



شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی مرودشت و بررسی سناریوهای پیش‌بینی با استفاده از کد ریاضی

MODFLOW

اعظم حیدری^۱، ایرج جباری^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲

وصول مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۴

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 آبخوان مرودشت-خرامه، واقع در استان فارس در رابطه با برداشت بی‌رویه‌ی آب‌های زیرزمینی از داده‌های ۸۱ حلقه چاه پیژومتری در بازه‌ی زمانی (۲۰۰۸-۲۰۱۸) با استفاده از مدل Modflow شبیه‌سازی انجام گرفت. هم‌چنین نتایج حاصل از محاسبه‌ی بیلان آبی تعداد ۷۵۰۰ حلقه چاه بهره‌برداری در حوضه حاکی از آن است که میزان ۱۱۰۰ میلیون مترمکعب آب از ذخیره‌ی ثابت آبخوان در بازه‌ی ۱۰ ساله کاسته شده است. با توجه به نقشه‌های درون‌یابی تهیه شده بیشترین میزان افت آب زیرزمینی مربوط به مناطق درودزن، رامجرد و شول 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 مرودشت با توجه به آبرفتی بودن سفره‌ی آب زیرزمینی اثر افت سطح آب را می‌توان با فاصله مکانی کم مشاهده کرد. از سوی دیگر در نقشه‌های میان‌یابی ضریب پارامتر هدایت هیدرولیکی بیان‌کننده‌ی این است که میزان افت تراز آبخوان در مناطق شمال‌غرب، مرکز و جنوب شرق حوضه دارای بیشترین مقدار می‌باشد که با ۱۱ درصد خطای نسبی مؤید مدل‌سازی مناسب است. در نهایت با انجام دو سناریوی کاهش ۱۰ و ۳۰ درصدی، میزان تغییرات آب زیرزمینی در طی سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۸ پیش‌بینی شد و نتایج نشان داد که در سناریوی اول بیشترین میزان افت با ۲۴/۸۳ متر و کمترین افت نیز به میزان ۲/۱۸۴ متر است. در سناریوی دوم نیز افت به میزان ۴/۵۲۳ متر کاهش یافته و سطح ایستابی به ۲۰/۳۰ متر رسیده است.

کلمات کلیدی: بیلان آبخوان، سناریوهای مدیریتی، تراز آب زیرزمینی، Modflow، حوضه‌ی مرودشت-خرامه، استان فارس.

آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان مهم‌ترین منبع تأمین آب هستند که در مصارف آب شرب، کشاورزی، صنعت و اکوسیستم‌های مرتبط مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، فقدان کنترل فعالیت‌های انسانی بر روی آن و تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث تخریب این منابع با ارزش گردد. با توجه به پتانسیل و اطمینان‌پذیری منابع آب زیرزمینی جهت تأمین آب بخصوص در مناطق خشک کشور، بهره‌برداری از این منابع در دو دهه‌ی اخیر رشد شایانی داشته است. کشور ایران با قرار گرفتن در ناحیه خشک و نیمه‌خشک در چند سال اخیر با بحران جدی آب مواجه گردیده است که این موضوع باعث گشته که بسیاری از آبخوان‌های کشور در شرایط بحرانی قرار گرفته و جزء دشت‌های ممنوعه اعلام گردند. دشت مرودشت در حوضه آبخیز بختگان یکی از مناطق حاصل‌خیز واقع در استان فارس می‌باشد که عواملی مانند افزایش سطح زیرکشت و خشکسالی‌های اخیر به قدری باعث افزایش برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی شده است که مسئولین را بر آن داشت است که این دشت را از نظر برداشت منابع آب جزء مناطق ممنوعه اعلام کنند (سازمان آب فارس، ۱۳۹۵). در این وضعیت بحرانی ارزیابی منابع آب برای مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح نیاز است. یکی از روش‌های ارزیابی منابع آب استفاده از مدل‌های عددی جریان آب زیرزمینی است که برجسته‌ترین آن مدل Modflow^۱ است (مک دونالد و هابارگ،^۲ ۱۹۹۶). این مدل یک شبیه‌ساز سه بعدی برای جریان آب زیرزمینی از طریق روش عددی تفاضلات محدود است که جریان آب زیرزمینی را تحت شرایط پیچیده و با فرآیندهای گوناگون هیدرولوژیک شبیه‌سازی انجام می‌دهد (ژو و لی^۳، ۲۰۱۱: ۱۸۶، میلست^۴ و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۲۵؛ السلاما^۵ و همکاران، ۲۰۱۱) و در مدیریت سطح آب زیرزمینی و استخراج آن کاربرد دارد (لئو^۶ و همکاران، ۲۰۱۰: ۲۰۵؛ لئو و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۱۴). اولین تحقیق در زمینه مدل‌سازی آب زیرزمینی توسط استلمان^۷ (۱۹۵۶) با به کار بردن روش تفاضلات محدود انجام گرفت و برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان‌های ناپایدار دو بعدی در آبخوان‌های ناهمگن (به ذکر از توسلی، ۱۳۷۷) نیز می‌توان از این روش استفاده کرد. نتایج مثبت حاصل از این مدل باعث شد که اکثر تحقیقات در زمینه مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از شبیه‌سازی مدل Modflow انجام شود. در بعضی تحقیقات دو یا چند کد برای مدل‌سازی برداشت آب زیرزمینی توسط مدل SWAT & Modflow^۸ و برای تخمین میزان کاهش تراز آب زیرزمینی استفاده می‌شود. (وی لیو^۹ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۲۸؛ کودربرت^{۱۰} و همکاران ۲۰۱۹: ۱۹۷؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۰۹؛ مولینا^{۱۱} و همکاران ۲۰۱۹: ۸۶؛ وی و همکاران، ۲۰۱۹: ۶۹) به این شیوه توانستند نشان دهند که خشکسالی هواشناسی باعث خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شود.

1- Modflow
 2- Macdonald
 3- Zhu & lie

4- Milest
 5- Eslama
 6- Leou

7- Estelman
 8- Swot & Modflow
 9- Vi lieu

10- Kouder bert
 11- Moulina

مدل Modflow ممکن است در ترکیب با مدل‌های دیگر در زمینه‌های دیگر منابع آب کارایی‌های بیشتری را نیز نشان دهد. برای مثال بررسی تأثیر کاهش تراز آب زیرزمینی بر روی کیفیت آب نمونه‌ای از آن است که پژوهشگرانی مانند موستازا کلادو^۱ و همکاران (۲۰۱۸) اوندوک^۲ و همکاران (۲۰۱۸)، تیان^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، ژانگ^۴ (۲۰۱۷)، هستر^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، و ویسنر^۶ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از آن رابطه‌ی مستقیمی را بین کاهش تراز آبخوان و افزایش میزان املاح در آب به دست آوردند. بعضی از پژوهشگران دو مدل Modflow و AWHM^۷ را با هم به کار گرفتند تا با استفاده از سه فاکتور مانند تغذیه‌ی آب زیرزمینی، رواناب سطحی و تبخیر و تعرق رابطه‌ی میزان برداشت آب از چاه‌های کشاورزی را با میزان تغذیه‌ی آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف نشان دهند (آلتر^۸ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۶۷؛ بویس^۹ و همکاران، ۲۰۲۰: ۸۲؛ هانس^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۲۹؛ دگراف^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۸۱؛ کاندن^{۱۲} و مکس ول، ۲۰۱۷). پیش‌بینی مدل‌های انتقال و جریان‌های زیرسطحی پیچیده و غیرخطی (یان^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۶۲؛ هو^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۱: ۸۳) تی سیا^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۵: ۷۱)، بررسی مشکلات ناشی از شوری خاک و سطوح ایستابی (انصاری، ۲۰۲۱: ۱۲۱؛ مالریس^{۱۶}، ۲۰۱۲: ۵۶؛ شیشر^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۹) و ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی در رابطه با آب‌های 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 می‌توان بر شمرد. مشخص شدن این کاربردها هم‌زمان با وقوع بحران‌های مختلف آبی برای پژوهشگران ایران فرصتی را فراهم نمود تا از آن برای ارزیابی منابع آب در زمینه‌های گوناگون بهره ببرند. این ارزیابی‌ها نتایج قابل توجهی را درباره‌ی میزان کاهش تراز آب‌های زیرزمینی و علل آن نشان داده‌اند. تحقیقات درباره‌ی میزان کاهش آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف ایران ارقام متفاوتی را ارائه داده است. شهبازی و همکاران (۲۰۲۱: ۱۷) با استفاده از مدل Modflow در دشت ایزه بر طبق سه سناریو اقلیمی مجموعاً ۱/۵ متر کاهش را نشان دادند. در پژوهشی ناظمی و همکاران (۲۰۲۱: ۱۰) نیز با مقایسه‌ی ۳۰ حوضه‌ی آبخیز ایران حوضه‌ی آبخیز بختگان واقع در استان فارس را با کاهش ۷۴ کیلومتر معکب حجم آب زیرزمینی در ردیف پر بحران‌ترین مناطق ایران از نظر کمبود آب معرفی کردند. این محققان برداشت بی‌رویه را در این دشت دلیل اصلی کاهش حجم آب زیرزمینی اعلام کردند. هم‌چنین از دلایل دیگر کاهش تراز آب زیرزمینی به کمبود بارش و وقوع خشکسالی‌های اخیر است که در تحقیقات (رحیمی و همکاران، ۲۰۱۹:

1- Mostaza
2- Oundouc
3- Tiyan
4- Zhang
5- Hester
6- Visner

7- Awhm
8- Alter
9- Bueis
10- Hans
11- Degraph
12- Kanden

13- yan
14- Huo
15- Tiseya
16- Marlis
17- Shisher
18- Kasta

19- Endecs
20- Tiyan

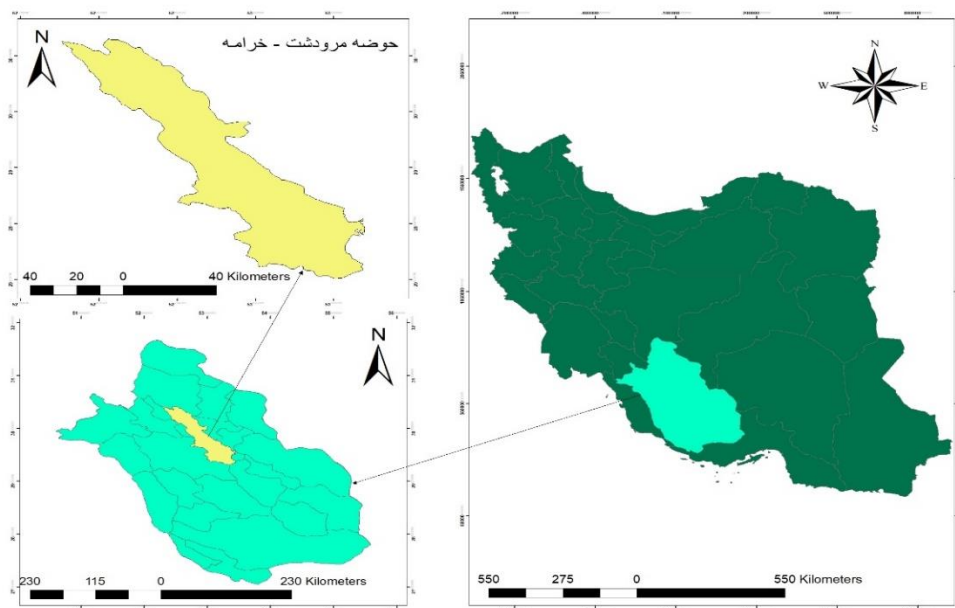
۶۱؛ فاروجی و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۵؛ بیاتی و همکاران، ۲۰۱۶: ۳۱؛ تیموری، ۲۰۲۰: ۱۰۲؛ علیاری و همکاران، ۲۰۱۹: ۷۶) به آن پرداخته اند به طوری که حتی این تشخیص در دشت کرمان تا حداقل ۵۷ درصد تغییرات آب زیرزمینی را توسط شاخص SPI قابل پیش‌بینی و قابل توجیه می‌گرداند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۸). در دشت قزوین نیز نتایج نشان می‌دهد که از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ افت سالانه ۱/۵ متری سطح ایستایی به دلایل کاهش بارندگی، کاهش آب‌های سطحی و برداشت از چاه‌های کشاورزی بیان می‌گردد (میسماریان و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۱). در هر حال ابعاد بحران آب تنها به کمبود آب ختم نشده و دامنه‌ی اثرات آن به فرونشینی و تخریب زمین‌ها کشیده می‌شود که نمونه‌ی آن در منطقه شول واقع در دشت مرودشت به اثبات رسیده است (رهنمایی و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۲) و همچنین می‌توان به پژوهش آندریانی و همکاران (۲۰۱۹: ۵۲) در رابطه با فرونشست زمین اشاره نمود. 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 حوضه‌ی مرودشت - خرامه 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، دشت مرودشت در بازه‌ی زمانی سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹ بر اساس یک روش کاملاً تئوریک توسعه‌ی مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی، مقدار تغییرات قائم آبخوان بر طبق تغییرات سلولی شبکه‌ی تفاضل محدود با استفاده از مدل Modflow جریان به صورت غیرخطی تهیه شد؛ و به منظور تعیین عامل اساسی به وجودآورنده‌ی 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، رابطه‌ی رگرسیونی نقاط مورد بررسی واقع گردید. با ترکیب اثرات برداشت بی‌رویه‌ی آب بر سناریوهای محتمل، میزان کاهش تراز آبخوان برای سال‌های آینده در مناطق مختلف این حوضه در قالب یک مدل پیش‌بینی و تعیین شد تا از این طریق بتوان درجات مختلف بحران را در بخش‌های مختلف حوضه نشان داد و در نهایت بتوان برای جلوگیری از گسترش مناطق بحرانی در سال‌های آینده راهکارهای مدیریتی مناسب در منطقه برنامه‌ریزی و اجرا کرد.

۲-۱- محدوده‌ی مورد مطالعه

محدودی مرودشت- خرامه واقع در حوضه‌ی آبریز دریاچه بختگان در استان فارس می‌باشد که از نظر زمین‌شناسی در پهنه‌ی تکتونیکی رشته کوه‌های زاگرس چین‌خورده قرار دارد. آبخوان مرودشت خرامه در مختصات جغرافیایی $25^{\circ} 17' 17''$ تا $26^{\circ} 44' 53''$ طول شرقی $89^{\circ} 18' 29''$ تا $71^{\circ} 26' 30''$ عرض شمالی واقع شده است. مساحت کل این محدوده‌ی مطالعاتی $3926/1$ کیلومتر مربع بوده که از این میزان $2102/70$ کیلومترمربع دشت و $1823/4$ کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل داده است. این ارتفاعات دارای امتداد شمال‌غربی، جنوب‌شرقی است. دشت‌های این حوضه که نواحی پست بین ارتفاعات را تشکیل می‌دهند، غالباً از روند ارتفاعات تبعیت می‌کنند. این حوضه دارای میانگین بارش سالانه $280/35$ میانگین سالانه درجه حرارت $17/5$ سانتی‌گراد می‌باشد. از نظر هیدرولوژی در این حوضه‌ی رودخانه‌ی کر، یک رودخانه اصلی و دائمی می‌باشد که از ارتفاعات شمال‌غرب حوضه سرچشمه گرفته و طول آن تا دریاچه بختگان $351/5$ کیلومتر و مساحت آبخوان کر $1470/540$ کیلومترمربع است. بر اساس آماربرداری 1398 تعداد 7500 چاه بهره‌برداری و تعداد 81 چاه مشاهده‌ای در حوضه وجود دارد (سازمان آب فارس، 1398). رودخانه‌ی کر در آبخوان مرودشت پس از تلاقی با رودخانه‌ی سیوند در نهایت به دریاچه بختگان سرازیر می‌شود. تراکم شبکه‌ی آبراهه‌ها نیز در سطح حوضه‌ی آبریز مورد مطالعه بسیار متفاوت است. در رسوبات نرم و فرسایش‌پذیر، مثل سازندهای گروه فارس، پابده و گورپی تراکم آبراهه‌ها بیشتر، جریان‌های سطحی و موقتی در منطقه دارای بستری پهن هستند و اغلب آن‌ها به صورت همگرا از حاشیه به مرکز دشت جریان یافته و در نهایت به سدهای درودزن و سیوند واقع در منطقه سرازیر می‌شوند. ولی در سطح سازندهای سخت از تراکم کمتری برخوردار هستند. بستر این رودخانه 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. توسعه و تراکم فشرده شبکه‌ی آبراهه‌ها در سرشاخه‌های شمال‌غربی و غرب حوضه‌ی رودخانه‌ی کر در حد فاصل تنگ براق و دشت درودزن به علت گسترش رسوبات نرم و فرسایش سازند گورپی، سبب ایجاد ناحیه‌ای بسیار ناهموار شده، موجب انتقال حجم زیادی از رسوبات به دریاچه‌ی سد درودزن می‌گردد. چین‌خوردگی‌های باریک و فشرده و بهم‌ریختگی طبقات و گسل‌های تراستی متعدد و مخروط‌افکنه‌های فراوان مانند دشتک و گنبدهای نمکی واقع در شمال‌شرق درودزن که حاصل رسوبات سازند هرمز در منطقه است از خصوصیات بارز ژئومورفولوژیکی در حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی کر می‌باشد. در شمال حوضه سازندهای آهکی گسترش غالب داشته و اغلب پرتگاه‌ها و ستیغ کوه‌های بلند را تشکیل داده است که مهم‌ترین آن تنگ براق است، که حاصل فرسایش آب‌های روان می‌باشد (نبوی، 1375). در کنار طاقدیس‌های بلند و مرتفع حوضه، ناودیس‌های کشیده و عریضی نیز وجود دارند که به‌وسیله‌ی رسوبات حاصل از فرسایش ارتفاعات اطراف پر شده

و دشت‌های این حوضه را به وجود آورده‌اند، که یکی از گسترده‌ترین دشت‌های حاصل‌خیز ایران به نام مرو دشت در این حوضه قرار دارد (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت حوضه‌ی آبریز مرو دشت - خرامه
Figure (1): Location of Marvdasht-Kharameh basin

۲-۲- روش تحقیق

۲-۲-۱- مواد و روش

در پژوهش حاضر، از داده‌ها و اطلاعات منطقه مورد مطالعه که شامل اطلاعات مربوط به ۸۱ حلقه چاه پیزومتری برای شبیه‌سازی مدل مادفلو و ۷۵۰۰ حلقه چاه بهره‌برداری برای تخمین میزان تخلیه‌ی آب زیرزمینی در بازه‌ی زمانی (۲۰۰۸-۲۰۱۸) از سازمان مدیریت منابع آب استان فارس جمع‌آوری شد و مورد استفاده قرار گرفت (آماربرداری سازمان آب فارس، ۱۳۹۸). برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مدل عددی Modflow در محیط نرم‌افزار GIS^۱ 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 تأثیرپذیری را دارند تعیین شد. برای تهیه مدل مفهومی، محدوده‌ی دشت به صورت فایل GIS^۲ وارد نرم‌افزار شد. سپس خصوصیات دیگر آبخوان مانند مرزهای تراوا و ناتراوا که با استفاده از پارامترهای خواص لیتولوژیکی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و مشخصات

1- Ground Modeling system

2- Geographic Information System

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 مرزهای تروا و ناتروا در آبخوان تهیه شد. مرزهای شبیه‌سازی شده در این مدل شامل مرز بدون جریان برای مرزهای شرق، غرب و جنوب آبخوان و مرزهای جریان وابسته به بار هیدرولیکی برای مرزهای ورودی در شمال، شمال غرب و خروجی در جنوب شرق آبخوان تعیین شد در ادامه با استفاده از DEM^۱ سی متری استان فارس نقاط ارتفاعی (توپوگرافی سطح زمین) تهیه شد. سپس نقاط ارتفاعی را به نرم‌افزار GMS وارد کرده و در نهایت با استفاده از روش کریجینگ نقشه‌ی پهنه‌بندی توپوگرافی سطح زمین تهیه شد. به جهت توسعه‌ی مدل مفهومی، نیاز به تخمین دقیقی از تغییرات ضخامت آبخوان (توپوگرافی سنگ کف) در حدود ناحیه‌ی 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 محدوده‌ی 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 GMS شد. سپس به روش میان‌یابی کریجینگ، نقشه‌ی پهنه‌بندی ضخامت سنگ کف با کم کردن ضخامت آبخوان از لایه‌ی توپوگرافی سطح زمین تهیه شد.

در ادامه، اطلاعات جمع‌آوری شده در مدل مفهومی شامل مقادیر پارامترهای فیزیکی (ضخامت لایه‌ی آبدار، ضریب تخلخل و غیره) و هیدرودینامیکی (ضریب هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال) در آبخوان و هم‌چنین مقادیر تغذیه (نفوذ ناشی از بارش و آب برگشتی ناشی از مصارف) و تخلیه از آبخوان (پمپاژ چاه‌ها) به مدل ریاضی منتقل شد و هر کدام توسط نماد مختص به خود نمایش داده شد. 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 نرم‌افزار می‌شود. در مدل Modflow این فرضیات با اجرا کردن مرحله‌ی 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 مرحله‌ی صحت‌سنجی،

1- Digital Elevation Model

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 تغذیه‌ی سطحی، پارامتر شبکه‌ی آبراه‌ای، 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 (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین مربع خطا (RMSE) خطای نسبی (NRMSD) اشاره کرد. معادلات مربوط به هر کدام به قرار معادلات (۱ تا ۴) می‌باشد: که در این روابط n تعداد دوره‌های مشاهداتی، Z^* مقادیر شبیه‌سازی و Z مقادیر مشاهداتی هستند.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n [Z_i^* - Z_i]}{n} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i^* - Z_i|}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{[Z_i^* - Z_i]^2}}{n} \quad (3)$$

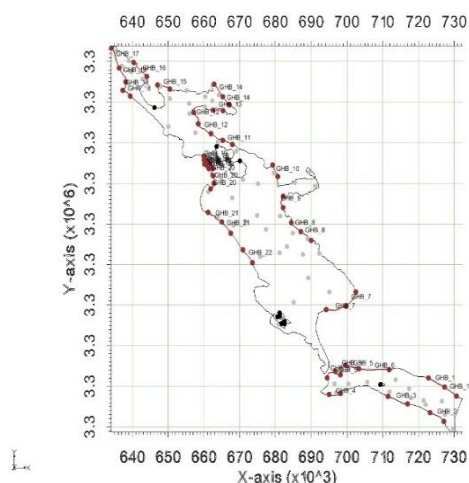
$$NRMSD = \frac{RMSE}{Y_{max} - Y_{min}} \quad (4)$$

پس از تهیه‌ی مدل آبخوان منطقه‌ی مورد مطالعه، محاسبات لازم در نرم‌افزار GMS و کد Modflow انجام شد. طول دوره ده ساله (۲۰۰۸-۲۰۱۸) بر پایه‌ی 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 بازه‌ی 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 محدوده‌ی 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 صحت‌سنجی مدل واسنجی شده در داده‌های بلندمدت 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 تغذیه‌ی آب زیرزمینی یا نرخ نشت از رودخانه) از بسته رودخانه مادفلو استفاده شد. در این بسته، تبدلات 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 تهیه‌ی مدل‌سازی کمی اقدام به پیش‌بینی شرایط آینده تراز آب زیرزمینی با استفاده از سناریوهای کاهش ۱۰ و ۳۰ درصد در بازه‌ی زمانی (۲۰۱۸-۲۰۲۸) مدل مورد برآزش قرار گرفت.

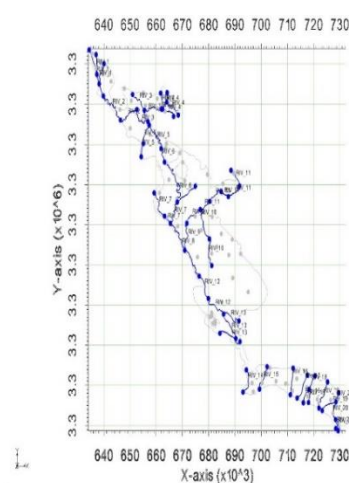
۳- یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از شبیه‌سازی کاهش تراز آب زیرزمینی حوضه‌ی مرودشت-خرامه نشان داد، که این مدل با قدرت تغییرپذیری مکانی بالا تأثیر پارامترهای مختلف را بر تراز آب زیرزمینی در نقاط مختلف آبخوان بخوبی مشخص می‌کند. در منطقه‌ی مورد مطالعه تعداد ۷۵۰۰ حلقه چاه بهره‌برداری و ۸۱ چاه پیزومتری با کاربری‌های متفاوت کشاورزی، شرب و صنعت قرار گرفته است که به جز در نواحی جنوبی دشت در سایر نقاط پراکنده شده‌اند. تمرکز این چاه‌ها در نواحی مرکزی به دلیل زمین‌های مسطح و در نواحی شمال غربی به دلیل بالاتر بودن سطح آب‌های زیرزمینی، بیشتر است. در ادامه، با توجه به نقشه‌ی درون‌یابی شبکه‌ی آبراهه‌ها و مرزهای تراوا و ناتراوا (شکل ۳ و ۲) از روش پایه‌ای که در آن موازی بودن خطوط هم‌مقدار در حاشیه‌ی آبخوان با مرزها بیانگر مرزهای تراوا است برای صحت‌یابی استفاده شد و نتایج نشان داد، که با توجه به قدرت تغییرپذیری مکانی بالا تأثیر پارامترهای مختلف بر تراز آب زیرزمینی در نقاط مختلف آبخوان با میزان بار هیدرولیکی رابطه‌ی مستقیم دارد.



شکل (۳): شبکه‌ی آبراهه

Figure (3): Waterway network

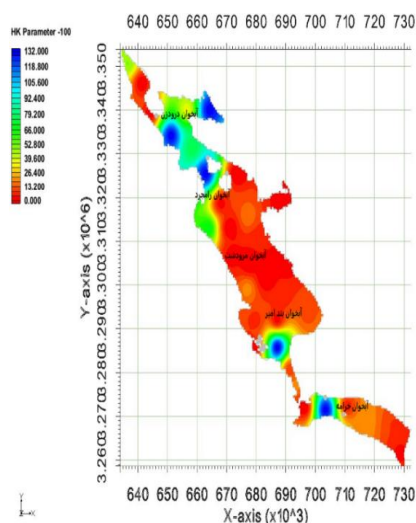


شکل (۲): مرزهای تراوا ناتراوا

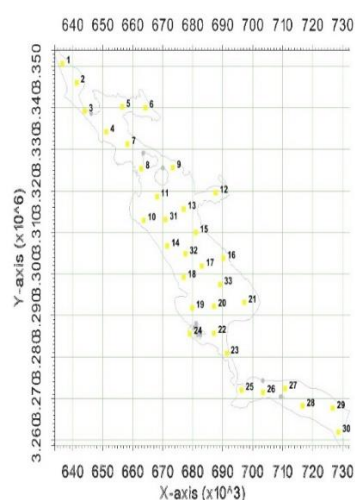
Figure (2): Borders of Trava Natrava

با استفاده از میان‌یابی چاه‌های مشاهداتی پارامترهای هدایت هیدرولیکی افقی، ناهمسانگردی افقی، تغذیه از سطح، آبدهی ویژه، مرزهای تراوا و شبکه‌ی آبراهه‌ای بهینه‌سازی شدند. هم‌چنین با توجه به نقشه‌ی هدایت هیدرولیکی آبخوان عمق سنگ کف در قسمت‌های مختلف متفاوت و از ۱۵ متر تا ۵۸۰ متر متغیر است و به

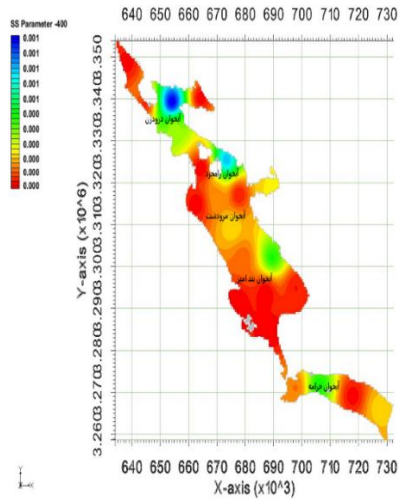
طور کلی عمق زیاد سنگ کف در مراکز دشت است. هم‌چنین در بازدیدهای میدانی نیز به وضوح می‌توان این مسئله را مشاهده کرد که اکثر چاه‌هایی که در امتداد قنات‌های قدیمی در حاشیه ارتفاعات زده شده است به دلیل پایین رفتن سطح آبخوان و بالا بودن عمق سنگ کف در این مناطق خشک شده‌اند. به طوری که نتایج واسنجی تغذیه در مدل نیز نشان می‌دهد که مدل در نقاط پر شیب دشت نتوانسته نوسانات سطح آب را به خوبی نشان دهد و در نقاط خروجی آب نیز واریانس خطای مدل بالا است. بنابراین به نظر می‌رسد شیوهی حل خطی این مدل، قادر به شبیه‌سازی این بخش از آبخوان نبوده است. با توجه به نقشه‌های منطقه در مناطق مرکزی مانند رامجرد شرقی و غربی دشت چاه‌های بهره برداری تعداد قابل ملاحظه‌ای را در این مناطق دارا می‌باشند و افت تراز آب زیرزمینی زیاد نیز اتفاق افتاده است. نکته قابل توجه در این مورد این است که، میزان افت تراز آبخوان در رسوبات ریزدانه‌ای مناطق مرکزی دشت بالا بوده است و نشان‌دهنده‌ی این است که بحران در این قسمت از حوضه در حال پیشروی است. در نهایت در آبخوان مرودشت با توجه به آبرفتی بودن سفره‌ی زیرزمینی اثر افت سطح آب را می‌توان با فاصله‌های مکانی کم مشاهده کرد. با توجه به عدم یکنواختی میزان کاهش تراز آب زیرزمینی در دشت مرودشت به دلیل تغییرات در سنگ کف، ایجاد شکستگی‌های وسیع و درز و ترک‌های ناشی از کاهش آب زیرزمینی در سطح زمین محتمل است و این پدیده باعث خسارت جبران‌ناپذیر می‌شود (شکل ۴ و ۱۱).



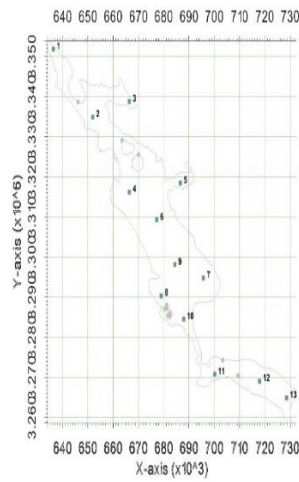
شکل (۵): میان‌بایی پارامتر هدایت هیدرولیکی افقی
Figure (5): Intermediate horizontal hydraulic conductivity parameter



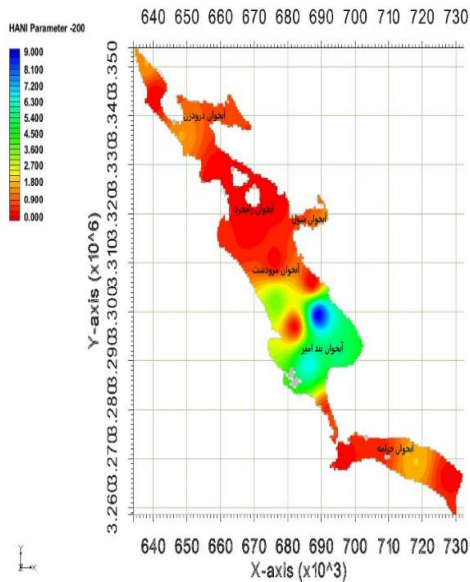
شکل (۴): کلیدی پیلوت‌های پارامتر هدایت هیدرولیکی
Figure (4): Key numbers of hydraulic conductivity parameter pilots



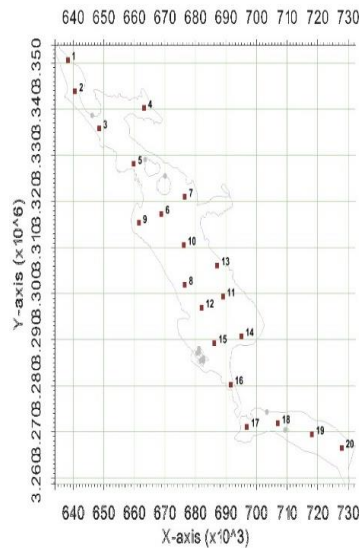
شکل (۷): توزیع پیوسته پارامتر تغذیه از سطح
Figure (7): Continuous distribution of the feed parameter from the surface



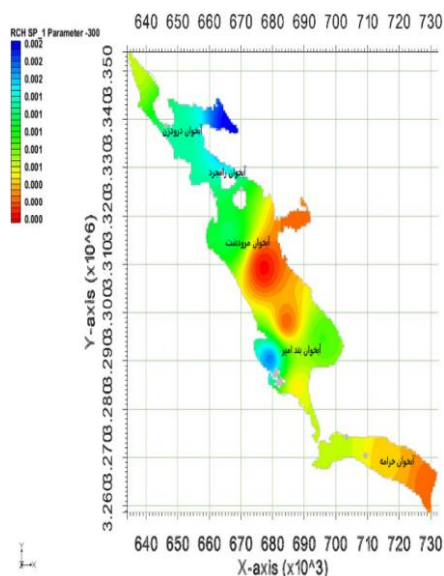
شکل (۶): اعداد کلیدی پایلوت‌های پارامتر تغذیه از سطح
Figure (6): Key numbers of surface feeding parameter pilots



شکل (۹): میان‌یابی ناهمسانگردی افقی هدایت هیدرولیکی
Figure (9): Horizontal hydraulic conductivity anisotropy interpolation

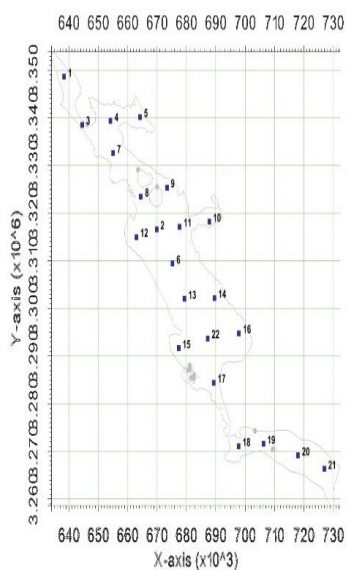


شکل (۸): اعداد کلیدی پایلوت‌های ناهمسانگردی افقی
Figure (8): Key numbers of horizontal anisotropy pilots



شکل (۱۱): میان یابی پارامتر آبدهی ویژه

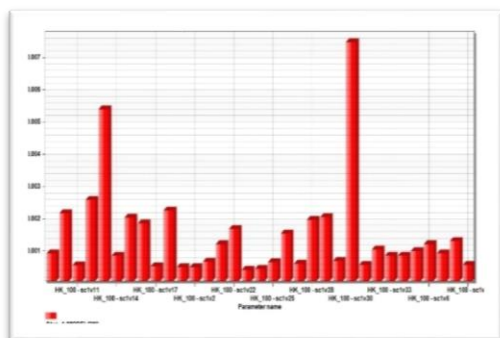
Figure (11): Specification of specific discharge parameter



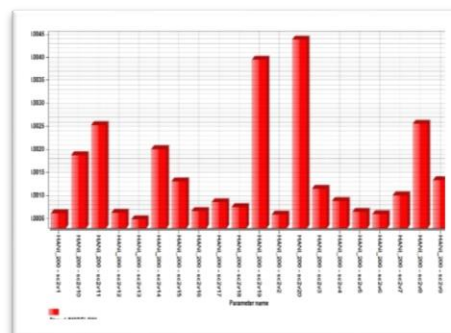
شکل (۱۰): اعداد کلیدی پایلوت‌های آبدهی ویژه

Figure (10): Key numbers of special discharge pilots

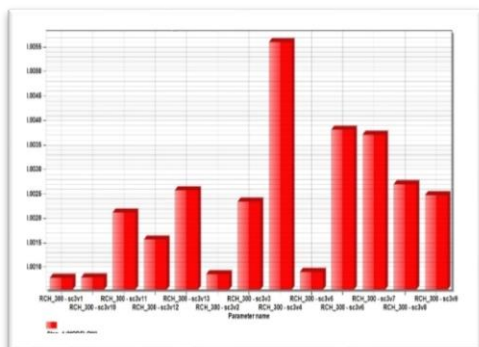
با توجه به نقشه‌های میان‌یابی که در بالا نشان داده شده است (شکل ۱۱ و ۴) ضریب پارامتر هدایت هیدرولیکی بیان‌کننده‌ی این است که میزان افت تراز آبخوان در مناطق شمال‌غرب، مرکز و جنوب شرق حوضه که با رنگ آبی نشان داده شده است دارای بیشترین مقدار می‌باشد. بنابراین میزان حساسیت پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی افقی به دلیل بالا بودن میزان چاه‌های بهره‌برداری که تعداد آن به ۷۵۰۰ حلقه چاه تا آخرین سرشماری یعنی سال ۱۳۹۸ در حوضه است نشان‌دهنده‌ی برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی توسط چاه‌های کشاورزی که کاملاً گویای گسترش و بحرانی بودن این مناطق به دلیل افزایش برداشت از آب‌زیرزمینی است (شکل ۱۲ و ۱۷).



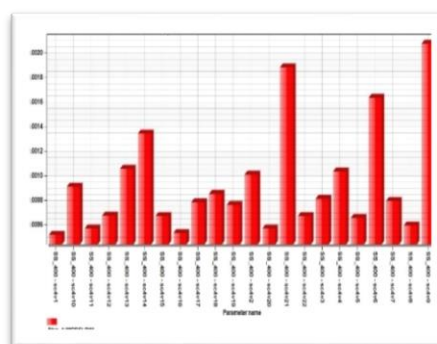
شکل (۱۳): تحلیل حساسیت پیلوت‌های هدایت هیدرولیکی
Sensitivity analysis of calibration parameters



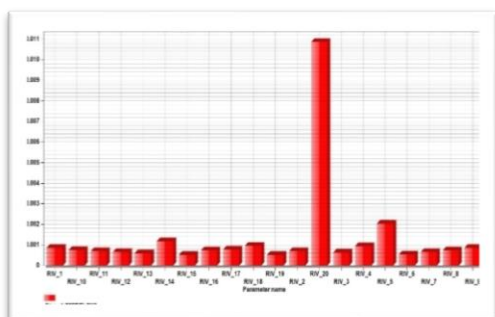
شکل (۱۲): تحلیل حساسیت پیلوت‌های ناهمسانگردی
Sensitivity analysis of calibration parameters



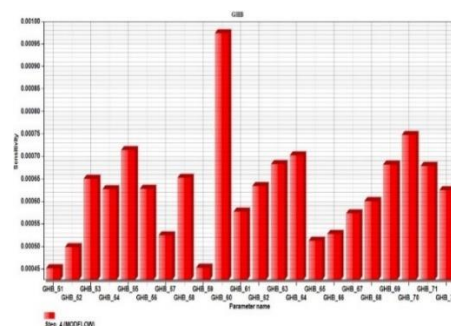
شکل (۱۵): تحلیل حساسیت پارامتر تغذیه از سطح
Sensitivity analysis of calibration parameters



شکل (۱۴): تحلیل حساسیت پیلوت‌های آبدهی ویژه
Sensitivity analysis of calibration parameters



شکل (۱۷): تحلیل حساسیت شبکه‌ی آبراه‌های
Sensitivity analysis of calibration parameters



شکل (۱۶): تحلیل حساسیت مرزهای تراوا
Sensitivity analysis of calibration parameters

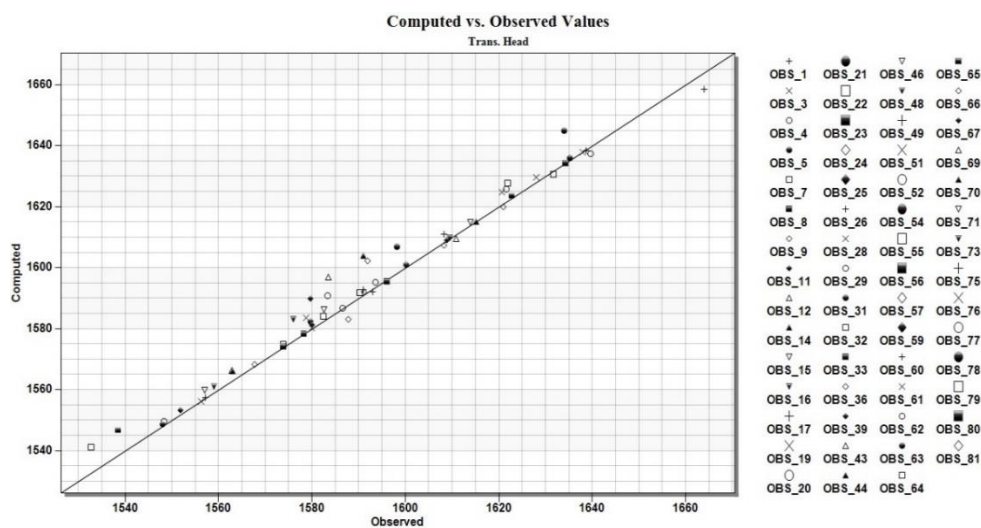
به منظور بررسی اهمیت هر یک از پارامترهای واسنجی و استخراج سهم هر یک در کاهش خطای کل از تحلیل حساسیت در شبیه‌سازی مدل استفاده شد که نتایج خروجی پارامترهای موثر در واسنجی آبخوان مرودشت واقع در استان فارس در اشکال بالا (شکل ۱۲ و ۱۷) نشان‌دهنده‌ی تأثیر حد‌اکثری تغذیه از سطح و هم‌چنین تأثیر اندک هدایت هیدرولیکی افقی بود. هم‌چنین با توجه نتایج مرحله‌ی واسنجی بر آبدهی ویژه، پارامترهای مرزهای تراوا و شبکه‌ی آبراهه‌ای، دارای بیشترین اثر کاهش خطا در آخرین مرحله‌ی تکرار بدست آمد که بر همین اساس، و با ویرایش‌های صورت گرفته بر مرزهایی با بار هیدرولیکی پویا در حدود پارامترهای با حساسیت زیاد، خطای کل واسنجی در آخرین مرحله از مراحل چهارگانه واسنجی به حداقل مطلوب کاهش یافت که این رقم با تقسیم RMSE معادل با ۲/۳۴ بر حدود ۲۲/۸۳ متر، متوسط اختلاف بیشینه از کمینه با تعداد ۸۱ حلقه چاه مشاهداتی در منطقه، معادل ۱۱ درصد مدل‌سازی مناسب و نتیجه مطلوب حاصل شد (جدول ۱).

جدول (۱): میانگین خطا در واسنجی ناپایدار

Table (1): Mean error in unstable calibration

ارزش	میانگین خطا در واسنجی
-۱/۱۸	خطا کلی
۱/۷۵	خطای مشاهده ای
۲/۳۴	خطای نسبی

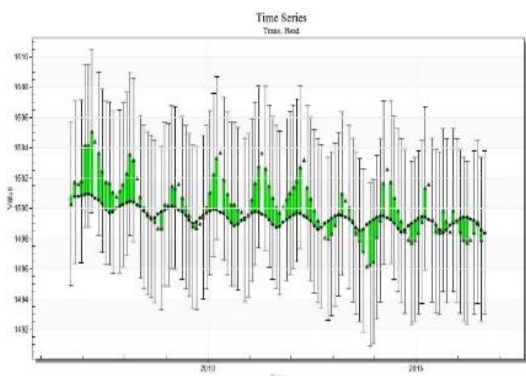
هم‌چنین شکل ۱۸ نیز مقادیر ضریب تشخیص و معادله خط برازش شده بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد. در این شکل هر کدام از ۸۱ حلقه چاه مشاهداتی توسط یک نماد مشخص شده‌اند. داده‌های مشاهداتی (محور افقی) و محاسباتی (محور عمودی) ترسیم شده است که میزان همبستگی بالایی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی دیده می‌شود و نشان‌دهنده‌ی مدل‌سازی مطلوب می‌باشد.



شکل (۱۸): خطای مقادیر محاسباتی در مقابل داده‌های مشاهداتی در مرحله صحت‌سنجی

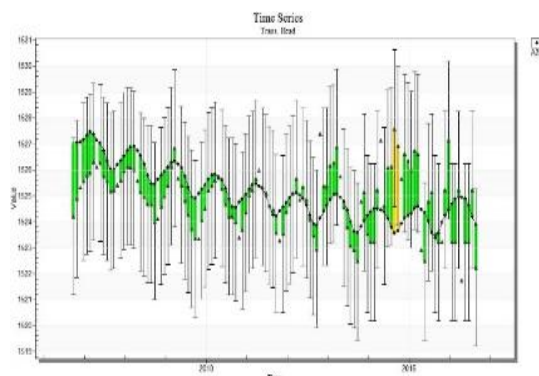
Figure (18): Error of computational values versus observational data in the validation stage

نتایج مدل‌سازی در تعداد ۴ حلقه چاه مشاهداتی که به صورت تصادفی و با پراکندگی جامع در قسمت‌هایی از سطح دشت که دارای کاهش تراز آب و بیشترین تعداد چاه بهره‌برداری قرار دارد 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 ۱۹ و ۲۰).



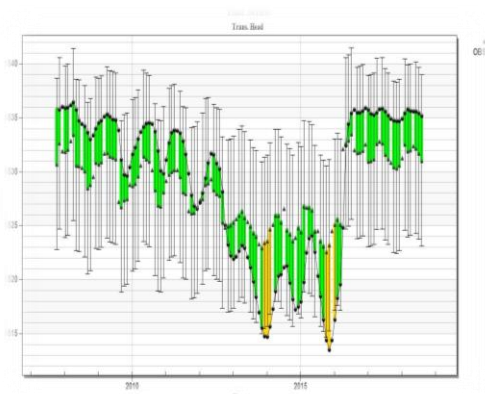
شکل (۲۰): خطای واسنجی در چاه شماره ۳۰

Figure (20): Steady state wells 30

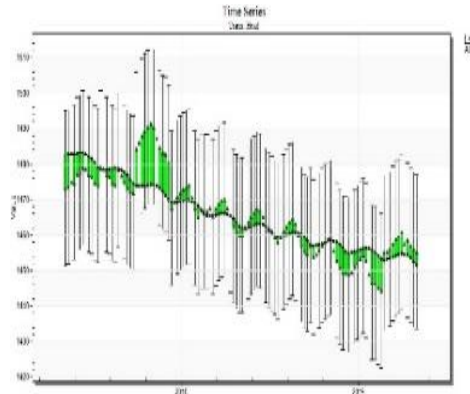


شکل (۱۹): خطای واسنجی در چاه شماره ۲۲

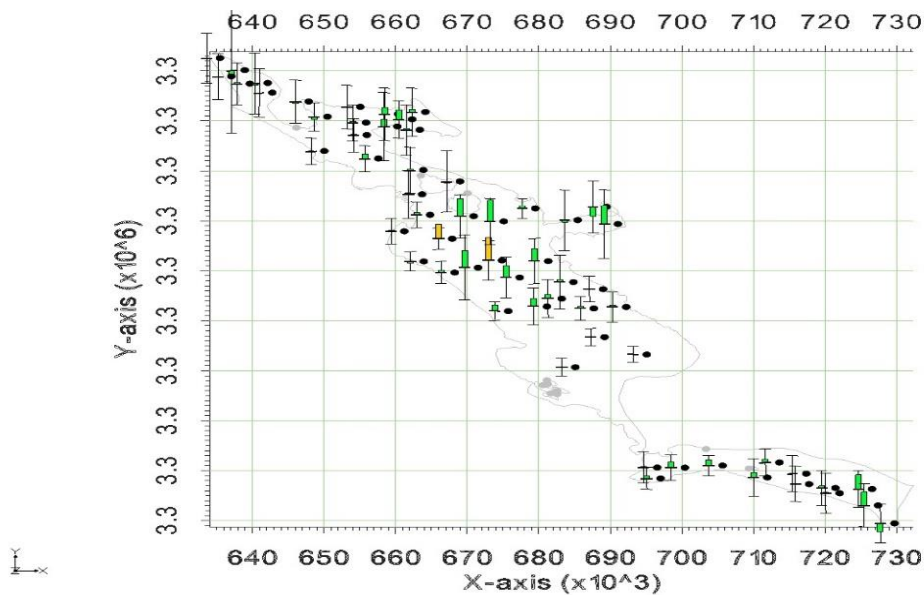
Figure (19): Steady state wells 22



شکل (۲۲): خطای واسنجی در چاه شماره ۵۳
Figure (22): Steady state well 53



شکل (۲۱): خطای واسنجی در چاه شماره ۷۲
Figure (21): Steady state wall 72



شکل (۲۳): نمایش خطای واسنجی در حالت پایدار در موقعیت چاه‌های مشاهداتی
Figure (23): Steady state calibration error in the position of observation wells

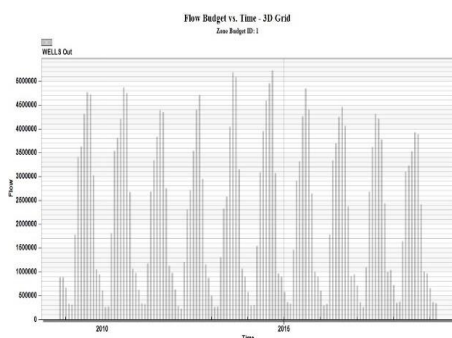
۴- تحلیل نتایج

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 رنجبر و احتشامی (۲۰۱۹) اشاره کرد. با این حال ایجاد یک مدل تصمیم‌ساز نیز برای نمونه در مقاله‌ی صفاری و همکاران (۱۳۹۵: ۹۳) ترکیب روش‌های محاسباتی

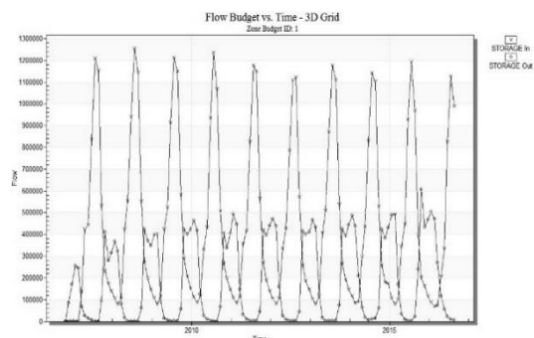
سنجش از دور بدون اعتباریابی احتمالاتی بوده است. هم‌چنین رشوند و همکاران (۲۰۱۹) از یک روش معادلاتی به منظور ایجاد یک امکان پیش‌بینی استفاده کردند، با این حال در نهایت آنچه برای مدیران اجرایی کارآمد می‌باشد، ترکیب پارامترهای موثر بر کاهش تراز آب با شرایط پیش‌بینی احتمالاتی شاخص محور می‌باشد. در این مطالعه و با بررسی پژوهش‌های اخیر در محدوده‌ی دشت مرودشت، اقدام به تهیه یک شبیه‌ساز تصمیم‌گیری بر پایه‌ی روش‌های خطی بر روی مدل کاهش تراز آب زیرزمینی انجام شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی کمی آبخوان مرودشت نشان داد که پارامتر ناهم‌سان‌گردی هدایت هیدرولیکی، در نواحی مرکزی آبخوان دارای بیشترین مقدار است که می‌توان به آبخوان منطقه‌ی شول و بندامیر اشاره کرد (شکل ۸). در حالی که هدایت هیدرولیکی افقی، در چهار پایلوت با توزیع‌های جنوب، مرکز و شمال دارای بیشترین مقدار می‌باشد. بیشینه مقدار هدایت هیدرولیکی افقی در آبخوان‌های مناطق درودزن، رامجرد، بندامیر، خرامه کاملاً مشهود است (شکل ۴). در نهایت دو پارامتر تغذیه از سطح و آبدهی ویژه به ترتیب در نواحی میانی و شمالی آبخوان به دلیل قرارگیری سدهای درودزن، سیوند در آن مناطق دارای ارزش بالاتری بودند (شکل‌های ۶ و ۱۰). نکته‌ی قابل توجه از منظر توزیع بیشینه مقادیر این پارامترها مشخص‌کننده‌ی 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 رامجرد می‌باشد. بنابراین تمایل به تأمین آب از دست رفته در ازای افت صورت گرفته با این پارامترهای نهایی قابل انتظار بود.

در ادامه نتایج حاصل از محاسبه بیلان آبی در آبخوان مرودشت که در طی بازه زمانی (۱۳۸۷-۱۳۹۸) انجام گرفت حاکی از آن است که میزان ۱۱۰۰ میلیون مترمکعب آب از ذخیره‌ی ثابت آبخوان کاسته شده است (شکل ۲۴ و ۲۵) در نتیجه مقدار آب ورودی به ناحیه علاوه‌بر وابستگی به شرایط فیزیکی آبخوان مرودشت، 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.



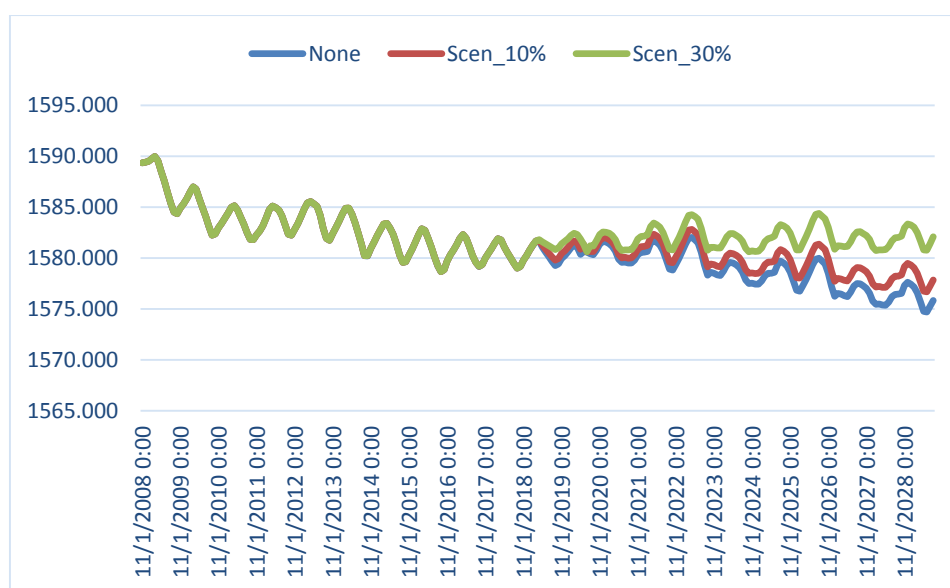
شکل (۲۵): حجم برداشت شده توسط چاه‌های بهره‌برداری
Figure (25): The amount of volume harvested



شکل (۲۴): حجم ذخیره ورودی و خروجی در دوره‌ی مطالعاتی
Figure (24): Amount of input and output storage

نمودار شکل ۲۶ سه سناریوی اجرای ۱۰ ساله مدل جریان آب زیرزمینی و مقدار متوسط سالانه افت آب زیرزمینی در محدوده‌ی دشت مرودشت را 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 درصد، ۳۰ درصد کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان مشاهده کرد که روند تغییرات در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۸ بر خلاف دوره‌ی 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 بی بازگشت پتانسیل تغذیه‌ی سفره آب زیرزمینی بازمی‌گردد. شاخص محاسباتی نشان می‌دهد که افزایش تخریب ساختار عمودی زمین درست در مناطقی رخ داده است که در سناریوهای پیش‌بینی به عنوان زون‌های پر خطر و با ممنوعیت بهره‌برداری 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 نقطه‌ی غیرقابل بازگشت خواهد شد. نقطه‌ی شکست در هر منطقه شرایطی است که بافت آبرفتی تا حد زیادی پتانسیل بازبایی 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 دشت مرودشت نیز به علت آنومالی‌های اقلیمی در چند سال اخیر، به وضع برداشت‌های مازاد و عموماً خارج از پروانه چاه‌های بهره‌برداری افزایش یافته است که دوره‌ی 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 (۲۶): سناریوی پیش‌بینی کاهش برداشت آب در آبخوان مرودشت- خرامه

Figure (26): Predictive scenario of water withdrawal reduction in Marvdasht-Kharameh aquifer

۵- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی آبخوان مرودشت- خرامه 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، نشان‌دهنده‌ی این است که بخش‌های میانی دشت مانند دشت رامجرد و بندامیر 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.

هم‌چنین با بررسی سناریو کاهش ۱۰ و ۳۰ 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.

نتایج نشان داد که در سناریوی اول بیشترین میزان افت با $24/83$ متر و کمترین افت نیز به میزان $2/184$ متر است. در سناریوی دوم نیز افت به میزان $4/523$ کاهش یافته و سطح ایستابی به $20/30$ متر رسیده است. در آبخوان مرودشت با توجه به آبرفتی بودن سفره زیرزمینی اثر افت سطح آب را می‌توان با فاصله مکانی کم مشاهده کرد.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در دشت مرودشت، میزان برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی رابطه‌ی مستقیمی با افت آب‌های زیرزمینی دارد بنابراین لازم است تا در مصرف آب‌های زیرزمینی به خصوص در زمینه‌ی کشاورزی نظارت بیشتری صورت گیرد و میزان بهره‌برداری متناسب با میزان تغذیه باشد 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 هم‌چنین می‌توان از مدل‌های شبیه‌ساز تغییرات عمودی ساختار زمین با لحاظ تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه رازی و شرکت مدیریت منابع آب ایران برای فراهم کردن امکانات و داده‌های لازم به منظور انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

۵-منابع

- 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.
- Andaryani, S., Nourani, V., Trolle, D., Dehghani, M., Mokhtari Asl, A. (2019). Assessment of land use and climate change effects on land subsidence using a hydrological model and radar technique. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124070>.
- Ansari, M.; Jabari, I. Sargordi, F; (2021). Spatial modeling of water quality parameters based on geological formations; *Journal of Hydrogeomorphology*, 8 (26), 137-117.
- Bayat Varkeshi, M., Farahani Dastjani, M., & Ghabaei Sough, M. (2018). Effect of meteorological drought on groundwater resources (Case 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. <https://doi.org/10.3133/tm6A60>.
- 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, <https://doi.org/10.5066/P9P8I8GS>.
- 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. <https://doi.org/10.5194/hess-19-823-2015>.
- 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.
- Hanson, R.T., Boyce, S.E., Schmid, W., Hughes, J.D., Mehl, S.W., Leake, S.A., Mad-dock III, T, Niswonger, R.G., (2014b). 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.
- Teymouri, M., & Asadi Nalivan, he. (2020). Assessing the Impact of Land Use and Geology on Groundwater Quality Using Multivariate Statistical Models and Geostatistical Analysis (Case Study: Part of the Hubble River Basin), *Journal of Hydrogeomorphology*, 7 (25): 97-121.
- 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.
- Ondeck, N.T., Bohl, D.D., Bovonratwet, P., McLynn, R.P., Cui, J.J., Shultz, B. N. and Grauer, J.N. (2018). Discriminative ability of commonly used indices to predict adverse outcomes after poster lumbar fusion: a comparison of demographics, ASA, the modified Charlson Comorbidity Index, and the modified Frailty Index. *The Spine Journal*, 18(1), 44–52.
- 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.
- Li L, Xia J., Xu C.Y., Chu, J., Wang, R. (2009). Analyse the sources of equifinality in hydrological model using glue methodology, IAHS publication, 331(4):130-138.
- 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. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-232>.
- Liu, W., Bailey, R.T., Andersen, H.E., Jeppesen, E., Park, S., Thodsen, H., Nielsen, A., Wei, X., Bailey, R.T., (2019). Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW, *Water*, 11, 1576.
- 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. 83-875.

- MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Dochartaigh, B.E.O. & Taylor, R.G. (2012). Quantitative maps of groundwater resources in Africa. *Environ. Res. Lett.* 7, 024009.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135702>.
- 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. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1590583>.
- 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.
- 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.
- Mesmarian, Z., Bouani, A., Pir Bazari, S.J. (2016). The effect of climate change on the groundwater balance of Shahrekord plain in future periods. *Ecohydrology*, 3(2):233-242 (In Persian).
- Mohammadi S, Naseri F, Nazaripour H (2017). Investigation of temporal changes and the effect of meteorological drought on groundwater resources of Kerman plain using standard precipitation indicators (SPI) and groundwater resources (GRI). *Ecohydrology*, 5(1):22-11 (In Persian).
- Mirlas, V. (2012). Assessing soil salinity hazard in cultivated areas using MODFLOW model and GIS tools: A case study from the Jezre'el Valley. *Agricultural Water Management* 109: 144–154.
- Mohammadi, A., karami. G., Dolati Ardejani, F. (2015). Aquifer management study using PMWIN model, case study: Shirvan aquifer, *Water Resources and Development*, 1 (3): 67-75 (in Persian).

- Nazemi, Ali, Ashraf, Samaneh, AghaKouchak, Amir (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran [nature.com/scientificreportshttps://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y](https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y), www.nature.com/reprints.
- 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.
- Rahimi, R., Rahimi, M. (2019). Spatial and temporal analysis of climate change in the coming years and comparison of micro-scale methods of SDSM, LARS-WG and artificial neural network in Khuzestan province. *Ecohydrology*, 5(4):1174-1161 (In Persian)
- Rajabi Khamseh, K,A. Nikbakht Shahbazi, H. Fathian1, and N. Zohrabi1 (2021). Izeh Plain Subsidence Modeling Using MODFLOW Mathematical Code, *Iran-Water Resources Research*, 16(4): 112-126, Winter 2021 (IR-WRR).
- 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, 68–79.
- 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 croplad 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.