition)
۲۸	شرایط اولیه
۲۸	واسنجی (Calibration)
۳۱	صحت‌سنجی مدل
۳۲	تحلیل حساسیت و پیش‌بینی (prediction) مدل
۳۲	ارائه نتایج مدل
۳۲	بازرسی بعدی
۳۳	مروری بر مطالعات گذشته در جهان
۳۶	مروری بر مطالعات گذشته در ایران
۴۱	مطالعات انجام شده در دشت بهاباد یزد
۴۳	فصل سوم: روش تحقیق
۴۳	۱-۳ ساخت مدل در نرم‌افزار GMS
۴۳	۱-۱-۳ مرحله پیش پردازش
۴۳	۱-۱-۱-۳ تعیین هدف
۴۴	۱-۱-۲-۳ تهیه و گردآوری اطلاعات
۴۴	۲-۱-۳ مرحله پردازش
۴۵	۱-۲-۱-۳ تهیه مدل مفهومی
۴۵	۲-۲-۱-۳ تهیه مدل عددی
۴۵	۳-۲-۱-۳ واسنجی مدل
۴۶	۴-۲-۱-۳ صحت‌سنجی یا تایید مدل
۴۶	۳-۱-۳ مرحله پس پردازش
۴۷	فصل چهارم: شبیه‌سازی جریان در آبخوان بهاباد با استفاده از مدل عددی

۴۷	..... ۱-۴- مقدمه
۴۷	..... ۲-۴- مدل مفهومی
۴۸	..... ۱-۲-۴- شرایط اولیه
۴۹	..... ۲-۲-۴- تعیین شرایط مرزی مدل
۵۱	..... ۳-۲-۴- پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان
۵۴	..... ۴-۲-۴- تغذیه
۵۵	..... ۵-۲-۴- تبخیر
۵۶	..... ۶-۲-۴- رودخانه‌های فصلی و دائمی
۵۶	..... ۷-۲-۴- پارامترهای تخلیه
۵۷	..... ۸-۲-۴- شبکه‌بندی مدل و گسسته‌سازی مکانی
۵۸	..... ۹-۲-۴- وضعیت هندسی آبخوان
۶۰	..... ۳-۴- اجرای مدل عددی در حالت پایدار
۶۱	..... ۱-۳-۴- واسنجی کردن مدل در حالت پایدار
۶۳	..... ۴-۴- اجرای مدل عددی در حالت ناپایدار
۶۳	..... ۱-۴-۴- گسسته‌سازی زمانی مدل برای حالت ناپایدار
۶۴	..... ۲-۴-۴- واسنجی مدل در حالت ناپایدار
۶۷	..... ۵-۴- صحت‌سنجی مدل
۷۱	..... ۶-۴- پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان در شرایط مختلف
۷۱	..... ۱-۶-۴- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط ادامه روند فعلی آبخوان (سناریوی اول)
۷۲	..... ۲-۶-۴- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط ترسالی (سناریوی دوم)
۷۲	..... ۳-۶-۴- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط خشکسالی (سناریوی سوم)
۷۳	..... ۴-۶-۴- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط اصلاح دبی چاه‌های صنعتی (سناریوی چهارم)
۷۴	..... ۵-۶-۴- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط دبی مجاز چاه‌های بهره‌برداری (سناریوی پنجم)
۷۴	..... ۶-۶-۴- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری
۷۴	..... به مقدار کسری بیلان (سناریوی ششم)
۸۱	..... ۵- فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۱	..... ۱-۵- نتیجه‌گیری
۸۳	..... ۲-۵- پیشنهادها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن..... ۲
- شکل ۲-۱- نمودار امپروترمیک ۵
- شکل ۳-۱- نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز بهاباد..... ۸
- شکل ۱-۲- شبکه عناصر محدود..... ۱۹
- شکل ۲-۲- شبکه تفاضل محدود..... ۲۰
- شکل ۳-۲- پروتکل مدل‌سازی ۲۳
- شکل ۴-۲- پروتکل روش سعی و خطا..... ۳۲
- شکل ۵-۲- نمایش بصری میزان خطا در حین فرآیند واسنجی..... ۳۳
- شکل ۱-۴- هیدروگراف معرف دشت بهاباد..... ۴۸
- شکل ۲-۴- جهت جریان و شرایط مرزی مدل..... ۵۰
- شکل ۳-۴- زون‌بندی قابلیت انتقال در آبخوان بهاباد..... ۵۲
- شکل ۴-۴- زون‌بندی اولیه هدایت هیدرولیکی در آبخوان بهاباد..... ۵۳
- شکل ۵-۴- زون‌بندی اولیه آبدهی ویژه در آبخوان بهاباد..... ۵۴
- شکل ۶-۴- زون‌بندی تغذیه ناشی از بارش در آبخوان بهاباد..... ۵۵
- شکل ۷-۴- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان بهاباد..... ۵۷
- شکل ۸-۴- شبکه‌بندی آبخوان بهاباد در مدل عددی..... ۵۸
- شکل ۹-۴- ارتفاع توپوگرافی سطح آبخوان بهاباد..... ۵۹
- شکل ۱۰-۴- نقشه تراز سنگ کف آبخوان بهاباد..... ۵۹
- شکل ۱۱-۴- ابزار چک‌کننده قبل از اجرای مدل..... ۶۰
- شکل ۱۲-۴- زون‌بندی نهایی هدایت هیدرولیکی در مرحله واسنجی..... ۶۲
- شکل ۱۳-۴- برآزش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در حالت پایدار..... ۶۳
- شکل ۱۴-۴- میانگین خطاها، قدر مطلق و میانگین مجذور مربع خطاها در واسنجی..... ۶۳
- شکل ۱۵-۴- دوره‌های تنش و طول آن‌ها..... ۶۴
- شکل ۱۶-۴- زون‌بندی واسنجی شده آبدهی ویژه..... ۶۵

- شکل ۴-۱۷- نقشه هم‌پتانسیل شبیه‌سازی توسط مدل عددی در پایان مرحله واسنجی در حالت ناپایدار ۶۶
- شکل ۴-۱۸- نتایج بیلان مدل و درصد اختلاف بین ورودی و خروجی ۶۶
- شکل ۴-۱۹- میانگین خطاها، قدر مطلق و میانگین مجذور مربع خطاها ۶۷
- شکل ۴-۲۰- مقایسه هیدروگراف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده پیژومترها در آبخوان بهاباد .. ۶۸
- شکل ۴-۲۱- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در صورت ادامه روند فعلی ۷۱
- شکل ۴-۲۲- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرایط ترسالی ۷۲
- شکل ۴-۲۳- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی ۷۳
- شکل ۴-۲۴- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرایط اصلاح دبی چاه‌های صنعتی .. ۷۳
- شکل ۴-۲۵- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرایط اعمال دبی مجاز چاه‌های بهره- برداری ۷۴
- شکل ۴-۲۶- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرایط اصلاح دبی چاه‌های بهره- برداری ۷۵
- شکل ۴-۲۷- هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای در سناریوهای مختلف ۷۶

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- آمار بارندگی و درجه حرارت برای یک دوره ۲۲ ساله ۴
- جدول ۲-۱- طبقه‌بندی دما رتن ۶
- جدول ۳-۱- آمار حداقل، حداکثر و متوسط ماهانه دبی رودخانه شور
برای یک دوره آماری ۱۹ ساله ۱۴
- جدول ۴-۱- چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان بهاباد و مشخصات آن‌ها ۱۴
- جدول ۱-۴- مختصات جغرافیایی چاه‌های مشاهده‌ای و ارتفاع سطح آب در مهر ۱۳۸۷ ۴۹
- جدول ۲-۴- مقادیر قابلیت انتقال در زون‌های مختلف آبخوان بهاباد ۵۱
- جدول ۳-۴- مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی در زون‌های مختلف آبخوان بهاباد ۵۲
- جدول ۴-۴- مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی در پایان واسنجی حالت پایدار ۶۱

فصل اول: مقدمه

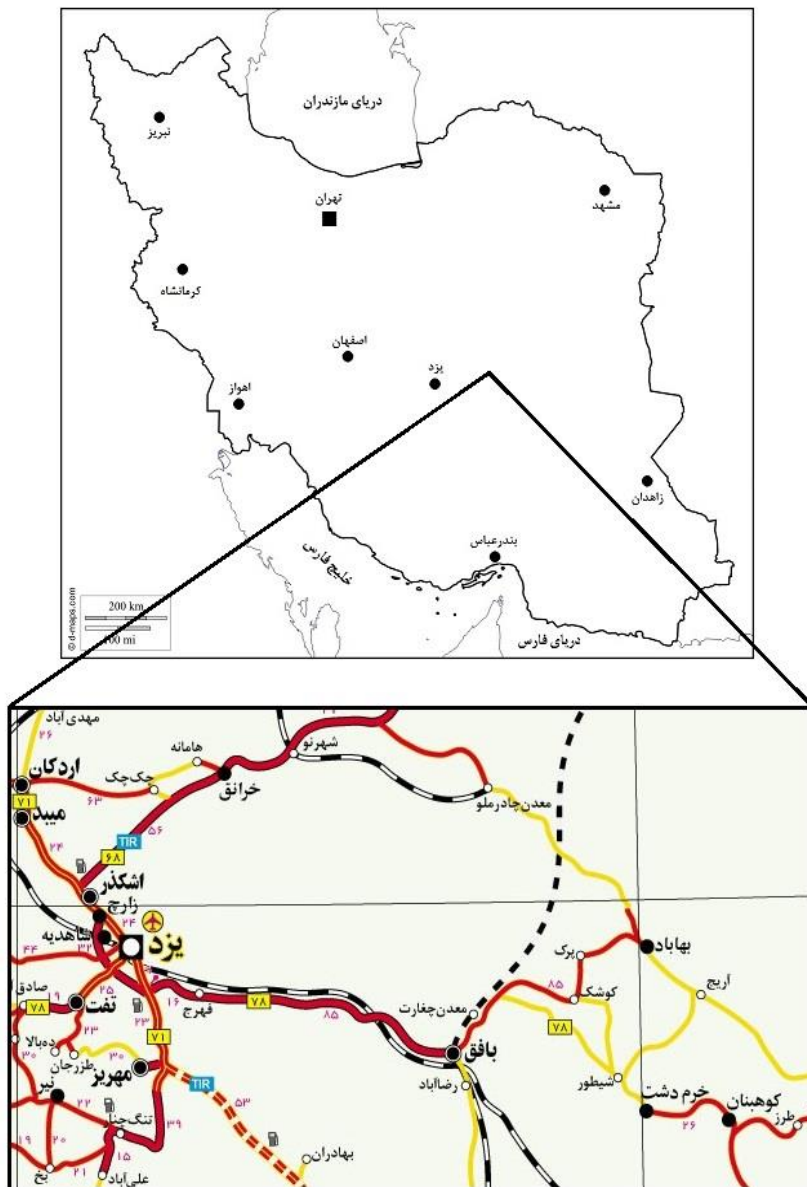
۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در اغلب آبخوان‌های کشور باعث افت سطح آب، کاهش کیفیت آب، افزایش هزینه‌های استحصال آب، نشست زمین و غیره شده است. کاهش بارندگی، تناوب و تداوم خشکسالی‌ها مزید بر علت شده و وضعیت بحرانی و ناپایدار منابع آب زیرزمینی را آشکار کرده است. مدیریت وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی در گام اول مستلزم شناخت کافی از سیستم آبخوان بوده و در گام دوم نیاز به ابزاری دارد تا بتواند عکس‌العمل تنش‌های مختلف کمی و کیفی وارد بر سفره را در شرایط فعلی و آینده پیش‌بینی کند. در این میان با ابزاری مانند شبیه‌سازی‌ها و مدل‌ها می‌توان با دقت قابل قبولی شرایطی مشابه آنچه در طبیعت موجود است را بوجود آورد و به نتایج رضایت‌بخشی دست یافت.

آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منبع آبی در دشت بهاباد بوده که در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیاز این بخش‌ها به آب زیرزمینی به دلیل نبود منابع آب سطحی مناسب در منطقه وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی ایجاد نموده است که این موضوع افت زیاد منابع آب زیرزمینی را در پی داشته است. مطالعات انجام شده (شیرافکن، ۱۳۹۲) بیانگر افت سطح ایستابی آبخوان بهاباد با نرخ در حدود ۰/۵ متر در سال می‌باشد. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در این منطقه خشک، مدیریت بهینه این منابع ارزشمند ضروری می‌باشد. در این راستا شناخت و پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی در این آبخوان ضروری می‌باشد. لذا هدف از انجام این تحقیق شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب در آبخوان بهاباد با استفاده از مدل عددی می‌باشد.

۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهر بهاباد در فاصله ۲۲۰ کیلومتری شرق شهر یزد قرار گرفته و با توجه به نقشه راه مهم‌ترین راه‌های ارتباطی به آن جاده آسفالت بهاباد-بافق و جاده بهاباد-چادرملو می‌باشد (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن

بهباد مرکز شهرستان بهباد، در منتهی‌الیه شرق استان و ۸۰ کیلومتری شهر بافق قرار دارد. آبخوان بهباد در محدوده جغرافیایی $۵۵^{\circ}۴۲'$ تا $۵۶^{\circ}۱۷'$ طول شرقی و $۳۱^{\circ}۴۳'$ تا $۳۲^{\circ}۱۲'$ عرض شمالی و دارای آب و هوای خشک و متوسط بارندگی $۸۱/۵$ میلی‌متر در سال می‌باشد (شیرافکن، ۱۳۹۲). وسعت آبخوان بهباد ۳۶۶ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا در مرکز آبخوان ۱۳۹۰ متر است. میانگین دمای سالیانه $۱۷/۹$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. تنها رودخانه دائمی بهباد رودخانه شور در منطقه جلگه، در شمال شهرستان جریان دارد.

۱-۳- ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه

ریخت کلی حوضه آبریز بهباد به صورت هورست و گرابن می‌باشد. دو رشته ارتفاعات موازی در امتداد شمال غرب- جنوب شرق در منطقه گسترده شده است. در میان این ارتفاعات دشت بهباد که دربردارنده پهنه‌های رسی و نمکی می‌باشد قرار دارد. ضخامت این رسوبات بیش از چند ده متر نمی‌باشد (سحبایی و همکاران، ۱۳۷۸). بلندترین نقطه ارتفاعی کوه لک درنگر به ارتفاع ۳۰۶۹ متر در جنوب زیر حوضه و پست‌ترین آن به ارتفاع ۱۱۲۰ متر در محل خروجی رودخانه شور بهباد قرار دارد. حدود $۵۸/۴$ درصد از سطح حوضه در ارتفاع کمتر از ۱۷۵۰ متر قرار دارد و بقیه دارای ارتفاع بیش از ۱۷۵۰ متر می‌باشد. شیب توپوگرافی از ارتفاعات اطراف به سمت مرکز دشت و محل خروجی رودخانه شور کاهش می‌یابد. شیب کلی منطقه از جنوب شرق به سمت شمال غرب می‌باشد. این پدیده باعث ایجاد یکسری شبکه آبراهه‌های خشک و مسیل‌های سیلابی شده که همگی از قسمت‌های غربی، جنوبی و شرقی به طرف مرکز دشت امتداد یافته است و سپس در امتداد طول دشت ادامه داشته و در نهایت تمام آن‌ها در قسمت شمالی دشت از حوضه آبریز بهباد خارج می‌گردند (شیرافکن، ۱۳۹۲).

۱-۴- آب و هوای منطقه

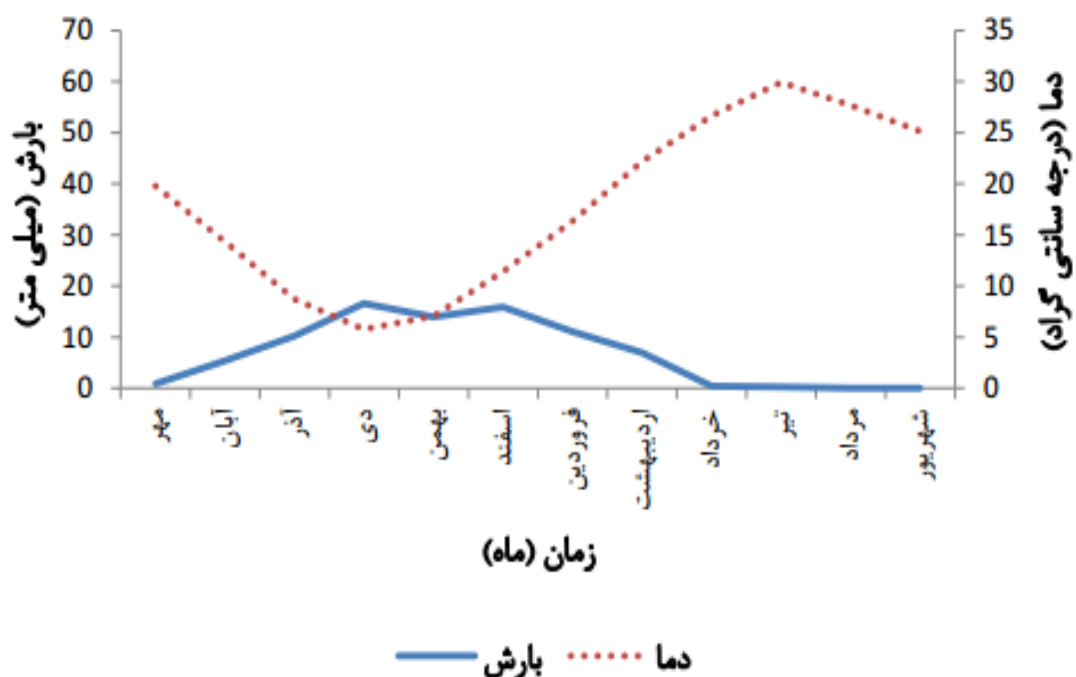
اطلاعات مربوط به میانگین ماهانه بارندگی و درجه حرارت ثبت شده در یک دوره ۲۲ ساله برای ایستگاه هواشناسی بهباد در جدول (۱-۱) ارائه شده است.

جدول ۱-۱- آمار بارندگی و درجه حرارت برای یک دوره ۲۲ ساله از سال ۱۳۶۷-۸۹ (شرکت آب منطقه‌ای یزد)

زمان (ماه)	درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)	میانگین بارندگی (میلی‌متر)
مهر	۱۹/۸	۰/۹
آبان	۱۴/۳	۵/۴
آذر	۸/۷	۱۰/۲
دی	۵/۸	۱۶/۶
بهمن	۷/۱	۱۳/۹
اسفند	۱۱/۴	۱۵/۹
فروردین	۱۶/۳	۱۱/۰
اردیبهشت	۲۲/۲	۶/۹
خرداد	۲۴/۲	۰/۴
تیر	۲۹/۹	۰/۲۵
مرداد	۲۷/۷	۰/۰۷
شهریور	۲۲/۰	۰/۰
سالانه	۱۷/۹	۸۱/۵

با توجه به ارقام مندرج در جدول و اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه، دمای متوسط بهاباد در تابستان حداکثر به ۲۹/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و در زمستان متوسط درجه حرارت در سردترین ماه تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد پایین می‌رود. میانگین سالانه بارندگی حدود ۸۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. بیش از نیمی از بارندگی سالانه در فصل زمستان بوده به طوری که میزان بارندگی زمستانه در بهاباد ۵۷ درصد بارندگی سالانه را به خود اختصاص می‌دهد. پس از آن فصل بهار پر باران‌ترین فصل در منطقه محسوب می‌شود. بیش‌ترین میزان بارندگی مربوط به سال‌های آماری ۱۳۷۷-۷۸ و ۱۳۸۷-۸۸ با مقدار ۱۲۰/۵ میلی‌متر و حداقل میزان آن مربوط به سال آماری ۱۳۷۸-۷۹ با مقدار ۲۸/۵ میلی‌متر می‌باشد.

بر اساس مقادیر بارندگی و دمای ماهانه، نمودار امبروترمیک منطقه رسم شده است. شکل (۱-۲) نمودار امبروترمیک منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نقطه تلاقی منحنی میانگین بارندگی با منحنی میانگین دما، جداکننده فصل خشک از فصل تر می‌باشد. در زمان‌هایی که میانگین بارندگی بالاتر از میانگین دما قرار می‌گیرد، فصل تر و در غیر اینصورت فصل خشک اتفاق می‌افتد. بر اساس این نمودار از دی ماه تا اواسط بهمن فصل تر و بقیه ماه‌های سال فصل خشک محسوب می‌شوند.



شکل ۱-۲- نمودار امبروترمیک منطقه بر اساس دوره آماری ۲۲ ساله (از سال ۱۳۸۹-۱۳۶۷)

اقلیم نتیجه تاثیر توأم پدیده‌های هواشناسی است. بسیاری از متخصصان هوا و اقلیم‌شناسی بر حسب نوع و اهداف مختلف یک یا چند عامل هواشناسی را انتخاب کرده و آن را پایه و اساس طبقه‌بندی قرار داده‌اند. در این میان مهم‌ترین پارامترهایی که پایه و اساس طبقه‌بندی قرار می‌گیرد داده‌های معمولی هواشناسی مثل بارندگی، دما و تبخیر است. از میان روش‌های مختلف برای تعیین اقلیم منطقه روش دمارتن به دلیل سادگی و جامعیت مقبولیت بیشتری یافته است. دمارتن در فرمول خود از دو عامل

متوسط بارندگی سالانه به میلی‌متر (p) و متوسط دمای سالانه به درجه سانتی‌گراد (T) استفاده کرده است که به صورت زیر می‌باشد. در این روش ضریب خشکی (I) از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$I = \frac{P}{T+10} \rightarrow I = \frac{81.5}{(17.9+10)} = 2.9 \quad (1-1)$$

براساس این روش نوع آب و هوا قابل تفکیک است (جدول ۱-۲). طبق روش دمارتن مقدار ضریب (I) در دشت بهاباد برابر ۲/۹ بوده که نشان‌دهنده قرار داشتن دشت بهاباد جزء مناطق خشک می‌باشد.

جدول ۱-۲- طبقه بندی دمارتن

نام اقلیم	محدوده ضریب خشکی دمارتن (I)
خشک	کوچکتر از ۱۰
نیمه خشک	۱۰ تا ۱۹/۹
مدیترانه‌ای	۲۰ تا ۲۳/۹
نیمه مرطوب	۲۴ تا ۲۷/۹
مرطوب	۲۸ تا ۳۴/۹
بسیار مرطوب	بزرگتر از ۳۵

۱-۵- زمین‌شناسی منطقه

شناخت ساختار زمین‌شناسی جهت درک درست از واقعیت، به ویژه در هنگام تهیه چارچوب فیزیکی (تهیه توپوگرافی سنگ بستر)، شناخت کیفی ورودی و خروجی زیرزمینی (استفاده از تکتونیک و چینه-شناسی)، تعیین منطقه‌بندی‌های مختلف S و K بر اساس نوع رسوبات، تعیین کیفیت آبخوان بر اساس نوع سازندها و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حوضه بهاباد از نظر زمین‌شناسی بخشی از زون

ایران مرکزی و بزرگ حوضه کویر لوت می‌باشد. طبقات زمین‌شناسی موجود در حوضه بهاباد بسیار متنوع و دارای رخساره‌های متفاوتی می‌باشند. شکل (۱-۲) نقشه زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد.

۱-۵-۱- چینه‌شناسی منطقه

رخنمون‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه از پایین‌ترین بخش کامبرین زیرین شروع شده و به آبرفت‌های جوان عصر حاضر خاتمه می‌یابد. بیش از ۷۰ درصد از این رخنمون‌ها را سنگ‌های مربوط به زمان مزوزوئیک تشکیل داده است. در ادامه به شرح هرکدام از واحدهای سنگی پرداخته می‌شود.

۱-۱-۵-۱- رسوبات پرکامبرین بالایی

در حوضه آبریز بهاباد نهشته‌های پرکامبرین حدود ۵ درصد از رخنمون‌های سنگی را به خود اختصاص می‌دهد (شرکت آب منطقه‌ای یزد، ۱۳۹۰). کهن‌ترین نهشته‌های رسوبی در حوضه بهاباد مربوط به سازند تاشک بوده که با علامت اختصاری pct بر روی نقشه زمین‌شناسی نشان داده شده است. جنس این رسوبات ماسه‌سنگ‌های کوارتزی و شیل‌های سیلتی با رنگ هوازده سبز تیره می‌باشد. مرز زیرین آن سازند بنه شور و مرز بالایی آن با دگرشیبی زاویه‌ای مشخص به وسیله سنگ‌های پرکامبرین پسین (سازند ساغند، سری ریزو) پوشیده شده است (جمشیدی و افشاریان زاده، ۱۳۷۰). این نهشته‌ها در ارتفاعات غربی حوضه بهاباد برونزد داشته و نقش منفی در تغذیه و کیفیت آب زیرزمینی داشته است. سری رحمت آباد از دیگر تشکیلاتی است که مربوط به این دوران می‌باشد. این سری از سه عضو تشکیل شده است. عضو "pedv" از دولومیت‌های قهوه‌ای تیره رنگ تشکیل شده که به وسیله دایک‌های دیابازی و استوک‌های گابرویی قطع گردیده است. این عضو به تدریج به وسیله عضو "ped" که از ردیف دولومیت ستمبر لایه چرت‌دار با میان لایه‌هایی از شیل ارغوانی با ضخامت ۲۰۰ متر تشکیل شده است، پوشیده می‌شود. عضو "pesh" از شیل و ماسه‌سنگ ارغوانی رنگ تشکیل شده و ضخامت آن در حدود ۲۵۰ متر می‌باشد. این نهشته‌ها در ارتفاعات غربی حوضه رخنمون دارند (جمشیدی و افشاریان زاده، ۱۳۷۰).

Legend

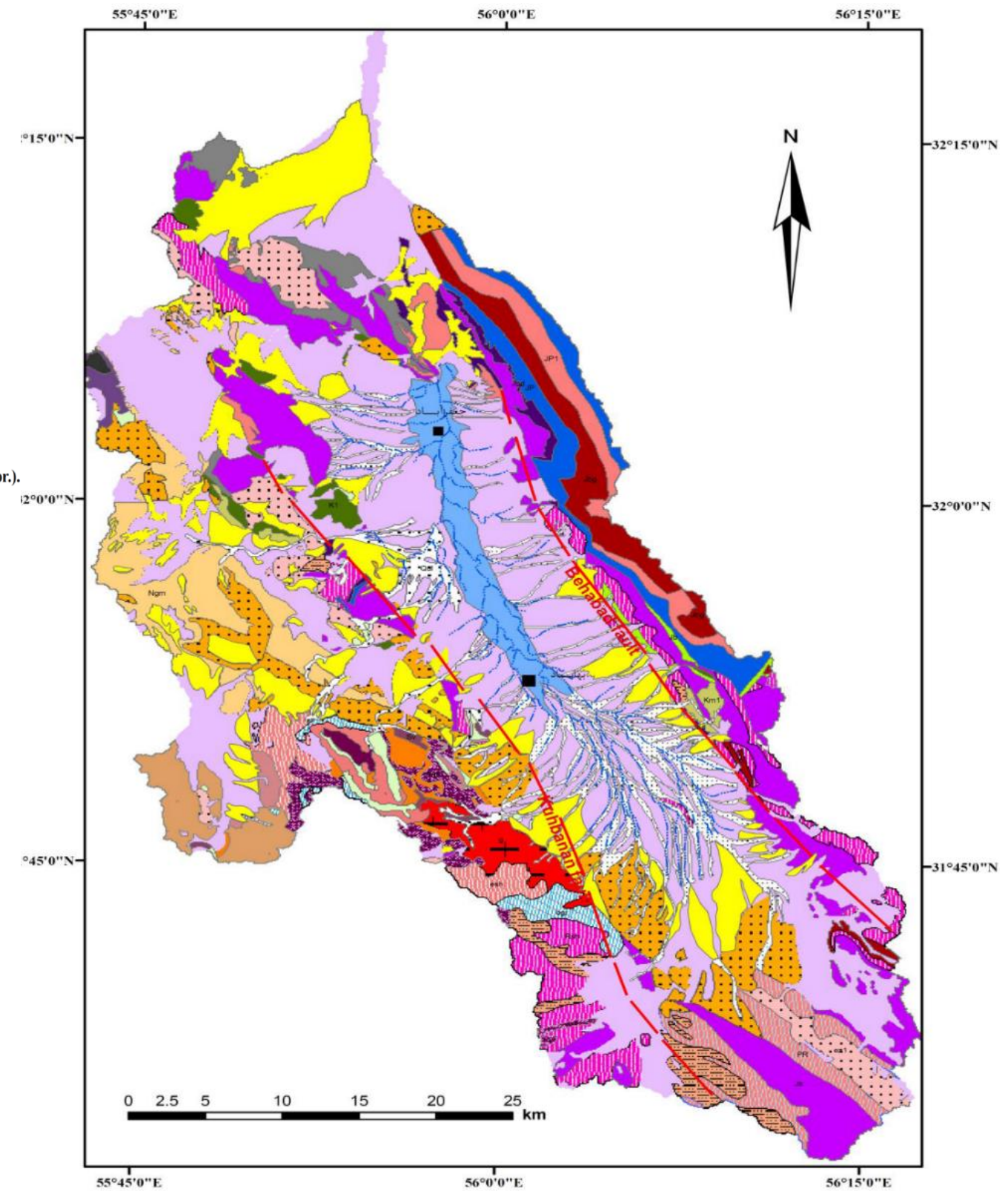
- (Qal) Recent alluvium
- (Qmf) Clay flats, mud flats, locally salty.
- (Q2) Low level piedmont fans.
- (Q1) High level piedmont fans.
- (Ngc) Conglomerate, sandstone minor marl and gypsum.
- (Ngm) Marl, gypsiferous sandstone.
- (K1) Limestone bedded, oolitic and orbitolina - bearing.
- (Km1) Marl, intercalation of limestone and gypsum lenses.
- (Jb) Sandstone, shale gypsiferous marl, minor conglomerate (Bidu For.).
- (JP) Pecten limestone, marly limestone, thin - bedded, light grey.
- (JP1) Pecten limestone, calcareous shale, light grey to white.
- (Jbg) Shale, sandstone with minor marl (Baghamshah For.).
- (Jbd) Limestone oolitic and fossiliferous, shale (Badamu For.).
- (Js) Shale, micaceous sandstone, quartzose sandstone, minor thin - bedded limestone, coal seams (Shemshak For.).
- (Rsh) Dolomite to dolomitic limestone, light to dark - grey (Shotori For.).
- (PR) Dolomite, limestone, calcareous shale, locally quartzose sandstone.
- (DC1) Gray, thick bedded limestone
- (D) Limestone, fossiliferous, quartzose sandstone, cross - bedded
- (Sv) Spilitic lavas.
- (ez1) Sandstone fine - grained, red to violet and shale (Lalun and Ziagun For. equivalent).
- (ev2) Andesite, trachyandesite.
- (ed1d) Dolomite, dolomitic limestone and gypsum (Desu series).
- (egr) Dolomite, shale, sandstone with subordinate acidic lavas and tuffs.
- (e1r) Limestone, stromatolite and chert bands.
- (esh) Calcareous shale, dolomite.
- (Pesh) shale, sandstone
- (Ped) Alternation of dolomite, shale, dark - grey.
- (Pedv) Dolomite, intermediate volcanic rocks and intermediate to basic intrusive rocks.
- (PCt) Shale, sandstone, limestone, bedded, Crystallized, black (Tashk For.).
- (Pc1) Marble, garnet schist, andalusite schist, silimanite schist, biotite schist and quartzite
- (Peq) Green to white quartzite.

Intrusive rocks

- (g) Granite to granodiorite.

Non geological

- City
- Village
- Stream
- Fault



شکل ۱-۳- نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز بهاباد (شیرافکن، ۱۳۹۲)

۱-۵-۱-۲- پرکامبرین بالایی و کامبرین زیرین

سری ریزو: این سری با دگر شیبی زاویه ای بر روی نهشته های قدیمی تر (سری مراد) قرار گرفته اند. جنس این نهشته ها اغلب از آهک، دولومیت، شیل، ماسه سنگ و گدازه های اسیدی می باشد. این نهشته ها در نقشه زمین شناسی با علامت های esh و egr نشان داده می شوند.

سری دزو: این سری از نظر ترکیب زمین شناسی بسیار مشابه سری ریزو بوده با این تفاوت که دارای سری های گچی می باشند. در نقشه زمین شناسی این واحدها با علامت اختصاری edId و eIr نشان داده می شوند. این سری ها در ارتفاعات جنوب غربی و غربی دشت یافت می شوند.

سازند لالون و زاگون (ez1): شامل نهشته های آواری است که به طور پراکنده در ارتفاعات جنوب غربی، غربی و شمال غربی موجود می باشند. این سازند بیشتر از ماسه سنگ قرمز تا بنفش تشکیل گردیده ولی در بخش زیرین آن شیل های سیلتی و ماسه سنگ های نازک لایه میکادار نیز وجود دارد. همچنین گدازه های آندزیتی با علامت (ev2) در ارتفاعات غربی حوضه نیز مربوط به این زمان زمین شناسی می باشند.

۱-۵-۱-۳- نهشته های پالئوزوئیک

نهشته های پالئوزوئیک ۲۴/۱۳ درصد از تشکیلات سنگی حوضه آبریز بهاباد را به خود اختصاص می دهند (شرکت سهامی آب منطقه ای یزد، ۱۳۷۵). نهشته هایی به سن کامبرین، اردوویسین، دونین و پرمین را شامل شده که بیشتر در ارتفاعات جنوبی، جنوب غربی و غربی دیده می شوند. این واحدها به طور عمده از دولومیت، آهک و ماسه سنگ تشکیل شده اند.

۱-۵-۱-۴- مزوزوئیک

این رسوبات حدود ۲۸/۷ درصد از کل رخنمون های سنگی را به خود اختصاص می دهد. نهشته های این دوران از قدیم به جدید به شرح زیر است:

الف) تریاس

سازند دولومیتی شتری (Rsh) مهم‌ترین نهشته‌های این دوره را تشکیل می‌دهد. این سازند سیمای خشن و بلند داشته که از ویژگی‌های چهره‌ساز این سازند می‌باشد. مرز پایینی آن سازند سرخ شیل و مرز بالایی آن عضو آهکی اسپهک که از آهک‌های ضخیم لایه و سفید رنگ تشکیل شده است، می‌باشد. این سازند در ارتفاعات غربی حوضه بهاباد رخنمون دارد (جمشیدی و افشاریان زاده، ۱۳۷۰).

ب) ژوراسیک

رسوبات آواری ژوراسیک در تمام اطراف دشت بهاباد به طور قابل ملاحظه‌ای وجود داشته و حدود ۲۴/۳۵ درصد از کل رخنمون‌های سنگی را به خود اختصاص می‌دهد. رسوبات ذغال‌دار و هم‌چنین بازمانده‌هایی از تنه درختان و ساقه گیاهان به صورت فسیل در نهشته‌های این دوره دیده می‌شود. این رسوبات نقش منفی در کیفیت و تغذیه آب زیرزمینی داشته و در نقشه زمین‌شناسی با پیشوند J نشان داده شده است. به طور عمده سازندهای این دوره در دشت بهاباد به شرح زیر است (شیرافکن، ۱۳۹۲):

سازند شمشک (Js): این نهشته‌ها به طور عمده شامل شیل، ماسه‌سنگ میکادار، ماسه‌سنگ کوارتزی و مقدار اندکی آهک نازک لایه، لایه‌های ذغال و به طور محلی سنگ‌های ولکانیکی می‌باشند. مرز زیرین این سازند، سازند نایبند و مرز بالایی آن سازند بادامو می‌باشد. به طور عمده در ارتفاعات جنوبی و شرقی گسترده شده و هم‌چنین در ارتفاعات شمال غربی نیز دیده می‌شود.

سازند بادامو (Jbd): با گسترش کم در ارتفاعات شمال شرقی وجود دارد. از آهک‌های اوولیتی فسیل‌دار و شیل تشکیل شده است. مرز بالایی آن سازند هجدک می‌باشد. فراوانی سنگواره‌های دو کفه‌ای و سرپایان به ویژه بلمنیت در بخش‌های بالایی این واحد سنگی بسیار چشمگیر است.

سازند بغمشاه (Jbg): در ارتفاعات شرقی و شمال شرقی گسترده شده و بیشتر از نوع شیل، ماسه‌سنگ همراه با مقدار کمی مارن بوده است که با فسیل شاخص آمونیت مشخص می‌شود. این نهشته‌ها یک واحد سنگی زودفرسا و نرم را تشکیل می‌دهند. مرز زیرین آن سازند بادامو بوده و مرز بالای آن که با یک وقفه رسوبی و چرخه فرسایشی مشخص شده است، سازند اسفندیار می‌باشد.

سازند بیدو (Jb): ترکیبات ماسه سنگ، شیل، مارن ژپس دار و مقدار کمی کنگلومرا را شامل می شود. این سازند در ارتفاعات شرقی دشت بهاباد دیده می شود. مرز پایینی آن سازند هجدک و مرز بالایی آن فرسایش یافته است.

ج) کرتاسه

سنگ های کرتاسه زیرین در حوضه بهاباد رخنمون چندانی ندارد و به صورت محدود و پراکنده در شمال و شمال غرب دشت بهاباد دیده می شود. تقریباً حدود ۳/۵ درصد رخنمون های سنگی را تشکیل می دهد. بخش مارنی رسوبات کرتاسه زیرین شامل مارن های خاکستری متمایل به سبز با میان لایه های ماسه-سنگ و آهک نازک لایه می باشد و در برخی از رخنمون های آن عدسی هایی از گچ دیده می شود. این بخش با علامت اختصاری Km1 در نقشه زمین شناسی مشخص شده است. بخش آهکی با لایه های ضخیم و خاکستری رنگ حاوی فسیل های اربیتولین دار می باشد که با علامت K1 روی نقشه زمین شناسی مشخص شده است (شرکت سهامی آب منطقه ای یزد، ۱۳۷۵).

۱-۵-۱-۵- سنوزوئیک

در حوضه بهاباد رسوبات ترشیاری گسترش نسبتاً زیادی داشته و حدود ۲۶ درصد رخنمون های سنگی را به خود اختصاص داده است. رسوبات تبخیری و قاره ای نئوژن قسمت عمده این رسوبات را تشکیل می دهند که به طور گسترده در قسمت های غرب و شمال غربی دشت بهاباد رخنمون دارد. از نظر مورفولوژی به صورت تپه ماهورهای شدیداً هوازده و نرم می باشند. این رسوبات از مارن و کنگلومرا تشکیل شده است. در این مارن ها لایه هایی از ماسه سنگ، عدسی هایی از ژپس و لایه هایی از آهک نیز وجود دارند. این واحد با علامت Ngm روی نقشه زمین شناسی مشخص شده است. این مارن ها توسط کنگلومرای پلیوسن Ngc پوشیده شده اند. مجموعه رسوبات نئوژن کاملاً چین خورده بوده و تاقدیس و ناودیس هایی را بوجود آورده است (شرکت سهامی آب منطقه ای یزد، ۱۳۷۵). علاوه بر نهشته های رسوبی سنگ های ماگمایی که شامل سنگ های آذرین درونی و بیرونی می باشند، در ارتفاعات غربی دشت بهاباد رخنمون دارند. از مهم ترین آن ها می توان به گرانیته بهاباد که به صورت توده نسبتاً بزرگی

در ارتفاعات غربی دشت بهاباد رخنمون دارد، اشاره کرد. این توده آذرین با علامت g روی نقشه زمین-شناسی مشخص شده است. با توجه به ساختار چینه‌ای حوضه بهاباد، ارتفاعات جنوب غربی و غربی به دلیل داشتن ساختار خشن و ستبر، ترکیبات دولومیتی، آهکی و همچنین توده‌های نفوذی نقش عمده-ای را در تغذیه آب زیرزمینی دارد. ارتفاعات شرقی و شمالی به دلیل گسترش سازندهای ژوراسیک با مورفولوژی زودفرسا نقش کمتری در تغذیه آب زیرزمینی داشته است (شیرافکن، ۱۳۹۲).

۱-۵-۲- زمین‌شناسی ساختاری

حوضه بهاباد بخشی از زون ایران مرکزی می‌باشد. ساختمان زمین‌شناسی این حوضه در اثر حرکات کمپرسیونی و کششی مربوط به فازهای کوهزایی کاتانگایی، سمیرین پیشین، سمیرین پسین و فازهای آلپین به وجود آمده است. گسل پشت بادام با امتداد شمال غرب - جنوب شرق مهم‌ترین عارضه ساختمانی در حوضه بهاباد می‌باشد. این گسل در دو طرف دره بهاباد امتداد یافته و شاخه غربی آن تا کوهبنان ادامه دارد. به همین دلیل شاخه غربی به نام گسل کوهبنان معرفی شده است. گسل پشت بادام در اثر چین‌خوردگی کاتانگایی به وجود آمده و در اثر فعالیت مجدد این گسل و گسل‌های فرعی وابسته به آن در دوران دوم حوضه گرابنی دشت بهاباد ایجاد شده و در اثر فعالیت دوره‌ای این گسل توده‌های ولکانیکی و پلوتونیکی نفوذ یافته است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، ۱۳۷۵).

۱-۶- هیدرولوژی و هیدروژئولوژی دشت بهاباد

حوضه آبریز بهاباد آبخوان آزاد به مساحت ۳۶۶ کیلومتر مربع را در بر دارد که جهت مصارف کشاورزی و صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیاز این بخش به آب زیرزمینی به دلیل نبود منابع آب سطحی مناسب در منطقه، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی ایجاد نموده است. رسوبات کواترنری در بخش عمده‌ای از دشت بهاباد گسترده شده و منطقه از نظر ارتفاعی به گونه‌ای است که از اطراف به سمت مرکز دشت و از جنوب به سمت شمال، از مقدار ارتفاعات کاسته می‌شود. ضخامت آبخوان بهاباد با توجه به ریخت گرابنی دشت متغیر بوده و حداکثر آن در مرکز دشت می‌باشد. ارتفاعات اطراف از نظر جنس

بسیار متنوع بوده و عمدتاً از شیل، مارن، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، آهک و دولومیت می‌باشند. ارتفاعات جنوبی و غربی مرتفع بوده و بیش‌ترین نقش را در تغذیه آب زیرزمینی دارد.

آب‌های زیرزمینی در دشت بهاباد به طور عمده در بین فضاهای خالی رسوبات تحکیم نیافته واحد آبرفتی جوان (Q2) قرار گرفته و این رسوبات به عنوان مخزن آب زیرزمینی عمل کرده و آبخوان آزاد را در سراسر دشت ایجاد کرده است. آب‌های زیرزمینی به طور عمده توسط چاه‌های بهره‌برداری استخراج می‌شوند و به مصارف مختلف می‌رسند. رودخانه شور تنها رودخانه مهم در دشت بهاباد بوده که در راستای شمالی- جنوبی کشیده شده و رژیم آبدهی آن سیلابی می‌باشد. بیش از ۳۰ مسیل کوچک و بزرگ به شاخه اصلی پیوسته و رودخانه شور را تشکیل می‌دهند (شیرافکن، ۱۳۹۲). بررسی تغییرات آبدهی رودخانه شور بر اساس آمار ارائه شده در ایستگاه هیدرومتری جعفرآباد انجام می‌شود. متوسط، حداقل و حداکثر دبی این رودخانه برای یک دوره آماری ۱۹ ساله در جدول (۱-۳) ارائه شده است.

منابع آبی دشت شامل چاه‌ها (کشاورزی، شرب و صنعتی)، چشمه‌ها و قنوات می‌باشد. چاه‌های بهره‌برداری به عنوان اصلی‌ترین منابع آبی در آبخوان بهاباد معرفی می‌گردند که اغلب این چاه‌ها عمقی بیشتر از ۱۰۰ متر داشته و از نوع چاه‌های عمیق محسوب می‌شوند. این منابع آبی به طور عمده شامل چاه‌های کشاورزی، صنعتی، شرب می‌باشند. بر اساس آمار برداری سال ۸۹-۹۰، تعداد چاه‌های موجود در حوضه بهاباد، ۷۸ حلقه می‌باشد که از مجموع چاه‌های موجود ۵۱ حلقه جهت مصارف کشاورزی (دبی متوسط ۱۶/۵ لیتر بر ثانیه)، ۲۲ حلقه برای مصارف صنعتی (دبی متوسط ۱۸/۵ لیتر بر ثانیه) و ۵ حلقه جهت شرب (دبی متوسط ۲۲/۴ لیتر بر ثانیه) مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی منطقه، عمدتاً از طریق چاه‌های عمیق و نیمه عمیق صورت می‌گیرد. جدول (۱-۴) آمار چاه‌های بهره‌برداری و حجم تخلیه سالانه این چاه‌ها را نشان می‌دهد. منبع تامین آب تمامی چشمه‌ها و اکثر قنات‌های موجود در حوضه آبریز بهاباد اغلب سازندهای سخت مجاور آبخوان بوده که خارج از مرز تعیین شده آن قرار گرفته و در این مرز تعیین شده تنها سه رشته قنات جهت مصارف کشاورزی با دبی متوسط ۱۱ لیتر بر ثانیه قرار می‌گیرند.

جدول ۱-۳- آمار حداقل، حداکثر و متوسط ماهانه دبی رودخانه شور برای یک دوره آماری ۱۹ ساله (از سال ۱۳۹۰-۱۳۷۱)

میانگین دبی (L/s)	حداکثر دبی (L/s)	حداقل دبی (L/s)	زمان (ماه)
۴۲/۳	۷۰	۲۷	مهر
۵۰	۶۰	۳۰	آبان
۷۳/۹	۴۵۰	۲۸	آذر
۸۰	۵۳۰	۲۷	دی
۹۲	۴۲۰	۳۰	بهمن
۸۲/۸	۴۱۰	۳۰	اسفند
۸۸	۳۸۰	۳۰	فروردین
۸۹	۳۴۰	۲۷	اردیبهشت
۴۵/۲	۱۱۰	۲۶	خرداد
۴۰/۴	۸۰	۲۵	تیر
۴۲	۱۰۰	۲۳	مرداد
۳۲/۸	۵۰	۲۲	شهریور

جدول ۱-۴- چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان بهاباد و مشخصات آن‌ها (دبی متوسط و تخلیه سالانه مربوط به سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ می‌باشد).

نوع چاه	تعداد حلقه چاه	عمق متوسط (متر)	دبی متوسط هر چاه (لیتر بر ثانیه)	تخلیه سالانه (میلیون متر مکعب برسال)	درصد برداشت
کشاورزی	۵۱	۹۲/۵	۱۶/۵	۲۵/۵	۶۹/۹
صنعتی	۲۲	۱۵۶	۱۸/۵	۸/۴	۲۳
شرب	۵	۹۳/۸	۲۲/۴	۲/۵	۶/۹
کل چاه‌ها	۷۸	۱۱۴/۱	۱۷/۵	۳۶/۴	۱۰۰

فصل دوم: مروری بر مطالعات مدل سازی آب های زیرزمینی

۲-۱- مقدمه

استفاده از مدل سازی به عنوان روشی کارآمد و کم هزینه شناخت ماهیت پیچیده آبخوان را ممکن می سازد. مدل در هر شاخه ای از علم، سیستم ساده شده ای است که دارای تشابه فیزیکی با نمونه اصلی می باشد. معمولاً سامانه ها و مسائل پیچیده آب زیرزمینی که راه حل تحلیلی ندارند، به کمک مدل های کامپیوتری حل می شوند. مدل وسیله ای است که حالت ساده ای از یک واقعیت یا اصل را نشان می دهد (Wang and Anderson, 1981). مدل به مفهوم نمایش یک پدیده حقیقی و یا نمایش مادی یک پدیده است که هدف آن واضح ساختن رفتار پدیده حقیقی تحت شرایط خاص می باشد. در مبحث آب های زیرزمینی، مدل به صورت های مختلف تعریف شده است که تمام تعاریف در مفهوم مشابه می باشند. هر سیستمی که بتواند عکس العمل ذخیره آب زیرزمینی را در مقابل تنش های وارده (تخلیه و تغذیه) نشان دهد مدل آب زیرزمینی گفته می شود (Anderson and Woessner, 1992). یک سامانه واقعی مانند یک آبخوان، متشکل از مجموعه ای از فرآیندها و پدیده های فیزیکی و شیمیایی است. بیان کمی و کیفی این پدیده ها و شناخت رفتار سامانه از طریق معادلات حاکم بر مدل ها صورت می گیرد. تعریف مدل باید مبتنی بر وضعیت هندسی دقیق سامانه مورد مطالعه (به عنوان مثال لایه آبدار) و اطلاعاتی درباره پارامترهای فیزیکی مرزهای ورودی و مرزهای خروجی های آن سامانه باشد. کاربرد هر مدل بستگی به هدف مدل دارد (Baalousha, 2009). اگر مدل یک سامانه طبیعی آب زیرزمینی به درستی و با دقت ساخته شود، به طوری که بازگوکننده واکنش های واقعی سامانه در اثر تغییرات باشد، وسیله ای با ارزش برای پیش بینی و مدیریت منابع آب زیرزمینی خواهد بود (Thangarajan, 2007). شبیه سازی جریان و انتقال املاح آب زیرزمینی به وسیله مدل های ریاضی عمدتاً از اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی رواج

یافت. پس از آن مدل‌های ریاضی به طور گسترده‌ای برای ارزیابی وضعیت کمی و کیفی آبخوان بکار می‌روند.

۲-۲- انواع مدل‌های جریان آب زیرزمینی

یک سامانه آب زیرزمینی متشکل از مجموعه‌ای از فرآیندها و پدیده‌های فیزیکی است که بیان کمی و کیفی فرآیندها و شناخت رفتار سامانه از طریق معادلات حاکم و مدل‌ها صورت می‌گیرد. انواع متعددی از مدل‌ها جهت مطالعه سیستم جریان آب زیرزمینی وجود دارد. هر یک از این مدل‌ها خواص مکانی یا زمانی یک سیستم یا بخش‌هایی از آن را به صورت فیزیکی یا ریاضی شبیه‌سازی می‌کند (چیت سازان و کشکولی، ۱۳۸۱).

۲-۲-۱- مدل‌های فیزیکی (Physical models)

از عمومی‌ترین مدل‌های فیزیکی می‌توان به مدل‌های محیط متخلخل ماسه‌ای متشکل از مخزن محتوی ماسه با دانه‌بندی مشخص اشاره نمود که بسته به همگنی یا ناهمگنی محیط داخل مخزن به صورت همگن یا با لایه‌بندی ساخته می‌شود. شکل مخزن نیز بستگی به شکل هندسی و شرایط محیط دارد. در شبیه‌سازی حرکت آب در اطراف یک چاه پمپاژ شکل مخزن ماسه‌ای به صورت استوانه‌ای و در شبیه‌سازی ارتباط رودخانه با آبخوان مجاور شکل آن به صورت مستطیلی انتخاب می‌شود. گاهی برای ردیابی دقیق‌تر حرکت آب در داخل مخزن از ذرات شیشه به جای ماسه استفاده می‌شود که به نام مدل شفاف شناخته شده‌اند.

۲-۲-۲- مدل‌های آنالوگ

در این مدل بر خلاف مدل‌های کوچک مقیاس از موادی غیر از مواد آبخوان برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. این مواد مشابه سیستم آب‌های زیرزمینی هستند و با وارد کردن استرس بر آن‌ها واکنشی شبیه واکنش آبخوان نسبت به آن استرس را نشان می‌دهد. در واقع این مدل‌ها با استفاده از قیاس

نمودن جریان آب زیرزمینی و برخی فرآیندهای فیزیکی مشابه، سیستم جریان آب زیرزمینی را شبیه سازی می نماید.

۲-۲-۳- مدل های هیبرید (Hybrid models)

یک مدل دیجیتال تشابهی مشتمل بر شبکه مقاومت الکتریکی، به عنوان یک مدل هیبریدی شناخته می شود. این قبیل مدل ها جهت کاهش زمان اجرای کامپیوتر مفید هستند. در مدل های کامپیوتری هیبرید داده های ورودی از قبیل منابع تغذیه و تخلیه، خصوصیات سفره و مرزها در شکل الکتریکی به وسیله یک مبدل آنالوگ-دیجیتال بیان می شوند. این تطابق برای حل نیازمند به تکرار زیاد، مانند جریان های ناپایدار در سفره های آزاد بسیار کاربردی و مفید است (دهقانی قهرخی، ۱۳۸۱).

۲-۲-۴- مدل های ریاضی (Mathematical models)

مدل ریاضی، جریان آب های زیرزمینی را به طور غیر مستقیم توسط معادلات ریاضی که بیانگر فرآیند های فیزیکی واقع در سیستم است، همراه با معادلاتی که جریان یا بار هیدرولیکی را در امتداد مرزهای مدل توصیف می نماید، شبیه سازی می کنند. برای مسائل وابسته به زمان، نیاز به معادله ای که توضیح اولیه بارهای هیدرولیکی در سیستم را توصیف کند (شرایط اولیه) نیز می باشد. اجرای مدل ریاضی شامل مراحل زیر است (Fitts, 2002):

الف- درک رفتار فیزیکی سیستم و ارائه یک مدل مفهومی

ب- تبدیل روابط فیزیکی به عبارات ریاضی که شامل معادله دیفرانسیل جزئی، شرایط اولیه و شرایط مرزی مناسب می باشد.

ج- حل معادلات دیفرانسیل بدست آمده

مدل های ریاضی خود براساس نوع روش حل معادلات دیفرانسیلی به دو دسته تحلیلی و عددی تقسیم می شوند:

۲-۴-۱- مدل‌های تحلیلی (Analytical models)

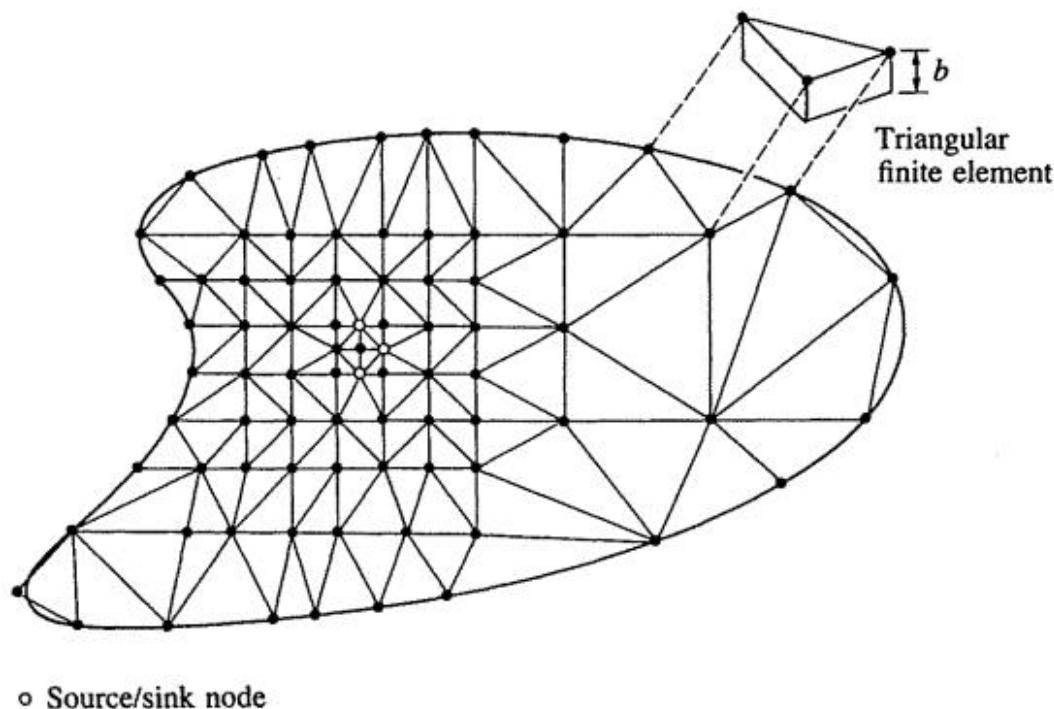
در مدل‌های تحلیلی تمام پارامترها به صورت میانگین در نظر گرفته می‌شوند و شرایط مرزی نیز به صورت تغذیه و غیره به وسیله معادله دیفرانسیلی مربوط به آن تعیین می‌شود. به طور کلی این مدل‌ها برای سیستم‌های فوق‌العاده ساده با شکل هندسی منظم و محیط همگن و همسانگرد (ایزوتروپ) به کار می‌روند، به دلیل پیچیدگی سیستم‌های طبیعی از این مدل‌ها به طور محدود استفاده می‌شود.

۲-۴-۲- مدل‌های عددی (Numerical models)

با پیشرفت تکنولوژی و ورود کامپیوتر، کاربرد مدل‌های عددی رو به افزایش می‌باشد. مدل‌های عددی قادر به حل معادلات پیچیده جریان آب زیرزمینی و انتقال مواد محلول در آب زیرزمینی می‌باشند. برای استفاده از این مدل‌ها باید متغیرهای سیستم که به صورت پیوسته می‌باشند، با متغیرهای ناپیوسته جایگزین شوند، در نتیجه احتیاج به شبکه‌بندی منطقه یا به عبارت دیگر تکه تکه کردن مسئله به ابعاد کوچکتر می‌باشد. بنابراین معادلات تفاضلی پیوسته که بیانگر سطح آب در هر قسمت سفره می‌باشند، توسط تعدادی نقطه که گره نامیده می‌شوند، جایگزین شده و به تعداد گره‌ها معادلات جبری بدست می‌آید که با حل این معادلات، ارتفاع سطح آب زیرزمینی در هر گره قابل محاسبه خواهد بود. مدل‌های عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل آب‌های زیرزمینی روش‌های مختلفی را بکار می‌برند که از دو روش عناصر محدود و تفاضل محدود نسبت به بقیه روش‌ها بیشتر استفاده می‌شود.

الف- روش عناصر محدود (Finite Element Method)

در این روش از شبکه‌های چند ضلعی به‌ویژه مثلثی استفاده می‌گردد (شکل ۲-۱) در این روش باید المان‌های مختلف تعیین شود و این المان‌ها به وسیله گره‌ها تعیین می‌گردند و می‌توانند به صورت منظم یا نامنظم باشند. گره‌ها ممکن است در محل تقاطع چند ضلعی‌ها و به ندرت در درون آن‌ها در وسط اضلاع در نظر گرفته شوند و بیانگر نقاطی هستند که در این نقاط پارامترهای مجهول محاسبه خواهند شد. محدوده منطقه مورد نظر به وسیله این گره‌ها تعیین می‌شود.



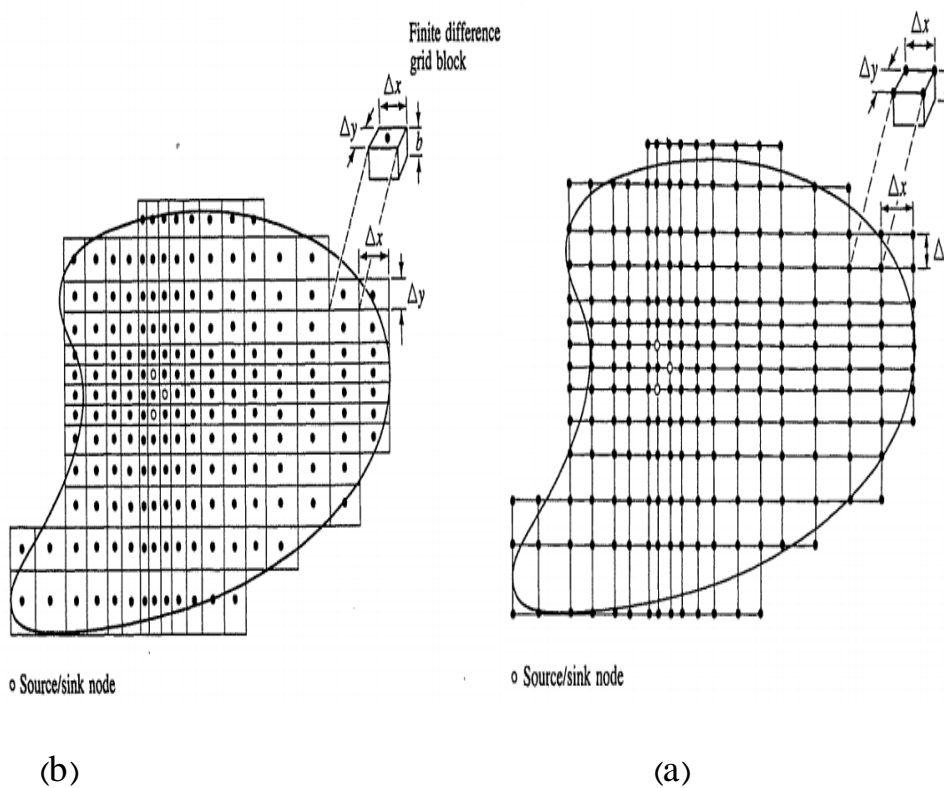
شکل ۱-۲- شبکه عناصر محدود (Wang and Andersson, 1982)

در روش اجزی محدود اولین قدم بدست آمدن معادله انتگرالی است که نشان دهنده معادله دیفرانسیل جزئی می باشد. حل این انتگرال یا تقسیم آبخوان به یکسری اجزاء بدست می آید. در این روش، طراحی شبکه بسیار مشکل تر و حساس تر از روش تفاضل محدود است، ولی با توجه به قابلیت شکل پذیری، می توان به خوبی محدوده مدل را پوشش داد و این یکی از مزیت های مهم روش اجزای محدود است.

ب- روش تفاضل محدود (Finite-Difference Method)

روش تفاضل محدود بر اساس تئوری و بسط تیلور بنا نهاده شده است. در این روش، معادلات از طریق گسسته کردن (تفاضل کردن) تقریب زده می شوند. سیستم پیوسته، از نظر زمانی و مکانی به یک سری بخش های مجزا تقسیم می شود و متغیرهای زمانی و مکانی به صورت پارامترهای ناپیوسته در نظر گرفته می شوند. نهایتاً مجموعه معادلات حاصل از معادلات تفاضل متناهی به شکل معادلات جبری در آمده و به کمک کامپیوتر، به صورت عددی حل می گردد. مسائل متعددی از قبیل بررسی جریان آب زیرزمینی ماندگار و غیر ماندگار در حالت های یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی برای آبخوان های تحت

فشار، نامحبوس و آرتزین در شرایط یکنواخت و همسانگرد (Isotropic) بوسیله مدل‌ها، بر مبنای روش تفاضل محدود حل شده است. هم‌چنین پارامترهای موثر بر آبخوان از قبیل تبخیر و تعرق، نفوذ القایی ناشی از جریان رودخانه (نشت رودخانه یا زهکشی آبخوان)، جریان چشمه‌ها، انتقال آلودگی، جریان‌های آشفته، توسط این روش حل گردیده است. اولین مطالعه مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از روش تفاضل محدود در سال ۱۹۶۸ توسط اداره منابع آب کالیفرنیا، جهت مطالعه آب زیرزمینی دشت ساحلی لس آنجلس انجام گرفته است (Spitz and Moreno, 1996). در این روش از شبکه‌های چهارگوش استفاده می‌شود که این شبکه‌ها می‌توانند با هم برابر یا نابرابر باشند. در این روش باید محل نقاط تعیین گردد که این نقاط یا گره‌ها می‌توانند در مرکز چهارگوش (Block-centered) یا در محل تقاطع خطوط شبکه (Mesh-centered) واقع شوند سپس پارامترهای ثابتی به عنوان مقدار اولیه به هر سلول اختصاص می‌یابد (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲- شبکه تفاضل محدود: (a) مش گوشه بلوکی، (b) مش مرکز بلوکی (Wang and Andersson, 1982)

۲-۳- پروتکل مدل‌سازی (Modeling protocol)

با مشخص شدن هدف و ضرورت انجام تحقیق، طراحی و اجرای مدل صورت می‌گیرد. برای انجام موفق طراحی مدل باید از یک پروتکل مدل‌سازی مناسب تبعیت نمود. پروتکل مدل‌سازی پیشنهاد شده توسط اندرسون و وسنر (Anderson and Woessner, 1992) که روند اجرای آن در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است شامل مراحل زیر می‌باشد:

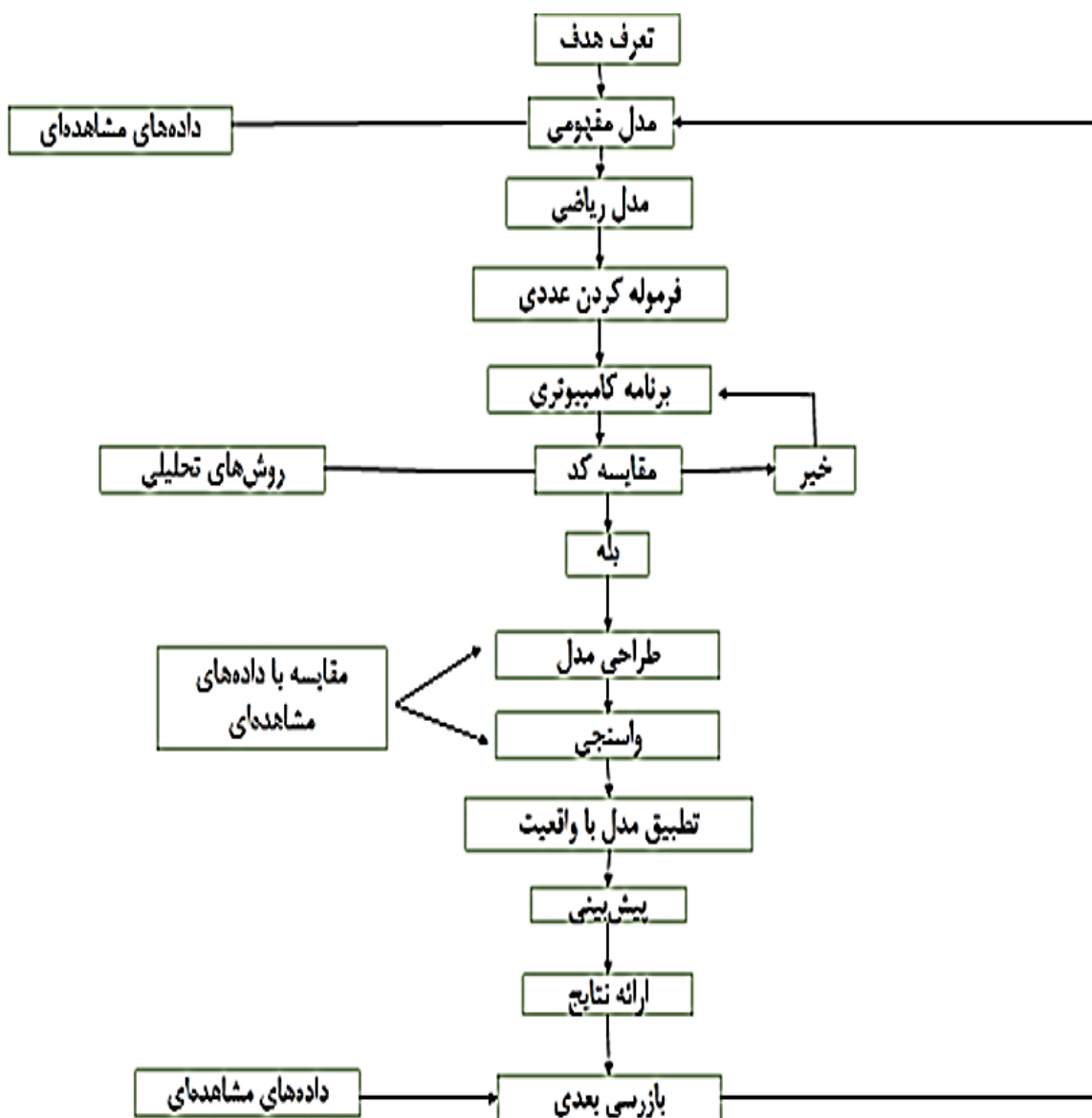
۲-۳-۱- تعیین هدف

با مشخص شدن هدف از مدل‌سازی، اسکلت و چهارچوب روند شبیه‌سازی و مدل‌سازی مشخص می‌شود. به‌طور کلی مدل‌سازی آب زیرزمینی معمولاً برای اهداف زیر انجام می‌گردد (Anderson and Woessner, 1992).

الف) پیش‌بینی (Prediction): برای پیش‌گویی و پیش‌بینی تغییرات طبیعی یا مصنوعی مورد انتظار در سیستم آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب) تفسیر سیستم (Interpretion): برای توصیف سیستم، به منظور تجزیه و تحلیل مفروضات گوناگون درباره ماهیت آن‌ها و هم‌چنین به منظور درک بهتر سیستم و طراحی تحقیقات آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ج) عمومی یا تحلیلی (Generic): برای ایجاد یک سیستم فرضی که برای مطالعه اصول جریان‌های آب زیرزمینی مرتبط با مسائل گوناگون برای موارد خاص یا عام مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۲-۳- پروتکل مدل‌سازی (Anderson and Woessner, 1992)

۲-۳-۲- تهیه مدل مفهومی (Conceptual model)

اولین گام در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی تهیه مدل مفهومی و شمای پایه سیستم سفره آب زیرزمینی منطقه است که بر اساس آن بتوان مدل ریاضی نمایشگر سیستم را ارائه داد (Wang and Anderson, 1981). یک مدل مفهومی نمونه ساده‌ای از سیستم آب زیرزمینی است و در واقع نمایانگر طبیعت سیستم آب زیرزمینی، ورودی و خروجی‌های آبخوان، شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی آن می‌باشد.

دقت و صحت مدل عددی به میزان دقت مدل مفهومی و شرایط خاص درون آبخوان بستگی دارد. ماهیت مدل مفهومی ابعاد مدل عددی و طراحی شبکه را مشخص می‌کند. انتخاب مدل مفهومی مناسب برای یک مسئله، یکی از مهم‌ترین مراحل در فرآیند مدل‌سازی است. ساده‌سازی بیش از حد، ممکن است به نتایج منفی در روند تهیه مدل ریاضی منجر شده و ایجاد مدلی با کمبود اطلاعات مورد نیاز را سبب گردد. از طرفی ساده‌سازی کم، باعث پیچیدگی و گران شدن مدل در مرحله شروع مدل‌سازی و ایجاد مشکلات در مرحله تنظیم مدل (Calibration) خواهد شد. انتخاب مدل مفهومی مناسب و میزان ساده‌سازی در هر مورد خاص، به اهداف موضوع مدیریتی، منابع موجود، اطلاعات صحرائی موجود و چارچوب قانونی و تنظیمی بکار گرفته شده برای منطقه بستگی دارد. لازم است تاکید شود که موجود بودن داده‌های صحرائی مورد نیاز برای واسنجی مدل و تخمین پارامتر، نوع مدل مفهومی انتخابی و درصد تخمین و تقریب را تحت تاثیر قرار می‌دهد. پس از جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز، مدل مفهومی منطقه به منظور ساده‌تر نمودن پیچیدگی‌های آبخوان و تجزیه و تحلیل داده‌های مشاهده‌ای تهیه می‌گردد. نتیجه نهایی مدل مفهومی ایجاد یک پایگاه اطلاعات رایانه‌ای و نقشه‌ها و مقاطع عرضی ساده شده‌ای است که در طراحی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۳-۳- انتخاب حل تحلیلی یا عددی

با توجه به هدف از مدل‌سازی و نوع معادله حاکم برای سیستم جریان آب زیرزمینی مورد نظر، باید یک روش حل انتخاب شود. از آنجایی که برخی از معادلات حاکم یا حل تحلیلی ندارند و یا اینکه حل تحلیلی برای آن‌ها سخت و زمان‌بر می‌باشد، لذا از روش‌های حل عددی برای این مسائل بهره گرفته شده و برای حل آن‌ها از کدهای کامپیوتری استفاده می‌شود.

۲-۳-۴- انتخاب کد کامپیوتری و نرم‌افزار

۲-۳-۴-۱- تعریف کد کامپیوتری

کد کامپیوتری عبارت است از یک برنامه کامپیوتری که شامل الگوریتمی برای حل مدل ریاضی به روش عددی می‌باشد (Fitts, 2002).

۲-۳-۴-۲- معرفی نرم‌افزار (Groundwater Modeling System) GMS

GMS یکی از پیشرفته‌ترین و کامل‌ترین بسته‌های مدل‌سازی آب زیرزمینی است که انواع مختلف مدل‌های عددی را پشتیبانی می‌کند. GMS برای هر یک از مراحل شبیه‌سازی آب زیرزمینی شامل توصیف منطقه مورد مطالعه، تهیه مدل مفهومی، ایجاد شبکه، زمین آمار، واسنجی، پس‌پردازش (Post-Processing) و مجسم‌سازی (Visualization) و غیره ابزار مناسب آن را فراهم می‌آورد. GMS هم از مدل Finite Difference و هم از مدل Finite Element پشتیبانی می‌کند.

ویژگی‌های منحصر به فرد GMS شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. تهیه مدل عددی Modflow به روش مدل مفهومی (Conceptual model approach)

این روش شامل استفاده از ابزار GIS در مدول نقشه برای تهیه مدل مفهومی منطقه‌ای است که قرار است مدل ریاضی آن تهیه گردد. مدل مفهومی در مدول نقشه با استفاده از نقاط، خطوط و چند وجهی‌ها تعریف می‌شود. پس از اینکه مدل مفهومی تعریف شد، با ایجاد شبکه مدل کلیه پارامترهای تعریف شده در مدل مفهومی به سلول‌های شبکه نسبت داده می‌شوند. این روش وارد کردن داده‌ها را به طور خودکار فراهم می‌کند و نیازی به وارد کردن حجم عظیم پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل به صورت سلول به سلول نیست.

از مهم‌ترین مزایای این روش تهیه مدل مفهومی بدون در نظر گرفتن قابلیت وضوح شبکه مدل می‌باشد. هم‌چنین تهیه کننده مدل نیازی به صرف وقت برای محاسبه ضریب رسانایی (Conductance) مناسب و نسبت دادن آن به یک سلول رودخانه بر اساس طول رودخانه در سلول مذکور ندارد، چرا که این عمل به طور خودکار انجام

می‌گردد. علاوه بر این، پارامترهای ناپایدار نظیر شدت پمپاژ چاه‌ها را نیز می‌توان مستقل از چگونگی تفکیک مدل وارد کرد.

۲. پشتیبانی و اجرای بسیاری از مدل‌های عددی و کدهای تحلیلی از جمله MODFLOW، MODPATH، MT3DMS، FEMWATER، PEST، MODAEM و غیره.

۳. وارد کردن (import) و انتقال دادن (export) داده‌های برداری و رستری GIS از Arc، Arc/Info، view و GRASS.

۴. ابزار چک‌کننده مدل (Model checker) فراهم شده در GMS این امکان را فراهم آورده تا قبل از اجرا و ذخیره مدل، مشکلات و مسائل بالقوه را بررسی نماییم.

۵. ابزار حسابگر اطلاعات (data calculator) می‌تواند با ترکیب داده‌ها با استفاده از هر معادله ریاضی مجموعه داده‌های جدیدی را ایجاد کند.

۶. با ابزار ساده طراحی فراهم شده در GMS می‌توان به نمودارهای GMS عنوان، زیرنویس و غیره اضافه نمود.

۷. ورود و خروج فایل‌های DXF (فرمت‌های نرم‌افزار AutoCAD)

۲-۳-۵- طراحی و اجرای مدل

بعد از انتخاب کد کامپیوتری مناسب باید داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از آرایه‌ها به کد کامپیوتری معرفی شوند و مدل کامپیوتری طراحی گردد. در این مرحله به طراحی شبکه مدل، تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه، درونیابی داده‌های ورودی و انتخاب دوره‌ها و گام‌های زمانی پرداخته می‌شود. پس از چک نمودن مدل شبیه‌سازی شده، مدل اجرا گردیده و مقادیر مجهول با استفاده از مدل محاسبه می‌گردد.

۲-۳-۵-۱- شبکه‌بندی (Mesh study)

شبکه‌بندی منطقه مدل اولین نقطه شروع در طراحی واقعی مدل رایانه‌ای است. در MODFLOW که مدلی از نوع تفاضل محدود است؛ شبکه مدل توسط دو دسته خط موازی عمود بر هم تشکیل می‌شود. بلوک‌های تشکیل شده توسط خطوط مذکور، سلول نامیده می‌شوند. مرکز هر سلول، گره نامیده می‌شود. فرض بر آن است که خواص هیدرولیکی و هیدروژئولوژیک، در محدوده یک سلول یکنواخت است. در نتیجه هر سلول توسط گره وابسته به آن مشخص می‌شود. شبکه‌بندی با در ذهن داشتن درک مفهومی مدل، خصوصاً موقعیت و شکل مناطق مورد نظر و مرزهای مدل صورت می‌گیرد. از لحاظ عملی، بهتر است که ابعاد کلی شبکه مدل بزرگتر از منطقه تخمینی مدل باشد. زیرا برای مثال ممکن است در اولین اجرای مدل مشخص شود که مرزهای هیدرولیکی بیش از اندازه نزدیک انتخاب شده‌اند و یا

آبخوان (آبخوان‌های) مجاور را باید در منطقه مدل قرار داد. باید به خاطر داشت که تغییر اندازه شبکه (طول‌های کلی در جهت ستون‌ها یا ردیف‌ها) پس از ایجاد آن مستلزم وارد کردن مجدد سایر پارامترها می‌باشد.

۲-۳-۵-۲- تقسیم‌بندی زمانی

مجموعه مشاهداتی که نسبت به زمان ثبت گردیده باشند را سری زمانی گویند (نیرومند و بزرگ نیا، ۱۳۷۲). تقسیم‌بندی زمانی مدل به معنی تقسیم نمودن مدت زمان اجرای مدل به دوره‌های زمانی کوچک‌تر می‌باشد. تقسیم زمانی مدل با تعیین دوره‌های تنش (Stress Periods) و گام‌های زمانی (Time Steps) مشخص می‌گردد.

۳-۵-۳-۲- شرایط مرزی (Boundary condition)

برای بدست آوردن جواب‌های یگانه یک معادله دیفرانسیل جزئی، به مجموعه‌ای از شرایط مکمل نیاز است. شرایط مرزی به معنی معلوم بودن مقدار متغیر وابسته و یا مشتق‌های آن در مرزهای قلمرو حل معادله دیفرانسیل می‌باشد (دهقانی قهفرخی، ۱۳۸۱). مرزها به طور کلی به دو دسته مرزهای فیزیکی و هیدرولیکی تقسیم‌بندی می‌شوند.

مرزهای فیزیکی سیستم‌های جریان آب زیرزمینی توسط حضور فیزیکی توده غیر قابل نفوذ از سنگ (مرز بدون جریان) یا یک توده عظیم از آب‌های سطحی که به طور کامل در آبخوان نفوذ کرده‌اند (مرزهای با بار آبی مشخص) و یا بعضی از زون‌های گسلی و سطح مشترک آب شور و شیرین در بعضی آبخوان‌های ساحلی (مرزهای بدون جریان) شکل می‌گیرند. توصیه می‌شود تا جایی که ممکن است مرزهای فیزیکی انتخاب شود، چون این مرزها معمولاً پدیده‌های پایدار سیستم جریان می‌باشند. مرزهای هیدرولیکی که به صورت نتیجه‌ای از شرایط هیدروژئولوژیکی به وجود می‌آیند، شامل خطوط تقسیم آب‌های زیرزمینی و خطوط جریان می‌باشند.

مرزهای هیدروژئولوژیکی توسط شرایط ریاضی زیر نشان داده می‌شوند (Anderson and Woessner, 1992):

الف) مرز با بار هیدرولیکی مشخص (شرایط مرزی نوع Dirrchlet)

اگر مقدار متغیر وابسته (ارتفاع آب، غلظت و غیره) بر روی مرزها مشخص باشد آن را شرایط مرزی نوع اول یا Dirrchlet گویند. این شرط مرزی دو نوع است:

۱. مقدار متغیر وابسته مشخص و ثابت است و با زمان تغییر نمی‌کند.

۲. مقدار متغیر وابسته مشخص و با زمان تغییر می‌کند.

خطوط هم‌پتانسیل یا تماس بین آبخوان و یک توده سطحی نمونه‌هایی از مرز با بار هیدرولیکی معلوم هستند. در شبیه‌سازی این نوع مرز نهایت احتیاط باید صورت گیرد، چرا که با وجود تغییرات در مرز آبخوان، سلول‌های شبیه‌سازی شده با بار ثابت مملو از آب باقی می‌مانند.

ب) مرز با شدت جریان مشخص (شرایط مرزی نوع Neuman)

در این نوع مرز جریان ورودی یا خروجی از مرزها مشخص است. شرایط مرزی بدون جریان با مشخص نمودن جریان برابر صفر در این نوع مرزها ایجاد می‌گردد. سطوح هم‌پتانسیل در آبخوان-های آزاد، ورودی و خروجی جانبی از محل تماس بین آبخوان‌های مختلف، نشت از لایه‌های مجاور، جریان چشمه و تغذیه به رودخانه یا تغذیه از رودخانه‌های سطحی، مثال‌هایی از مرز با جریان معلوم هستند (چیت سازان و کشکولی، ۱۳۸۱).

به طور کلی جریان معلوم را توسط یکی از بسته‌های تغذیه، تبخیر و تعرق، چاه یا نهر می‌توان در مدل عددی شبیه‌سازی کرد.

پ) مرز با شدت جریان وابسته به بار هیدرولیکی (شرایط مرزی مختلط)

مرزی که میزان جریان و یا خروجی از آن بر اساس اختلاف بار هیدرولیکی سلول‌های مرزی و سلول‌های آبخوان مجاور محاسبه می‌شود، مرز جریان وابسته به بار هیدرولیکی نامیده می‌شود. سه بسته رودخانه، زهکش و مرز با بار هیدرولیکی عمومی در Modflow می‌توانند چنین شرایطی را شبیه‌سازی کنند.

نقطه مشترک تمام بسته‌های مذکور، آن است که استفاده کننده از مدل باید یک واژه ضریب هدایتی (رسانایی) را مشخص کند که اغلب تعریف کامل آن فقط در اثنای فرآیند واسنجی امکان‌پذیر است. با وجود چنین دشواری هر سه بسته دارای قابلیت‌های خوبی جهت توصیف مرزهای گوناگون داخلی و خارجی می‌باشند (چیت‌سازان و کشکولی، ۱۳۸۱). جریان وابسته به بار هیدرولیکی (Q_b) را که از یک مرز عبور می‌کند و توسط بسته مرز دارای بار هیدرولیکی عمومی (General-Head Boundary Package) شبیه‌سازی می‌شود، می‌توان از رابطه (۱-۲) محاسبه کرد:

$$Q_b = C_b(h_b - h) \quad (1-2)$$

که در این رابطه، h_b بار هیدرولیکی در سلول مرزی، h بار هیدرولیکی در سلول آبخوان مجاور به مرز و C_b میزان هدایت هیدرولیکی بین منبع تامین کننده جریان و مرز شبکه اصلی است که به مقدار K ضریب هدایت هیدرولیکی روی مرز، A مساحت عمود بر جریان انتقالی و L فاصله بین منبع تامین کننده جریان و مرز شبکه اصلی وابسته است (جمعه‌نیا، ۱۳۸۸).

۲-۳-۶- شرایط اولیه

یکی دیگر از شرایط حل معادلات دیفرانسیل جزئی در آب زیرزمینی، وجود شرایط اولیه است تا مدل بتواند بوسیله اعداد و ارقام موجود محاسبات را از یک نقطه شروع نموده و ادامه دهد. شرایط اولیه به معنای مشخص نمودن متغیر مورد نظر (بار آبی، غلظت و غیره) در نقاط مختلف مدل در زمان اولیه می‌باشد.

۲-۳-۷- واسنجی (Calibration)

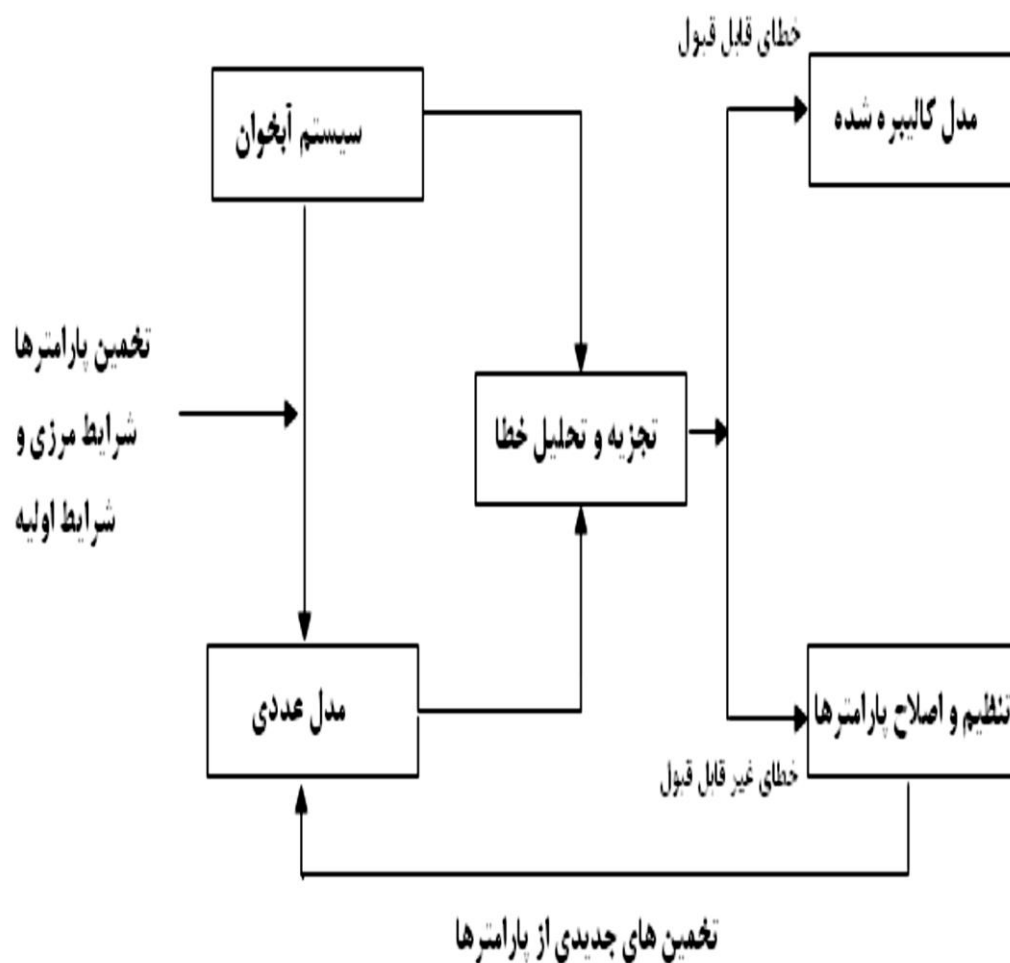
واسنجی فرآیندی است که طی آن پارامترهای ورودی و شرایط مرزی مدل را برای رسیدن به بهترین میزان انطباق بین شرایط مشاهده‌ای و سیستم آب‌های زیرزمینی تغییر می‌یابند (زارع ابانیه و همکاران، ۱۳۸۵). بخش مهمی از مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی، فرآیند واسنجی آن است. واسنجی مدل آب زیرزمینی دارای نقشی پیش‌گویانه است. این فرآیند اثبات می‌نماید که مدل می‌تواند رفتار مشاهده

شده از آبخوان را شبیه سازی کند. در فرآیند واسنجی، پارامترهای خاص مدل مانند تغذیه و هدایت هیدرولیکی در یک مدل اصولی تغییر پیدا می کند و مدل براساس این مقادیر جدید تا موقع ایجاد بیشترین همخوانی با طبیعت پی در پی اجرا می شود.

اولین قدم در واسنجی، تعیین معیار واسنجی (Calibration Value) است. این معیار عبارت است از نوع پارامتر مشاهده شده که می تواند بار هیدرولیکی، جریان هیدرولیکی و یا بیلان آب زیرزمینی باشد. مهم ترین و ساده ترین معیار کالیبراسیون را سطح آب زیرزمینی تشکیل می دهد، چون علاوه بر سهولت اندازه گیری آن، خطای اندازه گیری آن نیز کم بوده و همچنین کالیبراسیون آن آسان تر انجام می شود. گام دوم، تعیین هدف کالیبراسیون (Calibration Target) است که شامل معیار کالیبراسیون و خطای مربوط به آن می شود. مقدار خطای مجاز واسنجی با نوع معیار واسنجی در ارتباط است. در صورتی که معیار کالیبراسیون بار هیدرولیکی انتخاب شود، خطای آن در حد چند متر و کمتر از آن منظور می شود. ولی اگر بیلان آب به عنوان معیار واسنجی انتخاب شود، خطای آن بایستی در حد چند یا کمتر از یک میلیون متر مکعب در سال باشد. گاهی اوقات لازم می شود که تمام جوانب مد نظر باشند، چون ممکن است حین واسنجی به مجموعه جواب هایی دست یافت که نتایج شبیه سازی شده و مشاهداتی در مورد معیار واسنجی بر یکدیگر منطبق باشند، ولی پارامترهای شبیه سازی شده منطبق بر واقعیت نباشند.

واسنجی خود به دو طریق صورت می گیرد. واسنجی خودکار (Calibration Automated) که با استفاده از روش های حل معکوس (Inverse Solution) مقدار پارامترها توسط یک کد کامپیوتری برآورد شده و مدل اجرا می گردد و تا بدست آمدن جواب (انطباق شرایط واقعی با شرایط شبیه سازی شده) این عمل ادامه پیدا می کند. اغلب کدهای رایانه ای مربوط به واسنجی خودکار به دنبال مجموع پارامترهای بهینه ای هستند که مجموع مربعات انحراف بین مقادیر محاسباتی و اندازه گیری شده در آن ها به یک حداقل کاهش یابد. کدهای UCODE، PES، PEST، کدهای مورد استفاده در رابط کاربری GMS در تخمین پارامترها در روش واسنجی خودکار می باشد.

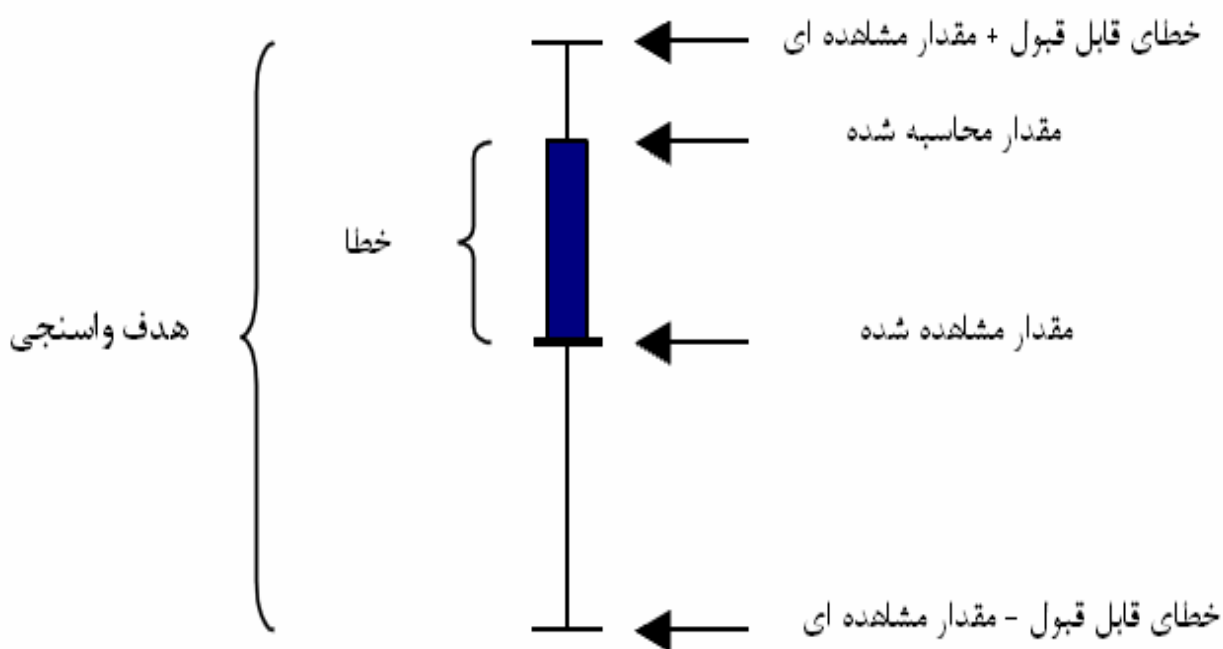
در روش دیگر که سعی و خطا (trial & error) نامیده می‌شود برآورد پارامترها و تغییر آن‌ها به روش دستی و نظر کارشناسی صورت می‌گیرد. از معایب این روش وقت‌گیر بودن آن است. ولی از مزایای آن این است که اگر توأم با تطبیق با واقعیت باشد اطمینان به پارامترها از درصد بالایی برخوردار خواهد بود. نحوه عملکرد این روش در شکل (۲-۴) آورده شده است.



شکل ۲-۴- پروتکل روش سعی و خطا

از مزایای مهم رابط کاربر GMS در حین فرآیند واسنجی، نمایش بصری میزان خطا در اختلاف بار هیدرولیکی محاسبه شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد. بدین صورت که با رسم یک هدف واسنجی در مجاورت هر یک از پیژومترها می‌توان به وضعیت واسنجی پس از هر اجرای مدل پی برد (شکل ۲-۵).

میله رنگی (Colored bar) نمایانگر خطای واسنجی می باشد. مرکز آن منطبق بر مقادیر مشاهده ای می باشد و اگر خطا در محدوده خطای قابل قبول قرار گیرد، میله به رنگ سبز خواهد بود و اگر خطا کمتر از ۲۰۰ درصد خطای قابل قبول باشد میله رنگی زرد و در صورتی که مقدار خطا بیشتر از ۲۰۰ درصد خطای قابل قبول باشد میله رنگی قرمز خواهد شد (Groundwater Modeling System Helpe, Version 6).



شکل ۲-۵- نمایش بصری میزان خطا در حین فرآیند واسنجی (زارع ابانیه و همکاران، ۱۳۸۵)

۲-۳-۸- صحت سنجی مدل

پس از انجام واسنجی برای تعیین اعتبار مدل و سنجش دقت آن و اثبات اینکه مدل قابلیت پیش گویی های صحیح را خواهد داشت، صحت سنجی مدل صورت می گیرد (سلاجقه و همکاران ۱۳۹۰). در این مرحله، اگر مدل بتواند حوادث دوره زمانی، غیر از دوره واسنجی را شبیه سازی کند ترکیب پارامترهای به کاررفته درست می باشد. این مرحله یکی از مهم ترین مراحل مدل سازی می باشد که معمولاً برای یک سال آبی طراحی می گردد (وزارت نیرو، ۱۳۸۵). در این مرحله معمولاً سال بعد از سالی که شرایط ناپایا شبیه سازی شده را در نظر می گیرند.

۲-۳-۹- تحلیل حساسیت و پیش‌بینی (prediction) مدل

تحلیل حساسیت یک ارزیابی کمی از تاثیرپذیری خروجی‌های مدل در اثر تغییر ورودی‌ها است و برای جلوگیری از تغییرات غیر منطقی پارامترها برای کالیبراسیون انجام می‌گیرد. در طی تحلیل حساسیت معمولاً با تغییر سیستماتیک یک پارامتر از قبیل هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، میزان برداشت و غیره مدل اجرا می‌شود و اثر این تغییر بر روی خطای محاسبه شده از مدل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نتیجه میزان حساسیت هر پارامتر مشخص می‌گردد. آنالیز حساسیت قبل از واسنجی و هم‌چنین بعد از واسنجی می‌تواند انجام گیرد.

آنالیز حساسیت پارامترهایی که بیش‌ترین تاثیر را در تعیین دقت و ظرافت پیش‌بینی‌های مدل دارند مشخص می‌کند (جمعه نیا، ۱۳۸۵). تعیین حساسیت پارامترها برای جمع‌آوری داده‌ها در آینده نیز مفید می‌باشد به طوری که در آینده دقت بیشتری در جمع‌آوری داده‌هایی که مدل حساسیت بیشتری نسبت به آن‌ها دارد منظور خواهد شد.

پس از صحت‌سنجی می‌توان از مدل شبیه‌سازی شده جریان آب جهت پیش‌بینی یا بهینه‌سازی منابع آب زیرزمینی سیستم آبخوان استفاده نمود. با استفاده از شرایط پیش‌بینی شده می‌توان مجموعه‌ای از برنامه‌ریزی، طراحی یا سیاست‌های اجرایی توسط بررسی پاسخگویی شبیه‌سازی آبخوان را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد (ماجدی و جلیلیان، ۱۳۸۴).

۲-۳-۱۰- ارائه نتایج مدل

در پایان مدل‌سازی طبق مراحل ذکر شده، کارهای انجام گرفته در راستای طراحی مدل و نتایج حاصل از مدل‌سازی و پیش‌بینی‌های انجام گرفته ارائه می‌گردد.

۲-۳-۱۱- بازرسی بعدی

منظور از این مرحله بررسی نتایج مدل در آینده و مقایسه آن با شرایط و داده‌های واقعی بوده که در صورت لزوم تغییرات در مدل اعمال می‌گردد.

۲-۴- مروری بر مطالعات گذشته در جهان

پیشینه استفاده از مدل های شبیه ساز به یک صد سال پیش باز می گردد. اما استفاده از مدل های بهره برداری تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی از دهه ۶۰ میلادی به طور گسترده رواج یافت. در دهه ۱۹۶۰، زمانی که کامپیوترهای دیجیتال با سرعت پردازش بالا به طور گسترده موجود بودند، مدل های عددی برای مطالعه آب های زیرزمینی به کار گرفته شدند. در سال ۱۹۸۸ میلادی MODFLOW، به عنوان یک مدل شبیه سازی جریان یک، دو و سه بعدی در آبخوان محبوس، نیمه محبوس و آزاد در حالت پایدار و ناپایدار، توسط مک دونالد و هارباغ

(Mc Donald and Harbaugh, 1990) در موسسه زمین شناسی آمریکا به زبان فرترن تهیه شد و سپس در سال ۱۹۹۶ بخش هیدروژئولوژی دانشگاه واترلو کانادا این کد کامپیوتری را در محیط ویندوز ارائه نمود.

وارنی و یوسونوف (Varni and Usunoff, 1999) با استفاده از مدل MODFLOW جریان آب زیرزمینی را در مقیاس ناحیه ای در حوضه آزل (Azul) در آرژانتین بررسی کردند. هدف از این مطالعه سنجش انواع اجزای شبیه سازی، مانند مرزهای فیزیکی، پارامترهای هیدرولیکی، رابطه بین آب های سطحی و زیرزمینی و تغذیه آب های زیرزمینی می باشد. سطح آب شبیه سازی شده با سطح آب مشاهداتی انطباق خوبی داشت. نتیجه این شبیه سازی حاکی از تغذیه غیر یکنواخت در سرتاسر منطقه و میزان تبخیر و تعرق بیشتر از مقدار محاسبه شده به روش تورنت وایت - متر (Thornthwaite-Mather) می باشد. ژانگ و همکاران (Zhang et al. 2001) جریان آب زیرزمینی در سفره های کارستی در شمال شرق آیوا (Iowa)، که به علت داشتن سیستم کارستی گسترده در معرض آلودگی شیمیایی و بیولوژیکی است را با استفاده از نرم افزار GMS و کد MODFLOW به منظور فهم بهتر از آلودگی و حرکت آن شبیه سازی کردند.

گورون و لابسینزکی (Gurvin and Lubczynski, 2004) سیستم پیچیده چند سفره ای منطقه سوئیدنیکا (Swidnica) در لهستان را برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی توسط مدل عددی GMS شبیه سازی کردند. در این مطالعه با استفاده از داده های طبیعی سطح آب و اطلاعات قابلیت انتقال

کالیبراسیون مدل در حالت پایدار انجام گرفت. این مدل نشان داد که ذخیره و منابع آب تجدیدپذیر در سفره هنوز وجود دارد.

شیت و همکاران (Sheets *et al.* 2005) تاثیر پمپاژ نزدیک مرز تقسیم آب را در دو آبخوان کربناته و ماسه‌ای واقع در شمال غرب اهایو (Ohio) واقع در آمریکای شمالی و شمال شرق هند را در شرایطی که محل چاه‌ها متفاوت و فاصله آن از مرز تقسیم آب یکسان باشد، با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW2000 شبیه‌سازی نموده و درصد آب پمپاژ از چاه‌ها را تا وقتی که سطح آب به خط تقسیم آب برخورد نماید، برای پمپاژهای متفاوت برآورد کرده‌اند.

ادریسی و اسمدت (Idrissy and Smedt, 2006) مدل جریان آب زیرزمینی در آبخوان تریفا (Trifa aquifer) در شمال شرقی مراکش را با استفاده از کد MODFLOW در قالب نرم‌افزار PMWIN توسعه دادند. صحت‌سنجی مدل مورد نظر برای سال آبی ۹۶-۱۹۹۵ بر اساس داده‌های سطح آب در ۴۶ چاه مشاهده‌ای انجام شد. این محققین، تاثیر توسعه کشاورزی در منطقه تریفا را بر منابع آب زیرزمینی به وسیله مدل هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی بررسی کردند. نتیجه مدل بدون کالیبره شدن انطباق خوبی با داده‌های مشاهده‌ای نشان داد. بر اساس نتایج بدست آمده از این مطالعه، مدل می‌تواند ابزار مناسبی برای پیش‌بینی و ارزیابی خطر افت آب زیرزمینی باشد.

ملوپولوس و همکاران (Mylopoulos *et al.* 2007) حوضه آبرگیر مقدونیه که از دو آبخوان کم‌عمق و عمیق تشکیل شده و در شمال شرق یونان واقع گردیده را با استفاده از مدل کامپیوتری MODFLOW شبیه‌سازی کردند و ارتباط هیدرولیکی بین این دو آبخوان و هم‌چنین آبخوان و دریاچه کورونیا را که بر روی آن قرار گرفته تعیین کردند.

هرزاگ (Herzog, 2007) با استفاده از مدل MODFLOW، منطقه Kampala در اوگاندا را به دلیل بالا بودن تراز آب زیرزمینی و احتمال آلودگی آب زیرزمینی با استفاده از فاضلاب در حالت غیرماندگار شبیه‌سازی نمود. نتایج این تحقیق نشان داده است که در ماه‌های تر که کانال‌های انتقال رواناب با ظرفیت کامل عمل می‌کنند، این کانال‌ها به عنوان مانعی برای خروج آب زیرزمینی عمل کرده و باعث بالا آمدن تراز آب زیرزمینی می‌شود. هم‌چنین احتمال آلودگی آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد.

جوسرت و همکاران (Jusseret *et al.* 2008) جریان آب زیرزمینی در زون مرکزی شهر هانوی (Hanoi) در کشور ویتنام را با کمک کد MODFLOW2000 به صورت مدل سه بعدی برای سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ شبیه‌سازی کردند. این شبیه‌سازی هم در شرایط پایدار (سطح آب زیرزمینی نسبت به زمان تغییر نمی‌کند) و هم شرایط ناپایدار (در طول زمان سطح آب زیرزمینی تحت تاثیر عوامل تغذیه و تخلیه تغییر پیدا می‌کند) اجرا شد. به کمک مدل، جهت جریان آب زیرزمینی در این ناحیه مشخص گردید. هم‌چنین اهمیت نسبی منابع مختلف و فعل و انفعالات بین آب‌های زیرزمینی و رودخانه سرخ در این منطقه تعیین گردید.

یائوتی و همکاران (Yaouti *et al.* 2008) از کد MODFLOW برای بررسی تغییرات شرایط هیدروژئولوژیکی و شبیه‌سازی رفتار جریان تحت استرس‌های مختلف در آبخوان غیرمحبوس بوآرگ (Bou-Areg) استفاده نموده و با استفاده از روش سعی و خطا به شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد که نوسانات بار هیدرولیکی به تغییرات فصلی تغذیه از بارش و آبیاری بستگی دارد.

یوسف‌زای و همکاران (Yousafzai *et al.* 2008) جریان آب‌های زیرزمینی را در حوضه پیشوار (Peshwar) در شمال غربی هیمالیا با استفاده از نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی کردند. به منظور شبیه‌سازی عددی در این تحقیق از مدل سه بعدی اجزا محدود FEMWATER برای تقسیم‌بندی حوضه پیشوار به چهار واحد هیدرواستراتیگرافی (وضعیت لایه‌های زمین در آبخوان) استفاده شده است. شبیه‌سازی ناپایدار این آبخون نشان داد که فقط توپوگرافی برای ایجاد هد موجود در زمین کافی نیست و در نتیجه همراه با شیب توپوگرافی، تاثیرات فشارهای تکتونیک نیز پیشنهاد شد.

روبرت و همکاران (Robert *et al.* 2009) با استفاده از مدل آب زیرزمینی MODFLOW2000 داده‌های پایه سفره و استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS به ارزیابی منابع آب زیرزمینی پرداختند و هم‌چنین آسیب‌پذیری این منابع آبی در مقابل آلودگی در ایالت هاوایی آمریکا را مورد بررسی قرار دادند.

جاووسکا و زولک (Jaworska and Szulk, 2009) جریان آب زیرزمینی درون سیستم چند سفره‌ای را برای ارزیابی منابع ناحیه‌ای با استفاده از کد MODFLOW2000 شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه

برای توسعه مدل مفهومی از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای و برای مدل‌سازی سیستم چند سفره‌ای از نرم‌افزار GMS استفاده گردید. این شبیه‌سازی منجر به شناخت چهار سفره آزاد و چهار سفره نشتی در منطقه دانسک (Gdansk) در لهستان شد. هم‌چنین مقدار نفوذ در این سفره ۸/۱۳۵ میلی‌متر در سال محاسبه گردید.

تامر ایوز (Tamer Ayvaz, 2009) از تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای حل مشکلات مدیریتی آب زیرزمینی استفاده کرد و در مطالعه خود برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی از مدل MODFLOW و از الگوریتم جستجوی هماهنگی (Harmony search) برای بهینه‌سازی تابع هدف بهره گرفت. در نتیجه با بکارگیری و تلفیق دو مدل به بررسی سه مشکل عمده مدیریتی آب‌های زیرزمینی یعنی بدست آوردن ماکزیمم نرخ پمپاژ از یک آبخوان (در حالت پایدار)، به حداقل رساندن هزینه پمپاژ کل برای تامین یک تقاضای مفروض (در حالت پایدار) و به حداقل رساندن هزینه پمپاژ کل برای تامین تقاضا در چندین دوره مدیریتی (در حالت ناپایدار) پرداخت.

جمع‌بندی مطالب فوق‌الذکر نشان می‌دهد که از مدل می‌توان برای بررسی مشکلات عمده مدیریتی نظیر بدست آوردن حداکثر نرخ پمپاژ یا به حداقل رساندن هزینه پمپاژ کل برای تامین تقاضا استفاده نمود. هم‌چنین مدل برای مطالعه سنجش انواع اجزای شبیه‌سازی مانند مرزهای فیزیکی، پارامترهای هیدرولیکی، رابطه بین آب‌های سطحی و زیرزمینی و تغذیه آب‌های زیرزمینی، فهم بهتر آلودگی و شبیه‌سازی حرکت آلودگی، تاثیر توسعه کشاورزی بر منابع آب زیرزمینی، تعیین جهت جریان آب زیرزمینی و فعل و انفعالات بین آب‌های زیرزمینی و رودخانه‌ها قابل استفاده می‌باشد.

۲-۵- مروری بر مطالعات گذشته در ایران

مطالعات مدل‌سازی در ایران اولین بار در سال ۱۳۴۸ خورشیدی توسط سازمان خواروبار جهانی (FAO) انجام شده است. در پی این مطالعات مدل ریاضی دشت ورامین تهیه شد و در ادامه تعدادی مدل با همکاری مشاورین فرانسوی تهیه شده است. از آن به بعد تعداد زیادی آبخوان در سراسر کشور توسط دانشگاه‌ها در قالب پایان‌نامه‌های دانشجویی و طرح‌های پژوهشی در مراکز اطلاعات مربوطه تحقیقاتی،

شرکت های مشاوره ای و سازمان های آب منطقه ای شبیه سازی شده اند (موسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۲). از جمله این مطالعات می توان به موارد زیر اشاره کرد.

کتیبه و همکاران (۱۳۸۲) به بررسی ویژگی های هیدروژئولوژیکی آبخوان آزاد شهر اصفهان و تاثیر عملیات احداث تونل متروی این شهر بر رژیم آب زیرزمینی پرداختند. آن ها ابتدا آمار سطح آب پیژومترهای موجود طی یک دوره ۴/۵ ساله (۱۳۷۶ - ۱۳۸۰) و نتایج تست پمپاژ، توپوگرافی سطح شهر و اطلاعات مربوط به ضخامت و جنس لایه ها را تهیه کردند. سپس کلیه اطلاعات در سیستم های GIS، WINSURFER و AUTOCAD پردازش شده و آنگاه در مدل ریاضی سه بعدی با روش تفاضل محدود به کمک نرم افزار PMWIN5.1 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مدل در واسنجی از دقت مناسبی برخوردار بود و جذر میانگین خطا برابر ۰/۹۴ به دست آمد. سپس نوسان سطح ایستابی آب زیرزمینی در طی زمان و تحت تاثیر عملیات احداث تونل و دیواره نفوذناپذیر دو سمت رودخانه زاینده رود پیش-بینی گردید، نتایج نشان می دهند که احداث دو تونل به قطر ۶ متر به موازات یکدیگر (گزینه اول) و یا احداث تنها یک تونل به قطر ۹ متر (گزینه دوم) تاثیر به سزایی بر نوسان سطح ایستابی آب زیرزمینی نخواهند داشت.

چیت سازان و ساعت ساز (۱۳۸۴) برای غلبه بر مشکلات بهره برداری، طرح استفاده توام منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت رامهرمز را مطرح کردند. لذا مدل ریاضی MODFLOW به عنوان یک ابزار کارآمد و با صرفه جهت بررسی گزینه های مختلف مدیریتی مورد بررسی قرار گرفت. پس از تهیه مدل مفهومی، داده های لازم در بسته نرم افزاری MODFLOW تعریف گردید. سپس واسنجی مدل توسط کد نرم افزاری PEST صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که ادامه روند کنونی برداشت از نظر مدیریتی گزینه قابل قبولی نمی باشد، و بر عکس حفر چاه های بهره برداری در مناطق شرقی و مرکزی و اعمال زهکشی در شمال و جنوب دشت گزینه مناسبی برای استفاده توام منابع آب سطحی و زیرزمینی خواهد بود.

آبخوان تبریز با اهدافی چون شناخت وضعیت منابع آب های زیرزمینی و بررسی امکان برآورده نمودن نیازهای آینده و با توجه به احداث شبکه آبیاری و زهکشی، بررسی اثرات احداث این شبکه بر وضعیت آب های زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW و MT3D توسط رزاقمنش و همکاران (۱۳۸۵)،

شبیه‌سازی گردید. مدل مطالعاتی نشان داد افزایش برداشت در طولانی مدت باعث افت سطح ایستابی تا حدود ۵ متر خواهد گردید و میزان شوری آب زیرزمینی در دراز مدت افزایش پیدا خواهد کرد. نجف آبادی و رهنما (۱۳۸۶) تغییرات سطح ایستابی دشت سیرجان را با مدل کامپیوتری MODFLOW شبیه‌سازی کردند. تخمین پارامترهای هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و میزان تغذیه با استفاده از نرم‌افزار PEST انجام پذیرفت. کالیبراسیون مدل در یک دوره ۹ ساله انجام پذیرفت. صحت‌سنجی مدل در یک دوره ۱۲ ماهه نشان داد که مقادیر سطح آب پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر مشاهداتی از توافق خوبی برخوردارند و جذر میانگین خطا برابر $0/89$ به دست آمد. میزان تغذیه دشت قبل و بعد از احداث سد تنگ‌کویه توسط مدل محاسبه گردید و مشخص شد که احداث این سد موجب کاهش تغذیه آبخوان دشت سیرجان شده است.

نکواآمال کرمانی و همکاران (۱۳۸۶) نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت بوچیر- حیران در غرب بندرعباس را با استفاده از کد MODFLOW و کد PEST شبیه‌سازی کردند. مدل نشان داد که با شرایط برداشت کنونی روند افت در این دشت همچنان ادامه خواهد یافت. با استفاده از این مدل می‌توان وضعیت سفره را در صورتی که مقادیر تغذیه و تخلیه سفره در مدت زمان مورد نظر مشخص باشد، پیش‌بینی کرد.

روش تفاضلات محدود و کد MODFLOW، با استفاده از نرم‌افزار GMS برای شبیه‌سازی آبخوان دشت عقیلی مورد استفاده قرار گرفت (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۷). با واسنجی مدل به روش دستی (سعی و خطا) ضرایب هیدرودینامیکی منطقه تصحیح شد. نحوه توزیع مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در دشت دارای رنج وسیعی می‌باشد که دلیل این تغییرات را می‌توان ناهمگنی توسط سازندهای موجود در دشت دانست.

رضایی و سرگزی (۱۳۸۹) برای ساخت مدل عددی جریان با نرم‌افزار MODFLOW و پیش‌بینی تغییرات سطح آب در دشت گوهرکوه در استان سیستان و بلوچستان از لاگ‌های حفاری، آماربرداری از منابع آبی، داده‌های پیزومتری و آزمایش‌های پمپاژ استفاده کردند. پس از اتمام ساخت مدل، به بررسی اثرات اجرای طرح تغذیه مصنوعی بر روی آبخوان دشت گوهرکوه پرداخته شد، که بر اساس شرایط موجود بهترین محل برای اعمال تغذیه مصنوعی بخش‌های شمالی آبخوان تشخیص داده شد. نتایج

نشان می‌دهد واکنش آبخوان در برابر اعمال تغذیه مصنوعی مثبت بوده و تغذیه مصنوعی اثر مخربی روی آبخوان ندارد.

طاهری تیزرو و همکاران (۱۳۹۰) به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW در دشت کبودرآهنگ با وسعت ۲۸۶ کیلومتر مربع واقع در شمال استان همدان پرداخته‌اند. با توجه به هیدروگراف واحد سطح مخزن آب زیرزمینی در سال مورد بررسی (سال آبی ۸۶-۸۵) برابر ۳/۱ متر افت نموده است. از بین داده‌های ورودی به مدل، هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (S) دارای بیش‌ترین اهمیت و حساسیت در واسنجی مدل جریان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که مدل، تراز سطح آب را با دقت قابل قبولی (میانگین خطا ۰/۹۴) شبیه‌سازی کرده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در این منطقه عبارتند از:

۱- بیش‌ترین افت تراز سطح آب‌های زیرزمینی در قسمت‌های مرکزی و شمالی دشت کبودرآهنگ رخ داده است.

۲- کم‌ترین میزان آبدهی ویژه در اطراف کبودرآهنگ و شمال مهاجران و مارهموار و کوریجان روستاهای زیرتوابع شهرستان کبودرآهنگ و بیش‌ترین میزان آبدهی ویژه در اطراف روستای کوریجان دو و عین آباد است.

۳- تاثیر تغذیه مصنوعی کوریجان به عنوان تنها طرح تغذیه مصنوعی در محدوده مطالعاتی بر کمیت آب زیرزمینی مثبت ارزیابی می‌گردد.

به منظور انجام مدیریت صحیح و پایدار منابع آب زیرزمینی، آبخوان دشت حسن آباد قوری واقع در شرق استان فارس با استفاده از نرم‌افزار GMS7.1 توسط کرونی و همکاران (۱۳۹۱) مدل‌سازی گردید. پس از تایید صحت مدل وضعیت تراز آب سفره برای یک دوره سه ساله (مهرماه سال ۱۳۹۱ تا مهرماه ۱۳۹۴) مورد پیش‌بینی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پیش‌بینی بیانگر این است که ادامه روند بهره‌برداری کنونی در سال‌های آتی حداکثر افتی برابر با ۵/۴ متر در سطح آب آبخوان ایجاد می‌کند.

بانزاد و همکاران (۱۳۹۱) پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز دشت نهاوند (یکی از دشت‌های - حوضه رودخانه کرخه) در جنوب استان همدان از قبیل اطلاعات زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و نقشه‌های توپوگرافی ابتدا مدل سه بعدی هیدرولوژیکی دشت با استفاده از لاگ چاه‌های منطقه و

اطلاعات ارتفاعی لایه سطحی دشت را تهیه نموده و سپس کد عددی MODFLOW در قالب نرم‌افزار GMS را برای شبیه‌سازی جریان مورد استفاده قرار دادند. پس از شبیه‌سازی اولیه جریان، مدل با استفاده از سعی و خطا و روش تخمین پارامتر و اطلاعات تراز آب چاه‌های منطقه برای حالت پایدار (سال ۱۳۷۶) کالیبره گردید. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل نتایج معقولی میان تراز مشاهده شده و محاسبه شده در سال ۱۳۷۶ نشان داد.

مهدوی و همکاران (۱۳۹۲) با هدف مطالعه و بررسی تاثیر عملیات مدیریتی بر وضعیت آبخوان دشت همدان - بهار تغییرات سطح ایستابی را با استفاده از مدل PMWIN بررسی کردند. به منظور پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان دو گزینه ادامه روند فعلی بهره‌برداری بدون افزایش بارش و گزینه ادامه روند فعلی بهره‌برداری با افزایش ۲۰ درصدی در میانگین بارش متوسط، تدوین و مدل مجدداً برای پنج سال آینده (سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳) اجرا شد. نتایج بیانگر این است که در هر دو سناریو، سطح ایستابی همچنان افت خواهد داشت. بررسی سه گزینه حذف چاه‌های غیر مجاز، تغییر الگوی کشت و تغییر شیوه آبیاری حاکی از تاثیر مثبت این عملیات بر وضعیت آینده آبخوان می‌باشد. از این میان گزینه تغییر شیوه آبیاری به دلیل صرفه‌جویی در مصرف آب بیش‌ترین تاثیر را بر کاهش میزان افت سطح تراز آبخوان در آینده خواهد داشت.

آبخوان شهر مشهد با استفاده از روش عددی تفاضلات محدود و نرم‌افزار GMS7.1 برای بررسی اثر اجرای طرح فاضلاب بر نوسانات سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده است (تندیسه و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج نشان داد اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب تاثیر مستقیم در سطح آب زیرزمینی دارد و باعث افت سطح آب می‌گردد. افت سطح ایستابی در منطقه از ۱ متر در جنوب شرق شهر مشهد تا ۱۶ متر در شمال و شمال غرب شهر مشهد متغیر است.

جنوبی و همکاران (۱۳۹۲) برای ساماندهی و سنجش واکنش منابع آب زیرزمینی دشت ارومیه در مقابل اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی و اجرایی از مدل‌سازی با نرم‌افزار MODFLOW استفاده کردند. در این راستا، سناریوی کاهش ۲۵ درصدی پمپاژ و قطع پمپاژ در مناطق غربی دشت به ترتیب موجب بالا آمدن سطح آب زیرزمینی به طور متوسط به اندازه ۰/۵ و ۴ متر و افزایش ۲۵ و ۵۰ درصدی پمپاژ در مناطق شرقی دشت به ترتیب موجب افت سطح آب زیرزمینی به طور متوسط به مقدار ۱ و ۵/۳ متر شد.

ملکی (۱۳۹۰) با استفاده از نرم‌افزار GMS به تهیه مدل ریاضی دشت شاهرود برای بررسی اثر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی پرداخته است.

قفقازی (۱۳۹۱) به شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان دشت میمه با استفاده از نرم‌افزار GMS پرداخته است.

جمع‌بندی مطالعات انجام شده در خصوص بکارگیری مدل نشان می‌دهد اهدافی چون شناخت وضعیت منابع آب‌های زیرزمینی و بررسی امکان برآورده نمودن نیازهای آینده، بررسی اثرات احداث شبکه‌های آبیاری بر وضعیت آب‌های زیرزمینی، بررسی اثرات اجرای طرح تغذیه مصنوعی بر روی آبخوان و پیش‌بینی وضعیت سفره در صورتی که مقادیر تغذیه و تخلیه سفره در مدت زمان مورد نظر مشخص باشد و غیره مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۶- مطالعات انجام شده در دشت بهاباد یزد

سحبایی و همکاران (۱۳۷۸) با شرح نقشه زمین‌شناسی، ریخت کلی حوضه آبریز بهاباد را مورد بررسی قرار دادند. دفتر مطالعات امور آب استان یزد (۱۳۷۵) به محاسبه بیلان آب زیرزمینی دشت بهاباد پرداخته و طی این مطالعات برآورد گردید رودخانه شور تنها رودخانه مهم در دشت بهاباد بوده که در راستای شمالی- جنوبی کشیده شده و رژیم آبدهی آن سیلابی می‌باشد. بیش از ۳۰ مسیل کوچک و بزرگ به شاخه اصلی پیوسته و رودخانه شور را تشکیل می‌دهند. مسیل‌های عمده حوضه رودخانه شور بهاباد، آسفیح، ده‌جمال، بنستان، آبدوگی، ده‌عروس و مشیر آباد بوده که از کوه‌های جنوب و غرب بهاباد سرچشمه می‌گیرند.

جدیدترین مطالعات انجام شده در دشت بهاباد توسط شیر افکن (۱۳۹۲) انجام شده است که هیدروژئولوژی آبخوان بهاباد و عوامل موثر بر افت سطح ایستابی را بررسی نموده است. لازم به ذکر است مدل‌سازی آبخوان بهاباد تا کنون انجام نشده است. در این راستا مطالعه حاضر به شبیه‌سازی عددی آبخوان بهاباد و بررسی آینده آبخوان تحت سناریوهای مدیریتی مختلف می‌پردازد.

فصل سوم: روش تحقیق

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان بهاباد توسط مدل عددی GMS انجام شده است. در این فصل روش انجام تحقیق ارائه می‌شود.

۳-۱- ساخت مدل در نرم‌افزار GMS

به‌طور کلی روش مدل‌سازی در نرم‌افزار GMS را می‌توان به سه مرحله زیر تقسیم‌بندی کرد: مرحله پیش پردازش (Pre-Processing step) که در ارتباط با تهیه اطلاعات ورودی به مدل است. مرحله پردازش (Processing step) که در برگیرنده طراحی و اجرای مدل است. مرحله پس پردازش (Post-Processing step) که شامل ارائه و بررسی نتایج خروجی‌هاست.

۳-۱-۱- مرحله پیش پردازش

این مرحله شامل تعیین اهداف مدل و تهیه و گردآوری اطلاعات می‌باشد.

۳-۱-۱-۱- تعیین هدف

قبل از شروع ساخت مدل ابتدا بایستی هدف از طراحی مدل مشخص باشد تا داده‌های مورد نیاز برای هدف مشخص و جمع‌آوری گردد. با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی بوده است، اطلاعات و روش‌های متناسب با آن انتخاب شده است.

۳-۱-۱-۲- تهیه و گردآوری اطلاعات

در این تحقیق ابتدا نسبت به جستجو در منابع اطلاعاتی و گزارشات حاصل از پژوهش‌های پیشین و به عبارتی انجام مطالعات کتابخانه‌ای پرداخته شده است. طی این مرحله، داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز شامل نقشه‌ها، عکس‌ها، اطلاعات هیدرولوژی و هیدروژئولوژی و غیره از منابع مختلف، مانند گزارش‌ها و مطالعات و پژوهش‌های قبلی انجام گرفته در منطقه جمع‌آوری و مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طور کلی اطلاعات مورد نیاز مدل به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

الف) اطلاعات بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها در مقیاس محدوده‌ای

اطلاعات استخراج شده از اندازه‌گیری‌های محدوده‌ای مشتمل بر استفاده از نقشه‌های پایه از قبیل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، تکتونیک و غیره به منظور مشخص نمودن محدوده مدل، وسعت آبخوان، مساحت تغذیه و شرایط مرزی می‌باشد. از ابزار GIS برای تهیه عکس‌ها، Shap File های ضروری، مرزهای حوضه آب زیرزمینی، جریان آب‌های سطحی و نقشه‌های پایه مورد نیاز استفاده می‌شود. سپس این اطلاعات وارد GMS می‌شوند. مدول نقشه (Map Module) این اطلاعات ورودی را پردازش کرده و داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل مفهومی را تولید می‌نماید.

ب) اطلاعات بدست آمده از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای

این اطلاعات عمدتاً مربوط به اطلاعات چاه‌ها و چشمه‌ها و نرخ تخلیه آن‌ها با زمان هستند که به صورت فایل Txt به GMS منتقل می‌شوند. اطلاعات مورد نیاز دیگر نیز از جمله داده‌های مربوط به هدایت هیدرولیکی، ارتفاع سطح فوقانی لایه آبدار و سنگ کف و سطح ایستابی با استفاده از مدول 2D Scatter Point وارد نرم‌افزار GMS شده و پس از بررسی داده‌ها به کمک روش‌های درونیابی مختلف نقشه تراز آن‌ها تهیه می‌گردد.

۳-۱-۲- مرحله پردازش

این مرحله شامل طراحی و اجرای مدل است که خود شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- تهیه مدل مفهومی

۲- تهیه مدل عددی

۳- واسنجی مدل

۴- صحت سنجی یا تایید مدل

۳-۱-۲-۱- تهیه مدل مفهومی

تهیه مدل مفهومی در واقع پایه و اساس مدل ریاضی می‌باشد که با تکیه بر آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده موجود در هر دشت ساخته می‌شود. یک مدل Modflow در GIS را می‌توان به یکی از دو روش زیر تهیه کرد:

الف) روش شبکه (Grid Approach)

در واقع در این روش مستقیماً با شبکه سلول‌ها سر و کار داریم و مقادیر و پارامترهای مدل سلول به سلول وارد می‌شوند.

ب) روش مدل مفهومی (Coceptual Model Approach)

این روش شامل استفاده از ابزارهای GIS در مدول نقشه برای تهیه مدل مفهومی است که قرار است مدل عددی آن تهیه گردد. مدل مفهومی در مدول نقشه با استفاده از نقاط، خطوط و چند وجهی‌ها تعریف می‌شود. پس از اینکه مدل مفهومی تعریف شد با ایجاد شبکه مدل، کلیه پارامترهای تعریف شده در مدل مفهومی به سلول‌های شبکه نسبت داده می‌شوند.

۳-۱-۲-۲- تهیه مدل عددی

این مرحله شامل بیان مدل مفهومی به شکل مدل ریاضی است. این مرحله شامل طراحی شبکه مدل، انتخاب گام‌های زمانی و تعیین شرایط اولیه است. در این مرحله تمام لایه‌های اطلاعاتی مدل مفهومی از سیستم فیزیکی به سیستم عددی تبدیل می‌گردند.

۳-۱-۲-۳- واسنجی مدل

با توجه به کمبود داده و ساده‌سازی‌هایی که در روند مدل‌سازی انجام می‌گیرد، بعد از اجرای مدل بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی اختلافی دیده می‌شود؛ لذا به منظور کاستن از این اختلاف باید داده‌های ورودی مدل واسنجی گردند که به این مرحله از مدل‌سازی، واسنجی کردن مدل گویند. قبل از واسنجی

کردن باید معیار واسنجی و میزان خطای مدل‌سازی توسط کاربر تعیین گردد. با توجه به توانایی‌های نرم‌افزار GMS برای نمایش دادن میزان خطا، برای واسنجی مدل از روش‌های مقایسه ترسیمی و مقایسه محاسبات آماری استفاده شده است. در روش مقایسه ترسیمی از نقشه‌های خطوط هم‌پتانسیل آب زیرزمینی و یا از نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر محاسباتی و مشاهداتی استفاده می‌شود. ولی در روش محاسبات آماری از میانگین مربع اختلاف‌های بین بارهای هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی، میانگین خطاها و قدر مطلق خطاها، برای بررسی میزان خطا استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز از دو روش بالا برای بررسی میزان این اختلاف استفاده شده است. لازم به ذکر است واسنجی مدل آبخوان بهاباد در مرحله پایدار و ناپایدار انجام شده است.

واسنجی کردن مدل به دو صورت دستی و خودکار انجام می‌گیرد. در روش دستی با سعی و خطا، پس از اجرای اولیه مدل، پارامترهای به‌کار رفته در مدل طی شرایط پایدار نظیر هدایت هیدرولیکی، شرایط مرزی، جریان‌ات ورودی و خروجی زیرزمینی تغییر می‌یابد. ولی در روش خودکار، این پارامترها توسط نرم‌افزارهای موجود تخمین زده شده و بهترین مقادیر برای مدل پیش‌بینی می‌شود. در این تحقیق از هر دو روش استفاده شده است.

۳-۱-۲-۴- صحت سنجی یا تایید مدل

هدف از صحت‌سنجی مدل این است که اثبات شود مدل می‌تواند شرایط صحرایی را شبیه‌سازی کند. در صورت تطابق شرایط شبیه‌سازی شده با شرایط صحرایی، از مدل برای پیش‌بینی‌های آینده استفاده می‌شود. در این تحقیق نیز با استفاده از داده‌هایی غیر از داده‌های مورد استفاده در مراحل واسنجی، برای بررسی صحت و تایید مدل استفاده شده است.

۳-۱-۳- مرحله پس پردازش

مرحله پس پردازش شامل ارائه و بررسی نتایج خروجی‌هاست و هم‌چنین پیش‌بینی سطح ایستابی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی است. زمانی که مدل ترجیحاً در دو حالت پایدار و ناپایدار واسنجی و صحت‌سنجی گردید می‌توان از آن برای پیش‌بینی آینده آبخوان استفاده کرد.

فصل چهارم: شبیه‌سازی جریان در آبخوان بهاباد با استفاده از مدل عددی

۴-۱- مقدمه

برای ساخت مدل عددی، در ابتدا بایستی مدل مفهومی (Conceptual Model) مناسب با طبیعت آبخوان برای نرم‌افزار تعریف شود که تهیه آن بستگی به اهداف مدل‌سازی، منابع موجود و آمار و اطلاعات میدانی دارد (اعتباری و یعقوب زاده ۱۳۸۸). در این فصل مراحل طراحی و اجرای مدل آب زیرزمینی به همراه نتایج بدست آمده ارائه شده است. این مراحل شامل تهیه مدل مفهومی، تعیین شرایط مرزی، شبکه‌بندی منطقه، وارد کردن پارامترها و داده‌های مختلف، واسنجی در شرایط پایدار و ناپایدار و صحت‌سنجی مدل و پیش‌بینی می‌باشد.

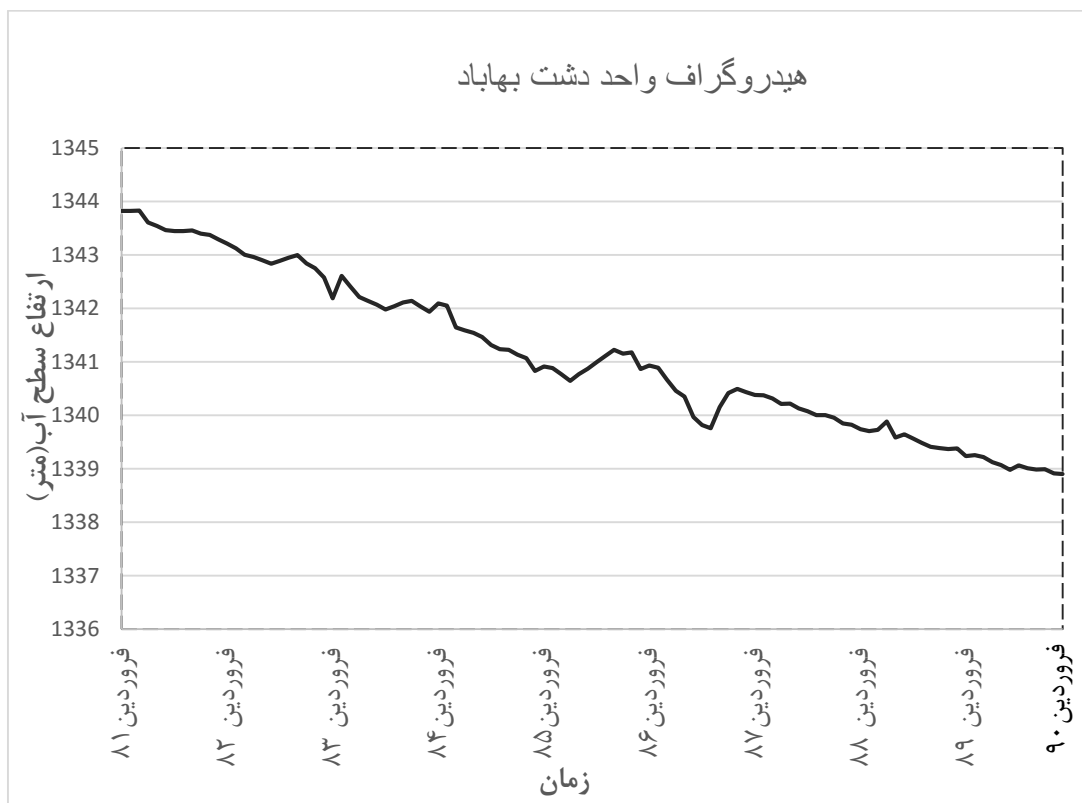
۴-۲- مدل مفهومی

مدل مفهومی مهم‌ترین و اساسی‌ترین مرحله در تهیه مدل جریان آب زیرزمینی می‌باشد. هدف از تهیه مدل مفهومی ساده کردن شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه و سازماندهی داده‌های صحرائی به منظور تجزیه و تحلیل سیستم می‌باشد. در فصل دوم اشاره شد که یکی از ویژگی‌های نرم‌افزار GIS تهیه مدل مفهومی با استفاده از نرم‌افزار GIS می‌باشد. در این تحقیق نیز با استفاده از این روش، ابتدا مدل مفهومی آبخوان بهاباد تهیه گردید. لازم به ذکر است که هرچه داده‌های مربوط به سیستم آبخوان بیشتر باشد تهیه مدل مفهومی راحت‌تر و دقیق‌تر خواهد بود. اولین مرحله برای تهیه مدل مفهومی آبخوان بهاباد وارد کردن نقشه زمین‌شناسی منطقه به محیط GIS و ژئورفرنس کردن آن توسط نرم‌افزار GIS می‌باشد. پس از ژئورفرنس کردن نقشه محدوده و مرز منطقه ترسیم و سپس با ایجاد لایه‌هایی شرایط

مرزی و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان به مدل وارد می‌شود و در مرحله آخر ساخت مدل مفهومی خصوصیات هندسی آبخوان به مدل نسبت داده می‌شود.

۴-۲-۱- شرایط اولیه

ابتدا مدل‌سازی در شرایط پایدار انجام می‌شود تا یک شرط اولیه برای وضعیت آبخوان برای مدل تعریف گردد. برای این منظور از داده‌های سطح آب اندازه‌گیری شده توسط ۱۴ حلقه چاه پیزومتری موجود در دشت استفاده گردید. برای تعیین بهترین زمان ممکن برای ساخت مدل پایدار هیدروگراف معرف دشت بهاباد برای بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۰ ترسیم گردید (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱- هیدروگراف معرف دشت بهاباد

با توجه به نوسانات کم هیدروگراف معرف دشت بهاباد در مهرماه سال ۱۳۸۷ این زمان به عنوان دوره پایدار انتخاب شد. داده‌های سطح آب در این ماه به مدل وارد و با روش IDW درونیابی و به همه

سلول‌ها تعمیم داده شد. در نهایت سطح آب به دست آمده در مدل پایدار به عنوان شرایط اولیه حالت ناپایدار در نظر گرفته می‌شود. ارتفاع سطح آب در مهرماه ۸۷ و مشخصات چاه‌های مشاهده‌ای در جدول (۱-۴) آمده است.

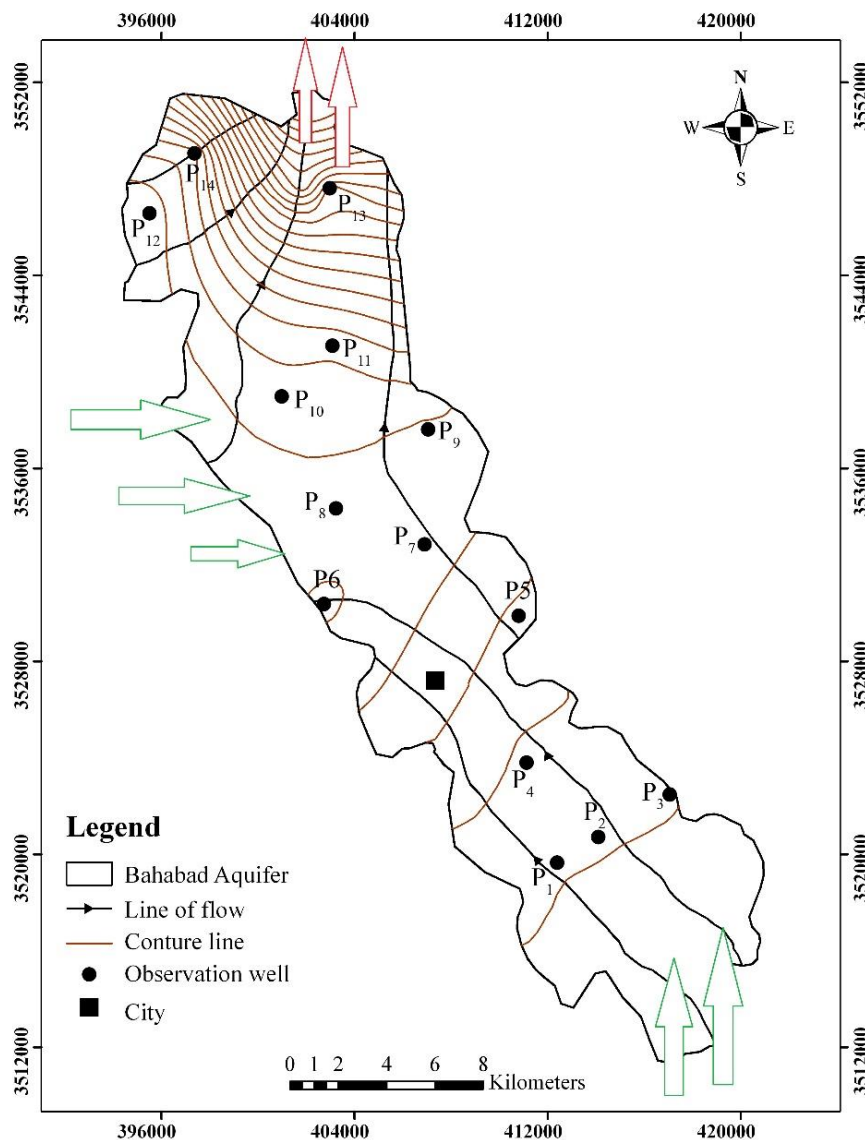
جدول ۱-۴- مختصات جغرافیایی چاه‌های مشاهده‌ای و ارتفاع سطح آب در مهر ۱۳۸۷

پیزومتر	UTM(x)	UTM(y)	سطح آب (m)	ارتفاع نقطه نشانه (m)
P1	412399	3519654	1360.40	1482.87
P2	414099	3520708	1360.86	1481.64
P3	415800	3522610	1360.36	1511.70
P4	411128	3523794	1356.53	1431.73
P5	410800	3529880	1351.14	1455.14
P6	402736	3530369	1336.17	1421.63
P7	406913	3532842	1341.69	1384.94
P8	403234	3534342	1344.07	1372.97
P9	407049	3537607	1334.87	1434.87
P10	400984	3538985	1338.13	1358.87
P11	403092	3541086	1334.36	1355.45
P12	395507	3546570	1335.11	1389.50
P13	402974	3547607	1300.26	1333.74
P14	397372	3549062	1335.33	1371.25

۴-۲-۲- تعیین شرایط مرزی مدل

هدف از تعیین شرایط مرزی ابتدا محدود کردن مدل‌سازی و نیز مشخص نمودن میزان ورودی و خروجی در مرز محدوده مدل‌سازی می‌باشد. با توجه به اینکه آبخوان بهاباد یک آبخوان آزاد می‌باشد و از آنجایی که تقریباً دور تا دور آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهد، به غیر از یک محدوده که به عنوان مرز فیزیکی در نظر گرفته شد سایر مرزهای اطراف آبخوان از نوع مرزهای هیدرولیکی تعریف گردید. با استفاده از نقشه هم‌پتانسیل آب زیرزمینی، مرزهای ورودی و خروجی آبخوان مشخص گردید. بر طبق این نقشه قسمت جنوب و غرب آبخوان به عنوان مرز ورودی و قسمت شمالی آبخوان به عنوان مرز خروجی در

نظر گرفته شد. بخش‌های شرقی آبخوان هم به دلیل وجود آهک‌های غیر قابل نفوذ به عنوان مرز نفوذ ناپذیر تعریف می‌شود. همچنین ارتفاع توپوگرافی و سنگ کف به عنوان مرزهای بالایی و پایینی مدل در نظر گرفته شد. شکل (۲-۴) جهت جریان و شرایط مرزی محدوده مدل‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- جهت جریان و شرایط مرزی مدل آبخوان بهاباد

از آنجایی که مرزهای محدوده مدل‌سازی از نوع هیدرولیکی می‌باشند، لذا از بسته مرز با بار هیدرولیکی عمومی برای این مرزها استفاده گردید. سطح آب در بسته با بار هیدرولیکی عمومی ثابت نمی‌باشد و

ممکن است با رسیدن اثر استرس‌های داخلی به مرز سطح آب تغییر نماید. دبی جریان ورودی یا خروجی با توجه به گرادیان هیدرولیکی در مرز و گذردهی یا ضریب هدایت مرز تغییر می‌نماید.

۴-۲-۳- پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان

عمده‌ترین پارامترهای هیدرولیکی شامل قابلیت انتقال، هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه می‌باشد.

الف) قابلیت انتقال

قابلیت انتقال در آبخوان بهاباد بر اساس مطالعات قبلی انجام گرفته در منطقه و نتایج آزمون‌های پمپاژ انجام شده در منطقه بدست آمده است. چهار زون برای قابلیت انتقال در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۳). هم‌چنین جدول (۴-۲) مقادیر تعیین شده قابلیت انتقال را نشان می‌دهد. در جنوب منطقه (زون A) مقادیر قابلیت انتقال بر اساس نتایج آزمون‌های پمپاژ حدود ۳۶۶۴ متر مربع بر روز تخمین زده شده است. مقدار قابلیت انتقال در زون B واقع در ناحیه غربی دشت با استفاده از تخلیه سالیانه چاه‌های بهره‌برداری که در محدوده محصور بین منحنی‌های هم پتانسیل قرار دارند بر اساس فرمول زیر حدود ۷۹۲ متر مربع بر روز تخمین زده شد.

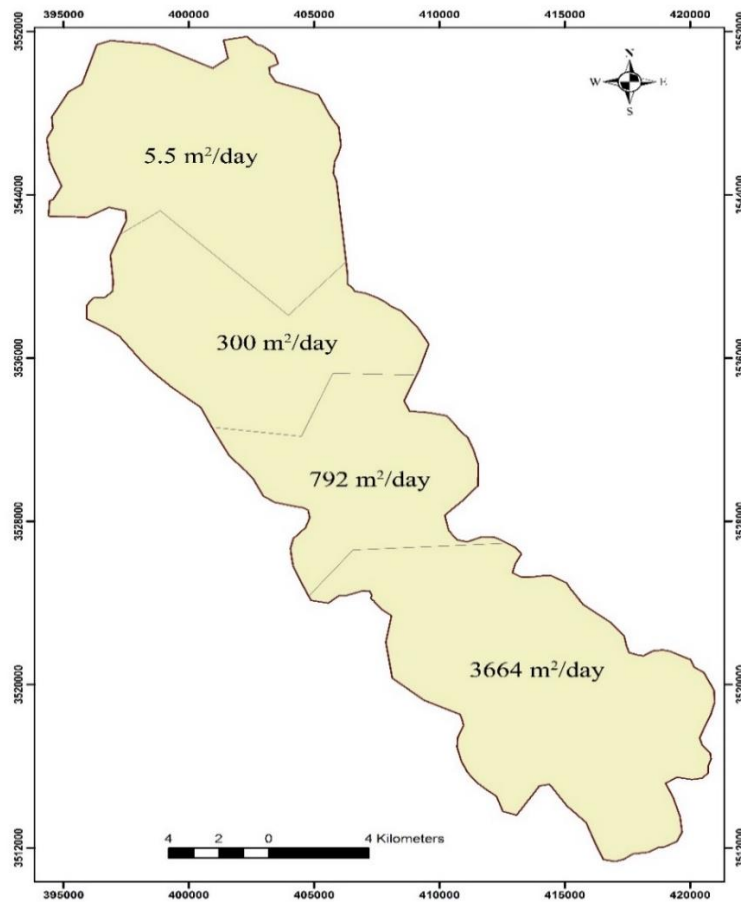
$$T = Q / [((w_1 + w_2) / 2) * i]$$

که در این فرمول W عرض خطوط کنتوری، i شیب هیدرولیکی، Q تخلیه سالانه چاه‌های واقع در منحنی‌های بسته و T قابلیت انتقال می‌باشد.

در بخش‌های میانی و شمالی قابلیت انتقال از حاصل ضرب هدایت هیدرولیکی (تعیین شده بر مبنای بافت خاک) و متوسط ضخامت اشباع آبخوان محاسبه شده است. مقادیر قابلیت انتقال در زون‌های C و D به ترتیب حدود ۳۰۰ و ۵/۵ متر مربع در روز برآورد شده است (شیر افکن، ۱۳۹۲).

جدول ۴-۲- مقادیر قابلیت انتقال در زون‌های مختلف آبخوان بهاباد

D	C	B	A	نام زون
۵/۵	۳۰۰	۷۹۲	۳۶۶۴	مقادیر قابلیت انتقال (m ² /day)



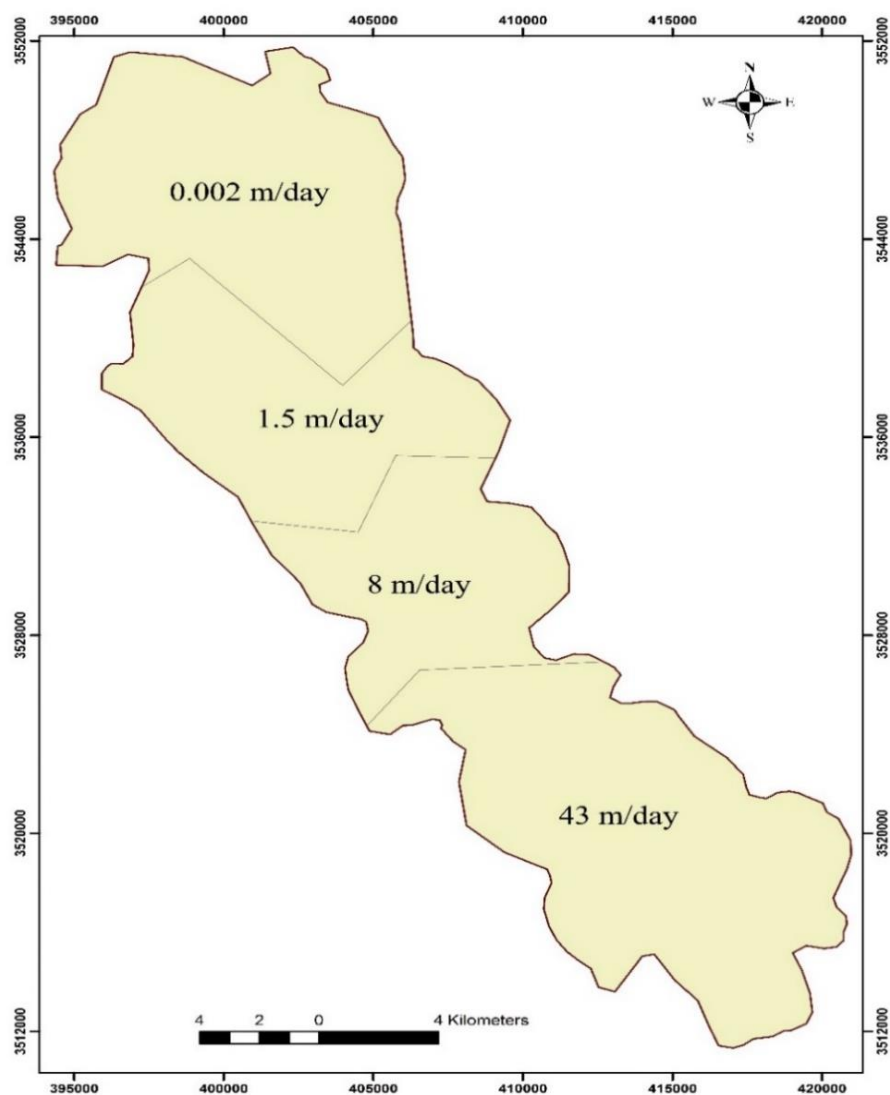
شکل ۴-۳- زون بندی قابلیت انتقال در آبخوان بهاباد

ب) هدایت هیدرولیکی

برای محاسبه هدایت هیدرولیکی آبخوان با استفاده از داده‌های سطح آب و داده‌های سنگ کف ضخامت اشباع آبخوان محاسبه شده و از تقسیم مقادیر قابلیت انتقال به ضخامت اشباع ضریب هدایت هیدرولیکی اولیه آبخوان محاسبه گردید. این مقادیر استفاده از بسته‌های در نظر گرفته شده در نرم‌افزار GMS به مدل اعمال گردید. مقادیر تعیین شده هدایت هیدرولیکی در جدول (۴-۲) آمده است. هم‌چنین شکل (۴-۴) زون بندی اولیه هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳- مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی در زون‌های مختلف آبخوان بهاباد

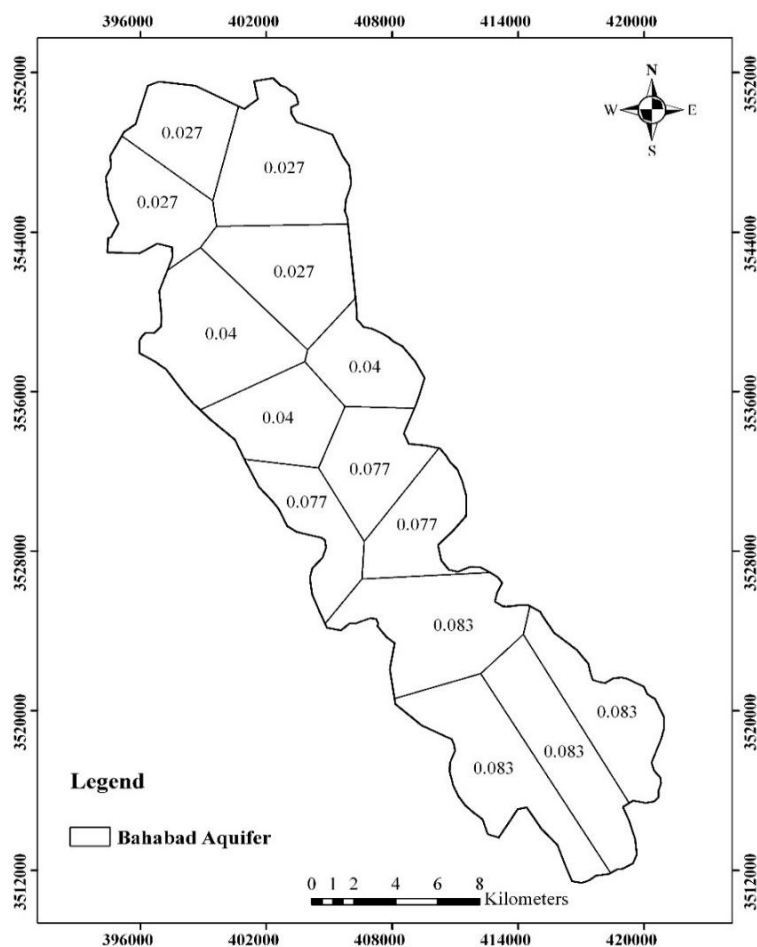
نام زون	A	B	C	D
مقادیر هدایت هیدرولیکی (m/day)	۴۳	۸	۱/۵	۰/۰۰۲



شکل ۴-۴- زون بندی اولیه هدایت هیدرولیکی در آبخوان بهاباد

ج) آبدهی ویژه

ضریب ذخیره یک آبخوان عبارت است از حجم آبی که هر واحد سطح از سطح افقی آبخوان به ازاء واحد افت سطح ایستابی (در آبخوان های آزاد) یا سطح پیزومتریک (در آبخوان های تحت فشار) می تواند آزاد کند. در آبخوان های آزاد ضریب ذخیره همان آبدهی ویژه می باشد. مقدار این پارامتر در آزمون های پمپاژ انجام شده در دشت بهاباد محاسبه نشده است. بنابراین آبدهی ویژه بر اساس بافت خاک در لوگ های حفاری و با توجه به مقادیر استاندارد در مراجع معتبر تعیین شده (شیرافکن، ۱۳۹۲) و در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- زون بندی اولیه آبدهی ویژه در آبخوان بهاباد

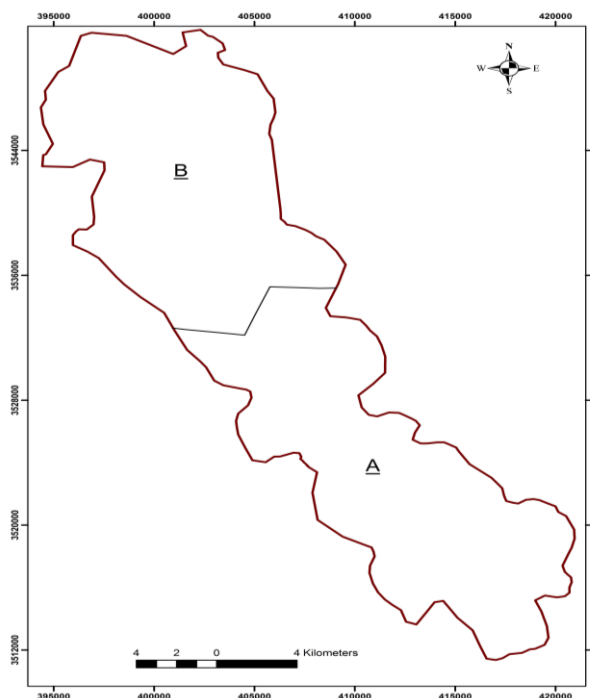
۴-۲-۴- تغذیه

در نرم افزار GMS با استفاده از بسته تغذیه نرخ تغذیه به مدل را می توان شبیه سازی نمود. در دشت بهاباد میزان تغذیه آبخوان وابسته به میزان تغذیه ناشی از بارندگی و آب برگشتی از چاه ها و قنات ها می باشد. مقدار بارندگی بر اساس داده های هواشناسی برای ماه هایی که بارندگی وجود داشت مشخص شد و سپس بر اساس نقشه خاک منطقه مقدار نفوذ ناشی از بارندگی در مناطق جنوبی آبخوان ۱۰ درصد و در مناطق شمالی ۵ درصد تعیین گردید. به منظور اعمال تغذیه ناشی از آب برگشتی از مصارف مختلف، مقدار ۱۵ درصد از دبی چاه های کشاورزی و ۵۰ درصد از دبی چاه های صنعتی و شرب کسر

گردید. از مجموع مقادیر تغذیه ناشی از بارندگی مقادیر کل تغذیه در آبخوان محاسبه شده و با تقسیم بندی آبخوان به دو منطقه تغذیه ای وارد نرم افزار گردید (شکل ۴-۶). با توجه به اینکه در مهرماه ۱۳۸۷ بارندگی صورت نگرفته است، لذا در حالت پایدار تغذیه ناشی از بارندگی صفر در نظر گرفته شد.

۴-۲-۵- تبخیر

در مناطقی که سطح آب زیرزمینی نزدیک سطح زمین باشد، با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و اختلاف ارتفاع سطح ایستابی با سطح زمین امکان تبخیر از سطح ایستابی آب زیرزمینی وجود دارد. نرم افزار GMS تبخیر از سطح ایستابی را به وسیله بسته تبخیر و تعرق شبیه سازی می نماید. در این بسته مواقعی که سطح ایستابی بالاتر یا هم سطح با سطحی که کاربر تعریف کرده است (سطح تبخیر و تعرق) قرار داشته باشد، تبخیر و تعرق صورت می پذیرد. با توجه به وضعیت اقلیمی ایران، تبخیر و تعرق معمولاً تا عمق ۲/۵ متری از سطح زمین قابل توجه و از عمق ۲/۵ تا ۵ متری این میزان خیلی ناچیز بوده و از عمق ۵ متر به بعد تقریباً به صفر می رسد (شمسائی، ۱۳۷۶). با توجه به اینکه عمق سطح آب در محدوده مدل سازی بیش از ۵ متر می باشد لذا میزان تبخیر و تعرق از سطح ایستابی آبخوان بهاباد قابل صرف نظر کردن می باشد.



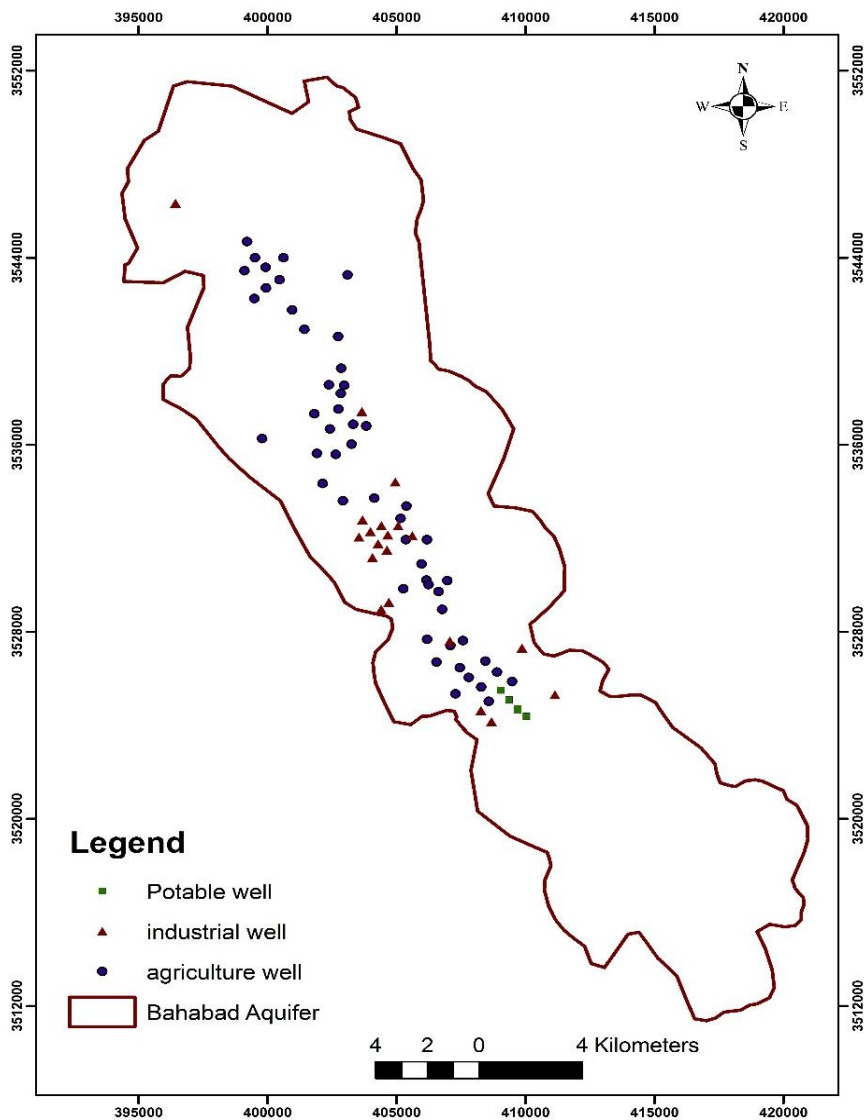
شکل ۴-۶- زون بندی تغذیه ناشی از بارش در آبخوان بهاباد

۴-۲-۶- رودخانه‌های فصلی و دائمی

برای اعمال رودخانه موجود در محدوده مدل‌سازی، ابتدا این مسیر در تصاویر ماهواره‌ای تعیین و در محیط GIS از آن پایگاه داده تهیه و با پسوند پلی لاین به محیط نرم‌افزار GIS وارد می‌گردد. از آنجاییکه رودخانه شور بهاباد آب زیرزمینی قسمت شمالی دشت بهاباد را زهکشی می‌کند برای اعمال تاثیر آن در مدل از بسته زهکش استفاده گردید.

۴-۲-۷- پارامترهای تخلیه

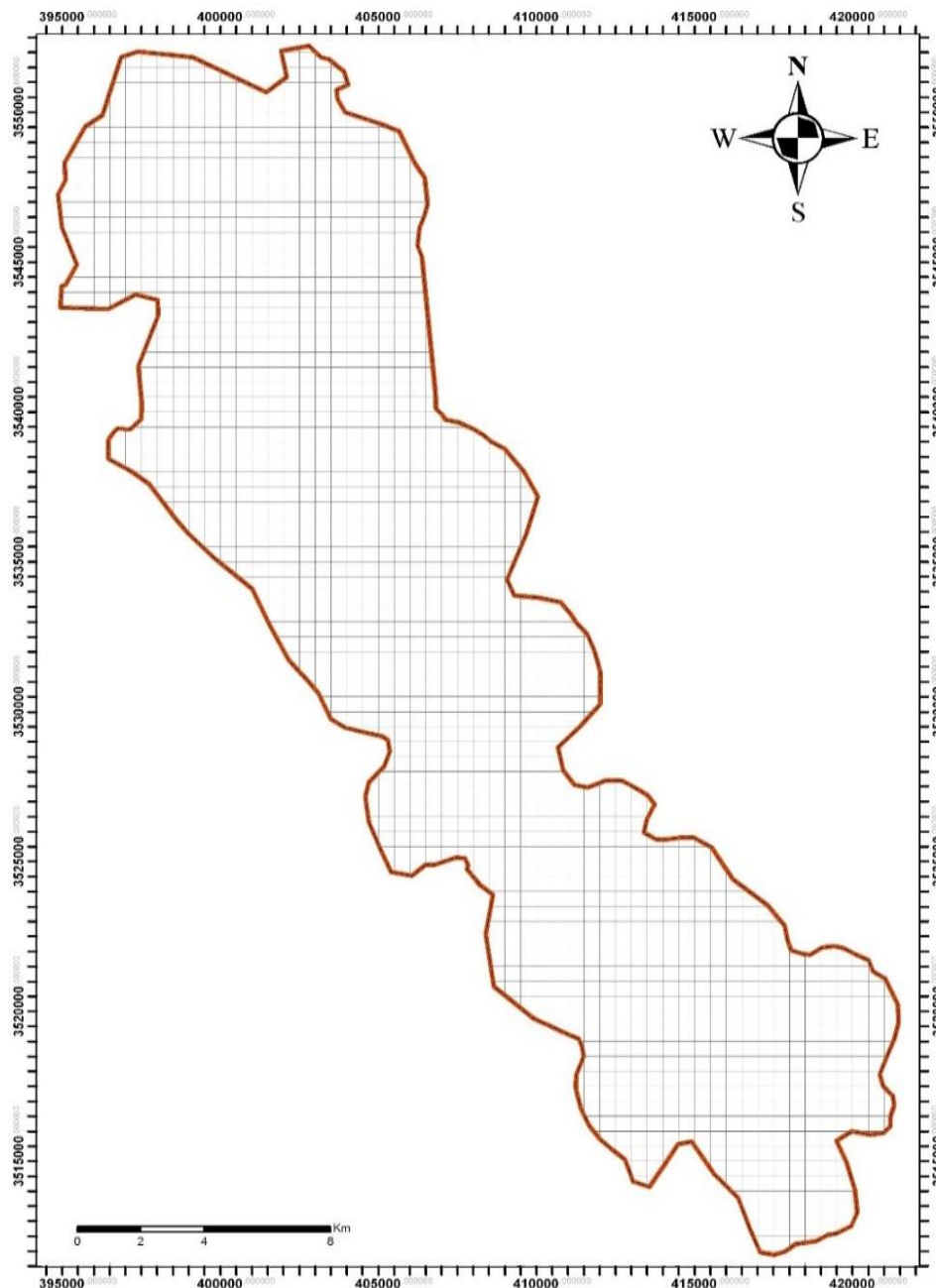
برای ورود اطلاعات مربوط به منابع آبی در منطقه از بسته چاه موجود در نرم‌افزار GIS استفاده شد. این بسته نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی میزان برداشت آب از چاه‌ها و یا مقدار تغذیه با جریان معین در یک دوره زمانی به کار می‌رود. به عبارتی مقادیر تخلیه و تغذیه توسط چاه به صورت جریان معین در مدل منظور می‌شود. این مقدار در هر گام زمانی مربوط به آبخوان، افزوده یا از آن برداشت خواهد گردید. در این بسته محل و دبی چاه مشخص می‌گردد. علامت منفی معرف برداشت و علامت مثبت معرف تغذیه می‌باشد. در آبخوان بهاباد ۷۸ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق وجود دارد که ۵۱ حلقه چاه جهت مصارف کشاورزی، ۲۲ حلقه چاه برای مصارف صنعتی و ۵ حلقه جهت مصارف شرب می‌باشد. تعداد سه حلقه قنات نیز در محدوده مدل‌سازی واقع شده است. شکل ۴-۷ چاه‌های بهره‌برداری و قنات‌های موجود در منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان بهاباد

۴-۲-۸- شبکه‌بندی مدل و گسسته‌سازی مکانی

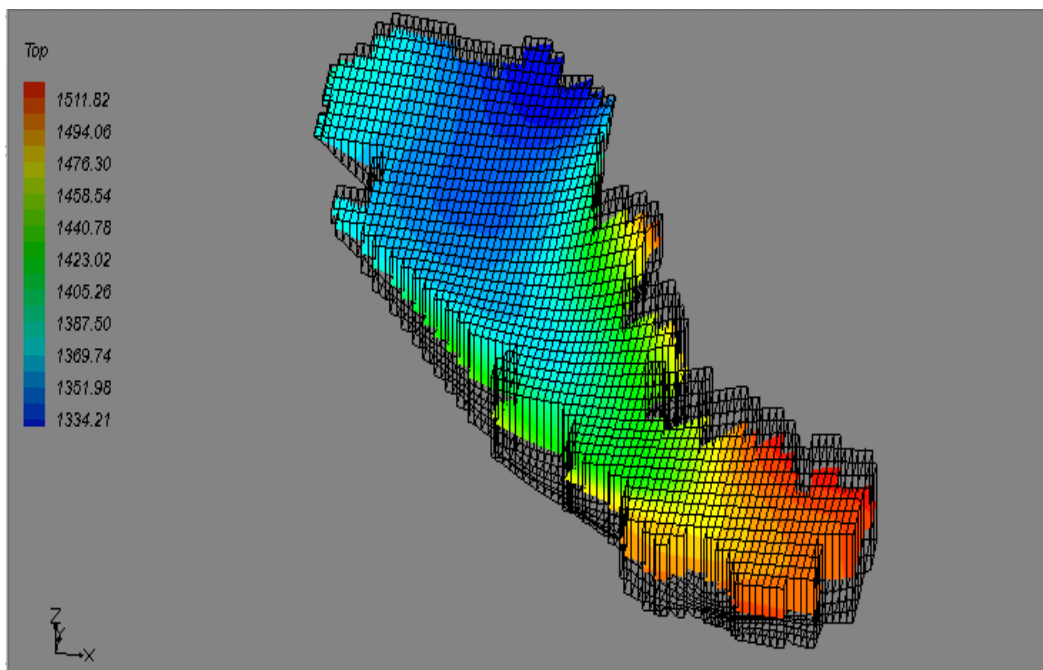
برای شبیه‌سازی جریان به روش تفاضل محدود لازم است که منطقه مورد مطالعه به تعدادی سلول تقسیم‌بندی گردد. هر قدر اطلاعات جمع آوری شده از آبخوان بیشتر باشد ابعاد سلول‌ها کوچکتر و تعداد سلول‌ها بیشتر و دقت محاسبات افزایش می‌یابد. در دشت بهاباد با در نظر گرفتن داده‌های در دسترس، شکل مرزهای آبخوان و وسعت منطقه، محدوده مدل به ۱۰۰ استون و ۵۸ ردیف از نوع مرکز بلوکی به ابعاد 250×250 متر شبکه‌بندی گردید. سپس سلول‌های فعال و غیرفعال مشخص شد (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸- شبکه‌بندی آبخوان بهاباد در مدل عددی (ابعاد سلول‌های شبکه ۲۵۰*۲۵۰ متر می‌باشد)

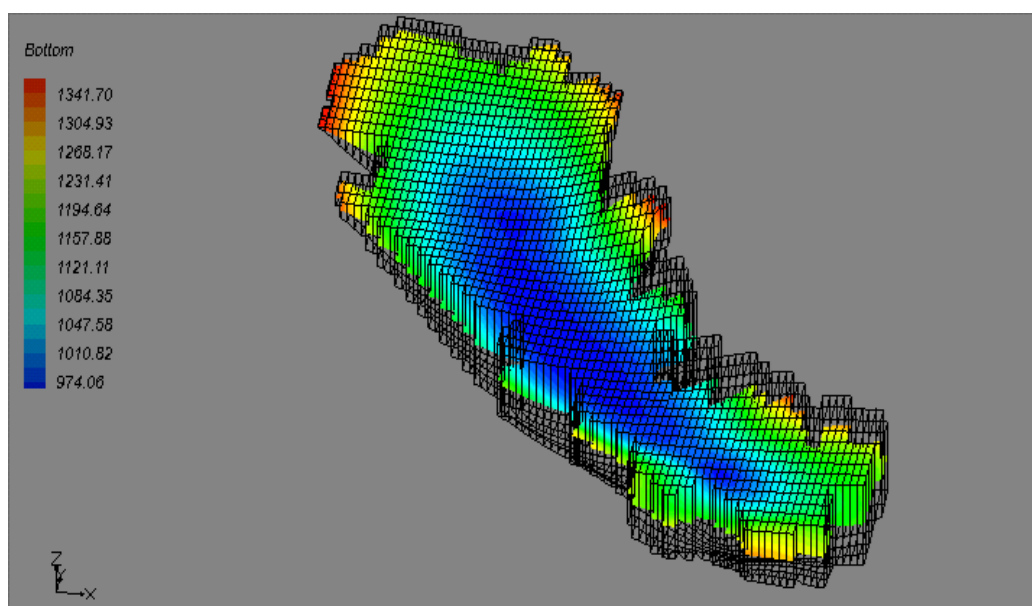
۴-۲-۹- وضعیت هندسی آبخوان

برای تعیین وضعیت هندسی آبخوان از نقشه‌های توپوگرافی و سنگ کف استفاده شد. توپوگرافی منطقه به صورت فایل text وارد نرم‌افزار مدل‌سازی گردید و در محیط GIS با استفاده از روش IDW درونیابی شد. سپس ارتفاع درونیابی شده به کل سلول‌های مدل نسبت داده شد (شکل ۴-۹).



شکل ۹-۴- ارتفاع توپوگرافی سطح آبخوان بهاباد (مقادیر بر حسب متر می باشد)

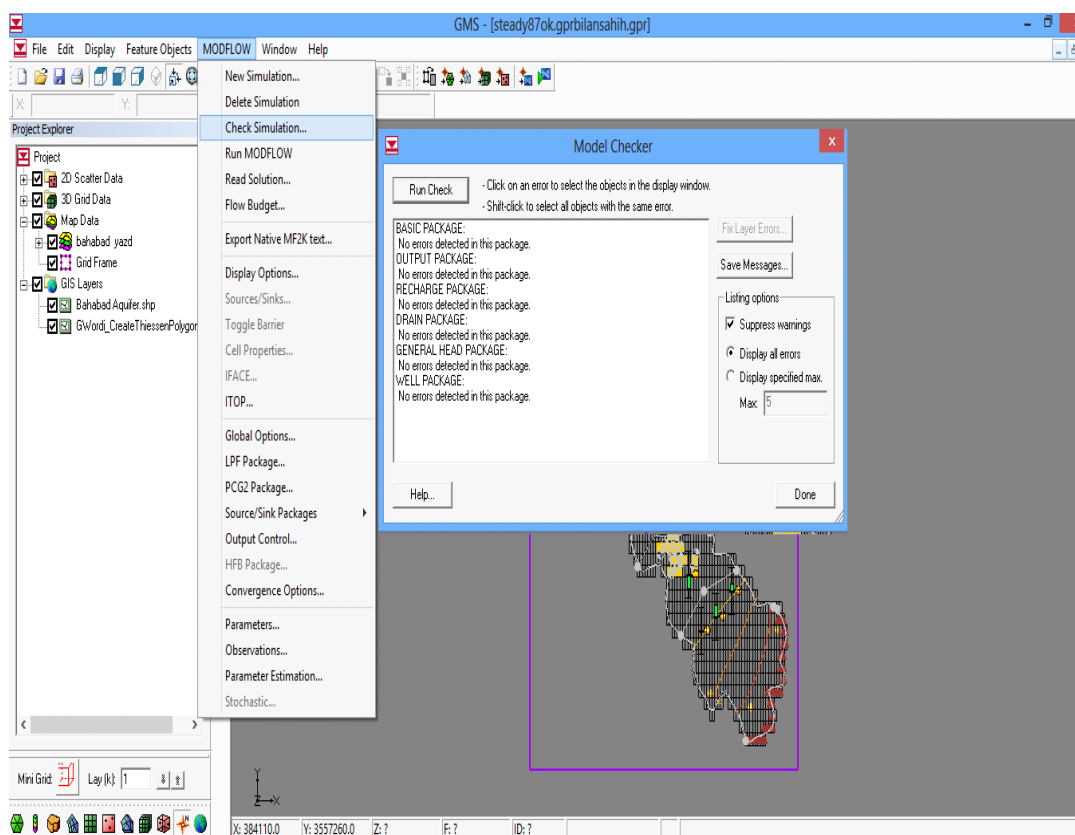
سنگ کف دشت بهاباد بر اساس گزارشات مطالعات ژئوفیزیکی، حداکثر عمق چاه‌ها، مقاطع و لاگ‌های زمین‌شناسی تعیین و به صورت فایل text وارد نرم‌افزار مدل‌ساز گردید. در محیط GMS با استفاده از روش IDW درونیابی شده، سپس به کل سلول‌های مدل نسبت داده شد (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰- نقشه تراز سنگ کف آبخوان بهاباد (مقادیر بر حسب متر می باشد)

۳-۴- اجرای مدل عددی در حالت پایدار

قبل از اجرای مدل، بهتر است از ابزار چک کننده مدل در مدول شبکه سه بعدی کارترین استفاده نمود و با استفاده از این ابزار تمام اطلاعات ورودی مدل را بررسی کرد و تمامی خطاهای نرم‌افزاری و هر نوع مشکل بالقوه و یا احتمالی را بررسی و حل نمود. در این تحقیق نیز ابتدا قبل از اجرای مدل از ابزار چک کننده برای بررسی خطاهای مدل طراحی شده استفاده گردید. شکل (۴-۱۱) پنجره مربوط به این چک کننده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مدل طراحی شده بدون هیچ خطایی در بسته‌های مختلف آماده اجرا می‌باشد. با اطمینان از نبود خطا مدل طراحی شده در حالت پایدار اجرا گردید. بعد از اجرای مدل ۹ حلقه از چاه‌های پیزومتری در محدوده خطا بوده و سبز رنگ می‌باشند که بیشتر در قسمت شمالی و جنوبی منطقه قرار دارند. ولی ۵ پیزومتر دیگر به رنگ قرمز بوده که نشان دهنده اختلاف بیش از حد مجاز در همد محاسبه شده آن‌ها در مقایسه با همد مشاهداتی می‌باشد.



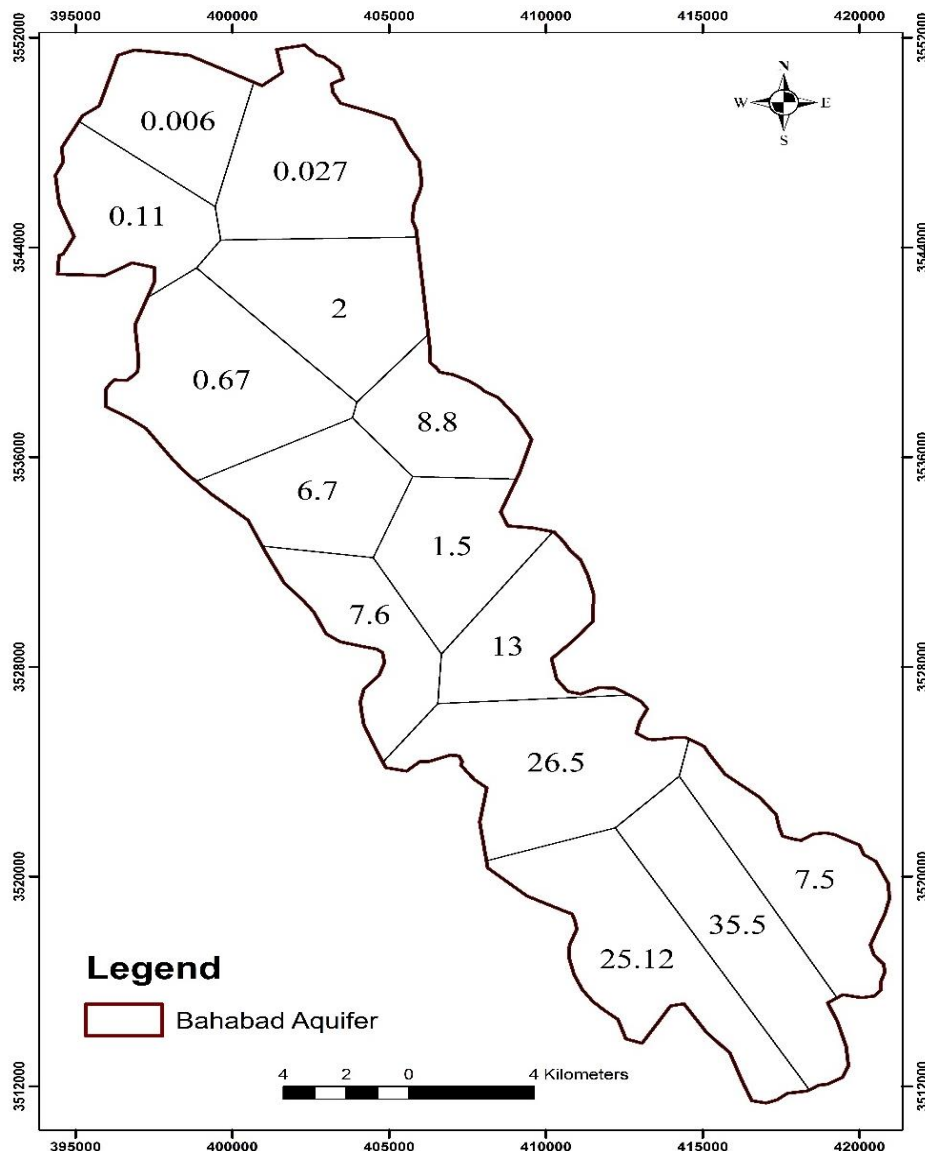
شکل ۴-۱۱- ابزار چک کننده قبل از اجرای مدل

۴-۳-۱- واسنجی کردن مدل در حالت پایدار

در این تحقیق از روش خودکار و از کد کامپیوتری Pest برای مرحله واسنجی استفاده گردید. لذا برای این منظور منطقه به ۱۴ پلی‌گون تقسیم‌بندی گردید و مقدار اولیه هدایت هیدرولیکی برای هر زون تعیین گردید. مدل در حالت معکوس اجرا گردید تا بهترین برازش بین بارهای هیدرولیکی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده حاصل گردد و مقدار بهینه هدایت هیدرولیکی برای محدوده مدل‌سازی تخمین زده شود. این عمل آنقدر تکرار شد تا اختلاف مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای به مقدار قابل قبولی از خطا برسد. این مقدار خطا بستگی به هدف مدل‌سازی دارد که در این تحقیق ۱ متر می‌باشد. در نتیجه واسنجی مدل، هدایت هیدرولیکی بهینه در ۱۴ زون تعیین گردید (جدول ۴-۳). در پایان مرحله واسنجی تمامی پیزومترها در محدوده خطای مجاز قرار گرفتند. شکل (۴-۱۲) نیز زون‌بندی نهایی هدایت هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴- مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی در پایان واسنجی حالت پایدار

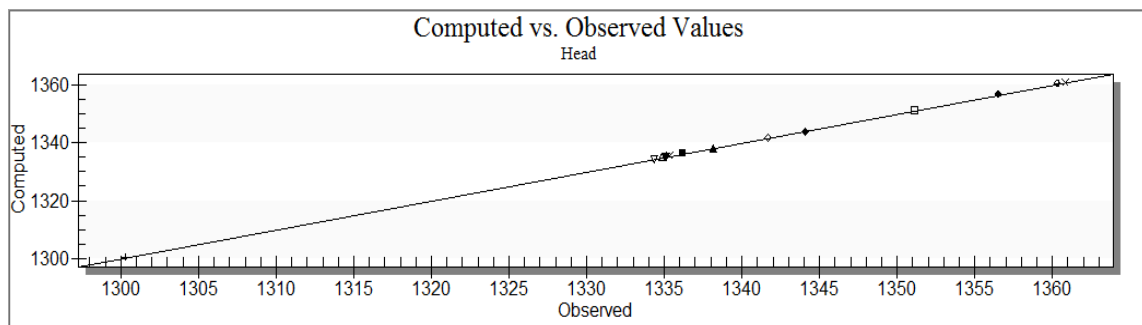
شماره زون	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
مقادیر هدایت هیدرولیکی (m/day)	۲۵/۱۲	۳۵/۵	۷/۵	۲۶/۵	۱۳	۷/۶	۱/۵
شماره زون	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
مقادیر هدایت هیدرولیکی (m/day)	۶/۷	۸/۸	۰/۶۷	۲	۰/۱۱	۰/۰۲۷	۰/۰۰۶



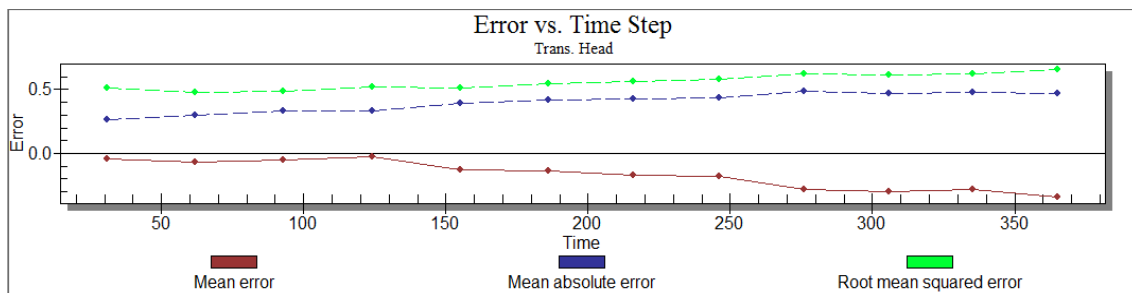
شکل ۴-۱۲- زون بندی نهایی هدایت هیدرولیکی در مرحله واسنجی
(مقادیر بر حسب متر در روز می باشد)

همانگونه که در جدول (۳-۴) قابل مشاهده است، مقادیر هدایت هیدرولیکی بین 0.006 تا 35.5 متر در روز قرار می گیرد. به دلیل بافت دانه درشت رسوبات در جنوب منطقه مقدار هدایت هیدرولیکی بالاتر از دیگر مناطق دشت می باشد. در شمال منطقه به دلیل اینکه بافت غالب رسوبات، رسی می باشد کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. با توجه به تجمع چاه های بهره برداری در محدوده میانی دشت، این محدوده بایستی دارای هدایت هیدرولیکی بالاتری نسبت به کناره دشت داشته باشد. به طور کلی با کاهش اندازه ذرات از جنوب به سمت شمال دشت مقدار هدایت هیدرولیکی کاهش می یابد. شکل

(۱۳-۴) نتایج برازش مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای درآبخوان بهاباد پس از مرحله واسنجی در حالت پایدار را نشان می‌دهد. میانگین خطاها، قدر مطلق و میانگین مجذور مربع خطاها در پایان مرحله واسنجی پایدار محاسبه شده که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در حالت پایدار



شکل ۴-۱۴- میانگین خطاها، قدر مطلق و میانگین مجذور مربع خطاها در واسنجی حالت پایدار

۴-۴- اجرای مدل عددی در حالت ناپایدار

۴-۴-۱- گسسته‌سازی زمانی مدل برای حالت ناپایدار

حالت ناپایدار برای فروردین ۱۳۸۸ تا اسفند ۱۳۸۸ در نظر گرفته شده و این زمان به ۱۲ دوره یک ماهه تقسیم گردید. فرض شد که تنش‌ها در طول هر دوره ثابت می‌باشد. از آنجایی که اندازه‌گیری از سطح آب چاه‌های پیژومتری به صورت ماهیانه انجام می‌گیرد افزایش تعداد پله‌های زمانی تاثیر چندانی روی نتایج مدل نخواهد داشت. شکل (۴-۱۵) نحوه تقسیم‌بندی زمانی در نرم‌افزار GMS را نشان می‌دهد.

	Start	Length	Num Time Steps	Multiplier	Steady state
▶ 1	0.0	93.0	3	1.0	<input type="checkbox"/>
2	93.0	93.0	3	1.0	<input type="checkbox"/>
3	186.0	90.0	3	1.0	<input type="checkbox"/>
4	276.0	89.0	3	1.0	<input type="checkbox"/>
End	365.0				<input type="checkbox"/>

شکل ۴-۱۵- دوره‌های تنش و طول آنها (بر حسب روز) در اجرای مدل عددی در حالت ناپایدار

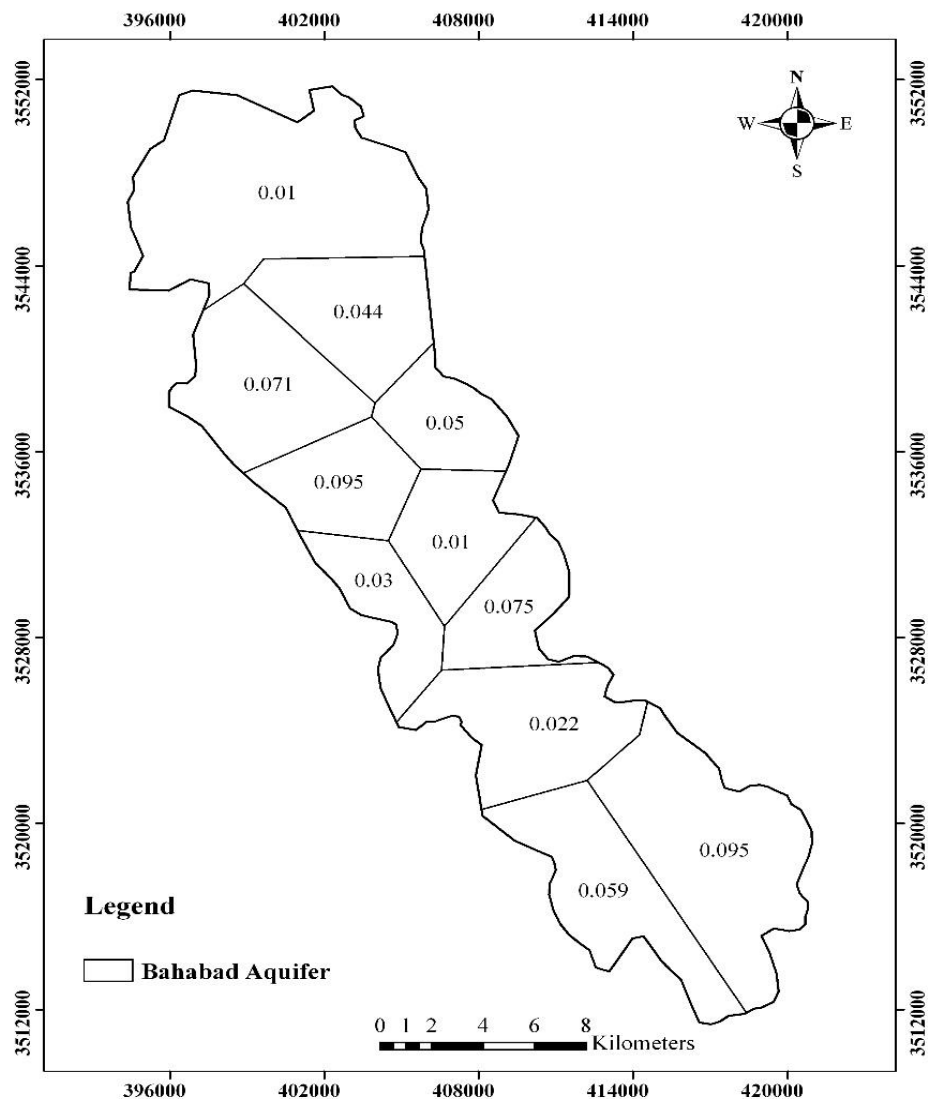
بعد از گسسته‌سازی زمانی و ورود داده‌ها بر اساس دوره‌های تنش انتخاب شده، باید مدل دوباره اجرا گردد تا مقادیر مجهول محاسبه گردند. در این مرحله نیز ابتدا قبل از اجرا با استفاده از ابزار چک‌کننده، مدل طراحی شده چک گردید و خطاهای آن برطرف گردید. بعد از رفع خطاهای موجود، مدل اجرا گردید. در اجرای مدل در حالت ناپایدار اکثر پیژومترها به رنگ سبز بوده که نشان از صحت تقریبی داده‌های ورودی می‌باشد. ولی با توجه به ناهمگنی محیط، ساده‌سازی‌ها و هم‌چنین خطاهایی که در روند مدل‌سازی وجود دارد، مقادیر محاسباتی دقیقاً با مقادیر اندازه‌گیری شده یکی نبوده و اختلافی بین این مقادیر دیده می‌شود. به منظور کاهش این اختلاف مدل باید واسنجی گردد.

۴-۴-۲- واسنجی مدل در حالت ناپایدار

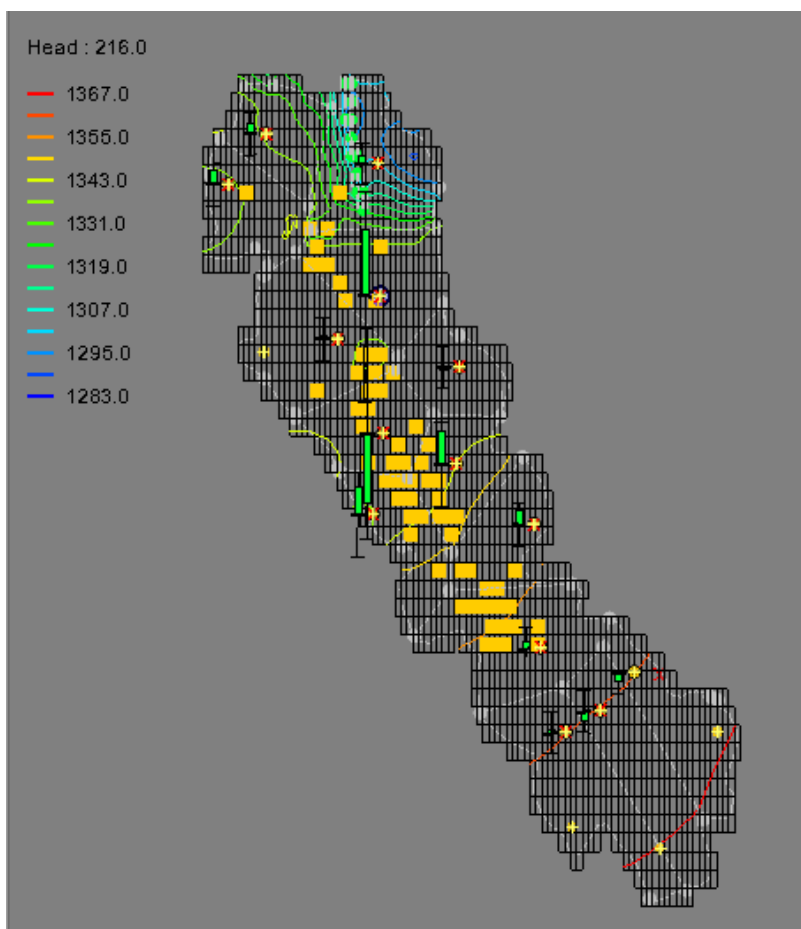
مدل در حالت ناپایدار نیز باید واسنجی گردد تا مقادیر سطح آب مشاهداتی و اندازه‌گیری شده در محدوده خطای مجاز قرار گیرند. در مرحله ناپایدار پارامتر آبدهی ویژه به مدل اضافه گردید. با توجه به عدم اندازه‌گیری این پارامتر در دشت بهاباد مقادیر آن با عدم قطعیت همراه می‌باشد. هم‌چنین داده‌های پمپاژ چاه‌ها نیز دارای عدم قطعیت بوده که این عامل نیز باعث بوجود آمدن خطا در مدل عددی می‌گردد. با توجه به این موارد پارامترهای دارای عدم قطعیت در این مرحله بهینه شدند. مقادیر آبدهی ویژه بهینه‌شده در محدوده آبخوان بهاباد در ۱۱ زون (شکل ۴-۱۶) بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۹۵ می‌باشد. با

توجه به اینکه آبخوان بهاباد از نوع آزاد است، این مقادیر قابل قبول می‌باشد. شکل ۴-۱۷ نقشه نهایی خطوط تراز سطح ایستابی در پایان مرحله واسنجی در حالت ناپایدار را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود انطباق بسیار خوبی بین این نقشه و نقشه سطح ایستابی آبخوان (شکل ۴-۲) وجود دارد که نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی می‌باشد.

همچنین بیلان آبخوان در سال ۱۳۸۸ نیز در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است. انطباق نسبتاً خوب مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در پیرومترها و تفاوت اندک مقدار داده‌های ورودی و خروجی در بیلان، حاکی از شبیه‌سازی قابل قبول مدل آبخوان بهاباد است.



شکل ۴-۱۶- مقادیر بهینه‌شده آبدهی ویژه در زون‌های مختلف آبخوان بهاباد



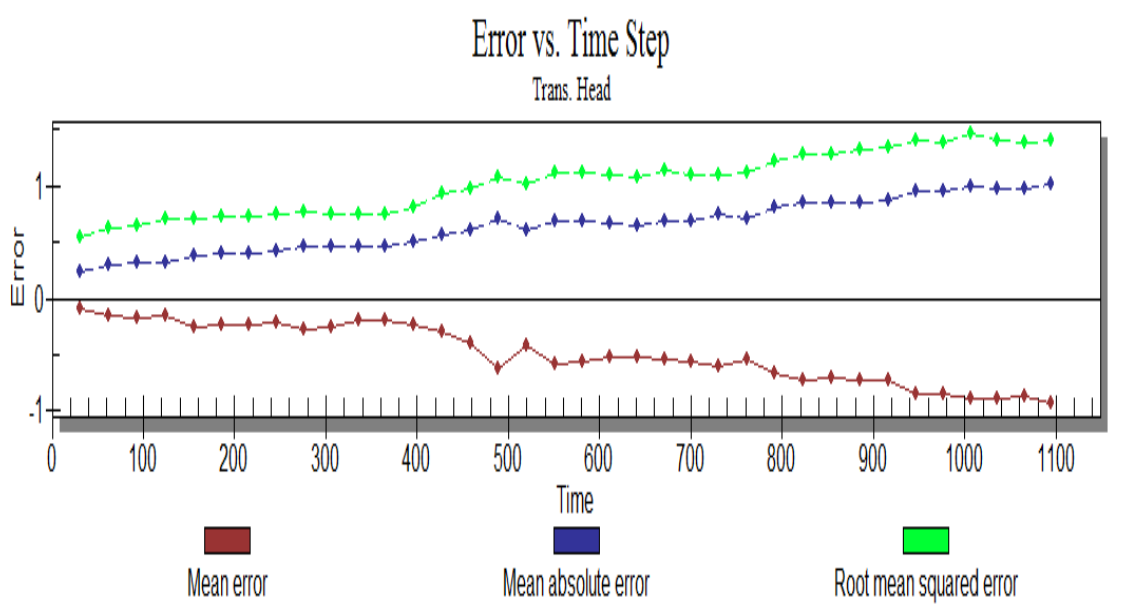
شکل ۴-۱۷- نقشه هم‌پتانسیل آبخوان بهاباد شبیه‌سازی توسط مدل عددی در پایان مرحله واسنجی در حالت ناپایدار (مقادیر بار هیدرولیکی بر حسب متر می‌باشد)

Timestep 12	
Time: 365.0	
IN:	
STORAGE	36717.762613297
CONSTANT HEAD	0.0
WELLS	0.0
DRAINS	0.0
HEAD DEP BOUNDS	50281.686406679
RECHARGE	9255.6059315205
Total IN	96255.054951496
OUT:	
STORAGE	1795.1327400208
CONSTANT HEAD	0.0
WELLS	66336.554779053
DRAINS	2264.0891547203
HEAD DEP BOUNDS	25863.138071188
RECHARGE	0.0
Total OUT	96258.914744982
SUMMARY:	
IN - OUT	-3.859793485608
Percent Discrepancy	-0.004009884053

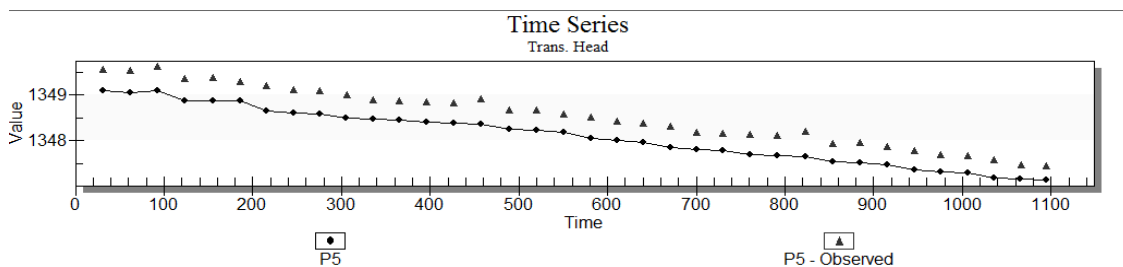
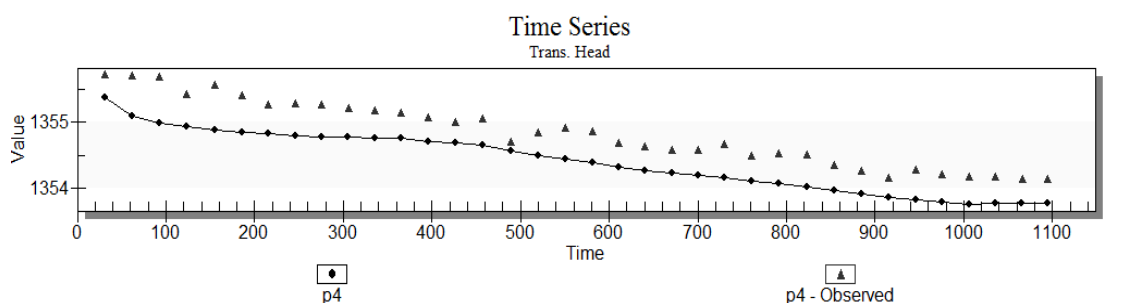
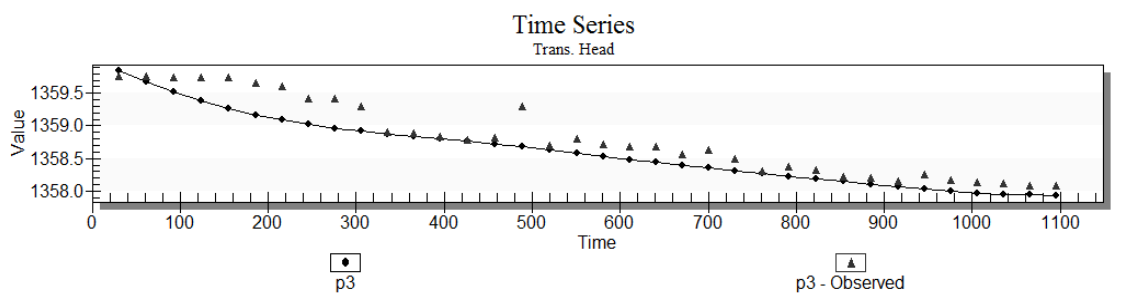
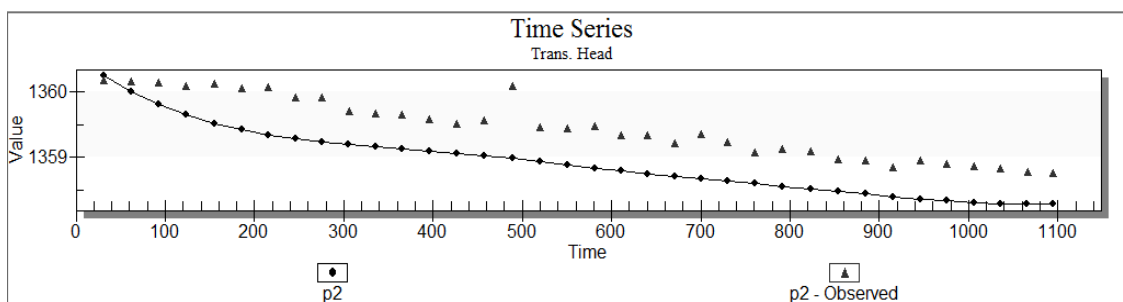
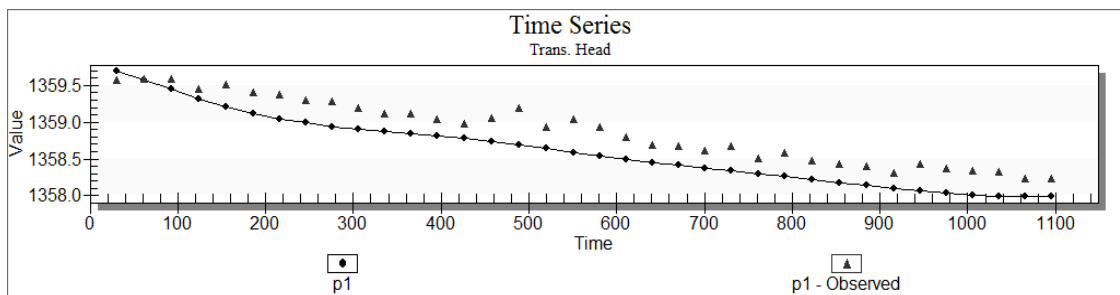
شکل ۴-۱۸- نتایج بیلان مدل و درصد اختلاف بین ورودی‌ها و خروجی‌ها

۴-۵- صحت‌سنجی مدل

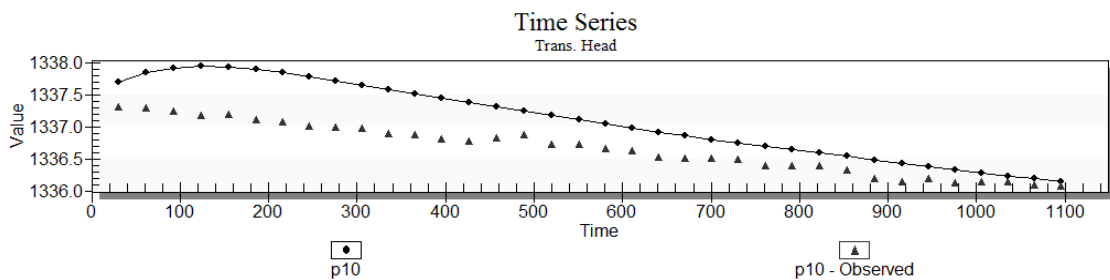
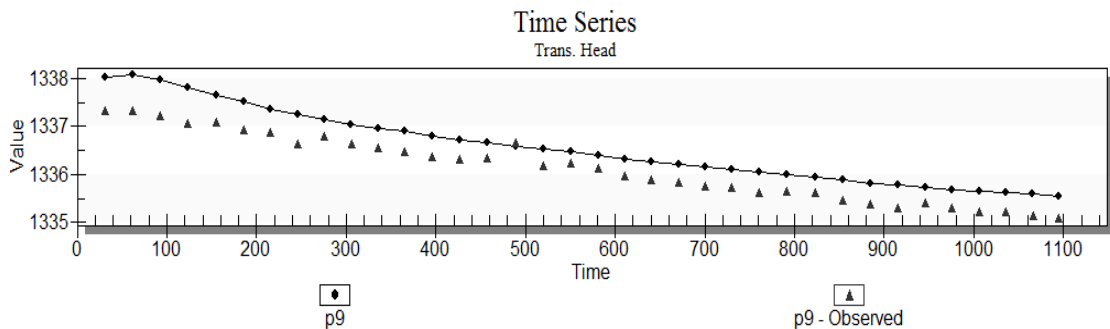
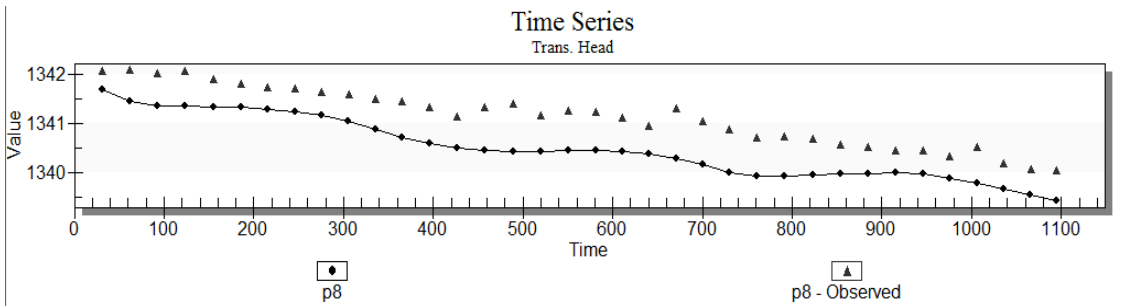
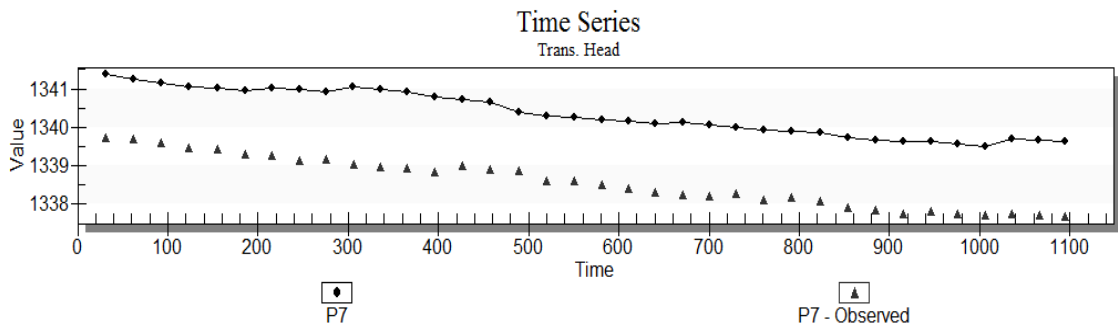
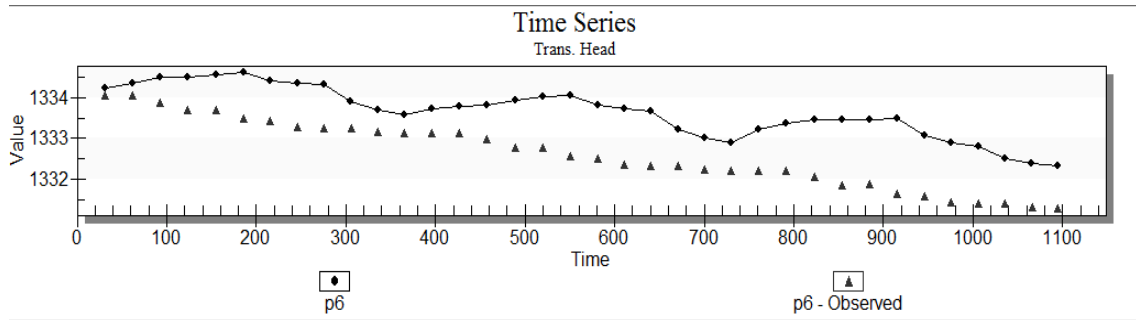
در این مرحله با استفاده از داده‌هایی که تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته است، مدل اجرا گردید تا در صورتی که بدون تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه، مدل وضعیت سطح آب منطقه را در حد قابل قبولی محاسبه نماید، صحت مدل مورد تایید قرار گیرد. برای این منظور از داده‌ها و اطلاعات فروردین ۹۱ تا اسفند ۹۳ استفاده گردید و اطلاعات در قالب دوره‌های تنش ماهیانه در مدل اعمال گردید. مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفت. اجرای مدل در این مرحله با میزان خطای مناسبی همراه بود شکل (۴-۱۹) میانگین خطا، قدر مطلق و میانگین مجذور مربع خطاها در دوره صحت‌سنجی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده صحت مدل ساخته شده است. شکل ۴-۲۰ هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی چاه‌های پیزومتری موجود در محدوده مدل‌سازی را در دوره صحت‌سنجی نشان می‌دهد. انطباق نسبتاً مناسبی بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی دیده می‌شود که بیانگر صحت مدل عددی در شبیه‌سازی آبخوان بهاباد می‌باشد.



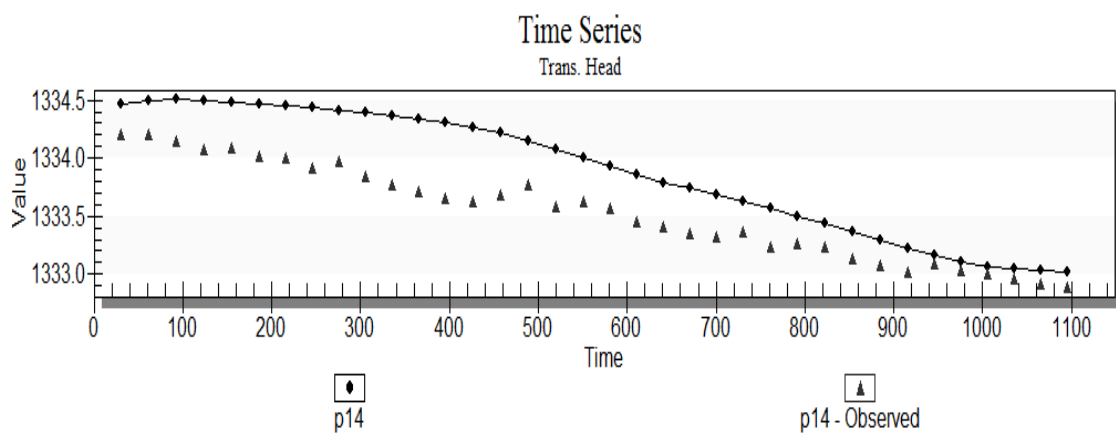
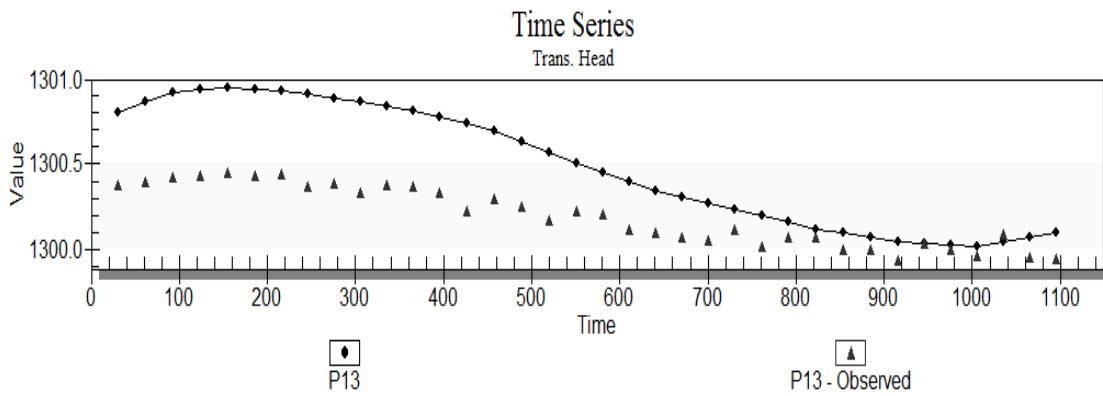
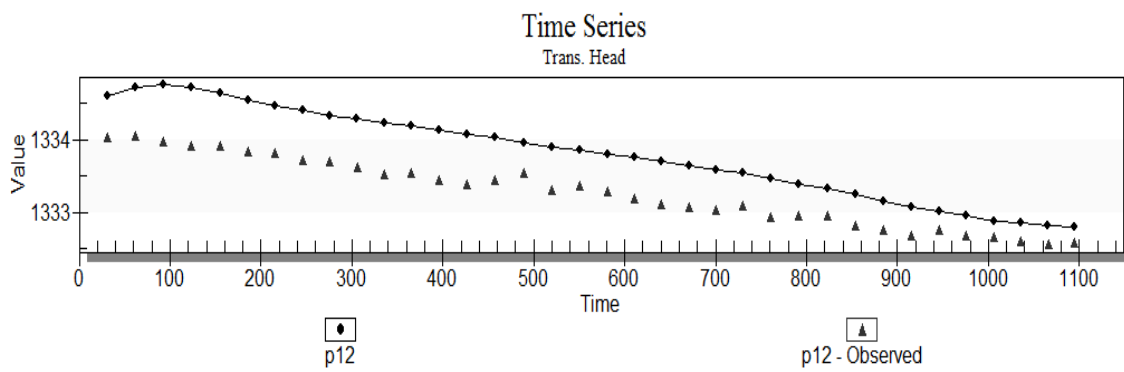
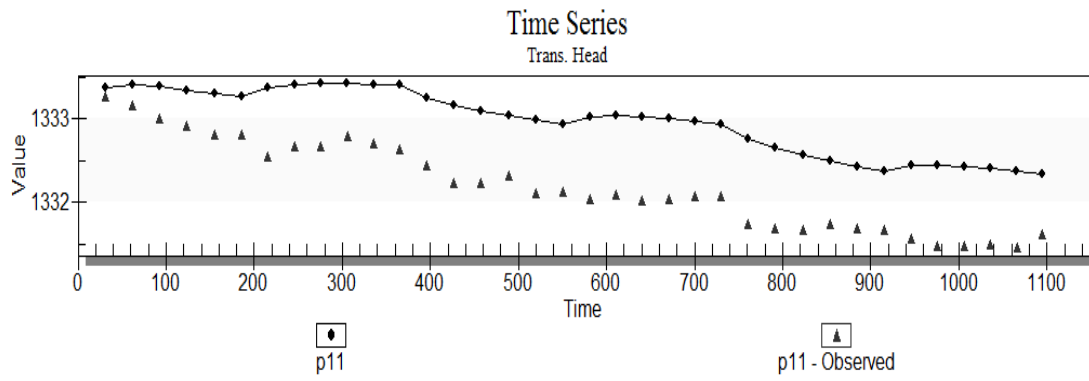
شکل ۴-۱۹- میانگین خطاها، قدر مطلق و میانگین مجذور مربع خطاها



شکل ۴-۲۰- مقایسه هیدروگراف اندازه‌گیری شده (با علامت ▲) و شبیه‌سازی شده (با علامت ●) پیزومترها در آبخوان بهاباد در دوره صحت‌سنجی



شکل ۴-۲۰- ادامه



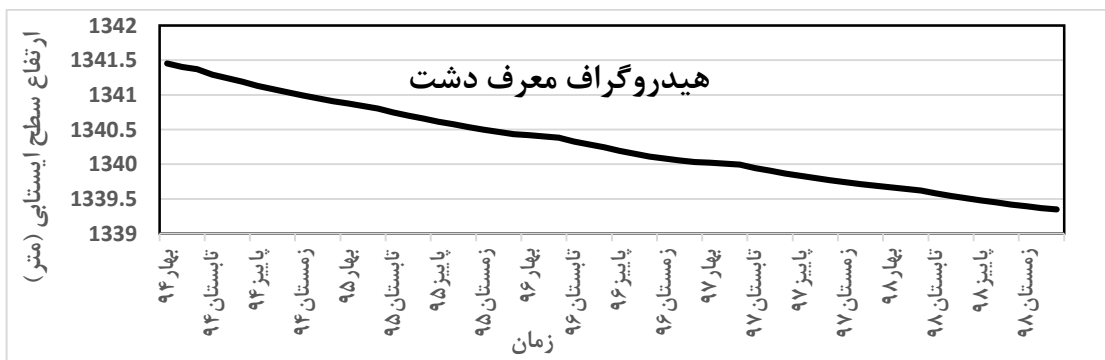
شکل ۴-۲۰- ادامه

۴-۶- پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان در شرایط مختلف

پس از انجام مراحل واسنجی و صحت‌سنجی و تایید مدل، از مدل ساخته شده برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی که هدف اصلی اکثر مدل‌سازی‌ها است، استفاده شد. با توجه به عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی آبخوان در آینده و معلوم نبودن دوره‌های هیدرولوژیکی کم‌آب، عادی و مرطوب و ترتیب وقوع آن‌ها لازم است بر اساس شرایط آبخوان تعدادی سناریو برای وضعیت آبخوان در آینده تعیین شده و مدل‌سازی بر اساس این سناریوها انجام شود. در این بخش به پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای شش‌گانه شامل: ۱- ادامه روند فعلی، ۲- خشکسالی (کاهش ۵۰٪ میزان بارندگی)، ۳- ترسالی (افزایش ۱/۵ برابری تغذیه ناشی از بارندگی)، ۴- اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری تا حد مجاز، ۵- اصلاح دبی چاه‌های صنعتی تا حد مجاز و ۶- اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری تا حد کسری بیلان پرداخته می‌شود.

۴-۶-۱- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط ادامه روند فعلی آبخوان (سناریوی اول)

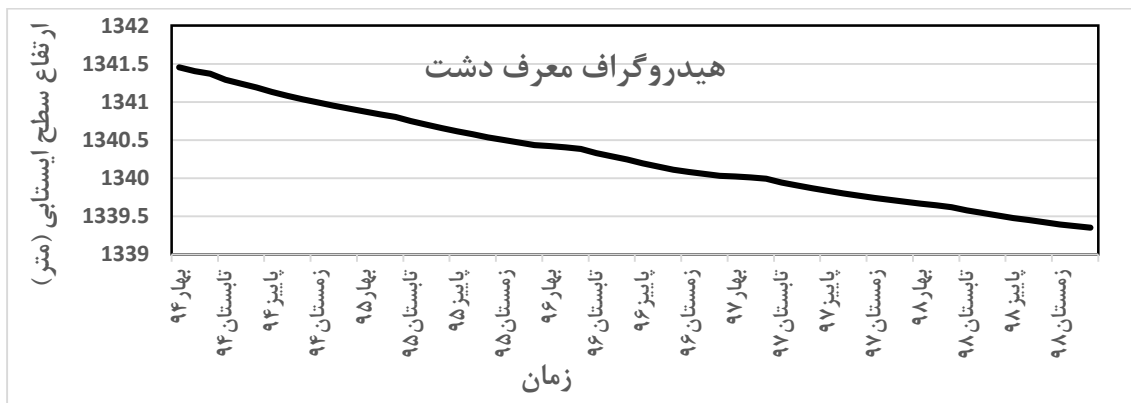
در سناریوی اول فرض شده است که کلیه عوامل تغذیه و تخلیه آبخوان روندی نظیر قبل داشته باشند. در این سناریو مقادیر برداشت از طریق چاه‌ها روند قبلی خود را حفظ کرده و تغذیه از طریق نفوذ بر اساس میانگین بارش ۲۲ سال گذشته می‌باشد. هیدروگراف معرف آبخوان برای ۵ سال پیش‌بینی در شکل (۴-۲۱) ارائه شده است. همانطور که در شکل مشخص است طی این ۵ سال مقدار ۲/۳ متر سطح آب زیرزمینی افت پیدا کرده و با این مقدار افت حدود ۴۲/۹۳ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی کاهش پیدا خواهد کرد.



شکل ۴-۲۱- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۵ سال در صورت ادامه روند فعلی (سناریوی اول)

۴-۶-۲- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط ترسالی (سناریوی دوم)

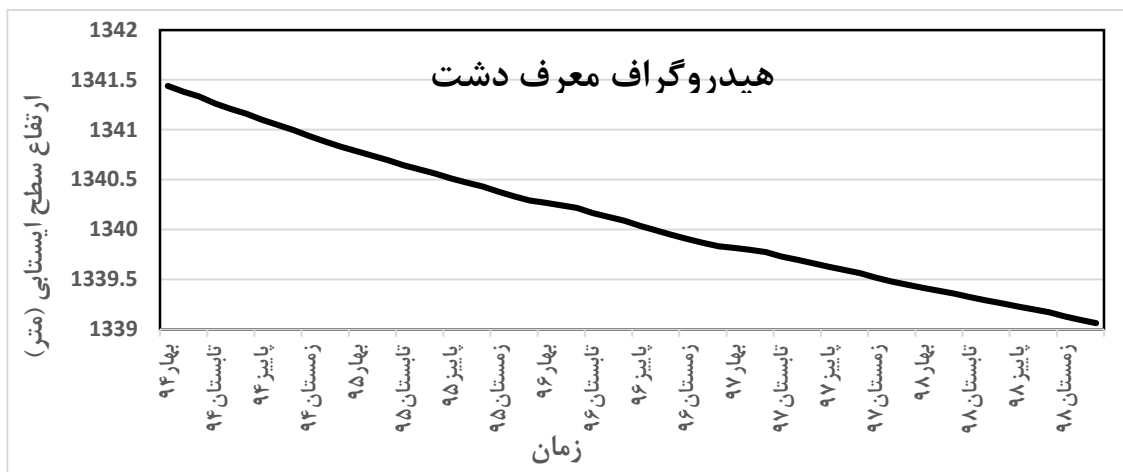
در این سناریو وضعیت آبخوان در طی ۵ سال با این فرض که در این سال‌ها بارش به میزان ۱/۵ برابر میانگین بارش بلندمدت باشد، پیش‌بینی شده است. این سناریو به سناریوی ترسالی معروف است و در آن بدون تغییر سایر پارامترها، میزان تغذیه به ۱/۵ برابر میزان تغذیه متوسط آبخوان افزایش می‌یابد. هیدروگراف معرف سطح آب در آبخوان بهاباد در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است طی ۵ سال دوره پیش‌بینی در صورتی که مقدار بارش را ۱/۵ برابر میانگین چند سال گذشته قرار دهیم، مقدار ۲/۲ متر سطح آب افت پیدا کرده و با این مقدار افت، ۴۲/۰۶ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی آبخوان کاهش پیدا خواهد کرد. این موضوع تاثیر اندک تغذیه مستقیم از سطح دشت بر بیلان آبخوان را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۲- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۵ سال در شرایط ترسالی (سناریوی دوم)

۴-۶-۳- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط خشک‌سالی (سناریوی سوم)

در این سناریو با این فرض که در ۵ سال آینده شرایط خشک‌سالی بر دشت حاکم باشد، مدل عددی اجرا شد. و سطح آب برای آبخوان پیش‌بینی گردید. برای شبیه‌سازی شرایط خشک‌سالی میزان میانگین بارش به نصف کاهش داده شد. هیدروگراف معرف دشت تحت شرایط خشک‌سالی برای ۵ سال آتی در شکل (۴-۲۳) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است طی ۵ سال دوره پیش‌بینی در صورتی که مقدار بارش را نصف میانگین چند سال گذشته قرار دهیم، مقدار ۲/۴ متر سطح آب افت پیدا کرده و با این مقدار افت حدود ۴۴/۷۹ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی کاهش پیدا خواهد کرد.

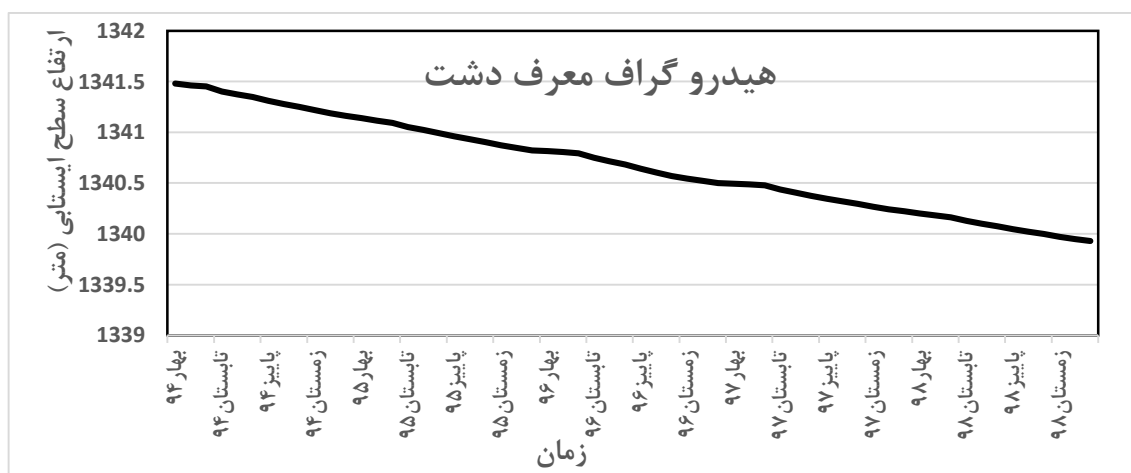


شکل ۴-۲۳- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۵ سال در شرایط خشکسالی (سناریوی سوم)

۴-۶-۴- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط اصلاح دبی چاه‌های صنعتی (سناریوی

چهارم)

در این بررسی، دبی هر یک از چاه‌های صنعتی برابر دبی مجاز آن‌ها در نظر گرفته شد و دبی سایر چاه‌های بهره‌برداری بدون تغییر ماند. آینده آبخوان نسبت به این وضعیت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصله در شکل ۴-۲۴ ارائه شد. همانطور که در شکل مشخص است طی ۵ سال دوره پیش‌بینی در صورتی که مقدار دبی مجاز چاه‌های صنعتی در مدل اعمال گردد، مقدار $1/5$ متر سطح آب افت پیدا کرده و با این مقدار افت حدود $27/99$ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی کاهش پیدا خواهد کرد.

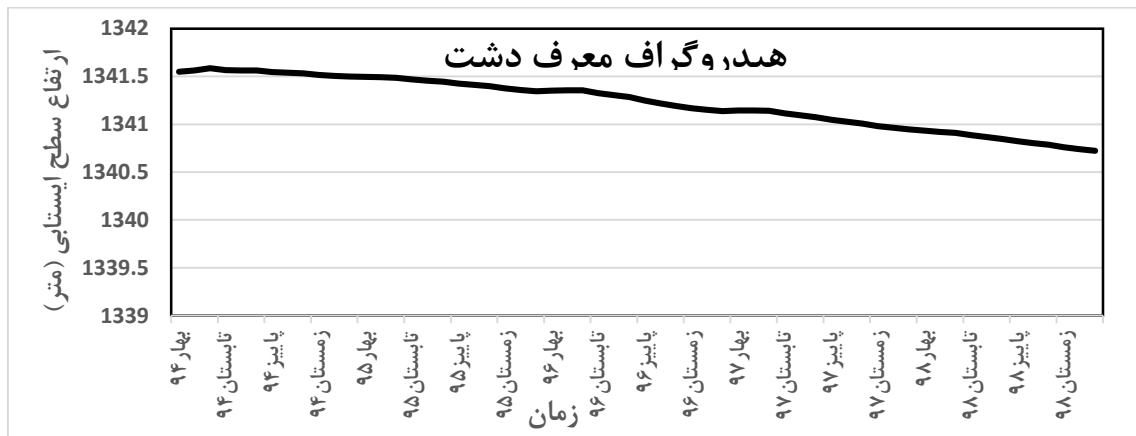


شکل ۴-۲۴- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۵ سال در شرایط اصلاح دبی چاه‌های صنعتی (سناریوی چهارم)

۴-۶-۵- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط دبی مجاز چاه‌های بهره‌برداری (سناریوی

پنجم)

در این بررسی، دبی هر یک از چاه‌های بهره‌برداری برابر دبی مجاز آن‌ها در نظر گرفته شد و مدل آبخوان نسبت به این تنش مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۲۵). همانطور که در شکل مشخص است طی ۵ سال دوره پیش‌بینی در صورتی که مقدار دبی‌های مجاز کل چاه‌های بهره‌برداری در مدل اعمال گردد، مقدار ۰/۹ متر سطح آب افت پیدا کرده و با این مقدار افت حدود ۱۶/۷۹ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی کاهش پیدا خواهد کرد. این موضوع تاثیر مشخص کاهش برداشت از آبخوان در جبران کسری بیلان را تایید می‌نماید.



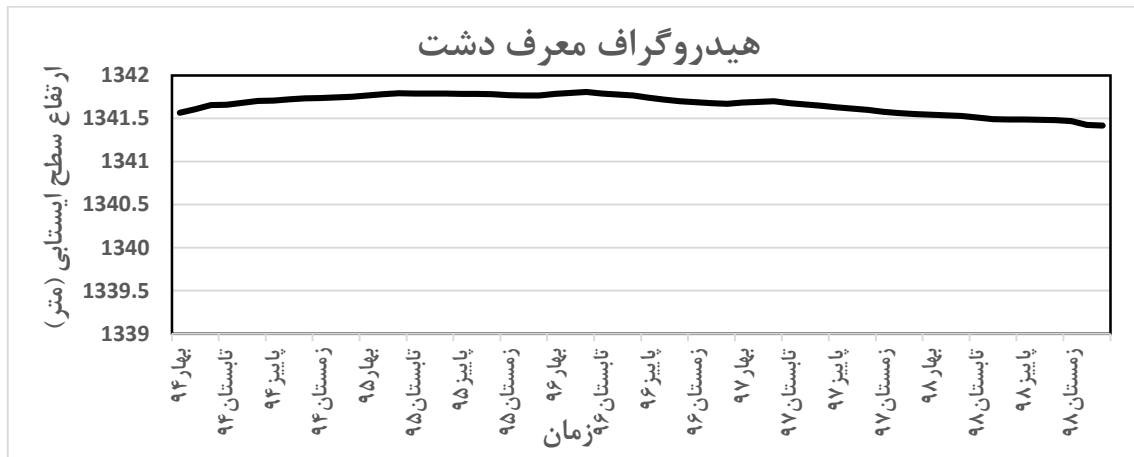
شکل ۴-۲۵- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۵ سال در شرایط اعمال دبی مجاز چاه‌های بهره‌برداری (سناریوی پنجم)

۴-۶-۶- پیش‌بینی وضعیت آبخوان در شرایط اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری به مقدار

کسری بیلان (سناریوی ششم)

در این سناریو میزان افت سالانه در مناطق با آبدهی ویژه متفاوت محاسبه شد و میزان اضافه برداشت از آبخوان تعیین گردید. این میزان در کل دشت ۸/۵۸ میلیون متر مکعب در یک سال می‌باشد. سپس درصد اضافه برداشت برای چاه‌های بهره‌برداری تعیین و از دبی آن‌ها کسر گردید. داده‌های جدید بدست آمده از دبی چاه‌ها برای پنج سال به مدل وارد شد و مدل برای این سناریو اجرا شد (شکل ۴-۲۶). همانطور که در شکل مشخص است طی ۵ سال دوره پیش‌بینی در صورتی که مقدار دبی‌های اصلاح

شده کل چاه‌های بهره‌برداری را قرار دهیم، مقدار افت به صفر رسیده بنابراین حجم مخزن آب زیرزمینی کاهش پیدا نخواهد کرد و سفره به حالت تعادل می‌رسد.



شکل ۴-۲۶- پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول ۵ سال در شرایط اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری (سناریوی ششم)

شکل (۴-۲۷) هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای را در شش سناریوی مختلف نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی در پی‌زومترهای مختلف متفاوت می‌باشد. بالاترین اختلاف سطح آب پس از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری تا حد کسری بیلان مربوط به پی‌زومتر P12 و P14 و P7 و P8 پایین‌ترین اختلاف مربوط به پی‌زومتر P5 می‌باشد. علت بالا آمدگی سطح آب بعد از اصلاح دبی چاه‌ها می‌تواند تحت تاثیر دو عامل زیر باشد:

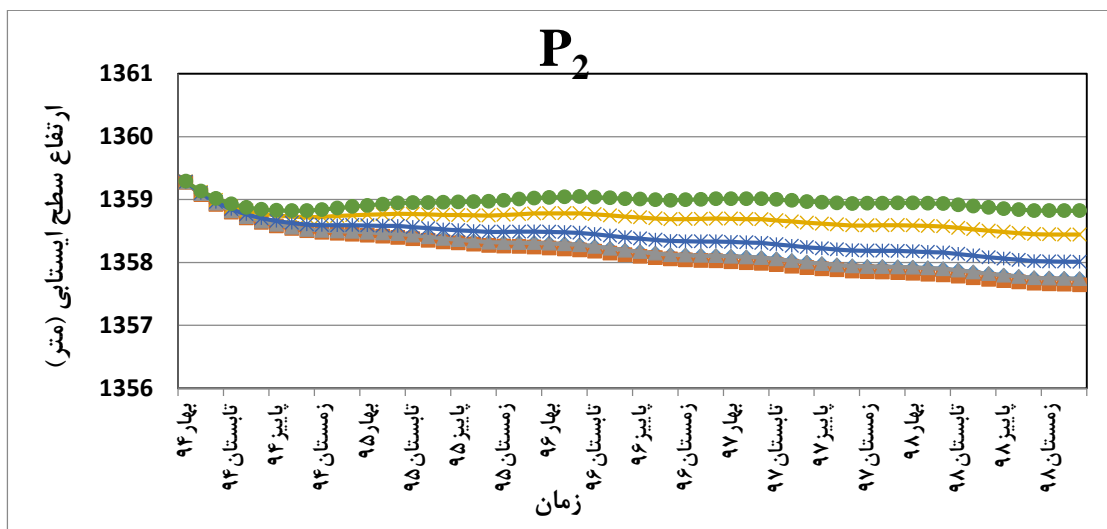
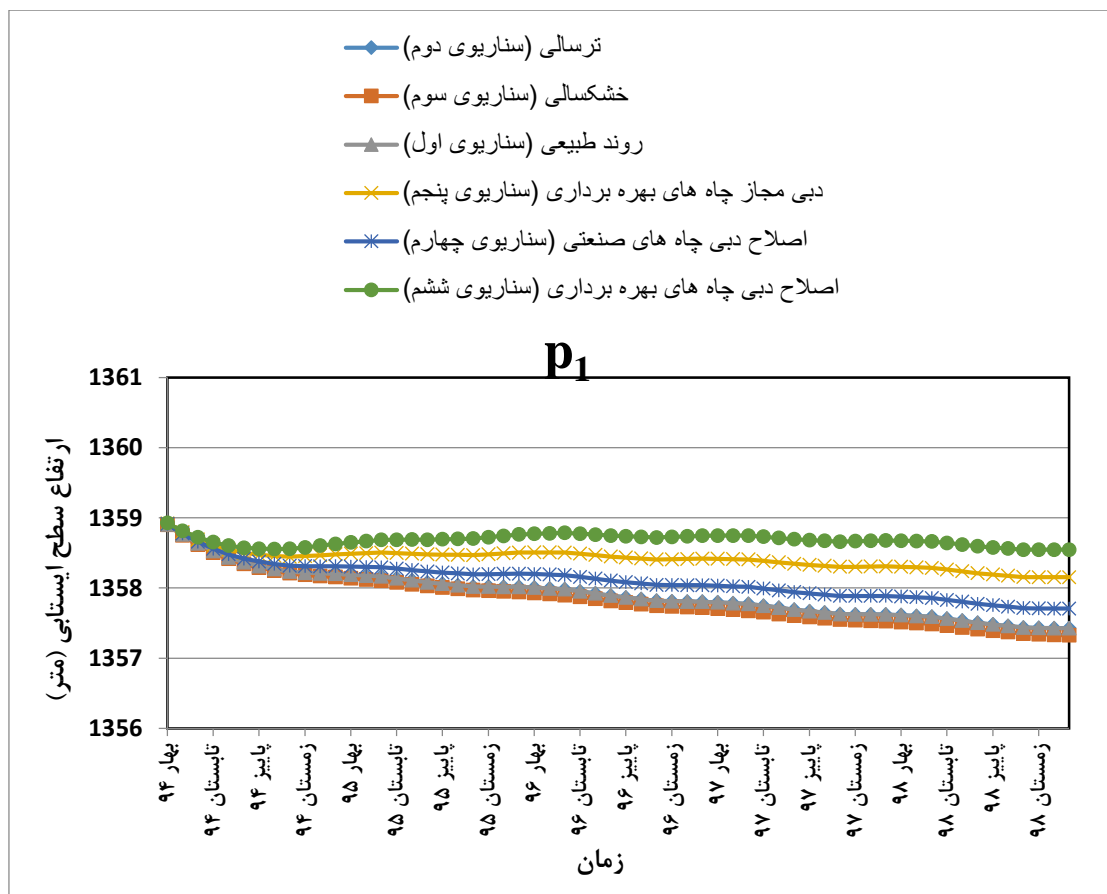
۱- دوری و نزدیکی به چاه‌های بهره‌برداری

در مناطق با تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری مقدار بالا آمدگی سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای آن منطقه بیشتر از بقیه مناطق می‌باشد. به عنوان مثال برای پی‌زومترهای P7 و P8 که در محدوده تمرکز چاه‌های بهره‌برداری قرار دارند، اختلاف سطح آب ایجاد شده بیشتر می‌باشد.

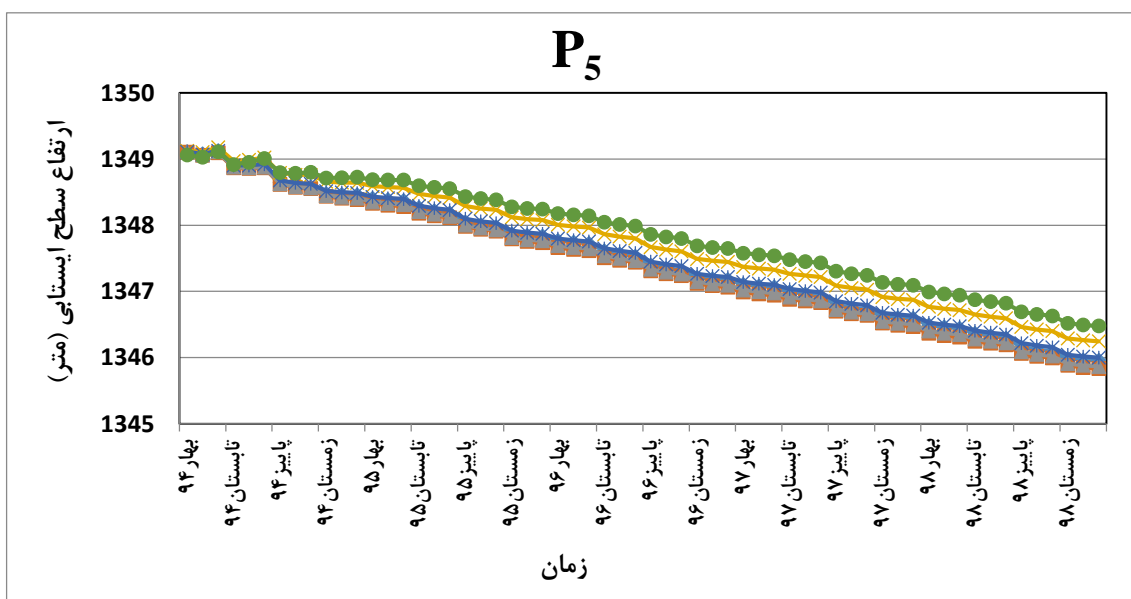
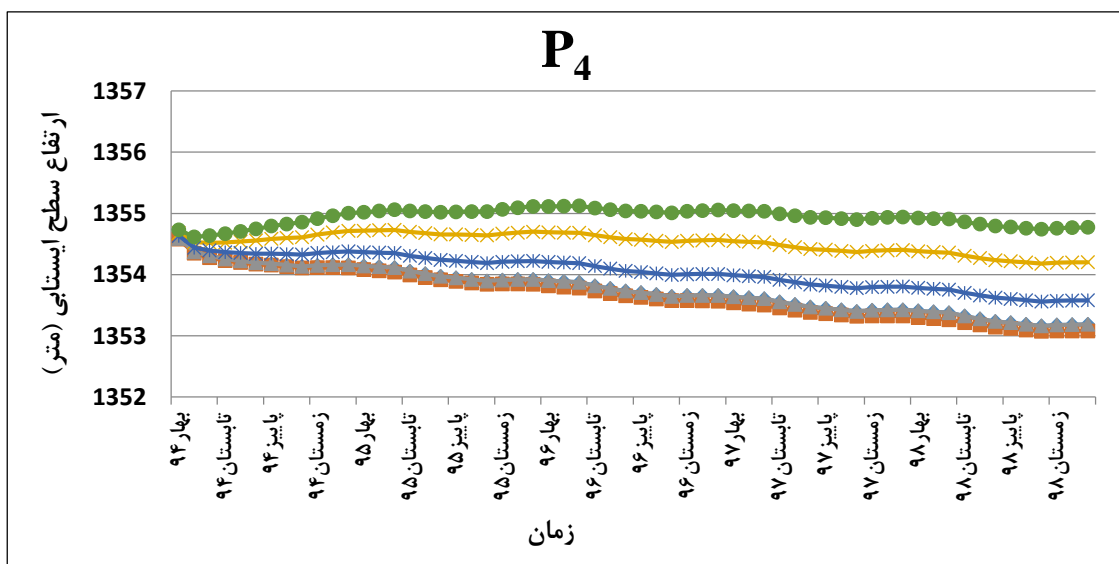
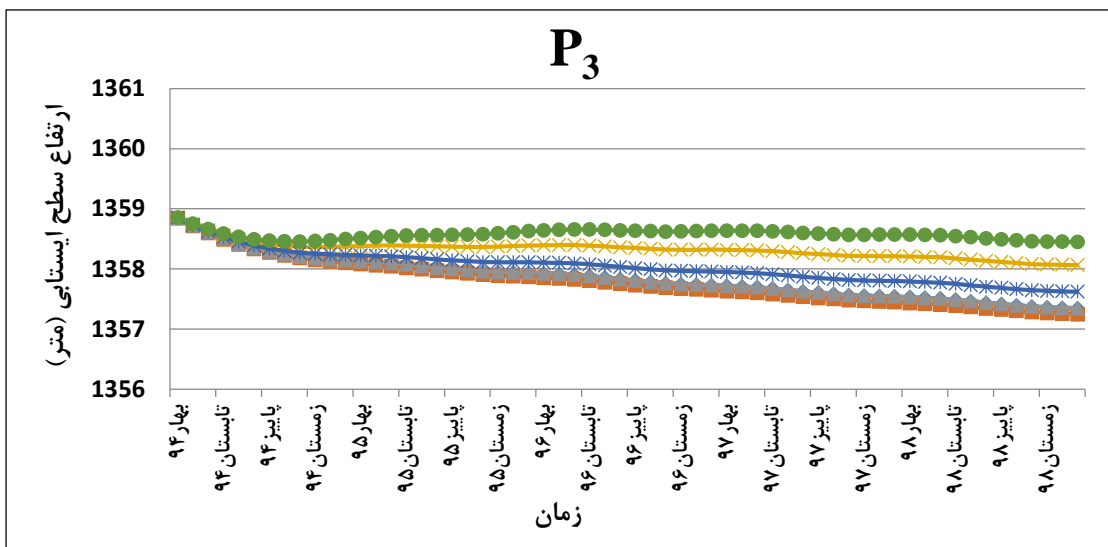
۲- افزایش گرادیان هیدرولیکی

چاه‌های مشاهده‌ای که در مسیر جریان آب زیرزمینی قرار گرفته‌اند حتی اگر در محدوده آن‌ها چاه بهره‌برداری کم باشد ممکن است، باز شاهد بالا آمدگی سطح آب در آن‌ها به مقدار قابل توجه باشیم. علت این است که به دلیل اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری که در بالا دست این پی‌زومترها می‌باشند،

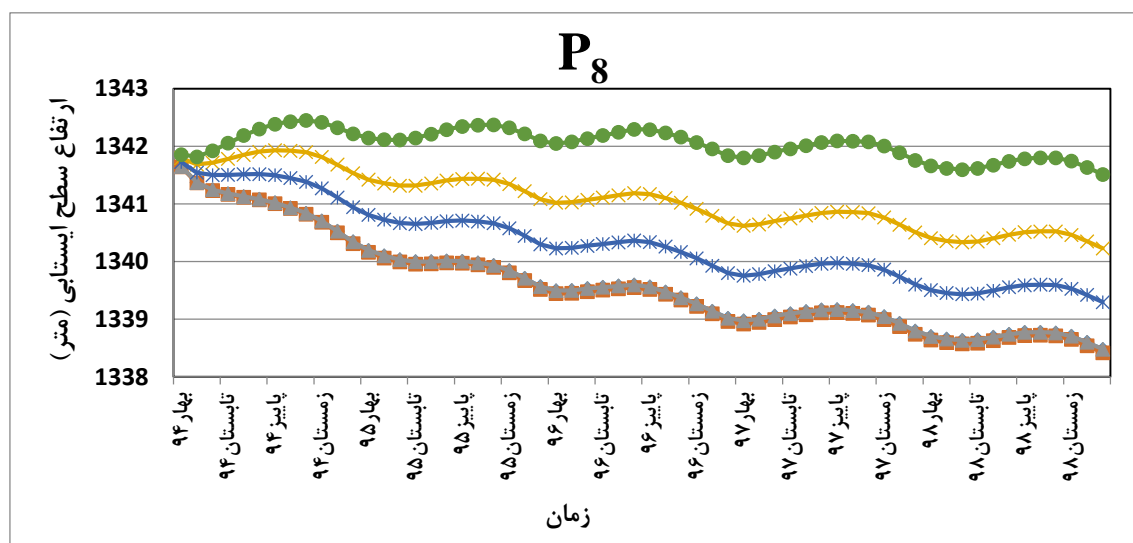
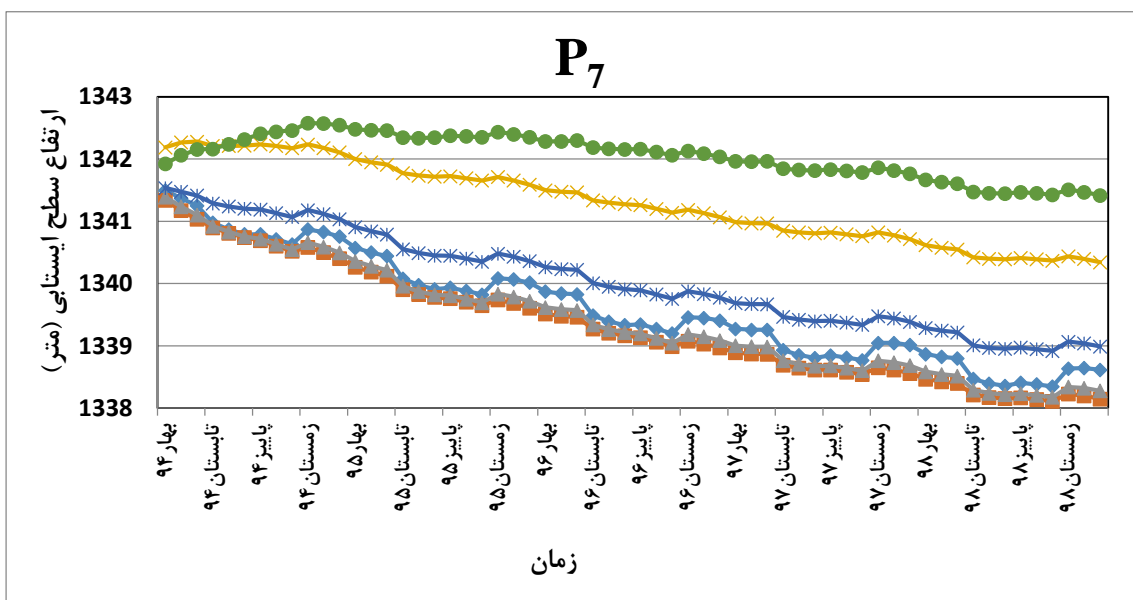
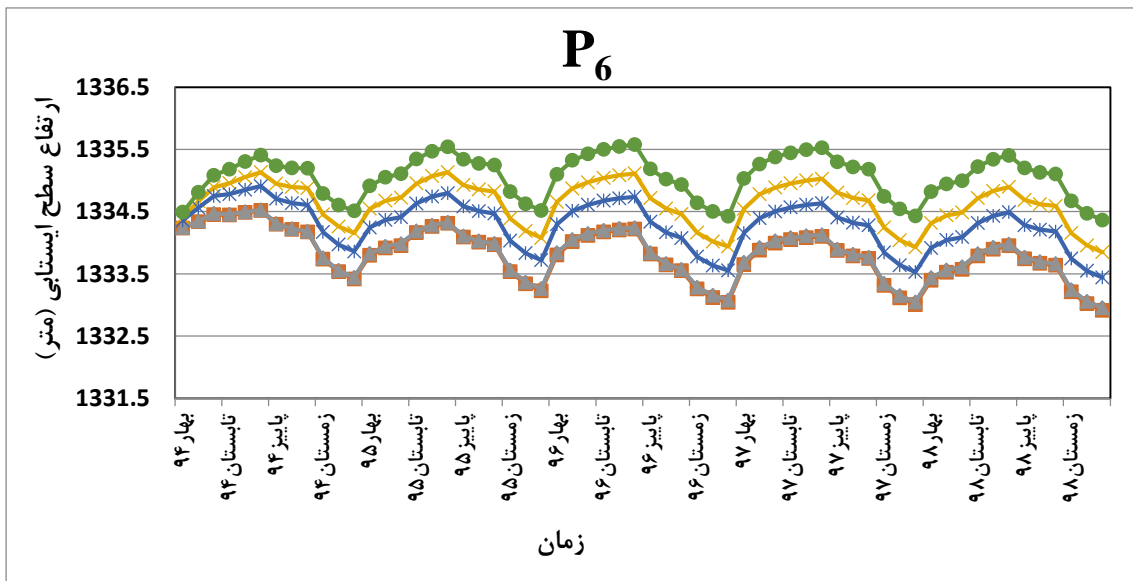
سطح آب در بالا دست افزایش یافته و بنابراین باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی و تشدید جریان به پیزومترهایی که در مسیر جریان آب قرار دارند می‌شود. به عنوان مثال پیزومتر P₁₂ و P₁₄ که دارای بیشترین بالا آمدگی سطح آب می‌باشد.



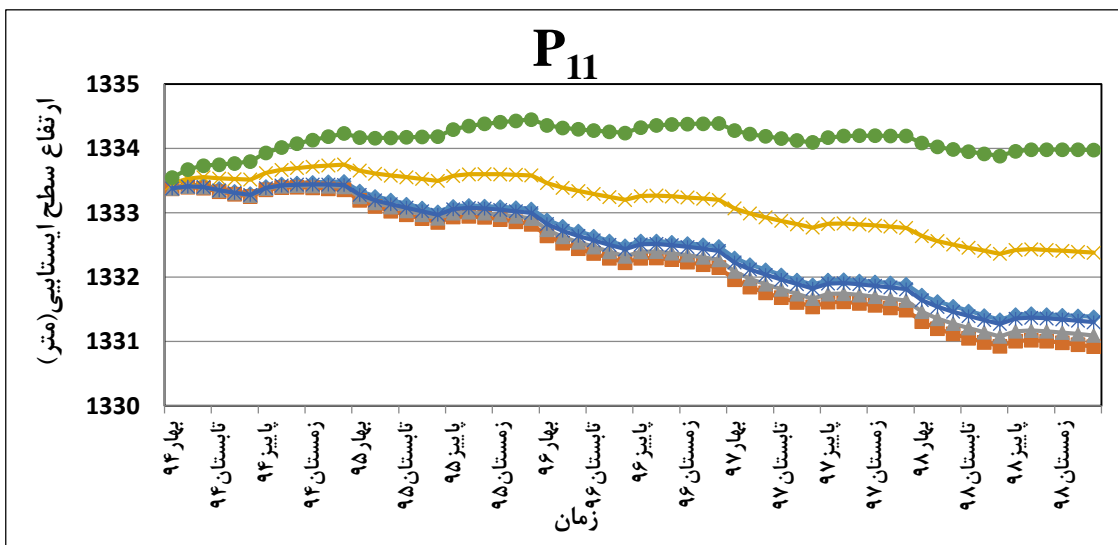
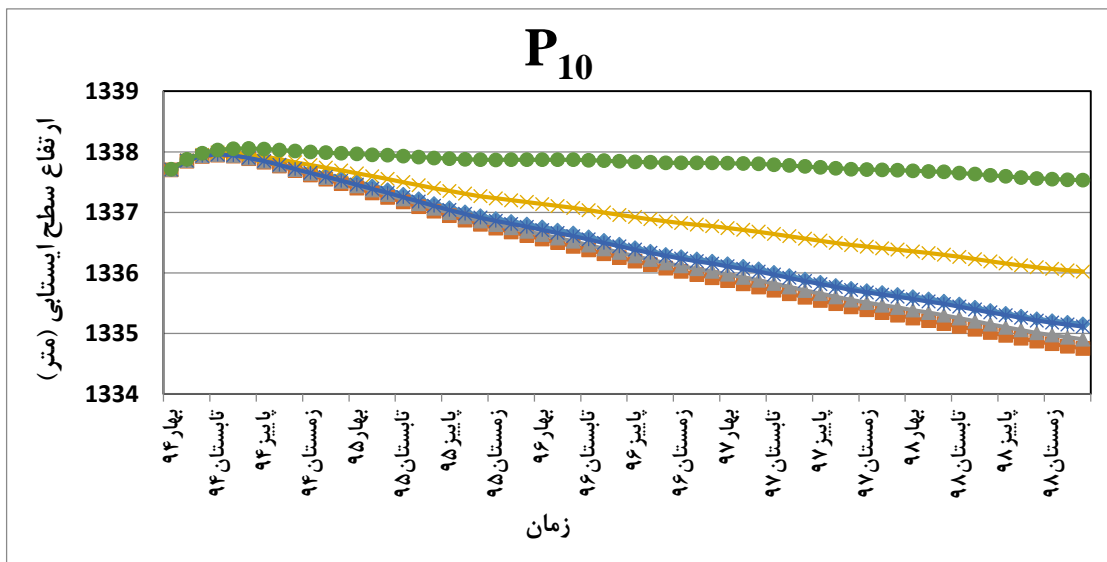
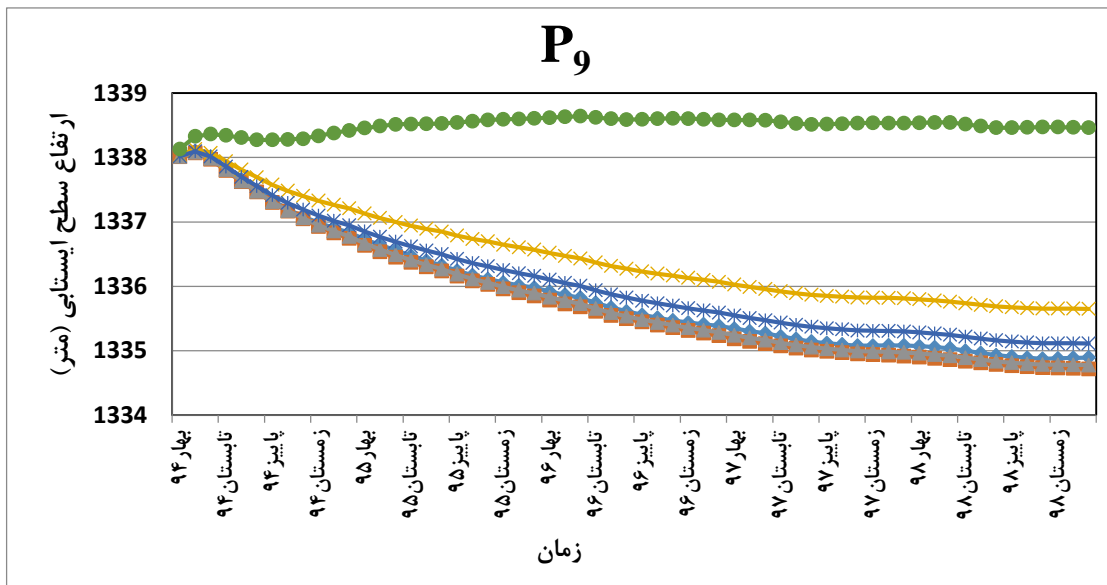
شکل ۴-۲۷- هیدروگراف پیش‌بینی شده چاه‌های مشاهده‌ای در سناریوهای مختلف



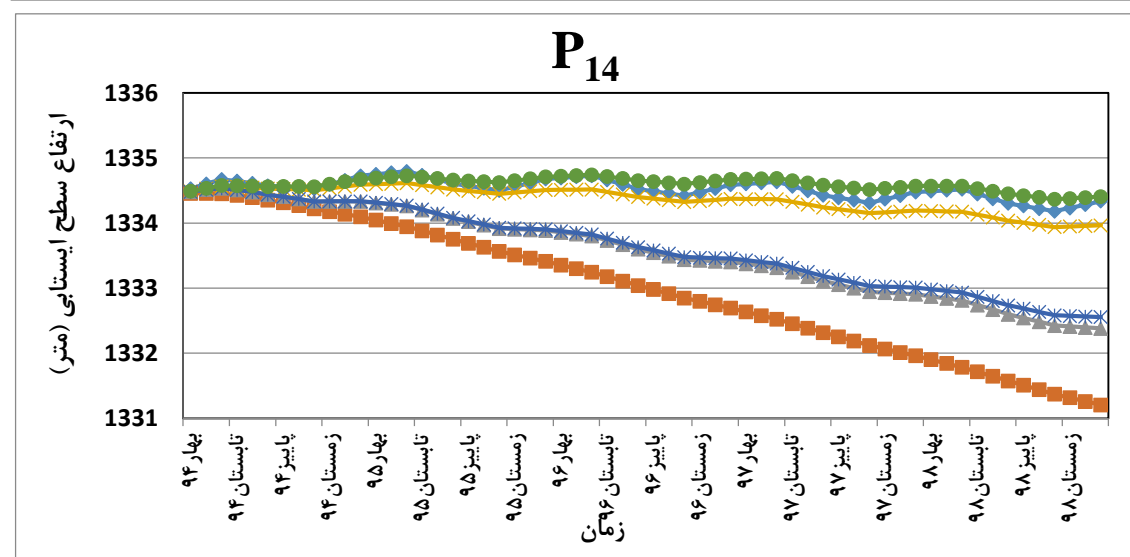
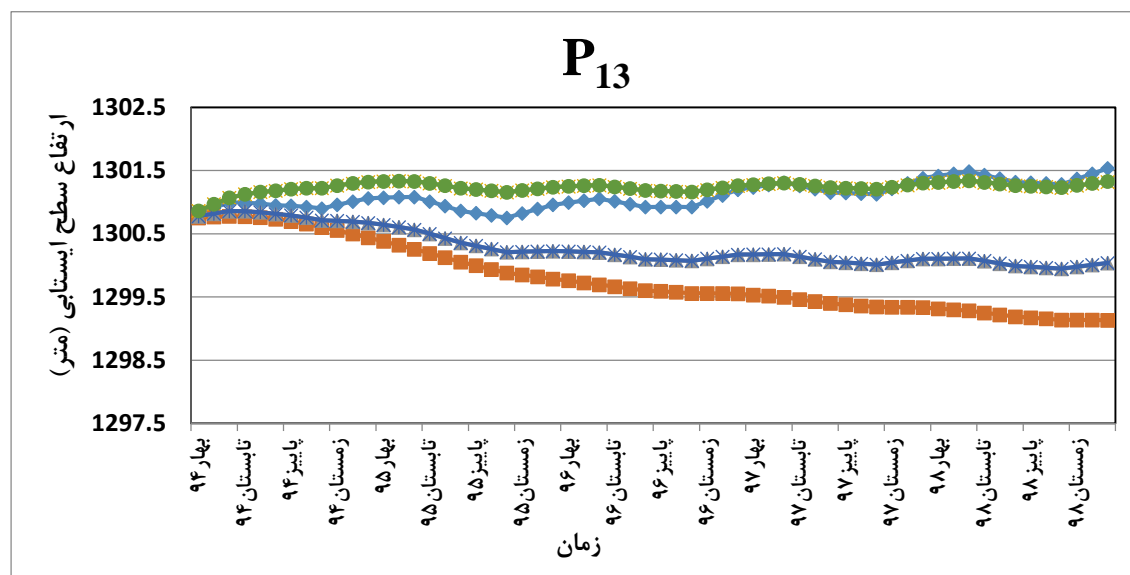
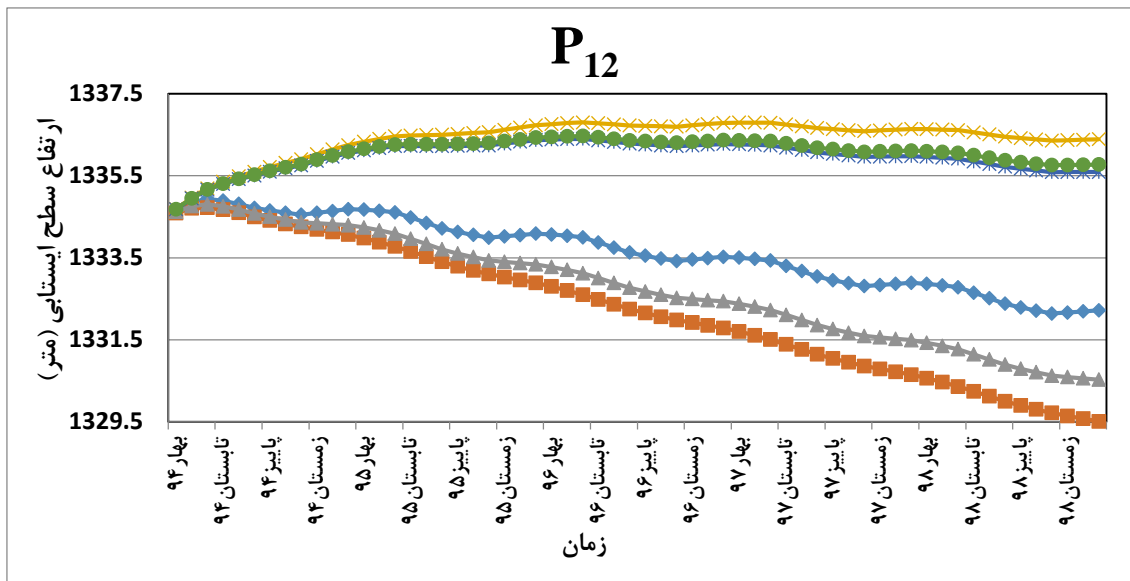
شکل ۴-۲۷- ادامه



شکل ۴-۲۷- ادامه



شکل ۴-۲۷- ادامه



شکل ۴-۲۷- ادامه

فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادها

هدف این فصل، نتیجه گیری نهایی از بحث های ارائه شده و طبقه بندی یافته های تحقیق مرتبط با هدف تحقیق می باشد. در نهایت نیز چند پیشنهاد برای بهبود شرایط آینده منطقه و بهبود مطالعات مشابه ارائه شده است.

۵-۱- نتیجه گیری

۱- طی فرآیند شبیه سازی آبخوان بهاباد توسط کد GMS، مهم ترین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان مانند K و S بهینه گردید. در واقع بهینه سازی این پارامترها که جزء مهم ترین داده های ورودی مورد نیاز در مدیریت آبخوان به شمار می رود، گام مهمی در اجرای طرح های مدیریت آبخوان محسوب می گردد.

۲- طی واسنجی مدل در حالت پایدار مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی در آبخوان بهاباد بین ۰/۰۰۶ تا ۳۵/۵ متر بر روز تعیین گردید. این مقدار در جنوب دشت به دلیل بافت دانه درشت نسبت به دیگر نقاط بیش تر بوده و هر چه به سمت شمال و خروجی دشت (اطراف رودخانه شور) نزدیک می شویم مقدار هدایت هیدرولیکی کاهش می یابد که با تغییر بافت رسوبات به رسی نیز تطابق دارد.

۲- مقدار آبدهی ویژه بهینه شده آبخوان در شرایط ناپایدار از سمت جنوب به سمت شمال و خروجی دشت کم می شود. دامنه تغییرات آبدهی ویژه از ۰/۰۱ تا ۰/۰۹۵ می باشد.

۳- در مدل شبیه‌سازی شده آبخوان، مطابقت هیدروگراف سطح آب مشاهده‌ای و مقایسه‌ای طی مرحله صحت‌سنجی، صحت نسبی و اطمینان از مدل واسنجی شده را نشان می‌دهد. لذا استفاده از مدل مذکور برای پیش‌بینی شرایط آینده آبخوان منطقی است.

۴- نتایج مدل‌سازی و پیش‌بینی انجام گرفته نشان می‌دهد که با ادامه روند کنونی و استمرار وضعیت آبخوان در شرایط فعلی، افت سطح آب تشدید خواهد شد. این افزایش افت در نواحی تمرکز چاه‌های بهره‌برداری (قسمت‌های مرکزی دشت) مشهودتر است. طبق پیش‌بینی صورت گرفته تا اسفند سال ۱۳۹۹ میانگین سطح تراز آب زیرزمینی آبخوان به‌باد حدود ۲/۳ متر افت خواهد کرد و کسری مخزن به حدود ۴۲/۹۳ میلیون متر مکعب خواهد رسید.

۵- در سناریوی خشکسالی (کاهش ۵۰ درصدی بارش) در کل دشت افت تشدید می‌شود بخصوص در پیژومتر ۱۳ که نزدیک خروجی دشت (اطراف رودخانه شور) قرار دارد. سطح ایستابی در این سناریو در پایان دوره پیش‌بینی حدود ۲/۴ متر افت پیدا کرده و کسری مخزن به حدود ۴۴/۷۹ میلیون متر مکعب خواهد رسید.

۶- در سناریوی ترسالی (افزایش ۱/۵ برابری بارش) در حالت کلی در وضعیت سطح ایستابی دشت تاثیر چندانی دیده نمی‌شود و به‌جز پیژومترهای ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ که اعمال این سناریو بر آن‌ها میزان افت را کم کرده است در دیگر پیژومترها تغییر قابل توجهی در سطح آب مشاهده نشده است. سطح ایستابی در این سناریو در پایان دوره پیش‌بینی حدود ۲/۲ متر افت پیدا کرده و با این مقدار افت، ۴۲/۰۶ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی آبخوان کاهش پیدا خواهد کرد.

۷- سناریوی دبی مجاز چاه‌های صنعتی در حالت کلی وضعیت دشت را بهبود می‌بخشد. تاثیر آن در قسمت‌های میانی دشت با تمرکز بالای چاه‌های بهره‌برداری بیشتر است. در پیژومتر ۶، ۷ و ۸ که در محل تمرکز چاه‌های بهره‌برداری قرار دارند سطح آب به صورت قابل توجهی بالا آمده است. هم‌چنین پیژومتر ۱۲ که در نزدیک بخش خروجی دشت قرار دارد به دلیل اینکه در جهت جریان قرار دارد، تاثیر اصلاح دبی در آن دیده می‌شود. سطح ایستابی در این سناریو در پایان دوره پیش‌بینی حدود ۱/۵ متر افت پیدا کرده و با این مقدار افت، ۲۷/۹۹ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی آبخوان کاهش پیدا خواهد کرد.

۸- در سناریوی دبی مجاز کل چاه‌ها، میزان دبی مجاز کل چاه‌های کشاورزی، صنعتی و شرب در مدل اعمال گردید و مدل اجرا شد. تحت این سناریو سطح آب در همه پیزومترها به جز پیزومتر ۵ که نزدیک مرز غیرقابل نفوذ و حاشیه دشت قرار دارد، بالا می‌آید. سطح ایستایی در این سناریو در پایان دوره پیش‌بینی حدود ۰/۹ متر افت پیدا کرده و با این مقدار افت، ۱۶/۷۹ میلیون متر مکعب حجم مخزن آب زیرزمینی آبخوان کاهش پیدا خواهد کرد.

۹- در سناریوی اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری، میزان حد مجاز برداشت چاه‌ها تعیین شد. در پیزومتر ۵ به علت مجاورت این پیزومتر با مرز غیرقابل نفوذ و عدم بهره‌وری از آبخوان هیدروگراف این چاه مشابه هیدروگراف سناریوی روند فعلی است. به علت تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در مرکز دشت و میزان بالای برداشت آن‌ها تاثیر این سناریو در این بخش‌ها خیلی زیاد بوده و به طور کلی اجرای این سناریو به بهبود وضعیت آبخوان کمک زیادی می‌کند.

۵-۲- پیشنهادها

۱- یکی از مهم‌ترین کمبودهای آبخوان بهاباد، کمبود آزمایش پمپاژ و نبود چاه‌های اکتشافی است. چون دقت اطلاعات و داده‌ها در مطالعات هیدروژئولوژیکی نقش مهم و اساسی دارد، لذا پیشنهاد می‌شود در نقاط مختلف دشت و با پراکندگی مناسب، چند آزمایش پمپاژ مناسب انجام شود تا مقادیر هدایت هیدرولیکی استاندارد و آبدهی ویژه به صورت دقیق‌تری تعیین شود.

۲- در حال حاضر آماربرداری از منابع آبی دشت و وضعیت برداشت از این منابع، هر پنج سال یک بار انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه آمار موجود یکی از مهم‌ترین ابزارهای ساخت مدل می‌باشد، پیشنهاد می‌شود به منظور تهیه بیلان دقیق، تهیه دقیق‌تر مدل و مدیریت دقیق‌تر منابع آبی در صورت امکان آماربرداری از منابع آبی به صورت سالیانه صورت بگیرد.

۳- با توجه به نتایج حاصل از مدل برای حفظ تعادل آبخوان و جلوگیری از افزایش افت سطح آب می‌بایستی از حفر چاه یا افزایش برداشت در مناطق دارای افت به ویژه بخش میانی دشت که محل تمرکز چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد جلوگیری نمود.

۴- از آنجاییکه تاثیر اجرای سناریوی اصلاح دبی چاه‌ها بر آبخوان زیاد می‌باشد، لذا بهتر است از دبی‌های تعیین شده در این سناریو در طرح‌های مدیریتی استفاده گردد.

مراجع

۱. آقائباتی، ع.، (۱۳۸۳)، "زمین شناسی ایران"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ص ۶۹۷.
۲. اعتباری، ب.، یعقوب زاده، م.، (۱۳۸۸)، "اهمیت تهیه مدل های مفهومی در تهیه مدل ریاضی آبخوان
ها (مطالعه موردی دشت تبریز)"، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، گرگان.
۳. بانژاد، ح.، محب زاده، ح.، قبادی، م. ح.، حیدری، م.، (۱۳۹۱)، "شبیه سازی عددی جریان و انتقال آلودگی
در آب های زیرزمینی مطالعه موردی: آبخوان دشت نهاوند"، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۲، ص ۵۷.
۴. تندیس، ز.، حافظی مقدس، ن.، کرمی، غ. ح.، جعفری، ه.، (۱۳۹۲)، "پیش بینی تاثیر اجرای طرح
فاضلاب
بر سطح آب زیرزمینی، مطالعه موردی: آبخوان شهر مشهد"، هشتمین همایش انجمن زمین-
شناسی
مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۳۶۹-۱۳۶۱.
۵. جمعه نیا، ج.، (۱۳۸۸)، "مدلسازی جریان آب زیرزمینی دشت حصاروئیه و مکان یابی طرح تغذیه
مصنوعی به کمک مدل ریاضی و GIS"، پایان نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه
سیستان و بلوچستان، زاهدان.
۶. جمشیدی، خ. و افشاریان زاده، ع.، (۱۳۷۰)، " نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی"،
سازمان زمین شناسی ایران.
۷. جنوبی، ر.، رضایی، ح.، بهمنش، ج.، (۱۳۹۲)، "مدیریت سطح آب زیرزمینی از طریق تلفیق آب
سطحی
و
زیر سطحی با استفاده از مدل MODFLOW (مطالعه موردی: دشت ارومیه)"، مجله مدیریت
آب
و
آبیاری، سال سوم، شماره ۱، ص ۶۸-۴۹.
۸. چیت سازان، م. و کشکولی، ح. ع.، (۱۳۸۱)، "مدل سازی آب های زیرزمینی و حل مسائل
هیدروژئولوژی"، دانشگاه شهید چمران اهواز، فصل ۸، ص ۳۳۵-۳۰۰.
۹. چیت سازان، م. و ساعت ساز، م.، (۱۳۸۴)، "کاربرد مدل ریاضی MODFLOW در بررسی گزینه-
های

- مختلف مدیریت منابع آب دشت رامهرمز"، مجله علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره ۱۴، ص ۱.
۱۰. دهقانی قهرخی، ا.، (۱۳۸۱)، "مطالعه هیدروژئولوژی و مدیریت آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی گروه زمین‌شناسی دانشگاه سیستان بلوچستان.
۱۱. رزاقمنش، م.، سالمی، ت.، سراجی، م.، (۱۳۸۵)، "بررسی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت تبریز"،
- همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۱۳۷-۱۲۸.
۱۲. رضا، م. و سرگزی، ا.، (۱۳۸۹)، "بررسی اثرات اجرای تغذیه مصنوعی بر روی آبخوان دشت گوهرکوه"، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۶، ص ۹۹.
۱۳. زارع ابانیه، م.، مهدی پور، ف.، ناصری، ح.، (۱۳۸۵)، "پیش‌بینی تاثیر زهکش‌ها بر آبخوان دشت شیراز با استفاده از مدل ریاضی و کد کامپیوتری Modflow".
۱۴. سحابی، م.، میرتوحیدی، الف.، حدادان، م.، (۱۳۷۸)، "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهاباد"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۱۵. شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، (۱۳۹۰)، "آمار برداری محدوده مطالعاتی یزد".
۱۶. شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، (۱۳۷۵)، "گزارش آماری و محاسبه بیلان آب زیرزمینی دشت بهاباد"، وزارت نیرو، امور مطالعات منابع آب.
۱۷. شیر افکن، م.، "هیدروژئولوژی آبخوان بهاباد یزد با تاکید بر عوامل موثر بر افت سطح ایستابی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی گروه زمین‌شناسی دانشگاه شاهرود، ۱۳۹۲.
۱۸. طاهری تیزرو، ع.، زارع، م.، الیاسی، م.، (۱۳۹۰)، "مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در دشت کبود آهنگ با استفاده از مدل ریاضی، MODFLOW چهارمین کنفرانس منابع آب ایران، تهران.
۱۹. علیزاده، ا.، (۱۳۸۲)، "اصول هیدرولوژی کاربردی"، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲۰. عطایی زاده، س.، چیت‌سازان م. و میرزایی ی.، (۱۳۸۶)، "هیدروژئولوژی و شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی دشت میداود-دالون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲۱. فضل‌اولی، ر.، شریفی، ف.، بهنیا، ع.، (۱۳۸۵)، "بررسی تاثیر پخش سیلاب در تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی دشت موسیان (استان ایلام)"، فصلنامه منابع طبیعی ایران، سال ۵۹، شماره ۱، ص ۵۷.
۲۲. قفقازی، م.، (۱۳۹۱)، "شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان دشت میمه با استفاده از GMS"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی گروه زمین‌شناسی دانشگاه شاهرود

۲۳. کرسیک، ن.، ترجمه چیت سازان، م.، کشکولی، ح. ع.، (۱۳۸۱)، "مدل سازی آب های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی"، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز.
۲۴. کتیبه، ه.، طاهری، ع.، ابوطالبی، ا.، (۱۳۸۲)، "مدل سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در محدوده مرکزی طرح متروی اصفهان"، مجله آب و فاضلاب، شماره ۴۶، ص ۴۱.
۲۵. لاله زاری، ر.، طباطبایی، ح.، خیاط خلقی، م.، صبا، ع.، (۱۳۹۳)، "شبیه سازی انتقال آلاینده نترات در آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از مدل MT3D"، نخستین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی منابع آب ایران، کرمانشاه، ۲۳۶-۲۲۱.
۲۶. ماجدی، ح. و جلیلیان، ع.، (۱۳۸۴)، "شبیه سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان شمال اهواز به منظور قطعیت دادن به پارامترهای تخصیصی آبخوان و محاسبه بیلان"، پنجمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران.
۲۷. مهدوی، م.، فرخ زاده، ب.، سلاجقه، ع.، ملکیان، آ.، سوری، م.، (۱۳۹۲)، "شبیه سازی آبخوان دشت همدان -بهار و بررسی سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل PMWIN"، فصلنامه پژوهش های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۹۸، ص ۱۰۸.
۲۸. ملکی، ر.، (۱۳۹۰)، "تهیه مدل ریاضی دشت شاهرود برای بررسی اثر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی"، پایان نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی گروه زمین شناسی دانشگاه شاهرود.
۲۹. نیرومند، ح. و بزرگ نیا، ا.، (۱۳۷۲)، "مقدمه ای بر سری های زمانی"، دانشگاه فردوسی مشهد.
۳۰. نکوآمال کرمانی، م.، کشکولی، ح. ع.، رهن، م. ب.، (۱۳۸۶)، "کاربرد نرم افزار MODFLOW (PMWIN5.1) در مطالعه نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت بوچیر -حمیران"، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، اهواز، ص ۳۰۳۶-۳۰۲۸.
۳۱. نجف آبادی، ر. و رهنما، م. ح.، (۱۳۸۶)، "شبیه سازی آبخوان دشت سیرجان با استفاده از مدل MODFLOW و بررسی اثرات احداث سد تنگکویه بر آن"، مجله پژوهش آب ایران، شماره ۱، ص ۱.
۳۲. وزارت نیرو، (۱۳۸۵)، "راهنمای تهیه مدل ریاضی آب های زیرزمینی".

33- Anderson M.P. and Woessner W.W., (1992), Applied Groundwater Modeling; Simulation of Flow and Advective Transport. Academic press. San Diego, CA. 381p. Academic press, inc. 381 pp.

- 34- Ayvaz T.(2009). “Application of Harmony search algorithm to solution of groundwater management models” . *Advances in water management*.916-924.
- 35- Baalousha H. (2009). “Fundamental Of Groundwater Modelling”. Nova Science Publisher Inc. New York
- 36- Fetter, C. W. *Applied Hydrogeology*. New Jersey: Prentice-Hall. (2001).
- 37- Froukh L.J. (2002). “Groundwater modeling in aquifers with highly karstic and heterogeneous characteristics (KHC) in Palestine”. *Water Resources Management*, 16: 369-379.
- 38- Fitts, C. R. (2002). *Groundwater Science*. Academic Press.
- 39- Gurwin J. Lubczynski M. (2004). “Modeling of groundwater response to artificial recharge. Artificial recharge of groundwater, Boston, Massachusetts”. Butterworth publishers, pp: 129-149.
- 40- Herzog, A. 2007. *Transient groundwater modeling in peri-urban Kampala, Uganda*. TRITA-LWR Master Thesis.
- 41- Idrysy H, Smedt F.D. (2006). “Modeling groundwater flow of the Trifa aquifer, Morocco” *Hydrogeology Journal*, 14: 1265-1276.
- 42- Jaworska, Szulc B. (2009).”Groundwater flow modeling of multi-aquifer systems for regional resources evaluation, the Gdansk hydrogeological system, Poland”. *Hydrogeology Journal*, 17:1521-1542.
- 43- Jaworska, Szulc B. (2009).”Groundwater flow modeling of multi-aquifer systems for regional resources evaluation, the Gdansk hydrogeological system, Poland”. *Hydrogeology Journal*, 17:1521-1542.
- 44- Ju sseret S, Thanh Tam V, Dassargues A. (2008). “Groundwater flow in the central zone of Hanoi (Vietnam)”. *Hydrogeology Journal*, 17:915-934.
- 45- Lofgern B.E. (1069). *Field measurement of aquifer system compaction*. Sanjoaquin Balley. California. U.S.A. *Proc. of Tokyo. Symp. on Land subsidence*. IASH-UNSCO. pp. 272-284.
- 46- Mylopoulos N., Mylopoulos Y., Veranis N. and Tolikas D., (2007). “Ground water modeling and manegment in a complex lake- aquifer system”, *Water Resource Management*, 21,469-496.
- 47- Punthakey, J. F., Somaratne, N. M., Prathapar, S. A., Merrick, N. P., Law son, S. and Williams R.M. (1994). “Regional Groundwater of the Lower Murrumbidgee River Basin Model Development and Calibration”, N.S.W. Australia.
- 48- Qahman K, Larabi A. (2006). “Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the Gaza aquifer (Palestine)”, *Hyrogeology Journal*, 14: 713-728.
- 49- Robert B W, Rotzoll K, Dhal S, El-Kadi A I, Ray C, Chang D. (2009). “Groundwater Source assessment program for the state of Hawaii, USA: methodology and example ap plication”. *Hydrogeology Journal*, 18: 711-723.

50- Sheets R.A., Dumouchelle D.H. and Feinstein D.T. (2005). "Ground Water Modeling of Pumping Effects near Regional Ground Water divides and River/ Aquifer systems – Results and Implications of numerical Experiments", scientific Investigations Report. 2005-5141.

51- Todd D K, Mays L W. (2005). "Groundwater Hydrogeology", Third Ed, John wiley & Sons Inc, New York, USA.

52- Tutorials

53- Thangarajan, M. Groundwater Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management. Springer. (2007).

54- Varni M R, Usunoff E J. (1999). "Simulation of regional-scale groundwater flow in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina". *Hydrogeology Journal*, 7: 180- 187.

55- Wang, H. F., and Anderson, M. P. Introduction to Ground water Modeling. New York: Academic Press. (1981).

56- Yaouti, F El, Mandour A El, Khattach D, Kaufmann O. (2008). "Modeling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco)", *Journal of Hydro-environment Research*, 192-209.

57- Yidana S. M. and Ophori D. (2008). "Groundwater Resources Management in the Afram Plains Area, Ghana". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(5):349-357.

58- Yousafzai A, Eckstein Y, Dahl P. (2008). "Numerical modeling of groundwater in Peshawar intermontane basin, northwest Himalayas", *Hydrogeology Journal*, 16: 1395-1409.

59- Zhang Y.K., Seo B. M., Lovanh N., Alvarez P. and Heathcote R. (2001). *IOWA Comprehensive Petroleum Underground Storage Tank Fund Board*, Final Report Evaluation of Computer Software Packages for RBCA Tier-3 Analysis.

Abstract

Bahabad is located in Yazd province, 80 kilometers far from Bafgh city. In this research with the aim of simulating Bahabad aquifer using GMS and predicting groundwater table fluctuations at the five next years, management scenarios for improving aquifer conditions were studied. The model was calibrated for a stress period of one month (October 2008) in steady state, and also for a period of one year (April to March 2010) in unsteady state, considering four stress periods and twelve time steps. Model sensitivity analysis indicates the maximum sensitivity of hydraulic conductivity. At the end of calibration process, the optimized values of hydraulic conductivity and specific yield were determined as 0.006-35.5 m/day and 0.01-0.095, respectively. The model was verified and validated using data for a period of three years from April 2012 to March 2015. Prediction of aquifer conditions at the following years (April 2015 to March 2021) indicate water table will highly decline (about 2.3 m), especially in areas with focus of discharging wells, as the current withdraw from aquifer will be continued. Investigating different scenarios related to climate change and aquifer management confirmed the rule of control of aquifer discharge in water table fluctuation. Change in rainfall has no more effect on the aquifer water budget and water table fluctuations, as the direct recharge into the aquifer is low. Scenario of reducing discharge by the wells to permitted values shows significant impacts on water table changes, but aquifer budget still remains negative. Based on modeling results, in order to balance the Bahabad aquifer, total withdraws must be decreased to $8.58 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

Keywords: Bahabad Aquifer, Mathematical Simulation, GMS, MODFLOW



Shahrood University of Technology

Faculty of Earth Sciences

Predicting Groundwater Level Fluctuation of Bahabad Aquifer Using Numerical Model

Kobra Khatibinia

Supervisor:

Dr. Hadi Jafari

February 2016