تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸
Volume 15, No. 2, Summer 2019 (IR-WRR)
۱۱۹-۱۳۳

مدیریت احیاء منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی عددی- بهینه‌سازی فراکاوشی جامعه مورچه‌ها

مهدی صاغی جدید[۱] و حامد کتابچی[۲*]

چکیده

ذخایر آب زیرزمینی در ایران از اصلی‌ترین منابع تأمین آب می‌باشد. با پیشرفت فناوری، بهره‌برداری از این ذخایر در چند دهه اخیر بشدت روبه‌فزونی گذاشته، بطوریکه آب استحصالی معمولاً بیشتر از ظرفیت آب تجدیدپذیر منبع بوده و روند افت سطح تراز آب زیرزمینی و کاهش این ذخایر را به‌دنبال داشته و منجر به بروز پیامدهای منفی شده است. از این‌رو، مدیریت صحیح این ذخایر ارزشمند و حفظ پایداری آنها اهمیت زیادی پیدا می‌کند. امروزه برای مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی از مدل‌های تصمیم با چارچوب تلفیقی مدل‌های شبیه‌سازی ـ بهینه‌سازی می‌توان استفاده کرد. بنابراین، در این تحقیق با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی MODFLOW در یک برنامه مدیریتی ده ساله و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای آبخوان نمدان واقع در استان فارس، ایران توسعه داده شد. سه شاخص پایداری، پرشدگی و احیاء آبخوان در راستای طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور برای مدیریت احیاء منابع آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه مدنظر قرار گرفت و بر اساس آنها، توابع هدف و قیود مسائل مدیریتی، توسعه داده شد. نتایج بدست آمده براساس هدف‌گذاری دستیابی به بهترین وضعیت پایداری، پرشدگی و احیاء آبخوان در طول دوره مدیریتی هدف به‌ترتیب بیانگر افزایش ۳، ۹/۵ و ۱۰/۶ متری سطح تراز آب زیرزمینی نسبت به ابتدای دوره بوده است که لزوم توجه به انتخاب تابع هدف صحیح در راستای تحقق هدف برنامه مدیریتی را مشخص می‌سازد و امکان بررسی عملیاتی شدن الزامات تحقق آن را فراهم می‌نماید. همچنین، استفاده از سه شاخص اعتمادپذیری، مطلوبیت و آسیب‌پذیری جهت بررسی نتایج سناریوها بیانگر بهترین وضعیت آبخوان تحت سناریوی اعمال شاخص احیاء بوده است.

کلمات کلیدی: آبخوان نمدان، الگوریتم بهینه‌سازی، شاخص‌های پایداری، پرشدگی و احیاء، مدل عددی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۷/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۲۶

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Restoration Management of Groundwater Resources Using the Combined Model of Numerical Simulation– Evolutionary Ant Colony Optimization

*M. Saghi-Jadid[1] and H. Ketabchi[2]**

Abstract

Groundwater storages are the main sources of water in Iran. With the developments in technology, utilization of these resources has been severely increased over the past few decades so that the extracted water is more than the capacity of renewable water. This has led to depletion in groundwater levels, deterioration of these resources and its associated negative consequences. Hence, the proper management of these valuable resources and the sustainability conservation means are of significant importance. For proper management of groundwater resources, decision models can be used with a combined framework of simulation and optimization models. Therefore, in this research, using numerical simulation model (MODFLOW) for a management horizon of ten-years and ant colony optimization algorithm, simulation-optimization model for the Namdan aquifer located in Fars province, Iran, was developed. Three indices of sustainability, filling and restoration of the aquifer are considered to restoration management of groundwater resources in the study area, in line with Iran aquifer restoration plan. Based on the objective of achieving best condition for stability, filling, and restoration of the aquifer over the management horizon, the results indicated an increase of 3, 9.5 and 10.6 m of groundwater level, respectively, compared to the beginning of the management period. This highlighted the necessity of proper selection of objective function considering the main objectives of the management plan and provided the feasibility of assessment on the requirements to implement the plan. Also, the use of three indicators of reliability, utility and vulnerability to examine the results of scenarios showed the best aquifer status under the scenario of applying the restoration index.

Keywords: Namdan Aquifer, Numerical Model, Optimization Algorithm, Stability, Filling and Restoration Indices.

Received: October 21, 2018
Accepted: January 16, 2019

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

۱- مقدمه

امروزه برای مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی می‌توان از مدل‌های تصمیم[1] استفاده کرد که یکی از بهترین ساختارها برای آن، چارچوب تلفیقی مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی است که یک ساختار قوی برای ارائه یک برنامه کارآمد و مطلوب جهت مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود. این ساختار در سال‌های اخیر بصورت گسترده در مطالعات محققانی مانند Sreekanth and Datta (2014)، Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a) و Ketabchi et al. (2018a) مورد استفاده قرار گرفته است.

روش‌های بهینه‌سازی، امروزه در بسیاری از شاخه‌های علوم مهندسی برای اتخاذ تصمیم‌های علمی صحیح، به کار می‌روند. ابزارهای بهینه‌سازی یکی از اصلی‌ترین اجزای مدل‌های تصمیم هستند و به فرآیند یافتن بهترین جواب به منظور حصول کارآمدترین و مطلوب‌ترین تصمیم‌گیری کمک می‌نمایند (Ataie-Ashtiani and Ketabchi, 2011). از طرفی مدل‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی پاسخ آبخوان‌ها به تنش‌های مختلف طراحی شده‌اند. وقتی یک مدل شبیه‌سازی توسعه داده شده برای راهبردهای مدیریت آب زیرزمینی استفاده می‌شود اغلب به یک رویکرد سعی و خطای تکرارشونده نیازمند است که راهبردها و گزینه‌های مدیریتی مختلف موردنیاز آزموده شود. البته به دلیل وقت‌گیر بودن تنها می‌توان تعداد محدودی از گزینه‌های مدیریتی را مورد آزمایش قرار داد (Parhami, 2002). در سالیان اخیر مدل‌های جریان آب زیرزمینی (مدل‌های شبیه‌سازی) در ترکیب با الگوریتم بهینه‌سازی بطور فزاینده به عنوان ابزار مدیریت آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرند که به عنوان مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی[2] معروف هستند. این نوع مدل‌ها برای مسائل مختلف مدیریت آب‌های زیرزمینی، مانند احیاء آبخوان (Maskey et al., 2002)، بهینه‌کردن پمپاژ (Ayvaz and Karahan, 2008)، حفاظت کیفی آبخوان (Sreekanth and Datta, 2010)، سود بیشینه (Ayvaz and Alci, 2015; Ayvaz, 2015) و تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی (Jonoski et al., 2012) استفاده شده‌اند و بطور کلی می‌توانند در بسیاری از مسائل مدیریت آب‌های زیرزمینی استفاده شوند. هدف اصلی این ابزارها ارزیابی نتایج مدل‌ها و انتخاب بهترین راهبرد مدیریتی با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی با توجه به محدودیت‌های فیزیکی یا مدیریتی است (Singh and Datta, 2006). مطالعات زیادی با اهداف مختلف از مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی بعنوان ابزار لازم برای مدیریت آبخوان استفاده کرده‌اند که در جدول ۱، به خلاصه‌ای از آنها اشاره شده است.

Alnahhal et al. (2010) طی مطالعاتی با هدف مدیریت توسعه پایدار آبخوان غزه، تحت تغذیه مؤثر و محدودیت‌های کیفی آب از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی براساس متغیر وابسته به چگالی جریان اشباع آب زیرزمینی و مدل CODESA برای انتقال املاح و از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حداکثر کردن نرخ پمپاژ از چاه‌های آبخوان با محدودیت غلظت شوری در آب پمپ شده استفاده کردند. نتایج حاصل با دو سناریو تغذیه آبخوان و بدون تغذیه آبخوان نشان داد که بدون تغذیه و با توزیع مکانی مطلوب ۱۶ حلقه چاه، سطح آبخوان بطور متوسط ۰/۱ متر افزایش داشته و با سناریو تغذیه آبخوان، سطح آبخوان ۰/۱۵ تا ۰/۴ متر افزایش داشته است. Gaur et al. (2011) با هدف پیدا کردن بهترین شیوه‌های مدیریتی برای جلوگیری از شرایط بحرانی منابع آب زیرزمینی، از روش اجزاء تحلیلی (AEM) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) براساس مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی و با تابع هدف حداکثر کردن پمپاژ از آبخوان و حداقل کردن هزینه برای توسعه سیستم‌های پمپاژ جدید استفاده کردند. نتایج بررسی آنها با سناریوهای ۴، ۵ و ۶ حلقه چاهی نشان داد که مجموعه ۴ حلقه چاه نیاز منطقه مطالعاتی را برآورد می‌کند و همچنین سناریو مجموعه ۵ حلقه چاه، اقتصادی می‌باشد. تحلیل حساسیت پارامترهای PSO و تابع هزینه نشان داد که این پارامترها می‌توانند نتایج را تحت تأثیر قرار دهند لذا باید برای یک مسأله خاص به درستی با روش سعی و خطا انتخاب گردند.

در مطالعات داخلی نیز، برای مثال، Mahmoodzadeh et al. (2015) از مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با بهره‌گیری از مدل SUTRA و الگوریتم CACO، برای مطالعه حساسیت راهبردهای مدیریتی منابع آب زیرزمینی جزیره کیش نسبت به تغییرات محیطی استفاده کردند و تابع هدف حداکثر نمودن آب برداشت شده با رعایت عدم تجاوز غلظت شوری چاه‌های مشاهده‌ای از وضع فعلی، تحت ۶ سناریو فرضی، از جمله در نظر گرفتن افزایش سطح آب دریا و کاهش نرخ تغذیه را مدنظر قرار دادند.

بر اساس نتایج حاصل، در نظر گرفتن بدترین حالت آثار تغییرات محیطی، که افزایش سطح آب دریا توام با کاهش تغذیه خالص به آبخوان بود. منجر به کاهش بیش از ۲۰ درصدی حجم مجاز آب برداشتی از سیستم آب زیرزمینی نمونه مورد بررسی، شد.

Table 1- A summary of studies on the application of simulation – optimization models in solving groundwater problems

جدول ۱- خلاصه‌ای بر مطالعات مربوط به کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در حل مسائل آب زیرزمینی

Reference	Simulation		Optimization		Objective	Case study
	Model	Solver	Algorithm*	Objective function		
Ayvaz and Elci (2013)	MODFLOW	Numerical	HS	Minimizing the cost of pumping the wells	Minimizing the costs for aquifer management	Tahtali watershed, Izmir-Turkey
Ataie-Ashtiani et al. (2014)	SUTRA, ANN	Numerical	MO, GA	Maximizing the amount of groundwater extraction by protecting seawater penetration	Developing an efficient aquifer multi-objective management model	Kish Island, Persian Gulf (90.5 km^2)
Hussain et al. (2015)	SUTRA	Numerical	GA	Minimizing the economic and environmental costs	Management of advancing seawater to groundwater	Hypothetical
Sedki and Ouazar (2011)	MODFLOW	Numerical	GA	Minimizing the risks for several adverse environmental impacts, such as seatwater intrusion	Sustainable groundwater development	Rhis-Nekor plain, Morocco (100 km^2)
Gaur et al. (2011)	AEM**	Analytical	PSO	Maximizing pumping from an aquifer and minimizing the cost to develop the new pumping well system	Groundwater management	***Dore river basin, France***
Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015b)	SUTRA	Numerical	CACO, PSO, GA	Minimizing of seawater intrusion	Determining the optimal management strategies of large scale coastal groundwater problems	Kish Island, Persian Gulf (90.5 km^2)
Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2011)	SUTRA	Numerical	CACO	Maximizing discharge with the observance of salinity	Optimal management of coastal aquifers	Hypothetical
Mahmoodzadeh et al. (2015)	SUTRA	Numerical	CACO	Maximizing discharge with the observance of salinity	Analysis of optimal strategies to environmental changes	Kish Island, Persian Gulf (90.5 km^2)

* MO: Multi-objective; GA: Genetic algorithm; HS: Harmony search; PSO: Particle swarm optimization; CACO: Continuous ant colony optimization

** AEM: Analytic element method

یک کار چالش‌برانگیز در استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی در مقیاس بزرگ، زمان محاسباتی قابل توجه آن است، زیرا تعداد زیادی از شبیه‌سازی مورد نیاز است. از این‌رو، کاهش زمان کل محاسبات و تعداد شبیه‌سازی‌ها تأثیر قابل توجهی بر بازده نهایی محاسباتی دارند (Werner et al., 2013; Ketabchi and AtaieAstiani, 2015b). اخیراً، طی یک بررسی کامل و منظم از

ابزارهای ممکن به منظور پرداختن به چالش بار محاسباتی مدل‌های تلفیقی، Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a, b)، تکنیک‌های پردازش موازی را برای این منظور پیشنهاد دادند. در مطالعات مختلفی نیز از این تکنیک استفاده شده است که می‌توان به کارهایی مانند Jin et al. (2011)، Amritkar et al. (2012)، Dong et al. (2013)، Zhang et al. (2014) و Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a, b) اشاره نمود.

در ایران، ذیل طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (Aquifer Restoration Plan, 2014)، کاهش مصرف سالانه آب به میزان ۵۵ میلیارد مترمکعب تا پایان برنامه ششم توسعه کشور پیش‌بینی شده است. از این‌رو، انجام مطالعات جامعی موردنیاز است تا بتوان بر پایه آنها دستورالعمل‌هایی را جهت مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی تهیه کرد. بررسی مطالعات انجام شده در مدیریت منابع آب زیرزمینی نیز بیانگر اهمیت بکارگیری ابزارهای مناسب جهت مدیریت مؤثر این منابع می‌باشد. به‌همین جهت در این تحقیق، مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی آبخوان نمدان (به عنوان یکی از آبخوان‌های حیاتی و دارای وضع بحرانی به دلیل افت سالانه تراز آب زیرزمینی) توسعه داده شده که بر اساس تلفیق مدل شبیه‌سازی عددی MODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی جامعه مورچه‌ها است. این مدل برای بررسی مدیریت احیاء آبخوان مورد مطالعه در راستای طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (Aquifer Restoration Plan, 2014)، با بهره‌گیری از سه شاخص پایداری، پرشدگی و احیاء و توسعه مسائل مدیریتی بر پایه آنها مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان از فرآیند پردازش موازی نیز برای اجرای مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی بهره گرفته شده است. نوآوری این مطالعه بکارگیری شاخص‌های آب زیرزمینی در مدیریت احیاء آبخوان با استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی می‌باشد که در مطالعه موردی واقعی به بررسی اثر انتخاب اهداف مختلف در تحقق نتایج مورد انتظار می‌پردازد که بر پایه اصول اشاره شده در Ketabchi and Saghi-Jadid (2018) است. همچنین، امکان تحقق الزامات حاصل برای احیاء آبخوان نیز از جنبه امکان عملیاتی شدن از موارد دیگری است که به آن پرداخته می‌شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مطالعه موردی

محدوده مورد مطالعه، آبخوان نمدان، واقع در شمال حوضه آبریز مهارلو- بختگان و طشک، استان فارس، ایران است (شکل ۱). آمار و اطلاعات کلی این محدوده مطالعاتی در جدول ۲ ارائه شده است که مساحت آن حدود ۸/۹ درصد از مساحت کل حوضه آبریز را در بر می‌گیرد و مرتفع‌ترین قسمت آن در جنوب محدوده مطالعاتی (قله‌کوه برآفتاب) و پست‌ترین قسمت، در محل ورود به دریاچه خشک شده کافتر قرار دارد. محدوده مطالعاتی نمدان از مهم‌ترین محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز طشک- بختگان از نظر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به شمار می‌آید که بر اساس آمار چاه‌های مشاهده‌ای در ده سال (۱۳۹۵-۱۳۸۵)، سطح تراز آب زیرزمینی در آبخوان ۱۰/۳ متر افت پیدا کرده که معادل حدود یک متر افت متوسط سالانه است (Fars Regional Water Authority, 2016).

۲-۲- مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

بطور کلی جهت بهینه‌سازی سیستم آب‌های زیرزمینی یک منطقه ابتدا مدل ریاضی آبخوان منطقه مورد نظر تهیه می‌گردد. لازم به ذکر است که در استفاده از مدل ریاضی جهت بهینه‌سازی در حوضه منابع آب زیرزمینی دو نگرش وجود دارد. در نگرش اول با استفاده از مدل ریاضی (مدل شبیه‌سازی)، ابتدا رفتار آبخوان از لحاظ خطی یا غیرخطی بودن تشخیص داده می‌شود، سپس رابطه بین مقادیر برداشت و افت سطح تراز آب زیرزمینی بصورت معادله‌ای بدست آمده و در نهایت، بهینه‌سازی سیستم آب زیرزمینی انجام می‌گیرد. نگرش دوم در بهینه سازی در حوضه منابع آب زیرزمینی، استفاده از مدل تلفیقی شبیه سازی- بهینه‌سازی است. در این نگرش بعد از واسنجی مدل شبیه‌سازی و تعیین متغیرهای تصمیم؛ تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی، تلفیق دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. مزیت این روش در این است که در هنگام بهینه‌سازی به ازای هر تغییر در بردار متغیرهای تصمیم، مدل شبیه‌سازی دوباره اجرا می‌گردد. بدیهی است که این نگرش نسبت به نگرش قبلی از دقت بالاتری برخوردار است (Parhami, 2002). رویکرد این تحقیق استفاده از نگرش دوم، مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی می‌باشد. در شکل ۲ مراحل تحقیق بر پایه این رویکرد ارائه شده است.

۲-۳- مدل شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی این تحقیق، مدل عددی MODFLOW برگرفته از مطالعه Ketabchi et al. (2018b) می‌باشد که برای ساخت مدل شبیه‌سازی ده ساله و تلفیق آن با الگوریتم بهینه‌سازی، اصلاح شده است. مدل مفهومی آبخوان شامل اطلاعات لایه‌های توپوگرافی سطح زمین، سنگ کف، چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای، مرز آبخوان، ضریب هدایت هیدرولیکی و تغذیه می‌باشد که به‌صورت دو بعدی تهیه

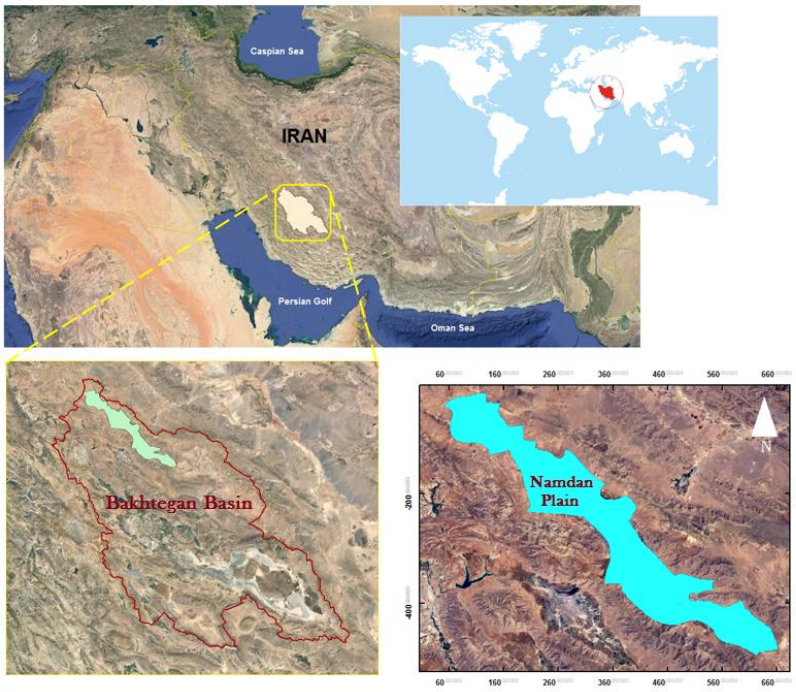

Fig. 1- Namdan plain study area, Tashk- Bakhtegan basin, Fars province, Iran
شکل ۱- محدوده مطالعاتی دشت نمدان، حوضه آبریز طشک- بختگان، استان فارس، ایران

Table 2- Characteristics of case study (Fars Regional Water Authority, 2016)
جدول ۲- مشخصات منطقه مطالعاتی (Fars Regional Water Authority, 2016)

Characteristics	Description
Overview	
Geographical coordinates	52°, 00'- 52°, 56' Longitude 30°, 30'- 30°, 31' Latitude
Total area	2803 km^2
Area of plain	1845.6 km^2
Area of aquifer	1217 km^2
Average plain elevation	2431.76 m
Operation status	
Depth of Groundwater	10-80 m
Number of exploitation wells	1702
Operating hours of exploitation wells (annual)	3673 hr
Discharge rate (annual)	320 MCM
Discharge capacity	318000 $m^3 \times year/km^2$
Consumption	Agriculture (almost)
Groundwater depletion (annual)	> 1 m
Meteorological (1966-2006)	Plains/ Mountains
Temperature (°C)	10.6
Precipitation (mm)	318.8
Evaporation (mm)	1515.6

شده است. برای محدوده مورد مطالعه، شبکه با ابعاد ۵۰۰ در ۵۰۰ متر تقسیم‌بندی شده (۵۰۵۸ سلول) و مدل عددی براساس شرایط هیدرولوژیکی آبخوان، به‌صورت یک لایه ایجاد شده است. شرایط مرزی لحاظ شده برای مدل بصورت مرزهای هد ثابت و مرز بدون جریان می‌باشد (شکل ۳).

شبیه‌سازی دائمی مدل مدنظر با اطلاعات متوسط سالانه پارامترهای تخلیه، تغذیه و متوسط تراز آب (شرایط اولیه) در طول دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۵-۱۳۸۵) لحاظ شد و مدل، مورد واسنجی قرار گرفت. لازم به ذکر است میزان تغذیه ناشی از بارش و آب برگشتی کشاورزی و میزان تخلیه نیز ناشی از چاه‌های بهره‌برداری بوده است. در نتایج نهایی واسنجی، پارامترهای هدایت هیدرولیکی (۱-۲۵ متر بر روز)، تغذیه ناشی از بارش (۱۰-۲۵ درصد بارش) و آب برگشتی (۱۰-۵۰ درصد برداشت)، مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۹۹ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا ۳/۲۴ متر برآورد شد، که بیانگر عملکرد مطلوب مدل و همچنین تطابق مطلوب سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد. توضیحات کامل از مشخصات مدل شبیه‌سازی در جدول ۳ و همچنین پارامترهای ورودی آن در جدول ۴ خلاصه شده که بر اساس مطالعه انجام شده توسط Ketabchi et al. (2018b) بوده است که با واسنجی مجدد تغذیه ناشی از بارش، نتایج مدل، بهبود ۲۶ سانتی‌متری در مقادیر خطاها داشته است.

شبیه‌سازی غیردائمی مدل مورد نظر برای یک دوره ۷ ساله (۱۳۹۱-۱۳۸۵) به صورت ماهانه اجرا و مورد واسنجی قرار گرفت.

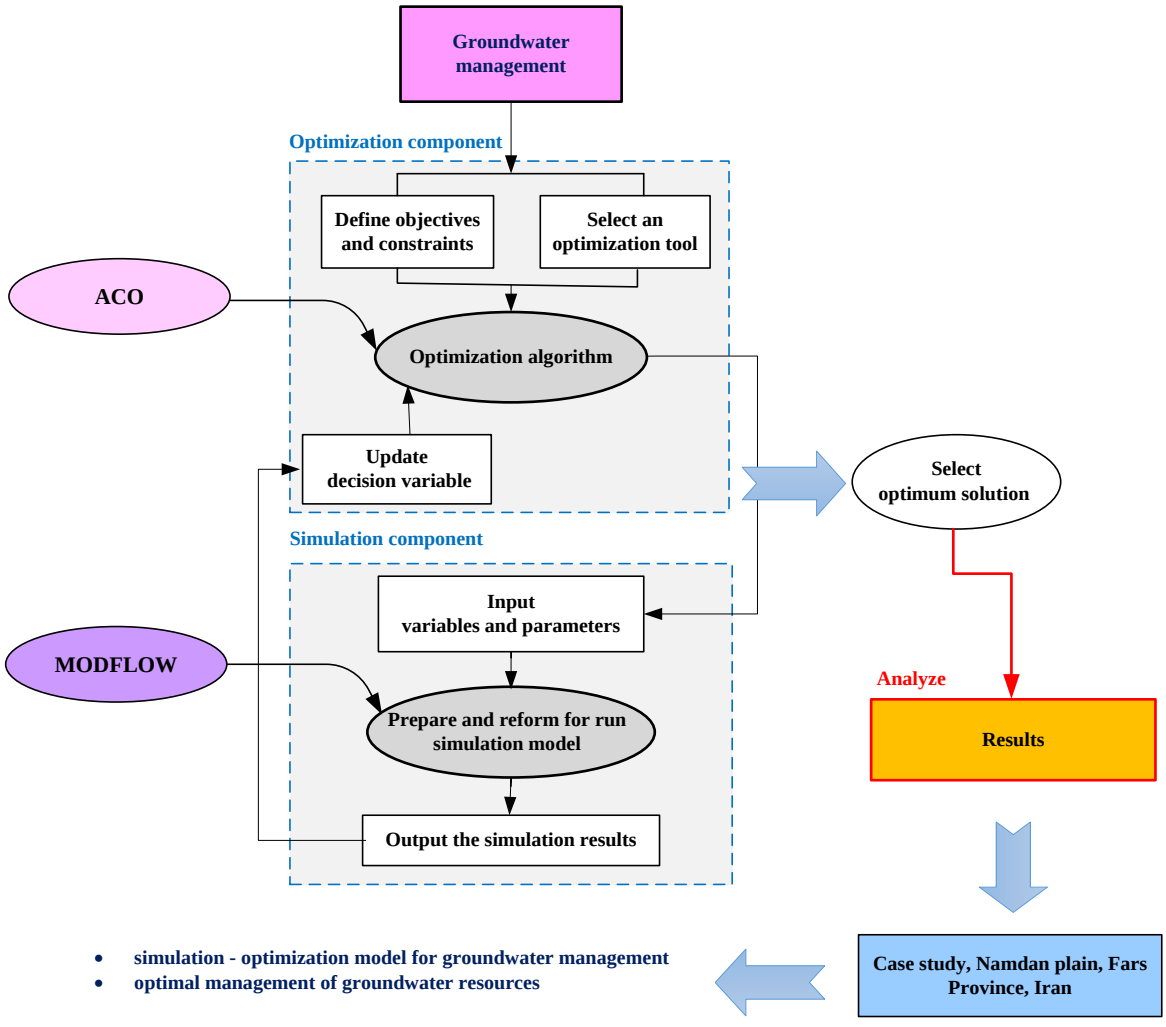

Fig. 2 - Simulation-optimization model procedure

شکل ۲- روند مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی

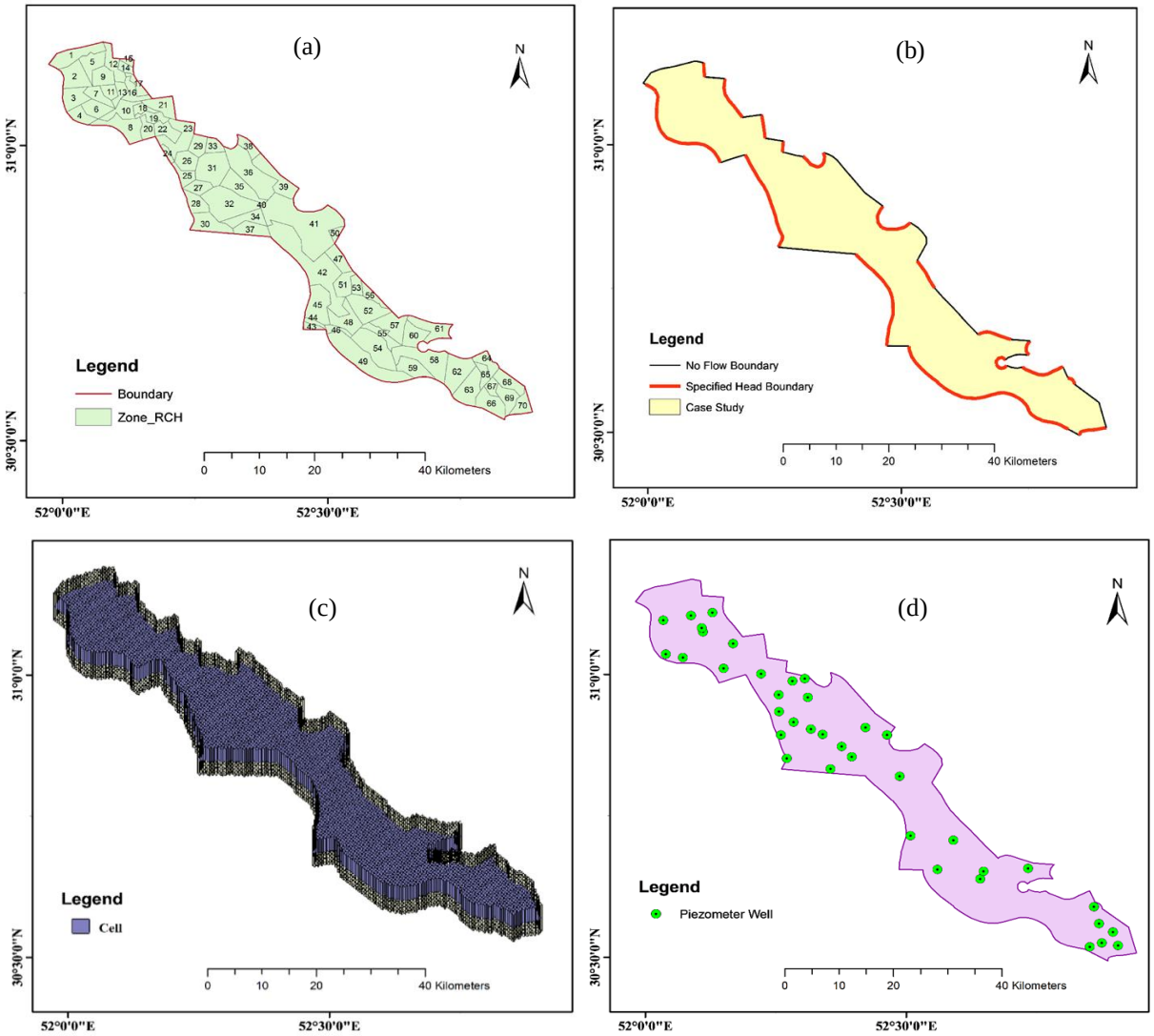

Fig. 3- Conceptual model of the aquifer a) zoning, b) boundaries, c) discretization, and d) observation wells

شکل ۳- مدل مفهومی آبخوان نمدان الف) ناحیه‌بندی، ب) مرزها، ج) گسسته‌سازی و د) چاه‌های مشاهده‌ای

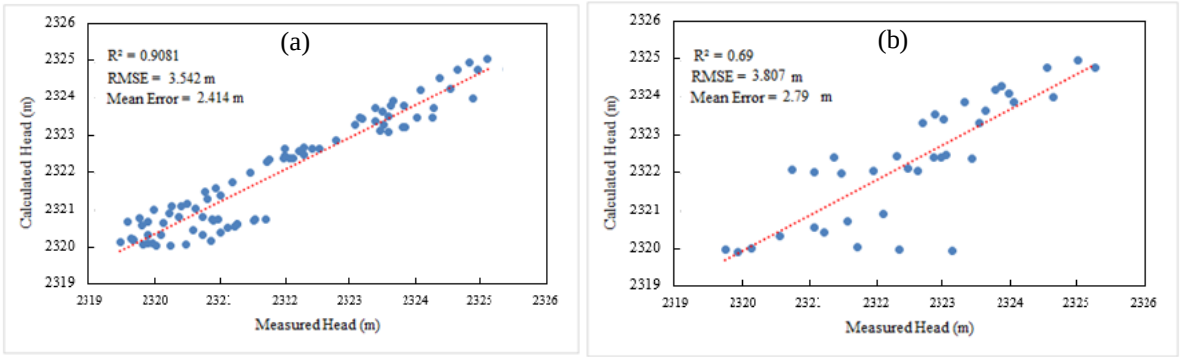

Fig. 4- Dispersion diagram of water surface values simulated and measured, and accuracy of calculation in model a) calibration; and b) validation

شکل ۴- نمودار پراکندگی مقادیر سطح آب شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و دقت محاسبات در مدل الف) واسنجی و ب) صحت‌سنجی

Table 3- The simulation model characteristics.

جدول ۳- مشخصات مدل شبیه‌سازی

Characteristics	Description
Simulation setup	
Dimension	Two dimensional
Simulation mode	Saturated steady-state and transient flow
Spatial discretization	
Simulation model	MODFLOW (Harbaugh, 2005)
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
Calibration	
Auto-calibration code	PEST (Doherty, 2005)
Calibration observation	Water elevation 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	20-30
Max of iteration with no improvement	3-4
Relative convergence limit	0.005
Relative parameter change criterion	0.005
Preferred homogenous regularization	Yes
Prior information power factor	1.0
Preferred value regularization	NO

Table 4- Input parameters to the simulation model

جدول ۴- پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی

Model Parameters	Description
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

نتایج واسنجی، مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۹۱ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا را برابر با ۳/۵۴ متر برآورد کرده است (شکل ۴-الف) که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل و همچنین تطابق مطلوب سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای می‌باشد. به‌علت وجود عدم‌قطعیت در واسنجی، مجموعه مقادیر پارامترهای استفاده شده در مدل واسنجی ممکن است مقادیر صحرایی را با دقت خوبی نشان ندهد. از این‌رو، امکان دارد پارامترهای واسنجی شده، سیستم را تحت شرایط مرزی و تنش‌های هیدرولوژیک مختلف به خوبی نشان ندهد.

از این‌رو، برای حصول اطمینان از نتایج مدل واسنجی، مدل برای ۴۲ گام زمانی، دوره سه و نیم ساله (۱۳۹۵-۱۳۹۲)، مورد صحت‌سنجی قرار گرفت، نتایج نهایی آن مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۶۹ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا برابر ۳/۸۱ متر برآورد شده است (شکل ۴-ب)، که بیانگر عملکرد مطلوب مدل در برآورد سطح تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای در مرحله صحت‌سنجی می‌باشد. نتایج حاصل با یافته‌های مطالعه Ketabchi et al. (2018b) نیز تطابق دارد و نشان دهنده بهبود نسبی مدل توسعه داده شده در مقایسه با کار آنها است.

۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی

به جهت تصمیم در مسائل مدیریت آبخوان‌ها، بهینه‌سازی لزوماً به معنای یافتن بهترین جواب‌ها نیست. بـــه دلیل پاره‌ای از مـــوارد مانند عـــدم‌قطعیت‌های مـوجـــود در چنین مسائلی و ساده‌سازی‌هـا و مفهوم‌سازی‌های که شده در واقعیت دستیابی به بهترین جواب، مقدور نیست و بهینه‌ترین جواب ممکن و قابل دستیابی، یافته می‌شود (Nguyen et al., 2014). در دهه‌های اخیر، الگوریتم‌های فراکاوشی با درجات مختلفی از پیچیدگی برای حل مسائل بهینه‌سازی در حوزه مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته‌اند. استفاده از این الگوریتم‌ها در مسائلی از حوزه آب‌های زیرزمینی که از مدل‌های عددی برای سنجش رفتار سیستم آب زیرزمینی استفاده می‌شود بسیار راهگشا بوده چرا که روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی به دلیل ماهیت غیرخطی و بسته متغیرهای تصمیم در مدل عددی، امکان استفاده ندارند (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015a, b, c). براساس مطالعات انجام شده توسط Ataie-Ashtiani and Ketabchi (2015c)، الگوریتم بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها یکی از موفق‌ترین روش‌های بهینه‌سازی در حوزه مدیریت آبخوان‌های زیرزمینی است. به همین سبب این الگوریتم برای ابزار بهینه‌سازی انتخاب شد. مسأله بهینه‌سازی این تحقیق مطابق هدف طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (Aquifer Restoration Plan, 2014) در آبخوان دشت نمدان بر اساس شاخص‌های آب زیرزمینی تعریف شده است. در این راستا، سه شاخص پایداری (SI)[۳]، که با توجه به مقادیر تغذیه و برداشت از آبخوان، پایداری آبخوان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (رابطه ۱)، شاخص پرشدگی (FI)[۴]، نشان دهنده میزان پرشدگی آبخوان (رابطه ۲)، و شاخص احیاء (EI)[۵]، بیان کننده قابلیت احیاء شدن آبخوان (رابطه ۳)، در قالب سه مسأله بهینه‌سازی با مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی حل شده و نتایج آنها در مقایسه با تراز مطلوب (تراز سال آبی ۸۶-۱۳۸۵) آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، از سه شاخص اعتمادپذیری (RI)[۶] (توانایی سناریو اجرایی در بازگرداندن به حالت اولیه مطابق رابطه ۴)، مطلوبیت (UI)[۷] (درصد بالا آمدن تراز آب زیرزمینی نسبت به تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و تراز مطلوب مطابق رابطه ۵) و آسیب‌پذیری (VI)[۸] (میزان کمبود در سیستم آب زیرزمینی مطابق رابطه ۶) برای تحلیل نتایج استفاده شده است.

$$SI_i=\sum_{i=1}^{n}\frac{RCH}{DCH} \qquad \text{(UNESCO, 2007)} \qquad (۱)$$

$$FI_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{PL_i-PL_{min}}{PL_{max}-PL_{min}} \qquad \text{(Camp et al., 2010)} \qquad (۲)$$

$$EI_i=\sum_{i=1}^{n}(H_{sim.}-H_{res.}) \qquad \text{(UNESCO, 2007)} \qquad (۳)$$

$$RI=\frac{Ns}{N};\ 0<RI<1 \qquad \text{(Loucks, 1997)} \qquad (۴)$$

$$UI=100\times(\frac{R_{el}-r_{el}}{R_{el}-R_{rp}}) \qquad \text{(Loucks, 1997)} \qquad (۵)$$

$$VI=\frac{\sum_{i=1}^{t}(W_s-W_t)}{\sum_{i=1}^{t}(W_t-W_{pr})} \qquad \text{(Hashimoto et al., 1982)} \qquad (۶)$$

در روابط ۱ تا ۶، مؤلفه‌های استفاده شده عبارتند از: RCH و DCH به ترتیب میزان تغذیه و برداشت از آبخوان، PL_i سطح تراز آب در پیزومتر i، در ماه PL_{min} حداقل سطح پیزومتریک برای سری زمانی مدنظر، PL_{max} حداکثر سطح پیزومتریک برای سری زمانی مدنظر، $H_{sim.}$ سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و $H_{res.}$ تراز مطلوب آبخوان، i تعداد ماه، Ns تعداد کل فواصل زمانی که تراز مطلوب حاصل شده، N تعداد کل فواصل زمانی (ماهانه)، R_{rp} سطح تراز آب زیرزمینی با اعمال سناریو، r_{el} سطح تراز آب زیرزمینی پس از افت، R_{el} سطح تراز مطلوب آب زیرزمینی، W_t سطح تراز آب زیرزمینی مطلوب در هر گام زمانی، W_s سطح تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در هر دوره زمانی برای هر سناریو، W_{pr} تراز آب زیرزمینی بدون اعمال سناریو و t تعداد دوره‌های که سطح تراز آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مطلوب قرار دارد. سه مسأله مدیریتی مطابق با سه شاخص تعریف شده (روابط ۷، ۸ و ۹) و بر اساس قیود (روابط ۱۰ و ۱۱) آنها حل شده است. به جهت ماهیت مسأله شاخص پایداری و احیاء در تابع هدف بصورت حداقل کردن و شاخص پرشدگی بصور حداکثر کردن حل شده است.

$$\text{Min } SI_{total}=\sum_{k=1}^{m}(SI_k-SI_o)^2;\ SI_o=1 \qquad (۷)$$

$$\text{Max } FI_{total}=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}FL_k \qquad (۸)$$

$$\text{Min } EI_{total}=\sum_{k=1}^{m}EI_k \qquad (۹)$$

$$\text{S.T.} \quad q_i^{min}<q_i<q_i^{max} \qquad i=1,..,n \qquad (۱۰)$$

$$Q_k^o < Q_k^r < Q_k^p \qquad k=1,\ldots,m \qquad (۱۱)$$

در روابط بالا، q_i^{min} و q_i^{max} مقادیر برداشت ماهانه بصورت کران بالا و پایین متغیر تصمیم، k تعداد سال، n تعداد ماه‌های یک‌سال و m تعداد سال‌های اجرای مدل برای اعمال مدیریت (۱۰ سال)، Q_k^r میزان برداشت بهینه سالانه، Q_k^p حداکثر میزان برداشت مجاز سالانه از آبخوان، Q_k^o حداقل میزان برداشت مجاز سالانه است. حداکثر میزان برداشت مجاز از آبخوان که بصورت محدودیت در توابع هدف فوق منظور شده است برابر میزان آب قابل برنامه‌ریزی سالانه در نظر گرفته شده است. همچنین، حداقل برداشت مجاز نیز با لحاظ کردن کشت محصولات راهبردی (در منطقه مورد مطالعه کشت گندم منظور شده است) و تأمین نیاز آبی آنها محاسبه شده است.

در مسأله بهینه‌سازی ۴۳ متغیر تصمیم استفاده شده است که این متغیرها معادل میزان برداشت از نواحی ۷۰ گانه تغذیه دارای چاه برداشت (شکل ۳-الف) بوده و با توجه به تعداد چاه‌های مدنظر در هر ناحیه، میزان برداشت آنها در هر گام زمانی بعنوان متغیر تصمیم اتخاذ گردیده است. در محدوده آبخوان با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، خاکشناسی، پوشش گیاهی، شیب زمین و همچنین نسبت تراکم چاه‌های بهره‌برداری و پیزومتری، تعداد ۷۰ ناحیه تغذیه اشاره شده برای آبخوان تعریف شده و از این میان، نواحی دارای چاه‌های برداشت که ۴۳ ناحیه بوده به‌عنوان متغیر تصمیم در مدل بهینه‌سازی اعمال گردیده‌اند. عملاً در ۲۷ ناحیه به دلیل نبود چاه برداشت آب، تصمیم اتخاذ نمی‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تنظیم پارامترهای مدل بهینه‌سازی

برای تنظیم پارامترهای الگوریتم فراکاوشی و دستیابی به مقادیر بهینه آنها، مدل با تعداد جمعیت‌های مختلف، چندین بار اجرا و مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس مطالعات Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a, b)، دو آزمون روی نتایج انجام می‌شود که عبارتند از: (۱) نرخ همگرایی مقادیر تابع هدف در دو نسل متوالی به کمتر از ۰/۰۱ درصد برسد و (۲) نسبت $\delta=N_n/N_t$ که در آن N_n تعداد نسل‌های بدون بهبود جواب و N_t تعداد کل نسل‌ها است، از ۱۰٪ کمتر نشود. با بررسی نتایج و همچنین مقایسه مقادیر تابع هدف در جمعیت‌های مختلف، درصد نسل‌های بدون بهبود جواب برای جمعیت ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰، به ترتیب برابر ۴۶، ۴۳، ۴۵ و ۳۳ درصد بوده که نشان‌دهنده کفایت جمعیت‌ها برای بهینه‌سازی می‌باشد. با افزایش تعداد جمعیت از ۳۰ تا ۵۰، ابتدا مقدار تابع هدف (بیشینه) افزایش یافته و پس از آن با افزایش تعداد جمعیت تغییر محسوس در مقدار تابع هدف مشاهده نمی‌شود، لذا تعداد جمعیت ۵۰ مورچه و تعداد تکرار ۱۵۰ (۷۵۰۰ نسل)، به عنوان پارامترهای بهینه الگوریتم فراکاوشی جامعه مورچه‌ها در نظر گرفته شده‌اند و برای کنترل مجدد تا تعداد تکرار ۲۰۰ بار نیز اجرا گردید (شکل ۵-الف و ۵-ب).

۳-۲- پردازش موازی

جهت تسریع سرعت محاسبات و کاهش زمان اجرای مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی از رویکرد پردازش موازی ارائه شده در مطالعه Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a, b)، بهره گرفته شد،

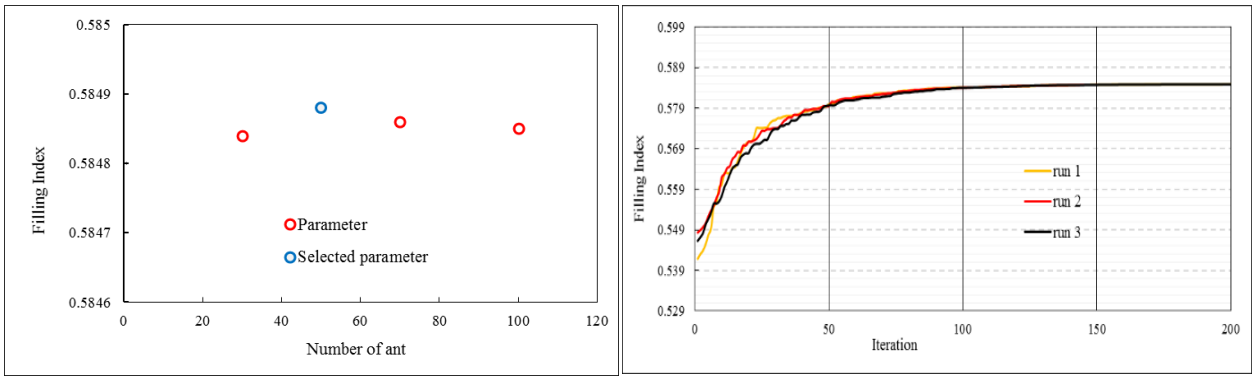

Fig. 5- a) Changes in the objective function for the number of 3 individual sample runs for 200 iterations and 50 population; b) The value of the objective function (maximum filling index) for the different values of the ant population

شکل ۵- الف) تغییرات تابع هدف برای تعداد ۳ اجرای نمونه جداگانه برای ۲۰۰ تکرار و ۵۰ جمعیت، ب) مقدار تابع هدف (بیشینه شاخص پرشدگی) به ازای مقادیر مختلف جمعیت مورچه‌ها

پردازش موازی در قسمت فراخوانی جمعیت مورد نظر در الگوریتم فراکاوشی بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت و برای ۱۰ اجرای همزمان، توانست زمان اجرای مدل را برای ۱۵۰ تکرار (۷۵۰۰ نسل) از ۴۷/۳ ساعت به ۳۶/۶ ساعت تقلیل داده و باعث بهبود ۲۳ درصدی زمان اجرای مدل در رایانه‌ای با مشخصات پردازنده Core i7 و حافظه 16GB شود.

۳-۳- نتایج

نتایج حاصل از اجرای سه سناریو بهینه کردن (۱) شاخص پایداری، (۲) شاخص پرشدگی و (۳) شاخص احیاء در جدول ۵ (بیلان) قابل مشاهده است. در هر سه سناریو، جریان زیرزمینی ورودی به آبخوان نسبت به حالت پایه (سال آبی ۹۶-۱۳۹۵)، کاهش و جریان زیرزمینی خروجی از آبخوان افزایش پیدا کرده است. این امر می‌تواند نشان‌دهنده افزایش تراز آب زیرزمینی در اجرای این سناریوها باشد.

در سناریو ۱، میزان برداشت سالانه از آبخوان از ۳۲۲/۶ به میزان ۲۰۲/۲۲ میلیون مترمکعب کاهش پیدا کرده است. کاهش ۳۷ درصدی میزان تخلیه، باعث ذخیره‌سازی آب در آبخوان شده است با وجود آنکه تغییرات حجم آب همچنان منفی مانده ولی نسبت به حالت پایه آبخوان به میزان ۳۹/۹ میلیون مترمکعب افزایش ذخیره داشته است. در سناریو ۲، برداشت سالانه با ۵۵ درصد کاهش به ۱۴۶/۷ میلیون مترمکعب رسیده است این میزان کاهش تخلیه باعث افزایش حجم ذخیره آبخوان به ۱۵/۹ میلیون مترمکعب و مثبت شدن تغییرات حجم آب در آبخوان گردیده است. در سناریو ۳، برداشت سالانه از آبخوان نسبت به روند قبلی، ۶۰ درصد کاهش پیدا کرده و به میزان ۱۳۱/۹ میلیون مترمکعب رسیده است. این میزان کاهش، ذخیره‌سازی آب در آبخوان را افزایش داده و با مثبت شدن تغییرات حجم ذخیره آب، حجم ذخیره آبخوان به ۱۶/۸ میلیون مترمکعب رسیده است.

با توجه به اینکه هدف این تحقیق بررسی احیاء شدن آبخوان نمدان می‌باشد. از این‌رو، سه سناریو اجرا شده به جهت توانایی رساندن تراز آبخوان در طی دوره ده ساله شبیه‌سازی به تراز احیاء، مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل ۶، در سناریو ۱، نتایج حاصل افزایش ۳ متری تراز آب زیرزمینی را در پایان دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سالانه بطور متوسط ۳۰ سانتی‌متر افزایش تراز آبخوان داشته است. در سناریو ۲، تراز آب زیرزمینی در پایان دوره ۹/۵ متر افزایش پیدا کرده است که این افزایش، سالانه بطور متوسط ۹۵ سانتی‌متر می‌باشد. در سناریو ۳، نتایج شبیه‌سازی افزایش تراز ۱۰/۶ متری را در آب زیرزمینی نشان می‌دهد که بیانگر افزایش سالانه بیش از ۱ متر می‌باشد.

همچنین، همانطور که در شکل ۶، مشاهده می‌شود با اجرای سناریو ۱، تراز آب زیرزمینی با تراز احیاء فاصله دارد لذا، این سناریو نتوانسته است اهداف تحقیق را در رساندن آبخوان به تراز هدف (احیاء) محقق سازد. در سناریو ۲، نیز با وجود اینکه تراز آبخوان به تراز احیاء نزدیک شده است ولی مانند سناریو ۱ موفق عمل نکرده است. در نهایت با اجرای سناریو ۳، در پایان دوره شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی به تراز هدف رسیده و تراز احیاء حاصل شده است. بنابراین مدنظر داشتن هدف اصلی در تصمیم‌گیری می‌تواند منجر به دستیابی به نتایج مطلوب‌تر شود که منطبق با اصول مدیریتی ذکر شده در Ketabchi and Saghi-Jadid (2018) هم است که بایستی اهداف مدیریتی در مسائل مدیریتی (یعنی توسعه توابع هدف و قیود مربوطه) را منطبق با هدف نهایی مدنظر انتخاب نمود.

خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی حاصل از نتایج شبیه‌سازی مدل برای دوره ده ساله در سناریو ۱، ۲ و ۳، در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که در هیدروگراف (شکل ۶)، افزایش تراز آبخوان مشاهده شد. با رسم خطوط هم‌تراز برای حالت پایه و سه سناریو اجرا شده (شکل ۷- الف، ب و ج)، افزایش تراز آبخوان به خوبی قابل رویت می‌باشد.

Table 5- Components of water balance in the study area under three management scenarios (Million cubic meters)

جدول ۵- اجزای بیلان محدوده مطالعاتی تحت سه سناریو مدیریتی (میلیون مترمکعب)

Management scenario	Recharge			Discharge			Storage change
	Groundwater inflow from boundaries	Recharge rate	Total inflow	Groundwater outflow from boundaries	Discharge from wells	Total outflow	
Base	43.1	221.6	264.7	55.5	322.6	378.1	-55.5
Sustainability	32.9	221.4	254.3	67.8	202.2	267.0	-15.6
Filling	24.9	221.3	246.2	83.5	146.7	230.2	+15.9
Restoration	20.9	221.2	242.1	93.4	131.9	225.3	+16.6

به جهت اینکه در قسمت جنوب شرقی آبخوان سطح آب زیرزمینی پایین‌ترین مقدار خود را دارد و از بالادست آبخوان نیز آب دریافت می‌کند، در این قسمت آبخوان افزایش تراز بیشتری نسبت به قسمت‌های شمال‌غربی آبخوان داشته است که فقط از مرزهای اطراف، ورودی آب دارد. همچنین، خطوط هم‌تراز برای هر سه سناریو نیز با هم مقایسه شده است (شکل۷- د) که نتایج حاکی از افزایش تراز بیشتر در سناریوهای ۲ و ۳ و کم‌ترین افزایش تراز نیز در سناریو ۱ ملاحظه می‌شود.

نتایج حاصل از سه سناریوی مطالعات حاضر جهت مدیریت احیاء آبخوان، با سه شاخص اعتمادپذیری، مطلوبیت و آسیب‌پذیری نیز مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۶). بر اساس مقادیر این شاخص‌ها در جدول ۶، به جهت اینکه سناریو ۱ و ۲ در احیاء آبخوان موفق نبوده‌اند اعتمادپذیری آنها صفر بدست آمده و همانطور که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود تنها می‌توان به سناریو ۳ جهت احیاء آبخوان اعتماد کرد. همچنین، شاخص‌های مطلوبیت و آسیب‌پذیری نیز در سناریو ۱ بدترین و در سناریو ۳ بهترین وضعیت را دارند که بیانگر وضعیت مطلوب آبخوان با اعمال سناریو ۳ می‌باشد.

هر کدام از سناریوهای مورد استفاده این تحقیق، قابل پیش‌بینی بود که منجر به افزایش تراز آب زیرزمینی می‌شود. اما نکته مهم این است که مقدار افزایش و زمان رسیدن به یک هدف مطلوب در آنها متفاوت است. لذا با توجه به اینکه هدف این تحقیق رسیدن به تراز مطلوب است، راهکار عملی برای این هدف در سناریو سوم (بهینه‌کردن شاخص احیاء) دیده شده است، که با کاهش ۶۰ درصدی برداشت از آبخوان اهداف تحقیق را محقق می‌سازد. نکته دیگری که باید به آن توجه داشت این است که نتایج این تحقیق نشان داد تحقق هدف احیاء آبخوان مورد مطالعه در طول ۱۰ سال نیازمند کاهش ۶۰ درصدی برداشت است. بدیهی است که در آبخوان‌های واقعی که فعالیت‌های کشاورزی و مصارف گوناگون آب در آنها نهادینه شده است، تحقق چنین کاهشی دور از انتظار است. چنین الزاماتی توجه بیشتر در سیاستگذاری‌های طرح‌هایی مانند طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (Aquifer Restoration Plan, 2014) را مشهود می‌سازد که آنچه به عنوان برنامه‌ها و توصیه‌های عملیاتی مطرح می‌شوند از لحاظ زمانی و امکان عملیاتی شدن، مقدور باشند.

Table 6- Reviewing the results of three scenarios with reliability, utility and vulnerability indexes

جدول ۶- بررسی نتایج سه سناریو با شاخص‌های اعتمادپذیری، مطلوبیت و آسیب‌پذیری

Scenarios	Index		
	Reliability	Utility	Vulnerability
Sustainability	0	-0.49	0.50
Filling	0	-0.34	0.65
Restoration	0.07	-0.25	0.74

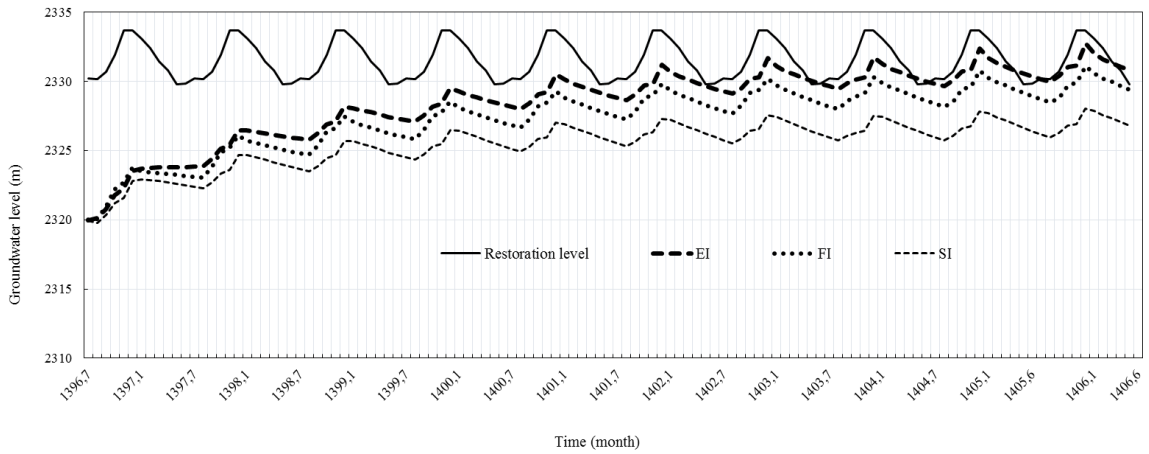

Fig. 6- Namdan aquifer groundwater level changes on the basis of three indicators, stability, filling and restoration for the ten-year simulation period

شکل ۶- تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی آبخوان نمدان بر اساس سه شاخص پایداری، پرشدگی و احیاء برای دوره شبیه‌سازی ده ساله

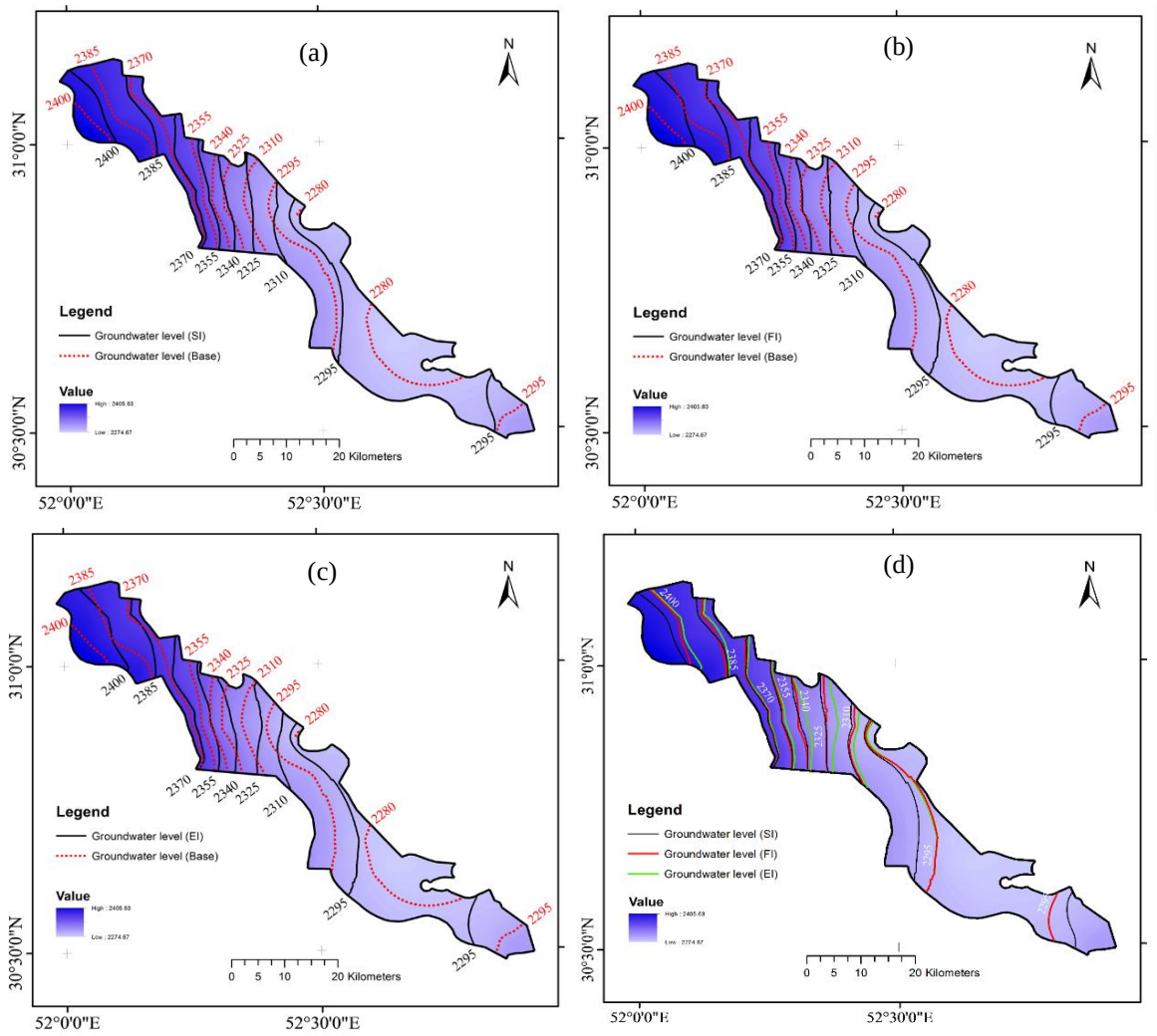

Fig. 7- Comparison of the iso-piez-lines of the aquifer under base case and a) Scenario 1, b) Scenario 2, c) Scenario 3, and d) Comparison of the iso-piez-lines of the aquifer under the assumed scenarios

شکل ۷- مقاسه خطوط هم‌تراز آبخوان با حالت پایه در، الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲، ج) سناریو ۳، و د) مقایسه خطوط هم‌تراز آبخوان سناریوها

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدیریت آبخوان در راستای طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (Aquifer Restoration Plan, 2014) مدنظر قرار گرفته و با توسعه مدل تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، سه مسأله مدیریتی در قالب سه سناریو و با استفاده از شاخص‌های آب زیرزمینی برای رسیدن به تراز احیاء آبخوان حل شده است. مدل تلفیقی شامل مدل شبیه‌سازی عددی MODFLOW و ابزار بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها بوده که با بهره‌گیری از فرآیند پردازش موازی در اجرای مدل، بار محاسبات آن ۲۳ درصد بهبود پیدا کرده است. با اجرای سه سناریو بر اساس شاخص‌های پایداری، پرشدگی و احیاء، نتایج بیانگر افزایش سطح تراز آب زیرزمینی در هر سه سناریو بوده است. بطوریکه، در سناریو ۱، ۲ و ۳، به ترتیب آبخوان ۳، ۹/۵ و ۱۰/۶ متر افزایش تراز نسبت به ابتدای دوره شبیه‌سازی مشاهده شده است. در این بین شاخص احیاء از درجه اهمیت بالاتری نسبت به دو شاخص دیگر برخوردار بوده و شاخص پرشدگی از اهمیتی بیشتری نسبت به شاخص پایداری به لحاظ افزایش تراز آبخوان داشته است که در نظرگیری هدف اصلی و نهایی برنامه مدیریتی در تابع هدف و قیود مسأله را نمایان می‌سازد. علاوه بر این موارد، از سه شاخص پایداری، مطلوبیت و آسیب‌پذیری برای بررسی سه سناریو اعمال شده بهره گرفته شد. به جهت اینکه بهبود در مقادیر این سه شاخص نشانگر بهبود وضعیت آبخوان بوده است. این سه شاخص به ترتیب از سناریو

۱ به ۲ و از سناریو ۲ به ۳ با افزایش مقادیر، بهبود وضعیت آبخوان در اثر اعمال سناریو ۳ را تأیید می‌کنند. با توجه به اینکه بهره‌گیری از شاخص احیاء می‌تواند اهداف احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی را در بازه زمانی مدنظر محقق می‌سازد. پیشنهاد می‌شود جهت مدیریت آبخوان با هدف احیاء و تعادل‌بخشی آنها از این شاخص بهره گرفته شود و اهداف دیگر همسو مانند پرشدگی آبخوان و موارد مشابه ملحوظ نشود. همچنین لازم است در تدوین برنامه‌های کلانی مانند طرح ملی احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور (Aquifer Restoration Plan, 2014)، امکانسنجی عملیاتی شدن اهدافی مانند احیاء آبخوان از جنبه امکان پیاده‌سازی ملزومات (مثلاً کاهش ۶۰٪ برداشت) و زمان محقق شدن آن، مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گیرد.

۵- تشکر

نویسندگان این مقاله از مؤسسه تحقیقات منابع آب وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران و شرکت سهامی آب‌منطقه‌ای فارس به جهت در اختیار قرار دادن بخشی از آمار و اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق، کمال تشکر و سپاس را دارند.

پی نوشت‌ها

1- Decision Models
2- Combined Simulation-Optimization
3- Sustainability Index
4- Filling Index
5- Restoration Index
6- Reliability Index
7- Utility Index
8- Vulnerability Index

۶- مراجع

Alnahhal S, Afifi S, Qahman Kh, Dentoni M, and Lecca G (2010) A simulation/optimization approach to manage groundwater resources in the Gaza aquifer (Palestine). International Conference on Water Resources Barcelona

Amritkar A, Tafti D, Liu R, Kufrin R, and Chapman B (2012) Open MP parallelism for fluid and fluid-particulate systems. Parallel Comput 38:501-517

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

Ataie-Ashtiani B and Ketabchi H (2011) Elitist continuous ant colony optimization algorithm for optimal management of coastal aquifers. Water Resources Management 25(1):165-190

Ataie-Ashtiani B, Ketabchi H, and Rajabi M (2014) Optimal management of a freshwater lens in a small island using surrogate models and evolutionary algorithms. Journal of Hydrologic Engineering 19:339-354

Ayvaz MT (2009) Application of Harmony Search algorithm to the solution of groundwater management models. Advances in Water Resources 32:916-924

Ayvaz MT and Elci A (2013) A groundwater management tool for solving the pumping cost minimization problem for the Tahtali watershed (Izmir Turkey) using hybrid HS-Solver optimization algorithm. Journal of Hydrology 478:63-76

Ayvaz MT and Karahan H (2008) A simulation/ optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates. Journal of Hydrology 357(1):76-92

Bahreinimotlagh M, Kawanisi K, and Meddy M (2016) Application of shallow-water acoustic tomography to measure flow direction and river discharge. Flow Measurement and Instrumentation 51:30-39

Dong Y, Li G, and Xu H (2013) Distributed parallel computing in stochastic modeling of groundwater systems. Groundwater 51(2):293-297

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)

Gaur S, Chahar BR, and Graillot D (2011) Analytic elements method and particle swarm optimization based simulation–optimization model for groundwater management. Journal of Hydrology 402(3):217-227

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.

Hashimoto T, Stedinger JR, and Loucks DP (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. Water Resources Research 18:14-20

Hussain MS, Javadi AA, Ahangar-Asr A, and Farmani R (2015) A surrogate model for simulation–optimization of aquifer systems subjected to seawater intrusion. Journal of Hydrology 523:542-554

Jin HQ, Jespersen D, Mehrotra P, Biswas R, Huang L, and Chapman B (2011) High performance

Maskey S, Jonoski A, and Solomatine DP (2002) Groundwater remediation strategy using global optimization algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management 128(6):431-440

Nguyen AT, Reiter S, and Rigo P (2014) A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. Applied Energy 113:1043-1058

Parhami B (2002) Introduction to parallel processing, algorithms and architectures. University of California at Santa Barbara. Kluwer Academic Publishers Santa Barbara, California

Sayeed M and Mahinthakumar G (2005) Efficient parallel implementation of hybrid optimization approaches for solving groundwater inverse problems. Journal of Computing in Civil Engineering-ASCE 19(4):329-340

Sedki A and Ouazar D (2011) Simulation-optimization modeling for sustainable groundwater development: a Moroccan coastal aquifer case study. Water Resources Management 25(11):2855-2875

Singh RM and Datta B (2006) Identification of groundwater pollution sources using GA-based linked simulation optimization model. Journal of Hydrologic Engineering 11(2):101-109

Sreekanth J and Datta B (2010) Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using genetic programming and modular neural network based surrogate models. Journal of Hydrology 393(3):245-256

Sreekanth J and Datta B (2014) Stochastic and robust multi-objective optimal management of pumping from coastal aquifers under parameter uncertainty. Water Resources Management 28(7):2005-2019

UNESCO (2007) Groundwater Resources Sustainability Indicators.

Werner AD, Zhang Q, Xue L, Smerdon BD, Li X, Zhu X, and Li L (2013) An initial inventory and indexation of groundwater mega-depletion cases. Water Resources Management 27(2):507-533

Zhang S, Xia Z, Yuan R, and Jiang X (2014) Parallel computation of a dam-break flow model using OpenMP on a multi-core computer. Journal of Hydrology 512:126-133

computing using MPI and OpenMP on multi-core parallel systems. Parallel Computing 37:562-575

Ketabchi H and Ataie-Ashtiani B (2011) Development of combined ant colony optimization algorithm and numerical simulation for optimal management of coastal aqueifer. Iran-Water Resources Research 14(2):119-130 (In Persian)

Ketabchi H and Ataie-Ashtiani B (2015a) Review: Coastal groundwater optimization-advances, challenges, and practical solutions. Journal of Hydrology 23:1129-1154

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

Ketabchi H and 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

Ketabchi H and Saghi-Jadid M (2018) Result based management (Approach to water resources and environmental management). Talab Publication (Wetland Press) (In Persian)

Ketabchi H, Mahmoodzadeh D, Ghadimi S, and Saghi-Jadid M (2018a) A review of groundwater resources 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)

Ketabchi H, Nik-Khah R, and Morid S (2018b) Numerical simulation of Namdan aquifer in Fars province in Iran; Assessment of green water management impacts on the aquifer restoration. Iran-Water Resources Research 14(2):119-130 (In Persian)

Loucks D P (1997) Quantifying trends in system sustainability. Hydrological Science Journal 42:513-530

Mahmoodzadeh D, Ketabchi H, and Ataie-Ashtiani B (2015) Optimal management of groundwater resources in Kish Island: Sensitivity analysis of optimal strategies for different environmental changes. Journal of Water and Wastewater 27(2):61-70 (In Persian)