

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین
پایان نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی

تخمین تغذیه سالانه به آبخوان سرخس با استفاده از FREEWAT

نگارنده:

نرگس نبی زاده چمازکتی

استاد راهنما

دکتر هادی جعفری

دی ۱۳۹۷

شماره: ۲۹۷۰۱۱۰۱

تاریخ: ۱۳۹۷/۱۱/۱

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم نرگس نبی زاده چمازکتی با شماره دانشجویی ۹۵۱۶۴۴۴ رشته زمین شناسی گرایش آب شناسی تحت عنوان تخمین تغذیه سالانه به آبخوان سرخس با استفاده از FREEWAT که در تاریخ ۹۷/۱۰/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

| | |
|-----------------------|-------------------------------------|
| قبول (با درجه:) | <input checked="" type="checkbox"/> |
| مردود | <input type="checkbox"/> |
| نوع تحقیق: نظری | <input type="checkbox"/> |
| عملی | <input checked="" type="checkbox"/> |

| عضو هیأت داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه علمی | امضاء |
|---------------------------|---------------------|------------|-------|
| ۱- استاد راهنمای اول | دکتر هادی جعفری | استادیار | |
| ۲- استاد راهنمای دوم | - | - | - |
| ۳- استاد مشاور | - | - | - |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | دکتر علی اکبر مومنی | استادیار | |
| ۵- استاد ممتحن اول | دکتر غلامحسین کرمی | دانشیار | |
| ۶- استاد ممتحن دوم | دکتر رحیم باقری | استادیار | |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر پرویز احمدی حسینی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۱۳۹۷/۱۱/۱

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ

فرشتگانی کہ سخات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام

تجربہ ہائی کیلٹا و زیبائی زندگی ام دیون حضور سبز آن ہاست...

تقدیم بہ خانوادہ عزیزم

تقدیر و تشکر

با سپاس فراوان از پروردگاری که نعمت قدرشناسی را به من آموخت، وظیفه خود می‌دانم از کسانی که به حر نوح ممکن، دیده‌م‌دون مسیر تلامطم علم و دانش به یاری ایجاب شافتند؛ تقدیر و تشکر کنم.

در ابتدا از زحمات بی‌شائبه استاد راهنمای بزرگوارم، جناب آقای دکتر هادی جعفری که در تهیه و تکمیل این پژوهش همواره از مساعدت و راهنمایی‌های سودمندشان بهره‌برده‌ام و با ایشان بودن افتخاری برای من بود، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌کنم و از خداوند منان برایشان سلامتی و توفیق در تمامی مراحل زندگی را خواهم.

بعینین از زحمات اساتید دلسوز و محترم گروه آب‌شناسی دانشکده علوم زمین، جناب آقایان دکتر کریمی و دکتر باقری که در طول مدت انجام این پایان‌نامه از راهنمایی‌ها و بهکاری‌های بی‌دینشان بهره‌برده‌ام، نهایت تشکر و قدردانی را دارم.

بعینین بر خود لازم می‌دانم از زحمات و محبت‌های بی‌دین خانواده‌ام که در نهایت صبر و بردباری، همواره محیطی مساعد و آرام را جهت رشد و تحصیلاتم فراهم نمودند، سپاس‌گزاری نمایم.

در پایان نیز از دوستان و بهکلاسی‌های گرامی ام خانم هاشجاری، مسکینی، کعبه، کاظمی، حاتم زاده و جعفری و آقایان باقری، جمشیدی، بطیاری، سرشچی، جریست، میری، سوگی و کلیه عزیزانی که در مراحل مختلف انجام این پژوهش، لطفشان را شامل حال بنده نمودند و مجال ذکر اسامی آنان نیست، صمیمانه سپاسگزارم.

زرکس نبی زاده

دی ماه ۱۳۹۷

تعهد نامه

اینجانب نرگس نبی زاده چمازکتی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته آشناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه تخمین تغذیه سالانه به آبخوان سرخس با استفاده از FREEWAT تحت راهنمایی دکتر هادی جعفری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « **Shahrood University** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تخمین تغذیه از مباحث مهم در مطالعات منابع آب زیرزمینی به خصوص بیلان آبخوان‌ها بوده و در راستای مدیریت بهره‌برداری از آنها سودمند می‌باشد. آبخوان آبرفتی مرزی سرخس با مساحت ۸۷۴ کیلومتر مربع در شمال شرق ایران و مجاورت مرز ترکمنستان قرار گرفته است. به دلیل قرارگیری در منطقه خشک ایران، فاقد منابع آب سطحی بوده و تنها منبع تأمین‌کننده‌ی آب شرب، کشاورزی و صنعت شهر سرخس، آب زیرزمینی است. در این تحقیق با استفاده از اطلاعات، گزارش‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی آبخوان، مدل مفهومی آبخوان سرخس تهیه شد. مدل مفهومی با استفاده از مادفلو (MODFLOW-2005) در نرم‌افزار فری‌وات (FREEWAT) به مدل عددی تبدیل شد. فرآیند کالیبراسیون (واسنجی) مدل در شرایط ناپایدار در یک دوره دو ساله (سال آبی ۹۵-۹۴ و ۹۵-۹۶) و صحت‌سنجی آن انجام شده است. نقشه هم‌پتانسیل شبیه‌سازی شده آبخوان نشان‌دهنده جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال می‌باشد. افزایش برداشت توسط چاه‌های بهره‌برداری باعث تغییر الگوی جریان و فروافتادگی در خطوط هم‌پتانسیل در این بخش شده به نحوی که سبب قطع جریان خروجی زیرزمینی از آبخوان شده است. بررسی حساسیت مدل عددی به پارامتر تغذیه نشان‌دهنده توانایی آن در تخمین تغذیه به آبخوان می‌باشد. بر اساس نتایج مدل عددی میزان تغذیه سطحی سالانه به آبخوان سرخس حدود ۸۰ میلیون مترمکعب بوده که از دو منبع بارش (حدود ۳۲ میلیون مترمکعب در سال) و آب برگشتی کشاورزی (حدود ۴۸ میلیون مترمکعب در سال) صورت می‌گیرد. بر این اساس ضریب تغذیه ناشی از بارش حدود ۲۰ درصد بارش سالیانه و ضریب جریان برگشتی ناشی از آبیاری برابر ۱۵ درصد تخلیه سالانه چاه‌های بهره‌برداری برآورد شده است. تغییرات زمانی تغذیه به آبخوان بر اساس مدل عددی کالیبره شده نشان‌دهنده رخداد تغذیه ناشی از بارش در ماه‌های دی تا خرداد و جریان برگشتی آبیاری از آبان تا فروردین هر سال می‌باشد. ضرایب تغذیه در محاسبات بیلان و در راستای مدیریت بهینه آبخوان سرخس و آبخوان‌های مشابه در ایران قابل استفاده می‌باشد.

کلمات کلیدی: آب برگشتی آبیاری، بیلان، تغذیه بارش، خراسان رضوی، مادفلو.

مقالات برگرفته شده از پایان نامه

- هیدروژئولوژی آبخوان مرزی سرخس، هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، یزد، دانشگاه یزد، ۱۳۹۷.
- بررسی الگوی جریان آب زیرزمینی در آبخوان مرزی سرخس با استفاده از مدل عددی، یازدهمین همایش ملی تخصصی زمین‌شناسی دانشگاه پیام نور و بیست و یکمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، قم، دانشگاه پیام نور قم، ۱۳۹۷.

فهرست مطالب

| | |
|--|----|
| فهرست شکل‌ها | ش |
| فهرست جدول‌ها | ض |
| فصل اول: مقدمه | ۱ |
| ۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق | ۲ |
| ۱-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه و راه‌های ارتباطی | ۲ |
| ۱-۳- آب و هوای منطقه مورد مطالعه | ۵ |
| ۱-۴-۱- تشکیلات مزوزوئیک (واحدهای زمین‌شناسی دوران دوم) | ۱۰ |
| ۱-۴-۲- تشکیلات سنوزوئیک (واحدهای زمین‌شناسی دوران سوم) | ۱۰ |
| ۱-۴-۳- دوران چهارم | ۱۱ |
| ۱-۵- ژئومورفولوژی منطقه | ۱۳ |
| ۱-۶- هیدروژئولوژی منطقه | ۱۴ |
| ۱-۷- هیدرولوژی منطقه | ۱۵ |
| فصل دوم: تئوری تحقیق و مروری بر مطالعات گذشته | ۱۷ |
| ۲-۱- مقدمه | ۱۸ |
| ۲-۲- تعاریف | ۱۹ |
| ۲-۳- ارائه مدل مفهومی فرآیندهای تغذیه | ۱۹ |
| ۲-۳-۲- آب و هوا | ۱۹ |
| ۲-۳-۳- خاک و زمین‌شناسی | ۲۰ |
| ۲-۳-۴- توپوگرافی سطحی | ۲۰ |
| ۲-۳-۵- آب‌شناسی | ۲۱ |
| ۲-۳-۶- پوشش گیاهی و کاربری زمین | ۲۱ |
| ۲-۴- چالش‌ها در تخمین تغذیه | ۲۲ |

| | |
|----|--|
| ۲۲ | ۲-۴-۱- عدم اطمینان در تخمین تغذیه |
| ۲۲ | ۲-۴-۲- مقیاس‌های زمانی و مکانی تخمین تغذیه |
| ۲۳ | ۲-۴-۳- هزینه |
| ۲۳ | ۲-۵- تکنیک‌های مختلف تخمین تغذیه |
| ۲۴ | - روش مدل‌سازی آب زیرزمینی در تخمین تغذیه |
| ۲۹ | فصل سوم: روش انجام تحقیق |
| ۳۰ | ۳-۱- مقدمه |
| ۳۰ | الف- تعیین هدف مدل‌سازی |
| ۳۰ | ب- جمع‌آوری داده و تفسیر اطلاعات |
| ۳۱ | - ترسیم نقشه پایه زمین‌شناسی |
| ۳۱ | - نقشه توپوگرافی سطح و سنگ کف آبخوان |
| ۳۱ | - داده‌های کمی آب زیرزمینی و هواشناسی |
| ۳۲ | پ- انتخاب مدل ریاضی و کد کامپیوتری |
| ۳۲ | ت- مدل مفهومی |
| ۳۳ | ث- مدل عددی |
| ۳۴ | ج- واسنجی، آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی مدل |
| ۳۵ | چ- بررسی تغییرات مکانی و زمانی تغذیه |
| ۳۷ | فصل چهارم: تخمین تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس |
| ۳۸ | ۴-۱- مقدمه |
| ۳۸ | ۴-۲- مدل مفهومی آبخوان سرخس |
| ۳۸ | ۴-۲-۱- هندسه آبخوان |
| ۳۹ | ۴-۲-۲- هیدرولیک آبخوان |
| ۳۹ | ۴-۲-۲-۱- شبکه پیزومتری |
| ۴۳ | ۴-۲-۳- سری زمانی |
| ۴۷ | ۴-۲-۲-۲- هیدروگراف معرف آبخوان سرخس |

- ۴۸ ۳-۲-۲-۴- تراف سطح آب زیرزمینی
- ۵۰ ۴-۲-۲-۴- پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان سرخس
- ۵۲ ۵-۲-۲-۴- بیان آبخوان آبرفتی دشت سرخس
- ۵۳ الف- ارزیابی جریان‌های ورودی به آبخوان آبرفتی سرخس
- ۵۳ الف-۱- حجم ورودی آب زیرزمینی به آبخوان
- ۵۵ الف-۲- تغذیه ناشی از نزولات جوی به آبخوان
- ۵۶ الف-۳- تغذیه ناشی از آب برگشتی یا انتقالی به آبخوان
- ۵۶ ب- ارزیابی جریان‌های خروجی از آبخوان آبرفتی سرخس
- ۵۶ ب-۱- جریان‌های خروجی آب زیرزمینی از آبخوان
- ۵۷ ب-۲- میزان تبخیر و تعرق از آبخوان
- ۵۸ ب-۳- حجم زهکشی از آبخوان
- ۵۸ ب-۴- حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آبخوان
- ۵۹ ج- ارزیابی تغییرات حجم ذخیره در آبخوان آبرفتی سرخس
- ۶۰ ۳-۴- مدل عددی
- ۶۰ ۱-۳-۴- گسسته سازی (شبکه‌بندی محدوده آبخوان)
- ۶۲ ۲-۳-۴- داده‌های ورودی به مدل
- ۶۲ ۱-۲-۳-۴- ویژگی‌های سفره
- ۶۲ الف- هدایت هیدرولیکی
- ۶۲ ب- آبدهی ویژه
- ۶۴ ۲-۲-۳-۴- تنش‌های وارده به سفره
- ۶۴ الف- بهره‌برداری از چاه‌های پمپاژ
- ۶۴ ب- تغذیه ناشی از بارندگی
- ۶۵ ج- آب برگشتی چاه‌های بهره‌برداری
- ۶۶ ۳-۲-۳-۴- شرایط مرزی و شرایط اولیه

| | |
|----|--|
| ۶۶ | (پیزومترها) چاه‌های مشاهده‌ای ۴-۲-۳-۴ |
| ۶۸ | ارتفاع توپوگرافی و ارتفاع سنگ کف آبخوان ۵-۲-۳-۴ |
| ۷۰ | انتخاب دوره‌ها و گام‌های زمانی ۳-۳-۴ |
| ۷۱ | (Calibration) واسنجی مدل ۴-۳-۴ |
| ۷۳ | بررسی کلی مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده و مشاهده‌ای ۱-۴-۳-۴ |
| ۷۴ | بررسی مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل مقادیر باقیمانده‌ها ۲-۴-۳-۴ |
| ۷۵ | مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهده‌ای ۳-۴-۳-۴ |
| ۸۰ | صحت سنجی مدل ۵-۳-۴ |
| ۸۱ | بررسی مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل مقادیر باقیمانده‌ها ۱-۵-۳-۴ |
| ۸۲ | بیلان آب زیرزمینی محاسبه شده توسط مدل ۶-۳-۴ |
| ۸۳ | نقشه‌های تراز شبیه‌سازی شده توسط مدل ۷-۳-۴ |
| ۸۶ | تخمین تغذیه و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن ۸-۳-۴ |
| ۸۶ | - آنالیز حساسیت تغذیه (Recharge Sensitivity Analysis) |
| ۹۱ | فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها |
| ۹۲ | ۱-۵- مقدمه |
| ۹۲ | ۲-۵- نتایج |
| ۹۴ | ۳-۵- پیشنهادها |
| ۹۵ | منابع |

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های ارتباطی منطقه مورد مطالعه ۴
- شکل ۲-۱- منحنی امپروترمیک سرخس در یک دوره ۳۱ ساله (۱۳۹۲-۱۳۶۱) ۶
- شکل ۳-۱- نقشه زمین‌شناسی سرخس و موقعیت آبخوان آبرفتی سرخس ۹
- شکل ۴-۱- ژئومورفولوژی دشت سرخس در محیط Google Earth ۱۴
- شکل ۱-۴- موقعیت پیزومترهای حفر شده در آبخوان سرخس ۴۰
- شکل ۲-۴- هیدروگراف پیزومترهای گروه اول ۴۴
- شکل ۳-۴- هیدروگراف پیزومترهای گروه دوم ۴۵
- شکل ۴-۴- هیدروگراف پیزومترهای گروه سوم ۴۶
- شکل ۵-۴- شبکه تیسن آبخوان سرخس ۴۷
- شکل ۶-۴- هیدروگراف معرف آبخوان سرخس طی سال‌های ۸۴ تا ۹۶ ۴۸
- شکل ۷-۴- نقشه هم‌پتانسیل آبخوان سرخس (فروردین ۹۶) ۴۹
- شکل ۸-۴- ترسیم قابلیت انتقال در برابر ضریب ذخیره حاصل از آزمون پمپاژ دشت سرخس ۵۲
- شکل ۹-۴- نقشه هم‌پتانسیل آبخوان سرخس در فروردین ۱۳۹۶ ۵۴
- شکل ۱۰-۴- نقشه هم‌عمق آبخوان سرخس ۵۷
- شکل ۱۱-۴- موقعیت چاه‌های پمپاژ در محدوده آبخوان سرخس ۵۸
- شکل ۱۲-۴- شبکه مدل و موقعیت سلول‌های فعال و غیرفعال در آبخوان سرخس ۶۱
- شکل ۱۳-۴- مقادیر هدایت هیدرولیکی و زون بندی آن در محدوده آبخوان آبرفتی سرخس ۶۳
- شکل ۱۴-۴- موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در محدوده شبکه‌بندی مدل آبخوان سرخس ۶۵
- شکل ۱۵-۴- شرایط مرزی مدل آبخوان آبرفتی سرخس ۶۷
- شکل ۱۶-۴- موقعیت پیزومترها در محدوده شبکه آبخوان سرخس ۶۸

- شکل ۴-۱۷- نقشه توپوگرافی سطحی دشت سرخس ۶۹
- شکل ۴-۱۸- نقشه‌ی ارتفاع سنگ کف آبخوان سرخس ۷۰
- شکل ۴-۱۹- خطوط تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده توسط مدل در پایان دوره واسنجی. ۷۲
- شکل ۴-۲۰- انطباق مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در چاه‌های پیژومتری..... ۷۳
- شکل ۴-۲۱- انطباق سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی در انتهای دوره مدل‌سازی..... ۷۴
- شکل ۴-۲۲- مقایسه مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل باقیمانده‌ها در دوره واسنجی ۷۵
- شکل ۴-۲۳- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهداتی..... ۷۶
- شکل ۴-۲۴- انطباق مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در دوره صحت سنجی..... ۸۰
- شکل ۴-۲۵- انطباق سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی در دوره صحت سنجی ۸۱
- شکل ۴-۲۶- مقایسه مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل مقادیر باقیمانده‌ها
در دوره صحت سنجی ۸۱
- شکل ۴-۲۷- خطوط تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان سرخس شبیه‌سازی شده..... ۸۵
- شکل ۴-۲۸- نتایج حساسیت نسبت به مقادیر مختلف تغذیه وارد شده به مدل ۸۶
- شکل ۴-۲۹- تغییرات مکانی تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس بر اساس نتایج مدل عددی ۸۸
- شکل ۴-۳۰- تغییرات زمانی تغذیه به آبخوان سرخس بر اساس نتایج مدل عددی ۸۹

فهرست جدول؛

- جدول ۱-۱- متوسط بارندگی و دمای ماهانه محدوده مطالعاتی سرخس در یک دوره ۳۱ ساله..... ۵
- جدول ۱-۲- طبقه‌بندی اقلیم ۷
- جدول ۱-۲- روش‌های مختلف تخمین تغذیه ۲۴
- جدول ۱-۴- مشخصات پیزومترهای حفر شده در آبخوان سرخس ۴۱
- جدول ۲-۴- خلاصه نتایج آزمایش‌های پمپاژ انجام شده در چاه‌های اکتشافی دشت سرخس ۵۰
- جدول ۳-۴- محاسبه جریان آب زیرزمینی ورودی به آبخوان آبرفتی سرخس ۵۵
- جدول ۴-۴- خلاصه اجزاء بیلان آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی سرخس..... ۵۹
- جدول ۵-۴- نتایج حاصل از بیلان آبخوان آبرفتی سرخس در انتهای دوره شبیه‌سازی مدل ۸۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

تخمین تغذیه یکی از مهم‌ترین مباحث در مطالعات آب زیرزمینی به ویژه بیلان آب زیرزمینی می‌باشد. به این منظور برآورد دقیق مقدار تغذیه آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. تکنیک‌های مختلف تخمین تغذیه را می‌توان بر اساس مناطق یا زون‌های هیدرولوژیکی که اطلاعات مورد نیاز از آن‌ها به دست می‌آید، به سه گروه تکنیک‌های آب سطحی، منطقه غیراشباع و منطقه اشباع تقسیم کرد. در هر یک از این زون‌ها تغذیه به روش‌های فیزیکی، ردیابی و مدل‌سازی عددی قابل تخمین می‌باشد (Healy, 2010).

دشت سرخس با زمین‌های حاصلخیز و خاک مناسب از پتانسیل‌های بالقوه‌ای جهت توسعه کشاورزی برخوردار است. از طرف دیگر منابع آب‌های سطحی دشت محدود بوده و منابع آب زیرزمینی (آبخوان دشت) نیز در اثر بهره‌برداری بیش از حد دچار افت شده است. به لحاظ مصرف در بخش‌های گوناگون بیشترین مصرف آب توسط چاه‌ها در بخش کشاورزی صورت می‌گیرد. در سال‌های اخیر وقوع خشکسالی‌های شدید در منطقه و توسعه شدید بهره‌برداری از این آبخوان باعث بروز مشکلاتی مانند افت سطح آب زیرزمینی شده و بنابراین ضرورت دارد مدیریت این آبخوان مهم در دستور کار قرار گیرد. مدیریت وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی این دشت مستلزم شناخت کافی از آبخوان بوده که در این راستا بررسی و برآورد تغذیه یکی از پارامترهای اساسی می‌باشد. بنابراین هدف از انجام این تحقیق، تخمین تغذیه به آبخوان سرخس با استفاده از مدل عددی فری‌وات (FREEWAT) در راستای مدیریت بهینه این آبخوان مهم می‌باشد. فری‌وات (FREEWAT) یک مدل هیدرولوژیکی است که با QGIS ادغام شده است و امکان شبیه‌سازی کل چرخه آب را فراهم می‌سازد.

۱-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه و راه‌های ارتباطی

محدوده مطالعاتی سرخس با وسعت ۱۹۲۶ کیلومترمربع در شمال شرق ایران و در مجاورت مرز ترکمنستان قرار دارد. شهر سرخس واقع در ۱۸۰ کیلومتری شهر مشهد مهم‌ترین مرکز جمعیتی در این

محدوده مطالعاتی بوده که در بخش شمال شرقی آن قرار گرفته است. از نظر مختصات جغرافیایی این محدوده در $۶۰^{\circ} ۴۲'$ تا $۶۱^{\circ} ۱۴'$ طول شرقی و $۳۵^{\circ} ۵۰'$ تا $۳۶^{\circ} ۳۷'$ عرض شمالی واقع شده است.

ارتفاعات محدوده مورد مطالعه در بخش غربی و جنوبی منطقه قرار داشته و دشت سرخس که آبخوان آبرفتی را در خود جای می‌دهد، در بخش شرقی و حاشیه رودخانه هریرود قرار دارد. آبخوان آبرفتی دشت سرخس با امتداد شمالی-جنوبی که حاصل فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه هریرود می‌باشد از پتانسیل آبدهی بالایی برخوردار است.

حدود محدوده مطالعاتی سرخس به شرح زیر می‌باشد:

شمال: مرز ایران-ترکمنستان (از رودخانه هریرود تا محل تلاقی مرز شرقی محدوده مطالعاتی گنبدلی با محدوده سرخس).

شرق: رودخانه هریرود از تقاطع مرز ایران و ترکمنستان تا تقاطع رودخانه در محل پل خاتون.

جنوب: از تقاطع رودخانه هریرود در محل پل خاتون به نقطه ارتفاعی ۶۹۰ و در ادامه در امتداد مرز محدوده مطالعاتی تا خط الراس ارتفاعات غربی کوه تخته گاوخانه.

غرب: خط‌الرأس ارتفاعات غربی کوه تخته گاو خانه در امتداد مرز محدوده مطالعاتی به نقاط ارتفاعی ۷۲۹، ۶۴۹، ۴۰۲ و ۵۲۲ و در ادامه در امتداد مرز محدوده مطالعاتی تا تقاطع محدوده با مرز ایران و ترکمنستان (هیدروتک توس، ۱۳۹۳).

بلندترین نقطه ارتفاعی محدوده مطالعاتی با ارتفاع ۱۲۱۰ متر از سطح تراز دریا و پست‌ترین نقطه ارتفاعی آن با ارتفاع ۲۵۵ متر در محل خروجی رودخانه هریرود از خاک ایران قرار دارد.

شیب عمومی دشت از جنوب به سمت شمال می‌باشد. دشت سرخس در عین حال دارای شیب جانبی از غرب به شرق (از ارتفاعات غربی به سمت رودخانه هریرود) می‌باشد. حداکثر منحنی ارتفاعی در

۱-۳- آب و هوای منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی آب و هوا و اقلیم منطقه مورد مطالعه از آمار هواشناسی سال‌های آبی ۶۱-۱۳۶۰ تا ۹۳-۱۳۹۲ استفاده شده است. متوسط بارندگی دشت سرخس ۱۸۳/۴ میلی‌متر می‌باشد. بیشترین میزان بارندگی ماهانه در اسفند و کمترین آن در ماه‌های تابستان اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی بارندگی منطقه از اواخر مهر ماه شروع می‌شود و تا اواخر اردیبهشت ماه ادامه پیدا می‌کند. سهم برف از کل بارش در محدوده دشت ۲۱ درصد می‌باشد که این نسبت برای ارتفاعات محدوده مطالعاتی به‌طور متوسط ۲۹ درصد از بارش‌ها را در برمی‌گیرد. حداکثر درجه حرارت مشاهده‌شده در ایستگاه سینوپتیک سرخس و تبخیر سنجی پل خاتون به ترتیب $+۴۶/۶$ و $+۴۸/۵$ درجه سانتی‌گراد بوده که در ماه‌های خرداد و تیر به ثبت رسیده است. پائین‌ترین درجه حرارت مشاهده‌شده نیز در ایستگاه‌های مذکور به ترتیب -۳۱ و $-۳۲/۵$ درجه سانتی‌گراد بوده که در ماه‌های دی و بهمن ثبت شده است (هیدروتک توس، ۱۳۹۳).

در محدوده مورد مطالعه ماه‌های دی و بهمن سردترین ماه‌های سال می‌باشد و پس از آن درجه حرارت به تدریج افزایش یافته تا اینکه در تیرماه به حداکثر خود می‌رسد و پس از آن روند نزولی درجه حرارت مشاهده می‌شود. در جدول (۱-۱) اطلاعات میانگین دمای ماهانه و بارش برای منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

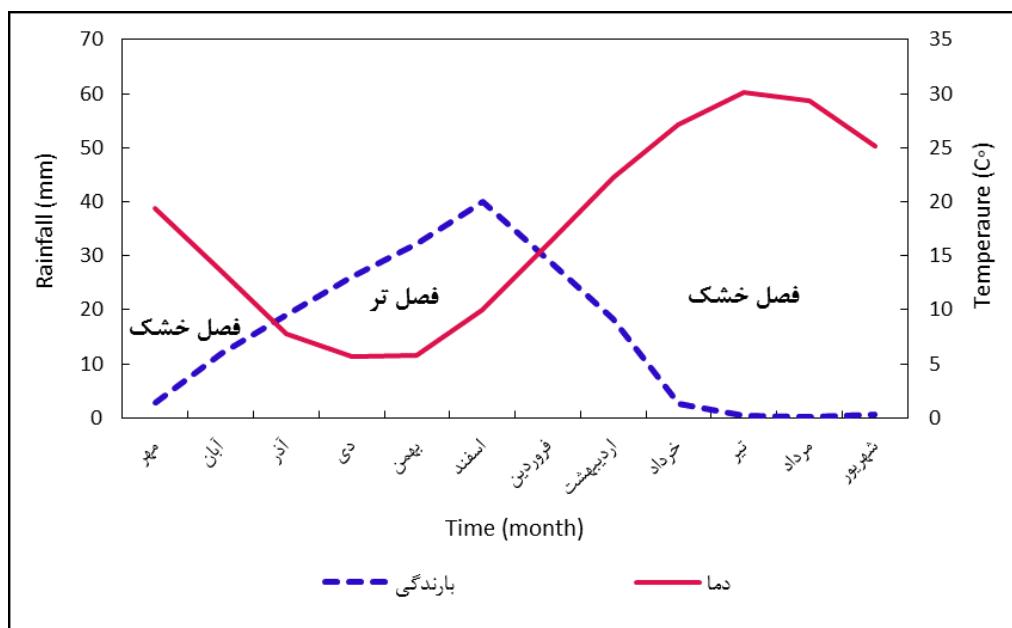
جدول ۱-۱: متوسط بارندگی و دمای ماهانه محدوده مطالعاتی سرخس در یک دوره ۳۱ ساله (۱۳۶۱-۱۳۹۲)

| زمان | میانگین بارندگی (میلی‌متر) | میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) |
|-------|----------------------------|-------------------------------|
| مهر | 2.8 | 19.4 |
| آبان | 12 | 13.6 |
| آذر | 19 | 7.8 |
| دی | 26 | 5.7 |
| بهمن | 32.2 | 5.7 |
| اسفند | 40.1 | 9.9 |

ادامه جدول ۲-۱: متوسط بارندگی و دمای ماهانه محدوده مطالعاتی سرخس در یک دوره ۳۱ ساله (۱۳۹۲-۱۳۶۱)

| زمان | میانگین بارندگی (میلی‌متر) | میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) |
|----------------|----------------------------|-------------------------------|
| فروردین | 29.4 | 16.1 |
| اردیبهشت | 18.4 | 22.3 |
| خرداد | 2.6 | 27.2 |
| تیر | 0.3 | 30.1 |
| مرداد | 0.1 | 29.4 |
| شهریور | 0.6 | 25.2 |
| میانگین سالانه | 183.4 | 17.7 |

بر اساس اطلاعات دما و بارندگی مربوط به منطقه مورد مطالعه، نمودار امبروترمیک (Embrotthermic) ترسیم شده است (شکل ۲-۱). در این نمودار زمان‌هایی که میانگین بارندگی بالاتر از میانگین دما است، فصل تر و در غیر این صورت فصل خشک اتفاق می‌افتد. نقطه تلاقی منحنی میانگین بارندگی با منحنی میانگین دما، جدا کننده فصل خشک و تر از یکدیگر می‌باشد. طبق این نمودار، آذر تا فروردین ماه، جزء فصل تر بوده و بقیه ماه‌های سال در فصل خشک قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۱: منحنی امبروترمیک سرخس در یک دوره ۳۱ ساله (۱۳۹۲-۱۳۶۱)

به منظور تعیین اقلیم منطقه از روش دمارتن (De Martonne) استفاده شده است. دمارتن با توجه به میانگین دما و بارش سالیانه، ضریبی به نام ضریب خشکی ارائه نموده است که بر اساس آن اقلیم منطقه مشخص می‌شود. ضریب خشکی دمارتن با استفاده از معادله (۱-۱) محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{P}{T+10} \quad \text{معادله ۱-۱}$$

در این معادله p میانگین بارندگی سالیانه بر حسب میلی‌متر و T میانگین دمای سالیانه بر حسب درجه سانتی‌گراد است. مقدار I محاسبه شده از معادله بالا برای محدوده مطالعاتی سرخس حدود ۶/۶۲ می‌باشد که با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده در جدول (۲-۱)، نشان‌دهنده اقلیم خشک منطقه می‌باشد. روش دیگر برای تعیین نوع اقلیم، نمای آمبرژه می‌باشد که با استفاده از معادله (۲-۱) محاسبه می‌شود:

$$Q2 = 2000P / (M+273.160)^2 - (m+273.160)^2 \quad \text{معادله ۲-۱}$$

در این معادله M میانگین حداکثرهای درجه حرارت در گرم‌ترین ماه سال، m میانگین حداقل‌های درجه حرارت در سردترین ماه سال و P میانگین بارندگی سالانه می‌باشد. مقدار Q2 محاسبه شده از معادله بالا ۲۵/۹۳ می‌باشد که با توجه به طبقه‌بندی در جدول (۲-۱) نشان‌دهنده اقلیم خشک می‌باشد.

جدول ۲-۱: طبقه‌بندی اقلیم به روش دمارتن و آمبرژه

| طبقه‌بندی اقلیم بر اساس ضریب دمارتن | | طبقه‌بندی اقلیم بر اساس نمای آمبرژه | |
|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| نام اقلیم | محدود ضریب خشکی دمارتن (I) | نوع اقلیم | مقدار Q2 (نمای آمبرژه) |
| خشک | مقادیر کمتر از ۱۰ | بیابانی | کوچکتر از ۱۰ |
| نیمه خشک | مقادیر ۱۰ الی ۱۹/۹ | خشک | ۱۰ تا ۲۸ |
| مدیترانه‌ای | مقادیر ۲۰ الی ۲۳/۹ | نیمه خشک | ۲۸/۱ تا ۳۸ |
| نیمه مرطوب | مقادیر ۲۴ الی ۲۷/۹ | نیمه مرطوب | ۳۸/۱ تا ۵۵ |
| مرطوب | مقادیر ۲۸ الی ۳۴/۹ | مرطوب | ۵۵ تا ۱۱۰ |
| بسیار مرطوب | مقادیر بیشتر از ۳۵ | خیلی مرطوب | بیشتر از ۱۱۰ |

۴-۱- زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی سرخس

هدف از مطالعه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی سرخس، شناخت و بررسی سازندهای مختلف و واحدهای زمین‌شناسی به لحاظ لیتولوژی، تعیین گسترش و اثرات آنها بر روی منابع آب سطحی و زیرزمینی است. محدوده مطالعاتی سرخس شکل نسبتاً کشیده‌ای دارد که تمامی بخش غربی و جنوبی آن را ارتفاعات احاطه کرده و بخش شمالی که خروجی دشت می‌باشد، نقاط پست و کم ارتفاع را تشکیل می‌دهد. این محدوده از نظر جایگاه زمین‌شناسی جزئی از زون کپه داغ است. حوضه رسوبی کپه داغ که بخش وسیعی از ترکمنستان، شمال افغانستان و شمال شرق ایران را دربرمی‌گیرد، از توالی ضخیمی از رسوبات دوران دوم و سوم تشکیل شده است (هیدروتک توس، ۱۳۹۳).

قدیمی‌ترین تشکیلات زمین‌شناسی رخنمون یافته در سطح محدوده مطالعاتی، سازند آب تلخ با سن کرتاسه بوده که در جنوب غرب محدوده سرخس رخنمون دارد. محدوده مورد مطالعه، در نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ سرخس قرار دارد. شکل (۱-۳) نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی سرخس و محدوده آبخوان آبرفتی سرخس را نشان می‌دهد.

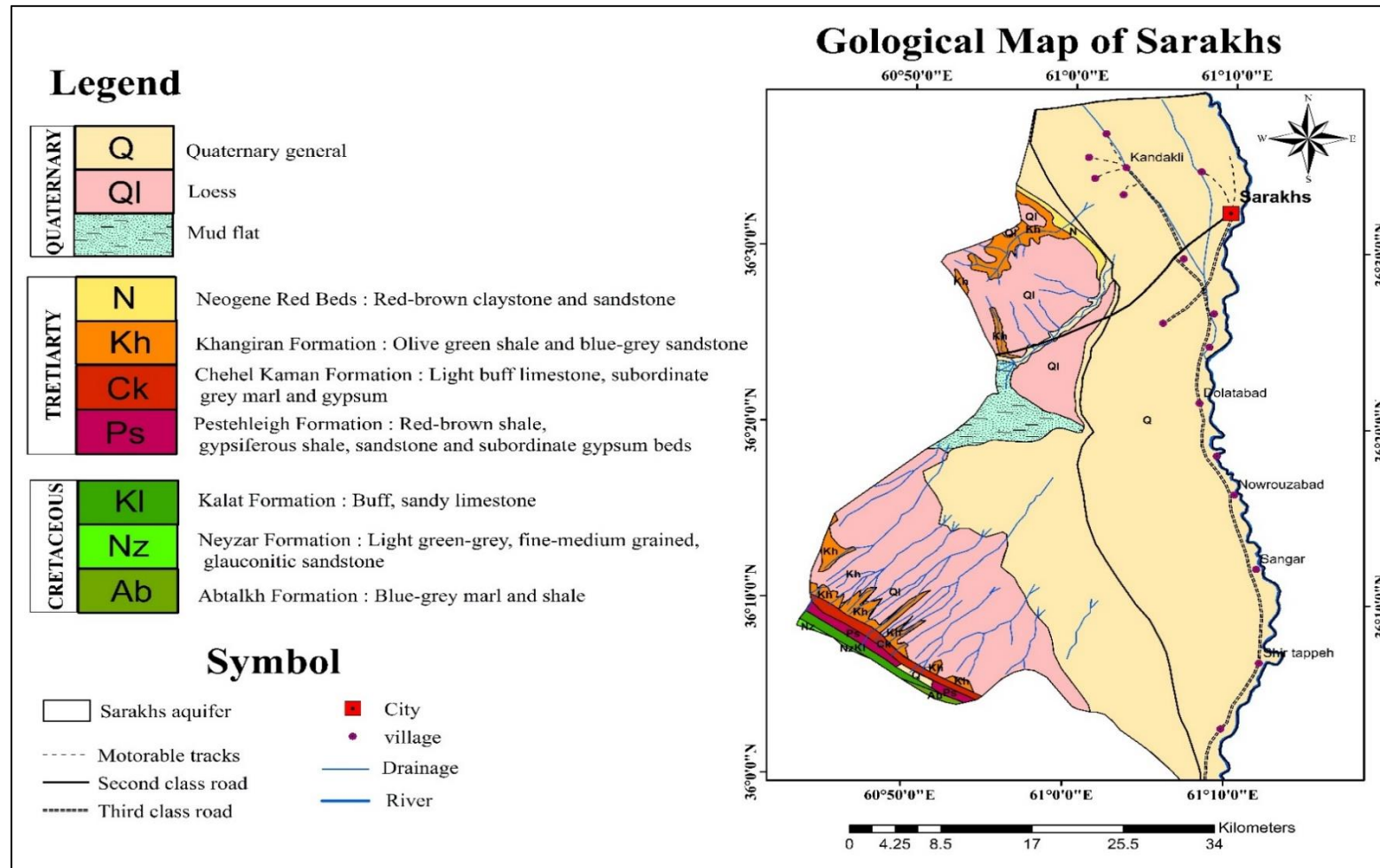
۱-۴-۱- تشکیلات مزوزوئیک (واحدهای زمین‌شناسی دوران دوم)

این رسوبات شامل سازندهای آب تلخ، نیزار و کلات است که در جنوب غربی حوضه رخنمون دارد.

سازند آب تلخ: این سازند به صورت هم‌شیب بر روی سازند آب‌دراز و در زیر سازند نیزار قرار گرفته است. رخساره‌های آب تلخ شامل شیل آهکی تیره رنگ، مارن و ماسه‌سنگ می‌باشد.

سازند نیزار: این سازند که در شمال شرق حوضه در محدوده‌های کلات نادر، گنبدلی و سرخس رخنمون دارد، شامل ماسه‌سنگ ضخیم لایه گلوکونیتی و شیل می‌باشد که به صورت هم‌شیب بر روی سازند آب تلخ قرار گرفته است. ضخامت این سازند بسیار متفاوت است.

سازند کلات: رخساره‌های کلات از سنگ آهک ماسه‌ای با سیمای صخره‌ای تشکیل گردیده و ضخامت آن به سمت جنوب شرق محدوده مطالعاتی کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۳: نقشه زمین‌شناسی سرخس (برگرفته از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ سرخس، شرکت ملی نفت ایران (۱۹۸۳)) و موقعیت آبخوان آبرفتی سرخس

۱-۴-۱- تشکیلات مزوزوئیک (واحدهای زمین‌شناسی دوران دوم)

این رسوبات شامل سازندهای آب‌تلخ، نیزار و کلات کرتاسه است که در جنوب غربی حوضه رخنمون دارد.

سازند آب تلخ: این سازند به صورت هم‌شیب بر روی سازند آبدراز و در زیر سازند نیزار قرار گرفته است. رخساره‌های آب تلخ شامل شیل آهکی تیره رنگ، مارن و ماسه‌سنگ می‌باشد.

سازند نیزار: این سازند که در شمال شرق حوضه در محدوده‌های کلات نادر، گنبدلی و سرخس رخنمون دارد، شامل ماسه‌سنگ ضخیم لایه گلوکونیتی و شیل می‌باشد که به صورت هم‌شیب بر روی سازند آب تلخ قرار گرفته است. ضخامت این سازند بسیار متفاوت است.

سازند کلات: رخساره‌های کلات از سنگ آهک ماسه‌ای با سیمای صخره‌ای تشکیل گردیده و ضخامت آن به سمت جنوب شرق محدوده مطالعاتی کاهش می‌یابد.

۱-۴-۲- تشکیلات سنوزوئیک (واحدهای زمین‌شناسی دوران سوم)

رسوبات دوره پالئوژن در سطح محدوده سرخس شامل سازندهای پسته‌لیق، چهل کمان و خانگیران می‌باشد که در جنوب غربی و غرب حوضه رخنمون دارد.

سازند پسته‌لیق: این سازند اولین سازند دارای سن ترشیری کپه داغ است که عمدتاً از لایه‌های شیل قهوه‌ای مایل به قرمز، رس سنگ، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و رسوبات تبخیری تشکیل شده است. سطح تماس تحتانی و فوقانی این سازند با سازندهای کلات و چهل کمان هم‌شیب است.

سازند چهل کمان: این سازند عمدتاً از سنگ‌های کربناته دارای بین لایه‌های مارن، شیل آهکی، لایه‌های نازک ماسه‌سنگ و سنگ گچ تشکیل شده است.

سازند خانگیران: از شیل آهکی یکنواخت به رنگ سبز زیتونی و خاکستری مایل به آبی و لایه‌های ماسه‌سنگ رس‌دار تشکیل شده است. این سازند در محیط دریایی تشکیل شده و شامل دو بخش فوقانی و تحتانی می‌باشد. بخش تحتانی شامل شیل آهکی، سنگ آهک و ماسه‌سنگ بوده و بخش فوقانی شامل شیل، ماسه‌سنگ و سیلتستون است. از نظر هیدروژئولوژیکی این سازند تقریباً غیرقابل نفوذ بوده و در ذخیره منابع آب نقش چندانی ندارد و به واسطه وجود میان لایه‌های گچی، باعث کاهش کیفیت آب زیرزمینی منطقه می‌شود. سازند خانگیران به‌عنوان سنگ کف آبخوان دشت سرخس شناخته شده است (هیدروتک توس، ۱۳۹۳).

رسوبات قرمز رنگ نئوژن: سازند نئوژن در دشت سرخس شامل رسوبات قرمز رنگی است که در دامنه شمالی تاقدیس خانگیران واقع در شمال دشت، رسوبات قرمز رنگ کنگلومرا، ماسه‌سنگ و بین لایه‌های رس سنگ ماسه‌دار به طور هم‌شیب بر روی سازند خانگیران قرار گرفته است. بخش‌های کنگلومرایی لایه‌بندی ضخیم داشته و از سنگ‌های کربناته تیرگان تشکیل شده است. مرز بین سازندهای خانگیران و رسوبات قرمز رنگ نئوژن تدریجی می‌باشد. این سازند نفوذپذیری اندکی داشته و تأثیر منفی بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه دارد و بخشی از سنگ کف آبخوان آبرفتی دشت سرخس را این رسوبات تشکیل می‌دهند.

۱-۴-۳- دوران چهارم

این رسوبات در سطح وسیعی از حاشیه غربی رودخانه هریرود بر جای گذاشته شده‌اند و حاصل فعالیت رسوب‌گذاری رودخانه می‌باشند. بخش سطحی این رسوبات از خاک زراعی (رس، سیلت و ماسه بادی) تشکیل شده و در اعماق شامل قلوه‌سنگ، شن، ماسه، سیلت و رس می‌باشد. این رسوبات بر روی تشکیلات غیر قابل نفوذ خانگیران نهشته شده و در

بسیاری از مناطق مرز آن با شیل‌های خانگیان به صورت تدریجی است. این رسوبات در محدوده مورد مطالعه شامل لس‌ها، پادگانه‌های آبرفتی و آبرفت‌های دوران چهارم می‌باشد.

لس‌ها: این رسوبات که از سیلت و کمی رس تشکیل شده‌اند، در روی سطح وسیعی از بخش‌های شمال غرب، جنوب غرب و غرب حوضه آبریز سرخس نهشته شده‌اند. این رسوبات لایه‌بندی نداشته و به علت جنس خاص خود که ترکیبی از سیلت و رس است، نفوذپذیری کافی برای جذب آب و حفظ رطوبت داشته و اراضی بسیار مناسبی برای زراعت دیم می‌باشند.

پادگانه‌های آبرفتی: این رسوبات که متشکل از کنگلومرا و ماسه‌سنگ درشت است، در بخش غربی حوضه در سطح بسیار محدودی بر جای گذاشته شده است و به دو گروه پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و جدید تقسیم می‌شوند:

پادگانه‌های قدیمی آبرفتی: قدیمی ترین رسوبات دوره کواترنر در این محدوده، تراس‌های قدیمی آبرفتی است که در دره‌ها و حاشیه ارتفاعات جنوب شرقی و شرق محدوده مطالعاتی رخنمون دارد. این سازند عمدتاً به واسطه فرسایش سازندهای قدیمی‌تر به وجود آمده است و در سطح دشت سرخس گسترش اندکی دارد.

پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های جوان آبرفتی: پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های جوان آبرفتی در سطح وسیعی رخنمون داشته و بخش اعظم پهنه آبرفتی دشت سرخس را تشکیل داده و آبخوان آبرفتی این دشت را در خود جای داده است. این رسوبات در حاشیه ارتفاعات دانه‌درشت‌تر بوده و به واسطه نفوذ سیلاب‌ها نقش تغذیه‌ای اصلی آبخوان آبرفتی دشت را ایفا می‌نمایند.

کفه‌های رسی: به تدریج با نزدیک شدن به نقاط خروجی دشت، این رسوبات ریزدانه‌تر شده و نفوذپذیری آن‌ها کاهش می‌یابد. تا آنجایی که در حوالی شهر سرخس و خروجی دشت

پهنه‌های رسی واقع شده که به واسطه عملکرد فرسایش باد تشکیل شده‌اند. این رسوبات به صورت محدود در بخش شمالی آبخوان آبرفتی رخنمون دارند.

تپه‌های ماسه‌ای: در سطح دشت سرخس رسوبات (تپه‌های) ماسه‌ای به صورت گسترده رخنمون دارند. این رسوبات که عمدتاً در جهت شمال غرب-جنوب شرق گسترش دارند به طور وسیعی کشاورزی دشت سرخس را تهدید می‌کنند. منشأ این رسوبات ماسه‌ای کشور ترکمنستان می‌باشد.

آبرفت‌های رودخانه‌ای: آبرفت‌های رودخانه‌ای در سطح وسیعی از حاشیه غربی رودخانه هریرود گذاشته شده و حاصل فعالیت رسوب‌گذاری رودخانه می‌باشند. آبرفت سطحی از خاک‌های زراعی تشکیل شده و در اعماق قله‌سنگ، شن، ماسه، سیلت و مقدار کمی رس بخش عمده ذرات را تشکیل می‌دهند.

۱-۵- ژئومورفولوژی منطقه

حوضه آبریز سرخس به شکل کشیده در امتداد شمالی-جنوبی می‌باشد. از نظر ژئومورفولوژی در این محدوده ۲ واحد کوهستان و دشت وجود دارد. واحد دشت به علت شیب کم و نفوذ پذیری بالا بیشترین نقش را در تغذیه آب‌های زیرزمینی دارد. در این دشت اکثر آبراهه‌ها از غرب به شرق کشیده شده‌اند. دشت مورد مطالعه دارای رود اصلی هریرود و رودهای فصلی چکودر، شورلق و چند آبراهه سیلابی می‌باشد.

دشت سرخس را از نظر شکل ظاهری می‌توان به دو بخش شرقی و غربی تقسیم نمود: ژئومورفولوژی بخش غربی را تپه‌های کم ارتفاع متشکل از رسوبات شیلی سازند خانگیران می‌سازد. بخش شرقی دشت نیز پوشیده از آبرفت‌های سیلابی می‌باشد. از عوارض بیابانی دشت سرخس می‌توان به تپه‌های ماسه‌ای اشاره کرد که گسترش زیادی یافته‌اند.

از نظر ژئومورفولوژی ساختمانی منطقه مورد مطالعه جزء سیستم چین خورده‌ی کپه داغ بوده و در انتهای جنوب شرقی این رشته کوه و در مرز تلاقی صفحه توران و ایران مرکزی واقع شده است. ارتفاعات در این منطقه دارای روند شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد که با روند ارتفاعات در کپه داغ همسو است. ریخت‌شناسی منطقه جوان بوده و توپوگرافی آن رابطه مستقیم با ساختارهای زمین‌شناسی دارد. مورفولوژی دشت سرخس در شکل (۴-۱) نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱: ژئومورفولوژی دشت سرخس در محیط Google earth

۱-۶- هیدروژئولوژی منطقه

طبق مطالعات ژئوفیزیک انجام شده در دشت سرخس، آبخوان آبرفتی این محدوده از نوع آزاد بوده و مساحت آن حدود ۸۷۴ کیلومترمربع می‌باشد. به‌طور کلی حد گسترش آبخوان از سمت شرق تا رودخانه هریرود و از سمت غرب تا ارتفاعات غربی می‌باشد. بر اساس بررسی‌های ژئوفیزیکی صورت گرفته در ناحیه جنوبی آبخوان، میزان تغییرات ضخامت رسوبات آبرفتی بین کمتر از ۲۰ تا حداکثر حدود ۸۰ متر می‌باشد که بیشترین ضخامت رسوبات به‌صورت آنومالی‌هایی در غرب چاه عبدا...، غرب شیرتپه و همچنین شمال غرب سنگر دیده می‌شود. روند منحنی‌های هم ضخامت رسوبات آبرفتی، مسیر یک

بستر قدیمی را در قسمت غربی رودخانه هریرود نشان می‌دهد که تحت تأثیر رودخانه و ته‌نشست رسوبات آبرفتی شکل گرفته و حاکی از تغییر مسیر رودخانه هریرود به سمت شرق در طول زمان می‌باشد. در ناحیه شمالی آبخوان نیز تغییرات ضخامت رسوبات آبرفتی بین کمتر از ۳۰ تا حداکثر حدود ۱۳۰ متر می‌باشد که بیشترین ضخامت رسوبات را می‌توان در نواحی قلعه قصاب، محدوده سرخس و امتداد آن به طرف شمال مشاهده نمود. در آبخوان این ناحیه نیز در حالت کلی بیشترین ضخامت رسوبات مربوط به نواحی مجاور رودخانه هریرود می‌باشد که تحت تأثیر آن دشت سرخس شکل گرفته است. تراز آب زیرزمینی در آبخوان از جنوب به شمال کاهش می‌یابد. به‌طور کلی رسوبات آبرفتی دانه‌درشت بوده و عمدتاً از قلوه‌سنگ، ماسه و شن تشکیل یافته‌اند که به طرف نواحی غربی و حاشیه ارتفاعات، رسوبات دانه‌ریز سیلتی و رسی خانگیان به آن‌ها افزوده شده و ضمن اینکه از نفوذپذیری آن‌ها کاسته می‌گردد، از نظر کیفی نیز نامطلوب‌تر می‌شوند. سنگ کف منطقه نیز از نوع رس‌های متراکم و مارن‌های تشکیلات خانگیان می‌باشد که وجود لایه‌های رسی در سفره آزاد علی‌الخصوص در حاشیه ارتفاعات غربی تا حدودی موجب تشکیل سفره‌های نیمه تحت فشار شده است. سازند خانگیان به‌عنوان سنگ کف آبخوان دشت سرخس شناخته شده است. رسوبات قرمز رنگ نئوژن نیز بخشی از سنگ کف آبخوان آبرفتی دشت سرخس را این رسوبات تشکیل می‌دهند.

۱-۷- هیدرولوژی منطقه

منابع آب سطحی دشت سرخس، شامل رودخانه‌های فصلی هریرود (رودخانه مرزی ایران و افغانستان)، کشف‌رود (رودخانه حوضه آبریز مشهد)، شورلق و چکودر می‌باشد. پس از احداث سد دوستی بر روی رودخانه هریرود، تغذیه سالیانه رودخانه هریرود در دریاچه سد دوستی ذخیره می‌گردد. رودخانه‌های هریرود و کشف‌رود در بخش جنوبی دشت سرخس بهم پیوسته و رودخانه تجن (رودخانه مرزی ایران و ترکمنستان) را تشکیل می‌دهند که با امتداد جنوب به شمال در دشت سرخس جریان داشته و پس از تغذیه آبخوان دشت سرخس وارد خاک ترکمنستان می‌گردد.

فصل دوم

تئوری تحقیق و مروری بر مطالعات گذشته

۲-۱- مقدمه

آب زیرزمینی منبع مطمئنی از آب شیرین در سرتاسر جهان به حساب می‌آید. آمار جامعی از میزان برداشت و مصرف آب زیرزمینی در دسترس نیست؛ اما برآوردها حاکی از آن است که بیش از ۱/۵ میلیارد نفر در سرتاسر جهان برای تأمین آب شرب مورد نیاز خود، به آب زیرزمینی وابسته هستند (Clarke et al., 1996). به جز آب ذخیره شده در پوشش یخ‌ها و یخچال‌ها، حدود ۹۷ درصد آب شیرین

زمین را آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهند (Nace, 1967؛ Shiklomanov and Rodda, 2003).

با توجه به رشد جمعیت، افراد بیشتری به منابع آب زیرزمینی، خصوصاً در نواحی خشک و نیمه خشک روی خواهند آورد. آگاهی از میزان طبیعی آب زیرزمینی (یعنی نرخ بازگشت آب به آبخوان) به منظور مدیریت کارآمد در مبحث آب زیرزمینی ضروری است (Simmers, 1990).

تغذیه طبیعی آب زیرزمینی، از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در مطالعه آب زیرزمینی می‌باشد. نرخ، زمان و موقعیت تغذیه از مسائل مهم در آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌باشند. به طور کلی با افزایش نرخ تغذیه، حرکت آلاینده‌ها به سمت سطح ایستابی افزایش می‌یابد، از این رو مناطقی که نرخ تغذیه در آن‌ها بالاست، دارای آبخوان آسیب‌پذیرتری هستند (US National Research Council, 1993; ASTM, 2008).

مدیریت وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی در گام اول مستلزم شناخت کافی از سیستم آبخوان می‌باشد. در این راستا تخمین تغذیه به عنوان آب ورودی به سیستم آب زیرزمینی و بنابراین مدیریت برداشت از آبخوان‌ها ضروری می‌باشد.

مدل‌های کامپیوتری جریان آب زیرزمینی، از ابزارهای مفید در مدیریت منابع آب زیرزمینی هستند. مدل‌های شبیه‌سازی در تمامی انواع مطالعات هیدروژیکی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. از بسیاری از این مدل‌ها می‌توان برای برآورد تغذیه بهره‌مند شد. مدل‌ها قادرند تا دید مناسبی را نسبت به کارکرد سیستم‌های هیدرولوژیکی به منظور شناسایی عوامل اثرگذار بر تغذیه فراهم کنند. از قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها می‌توان برای ارزیابی چگونگی تغییرات ایجاد شده در اقلیم، کاربرد آب، کاربری اراضی و سایر عوامل بر روی نرخ تغذیه، استفاده نمود (Healy, 2010).

۲-۲- تعاریف

تغذیه آب‌های زیرزمینی (Recharge) که با اصطلاحات مختلف نظیر نفوذ خالص (Net Infiltration)، زهکشی (Drainage) یا نفوذ عمقی (Percolation) توصیف می‌شود، معرف حرکت یا جابجایی آب در زیر منطقه ریشه بوده که به دو گروه پراکنده (Diffiuse) و متمرکز (Focused) قابل تقسیم می‌باشد (Scanlon et al., 2002). تغذیه پراکنده، تغذیه ناشی از آب بارش یا آبیاری بوده که به صورت یکنواخت از یک سطح بزرگ روی می‌دهد. در حالیکه تغذیه متمرکز، در برگیرنده تغذیه ناشی از گودی‌های توپوگرافی نظیر رودخانه و دریاچه می‌باشد.

راشتون (Rushton, 1997) تغذیه را به دو گروه واقعی (Actual) و پتانسیل (Potential) تقسیم بندی کرده است. تغذیه پتانسیل که از مطالعات منطقه غیراشباع یا آب‌های سطحی به دست می‌آید، نشان دهنده آب عبوری از منطقه ریشه بوده که ممکن است به سطح ایستابی برسد یا نرسد؛ در حالیکه تغذیه واقعی (برآورد شده از مطالعات منطقه اشباع) نشان دهنده آبی است که به سطح ایستابی رسیده است.

۳-۲- ارائه مدل مفهومی فرآیندهای تغذیه

توسعه مدل مفهومی فرآیندهای تغذیه یک مرحله مهم در مطالعه تغذیه می‌باشد. مدل مفهومی در ابتدای مطالعه باید توسعه داده شده و ضمن اصلاح با اطلاعات و آنالیزها در سیستم هیدرولوژی جدید تطبیق داده شود (Zheng and Bennet, 2002).

عوامل مؤثر در تهیه مدل مفهومی شامل زمین‌شناسی، هیدرولوژی، آب و هوا، توپوگرافی و پوشش گیاهی و کاربری زمین می‌باشد.

۲-۳-۲- آب و هوا

تغییرات جهانی آب و هوا تأثیر زیادی بر سیکل هیدرولوژی و منابع آب در بسیاری از نواحی جهان داشته است (Huntington., 2006).

کاهش قابل توجه بارش سالانه و افزایش میانگین دمای سالانه باعث تغییر بیلان آب و خاک و تغذیه آب زیرزمینی شده است که نشان دهنده پاسخ در برابر تغییرات آب و هوا می‌باشد. درک بهتر اثر تغییرات آب و هوا لازم بوده، زیرا در مقیاس جهانی یک سوم از جمعیت جهان مخصوصاً در نواحی خشک و نیمه خشک وابسته به آب‌های زیرزمینی می‌باشند. منابع آب زیرزمینی ممکن است عکس العمل قوی در برابر تغییرپذیری آب و هوا تحت شرایط تغییرات آب و هوایی داشته باشند. مقدار تأثیر تغییرات آب و هوا بر منابع آب زیرزمینی نیازمند پیش‌بینی دقیق تغییرات آب و هوا و تخمین دقیق تغذیه می‌باشد (Maxwell and Kollet, 2008).

اثر تغییرات آب و هوا بر بیلان آب و خاک و تغذیه به آبخوان در جنوب غربی اسپانیا ارزیابی شد. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد که تغییرات آب و هوا در این ناحیه تأثیر مهمی بر بیلان آب و خاک و تغذیه آب زیرزمینی در دوره مورد مطالعه داشته است (Touhami, 2015).

۲-۳-۳- خاک و زمین‌شناسی

نفوذپذیری مواد سطحی و زیرسطحی از جمله عوامل مؤثر در فرآیندهای تغذیه هستند. تغذیه در نواحی که خاک با دانه‌بندی درشت و نفوذپذیری بالا وجود داشته باشد، بیشتر بوده در حالیکه در مناطق با دانه‌بندی ریز و نفوذپذیری کم، میزان تغذیه نیز کمتر است.

خاک‌هایی که دانه‌بندی درشت‌تری دارند به دلیل نفوذپذیری بالای آن‌ها، آب را به سرعت انتقال می‌دهند. این انتقال سریع آب باعث می‌شود که آب قبل از اینکه توسط ریشه‌های گیاه جذب شود نفوذ کند و زهکشی شود. نفوذپذیری در تغذیه متمرکز دارای اهمیت می‌باشد. قابلیت نفوذپذیری بالا در بستر رودخانه تبادل میان آب زیرزمینی و سطحی را تسهیل می‌کند.

۲-۳-۴- توپوگرافی سطحی

توپوگرافی سطحی نقش مهمی در مکانیسم تغذیه متمرکز و پراکنده دارد. هر چه شیب در منطقه تند باشد میزان نفوذ کم شده و نرخ رواناب افزایش می‌یابد و در نهایت باعث ایجاد سیلاب می‌شوند. دلین

و همکاران (Delin and et al., 2005) نشان دادند که حتی با خاک‌های با نفوذپذیری بالا، گودی‌های ملایم در یک زمین کشاورزی ظاهراً یکنواخت، باعث ایجاد رواناب متمرکز در مناطق معینی می‌گردد، که نتیجه آن نفوذ و تغذیه قابل توجهی بزرگ‌تر نسبت به سایر مناطق می‌باشد. حتی با خصوصیات سطح یکنواخت، نرخ نفوذ در طول شیب‌های کم در یک تپه پرشیب افزایش می‌یابد (Dunne et al., 1991). برجستگی‌های سطحی، جهت و ارتفاع محدوده‌های کوهستان از فاکتورهای توپوگرافی هستند که بر روی فرآیند تغذیه تأثیر دارند (Stonestrom and Harrill, 2007).

۲-۳-۵- آب‌شناسی

مدل مفهومی فرآیندهای تغذیه به توضیح سیستم‌های جریان آب زیرزمینی و آب سطحی و چگونگی ارتباط این سیستم با هم نیاز دارد. اگر زون غیراشباع نازک باشد آب نفوذ یافته می‌تواند به سطح ایستابی برسد و در هر بارندگی نسبتاً بزرگ امکان رخ دادن تغذیه بیشتر می‌شود. اما وجود سطح ایستابی با عمق کم نسبت به تخلیه آب زیرزمینی توسط تعرق گیاهان حساس می‌باشد. همچنین از سطح ایستابی کم عمق تبخیر صورت گرفته و این آب به اتمسفر برمی‌گردد.

۲-۳-۶- پوشش گیاهی و کاربری زمین

پوشش گیاهی و استفاده از زمین تأثیر زیادی در فرآیندهای تغذیه دارد. نوع پوشش گیاهی و تراکم آن در هر منطقه روی الگوهای تبخیر و تعرق مؤثر می‌باشد. زمین دارای پوشش گیاهی معمولاً نرخ زیادی از تبخیر و تعرق (و بنابراین کاهش آب در دسترس برای تغذیه) نسبت به یک زمین پوشیده نشده در شرایط مشابه دارد. درختان توانایی کشیدن رطوبت از عمق چند متری را دارند. در مقابل، ریشه‌های کم عمق نمی‌توانند به آبی که به عمق نفوذ کرده دسترس داشته باشند. بنابراین نرخ تغذیه در مناطقی با پوشش گیاهی دارای ریشه‌های عمیق که در برخی مناطق نیمه خشک دیده می‌شوند، موقعی که

پوشش‌های گیاهی دائمی به وسیله پوشش گیاهی با ریشه‌های کم‌عمق جایگزین شوند زیاد می‌شود (Scanlon et al., 2005; Leblance et al., 2008).

فیشر و هیلی (Fisher and Healy, 2008) فرآیندهای تغذیه در دو زمین کشاورزی آبیاری شده در مناطق نیمه خشک را مطالعه کرده‌اند. همه‌ی تغذیه طبیعی در مدت فصول آبیاری اتفاق افتاده و به جریان برگشتی آبیاری نسبت داده شده است.

فانت (Faunt, 2009) از یک مجموعه مدل جریان آب زیرزمینی به منظور نشان دادن جریان برگشتی آبیاری که در مدت زمستان در دره مرکزی کالیفرنیا اتفاق افتاده است و همچنین در تغذیه‌ای که در مدت فصل رشد در نتیجه‌ی جریان آب برگشتی روی می‌دهد، استفاده کرده است.

۲-۴- چالش‌ها در تخمین تغذیه

۲-۴-۱- عدم اطمینان در تخمین تغذیه

تخمین‌های دقیق تغذیه همیشه مدنظر بوده، لیکن با هر میزان دقت، عدم اطمینان در هر تخمین تغذیه وجود خواهد داشت. یک مدل مفهومی نادرست می‌تواند منجر به کاربرد نادرست تکنیک‌های تخمین شده و تخمین تغذیه بی‌معنی گردد. این موضوع می‌تواند به دلیل عدم فهم کافی روش، یا عدم موفقیت در محاسبه‌ی دقیق تغییرپذیری زمانی و مکانی باشد. تایس (Thies, 1937) با استفاده از معادله‌ی دارسی نرخ تغذیه‌ی طبیعی بین ۳ تا ۷ میلی‌متر در سال را برای آبخوان دشت‌های مرتفع جنوبی تخمین زده است. مقادیر به دست آمده در سال‌های بعد با تکنیک‌های دقیق‌تر تغذیه‌ی بیشتری را تخمین زدند (Gurduk and Roe, 2009).

۲-۴-۲- مقیاس‌های زمانی و مکانی تخمین تغذیه

مقیاس مکانی در انتخاب نوع روش تغذیه مهم می‌باشد. در روش‌های احتمالاتی و سیستماتیک نرخ تغذیه نسبت به زمان متفاوت می‌باشد. اساساً برخی روش‌ها، برآوردهای نقطه‌ای را ارائه می‌دهند؛ این

روش‌ها جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به آلودگی به هنگام تصمیم‌گیری در رابطه با کاربری اراضی مفید هستند. به‌کارگیری این روش‌ها در نقاط بیشتر، می‌تواند یک میانگین واقعی از نرخ تغذیه ارائه نماید. روش‌های برآورد تغذیه به مقیاس‌های مکانی و زمانی وابسته هستند. برخی روش‌ها نظیر روش نوسان سطح ایستابی قادرند به ازای هر رخداد منفرد بارندگی، برآوردی از تغذیه را ارائه دهند. روش‌های ردیابی تنها برای تغذیه در دوره زمانی بین ردیابی استفاده می‌شوند. روش‌های بیلان آب، روش‌های داری و سایر روش‌ها را می‌توان با فواصل زمانی گوناگون نظیر روزانه، ماهانه و یا سالانه به کار برد. مدل‌های جریان آب زیرزمینی در گذشته، با این فرض که تغذیه مقدار ثابتی است توسعه یافتند؛ اما مدل‌های کاربردی فعلی معمولاً تغذیه را نسبت به زمان، متغیر فرض می‌کنند؛ اما برای دوره‌های ماهانه و سالانه ثابت نگه می‌دارند.

۲-۴-۳- هزینه

هزینه می‌تواند یک عامل محدود کننده برای به‌کارگیری برخی از روش‌های تخمین تغذیه باشد. در بعضی از روش‌ها یک بازدید صحرایی به منظور جمع‌آوری و تحلیل نمونه‌های آب و خاک کاربردی می‌باشد. سایر روش‌ها نیازمند یک پایش مداوم در طول یک سال و یا بیشتر می‌باشد. روش‌هایی که نیاز به هزینه‌های بالا و جمع‌آوری داده‌هایی زیادی دارند، در مطالعات تخمین تغذیه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۵- تکنیک‌های مختلف تخمین تغذیه

تکنیک‌های مختلف تغذیه را بر اساس مناطق یا زون‌های هیدرولوژیکی که اطلاعات مورد نیاز از آن‌ها به دست می‌آید، می‌توان به سه گروه تکنیک آب‌های سطحی، منطقه‌ی غیراشباع و منطقه اشباع تقسیم نمود (جدول ۱-۲). در هر کدام از این مناطق، تغذیه به روش‌های فیزیکی، ردیابی و مدل‌سازی عددی قابل تخمین می‌باشد. بر این اساس روش‌های تخمین تغذیه در زون اشباع شامل تکنیک‌های فیزیکی (بررسی نوسان سطح ایستابی، قانون داری)، تکنیک‌های ردیابی (سن سنجی آب زیرزمینی، ردیاب‌های

محیطی-کلراید) و تکنیک‌های مدل‌سازی عددی (مدل‌سازی آب زیرزمینی) می‌باشند. لازم به ذکر است که معادله بیلان اساس اکثر تکنیک‌ها در زون‌های سه گانه بوده که البته به صورت مجزا جهت تخمین تغذیه نیز استفاده می‌گردد (جعفری و رئیسی، ۱۳۹۰).

جدول ۱-۲: روش‌های مختلف تخمین تغذیه

| مدل‌سازی عددی | تکنیک‌های ردیابی | تکنیک‌های فیزیکی | تخمین تغذیه |
|----------------------------|---|--|--------------------------|
| مدل‌سازی بارش/رواناب | ردیاب حرارتی ردیاب‌های ایزوتوپی | بیلان آب کانال نشت‌سنج بررسی جریان پایه | مطالعات آب سطحی |
| مدل‌سازی منطقه غیراشباع | ردیاب‌های تاریخی ردیاب‌های کاربردی ردیاب‌های محیطی- کلراید | بیلان آب لایسیمتر سطوح بدون جریان قانون دارسی | مطالعه منطقه غیراشباع |
| مدل‌سازی آب زیرزمینی | سن‌سنجی آب‌های زیرزمینی ردیاب‌های محیطی-کلر | بررسی نوسانات سطح ایستابی قانون دارسی | مطالعات منطقه اشباع |

- روش مدل‌سازی آب زیرزمینی در تخمین تغذیه

روش مدل‌سازی عددی از جمله تکنیک‌های تخمین تغذیه بوده که در سه منطقه آب‌های سطحی، منطقه غیراشباع و منطقه اشباع قابل کاربرد می‌باشد. در روش مدل‌سازی ابتدا مدل مفهومی آبخوان تهیه شده و پس از ورود داده‌های مورد نیاز در نرم‌افزار، به مدل عددی تبدیل می‌گردد. سپس طی واسنجی مدل و فرآیندهای توسعه مدل مقدار تغذیه تخمین زده می‌شود.

مدل‌های هیدرولوژیکی، ابزار مفیدی برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی هستند. این مدل‌ها علاوه بر نرخ تغذیه، می‌توانند دیدگاهی نسبت به خصوصیات سیستم هیدرولوژیکی که بر نرخ تغذیه اثر می‌گذارد، ارائه دهند.

مدل‌های شبیه‌سازی در تمامی انواع مطالعات هیدرولوژیکی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند و از بسیاری از آن‌ها می‌توان برای برآورد تغذیه بهره‌مند شد. از قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها می‌توان برای ارزیابی چگونگی تأثیرات تغییرات ایجاد شده در اقلیم، کاربرد آب، کاربری اراضی و سایر عوامل بر روی نرخ تغذیه، استفاده نمود. برآورد تغذیه را می‌توان به صورت غیرمستقیم از طریق سایر مدل‌ها نیز به دست آورد. به عنوان مثال، تغذیه یکی از پارامترها در مدل‌های جریان آب زیرزمینی است که برای ارتفاع هیدرولیکی (سطح آب زیرزمینی) حل می‌شوند. در واقع برآورد تغذیه می‌تواند از طریق فرآیند واسنجی مدل که در آن تغذیه و سایر پارامترها تنظیم می‌شوند به دست آید؛ به گونه‌ای که سطح آب شبیه‌سازی شده با سطح آب اندازه‌گیری شده مطابقت داشته باشد. هر شبیه‌سازی را که نزدیک‌ترین تطابق را ارائه دهد، بهترین تناسب (best fit) می‌نامند و مقدار تغذیه استفاده شده در این شبیه‌سازی، برآورد تغذیه به دست آمده توسط مدل است. با استفاده از مدل‌ها، هم تغذیه پراکنده و هم تغذیه متمرکز را می‌توان برآورد نمود. همانند سایر روش‌ها مقیاس‌های مکانی و زمانی برآورد تغذیه برای مدل‌های مختلف و کاربردهای گوناگون مدل متفاوت است. به هنگام کاربرد مدل حوضه آبریز و یا جریان آب زیرزمینی، می‌توان تغذیه را در دامنه شبیه‌سازی نسبت به مکان، یکنواخت و یا متغیر فرض نمود. در مقیاس زمانی نیز تغذیه به صورت سالانه، ماهانه و یا روزانه در نظر گرفته می‌شود، البته ممکن است که تغذیه نسبت به زمان ثابت در نظر گرفته شود. مدل‌های جریان آب زیرزمینی به منظور پیش‌بینی واکنش آبخوان‌ها به ارتفاع هیدرولیکی (سطح آب زیرزمینی)، و جریان‌های ورودی و خروجی یک آبخوان و تنش‌های طبیعی و مصنوعی ایجاد شده توسط انسان استفاده می‌شوند. این مدل‌ها ابزار بسیار مهمی برای مدیریت منابع و محیط زیست محسوب می‌شوند. اگر مقدار واقعی سطح آب و تخلیه آب زیرزمینی

در دسترس باشد، در آن صورت می‌توان طی فرآیند واسنجی مدل‌های جریان آب زیرزمینی تغذیه را نیز به دست آورد (Healy, 2010)

استورتز و بردباری (Stoertz & Bradbury, 1989) روشی را شرح دادند که در آن از مدل جریان آب زیرزمینی برای محاسبه تغذیه آب زیرزمینی استفاده شده است. ابتدا نقشه سطح ایستابی به صورت دستی ترسیم و سپس بر روی آن یک شبکه دو بعدی افقی قرار داده شد. ارتفاع سطح ایستابی در نزدیک محل هر گره، به همان گره اختصاص داده شد. سپس از مادفلو به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده گردید. بر اساس نتایج، نرخ تغذیه محاسبه شده با هدایت هیدرولیکی، رابطه خطی نشان داده است.

باور و ماستین (Baver & Mastin, 1997) از مدل به منظور شبیه‌سازی جزئیات بیلان آبی سه حوضه کوچک در زمین‌های پوشیده از خاک‌های یخچالی در واشنگتن استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصله، مقدار متوسط تغذیه سالانه یخرفت‌ها حدود ۳۷ تا ۱۷۲ میلی‌متر برآورد گردید.

تیدمن و همکاران (Tideman et al., 1997) مطالعه مدل‌سازی حوضه آب زیرزمینی منطقه دریاچه میروور انگلستان را به منظور توسعه درکی از گستره سه بعدی حوضه و تعیین مؤلفه‌های بیلان آبی نظیر تغذیه انجام دادند. نتایج نشان داد حوضه آب زیرزمینی دریاچه میروور، بسیار بزرگ‌تر از حوضه آب سطحی بوده و چنانچه مدل آب زیرزمینی بر اساس مرزهای حوضه آب سطحی ساخته شود، در آن صورت مقدار تغذیه حدود ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

بلوشا (Baalousha, 2005) با استفاده از مدل میزان تغذیه آب زیرزمینی ناشی از بارندگی در نوار غزه در فلسطین را حدود ۴۳ میلیون مترمکعب برآورد کرد. درپیس و همکاران (Dripps et al., 2006) نشان دادند که چگونه مدل در ترکیب با یک کد برآورد پارامتر می‌تواند به منظور برآورد تغذیه در حوضه کوچکی واقع در ویسکانسین شمالی مورد استفاده قرار گیرد. واسنجی مدل، بر اساس تطبیق جریان پایه شبیه‌سازی شده، با میانگین سالانه جریان پایه تعیین شده از روش جداسازی هیدروگراف رودخانه‌ای در شرایط پایدار انجام شد.

نرخ تغذیه آب زیرزمینی به عنوان شرط مرزی تغذیه برای مدل آب زیرزمینی منطقه‌ای در آلمان مورد استفاده قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد تغذیه محاسبه شده، با تنظیم شاخص جریان پایه برای مناطقی که رواناب تحت تأثیر شیب و ورود کم آب قرار دارد، بهبود می‌یابد. با استفاده از مجموعه تنظیم شده شاخص جریان پایه، متوسط نرخ تغذیه آب زیرزمینی منطقه حدود ۱۷۰ میلی‌متر در سال می‌باشد (Herrmann et al., 2009).

تغذیه منطقه‌ای با استفاده از سه روش مختلف مدل‌سازی در حوضه نیمه خشک اکاناگان (Okanagan)، بریتیش کلمبیا مقایسه شده است. میانگین تغذیه سالانه پیش‌بینی شده توسط مدل منطقه‌ای از مقدار صفر تا ۱۸۶ میلی‌متر در سال متفاوت است (Ligget & Allen, 2010).

زیو و همکاران (Xu et al., 2010) در تحقیقی در چین نشان دادند که نشت آب از کانال و نفوذ عمقی آب آبیاری به ترتیب ۴۸ درصد و ۴۴ درصد از تغذیه سالانه آب‌های زیرزمینی را تشکیل می‌دهند. سلطانی و عابدی (۱۳۸۹)، تغذیه به زیر حوضه کرون در منطقه اصفهان را با استفاده از مدل عددی تخمین زدند. بر این اساس میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی در این زیر حوضه ۴۸/۰۷ میلیون مترمکعب می‌باشد.

لاریجانی و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی تخمین تغذیه با استفاده از مدل عددی در دشت هشتگرد پرداختند. نتایج نشان داد که آبیاری با راندمان‌های ۶۰ و ۸۰ درصد به ترتیب موجب تغذیه به مقدار ۲/۶۳ و ۱/۶ متر طی ۱۰ سال شد.

قشقایی نژاد و چیت‌سازان (۱۳۹۶)، تغذیه به آبخوان آزاد دشت گلگیر استان خوزستان را با استفاده از مدل عددی برآورد کردند. میانگین تغذیه سالانه دوره هشت ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۲) برای سه روش لاگ چاه‌های مشاهده‌ای، خط پوش مستقیم و روش سونداژ الکتریکی قائم به ترتیب برابر ۱۸۶/۶، ۱۹۹/۸ و ۱۷۹/۳ میلی‌متر در سال تخمین زده شد.

مدل‌های ترکیبی حوضه آبریز و جریان آب زیرزمینی ابزار مفیدی برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی محسوب می‌شوند. روش یکپارچه و ترکیبی، کل هیدرولوژی یک سیستم حوضه آبریز و آبخوان را در نظر می‌گیرد. نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد تغذیه محاسبه شده، ممکن است نسبت به زمان و مکان متغیر باشد (Healy, 2010).

فصل سوم

روش انجام تحقیق

۳-۱- مقدمه

هدف از انجام تحقیق حاضر تخمین تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس با استفاده از مدل سازی عددی جریان آب زیرزمینی بوده که طی مراحل زیر انجام شده است:

الف- تعیین هدف مدل سازی

ب- جمع آوری داده‌ها و تفسیر اطلاعات

پ- ساخت مدل مفهومی

ت- انتخاب مدل ریاضی و کد کامپیوتری

ث- ایجاد مدل عددی که شامل شبکه بندی مدل، تعیین مرزهای هیدرولوژیکی، تعیین پارامترهای هیدرولیکی سفره و ارزیابی منابع تغذیه و تخلیه می باشد.

ج- واسنجی، صحت سنجی و آنالیز حساسیت مدل

چ- بررسی تغییرات مکانی و زمانی تغذیه

مراحل انجام تحقیق در ادامه با جزئیات بیشتر ارائه شده است.

الف- تعیین هدف مدل سازی

با توجه به موضوع تحقیق، هدف از مدل سازی عددی آبخوان سرخس، برآورد تخمین تغذیه آب زیرزمینی و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن با استفاده از مدل عددی می باشد.

ب- جمع آوری داده و تفسیر اطلاعات

مدل مفهومی بر اساس آمار و اطلاعات جمع آوری شده موجود در هر دشت تهیه می شود، لذا یکی از مهم ترین مراحل مدل سازی، جمع آوری داده های لازم می باشد. بنابراین هر چه آمار و اطلاعات موجود از دقت و صحت بیشتری برخوردار باشند، مدل تهیه شده خطای کمتری خواهد داشت. در مدل سازی

آبخوان این داده‌ها شامل تهیه نقشه زمین‌شناسی، عکس ماهواره‌ای منطقه، نقشه توپوگرافی، لاگ چاه-های اکتشافی، داده چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری، میزان بارش، خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان و نقشه سنگ کف آبخوان جهت شناخت هیدروژئولوژیکی سیستم آبخوان می‌باشد.

- ترسیم نقشه پایه زمین‌شناسی

برای تهیه نقشه پایه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی سرخس با مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ (شرکت ملی نفت ایران، ۱۹۸۳) استفاده گردید. لایه‌های اطلاعاتی موجود در نقشه، واحدهای لیتولوژی و ساختاری موجود در نقشه در محیط Arc GIS ترسیم شد.

- نقشه توپوگرافی سطح و سنگ کف آبخوان

یکی از اطلاعات مورد نیاز در ساخت مدل، داشتن ضخامت لایه می‌باشد. در این تحقیق لایه توپوگرافی سطحی آبخوان با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) منطقه تهیه شد. همچنین نقشه سنگ کف آبخوان نیز بر اساس درون‌یابی نتایج حاصل از لاگ حفاری‌های انجام شده در منطقه در محیط Arc GIS تهیه شد.

- داده های کمی آب زیرزمینی و هواشناسی

سطح آب زیرزمینی در ۴۶ حلقه پیزومتر حفر شده در آبخوان سرخس به صورت ماهانه توسط آب منطقه‌ای اندازه گیری می‌شود. در این تحقیق از داده‌های سطح آب زیرزمینی ۳۸ حلقه پیزومتر با سری زمانی کامل‌تر از سال ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۶ استفاده شده است. همچنین داده‌های بارش و دمای هوا در ایستگاه هواشناسی سرخس مورد استفاده قرار گرفته است. برای ترسیم هیدروگراف معرف آبخوان ابتدا با استفاده از نرم افزار Arc GIS نقشه تیسن آبخوان سرخس ترسیم گردید و سپس با استفاده از نقشه

تیسین منطقه، مساحت هر پلی گون محاسبه شد و برای ترسیم هیدروگراف معرف آبخوان سرخس مورد استفاده قرار گرفت.

پ- انتخاب مدل ریاضی و کد کامپیوتری

انتخاب کد کامپیوتری و مدل ریاضی بستگی به هدف ساخت مدل و کاربرد مدل دارد. در این تحقیق تخمین تغذیه به آب زیرزمینی با استفاده از کد مادفلو (MODFLOW-2005) در نرم افزار فریوات (FREEWAT) انجام شده است. مادفلو (MODFLOW) یکی از پرکاربردترین کدهای کامپیوتری شبیه سازی جریان آب زیرزمینی به دلیل منبع باز (Open-Source) بودن و کاربرد وسیع می باشد. این نرم افزار دارای ساختار مدولار و یادگیری آسان می باشد (Cheng and Bear, 2010).

نرم افزار فریوات (FREEWAT) که نرم افزاری برای مدیریت منابع آب زیرزمینی بوده و امکان شبیه سازی کل چرخه هیدرولوژیکی را فراهم می کند در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. نرم افزار فریوات (FREEWAT) یک مدل هیدرولوژیکی را با QGIS GIS ادغام می کند که در آن داده ها از طریق یک سیستم مدیریت پایگاه داده (DBMS) مدیریت می شوند. مدل هیدرولوژیکی موجود در فریوات (FREEWAT) اجازه می دهد تا کل چرخه آب (از جمله روابط سطح و آب زیرزمینی) یا زیر مجموعه های آن را براساس اطلاعات مربوط به آب و هوا، هیدرولوژیکی، هیدرودینامیکی و داده های زمین، شبیه سازی کند.

در فریوات (FREEWAT)، شبیه سازی چرخه آب با استفاده از دو نسخه MODFLOW (MODFLOW-2005) و (MODFLOW-OWHM) که در پلت فرم فریوات (FREEWAT) یکپارچه شده است، انجام می گردد (Rossetto et al., 2018).

ت- مدل مفهومی

منابع تغذیه کننده دشت شامل بارش، آب زیرزمینی ورودی و آب برگشتی از چاه های بهره برداری می باشد. عمده تخلیه از منطقه نیز توسط چاه های بهره برداری صورت می گیرد.

برای ساخت مدل مفهومی آبخوان، مطالعات و گزارش‌های موجود در دشت سرخس جمع-آوری شد. عکس‌های ماهواره‌ای و نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ سرخس وارد نرم افزار GIS شده و مرز آبخوان مشخص گردید. نقشه توپوگرافی و سنگ کف منطقه با توجه به اطلاعات لاگ‌های حفاری و نقشه ارتفاعی رقومی (DEM) در نرم افزار GIS رسم شد. نقشه هم‌پتانسیل نیز بر اساس اطلاعات چاه‌های پیزومتری ترسیم شد و با استفاده از این نقشه محل‌های ورودی و خروجی آبخوان مشخص شد.

بیان شامل توازن ورودی‌ها و خروجی‌ها در سیستم آب زیرزمینی می‌باشد. در این مطالعه برای ارزیابی بیان آب زیرزمینی از معادله زیر استفاده شده است:

$$\Delta S^{gw} = R - Q^{gw}_{off} + Q^{gw}_{on} - Q^{bf} - ET^{gw}$$

R: تغذیه به آب زیرزمینی، Q^{gw}_{off} : جریان زیرزمینی خروجی، Q^{gw}_{on} : جریان زیرزمینی ورودی، Q^{bf} : زهکشی از آب زیرزمینی، ET^{gw} : تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی و ΔS^{gw} تغییرات به وجود آمده در ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد.

تغییرات در ذخیره آبخوان (ΔS) نیز از معادله زیر محاسبه شده است.

$$\Delta S = \pm A \cdot \Delta h \cdot S_y$$

A مساحت منطقه بیان، Δh متوسط افت سالیانه (متر) و S_y آبدهی ویژه آبخوان می‌باشد.

ث- مدل عددی

پس از انتخاب نرم افزار و ساخت مدل مفهومی، مدل عددی آبخوان با استفاده از مدل مادفلو (MODFLOW-2005) در نرم‌افزار فری‌وات (FREEWAT) طی مراحل زیر طراحی شد:

- طراحی شبکه مدل

اولین مرحله در طراحی مدل‌های عددی شبکه بندی مدل می‌باشد. در مدل مادفلو شبکه-بندی توسط خطوط موازی عمود بر هم انجام می‌شود. در این بخش محدوده مورد مطالعه با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژی، مساحت آبخوان و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای به سلول‌هایی با ابعاد 500×500 تقسیم‌بندی شد.

- تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه

تعیین شرایط مرزی نیز یکی مراحل مهم در مدل‌سازی آب زیرزمینی می‌باشد که بایستی مرزهای ورودی و خروجی به آبخوان تعیین شود. مرزهای ورودی و خروجی آبخوان با استفاده از نقشه هم‌پتانسیل و جهت جریان مشخص شده است. بدین منظور مرزهای ورودی شرقی و غربی آبخوان با استفاده از بسته مرز با بار هیدرولیکی عمومی (GHB) شبیه‌سازی گردید. تغذیه به آبخوان آبرفتی که از دو بخش بارش و آب برگشتی رخ می‌دهد، با استفاده از بسته تغذیه (RCH) شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی موقعیت چاه‌های بهره‌برداری نیز توسط بسته چاه (WEL) صورت گرفت.

- انتخاب دوره‌ها و گام‌های زمانی

پارامترهای زمانی بر اساس اهداف مدل، اطلاعات و شرایط آبخوان تعیین می‌شود که از مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به دوره‌های تنش و گام‌های زمانی اشاره کرد. در این تحقیق برای یک دوره دو ساله از شهریور ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۶، ۲۴ دوره تنش با گام زمانی یک ماهه انتخاب شده است. هرچه گام زمانی کوتاه‌تر باشد حجم محاسبات بالاتر و دقت مدل‌سازی بیشتر خواهد بود.

ج- واسنجی، آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی مدل

بعد از انجام مراحل ذکر شده، مدل برای بازه‌ی دوساله اجرا شده است. مقایسه نتایج حاصل از بیلان مدل و مقادیر ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در پی‌زومترها، مهم‌ترین ابزار در

جهت بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی الگوی جریان آب زیرزمینی می‌باشد. در این تحقیق واسنجی مدل به روش سعی و خطا جهت نزدیک نمودن نتایج مدل به شرایط واقعی انجام شده است. پارامترهایی با حساسیت بیشتر مشخص شده و تغییرات آنها در بازه معقول جهت واسنجی مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از کالیبراسیون مدل، صحت‌سنجی آن برای سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ انجام شد. در طول دوره صحت‌سنجی پارامترهای کالیبره شده ثابت بوده و تنها تنش‌های وارد بر سیستم تغییر می‌کنند.

چ- بررسی تغییرات مکانی و زمانی تغذیه

بعد از کالیبراسیون مدل مقدار تغذیه (بیان آبخوان) و تغییرات زمانی و مکانی تغذیه به آبخوان بررسی گردید. بدین منظور مقدار نهایی تغذیه کالیبره شده استخراج و تغییرات آن در بخش‌های مختلف و زمانهای مختلف در طول دوره مدل‌سازی بررسی و گزارش گردید.

فصل چهارم

تخمین تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس

۴-۱- مقدمه

در این تحقیق به منظور تخمین تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس، مدل سازی عددی انجام شده است. موضوعاتی که در این فصل ارائه شده است، شامل مدل مفهومی، مدل عددی، واسنجی، صحت سنجی و بررسی تغییرات مکانی و زمانی تغذیه می باشد.

۴-۲- مدل مفهومی آبخوان سرخس

هدف از ساخت مدل مفهومی ساده تر کردن شرایط واقعی منطقه ی مورد بررسی و سازمان دهی بهتر داده های صحرائی به منظور تجزیه و تحلیل ساده تر آن می باشد (Anderson and Woessner, 1992). هر چه مدل مفهومی دقت بیشتری داشته باشد و به شرایط طبیعی نزدیک تر باشد مدل عددی نیز از دقت و صحت بیشتر برخوردار خواهد بود. برای ساخت مدل مفهومی دشت ابتدا نقشه زمین شناسی دشت وارد نرم افزار GIS گردید و شرایط مرزی آبخوان مشخص شد. سپس به بررسی ویژگی های هیدروژئولوژی و هیدرولوژی منطقه پرداخته شد. مدل مفهومی آبخوان سرخس در دو بخش شامل هندسه آبخوان و هیدرولیک آبخوان به شرح زیر توصیف شده است.

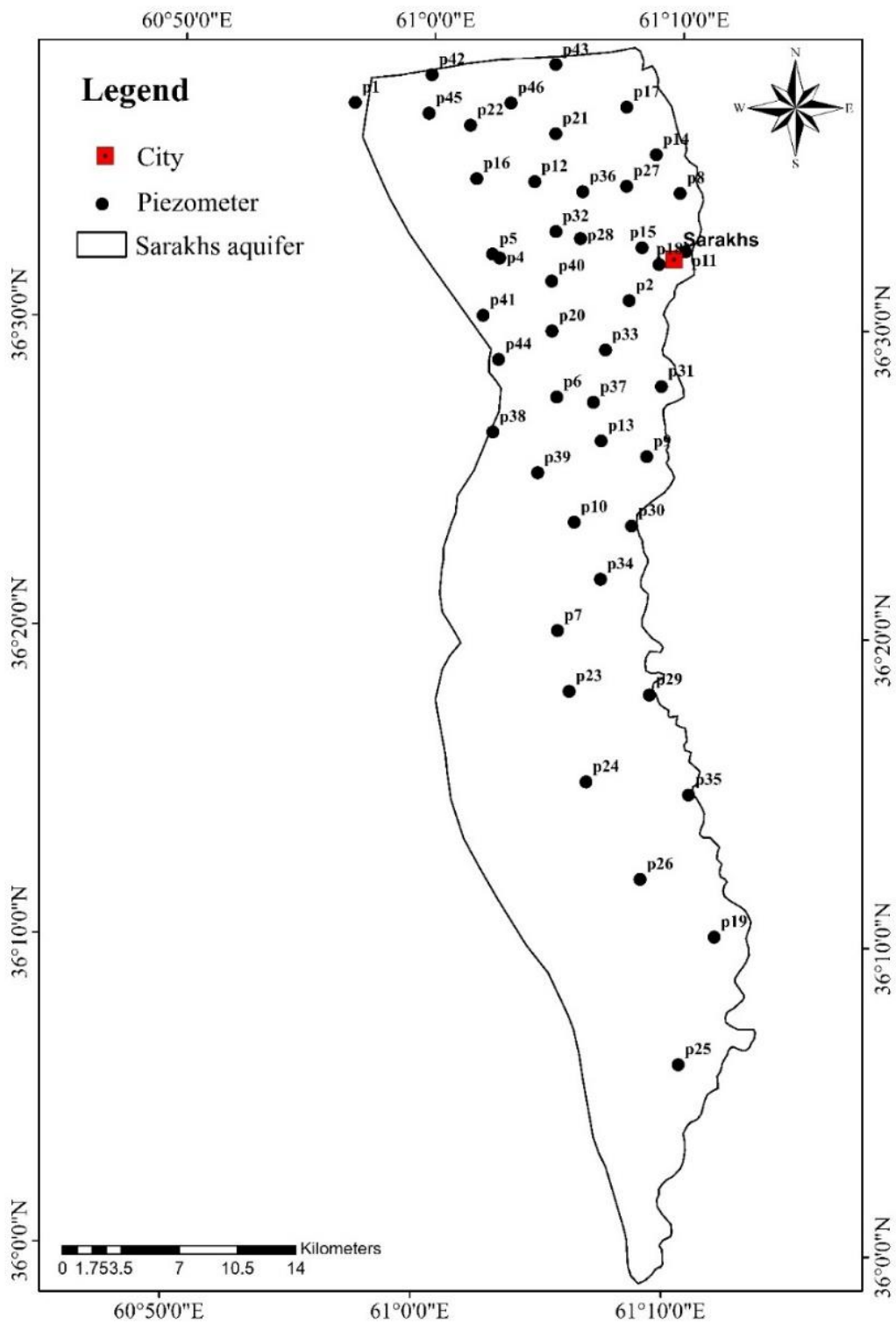
۴-۲-۱- هندسه آبخوان

با توجه به مطالعات ژئوفیزیک صورت گرفته در منطقه و بررسی خصوصیات زمین شناسی، آبخوان سرخس از نوع آزاد می باشد. آبخوان سرخس نسبتاً کشیده با طول حدود ۷۴ کیلومتر و عرض متوسط حدود ۱۵ کیلومتر می باشد. مرز شرقی آبخوان منطبق بر رودخانه هریرود (مرز ایران و ترکمنستان) و مرز شمالی آن خط مرزی ایران-ترکمنستان می باشد. حد غربی آبخوان منطبق بر حد کوه و دشت بوده و مرز جنوبی آن با باریک شدگی تا محل پل خاتون ادامه می یابد. سازند خانگیران به عنوان سنگ کف آبخوان معرفی شده است (هیدروتک توس، ۱۳۹۳). متوسط ضخامت آبرفت در دشت سرخس حدود ۲۲۰ متر می باشد.

۴-۲-۲- هیدرولیک آبخوان

۴-۲-۲-۱- شبکه پیزومتری

در دشت سرخس از سال ۱۳۴۶ اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی شروع شده، ولی شبکه اندازه‌گیری فعلی دشت سرخس در سال ۱۳۶۷ با حفر ۱۵ حلقه چاه مشاهده‌ای ایجاد شده و در سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۸ تعداد ۱۵ حلقه چاه مشاهده‌ای جدید دیگر نیز در این دشت حفر گردید. با توجه به احداث سد دوستی بر روی رودخانه هریرود و تغییر شرایط هیدرولوژیکی و تغذیه‌ای دشت سرخس، در پی انجام مطالعات نیمه تفصیلی دشت سرخس و لزوم بررسی دقیق‌تر وضعیت هیدروژئولوژیکی آن در سال ۱۳۸۳ پیشنهاد حفر ۲۰ حلقه چاه مشاهده‌ای اکتشافی جدید ارائه شد که در سال ۱۳۸۴ حفر گردید. در حال حاضر شبکه رفتار سنجی جدید دشت شامل ۴۶ حلقه پیزومتر است که اندازه‌گیری ماهیانه در آن‌ها صورت می‌گیرد. تراکم شبکه پیزومتری در آبخوان سرخس در هر ۲۵ کیلومترمربع آبخوان ۱/۸۵ است (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۳). موقعیت پیزومترها در شکل (۴-۱) و مشخصات آن‌ها در جدول (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: موقعیت پیزومترهای حفر شده در آبخوان سرخس

جدول ۴-۱: مشخصات پیزومترهای حفر شده در آبخوان سرخس

| ردیف | نام پیزومتر | نام اختصاری | UTM X | UTM Y | ارتفاع نشانه (m) | مساحت پلی گون تیسین (km ²) |
|------|----------------------------|-------------|--------|---------|------------------|--|
| 1 | نوار مرزی ۱۴ | P1 | 316424 | 4054512 | 257.88 | 0 |
| 2 | پشت فرودگاه قدیم ۷ | P2 | 332848 | 4042633 | 278.86 | 13.95 |
| 3 | اراضی حسن آباد wa | P4 | 325084 | 4045190 | 273.44 | 6.76 |
| 4 | اراضی حسن آباد wb | P5 | 324655 | 4045424 | 272.68 | 16.30 |
| 5 | اول کچولی | P6 | 328501 | 4036848 | 291.54 | 12.35 |
| 6 | ایستگاه کنترل گاز | P7 | 328548 | 4022853 | 348.17 | 51.55 |
| 7 | بابالقمان | P8 | 335901 | 4049057 | 269.58 | 8.57 |
| 8 | بعد از عاصف آباد چاه شماره | P9 | 333898 | 4033275 | 295.12 | 11.77 |
| 9 | بعد از قوش سربزی عیسی مخت | P10 | 329550 | 4029350 | 305.21 | 23.50 |
| 10 | بلوار امام رضا | P11 | 336223 | 4045565 | 273.73 | 5.01 |
| 11 | بین تام مختار و کندکلی | P12 | 327184 | 4049761 | 269.83 | 11.24 |
| 12 | بین کچولی و قوش عظیم | P13 | 331170 | 4034220 | 292.43 | 11.93 |
| 13 | پشت پاسگاه سه گوش | P14 | 334477 | 4051375 | 268.21 | 9.70 |
| 14 | پشت گاز رسانی | P15 | 333621 | 4045802 | 276.97 | 8.77 |
| 15 | تام رسول | P16 | 323711 | 4049942 | 262.99 | 24.89 |
| 16 | چاه شیلات چاه شماره ۹ | P17 | 332705 | 4054228 | 262.11 | 19.80 |
| 17 | چاه آب شرب | P18 | 334636 | 4044798 | 277 | 5.36 |
| 18 | حاجی جهند | P19 | 337938 | 4004477 | 346.75 | 36.80 |
| 19 | دامپروری ۲ | P20 | 328220 | 4040808 | 285.69 | 11.96 |
| 20 | راه جنگل چاه شماره ۱۰ | P21 | 328441 | 4052639 | 264.93 | 13.40 |
| 21 | روستای یاس تپه چاه شماره | P22 | 323337 | 4053146 | 263.75 | 10.13 |
| 22 | شماره ۱ جاده دولت آباد به | P23 | 329244 | 4019211 | 331.03 | 47.51 |
| 23 | شماره ۲ جاده دولت آباد به | P24 | 330258 | 4013785 | 405.68 | 74.63 |
| 24 | شیرتپه | P25 | 335783 | 3996833 | 363.63 | 100.08 |
| 25 | صمدآباد | P26 | 333499 | 4007943 | 353.72 | 73.99 |

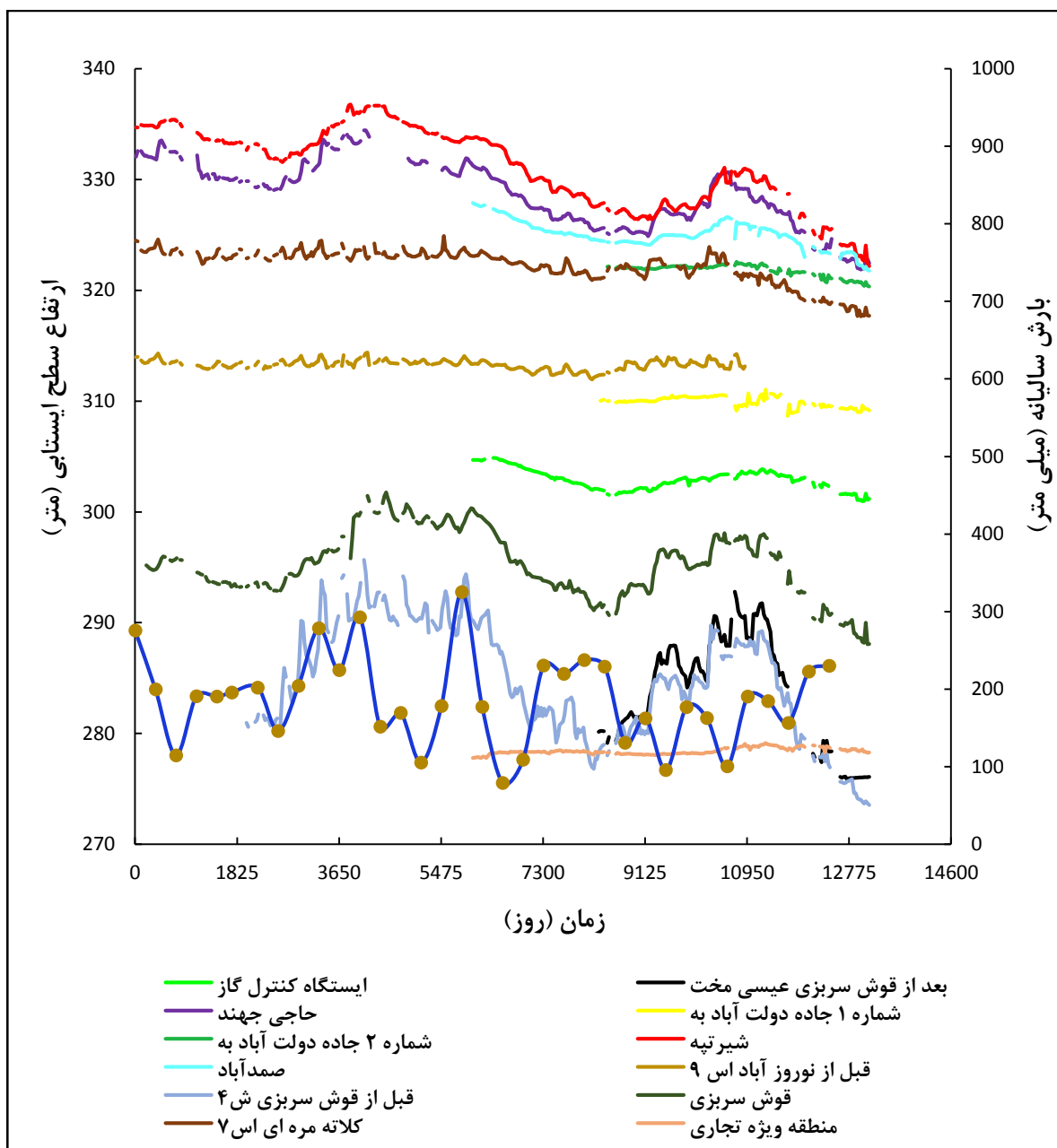
ادامه جدول ۴-۱: مشخصات پیزومترهای حفر شده در آبخوان سرخس

| ردیف | نام پیزومتر | نام اختصاری | UTM X | UTM Y | ارتفاع نشانه (m) | مساحت پلی گون تیسن (km ²) |
|------|--------------------------|-------------|--------|---------|------------------|---------------------------------------|
| 26 | قبرستان تپه میر احمد | P27 | 332695 | 4049486 | 274.44 | 10.13 |
| 27 | قبرستان تپه عباس آباد | P28 | 329921 | 4046354 | 275.11 | 8.57 |
| 28 | قبل از نوروز آباد اس ۹ | P29 | 334051 | 4018988 | 318.84 | 21.01 |
| 29 | قبل از قوش سربزی شماره ۴ | P30 | 332993 | 4029122 | 305.48 | 9.90 |
| 30 | قلعه نو چاه ۶ | P31 | 334780 | 4037480 | 286.43 | 11.11 |
| 31 | قوش چاکر | P32 | 328450 | 4046773 | 274.83 | 7.57 |
| 32 | قوش خزانی | P33 | 331425 | 4039673 | 281.67 | 12.03 |
| 33 | قوش سربزی | P34 | 331123 | 4025930 | 313.28 | 20.43 |
| 34 | کلاته موری اس ۷ | P35 | 336406 | 4013001 | 330.93 | 21.14 |
| 35 | مسیر خط انتقال آب | P36 | 330068 | 4049159 | 266.79 | 9.10 |
| 36 | معدن شن و ماسه ۳ | P37 | 330704 | 4036539 | 286.69 | 8.42 |
| 37 | مقابل منطقه ویژه اقتصادی | P38 | 324670 | 4034760 | 318.92 | 11.09 |
| 38 | منطقه ویژه تجاری | P39 | 327360 | 4032320 | 307.39 | 28.90 |
| 39 | نزدیک فرودگاه خط لوله ۷ | P40 | 328202 | 4043802 | 274.40 | 11.21 |
| 40 | نزدیک فنس های فرودگاه | P41 | 324087 | 4041753 | 287.13 | 9.95 |
| 41 | نوار مرزی چاه شماره ۱۲ | P42 | 321029 | 4056174 | 260 | 8.06 |
| 42 | نوار مرزی چاه شماره ۱۱ | P43 | 328444 | 4056794 | 262.10 | 10.48 |
| 43 | نهر انقلاب | P44 | 325017 | 4039104 | 298.47 | 7.94 |
| 44 | یاز تپه چاه شماره ۲ | P45 | 320848 | 4053867 | 258.05 | 23.37 |
| 45 | یاس تپه راه جنگل | P46 | 325760 | 4054481 | 260.56 | 13.18 |

۴-۲-۳- سری زمانی

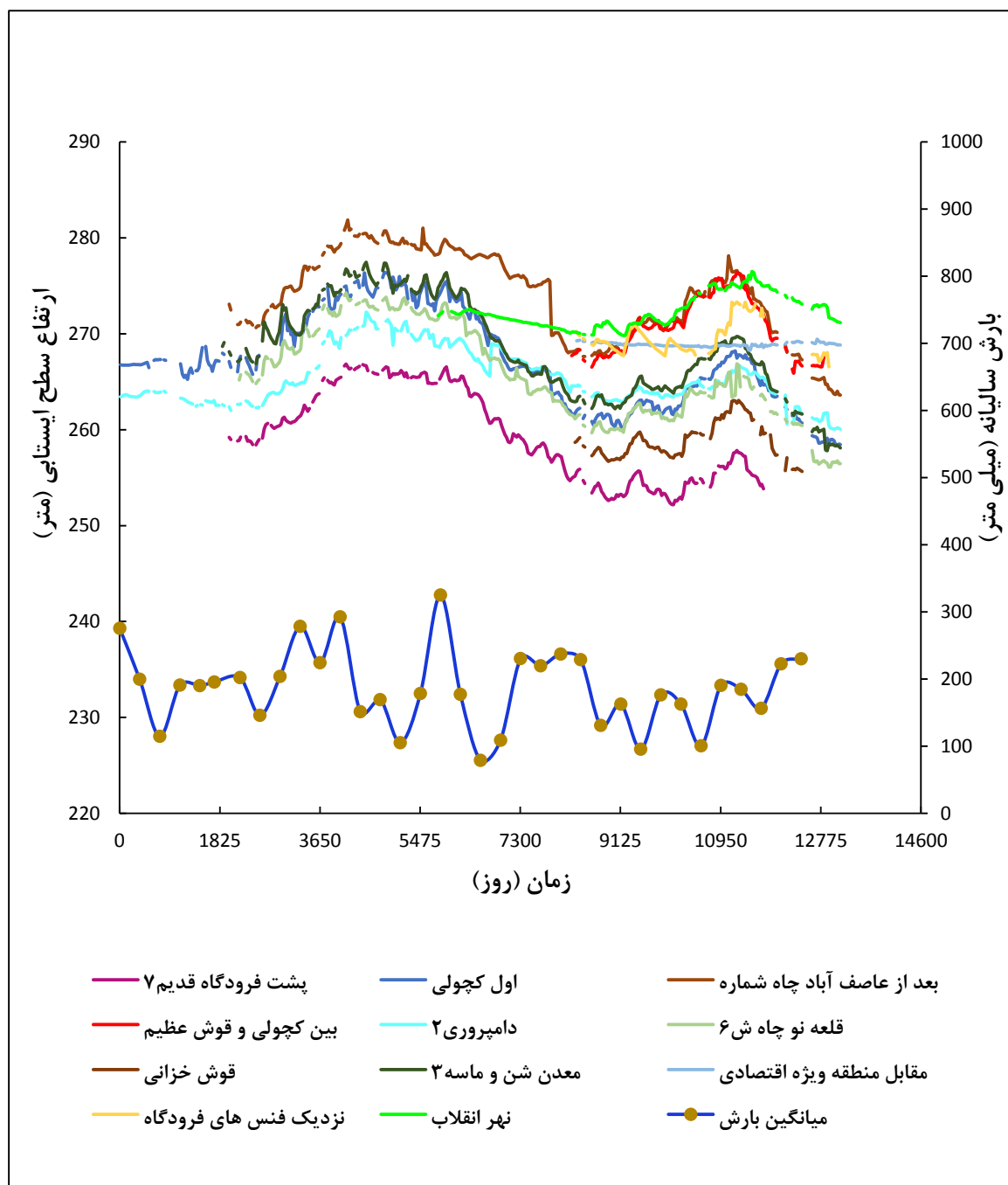
به منظور بررسی نحوه تغییرات سطح ایستابی آبخوان سرخس در نقاط مختلف آبخوان از پیزومترهای موجود در این محدوده استفاده شده است. به این منظور از داده‌های ۳۸ پیزومتر که سری زمانی کامل تری داشته و معرف آبخوان سرخس می‌باشند استفاده شده است. عمق سطح ایستابی در پیزومترها از اختلاف تراز و سطح آب در هر پیزومتر محاسبه می‌شود. محدوده آماری این پیزومترها از سال ۱۳۶۱ تا سال ۱۳۹۶ می‌باشد که در بعضی از پیزومترها وقفه آماری نیز وجود دارد.

نوسانات آب زیرزمینی از عوامل مختلفی تأثیر می‌پذیرد. این عوامل هم در کوتاه مدت و هم در بلندمدت می‌توانند بر سطح آب زیرزمینی تأثیرگذار باشند. از این عوامل می‌توان به مواردی مانند تغییرات اقلیم، فعالیت انسانی و تبخیر و تعرق اشاره کرد. به منظور بررسی رفتار آبخوان سرخس نمودار ارتفاع سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای در سال‌های ۱۳۶۱ تا ۱۳۹۶ ترسیم شده است. از آنجایی که تعداد چاه‌های مشاهده‌ای دشت سرخس نسبتاً زیاد است، با توجه به مقادیر ارتفاع آب در پیزومترها، به ۳ گروه دسته بندی می‌شوند. شکل (۴-۲) هیدروگراف پیزومترهایی را نشان می‌دهد که سطح ایستابی در آنها بیشتر از ۲۸۰ متر می‌باشد. این پیزومترها در ابتدای ورودی دشت قرار دارند (گروه اول). روند نزولی سطح ایستابی در پیزومترهای این گروه مشاهده شده، لیکن در مقایسه با گروه دوم و سوم تغییرات سطح ایستابی در آنها کمتر می‌باشد.



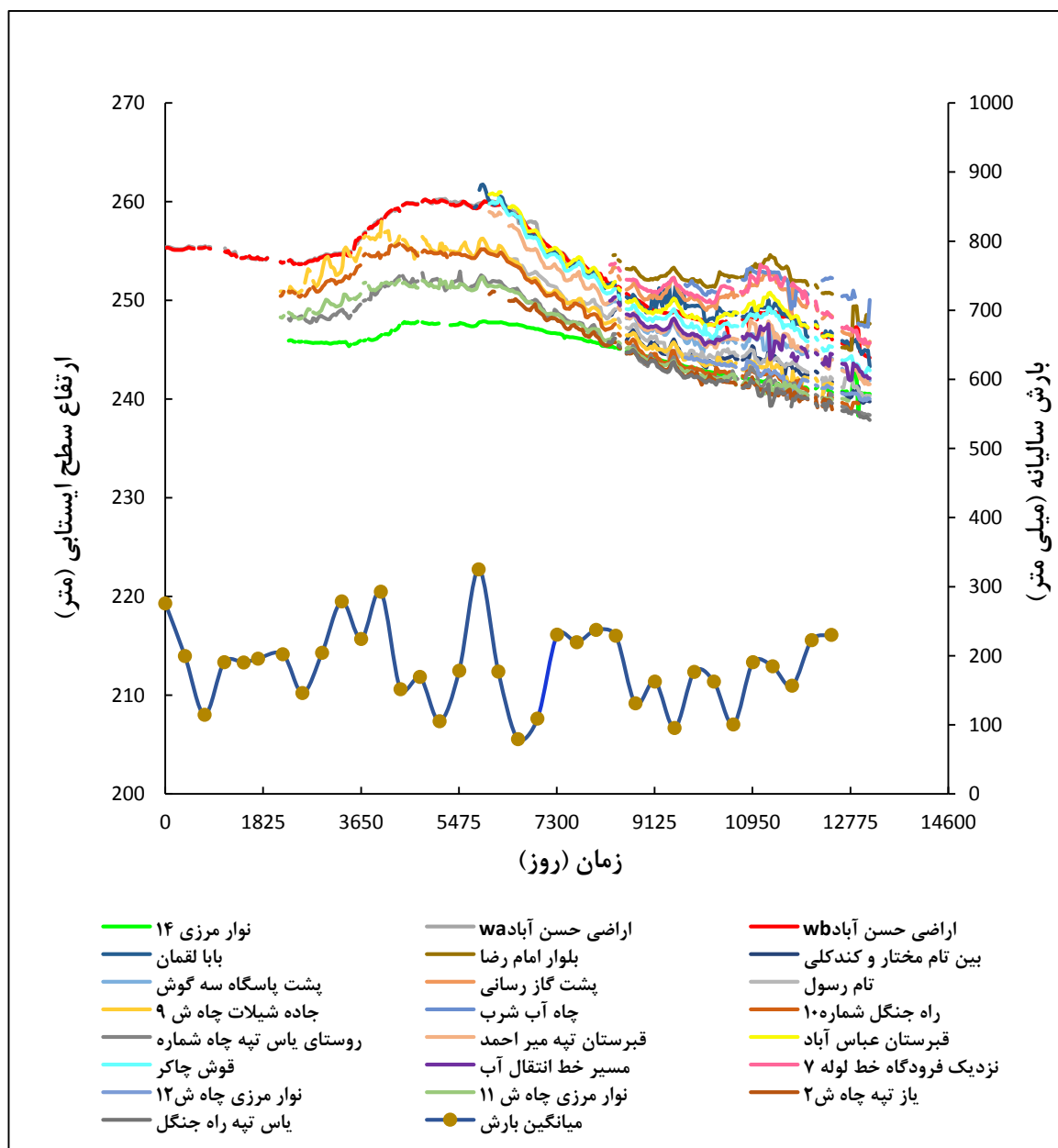
شکل ۴-۲: هیدروگراف پیزومترهای گروه اول (عدد صفر در محور افقی نشان دهنده ۱۵ مهر ۶۱ می باشد)

شکل (۳-۴) هیدروگراف پیزومترهایی را نشان می دهد که سطح ایستابی در آن ها کمتر از ۲۸۰ متر می باشد. این پیزومترها در میانه دشت قرار دارند و نوسانات زیادی در سطح ایستابی آن ها مشاهده می شود (گروه دوم).



شکل ۴-۳: هیدروگراف پیزومترهای گروه دوم (عدد صفر در محور افقی نشان دهنده ۱۵ مهر ۶۱ می باشد)

شکل (۴-۴) هیدروگراف پیزومترهایی را نشان می‌دهد که سطح ایستابی در آن‌ها کمتر از ۲۶۰ متر می‌باشد. این پیزومترها در انتهای دشت قرار دارند و نوسانات زیادی در سطح ایستابی آن‌ها مشاهده می‌شود (گروه سوم).

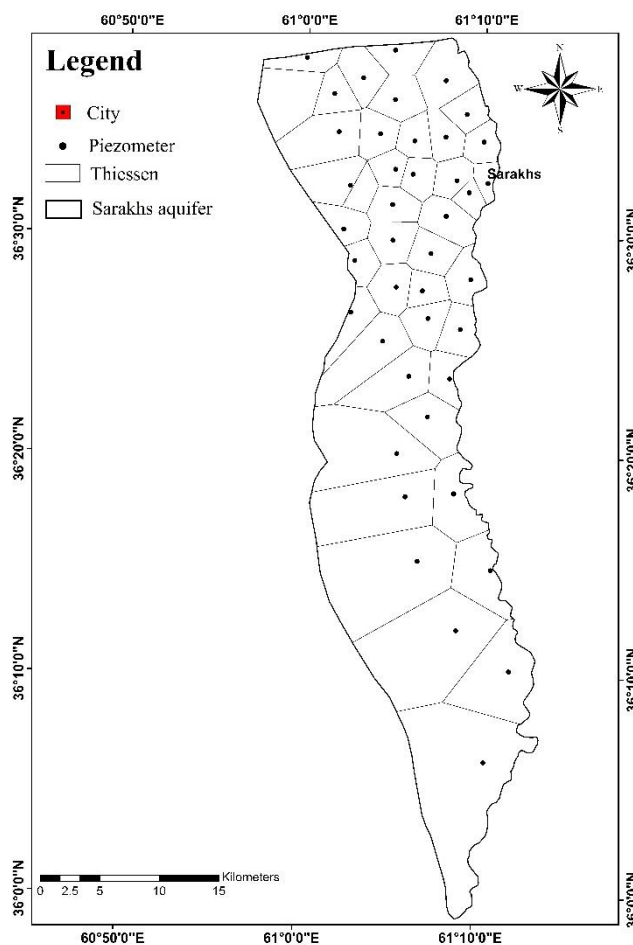


شکل ۴-۴: هیدروگراف پیزومترهای گروه سوم (عدد صفر در محور افقی نشان دهنده ۱۵ مهر ۶۱ می باشد)

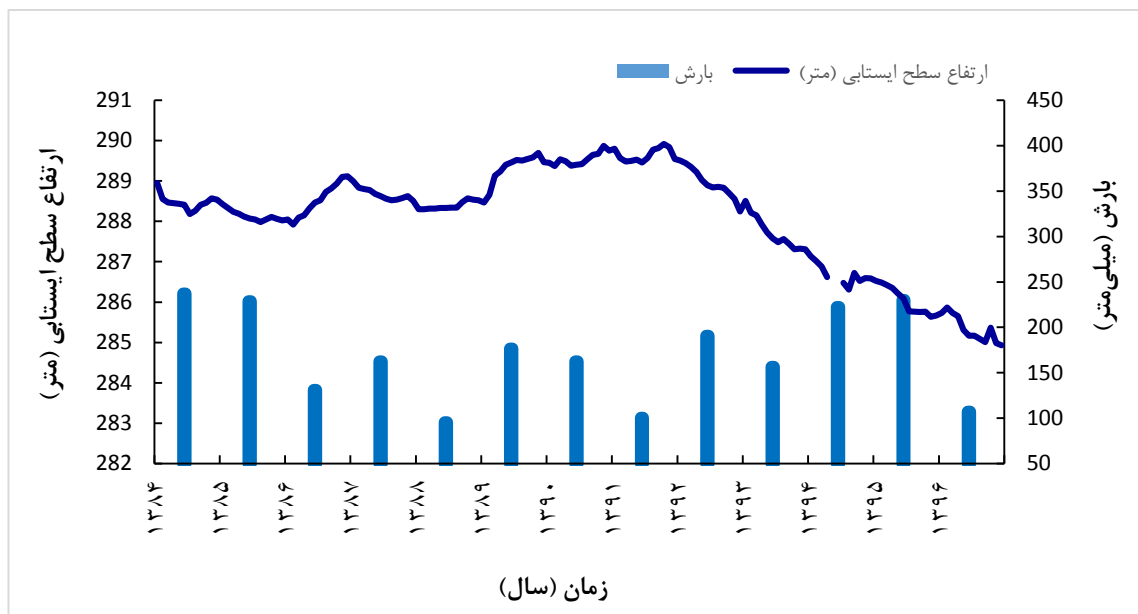
بررسی هیدروگراف‌های هر سه گروه نشان می‌دهد که تقریباً در تمامی پیزومترها در سال‌های ابتدایی دوره آماری یک دوره بدون تغییرات شاخص در سطح آب وجود داشته، لیکن در سال‌های انتهایی (اوایل دهه ۹۰ به بعد) افت شدید سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. از دلایل افت زیاد در این دوره می‌توان به کاهش بارش در سال‌های اخیر، افزایش میزان برداشت توسط چاه‌ها در منطقه و همچنین کاهش احتمالی تغذیه زیرزمینی ناشی از احداث سد دوستی در بالادست آبخوان سرخس اشاره نمود.

۴-۲-۲-۲- هیدروگراف معرف آبخوان سرخس

به منظور تعیین متوسط نوسانات سطح آب زیرزمینی و بررسی وضعیت کلی آبخوان و ارزیابی تغییرات صورت گرفته در آبخوان، هیدروگراف معرف (واحد) آن ترسیم می‌گردد. برای محاسبه هیدروگراف واحد ابتدا با توجه به موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای نقشه شبکه تیسن ترسیم شده (شکل ۴-۵)، سپس با توجه به ارقام ارتفاع مطلق سطح آب، هیدروگراف واحد محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است مساحت پلی‌گون تیسن اطراف هر پیزومتر در جدول (۴-۱) ارائه شده است. هیدروگراف واحد آبخوان سرخس در فاصله زمانی مهر ۱۳۸۴ تا شهریور ۱۳۹۶ برای مساحت حدود ۸۷۳/۶ کیلومترمربع تهیه شده است که در شکل (۴-۶) نمایش داده شده است. نوسانات هیدروگراف واحد آبخوان دشت سرخس تابع میزان تغذیه آبخوان و فعالیت چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد.



شکل ۴-۵: شبکه تیسن آبخوان سرخس

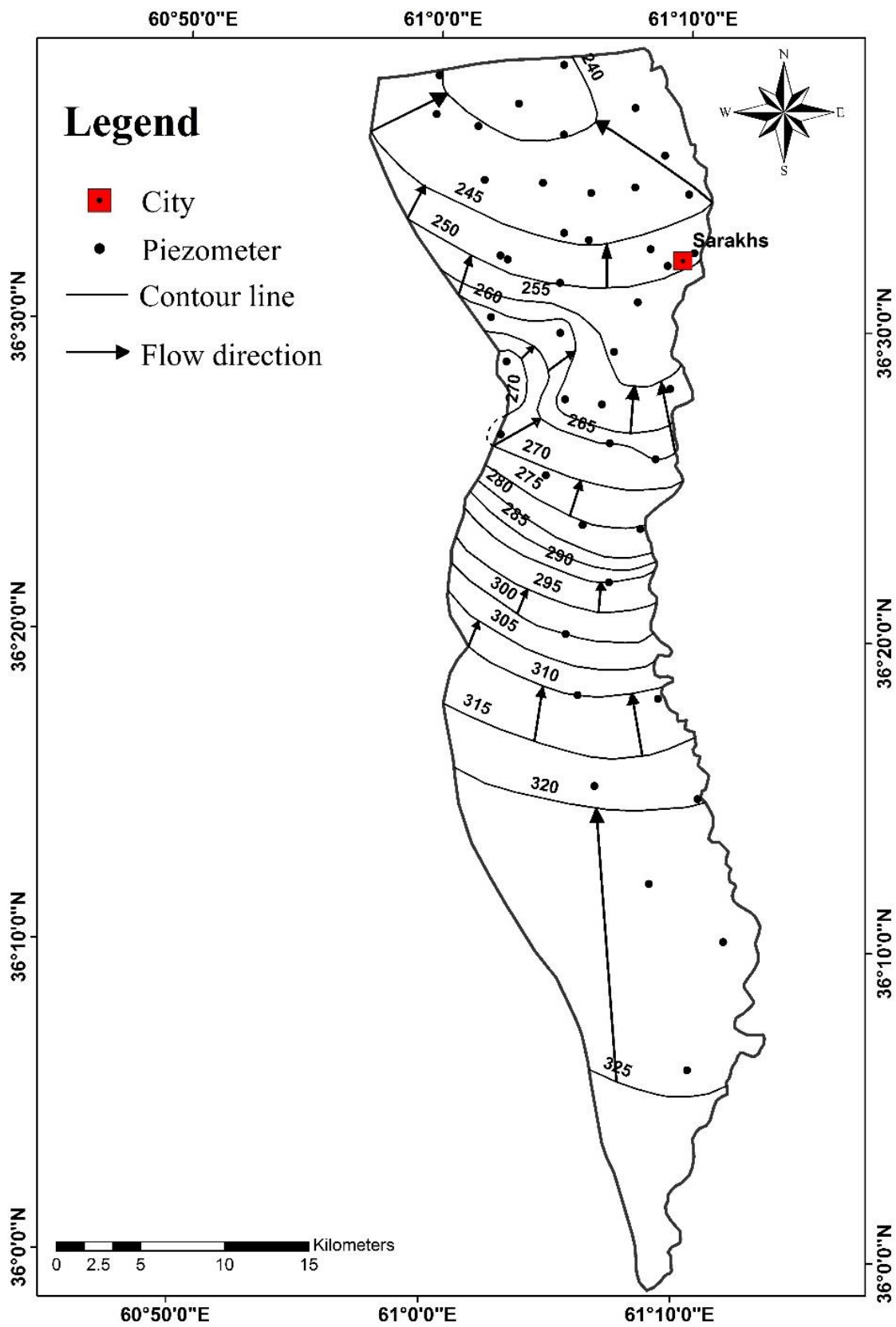


شکل ۴-۶: هیدروگراف معرف آبخوان سرخس طی سال‌های ۸۴ تا ۹۶

بررسی هیدروگراف معرف آبخوان سرخس نشان می‌دهد که در یک دوره ۱۲ ساله، از سال آبی ۸۳-۸۴ تا ۹۵-۹۶ میزان افت حدود ۳/۵ متر بوده که میانگین افت سالانه آن ۰/۳ متر می‌باشد. نرخ افت سطح ایستابی در سال‌های اخیر افزایش یافته و به حدود ۰/۶ متر در سال آبی ۹۵-۹۶ رسیده است. به طور کلی افت سطح آب در ماه‌های تر که تغذیه آبخوان در آن صورت می‌گیرد ناچیز بوده و در ماه‌های خشک با کاهش تغذیه و افزایش بهره‌برداری، افزایش می‌یابد.

۴-۲-۳- تر از سطح آب زیرزمینی

نقشه تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان سرخس بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده عمق سطح آب زیرزمینی در ۴۲ حلقه پیزومتر در فروردین سال ۹۶ ترسیم شده است (شکل ۴-۷). حداکثر ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی به میزان ۳۲۴/۱۷ متر در پیزومتر شیرتپه و حداقل ارتفاع مطلق سطح آب زیرزمینی به میزان ۲۳۸/۵۱ متر در پیزومتر روستای یاس تپه اندازه‌گیری شده است. بررسی نقشه تراز ترسیمی نشان می‌دهد که جهت کلی جریان آب زیرزمینی در آبخوان سرخس از جنوب به سمت شمال می‌باشد. با توجه به خطوط هم‌پتانسیل آبخوان از قسمت‌های جنوبی و بخش‌هایی در غرب و شمال شرقی تغذیه می‌شود.



شکل ۴-۷: نقشه هم‌پتانسیل آبخوان سرخس (فروردین ۹۶)

۴-۲-۲-۴- ضرایب هیدرودینامیک آبخوان سرخس

روش‌های گوناگونی جهت دستیابی به ضرایب هیدرودینامیکی ارائه شده است، ولی بدون تردید انجام آزمایش پمپاژ در صورتی که شرایط آبخوان و ویژگی‌های چاه آزمایشی به دقت مدنظر قرار گیرد، بهترین روش برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان است. نتایج آزمون‌های پمپاژ که تا کنون در دشت سرخس انجام شده در جدول (۲-۴) ارائه شده است.

جدول ۲-۴: خلاصه نتایج آزمایش‌های پمپاژ انجام شده در چاه‌های اکتشافی دشت سرخس

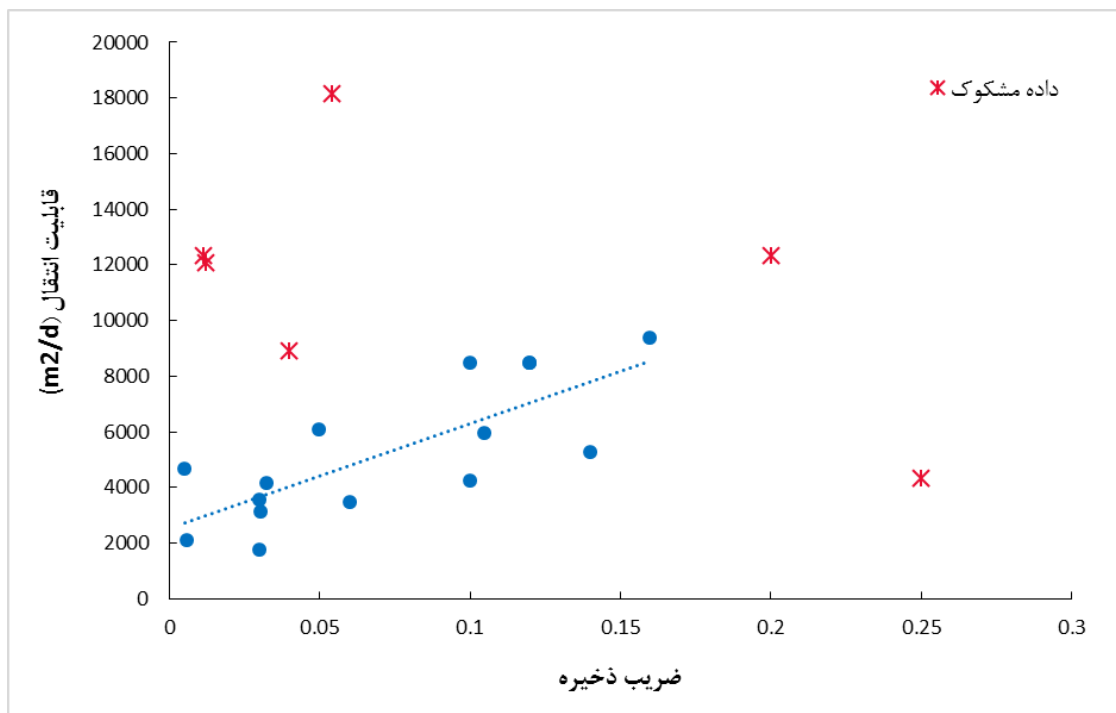
| ضریب ذخیره (بدون بعد) | قابلیت انتقال (m ² /day) | Y | X | نام چاه | ردیف | |
|-----------------------|-------------------------------------|---------|--------|---------|---|----|
| 0.25 | 4320 | 4045150 | 334250 | C1I7 | مطالعات قهرمانی ۱۳۴۹ | 1 |
| - | 6912 | 4053650 | 324300 | A4I1 | | 2 |
| 0.05 | 6048 | 4046100 | 325500 | C4I4 | | 3 |
| 0.06 | 3456 | 4025000 | 332650 | H2P1 | | 4 |
| 0.12 | 8460 | 4028400 | 332250 | G2P1 | | 5 |
| 0.03 | 1728 | 4050000 | 331700 | B2I1 | | 6 |
| 0.12 | 8640 | 4035550 | 335000 | F1I4 | | 7 |
| - | 3975 | 4044800 | 325500 | A | مطالعات قهرمانی-الکتروپروژکت ۱۳۴۹-۵۲ | 8 |
| - | 1564 | 4044900 | 324550 | B | | 9 |
| 0.04 | 8899 | 4044150 | 326200 | C | | 10 |
| 0.03 | 3542 | 4045500 | 327550 | D | | 11 |
| 0.1 | 4234 | 4045850 | 329100 | E | | 12 |
| 0.2 | 12355 | 4054450 | 333700 | F | | 13 |
| 0.16 | 9348 | 4053300 | 329250 | G | | 14 |
| 0.05 | 18144 | 4011650 | 336620 | H | | 15 |
| 0.1 | 8640 | 4045800 | 328800 | I | | 16 |
| 0.14 | 5270 | 4046850 | 336450 | K | | 17 |
| 0.01 | 12355 | 4010500 | 337600 | S4 | 18 | |
| 0.01 | 12096 | 4014950 | 335950 | S7 | 19 | |

ادامه جدول ۴-۲: خلاصه نتایج آزمایش‌های پمپاژ انجام شده در چاه‌های اکتشافی دشت سرخس

| ردیف | نام چاه | X | Y | قابلیت انتقال (m ² /day) | ضریب ذخیره (بدون بعد) |
|------|-----------------------------------|-----|--------|--|--------------------------|
| 20 | مطالعات مه‌باب قدس ۵۳- ۱۳۶۰ | EX1 | 336530 | 4144 | 0.03 |
| 21 | | EX2 | 337650 | 4645 | 0.01 |
| 22 | | EX3 | 331400 | 2077 | 0.01 |
| 23 | | EX4 | 328180 | 3125 | 0.03 |
| 24 | مطالعات مه‌باب قدس ۵۳- ۱۳۶۰ | EX5 | 328700 | 3492 | - |
| 25 | | EX6 | 326030 | 2665 | - |
| 26 | | EX7 | 322050 | 5917 | 0.11 |

بر اساس نتایج آزمایش‌های پمپاژ، قابلیت انتقال آبخوان سرخس بالا و از حداقل ۱۵۶۴ مترمربع در روز تا حداکثر ۱۲۳۵۵ مترمربع بر روز گزارش شده است. رسم نمودار قابلیت انتقال در برابر ضریب ذخیره شکل (۴-۸) بیانگر عدم انطباق مقادیر بالای قابلیت انتقال و ضریب ذخیره بوده، به همین دلیل این مقادیر در بررسی توزیع قابلیت انتقال در نظر گرفته نشده است. مقدار قابلیت انتقال آبخوان از غرب به سمت شرق نیز افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین مقدار آن در مجاورت رودخانه هریرود و کمترین آن در بخش غربی دشت مشاهده می‌شود. بر این اساس آبخوان به لحاظ قابلیت انتقال قابل تقسیم بندی به سه زون با مقادیر کمتر از ۲۵۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۵۰۰ مترمربع بر روز می‌باشد.

مطابق نتایج آزمون‌های پمپاژ انجام شده در دشت و پس از حذف مقادیر مشکوک متوسط ضریب ذخیره آبخوان آبرفتی دشت سرخس برابر ۷٪ درصد برآورد گردیده است.



شکل ۴-۸: ترسیم قابلیت انتقال در برابر ضریب ذخیره حاصل از آزمون‌های پمپاژ دشت سرخس

۴-۲-۲-۵- بیان آبخوان آبرفتی دشت سرخس

معادله هیدرولوژی که بر اصل بقاء ماده در چرخه آب در طبیعت تأکید دارد مبنای تعریف بیان آب می‌باشد. معادله بیان شامل توازن ورودی‌ها و خروجی‌ها در سیستم آب زیرزمینی می‌باشد. برای ارزیابی بیان آب زیرزمینی لازم است تا هرگونه تغذیه سطحی و زیرزمینی، هرگونه تخلیه مانند بهره‌برداری از چاه‌ها، تبخیر و تعرق، زهکش و تغییرات حجم آبخوان در زمان و محدوده مشخص که سطح بیان نامیده می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به متنوع بودن مؤلفه‌های ورودی و خروجی، معادله مورد استفاده در آبخوان سرخس به صورت زیر می‌باشد:

$$\Delta s^{gw} = R - Q^{gw}_{off} + Q^{gw}_{on} - Q^{bf} - ET^{gw}$$

R: تغذیه به آب زیرزمینی، Q^{gw}_{off} : جریان زیرزمینی خروجی، Q^{gw}_{on} : جریان زیرزمینی ورودی، Q^{bf} : زهکشی از آب زیرزمینی، ET^{gw} : تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی و Δs^{gw} تغییرات به وجود آمده در ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد.

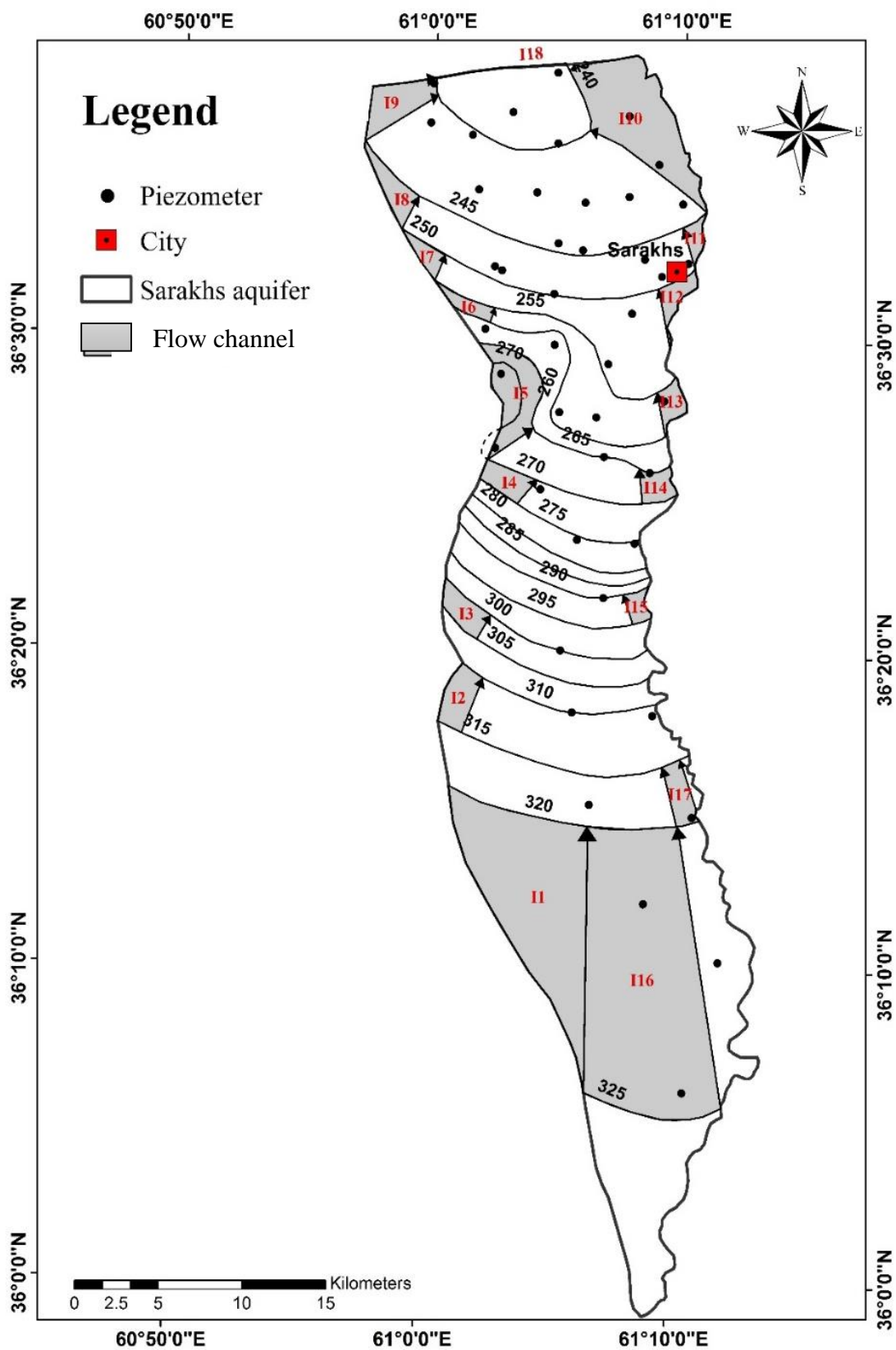
بیان برای آبخوان سرخس با مساحت $873/58$ کیلومتر مربع برای سال آبی ۹۶-۹۵ محاسبه شده است. در ادامه جزئیات بیان آبخوان سرخس ارائه می‌گردد.

الف- ارزیابی جریان‌های ورودی به آبخوان آبرفتی سرخس

الف-۱- حجم ورودی آب زیرزمینی به آبخوان

هنگامی که بار هیدرولیکی یا فشار در مجاورت مرزهای آبخوان بیشتر از بار هیدرولیکی محدوده مرزی آبخوان باشد، تحت تأثیر اختلاف بار، مقداری از جریان زیرزمینی به سمت آبخوان هدایت می‌شود که میزان آن تابعی از شیب هیدرولیکی، قابلیت انتقال، زمان و طول مقطع جریان می‌باشد. بسته به مقدار جریان ورودی، جهت خطوط هم‌پتانسیل نیز تغییر می‌کند.

به منظور محاسبه جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان سرخس ابتدا با استفاده از نقشه هم‌پتانسیل ترسیمی آب زیرزمینی در سال بیان، مقاطع ورودی آب زیرزمینی به آبخوان مشخص شده و برای هر مقطع مقادیر قابلیت انتقال (T)، عرض مقطع (W) و گرادیان هیدرولیکی (i) آن برآورد شده است. با توجه به نقشه هم‌پتانسیل در فروردین ۱۳۹۶ برای آبخوان سرخس ۱۸ ورودی زیرزمینی مشخص شد (شکل ۴-۹) که مشخصات هر یک از این ورودی‌ها در جدول (۴-۳) نشان داده شده است. با توجه به زون‌بندی مقادیر قابلیت انتقال آبخوان، این مقدار از 2500 مترمربع بر روز تا 7500 مترمربع بر روز متغیر می‌باشد. مقادیر گرادیان هیدرولیکی نیز با توجه به خطوط هم‌پتانسیل در آبخوان از حداقل $0/0003$ تا حداکثر $0/0051$ متغیر می‌باشد. با توجه به طول هر کدام از جبهه‌های ورودی، قابلیت انتقال در مقاطع مختلف و همچنین شیب هیدرولیکی در هر یک از مقاطع، مقدار جریان ورودی بر اساس قانون دارسی ($Q_i = T_i W$) محاسبه می‌شود. حجم جریان ورودی سالانه زیرزمینی به آبخوان سرخس بر حسب مجموع مقاطع ورودی به آبخوان حدود ۱۹۹ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است.



شکل ۴-۹: نقشه هم‌پتانسیل آبخوان سرخس در فروردین ۱۳۹۶، (مقاطع ورودی به آبخوان سرخس با علامت I نمایش

داده شده است)

جدول ۴-۳: محاسبه جریان آب زیرزمینی ورودی به آبخوان آبرفتی سرخس

| ورودی | طول مقطع (km) | شیب هیدرولیکی | قابلیت انتقال (m ² /d) | حجم ورودی آب زیرزمینی (m ³ /d) |
|--|------------------|---------------|--------------------------------------|--|
| I1 | 9.7 | 0.0003 | 2500 | 8083 |
| I2 | 2.1 | 0.0015 | 2500 | 7537 |
| I3 | 3.6 | 0.0032 | 2500 | 29032 |
| I4 | 2.6 | 0.0032 | 2500 | 20968 |
| I5 | 5.5 | 0.0016 | 2500 | 22177 |
| I6 | 4.5 | 0.0051 | 2500 | 114573 |
| I7 | 3.2 | 0.0033 | 5000 | 52632 |
| I8 | 4.8 | 0.0023 | 5000 | 55814 |
| I9 | 2.2 | 0.0011 | 5000 | 11962 |
| I10 | 7.0 | 0.0005 | 7500 | 28235 |
| I11 | 2.0 | 0.0019 | 7500 | 28125 |
| I12 | 2.5 | 0.0010 | 7500 | 18543 |
| I13 | 1.7 | 0.0018 | 7500 | 22970 |
| I14 | 1.7 | 0.0028 | 7500 | 35124 |
| I15 | 1.7 | 0.0028 | 7500 | 35417 |
| I16 | 6.4 | 0.0003 | 5000 | 9832 |
| I17 | 2.1 | 0.0014 | 7500 | 21875 |
| I18 | 8.5 | 0.0005 | 5000 | 22642 |
| مجموع جریان ورودی آب زیرزمینی (میلیون مترمکعب در سال) | | | | 199 |

الف-۲- تغذیه ناشی از نزولات جوی به آبخوان

یکی از عوامل اصلی تغذیه کننده آبخوان‌های زیرزمینی بارش است که به صورت مستقیم (نفوذ مستقیم از بارندگی) و یا غیرمستقیم (از طریق ایجاد جریان‌ات سطحی و زیرسطحی) در تغذیه آبخوان نقش دارد. وقتی که نزولات جوی به سطح زمین می‌رسند بسته به میزان و نوع نزولات (باران، برف، تگرگ) و شدت

آن‌ها و همچنین فاکتورهای وابسته به زمین نظیر توپوگرافی، پوشش گیاهی، بافت خاک سطحی، انواع جریان نظیر جریان سطحی، نیمه سطحی و زیرسطحی به وجود می‌آید. آن مقدار از نزولات جوی که به شکل جریانات مختلف باعث تغذیه آبخوان می‌گردند اهمیت دارند.

بر طبق آمار و اطلاعات موجود، میزان متوسط بارندگی در منطقه در سطح محدوده بیلان (۸۷۴ کیلومتر مربع) حدود ۱۸۳/۴ میلی‌متر در سال بوده و بنابراین حجم بارندگی برابر ۱۶۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد گردیده است. با توجه به جنس و اندازه ذرات خاک، شیب توپوگرافی و پوشش گیاهی حدود ۲۰٪ از کل نزولات جوی معادل ۳۳ میلیون مترمکعب در سال به عنوان حجم آب نفوذ یافته از نزولات جوی در نظر گرفته شده است.

الف-۳- تغذیه ناشی از آب برگشتی یا انتقالی به آبخوان

مقداری از آب‌هایی که توسط چشمه‌ها، چاه‌ها و قنات برداشت می‌شود و در بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب و صنعت به مصرف می‌رسد، مجدداً به زمین نفوذ کرده و به سفره آب زیرزمینی می‌رسد. با توجه به آماربرداری منابع آب محدوده مطالعاتی سرخس در سال ۱۳۹۵، میانگین حجم بهره‌برداری از آب زیرزمینی در محدوده بیلان برابر ۳۱۰ میلیون مترمکعب در سال است. از این میزان حدود ۱۵٪ آن به آبخوان بازگشت نموده که معادل ۴۷ میلیون مترمکعب در سال تخمین زده می‌شود.

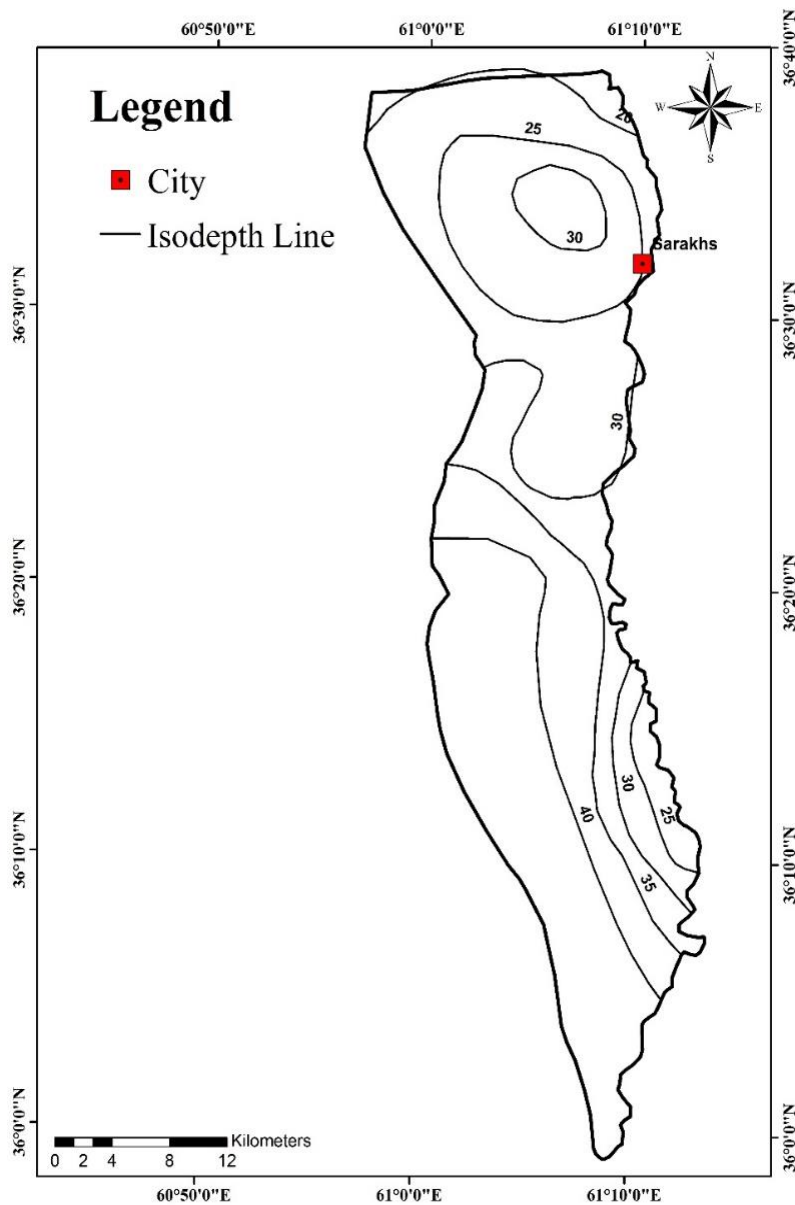
ب- ارزیابی جریان‌های خروجی از آبخوان آبرفتی سرخس

ب-۱- جریان‌های خروجی آب زیرزمینی از آبخوان

بر اساس نقشه تراز ترسیمی سطح آب زیرزمینی در آبخوان سرخس، در حال حاضر جریان خروجی زیرزمینی وجود ندارد.

ب-۲- میزان تبخیر و تعرق از آبخوان

نقشه هم عمق سطح آب زیرزمینی ترسیم شده برای آبخوان آبرفتی سرخس (شکل ۴-۱۰) نشان می‌دهد که در این آبخوان محدوده دارای عمق کمتر از ۵ متر وجود نداشته و عمق سطح آب بیش از ۵ متر می‌باشد. بنابراین میزان تبخیر و تعرق از سطح آب زیرزمینی در محاسبات بیلان صفر در نظر گرفته می‌شود.



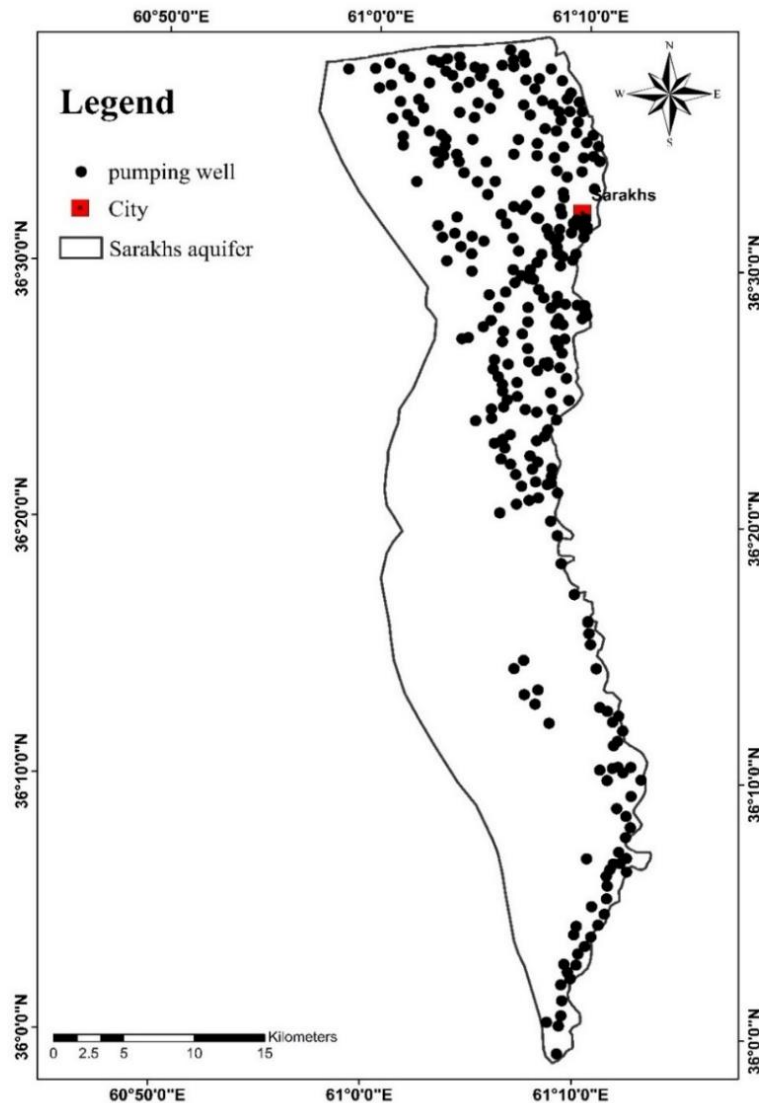
شکل ۴-۱۰: نقشه هم عمق آبخوان سرخس

ب-۳- حجم زهکشی از آبخوان

با توجه به نقشه هم‌پتانسیل آبخوان آبرفتی سرخس میزان زهکشی آبخوان از طریق رودخانه برابر صفر است.

ب-۴- حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آبخوان

نتایج آماربرداری انجام شده در محدوده مطالعاتی سرخس در سال ۹۵-۹۶ نشان می‌دهد که سالانه حدود ۳۱۰ میلیون مترمکعب، توسط ۳۷۴ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق برداشت صورت می‌گیرد (شکل ۴-۱۱).



شکل ۴-۱۱: موقعیت چاه‌های پمپاژ در محدوده آبخوان سرخس

ج- ارزیابی تغییرات حجم ذخیره در آبخوان آبرفتی سرخس

جهت محاسبه تغییرات حجم ذخیره در آبخوان سرخس از هیدروگراف معرف آب زیرزمینی دشت سرخس استفاده شده است. با توجه به هیدروگراف واحد دشت میزان افت سطح آب زیرزمینی در سال آبی ۹۵-۹۶ حدود ۰/۶ متر است (شکل ۴-۶). براساس معادله زیر تغییرات حجم مخزن در دوره بیلان را می‌توان محاسبه نمود:

$$\Delta s = \pm A \cdot \Delta h \cdot S_y$$

Δs : تغییرات حجم ذخیره آبخوان، A: مساحت منطقه بیلان، Δh : متوسط افت سالیانه، S_y : آبدهی ویژه آبخوان می‌باشد.

با توجه به مقادیر پارامترها میزان کسری مخزن سالانه آبخوان سرخس برابر ۳۶/۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد.

$$\Delta s = ۸۷۳/۵۸ \times ۰/۰۷ \times (-۰/۶) = - ۳۶/۷$$

خلاصه اجزاء بیلان آبخوان سرخس در جدول شماره (۴-۴) ارائه گردیده است.

جدول ۴-۴: خلاصه اجزاء بیلان آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی سرخس (میلیون مترمکعب در سال)

| تخلیه (میلیون مترمکعب در سال) | تغذیه (میلیون مترمکعب در سال) | اجزاء بیلان آب زیرزمینی |
|-------------------------------|-------------------------------|---|
| - | ۱۹۹ | حجم ورودی آب زیرزمینی به آبخوان |
| - | ۳۳ | حجم آب نفوذ یافته از نزولات جوی به آبخوان |
| - | ۴۷ | حجم آب برگشتی یا انتقالی به آبخوان |
| ۰ | - | میزان تبخیر و تعرق از آبخوان |
| ۰ | - | حجم زهکشی از آبخوان |
| ۳۱۰ | - | حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آبخوان |
| ۳۱۰ | ۲۷۹ | جمع |
| -۳۱ | | تغییرات حجم مخزن |

همان‌طور که در جدول (۴-۴) مشاهده می‌شود، بیلان آب زیرزمینی در آبخوان دشت سرخس در سال آبی ۹۵-۹۶ منفی می‌باشد. به این ترتیب که در این سال آبی حجم جریان‌های تغذیه‌ای ۳۱ میلیون مترمکعب از حجم جریان‌های تخلیه‌ای کمتر بوده است. مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در این بیلان منفی، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، کاهش بارندگی و خشک‌سالی در سال‌های اخیر و همچنین تأثیرات احتمالی احداث سد دوستی دانست می‌باشد. میزان کسری مخزن محاسبه شده با استفاده از هیدروگراف معرف تقریباً مشابه با جمع جبری اجزای بیلان بوده که این موضوع صحت محاسبات بیلان آبخوان آبرفتی را تأیید می‌نماید.

۴-۳- مدل عددی آبخوان سرخس

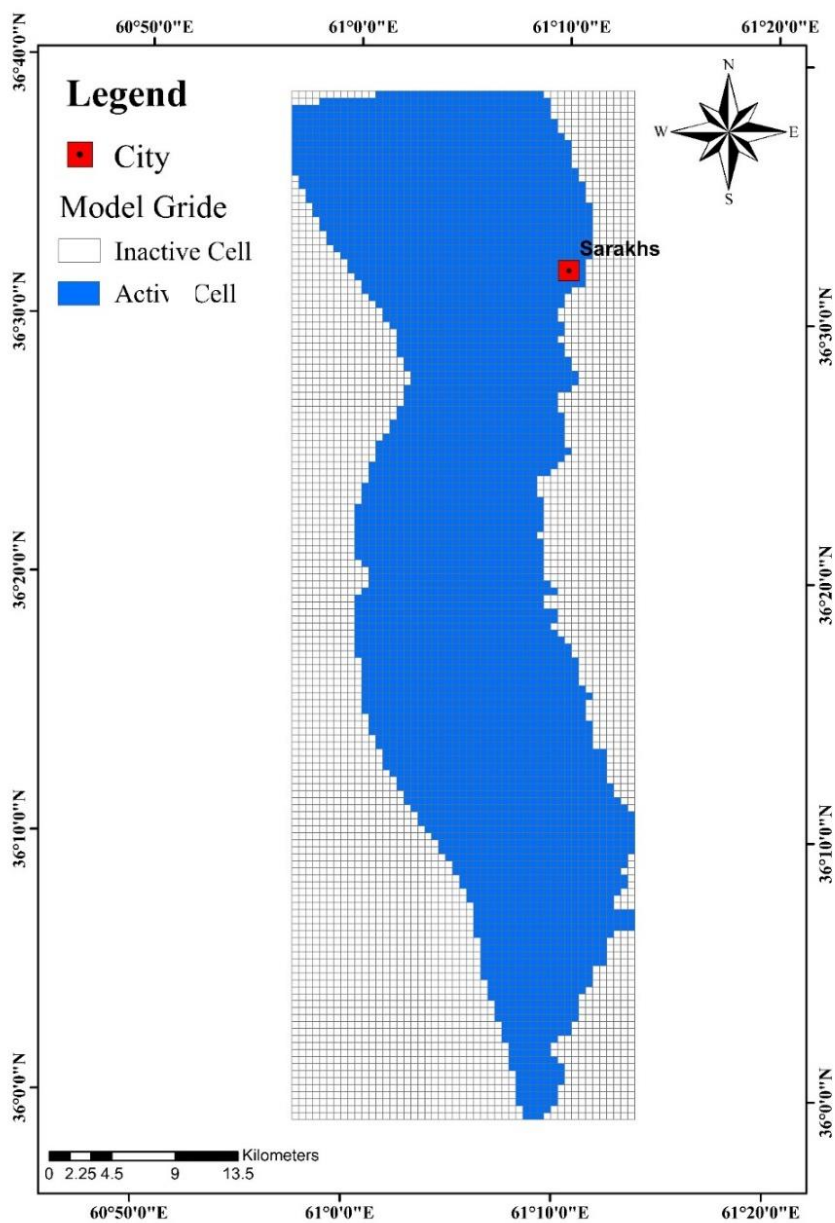
در این تحقیق از کد کامپیوتری مادفلو (Modflow) در نرم‌افزار فری‌وات (FREEWAT) جهت ساخت مدل عددی جریان در آبخوان سرخس استفاده شده است. شبکه مدل، تعیین شرایط مرزی و شرایط اولیه، انتخاب دوره‌ها و گام‌های زمانی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل در این بخش توضیح داده شده می‌شود.

۴-۳-۱- گسسته سازی (شبکه‌بندی محدوده آبخوان)

در مدل مادفلو (MODFLOW) برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی جریان آب زیرزمینی از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود (Anderson and Woessner, 1992). برای این کار باید محدوده مورد نظر با استفاده از خطوط موازی عمود بر هم به اجزاء کوچک‌تر سلول‌ها هستند، تقسیم شود. هرچه ابعاد این سلول‌ها کوچک‌تر باشد حل دقیق‌تری به دست خواهد آمد. لیکن با افزایش تعداد سلول‌ها زمان اجرای مدل و تهیه داده‌های مورد نیاز به مراتب افزایش می‌یابد و همچنین نیاز است که اطلاعات دقیق‌تری وجود داشته باشد.

با توجه به محدوده آبخوان سرخس، هدف مطالعه، شکل هندسی آبخوان، تعداد و موقعیت چاه‌های پیژومتری و بهره‌برداری، شبکه تفاضل محدود با ابعاد ۴۹ ستون و ۱۴۷ ردیف ایجاد شده است. ابعاد

سلول‌ها 500×500 می‌باشد. تعداد کل سلول‌های تشکیل دهنده این شبکه 7203 سلول می‌باشد که به دو دسته سلول‌های فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. سلول‌های غیرفعال (3354 سلول) سلول‌های فاقد جریان در بیرون مرز مدل بوده و در فرآیند مدل‌سازی وارد نمی‌شوند. سلول‌های فعال نیز 3849 سلول بوده که محاسبات مدل در آن‌ها انجام می‌شود. شکل (۴-۱۲) شبکه مدل و موقعیت سلول‌های فعال و غیرفعال آبخوان آبرفتی سرخس را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲: شبکه مدل و موقعیت سلول‌های فعال (تیره) و غیرفعال (روشن) در آبخوان سرخس

۴-۳-۲- داده‌های ورودی به مدل

مهم‌ترین داده‌های ورودی به مدل شامل ویژگی‌های آبخوان (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه)، تنش‌های وارده به سفره شامل بهره‌برداری از چاه‌ها، تغذیه ناشی از بارندگی و تغذیه جریان برگشتی چاه‌های بهره‌برداری، شرایط اولیه و شرایط مرزی، چاه‌های مشاهده‌ای، ارتفاع توپوگرافی، ارتفاع سنگ کف آبخوان و هد اولیه ورودی به آبخوان می‌باشند که در ادامه هریک از این موارد به‌طور مختصر توضیح داده می‌شود.

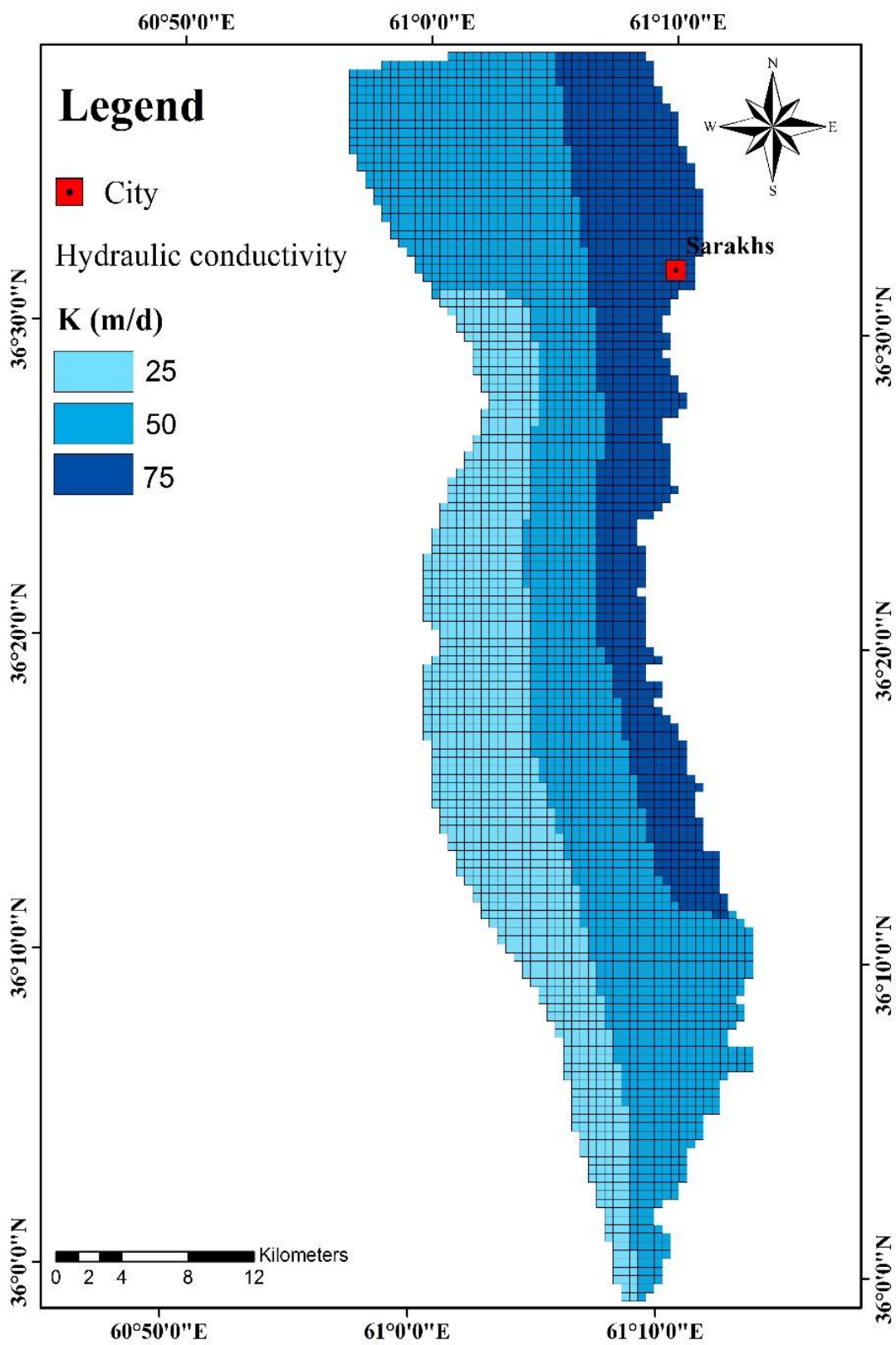
۴-۳-۱- ویژگی‌های سفره

الف- هدایت هیدرولیکی

برای به دست آوردن مقادیر هدایت هیدرولیکی (K) از نتایج آزمایش پمپاژ در دشت استفاده شده است. بدین منظور با توجه به ضخامت آبخوان (b) و قابلیت انتقال (T) مقدار هدایت هیدرولیکی از رابطه $T = Kb$ محاسبه شده است. مقادیر هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان به ۳ زون تقسیم شد. هدایت هیدرولیکی از غرب به شرق افزایش یافته به گونه‌ای که از حداقل ۲۵ متر بر روز غرب آبخوان به ۷۵ متر بر روز در بخش شرقی افزایش می‌یابد. شکل (۴-۱۳) مقادیر هدایت هیدرولیکی و زون بندی آن در محدوده آبخوان آبرفتی سرخس را نشان می‌دهد.

ب- آبدهی ویژه

مقدار آبدهی ویژه آبخوان با استفاده از نتایج آزمون پمپاژ و لاگ‌های حفاری به‌طور متوسط ۷٪ تخمین زده شد که این مقدار به تمام سلول‌های مدل اختصاص یافت.



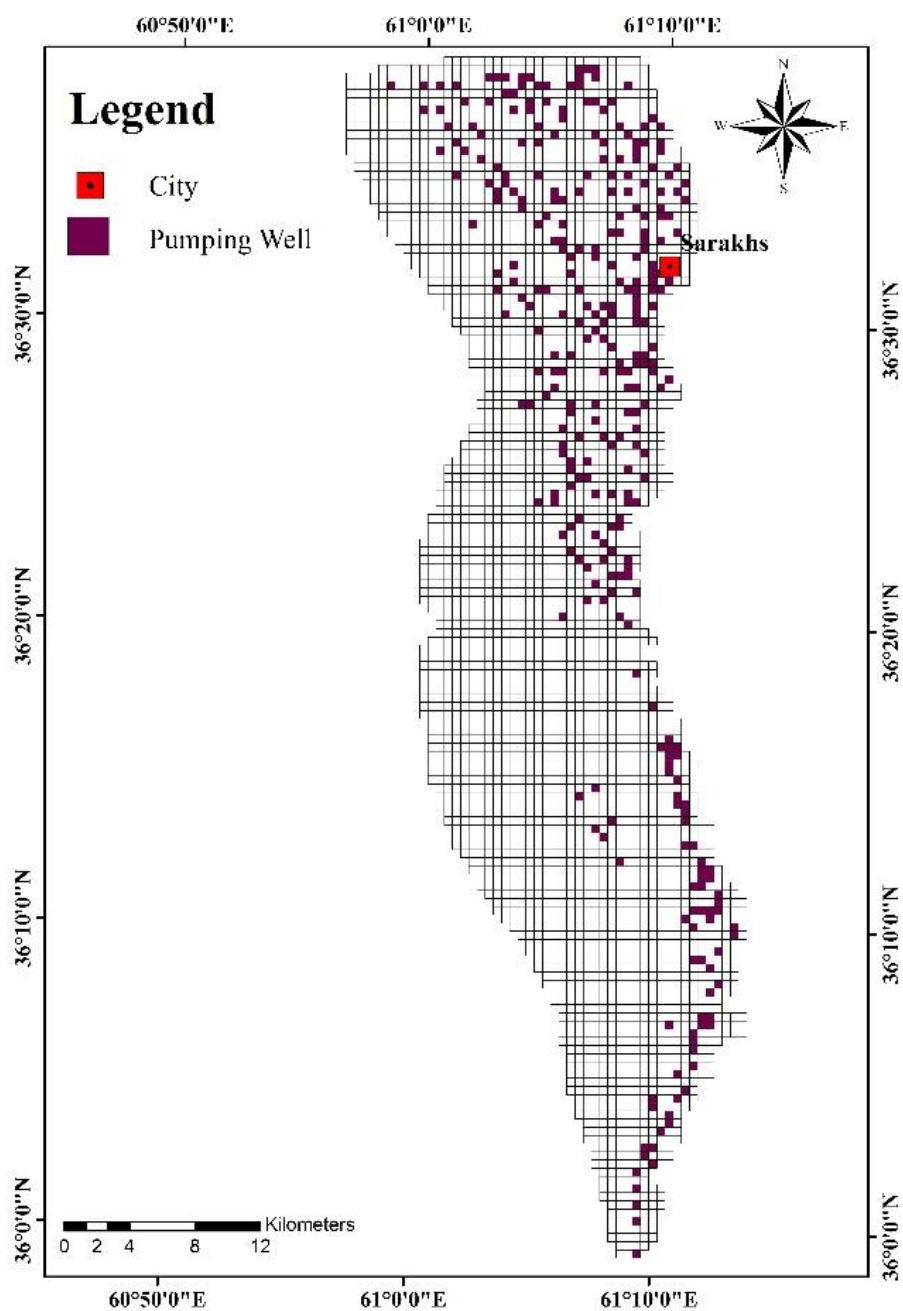
شکل ۴-۱۳: مقادیر هدایت هیدرولیکی و زون بندی آن در محدوده آبخوان آبرفتی سرخس

الف- بهره‌برداری از چاه‌های پمپاژ

یکی از مهم‌ترین منابع تخلیه آب زیرزمینی سرخس چاه‌های بهره‌برداری می‌باشند که به صورت فصلی و یا دائمی برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب پمپاژ می‌شوند. عمده بهره‌برداری در نواحی نزدیک به رودخانه هریرود (مرز شرقی آبخوان)، مرکز آبخوان و شمال شرقی آبخوان صورت می‌گیرد. به منظور اعمال برداشت از آبخوان، اطلاعات چاه‌های حفر شده در محدوده آبخوان که شامل مختصات چاه و دبی آن‌ها می‌باشد به مدل وارد گردید. مقادیر تخلیه برای چاه‌هایی که در یک سلول از شبکه قرار گرفته‌اند با هم جمع شده و مجموع تخلیه آن‌ها به صورت یک چاه در سلول به مدل اعمال شده است. با توجه به در دسترس بودن مقدار دبی چاه‌های بهره‌برداری در دشت، نقشه مکانی چاه‌ها در نرم‌افزار GIS تهیه و با پسوند (Shp) ذخیره شد. سپس در نرم‌افزار فری‌وات (FREEWAT) از بسته چاه (WEL) استفاده شد و تخلیه روزانه هر چاه به سلول متناظر با آن اختصاص یافت. شکل (۴-۱۴) موقعیت سلول‌های چاه در محدوده شبکه‌بندی مدل آبخوان سرخس را نمایش می‌دهد.

ب- تغذیه ناشی از بارندگی

به دلیل اهمیت بالای تغذیه در مناطق خشک، برآورد مقدار تغذیه حاصل از بارندگی فقط برای سلول‌هایی که در محل آبراهه‌ها قرار دارند، در نظر گرفته شده است. مقدار تغذیه در ماه‌های مختلف بر اساس بارش موجود متفاوت بوده (متوسط حدود ۰/۰۰۳۱۵۲۹۵ متر بر روز) و در ماه‌های دی تا خرداد (استرس پریود یا دوره‌های تنش ۴ تا ۹ و ۱۶ تا ۲۱) در مدل اعمال شده است. تغذیه به آبخوان توسط بسته تغذیه (RCH) شبیه‌سازی شده است.



شکل ۴-۱۴: موقعیت چاه‌های بهره‌برداری در محدوده شبکه‌بندی مدل آبخوان سرخس

ج- آب برگشتی چاه‌های بهره‌برداری

با توجه به اینکه بیشترین مصرف آب زیرزمینی در دشت سرخس برای مصارف کشاورزی می‌باشد. این مناطق از مهم‌ترین مناطق تغذیه ناحیه‌ای پراکنده می‌باشد. پس از آبیاری مقداری از این آب به آبخوان

باز می‌گردد. مقدار تغذیه حاصل از آب برگشتی ۰/۰۰۰۶۵ متر بر روز بوده که در ماه‌های آبان تا فروردین (دوره‌های تنش ۲ تا ۷ و ۱۴ تا ۱۹) در مدل اعمال شده است. تغذیه حاصل از این بخش نیز مانند بارش توسط بسته تغذیه شبیه‌سازی گردیده است. مقدار تغذیه در دشت به عنوان پارامتری برای واسنجی در نظر گرفته شده تا طی فرآیند واسنجی مقدار بهینه آن یافت شود.

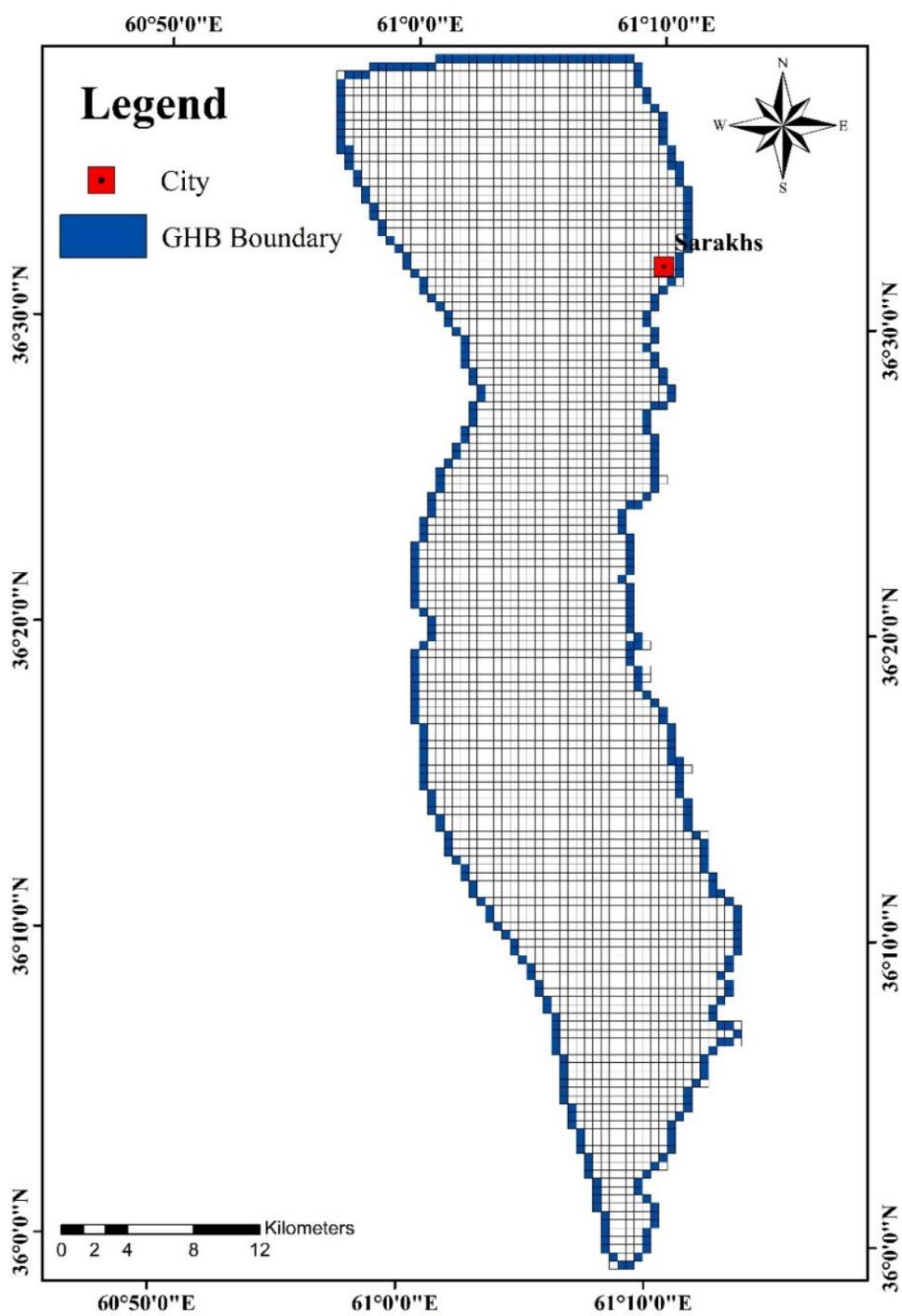
۴-۳-۲-۳- شرایط مرزی و شرایط اولیه

شرایط مرزی سفره بر اساس نقشه تراز سطح ایستابی، داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری تعیین شده است. برای در نظر گرفتن مقدار جریان زیرزمینی وارد شده به سفره از بسته مرز با بار عمومی (GHB) در مدل استفاده شده است. این مقدار از طریق سطح تراز آب بر اساس نقشه تراز سطح ایستابی به سلول‌های مرزی اختصاص یافت. شکل (۴-۱۵) شرایط مرزی آبخوان سرخس را نشان می‌دهد.

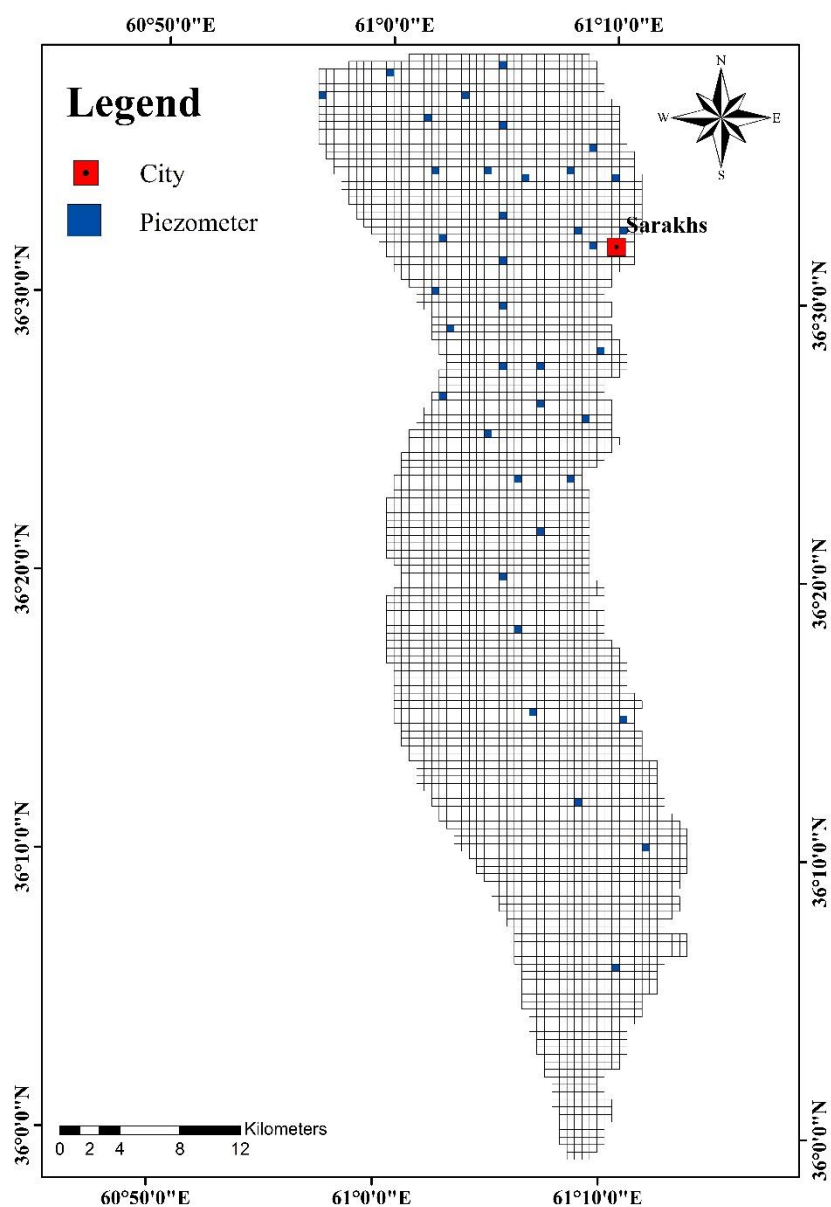
مقادیر سطح آب زیرزمینی در مهر ۱۳۹۴ به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده است. بدین منظور اطلاعات سطح ایستابی در نرم‌افزار GIS وارد شده و پس از درونیابی نقاط (روش Kriging) نقشه رستری تهیه شده و مقادیر اولیه سطح ایستابی به سلول‌های مدل اختصاص یافت.

۴-۳-۲-۴- چاه‌های مشاهده‌ای (پیزومترها)

برای ساخت پیزومتر از بسته Create Head Observation Layer در نرم‌افزار فری‌وات (FREEWAT) استفاده می‌شود. ابتدا فایل csv تهیه شده به مدل وارد شده و سپس از طریق بسته ذکر شده شبیه‌سازی پیزومترها انجام می‌شود. شکل (۴-۱۶) موقعیت پیزومترها در محدوده شبکه‌بندی مدل آبخوان سرخس را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: شرایط مرزی مدل آبخوان آبرفتی سرخس



شکل ۴-۱۶: موقعیت پیزومترها در محدوده شبکه آبخوان سرخس

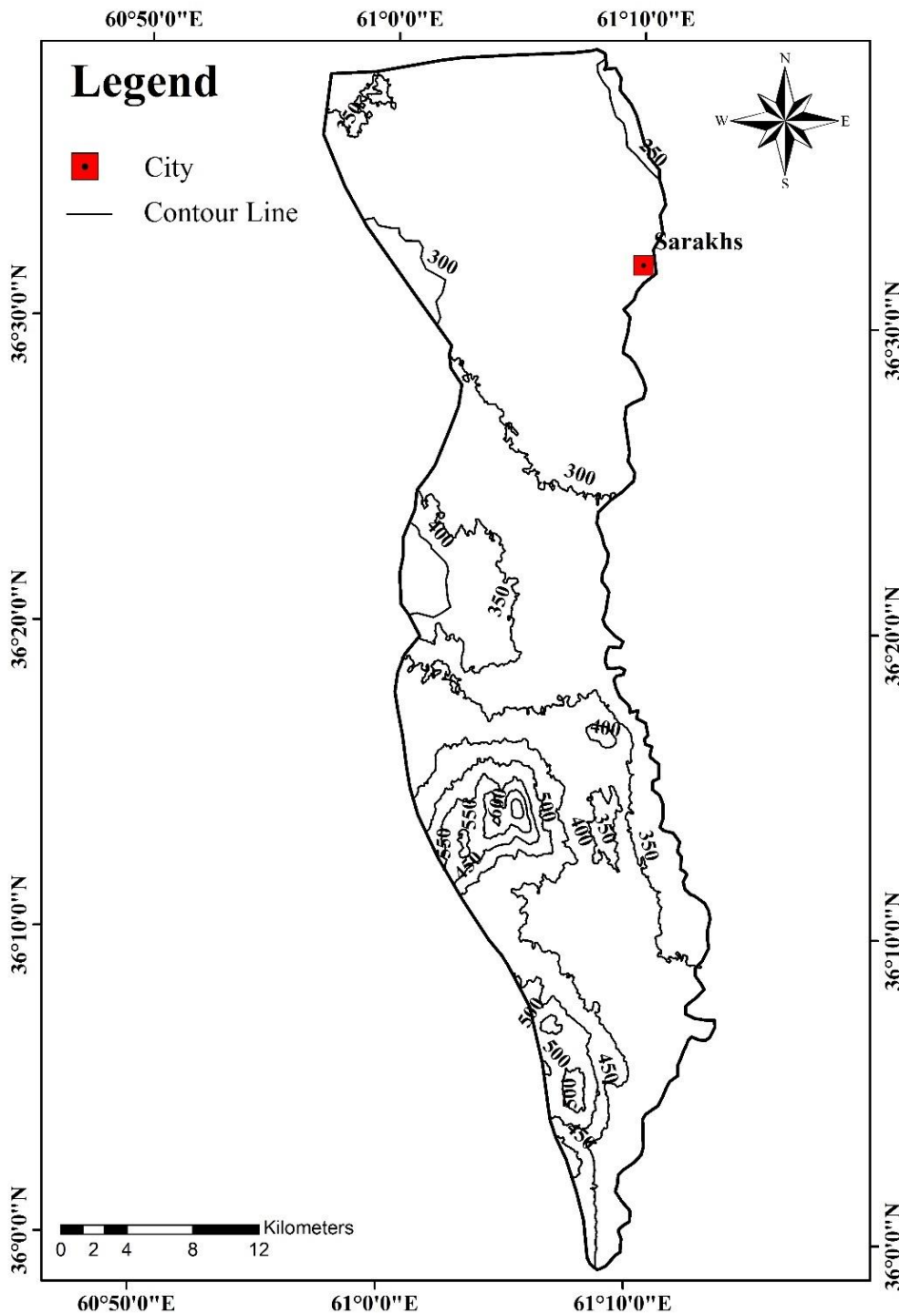
۴-۳-۲-۵- ارتفاع توپوگرافی و ارتفاع سنگ کف آبخوان

به منظور تهیه ارتفاع سلول‌های شبکه مدل از نقشه رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه استفاده شده است.

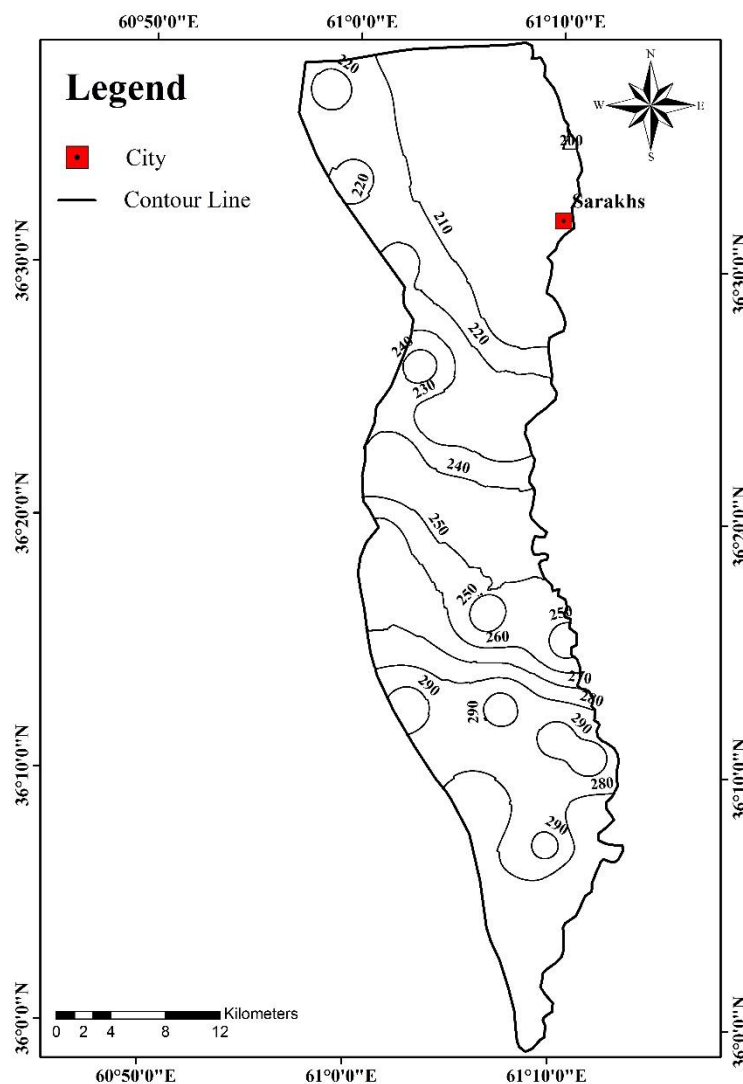
شکل (۴-۱۷) نقشه توپوگرافی سطحی آبخوان سرخس را نشان می‌دهد.

جهت به دست آوردن ارتفاع سنگ کف از اطلاعات حاصل از لاگ‌های حفاری و عمق برخورد آن‌ها به سنگ کف و مطالعات ژئوفیزیک صورت گرفته توسط شرکت مطالعات مه‌باب قدس (۱۳۶۰-۱۳۵۳) و

مطالعات قهرمانی-الکتروپروژکت (۱۳۴۹-۱۳۵۲) در دشت سرخس استفاده شده است. شکل (۴-۱۸) نقشه ارتفاعی سنگ کف آبخوان سرخس را نشان می‌دهد. طبق این نقشه ارتفاع سنگ کف آبخوان از ۲۰۰ تا ۲۹۰ متر متغیر می‌باشد و متوسط ضخامت آبرفت ۲۲۰ متر می‌باشد.



شکل ۴-۱۷: نقشه توپوگرافی سطحی دشت سرخس



شکل ۴-۱۸: نقشه‌ی ارتفاع سنگ کف آبخوان سرخس

۴-۳-۳- انتخاب دوره‌ها و گام‌های زمانی

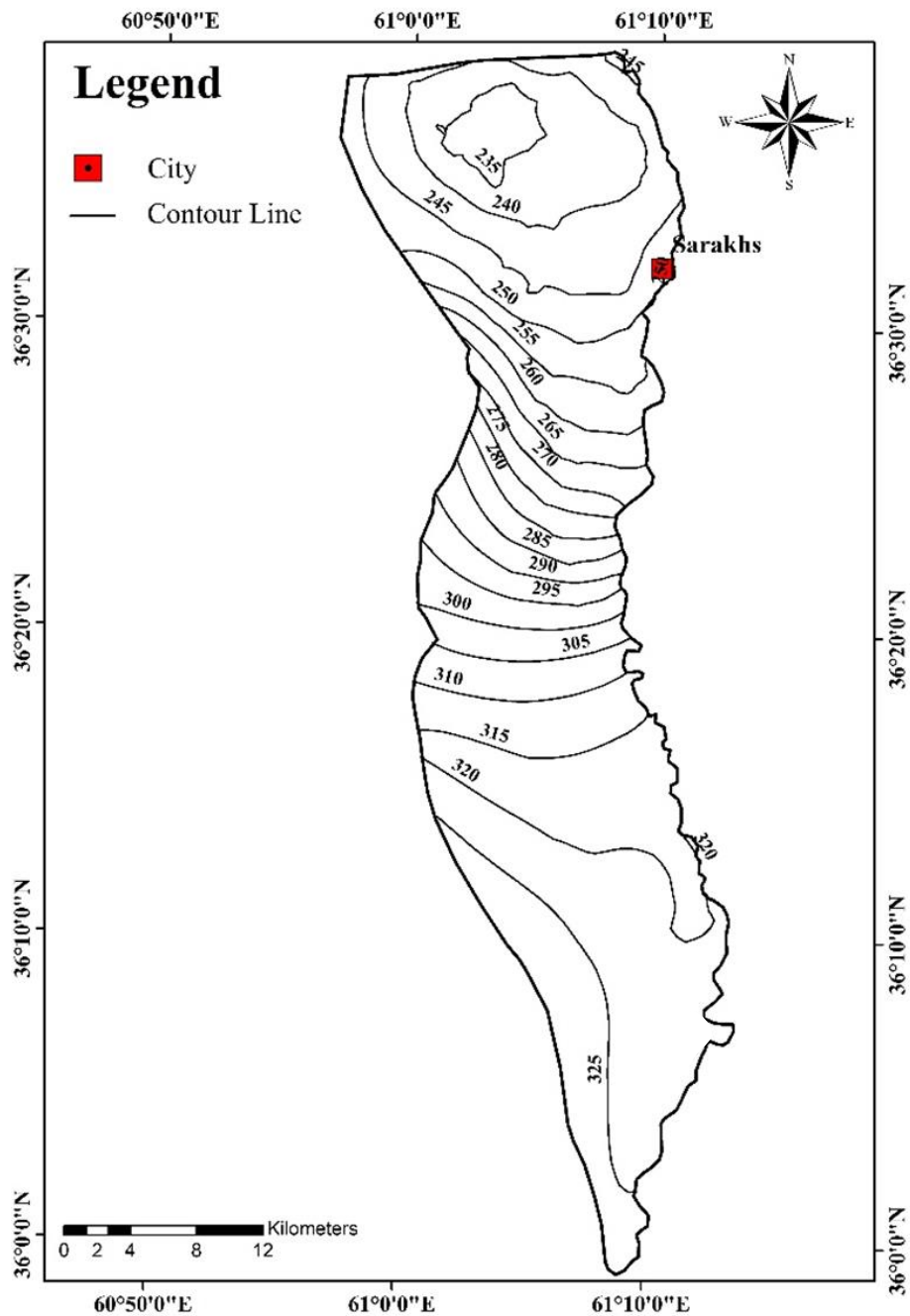
در این مرحله با توجه به استرس و تنش‌های مختلف، پارامتر زمانی تعریف می‌شود. که شامل دوره‌های تنش (Stress periods) و گام‌های زمانی (Time Steps) می‌باشد. بر این اساس برای بازه زمانی شهریور ۹۴ تا شهریور ۹۶، دوره تنش با گام زمانی یک ماهه در نظر گرفته شده است. هر چه تعداد گام‌های زمانی بیشتر باشد، دقت محاسبات نیز افزایش پیدا می‌کند. اطلاعات تغذیه و برداشت در هریک از دوره‌های تنش به مدل اعمال شده است.

۴-۳-۴- واسنجی مدل (Calibration)

با فرض اینکه تمام پارامترهای توضیح داده شده به طرز صحیح به هر سلول اختصاص داده شده باشد، با انتخاب گزینه اجرا (Run) از منوی اجرای مدل (Run Model) مدل ساخته شده اجرا می‌شود. خروجی مدل شامل بیلان برای هر استرس پیرو و اطلاعات ارتفاع سطح ایستابی برای پیزومترها در تمام استرس پیروها می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از بیلان مدل و مقادیر ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در پیزومترها، مهم‌ترین ابزار در جهت بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی الگوی جریان آب زیرزمینی می‌باشد. بنابراین هر چه نقشه هم‌پتانسیل شبیه‌سازی شده با حالت مشاهده‌ای نزدیک‌تر باشد نتایج مدل نیز از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد.

بعد از اجرای مدل و مقایسه مقادیر سطح آب در پیزومترها و الگوی جریان آب زیرزمینی در آبخوان، تغییرات شاخصی در مقادیر ارتفاع سطح ایستابی در پیزومترها مشاهده می‌گردد. از همین رو نسبت به واسنجی مدل از طریق تغییرات در پارامترهای مختلف مدل با توجه به حساسیت آنها طی فرآیند آنالیز حساسیت بر اساس دید هیدروژئولوژیکی و نظر کارشناسی اقدام گردید. آنالیز حساسیت در واقع به معنی مشخص کردن حساسیت مدل نسبت به پارامترهایی می‌باشد که به آن اعمال شده است. در طول حساسیت سنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، شرایط مرزی، سنگ کف بخوان و تغذیه تغییر داده می‌شوند. در این میان پارامترهایی که عکس‌العمل مدل به تغییراتشان بیشتر بوده و یا به عبارت دیگر مدل نسبت به آنها حساسیت بیشتری نشان می‌دهد، از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. زیرا با تغییر کمتر در این پارامترها می‌توان خطای میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را به حداقل رسانید و باعث می‌شود مدل به سرعت کالیبره شود. پس از انجام آنالیز حساسیت مشخص شد که مدل شبیه‌سازی شده نسبت به تغییرات سنگ کف و مقدار تغذیه وارد شده بیشترین حساسیت را داراست. واسنجی برای ۲۴ دوره تنش از شهریور ۹۴ تا شهریور ۹۶ انجام شده است. هر یک از پارامترها بسته به حساسیت آنها طی کالیبراسیون باید به اندازه‌ای تغییر داده شوند تا اختلاف میان سطح ایستابی

اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به حداقل مقدار برسد و همچنین مقدار بیلان مدل نیز مشابه بیلان تهیه شده باشد. بعد از اصلاح هر یک از پارامترها مدل دوباره اجرا می‌شود. این کار تا جایی تکرار می‌شود که نتایج قابل قبولی حاصل شود. شکل (۴-۱۹) نقشه هم‌پتانسیل واسنجی شده را در پایان دوره واسنجی نشان می‌دهد.

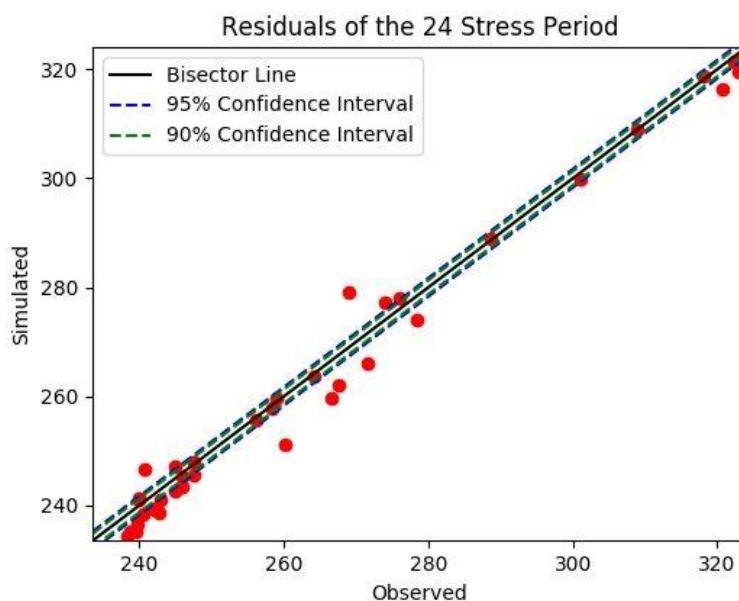


شکل ۴-۱۹: خطوط تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده توسط مدل در پایان دوره واسنجی

بر اساس استانداردهای امریکایی ASTM برای واسنجی مدل‌های جریان آب زیرزمینی در صورتی فرآیند واسنجی صحیح است که مقادیر باقیمانده‌ها بخش کوچکی از اختلاف بین بیشترین و کمترین بار هیدرولیکی مشاهده شده در آبخوان باشد. در صورتیکه ۱۰٪ این اختلاف به عنوان این بخش کوچک در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه حداقل بار هیدرولیکی مشاهده شده در محدوده آبخوان سرخس ۲۳۸ متر و حداکثر آن ۳۲۵ متر از سطح دریا می‌باشد، در این صورت معیار خطای واسنجی ۸ متر خواهد بود. در مدل واسنجی شده آبخوان سرخس حداکثر مقادیر باقیمانده‌ها ۵ متر بوده که کمتر از معیار واسنجی می‌باشد. بنابراین مدل تهیه شده از آبخوان صحیح می‌باشد. سایر نتایج حاصل از واسنجی که بیانگر صحت و قابل اعتماد بودن مدل آبخوان سرخس می‌باشد به شرح زیر است.

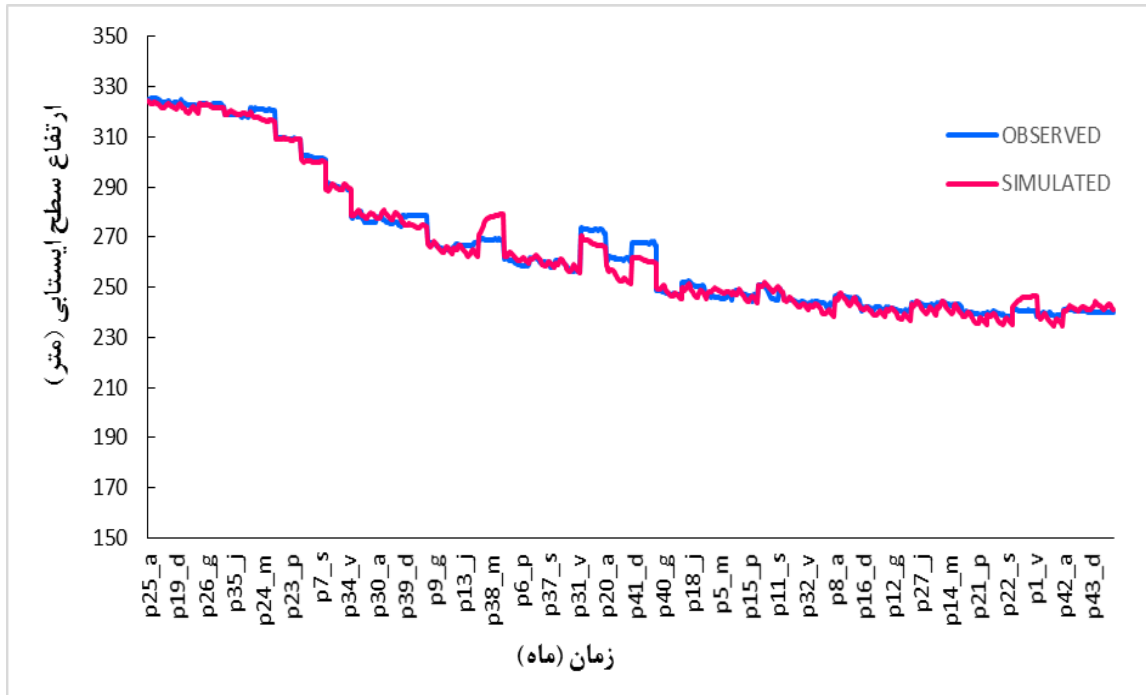
۳-۴-۱- بررسی کلی مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده و مشاهده‌ای

شکل (۴-۲۰) مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده را در آبخوان آبرفتی سرخس نشان می‌دهد. همبستگی بالای مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای بیانگر دقت مدل در پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی می‌باشد.



شکل ۴-۲۰: انطباق مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در چاه‌های پیژومتری در انتهای دوره مدل‌سازی

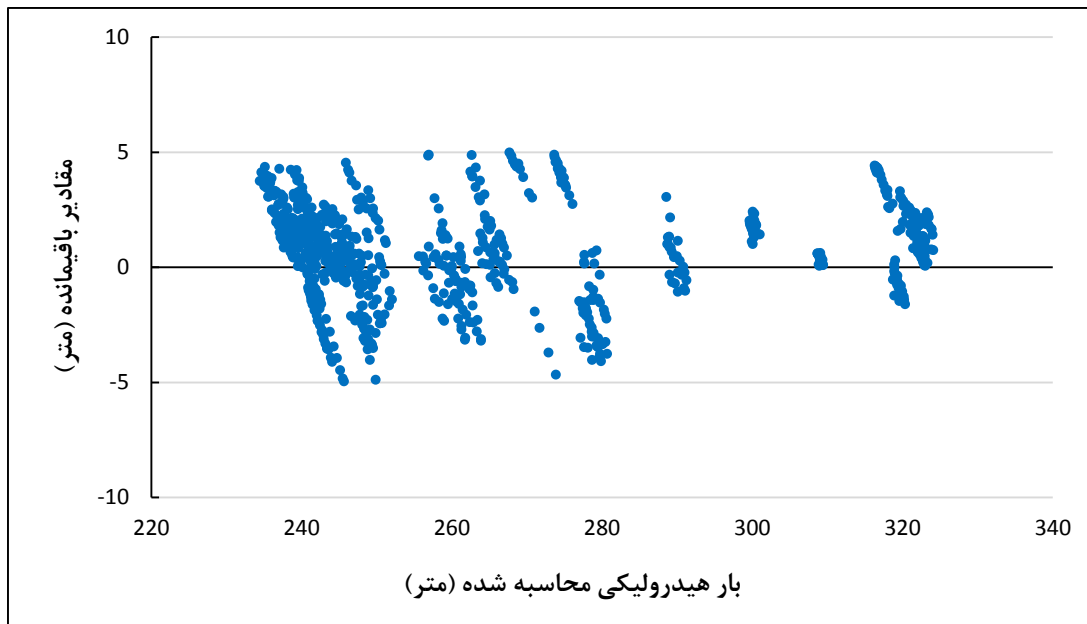
انطباق سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی (شکل ۴-۲۱) در بازه دوساله (۲۴ماه) نیز حاکی از شبیه‌سازی قابل قبول جریان آب زیرزمینی توسط مدل عددی می‌باشد (شکل ۴-۲۱).



شکل ۴-۲۱: انطباق سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی در انتهای دوره مدل‌سازی

۴-۳-۲- بررسی مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل مقادیر باقیمانده‌ها

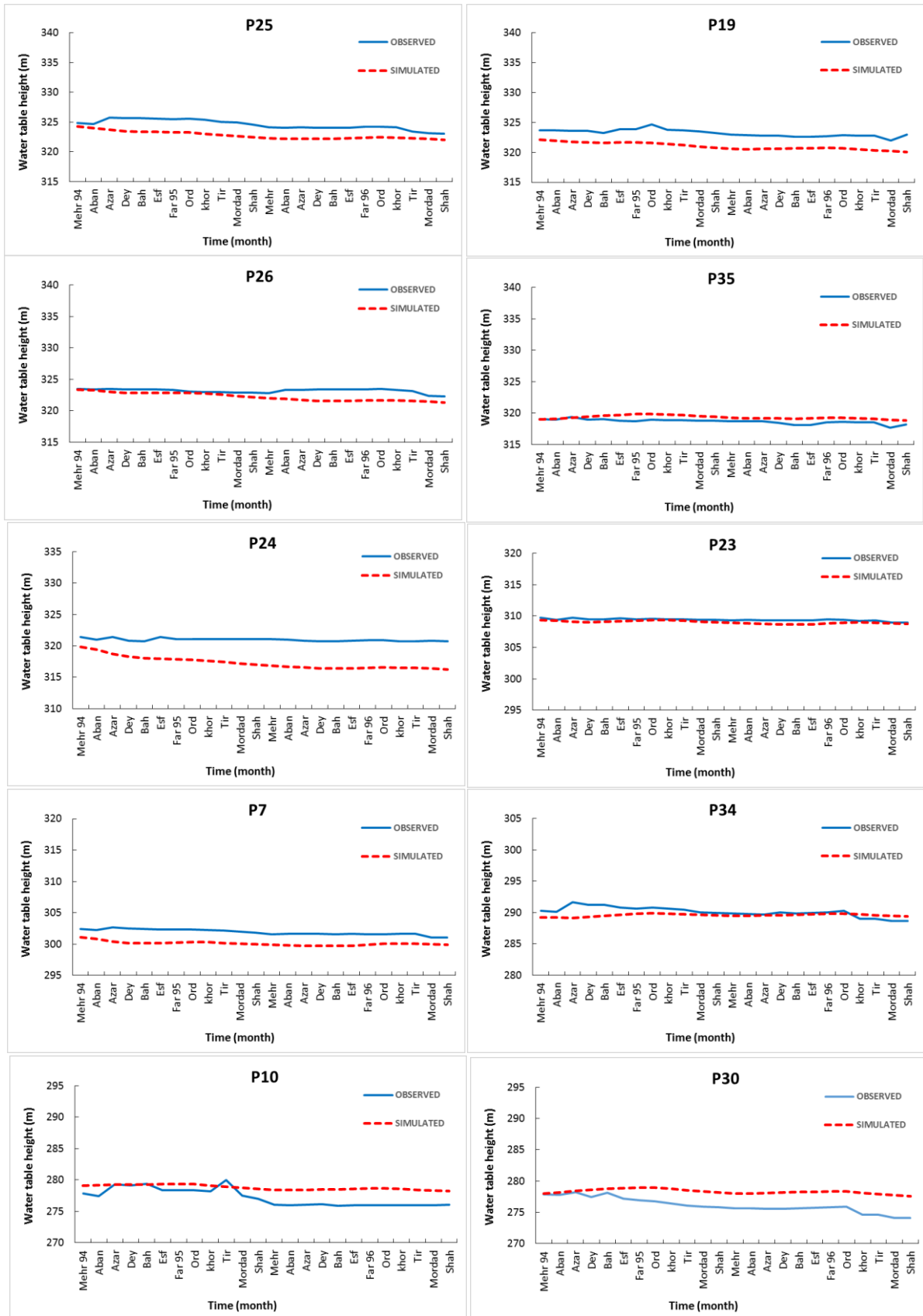
شکل (۴-۲۲) توزیع مقادیر باقیمانده (اختلاف بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) در برابر مقادیر محاسبه شده بار هیدرولیکی را نشان می‌دهد. توزیع مقادیر از حدود -۵ تا ۵ متغیر بوده که بیانگر عدم جهت یافتگی و بنابراین صحت شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی می‌باشد.



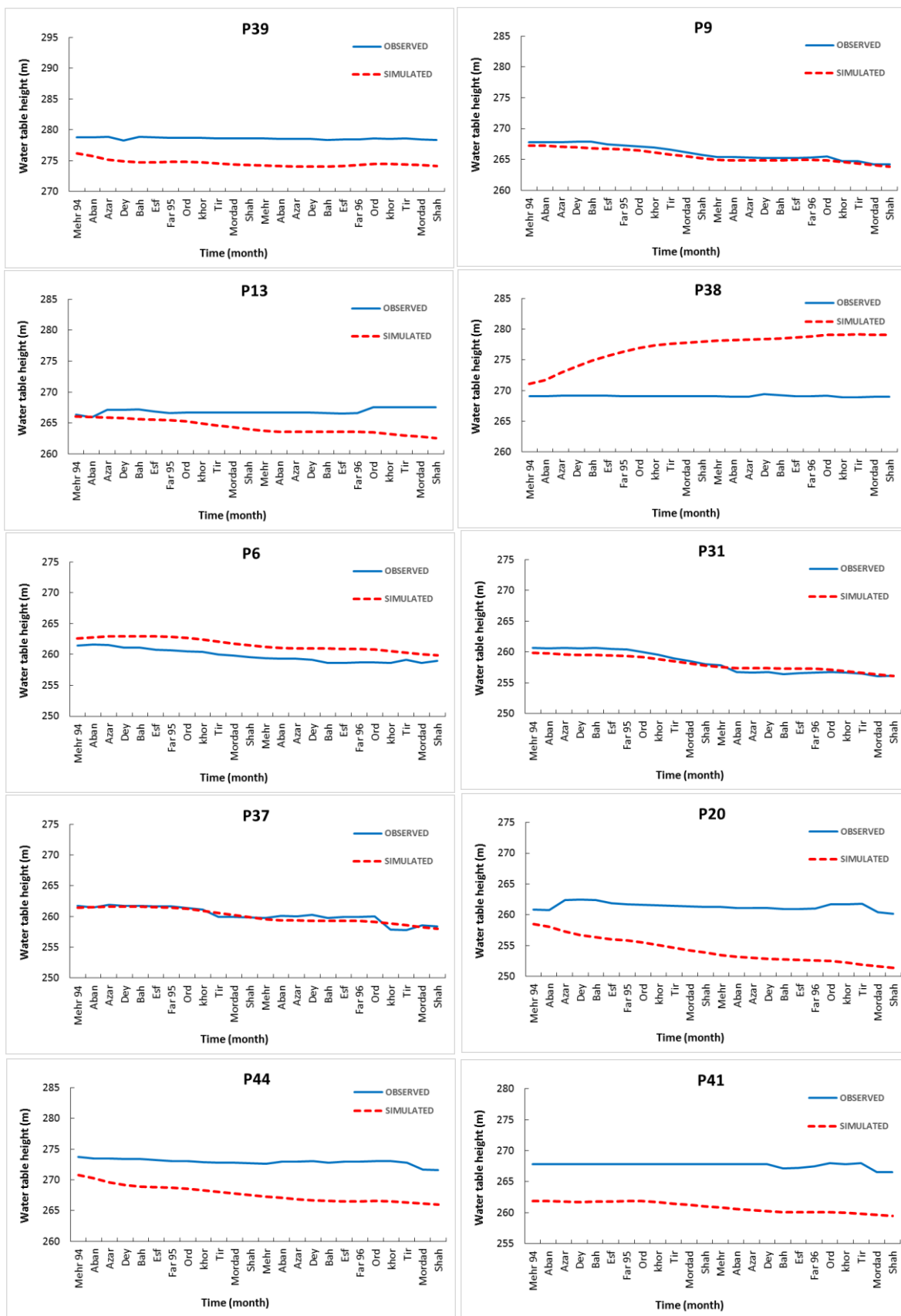
شکل ۴-۲۲: مقایسه مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل مقادیر باقیمانده‌ها در دوره واسنجی مدل

۴-۳-۳-۴- مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهده‌ای

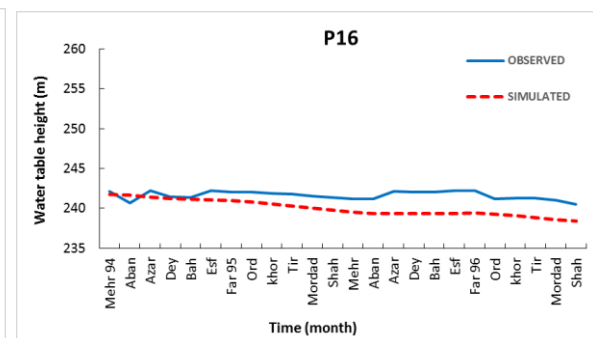
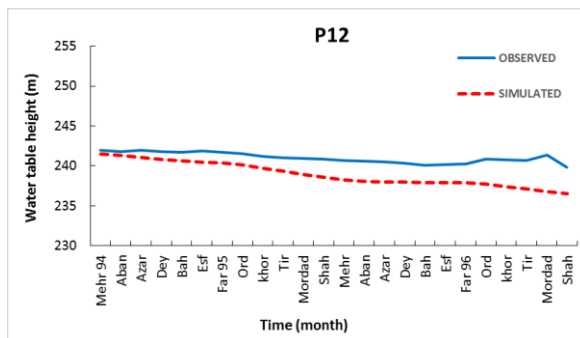
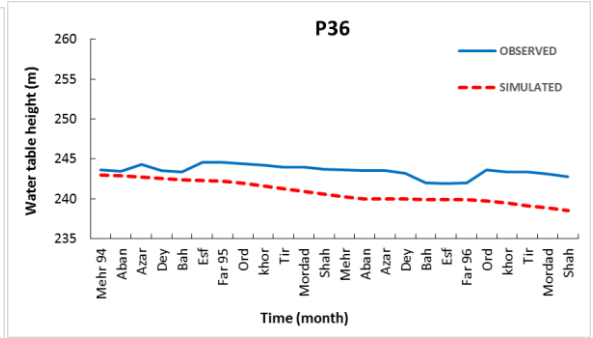
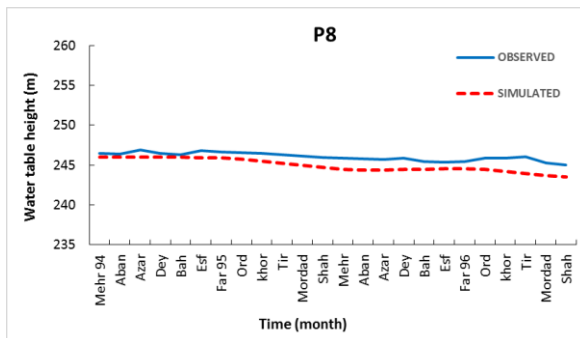
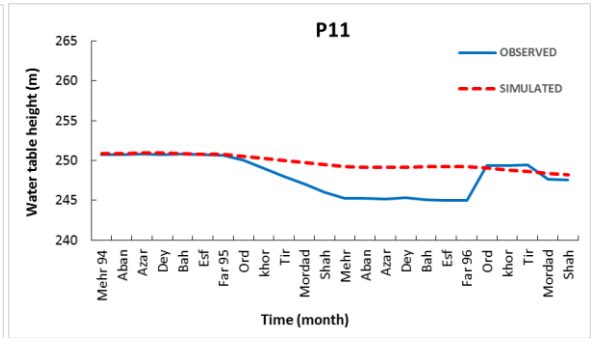
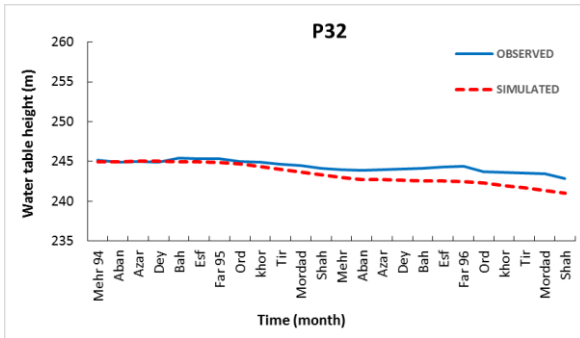
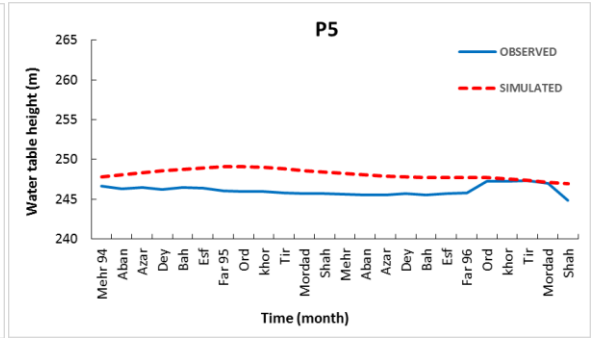
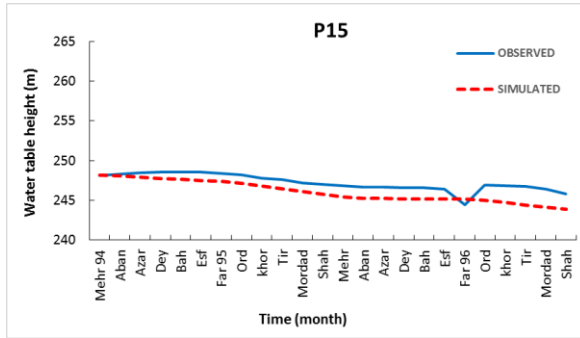
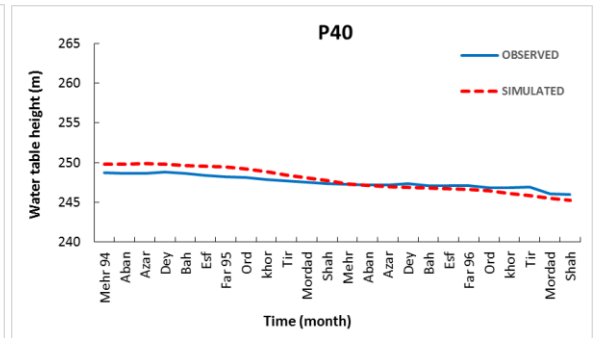
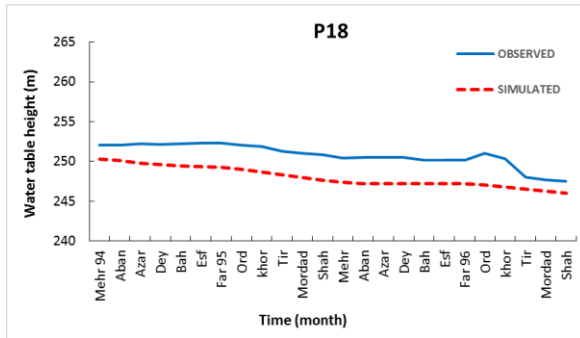
مطابق نتایج حاصل از واسنجی بایستی مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه‌ای و مشاهده‌ای بیشترین انطباق را نسبت به هم پیدا کنند. شکل (۴-۲۳) مقایسه نتایج هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای پیرومترها انطباق خوبی وجود دارد که نشان می‌دهد معیار واسنجی برای آن‌ها به درستی برآورد شده است. بنابراین مدل تهیه شده از دقت و اعتبار خوبی جهت محاسبات بعدی برخوردار می‌باشد.



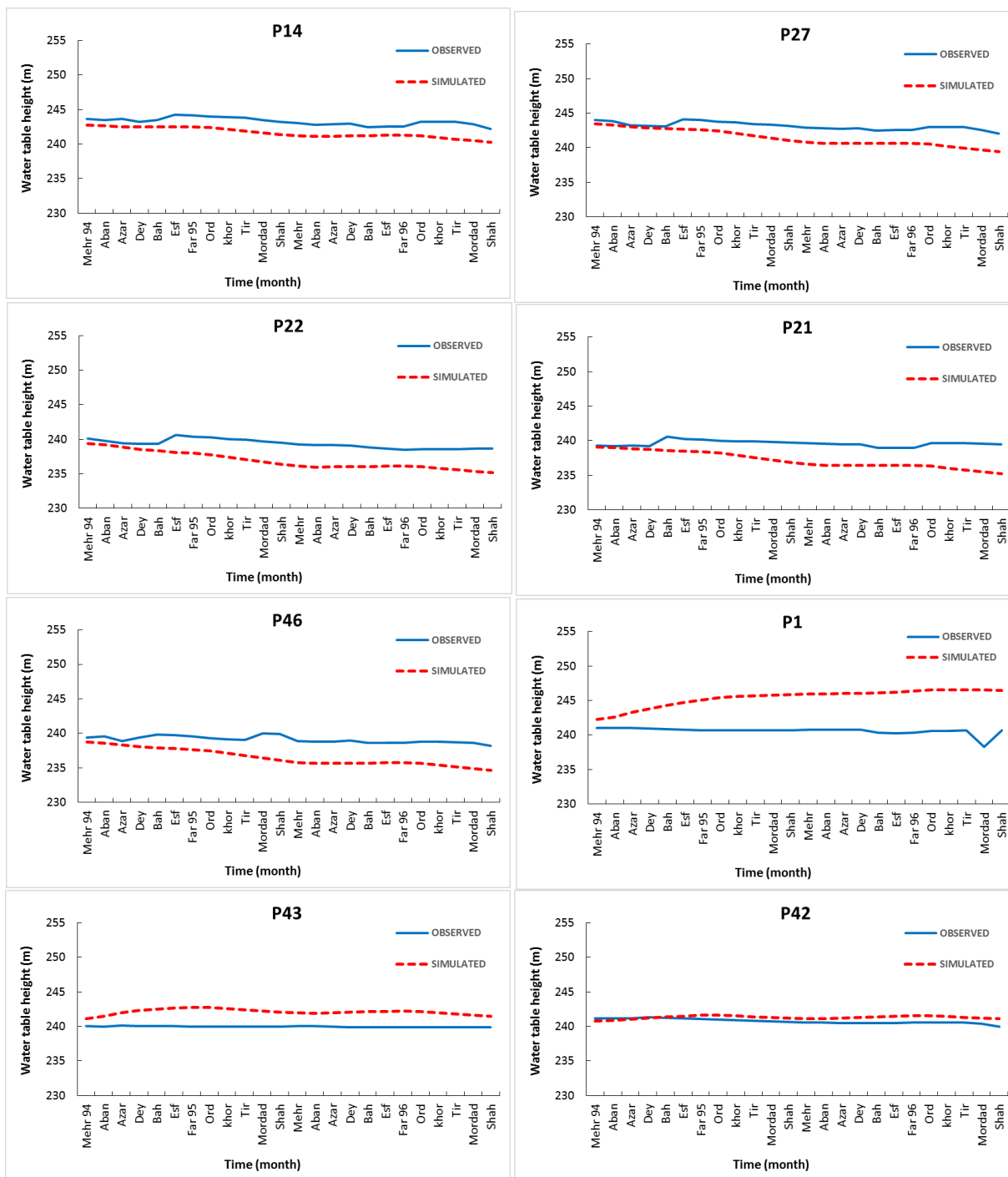
شکل ۴-۲۳: مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهداتی در پیزومترهای آبخوان سرخس



ادامه شکل ۴-۲۳: مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهداتی در پیزومترهای آبخوان سرخس



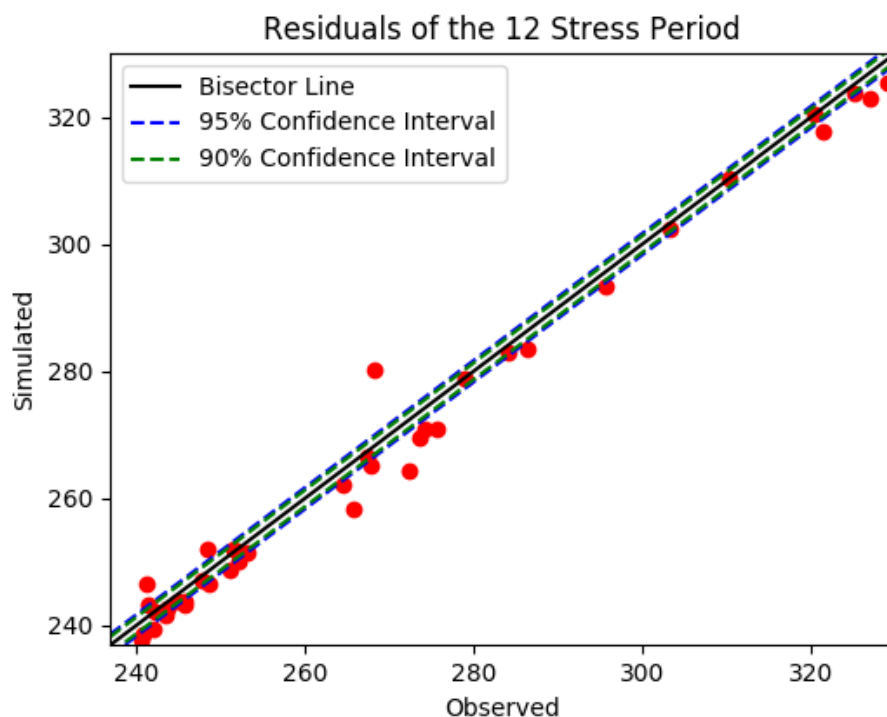
ادامه شکل ۴-۲۳: مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهداتی در پیزومترهای آبخوان سرخس



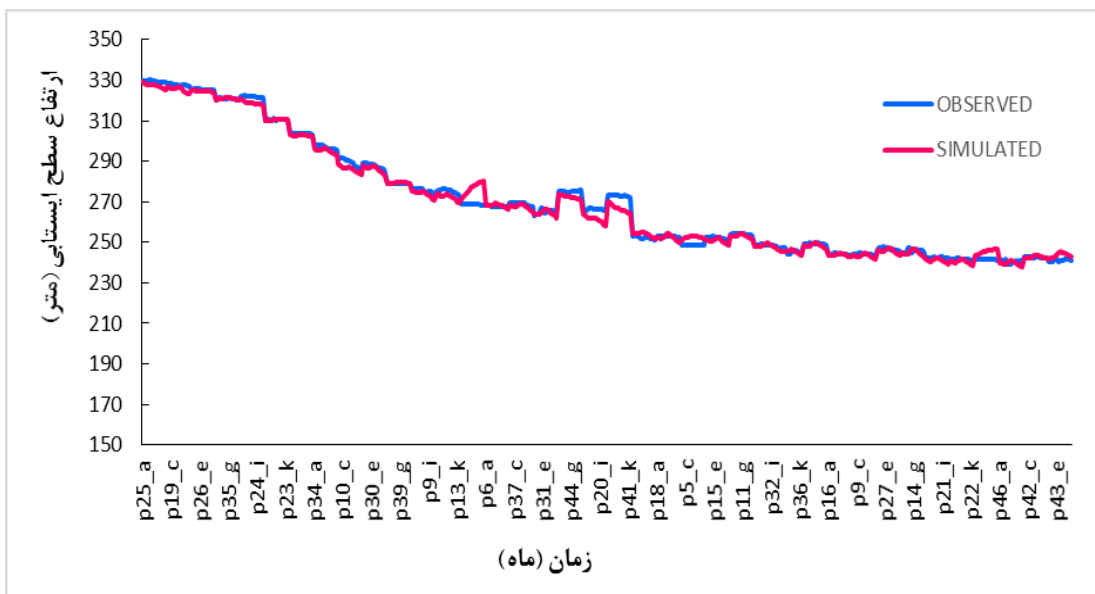
ادامه شکل ۴-۲۳: مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل و هیدروگراف مشاهداتی در پی‌زومترهای آبخوان سرخس

۴-۳-۵- صحت سنجی مدل

صحت سنجی مدل، با استفاده از داده‌های سال ۹۲-۱۳۹۱ برای یک دوره یک ساله با ۱۲ دوره تنش و گام‌های زمانی یک ماهه انجام شد. در دوره پارامترهای کالیبره شده در مدل تغییر نمی‌کنند و فقط پارامترهای وابسته به زمان که شامل تغذیه و برداشت توسط چاه‌های بهره‌برداری هستند تغییر می‌کنند. در صورت تطابق مقادیر شبیه‌سازی شده با شرایط صحرایی، از مدل برای پیش‌بینی‌های آینده استفاده می‌شود در غیر این صورت، مدل مورد نظر باید دوباره مراحل واسنجی را طی نماید. شکل (۴-۲۴) انطباق خوب مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مشاهده‌ای در چاه‌های پیزومتری را در دوره صحت سنجی نمایش می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت که مدل دقت بالایی در برآورد مقادیر سطح ایستابی شبیه‌سازی شده را دارد و برای مقاصد بعدی مثلاً تخمین تغذیه می‌توان از آن استفاده کرد. انطباق سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی در دوره صحت سنجی (شکل ۴-۲۵) نیز حاکی از شبیه‌سازی قابل قبول جریان توسط مدل عددی می‌باشد.



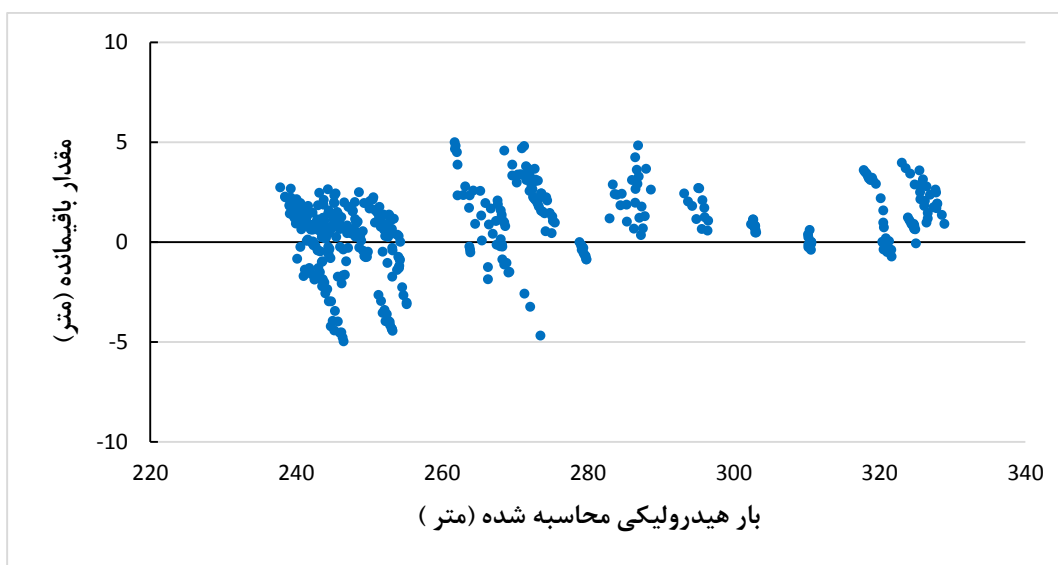
شکل ۴-۲۴: انطباق مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در چاه‌های پیزومتری در دوره صحت سنجی



شکل ۴-۲۵: انطباق سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسباتی در دوره صحت سنجی

۴-۳-۵-۱- بررسی مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل مقادیر باقیمانده‌ها

شکل (۴-۲۶) توزیع مقادیر باقیمانده (اختلاف بین مقادیر محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) در برابر مقادیر محاسبه شده بار هیدرولیکی را نشان می‌دهد. توزیع مقادیر از حدود -۵ تا ۵ متغیر بوده بیانگر عدم جهت یافتگی و بنابراین صحت شبیه‌سازی در دوره صحت سنجی مدل عددی می‌باشد.



شکل ۴-۲۶: مقایسه مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده در مقابل مقادیر باقیمانده‌ها در دوره صحت سنجی

۴-۳-۶- بیان آب زیرزمینی محاسبه شده توسط مدل

یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین اطلاعات خروجی از مدل آب زیرزمینی، تهیه بیان آب زیرزمینی در محدوده مدل می‌باشد. هدف از محاسبه بیان آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه تعیین میزان ورودی و خروجی‌های دشت و بررسی میزان کسری آبخوان می‌باشد. جدول (۴-۵) بیان آبخوان سرخس محاسبه شده توسط مدل عددی مادفلو را نشان می‌دهد. با استفاده از مدل مادفلو (MODFLOW) می‌توان بیان را به صورت تجمعی در ماه‌های مختلف هم به صورت حجمی و هم نرخ جریان محاسبه کرد. در بیان محاسبه شده توسط مدل باید توجه نمود که مقدار تغذیه (RECHARGE) به سفره از طریق آب برگشتی و بارش مجموع آن‌ها باهم محاسبه شده است. جریان خروجی از مدل که توسط چاه‌های بهره‌برداری می‌باشد، نیز با عنوان چاه‌ها (WELS) آمده است. جریان آب زیرزمینی ورودی به آبخوان نیز تحت عنوان مرز وابسته به جریان (HEAD DEP BOUNDS) آمده است.

مطابق نتایج بیان مقدار تغذیه سالانه به آبخوان که از طریق آب برگشتی و بارش انجام شده حدود ۸۰ میلیون مترمکعب، جریان ورودی زیرزمینی حدود ۲۰۴ میلیون مترمکعب و تخلیه چاه‌ها حدود ۳۰۸ میلیون مترمکعب محاسبه شده است. بر این اساس مجموع ورودی‌های سالانه به آبخوان حدود ۲۸۴ میلیون مترمکعب بوده، در حالی که مجموع خروجی‌ها ۳۰۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. کاهش حجم ذخیره آبخوان که معادل ۲۴ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده، نشان‌دهنده بیان منفی و تأکیدی بر کسری مخزن سالانه آبخوان سرخس می‌باشد. که این کاهش حجم با افت ممتد سطح ایستابی همراه بوده، و تغییر در الگوی جریان و معکوس شدن جریان آب زیرزمینی در بخش شمالی آبخوان را در پی داشته که این موضوع در مدیریت این آبخوان بایستی مد نظر قرار گیرد.

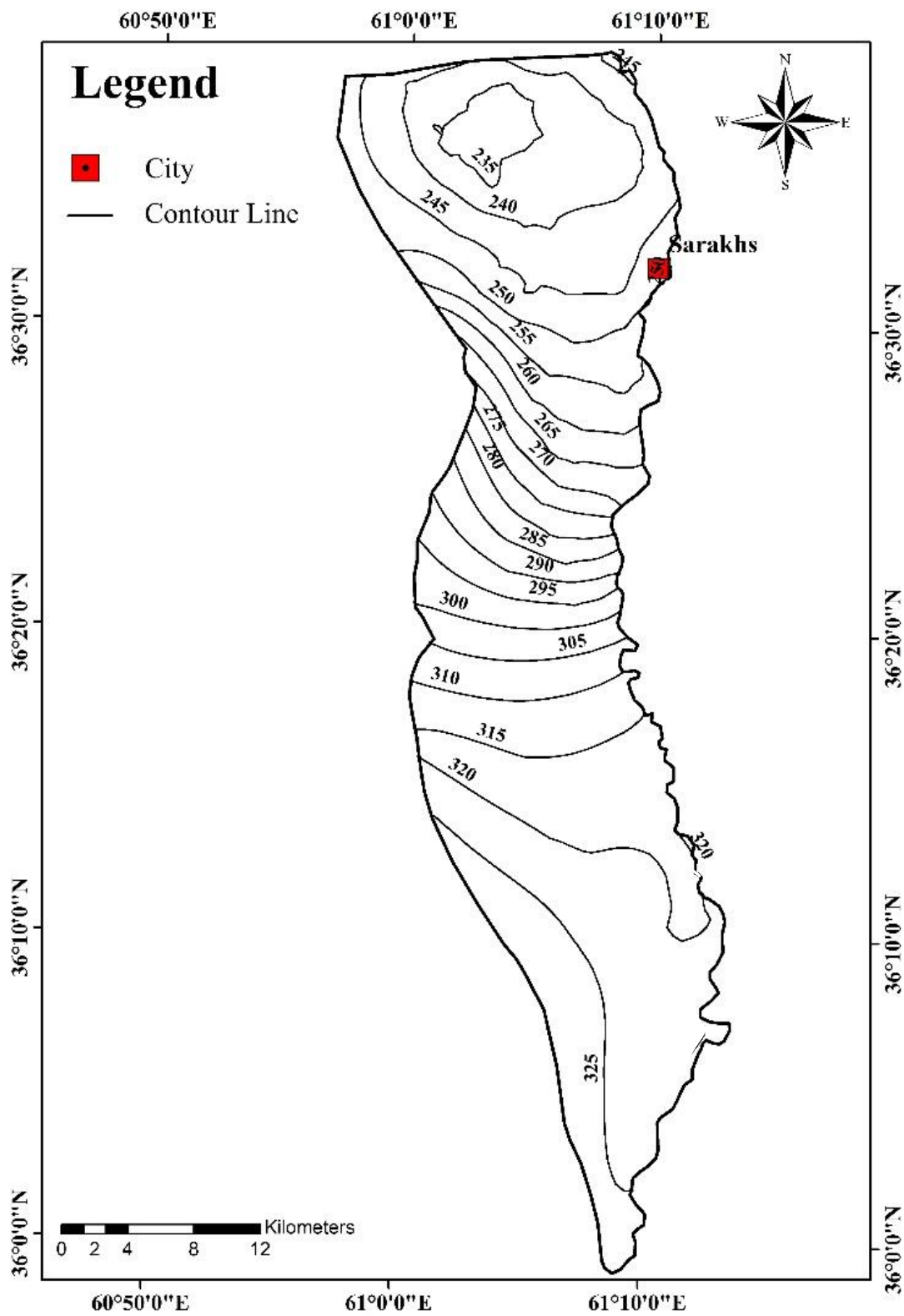
جدول ۴-۵: نتایج حاصل از بیلان آبخوان آبرفتی سرخس در انتهای دوره شبیه‌سازی مدل

| HEAD WILL BE SAVED ON UNIT 51 AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 24 | | | |
|--|----------------|--------------------------|-------------|
| VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 24 | | | |
| CUMULATIVE VOLUMES | L**3 | RATES FOR THIS TIME STEP | L**3/T |
| IN: | | IN: | |
| STORAGE = | 154938144.0000 | STORAGE = | 276237.7812 |
| CONSTANT HEAD = | 0.0000 | CONSTANT HEAD = | 0.0000 |
| WELLS = | 0.0000 | WELLS = | 0.0000 |
| HEAD DEP BOUNDS = | 408573152.0000 | HEAD DEP BOUNDS = | 569183.1875 |
| RECHARGE = | 160528496.0000 | RECHARGE = | 0.0000 |
| TOTAL IN = | 724039808.0000 | TOTAL IN = | 845421.0000 |
| OUT: | | OUT: | |
| STORAGE = | 108032496.0000 | STORAGE = | 3490.6211 |
| CONSTANT HEAD = | 0.0000 | CONSTANT HEAD = | 0.0000 |
| WELLS = | 615300608.0000 | WELLS = | 840574.5000 |
| HEAD DEP BOUNDS = | 708527.0000 | HEAD DEP BOUNDS = | 1356.1268 |
| RECHARGE = | 0.0000 | RECHARGE = | 0.0000 |
| TOTAL OUT = | 724041664.0000 | TOTAL OUT = | 845421.2500 |
| IN - OUT = | -1856.0000 | IN - OUT = | -0.2500 |
| PERCENT DISCREPANCY = | -0.00 | PERCENT DISCREPANCY = | -0.00 |

۴-۳-۷- نقشه تراز شبیه‌سازی شده توسط مدل

نقشه هم‌پتانسیل شبیه‌سازی شده آبخوان سرخس با استفاده از مدل عددی در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است. بر این اساس سطح آب زیرزمینی در آبخوان از حداقل ۲۳۵ متر تا حداکثر ۳۲۵ متر متغیر می‌باشد. مطابق الگوی شبیه‌سازی شده سطح ایستابی (شکل ۴-۲۶) جهت کلی جریان در آبخوان سرخس از جنوب به سمت شمال می‌باشد. تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در قسمت‌های شمالی باعث افزایش میزان برداشت از آبخوان، تشکیل مخروط افت و در نتیجه ایجاد منحنی‌های تراز بسته در قسمت شمالی دشت شده است. طبق مطالعات انجام شده قبلی جهت جریان از جنوب به سمت شمال بوده و در قسمت شمالی دشت، تخلیه آبخوان انجام می‌شده است. در حالی که به دلیل افزایش بهره‌برداری، در حال حاضر آبخوان فاقد خروجی زیرزمینی بوده و عمده تخلیه توسط چاه‌های بهره‌برداری صورت می‌گیرد. ایجاد منحنی‌های بسته در خطوط هم‌پتانسیل نشان دهنده تغییر الگوی جریان آب زیرزمینی بوده که می‌تواند تغییرات کیفی برای مثال شوری منابع آب زیرزمینی به دلیل نفوذ آب‌های شور از مرز

شمالی آبخوان را در پی داشته باشد. چنانچه افت سطح آب همچنان ادامه داشته باشد در آینده‌ای نه چندان دور شور شدن احتمالی آب چاه‌ها را به دنبال خواهد داشت که این موضوع بایستی در مدیریت این آبخوان مرزی مورد توجه قرار گیرد. مقایسه نقشه سطح ایستابی شبیه‌سازی شده آبخوان سرخس توسط مدل عددی (شکل ۴-۲۷) و نقشه تراز ترسیم شده بر اساس مقادیر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در پیزومترها (شکل ۴-۷) تأییدی بر توانایی مدل در شبیه‌سازی آبخوان بوده و بنابراین مدل تهیه شده جهت انجام مطالعات بعدی نظیر تخمین تغذیه قابل اعتماد می‌باشد.

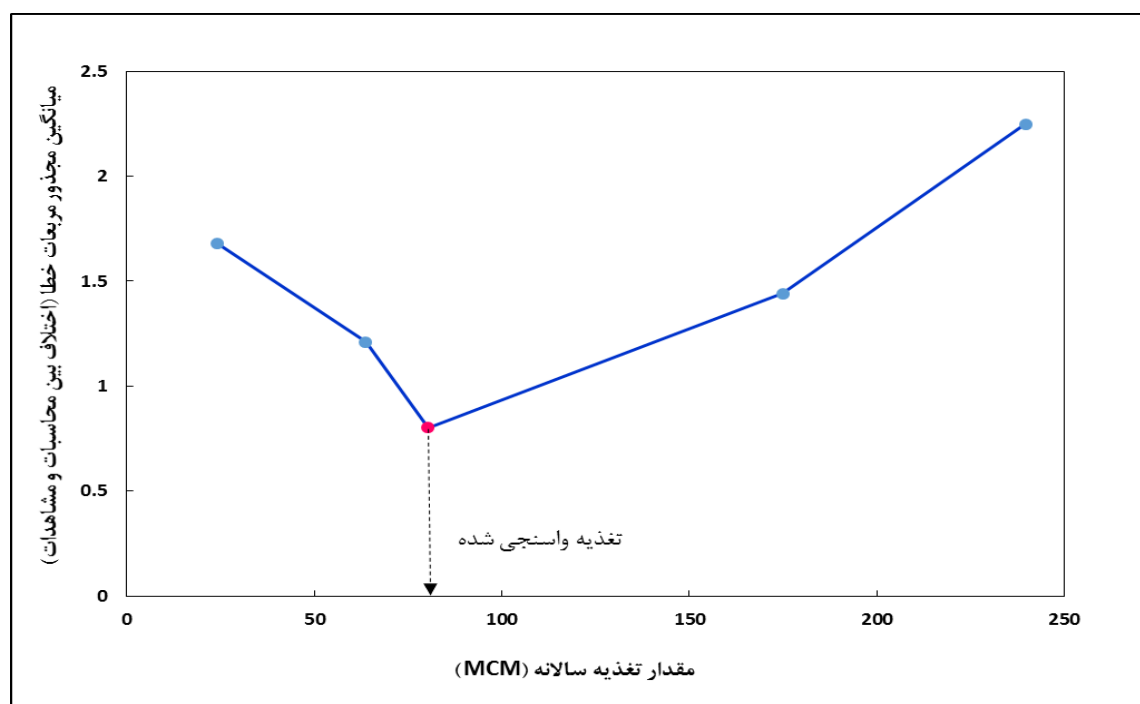


شکل ۴-۲۷: خطوط تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان سرخس شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی (شهریور ۹۶)

۴-۳-۸- تخمین تغذیه و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن

آنالیز حساسیت تغذیه (Recharge Sensitivity Analysis)

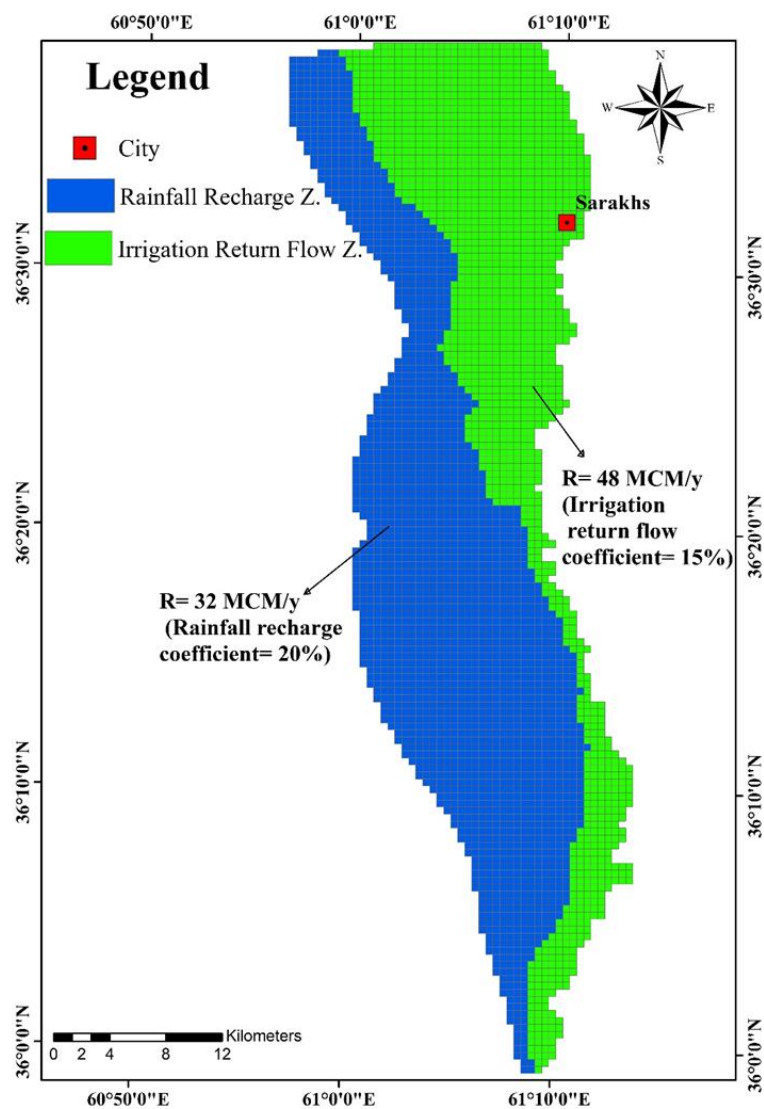
با توجه به اینکه هدف از تهیه مدل و شبیه‌سازی آبخوان سرخس تخمین تغذیه به آبخوان بوده است، ابتدا حساسیت مدل نسبت به تغذیه بررسی گردید. ابتدا برای تمام سلول‌ها تغذیه به میزان چند درصد افزایش و کاهش یافته و مدل اجرا شده است. بدین منظور تغییرات تابع هدف (اختلاف بین هد محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) نسبت به تغییرات تغذیه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴-۲۸). همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل تهیه شده از آبخوان کاملاً به تغییرات تغذیه حساس بوده و بنابراین می‌توان به نتایج آن در تخمین تغذیه اعتماد نمود.



شکل ۴-۲۸: نتایج حساسیت نسبت به مقادیر مختلف تغذیه وارد شده به مدل

بر اساس نتایج مدل میزان کل تغذیه به آبخوان سرخس برابر ۸۰ میلیون مترمکعب در سال بوده که از دو منبع بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی تأمین شده است.

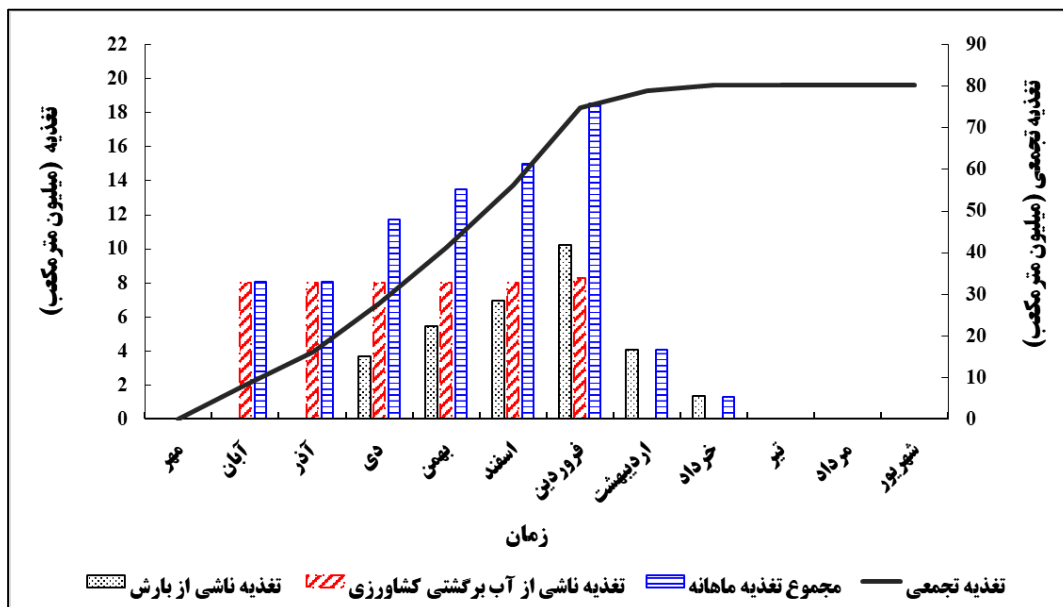
تغییرات مکانی تغذیه به آبخوان سرخس در شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است. تغذیه سطحی به آبخوان سرخس در دو بخش شرقی و غربی تفکیک شده است. بخش شرقی آبخوان به علت تمرکز زمین‌های زراعی به عنوان محدوده تأثیر آب برگشتی و بخش غربی به دلیل وجود رسوبات ماسه‌ای بادی، نفوذپذیری بالا و شبکه آبراهه‌ای توسعه‌یافته به‌عنوان محدوده تغذیه ناشی از بارش در نظر گرفته شده است. مقدار تغذیه سالانه ناشی از بارش برابر ۳۲ میلیون مترمکعب در سال بوده که با توجه به میانگین بارش سالانه در محدوده آبخوان سرخس (۱۸۴ میلی‌متر در سال) این حجم تغذیه معادل حدود ۲۰ درصد بارش سالیانه بوده و بنابراین ضریب تغذیه ناشی از بارش در آبخوان سرخس برابر ۲۰ درصد معرفی می‌گردد. تغذیه ناشی از کشاورزی که در بخش شرقی آبخوان روی می‌دهد، برابر ۴۸ میلیون مترمکعب در سال بوده که این حجم تغذیه برابر حدود ۱۵ درصد کل حجم آب استفاده شده در کشاورزی می‌باشد. بنابراین ضریب آب برگشتی کشاورزی در محدوده آبخوان سرخس نیز برابر ۱۵ درصد معرفی می‌گردد.



شکل ۴-۲۹: تغییرات مکانی تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس بر اساس نتایج مدل عددی

تغییرات زمانی تغذیه به آبخوان سرخس بر اساس نتایج مدل عددی در شکل (۴-۳۰) ترسیم شده است. مقدار تغذیه سالانه ناشی از بارش به آبخوان از حداقل صفر تا حداکثر ۱۰ میلیون مترمکعب در ماه‌های مختلف متغیر می‌باشد. حداقل مقدار تغذیه ناشی از بارش در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر بوده و حداکثر آن در فروردین‌ماه روی می‌دهد. سری زمانی تغییرات حجم آب برگشتی در طول سال (شکل ۴-۳۰) نشان می‌دهد عمده تغذیه ناشی از آب برگشتی کشاورزی مربوط به نیمه اول سال آبی (ماه‌های آبان تا فروردین) بوده که بر اثر مصرف آبیاری بیش از نیاز محصولات زراعی روی داده

است. در این دوره از سال به دلیل کاهش دمای هوا و کم بودن عمق ریشه محصولات زراعی، میزان تبخیر و تعرق (نیاز آبی) اندک بوده، لیکن کشاورزان به صورت سنتی آبیاری مازاد بر نیاز محصول انجام می‌دهند که این موضوع برگشت آب مازاد بر نیاز آبی گیاه به صورت تغذیه به آبخوان را در پی دارد. لازم به ذکر است نتایج حاصل از مدل‌سازی در شبیه‌سازی تغییرات زمانی آب برگشتی کشاورزی در آبخوان سرخس با مطالعات اندازه‌گیری مستقیم آب برگشتی کشاورزی با استفاده از لایسیمترها در مناطق نیمه‌خشک ایران (Jafari et al., 2012) همخوانی دارد. در مجموع تغذیه تجمعی ناشی از بارش و آب برگشتی در ماه‌های دی تا فروردین باعث افزایش حجم مخزن آب زیرزمینی و بالا آمدن سطح ایستابی در این دوره زمانی از سال می‌گردد. مطابق نتایج حاصل از مدل عددی حداکثر میزان مجموع تغذیه ناشی از بارش و آب برگشتی کشاورزی حدود ۱۸ میلیون مترمکعب بوده که در فروردین‌ماه روی می‌دهد. آبخوان سرخس در دوره تابستان و اوایل پاییز (ماه‌های تیر تا مهر) فاقد هرگونه تغذیه سطحی (مجموع بارش و آب برگشتی کشاورزی) بوده که این موضوع با نبود بارندگی در این دوره و همچنین افزایش میزان تبخیر و تعرق که سبب کاهش و یا توقف آب برگشتی کشاورزی می‌گردد، همخوانی دارد.



شکل ۴-۳: تغییرات زمانی تغذیه به آبخوان سرخس بر اساس نتایج مدل عددی

فصل پنجم

نتیجہ گیری و مشاہدہ

۵-۱- مقدمه

در این مطالعه، تغذیه به آبخوان آبرفتی سرخس با استفاده از روش مدل سازی عددی برآورد گردید. در این فصل، نتایج حاصل از تحقیق ارائه شده و در پایان پیشنهادهایی جهت مطالعات بعدی ذکر می گردد.

۵-۲- نتایج

۱- بررسی هیدروگراف معرف آبخوان سرخس نشان می دهد که در یک دوره ۱۲ ساله، از سال آبی ۸۳-۸۴ تا ۹۶-۹۵ میزان افت حدود ۳/۵ متر بوده که میانگین افت سالانه آن ۰/۳ متر می باشد. نرخ افت سطح ایستابی در سال های اخیر افزایش یافته و به حدود ۰/۶ متر در سال آبی ۹۶-۹۵ رسیده است.

۲- بر اساس نتایج آزمایش های پمپاژ، قابلیت انتقال آبخوان قابل تقسیم بندی به سه زون با مقادیر کمتر از ۲۵۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۵۰۰ مترمربع بر روز می باشد متوسط ضریب ذخیره آبخوان آبرفتی دشت سرخس نیز برابر ۷٪ درصد برآورد گردیده است.

۳- مقایسه نتایج هیدروگراف های شبیه سازی شده توسط مدل عددی و مشاهده ای پیژومترها در دوره واسنجی مدل عددی (شهریور ۹۴ تا شهریور ۹۶) نشان می دهد، بین مقادیر محاسبه ای و مشاهده ای پیژومترها انطباق خوبی وجود دارد. بنابراین مدل تهیه شده از دقت و اعتبار خوبی جهت محاسبات بعدی برخوردار می باشد.

۴- صحت سنجی مدل، با استفاده از داده های سال ۹۲-۱۳۹۱ برای یک دوره یک ساله با ۱۲ دوره تنش و گام های زمانی یک ماهه انطباق خوب مقادیر محاسبه شده توسط مدل و مشاهده ای در چاه های پیژومتری را نشان می دهد. انطباق سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده ای و محاسباتی در دوره صحت سنجی نیز حاکی از شبیه سازی قابل قبول جریان توسط مدل عددی می باشد.

۵- مطابق نتایج بیلان آبخوان شبیه سازی شده توسط مدل عددی مقدار تغذیه سالانه به آبخوان که از طریق آب برگشتی و بارش انجام شده حدود ۸۰ میلیون مترمکعب، جریان ورودی زیرزمینی حدود ۲۰۴ میلیون مترمکعب و تخلیه چاه ها حدود ۳۰۸ میلیون مترمکعب محاسبه شده است. بر این اساس مجموع

ورودی‌های سالانه به آبخوان حدود ۲۸۴ میلیون مترمکعب بوده، در حالی که مجموع خروجی‌ها ۳۰۸ میلیون مترمکعب می‌باشد. کاهش حجم ذخیره آبخوان که معادل ۲۴ میلیون مترمکعب در سال محاسبه شده، نشان‌دهنده بیلان منفی و تأکیدی بر کسری مخزن سالانه آبخوان سرخس می‌باشد.

۶- نقشه هم‌پتانسیل شبیه‌سازی شده آبخوان سرخس با استفاده از مدل عددی نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در آبخوان از حداقل ۲۳۵ متر تا حداکثر ۳۲۵ متر متغیر می‌باشد. مطابق الگوی شبیه‌سازی شده سطح ایستابی جهت کلی جریان در آبخوان سرخس از جنوب به سمت شمال می‌باشد. تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در قسمت‌های شمالی باعث افزایش میزان برداشت از آبخوان و تشکیل مخروط افت و در نتیجه ایجاد منحنی‌های بسته تراز در این قسمت شده است. ایجاد منحنی‌های بسته در خطوط هم‌پتانسیل نشان‌دهنده تغییر الگوی جریان آب زیرزمینی بوده که می‌تواند تغییرات کیفی برای مثال شوری منابع آب زیرزمینی به دلیل نفوذ آب‌های شور از مرز شمالی آبخوان را در پی داشته باشد. این موضوع بایستی در مدیریت این آبخوان مرزی مورد توجه قرار گیرد.

۷- با توجه به اینکه هدف از تهیه مدل و شبیه‌سازی آبخوان سرخس تخمین تغذیه به آبخوان بوده است، ابتدا حساسیت مدل نسبت به تغذیه بررسی گردید. بدین منظور تغییرات تابع هدف (اختلاف بین هد محاسبه‌ای و مشاهده‌ای) نسبت به تغییرات تغذیه مورد بررسی قرار گرفت. مدل تهیه شده از آبخوان کاملاً به تغییرات تغذیه حساس بوده و بنابراین می‌توان به نتایج آن در تخمین تغذیه اعتماد نمود.

۸- بر اساس نتایج مدل عددی میزان کل تغذیه به آبخوان سرخس برابر ۸۰ میلیون مترمکعب در سال بوده که از دو منبع بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی تأمین شده است. مقدار تغذیه سالانه ناشی از بارش برابر ۳۲ میلیون مترمکعب در سال بوده این حجم تغذیه معادل حدود ۲۰ درصد بارش سالیانه بوده و بنابراین ضریب تغذیه ناشی از بارش در آبخوان سرخس برابر ۲۰ درصد معرفی می‌گردد. تغذیه ناشی از کشاورزی که در بخش شرقی آبخوان روی می‌دهد، برابر ۴۸ میلیون مترمکعب در سال

بوده که این حجم تغذیه برابر حدود ۱۵ درصد کل حجم آب استفاده شده در کشاورزی می‌باشد. بنابراین ضریب آب برگشتی کشاورزی در محدوده آبخوان سرخس نیز برابر ۱۵ درصد معرفی می‌گردد.

۹- مقدار تغذیه ناشی از بارش به آبخوان از حداقل صفر تا حداکثر ۱۰ میلیون مترمکعب در ماه‌های مختلف متغیر می‌باشد. حداقل مقدار تغذیه ناشی از بارش در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر بوده و حداکثر آن در فروردین‌ماه روی می‌دهد. عمده تغذیه ناشی از آب برگشتی کشاورزی نیز مربوط به نیمه اول سال آبی (ماه‌های آبان تا فروردین) بوده که بر اثر مصرف آبیاری بیش از نیاز محصولات زراعی روی داده است.

۵-۳- پیشنهادها

- ۱- با توجه به کاهش ذخیره‌ی آبخوان سرخس و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در این آبخوان مرزی پیشنهاد می‌گردد.
- ۲- کاهش بهره‌برداری از آب زیرزمینی به خصوص در مناطق با افت شدید سطح ایستابی در بخش شمالی آبخوان.
- ۳- تهیه نقشه دقیق موقعیت و عمق سنگ کف با روش‌های مرسوم.
- ۴- برآورد تغذیه به آبخوان سرخس با استفاده از سایر روش‌ها نظیر نوسان سطح ایستابی، بیلان جرمی کلر و ایزوتوپ‌ها و مقایسه نتایج آن‌ها با یافته‌های تحقیق حاضر.

- ترک قشقایی نژاد س و چیت سازان س، (۱۳۹۶) "برآورد مقدار بهینه آبدهی ویژه و تخمین تغذیه‌ی آب زیرزمینی آبخوان آزاد دشت گلگیر، استان خوزستان" اکوهیدرولوژی، شماره ۴، دوره ۴: ص ۹۶۹-۹۸۱.
- جعفری ه، (۱۳۹۰)، " تخمین تغذیه ناشی از آبیاری به آبخوان هرات در استان یزد"، سی امین گردهمایی علوم زمین، وزارت صنعت و معدن تجارت سازمان زمین شناسی و اکتشافات
- سلطانی س و عابدی ج، (۱۳۸۹)، "تخمین تغذیه آب زیرزمینی زیر حوضه کرون در منطقه اصفهان با استفاده از مدل CRD" مجله آب و فاضلاب ، شماره ۴.
- شرکت ملی نفت ایران، ۱۹۸۳. نقشه زمین‌شناسی سرخس با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰.
- لاریجانی ش، نوری ح، ابراهیمیان ح، (۱۳۹۵)، "برآورد تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل HYDRUS-ID (مطالعه موردی: هشتگرد)" نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۴ جلد ۱۱: ص ۵۷۲-۵۸۵.
- مهندسین مشاور هیدروتک توس، ۱۳۹۳. گزارش فنی پیشنهاد تمدید ممنوعیت دشت سرخس. کارفرما: شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی.
- ASTM (2008). Standard guide for selection of methods for assessing ground water or aquifer sensitivity and vulnerability. ASTM D6030-96(2008). American Society of Testing Materials.
- Anderson M. P. and Woessner W. w. (1992) " Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport", San diego, CA: Academic press.
- Baalousha H. (2005) "Using CRD method for quantification of groundwater recharge in the Gaza strip". Palestine, Environmental Geology, 48,pp 889-900.

- Bauer H. H. and Mastin M. C. (1997). "Recharge from precipitation in three small glacial-till mantled catchments in the Puget sound Lowland' Washington. US Geological Survey Water Resources Investigation Report, 96-4219.
- Bear J. and Cheng A. H.-D. (2010), "Contaminant, Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport". Vol. 23.
- Clarke R., Lawrence A. and Foster S. (1996). "Groudwater: A threatened resource". Nairobi, Kenya: United Nations Enviroment Library No. 15.
- Delin G.N., Herkelrath W. N. (2005). "Use of Soil moisture probes to estimate ground water recharge at an oil spill site". J. Amer. Water Resour. Assoc., 41, 1259-1277.
- Dripps W.R., Hunt R.J. and Anderson, M.P. (2006). "Estimating recharge rates with analytic element models and parameter estimation", ground water, 44,pp 47-55.
- Dunne T., Zhang, W., and Brian F. A. (1991). "Effects of Rainfall, Vegetation, and Microtopography on Infiltration and Runoff." Water Resources Research 27, 9, pp2271-2285.
- Faunt C. C. (ed.) (2009). "Groundwater availability of the Central Valley aquifer, California". US Geological Survey Professional ,pp 1766.
- Fisher L.H. and Healy R. W. (2008). "Water movement within the unsaturated zone in four agricultural areas of the Unithed States". J. Environ. Qual., 37, pp 1051-1063.
- Gurdak J J. and Cassia D Roe. (2009). "Recharge Rates and Chemistry beneath Playas of the High Plains Aquifer: A Literature Review and Synthesis". US Geological Survey.

- Healy R W. (2010). "Estimating groundwater recharge", Cambridge University Press.
- Herrmann F., Jahnke Ch., Jenn F., Kunkel R., Voigt H., Voigt J., Wendland F. (2009). "Groundwater recharge rates for regional groundwater modelling: a case study using GROWA in the Lower Rhine lignite mining area", Germany. *Hydrogeology Journal*, 17, pp 2049–2060.
- Huntington Thomas G. 2006. "Evidence for Intensification of the Global Water Cycle: Review and Synthesis ." *Journal of Hydrology* 319, 1, pp 83-95.
- Jafari, H. Raeisi E., Zare M. and Haghghi A.A.K. (2012). "Time series analysis of irrigation return flow in a semi-arid agricultural region, Iran". *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, 6, pp.673-689.
- Leblance, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S. O., Loireau, M., & Cappelaere, B. (2008). Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger [J]. *Global and Planetary Change*, 61, 135-150.
- Ligget Jessica E., Allen Diana M. (2009). " Comparing approaches for modeling spatially distributed direct recharge in a semi-arid region (Okanagan Basin, Canada)". *Hydrogeology Journal* 18, pp 339–357.
- Maxwell, R M, and Kollet, S. J.. (2008). "Interdependence of Groundwater Dynamics and Land-Energy Feedbacks Under Climate Change." *Nature Geo science* 1, 10, pp 665-69.
- Nace R. L. (1967). "Are we running out of water?". US Geological Survey Circular 536.

- Rossetto, R., De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Criollo, R., Vázquez-Suñé, E., (2018). "Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management, *Environmental Modelling & Software*", 107:210-230
- Rushton K., (1997). "Recharge from permanent water bodies. In: Simmers I (ed) *Recharge of phreatic aquifers in (semi)arid areas*". AA Balkema, Rotterdam., pp 215-255.
- Shiklomanov I. A. and Rodda J. C. (2003). "World Water Resources at the Beginning of the Twenty-first Century". Cambridge: Cambridge University Press.
- Simmers, I. (1990). Aridity, "groundwater recharge and water resources management. In *Groundwater Recharge, A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge*". International Contribution to Hydrogeology Vol. 8, ed. D. N. Lerner, A. S. Isaar and I. simmers. Hanover: Verlag Heinz Heise, pp 3-22.
- Scanlon B.R., R.W. Healy Cook, P.G. (2002). "Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge". *Hydrogeology Journal*.,10, pp 18-39.
- Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Stonestrom, D. A., Prudic, D. E., & Dennehy, K. F. (2005). Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology*, 11(10), 1577-1593.
- Stonestorm D. A, and James R Harrill. (2007). "Ground-Water Recharge in the Arid and Semiarid Southwestern United States-Climatic and Geologic Framework". Geological Survey (US).
- Stoertz M. W. and Bradbury K. R. (1989). "Mapping recharge area using a groundwater flow model: a case study". *Groundwater*, 27, pp 220-228.
- Theis, C. V. (1937). Amount of ground-water recharge in the southern High Plains. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 18(2), 564-568.

- Tideman C. R., Goode D. J. and Hsieh P. A., (1997). "Numerical simulation of ground-water flow through glacial deposits and crystalline bedrock in the Mirror Lake area, Grafton country, New Hampshire". US Geological Survey Professional, pp 1572.
- Touhami, I., Chirino, E., Andreu, J. M., Sánchez, J. R., Moutahir, H., and Bellot, J. (2015). "Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain". *Journal of Hydrology*, 527, 619-629.
- US National Research Council (1993). "Ground Water Vulnerability Assessment. Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty". Washington, DC: National Academy Press.
- Xu,X., Huang G., Qu,Z., Pereia L. (2010). "Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District", Yellow River basin *Journal of Agricultural Water Management*. 98, 2, pp 301-313.
- Zheng Chunmiao, and Gordon D Bennett. (2002). "Applied Conhaminant Transport Modeling". Wiley-Interscience New York.

Abstract

Estimating recharge is important in groundwater studies, especially in budget calculations to properly manage groundwater withdrawals. Alluvial aquifer of Sarakhs with an area of about 874 square kilometers in northeastern Iran is located adjacent to Turkmenistan border line. Because of locating in arid areas, it has no surface water resources, and the only source of drinking water, agriculture and industry in Sarakhs city is groundwater. In this research, the conceptual model of Sarakhs aquifer was prepared using geological and hydrogeological data of the aquifer. The conceptual model was transformed into a numerical model using the MODFLOW-2005 in FREEWAT software. It was calibrated in unsteady states during a two-year period (Water-year 94-95 and 95-96) and verified. The simulated Iso-potential map of the aquifer indicates the general direction of groundwater flow is from south to the north. Increased extraction by pumping wells has changed the pattern of flow and created a closed depression in Iso-potential map, causing the cease of groundwater outflow from the aquifer. The sensitivity process confirmed validity of the numerical model in estimation of the aquifer recharge. Accordingly, the annual surface recharge was estimated at 80 million cubic meters (MCM), occurring from rainfall (32 MCM/year) and irrigation return flows (48 MCM/year). In this regard, rainfall recharge coefficient was estimated about 20% of the annual rainfall and irrigation return flow coefficient was calculated about 15% of the annual discharge rates of the discharging wells. Simulated temporal variations of the groundwater recharge indicates occurrence of the rainfall recharge during January to June and irrigation return flows from November to April months of the year. The estimated recharge coefficients can be used in budget studies to properly manage the Sarakhs aquifer, as well as the same aquifers in Iran.

Keywords: Irrigation return flow, Budget, Rainfall recharge, Khorasan Razavi, MODFLOW.



Shahrood University of Technology

Faculty of Earth Sciences

MSc. Thesis of Hydrogeology

Estimating annual recharge to the Sarakhs aquifer using FREEWAT

By:

Narges Nabizadeh Chamazcoti

Supervisor:

Dr. Hadi Jafari

January 2019