



دانشگاه گواران و منابع آب

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و پنجم، شماره ششم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.13944.2870

ارزیابی اثرات اعمال سیاست‌های مختلف مدیریتی بر روی آبخوان با استفاده از شبیه‌سازی عددی (مطالعه موردی: آبخوان نمدان، استان فارس، ایران)

سه‌ند قدیمی^۱ و *حامد کتابچی^۲

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران،

^۲استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۳

چکیده

سابقه و هدف: امروزه علاوه بر رشد جمعیت و افزایش نیاز به منابع آب، کمبود بارندگی و جریانات سطحی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان باعث افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه بروز مشکلات متعددی در این منابع تجدیدناپذیر و ارزشمند شده است. از این رو، بررسی، پایش و پیش‌بینی وضعیت منابع آب زیرزمینی دارای اهمیت است. در این پژوهش از یک مدل توسعه داده‌شده شبیه‌سازی عددی تفاضل محدود با استفاده از کدنویسی در محیط متلب، جهت بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در یک محدوده مطالعاتی واقعی استفاده شد.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه، آبخوان نمدان واقع در حوضه آبریز طشک- بختگان، استان فارس، ایران است. جهت بررسی تغییرات تراز آبخوان، مدل غیرماندگار تفاضل محدود، توسعه داده شد. جهت پیاده‌سازی مدل، محدوده با توجه به معیارهای مختلف، سلول‌بندی شد و تعداد ۵۰ سلول چهارضلعی حاصل گردید. علاوه بر تبادل جریان زیرزمینی بین سلول‌ها در محدوده، تبادل بین سلول‌های مرزی و جریانات ورودی و خروجی از مرزها به این سلول‌ها نیز در مدل‌سازی لحاظ شد. پارامترهای تغذیه به روش سعی و خطا و ضرایب هدایت هیدرولیکی با استفاده از یک مسأله بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات خطاهای محاسبات تراز آب محاسباتی و مشاهده‌ای (دوره ۷ ساله) با ابزار بهینه‌سازی فراابتکاری کلونی مورچگان واسنجی شدند و ضریب تبیین ۰/۹۳ حاصل شد. همچنین مدل واسنجی شده در یک دوره سه‌ساله صحت‌سنجی گردید.

یافته‌ها: وضعیت آبخوان محدوده مطالعاتی، در شرایط غیرماندگار در دوره شبیه‌سازی ۳۰ ساله، تحت ۷ سناریو مختلف تدوین شده بر اساس شاخص‌های اقلیمی، برداشت، الگوی کشت و طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در ایران، مورد بررسی قرار گرفت. با کاهش ۱۰ درصدی بارش سالانه و افزایش ۲۰ درصدی برداشت، تراز

* مسئول مکاتبه: h.ketabchi@modares.ac.ir

سطح آب زیرزمینی تا پایان دوره شبیه‌سازی نسبت به ادامه وضع موجود، به ترتیب ۰/۹ و ۶/۱ متر افت پیدا می‌کند. تغییر الگوی کشت با تغییر نوع محصول از گندم به محصولی با نیاز آبی کم مانند جو باعث می‌شود تا تراز سطح آب تا پایان دوره شبیه‌سازی، ۴/۴ متر افزایش پیدا کند. در سناریو حذف چاه‌های غیرمجاز بهره‌برداری در کل محدوده، به‌طور میانگین در هر سال، تراز سطح آب زیرزمینی ۰/۴۵ متر افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: تحت سناریوی انسداد کامل چاه‌های غیرمجاز در کل منطقه، تراز آب زیرزمینی بیش‌ترین تغییرات را در بین سناریوها داشته و تا پایان دوره شبیه‌سازی، ۱۹/۶ متر افزایش پیش‌بینی می‌شود. این امر لزوم توجه به تعیین تکلیف چاه‌های غیرمجاز در طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در ایران را بیش‌ازپیش نمایان می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آبخوان نمدان، روش تفاضل محدود، شبیه‌سازی عددی، طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی

مقدمه

جمعیت جهان به سرعت در حال رشد بوده و انتظار می‌رود که از ۷/۶ میلیارد نفر حال حاضر به حدود ۹/۸ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ برسد (۲۸). افزایش جمعیت جهان و به تبع آن افزایش نیاز غذایی، توسعه کشاورزی، گسترش مناطق شهری و پیشرفت صنایع و فناوری‌ها، بشر را بیش‌ازپیش به منابع آب‌و خاک وابسته نموده است. با توجه به کمبود بارش و جریانات سطحی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک کره زمین از جمله کشور ایران، بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و این منابع ارزشمند و محدود را با چالش‌های بسیاری از جمله کاهش ذخایر، افت تراز و آلودگی مواجه ساخته است. امروزه طیف وسیعی از روش‌های بررسی مسائل کمی و کیفی مدیریت منابع آب زیرزمینی شناسایی شده است. با توجه به قابلیت پیش‌بینی، مدل‌های شبیه‌سازی که در واقع معادلات و الگوریتم‌های ریاضی بیان شرایط آب زیرزمینی در آبخوان‌ها هستند، غالباً تنها راه ممکن برای تهیه ورودی‌های یک برنامه تصمیم‌گیری مدیریتی هستند.

روش‌های اجزاء محدود، تفاضل محدود و روش‌های نوین حل معادلات دیفرانسیل در طیف گسترده‌ای از مطالعات به‌کار گرفته شده‌اند (۱۰، ۱۱ و ۱۲).

در دهه اخیر کاربردهای بسیاری از روش‌های عددی در مدل‌سازی مسائل مربوط به منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. خلاصه‌ای از محدوده مورد مطالعه، اهداف مطالعه، مدل‌ها و روش‌های حل مورد استفاده در تعدادی از اهم آن‌ها در عرصه‌های بین‌المللی و داخلی در جدول ۱ آمده است. در حوزه بین‌المللی می‌توان به مطالعاتی هم‌چون آنان و همکاران (۲۰۰۷)، سنفورد و پوپ (۲۰۱۰)، سین و پاندا (۲۰۱۳)، الکادی و همکاران (۲۰۱۴) و تات و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد (۱، ۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷). به‌عنوان مثال، در مطالعه آنان و همکاران (۲۰۰۷)، جهت کمی‌سازی اثر زهاب ناشی از اراضی شالیزاری بر تغذیه آب زیرزمینی، در یک دشت آبرفتی واقع بر حاشیه رود چیکوگو در جنوب ژاپن، از یک مدل عددی ایجاد شده با استفاده از مادفلو^۱ استفاده شد که نتایج اجرای مدل در شرایط

مصنوعی با انتقال فاضلاب به موقعیت‌های مختلف دشت تعریف و تأثیر حجم و غلظت نیترات موجود در فاضلاب، در کمیت و کیفیت آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه بررسی شد. نتایج نشان داد که تزریق آب در این منطقه تا شعاع بیش از ۶ کیلومتر در افزایش سطح ایستابی تأثیر داشته است (۱۶). در مطالعه پارسا صدر و همکاران (۲۰۱۵)، جهت شبیه‌سازی آبخوان دشت روداب سبزوار و بررسی اثرات احداث و آبیگری سد رودآب بر آبخوان این دشت، از مدل مادفلو استفاده شد. نتایج پیش‌بینی‌های این مطالعه بیانگر آن است که به دلیل کاهش تغذیه دشت از رودخانه به دلیل احداث سد، متوسط سطح ایستابی آبخوان دشت روداب در سال‌های ۹۳، ۹۴ و ۹۵ به ترتیب ۰/۱۷، ۰/۲ و ۰/۲۳ متر کاهش خواهد یافت (۲۲).

هدف از انجام این پژوهش، ابتدا توسعه و واسنجی یک مدل عددی تفاضل محدود به صورت برنامه‌نویسی در محیط متلب در یک محدوده مطالعاتی واقعی و پس از آن بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف تدوین‌شده بر اساس شرایط مختلف اقلیمی، برداشت آب، الگوی کشت و به‌خصوص طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در ایران (۲) می‌باشد. مدل‌سازی در محدوده مطالعاتی آبخوان دشت نمدان در استان فارس ایران انجام می‌شود. پس از واسنجی، پیش‌بینی برای یک دوره ۳۰ ساله آتی تحت سناریوهای مختلف صورت گرفته و تجزیه و تحلیل‌های لازم انجام می‌شود.

دوره آبیاری و کشت کل اراضی، بیانگر افزایش ۰/۵ تا ۱ متری تراز سطح آب زیرزمینی بود (۱). جهت بررسی آثار و تبعات بلندمدت تصمیمات مختلف مدیریتی بر تراز سطح آب زیرزمینی، سین و پاندا (۲۰۱۳) یک مدل شبیه‌سازی تفاضل محدود دوبعدی را توسعه داده و با به‌کارگیری آن همراه با یک مدل بهینه‌سازی، به بررسی معضلات شوری و ماندابی شدن اراضی منطقه‌ای در ایالت هاریانا هند پرداختند (۲۶). الکا دی و همکاران (۲۰۱۴) با هدف دستیابی به بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی جزیره جاجو کره جنوبی، تحت سناریوهای اقلیمی، الگوی کشت و مقدار پمپاژ، از مدل‌های عددی مادفلو و سیوات^۱ بهره بردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با مقدار حداکثری برداشت با بازده ۸۴ درصد و شرایط خشک‌سالی ۱۰ ساله و کاهش ۲۷ درصدی تغذیه، میانگین تراز هیدرولیکی سطح آب در جزیره ۷ متر افت خواهد داشت (۴). در حوزه داخلی نیز مطالعات مختلفی انجام شده است. برای مثال، یاری و دادمهر (۲۰۱۲) با هدف بررسی اندرکنش بین سیستم‌های آبیاری و زهکشی و منابع آب زیرزمینی در دشت زربینه رود استان آذربایجان غربی، جهت شبیه‌سازی تغییرات تراز آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف، از مدل عددی بهره بردند. نتایج این پژوهش نشان داد که تحت سناریوی افزایش بازدهی آبیاری به میزان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد، سطح آب زیرزمینی دشت به ترتیب در حدود ۰/۵، ۱/۲ و ۲ متر افت می‌کند (۲۹). لاله‌زاری و همکاران (۲۰۱۳) جهت بررسی سناریوهای مختلف تغذیه مصنوعی در آبخوان شهرکرد، از مدل‌های مادفلو و ام‌تی‌۳دی^۲ استفاده کردند. در این مطالعه ۱۰ سناریوی فرضی تغذیه

1- SEAWAT

2- MT3d

جدول ۱- خلاصه‌ای از مطالعات مربوط به کاربرد شبیه‌سازی عددی در مسائل مدل‌سازی آب زیرزمینی.

Table 1. Summary of studies regarding the application of numerical simulation in groundwater modeling issues.

مرجع Reference	محدوده مطالعاتی Case Study		هدف Objective	مدل Model	روش Method
	منطقه Region	مساحت Area			
Anan et al. (2007) (آنان و همکاران (۲۰۰۷))	Chikugo River, Japan رود چیکگو، ژاپن	6km ²	Quantification of groundwater recharge کمی‌سازی تغذیه آب زیرزمینی	MODFLOW	FDM
Sanford and Pope (2010) (سنفورد و پوپ (۲۰۱۰))	Eastern Shore of Virginia, USA ساحل شرقی ویرجینیا، ایالات متحده آمریکا	2,000km ²	Forecasting the potential for saltwater intrusion پیش‌بینی پتانسیل نفوذ آب شور	SEAWAT	FDM
Singh and Panda (2013) (سین و پندا (۲۰۱۳))	Haryana State, India ایالت هاریانا، هند	920km ²	Evaluating impacts of water management strategies on the water table ارزیابی راهبردهای مدیریتی بر تراز سطح آب	A two-dimensional groundwater flow and transport model مدل دوبعدی جریان و انتقال آب زیرزمینی	SahysMod
El-Kadi (2014) (ال-کادی (۲۰۱۴))	Jaju island, south Korea جزیره جاجو، کره جنوبی	1,849km ²	Assessing the groundwater sustainability ارزیابی پایداری آب زیرزمینی	MODFLOW and SEAWAT	FDM
Toth et al. (2016) (تاث و همکاران (۲۰۱۶))	Tihany Peninsula, Hungary تیبانی پنینسولا، مجارستان	20km ²	Understanding the groundwater-related environmental phenomena بررسی پدیده محیط زیست مرتبط با آب زیرزمینی	3D applying COMSOL Multi-physics	FEM
Safavi et al. (2006) (صفوی و همکاران (۲۰۰۶))	Hypothetical فرضی	250 m	Evaluating surface/groundwater interaction ارزیابی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی	Flow- transport جریان - انتقال	FDM
Ketabchi (2011) (کتابچی (۲۰۱۱))	Hypothetical فرضی	7 km × 4 km	Optimal management of a coastal aquifer مدیریت بهینه یک آبخوان ساحلی	Continuity (balance) equation for groundwater flow معادله پیوستگی جریان آب زیرزمینی	FDM
Yari and Dadmehr (2012) (یاری و داممهر (۲۰۱۲))	Zarrineh-rud plain, West Azerbaijan, Iran دشت زرینه‌رود، آذربایجان غربی، ایران	3415.31km ²	Evaluating irrigation and drainage network - Groundwater resources interactions ارزیابی تبادلات آب زیرزمینی با شبکه آبیاری و زهکشی	MODFLOW	FDM
Lalezari et al. (2012) (لاله‌زاری و همکاران (۲۰۱۲))	Shahrekord aquifer, Charmahal and Bakhtiari, Iran آبخوان شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران	551km ²	Modeling the aquifer under artificial recharge scenarios مدل‌سازی آبخوان جهت بررسی سناریوهای تغذیه مصنوعی	MODFLOW MT3D	FDM

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

مرجع Reference	محدوده مطالعاتی Case Study		هدف Objective	مدل Model	روش Method
	منطقه Region	مساحت Area			
Mohammadrezapoor (2014) (محمدرضاپور (۲۰۱۴)	Ghaen plain, south Khorasan, Iran دشت قائن، خراسان جنوبی، ایران	306km ²	Calibration of parameters واسنجی پارامترها	Continuity (balance) equation for groundwater flow معادله پیوستگی جریان آب زیرزمینی	FDM
Sadat-Hamraz et al. (2014) سادات همراز و همکاران (۲۰۱۴)	Birjand plain, south Khorasan, Iran دشت بیرجند، خراسان جنوبی، ایران	3155km ²	Evaluation of the uncertainties of a groundwater flow model بررسی عدم قطعیت پارامترها در یک مدل جریان آب زیرزمینی	MODFLOW code in MATLAB کد MODFLOW در محیط MATLAB	FDM
Haji pour et al. (2014) حجی پور و همکاران (۲۰۱۴)	Bojnourd Plain basin, North Khorasan, Iran حوضه آبریز دشت بجنورد، خراسان شمالی، ایران	1265.8km ²	Integrated management of surface and groundwater مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی	Linking between WEAP and MODFLOW models اتصال دو مدل WEAP و MODFLOW	Nodebase (WEAP) FDM (MODFLOW)
Parsa-Sadr et al. (2015) پارساصدر و همکاران (۲۰۱۵)	Roudab plain, Sabzevar, North Khorasan, Iran دشت روداب سبزوار، خراسان شمالی، ایران	1828km ²	Evaluation the effect of the Roudab Dam on the aquifer بررسی اثر احداث سد روداب بر آبخوان دشت	MODFLOW	FDM
Lalehzari (2016) لاله‌زاری (۲۰۱۶)	Baghmalek plain Khuzestan, Iran دشت باغملک، خوزستان، ایران	62.4km ²	Achievement of optimized water allocation دستیابی به تخصیص بهینه آب	MODFLOW	FDM
Farhodi and Ketabchi (2018) فرهودی هفدران و کتابچی (۲۰۱۸)	Ajabshir plain, East Azarbayjan, Iran دشت عجب‌شیر، آذربایجان شرقی، ایران	120km ²	Assessment of interaction between Urmia Lake and the aquifer بررسی اندرکنش میان دریاچه ارومیه و آبخوان	SUTRA	FEM, FDM
Ketabchi et al. (2018a) کتابچی و همکاران (۲۰۱۸)	Namdan plain, Fars, Iran دشت نمدان، فارس، ایران	1400km ²	Assessment of Green Water Management Impacts on the Aquifer بررسی اثرات اقدامات مدیریت آب سبز بر آبخوان	MODFLOW	FDM

مواد و روش‌ها

مدل مفهومی آبخوان تشکیل شده و بر اساس آن، مدل عددی توسعه داده شده، واسنجی و صحت‌سنجی شده است. با استفاده از آن، ۷ سناریو مختلف اجرا شده و تغییرات تراز آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات فرآیند مذکور در ادامه، شرح داده می‌شود.

در شکل ۱، مراحل مدل‌سازی مطالعه حاضر نمایش داده شده است. پس از تعیین اهداف مدل‌سازی که بررسی تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی است، با استفاده از مفهوم بیلان (۱۴) و معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان آب زیرزمینی،

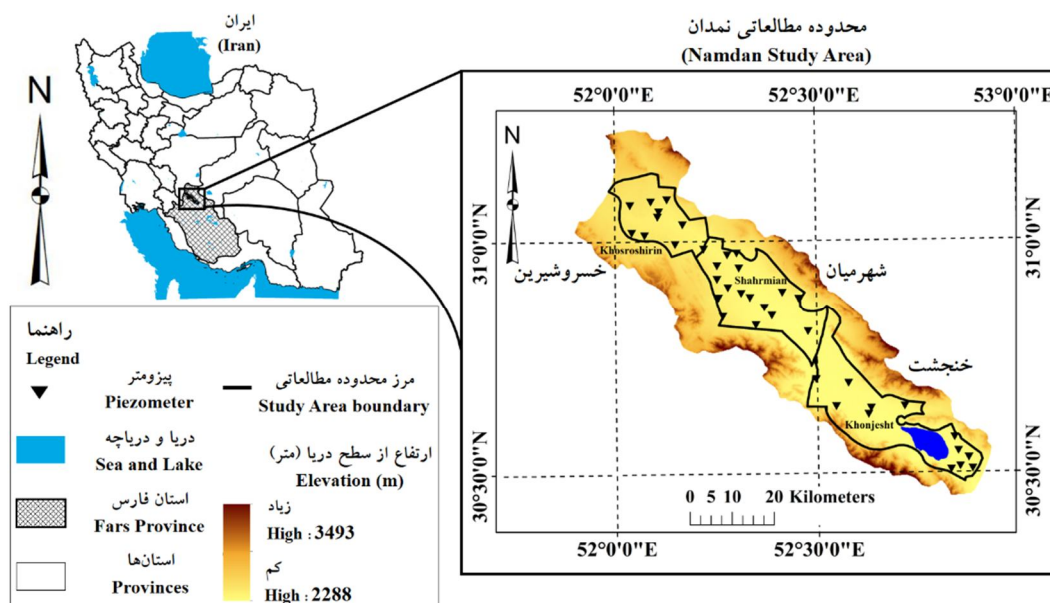


شکل ۱- نمودار روند انجام مطالعه.

Figure 1. The flowchart of the study procedure.

محدوده دریاچه کافتراست (شکل ۲). در محدوده مطالعاتی دشت نمدان، میانگین مجموع بارش سالانه در ارتفاعات این منطقه ۳۵۳ میلی‌متر و در دشت‌ها ۳۱۸ میلی‌متر بوده و میانگین سالانه تبخیر از سطوح آبی، در ارتفاعات ۱۳۷۵/۵ میلی‌متر و در دشت‌ها ۱۵۱۵/۶ میلی‌متر برآورد شده است. متوسط ضریب ذخیره در محدوده مطالعاتی نمدان برابر ۴ درصد و متوسط ضریب قابلیت انتقال در این محدوده حدود ۸۰۰ مترمربع بر روز می‌باشد (۸).

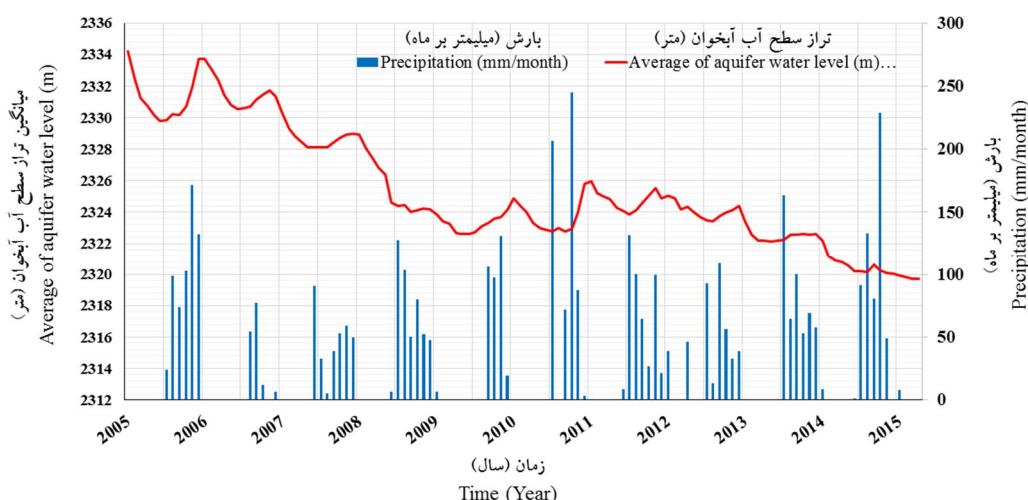
معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه، آبخوان نمدان واقع در حوضه آبریز طشک- بختگان، استان فارس، ایران است (شکل ۲). این آبخوان در مختصات طول جغرافیایی ۵۲° ۰۰' تا ۵۲° ۵۶' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۰' تا ۳۱° ۳۰' شمالی قرار گرفته است. مساحت این محدوده ۱۳۲۴/۱ کیلومترمربع می‌باشد. حداکثر ارتفاع در این محدوده ۳۵۱۴ متر (از سطح آزاد دریا) مربوط به قله کوه برآفتاب در جنوب محدوده و حداقل آن را ۲۳۰۲ متر در محل ورود به



شکل ۲- نقشه رقوم ارتفاعی و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای محدوده مطالعاتی نمدان، حوضه آبریز طشک- بختگان، استان فارس، ایران.
Figure 2. The elevation map and the piezometer location of the Namdan study area, Tashk-Bakhtegan basin, Fars province, Iran.

حداقل عمق در ناحیه شمال غربی و حداکثر در ناحیه جنوب‌شرقی، بالای دریاچه خشک شده کافت، مشاهده شده است. همچنین، منابع مصرفی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی شامل ۱۶۴۳ حلقه چاه بهره‌برداری با تخلیه سالانه ۳۲۸/۳ تا ۴۱۹/۳ میلیون مترمکعب در سال (از سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۵-۱۳۹۴) می‌باشد که در طول این ده سال، با توجه به افت تراز آبخوان، روند برداشت‌ها از آبخوان به ناگزیر کاهشی بوده است. غالب این برداشت‌ها مربوط به مصارف کشاورزی است و بخش اندکی از آن به مصارف شرب و صنعت اختصاص دارد (۸ و ۲۱).

نوسانات تراز آب زیرزمینی توسط ۳۶ حلقه چاه مشاهده‌ای برآورد شده است (شکل ۲). همان‌طور که در هیدروگراف شکل ۳ مشاهده می‌گردد، آمار و ارقام سطح آب زیرزمینی دشت نمدان مربوط به دوره ۱۰ ساله (از سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ تا سال آبی ۹۵-۱۳۹۴) است (۸ و ۲۱). مطابق هیدروگراف رسم شده، مقدار افت سطح آب زیرزمینی در این دشت ۱۲ متر (۰/۸ متر در سال) می‌باشد. مجموع تغذیه ورودی به آبخوان نمدان ۳۸۵/۱ میلیون مترمکعب در سال و مجموع تخلیه از آن ۴۳۰/۹ میلیون مترمکعب در سال بوده و تغییرات حجم مخزن این آبخوان ۴۵/۱- میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳- هیدروگراف آبخوان نمدان و ایستگاه باران‌سنجی کافتار در محدوده مطالعاتی.

Figure 3. Namdan aquifer hydrograph and the Kaftar precipitation station in the study area.

در این مطالعه در محیط برنامه‌نویسی متلب توسعه داده شده است. این مدل در شرایط غیرماندگار، شبیه‌سازی را در راستای قائم در یک لایه انجام می‌دهد (رابطه‌های ۳ و ۴) (۳). به سبب توسعه مدل به روش تفاضل محدود، لازم است تا سیستم آب زیرزمینی مورد نظر جهت پیاده‌سازی، سلول‌بندی گردد که در بخش سلول‌بندی محدوده مطالعاتی به جزئیات آن پرداخته خواهد شد. در واقع رابطه ۲ باید در هر سلول برقرار باشد تا بیان آب در هر سلول رعایت شود (شکل ۴). این رابطه برگرفته از مطالعه کتابچی و عطائی-آشتیانی (۲۰۱۱) است (۱۳).

$$H_j(t+1) = H_j(t) + \quad (2)$$

$$\frac{\sum_k \left[\frac{W_{kj} \cdot T_{kj}}{L_{kj}} \times (H_k(t) - H_j(t)) \right] + q_j + R_j + (\alpha - 1) E_x}{AS_{y_j}}$$

$$, H_j(0) = H_{0j}$$

که در آن، k شماره‌دهنده سلول‌های مجاور سلول j است. W_{kj} طول مرز مشترک سلول j با سلول مجاور آن k بر حسب متر، T_{kj} ضریب قابلیت انتقال بین سلول j و

مدل شبیه‌سازی عددی آب زیرزمینی: معادله دیفرانسیلی حاکم بر آب زیرزمینی در حالت غیرماندگار به شرح رابطه ۱ است (۳). در این مطالعه جهت بررسی تغییرات تراز آبخوان، شرایط غیرماندگار که در آن، مجموع ورودی‌ها به آبخوان و خروجی‌ها از آن برابر با مقدار ذخیره در آبخوان است، مدنظر است. بر همین اساس مدل مفهومی مطالعه حاضر به شرح شکل ۴ است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \quad (1)$$

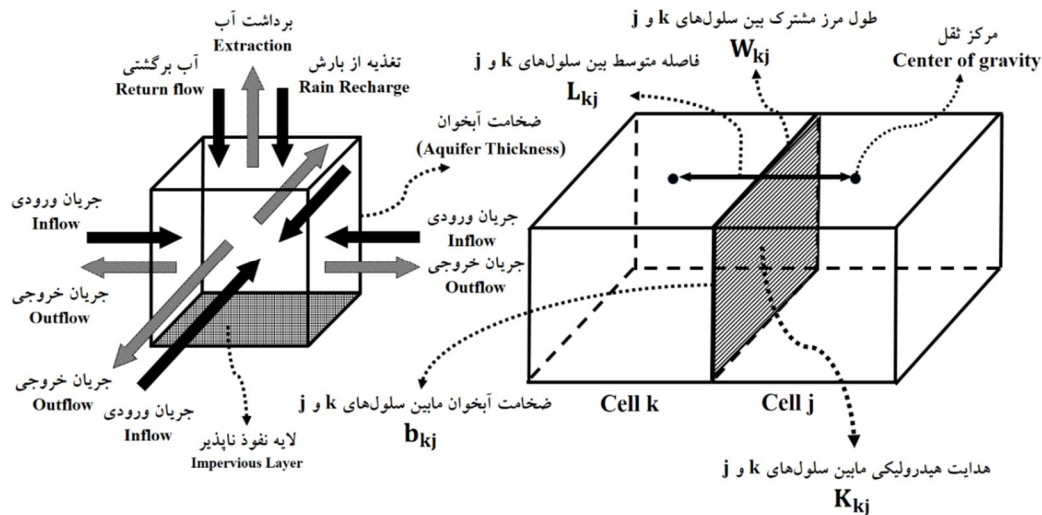
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

که در آن، K_{xx} ، K_{yy} و K_{zz} مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x ، y و z بر حسب متر بر روز هستند. h برابر تراز آب زیرزمینی بر حسب متر، q برابر جریان واحد تخلیه (با علامت منفی) یا تغذیه (با علامت مثبت) بر حسب مترمکعب، S_s ضریب ذخیره آبخوان با واحد عکس متر می‌باشد.

با بهره‌گیری از رابطه حاکم بر سیستم آب زیرزمینی، مدل شبیه‌سازی عددی دوبعدی مورد نظر

H_k تراز سطح آب در سلول مجاور k بر حسب متر است و اختلاف تراز آب بین سلول j و سلول مجاور k ، همچنین $(H_k(t) - H_j(t))$ است. همچنین $H_j(t+1)$ تراز سطح آب در سلول j در گام زمانی جدید و $H_j(t)$ تراز سطح آب در سلول j در گام زمانی قبلی، هستند. همچنین تبادلات جریان بین سلول‌ها، در مدل از طریق جزء $(W_{kj} \cdot T_{kj} / L_{kj}) \times (H_k(t) - H_j(t))$ که بر اساس معادله داریسی است، اعمال می‌شود (شکل ۴).

سلول مجاور آن k بر حسب مترمربع بر روز، L_{kj} فاصله متوسط بین سلول j و سلول مجاور آن k بر حسب متر، q_j جریان واحد عرض ورودی (علامت مثبت) یا خروجی (علامت منفی) مترمکعب بر روز، R_j تغذیه حاصل از بارش از سطح بر حسب مترمکعب بر روز، α ضریب آب برگشتی، E_x میزان برداشت از آبخوان توسط چاه‌های بهره‌برداری بر حسب مترمکعب بر روز، A مساحت سلول j بر حسب متر مربع و S_{y_j} ضریب آبدهی ویژه سلول j هستند. H_j تراز سطح آب در سلول j بر حسب متر و



شکل ۴- مدل مفهومی.

Figure 4. Conceptual model.

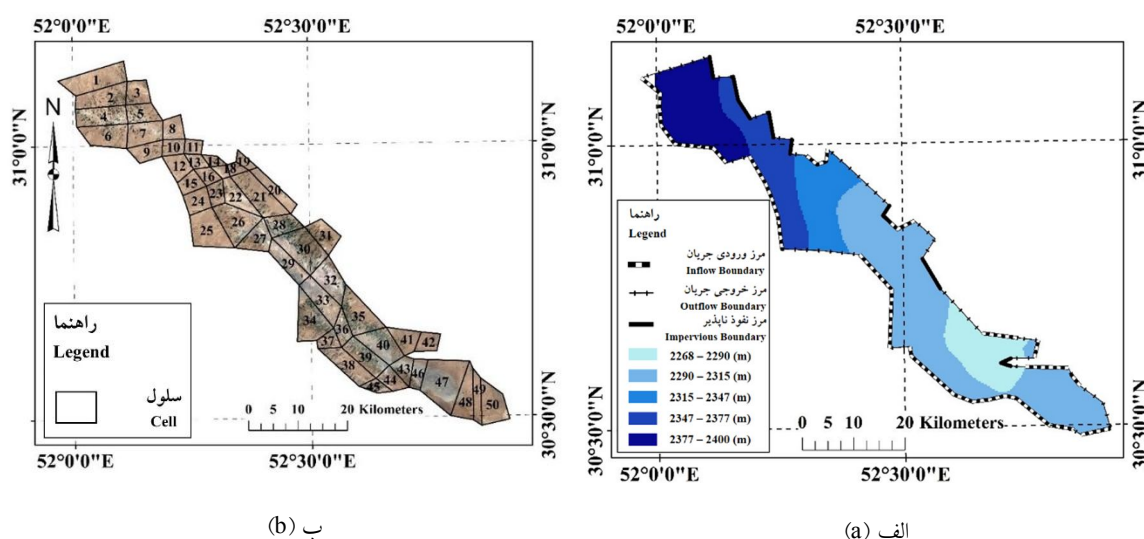
ورودی در غرب محدوده و مرزهای خروجی در شرق محدوده تشخیص داده شده است. شرایط مرزی در مدل به صورت تراز ثابت و نفوذناپذیر اعمال شده است. همچنین با توجه به مطالعات میدانی و پیشینه تاریخی منطقه، دریاچه کافت در دوره زمانی مورد بررسی خشک بوده و ذخیره‌ای نداشته است. از این رو تأثیر آن در مدل دیده نشده است.

سلول‌بندی محدوده مطالعاتی آبخوان نمدان: با توجه به مدل شبیه‌سازی تراز آبخوان (رابطه ۱)، لازم

شرایط مرزی محدوده مطالعاتی آبخوان نمدان: بخش‌هایی از مرزهای محدوده مطالعاتی، محل ورود یا خروج جریان‌های زیرزمینی است (شکل ۵- الف). علاوه بر تبادل جریان زیرزمینی بین سلول‌ها در محدوده، لازم است تا تبادل بین سلول‌های مرزی و جریان‌ات ورودی و خروجی از مرزها به این سلول‌ها نیز در مدل‌سازی لحاظ گردد. با توجه به جهت جریان آب زیرزمینی در محدوده که از غرب و شمال‌غربی به سمت شرق و جنوب‌شرقی هستند، اکثر مرزهای

دقیقاً منطبق بر ضلع سلول دیگر باشد. از طرفی دیگر، در مورد ورودی‌ها و خروجی‌های مرزی، باید سلول‌ها طوری بر مرزها منطبق شوند که هیچ ضلعی، همه یا بخشی از دو مرز نفوذپذیر و نفوذناپذیر را باهم دربرنگیرد. در نهایت با رعایت این معیارها، محدوده مطالعاتی به ۵۰ سلول قطعه‌بندی شد (شکل ۵-ب).

است تا محدوده مطالعاتی انتخاب شده از دشت (شکل ۱)، با لحاظ معیارهای متعددی هم‌چون تغذیه، کاربری زمین، زمین‌شناسی، چاه‌های بهره‌برداری و ورودی و خروجی‌های مرزی، سلول‌بندی شود. همچنین جهت تسهیل برقراری رابطه شبیه‌ساز تراز سطح آب (رابطه ۲)، بهتر است تا سلول‌ها به شکل چهارضلعی‌هایی در نظر گرفته شوند که هر ضلع آن‌ها



شکل ۵- نقشه مرزهای ورودی و خروجی و نفوذناپذیر (الف) و نقشه قطعه‌بندی (ب) محدوده مطالعاتی.

Figure 5. The inflow, outflow and impervious boundaries map (a) and the segmentation map (b) of the study area.

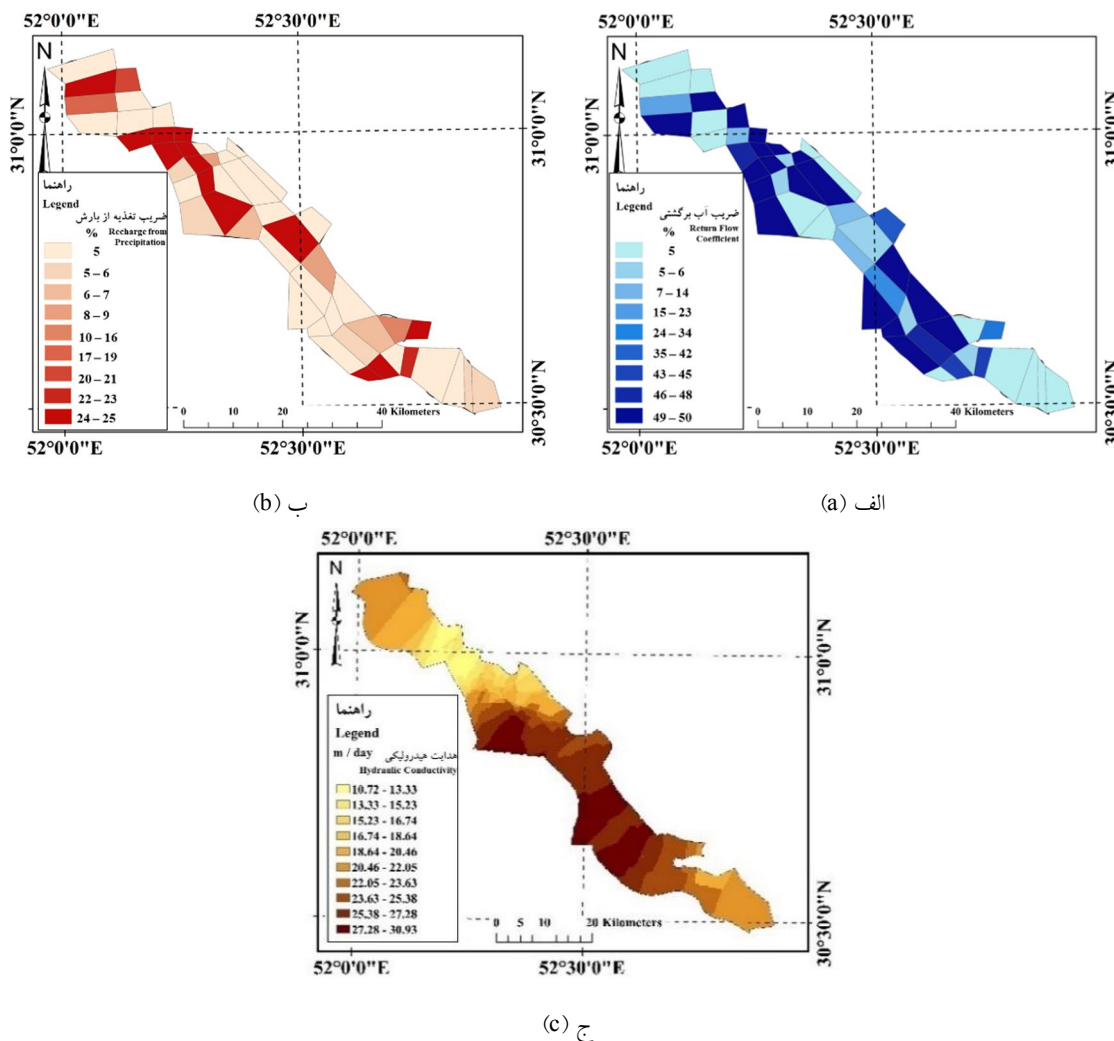
مدل ساخته شده تا حد امکان با واقعیت منطقه تطبیق داده شود. بنابراین با تغییر ضرایبی همچون ضریب آب برگشتی، ضریب نسبت تغذیه حاصل از بارش و هدایت هیدرولیکی که دارای عدم قطعیت هستند، می‌توان تا حد امکان، مدل را به واقعیت نزدیک کرد (۵، ۱۴ و ۱۸).

جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی مطالعه حاضر در شرایط غیرماندگار، از مقادیر مشاهده‌ای سالانه تراز سطح آبخوان در سال‌های آبی ۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۵-۱۳۹۴ و همچنین میانگین مجموع بارش سالانه ۱۵۰ تا ۶۱۴ میلی‌متر برای دوره مشابه، استفاده شد. جهت تطبیق نتایج با مقادیر مشاهده‌ای و

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی: جهت دستیابی به نتایج بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت، نیاز است تا پارامترهای مؤثر بر یک سیستم جریان آب زیرزمینی که به دلیل نبود امکانات و شرایط مناسب اندازه‌گیری، امکان اندازه‌گیری آن‌ها وجود ندارد، به صورت اولیه برآورد شوند. این برآورد با استفاده از یک سری آمار و اطلاعات، بررسی‌های اکتشافی و همچنین تصمیم‌گیری‌های کارشناسانه در مورد هیدروژئولوژی منطقه، انجام می‌پذیرد (۱۴ و ۱۷). با توجه به این‌که میزان برداشت‌ها و تراز سطح آب، تنها اطلاعات دقیقی هستند که از یک محدوده مطالعاتی آبخوان می‌توان کسب نمود، لازم است تا

صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، نتایج واسنجی پارامترهای آب برگشتی، تغذیه حاصل از بارش و هدایت هیدرولیکی در شکل ۶ قابل مشاهده است.

همچنین صحت عملکرد مدل، مقادیر مشاهداتی هفت سال ابتدایی دوره آماری (سال‌های آبی ۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۲-۱۳۹۱) جهت واسنجی و سه سال انتهایی دوره آماری (سال‌های آبی ۹۳-۱۳۹۲ تا ۹۵-۱۳۹۴) جهت



شکل ۶- ضرایب واسنجی شده: آب برگشتی (الف)، نسبت تغذیه حاصل از بارش (ب) و هدایت هیدرولیکی (ج).

Figure 6. Coefficients of calibrated return flow (a) precipitation recharge (b) hydraulic conductivity (c).

شده‌اند و ضریب تبیین $0/93$ (خطای جذر میانگین مربعات برابر $0/88$ متر) حاصل شده است (شکل ۷). همچنین، جهت بررسی صحت عملکرد مدل، شبیه‌سازی برای سه سال آبی انتهایی دوره آماری انجام شد که ضریب تبیین $0/99$ (خطای جذر

پارامترهای تغذیه به روش سعی و خطا و ضرایب هدایت هیدرولیکی با استفاده از یک مسأله بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات خطاهای محاسبات تراز آب با ابزار بهینه‌سازی فراابتکاری کلونی مورچگان (۱۰، ۱۱ و ۱۲) واسنجی

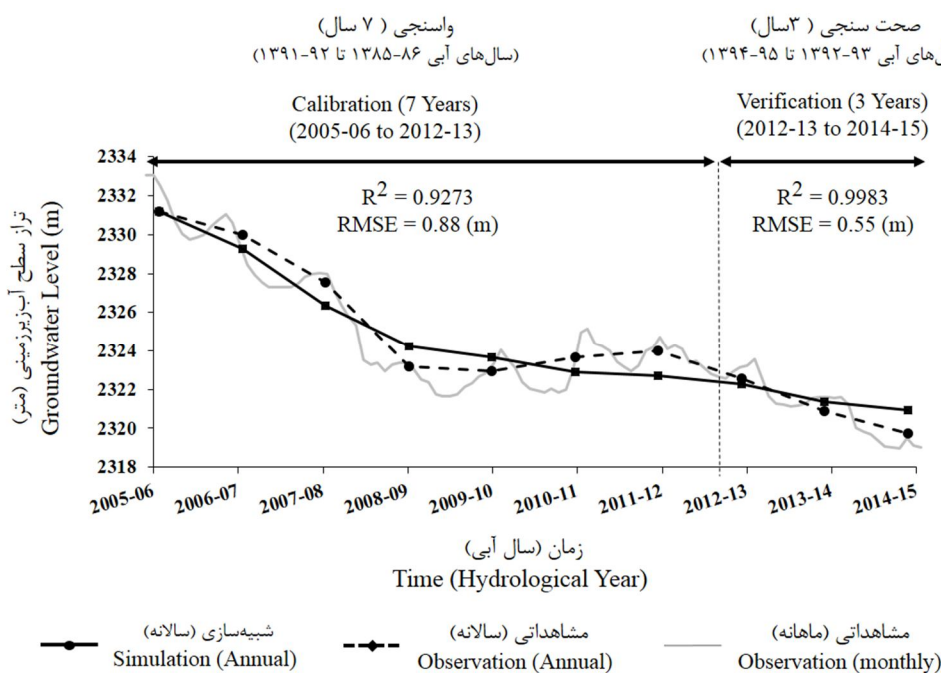
با توجه به این‌که نرخ آب برگشتی متأثر از جنس و بافت خاک، نوع محصول، نحوه مدیریت مزرعه و روش آبیاری است و تحت شرایط محیطی و مدیریتی مختلف، این مقدار می‌تواند متفاوت باشد، در این پژوهش بازه گسترده‌ای برای نرخ آب برگشتی (۵ تا ۵۰ درصد) و نفوذ از بارش (۵ تا ۲۵ درصد) با توجه به مقادیر معرفی شده برای دشت نمدان در مراجعی مانند مراجع ۸، ۹، ۱۳ و ۲ در نظر گرفته شده است. مقادیر واسنجی شده ضرایب هدایت هیدرولیکی، آب برگشتی و تغذیه از بارش به‌طور میانگین در کل محدوده به‌ترتیب ۱۹/۵ مترمربع بر روز، ۲۵ درصد و ۱۰ درصد حاصل شد.

میانگین مربعات برابر ۰/۵۵ (متر) حاصل شده است (شکل ۷). مسأله بهینه‌سازی واسنجی به شرح رابطه ۳ است:

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (h_{\text{obs}}^{j,t} - h_{\text{sim}}^{j,t})^2 \quad (3)$$

$$-\Delta h \leq (h_{\text{obs}} - h_{\text{sim}}) \leq \Delta h$$

که در آن، $h_{\text{obs}}^{j,t}$ تراز مشاهداتی بر حسب متر و $h_{\text{sim}}^{j,t}$ تراز شبیه‌سازی شده در سلول j در سال t ام بر حسب متر، J تعداد سلول‌ها، T تعداد سال‌ها (هفت سال) و Δh حد مجاز اختلاف تراز محاسباتی با مشاهداتی بر حسب متر هستند.



شکل ۷- هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده آبخوان در دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی.

Figure 7. Observed and simulated hydrograph of the aquifer in calibration and verification periods.

سال آبی ۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۵-۱۳۹۴ (۲۰۰۵-۲۰۱۵) است، بنابراین سال آبی شمسی ۹۶-۱۳۹۵ (معادل آن سال ۲۰۱۶ میلادی) به‌عنوان سال شروع مدل‌سازی برای اعمال سناریوها و دوره شبیه‌سازی ۳۰ ساله با

سناریوها: جهت بررسی رفتار آبخوان محدوده مطالعاتی، علاوه بر سناریو پایه (وضع موجود)، ۷ سناریو در نظر گرفته شد (جدول ۲). با توجه به این‌که دوره بررسی تراز آب در چاه‌های مشاهداتی ده

کاهش ۱۰ درصدی بارش، فرض شد (۱۹). در شرایط وضع موجود، برداشت آب از آبخوان به میزان ۳۲۸/۳ میلیون مترمکعب در سال و تغذیه حاصل از بارش به میزان ۱۰۵/۵ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. در سناریو ۲، با توجه به روند افزایش برداشت در سال‌های اخیر، افزایش ۲۰ درصدی برداشت از آبخوان مدنظر قرار گرفته است که منجر به تخلیه ۳۹۹/۴ میلیون مترمکعب آب از آبخوان می‌شود که این میزان نسبت به مقدار برداشت در شرایط وضع موجود، ۶۶/۶ میلیون مترمکعب بیش‌تر است.

گام زمانی ماهانه در نظر گرفته می‌شود و میانگین اطلاعات درازمدت ۱۰ ساله (سال‌های آبی ۸۶-۱۳۸۵ تا ۹۵-۱۳۹۴) بارش به میزان ۴۵۲ میلی‌متر در سال و همچنین ادامه روند برداشت کنونی به میزان ۳۲۸/۳ میلیون مترمکعب به‌عنوان مقدار ملحوظ این دوره در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جلد سوم گزارش ملی تغییر اقلیم ایران (۲۰۱۴)، تغییرات بارش سالانه در سال ۲۰۵۰ نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۶۱-۱۹۹۰) در منطقه، بین ۲۰- تا ۰ درصد خواهد بود که بر این اساس در این پژوهش، در سناریو ۱،

جدول ۲- سناریوهای مختلف شبیه‌سازی.

Table 2. Different scenarios for simulation.

شماره سناریو Scenario Number	توضیحات Description	نوع سناریو Scenario Type
1	۱۰ درصد کاهش بارش 10% decrease in precipitation	اقلیمی Climatic
2	۲۰ درصد افزایش برداشت 20% increase in extraction	بهره‌برداری Utilization
3	تغییر الگوی کشت از گندم به جو Changing crop-pattern from wheat to barley	الگوی کشت Crop pattern
4	حذف تمامی چاه‌های غیرمجاز Removing all unlicensed wells	طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی Aquifer restoration plan
5	حذف چاه‌های غیرمجاز خسروشیرین Removing unlicensed wells of Khosroshirin	طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی Aquifer restoration plan
6	حذف چاه‌های غیرمجاز شهرمیان Removing unlicensed wells of Mianshahr	طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی Aquifer restoration plan
7	حذف چاه‌های غیرمجاز خنجشت Removing unlicensed wells of Khonjesht	طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی Aquifer restoration plan

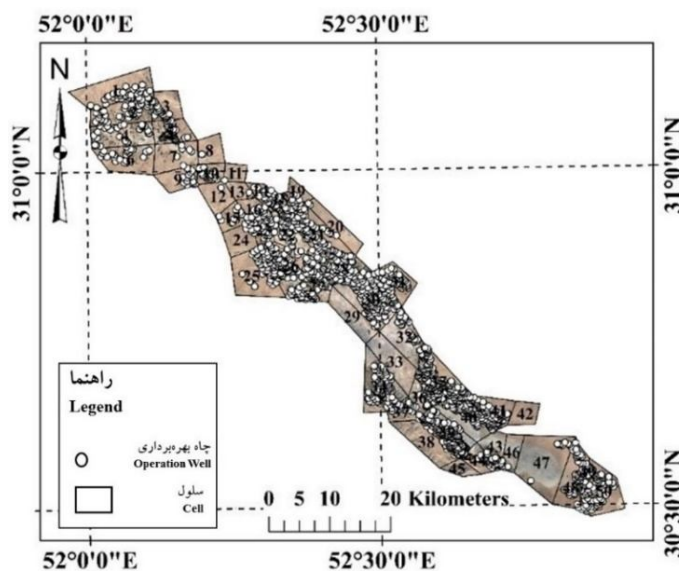
آبیاری گندم ۶۵۰۰ مترمکعب در هر هکتار و نیاز خالص آبیاری جو ۵۸۴۰ مترمکعب در هر هکتار در طول فصل رشد است (۲۰)، به‌طور تقریبی، با تغییر الگوی کشت از گندم به جو، حجم آب مصرفی در

مساحت اراضی کشاورزی در محدوده ۳۱۷/۶ کیلومترمربع می‌باشد که ۶۲/۸ درصد (۱۹۹/۵) کیلومترمربع) از این اراضی زیر کشت گندم است. با توجه به این‌که در محدوده مطالعاتی، نیاز خالص

مقدار قابل توجهی است. با توجه به این که یکی از اقدامات طرح احیاء و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در ایران (۲۰۱۴)، انسداد چاه‌های غیرمجاز می‌باشد (۲)، سناریوهای ۴ تا ۷ در راستای انسداد چاه‌های غیرمجاز در کل آبخوان و به تفکیک مناطق روستایی تعریف شد تا تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در دوره شبیه‌سازی، در شرایط انسداد این چاه‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

این مزارع ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت که در سناریو ۳ به بررسی تأثیر تغییر الگوی کشت مذکور پرداخته خواهد شد.

از مجموع ۱۶۴۳ چاه بهره‌برداری فعال در منطقه (شکل ۸) با حجم برداشت سالانه ۳۲۸/۳ میلیون مترمکعب، ۹۲۹ حلقه چاه با حجم برداشت سالانه ۱۷۹ میلیون مترمکعب، فاقد مجوز بهره‌برداری هستند که با بسته شدن این چاه‌ها، حجم برداشت سالانه تا ۱۴۹/۳ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت که



شکل ۸- چاه‌های بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی.

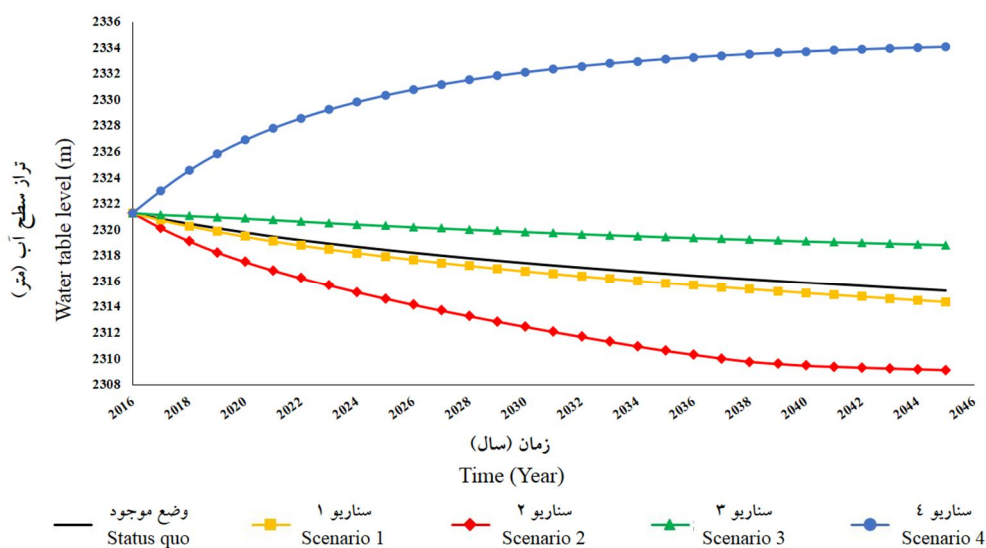
Figure 8. Utilization wells.

میلیون مترمکعب در سال نسبت به شرایط وضع موجود خواهد شد. در این حالت میزان تغذیه حاصل از بارش به ۹۵ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد که به تبع آن، تراز آبخوان به‌طور میانگین در هر سال ۰/۲۳ متر افت پیدا کرده و در پایان دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی، تراز سطح آب در آبخوان نسبت به ادامه شرایط وضع موجود، ۰/۹ متر پایین رفته و آبخوان در تراز ۲۳۱۴/۴ متری به تعادل می‌رسد (شکل ۹). در سناریو ۲، افزایش ۲۰ درصدی برداشت از آبخوان،

یافته‌ها: نتایج حاصل از اجرای سناریوهای ۱ تا ۴ در شکل ۹، نمایش داده شده است. با ادامه وضع موجود بهره‌برداری از آب زیرزمینی در محدوده، تراز آبخوان به‌طور میانگین در هر سال ۰/۲ متر افت پیدا کرده و در پایان دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی نسبت به تراز سال پایه (۲۳۲۱/۱ متر) ۶ متر افت می‌کند و آبخوان در تراز ۲۳۱۵/۳ متری به تعادل می‌رسد (شکل ۹). در سناریو ۱، کاهش ۱۰ درصدی بارش حاصل از تغییرات اقلیم، باعث کاهش تغذیه آب زیرزمینی به میزان ۱۰/۵

هرسال $0/06$ متر و در پایان دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی، $4/4$ متر نسبت به وضع موجود، افزایش می‌دهد (شکل ۹). در سناریو ۴، با انسداد چاه‌های فاقد مجوز بهره‌برداری، ۱۷۹ میلیون مترمکعب از میزان برداشت‌ها کاسته می‌شود که این کاهش باعث می‌شود تا تراز سطح آب در آبخوان، به‌طور میانگین در هر سال $0/45$ متر افزایش پیدا کرده و در پایان ۳۰ سال دوره شبیه‌سازی با افزایش $19/6$ متری، تراز سطح آب از $2315/3$ متر شرایط وضع موجود تا تراز $2334/9$ بالا آید (شکل ۹).

به‌طور میانگین در هر سال، باعث افت $0/41$ متری تراز سطح آبخوان می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با اعمال این سناریو تا پایان دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی، میانگین تراز سطح آب در کل آبخوان نسبت به ادامه وضع موجود، $6/1$ متر افت پیدا کرده و در تراز $2309/1$ متری پایدار می‌شود (شکل ۹). در سناریو ۳، با تغییر الگوی کشت از گندم به جو، حجم آب برداشتی از آبخوان، $20/9$ میلیون مترمکعب در سال کاهش می‌یابد. این میزان کاهش در برداشت از آبخوان، تراز سطح آبخوان را به‌طور میانگین در



شکل ۹- هیدروگراف محدوده مطالعاتی تحت سناریوهای ۱، ۲، ۳ و ۴ در دوره شبیه‌سازی ۳۰ ساله.

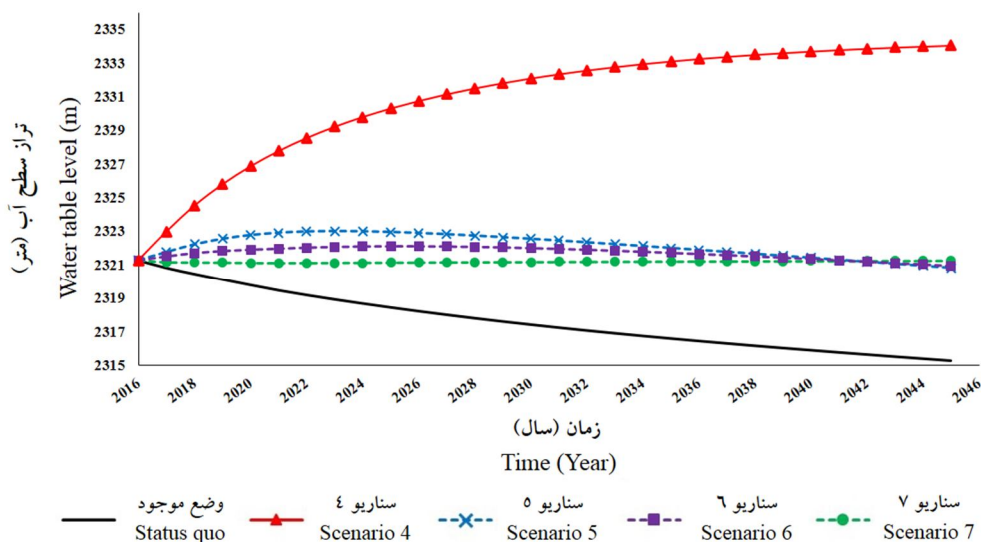
Figure 9. The hydrograph in thr Study area under scenarios number 1, 2, 3 and 4 for a 30- year period of simulation.

نتایج تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای ۵، ۶ و ۷ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. مسدودسازی چاه‌های غیرمجاز در خسروشیرین، شهرمیان و خنجش، به‌طور میانگین در هر سال، باعث افزایش $0/43$ متری تراز سطح آب زیرزمینی می‌شود. در سناریو ۵، انسداد چاه‌های غیرمجاز در منطقه خسروشیرین باعث افزایش تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به شرایط وضع موجود، به میزان $6/5$ متر در طول دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی

سه دهستان خسروشیرین، شهرمیان و خنجش، به‌ترتیب مناطق شمالی، مرکزی و جنوبی محدوده مطالعاتی آبخوان نمدان را در برگرفته‌اند (شکل ۲). (۲). با توجه به گرادیان هیدرولیکی آب زیرزمینی منطقه، از نظر جهت جریان آب زیرزمینی، خسروشیرین در بالادست و خنجش در پایین‌دست دو محدوده دیگر قرار گرفته‌اند. در سناریوهای ۵، ۶ و ۷، تأثیر نحوه مدیریت آب در سطح سه دهستان مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

طول دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی، ۶/۵ متر نسبت به ادامه وضع موجود بالا آورده و آبخوان در تراز ۲۳۲۱/۸ متری به تعادل می‌رسد.

می‌شود و سطح آب آبخوان در تراز ۲۳۲۱/۸ متری به تعادل می‌رسد. در سناریو ۶، انسداد چاه‌های غیرمجاز در منطقه شهرمیان، تراز سطح آب زیرزمینی را در

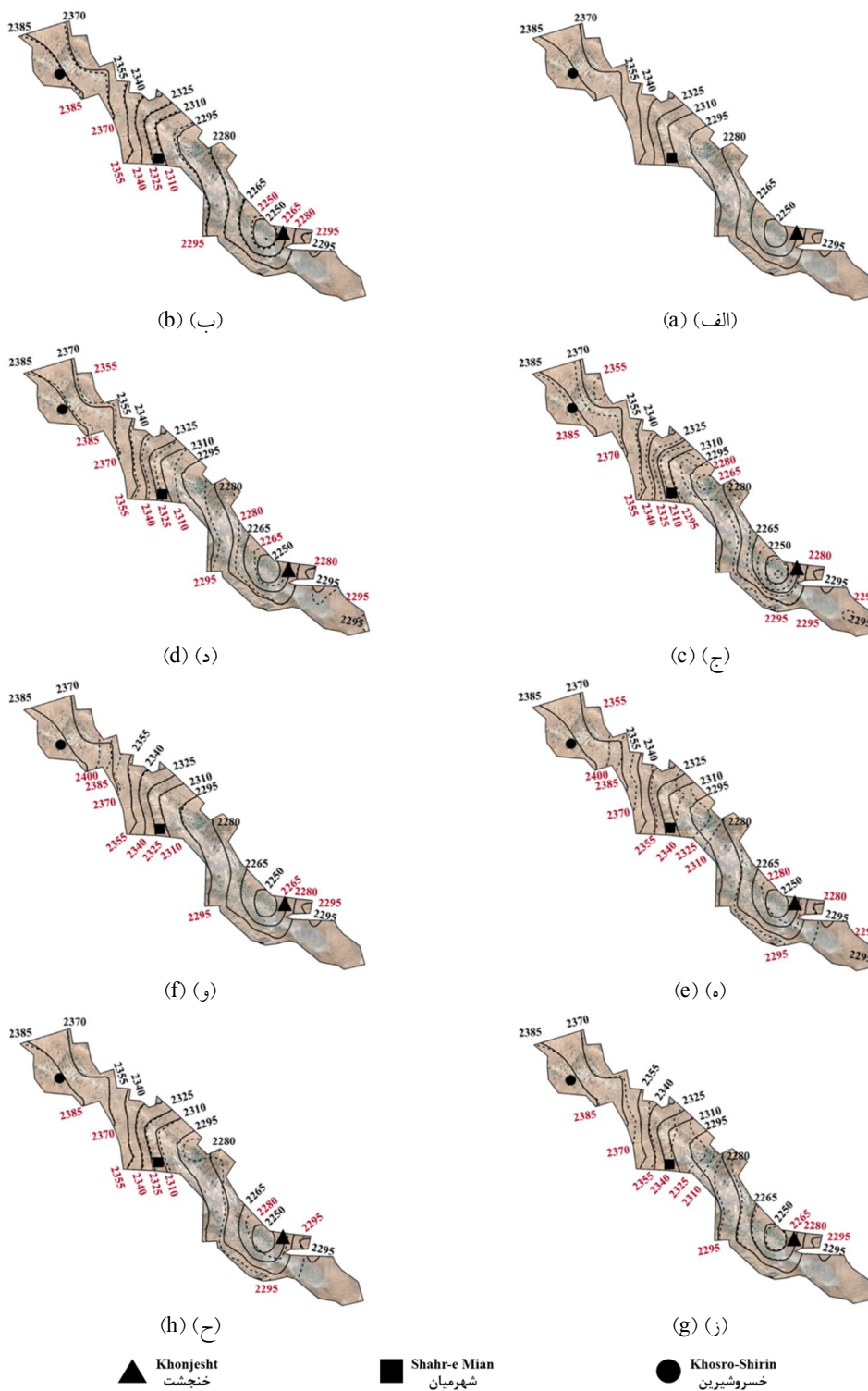


شکل ۱۰- هیدروگراف محدوده مطالعاتی نمدان، تحت سناریوهای ۴، ۵، ۶ و ۷.

Figure 10. The hydrograph variations in the study area under scenarios of 4, 5, 6 and 7.

بیش‌تری می‌یابد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). نتایج نشان می‌دهد که تراز سطح آب زیرزمینی در دو منطقه خسروشیرین و شهرمیان، هنگام انسداد چاه‌های غیرمجاز در دو منطقه دیگر (سناریوهای ۶ و ۷ برای خسروشیرین و سناریوهای ۵ و ۷ برای شهرمیان)، تغییرات بسیار ناچیزی داشته و نسبت به دو منطقه دیگر مستقل هستند (شکل ۱۲-الف و ۱۲-ب). تراز سطح آب زیرزمینی در منطقه خنجشست نیز در سناریوهای ۵ تغییری نکرده است؛ اما در سناریو ۶، با حذف چاه‌های بدون مجوز منطقه شهرمیان تا پایان دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی، ۱/۲ متر نسبت به ادامه روند وضع موجود افزایش می‌یابد (شکل ۱۲-ج).

در سناریو ۷ نیز با مسدود نمودن چاه‌های غیرمجاز در منطقه خنجشست، در جنوب محدوده، تراز سطح آب زیرزمینی تا پایان دوره شبیه‌سازی، نسبت به وضع موجود ۶/۸ متر افزایش یافته و در تراز ۲۳۲۲/۱ متری به تعادل می‌رسد. همچنین با نگاهی کلی به نتایج حاصل از سه سناریوی ۵، ۶ و ۷ می‌توان دریافت که تراز آبخوان در محدوده مورد مطالعه، نسبت به تغییرات میزان برداشت در منطقه خنجشست در جنوب محدوده، بیش‌تر از دو منطقه دیگر حساس است. لازم به ذکر است که در هر سناریو ۵، ۶ و ۷ چاه‌های غیرمجاز در دو منطقه دیگر فعال خواهند بود و تنها چاه‌های بدون مجوز در یک منطقه مسدود می‌گردند. همچنین، تراز سطح آب زیرزمینی در سناریو ۴، نسبت به سه سناریوی ۵، ۶ و ۷، افزایش

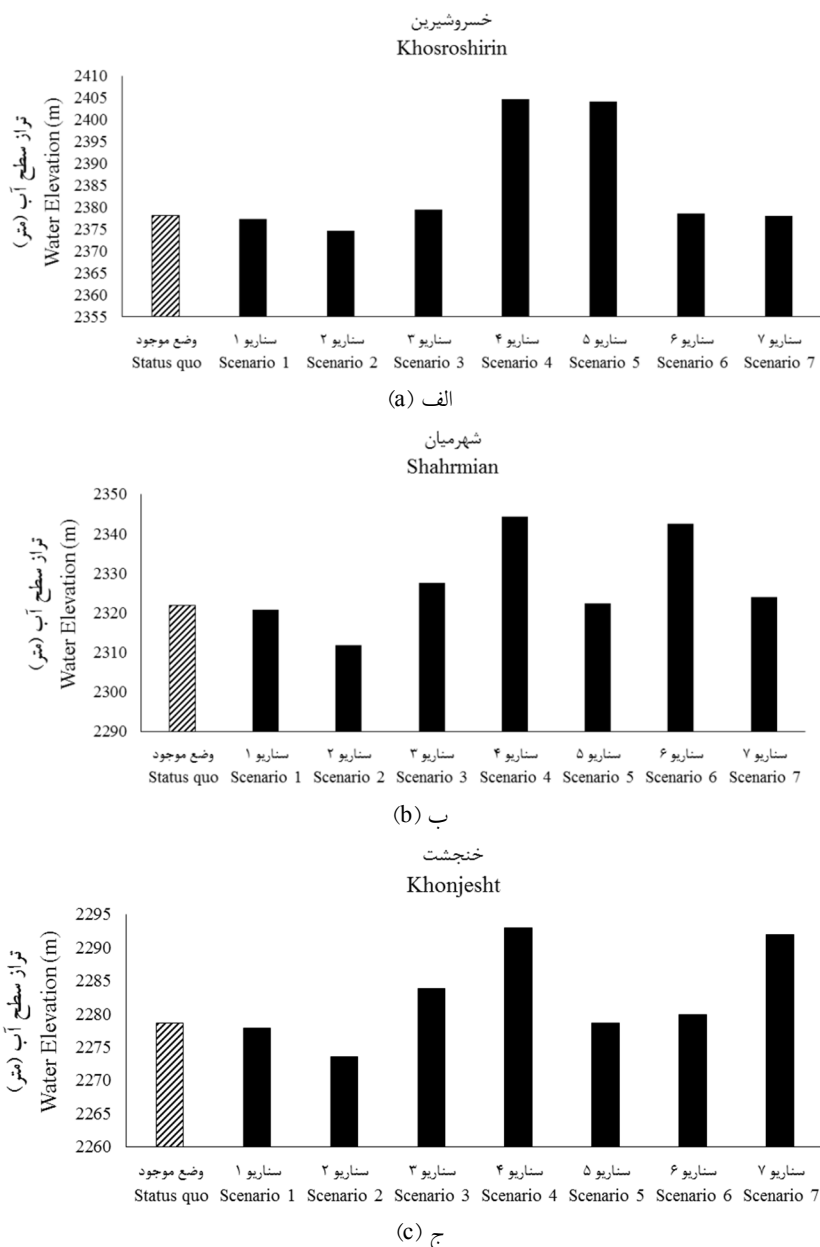


شکل ۱۱- نقشه خطوط هم پتانسیل آب زیرزمینی بر حسب متر در شرایط وضع موجود (الف)، سناریو ۱ (ب)، سناریو ۲ (ج)، سناریو ۳ (د)، سناریو ۴ (ه) سناریو ۵ (و)، سناریو ۶ (ز)، سناریو ۷ (ح) که در آن خط ممتد و اعداد سیاه مربوط به وضع موجود و خط چین و اعداد قرمز مربوط به سناریو مربوطه است.

Figure 11. Water table contour maps (meter) of study area, under Status quo conditions (a), Scenario 1 (b), scenario 2 (c), Scenario 3 (d), Scenario 4 (e), Scenario 5 (f), Scenario 6 (g), Scenario 7 (h) which the black continuous line and numbers belong to the status quo and the dashed lines and the red numbers belong to the related scenario.

خنجشت در وضع موجود و تحت سناریوهای مختلف در نمودارهای شکل ۱۲ قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سناریو ۴، با انسداد همه چاه‌های غیرمجاز موجود در محدوده مطالعاتی، تراز سطح آب در هر سه منطقه به بیش‌ترین مقدار خود در مقایسه با سایر سناریوها می‌رسند.

با مقایسه نتایج سناریوهای اعمال شده، می‌توان نتیجه گرفت، تراز سطح آب زیرزمینی در سناریو ۴ دارای تغییرات بیش‌تری نسبت به سایر سناریوها می‌باشد. از طرفی دیگر، کم‌ترین تغییرات تراز سطح آب نیز در سناریو ۱ رخ می‌دهد (شکل ۱۱). همچنین، تغییرات تراز سه بخش خسروشیرین، شهرمیان و



شکل ۱۲- نمودار تغییرات تراز سطح آب تحت سناریوهای مختلف در سه بخش: خسروشیرین (الف)، شهرمیان (ب) و خنجشت (ج).
Figure 12. Water table changes diagrams for three counties: Khosro-Shirin (a), Shahr-Mian (b) and Khonjesht (c).

وضع موجود، ۱۷/۲ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. همچنین بیش‌ترین میزان احیاء آبخوان (افزایش ذخیره) تا پایان دوره ۳۰ ساله در سناریو ۴ با انسداد کامل چاه‌های غیرمجاز محدودده به میزان ۵۵/۱ میلیون مترمکعب افزایش نسبت به وضع موجود حاصل می‌شود.

مقادیر متوسط سالیانه مؤلفه‌های بیلان و تغییرات ذخیره آبخوان بر اساس نتایج مشاهده شده در طول دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی در جدول ۳ آمده است. بیش‌ترین کاهش ذخیره نسبت به شرایط ادامه وضع موجود، در سناریو افزایش ۲۰ درصدی برداشت (سناریو ۲) رخ می‌دهد و ذخیره آبخوان نسبت به

جدول ۳- مقادیر متوسط سالیانه اجزاء بیلان آب زیرزمینی، تغییرات ذخیره و افت تراز سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف.

Table 3. Mean Annual values of groundwater balance components, storage change and groundwater level depletion under various scenarios.

سناریو (میلیون مترمکعب) Scenario (MCM) ¹							وضع موجود Status quo	اجزاء بیلان Balance components	
7	6	5	4	3	2	1			
248.3	282.6	277.5	151.9	287.6	393.9	328.3	328.3	برداشت Extraction	تخلیه Discharge
61.2	61.2	61.2	61.2	61.2	61.2	55.1	61.2	نفوذ از بارش From precipitation	تغذیه Recharge
61.9	77.2	76.9	44.8	74.8	102.7	85.6	85.6	آب برگشتی Return flow	
127.4	145.6	140.7	84	146.9	195.8	168.1	164.5	ورودی (مثبت) و خروجی (منفی) مرزهای زیرزمینی Inflow (+) and outflow (-) from subsurface boundaries	
2.2	1.4	1.3	38.1	-4.7	-34.2	-19.5	-17	تغییرات ذخیره Storage changes	
0.03	0.02	0.02	0.45	-0.06	-0.41	-0.23	-0.2	تغییرات تراز سطح آب (متر) Groundwater level changes (m)	
19.2	18.4	18.3	55.1	12.3	-17.2	-2.5		تغییرات ذخیره نسبت به وضع موجود Storage changes comparing to current status	

الگوی کشت و طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در ایران، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در پایان دوره شبیه‌سازی ۳۰ ساله، با کاهش ۱۰ درصدی بارش سالانه، تراز سطح آب زیرزمینی از ۲۳۱۵/۳ متر در شرایط وضع موجود تا ۲۳۱۴/۴ متر افت پیدا می‌کند در حالی‌که با افزایش

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش با استفاده از یک مدل عددی تفاضل محدود که در محیط متلب کدنویسی شده است، وضعیت آبخوان محدودده مطالعاتی نمدان در استان فارس ایران، در شرایط غیرماندگار، طی یک دوره شبیه‌سازی ۳۰ ساله، تحت ۷ سناریو مختلف تدوین شده بر اساس شاخص‌های اقلیمی، برداشت،

1- Million cubic metre

دارد که در آن، با حذف چاه‌های غیرمجاز منطقه شهرمیان تا پایان دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی، تراز سطح آب در خنجشت ۱/۲ متر افزایش می‌یابد. بیش‌ترین کاهش ذخیره نسبت به شرایط ادامه وضع موجود در سال پایانی دوره، هنگام افزایش ۲۰ درصدی برداشت در سناریو ۲ رخ می‌دهد و ذخیره آبخوان نسبت به وضع موجود، ۱۷/۲ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد که معادل افت متوسط سالانه در حدود ۰/۴۱ متر است. همچنین بیش‌ترین میزان احیاء آبخوان (افزایش ذخیره) تا پایان دوره ۳۰ ساله در سناریو ۴ با انسداد کامل چاه‌های غیرمجاز محدوده به میزان ۵۵/۱ میلیون مترمکعب افزایش نسبت به وضع موجود حاصل شده و منجر به افزایش متوسط سالیانه تراز سطح آب زیرزمینی در حدود ۰/۴۵ متر می‌شود. بیش‌ترین تغییرات تراز در بین سناریوهای مورد بررسی مربوط به سناریوی انسداد چاه‌های غیرمجاز است که در آن با مسدودسازی ۹۲۹ چاه غیرمجاز از مجموع ۱۶۴۳ چاه فعال در کل محدوده، تراز آبخوان بیش‌ترین افزایش را داشته است. این مسأله نشان‌دهنده اهمیت و لزوم بررسی مسائل قانونی و تعیین تکلیف چاه‌های غیرمجاز در طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی در ایران است.

۲۰ درصدی برداشت، تراز سطح آب تا پایان دوره شبیه‌سازی ۶/۱ متر افت پیدا می‌کند. کشت گندم ۶۲/۸ درصد از کل مساحت اراضی کشاورزی موجود در محدوده را به خود اختصاص داده است. از این‌رو، تغییر الگوی کشت با تغییر نوع محصول از گندم به محصولی با نیاز آبی کم مانند جو، سبب کاسته شدن حجم آب مصرفی در اراضی مذکور تا حدود ۱۹ درصد شد که باعث می‌شود تا تراز سطح آب تا پایان دوره شبیه‌سازی، ۴/۴ متر افزایش پیدا کند.

با انسداد چاه‌های غیرمجاز، در طول دوره شبیه‌سازی، تراز سطح آب بیش‌ترین تغییر را نسبت به سایر سناریوها داشته و در پایان دوره شبیه‌سازی از ۲۳۱۵/۳ متر در وضع موجود تا ۲۳۳۴/۹ متر افزایش می‌یابد. انسداد منطقه‌ای چاه‌های غیرمجاز به ترتیب در مناطق خسروشیرین، شهرمیان و خنجشت نیز بررسی شد. در هر کدام از این حالات، تغییرات تراز سطح آب نسبت به سناریوی انسداد در کل محدوده، کم‌تر بوده و بیش‌ترین تغییر تراز در بین این حالات مربوط به سناریوی انسداد چاه‌های خنجشت با افزایش ۶/۸ متری تراز سطح آب در پایان دوره شبیه‌سازی است. همچنین در مقایسه وضعیت تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی هر منطقه هنگام انسداد چاه‌های غیرمجاز سایر مناطق، تنها منطقه خنجشت تغییرات محسوسی

منابع

1. Anan, M., Yuge, K., Nakano, Y., Saptomo, S., and Haraguchi, T. 2007. Quantification of the effect of rice paddy area changes on recharging groundwater. Paddy and Water environment. 5: 41-47.
2. Aquifer Restoration Plan 2014. Ministry of Energy, Water Assistance. The 5th instruction. (In Persian)
3. Ataie-Ashtiani, B., and Ketabchi, H. 2011. Elitist continuous ant colony optimization algorithm for optimal management of coastal aquifers. Water resources management. 25: 165-190.
4. El-Kadi, A.I., Tillery, S., Whittier, R.B., Hagedorn, B., Mair, A., Ha, K., and Koh, G.W. 2014. Assessing sustainability of groundwater resources on Jeju Island, South Korea, under climate change, drought, and increased usage. Hydrogeol. J. 22: 625-642.
5. Farhoudi-Hafadaran, R., and Ketabchi, H. 2018. Numerical simulation of Urmia Lake and Ajabshir coastal aquifer interaction. Iran-Water Resources Research. 14: 45-58. (In Persian)

6. Hajipour, M., Zakerinia, M., Ziaee, A.N., and Hesam, M. 2015. Water demand management in agriculture and its impact on water resources of Bojnourd basin with WEAP and MODFLOW models. *J. Water Soil Cons.* 22: 85-101. (In Persian)
7. Hamraz, B., Akbarpour, A., and Pourreza-Bilondi, M. 2014. Assessment of parameter uncertainty of MODFLOW model using GLUE method (Case study: Birjand plain). *J. Water Soil Cons.* 22: 61-79. (In Persian)
8. Iran Water Resources Management Company 2016. Ministry of Energy, Fars Regional Water Authority. Updating water resources studies report of Tashk- Bakhtegan & Maharlou lakes river basin. (In Persian)
9. Ketabchi, H., Nik-Khah, R., and Morid, S. 2018a. Numerical simulation of Namdan aquifer in the Fars province of Iran: Assessment of green water management impacts on the aquifer restoration. *Iran-Water Resources Research.* 14: 119-130. (In Persian)
10. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. 2015a. Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers, *Environmental Modelling & Software.* 74: 21-38.
11. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. 2015b. Review: Coastal groundwater optimization - advances, challenges and practical solutions, *Hydrogeol. J.* 23: 1129-1154. (The Theme Issue Optimization for Groundwater Characterization and Management)
12. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. 2015c. Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges, *J. Hydrol.* 520: 193-213.
13. Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. 2011. Development of Combined Ant Colony Optimization Algorithm and Numerical Simulation for Optimal Management of Coastal Aquifers. *Iran-Water Resources Research.* 7: 1-12. (In Persian)
14. Ketabchi, H., Mahmoudzadeh, D., Ghadimi, S., and Saghi Jadid, M. 2018b. A review of evaluating groundwater balance in Iran: Methods and suggestions. Islamic Parliament Research Center of The Islamic Republic Of Iran, Head of Research and production, Department of Water and Environmen. (In Persian)
15. Lalehzari, R., and Abbaslou, H. 2016. Simulating the effect of optimal water allocation on groundwater in monthly stress periods (Baghmalek plain, Khuzestan province). *J. Water Soil Sci.* 26: 307-320. (In Persian)
16. Lalehzari, R., Tabatabaei, S.H., Khayat-Kholghi, M., Yarali, N., and Saba, A. 2013. Evaluating the effect of artificial recharging with treated sewage scenarios on quality and quantity of the Shahre-Kord aquifer. *J. Environ. Stud.* 40: 221-236. (In Persian)
17. Mahmoudzadeh, D., Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., and Simmons, C.T 2014. Conceptualization of a fresh groundwater lens influenced by climate change: A modeling study of an arid-region island in the Persian Gulf, Iran. *J. Hydrol.* 519: 399-413.
18. Mahmoudzadeh, D., Ketabchi, H., and Ataie-Ashtiani, B. 2016. Optimized management of groundwater resources in Kish Island: A sensitivity analysis of optimal strategies in response to environmental changed. *J. Water Wastewater.* 27: 61-70. (In Persian)
19. National Climate Change Office, Department of Environment, 2010. Iran third national Communication to UNFCCC. (In Persian)
20. National document of water 1999. Ministry of Agriculture Jihad-Meteorological Organization. (In Persian)
21. Nik-Khah, R. 2017. Groundwater resources condition under joint green and blue water management and climate change using SWAT and MODFLOW models. Thesis Submitted for the Degree of Master of Science (M.Sc.) in Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Faculty of Agriculture. (In Persian)

22. Parsa Sadr, H., Mohammadzadeh, H., and Nassery, H.R. 016. Numerical simulating of Sabzevar Roudab aquifer and checking influences of constructing Sabzevar Roudab dam on it. *J. Water Soil Cons.* 23: 119-135. (In Persian)
23. Rezapour Tabari, M., and Eil-Beige, M. 2014. Auto-Calibration of Aquifer Parameters Using Aquifer Distributed Mathematical Models and Direct Searching Algorithm. *J. Water Wastewater.* 25: 98-109. (In Persian)
24. Safavi, H., Afshar, A., and Abrishamchi, A. 2006. A quality-quantity simulation model for stream-aquifer interactions. *J. Water Wastewater.* 18: 2-14. (In Persian)
25. Sanford, W.E., and Pope, J.P. 2010. Current challenges using models to forecast seawater intrusion: lessons from the Eastern Shore of Virginia, USA. *Hydrogeol. J.* 18: 73-93.
26. Singh, A., Nath Panda, S., Flugel, W. A., and Krause, P. 2012. Waterlogging and farmland salinisation: causes and remedial measures in an irrigated semi-arid region of India. *Irrigation and drainage.* 61: 357-365.
27. Tóth, Á., Havril, T., Simon, S., Galsa, A., Santos, F.A.M., Müller, I., and Mádl-Szőnyi, J. 2016. Groundwater flow pattern and related environmental phenomena in complex geologic setting based on integrated model construction. *J. Hydrol.* 539: 330-344.
28. United Nations (UN). 2017. World Population Prospects, the 2017 Revision.
29. Yari, E., and Dadmehr, R. 2012. Evaluation the effect of increasing the Irrigation efficiency on evapotranspiration of groundwater aquifer – The case of Zarrineh rud plain. *J. Iran Water Res.* 6: 145-154. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(6), 2019

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.13944.2870

Impact assessment of different management strategies implementation on the aquifer using numerical simulation (Case study: Namdan aquifer, Fars province, Iran)

S. Ghadimi¹ and *H. Ketabchi²

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,

²Assistant Prof., Dept. of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran Iran

Received: 09.12.2017; Accepted: 11.24.2018

Abstract

Background and Objectives: Nowadays, in addition to increase in the population growth, decrease in precipitation and surface flows in arid and semi-arid regions of the world, has caused to increase the extraction of groundwater resources and therefore many problems in this valuable and non-renewable resources. In this regard, assessing, monitoring and prediction of the groundwater resources behavior is significant. In this study, a developed numerical simulation model with finite difference solution using MATLAB was applied to evaluate the groundwater elevation changes in a real case.

Materials and Methods: The study area is the Namdan aquifer located in the Tashk- Bakhtegan basin, Fars province, Iran. The transient finite difference model was developed to assess the groundwater elevation changes. For setting up the model, the study area zoned manually considering the various factors and finally 50 cells were considered. In addition to the groundwater flow interactions between cells, the interactions between boundary cells and inflows and outflows boundaries took account into the modeling. The recharge parameters were calibrated using try and error method while the hydraulic conductivities were calibrated using an optimization problem with an objective function of minimizing the residual sum of squares of water table prediction and observation (a period of 7 years) using an evolutionary ant colony optimization tool and $R^2=0.93$ obtained. Furthermore, the calibrated model verified for a period of 3 years.

Results: The aquifers condition was assessed in transient condition for a period of 30 years, under 7 various scenarios which have been compiled from climate, utilization, crop pattern and the aquifer restoration plan of Iran indexes. By a decrease of 10% in the precipitation and an increase of 20% in the extractions, the groundwater elevation will drop by 0.9 meter and 6.1 meter, respectively. Changing the crop pattern from wheat to barley, which consumes less water, causes 4.4 meters rising in the groundwater elevation. In the removing unlicensed wells scenario, the annual water level rising will be 0.45 meter in average.

Conclusion: The groundwater elevation has been faced with the most changes in the scenario of removing unlicensed wells in all over the study area compared to other scenarios and at the end of simulation period, it would be predicted that the groundwater elevation will increase about 19.6 m. This shows the necessity of paying attention to determining unlicensed wells condition in the aquifer restoration plan more than ever.

Keywords: Aquifer restoration plan, Finite difference method, Namdan aquifer, Numerical simulation

* Corresponding Author; Email: h.ketabchi@modares.ac.ir

