Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Formulation of an optimized cropping pattern in order to manage groundwater level changes in Shahriar Plain

Nima Salehi Shafa[1], Hossein Babazadeh[2]*, Fayaz Aghayari[3], Ali Saremi[4], Mohammad Reza Ghafouri[5], Masoud Safavi[6], Ali Panahdar[7]

[1] Graduated Ph.D. Student, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Food Industry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[2] Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Food Industry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[3] Assistant Professor, Agronomy Department, Faculty of Agriculture, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

[4] Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Food Industry, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[5] Graduated M.Sc. Student, Water and Environmental Engineering Department, Iran Structural Consulting Engineers, Tehran, Iran

[6] Ph.D. Student, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

[7] Graduated M.Sc. Student, Hydraulic Structures Department, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Optimal cultivation patterns are necessary for the sustainable development of agriculture and the protection of land and water resources, and the need for it has deepened. In the context of sustainable agricultural development, the optimization of the cultivation pattern, in addition to the economic benefits, should also follow the subsequent environmental effects. Due to the limitation of water resources in different regions of the world, joint use of surface and groundwater has become very important. Optimizing the joint use of surface and groundwater has become a necessary contribution to sustainable irrigation methods, and due to this, there is a need to improve methods of joint use of surface and underground water. The purpose of this research is to use a new comprehensive structure of multi-objective simulator-optimizer in order to simultaneously formulate the optimal cultivation pattern and the optimal allocation of surface and groundwater resources for the integrated management of the water resources system and solving complex water resources problems.

Materials and Methods

The study area in this research is Shahriar Plain in Tehran Province, Iran. Shahriar Plain is located on the western outskirts of Tehran city. In this study, a multi-objective simulator-optimizer modeling pattern was prepared and for this purpose, it was first simulated using the groundwater modeling system (GMS) of the groundwater level. Then six scenarios including a 50 % increase in artificial recharge, 50 % increase in artificial recharge and 30 % reduction in consumption from exploitation wells, 50 % increase in artificial recharge and 40 % reduction in consumption from exploitation wells, 30 % reduction in consumption from exploitation wells, 40 % The reduction of consumption from exploitation wells, elimination of drinking and industrial exploitation wells and its impact on the aquifer was defined based on the groundwater level in order to optimally exploit the aquifer of the study area. After this step, the groundwater level was estimated using the artificial neural network (ANN) model. Finally, the two objective functions of income to cost and groundwater level changes were estimated based on the constraints related to the conditions of the desired area by a multi-objective genetic algorithm (NSGA-II).

Results and Discussion

Water and Soil Management and Modeling

University of Mohaghegh Ardabili

Online ISSN: 2783 - 2546

The GMS model in a steady state was calibrated. The RMSE error was 0.71 meters and the maximum and minimum differences between observed and calculated values were calculated as 1.73 and 0.001 meters, respectively. The maximum amount of yield water in the calibration stage of the unstable state is 0.0976 and related to the northern regions of the area and due to the coarseness of the alluvial formations in these areas, and its minimum value is 0.0003 and related to the southern regions of the area. The results obtained from the model showed the RMSE error at this stage and the verification mode equal to 0.72 and 0.98 meters, respectively. Also, the budget resulting from the third scenario of the GMS was estimated to be 203 (MCM), which has increased by 313 (MCM) compared to the budget resulting from this model in the water year 95, and has caused an increase of the groundwater level by 13 meters. Therefore, the model has adequately simulated the groundwater flow in the aquifer. Also, the results of the optimization model showed the highest amount of optimal irrigation demand for Eslamshahr district at 66%, then Shahriyar at 20%, and finally Robat Karim at 14%. Optimal water demand volume and area under cultivation in the total state, have decreased by 36%, and the volume of groundwater consumption by 74 percent compared to the current conditions. The amount of optimal water consumption (surface water and groundwater) of agricultural products also shows the values of 36, 39, and 25% respectively in Shahriar, Eslamshahr, and Robat Karim districts, which according to this issue, water consumption in the agricultural sector is in optimal conditions compared to the current situation has decreased by 44 %. The highest parameter of the ratio of income to cost obtained is related to Shahriar district, then Robat Karim district and finally Eslamshahr district. The results of the simulator models show the groundwater level changes resulting from the third scenario compared to the neural network model by 11 m. Finally, Optimal cultivation pattern planning and exploitation of water resources compared to the third scenario of the model and the neural network model, was chosen as the pattern of optimal water planning.

Conclusion

Products such as vegetables, alfalfa, onions, grapes, pears, and pomegranates can be used more in the study areas, because the amount of income to cost and volume of water consumed have been suitable, and these factors have been very effective in increasing the net profit and changes in the groundwater level, and prevent the occurrence of crime and water complex problems. Also, optimal cultivation pattern planning and exploitation of water resources compared to the third scenario of the GMS and the neural network model, was evaluated as the selected optimal planning pattern of water resources. Therefore, by applying the desired research policies and optimal management and control of the cultivation pattern of agricultural products and available water resources, in addition to preventing the occurrence of crisis in water issues, environmental and economic problems can also be reduced.

Keywords: Cultivation pattern, Groundwater level Changes, Income-cost ratio, Water demand

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

Citation: Salehi Shafa, N., Babazadeh, H., Aghayari, F., Saremi, A., Ghafouri, M.R., Safavi, M., & Panahdar, A. (2023). Formulation of an optimized cropping pattern in order to manage groundwater level changes in Shahriar Plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 217-235.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11792.1169

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.15.5

Received: 12 November 2022, Received in revised form: 13 December 2022, Accepted: 13 December 2022, Published online: 13 December 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 2, pp. 217-235

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۲۵۴٦

تدوین الگوی کشت بهینه به‌منظور مدیریت تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت شهریار

نیما صالحی شفا[۱]، حسین بابازاده[۲]*، فیاض آقایاری[۳]، علی صارمی[۴]، محمدرضا غفوری[۵]، مسعود صفوی[۶]، علی پناهدار[۷]

[۱] دانش‌آموختهٔ دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

[۲] استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

[۳] استادیار، گروه زراعت، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران

[۴] استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

[۵] دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد، بخش مهندسی آب و محیط زیست، مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران، تهران، ایران

[۶] دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران

[۷] دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد، گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

در تحقیق حاضر، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی تهیه شد. به این منظور ابتدا با استفاده از سیستم مدل‌سازی آب زیرزمینی (GMS) تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد، سپس شش سناریو بر اساس سطح آب زیرزمینی به‌منظور بهره‌برداری بهینه از آبخوان دشت شهریار تعریف شد. پس از این مرحله تراز آب زیرزمینی به‌وسیلهٔ مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی (ANN) برآورد شد. در نهایت توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II)، دو تابع هدف درآمد به هزینه و تغییرات سطح آب زیرزمینی بر اساس سطح زیرکشت، منابع آب زیرزمینی و سطحی برآورد شدند. در این تحقیق، جهت افزایش دقت مصارف بهینهٔ آب زیرزمینی و سطحی، مقادیر بهره‌برداری از منابع آب سطحی نیز برآورد شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین پارامتر نسبت درآمد به هزینه حاصل شده، مربوط به ناحیهٔ شهریار سپس ناحیهٔ رباط کریم و در آخر ناحیهٔ اسلامشهر بوده و الگوی کشت و حجم نیاز آبی بهینهٔ کل محدودهٔ مطالعاتی نسبت به شرایط فعلی به میزان ۳۶ درصد و حجم مصرف آب کشاورزی ۴۴ درصد کاهش یافته‌اند. تغییرات تراز و بیلان بهینهٔ آب زیرزمینی همزمان با کاهش مصارف آب زیرزمینی در بخش کشاورزی افزایش قابل ملاحظه‌ای به اندازهٔ ۱۷ متر و ۳۹۴ میلیون مترمکعب داشته‌اند. هم‌چنین، بیلان حاصل از سناریوی سوم GMS، ۲۰۳ میلیون مترمکعب برآورد شد که نسبت به بیلان حاصل از این مدل، ۳۱۳ میلیون مترمکعب افزایش یافته و باعث افزایش تغییرات سطح آب زیرزمینی به اندازهٔ ۱۳ متر شده است. مقدار تغییرات تراز آب زیرزمینی حاصل از سناریوی سوم نسبت به مدل شبکهٔ عصبی ۱۱ متر برآورد شد. در تحقیق حاضر، برنامه‌ریزی الگوی کشت و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی در مقایسه با سناریوی سوم و مدل شبکهٔ عصبی، به‌عنوان الگوی برنامه‌ریزی بهینهٔ آبی انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی : الگوی کشت، تغییرات سطح آب زیرزمینی، نسبت درآمد به هزینه، نیاز آبی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

استناد: صالحی شفا، نیما، بابازاده، حسین، آقایاری، فیاض، صارمی، علی، غفوری، محمدرضا، صفوی، مسعود، پناهدار، علی (۱۴۰۲). تدوین الگوی کشت بهینه به‌منظور مدیریت تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت شهریار. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۲۱۷-۲۳۵.

DOI:10.22098/mmws.2022.11792.1169

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.15.5

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۲۱۷ تا ۲۳۵

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

۱– مقدمه

با رشد جمعیت و توسعهٔ اقتصاد، فشار بر سیستم‌های منابع آبی افزایش یافته است. بنابراین، برای مقابله با افزایش کمبود و آلودگی آب، چالش‌های حیاتی مهمی پیش‌رو هستند. مسائل و مشکلات مربوط به منابع آب در آینده پیچیده‌تر خواهند شد. افزایش نرخ رشد جمعیت، تنوع اقلیمی و شرایط نامناسب محیط زیست عواملی هستند که باعث افزایش پیچیدگی مشکلات منابع آب می‌شوند. مطابق با افزایش نیاز آبی در بخش‌های مختلف مصرف و به‌منظور تأمین نیازهای آبی، منابع آب در دسترس باید در فضای بزرگ‌تر و به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، در مناطق مختلف مدل‌ها و روش‌های متنوعی به‌منظور شبیه‌سازی و بهینه‌سازی منابع و مصارف آبی ارائه شده است. با توجه به این موضوع، Qiu et al. (2015) با شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی حوضهٔ درهٔ رودخانهٔ جیلین در چین در محیط نرم‌افزار GMS دریافتند مقدار برداشت از منطقه بیش از تغذیه است. هم‌چنین، Karimi et al. (۲۰۱۹) به بررسی پویایی تغییرات آب زیرزمینی در آبخوان تهران با استفاده از GMS پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده که هدایت هیدرولیکی بالا در بخش‌های شمالی و مرکزی دشت تهران است که به رسوب رودخانه در آن‌جا نسبت داده می‌شود.

Xue et al. (2022) اثرات بلندمدت انواع مختلف راهبردهای تشدید کشاورزی را بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در واحهٔ سله در چین با استفاده از مدل HYDRUS-1D و MODFLOW بررسی کردند. آن‌ها پاسخ آب زیرزمینی را به سناریوهای ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۳۰ و ۱۷۰ درصد سطح کشت فعلی، پیش‌بینی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها مشخص نمود که سطح آب زیرزمینی نسبت به سناریوی ۱۰۰ درصد سطح کشت فعلی ثابت باقی‌مانده، نسبت به سناریوهای ۱۱۰ و ۱۳۰ درصد کمی کاهش یافته، نسبت به سناریوی ۱۷۰ درصد به سرعت کاهش یافته است و در نهایت در تحقیق آن‌ها سناریوی ۱۳۰ درصد به‌عنوان بهترین سناریو معرفی شده است. Bayat et al. (2020) به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی برای حالت‌های پایدار و ناپایدار، از مدل MODFLOW استفاده نمودند. در این تحقیق، شش سناریو به‌صورت افزایش و کاهش ۳۰ درصدی بارش، افزایش و کاهش ۳۰ درصدی تغذیهٔ سطحی، افزایش ۱۰ درصدی در برداشت آب چاه و کاهش ۳۰ درصدی بارش تعریف نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزایش ۱۰ درصد برداشت آب چاه، بهترین سناریوی منتخب برای مدیریت آب محدودهٔ مورد مطالعه است. تاکنون تحقیقات متعددی در مناطق مختلفی، مانند آبخوان غرب کشور مصر (Moharram et al., 2012)، درهٔ کاتماندو در نپال (Shrestha et al., 2020)، دشت بیرجند (Ghoochanian et al., 2013)، منطقهٔ معدنی دادوگو چین (Wang et al., 2020)، حوضهٔ رودخانه ممی در نیجریه (Sule and Ayenigba, 2017)، دشت نیمه‌خشک مراکش (Le Page et al., 2012)، دشت پینگ تونگ تایوان (Jang et al., 2016)، منطقهٔ چاتیسگار در هندوستان (Bohidar and Ahmad, 2021) به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و حل مشکلات مربوط به این منبع آبی ارزشمند صورت گرفته است. به‌دلیل این‌که آب‌های زیرزمینی و سطحی در ارتباط کامل با یک‌دیگر هستند؛ بنابراین، باید در بررسی‌ها و مطالعات به‌صورت با هم در نظر گرفته شوند. هم‌چنین، بهره‌برداری تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی و تعیین الگوی کشت بهینه با توجه به شرایط مناطق مختلف، یک راه‌کار مؤثر به‌منظور مدیریت مناسب و کارآمد و بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آبی است. مدل‌های شبیه‌ساز یک ابزار مهم در مدیریت نوین منابع آبی است، ولی علاوه‌بر آن، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی راه‌کاری نوین، کم هزینه، سریع و مؤثر به‌منظور ارتقاع مدیریت منابع آبی به‌شمار می‌آیند. که بر این اساس در مناطق بسیاری، مانند منطقهٔ دشت نجف‌آباد اصفهان در ایران (Safavi et al., 2010)، شبه جزیرهٔ ایبری در جنوب‌غربی اروپا (Pereira et al., 2016)، سه منطقهٔ قدیمی مصر (Osama et al., 2017)، حوزهٔ آبریز دریاچهٔ دیانچی چین (Dai et al., 2018)، ایالت اودیشا هندوستان (Rath et al., 2019)، استان اصفهان در ایران (Najafabadi et al., 2019)، بخش شرقی استان تهران در ایران (Mooselu et al., 2020)، سنت آرکانجلو در جنوب ایتالیا (Alobid et al., 2022)، استان هیلونگجیانگ در شمال‌شرقی چین (Chen et al., 2022)، دشت البرز در ایران (Mirhashemi et al., 2022)، استان هیلونگجیانگ در چین (Li et al., 2022)، دشت شهریار استان تهران در ایران (Salehi Shafa et al., 2022) سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از منابع آبی و هم‌چنین الگوی کشت بهینه تدوین شده است. با توجه به این موضوع، Zamani et al. (2022) به‌منظور استفادهٔ بهینه از آب‌های زیرزمینی و تعیین نرخ پمپاژ بهینهٔ چاه‌ها از مدل MODFLOW استفاده نمودند. هم‌چنین، توابع هدف را برای به حداکثر رساندن سود خالص محصولات کشاورزی و به حداقل رساندن کاهش سطح آب زیرزمینی برای الگوریتم ژنتیک چندهدفهٔ NSGA-II تعریف نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، که تحت سناریوی افزایش ۵۰ درصدی هزینه‌های مصرف آب و برق، سطح آب زیرزمینی ۵۱ درصد افزایش یافته و

تحت سناریوی کاهش ۵۰ درصدی هزینه‌های مصرف آب و برق، سطح آب زیرزمینی ۱۶ درصد کاهش خواهد یافت. Dehghanipour et al. (2020) با استفاده از مدل شبیه‌ساز–بهینه‌ساز WEAP، MODFLOW و SO راهبردهای مدیریت آب را برای دشت آبی میاندوآب واقع در بالادست دریاچهٔ اندورهیک ارومیه بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها، سودمندی و انعطاف‌پذیری روش مورد نظر در شناسایی طیف وسیعی از استراتژی‌های مدیریت آب بالقوه در حوضه‌های پیچیده اندورهیک آبی، مانند حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه را نشان داد. (Mirzaei et al. 2022) به‌منظور برنامه‌ریزی بهینهٔ الگوی کشت، مدلی از تخصیص آب آبیاری بر اساس الگوی کشت دشت جیرفت در استان کرمان با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای مطابق با نوسانات تأمین آب سطحی توسعه دادند. نتایج حاکی از آن بود که در صورت افزایش آب‌های سطحی رها شده به کانال‌ها در فصل بهار، سهم محصولات پرمصرف در الگو افزایش می‌یابد که این امر موجب تقویت سود کشاورزان و فشار بر منابع آب زیرزمینی می‌شود.

Salehi Shafa et al. (2022) یک پلتفرم مدل‌سازی چندهدفه شامل یک مدل شبیه‌ساز– بهینه‌ساز (مدل اول) متشکل از مدل ریاضی HEC-HMS و الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II و یک مدل بهینه‌ساز (مدل دوم) متشکل از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II را به‌منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب در دسترس و بهره‌برداری بهینه از سیستم تغذیهٔ مصنوعی برای دشت شهریار تهران توسعه دادند. با توجه به نتایج مدل اول، کل آب قابل دسترس به میزان ۲۹ درصد کاهش یافت و حجم کل تغذیهٔ بهینه ۷۰ میلیون مترمکعب در بازهٔ زمانی مورد نظر افزایش یافت. بر اساس نتایج مدل دوم، سطح زیرکشت، حجم آب مصرفی و حجم نیاز آبی بهینهٔ کل محدودهٔ مورد مطالعه نسبت به شرایط فعلی به میزان ۲۰، ۵۰ و ۲۰ درصد کاهش یافتند. Jha et al. (2020) از GMS در مدل بهینه‌سازی SOMO1 به‌منظور تخمین حداکثر برداشت مجاز سفرهٔ آب زیرزمینی حوضهٔ رودخانه ماهانادی ایالت اودیشا در هندوستان و از مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی به‌عنوان مدل دوم بهینه‌سازی جهت بهینه‌سازی تخصیص پیوستهٔ آب‌های سطحی و زیرزمینی، تعیین الگوی کشت استفاده نمودند. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که به حداقل رساندن کشت برنج کشاورزی (به‌ویژه در طول فصل غیرموسمی) و افزایش تنوع محصولات، معیشت کشاورزان را بهبود می‌بخشد و به استفادهٔ پایدار از منابع آب کمک می‌کند.

Asadzadeh Sharafeh and Raoof (2018) به‌منظور ارزیابی مدیریت مصرف آب آبیاری و بهره‌وری آب در شبکهٔ آبیاری بارانی یامچی و شبکهٔ کم‌فشار قوری‌چای در دشت اردبیل، متوسط سود ناخالص و سود خالص آب شبکهٔ یامچی و قوری‌چای را برآورد نمودند. با توجه به نتایج تحقیق آن‌ها، متوسط سود ناخالص و سود خالص آب شبکهٔ یامچی به‌ترتیب ۶۷/۸۸۴۷ ۶۷/۹۸۷ و شبکهٔ قوری‌چای به‌ترتیب ۹۱۰۰ و ۴۰۲۸ ریال بر مترمکعب و متوسط سود ناخالص آب آبیاری برای یامچی به‌ترتیب ۱۲۶۶۹ و ۳۳/۱۵۱۵ و شبکهٔ قوری‌چای ۳۳/۲۳۹۸۸ و ۳۳/۶۵۲۳ ریال بر مترمکعب محاسبه شد. Ehsani Kolikand et al. (2018) برای تعیین الگوی کشت بهینه در دشت قزوین در شرایط تحویل حجمی از روش برنامه‌نویسی خطی برای بهینه‌سازی استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که به‌طور متوسط در الگوی کشت بهینه با محدودیت آب، بهره‌وری آب و سود خالص به‌ترتیب ۹۳ و ۷/۶۷ درصد افزایش یافته و آب مصرفی ۱۵ درصد نسبت الگوی کشت مصوب کاهش خواهد یافت. هدف این تحقیق، تدوین الگوی کشت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌طور همزمان با استفاده از مدل شبیه‌ساز–بهینه‌ساز به‌منظور افزایش پایداری سیستم منابع آبی و تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف بر اساس کشت و درآمد حاصل از آن در محدودهٔ مورد مطالعه است. در این تحقیق از دو مدل شبیه‌ساز GMS و شبکهٔ عصبی مصنوعی ANN در ترکیب با مدل بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II برای برنامه‌ریزی بهینه از منابع آبی و همزمان تدوین الگوی کشت مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، نوآوری در تحقیق حاضر ارائه سیاست‌های همزمان بهره‌برداری بهینه از منابع آبی و الگوی کشت بهینه در محدودهٔ مطالعاتی بر اساس اهداف تعریف شده و با رویکرد قابلیت تعمیم به سایر مناطق دیگر است.

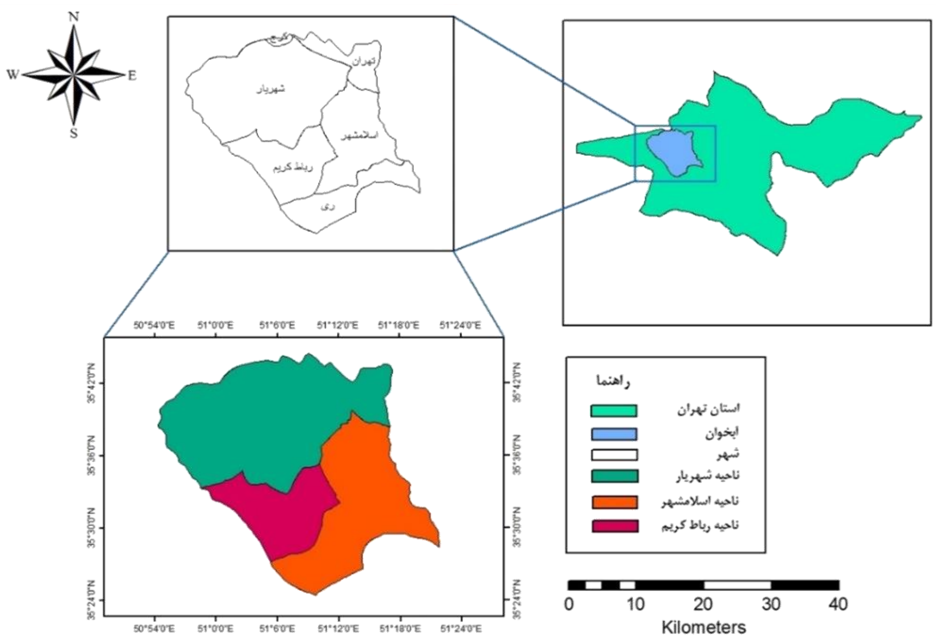
۲– مواد و روش‌ها

۲–۱– منطقه مورد مطالعه

محدودهٔ مطالعاتی شهریار در حاشیهٔ غربی شهر تهران و در موقعیت جغرافیایی "۱۴ '۲۲ °۵۰ تا "۰۲ '۲۲ °۵۱ طول شرقی و "۳۲ '۴۴ °۳۵ تا " ۲۵ '۰۲ °۳۵ عرض شمالی واقع شده است. از شمال غربی به شهر کرج، از غرب به ارتفاعات سیاه کوه، از شرق و شمال شرقی به شهر تهران و رودخانهٔ کن، از جنوب به رباط‌کریم محدود می‌شود. این محدوده به مساحت تقریبی ۸۹۷/۲۱۴ کیلومتر مربع است و شهرهای شهریار، اسلامشهر، رباط‌کریم و بخشی از شهر تهران و کرج را در بر می‌گیرد. این محدودهٔ مطالعاتی از نظر تقسیمات سیاسی

کشور جزء استان تهران بوده و بخش‌هایی از شهرستان‌های تهران، کرج، شهریار، رباط‌کریم، اسلامشهر و حاشیهٔ شمالی شهرستان ری را در خود جای می‌دهد (شکل ۱). محدودهٔ مطالعاتی برای انجام محاسبات و تحلیل‌های مربوطه به سه ناحیهٔ شهریار، اسلامشهر و رباط کریم تقسیم شدند.

در محدودهٔ مورد مطالعه، ناحیهٔ شهریار در شمال، اسلامشهر در جنوب و شرق و رباط کریم در غرب دشت شهریار قرار دارند. در تحقیق حاضر منابع آب قابل دسترس در محدودهٔ مطالعاتی شامل آبخوان دشت شهریار، جریان‌های سطحی شامل رودخانه‌های کرج، کن و چیتگر، شبکهٔ آبیاری کرج و شبکهٔ رباط‌کریم است. هم‌چنین، حجم بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری برآورد شده است. حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی در سال آبی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی به‌ترتیب برابر ۲۰۸، ۵۲ و ۵۲۵ میلیون مترمکعب است. اطلاعات مربوط به حجم آب رودخانهٔ کرج و موقعیت حجم جریان در رودخانهٔ کن در دورهٔ زمانی مطالعاتی در جدول ۱ مشخص شده‌اند. هم‌چنین، مساحت کشت و کل آب مصرفی فعلی در محدودهٔ مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت مکانی محدودهٔ مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area

جدول ۱- حجم جریان در مسیر رودخانهٔ کرج و کن

Table 1- The volume of flow along the Karaj and Kan rivers

محل مسیر جریان	حجم جریان (میلیون مترمکعب)
کل بیلقان (ایستگاه بیلقان)	304
سیلاب بیلقان به سمت مخروطه افکنه در پایین‌دست	8
آب ورودی از بیلقان به شهریار	41
شهر تهران و کرج	255
رودخانهٔ کن (سولقان)	31
تخلیهٔ کانال غرب (ابتدای رودخانهٔ کن)	68
برداشت موتور پمپ‌های کن (ابتدای رودخانهٔ کن)	23
برداشت کانال نواب (کاشانک)	64
رودخانهٔ کن (جهان آباد)	7

۲-۲- شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی با مدل MODFLOW

در ابتدا مدل مفهومی با استفاده از ابزارهای GIS برای تهیهٔ نقشهٔ مدل مفهومی منطقه‌ای در مدل ریاضی GMS تهیه شد. مدل تفهیمی به‌وسیله فایل برداری مدل GIS برای محدودهٔ مطالعاتی شامل نقاط، خطوط، و چندوجهی‌ها تعریف شد. سپس مدل مفهومی شبکه‌بندی شد و کلیهٔ پارامترهای تعریف شده به سلول‌های شبکه نسبت داده شد. در این تحقیق با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی و وسعت منطقهٔ مورد مطالعه، سلول‌های شبکه تهیه شد. ابعاد سلول‌ها ۵۰۰×۵۰۰ متر شامل ۸۲ ستون و ۹۲ سطر برای محدودهٔ مورد نظر تهیه شد و داده‌ها و اطلاعات به هر یک از سلول‌های مدل مفهومی اختصاص داده شدند.

جدول ۲- مساحت کشت و کل آب مصرفی محدودهٔ مورد مطالعه

Table 2- Cultivation area and total water consumption of the study area

نوع محصول	محصول	مساحت کشت (هکتار)			کل آب مصرفی (میلیون متر مکعب)		
		رباط کریم	اسلامشهر	شهریار	رباط کریم	اسلامشهر	شهریار
زراعی	گندم	848	13398	1320	9.29	55.23	28.89
	جو	2281	10900	720	24.98	44.93	15.76
	پنبه	0	6	2	0	0.03	0.05
	کلزا	30	109	15	0.33	0.45	0.33
	خیار	0	21	1	0	0.11	0.03
	یونجه	0	277	10	0	7.98	1.55
	ذرت علوفه‌ای	368	4535	800	4.09	18.89	17.64
	پیاز	0	0	1	0	0	0.03
	گوجه فرنگی	0	89	14	0	0.51	0.42
	سایر سبزیجات	577	5205	1090	7.75	26.17	28.96
	ذرت دانه‌ای	1710	12438	1500	19	51.82	33.08
	خربزه	0	9	2	0	0.05	0.05
باغی	سیب	31	7	1010	0.4	0.03	24.38
	گیلاس	6	0	360	0.07	0	8.09
	گلابی	33	15	832	0.43	0.07	20.07
	زرد آلو و قیسی	69	10	1640	0.81	0.04	36.85
	هلو، شلیل، شفتالو	148	120	2100	1.75	0.52	47.19
	آلو، گوجه	141	81	2521	1.67	0.35	56.64
	زیتون	0	71	0	0	0.44	0
	بادام زمینی	1	2	52	0.02	0.01	1.63
	انار	4	153	0	0.07	0.91	0
	گردو	22	56	221	0.28	0.27	5.49
	پسته	5	618	3	0.08	3.52	0.07
	انگور	4065	566	1215	47.03	2.41	26.95
	توت درختی	3	6	45	0.05	0.03	1.26
	به	0	9	12	0	0.04	0.28
	انجیر	0	173	19	0	1.22	0.72

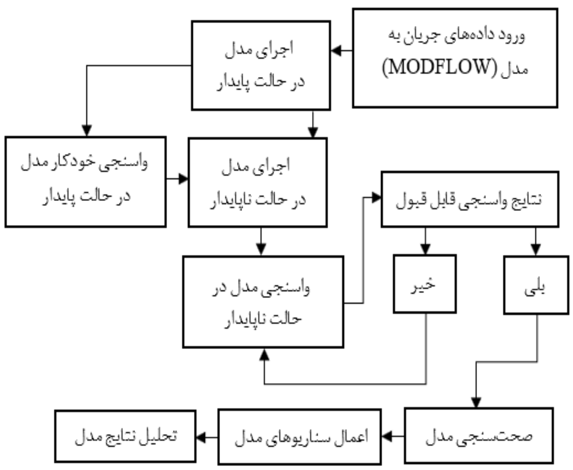
به‌منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در حالت پایدار، داده‌های هدایت هیدرولیکی، انیزوتراپی عمودی، قابلیت انتقال، تراز سنگ کف، تراز زمین، تراز سطح آب زیرزمینی، دبی چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی، شرب و صنعت و نیز تغذیهٔ از باران، رودخانه و تغذیهٔ مصنوعی به‌صورت میانگین سه ماه بهمن، اسفند و فروردین سال ۱۳۹۳ استفاده شد. به‌دلیل این‌که تراز آب زیرزمینی در این سه ماه حدودا ثابت و پایدار بوده است، اطلاعات مورد نظر برای حالت پایدار در نظرگرفته شده و وارد مدل شدند، سپس مدل اجرا شد. در این حالت باید شرایط مرزی مدل مشخص شود. برای مرزهای محدوده از مرز با بار هیدرولیکی عمومی[1] GHB استفاده شده است. ولی در مرز شرقی محدوده، به‌علت وجود رودخانهٔ کن از مرز با بار هیدرولیکی مشخص CHD استفاده شده است. پیش از واسنجی مدل باید واسنجی فرآیند تغییر پارامترهای ورودی به مدل شامل میزان تغذیه از منابع آبی، هدایت هیدرولیکی و ضریب آب‌دهی ویژه در یک محدودهٔ معین، انجام شود تا زمانی‌که بهترین درجه از تطابق بین مقادیر مشاهده شده با شبیه‌سازی شده برقرار شود. پس از ساخت و اجرای مدل کمی در حالت جریان پایدار، واسنجی مدل به‌منظور بهینه کردن پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان، با میانگین سه ماه بهمن، اسفند و فروردین سال ۱۳۹۳ انجام شد. در این تحقیق، هدف از واسنجی، رساندن اختلاف بین تراز مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به حداکثر و حداقل یک متر و کاهش خطای مدل است. بعد از واسنجی مدل در حالت پایدار، مدل در حالت ناپایدار و به‌صورت ماهانه برای سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ واسنجی شد. در شرایط

[1] General Head Boundry

ناپایدار علاوه‌بر مشخص نمودن شرایط مرزی، شرایط اولیه نیز تعریف شد. شرایط مرزی در این حالت به‌صورت ناپایدار بوده و از داده‌های ماهانه استفاده شده است. شرایط اولیه در مدل، بار هیدرولیکی در هر سلول است که در تحقیق حاضر، بار هیدرولیکی حاصل از واسنجی مدل در شرایط پایدار، به‌عنوان بهترین مقدار برای شرایط اولیه در حالت ناپایدار در نظر گرفته شد. هدایت هیدرولیکی در این مرحلهٔ ثابت‌باقی ماند؛ زیرا در حالت پایدار واسنجی شده است. در این مرحله ابتدا مدل اجرا شده سپس واسنجی حالت ناپایدار توسط آب‌دهی ویژه انجام شد. به‌منظور کاهش خطای مدل، نتایج واسنجی با استفاده از معیارهای آماری ME و RMSE مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از واسنجی، صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های ماهانهٔ سال ۱۳۹۵ و در شرایط ناپایدار صورت گرفت. آب‌دهی ویژه نیز به‌صورت دستی و با اجرای مدل واسنجی شد. در نهایت چندین سناریو به‌منظور کاربردی کردن نتایج GMS ارائه و پاسخ آبخوان نسبت به آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. سناریوهای مورد بررسی شامل: ۱- افزایش ۵۰ درصد تغذیهٔ مصنوعی، ۲- افزایش ۵۰ درصد تغذیهٔ مصنوعی و همزمان ۳۰ درصد کاهش مصارف از چاه‌های بهره‌برداری، ۳- افزایش ۵۰ درصد تغذیهٔ مصنوعی و همزمان ۴۰ درصد کاهش مصارف از چاه‌های بهره‌برداری، ۴- ۳۰ درصد کاهش مصارف از چاه‌های بهره‌برداری، ۵- ۴۰ درصد کاهش مصارف از چاه‌های بهره‌برداری، ۶- حذف چاه‌های بهره‌برداری شرب و صنعت و تأثیر آن بر آبخوان، می‌باشند. همچنین، بر اساس سناریوهای مورد نظر الگوی برنامه‌ریزی بهینه برای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی ارائه شده است. در شکل ۲ الگوریتم فرآیند محاسبات GMS مشخص شده است.

۲-۳- شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با شبکهٔ عصبی مصنوعی ANN

پس از مرحلهٔ محاسبات توسط GMS، به‌منظور برآورد سطح آب زیرزمینی از مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه استفاده شد. داده‌های حاصل از نتایج مرحلهٔ قبل برای کل بازهٔ زمانی مطالعاتی، در مدل شبکهٔ عصبی مورد نظر اعمال شدند. بنابراین داده‌های حجم آب زیرزمینی ورودی و خروجی در مرزهای محدوده، تغذیه از سطح و تخلیهٔ آب زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری به‌عنوان ورودی و داده‌های تراز آب زیرزمینی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شدند. واحد متغیرهای ورودی و خروجی برحسب میلیون مترمکعب است. در نهایت پیش‌پردازش یا نرمال‌سازی داده‌ها قبل از وارد کردن داده‌ها به‌صورت اولیه و محاسبهٔ شبکه، انجام شد. در این مدل شبکهٔ عصبی، چهار لایه شامل یک لایهٔ ورودی، دو لایه پنهان و یک لایه خروجی به‌عنوان ساختار مدل در نظر گرفته شدند.



شکل ۲- نمودار جریانی فرآیند محاسبات GMS

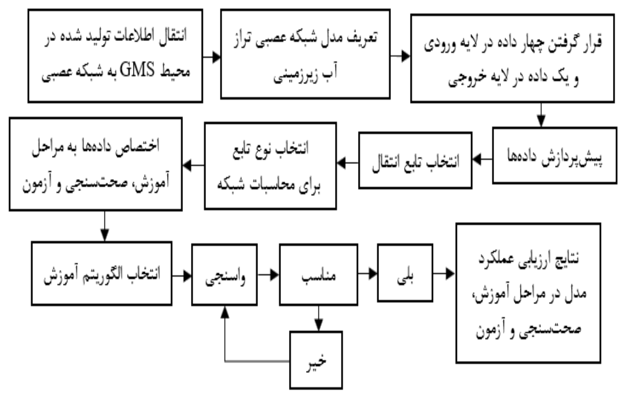
Figure 2- Flow chart of the calculation process of the GMS

همچنین، برای لایهٔ اول پنهان مدل شبکهٔ عصبی مورد نظر پنج نرون، لایهٔ دوم پنهان هشت نرون و لایهٔ خروجی یک نرون، برآورد شد. تابع انتقال نرون‌ها نیز در لایهٔ پنهان اول، تابع logsig در لایهٔ پنهان دوم، تابع tansig و در لایهٔ خروجی، تابع انتقال purelin می‌باشد. در مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی مورد نظر از تابع feed forward backpropagation network و با نام newff، به‌عنوان شبکهٔ پیش‌خور استفاده شد. همچنین، مدل با استفاده از الگوریتم لونبرگ-مارکوآرت آموزش داده شد. به‌منظور اختصاص داده‌ها به مراحل آموزش، صحت‌سنجی و آزمون، به سه دسته تقسیم شدند که با توجه به این موضوع ۷۵ درصد داده‌ها به مرحلهٔ آموزش، ۱۵ درصد داده‌ها به مرحلهٔ صحت‌سنجی و ۱۰ درصد دیگر داده‌ها به مرحلهٔ آزمون اختصاص داده شد. تعداد دوره‌ها یا تکرارهایی که شبکه در حین آموزش انجام می‌دهد برابر ۱۰۰۰ دور در نظر گرفته شد. در نهایت انتخاب بهترین ساختار شبکه با توجه به آموزش شبکهٔ عصبی و بر مبنای آزمون و خطا و نیز معیارهای ارزیابی آماری، صورت گرفته است. شکل ۲ نمودار جریانی فرآیند محاسبات GMS و شکل ۳ نمودار جریانی فرآیند محاسبات تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.

۲-۴- بهینه‌سازی اهداف تحقیق با الگوریتم ژنتیک چندهدفه

در تحقیق مورد نظر، داده‌های مساحت زیرکشت هر محصول، آب مصرفی سطحی در هر هکتار برای هر محصول، هزینه هر محصول

در هر هکتار، فروش هر محصول در هر هکتار، نیاز ناخالص آبیاری هر محصول در هر هکتار، عملکرد واقعی هر محصول در هر هکتار، آب مصرفی زیرزمینی کشاورزی هر محصول در هر هکتار برای بازه زمانی سال آبی ۱۳۹۵، مورد محاسبه قرار گرفتند. حجم آب ورودی و خروجی زیرزمینی در مرزهای محدوده مورد مطالعه، تغذیه از سطح شامل تغذیه از مصارف، بارندگی، رودخانه، تغذیهٔ مصنوعی و آب مصرفی زیرزمینی شرب، صنعت، به صورت ماهانه و برای سال ۱۳۹۵، وارد الگوریتم شدند. اهداف مورد نظر در مدل بهینه‌سازی شامل هدف اول، حداکثر نمودن نسبت درآمد به هزینه محصولات کشاورزی و هدف دوم، حداقل نمودن تغییرات تراز آب زیرزمینی ناشی از مصرف محصولات کشاورزی از این منبع آبی، است. نمودار جریانی فرآیند محاسبات در شکل ۴ نشان داده شده است. در محاسبات الگوریتم جمعیت اولیه، والدها هستند که از متغیرهای تصمیم (سطح زیرکشت و مصارف آب زیرزمینی) تولید می‌شوند. بنابراین روند محاسبات الگوریتم با توجه به جمعیت اولیه صورت می‌گیرد.



شکل ۳- نمودار جریانی فرآیند محاسبات مدل شبکهٔ عصبی تراز آب زیرزمینی
Figure 3- The flowchart of the calculation process of the neural network model of the underground water level

۲-۵- محاسبه نسبت (درآمد به هزینه) متناسب با سطح زیرکشت و مصرف آب محصولات کشاورزی

در تحقیق حاضر، ساختار مدل بهینه‌سازی مورد نظر به‌صورت روابط (۱) تا (۱۰) است که در آن Z_1 و Z_2 توابع هدف اول و دوم و penalty function توابع جریمهٔ اهداف مسأله مطابق با روابط (۱)، (۲)، (۵) و (۷) ارائه شده‌اند. در روابط فوق، Z_1؛ تابع هدف اول در این تحقیق است. در تابع هدف اول، OP؛ عملکرد واقعی محصولات (کیلوگرم بر هکتار)، SE؛ قیمت فروش هر کیلوگرم محصولات کشاورزی (ریال)، A؛ مساحت زیرکشت محصولات کشاورزی (هکتار)، CO؛ هزینهٔ ثابت هر هکتار از محصولات کشاورزی (ریال)، COW؛ هزینهٔ هر مترمکعب آب مصرفی (ریال)، kdg؛ مقدار مصارف آب زیرزمینی محصولات (مترمکعب در هکتار) و ksw؛ حجم مصارف آب سطحی کل سطح زیرکشت هر محصول کشاورزی (مترمکعب) است. به‌دلیل افزایش دقت مصارف بهینهٔ آب زیرزمینی و سطحی، مقادیر بهره‌برداری از منابع آب سطحی نیز برآورد شد. در این تحقیق، مقدار آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی kdg؛ و مساحت زیرکشت محصولات (A) نیز، متغیر تصمیم هستند. هم‌چنین، penalty function تابع جریمه بوده که در صورت عدم رعایت حداکثر سطح زیرکشت $Area_{max}$ و حداقل سطح زیرکشت $Area_{min}$ محاسبه شده و به تابع هدف افزوده می‌شود. At_{max} در رابطهٔ (۳)، حداکثر سطح زیرکشت و At_{min} در رابطهٔ (۴) حداقل سطح زیرکشت محصولات می‌باشند. حداکثر سطح زیرکشت برابر سطح زیر کشت فعلی بوده و حداقل سطح زیر کشت با توجه به شرایط منابع و مصارف آبی و فعالیت‌های کشاورزی برابر ۰/۶ سطح زیرکشت فعلی محدودهٔ مورد مطالعه، برآورد شده است.

داده‌های مورد نظر بر اساس داده‌ها و اطلاعات سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ضرایب ثابت α و β در تابع جریمهٔ اول نیز برابر 10^6 در نظر گرفته شدند.

$$Z_1=\text{Maximize}\ \sum_{p}^{np}\left(\frac{(OP\times SE\times A)}{(CO\times A)+(COW\times((kdg\times A)+(ksw)))}\right) - (\text{penalty function}) \quad (۱)$$

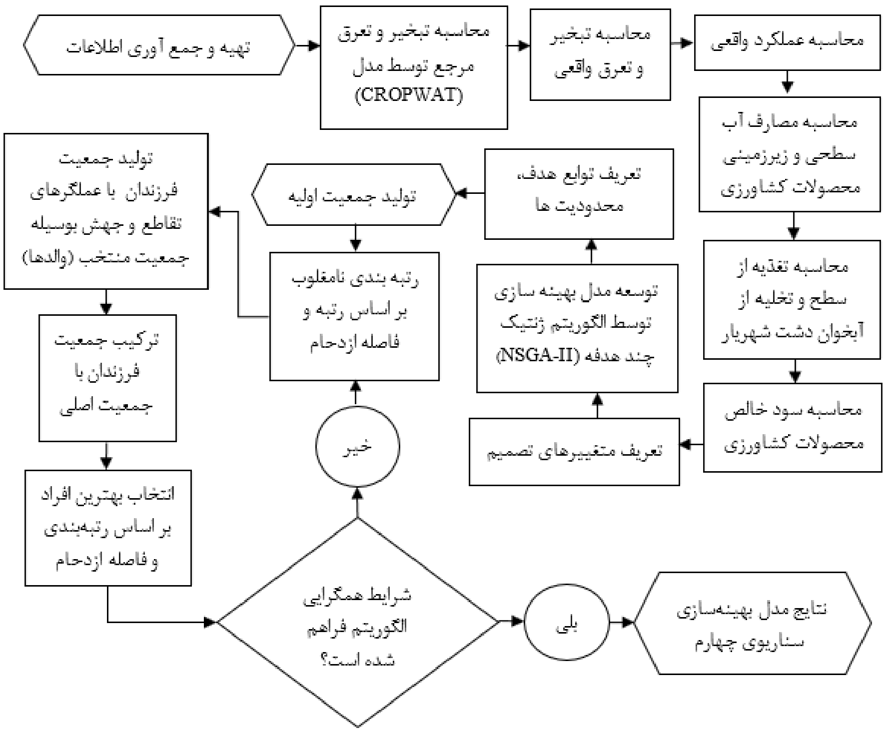
$$\text{penalty function}=\sum_{p}^{np}\left((Area_{max})^2\times\alpha\right)+\left((Area_{min})^2\times\beta\right) \quad (۲)$$

$$Area_{max}=\begin{cases} \text{if} & A - At_{max}\le 0 \quad , \quad 0 \\ \text{else} & A - At_{max} \end{cases} \quad (۳)$$

$$Area_{min}=\begin{cases} \text{if} & A - At_{min}\ge 0 \quad , \quad 0 \\ \text{else} & A - At_{min} \end{cases} \quad (۴)$$

۲-۶- محاسبهٔ تغییرات تراز آب زیرزمینی متناسب با مصرف محصولات کشاورزی

در روابط زیر، Z_2؛ تابع هدف دوم است. در تابع هدف دوم، wtch مقدار تغییرات تراز آب زیرزمینی حاصل از الگوی کشت بهینهٔ محصولات کشاورزی با واحد متر، input و output به‌ترتیب حجم ورودی و خروجی آب زیرزمینی در مرزهای محدودهٔ مورد مطالعه، dgw و igw حجم مصارف آب زیرزمینی در بخش‌های شرب، صنعت بوده و rech حجم نفوذ از مصارف، بارندگی، رودخانه و سیستم تغذیهٔ مصنوعی بر حسب مترمکعب است و به‌صورت ماهانه



شکل ۴- نمودار جریانی فرآیند محاسبات نسبت (درآمد به هزینه) و تغییرات تراز آب زیرزمینی

Figure 4- Flow diagram of the calculation process of the ratio (income to cost) and changes in the underground water level

و در سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ است. همچنین، در روابط زیر، kg و Ni به‌ترتیب، حجم مصارف آب زیرزمینی محصولات کشاورزی، حجم نیاز ناخالص آبیاری محصولات کشاورزی با واحد متر مکعب در هکتار برای هر محصول است. At_{max} حداکثر مساحت زیرکشت محصولات است که با واحد هکتار محاسبه شده و سطح زیرکشت فعلی محصولات نیز است. تابع جریمهٔ penalty function مقدار جریمهٔ افزوده شده به تابع هدف در صورت عدم رعایت تخصیص بهینهٔ مصرف آب زیرزمینی به محصولات کشاورزی زیرکشت، عدم رعایت تأمین نیاز ناخالص آبیاری محصولات کشاورزی به اندازهٔ مصارف آبی و نیز تخطی از محدودهٔ تغییرات تراز آب زیرزمینی، است. در این تحقیق با توجه به آمار و اطلاعات ماهانه و سالانهٔ تغییرات تراز آب زیرزمینی محدودهٔ مورد مطالعه و شرایط آبخوان، حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ΔL_{MAX} برابر ۰/۳ متر در نظر گرفته شد. در تابع جریمهٔ دوم ضرایب ثابت شامل γ، ω برابر 10^5 و λ برابر ۱۰ محاسبه شدند. همچنین، مقدار تغییرات تراز آبخوان و محدودیت حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی به‌صورت سالانه و برای کل محصولات و محدودهٔ مطالعاتی، مورد محاسبه قرار گرفته و بهینه شده است.

$$Z_2=\text{Minimize (wtch)} + \text{penalty function} \quad (۵)$$

$$\text{wtch} = \frac{\sum_t^{nt}(|\text{input-output}|)+(\text{rech})-(\text{dgw+igw})-\sum_p^{np}(\text{l}}{\text{area}\times S_y} \quad (۶)$$

$$\text{penalty function} =((\sum_p^{np} \text{Akdg})^2\times\gamma) + ((\text{Lwtch})^2\times\lambda)+ ((\sum_p^{np} \text{nid})^2\times\omega) \quad \text{Akdg} = \quad (۷)$$

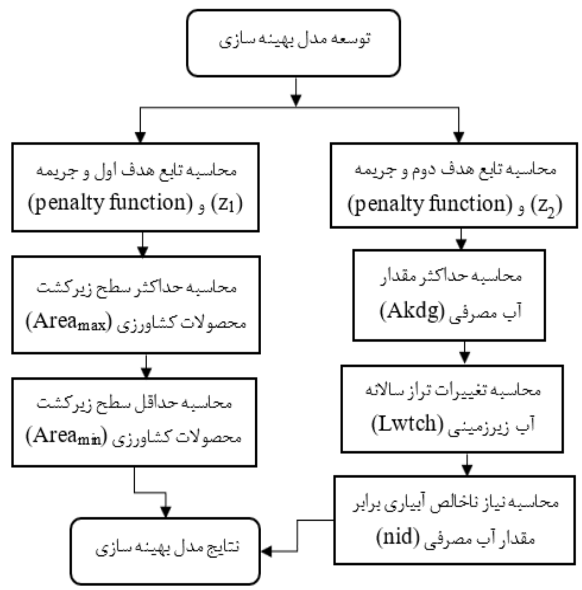
$$\begin{cases} \text{if} \quad (\text{ksw}+(\text{kdg}\times A)) - (\text{ksw}+(\text{kg}\times At_{max})) \le 0 \quad , \quad 0 \\ \text{else} \quad (\text{ksw}+(\text{kdg}\times A)) - (\text{ksw}+(\text{kg}\times At_{max})) \end{cases} \quad (۸)$$

$$\text{Lwtch} = \begin{cases} \text{if} \quad |\text{wtch}| - \Delta L_{MAX} \le 0 \quad , \quad 0 \\ \text{else} \quad |\text{wtch}| - \Delta L_{MAX} \end{cases} \quad (۹)$$

$$\text{nid} = \begin{cases} \text{if} \quad (\text{Ni}\times A) - (\text{ksw}+(\text{kdg}\times A)) = 0 \quad , \quad 0 \\ \text{else} \quad (\text{Ni}\times A) - (\text{ksw}+(\text{kdg}\times A)) \end{cases} \quad (۱۰)$$

مقادیر آب سطحی که متغیر مهم و تأثیرگذاری در مصارف آبی توسط محصولات کشاورزی است، در روابط (۸) و (۱۰) اعمال شده است، به‌دلیل این‌که بر افزایش یا کاهش سطح زیرکشت تأثیر گذاشته و بخشی از نیاز ناخالص آبی محصولات تأمین می‌کند. همچنین، این متغیر بر محاسبهٔ مقادیر بهینهٔ آب زیرزمینی نیز تاثیرگذار بوده و دقیق‌تر برآورد خواهد شد. Lwtch تغییرات تراز

سالانه است که با توجه به اطلاعات ماهانه و سالانهٔ تغییرات تراز آب زیرزمینی و شرایط آبخوان محدودهٔ مورد مطالعه باید کم‌تر یا مساوی حداکثر مجاز تغییرات تراز آب زیرزمینی ΔL_{MAX} باشد. به‌طور کلی در تحقیق حاضر، متغیر تصمیم برای سطح زیرکشت و حجم مصارف آب زیرزمینی هر محصول در نظر گرفته شده است، که تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با ۱۳۶ خواهد بود. هم‌چنین، اندازهٔ جمعیت کروموزم‌ها ۳۰۰ و تعداد تکرارها ۱۰۰۰ دور در نظر گرفته شد. ساختار محاسبات مدل بهینه‌سازی چندهدفه به‌صورت شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- الگوریتم محاسبات مدل بهینه‌سازی نسبت (درآمد به هزینه) و تغییرات تراز آب زیرزمینی

Figure 5- Calculation algorithm of optimization model of (income to cost) ratio and groundwater level changes

۳- نتایج و بحث

پس از اجرای مدل در حالت پایدار واسنجی مدل انجام شد. با توجه به بهینه نمودن پارامتر هدایت هیدرولیکی، اختلاف بین تراز مشاهداتی و شبیه‌سازی شده و خطای مدل کاهش یافت. به این منظور بعد از چندین دورهٔ محاسبه و واسنجی هدایت هیدرولیکی با استفاده از کد PEST تراز آب زیرزمینی در حالت پایدار با دقت مناسب و با خطای کم‌تر از دو متر محاسبه شد. هم‌چنین، خطای RMSE در این حالت ۰/۷۱ متر برآورد شد. حداکثر و حداقل میزان تفاوت (خطا) میان مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی به‌ترتیب برابر ۱/۷۳ و ۰/۰۰۱ متر محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصل شده، حداکثر مقدار هدایت هیدرولیکی حاصل از مرحلهٔ واسنجی حالت پایدار برابر ۶۲/۳۸ و حداقل مقدار آن ۴/۴۸ متر بر روز برآورد شد. حداقل مقدار این متغیر مربوط به نواحی جنوبی محدوده و حداکثر آن مربوط به نواحی شمالی محدوده است.

در تحقیق حاضر، مدل مورد نظر سطح آب زیرزمینی را در حالت پایدار با دقت مطلوب محاسبه نموده است. حداکثر مقدار آب‌دهی ویژه در مرحلهٔ واسنجی حالت ناپایدار ۰/۰۹۷۶ و مربوط به نواحی شمالی محدوده و به‌دلیل بزرگ بودن تشکیلات آبرفتی این مناطق بوده و حداقل مقدار آن ۰/۰۰۰۳ و مربوط به نواحی جنوبی محدوده است. هم‌چنین، خطای RMSE در حالت ناپایدار و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۹۸ متر محاسبه شد. بنابراین با توجه به نتایج این تحقیق، مدل تا حد قابل‌قبولی شرایط جریان آب زیرزمینی در آبخوان را شبیه‌سازی نموده است. جدول ۳ بیلان آب زیرزمینی دشت شهریار توسط مدل در شرایط پایدار، ناپایدار و صحت‌سنجی را نمایش می‌دهد. مدل واسنجی شده در حالت پایدار مربوط به میانگین سه ماه بهمن، اسفند و فروردین سال ۱۳۹۳ است. و همان‌طورکه در جدول مذکور مشخص است، بیلان آب زیرزمینی در این حالت ۰/۰۰۹۷- میلیون مترمکعب برآورد شده است. به‌دلیل این‌که در شرایط پایدار، بیلان باید صفر و مجموع ورودی‌ها و خروجی‌ها مساوی باشد، نتیجه مدل‌سازی بیلان آب زیرزمینی در شرایط پایدار تغییرات ذخیره را نزدیک به صفر برآورد نموده است که نشان‌دهندهٔ واسنجی مناسب مدل است. در حالت پایدار بسیاری از پارامترها یا اعمال نمی‌شوند یا با فرض ثابت بودن اعمال می‌شوند؛ بنابراین، نتایج بیلان در این حالت صفر یا نزدیک به آن است. در حالت ناپایدار به علت این‌که پارامترها با توجه به دورهٔ زمانی ماهانهٔ سال‌های آبی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ به‌صورت متغیر است، تا حدودی به شرایط واقعی نزدیک شده و مقادیر ورودی و خروجی با یک‌دیگر متفاوت می‌باشند. بنابراین، مقدار بیلان در این حالت منفی یا مثبت خواهد بود. با توجه به جدول ۲، بیلان حالت ناپایدار و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۳۴۴/۶۸۶۶- و ۱۰۹/۹۸۳۶- میلیون مترمکعب است و مشخص می‌شود که بیلان محدودهٔ مورد مطالعه منفی بوده و نزدیک به مقدار واقعی است.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌ساز GMS، سناریوی شمارهٔ یک بر تراز آب زیرزمینی آبخوان تأثیر چشم‌گیری نداشته است و سطح آب زیرزمینی به میزان ۰/۱۷ متر در سال نسبت به تراز آب زیرزمینی مشاهداتی افزایش می‌یابد. بنابراین، این سناریو نشان می‌دهد که با افزایش ۵۰ درصد حجم آب تغذیه شده، نمی‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر تراز آب زیرزمینی داشته باشد. سناریوی شمارهٔ دو بر

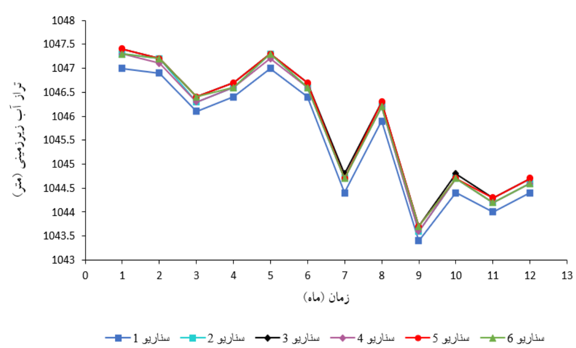
تراز آب زیرزمینی آبخوان تأثیر چشم‌گیری داشته و باعث افزایش سطح آب زیرزمینی چشم‌گیری داشته و باعث افزایش سطح آب زیرزمینی به میزان ۳/۲۵ متر در سال نسبت به تراز آب زیرزمینی مشاهداتی شده است. این سناریو با توجه به نتایج آن، می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر سطح آب زیرزمینی داشته باشد.

جدول ۳- بیلان حالت‌های مختلف محاسباتی (میلیون مترمکعب)

Table 3- The budget of different calculation modes (MCM)

جریان	پارامتر	وضعیت		
		پایدار	ناپایدار	صحت‌سنجی
ورودی (میلیون مترمکعب)	رودخانه	5.2943	49.82	32.4098
	مرز	26.6703	366.213	275.4763
	تغذیه از سطح و آب‌های برگشتی	94.6984	743.2374	374.9335
	مجموع ورودی	126.6629	1159.2704	682.8196
خروجی (میلیون مترمکعب)	رودخانه	0.9	4.22	7.9406
	چاه	123.9241	1485.6398	774.9396
	مرز	1.8484	14.0972	9.923
	مجموع خروجی	126.6726	1503.957	792.8032
اختلاف (ورودی - خروجی)		-0.0097	-344.6866	-109.9836

سناریوی شمارهٔ سه همانند سناریوی شمارهٔ دو بر تراز آب زیرزمینی آبخوان تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته و باعث افزایش سطح آب زیرزمینی به اندازهٔ ۴/۲۸ متر در سال شده است. شکل ۶ تراز آب زیرزمینی حاصل از سناریوهای GMS را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل مورد نظر، تراز آب زیرزمینی حاصل از سناریوی سوم نسبت به تراز آب زیرزمینی حاصل از سناریوهای دیگر در سطح بالاتری قرار دارد. سناریوی شمارهٔ چهار مانند سناریوهای دو و سه دارای تأثیرگذاری مناسبی بر تراز آب زیرزمینی بوده و با اعمال این سناریو سطح آب زیرزمینی ۳/۱۲ متر در سال افزایش خواهد یافت. هم‌چنین، سناریوی شمارهٔ پنج به اندازهٔ ۴/۱۴ متر در سال منجر به افزایش سطح آب زیرزمینی خواهد شد. در نهایت سناریوی شمارهٔ شش با حذف مصارف به اندازهٔ شرب و صنعت، تأثیر آن‌ها و مصارف کشاورزی بر آبخوان را تحلیل می‌نماید.



شکل ۶- تراز آب زیرزمینی حاصل از سناریوهای GMS

Figure 6- Groundwater level resulting from GMS scenarios

با اعمال سناریوی حاضر، تراز آب زیرزمینی ۳/۴۹ متر در سال افزایش خواهد یافت. ولی مسأله مهم، بهره‌برداری از چاه‌های کشاورزی است که نشان می‌دهد به تنهایی باعث کاهش تراز آب زیرزمینی می‌شود؛ زیرا مصارف کشاورزی به‌دلیل حجم برداشت قابل توجه از چاه‌های کشاورزی، زیاد بوده و تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش تراز آب زیرزمینی می‌گذارد، ولی در سناریوی حاضر به‌دلیل کاهش مصارف، تأثیر آن کم‌تر از حالت فعلی شده است.

مقدار افزایش تراز آب زیرزمینی در این سناریو نسبت به سناریوی پنج و سه کم‌تر است. بنابراین، با توجه به مطالب بیان شده، استفاده به اندازهٔ مصارف کشاورزی برای کل مصارف نیز زیاد است. ولی در کل سناریوی مورد نظر منجر به افزایش تراز آب زیرزمینی خواهد شد که مناسب بوده، ولی کافی نخواهد بود. بنابراین، بهترین سناریوی منتخب بر اساس تراز آب زیرزمینی، سناریوی شمارهٔ سه است. در حالت کلی با توجه به نتایج به‌دست آمده، بهترین سناریوهای منتخب به‌ترتیب سناریوی شماره سه، پنج، شش، دو، چهار و یک است. در این زمینه، OstadAliAskari (2019) با استفاده از مدل MODFLOW، سه سناریوی کاهش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصدی برداشت از آبخوان برخوار اصفهان در ایران را به‌منظور کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر آبخوان تعریف نمودند. نتایج نشان داد که میانگین سطح آب زیرزمینی به‌ترتیب ۱۴، ۱۱ و ۷ متر در بازهٔ زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۴ میلادی کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج اصلی مطالعه مشخص شد که کاهش ۵۰ درصدی برداشت از آب‌های زیرزمینی، ممکن است سطح آب‌های زیرزمینی

را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد تا پایداری سفره‌های زیرزمینی در منطقهٔ مورد مطالعه بازیابی شود.

همچنین، Shakoor et al. (2018) تحقیقی برای تعیین کمیت پمپاژ آب زیرزمینی و شناسایی مناطق تخلیهٔ آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW انجام دادند. در تحقیق آن‌ها سه سناریوی پمپاژ تا سال ۲۰۳۰ میلادی توسعه داده شد. سناریوهای مورد مطالعه شامل سناریوی اول، حفظ نرخ پمپاژ فعلی برای دورهٔ مورد مطالعه، سناریوی دوم، افزایش نرخ پمپاژ مطابق با روند تاریخی و سناریوی سوم، تأمین منابع آب کانال و الگوهای آب زیرزمینی تنظیم شده، بود. نتایج سناریوی اول نشان داد که سطح آب زیرزمینی برای دورهٔ مورد مطالعه تا ۱۴ متر کاهش می‌یابد. نتایج سناریوی دوم حداکثر کاهش سطح آب زیرزمینی را نشان داد که تا سال ۲۰۳۰ میلادی ۱۸ متر خواهد بود. و سناریوی سوم مشخص نمود که منابع آب کانال و آب زیرزمینی تنظیم شده در میان بخش بالایی و میانی منطقه مورد مطالعه را ۲ تا ۳ متر در سال بازیابی می‌کند.

با توجه به شکل ۷ در اکثر بازهٔ زمانی مورد نظر، تراز آب زیرزمینی حاصل از برآورد مدل‌های MODFLOW و شبکهٔ عصبی مصنوعی ANN کم‌تر از میزان تراز آب زیرزمینی مشاهداتی است. از این‌رو اختلاف کم‌تر از دو متر بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی (مدل‌های شبیه‌ساز) وجود دارد. همچنین، در این بازهٔ زمانی اختلاف بسیار کمی بین مقادیر حاصل از شبکهٔ عصبی و MODFLOW وجود دارد. بنابراین عملکرد مدل MODFLOW و نتایج آن مطلوب بوده است ولی در تحقیق حاضر مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند، تراز آب زیرزمینی حاصل از مدل MODFLOW را به‌صورت مطلوب و در مدت زمان کم‌تر نسبت به آن برآورد نموده است.

شکل ۷- تراز آب زیرزمینی مشاهده‌ای، شبکهٔ عصبی مصنوعی و شبیه‌ساز GMS

Figure 7- Observational groundwater level, artificial neural network, and GMS simulator

جدول ۴ سطح زیرکشت، حجم آب مصرفی زیرزمینی، حجم نیاز آبی و نسبت درآمد به هزینه فعلی و بهینه نواحی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از مدل بهینه‌سازی، بیش‌ترین میزان نیاز آبیاری بهینه به‌ترتیب مربوط به ناحیهٔ اسلامشهر با ۶۶ درصد سپس شهریار با ۲۰ درصد و در نهایت رباط کریم با ۱۴ درصد است. همچنین، ناحیهٔ اسلامشهر در شرایط بهینه با ۵۰ درصد بیش‌ترین مصرف آب زیرزمینی در بخش کشاورزی را دارد سپس شهریار با ۳۱ درصد و در آخر رباط کریم با ۱۹ درصد، کم‌ترین میزان مصرف آب زیرزمینی را دارد.

جدول ۴- وضعیت فعلی و بهینهٔ متغیرهای مورد بررسی نواحی مورد مطالعه

Table 4- The current and optimal status of the investigated variables of the study areas

وضعیت	عنوان متغیر	رباط کریم	اسلامشهر	شهریار
فعلی	مساحت کشت (هکتار)	10342	48873	15505
	آب مصرفی زیرزمینی (میلیون متر مکعب)	69	165	291
	نیاز آبی (میلیون متر مکعب)	100	572	178
	نسبت درآمد به هزینه	1.77	1.61	1.98
بهینه	مساحت کشت (هکتار)	7844	30732	9239
	آب مصرفی زیرزمینی (میلیون متر مکعب)	26	68	42
	نیاز آبی (میلیون متر مکعب)	77	360	107
	نسبت درآمد به هزینه	2.09	1.71	2.21

در حالت کلی بر اساس محدویت‌های شرایط فعلی محدودهٔ مطالعاتی، سطح زیرکشت و حجم نیاز آبی بهینهٔ کل محدوده نسبت به شرایط فعلی به میزان ۳۶ درصد و حجم مصرف آب زیرزمینی ۷۴ درصد کاهش یافته‌اند. با توجه به این موضوع، Fard et al.(2022) یک سیستم عامل خودکار برای منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی پیوندی در منطقهٔ آبیاری واقع در مرکز ایران تعریف نمودند. به این منظور سیستم توزیع خودکار SW را در MATLAB توسعه داده و با سیستم مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی GMS یکپارچه نمودند و به این صورت یک سیستم عامل هوشمند SW-GW را در سناریوهای کمبود آب ارائه دادند. نتایج کاهش برداشت آب از آبخوان را پس از یک سال، حدود ۱۶ درصد نشان داد. Varade and Patel (2019) یک مدل بهینه‌سازی فرموله شده با استفاده از الگوریتم آموزش مبتنی بر یادگیری TLBO و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی، تنها منبع تأمین نیاز آبیاری منطقهٔ سینار تالوکا از ناحیهٔ ناسیک ایالت

ماهاراشترا در هندوستان ارائه نمودند. بر اساس نتایج تحقیق آن‌ها، مصرف آب زیرزمینی ۱۶/۵۲ درصد کاهش می‌یابد.

مساحت کشت فعلی و بهینهٔ ناحیهٔ اسلامشهر از سایر نواحی دیگر بیش‌تر بوده سپس ناحیهٔ شهریار و در آخر ناحیهٔ رباط کریم از نظر سطح زیرکشت دارای وسعت هستند. با وجود این‌که در هر ناحیهٔ و در کل محدودهٔ مطالعاتی، سطح زیرکشت بعضی از محصولات افزایش یافته، ولی مساحت کشت اکثر محصولات کاهش یافته و این موضوع در محصولاتی که مساحت کشت آن‌ها وسیع است چشم‌گیر می‌باشد. بیش‌ترین نسبت درآمد به هزینه در حالت فعلی و بهینهٔ مربوط به ناحیهٔ شهریار سپس ناحیهٔ رباط کریم و در انتها ناحیهٔ اسلامشهر کم ترین نسبت درآمد به هزینه را دارد. مقادیر نسبت درآمد به هزینه در حالت بهینهٔ بیش‌تر از شرایط فعلی است. زیرا در حالت بهینه، مقدار آب مصرفی و هزینهٔ آن (هزینهٔ متغیر) برای اکثر محصولات کاهش یافته است. هم‌چنین، برای بعضی از محصولات که مقدار این دو پارامتر افزایش یافته، سطح زیرکشت آن‌ها نیز افزایش یافته که این موضوع منجر به افزایش نسبت درآمد به هزینه این محصولات به مقدار بسیار کمی شده است.

بنابراین، با توجه به این موضوع، کاهش هزینهٔ آب مصرفی در افزایش نسبت درآمد به هزینهٔ محصولات کشاورزی تأثیر چشم‌گیری داشته است. هم‌چنین، دلیل این‌که مقدار درآمد نسبت به هزینه در شرایط فعلی و بهینه در ناحیهٔ شهریار از رباط کریم و هر دوی آن‌ها نسبت به ناحیهٔ اسلامشهر بیش‌تر است این است که، نسبت مقدار این پارامتر برای اکثر محصولات ناحیهٔ شهریار نسبت به رباط کریم و این دو ناحیه در مقایسه با محصولات ناحیهٔ اسلامشهر بیش‌تر است.

در این تحقیق، مصارف آبی شامل آب سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی است و به‌دلیل این‌که سیاست بهره‌برداری از منابع آبی در تحقیق فعلی، آب سطحی را در اولویت مصارف قرار می‌دهد. ابتدا نیاز آبی بخش کشاورزی توسط آب سطحی تأمین شده سپس در صورت کمبود منابع آب سطحی، منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر، میزان مصرف آب محصولات کشاورزی در ناحیه‌های شهریار، اسلامشهر و رباط کریم و در شرایط فعلی به‌ترتیب برابر ۵۲، ۳۱ و ۱۷ درصد و مقادیر بهینهٔ آن‌ها برابر ۳۶، ۳۹ و ۲۵ درصد است. با توجه به مقادیر فعلی و بهینهٔ حجم مصارف آبی (سطحی و زیرزمینی)، بیش‌ترین حجم مصارف در حالت فعلی مربوط به ناحیهٔ شهریار و سپس اسلامشهر بوده، و کم‌ترین مقدار در این حالت مربوط به رباط کریم است. در حالی‌که در شرایط بهینه، حجم مصارف در ناحیهٔ اسلامشهر از سایر نواحی دیگر بیش‌تر است و نیز ناحیهٔ رباط کریم بعد از شهریار بیش‌ترین مقدار حجم مصارف بهینه را دارد. در حالت بهینه مصرف آب محصولات کشاورزی ناحیهٔ رباط کریم و اسلامشهر نسبت به کل مصرف بهینهٔ محدوده در مقایسه با حالت فعلی بیش‌تر برآورد شده است ولی حجم مصارف نواحی مورد نظر در شرایط بهینه کم‌تر از شرایط فعلی است. در نهایت مصرف آب در بخش کشاورزی در شرایط بهینه نسبت به وضعیت فعلی ۴۴ درصد کاهش یافته است.

Mohammadzadeh et al. (2022) یک مدل برنامه‌ریزی به منظور بهینه‌سازی الگوی کشت دشت مراغه- بناب ارائه نمودند. نتایج تحقیق نشان داد، که تحت سناریوی دسترسی سالانه ۶۰ میلیون مترمکعب آب، مصرف آب نسبت به شرایط موجود از نظر کشاورزان ۴۲ درصد و از نظر کارشناسان ۵۵ درصد کاهش خواهد یافت. Shirshahi et al. (2020) در تحقیقی از یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی با به حداکثر رساندن سود و به حداقل رساندن اختلال در پایداری منابع آب در شعب و کانال‌های توزیع در منطقهٔ قزوین، ایران به‌منظور بهینه‌سازی الگوی کشت، استفاده نمودند. نتایج حاصل شده نشان داد که در منطقهٔ مورد نظر، میزان آب مصرفی در شرایط مطلوب ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت.

با توجه به نتایج حاصل شده از مدل بهینه‌سازی، بیش‌ترین سطح زیرکشت زراعی بهینه در ناحیهٔ رباط کریم مربوط به محصولات ذرت علوفه‌ای، سایر سبزیجات و ذرت دانه‌ای بوده که به‌ترتیب برابر ۸ ، ۱۰ و ۲۹ درصد است. این متغیر در ناحیهٔ اسلامشهر برای محصولات یونجه، ذرت علوفه‌ای، سایر سبزیجات و ذرت دانه‌ای برابر ۰/۵۸، ۹ ، ۱۱ و ۲۶ درصد و در ناحیهٔ شهریار برای محصولات یونجه، ذرت علوفه‌ای، پیاز، سایر سبزیجات و ذرت دانه‌ای برابر ۰/۴ ، ۱۵ ، ۰/۱۵ ، ۲۰ و ۲۷ درصد است. هم‌چنین، بیش‌ترین سطح زیرکشت باغی بهینه در ناحیهٔ رباط کریم مربوط به محصولات گلابی، انار و انگور بوده که به‌ترتیب برابر ۲، ۰/۳۳ و ۸۴ درصد است. این متغیر در ناحیهٔ اسلامشهر برای این محصولات که بیش‌ترین مساحت کشت بهینه را دارند برابر ۲، ۸ و ۲۲ درصد بوده و در ناحیهٔ شهریار برای محصولات گلابی و انگور برابر ۸ و ۱۲ درصد است.

Azadi et al. (2022) مدلی را با استفاده از رویکرد دینامیک سیستم برای شبیه‌سازی الگوی کشت شبکهٔ آبیاری و زهکشی کوثر در ایران و تخلیهٔ و شوری آب زهکشی از مزارع تحت شبکه و بهینه‌سازی سود اقتصادی محصولات زراعی توسط الگوریتم پاول توسعه دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ذرت دانه‌ای و یونجه شرایط متفاوتی دارند و با در نظر گرفتن همه سناریوها تولید آن‌ها

مناسب است. بنابراین به‌دلیل این‌که متغیرهای حجم مصرف آب و درآمد به هزینهٔ بهینهٔ محصولات کشاورزی فوق در نواحی مورد مطالعه مناسب است، می‌توان این محصولات را با توجه به شرایط منابع آبی، اقلیمی و اقتصادی نواحی در الگوی کشت بیش‌تر مورد استفاده قرار داد. جداول ۵ و ۶ به‌ترتیب مساحت کشت، کل آب مصرفی و نسبت درآمد به هزینه محصولات زراعی و باغی در حالت بهینه در محدودهٔ مطالعاتی را نشان می‌دهند.

در تحقیق حاضر تغییرات تراز آب زیرزمینی با توجه به مصارف آب زیرزمینی محصولات کشاورزی محدودهٔ مورد مطالعه بهینه برآورد شده است. همان‌طورکه در جدول ۷ مشاهده می‌شود مقدار تغییرات تراز و بیلان بهینهٔ آب زیرزمینی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند؛ به‌طوری‌که همزمان با کاهش مصارف آب زیرزمینی به‌منظور آبیاری محصولات کشاورزی، تغییرات تراز آب زیرزمینی ۱۷ متر و بیلان آب زیرزمینی به میزان ۳۹۴ میلیون مترمکعب افزایش داشته‌اند. این در حالی است که بیلان حاصل از سناریوی سوم GMS، ۲۰۳ میلیون مترمکعب برآورد شد که نسبت به بیلان حاصل از این مدل در سال آبی ۱۳۹۵، ۳۱۳ میلیون مترمکعب افزایش یافته است که این موضوع منجر به افزایش تغییرات سطح آب زیرزمینی به اندازهٔ ۱۳ متر شده است. هم‌چنین، مقدار این متغیر برای سناریوی سوم نسبت به مدل شبکهٔ عصبی ۱۱ متر برآورد شد. در مطالعه‌ای Nouri et al. (2019) یک الگوی کشت بهینه برای منطقهٔ نجف‌آباد واقع در دشت مرکزی ایران با هدف بازیابی آب‌های زیرزمینی با استفاده از رویکرد مبتنی بر عامل توسعه دادند. آن‌ها از مدل مبتنی بر عامل (ABM)، برای یادگیری عوامل از یک‌دیگر و از سیستم استنتاج فازی (FIS) برای شبیه‌سازی رفتار عوامل کشاورزی و نیز از برنامه‌ریزی خطی به‌منظور به حداکثر رساندن درآمد کشاورزان استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در یک سناریوی عادی با برداشت فعلی آب زیرزمینی، سطح آب به‌طور متوسط ۰/۱۸ متر در سال کاهش می‌یابد و در مقابل، سطح آب در سناریوی بازیابی آبخوان به‌طور متوسط ۰/۴۸ متر افزایش خواهد یافت. بنابراین، الگوی برنامه‌ریزی، الگوی کشت و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی در مقایسه با سناریوی سوم شبیه‌ساز GMS، از نظر برآورد حجم بهره‌برداری، بیلان و تغییرات سطح آب زیرزمینی و در مقایسه با مدل شبکهٔ عصبی از نظر تغییرات تراز آب زیرزمینی مناسب‌تر بوده و به‌عنوان الگوی برنامه‌ریزی بهینهٔ آبی منتخب ارزیابی شد. با توجه به نتایج تحقیق مورد نظر، مصارف از آب زیرزمینی به‌ویژه در بخش کشاورزی تأثیر قابل‌توجهی بر شرایط کمی آبخوان داشته و باعث کاهش بیلان و به‌دنبال آن تغییرات تراز آب زیرزمینی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل شده از مدل بهینه‌سازی، سطح زیرکشت و حجم نیاز آبی بهینهٔ کل محدودهٔ مطالعاتی نسبت به شرایط فعلی به میزان ۳۶ درصد و حجم مصرف آب زیرزمینی ۷۴ درصد کاهش یافته‌اند. در تحقیق حاضر، بیش‌ترین نسبت درآمد به هزینه در حالت فعلی و بهینهٔ مربوط به ناحیهٔ شهریار سپس رباط کریم و در آخر

جدول ۵- مساحت کشت بهینهٔ محصولات زراعی و باغی در نواحی مورد مطالعه

Table 5- Optimum cultivation area of agricultural and garden crops in the study areas

نوع محصول	نام محصول	سطح زیر کشت بهینه (هکتار)			نوع محصول	نام محصول	سطح زیر کشت بهینه (هکتار)		
		رباط کریم	اسلامشهر	شهریار			رباط کریم	اسلامشهر	شهریار
زراعی	گندم	584	8077	749	باغی	سیب	56	44	593
	جو	1775	7519	428		گیلاس	25	0	244
	پنبه	0	25	11		گلابی	60	28	471
	کلزا	49	94	28		زرد آلو و قیسی	66	37	974
	خیار	0	52	4		هلو، شلیل، شفتالو	97	126	1220
	یونجه	0	170	13		آلو، گوجه	120	79	1473
	ذرت علوفه‌ای	350	2606	479		زیتون	0	104	0
	پیاز	0	0	5		بادام زمینی	3	8	39
	گوجه فرنگی	0	98	24		انار	11	127	0
	سایر سبزیجات	454	3076	644		گردو	60	102	156
	ذرت دانه‌ای	1302	7473	881		پسته	3	486	2
	خربزه	0	24	5		انگور	3237	451	968
	–	-	-	-		توت درختی	2	4	9
	–	-	-	-		به	0	7	36
	–	-	-	-		انجیر	0	138	14

جدول ۶- کل آب مصرفی و نسبت درآمد به هزینه محصولات زراعی و باغی در حالت بهینه در نواحی مورد مطالعه

Table 6- Total water consumption and ratio of income to cost of agricultural and garden crops in the optimal state in the study areas

نوع محصول	نام محصول	کل آب مصرفی بهینه (میلیون متر مکعب برهکتار)			نسبت درآمد به هزینه بهینه		
		رباط کریم	اسلامشهر	شهریار	رباط کریم	اسلامشهر	شهریار
زراعی	گندم	6.44	28.4	8.2	1.57	1.7	1.63
	جو	19.24	26.96	4.68	1.07	1.05	1.19
	پنبه	0.00	0.32	0.14	0.00	0.92	1.10
	کلزا	0.54	0.36	0.31	1.05	1.12	1.09
	خیار	0.00	0.55	0.05	0.00	1.11	1.43
	یونجه	0.00	4.18	0.98	0.00	2.02	4.65
	ذرت علوفه‌ای	3.87	9.24	5.28	2.83	2.12	2.32
	پیاز	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	3.16
	گوجه فرنگی	0.00	0.59	0.37	0.00	1.88	2.87
	سایر سبزیجات	6.03	13.17	8.56	9.17	9.06	8.87
	ذرت دانه‌ای	14.35	26.54	9.72	2.69	1.86	2.57
	خربزه	0.00	0.26	0.07	0.00	2.06	1.25
باغی	سیب	0.17	0.54	7.16	1.60	1.12	1.38
	گیلاس	0.03	0.00	2.75	2.10	0.00	1.58
	گلابی	0.18	0.21	5.69	1.68	1.27	2.08
	زرد آلو و قیسی	0.34	0.43	10.95	1.35	0.92	1.77
	هلو، شلیل، شفتالو	0.73	0.56	13.71	1.15	1.2	1.43
	آلو، گوجه	0.70	0.34	16.57	1.47	1.24	1.88
	زیتون	0.00	0.83	0.00	0.00	1.08	0.00
	بادام زمینی	0.01	0.14	0.61	1.51	0.96	1.97
	انار	0.19	0.69	0.00	1.89	2.11	0.00
	گردو	0.12	0.74	1.94	1.57	1.05	1.91
	پسته	0.03	1.80	0.06	1.35	1.16	1.18
	انگور	22.8	1.21	7.78	2.43	2.28	3.31
	توت درختی	0.02	0.45	0.66	1.22	0.91	1.51
	به	0.00	0.11	0.25	0.00	1.23	1.99
	انجیر	0.00	0.66	0.5	0.00	1.21	1.23

جدول ۷- بیلان و تغییرات تراز حاصل از برآورد GMS و مدل بهینه‌سازی

Table 7- Budget and level changes resulting from the estimation of the GMS and optimization model

سال آبی	برآورد GMS		برآورد مدل بهینه‌سازی	
	بیلان (میلیون متر مکعب)	تغییرات تراز (متر)	بیلان (میلیون متر مکعب)	تغییرات تراز (متر)
1395	-110	-5	284	12

اسلامشهر کم‌ترین مقدار این پارامتر را دارد. میزان مصرف آب محصولات کشاورزی در ناحیه‌های شهریار، اسلامشهر و رباط کریم و در شرایط فعلی به‌ترتیب برابر ۵۲، ۳۱ و ۱۷ درصد و مقادیر بهینهٔ آن‌ها برابر ۳۶، ۳۹ و ۲۵ درصد است. حجم مصرف آب کشاورزی نیز در حالت بهینه نسبت به شرایط فعلی ۴۴ درصد کاهش یافته است. بیش‌ترین سطح زیر کشت زراعی بهینه در ناحیهٔ رباط کریم مربوط به محصولات ذرت علوفه‌ای، سایر سبزیجات و ذرت دانه‌ای و در ناحیهٔ اسلامشهر، محصولات یونجه، ذرت علوفه‌ای، سایر سبزیجات و ذرت دانه‌ای و در ناحیهٔ اسلامشهر، محصولات یونجه، ذرت علوفه‌ای، سایر سبزیجات و ذرت دانه‌ای و در ناحیهٔ شهریار، محصولات یونجه، ذرت علوفه‌ای، پیاز، سایر سبزیجات و ذرت دانه‌ای است. بیش‌ترین سطح زیرکشت باغی بهینه نیز در ناحیهٔ رباط کریم و اسلامشهر مربوط به محصولات گلابی، انار و انگور بوده و در ناحیهٔ شهریار محصولات گلابی و انگور است. در این

تحقیق، تغییرات تراز آب زیرزمینی با توجه به مصارف آب زیرزمینی محصولات کشاورزی محدودهٔ مورد مطالعه، بهینه برآورد شده است که در این حالت مقدار تغییرات تراز و بیلان آب زیرزمینی همزمان با کاهش مصارف آب زیرزمینی بخش کشاورزی افزایش قابل ملاحظه‌ای به اندازهٔ ۱۷ متر و ۳۹۴ میلیون مترمکعب داشته‌اند. هم‌چنین، بیلان حاصل از سناریوی سوم GMS، ۲۰۳ میلیون مترمکعب برآورد شد که نسبت به بیلان حاصل از این مدل در سال آبی ۱۳۹۵، ۳۱۳ میلیون مترمکعب افزایش یافته است و باعث افزایش تغییرات سطح آب زیرزمینی به اندازهٔ ۱۳ متر شده است. و مقدار تغییرات تراز آب زیرزمینی حاصل از سناریوی سوم نسبت به مدل شبکهٔ عصبی ۱۱ متر برآورد شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده و شرایط منابع آبی، اقلیمی، اقتصادی در هر ناحیه می‌توان محصولاتی مانند ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای سبزیجات، یونجه، پیاز، انگور گلابی و انار را بیش‌تر مورد توجه قرار داد؛ زیرا مقدار درآمد به هزینه و حجم آب مصرفی آن‌ها مناسب بوده و این عوامل در افزایش سود خالص و تغییرات تراز آب زیرزمینی بسیار مؤثر است و باعث جلوگیری از بروز بحران آبی و مشکلات پیچیده در این زمینه می‌شوند. هم‌چنین، برنامه‌ریزی الگوی کشت و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی در مقایسه با سناریوی سوم GMS و مدل شبکهٔ عصبی، به‌عنوان الگوی برنامه‌ریزی بهینهٔ آبی منتخب ارزیابی شد. بنابراین، با اعمال سیاست‌های این تحقیق و مدیریت و کنترل بهینهٔ الگوی کشت محصولات کشاورزی و منابع آبی در دسترس، می‌توان علاوه‌بر پیش‌گیری از بروز بحران در مسائل آبی، مسائل محیط زیستی و اقتصادی را نیز کاهش داد.

منابع

اسدزاده شرفه، حبیبه، و رئوف، مجید (۱۳۹۷). مقایسه کارایی مصرف آب در سیستم‌های آبیاری بارانی و هیدروفلوم (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *مدیریت آب و آبیاری*، ۸(۱)، ۵۵–۶۸. doi:10.22059/jwim.2018.239976.556

احسانی کلی‌کند، سمانه، نظری، بیژن، رمضانی اعتدالی، هادی، و ستوده‌نیا، عباس (۱۳۹۷). تعیین الگوی کشت بهینه با هدف سازگاری با کم آبی و افزایش درآمد کشاورزان در شرایط تحویل حجمی. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۵(۱)، ۷۱–۷۸.

صالحی شفا، نیما، بابازاده، حسین، آقایاری، فیاض، و صارمی، علی (۱۴۰۱). تعیین الگوی کشت مطلوب با تأکید بر مصارف بهینه آب کشاورزی در دشت شهریار تهران. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۶(۱)، ۱۱۹–۱۳۳. dor: 20.1001.1.20087942.1401.16.1.10.7

References

Alobid, M., Derardja, B., & Szűcs, I. (2022). Economic analysis of an optimized irrigation system: case of Sant'Arcangelo, Southern Italy. *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, 11(1), 134-155.

Asadzadeh Sharafeh, H., & Raoof, M. (2018). Comparison of water use efficiency in sprinkler and hydroflume irrigation systems (case study: Ardabil Plain). *Journal of Water and Irrigation Management*, 8(1), 55-68. doi:10.22059/jwim.2018.239976.556 [In Persian]

Azadi, S., Nozari, H., Ghanbarian, B., & Marofi, S. (2022). Optimizing cropping pattern to improve the performance of irrigation network using system dynamics—Powell algorithm. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 64547-64559. doi:10.1007/s11356-022-20335-6

Bayat, M., Eslamian, S., Shams, R., & Hajiannia, A. (2020). Groundwater level prediction through GMS software–case study of Karvan area, Iran. *Quaestiones Geographicae*, *39*(3), 139-145. doi:10.2478/quageo-2020-0028

Bohidar, A.K., & Ahmad, I. (2021). Development of conceptual model and groundwater flow modeling using GMS software: a case study for Dharsiwa Block, Chhattisgarh, India. Pp. 151-164, In: *Groundwater Resources Development and Planning in the Semi-Arid Region*, Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-68124-1_8

Chen, Y., Zhou, Y., Fang, S., Li, M., Wang, Y., & Cao, K. (2022). Crop pattern optimization for the coordination between economy and environment considering hydrological uncertainty. *Science of the Total Environment*, 809, 151152. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151152

Dai, C., Qin, X.S., Chen, Y., & Guo, H.C. (2018). Dealing with equality and benefit for water allocation in a lake watershed: a Gini-coefficient based stochastic optimization approach. *Journal of Hydrology*, 561, 322-334. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.04.012

Dehghanipour, A.H., Schoups, G., Zahabiyoun, B., & Babazadeh, H. (2020). Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: A simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran. *Agricultural water management*, 241, 106353. doi:10.1016/j.agwat.2020.106353

Ehsani kolikand, S., Nazai, B., Ramezai Etedali, H., & Sootodehnia, A. (2018). The determination of optimum cropping pattern with the aim of adaptation to water shortage conditions and increasing farmers' income in terms of volume delivery. *Journal of Water Management in Agriculture*, 5(1), 71-78. [in Persian]

Fard, A.A., Shahdany, S.M.H., Javadi, S., & Maestre, J.M. (2022). Developing an automatic conjunctive surface-groundwater operating system for sustainable agricultural water distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194, 106774. doi:10.1016/j.compag.2022.106774

Ghoochanian, M., Etebari, B., & Akbarpour, A. (2013). Integrating groundwater management with weap and modflow models (case study: Birjand Plain, east of Iran). MODFLOW and More 2013: Translating Science into Practice Conference, Colorado.

Jang, C.S., Chen, C.F., Liang, C.P., & Chen, J.S. (2016). Combining groundwater quality analysis and a numerical flow simulation for spatially establishing utilization strategies for groundwater and surface water in the Pingtung Plain. *Journal of Hydrology*, 533, 541-556. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.12.023

Jha, M.K., Peralta, R.C., & Sahoo, S. (2020). Simulation-optimization for conjunctive water resources management and optimal crop planning in Kushabhadra-Bhargavi river delta of Eastern India. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10), 3521. doi:10.3390/ijerph17103521

Karimi, L., Motagh, M., & Entezam, I. (2019). Modeling groundwater level fluctuations in Tehran aquifer: results from a 3D unconfined aquifer model. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 439-449. doi:10.1016/j.gsd.2019.01.003

Le Page, M., Berjamy, B., Fakir, Y., Bourgin, F., Jarlan, L., Abourida, A., Benrhanem, M., Jacob, G., Huber, M., Sghrer, F., Simonneaux, V., & Chehbouni, G. (2012). An integrated DSS for groundwater management based on remote sensing. The case of a semi-arid aquifer in Morocco. *Water resources management*, 26(11), 3209-3230. doi:10.1007/s11269-012-0068-3

Li, L., Zhou, Y., Li, M., Cao, K., Tao, Y., & Liu, Y. (2022). Integrated modelling for cropping pattern optimization and planning considering the synergy of water resources-society-economy-ecology-environment system. *Agricultural Water Management*, 271, 107808. doi:10.1016/j.agwat.2022.107808

Mirhashemi, S.H., & Panahi, M. (2022). Predicting groundwater level changes within the irrigation network range using the tree algorithm (case study: Alborz plain). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 9817-9856. doi:10.1007/s13762-022-04176-x

Mirzaei, A., Azarm, H., & Naghavi, S. (2022). Optimization of the cropping pattern under seasonal fluctuations of surface water using multistage stochastic programming. *Water Supply*, 22(6), 5716-5728. doi:10.2166/ws.2022.224

Mohammadzadeh, A., Vafabakhsh, J., Mahdavi Damghani, A., & Deihimfard, R. (2022). Optimal land allocation to crop production in different decision priorities and water availability scenarios: East Azerbaijan province of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(5), 597-614. doi:10.1080/03650340.2020.1843637

Moharram, S.H., Gad, M.I., Saafan, T.A., & Allah, S.K. (2012). Optimal groundwater management using genetic algorithm in El-Farafra Oasis, western desert, Egypt. *Water Resources Management*, 26(4), 927-948. doi:10.1007/s11269-011-9865-3

Mooselu, M.G., Nikoo, M.R., Latifi, M., Sadegh, M., Al-Wardy, M., & Al-Rawas, G.A. (2020). A multi-objective optimal allocation of treated wastewater in urban areas using leader-follower game. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122189. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122189

Najafabadi, M.M., Ziaee, S., Nikouei, A., & Ahmadpour Borazjani, M. (2019). Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: a case study. *Agricultural Systems*, 173, 218-232. doi:10.1016/j.agsy.2019.02.006

Nouri, A., Saghafian, B., Delavar, M., & Bazargan-Lari, M.R. (2019). Agent-based modeling for evaluation of crop pattern and water management policies. *Water Resources Management*, 33(11), 3707-3720. doi:10.1007/s11269-019-02327-3

Osama, S., Elkholy, M., & Kansoh, R.M. (2017). Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 557-566. https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.015

OstadAliAskari, K., Ghorbanizadeh Kharazi, H., Shayannejad, M., & Zareian, M.J. (2019). Effect of management strategies on reducing negative impacts of climate change on water resources of the Isfahan–Borkhar aquifer using Modflow.

River Research and Applications, 35(6), 611-631. doi:10.1002/rra.3463

Pereira-Cardenal, S.J., Mo, B., Gjelsvik, A., Riegels, N.D., Arnbjerg-Nielsen, K., & Bauer-Gottwein, P. (2016). Joint optimization of regional water-power systems. *Advances in Water Resources*, 92, 200-207. doi:10.1016/j.advwatres.2016.04.004

Qiu, S., Liang, X., Xiao, C., Huang, H., Fang, Z., & Lv, F. (2015). Numerical simulation of groundwater flow in a river valley basin in Jilin Urban area, China. *Water*, 7(10), 5768-5787. doi:10.3390/w7105768

Rath, A., Samantaray, S., & Swain, P.C. (2019). Optimization of the cropping pattern using cuckoo search technique. Pp. 19-35, In: *Smart Techniques for a Smarter Planet*, Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-03131-2_2

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. doi:10.1007/s11269-009-9533-z

Salehi Shafa, N., Babazadeh, H., Aghayari, F., & Saremi, A. (2022). Determining the optimal cultivation area and pattern of agricultural water consumption in order to manage multi-objective planning. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(1), 119-133. [In Persian]

Salehi Shafa, N., Babazadeh, H., Aghayari, F., & Saremi, A. (2022). Multi-objective planning for optimal exploitation of surface and groundwater resources through development of an optimized cropping pattern and artificial recharge system. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(2), 101847. doi:10.1016/j.asej.2022.101847

Shakoor, A., Arshad, M., Ahmad, R., Khan, Z.M., Qamar, U., Farid, H.U., Sultan, M., & Ahmad, F. (2018). Development of groundwater flow model (MODFLOW) to simulate the escalating groundwater pumping in the Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(3), 629-638. doi:10.21162/PAKJAS/18.4909

Shirshahi, F., Babazadeh, H., EbrahimiPak, N., & Khaledian, M. (2020). Sustainable optimization of regional agricultural water use by developing a two-level optimization model. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4), 1-12. doi:10.1007/s12517-020-5175-5

Shrestha, S., Neupane, S., Mohanasundaram, S., & Pandey, V.P. (2020). Mapping groundwater resiliency under climate change scenarios: A case study of Kathmandu Valley, Nepal. *Environmental research*, *183*, 109149. doi:10.1016/j.envres.2020.109149

Sule, B.F., & Ayenigba, S.E. (2017). Application of GMS-Modflow to investigate groundwater development potential in River Meme catchment, Kogi State, Nigeria. *International Journal of Sciences*, 6(09), 39-51. doi:10.18483/ijSci.1332

Varade, S., & Patel, J.N. (2019). Optimization of groundwater resource for balanced cropping pattern. *Water Policy*, 21(3), 643-657. doi:10.2166/wp.2019.105

Wang, X., Sun, Y., Xu, Z., Zheng, J., & Zhang, C. (2020). Feasibility prediction analysis of groundwater reservoir construction based on GMS and Monte Carlo analyses: A case study from the Dadougou Coal Mine, Shanxi Province, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1), 1-11. doi:10.1007/s12517-019-4978-8

Xue, D., Dai, H., Liu, Y., Liu, Y., Zhang, L., & Lv, W. (2022). Interaction simulation of vadose zone water and groundwater in Cele Oasis: assessment of the impact of agricultural intensification, northwestern China. *Agriculture*, 12(5), 641. doi:10.3390/agriculture12050641

Zamani, M.G., Moridi, A., & Yazdi, J. (2022). Groundwater management in arid and semi-arid regions. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), 1-14. doi:10.1007/s12517-022-09546-w