

"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 Ashuri¹, Seyed Sajjad Mehdizadeh², Homan Haji Kandi³, Saeed Jamali³ and Samad Emamgholizadeh⁴

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 NSGAI 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

"مقاله پژوهشی"

مدل سازی آب زیرزمینی دشت دامغان و بهینه سازی الگوی کشت به منظور جلوگیری از افت تراز آب زیرزمینی

رضا آشوری^۱، سید سجاده مهدی زاده^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 مسؤل: 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: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸

صفحه: ۱۳۴ تا ۱۴۷

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: بهره برداری بی رویه از آب های زیرزمینی در دشت دامغان موجب شده است که ضمن کاهش تراز سطح آب زیرزمینی و از بین رفتن بخشی از آبخوان و کاهش آبدی ویژه سفره آب زیرزمینی مشکلات عدیده ای مانند فرونشست زمین در منطقه ایجاد گردد. لذا جهت کنترل برداشت از سفره آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش افت سطح آب زیرزمینی مدل سازی ریاضی دشت دامغان جهت مدیریت بهینه بهره برداری و ارائه الگوی کشت بهینه به منظور صرفه جویی در مصرف آب با محوریت کنترل سطح آب زیرزمینی و محدود نمودن فرونشست زمین انجام گرفت.

مواد و روش ها: در این تحقیق ابتدا آبخوان دشت دامغان با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW شبیه سازی گردید. سپس با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف بهره برداری از آبخوان، با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGAII به بهینه سازی بهره برداری چندهدفه از منابع آب و مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب در بخش کشاورزی پرداخته شد. نتایج مدل بر اساس پارامترهای آماری خطا جهت پیش بینی سطح تراز آب زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته ها: نتایج این تحقیق نشان داد که مدل ریاضی MODFLOW توانسته است سطح آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه را در شرایط پایدار و غیر پایدار در مراحل واسنجی و صحت سنجی به خوبی شبیه سازی کند. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم شبیه سازی - بهینه سازی نشان داد که می توان با تغییر الگوی کشت و همچنین با تغییر نوع سیستم آبیاری از سنتی به آبیاری نوین و در نتیجه افزایش راندمان آبیاری (۹۰ درصد)، مقدار میانگین افت تراز سطح آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه را از ۰/۴۹ متر 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.

نتیجه گیری: استفاده از راهکارهای مدیریتی مانند تغییر الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری و همچنین با کنترل آب های سطحی و تزریق آن به آب زیرزمینی می توان روند کاهش سطح آب زیرزمینی را در دشت مورد مطالعه به طور کامل مهار کرد و تأمین نیاز آبی دشت را به صورت ۱۰۰ درصد تأمین نمود.

واژه های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوی کشت بهینه، بهینه سازی چندهدفه، تراز سطح آب زیرزمینی، شبیه سازی

مقدمه

پایین رفتن سطح سفره های آب زیرزمینی و بحرانی شدن وضعیت آب در دشت ها یکی از بزرگ ترین و چالشی ترین مشکلات بخش کشاورزی است. در حال حاضر قسمت اعظم مصارف آب استحصالی کشور به بخش کشاورزی اختصاص دارد. آمارهای موجود نشان می دهد که ذخایر منابع آب در اکثر مناطق کشور از جمله دشت دامغان به دلیل بهره برداری غیر بهینه در معرض خطر جدی است که قطعاً ادامه این روند پیامدهای جبران ناپذیر اقتصادی و زیست محیطی را در منطقه به جای خواهد گذاشت. لذا پمپاژ بیش از حد آب های زیرزمینی به دلیل رشد فزاینده جمعیت و صنعتی شدن شهرها، موجب افزایش نگرانی جهانی شده است و در دهه های اخیر خطرات هیدروژئولوژیکی را تشدید نموده است (Gorelick & Zheng, 2015). خطر فرونشست زمین در اثر پایین افتادن تراز سطح آب زیرزمینی در بین سال های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ هم زمان با صنعتی شدن رشد جمعیت در جهان گزارش شده است (Waltham, 1989). در ایران نیز وجود شرایط اقلیمی خشک تا نیمه خشک موجب بهره برداری بیش از حد 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

سال های (۱۹۶۹ تا ۱۹۹۹) طی ۳۰ سال سطح آب زیرزمینی حدود ۲۵ متر افت داشته که به تبع آن به طور میانگین سالیانه معادل ۱۵ سانتی متر فرونشست زمین را به همراه داشته است (Tourani et al., 2018). پدیده فرونشست زمین دارای پیچیدگی های زیادی بوده و شدت گستردگی آن در زمان و مکان های مختلف متفاوت است (Mohammady et al., 2021). علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2012) به بررسی بهینه سازی الگوی کشت با هدف تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی پرداختند. آن ها برای دستیابی به هدف فوق از روش های حل بهینه سازی برنامه ریزی خطی و غیرخطی چندهدفه آرمانی در قالب ساختارهای اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی استفاده کردند. نتایج مطالعه آن ها نشان داد با به کارگیری الگوی مشخص شده در دوره برنامه ریزی ده ساله 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 می توان 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

باید و در زمستان برخلاف شرایط کنونی، بهره برداری صورت نگیرد تا تعادل انجام شود (Atala & Mohammad, 2009). قبادی علمداری و همکاران با استفاده از مدل MODFLOW امکان سنجی استفاده از مدل تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت دهلران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد مدل مذکور توانایی شبیه سازی آبخوان دشت را داشته است و مقدار خطای میانگین، خطای میانگین مطلق و مجذور مربعات خطاهای اندازه گیری شده در پیرومترها به ترتیب $0/24$ ، $0/46$ و $0/65$ متر بوده است. همچنین آن ها نشان دادند با اعمال سناریوهای مختلف استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی می توان در آینده حجم آب زیرزمینی آبخوان را به طور سالیانه ۲ میلیون مترمکعب احیا نمود (Ghobadi Alamdari et al., 2019). قربانی سرهنگی و همکاران جهت بررسی تاثیر انتقال آب کانال های آبیاری شبکه البرز بر روی سطح ایستابی در حوزه آبخیز قائمشهر-جویبار از مدل ریاضی MODFLOW استفاده کردند. آن ها 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 آن ها نشان داد در صورت اجرای طرح می توان 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 هشنگرد را با استفاده از مدل عددی MODFLOW شبیه سازی کردند. بدین منظور سناریوهای مختلفی را جهت طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد با تلفیق سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب پذیری و مطلوبیت شاخص پایداری سیستم آب به میزان ۱۵ درصد بیش ترین 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. آن ها از داده های ۳۳ حلقه چاه پیرومتری در بازه زمانی (۲۰۰۸-۲۰۲۰) برای انجام شبیه سازی استفاده نمودند. نتایج حاصل از محاسبه بیان آبی منطقه مورد مطالعه نشان می دهد که در این دشت به میزان 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 et al., 2022). عدالت و همکاران مدل سازی عددی آب زیرزمینی دشت علی آباد قم را با استفاده از مدل MODFLOW بین سال های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ انجام دادند. با استفاده از جمع آوری اطلاعات مانند زمین شناسی، هیدرولوژیکی، و تراز سطح آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه تخمین زده شد. جهت اعتبارسنجی مدل، تغییرات سطح پیش بینی شده توسط مدل با نتایج حاصل از اندازه گیری های چاه های پیرومتریک مورد مقایسه قرار گرفت و مقدار خطای RMSE تعیین گردید. مقدار خطای مدل برابر با ۱/۴ متر به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد در ۱۳ حلقه چاه

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 بهینه سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت شبستر تحت شرایط محدودیت آب نمودند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد می توان 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. آن ها برای تخصیص بهینه آب برای سطوح زیر کشت در منطقه مورد مطالعه، از برنامه ریزی 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، می تواند علاوه بر حفظ تعادل هیدروژئولوژیکی منطقه حداقل نیازهای آبی لازم را برآورده کند (Sethi et al., 2006). خاره و جات مدل بهینه سازی اقتصادی در منطقه کشاورزی SAPON در کشور اندونزی را ارائه کردند و بهره برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از برنامه ریزی خطی و با در نظر گرفتن قیود هیدروژئولوژیکی 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 شبیه سازی-بهینه سازی بهره برداری توامان از منابع آب سطحی و زیرزمینی را در دشت نجف آباد توسعه دادند. در این مدل شبکه عصبی مصنوعی در شبیه سازی توامان آب های سطحی و زیرزمینی و الگوریتم ژنتیک به عنوان مدل بهینه استفاده کردند که هدف اصلی آن ها در مدل توسعه داده شده به حداقل رساندن کمبودها در برآورد نیاز آبیاری منطقه با در نظر گرفتن افت تجمعی سطح آب زیرزمینی به عنوان قید مساله را مورد بررسی قرار گرفت (Safavi et al., 2010). پرالتا و همکاران برای حل مساله بهینه سازی و بهره برداری توامان آب سطحی و زیرزمینی با هدف حداکثر کردن برق آبی و تامین آب و حداقل کردن هزینه های 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 بهینه سازی چندهدفه غیرخطی بوده است (Peralta et al., 2014). جودوی و همکاران با استفاده از کد نرم افزاری MODFLOW در محیط GIS امکان به تعادل رساندن آب زیرزمینی آبخوان دشت فیض آباد را بررسی کردند. نتایج نشان داد برای متوقف کردن افت سطح آب زیرزمینی باید برداشت ماهانه، ۴۰ درصد کاهش

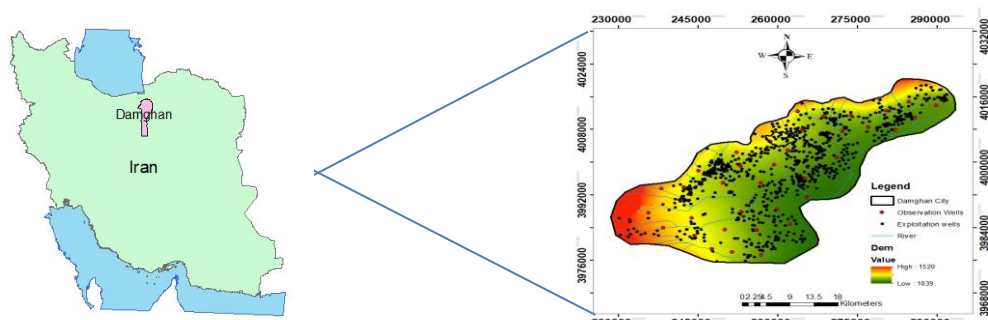
۴۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. براساس اقلیم بندی دوما رتن منطقه مورد مطالعه در منطقه گرم و خشک واقع شده است. شهرستان دامغان به لحاظ تقسیمات سیاسی کشور یکی از شهرستان های استان سمنان است که در شمال شرق این استان در دامنه جنوبی سلسله جبال البرز شرقی واقع شده است (شکل ۱). مساحت محدوده دشت آبرفتی حدود ۱۳۵۱/۲ کیلومترمربع می باشد. همچنین در شکل (۱) موقعیت چاه های بهره برداری و چاه های مشاهداتی، و تغییرات ارتفاعی دشت در این شکل نشان داده شده است. حداکثر ارتفاع حوضه آبریز دشت دامغان ۱۵۲۰ متر و حداقل ارتفاع ۱۰۳۹ متر و ارتفاع متوسط از سطح آزاد ۱۲۵۰ متر می باشد. میانگین بارش سالیانه منطقه ۱۲۷ میلی متر و میانگین دمای سالیانه ۱۶/۴ درجه سانتی گراد و متوسط تبخیر سالیانه نیز ۲۴۲۹ میلی متر می باشد. نقشه خطوط هم پتانسیل آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی دامغان مربوط به سال های ۱۳۸۵ و ۱۴۰۰ در شکل (۲) ارائه گردیده است. بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی در آبخوان در دو سال ۱۳۸۵ و ۱۴۰۰ همان طوری که در این شکل مشاهده می شود تراز سطح آب در آبخوان آبرفتی دامغان به طور 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 به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۶۵ و ۰/۳۸ متر در سال می باشد.

از ۲۶ حلقه چاه مشاهداتی، میانگین اختلاف تراز مشاهداتی و پیش بینی شده کمتر از ۰/۵ متر و حداکثر میانگین اختلاف برابر با ۲/۹۴ متر می باشد. بین داده های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و پیش بینی شده همبستگی قابل قبولی وجود داشته و مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۹۸۹ بوده است (Edalat et al., 2022).

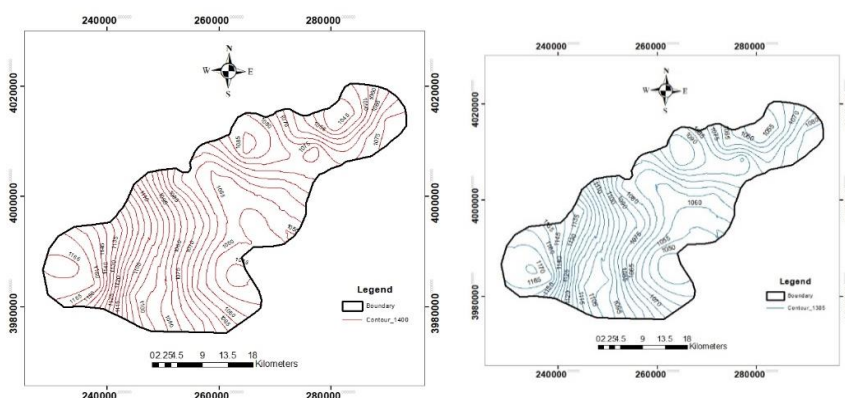
با توجه به اینکه دشت دامغان یکی از دشت های مهم استان سمنان می باشد و افت سطح آب زیرزمینی در این دشت مشهود است، در این تحقیق مدل سازی و بهینه سازی الگوی کشت در منطقه مورد مطالعه، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بررسی منابع نشان می دهد در این منطقه، تا به حال از الگوریتم ژنتیک NSGAII و تلفیق آن با مدل ریاضی MODFLOW برای بهینه سازی بهره برداری از آب زیرزمینی جهت مدیریت بهینه عرضه و تقاضای آب پرداخته نشد. لذا در این تحقیق با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف بهره برداری از آبخوان، بهینه سازی مصرف آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش ها منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه آبخوان آبرفتی شهر دامغان است. محدوده مورد مطالعه در موقعیت جغرافیایی حداثی ۵۳ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و



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 سال های ۱۳۸۵ و ۱۴۰۰
Figure 2. Isopotential map of groundwater level in Damghan alluvial aquifer in 2006 and 2021

مدل مادفلو

در این تحقیق برای انجام شبیه سازی سطح آب زیرزمینی از مدل MODFLOW استفاده گردید. این مدل اولین بار توسط مک دونالد و هاریاو (۱۹۸۸) از انجمن زمین شناسی ایالات متحده آمریکا منتشر شده و از آن زمان تاکنون نسخه های فراوانی از آن تهیه شده است که روز به روز بر قابلیت آن افزوده می شود. این کد نرم افزاری نتیجه ی سال ها تحقیقات در سازمان تحقیقات زمین شناسی آمریکا می باشد (Chiang, Kinzelbach, 1990). این مدل در داخل و خارج توسط محققین مختلفی جهت مدل سازی سفره آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (Ebrahimi et al., 2023; Moghadam et al., 2022; Sabale & Jose, 2022).

برای مدل شبیه سازی آبخوان محدوده مطالعاتی با تکیه بر حرکت سه بعدی آب زیرزمینی در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی که مطابق رابطه ۱ توصیف می شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

در رابطه ۱ ضرایب kx و ky و kz ضرایب هدایت هیدرولیکی آبخوان در راستای $h_{z,y,x}$ سطح آب، w میزان تخلیه آب یا تغذیه S_y آبدهی ویژه و t پارامتر زمان می باشد. جهت مدل سازی جریان آب زیرزمینی از آمار و اطلاعات چاه های مشاهده ای برای واسنجی پارامترهایی از قبیل ضریب هیدرولیکی آبخوان، میزان تغذیه سطحی (بارش موثر و آب برگشتی کشاورزی، صنعت شرب) و غیره استفاده می شود. همچنین در این مدل برای تعریف شرایط مرزی سفره های آب های زیرزمینی می توان 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 می شود مقادیر سطح تراز آب زیرزمینی به دو گروه ابتدا و انتهای آن خط وارد می شود و در سلول های بین دو نقطه و بر روی آن خط مقادیر دو گره به صورت خطی درونیابی می شود. همچنین میزان قابلیت انتقال سلول هایی که خط مرزی در آن ها واقع شده است باید به مدل وارد شود. در این تحقیق برای شبیه سازی شبکه سه بعدی 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 به عنوان یک شرط مرزی داخلی در مدل سازی آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. جهت واسنجی مدل مورد استفاده در شرایط پایدار از داده های تراز آب زیرزمینی در چاه های 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 (Ghodraty & Sabany, 2012).

همچنین برای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی در حالت غیر پایدار و تعیین ضریب ذخیره آبخوان، مدل واسنجی شده در حالت پایدار به عنوان مدل پایه مورد استفاده قرار گرفت.

1-Pilot points

بدین منظور از داده های سال های ۱۳۹۵-۱۳۹۹ (۵ ساله) استفاده گردید. به دلیل بزرگی منطقه مورد مطالعه، دشت دامغان به چند ناحیه (۲۱ ناحیه) به صورت چندضلعی با استفاده از روش تیسن تقسیم گردید. با توجه به اینکه تعداد نواحی دشت نسبتاً زیاد می باشد، لذا واسنجی مدل در این مرحله به روش اتوماتیک و با استفاده از کد PEST به جای روش دستی انجام گرفت. به عبارتی با معرفی نقاط پایلوت پوینت^۱ در منوی پارامترهای مدل مادفلود برای دو پارامتر ضریب ذخیره آبخوان و هدایت هیدرولیکی افقی، از آن ها به عنوان پارامترهای واسنجی استفاده گردید. بعد از انجام واسنجی مدل، از داده های سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به عنوان داده صحت سنجی مدل استفاده شد.

مدل بهینه سازی

در سال های اخیر استفاده از مدل های هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مصنوعی، مدل های فازی، و ... جهت مطالعه آب زیرزمینی مورد توجه محققین قرار گرفته است (Akbarzadeh et al., 2016; Hosseini & Roshani, 2020; Piri et al., 2023). با توجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق بهینه سازی منابع آبی جهت رسیدن به کاهش سطح آب و در نتیجه کنترل فرونشست زمین است، جهت انجام بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGAI) تکاملی نخبه گرا استفاده شد. این مدل توسط دب و همکاران معرفی گردید (Deb et al., 2002). در این روش از مفاهیم مرتب سازی نامغلوب، نخبه گرایی و عملگرهای الگوریتم ژنتیک استفاده شده و الگوریتم قدرتمندی جهت حل مسائل بهینه سازی چندهدفه ارائه می کند (Kanooni, 2013). این مدل توسط محققین مختلفی جهت بهینه سازی در مسائل مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته است (Bekele & Nicklow, 2007; Jalili et al., 2023; Reed & Deviredy, 2004; Rezapour Tabari & Soltani, 2013; Tabari & Abyar, 2021; Zamani et al., 2022). شکل کلی توابع هدف بهینه سازی به صورت رابطه ۲ می باشد:

$$Z_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{X_{1ij} + X_{2ij} - demand_{ij}}{demand_{ij}} \quad (2)$$

Minimize

$$Z_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \frac{\Delta Li(k)}{\Delta L_{max}} \left(\frac{ak}{A} \right)$$

Z_1 و Z_2 توابع هدف می باشند. Z_1 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 آن ها در طول همه دوره ها برای همه محصولات کشاورزی (بی بعد) $i=1, \dots, 12$ اندیس ماه شبیه سازی، $j=1, \dots, 10$ اندیس تعداد محصولات کشاورزی غالب در منطقه X_{1ij} میزان آب زیرزمینی برداشت شده از چاه های پمپاژ در ماه i و X_{2ij} میزان آب سطحی برداشت شده از سد دامغان در ماه i برای محصول j ($m^3/month$)، $demand_{ij}$ نیاز آبی ناخالص محصول j در ماه i ($m^3/minth$) تعریف می شود.

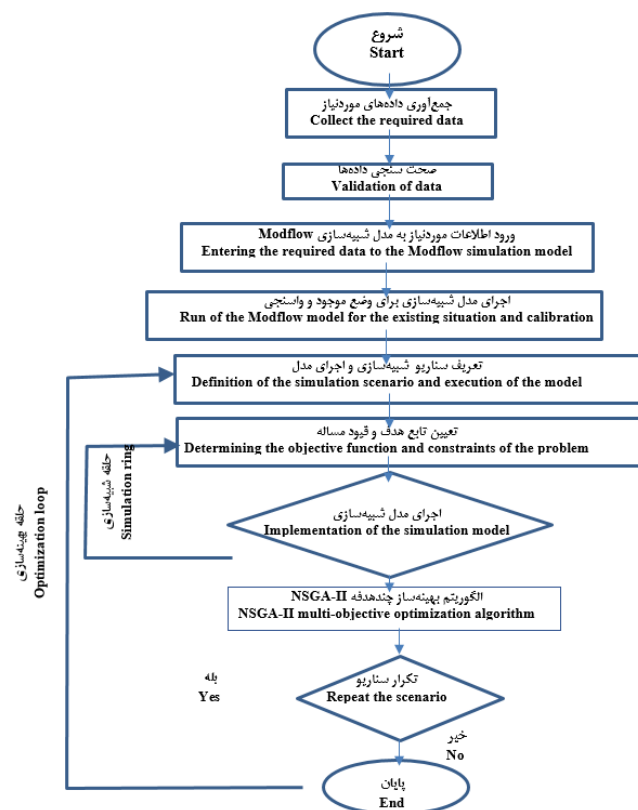
اصلی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تشکیل شده است. هسته اصلی محاسبات در مرحله اول، مدل شبیه‌سازی جریان آب زمینی و مرحله بعدی شامل مدل تخصیص بهینه منابع آب است. مدل‌سازی آب زیرزمینی که در محیط متخلخل مورد بررسی قرار می‌گیرد چون دارای خروجی‌ها و ورودی‌های متعددی است و دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد، لذا از مدل 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 داده شده است، داده‌ها بعد از جمع‌آوری صحت‌سنجی شدند، یعنی داده‌های جمع‌آوری شده، 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).

Z2 دومین تابع هدف و برابر است با متوسط سالیانه تغییرات تراز آب زیرزمینی (بی‌بعد) $K=1 \dots 40$ اندیس چاه مشاهده‌ای نماینده $\Delta Li(k)$ میزان تغییرات تراز آب زیرزمینی در ماه i و چاه مشاهده‌ای ak مساحت چندضلعی‌های تیسین 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 متأثر 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. مراحل مدل‌سازی تحقیق در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌طوری که در این شکل نشان داده شده است، فرآیند انجام کار در این تحقیق از دو مرحله



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

جدول ۱- مقادیر نیاز آبی منطقه مورد مطالعه در سال ۱۴۰۰ برحسب میلیون مترمکعب

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

هیدرولیکی دشت برابر با معادل ۲/۷ متر بر روز در کل آبخوان می باشد، 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) به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۳۳، ۰/۴۱ متر و ۰/۹۹ به دست 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 مدل سازی 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) به ترتیب ۱/۶۵ متر، ۱/۹۸ متر، ۳/۶۵ متر و ۰/۹۶ به دست آمد که بیانگر دقت نسبتاً خوب مدل در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی می باشد. شکل ۵ هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی به عنوان نمونه در دو پیرومتر مهماندوست و جنوب شرقی قادر آباد برای حالت ناپایدار نشان داده شده است. همان طوریکه که در این دو پیرومتر به خوبی نشان داده شده است، نوسانات سطح آب در ۵ سال به خوبی توسط مدل شبیه سازی گردیده است که بیانگر دقت نسبتاً خوب مدل در برآورد سطح آب در حالت ناپایدار می باشد.

همچنین جهت صحت سنجی مدل، از داده آب زیرزمینی سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل با داشتن پارامترهای آماری میانگین خطا، میانگین قدرمطلق خطا، ریشه مربع میانگین خطا و ضریب تبیین به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۸۴، ۱/۵۲ متر و ۰/۹۷ به دست آمد، و این امر نشان می دهد 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 و همکاران و قبادی علمداری و همکاران نشان می دهد که مدل مذکور دارای دقت قابل قبول جهت شبیه سازی تراز سطح آب زیرزمینی می باشد (Karimian et al., 2022; Edalat et al., 2022; Ghobadi Alamdari et al., 2019).

ارزیابی نتایج مدل

جهت ارزیابی نتایج به دست 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 آن ها در روابط ۳ الی ۶ آمده است، استفاده شد:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_o - h_c)_i \quad (3)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_o - h_c)_i| \quad (4)$$

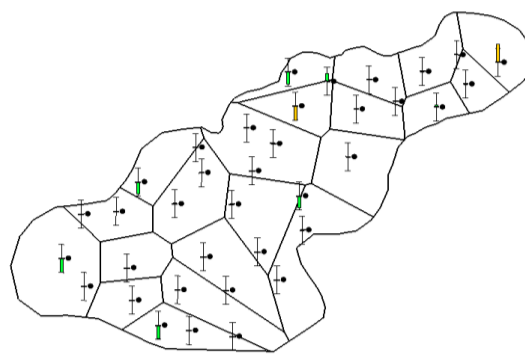
$$NRMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(h_o - h_c)_i^2} \right) / \bar{h}_o \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{k=0}^n (h_{io} - \bar{h}_{oi})(h_{ic} - \bar{h}_{ci}))^2}{\sum_{k=1}^n (h_{io} - \bar{h}_{oi})^2 \sum_{k=1}^n (h_{ic} - \bar{h}_{ci})^2} \quad (6)$$

در این روابط n تعداد پیرومترها، h_o و h_c به ترتیب سطح تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی می باشند.

نتایج و بحث

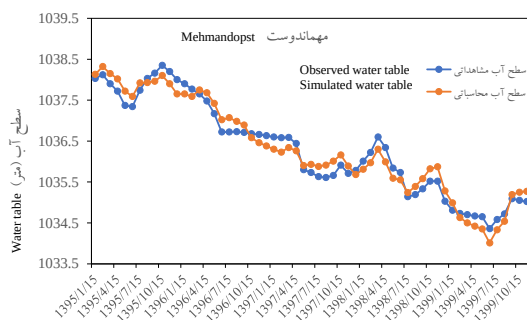
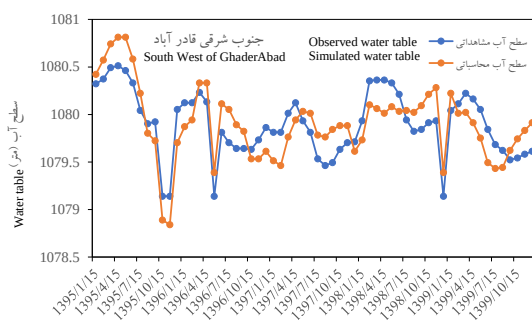
در این تحقیق در مرحله اول شبیه سازی آبخوان دشت دامغان با استفاده مدل MODFLOW در شرایط پایدار و غیرپایدار انجام شد. بدین منظور پارامترهای سطح تراز آب زیرزمینی، چاه های بهره برداری، چاه های مشاهداتی، سنگ کف، رقوم ارتفاعی زمین، هدایت هیدرولیکی، مقدار تغذیه و .. به مدل معرفی گردید. برای حالت پایدار شش ماهه 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 شبیه سازی در حالت پایدار را نشان می دهد. همان طوری که در شکل ۴ نشان داده شده است، سطح آب پیش بینی شده در پیرومترهای منطقه مورد مطالعه برای حالت پایدار در بیشتر پیرومترها تقریباً برابر با سطح آب اندازه گیری شده می باشد، و به جز دو پیرومتر در قسمت شمال شرق و شمال دشت که به رنگ زرد می باشند، بقیه پیرومترها در محدوده مجاز (در این مطالعه کمتر از ۰/۵ متر) بودند و به رنگ سبز می باشند. مقدار متوسط پارامتر ضریب



شکل ۴- وضعیت سطح آب شبیه سازی شده و اندازه گیری 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 شبیه سازی در حالت پایدار
Table 2. Hydrodynamic characteristics of the aquifer after simulation in steady state

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



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 Mehmandoust and southeast of Qadir Abad for unsteady state

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 مورد نیاز به صورت کاهش برداشت آب زیرزمینی توسط چاه های بهره برداری به مدل MODFLOW معرفی گردید و اقدام به شبیه سازی سطح آب زیرزمینی دشت دامغان گردید.

بدین منظور ابتدا وضعیت موجود الگوی کشت منطقه مورد مطالعه با جمع آوری داده ها از جهاد کشاورزی شهرستان مورد بررسی قرار گرفت. در این منطقه کشت درختان مختلفی از جمله پسته، درختان دانه دار و هسته دار (مانند گیلاس، سیب، زردآلو، بادام، زیتون و ...)، نباتات علوفه ای، نباتات جالیز، حبوبات، زیره و زعفران رایج می باشد. شکل ۷ درصد الگوی کشت منطقه را نشان می دهد. در منطقه مورد مطالعه بیشترین سهم الگوی کشت مربوط به درختان پسته می باشد (۶۵/۸ درصد) می باشد،

همان طوریکه در بخش مواد و روش ها توضیح داده شده، دشت مورد مطالعه دارای افت سطح آب زیرزمینی به طور متوسط ۰/۴۹ متر می باشد، که این امر در اثر کسری مخزن آبخوان برابر با ۳۱/۹ میلیون مترمکعب می باشد. با ادامه روند فعلی در اثر برداشت بی رویه انجام گرفته 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 به خوبی قابل مشاهده است که اگر به درستی مدیریت انجام نگیرد، در آینده نه چندان دور شاهد اثرات مخرب فرونشست شامل شکست و بیرون زدگی لوله های جداره چاه، کاهش برگشت ناپذیر تمام یا بخشی از مخازن آب زیرزمینی، تخریب شریان های حیاتی زیرساخت ها و سازه های مهم گردد.

بعد از انجام مدل سازی با استفاده از مدل MODFLOW در این مرحله جهت مدیریت و کنترل سطح آب زیرزمینی

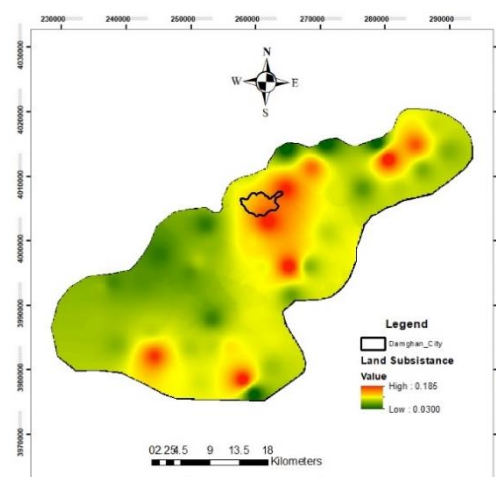
و بعد از آن گندم و جو با داشتن ۲۲/۷ درصد جایگاه دوم قرار دارند.

با توجه به اینکه در این مطالعه تابع هدف در برگیرنده دو تابع Z1 و Z2 می باشند که Z1 برابر با کمبود نسبی آب و Z2 متوسط سالیانه تغییرات تراز آب زیرزمینی است، با استفاده از داده های محاسباتی برای ماه های مختلف و همچنین سناریوهای در نظر گرفته شده، از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه NSGAII برای حل مسئله بهینه سازی استفاده شد و جهت اعمال محدودیت ها در الگوریتم بهینه سازی، توابع جریمه فازی (Cheng & Li, 1998) اعمال گردید. بدین منظور با در نظر گرفتن کاهش برداشت آب زیرزمینی و اجرای مدل MODFLOW و همچنین انجام محاسبات لازم مقادیر دو تابع هدف Z1 و Z2 محاسبه گردید. بدین منظور بعد از اجرای سناریوهای مختلف و آماده سازی داده های دو تابع Z1 و Z2، داده ها 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 بهینه سازی 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 اجرای مختلف کد مذکور، نتایج به دست آمده نشان داد بهترین نتایج زمانی حاصل می شود 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 می باشد.

نتایج به دست آمده نشان می دهد 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 به دست آمده از الگوریتم NSGAII برای جبران کاهش کمبود ۳۲/۵ درصدی

محصولات، سناریوهای مختلفی جهت کاهش مصرف آب محصولات کشت شده پرداخته شد. بدین منظور با توجه به اینکه می توان از تغییر الگوی کشت پیشنهادی و افزایش راندمان سیستم آبیاری جهت کاهش مصرف آب استفاده کرد تا بتوان بر میزان برداشت آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد، لذا دو پارامتر مذکور به عنوان سناریوهای پیشنهادی در نظر گرفته شد. با بازدید میدانی انجام شده 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 (قطره ای، تیپ، و کم فشار) می باشد. لذا با تغییر نوع سیستم آبیاری و در نتیجه افزایش راندمان آبیاری می توان در مصرف آب صرفه جویی کرد و تا حد ممکن از برداشت بی رویه مخزن کاست و در نتیجه از کاهش سطح آب زیرزمینی جلوگیری نمود. نیاز آبی گیاهان متأثر از عواملی همچون بارش، تبخیر، درجه حرارت و ضریب استفاده از آب توسط گیاه می باشد. 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 تغییر 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. به عبارتی، برای مثال در سناریوی یک پیشنهاد گردید کاشت نباتات علوفه ای 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 علوفه ای به میزان همان ۲۰ درصد (۲۰۹ هکتار) کاهش داده شود، همین مساحت به کشت نباتات علوفه ای اضافه گردد (مساحت ۲۵۲ هکتار).

الف



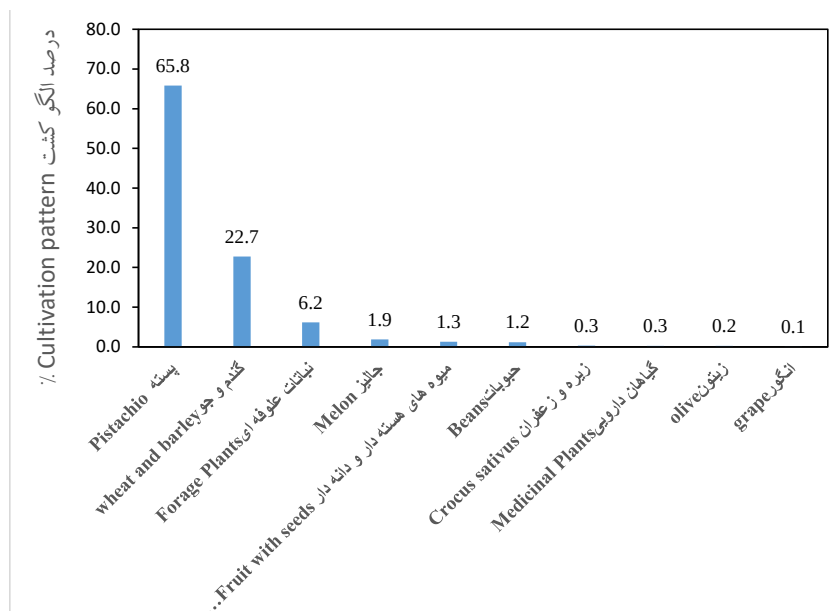
ب.



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

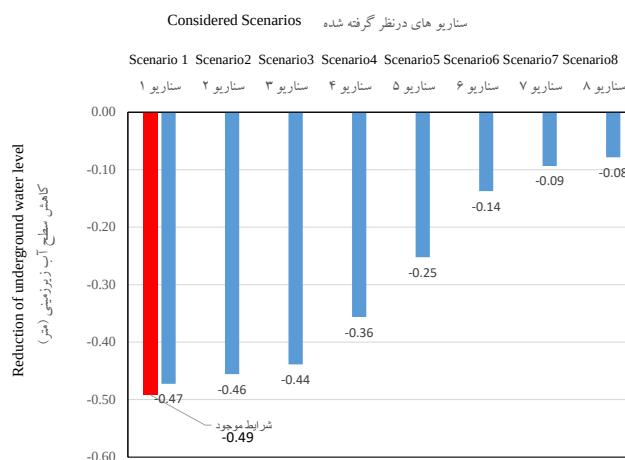
جدول ۳- سناریوهای در نظر گرفته شده جهت مدیریت آبخوان

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 به میزان 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 به میزان 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 به میزان 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 به میزان ۲۰ درصد مساحت زیر 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 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

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 با به عبارتی 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).

با توجه به سناریوهای پیشنهاد شده مذکور حجم آب مصرفی آب برای هر کدام از آن‌ها محاسبه گردید. نتایج به دست آمده تحت سناریوهای مختلف در شکل ۸ آمده است. همان طوریکه 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 سانتی متر 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 سانتی متر کاهش یابد. به عبارتی استفاده از هریک از سناریوها منجر به کاهش



شکل ۸- پیش بینی سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف
Figure 8. Prediction of rgroundwater level considering different scenarios

نتیجه گیری کلی

موجود افزایش داد و از مقدار ۰/۴۹- متر در شرایط موجود به ۰/۸- متر در سال در آینده تغییر داد. اثر الگوی کشت بهینه بر وضعیت آبخوان در نواحی شمال- مرکز و جنوب غرب به دلیل وجود مناطق کشاورزی نسبت به سایر مناطق محسوس و مؤثرتر می باشد. همچنین پیشنهاد می گردد 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 آب های سطحی و تزریق آن به آب زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد تا در آن صورت بتوان کاهش (۵/۱ میلیون مترمکعب در سال) در دشت مورد مطالعه را به طور کامل مهار کرد و تأمین نیاز آبی دشت را به صورت ۱۰۰ درصد تأمین نمود. با توجه به اینکه در منطقه مورد مطالعه بارش ها با شدت زیاد و مدت کم صورت می گیرد، و غالباً به صورت رگباری می باشد، لذا بررسی های میدانی نشان می دهد که قسمت زیادی از بارش ها به صورت رواناب در سطح حوضه جاری شده و به دلیل شیب زیاد و پوشش کم گیاهی فرصت نفوذ بسیار کم بوده و از دشت مورد مطالعه خارج می گردد و وارد کویر حاج علی قلی دامغان می گردد. 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 می دهد سناریوهای مدیریتی نظیر تغذیه مصنوعی، کاهش برداشت ها، تغییر الگوی کشت در آبخوان دشت بیجار- دیواندره باید مدنظر قرار گیرد (Ghamarnia et al., 2022).

در این تحقیق با استفاده از مدل عددی MODFLOW به شبیه سازی آبخوان دشت دامغان پرداخته شد و مدل مورد استفاده در حالت پایدار و غیرپایدار مورد واسنجی و صحت سنجی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی جریان آبخوان نشان داد که اختلاف بین سطح آب شبیه سازی شده و مقادیر مشاهداتی در پیژومترهای موجود در منطقه مورد مطالعه در اغلب نقاط در بازه قابل قبول قرار دارد. با توجه به برداشت بی رویه از آبخوان دشت مورد مطالعه باز دیدهای میدانی نشان می دهد که خطر فرونشست زمین در این دشت بسیار جدی بوده و اثرات جبران ناپذیری در آینده نه چندان دور اگر مدیریت آن به درستی انجام نگیرد، اتفاق خواهد افتاد. در مجموع با استفاده از الگوریتم بهینه ساز چندهدفه NSGAII نتایج به دست 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 به میزان ۲۰ درصد مساحت زیر سطح زیر کشت گندم و جو) و همچنین کاهش سطح زیر کشت نباتات علوفه ای 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 علوفه ای) و راندمان آبیاری ۹۰ درصد برای کل محصولات، می توان تراز آب زیرزمینی در سراسر آبخوان را نسبت به شرایط

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 Drainage*, (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).

- 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., Saghaian, 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).

- 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 GIS 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 GIS 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).