تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷
Volume 14, No. 2, Summer 2018 (IR-WRR)
۱۱۹-۱۳۰

شبیه‌سازی عددی آبخوان نمدان در استان فارس ایران: بررسی اثرات مدیریت آب سبز در احیاء آبخوان

حامد کتابچی[۱*]، روح‌انگیز نیک‌خواه[۲] و سعید مرید[۳]

چکیده

افزایش در رشد جمعیت و برنامه‌های توسعه اقتصادی موجب تشدید فشارها بر منابع آب شده است و تعادل سیستم‌های آب سطحی و به‌خصوص زیرزمینی را با چالش‌های جدی مواجه نموده است. این امر در سال‌های اخیر موجب توجه به آب سبز به‌عنوان یکی از منابع آب شیرین شده و به جهت مدیریت علمی و عملی آن، اقدامات مختلف صورت گرفته است. اقدامات مدیریت آب سبز بر هر دو منابع آب سطحی و زیرزمینی اثر می‌گذارند و می‌توانند در جهت احیاء آبخوان‌ها مؤثر باشند. در این تحقیق با استفاده مـــدل مادفلو (MODFLOW) در محدوده مطالعاتـی نمدان در حوضه طشک- بختگان استان فارس واقع در کشور ایران، اثرات این اقدامات مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل مادفلو پس از تـــوسعه، در دو حالت دائمی و غیردائمی برای دوره هفت‌ساله (۱۳۹۱-۱۳۸۵)، واسنجی و برای دوره سه ساله (۱۳۹۴-۱۳۹۱) صحت‌سنجی شد. سپس اثرات اقدامات مالچ، خطوط سنگی، تراس و کانتور بر روی بیلان و تراز سطح آبخوان بررسی گردید. نتایج نشان داد اقدام مالچ به طور متوسط بـا افزایش ذخیره سالیانه ۴/۲ درصد و تراس با افزایش ۴ درصد آب در آبخوان، بیشترین تأثیر را بر آبخوان داشته‌اند که می‌توانند اقدامات مناسبی برای احیاء آبخوان در طرح‌هایی از جمله طرح احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها در ایران، تلقی شوند ولی برای تحقق اهداف احیاء، کافی نیستند.

کلمات کلیدی: آب سبز، آب زیرزمینی، طرح احیاء و تعادل‌بخشی، مدل مادفلو، مدیریت منابع آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۶/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۸/۲۶

۱- استادیار، دانشکده مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۳- استاد، دانشکده مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

Numerical Simulation of Namdan Aquifer in Fars Province in Iran; Assessment of Green Water Management Impacts on the Aquifer Restoration

H. Ketabchi[1], R. Nik-Khah[2] and S. Morid [3]*

Abstract

Population growth and economic developing programs have increased the pressures on water resources and put serious challenges on the balance of water resources and especially groundwater systems. In recent years, green water has been considered as one of fresh water sources while various acts have taken for its scientific and practical management. Green water management acts affect both surface and ground water resources and can be effective in aquifer restoration plans. In this research, the effects of these acts in the study area of Namdan located in the Tashk-Bakhtegan basin in Fars province of Iran have been evaluated using MODFLOW model. The model was calibrated for a seven year period (2006-2013) and validated for a three year period (2013-2016) in both steady and unsteady conditions. Then, the effects of mulch, stone lines, terraces, and contour acts on the balance and the water level of the aquifer were investigated. The results showed that the mulch with the average of an annual increase of 4.2% in storage and terrace with an increase of 4% of stored water in the aquifer have had the greatest impact on the aquifer, which can be suitable acts for the aquifer restoration under plans such as Iran Aquifer Restoration Plan but results are not enough to cover for the restoration objectives.

Keywords: Green Water, Groundwater, Aquifer Restoration Plan, MODFLOW Model, Water Resources Management.

Received: September 12, 2016
Accepted: November 17, 2017

1- Assistant Professor, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: h.ketabchi@modares.ac.ir
2- M.Sc. Graduate, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3- Professor, Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

منابع آب را می‌توان به دو دسته کلی آب آبی[1] و آب سبز[2] تقسیم نمود تا بتوان با تفکیک آنها از یکدیگر، سیاست‌های مدیریتی مناسب‌تری را برای هر کدام و با توجه به کمبود این منابع اتخاذ نمود. آب‌های زیرزمینی[3] (منطقه اشباع خاک) و آب‌های سطحی (از جمله رودخانه‌ها و دریاچه‌ها)، آب آبی را تشکیل می‌دهند. آب نفوذ یافته به خاک در اثر بـــارش (تغذیـــه) در ناحیه غیراشباع، آب سبز نامیده می‌شود (Akombo et al., 2014; Brandsma et al., 2013). در سال‌های اخیر دسترسی به منابع آب شیرین درون رودخانه‌ها و دریاچه‌ها (آب آبی)، به دلیل بهره‌برداری بیش از حد و تخریب کیفیت آنها رو به کاهش بوده است (Hanjra and Qureshi, 2010). همچنین اراضی مناسب کشت آبی تا حد زیادی قبلاً مورد استفاده قرار گرفته است، لذا توجه بیشتر به کشت دیم که عمدتاً از آب سبز بهره‌برداری می‌کند، ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا لازم به ذکر است که تنها یک‌سوم از منابع آب شیرین، آب آبی می‌باشد و حدود دوسوم آب باران که توسط خاک نگه داشته می‌شود، آب سبز است. در نتیجه برای تولید بیشتر مواد غذایی و صرفه‌جویی در استفاده از منابع آب سطحی و به‌خصوص زیرزمینی باید بر روی مدیریت آب سبز تمرکز بیشتری داشت (Akombo et al., 2014). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، منابع آب زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین آب مورد نیاز تولیدات کشاورزی بوده که بهره‌برداری بی‌رویه از آن، باعث به بار آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیر از جمله کاهش سطح تراز سفره‌های آب زیرزمینی شده است (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015a,b,c; Farhoudi-Hafdaran and Ketabchi, 2017). بنابراین ضرورت پیش‌بینی وضعیت این منابع در شرایط مختلف و نیز در تعامل با اقدامات مدیریت آب سبز، بیش از پیش احساس می‌شود.

تاکنون مدل‌های آب زیرزمینی برای تدوین مدل‌های مفهومی مختلف، برآورد پارامترهای هیدرولیکی، به منظور مدیریت منابع آب آبی و سبز و پیش‌بینی رفتار آبخوان در پاسخ به تغییرات گوناگون محیطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و اخیراً تلفیق آنها با مدل‌های هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز مانند مدل نیمه‌تجربی سوات[4] به جهت بهره بردن از امکانات هر کدام از آنها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Bailey et al., 2016; Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2011). Hunink et al. (2012) با توجه به افت سطح تراز آب‌های زیرزمینی توجه به آب سبز جهت افزایش سطح تراز آب زیرزمینی را مدنظر قرار دادند و با استفاده از مدل سوات، اثرات اقدامات مدیریت آب سبز نظیر مالچ[5] و کشت کانتور[6] را بر تغذیه به آب زیرزمینی در حوضه تانا در کنیا بررسی کردند. آنها دریافتند که اعمال این اقدامات در پایین‌دست منجر به افزایش تغذیه آب زیرزمینی تا حدود ۱۰ درصد می‌گردد اما تغییرات سطح تراز سفره در اثر این اقدامات را نتوانستند تدقیق کنند. Brandsma et al. (2013) نیز با بررسی اثرات اقدامات مدیریتی در کاربری اراضی کشاورزی حوضه دوهه در چین در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ دریافتند که بطور متوسط مالچ، خطوط سنگی[7] و تراس[8] به ترتیب موجب افزایش تغذیه آب زیرزمینی به میزان ۴۴، ۳۹ و ۳۴ درصد می‌شوند. Abouabdillah et al. (2014)، ارزیابی اثرات اقدامات حفاظت آب و خاک بر اجزای بیلان آب و فرسایش را بهره‌گیری از مدل سوات تحت اقدام کانتور در حوضه نیمه‌خشک مرگولیل تونس مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از این بود که اقدام کانتور به ترتیب سبب کاهش ۳۲ و ۲۱ درصدی رواناب سطحی و دبی رودخانه جاری در حوضه شده و تغذیه آبخوان را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. Kauffman et al. (2014) اثرات اقدامات حفاظت خاک بر فرسایش و خدمات اکوسیستم و بهبود مدیریت منابع آب را در حوضه تانا در کنیا با استفاده از مدل‌های سوات و ویپ[9] بررسی نمودند. اقدامات مختلف مانند تراس‌بندی، مالچ، کانتور و غیره در این مطالعه تحت سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و تغییرات مقادیر تغذیه، تبخیر و تعرق، رواناب مورد تجزیه و تفسیر قرار گرفت اما به تغییرات در سفره آب زیرزمینی پرداخته نشد.

می‌توان جمع‌بندی نمود که به کارگیری مدل‌های آب زیرزمینی در بررسی رفتار آبخوان‌ها در تحقیقات پیشین رایج بوده و همچنین مطالعاتی در راستای شبیه‌سازی آب سبز و آب آبـی و اثـرات اقدامات مدیـریت آنها بر روی سفره‌های آب زیرزمینی نیز انجام شده است اما غالب این مطالعات با بهره‌گیری از مدل‌هایی همچون سوات بوده که قـــادر به شبیه‌سازی کامل سیستم آب زیرزمینی نیستند و فقط تغییـــرات آن را برآورد می‌کنند (مانند Hunink et al., 2012; Brandsma et al., 2013). نکته حائز اهمیت این است که مقدار نفوذ عمقی به میزان زیادتری نسبت به بقیه پارامترها، تحت تأثیر اقدامات حفاظت آب سبز قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین عوامل تغذیه آب زیرزمینی (آب آبی) است در نتیجه باعث تغییرات زیادی در سیستم آب زیرزمینی می‌شود که با توجه به مرور مطالعات پیشین در این حوزه، نیاز به تحقیقات بیشتر و تدقیق آثار آن بر روی تغییرات مکانی و زمانی سیستم آب زیرزمینی، کاملاً روشن است (Akombo et al., 2014; Brandsma et al., 2013; Bailey et al., 2016).

در کشور ایران نیز منابع آب زیرزمینی، نقش برجسته‌ای در تأمین آب مورد نیاز تولیدات کشاورزی داشته است بطوریکه در چند دهه اخیر افت سطح تراز آبخوان‌ها به دلیل برداشت بیش از حد از آنها، مشهود

است. لذا پیاده‌سازی اقدامات مدیریتی مانند اقدامات اشاره شده در طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها در ایران (Aquifer Restoration Plan, 2014) ضروری است. هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثرات اقدامات مدیریت آب سبز (مشتمل بر مالچ، خطوط سنگی، تراس و کانتور) به عنوان یکی از اقدامات راهبردی طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها در ایران (Aquifer Restoration Plan, 2014) بر بیلان و سطح تراز آب زیرزمینی یک آبخوان واقعی، تحت فشار فزاینده برداشت بی‌رویه است. در این راستا، آبخوان نمدان واقع در استان فارس در کشور ایران به مساحت ۱۴۰۰ کیلومترمربع انتخاب گردیده است. شبیه‌سازی عددی سیستم آب زیرزمینی این آبخوان با استفاده از مدل عددی مادفلو[۱۰] انجام شده و عملیات واسنجی و صحت‌سنجی در یک دوره ده‌ساله (۱۳۹۴–۱۳۸۵) تکمیل گردیده و جهت بررسی‌های مورد هدف در این مطالعه به کار گرفته شده است. در ادامه پس از ارائه روش تحقیق و فرایند شبیه‌سازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی تهیه شده، اثرات اقدامات مدیریت آب سبز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مطالعه موردی

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۱۲۱۷ کیلومترمربع از آبخوان نمدان واقع در حوضه طشک- بختگان، استان فارس، ایران است (شکل ۱).

آبخوان نمدان در مختصات جغرافیایی '۰۰ °۵۲ تا '۵۶ °۵۲ طول شرقی و '۳۰ °۳۰ تا '۳۰ °۳۱ عرض شمالی قرار گرفته است. محدوده مطالعاتی نمدان، مرتفع‌ترین حوضه آبریز دریاچه‌های طشک- بختگان و مهارلو می‌باشد. با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی، گسترش سازندهایی که قابلیت ذخیره‌سازی منابع آب را دارا می‌باشند در منطقه مورد مطالعه، مطلوب بوده و اکثر مناطق حوضه را می‌پوشانند (Fars Regional Water Authority, 2016).

در محدوده مطالعاتی نمدان، عمق آب زیرزمینی در حاشیه ارتفاعات به دلیل جریان‌های ورودی به آبخوان کم بوده و در سمت مرکز و جنوب دشت، افزایش عمق آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. حداکثر و حداقل عمق آب زیرزمینی ۸۰ و ۱۰ متر است. حداکثر عمق آب زیرزمینی در ناحیه جنوب شرقی، بالای دریاچه خشک شده کافتر و حداقل آن در ناحیه شمال غربی مشاهده شده است. نوسانات سطح تراز آب زیرزمینی برای دوره ۱۳۹۵–۱۳۸۵ توسط ۴۸ حلقه چاه پیزومتری برآورد گردیده که در شکل ۲ موقعیت آنها نشان داده شده است. بر اساس هیدروگراف آبخوان منطقه که در شکل ۳ ارائه شده است، مقدار افت کلی سطح تراز آب زیرزمینی در این دوره برابر با ۱۰/۳ متر و میانگین افت سالیانه در این آبخوان بیش از ۱ متر است. طبق آمار موجود و نقشه کاربری زمین، نزدیک به ۴۱ درصد از محدوده را زمین‌های کشاورزی تشکیل داده‌اند.

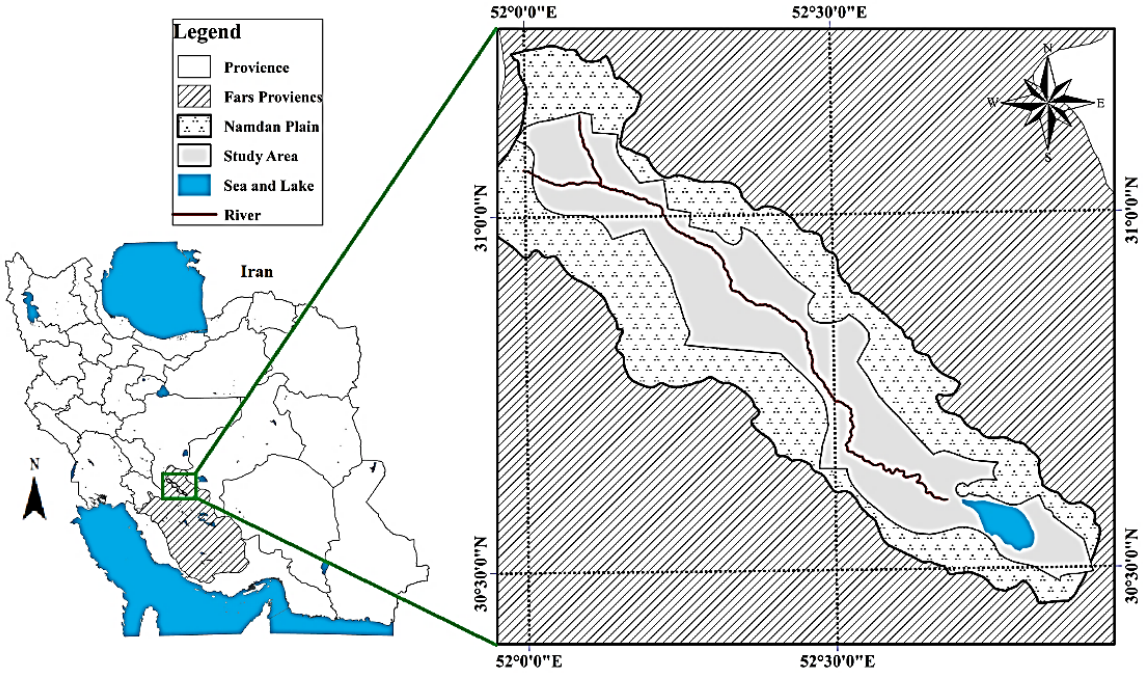

Fig. 1- Namdan Aquifer study area, Tashk- Bakhtegan basin, Fars province, Iran

شکل ۱- محدوده مطالعاتی آبخوان نمدان، حوضه آبریز طشک- بختگان، استان فارس، ایران

همچنین ۴/۷ درصد از منطقه بدون پوشش و بایر است. مراتع، بخش وسیعی از منطقه (۴۴ درصد از کل منطقه) را به خود اختصاص داده‌اند و ۰/۴ درصد از منطقه دارای پوشش جنگلی است. بهره‌برداری از آب زیرزمینی در این محدوده عمدتاً از طریق چاه‌های بهره‌برداری عمیق و نیمه‌عمیق در کاربری کشاورزی صورت می‌گیرد. خلاصه‌ای از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری مورد اشاره در جدول ۱ آمده است تعداد کل چاه‌های بهره‌برداری موجود در این محدوده، ۱۷۰۲ حلقه چاه که موقعیت آنها در شکل ۲ قابل مشاهده است. متوسط ساعات کارکرد این چاه‌ها در سال ۳۶۷۳ ساعت است که عمدتاً در فصول بهار تا پاییز صورت گرفته و به مقدار خیلی کم در زمستان می‌باشد. توزیع فصلی اشاره شده در جدول ۱ آورده شده است (Fars Regional Water Authority, 2016).

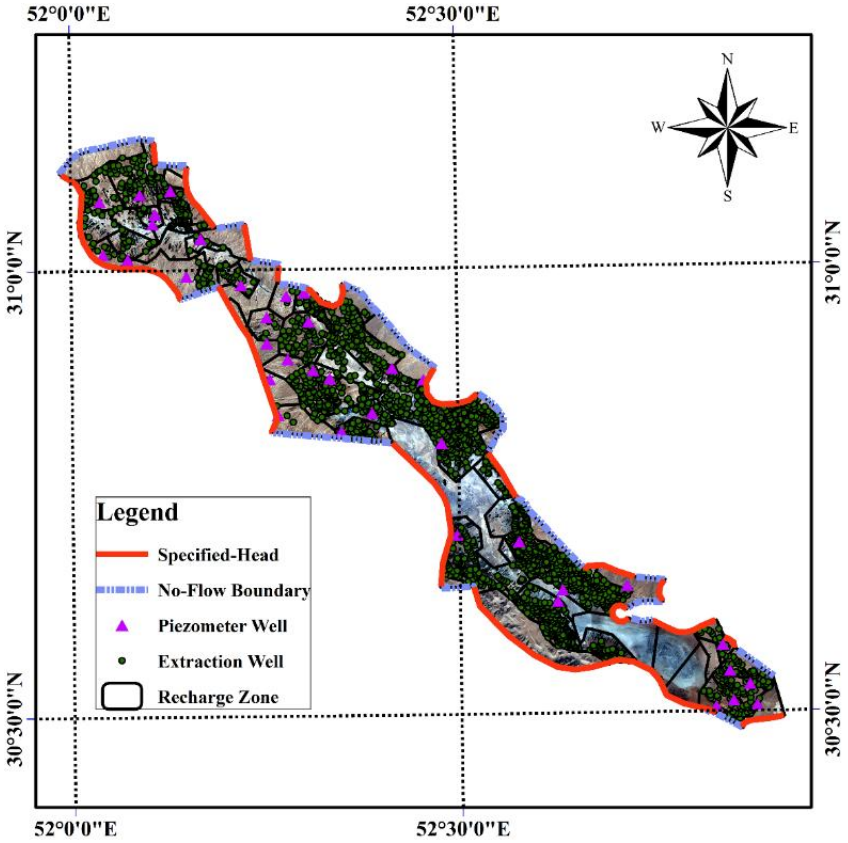

Fig. 2- Conceptual model of Namdan aquifer and the location of piezometer and extraction wells

شکل ۲- مدل مفهومی آبخوان نمدان و موقعیت چاه‌های پیزومتر و بهره‌برداری

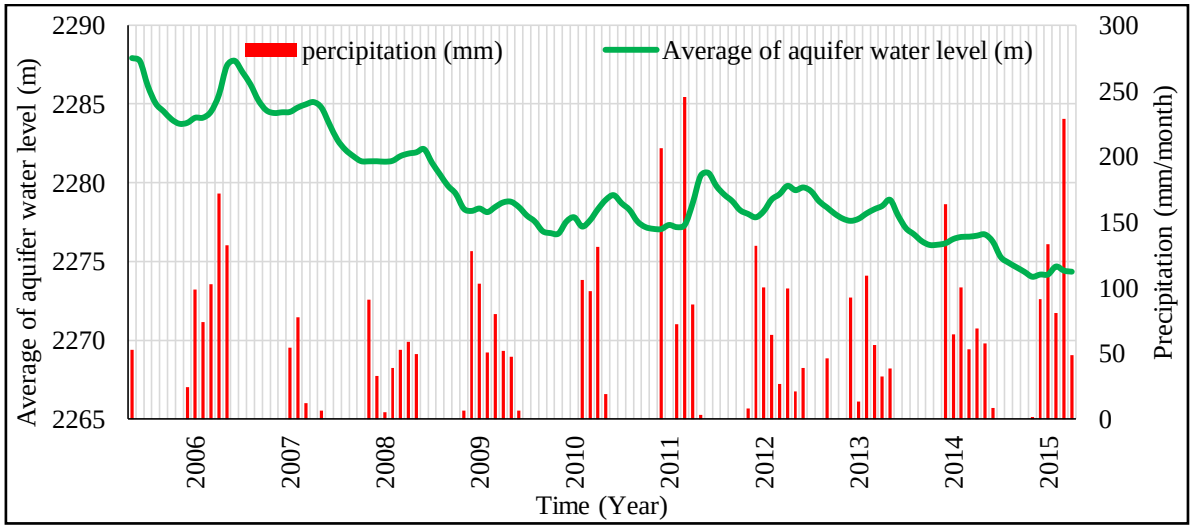

Fig. 3- Namdan aquifer hydrograph and the Kaftar precipitation station in the study area

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

Table 1– Summary of extraction wells information
جدول ۱- خلاصه‌ای از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری

Parameter	Unit	Maximum	Minimum	Annual average	Total
Number of wells	-	-	-	-	1702
Annual extraction	m^3	884350	415	188015	~320×10^6
Pumping depth	m	250	6	49	-
Spring operating hours	hr	2160	15	1424	40% of total extraction
Summer operating hours	hr	2160	30	1613	43% of total extraction
Fall operating hours	hr	1440	40	633	17/1% of total extraction
Winter operating hours	hr	890	100	495	0/04% of total extraction

* Based on Power Ministry information about extraction wells (2009)

۲-۲- مدل شبیه‌سازی

در این مطالعه از مدل عددی مادفلو (Harbaugh, 2005)، جهت ساخت مدل مفهومی و عددی آبخوان استفاده می‌شود. مدل عددی مادفلو بر پایه حل معادلات حرکت آب‌های‌زیرزمینی در محیط متخلخل می‌باشد به‌طوریکه حرکت آب زیرزمینی بوسیله معادله دیفرانسیل جزیی زیر (رابطه ۱) با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}h\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{yy}h\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{zz}h\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۱)$$

در این رابطه، K_{xx}، K_{yy} و K_{zz} [$L.T^{-1}$] مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x، y و z هستند. W [$L.T^{-1}$] برابر جریان واحد تغذیه یا تخلیه، S_S ضریب ذخیره آبخوان، h [L] برابر سطح تراز آب زیرزمینی می‌باشد.

۲-۳- مدل مفهومی و عددی آبخوان دشت نمدان

ساختار مدل مفهومی آبخوان دشت نمدان شامل محدوده مدل‌سازی، چاه‌های بهره‌برداری و پیزومتری (شکل ۲)، میزان تغذیه از سطح (شامل بارش و آب برگشتی از چاه‌ها)، توزیع اولیه مقدار پارامترهای هیدروژئولوژیکی (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه) است. در این تحقیق مدل‌سازی دوبعدی آبخوان انجام شده به‌طوریکه در راستای قائم، آبخوان تک‌لایه فرض شده است.

برای تعیین الگوی تغذیه از سطح زمین، ۷۰ ناحیه تغذیه متأثر از محل قرارگیری شبکه چاه‌های بهره‌برداری، زمین‌شناسی منطقه و پیزومترها در سطح دشت تعریف شده است (شکل ۲). شرایط مرزی مدل مشتمل بر مرزهای هد و مرزهای نفوذناپذیر می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از تهیه مدل مفهومی، شبکه‌بندی مدل بر اساس وسعت منطقه، وضعیت زمین‌شناسی، تراکم چاه‌های بهره‌برداری، توپوگرافی، شکل مرزهای محدوده و میزان اطلاعات موجود انجام شد (Harbaugh, 2005)، پس از بررسی‌های لازم به جهت کنترل‌های عددی و زمان محاسبات لازم، محدوده به شبکه‌های مربعی با وسعت ۵۰۰ در ۵۰۰ متر تقسیم گردیده است که سلول‌هایی با تعداد ۵۰۵۸ عدد را ایجاد می‌نماید. بر اساس این سلول‌بندی هم می‌توان دقت لازم جهت لحاظ مرزها، شکل محدوده و هندسه آبخوان برآورده می‌شود و هم زمان محاسبات، شرایطی منطقی را خواهد داشت. در جدول ۲، اطلاعات کلیدی شبیه‌سازی عددی مورد نظر، خلاصه شده است.

۲-۴- واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی

واسنجی مدل یک روش برای تنظیم پارامترهای مدل شامل داده‌های هیدرولیکی و هیدرودینامیکی به منظور ارائه بهترین نتیجه بین مقادیر مشاهداتی سطح آب و مقادیر شبیه‌سازی شده می‌باشد. در این مطالعه، داده‌های ثبت شده تراز آب زیرزمینی در ۴۸ حلقه چاه پیزومتری (شکل ۲) مبنای تنظیم پارامترها است. واسنجی به دو صورت دائمی و غیردائمی با استفاده از برنامه عملیات واسنجی خودکار (برنامه پست[۱۱]) انجام شده است. در جدول ۳ خلاصه‌ای از اطلاعات فرایند واسنجی آمده است.

مدل آب زیرزمینی نمدان در حالت دائمی برای مقادیر متوسط سالیانه در دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۴ توسعه داده شده و مورد واسنجی قرار گرفته و در این فرایند پارامترهای تغذیه از سطح و هدایت هیدورلیکی تدقیق گردید. برای تنظیم تغذیه از سطح، ناحیه‌بندی منطقه بر اساس کاربری زمین، شیب و اطلاعات زمین‌شناسی مورد نظر قرار گرفت (شکل ۲) و سپس مقادیر تغذیه از بارش و تغذیه حاصل از آب برگشتی به ترتیب در محدوده‌های ۵ تا ۲۵ درصد بارش و ۱۰ تا ۵۰ درصد آب برداشت شده تنظیم گردید.

Table 2– The numerical simulation model characteristics

جدول ۲- مشخصات شبیه‌سازی عددی

Characteristics	Description
Simulation setup	
Groundwater flow modeling	MODFLOW (Harbaugh, 2005)
Dimension	Two dimensional
Porous media	Heterogeneous media
Simulation mode	Saturated steady-state and transient flow
Spatial discretization	
Structure	Finite difference method
Number of elements	5058
Mesh dimension (vertical direction) (m)	15-153 (one layer)
Mesh dimension (horizontal direction) (m)	500×500
Temporal discretization	
Time step for transient simulation (day)	30
Stress period for transient simulation (month)	83
Boundary conditions	
Lateral boundaries	No flow Time-dependent fixed head (2241.2-2339.6 m)
Top surface boundary	Flow boundary (recharge and extraction rates)
Bottom surface boundary	No flow
Model Parameters	
Topography elevation (m)	2288-3022
Bedrock elevation (m)	2148-2394
Water table elevation (m)	2268-2400
Aquifer thickness (m)	15-153
Freshwater density (kg/m^3)	1000
Recharge rate (m/day)	0.00000945-0.003354
Extraction rate (m^3/day)	554.1-2622.8
Gravitational acceleration (m/s^2)	9.81
Hydraulic conductivity (m/day)	1-25
Specific storage	0.008-0.21

Table 3- The calibration procedure characteristics

جدول ۳- مشخصات فرایند واسنجی

Characteristics	Description
Auto-calibration code	PEST (Doherty, 2005)
Calibration observation	Water elevations in 48 piezometer wells
Calibration parameters	Hydraulic conductivity Recharge rate Specific yield (only for transient calibration)
Total number of calibration parameters	3108
Optimization algorithm	Gauss-Marquardt-Levenberg nonlinear scheme
Max number of iteration for PEST	20-30
Max of iteration with no improvement for PEST	3-4
Relative convergence limit	0.005
Relative parameter change criterion	0.005
Preferred homogenous regularization for PEST	Yes
Prior information power factor for PEST	1.0
Preferred value regularization for PEST	No

برای واسنجی هدایت هیدرولیکی، مقادیر اولیه بر اساس داده‌های اطلاعات زمین‌شناسی و نوع خاک محدوده، مقادیر حداقل و حداکثر موجود قابلیت انتقال و ضخامت آبخوان حاصل گردید و بر اساس آن در بازه ۱ تا ۲۵ متر بر روز تنظیم گردید. پس از تکرارهای متوالی

و همزمان برای تنظیم این دو مشخصه، در حالت دائمی، ضریب تبیین برآورد شده برای مقادیر تراز محاسباتی و مشاهداتی در محل چاه‌های پیزومتر برابر ۰/۹۹، مقدار پارامتر مجذور میانگین مربعات خطاها برابر ۳/۲۴ متر و قدر مطلق میانگین خطاها برابر ۲/۱۷ متر برآورد شد.

مقادیر حاصل برای تغذیه از سطح و هدایت هیدرولیکی در حالت دائمی، مبنای واسنجی حالت غیردائمی قرار گرفت و واسنجی مدل در حالت غیردائمی برای یک دوره هفت‌ساله از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۱، توسط شبیه‌سازی تغییرات ماهیانه سطح تراز آب زیرزمینی در پاسخ به تغییرات مقادیر تغذیه ناشی از نوسانات بارش و آب برگشتی از آب برداشت شده از منابع آب زیرزمینی انجام گرفت. توزیع ماهانه مقادیر برداشت، تغذیه و سطح تراز آب در این شرایط بررسی شد و علاوه بر پارامترهای مورد اشاره در واسنجی حالت دائمی، پارامتر ضریب ذخیره نیز تدقیق شد. رویکرد مشابه حالت دائمی برای تنظیم تغذیه از سطح و هدایت هیدرولیکی مدنظر قرار گرفت و در تنظیم پارامتر ضریب ذخیره نیز، همان رویکرد تنظیم هدایت هیدرولیکی انتخاب شد. پس از تکرارهای متوالی، در حالت واسنجی غیردائمی مقدار پارامتر مجذور میانگین مربعات خطاها و قدر مطلق میانگین خطاها به ترتیب برابر۳/۵۴ و ۲/۴۱ متر برآورد شد. همچنین مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۹۹ گردید که نشان می‌دهد مدل به‌صورت مطلوب روندها را شبیه‌سازی کرده است. توزیع مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، آبدهی ویژه (–) و نرخ تغذیه (متر بر روز) نیز در شکل ۴ نشان داده شده و بازه تغییرات آنها در جدول ۲ خلاصه گردیده است.

به منظور اطمینان از نتایج واسنجی، مدل برای دوره سه‌ساله از سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. در این حالت مقدار قدرمطلق میانگین خطاها و مجذور میانگین مربعات خطاها برابر ۲/۸، ۳/۸ متر شد همچنین ضریب تبیین نیز برابر ۰/۹۹ برآورد گردید. شکل ۵ هیدورگراف آبخوان را بر مبنای داده‌های مشاهداتی و محاسباتی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، تطابق مطلوب بین حالات مشاهداتی و محاسباتی در هر دو بازه واسنجی و صحت‌سنجی وجود دارد. متوسط سالیانه کاهش حجم ذخیره آبخوان در طی دوره واسنجی و در مقیاس محدوده مدل‌سازی برابر ۱۰۲– میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. در ادامه با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده محدوده مطالعاتی مدل شده، به بررسی سناریوهای موردنظر در جهت بهبود وضعیت آبخوان پرداخته می‌شود.

۳- اقدامات مدیریت آب سبز

در این مطالعه، اثرات چهار نوع اقدام مدیریت آب سبز شامل مالچ، خطوط سنگی، تراس و کانتور بر آبخوان دشت نمدان بررسی می‌شود. اقدامات فوق با استفاده از مدل سوات (Delavar et al., 2017) در کاربری مرتع به مساحت ۱۴۰۰ کیلومترمربع که امکان پیاده‌سازی این ۴ اقدام مقدور بوده است اعمال شده و نتایج حاصل از تغییرات اجزای مؤثر در تغذیه در مدل آب زیرزمینی اعمال شده است. خلاصه‌ای از این تغییرات در جدول ۴ آمده است.

در ادامه جزییاتی بیشتر از چهار اقدام اشاره شده برای مدیریت آب سبز ارائه می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی اعمال این اقدامات مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از اعمال این اقدامات در اجزای بیلان آب زیرزمینی برای دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۱ به صورت متوسط سالیانه در جدول ۵ نشان داده شده است.

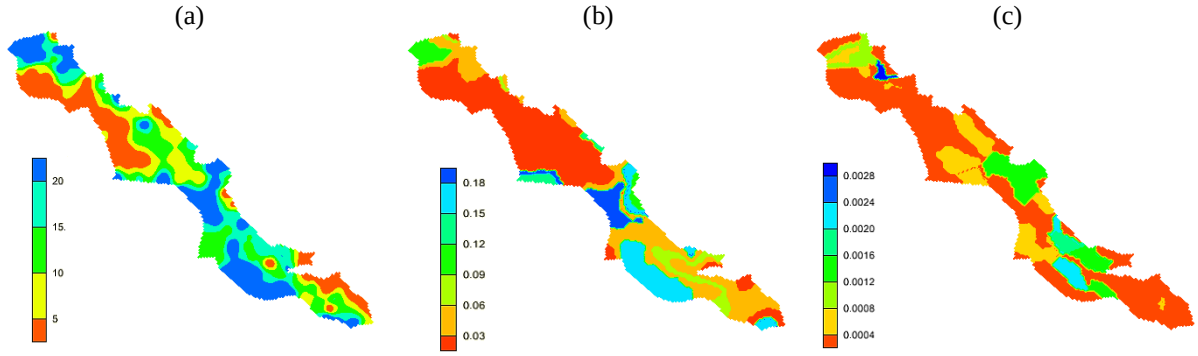

Fig. 4- Calibrated values of (a) hydraulic conductivity (m/day), (b) specific yield (-), and (c) recharge rate (m/day) for the study area

شکل ۴- مقادیر واسنجی شده (الف) هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)، (ب) آبدهی ویژه (–) و (ج) نرخ تغذیه (متر بر روز) در محدوده مطالعاتی

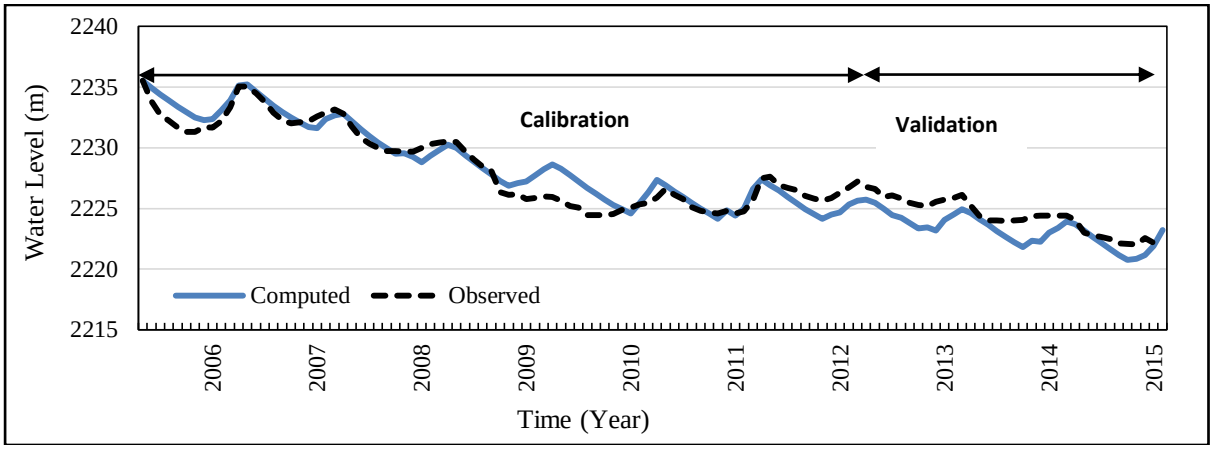

Fig. 5- Calibrated and validated aquifer hydrograph

شکل ۵- هیدروگراف آبخوان در حالت واسنجی و صحت‌سنجی

Table 4- Estimated changes in groundwater inflow under green water management acts using SWAT model (Delavar et al., 2017)

جدول ۴- تغییرات اجزای ورودی به آب زیرزمینی تحت اقدامات مدیریت آب سبز با مدل SWAT (Delavar et al., 2017)

Management acts	Land use	Surface runoff	Percolation
Mulch	Rangeland	28%	9%
Stone-lines	Rangeland	29%	6.1%
Terraces	Rangeland	71.8%	11%
Contour	Rangeland	43.6%	1.4%

Table 5- Components balance in the study area under green water management acts in rangeland land use (Million cubic meters)

جدول ۵- اجزای بیلان محدوده مطالعاتی تحت اقدامات مدیریت آب سبز در کاربری مرتع (میلیون مترمکعب)

Management acts	Recharge			Discharge			
	Groundwater inflow from boundaries	Recharge rate*	Total inflow	Discharge from wells	Groundwater outflow from boundaries	Total outflow	Storage change
Base	81.4	181.8	263.1	318.7	46.5	365.2	-102
Mulch	85.9	182.8	268.7	319.6	46.9	366.5	-97.8
Stone-lines	84.5	182	266.5	319.3	46.7	366	-99.5
Terraces	86.9	181.3	268.2	319.5	46.8	366.3	-98.1
Contour	82.1	180.1	262.2	318.4	46.4	364.8	-102.6

* Infilitration from surface caused by both precipitation and return flow of extraxted water

۳-۱- مالچ

مالچ یکی از اقدامات پرکاربرد در زمینه حفاظت آب می‌باشد که با حفظ رطوبت خاک و کاهش تبخیر از خاک باعث کاهش تلفات آب سبز و افزایش نفوذ به آب زیرزمینی می‌شود (Brandsma et al., 2013). تحت این اقدام به طور متوسط مقدار تغذیه از سطح حدود ۹ درصد افزایش یافته از طرفی نیز مقدار رواناب موجود در رودخانه ۲۸ درصد کاهش یافته است که منجر به کاهش تغذیه در پایین‌دست می‌شود. تحت این اقدام به طور متوسط سالانه میزان ورودی به آب زیرزمینی حدود ۴/۵ میلیون مترمکعب افزایش یافته و از طرفی نیز مقدار تغذیه از سطح آبخوان نیز ۰/۹ میلیون مترمکعب افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار ورودی از مرز و سطح آبخوان انتظار می‌رود مقدار خروجی نیز به دلیل افزایش تراز، افزایش گردد که این افزایش میزان خروجی (۰/۳ میلیون مترمکعب) نیز در نتایج حاصل از مدل مشاهده می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که تحت اقدام مالچ به طور متوسط، سالانه حدود ۴/۳ میلیون مترمکعب (۴/۳ درصد) آب درون آبخوان ذخیره می‌شود.

۳-۲- خطوط سنگی

خطوط سنگی، ردیف‌های سنگی ساخته شده از ساختارهای سنگی کوچک می‌باشد که سنگ‌ها به صورت افقی در سراسر شیب قرار داده می‌شوند. فاصله بین سنگ‌ها تابع شیب و موجود بودن سنگ‌ها است. خطوط سنگی با کاهش سرعت رواناب منجر به افزایش نرخ نفـــوذ می‌شود که در نتیجه رشد گیاهان را بهبـــود می‌بخشد (Brandsma et al., 2013). اعمال این اقدام در مدل و برای منطقه طرح مانند مالچ، باعث کاهش رواناب در حدود ۲۹ درصد و افزایش تغذیه به آب زیرزمینی تا حدود ۶/۱ درصد شده است. با توجه به افزایش بیشتر تغذیه در اقدام مالچ نسبت به خطوط سنگی، انتظار می‌رود که این افزایش در آب زیرزمینی نیز بیشتر تأثیرگذار باشد. تحت اعمال خطوط سنگی میزان کل جریان ورودی به آبخوان از مرزهای ورودی و همچنین تغذیه از سطح به ترتیب ۳/۱ و ۰/۲ میلیون مترمکعب است که کمتر از اقدام مالچ می‌باشد. به طور متوسط تحت اقدام خطوط سنگی سالانه ۲/۶ میلیون مترمکعب آب در آبخوان ذخیره می‌باشد.

۳-۳- تراس

این اقدام یک خاکریز ساخته شده در طول کانتور با استفاده از سنگ و خاک می‌باشد. این روش در مناطقی استفاده می‌شود که سنگ کافی وجود ندارد و خاک کم‌عمق است. اما زمانی که خاک کافی باشد، پوشش گیاهی در قسمت بالای خاکریز کاشته می‌شود. هدف از این اقدام کاهش رواناب، کاهش طول دامنه (شیب) و افزایش نرخ نفوذ است (Brandsma et al., 2013). اعمال تراس در کاربری اراضی مرتع، نشان از افزایش ۱۱ درصدی تبخیر و کاهش ۷۳ درصدی رواناب داد. در نتیجه باعث افزایش میزان آب ورودی از مرز به مقدار متوسط سالانه ۵/۵ میلیون مترمکعب شده اما مقدار تغذیه از سطح آبخوان به دلیل کاهش قابل توجه رواناب سطحی نسبت به اقدام مالچ و خطوط سنگی، حدود ۰/۵ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. از طرفی چون مقدار آب ورودی از مرزها بیشتر از کاهش تغذیه از سطح می‌باشد در نتیجه تراز مرزهای خروجی نیز افزایش یافته و حدود ۰/۲ میلیون مترمکعب آب از آبخوان خارج می‌شود. مقدار کل آب اضافه شده به آبخوان تحت این اقدام به طور متوسط ۴ میلیون مترمکعب می‌باشد که تفاوت چندانی با اقدام مالچ ندارد.

۳-۴- کانتور

این گزینه مدیریت آب سبز، شامل انجام عملیات کشاورزی از قبیل شخم و کشت در طول خطوط کانتور (تراز) می‌باشد که اغلب با خاکریزهای خاک (در شیب‌های بیش از ۳ درصد) ترکیب می‌شود. این اقدام می‌تواند به مقدار قابل توجهی فرسایش را کاهش دهد. همچنین، خاکریزها یا باندها، سرعت رواناب و فرسایش خاک را کاهش داده، آب را پشت ساختارها یا خاکریزها نگه می‌دارند و به آن اجازه می‌دهند تا نفوذ کند. این اقدام به روند بیشتر تغذیه آب زیرزمینی کمک می‌کند (Brandsma et al., 2013). شبیه‌سازی اقدام کانتور توسط (Delavar et al., 2017)، باعث افزایش تغذیه به مقدار ۱/۴ درصد و کاهش رواناب به میزان ۴۳/۶ درصد شده است. نتایج این اقدام در آب زیرزمینی موجب شد مقدار ورودی به آبخوان ۰/۷ میلیون مترمکعب افزایش و میزان تغذیه از سطح به دلیل کاهش رواناب، ۱/۷ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. در نتیجه مقدار خروجی از آبخوان نیز حدود ۰/۲ میلیون متر مکعب کاهش یافته است. اقدام کانتور بر عکس سه اقدام دیگر در جهت بهبود وضعیت آبخوان تحت کاربری مرتع مناسب نمی‌باشد، زیرا باعث کاهش مقدار آب اضافه شده به آبخوان در حدود سالانه ۰/۵ میلیون مترمکعب می‌شود.

در این مطالعه، علاوه بر بررسی اثرات اقدامات مورد اشاره مدیریت آب سبز بر روی اجزای بیلان آب زیرزمینی، اثرات آنها بر سطح تراز آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. هیدروگراف آبخوان تحت اعمال این چهار نوع اقدام در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به آنچه که بیان شد اقدام مالچ بیشترین اثر را بر روی بیلان آب زیرزمینی داشته و به طور متوسط؛ سالیانه موجب افزایش سطح تراز آبخوان به میزان ۵/۷ سانتی‌متر می‌شود. پس از مالچ، اقدام تراس و خطوط سنگی بیشترین تأثیر را بر روی آبخوان داشته‌اند و موجب افزایش سطح ۵/۵ و ۳/۶ سانتی‌متری سطح تراز آبخوان می‌شوند. اقدام کانتور نیز به طور متوسط سالیانه باعث کاهش سطح تراز آبخوان به میزان ۰/۹ سانتی‌متر شده است.

به طور کلی اقدامات مدیریت آب سبز منجر به تغذیه به آب زیرزمینی و همچنین کاهش رواناب سطحی شدند که کاهش رواناب خود نیز منجر به کاهش تغذیه در پایین دست می‌شود که با بررسی دقیق این اقدامات توسط مدل مادفلو نتایج حاکی از آن بود که سه اقدام مالچ، تراس و خطوط کانتور در جهت افزایش ذخیره آب در آبخوان مؤثر بوده که می‌توانند در جهت احیاء آبخوان‌ها و بهبود وضعیت آنها مورد استفاده قرار گیرند اما اقداماتی کافی برای تعادل‌بخشی یا احیاء آبخوان نخواهند بود و لزوم توجه به کاهش تغذیه سطحی تحت این اقدامات به دلیل کاهش رواناب‌ها در برنامه‌ریزی‌ها ضروری است. باید توجه داشت که بهترین این اقدامات (اقدام مالچ) تنها قادر به جبران ۴/۲ میلیون مترمکعب از کسری ۱۰۲ میلیون مترمکعب مخزن محدوده مورد مطالعه (حدود ۴ درصد) بوده و نیاز به راهکارهای دیگر جبران کسری مخزن ضروری است.

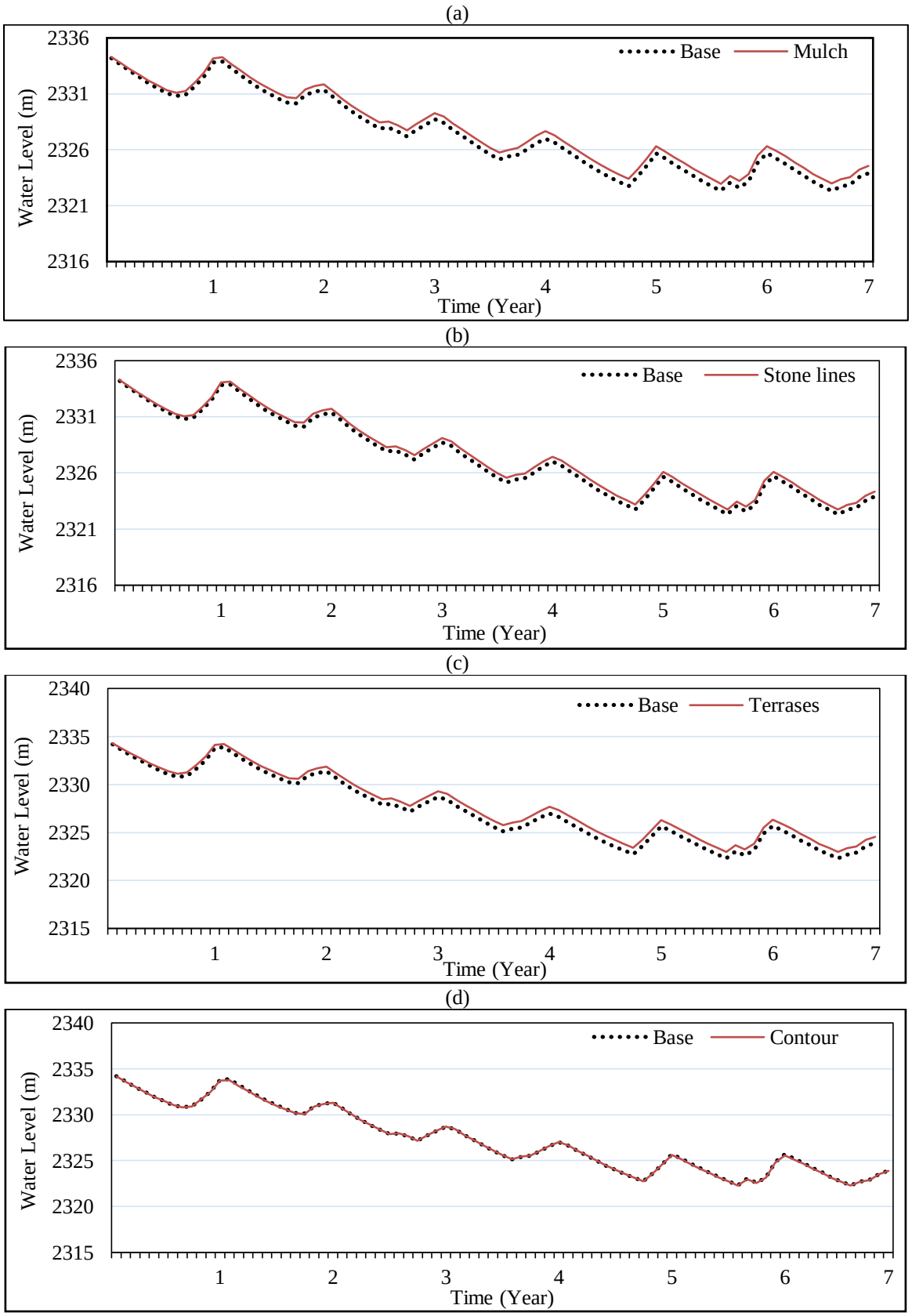

Fig. 6- Study area hydrograph under the management acts: (a) Mulch, (b) Stone lines, (c) terraces, and (d) Contour

شکل ۶- هیدروگراف محدوده مطالعاتی تحت اقدامات مدیریتی: (الف) مالچ، (ب) خطوط سنگی، (ج) تراس، و (د) کانتور

طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها در ایران جهت جبران کل کسری حجم مخزن دشت‌های دارای بیلان منفی، سهمی معادل ۶ درصد را برای اقدامات آبخیزداری و معادل ۴ درصد را برای تغذیه مصنوعی ملحوظ نموده است (Aquifer Restoration Plan, 2014) که اقدامات مورد بررسی در این مطالعه، جهت تحقق این برنامه‌ها نیز سودمند خواهند بود.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی یک مسأله حیاتی در برابر کاهش منابع آب و افزایش تقاضای آن برای مصارف مختلف است. عدم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی منجر به اثرات متعدد نامطلوب در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته شده است. لذا به منظور بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی و کاهش اثرات نامطلوب بوجود آمده، توجه به یکی دیگر از منابع آب شیرین با عنوان آب سبز که حدود دوسوم آب باران می‌باشد، ضروری است. بنابراین باید اقدامات لازم در جهت مدیریت این منبع صورت گیرد زیرا مدیریت این منبع موجب افزایش نفوذ و افزایش تغذیه به آب زیرزمینی می‌شود.

در این تحقیق مدل با استفاده از مدل مادفلو اثرات اقدامات مدیریت آب سبز بر روی کاربری اراضی محدوده مطالعاتی مورد نظر در دشت نمدان، شبیه‌سازی شد. نتایج نشان دادند که اقدامات مالچ، خطوط سنگی، تراس و کانتور به ترتیب موجب افزایش تغذیه به آب زیرزمینی می‌شوند. از بین این اقدامات، اقدام مالچ به طور متوسط در سال موجب افزایش ذخیره معادل ۴/۲ درصد آب در آبخوان شده و تراز سطح آب زیرزمینی را حدود ۵/۷ سانتی‌متر در مقایسه با شرایط بدون این اقدام، افزایش می‌دهد. اقدام تراس نیز موجب افزایش تغذیه و ذخیره آب در آبخوان گردید؛ اما در مقایسه با اقدام مالچ، تأثیر کمتری را دارا بود (افزایش ذخیره ۴ درصدی آب در آبخوان). در نتیجه با توجه به اینکه تأثیر دو اقدام مالچ و تراس‌بندی بر روی بهبود آب زیرزمینی تقریباً یکسان است، بر حسب عوامل مختلفی مانند هزینه‌های اعمال و هدف‌های جانبی از پیاده‌سازی این اقدامات، بهترین اقدام باید انتخاب شود. پس از این دو اقدام، خطوط سنگی بیشترین اثر را بر آبخوان داشت؛ اما کانتور بر عکس این سه اقدام در جهت بهبود وضعیت سیستم آبخوان مؤثر نبود زیرا میزان کاهش رواناب در این اقدام بیشتر از تغذیه به آب زیرزمینی است.

می‌توان بر اساس نتایج این مطالعه جمع‌بندی نمود که با توجه به اهداف طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها در ایران، اقدام مالچ و تراس با افزایش سالیانه ذخیره آب در آبخوان (به میزان حدود ۴ درصد) می‌توانند برای تحقق اهداف این طرح مورد استفاده قرار گیرند ولی به تنهایی نمی‌توانند سبب تعادل‌بخشی یا احیاء آبخوان مورد مطالعه در زمان مورد نظر طرح اشاره شده بشوند و کسری بیش از ۱۰۰ میلیون‌مترمکعب بر سال آبخوان مورد مطالعه را جبران نمایند.

۵- تشکر

نویسندگان این مقاله از مؤسسه تحقیقات آب، پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس، شرکت مدیریت منابع آب ایران و سازمان آب منطقه‌ای فارس به جهت در اختیار قرار دادن بخشی از آمار و اطلاعات مورد استفاده در این مطالعه، کمال تشکر و سپاس را دارند.

پی‌نوشت‌ها

1- Blue Water
2- Green Water
3- Groundwater
4- SWAT
5- Mulch
6- Contour Strips
7- Stone Lines
8- Terraces
9- WEAP
10- MODFLOW
11- PEST

۶- مراجع

Abouabdillah A, White M, Arnold J, De Girolamo A, Oueslati O, Maataoui A, Lo Porto A (2014) Evaluation of soil and water conservation measures in a semi-arid river basin in Tunisia using SWAT. Soil use and management 30(4):539-549

Akombo RA, Luwesi CN, Shisanya CA, Obando JA (2014) Green water credits for sustainable agriculture and forestry in arid and semi-arid tropics of Kenya. Journal of Agri-Food and Applied Sciences 2(4):86-92

Aquifer Restoration Plan (2014) Ministry of Energy, Water Assistance (In Persian)

Bailey RT, Wible TC, Arabi M, Records RM, Ditty J (2016) Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater–surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. Hydrological Processes 30:4420-4433

Brandsma J, van den Eertwegh G, Droogers P (2013) Green and blue water resources and management scenarios using the SWAT model for the upper Duhe basin, China feasibility study

conservation measures: Supporting policy making in the Green Water Credits program of Kenya. Journal of environmental management 111:187-194

Kauffman S, Droogers P, Hunink J, Mwaniki B, Muchena F, Gicheru P, Bindraban P, Onduru D, Cleveringa R, Bouma J (2014) Green water credits–exploring its potential to enhance ecosystem services by reducing soil erosion in the upper Tana basin, Kenya. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management 10(2):133-143

Ketabchi H, 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):1-12 (In Persian)

Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015a) Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers. Environmental Modelling & Software 74:21-38

Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015b) Coastal groundwater optimization—advances, challenges, and practical solutions. Hydrogeology Journal 23(6):1129-1154

Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015c) Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. Journal of Hydrology 520:193-213

Delavar M, Morid S, Morid R (2017) Basin-wide water accounting based on modified SWAT model (SWAT-FARS): an application for the Tashk-Bakhtegan Basin, Iran. International Soil and Water Assessment Tool Conference, 28-30 Jun., Warsaw, Poland

Doherty J (2005) PEST: Model Independent Parameter Estimation, User Manual, fifth edition. Watermark Numerical Computing

Farhoudi-Hafdaran R, Ketabchi H (2017) Numerical simulation of Urmia lake and Ajabshir coastal aquifer interaction. Journal of Iran-Water Resources Research (Accepted) (In Persian)

Fars Regional Water Authority (2016) Updating water resources studies report of Tashk- Bakhtegan and Maharlou lakes river basin. Iran Water Resources Management Company, Ministry of Energy (In Persian)

Hanjra MA, Qureshi ME (2010) Global water crisis and future food security in an era of climate change. Food Policy 35(5):365-377

Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA

Hunink J, Droogers P, Kauffman S, Mwaniki B, Bouma J (2012) Quantitative simulation tools to analyze up- and downstream interactions of soil and water