





دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب

بررسی تغییرات سطح سفره های آب زیر زمینی دشت کاشان تحت

اثر تغییر اقلیم

نگارنده: سلاله ولایتی

اساتید راهنما

دکتر رمضان واقعی

دکتر سعید گلپان

استاد مشاور

دکتر محمود اکبری

بهمن ۱۳۹۶

تقدیم ہے:

این پایان نامہ راضمن شکر و سپاس سیکران، در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به محضر ارزشمند پروماد عزیزم از بابت تلاش های

محبت آمیزی که در تمام دوران زندگی ام بی منت نثارم کردید و با مهربانی چگونگی زیستن را به من آموختند. و همسر مهربانم که در این راه پر نشیب

همواره بایه قوت قلب بود و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود و خواهر مهربانم که وجودش شادی، نخس و صفایش بایه آرامش من است.

پاسکوزاری

از استاد کرامی جناب دکتر سعید گلیمان بنیاد پاسکوزارم چرا که بدون راهنمایی های ایشان تمهید این پایان نامه بنیاد مشکل می نمود. و

پاسکوزاری فراوان از جناب دکتر محمود اکبری که حضور همیشگی و راهنمایی های به جا و شایسته ایشان چراغ راه بود.

همچنین از جناب دکتر رمضان واقعی که بنده را در این مسیر، همراهی فرمودند.

تعهد نامه

اینجانب **سلاله ولایتی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب دانشکده مهندسی

عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تغییرات سطح سفره های آب زیر زمینی دشت

کاشان تحت اثر تغییر اقلیم تحت راهنمایی دکتر رمضان واقعی و دکتر سعید گلپان 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 صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » 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 .

•

چکیده

مدل سازی یکی از روش های غیرمستقیم مطالعه منابع آب زیرزمینی است که با توجه به کارائی بالا و هزینه پائین، این امکان را فراهم می سازد تا سیستم پیچیده آب زیرزمینی را به طرز مطلوبی شبیه سازی نماید. مدل کمی آب های زیرزمینی دشت کاشان با وسعت ۱۴۷۴ کیلومتر مربع نیز به همین منظور تهیه گردیده است. اهداف اصلی تهیه مدل آب زیرزمینی دشت کاشان، شامل درک کمی جریان آب زیرزمینی و اثرات تغییر اقلیم بر افت سطح ایستابی آب زیرزمینی است که منجر به مدیریت بهینه آبخوان در سال های آتی خواهد شد. در این تحقیق، آبخوان دشت کاشان با روش مدل سازی عددی تفاضلات محدود توسط نرم افزار GMS 7.1 شبیه سازی گردید. پس از شبیه سازی جریان، مدل در حالت جریان پایدار با استفاده از الگوریتم PEST واسنجی گردید. نتایج حاصل از واسنجی مدل در حالت پایدار و ناپایدار نشان داد که تراز سطح آب زیرزمینی مشاهده ای و شبیه سازی شده در آبخوان به یکدیگر نزدیک می باشد. و در مرحله پایانی به منظور در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم، مدل سه بعدی گردش عمومی جو (GCM) در نظر گرفته شد که در حال حاضر قابل اعتمادترین مدل در مطالعات تغییر اقلیم به شمار می آید. به دلیل تفکیک فضایی کم مدل های گردش عمومی جو، این مدل ها نمی توانند تقریب درستی از شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه ارائه دهند، لذا بایستی خروجی آنها تا حد ایستگاه هواشناسی ریزمقیاس گردد. در این تحقیق، مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM، جهت ریزمقیاس سازی اطلاعات بارش و دما به کار گرفته شده است. دمای حداکثر شبیه سازی شده در طول دوره ۲۰۵۰-۲۰۱۶ نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۱ تحت سناریو A2 نشان می دهد که پارامتر دمای حداکثر در ماه اکتبر بیشترین افزایش، معادل ۱.۳۱ درجه سانتی گراد و در طی همین دوره تحت سناریوی B2 که سناریوی خوش بینانه تری می باشد، مقدار افزایش دما در ماه اکتبر ۱.۲ درجه سانتی گراد است. نتایج پیش بینی بارش ماهانه برای دوره های آتی نشان می دهد که بارش تحت سناریوی A2 در اکثر ماه های سال روند

کاهش داشته است و بیشترین کاهش در ماه می به میزان ۰.۴۳ میلی‌متر در روز، حادث شده است و در ماه‌های دسامبر و اکتبر و فوریه، افزایش یافته است. همچنین تحت سناریوی B2، بارش در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل و می کاهش یافته است و بیشترین کاهش در ماه مارس به میزان ۰.۱۶ میلی‌متر، اتفاق افتاده است و در فصل تابستان و پائیز افزایش جزئی بارش را خواهیم داشت. یه عبارتی بارش‌ها از فصل زمستان به پائیز شیف‌ت پیدا کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تحت سناریوی A2 که بدبینانه می‌باشد با تابستان‌های بسیار خشک و کم‌بارش مواجه خواهیم شد. به طور کلی اثر تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی دشت کاشان به علت پایین بودن نرخ تغذیه، محسوس نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی، آبهای زیرزمینی، دشت کاشان، مدل GMS، تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌سازی SDMS.

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تغییر اقلیم.....	۴
۳-۱- مدلسازی تغییر اقلیم.....	۵
۴-۱- ضرورت انجام پژوهش.....	۶
۵-۱- اهداف تحقیق.....	۷
۶-۱- سازمان‌بندی پایان‌نامه.....	۷
فصل ۲ مطالعات پیشین.....	۹
۱-۲- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه آشکار سازی تغییر اقلیم.....	۱۳
۳-۲- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب.....	۱۶
۴-۲- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی آبهای زیرزمینی.....	۲۰
۵-۲- جمع‌بندی.....	۲۳
فصل ۳ مواد و روش‌ها.....	۲۵
۱-۳- مقدمه.....	۲۶
۲-۳- روش تحقیق.....	۲۶
۳-۳- مدل‌های آب زیرزمینی.....	۲۹
۱-۳-۳- مدل‌های فیزیکی.....	۲۹
۲-۳-۳- مدل‌های ریاضی.....	۲۹
۱-۲-۳-۳- روش تفاضل محدود (FDM)،.....	۳۱
۲-۲-۳-۳- روش اجزای محدود (FEM).....	۳۳
۳-۳-۳- تاریخچه مدل‌های عددی آب زیرزمینی.....	۳۴

۳۴	..... ۱-۳-۳-۳ مدل GMS
۳۵	..... ۲-۳-۳-۳ قابلیت‌های نرم‌افزار GMS
۳۵	..... ۳-۳-۳-۳ مدل MODFLOW
۳۸	..... ۴-۳-۳-۳ معادله عمومی حاکم بر جریان آبهای زیرزمینی
۴۰	..... ۵-۳-۳-۳ مشخصات عمومی آبخوان مورد مطالعه
۴۰	..... ۱-۵-۳-۳-۳ موقعیت عمومی و جغرافیایی
۴۱	..... ۲-۵-۳-۳-۳ آب و هوا
۴۴	..... ۶-۳-۳-۳ زمینشناسی منطقه
۴۵	..... ۱-۶-۳-۳-۳ هیدروژئولوژی
۴۵	..... ۲-۶-۳-۳-۳ بررسی‌های اکتشافی
۴۶	..... ۳-۶-۳-۳-۳ بررسی‌های ژئوفیزیکی
۴۶	..... ۴-۶-۳-۳-۳ چاه‌های اکتشافی
۴۷	..... ۵-۶-۳-۳-۳ ضرایب هیدرودینامیکی
۵۰	..... ۴-۳-۳-۳ مراحل ساخت مدل
۵۰	..... ۱-۴-۳-۳-۳ مدل مفهومی
۵۰	..... ۱-۱-۴-۳-۳-۳ شبکه بندی آبخوان
۵۱	..... ۲-۱-۴-۳-۳-۳ نوع و تعداد لایه‌ها
۵۱	..... ۳-۱-۴-۳-۳-۳ شرایط مرزی
۵۲	..... ۴-۱-۴-۳-۳-۳ پارامتر زمان (Time)
۵۳	..... ۵-۱-۴-۳-۳-۳ هد هیدرولیکی اولیه (Initial Hydraulic Head)
۵۳	..... ۶-۱-۴-۳-۳-۳ تنش‌های هیدرولیکی
۵۶	..... ۵-۳-۳-۳ اجرای مدل
۵۶	..... ۶-۳-۳-۳ واسنجی (Calibration)
۵۷	..... ۷-۳-۳-۳ کالیبراسیون با روش سعی و خطا (دستی)
۵۷	..... ۱-۷-۳-۳ روش اتوماتیک واسنجی

۵۸	۲-۷-۳- واسنجی در حالت پایدار
۵۸	۳-۷-۳- واسنجی در حالت ناپایدار
۵۸	۴-۷-۳- صحت سنجی
۵۹	۵-۷-۳- تغییر اقلیم
۵۹	۱-۵-۷-۳- سناریو های غیر اقلیمی
۶۱	۲-۵-۷-۳- سناریو های اقلیمی
۶۱	۳-۵-۷-۳- مدل های گردش عمومی جو
۶۲	۴-۵-۷-۳- ریزمقیاسسازی دادههای مدل گردش عمومی جو
۶۳	۶-۷-۳- مدل SDSM
۶۵	۱-۶-۷-۳- کنترل کیفی داده ها- Quality control
۶۵	۲-۶-۷-۳- غربالگری- Screening
۶۶	۳-۶-۷-۳- واسنجی- Calibration
۶۶	۴-۶-۷-۳- تولید داده- Weather Generator
۶۶	۵-۶-۷-۳- تولید سناریو- Scenario Generation
۶۷	فصل ۴ نتایج و بحث
۶۸	۱-۴- مقدمه
۶۸	۲-۴- نتایج کالیبراسیون مدل آبخوان در حالت پایدار
۷۱	۳-۴- هدایت هیدرولیکی در حالت پایدار
۷۲	۴-۴- نتایج کالیبراسیون آبخوان در حالت ناپایدار
۷۵	۱-۴-۴- آبدهی ویژه
۷۷	۲-۴-۴- هدایت هیدرلیکی در حالت ناپایدار
۸۴	۳-۴-۴- صحت سنجی مدل
۸۵	۴-۴-۴- نتایج ریزمقیاسسازی دادههای منطقه توسط مدل SDSM
۸۵	۵-۴-۴- همبستگی متغیرهای پیشبینی شونده و پیشبینی کننده

۶-۴-۴- پیشبینی تغییرات دما ۸۶

۷-۴-۴- صحت سنجی مدل ۸۹

۸-۴-۴- تغییرات بارش ۹۰

۹۷ فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱-۵- مقدمه ۹۸

۲-۵- خلاصه نتایج پژوهش ۹۸

۳-۵- نتایج حاصل از تولید سناریوهای اقلیمی در آینده ۱۰۰

۴-۵- آثار تغییر اقلیم بر سطح آبهای زیرزمینی دشت کاشان ۱۰۰

۵-۵- پیشنهادات ۱۰۱

۶-۵- جمع بندی ۱۰۱

منابع ۱۰۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۳-۱- فلوجارت روش تحقیق..... ۲۸
- شکل ۳-۲ مولفه های یک آبخوان که توسط MODFLOW قابل شبیه سازی است ۳۶
- شکل ۳-۳ شبکه بندی MODFLOW جهت شبیه سازی سه بعدی جریان در آبخوان (ماخذ: کتاب قدرتی ۱۳۹۵) ۳۷
- شکل ۳-۴ سلول مرکزی (i,j,k) ، و ۶ سلول مجاور آن ۳۸
- شکل ۳-۵ محدوده مطالعاتی ۴۱
- شکل ۳-۶ نقشه زمینشناسی محدوده کاشان ۴۴
- شکل ۳-۷ نقشه پراکندگی چاههای مشاهدهای ۴۷
- جدول ۳-۳ مقادیر ضریب انتقال در دشت کاشان ۴۸
- شکل ۳-۸ شبکه بندی مدل و مرز محدوده ۵۱
- شکل ۳-۹ تشکیلات آبرفتی آبخوان در راستای مقطع ۵۵
- شکل ۳-۱۰ میزان پخش گاز کربنیک در اتمسفر کره زمین تا سال ۲۱۰۰ ۶۰
- شکل ۳-۱۱ ساختار افقی و قائم مدل جفت شده جوی-اقیانوسی HadCM3 ۶۲
- شکل ۳-۱۲ ساختار SDSM (ماخذ Wilby et al., 2002) ۶۵
- شکل ۴-۱ میانگین خطای اجرای مدل در حالت پایدار ۶۹
- شکل ۴-۲ برآزش بین بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی در حالت پایدار ۶۹
- شکل ۴-۳ نقشه سطح آب مشاهداتی ۷۰
- شکل ۴-۴ نقشه سطح آب محاسباتی ۷۱
- شکل (۴-۵) مقادیر کالیبره شده پارامتر هدایت هیدرولیکی در محدوده مدلسازی ۷۲

- شکل ۴-۶ میزان خطای آخرین اجرای مدل در حالت ناپایدار ۷۳
- شکل ۴-۷ انواع میانگین خطاها در گام‌های زمانی ۷۴
- شکل ۴-۸ تراز محاسباتی در گام زمانی اول در حالت ناپایدار ۷۵
- شکل ۴-۹ نقشه ضریب آبدهی ویژه در منطقه مورد مطالعه ۷۶
- شکل ۴-۱۰ هدایت هیدرولیکی در حالت ناپایدار ۷۷
- شکل ۴-۱۱-۱ سری اول زمانی (مهر ۹۰) ۷۸
- شکل ۴-۱۱-۲ سری دوم زمانی (آبان ۹۰) ۷۸
- شکل ۴-۱۱-۳ سری سوم زمانی (آذر ۹۰) ۷۹
- شکل ۴-۱۱-۴ سری چهارم زمانی (دی ۹۰) ۷۹
- شکل ۴-۱۱-۵ سری زمانی پنجم (بهمن ۹۰) ۸۰
- شکل ۴-۱۱-۶ سری زمانی ششم (اسفند ۹۰) ۸۰
- شکل ۴-۱۱-۷ سری زمانی هفتم (فروردین ۹۱) ۸۱
- شکل ۴-۱۱-۸ سری زمانی هشتم (اردیبهشت ۹۱) ۸۱
- شکل ۴-۱۱-۹ سری زمانی نهم (خرداد ۹۱) ۸۲
- شکل ۴-۱۱-۱۰ سری زمانی دهم (تیر ۹۱) ۸۲
- شکل ۴-۱۱-۱۱ سری زمانی یازدهم (مرداد ۹۱) ۸۳
- شکل ۴-۱۱-۱۲ سری زمانی دوازدهم (شهریور ۹۱) ۸۳
- شکل ۴-۱۲ صحت سنجی مدل ۸۴
- شکل ۴-۱۲ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حدکثر تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۱۶-۲۰۵۰ .. ۸۷
- شکل ۴-۱۳ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حدکثر تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۵۱-۲۰۹۹ .. ۸۷
- شکل ۴-۱۴ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حداقل تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۱۶-۲۰۵۰ .. ۸۸

- شکل ۴ - ۱۵ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حداقل تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۵۱-۲۰۹۹. ۸۸
- شکل ۴-۱۶ توسعه مدل طی مرحله صحتسنجی (Tmin) ۸۹
- شکل ۴-۱۷ توسعه مدل طی مرحله صحتسنجی (Tmax) ۹۰
- شکل ۴-۱۸ توسعه مدل طی مرحله صحتسنجی ۹۱
- شکل ۴-۱۹ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی بارش تحت سناریو A2 و در دوره ۲۰۱۶-۲۰۹۹ ۹۱
- شکل ۴-۱۹ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی بارش تحت سناریو B2 و در دوره ۲۰۱۶-۲۰۹۹ ۹۲
- شکل ۴-۲۱ سطح آب زیرزمینی در طول یک سری زمانی مدلسازی (اردیبهشت ۹۱) ۹۴
- شکل ۴-۲۲ سطح آب زیرزمینی در طول دوره آبی تحت سناریو B2 (آینده دور تا ۲۰۹۹) ۹۵

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳ طبقه بندی اقلیمی براساس روش دو مارتن ۴۲
- جدول ۳-۲ : نوع اقلیم کاشان براساس روش دومارتن ۴۳
- جدول ۳-۳ مقادیر ضریب انتقال دردشت کاشان ۴۸
- جدول ۱-۴ : معرفی متغیرهای پیشبینی کننده NCEP ۸۶
- جدول ۲-۴ : پیش بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی تحت سناریوی A2 و B2 ۹۳

فصل ۱ کلیات

افزایش گاز های گلخانه ای در دهه های گذشته موجب گرم شدن زمین شده است. کشور ایران در پهنه اقلیمی¹ IPCC (هیئت بین دولتی تغییر اقلیم) جزء مناطق خشک و نیمه خشک به حساب می آید. شواهد داده های تاریخی هواشناسی نشان دهنده وقوع پدیده تغییر اقلیم در دهه های اخیر است. پیش بینی های صورت گرفته از وضعیت اقلیمی بر روی کشورمان، تایید کننده ادامه این روند در آینده است. همچنین کمبود بارش در مناطق مختلف جهان بخصوص در ایران موجب بروز خشکسالی های هیدرولوژیک شده که کاهش منابع آب زیر زمینی و سطحی را بدنبال داشته است. از طرف دیگر پیش بینی می شود افزایش سریع جمعیت، تقاضا برای آب را در سالهای پیش رو زیاد تر نماید. بنابراین افزایش تقاضای آب در سالهای آتی از یک سو و تغییرات الگوی بارندگی و خشکسالی ها به علت تغییر اقلیم از سوی دیگر، مدیریت منابع آب را بخصوص در مناطق خشک که عمدتاً از سفره های آب زیرزمینی استفاده می کنند با چالش جدی روبرو کرده است. هدف از این مطالعه تأثیر تغییر اقلیم بر تغییرات تراز آب سفره های زیرزمینی در مناطق خشک است که برای این منظور دشت کاشان به عنوان مطالعه موردی استفاده می شود.

در منطقه مورد مطالعه (شهرستان کاشان)، منبع اصلی تامین آب، همان آبهای زیرزمینی هستند. در سال های اخیر، تراز آب زیرزمینی از الگوهای سابق پیروی نمی کنند، و کاهش چشم گیری در سطح آب سفره ها مشاهده شده است. یکی از عوامل تأثیر گذار در این روند می تواند پدیده تغییر اقلیم باشد، که در این تحقیق میزان تأثیر این پدیده بر روی کاهش سطح آب سفره های آب زیرزمینی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

در کشور ما بهره برداری از منابع آب زیرزمینی به دلیل اطمینان و صرفه اقتصادی آن توسعه قابل ملاحظه ای یافته است. اما متأسفانه در بهره برداری از این منبع ارزشمند به میزان تغذیه اهمیتی نداده و ذینفعان فقط به فکر بهره برداری و رسیدن به سود کوتاه مدت توجه نشان داده‌اند. همین امر منجر به استخراج بیش از حد آب و حفر چاه‌های بدون پروانه شده، که خود معضلی است که همگان بر آن اتفاق نظر دارند. اگرچه سازمان‌های مرتبط در چند سال اخیر هر کدام به صورت مجزا با صرف هزینه‌هایی سعی در کاهش اثرات سوء افت آبخوان داشته‌اند، اما همچنان این منطقه با کمبود آب، به ویژه در بخش کشاورزی روبرو است. منابع آب زیرزمینی اصلی‌ترین منبع تامین کننده آب در منطقه مورد مطالعه (دشت کاشان) می‌باشد. در طی سال‌های گذشته نیز، برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی در بخش شرب و کشاورزی افزایش چشمگیری یافته است. بنابراین با توجه به افزایش بهره برداری بیش از حد آب در این منطقه، لازمه مدیریت یکپارچه، یک نگاه جامع در مقوله منابع آب می‌باشد. این امر خود نیازمند مطالعاتی در خصوص منابع آبی، موانع موجود و پیش بینی وضعیت آن‌ها در آینده می‌باشد. به طور کلی می‌توان بیان کرد که دسترسی به مطالعات مذکور جز با بررسی وضعیت فعلی و پیش بینی وضعیت آینده به صورت داده‌های کمی امکان پذیر نیست.

در مدیریت تلفیقی منابع آب زیرزمینی نیاز به مدلسازی آب‌های زیرزمینی و اطلاع از تغییرات تراز سطح آب در پایه زمانی مشخص می‌باشد. از این رو رسیدن به مدل بهینه در پیش بینی وضعیت آینده این منبع، امری ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که مشخص شدن وضعیت آینده آبخوان می‌تواند به برنامه ریزی‌های مدیریتی منابع آبی منطقه، بالاحص آب‌های زیر زمینی دشت کاشان، کمک شایانی کند، انجام تحقیق حاضر اهمیت زیادی دارد.

براین اساس بایستی توجه داشت که مدل های پیشرفته شبیه سازی آب زیرزمینی با سیستم هیدروژئولوژیک آبخوان قابلیت تطابق بالایی دارند، بنابراین مدل های مذکور شرایط مناسبی را به منظور مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی فراهم آورده و می‌توان از این مدل ها برای

پیش بینی وضعیت آینده آبخوان استفاده نمود. به موجب همین امر برای انجام تحقیق حاضر، از مدل شبیه سازی GMS که نرم افزار جامعی برای مدل سازی آب های زیرزمینی می باشد، استفاده شده است که در فصل مربوطه تشریح خواهد شد.

۱-۲- تغییر اقلیم

اقلیم به شرایط آب و هوایی یک منطقه جغرافیایی نظیر دما، رطوبت، فشار اتمسفر، باد، بارش و سایر مشخصه های هواشناسی در مدت زمانی نسبتاً طولانی نسبت داده می شود. به طور کلی میانگین آب و هوای یک منطقه را در طول زمان اقلیم آن منطقه می گویند و میانگین زمانی که نشان دهنده اقلیم آن منطقه باشد به طور معمول ۳۰ سال توسط سازمان هواشناسی تعریف شده است.

تغییر اقلیم اشاره به تغییر در میانگین خصوصیات اقلیمی (با استفاده از آزمون های آماری) برای مدت طولانی یا دهه ها مشاهده می شود. تغییر اقلیم ممکن است به علت نیروهای داخلی (طبیعی) یا خارجی (تغییرات انسانی) اتفاق بیافتد. تغییر اقلیم یک روند تدریجی و پروسه ای بلند مدت است اما آب و هوا به تغییرات کوتاه مدت و روزانه مربوط می شود که بر اثر جریان های محلی باد، تبخیر و جریان های اقیانوس ها ایجاد می شوند (چیورز^۱ ۲۰۱۳).

تغییر اقلیم بر مواردی از جمله منابع آب، بخش کشاورزی و امنیت غذایی، افزایش سطح آب اقیانوس ها و دریاها، تنوع زیستی و اکوسیستم ها، مصرف انرژی و صنعت، ایجاد حوادث و بلاهای طبیعی، تشدید پدیده خشکسالی و در نهایت تخریب سرزمین، اثر گذار است.

¹ Danny chivers

۱-۳-مدل سازی تغییر اقلیم

به طور کلی می توان مدل های اقلیمی را بر اساس ساختار و نوع عملکرد به چهار نوع تقسیم بندی نمود که شامل موارد زیر می باشد.

- مدل های توازن انرژی^۱ (EBM): این مدل ها دو فرآیند حاکم بر سیستم اقلیمی (توازن انرژی تابشی را در کل سطح کره زمین، انتقال انرژی بین مداری در حد فاصل قطبها تا استوا) را شبیه سازی می کند.
 - مدل های تابشی همرفتی^۲ (RCM): این مدل ها علاوه بر ویژگی های مدل EBM جابه جایی عمودی انرژی را نیز در نظر می گیرند.
 - مدل های دو بعدی دینامیکی آماری^۳ (SDM): این مدل ها معمولا دو بعدی بوده و ترکیبی از دو مدل اول می باشند.
 - مدل های گردش عمومی جو^۴ (GCM): این مدل ها سه بعدی بوده و قادرند سیستم اقلیمی را با لحاظ نمودن اکثر فرآیندها در مقیاس جهانی و یا قاره ای شبیه سازی کنند.
- در حال حاضر قابل اعتمادترین مدل در مطالعات تغییر اقلیم، مدل سه بعدی گردش عمومی جو (GCM) می باشد. مدل های GCM بر پایه قوانین فیزیکی می باشند که توسط روابط ریاضی ارائه می شود. مدل های گردش عمومی جو با شبیه سازی افزایش درجه حرارت بر چرخه خشکی -

¹ Energy Balance Models

² Radiation-Convection Models

³ Statistic-Dynamic Model

⁴ General Climate Model

اقیانوس- اتمسفر قادر هستند، شدت و وسعت وقوع تغییرات اقلیمی آینده را برای مناطق مختلف جهان، پیش‌بینی کنند.

۱-۴- ضرورت انجام پژوهش

افزایش تقاضای آب در سالهای آتی از یک سو و تغییرات الگوی بارندگی و خشکسالی ها به علت تغییر اقلیم از سوی دیگر، مدیریت منابع آب را به خصوص در مناطق خشک که عمدتاً از سفره های آب زیرزمینی استفاده می کنند با چالش جدی روبرو کرده است.

از جمله مناطقی که در کشورمان با بحران آب مواجه است، استان اصفهان و شهرستان کاشان می باشد. شهرستان کاشان در منطقه گرم و خشک کشور قرار دارد که از سمت شمال و شرق مشرف به حاشیه دشت کویر است. این شهرستان از مناطق کم آب کشور است و آب آشامیدنی آن بیشتر از منابع آب زیر زمینی تامین می شود. به این دلیل که در این شهرستان رودخانه دائمی وجود ندارد و مهمترین رودخانه های این شهرستان با نام های هجن، قهرود، لتحر و چم رود، همگی فصلی هستند. سفره های آب زیر زمینی کاشان از دامنه رشته کوه های کرکس شروع می شود و تا دریاچه نمک ادامه دارد. در سالهای اخیر با کاهش میانگین بارندگی ها در بلند مدت، میزان آب در سفره های زیر زمینی این شهرستان به شدت کاهش یافته است. متوسط بارندگی سالانه در شهرستان کاشان حدود ۱۳۵ میلی متر یعنی تقریباً نصف میانگین بارندگی کشور و یک ششم بارندگی در جهان است. تبخیر آب در پی خشکسالی و گرمای هوا در شهرستان کاشان را هم نباید نادیده گرفت ؛ درجه حرارت شهرستان کاشان در گرمترین روزهای سال، گاه تا حدود ۵۰ درجه سانتی گراد و میزان تبخیر آب به ۳۰۰۰ میلی متر در سال می رسد.

همچنین در سالیان اخیر برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی در بخش شرب و کشاورزی افزایش چشمگیری یافته است. بنابراین با توجه به افزایش بهره برداری بیش از حد آب در این منطقه، لازمه

مدیریت یکپارچه ، یک نگاه جامع در مقوله منابع آب می‌باشد. این امر خود نیازمند مطالعاتی در خصوص منابع آبی، موانع موجود و پیش بینی وضعیت آن‌ها در آینده می‌باشد. به طور کلی می‌توان بیان کرد که دسترسی به مطالعات مذکور جز با بررسی وضعیت فعلی و پیش بینی وضعیت آینده به صورت داده‌های کمی امکان پذیر نیست.

۱-۵- اهداف تحقیق

- ۱- شبیه سازی تراز آب زیر زمینی دشت کاشان
- ۲- بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی تراز آب زیر زمینی دشت کاشان
- ۳- نشان دادن وضعیت آینده سفره‌های آب زیرزمینی دشت کاشان و کمک به مدیران برای ارائه طرح‌های مدیریتی جهت کنترل بحران کم‌آبی در سال‌های پیش رو

۱-۶- سازمان‌بندی پایان‌نامه

تحقیق حاضر به صورت زیر سازمان‌بندی شده است:

فصل اول مروری بر تعاریف اولیه دارد و در آن برخی از مفاهیم ابتدایی موضوع مورد مطالعه، اهداف پژوهش و ضرورت انجام پژوهش حاضر گردآوری شده است. در فصل دوم به بررسی مطالعات صورت گرفته پیرامون موضوع موردنظر و علوم مرتبط با آن توسط محققین پیشین پرداخته شد. در فصل سوم مدل و نرم‌افزارهای استفاده شده در این مطالعه ذکر گردید و همچنین چگونگی و روش‌های انجام مدل‌سازی و مراحل آن بیان شده است. فصل چهارم به بررسی نتایج بدست آمده از نرم‌افزار، ترسیم گراف‌ها و نمودارها و تجزیه و تحلیل فرآیند مدل‌سازی اختصاص داده شد. در فصل پنجم،

نتیجه‌گیری کلی مطالعه حاضر و پیشنهاداتی در ارتباط با انجام مطالعات تکمیلی در آینده ارائه

گردید.

فصل ۲ مطالعات پیشین

در سال‌های دهه ۱۹۸۰، شواهد علمی نشان داد که انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی خطراتی برای آب و هوای جهان ایجاد می‌کند و به این ترتیب افکار عمومی لزوم ایجاد کنفرانس‌های بین‌المللی دوره‌ای و تشکیل پیمان نامه‌ای را برای حل این قضایا احساس کرد. در پاسخ به افکار عمومی یک رشته کنفرانس بین‌المللی برگزار گردید و در میان دولت‌ها قراردادی بین‌المللی برای واکاوی این مساله تنظیم شد. در سال ۱۹۹۰ مجمع عمومی سازمان ملل متحد، کمیته مذاکرات بین‌الدول را جهت تدوین کنوانسیون تغییر آب و هوا^۱ (UNFCCC) تشکیل داد. کمیته مذاکرات پیش‌نویس کنوانسیون را تدوین نمود و این پیش‌نویس در ۹ ماه می ۱۹۹۲ در مقر سازمان ملل در نیویورک تصویب شد. این کنوانسیون در اجلاس زمین در ژوئن ۱۹۹۲ در ریودوژانیروی برزیل جهت امضای اعضا آماده گردید و در طول کنفرانس ریو توسط سران کشورها و مقامات ارشد دنیا امضا و از تاریخ ۲۱ مارس ۱۹۹۴ در ۵۰ کشور عضو لازم‌الاجرا شناخته شد. هدف نهائی این کنوانسیون و هر ابزار قانونی مرتبط که توسط کنفرانس اعضا مورد پذیرش قرارگیرد، دستیابی به تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر تا سطحی است که از تداخل خطرناک فعالیت‌های بشر با سیستم آب و هوایی جلوگیری نماید. چنین سطحی باید در یک چهارچوب زمانی کافی حاصل گردد تا اکوسیستم‌ها به طور طبیعی با تغییر آب و هوا خود را وفق دهند و اطمینان حاصل شود که امنیت غذایی تهدید نمی‌شود و توسعه اقتصادی به طور پایدار ایجاد می‌گردد (متن کنوانسیون تغییر آب و هوای سازمان ملل متحد).

کشور جمهوری اسلامی ایران در بهار سال ۱۳۷۵ شمسی نخستین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم را در تهران تشکیل داد و در همان سال به کنوانسیون تغییر اقلیم پیوست. هیأت بین‌الدولی تغییر

^۱ United Nations Framework Conventions On Climate Change

اقلیم^۱ (IPCC) یک نهاد بین المللی است که پس از مطرح شدن اهمیت مسئله اثرات گرمایش جهانی در اولین کنفرانس بین المللی تغییر اقلیم، با هدف ارزیابی تحقیقات علمی، فنی، اقتصادی و اجتماعی مرتبط با تغییر اقلیم و اثرات آن بر کره زمین در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان جهانی هواشناسی^۲ (WMO) و برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد^۳ (UNEP) تاسیس شد.

بر اساس تعریف IPCC (۲۰۱۴) تغییر اقلیم مربوط به تغییر حالتی از اقلیم که شامل تغییر در میانگین یا خصوصیات قابل تغییر پارامترهای اقلیمی در چند دهه یا طولانی تر می شود. تردید چندانی وجود ندارد که

تغییرات اقلیم رخ داده، به طور قابل توجهی چرخه هیدرولوژیکی در سراسر جهان را تحت تاثیر قرار خواهد داد (کندسویچ ۲۰۰۸^۴).

بر اساس پیش‌بینی‌های IPCC (هیات بین‌الدول تغییر اقلیم)، غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو افزایش خواهد یافت و انتظار می‌رود تغییر اقلیم در آینده ادامه پیدا کند.

عدم قطعیت در پیش‌بینی تغییر اقلیم بسیار بالاست که ناشی از عدم قطعیت‌های ذکر شده می‌باشد:

۱ - عدم قطعیت در سناریوهای انتشار

۲- عدم قطعیت در مدل‌های گردش عمومی (GCM)

۳- عدم قطعیت در داده‌های مشاهده‌ای مورد استفاده برای ریز مقیاس‌سازی

¹ Intergovernmental Negotiation Committee

² World Meteorological Organization

³ United Nations Environment Programme

⁴ kundsevice

۴- عدم قطعیت در روش‌های ریزمقیاس‌سازی.

برای بررسی اثرات تغییر اقلیم لازم است که مطالعاتی در سه بخش کلی به صورت زیر انجام شود:

۱- آشکار سازی رخداد تغییر اقلیم

۲- کوچک مقیاس‌سازی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی گردش عمومی جو

۳- بکارگیری نتایج مدل‌های اقلیمی برای پیش‌بینی شرایط آینده و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم

فرانسن^۱ (۲۰۰۹)، بر اهمیت ریزمقیاس‌سازی بارش آینده از GCM ها برای تخمین اثرات آن بر پارامترهای هیدرولوژیکی تاکید می‌کند. برخی دانشمندان از جمله چن^۲ (۲۰۰۲) و هسو^۳ (۲۰۰۶)، اعمال یک تابع خطی ساده بارش-دما را برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی در نظر می‌گیرند و گروهی دیگر مانند فرانسن (۲۰۰۹) و فرگوسن و ماکسول^۴ (۲۰۱۰) یک رویکرد مبتنی بر خصوصیات فیزیکی بر حسب تغییرات مکانی و زمانی آب‌های سطحی و زیرسطحی منطقه مورد مطالعه را پیشنهاد می‌دهند که در زمان شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی حالت پایدار، محدودیت‌هایی در شرایط مرزی دارد و تنها برای آنالیز حساسیت استفاده خواهد داشت.

مشاهدات جاری نشان می‌دهد که در حال حاضر تغییرات اقلیمی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی در مناطق خاص تاثیر می‌گذارد (روزن وی^۵ ۲۰۰۷).

¹ Hendricks Franssen

² Chen

³ Hsu

⁴ Ferguson and Maxwell

⁵ Rosenzweig

منابع آب شیرین از جمله سیستم‌هایی است که نسبت به تغییر اقلیم بسیار آسیب‌پذیر است. به خصوص در طول خشکسالی، آب‌های زیرزمینی از اهمیت حیاتی در تامین آب برای تولید مواد غذایی و مصارف آشامیدنی برخوردار است (سولومون^۱ ۲۰۰۷).

از آنجایی که آب‌های زیرزمینی کمتر قابل مشاهده است، در مقایسه با آب‌های سطحی یک رابطه پیچیده‌تر با تغییر اقلیم دارد. با این حال آگاهی فزاینده‌ای برای حفاظت از منابع آب‌های زیرزمینی و ارزیابی تأثیر کاربری اراضی و تغییر اقلیم به وجود آمده است. به منظور ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیم بر روی سیستم آب زیرزمینی نیاز به سناریوهای قابل اعتماد و روش‌های سازگار، برای تخلیه و تغذیه آب زیرزمینی وجود دارد.

۲-۲- مطالعات انجام شده در زمینه آشکار سازی تغییر اقلیم

ویلی^۲ و همکاران (۲۰۰۲)، مدل ریزمقیاس‌سازی آماری SDSM را که یک نسخه تحت ویندوز است، جهت ریزمقیاس کردن پارامترهای بارش و دما ارائه کردند. نسخه ۲.۱ این ابزار پشتیبانی، عملیات آماری روی خروجی‌های GCM از جمله غربالگری متغیرهای پیش بینی شونده، کالیبراسیون مدل و تولید سناریوهای آب و هوایی برای آینده را، به خوبی تجزیه و تحلیل کرد.

گولاچا^۳ و همکاران (۲۰۱۶)، مدل ریزمقیاس‌سازی آماری SDSM را برای تبدیل مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) به مقیاس محلی، در حوضه وامی-رود کشور تانزانیا، به کار گرفتند. آنها برای ارزیابی تغییرات اقلیمی، دوره سال‌های ۱۹۶۱-۱۹۹۰ را به عنوان دوره پایه در نظر گرفتند که داده‌های سال‌های ۱۹۶۱-۱۹۷۵ را برای کالیبراسیون و داده سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۹۶ را برای صحت

¹ Solomon

² Wilby

³ Gulacha

سنجی به کار بردند. نتایج آنها نشان‌دهنده ضریب همبستگی بین ۰.۰۳-۰.۰۵ برای پارامتر بارش بود که گواه عملکرد پایین این مدل در شبیه‌سازی بارش است. سپس آنها مدل SDSM کالیبره شده را به منظور ریزمقیاس‌سازی داده‌های GCM، برای مدل HADCM3 و تحت سناریوهای A2 و B2 به کار گرفتند. مطالعات آنها نشان داد که روند افزایش دما بین سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۸۰ از ۰.۲ تا ۷.۲ درجه سانتی‌گراد است و همچنین حداکثر بارش و رواناب تحت سناریوی A2 با افزایش ۱۱۷ و ۱۹۹ و ۳۴۵ درصدی به ترتیب برای دوره‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ مواجه خواهد شد. در نهایت تحقیقات آنها نشان داد که در حوضه وادی-رود پتانسیل وقوع سیل و خشکسالی، بسیار بالاست و اقدامات پیش‌گیرانه برای جلوگیری از این وقایع ضروری است.

محمود و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی تغییرات آینده در افزایش درجه حرارت با استفاده از مدل ریزمقیاس‌سازی آماری توسط SDSM بر روی حوضه آبریز جهلم در مرز بین هند و پاکستان، تحت سناریوهای A2 و B2 پرداختند. آنها مدل را برای بازه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ کالیبره کردند سپس برای بازه ۱۹۹۱-۲۰۰۰ کار صحت‌سنجی را انجام دادند که نتیجه آن مقادیر واقعی شبیه‌سازی شده توسط مدل در مقایسه با داده‌های دیده‌بانی بود که بر اساس این آمار، برای سه سری زمانی در آینده شامل ۲۰۴۰-۲۰۱۱ و ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۹۹-۲۰۷۱ داده تولید کردند. نتایج آنها نشان داد، روزهای گرم و شب‌های گرم افزایش خواهد داشت و در مقام مقایسه فراوانی روزهای سرد و شب‌های سرد در هر سه سری زمانی آینده، کاهش می‌یابند. آنها پیش‌بینی کردند، تقریباً در تمامی فصول شاهد گرم‌تر شدن خواهیم بود، اگر چه این اثر در فصل بهار(روزها و شب‌های گرم) و در فصل زمستان(روزها و شب‌های سرد)، جدی‌تر خواهد بود. آنها بر این موضوع که به طور کلی در حوضه جهلم، شدت و فرکانس حداکثر درجه حرارت رو به فزونی و شدت و فرکانس حداکثر دمای سرد، نزولی خواهد بود، اتفاق نظر داشتند.

اصلاحی و همکاران (۱۳۹۲)، با استفاده از روش‌های آماری بلند مدت داده‌های اقلیمی از قبیل بارش، دما و تبخیر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را مورد بررسی قرار دادند. به این منظور از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک تبریز و ارومیه که دارای آمار بلند مدت حداقل ۵۰ ساله (۱۳۹۰-۱۳۳۰) هستند، استفاده شده است. برای مقایسه تغییرات بارش و دمای سالانه می‌توان پس از استاندارد کردن مقادیرشان، آنها را در یک نمودار نشان داد. نتایج نشان دادند روند بارش از سال ۱۳۷۵ تغییر محسوسی داشته است، به طوری که دما نسبت به بارش افزایش داشته و اختلاف مقدار استاندارد شده این دو پارامتر در طی ۱۵ سال اخیر، به طور یکنواخت زیاد شده است. به عبارت دیگر در این دوره افزایش میانگین دمای سالانه و کاهش بارش سالانه در ایستگاه تبریز محسوس بوده است. برای اثبات معنی دار بودن اختلاف دوره میانگین ۴۵ ساله اول با ۱۵ سال اخیر از لحاظ آماری، از آزمون ناپایداری مقایسه دو جامعه (آزمون من ویتنی)، استفاده شده است. نتایج نهایی میانگین دمای سالانه دوره ۴۵ ساله اول را ۱۰.۴ و برای دوره ۱۵ ساله اخیر ۱۱.۷ درجه سانتیگراد، نشان دادند که گواه افزایشی معادل با ۱.۳ درجه سانتیگراد است. معنی داری این افزایش از طریق آزمون من ویتنی به اثبات می‌رسد از آنجا که مقدار P-Valu یا Sig. در جدول ناچیز بوده و مقداری معادل ۰.۰۰۱ بوده است که کمتر از سطح معنی داری می‌باشد. در ارتباط با بارش سالانه نیز دوره ۴۵ ساله دارای میانگین بارش ۳۷۴.۴ میلی‌متر و دوره ۱۵ ساله دارای میانگین بارش ۲۶۵.۲ میلی‌متر بوده‌اند به طوری که دوره ۱۵ ساله آخر نسبت به گذشته ۴۱ درصد کاهش داشته است که معنی داری این کاهش با ناچیز بودن P-Valu یا Sig. جدول نتایج آزمون من ویتنی اثبات شد.

مساح بوآنی و همکاران (۱۳۸۴)، آثار تغییر اقلیم را بروی دما و بارش و رواناب در حوضه آبریز اصفهان را تحت دو سناریوی اقلیمی بررسی کردند. آنها برای این کار از مدل گردش عمومی HadCM3(GCM) استفاده کردند که شامل اطلاعاتی از مقادیر دما و بارندگی در سال‌های آینده،

تحت دو سناریوی A2 و B (از سناریوهای تولید گازهای گلخانه‌ای¹ SRES) بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که میزان کاهش بارندگی ۱۶٪ و افزایش دما ۴.۶ درجه سانتی گراد تحت سناریوی A2 که تاکید بر رشد صنعت دارد، خواهد بود و تحت سناریوی B2 که توجه بیشتری به مسایل زیست محیطی دارد، میزان کاهش بارندگی ۱۰٪ و افزایش درجه حرارت ۳.۲ درجه سانتی گراد شده است.

ظهراپی و همکاران (۱۳۸۹)، به منظور آشکارسازی تغییر اقلیم در حوضه کارون بزرگ، مطالعاتی انجام دادند. نتایج آنها گواه روند افزایشی دما و کاهش بارش بوده و همچنین تحت تاثیر قرار گرفتن متغیر دما بر اثر تغییر اقلیم بود. ظهراپی و همکاران نشان دادند که در تمامی نواحی حوضه آبریز کارون بزرگ در سال‌های انتهایی دوره مشاهداتی (۲۰۰۹-۱۹۷۱)، تاثیرات گازهای گلخانه‌ای به راحتی قابل استنتاج و متغیرهای اقلیمی خارج از محدوده نوسانات درونی اقلیم قرار گرفته است.

خوش اخلاق و همکاران در سال ۱۳۹۴، اقدام به پژوهش در زمینه اثرات ناشی از تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز پلرود، تحت سناریوهای A2 و A1B از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۹، نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد دبی ماهانه از مارس تا جولای، کاهش و از آگوست تا فوریه مقدار دبی کمی افزایش می‌یابد اما به طور کلی حجم و مقدار دبی سالانه با کاهش مواجه شده است.

۲-۳- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب

دمس^۲ و همکاران (۲۰۱۲) تاثیر تغییر اقلیم بر روی آب زیرزمینی در کشور بلژیک را بررسی کردند. آنها اثر ۲۸ سناریوی تغییر اقلیم بر روی سیستم آب زیرزمینی را مورد مطالعه قرار دادند. سناریوهای تغییر اقلیم از ترکیب چند GCM شامل: ECHAM4/OPYC، HadAM3H، HadAM3P،

¹ Special Report on Emmission Scenarios

² Dams

ARPEGE و HadCM3 و پایگاه داده‌های PRUDENCE به دست می‌آید. همه این سناریوها بر اساس سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A2 و B2 هیات بین دولتی تغییر اقلیم می‌باشد. به طور کلی پیش‌بینی‌ها از اجرای ۲۸ مدل اقلیمی، آنالیز آماری می‌شوند. نتایج نشان دادند، تغذیه آب زیرزمینی سالانه برای دوره سناریو ۲۰۷۰-۲۱۰۱ در مقایسه با دوره مرجع ۱۹۹۱-۱۹۶۰، به میزان ۷٪ کاهش یافته است. تغییرات الگوهای تغذیه باعث می‌شود سطح آب‌های زیرزمینی به طور قابل توجهی از سپتامبر تا ژانویه روند نزولی داشته و به طور متوسط ۷ متر کاهش می‌یابد. سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با انحراف استاندارد، تحت اثر تغییر اقلیم، بین ۵ تا ۷ سانتی متر کاهش می‌یابد. در اغلب موارد تغذیه سفره‌ها در فصل زمستان افزایش و در طول تابستان کاهش می‌یابد و سطح آب‌های زیرزمینی در مناطق بالادست و میاناب‌ها نسبت به مناطق بستر رودخانه دارای حساسیت بیشتری در برابر تغییر اقلیم می‌باشند. آب ورودی به اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی (GWDTEs) در اواخر تابستان و اوایل پاییز به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد، اگر چه این پارامتر در طول زمستان و اوایل بهار در سطح مرجع باقی می‌ماند. نتایج شبیه‌سازی بارش روزانه تبخیر-تعرق (PET) بین دوره مرجع و دوره سناریوی آینده، مقایسه می‌شود. نتایج بارش به طور مستقیم از خروجی RCM به دست آمده است و PET با استفاده از معادله پنمن بر اساس خروجی RCM فشار متوسط سطح دریا، تابش خالص، تابش خورشیدی کل، پوشش ابر، دمای هوا در ۲ متری زمین و باد و رطوبت در ارتفاع ۱۰ متری زمین، حاصل شده است. تفاوت در میزان بارش بین سناریوهای تغییر اقلیم و کنترل، با ضرب مقدار بارش در هر روز مرطوب، توسط یک فاکتور تغییر واحد که بر اساس احتمال وقوع بارش در طول آن روز است، بر روی سری‌های زمانی مشاهده شده، اعمال می‌شود. این روش به طور جداگانه برای همه ماه‌ها انجام می‌شود (کل روزهای در یک ماه در کل دوره مرجع)، که منجر به نمایش انحراف معیار سری‌های مشاهده شده می‌شود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر روی نرخ تغذیه و تخلیه سفره‌های آب زیرزمینی و هد رودخانه

از مدل MODFLOW (هاربرت^۱ و مکدونالد^۲، ۲۰۰۰) استفاده شده است. برای در نظر گرفتن تنوع فضایی هدایت هیدرولیکی و عملکرد خاص لایه فوقانی، لایه‌های زیرین به هفت زیرمنطقه تقسیم می‌شوند. هدایت افقی و عمودی اولیه در این مناطق، با استفاده از محاسبه وزن و میانگین هارمونیک، محاسبه می‌گردند. فرض می‌شود مرزهای حوضه اعمال شده به مدل، مرز بدون جریان باشد. رودخانه‌های بزرگ، کانال‌ها و دریاچه‌ها، به عنوان مرزهای داخلی، با بسته RIVER شبیه‌سازی شده‌اند. این بسته مقدار آب رد و بدل شده بین سیستم آب زیرزمینی و رودخانه را، بر اساس محل رودخانه، ارتفاع از پایین دست و هد هیدرولیکی محاسبه شده برای سلول مدل که حاوی مشخصات آب سطحی است، را کنترل کرده‌اند. زهکشی آب‌های زیرزمینی از حفره‌ها، نهرهای کوچک و تالاب-ها را با استفاده از بسته DRIN شبیه‌سازی کردند. سلول زهکشی برای همه مناطق به جز مناطقی که برای آن سلول رودخانه تعریف شده باشد، تعریف شده است. زهکشی شبیه‌سازی شده توسط مدل MODFLOW نشان دهنده جریان از منطقه اشباع به سطح زمین است. جریان زهکشی شبیه-سازی شده توسط بسته DRIN، به سطح زهکشی و قابلیت انتقال، بستگی دارد. پیش‌بینی بارش متوسط در حوضه‌ها برای هر گام زمانی نشان دهنده کاهش ۵۰ میلی متری (از $\frac{mm}{yr} 821$ به $\frac{mm}{yr} 771$)، با انحراف استاندارد ۳۵ میلی متر بین سناریوها است. علاوه بر اینها نتایج تغییرات بارش متناسب با فصول را نشان می‌دهند، از اکتبر تا آوریل میزان بارندگی ۵۰ میلی متری کاهش یافته در حالی که نمودار بارش از می تا سپتامبر در حدود ۱۰۰ میلی متری افزایش بارندگی را نشان می‌دهند. پیش‌بینی تبخیر-تعرق درون سالیانه در طول دوره ۳۲ ساله شبیه‌سازی (۱۹۹۱-۱۹۶۰) با انحراف استاندارد معادل $\frac{mm}{yr} 91$ ، افزایش ۳۰ درصدی یافته است. نتایج برای تغییرات هد آب زیرزمینی در مقایسه دوره مرجع با دوره سناریوهای اقلیمی، کاهش حجم ذخیره آب زیرزمینی در طول دوره

¹ Harbaugh

² McDonald

تابستان را نشان می‌دهند. شبیه‌سازی حداکثر عمق آب زیرزمینی در طول دوره سناریوی مرجع حدود ۲.۲ متر زیر خط توپوگرافی است و در طول نیمه اول سپتامبر اتفاق افتاده است در حالی که حداکثر عمق پیش‌بینی شده برای سناریوهای اقلیمی ۲.۳ متر زیر خط توپوگرافی است و در پایان ماه سپتامبر حادث شده است. همچنین زمان حداقل سطح آب زیرزمینی از اواخر دسامبر-ژانویه به اواخر مارس-فوریه تغییر یافته است.

کلاو^۱ و همکاران (۲۰۱۴) اظهار کردند، بسیاری از منابع آب زیرزمینی برای جوامع انسانی و اکوسیستم، در مقیاس‌های زمانی دراز مدت، تجدیدنپذیر می‌باشند. پیش‌بینی‌های آنها گواه آن بود که تغییر اقلیم در بسیاری از نقاط جهان این بحران را تشدید خواهد کرد و همچنین دو عامل کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق منجر به کاهش تغذیه و احتمالاً افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی خواهد شد. مطالعات آنها نشان داد که تغییر اقلیم بر روی تنوع زیستی، حیات آبریان و اکوسیستم-های زمینی، اثر گذار خواهد بود. با توجه به عدم درک بسیاری از فرآیندهای کلیدی، کلاو و همکارانش نقش روش‌های جدید مانند مدلسازی در زمینه مدیریت یکپارچه منابع آب را ضروری دانستند، در حالی که شاخص‌های ساده را برای نظارت بر نتایج مفید، ارزیابی کردند.

شستا^۲ و همکاران (۲۰۱۶)، با توجه به اهمیت اقتصادی بسیار بالای دلتای مکنونگ که برنج نیمی از ویتنام را تولید می‌کند و سهم بسیار بزرگی در تولید ناخالص داخلی این کشور دارد، به مطالعه سیستم منابع آب زیرزمینی این آبخوان تحت اثرات تغییر اقلیم پرداختند. شستا و همکاران بعد از مدلسازی سیستم آب زیرزمینی، به ریزمقیاس‌سازی داده‌های مدل گردش عمومی جو (GCMs) که از داده‌های CMIP5 استخراج شدند، پرداختند و برای در نظر گرفتن شرایط آینده از سناریوهای

¹ Klove

² Shrestha

RCP4.5 و RCP8.5 استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که دمای متوسط سالیانه تحت سناریوی RCP4.5 به میزان ۱.۵ درجه سانتی گراد و تحت سناریوی RCP8.5، ۴.۵ درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد و همچنین میزان بارندگی در فصول تر سال افزایش و در فصول خشک سال روند نزولی داشته است که منجر به کاهش ذخیره حجم آب زرزیمینی خواهد شد.

لموکسا^۱ و همکاران (۲۰۱۵)، اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب را در جزایر ماگدالن واقع در شهر کبک کانادا، مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند از میان اثرات در نظر گرفته شده، مهمترین آنها، افزایش سطح آب دریا، کاهش سطح سفره‌های آب زیرزمینی و افزایش فرسایش ساحلی است که در طی یک دوره ۲۸ ساله، این اثرات ترکیبی باعث هجوم آب شور دریا به سمت آب‌های زیرزمینی خواهد شد.

۲-۴- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی

با در نظر گرفتن اثرات آینده تغییرات منابع آب، درک درست از رفتار سیستم آب زیرزمینی و ارزیابی منابع آب زیرزمینی، ضروری است. پیش نیاز این کار، شناخت عملکرد سفره در شرایط طبیعی در وهله اول و سپس پیش بینی اثرات برداشت و یا تغذیه می باشد. بدون شک بهترین حالت شناخت رفتارهای یک سیستم سفره آب‌های زیرزمینی، انجام یک سری تحقیقات طولانی مدت برای هر منطقه خاص می باشد که با توجه به وضعیت کنونی و سقف محدود بودجه ها عملا امکان پذیر نیست. در این میان با ابزاری مانند شبیه سازها و یا مدلها می توان شرایطی مشابه آنچه در طبیعت موجود است به وجود آورد.

¹ Lemieux

فتحی^۱ و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه آبخوان زرامدین بنی حسن میوسن در دشت‌های شرق تونس ضمن مدلسازی دشت با استفاده توام از نرم افزارهای MODFLOW و GIS، با بررسی مطالعات زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، هیدرودینامیک و هیدروشیمی انجام شده بر روی دشت، وضعیت آب‌های زیرزمینی را تشریح کردند. یک مدل جریان آب زیرزمینی با استفاده از مقادیر زیادی از داده‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی قابل دسترس، تنظیم شد و در پایان برای مجموعه داده‌های دوره ۲۰۰۱-۱۹۸۰ کالیبره شد. با توجه به این که در مرحله صحت سنجی اگر مدل بتواند حوادث دوره زمانی غیر از دوره کالیبراسیون را شبیه‌سازی کند، ترکیب پارامترهای به کار رفته درست می‌باشد، مدل در طول دوره سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ آزموده شد. نقشه‌های پیزومتری برای دوره‌های تست شده که توسط مدل تولید شدند، در بخش بزرگی از منطقه مورد مطالعه با نقشه‌های مشاهداتی مطابقت داشتند. فقط در بخشی از مرکز غربی یک خطای کوچکی اتفاق افتاد، که ممکن بوده است ناشی از خطای مشاهداتی و ناهمگونی زمین‌شناسی باشد. پس از تطبیق مدل تدوین شده بر آبخوان در حالت‌های پایدار و ناپایدار، حساسیت مدل به تغییر پارامترهای موثر بر تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور در این مطالعه، پارامتر نفوذ را به میزان ۱۰٪ کاهش و افزایش دادند. در حالت اول، تغذیه آب زیرزمینی ۹٪ کاهش داشته است و اختلافی معادل ۷ متر بین هد پیزومتری مشاهداتی و محاسباتی، به وجود آمد. و در حالت دوم، تغذیه آب زیرزمینی به میزان ۱۱٪ افزایش یافته و اختلاف بین هد پیزومتری مشاهداتی و محاسباتی، به ۶ متر رسید. در واقع این مدل، به تغییرات نفوذپذیری حساسیت بالایی نشان داد. به طور مثال، افزایش ۵ درصدی نفوذپذیری در منطقه مرکزی، منجر به اختلال هد پیزومتری در سراسر آبخوان، تا بیش از چند متر شد. نتایج نشان دادند که آبخوان بنی حسن میوسن بالاترین حساسیت را به تغییرات نفوذ

¹ Fethi Lachaal

آب و هدایت هیدرولیکی داشته است. نتایج کلی نشان دادند این مدل یک ابزار بسیار قدرتمند برای پیشنهاد طرح های مدیریت منابع آب در مطالعه آبخوان ها در مناطق خشک و نیمه خشک، می باشد. دبارما¹ و هکاران (۲۰۱۶)، به منظور بررسی تغییرات هیدرژئولوژیکی و شبیه سازی نرخ جریان تحت تنش های به وجود آمده در شرایط آبخوان آگرتلا و خوآی در ایالت تریپورای هند، یک مدل جریان آب زیرزمینی سه بعدی تفاضل محدود را به کار گرفتند. آنها با استفاده از نرم افزار GMS و به کار گیری پکیج MODFLOW، میزان جریان حجمی و هد هیدرولیکی آب زیرزمینی را برآورد نمودند. لیتوگرافی (چینه شناسی)، پارامترهای آبخوان در طول آزمایش پمپاژ، داده های بارش -دما و سایر ویژگی های حوضه آبریز و .. برای کالیبراسیون و صحت سنجی مدل مفهومی به کار گرفته شدند. نتایج نشان دادند که هد هیدرولیکی در برابر تخلیه چاه ها کاهش و در برابر تغذیه چاه ها افزایش یافته است و این مدل به تخمین حجم آب زیرزمینی برای بودجه بندی آب، کمک شایانی کرده است.

محمدزاده و همکاران (۲۰۱۷)، سیستم جریان آب زیرزمینی دشت بجنورد، مرکز استان خراسان شمالی را توسط کد MODFLOW با رابط گرافیکی GMS، به صورت عددی شبیه سازی کردند. سپس مدل را در شرایط پایدار از سپتامبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۰، که آبخوان تحت تنش آبی کمتری است، و از سپتامبر ۲۰۰۷ تا سپتامبر ۲۰۰۹ برای حالت ناپایدار، کالیبره کردند. آنها بعد از تخمین خواص هیدرولیکی آبخوان و صحت سنجی مقادیر، سناریوهای مدیریتی مختلف را به مدل اعمال کردند. نتایج نشان دادند که در صورت آزادسازی ۴۰٪ از ذخیره آب پشت سد شیرین دره، سطح سفره های آب زیرزمینی تا ۳ متر افزایش می یابد. تحقیقات آنها نشان داد با مدیریت صحیح

¹ jayanta debbarma

بهره‌برداری از آبخوان در شرایط بحرانی، هم می‌توان از کاهش سطح آب سفره‌ها جلوگیری کرد و هم با گسترش فضاهای تفریحی و ورزشی به توسعه پایدار شهر بجنورد کمک کرد.

پناهی و همکاران (۱۳۹۴)، نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت زنجان را مورد مطالعه قرار دادند و به منظور مدل‌سازی از نرم‌افزار ¹GMS استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد، مقدار سالیانه آب ذخیره شده در آبخوان، معادل ۲۱ میلیون متر مکعب در سال است، در حالی که میزان تخلیه سالیانه توسط چاه‌ها و چشمه‌ها حجمی معادل ۳۵۷ میلیون متر مکعب می‌باشد که این به این معنا است که میزان تخلیه ۱۷ برابر میزان تغذیه می‌باشد. پناهی و همکاران پیش‌بینی کردند در صورت ادامه این روند و برداشت بی‌رویه آب، در سال‌های آتی، آبخوان دشت زنجان به طور کامل نابود خواهد شد.

حسینی و همکاران (مهر ۹۴)، به منظور پیش‌بینی سطح آبخوان دشت خانمیرزا واقع در استان چهارمحال و بختیاری، از نرم‌افزار GMS استفاده کردند. سپس آنها با تهیه مدل مفهومی از منطقه مورد مطالعه، به منظور تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی، مدل را در شرایط پایدار برای یک ماه (مهر ۹۱) و برای حالت ناپایدار برای مدت یک سال آبی (مهر ۹۱ تا مهر ۹۲)، صحت‌سنجی کردند. بر اساس مدل ساخته شده، نتایج تحقیقات نشان دادند با ادامه وضعیت فعلی آبخوان، افت سطح آب در قسمت‌های شمالی دشت ادامه می‌یابد و در آینده مناطق وسیع‌تری را در برخواهد گرفت.

۲-۵- جمع‌بندی

به طور کلی نتایج تحقیقات محققین نشان داد، تغییرات بارش و دما تحت سناریوهای A2 و B2، منجر به افزایش دما و کاهش بارش-رواناب خواهد شد. آنها پیش‌بینی کردند، تقریباً در تمامی فصول

¹ Groundwater Modeling System

شاهد گرمتر شدن هوا خواهیم بود و همچنین میزان بارندگی در فصول تر سال افزایش و در فصول خشک سال روند نزولی داشته است و از طرفی تغذیه آب زیرزمینی سالانه برای دوره سناریو آتی در مقایسه با دوره مرجع کاهش خواهد یافت که منجر به کاهش ذخیره حجم آب زیرزمینی خواهد شد.

فصل ۳ مواد و روش ها

۳-۱- مقدمه

به طور کلی مدل‌ها، ابزاری توصیفی برای درک بهتر پدیده‌هایی که امکان دیدن آن‌ها وجود ندارد، هستند. مدل فرآیندی است که ارتباط دقیق پارامترهای مختلف یک سیستم را به زبان ریاضی بیان می‌کند و این روابط ریاضی، خواص مکانی و زمانی یک سیستم یا بخش‌هایی از آن را شبیه‌سازی می‌کند. مدل وسیله و یا یکی از راه‌های ساده نمودن سیستم‌های مختلف فیزیکی به شمار می‌رود. مدل آب زیرزمینی در مفهوم خاص آن، روابط ریاضی است که سیستم طبیعی آبخوان و عوامل تغذیه و تخلیه آن و تغییرات سطح پیزومتريك را به صورت مکانی و زمانی نشان می‌دهد (قدرتی و همکاران ۹۵).

۳-۲- روش تحقیق

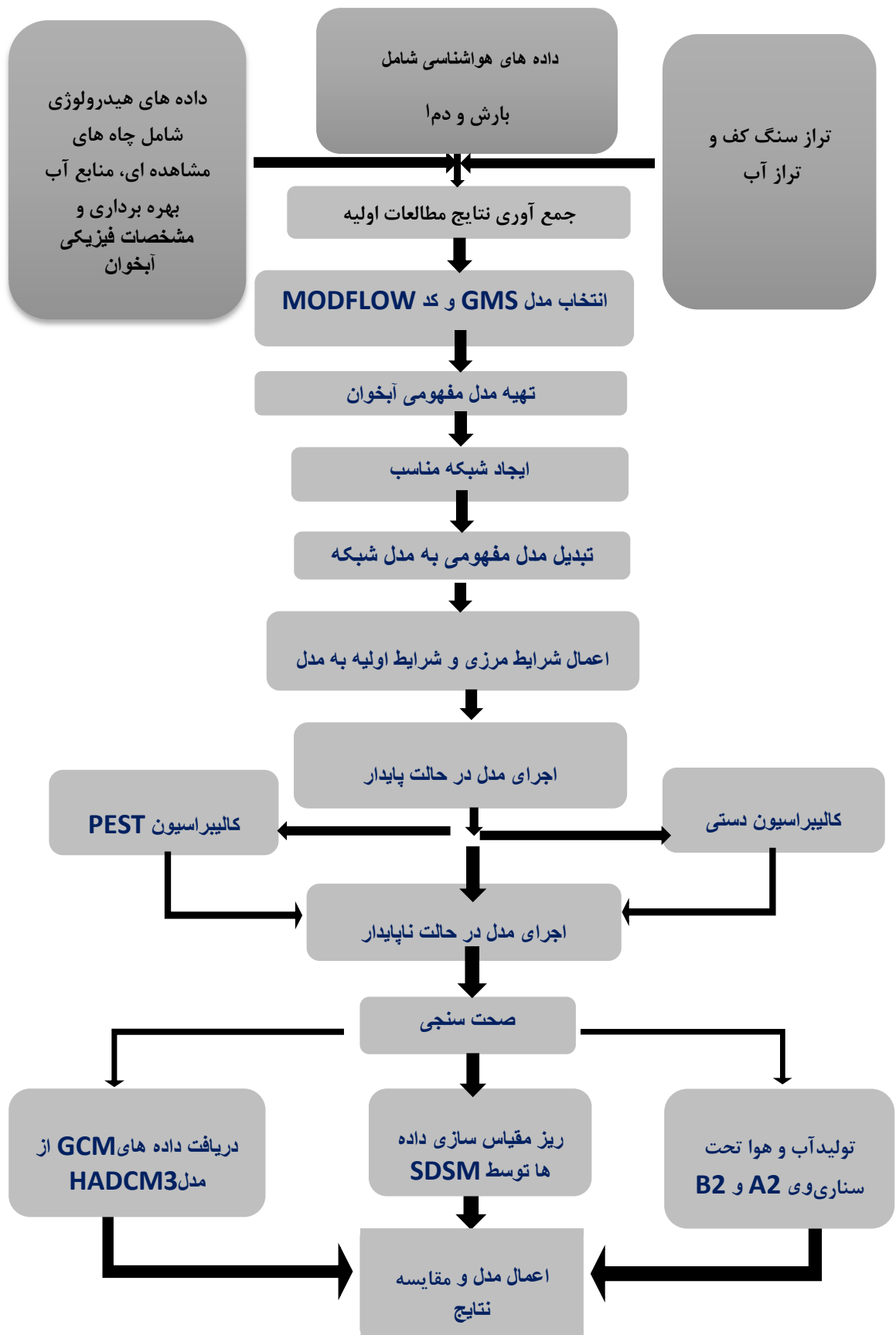
روش تحقیق در این پایان‌نامه به صورت فلوجارت در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود ابتدا تمامی داده‌های مورد نیاز برای استفاده در دو نرم‌افزار GMS و SDSM^۱ مورد استفاده در این تحقیق، از مراجع معتبر دریافت شده است.

در مرحله بعد مدل ریاضی آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار GMS، تهیه شده و با استفاده از اطلاعات موجود شامل اطلاعات اکتشافی، منابع بهره‌برداری، چاه‌های مشاهده‌ای و .. کالیبره می‌گردد. سپس با استفاده از مدل ریزمقیاس‌سازی آماری SDSM، تغییر متغیرهای اصلی آب‌وهوا نظیر درجه حرارت و بارش‌های جوی در محدوده مورد بررسی تحت دو سناریوی A2 و B2، تخمین زده می‌شود.

در انتها نتایج حاصل از روند تغییر اقلیم در محدوده دشت کاشان به سیستم مدل ریاضی منطقه اعمال شده و نتایج حاصل از پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار با روند مورد پیش‌بینی در خروجی مدل تغییر

^۱ Statistical DownScaling Model

اقلیم بر روی آب زیرزمینی منطقه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد؛ و در نهایت پیش‌بینی مناسبی به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی در جهت مدیریت برداشت آب در محدوده مورد مطالعه ارائه می‌گردد.



شکل ۳-۱- فلوچارت روش تحقیق

۳-۳-مدل‌های آب زیرزمینی

به طور کلی مسائل پیچیده عملکرد سامانه‌های طبیعی آب زیرزمینی را که راه‌حل تحلیلی ندارند، به کمک مدل‌ها حل می‌نمایند و مدل واکنش‌های یک سامانه‌ی آب زیرزمینی را تحت شرایط مختلف، شبیه‌سازی می‌کند. به طور کلی مدل‌های آب زیرزمینی را به دو دسته مدل‌های فیزیکی و ریاضی طبقه‌بندی می‌کنند.

۳-۳-۱- مدل‌های فیزیکی

- مدل ماسه‌ای
- مدل قیاسی

مدل ماسه‌ای، شامل مخزن پر شده از ماسه و اشباع از آب می‌باشد که مشابه یک آبخوان آزاد با گسترش محدود است. اصلی‌ترین ضعف این مدل این است که معرف شرایط صحرائی نمی‌تواند باشد و صرفاً جنبه نمایشی و آموزشی دارد.

یک سیستم آب زیرزمینی را می‌توان با استفاده از قیاس نمودن بین جریان آب زیرزمینی و فرآیندهای فیزیکی مشابه، مانند عبور جریان‌های الکتریکی از رساناها، شبیه‌سازی نمود (چیت‌سازان ۸۱).

۳-۳-۲-مدل‌های ریاضی

مدل‌های ریاضی را بسته به نوع معادلات به انواع زیر می‌توان طبقه‌بندی کرد:

- مدل‌های تجربی (Empirical Model)
- مدل‌های احتمالاتی (Probabilistic Model)
- مدل‌های علت و معلولی (Deterministic Model)

مدل‌های تجربی، نتایجی از داده‌های تجربی هستند که بر روی یک معادله ریاضی برازش داده می‌شوند. اگر چه این دسته از مدل‌ها، دامنه کاربرد محدودی دارند و در رابطه با مسائل خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی می‌توانند بخش مهمی از یک مدل پیچیده عددی را تشکیل دهند.

مدل‌های احتمالاتی بر پایه قوانین احتمالاتی و آماری استوار می‌باشند. مدل‌های مذکور می‌توانند دارای شکلها و پیچیدگی‌های متنوعی باشند که از توزیع احتمالاتی ساده یک خاصیت هیدرولوژیک، شروع و به مدل‌های پیچیده تصادفی وابسته به زمان ختم شوند. محدودیت این مدل‌ها در این است که از این مدل‌ها نمی‌توان برای پیش‌بینی پارامترهای هیدروژئولوژیک، استفاده کرد. همچنین برای کار کردن با این مدل‌ها نیاز به داده‌های گسترده‌تری داریم.

در مدل‌های علت و معلولی فرض بر آن است که بازخوردهای آینده سیستم مورد مطالعه، با قوانین فیزیکی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی تعیین شوند. این مدل‌ها بر اساس معادله ریاضی مورد استفاده در آنها به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند.

- تحلیلی
- عددی

مدل‌های تحلیلی، هر بار یک معادله جریان آب زیرزمینی را حل می‌کنند که نتیجه آن در یک نقطه یا خطی از نقاط، در آبخوان به کار گرفته می‌شود. اشکال اساسی این مدل‌ها، عدم کاربردشان در شرایط پیچیده و آبخوان‌های غیر یکنواخت با چندین مرز و چاه، است. در حقیقت این مدل‌ها تنها قادر به تجزیه و تحلیل شرایط ایده‌آل هستند که در آنها بسیاری از پیچیدگی‌های سیستم آب زیرزمینی واقعی، با فرضیات ساده و محدود، نادیده گرفته می‌شوند (سلیمانی ۹۲).

مدل‌های عددی، توصیف کننده تمام میدان جریان مورد نظر به طور همزمان می‌باشند، به شرط آنکه برای نقاط مورد نظر، حل ریاضی موجود باشد. در این روش ناحیه مورد مطالعه، به تعدادی ناحیه

کوچکتر که اغلب سلول یا المان نامیده می‌شوند، تقسیم می‌شود و یک معادله پایه جریان برای هر سلول، که غالباً بیلان آبی آن مورد نظر است، حل می‌شود. از حل مدل عددی، تعیین بار هیدرولیکی در نقاط مشخص کننده هر سلول مشخص می‌گردد (چیت‌سازان، ۸۱).

دو روش عددی متداول برای حل مدل‌های ریاضی جریان آب زیرزمینی معرفی می‌گردد که عبارت است از:

- روش تفاضل محدود (FDM)
- روش اجزای محدود (FEM)

۳-۲-۱- روش تفاضل محدود (FDM)^۱

روش تفاضل محدود یک روش عددی چند منظوره و ساده است که در سال‌های اخیر، جهت مدل‌سازی جریان‌ها، به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. در این روش ابتدا سطح آبخوان مورد مطالعه به شبکه‌هایی با ابعاد و تراز سطح آب مشخص تقسیم‌بندی می‌شود. سپس با جانشین کردن مشتقات جزئی توسط تفاضل‌های محدود در معادله جریان، یک دستگاه معادلات خطی شامل N معادله و N مجهول به دست می‌آید که با حل آن، مقدار تراز سطح آب در N سلول شبکه حاصل می‌گردد. بر این اساس می‌توان مقادیر تراز سطح آب شبیه‌سازی شده در هر سلول را مطابق رابطه زیر و ضرائب مشخص شده، تعیین نمود. به طور کلی روش تفاضلات محدود به دو صورت صریح و ضمنی نوشته می‌شوند.

• روش صریح

در این روش هر معادله به گونه‌ای تقریب زده می‌شود که همواره در هر معادله فقط یک مجهول ظاهر شده و صریحاً قابل حل است. این روش معمولاً از تقریب پیشرو در ارتباط با زمان (n) استفاده

^۱ Finite Difference Method

می‌گردد. به عبارتی برای تقریب مشتق زمانی معمولاً از تفاضل پیشرو نسبت به زمان (n) و برای مشتقات مکانی از تقریب تفاضل مرکزی در زمان (n) استفاده می‌گردد. معادله حاکم در شرایط ناپایدار سه بعدی در این روش به صورت زیر درمی‌آید:

$$K_x \frac{h_{j-1}^n - 2h_j^n + h_{j+1}^n}{\Delta x^2} + K_y \frac{h_{i-1}^n - 2h_i^n + h_{i+1}^n}{\Delta y^2} + K_z \frac{h_{k-1}^n - 2h_k^n + h_{k+1}^n}{\Delta z^2} = S_s \frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} \pm q^n \quad \text{رابطه ۳-۱}$$

این روش اگرچه ساده است ولی معایبی دارد که استفاده از آن را در آبخوان‌ها محدود می‌کند. از جمله این معایب اینکه در محاسبه بار هیدرولیکی برای یک زمان به اندازه Δt بعد از زمان اولیه، از شرایط مرزی خارجی و همچنین q_s (شرط مرزی داخلی) در زمان n استفاده می‌کند. در حالی که ممکن است هم مقدار q_s و هم شرایط مرزی خارجی در زمان n+1 تغییر کرده باشد. به طور مثال ممکن است یک چاه بهره برداری برای زمان دوم فعال شده در حالی که در زمان اولیه فعال نبوده باشد. عیب دیگر این اینکه این روش برای Δt های بزرگ، خصوصاً در آب‌های زیرزمینی که معمولاً Δt ها بزرگ هستند، ناپایدار است. یعنی اگر در گام‌های اولیه خطای کوچکی در محاسبات حاصل شود، در گام‌های بعدی این خطا به طور فزاینده‌ای زیاد می‌شود و جواب‌ها را به کلی از مقدار واقعی دور می‌سازد و مانع همگرا شدن روش حل می‌گردد.

• روش ضمنی

در این روش معادلات به گونه‌ای توسط تفاضلات تقریب زده می‌شوند که همواره در یک معادله بیش از یک مجهول ظاهر می‌شود و لذا معادله صریحاً قابل حل نیست. در این روش معمولاً از تقریب تفاضل پسرو یا رو به عقب در ارتباط با زمان n+1 استفاده می‌شود. به عبارتی معمولاً برای تقریب مشتق زمانی از تفاضل پسرو یا رو به عقب نسبت به زمان n+1 و برای تقریب مشتقات مکانی از تقریب تفاضل مرکزی (معمولاً مرتبه دوم) در زمان n+1 استفاده می‌شود. معادله در این روش به صورت زیر درمی‌آید:

$$K_x \frac{h_{j-1}^{n+1} - 2h_j^{n+1} + h_{j+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + k_y \frac{h_{i-1}^{n+1} - 2h_i^{n+1} + h_{i+1}^{n+1}}{\Delta y^2} + K_z \frac{h_{k-1}^{n+1} - 2h_k^{n+1} + h_{k+1}^{n+1}}{\Delta z^2} = \frac{S}{b} \frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} \pm q^{n+1} \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

در معادله بالا همانگونه که دیده می‌شود بیش از یک مجهول وجود دارد به عبارتی برای هر المان فقط مقدار در زمان اولیه (n) مشخص است. از آنجایی که در روش ضمنی تمامی معادلات باید همزمان حل شوند، زمان محاسبات افزایش می‌یابد و از این نظر هزینه بالایی را ایجاد می‌کند. به این دلیل که به امکانات کامپیوتری بیشتری نیاز دارد و از طرف دیگر وقت گیر است. ولی با توجه به دلایل زیر در آبخوان‌ها عموماً از این روش استفاده می‌شود:

- بیشتر روش‌های ضمنی پایدار هستند و از نظر افزایش گام زمانی محدودیت پایداری وجود ندارد و می‌توان از گام‌های زمانی بزرگ استفاده کرد .
- در این روش برخلاف روش صریح از شرایط مرزی در زمان n+1 استفاده می‌شود و از این نظر خطایی ایجاد نمی‌شود (میرعباسی ۱۳۸۶).

۳-۳-۲- روش اجزای محدود (FEM^۱)

روش اجزای محدود، یک روش عددی قدرتمند است که از آن برای مدل‌سازی آبخوان می‌توان استفاده نمود. در این روش حوزه پیوسته‌ی آبخوان به تعدادی زیرحوزه یا اجزای محدود تقسیم می‌شوند که این اجزا برای درج عوامل حوزه مانند بار پیزومتری، هدایت هیدرولیکی و... به کار می‌روند. در این روش، جواب معادله‌ی دیفرانسیلی حاکم با یک روش انتگرالی به دست می‌آید (شوشتری ۹۲).

^۱ Finite Element Method

۳-۳-۳- تاریخچه مدل‌های عددی آب زیرزمینی

از دهه‌ی ۷۰ قرن بیستم میلادی که روش‌های مدل‌سازی عددی به عنوان یک رویکرد نسبتاً جدید برای حل مسائل مختلف، مطرح شد، تغییرات زیادی در مدل‌سازی سیستم‌های آب زیرزمینی صورت گرفته است. قبل از آن تا اواسط دهه‌ی ۶۰ قرن بیستم میلادی، به دلیل در دسترس نبودن رایانه‌های دیجیتال با سرعت و دقت بالا، مدل‌های ریاضی عددی برای حل مسائل به طور گسترده به کار گرفته نشدند ولی در سال‌های دهه‌ی هفتاد میلادی، مقالات و کتب زیادی در زمینه مدل‌سازی انتشار یافتند. در حال حاضر استفاده از مدل‌های ریاضی عددی در حل مسائل عملی آب‌های زیرزمینی، از پیش‌روترین روش‌هاست (شوشتری ۹۲). مطالعات آب‌های زیرزمینی به روش‌های نوین در ایران در سال ۱۳۴۱ و با کمک کارشناسان سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۱ آغاز گردید. تهیه مدل منابع آب زیرزمینی نیز برای اولین بار در سال ۱۳۴۶ با همکاری آن‌ها با تهیه مدل الکتریکی آبخوان دشت قزوین انجام شد. تهیه مدل ریاضی آبخوان در ایران با به کارگیری ماشین‌های حسابگر از سال ۱۳۵۲ آغاز شد و آبخوان‌هایی نظیر کرمانشاه و همدان و ورامین، به کمک این مدل‌ها بررسی شدند (دستورالعمل وزارت نیرو در انتخاب آمارهای مورد نیاز برای مدل‌سازی ۹۳).

۳-۳-۳-۱- مدل GMS

GMS نرم‌افزار بسیار پیچیده و جامعی جهت مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌باشد. نرم‌افزار GMS واسط گرافیکی می‌باشد که قابلیت پیش‌پردازش یا پس‌پردازش برای ۱۰ نوع مدل آب زیرزمینی را داراست که این دست مدل‌ها عمدتاً با روش‌های عددی تفاضل محدود و اجزای محدود به شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی می‌پردازد. مدل‌هایی که GMS پشتیبانی می‌کند به چهار گروه تقسیم بندی می‌شوند:

^۱ FAO

- مدل‌های شبکه سه بعدی که شامل : RT3D، MT3DMS، MODPATH، MODFLOW، UTCHEM، SEAM3D، ART3D
- مدل تحلیلی شامل : MODAEM
- مدل دو بعدی مش : SEEP2D
- مدل سه بعدی مش : FEMWATER

۳-۳-۲- قابلیت‌های نرم‌افزار GMS

- از همه‌ی نسخه‌های مادفلو پشتیبانی می‌کند.
- با نرم افزار^۱ GIS به خوبی لینک شده و پایگاه‌های داده و شیپ فایل ها را مستقیماً باز می‌کند. همچنین می‌تواند با ایجاد یک پایگاه داده قوی اطلاعات خود را ذخیره کند.
- از همه ابزار کالیبراسیون دستی و اتوماتیک از قبیل PEST، Parallel PEST، Monte Carlo، Calibration targets simulation، plots and charts برخوردار است (قدرتی و همکاران ۹۵).
- در تحقیق حاضر از کد ریاضی MODFLOW با کمک رابط گرافیکی GMS، استفاده شده است.

۳-۳-۳- مدل MODFLOW

نسخه اصلی MODFLOW توسط McDonald and Harbough در سال ۱۹۸۸ تهیه و ارائه گردیده است. MODFLOW معادله دیفرانسیلی جریان در محیط متخلخل را به روش تفاضلهای محدود حل می نماید. فرضیاتی که در تهیه مدل MODFLOW به کار رفته بدین قرار است:

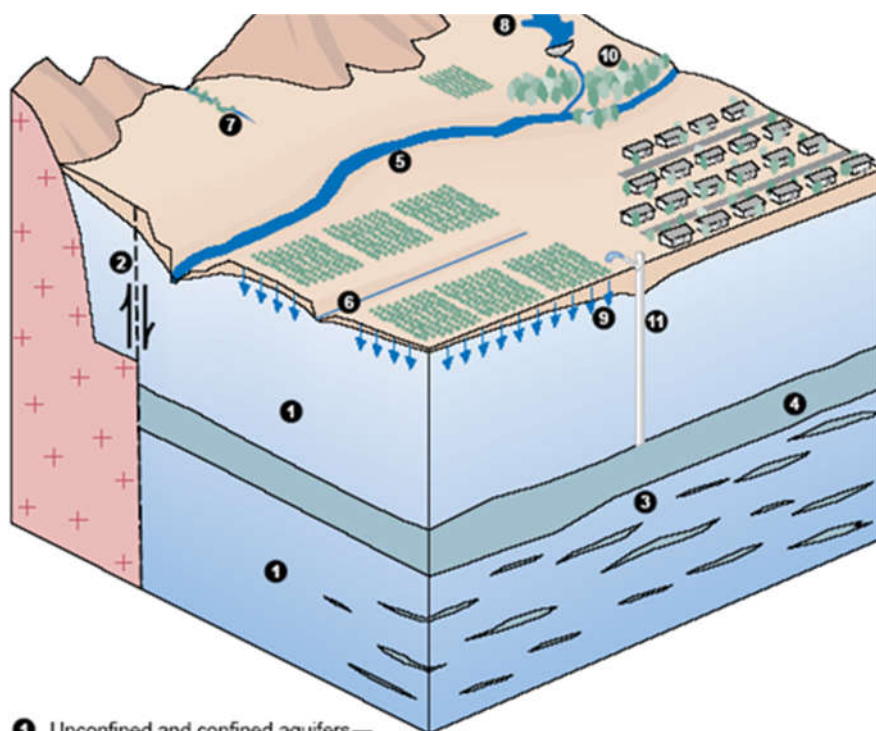
- ۱- محیط آبخوان اشباع است.
- ۲- جریان در محیط متخلخل تابع قانون دارسی است.

¹ Geographic Information System

۳- چگالی آب زیر زمینی در زمان و مکان ثابت است.

۴- جهت های اصلی هدایت هیدرولیکی افقی و قابلیت گذردهی ثابت است.

همان طور که در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است MODFLOW قادر به شبیه سازی محدوده وسیعی از فرآیندها و جنبه های هیدروژئولوژیکی می باشد. جریان های ماندگار و غیر ماندگار، آبخوانهای آزاد و تحت فشار و سایر انواع آبخوانها، رودخانه، زهکش، چاه، چشمه، تبخیر و تعرق، نفوذ توسط بارندگی و آبیاری به کمک MODFLOW قابل شبیه سازی است.

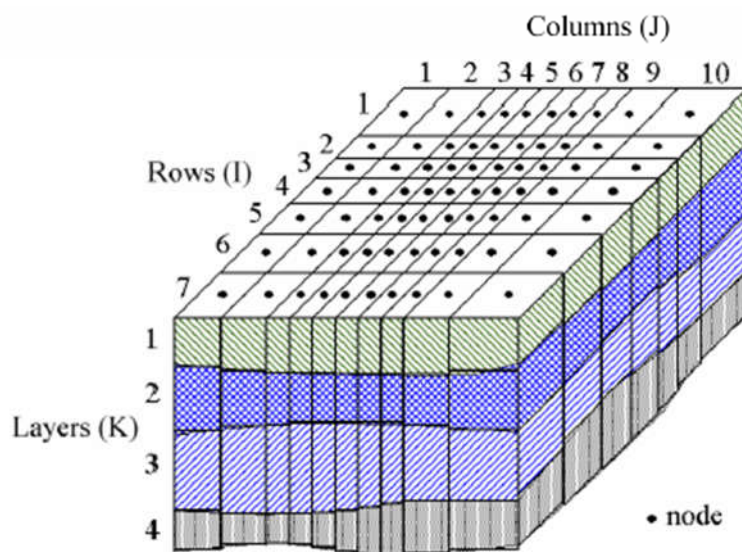


- | | |
|--|--|
| ① Unconfined and confined aquifers—
Ground-water flow and storage changes | ⑦ Ephemeral streams—Exchange of water
with aquifers |
| ② Faults and other barriers—Resistance to
horizontal ground-water flow | ⑧ Reservoirs—Exchange of water with
aquifers |
| ③ Fine-grained confining units and interbeds | ⑨ Recharge from precipitation and irrigation |
| ④ Confining units—Ground-water flow and
storage changes | ⑩ Evapotranspiration |
| ⑤ Rivers—Exchange of water with aquifers | ⑪ Wells—Withdrawal or recharge at speci-
fied rates |
| ⑥ Drains and springs—Discharge of water
from aquifers | |

شکل ۲-۳ مولفه های يك آبخوان که توسط MODFLOW قابل شبیه سازی است

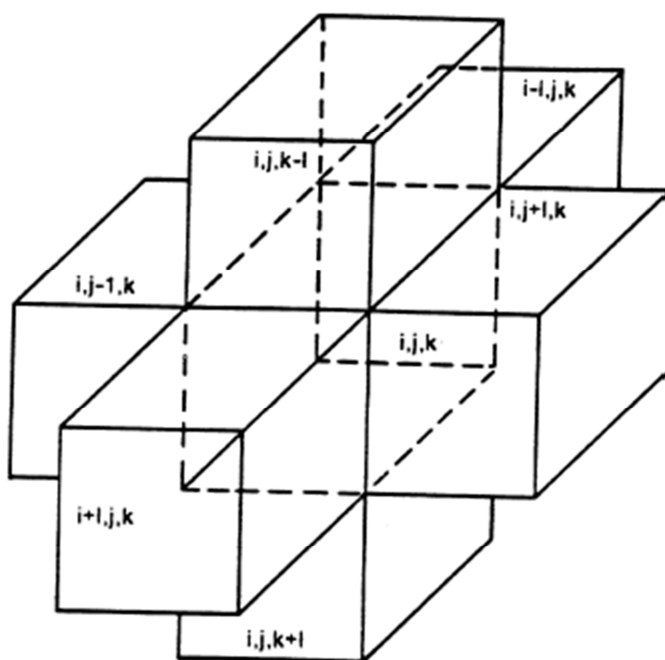
MODFLOW معادله جریان در محیط متخلخل را به روش تفاضل‌های محدود حل می‌کند (مکدونالد و هارباگ^۱ ۱۹۹۸). برای این کار مطابق شکل ۳-۳ محدوده آبخوان در جهات مختلف، به صورت یک شبکه از بلوک‌ها تقسیم‌بندی می‌شود. شبکه بندی بلوکها با ردیفها، ستونها، و لایه های آبخوان مشخص می‌گردد. همچنین هر بلوک را یک سلول می‌نامند و در مرکز هر سلول نقطه‌ای به نام گره وجود دارد، که باید بار هیدرولیکی در آن محاسبه گردد.

جریان در آبخوان از طریق محاسبه تراز آب در سلولهای مجاور مشخص می‌گردد. بدین منظور برای هر سلول مطابق شکل ۳-۴، ۶ سلول مجاور آن در نظر گرفته می‌شود. برای هر سلول در محدوده آبخوان، لازم است مشخصه های هیدرودینامیکی آبخوان در آن سلول وارد گردد. همچنین لازم است اطلاعات مربوط به چاهها، رودخانه ها، و سایر اجزای ورودی و خروجی به مدل داده شود.



شکل ۳-۳ شبکه بندی MODFLOW جهت شبیه سازی سه بعدی جریان در آبخوان (ماخذ: کتاب قدرتی ۱۳۹۵)

¹ McDonald & Harbaugh



شکل ۳-۴ سلول مرکزی (i,j,k) ، و ۶ سلول مجاور آن

۳-۳-۴- معادله عمومی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی

جریان سه بعدی آب زیرزمینی در یک محیط متخلخل اشباع با معادله‌ی دیفرانسیلی جزئی، توصیف می‌شود که به صورت زیر می‌توان نوشت. معادله (۳-۳) جریان آب زیرزمینی را در حالت ناپایدار در یک محیط متخلخل ناهمگن و ناهمسان به شرط این که محورهای اصلی هدایت هیدرولیکی با محورهای مختصات همسو باشند، بیان می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm Q_s \quad \text{رابطه ۳-۳}$$

K_x ، K_y و K_z به ترتیب هدایت هیدرولیکی در راستای محورهای x ، y و z $[LT^{-1}]$

h : بار هیدرولیکی یا پیزومتری $[L^{-1}]$

Q_s : شار حجمی در حجم واحد و نشان دهنده‌ی چشمه یا چاه آب $[T^{-1}]$

S_s : ذخیره ویژه محیط متخلخل $[L^{-1}]$

t : زمان $[T]$ است.

اگر جریان آب زیرزمینی دوبعدی باشد، معادله‌ی دیفرانسیل جزئی مناسب در این حالت به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \pm w \quad \text{رابطه ۳-۴}$$

که در آن T_x و T_y به ترتیب انتقال پذیری آبخوان در جهت محورهای x و y $[L^2 T^{-1}]$

h : بار هیدرولیکی $[L]$

S : ضریب ذخیره‌ی محیط متخلخل

t : زمان $[T]$

$\pm w$: شار حجمی در سطح واحد $[L T^{-1}]$ ، که w برای حالتی که آب از آبخوان خارج و مقدار $-w$ برای حالتی است که آب وارد آبخوان می‌شود.

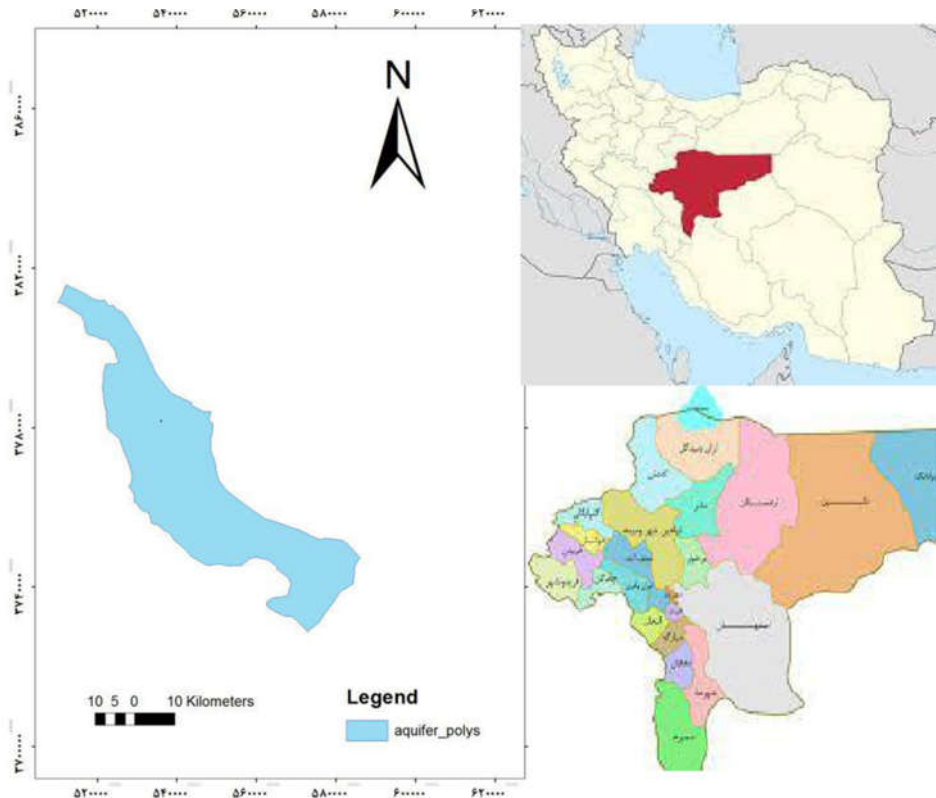
اگر محیط همگن و همسان و همچنین ضخامت آبخوان ثابت باشد رابطه به شکل زیر در می‌آید (شوستری ۹۲).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \pm \frac{w}{T} \quad \text{رابطه ۳-۵}$$

مورد مطالعه ۳-۳-۵- مشخصات عمومی آبخوان

۳-۳-۵-۱- موقعیت عمومی و جغرافیایی

حوزه آبریز کاشان از شمال و شمال غربی به محدوده قم، از جنوب غربی به محدوده مویه، از جنوب به دشت نطنز و از شرق به محدوده دریاچه نمک محدود می‌باشد و دارای وسعت ۷۰۸۳ کیلومترمربع می‌باشد که ۳۰۴۰ کیلومترمربع آنرا ارتفاعات و مناطق کوهپایه ای و ۴۰۴۳ کیلومترمربع آن را دشت واقع در شمال و شمال شرق ارتفاعات اشغال کرده است. این در شرایطی است که وسعت محدوده جغرافیایی شهرستان‌های کاشان و آران و بیدگل حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. منطقه دشت از حوزه آبریز کاشان خود به دو قسمت تقسیم می‌شود. بخشی از آن را اراضی بایر و شورزار در بر می‌گیرد که وسعت آن ۲۵۶۹ کیلومترمربع بوده و شامل مناطق کویری حاشیه دریاچه نمک می‌باشد. بخش دیگر که تاحدی مستعد کشاورزی می‌باشد معروف به دشت کاشان می‌باشد. دشت کاشان به صورت یک دره باریک با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی است. عرض این دره حدود ۲۰ کیلومتر می‌باشد. دشت کاشان، به وسعت ۱۴۷۴ کیلومتر مربع، شهر کاشان و بخش مرکزی آن و شهر آران و بیدگل و همه بخش‌های آن و اراضی کشاورزی واقع در دشت را شامل می‌شود. محدوده مطالعاتی کاشان با کد مطالعاتی (۴۱۳۲) بین طول‌های ۵۵° ۵۰ تا ۵۱° ۵۵' و عرض‌های ۳۰° ۳۳ تا ۵۰° ۵۵' شمالی واقع شده است. محدوده مورد مطالعه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵. محدوده مطالعاتی

۳-۳-۵-۲- آب و هوا

اقلیم منطقه بر پایه‌ی روش دومارتن، جزو مناطق خشک یا بیابانی شدید طبقه‌بندی می‌گردد. از سوی دیگر نواحی کوهستانی جنوب دشت کاشان از اقلیم ویژه‌ای برخوردار است که طبق طبقه‌بندی دومارتن جزو مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود (مسعودی ۹۴). به منظور بررسی وضعیت اقلیمی منطقه مورد مطالعه از پارامترهای اقلیمی ایستگاه سینوپتیک کاشان به عنوان ایستگاه مبنا، استفاده شده است.

روش دومارتن

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

رابطه ۳-۶

پارامترهای به کار رفته در این رابطه عبارت است از :

I = شاخص اقلیمی دومارتن

P = میانگین بارش سالانه بر حسب میلی‌متر

T = میانگین درجه حرارت سالانه بر حسب درجه سانتیگراد

محدوده ضریب I و نتایج حاصل از محاسبه رابطه ۳-۳ در جداول ۱-۳ و ۲-۳ نشان داده شده است .

بر این اساس، محدوده مورد مطالعه در اقلیم خشک قرار دارد.

جدول ۱-۳ طبقه بندی اقلیمی براساس روش دو مارتن

نوع اقلیم	محدوده شاخص اقلیمی (I)
خشک	کوچکتر از ۱۰
نیمه خشک	۱۰ تا ۱۹/۹
مدیترانه ای	۲۰ تا ۲۳/۹
نیمه مرطوب	۲۴ تا ۲۷/۹
مرطوب	۲۸ تا ۳۴/۹
بسیار مرطوب	بزرگتر از ۳۵

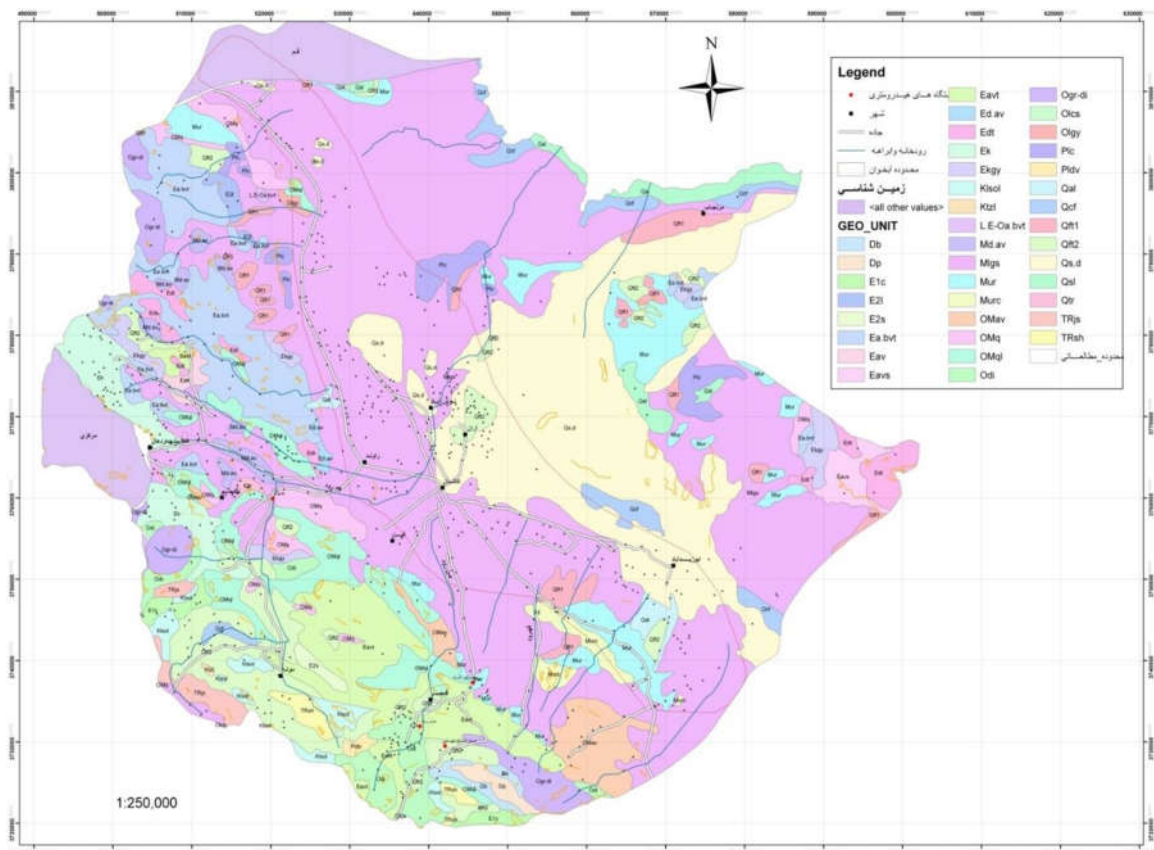
جدول شماره (۲-۳) : نوع اقلیم کاشان بر اساس روش دومارتن

نوع اقلیم	شاخص اقلیمی (I)	میانگین درجه حرارت سالانه T (°C)	میانگین بارش سالانه P(mm)
خشک	۵/۳	۱۸/۶۴	۱۵۳/۰۰

میزان بارندگی در دشت کاشان ۱۳۶.۵۷ میلیمتر و در ارتفاعات منطقه مطالعاتی برابر ۱۷۵.۲ میلیمتر در سال و متوسط بارندگی سالانه منطقه معادل ۱۵۵ میلیمتر می باشد. میزان تبخیر تعرق واقعی بر اساس روش تورنت وایت، در دشت های محدوده مطالعاتی برابر با ۱۳۶.۵ و در ارتفاعات ۱۲۷.۷۲ میلیمتر در سال می باشد. متوسط دمای سالانه در دشت های محدوده مطالعاتی کاشان برابر با ۱۸.۶۴ درجه سانتیگراد و در ارتفاعات محدوده مطالعاتی برابر با ۱۲.۸۹ درجه سانتیگراد می باشد. به موجب آمار ایستگاههای معرف دشت و ارتفاعات، دمای دشت در محدوده مورد نظر بین کمترین دمای مطلق ۴- و بیشترین مطلق ۴۴ درجه سانتیگراد متغیر است و در ارتفاعات موجود در محدوده دما بین کمترین دمای مطلق ۱۰- و بیشترین دمای مطلق ۳۵ درجه سانتیگراد متغیر می باشد (گزارش بیلان آب زیرزمینی دشت کاشان ۱۳۹۱).

۳-۳-۶- زمین‌شناسی منطقه

از دیدگاه تقسیمات واحدهای ساختمانی-رسوبی ایران، مثلث کاشان در زون ایران مرکزی قرار گرفته است. دشت کاشان جزئی از ساختمان‌های شکسته ای است که به صورت فروزمین در ایران مرکزی شکل گرفته است. ارتفاعات کاشان نواحی غربی، جنوبی و جنوب غربی دشت را شامل می‌شوند و از آندزیت‌های ائوسن، آهک‌های الیگسون و الیگومیوسن، مارن‌های رنگی و گچ و کنگلومرای پلیوسن، تشکیل شده است (مصلحی بهمن ۱۳۹۱). مشخصات زمین‌شناسی منطقه در شکل ۳-۶ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۳-۶ نقشه زمین‌شناسی محدوده کاشان

۳-۳-۶-۱- هیدروژئولوژی

آبخوان دشت کاشان مهمترین و تنها آبخوان تعریف شده در محدوده دشت کاشان می باشد. فرورفتگی دشت کاشان را می توان حاصل رسوب گذاری مستقیم رودخانه ها و مسیل هایی دانست که از ارتفاعات غربی دشت وارد می شوند. این فرورفتگی انباشته از رسوبات آبرفتی و رودخانه ای، تراس ها، تراورتن حفره دار و رسوبات سیلابی و بالاخره باد رفتی می باشد که منبع ذخیره آب های زیرزمینی این محدوده را تشکیل می دهند. آبخوان دشت کاشان شامل رسوبات دوران چهارم زمین شناسی می باشد که این رسوبات از تشکیلات زیر تشکیل شده است:

الف- واریزه های کنار دشت که کوهپایه های جنوبی را تشکیل می دهند و شامل قلوه سنگ و پاره سنگ می باشد که هم جنس طبقاتی هستند که کوه های جنوبی دشت را تشکیل داده اند.

ب- مخروط افکنه ها که در مسیر مسیل های فعلی قرار گرفته و از نفوذ پذیری خوبی برخوردار هستند.

ج- پوشش رسی که روی اغلب قسمت های شمالی و شمال غربی دشت را می پوشاند.

د- در مناطق شمالی و شمال غربی دشت در بعضی نواحی پوششی از ماسه بادی وجود دارد که به وسیله باد از کویر شمالی آورده شده اند(گزارش بیلان آب زیرزمینی دشت کاشان ۱۳۹۱).

۳-۳-۶-۲- بررسی های اکتشافی

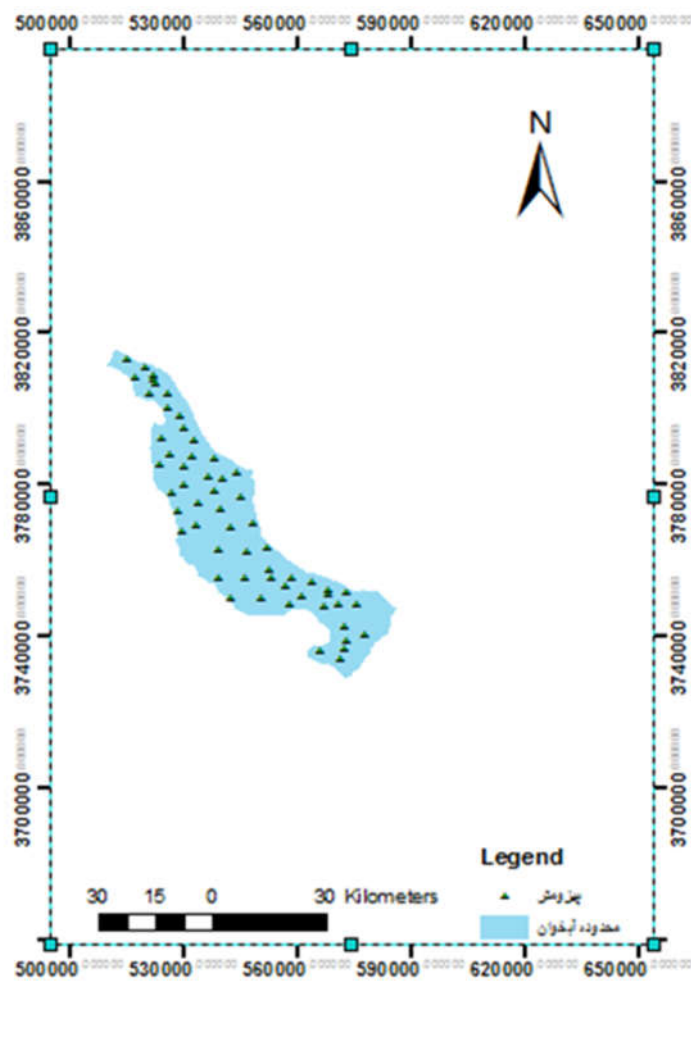
کاوش های انجام شده در دشت کاشان با استفاده از روش های ژئوفیزیکی، حفر گمانه ها و چاه های اکتشافی و آزمایش های پمپاژ صورت گرفته است.

۳-۳-۳- بررسی های ژئوفیزیکی

این بررسی ها در محدوده ای از ۳ کیلومتری شمال روستای مشکان تا روستای لتحر در جنوب شهرستان کاشان در نظر گرفته شده است. با توجه به نیاز به اطلاعات تغییرات مقاومت الکتریکی در سطح محدوده در این مطالعات تعداد ۱۳۱ گمانه الکتریکی در ۱۱ مقطع با نام های A, B, ..., K و برداشت گردیده است. منحنی های تغییرات مقاومت الکتریکی مورد تفسیر قرار گرفته و بر مبنای نتایج حاصل از بررسی های ژئوالکتریک، نقشه تغییر ضخامت آبرفت یا عمق سنگ کف تهیه شده است. بر این اساس عمق سنگ کف در قسمت های غربی محدوده دارای رخنمون بوده و با حرکت به سمت شرق عمق آن افزایش می یابد، به طوری که مقدار آن از صفر متر به ۲۸۰ متر افزایش می یابد.

۳-۳-۴- چاه های اکتشافی

به منظور بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان، تراز آب در ۶۳ حلقه چاه پیزومتری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. پراکندگی چاه های پیزومتری مورد نظر در شکل ارائه گردیده است. جانمایی چاه های مشاهده ای در شکل ۳-۷ آورده شده است.



شکل ۳-۷ نقشه پراکنندگی چاه‌های مشاهده‌ای

۳-۳-۶-۵- ضرایب هیدرودینامیکی

چگونگی حرکت جریان آب زیرزمینی در محیط آبخوان، تابع ضرایب هیدرودینامیکی است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیک وجود دارد که روش آزمون‌های پمپاژ در شرایط جریان پایدار و ناپایدار یکی از روش‌های مهم در تعیین ضرایب هیدرودینامیک در کارهای عملی محسوب می‌شود. ضرایب آبگذری و ضرایب ذخیره در آزمون‌های پمپاژ بر این اساس تعیین می‌شود که یک چاه با دبی ثابت پمپاژ شده و افت سطح پیزومتریک یا سطح ایستابی در

پیزومترهایی که به فاصله ای مشخص از چاه اصلی قرار دارند، به طور متناوب اندازه گیری می شود. سپس با استفاده از این داده ها و معادلات جریان های شعاعی، ضرایب هیدرودینامیک لایه آبدار محاسبه می گردد. با توجه به موارد ذکر شده در فوق و با استفاده از گزارش مطالعات بیلان آب مقادیر در نظر گرفته شده برای ضریب انتقال (T) در دشت کاشان در جدول شماره ۳-۳ ارائه شده است. ضریب ذخیره از پارامترهای مهم و ضروری در محاسبه حجم مخزن آب زیر زمینی در معادلات بیلان محسوب می شود. میزان ضریب ذخیره با توجه به جنس آبخوان و همچنین مطالعات و گزارشات گذشته در کل دشت در حدود ۴ درصد برآورد می شود.

جدول ۳-۳ مقادیر ضریب انتقال در دشت کاشان

ردیف	نام محل	X	Y	T
1	شمال راوند	536277	3767147	484
2	پل اتوبان قمصر	524348	3750395	475
3	سرخ گل	566800	3747939	345
4	مسجد الحسین مشکات	526800	3777922	331
5	شرکت گالوانیزه	558023	3748417	326
6	لتحر	539022	3755434	311
7	خزاق	529615	3767811	289
8	فخر آباد	536704	3782447	281
9	بیابانک	577987	3740480	280
10	جعفر آباد زیره	527610	3736676	278

275	3773819	539638	تاج آباد	11
274	3755637	546400	چاه سيمرغ	12
264	3746196	579778	جنوب شرق حسين آباد	13
260	3761345	530948	ناحي آباد	14
256	3787050	538310	كديش	15
255	3778668	538205	شجاع آباد نوش آباد	16
253	3785243	530342	قلعه وزير	17
252	3781900	540092	فيض آباد	18
252	3780200	530197	نصر آباد	19
247	3762293	546498	مزرعه نو	20
246	3763387	551872	بند ريگ	21
245	3769130	542219	جاده نوش آباد	22
242	3751295	568082	جنوب غرب ابوزيد آباد	23
241	3736165	566062	شجاع آباد چالقره	24
235	3755802	559415	روبروي ايستگاه گز	25
234	3813397	514910	حسين آباد ميش مست	26
232	3754462	564024	فخره	27

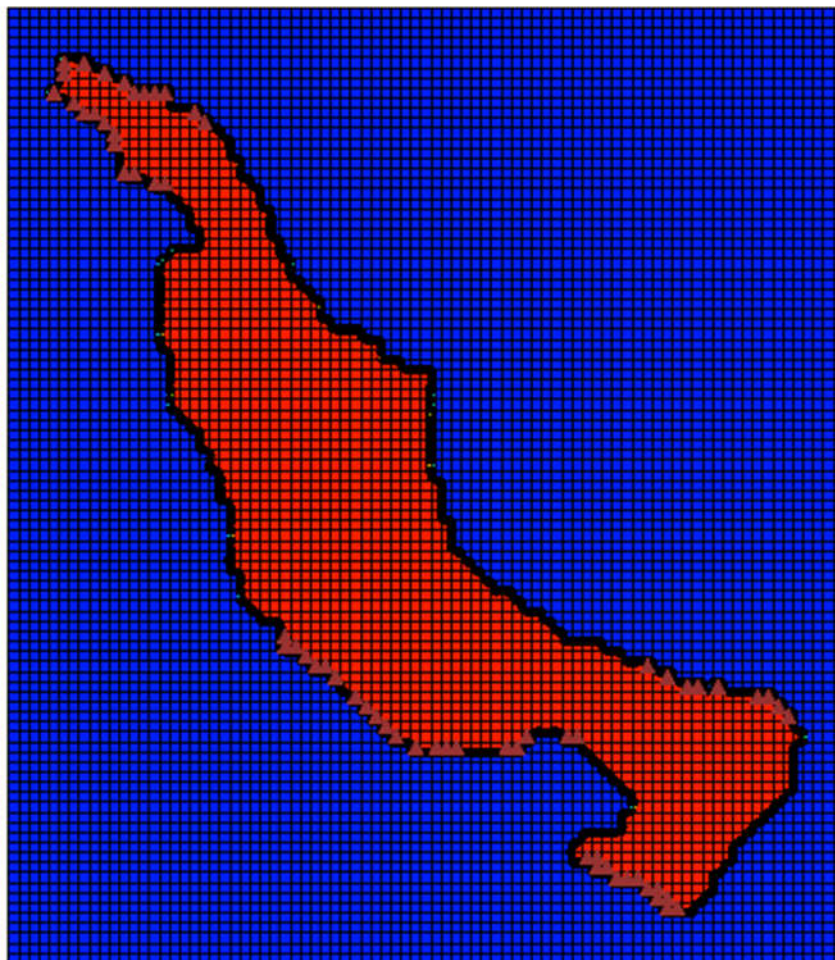
۳-۴-مراحل ساخت مدل

۳-۴-۱-مدل مفهومی

تهیه مدل مفهومی یکی از مهمترین مراحل مدلسازی می‌باشد و بر پایه مدل ریاضی است. در حقیقت مدل مفهومی تصویر ساده شده‌ای از دنیای واقعی است که شامل چکیده‌ای از خصوصیات سیستم هیدروژئولوژیکی است. (پناهی ۹۴). مدل‌سازی آبخوان‌های واقعی به کمک این روش، دقت زیادی دارد و بر خلاف پیچیدگی‌های ظاهری این روش، در صورت آشنایی مقدماتی از نرم‌افزار GIS، مدل‌سازی با این تکنیک ساده و کارآمد خواهد بود. در این روش از ماژول GIS استفاده می‌شود و عوارض نقطه‌ای، خطی و پلیگون مستقیماً از GIS با پسوند Shape وارد GIS می‌شود.

۳-۴-۱-۱-شبکه بندی آبخوان

شبکه بندی منطقه مدل، اولین گام شروع در طراحی واقعی مدل کامپیوتری است. برای این که بتوان معادلات دیفرانسیل جزئی را حل کرد، بایستی محیط را به اجزاء کوچک‌تری که اصطلاحاً شبکه می‌نامند، تقسیم نمود. در مدل MODFLOW همان طور که در بخش ۳-۴-۲ ذکر شد، شبکه‌های مدل توسط خطوط موازی عمود بر هم ایجاد می‌شوند که هر کدام سلول نامیده می‌شود. هر چه ابعاد شبکه‌ها کوچک‌تر باشند، تعداد شبکه‌ها زیادتر شده و دقت محاسبات افزایش می‌یابد، ولی باید توجه داشت که با افزایش تعداد شبکه‌ها، داده‌های ورودی بیشتری مورد نیاز بوده و حجم عملیات محاسباتی جهت آماده سازی داده‌ها به مراتب بیشتر خواهد شد. با بررسی کلیه شرایط و اطلاعات موجود و ، برای شبیه سازی آبخوان مورد مطالعه اندازه سلول‌های شبکه مدل (۲۰۰*۲۰۰) متر در نظر گرفته شد (شکل ۳-۸). در ضمن سلول‌های به رنگ آبی سلول‌های فعال شناخته می‌شوند و سلول‌های به رنگ آبی غیر فعال که در مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شوند.



شکل ۳-۸ شبکه بندی مدل و مرز محدوده

۳-۴-۱-۲- نوع و تعداد لایه‌ها

با توجه به مطالعات ژئوفیزیک و تراز پیزومترها در محدوده مورد مطالعه فقط یک نوع سفره از نوع آزاد (سطحی) وجود دارد، بر همین اساس مدل نیز از نوع تک لایه در نظر گرفته شد.

۳-۴-۱-۳- شرایط مرزی

انتخاب صحیح شرایط مرزی یک مرحله حساس در طراحی مدل می‌باشد که دقت قابل ملاحظه‌ای را می‌طلبد. شرایط مرزی به دو دسته مرزهای فیزیکی (واقعی) و مرزهای هیدرولیکی (مصنوعی)

تقسیم می‌شود. مرزهای فیزیکی^۱ سیستم‌های جریان آب زیرزمینی با ایجاد یک توده غیر قابل نفوذ از سنگ شکل می‌گیرد به طور مثال سطح تماس نفوذ ناپذیر بین دو واحد زمین شناسی و گسل، مثالهایی از مرزهای فیزیکی هستند. به این دلیل که این مرزها عموماً جزو پدیده‌های پایدار سیستم جریان می‌باشند، ترجیح داده می‌شود که مرزهای خارجی مدل به صورت مرزهای فیزیکی واقعی باشند. اگر به علت محدودیت‌های مقیاسی مدل، چنین امکانی وجود نداشته باشد، بایستی مرزهای هیدرولیکی مشخص شوند. مرزهای هیدرولیکی می‌توانند به صورت مرزهای فاقد جریان (خطوط جریان) و یا مرزهای با بار هیدرولیکی معلوم (خطوط هم پتانسیل) مشخص شوند. از آنجایی که مرزهای مذکور دائمی نیستند و ممکن است بر حسب زمان تغییر کنند تهیه مدل با این گونه مرزها ترجیح داده نمی‌شود. به صورت کلی مرزهای مدل می‌توانند از مرز با بار هیدرولیکی مشخص^۲، مرز با شدت جریان معلوم^۳ (مرز نوع دوم) و یا مرز با شدت جریان وابسته به بار هیدرولیکی (مرز نوع سوم)^۴ باشد. مرزهای نفوذ ناپذیر^۵ جزء مرز با شدت جریان معلوم می‌باشند (شوشتری، ۱۳۹۲). در نهایت پس از بررسی زمین شناسی منطقه مرزهای مدل به دو صورت مرز فیزیکی و مرز وابسته به بار هیدرولیکی مطابق شرایط طبیعی آبخوان تعیین شد.

۳-۴-۱-۴- پارامتر زمان (Time)

پارامترهای زمانی شامل واحد زمانی (Time unit)، طول، تعداد دوره‌های تنش (Stress periods) و تعداد گام‌های زمانی (Time steps) می‌شوند. گام زمانی، فواصل زمانی محدودی است که نتایج حل

¹ Physical boundaries

² Dirichlet Boundary

³ Neumann Boundary

⁴ Cauchy Boundary

⁵ No Flow Boundary

معادلات برای انتهای این زمان‌ها بدست می‌آید. هرچه طول گام زمانی کوتاه‌تر انتخاب شود، دقت محاسبات بیشتر خواهد بود. طبق آمار سازمان‌های مرتبط، آمار چاه‌های مشاهده‌ای دشت کاشان به صورت ماهیانه است. پس از بررسی چاه‌های برداشتی داده‌های ثبت شده برای این دشت در قالب دوره‌های سه ماهه بوده و با توجه به این موضوع برای به دست آوردن آمار ماهانه، داده‌ها را به طور مساوی برای ماه‌های هر فصل در نظر گرفتیم (دبی را بر عدد سه تقسیم کردیم). در این مدل از دوره‌های زمانی یک ماهه و با یک گام زمانی برای مدل در نظر گرفته شده و همچنین آمار چاه‌های مشاهده‌ای نیز به صورت ماهیانه ثبت گردیده است که با همین گام زمانی یک ماهه در مدل آورده شده است.

۳-۴-۱-۵-هد هیدرولیکی اولیه (Initial Hydraulic Head)

یکی از شرایط حل معادلات دیفرانسیل جزئی در آب زیرزمینی وجود شرایط اولیه است تا مدل بتواند به وسیله آن اعداد، از یک نقطه، محاسبات را شروع کرده و ادامه دهد. در این تحقیق سطح ایستابی مهرماه سال ۱۳۹۰، به عنوان بار هیدرولیکی اولیه انتخاب شده است.

۳-۴-۱-۶-تنش‌های هیدرولیکی

تنش‌های هیدرولیکی شامل موارد زیر می‌شوند:

• تخلیه آب زیر زمینی از چاه‌های بهره برداری

طبق آمار در این منطقه تعداد کل چاه‌های کم عمق، نیمه عمیق و عمیق ۱۲۸۰ می‌باشد، که از این تعداد ۹۲۷ حلقه چاه در محدوده مدلسازی قرار گرفته است.

• تخلیه ناشی از تبخیر از سطح آب زیرزمینی

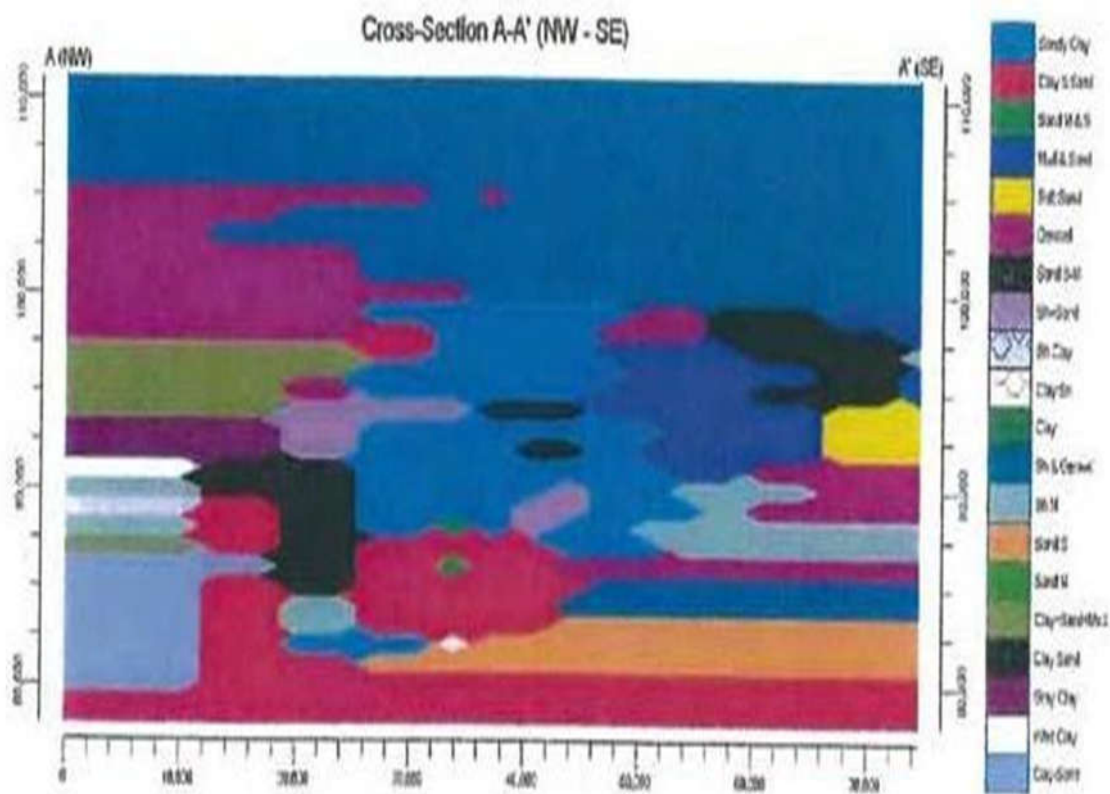
با توجه به اینکه عمق آب زیرزمینی در این دشت بیش از ۵ متر در طول دوره‌ی مدلسازی بوده است، از میزان تبخیر مستقیم از سطح سفره صرف نظر شد.

- **تغذیه ناشی از آب برگشتی از چاه‌های بهره‌برداری**

تغذیه حاصل از آب برگشتی کشاورزی به میزان حداکثر ۳۰ درصد و تغذیه حاصل از آب برگشتی در بخش شرب و صنعت، به علت جذبی بودن چاه‌های خانگی، میزان ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است. که این مقادیر از میزان حجم خروجی چاه‌ها کسر شده و عدد حاصل به عنوان تخلیه به مدل اعمال شد.

- **تغذیه از بارش**

بخشی از بارش‌هایی که در ناحیه دشت رخ می‌دهد، در زمین نفوذ کرده و به آب زیرزمینی منتج می‌گردد. بارش موثر از کسر میزان تبخیر و تلفات از مقدار کل بارندگی به دست می‌آید و برآورد واقعی میزان نفوذ به داخل لایه های پائینی نیاز به اطلاعات از خصوصیات گیاهان، شرایط لایه‌های مختلف زمین و پارامترهای تبخیر و تعرق از گیاهان دارد و برای هر دشت میزانی ، متفاوت است. . دشت کاشان همانطور که در شکل ۹-۳ نشان داده شده درصد بسیار بالایی دارای شن و قلوه سنگ می باشد. بنابراین بافت غالب منطقه نفوذپذیر و متخلخل آبرفتی می باشد. بنابراین این مجموعه لیتولوژی تخلخل بین ۱۰ تا ۶۰ درصد داشته و در نهایت با در نظر گرفتن تمام شرایط مقدار ضریب نفوذ را ۲۰ درصد در نظر گرفته‌ایم(گزارش بیلان آب زیرزمینی دشت کاشان ۱۳۹۱).



شکل ۳-۹ تشکیلات آبرفتی آبخوان در راستای مقطع

• تغذیه از مرزهای مدل

با توجه به این که قسمتی از مرزهای مدل به عنوان مرزهای وابسته بار هیدرولیکی^۱ (بارعمومی) انتخاب شدند، بایستی که میزان جریان ورودی یا خروجی آنها تعیین شود. در این تحقیق، میزان هدایت مرزها در بازه منطقی که از اطلاعات بیان آب استخراج شده است، در طول یک متر تخمین زده شده است و در نهایت در خلال کالیبراسیون مقدار آن بهینه شده است.

¹ General head boundary

۳-۵- اجرای مدل

پس از اینکه پارامترهای مدل، به طور صحیحی به هر سلول تخصیص داده شد، مدل وارد مرحله اجرا می‌شود. در این مرحله، کاربر بایستی یکی از روش‌های محاسباتی را انتخاب کند. نقطه مشترک در تمامی روش‌های محاسباتی، معیار تغییر بار هیدرولیکی برای همگرایی و حداکثر تعداد تکرار مجاز می‌باشد. پرکاربردترین روش‌های محاسباتی مادفلو، روش به شدت ضمنی^۱ یا روش SIP، روش فوق تخفیف متوالی^۲ یا روش SSOR و روش (PCG2)^۳ می‌باشند. در این پژوهش، روش سوم (PCG2) انتخاب گردید.

۳-۶- واسنجی (Calibration)

هدف از واسنجی، قابل قبول بودن هدهای اندازه‌گیری شده در منطقه و جریان‌های استفاده شده می‌باشد. در هنگام واسنجی یک سری از پارامترهای آبخوان و تنش‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر طی چند مرحله تغییر می‌یابند تا اینکه مقادیر محاسباتی با مقادیر مشاهده شده در یک نقطه معلوم، بر هم منطبق شوند. به طور معمول پارامترهایی که مورد واسنجی قرار می‌گیرند شامل هدایت هیدرولیکی، مقدار تغذیه از سطح و یا ضریب ذخیره هستند.

¹ Strongly Implicit Procedure

² Slice Successive Over Relaxation

³ Preconditioned Conjugate Gradient2

۳-۷- کالیبراسیون با روش سعی و خطا (دستی)

در این روش پارامتری نظیر ضریب هدایت هیدرولیکی، تغذیه از سطح یا هد آب در مرزهای مدل انتخاب شده و مقدار آن به اندازه مشخصی، کم یا زیاد می‌شود و تغییرات ایجاد شده را به مدل مفهومی داده و مدل مجدداً، اجرا می‌شود. این تغییرات، تا مرحله‌ای ادامه می‌یابد که میزان خطا در چاه‌های مشاهده‌ای کمتر شود. پس از اجرای مدل بین مقادیر سطح آب مشاهده شده و محاسبه شده مقایسه ای انجام می‌شود. در صورتیکه اختلاف قابل ملاحظه ای بین این دو پارامتر مشاهده شود، پارامتر با دید کارشناس تصحیح شده و مجدداً به مدل وارد و مدل راه اندازی می‌شود. این کار آنقدر تکرار می‌شود تا اینکه نتایج قابل قبولی حاصل شود. این روش هم به شدت زمان بر بوده و هم در آبخوان‌های کشور ایران که دارای پیچیدگی‌های هیدرولوژیکی بالایی هستند، دارای خطای بالایی است.

۳-۷-۱- روش اتوماتیک واسنجی

GMS برای رفع مشکلات کالیبراسیون دستی و تخمین پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی، به روش ¹PEST مجهز شده است. در این روش، با لحاظ کردن قیدهایی، مقدار تفاوت سطح آب مشاهده و محاسبه شده را با تابع هدف حداقل کردن میزان خطا، به کمترین میزان می‌رساند. نرم‌افزار PEST یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای بهینه‌سازی خطی و غیرخطی است.

¹ Politic economy society trade

۳-۷-۲- واسنجی در حالت پایدار

عمل واسنجی برای مدل در حالت پایدار، برای شروع دوره آماری یعنی مهر سال ۱۳۹۰ انجام شده است، با این استدلال که با توجه به هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای در سال ۹۰-۹۱، ماه مهر کمترین تغییرات را در بین سایر ماه‌های سال داشته و در نتیجه می‌توان گفت میزان تغذیه و تخلیه دارای تعادل نسبی است. مقدار بهینه ضرایب هدایت هیدرولیکی در آبخوان ابتدا با PEST تخمین اولیه زده شد، سپس با تغییرات مکرر در پارامترهای مدل، به دست آمد.

۳-۷-۳- واسنجی در حالت ناپایدار

پس از انجام واسنجی در حالت پایدار، واسنجی مدل در ۱۲ گام زمانی یک ماهه، یعنی از مهر ماه ۱۳۹۰ تا شهریور ماه ۱۳۹۱ جهت تعیین مقدار ضریب آبدهی ویژه، با روش سعی و خطا انجام شد.

۳-۷-۴- صحت سنجی

صحت‌سنجی مدل توسط مقایسه نتایج پیش‌بینی شده و مشاهده شده در یک محدوده زمانی خارج از دوره زمانی واسنجی مدل، انجام می‌شود. برای نیل به این منظور از داده‌ها و اطلاعات سطح آب مهر ۱۳۹۱ تا شهریور ۱۳۹۲، استفاده گردید. در مرحله صحت‌سنجی پارامترهایی نظیر هدایت هیدرولیکی، شرایط مرزی و ضرایب ذخیره بدون تغییر نسبت به مرحله کالیبراسیون، به مدل ارائه گردید.

۳-۷-۵- تغییر اقلیم

میانگین دمای سطح زمین بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای، به طور مرتب در حال افزایش است، به طوری که سناریوهای اخیر هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، افزایش متوسط دمای جهانی را ۰.۷۶ در قرن گذشته، تا ۶.۴ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کنند (IPCC, 2007). این پدیده که به آن تغییر اقلیم گفته می‌شود، می‌تواند بر روی پدیده‌های متنوعی اثرگذار باشد که بخش منابع آب از مهمترین آنهاست (آشفته ۱۳۸۹).

۳-۷-۵-۱- سناریوهای غیر اقلیمی

سناریوهای غیر اقلیمی^۱ بیانگر مجموعه‌ای از اطلاعات در رابطه با وضعیت اقتصادی-اجتماعی و در نتیجه تاثیر این وضعیت بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر می‌باشد که به آن سناریوی انتشار نیز گفته می‌شود. می‌توان خانواده سناریوهای SRES را با توجه به گزارش IPCC(2000)، به شرح زیر طبقه‌بندی کرد:

A1: در این سناریو جهان به صورت یکپارچه در نظر گرفته می‌شود و رشد اقتصادی سریع، جمعیت رو به افزایش، گسترش سریع فناوری‌های جدید و کارآمد

B1: در این سناریو جهان به صورت یکپارچه و دوست‌دار محیط زیست در نظر گرفته می‌شود. رشد اقتصادی سریع، رشد جمعیت زیاد، استفاده از منابع پاک و فناوری‌های نوین، کاهش مواد آلاینده و تاکید بر راه‌حل‌های جهانی برای پایداری اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی

A2: بر خلاف A1 جهان به صورت همگرا در نظر گرفته نمی‌شود. ناهمگونی در دنیا زیاد، رشد جمعیت زیاد، رشد اقتصادی به صورت منطقه‌ای، توسعه و تغییرات فن آوری به صورت منطقه‌ای

¹ Non-Climatic scenario

B2: رشد جمعیت و اقتصادی متوسط، رشد فناوری از سناریو A1 و B1 کمتر است. تاکید به

دستیابی به راه‌های محلی در مورد مسائل زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی

سناریوهای مذکور تغییر اقلیم، میزان پخش گازهای گلخانه‌ای را در اتمسفر کره زمین تا سال

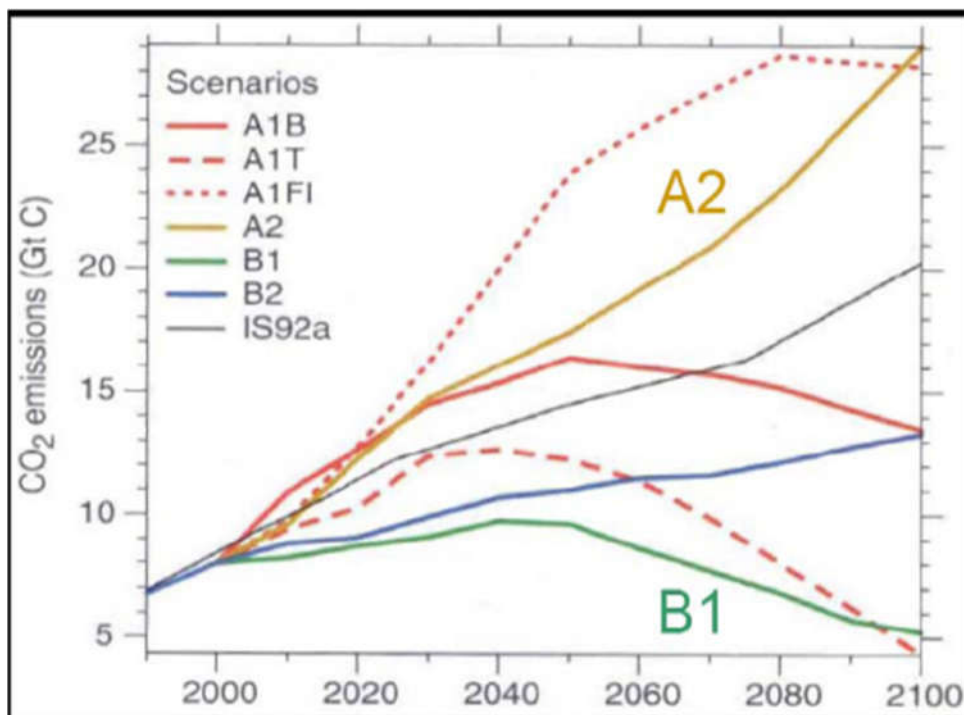
۲۱۰۰ متفاوت از دیگری پیش‌بینی می‌کنند. در شکل (۱۰-۳) می‌توان میزان پخش گاز کربنیک

در اتمسفر کره را تا سال ۲۱۰۰ براساس فرضیات سناریوهای SRES مشاهده کرد.

سناریوهای تغییر اقلیم میزان پخش گازهای گلخانه‌ای را در اتمسفر کره زمین تا سال ۲۱۰۰

متفاوت از دیگری پیش‌بینی می‌کنند. در شکل (۱۰-۳) می‌توان میزان پخش گاز کربنیک در

اتمسفر کره را تا سال ۲۱۰۰ براساس فرضیات سناریوهای SRES مشاهده کرد.



شکل ۱۰-۳ میزان پخش گاز کربنیک در اتمسفر کره زمین تا سال ۲۱۰۰

۳-۷-۵-۲- سناریو های اقلیمی

در حال حاضر معتبر ترین ابزار جهت تولید سناریو های اقلیمی^۱، مدل سه بعدی گردش عمومی جو (GCM) می باشد.

۳-۷-۵-۳- مدل های گردش عمومی جو

مدل های GCM بر پایه قوانین فیزیکی که به وسیله روابط ریاضی ارائه می شود استوار می باشند. مدل های گردش عمومی در واقع حل معادلات حاکم بر جو بر اساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک می باشند. به عبارت دیگر قوانین نیوتن در سه محور نوشته شده که در نهایت به عنوان معادلات تکانه تعبیر می شوند و هدف مدل های گردش عمومی پیش بینی تحول زمانی جو می باشد. این سه معادله در کنار قوانین عمومی گازها و ترمودینامیکی، اساس مدل های گردش عمومی جو را تشکیل می دهند.

مدل های گردش عمومی شامل دو دسته می باشند:

۱- مدل های AGCMs^۲ که بر هم کنش اتمسفر را در نظر می گیرند.

۲- مدل های OGCMs^۳ که بر هم کنش اقیانوس ها را در نظر می گیرند.

مراکز تحقیقاتی مختلف در دنیا، مدل های گردش عمومی متنوعی را برای کره زمین توسعه داده اند. در زیر برخی از مدل های معتبر را ذکر کرده ایم.

- مرکز تحقیقات و پیش بینی اقلیم Hadley انگلستان: مدل HadCM
- مرکز تحقیقات صنعتی و علمی استرالیا: مدل CSIRO-MK

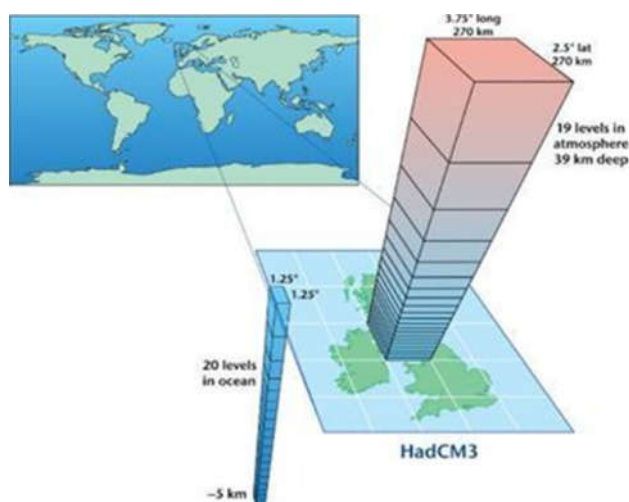
¹ Climatic scenario

² Atmospheric GCMs

³ Oceanic GCMs

- تجزیه و تحلیل و مدل سازی اقلیم کانادا: مدل CGCM
- مرکز تحقیقات اقلیمی آلمان: مدل ECHAM
- لابراتوار دینامیک سیالات ژئوفیزیک آمریکا: مدل GFDL-R30
- مرکز تحقیقات اقلیم ژاپن : مدل CCSR

در تحقیق حاضر از مدل HADCM3 استفاده شده است که ساختار آن در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱ ساختار افقی و قائم مدل جفت شده جوی-اقیانوسی HadCM3

۳-۷-۴- ریزمقیاس سازی داده‌های مدل گردش عمومی جو

به دلیل تفکیک فضایی کم و ساده سازی های مدل‌های گردش عمومی جو در مقایسه با مدل‌های منطقه ای و کوتاه مدت، خروجی این مدل‌ها نمی‌تواند تقریب درستی از شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه را ارائه دهد. برای این منظور از دو روش ریزمقیاس‌سازی به شرح زیر استفاده می‌شود:

۱- ریزمقیاس سازی دینامیکی^۱: مدل‌هایی که برای ریز مقیاس نمایی دینامیکی استفاده می‌شوند بسیار شبیه همان مدل‌های گردش عمومی هستند، با این تفاوت که گام‌های زمانی و مکانی شبکه ریزتر و دقیق‌تر هستند. به طور مثال گام مکانی مدل‌های گردش عمومی حدود ۲.۵ در ۲.۵ درجه جغرافیایی حدود ۲۵۰ کیلومتر در عرض‌های جغرافیایی محدوده کشورمان می‌باشد. در حالی که گام مکانی مدل‌های ریزمقیاس نمایی دینامیکی که به آنها مدل‌های منطقه‌ای نیز می‌گویند بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود.

۲- روش‌های آماری (استاتیکی)^۲: در این روش پس از تعیین تابع مطلوب، متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس که توسط مدل‌های گردش عمومی در دوره‌های آینده شبیه‌سازی شده‌اند، به عنوان ورودی در این توابع اعمال شده و متغیر سطحی مورد نظر نتیجه خواهد شد. در این روش یک ارتباط آماری با استفاده از رگرسیون ساده، چند متغیره، شبکه عصبی و . . . بین رفتار واقعی ایستگاه و برون‌داد مدل گردش عمومی ایجاد می‌شود. بعد از راستی‌آزمایی، این معادلات می‌توانند در ریزمقیاس نمایی پیش‌بینی‌های آینده با استفاده از سناریوهای انتشار مورد استفاده قرار گیرند. برخی از پرکاربردترین آنها مدل‌های CLIMGEN, LARS-WG, SDSM, ASD, Magicc - می‌باشند، در این تحقیق از مدل SDSM استفاده شده است.

۳-۷-۶-مدل SDSM

ویبلی و همکاران (۲۰۰۱)، مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM، را جهت ریزمقیاس‌سازی اطلاعات بارش و دما با استفاده از روش‌های آماری، ارائه کردند. این مدل با هدف تولید داده‌های اقلیمی با قدرت تفکیکی بالا در حد روزانه، از داده‌های شبیه‌سازهای درشت مقیاس مدل گردش عمومی جو،

¹ - Dynamical approaches

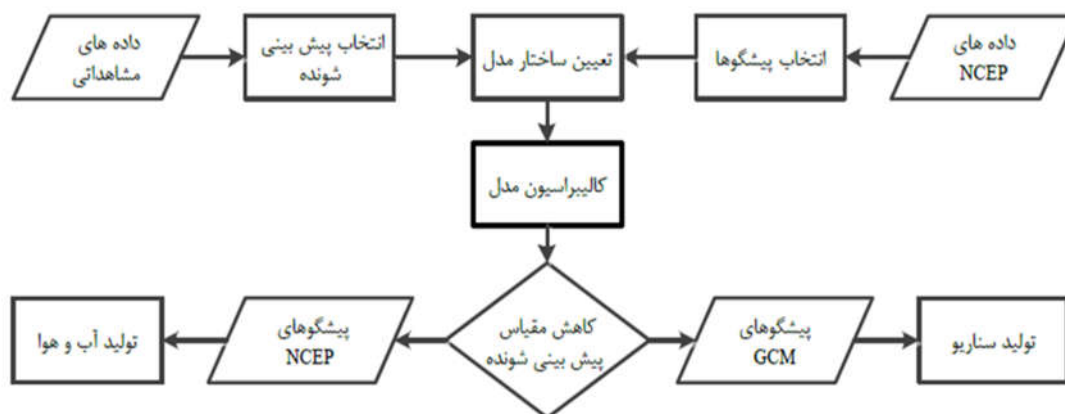
² Statistical approaches

طراحی شده است. این مدل از طریق برازش مدهای رگرسیونی چند متغیره و با نسبت دادن اعداد تصادفی و مقایسه آنها با مقادیر خروجی مدل رگرسیونی، به ایجاد سری‌های آب و هوایی مختلف، می‌پردازد. در SDSM پس از انتخاب پیش‌بینی شونده (به طور مثال بارش)، و پیشگوها از میان پیش‌بینی کننده‌های NCEP¹، ساختار مدل تعیین می‌شود. ساختار مدل در شکل نشان داده شده است. متغیرهای پیش‌بینی کننده و بزرگ‌مقیاس مدل‌های گردش عمومی جو شامل موارد زیر می‌شوند:

دمای ۲ متری، فشار سطح متوسط دریا، ارتفاع ژئوپتانسیلی ۵۰۰ میلی باری، ارتفاع ژئوپتانسیلی سطح ۸۵۰ میلی باری، رطوبت نسبی مجاور سطح زمین، رطوبت نسبی سطح ۵۰۰ میلی باری، رطوبت نسبی سطح ۸۵۰ میلی باری، رطوبت ویژه مجاور سطح زمین، رطوبت ویژه سطح ۵۰۰ میلی باری، رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ میلی باری، سرعت باد زمینگرد، تاوایی، مولفه مداری باد، مولفه نصف النهاری باد، واگرایی و سمت باد.

متغیرهای پیش‌بینی شونده در تحقیق حاضر شامل دما و بارش، هستند. داده‌های مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک کاشان، ثبت شده‌اند که از اداره هواشناسی شهرستان، اخذ شده است که حاوی داده‌های روزانه مذکور از سال ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۳، است. و در نهایت با کاربرد روابط به دست آمده از مدل SDSM، جهت تولید داده‌های روزانه طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۶، توسط خروجی‌های مدل HADCM3 و تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2، روند و مقدار حداکثر، حداقل و میانگین تغییر دما و همچنین تغییر بارش، طی سه دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۰، ۲۰۳۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۹۹، بررسی شد. گراف مدل SDSM در شکل ۳-۱۲ آورده شده است.

¹ National Centre for Environmental Prediction



شکل ۳-۱۲ ساختار SDSM (ماخذ Wilby et al., 2002)

۳-۷-۶-۱- کنترل کیفی داده ها - Quality control

در این گام کنترل داده های دیدبانی (پیش بینی شونده) ایستگاه مورد مطالعه از نظر داده های مشکوک و مفقود انجام می گیرد. از آنجایی که در این تحقیق از گزارش چهارم مدل HADCM3، استفاده شده است، داده های مشاهداتی بین سالهای ۱۹۷۱-۲۰۰۱، را به مدل معرفی می کنیم.

۳-۷-۶-۲- غربالگری - Screening

ارتباط بین داده های دیدبانی (پیش بینی شونده) با داده های بزرگ مقیاس (پیش بینی کننده) دارای قوت و ضعف است. هدف از این مرحله کمک به کاربر در یافتن پیش بینی کننده هایی (Predictand) با قوی ترین ارتباط با پیش بینی شونده ها (Predictor) می باشد. گزینه Analyse درصد واریانس تبیین شده بین پیش بینی شونده و پیش بینی کننده را محاسبه می کند. به ازای هر پیش بینی شونده می توان ۱۲ پیش بینی کننده را به مدل شناساند تا مدل واریانس

های آنها را حساب کند. واریانس های به رنگ قرمز نشان دهنده قوی ترین واریانس های تبیین شده بوده و واریانس های به رنگ سیاه، معنی دار نیستند.

۳-۷-۶-۳- واسنجی - Calibration

برای مدل سازی آینده در ابتدا مدل بایستی آگاهی و شناخت کافی از رفتار آماری دوره دیدبانی را داشته باشد. در این گام مدل های آماری سالانه، فصلی و ماهانه مبتنی بر معادلات وایازی چندگانه با به کارگیری داده های پیش بینی شونده و پیش بینی کننده روزانه ساخته می شوند. در این تحقیق داده های ۱۹۷۱-۱۹۹۰ را برای مرحله کالیبراسیون، به مدل ارائه می دهیم.

۳-۷-۶-۴- تولید داده - Weather Generator

تابع تولید داده، مجموعه ای از داده های روزانه پیش بینی شونده را با لحاظ سری داده های روزانه پیش بینی کننده ها و بر اساس معادلات وایازی پایه گذاری شده در بخش واسنجی، تولید می کند. این گام در مدل SDSM، صحت معادلات ریزمقیاس نمایی طراحی شده در گام واسنجی را انجام می دهد. می توان با ۷۰ درصد داده های موجود مدل اماری را طراحی نمود و با ۳۰ درصد باقی مانده آنها را راستی آزمایی نمود. در تحقیق حاضر از داده های مشاهداتی دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۱ برای این منظور، استفاده شده است.

۳-۷-۶-۵- تولید سناریو - Scenario Generation

در این مرحله با استفاده از معادلات ریزمقیاس نمایی ایجاد شده در قسمت کالیبراسیون و داده های مدل گردش عمومی، داده های روزانه متغیرهای پیش بینی شونده برای دهه های آینده تولید می شود.

فصل ۴ نتایج و بحث

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط مدل ریاضی یک روش غیر مستقیم مطالعه است که با صرف هزینه کمتر، در مقایسه با روش‌های مستقیم، می‌تواند مشکلات پیش رو را بررسی کند (حسینی ۱۳۹۴). مدل‌های جریان آب زیرزمینی به‌منظور پیش‌بینی تراز سطح آب، استفاده از نتایج آن‌ها به‌منظور دستیابی به پارامترهای کنترل‌کننده در یک منطقه خاص، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مفید بودن یک مدل به میزان تقریب مطالعات ریاضی با سیستم واقعی شبیه‌سازی شده بستگی دارد.

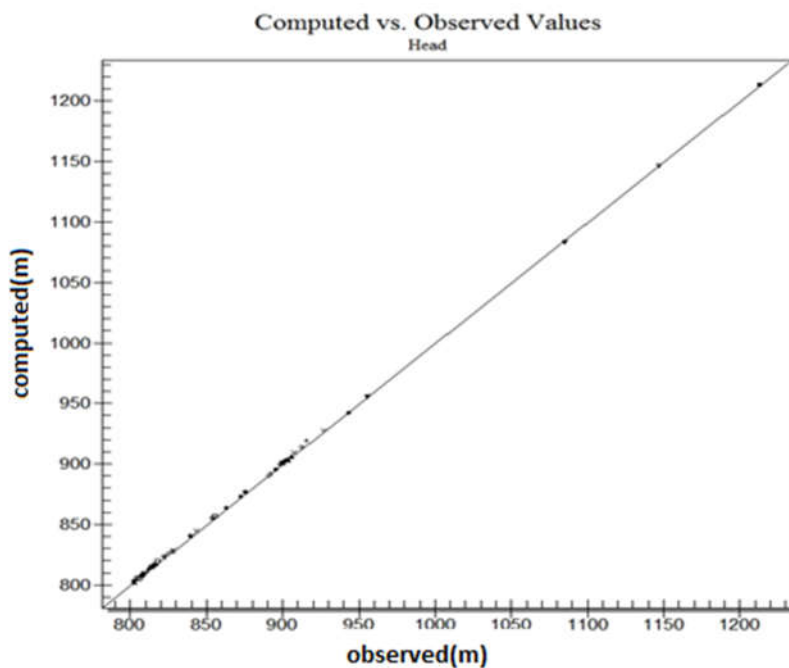
۴-۲- نتایج کالیبراسیون مدل آبخوان در حالت پایدار

در این مرحله، واسنجی مدل در حالت پایدار با استفاده از تراز سطح ایستابی چاه‌های مشاهداتی در مهرماه سال ۱۳۹۰ انجام شده است، به دلیل پایین بودن نرخ تغییرات سطح آب زیرزمینی در ماه مهر با توجه به محدود بودن برداشت آب در بخش کشاورزی، که دلیل عمده استخراج از منابع آب زیر زمینی هستند. سپس با تغییر پارامترهای آبخوان برای رسیدن به بالاترین تطابق بین تراز مشاهداتی و محاسبه شده جهت تعیین مقادیر بهینه ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان انجام شده است. در شکل ۴-۱ میزان خطای محاسبه شده مدل در محاسبه سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در مرحله پایدار آورده شده و در نمودار ۴-۲، برازش بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده نشان داده شده است.

Error Summary Head

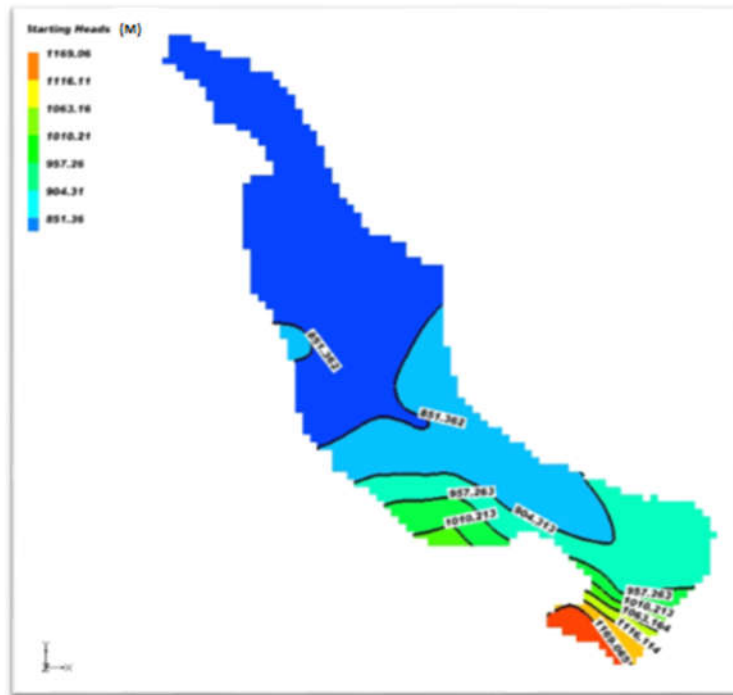
Mean Error:	0.330
Mean Abs. Error:	0.724
Root Mean Sq. Error:	0.942

شکل ۱-۴ میانگین خطای اجرای مدل در حالت پایدار

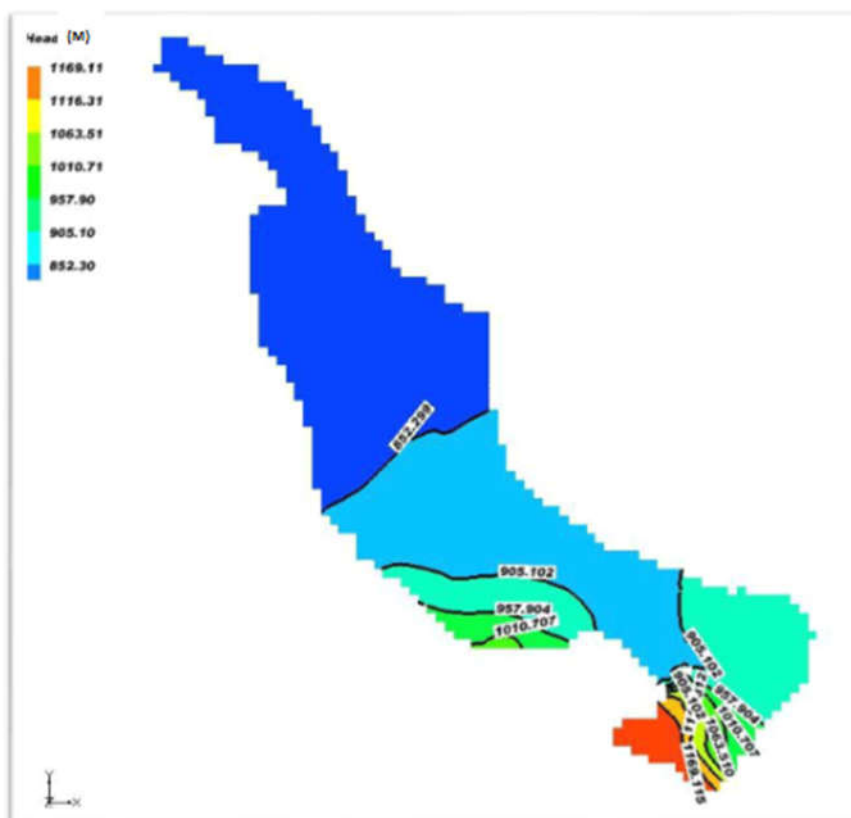


شکل ۲-۴ برآزش بین بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی در حالت پایدار

نقشه سطح ایستابی مشاهداتی و سطح ایستابی شبیه‌سازی‌شده در حالت پایدار را می‌توان در شکل (۳-۴) و شکل (۴-۴) مشاهده کرد.



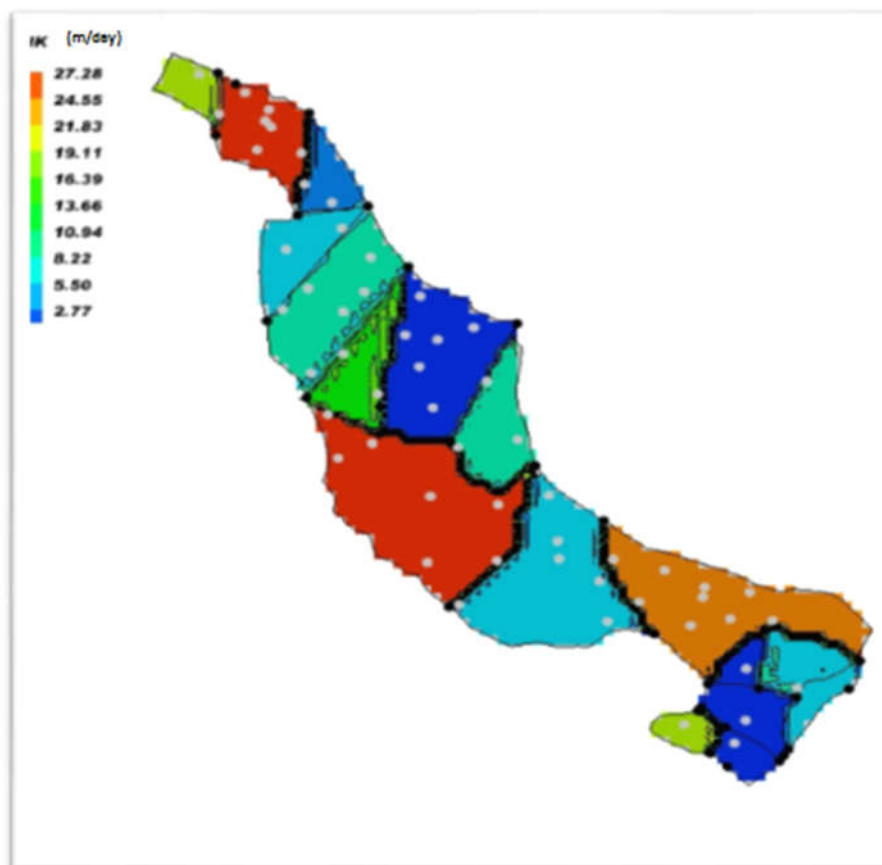
شکل ۴-۳ نقشه سطح آب مشاهداتی بر حسب متر



شکل ۴-۴ نقشه سطح آب محاسباتی بر حسب متر

۴-۳- هدایت هیدرولیکی در حالت پایدار

در این مطالعه برای تخمین مقادیر هدایت هیدرولیکی از روش زون بندی استفاده شد. در این روش نقاطی از محدوده آبخوان را که به لحاظ لیتولوژیکی نسبتاً مشابه هستند به صورت یک زون تعریف و برای آن یک مقدار هدایت هیدرولیکی تعریف می‌شود. سپس در مرحله واسنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی در زون‌های مختلف به گونه‌ای اصلاح می‌شود تا بهترین انطباق بین مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در چاه‌های مشاهده‌ای ایجاد گردد. مقدار نهایی کالیبره شده هدایت هیدرولیکی در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل (۴-۵) مقادیر کالیبره شده پارامتر هدایت هیدرولیکی در محدوده مدل‌سازی

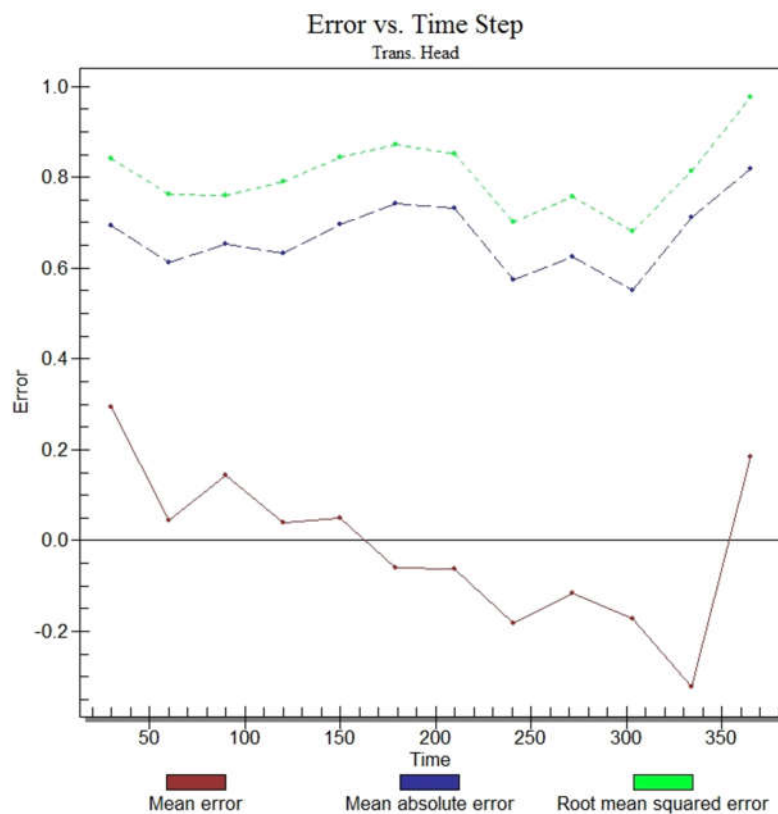
۴-۴- نتایج کالیبراسیون آبخوان در حالت ناپایدار

معمولا سیستم آب زیرزمینی یک منطقه، با توجه به متغیرهای ورودی و خروجی و میزان برداشت، رژیم ناپایدار است. در واقع واسنجی در حالت پایدار به منظور دستیابی به حدود قابلیت انتقال صورت می‌گیرد و تنظیم واقعی مدل در حالت ناپایدار انجام می‌شود (کوهستانی و همکاران ۱۳۹۱). واسنجی در حالت ناپایدار با روش سعی و خطا انجام شده است و روش واسنجی با PEST، تغییرات محسوس در میزان خطای مدل نخواهد داشت و این روش در حالت ناپایدار کارآمد نبوده است ولی روش سعی و خطا نتایج خوبی به همراه داشت. در اینجا از همان مدلی که در حالت پایدار ساخته شده بود استفاده شد، با این تفاوت که سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای، میزان دبی برداشتی از منابع آبی و میزان تغذیه از طریق بارش را در تمامی ماه‌های سال، به صورت سری زمانی به مدل فراخوانده

شد و همچنین ضریب ذخیره یا همان آبدهی ویژه برای آبخوان باز، با مقدار اولیه ۰.۰۴ که در گزارش‌های منابع آب تخمین زده شده بود، به لایه‌های مدل مفهومی اضافه گردید. در نهایت پارامتر ضریب آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی با روش کالیبراسیون دستی بهینه شدند و شکل ۴-۶ که میزان خطاها آورده شده است، گویای واسنجی صحیح مدل در حالت ناپایدار می‌باشد. همچنین در شکل ۴-۷ میانگین خطاها در گام‌های زمانی به تصویر آورده شده است.

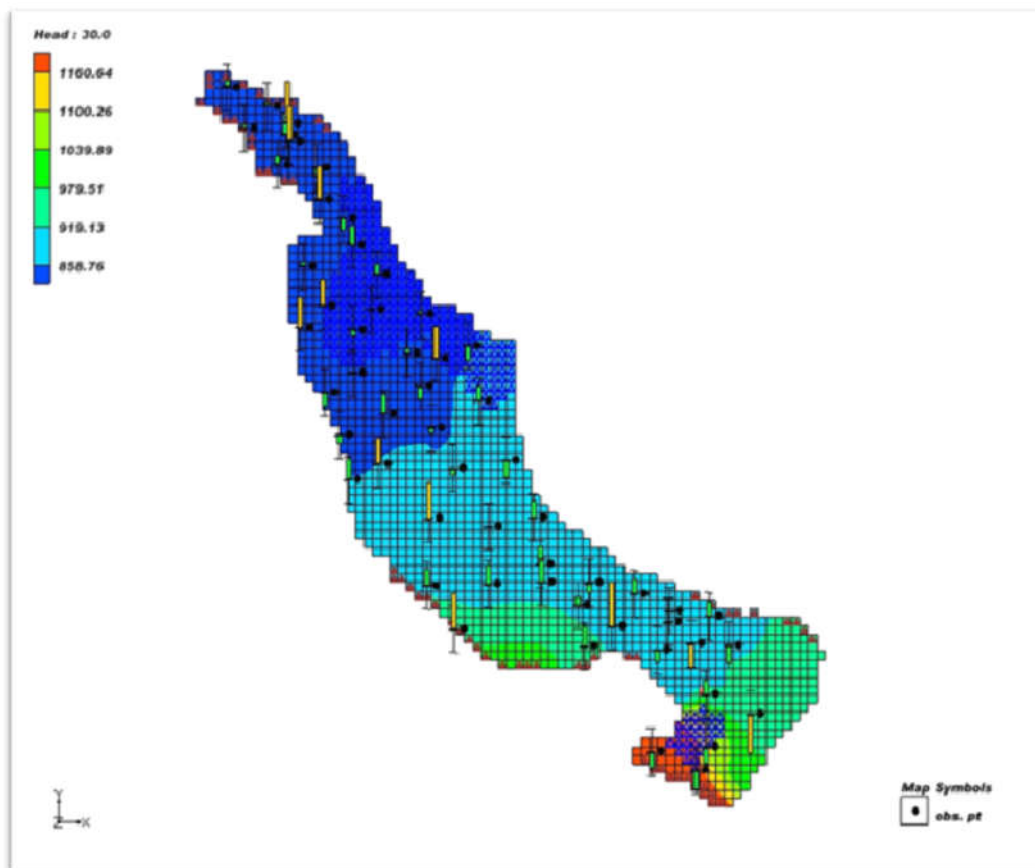
Error Summary	
Trans. Head	
Mean Error:	0.655
Mean Abs. Error:	1.786
Root Mean Sq. Error:	2.967

شکل ۴-۶ میزان خطای آخرین اجرای مدل در حالت ناپایدار



شکل ۴-۷ انواع میانگین خطاها در گام‌های زمانی

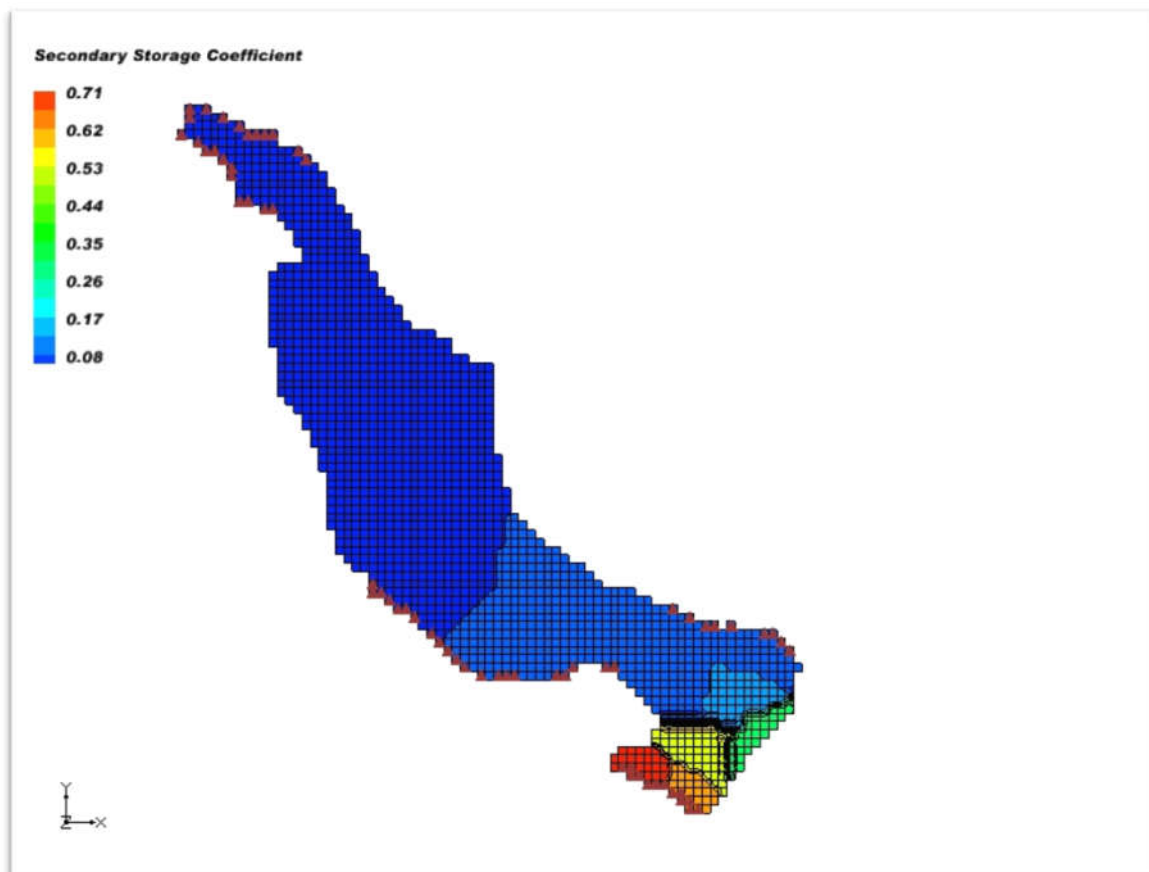
(شکل ۴-۸) تراز سطح آب محاسباتی در انتهای استرس پریود اول (مهر ۹۰) به همراه پیزومترهای کالیبره شده در این ماه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پیزومترهای موجود در منطقه به صورت مطلوبی (خطای کمتر از یک) کالیبره گردیده است.



شکل ۸-۴ تراز محاسباتی در گام زمانی اول در حالت ناپایدار

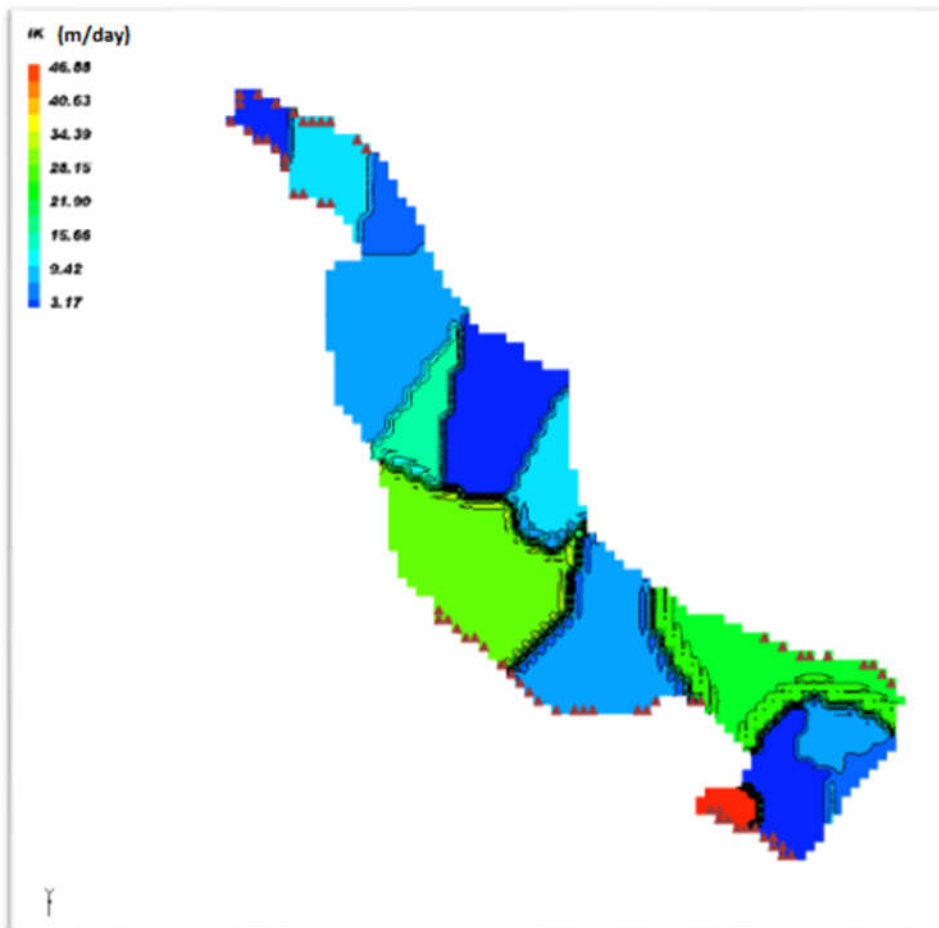
۴-۴-۱-آبدهی ویژه

در این مرحله کالیبراسیون پارامتر آبدهی ویژه با روش دستی انجام شد و برای محدوده مطالعاتی مدل سازی، واسنجی شد که در شکل ۹-۴ مقدار آن در کل دشت نشان داده شده است.



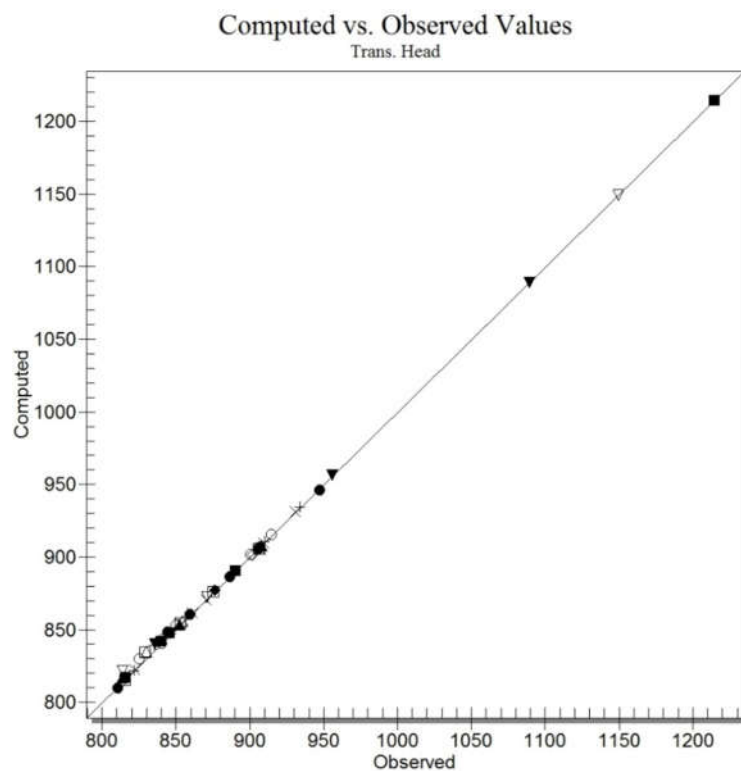
شکل ۹-۴ نقشه ضریب آبدهی ویژه در منطقه مورد مطالعه

۴-۴-۲- هدایت هیدرولیکی در حالت ناپایدار

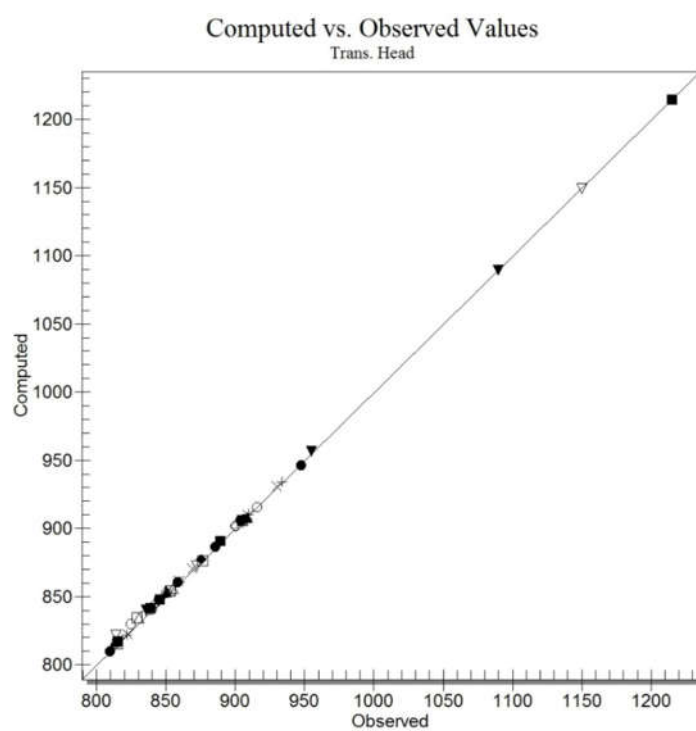


شکل ۴-۱۰ هدایت هیدرولیکی در حالت ناپایدار

برازش بین بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی در شکل ۳-۱۱ آورده شده، که به ترتیب ۱۲ سری زمانی از ماه مهر ۹۰ تا شهریور ۹۱ در زیر شکل‌های مختلف نشان داده شده است (در تمامی شکل‌ها بار هیدرولیکی بر حسب متر است).

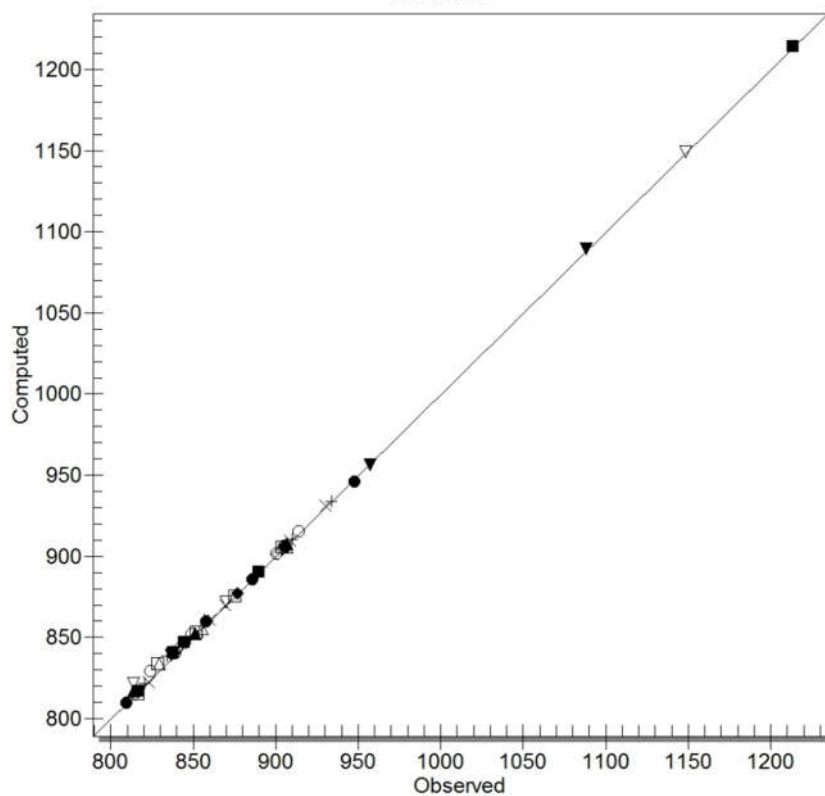


شکل ۴-۱۱-۱ سری اول زمانی (مهر ۹۰)



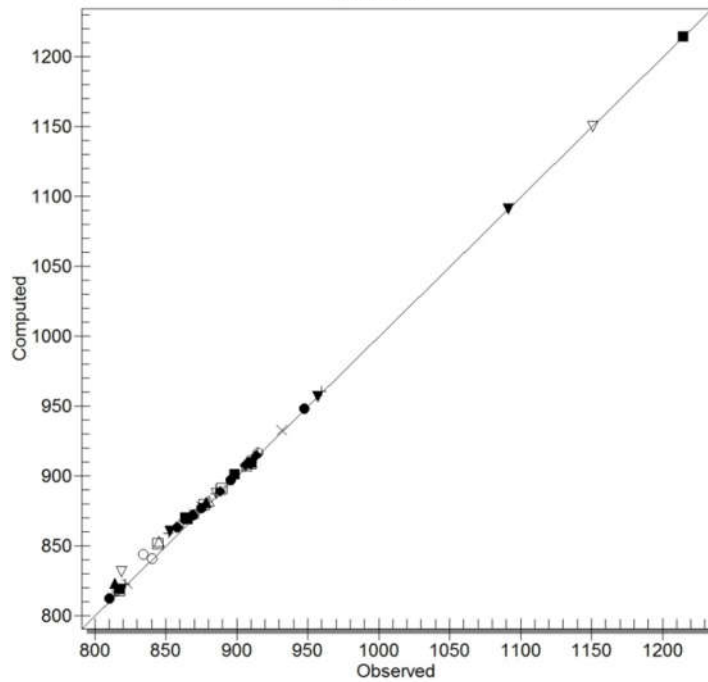
شکل ۴-۱۱-۲ سری دوم زمانی (آبان ۹۰)

Computed vs. Observed Values
Trans. Head

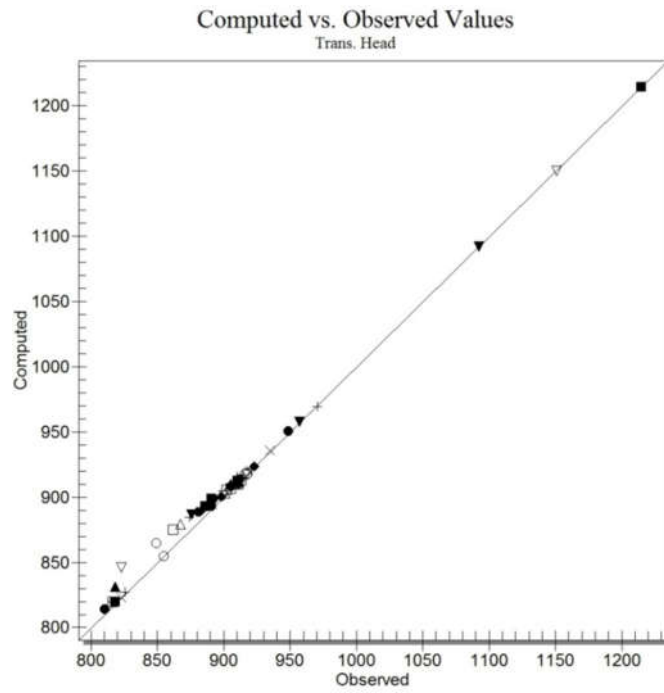


شکل ۴-۱۱-۳ سری سوم زمانی (آذر ۹۰)

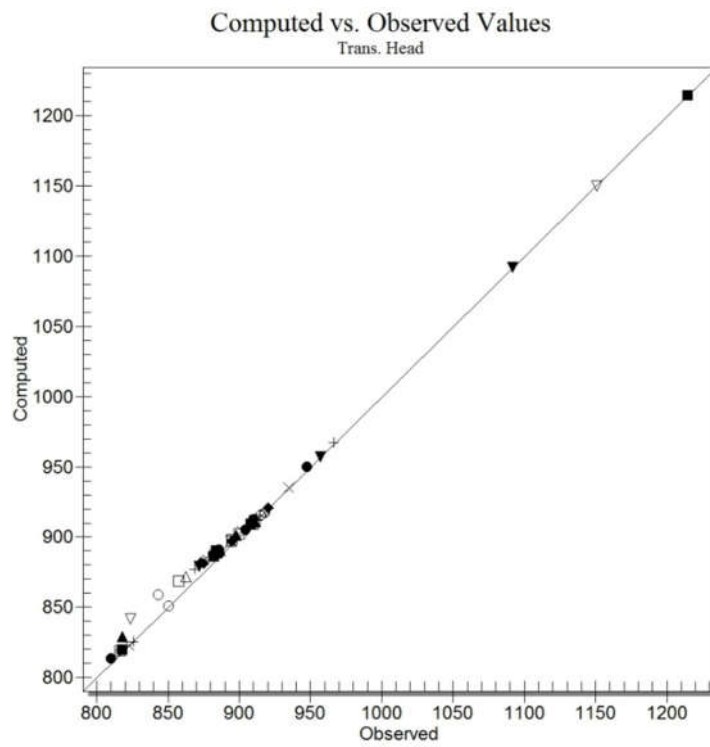
Computed vs. Observed Values
Trans. Head



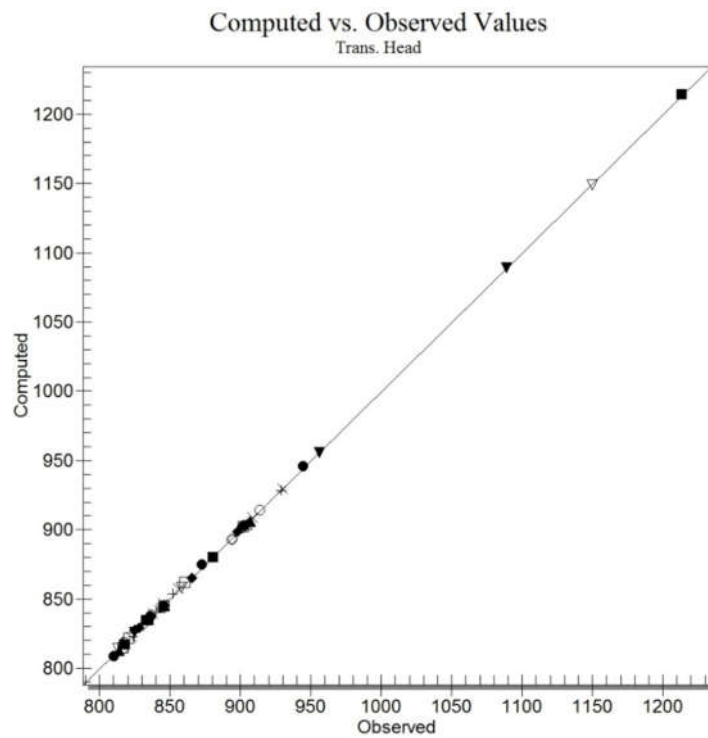
شکل ۴-۱۱-۴ سری چهارم زمانی (دی ۹۰)



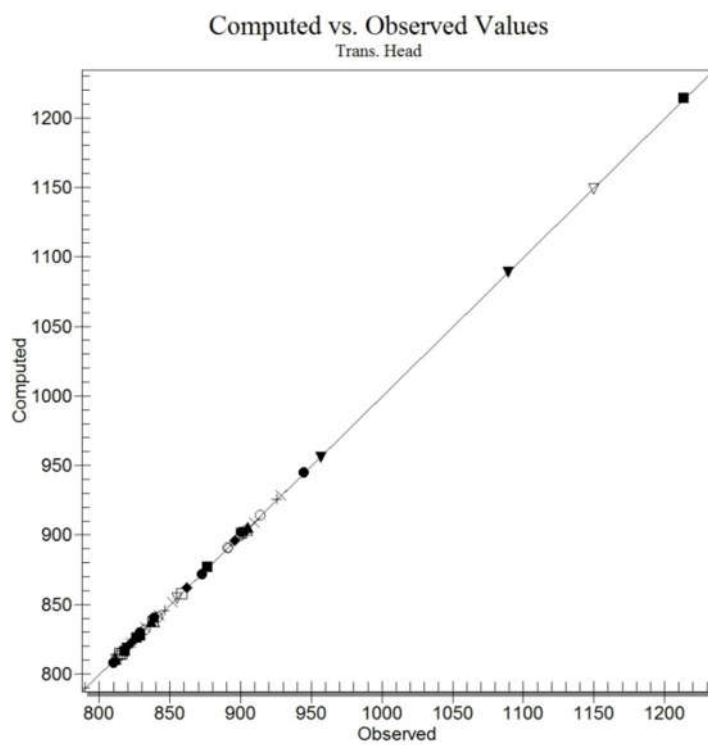
شکل ۴-۱۱-۵ سری زمانی پنجم (بهمن ۹۰)



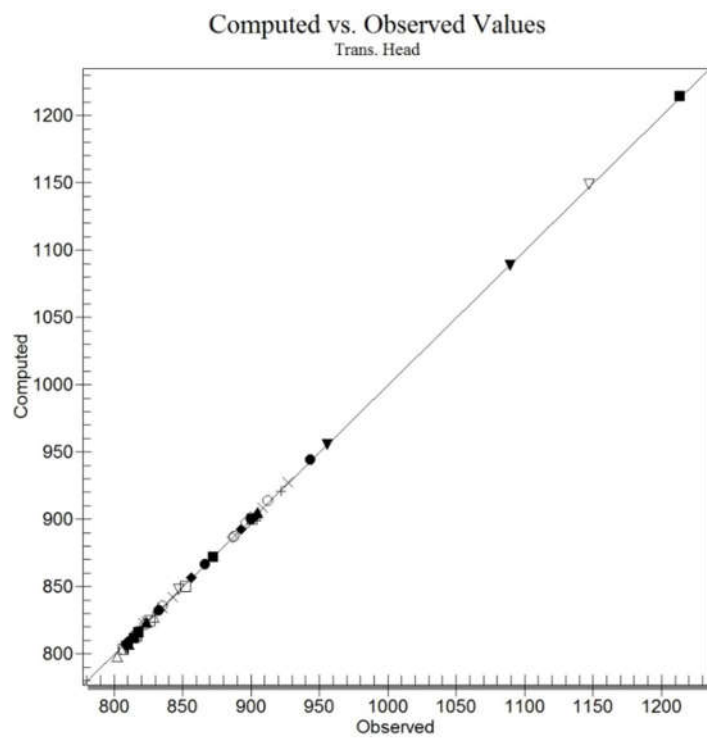
شکل ۴-۱۱-۶ سری زمانی ششم (اسفند ۹۰)



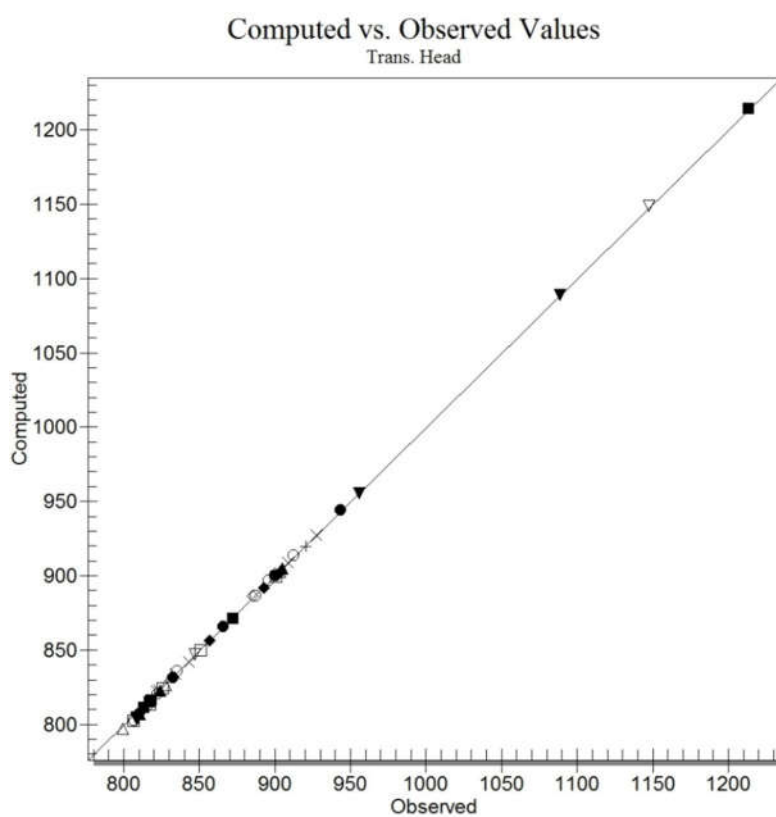
شکل ۴-۱۱-۷ سری زمانی هفتم (فروردین ۹۱)



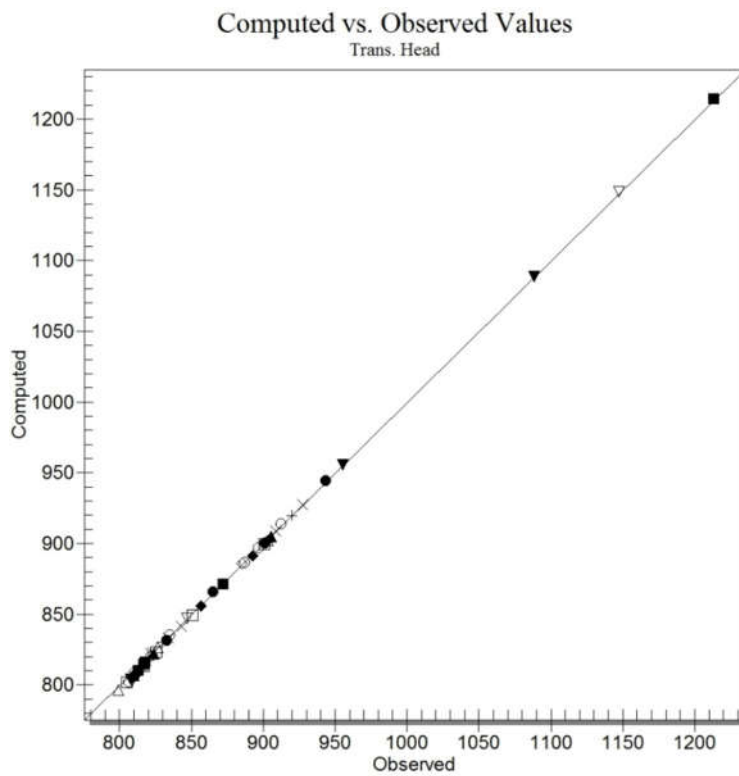
شکل ۴-۱۱-۸ سری زمانی هشتم (اردیبهشت ۹۱)



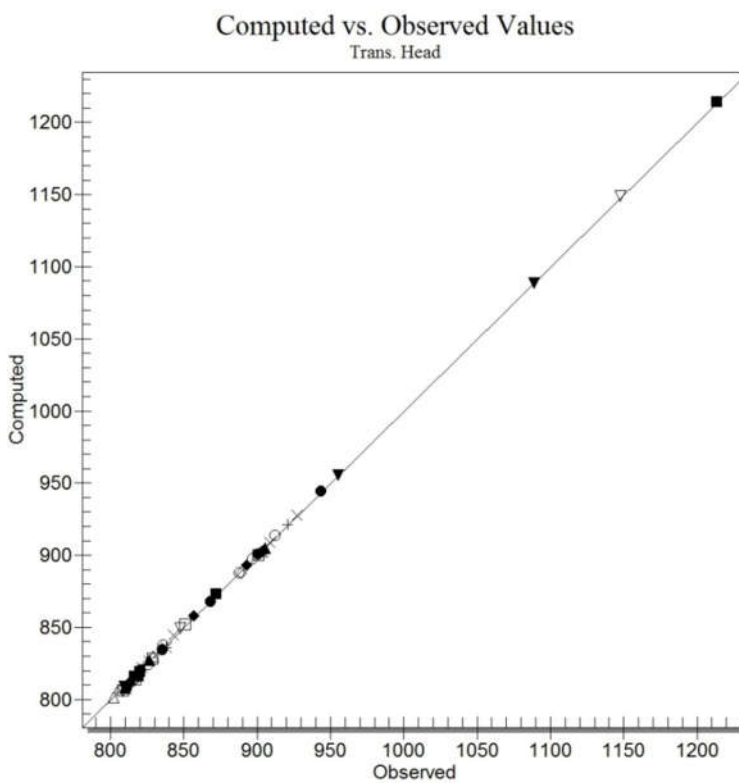
شکل ۴-۱۱-۹ سری زمانی نهم (خرداد ۹۱)



شکل ۴-۱۱-۱۰ سری زمانی دهم (تیر ۹۱)



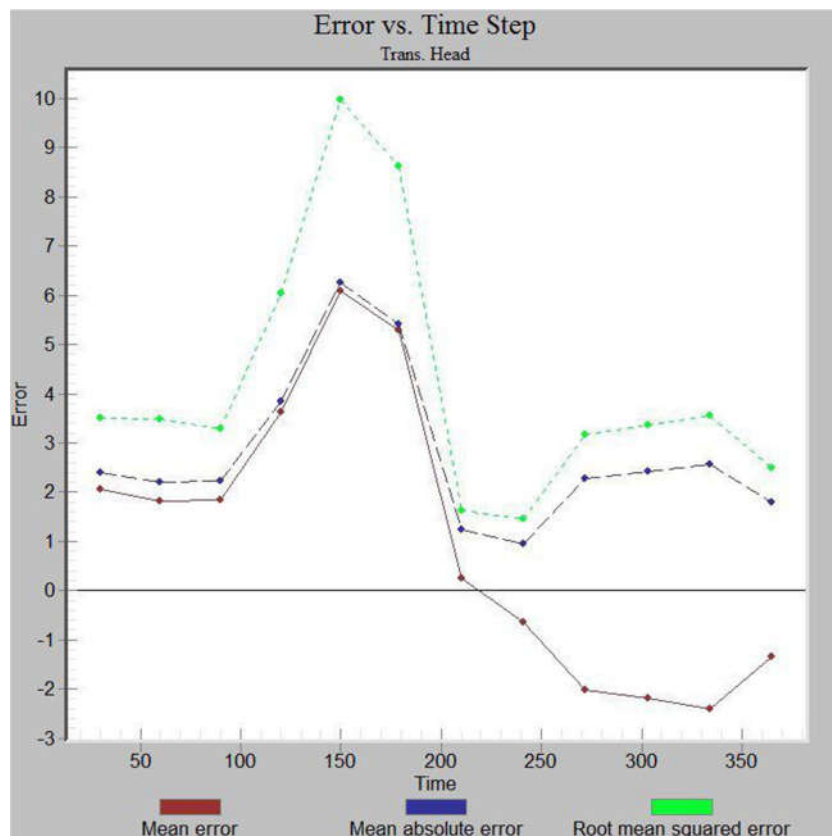
شکل ۴-۱۱-۱۱ سری زمانی یازدهم (مرداد ۹۱)



شکل ۴-۱۱-۱۲ سری زمانی دوازدهم (شهریور ۹۱)

۴-۳-۴- صحت سنجی مدل

صحت‌سنجی فرآیندی است که در طول آن مدل از نظر پارامترهای حاصل شده، طی مرحله واسنجی مورد بررسی قرار داده می‌شود. واسنجی مدل به‌دست آوردن ترکیبی از پارامترهای مختلف (ضرائب هیدرودینامیک، مقادیر تغذیه و تخلیه) است که در این ترکیب منجر به کمینه کردن خطا بین سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در طول دوره واسنجی می‌شود. این ترکیب نهائی زمانی قابل قبول است که کاربر بدون تغییر پارامترهائی نظیر هدایت هیدرولیکی، ضریب آبدهی ویژه و .. در دوره زمانی دیگری بتواند به نتایج قابل قبول برسد. در آبخوان کاشان نتایج واسنجی دشت برای مدت ۳۶۵ روز از مهرماه ۹۱ الی شهریورماه ۹۲ مورد صحت سنجی قرار گرفتند که انواع میانگین خطاها در گام‌های زمانی در دوره صحت سنجی در شکل ۴-۱۲ آورده شده است.



شکل ۴-۱۲ صحت سنجی مدل

۴-۴-۴- نتایج ریزمقیاس‌سازی داده‌های منطقه توسط مدل SDSM

در شبیه‌سازی تغییر اقلیم، داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده تحت سناریوهای A2، B2 روند و مقدار حداکثر، حداقل و میانگین تغییر دما و همچنین تغییر بارش، طی سه دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۶، ۲۰۶۰-۲۰۳۱ و ۲۰۹۹-۲۰۶۱، تحت سناریوهای A2 و B2 بررسی شد.

۴-۴-۵- همبستگی متغیرهای پیش‌بینی شونده و پیش‌بینی‌کننده

در اینجا از ۳۰ سال داده‌های مشاهداتی طی دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۱ جهت کالیبره و صحت‌سنجی مدل SDSM استفاده شد و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده پارامترهای اقلیمی دما که همبستگی زیادی با داده‌های NCEP داشتند، استفاده شدند. همانطور که در جدول ۴-۱ مشخص است داده‌های NCEP همبستگی بالایی را با متغیر اقلیمی دما داشته است و این نشان‌دهنده صحت پیش‌بینی دما طی دوره‌های آتی است.

جدول ۴-۱ معرفی متغیرهای پیش‌بینی کننده NCEP

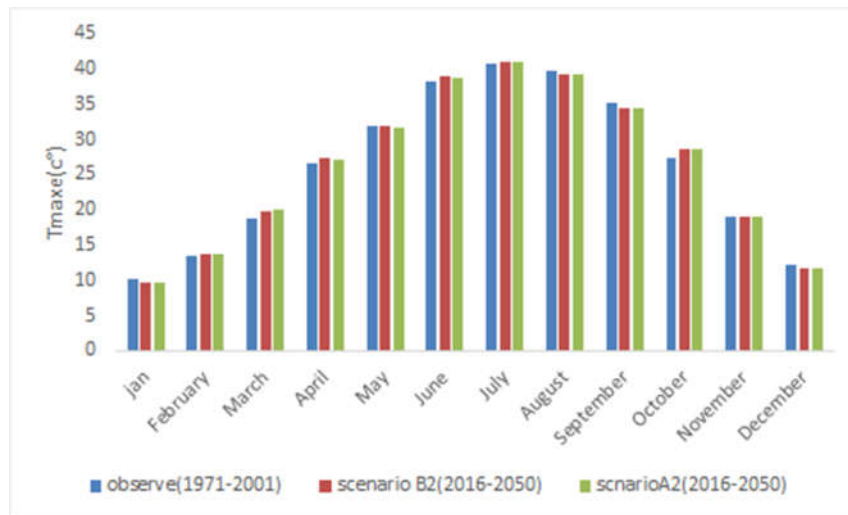
متغیرهای پیش‌بینی شونده	متغیرهای پیش‌بینی کننده	ضریب همبستگی
دمای حداکثر	nceptempaf	0.885
	ncepp ^{۸۵۰} af	0.82
	ncepshumaf	0.88
دمای مینیمم	nceptempaf	0.88
	ncepp-uaf	0.73
	ncepp-thaf	0.72
	ncepp500af	0.79
	Ncepshumaf	0.82

۴-۴-۶- پیش‌بینی تغییرات دما

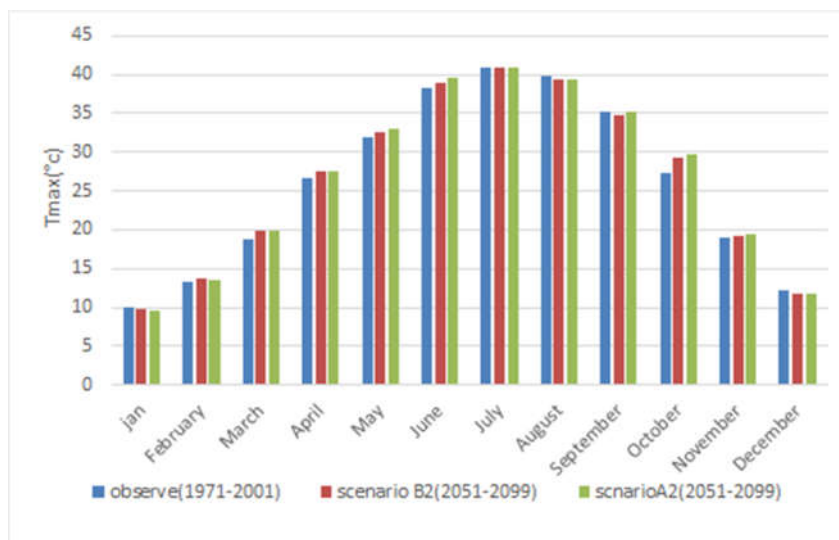
دمای حداکثر شبیه‌سازی شده در طول دوره ۲۰۵۰-۲۰۱۶ نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۱ تحت سناریو A2 نشان می‌دهد که پارامتر دمای حداکثر در ماه‌های ژانویه، آگوست، سپتامبر و دسامبر روند نزولی و در ماه اکتبر بیشترین افزایش، معادل ۱.۳۱ درجه سانتی‌گراد و در ماه ژوئن ۰.۶۳ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. و طی همین دوره تحت سناریوی B2 که سناریوی خوش‌بینانه‌تری می‌باشد مقادیر افزایش دما در ماه اکتبر ۱.۲ درجه سانتی‌گراد است. (شکل ۴-۱۲)

دمای حداکثر شبیه‌سازی شده در طول دوره ۲۰۹۹-۲۰۵۱ نسبت به دوره پایه، تحت سناریوی A2، ماه اکتبر بالاترین افزایش، معادل با ۲.۴ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریوی B2، ۱.۹ درجه سانتی‌-

گرم، را نشان می‌دهند. و همچنین در این دوره نیز در طول ماه‌های ژانویه، آگوست، سپتامبر و دسامبر، تحت هر دو سناریو کاهش داشته است. (شکل ۴-۱۳)



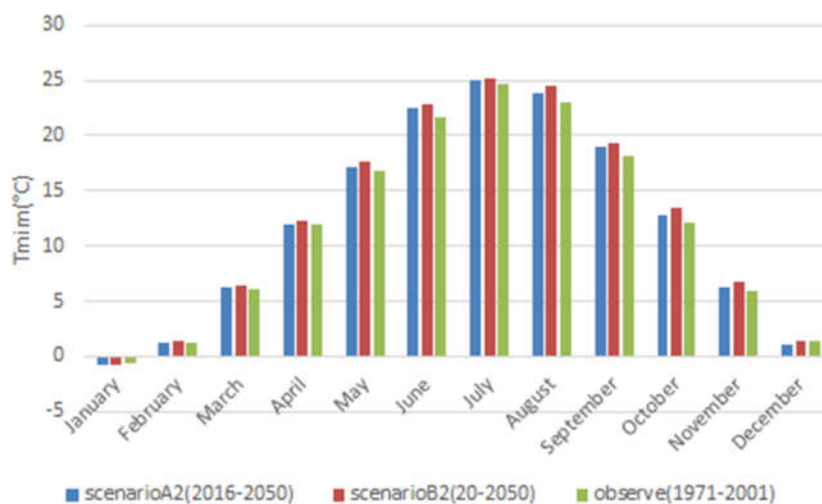
شکل ۴-۱۲ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حدکثر تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۱۶-۲۰۵۰



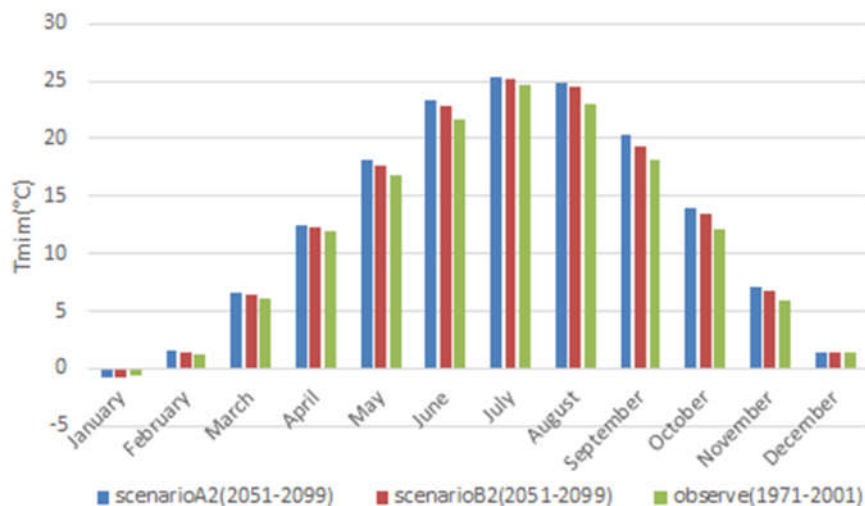
شکل ۴-۱۳ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حدکثر تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۵۱-۲۰۹۹

داده‌های شبیه‌سازی شده دمای حداقل دوره آتی (۲۰۵۱-۲۰۹۹)، تحت سناریوی B2 بیشترین افزایش را در ماه آگوست به میزان ۱.۵۸ درجه سانتی‌گراد، نشان داده‌اند. و همچنین روند صعودی دما در ماه‌های گرم سال شدیدتر از سایر ماه‌ها می‌باشند. همچنین طی اعمال سناریوی A2 بیشترین

افزایش دمای کمینه در ماه سپتامبر به میزان ۲.۰۸ درجه سانتی‌گراد است. و تحت هر دو سناریو دمای حداقل در ماه ژانویه روند نزولی داشته است و این گویای زمستان‌های سردتر است. مقایسه نتایج دمای کمینه تحت دو سناریوی A2 و B2 در طی دوره (۲۰۱۶-۲۰۵۰) در شکل ۴-۱۴ و در دوره (۲۰۵۱-۲۰۹۹) در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حداقل تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۱۶-۲۰۵۰

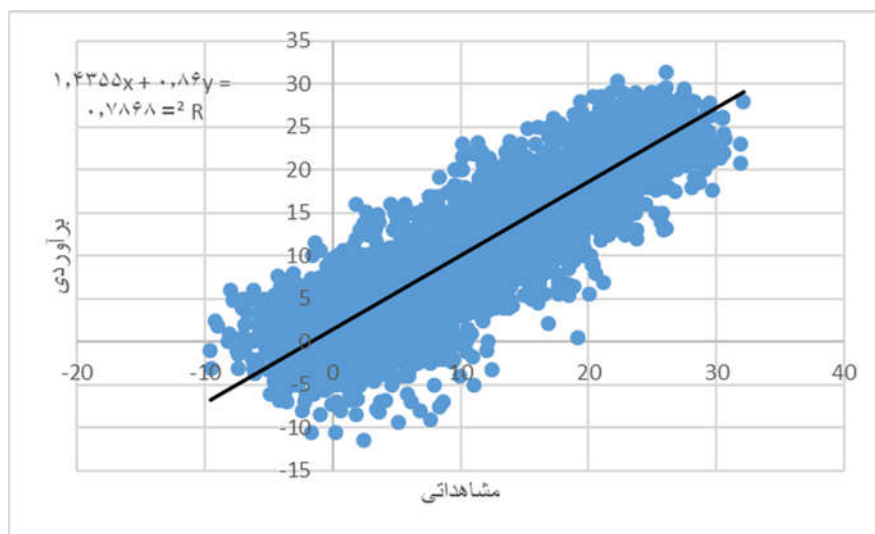


شکل ۴-۱۵ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی دمای حداقل تحت سناریو A2 و B2 در دوره ۲۰۵۱-۲۰۹۹

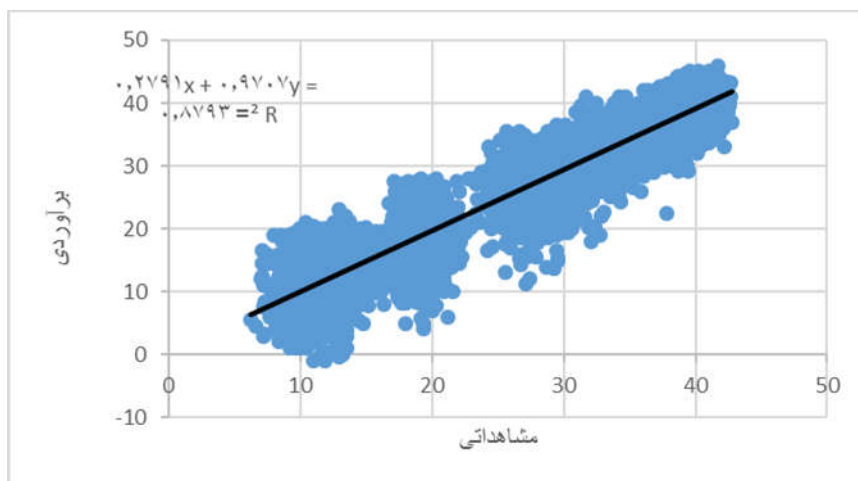
دمای شبیه سازی نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۱ تحت سناریو A2 نشان می دهد که دمای حداکثر در همه ماه ها به غیر از آوریل افزایش یافته است و بیشترین افزایش در جولای به مقدار ۳/۶ درجه سانتی گراد طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۵۰ و ژوئن به مقدار ۸ درجه سانتی گراد طی دوره ۲۰۵۱ تا ۲۰۹۱ بوده است.

۴-۴-۷- صحت سنجی مدل

همانطور که در فصل قبل اشاره شد از ۷۰ درصد داده ها برای کالیبره کردن و ۳۰ درصد آن برای صحت سنجی استفاده شده است که ضریب همبستگی طی دو مرحله بیش از ۹۴ درصد می باشد. در شکل ۴-۱۶ و ۴-۱۷ به ترتیب ضرایب همبستگی دمای کمینه و بیشینه در دوره صحت سنجی به صورت گراف آمده است.



شکل ۴-۱۶ توسعه مدل طی مرحله صحت سنجی (Tmin)



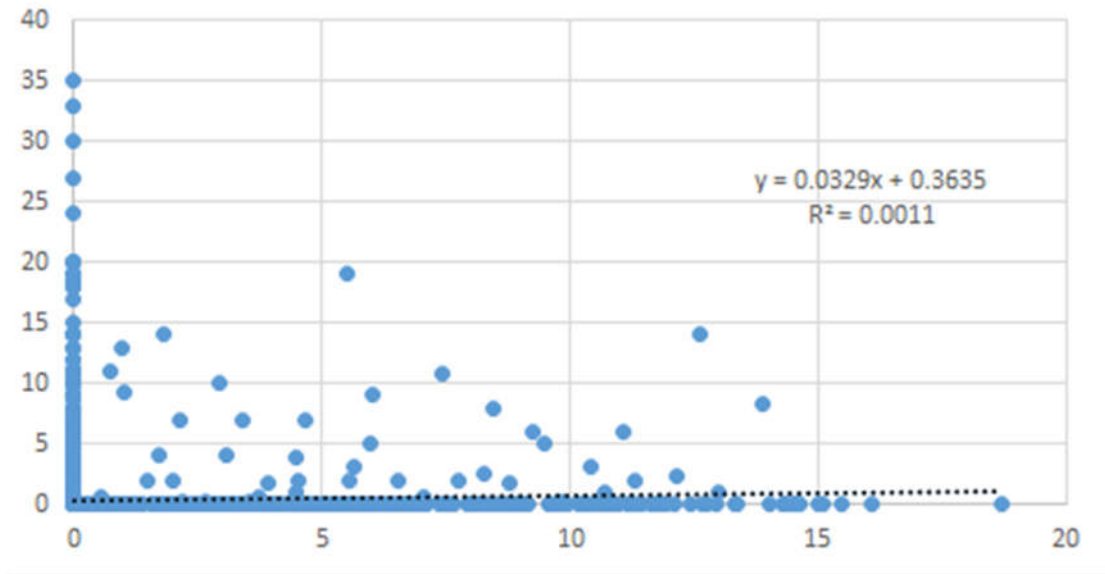
شکل ۴-۱۷ توسعه مدل طی مرحله صحت‌سنجی (Tmax)

۴-۱-۴- تغییرات بارش

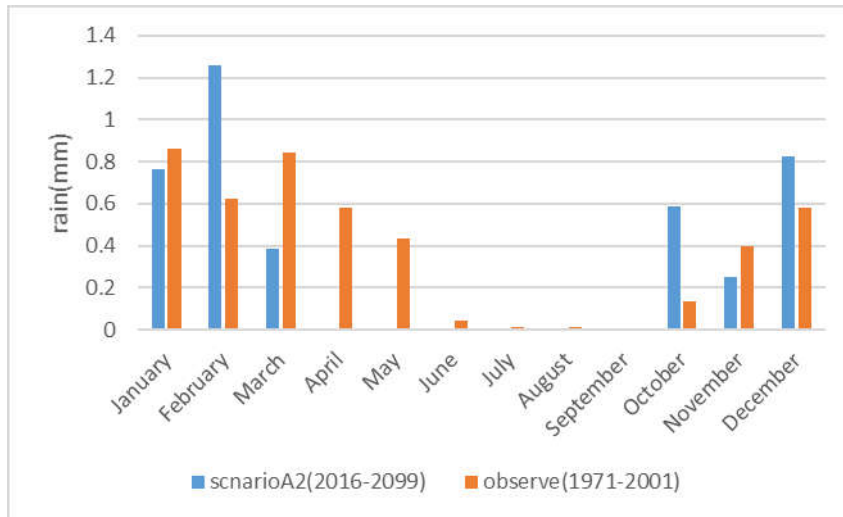
شکل ۴-۱۸ نتایج توسعه مدل را برای دوره صحت‌سنجی بارش ماهانه با استفاده از مدل SDSM نشان می‌دهد. با توجه به معادله ارائه شده و ضرایب همبستگی آنها، نتایج نشان می‌دهد که مدل توسط داده‌های مشاهداتی بطور قوی توسعه نیافته چرا که ضرایب همبستگی بین برآوردی و مشاهداتی در دو مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی کم و مقادیر آنها کمتر از ۰/۱ می‌باشد.

نتایج پیش‌بینی بارش ماهانه برای دوره‌های آبی نشان می‌دهد که بارش تحت سناریوی A2 در اکثر ماه‌های سال روند کاهشی داشته است و بیشترین کاهش در ماه می به میزان ۰/۴۳ میلی‌متر در روز، حادث شده است و در ماه‌های دسامبر و اکتبر و فوریه، افزایش یافته است. همچنین تحت سناریوی B2، در ماه‌های ژانویه، مارس، آوریل و می کاهش یافته است و بیشترین کاهش در ماه مارس به میزان ۰/۱۶ میلی‌متر، اتفاق افتاده است و در فصل تابستان و پائیز افزایش جزئی بارش را خواهیم داشت. یه عبارتی بارش‌ها از فصل زمستان به پائیز شیفت پیدا کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تحت سناریوی A2 که بدبینانه می‌باشد با تابستان‌های بسیار خشک و کم‌بارش مواجه خواهیم شد.

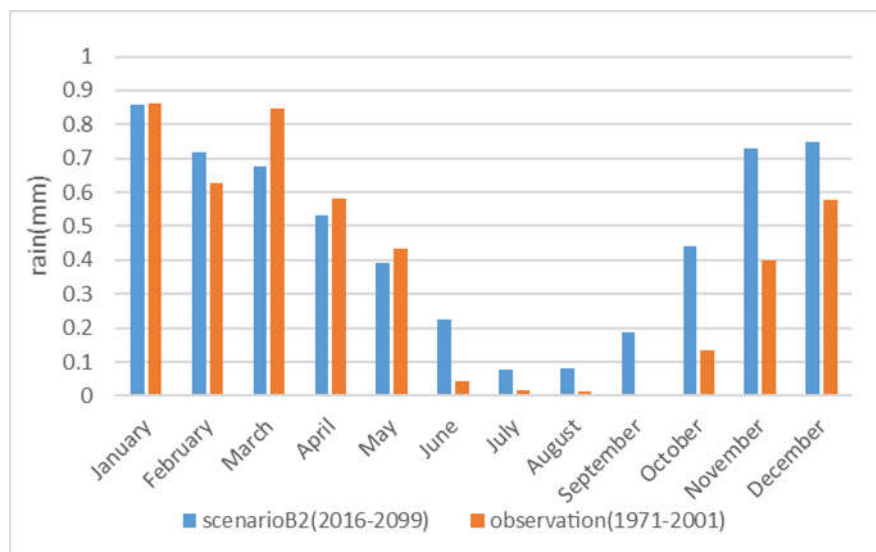
Chart Title



شکل ۱۸-۴ توسعه مدل طی مرحله صحت‌سنجی



شکل ۱۹-۴ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی بارش تحت سناریو A2 و در دوره ۲۰۱۶-۲۰۹۹



شکل ۴-۱۹ مقایسه مقادیر مشاهداتی و برآوردی بارش تحت سناریو B2 و در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۶

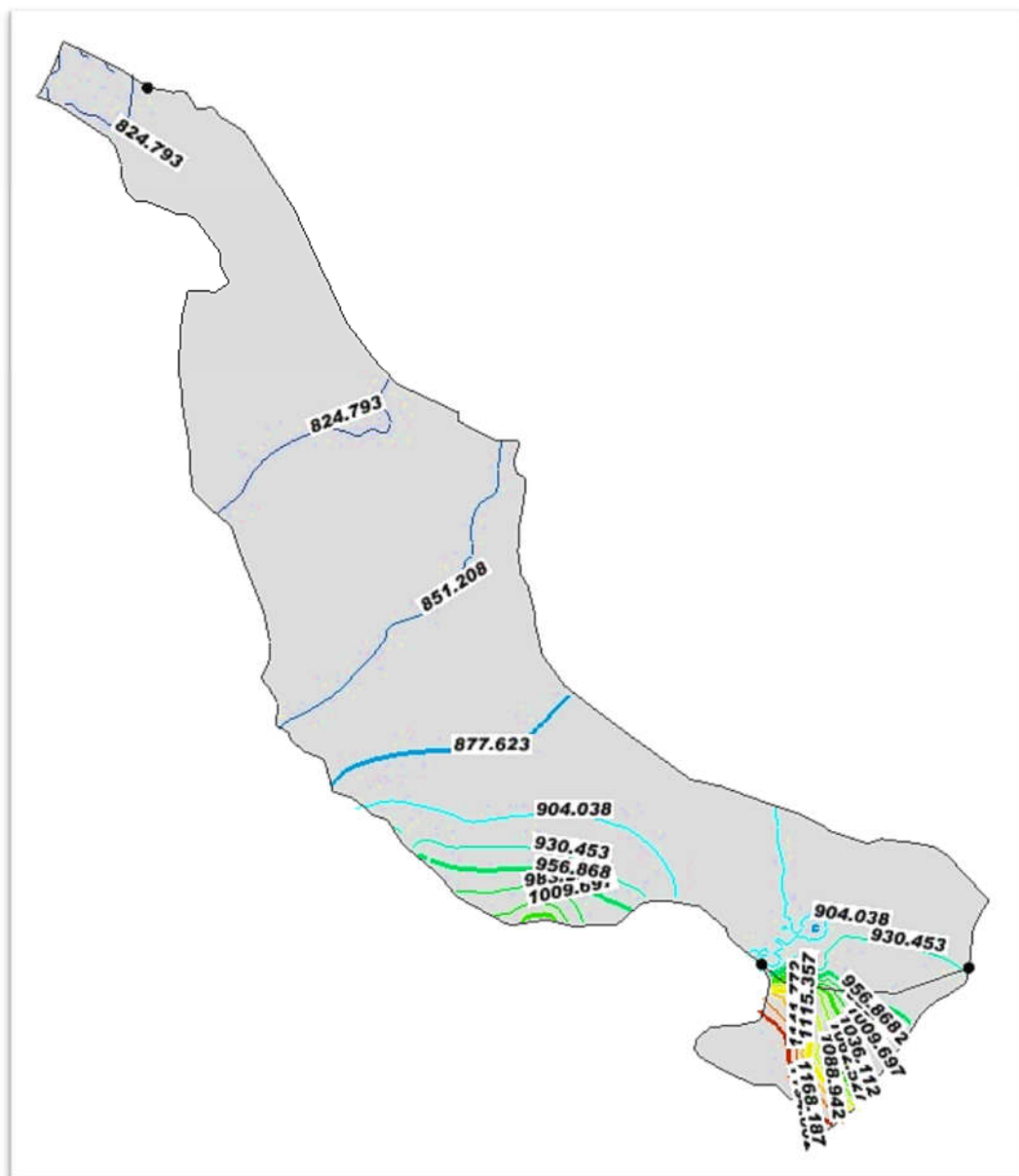
۴-۴ - پیش‌بینی وضعیت آبخوان در دوره آبی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم

از آنجایی که سطح آب زیرزمینی در ارتفاعی بیش از پنج متر از سطح زمین واقع شده است، نتیجه می‌گیریم افزایش دما بر تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت کاشان، بی‌اثر است چرا که افزایش دما بر روی تبخیر و تعرق میزان آب ورودی از طریق بارندگی، در آبخوان‌های نزدیک به سطح زمین، موثر است.

برای اعمال اثرات تغییر بارش بر سطح آب زیرزمینی، از پارامترهای پیش‌بینی شده بارش طی محاسبات اقلیمی، تحت سناریوی A2 و B2 استفاده شده است و نتایج تغییرات برای بخش مرکزی دشت، در جدول ۴-۲ آورده شده است. و همچنین مقدار برآورد شده سطح آب زیرزمینی در کل منطقه برای یک سری زمانی مدل‌سازی (اردیبهشت ۹۱) در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است.

جدول ۲-۴ پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی تحت سناریوی A2 و B2

B2	A2	سطح مشاهده ای	نام ماهها
904.032	904.022	904.038	مهر
904.023	904.018	904.038	آبان
904.055	904.028	904.039	آذر
904.021	904.022	904.041	دی
904.018	904.039	904.041	بهمن
904.026	904.018	904.041	اسفند
904.032	904.015	904.039	فروردین
904.031	904.024	904.039	اردیبهشت
904.029	904.037	904.038	خرداد
904.045	903.055	904.037	تیر
904.043	903.045	904.037	مرداد
904.041	903.42	904.037	شهریور



شکل ۴-۲۱ سطح آب زیرزمینی در طول یک سری زمانی مدلسازی (ار دیبهشت ۸۱)



شکل ۴-۲۲ سطح آب زیرزمینی در طول دوره آبی تحت سناریو B2 (آینده دور تا ۲۰۹۹)

همان طور که از شکل ۴-۲۲ قابل استنتاج است، تغییرات شدید و محسوس نمی‌باشد. این نتیجه به این علت است که نرخ تغذیه به طور کلی در این دشت پایین است و همچنین سطح آب زیرزمینی در برخی نقاط دشت به ۳۰۰ متر هم رسیده است و این مطلب گواه آن است که اگر چه تغییرات

اقلیمی شرایط آب و هوایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و شرایط زندگی را سخت‌تر می‌کنند، ولی عامل اساسی در افت سطح آب زیرزمینی الگوی ناصحیح برداشت از آبخوان می‌باشد.

طبق گزارش سازمان مدیریت منابع آب شهرستان کاشان، ??? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?
? ??? ?? . کل حجم آب ورودی به آبخوان شامل ۳۰٪ تغذیه از آب-

های سطحی، ۳۰٪ آب برگشتی از مصارف کشاورزی و ۷۰٪ در بخش شرب و صنعت (با توجه به شرایط شبکه های توزیع آب در این بخش)، به میزان ۲۷۳.۲ میلیون متر مکعب و کل حجم آب خروجی از آبخوان ۴۱۹.۹ میلیون متر مکعب می‌باشد. با توجه به این گزارش، بیلان دشت کاشان منفی است و صرفا با در نظر گرفتن راه کارهای مدیریتی و تغییر الگوی برداشت می‌توان افت سطح آب زیرزمینی در دشت را کنترل کرد. قابل ذکر است که دشت کاشان از سال ۱۳۵۸ به عنوان دشت ممنوعه بحرانی معرفی شده است که قطعا سناریوهای جدید مدیریتی باید جایگزین الگوی برداشت فعلی گردند.

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر ظهور پدیده تغییر اقلیم و عدم وقوع بارش‌های کافی و به هنگام، و در نتیجه عدم تامین آب مورد نیاز برای بخش کشاورزی و توزیع نامناسب منابع آب شیرین و رشد سریع جمعیت، مشکلات بسیاری را در سراسر جهان به وجود آورده است. با توجه به این تفاسیر مدیریت منابع آب در جهان و به‌خصوص در مناطق خشک که عمدتاً از سفره‌های آب زیرزمینی استفاده می‌کنند با چالش جدی روبرو کرده است. در این تحقیق جهت بررسی رفتار آبخوان و پیش‌بینی شرایط آتی تحت اثر تغییر اقلیم از مدل GMS استفاده شده است که در ادامه به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این پژوهش پرداخته می‌شود.

۵-۲- خلاصه نتایج پژوهش

بررسی نقشه‌های تراز آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهند، بالاترین سطح آب در چاه-های مشاهده‌ای در نواحی جنوبی دشت است بر اساس این داده‌ها، جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در دشت کاشان از جنوب شرقی به سمت شمال غربی می‌باشد. عمده تغذیه آب زیرزمینی در این دشت نیز در قسمت جنوب شرقی دشت صورت می‌گیرد که جزو مناطق کوهستانی دشت می‌باشند.

خصوصیات هیدرولیکی برای رسیدن به تطابق نزدیک بین سطوح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به‌صورت دستی تنظیم و تعدیل گردید. میانگین خطای آخرین اجرای مدل آبخوان کاشان در حالت پایدار ۰/۷۲۴ است؛ و بار هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی در آخرین اجرای مدل در حالت پایدار، برآزش مطلوبی را نشان داده‌اند.

در حالت ناپایدار مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، جریان‌های ورودی و خروجی و تغذیه سطحی مدل به صورت دستی واسنجی شده است، و میانگین خطای آخرین اجرای مدل در حالت ناپایدار ۱/۷۸ است.

پس از کالیبراسیون مدل در حالت ناپایدار، مقدار هدایت هیدرولیکی همان طور که در شکل ۴-۱۰ آورده شده است، در قسمت‌های شمالی و شمال غربی آبخوان از ۳ تا ۲۰ متر در روز متغیر است که نشان‌دهنده ریزدانه بودن رسوبات در این ناحیه است که شامل پوشش رسی و در برخی مناطق حاوی مقادیر زیادی ماسه بادی می‌باشند که نفوذ پذیری پایینی دارند. در قسمت میانی آبخوان میزان هدایت هیدرولیکی ۲۲ متر در روز است؛ که نشان‌دهنده این است که رسوبات این ناحیه نسبت به قسمت‌های شمال و شمال شرقی کمی ریزدانه‌تر هستند؛ اما بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی مربوط به قسمت‌های جنوبی که شامل پایه‌های جنوبی می‌شوند و میزان هدایت هیدرولیکی تا ۴۰ متر در روز هم می‌رسد.

صحت سنجی، آزمون نتایج حاصل از واسنجی مدل است. بنابر این مدل آبخوان کاشان برای مدت یک سال آبی از مهر ۹۰ الی شهریور ۹۱ صحت سنجی گردید. انواع میانگین خطاها در دوره‌های تنش صحت سنجی و همچنین برآزش نسبتاً مناسب بارهای هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی بیانگر قابل قبول بودن مدل در برآورد ضرایب هیدرودینامیکی و توانایی مدل برای پیش‌بینی شرایط مختلف می‌باشد.

ضریب ذخیره از پارامترهای مهم و ضروری در محاسبه حجم مخزن آب زیر زمینی در معادلات بیلان محسوب می‌شود. میزان ضریب ذخیره با توجه به جنس آبخوان و همچنین مطالعات و گزارشات گذشته در کل دشت در حدود ۴ درصد برآورد می‌شود.

۵-۳- نتایج حاصل از تولید سناریوهای اقلیمی در آینده

دمای حداکثر شبیه سازی شده در طول دوره ۲۰۵۰-۲۰۱۶ نسبت به دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۱ تحت سناریو A2 نشان می دهد که پارامتر دمای حداکثر در ماه اکتبر بیشترین افزایش، معادل ۱.۳۱ درجه سانتی گراد و طی همین دوره تحت سناریوی B2 که سناریوی خوش بینانه تری می باشد مقادیر افزایش دما در ماه اکتبر ۱.۲ درجه سانتی گراد است.

دمای حداکثر شبیه سازی شده در طول دوره ۲۰۹۹-۲۰۵۱ نسبت به دوره پایه، تحت سناریوی A2، ماه اکتبر بالاترین افزایش، معادل با ۲.۴ درجه سانتی گراد و تحت سناریوی B2، ۱.۹ درجه سانتی-گراد، را نشان می دهند.

از ۷۰ درصد داده های دمای حداکثر برای کالیبره کردن و ۳۰ درصد آن برای صحت سنجی استفاده شده است که ضریب همبستگی طی دو مرحله بیش از ۹۴ درصد می باشد که در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است.

نتایج پیش بینی بارش ماهانه برای دوره های آتی نشان می دهد که بارش تحت سناریوی A2 و B2 در اکثر ماه های سال روند کاهشی داشته است در فصل تابستان و پائیز افزایش جزئی بارش را خواهیم داشت. یه عبارتی بارش ها از فصل زمستان به پائیز شیفیت پیدا کرده اند. نتایج نشان می دهند که تحت سناریوی A2 که بدبینانه می باشد با تابستان های بسیار خشک و کم بارش مواجه خواهیم شد.

۵-۴- آثار تغییر اقلیم بر سطح آب های زیرزمینی دشت کاشان

در اثر پدیده تغییر اقلیم طی سال های ۲۰۹۹-۲۰۱۶ میزان تغذیه از سطح به میزان اندکی در هر دو سناریو کاهش می یابد و میانگین تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه، شدید و محسوس نمی باشد و این نتیجه به این علت است که نرخ تغذیه به طور کلی در این دشت پایین است و تغییرات پارامتر

بارش تاثیر چندانی بر روی سطح آب زیرزمینی نخواهد داشت و عمده تغییرات به علت خروجی بیش از حد از این آبخوان می‌باشد.

در سراسر دشت کاشان، سطح آب زیرزمینی در ارتفاعی بیش از پنج متر از سطح زمین واقع شده است، در نتیجه افزایش دما بر تغییرات سطح آب زیرزمینی، بی اثر است چرا که افزایش دما بر روی تبخیر و تعرق میزان آب ورودی از طریق بارندگی، در آبخوان‌های نزدیک به سطح زمین، موثر است. با توجه به این تفاسیر از تاثیر پارامتر دما، چشم‌پوشی شده است.

۵-۵- پیشنهادات

۱- در بحث تغییر اقلیم از گزارش پنجم IPCC که شامل سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 می‌باشد، استفاده شود. در گزارش پنجم اثرات پوشش گیاهی و کاربری اراضی علاوه بر تولید گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است و دقت پیش‌بینی‌ها بالاتر خواهد رفت.

۲- مدلسازی کیفی آب زیرزمینی در قسمت‌های دشت کویر جهت محاسبه تداخل آب شور دریاچه نمک به سفره‌های آب زیرزمینی، انجام شود.

۳- طول دوره مدلسازی جهت ارتقاء دقت محاسبات افزایش یابد، به طور مثال برای سه سال متوالی مدلسازی انجام شود.

۵-۶- جمع بندی

۱- با توجه به کمبود بارش در منطقه و درصد بالای تبخیر و تعرق پیشنهاد می‌گردد جهت رفع بیابان زدایی و همچنین استفاده بهینه از آب، از کشت گیاهان و محصولات کشاورزی نامناسب با شرایط منطقه جدا پرهیز گردد و با الگوی کشت مناسب بهره برداری آبخوان زیرزمینی کاهش یابد.

۲- نقشه‌های هدایت الکتریکی (EC) و آنالیز کیفی نمونه‌های برداشت شده از منابع انتخابی افزایش شوری در حاشیه دریاچه منرنجاب و پیشروی در آن سمت آبخوان و مرکز دشت، را نشان

می‌دهند. این نیز حاصل کمبود بارش و برداشت های بی رویه از آبخوان زیرزمینی می باشد و باید تا حد امکان در برداشت ها تجدید نظر نمود.

۳- همان طور که در بخش چهارم ذکر شد میزان ورودی آب سطحی (تغذیه از سطح) به منطقه بسیار پایین است، از این رو پیشنهاد می گردد مطالعات در زمینه انتقال آب از رودخانه های اطراف شهرستان انجام گردد.

۴- میزان برداشت آب از چاه های بهره برداری باید کنترل شود و همچنین از صدور پروانه های جدید جهت حفر چاه های بهره برداری بیشتر جلوگیری شود.

۵- با توجه به ارزش بالای آب در منطقه خشک کاشان، پیشنهاد می گردد قیمت گذاری مناسبی در بخش آب کشاورزی و صنعت، در راستای مدیریت بهتر، صورت گیرد.

۵- مطالعات سنگ بستر در دشت کاشان به صورت دقیق انجام نشده است و برای تهیه مدل مفهومی با دقت بالاتر نیاز به داده های بیشتر و با ضریب اطمینان بالاتر است.

۶- تعداد چاه های مشاهده ای با پراکندگی مناسب در دشت افزایش یابد ، تا تغییرات سطح آب ثبت به صورتی دقیق تر ثبت و پایش شوند.

۷- اطلاع رسانی و آگاهی ساکنین شهرستان کاشان از عواقب ناشی از خشکسالی و افت سطح آب و کاهش ذخیره زیرزمینی در بهینه شدن مصرف بسیار حائز اهمیت می باشد.

منابع

- ۱- اصلاحی م، حسنعلیزاده ا، پوراصغرف، اکبرزاده ی، (۱۳۹۲)، "آشکارسازی تغییر اقلیم حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از بررسی روند تغییرات درازمدت اقلیمی"، اولین همایش ملی تاثیر پسروری دریاچه ارومیه بر منابع خاک و آب
- ۲- مساح بوآنی ع، مرید س، (۱۳۸۴)، "اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده رود اصفهان"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال نهم، شماره چهارم.
- ۳- ظهرابی ن، مساح بوآنی ع، تلوری ع، صدقی ح، (۱۳۸۹)، "آشکارسازی تغییر اقلیم در حوضه آبریز کارون بزرگ"، چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران.
- ۴- خوش اخلاق ف، غیاث‌الحسینی م، (۱۳۹۴)، "پیش‌یابی اثر گرمایش جهانی بر جریان رواناب حوضه پلرود"، اولین همایش ملی گردشگری، جغرافیا و محیط زیست پاک، دانشگاه بوعلی، همدان.
- ۵- پناهی م، میثاقی ف، عسگری پ، (۱۳۹۴)، "بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل GMS، (مطالعه موردی دشت زنجان)"، دومین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، راهکارها و چالش‌ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری، تبریز.
- ۶- حسینی ف، اسدی ن، (۱۳۹۴)، "استفاده از مدل ریاضی برای پیش‌بینی سطح آبخوان دشت خانمیرزا (استان چهارمحال و بختیاری)"، اولین همایش مدیریت، تقاضا و بهره‌وری مصارف آب، شرکت آب و فاضلاب استان همدان.
- ۷- قدرتی م، برزگری ف، (۱۳۹۵)، "مدل‌های ریاضی آبهای زیرزمینی، آموزش کاربردی مدل GMS 7.1"، چاپ دوم، انتشارات سیمای دانش، ص ۲۷
- ۸- کرسیک ن، (۱۳۸۱)، "مدلسازی آب‌های زیرزمینی و حل مسائل هیدروژئولوژی"، ترجمه چیت‌سازان و کشکولی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۴۳۹.

- ۹- سلیمانی ب، قریشی نجفآبادی ح، (۱۳۹۲)، "بررسی اثر برداشت آب از آبخوان بر روی دبی رودخانه با استفاده از مدل PMWIN MODFLOW"، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- ۱۰- میرعباسی ر، رهنما م، (۱۳۸۶)، "شبیه سازی آبخوان دشت سیرجان با استفاده از مدل MODFLOW و بررسی اثرات احداث سد تنگوئییه بر آن"، مجله پژوهش‌های آب ایران، سال اول، شماره اول، ص ۹-۱.
- ۱۱- محمودیان شوستری م، (۱۳۹۲)، "هیدرولیک آبهای زیرزمینی"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم، ص ۵۲۶
- ۱۲- وزارت نیرو، معاونت امور آب و آبفا، (۱۳۹۳)، "پیش‌نویس دستورالعمل انتخاب آمارها و داده‌های مورد نیاز برای تهیه مدل‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی"، نشریه شماره ۴۱۷-الف، ص ۵.
- ۱۳- مسعودی ر، زهتابیان غ، احمدی ح، ملکیان آ، (۱۳۹۴)، "ارزیابی روند تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی دشت کاشان"، نشریه مدیریت بیابان، شماره ۵، ص ۶۷-۸۰
- ۱۴- گزارش بیان آب زیرزمینی دشت کاشان، مدیریت منابع آب شهرستان کاشان.
- ۱۵- مصلحی ع، قاضی فردا، (۱۳۹۱)، "بررسی فرونشست زمین و پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت کاشان"، همایش ملی عمران و توسعه پایدار.
- ۱۶- آشفته پ، (۱۳۸۹)، "اثر تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل HadCM3 و تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، مطالعه موردی حوضه قرقو"، چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران.
- ۱۷- کوهستانی ن، مفتاح هلقی م، (۱۳۹۱)، "برآورد حداکثر برداشت مجاز از منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی حوضه نرماب استان گلستان)"، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- 18- Franssen, H. H.-J. (2009): The impact of climate change on groundwater resources: the need for integrative approaches, *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 1, 241–254.
- 19- Chen, Z. H., Grasby, S. E., Osadetz, K. G. (2002): Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model, *J. Hydrol.*, 260, 102–117.
- 20- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., D'oll, P., Jimenez, B., Miller, K., Oki, T., Sen, Z., & Shiklomanov, I. (2008): The implications of projected climate change for freshwater resources and their management, *Hydrolog. Sci. J.*, 53, 3–10.
- 21- Hsu, K.-C., Wang, C.-H., Chen, K.-C., Chen, C.-T., & Ma, K.-W. (2006): Climate-induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan, *Hydrogeol. J.*, 15, 903–913.
- 22- Ferguson, M. and Maxwell, R. M. (2010): Role of groundwater in watershed response and land surface feedbacks under climate change, *Water Resour. Res.*, 46, W00F02.
- 23- Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D. J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., Root, T. L., Seguin, B., Tryjanowski, P., & Hanson, C. E. (2007): Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems, in *Climate Change 79–131*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- 24- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. (Eds.). (2007): *Climate change, 2007: the physical science basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge Univ Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- 25- Wilby, R. L., Dawson, C. W., Barrow, E. M., Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 147–159
- 26- Gulacha, M. M., & Mulungu, D. M. M. (2016). Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu River Basin Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*.
- 27- Mahmood, R., & Babel, M. S. (2014). Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum river basin. *Weather and Climate Extremes*, 5(1), 56–66.
- 28- Dams, J., Salvatore, E., Van Daele, T., Ntegeka, V., Willems, P., & Batelaan, O. (2012). Spatio-temporal impact of climate change on the groundwater system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(5), 1517–1531

- 29- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., ... Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 250–266.
- 30- Shrestha, S., Bach, T. V., & Pandey, V. P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science and Policy*, 61, 1–13.
- 31- Lemieux, J., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M., & Ouellet, M. (2015). Journal of Hydrology : Regional Studies Simulating the impact of climate change on the groundwater resources of the Magdalen Islands . *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 400–423.
- 32- Lachaal, F., Mlayah, A., Bédir, M., Tarhouni, J., & Leduc, C. (2012). Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine-Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia). *Computers and Geosciences*, 48, 187–198.
- 33- Mohammadzadeh, H., Dadgar, M. A., & Nassery, H. (2017). Prediction of the effect of water supplying from Shirindare dam on the Bojnourd aquifer using MODFLOW 2000. *Water Resources*, 44(2), 216–225.
- 34- McDonald, J. M., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference flow model. *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*, Book 6.
- 35- Lemieux, J., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M., & Ouellet, M. (2015). Journal of Hydrology: Regional Studies Simulating the impact of climate change on the groundwater resources of the Magdalen Islands. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 400–423.

Abstract

Modeling is one of the indirect methods of studying groundwater resources, which, due to its high efficiency and low cost, allows us to simulate the complex system of underground water. A quantitative model of groundwater of Kashan plain with an area of 1,474 square kilometers has been prepared for this purpose. The main objectives of the Kashan groundwater underground water model include a quantitative understanding of underground water flow and the effects of climate change on the decline of groundwater level, which will lead to optimal aquifer management in the coming years. In this research, the aquifer of Kashan plain was simulated by finite difference numerical modeling (GMS 7.1) software. After simulating the flow, the model was calibrated using PEST algorithm in steady state mode. The results of calibration of the model in a stable and unstable state showed that the level of groundwater observed and simulated in the aquifer is close to each other. In the final stage, in order to consider the effects of climate change, the three-dimensional General atmospheric Circulation Model (GCM) is considered to be the most trusted model in climate change studies.

Due to the low spatial separation of the general circulation models, these models can not provide an accurate approximation of the weather conditions in the area under study, so their output must be downscaling station. In this research, the SDSM Statistical Downscaling Model was used for downscaling of rainfall and temperature data. The maximum simulated temperature during the 2016-2050 period compared to the base period of 1961-2001 under scenario A2 shows that the maximum temperature parameter in October was the highest increase, equal to 1.31°C , and during the same period under scenario B2, which is a more optimistic scenario, the temperature rise in October is 1.2 degrees Celsius. Monthly precipitation forecasts for the upcoming period show that precipitation under the A2 scenario has been decreasing for most months of the year, with the highest decline in May of 0.43 mm per day, and in December and October and February, Increased. It also fell under the B2 scenario in January, March, April and May, with the highest decline of 0.16 mm in March, and a slight increase in precipitation in the summer and autumn. In another word, the rainfall has shifted from winter to autumn. The results show that under the A2 scenario, which is pessimistic, we will face very dry summers. In general, the effect of climate change on the groundwater level of Kashan plain is not appreciable due to the low feeding rate.

Groundwater modeling.Kashan plain .model GMS.climate change .Downscaling Model SDMS.



Shahrood University of Technology

Department of Civil Engineering

Thesis for Master of Science in Environmental Engineering

**Simulation of the Kashan plain groundwater level Under climate
change scenarios**

By: Solale Velayati

Supervisor:

Ramezan vagheei

Saeed golian

Advisor:

Mahmood Akbari

February 2018