نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۵۵۴-۵۳۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 537-554

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تأثیرات تغییر الگوی کشت زراعی بروضعیّت کمّی منابع آب‌زیرزمینی آبخوان دشت قاین

مهدی دستورانی*[۱]، مهدی امیرآبادی زاده[۲]، کامبیز محمّدی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

چکیده:

محدوده مطالعاتی این پژوهش آبخوان دشت قاین در استان خراسان جنوبی است که اقلیمی گرم و خشک دارد. طی سال‌های اخیر، کاهش بارندگی، محدودیت منابع آب، حفر بی‌رویه چاه‌های کشاورزی و برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی در این منطقه شده است. هدف این تحقیق، بررسی مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی و کاربرد مدل‌های کمی برای شبیه‌سازی جریان آبخوان دشت قاین و تحلیل نوسانات سطح ایستابی در چاهک‌های پیزومتری، همچنین ارائه راهکارهای مدیریتی برای مقابله با افت تراز آب زیرزمینی است. این مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های هیدروژئولوژیکی، هیدرولوژی، هواشناسی و مطالعات پایه منابع آب زیرزمینی انجام شد. برای تحلیل دقیق هیدروژئولوژی آبخوان، مدل‌سازی کمی آب زیرزمینی با نرم‌افزار GMS و کد MODFLOW صورت گرفت و سطح آب زیرزمینی برای بازه سه‌ساله (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲) در ۳۶ گام زمانی ماهانه شبیه‌سازی شد. واسنجی مدل به صورت دستی برای سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ و صحّت‌سنجی آن برای سال‌های ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ انجام گرفت. تفاوت بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و محاسبه شده در مراحل واسنجی مدل با معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد. در مرحله ماندگار مدل با معیارهای آماری ME وMAE وRMSE مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر آن به ترتیب ۰/۳۵۸ متر و۰/۳۶۲ متر و ۰/۴۷۹ متر تعیین شد مقادیر پارامترهای ME وMAE و RMSE در مرحله واسنجی و صحّت‌سنجی مدل در حالت غیر ماندگار بترتیب ۰/۰۲ و ۰/۳۱ و ۰/۴ تعیین شد که نشان دهنده دقّت مدل در تخمین وشبیه‌سازی درست و نزدیک به واقعیّت پارامترهای هیدرولیکی و تغییرات تراز آب در سطح آبخوان است. پس از اطمینان از دقّت مدل، سناریوی تغییر الگوی کشت در دشت قاین و تأثیر آن بر افزایش سطح تراز آب زیرزمینی (با ثابت در نظر گرفتن سایر شرایط) در پیزومترهای دشت مورد بررسی و تجزیه وتحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که اجرای سناریوی فوق و تغییر الگوی کشت دشت قاین از محصولات پر آب بر به کم آب بر سبب افزایش حجم ذخیره آب‌های زیرزمینی در دشت مذکور به میزان۵/۸۵ میلیون متر مکعب در سال خواهد گردید.

واژه‌های کلیدی: چاهک پیزومتری، قاین، مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی، نوسانات سطح ایستابی

مقدّمه:

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در کشورهای در حال توسعه، به ویژه در شرایطی که تقاضا برای آب شرب سالم و مصارف کشاورزی به دلیل رشد سریع جمعیت فزونی دارد از اهمیّت ویژه‌ای برخوردار است. رشد بی‌رویه صنایع، توسعه اراضی کشاورزی و شهرها و همچنین ضعف در مدیریت منابع آب زیرزمینی، ضرورت اتخاذ روش‌های مدیریتی مناسب برای بهبود وضعیت موجود را بیش از پیش نمایان می‌سازد. آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در جهان برای مصارف خانگی و شرب است و پیش‌بینی دقیق نوسانات تراز آن، به ویژه در فصول خشک، از ملزومات سیاست‌گذاری تأمین آب محسوب می‌شود.

ورود مدل‌های ریاضی به مطالعات آب‌های زیرزمینی جهت بررسی ومدیریت منسجم از دهه ۱۹۶۰ میلادی رواج یافت. زمانی که پیشرفت فناوری کامپیوتر امکان حل معادلات پیچیده عددی را فراهم ساخت. در این دوره، استفاده از روش‌های عددی در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی به سرعت گسترش پیدا کرد و جایگزین مدل‌های

۱- دانشیار گروه مهندسی علوم آب ،دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی علوم آب،دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۳-دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی گروه مهندسی علوم آب ، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mdastourani@birjand.ac.ir)

تشابهی شد. استالمن[1] نخستین پژوهشگری بود که با تمرکز بر تحلیل ناحیه‌ای آبخوان، به کارگیری روش‌های عددی را در حل مسائل آب‌های زیرزمینی آغاز کرد. او روشی نوین برای محاسبه نفوذپذیری آبخوان بر اساس تغییرات سطح آب ارائه داد. همچنین، مرسر و فاوست در سال ۱۹۸۰ به تشریح مدل‌های ریاضی و عددی در زمینه مدل سازی آب‌های زیرزمینی پرداختند. این تحولات باعث شد که مدل‌های ریاضی به ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب و مدیریت منابع آب زیرزمینی تبدیل شود (Mercer and Faust, 1980).

در ایران نیز مدل‌سازی عددی آب‌های زیرزمینی از دهه ۱۳۴۰ آغاز شد و در دهه‌های بعد با پیشرفت فناوری و ورود نرم‌افزارهای تخصصی، توسعه پیدا کرد. نخستین تلاش‌ها در این زمینه به مطالعات سازمان خواروبار جهانی (FAO) در سال ۱۳۴۸ و مدل‌سازی آبخوان دشت ورامین بازمی‌گردد. پس از آن، تا سال ۱۳۶۰، بررسی و مدل‌سازی حدود ۲۰۰ آبخوان با مساحتی بالغ بر ۵۵۰ هزار کیلومتر مربع و مطالعات نیمه‌تفصیلی روی ۸۰ آبخوان دیگر انجام شد. با ورود رایانه‌ها در دهه ۱۳۵۰، مدل‌های فیزیکی جای خود را به مدل‌های ریاضی دادند و روش‌هایی مانند تفاضل محدود و برنامه‌نویسی پویا به کار گرفته شد (فیروزکوهی، ۱۳۹۰).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی با استفاده از نرم‌افزارهای GMSو MODFLOW در نقاط مختلف کشور انجام شده است.

خلق ذکر آباد و همکاران (۱۳۷۴)، در یک پژوهش بااستفاده از کد MODFLOW جریان آب زیرزمینی را در منطقه زاوه واقع در تربت حیدریه شبیه‌سازی نمودند. در این مطالعه میزان افت سطح آب در مخزن آبخوان با درنظرگرفتن میزان تغذیه و تخلیه ازآبخوان مورد بررسی قرارگرفت.

ساعت‌ساز و چیت‌سازان(۱۳۸۴) با استفاده از کاربرد مدل ریاضی MODFlOW به بررسی گزینه‌های مختلف مدیریتی در دشت رامهرمز پرداختند.

جهرمی (۱۳۸۸)، دست به شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی دشت عقیلی با استفاده از نرم‌افزار GMS پرداخت.

فاتحی مرج و همکاران (۱۳۹۰)، در پژوهشی به پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی آبخوان گربایگان برای دوره زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷ با استفاده از مدل عددی MODFLOW پرداختند. هدف از این تحقیق پیش‌بینی سطح ایستابی آبخوان گربایگان برای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سال آتی (۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷) با استفاده از مدل MODFLOW جهت اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب ، درست و دقیق در خصوص منابع آب زیرزمینی در چندین دشت مهم از نظر سطح وسیع کشاورزی بود. نتایج پژوهش گویای آن بود که شیب افت آبنمود واحد آبخوان برای ۱۰،۳۰ و ۵۰ سال آینده، به ترتیب به میزان ۰/۳۳۱، ۰/۲۹۸ و ۰/۲۷ متر بر سال می باشد. کاهش و افت سطح آب آبخوان با افزایش دوره زمانی پیش‌بینی از نتایج این مدل بود.

نوذرپور (۱۳۹۳)، در پژوهش خود شبیه‌سازی آبخوان دشت لور با استفاده از کد MODFLOW درنرم‌افزار GMS را پیاده‌سازی نمود. پیش‌بینی وضعیّت آبخوان در شرایط خشکسالی و ترسالی، افزایش ۱۰٪ دبی پمپاژ، کاهش ۲۵٪ دبی پمپاژ و ارزیابی تغذیه مصنوعی جارمه مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفت. نتایج حاصل از بیلان آبی در سال تهیّه مدل (۸۹-۸۸) نشان دهنده منفی بودن بیلان آب زیرزمینی دشت لور به میزان ۷/۴۵ میلیون متر مکعب در سال بود. نتایج مدل آبهای زیرزمینی دشت لور نشان داد تغذیه مصنوعی علاوه بر افزایش تراز سطح ایستابی، توانسته بیلان منفی را کاهش دهد و باعث بهبود تراز آب زیرزمینی آبخوان شد.

عزیزی و همکاران (۱۳۹۸)، دردشت ملکان به شبیه‌سازی جریان آب زیزمینی و نفوذ آب شور در این دشت با استفاده از نرم‌افزار GMS اقدام‌نمودند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که برداشت بی‌رویه ازمنابع آب زیرزمینی درحالیکه با افت شدید سطح آب در این آبخوان همراه است سبب گسترش نفوذ آب شور در قسمت شمال‌غربی دشت شده‌است و در نتیجه باعث کاهش کمّی و کیفی در این بخش از آبخوان گردیده‌است.

خسروی و همکاران(۱۴۰۱)، در پژوهشی به بررسی کمّی و کیفی منابع آب زیرزمینی دشت میناب پرداختند. به منظور شبیه‌سازی پارامترهای کمّی و کیفی آب زیرزمینی از نرم افزار GMS10.5 تحت کد MODFLOW کمک گرفته شد . نتایج این تحقیق نشان داد که طی سالهای اخیر به علّت حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق در حالت پایه(سالهای ۱۳۸۲، ۱۳۸۷، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۷) بیشترین افت آبخوان در منطقهٔ مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۳/۱۶- ، ۱۲/۸۷- ، ۲۳/۸۹- و ۳۰/۳۰- متر بوده‌است. بیشترین میزان افزایش افت آب زیرزمینی در دشت میناب با گذشت زمان تحت سناریوهای ۵ ، ۱۰ و ۱۵ درصد افزایش بهره‌برداری به ترتیب ۵۹/۵- ، ۶۱/۳- و ۶۳/۲- متر است و حجم آبخوان تحت تأثیر این سناریوها ۱۵۳/۵۵ ، ۱۶۰/۸۶ و ۱۶۸/۱۷ میلیون مترمکعب نسبت به شرایط پایهٔ تحت تأثیر این سناریوها به ترتیب کاهش‌می‌یابد.

عدالت و همکاران مدل‌سازی عددی آبخوان دشت علی‌آباد قم را در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ انجام دادند و با مقایسه نتایج مدل و داده‌های پیزومتری، خطای RMSE را ۱/۴ متر و ضریب همبستگی را ۰/۹۹۵ گزارش کردند (Edalat et al., 2021).

نخعی و همکاران پیامدهای حاصل از بهره‌برداری بی‌رویه از آبخوان دشت زرند واقع در استان مرکز ی را با کد MODFLOW و رابط کاربری GMS مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پیش‌بینی این محققین نشان داد که وضعیت آبخوان در سالهای آتی با ادامه روند

1- Stalman

جاری برداشت از آب زیرزمینی، منجر به کاهش محسوس تراز آب زیرزمینی در قسمت‌های مرکزی و غرب آبخوان و افزایش میزان فرونشست در این بخش‌ها خواهد شد. آنان پیشنهاد نمودند در راستای بهبود وضعیت آبخوان راهکارهای مدیریتی شامل کاهش میزان برداشت آب، اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی، تغییر الگوی کشت و افزایش راندمان آبیاری با به کارگیری سامانه‌های نوین آبیاری در دستور کار متخصصین و ذینفعان منابع آب زیرزمینی قرار گیرد (Nakhaei et al., 2022).

خالدی علمداری و مجنونبا استفاده از مدل عددی MODFLOW و رابط کاربری GMS آبخوان دشت شبستر را با هدف تخمین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان شبیه‌سازی نمودند. یافته های حاصل از شبیه‌سازی نشان دهندهٔ تغییرپذیری زیاد مکانی ضرایب هیدرودینامیک در آبخوان‌های ناهمگن بود. این محققین تنوع زیاد ضرایب هیدرودینامیک را به وجود آبرفت‌هایی با منشأ سازندهای زمین‌شناسی مختلف نسبت دادند (Khaledi Alamdari and Majnooni Heris, 2022).

ریحانی و همکاران اقدام به مدل سازی آبخوان کاشان با کد MODFLOWنمودند و سپس وضعیت آبخوان با راهبردهای مدیریتی مختلف را بررسی نمودند. واسنجی و صحّت‌سنجی مدل MODFLOWحاکی از دقّت مناسب آن برای اجرای آن تحت راهبردهای مختلف مدیریتی بود. اجرای مدل با راهبرد خاموشی چاه ها به مدت یک ماه در آبخوان مذکور، افزایش حجم ذخیره آبخوان به میزان MCM ۰/۰۱۴۷ را پیش‌بینی نمود. این محققین پیشنهاد نمودند برای جلوگیری از تخریب بیشتر منابع آب زیرزمینی اجرای همزمان چندین راهبرد علمی و مدیریتی الزامی می‌باشد (Reyhani et al., 2023).

در زمینه تحقیقات خارجی در مبحث مدل سازی عددی با استفاده از MODFLOW نیزمی توان به موارد زیر اشاره نمود:

وانگ و همکاران، اقدام به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در شمال دشت چین با استفاده از کدMODFLOW و نرم‌افزار GIS نمودند. شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیک منطقه با استفاده از MAP GIS مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفت و جریان آب زیرزمینی با استفاده از MODFLOW مدل‌سازی شد (Wang et al,.2008).

ییدانا و همکاران، درجنوب‌شرقی غنا با استفاده از نرم‌افزار و کد اقدام به شبیه‌سازی یک آبخوان سازند سخت در شرایط پایدار نمودند (Yidana et al,.2011).

چکاربورتی و همکاران با استفاده از نرم‌افزارMODFLOW به شبیه‌سازی دشت پوربا درهند پرداختند. نتایج پژوهش نشانگر این موضوع بود که جریان آب زیرزمینی در دشت مذکور از جنوب به سمت شمال در حرکت می‌باشد. پس از مدل‌سازی دشت مورد نظردادههای واقعی موجود مطابقت خوبی با نرم‌افزار مورد استفاده نشان می‌داد (Chakraborty et al,.2020).

با عنایت به لزوم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در استان خراسان جنوبی بعنوان یکی از استان های درگیر با پدیده خشکسالی که اکثر دشت های آن جزو دشت های ممنوعه محسوب گردیده و سطح تراز آب زیرزمینی در این دشت ها با افت روبرو می باشد لازم است تا ضمن کنترل افت سطح ایستابی، پدیده فرونشست زمین بعنوان یکی از مهمترین پیامدهای افت تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، مورد توجّه قرار گرفته و تدابیر لازم در جهت کنترل و به حداقل رساندن این پدیده اندیشیده شود. از آنجایی که در اکثر مطالعات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW تنها به بررسی کمّی وکیفی منابع آب زیرزمینی پرداخته شده و به سناریو های قابل اعمال توسط این مدل(به عنوان یک ابزار مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی) وعلی الخصوص سناریو بررسی تأثیرات تغییرات الگوی کشت بر وضعیّت منابع آب زیرزمینی بصورت محدود پرداخته شده، لذا پس از تعریف این سناریو برای مدل (از طریق تغییرات در یکسری از کاوریج های مدل نظیر کاوریج میزان برداشت چاه‌های کشاورزی وکاوریج تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی از طریق جریانات سطحی) از مدل جهت تجزیه وتحلیل سناریو تغییر الگوی کشت (بعنوان یکی از سیاست‌های سازمان جهادکشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای استان جهت مقابله با بحران آب در منطقه مورد مطالعه) خروجی گرفته‌شد. ارائه نتایج کمّی وکیفی(و نه تنها کیفی) تغییر الگوی کشت در سطح منطقه مورد مطالعه وتأثیرات آن بر حجم مخزن آبخوان و نوسانات پیزومترها در سطح آبخوان (باذکر کمّی نتایج) و تعمیم اثرات آن به سایر دشت‌های ممنوعه استان وحتّی کشور می تواند بعنوان یک جنبه نوآورانه تحقیق در زمینه مطالعات آب‌های زیرزمینی مورد توّجه قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

توصیف منطقهٔ مطالعه شده:

حوزه آبریز دشت قاین با وسعتی حدود ۹۲۰ کیلومتر مربع در شهرستان قائنات، واقع در شمال استان خراسان‌جنوبی قرار دارد. این منطقه دارای اقلیم نیمه‌بیابانی و معتدل است که در بخش‌های شرقی و غربی شهرستان به اقلیم بیابانی تغییر می‌یابد. متوسط بارش سالانه در این حوزه حدود ۱۸۶/۲ میلی‌متر است که در دوره‌های ترسالی تا ۲۸۱/۲ میلی‌متر و در دوره‌های خشکسالی به ۱۰۵/۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. بارش‌ها در سطح منطقه معمولاً به صورت نامنظم در طول سال رخ می‌دهد و عمدتاً در اواخر زمستان و اوایل بهار به واسطه نفوذ توده هوای باران‌زا مدیترانه‌ای اتفاق می‌افتد.

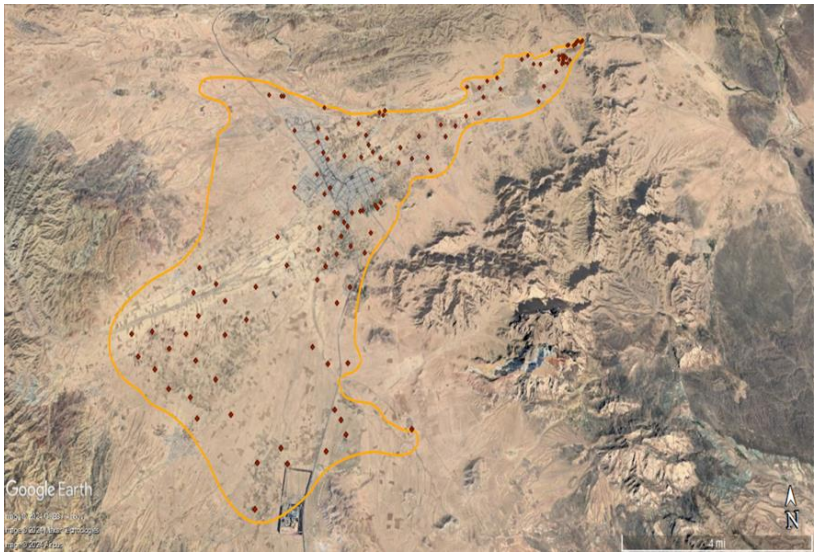
حوزه آبریز دشت قاین شامل زیرحوضه‌های نمکزار خواف و دق پترگان است و در عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی و طول‌های ۵۸ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۵۹

درجه و ۲۴ دقیقه شرقی واقع شده است. این حوزه از غرب و شمال‌غرب به خضری، از شرق به محدوده اسفدن و از جنوب و جنوب‌غرب به منطقه چاهک موسویّه محدود می‌شود. شکل کلی حوزه تقریباً مثلثی بوده و با محیطی به طول ۱۷۱ کیلومتر، طول متوسط ۳۰ کیلومتر و عرض متوسط ۲۰ کیلومتر مشخص می‌گردد.

بیشتر وسعت این حوزه را دشت تشکیل می‌دهد که توسط ارتفاعات کمرآوش، کوهورزگ، اندریک و کوه‌های زول احاطه شده است. ارتفاع متوسط منطقه حدود ۱۶۶۳ متر و بیشینه ارتفاع ۲۳۲۰ متر در ارتفاعات جنوب غربی حوزه است، در حالی که کمترین ارتفاع مربوط به خروجی حوزه در کال خونیک می‌باشد.

در این حوزه هیچ رودخانه دائمی وجود ندارد و اغلب رودخانه‌ها فصلی هستند. طول کل آبراهه‌های اصلی حوزه که بیشتر به سد فرخی قاین منتهی می‌شوند، حدود ۵۳/۳۳ کیلومتر است.

این ویژگی‌ها نشان‌دهنده شرایط خشک و نیمه‌بیابانی منطقه و اهمیّت منابع آب زیرزمینی در تأمین نیازهای آبی آن است.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه، موقعیّت وپراکنش چاههای بهره‌برداری دشت قاین

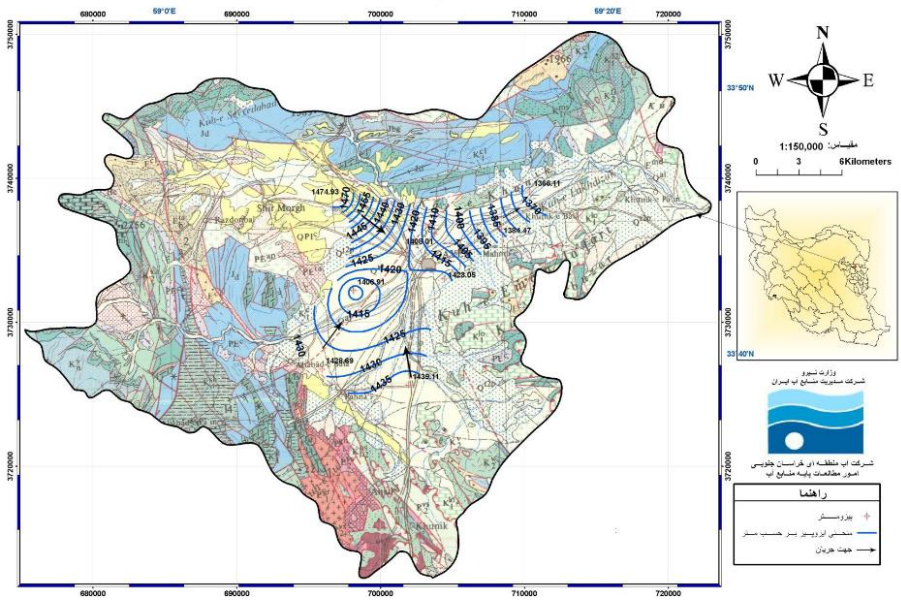
وضعیّت هیدرولیک آبخوان

بررسی نقشه‌های ایزوپیز و جهت جریان آب زیرزمینی

نقشه ایزوپیز آبخوان دشت قاین بر اساس سطح آب در تیرماه سال ۱۳۸۶ ترسیم شده است (شکل ۲). میزان تغییرات پتانسیل آب زیرزمینی در این منطقه از حداکثر ۱۴۷۵ متر در شمال‌غرب آبخوان (محدوده اراضی شیرمرغ) تا حداقل ۱۳۶۶ متر در شمال‌شرق آبخوان (محدوده اراضی اسفشاد) متغیر است. جهت کلی جریان آب زیرزمینی در دشت، از شمال‌غرب و جنوب‌غرب به سمت مرکز آبخوان و در نهایت به شمال‌شرق در ناحیه خروجی دشت قاین (منطقه اسفشاد) ختم می‌شود. در مرکز آبخوان، به دلیل تجمع چاه‌های بهره‌برداری، سطح ایستابی با افت شدید مواجه شده و خطوط منحنی ایزوپیز به صورت بسته درآمده‌اند. گرادیان هیدرولیکی در مرکز آبخوان تقریباً صفر است، در حالی که بیشترین مقدار آن در شمال‌غرب آبخوان حدود ۱/۱درصد، حداقل در جنوب‌غرب حدود ۰/۴درصد و در ناحیه خروجی دشت حدود ۰/۶ درصد گزارش شده است.

تغذیه عمده آبخوان از طریق مسیل‌های پهنایی در جنوب‌غرب، کلاته خان در غرب و شیرمرغ در شمال‌غرب در زمان‌های سیلابی انجام می‌شود. تشکیلات ماسه‌سنگی و آهک‌های متراکم دوره کرتاسه در حاشیه ارتفاعات آبدار قرار دارند و به دلیل وجود گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان، مسیر جریان آب غالباً در امتداد این گسل‌ها شکل می‌گیرد.

با بررسی نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی دشت قاین بر اساس داده‌های تیرماه ۱۳۸۶، مشخص می‌شود که کمترین عمق آب زیرزمینی حدود ۱۳/۱۶متر و بیشترین آن حدود ۱۳۶/۶۵ متر است. میانگین عمق سطح ایستابی در این منطقه تقریباً ۶۶ متر تخمین زده می‌شود. عمق سطح آب زیرزمینی از سمت جنوب‌غرب به شمال‌شرق با روندی یکنواخت کاهش می‌یابد. در مجاورت ارتفاعات جنوب‌غربی، عمق آب بیش از ۱۳۵ متر است، در حالی که در جهت شمال‌شرق آبخوان (خروجی دشت)، این عمق به کمتر از ۱۵ متر می‌رسد.



شکل ۲- نقشه ایزوپیز آبخوان دشت قاین در شهریور ۱۳۸۶(گزارش توجیهی تمدید ممنوعیّت دشت قاین ۱۳۸۷)

هیدروژئولوژی دشت قاین

وضعیّت فیزیکی آبخوان

آبخوان دشت قاین از نوع آبخوان آزاد می‌باشد و وسعتی حدود ۱۳۶ کیلومتر مربع را در برگرفته‌است. این آبخوان در بخش میانی محدودهٔ مورد مطالعه قرارداشته واز ارتفاعات شمال‌غرب وجنوب‌غرب تغذیه شده و از شرق به محدوده اسفدن منتهی می‌گردد. با توّجه به سوابق حفاری‌های بهره‌برداری اشخاص مشخص‌گردیده که قسمت غربی و جنوب غربی سفره دارای ضخامت بیشتر و نسبتاً با پتانسیل آبدهی غنی‌تر می‌باشد و باحرکت به سمت شمال‌شرقی ازضخامت آن کاسته شده، جنس آن ریزتر شده و از نظر کیفیت نیز نامناسب‌تر می‌شود.

سطح دشت از پادگانه‌های آبرفتی، رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای و مخروطه‌افکنه‌ها درحاشیه دشت پوشیده شده‌است که جنس آن در دامنه‌های غربی ازخرده‌های شیل و آهک و ماسه‌سنگ و سنگ‌های‌آذرین و دردامنه ارتفاعات جنوب شرق از آهک‌های کرتاسه می‌باشد. درحاشیه ارتفاعات غربی و جنوبی، آبرفت تاحّدی درشت‌دانه بوده و به تدریج به طرف مرکز و شمال‌شرق که محل خروجی است دانه‌ریز می‌شود.

با توّجه به عمق چاه‌های بهره‌برداری متوّسط ضخامت آبرفت درقسمت جنوب‌غربی ۱۶۳ متر و در بخش میانی حدود ۶۰ متر و در ناحیه شمال‌شرقی کم ضخامت و کمتر از ۳۰ متر می‌باشد. بطور کلّی می‌توان ضخامت متوّسط آبخوان را ۹۷ متر برآورد نمود. سنگ کف آبخوان از رسوبات کنگلومرایی پلیوسن، مارن و سایر رسوبات تبخیری نئوژن تشکیل شده‌است.

داده‌های مدل‌سازی

صحّت شبیه‌سازی به معتبر بودن فیزیک مدل و کیفیت داده‌های ورودی وابسته است و پارامترهای مدل باید از داده‌های صحرایی استخراج شوند. برای طراحی و ایجاد شرایط معادل ساده‌سازی شده، اطّلاعات زیادی از سیستم طبیعی مورد نیاز است که می‌تواند با استفاده از کدهای کامپیوتری حل شود. ورود اطّلاعات صحیح و مطابق با واقعیت در مدل‌سازی آب زیرزمینی ضروری است.

در مدل‌سازی آبخوان دشت قاین، اطلاعات زیر جمع‌آوری شده است

- محدوده مطالعاتی
- موقعیت چاه‌های مشاهداتی و بهره‌برداری به همراه مقادیر آن‌ها (تراز آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای و مقادیر تخلیه چاه‌های-بهره‌برداری)
- مقادیر تغذیه ناشی از جریان‌های برگشتی چاه‌های کشاورزی
- اطلاعات مرتبط با تغییرات هدایت هیدرولیکی آبخوان
- اطلاعات مربوط به جبهه‌های ورودی و خروجی
- نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰
- عمق سنگ کف
- اطّلاعات مربوط به قابلیّت انتقال و ضریب آبدهی ویژه با استفاده از اطّلاعات شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی و نیز مطالعات و گزارشات تفصیلی موجود در مورد حوضه دشت قاین

گردآوری گردید.

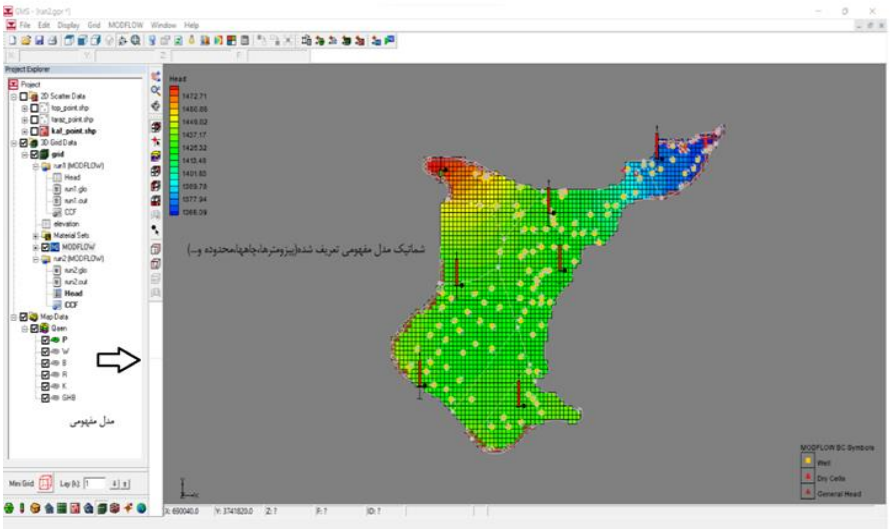
این اطّلاعات به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و پیش‌بینی مؤلّفه‌های گوناگون بیلان دشت قاین با استفاده از مدل MODFLOW در قالب نرم‌افزار GMS جمع‌آوری شده‌اند.

نحوهٔ ایجاد مدل مفهومی در نرم‌افزار GMS

در مرحله دوّم مدل‌سازی آب‌زیرزمینی، پس از تعیین هدف، مدل مفهومی تهیّه و وضعیت آبخوان بررسی می‌شود. در این بخش، ابتدا مرزهای سیستم و واحدهای چینه‌شناسی مشخّص و به مدل اضافه می‌گردد. همچنین اطّلاعات مربوط به بیلان آب، پارامترها و ضرایب هیدرودینامیکی گردآوری و صحّت آن‌ها ارزیابی می‌شود. هدف از مدل مفهومی، ساده‌سازی شرایط واقعی منطقه و ساماندهی داده‌های میدانی است تا سیستم مورد بررسی به شکل قابل حل برای کدهای عددی تبدیل شود. هرچه داده‌های ورودی کامل‌تر و دقیق‌تر باشند، مدل نهایی با سادگی بیشتر و خطای کمتر به واقعیت نزدیک خواهد شد. از آنجا که شبیه‌سازی کامل سیستم واقعی امکان‌پذیر نیست، ساده‌سازی در مدل مفهومی امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

در این تحقیق، مدل مفهومی آبخوان دشت قاین با بهره‌گیری از نرم‌افزار GMS توسعه یافته است. در ابتدا محدوده آبخوان در محیط GIS تعیین و به صورت فایل شیپ به نرم‌افزار GMS منتقل شده است. سپس خصوصیّات آبخوان از جمله منابع تغذیه، تخلیه و محل‌های مشاهده، در لایه‌های جداگانه تعریف شده‌اند. در مدل مفهومی دشت قاین، موقعیت ۷ حلقه چاه مشاهده‌ای، ۱۲۳ حلقه چاه بهره‌برداری (کشاورزی و شرب) و محدوده تغذیه سطحی در مدل وارد شده است.

این مرحله، اساس ساخت مدل عددی جریان آب‌زیرزمینی را فراهم می‌کند و امکان تحلیل و پیش‌بینی جریان، تغییرات سطح آب و اثرات اقدامات مدیریتی را فراهم می‌آورد. این اطّلاعات به منظور شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی و پیش‌بینی مؤلّفه‌های گوناگون بیلان دشت قاین با استفاده از مدل MODFLOW در قالب نرم‌افزار GMS جمع‌آوری شده‌اند.



شکل۳ - نمایشی از پوشش‌های موجود در مدل مفهومی آبخوان مورد مطالعه

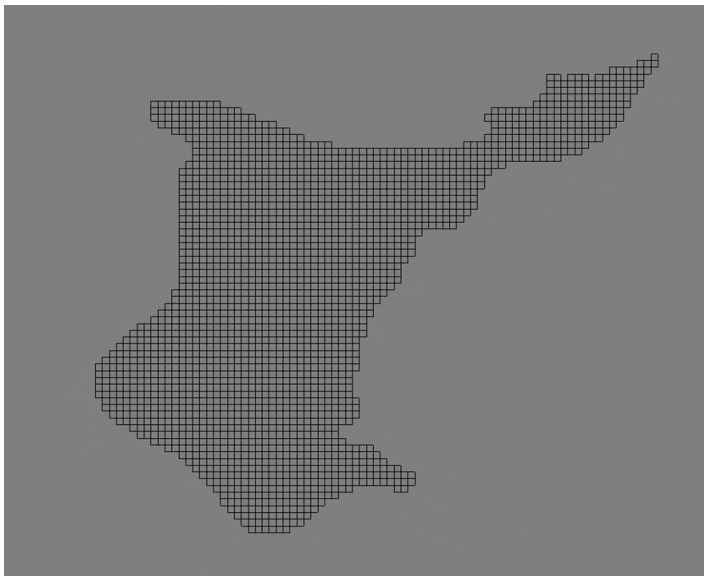
شبکه‌بندی مدل

پس از ساخت مدل مفهومی، گام بعدی در مدل‌سازی عددی آب‌زیرزمینی، طّراحی شبکه و تعیین ابعاد مدل است. در این مرحله، حوزهٔ مدل‌سازی که پیش‌تر به صورت پیوسته تعریف شده بود، به حوزه‌ای گسسته تقسیم می‌شود که شامل نقاط، سلّول‌ها (اجزاء تفاضل محدود) و المان‌های محدود است. نرم‌افزار MODFLOW برای حل معادلات جریان از شبکه‌بندی تفاضل محدود مرکز سلّول-Block) Centered Finit Difference Gride) استفاده می‌کند.

انتخاب اندازه سلّول‌های شبکه اهمیّت بالایی دارد، زیرا باید امکان تعریف دقیق خصوصیات فیزیکی و هیدرودینامیکی آبخوان و همچنین وارد کردن منابع تغذیه و تخلیه به صورت صحیح فراهم شود. با این حال، کاهش بیش از حد اندازه سلّول‌ها محدودیّت‌هایی دارد که مهم‌ترین آن کمبود داده‌های کافی مانند اطّلاعات چاه‌های مشاهده‌ای، حفاری و آزمون‌های پمپاژ در سطح دشت است. برای مدل‌سازی آبخوان دشت قاین، شبکه‌بندی با سلّول‌هایی به ابعاد ۲۵۰ در ۲۵۰ متر و مساحتی حدود ۱۳۶/۵۳ کیلومتر مربع انجام شده است. داده‌هایی مانند عمق سنگ‌بستر، هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی و تراز اولّیه آب‌زیرزمینی به هر سلّول اختصاص داده شده‌اند. پس از

طراحی شبکه، مدل مفهومی به مدل عددی تبدیل شده و مناطق فعّال و غیرفعّال به صورت خودکار تعیین می‌شوند. در نهایت، تعداد سلّول‌های فعّال در محدوده آبخوان دشت قاین به ۲۱۶۸ سلول می‌رسد.

این فرآیند، پایه‌ای برای شبیه‌سازی دقیق جریان آب‌زیرزمینی و تحلیل اثرات مدیریتی بر منابع آب دشت قاین فراهم می‌کند.



شکل ٤- نمایش شبکه بندی محدوده آبخوان مورد مطالعه در محیط GMS با شبکه هایی به ابعاد ۲۵۰متردر۲۵۰متر

واردکردن توپوگرافی سطح و کف آبخوان به مدل

توپوگرافی دشت قاین به طور کلّی از شمال‌غرب و غرب به سمت شرق کاهش می‌یابد و ارتفاع متوسّط آن حدود ۱۳۵۸/۱۷متر از سطح دریا است. شیب عمومی دشت از غرب به شرق است، به گونه‌ای که ارتفاع در شمال‌غرب به حدود ۱۴۳۵/۷۶متر می‌رسد و در بخش شرقی به ۱۲۴۰/۷۵متر کاهش می‌یابد. داده‌های رقومی توپوگرافی این منطقه از پایگاه‌های داده جغرافیایی استان خراسان جنوبی استخراج شده و با استفاده از روش درونیابی IDW در محیط GISپردازش شده‌اند. این داده‌ها سپس به مدل وارد شده و توپوگرافی به طور مستقیم به شبکهٔمدل نسبت داده شده است. همچنین، اطّلاعات مربوط به سنگ کف آبخوان از طریق آزمایش‌های سونداژ در محدودهٔ مطالعه جمع‌آوری و در قالب نقشه‌ای رقومی در محیط GIS تهیّه شده است. این نقشه به صورت فایل شیپ (Shape) و در قالب پوشش (Coverage) به مدل معرفی شده است.

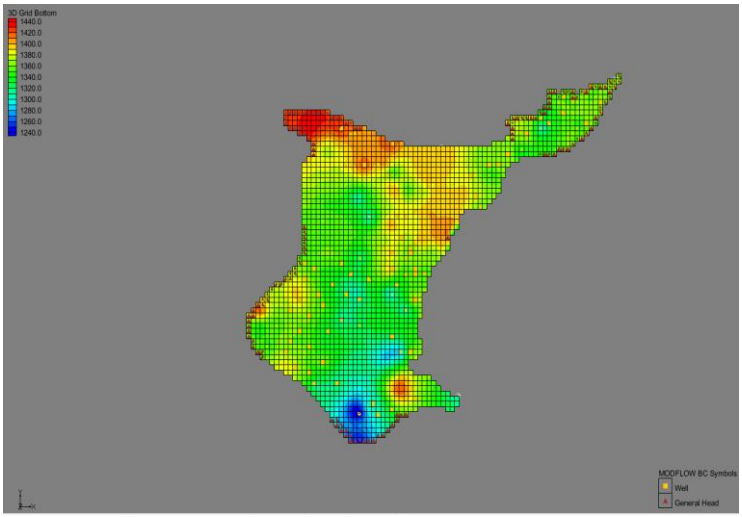
بنابراین، مدل‌سازی آبخوان دشت قاین بر اساس داده‌های دقیق توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه استوار است که امکان تحلیل دقیق جریان آب زیرزمینی و مدیریت بهینه منابع آبی را فراهم می‌آورد. این داده‌ها از منابع معتبر شامل پایگاه‌های داده جغرافیایی و مطالعات زمین‌شناسی استان خراسان جنوبی استخراج شده‌اند.

واردکردن سطح آب مشاهده‌ای و شرایط مرزی به مدل

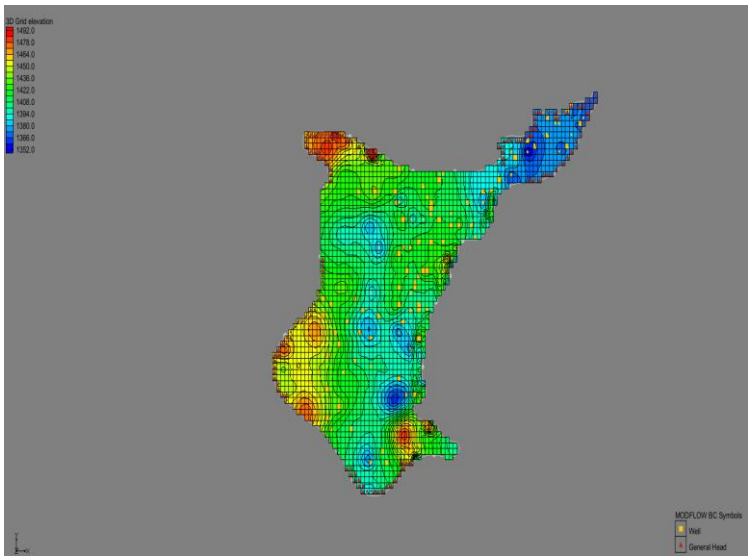
یکی از مراحل کلیدی در مدل‌سازی آب‌زیرزمینی، تعیین حدود یا ناحیه مدل و مرزهای آن است. در این مرحله، لازم است که ناحیه مورد مطالعه از سیستم‌های آب زیرزمینی مجاور جدا شود تا مرز مدل به عنوان فصل مشترک بین ناحیه مدل و محیط اطراف آن تعریف گردد. برای تعیین شرایط مرزی، پارامترهایی مانند بار هیدرولیکی، نرخ جریان یا ترکیبی از آن‌ها به سلول‌های مرزی اختصاص داده می‌شود.

داده‌های مورد نیاز مدل، شامل سطح آب مشاهده‌ای، توپوگرافی سطحی، سنگ کف و شرایط مرزی، ابتدا با استفاده از نرم‌افزارهای GISو Excel آماده و پیش‌پردازش می‌شوند. سپس این داده‌ها در محیط نرم‌افزار GMS به مدل مفهومی وارد شده و پس از آن به مدل شبکه‌های سه‌بعدی MODFLOW تبدیل می‌گردند. به عنوان نمونه، در پژوهش حاضر، اطّلاعات سطح آب پیزومترها برای شهریور ماه ۱۳۹۹ وارد نرم‌افزار شده و در مراحل واسنجی و صحّت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برای تعیین تراز آب زیرزمینی اوّلیّه مدل، داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای به عنوان نقاط شاهد به کار رفته و با استفاده از روش درونیابی وزنی معکوس (Inverse Distance Weighted) در سطح شبکه گسسته توسط نرم‌افزار GMS مقداردهی شده‌اند.



شکل۵ - نقشه خطوط همتراز سنگ کف آبخوان پس از تعریف شدن در مدل‌مفهومی



شکل ٦ - نقشه توپوگرافی سطح آبخوان مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار GMS

مدل MODFLOW که توسط سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا توسعه یافته، یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی است و به روش تفاضل محدود سه‌بعدی جریان را مدل می‌کند. نرم‌افزار GMS نیز به عنوان یک محیط جامع، امکان آماده‌سازی داده‌ها، ساخت مدل مفهومی و تبدیل آن به مدل عددی MODFLOWرا فراهم می‌آورد و قابلیت اشتراک داده‌ها با نرم‌افزارهای GIS را داراست.

در نهایت، تعیین دقیق مرزهای مدل و ورود داده‌های صحیح و معتبر، اساس صحّت و دقّت شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی و تحلیل‌های مدیریتی مرتبط با آن را تشکیل می‌دهد.

نتایج وبحث

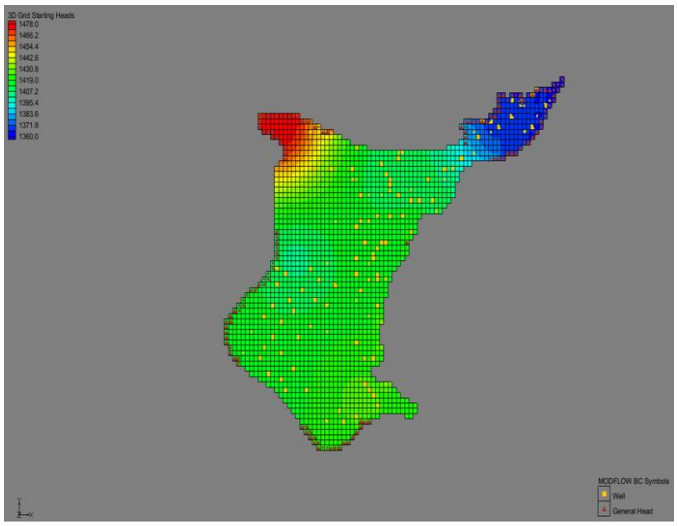
پس از ایجاد مدل مفهومی، شبکه‌بندی، تعیین تراز اوّلیّه و تعریف شرایط مرزی، مرحلهٔ مهّم بعدی کاهش عدم قطعّیت‌های ناشی از داده‌های ناقص یا نادرست و پارامترهای نامشخّص مانند مقادیر تخلیه و تغذیه آبخوان است. این کار از طریق واسنجی مدل انجام می‌شود تا پارامترهای مدل به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شده و خطاهای خروجی کاهش یابد. واسنجی باید در دو حالت ماندگار و غیرماندگار صورت گیرد تا نتایج مدل با داده‌های واقعی تطابق داشته باشد.

هرچه واسنجی دقیق‌تر انجام شود، خطای مدل کاهش یافته و مقادیر محاسبه‌شده به مشاهدات واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. واسنجی مدل به دو روش دستی (سعی و خطا) و خودکار با استفاده از

نرم‌افزارهایی مانند (PEST) انجام می‌شود. در این فرآیند، داده‌هایی مانند تراز سطح آب زیرزمینی به عنوان معیار واسنجی استفاده می‌شوند که به دلیل سهولت اندازه‌گیری و دقّت بالا، رایج‌ترین معیار به شمار می‌روند

مدل ماندگار

برای افزایش دقّت محاسبات در مدل‌سازی آب‌زیرزمینی با استفاده از روش تفاضل محدود، منطقه مورد نظر به سلّول‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود تا خطا کاهش یافته و نتایج دقیق‌تر بدست آید. در مناطقی که نیاز به بررسی دقیق‌تر وجود دارد، شبکه‌بندی ریزتر و با ابعاد کوچک‌تر انتخاب می‌شود. اگرچه شبکه‌بندی یکنواخت از نظر ریاضی مطلوب است، اما در برخی موارد طرّاحی شبکهٔ غیریکنواخت به دلیل ویژگی‌های خاص منطقه یا اهداف مدل ضروری است.



شکل۷ – نقشه تراز اوّلیه آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار GMS

در مدل آب‌زیرزمینی دشت قاین که برای شرایط ماندگار شهریور ۱۳۹۹ تهیّه شده است، فاصله گره‌ها به صورت یکنواخت و برابر با ۲۵۰ متر انتخاب گردیده است. نقشه تراز آب‌زیرزمینی ابتدا در محیط GIS ترسیم و با محدودهٔ مدل تنظیم می‌شود، سپس تراز آب برای تمامی سلّول‌های فعّال مشخص می‌گردد. با وارد کردن مقادیر تخلیه و تغذیّه آبخوان، مدل قادر به محاسبه تراز آب زیرزمینی در گام‌های زمانی تعیین شده خواهد بود. برای تعیین حدود آبخوان، ارتفاع سطح توپوگرافی و سطح تحتانی آبخوان به مدل وارد شده‌اند. سطح توپوگرافی از نقشه‌های سازمان جغرافیایی کشور با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استخراج و داده‌های عددی آن در محیط GIS پردازش شده‌اند. با استفاده از نرم‌افزارArcGIS 10.3 ، مختصات نقاط و DEM سطح ایستابی و سنگ‌بستر ساخته شده و ضخامت آبخوان با تفریق این دو DEMمحاسبه شده است.

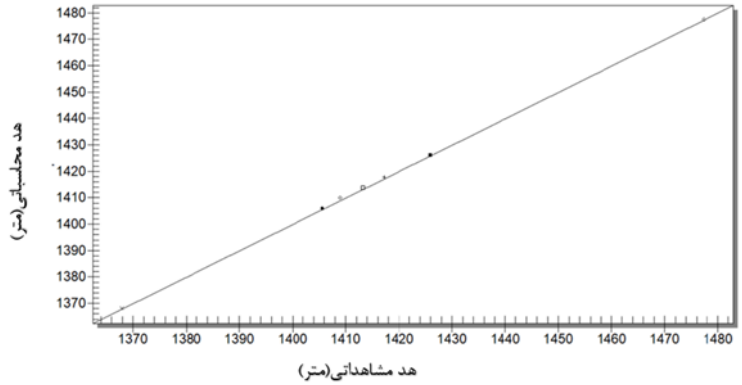
پارامترهای نفوذ جریان برگشتی چاه‌های بهره‌برداری و جریان ورودی آب زیرزمینی به عنوان ورودی‌ها و پارامترهای پمپاژ به عنوان خروجی‌ها در مدل لحاظ شده‌اند. شکل مدل اجرا شده در حالت ماندگار و شبکه‌بندی آن در مرحله اوّل اجرای نرم‌افزار نمایش داده شده است.

در نهایت، انتخاب شبکه‌بندی مناسب که با اهداف مدل، کیفیّت و کمیّت داده‌ها، ویژگی‌های هیدرودینامیکی و مناطق بحرانی هماهنگ باشد، نقش کلیدی در افزایش دقّت و کارایی مدل‌های عددی آب‌زیرزمینی مانند MODFLOW ایفا می‌کند.

واسنجی، تحلیل حساسیّت و صحّت سنجی مدل در حالت ماندگار

مرحله واسنجی مدل در شرایط ماندگار براساس مقادیر محاسبه شده برای هدایت هیدرولیکی آبخوان انجام پذیرفت. دقّت در تعیین این پارامتر می‌تواند نقش مهمّی در تعیین دقّت سایر پارامترها ودر نهایت دقّت مدل داشته باشد. هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت قاین بر اساس واسنجی وصحّت‌سنجی انجام گرفته بین ۳/۴۴ متربرروز تا ۴/۴۴ متر برروز (جدول شماره ۳) درنقاط مختلف دشت متغیّر می باشد. براساس نتایج بدست آمده از مرحله واسنجی حالت ماندگار مدل مشاهده گردید در تمام چاه‌های مشاهداتی سطح آبخوان مقادیر شبیه سازی شده توسط مدل برای سطح آب‌زیرزمینی با مقادیر مشاهداتی سطح آب در کلیّه پیزومترها نزدیک بوده و همخوانی دارد(شکل ۹ وجدول ۲). مقادیر میزان خطا بین مقاد یر تراز آب

زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در این مرحله ازاجرای مدل، با معیارهای آماری ME وMAE وRMSE مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر آن به ترتیب ۰/۳۵۸ متر و۰/۳۶۲ متر و ۰/۴۷۹ متر تعیین شدکه بیان کننده میزان دقّت بالای مدل در مرحله اوّل واسنجی است. با استناد به نتایج فوق پارامتر هدایت هیدرولیکی محاسباتی در مرحله واسنجی منعکس کننده شرایط واقعی سامانه آبخوان بوده و کاربرد آن در مراحل بعدی شبیه‌سازی با مدل مورد تأیید است.



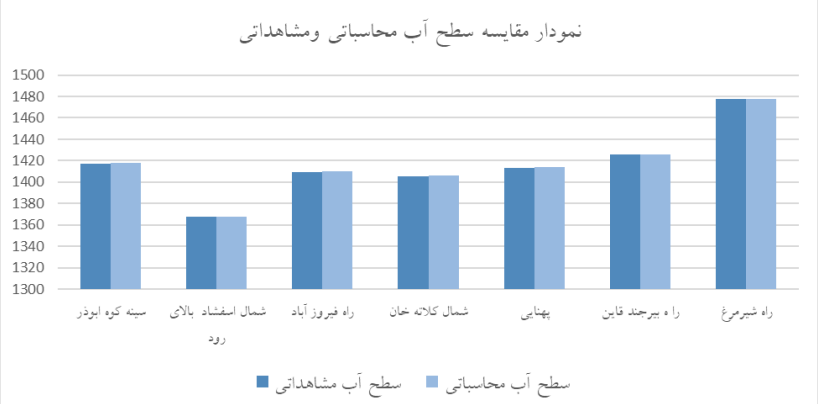
شکل ۸- نمودار مقادیر محاسباتی ومشاهداتی سطح آب در پیزومترهای آبخوان دشت قاین

جدول ۱- مقادیر میانگین خطا و میانگین قدر مطلق خطا و ریشه میانگین مربعات خطا مدل پس از واسنجی در حالت ماندگار

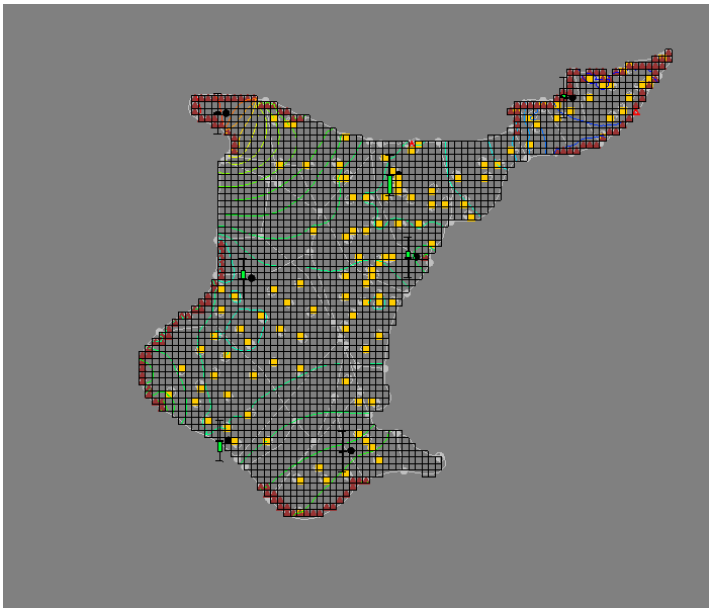
میانگین خطا	۰/۳۵۸متر
میانگین قدر مطلق خطا	۰/۳۶۲متر
ریشه میانگین مربعات خطا	۰/۴۷۹ متر

جدول۲ - جدول مقادیر محاسباتی ومقادیر مشاهداتی پیزومترهای آبخوان دشت قاین پس از واسنجی مدل در حالت ماندگار درنرم افزارGMS

نام پیزومتر	هد مشاهداتی	هد محاسباتی
سینه کوه ابوذر	۱۴۱۷/۲۷	۱۴۱۷/۷۰۸
شمال اسفشاد – بالای رود	۱۳۶۷/۹۵	۱۳۶۸/۰۷
راه فیروزآباد	۱۴۰۹	۱۴۰۹/۹۸۶
شمال کلاته خان	۱۴۰۵/۷۱	۱۴۰۶/۰۰۹
راه بیرجند – قاین	۱۴۱۳/۲۳	۱۴۱۳/۸۰۴
راه شیرمرغ	۱۴۲۶/۰۴	۱۴۲۶/۰۲۶
پهنایی	۱۴۷۷/۳۴	۱۴۷۷/۴۴۳



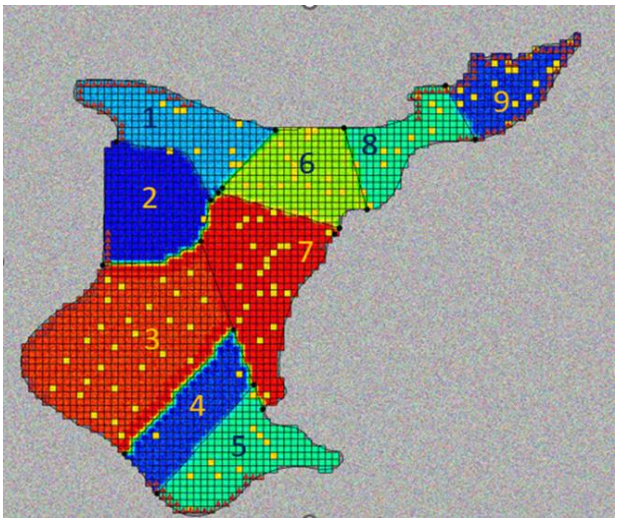
شکل ۹- نمودار مقایسه‌ای سطح آب ایستابی محاسباتی و مشاهداتی در پیزومترهای آبخوان دشت قاین پس از واسنجی در حالت ماندگار



شکل ۱۰- وضعیّت سطح آب در پیزومترهای آبخوان دشت قاین پس از واسنجی مدل در حالت ماندگار

جدول ۳- مقادیر پارامتر هدایت هیدرولیکی پهنه‌های مختلف آبخوان دشت قاین پس از واسنجی مدل در حالت ماندگار

شماره پهنه	مقدار هدایت هیدرولیکی (m/day)
۱	۳/۶
۲	۳/۴۴
۳	۴/۴۴
۴	۳/۵
۵	۳/۸
۶	۴/۱
۷	۴/۵
۸	۳/۸
۹	۳/۵



شکل ۱۱- پهنه بندی آبخوان دشت قاین براساس مقادیر هدایت هیدرولیکی

مدل غیرماندگار

مدلسازی جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت قاین در شرایط غیرماندگار بر پایه داده‌های سه‌ساله از شهریور ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۲ انجام شده است. دوره زمانی مدل‌سازی به ۳۶ گام ماهانه تقسیم شده که طول هر گام برابر با تعداد روزهای همان ماه است (برای مثال ۲۹ روز برای اسفند و ۳۱ روز برای فروردین). در این مدل غیرماندگار، تغییرات پارامترهایی مانند تراز آب‌زیرزمینی، تخلیه چاه‌ها و تغذیه آبخوان به صورت خطّی در هر گام زمانی فرض شده و به مدل وارد می‌شوند. این گام‌ها در نرم‌افزار MODFLOW به عنوان استرس‌پریود [1](دوره‌های تنش) شناخته می‌شوند.

هدف اصلی این مدل، شبیه‌سازی تغییرات تراز آب‌زیرزمینی، محاسبه بیلان حجمی محدوده مطالعه و پیش‌بینی اثرات سیاست‌های مدیریتی آینده است. پارامترهای کالیبره شده شامل هدایت هیدرولیکی و جبهه‌های ورودی که در مدل ماندگار به دست آمده‌اند، در مدل غیرماندگار نیز به کار گرفته شده‌اند. واسنجی مدل غیرماندگار برای ۲۴ گام اول (شهریور ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۱) انجام شده است. در این مرحله، پارامترهایی مانند آبدهی ویژه و جبهه‌های ورودی وارد مدل شده و با اجرای مدل و تحلیل خطاها، پارامترها با روش سعی و خطا تنظیم می‌شوند تا خطا کاهش یافته و نتایج مدل به داده‌های مشاهده‌ای نزدیک‌تر شود. سپس صحّت‌سنجی مدل برای ۱۲ گام پایانی دوره (شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۲) با مقایسه بار هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی انجام شده است.

مدل MODFLOW که در محیط نرم‌افزاری GMS اجرا می‌شود، یکی از معتبرترین مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی است و قابلیّت اجرای حالت‌های ماندگار و غیرماندگار را دارد. این مدل امکان بررسی سناریوهای مدیریتی، اثر تغییر اقلیم، تبادل آبخوان و رودخانه و پیش‌بینی فرونشست زمین را فراهم می‌کند.

مطالعات مشابه نیز از مدل‌های عددی مانند MODFLOW و MT3DMSبرای شبیه‌سازی جریان و انتقال آلاینده‌ها در آبخوان‌ها استفاده کرده‌اند. واسنجی این مدل‌ها معمولاً با داده‌های مشاهداتی و روش‌های آماری مانند خطای میانگین، خطای مطلق میانگین و ریشه میانگین مربعات انجام می‌شود تا دقّت مدل تضمین شود.

مقادیر پارامترهای ME وMAE و RMSE در مرحله واسنجی وصحّت‌سنجی مدل در حالت غیر ماندگار بترتیب ۰/۰۲ و ۰/۳۱ و ۰/۴ متر می‌باشدکه نشانی از دقّت بالای مدل در تخمین وشبیه‌سازی درست ونزدیک به واقعیّت پارامترهای هیدرولیکی و تغییرات تراز آب در سطح آبخوان است.

شبیه‌سازی درست ونزدیک به واقعیّت آبخوان توسط مدل در شرایط ماندگار نشان دهنده این موضوع است که مدل ایجاد شده می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثّر در مدیریت پایدار منابع آب‌زیرزمینی و برنامه‌ریزی سیاست‌های آبی در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

مدیریت آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه

مدل‌سازی آبخوان به عنوان ابزاری کلیدی در مدیریت منابع آب زیرزمینی و اتّخاذ سیاست‌های بهینه در آینده شناخته می‌شود. با وارد کردن داده‌ها و انجام واسنجی مدل در شرایط پایدار و ناپایدار، امکان پیش‌بینی اثرات راهکارهای مختلف مدیریتی فراهم می‌آید. این سیاست‌ها می‌توانند شامل تغییر در میزان برداشت آب یا بهبود شرایط تغذیه آبخوان باشند.

با توجه به بیلان منفی آبخوان دشت قاین، شرایط اقلیمی منطقه و همچنین بیشترین میزان برداشت آب از این آبخوان در بخش کشاورزی، که عمدتاً به دلیل اجرای الگوی کشت نامناسب و کشت محصولات پرآب‌بر، بهره‌برداری بیش از ظرفیّت آبخوان صورت می‌گیرد، سناریوی تغییر الگوی کشت به عنوان یکی از راهکارهای مهم برای بهبود وضعیت آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است.

سناریوهای قابل اعمال پس از واسنجی و صحّت سنجی مدل غیر ماندگار

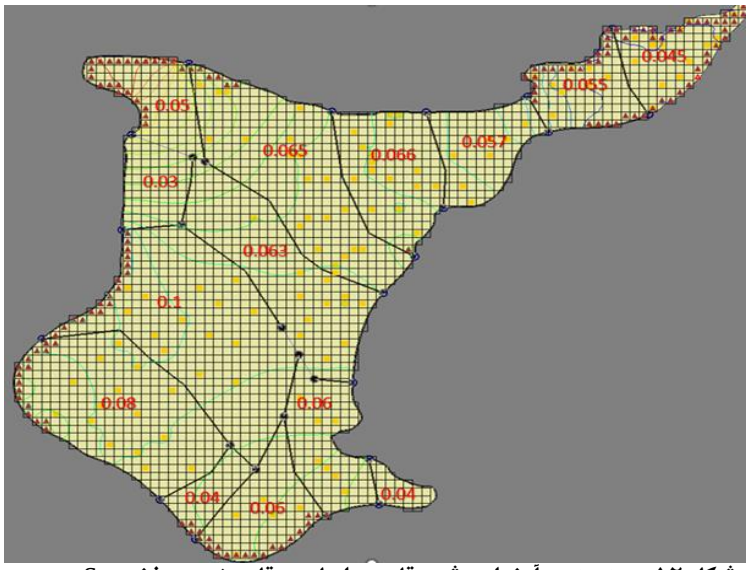
پس از تهیّه مدل غیرماندگار و انجام واسنجی آن، صحّت‌سنجی مدل نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده بسیار به داده‌های مشاهداتی نزدیک هستند و بنابراین می‌توان با اطمینان از نتایج مدل برای تحلیل و اجرای سناریوهای مدیریتی استفاده کرد. در ادامه، با اعمال سناریوی تغییر الگوی کشت زراعی در منطقه بر مدل ایجاد شده، نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل نشان‌دهنده واکنش سطح ایستابی آبخوان دشت قاین نسبت به این تغییرات است. این واکنش‌ها می‌توانند به عنوان مبنایی مهم در مدیریّت منابع آبی حوزه مورد مطالعه قرار گرفته و راهکارهایی برای مقابله با بحران آب در منطقه ارائه دهند.

مطالعات مشابه نیز تأکید دارند که تغییر الگوی کشت و کاهش برداشت آب در بخش کشاورزی تأثیر قابل توجهی بر بهبود تراز آب زیرزمینی دارد و می‌تواند به کاهش افت منابع آبی کمک کند. بنابراین، استفاده از مدل‌های عددی مانند MODFLOW در کنار داده‌های دقیق و سناریوهای مدیریتی، ابزاری مؤثّر برای برنامه‌ریزی پایدار منابع آب زیرزمینی در دشت قاین محسوب می‌شود.

1. Stress Period

جدول ٤- مقادیر میانگین خطاها و میانگین قدرمطلق خطاها و ریشه میانگین مربع خطاها مدل پس از واسنجی در حالت غیرماندگار

میانگین خطاها	۰/۰۲
میانگین قدرمطلق خطاها	۰/۳۱
ریشه میانگین مربع خطاها	۰/۴



شکل ۱۲- پهنه بندی آبخوان دشت قاین براساس مقادیرضریب ذخیرهSy

جدول ۵ - مقادیر ضریب ذخیره Sy آبخوان درGMS

شماره پهنه	مقادیر ضریب ذخیره (Sy) هر پهنه پس از کالیبراسیون مدل
۱	۰/۰۸۵
۲	۰/۰۶
۳	۰/۰۴
۴	۰/۰۶
۵	۰/۰۴
۶	۰/۰۶۳
۷	۰/۰۳
۸	۰/۰۵
۹	۰/۰۶۵
۱۰	۰/۰۶۶
۱۱	۰/۰۵۷
۱۲	۰/۰۵۵
۱۳	۰/۰۴۵
۱۴	۰/۱

سناریوی کاهش بهره‌برداری از منابع آبی دشت قاین با اجرای الگوی کشت مناسب

بر اساس آمار شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان‌جنوبی، میزان استحصال آب از منابع زیرزمینی در سال ۱۴۰۳ میزان ۲۴/۸ میلیون مترمکعب در سال بوده و سهم چاه‌های کشاورزی دشت قاین ۱۳۶۱۳۳۱۵ مترمکعب در سال بوده است که چیزی در حدود ۵۵ درصد برداشت (این میزان برداشت غیر از برداشت قنوات وچشمه ها به میزان ۴/۳۳ میلیون مترمکعب در سال) می باشد. الگوی کشت نامناسب، به ویژه کشت محصولاتی مانند چغندر قند با نیاز آبی حدود ۱۰۹۵۳/۳متر مکعب در هکتار، پنبه ۶۹۰۰ مترمکعب در هکتار و

محصولات جالیزی ۳۶۲۵/۳ متر مکعب در هکتار، ذرّت علوفه‌ای ۶۹۲۲/۴ متر مکعب در هکتار، یونجه ۱۳۱۳۳/۳ متر مکعب در هکتار و... که مصرف آب بالایی دارند، نقش قابل توجّهی در هدررفت منابع آبی این دشت ایفا می‌کند. این محصولات علاوه بر اینکه از نظر عملکرد توجیه اقتصادی مناسبی ندارند، منابع اصلی اتلاف آب محسوب می‌شوند.

با تغییر الگوی کشت به سمت محصولات کم آب‌بر و دارای توجیه اقتصادی مانند زعفران بانیاز آبی ۱۹۷۰/۶۲متر مکعب در هکتار، زرشک ۵۲۷۰/۹ متر مکعب در هکتار و عناب۴۰۲۷/۴ مترمکعب در هکتار و... در اراضی دشت قاین و کاهش ۱۰ درصدی برداشت از منابع آب زیرزمینی ناشی از تغییر الگوی کشت و با ثابت در نظر گرفتن سایر شرایط تعریف شده برای مدل، نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد:

۱. شیب تراز آب زیرزمینی مثبت شده و در مدت یک سال به طور متوسط حدود ۰/۷۴ متر جبران افت آبخوان رخ می‌دهد.

۲. با احتساب ضریب ذخیره متوسط ۰/۰۵۸، حدود ۵۸۴۵۳۱۲ متر مکعب در سال به حجم آب مخزن آبخوان افزوده می‌شود.

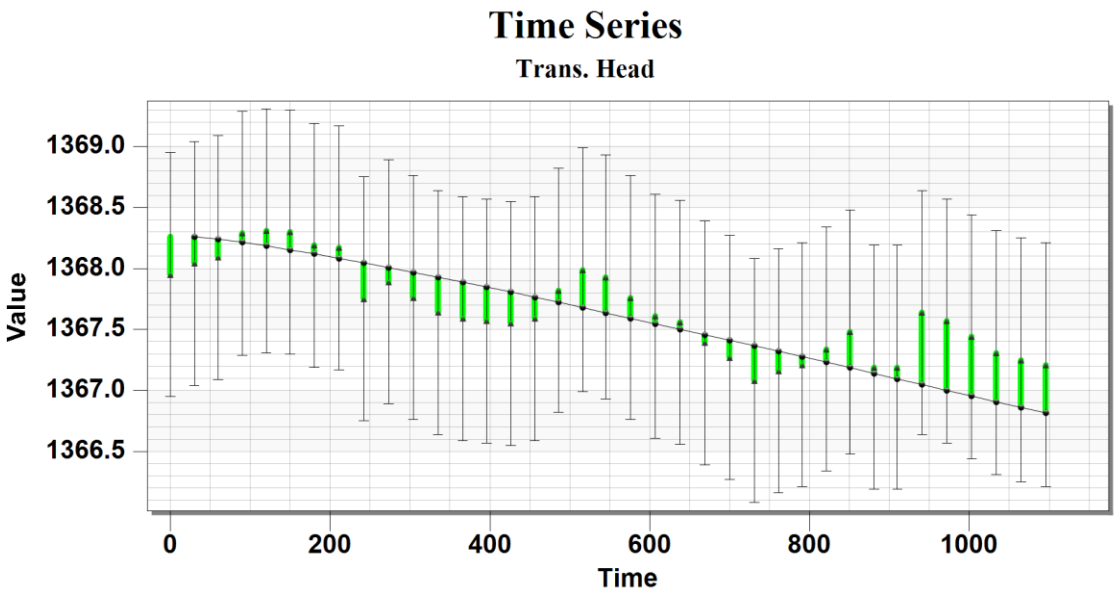
۳. واکنش پیزومترها نسبت به این سناریو یکسان نبوده است؛ در ۴ پیزومتر افزایش سطح تراز آب و در ۳ پیزومتر از ۷ پیزومتر کاهش تراز آب مشاهده شده است. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر سناریو در بخش‌های مختلف آبخوان به صورت یکنواخت نبوده و عوامل محلّی مانند ویژگی‌های زمین‌شناسی، میزان برداشت آب و شرایط تغذیه آبخوان ممکن است باعث این تفاوت‌ها شده باشند .

بنابراین، برای مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی، لازم است این واکنش‌های متفاوت در نظر گرفته شده و راهکارهای منطقه‌ای متناسب با هر بخش ارائه شود.

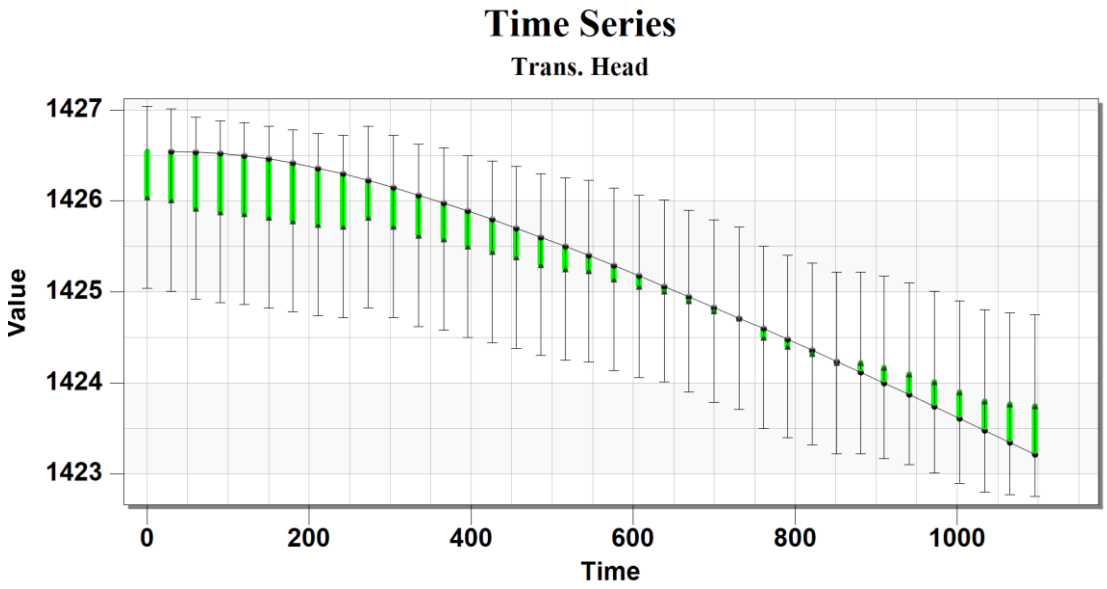
این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت تغییر الگوی کشت و بهبود روش‌های آبیاری بر وضعیّت منابع آب‌زیرزمینی دشت قاین است و می‌تواند به عنوان یکی از راهکاری مؤثّر در مدیریت پایدار منابع آبی این منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ٦- تغییرات تراز سطح ایستابی در پیزومترهای دشت قاین در اثر اعمال طرح تغییر الگوی کشت وبررسی اثرات آن دریک دوره ۱۲ ماهه

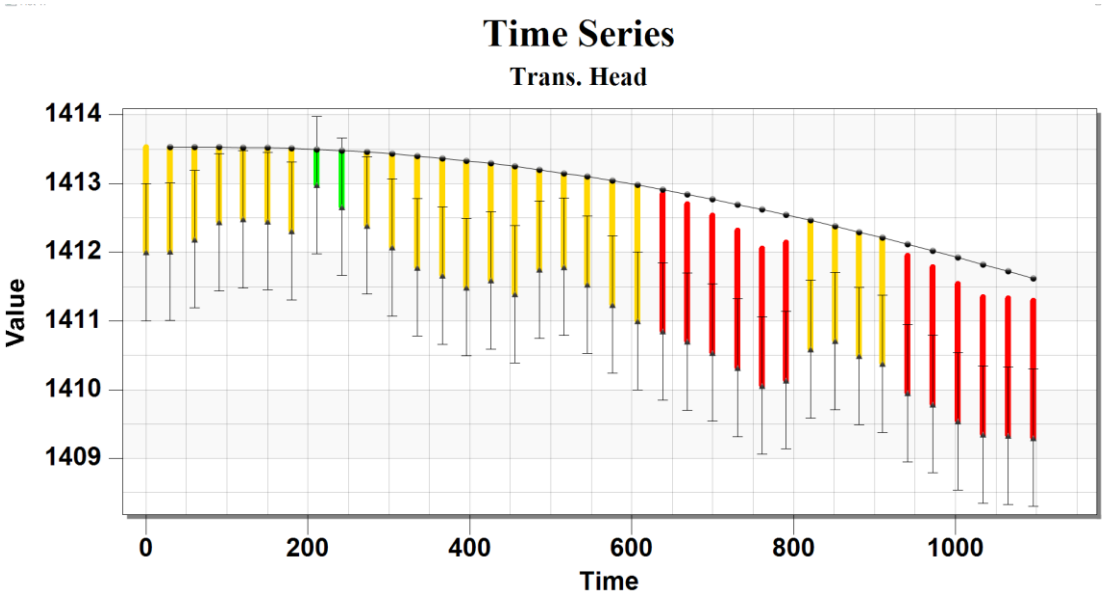
ردیف	نام پیزومتر	مشاهدات		داده‌های شبیه‌سازی شده			میزان افزایش هدپیزومتر
		SP1	SP36	SP1	SP36	SP60	دراثر اعمال سناریو
۱	سینه کوه ابوذر	۱۴۲۲/۷۷	۱۴۱۷/۳۶	۱۴۱۹/۵۳۳	۱۴۱۸/۹۱	۱۴۱۸/۰۷۸	۱/۴۴۷
۲	شمال اسفشاد بالای رود	۱۳۶۷/۹۵	۱۳۶۷/۲۱	۱۳۶۸/۳۲۴	۱۳۶۶/۸۵۲	۱۳۶۶/۷۲۳	-۰/۴۸۷
۳	راه فیروز آباد	۱۴۰۸/۷۸	۱۴۰۹/۱۴	۱۴۱۲/۹۵۷	۱۴۱۲/۹۵۲	۱۴۱۲/۹۴۱	۳/۸
۴	شمال کلاته خان	۱۴۰۵/۷۱	۱۴۰۵/۵	۱۴۰۷/۸۸۱	۱۴۰۶/۵۱۱	۱۴۰۵/۹۸۶	۰/۴۸۶
۵	راه بیرجند قاین	۱۴۲۶/۰۴	۱۴۲۳/۷۵	۱۴۲۶/۹۸	۱۴۲۳/۵۳۴	۱۴۲۲/۵۸۲	-۱/۱۶۸
۶	راه شیرمرغ	۱۴۷۷/۳۴	۱۴۷۹/۱۵	۱۴۷۷/۴۶۶	۱۴۷۸/۴۲۷	۱۴۷۸/۴۴۶	-۰/۷۰۴
۷	پهنایی	۱۴۱۲	۱۴۰۹/۳	۱۴۱۴/۱۵۲	۱۴۱۲/۱۳۴	۱۴۱۰/۹۶۹	۱/۶۶۹



شکل ۱۳ - واکنش پیزومتر شمال اسفشاد بالای رود به سناریوی تغییر الگوی کشت وکاهش برداشت در سطح آبخوان دشت قاین



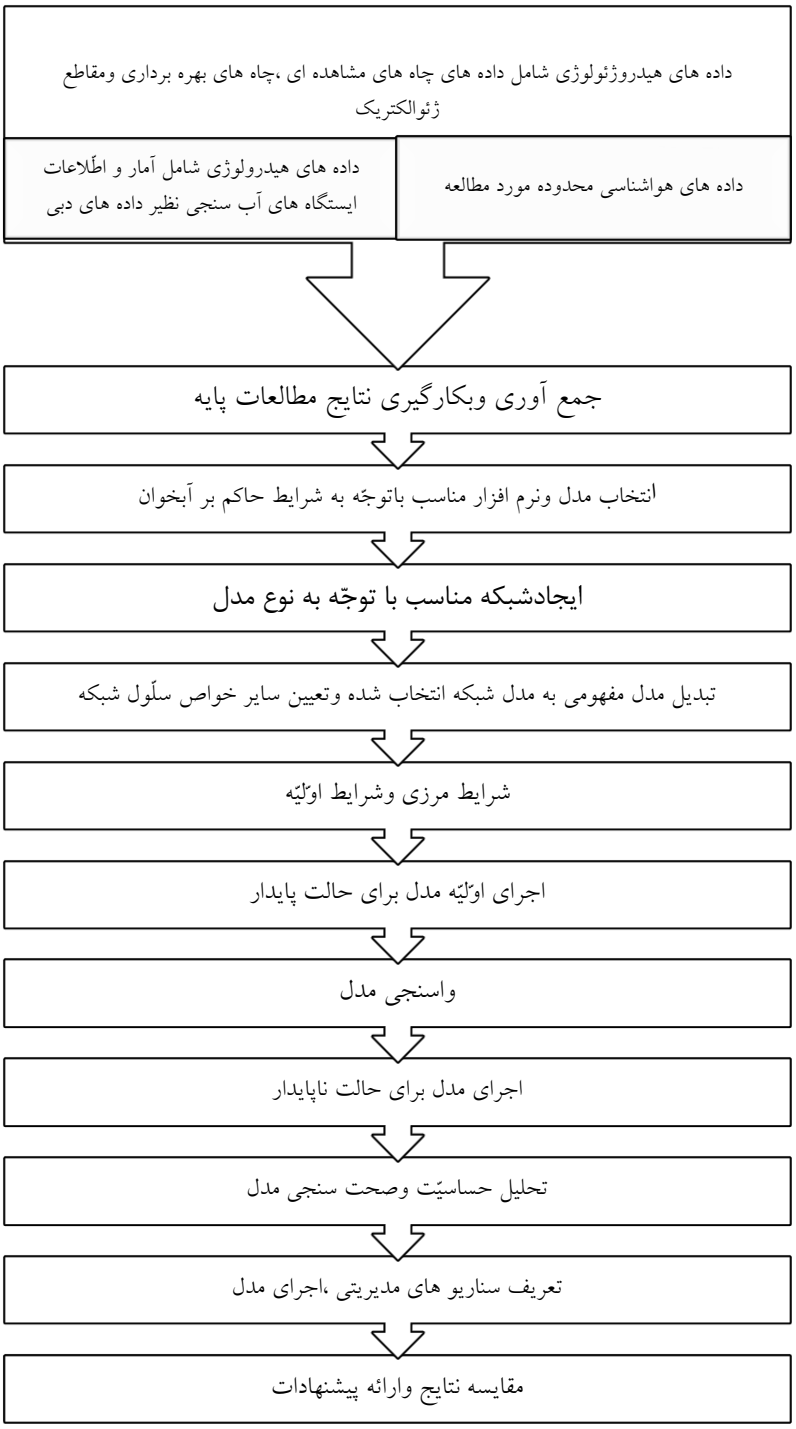
شکل ١٤ – واکنش پیزومتر راه بیرجند – قاین به سناریوی تغییر الگوی کشت وکاهش برداشت در سطح آبخوان دشت قاین



شکل ١٥ – واکنش پیزومتر پهنایی به سناریوی تغییر الگوی کشت وکاهش برداشت در سطح آبخوان دشت قاین

نتیجه‌گیری

در تهیّه مدل آب‌های زیرزمینی همیشه بالا بودن دقّت در آمار و اطّلاعات اوّلیه (استفاده از اطلاعات و داده هایی مانند توپوگرافی، داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری، تغذیه، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، ارتفاع سنگ کف) نقش بسزایی در بالابردن دقّت مدل ایفا می نماید و برعکس هرگونه خطا و اشتباه در داده‌های اوّلیّه سبب بروز عدم قطعیّت در مدل وخروجی‌های آن می گردد. از مهمترین پارامترهایی که سبب بروز عدم قطعیّت در مدل در حالت ماندگار وغیرماندگار گردید پارامتر هدایت هیدرولیکی در مدل ماندگار و ضریب ذخیره Sy در مدل غیرماندگار بود. برای اینکه تأثیر پارامترهای فوق به حداقل ممکن برسد در مرحلهٔ ماندگار محدوده مورد مطالعه براساس پارامتر هدایت هیدرولیکی به ۹ منطقه تقسیم بندی شد و براساس مقادیر مختلف این پارامتر مرحلهٔ واسنجی مدل انجام پذیرفت. مقادیر نهایی پارامتر هدایت‌هیدرولیکی در جدول شماره ۳ ارائه گردید. در مرحلهٔ ماندگار با تغییرات این پارامتر خطای مدل به حداقل ممکن رسید.



شکل ١٦ - فلوچارت مراحل انجام تحقیق

در ایـن مرحلـه ازاجـرای مـدل، بـا معیارهـای آمـاری ME و MAEوRMSE مورد ارزیـابی قـرار گرفـت و مقـادیر آن بـه ترتیـب ۰/۳۵۸ متر و۰/۳۶۲ متر و ۰/۴۷۹ متر تعیین شدکه بیان کننده میـزان دقّت بالای مدل در مرحله اوّل واسنجی است. پارامتر دیگـری کـه در مرحله حالت غیرماندگار سبب بـروز عـدم قطعیّـت در خروجـی مـدل گردید ضریب ذخیره بود که براین اساس محـدوده مـورد مطالعـه بـر اساس مقادیر مختلف به ۱۴ محدوده تقسیم بندی شد و بـا واسـنجی مدل در این مرحله مقادیر این پارامتر در محدوده مورد مطالعه به شرح

جدل شماره ۵ برآورد گردید. مقادیر پارامترهای ME وMAE و RMSE در مرحلهٔ واسنجی مدل در حالت غیر ماندگار بترتیب ۰/۰۲ و ۰/۳۱ و ۰/۴ متر می‌باشدکه نشانی از دقّت بالای مدل در تخمین و شبیه‌سازی درست و نزدیک به واقعیّت پارامترهای هیدرولیکی و تغییرات تراز آب در سطح آبخوان است.

با اعمال سناریو تغییر الگوی کشت در محدوده مورد مطالعه آبخوان دشت قاین و جایگزینی محصولات کم آب بر دارای توجیه اقتصادی بجای محصولات پر آب بری که بعضاً توجیه اقتصادی ندارند شاهد کاهش ۵۸۴۵۳۱۲ متر مکعبی برداشت از منابع آب زیرزمینی محدودهٔ مورد مطالعه می باشیم. نتایج نشان می دهد که تغییر الگوی کشت بعنوان راهکار عملی می تواند در مقابله با پدیده خشکسالی در استان خراسان جنوبی و دشت های ممنوعه این استان مورد استفاده واجرا قرار گیرد . البته این موضوع با همکاری دستگاههای دولتی (سازمان جهاد کشاورزی وشرکت آب منطقه ای استان) وذینفعان بخش کشاورزی محقّق خواهد گردید. البته بعضی از حمایت های مالی و قانونی دولت در پیش خرید محصولات جایگزین و قیمت گذاری مناسب در موفقیّت این طرح بی تأثیر نخواهد بود.

منابع

خسروی،ح. اسکندری دامنه، ح. زهتابیان، غ. و آذرنیوند، ح. براتی، ع. ۱۴۰۱. پیش بینی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در مناطق خشک (مطالعه موردی دشت میناب). پژوهش های فرسایش محیطی. ۳:۱۲ (۴۷). ۹۹-۷۸.

محمدزاده، ح.، ناصری، ح. و نظری، ر. ۱۳۹۱. شبیه سازی سیستم جریان آب زیرزمینی دشت زاوه - تربت حیدریه با استفاده از کد MODFLOW. شانزدهمین انجمن زمین شناسی ایران.

ساعت ساز، م. و چیت سازان، م. ۱۳۸۴. کاربرد مدل ریاضی MODFLOW در بررسی گزینه‌های مختلف مدیریت منابع آب دشت رامهرمز .مجله علوم دانشگاه شهید چمران، شماره ۱۴: ۱-۱۵.

عزیزی، ف.، اصغری مقدم، ا. و ناظمی، ا. ۲۰۱۹. تغییرات مکانی شوری آب‌زیرزمینی و ارزیابی خطر نفوذ آب شور در آبخوان دشت ملکان. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱): ۳۲-۴۴.

فاتحی مرج، ا.، طائی سمیرمی، م.، کلاهچی، ع. و میرنیاپیش، س، خ. ۱۳۹۰. بینی نوسانات سطح ایستابی آبخوان گربایگان برای دوره زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۴۳۷ با استفاده از مدل عددی MODFLOW. ۳۴(۲): ۴۱-۵۰.

نجاتی جهرمی. ز. ۱۳۸۸. شبیه سازی منابع آب دشت عقیلی با استفاده از مدل ریاضی تفاضلات محدود. پایان نامه کارشناسی ارشد،دانشگاه شهید چمران اهواز.

نوذرپور، ل.، چیت سازان، م. و فرهادی‌منش، آ. ۱۳۹۳. ارزیابی ارتباط هیدرولیکی آبخوان دشت لور اندیمشک و رودخانه دز با استفاده از مدلMODFLOW. زمین شناسی کاربردی پیشرفته.

Chakraborty, S., Maity, P. K. and Das, S. 2020. Investigation, simulation, identification and prediction of groundwater levels in coastal areas of Purba Midnapur, India, using MODFLOW. Environment, development and sustainability. 22(4): 3805-3837.

Khaledi Alamdari, M. and Majnooni Heris, A. 2022. Estimation of Hydraulic conductivity and Specific storage of Shabestar Plain Aquifer Using Numerical model. Hydrogeology. 7(1): 42-52.

Nakhaei, M., Hasani, A., Moghimi, H. and Abbasnovinpour, E. 2022. Predicting the effects of overuse on Zarandieh plain aquifer (Markazi province, Iran) using GMS software. Hydrogeology. 6(2): 13-29.

Reyhani, E., Yousefi, H., Mirzavand, M. and Sadatinejad, S. J. 2023. Modeling the Impact of Manangement Scenario on the Kashan Aquifer Using Mathematical Model of Modflow and Seawat. Iranian journal of Ecohydrology. 10(1): 17-32.

Edalat, A., Rajabi, A.M. and khodaparast, M. 2022. Numerical modeling of groundwater flow in Ali Abad Plain of Qom to predict fluctuations of the water table and hydraulic conductivity. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology.15 (2): 49- 67.

Wang, S., Shao, J., Song, X., Zhang, Y., Huo, Z. and Zhou, X. 2008. Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China. Environmental Geology. 55: 1449-1462

Yidana, S. M., Banoeng-Yakubo, B. and Akabzaa, T. M. 2010. Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. Journal of African Earth Sciences. 58(2): 220-234.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 19, Oct.-Nov. 2025, p. 537-554

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۹، مهر - آبان ۱۴۰۴، ص. ۵۵۴-۵۳۷

Studying the Effects of Changing Cropping Patterns on the Quantitative Status of Groundwater Resources in the Qain Plain Aquifer

Mehdi Dasturani[1]*, Mahdi Amirabadizadeh[2], Kambiz Mohammadi[3]
Recived: May.28, 2025 Accepted: Jun.18, 2025

Abstract

The study area of this research is the Qayen aquifer plain in South Khorasan Province, which has a hot and dry climate. In recent years, decreased precipitation, limited water resources, excessive drilling of agricultural wells, and over-extraction of groundwater have led to a sharp decline in groundwater levels in this region. The aim of this study is to model groundwater resources and apply quantitative models to simulate the flow in the Qayen aquifer plain and analyze fluctuations in the static water level in piezometer wells, as well as to provide managerial strategies to counteract the drawdown of groundwater levels. This study was conducted using hydrogeological, hydrological, meteorological data, and foundational groundwater resource studies. For a detailed hydrogeological analysis of the aquifer, groundwater numerical modeling was performed with the GMS software and the MODFLOW code, and the groundwater level was simulated for a three-year period (1399 to 1402) in 36 monthly time steps. Model calibration was done manually for years 1399 to 1401, and validation was performed for years 1401 to 1402. The difference between the observed and calculated groundwater levels during the calibration steps was evaluated using the root mean squared error (RMSE). In the steady-state stage, the model was evaluated with the statistical criteria ME, MAE, and RMSE, whose values were 0.358 m, 0.362 m, and 0.479 m, respectively. The ME, MAE, and RMSE values in the calibration and validation stages for the transient (unsteady) state were 0.02, 0.31, and 0.40, respectively, indicating the model's accuracy in estimating and simulating the hydraulic parameters and water level changes in the aquifer. After ensuring the model's accuracy, a scenario of changing cropping patterns in the Qayen plain and its impact on increasing the groundwater level (holding other conditions constant) was analyzed in the plain's piezometers and subjected to analysis. The results showed that implementing the above scenario and shifting Qayen plain's cropping pattern from water-intensive crops to water-saving crops would increase the volume of groundwater stored in the plain by 85.5 million cubic meters per year**.**

Keywords: Groundwater resource modeling, Piezometric well, Qain, Water table fluctuations

1- Associate Professor, Department of Water Science Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Science Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
3- PhD Student, Irrigation and Drainage, Department of Water Science Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
(* Corresponding Author Email: mdastourani@birjand.ac.ir)