

شبیه‌سازی پیشروی آب شور و ارزیابی سناریوهای مدیریتی بر آن، مطالعه‌ی موردی: محدوده مطالعاتی کاشان.

پژوهشگران: آزاده احمدی^۱، سعید صالحی^۲
کد پروژه:

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل عدم وجود آب سطحی مستمر و با کیفیت اکثر نیازها از آب زیرزمینی تامین می‌شود؛ کمبود آب زیرزمینی در این مناطق بسیار مشهود می‌باشد. حوضه آبریز کاشان در فلات مرکزی ایران، از دو بخش شوره‌زارها شامل مناطق کویری دریاچه نمک و دشت کاشان تشکیل شده است. در شرایط طبیعی با توجه به تراز آب زیرزمینی در محدوده، جهت جریان آب زیرزمینی همواره به سمت خروجی آبخوان و شوره‌زارها برقرار می‌باشد؛ اما برداشت‌های بیش از حد و کاهش تغذیه موجب کاهش تراز آب زیرزمینی و معکوس شدن جریان آب زیرزمینی و هجوم آب شور خروجی به سمت آبخوان شده است. پیشروی آب شور در محدوده موجب کاهش کیفیت آب زیرزمینی و نامناسب شدن برای مصارف مختلف می‌شود. بنابراین مدیریت آب زیرزمینی در محدوده کویری برای جلوگیری از تغییرات نگران کننده به عنوان تنها منبع در دسترس برای تامین نیازها امر ضروری می‌باشد. به این منظور از مدل‌های ریاضی توزیعی و فیزیکی محور MODFLOW و MT3DMS و SEAWAT در این مطالعه استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی کمی مشخص کرد تراز آب زیرزمینی در طول مدل‌سازی ۱/۲۲ متر افت پیدا خواهد کرد. همچنین مدل‌سازی کیفی مشخص کرد بر غلظت TDS در دو ناحیه شرقی و شمال شرقی افزوده شده است. نتایج مدل‌سازی با چگالی مختلف مشخص کرد میزان پیشروی آب شور در عمق بیشتر از سطح می‌باشد. بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی در محدوده مطالعاتی مشخص کرد کاهش برداشت آب زیرزمینی موجب افزایش تراز آب زیرزمینی و کاهش پیشروی آب شور در محدوده مطالعاتی شده است. همچنین وجود خط انتقال آب از حوضه زاینده رود نیز موجب افزایش تراز و کاهش پیشروی آب شور به محدوده مطالعاتی شده است.

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، مدل‌سازی، آبخوان کاشان، مدیریت منابع آب زیرزمینی، پیشروی آب شور، کمی و کیفی.

^۱ عضو هیئت علمی دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی تهران (ایمیل: az_ahmadi@sbu.ac.ir)

^۲ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران- مدیریت منابع آب، دانشگاه شهید بهشتی (ایمیل: s.salehifar@mail.sbu.ac.ir)

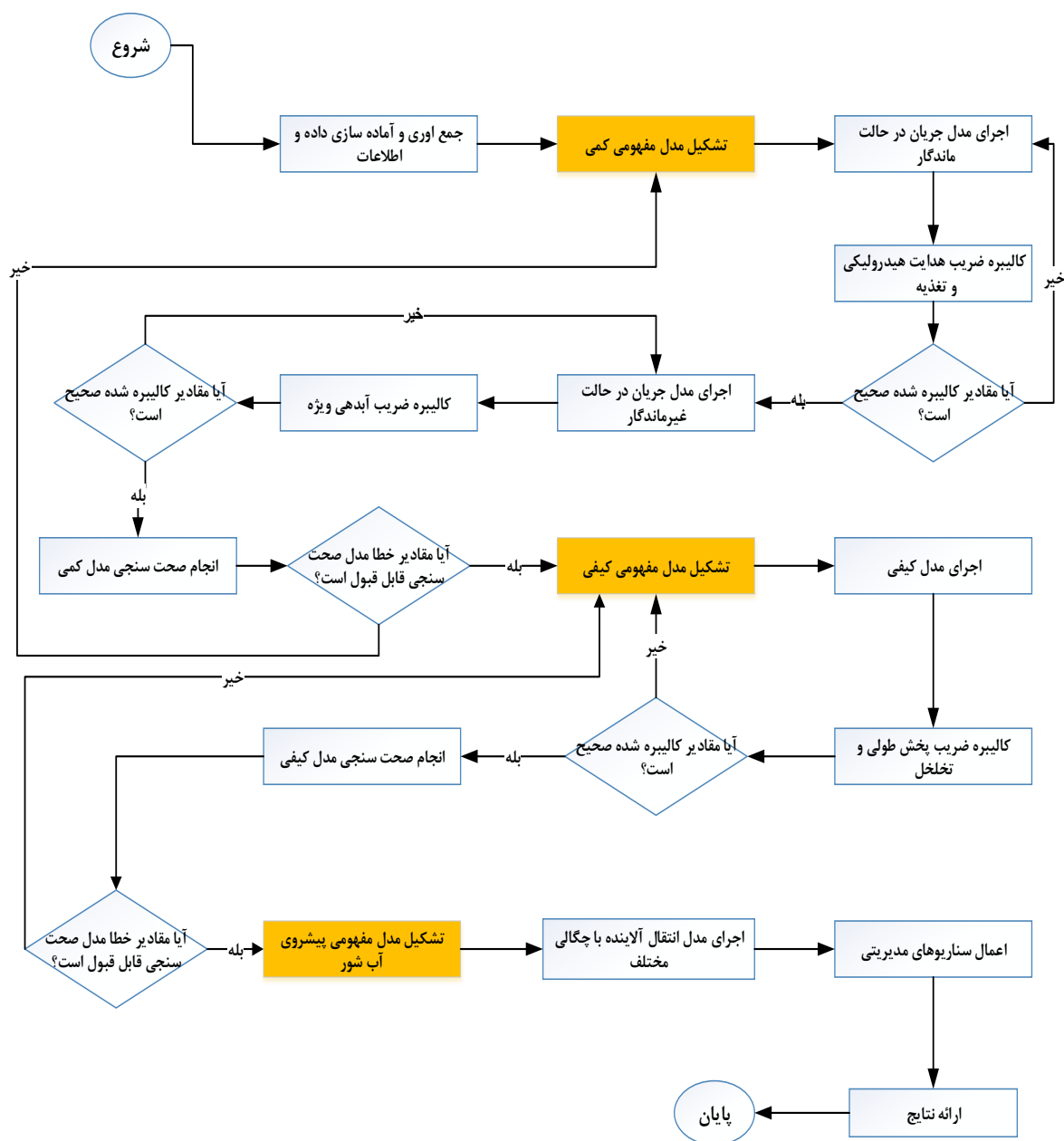
۱- مقدمه

کاهش ذخایر آب سطحی و زیرزمینی موجب آسیب دیدگی اکوسیستم های آبی، کاهش کیفیت ذخایر آب، و پیامدهای اجتناب ناپذیر طبیعی شده است (Konikow and Kendy 2005). آب های زیرزمینی مهم ترین منبع آب برای مصارف مختلف، از جمله مصارف صنعتی، کشاورزی، خانگی و آشامیدنی می باشد و تقریباً یک سوم مصرف آب شیرین جهان را تامین می کند (Marcuschi 2002). کاهش میزان تغذیه و افزایش بهره برداری همچنین بهره برداری نادرست از منابع به ویژه در بخش کشاورزی موجب وارد آمدن خسارت های غیرقابل جبرانی به آب های زیرزمینی شده است. در نواحی ساحلی و مناطق کویری منتهی به بخش شور، آب شیرین با آب شور دارای ارتباط هیدرولیکی می باشد. در شرایط طبیعی، تعادل بین آب شور و شیرین برقرار بوده و با توجه به تراز آب شیرین، جهت جریان به سمت آب شور برقرار می باشد، اما به دلیل فعالیت و پمپاژ بیش از حد آب شیرین تراز آب زیرزمینی کاهش یافته و موجب معکوس شدن جهت جریان و تهاجم آب شور به سمت آب شیرین می شود (Lathashri and Mahesha 2015). پیشروی آب شور پیامدهای غیر منتظره ای را برای سیستم های اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی به همراه خواهد داشت (Tuohy et al. 2014). مدیریت منابع آب زیرزمینی برای جلوگیری از تغییرات نگران کننده در آسیب پذیری های اجتماعی و اقتصادی به عنوان یک منبع حیاتی برای آینده امری ضروری است. به منظور مدیریت این منابع لازم است با استفاده از مدل های عددی، آبخوان مورد نظر شبیه سازی گردد؛ امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی و ارتباط بین علوم مختلف با ابزارهای کامپیوتری باعث شده تا از روش های مختلف مدل سازی برای شبیه سازی وضعیت موجود آبخوان استفاده شود. با توجه به توضیحات فوق مسئله پیشروی آب شور و مسائل کیفی در مدیریت منابع آب زیرزمینی از چالش های اساسی جامعه در آبخوان های ساحلی و کویری منتهی به بخش شور می باشد. بنابراین در این تحقیق با شبیه سازی جریان آب زیرزمینی و بررسی روند تغییرات کیفی به بررسی وضعیت فعلی آبخوان و ارائه راهکارهای مدیریتی برای آینده آبخوان پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی می باشد و به ارزیابی منطقه مورد مطالعه از نظر کمیت و کیفیت آب زیرزمینی می پردازد و در نهایت راهکارهای مدیریتی برای پیشگیری از تغییر کیفیت آب زیرزمینی و پیشروی آب شور ارائه می دهد. به منظور مدیریت صحیح منابع آب بخصوص منابع آب زیرزمینی، لازم است این منابع به صورت مدل درآید و روند تغییرات آن شبیه سازی شود، تا با مدیریت هدفمند و فرایندی بتوان بهترین تصمیم ها را در زمان مناسب برای آبخوان اتخاذ نمود. اصولاً با مدل سازی می توان حرکات و واکنش های یک سیستم را به سادگی در اختیار گرفت و کنترل کرد. کنترل این حرکات در طبیعت معمولاً امکان پذیر نیست یا اینکه متضمن صرف هزینه و زمان زیادی است. گذشته از این، در علوم مهندسی اغلب طراح مایل به جایگزین کردن سیستم جدید به جای سیستم اصلی است تا در نهایت بتوان بهترین انتخاب را داشته باشد. این کار در عمل تقریباً غیرقابل اجرا است، ولی به کمک مدل سازی می توان با هزینه کم این بررسی را انجام داد (Wagner 1995). مدل ها به کمک زبان ریاضی ارتباط دقیقی بین پارامترهای یک سیستم ایجاد می کنند و با استفاده از روابط ریاضی مشخصات مکانی و زمانی سیستم را شبیه سازی می کند. با داشتن چنین روابطی می توان عوامل اثرگذار بر سیستم آب زیرزمینی را شناسی کرده و به شکل بهتری به بررسی آن پرداخت. از بین مدل های مختلف موجود در نرم افزار GMS، از مدل MODFLOW برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی و از بین مدل های مختلف شبیه سازی کیفی از مدل های SEAWAT و MT3DMS

برای انجام این پژوهش استفاده شده است. شکل (۱) مراحل اصلی شبیه سازی کمی و کیفی و نحوه ارتباط بین این مدل ها را مشخص کرده است.



شکل (۱) - مراحل اصلی برای رسیدن به اهداف تحقیق.

GMS^۳ نرم افزار پیچیده و جامعی برای مدل سازی آب های زیرزمینی می باشد. از GMS برای تهیه فایل های ورودی و پیش پردازش مدل های کمی و کیفی آب زیرزمینی استفاده می شود. GMS در حقیقت یک محیط مدل سازی گرافیکی جامع برای پاسخ گویی به نیازهای شبیه سازی رایانه ای جریان آب زیرزمینی ایجاد کرده که در برگیرنده انواع مدل های المان محدود و تفاضل محدود، به صورت دوبعدی و سه بعدی است. GMS به طور خاص برای مدل های آب زیرزمینی طراحی شده و بسیاری از آخرین تکنیک های پیشرفته در رابط های کاربری و گرافیکی کامپیوتری را در خود جای داده است. GMS مدل های جریان و انتقال آلاینده را پشتیبانی می کند و روش های نیمه خودکار و تمام خودکار را برای تولید مش های دو بعدی و سه بعدی در اختیار کاربر قرار می دهد و سپس می توان از انواع زبانه ها و ابزارهای گرافیکی برای تعریف شرایط مرزی و سایر اطلاعات استفاده کرد (Owen et al. 1996).

۲-۲- مدل MODFLOW

MODFLOW^۴ یک مدل عددی فیزیک محور در مقیاس حوضه است، که از آن می توان برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی بهره برد. مدل MODFLOW برای شبیه سازی سه بعدی آب زیرزمینی در یک محیط متخلخل معادلات دیفرانسیل جریان آب زیرزمینی را به روش تفاضل محدود حل می کند. این مدل جریان آب زیرزمینی را برای دو حالت ماندگار و غیرماندگار در آبخوان تک لایه یا چند لایه شبیه سازی می کند. این مدل توانایی شبیه سازی جریان یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی در آبخوان های آزاد یا تحت فشار را دارد. همچنین، جریان های مرتبط با تنش های خارجی مانند چاه ها، شارژ مجدد منطقه، تبخیر و تعرق، زهکشی ها و رودخانه ها را نیز می تواند شبیه سازی کند. این مدل توانایی محاسبه بیلان آب زیرزمینی در مکان و زمان های مختلف را دارد.

مدل MODFLOW برای شبیه سازی سیستم آب زیرزمینی فرضیات زیر را در نظر می گیرد (Chakraborty et al. 2020).

- محیط شبیه سازی کاملاً در حالت اشباع قرار دارد.
- جریان آب زیرزمینی از قانون دارسی پیروی می کند.
- چگالی آب زیرزمینی در طول مدل سازی ثابت است.
- جهت و مقادیر هدایت هیدرولیکی و انتقال پذیری در سیستم آبخوان ثابت باقی می ماند.

مدل MODFLOW دارای ساختار مدولار می باشد، به این ترتیب که از یک برنامه اصلی و یک سری ریز برنامه های مستقل (ماژول) تشکیل شده است. این ماژول ها در بسته هایی^۵ گروه بندی می شوند و هر بسته با ویژگی که باید شبیه سازی کند، با مجموعه ای از معادلات حاصل از تفاضل محدود سرو کار دارد. تقسیم بندی برنامه به کاربر اجازه می دهد تا ویژگی های هیدرولوژیکی خاص را به طور مستقل مورد بررسی قرار دهد.

^۳GroundWater Modeling System

^۴ Moular Groundwater Flow

^۵ package

۲-۳- مدل MT3DMS

MT3D^۶ مدل سه بعدی انتقال آلاینده و املاح آب زیرزمینی است، که برای شبیه سازی پخش، انتقال و واکنش شیمیایی اجزای محلول در آب های زیرزمینی مورد استفاده قرار می گیرد. در سال ۱۹۹۸ نسخه کامل تر MT3D به عنوان MT3DMS گسترش یافت و منتشر شد. که در آن پسوند "MS"^۷ بیانگر انتقال چند گانه است که به بسته های موجود MT3D بسته ی واکنش پارامترهای کیفی نیز اضافه شده است (Zheng and Wang 1999). مانند MT3D کد MT3DMS به همراه خود شبیه سازی جریان ندارد. بنابراین، این کدهای شبیه سازی انتقال آلاینده مستقل هستند و می توانند به همراه هر مدل آب زیرزمینی تفاضل محدود به کار گرفته شوند. با این حال، تمام نسخه های MT3D و MT3DMS تقریباً به طور انحصاری با مدل MODFLOW مورد استفاده قرار می گیرند. ارتباط بین مدل های MODFLOW و MT3DMS توسط یک بسته ی اضافی که جریان مورد نیاز برای شبیه سازی انتقال آلاینده را ذخیره می کند انجام می شود. این مدل از نتایج نهایی مدل کمی در حالت ناماندگار برای شبیه سازی انتقال آلاینده استفاده می کند (Zheng and Bennett 2002). در این مدل حرکت و انتقال آلاینده در محیط اشباع صورت می گیرد.

برخی از خصوصیات مدل عددی MT3DMS به صورت زیر می باشد:

۱. مدل توانایی شبیه سازی کیفی آلاینده های موضعی، نظیر نشت از منابع را دارد.
۲. مدل توزیعی است
۳. مدل می تواند انتقال آلاینده ها در آبخوان آزاد و محصور را شبیه سازی کند.
۴. مدل توانایی بررسی اثر تغذیه، برداشت، زهکش ها، رودخانه، جریان های سطحی و زیرزمینی، بر انتقال آلاینده ها را دارد.
۵. از مدل می توان برای شبیه سازی انتقال چندین آلاینده به صورت همزمان استفاده کرد.
۶. مدل قادر به بررسی انواع شرایط مرزی برای وارد یا خارج کردن آلاینده ها است.
۷. از مدل می توان برای شبیه سازی و بررسی انتقال، پخش و واکنش های شیمیایی استفاده کرد.

۲-۴- مدل SEAWAT

SEAWAT یک مدل عددی برای شبیه سازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی با چگالی متغیر^۸ می باشد. در بسیاری از مسائل مربوط به آب زیرزمینی فرض بر این است که غلظت املاح به اندازه کافی بزرگ نیست که بر چگالی سیال اثر بگذارد، این فرض در بسیاری از شبیه سازی های آب زیرزمینی معتبر است. با این حال در بعضی از مسائل آب زیرزمینی، تغییرات چگالی سیال می تواند تأثیرات زیادی بر الگوی جریان آب زیرزمینی داشته باشد. مدل SEAWAT یک کد تفاضل محدود است، که برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی با چگالی متغیر، از ترکیب مدل های MODFLOW و MT3DMS با تعدادی اصلاحات برای تطبیق با مسئله چگالی استفاده می کند. از آنجایی که چگالی به غلظت املاح بستگی دارد، شبیه سازهای انتقال به طور کلی باید به همراه مدل MODFLOW به کار گرفته شوند. شکل (۲) توالی محاسبه در مدل SEAWAT را نشان می دهد.

^۶ Modular tree-dimensional Transport model

^۷ Multi-Species

^۸ Variable density

برخی از خصوصیات SEAWAT به صورت زیر است:

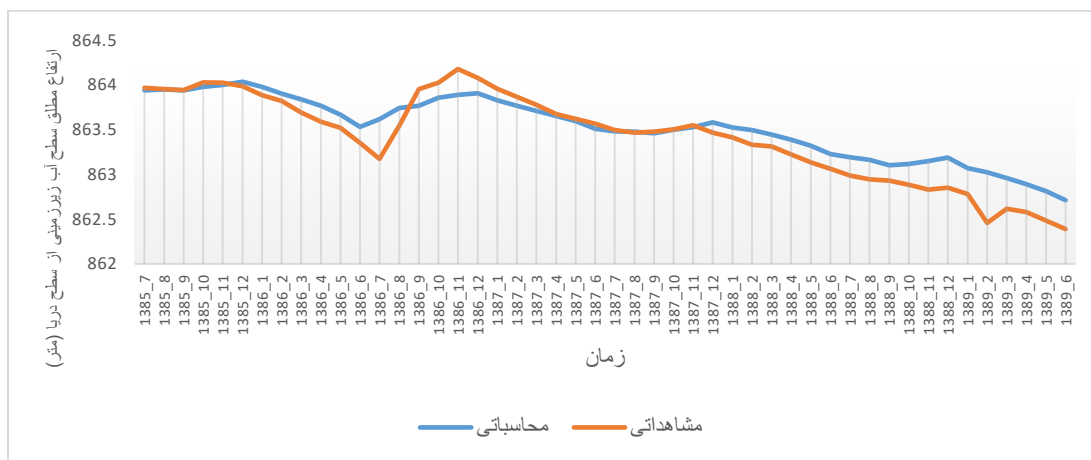
۱. مدل توانایی شبیه سازی جریان آب زیرزمینی با چگالی مختلف را دارد و از تراکم پذیری سیال و امتزاج پذیر آلاینده صرف نظر شده است.
۲. مدل می تواند جریان آب زیرزمینی را با توجه به تغییر درجه حرارت آب زیرزمینی مدل کند.
۳. مدل قادر به شبیه سازی جریان و انتقال آلاینده با انواع شرایط مرزی می باشد.
۴. مدل را می توان برای بررسی تغییرات غلظت آلاینده در لایه ها و ترازهای مختلف آب زیرزمینی به کار برد.
۵. امکان شبیه سازی جریان با چگالی مختلف در آبخوان آزاد، نیمه آزاد و محصور وجود دارد.
۶. شبیه سازی در محیط کاملاً اشباع صورت می پذیرد و فرایند انتقال ماده براساس قانون فیک می باشد.

۳- مطالعه ی موردی

محدوده مطالعاتی کاشان یکی از زیر حوضه های دریاچه نمک، در تقسیم بندی کلی هیدرولوژی ایران بوده و با کد ۴۱۳۲ مشخص شده است. این محدوده در قسمت شرق-جنوب شرق حوضه آبریز و در بخش میانی فلات مرکزی ایران واقع شده است. در دشت کاشان یک آبخوان آبرفتی با وسعت ۱۷۳۵/۷ کیلومتر مربع که معادل ۵۳ درصد از کل دشت می شود تشکیل گردیده است. جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت از سمت غرب به سمت شرق بوده و ضخامت اشباع آبخوان آبرفتی در اراضی مخروط افکنه ای درشت کم بوده که به سمت شرق در اراضی مرکزی دشت افزایش یافته و از مرکز به سمت شرق مجدداً کاهش می یابد. محدوده مطالعاتی کاشان فاقد رودخانه دائمی و یا حتی فصلی بوده و به طور کلی توان تولید رواناب در محدود مطالعاتی ضعیف بوده و جریان های سطحی تولید شده عموماً محدود به ارتفاعات و سرشاخه رودخانه ها می گردد. بر اساس اطلاعات سال های ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۰ مقدار متوسط بارندگی سالانه در دشت و ارتفاعات محدوده مورد مطالعه کاشان، به ترتیب برابر ۱۲۳/۳ و ۱۷۲/۶ ارزیابی شده است. در محدوده مطالعاتی کاشان طبق آمار جمع تخلیه از آبخوان آبرفتی به وسیله چاه و قنات برابر ۲۴۵/۸۹ میلیون متر مکعب در سال می باشد، که ۱۰۰ درصد مجموع عوامل خروجی بیلان را شامل می شود. میزان برداشت از طریق چاه ها ۲۳۹/۴۲ و از طریق قنات ۶/۴۶ میلیون متر مکعب در سال می باشد. میزان مصرف آب برداشت شده در سطح آبخوان آبرفتی در بخش کشاورزی، شرب و صنعت به ترتیب ۲۱۴/۲۷، ۲۶/۱۵ و ۵/۳ میلیون متر مکعب در سال می باشد. افزایش برداشت و کاهش تغذیه آب زیرزمینی موجب کاهش تراز آب زیرزمینی در محدوده آبخوان شده است. به گونه ای که تغییرات ذخیره آبخوان آبرفتی کاشان بر اساس داده های ۲۱ ساله، میزان کاهش حجم ذخیره یا اضافه برداشت از ذخیره ثابت آبخوان حدود ۳۶/۸۷ میلیون متر مکعب در سال محاسبه شده است. از آنجایی که بخشی از محدوده مطالعاتی کاشان را اراضی بایر و شوره زار در بر گرفته است، کاهش تراز آب زیرزمینی موجب معکوس شدن جریان آب زیرزمینی و حرکت آب شور به سمت آبخوان شده است، به گونه ای که در نواحی شرقی آبخوان منحنی های هم هدایت الکتریکی ۱۰۰۰۰ میکروموس بر سانتی متر گسترش یافته است.

۴- یافته های تحقیق

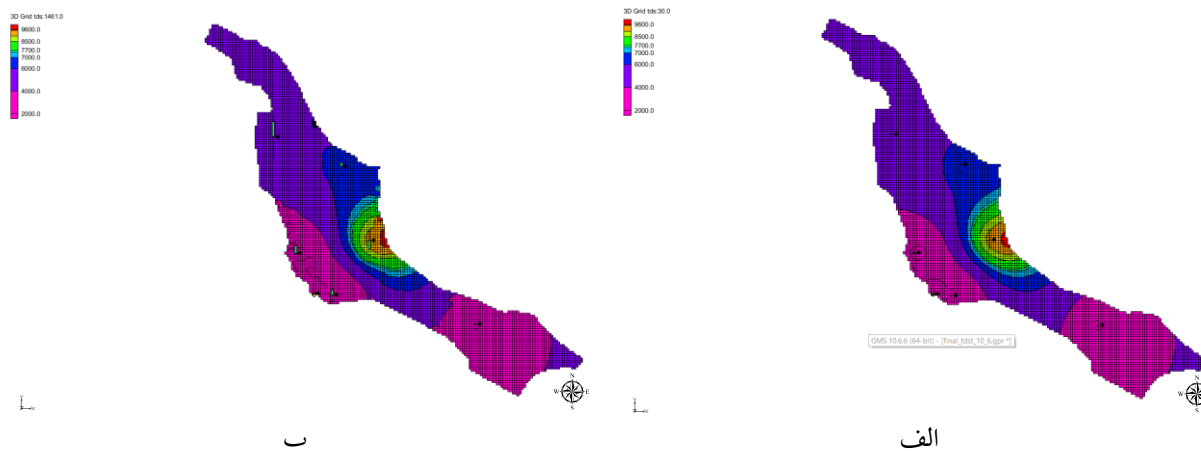
بارندگی غیریکنواخت در ایران باعث شده، مناطق کویری فلات مرکزی سهم اندکی از آن را دریافت کنند. در این مناطق به دلیل تبخیر زیاد، بخش عمده بارندگی تبخیر شده و مجدد به جو باز می‌گردد. ناچیز بودن جریانات سطحی در محدوده گرم و خشک کاشان، باعث اتکای بیش از حد به آب زیرزمینی شده است. کاشان بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهرستان بعد از اصفهان در این استان می‌باشد، تمرکز جمعیت در این نواحی و بالطبع رشد فعالیت‌ها سبب افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی شده است. افزایش برداشت و کاهش تغذیه آب زیرزمینی موجب کاهش تراز آب زیرزمینی در محدوده آبخوان شده است. در این پژوهش به منظور پایش و حفاظت از منابع آب زیرزمینی مجاور با منابع آب شور از مدل‌های شبیه‌ساز عددی MODFLOW و MT3DMS و SEAWAT برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و تغییرات کیفی محدوده کاشان استفاده شده است و به بررسی وضعیت فعلی آبخوان و ارائه راهکارهای مدیریتی برای آینده آبخوان پرداخته شده است. مدل‌سازی جریان در شرایط ماندگار برای مهر ماه ۱۳۸۵ انجام شد. پس از کالیبره ضریب هدایت هیدرولیکی و میزان تغذیه و تعیین جبهه‌های ورودی و خروجی، مقادیر خطای RMSE مدل در این شرایط معادل ۰/۸۲ به دست آمد. پس از آن جریان آب زیرزمینی در شرایط غیرماندگار در طول ۴۸ ماه، از مهر ۱۳۸۵ تا شهریور ۱۳۸۹ مورد مدل‌سازی قرار گرفت. در این شرایط نیز ضریب آبدهی ویژه و میزان تغذیه در طول مدل‌سازی مورد کالیبره قرار گرفت. مقدار خطای RMSE مدل در شرایط ناماندگار برابر ۱/۰۳ به دست آمد شکل (۲) میانگین تغییرات تراز آب محاسباتی و مشاهداتی طی دوره مدل‌سازی را مشخص کرده است. نتایج مدل‌سازی کمی مشخص کرد متوسط تراز آب زیرزمینی در طول ۴ سال مدل‌سازی به میزان ۱/۲۲ متر کاهش پیدا خواهد کرد. سپس مدل جریان آب زیرزمینی در طول ۲۴ ماه از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۱ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. مقدار خطای RMSE در این شرایط برابر ۱/۴۵ به دست آمد که مشخص کننده دقت مدل بوده و از آن می‌توان برای پیش‌بینی شرایط کمی آبخوان استفاده نمود.



شکل (۲) - میانگین تغییرات تراز آب محاسباتی و مشاهداتی طی دوره مدل‌سازی.

از آنجایی که پیش‌نیاز مدل کیفی مدل کمی می‌باشد، از مدل کالیبره شده مرحله قبل جهت مدل‌سازی کیفی استفاده شده است. بنابراین مدل‌سازی کیفی مشابه مدل کمی در طول ۴۸ ماه از مهر ۱۳۸۵ تا شهریور ۱۳۸۹ انجام شده است. در مدل کیفی مقادیر ضریب پخشیدگی طولی و مقدار تخلخل مورد واسنجی قرار گرفته است. مقدار خطای RMSE مدل کیفی معادل ۱۰۰/۲ میلی گرم بر لیتر به دست آمد. نتایج حاصل از مدل‌سازی کیفی مشخص کرد، با گذشت زمان بر غلظت کل مواد جامد محلول در قسمت شرق و شمال شرقی محدوده مورد مطالعه افزوده شده است. در شکل (۳) میزان تغییرات غلظت TDS در گام ابتدایی و انتهایی دوره مدل‌سازی مشخص شده است. سپس با توجه به ضرایب واسنجی شده این مرحله مشابه مدل کمی، مدل کیفی به مدت ۲۴ ماه از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۱

مورد واسنجی قرار گرفت. مقدار خطای RMSE در این شرایط معادل ۱۶۹/۸۱ میلی گرم در لیتر به دست آمده است؛ که نشان دهنده دقت مدل سازی کیفی بوده و می توان از آن برای پیش بینی کیفی شرایط آینده استفاده نمود.



شکل (۳) - تغییرات پارامتر کل جامدات محلول (TDS) (الف) در مهر ماه ۱۳۸۵ (ب) در شهریور ۱۳۸۹.

پس از بررسی غلظت آلاینده در سطح آبخوان توسط کد MT3DMS مشخص شد، در دو محدوده شرقی و شمال شرقی غلظت کل مواد جامد محلول افزایش پیدا کرده است. به این ترتیب به منظور بررسی جریان آب با چگالی مختلف و پیشروی مواد آلاینده در عمق آبخوان از کد تفاضل محدود SEAWAT استفاده شده است. برای شبیه سازی انتقال آلاینده با چگالی مختلف لازم است، محدوده های پیشروی آب شور گسسته سازی شود. گسسته سازی در SEAWAT شامل شبکه های تفاضل محدود در ابعاد و لایه های مختلف می باشد. به این منظور محدوده شرقی پیشروی آب شور با شبکه هایی با ابعاد 500×500 متر، شامل ۹۰۰ سلول فعال در ۱۰ لایه در نظر گرفته شده است. گسسته سازی برای محدوده شمال شرقی، شبکه تفاضل محدود با ابعاد 500×500 شامل ۵۰۴ سلول فعال در ۷ لایه در نظر گرفته شده است. ضخامت هر لایه در شبکه بندی صورت گرفته ۲۰ متر می باشد. سایر پارامترهای کمی و کیفی به سلول های مورد نظر وارد شده و مدل مشابه مدت زمان مدل سازی کمی از مهر ۱۳۸۵ تا شهریور ۱۳۸۹ به اجرا درآمده است. نتایج مدل مشخص کرد، میزان پیشروی در عمق بیشتر از سطح می باشد؛ به طوری که میزان پیشروی در عمق و سطح ناحیه شرقی به ترتیب برابر $2/88$ و $1/31$ کیلومتر مربع و در ناحیه شمال شرقی به ترتیب برابر $1/8$ و $0/48$ می باشد.

هدف اصلی از تهیه مدل کمی و کیفی آبخوان، شناخت رفتار آبخوان و پیش بینی آینده آن تحت شرایط مختلف تخلیه و تغذیه و در نهایت ارائه راهکارهای مدیریتی به منظور کاهش افت تراز آب زیرزمینی و کاهش افت کیفیت آب زیرزمینی در آینده می باشد. در آبخوان کاشان اضافه برداشت ها و کاهش تغذیه آب زیرزمینی موجب افت تراز آب زیرزمینی در سال های اخیر شده است. افت تراز آب زیرزمینی در محدوده آبخوان موجب معکوس شدن جریان در بخش خروجی آبخوان و ورود آب با غلظت بالا به محدوده شده است. از این رو لازم است آبخوان مورد نظر تحت سناریوهای مختلف مدیریتی قرار گرفته و وضعیت آبخوان تحت هر سناریو مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. به این ترتیب شرایط کمی و کیفی آبخوان برای تمامی سناریوها از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۷ به مدت هشت سال مورد پیش بینی قرار گرفته است. سناریو پایه به منظور مقایسه نتایج حاصل از سناریوهای مدیریتی با نتایج حاصل از این سناریو اجرا شد. نتایج سناریو پایه مشخص کرد، پیشروی آب شور در پایان دوره پیش بینی برای سطح و عمق ناحیه شرقی به ترتیب برابر با $2/75$ و 5 کیلومتر مربع و برای ناحیه شمال شرقی به ترتیب برابر با $1/47$ و $2/38$ کیلومتر مربع می باشد. همچنین با توجه به اینکه اکثریت آب برداشتی

زیرزمینی به مصرف کشاورزی می‌رسد، مدیریت مصرف در این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به این ترتیب سناریوهای کاهش ۱۰ درصدی، ۲۰ درصدی و ۳۰ درصدی از آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین وجود خط انتقال آب از زاینده رود به محدوده مطالعاتی کاشان تحت ظرفیت‌های مختلفه عنوان سناریوهای دیگر مورد ارزیابی قرار گرفتند. در جدول (۱) نتایج حاصل از سناریوهای مدیریتی در کاهش پیشروی آب شور مشخص شده است. بهترین سناریو برای کاهش پیشروی آب شور در محدوده شرقی آبخوان، انتقال آب از زاینده رود به میزان ۱۲۰۰ لیتر در ثانیه و بهترین سناریو برای محدوده شمال شرقی کاهش ۳۰ درصدی برداشت به دست آمده است.

جدول (۱) - نتایج حاصل از سناریوهای مدیریتی در کاهش پیشروی آب شور.

سناریوها	افزایش متوسط تراز آب زیرزمینی نسبت به سناریو پایه (متر)	کاهش پیشروی آب شور در سطح قسمت شرقی نسبت به سناریو پایه (درصد)	کاهش پیشروی آب شور در عمق قسمت شرقی نسبت به سناریو پایه (درصد)	کاهش پیشروی آب شور در سطح بخش شمال شرقی نسبت به سناریو پایه (درصد)	کاهش پیشروی آب شور در عمق بخش شمال شرقی نسبت به سناریو پایه (درصد)
سناریو پایه	متوسط تراز آب زیرزمینی در انتهای دوره (۸۵۸/۱۹ متر)	(مساحت پیشروی آب شور در انتهای دوره ۲/۷۵ کیلومتر مربع)	(مساحت پیشروی آب شور در انتهای دوره ۵ کیلومتر مربع)	(مساحت پیشروی آب شور در انتهای دوره ۱/۴۷ کیلومتر مربع)	(مساحت پیشروی آب شور در انتهای دوره ۲/۳۸ کیلومتر مربع)
کاهش ۱۰ درصدی	۰/۷	۵	۳	۸	۳/۵
کاهش ۲۰ درصدی	۱/۴	۸	۵/۵	۱۵	۷/۵
کاهش ۳۰ درصدی	۲	۱۰/۵	۸	۲۲/۵	۱۲
آب انتقالی ۳۰۰ لیتر در ثانیه	۰/۲۲	۳	۱/۵	۱	۰/۵
آب انتقالی ۱۲۰۰ لیتر در ثانیه	۲/۳۱	۱۵/۵	۱۲/۸	۱۱	۵/۵

۵- جمع‌بندی

محدوده مطالعاتی کاشان در حاشیه دریاچه نمک قرار گرفته است و با توجه به آب و هوای خشک و کمی بارش‌های جوی فاقد رودخانه بزرگ و دائمی بوده و مهم‌ترین منبع آب مورد استفاده در این محدوده، منابع آب زیرزمینی می‌باشد. حوضه آبریز کاشان از دو بخش اراضی بایر و شوره‌زارها و دشت کاشان تشکیل شده است. با توجه به تراز آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی، همواره جهت جریان از سمت آبخوان به سمت خروجی آبخوان یعنی شوره‌زارهای مجاور دریاچه نمک برقرار می‌باشد. اما کاهش تغذیه آبخوان و افزایش برداشت‌ها در سال‌ها اخیر موجب کاهش تراز آب زیرزمینی و معکوس شدن جریان زیرزمینی در محدوده شده و آب با غلظت بالا از بخش خروجی به سمت آبخوان هجوم آورده و موجب کاهش کیفیت آب این منابع در محدوده مطالعاتی شده است. کاهش کیفیت آب در اثر پیشروی آب شور موجب نامناسب شدن آب برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی می‌شود. به گونه‌ای که استفاده

از آن در کشاورزی موجب بیابانزایی و خشک شدن مزارع شده و استفاده در شرب بر سلامت انسان اثر می‌گذارد. همچنین پیشروی آب شور زمان تشخیص داده می‌شود، که آلودگی به محل پمپاژ چاه‌ها رسیده باشد، در این صورت پاکسازی آبخوان آلوده به پیشروی آب شور نیازمند صرف وقت و هزینه بسیاری می‌باشد. از آنجایی که این منبع به عنوان تنها منبع در دسترس برای تامین نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی افراد ساکن می‌باشد، مدیریت کمی و کیفی برای جلوگیری از تغییرات نگران کننده امر ضروری می‌باشد. جهت اعمال مدیریت بهتر بر این منابع آبی، استفاده از مدل‌های کامپیوتری برای شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی و به کار بردن سناریوهای مختلف می‌تواند، به عنوان مهم‌ترین ابزار مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از مدل‌ها می‌توان شرایط طبیعی منطقه مطالعاتی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کرد. بنابراین در این پژوهش از مدل‌های مختلف عددی جهت شبیه‌سازی آبخوان استفاده شده است. پس از شبیه‌سازی کمی آبخوان کاشان متوسط تغییرات تراز آب زیرزمینی در طول مدل‌سازی رسم شد، که مشخص کننده کاهش تراز آب زیرزمینی طی دوره مدل‌سازی می‌باشد. پس از نهایی شدن مدل کمی مدل کیفی تهیه شد. نتایج مدل‌سازی کیفی مشخص کرد که با گذر زمان بر میزان غلظت آلاینده موجود در دو محدوده شرقی و شمال شرقی افزوده شده و موجب کاهش کیفیت آب زیرزمینی در این محدوده‌ها شده است. پس از تعیین ناحیه‌های پیشروی آب شور، از مدل تفاضل محدود SEAWAT به منظور بررسی پیشروی در عمق آبخوان استفاده شد. نتایج مشخص کرد میزان پیشروی آب شور در عمق بیشتر از سطح محدوده می‌باشد. براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی کمی و کیفی مشخص شد، این آبخوان نیازمند راهکارهای مدیریتی مناسب جهت افزایش تراز آب زیرزمینی و کاهش پیشروی آب شور می‌باشد. به این ترتیب سناریوهای مختلف به عنوان راهکارهای مدیریتی جهت افزایش تراز آب زیرزمینی و کاهش پیشروی آب شور در محدوده مطالعاتی کاشان در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از اجرای هر سناریو با نتایج حاصل از سناریو پایه مقایسه شد. به این ترتیب سناریو انتقال آب با ظرفیت ۱۲۰۰ لیتر در ثانیه بیشترین تاثیر در کاهش پیشروی آب شور در محدوده شرقی و کاهش ۳۰ درصدی برداشت آب زیرزمینی بیشترین تاثیر در کاهش پیشروی آب شور در محدوده شمال شرقی را دارد.

۶- مراجع

- Konikow, L. F., & Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13, 317-320.
- Marcuschi, L. A. (2002). Gêneros textuais: definição e funcionalidade. *Gêneros textuais e ensino*, 2, 19-36.
- Lathashri, U. A., & Mahesha, A. (2015). Simulation of saltwater intrusion in a coastal aquifer in Karnataka, India. *Aquatic Procedia*, 4, 700-705.
- Tuohy, R., Stephens, C., & Johnston, D. (2014). Older adults 'disaster preparedness in the context of the September 2010–December 2012 Canterbury earthquake sequence. *International journal of disaster risk reduction*, 9, 194-203.
- Wagner, B. J. (1995). Recent advances in simulation-optimization groundwater management modeling. *Reviews of Geophysics*, 33(S2), 1021-1028.
- Owen, S. J., Jones, N. L., & Holland, J. P. (1996). A comprehensive modeling environment for the simulation of groundwater flow and transport. Chakraborty, S., Maity, P. K., & 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, 3805-3837.
- Zheng, C., & Wang, P. P. (1999). MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide
- Zheng, C., & Bennett, G. D. (2002). Applied contaminant transport modeling (Vol. 2, p. 353). New York: Wiley-Interscience.

Simulation of salt water advance and evaluation of the effect of management scenarios on it

Researchers: Azadeh Ahmadi⁹, saeid salehifar¹⁰

Project Code:

Abstract

In dry and semi-arid regions, due to the lack of continuous and high-quality surface water, most of the water needs are met from groundwater. The shortage of groundwater in these areas is very noticeable. The Kashan watershed, located in the central plateau of Iran, consists of two parts: salt flats, including the desert areas around Lake Namak, and the Kashan plain. Under natural conditions, considering the groundwater level in the region, the flow of groundwater is always directed towards the aquifer outlets and salt flats. However, excessive pumping and reduced recharge have led to a decline in the groundwater levels and a reversal of groundwater flow, causing saline water to infiltrate towards the aquifer. The advancement of saline water intrusion in the area leads to a reduction in the quality of groundwater, rendering it unsuitable for various purposes. Therefore, groundwater management in the desert region is essential to prevent concerning changes, as it serves as the only available source to meet various needs. To this end, mathematical distribution and physics-based models such as MODFLOW, MT3DMS, and SEAWAT have been used in this study. Quantitative modeling results indicate that groundwater levels will drop by 1.22 meters during the modeling period. Furthermore, the modeling of water quality reveals an increase in Total Dissolved Solids (TDS) concentrations in the eastern and northeastern regions. The modeling results show that the advancement of saline water occurs at depths greater than the surface. An examination of various management scenarios in the study area indicates that reducing groundwater extraction leads to an increase in groundwater levels and a decrease in saline water intrusion in the study area. Additionally, the presence of a water transfer line from the Zayandehrud watershed results in an increase in groundwater levels and a decrease in saline water intrusion into the study area.

Keywords: Groundwater, Modeling, Kashan Aquifer, Groundwater Resource Management, Saline Water Intrusion.

⁹ Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Shahid Beheshti Univ. (email: az_ahmadi@sbu.ac.ir)

¹⁰ Master's in Water Resources Management, Dept. of Civil Engineering, Shahid Beheshti University (email: s.salehifar@mail.sbu.ac.ir)