

بررسی تراز آب زیرزمینی و شبیه‌سازی سناریوهای پیش‌بینی در حوضه آبریز پریشان

کامران رضایی توابع* - دانشیار گروه محیط زیست و شیلات، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
اعظم حیدری - دانشجوی دکتری گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
محمد جواد سیاح پور - دانشجوی کارشناسی ارشد گروه محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۴/۲۸

چکیده

برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی در کشور سبب افت شدید سطح ایستابی آبخوان و از بین رفتن لایه‌های آبدار زمین گردیده است. در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت تراز آب زیرزمینی حوضه آبریز پریشان، واقع در استان فارس در رابطه با برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از داده‌های ۳۳ حلقه چاه پیژومتری در بازه زمانی (۲۰۰۸-۲۰۲۰) با استفاده از مدل Modflow شبیه‌سازی انجام گرفت. هم‌چنین نتایج حاصل از محاسبه بیلان آبی تعداد ۹۶۰ حلقه چاه بهره برداری در حوضه حاکی از آن است که میزان ۱۳ متر کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در سطح حوضه پریشان اتفاق افتاده است و جمعا میزان ۴۲,۴ میلیون مترمکعب آب از ذخیره ثابت آبخوان در بازه ۱۰ ساله کاسته شده است. با توجه به نقشه‌های درون‌یابی تهیه شده بیشترین میزان افت آب زیرزمینی مربوط به مناطق پریشان و فامور اتفاق افتاده است. از این رو با آمار سازمان آب منطقه‌ای فارس مبنی بر وجود چاه‌هایی با آبدهی بالا در این مناطق هماهنگی دارد. با استناد به نقشه‌های تهیه شده از آبخوان پریشان با توجه به آبرفتی بودن سفره آب زیرزمینی اثر افت سطح آب را می‌توان با فاصله مکانی کم مشاهده کرد. از سوی دیگر در نقشه‌های میان‌یابی ضریب پارامتر هدایت هیدرولیکی بیان‌کننده این است که میزان افت تراز آبخوان در مناطق پریشان و ملاره، فامور دارای بیشترین مقدار می‌باشد که با ۱۱ درصد خطای نسبی مؤید مدل‌سازی مناسب است. در نهایت با انجام سه سناریوی کاهش ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ درصدی، میزان تغییرات آب زیرزمینی در طی سال‌های ۲۰۱۹ - ۲۰۲۶ پیش‌بینی شد نتایج در سناریوی نهایی نشان داد که بیشترین میزان افت با ۲۱/۷۸ متر و کمترین افت نیز به میزان ۲/۱۴۶ متر است.

واژگان کلیدی: بیلان آبخوان، سناریوهای مدیریتی، تراز آب زیرزمینی، حوضه پریشان، Modflow

مقدمه

از مهم‌ترین و اساسی‌ترین منابع طبیعی موجود در هر سرزمینی و به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، منابع آب است. برداشت بی‌رویه و کنترل نشده منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش نزولات جوی، تمرکز مصرف در برخی نقاط (عدم تعادل بین تقاضا و پتانسیل تأمین آب)، الگوی کشت نامناسب و عدم آبیاری صحیح و حفر چاه‌های متعدد و بهره‌برداری بی‌رویه از آنها در چند دهه اخیر باعث بحرانی شدن و وضعیت منابع آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های کشور شده است. به نحوی که سطح آب زیرزمینی در اغلب آبخوان‌های کشور به طور مداوم سیر کاهشی داشته و متوسط افت سالانه در طول ۱۰ سال گذشته در حد ۱۳ متر بوده است. یکی دیگر از عواملی که باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی شده است، تغییر شرایط و رژیم تغذیه طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی است. به عنوان مثال در برخی از دشت‌ها، ساخت و سازهای هیدرولیکی نامناسب بر روی رودخانه‌ها انجام شده و باعث کاهش تغذیه مناسب آبخوان پایین دست و یا خشک شدن دریاچه‌ها و تالاب‌ها شده است.

استان فارس یکی از مناطقی است که به دلیل قرارگیری در مناطق اقلیمی خشک و نیمه خشک با بحران کمبود آب مواجه است که می‌توان گفت آثار زیان بار محیطی به ویژه ژئومورفولوژیک در آن بیش از هر جای آشکارتر است. بخش عمده‌ای از این استان در شهرستان کازرون قرار دارد و حوضه دریاچه پریشان نیز جزئی از آن می‌باشد که به دلیل قرارگیری در منطقه خشک و نیمه خشک با کاهش بیش از حد تراز آب زیرزمینی، به علت بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها مواجه است (گزارش سازمان آب فارس، ۱۳۹۵). هم‌چنین حفر چاه‌های بدون مجوز (دفتر مطالعات پایه وزارت نیرو، ۱۳۹۵) باعث بروز حوادثی جبران‌ناپذیر شده است که این موضوع باعث گشته، بسیاری از آبخوان‌های کشور در شرایط بحرانی قرار گرفته و به علت کاهش تراز آبخوان جزء دشت‌های ممنوعه اعلام گردند.

به طور کلی بحث‌هایی که در ارتباط با علل افت آب زیرزمینی در ایران صورت گرفته در تضاد با یکدیگر بوده و هنوز به یک جامعیت و هدفی روشن دست پیدا نکرده است. برخی معتقدند علل افت آب زیرزمینی، ناشی از تغییر اقلیم گسترده در ایران است (وحیدی، ۱۳۹۰؛ ربانی و علیخانی، ۱۳۸۹) و برخی دیگر آن را نتیجه بهره‌گیری بی‌رویه انسان از منابع آبی و عدم مدیریت درست منابع آب می‌دانند (نورانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ فسخودی و میرزایی، ۱۳۹۲). هرچند منابع آب زیرزمینی بلافاصله تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی به ویژه نوسانات بارندگی قرار نمی‌گیرد (صمدی و همکاران، ۱۳۹۴). اما در دراز مدت به واسطه تغییرات اقلیمی و یا افزایش برداشت نسبت به نفوذ آب، سبب کاهش تراز آب‌های زیرزمینی می‌شود. بنابراین با استفاده مدل عددی جریان آب زیرزمینی مادفلو مک دونالد و هابارگ^۱ (۱۹۹۶) یک شبیه‌سازی سه بعدی برای جریان آب زیرزمینی از طریق روش عددی تفاضلات محدود است که می‌توان جریان آب زیرزمینی را تحت شرایط پیچیده هیدرولیکی و با فرآیندهای گوناگون هیدرولوژیکی ژو^۲ و لی^۳ (۲۰۱۱) شبیه‌سازی کرد. این مدل قادر است جریان آب زیرزمینی قابل استفاده را شبیه‌سازی کند (رجایی و همکاران، ۲۰۰۸؛ میتلست^۴ و همکاران، ۲۰۱۱؛ السلاما^۴ و همکاران، ۲۰۱۱) و هم‌چنین در مدیریت سطح آب زیرزمینی و استخراج آن (لئو و همکاران، ۲۰۱۰؛ لئو^۵ و همکاران، ۲۰۰۶) نیز کاربرد داشته باشد.

1. Mac Downald

2. Gwo

3. Mitles

4. Eslama

5. Leo

پیشینه پژوهش

در این زمینه مطالعات مختلفی در داخل و خارج از کشور بر روی مناطق صورت گرفته است. در خارج از کشور اولین تحقیق در زمینه مدل سازی آب زیرزمینی توسط استلمان^۱ (۱۹۵۶) با به کار بردن روش تفاضل محدود انجام گرفت که برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان های ناپایدار دو بعدی در آبخوان های ناهمگن از این روش استفاده کرد (به ذکر از توسلی، ۱۳۷۷). گویمون و هیرومیکا^۲ (۱۹۸۵) برای ارزیابی واکنش آبخوان ها به تغذیه مصنوعی و بررسی تغییرات سفره آب زیرزمینی اقدام به مدل سازی آبخوان نمودند و نتایج حاکی از آن بود که تحلیل های هیدرولوژیکی مناسب و شناسایی ژئوتکنیک منطقه اگر با مدل سازی عددی ترکیب شوند مدل ایجاد شده می تواند نوسانات تراز آبخوان ها را به بهترین نحو شبیه سازی کند. مدل Modflow ممکن است در ترکیب با مدل های دیگر در زمینه های دیگر منابع آب کارایی های بیشتری را نیز نشان دهد. برای مثال بررسی تاثیر کاهش تراز آب زیرزمینی بر روی کیفیت آب نمونه ای از آن است که پژوهشگرانی مانند تیان^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، هستر^۴ و همکاران (۲۰۱۶)، ژانگ^۵ (۲۰۱۷)، ویسنر^۶ و همکاران (۲۰۱۷) موستازا کلادو^۷ و همکاران (۲۰۱۸) اوندوک^۸ و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از آن رابطه مستقیمی را بین کاهش تراز آبخوان و افزایش میزان املاح در آب به دست آوردند. در بعضی تحقیقات دو یا چند کد برای مدل سازی برداشت آب زیرزمینی توسط مدل Modflow & SWAT^۹ و برای تخمین میزان کاهش تراز آب زیرزمینی استفاده می شود. (کودربرت^{۱۰} و همکاران ۱۹۷۷:۲۰۱۹؛ لیو و همکاران ۲۰۱۹:۱۰۹؛ مولینا^{۱۱} و همکاران ۲۰۱۹:۸۶؛ وی و همکاران، ۲۰۱۹:۶۹؛ وی لیو^{۱۲} و همکاران ۲۰۲۰:۱۲۸) به این شیوه توانستند نشان دهند که خشکسالی هواشناسی باعث خشکسالی هیدرولوژیکی می شود. پیش بینی مدل های انتقال و جریان های زیر سطحی پیچیده و غیر خطی (هو^{۱۳} و همکاران ۲۰۱۱:۸۳؛ یان^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۳:۱۶۲؛ تی سیا^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۵:۷۱)، بررسی مشکلات ناشی از شوری خاک و سطوح ایستابی (شیشر^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۱:۳۹؛ مالریس^{۱۷}، ۲۰۱۲:۵۶) و ارزیابی کیفیت آب های زیرزمینی در رابطه با آب های سطحی (کاستا^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۶:۸۲؛ ایندکس^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۸:۳۷؛ تیان^{۲۰} و همکاران، ۲۰۱۸:۴۳) کاربردهای دیگری است که برای روش Modflow می توان بر شمرد.

¹ Eatelman² Hiromika³ Tiyan⁴ Hester⁵ Zhang⁶ Visner⁷ Mostaza⁸ Oundouc⁹ Swot & Modflow¹⁰ Kouder bert¹¹ Moulina¹² Vi lieu¹³ Huo¹⁴ yan¹⁵ Tiseya¹⁶ Shisher¹⁷ Marlis¹⁸ Kasta¹⁹ Endecs²⁰ Tiyan

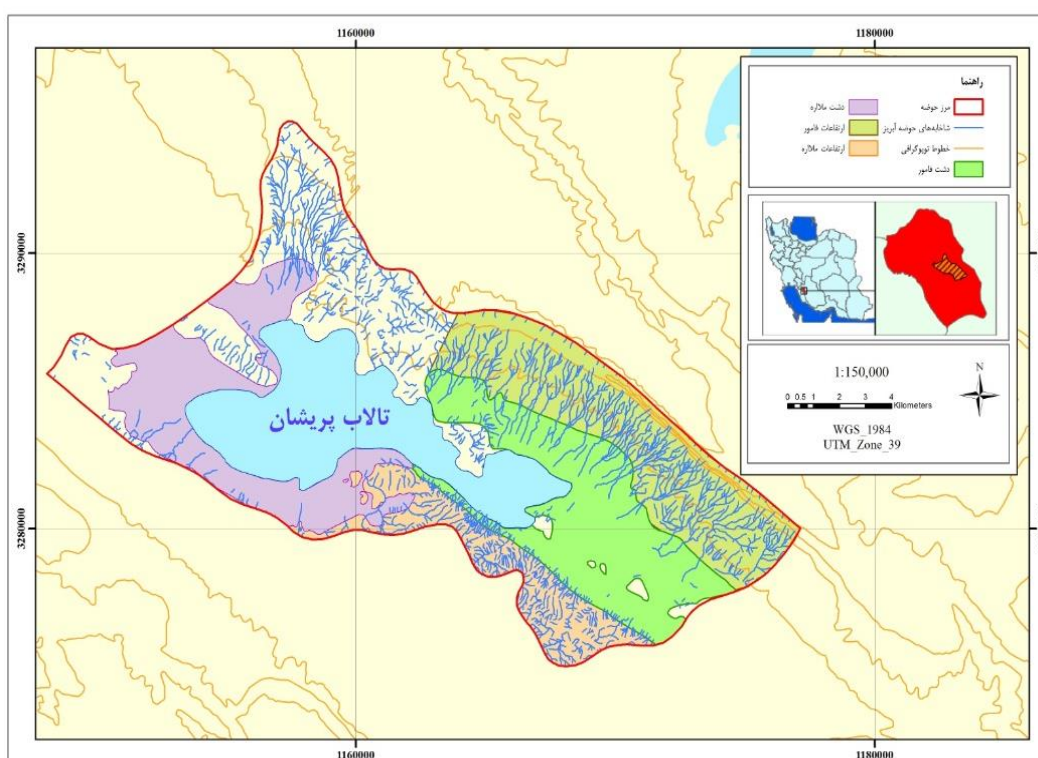
مشخص شدن این کاربردها هم‌زمان با وقوع بحران‌های مختلف آبی برای پژوهشگران ایرانی فرصتی را فراهم نمود تا از آن برای ارزیابی منابع آب در زمینه‌های گوناگون بهره ببرند. هم‌چنین از دلایل دیگر کاهش تراز آب زیرزمینی به کمبود بارش و وقوع خشکسالی‌های اخیر است که در تحقیقات (بیاتی و همکاران ۲۰۱۶: ۳۱؛ رحیمی و همکاران، ۲۰۱۹: ۶۱؛ تیموری، ۲۰۲۰: ۱۰۲) به آن پرداخته اند به طوری که حتی این تشخیص در دشت کرمان تا حداقل ۵۷ درصد تغییرات آب زیرزمینی را توسط شاخص خشکسالی اقلیمی قابل پیش‌بینی و قابل توجیه می‌گرداند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۸). این در حالی است که به عنوان اولین گام مدیریتی هنوز در بسیاری از دشت‌های در معرض بحران هنوز روابط دقیقی که بتواند توزیع جغرافیایی تغییرات تراز آبخوان‌ها را در رابطه با برداشت آب‌های زیرزمینی نشان دهد، صورت نگرفته است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته تاکنون، پژوهش مشابهی در حیطه اثرات تغییر تراز آب زیرزمینی با تأکید بر سناریوهای پیش‌بینی در حوضه دریاچه پریشان در استان فارس انجام نشده است و با توجه به دقت خروجی در مطالعات پیشین در حیطه محاسبات عددی مدل‌های تراز آب زیرزمینی در این تحقیق، حوضه دریاچه پریشان در بازه زمانی سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹ بر اساس یک روش کاملاً تئوریک توسعه مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی، مقدار تغییرات قائم آبخوان بر طبق تغییرات سلولی شبکه تفاضل محدود با استفاده از مدل Modflow جریان به صورت غیرخطی تهیه شد؛ و به منظور تعیین عامل اساسی به وجود آورنده این تغییرات، از روش و تحلیل آماری-مکانی استفاده گردید. بزرگترین عامل اثرگذار در تغییرات تراز آب زیرزمینی شناسایی شد و در نهایت در محیط صفحات گسترده، رابطه رگرسیونی نقاط مورد بررسی واقع گردید.

در نهایت با ترکیب اثرات برداشت بی‌رویه آب بر سناریوهای محتمل، میزان کاهش تراز آبخوان برای سال‌های آینده در مناطق مختلف این حوضه در قالب یک مدل پیش‌بینی و تعیین شد و درجات مختلف بحران کاهش تراز آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف حوضه از این طریق مشخص شد. در ادامه با شناسایی نقاط تحت تأثیر کاهش تراز آب در سال‌های آتی جهت مقابله با گسترش مناطق بحرانی (اعم از شور شدن آب زیرزمینی و جلوگیری از گسترش شوری خاک و توسعه بیابانزایی) و هم‌چنین با پیش‌بینی مخاطرات ژئومورفولوژیک مانند توسعه فرونشینی در نقاط مختلف حوضه می‌توان از گسترش بیشتر این نوع مخاطرات در حوضه با برنامه ریزی و اجرای راهکارهای مدیریتی مناسب جلوگیری کرد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه پریشان بین طول شرقی " ۲۵°۵۲' ۵۱" تا " ۵۱°۴۳' ۵۰" و عرض شمالی " ۲۵°۲۲' ۲۹" تا " ۴۰°۲۷' ۲۹" یکی از کفه‌های نیمه بسته در استان فارس (شهرستان کازرون) می‌باشد. این حوضه از طرف شمال به زیر حوضه کازرون، از شرق به زیر حوضه برم، از جنوب و غرب به زیر حوضه جره و بالاده منتهی می‌شود. مساحت این حوضه ۲۲۵ کیلومتر مربع است که ۴۰ درصد آن (۹۰ کیلومتر مربع) با ارتفاعات و ۶۰ درصد آن (۱۳۵ کیلومتر مربع) آن با دشت و دریاچه پوشیده شده است. حداکثر ارتفاع حوضه پریشان ۱۸۰۰ متر و حداقل ارتفاع ۸۵۵ متر از سطح دریا قرار دارد و این ارتفاعات دارای امتداد شمال‌غربی، جنوب‌شرقی است. حوضه پریشان در بخش نیمه‌خشک ایران قرار دارد که دارای زمستان‌های معتدل و کوتاه و تابستان‌های طولانی و گرم و خشک است. رژیم بارندگی این منطقه از رژیم مدیترانه‌ای پیروی می‌کند و بخش عمده بارش‌ها در طول ماه‌های پاییز تا بهار رخ می‌دهد و ماه‌های تابستان عموماً خشک است. میانگین دما از کمتر از ۸ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات شمالی تا بیش از ۲۴ درجه سانتی‌گراد در بخش‌های غربی تغییر می‌کند. متوسط بارندگی سالیانه بلندمدت برای حوضه پریشان، ۴۶۳ میلی‌متر می‌باشد. میزان تبخیر سالانه از کمتر از ۲۴۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمالی تا بیش از ۲۵۰۰ میلی‌متر در بخش‌های کم‌ارتفاع‌تر تغییر می‌کند (شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس، ۱۳۹۵: ۴۸). در حوضه تعداد ۹۶۰ حلقه چاه وجود دارد که بیش از ۳۰۰ حلقه آن غیر مجاز می‌باشد (مطالعات انتقال آب از سد نرگسی به

تالاب پریشان، ۲۰۲۱: ۶۸). محدوده مطالعاتی دریاچه پریشان دارای دو آبخوان آبرفتی است که از شرق به غرب شامل آبخوان آبرفتی فامور و ملاره است (شرکت سهامی آب منطقه ای استان فارس، ۱۳۹۵: ۵۶). دشت‌های این حوضه که نواحی پست بین ارتفاعات را تشکیل می‌دهند، غالباً از روند ارتفاعات تبعیت می‌کنند. از نظر زمین‌شناسی در پهنه تکتونیکی رشته کوه‌های زاگرس چین‌خورده قرار دارد و در آن رسوبات پالئوزوئیک، مزوزوئیک و ترسیب به طور هم شیب روی هم قرار دارند. این رسوبات در پلیوسن تغییر شکل یافته و چین‌خورده‌اند. از نظر هیدرولوژی در این حوضه رودخانه دائمی وجود نداشته و کلیه جریان‌ها موقت و فصلی می‌باشند که تمامی جریان‌های سطحی منطقه به صورت همگرا از حاشیه به سمت مرکز دشت و دریاچه پریشان جریان یافته و در نهایت در مرکز و غرب دشت تجمع می‌یابند. تراکم شبکه آبراهه‌ها نیز در سطح حوضه آبریز مورد مطالعه بسیار متفاوت است. بستر آبراهه‌ها در برخی نقاط بر روی این سازندها دارای شکستگی‌ها و درز و شکاف فراوان است که غالباً به شکل دره‌های ژرف V مانند نمایان است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت حوضه پریشان

روش تحقیق

برای انجام این تحقیق نخست داده‌ها و اطلاعات منطقه مورد مطالعه مانند داده‌های چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای که شامل اطلاعات مربوط به ۲۵ چاه اکتشافی و ۹۶۰ چاه بهره‌برداری از سازمان مدیریت منابع آب استان فارس جمع‌آوری شد (آماربرداری سازمان آب فارس، ۱۳۹۸). برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مدل عددی مادفلو در محیط نرم افزار GMS با توجه به کاربرد و جامعیت آن انتخاب شد. پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، مدل مفهومی منطقه که به صورت فرم هندسی و براساس پارامترهایی که بر آبخوان بیشترین تأثیر پذیری را دارند تعیین شد. برای تهیه مدل مفهومی،

محدوده دشت به صورت فایل^۱ GIS وارد نرم افزار شد. سپس خصوصیات دیگر آبخوان مانند مرزهای تراوا و ناتراوا که با استفاده از پارامترهای خواص لیتولوژیکی، ویژگی‌های زمین شناسی (شکل ۳) و مشخصات سازندهای مرزی در منطقه و همچنین دبی ورودی و خروجی به سلول‌های مرزی در محدوده تعیین شد و با انطباق تمام پارامترهای ذکر شده نقشه میان‌یابی سطح آب زیرزمینی در آبخوان تهیه شد.

در ادامه با استفاده از DEM^۲ سی متری استان فارس نقاط ارتفاعی (توپوگرافی سطح زمین) تهیه شد. سپس نقاط ارتفاعی را به نرم افزار GMS وارد کرده و در نهایت با استفاده از روش کریجینگ نقشه پهنه‌بندی توپوگرافی سطح زمین تهیه شد. به جهت توسعه مدل مفهومی، نیاز به تخمین دقیقی از تغییرات ضخامت آبخوان (توپوگرافی سنگ کف) در حدود ناحیه اشباع بود. برای این منظور اطلاعات عمق چاه‌های عمیق و بالاتر از حد معین و داده‌های به دست آمده از مطالعات ژئو الکتریک که در محدوده دشت انجام شده بود با هم تلفیق گشت و برای تعیین ضخامت آبخوان در لایه‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن عمق چاه‌های بهره‌برداری و نیز داده‌های به دست آمده از اکتشافات ژئوفیزیک، به صورت فایل‌های متنی وارد محیط^۳ GMS شد.

پس از تهیه مدل مفهومی، محیط آبخوان با استفاده از شبکه‌بندی تفاضل محدود به صورت مدل ریاضی مشخص شد. با استفاده از شبکه‌های با سلول‌هایی در جهت X به ۱۰۳ و در جهت Y به ۱۰۶ ردیف تقسیم و مش‌بندی آبخوان انجام شد. در واقع ساخت مدل ریاضی یک مرحله واسط برای انتقال اطلاعات وارد شده به محیط نرم افزار GMS می باشد. به طوری که، این مرحله شامل بیان مدل مفهومی در قالب معادلات ریاضی است. به عبارت دیگر طی این مرحله مدل مفهومی از سیستم فیزیکی به سیستم ریاضی تبدیل شد. معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد (بیر، ۱۹۹۰) در حالت کلی به صورت زیر می‌باشد (معادله ۱). در این معادله h ارتفاع سطح آب زیرزمینی، S_y آبدهی ویژه، K هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x, y, z و Z سفره آب زیرزمینی است.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{معادله ۱:}$$

در نهایت محاسبات مربوط به هر سلول انجام شد و نتایج در قالب نقشه‌های شبیه‌سازی شده مشخص شد. پس از تبدیل مدل مفهومی به شبکه و تعیین سایر خواص سلول‌های شبکه، به اجرای اولیه مدل برای حالت پایدار اقدام شد که در حالت اولیه امکان دارد مدل در مراحل ابتدایی اجرا نتایج قابل قبولی را ارائه ندهد، به عنوان مثال احتمال دارد بین داده‌های مشاهداتی سطح تراز و داده‌های محاسباتی اختلاف زیادی وجود داشته باشد، که باعث ایجاد خطای بالا در نتایج نرم افزار می‌شود. در مدل مادفلو این فرضیات با اجرا کردن مرحله کالیبره مدل انجام شد. به این صورت که تعدادی از پارامترهای آبخوان به عنوان پارامتر کالیبراسیون در نظر گرفته شد و نتایج مربوط به داده‌های محاسباتی تا حد ممکن و بهینه به داده‌های مشاهداتی نزدیک شد و با توجه به این پارامترها کالیبره مدل انجام شد. پس از کالیبره کردن مدل در حالت پایدار، مدل در حالت ناپایدار نیز با توجه به نوع کاربری و مشخص کردن تعداد گام‌های زمانی کالیبره و اجرا شد. پس از انجام کالیبراسیون مدل مرحله صحت‌سنجی، که مهر تأییدی برای انجام مدل‌سازی هم در شرایط پایدار و ناپایدار است نیز انجام شد. در ادامه برای تحلیل حساسیت پارامترهایی که واسنجی شده‌اند از پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی، آنیزوتروپی، پارامتر

^۱ Geographic Information System

^۲ Digital Elevation Model

^۳ Groundwater Modeling System

تغذیه سطحی، پارامتر شبکه آبراهه‌ای، مرزهای تراوا و آبدهی ویژه استفاده شد. به این صورت که پارامترهای واسنجی که مورد آنالیز حساسیت قرار گرفته بودند به دلیل داشتن میزان خطای کم و قابل قبول صحت آن‌ها تأیید شد. همچنین از معیارهای مختلف جهت ارزیابی برآورد مدل می‌توان به میانگین خطای اریب، میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مربع خطا، خطای نسبی اشاره کرد. معادلات مربوط به هر کدام به قرار معادلات (1 تا 4) می‌باشد: که در این روابط n تعداد دوره‌های مشاهداتی، Z^* مقادیر شبیه‌سازی و Z مقادیر مشاهداتی هستند.

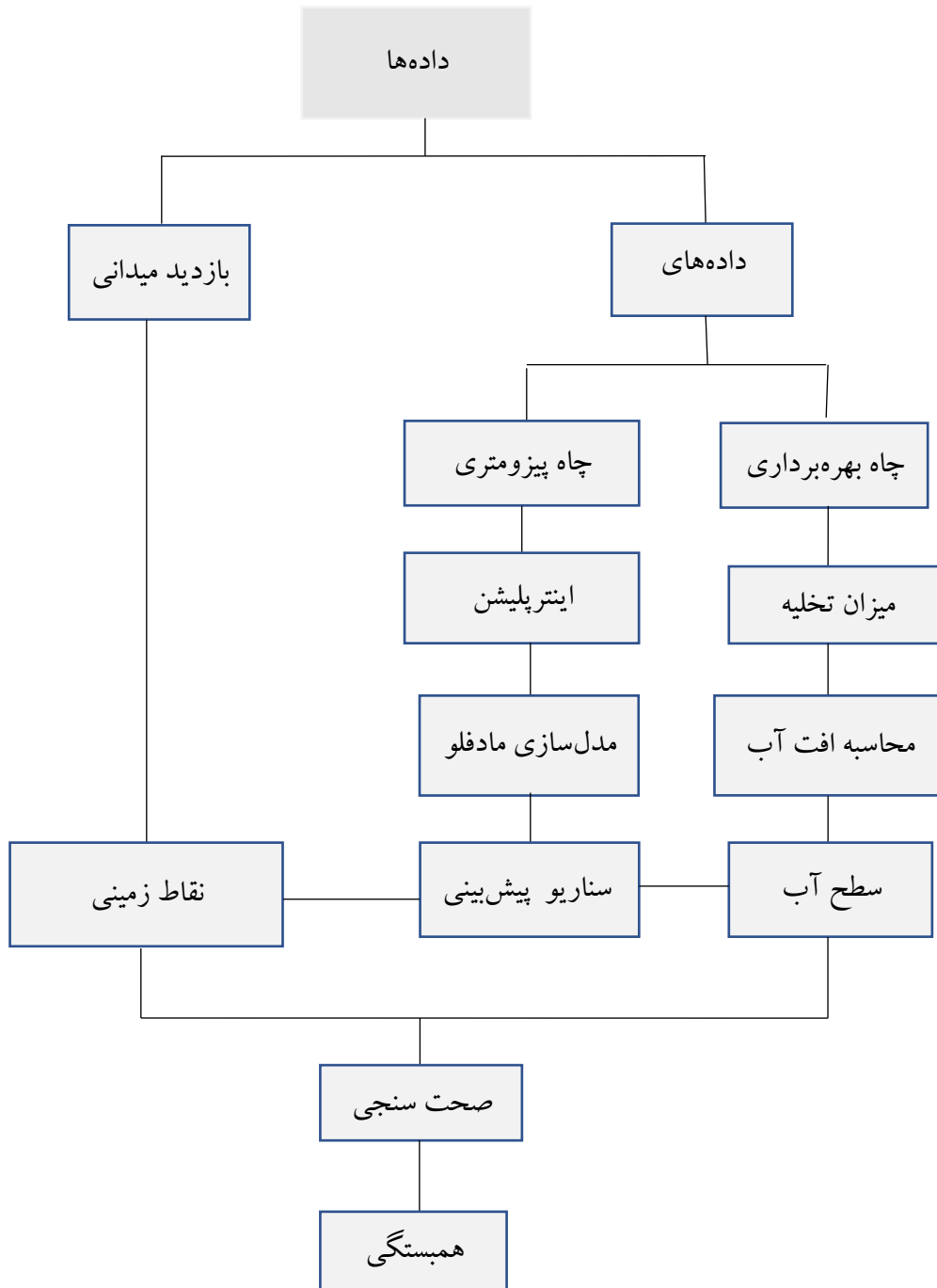
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i^* - Z_i]}{n} \quad \text{معادله ۲:}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |[Z_i^* - Z_i]|}{n} \quad \text{معادله ۳:}$$

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{[Z_i^* - Z_i]^2}}{n} \quad \text{معادله ۴:}$$

$$NRMSD = \frac{RMSD}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad \text{معادله ۵:}$$

پس از تهیه مدل آبخوان منطقه مورد مطالعه، محاسبات لازم در نرم افزار GMS و کد Modflow انجام شد. طول دوره ده ساله (۲۰۰۸-۲۰۱۹) بر پایه حداکثر داده‌های موجود قابل تدقیق و بازسازی در نظر گرفته شد. موتور محاسباتی PCGU با ۱۰۰ تکرار Outer و Inner با حد بحرانی تغییرات همگرایی ۰/۰۱ و همچنین حد بحرانی خطای همگرایی ۰/۰۱ مترمکعب در روز انتخاب شد. پس از ورود همه داده‌های مورد نیاز مدل و اجرای مدل جریان آب زیرزمینی برای بازه زمانی ۹۴ ماهه از سال ۲۰۰۸-۲۰۱۵ پارامترهای هدایت هیدرولیکی، مقادیر تغذیه و ضریب هدایت بستر رودخانه‌ها و زهکش‌ها به عنوان پارامترهای واسنجی انتخاب شدند که با تغییر آن‌ها در محدوده مجاز مقادیر نهایی به دست آمد. جهت عملیات واسنجی در شرایط غیرماندگار از ۷۰ درصد و واسنجی ۳۰ درصد داده‌های پیژومتری در طول بازه‌های زمانی ۱۲۶ ماهه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استفاده شد. در ادامه صحت سنجی مدل واسنجی شده در داده‌های بلند مدت ۲۰۰۸-۲۰۱۸ ماهه بر اساس ارتفاع مقادیر بار هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. شایان ذکر است که برای شبیه‌سازی ارتباط هیدرولیکی رودخانه و آبخوان (مانند نرخ تغذیه آب زیرزمینی یا نرخ نشت از رودخانه) از بسته رودخانه مادفلو استفاده شد. در این بسته، تبادلات حجمی آب بین رودخانه و آبخوان با استفاده از هدایت بستر رودخانه و قانون دارسی و با توجه به تراز سطح آب زیرزمینی و تراز سطح آب در رودخانه محاسبه می‌شود. در نهایت به منظور ایجاد رابطه بین تراز آبخوان و برداشت بی‌رویه آب، پس از تهیه مدل‌سازی کمی اقدام به پیش‌بینی شرایط آینده تراز آب زیرزمینی با استفاده از سناریوهای کاهش ۱۰ و ۳۰ درصد در بازه زمانی (۲۰۱۹-۲۰۲۶) مدل مورد برازش قرار گرفت.

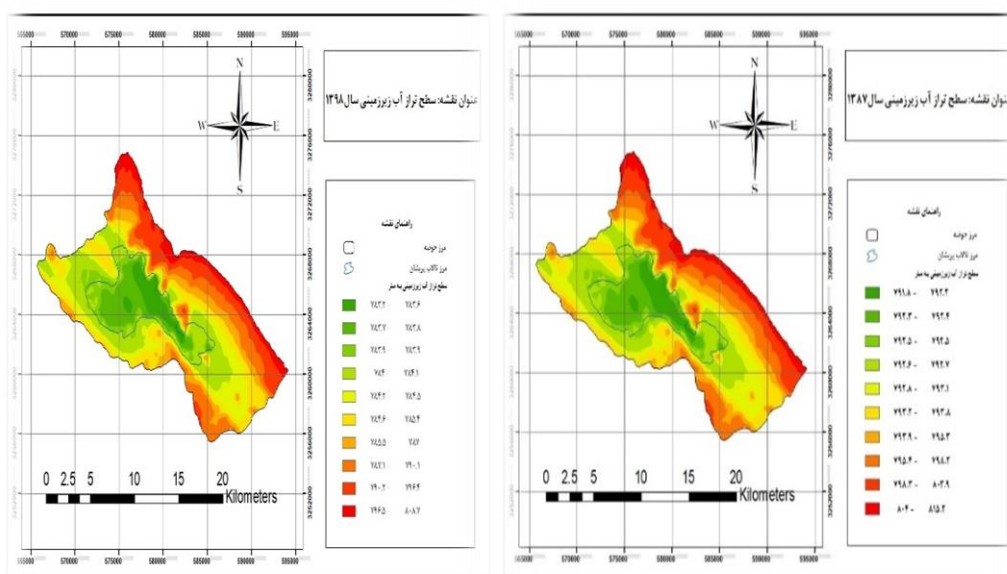


شکل ۲: فلوجارت روش تحقیق

بحث و یافته‌ها

بررسی سطح تراز آب زیرزمینی حوضه پریشان

با توجه به اینکه برداشت از آب‌های زیرزمینی توسط چاه‌های کشاورزی یکی از علل مهم کاهش آب در حوضه پریشان عنوان شده است. به منظور تبیین روند تغییرات تراز آب زیرزمینی، روند کلی میزان سطح آب سالانه تمام چاه‌های مشاهده‌ای (۲۵ پیژومتر) در بازه زمانی ۱۳۸۷-۱۳۹۸ مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین نقشه‌های درون‌یابی سطح آب زیرزمینی با استفاده از پهنه‌بندی جهت نشان دادن تغییرات آب زیرزمینی نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حاشیه شرقی و شمال‌شرقی حوضه کمترین میزان افت سطح آب زیرزمینی و در شمال و حاشیه شمال‌غربی محدود مورد مطالعه بیشترین میزان افت اتفاق افتاده است (شکل ۳-۴).

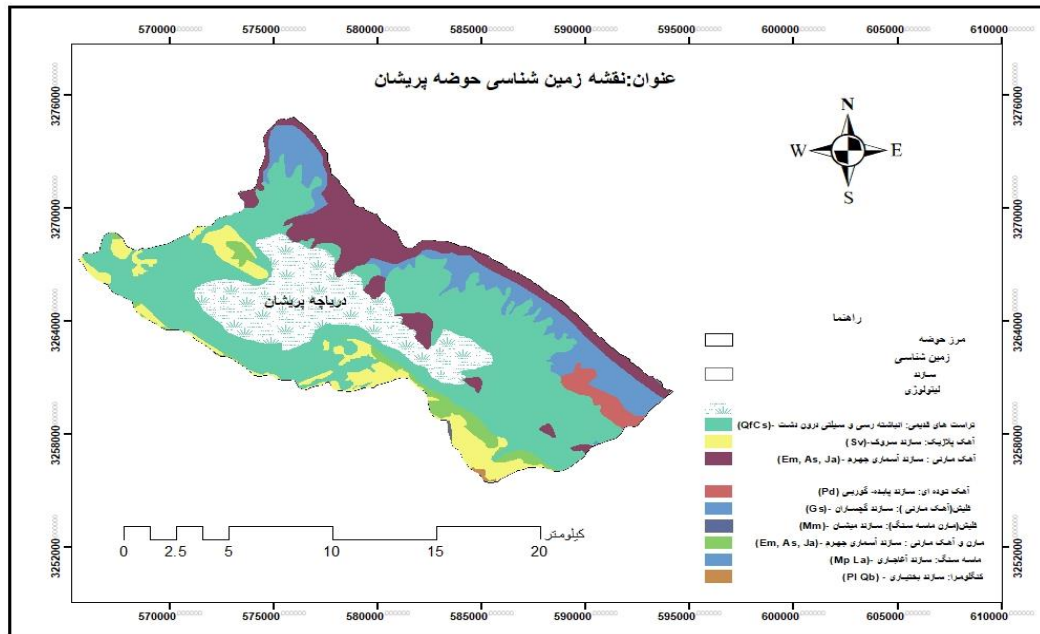


شکل ۴: سطح تراز آب زیرزمینی سال ۱۳۹۸

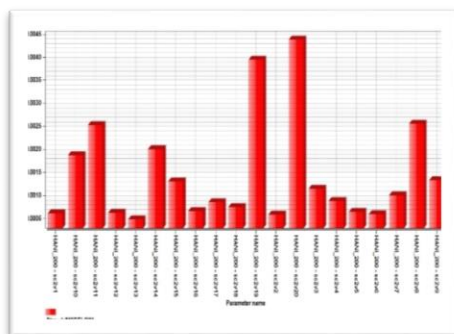
شکل ۳: سطح تراز آب زیرزمینی سال ۱۳۸۷

در این پژوهش، از روش تحلیل حساسیت تلفیق شده با مرحله واسنجی استفاده شده است. نتایج خروجی از آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در واسنجی آبخوان حوضه پریشان، نشان‌دهنده تأثیر حداکثری پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی افقی و یک مجموعه گروه خطی شبکه آبراه‌ای بود (شکل ۵-۱۰). هدایت هیدرولیکی آبخوان یکی از پارامترهایی است که در این مدل از عدم قطعیت بالایی برخوردار است و با تغییر در مقادیر این پارامتر مدل حساسیت زیادی نشان می‌دهد. بنابراین دلیل بالا بودن میزان حساسیت هدایت هیدرولیکی آبخوان وجود چاه‌هایی با آبدی بالا در این مناطق است از این رو با آمارهایی که از سازمان آب منطقه‌ای فارس دریافت شده است هماهنگی دارد. هم‌چنین پارامتر آنیزوتراپی نیز در این مدل دارای حساسیت قابل توجهی است. در این نمودارها محور افقی شماره و عنوان هر پایلوت و محور عمودی در این شکل، مقدار حساسیت را نمایش می‌دهد. موقعیت هر پایلوت باید به صورت منحصر در محدوده

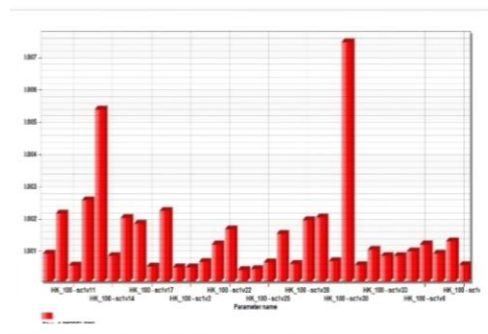
مکانی دشت مورد بررسی قرار بگیرد. در این پژوهش به موارد بیشینه (حساسیت حداکثری) اشاره شده است. بر همین اساس، ویرایش‌های صورت گرفته بر مرزهای با بار هیدرولیکی پویا (مدل مفهومی) در حدود پارامترهای با حساسیت زیاد، خطای کل واسنجی را در آخرین مرحله از مراحل چهارگانه واسنجی به حداقل مطلوب کاهش داد. بنابراین به دلیل داشتن میزان خطای کم و قابل قبول صحت پارامترهای واسنجی شده تأیید شد.



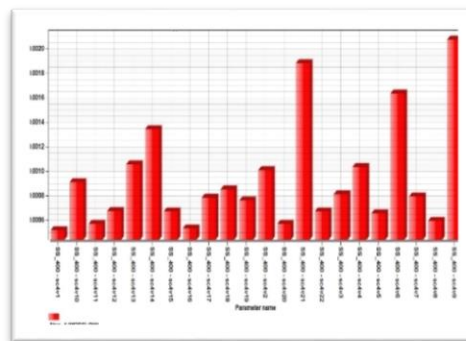
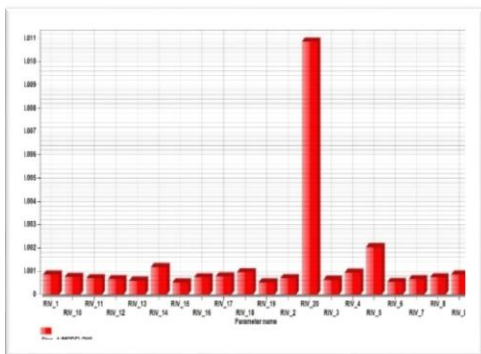
شکل ۵: نقشه زمین‌شناسی حوضه پریشان



شکل ۷: تحلیل حساسیت پیلوت‌های ناهمسانگردی

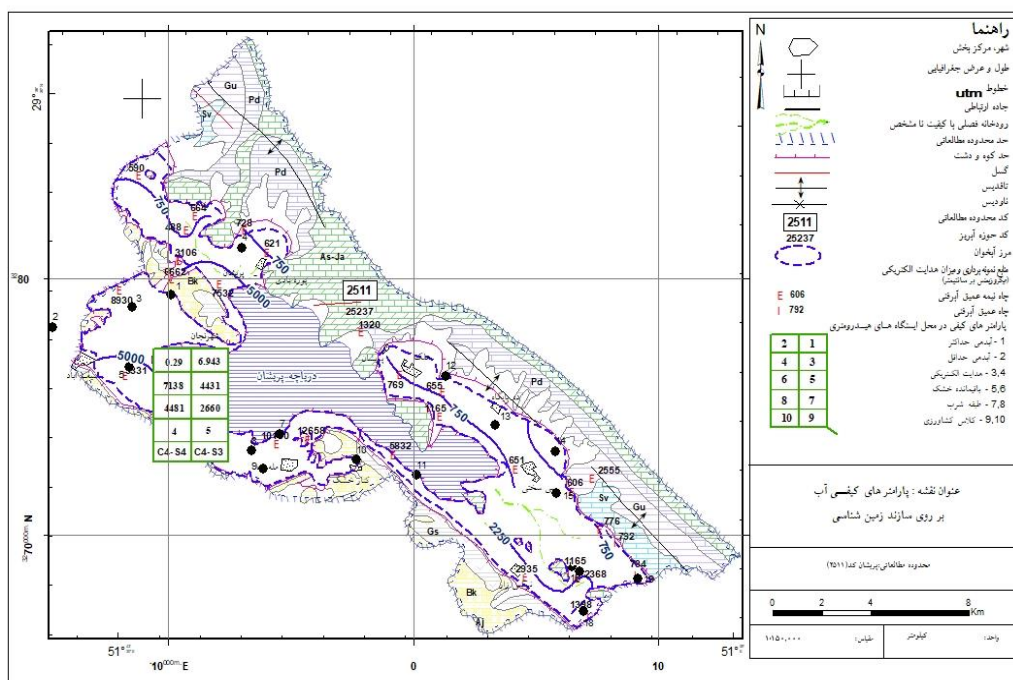


شکل ۶: تحلیل حساسیت پیلوت‌های هدایت هیدرولیکی



شکل ۸: تحلیل حساسیت پارامترهای آبدهی ویژه

شکل ۹: تحلیل حساسیت شبکه آبراهه



شکل ۱۰: نقشه خروجی پارامتر کیفی آب بر روی سازند زمین شناسی

به منظور تبیین روند تغییرات آب زیرزمینی، روند کلی میزان سطح آب سالانه تمام چاه‌های مشاهده‌ای (۳۳ حلقه چاه پیزومتر) در بازه زمانی (۲۰۰۸-۲۰۱۹) مورد بررسی قرار گرفت. در نمایش خطا و همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (مرحله صحت سنجی)، محور طولی مقادیر مشاهداتی و در محور عمودی مقادیر محاسباتی برای تک تک پیزومترها نمایش داده شده است. همچنین برای بررسی خطا در صحت سنجی از معادله زیر استفاده شده است که اگر مقدار درصد بدست آمده کمتر از ۱۰ درصد باشد مدل سازی مطلوب است. اگر کمتر از ۲۰ درصد باشد مدل سازی مناسب،

اما با مقدار مشخصی خطای قابل بررسی است و اگر بیش از این مقدار باشد دارای خطای بزرگ و قابل بررسی است. که مقدار خطا پس از محاسبه در مدل حاضر ۲ درصد حاصل شد.

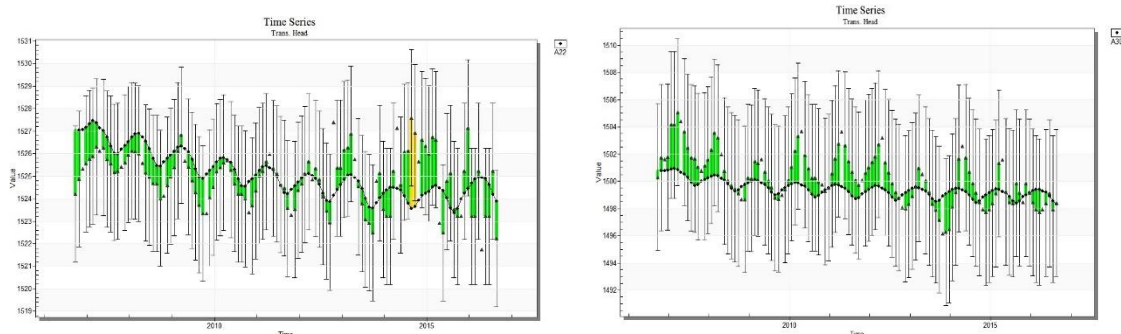
$$[RMSE/(MAX_{\text{Observation}}-MIN_{\text{Observation}})]=NRMSE$$

با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی از لایه‌های درونی زمین (بویژه سنگ کف) دستیابی به این مقدار تا حد بسیار زیادی غیر ممکن بنظر می‌رسید. هم چنین عامل دیگری که مدل سازی را می‌تواند در این مورد با مشکلات بزرگ مواجه سازد، افت شدید سطح آب در آبخوان به سبب وجود برداشت‌های بیش از حد مجاز و حفر چاه‌های غیر مجاز و خشکسالی و غیره است و در عین حال انتظار می‌رفت واسنجی مدل با بایاس شدید همراه گردد. با این همه در نهایت هیدروگراف چاه‌ها در محدوده انحراف استاندارد داده‌های پیژومتری با تطبیق نسبی حاصل شده و خطای کل نیز به قدر مطلوب کاهش داشت. مقدار مورد نظر برای مدل حاضر با تقسیم $RMSE$ با رقم ۱٫۶۳ بر حد اختلاف کمینه از بیشینه با تعداد ۳۳ حلقه چاه مشاهداتی در منطقه، عدد نرمال شده ۱۱ درصد را به دست داد، که کمتر بودن این عدد از حد ۲۰ درصد برای دوره طولانی مدت شبیه سازی، ایده آل می‌باشد (جدول ۱).

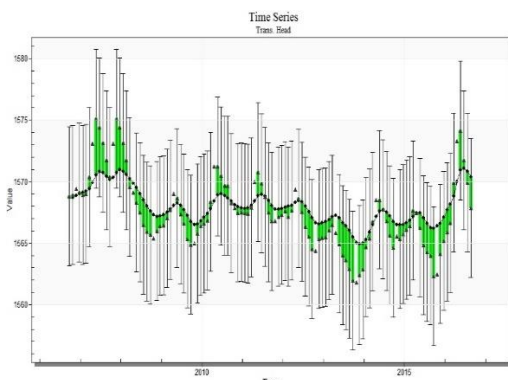
جدول ۱: میانگین خطا در واسنجی ناپایدار

ارزش	میانگین خطا در واسنجی
-۱/۱۲	خطا کلی
۱/۶۳	خطای مشاهده ای
۲/۴۵	خطای نسبی

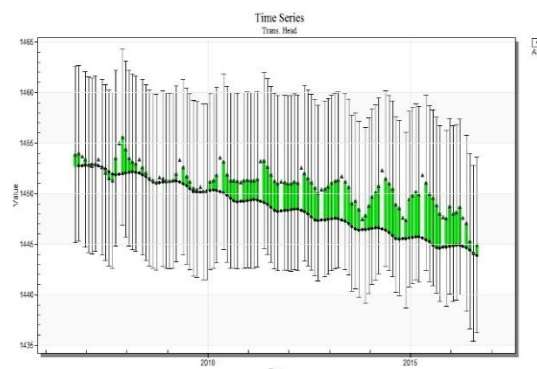
در ادامه نتایج مدل سازی در تعداد ۴ حلقه چاه مشاهداتی به صورت تصادفی و با پراکندگی جامع در قسمت‌هایی از سطح دشت که بیشترین تعداد چاه بهره برداری قرار دارد و دارای کاهش تراز آب زیرزمینی است انتخاب گردید که نشان دادن رنگ زرد مشخصه خطا و رنگ سبز مقدار واسنجی را مطلوب نشان می‌دهد. در این نمودارها محور افقی گام‌های زمانی و محور عمودی تراز سطح آب را نمایش می‌دهد (شکل ۱۱-۱۴)



شکل ۱۱: خطای شماتیک مقادیر مشاهداتی چاه ۳۰. شکل ۱۲: خطای شماتیک مقادیر مشاهداتی چاه ۲۲.



شکل ۱۴: خطای شماتیک مقادیر مشاهداتی چاه ۱۹.



شکل ۱۳: خطای شماتیک مقادیر مشاهداتی چاه ۱۱.

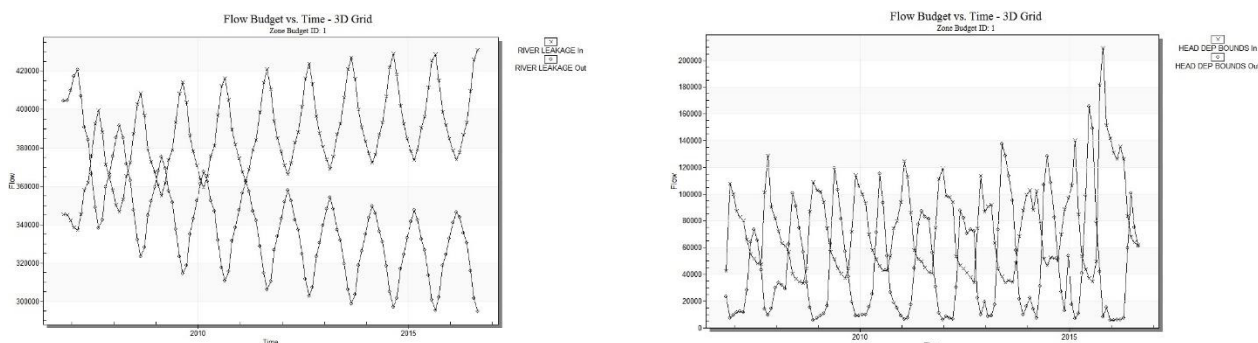
تحلیل نتایج

عمده مطالعات صورت گرفته در حیطه بررسی کاهش تراز در دشت‌های کشور، تنها به تغییرات کمی ساختار زمین پرداخته است؛ برای نمونه می‌توان به مطالعات حیدری و جباری (۲۰۲۱) و رنجبر و احتشامی (۲۰۱۹) اشاره کرد. با این حال ایجاد یک مدل تصمیم‌ساز نیز برای نمونه در مقاله صفاری و همکاران (۹۳:۱۳۹۵) ترکیب روش‌های محاسباتی سنجش از دور بدون اعتباریابی احتمالاتی بوده است. هم‌چنین رشوند و همکاران (۲۰۱۹) از یک روش معادلاتی به منظور ایجاد یک امکان پیش‌بینی استفاده کردند، با این حال در نهایت آنچه برای مدیران اجرایی کارآمد می‌باشد، ترکیب پارامترهای موثر بر کاهش تراز آب با شرایط پیش‌بینی احتمالاتی شاخص محور می‌باشد. در این مطالعه و با بررسی پژوهش‌های اخیر در محدوده حوضه پریشان، اقدام به تهیه یک شبیه‌ساز تصمیم‌گیری بر پایه روش‌های خطی بر روی مدل کاهش تراز آب زیرزمینی انجام شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی کمی آبخوان پریشان نشان داد که پارامتر ناهمسانگردی هدایت هیدرولیکی، در نواحی مرکزی آبخوان دارای بیشترین مقدار است که می‌توان به آبخوان منطقه پریشان و فامور و ملاراه اشاره کرد (شکل ۵-۶). در حالی که هدایت هیدرولیکی افقی، در چهار پایلوت با توزیع‌های جنوب، مرکز و شمال دارای بیشترین مقدار می‌باشد (شکل ۲-۳). بیشینه مقدار هدایت هیدرولیکی افقی در آبخوان‌های مناطق فامور، هلک، سیف‌آباد، کنارخسک کاملاً مشهود است (شکل ۴). در نهایت دو پارامتر شبکه آبراهه و آبدهی ویژه به ترتیب در نواحی میانی و شمالی آبخوان به دلیل قرارگیری تالاب پریشان در آن مناطق دارای ارزش بالاتری بودند (شکل‌های ۷-۸). نکته قابل توجه از منظر توزیع بیشینه مقادیر این پارامترها مشخص‌کننده این مطلب می‌باشد که در اجرای مدل بیشترین سلول‌ها به صورت خشک در آبخوان مشخص شده است. در هر چهار پارامتر مورد نظر بیشترین سلول خشک، مربوط به منطقه فامور می‌باشد (شکل ۴). بنابراین تمایل به تأمین آب از دست رفته در ازای افت صورت گرفته با این پارامترهای نهایی قابل انتظار بود.

بررسی میزان تخلیه و آبدهی در محدوده آبخوان

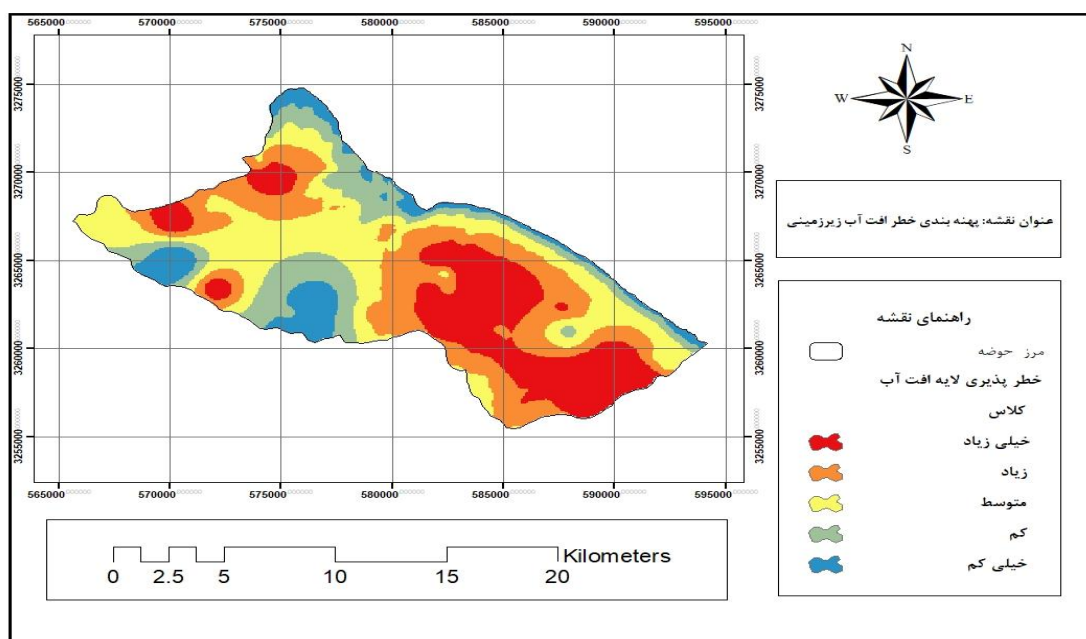
در ادامه نتایج حاصل از محاسبه بیلان آبی در آبخوان حوضه پریشان که در طی بازه زمانی (۱۳۸۷-۱۳۹۸) انجام گرفت حاکی از آن است که میزان ۴۲,۴ میلیون مترمکعب آب از ذخیره ثابت آبخوان کاسته شده است (شکل ۱۵-۱۶) در نتیجه مقدار آب ورودی به ناحیه علاوه بر وابستگی به شرایط فیزیکی حوضه پریشان، نظیر ضرایب هیدرودینامیکی و ثقل، به مقدار دبی پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری وابستگی مستقیم دارد. بنابراین با افزایش برداشت از آبخوان تغییر در مقدار حجم جریان تبدالی از پارامترهای موثر در بیلان قابل انتظار خواهد بود که با تهیه نقشه پهنه بندی خطر افت آب زیرزمینی در حوضه پریشان میزان درجات خطر پذیری افت لایه‌های آب زیرزمینی در مناطق مختلف حوضه مشخص شد. همانگونه

که در نقشه نیز مشاهده می‌گردد و بیشترین میزان کاهش آب زیرزمینی در حوضه مربوط به منطقه مرکزی حوضه یعنی تالاب پریشان و فامور می‌باشد که اغلب کلاس خطرپذیری زیاد را شامل شده است (شکل ۱۷).



شکل ۱۷: حجم جریان تخلیه و تغذیه

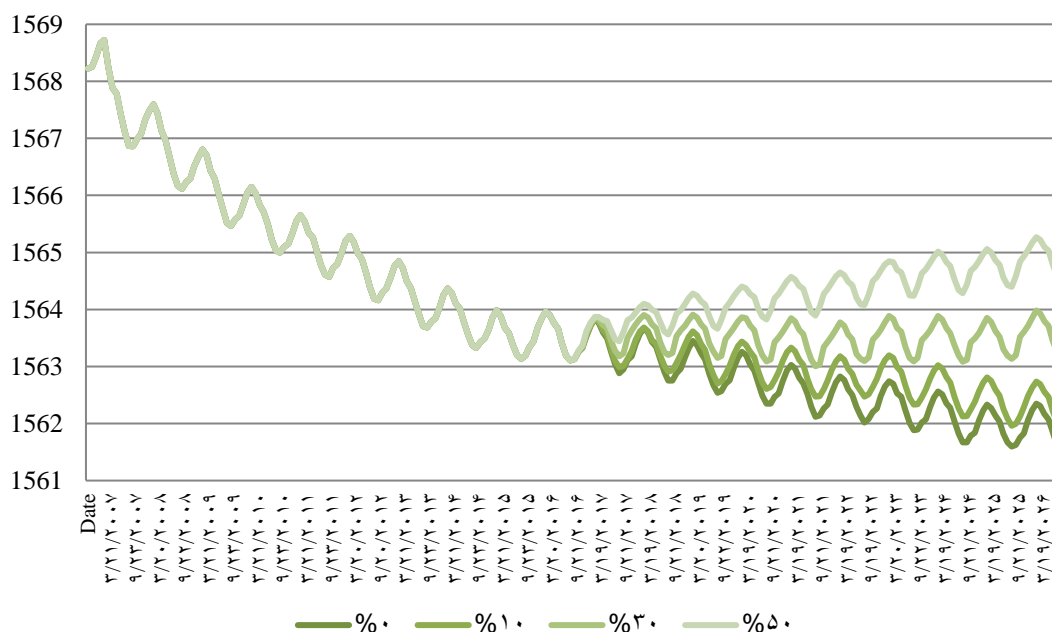
شکل ۱۶: جریان ورودی و خروجی



شکل ۱۸: نقشه پهنه بندی خطر افت آب زیرزمینی

در نمودار (شکل ۱۹) سه سناریوی اجرای ۱۰ ساله مدل جریان آب زیرزمینی و مقدار متوسط سالانه افت آب زیرزمینی در محدوده حوضه پریشان برای هر مورد نشان داده است. در سناریو اول امتداد شرایط حاضر بر پایه دبی در آخرین سال بهره‌برداری (مدل سازی) و با تثبیت شرایط مرزی و تثبیت روند تغییرات خطی و غیرخطی پارامترهای مدل را نشان داده شده است. دو سناریو دیگر که به ترتیب ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۶ بر خلاف دوره ابتدایی مدل علاوه بر شیب کلی تند سناریوها، دارای یک جهش شدید نیز بوده است. علت این موضوع به عبور از نقاط شکست آبخوان و تخریب بی‌بازگشت پتانسیل تغذیه سفره آب زیرزمینی باز می‌گردد. شاخص محاسباتی نشان می‌دهد که افزایش تخریب ساختار عمودی زمین درست در مناطقی رخ داده است که در سناریوهای پیش‌بینی به عنوان زون‌های پرخطر و با ممنوعیت بهره

برداری در بسیاری از مطالعات دسته‌بندی شده بودند. این نواحی که عمدتاً در بخش‌های مرکزی با اعمال طرح‌های احیا و مدیریت آبخوان از سوی شرکت‌های تابعه کنترل شده است، همچنان در صورت وقوع تغییرات منفی اقلیمی، با گذر از مرز بحرانی وارد فضای شکست و نقطه غیرقابل بازگشت خواهد شد. نقطه شکست در هر منطقه شرایطی است که بافت آبرفتی تا حد زیادی پتانسیل بازیابی خود را در گردش فصلی برای افزایش تراز آب زیرزمینی با تخریب خلل و فرج از دست بدهد. این مناطق در این پژوهش در شدیدترین کلاس به صورت مکانی قابل شناسایی است. در حوضه پریشان نیز به علت آنومالی‌های اقلیمی در چند سال اخیر، به وضوح برداشت‌های مازاد و عموماً خارج از پروانه‌های بهره‌برداری افزایش یافته است که دوره پیش‌بینی تشدید این شرایط را گواهی می‌دهد و همان‌گونه که انتظار می‌رود هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی افزایش یابد به تبع آن تراز آبخوان نیز افت بیشتری خواهد داشت. بنابراین در صورت ادامه این روند ایجاد فرونشست و شکستگی‌های وسیع و گسترش درز و ترک‌های ناشی از کاهش آب زیرزمینی در سطح زمین محتمل است.



شکل ۱۹: سناریوی پیش‌بینی کاهش برداشت آب در آبخوان پریشان

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی حوضه پریشان توسط تحلیل رگرسیون و مدل Modflow با ۸۰ درصد پیوستگی انجام شد. از بین پارامترهای مؤثر تنها لایه نقطه‌ای شده عمق آبخوان دارای همبستگی ۳۰ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از واسنجی مدل در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار، نشان‌دهنده این است که بخش‌های میانی دشت مانند فامور و پریشان دارای بالاترین مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه هستند از این رو با آمار سازمان آب منطقه‌ای فارس مبنی بر وجود چاه‌هایی با آبدهی بالا در این مناطق هماهنگی دارد. نتایج حاصل از محاسبه بیلان آبی در آبخوان پریشان که در طی بازه زمانی (۱۳۸۷-۱۳۹۸) انجام گرفت حاکی از آن است که میزان ۱۳ متر کاهش سطح تراز آب زیرزمینی در سطح حوضه پریشان اتفاق افتاده است و جمعا میزان ۴۲,۴ میلیون مترمکعب آب از ذخیره ثابت آبخوان کاسته شده است.

همچنین با بررسی سناریو کاهش ۱۰ و ۵۰ درصدی برداشت آب زیرزمینی از منطقه مشخص گردید که این سناریوها نیز تنها مسکنی بر کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه خواهد بود و بهتر است در کنار آن از سناریوهای دیگری نظیر آمایش سرزمین و تغییر الگوهای آبیاری و کشت در منطقه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

در نهایت نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در حوضه پریشان، نیز به علت آنومالی‌های اقلیمی در چند سال اخیر، به وضوح برداشت‌های مازاد و عموماً خارج از پروانه چاه‌های بهره برداری افزایش یافته است که دوره پیش‌بینی تشدید این شرایط را گواهی می‌دهد و همان‌گونه که انتظار می‌رود هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی افزایش یابد به تبع آن تراز آبخوان نیز افت بیشتری خواهد داشت. بنابراین میزان برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی رابطه مستقیمی با افت آب‌های زیرزمینی دارد و لازم است تا در مصرف آب‌های زیرزمینی به خصوص در زمینه کشاورزی نظارت بیشتری صورت گیرد و میزان بهره برداری متناسب با میزان تغذیه باشد و در صورت ادامه این روند ایجاد فرونشست و شکستگی‌های وسیع و گسترش درز و ترک‌های ناشی از کاهش آب زیرزمینی در سطح این منطقه محتمل است. زیرا تداوم روند استفاده از آب‌های زیرزمینی علاوه بر مسائل و مشکلات مربوط به کم‌آبی می‌تواند منجر به مخاطرات جبران‌ناپذیر ناشی از فرونشست زمین در منطقه شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این تحقیق از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، سازمان محیط زیست استان فارس و سازمان آب منطقه‌ای استان فارس و انجمن میراث پریشان جهت ارائه داده‌ها و اطلاعات و همچنین سایر سازمان‌هایی که دسترسی به داده‌ها و اطلاعات این پژوهش را در سایت‌های مربوطه فراهم کرده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- پورحقی، ا؛ آخوندعلی، ع؛ رادمنش، ف؛ میرزایی، س، ۱۳۹۹. مدیریت بهره برداری از منابع آب در شرایط خشکسالی با مدل *MODFLOW* مطالعه موردی (دشت نورآباد) علوم مهندسی و آبیاری، دوره ۳۷، شماره ۲، صص ۷۱-۸۲.
- تیموری، م. و اسدی نلیوان، ا، ۱۳۹۹. ارزیابی تاثیر کاربری زمین و زمین شناسی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌های آماری چند متغیره و تحلیل زمین آماری (مطالعه موردی: بخشی از حوضه رودخانه هابل)، مجله هیدروژئومورفولوژی، ۷ (۲۵)، ۹۷-۱۲۱.
- حیدری، ا. رضایی، ک. سیاح پور، م. ۱۴۰۰. ارزیابی جریان زیست محیطی و ارائه رویکردی جامع با بررسی پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی مطالعه موردی: حوضه دریاچه پریشان. اولین کنفرانس ملی مدیریت کیفیت آب و سومین کنفرانس ملی مدیریت مصرف آب، تهران، دانشگاه تهران.
- حیدری، ا. جباری، ا. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی مرودشت و بررسی سناریوهای پیش‌بینی با استفاده از کد ریاضی *MODFLOW* هیدروژئومورفولوژی، شماره ۹۲، سال هشتم، صص ۱۴۹-۱۷۲.
- صمدی ر، بهمنش، ج؛ رضایی، ح، ۱۳۹۴. بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت ارومیه)، نشریه دانش آب خاک، جلد ۲۲، شماره ۴، صص ۶۷-۸۴.
- صفاری، ا. جعفری، ف و توکلی صبور، س، م. ۱۳۹۵. پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج-شهریار، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۵، ۹۳-۸۲.

- رجبی خمسه، ک؛ نیکبخت شهبازی ع؛ فتحیان، ح؛ ظهراپی، ن ، ۱۳۹۰. مدل سازی فرونشست دشت ایذه با استفاده از کد ریاضی *MODFLOW* ، پژوهش منابع آب ایران، دوره ۱۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۰-*IR* (*WRR*)، ۱۱۲-۱۲۶.
- رحیمی ر، رحیمی م، ۱۳۹۸. تحلیل فضایی و زمانی تغییرات اقلیمی در سال‌های آتی و مقایسه روش‌های مقیاس خرد *SDSM* ، *LARS-WG* و شبکه عصبی مصنوعی در استان خوزستان مجله اکوهیدرولوژی، 5(4):1174-1161
- سازمان آب منطقه ای فارس ۱۳۹۵. گزارش بیان آب منطقه مطالعاتی کازرون (۲۶۴۷)، ۱-۶۳.
- سازمان آب منطقه ای فارس ۱۳۹۰. «مدیریت تحقیقات و مطالعات پایه منابع آب، فهرست جهانی منابع و مصارف آب شاپور دالکی»، گزارش مطالعه موجودی پریشان.
- فسخودی، ع؛ میرزایی، م، ۱۳۹۲. پیامدهای بحران کم‌آبی و خشک شدن زاینده رود در مناطق روستایی، مطالعه موردی: جلگه برآن در شرق اصفهان، مجله توسعه محلی، شماره ۲، ۱۸۰-۱۵۷.
- محمدی س، ناصری ف، نظری پور ح ۱۳۹۷. بررسی تغییرات زمانی و تاثیر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از شاخص های استاندارد بارش (*SPI*) و منابع آب زیرزمینی (*GRI*). اکوهیدرولوژی ۵(۱):۲۲-۱۱ .
- محمدی، ع.، کرمی. گ.، دولتی اردجانی، ف.، ۱۳۹۴. مطالعه مدیریت آبخوان با استفاده از مدل *PMWIN* ، مطالعه موردی: آبخوان شیروان، منابع و توسعه آب، ۱ (۳): ۶۷-۷۵.
- مطالعات انتقال آب از سد نرگسی به تالاب پریشان: قسمت اول (مرحله شناخت)، (۱۳۹۹)، طرح احیای تالاب پریشان، کارفرما: اداره کل حفاظت محیط زیست استان فارس، مشاور: دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ناظر: شرکت مهندسی مشاور رویان.
- میسماریان ز، بوانی ع، پیر بازاری، ج ۱۳۹۵. تأثیر تغییر اقلیم بر تعادل آب زیرزمینی دشت شهرکرد در دوره‌های آینده، مجله اکوهیدرولوژی تبریز، ۳(۲)، ۲۳۳-۲۴۲.
- میرلاس، و، ۲۰۱۲. ارزیابی خطر شوری خاک در مناطق زیر کشت با استفاده از مدل *MODFLOW* و ابزار *GIS*: مطالعه موردی از دره جزرئیل. مدیریت آب کشاورزی ۱۰۹: ۱۴۴-۱۵۴.
- نورانی، و، رنجبر، س؛ توتونچیان، ف ، ۱۳۹۴. بررسی تغییرات فرآیندهای هیدرولوژیکی با استفاده از معیارهای موجک- آنتروپی، مطالعه موردی دریاچه ارومیه، فصلنامه عمران و مهندسی محیط زیست، شماره ۸۰، ۷۵-۸۶.
- وحیدی، ع، ۱۳۹۰. تأثیر اقلیم و خشکسالی بر منابع آب ایران، کنفرانس آبخیزداری منابع آب و خاک ایران ، کرمان. ۵۸-۷۶.
- *Al-Salamah, L.S., Ghazaw, Y.M. and Ghumman, A.R. (2011). Groundwater modeling of Saq Aquifer Buraydah Al Qassim for better water management strategies. Environmental Monitoring and Assessment 173 (1-4): 851-860.*
- *Bayat Varkeshi M, Farahani Dastjani M, and Ghabaei Sough M (2018) Effect of meteorological drought on groundwater resources (Cas study: Komijan aquifer in Markazi provience). Iran-Water Resource Research 14(1):114-124.*
- *Boyce, S.E., Hanson, R.T., Ferguson, I., Schmid, W., Henson, W., Reimann, T., Mehl, S.M., Earll, M.M., (2020). One-Water Hydrologic Flow Model: A MODFLOW based conjunctive-use simulation software: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6- A60, p. 435.*

- Boyce, S.E., (2020). *MODFLOW One-Water Hydrologic Flow Model (MF-OWHM) Conjunctive Use and Integrated Hydrologic Flow Modeling Software, version 2.0.0. U.S. Geological Survey Software Release.*
- Condon, L.E., Maxwell, R.M., (2017). *Systematic shifts in Budyko relationships caused by groundwater storage changes. Hydrol. Earth Syst. Sci. 21 (2).*
- Costa-Cabral MC, Burges SJ (1994) *Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research 30:1681–1692*
- de Graaf, I.E.M., Sutanudjaja, S.H., Van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., 2015. *A high-resolution global-scale groundwater model. Hydrol. Earth Syst. Sci. 19 (2), 823–837.*
- El Madani, F., Chiaar, A., Chafi, A., (2011). *Phytoplankton composition and abundance assessment in the Nador lagoon (Mediterranean coast of Morocco). Acta Bot. Croat. 70, 269–288.*
- Siarkos, I., and Latinopoulos, P. (2012). “*Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Moudania, Greece*”. *European Water, 40: 3-17.*
- Shishir, G., Chaharb, B.R., and Didier, G. (2011). *Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13: 127–139.*
- Guymon, G. L., and Hromadka, T. V. (1985). “*Modeling of groundwater response to artificial recharge. In T.Asano “Artificial recharge of groundwater :129-149.*
- Hanson, R.T., Boyce, S.E., Schmid, W., Hughes, J.D., Mehl, S.W., Leake, S.A., Maddock III, T, Niswonger, R.G., (2014)b. *One-water hydrologic flow model (MODFLOW-OWHM). US Geol. Surv. <https://doi.org/10.3133/tm6A51>*
- Hester, E. T., Hammond, B. and Scott, D. T. (2016). *Effects of inset floodplains and hyporheic exchange induced by in-stream structures on nitrate removal in a headwater stream. Ecological Engineering, 97, 452–464.*
- Hu Y, Moiwo J P, Yang Y, Han S, Yang Y (2010) *Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain. Journal of Hydrology 393(3-4):219–232.*
- Tian, Y., Zheng, Y., Wu, B., Wu, X., Liu, J. and Zheng, C. (2015). *Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. Environmental Modelling and Software, 63, 170–184.*
- Tsai TL, Tsai PY, Yang PJ (2015) *Probabilistic modeling of rainfall-induced shallow landslide using a point-estimate method. Environmental Earth Sciences 73(8):4109-4117*
- Liu, C.W., Lin, C.N., Jang, C.S., Chen, C.P., Chang, J.F., Fan, C.C. and Lou, K.H. (2006). *Sustainable groundwater management in Kinmen Island. Hydrological Processes 20: 4363–4372.*
- Liu, C.W., Chou, Y.L., Lin, S.T., Lin, G.J. and Jang, C.S. (2010). *Management of high groundwater level aquifer in the Taipei Basin. Water Resources Management 24 (13): 3513–3525.*
- Liu, W., Park, S., Bailey, R.T., Molina-Navarro, E., Andersen, H.E., Thodsen, H., Nielsen, A., Jeppesen, E., Jensen, J.S., Jensen, J.B., Trolle, D., (2019). *Comparing SWAT with SWATMODFLOW hydrological simulations when assessing the impacts of groundwater abstractions for irrigation and drinking water. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2019, 1–51.*
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model (PDF), Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. U.S. Geological Survey, Reston, VA.*
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model. US Geological Survey Open-file Report. PP. 83-87.*

- Mittelstet, A.R., Smolen, M.D., Fox G.A. and Adams D.C. (2011). Comparison of aquifer sustainability under groundwater administrations in Oklahoma and Texas. *Journal of the American Water Resources Association* 47 (2): 424–431.
- M.O. Cuthbert, An improved time series approach for estimating groundwater recharge from groundwater level fluctuations, *Water Resour. Res.* 46 (2010) W09515 . Tian, Y., Zheng, Y., Wu, B., Wu, X., Liu, J. and Zheng, C. (2015). Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. *Environmental Modelling and Software*, 63, 170–184.
- Molina-Navarro, E., Trolle, D., (2020). Assessing the impacts of groundwater abstractions on flow regime and stream biota: combining SWAT-MODFLOW with flow-biota empirical models. *Sci. Total Environ.* 706, 135702.
- Molina-Navarro, E., Bailey, R.T., Andersen, H.E., Thodsen, H., Nielsen, A., Park, S., Jensen, J.S., Jensen, J.B., Trolle, D., (2019). Comparison of abstraction scenarios simulated by SWAT and SWAT MODFLOW. *Hydrol. Sci. J.* 64, 434–454.
- Mostaza-Colado, D., Carreño-Conde, F., Rasines- Ladero, R. and Iepure, S. (2018). Hydrogeochemical characterization of a shallow alluvial aquifer: 1 baseline for groundwater quality assessment and resource management. *Science of The Total Environment*, 639, 1110–1125
- Wu JC, Lu L, Tang T (2011). Bayesian analysis for uncertainty and risk in a groundwater numerical model's predictions. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 17(6):1310-1331.
- Woessner, W. W. (2017). Hyporheic Zones. *Methods in Stream Ecology*. Elsevier Inc.
- Yang, T., Cui, T., Xu, C.-Y., Ciais, P., Shi, P., (2017). Development of a new IHAMethod for impact assessment of climate change on flow regime. *Glob. Planet. Chang.* 156, 68.
- Yoon H, Hart DB, McKenna SA (2013). Parameter estimation and predictive uncertainty in stochastic inverse modeling of groundwater flow: Comparing null-space Monte Carlo and multiple starting point methods. *Water Resources Research* 49(1):536-553
- Yuan W, Cai W, Nguy-Robertson AL, Fang H, Suyker AE, Chen Y, Zhang H. (2015). Uncertainty in simulating gross primary production of cropland ecosystem from satellite-based models. *Agricultural and Forest Meteorology.* 207: 48–57.
- Zhang, J., Song, J., Long, Y., Kong, F., Wang, L., Zhang, Y. and Hui, Y. (2017). Seasonal variability of hyporheic water exchange of the Weihe River in Shaanxi Province, China. *Ecological Indicators*, 92, 278-287.
- Zhou Y. and Li W. (2011). A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers* 2(2): 205-214.