Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 14, No.28, Winter 2023 p: 134-147

"Research Paper"

Modeling the Groundwater Water of Damghan Plain and Optimizing the Cropping Pattern in Order to Prevent the Drop of the Groundwater Level

Reza Ashuri[1], Seyed Sajjad Mehdizadeh[2], Homan Haji Kandi[3], Saeed Jamali[3] and Samad Emamgholizadeh[4]

1- Ph.D. student of Water Resources, Department of Civil Engineering, Faculty of Technical Engineering, Central Tehran Azad University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran, (Corresponding author: Saj.Mehdizadeh@iauctb.ac.ir)
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Central Tehran Azad University, Tehran, Iran.
4- Professor, Department of Water and Environment, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
Received: 15 April, 2023 Accepted: 9 August, 2022

Extended Abstract

Introduction and Objective: Excessive exploitation of groundwater in Damghan plain has caused many problems such as land subsidence in the study area, along with the reduction of the groundwater level and the loss of a part of the aquifer and the reduction of the specific yield of aquifer. Therefore, in order to control the withdrawal from the aquifer and as a result to reduce the drop in the groundwater level in that plain, it was investigated. For this purpose, in this research, the mathematical modeling of Damghan Plain was done for the optimal management of exploitation and providing the optimal cultivation pattern in order to save water consumption with the focus on controlling the groundwater level and limiting land subsidence.

Material and Methods: In this research, Damghan plain aquifer was first simulated using MODFLOW mathematical model. Then, taking into account different scenarios of aquifer exploitation, using the NSGAII genetic algorithm, optimization of multi-objective exploitation of water resources and optimal management of water supply and demand in the agricultural sector was done. The results of the model were evaluated based on statistical error parameters to predict the ground water level.

Results: The results of this research showed that the MODFLOW numerical model was able to simulate the groundwater level of the studied plain well in steady and unsteady conditions in the calibration and validation stages. Also, the results of the simulation-optimization algorithm showed that by changing the cultivation pattern and also by changing the type of irrigation system from traditional to modern irrigation and as a result of increasing the irrigation efficiency (90 percent), the average drop of the groundwater level of the plain can be reduced. It reduced the groundwater level of the study area from 0.49 m in existing conditions to 0.07 m in optimal conditions. This will compensate the deficit of the aquifer from 31.90 to 5.1 million cubic meters per year.

Conclusion: Using management strategies such as changing the cultivation pattern, increasing irrigation efficiency, and also by controlling surface water and injecting it into groundwater, the process of reducing the groundwater level in the studied plain can be completely controlled and provided 100% of the water needs of the plain.

Keywords: Genetic algorithm, Groundwater level, Multi-objective optimization, Optimal cultivation pattern, Simulation

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

"مقاله پژوهشی"

مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت دامغان و بهینه‌سازی الگوی کشت به‌منظور جلوگیری از افت تراز آب زیرزمینی

رضا آشوری[۱]، سید سجاد مهدی‌زاده[۲]، هومن حاجی کندی[۳]، سعید جمالی[۳] و صمد امامقلی زاده[۴]

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد تهران مرکزی، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران، (نویسنده مسوول: Saj.Mehdizadeh@iauctb.ac.ir)
۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد تهران مرکزی، تهران، ایران
۴- استاد، گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۱۸
صفحه: ۱۳۴ تا ۱۴۷

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دشت دامغان موجب شده است که ضمن کاهش تراز سطح آب زیرزمینی و از بین رفتن بخشی از آبخوان و کاهش آبدهی ویژه سفره آب زیرزمینی مشکلات عدیده‌ای مانند فرونشست زمین در منطقه ایجاد گردد. لذا جهت کنترل برداشت از سفره آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش افت سطح آب زیرزمینی مدل‌سازی ریاضی دشت دامغان جهت مدیریت بهینه بهره‌برداری و ارائه الگوی کشت بهینه به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب با محوریت کنترل سطح آب زیرزمینی و محدود نمودن فرونشست زمین انجام گرفت.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق ابتدا آبخوان دشت دامغان با استفاده از مدل ریاضیMODFLOW شبیه‌سازی گردید. سپس با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف بهره‌برداری از آبخوان، با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGAII به بهینه‌سازی بهره‌برداری چندهدفه از منابع آب و مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب در بخش کشاورزی پرداخته شد. نتایج مدل بر اساس پارامترهای آماری خطا جهت پیش‌بینی سطح تراز آب زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج این تحقیق نشان داد که مدل ریاضیMODFLOW توانسته است سطح آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه را در شرایط پایدار و غیر پایدار در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به‌خوبی شبیه‌سازی کند. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی – بهینه‌سازی نشان داد که می‌توان با تغییر الگوی کشت و همچنین با تغییر نوع سیستم آبیاری از سنتی به آبیاری نوین و درنتیجه افزایش راندمان آبیاری (۹۰ درصد)، مقدار میانگین افت تراز سطح آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه را از ۰/۴۹متر در شرایط موجود به ۰/۰۷ متر در شرایط بهینه کاهش داد. این امر موجب جبران میزان کسری مخزن از ۳۱/۹۰ به ۵/۱ میلیون مترمکعب در سال خواهد گردید.

نتیجه‌گیری: استفاده از راهکارهای مدیریتی مانند تغییر الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری و همچنین با کنترل آب‌های سطحی و تزریق آن به آب زیرزمینی می‌توان روند کاهش سطح آب زیرزمینی را در دشت مورد مطالعه به‌طور کامل مهار کرد و تأمین نیاز آبی دشت را به‌صورت ۱۰۰ درصد تامین نمود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوی کشت بهینه، بهینه‌سازی چندهدفه، تراز سطح آب زیرزمینی، شبیه‌سازی

مقدمه

پایین رفتن سطح سفره‌های آب زیرزمینی و بحرانی شدن وضعیت آب در دشت‌ها یکی از بزرگ‌ترین و چالشی‌ترین مشکلات بخش کشاورزی است. در حال حاضر قسمت اعظم مصارف آب استحصالی کشور به بخش کشاورزی اختصاص دارد. آمارهای موجود نشان می‌دهد که ذخایر منابع آب در اکثر مناطق کشور ازجمله دشت دامغان به‌دلیل بهره‌برداری غیر بهینه در معرض خطر جدی است که قطعاً ادامه این روند پیامدهای جبران‌ناپذیر اقتصادی و زیست‌محیطی را در منطقه به‌جای خواهد گذاشت. لذا پمپاژ بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی به‌دلیل رشد فزاینده جمعیت و صنعتی شدن شهرها، موجب افزایش نگرانی جهانی شده است و در دهه‌های اخیر خطرات هیدروژئولوژیکی را تشدید نموده است (Gorelick & Zheng, 2015). خطر فرونشست زمین در اثر پایین افتادن تراز سطح آب زیرزمینی در بین سال‌های ۱۹۵۰تا ۱۹۷۰ هم‌زمان با صنعتی شدن رشد جمعیت در جهان گزارش شده است (Waltham, 1989). در ایران نیز وجود شرایط اقلیمی خشک تا نیمه‌خشک موجب بهره‌برداری بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی و در نتیجه تشدید فرونشست زمین شده است (Tourani et al., 2018). پدیده فرونشست زمین اولین بار در سال ۱۳۴۲ در دشت رفسنجان استان کرمان گزارش گردید. در این دشت بین سال‌های (۱۹۶۹ تا ۱۹۹۹) طی ۳۰ سال سطح آب زیرزمینی حدود ۲۵ متر افت داشته که به تبع آن به‌طور میانگین سالیانه معادل ۱۵ سانتی‌متر فرونشست زمین را به‌همراه داشته است (Tourani et al., 2018). پدیده فرونشست زمین دارای پیچیدگی‌های زیادی بوده و شدت گستردگی آن در زمان و مکان‌های مختلف متفاوت است (Mohammady et al., 2021). علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2012) به بررسی بهینه‌سازی الگوی کشت با هدف تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی پرداختند. آن‌ها برای دستیابی به هدف فوق از روش‌های حل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی چندهدفه آرمانی در قالب ساختارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد با به‌کارگیری الگوی مشخص‌شده در دوره برنامه‌ریزی ده‌ساله علاوه بر دستیابی به اهداف چندگانه، سبب کاهش کسری ذخایر زیرزمینی آب منطقه مورد مطالعه خواهد شد. همچنین خاشعی و همکاران با استفاده از مدل بیلان آب زیرزمینی با روش فرا کاوشی PSO الگو و تراکم کشت بهینه محصولات زراعی دشت نیشابور را تعیین نمودند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که می‌توان با کاهش ۳۰ درصدی سطح زیر کشت اغلب محصولات بهاره و افزایش ۳۰ درصدی سطح زیر کشت گندم و جو و رده بیشترین درآمد را از آب استحصالی از آبخوان

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

دشت نیشابور کسب نمود (Khashei Siuki et al., 2013). خاشعی و همکاران اقدام به تعیین الگوی کشت بهینه برای جلوگیری از افت آب زیرزمینی با الگوریتم فرا ابتکاری PSO نمودند و بیان کردند برای به حداقل رساندن افت سطح آب، در صورت وقوع بارش، برابر میانگین بارش سالیانه منطقه، کشاورزان فقط مجاز به برداشت ۳۵۹ میلیون مترمکعب از آبخوان دشت نیشابور را دارند که با این حجم آب باید ۵۹۷۰۶ هکتار از اراضی دشت را فاریاب کرده که ۴۸۷۸۹ هکتار کمتر از وضع موجود است (Khashei-siuki et al., 2014). فلسفیان و پناهی اقدام به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت شبستر تحت شرایط محدودیت آب نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد می‌توان با اجرای الگوی کشت بهینه، میزان سود را ۱/۱ درصد افزایش و میزان مصرف آب را ۴/۷۱ درصد کاهش داد (Falsafian & Panahi, 2021). ستی و همکاران طرح کشت بهینه و تخصیص منابع آب را در حوضه ORISSA در شرق هندوستان را بررسی کردند. آن‌ها برای تخصیص بهینه آب برای سطوح زیر کشت در منطقه مورد مطالعه، از برنامه‌ریزی خطی استفاده کردند. آنالیز حساسیت مدل با در نظر گرفتن سه سناریو شامل ۲۰٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ انحراف از الگوی کشت موجود در منطقه انجام شده است. نتایج تحقیق بیانگر آن است که با سناریوی دوم یعنی ۴۰ درصد انحراف از الگوی کشت موجود در منطقه، می‌تواند علاوه بر حفظ تعادل هیدروژئولوژیکی منطقه حداقل نیازهای آبی لازم را برآورده کند (Sethi et al., 2006). خاره و جات مدل بهینه‌سازی اقتصادی در منطقه کشاورزی SAPON در کشور اندونزی را ارائه کردند و بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و با در نظر گرفتن قیود هیدرولوژیکی و مدیریتی در منطقه، برای رسیدن به الگوی کشت بهینه و ماکزیمم سود حاصل از کشاورزی با حداقل مصرف آب بررسی کردند (Khare & Jat, 2006). صفوی و همکاران مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی بهره‌برداری توامان از منابع آب سطحی و زیرزمینی را در دشت نجف‌آباد توسعه دادند. در این مدل شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی توامان آب‌های سطحی و زیرزمینی و الگوریتم ژنتیک به‌عنوان مدل بهینه استفاده کردند که هدف اصلی آن‌ها در مدل توسعه داده‌شده به حداقل رساندن کمبودها در برآورد نیاز آبیاری منطقه با در نظر گرفتن افت تجمعی سطح آب زیرزمینی به‌عنوان قید مساله را مورد بررسی قرار گرفت (Safavi et al., 2010). پرالتا و همکاران برای حل مساله بهینه‌سازی و بهره‌برداری توامان آب سطحی و زیرزمینی با هدف حداکثر کردن برق‌آبی و تامین آب و حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی انتقال آب در یک سیستم هیدرولیکی غیرخطی شامل آبخوان، رودخانه و مخزن از الگوریتم NSGA استفاده کردند. نتایج این مطالعه حاکی از توانایی الگوریتم NSGA در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی بوده است (Peralta et al., 2014). جودوی و همکاران با استفاده از کد نرم‌افزاری MODFLOW در محیط GMS امکان به تعادل رساندن آب زیرزمینی آبخوان دشت فیض‌آباد را بررسی کردند. نتایج نشان داد برای متوقف کردن افت سطح آب زیرزمینی باید برداشت ماهانه، ۴۰ درصد کاهش یابد و در زمستان برخلاف شرایط کنونی، بهره‌برداری صورت نگیرد تا تعادل انجام شود (Atala & Mohammad, 2009).

قبادی علمداری و همکاران با استفاده از مدل MODFLOW امکان‌سنجی استفاده از مدل تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت دهلران را موردبررسی قراردادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد مدل مذکور توانایی شبیه‌سازی آبخوان دشت را داشته است و مقدار خطای میانگین، خطای میانگین مطلق و مجذور مربعات خطاهای اندازه‌گیری شده در پیزومترها به‌ترتیب ۰/۲۴-، ۰/۴۶ و ۰/۶۵ متر بوده است. همچنین آن‌ها نشان دادند با اعمال سناریوهای مختلف استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌توان در آینده حجم آب زیرزمینی آبخوان را به‌طور سالیانه ۲ میلیون مترمکعب احیا نمود (Ghobadi Alamdari et al., 2019).

قربانی سرهنگی و همکاران جهت بررسی تاثیر انتقال آب کانال‌های آبیاری شبکه البرز بر روی سطح ایستابی در حوزه آبخیز قائمشهر-جویبار از مدل ریاضی MODFLOW استفاده کردند. آن‌ها سه سناریو تحت عنوان شرایط موجود (یعنی قبل از اجرای طرح شبکه آبیاری و زهکشی البرز)، بعد از اجرای طرح و شرایط بهینه برداشت از آب زیرزمینی را در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد در صورت اجرای طرح می‌توان ظرفیت برداشت از آب زیرزمینی را به مقدار ۹۶ میلیون مترمکعب افزایش داد (Ghorbani Sarhangi et al., 2018). کریمیان و همکاران وضعیت تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی آبخوان هشتگرد را با استفاده از مدل عددی MODFLOW شبیه‌سازی کردند. بدین‌منظور سناریوهای مختلفی را جهت طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با تلفیق سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت شاخص پایداری سیستم آب به‌میزان ۱۵درصد بیش‌ترین میزان پایداری در سیستم آبخوان را ایجاد نموده و میزان پایداری سیستم از مقدار ۵۵ درصد تا ۸۷ درصد افزایش یافت (Karimian et al., 2022). رضایی توابع و همکاران با استفاده از مدل MODFLOW حوضه آبریز پریشان، ملارد و فامور واقع در استان فارس را شبیه سازی کردند. آن‌ها از داده‌های ۳۳ حلقه چاه پیزومتری در بازه زمانی (۲۰۰۸- ۲۰۲۰) برای انجام شبیه‌سازی استفاده نمودند. نتایج حاصل از محاسبه بیلان آبی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در این دشت به‌میزان ۱۳ متر کاهش سطح تراز آب زیرزمینی اتفاق افتاده است و جمعاً میزان ۴۲/۴ میلیون مترمکعب آب کسری مخزن از آبخوان در طی یک دوره ۱۰ ساله حادث شده است (Razaei Tavabe et al., 2022). عدالت و همکاران مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی دشت علی‌آباد قم را با استفاده از مدل MODFLOW بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ انجام دادند. با استفاده از جمع‌آوری اطلاعات مانند زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، و تراز سطح آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه تخمین زده شد. جهت اعتبارسنجی مدل، تغییرات سطح پیش‌بینی شده توسط مدل با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های چاه‌های پیزومتریک مورد مقایسه قرار گرفت و مقدار خطای RMSE تعیین گردید. مقدار خطای مدل برابر با ۱/۴ متر به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد در ۱۳ حلقه چاه

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

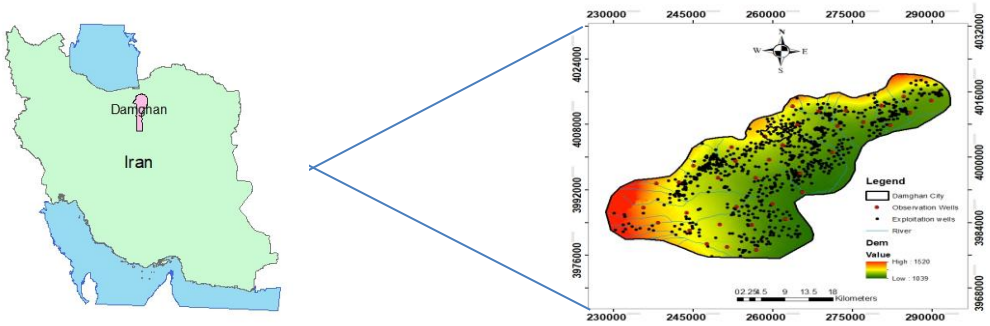
از ۲۶ حلقه چاه مشاهداتی، میانگین اختلاف تراز مشاهداتی و پیش‌بینی شده کمتر از۰/۵ متر وحداکثر میانگین اختلاف برابر با ۲/۹۴ متر می‌باشد. بین داده‌های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و پیش‌بینی شده همبستگی قابل قبولی وجود داشته و مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۹۸۹ بوده است (Edalat et al., 2022).

با توجه به اینکه دشت دامغان یکی از دشت‌های مهم استان سمنان می‌باشد و افت سطح آب زیرزمینی در این دشت مشهود است، در این تحقیق مدل‌سازی و بهینه‌سازی الگوی کشت در منطقه مورد مطالعه، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بررسی منابع نشان می‌دهد در این منطقه، تا به‌حال از الگوریتم ژنتیک NSGAII و تلفیق آن با مدل ریاضی MODFLOW برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از آب زیرزمینی جهت مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب پرداخته نشد. لذا در این تحقیق با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف بهره‌برداری از آبخوان، بهینه‌سازی مصرف آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

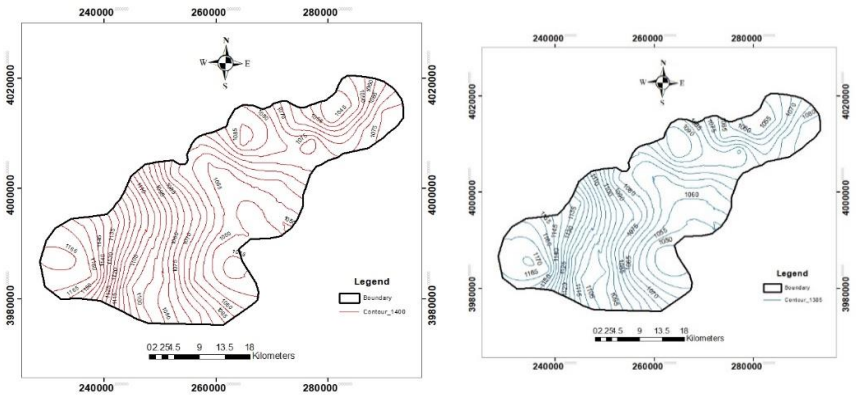
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه آبخوان آبرفتی شهر دامغان است. محدوده مورد مطالعه در موقعیت جغرافیایی حدفاصل ۵۳ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. براساس اقلیم بندی دومارتن منطقه مورد مطالعه در منطقه گرم و خشک واقع شده است. شهرستان دامغان به لحاظ تقسیمات سیاسی کشور یکی از شهرستان‌های استان سمنان است که در شمال شرق این استان در دامنه جنوبی سلسله جبال البرز شرقی واقع شده است (شکل ۱). مساحت محدوده دشت آبرفتی حدود ۱۳۵۱/۲ کیلومترمربع می‌باشد. همچنین در شکل (۱) موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و چاه‌های مشاهداتی، و تغییرات ارتفاعی دشت در این شکل نشان داده‌شده است. حداکثر ارتفاع حوضه آبریز دشت دامغان ۱۵۲۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۰۳۹ متر و ارتفاع متوسط از سطح آزاد ۱۲۵۰ متر می‌باشد. میانگین بارش سالیانه منطقه ۱۲۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالیانه ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد و متوسط تبخیر سالیانه نیز۲۴۲۹ میلی‌متر می‌باشد. نقشه خطوط هم پتانسیل آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دامغان مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ و سال ۱۴۰۰ در شکل (۲) ارائه گردیده است. بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان در دو سال ۱۳۸۵ و ۱۴۰۰ همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود تراز سطح آب در آبخوان آبرفتی دامغان به‌طور متوسط در طول دوره آماری بین ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۰ برابر با ۰/۴۹ متر در سال بوده و مقدار متوسط افت سطح آب در ناحیه شمال شرق دشت، مرکز آبخوان و ناحیه جنوبی به‌ترتیب ۰/۵۱، ۰/۶۵ و ۰/۳۸ متر در سال می‌باشد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در دشت دامغان
Figure 1. The studied area in Damghan Plain



شکل ۲- نقشه هم پتانسیل سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دامغان در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۴۰۰
Figure 2. Isopotential map of groundwater level in Damghan alluvial aquifer in 2006 and 2021

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

مدل مادفلو

در این تحقیق برای انجام شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی از مدل MODFLOOW استفاده گردید. این مدل اولین بار توسط مک‌دونالد و هارباو (۱۹۸۸) از انجمن زمین‌شناسی ایالات‌متحده آمریکا منتشرشده و از آن زمان تاکنون نسخه‌های فراوانی از آن تهیه‌شده است که روز به‌روز بر قابلیت آن افزوده می‌شود. این کد نرم‌افزاری نتیجه‌ی سال‌ها تحقیقات در سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا می‌باشد (Chiang. Kinzelbach, 1990). این مدل در داخل و خارج توسط محققین مختلفی جهت مدل‌سازی سفره آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (Ebrahimi et al., 2023; Moghadam et al., 2022; Sabale & Jose, 2022).

برای مدل شبیه‌سازی آبخوان محدودهٔ مطالعاتی با تکیه بر حرکت سه‌بعدی آب زیرزمینی در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی که مطابق رابطه ۱ توصیف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(kx\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(ky\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(kz\frac{\partial h}{\partial z}\right)-w=S_y\frac{\partial h}{\partial t} \quad (۱)$$

در رابطه ۱ ضرایب kx و ky و kz ضرایب هدایت هیدرولیکی آبخوان در راستای x،y،z، h سطح آب، w میزان تخلیه آب یا تغذیه S_y آبدهی ویژه و t پارامتر زمان می‌باشد. جهت مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی از آمار و اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای برای واسنجی پارامترهایی از قبیل ضریب هیدرولیکی آبخوان، میزان تغذیه سطحی (بارش موثر و آب برگشتی کشاورزی، صنعت شرب) و غیره استفاده می‌شود. همچنین در این مدل برای تعریف شرایط مرزی سفره‌های آب‌های زیرزمینی می‌توان از مرز تراوا و ناتراوا با سطح ثابت، با سطح کلی، با سطح مشخص، با حجم جریان مشخص و غیره استفاده نمود. در شرایط مرزی که به خط مرزی آبخوان اعمال می‌شود مقادیر سطح تراز آب زیرزمینی به دو گروه ابتدا و انتهای آن خط وارد می‌شود و در سلول‌های بین دو نقطه و بر روی آن خط مقادیر دو گره به‌صورت خطی درون‌یابی می‌شود. همچنین میزان قابلیت انتقال سلول‌هایی که خط مرزی درآن‌ها واقع شده است باید به مدل وارد شود. در این تحقیق برای شبیه‌سازی شبکه سه‌بعدی اولیه با توجه به اطلاعات موجود و شرایط هیدروژئولوژیکی در ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ متر در جهت x و y استفاده شد. در این پژوهش اثر متقابل آبخوان و مرز حوضه به‌عنوان یک شرط مرزی داخلی در مدل‌سازی آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. جهت واسنجی مدل مورد استفاده در شرایط پایدار از داده‌های تراز آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی در شش ماه دوم سال آبی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ استفاده گردید. برای واسنجی مدل از روش اتوماتیک (PEST) با تغییر پارامترهای تغذیه و هدایت هیدرولیکی افقی استفاده شد (Ghodrati & Sabany, 2012).

همچنین برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در حالت غیر پایدار و تعیین ضریب ذخیره آبخوان، مدل واسنجی شده در حالت پایدار به‌عنوان مدل پایه مورد استفاده قرار گرفت. بدین‌منظور از داده‌های سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۹۵ (۵ ساله) استفاده گردید. به‌دلیل بزرگی منطقه مورد مطالعه، دشت دامغان به چند ناحیه (۲۱ ناحیه) به‌صورت چندضلعی با استفاده از روش تیسن تقسیم گردید. با توجه به اینکه تعداد نواحی دشت نسبتاً زیاد می‌باشد، لذا واسنجی مدل در این مرحله به‌روش اتوماتیک و با استفاده از کد PEST به‌جای روش دستی انجام گرفت. به‌عبارتی با معرفی نقاط پایلوت پوینت[1] در منوی پارامترهای مدل مادفلود برای دو پارامتر ضریب ذخیره آبخوان و هدایت هیدرولیکی افقی، از آن‌ها به‌عنوان پارامترهای واسنجی استفاده گردید. بعد از انجام واسنجی مدل، از داده‌های سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به‌عنوان داده صحت‌سنجی مدل استفاده شد.

مدل بهینه‌سازی

در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌های فازی، و ... جهت مطالعه آب زیرزمینی مورد توجه محققین قرارگرفته است (Akbarzadeh et al., 2016; Hosseini & Roshani, 2020; Piri et al., 2023). با توجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق بهینه‌سازی منابع آبی جهت رسیدن به کاهش سطح آب و در نتیجه کنترل فرونشست زمین است، جهت انجام بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGAII) تکاملی نخبه‌گرا استفاده شد. این مدل توسط دب و همکاران معرفی گردید (Deb et al., 2002). در این روش از مفاهیم مرتب‌سازی نامغلوب، نخبه‌گرایی و عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده و الگوریتم قدرتمندی جهت حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه می‌کند (Kanooni, 2013). این مدل توسط محققین مختلفی جهت بهینه‌سازی در مسائل مهندسی آب مورد استفاده قرارگرفته است (Bekele & Nicklow, 2007; Jalili et al., 2023; Reed & Devireddy, 2004; Rezapour Tabari & Soltani, 2013; Tabari & Abyar, 2021; Zamani et al., 2022). شکل کلی توابع هدف بهینه‌سازی به‌صورت رابطه ۲ می‌باشد:

$$Z_1=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{j}\frac{X_1ij+X_2ij-demand\ i\ j}{demand\ i\ j}$$
$$\text{Minimize} \quad (۲)$$
$$Z_2=\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\frac{\Delta Li\ (k)}{\Delta L_{max}}\left(\frac{ak}{A}\right)$$

Z_1 و Z2 توابع هدف می باشند. Z1 اولین تابع هدف و برابر با کمبود نسبی آب (تفاضل نیاز آبی ناخالص و حجم آب تامین شده برای محصولات نسبت به نیاز آبی ناخالص آن‌ها در طول همه دوره‌ها برای همه محصولات کشاورزی (بی‌بعد) i=1…..12 اندیس ماه شبیه‌سازی، j=1…..10 اندیس تعداد محصولات کشاورزی غالب در منطقه X1ij میزان آب زیرزمینی برداشت‌شده از چاه‌های پمپاژ در ماه i و X2ij میزان آب سطحی برداشت‌شده از سد دامغان در ماه i برای محصول j (demand ij (m^3/month)، نیاز آبی ناخالص محصول j درماه i (m^3/minth) تعریف می‌شود.

1-Poilot points

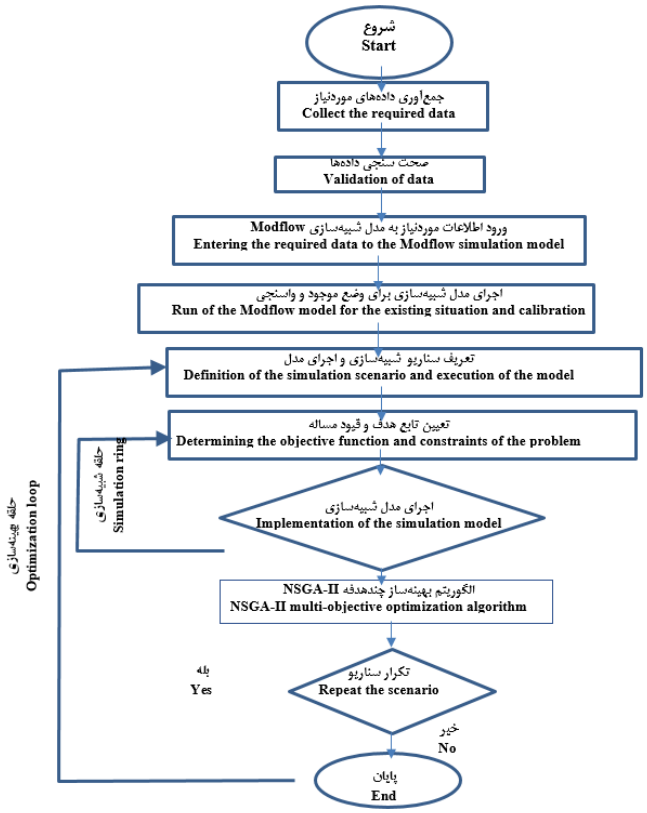
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

Z2 دومین تابع هدف و برابر است با متوسط سالیانه تغییرات تراز آب زیرزمینی (بی‌بعد) K=1…..40 اندیس چاه مشاهده‌ای نماینده Δ Li(k) میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی در ماه i و چاه مشاهده‌ای m(k)، ak مساحت چندضلعی‌های تیسن مربوط به هریک از چاه‌های مشاهده‌ای (ha) و A مساحت کل آبخوان (ha) می‌باشد جهت حل مسئله بهینه‌سازی (مجموعه محدودیت‌های مربوط به سطح زیر کشت محصولات و منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شد). هدف از انجام این تحقیق حداقل کردن دو تابع هدف Z1 و Z2 می‌باشد. برای حل مسئله بهینه‌سازی از NSGAII استفاده شد و جهت اعمال محدودیت‌ها در الگوریتم بهینه‌سازی، توابع جریمه فازی اعمال گردید. در این روش مساله محدودیت دار تبدیل به یک مساله غیر محدود تبدیل می‌گردد و سپس روش تابع جریمه منطق فازی می‌تواند به‌درستی ترتیب رتبه یک نقطه معین را در یک جبهه پارتو GA مشخص کند (Cheng & Li, 1998).

نیاز آبی گیاهان متاثر از عواملی همچون بارش، تبخیر، درجه حرارت و ضریب استفاده از آب توسط گیاه می‌باشد. نیاز خالص آبی محصولات زراعی و باغی در واحد هیدرولوژیکی دشت دامغان به‌تفکیک از جهاد کشاورزی استان سمنان تهیه و با اعمال راندمان آبیاری متناسب با نوع سیستم آبیاری، نیاز آبی محصولات ناخالص تعیین گردید. مراحل مدل‌سازی تحقیق در شکل (۳) ارائه‌شده است. همان‌طوری که در این شکل نشان داده‌شده است، فرآیند انجام کار در این تحقیق از دو مرحله اصلی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تشکیل‌شده است. هسته اصلی محاسبات در مرحله اول، مدل شبیه‌سازی جریان آب زمینی و مرحله بعدی شامل مدل تخصیص بهینه منابع آب است. مدل‌سازی آب زیرزمینی که در محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد چون دارای خروجی‌ها و ورودی‌های متعددی است و دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد، لذا از مدل MODFLOW جهت حل معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی استفاده شد و تراز سفره آب زیرزمینی براساس روش عددی تفاضل محدود حل گردید.

همان‌طوری که در شکل ۳ نشان داده‌شده است، داده‌ها بعد از جمع‌آوری صحت‌سنجی شدند، یعنی داده‌های جمع‌آوری‌شده، قبل از اینکه مورد استفاده قرار بگیرند ابتدا داده‌های پرت و استثنایی شناسایی و حذف شدند. همچنین با استفاده از آزمون ران تست، همگنی داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

همچنین مقادیر نیاز آبی منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ یعنی نیاز آبی نیاز شرب، بهداشت و صنعت در سال ۱۴۰۰ برحسب میلیون مترمکعب از سازمان آب و فاضلاب استان سمنان اخذ شد و همچنین نیاز آبی کشاورزی براساس الگوی کشت حاکم در منطقه از نشریه وزارت جهاد کشاورزی مربوط به برآورد آب موردنیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور محاسبه گردید (Farshina, 1998).



شکل ۳- ساختار الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق
Figure 3. Algorithm structure used in this study

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

جدول ۱- مقادیر نیاز آبی منطقه مورد مطالعه در سال ۱۴۰۰ برحسب میلیون مترمکعب
Table 1. Amount of water requirement of the studied area in the year 2021 in terms of million cubic meters

ماه Month	نیاز شرب، بهداشت و صنعت Needs of Drinking health and industry	نیاز کشاورزی Agricultural needs	کل نیاز آبی منطقه Total water needs of the region
فروردین April	0.87	15.41	16.28
اردیبهشت May	0.9	24	24.9
خرداد June	0.98	32.65	33.64
تیر July	1.14	35.67	36.81
مرداد August	1.18	33.43	34.6
شهریور September	1.11	23.01	24.12
مهر October	0.92	10.49	11.41
آبان November	0.79	1.19	1.98
آذر December	0.77	0.35	1.12
دی January	0.78	0.42	1.2
بهمن February	0.7	0.98	1.69
اسفند March	0.74	4.43	5.17

ارزیابی نتایج مدل

جهت ارزیابی نتایج به‌دست آمده از مدل از ۴ شاخص آماری میانگین خطا (ME)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، ریشه مربع میانگین خطا (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) که روابط آن‌ها در روابط ۳ الی ۶ آمده است، استفاده شد:

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(h_o - h_c)_i \quad (۳)$$

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|(h_o - h_c)_i| \quad (۴)$$

$$NRMSE = \left(\frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(h_o - h_c)_i^{\,2}}\right]\right)/\overline{h_o} \quad (۵)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{k=0}^{n}(h_{io} - \overline{h_{oi}})(h_{ic} - \overline{h_{ci}})\right)^2}{\sqrt{\sum_{k=i}^{n}(h_{io} - \overline{h_{oi}})^2}\sqrt{\sum_{k=i}^{n}(h_{ic} - \overline{h_{ic}})^2}} \quad (۶)$$

در این روابط n تعداد پیزومترها، h_o و h_c به‌ترتیب سطح تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی می‌باشند.

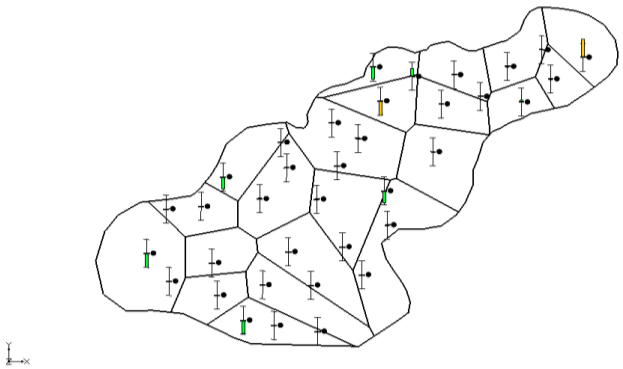
نتایج و بحث

در این تحقیق در مرحله اول شبیه‌سازی آبخوان دشت دامغان با استفاده مدل MODFLOW در شرایط پایدار و غیرپایدار انجام شد. بدین‌منظور پارامترهای سطح تراز آب زیرزمینی، چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های مشاهداتی، سنگ کف، رقوم ارتفاعی زمین، هدایت هیدرولیکی، مقدار تغذیه و .. به مدل معرفی گردید. برای حالت پایدار شش‌ماهه اول (مهر تا اسفند) سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴ در نظر گرفته شد. در این دوره در شرایط پایدار ضرایب هیدرولیکی واسنجی گردید. شکل ۴ و جدول ۲ مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان پس از شبیه‌سازی در حالت پایدار را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل ۴ نشان داده‌شده است، سطح آب پیش‌بینی‌شده در پیزومترهای منطقه مورد مطالعه برای حالت پایدار در بیشتر پیزومترها تقریبا برابر با سطح آب اندازه‌گیری شده می‌باشد، و به جز دو پیزومتر در قسمت شمال شرق و شمال دشت که به رنگ زرد می‌باشند، بقیه پیزومترها در محدوده مجاز (در این مطالعه کمتر از ۰/۵ متر) بودند و به رنگ سبز می‌باشند. مقدار متوسط پارامتر ضریب هیدرولیکی دشت برابر با معادل ۲/۷ متر بر روز در کل آبخوان می‌باشد، همچنین مقدار متوسط ضریب ذخیره دشت بعد از واسنجی مدل در شرایط پایدار دارای میانگینی معادل ۰/۰۰۰۱۸۴ در کل آبخوان بدست آمد. مقدار متوسط پارامترهای میانگین خطا (ME)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه مربع میانگین خطا (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) به‌ترتیب ۰/۲۷ متر، ۰/۳۳ متر، ۱/۴۱ متر و ۰/۹۹ به‌دست آمد.

برای واسنجی مدل در حالت غیرپایدار از اطلاعات دوره آماری ۵ ساله (از سال ۱۳۹۵ تا ابتدای سال ۱۴۰۰) استفاده گردید و ضریب ذخیره آبخوان واسنجی گردید. نتایج مدل‌سازی در مرحله واسنجی نشان داد، مقدار ضریب ذخیره بین ۲ تا ۹ درصد متغیر است. مقدار متوسط پارامترهای میانگین خطا (ME)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه مربع میانگین خطا (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) به‌ترتیب ۱/۶۵ متر، ۱/۹۸ متر، ۳/۶۵ متر و ۰/۹۶ به‌دست آمد که بیانگر دقت نسبتاً خوب مدل در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌باشد. شکل ۵ هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی به‌عنوان نمونه در دو پیزومتر مهماندوست و جنوب شرقی قادر آباد برای حالت ناپایدار نشان داده‌شده است. همان‌طوریکه که در این دو پیزمتر به‌خوبی نشان داده‌شده است، نوسانات سطح آب در ۵ سال به‌خوبی توسط مدل شبیه‌سازی گردیده است که بیانگر دقت نسبتا خوب مدل در برآورد سطح آب در حالت ناپایدار می‌باشد.

همچنین جهت صحت سنجی مدل، از داده آب زیرزمینی سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مدل با داشتن پارامترهای آماری میانگین خطا، میانگین قدرمطلق خطا، ریشه مربع میانگین خطا و ضریب تبیین به‌ترتیب ۰/۳۶ متر، ۰/۸۴ متر، ۱/۵۲ متر و ۰/۹۷ به‌دست آمد، و این امر نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده دارای دقت خوب در برآورد سطح آب زیرزمینی داشته است. مقایسه نتایج مدل عددی MODFLOW در این تحقیق با نتایج سایر محققین مانند عدالت و همکاران، کریمیان وهمکاران و قبادی علمداری و همکاران نشان می‌دهد که مدل مذکور دارای دقت قابل‌قبول جهت شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی می‌باشد (Karimian et al., 2022؛ Edalat et al., 2022؛ Ghobadi Alamdari et al., 2019).

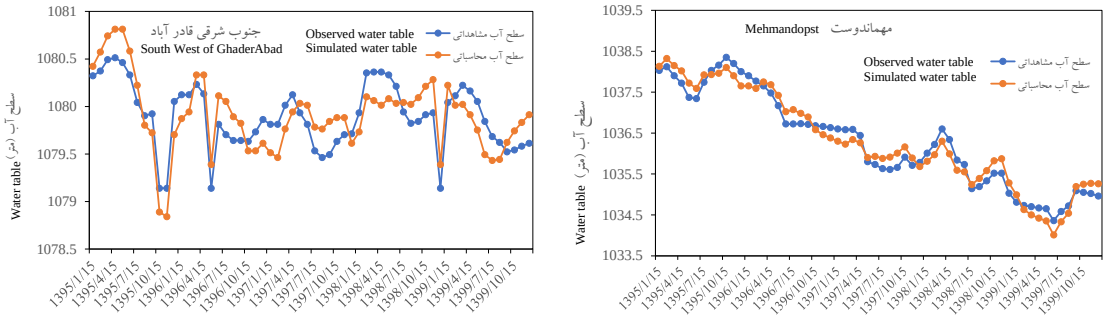
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]



شکل ۴- وضعیت سطح آب شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در پیزومترهای منطقه مورد مطالعه برای حالت پایدار
Figure 4. Simulated and measured water level status in piezometers of the study area for steady state

جدول ۲- مشخصات هیدرودینامیکی آبخوان پس از شبیه‌سازی در حالت پایدار
Table 2. Hydrodynamic characteristics of the aquifer after simulation in steady state

مشخصات هیدرولیکی Hydraulic specifications	توضیحاتDescription
نوع آبخوان Aquifer type	آبرفتی آزاد. Free Aquifer
ضریب هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity coefficient (k)	دارای میانگینی معادل ۲/۷ متر بر روز در کل آبخوان می‌باشد. It has an average of 2.7 meters per day in the whole aquifer.
ضریب تغذیه Feeding coefficient	دارای میانگینی معادل ۰/۰۰۰۱۸۴ در کل آبخوان می‌باشد. It has an average of 0.000184 in the whole aquifer.
ضریب انتقال Transmission coefficient (T)	بر اساس لوگ های حفاری موجود در مناطق مختلف آبخوان بین ۴۰ تا ۱۲۰۰متر مربع در روز متغییر است. According to the existing drilling logs in different areas of the aquifer, it varies between 40 and 1200 square meters per day.



شکل ۵- مقایسه تغییرات سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در دو پیزومتر مهماندوست و جنوب شرقی قادر آباد برای حالت ناپایدار
Figure 5. Comparison of observed and calculated water level changes in two piezometers in Mehmandoost and southeast of Qadir Abad for unstady state

همان طوریکه در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده‌شده، دشت موردمطالعه دارای افت سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط ۰/۴۹ متر می‌باشد، که این امر در اثر کسری مخزن آبخوان برابر با ۳۱/۹ میلیون مترمکعب می‌باشد. با ادامه روند فعلی در اثر برداشت بی‌رویه انجام‌گرفته شده از آبخوان، شاهد فرونشست زمین خواهیم بود. هرچند در برخی از مناطق دشت فرونشست اتفاق افتاده است که برای نمونه در شکل ۶ فرونشست اتفاق افتاده به‌خوبی قابل مشاهده است که اگر به‌درستی مدیریت انجام نگردد، در آینده نه‌چندان دور شاهد اثرات مخرب فرونشست شامل شکست و بیرون‌زدگی لوله‌های جداره چاه، کاهش برگشت‌ناپذیر تمام یا بخشی از مخازن آب زیرزمینی، تخریب شریان‌های حیاتی زیرساخت‌ها و سازه‌های مهم گردد.

بعد از انجام مدل‌سازی با استفاده از مدل MODFLOW در این مرحله جهت مدیریت و کنترل سطح آب زیرزمینی سناریوهای مختلفی مانند تغییر الگوی کشت و همچنین تغییر راندمان آبیاری محصولات مختلف بر اساس جدول ۳ در نظر گرفته شد. بعد از انجام محاسبات لازم کاهش آب موردنیاز به‌صورت کاهش برداشت آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری به مدل MODFLOW معرفی گردید و اقدام به شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی دشت دامغان گردید.

بدین‌منظور ابتدا وضعیت موجود الگوی کشت منطقه مورد مطالعه با جمع‌آوری داده‌ها از جهاد کشاورزی شهرستان مورد بررسی قرار گرفت. در این منطقه کشت درختان مختلفی ازجمله پسته، درختان دانه‌دار و هسته‌دار (مانند گیلاس، سیب، زردآلو، بادام، زیتون و ...)، نباتات علوفه‌ای، نباتات جالیز، حبوبات، زیره و زعفران رایج می‌باشد. شکل ۷ درصد الگوی کشت منطقه را نشان می‌دهد. در منطقه موردمطالعه بیشترین سهم الگوی کشت مربوط به درختان پسته می‌باشد (۶۵/۸ درصد) می‌باشد،

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

و بعد از آن گندم و جو با داشتن ۲۲/۷ درصد جایگاه دوم قرار دارند.

با توجه به اینکه در این مطالعه تابع هدف در برگیرنده دو تابع Z1 و Z2 می‌باشند که Z1 برابر با کمبود نسبی آب و Z2 متوسط سالیانه تغییرات تراز آب زیرزمینی است، با استفاده از داده‌های محاسباتی برای ماه‌های مختلف و همچنین سناریوهای در نظر گرفته شده، از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه NSGAII برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شد و جهت اعمال محدودیت‌ها در الگوریتم بهینه‌سازی، توابع جریمه فازی (Cheng & Li,1998) اعمال گردید. بدین‌منظور با درنظر گرفتن کاهش برداشت آب زیرزمینی و اجرای مدل MODFLOW و همچنین انجام محاسبات لازم مقادیر دو تابع هدف Z1 و Z2 محاسبه گردید. بدین‌منظور بعد از اجرای سناریوهای مختلف و آماده‌سازی داده‌های دو تابع Z1 و Z2، داده‌ها وارد محیط متلب برای اجرای کد NSGAII گردید. برای اجرای کد مذکور لازم است تنظیماتی مانند معرفی نوع تابع و احتمال جهش، نوع تابع و احتمال تزویج، اندازه جمعیت و حداکثر تعداد تولید نسل صورت گیرد. در حقیقت عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II وابسته به معرفی این مقادیر است. بنابراین در مرحله اول با انجام تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای فوق، همگرایی مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از اجراهای مختلف کد مذکور، نتایج به‌دست آمده نشان داد بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که تابع Uniform با احتمال ۰/۰۱ برای عملگر جهش انتخاب گردد. همچنین تابع Intermediate با احتمال ۱ برای عملگر تزویج و حداکثر تولید نسل برابر با ۲۸۰۰۰ می‌باشد.

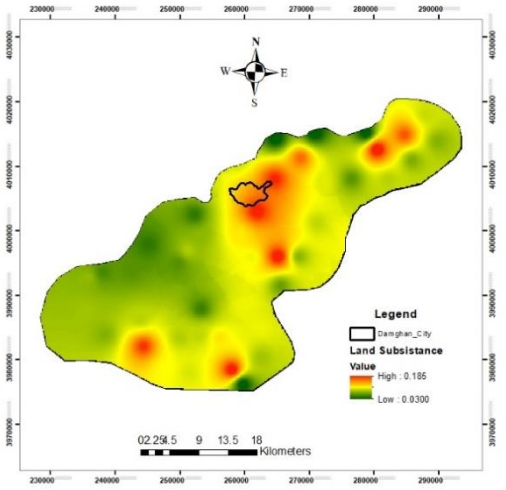
نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد برای اینکه در کل دشت اگر بخواهیم کاهش سطح آب زیرزمینی به صفر برسد، لازم است کمبودی برابر با ۳۲/۵ درصد جهت تأمین آب محصولات اعمال نمود تا بتوان سطح آب زیرزمینی را کنترل نمود.

در گام بعدی با توجه به نتایج به‌دست آمده از الگوریتم NSGAII برای جبران کاهش کمبود ۳۲/۵ درصدی محصولات، سناریوهای مختلفی جهت کاهش مصرف آب محصولات کشت‌شده پرداخته شد. بدین‌منظور با توجه به اینکه می‌توان از تغییر الگوی کشت پیشنهادی و افزایش راندمان سیستم آبیاری جهت کاهش مصرف آب استفاده کرد تا بتوان بر میزان برداشت آب زیرزمینی تاثیرگذار باشد، لذا دو پارامتر مذکور به‌عنوان سناریوهای پیشنهادی در نظر گرفته شد. با بازدید میدانی انجام‌شده در منطقه طرح و همچنین اطلاعات کسب شده از جهاد کشاورزی دامغان، در این منطقه سیستم رایج آبیاری ترکیبی از آبیاری سنتی (غرقابی) و سیستم آبیاری نوین (قطره‌ای، تیپ، و کم‌فشار) می‌باشد. لذا با تغییر نوع سیستم آبیاری و در نتیجه افزایش راندمان آبیاری می‌توان در مصرف آب صرفه‌جویی کرد و تا حد ممکن از برداشت بی‌رویه مخزن کاست و در نتیجه از کاهش سطح آب زیرزمینی جلوگیری نمود. نیاز آبی گیاهان متاثر از عواملی همچون بارش، تبخیر، درجه حرارت و ضریب استفاده از آب توسط گیاه می‌باشد. نیاز خالص آبی محصولات زراعی و باغی در واحد هیدرولوژیکی دشت دامغان به تفکیک از جهاد کشاورزی استان سمنان تهیه و با اعمال راندمان آبیاری متناسب با نوع سیستم آبیاری، نیاز آبی محصولات ناخالص تعیین گردید. با تلفیق تغییر الگوی کشت و تغیر نوع سیستم آبیاری در این مطالعه ۸ سناریو به شرح جدول ۳ در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن سناریوی تغییر الگوی کشت، فرض بر ثابت بودن سطح کشت بوده است. به‌عبارتی، برای مثال در سناریوی یک پیشنهاد گردید کاشت نباتات علوفه‌ای از ۱۰۰ درصد به ۸۰ درصد کاهش داده شود (مساحت فعلی ۱۰۴۵ هکتار)، و سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی شود (مساحت فعلی ۴۳ هکتار)، به میزان ۲۰ درصد افزایش داده شود این بدان معنی است که وقتی سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای به‌میزان همان ۲۰ درصد (۲۰۹ هکتار)کاهش داده شود، همین مساحت به کشت نباتات علوفه‌ای اضافه گردد (مساحت ۲۵۲ هکتار).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

الف



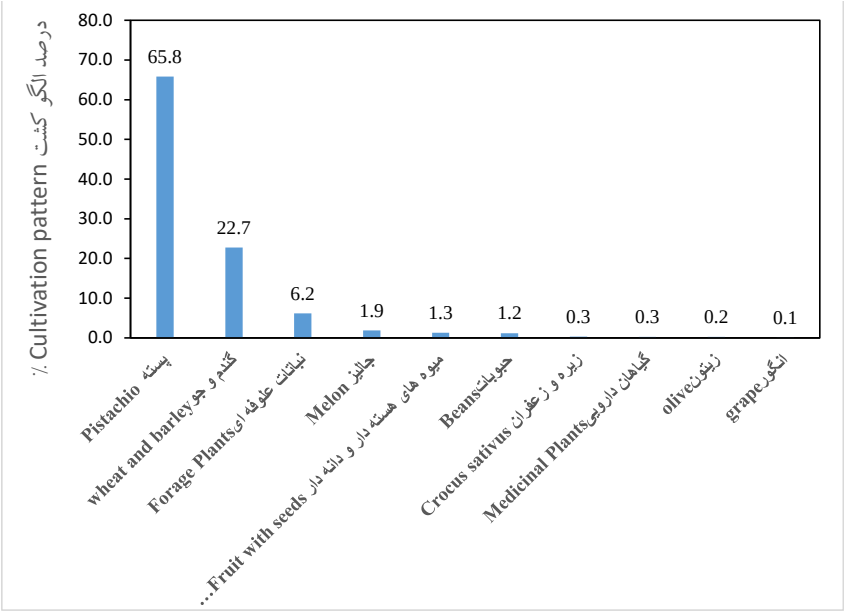
ب



ج



شکل ۶- (الف) فرونشست اتفاق افتاده در محدوده دشت دامغان، (ب) ترک در سطح زمین، و (ج) فرونشست اطراف پیزومتر مشاهداتی
Figure 6. (a) Subsidence occurred in Damghan plain, (b) cracks on the ground surface, and (c) subsidence around observational piezometer.



شکل ۷- الگوی کشت منطقه مورد مطالعه
Figure 7. Cultivation pattern of the studied area

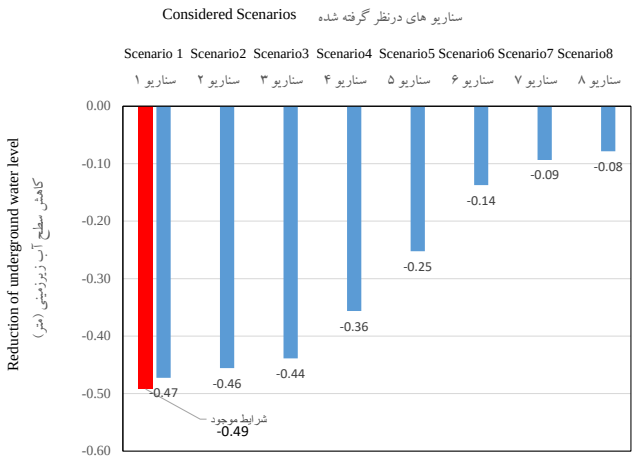
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

جدول ۳- سناریوهای در نظر گرفته شده جهت مدیریت آبخوان

Table 3. Considered scenarios for aquifer management

سناریو Scenario	توضیحات Description
سناریو ۱ Scenario 1	تغییر الگوی کشت (کاهش نباتات علوفه‌ای از ۱۰۰ به ۸۰ درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به‌میزان ۲۰ درصد مساحت زیر کشت نباتات علوفه‌ای) Changing the cultivation pattern (reducing forage plants from 100 to 80% and increasing the area under cultivation of saffron, cumin and medicinal plants by 20% of the area under cultivation of forage plants)
سناریو ۲ Scenario 2	تغییر الگوی کشت (کاهش نباتات علوفه‌ای از ۱۰۰ به ۶۰ درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به‌میزان ۴۰ درصد مساحت زیر کشت نباتات علوفه‌ای) Changing the cultivation pattern (reducing forage plants from 100 to 60% and increasing the area under cultivation of saffron, cumin and medicinal plants by 40% of the area under cultivation of forage plants)
سناریو ۳ Scenario 3	تغییر الگوی کشت (کاهش نباتات علوفه‌ای از ۱۰۰ به ۴۰ درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به‌میزان ۶۰ درصد مساحت زیر کشت نباتات علوفه‌ای) Changing the cultivation pattern (reducing forage plants from 100 to 40% and increasing the area under cultivation of saffron, cumin and medicinal plants by 60% of the area under cultivation of forage plants)
سناریو ۴ Scenario 4	تغییر راندمان آبیاری باغات پسته از ۷۰ به ۸۰ درصد بدون تغییر الگوی کشت Changing the irrigation efficiency of pistachio orchards from 70 to 80% without changing the cultivation pattern
سناریو ۵ Scenario 5	تغییر راندمان آبیاری باغات پسته از ۷۰ به ۹۰ درصد بدون تغییر الگوی کشت Changing the irrigation efficiency of pistachio orchards from 70 to 90% without changing the cultivation pattern
سناریو ۶ Scenario 6	تغییر راندمان آبیاری کل محصولات دشت به ۹۰ درصد بدون تغییر الگوی کشت و راندمان آبیاری ۹۰ درصد کل محصولات Changing the irrigation efficiency of all plain crops to 90% without changing the cultivation pattern and irrigation efficiency of 90% of all crops
سناریو ۷ Scenario 7	تغییر الگوی کشت (کاهش سطح زیر کشت گندم و جو از ۱۰۰ به ۸۰ درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به‌میزان ۲۰ درصد مساحت زیر سطح کشت گندم و جو) و راندمان آبیاری ۹۰ درصد کل محصولات Changing the cultivation pattern (reducing the area under cultivation of wheat and barley from 100 to 80% and increasing the area under cultivation of saffron, cumin and medicinal plants by 20% of the area under cultivation of wheat and barley) and the irrigation efficiency of 90% of all crops
سناریو ۸ Scenario 8	تغییر الگوی کشت (کاهش سطح زیر کشت گندم و جو از ۱۰۰ به ۸۰ درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به میزان ۲۰ درصد مساحت زیر سطح زیر کشت گندم و جو) و همچنین کاهش سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای از ۱۰۰ به صفر درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به میزان ۱۰۰ درصد مساحت سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای) و راندمان آبیاری ۹۰ درصد برای کل محصولات Changing the cultivation pattern (decreasing the cultivated area of wheat and barley from 100 to 80 percent and increasing the cultivated area of saffron, cumin and medicinal plants by 20 percent of the area under the cultivated area of wheat and barley) and also reducing the cultivated area of fodder plants from 100 to zero percent and increasing the area under cultivation of saffron and cumin and medicinal plants to the extent of 100 percent of the area under cultivation of fodder plants) and irrigation efficiency of 90 percent for all crops

با توجه به سناریوهای پیشنهادشده مذکور حجم آب مصرفی آب برای هرکدام از آن‌ها محاسبه گردید. نتایج به‌دست آمده تحت سناریوهای مختلف در شکل ۸ آمده است. همان‌طوریکه در این شکل نشان داده شده است، استفاده از سناریوی ۱ می‌تواند حجم آب مصرفی را ۱/۱۸ میلیون مترمکعب کاهش دهد و همچنین سطح آب زیرزمینی را از ۴۹ به ۴۷ سانتی‌متر کاهش دهد. همچنین سناریو ۸ می‌تواند حجم آب مصرفی را ۲۷/۸ میلیون مترمکعب کاهش دهد، که این امر موجب خواهد شد که سطح آب از ۴۹ به ۸ سانتی‌متر کاهش یابد. به‌عبارتی استفاده از هریک از سناریوها منجر به کاهش برداشت از سفره آب زیرزمینی و افزایش سطح آب در دشت مورد مطالعه خواهد شد. نتایج این تحقیق نشان داد یکی از راهکارهای اصلی در منطقه مورد مطالعه، اصلاح الگوی کشت می‌باشد. این نتیجه یا به‌عباراتی این راهکار ارائه شده در تطابق با نتایج سایر محققین مانند اکبری و همکاران، حیدری و همکاران و شمسایی و فرقانی می‌باشد که اظهار داشتند، جهت جلوگیری از کاهش تراز سطح آب زیرزمینی لازم است اصلاح الگوی کشت انجام گردد (Akbari et al., 2021؛ Heydari et al., 2016؛ Shamsai & Forghani, 2011).



شکل ۸- پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف

Figure 8. Prediction of rgroundwater level considering different scenarios

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق با استفاده از مدل عددی MODFLOW به شبیه‌سازی آبخوان دشت دامغان پرداخته‌شد و مدل مورداستفاده در حالت پایدار و غیرپایدار مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی جریان آبخوان نشان داد که اختلاف بین سطح آب شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهداتی در پیزومترهای موجود در منطقه مورد مطالعه در اغلب نقاط در بازه قابل‌قبول قرار دارد. با توجه به برداشت بی‌رویه از آبخوان دشت مورد مطالعه بازدیدهای میدانی نشان می‌دهد که خطر فرونشست زمین در این دشت بسیار جدی بوده و اثرات جبران‌ناپذیری در آینده نه‌چندان دور اگر مدیریت آن به‌درستی انجام نگردد، اتفاق خواهد افتاد. در مجموع با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز چندهدفه NSGAII نتایج به‌دست آمده نشان داد که بهترین گزینه برای دشت مورد مطالعه آن است که ضمن اصلاح الگوی کشت، راندمان سیستم آبیاری با تغییر نوع سیستم آبیاری ارتقا یابد تا بتوان کاهش سطح آب زیرزمینی را کنترل نمود. نتایج حاصل نشان داد که در نتیجه اعمال الگوی کشت بهینه پیشنهادی (سناریوی ۸) یعنی تغییر الگوی کشت (کاهش سطح زیر کشت گندم و جو از ۱۰۰ به ۸۰ درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به‌میزان ۲۰ درصد مساحت زیر سطح زیر کشت گندم و جو) و همچنین کاهش سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای از ۱۰۰ به صفر درصد و افزایش سطح زیر کشت زعفران و زیره و گیاهان دارویی به‌میزان ۱۰۰ درصد مساحت سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای) و راندمان آبیاری ۹۰ درصد برای کل محصولات، می‌توان تراز آب زیرزمینی در سراسر آبخوان را نسبت به شرایط موجود افزایش داد و از مقدار ۰/۴۹- متر در شرایط موجود به ۰/۰۸- متر در سال در آینده تغییر داد. اثر الگوی کشت بهینه بر وضعیت آبخوان در نواحی شمال- مرکز و جنوب غرب به‌دلیل وجود مناطق کشاورزی نسبت به سایر مناطق محسوس و مؤثرتر می‌باشد. همچنین پیشنهاد می‌گردد جهت جبران کسری مخزن (۳۹/۱ میلیون مترمکعب در سال) علاوه بر استفاده از راهکارهای مدیریتی مانند تغییر الگوی کشت و افزایش راندمان آبیاری، کنترل آب‌های سطحی و تزریق آن به آب زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد تا در آن‌صورت بتوان کاهش (۵/۱ میلیون مترمکعب در سال) در دشت مورد مطالعه را به‌طور کامل مهار کرد و تأمین نیاز آبی دشت را به‌صورت ۱۰۰ درصد تامین نمود. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه بارش‌ها با شدت زیاد و مدت کم صورت می‌گیرد، و غالباً به‌صورت رگباری می‌باشد، لذا بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که قسمت زیادی از بارش‌ها به‌صورت رواناب در سطح حوضه جاری‌شده و به‌دلیل شیب زیاد و پوشش کم گیاهی فرصت نفوذ بسیار کم بوده و از دشت مورد مطالعه خارج می‌گردد و وارد کویر حاج علی قلی دامغان می‌گردد. لذا از لحاظ عملی و کاربردی لازم است متولیان امر، اقدام به انجام عملیات آبخیزداری و آبخوان‌داری (مانند احداث تورکینست، بندهای تأخیری، سنگ و ملات، گابیون و ...) نمایند تا ضمن کنترل سیلاب حادث شده، فرصت تدریجی جهت تزریق و بارور شدن سفره آب زیرزمینی دهند. نتایج سایر محققین مانند قمرنیا و همکاران نیز نشان می‌دهد سناریوهای مدیریتی نظیر تغذیه مصنوعی، کاهش برداشت‌ها، تغییر الگوی کشت در آبخوان دشت بیجار-دیواندره باید مدنظر قرار گیرد (Ghamarnia et al., 2022).

منابع

Akbari, F., Shourian, M., & Moridi, A. (2021). Planning the Optimum Crop Pattern Considering Surface and Groundwater Resources Interaction by Coupling SWAT, MODFLOW and PSO. *Iran-Water Resources Research*, *17*(1), 136-150 (In Persian).

Akbarzadeh, F., Hasanpour, H., & Emamgholizadeh, S. (2016). Groundwater level prediction of Shahrood Plain using RBF neural networks. *Journal of watershed management research*, *7*(13), 104-118 (In Persian).

Alizadeh, A., Majidi, N., Ghorbani, M., & Mohammadian, F. (2012). Cropping pattern optimization with target balancing of ground water resources: case study of Mashhad-Chenaran plain, Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drinage*, (1), 55-68 (In Persian).

Atala, J., & Mohammad, Z. (2009). Planning of underground water resources in the conditions of "groundwater mining" case study: Faiz Abad plain. The first international conference on water resources with a regional approach, Shahrood (In Persian).

Bekele, E. G., & Nicklow, J. W. (2007). Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II. *Journal of Hydrology*, *341*(3-4), 165-176.

Cheng, F. Y., & Li, D. (1998). Genetic algorithm development for multiobjective optimization of structures. *AIAA journal*, *36*(6), 1105-1112.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, *6*(2), 182-197.

Ebrahimi, R. S., Eslamian, S., & Zareian, M. J. (2023). Groundwater level prediction based on GMS and SVR models under climate change conditions: Case Study—Talesh Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, *151*(1-2), 433-447 (In Persian).

Edalat, A., Rajabi, A., & Khodaparast, M. (2022). Numerical modeling of groundwater flow in Ali Abad Plain of Qom to predict fluctuations of the water table and hydraulic conductivity. *Iranian Journal of Engineering Geology*, *15*(2), 49-67 (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

Falsafian, A., & Panahi, A. (2021). Optimization of the crop cultivation in the Shabestar plain underwater constraint. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, *10*(4), 35-48 (In Persian).

Farshina, A. A. (1998). *Estimating the water requirement of major agricultural and garden plants in the country (crop plants) (volume 1 and 2)*. Agricultural Education affiliated to the Deputy Ministry of Agricultural Education and Promotion (Agricultural Education affiliated to the Office of Educational Technology Services of the Ministry of Agricultural Jihad) (In Persian).

Ghamarnia, H., Enayati, S., & Amini, A. (2022). Numerical Simulation of Bijar-Divandere Plain Aquifer Using MODFLOW Code and Investigation in The Effects of Drought on Its Quantitative Changes. *Environment and Water Engineering*, *8*(1), 15-30 (In Persian).

Ghobadi Alamdari, S., Asghari Moghaddam, A., & Shahsavari, A. (2019). The Feasibility of the Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources in Dehloran Plain by Using the MODFLOW Model. *JWSS-Isfahan University of Technology*, *23*(4), 45-57 (In Persian).

Ghodrati, M., & Sabany, A. (2012). Mathematical models of groundwater. Tehran. In: Simaye Danesh Publication (In Persian).

Ghorbani Sarhangi, Z., Shahnazari, A., Gholami Sefidkohi, M., & Jannat Rostami, S. (2018). Simulation of Groundwater from Qaemshahr- Juibar Catchment under Performance of Alborz Irrigation and Drainage Network. *Journal of watershed management research*, *9*(17), 246-257 (In Persian).

Gorelick, S. M., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water resources research*, *51*(5), 3031-3051 (In Persian).

Heydari, F., Saghafian, B., & Delavar, M. (2016). Development of conjunctive surface and ground water use model with emphasis on the quality and quantity of water resources. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *47*(4), 687-699 (In Persian).

Hosseini, M., & Roshani, A. (2020). Modeling of Groundwater Fluctuations Based on Artificial Intelligence Methods (Case study: Zawah-Torbat Heidarieh plain). *Journal of watershed management research*, *11*(21), 223-235 (In Persian).

Jalili, A. A., Najarchi, M., Shabanlou, S., & Jafarinia, R. (2023). Multi-objective Optimization of water resources in real time based on integration of NSGA-II and support vector machines. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(6), 16464-16475.

Kanooni, A. (2013). *Development of integrated model of optimal water allocation and distribution in irrigation networks* Ph. D. dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran (In Persian).

Karimian, P., Shourian, M., & Kardan Moghaddam, H. (2022). Assessment of the Groundwater Resources Balancing Using Sustainability Indicators. *Water and Irrigation Management*, *12*(2), 213-229 (In Persian).

Khare, D., & Jat, M. (2006). Assessment of counjunctive use planning options: A case study of Sapon irrigation command area of Indonesia. *Journal of Hydrology*, *328*(3-4), 764-777.

Khashei-siuki, A., Ghahraman, B., & Kouchakzadeh, M. (2014). Determination of Optimal Crop Pattern to Prevent the Water Table Drawdown Using PSO Algorithm. *Iranian Water Researches Journal*, *8*(1), 137-146 (In Persian).

Khashei Siuki, A., Ghahraman, B., & Kouchakzadeh, M. (2013). Application of Agricultur Water Allocation and Management by PSO Optimization Technic (Case study: Nayshabur Plaine). *Water and Soil*, *27*(2), 292-303 (In Persian).

Moghadam, S. H., Ashofteh, P.-S., & Loáiciga, H. A. (2022). Optimal water allocation of surface and ground water resources under climate change with WEAP and IWOA modeling. *Water resources management*, *36*(9), 3181-3205.

Mohammady, M., Pourghasemi, H., & Mojtaba, M. (2021). Investigation of Subsidence Susceptibility in the Semnan Plain Using Entropy Model. *Journal of Watershed Management Research*, *12*(23), 75-85 (In Persian).

Peralta, R. C., Forghani, A., & Fayad, H. (2014). Multiobjective genetic algorithm conjunctive use optimization for production, cost, and energy with dynamic return flow. *Journal of Hydrology*, *511*, 776-785.

Piri, H., Mobaraki, M., & Siasar, S. (2023). Temporal and spatial modeling of groundwater Level in Bushehr Plain using artificial Intelligence and Geostatistics. *Journal of Watershed Management Research*, *13*(26), 58-68 (In Persian).

Razaei Tavabe, K., Heidari, A., & Sayahpour, M. (2022). Investigation of groundwater level and simulation of forecast scenarios in Parishan catchment. *Quantitative Geomorphological Research*, *11*(2), 210-228 (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]

Reed, P., & Devireddy, V. (2004). Groundwater monitoring design: a case study combining epsilon dominance archiving and automatic parameterization for the nsga-ii. In *Applications of multi-objective evolutionary algorithms* (pp. 79-100). World Scientific.

Rezapour Tabari, M. M., & Soltani, J. (2013). Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models. *Water Resource Management*, *27*, 37-53.

Sabale, R., & Jose, M. K. (2022). Conjunctive Use Modeling Using SWAT and GMS for Sustainable Irrigation in Khatav, India. In *Recent Trends in Construction Technology and Management: Select Proceedings of ACTM 2021* (pp. 373-386). Springer.

Safavi, H. R., Darzi, F., & Mariño, M. A. (2010). Simulation-Optimization Modeling of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater. *Water resources management*, *24*(10), 1965-1988.

Sethi, L. N., Panda, S. N., & Nayak, M. K. (2006). Optimal crop planning and water resources allocation in a coastal groundwater basin, Orissa, India. *Agricultural Water Management*, *83*(3), 209-220 (In Persian).

Shamsai, A., & Forghani, A. (2011). Conjunctive use of surface and ground water resources in arid regions. *Iran-Water Resources Research*, *7*(2), 26-36 (In Persian).

Tabari, M. M. R., & Abyar, M. (2021). Development a novel integrated distributed multi-objective simulation-optimization model for coastal aquifers management using NSGA-II and GMS models. *Water resources management*, 1-28.

Tourani, M., Agh-Atabai, M., & Roostaei, M. (2018). Study of subsidence in Gorgan using InSAR method. *Geographical Planning of Space*, *8*(27), 117-128 (In Persian).

Waltham, A. (1989). *Ground subsidence*. Blackie & Son Limited. Michigan University, USA. 202 P.

Zamani, M. G., Moridi, A., & Yazdi, J. (2022). Groundwater management in arid and semi-arid regions. *Arabian Journal of Geosciences*, *15*(4), 362 (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.61186/jwmr.14.28.134]