



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: علوم زمین

گروه آبشناسی و زمین شناسی زیست محیطی

پایان نامه کارشناسی ارشد

## بررسی اثر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود با استفاده از مدل ریاضی

دانشجو:

رقیه ملکی

اساتید راهنما:

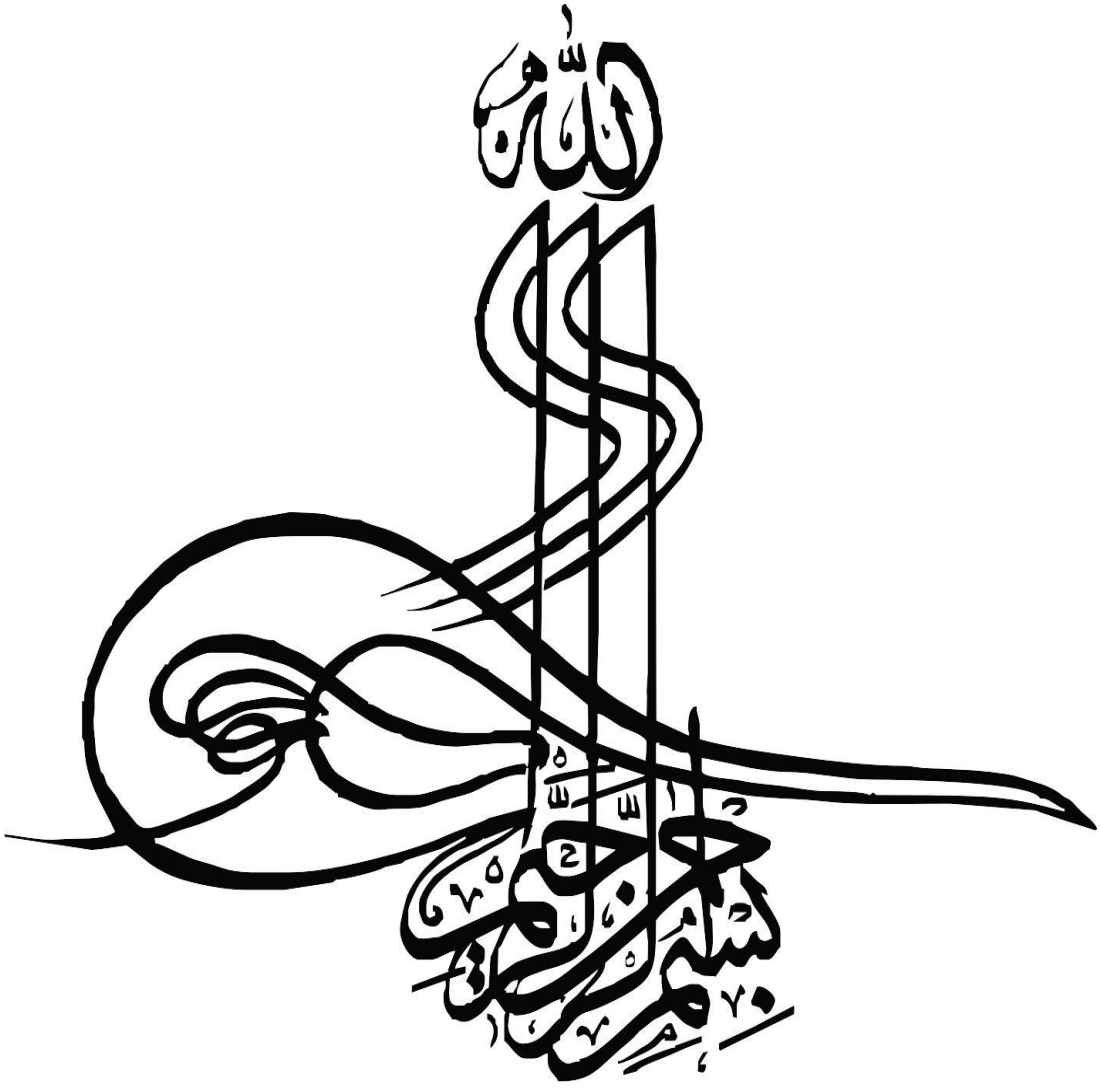
دکتر غلامحسین کرمی

دکتر فرامرز ارده جانی

استاد مشاور:

مهندس حسین حسینی

خرداد ماه ۱۳۹۰



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. ملکی، ر.، کرمی، غ.ح.، دولتی ارده‌جانی، ف.، حسینی، ح. و اسدیان، ف.، (۱۳۹۰)، پیش‌بینی تاثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی شاهرود، چهارمین کنفرانس منابع آب ایران، تهران.
۲. ملکی، ر.، کرمی، غ.ح.، دولتی ارده‌جانی، ف.، حسینی، ح. و اسدیان، ف.، (۱۳۹۰)، تصحیح ضرایب هیدرودینامیکی دشت شاهرود، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران.
۳. ملکی، ر.، کرمی، غ.ح.، دولتی ارده‌جانی، ف.، حسینی، ح. و اسدیان، ف.، (۱۳۹۰)، تاثیر خشکسالی سال ۱۳۸۶-۱۳۸۷ بر دشت شاهرود با استفاده از مدل GMS6.0، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، زنجان.

تقدیم به

پدر و مادر نازنینم

به پاس تمامی زحمات بی دریغشان

و

همسر عزیزم

که در سایه همیاری و همدلی او به این منظور نائل شدم

## تقدیر و تشکر:

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. پس از یاری خدای پیمودن این راه ممکن نبود مگر در سایه راهنمایی اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی و جناب دکتر فرامرز دولتی اده جانی که با راهنمایی های مفید و موثر و پیشنهادهای سازنده و در ارائه هر چه بهتر پایان نامه نقش داشتند و جناب آقای مهندس حسین حسینی استاد مشاور گرامی که که اطلاعات مفیدی در خصوص دشت شاهرود در اختیار بنده قرار دادن کمال تشکر و قدردانی را دارم و همچنین از همکاری و رهنمودهای جناب آقای مهندس فرهاد اسدیان و سرکار خانم زهره نجاتی جهرمی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از تمامی دوستان و همکارانی که به نحوی مرا در انجام این پایان نامه یاری نمودند تشکر می کنم. و در نهایت از سرکار مهندس فارسی (دفتر دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود) که صبورانه با من همکاری نمودند تشکر و سپاس گزاری می نمایم.

## چکیده

در این تحقیق به بررسی تاثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود با استفاده شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی پرداخته شده است. مدل‌های جریان آب زیرزمینی عمدتاً "وسیله‌ای برای پیش‌بینی عکس‌العمل آبخوان تحت تاثیر عوامل تغذیه و تخلیه است. یکی از منابع عمده تغذیه دشت شاهرود چاه‌های فاضلاب موجود در سطح شهر شاهرود می‌باشد. با توجه به این که قرار است در آینده‌ای نزدیک، طرح جمع‌آوری فاضلاب‌ها در سطح شهر شاهرود اجراء گردد بنابراین تاثیر قابل توجهی بر سطح آب‌های زیرزمینی این دشت خواهد گذاشت. جهت پیش‌بینی تاثیر طرح جمع‌آوری فاضلاب، آبخوان دشت شاهرود با استفاده از روش عددی تفاضل‌های محدود و نرم‌افزار GMS6.0 برای یک دوره یک ساله ۱۳۸۸-۱۳۸۷ شبیه‌سازی گردید. مدل تهیه شده برای آذر ۱۳۸۷ تحت شرایط پایدار اجرا و کالیبره گردید. بعد از واسنجی مدل در حالت پایدار، این کار در حالت ناپایدار نیز انجام و پارامترهای آبدهی ویژه، مقدار تغذیه و تخلیه بهینه گردید. سپس مدل صحت‌سنجی گردید. از آنجا که مدل در صحت‌سنجی (سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸) از دقت مناسبی برخوردار بود انتظار می‌رود که نتایج به دست آمده به واقعیت نزدیک باشد. به منظور پیش‌بینی تاثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی، مقدار تغذیه از طریق چاه‌های فاضلاب از کل تغذیه حذف شد و مدل به مدت ۱۰ سال مجدداً اجرا گردید. با توجه به نتایج مدل سطح آب در اکثر پیژومترهای منطقه به مقدار قابل توجهی پایین می‌افتد و در صورت اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری افت سطح آب به مقدار زیادی جبران می‌گردد.

کلمات کلیدی: سطح آب زیرزمینی، فاضلاب، دشت شاهرود، مدل‌سازی عددی

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات.....	۲
۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق.....	۲
۲-۱- ساماندهی پایان نامه.....	۲
۳-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.....	۳
۴-۱- هواشناسی منطقه.....	۴
۵-۱- زمین‌شناسی منطقه.....	۶
۱-۵-۱- چینه‌شناسی منطقه.....	۷
۶-۱- زمین‌شناسی ساختمانی.....	۱۱
۷-۱- ژئومورفولوژی منطقه.....	۱۲
۸-۱- هیدروژئولوژی منطقه.....	۱۳
۹-۱- جمعیت.....	۱۵
فصل دوم: مروری بر مطالعات مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی.....	۱۶
۱-۲- مروری بر مدل‌سازی آبخوان‌ها در دنیا.....	۱۶
۲-۲- مدل‌سازی آبخوان‌ها در ایران.....	۱۹
۳-۲- سابقه مدل‌سازی در دشت شاهرود.....	۲۴
فصل سوم: مدل‌های آبهای زیرزمینی و معادلات اساسی حاکم بر جریان آب.....	۲۵
۱-۳- تعریف مدل‌سازی.....	۲۵
۲-۳- معادلات اساسی حاکم بر جریان آب زیرزمینی.....	۲۶
۱-۲-۳- قانون داریسی.....	۲۶
۲-۲-۳- معادله پیوستگی.....	۲۹
۳-۲-۳- معادله لاپلاس.....	۳۱
۴-۲-۳- معادله عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان تحت فشار.....	۳۱
۵-۲-۳- معادله عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان آزاد.....	۳۲
۶-۲-۳- معادله عمومی جریان آب زیرزمینی با مولفه تغذیه یا تخلیه.....	۳۴
۳-۳- طبقه‌بندی مدل‌های آب زیرزمینی.....	۳۵
۱-۳-۳- مدل‌های فیزیکی.....	۳۶
۲-۳-۳- مدل‌های ریاضی.....	۳۷
۳-۲-۳-۳- مدل‌های علت و معلولی یا معین.....	۳۸
۴-۳- الگوریتم مدل‌سازی.....	۴۴
۱-۴-۳- طرح مسئله و تعیین هدف.....	۴۶
۲-۴-۳- مدل مفهومی.....	۴۶
۳-۴-۳- انتخاب کد کامپیوتری و نرم‌افزار.....	۴۶

۵۰	..... ۴-۴-۳ طراحی مدل
۵۸	..... ۵-۴-۳ شرایط اولیه
۵۹	..... ۶-۴-۳ واسنجی مدل
۵۹	..... ۷-۴-۳ نتایج واسنجی
۶۲	..... ۸-۴-۳ صحت‌سنجی
۶۲	..... ۹-۴-۳ پیش‌بینی
۶۲	..... ۱۰-۴-۳ ارائه نتایج
۶۳	<b>فصل چهارم: تهیه مدل عددی دشت شاهرود با استفاده از GMS6.0</b>
۶۳	..... ۱-۴-۱ تهیه مدل مفهومی
۶۴	..... ۲-۴-۲ شرایط اولیه
۶۶	..... ۳-۴-۳ شرایط مرزی مدل
۶۸	..... ۴-۴-۴ چاه‌های بهره‌برداری
۷۰	..... ۵-۴-۵ تبخیر
۷۱	..... ۶-۴-۶ تغذیه
۷۲	..... ۷-۴-۷ پارامترهای هیدرولیکی آبخوان
۷۳	..... ۸-۴-۸ چاه‌های مشاهده‌ای
۷۴	..... ۹-۴-۹ بار هیدرولیکی اولیه در شرایط پایدار
۷۵	..... ۱۰-۴-۱۰ وضعیت هندسی
۷۶	..... ۱۱-۴-۱۱ تهیه شبکه مدل و گسسته‌سازی مکانی
۷۷	..... ۱۲-۴-۱۲ تعریف مدل عددی
۷۷	..... ۱۳-۴-۱۳ گسسته‌سازی زمانی مدل در شرایط پایدار
۷۸	..... ۱۴-۴-۱۴ تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی
۷۸	..... ۱۵-۴-۱۵ اجرای مدل
۷۸	..... ۱۶-۴-۱۶ حساسیت‌سنجی مدل
۷۹	..... ۱۷-۴-۱۷ واسنجی مدل برای شرایط پایدار
۸۱	..... ۱۸-۴-۱۸ بار هیدرولیکی اولیه در شرایط ناپایدار
۸۱	..... ۱۹-۴-۱۹ گسسته‌سازی زمانی در شرایط ناپایدار
۸۲	..... ۱۹-۴-۱۹ واسنجی مدل برای شرایط ناپایدار
۸۸	..... ۲۰-۴-۲۰ صحت‌سنجی مدل
۸۹	<b>فصل پنجم: پیش‌بینی تاثیر اجرای فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود</b>
۸۹	..... ۱-۵-۱ مقدمه
۹۰	..... ۲-۵-۲ پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب
۹۴	..... ۳-۵-۳ پیش‌بینی مدل برای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ همراه با اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری
۹۹	<b>فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها</b>
۹۹	..... ۱-۶-۱ نتیجه‌گیری
۱۰۱	..... ۲-۶-۲ پیشنهادها
۱۰۲	..... مراجع



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه..... ۱۰
- شکل ۱-۳- تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه..... ۱۳
- شکل ۳-۴- تفاوت بین سیستم مرکز بلوکی و سیستم مرکز شبکه‌ای..... ۴۱
- شکل ۳-۵- دستگاه مختصات در نظر گرفته شده برای حل معادلات جبری..... ۴۱
- شکل ۳-۶- شبکه اجزا محدود مثلثی..... ۴۳
- شکل ۳-۷- مراحل مدل‌سازی..... ۴۵
- شکل ۳-۸- یک سیستم آبخوان فرضی تقسیم‌بندی شده..... ۵۱
- شکل ۳-۱۰- هدف واسنجی..... ۵۹
- شکل ۴-۱- هیدروگراف واحد دشت..... ۶۵
- شکل ۴-۲- شرایط مرزی منطقه مورد مطالعه..... ۶۷
- شکل ۴-۳- چاه‌های بهره‌بردار در محدوده مطالعاتی دشت..... ۶۹
- شکل ۴-۴- نقشه هم‌عمق مربوط به بهمن ۱۳۸۷..... ۷۰
- شکل ۴-۵- منطقه‌بندی تغذیه..... ۷۱
- شکل ۴-۶- منطقه‌بندی اولیه هدایت هیدرولیکی..... ۷۳
- شکل ۴-۷- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای..... ۷۴
- شکل ۴-۸- منحنی تراز توپوگرافی دشت شاهرود..... ۷۵
- شکل ۴-۹- منحنی تراز سنگ کف دشت شاهرود..... ۷۶
- شکل ۴-۱۰- شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه..... ۷۷
- شکل ۴-۱۱- حساسیت مدل نسبت به تغییر یکنواخت برخی پارامترها..... ۷۹
- شکل ۴-۱۲- میانگین خطای آخرین اجرای مدل دشت شاهرود در حالت پایدار..... ۸۰
- شکل ۴-۱۳- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای آخرین اجرای مدل دشت شاهرود در حالت پایدار..... ۸۰
- شکل ۴-۱۴- تراز آب زیرزمینی اولیه در شرایط ناپایدار..... ۸۱
- شکل ۴-۱۵- دوره‌های تنش و گام‌های زمانی در حالت ناپایدار..... ۸۲
- شکل ۴-۱۶- انواع میانگین خطاها در گام‌های زمانی..... ۸۳
- شکل ۴-۱۷- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی اول)..... ۸۴
- شکل ۴-۱۸- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی دوم)..... ۸۴
- شکل ۴-۱۹- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی سوم)..... ۸۴
- شکل ۴-۲۰- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی چهارم)..... ۸۵
- شکل ۴-۲۱- منطقه‌بندی نهایی هدایت هیدرولیکی..... ۸۵
- شکل ۴-۲۳- انواع میانگین خطاها در گام‌های زمانی..... ۸۸
- شکل ۵-۱- سطح آب محاسباتی مدل قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب در پی‌زومترهای شماره ۱ تا ۶..... ۹۱
- شکل ۵-۲- سطح آب محاسباتی مدل قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب در پی‌زومترهای شماره ۶ تا ۱۲..... ۹۲
- شکل ۵-۳- سطح آب محاسباتی مدل قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب در پی‌زومترهای شماره ۱۲ تا ۱۶..... ۹۳
- شکل ۵-۴- کاهش سطح آب زیرزمینی در پی‌زومترهای مختلف بعد از اجرای طرح فاضلاب..... ۹۴
- شکل ۵-۵- سطح آب محاسباتی قبل و بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌بردار در پی‌زومترهای شماره ۱ تا ۶..... ۹۵
- شکل ۵-۶- سطح آب محاسباتی قبل و بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌بردار در پی‌زومترهای شماره ۶ تا ۱۲..... ۹۶
- شکل ۵-۷- سطح آب محاسباتی قبل و بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌بردار در پی‌زومترهای شماره ۱۲ تا ۱۶..... ۹۷

- شکل ۵-۸- بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای مختلف بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری ..... ۹۸
- شکل ۶-۱- کاهش سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای مختلف بعد از اجرای طرح فاضلاب ..... ۱۰۰
- شکل ۶-۲- بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای مختلف بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری ..... ۱۰۱

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- میانگین خصوصیات آب و هوایی ایستگاه شاهرود..... ۵
- جدول ۲-۱- میانگین ۱۵ ساله خصوصیات آب و هوایی..... ۶
- جدول ۱-۴- مشخصات جغرافیایی و ارتفاع سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای دشت شاهرود..... ۶۴
- جدول ۲-۴- مقادیر اولیه تغذیه هر منطقه..... ۷۲
- جدول ۳-۴- مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی هر منطقه..... ۷۳
- جدول ۴-۴- مقادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه مربوط به هر منطقه پس از واسنجی دستی..... ۸۶
- جدول ۵-۴- مقادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه مربوط به هر منطقه پس از واسنجی خودکار..... ۸۶
- جدول ۶-۴- مقادیر نهایی تغذیه مربوط به هر منطقه..... ۸۷
- جدول ۱-۵- بیلان آب زیرزمینی دشت شاهرود بر اساس نتایج مدل بر حسب متر مکعب..... ۹۰

## فصل اول: کلیات

### ۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

سرزمین ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی، دارای میزان نزولات جوی ناچیزی است به طوری که اگر میانگین بارندگی سالانه در سطح کره زمین حدود ۸۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود و این میزان با متوسط بارندگی سالانه ایران که حدود ۲۴۰ میلی‌متر است مقایسه شود، ملاحظه می‌شود که بارندگی در ایران حتی کمتر از یک‌سوم متوسط بارندگی در سطح دنیا است. به همین دلیل در اغلب مناطق ایران منابع آب سطحی وجود ندارد و آب مورد نیاز برای مصارف مختلف محدود به آب‌های زیرزمینی می‌شود.

محدودیت منابع آب‌های سطحی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع آب کشور در سال‌های گذشته شده است. علاوه بر افت شدید سطح آب در آبخوان‌ها، فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری آلاینده‌های مختلفی را به آبخوان‌ها تحمیل می‌کنند که برای جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی، حفاظت از آب‌های زیرزمینی و مدیریت بهره‌برداری باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد. در این رابطه، مدل ریاضی در صورت شناخت درست و به شرط آماده بودن زمینه، می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد در اختیار مدیران قرار گیرد. مدل ریاضی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی است که از قوانین هیدرولیک کمک می‌گیرد. مدل آب زیرزمینی ابزاری در اختیار می‌دهد تا بتوان داده‌های موجود را تبدیل به ویژگی‌های عددی برای سامانه آب زیرزمینی نمود و عمدتاً "وسيله‌ای برای پیش‌بینی عکس‌العمل آبخوان تحت‌تاثیر عوامل تغذیه و تخلیه است (موسسه تحقیقات آب ۱۳۸۲).

منطقه مورد مطالعه بخشی از دشت شاهرود می‌باشد. مدل‌سازی آبخوان دشت شاهرود تاکنون انجام نشده است بنابر این مدل‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی دشت شاهرود می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را فراهم کند. یکی از منابع تغذیه دشت شاهرود، فاضلاب شهر شاهرود می‌باشد. سالانه حدود ۱۶ میلیون متر مکعب آب به صورت فاضلاب، آبخوان دشت شاهرود را تغذیه می‌کند. با توجه به این که آبرفت‌های دشت شاهرود دانه درشت هستند و علاوه بر این عمق سطح ایستابی بسیار زیاد است (حدوداً ۱۰۰ متر) بنابراین تبخیر از فاضلاب‌ها و یا ذخیره شدن آن‌ها در چاه‌های فاضلاب بسیار ناچیز خواهد بود و تقریباً تمام فاضلاب به آبخوان ملحق می‌شود. از آنجا که قرار است در آینده‌ای نزدیک، طرح جمع‌آوری فاضلاب‌ها در سطح شهر شاهرود اجرا شود، اجراء طرح فاضلاب باعث می‌شود که یکی از منابع عمده تغذیه دشت حذف شود که این پدیده تاثیر قابل توجهی بر سطح آب‌های زیرزمینی این دشت خواهد گذاشت. در این تحقیق سعی می‌گردد آبخوان دشت شاهرود شبیه‌سازی شده و مدل ریاضی به دست آمده جهت پیش‌بینی تغییرات سطح آب‌زیرزمینی، بعد از اجرای طرح فاضلاب به کار گرفته شود.

## ۱-۲- سامان‌دهی پایان نامه

**فصل اول:** در این فصل به کلیاتی درباره اهمیت مسئله و معرفی منطقه از لحاظ موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی، هواشناسی، چینه‌شناسی، ژئومورفولوژی و جمعیت منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است.

**فصل دوم:** در این فصل به تحقیقات انجام شده مربوط به مدل‌های عددی در جهان و ایران پرداخته شده است.

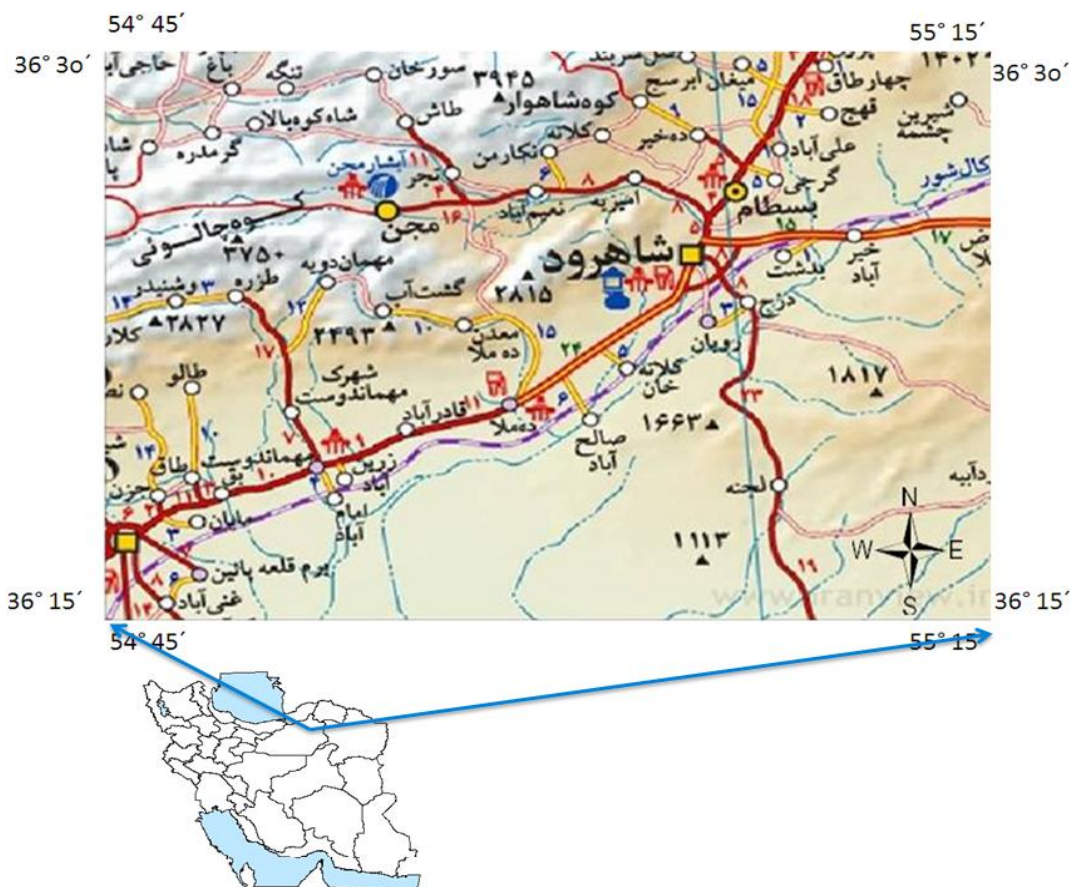
**فصل سوم:** در این فصل تعریف مدل‌سازی، معادلات اساسی حاکم بر جریان آب‌زیرزمینی، طبقه‌بندی مدل‌های آب زیرزمینی و مراحل طراحی یک مدل عددی آورده شده است.

**فصل چهارم:** در این فصل پس از تهیه مدل مفهومی دشت، مدل عددی آبخوان تهیه گردید. مدل تهیه شده برای یک سال آبی کالیبره و برای سال بعدی صحت‌سنجی گردید.

**فصل پنجم:** در این فصل با استفاده از خروجی‌های مدل، بیلان سالانه آبخوان مذکور برای سال اجرای مدل محاسبه گردیده و تغییرات سطح آب برای چند سال بعد از اجرای طرح فاضلاب پیش-بینی گردید.

### ۳-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

دشت شاهرود و حوضه آبرگیر آن مشتمل بر دشت بسطام و مجن در جنوب ارتفاعات البرز در مسیر جاده اصلی تهران-مشهد قرار گرفته است. از نظر جغرافیایی این دشت در محدوده ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. از مهمترین ارتفاعات واقع در حوضه آبرگیر این دشت می‌توان شاهوار و ارتفاعات تپال را نام برد که شاهوار با ارتفاعی برابر ۳۹۴۵ متر به عنوان مرتفع‌ترین ارتفاع این حوضه محسوب می‌گردد و اغلب اوقات پوشیده از برف می‌باشد. حداکثر ارتفاع دشت شاهرود ۱۴۵۰ متر از سطح دریا در حاشیه ارتفاعات تپال و حداقل آن در خروجی یعنی ورودی به کویر در حدود ۱۰۰۰ متر می‌باشد. وسعت کلی حوضه آبرگیر دشت شاهرود ۱۲۶۵/۸ کیلومتر مربع و مساحت دشت در محدوده مورد مطالعه حدود ۴۵۰/۴۱ کیلومتر مربع می‌باشد. دشت بسطام و مجن در داخل حوضه آبرگیر دشت شاهرود واقع شده است. شکل (۱-۱) موقعیت محدوده مطالعاتی شاهرود و راه‌های ارتباطی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- موقعیت محدوده مطالعاتی شاهرود و راه‌های ارتباطی

#### ۱-۴- هواشناسی منطقه

در محدوده مطالعاتی دشت شاهرود مناسب‌ترین ایستگاه هواشناسی، ایستگاه سینوپتیک شاهرود است که به لحاظ صحت آماری نیز قابل اطمینان است. بر اساس بررسی آماری این ایستگاه حداکثر و حداقل بارندگی سالانه ثبت شده به ترتیب ۳۴۳ و ۷۸ میلی‌متر بوده و بارندگی سالانه آن نسبتاً نامنظم تا نسبتاً منظم ارزیابی شده است. مقدار تبخیر و تعرق سالانه بین ۱۱۵۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متر، تبخیر پتانسیل سالانه حدود ۲۱۰۰ میلی‌متر و متوسط رطوبت نسبی سالانه ۴۸ درصد است. در جدول (۱-۱) میانگین سالانه خصوصیات آب و هوایی ثبت شده در ایستگاه شاهرود نشان داده شده است.

جدول ۱-۱- میانگین خصوصیات آب و هوایی ایستگاه شاهرود (برگرفته از داده‌های آب منطقه‌ای)

سال آماری	متوسط دمای سالانه (°C)	میانگین بارش سالانه (mm)
۱۳۵۸	۱۴/۹	۲۰۷/۶
۱۳۵۹	۱۳/۸	۲۰۱/۷
۱۳۶۰	۱۵/۴	۱۴۱/۲
۱۳۶۱	۱۳/۶	۱۹۸/۴
۱۳۶۲	۱۴/۲	۹۶/۰
۱۳۶۳	۱۳/۷	۱۸۳/۷
۱۳۶۴	۱۴/۵	۷۸/۷
۱۳۶۵	۱۳/۹	۱۸۴/۰
۱۳۶۶	۱۴/۶	۱۷۷/۷
۱۳۶۷	۱۴/۵	۱۶۱/۹
۱۳۶۸	۱۴/۵	۱۴۸/۹
۱۳۶۹	۱۲/۸	۲۸۵/۵
۱۳۷۰	۱۳/۹	۲۷۹/۶
۱۳۷۱	۱۲/۸	۲۵۸/۵
۱۳۷۲	۱۳/۶	۲۷۷/۷
۱۳۷۳	۱۵/۰	۱۱۰/۹
۱۳۷۴	۱۴/۶	۲۲۷/۸
۱۳۷۵	۱۴/۹	۹۲/۸
۱۳۷۶	۱۵/۳	۱۵۷/۵
۱۳۷۷	۱۶/۳	۱۳۸/۷
۱۳۷۸	۱۵/۱	۱۳۹/۱
۱۳۷۹	۱۵/۹	۱۲۶/۹
۱۳۸۰	۱۶/۴	۹۰/۳
۱۳۸۱	۱۵/۶	۱۶۲/۷
۱۳۸۲	۱۵/۵	۱۷۴/۸
۱۳۸۳	۱۵/۲	۱۸۰/۴
۱۳۸۴	۱۵/۹	۹۷/۳
۱۳۸۵	۱۵/۹	۱۶۸/۰
۱۳۸۶	۱۴/۸	۲۱۶/۱
۱۳۸۷	۱۶/۳	۱۱۲/۴
۱۳۸۸	۱۵/۵۲	۱۳۸/۶
میانگین	۱۵/۱۵	۱۵۳/۰۸



مشاهده می‌شود که میانگین بارش سالانه شاهرود، ۱۵۳/۰۸ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۵/۱۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. جدول (۱-۲) میانگین ماهانه (از سال آبی ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۸) خصوصیات آب و هوایی را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲- میانگین ۱۵ ساله خصوصیات آب و هوایی (برگرفته از داده‌های آب منطقه‌ای سمنان)

تبخیر (mm)	میانگین دما (°C)	میانگین بارش (mm)	ماه
۱۵۲/۰	۱۳/۴	۲۷/۰	فروردین
۲۱۸/۰	۱۸/۷	۲۶/۳	اردیبهشت
۲۹۵/۰	۲۳/۵	۸/۲	خرداد
۳۴۴/۹	۲۷/۰	۲/۶	تیر
۳۴۷/۵	۲۷/۲	۱/۸	مرداد
۲۷۱/۳	۲۴/۴	۲/۶	شهریور
۱۵۵/۶	۱۸/۶	۵/۸	مهر
۸۵/۸	۱۲/۰	۶/۶	آبان
۱۸/۸	۵/۱	۱۸/۲	آذر
۰/۲	۲/۶	۱۲/۰	دی
۰/۰	۳/۷	۲۲/۰	بهمن
۲/۷	۷/۸	۲۵/۳	اسفند
۱۵۲/۱	۱۵/۳	۱۵۸/۴	میانگین سالانه

شهر شاهرود دارای آب و هوای نیمه‌بیابانی با زمستان‌های سرد و خشک و تابستان‌های معتدل می‌باشد. در این ناحیه رطوبت نسبی پایین است. این شهر از نظر طبقه‌بندی کوپن، جزء اقلیم‌های بیابانی و خشک طبقه‌بندی می‌شود (گزارش وضعیت منابع آبی شهرستان شاهرود).

### ۱-۵- زمین‌شناسی منطقه

از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه مربوط به دو زون ساختاری البرز و ایران مرکزی می‌باشد. به طوری که قسمت‌های شمالی منطقه به زون ساختاری البرز و قسمت‌های جنوبی منطقه به زون ساختاری ایران مرکزی تعلق دارد.

قسمت‌های شمالی منطقه با ارتفاعات البرز خاوری محدود شده که در نتیجه عملکرد فرآیندهای کوهزایی، خشکی‌زایی و حرکات زمین‌ساختی مختلف و چین‌خوردگی‌ها و گسلش‌های متعدد ناشی از آنها به وجود آمده که سبب ظهور ساختارهای تاقدیس، ناودیس و راندگی‌های متعدد شده است. بخش‌های جنوبی منطقه نیز شامل ساختارهای تاقدیسی، چین‌های جناغی و پدیده راندگی می‌باشد. بیشتر برون‌زدهای منطقه مورد مطالعه مربوط به بخش‌های شرقی رشته‌کوه‌های البرز می‌باشد (رشته کوه‌های با روند شرقی- غربی واقع در شمال ایران و جنوب دریاچه خزر) حاشیه جنوبی و حاشیه شمالی این رشته‌کوه‌ها دارای اختلاف فاحشی از نظر زمین‌شناسی و چین‌شناسی می‌باشند و حاشیه جنوبی این رشته کوه‌ها از نظر ساختاری و چین‌شناسی مشابه ایران مرکزی می‌باشد.

#### ۱-۵-۱- چین‌شناسی منطقه

تشکیلات زمین‌شناسی این ناحیه بر اساس نقشه زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور، متعلق به دوران اول تا عهد حاضر است و از قدیم به جدید شامل سازندهای الیکا، میلا، شمشک، دلیچای، لار، فجن، میوسن زیرین، سنگ‌های آتشفشانی میوسن میانی، رسوبات پلیوکواترنری و رسوبات کواترنری می‌باشد. عمدتاً "جنس طبقات آهکی است. حاشیه ارتفاعات، رسوبات تخریبی و واریزه‌های انباشته گردیده است و سطح شهر شاهرود و دشت را آبرفت‌های عهد حاضر می‌پوشاند. شکل (۱-۲) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این بخش توضیح مختصری در خصوص سازندهای مختلف منطقه با استفاده از گزارش شرکت مهندسی مشاور فن آوران آب سازه ارائه می‌شود.

#### الف- سازند میلا

نام این تشکیلات از میلاکوه واقع در غرب دامغان گرفته شده است. این تشکیلات که ضخامت آن در مقطع اصلی ۵۸۰ متر است شامل ۵ بخش می‌باشد که عمدتاً "از آهک تشکیل یافته است. این تشکیلات مربوط به کامبرین میانی تا اردویسین زیرین می‌باشد.

ب- سازند الیکا

این سازند متعلق به دوره تریاس زیرین، میانی و فوقانی بوده و عمدتاً "از سنگ آهک تشکیل گردیده اما تفاوت‌هایی در طبقات با میان لایه‌ها وجود دارد که می‌توان بخش‌های مختلف دوره تریاس را جدا نمود. به طوری که در بخش زیرین سنگ آهک شیلی و خاکستری رنگ نازک لایه و به هم ریخته و بدون نظم چین‌شناسی و بخش فوقانی و میانی را تناوب‌های سنگ آهک توده‌ای خاکستری دارای رگه‌هایی از کلسیت و دولومیت زرد تا آجری رنگ با میان لایه‌هایی از شیل‌های نازک و سبز رنگ تشکیل می‌دهد.

پ- سازند شمشک

سازند شمشک عمدتاً "از ماسه‌سنگ و شیل تشکیل گردیده و فسیل‌های گیاهی خاصی در طبقات اولیه این سازند مشاهده می‌شود. سازند شمشک را متعلق به دوره تریاس فوقانی تا ژوراسیک میانی می‌دانند. ضخامت این سازند در بعضی جاها بیش از ۱۰۰۰ متر هم گزارش شده و به دلیل تحمل فشارهای کوهزایی به هم پیچیده چین‌خورده‌های فراوان دارد. گرچه این سازند به بخش‌های مختلف قابل تفکیک است اما همه بخش‌ها از ماسه‌سنگ و شیل و رگه‌های زغالی تشکیل گردیده است.

ت- سازند دلیچای

این سازند بر روی سازند شمشک واقع شده و سن ژوراسیک میانی را دارد. سازند دلیچای از لایه‌های مارن، ماسه‌سنگ آهکی و طبقات آهک تشکیل شده اما به دلیل وجود مارن در آهک و آهک توده‌ای و فشرده آن باعث گردیده تا سازند آهکی دلیچای از نظر ذخیره‌سازی آب‌های نفوذی حائز اهمیت نباشد.

ث- سازند لار

از نظر لیتولوژی شامل آهک‌های نازک لایه در قاعده و سپس آهک‌های ضخیم لایه حاوی آمونیت و در بالا شامل آهک‌های ضخیم لایه حاوی نودول‌های چرت می‌باشد. این سازند با توجه به لیتولوژی

خود اکثراً تشکیل دهنده ستیغ‌های بلند و پرتگاه‌های عمیق و قلل در منطقه می‌باشد. این سازند می‌تواند نقش عمده‌ای در تشکیل سنگ مخزن جهت استحصال آب و تغذیه به آبخوان ایفا نماید.

#### ج- سازند فجن

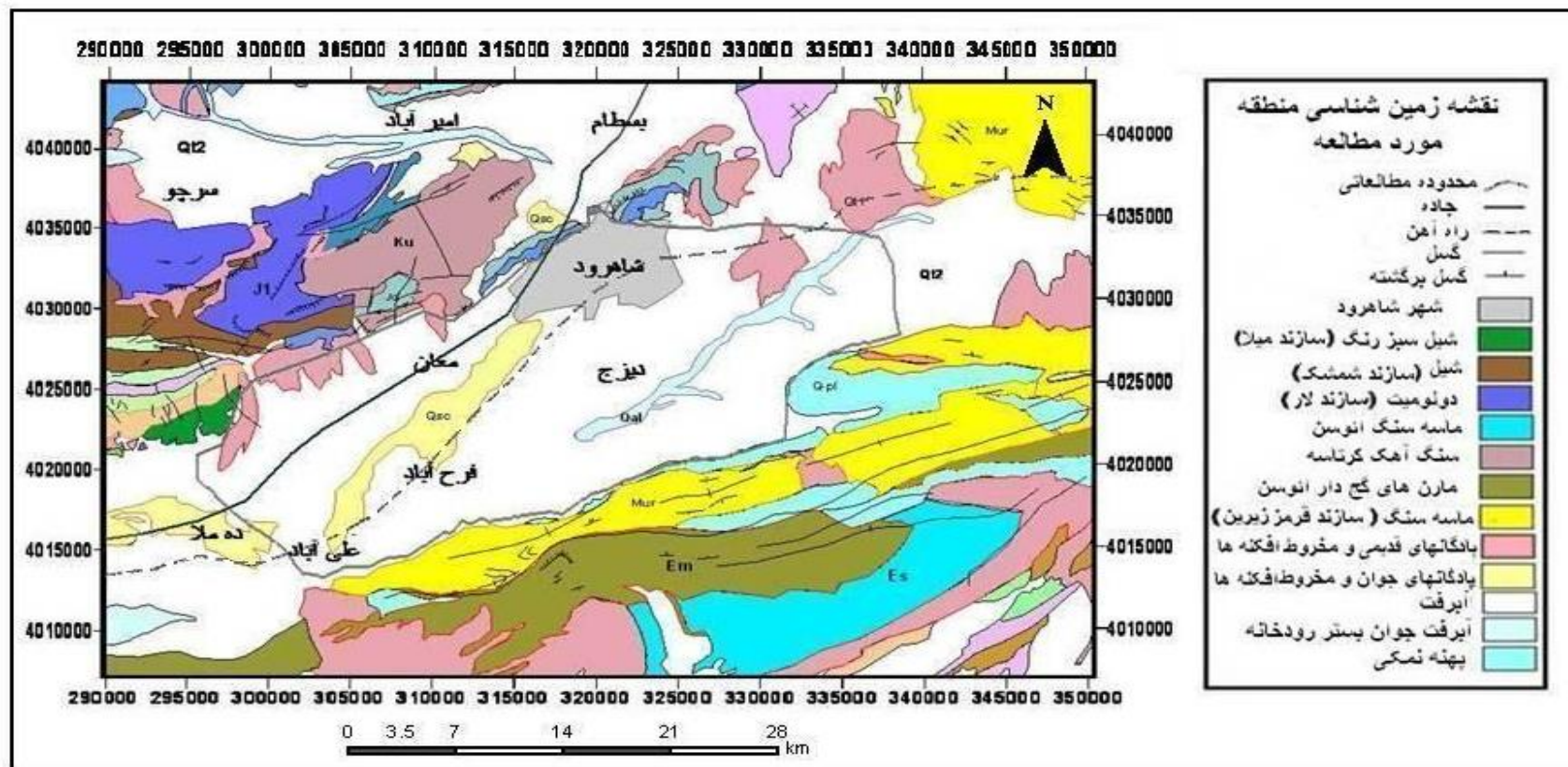
سازند فجن قاعده طبقات دوران سوم می‌باشد و در شمال منطقه قابل رویت است و از نظر رخساره به واحدهای متفاوت تقسیم می‌شود. در قاعده سازند فجن لایه‌ای از کنگلومرای قرمز رنگ مشاهده می‌شود که دانه‌ها و قطعات خرد شده آهک‌ها به وسیله خمیری از رس به هم متصل شده‌اند. جنس و رنگ آن مشخصه سازند فجن می‌باشد. علاوه بر کنگلومرا قرمز رنگ، لایه‌ای از ماسه‌سنگ قرمز رنگ و سبز رنگ نیز به همراه این طبقه قابل تشخیص است که به طور متناوب قرار گرفته‌اند.

#### ح- سازند زیارت

بر روی سازند قرمز رنگ فجن، سازند زیارت قرار دارد که متعلق به ائوسن زیرین است. از نظر لیتولوژی بخش زیرین این سازند شامل مارن‌های ژپس‌دار و ژپس با فسیل‌های دوکفه‌ای و در بخش بالائی شامل آهک‌های ریفی می‌باشد. فسیل موجود در این سازند انواع نومولیت‌ها می‌باشند. این سازند به دلیل وجود لایه‌ای از آهک برای ذخیره‌سازی آب‌های نفوذی اهمیت دارند و حفاری‌های انجام شده در این سازند نتیجه‌دار بوده است.

#### خ- سازند میوسن زیرین

طبقات این سازند معادل بخش‌هایی از سازند قرمز زیرین که در ایالت ایران مرکزی وجود دارد، می‌باشد. این سازندها از طبقات مارن‌های قرمز رنگ همراه با رگه‌های ژپس و لایه‌هایی از ماسه‌سنگ نازک لایه و متوسط لایه به رنگ ارغوانی و شیل‌های نازک لایه ارغوانی به همراه لایه‌هایی از کنگلومرا و میکروکنگلومرای قرمز رنگ تشکیل شده است. این سازند بر اثر تحمل فشارهای کوهزایی چین-خورده و در بعضی مناطق از منطقه به هم ریخته است. ضخامت آن حدود ۶۰۰ تا ۸۰۰ متر برآورد شده اما به دلیل وجود رسوبات ریز دانه رسی و مارنی از نظر آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت نیستند.



شکل ۱-۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

د- سنگ‌های آتشفشانی میوسن میانی

پس از سازندهای میوسن زیرین توده‌های تراکی آندزیت سیاه رنگ قابل تشخیص می‌باشند که سن آن را می‌توان پس از میوسن زیرین دانست و در جنوب محدوده مورد مطالعه یافت می‌گردد.

ذ- رسوبات پلیوکواترنری

رسوبات این بخش شامل رسوباتی است که بر اثر پسروی دریا، تخریب و خرد شدن طبقات دوره‌های قبل به جای مانده و مجدداً در قسمت‌های کناری و نواحی کم عمق دریا به هم متصل شده‌اند. لذا تولید طبقات کنگلومرا و سنگ‌جوش با ماسه‌سنگ و شیل‌های نازک لایه را نموده‌اند. این طبقات بر اثر تحمل فشارهای جانبی دارای چین خوردگی می‌باشند.

ر- رسوبات کواترنری

این رسوبات متعلق به آخرین دوران بوده و اکثراً به عنوان رسوبات آبرفتی محسوب می‌شود که به وسیله دریا‌های کم عمق با جریان‌های سطحی بر جای مانده‌اند. این رسوبات در سطح دشت‌ها و حاشیه ارتفاعات گسترده شده و گسترش زیادی دارند. مجموعه این رسوبات با توجه به قدمت و محل قرارگیری به بخش‌های مختلف تقسیم می‌گردند.

## ۱-۶- زمین‌شناسی ساختمانی

منطقه شاهرود همانطور که گفته شد بین دو ایالت ساختاری البرز و ایران مرکزی قرار گرفته است. بنابر این، پدیده‌های زمین‌شناسی ساختمانی البرز در شمال محدوده شاهرود دارای ویژگی‌های خاص البرز بوده و محور چین‌خوردگی‌های آن‌ها در راستای شمال‌شرقی- جنوب‌غربی و یا به طور دقیق شرقی- غربی است. چین‌ها متقارن می‌باشند. گسل‌های اصلی البرز مانند گسل جنوب البرز یا گسل مشا- فشم در

شمال شاهرود طبقات را تحت تاثیر قرار داده و جنوب دشت که متعلق به ایالت ساختاری ایران مرکزی است، تحت تاثیر پدیده‌های خاص ایران مرکزی می‌باشند.

از جمله ناودیس‌های مهم ناودیس دهملا است که در راستای شمال خاوری- باختر به موازات راندگی- های شاهرود و طرزه می‌باشد. یال‌های آن را سازند لالون و زاگون تشکیل می‌دهند. تاقدیس مهم در منطقه، تاقدیس تل است. تاقدیس تل به صورت نامتقارن در راستای شمال خاور - جنوب باختر به موازات راندگی میامی قرار گرفته است.

سیستم گسل‌های منطقه عمدتاً " گسل رورانده بوده که در امتداد شرقی- غربی مشاهده می‌گردند. از جمله گسل‌های معروف در شمال شاهرود می‌توان به گسل روراندگی شاهرود، گسل روراندگی طرزه، گسل روراندگی مجن، گسل روراندگی میامی و گسل‌های کواترنری اشاره کرد. دو گسل جدید میان دشتی دهملا و گسل علی‌قلی متعلق به کواترنری می‌باشند که به نام‌های گسل کواترنری معروف هستند. گسل میان دشتی دهملا امتداد شرقی- غربی دارد و از شمال دشت عبور می‌نماید. گسل علی‌قلی دارای امتداد شمال شرق - جنوب غرب، در جنوب دشت شاهرود قابل تشخیص می‌باشد. گسل روراندگی شاهرود گسل اصلی منطقه محسوب می‌گردد و دارای امتداد طولانی در راستای خاور-باختر می‌باشد.

## ۷-۱- ژئومرفولوژی منطقه

از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی، محدوده مورد مطالعه قابل تقسیم به سه واحد دشت، تپه‌ماهور و کوهستان می‌باشد. این دشت که به صورت مستطیلی در جهت شمال‌شرق- جنوب غرب می‌باشد، از طرف شمال به واحدهای کوهستانی (ارتفاعات تپال) و از جنوب ابتدا به تپه‌ماهورهای مارنی گچی سپس به مناطق کوهستانی ختم می‌شود. از عرض غربی به دشت دامغان و عرض شرقی به حوضه آبگیر میامی می‌رسد. دشت از آبرفت‌ها و نهشته‌های رودخانه‌ای عهد حاضر پوشیده شده که در باند شمالی و حاشیه ارتفاعات غالباً درشت دانه و به سمت جنوب و جنوب غرب با کاهش شیب به رسوبات رسی و ریز دانه ختم

می‌گردد. (شرکت مهندسیین مشاور فن آوران آب سازه ۱۳۸۲). شکل (۱-۳) تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

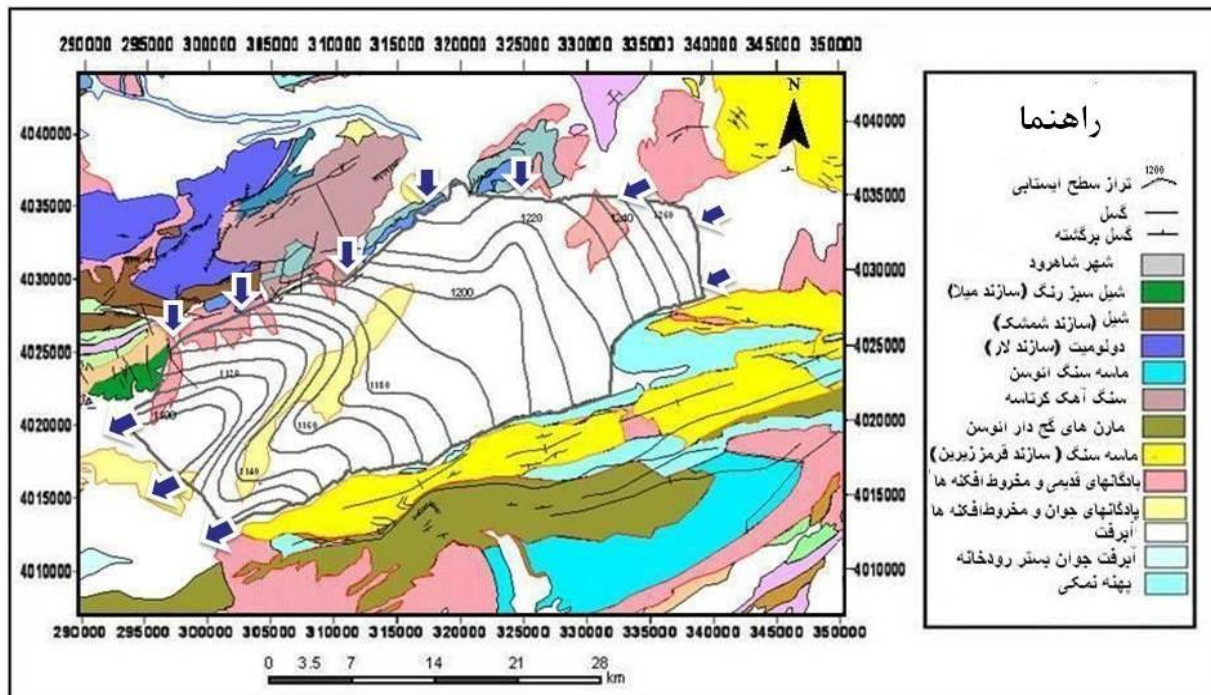
## ۱-۸- هیدروژئولوژی منطقه

آبخوان دشت شاهرود در محدوده مطالعاتی از نوع آزاد و تک لایه می‌باشد. بر اساس نقشه تراز سطح آب زیرزمینی جهت جریان آب آبخوان از سمت شمال و شمال شرق به سمت نواحی مرکزی و جنوب غربی می‌باشد. مرزهای شرق و شمال منطقه مرزهای تغذیه‌ای و مرز جنوب غربی مرز تخلیه‌ای آبخوان می‌باشد (شکل ۱-۴). به همچنین تغذیه بسیار مناسبی از اطراف شهر شاهرود در دشت مشاهده می‌شود که به



احتمال زیاد مربوط به ورودی جریان آب زیرزمینی و سطحی دشت بسطام و نیز آب‌های نفوذی حاصل از چاه‌های جذبی می‌باشد.

بر اساس داده‌های جمع آوری شده از اداره امور آب شاهرود تعداد ۲۳۸ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق فعال در محدوده مطالعاتی وجود دارد که عمدتاً برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در منطقه هیچ چشمه و قنات فعالی وجود ندارد. کاوش‌های ژئوفیزیکی و چاه‌های اکتشافی حفاری شده در این دشت، بیانگر وجود آبرفت ضخیم لایه در اطراف شهر شاهرود، قلعه نوخالصه و قلعه نوروزخان نسبت به بقیه بخش‌ها می‌باشد (ذاکری ۱۳۸۲). وضعیت هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه به صورت کامل‌تر در فصل چهارم ارائه شده است.



شکل ۱-۴- نقشه تراز سطح آب منطقه .

## ۱-۹- جمعیت

مطابق سرشماری سال ۱۳۳۵ جمعیت شهر بالغ بر ۱۷۰۵۸ نفر و در سال ۱۳۴۵ بالغ بر ۳۰۷۶۸ نفر بوده است. بر اساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن جمعیت شهر در سال‌های ۱۳۵۵، ۱۳۶۵، ۱۳۷۰، ۱۳۷۵ و ۱۳۸۵ به ترتیب ۴۹۷۸۳، ۷۸۹۵۰، ۹۲۱۹۵، ۱۰۴۷۶۵ و ۱۵۷۸۲۷ نفر اعلام گردیده است. شهر شاهرود پرجمعیت‌ترین شهر استان سمنان می‌باشد و بیش‌ترین رشد جمعیت را دارا می‌باشد  
(www.Sci.org.ir).

## فصل دوم: مروری بر مطالعات مدل سازی جریان آب زیرزمینی

### ۲-۱- مروری بر مدل سازی آبخوان ها در دنیا

دوره جدید هیدروژئولوژی از سال ۱۹۳۵ با معادله تایس (Theis) آغاز گردید. در دهه های ۴۰ و ۵۰ قرن نوزدهم ژاکوب و هانتوش روابطی را در زمینه حل مسایل هیدرولیک چاه ها ارائه نمودند. از همین زمان بود که روش های نظری در حل مسایل آب های زیرزمینی بسیار متداول شد و اکثر فرمول ها و روش های تجربی در قالب معادلات ریاضی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

در سال ۱۹۵۰ ریاضی دانان و مهندسین مخازن نفت روش های حل عددی را برای معادله جریان در صنعت نفت مورد آزمایش قرار دادند و از آن زمان به بعد این روش نیز به مجموعه مدل ها پیوست. این در حالی بود که هنوز مدل های تشابهی برای حل جریان یک سیال منفرد استفاده می شد، ولی نمی توانست برای مسایل چند فازی به آسانی مورد استفاده قرار گیرد. این نارسایی موجب شد که مدل های عددی سیر تکاملی خود را تا امروز طی کنند. به طوری که از سال ۱۹۷۰ به بعد استفاده از مدل های تشابهی تقریباً کنار گذاشته شد و روش های عددی در حل مسایل آب شناسی بسیار متداول شد و برنامه های زیادی به زبان های برنامه نویسی مختلف توسط افراد مختلف نوشته شد.

همزمان با توسعه علوم کامپیوتری در دهه های ۶۰ و ۷۰ قرن نوزدهم استفاده از مدل های ریاضی با راه حل عددی به عنوان یکی از روش های مناسب در مطالعه هیدروژئولوژی به کار گرفته شد و دو راه حل

عددی اجزای محدود (Finite element) و تفاضل‌های محدود (Finite difference) به وجود آمد و تحولی مجدد در تاریخ هیدروژئولوژی ایجاد گردید. استفاده از این روش‌ها در کارهای مهندسی و مخازن نفت در دهه ۷۰ قرن نوزدهم توسط Price به کار گرفته شد (موسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۲).

آندرسون (Anderson, 1989) با مدل‌سازی رخساره‌های مختلف هیدروژئولوژیکی، روند کلی تغییرات ناهمگنی را در مناطق مختلف مشخص نمود و از آن برای مدل‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی استفاده کرد.

مرجیا و کلی (Mergia and Kelly, 1994) از روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی استفاده کردند و مدل ساخته شده را به روش سعی و خطا واسنجی نمودند. پیتر و هیل (Poeter and Hill, 1996) در مطالعه یک آبخوان ناهمگن نشان دادند که استفاده از پارامترهای هیدرولوژیکی بهینه شده ممکن است منجر به خطا در نتایج مدل گردد. اما از این پارامترهای بهینه شده می‌توان برای اصلاح مدل مفهومی استفاده کرد.

هیل و همکاران (Hill et al., 2000) کد کامپیوتری MODFLOW 2000 را طراحی کرده‌اند که قادر به محاسبه حساسیت مشاهدات از طریق روش معادله حساسیت می‌باشد.

ژانگ (Zhang, 2001) جریان آب‌زیرزمینی در سفره‌های کارستی را در شمال شرق یووا (IOWA) را که به علت داشتن سیستم کارستی گسترده در معرض آلودگی شیمیایی و بیولوژیکی است را با استفاده از نرم افزار GMS به منظور فهم بهتر از آلودگی و حرکت آلودگی شبیه‌سازی کرد.

لوری و فروخ (Luary and Froukh, 2002) آبخوان هولو (Holo) با کارستی شدگی بالا و هتروژن را مدل‌سازی کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که آبخوان مذکور به علت کارستی شدگی بالا نسبت به پمپاژ با دبی بالا از چاه‌ها حساسیت بالایی داشته و سطح آب به شدت پایین می‌افتد.

لوجنبرگ و کوئیست (Ljungberg and Qvist, 2004) مدل‌سازی کیفی منطقه Sulur watershed واقع در بخش کومباتور (Coimbatore) هندوستان را با استفاده از نرم افزار GMS درحالت ناماندگار شبیه‌سازی کرد.

کومار و همکاران (Kumar *et al.* 2004) با استفاده از PMWIN تغییرات سطح آب در طول رودخانه هانگتون را بر اثر تاثیر ارتفاع بند وال (Val) شبیه‌سازی کردند.

شیت و همکاران (Sheets *et al.* 2005) تاثیر پمپاژ نزدیک مرز تقسیم آب را در دو آبخوان کربناته و ماسه‌ای واقع در شمال غرب اهیو (Ohio) و شمال شرق هند را در شرایطی که محل چاه‌ها متفاوت و فاصله آن از مرز تقسیم آب یکسان باشد را با استفاده از نرم افزار MODFLOW-2000 شبیه‌سازی نموده و درصد آب پمپاژ از چاه‌ها را تا وقتی که سطح آب به خط تقسیم آب برخورد نماید را برای پمپاژهای متفاوت برآورد کرده‌اند.

مارگاس و همکاران (Maquez *et al.* 2006) آبخوان پالبا والی (Puebla Valley) واقع در مکزیک را با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی MODFLOW و MT3D شبیه‌سازی کرده و هجوم آب‌های ژئوترمال به آبخوان و انتقال مواد محلول آن را بررسی کرده‌اند.

چریستین و همکاران (Christian *et al.* 2006) در تحقیقات خود ترکیب کدهای MODFLOW و MT3D را برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مطالعه کرده و نتایج حاصل از آن را مفید ارزیابی نموده‌اند. گالبیاتی و همکاران (Galbiati *et al.* 2006) منطقه بنلو در ایتالیا به منظور بررسی و پیش‌بینی کیفیت و کمیت آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل آب‌های زیرزمینی swat، MODFLOW و MT3DMS شبیه‌سازی کردند.

ملوپولوس و همکاران (Mylopoulos *et al.* 2007) حوضه آبرگیر مقدونیه که از دو آبخوان کم عمق 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 را تعیین کردند.

باب سو و همکاران (Bob Su *et al.* 2007) آبخوان والاوا (Walawa) در سری‌لانکا را در حالت پایدار با استفاده از نرم‌افزار PMWIN شبیه‌سازی کردند. سپس نوع آبخوان در بخش‌های مختلف دشت را با استفاده مدل تهیه شده مشخص کردند.

آلن و همکاران (Allen *et al* 2007) بر اساس تئوری فوژی (Fuzzy) روشی برای مدل‌سازی و ایجاد تصویر فضایی سه بعدی از ساختار آبخوان گسترش دادند و سپس این روش را با داده‌های لیتولوژی بریتش کلمبیا تست کردند.

های و همکاران (Hi *et al* 2010) تاثیر تغییرات آب و هوا را بر سطح آب زیرزمینی در آبخوان ویکتوریا (Victoria) را با استفاده از مدل عددی MODFLOW مورد بررسی قرار دادند.

## ۲-۲- مدل‌سازی آبخوان‌ها در ایران

مطالعات مدل‌سازی در ایران برای 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 مربوط به تعداد و زمان تحقیقاتی و شرکت‌های مشاوره‌ای و سازمان‌های آب منطقه‌های شبیه‌سازی شده‌اند. از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (موسسه تحقیقات آب ۱۳۸۲).

چیت‌سازان و توسلی (۱۳۷۷) با استفاده از مدل اجزای محدود آبخوان دشت مهیار را شبیه‌سازی کردند و مقدار هدایت هیدرولیکی و آبدهی‌ویژه آبخوان را بهینه نمودند. سپس با استفاده از مدل ساخته شده، شیوه‌های مختلف بهره‌برداری تلفیقی از آب زیرزمینی و آب انتقالی از زاینده رود به دشت مهیار را مورد بررسی قرار داده و روش بهتر را انتخاب نمودند.

پیرهادی (۱۳۷۸) مدل ریاضی دشت رامهرمز را با استفاده از مدل اجزای محدود که توسط بخش هیدرولوژی دانشگاه چانچون کشور چین تهیه شده است بهینه نمود و با روش اصلاح تلسکوپی اقدام به بهینه‌سازی ضرایب هیدرودینامیک آبخوان کرد. نهایتاً "از مدل ساخته شده برای معرفی گزینه برتر مدیریتی استفاده نموده است."

احمدی‌افزادی (۱۳۷۸) برای مقابله با بالآمدگی سطح آب‌های زیرزمینی دشت کرمان از مدل MODFLOW استفاده نمود. وی سه گزینه مدیریتی افزایش پمپاژ از چاه‌های موجود در منطقه بالا-آمدگی، حفاری چاه‌های جدید در منطقه بالاآمدگی و کاهش انتقال فاضلاب و پساب‌ها به آبخوان از طریق جمع‌آوری، انتقال و تصفیه پساب‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. با توجه به ملاحظات کمی و کیفی کاهش انتقال فاضلاب‌ها به آبخوان از طریق جمع‌آوری، انتقال و تصفیه پساب‌ها، بهترین گزینه مدیریتی برای مقابله با بالآمدگی سطح آب‌های زیرزمینی دشت کرمان می‌باشد.

ماجدی (۱۳۸۰) مطالعه هیدروژئولوژی آبخوان دشت نیریز را با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW انجام داد.

لهونی و همکاران (۱۳۸۰) آبخوان دهپهن واقع در منطقه کرمانشاه با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW شبیه‌سازی کرده و با استفاده از روش خودکار، اقدام به واسنجی مدل نموده و با استفاده از رگرسیون غیرخطی حداقل مربعات وزنی، اقدام به برآورد بهینه پارامتر ضریب قابلیت انتقال در مرحله واسنجی مدل کرده است. این روش ابتدا برای یک آبخوان فرضی و سپس برای آبخوان دهپهن به کار برده شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورت داشتن داده‌های با کمیت و کیفیت خوب روش‌های اتوماتیک یا خودکار، می‌تواند جایگزین روش دستی آزمون و خطا گردد و با واسنجی مدل توسط این روش‌ها می‌توان قابلیت به کارگیری مدل آب‌های زیرزمینی را افزایش داد و از پارامترهای برآورد شده مستقلاً در تحقیقات مربوط به بیلان آب استفاده کرد.

زارع و همکاران (۱۳۸۱) آبخوان شیراز را که به علت گسترش شهر با معضل بالآمدگی سطح آب همراه است را به منظور بررسی تاثیر زهکش‌ها بر روی سطح آب زیرزمینی که جهت پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در آبخوان تعبیه شده با استفاده از نرم افزار MODFLOW شبیه‌سازی نموده‌اند.

کتیبه و همکاران (۱۳۸۱) آبخوان آزاد شهر اصفهان را به منظور بررسی هیدروژئولوژیکی آبخوان و تاثیر عملیات احداث تونل متروی این شهر بر رژیم آب زیرزمینی را با نرم افزار PMWIN شبیه‌سازی کرده‌اند.

سروری (۱۳۸۲) شبیه سازی منابع آب زیرزمینی دشت دوسلق را توسط مدل ریاضی MODFLOW انجام داد و پارامترهای هیدروژئولوژیکی دشت، بهینه سازی نمود.

رضایی و موسوی (۱۳۸۲) دشت باجگاه را با استفاده مدل کامپیوتری MODFLOW مورد مطالعه قرار دادن و رفتار سطح ایستابی برای یک دوره ۲۰ ساله تحت تاثیر تنش های مختلف مورد بررسی قرار دادند. توفیق و فرج پور حقیقی (۱۳۸۲) نشست منطقه ای زمین را در اطراف چندین حلقه چاه پمپاژ با روش اجزای محدود مدل سازی نموده اند و با ترسیم نقشه های هم نشست منطقه در طول زمان نشست منطقه ای زمین را مورد بررسی قرار داده اند.

ساعت ساز (۱۳۸۴) استفاده توأم از منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت رامهرمز جهت توسعه کشاورزی را با استفاده از مدل ریاضی عددی، مورد بررسی قرار داد.

چیت سازان و همکاران (۱۳۸۴) جایگاه آنالیز حساسیت و اطلاعات آماری در کاهش عدم قطعیت پارامترهای آبخوان دشت کازرون با کمک مدل ریاضی MODFLOW 2000 مورد بررسی قرار دادند. زارع و نوری (۱۳۸۴) هیدروژئولوژی و مدیریت بهره برداری از آب های زیرزمینی با استفاده از مدل عددی MODFLOW 2000 بر روی آبخوان داراب مورد بررسی قرار گرفت.

اعتباری (۱۳۸۴) با استفاده از کد MT3D مدل کیفی آبخوان دشت سرخس را با توجه به وجود سازندهای نئوژن که عامل ورود مقادیر قابل توجهی املاح مختلف به آب های زیرزمینی در قسمت غربی و شوری آب در این قسمت شده اند تهیه کرده و با استفاده از آن شرایط آینده را از نظر کمی و کیفی با اجرای سناریوهای مختلف بررسی نموده است.

درزی و صفوی (۱۳۸۵) آبخوان دشت نجف آباد واقع در حوضه آبریز زاینده رود را با در نظر گرفتن شرایط خاص فیزیکی، هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی و با توجه به اندرکنش های بین منابع آب سطحی و زیرزمینی موجود در آن شبیه سازی کردند. با توجه به سیاست بهره برداری تلفیقی از آب سطحی و زیرزمینی در شبکه و با مقایسه سطح ایستابی شبیه سازی شده در چاه های مشاهده ای منطقه در طی سال های ۱۳۸۳-۱۳۷۹ با مقادیر اندازه گیری شده در آن ها و با توجه به بیلان جرمی منطقه، ضریب نفوذ



آب کشاورزی در منطقه راست و چپ نکوآباد به ترتیب برابر ۳۰٪ و ۲۵٪ محاسبه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شرایط آب زیرزمینی در دشت به شدت تحت تاثیر تغذیه از محل رودخانه زاینده رود و برگشتی حاصل از آبیاری می‌باشد.

سراج (۱۳۸۵) در منطقه امان‌آباد اراک پس از استخراج اطلاعات مربوط به سنگ کف، ضخامت آبرفت توسط مدل‌سازی‌های الکتریکی، این اطلاعات برای مدل‌سازی حرکت آلودگی استفاده نموده و به این وسیله حرکت تقریبی آلودگی و گسترش زون آلوده در سال‌های آینده را پیش‌بینی کرد.

منفرد و حسینی (۱۳۸۴) تاثیر طرح جامع تامین آب شرب مشهد و پروژه احداث شبکه فاضلاب این شهر را بر سطح آب زیر زمینی به کمک مدل عددی PMWIN مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی طرح جامع تامین آب مشهد در قالب دو سناریو اصلاح شده و پیامدهای هر یک تا سال ۱۳۹۵ پیش‌بینی گردید. سناریوی اول احیای آبخوان شهری را مد نظر ندارد اما در سناریوی دوم، توقف بهره‌برداری برخی چاه‌های درون و پیرامون شهر برنامه‌ریزی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که احداث شبکه فاضلاب در صورت اعمال سناریوی اول، افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی را موجب خواهد شد. همچنین نقش پیشگیرانه سناریوی دوم در قبال این واقعه به خوبی در نتایج مشاهده می‌شود.

رزاق منش و همکاران (۱۳۸۵) آبخوان تبریز را با اهدافی چون شناخت وضعیت منابع آب‌های زیرزمینی و بررسی امکان برآورده نمودن نیازهای آینده و با توجه به احداث شبکه آبیاری و زهکشی، بررسی اثرات احداث این شبکه بر وضعیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از نرم افزار MODFLOW و MT3D شبیه‌سازی کردند. مدل مطالعاتی نشان داد که با 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.

نکوآمال کرمانی و همکاران (۱۳۸۶) آبخوان بوچیر و حمیران واقع در غرب بندرعباس را با استفاده از نرم افزار PMWIN شبیه‌سازی نموده‌اند. پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره را با استفاده از بسته PEST بهینه‌سازی کردند. سپس با استفاده از نتایج مدل پیش‌بینی کردند که با ادامه شرایط برداشت کنونی، روند افت ادامه خواهد داشت.

محمدی و کرمی (۱۳۸۶) آبخوان شیروان را با استفاده از نرم افزار PMWIN شبیه‌سازی نموده‌اند و برای مدیریت بهتر آبخوان تاثیر تنش‌های مختلف از قبیل تغذیه، پمپاژ و دیگر عوامل برسفره را بررسی کرده‌اند. ستاری و همکاران (۱۳۸۷) آبخوان دشت مهران را به منظور ارزیابی هیدروژئولوژیکی و تاثیر شبکه آبیاری و زهکشی سد مخزنی چنگوله بر سطح آب زیرزمینی را با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW شبیه‌سازی کرده‌اند.

فتوت اسکندری و همکاران (۱۳۸۷) دشت شهریار را با استفاده از نرم افزار PMWIN شبیه‌سازی نموده‌اند و از مدل ساخته شده برای پیش بینی فرونشست زمین برای سال ۱۳۹۰-۱۳۸۹ استفاده کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که با فرض ثابت ماندن شرایط آب و هوایی منطقه و بهره‌برداری از چاه‌ها فرونشست زمین روند صعودی خواهد داشت.

سالاری و اژدری مقدم (۱۳۸۶) جلگه چاه هاشم در دشت اسپکه واقع در غرب شهرستان ایرانشهر به کمک نرم افزار MODFLOW مدل‌سازی کرده‌اند و از این مدل برای پیش‌بینی شرایط آینده و مدیریت آبخوان استفاده نموده‌اند. مدیریت آبخوان با اعمال دو استراتژی کاهش دبی چاه‌های بهره‌برداری و نفوذ رواناب سطحی به آبخوان انجام شد.

شفیعی و پارسا (۱۳۸۶) پیشروی شوری آب دریا در دهانه رودخانه‌ها با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی نمود. مدل حاضر از دو بخش تشکیل شده بخش اول آن، کمیت‌های هیدرولیکی جریان، تحت شرایط انتشار موج جزر و مدی محاسبه شده و در بخش دوم، توزیع شوری در نقاط مختلف در طی زمان جزر و مد برآورد می‌شود.

بندانی و اژدری مقدم (۱۳۸۶) اثرات احداث سد گلوگاه بر آبخوان به کمک مدل MODFLOW مورد بررسی قرار داده است.

سالاری و اژدری مقدم (۱۳۸۶) تأثیرات احداث سد دودر بر روی آبخوان دشت لادیز با استفاده از نرم افزار MODFLOW شبیه‌سازی کرده‌اند و با کمک مدل طراحی شده میزان تغییرات سطح ایستابی در آبخوان

را مورد بررسی قرار داده‌اند و بهترین مکان و زمان برای تزریق آب ذخیره شده پشت سد به آبخوان، در حوضچه‌های تغذیه مصنوعی مشخص نموده‌اند.

فاضلی (۱۳۸۷) منطقه تبریز را با استفاده از نرم افزار MODFLOW شبیه سازی کرده پارامترهای هیدرولیکی و بیلان آبی را در این منطقه ارزیابی کرده است. در مرحله واسنجی، اثر تغییر پارامترهای هیدرولیکی و تاثیر آنها در تغییرات جریان و سطح تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داده است. بارانی و همکاران (۱۳۸۸) جهت مطالعه تغییرات سطح ایستابی و اعمال مدیریت بهینه از مدل کامپیوتری MODFLOW جهت شبیه سازی جریان آب زیرزمینی دشت مروست استفاده کردند.

نخعی و امیرصابری نصر (۱۳۸۹) در ابتدا با استفاده از شبکه عصبی- موجکی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت قروه را پیش بینی کردند. سپس نتایج آن را با مدل عددی MODFLOW مقایسه کردند. سپس به این نتیجه رسیدند که روش شبکه عصبی - موجکی از کارایی بالایی برخوردار می باشد.

طایی سمیرمی و همکاران (۱۳۸۹) آبخوان دشت گربایگان فسا را با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW شبیه سازی کردند. سپس از مدل شبیه سازی شده برای پیش بینی سطح ایستابی و مدیریت آبخوان استفاده نمودند.

چیت سازان و عابدینی (۱۳۸۹) آبخوان دشت کازرون با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW به منظور بهینه سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی مدل سازی نموده و عدم قطعیت در مدل آب زیرزمینی آبخوان دشت کازرون را به کمک مشخصه های آماری کمی سازی و مورد بررسی قرار دادند. برای تجزیه و تحلیل مشخصه آماری از روش واسنجی خودکار استفاده نموده‌اند.

## ۲-۳- سابقه مدل سازی در دشت شاهرود

مدل سازی آبخوان دشت شاهرود تاکنون انجام نشده است. به همین دلیل مطالعه حاضر در آبخوان مذکور انجام می گیرد.

## فصل سوم: مدل‌های آب‌های زیرزمینی و معادلات اساسی حاکم بر جریان آب

### ۳-۱- تعریف مدل‌سازی

مدل توسط محققین به صورت‌های مختلف تعریف شده است که تمام تعاریف در مفهوم مشابه می‌باشند. در یک تعریف ساده مدل به معنی نمایش یک پدیده واقعی است که هدف آن واضح ساختن رفتار پدیده واقعی تحت شرایط خاص می‌باشد. هر سیستمی که بتواند عکس‌العمل ذخیره آب‌زیرزمینی را در مقابل تنش‌های وارده (تخلیه و تغذیه) نشان دهد مدل آب‌زیرزمینی گفته می‌شود. در واقع به هر نوع وسیله‌ای که تخمینی از وضعیت کلی منطقه را ارائه دهد، مدل گفته می‌شود (Anderson and Woessner, 1992). به کاربرد مدل و کنترل نتایج حاصل از آن به اصطلاح شبیه‌سازی (Simulation) گفته می‌شود (Prickett, 1975). یک مدل، در واقع دیدی کلی را در مورد آبخوان و شرایط موجود در آن به مدل‌ساز یا متخصصین آب‌های زیرزمینی می‌دهد که بر اساس آن بتواند واکنش مدل را نسبت به تنش‌های گوناگونی که ممکن است بر آن وارد شود، پیش‌بینی کرده و با در نظر گرفتن این واکنش بتواند تصمیم‌گیری مناسبی را بسته به شرایط موجود انجام دهد (مظفری و همکاران، ۱۳۸۵). مدل‌های جریان آب زیرزمینی عمدتاً "وسیله‌ای برای پیش‌بینی عکس‌العمل آبخوان تحت تاثیر عوامل تغذیه و تخلیه است. علاوه بر این، مدل‌ها برای توصیف سیستم همچون درک سیستم‌های جریان منطقه‌ای، خصوصیات مرزهای آبخوان، ارزیابی مقدار آب درون سیستم و مقدار تغذیه آبخوان استفاده می‌گردد. مدل‌ها همچنین با ایجاد یک

سیستم فرضی برای مطالعه اصول جریان آب‌های زیرزمینی مرتبط با مسائل گوناگون عام و یا خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند (چیت‌سازان ۱۳۸۱).

تعریف مدل باید مبتنی بر درک کامل از فرضیات به کار رفته در اشتقاق معادلات ریاضی، محدودیت‌های مدل، وضعیت هندسی دقیق سامانه مورد مطالعه، اطلاعاتی درباره پارامترهای فیزیکی و مرزهای ورودی و خروجی آن سامانه باشد (موسسه تحقیقات آب ۱۳۸۲).

کاربرد مدل‌های عددی برای مسأله آب زیرزمینی موضوعی علمی و در عین حال هنری می‌باشد. مدل-سازان موفق می‌دانند داشتن پیش‌زمینه قوی علمی در مورد مدل، کمک زیادی به حل مسأله می‌کند. هنر مدل‌سازی بر اساس تمرین چگونه به کار بردن مدل به دست می‌آید. به عبارت دیگر مدل‌ساز موفق کسی است که بر علم مدل‌سازی احاطه داشته و بتواند از هنر مدل‌سازی در حین کار استفاده نماید (Anderson and Woessner, 1992).

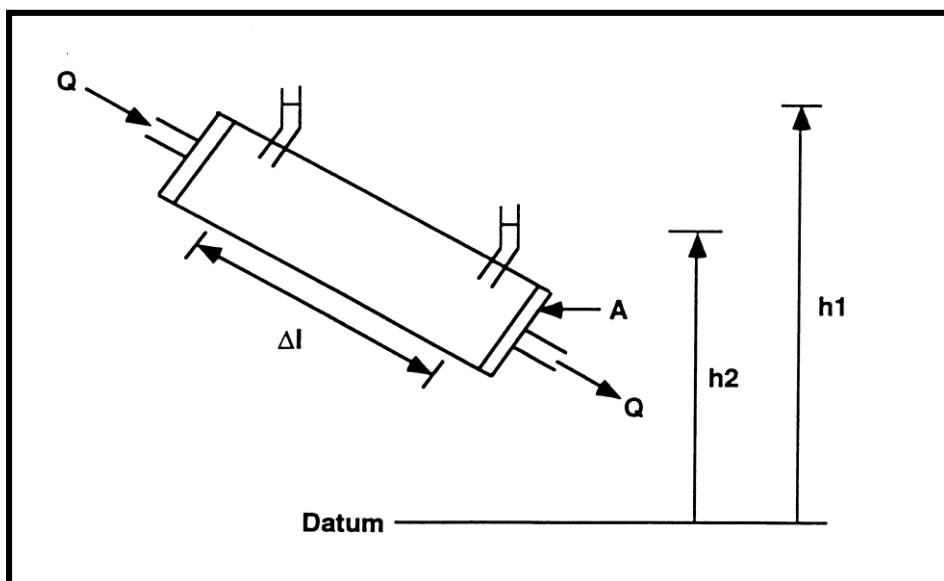
قبل از هر توضیحی در مورد مدل‌ها، بهتر است معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل که در مدل آب زیرزمینی استفاده می‌شود مورد بررسی قرار گیرد.

### ۳-۲- معادلات اساسی حاکم بر جریان آب زیرزمینی

معادله اساسی حاکم بر جریان آب زیرزمینی شامل قانون داری و معادله پیوستگی می‌باشد.

#### ۳-۲-۱- قانون داری

هنری داری دانشمند فرانسوی در سال ۱۸۵۶ معادلات خود را در مورد حرکت سیالات به نتیجه رساند. او در این مطالعات از استوانه‌ای شنی استفاده کرد و با عبور دادن آب با دبی مشخص از آن مقدار آب خروجی از استوانه (محیط متخلخل) را اندازه‌گیری کرد (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- استوانه آزمایشی قانون دارسی (Bedient, 2005)

دارسی به این نتیجه رسید که دبی عبوری ( $Q$ ) از محیط متخلخل با افت بار ( $\Delta h$ ) رابطه مستقیم و با طول مسیر جریان ( $\Delta l$ ) نسبت معکوس داشته و به جنس مواد درون استوانه نیز وابسته می‌باشد. با اثبات این مطالعه توسط اصول و قوانین فیزیکی، فرمول دارسی نهادینه شد و تحول بزرگی را در علم هیدرولوژی بر جای گذاشت.

اگر جریان در حالت سه‌بعدی در نظر گرفته شود بار هیدرولیکی تابعی از محورهای سه‌گانه خواهد بود. به عبارتی  $h=h(x,y,z)$  و عبارت  $\frac{dh}{dL}$  نیز بیان‌کننده میزان تغییرات ارتفاع به ازای موقعیت در سه جهت فضایی می‌باشد.

برای بیان مقدار جریان به ازاء سطح مقطع واحد جریان عبارت  $q = \frac{Q}{A}$  در نظر گرفته می‌شود که در اینجا  $q$  دبی‌ویژه یا شار دارسی می‌باشد و همچنین به دلیل دارا بودن بعد سرعت به نام سرعت دارسی نیز نامیده می‌شود.  $Q$  میزان آب عبوری از یک مقطع عمود بر جهت جریان در واحد زمان می‌باشد. معادله دارسی به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{Q} = A\vec{q} = Ak \frac{\partial h}{\partial l} \quad (1-3)$$

که در آن هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل،  $i = \frac{\partial h}{\partial l}$  گرادیان هیدرولیکی و  $h$  بار هیدرولیکی می‌باشد. قانون دارسی به طور اساسی بیان می‌کند که دبی با گرادیان هیدرولیکی رابطه مستقیم دارد.

در صورتی که محورهای  $x, y, z$  به عنوان جهات اصلی انتخاب شوند، در این حالت خواهد بود:

$$q_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2-3)$$

$$q_y = -k \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3-3)$$

$$q_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4-3)$$

چون در معادلات بالا بار تابعی از سه محور اصلی می‌باشد لذا مشتقات فوق به شکل مشتقات جزیی می‌باشند و معادله به شکل زیر در می‌آید:

$$\vec{q} = q_x i + q_y j + q_z k = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} i - k_y \frac{\partial h}{\partial y} j - k_z \frac{\partial h}{\partial z} k \quad (5-3)$$

معادله (۵-۳) در صورتی صادق است که جهات اصلی تغییرات هدایت هیدرولیکی منطبق بر جهات اصلی محورهای مختصات باشد. در حالت کلی برای یک محیط ناهمگن رابطه دارسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \\ \partial h / \partial z \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

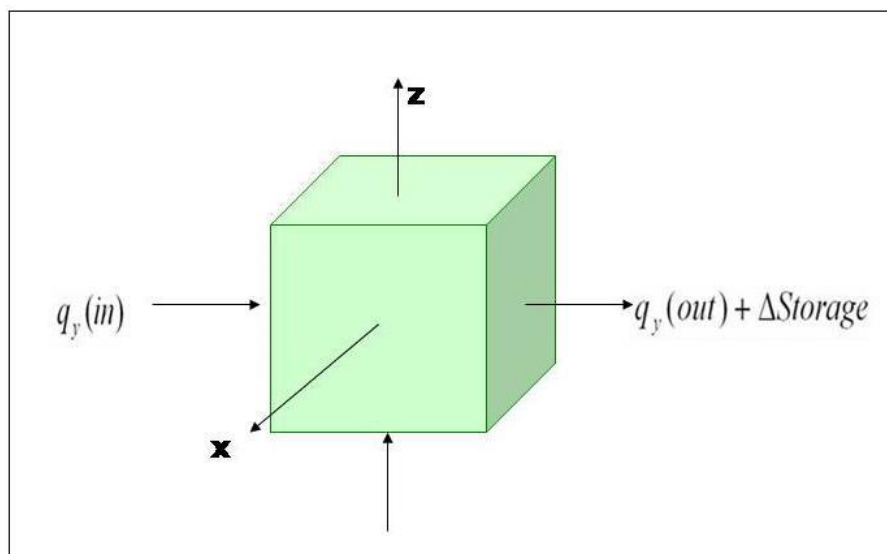
### ۲-۲-۳- معادله پیوستگی

چارلز اسلیشر (Charles Slichter) در سال ۱۸۸۹ معادله پیوستگی را ابتدا برای جریان سیال داخل یک حجم ثابت یا حجم کنترل شده توسعه داد. این معادله بیان می‌کند که مجموع تمامی جریان‌های یک سیال به داخل یا خارج از حجم ثابت  $q_y(out)$  به علاوه یا منهای تمام فرآیندهای سیال که داخل حجم را کم یا زیاد می‌کنند باید معادل تغییرات حجم سیال داخل حجم ثابت  $\Delta Storage$  باشد.

$$q_y(in) + q_y(out) \pm w = \Delta Storage \quad (۷-۳)$$

الف- معادله پیوستگی برای جریان پایدار

برای شرایط جریان ماندگار ضرورت اصل پیوستگی این است که مقدار جریان ورودی به قطعه‌ای مشخص برابر مقدار جریان خروجی از آن باشد، همچنین ارتفاع تابع زمان نمی‌باشد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- نمایش مفهومی معادله پیوستگی (Bedient, 2005)



مکعبی بسیار کوچک را با ابعاد  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  و  $\Delta z$  در نظر می‌گیریم. توازن جرمی با جمع کردن اجزاء ورودی و خروجی جریان در سه جهت حاصل می‌شود. به طور مثال  $q$  نشان‌دهنده حجم جریان بر واحد سطح از طرف چپ مکعب می‌باشد. دبی جریان از جهت چپ به راست در مکعب مورد نظر برابر حاصل ضرب مقدار جریان به ازاء واحد سطح در مقطع مربوط یعنی  $\Delta Z \Delta X$  می‌باشد که از سطح مذکور جریان برقرار می‌گردد. در طرف راست  $q_y$  به اندازه  $\left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right) \Delta y$  از جریان ورودی (سمت چپ) متفاوت می‌باشد. در نتیجه تغییر واقعی مقدار جریان در امتداد  $y$  عبارت است از:

$$\left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right) \Delta y (\Delta x \times \Delta z) = \left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right) \Delta V \quad (۸-۳)$$

در امتداد محورهای  $x$  و  $z$  نیز روابط مشابهی برقرار است. طبق قانون بقاء جرم، مجموع تغییرات در سه جهت باید مساوی صفر شود یعنی:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right) \Delta V + \left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right) \Delta V + \left(\frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \Delta V = 0 \quad (۹-۳)$$

در صورت تقسیم عبارت بالا به واحد حجم مکعب  $\Delta V$ ، خواهیم داشت:

$$\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right] = 0 \quad (۱۰-۳)$$

عبارت سمت چپ معادله (۱۰-۳) نشان‌دهنده تغییرات حجم جریان به ازاء واحد حجم می‌باشد.

ب- معادله پیوستگی برای جریان ناپایدار

$$-\left[\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z}\right] = \rho(\alpha + n\beta) \frac{\partial p}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \pm Q_s \quad (۱۲-۳)$$

که در آن،  $q$  آب تخلیه یا تغذیه‌ای در واحد حجم،  $p$  فشار حفره‌ای یا فشار بار پیژومتری،  $n$  تخلخل محیط جریان،  $\rho$  جرم حجمی آب،  $\alpha$  ضریب تراکم‌پذیری عمودی مواد جامد و  $\beta$  ضریب تراکم‌پذیری آب می‌باشد (به نقل از عطایی‌زاده ۱۳۸۶).

### ۳-۲-۳- معادله لاپلاس

معادله لاپلاس، از تلفیق قانون داری و معادله پیوستگی به دست آمده و در فرم یک معادله دیفرانسیل درجه دوم ارائه می‌شود. به این ترتیب که قانون داری به صورت جز به جز در معادله (۳-۱۰) قرار گرفته

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

و معادله زیر به دست می‌آید:

(۳-۱۳)

اگر محیط جریان همگن و ایزوتروپ باشد ( $k_x = k_y = k_z = k$ )، معادله لاپلاس به شکل ساده‌تری به

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

صورت زیر تبدیل می‌شود:

(۳-۱۴)

معادله (۳-۱۴)، معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در شرایط ماندگار و در محیط همگن و ایزوتروپ می‌باشد.

### ۳-۲-۴- معادله عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان تحت فشار

معادله عمومی جریان آب در آبخوان‌های تحت فشار از ترکیب معادله داری با اصل بقای جرم به دست می‌آید. اصل بقای جرم در نظر گرفتن ورودی‌ها، خروجی‌ها و تغییرات در ذخیره آب زیرزمینی است. معادله (۳-۱۵) برای آبخوان‌های تحت فشار ناهمگن و ناهمسان در شرایط ناپایدار کاربرد دارد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (15-3)$$

هنگامی که آبخوان همگن ولی ناهمسان است معادله (۱۶-۳) کاربرد دارد:

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (16-3)$$

اگر آبخوان همگن و همسان ( $k_x = k_y = k_z = k$ ) باشد معادله (۱۵-۳) به شکل زیر ساده می‌گردد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (17-3)$$

با توجه به اینکه ضریب ذخیره، حاصل ضرب ذخیره ویژه و ضخامت است معادله در حالت دو بعدی به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{bK} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (18-3)$$

در شرایط پایدار یعنی در حالتی که تغییرات بار هیدرولیکی نسبت به زمان ثابت است و میزان آب ورودی با خروجی برابر است و هیچ تغییری در ذخیره رخ نمی‌دهد. عبارت  $\frac{\partial h}{\partial t}$  در سمت راست معادله (۱۸-۳) برابر صفر می‌شود بنابراین معادله به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (19-3)$$

معادله حاصل به معادله لاپلاس مشهور است و جریان پایدار را در آبخوان‌های تحت فشار همگن و همسان توصیف می‌کند.

### ۳-۲-۵- معادله عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان آزاد

در آبخوان‌های آزاد آب در اثر زهکشی منافذ، انبساط آب و فشردگی سفره خارج می‌گردد. ولی سهم دو مکانیزم انبساط و فشردگی سفره ناچیز است بنابراین آبی که از لایه آبدار آزاد توسط چاه‌های پمپاژ خارج

می‌گردد حاصل زهکشی از منافذ سفره و بی‌آب شدن بخشی از سفره در حین پایین رفتن سطح ایستابی و کاهش حجم آب ذخیره آن می‌باشد. مقدار این کاهش حجم در لایه‌های آبدار آزاد از حاصلضرب حجم سفره بین دو سطح ایستابی قبل و بعد تخلیه در میانگین آبدهی ویژه به دست می‌آید.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (20-3)$$

سمت راست معادله (۲۰-۳) صفر است، نه به این دلیل که جریان پایدار است بلکه دلیلش این است که  $S_s = 0$  می‌باشد. برای به دست آوردن راه‌حل مناسب برای معادله بالا در آبخوان آزاد، دوپویی در سال ۱۸۶۳ فرضیاتی را وضع کرد که عبارتند از:

۱- آنها فرض نمودند که سرعت جریان متناسب با تانژانت  $\alpha$  می‌باشد  $\alpha$  زاویه‌ای است که سطح آب زیرزمینی با افق می‌سازد) به عبارت دیگر آنها فرض نمودند که:

$$V = k \frac{dh}{dx} \quad (21-3)$$

این فرض در صورتی صحیح است که  $\alpha$  زاویه کوچکی بوده و سطح آب دارای شیب بسیار کمی باشد.

۲- آنها فرض نمودند که در یک مقطع قائم جریان افقی و یکنواخت است.

با در نظر گرفتن فرضیات دوپویی- فورشه‌ایمر و مفهوم تعادل جرمی و چنانچه آب به عنوان یک سیال بدون قابلیت فشردگی در تعادل حجمی فرض شود، معادله بوزینسکی غیر خطی حاصل می‌گردد. معادله (۲۲-۳) برای آبخوان‌های همسو و ناهمگن به کار گرفته می‌شود. این معادله به سبب غیر خطی بودن دارای راه‌حل تحلیلی بسیار دشوار می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( Kh \frac{\partial h}{\partial z} \right) = Sy \frac{\partial h}{\partial t} \quad (22-3)$$

برای آبخوان‌های همگن و همسو معادله (۲۲-۳) به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (23-3)$$

هنگاهی که تغییرات فضایی  $h$  در مقایسه با مقدار  $h$  کوچک باشد. در این حالت می‌توان ضخامت متغیر لایه اشباع را با ضخامت متوسط  $b$  جایگزین نمود. معادله بوزینسکی حاصل خطی می‌گردد. که به نام معادله خطی بوزینسکی مشهور است.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_{ya}}{bK} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (24-3)$$

### ۳-۲-۶- معادله عمومی جریان آب زیرزمینی با مولفه تغذیه یا تخلیه

کاربرد معادله عمومی جریان آب زیرزمینی با مولفه تغذیه یا تخلیه شامل آبخوان‌هایی می‌شود که در آن‌ها جریان آب‌های ورودی یا خروجی علاوه بر مرزهای خارجی سیستم، از بالا یا پایین لایه آبدار نیز صورت می‌گیرد. به عنوان مثال آبخوان‌هایی که در آن‌ها تخلیه از طریق چاه‌ها پمپاژ یا تبخیر و تعرق و یا تغذیه از آب برگشتی چاه‌های بهره‌برداری وجود دارد. در چنین شرایطی تابع عمومی  $\omega$  به طرف راست معادله (۳-۱۱) اضافه می‌شود.  $\omega$  جریان حجمی بر واحد حجم می‌باشد که نشان‌دهنده منابع افزایش‌دهنده و منابع کاهش‌دهنده آب است. که در شرایط افزودگی علامت  $\omega$  مثبت و در شرایط تخلیه علامت  $\omega$  منفی می‌باشد.

برای آبخوان‌های محبوس با به کار بردن تعادل جرمی و در نظر گرفتن جریان افقی دو بعدی و در شرایط افزودگی، معادله زیر کاربرد دارد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\omega}{K} = \frac{S}{bK} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (25-3)$$

و برای آبخوان‌های آزاد همسو، همگن و با مولفه نفوذ قائم در شرایط ناپایدار معادله زیر به کار می‌رود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\omega}{K} = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (26-3)$$

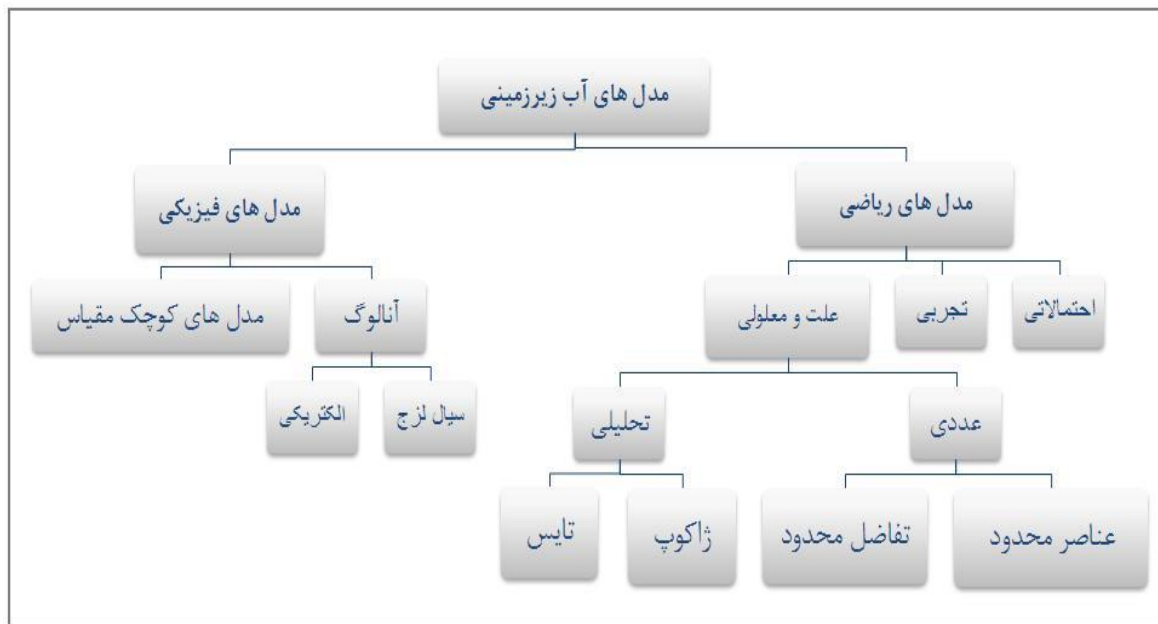
برای آبخوان‌های آزاد همسو، همگن و با مولفه نفوذ قائم در شرایط پایدار معادله مشهور پواسون (۲۷-۳) به کار می‌رود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\omega}{K} = 0 \quad (27-3)$$

### ۳-۳- طبقه‌بندی مدل‌های آب زیرزمینی

انواع متعددی از مدل‌ها جهت مطالعه سیستم جریان آب زیرزمینی وجود دارد. هر یک از این مدل‌ها خواص مکانی و زمانی یک سیستم یا بخش‌هایی از آن را به صورت فیزیکی و یا ریاضی شبیه‌سازی می‌کند (چیت‌سازان، ۱۳۸۱).

مجموعه مدل‌های آب زیرزمینی به طور کلی در دو گروه طبقه‌بندی می‌گردد که شامل مدل فیزیکی و مدل‌های ریاضی می‌باشد. شکل (۳-۳) انواع مدل‌های جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳- انواع مدل‌های جریان آب زیرزمینی (Prickett, 1975)

### ۳-۳-۱- مدل‌های فیزیکی

مدل‌های فیزیکی در یک تقسیم بندی کلی شامل مدل‌های کوچک مقیاس و آنالوگ می‌شود.

#### ۳-۳-۱-۱- مدل‌های کوچک مقیاس

در مدل‌های کوچک مقیاس نمونه کوچک از یک سیستم واقعی با استفاده از عناصر موجود در آبخوان ساخته می‌شود و پدیده‌های هیدروژئولوژیکی از نزدیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مثال می‌توان به تانک‌های شیشه‌ای (Dye tracer) اشاره کرد که برای بررسی چگونگی پخش ردیاب‌ها در محیط‌های متخلخل به کار می‌رود. این نوع مدل‌ها به دلایلی همچون پیچیدگی و مشکل بودن تغییر ابعاد و تهیه آن برای یک منطقه خاص و پر هزینه بودن گسترش چندانی نداشته است و کاربرد آن بیشتر محدود به مقاصد آموزشی و نمایشی بوده است (چیت‌سازان ۱۳۸۱).

#### ۳-۳-۱-۲- مدل‌های آنالوگ

در مدل‌های آنالوگ برخلاف مدل‌های کوچک مقیاس از موادی غیر از مواد آبخوان برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. این مواد رفتاری شبیه به آبخوان دارند 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 شبیه‌سازی می‌نماید. از مهمترین این مدل‌ها، مدل‌های آنالوگ-الکتریک و آنالوگ-ویسکوز سیال می‌باشد.

#### الف- مدل‌های آنالوگ-الکتریک

مدل‌های الکتریکی از شباهت ریاضی بین قانون دارسی (قانون جریان آب زیرزمینی  $q = -k \frac{dh}{dL}$ ) و قانون

اهم (قانون حاکم بر جریان الکتریسیته  $I = \sigma \frac{dE}{dx}$ ) استنتاج گردیده است که تغییرات ولتاژ در یک مدل

آنالوگ-الکتریکی نظیر تغییر ارتفاع در جریان آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود و گرادیان ولتاژ  $(\frac{dE}{dx})$

نیز مشابه گرادیان هیدرولیکی  $(\frac{dh}{dm})$  در نظر گرفته می‌شود.

### ب- مدل‌های آنالوگ-سیالات لزج

مدل‌های آنالوگ-سیالات لزج که از عبور دادن سیال لزج تر از آب مثلاً روغن بین صفحات عمودی و یا افقی با فواصل کم (۱ تا ۱۰ میلیمتر) استفاده می‌شود و حرکت آب را در آبخوان شبیه‌سازی می‌نماید.

### ۳-۳-۲- مدل‌های ریاضی

یک مدل ریاضی، شامل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل می‌باشد که رفتار جریان آب‌های زیرزمینی را به صورت کمی تخمین می‌زند. کاربرد مدل‌های ریاضی آسان‌تر از مدل‌های فیزیکی بوده و هزینه کمتری را نیز به همراه دارد. استفاده از این مدل‌ها در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری را نشان می‌دهد. بسته به نوع معادلات می‌توان به سه نوع تجربی، احتمالاتی و علت و معلولی تقسیم می‌شوند.

#### ۳-۳-۲-۱- مدل‌های تجربی

قانون دارسی مثال خوبی از این نوع مدل‌ها می‌باشد. این مدل‌ها تنها براساس تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی خروجی و ورودی داده‌های تجربی می‌باشند، که بر نوعی معادله ریاضی برازش داده می‌شوند.

#### ۳-۳-۲-۲- مدل‌های احتمالاتی



مدل‌های احتمالی بر اساس قوانین احتمالی و آماری می‌باشند و برای شناسایی پارامتر نیاز به مجموعه داده‌های زیادی دارند و مدل‌هایی هستند که رابطه بین علت و معلول از یک رابطه فیزیکی تبعیت نمی‌کند و شناخته شده نیست، مثل وقوع بارش که بخشی از آن تصادفی و بخشی فیزیکی است. از این مدل‌ها نمی‌توان در پیش‌بینی اثر فعالیت‌های هیدروژئولوژیکی نظیر اثر پمپاژ بر تراز آب زیرزمینی آبخوان استفاده کرد.

### ۳-۲-۳-۳- مدل‌های علت و معلولی یا معین

در مدل‌های علت و معلولی یا معین (Deterministic Models) فرض بر این است که واکنش‌های بعدی آبخوان مورد مطالعه با قوانین فیزیکی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی تعیین شوند. برای مثال جریان آب زیرزمینی به طرف چاهی که به طور کامل در آبخوان محبوس حفر گردیده است توسط معادله تائیس توصیف می‌شود. مدل‌های معین بر اساس نوع معادله ریاضی، به دو گروه عمده تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی می‌شوند.

### الف- مدل‌های تحلیلی

مدل‌های تحلیلی (Analytical Model) ابزاری قوی برای ارزیابی مخازن آب‌های زیرزمینی می‌باشند که با استفاده از یک ماشین حساب با قابلیت برنامه‌نویسی یا به وسیله یک کامپیوتر شخصی می‌توان مدل‌های تحلیلی را سریع، دقیق و با هزینه کم حل کرد. در این نوع مدل‌ها هر بار یک معادله جریان آب زیرزمینی حل می‌شود که نتیجه آن در یک نقطه خطی از نقاط در میدان جریان مورد تحلیل به کار گرفته می‌شود. در این روش همه پارامترها میانگین در نظر گرفته می‌شود و سیستم باید شکل هندسی خاصی داشته و از نظر شرایط مرزی و شرایط اولیه پیچیدگی نداشته باشد. بنابراین در بسیاری از مدل‌های تحلیلی فرض

شده است که سفره همگن و همسو است. چنین فرضیاتی سبب می‌شود که شبیه‌سازی سیستم هیدروژئولوژیکی دقیق نباشد. از انواع این مدل‌ها می‌توان به آزمایش پمپاژ اشاره کرد.

#### ب- مدل‌های عددی

مدل‌های عددی (Numerical models)، توصیف‌کننده تمام میدان جریان مورد نظر به طور همزمان می‌باشند، به شرط آنکه برای نقاط مشخص شده توسط کاربر، حل ریاضی داشته باشد. در این مدل‌ها منطقه مورد نظر به تعدادی منطقه کوچک‌تر (که اغلب سلول یا المان نامیده می‌شوند) تقسیم می‌گردند. معادله پایه‌ای جریان برای هر سلول یا المان برای نقاط مشخص حل می‌شود. این نقاط را می‌توان در مرکز هر سلول در محل‌های تقاطع سلول‌های مجاور یا در هر محل دیگری قرار داد. معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان آب زیرزمینی توسط یک معادله جبری جایگزین یا تقریب‌سازی می‌شود. این معادلات جبری به شکل یک ماتریس بزرگ در می‌آیند و در نهایت ماتریس مذکور به صورت عددی از طریق فرآیندهای تکراری و با استفاده از کامپیوتر برای آن متغیر انتخابی که سیستم را توجیه می‌کند حل می‌شود. به این جهت به این نوع مدل‌ها، مدل‌های عددی می‌گویند. مدل‌های عددی بر اساس روش‌های گوناگون تقریب‌سازی، معادلات دیفرانسیل جریان و روش‌های حل عددی سیستم معادلات جبری جدید به چندین گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های معمول عبارتند از:

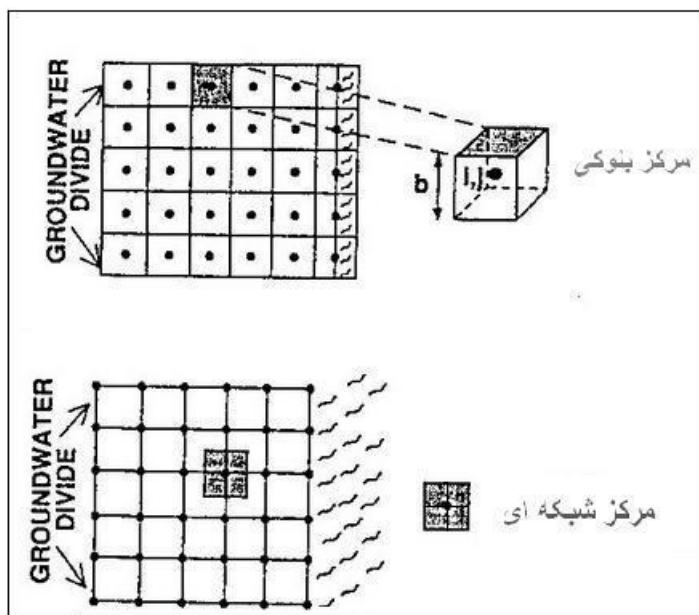
- روش تفاضل‌های محدود (Finite difference)
- روش اجزای محدود (Finite elements)
- روش تفاضل‌های محدود تلفیقی (Integrated finite difference)
- روش معادله انتگرال‌گیری مرزی (Boundary integral equation method)
- المان‌های تحلیلی (Analytic elements)
- مدل ریاضی عددی برنامه‌ریزی پویا (Dynamic program)
- مدل ریاضی عددی المان‌های مرزی (Boundary elements)

• مدل ریاضی شاخص (Characteristic model)

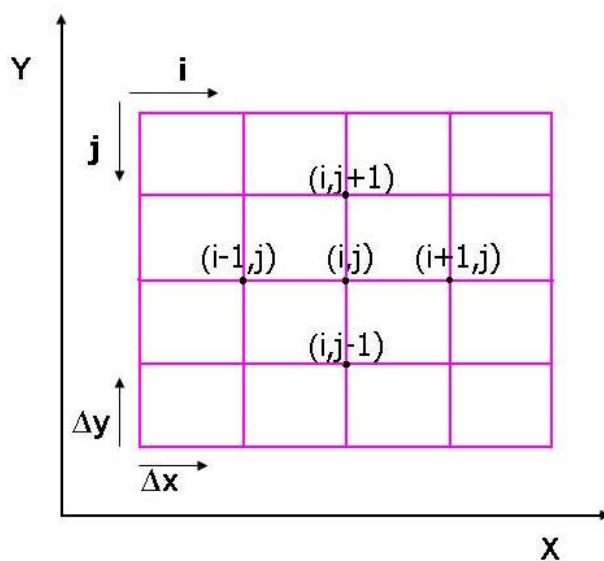
دو روش تفاضل‌های محدود و اجزای محدود در ادامه توضیح داده می‌شود. این روش‌های از معمول‌ترین روش عددی می‌باشند (Anderson and Woessner, 1992).

۱- روش تفاضل‌های محدود

این روش در حقیقت اولین روشی بود که برای حل معادلات دیفرانسیلی جزئی به کار رفته است و امروزه اساس حل بسیاری از مدل‌ها و بسته‌های کامپیوتری را تشکیل می‌دهد. یکی از این مدل‌ها، مدل MODFLOW (مدل سه بعدی تفاضل محدود جریان آب‌های زیرزمینی) که توسط USGS تهیه شده است. روش تفاضل‌های محدود براساس تئوری و بسط سری تیلور بنا نهاده شده است. اصول روش‌های تفاضل محدود این است که ابتدا سیستم پیوسته به یک سری بخش‌های مجزا تقسیم می‌شوند که این عمل، گسسته‌سازی و به اصطلاح شبکه‌بندی نامیده می‌شود. این شبکه‌بندی هم در بعد زمان و هم در دامنه مکان در نظر گرفته می‌شود. وضعیت جریان‌های مربوط به یک شبکه در آبخوان تحت بررسی، تحلیل می‌شود و معادلات جبری در نقاط گره‌ای این شبکه به دست می‌آید. برحسب تدوین، نقاط گره‌ای می‌توانند مرکز شبکه‌ای و یا مرکز بلوکی باشند. در روش مرکز بلوکی، بلوک‌های ایجاد شده از برخورد این خطوط موازی، سلول‌ها را تشکیل می‌دهند و گره‌ها در مرکز این سلول‌ها قرار دارند. در روش مرکز شبکه‌ای، گره‌ها در محل برخورد خطوط موازی قرار داشته و سلول‌ها در اطراف این گره‌ها طوری ساخته می‌شوند که وجوه وابسته به آن‌ها در مرکز فاصله بین دو گره مجاور قرار گیرند. در این حالت، فاصله گره‌ها طوری انتخاب می‌شود که خصوصیات هیدرولیکی در یک سلول به طور کلی یکنواخت باشد (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴- تفاوت بین سیستم مرکز بلوکی و سیستم مرکز شبکه‌ای (Anderson and Woessner, 1992)



شکل ۳-۵- دستگاه مختصات در نظر گرفته شده برای حل معادلات جبری (Wang and Anderson, 1982)

در روش تفاضل محدود برای بسط معادلات جریان آب زیرزمینی با توجه به شکل (۳-۵) که مختصات محلی یک سیستم شبکه‌بندی شده را در یک دستگاه دکارتی نشان می‌دهد، ابتدا مشتقات با تفاوت‌های

بین نقاط گره‌ای جایگزین می‌شود. با توجه به تعریف مشتق اول بین دو نقطه  $(i, j)$  و  $(i+1, j)$  معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{(i+1,j)} - h_{(i,j)}}{\Delta x} \quad (27-3)$$

و به طور مشابه بین دو نقطه  $(i, j)$  و  $(i-1, j)$  معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{(i,j)} - h_{(i-1,j)}}{\Delta x} \quad (28-3)$$

مشتق دوم در نقطه  $(i, j)$  از تفاوت مشتقات اول در آن نقطه حاصل می‌گردد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{(h_{(i+1,j)} - h_{(i,j)}) - (h_{(i,j)} - h_{(i-1,j)})}{\Delta x^2} \quad (29-3)$$

به روش مشابه مشتق دوم نسبت به محور  $y$  به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{(h_{(i,j+1)} - h_{(i,j)}) - (h_{(i,j)} - h_{(i,j-1)})}{\Delta y^2} \quad (30-3)$$

و در نهایت اگر معادله عمومی جریان آب زیرزمینی (معادله لاپلاس) با مشتقات بالا جایگزین گردد معادله زیر حاصل می‌گردد:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{(h_{(i+1,j)} - h_{(i,j)}) - (h_{(i,j)} - h_{(i-1,j)})}{\Delta x^2} + \frac{(h_{(i,j+1)} - h_{(i,j)}) - (h_{(i,j)} - h_{(i,j-1)})}{\Delta y^2} = 0 \quad (31-3)$$

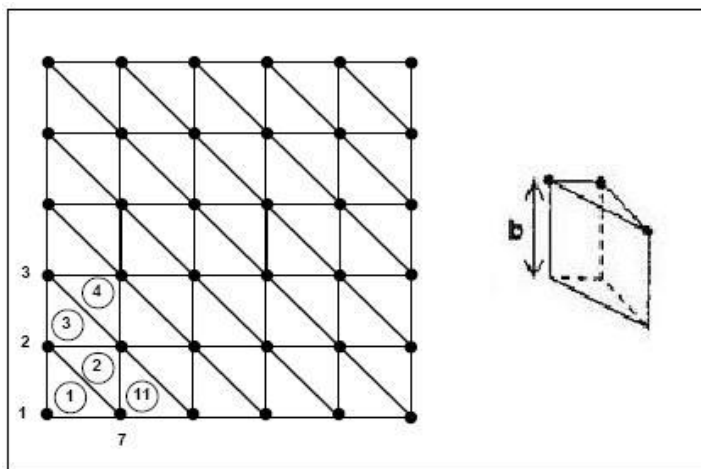
اگر فرض شود  $\Delta x$  برابر  $\Delta y$  و برابر یک باشد معادله به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$h_{(i-1,j)} - 4h_{(i,j)} + h_{(i+1,j)} + h_{(i,j+1)} + h_{(i,j-1)} = 0 \quad (32-3)$$

معادله (32-3) که در واقع بیان تفاضل عددی معادله لاپلاس می‌باشد به نام عملگر پنج نقطه‌ای مطرح می‌باشد (Wang and Anderson, 1982).

۲- روش اجزا محدود

در این روش منطقه مورد مطالعه به یک سری عناصر چند ضلعی تقسیم‌بندی می‌شود. متداول‌ترین نوع چندضلعی که بیش‌تر انتخاب می‌شود مثلث می‌باشد. زیرا با اجزای مثلثی بهتر می‌توان یک شبکه مناسب منطبق بر مرزهای نامنظم حوضه ایجاد نمود. همچنین چند ضلعی مثلثی منجر به روابط ساده‌تری می‌شود شکل (۳-۶). اندازه اجزا در قسمت‌های مختلف شبکه را می‌توان متفاوت انتخاب نمود به گونه‌ای که در نقاطی از حوضه که اطلاعات بیش‌تر و دقیق‌تر وجود دارد و بیش‌تر مورد توجه می‌باشد، اجزا کوچک‌تر و در نتیجه شبکه فشرده‌تر انتخاب می‌شود و برعکس در نقاطی که اطلاعات کمتر است و کم‌تر مورد توجه می‌باشد اجزا بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شود.



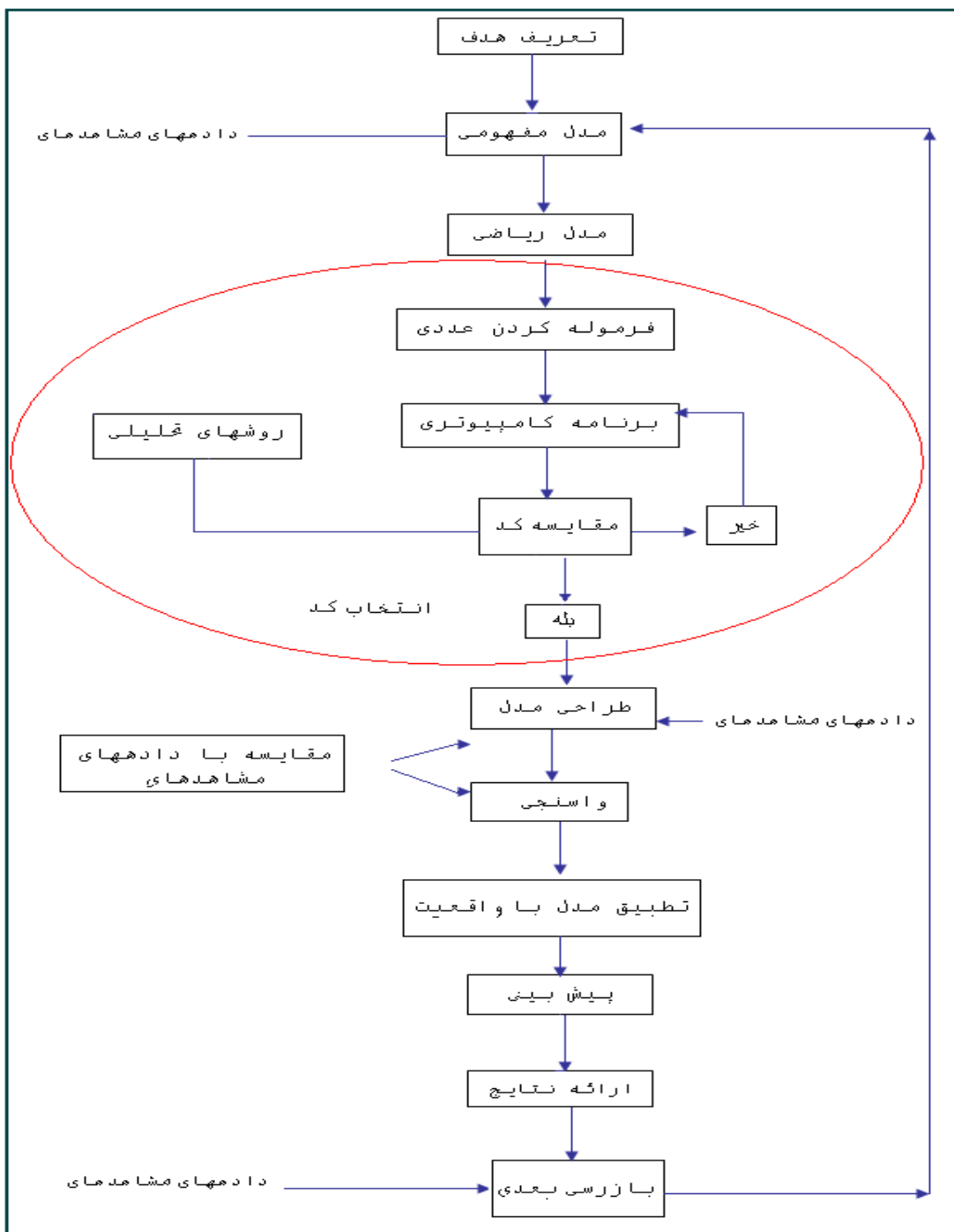
شکل ۳-۶- شبکه اجزا محدود مثلثی

که این عناصر توسط گره‌ها تعریف می‌گردند گره‌ها ممکن است در محل نقاط چند وجهی درون آن‌ها و یا در وسط اضلاع در نظر گرفته شود. اساس این روش این است که هر حرکت پیوسته‌ای مانند درجه حرارت، فشار، بار آبی به صورت یک‌سری معادلات پیوسته در یک سری نقاط مشخص در حوضه مورد مطالعه تعیین می‌شوند. در این روش معادلات دیفرانسیل جزئی به یک‌سری معادلات انتگرالی تبدیل

می‌گردد، که این معادلات تنها در برگیرنده مشتقات مرتبه اول می‌باشند. سپس معادلات انتگرال برای هر یک از عناصر حل می‌شوند (Wang and Anderson, 1982).

### ۳-۴- الگوریتم مدل سازی

الگوریتم مدل‌سازی (Modeling protocol) نموداری است که نحوه و شرایط حرکت از یک مرحله به مرحله دیگر از آغاز تا پایان پروژه مدل‌سازی را نشان می‌دهد. هر یک از مراحل باعث می‌شوند تا مدل تهیه شده نتایج معنی‌داری را ارائه دهد و به عبارتی مدل معتبر باشد. به طور کلی مراحل مدل‌سازی شامل مراحل اساسی تعیین هدف، انتخاب کد، کالیبراسیون، آنالیز حساسیت، تعیین صحت طراحی مدل و در نهایت پیش‌بینی می‌باشد. در ادامه، مراحل پروژه مدل‌سازی به صورت مختصر توضیح داده شده است (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷- مراحل مدل‌سازی (Anderson and Woessner 1992)



### ۳-۴-۱- طرح مسئله و تعیین هدف

در این مرحله مسئله مورد بحث مشخص و هدف از مدل‌سازی منطقه مورد مطالعه تعیین می‌گردد. در واقع با مشخص نمودن هدف از تهیه مدل، اسکلت و چارچوب اولیه جهت انجام مراحل بعدی پروژه مدل‌سازی مشخص می‌شود.

### ۳-۴-۲- مدل مفهومی

بعد از مرحله تعیین هدف، مرحله بعدی طراحی مدل مفهومی می‌باشد. مدل مفهومی مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی سیستم جریان آب زیرزمینی و پایه مدل عددی می‌باشد. مدل مفهومی تصویر ساده شده از سیستم واقعی می‌باشد. مهم‌ترین هدف از ساخت مدل مفهومی دستیابی به دانش صحیح از وضعیت هیدروژئولوژی، هیدرولوژی و دینامیک جریان آب‌های زیرزمینی در داخل و اطراف منطقه مورد مطالعه، ساده کردن وضعیت پیچیده طبیعت به کمک فرضیه‌های مناسب و تشریح مساله آب زیرزمینی برای تهیه یک مدل عددی می‌باشد.

### ۳-۴-۳- انتخاب کد کامپیوتری و نرم‌افزار

کد همان برنامه کامپیوتری است که شامل الگوریتمی برای حل مدل ریاضی به روش عددی می‌باشد. انتخاب کد مدل‌سازی مناسب، بستگی به اهداف مدل، زمان اجرای مدل، هزینه‌های مربوط و در دسترس بودن آن دارد. کد مدل‌سازی انتخابی، می‌باید سیستم جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی و هدف تهیه مدل را برآورد نماید (چیت‌سازان ۱۳۸۱).

نرم افزار مورد استفاده در این پروژه GMS می‌باشد که در زیر به صورت مختصر توضیح داده شده است. Groundwater modeling system یا همان GMS یک بسته نرم‌افزاری شبیه‌سازی برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌باشد. GMS محیطی جامع و گرافیکی برای شبیه‌سازی‌های جریان آب زیرزمینی است. در واقع GMS شامل یک انترفاز کارتوگرافیکی کاربر (برنامه GMS) و تعدادی کد

نظیر NUFT, FEMWATER, SEEP2D, MODPATH, SEAM3D, RT3D, MT3DMS, MODFLOW و UTCHEM می‌باشد. انترفاز GMS توسط Laboratory of Environmental Modeling Research از دانشگاه Brigham Young با مشارکت US. Army Engineer Watrrways Experiments Station تهیه شده است.

کد انتخابی برای مدل‌سازی عددی منطقه مورد مطالعه MODFLOW (Modular groundwater flow) می‌باشد. MODFLOW موجود در انترفاز GMS یک برنامه ریاضی مدل تفاضل محدود به زبان فرترن ۲۰۰۰ می‌باشد. که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده تهیه شده است. MODFLOW براساس پیوستگی حرکت و قانون بقای جرم بنا نهاده شده است و در محیط‌های مختلف تحت شرایط متفاوت مثل سیستم‌های تک بعدی، شبه دو بعدی و سه بعدی به طور گسترده مورد آزمایش قرار گرفته است (GMS6.0. 2005).

کاربرد MODFLOW توصیف و پیش‌گویی سیستم جریان آب زیرزمینی می‌باشد. GMS به عنوان یک پیش و پس پردازش‌گر MODFLOW را پشتیبانی می‌کند. داده‌های ورودی برای MODFLOW توسط GMS تهیه و در فایل‌هایی ذخیره می‌شوند که این فایل‌ها به هنگام راه‌اندازی توسط MODFLOW از GMS فراخوانی می‌شوند. تهیه مدل جریان آب زیرزمینی در GMS می‌تواند به یکی از دو روش زیر انجام گیرد:

#### ۱- روش شبکه

در این روش پارامترهای مختلف هر یک از سلول‌ها مستقیماً به آن سلول داده می‌شود. در واقع در این روش مستقیماً با شبکه سلول سرکار داریم و مقادیر تخلیه و تغذیه و دیگر پارامترهای مدل سلول به سلول وارد می‌شوند. این روش برای مدل‌هایی که پیچیدگی کمتر دارند مناسب می‌باشد.

#### ۲- روش مدل مفهومی

این روش شامل استفاده از ابزارهای GIS در مودول نقشه برای تهیه مدل مفهومی منطقه‌ای است که قرار است مدل ریاضی آن تهیه گردد. مدل مفهومی در مودول 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 مدل نسبت داده می‌شود. این روش، وارد کردن داده‌ها را به طور خودکار فراهم می‌کند و دیگر نیازی به وارد کردن حجم عظیم پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل به صورت سلول به سلول نیست. از مزایای این روش قابلیت وضوح شبکه مدل می‌باشد.

این برنامه مودولار می‌باشد (از بسته‌های مجزا و مستقل تشکیل شده است که وظیفه خاصی را به عهده دارند) ساختار مودولار آن شامل یک برنامه اصلی و یک سری از برنامه‌های فرعی کاملاً مستقل می‌باشد که مودول نامیده می‌شود. مودول‌ها به صورت بسته‌هایی گروه‌بندی شده‌اند که هر بسته در ارتباط با قسمتی از سیستم هیدرولوژیکی که باید شبیه‌سازی شود، می‌باشد. طراحی مودولار برنامه این توانایی را به کاربر می‌دهد که بتواند شرایط هیدروژئولوژیکی متفاوت را به صورت جداگانه در داخل مدل مورد آزمایش قرار دهد. مزیت دیگر این طراحی در این است که مودول‌های جدید را بدون تغییر نسخه موجود می‌توان مورد استفاده قرار داد. از خصوصیات بارز دیگر GIS وارد کردن داده‌ها با فرمت‌های گوناگون از نرم‌افزارهای مختلف به خصوص از پایگاه GIS می‌باشد.

### انواع مودول‌های GIS

انترفاز GIS شامل ۱۰ نوع مودول می‌باشد که در ادامه به صورت مختصر توضیح داده شده است (GMS6.0 2005).

#### ۱ - Map Module

Map Module ابزارهای مناسبی برای استفاده از انواع مختلف اجزاء ساده GIS (نقطه، خط و چندضلعی) را برای تهیه مدل عددی فراهم می‌آورد. مودول ترسیمی چهار پدیده را که شامل feature objects digital image, drawing, objects و فایل‌های DXF می‌باشند، پشتیبانی می‌کند.

### *TIN Module -۲*

مودول شبکه مثلثی بی‌قائده (Triangulated Irregular Network) که در مدل کردن سطوح به کار می‌رود. این شبکه‌ها برای نشان دادن سطوح یک واحد زمین‌شناسی یا سطحی که توسط یک تابع ریاضی تعریف شده به کار می‌روند.

### *2D scatter point Module -۳*

یکی از مهمترین مودول موجود در انترفاز GMS مودول نقاط پخش شده دوبعدی است. این مودول برای درون‌یابی از یک سری داده‌های دو بعدی که در سطوح توزیع شده‌اند استفاده می‌نمایند که برای این کار از چهار تابع خطی و غیرخطی درون‌یابی، از جمله کریجینگ (Kriging) استفاده می‌شود.

### *Borehole Module -۴*

مودول گمانه‌ها در مدیریت داده‌های گمانه‌ای و حفاری‌ها به کار برده می‌شود. تهیه مقاطع در طول گمانه‌های مختلف از جنبه‌های مهم آن است.

### *Solid Module -۵*

مودول حجمی یا سه بعدی GMS در تهیه مدل‌های سه بعدی چینه‌نگاری به کار برده می‌شود. پس از تهیه این مدل می‌توان از مکان‌های مختلف آن برش تهیه کرد. در واقع از این مودول برای شناسایی بهتر منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از آن می‌توان داده‌های ارتفاعی لایه‌های مختلف آبخوان را برای مدل MODFLOW مستقیماً استخراج کرد.

### ۶- 2D Mesh Module

مودول شبکه‌ای دو بعدی در تهیه شبکه‌های با المان محدود دو بعدی استفاده می‌شود.

### ۷- 2D grid Module

برای تهیه و ویرایش شبکه‌های دو بعدی کارت‌زین به کار برده می‌شود. این مودول برای نمایش بهتر سطوح و تهیه خطوط کنٹوری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۸- 3D Mesh Module

این مودول در تهیه شبکه‌های سه بعدی با المان محدود کاربرد دارد.

### ۹- 3D grid Module

مودول شبکه‌ای سه بعدی در تهیه شبکه‌های کارت‌زین سه بعدی به کار می‌رود. از این شبکه‌ها می‌توان برای درون‌یابی، تهیه خطوط هم تراز آب زیرزمینی و تهیه مقاطع عرضی و تهیه مدل به روش تفاضل محدود استفاده کرد.

### ۱۰- 3D scatter point Module

این مودول برای درون‌یابی از یک سری نقاط سه بعدی شبکه‌ها یا شبکه مثلثی بی‌قاعده به کار می‌رود.

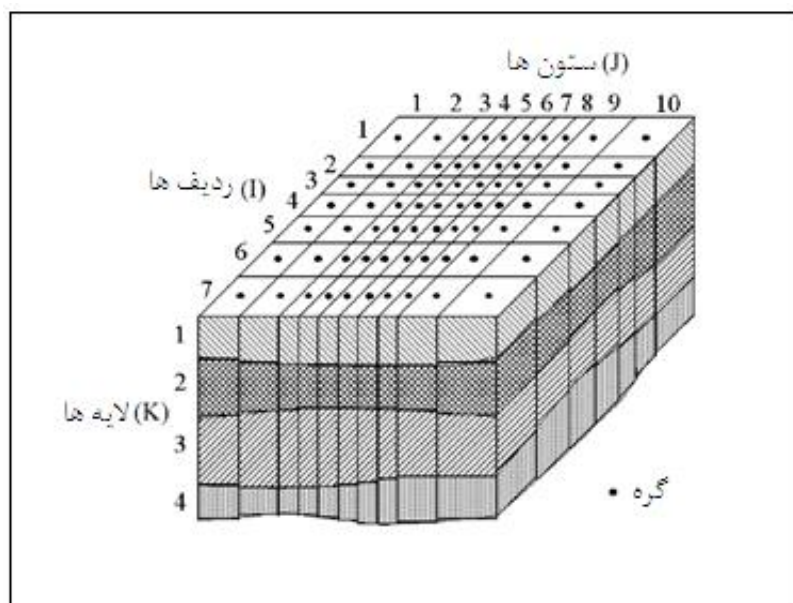
### ۳-۴-۴- طراحی مدل

پس از توصیف مدل مفهومی و انتخاب نرم‌افزار مناسب، مرحله طراحی مدل آغاز می‌شود این مرحله شامل طراحی شبکه مدل، انتخاب گام‌های زمانی، تنظیم شرایط مرزی و شرایط اولیه و تعیین مقادیر اولیه برای

پارامترهای آبخوان و استرس‌های هیدرولوژیکی می‌باشد که در ادامه به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

### ۳-۴-۱- تقسیم‌بندی فضایی

با توجه به اینکه در مدل MODFLOW، برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود و به دلیل اینکه در مدل‌های عددی قلمروی پیوسته منطقه (Continuos domain) با قلمرو گسسته (Discretised domain) جایگزین می‌گردد، پس از تهیه مدل مفهومی، محدوده مورد نظر باید به بلوک‌هایی (سلول) تقسیم شود. این بلوک‌ها در روش تفاضل‌های محدود مربع یا مستطیل شکل است. موقعیت هر یک از بلوک‌ها بر حسب شماره ردیف، ستون و لایه‌ها به وسیله یک سیستم شماره‌گذاری  $i, j, k$  مشخص می‌گردد. برای سیستمی شامل  $n$  سطر،  $n$  ستون و  $n$  لایه،  $i$  شماره سطر،  $j$  شماره ستون و  $k$  شماره لایه تعریف می‌شود. ردیف‌ها و ستون‌ها در جهت موازی محورهای عمود بر هم در لایه‌ها هستند (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸- یک سیستم آبخوان فرضی تقسیم‌بندی شده (Ching and Kinzelbach, 2000)

۳-۴-۴-۲ - تقسیم‌بندی زمانی

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. اصلی‌ترین مولفه در تقسیمات زمانی، گام زمانی می‌باشد. گام زمانی در واقع جدا سازنده زمانی معادلات جریان می‌باشد و مقاطع زمانی شبیه‌سازی را تعیین می‌کند. از اجتماع گام‌های زمانی، یک دوره تنش حاصل می‌گردد. برای هر دوره استرس، زمان کلی تعداد گام‌های زمانی و ضریب افزایش گام زمانی باید مشخص گردد. طول گام زمانی  $i$  برابر حاصل ضرب گام زمانی  $1 - i$  با ضریب افزایش می‌باشد.

۳-۴-۴-۳ - شرایط مرزی

شرایط مرزی به محدودیت‌هایی گفته می‌شود که بر شبکه مدل اعمال می‌شود تا اندرکنش بین محدوده شبیه‌سازی و محیط اطراف مدل را نشان دهد و به کمک آن نتیجه تغییرات محیط بر روی محدوده مدل مشاهده می‌شود. انتخاب درست شرط مرزی یک گام مهم در طراحی مدل‌ها می‌باشد. وجود خطا در آن می‌تواند باعث ایجاد خطاهای قابل توجهی در نتایج شبیه‌سازی شود. در مدل‌های آب زیرزمینی چهار نوع مرز در نظر گرفته می‌شود:

۳-۴-۴-۴ - مرز با بار هیدرولیکی مشخص

در مرز با بار هیدرولیکی مشخص (Specific head boundary)، هد ثابت فرض می‌شود. خط هم پتانسیل یا تماس بین آبخوان و یک توده آب سطحی را می‌توان با سلول‌های بار هیدرولیکی ثابت شبیه‌سازی کرد. شبیه‌سازی مرز با بار هیدرولیکی مشخص باید با احتیاط زیاد انجام گیرد، زیرا با وجود تغییرات در مرز و آبخوان، سلول‌های مذکور مملو از آب باقی می‌مانند. به همین جهت بار هیدرولیکی در سلول‌های با بار ثابت در تمام دوره شبیه‌سازی به همان صورت اولیه باقی می‌ماند. به عنوان مثال، یک رودخانه کوچک ممکن

است بر اثر پمپاژ چاه مجاور خشک شود ولی سلول‌های با بار ثابت شبیه‌سازی کننده آن به تامین آب به آبخوان ادامه می‌دهند.

۳-۴-۵- مرز با شدت جریان وابسته به بار هیدرولیکی

مرزی که میزان جریان ورودی و یا خروجی از آن بر اساس اختلاف بار هیدرولیکی سلول‌های مرزی و سلول‌های آبخوان مجاور محاسبه می‌شود، مرز جریان وابسته به بار هیدرولیکی ( Head dependent flux boundary) نامیده می‌شود. سه بسته MODFLOW می‌توانند چنین شرایطی را شبیه‌سازی کنند:

الف- بسته رودخانه

بسته رودخانه (River package)، جریان بین آبخوان و منبع آب‌های سطحی، نظیر رودخانه یا دریاچه را شبیه‌سازی می‌کند. میزان جریان از رودخانه به آبخوان از طریق معادله (۳-۳۳) محاسبه می‌گردد (چیت‌سازان ۱۳۸۱):

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(h_{RIV} - h) \quad (3-33)$$

که در آن:

$Q_{RIV}$ : جریان بین رودخانه و آبخوان

$H_{RIV}$ : بار هیدرولیکی رودخانه

$C_{RIV}$ : هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه

$h$ : بار هیدرولیکی سلول

در صورتی که آب از رودخانه به سمت آبخوان جریان داشته باشد  $Q_{RIV}$  مثبت و برعکس آن منفی در نظر گرفته می‌شود.

$$C_{RIV} = \frac{kLW}{M} \quad (3-34)$$



که در آن،  $K$  هدایت هیدرولیکی مواد بستر رودخانه،  $L$  طول آبراهه رودخانه در سلول،  $W$  عرض آبراهه رودخانه در سلول و  $M$  ضخامت بستر رودخانه است. زمانی که بار هیدرولیکی در آبخوان به زیر بستر رودخانه نزول پیدا کند مقدار نشت بستر رودخانه از معادله زیر به دست می‌آید:

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(h_{RIV} - R_{BOT}) \quad h > R_{BOT} \quad (3-35)$$

که در آن،  $R_{BOT}$  ارتفاع کف آبراهه رودخانه است (چیت‌سازان ۱۳۸۱).

#### ب- بسته زهکشی

بسته زهکشی (Drain package)، دو نوع زهکش باز و بسته را شبیه‌سازی می‌کند. تفاوت آن با بسته رودخانه در آن است که جریان فقط از آبخوان به طرف زهکش است و زمانی که بار هیدرولیکی در آبخوان به زیر ارتفاع زهکش نزول کرد، جریان متوقف می‌شود. به همین جهت بسته زهکشی ابزاری مفید برای مدل‌سازی چشمه است. میزان جریان ورودی به زهکش از معادله (۳-۳۶) به دست می‌آید (McDoland and Harbaugh, 1988):

$$\begin{aligned} QD &= CD(h - d) & h > d \\ QD &= 0 & h \leq d \end{aligned} \quad (3-36)$$

که در آن:

$QD$ : جریان ورودی به زهکش

$CD$ : رسانایی هیدرولیکی زهکش

$h$ : بار هیدرولیکی در سلول آبخوان

$d$ : ارتفاع زهکش در سلول زهکش

#### ج- بسته مرز با بار هیدرولیکی عمومی

بسته مرز دارای بار هیدرولیکی عمومی (General Head Boundary package) جریان وابسته به بار هیدرولیکی ( $Q_b$ ) را که از یک مرز عبور می‌کند را با استفاده از معادله زیر شبیه‌سازی می‌کند.

$$Q_b = C_b (h_b - h)$$

معادله (۳-۳۷)

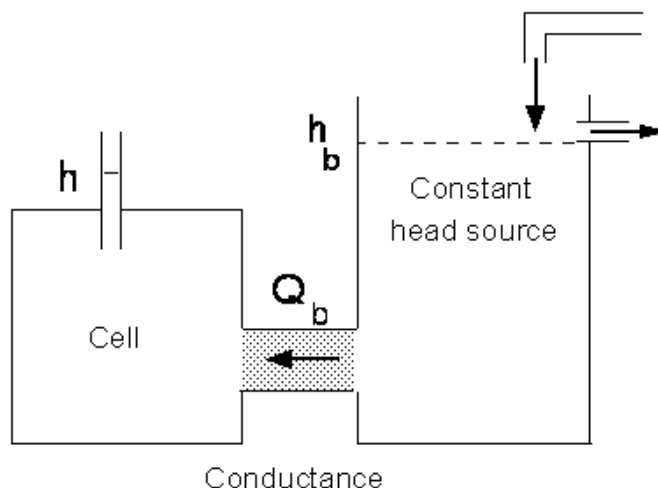
$Q_b$ : جریان به داخل سلول از منبع

$C_b$ : ضریب رسانایی بین منبع خارجی و سلول

$h_b$ : بارهیدرولیکی منبع خارجی

$h$ : بارهیدرولیکی سلول

بسته مرز با بار هیدرولیکی عمومی یک جریان خطی نامحدود را بین مرز و آبخوان مفروض می‌دارد و باید آن را با احتیاط مورد استفاده قرار داد. این بسته برای شبیه‌سازی جریان ناپایدار با بار هیدرولیکی معلوم مفید است، زیرا با استفاده از آن تغییر  $C_b$  و  $h_b$  در دوره‌های مختلف امکان‌پذیر می‌شود. شکل (۳-۹) رابطه  $Q_b$  را در مقابل  $h_b$ ، مطابق با معادله (۳-۳۷) نشان می‌دهد.



شکل ۳-۹- شماتیکی از بسته نرم افزاری مرز با بار هیدرولیکی عمومی

۳-۴-۴-۶- مرز با شدت جریان معلوم

سطح ایستایی در آبخوان‌های آزاد، ورودی و خروجی جانبی از محل تماس بین آبخوان‌های مختلف، نشت از لایه‌های مجاور، جریان چشمه و تغذیه به رودخانه و یا تغذیه از رودخانه‌های سطحی، مثال‌هایی از مرز با جریان معلوم هستند.

جریان معلوم را توسط یکی از بسته‌های زیر می‌توان شبیه‌سازی کرد:

الف- بسته تغذیه

بسته تغذیه (Recharge Package) برای شبیه‌سازی مقدار تغذیه به سیستم آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغذیه به سلول مدل، به صورت شدت تغذیه مشخص می‌شود و مقدار آن در یک سلول آبخوان از معادله زیر به دست می‌آید:

$$Q_R = I_R \times DELR.DELC \quad (38-3)$$

$I_R$ : شدت تغذیه

$DELR.DELC$ : مساحت یک سلول مدل

برای مشخص کردن سلول واقع در ستون عمودی سلول‌های شبکه که در معرض تغذیه قرار دارد، سه گزینه وجود دارد که عبارتند از:

۱- تغذیه فقط برای لایه بالایی شبکه

۲- دادن مقدار تغذیه به هر سلول از شبکه عمودی. شماره لایه با پارامتر  $I_{RICH_{ij}}$  مشخص می‌شود.

۳- اعمال تغذیه به فوقانی‌ترین سلول فعال در ستون عمودی.

د- بسته تبخیر و تعرق

بسته تبخیر و تعرق (*Evapotranspiration Packag*) اثرات تعرق گیاه و تبخیر مستقیم از سطح ایستابی کم عمق را شبیه‌سازی می‌کند. حداکثر تبخیر و تعرق با توجه به ارتفاع سطح ایستابی که توسط استفاده کننده از مدل مشخص شده است روی می‌دهد. هنگامی که سطح ایستابی به زیر عمق توقف نزول می‌کند، تبخیر و تعرق متوقف می‌شود. تبخیر و تعرق به صورت خطی، بین این دو ارتفاع نهایی تغییر می‌کند.

میزان حجمی تبخیر و تعرق برابر حاصل ضرب شدت تلفات در واحد سطح و مساحت به دست می‌آید. مقدار آن با استفاده از معادله (۳۹-۳) به دست می‌آید:

$$Q_{ETi,j} = R_{ETi,j} \cdot DELR_j \cdot DELC_i \quad (39-3)$$

$$R_{ETi,j} = R_{ETMi,j} \quad h_{i,i,k} > h_{s,i,j} \quad (40-3)$$

$$R_{ETi,j} = 0 \quad h_{i,i,k} < h_{s,i,j} - d_{i,j} \quad (41-3)$$

که در آن:

$Q_{ETi,j}$ : حجم تبخیر و تعرق در مساحت  $DELR_j \cdot DELC_i$

$R_{ETi,j}$ : شدت تلفات در واحد سطح

$h_{i,i,k}$ : بار هیدرولیکی در سلولی است که تبخیر در آن رخ می‌دهد.

$R_{ETMi,j}$ : حداکثر مقدار  $R_{ETi,j}$

$h_{s,i,j}$ : ارتفاع سطح تبخیر و تعرق یا ارتفاع سطح ایستابی در جایی است که بیشترین مقدار تبخیر و تعرق صورت می‌گیرد.

$d_{i,j}$ : عمق توقف تبخیر و تعرق

تبخیر و تعرق تنها از یک سلول در ستون عمودی که در زیر منطقه  $DELR \cdot DELC$  واقع است خارج می‌گردد. کاربر این سلول را به کمک یکی از دو گزینه زیر که توسط بسته فراهم شده است، مشخص می‌کند:

۱- تبخیر و تعرق همواره از بالاترین لایه مدل خارج می‌گردد.

۲- کاربر با استفاده از آرایه شاخص لایه ( $I_{ET}$ ) تعیین می‌کند که تبخیر و تعرق از چه سلولی در ستون عمودی صورت می‌گیرد.

ز- بسته چاه

بسته چاه (Well Package) چاه‌های پمپاژی یا تزریقی را با استفاده از میزان مشخص شده توسط کاربر ( $Q$ ) در هر دوره تنش، شبیه‌سازی می‌کند.

ر- بسته نهر

بسته نهر (Stream Package)، در واقع ترکیبی از مرز با جریان معلوم و مرز جریان وابسته به بار هیدرولیکی است. این بسته مشابه بسته رودخانه است زیرا امکان ورود و خروج آب از نهر در آن وجود دارد. اما مجهزتر از بسته رودخانه است زیرا جریان آب در نهر را مورد ملاحظه قرار می‌دهد و نشت آب بین آبخوان و نهر را مطابق با آن محدود می‌نماید.

### ۳-۴-۷- مرزهای فاقد جریان

مرزهای فاقد جریان (No Flow Boundary) مرزهایی که جریان ورودی به آنها صفر در نظر گرفته می‌شود را مرزهای فاقد جریان می‌نامند. MODFLOW به طور اتوماتیک یک مرز فاقد جریان را پیرامون شبکه فرض می‌دارد.

### ۳-۴-۵- شرایط اولیه

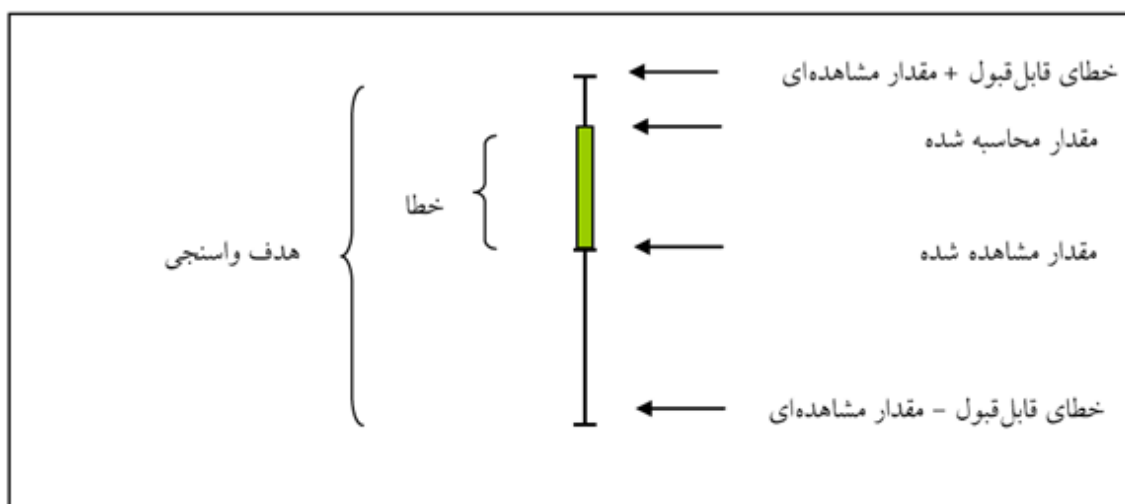
منظور از شرایط اولیه مقادیر متغیرهای مجهول درون محدوده مدل (مانند بارهیدرولیکی و جریان) در لحظه ابتدایی شبیه‌سازی می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های غیرماندگار لازم است شرایط اولیه مشخص باشد. معمولاً مدل برای یک حالت ماندگار واسنجی شده و نتایج آن به عنوان شرایط اولیه در شبیه‌سازی غیرماندگار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۴-۶- واسنجی مدل

واسنجی مدل (Calibration) عبارت است از فرآیند پیدا کردن مجموعه‌ای از شرایط مرزی، تنش‌ها و پارامترهای هیدروژئولوژیک، که نتایج به دست آمده از آن برازش مناسبی با اندازه‌گیری‌های بار هیدرولیکی و جریان‌های صحرایی دارد (چیت‌سازان ۱۳۸۱). واسنجی هر مدل باید از قبل دارای هدفی از خطای قابل قبول باشد که دامنه خطای قابل قبول به هدف مدل بستگی دارد. هدف از واسنجی به حداقل رساندن خطا یا معیار واسنجی (Calibration target) می‌باشد.

### ۳-۴-۷- نتایج واسنجی

از مشخصه نرم‌افزار GMS نمایش تصویری میزان خطای ناشی از اختلاف بار هیدرولیکی محاسبه شده و شبیه‌سازی شده است. به این 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 (۳-۱۰) هدف واسنجی و منطقه‌بندی خطا، مقدار مشاهده‌ای و محاسباتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰- هدف واسنجی

در واقع میله رنگی (Colored bar) نمایانگر خطای واسنجی می‌باشد و مرکز آن منطبق بر مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد و اگر خطا در محدوده خطای قابل قبول قرار گیرد، میله به رنگ سبز خواهد بود و اگر خطا خارج از محدوده خطای قابل قبول و کمتر از ۲۰۰٪ باشد، میله رنگی زرد و در صورتی که مقدار خطا بیشتر از ۲۰۰٪ باشد، میله رنگی قرمز خواهد شد.

به منظور ارزیابی دقیق نتایج واسنجی، از بارهای اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی شده، اختلاف آن‌ها و انواع میانگین خطاها در نتایج واسنجی استفاده شده است. سه روش معمول برای نشان دادن معیار واسنجی عبارتند از:

#### الف- خطای میانگین

خطای میانگین (Mean Error) میانگین تفاوت بین بار محاسباتی ( $h_m$ ) و بار شبیه‌سازی شده ( $h_s$ ) می‌باشد (معادله ۳-۴۳).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i$$

که در آن  $n$  تعداد پیزومترها است.

خطای میانگین روش ساده و آسان است ولی معیار مناسبی نیست. چرا که اختلاف میانگین‌های مثبت و منفی با هم جمع جبری شده و اثر همدیگر را خنثی می‌کنند. از این رو، خطای میانگین پایین نشان‌دهنده یک واسنجی خوب نیست.

#### ب- متوسط خطای مطلق

متوسط خطای مطلق (Mean Absolute Error)، میانگین قدر مطلق تفاوت بین بار محاسباتی ( $h_m$ ) و بار شبیه‌سازی شده ( $h_s$ ) می‌باشد (معادله ۳-۴۴).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i|$$

معادله (۳-۴۴)

ج- جذر میانگین مربعات خطاها

جذر میانگین مربعات خطاها یا اختلاف معیار (Root Mean Squared Error) برابر است با جذر میانگین

مربع اختلاف‌های بین بار محاسباتی ( $h_m$ ) و بار شبیه‌سازی شده ( $h_s$ )

$$RMS = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2 \right]^{0,5} \quad h_s \text{ می‌باشد.}$$

معادله (۳-۴۵)

انتخاب هر یک از این خطاها بر مقادیر پارامترهای انتخابی برای مدل واسنجی شده موثر است

(Anderson and Woessner 1992). در صورتی که خطاها به صورت نرمال توزیع شده باشد خطای RMS

بهترین معیار خطا می‌باشد.

واسنجی به دو روش زیر انجام می‌شود:

الف- واسنجی دستی یا سعی و خطا

واسنجی سعی و خطا (Manual trial and error) مدل با اطلاعات اولیه اجرا می‌شود و پس از اجرای مدل

و مقایسه سطح آب مشاهده‌ای و سطح آب محاسبه شده توسط مدل، در صورت وجود اختلاف قابل

ملاحظه بین این دو، پارامترها با دید کارشناسی و در چارچوب حدود مجاز تغییر می‌یابد و مدل مجدداً

اجرا می‌گردد. این کار آنقدر تکرار می‌شود تا خطا در محدوده خطای قابل قبول قرار گیرد.

ب- واسنجی خودکار

واسنجی خودکار (Automated calibration) توسط کدهای رایانه‌ای صورت می‌گیرد و از روش معکوس

حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌شود. اغلب کدهای رایانه‌ای مربوط به واسنجی خودکار، به

دنبال مجموعه پارامترهای بهینه‌ای هستند که مجموع مربعات انحراف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی



به یک حداقل کاهش می‌یابد. از بین کدهای مورد استفاده برای واسنجی خودکار می‌توان به PEST، UCODE و MF2K PES Process اشاره کرد.

### ۳-۴-۸-صحت‌سنجی

پس از انجام واسنجی، مرحله تنظیم و تطبیق مدل برای شرایط خاص منطقه لازم است، مدل برای چند سال بعد کنترل شود و صحت و دقت آن مورد ارزیابی قرار گیرد. به عبارتی دیگر مرحله صحت‌سنجی (Verification) به منظور اعتماد بیشتر به مقادیر پارامترهای کالیبره شده انجام می‌شود. به این ترتیب که در صحت‌سنجی، مدل با استفاده از پارامترهای واسنجی شده و تنش‌های وارد شده به مدل، و با داده‌های مشاهداتی که تاکنون استفاده نشده است شبیه‌سازی می‌شوند. سپس در صورتی که مدل با موفقیت، داده‌های اندازه‌گیری شده در صحرا را در زمان صحت‌سنجی شبیه‌سازی کرد، آنوقت می‌تواند به منظور پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳-۴-۹-پیش‌بینی

بعد از مرحله صحت‌سنجی، مرحله پیش‌بینی (Prediction) که هدف اغلب مدل‌سازی است، انجام می‌گیرد. مرحله پیش‌بینی به این صورت انجام می‌گیرد که استرس‌های حاکم بر سیستم در آینده تخمین زده شده و به مدل وارد و پاسخ سیستم به این استرس‌ها کمی‌سازی می‌گردد.

### ۳-۴-۱۰-ارائه نتایج

ارائه نتایج، آخرین مرحله تهیه مدل و مهمترین بخش از لحاظ استفاده‌کنندگان از مدل است.

## فصل چهارم: تهیه مدل عددی دشت شاهرود

### با استفاده از GMS6.0

#### ۴-۱- تهیه مدل مفهومی

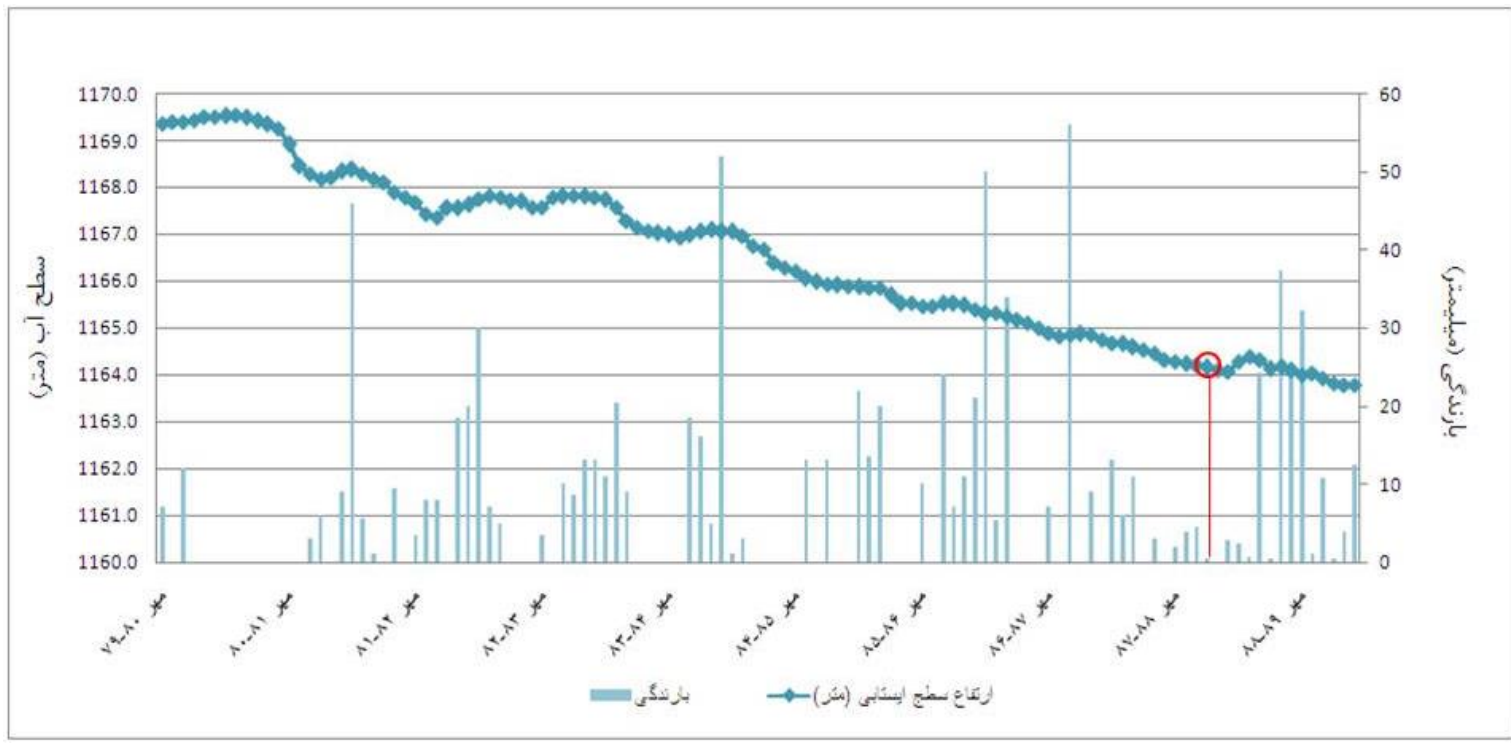
مدل مفهومی، مهم‌ترین و اساسی‌ترین مرحله در تهیه مدل جریان آب زیرزمینی می‌باشد. هدف از تهیه مدل مفهومی، ساده کردن شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه و سازماندهی داده‌های صحرایی به منظور تجزیه و تحلیل راحت‌تر سیستم می‌باشد (Anderson and Woessner, 1992). همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد یکی از ویژگی‌های نرم‌افزار GMS، امکان تهیه مدل مفهومی در مودول نقشه با استفاده از ابزارهای GIS (نقاط، خطوط و چند وجهی) می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از این روش، ابتدا مدل مفهومی تهیه گردید و سپس مدل مفهومی تهیه شده به مدل عددی تبدیل گردید. برای تهیه مدل مفهومی در مرحله اول عکس هوایی یا نقشه منطقه مورد مطالعه وارد نرم‌افزار مدلساز شد و ژئورفرنس گردید. محدوده مدل‌سازی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی دشت شاهرود، تعیین و توسط ابزارهای مودول نقشه ترسیم شد. سپس پارامترهای تغذیه سطحی، پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، بار هیدرولیکی اولیه، تبخیر، چاه‌های بهره‌برداری و چاه‌های مشاهده‌ای که برای تهیه مدل مفهومی لازم است تعیین و به نرم‌افزار GMS وارد گردید.

## ۲-۴- شرایط اولیه

ابتدا مدل سازی در شرایط پایدار انجام می شود تا یک شرط اولیه برای وضعیت آبخوان برای مدل تعریف گردد. برای تعیین شرایط اولیه با استفاده از داده های اندازه گیری شده توسط ۱۶ چاه مشاهده ای هیدروگراف سطح آب از سال آبی ۱۳۸۰-۱۳۷۹ تا سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۸۸ ترسیم گردید (شکل ۴-۱). با توجه به نوسانات کم هیدروگراف واحد دشت شاهرود در دی ۱۳۸۷ نسبت به ماه های دیگر، دی ۱۳۸۷ به عنوان شرایط اولیه انتخاب شد. سپس با استفاده از داده های ۱۶ چاه مشاهده ای در آذر ۱۳۸۷ بار هیدرولیکی اولیه به همه سلول های مدل از طریق درون یابی اختصاص داده شد. ارتفاع سطح آب این چاه ها در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول ۴-۱- مشخصات جغرافیایی و ارتفاع سطح آب چاه های مشاهده ای دشت شاهرود (اداره امور آب شاهرود)

شماره	نام چاه	UTM(x)	UTM(y)	ارتفاع سطح آب متر (آذر ۱۳۸۵)
۱	خیر آباد	۳۳۳۱۵۰	۴۰۳۳۱۵۰	۱۲۶۸/۱۶
۲	قلعه اصف	۳۳۲۵۰۰	۴۰۲۹۸۰۰	۱۲۴۷/۴۴
۳	فرودگاه	۳۲۸۳۵۰	۴۰۲۲۶۰۰	۱۲۳۰/۶۹
۴	حصار	۳۲۶۳۵۰	۴۰۲۸۹۵۰	۱۲۱۹/۸۷
۵	جعفر خان	۳۲۶۹۵۰	۴۰۲۲۸۵۰	۱۲۱۰/۶۳
۶	شرکت نفت	۳۲۲۸۰۰	۴۰۳۱۰۵۰	۱۲۰۸/۸۹
۷	پارک انقلاب	۳۱۹۵۵۰	۴۰۳۱۱۵۰	۱۲۲۵/۸۳
۸	قلعه نو خالصه	۳۱۳۶۵۰	۴۰۲۲۵۰۰	۱۱۸۴/۶۶
۹	شکار آباد	۳۱۳۶۵۰	۴۰۱۸۲۰۰	۱۱۵۵/۸۰
۱۰	خوریان	۳۰۹۲۶۱	۴۰۲۴۱۸۶	۱۱۴۰/۳۰
۱۱	شرق کلانخان	۳۰۹۲۶۱	۴۰۱۹۶۴۸	۱۱۶۷/۰۵
۱۲	کارگاه شن و ماسه	۳۰۲۰۳۶	۴۰۱۰۷۰۳	۱۰۸۴/۰۱
۱۳	علی آباد	۳۰۴۵۳۸	۴۰۱۶۰۴۱	۱۱۲۸/۹۰
۱۴	فولاد	۳۰۵۳۵۶	۴۰۲۳۷۱۶	۱۱۳۲/۴۵
۱۵	وصفه	۳۰۳۰۴۵	۴۰۲۱۷۵۲	۱۱۰۶/۶۲
۱۶	جاده کلانخوان	۳۰۵۶۴۶	۴۰۲۰۸۳۴	۱۱۱۳/۷۷

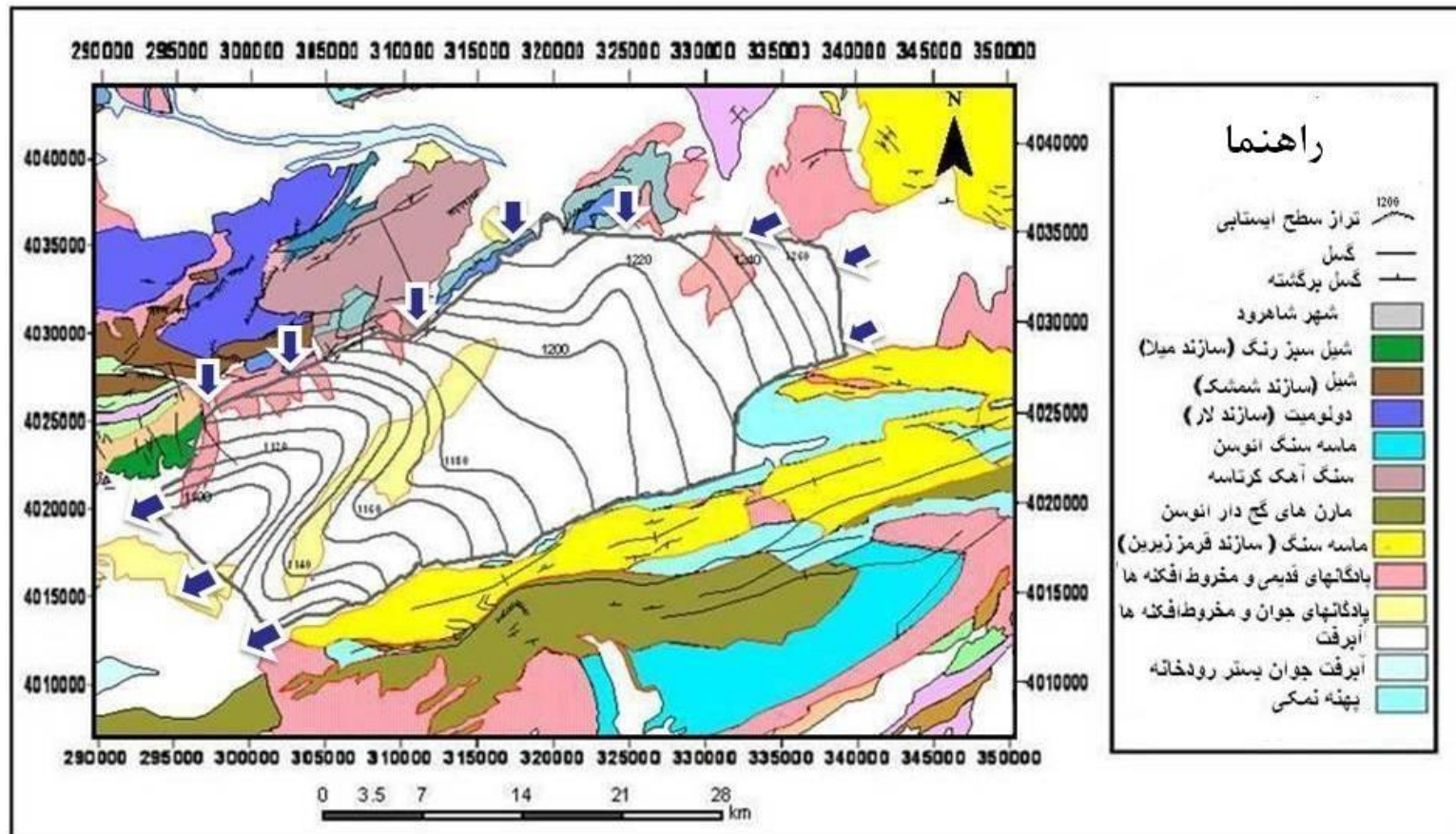


شکل ۴-۱- هیدروگراف واحد دشت (اداره امور آب شاهرود)

### ۴-۳- شرایط مرزی مدل

شرایط مرزی به مفهوم نقش و تأثیر مرزهای محدود کننده منطقه بر آبخوان می‌باشد. مرزهای هیدروژئولوژیکی به دو دسته مرزهای فیزیکی و هیدرولیکی تقسیم می‌شوند. مرزهای فیزیکی سیستم جریان آب زیرزمینی قابل رؤیت بوده و شامل توده‌ای از سنگ‌های نفوذناپذیر یا پهنه بزرگی از آب سطحی است ولی مرزهای هیدرولیکی متشکل از خطوط جریان و خطوط تقسیم آب بوده و غیر قابل رؤیت است. این مرزها با توجه به خطوط تراز پیزومترها تعیین می‌گردد. مرزهای هیدرولیکی با تغییر شرایط هیدرولوژیکی ممکن است جابجا شوند یا از بین بروند. این مرزها می‌توانند به صورت مرزهای فاقد جریان یا به صورت مرزهای جریانی با بار هیدرولیکی معلوم باشند (چیت‌سازان ۱۳۸۱).

برای تعیین مرزهای آبخوان دشت شاهرود از نقشه سطح آب و الگوی جریان (از شمال و شمال شرق به سمت نواحی مرکزی و غرب دشت می‌باشد)، مرزهای آبخوان استفاده شده است (شکل ۴-۲). مرز فاقد جریان یا نفوذناپذیر در قسمت‌هایی از دشت که تغذیه‌ای صورت نمی‌گرفت (مرزهای موازی با خطوط جریان) در نظر گرفته شد. مرزهای جنوبی به عنوان مرز نفوذناپذیر، مرزهای شمال و شرق دشت، به عنوان مرزهای ورودی و مرزهای جنوب غرب به عنوان مرزهای خروجی در نظر گرفته شد.

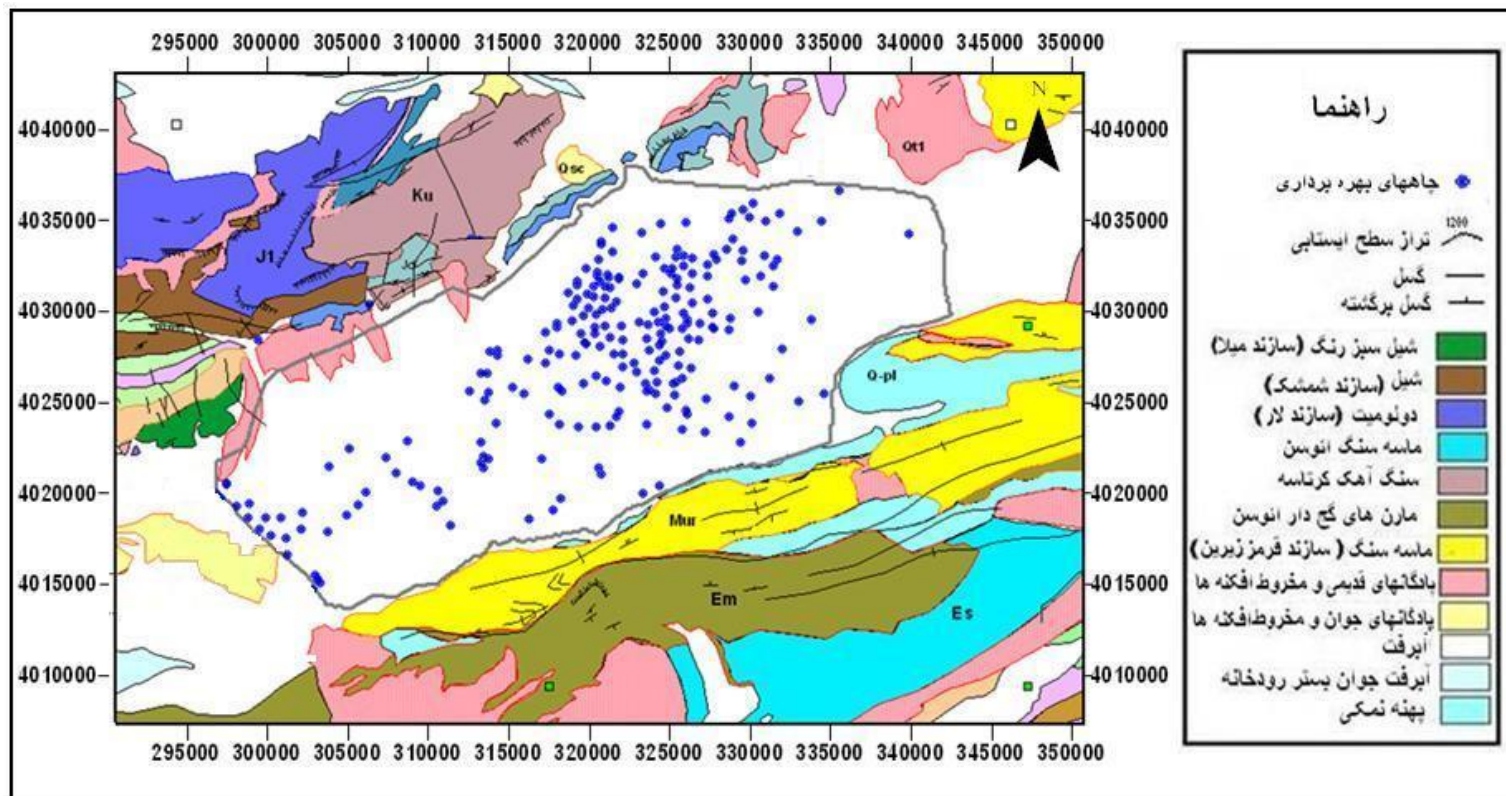


شکل ۴-۲- شرایط مرزی منطقه مورد مطالعه

جهت اعمال مرزهای ورودی و خروجی، مرزهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مرز با بار هیدرولیکی عمومی (GHB) انتخاب گردید. علت استفاده از مرز نوع GHB این است که برخلاف مرز با بار مشخص، سطح آب در این نوع مرز 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 (Conductance coefficient) سلول مرزی تغییر می‌نماید. از طرف دیگر حساسیت بارهای هیدرولیکی محاسباتی مدل به پارامتر مرزی نوع GHB کمتر از سایر مرزها است. بنابراین اگر فرضیات مرزی به کار رفته در مرز درست نباشد و یا در اثر رسیدن اثر استرس‌ها، مرزها رفتار غیر واقعی نشان دهند، نتایج مدل کمتر تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (عطایی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۶).

#### ۴-۴- چاه‌های بهره‌برداری

برای شبیه‌سازی چاه‌های تخلیه از بسته نرم‌افزاری چاه (Well Package) نرم‌افزار GMS استفاده شده است. 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 که این مقدار در هر گام زمانی مربوط به آبخوان، افزوده و 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 محدوده مورد مطالعه ۲۳۸ چاه عمیق و نیمه عمیق واقع می‌باشد و عمدتاً دارای کاربری کشاورزی می‌باشند. شکل (۳-۴) چاه‌های بهره‌برداری موجود در محدوده مدل دشت شاهرود را نشان می‌دهد.

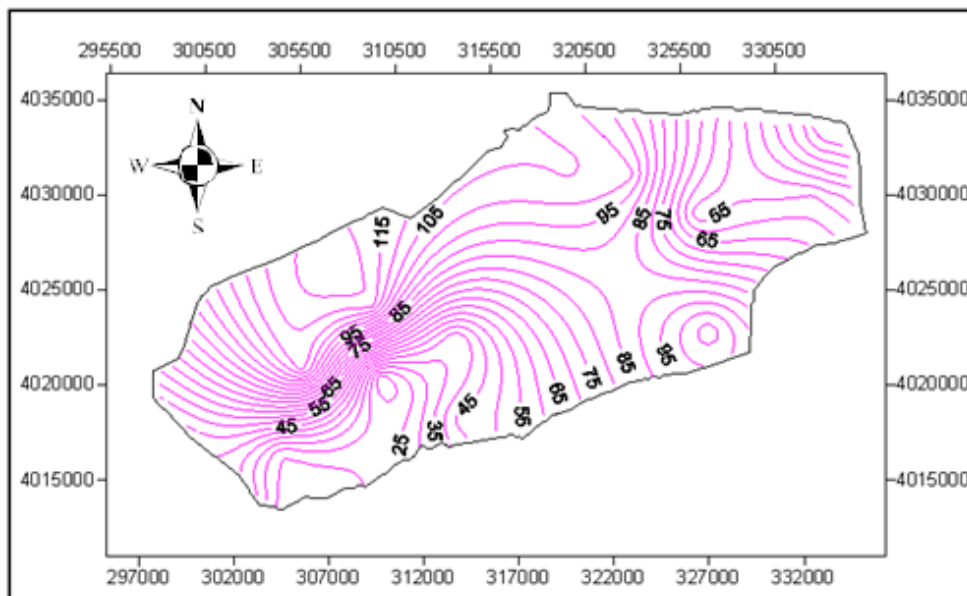


شکل ۳-۴- چاههای بهره برداری در محدوده مطالعاتی دشت



#### ۴-۵- تبخیر

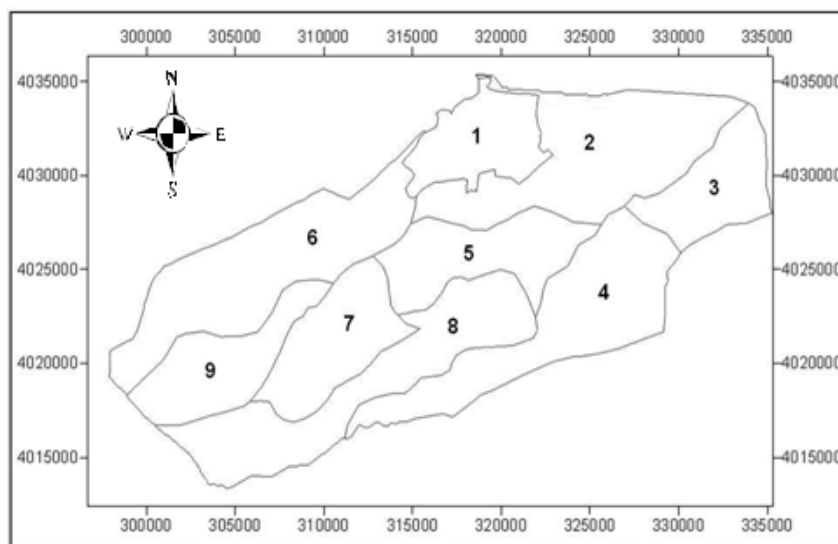
هنگامی که سطح ایستابی در نزدیکی سطح زمین قرار داشته باشد با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و اختلاف ارتفاع سطح ایستابی با سطح زمین، امکان تبخیر از سطح ایستابی آب زیرزمینی وجود دارد. MODFLOW تبخیر از سطح ایستابی را به وسیله بسته نرم‌افزاری تبخیر و تعرق شبیه‌سازی می‌نماید. در این بسته نرم‌افزاری در مواقعی که سطح ایستابی بالاتر یا هم سطح با سطحی تعریف شده توسط کاربر، که سطح تبخیر و تعرق نامیده می‌شود، باشد تلفات ناشی از تبخیر و تعرق صورت خواهد گرفت. به عبارتی اگر سطح ایستابی نسبت به سطح تبخیر و تعرق از حد معینی (Extinction depth) بیشتر باشد، تبخیر و تعرق از سطح ایستابی متوقف خواهد شد. معمولاً عمق توقف تبخیر و تعرق در ایران ۴ متر تعیین می‌شود (نجاتی و همکاران، ۱۳۸۷). در دشت شاهرود عمق برخورد به آب حداقل ۱۵ متر بوده که بیشتر از عمق توقف می‌باشد (شکل ۴-۴). بنابراین تبخیر و تعرق از آبخوان وجود ندارد.



شکل ۴-۴- نقشه هم عمق مربوط به بهمن ۱۳۸۷

## ۴-۶- تغذیه

برای در نظر گرفتن تغذیه ناحیه‌ای پراکنده در منطقه، از بسته تغذیه استفاده می‌گردد. معمولاً به دلیل ویژگی‌های متفاوت خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، شدت بارندگی و شیب زمین میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در نقاط مختلف، متفاوت می‌باشد. در دشت شاهرود میزان تغذیه آبخوان بر اساس میزان تغذیه ناشی از بارندگی، آب برگشتی چاه‌ها و آب چاه‌های فاضلاب برآورد گردید. مقدار بارندگی بر اساس داده‌های هواشناسی برای ماه‌هایی که بارندگی وجود داشت مشخص و سپس بر اساس نقشه خاک منطقه مقدار نفوذ ناشی از بارندگی تعیین گردید. میزان آب برگشتی کشاورزی نیز با توجه به وجود چاه‌های کشاورزی و در نظر گرفتن ۲۵ درصد دبی چاه‌های کشاورزی به دست آمد. همچنین میزان تغذیه ناشی از چاه‌های فاضلاب بر اساس ۸۰ درصد آب مصرفی کل شهر در ماه‌های مختلف تعیین گردید. (کشاورزیان ۱۳۸۸). سپس از مجموع مقادیر تغذیه ناشی از بارندگی، آب برگشتی چاه‌ها و چاه‌های جذبی مقادیر کل تغذیه در آبخوان به دست آمد و با تقسیم‌بندی آبخوان (بر اساس نقشه خاک منطقه) به ۹ منطقه تغذیه‌ای وارد نرم‌افزار گردید (شکل ۴-۵). در جدول (۲-۴) مقادیر اولیه تغذیه مربوط به هر منطقه آورده شده است.



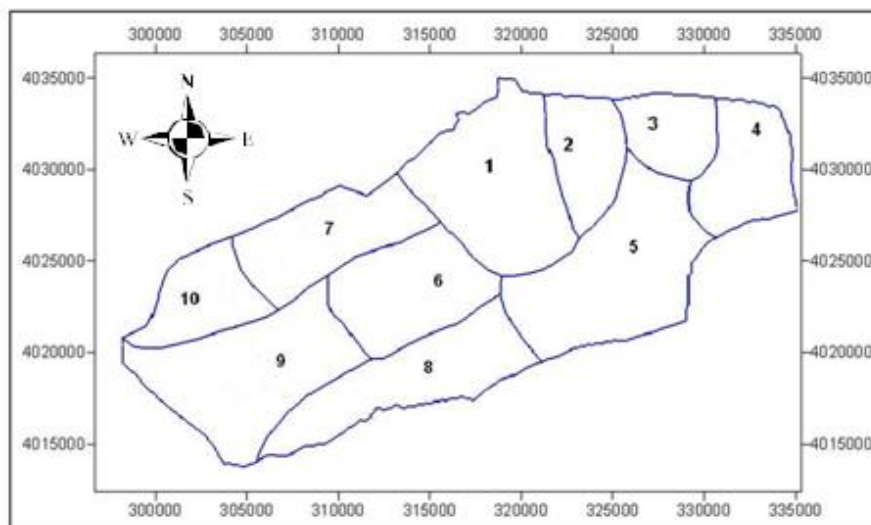
شکل ۴-۵- منطقه‌بندی تغذیه

جدول ۴-۲- مقادیر اولیه تغذیه هر منطقه

شماره منطقه	تغذیه (m/d)
۱	۰/۰۰۲۰۱۲
۲	۰/۰۰۰۰۳۸
۳	۰/۰۰۰۰۱۶۵
۴	۰/۰۰۰۰۱۲۶
۵	۰/۰۰۰۰۱۴۳
۶	۰/۰۰۰۰۱۴۵
۷	۰/۰۰۰۰۰۳۴
۸	۰/۰۰۰۰۵۷۹
۹	۰/۰۰۰۰۲۸۳

#### ۴-۷- پارامترهای هیدرولیکی آبخوان

پارامترهای هیدرولیکی شامل هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و ضریب نشت عمودی و موارد دیگر می-شود. با توجه به اینکه آبخوان دشت شاهرود آزاد می‌باشد، پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه برای مدل تعریف گردید. برای مشخص کردن پارامترهای مذکور از روش منطقه‌بندی استفاده شد. به دلیل تعداد کم آزمون پمپاژ انجام شده در محدوده مطالعاتی جهت ارائه اطلاعات کافی مربوط به پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان، به بررسی لاگ چاه‌های حفاری نیز پرداخته شد. مقادیر  $k$  و  $S$  حاصل از آزمون پمپاژ به طور متوسط به ترتیب  $۶/۴$  و  $۰/۰۴$  می‌باشد. هدایت هیدرولیکی به ۱۰ منطقه تقسیم-بندی گردید (شکل ۴-۶). مقادیر هر کدام از این منطقه‌ها در جدول (۴-۳) آورده شده است.



شکل ۴-۶- منطقه‌بندی اولیه هدایت هیدرولیکی

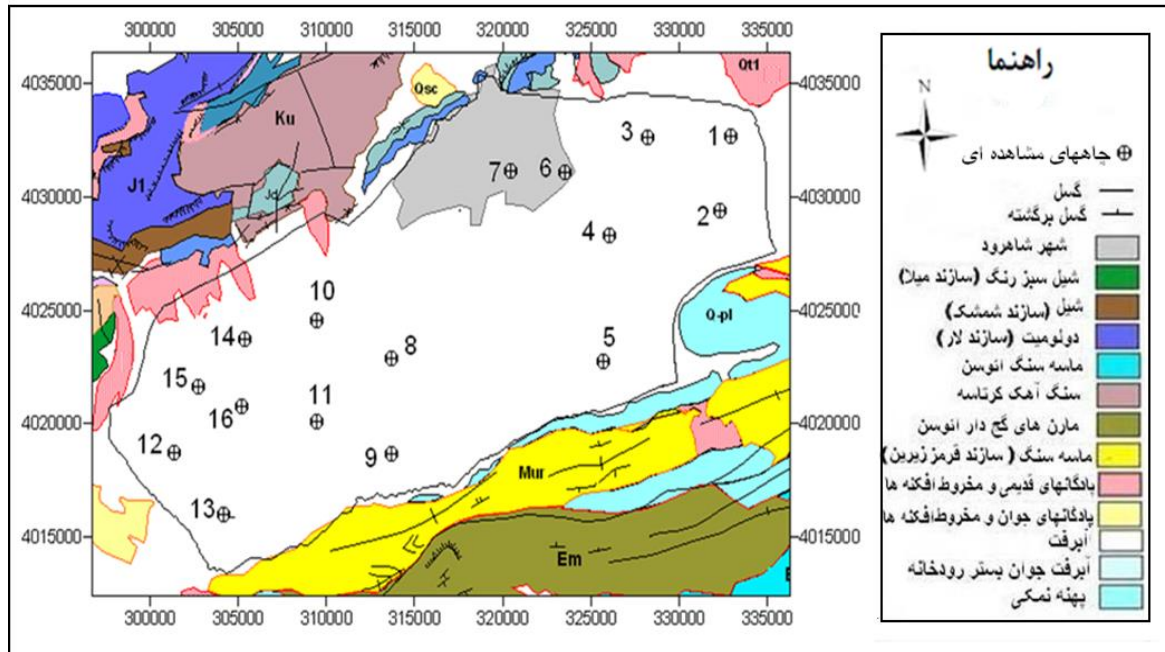
جدول ۴-۳- مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی هر منطقه

شماره منطقه	هدایت هیدرولیکی اولیه (m/d)
۱	۱۲/۰
۲	۷/۰
۳	۲/۵
۴	۱/۰
۵	۴/۰
۶	۶/۵
۷	۸/۰
۸	۳/۰
۹	۴/۰
۱۰	۵/۰

#### ۴-۸- چاه‌های مشاهده‌ای

جهت مقایسه تراز هیدرولیکی محاسبه شده با مقادیر مشاهده شده صحرائی به منظور بررسی روند درستی شرایط شبیه‌سازی شده همچنین محاسبه معیارهای آماری خطا در نتیجه مدل‌سازی، موقعیت و

مقادیر تراز آب مشاهده شده برای ۱۶ پیزومتر فعال در منطقه مورد مطالعه به صورت لایه شاخص (Observation Coverage) در نرم‌افزار GMS وارد گردید (شکل ۴-۷).



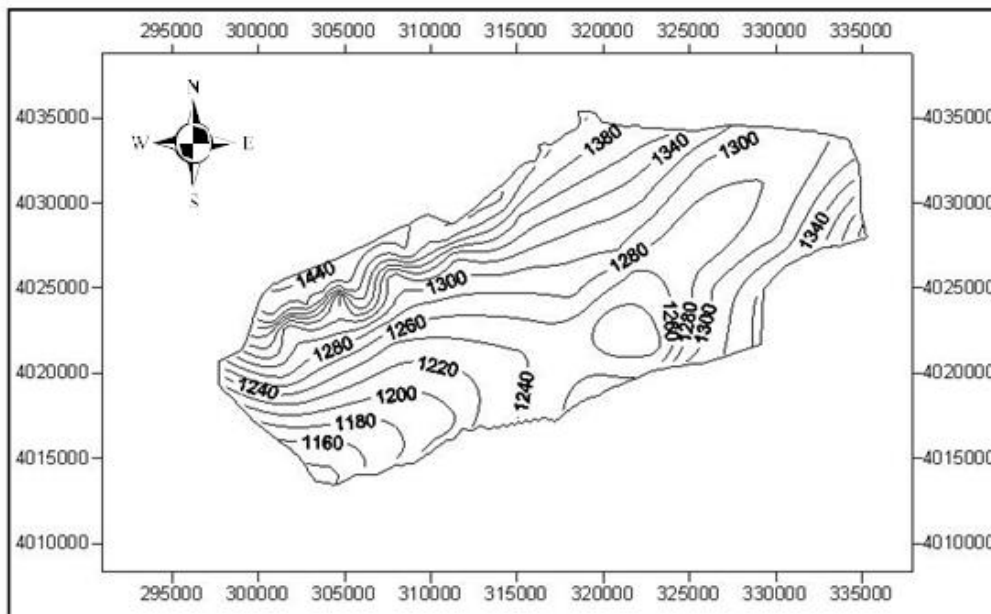
شکل ۴-۷- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای

#### ۹-۴- بار هیدرولیکی اولیه در شرایط پایدار

بار هیدرولیکی اولیه (Starting Head) آبخوان یعنی بار هیدرولیکی گره‌ها در شروع دوره‌های زمانی مدل می‌باشد. مشخص نمودن بار هیدرولیکی اولیه در شرایط پایدار، از لحاظ تئوری تاثیر مستقیم در پاسخ مدل نخواهد گذاشت ولی با فعال بودن مودول‌های مختلف نظیر تبخیر و تعرق و چاه، تعیین دامنه مناسبی برای تراز آب زیرزمینی می‌تواند موجب پایداری و همگرا بودن روند حل معادله حاکم و جلوگیری از بروز پدیده نوسان در آن گردد (Anderson and Woessner 1992). بار هیدرولیکی اولیه در شرایط پایدار، با توجه به این که مدل پایدار برای دی ۱۳۸۷ تهیه شده است، از داده‌های سطح آب آذر ۱۳۸۷ استفاده گردید و توسط روش کریجینگ برای مدل تعریف و مقاردهی شد.

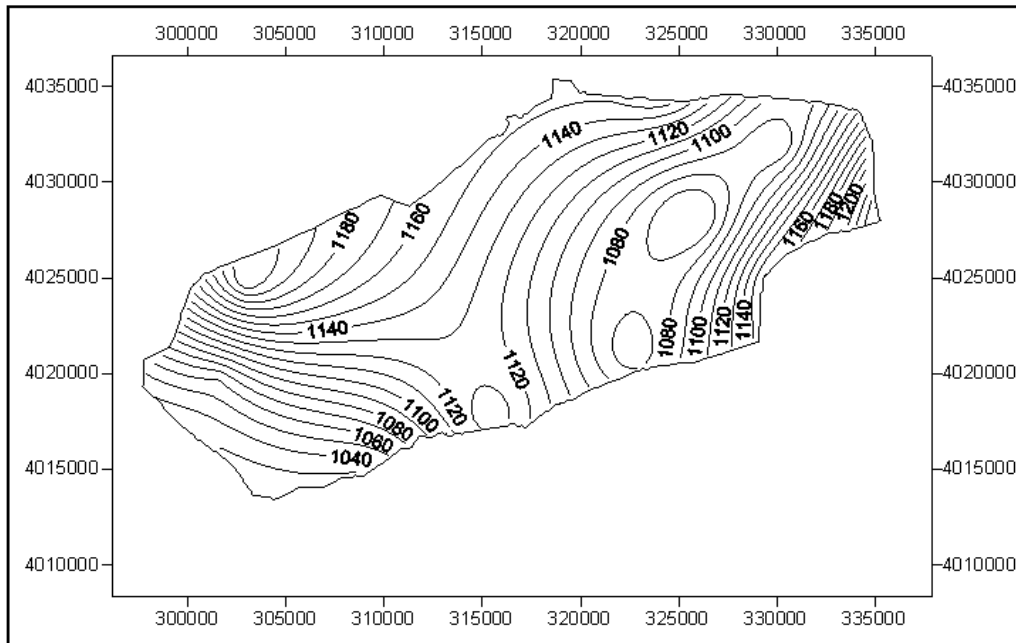
#### ۴-۱۰- وضعیت هندسی

شکل هندسی (Geometry) آبخوان حاصل محدوده بین سنگ کف و توپوگرافی سطح آبخوان و شرایط مرزی است. سقف لایه آبدار، سطح زمین در نظر گرفته شد. توپوگرافی منطقه به صورت فایل text وارد نرم افزار مدل ساز گردید و در محیط GMS با استفاده از روش درون یابی کریجینگ، درون یابی شد و سپس به کل سلول های مدل نسبت داده شد (شکل ۴-۸).



شکل ۴-۸- منحنی تراز توپوگرافی دشت شاهرود

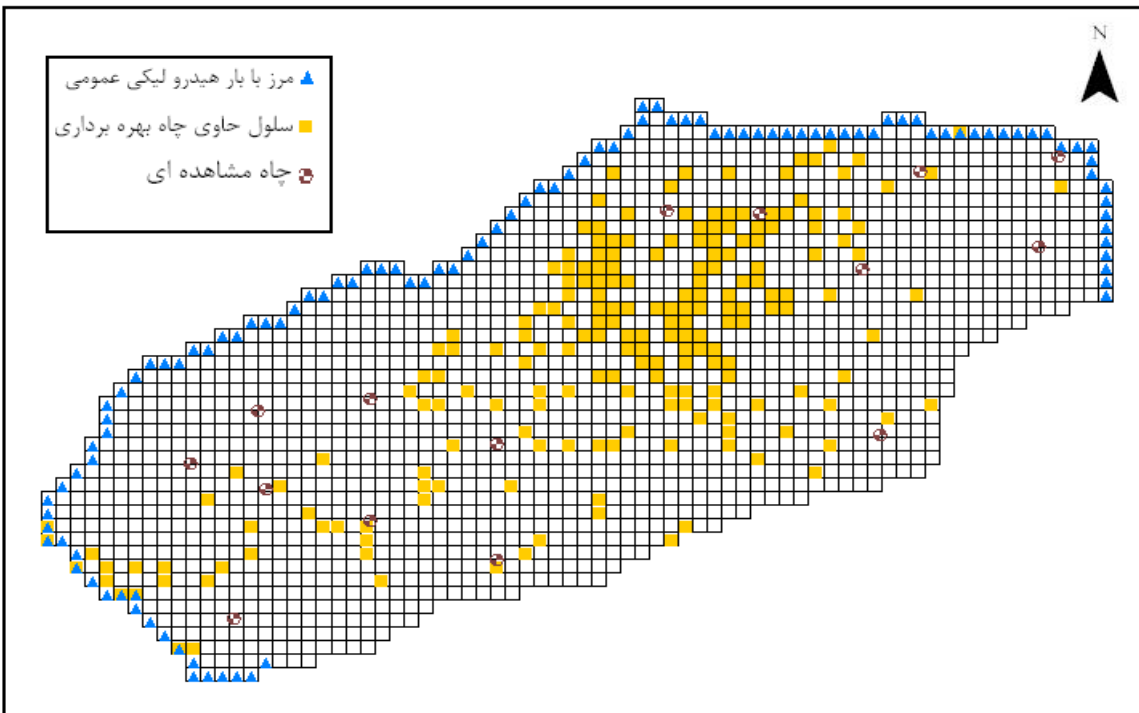
سنگ کف دشت شاهرود بر اساس گزارشات مطالعات ژئوفیزیکی، حداکثر عمق چاه های عمیق، مقاطع و لاگ های زمین شناسی تعیین و آن نیز به صورت فایل text وارد نرم افزار مدل ساز گردید و در محیط GMS با استفاده از روش درون یابی کریجینگ، درون یابی شد و سپس به کل سلول های مدل نسبت داده شد (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹- منحنی تراز سنگ کف دشت شاهرود

#### ۴-۱۱- تهیه شبکه مدل و گسسته‌سازی مکانی

پس از تهیه مدل مفهومی، محدوده مورد نظر به اجزاء کوچک‌تر (سلول) تقسیم می‌شود. لذا تفکیک مکانی یک گام اساسی در ساختن مدل است. در آبخوان دشت شاهرود با توجه به داده‌های در دسترس، هیدروژئولوژی و وسعت منطقه مورد مطالعه، محدوده مدل به ۸۱ ستون و ۵۶ ردیف از نوع مرکز بلوکی به ابعاد  $500 \times 500$  متر شبکه‌بندی گردید. سپس سلول‌های فعال و غیرفعال مشخص شده‌اند. در واقع به اندازه محدوده مورد مطالعه، سلول‌های فعال تفکیک شده است (شکل ۴-۱۰).



شکل ۴-۱۰- شبکه‌بندی محدوده مورد مطالعه

#### ۴-۱۲- تعریف مدل عددی

بعد از ساخت شبکه و مشخص کردن سلول‌های فعال و غیر فعال، مرحله بعدی تبدیل مدل مفهومی به سلول‌های شبکه است، که برای این کار یک مدل عددی تعریف می‌شود. مدل عددی به کار رفته MODFLOW می‌باشد.

#### ۴-۱۳- گسسته‌سازی زمانی مدل در شرایط پایدار

گام زمانی با در نظر گرفتن داده‌های هیدروژئولوژیکی در دسترس، تنش‌های وارده به سیستم و هدف مطالعه صورت می‌گیرد. مثلاً اگر هدف، تعیین افت منطقه در اثر پمپاژ چاه باشد، باید گام زمانی کوچک‌تر از مواردی که منظور بررسی عمومی یک آبخوان توسط مدل است باشد. در این تحقیق شرایط پایدار به



منظور برآورد برخی از پارامترها بر مبنای یک دوره یک ماهه یعنی دی ماه سال ۱۳۸۸-۱۳۸۷ ایجاد گردیده است.

#### ۴-۱۴- تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی

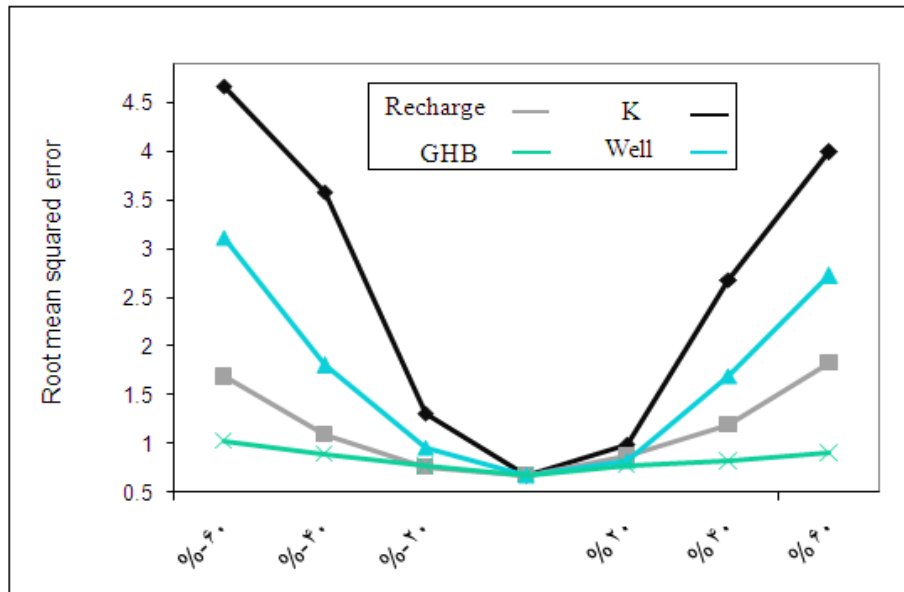
پس از کامل شدن مراحل بالا برای تبدیل پارامترهای تهیه شده در مدل مفهومی به مدل عددی در مودول map در منوی Feature با انتخاب گزینه map > Modflow مدل مفهومی ساخته شده در مودول map تبدیل به مدل عددی گردید.

#### ۴-۱۵- اجرای مدل

بعد از بازبینی، تصحیح اشتباهات احتمالی و رفع خطاهای اعلام شده توسط نرم‌افزار مدل‌ساز، مدل اجرا می‌گردد. برای اجرای مدل در مودول 3D Grid Data در منوی MODFLOW گزینه Run MODFLOW انتخاب می‌گردد.

#### ۴-۱۶- حساسیت سنجی مدل

آنالیز حساسیت فرآیندی است که در طول آن میزان درک مدل‌ساز از فرآیند شبیه‌سازی توسط مدل و سیستم شبیه‌سازی شده افزایش می‌یابد و می‌توان گفت اولین مرحله از فرآیند واسنجی می‌باشد که به وسیله آن حساسیت کلیه پارامترهای سیستم شناخته خواهد شد. پس از اجرای مکرر مدل دشت شاهرود، مشخص گردید که مدل دشت نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی، دبی بهره‌برداری از چاه‌ها، میزان تغذیه سطحی و تراز سنگ کف آبخوان از حساسیت بالایی برخوردار است. مدل نسبت به توپوگرافی کمترین حساسیت را نشان می‌دهد. شکل (۴-۱۱) حساسیت مدل را نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی، نرخ پمپاژ چاه‌ها و ارتفاع بار هیدرولیکی در مرزها را نشان می‌دهد.

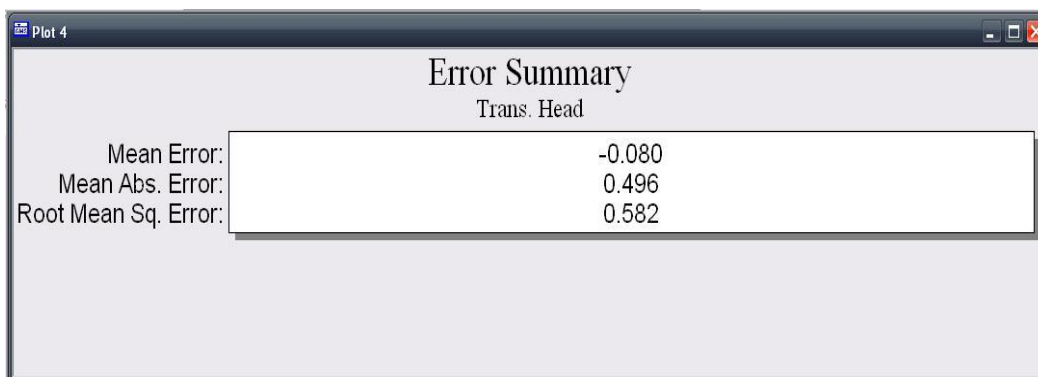


شکل ۴-۱۱- حساسیت مدل نسبت به تغییر یکنواخت برخی پارامترها

#### ۴-۱۷- واسنجی مدل برای شرایط پایدار

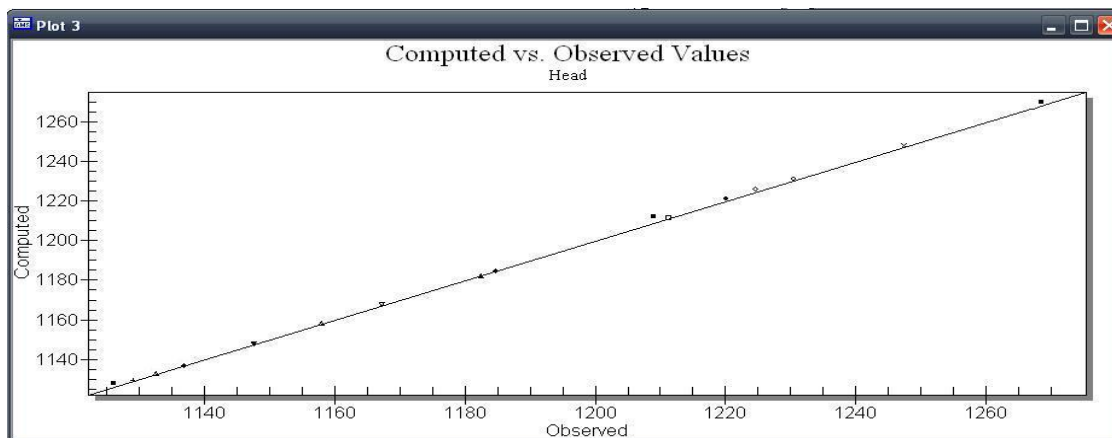
پس از ساخت و طراحی مدل، لازم است برای اینکه مدل قابلیت تولید داده‌های مشاهده شده را داشته باشد، باید واسنجی گردد. در این تحقیق واسنجی مدل در حالت پایدار به منظور بهینه کردن پارامتر تغذیه، هدایت هیدرولیکی و فاکتور قابلیت هدایت مرزها برای محاسبه جریان‌های ورودی و خروجی از مرزهای نفوذپذیر به روش دستی انجام گرفته است. در اولین اجرای مدل در حالت پایدار همخوانی چندانی بین روند منحنی‌های تراز محاسباتی و مشاهده‌ای وجود نداشت که احتمالاً به دلیل عدم قطعیت پارامترهای مربوط به شرایط مرزی و هدایت هیدرولیکی می‌باشد.

خصوصیات هیدرولیکی برای رسیدن به انطباقی نزدیک بین سطوح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به صورت دستی واسنجی گردید. شکل (۴-۱۲) میانگین خطای آخرین اجرای مدل دشت شاهرود در حالت پایدار را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲- میانگین خطای آخرین اجرای مدل دشت شاهرود در حالت پایدار

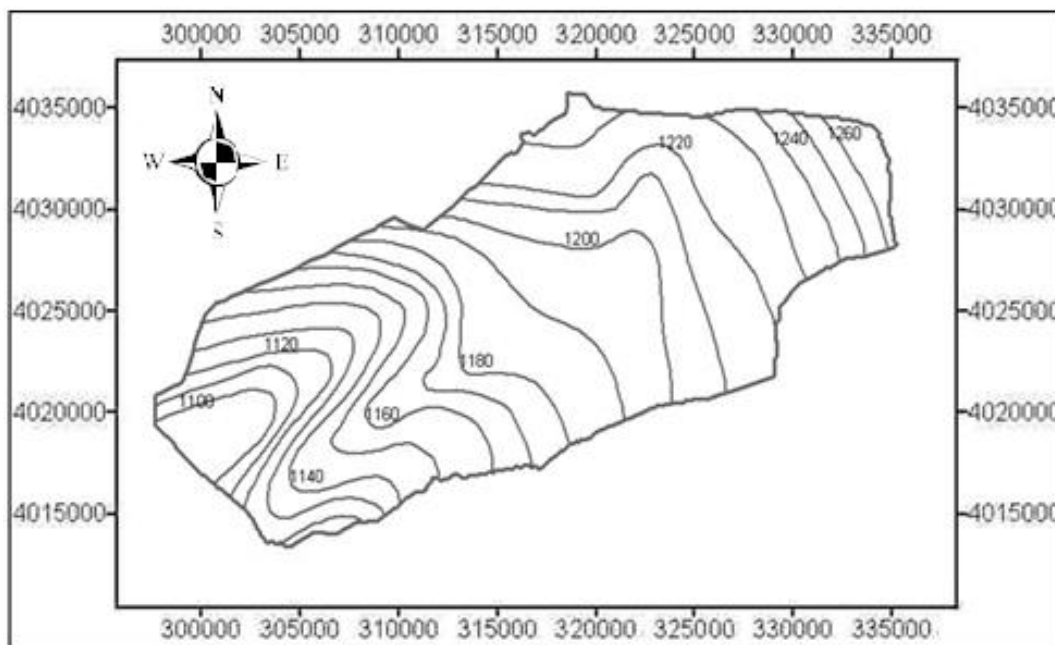
شکل (۴-۱۳) برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای آخرین اجرای مدل دشت شاهرود در حالت پایدار را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۳- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای آخرین اجرای مدل دشت شاهرود در حالت پایدار

#### ۱۸-۴- بار هیدرولیکی اولیه در شرایط ناپایدار

برای محاسبه بار هیدرولیکی اولیه مدل در شرایط ناپایدار، از نقشه سطح ایستابی متوسط شهر یور و مهر سال ۱۳۸۷ استفاده گردید و ارقام آن به صورت text وارد نرم افزار مدل ساز شد و سپس توسط درون‌یابی به روش کریجینگ به کل شبکه نسبت داده شد (شکل ۴-۱۴).

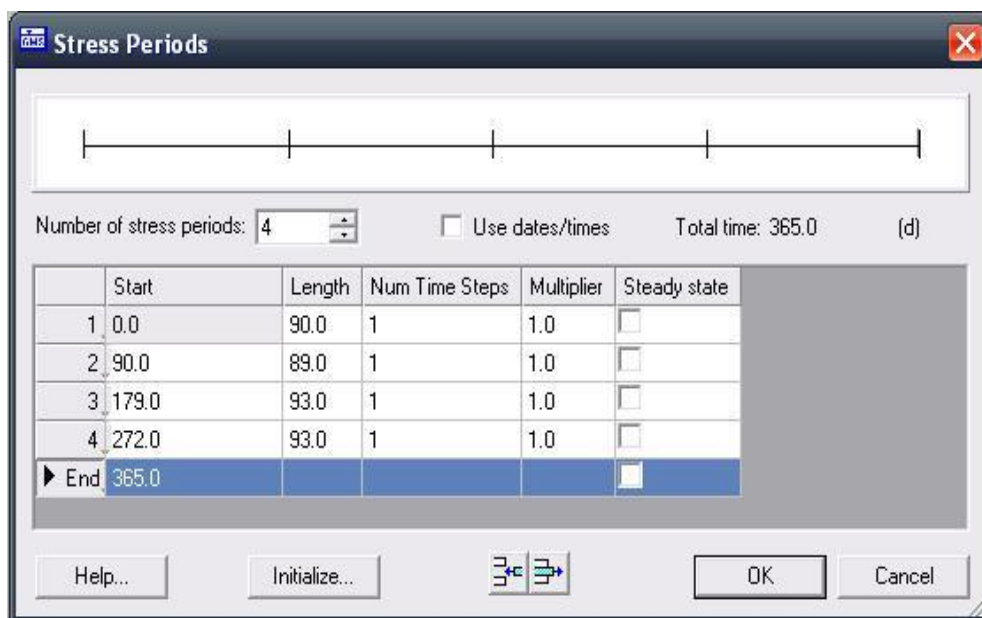


شکل ۴-۱۴- تراز آب زیرزمینی اولیه در شرایط ناپایدار

#### ۱۹-۴- گسسته‌سازی زمانی در شرایط ناپایدار

گام زمانی در شرایط ناپایدار بر اساس تقسیم چرخه هیدرولوژی سالانه برای سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸ به چهار دوره فصلی تعریف گردیده است. به گونه‌ای طول هر یک از دوره‌ها برابر با تعداد روزهای هر فصل می‌باشد. این چهار دوره در نرم‌افزار MODFLOW به دوره‌های تنش معروف‌اند. چرا که تنش‌های

هیدرولوژیکی مشخص شده از یک دوره به دوره بعد تغییر می‌کند و تنش‌ها در طول هر دوره ثابت فرض می‌شود. همچنین برای هر دوره تنش یک گام زمانی در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۱۵). داده‌های فصلی تحلیل صحیح اثرات فصلی را که برای پیش‌بینی‌های طولانی مدت مهم هستند، امکان‌پذیر می‌سازد. تقسیمات زمانی ذکر شده برای تمام چاه‌های مشاهده‌ای، بهره‌برداری، شرایط مرزی و تنش‌های موجود در دشت اعمال شده و در بسته‌های نرم افزاری مربوطه وارد گردید.



شکل ۴-۱۵- دوره‌های تنش و گام‌های زمانی در حالت ناپایدار

#### ۴-۱۹- واسنجی مدل برای شرایط ناپایدار

واسنجی مدل در حالت ناپایدار به دلایل زیر انجام می‌شود:

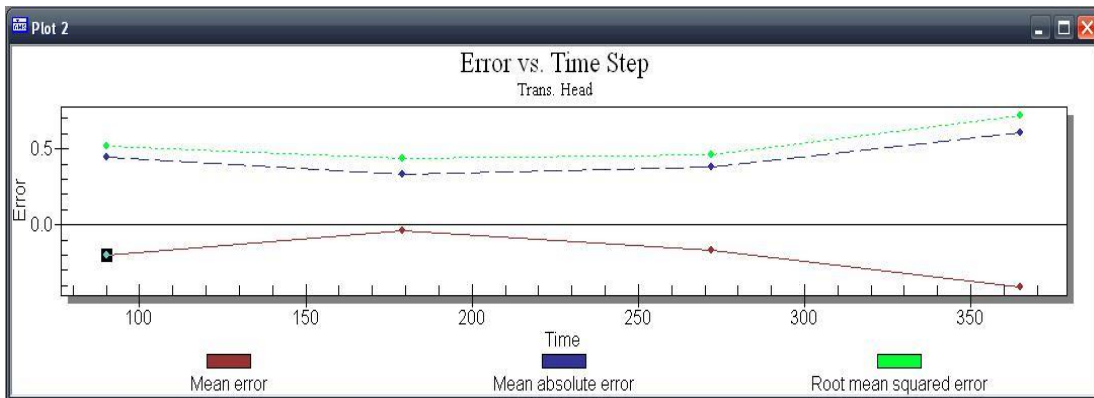
۱- جریان آب زیرزمینی به طور طبیعی غیر ماندگار است.

۲- هدف اکثر مدل‌سازی‌ها پیش‌بینی می‌باشد که از لحاظ تعریفی وابسته به زمان است.

بعد از واسنجی مدل در شرایط ماندگار، سطح آب به دست آمده به عنوان شرایط اولیه به مدل داده شده،

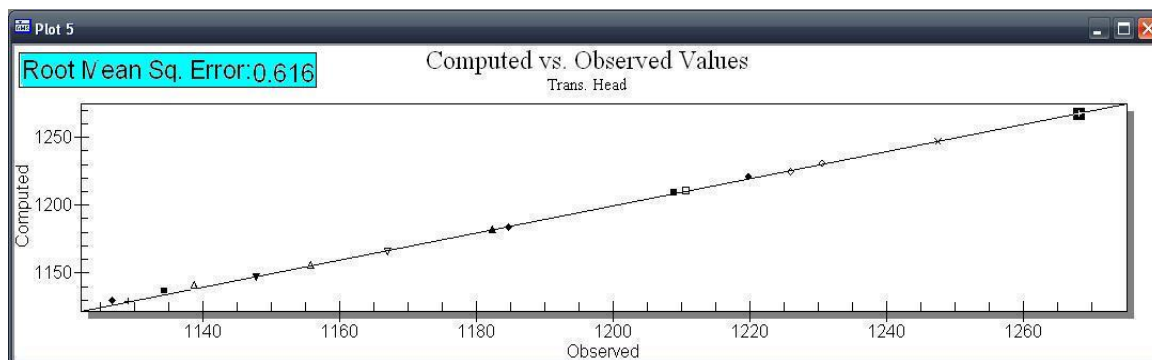
استرس‌پریندهای غیرماندگار به مدل اضافه شد و مدل برای مدت ۳۶۵ روز در حالت ناپایدار اجرا گردید.

در شرایط غیرماندگار آبدهی ویژه با توجه به داده‌های موجود و شرایط دشت زون‌بندی گردید. پس از تصحیح مقادیر آبدهی ویژه، جریان‌های ورودی و خروجی و تغذیه سطحی مدل به دو صورت دستی و خودکار واسنجی شد که انواع میانگین خطاها در هر یک از گام‌های زمانی پس از واسنجی دستی، در شکل (۴-۱۶) آورده شده است.

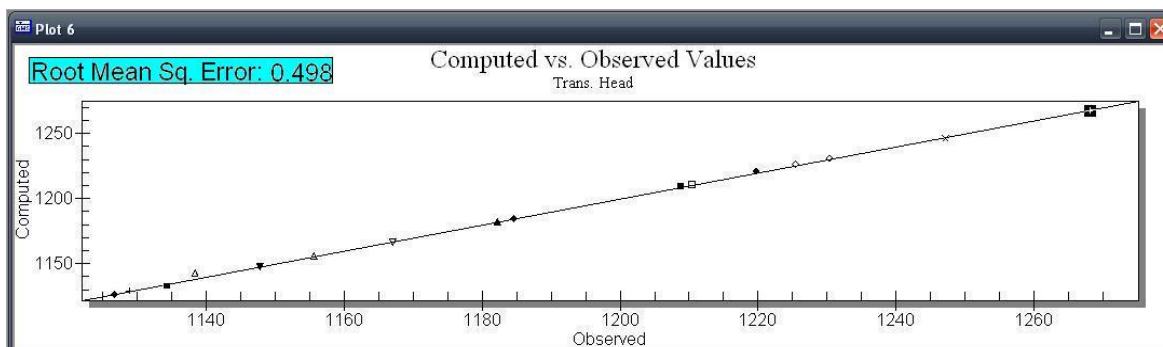


شکل ۴-۱۶- انواع میانگین خطاها در گام‌های زمانی

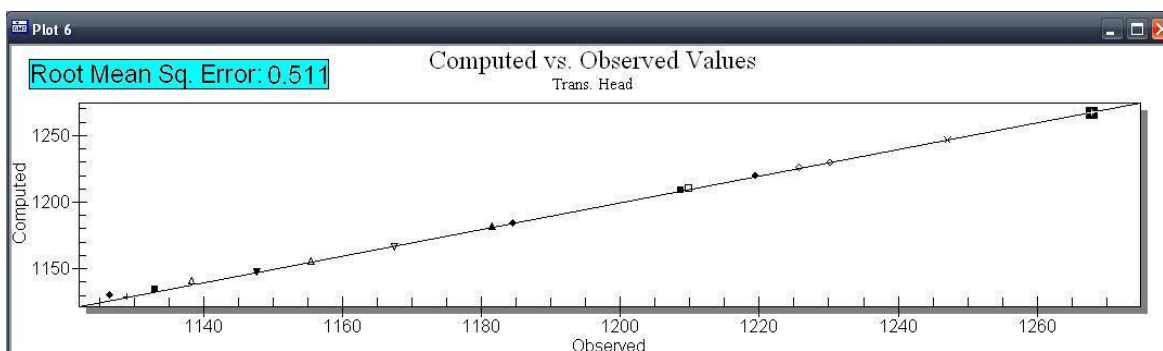
اشکال (۴-۱۷) تا (۴-۲۰) برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای در گام‌های زمانی اول تا چهارم را نشان می‌دهد. انطباق نسبتاً خوب تراز مشاهده‌ای و محاسباتی در پیزومترها و همخوانی مناسب روند خطوط تراز و خطوط جریان آب زیرزمینی در قلمرو مدل، حاکی از شبیه‌سازی قابل قبول مدل دشت شاهرود می‌باشد.



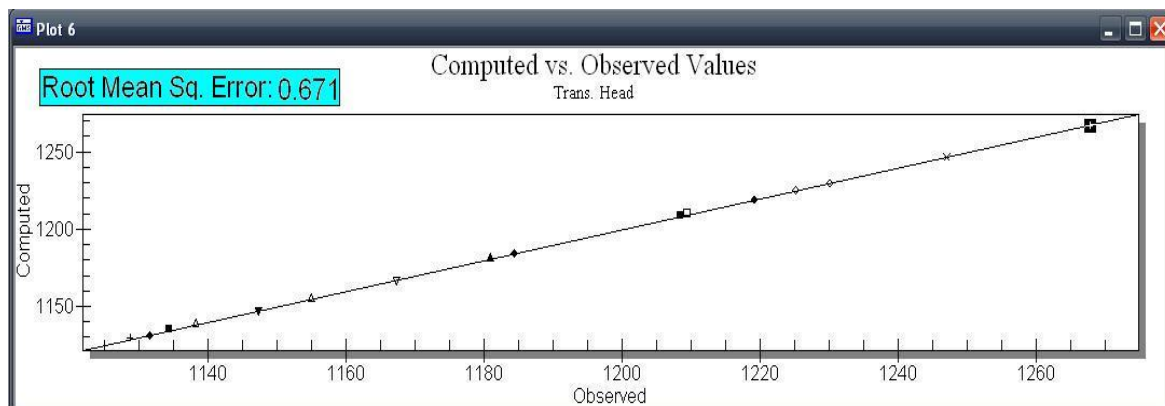
شکل ۴-۱۷- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی اول)



شکل ۴-۱۸- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی دوم)

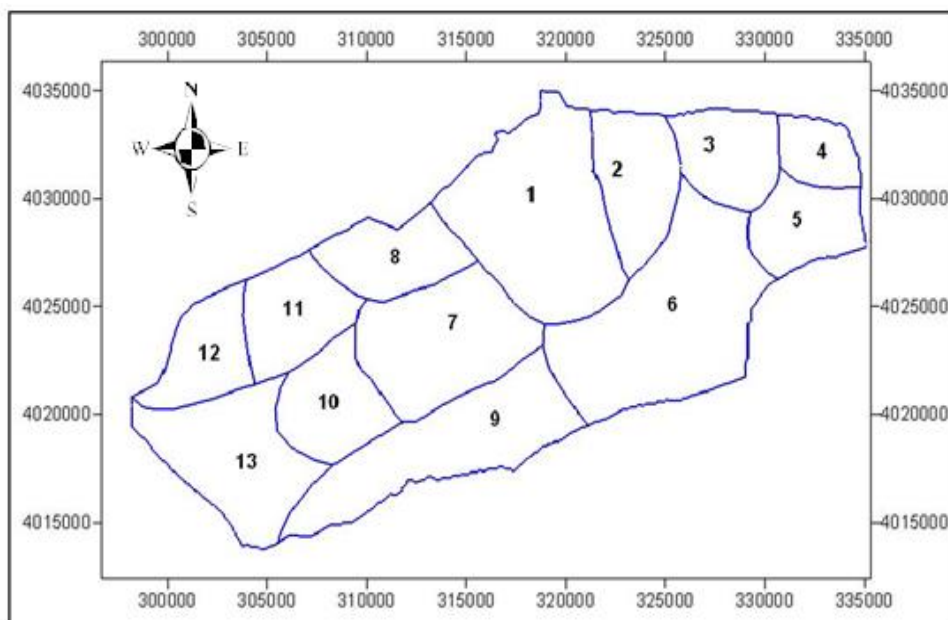


شکل ۴-۱۹- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی سوم)



شکل ۴-۲۰- برازش بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهده‌ای (گام زمانی چهارم)

منطقه‌بندی نهایی پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در شکل (۴-۲۱) و مقادیر مربوط به هر منطقه پس از واسنجی دستی در جدول (۴-۴) و پس از واسنجی خودکار در جدول (۴-۵) آورده شده است.



شکل ۴-۲۱- منطقه‌بندی نهایی هدایت هیدرولیکی



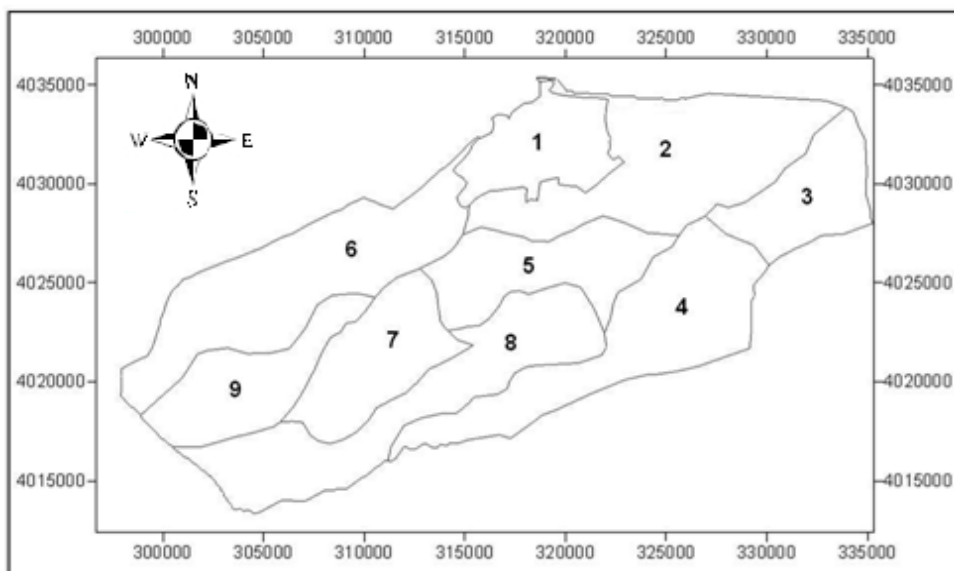
جدول ۴-۴- مقادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه مربوط به هر منطقه پس از واسنجی دستی

شماره منطقه	هدایت هیدرولیکی (m/d)	آبدهی ویژه
۱	۸/۵۰	./۰۴۳
۲	۷/۲۱	۰/۰۵۰
۳	۵/۶۰	۰/۰۱۷
۴	۱/۷۶	۰/۰۱۰
۵	۱/۲۰	۰/۰۰۸
۶	۴/۳۵	۰/۰۳۸
۷	۶/۲	۰/۰۲۷
۸	۶/۶۸	۰/۰۳۲
۹	۱/۳۰	۰/۰۱۰
۱۰	۳/۶۲	۰/۰۲۰
۱۱	۴/۵۰	۰/۰۲۲
۱۲	۳/۰۰	۰/۰۲۰
۱۳	۱/۱۰	۰/۰۲۴

جدول ۴-۵- مقادیر نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه مربوط به هر منطقه پس از واسنجی خودکار

شماره منطقه	هدایت هیدرولیکی (m/d)	آبدهی ویژه
۱	۹/۳۵	./۰۳۵
۲	۶/۳۰	۰/۰۴۱
۳	۵/۱۱	۰/۰۲۲
۴	۲/۱۳	۰/۰۱۵
۵	۱/۵۶	۰/۰۱۱
۶	۴/۸۱	۰/۰۳۰
۷	۷/۸۸	۰/۰۲۹
۸	۸/۵۶	۰/۰۳۲
۹	۱/۲۰	۰/۰۱۳
۱۰	۴/۱۸	۰/۰۲۰
۱۱	۶/۶۴	۰/۰۱۸
۱۲	۴/۰۰	۰/۰۲۱
۱۳	۰/۹۶	۰/۰۲۷

منطقه‌بندی نهایی تغذیه سطحی در شکل (۴-۲۲) و مقادیر مربوط به هر منطقه در جدول (۴-۶) آورده شده است.



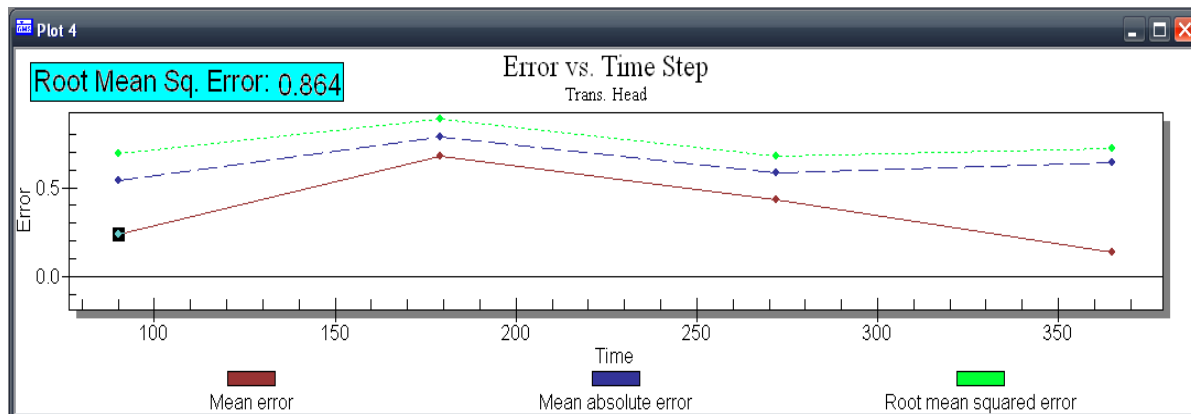
شکل ۴-۲۲- منطقه‌بندی تغذیه

جدول ۴-۶- مقادیر نهایی تغذیه مربوط به هر منطقه

شماره منطقه	تغذیه (m/d)
۱	۰/۰۰۲۰۳۲
۲	۰/۰۰۰۰۳۱
۳	۰/۰۰۰۲۲۵
۴	۰/۰۰۰۱۳۱
۵	۰/۰۰۰۱۵۵
۶	۰/۰۰۰۱۲۷
۷	۰/۰۰۰۰۳۲
۸	۰/۰۰۰۵۹۰
۹	۰/۰۰۰۲۴۵

#### ۴-۲۰- صحت‌سنجی مدل

در مرحله صحت‌سنجی، با استفاده از داده‌های که تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته بود مدل اجرا شد. اگر بدون تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی‌ویژه و درصد نفوذ به نتایج قابل قبول برسیم مدل ساخته شده مورد قبول خواهد بود. مدل دشت شاهرود به مدت ۳۶۵ روز برای سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در طی فرآیند صحت‌سنجی دشت شاهرود سعی گردید برای بر طرف کردن اختلاف جزئی که در برخی از چاه‌های مشاهده‌ای وجود داشت، برخی پارامترهای قابل تغییر (مانند مقادیر پمپاژ) در حد مجاز تغییر داده شود. در پایان دوره صحت‌سنجی، مدل توانست نتایج قابل قبولی ارائه دهد. همان‌طور که در شکل (۴-۲۳) ملاحظه می‌شود انواع میانگین خطاها در هر یک از گام‌های زمانی در محدوده خطای قابل قبول قرار دارد.



شکل ۴-۲۳- انواع میانگین خطاها در گام‌های زمانی

از آنجا که مدل در صحت‌سنجی (سال آبی ۱۳۸۸-۱۳۸۹) از دقت مناسبی برخوردار بود انتظار می‌رود که نتایج حاصل از مدل هم به واقعیت نزدیک باشند.

## فصل پنجم: پیش‌بینی تاثیر اجرای فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود

### ۵-۱- مقدمه

پس از مرحله صحت‌سنجی و تایید مدل، می‌توان از مدل ساخته شده برای پیش‌بینی که هدف اصلی اکثر مدل‌سازی‌ها است، استفاده نمود. در میان انواع مختلف مدل‌ها، مدل‌هایی که در گروه مدل‌های پیش‌بینی قرار می‌گیرند، همواره بیشترین توجه بخش‌های اجرایی و تحقیقاتی را متوجه ساخته است. زیرا این مدل‌ها علاوه بر شبیه‌سازی آبخوان و شناسایی خوب آن، عکس‌العمل آن را در برابر تنش‌های مختلف از قبیل پمپاژ، تغذیه و دیگر عوامل بررسی می‌نماید.

در این تحقیق تاثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، ابتدا با استفاده از نتایج خروجی از اجرای مدل ابتدا برای سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸ اختلاف مجموع حجم تغذیه از سطح و جریان ورودی از طریق مرزهای نفوذپذیر با حجم تخلیه از طریق چاه‌های بهره‌برداری و جریان خروجی از طریق مرزهای نفوذپذیر بر حسب متر مکعب محاسبه گردیده است (جدول ۵-۱).

جدول ۵-۱- بیلان آب زیرزمینی دشت شاهرود بر اساس نتایج مدل بر حسب متر مکعب (سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۸)

اجزاء بیلان	ورودی‌ها	خروجی‌ها
تغذیه	۵۲۲۷۰۲۲۳	۰
چاه‌های بهره‌برداری	۰	-۵۷۰۸۱۷۳۶
تبخیر	۰	۰
جریان‌های زیرزمینی	۱۰۳۲۶۵۹۸	-۱۰۰۳۴۱۵۶
مجموع	۶۲۵۹۶۸۲۱	-۶۷۱۱۵۸۹۲
ورودی - خروجی		-۴۵۱۹۰۷۱

تغییرات سطح آب بعد از اجرای طرح فاضلاب توسط دو سناریو مورد بررسی قرار گرفت:

- ۱- پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب
- ۲- پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ همراه با اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری

## ۵-۲- پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی برای سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ قبل و بعد از اجرای

### طرح فاضلاب

برای پیش‌بینی سطح آب در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸، داده‌های سطح آب متوسط شهریور و مهر ماه ۱۳۸۷ به عنوان شرایط اولیه به مدل داده شد. پارامترهایی مانند تغذیه و تخلیه با توجه به تشابه همه سال‌ها تعیین گردید. به این شکل که هر فصل خاص در سال‌های متوالی مقدار تقریباً یکسانی دارد. سپس مدل به مدت ۱۰ سال اجرا گردید. با توجه به نتایج مدل مشاهده می‌شود که با ادامه روند کنونی، تراز آب زیرزمینی دشت پایین می‌افتد. سپس تغذیه ناشی از چاه‌های فاضلاب موجود در سطح شهر حذف و مدل مجدداً اجرا گردید و تاثیر آن بعد از ۱۰ سال مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۵-۱) تا شکل (۵-۳) سطح آب محاسباتی مدل قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب را نشان می‌دهد.

## فصل پنجم: پیش‌بینی اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود

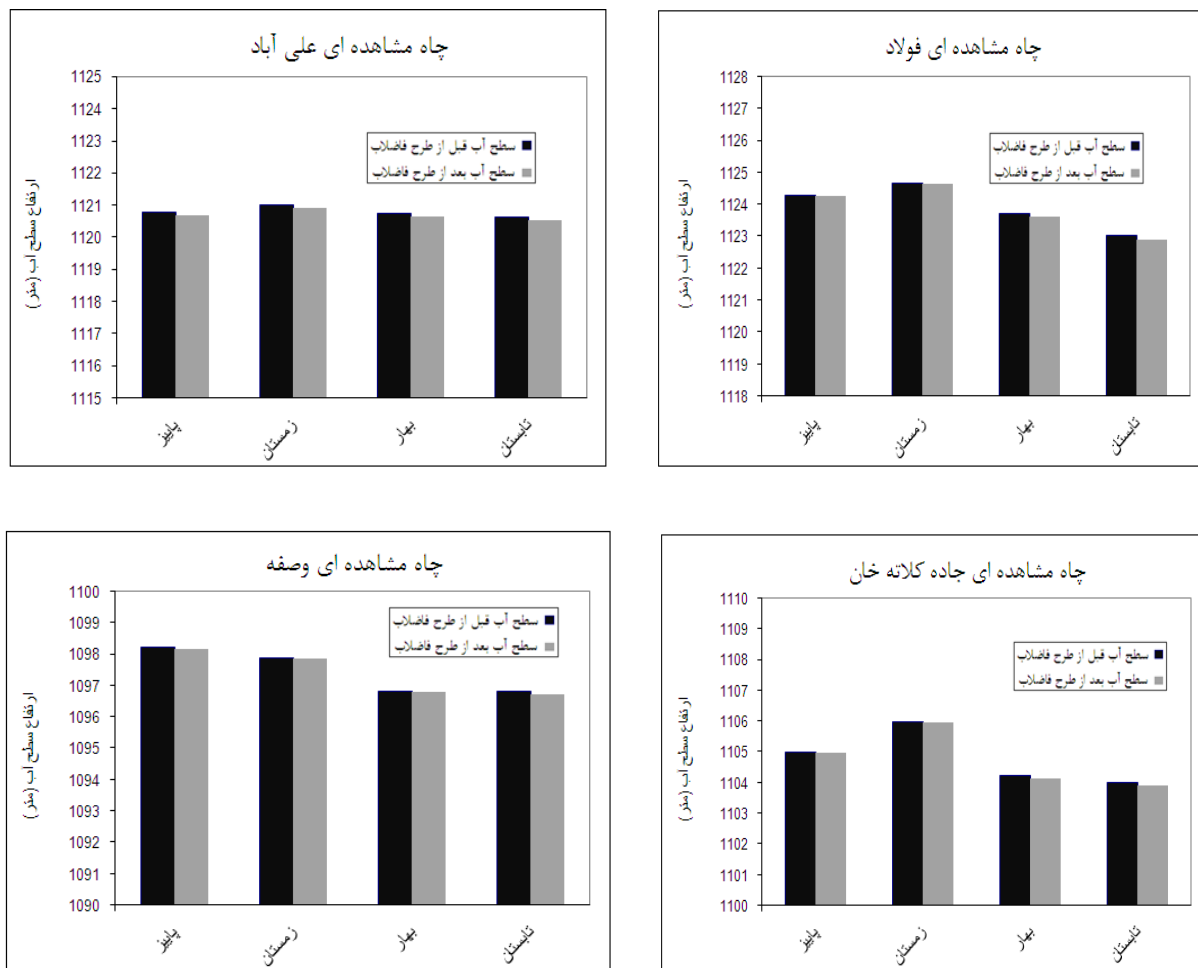


شکل ۵-۱- سطح آب محاسباتی مدل قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب در پیژومترهای شماره ۱ تا ۶

## فصل پنجم: پیش‌بینی اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود



شکل ۵-۲- سطح آب محاسباتی مدل قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب در پیژومترهای شماره ۶ تا ۱۲

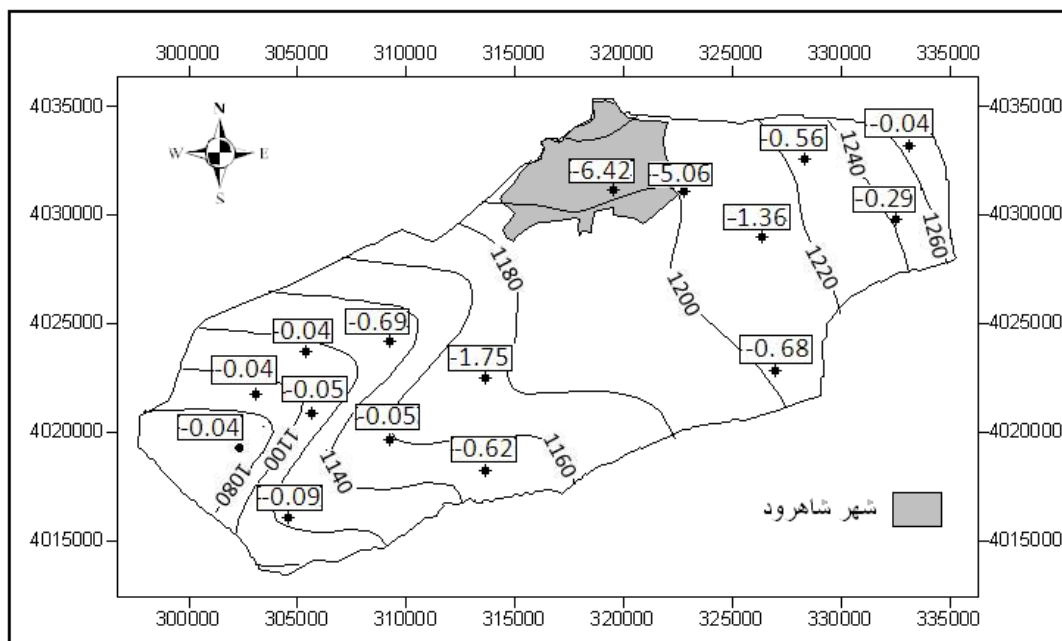


شکل ۵-۳- سطح آب محاسباتی مدل قبل و بعد از اجرای طرح فاضلاب در پیزومترهای شماره ۱۲ تا ۱۶

با توجه به شکل‌های (۵-۱) تا (۵-۳) مشاهده می‌گردد که سطح آب در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بعد از اجرای طرح فاضلاب در اکثر چاه‌های مشاهده‌ای به مقدار قابل توجهی پایین می‌آید. بالاترین اختلاف سطح آب در پیزومترهای پارک انقلاب و شرکت نفت مشاهده گردید. این پیزومترها در محدوده شهر واقع بوده و تحت تاثیر تغذیه شهر می‌باشند بنابر این حذف فاضلاب تاثیر زیادی بر سطح آب پیزومترهای مذکور داشته است. در پیزومتر خیرآباد که در شرق دشت قرار دارد، همچنین در پیزومترهای کارگاه شن و ماسه، شرق کلاته‌خوان، جاده کلاته‌خوان و وصفه که در جنوب ارتفاعات تپال قرار گرفته‌اند و دور از تاثیر جریان عمومی شهر می‌باشند، اختلاف سطح آب ایجاد شده کم (به طور متوسط ۰/۰۴ متر) است.



شکل (۴-۵) کاهش سطح آب زیرزمینی در پی‌زومترهای مختلف موجود در محدوده مطالعاتی را بعد از اجرای طرح فاضلاب نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵- کاهش سطح آب زیرزمینی در پی‌زومترهای مختلف بعد از اجرای طرح فاضلاب

### ۳-۵- پیش‌بینی مدل برای سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ همراه با اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری

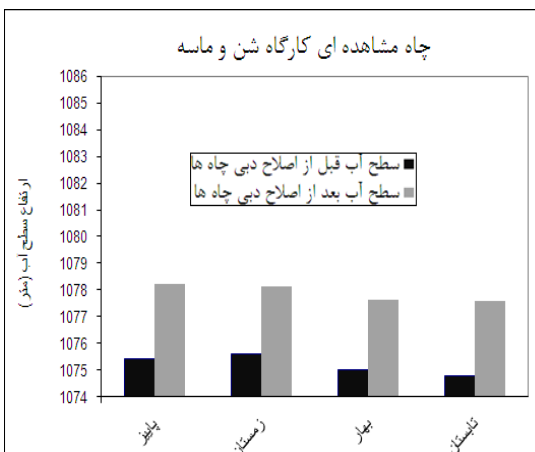
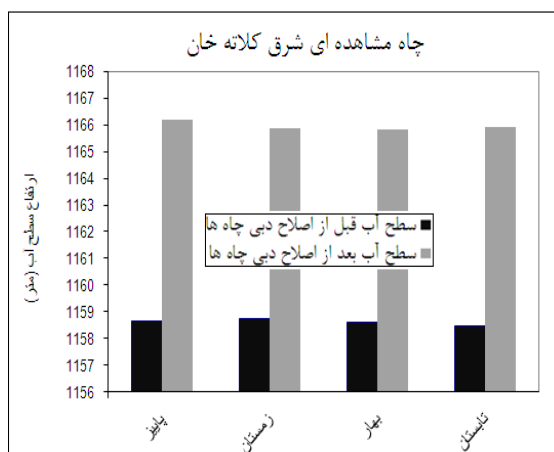
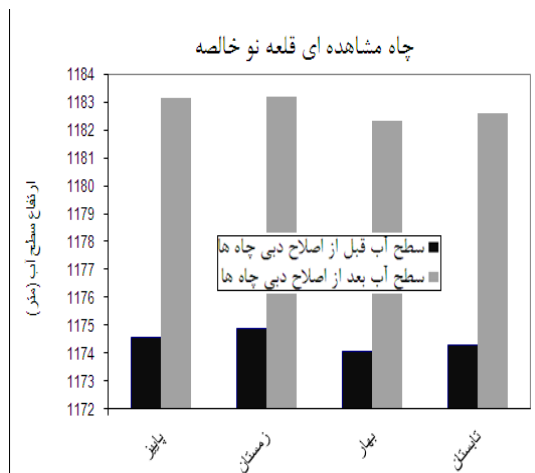
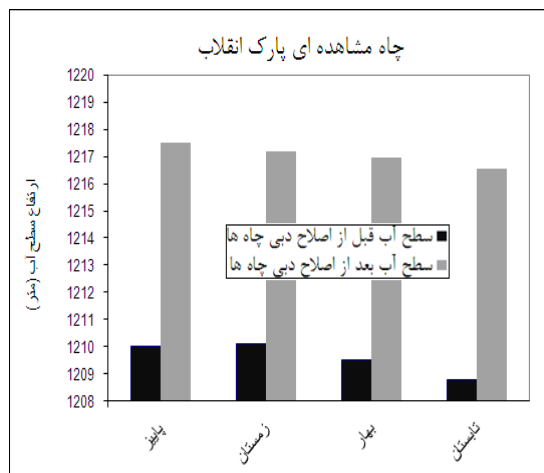
در این بررسی، ابتدا با توجه به نتایج مدل، میزان اضافه برداشت از آبخوان تعیین گردید. میزان اضافه برداشت برای سال ۱۳۸۸-۱۳۸۷ حدود ۴/۵ میلیون متر مکعب می‌باشد. سپس درصد اضافه برداشت (۸ درصد) برای هر چاه بهره‌برداری تعیین و از دبی چاه‌ها کم شد و مدل آبخوان نسبت به این تنش مورد بررسی قرار گرفت. بر اثر اعمال این گزینه سطح آب به مقدار زیادی بالا آمد. شکل‌های (۵-۵) تا (۷-۵) سطح آب پس از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری را نشان می‌دهند.

فصل پنجم: پیش‌بینی تاثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود

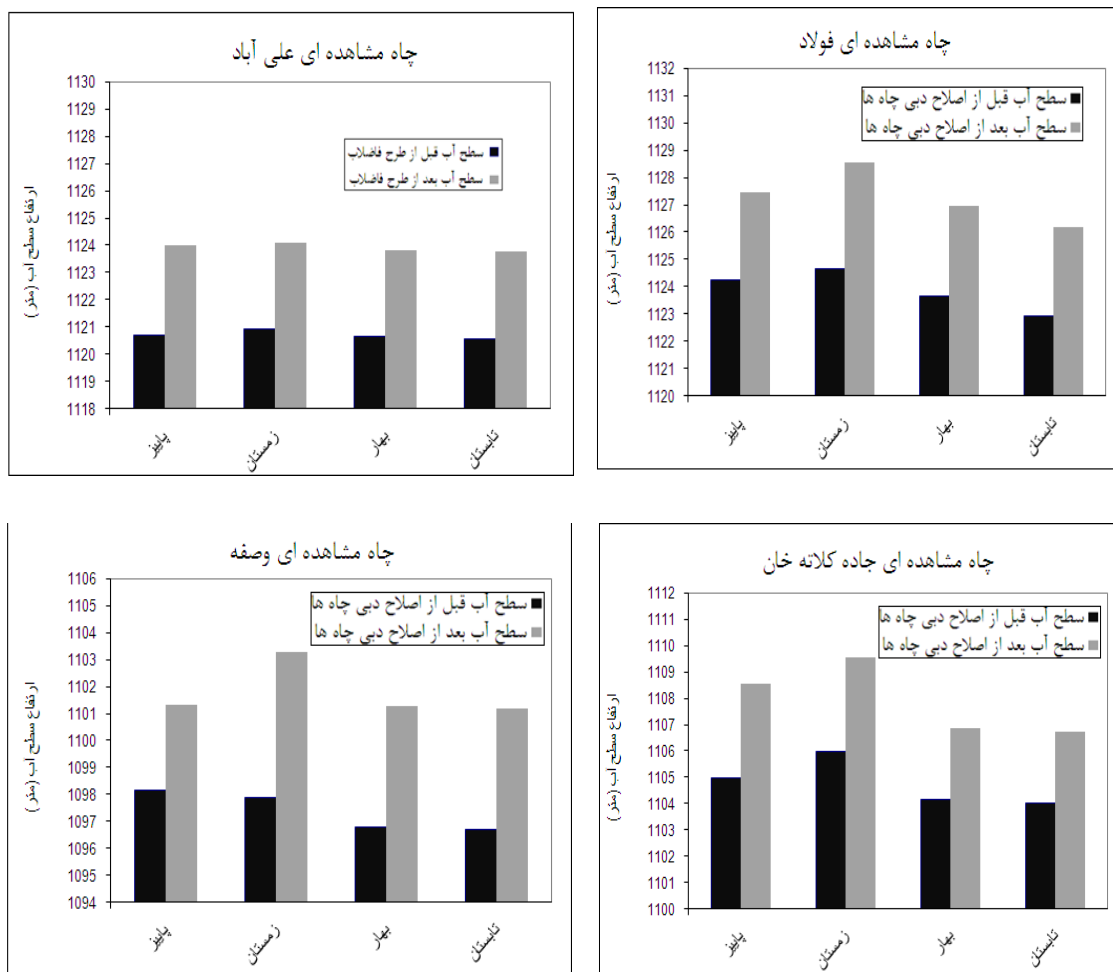


شکل ۵-۵- سطح آب محاسباتی قبل و بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداري در پیزومترهای شماره ۱ تا ۶

فصل پنجم: پیش‌بینی تاثیر اجرای طرح فاضلاب بر سطح آب زیرزمینی دشت شاهرود



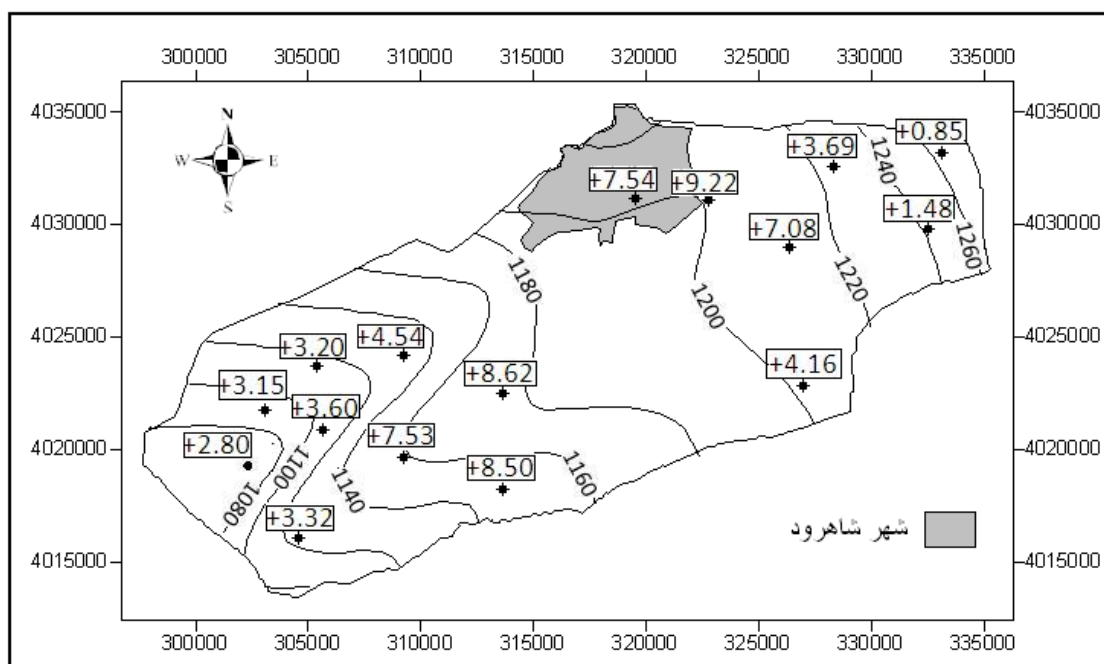
شکل ۵-۶- سطح آب محاسباتی قبل و بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری در پی‌زومتری‌های شماره ۶ تا ۱۲



شکل ۵-۷- سطح آب محاسباتی قبل و بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری در پی‌زومترهای شماره ۱۲ تا ۱۶

با توجه به شکل‌های (۵-۵) تا (۷-۵) مشاهده می‌گردد که سطح آب در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری در اکثر چاه‌های مشاهده‌ای به مقدار قابل توجهی بالا می‌آید. بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی در پی‌زومترهای مختلف متفاوت می‌باشد. شکل (۸-۵) بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی در پی‌زومترهای مختلف موجود در محدوده مطالعاتی را بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری در استرس‌پریند اول را نشان می‌دهد.

بالاترین و پایین‌ترین اختلاف سطح آب پس از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری به ترتیب مربوط به پی‌زومترهای شرکت نفت و خیرآباد می‌باشد. علت تفاوت بالا آمدگی سطح آب بعد از اصلاح دبی چاه‌ها می‌تواند تاثیر دو عامل زیر باشد.



شکل ۵-۸- بالآمدگی سطح آب زیرزمینی در پیژومترهای مختلف بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری

#### ۱- دوری و نزدیکی به چاه‌های بهره‌برداری

در مناطقی که چاه‌های بهره‌برداری تراکم بیشتری دارند مقدار بالآمدگی سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای آن منطقه، بیشتر از بقیه بخش‌ها می‌باشد. به عنوان مثال برای پیژومترهای شرکت نفت و پارک انقلاب که در محدوده چاه‌های بهره‌برداری قرار دارند، اختلاف سطح آب ایجاد شده بیشتر می‌باشد.

#### ۲- افزایش گرادیان هیدرولیکی

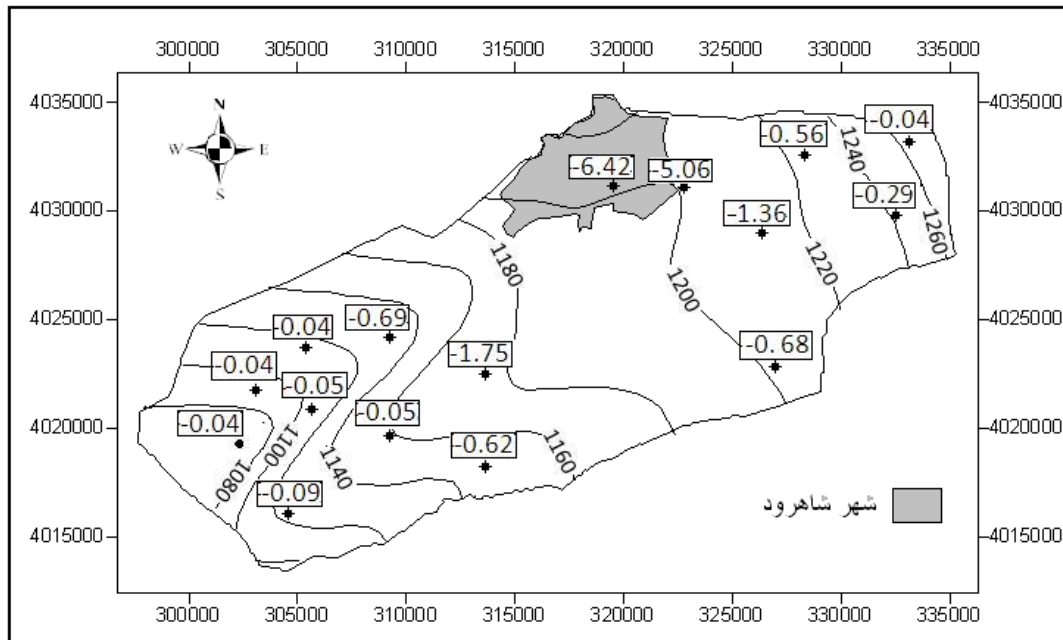
چاه‌های مشاهده‌ای که در مسیر جریان آب زیرزمینی قرار گرفته‌اند حتی اگر در محدوده آن‌ها چاه بهره‌برداری کم باشد ممکن است، باز شاهد بالآمدگی سطح آب در آن‌ها به مقدار قابل توجه باشیم. علت آن این است که به دلیل اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری که در بالا دست این پیژومترها می‌باشند، سطح آب در بالا دست، بالا می‌آید بنابراین باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی و تشدید جریان به پیژومترهایی که در مسیر جریان آب قرار دارند می‌شود.

## فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

### ۶-۱- نتیجه‌گیری

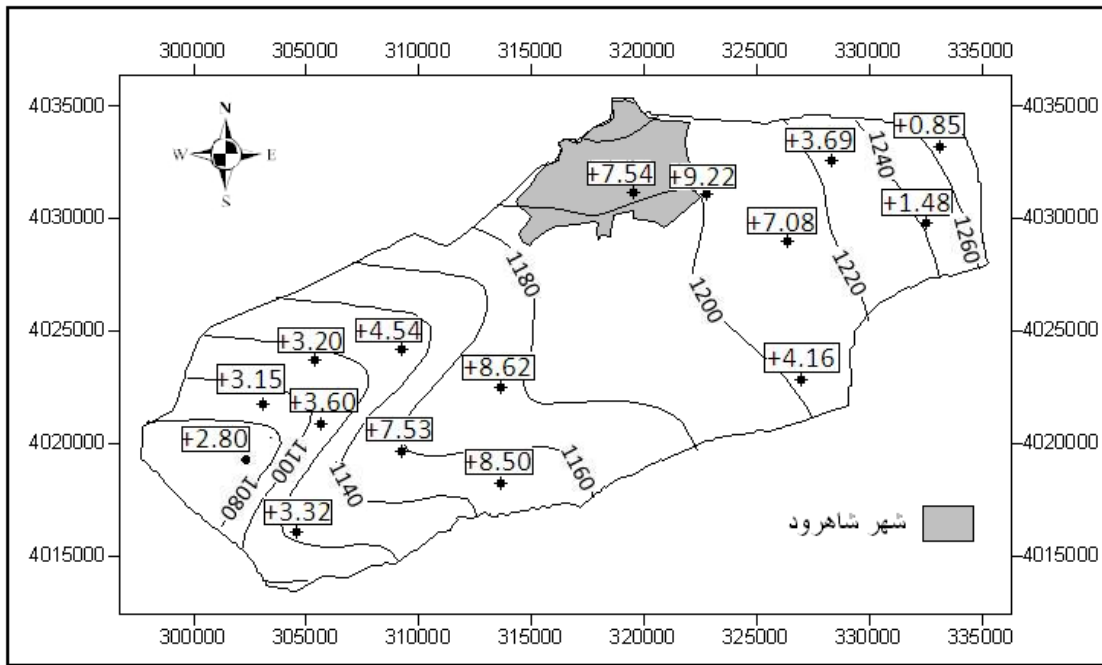
نتایج حاصل از مدل‌سازی تاثیر اجرای طرح فاضلاب شهر شاهرود بر سطح آب زیرزمینی دشت در قالب دو سناریو به طور خلاصه ارائه می‌شود:

- در سناریو اول تغییرات سطح آب در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ بعد از اجرای طرح فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج مدل سطح آب بعد از اجرای طرح فاضلاب در اکثر چاه‌های مشاهده‌ای به مقدار قابل توجهی پایین می‌آید. بالاترین اختلاف سطح آب در پیزومترهای پارک انقلاب و شرکت نفت مشاهده گردید. این پیزومترها در محدوده شهر واقع بوده و تحت تاثیر تغذیه شهر می‌باشند. بنابراین حذف فاضلاب تاثیر زیادی بر سطح آب پیزومترهای مذکور داشته است. در پیزومترهای خیرآباد، کارگاه شن و ماسه، شرق کلاته‌خوان، جاده کلاته‌خوان و وصفه که دور از جریان عمومی شهر می‌باشند اختلاف سطح آب ایجاد شده کم (به طور متوسط  $0/04$  متر) است (شکل ۶-۱). انتظار می‌رود بعد از اجرای طرح فاضلاب در محدوده شهر مشکلات ناشی از افت سطح آب مشاهده شود.



شکل ۶-۱- کاهش سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای مختلف بعد از اجرای طرح فاضلاب

- در سناریوی دوم، اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری موجود در محدوده مدل به اندازه بیلان منفی انجام شد. نقش پیشگیرانه سناریوی دوم در قبال این واقعه به خوبی در نتایج مشاهده گردید و اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری باعث بالآمدگی سطح آب زیرزمینی در بیشتر مناطق دشت شد. اصلاح دبی چاه‌ها در بخش‌هایی که تمرکز چاه‌های بهره‌برداری بیشتر است و همچنین در مناطقی که در مسیر جریان آب زیرزمینی قرار دارند تاثیر بیشتری گذاشته است. بالاترین و پایین‌ترین اختلاف سطح آب پس از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری به ترتیب مربوط به پیزومترهای شرکت نفت و خیرآباد می‌باشد (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲- بالآمدگی سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای مختلف بعد از اصلاح دبی چاه‌های بهره‌برداری

## ۲-۶- پیشنهادها

- از لحاظ توسعه بهره‌برداری با توجه به بیلان منفی و این که طرح جمع‌آوری فاضلاب در آینده نزدیک اجرا خواهد شد پیشنهاد می‌گردد که ممنوعه بودن دشت همچنان ادامه پیدا کند و علاوه بر آن برای جلوگیری از افت بیشتر سطح آب، دبی چاه‌های بهره‌برداری نیز کاهش داده شود.
- انجام آزمایش پمپاژ جامع و کامل در نقاط مختلف دشت به منظور دستیابی به داده‌های بیشتر و دقیق‌تر.
- انجام مطالعات ژئوفیزیکی دقیق به منظور تعیین سنگ کف و تهیه مدل مفهومی کامل‌تر و با دقت بیشتر.
- اندازه‌گیری دقیق سطح آب زیرزمینی.
- نصب کنتور بر چاه‌های بهره‌برداری جهت کنترل برداشت آب و جلوگیری از افت سطح آب آبخوان.



## مراجع

اداره امور آب شاهرود، اطلاعات لاگ چاه‌های بهره‌برداری دشت شاهرود.

احمدی‌افزادی ع.، (۱۳۸۱)، مدل آب زیرزمینی دشت کرمان با تاکید بر راه حل‌های مدیریتی جهت مقابله با بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی و ارائه راه‌حل‌های مدیریتی، مجموعه مقالات ششمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، کرمان، ص ۲۱-۱۷.

اصغری مقدم ا.، (۱۳۸۷)، ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی و بیلان آبی منطقه تبریز با استفاده از مدل مدفلو (MODFLOW). سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز.

بندانی ا. و اژدری مقدم م.، (۱۳۸۶)، بررسی اثرات احداث سد گلوگاه بر روی آبخوان شور و با مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی. سومین همایش زمین‌شناسی کاربردی و محیط زیست، تهران.

بارانی س.، شفیعی س.، ملکی‌نژاد ح.، نژادکوری ف.، (۱۳۸۹)، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی دشت مروست با استفاده از نرم افزار MODFLOW و کد کامپیوتری PEST. اولین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا، کرمان.

پیرهادی ع. و چیت‌سازان م.، (۱۳۸۷)، مدیریت منابع آب دشت رامهرمز با استفاده از مدل ریاضی. سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز، ص ۱۳۸-۱۳۶.

توفیق م.م. و فرج‌پور حقیقی ب.، (۱۳۸۲)، مدل‌بندی و آنالیز نشست منطقه زمین در اطراف چندین حلقه چاه پمپاژ با روش اجزای محدود و تهیه نقشه هم‌نشست زمین. هیدرولیک مجموع مقالات چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، شیراز، ص ۸۹۹.

چیت‌سازان م. توسلی م.، (۱۳۷۷)، مدیریت منابع آب دشت مهبیار شمالی با استفاده از مدل ریاضی. دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۱۳۸-۱۳۶.

چیت‌سازان م. و کشکولی، ح.ع.، (۱۳۸۱)، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و حل مسایل هیدرژئولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز، فصل ۸، ۳۰۰-۳۳۵.

چیت‌سازان م.، عابدینی م.ج. و سالک م.، (۱۳۸۷)، بررسی و کمی‌سازی عدم قطعیت در مدل آب زیرزمینی آبخوان دشت کازرون به کمک مشخصه‌های آماری. مجله علوم دانشگاه شهید چمران، شماره ۱۹، قسمت ب.

درزی ف.، صفوی ح. ر.، مامن پوش ع.ر. و بحرینی غ.ر.، (۱۳۸۵)، مدل‌سازی جریان برگشتی از شبکه آبیاری نکوآباد به آبخوان دشت نجف‌آباد. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان.

- ذاکری م.ا.، (۱۳۸۲)، گزارش پیشنهاد تمدید ممنوعیت دشت شاهرود. مطالعات اداره کل امور آب استان سمنان.
- رزاق منش م.، سالمی ت. و سراج م.، (۱۳۸۵)، بررسی کمی و کیفی آبهای زیرزمینی دشت تبریز، همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- رضایی ح. و موسوی ع.ا.، (۱۳۸۲)، مطالعه وضعیت آب زیرزمینی دشت باجگاه با استفاده از مدل سه بعدی تفاضل معین *MODFLOW*. هیدرولیک مجموع مقالات چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۸۸۹، شیراز.
- زارع م.، مهدی پور ف. و ناصری ح. (۱۳۸۵)، پیش بینی تاثیر زهکش ها بر آبخوان دشت شیراز با استفاده از مدل ریاضی و کد کامپیوتری *MODFLOW*، بیست و دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور، <http://www.ngdir.ir>.
- ساداتی ا. (۱۳۷۰)، مطالعات اجمالی خاکشناسی و طبقه بندی اراضی منطقه شاهرود، وزارت کشاورزی، سازمان تحقیقات خاک و آب گرگان و کند، نشریه ۸۴۰.
- ستاری س.، ناصری ح.ر. و توانا ب.، (۱۳۸۸)، شبیه سازی تاثیر احداث سد چنگوله بر آبخوان دشت مهران با استفاده از *MODFLOW*، اولین کنفرانس بین المللی مدیریت منابع آب، ساری.
- سروری م.، (۱۳۸۲)، هیدروژئولوژی و شبیه سازی منابع آب زیرزمینی دشت دوسلق (چنانه). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ساعت ساز م.، چیت سازان م. و کشکولی ح.ع.، (۱۳۸۲)، مطالعه استفاده توأم از منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت رامهرمز جهت توسعه کشاورزی با استفاده از مدل ریاضی عددی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- سالاری م. و اژدری مقدم م.، (۱۳۸۶)، مدیریت آبخوان جلگه چاههاشم با استفاده از مدل *MODFLOW*، سومین همایش زمین شناسی کاربردی و محیط زیست، اسلامشهر.
- ساعت ساز م. چیت سازان م.، (۱۳۸۴)، کاربرد مدل ریاضی *MODFLOW* در بررسی گزینه های مختلف مدیریت منابع آب دشت رامهرمز، مجله علوم، شماره ۱۴، قسمت ب.
- سروری م. ر.، کلانتری ن.، چیت سازان م. و کشکولی ح. ع.، (۱۳۸۲)، هیدروژئولوژی و شبیه سازی منابع آب زیرزمینی دشت دوسلق (چنانه)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

- سراج ا.، (۱۳۸۵)، مدل‌سازی ژئوالکتریک یک و دو بعدی آلودگی در محل دفن زباله‌ها در منطقه امان‌آباد اراک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شرکت مهندسين فن‌آوران آب سازه، (۱۳۸۲)، گزارش بررسی اثرات توسعه بر محیط زیست سمنان، دامغان و شاهرود، اداره کل حفاظت محیط زیست استان سمنان.
- صدقی م.م. و چیت‌سازان م.، (۱۳۸۳)، تعیین شرایط مرزی مناسب برای مدل جریان آبهای زیرزمینی دشت ارسنجان. بیست و سومین گردهمایی علوم زمین، تهران، <http://www.ngdir.ir>
- طایی سمیری م.، فاتحی مرج ا. و میرنیا خ.، (۱۳۸۹)، شبیه‌سازی سطح ایستابی آبخوان دشت گریایگان فسا با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW، ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، تهران.
- عطایی‌زاده س.، چیت‌سازان م. و میرزایی ی.، (۱۳۸۶)، هیدروژئولوژی و شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی دشت میداود - دالون. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدچمران اهواز.
- علیزاده، ا.، (۱۳۸۱)، اصول هیدرولوژی کاربردی (چاپ چهارم). مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی.
- فتوت اسکندری آ.، دولتی ارده‌جانی ف. و کرمی غ.ج. (۱۳۸۷)، مدل‌سازی ریاضی فرونشست دشت شهریار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قاسمی ل.، عربی آ. و کنشکو ا.، (۱۳۸۹)، گزارش مطالعات محدوده مطالعاتی دشت‌های استان سمنان، شرکت سهامی آب منطقه‌ای سمنان.
- کشاورزبان م.، (۱۳۸۸)، پیام استان، آب و فاضلاب شهری.
- کتیبه ه.، طاهری ع. و ابوطالبی میر صالح ا.، (۱۳۸۱)، مدل‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در محدوده مرکزی طرح متروی اصفهان، مهندسين مشاور طرح تحقیقات آب و فاضلاب، آب و فاضلاب ۴۶.
- گزارش وضعیت منابع آبی شهرستان شاهرود، (۱۳۸۰)، اداره کل امور آب استان سمنان.
- لهوی ش.، خیاط خلقی م. و میرزایزاده م.، (۱۳۸۰)، مسئله معکوس در مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی. سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران.
- محمدی ا.، کرمی غ.ج. و کاظمی گلپان ر.، (۱۳۸۶)، مدیریت آبخوان شیروان با استفاده از مدل ریاضی PMWIN. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

موسسه تحقیقات آب، (۱۳۸۲)، راهنمای تهیه مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی، نشریه شماره ۳۳۷ - الف.

مظفری زاده ج.، چیت‌سازان م. و ماجدی ح.ر.، (۱۳۸۵)، مدیریت بهینه منابع آب دشت گتوند با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدچمران اهواز.

ماجدی ح.ر.، (۱۳۸۰)، مطالعه هیدروژئولوژی آبخوان دشت نی‌ریز با استفاده از مدل ریاضی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهیدچمران اهواز.

منفرد ی. و حسینی م.، (۱۳۸۴)، پیامدهای کمی طرح جامع تامین آب شرب مشهد بر منابع آب زیرزمینی، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان.

نتایج سرشماری نفوس و مسکن، ([www.Sci.org.ir](http://www.Sci.org.ir)).

نکوآمال کرمانی م.، کشکولی ح.ع. و رهنما م.ب.، (۱۳۸۶)، کاربرد نرم افزار *MODFIOW (PNWIN5.1)* در مطالعه نوسانات سطح آب زیر زمینی دشت بوچیر - حمیران. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان.

نقشه‌ی توپوگرافی منطقه ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان نقشه‌برداری کشور.

نقشه‌ی زمین‌شناسی گرگان، ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.

نقشه‌ی زمین‌شناسی شاهرود، ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.

نخعی م. و صابری نصر ا.، (۱۳۸۹)، پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت قروه با استفاده از شبکه عصبی - موجکی و مقایسه آن با مدل عددی *MODFLOW*، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، تهران.

نجاتی جهرمی ز.، چیت‌سازان م. و میرزایی ی.، (۱۳۸۷)، شبیه سازی منابع آب زیرزمینی دشت عقیلی با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

Allen D.M., Schuurman N. and Zhang Q., (2007), *Using Fuzzy Logic for Modeling Aquifer Architecture*, Journal of Geographical Systems 3, 289-310.

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.

Anderson, M.P., (1989), *Hydrogeologic Facies Models to Delineate Large-Scale Spatial Trends in Glacial and Glaciofluvial Sediments*, Geol. Soc. of America Bulletin 101, 501-511p.

Bob Su z., Droogers Ir. P., Gieske A.S.M. and Reintjes T.H.M., (2007), *Development of Steady State Ground water Flow Model in Lower Walawa Basin –Sri Lanka*, International Institute For Geo- Information Science and Earth Observation Enschede The Netherlands.

Bendient P.B., Rifai H.S. and Newell C.J., (2005), *Groundwater Contamination: Transport and Redediation*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ.

Ching W.H. and Kinzelbach W., (2001), *3D Groundwater Modeling with PMWIN, A Simulation System fo Modeling Groundwater Flow and Pollution*, Hydrogeology Journal 10, 455-474p.

Christian M., (1996), *Using GIS, MODFLOW, MODPATH for groundwater management of an alluvial aquifer of the River Sieg, Germany*, HydroGIS 96: Application of Geographic Information System in Hydrology and Water Resources Management, IAHS pu. no. 235.

Domenico P.A. and Schwartz F.W., (1998), *Physical and Chemical Hydrogeology*, John wiley and sons, New York, NY.

Freeze R. A., and Cherry J. A., (1979), *Ground Water*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 604p.

Galbiati I., Bouraoui F., Elorza F.J. and Bidoglio G., (2006), *Modeling diffuse Pollution Loading into a Mediterranean Lagoon, Development and application of an integrated surface- subsurface model tool*. Ecological modeling, 193: 4-18.

Hill M. C., Banta E. R. Harbaugh A. W. and Anderman E.R., (2000), *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model, User Guide to the observation, sensitivity and parameter estimation processes and three post-processing program*: Open File Report 00-184, 209p.

Hi J. Eigenraam M., Forbes G., Lewis W. and Chua J., (2010), *The Environmental Systems Modelling Platform (EnSym) to Assess Effects of Land Use Changes on Groundwater Recharge*, International Environmental Modelling and Software Society.

Kumar A. Narayan, Damaris Hartmann, (2004), *Philip Charlesworth, Joseph K. Kemei and Keith L. Bristow. 2004. Modeling Effects of Val-Bird Weir Height on Water Tables Along the Haughton River*, CSIRO Land and Water Client Report for Burdekin Dry Tropics Board.

Ljungberg V. and Qvist S., (2004), *Assesment of Groundwater Flow and Pollutant Transport through Modeling*. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden 2004

Leonard F. Konikow and George Z., (2006), *Modeling Effects of Multinode Wells on Solute Transport*, GROUND WATER 44, no. 5, 648–660.

Luary J. Froukh, (2002), *Ground Water Modeling in Aquifer with Highly Karstic and Heterogeneous Characteristic (KHC) in Palestene*, Water Resources manegment 5, 369-379.

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.

McDonald M.G. and Harbaugh A.W., (1988), *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, U. S. Geological survey, Techniques of Water-Resources Investigation, book 6, chap. A1, 586p.

Mergia G. and Kelly W,E., (1994), *Modeling Ground Water Remediation in the High Plains Aquifer*, National Ground Water Assoeiation.

Marquez L. F., Suarez G.J., Serrano G. and Chavez R., (2006), *Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico*. Hydrogeology Journal, 1216-1230.

MCWhorter D. B. sanda, D.K., (1977), *Groundwater hydrology and hydraulica*. Water Resources Publications.

Prikett T.A., (1975), *Modeling Techniques for Groundwater Resource Evaluation* . Advance in Hydroscience , vol . 10 , pl- 143.

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

Wang H.F and Anderson M.P., (1982), *Introduction to Groundwater Modeling; Finite Difference and Finite Element methods*, W.H. Freeman and Company.

Seneviratne A., (2007), *Development Of Steady State Groundwater Flow Model In Lower Walawa Basin*, Sri Lanka.

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.

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.

GMS 6.0 (2005), Reference Manual, Brigham Young University.

## **Abstract**

This study investigates the influence of the sewage project on the groundwater surface in the shahrood plain using Ground water modeling. Groundwater flow models are generally used as appropriate tools to predict aquifer response under the influence of recharge and discharge conditions. Sewage wells are the major sources of recharge in Shahrood Plain. It is expected that the performance of the sewage collection scheme in the Shahrood city will considerably affect on the quality of groundwater. A numerical finite difference model using GMS6.0 commercial software has been presented to simulate the effect of the sewage collection scheme on Shahrood aquifer. The numerical modeling was performed for a 1-year period (2008-2009). The simulation was first performed under a steady state condition for a time period of 1-month (January 2008) in order to calibrate the model. The model was then run under a transient case (from 2008 to 2009) to optimize specific yield, recharge and discharge values. The model was finally verified for a 1-year hydrological data (2009-2010). A close agreement was achieved between model predictions and field data. In order to consider the effect of sewage system on groundwater surface, the recharge from the sewage wells were removed from the total recharge and the model was again performed for a 10-year period. The results obtained from the numerical model show that the groundwater surface is dropped significantly in most of observation wells if the sewage system is performed. The drawdown can be reduced by amending water supply wells in the study area.

**Key words:** Groundwater surface, sewage, Shahrood plain, numerical modeling





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Earth Sciences**  
M.S.C Thesis

Development of a mathematical model for evaluation of the effect of sewage  
network on groundwater in shahrood plain

**Roghaye Maleki**

**Supervisor:**  
**Dr. G.H. Karami**  
**Dr. F. Dolati Ardehjani**

**Advisor:**  
**H. Hoseini**

**June 2011**