

# Groundwater withdrawal management measures using a finite difference mathematical model: A case study of Marvdasht aquifer in Fars province

## ABSTRACT

In this study involves a finite difference mathematical model was used to simulate the groundwater flow in an aquifer within a real study area in Fars Province. Firstly, a 15-year simulation period was conducted to analyze groundwater level fluctuations and the aquifer water balance. Subsequently, key parameters, including return flow coefficients, infiltration rate from precipitation, and groundwater recharge coefficient, were calibrated. Based on the calibration results, it was determined that the infiltration rate from precipitation across the entire study area was approximately 23%. However, the return flow coefficient varied across different parts of the region, ranging between 20% and 50%. To predict the future status of groundwater resources, several management measures were considered. The simulation results indicated that changing the irrigation system from traditional surface irrigation to a pressurized irrigation system had the most significant impact on the aquifer balance and groundwater levels compared to other scenarios. Specifically, in the area where this scenario was implemented, the groundwater level declined by 17 meters, and the aquifer storage deficit increased by 7.8 million cubic meters. In contrast, the crop pattern modification and groundwater withdrawal reduction scenarios had a positive effect on the aquifer balance and groundwater levels. These two scenarios led to an increase in groundwater levels by 4 meters and 11.7 meters, respectively, in the affected areas. Overall, for sustainable water management and optimal use of water resource, it is recommended that crop pattern modification and groundwater withdrawal reduction policies be prioritized over changing the irrigation system policies.

## Keywords

*Marvdasht aquifer, Fars province, recharge estimation, finite difference method, groundwater modeling*

## Introduction

Groundwater resources are a vital source of freshwater worldwide, especially in arid and semi-arid regions. The over-extraction of groundwater can have significant consequences and pose a potential threat to human life and survival. Therefore, it is essential to manage the use of these resources in a way that ensures their sustainability and prevents damage to their balance. One effective approach for evaluating the sustainability and management of groundwater resources is through the estimation of groundwater balance and the analysis of water table fluctuations. This approach quantitatively determines the groundwater system's inflows, outflows, and water table fluctuations. Also, this approach provides managers/policymakers with the tools to make informed decisions and plan effectively for these resources. There are various methods for evaluating and estimating the groundwater balance. One such method is numerical modeling, which has been widely used in many studies as an effective and efficient tool for assessing the groundwater balance and water table fluctuations, demonstrating satisfactory performance. This study aimed to develop a numerical groundwater model to assess and estimate the changes in groundwater levels and their fluctuations and the aquifer balance in a real region within Fars Province.

## Material & Method

This study evaluates and analyzes the water balance changes and groundwater table fluctuations of the Marvdasht aquifer in Fars Province using a finite-difference mathematical modeling approach. The model is designed as a two-dimensional, single-layer representation of the groundwater system. The simulation period spans 15 years, covering the hydrological years from 2004 to 2018. For the model, both calibration and validation processes were conducted to minimize the differences between simulated and observed water table levels at observation wells. Finally, after completing the calibration and validation processes, the model was employed to predict and evaluate groundwater table levels for the next 15 years.

## Results

Data from 54 observation wells in the study area were used to determine the aquifer's hydrograph over a 15-year period. The results show that groundwater levels declined by an average of 20 meters during the simulation period. The model calibration was conducted using recharge parameters dependent on return flow and rainfall infiltration coefficients, hydraulic conductivity, transmissivity, inflow and outflow rates at the boundaries. The rainfall infiltration coefficient set to 23% for all grid cells and the return flow coefficient varying between 20% and 50% across different sections of the region. During the 15-year simulation period, 12 years were used for calibration and 3 years for validation, and the model was evaluated using RMSE, ME, and MAE metrics. The results of RMSE = 0.65 m, ME = -0.58 m, and MAE = 0.58 m were calculated for the calibration period and RMSE = 0.12 m, ME = 0.24 m, and MAE = 0.24 m were calculated for the validation period, indicating that the model successfully simulated and estimated groundwater levels. The simulation revealed a -46.7 million cubic meter change in aquifer storage, and of the management scenarios applied to predict the aquifer's future status, two scenarios had positive impacts, improving groundwater levels and water balance, while two scenarios had negative impacts, leading to further declines, with the maximum groundwater level decline recorded at 17 meters and the maximum rise at 11.7 meters across the study area. On a long-term average, the contributions to recharge were estimated as total recharge at 421.55 million cubic meters, rainfall infiltration at 62.75 million cubic meters, surface water infiltration at 145.54 million cubic meters, and return flow at 213.25 million cubic meters.

## Conclusions

In this study, a finite difference mathematical simulation model was employed to simulate groundwater level fluctuations and the water balance of an actual aquifer study area. After calibrating and validating the model, four management scenarios were applied to predict and evaluate the aquifer's status. Among the scenarios, transitioning irrigation systems from traditional surface irrigation methods to pressurized irrigation systems reduced groundwater levels by 17 meters in the scenario-affected region, while reducing groundwater extraction by 50% compared to current conditions led to an increase in groundwater levels by 11.7 meters across the study area. These findings highlight the significant impact of improved irrigation practices and controlled water extraction on the sustainability of aquifer resources.

## Author Contributions

Conceptualization, H.K., D.M. and M.G.; methodology, H.K.; software, M.G.; validation, H.K. and D.M.; formal analysis, H.K., D.M.; investigation, M.G.; writing—original draft preparation, M.G.; writing—review and editing, M.G., H.K. and D.M.; visualization, M.G.; supervision, H.K., D.M.; project administration, H.K., D.M.;

## Data Availability Statement

Not applicable

## Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

## Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

# اقدامات مدیریت برداشت آب زیرزمینی با مدل ریاضی تفاضل محدود: مطالعه موردی آبخوان مروذشت استان فارس

## چکیده

در این مطالعه یک مدل ریاضی تفاضل محدود برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان یک محدوده مطالعاتی واقعی در استان فارس استفاده شد. در این روند، ابتدا در یک دوره شبیه‌سازی ۱۵ ساله، تغییرات تراز آب زیرزمینی و بیلان آبخوان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و سپس مقادیر ضرایب آب برگشتی، ضریب نفوذ از بارش و ضریب تغذیه آب زیرزمینی واسنجی شد. براساس واسنجی مشخص شد که ضریب نفوذ از بارش برای کل محدوده، در حدود ۲۳ درصد است اما در مقابل ضریب آب برگشتی در بخش‌های مختلف محدوده متفاوت است و مقدار بین ۲۰ الی ۵۰ درصد را به خود اختصاص داده است. سپس به جهت پیش‌بینی وضعیت منابع آب زیرزمینی برای یک دوره آینده، چندین اقدام مدیریتی مدنظر قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این اقدامات نشان داد که اقدام تغییر سیستم آبیاری از سنتی و سطحی به تحت فشار بیشترین تغییرات را نسبت به سایر اقدامات بر روی بیلان و تراز آبخوان در محدوده مطالعاتی داشته به طوری که در محل اعمال این اقدام، ۱۷ متر افت تراز سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و کسری مخزن ۷/۸ میلیون مترمکعب افزایش یافته است. دو اقدام تغییر الگوی کشت و کاهش برداشت از آبخوان تاثیر مثبتي را بر روی بیلان آبخوان و تراز آب زیرزمینی داشته‌اند، طوری که این دو اقدام به ترتیب سبب افزایش تراز آب زیرزمینی به میزان ۴ و ۱۱/۷ متر در محل پیاده‌سازی شدند. برای مدیریت پایدار و استفاده بهینه از منابع آب بهتر است سیاست‌های تغییر الگوی کشت و کاهش برداشت از آبخوان به جای سیاست تغییر سیستم آبیاری مورد توجه قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها

آبخوان مروذشت، استان فارس، برآورد تغذیه، روش تفاضل محدود، مدل‌سازی آب زیرزمینی

## مقدمه

تقریباً یک سوم مساحت زمین خشک یا نیمه‌خشک است. این مناطق تحت فشار جمعیت و تغییرات آب و هوایی با چالش‌های عمده‌ای در مدیریت منابع کمیاب آب شیرین مواجه هستند. آب زیرزمینی شاید تنها منبع تأمین آب در چنین مناطقی باشد. منابع آب زیرزمینی برای اهدافی مختلفی همچون آبیاری، مصارف خانگی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تأمین آب برای مصارف مذکور در مناطق خشک و نیمه‌خشک وابستگی و اتکای بیشتری به این منابع ارزشمند دارد. درک تغییرات در سیستم منابع آب زیرزمینی برای مدیریت پایدار این منابع، ضروری است. یکی از اجزای اصلی در این مسیر، برآورد بیلان آب است که ورودی‌ها، خروجی‌ها و تغییرات ذخیره آب را در یک سیستم هیدرولوژیکی به صورت کمی بیان می‌کند (کتابچی و محمودزاده، ۱۳۹۷).

بیلان آب زیرزمینی، مفهوم مهمی در چرخه هیدرولوژی می‌باشد. با این مفهوم، امکان، پایداری و دسترسی به منابع آب زیرزمینی تعیین می‌شود. بیلان آب زیرزمینی در یک محدوده، تحت تاثیر پارامترهای مختلفی قرار دارد. می‌توان این پارامترها را در دو دسته پارامترهای ورودی و پارامترهای خروجی تقسیم‌بندی نمود. از جمله مهم‌ترین پارامترهای ورودی و خروجی که بیلان آب زیرزمینی را به طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد می‌توان به پارامتر تغذیه آب زیرزمینی و پارامتر برداشت (توسط چاه‌ها از آبخوان) اشاره نمود. بنابراین با توجه به اجزای ورودی و خروجی بیلان منابع آب و عدم قطعیتی که در هر کدام از این اجزاء وجود دارد، برآورد بیلان

آب با دقت مناسب و با هدف ارزیابی وضعیت فعلی منابع آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار این منابع از اهمیت زیادی برخوردار است. در این راستا شبیه‌سازی اقدامات مدیریت برداشت آب زیرزمینی و برآورد و بروزرسانی بیلان آب برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی نیاز به تمرکز بیشتر است. روش‌های مختلفی برای محاسبه و برآورد بیلان وجود دارد که یکی از آنها روش مدل‌سازی عددی می‌باشد (Mahmoodzadeh and Karamouz, 2022; Gumuła-Kawęcka et al., 2022; Lozano Hernández et al., 2024). یک مدل ریاضی، در واقع سیستم واقعی را تا حد قابل قبولی تقلید می‌کند و یک ابزار منطقی برای پیش‌بینی و ارزیابی اثرات تنش‌های مختلف بر روی سیستم ارائه می‌دهد. از این رو مدل‌سازی عددی به عنوان ابزار مفید و کارآمد توسط مطالعات مختلف برای ارزیابی و بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی و نیز برآورد بیلان توصیه و به کار برده شده است که در ادامه به برخی از مطالعات داخلی و بین‌المللی انجام شده در این زمینه اشاره می‌گردد.

به عنوان نمونه Usman et al. (2020) از رویکرد مدل‌سازی عددی و داده‌های سنجش از دور برای ارزیابی منابع آب زیرزمینی و تغییرات آن، تحت اثر تغییر در پوشش گیاهی، کاربری اراضی و همچنین تغییر اقلیم در یک منطقه کشاورزی در کشور پاکستان استفاده نمودند. در این راستا برآوردی از بیلان آب در مقیاس مکانی مختلف و مصرف از منابع آب زیرزمینی تحت الگوی کشت منطقه انجام شد و همچنین به سناریوی اقلیمی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر در الگوی کشت تأثیر قابل توجهی بر تراز آب زیرزمینی در محدوده دارد و مدیریت منابع آب نیازمند بازنگری در الگوهای کشت و افزایش تأمین آب از طریق منابع آب سطحی در منطقه است. Abraham et al. (2021) از مدل‌ها به عنوان ابزارهای مفیدی در ارزیابی الگوی تغذیه در سفره‌های زیرزمینی و یک پشتیبان به جهت برنامه‌ریزی طرح‌های تغذیه مصنوعی یاد کرده‌اند. در مطالعه آنها یک مدل تفاضل محدود MODFLOW برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و MT3DMS برای بررسی کیفیت و انتقال املاح به جهت ارزیابی تأثیر سازه‌های مختلف تغذیه مصنوعی، مانند سدها و حوضچه‌ها، توسعه داده شد. در راستای شبیه‌سازی اقدامات مدیریتی، در مطالعه آنها با اعمال تغذیه مصنوعی به مدت دو سال، حدود دو متر افزایش تراز در منطقه مورد مطالعه همراه با افزایش قابل توجه کیفیت آب زیرزمینی مشاهده شد. نتایج آنها بر ضرورت تغذیه مصنوعی برای حفظ تراز آب زیرزمینی و بهبود کیفیت آب، به ویژه در مناطقی که با بحران‌های آب مکرر مواجه هستند، تأکید نمود. قدیمی و کتابچی (۱۳۹۷) با استفاده از یک مدل ریاضی شبیه‌سازی تفاضل محدود به بررسی و پایش وضعیت آب زیرزمینی و تغییرات تراز در آن پرداختند. در این مدل، پارامتر تغذیه آب زیرزمینی به روش سعی و خطا و ضرایب هدایت هیدرولیکی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری مورد واسنجی قرار گرفت. پس از اتمام فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل، وضعیت آبخوان با استفاده از هفت سناریو برای یک دوره ۳۰ ساله آینده مورد ارزیابی قرار گرفت. از جمله سناریوهای استفاده شده در این مطالعه می‌توان به کاهش بارش، افزایش برداشت، تغییر الگوی کشت و حذف چاه‌های غیرمجاز در محدوده اشاره نمود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از اقدام حذف چاه‌های غیرمجاز در کل محدوده سبب افزایش تراز آب زیرزمینی در محدوده می‌گردد و بیشترین میزان تغییر در بین اقدامات اعمال شده در تراز آب زیرزمینی را دارد.

Aredo et al. (2023) با هدف برآورد بیلان آب زیرزمینی تحت اقدامات برداشت موجود و برآورد تقاضای آب در حوضه آبریز، اقداماتی را انجام دادند. ایشان بیان نمودند که منابع آب زیرزمینی، منبع اصلی تأمین آب در محدوده مطالعاتی آنها می‌باشد و این منطقه به دلیل افزایش تقاضای آب، توزیع نابرابر منابع آب و تغییرات محسوس در سطح آب زیرزمینی با چالش مواجه شده است. این مطالعه به بررسی اقدامات برداشت در شرایط موجود و نیاز آبی آینده در بیلان آب زیرزمینی در حوضه آبریز Weyib با استفاده از مدل‌های WetSpa-M و MODFLOW-2005 متمرکز بود. مدل‌های به کار رفته شده در این مطالعه عملکرد خوبی را در طول شبیه‌سازی تغذیه آب زیرزمینی و بیلان آب زیرزمینی، تحت برداشت‌های موجود و اقدامات تقاضای تخمینی نشان دادند. علاوه بر موارد ذکر شده Kakavand & Mozaffari (2023) بیان نمودند که پیش‌بینی و ارزیابی روند تغییرات و نوسانات تراز آب زیرزمینی نقش مهمی در

مدیریت و پایداری منابع آب زیرزمینی دارد. از این رو از یک مدل ریاضی MODFLOW برای یک دوره ۱۲۰ ماهه برای شبیه‌سازی و بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت نهاوند واقع در حوضه آبریز کرخه استفاده نمودند و به جهت ارزیابی روند تغییرات تراز، چهار اقدام به مدل اعمال کردند. این اقدامات براساس برداشت از چاه کشاورزی با درصدهای متفاوت بودند. نتایج حاصل از اقدامات نشان داد که از بین اقدامات اعمال شده فقط اقدام کاهش ۵۰ درصدی برداشت از چاه‌های کشاورزی می‌تواند در آینده باعث جبران کسری مخزن گردد و در صورتی که میزان برداشت به صورت روند فعلی در محدوده ادامه دار باشد، سبب کاهش تراز آب زیرزمینی در محدوده می‌گردد. در ادامه و در راستای بررسی روند و تغییرات تراز آب زیرزمینی شیخ‌بگم‌قلعه و همکاران (۱۴۰۱) نیز با استفاده از مدل MODFLOW برای یک دوره دو ساله به شبیه‌سازی سیستم آبخوان مه‌باد پرداختند. در مطالعه آنها، برای بررسی روند تراز آب زیرزمینی از روش‌های من-کندال و شیب سن در چهار سطوح معنی‌داری مختلف استفاده شد. آزمون من-کندال نشان داد که آبخوان محدوده مطالعاتی در وضعیت نامناسبی قرار داشته و به طور تقریبی از ۱۹ چاه بررسی شده در سطح محدوده مطالعاتی ۱۸ چاه روند نزولی دارد. در این مطالعه به دلیل وجود پتانسیل منابع آب سطحی، استفاده تلفیقی و بهینه از این منابع در کنار منابع آب زیرزمینی پیشنهاد شده است.

Raheem et al. (2024) با استفاده از رویکرد مدل‌سازی عددی و مدل سه‌بعدی تفاضل محدود MODFLOW به تغییرات تراز آب زیرزمینی ناشی از چند اقدام مختلف برداشت از آبخوان پرداختند و یک ارزیابی جامعی از نیاز گیاهان برای آبیاری و برداشت از آبخوان برای تأمین آن انجام دادند. در این مطالعه، واسنجی مدل برای دوره (۲۰۲۰-۲۰۱۰) و با تمرکز بر داده‌های هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه انجام شد. اقدامات در نظر گرفته شده، دو اقدام افزایش و کاهش برداشت از آبخوان به میزان ۲۰ درصد بود که اثرات آن تا سال ۲۰۴۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با اعمال اقدامات تغییرات قابل توجهی در تراز و بیلان آب زیرزمینی به وجود می‌آید، به طوری که کاهش ۲۰ درصدی برداشت می‌تواند منجر به کاهش کسری مخزن به میزان ۲۹۱ میلیون مترمکعب در سال در محدوده گردد. در نهایت، آنها بیان کردند که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عددی امکان تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد مدیریت پایداری منابع آب زیرزمینی در منطقه را فراهم می‌کند و می‌تواند راهنمای ارزشمندی را برای سیاست‌گذاران و سهامدارانی که به دنبال تعادل بین بهره‌وری کشاورزی و پایداری بلندمدت منابع آب زیرزمینی هستند ارائه دهد. رضایی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از ابزار شبیه‌سازی عددی به بررسی وضعیت آبخوان از لحاظ تاثیر احداث سد زیرزمینی بر روی وضعیت و تغییرات رفتار هیدرودینامیکی آن مورد بررسی قرار دادند. در این راستا چند اقدام نیز به مدل اعمال شده از جمله اقدامات به کار برده شده در این مطالعه می‌توان به اقدام تغذیه مصنوعی و اقدام کاهش بهره‌برداری به میزان ۱۰ و ۲۰ درصد اشاره نمود. در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که در صورت احداث سد آب زیرزمینی به عنوان یک روش پیشنهادی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی و همچنین کاهش بهره‌برداری از آبخوان به میزان ۲۰ درصد، افزایش تراز آب زیرزمینی به میزان ۲/۵ متر در محدوده انتظار می‌رود. در این مطالعه، واسنجی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه با استفاده از تراز آب زیرزمینی مشاهداتی در چهار چاه مشاهده‌ای در محدوده انجام شد. در ادامه و در راستای شبیه‌سازی عددی آبخوان، آزادگان و همکاران (۱۴۰۳)، به منظور بررسی راهکارهای مدیریتی مختلف برای جلوگیری و مقابله با افت تراز آب زیرزمینی، یک مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی به صورت کمی در آبخوان دشت تایباد انجام دادند. شبیه‌سازی صورت گرفته در این مطالعه نشان داد که از بین سناریوهای مدیریتی اعمال شده به آبخوان، کاهش ۲۰ درصدی برداشت از چاه‌ها و همچنین کاهش ۱۰ درصدی در میزان تغذیه تنها باعث افزایش در حجم بیلان آبخوان به اندازه ۲۶ میلیون مترمکعب در سال خواهد شد. خدایاری و همکاران (۱۴۰۲) با هدف بررسی و ارزیابی عملکرد تغذیه مصنوعی بر وضعیت منابع آب زیرزمینی و احیاء آن با استفاده از یک مدل ریاضی، پنج سناریو مدیریتی به وسیله ایجاد تغییرات در میزان حجم آبیگری و افزایش در میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری به مدل اعمال نمودند. نتایج حاصل از این سناریوها نشان داد که تغذیه مصنوعی آبخوان سبب

افزایش نسبی تراز آب زیرزمینی و تاثیر مثبت آن در بخش‌های پایین‌دست محل اعمال تغذیه مصنوعی شده است به طوری که با افزایش میزان حجم آبیگری، تراز آب زیرزمینی به میزان ۰/۵ الی ۱/۰۳ افزایش یافته ولی در مقابل و در شرایط افزایش برداشت از آبخوان و عدم درنظر گرفتن تغذیه مصنوعی، کاهش تراز و افت سطح آب زیرزمینی به میزان ۱/۶۷ تا ۳/۱۳ متر در محدوده رخ داده است.

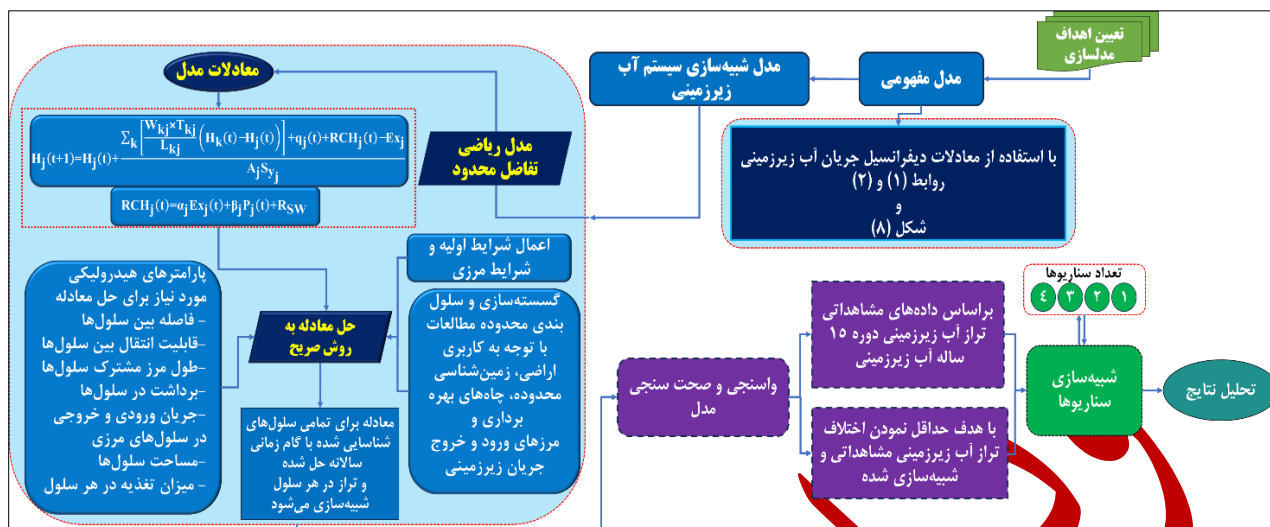
براساس مرور ادبیات انجام شده مشخص شد که مدلسازی ریاضی برای ارزیابی بیلان، تغییرات و نوسانات تراز و تحت اقدامات مختلف در موارد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج و عملکرد خوبی از خود نشان داده و به عنوان یک ابزار برای تصمیم‌گیری و نتیجه‌گیری در رابطه با پایداری و مدیریت صحیح منابع آب مورد تایید محققان مختلف قرار گرفته است. از این رو در این مطالعه، یک مدل ریاضی به جهت شبیه‌سازی جریان و تراز آب زیرزمینی و همچنین تغییرات آن در محدوده مطالعاتی مرودشت-خرامه که یکی از محدوده‌های ممنوعه از نظر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بوده و از نظر فعالیت کشاورزی و تولید محصولات کشاورزی در استان فارس دارای پتانسیل بالایی می‌باشد، انتخاب گردید. هدف مطالعه حاضر، شبیه‌سازی آبخوان با تمرکز بر کشف و درک پیچیدگی‌های هیدرولوژیکی با بکارگیری یک مدل ریاضی تفاضل محدود است که با روش حل عددی صریح به شبیه‌سازی آبخوان و ارزیابی رفتار آبخوان به صورت کمی می‌پردازد. همچنین با استفاده از مدل توسعه داده شده در این مطالعه رفتار آبخوان تحت اقداماتی مدیریتی مختلف برای یک دوره آینده مورد بررسی قرار گرفته و میزان تاثیر هر کدام از اقدامات بر روی بیلان، تغییرات تراز و کسری مخزن در آبخوان و شعاع تاثیرشان در محدوده مطالعاتی انتخاب شده ارزیابی شد که نتایج حاصل از این ارزیابی می‌تواند به جهت مدیریت پایدار و بهره‌برداری و استفاده بهینه از منابع آب زیرزمینی و همچنین تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در این راستا موثر واقع گردد. نوآوری و مزایای مدل توسعه داده شده در این پژوهش، دوبردی و عمق متوسط بودن با روش حل صریح تفاضل محدود است که نسبت به رویکردهای دیگر، دارای انعطاف‌پذیری بیشتری از نظر زمان اجرا و درنظرگرفتن کل محدوده مطالعاتی به جهت شبیه‌سازی می‌باشد. همچنین از مزایای مدل بکارگرفته شده در این مطالعه را می‌توان در نحوه ارزیابی تغییرات تراز آب زیرزمینی در آینده عنوان کرد. با توجه به اینکه در مطالعات انجام شده عموماً ارزیابی و بررسی تغییرات تراز با تمرکز بر یک اقدام انجام شده بود. در این مطالعه سعی شد که بر خلاف این موضوع و نگاه جامع به عوامل تاثیرگذار بر تراز آب زیرزمینی، اقدامات مختلفی که بر تراز تاثیر دارند مورد توجه قرار گیرد؛ علاوه براین، در این مطالعه میزان نفوذ از منابع آب سطحی (رودخانه) در اثر اندرکنشی که با سیستم آب زیرزمینی وجود دارد دیده شده است که در بیشتر مطالعات به این موضوع پرداخته نشده بود.

## روش‌شناسی

روش‌شناسی در نظرگرفته شده برای این مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. پس از جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از محدوده مطالعاتی موردنظر اقدام به ایجاد مدل مفهومی محدوده مطالعاتی و ساخت مدل ریاضی جریان آب زیرزمینی گردید. در ادامه پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، برای پیش‌بینی وضعیت آبخوان برای یک دوره آینده، چند اقدام مدیریتی بر روی مدل اعمال شد و نتایج حاصل از این اقدامات بر روی تراز آبخوان و بیلان آبخوان بررسی و ارزیابی شد. لازم به ذکر است که مدل ریاضی در نظرگرفته شده برای شبیه‌سازی جریان یک مدل ریاضی تفاضل محدود می‌باشد که براساس فرم ریاضی اصلی جریان در سیستم آب زیرزمینی به بررسی و شبیه‌سازی تراز و جریان در این ناحیه می‌پردازد که در ادامه به معادلات به کارگرفته شده در مدل و فرایند محاسبه تراز آب زیرزمینی پرداخته شده است.

<sup>1</sup> Depth average

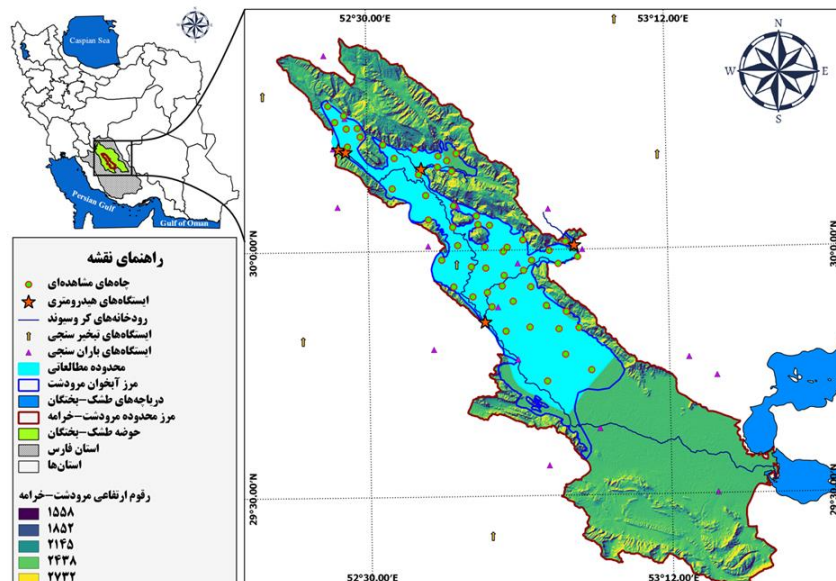




شکل ۱. روش شناسی و فرآیند انجام پژوهش حاضر

### محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی بخشی از آبخوان مروودشت واقع در حوضه طشک-بختگان استان فارس است (شکل ۲). محدوده مطالعاتی مروودشت-خرامه در مرکز حوضه آبریز طشک-بختگان و مهارلو، استان فارس ایران واقع شده است. این محدوده بین طول جغرافیایی  $26^{\circ} 14'$  تا  $26^{\circ} 52'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $29^{\circ} 18' 51''$  تا  $30^{\circ} 26' 8''$  شمالی قرار گرفته است. مساحت کل این محدوده مطالعاتی  $3926/1$  کیلومتر مربع بوده که از این میزان  $4102/7$  کیلومتر مربع دشت و  $1823/4$  کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل داده است. حداکثر ارتفاع در این محدوده  $3099$  متر در قله کوه دشتک، در بخش شمالی محدوده و حداقل آن  $1563$  متر در خروجی محدوده به سمت دریاچه بختگان است. محدوده مطالعاتی مروودشت-خرامه بزرگترین و وسیعترین و پیچیدهترین محدوده مطالعاتی حوضه آبریز طشک-بختگان و مهارلو است. این محدوده جزء محدودههایی است که از نظر توسعه و بهره برداری مجموعه اعلام شده است. این محدوده به دو بخش، دشت مروودشت و دشت خرامه قابل تقسیم است. در هر کدام از دشت های مروودشت و خرامه یک آبخوان شناسایی شده است. برای دشت مروودشت، در طول یک دوره بلند مدت  $45$  ساله ( $1390-1345$ ) میانگین بارش و تبخیر به ترتیب  $312/7$  و  $2227/5$  میلی متر برآورد شده است (گزارش بیان پهنگام سازی بیان منابع آب محدوده های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه های طشک-بختگان و مهارلو منتهی به سال  $1389-1390$ ).

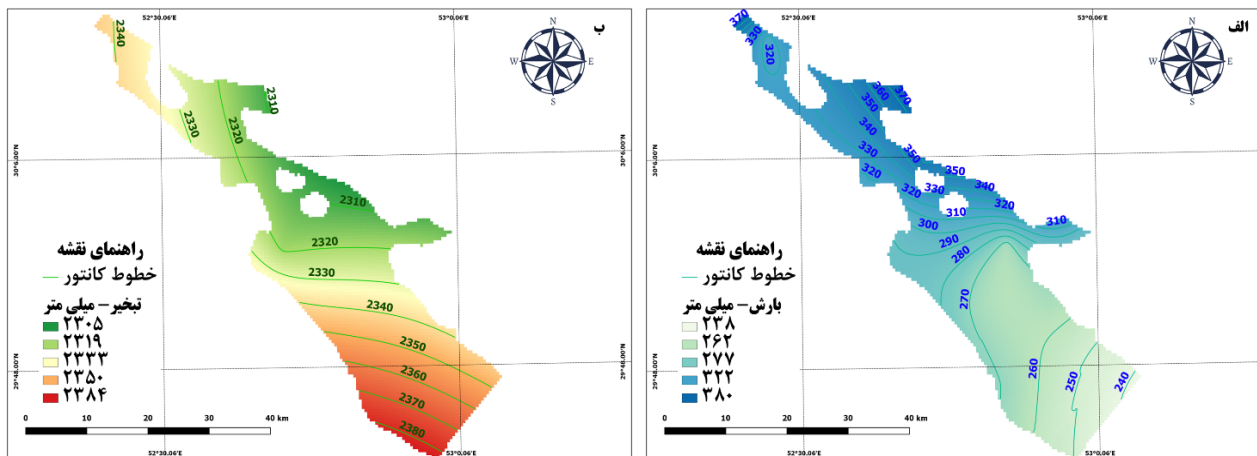


شکل ۲. موقعیت جاهای مشاهده‌ای، ایستگاه‌های هیدرومتری، ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی و نقشه رقوم ارتفاعی (متر) محدوده مطالعاتی مروت-خرامه، حوضه آبریز طشک-بختگان، استان فارس، ایران

## بارش و تبخیر و تعرق

برای ترسیم منحنی‌های هم‌بارش و هم‌تبخیر در محدوده مطالعاتی از ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی استفاده شد که موقعیت آنها در شکل (۲) نشان داده شده است. میزان بارش و تبخیر تعرق در محدوده مطالعاتی براساس اطلاعات و آمار ارائه شده از ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی سازمان هواشناسی و شرکت مدیریت منابع آب محاسبه شد. پس از استخراج مقادیر بارش و تبخیر برای هر ایستگاه براساس طول دوره شبیه‌سازی نقشه‌های درون‌یابی شده بارش و تبخیر برای محدوده رسم گردید و در نهایت منحنی‌های هم‌تبخیر و هم‌بارش برای محدوده مطالعاتی استخراج شد. در شکل (۳) به ترتیب منحنی هم‌بارش و منحنی هم‌تبخیر برای محدوده نشان داده شده است. براساس نقشه‌های بارش و منحنی‌های هم‌بارش تولید شده در شکل (۳) الف، میزان بارندگی در محدوده در طول دوره آماری ۱۵ ساله (از سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶) از ۲۴۳ میلی‌متر تا ۳۶۲ میلی‌متر متغیر بوده و به صورت میانگین ۲۹۰ محاسبه شده است، همچنین براساس شکل (۳) ب، منحنی‌های هم‌تبخیر تولید شده در محدوده در طول دوره آماری ۱۵ ساله اخیر (از سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶) میزان تبخیر از ۲۳۰۸ میلی‌متر تا ۲۳۷۸ میلی‌متر متغیر بوده و به صورت میانگین ۲۳۳۶ محاسبه شده است.





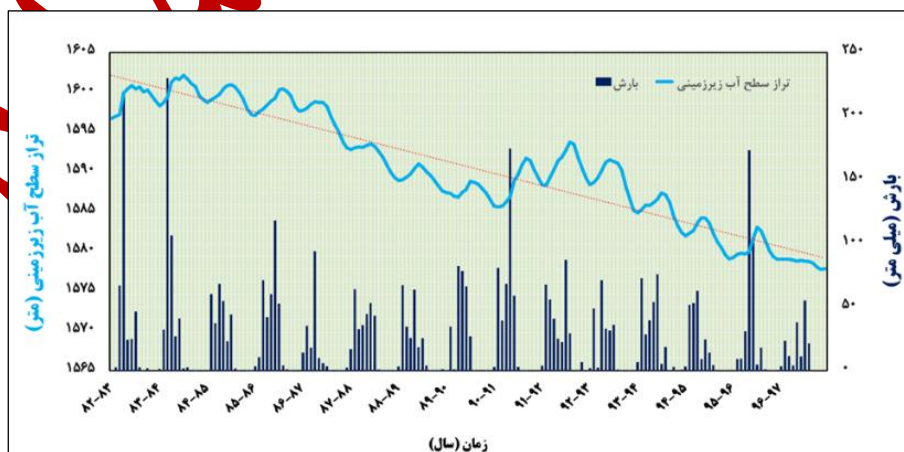
شکل ۳. الف: نقشه منحنی هم‌بارش و ب: نقشه منحنی هم‌تبخیر

### وضعیت منابع آب زیرزمینی و چاه‌های مشاهده‌ای

آبخوان مرودشت دارای مساحتی بالغ بر ۲۲۱/۵ کیلومتر مربع می‌باشد. در این مطالعه، بخشی از آبخوان مرودشت با مساحت ۱۱۰۰ کیلومتر مربع برای شبیه‌سازی جریان در سیستم آبخوان در نظر گرفته شده است. با استفاده از ۵۴ حلقه چاه مشاهده‌ای نوسانات، تراز آب زیرزمینی بررسی شده است.

### جهت جریان زیرزمینی و هیدروگراف آبخوان

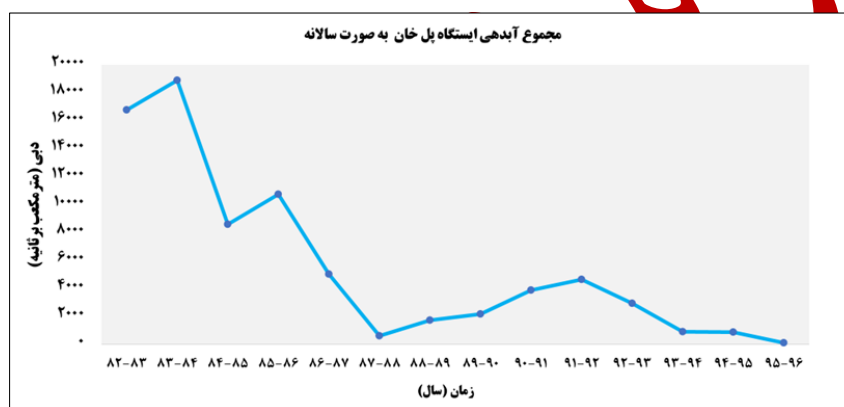
براساس چاه‌های مشاهده‌ای بررسی شده طی یک دوره آماری ۱۵ ساله، از سال آبی ۱۳۸۳-۱۳۸۲ تا سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ مشخص شد که روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در طول دوره آماری به صورت کاهشی بوده و افت تراز آب زیرزمینی را در آبخوان محدوده نشان می‌دهد (شکل ۴). مطابق شکل می‌توان دریافت که در طول دوره ۱۵ ساله آبخوان به طور میانگین افت ۲۰ متری را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده وضعیت نابسامان و بحرانی این آبخوان است. همچنین براساس تراز مشاهده‌ای، مشخص شد که در محدوده مطالعاتی جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه از شمال و شمال غرب آبخوان به سمت جنوب شرق و مرزهای دریاچه بختگان است.



شکل ۴. هیدروگراف آبخوان مرودشت برای یک دوره آماری ۱۵ سال (۱۳۸۲-۱۳۸۳ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۶)

### وضعیت منابع آب سطحی و ایستگاه‌های هیدرومتری

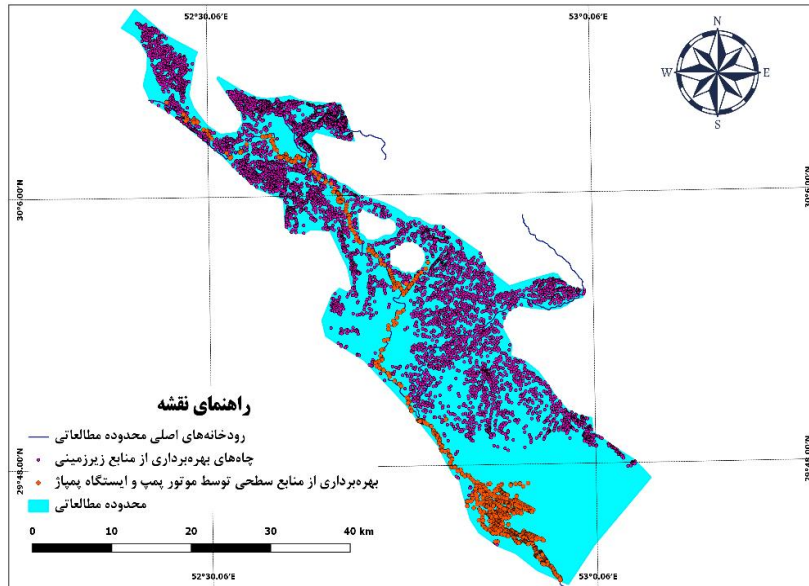
اصلی‌ترین رودخانه‌های حوضه دریاچه طشک-بختگان و مهارلو رودخانه‌های کر و سیوند می‌باشد که در محدوده مطالعاتی مروودشت-خرامه جریان دارد. این دو رودخانه پس از تلاقی در محلی به نام پل‌خان (مرکز محدوده مطالعاتی) و جمع‌آوری آب‌های سطحی محدوده مطالعاتی مروودشت-خرامه، در نهایت به دریاچه بختگان منتهی می‌شوند. رودخانه کر به عنوان بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه در حوضه، از سمت شمال غرب وارد محدوده مطالعاتی مروودشت-خرامه شده و در راستای شمال غرب-جنوب شرق در محدوده جریان دارد. در شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری شاهد مورد بررسی قرار گرفته شده به جهت تعیین میزان جریانات سطحی ورودی و خروجی و همچنین میزان آب نفوذ یافته از منابع آب سطحی به منابع آب زیرزمینی نشان داده شده است. از بین ایستگاه‌های هیدرومتری بررسی شده با توجه به اینکه ایستگاه هیدرومتری پل‌خان یکی از مهم‌ترین ایستگاه شاهد در سطح محدوده مطالعاتی بود، میزان آبدهی این ایستگاه به صورت سالانه و در شکل (۵) نشان داده شده است (گزارش بیلان مطالعات بهنگام‌سازی اطلس منابع آب حوضه آبریز دریاچه‌های طشک-بختگان و مهارلو، ۱۳۸۹).



شکل ۵. میزان آبدهی ایستگاه پل خان

### برداشت از منابع زیرزمینی و سطحی در سطح محدوده مطالعاتی

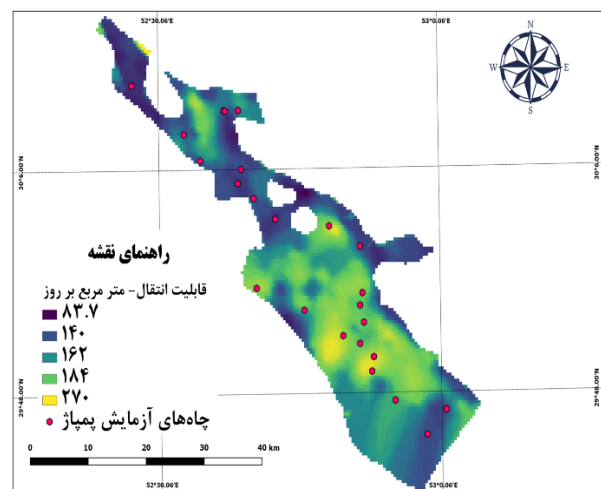
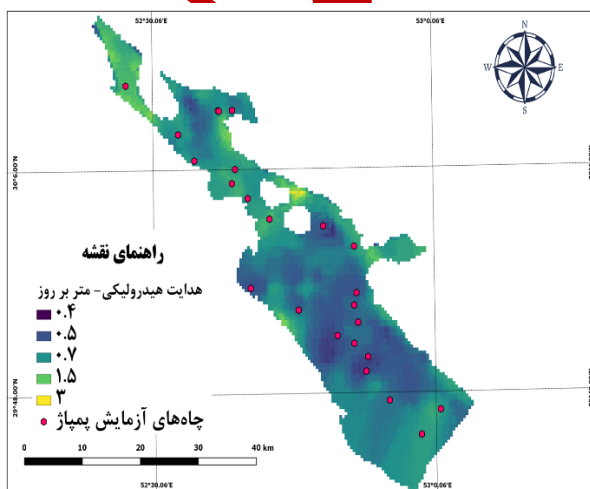
در محدوده مطالعاتی مروودشت برداشت از هر دو منابع آب زیرزمینی و سطحی وجود دارد. علیرغم وجود رودخانه دائمی کر در سطح محدوده مطالعاتی برداشت از منابع زیرزمینی در محدوده به مراتب بیشتر از منابع سطحی است. عمده مصرف برداشت از منابع صرف کشاورزی در محدوده می‌شود. برداشت از منابع آب زیرزمینی در محدوده توسط چاه‌های بهره‌برداری و برداشت از منابع سطحی توسط موتور پمپ و ایستگاه‌های پمپاژ صورت می‌گیرد. براساس آمار برداری سراسری مرحله دوم برداشت از منابع آب زیرزمینی توسط ۵۵۲۸ حلقه چاه، باعث تخلیه سالانه از آبخوان به مقدار ۵۳۹ مترمکعب در سال و برداشت از منابع سطحی توسط آنها، موتور پمپ و ایستگاه‌های پمپاژ، سالانه باعث برداشت از منابع آب سطحی و رودخانه به میزان ۶۵ مترمکعب در سال در سطح محدوده مطالعاتی می‌گردد. در شکل (۶) موقعیت چاه‌های بهره‌برداری از منابع زیرزمینی و برداشت از منابع سطحی نشان داده شده است.



شکل ۶. موقعیت نقاط بهره‌برداری از منابع زیرزمینی و سطحی در محدوده

### هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال در محدوده

از جمله خصوصیات مهمی که برای شبیه‌سازی جریان و آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال را نام برد. این دو پارامتر باهمدیگر رابطه مستقیمی داشته و در مطالعات مربوط به شبیه‌سازی جریان در آب زیرزمینی مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار می‌گیرند. در این مطالعه نیز این دو پارامتر در فرایند واسنجی و صحت‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفته شده و برای کل محدوده مقادیر آنها بدست آمد. ابتدا برای محاسبه این دو پارامتر از آمار و اطلاعات آزمایش‌های پمپاژ و مطالعات بیلان در دشت مرو دشت استفاده شد که در شکل (۷) به ترتیب نقشه قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی به همراه موقعیت نقاط چاه‌های که در آنها آزمایش پمپاژ صورت گرفته، نشان داده است. در ادامه و در بخش نتایج، نقشه واسنجی شده این دو پارامتر برای کل محدوده نیز ارائه خواهد شد.



شکل ۷. الف: نقشه قابلیت انتقال و ب: نقشه هدایت هیدرولیکی

## مدل شبیه‌سازی ریاضی جریان

در این بخش به مدل در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی اشاره شده و مدل مفهومی سیستم آب زیرزمینی و روابط آن ارائه خواهد شد. سپس معادله بیلان و شرایط ماندگار و غیرماندگار استفاده شده برای شبیه‌سازی جریان در سیستم آب زیرزمینی برای محدوده مطالعاتی و روش واسنجی و صحت‌سنجی آنها شرح داده خواهند شد. معادلات دیفرانسیلی حاکم بر جریان در ناحیه اشباع در زیر نشان داده شده است (Anderson et al., 2015):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = 0 \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{رابطه ۲}$$

در روابط بالا  $K_{xx}$ ،  $K_{yy}$  و  $K_{zz}$  مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  هستند. همچنین  $h$  برابر تراز آب،  $q$  برابر جریان واحد که نشان‌دهنده تخلیه یا تغذیه به سیستم آب زیرزمینی می‌باشد (از علامت منفی برای نشان دادن تخلیه و از علامت مثبت برای تغذیه استفاده می‌گردد)،  $S_s$  ضریب ذخیره ویژه و  $t$  برابر زمان هستند. در حالت جریان به صورت ماندگار، سطح آب با گذر زمان ثابت بوده و مقادیر جریان‌های ورودی و خروجی با یکدیگر برابرند. در حالت غیرماندگار سطح آب وابسته به زمان بوده و می‌تواند با گذر زمان تغییر کند و مقادیر ورودی و خروجی جریان نیز می‌توانند متفاوت باشند. رابطه بیلان در نظر گرفته شده در این مطالعه برای محدوده به صورت زیر می‌باشد:

$$\Delta S = In + Out + RCH \quad \text{رابطه ۳}$$

$$RCH = \alpha Ex + \beta P + R_{SW} \quad \text{رابطه ۴}$$

که  $In$  ورودی زیرزمینی از مرزهای آبخوان،  $Out$  خروجی زیرزمینی از مرزهای آبخوان،  $RCH$  میزان تغذیه ناشی از بارش و آب برگشتی به آبخوان و  $\Delta S$  برابر تغییرات ذخیره آبخوان است. در معادله نشان داده شده سه حالت مختلف برای  $\Delta S$  وجود دارد در صورتی که  $\Delta S = 0$  باشد آبخوان در وضعیت تعادل قرار دارد، در صورتی که  $\Delta S < 0$  آبخوان در وضعیت اضافه برداشت قرار دارد و در نهایت در صورتی که  $\Delta S > 0$  باشد در وضعیت تغذیه قرار دارد، به این معنی که میزان ورودی بیشتر از میزان خروجی است. در رابطه تغذیه ( $RCH$ ) نیز پارامترهای  $\alpha$  نشان‌دهنده ضریب آب برگشتی،  $EX$  میزان برداشت از آبخوان توسط چاه‌های بهره‌برداری و برداشت از منابع آب سطحی توسط موتورپمپ و انهار،  $\beta$  ضریب نفوذ ناشی از بارش و  $P$  میزان بارندگی در سطح محدوده مطالعاتی و  $R_{SW}$  نفوذ از آب‌های سطحی (کف رودخانه‌ها و ...) است. مدل شبیه‌سازی سیستم آب زیرزمینی در این مطالعه برای جریان در سیستم آب زیرزمینی یک مدل ریاضی شبیه‌سازی تفاضل محدود بصورت صریح است که بر اساس معادلات اشاره شده در بالا به دو صورت ماندگار و غیرماندگار در نظر گرفته شد. در شرایط ماندگار، مجموع جریان‌های ورودی و خروجی در یک سلول، برابر صفر بوده و تراز سطح آب در هر سلول در شرایط ماندگار همواره در طول زمان ثابت است. بنابراین برای هر سلول رابطه در شرایط ماندگار بر اساس مطالعه (Ghadimi & Ketabchi, 2019) و مدل مفهومی نشان داده شده در شکل (۸) می‌توان به صورت زیر نوشت:

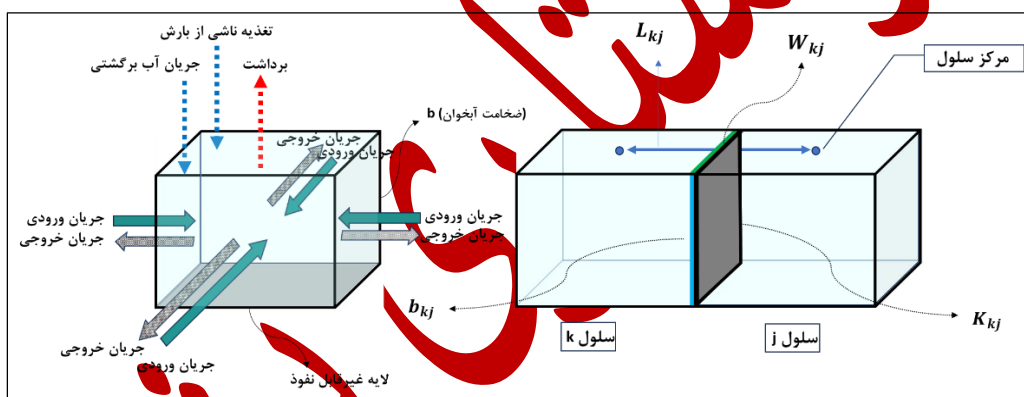
$$\sum_k \left[ \frac{W_{kj} \times T_{kj}}{L_{kj}} (H_k(t) - H_j(t)) \right] + q_j(t) + RCH_j(t) - EX_j = 0 \quad \text{رابطه ۵}$$

$$RCH_j(t) = \alpha_j EX_j(t) + \beta_j P_j(t) + R_{SW} \quad \text{رابطه ۶}$$

در رابطه فوق  $W_{kj}$  طول مرز مشترک سلول  $I$  با سلول مجاور  $k$  بر حسب متر در روز،  $T_{kj}$  ضریب قابلیت انتقال بین سلول  $z$  و سلول مجاور  $k$  روی مرز مشترک بر حسب مترمربع بر روز،  $L_{kj}$  فاصله متوسط بین مرکز سلول  $z$  و سلول مجاور  $k$  بر حسب متر است. همچنین  $(H_k(t) - H_j(t))$  بیانگر اختلاف تراز آب بین سلول  $z$  و سلول مجاور  $k$  بر حسب متر،  $Q_j$  جریان واحد عرض ورودی (به صورت علامت مثبت) یا خروجی (به صورت علامت منفی) بر حسب مترمکعب بر روز است. بر خلاف شرایط ماندگار، در شرایط غیرماندگار مجموع جریان‌های ورودی و خروجی در یک سلول برابر صفر نبوده و تراز سطح آب در هر سلول متغیر است. بنابراین براساس مدل مفهومی ارائه شده در شکل (۷)، برای شرایط غیرماندگار رابطه (۵) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$H_j(t+1) = H_j(t) + \frac{\sum_k \left[ \frac{W_{kj} \times T_{kj}}{L_{kj}} (H_k(t) - H_j(t)) \right] + q_j(t) + RCH_j(t) - Ex_j}{A_j S_{y_j}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$H_j$  تغییرات تراز آبخوان بر حسب متر،  $A$  مساحت سلول بر حسب مترمربع،  $S_{y_j}$  ضریب آبدهی ویژه (در آبخوان‌های نامحصور ضریب آبدهی ویژه تقریباً برابر ضریب ذخیره است ( $S=S_y$ )) و سایر پارامترها نیز همانند تعاریف رابطه (۵) هستند.



شکل ۸. مدل مفهومی

## واسنجی و صحت‌سنجی مدل

صحت مدل تهیه شده در این مطالعه، برپایه روابط بیلات مورد تایید قرار گرفت. سپس، واسنجی و صحت‌سنجی مدنظر در این مطالعه به روش سعی و خطا با رویکرد ناحیه‌ای و با استفاده از پارامترهای تغذیه آب زیرزمینی که خود وابسته به نفوذ ناشی از بارش و آب برگشتی از مصارف است؛ همچنین هدایت هیدرولیکی و میزان قابلیت انتقال در محدوده با هدف به حداقل رساندن میزان اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و تراز آب شبیه‌سازی شده توسط مدل انجام شد. از کل دوره شبیه‌سازی ۱۵ ساله، ۱۲ سال برای دوره واسنجی و ۳ سال برای دوره صحت‌سنجی انتخاب گردید. پس از انجام فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی، عملکرد مدل نیز براساس معیارهای مختلف خطا مورد ارزیابی قرار گرفت که در ادامه نتایج حاصل ارائه خواهد شد.

## اقدامات

برای بررسی و ارزیابی وضعیت محدوده مطالعاتی از لحاظ وضعیت منابع آب زیرزمینی و بیلان آبخوان برای یک دوره (۱۵ ساله) آینده، اقدامات مختلفی در این مطالعه مدنظر قرار گرفت. در جدول (۱) مشخصات اقدامات در نظر گرفته شده در این مطالعه نشان داده شده است که ادامه نتایج حاصل از این اقدامات ارائه و بررسی می‌گردد.

جدول ۱. اقدامات در نظر گرفته شده در دوره شبیه‌سازی

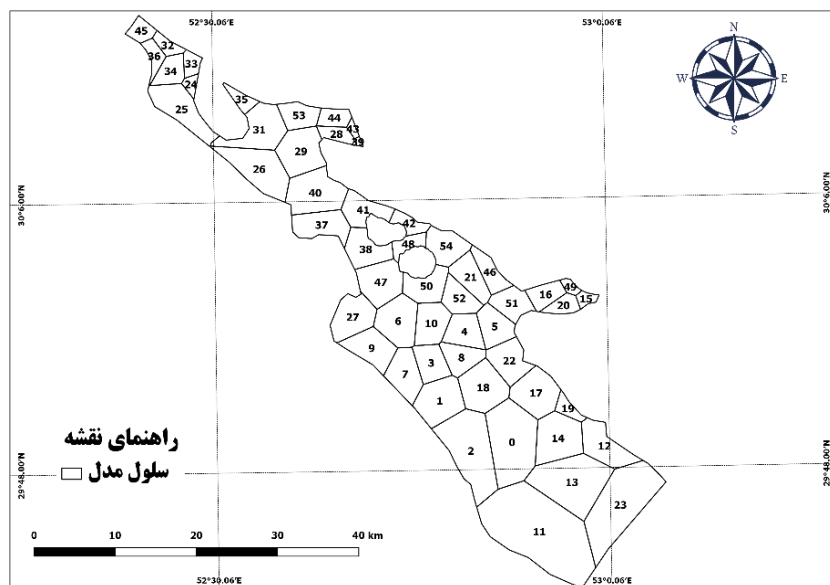
| اقدام           | تعداد حالت | نوع اقدام                                   | نحوه اعمال                                                                                                                       | دوره شبیه‌سازی | دوره شبیه‌سازی به صورت سال آبی |
|-----------------|------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------|
| وضعیت پایه      | یک حالت    | نشان‌دهنده وضعیت ادامه شرایط موجود در آینده | استفاده از داده‌های دوره شبیه‌سازی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ الی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ برای دوره آینده با فرض اینکه ۱۵ سال گذشته برای ۱۵ آینده نیز تکرار شود | ۱۵ ساله        | ۱۳۹۶-۱۳۹۷ الی ۱۴۱۱-۱۴۱۲        |
| اقدامات مدیریتی | چهار حالت  | تغییر سیستم آبیاری از سنتی به تحت فشار      | کاهش میزان آب برگشتی                                                                                                             |                |                                |
|                 |            | تغییر الگوی کشت                             | تغییر کشت غالب منطقه از گیاه پرمصرف به گیاه کم مصرف                                                                              |                |                                |
|                 |            | کاهش برداشت                                 | کاهش میزان برداشت به میزان ۵۰ درصد                                                                                               |                |                                |
|                 |            | افزایش برداشت                               | افزایش میزان برداشت به میزان ۵۰ درصد                                                                                             |                |                                |

## نتایج

### گسسته‌سازی و سلول بندی آبخوان

اولین قدم در فرآیند شبیه‌سازی، گسسته‌سازی محدوده مطالعاتی به سلول‌های مختلف است. در واقع رابطه (۷) ارائه شده باید در هر سلول شناسایی شده از مدل برقرار باشد تا بیلان آب در هر سلول رعایت شود. فرآیند گسسته‌سازی در این مطالعه براساس پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های بهره‌برداری، مرزها و کاربری اراضی انجام گرفت. در نهایت پس از این بررسی، فرآیند گسسته‌سازی انجام شد که در نهایت سبب تقسیم‌بندی محدوده مطالعاتی به ۵۴ سلول گردید. این سلول‌ها با هم در ارتباط هستند بدون اینکه همدیگر را قطع کنند (شکل ۹). در این سلول‌بندی سعی بر این بود که اضلاع یک سلول منطبق بر اضلاع سلول مجاور خود باشد و اضلاع سلول‌ها همدیگر را قطع نکنند. پس از انجام سلول‌بندی و گسسته‌سازی محدوده مطالعاتی، پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد نیاز مدل برای محاسبه تراز آب زیرزمینی در هر سلول استخراج گردید.





شکل ۴. گسسته‌سازی محدوده مطالعاتی

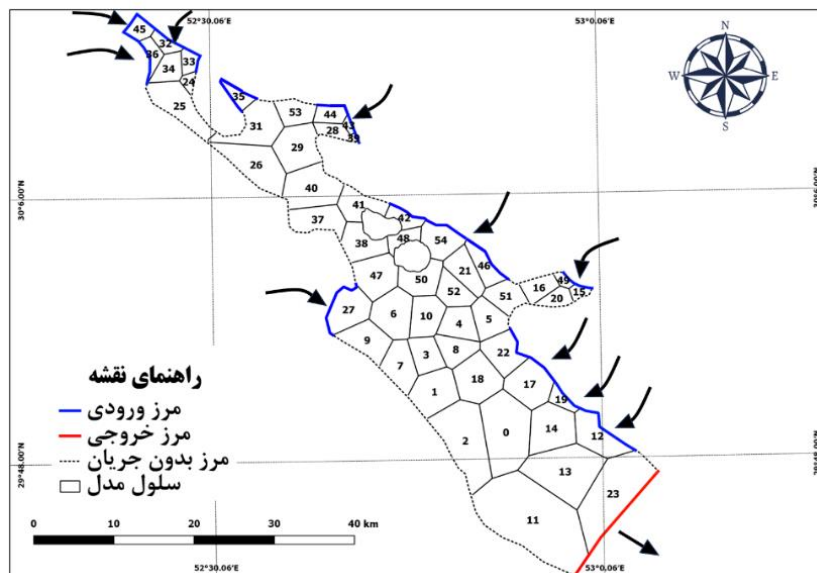
پس از گسسته‌سازی محدوده مطالعاتی، مرحله بعدی از فرآیند شبیه‌سازی، محاسبه پارامترهای ورودی و خروجی در هر سلول از محدوده است. از جمله پارامترهای ورودی می‌توان به بارش، جریان ورودی زیرزمینی، نفوذ از رودخانه، آب برگشتی از مصارف و تغذیه اشاره نمود. همچنین از اجزای خروجی نیز می‌توان به پارامترهای تأخیر و تعرق، تبخیر از آب زیرزمینی، جریان خروجی زیرزمینی، برداشت از آبخوان اشاره نمود. در ادامه نحوه هر کدام از پارامترهای مذکور به تفکیک ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که باتوجه به معادلات ارائه شده برای مدل، دو پارامتر تغذیه و آب برگشتی از پارامترهایی هستند که مقادیر نهایی آنها در فرآیند واسنجی مدل بدست آمده و محاسبه می‌گردد.

### شرایط اولیه و شرایط مرزی آبخوان

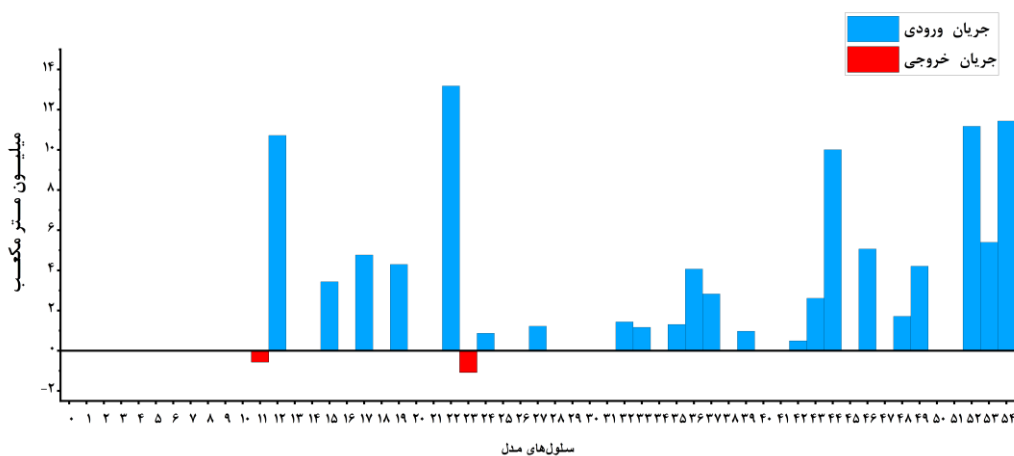
برای حل عددی معادله جریان و نیز مدل ریاضی در این مطالعه به روش تفاضل محدود، تشخیص و تعیین شرایط اولیه و شرایط مرزی امری ضروری است. شرایط اولیه نشان‌دهنده توزیع تراز یا هد آب زیرزمینی در کل سیستم در یک زمان مشخصی است. شرایط مرزی نشان‌دهنده موقعیت‌هایی است که در آن آب به داخل و یا به خارج از محدوده جریان می‌یابد. این ورود و خروج آب به داخل و یا خارج محدوده ممکن است در داخل و در بین سلول‌های محدوده و یا همچنین در مرزهای اطراف محدوده اتفاق بیفتد که ضروری است هر دو مورد در فرآیند شبیه‌سازی جریان در نظر گرفته شود. انتقال جریان در داخل محدوده و بین سلول با استفاده از بخش اول ارائه شده در رابطه (۷) محاسبه گردید. همچنین جریان‌ات مرزی در خارج از محدوده و از طریق مرزها با استفاده از قانون دارسی محاسبه و برآورد شد.

### جریان ورودی و خروجی از مرزهای آبخوان

پس از تعیین شرایط اولیه و شرایط مرزی آبخوان، مقادیر جریان ورودی و خروجی به محدوده آبخوان در مرزهای ورود و خروج زیرزمینی شناسایی و محاسبه شد. میزان جریان ورودی در مرزها براساس رابطه دارسی انجام شد. در این راستا، طول جبهه، عرض جبهه و شیب هیدرولیکی در مرزها تعیین شد و میزان جریان ورودی و خروجی برآورد شدند. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب موقعیت مرزهای ورودی و خروجی و همچنین برآورد جریان ورودی و خروجی در سلول‌های مرزی، ارائه شده است.



شکل ۵. مرزهای ورود و خروج جریان زیرزمینی



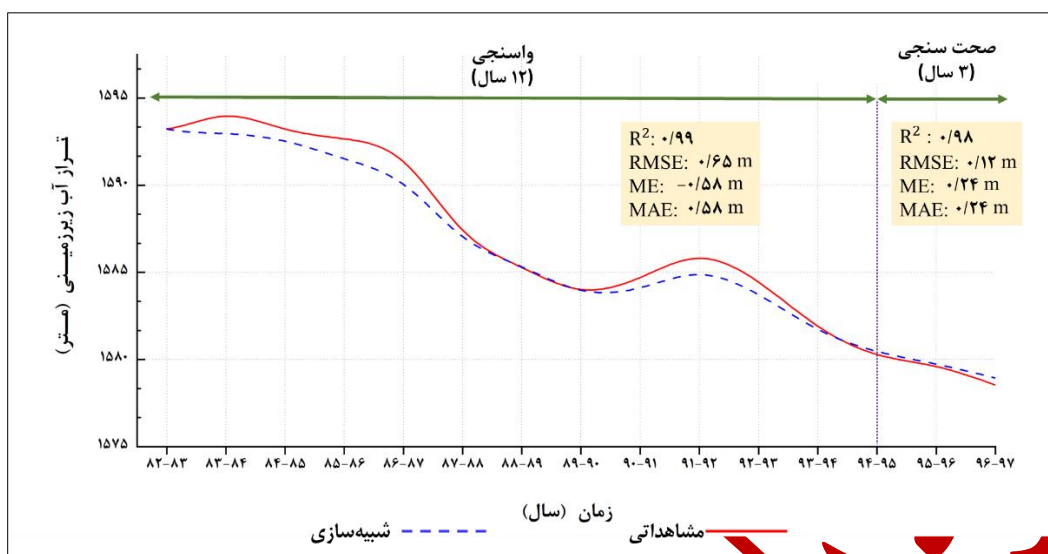
شکل ۶. میزان جریان ورودی و خروجی در مرزها

## نفوذ از منابع آب سطحی

برای محاسبه میزان نفوذ از آب سطحی در هر سلول از محدوده مطالعاتی، ابتدا سلول‌هایی که در آنها رودخانه عبور می‌کند شناسایی شده و میزان طولی از رودخانه که در سلول قرار دارد محاسبه شد. در نهایت با استفاده از ضریب نفوذ و همچنین میزان آبدهی در رودخانه، میزان نفوذ از رودخانه و منابع سطحی به آبخوان در داخل هر سلول با واسنجی ضرایب نفوذ برآورد شد.

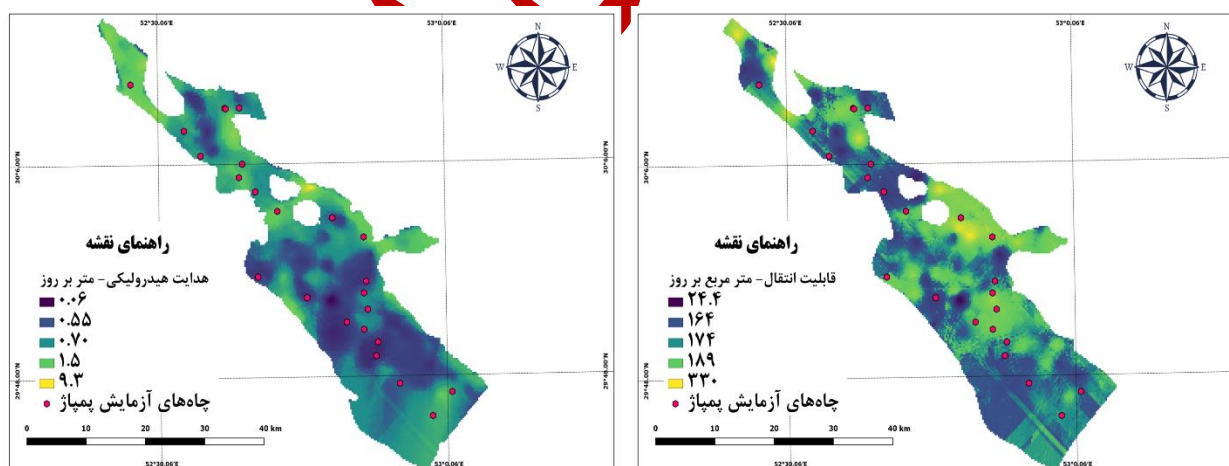
## واسنجی و صحت‌سنجی مدل

فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی در این مطالعه با هدف حداقل نمودن فاصله مقادیر تراز شبیه‌سازی شده و تراز مشاهداتی در هر سلول انجام گرفت. در شکل (۱۲) نتایج ارزیابی معیارهای مختلف خطا در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان داده شده است.

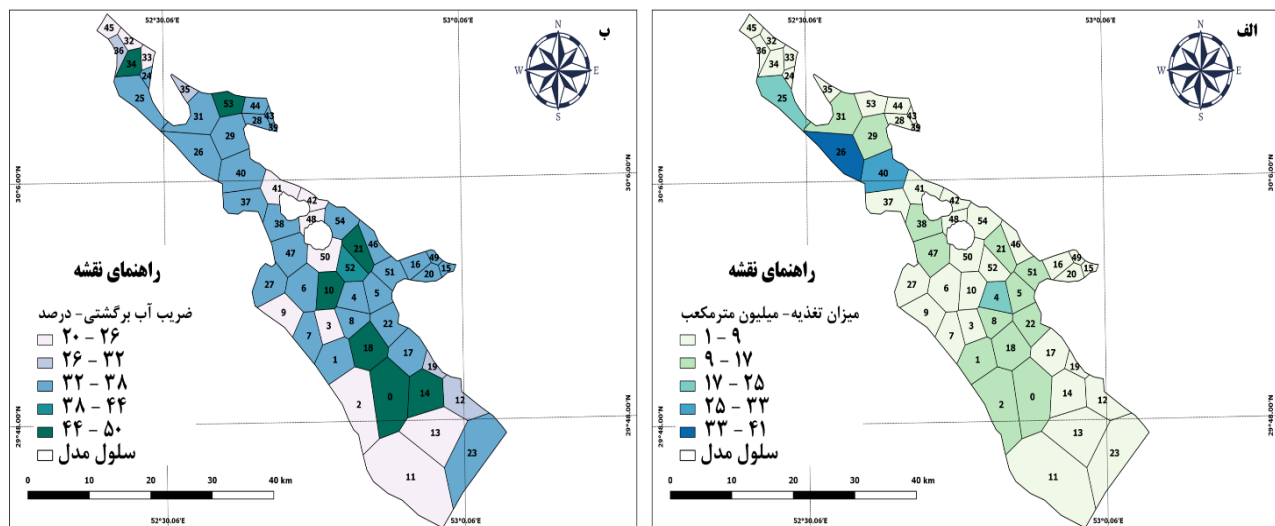


شکل ۱۲. مقایسه تراز محاسباتی و تراز مشاهداتی آب زیرزمینی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل

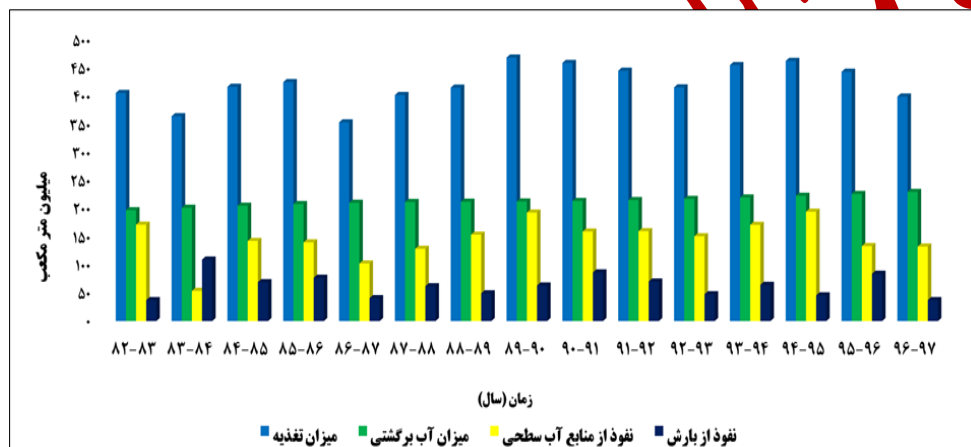
مقدار ضریب تعیین مدل در هر دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی بیشتر از ۰/۹۵ بوده که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل است. معیارهای خطا به جهت ارزیابی عملکرد مدل در شکل (۱۲) نشان داده شده است. براساس مقادیر بدست آمده از معیارهای خطا محاسبه شده، مشخص شد که میزان RMSE در دوره صحت‌سنجی کمتر از دوره واسنجی است. در ادامه و در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) مقادیر واسنجی شده پارامترهای هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال و همچنین ضرایب آب برگشتی و میزان تغذیه واسنجی شده نشان داده شده است. لازم به ذکر است در فرآیند واسنجی ضریب نفوذ از بارش برای کل محدوده به میزان ۲۳ درصد برآورد گردید.



شکل ۱۳. الف: نقشه واسنجی شده قابلیت انتقال و ب: نقشه واسنجی شده هدایت هیدرولیکی



شکل ۱۴. الف: میزان تغذیه واسنجی شده و ب: میزان ضریب آب برگشتی واسنجی شده در سلول‌های محدوده



شکل ۱۵. مقادیر بدست آمده از پارامترهای واسنجی شده در طول دوره شبیه‌سازی

باتوجه به شکل (۱۵) می‌توان بیان کرد که میزان واسنجی شده تغذیه در این مطالعه از مجموع سه پارامتر واسنجی شده نفوذ از بارش، نفوذ از آب سطحی و میزان آب برگشتی حاصل شده است. با توجه به شکل همچنین می‌توان بیان کرد روند تغذیه متناسب با الگوی بارش و نفوذ از منابع سطحی در محدوده می‌باشد. مقادیر واسنجی شده پارامترهای مختلف مورد نظر به صورت سلول به سلول در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر واسنجی شده پارامترها به صورت سلول به سلول

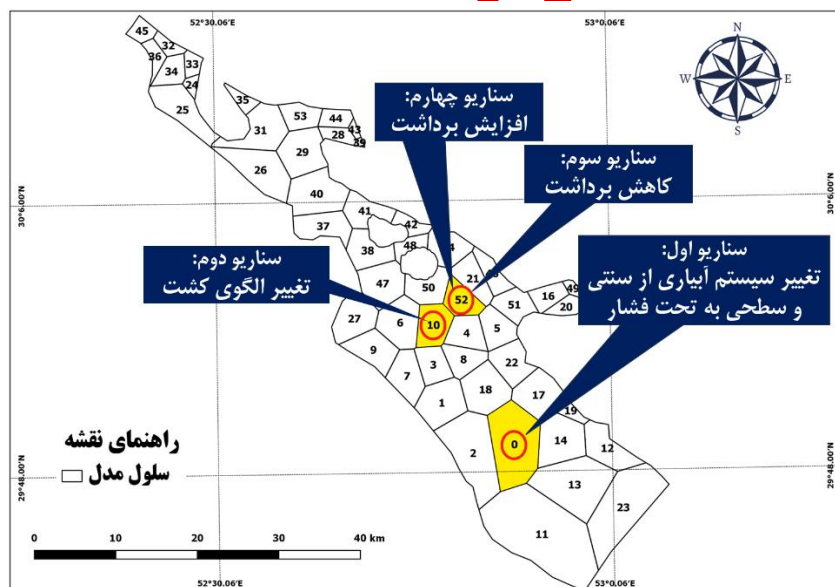
| شماره سلول | هدایت هیدرولیکی<br>متر بر روز | قابلیت انتقال<br>متر مربع بر روز | ضرایب آب برگشتی | ضریب نفوذ از بارش |
|------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| ۰          | ۰/۵                           | ۱۷۲                              | ۰/۵             | ۰/۲۳              |
| ۱          | ۰/۴۹                          | ۱۶۳                              | ۰/۳۵            | ۰/۲۳              |
| ۲          | ۰/۵۵                          | ۱۷۲                              | ۰/۲۵            | ۰/۲۳              |

|    |      |     |      |      |
|----|------|-----|------|------|
| ۳  | ÷/۵۸ | ۱۶۶ | ÷/۲  | ÷/۲۳ |
| ۴  | ÷/۵۵ | ۱۷۵ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۵  | ÷/۴۹ | ۱۶۳ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۶  | ÷/۵۶ | ۱۷۲ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۷  | ۱/۰۵ | ۱۵۹ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۸  | ÷/۴۷ | ۱۷۰ | ÷/۳۳ | ÷/۲۳ |
| ۹  | ÷/۷۶ | ۱۹۴ | ÷/۲  | ÷/۲۳ |
| ۱۰ | ÷/۶۲ | ۱۷۹ | ÷/۵  | ÷/۲۳ |
| ۱۱ | ÷/۷۷ | ۱۶۹ | ÷/۲  | ÷/۲۳ |
| ۱۲ | ÷/۷۱ | ۱۷۱ | ÷/۳۲ | ÷/۲۳ |
| ۱۳ | ÷/۶۵ | ۱۶۸ | ÷/۲  | ÷/۲۳ |
| ۱۴ | ÷/۴۶ | ۱۷۶ | ÷/۵  | ÷/۲۳ |
| ۱۵ | ۱/۸۲ | ۲۰۸ | ÷/۲۵ | ÷/۲۳ |
| ۱۶ | ۱/۲۱ | ۱۹۸ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۱۷ | ÷/۶۶ | ۱۸۷ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۱۸ | ÷/۵۵ | ۱۹۹ | ÷/۵  | ÷/۲۳ |
| ۱۹ | ÷/۷  | ۱۸۲ | ÷/۲۸ | ÷/۲۳ |
| ۲۰ | ۱/۴  | ۲۰۰ | ÷/۲۵ | ÷/۲۳ |
| ۲۱ | ÷/۸۲ | ۲۳۷ | ÷/۵  | ÷/۲۳ |
| ۲۲ | ÷/۷۱ | ۱۸۹ | ÷/۳۶ | ÷/۲۳ |
| ۲۳ | ÷/۹۲ | ۱۷۳ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۲۴ | ۲/۶۸ | ۲۰۷ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۲۵ | ۱/۹۴ | ۱۷۲ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۲۶ | ÷/۷۷ | ۱۶۵ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۲۷ | ÷/۵۸ | ۱۶۹ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۲۸ | ÷/۷۴ | ۱۷۰ | ÷/۳۳ | ÷/۲۳ |
| ۲۹ | ۱/۲۲ | ۱۹۳ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۳۱ | ÷/۸۲ | ۱۸۱ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۳۲ | ۱/۵۲ | ۱۸۵ | ÷/۲  | ÷/۲۳ |
| ۳۳ | ۲/۰۱ | ۲۲۰ | ÷/۲۲ | ÷/۲۳ |
| ۳۴ | ۱/۵۸ | ۱۵۸ | ÷/۵  | ÷/۲۳ |
| ۳۵ | ۱/۴۱ | ۲۰۳ | ÷/۲۸ | ÷/۲۳ |
| ۳۶ | ۲/۳۵ | ۱۹۰ | ÷/۳۱ | ÷/۲۳ |
| ۳۷ | ۱/۱۳ | ۱۶۰ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۳۸ | ۱/۰۶ | ۱۵۶ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۳۹ | ÷/۷۱ | ۱۶۴ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۴۰ | ۱/۱۸ | ۱۷۲ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۴۱ | ÷/۸۳ | ۱۴۹ | ÷/۲۵ | ÷/۲۳ |
| ۴۲ | ۳/۱۵ | ۱۸۶ | ÷/۲  | ÷/۲۳ |
| ۴۳ | ÷/۷۲ | ۱۶۳ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |
| ۴۴ | ÷/۷۱ | ۱۵۹ | ÷/۳۵ | ÷/۲۳ |

|    |      |     |      |      |
|----|------|-----|------|------|
| ۴۵ | ۲/۲۱ | ۲۵۵ | ۰/۲  | ۰/۲۳ |
| ۴۶ | ۱/۶۷ | ۲۲۵ | ۰/۳۵ | ۰/۲۳ |
| ۴۷ | ۱/۱  | ۱۷۴ | ۰/۳۵ | ۰/۲۳ |
| ۴۸ | ۲/۳۲ | ۱۹۸ | ۰/۲  | ۰/۲۳ |
| ۴۹ | ۱/۲۹ | ۱۹۳ | ۰/۳۵ | ۰/۲۳ |
| ۵۰ | ۰/۷۳ | ۲۰۳ | ۰/۲۵ | ۰/۲۳ |
| ۵۱ | ۱/۵۱ | ۱۹۳ | ۰/۳۵ | ۰/۲۳ |
| ۵۲ | ۰/۷۸ | ۲۳۰ | ۰/۴۳ | ۰/۲۳ |
| ۵۳ | ۰/۹۳ | ۱۸۳ | ۰/۴۵ | ۰/۲۳ |
| ۵۴ | ۱/۲۹ | ۲۲۵ | ۰/۳۵ | ۰/۲۳ |

## اقدامات

در شکل (۱۶)، محل اعمال اقدامات مدنظر در سلول‌های انتخاب شده در سطح محدوده نشان داده شده است. مطابق شکل هر اقدام برای یک سلول از سطح محدوده اعمال شده به جز اقدامات افزایش و کاهش برداشت که هر دو آن‌ها به یک سلول اعمال شده است. انتخاب این سلول‌ها براساس اقدامات در نظر گرفته شده انجام گرفت. به عنوان نمونه برای اعمال اقدامات کاهش و افزایش برداشت، از بین سلول‌های موجود در کل سطح محدوده سلولی انتخاب شد که بیشترین میزان برداشت و تخلیه از منابع آب در آن اتفاق می‌افتد.



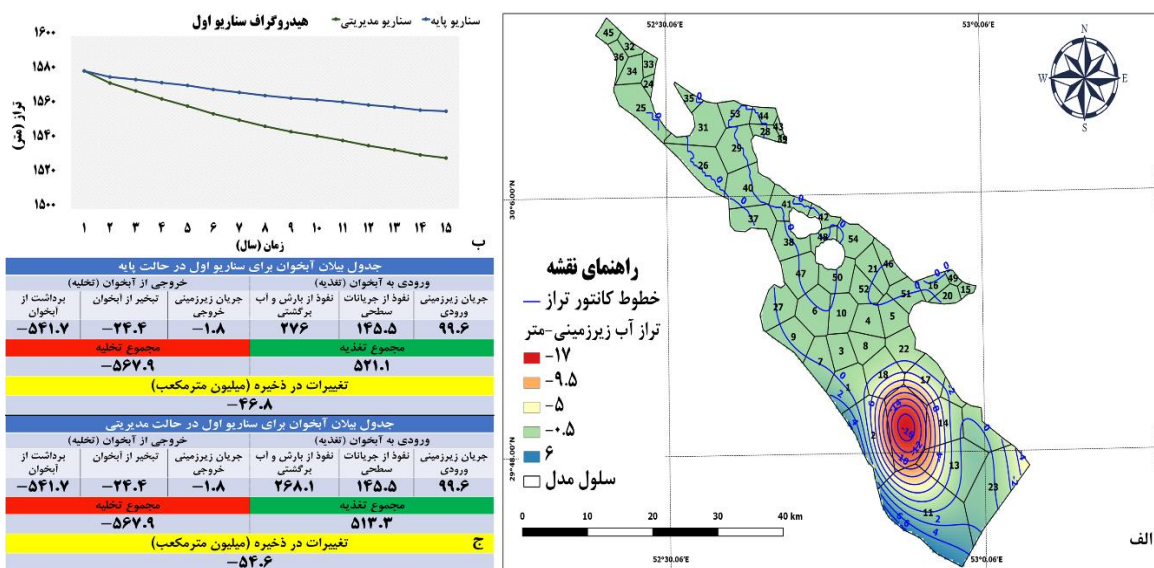
شکل ۱۶. محل اعمال اقدامات به سلول‌های انتخابی در سطح محدوده

## اقدام اول (اقدام تغییر سیستم آبیاری از سطحی و سنتی به سیستم تحت فشار)

برای اعمال این اقدام، از بین سلول‌های موجود در محدوده سلولی که دارای بیشترین زمین زراعی به صورت کشت آبی و سیستم آبیاری در آن وجود دارد، شناسایی و برای تغییر سیستم آبیاری انتخاب شد. در ادامه نتایج حاصل از این اعمال این اقدام به صورت سه



دسته اطلاعات، یعنی نقشه اختلاف تراز آب زیرزمینی اقدام نسبت به وضعیت پایه، هیدروگراف آب زیرزمینی در سلول متناظر با اقدام و در نهایت جدول بیلان آبخوان برای محدوده ارائه شده است.

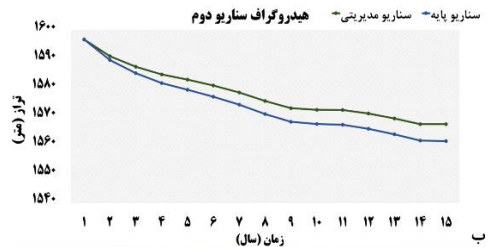


شکل ۱۷. الف: نقشه اختلاف هم تراز آب زیرزمینی نسبت به وضعیت پایه، ب: هیدروگراف سلول، ج: جدول بیلان آبخوان

براساس شکل (۱۷)، مشاهده می‌گردد که بیشترین افت تراز آب زیرزمینی به دلیل کاهش میزان آب برگشتی ناشی از استفاده از این نوع سیستم آبیاری در محل اعمال اقدام یعنی سلول شماره صفر رخ داده است. در غالب مناطق این محدوده، به دلیل کمبود آب، بخش قابل توجهی از زمین‌ها کشت نمی‌شود یا تحت کشت‌های موم و سوم قرار نمی‌گیرد لذا در صورت تجهیز سیستم‌های آبیاری نوین و صرفه‌جویی آب، کشاورزان آب صرفه‌جویی شده را معمولاً برای توسعه بهره‌برداری می‌کنند. در این اقدام، این عملکرد کشاورزان مدنظر بوده است. تراز و هیدروگراف آب زیرزمینی در سلول به طور قابل ملاحظه‌ای دچار افت شده است، این افت تراز تقریباً ۱۷ متر برآورد شده است؛ این افت تراز همچنین سبب افزایش کسری مخزن به میزان ۷/۸ میلیون مترمکعب در آبخوان محدوده مطالعاتی شده است.

## اقدام دوم (اقدام تغییر الگوی کشت)

تغییر الگوی کشت یکی از عوامل موثر در رشد و توسعه کشاورزی و همچنین از راه‌های بهینه در استفاده از زمین‌های زراعی شناخته می‌شود. برای اعمال این اقدام در مدل، از میزان تغییر در نیاز آبی محصول کشت شده در قبل و محصول جدید استفاده شد. از این رو میزان سطح زیر کشت محصولات زراعی آبی در محدوده مطالعاتی بر اساس مستندات در دسترس از محدوده مطالعاتی استخراج شد. در ادامه همچنین محصولی که به صورت محصول راهبردی و کشت غالب در محدوده بود شناسایی گردید. بر اساس این اطلاعات و آمار بررسی شده، تغییر الگوی کشت مورد نظر برای اعمال در اقدام، به صورت تغییر کشت یک پنجمی زمین‌های زراعی در محدوده مطالعاتی از محصول برنج به محصول گندم در نظر گرفته شد. اختلاف نیاز آبی این دو محصول به درصد در میزان برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی اعمال شد به طوری که این اختلاف نیاز آبی سبب کاهش برداشت به میزان ۲۰ درصد در سلول متناظر اقدام شد و مدل برای این اقدام اجرا گردید.



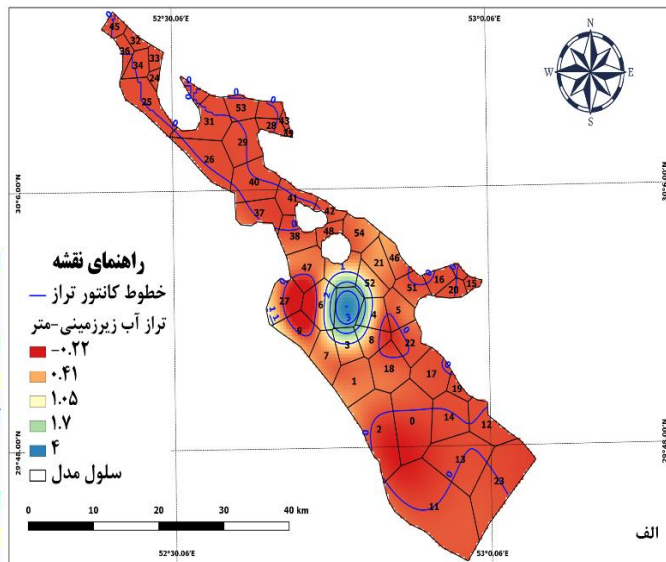
**ب**

| جدول بیلان آبخوان برای سناریو دوم در حالت پایه |                |                |                         |                  |
|------------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------|------------------|
| ورودی به آبخوان (تغذیه)                        | چریان زیرزمینی | تخیر از آبخوان | خروجی از آبخوان (تخلیه) | برداشت از آبخوان |
| ۹۹.۶                                           | ۱۴۵.۵          | ۲۷۶            | -۱.۸                    | -۲۴.۴            |
| مجموع تغذیه                                    |                |                | مجموع تخلیه             |                  |
| ۵۲۱.۱                                          |                |                | -۵۶۷.۹                  |                  |
| تغییرات در ذخیره (میلیون مترمکعب)              |                |                |                         |                  |
| -۴۶.۸                                          |                |                |                         |                  |

| جدول بیلان آبخوان برای سناریو دوم در حالت مدیریتی |                |                |                         |                  |
|---------------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------|------------------|
| ورودی به آبخوان (تغذیه)                           | چریان زیرزمینی | تخیر از آبخوان | خروجی از آبخوان (تخلیه) | برداشت از آبخوان |
| ۹۹.۶                                              | ۱۴۵.۵          | ۲۷۴.۹          | -۱.۸                    | -۲۴.۴            |
| مجموع تغذیه                                       |                |                | مجموع تخلیه             |                  |
| ۵۲۰                                               |                |                | -۵۶۵.۷                  |                  |
| تغییرات در ذخیره (میلیون مترمکعب)                 |                |                |                         |                  |
| -۴۵.۷                                             |                |                |                         |                  |

**ج**

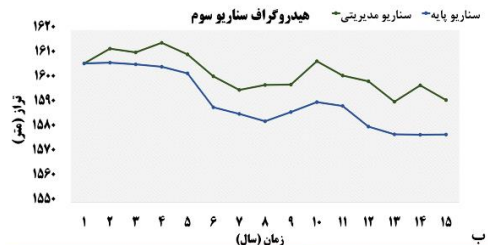


شکل ۱۸ الف: نقشه اختلاف هم تراز آب زیرزمینی نسبت به وضعیت پایه، ب: هیدروگراف سلول، ج: جدول بیلان آبخوان

این اقدام بر خلاف اقدام قبلی، سبب افزایش تراز آب زیرزمینی در محل اعمال اقدام و افزایش تراز آب زیرزمینی شده است. براساس هیدروگراف شکل (۱۸)، همچنین مقدار افزایش تراز آب زیرزمینی و جبران کسری مخزن در صورت اجرای این اقدام به ترتیب ۴ متر و ۱/۱ میلیون مترمکعب برآورد شده است که در شکل (۱۸) و جدول بیلان نتایج ارائه شده است.

### اقدام سوم (کاهش برداشت)

این اقدام و اقدام بعدی به یک روش مشابه به مدل اعمال شدند. با این تفاوت که در یکی افزایش و دیگری کاهش میزان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی اتفاق افتاد. سلول انتخابی برای اعمال این اقدام در سطح محدوده میزان برداشتی قابل توجهی را به خود اختصاص داده بود که برای اعمال این اقدام انتخاب گردید. نحوه اعمال و اجرای این اقدام در مدل بر اساس میزان برداشتی که در سلول انتخابی در محدوده اتفاق افتاده است، این مقدار در این اقدام به میزان ۵۰ درصد کاهش یافته و اثرات آن در محدوده مطالعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت.



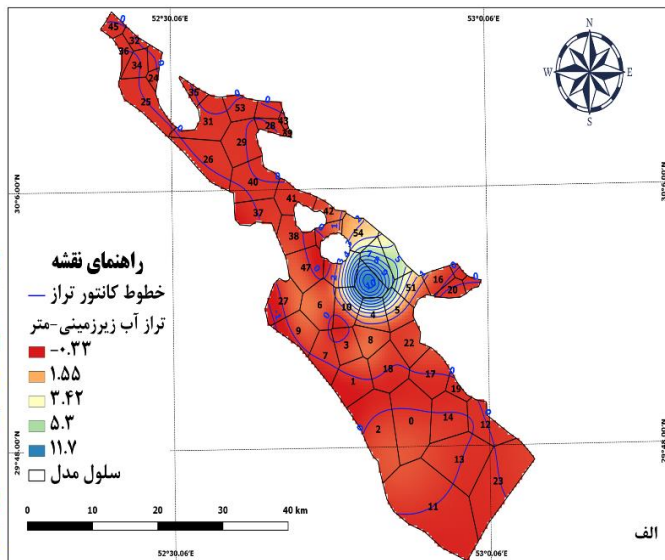
ب

| جدول بیلان آبخوان برای سناریو سوم در حالت پایه |                         |                                   |                      |                  |
|------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------|
| ورودی به آبخوان (تغذیه)                        | خروجی از آبخوان (تخلیه) | تغییرات در ذخیره (میلیون مترمکعب) |                      |                  |
| ۹۹.۶                                           | ۵۴۱.۷                   | -۴۴۱.۱                            | جریان زیرزمینی       | برداشت از آبخوان |
| ۱۴۵.۵                                          | ۲۴.۴                    | -۱۲۱.۱                            | نفوذ از جریانات سطحی | تبخیر از آبخوان  |
| ۲۷۶                                            | -۱.۸                    | -۲۷۷.۸                            | جریان زیرزمینی       | خروجی            |
| مجموع تغذیه                                    | مجموع تخلیه             |                                   |                      |                  |
| ۵۲۱.۱                                          | -۵۶۷.۹                  | -۴۶.۸                             |                      |                  |

| جدول بیلان آبخوان برای سناریو سوم در حالت مدیریتی |                         |                                   |                      |                  |
|---------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------|
| ورودی به آبخوان (تغذیه)                           | خروجی از آبخوان (تخلیه) | تغییرات در ذخیره (میلیون مترمکعب) |                      |                  |
| ۹۹.۶                                              | ۵۳۵.۴                   | -۴۳۵.۸                            | جریان زیرزمینی       | برداشت از آبخوان |
| ۱۴۵.۵                                             | ۲۴.۴                    | -۱۲۱.۱                            | نفوذ از جریانات سطحی | تبخیر از آبخوان  |
| ۲۷۳.۳                                             | -۱.۸                    | -۲۷۵.۱                            | جریان زیرزمینی       | خروجی            |
| مجموع تغذیه                                       | مجموع تخلیه             |                                   |                      |                  |
| ۵۱۸.۴                                             | -۵۶۱.۶                  | -۴۳.۲                             |                      |                  |

ج

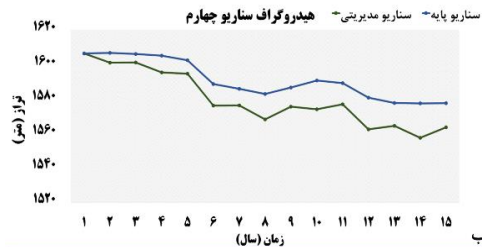


شکل ۱۹ الف: نقشه اختلاف هم تراز آب زیرزمینی نسبت به وضعیت پایه، ب: هیدروگراف سلول، ج: جدول بیلان آبخوان

از نتایج حاصل از اجرای این اقدام می‌توان دریافت که این اقدام نیز همانند اقدام قبل به افزایش تراز و کاهش کسری مخزن در آبخوان محدوده کمک کرده و مقدار این کمک قابل توجه است (شکل ۱۹). براساس این اقدام تراز آب زیرزمینی به مقدار ۱۱/۷ متر و همچنین بیلان آبخوان به میزان ۳/۶ میلیون متر مکعب افزایش یافته که نشان‌دهنده تاثیر مثبت و قابل توجه برداشت بر تراز و بیلان آبخوان می‌باشد.

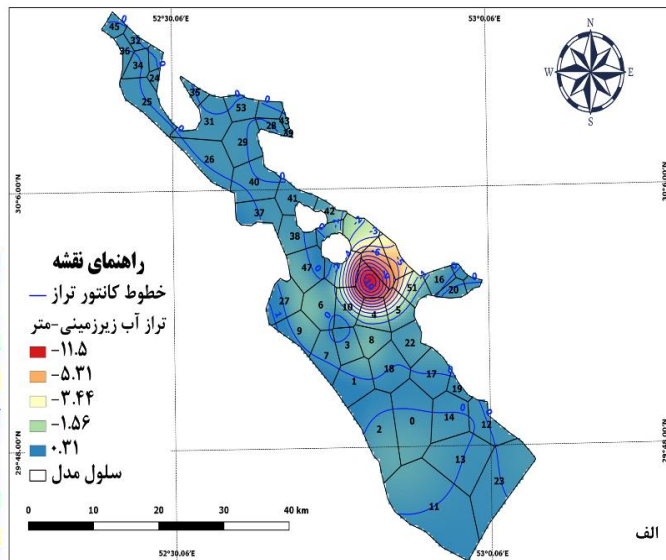
#### اقدام چهارم (افزایش برداشت)

همانطور که بیان شد این اقدام همانند اقدام قبل به مدل اعمال شد، به این نحو که میزان برداشت در سلول انتخاب شده به میزان ۵۰ درصد افزایش یافت. مفهوم این اقدام همانند اقدام قبل است و با فرض اینکه میزان برداشت با توجه به افزایش جمعیت و افزایش برداشت از آبخوان میزان برداشت‌ها به مقدار ۵۰ درصد افزایش می‌یابد اقدام اجرا شد. پس اجرای اقدام مشخص گردید که اقدام برداشت، همانند اقدام کاهش برداشت تاثیر قابل توجهی بر افت تراز و افزایش کسری مخزن دارد. این تاثیر تقریباً با تاثیری که اقدام قبل بر تراز و بیلان آبخوان گذاشت برابر و مساوی است. در این اقدام میزان افت تراز براساس نقشه اختلاف هم تراز حدود ۱۱/۵ متر افت و کسری مخزن نیز به میزان ۳/۶ میلیون مترمکعب افزایش یافته است (شکل ۲۰).



| جدول بیلان آبخوان برای سناریو چهارم در حالت پایه |                      |                          |                      |                                 |        |
|--------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------|--------|
| ورودی به آبخوان (تغذیه)                          |                      | خروجی از آبخوان (تخلیه)  |                      |                                 |        |
| جریان زیرزمینی ورودی                             | نمود از جریانات سطحی | نمود از بارش و آب برگشتی | جریان زیرزمینی خروجی | تخیر از آبخوان برداشت از آبخوان |        |
| ۹۹.۶                                             | ۱۴۵.۵                | ۲۷۶                      | -۱.۸                 | -۲۴.۴                           | -۵۴۱.۷ |
| مجموع تغذیه                                      |                      |                          | مجموع تخلیه          |                                 |        |
| ۵۲۱.۱                                            |                      |                          | -۵۶۷.۹               |                                 |        |
| تغییرات در ذخیره (میلیون مترمکعب)                |                      |                          |                      |                                 |        |
| -۴۶.۸                                            |                      |                          |                      |                                 |        |

| جدول بیلان آبخوان برای سناریو چهارم در حالت مدیریتی |                      |                          |                      |                                 |      |
|-----------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------------|------|
| ورودی به آبخوان (تغذیه)                             |                      | خروجی از آبخوان (تخلیه)  |                      |                                 |      |
| جریان زیرزمینی ورودی                                | نمود از جریانات سطحی | نمود از بارش و آب برگشتی | جریان زیرزمینی خروجی | تخیر از آبخوان برداشت از آبخوان |      |
| ۹۹.۶                                                | ۱۴۵.۵                | ۲۷۸.۷                    | -۱.۸                 | -۲۴.۴                           | -۵۴۸ |
| مجموع تغذیه                                         |                      |                          | مجموع تخلیه          |                                 |      |
| ۵۲۳.۸                                               |                      |                          | -۵۷۴.۲               |                                 |      |
| تغییرات در ذخیره (میلیون مترمکعب)                   |                      |                          |                      |                                 |      |
| -۵۰.۴                                               |                      |                          |                      |                                 |      |



شکل ۲۰ الف: نقشه اختلاف هم تراز آب زیرزمینی نسبت به وضعیت پایه، ب: هیدروگراف سلول، ج: جدول بیلان آبخوان

## بحث

در این مطالعه چهار نوع اقدام مختلف به مدل اعمال شد، و تغییرات تراز آب زیرزمینی و بیلان آبخوان ناشی از این اقدامات مشاهده شد. مقایسه نتایج بدست آمده از این پژوهش با سایر مطالعات نشان داد که در راستای دو اقدام افزایش و کاهش برداشت مطالعات متعددی در مناطق مختلفی با بکارگیری مدل‌های ریاضی و رویکردهای متفاوتی انجام شده است به عنوان نمونه می‌توان بیان کرد دوستی رضایی و همکاران (۱۴۰۰)، با اعمال چند سناریو مختلف که شامل کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری بود دریافتند که کاهش نرخ برداشت چاه‌ها، وضعیت منابع آب زیرزمینی را به طور معناداری بهبود می‌دهد، به طوری که با کاهش نرخ برداشت چاه‌ها به میزان ۳۰ درصد علاوه بر جبران کمبود کسری مخزن سبب افزایش حجم آب زیرزمینی به میزان ۱۴ میلیون مترمکعب افزایش شده است. در ادامه احمدی و همکاران (۱۳۹۹) دو نرخ متفاوت برداشت از آبخوان، برای یک دوره پیش‌بینی طراحی کرده و به مدل خود اعمال نمودند نتایج این طراحی نشان داد که برداشت از آبخوان با سیاست فعلی باعث خشک شدن قسمت‌های زیادی از آبخوان شده بطوری که حداکثر افت به میزان ۱۲/۲۰ متر و حداقل آن به میزان ۱/۷۰ متر در محدوده به وجود آورده است، ایشان بیان نمودند که کاهش در نرخ برداشت از آبخوان تاثیر مثبت و متفاوتی بر روی سطح تراز آبخوان می‌گذارد. در این راستا همچنین پارسا و همکاران (۱۳۹۴) نیز در مدلی که برای شبیه‌سازی آبخوان دشت روداب سبزوار استفاده نمودند و اظهار داشتند که مدل بیشترین حساسیت را نسبت به دبی برداشت از چاه‌ها دارد زیرا بخش اصلی تخلیه آبخوان توسط چاه‌های بهره‌برداری صورت می‌گیرد و تخلیه طبیعی سهم کمتری در میزان تخلیه آبخوان دارد که با نتایج بدست آمده از این پژوهش سازگاری دارد در راستای اقدام تغییر الگوی کشت، قدیمی و کتابچی (۱۳۹۷) برای یک دوره شبیه‌سازی ۳۰ ساله در شرایط غیرماندگار نتیجه‌گیری کردند که از بین سناریوهای اعمالی مختلف، سناریو تغییر الگوی کشت با تغییر نوع محصول از گندم به محصولی با نیاز آبی کم مانند جو، منجر به کاهش حجم آب مصرفی حدود ۱۹ درصد شده که در نهایت منجر به افزایش تراز سطح آب زیرزمینی تا پایان دوره شبیه‌سازی، به اندازه ۴/۴ متر شده است که در تطابق با نتیجه بدست آمده در این پژوهش است. در راستای دو اقدام تغییر الگوی کشت و استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین (تحت فشار) آزادگان و همکاران (۱۴۰۲) یک سناریو ترکیبی که شامل کاهش برداشت چاه‌های کشاورزی برای توجیه تغییر الگوی کشت به همراه کاهش تغذیه سطحی ناشی از جریان‌های برگشتی کشاورزی برای فرض استفاده از شیوه‌های

نوبین آبیاری، انتخاب و مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با وجود اینکه مقدار بیلان منفی مخزن جبران نمی‌شود ولی از میزان افت تراز آب زیرزمینی با استفاده از این سناریو ترکیبی کاسته می‌شود. می‌توان بیان کرد که نتایج مطالعه آزادگان و همکاران (۱۴۰۲) با نتایج بدست آمده در این پژوهش دارای تفاوت است زیرا آن‌ها استفاده از سیستم آبیاری نوبین را به همراه کاهش برداشت از آبخوان به مدل اعمال نمودند از این رو می‌توان بخش اعظمی از کاهش در میزان افت تراز آب زیرزمینی را به تاثیر قابل توجه کاهش برداشت از آبخوان نسبت داد. بنابراین می‌توان بیان کرد که در صورتی استفاده از روش‌های نوبین آبیاری می‌تواند موثر واقع گردد و تاثیر مثبتی بر روی تراز و بیلان آبخوان داشته باشد که همراه با کاهش برداشت از چاه‌ها و به صورت ترکیبی در نظر گرفته شود و در صورتی که سیستم‌های آبیاری تحت فشار به تنهایی مورد استفاده قرار گیرد به دلیل عدم کاهش در میزان برداشت، توسعه کشاورزی و زیرکشت رفتن زمین‌هایی که در قبل هیچ کشتی در آنها صورت نمی‌گرفت می‌تواند تاثیر منفی و مخرب بر روی تراز و بیلان آبخوان داشته باشد که نتایج بدست آمده از این پژوهش حاضر نیز گواه بر این موضوع است. بنابراین با توجه به مقایسه و تحلیل نتایج با سایر مطالعات می‌توان بیان کرد که اقدام اول که اقدام تغییر سیستم آبیاری است بر خلاف این باور که سیستم‌های تحت فشار موجب کاهش مصرف آب و افزایش راندمان می‌گردد ملاحظه شد که استفاده از این سیستم به تنهایی و بدون کنترل سیاست‌های توسعه، تاثیر منفی بر روی تراز سطح ایستابی و بیلان آبخوان در محدوده دارد. از بین اقدامات اجرا شده دو اقدام تاثیر مثبت و دو اقدام دیگر تاثیر منفی بر تراز و بیلان آبخوان در محدوده مطالعاتی داشتند. دو اقدام تغییر سیستم آبیاری از سنتی به تحت فشار و اقدام افزایش ۵۰ درصدی برداشت از آبخوان اقداماتی هستند که تاثیر منفی داشته و دو اقدام تغییر الگوی کشت و اقدام کاهش ۵۰ درصدی برداشت از آبخوان تاثیر مثبت بر روی بیلان و نوسانات تراز در محدوده داشته‌اند. همچنین از بین اقدامات، اقدام تغییر سیستم آبیاری بیشترین تاثیر منفی و اقدام کاهش برداشت بیشترین تاثیر مثبت بر تغییرات و نوسانات تراز را به خود اختصاص داده است. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در صورت استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار، میزان آب برگشتی در این اقدام به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. همچنین با اینکه کاهش میزان برداشت به مقدار ۵۰ درصد غیرقابل تصور است ولی به دلیل وجود منابع آب سطحی در محدوده همچون رودخانه دائمی کر، می‌توان با استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و کاهش برداشت (به عنوان مثال با شناسایی و مسدود کردن چاه‌های غیرمجاز و ممانعت از توسعه با تعدیل پروانه چاه‌های مجاز) کمک شایانی به بهبود تراز و بیلان آبخوان در محدوده نمود.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، یک شبیه‌سازی با استفاده از یک مدل ریاضی جریان به روش تفاضل محدود در سیستم آب زیرزمینی و بررسی و ارزیابی بیلان آن در نظر گرفته شد که پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، معیارهای مختلف برای ارزیابی مدل مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نتایج خطا ناشی از تراز آب شبیه‌سازی شده با تراز آب مشاهداتی در چاه‌های مشاهده‌ای نشان داد که مدل به خوبی توانسته در شبیه‌سازی تراز آب عمل نماید. همچنین به جهت بررسی و ارزیابی وضعیت آبخوان برای یک دوره آینده، چند اقدام مدیریتی که در راستای افزایش بهره‌وری از منابع آب و همچنین طرح احیاء و تعادل بخشی آبخوان بود به مدل اعمال شد. در نهایت نتایج حاصل از این اقدامات نشان داد که از بین اقدامات اعمال شده اقدام تغییر سیستم آبیاری سنتی به تحت فشار بیشترین افت تراز و کسری مخزن را به همراه داشته به طوری که در محل اعمال این اقدام، ۱۷ متر افت محلی تراز و ۷/۸ میلیون مترمکعب کسری مخزن در آبخوان دشت مشاهده شد. دو اقدام تغییر الگوی کشت و اقدام کاهش پمپاژ، تاثیر مثبتی بر روی بیلان و کسری مخزن داشته به طوری این دو اقدام به ترتیب سبب افزایش تراز در محل اعمال اقدام به میزان ۴ و ۱۱/۷ متر و همچنین کاهش کسری مخزن به میزان ۱/۱



و ۳/۶ میلیون مترمکعب شد. در رابطه با اقدام تغییر سیستم آبیاری از سطحی به تحت فشار می‌توان بیان کرد که بر خلاف آن چیزی که شاید تصور شود، با اعمال سیاست‌های مدیریتی افزایش سیستم‌های آبیاری نوین در سطح کشور برای کاهش مصرف آب و بهبود به کمبود منابع آبی از جمله منابع آب زیرزمینی، اما نتایج در محدوده مورد بررسی بیانگر این است که با به کارگیری این نوع سیستم آبیاری نه تنها کسری مخزن کاهش نیافته بلکه به میزان تقریباً ۱۴ درصد کسری مخزن بیشتر نیز شده است. در رابطه با اقدام تغییر الگوی کشت نیز می‌توان بیان کرد که با توجه به وضعیت منابع آب در محدوده، اجرای این سیاست و تغییر الگوی کشت در محدوده با تغییر از محصولات پرمصرف همچون برنج و جایگزینی آن با محصولات کم مصرفی همچون گندم می‌تواند منجر به کاهش تقاضای آب و به دنبال آن کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و افزایش تراز را در بر داشته باشد. در راستای مدیریت پایدار و استفاد بهینه از منابع آب زیرزمینی ضروری است که بکارگیری اقداماتی همچون تغییر الگوی کشت و کاهش برداشت در آینده بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. همچنین رفع برخی محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌ها مانند توجه به فراهم نمودن اطلاعات در زمینه عمق کف و بستر آبخوان برای تعیین و برآورد دقیق ضخامت آبخوان در سطح محدوده مطالعاتی، حفر چاه‌های اکتشافی و آزمایش‌های پمپاژ به جهت برآورد دقیق میزان هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال و تکمیل شبکه چاه‌های مشاهداتی برای دوره آماری در نظر گرفته شده برای تهیه هیدروگراف آبخوان در راستای کاربردی‌تر کردن، واقعی سازی و بروز کردن یافته‌های چنین مطالعاتی راهگشا است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد."

## منابع

- آزادگان، بهزاد؛ حنفی، حنان؛ وراوی پور، مریم و کاردان مقدم، حمید. (۱۴۰۳). شبیه سازی عددی آبخوان دشت تایباد با استفاده از MODFLOW و پیش بینی سناریوهای مدیریتی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۳۴۳-۳۵۵.
- احمدی بادجانی، علی، ملک محمودی، مهدی، رجایی، طاهر، و جوادی راد، محمد. (۱۳۹۹). شبیه سازی عددی جهت ارائه رابطه‌ای برای برداشت بهینه آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دامنه). مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴ (۴)، ۱۳۶۳-۱۳۷۵.
- پارسا صدر، حسین، محمدزاده، حسین و ناصری، حمید رضا. (۱۳۹۵). شبیه سازی عددی آبخوان دشت روداب سبزوار و بررسی اثرات احداث سد روداب بر آن. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳ (۱)، ۱۱۹-۱۳۵.
- خدایاری، مریم، حصاری، بهزاد، احمدی، حجت و محمدپور، مریم. (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی طرح تغذیه مصنوعی بر بهبود وضعیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی (مطالعه موردی دشت فیروزق خوی در استان آذربایجان غربی). هیدروژئولوژی، ۸ (۱)، ۱۷۰-۱۸۶.
- دوستی رضایی، مهرنگ، زینال‌زاده، کامران، بشارت، سینا و امیرعطایی، بابک. (۱۴۰۱). تأثیر سناریوهای مدیریتی و اقلیمی در تغییرات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی مدل سازی عددی در آبخوان دشت سلماس). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶ (۲)، ۲۹۳-۲۸۰.
- رضایی، سمیرا، جوادی، سامان و کاردان مقدم، حمید. (۱۳۹۹). ارزیابی راهکارهای مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد اجرای محدود در شبیه سازی عددی. هیدروژئولوژی، ۵ (۲)، ۳۲-۴۲.
- شیخ‌باگم قلعه، سیمین، بابازاده، حسین، رضایی، حسین و سرایی تبریزی، مهدی. (۱۴۰۲). مدل سازی عددی و تحلیل روند وضعیت کمی آبخوان مهاباد. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳ (۲)، ۱-۱۷.
- قدیمی، سهند و کتابچی، حامد. (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات اعمال سیاست‌های مختلف مدیریتی بر روی آبخوان با استفاده از شبیه سازی عددی (مطالعه موردی: آبخوان نمدان، استان فارس، ایران). مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۵ (۱۶)، ۲۳-۳۳.
- کتابچی، حامد و محمودزاده، داود. (۱۳۹۷). نقدی بر برآورد بیلان منابع آب زیرزمینی در کشور ایران: راهکارها و پیشنهادها. تهران، ایران: مرکز پژوهش‌های

## REFERENCES

- Azadegan, B., Hanafi, H., Varavipour, M., & Kardan Moghaddam, H. (2024). Numerical simulation of Taybad plain aquifer using MODFLOW and prediction of management scenarios. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 343-35. (In Persian).
- Ahmadi Badejani, A., MalekMahmoudi, M., Rajayee, T., & Javadi Rad, M.. (2020). Numerical Simulation for Present a Relationship for Optimize Exploitation Groundwater (Case Study: Damaneh Aquifer). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(4 ), 1362-1375. (In Persian).
- Abraham, M. K., Priyadarshini, & Manikannan, K. (2021). Numerical Modeling for Groundwater Recharge (pp. 165–177).
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling*. In *Applied Groundwater Modeling*.
- Aredo, M. R., Lohani, T. K., & Mohammed, A. K. (2023). Numerical groundwater modelling under changing water abstraction in Weyib watershed , Ethiopia Numerical groundwater modelling under changing water abstraction in Weyib watershed ,. *Cogent Engineering*, 10(2).
- Dousti Rezaie, M. , Zeinalzadeh, K. , Besharat, S. and Amirataee, B. (2022). Effects of Management and Climate Scenarios on Groundwater Level Changes: Case Numerical Modeling Study in Salmas Plain Aquifer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(2), 280-293. (In Persian).
- Ghadimi, S., & Ketabchi, H. (2019). Possibility of cooperative management in groundwater resources using an evolutionary hydro-economic simulation-optimization model. *Journal of Hydrology*, 578, 124094.
- Ghadimi, S. & Ketabchi, H. (2019). Impact assessment of different management strategies implementation on the aquifer using numerical simulation (Case study: Namdan aquifer, Fars province, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), 1-23. (In Persian).
- Gumula-Kawęcka, A., Jaworska-Szulc, B., Szymkiewicz, A., Gorczewska-Langner, W., Pruszkowska-Caceres, M., Angulo-Jaramillo, R., & Šimůnek, J. (2022). Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology*, 605.
- Kakavand, Y., & Mozaffari, J. (2023). Simulation of Groundwater Level in Nahavand Plain Using MODFLOW. *Irrigation and Water Engineering*, 13(3), 305–319.
- Ketabchi, Hamed and Mahmoodzadeh, Davood. (2018). Critique of estimating groundwater resources balance in Iran: Strategies and suggestions. Tehran, Iran: Center of the Research Islamic Consultative Assembly. (In Persian).
- Khodaiari, M. , Hessari, B. , Ahmadi, H. and Mohammadpour, M. (2023). Evaluation of artificial recharge project efficiency for groundwater recovery with mathematical modeling (A case study on Firuraq of Khoy Plain in West Azerbaijan province). *Hydrogeology*, 8(1), 170-186. (In Persian).
- Lozano Hernández, B. L., Marín Celestino, A. E., Martínez Cruz, D. A., Ramos Leal, J. A., Hernández Pérez, E., García Pazos, J., & Almanza Tovar, O. G. (2024). A Systematic Review of the Current State of Numerical Groundwater Modeling in American Countries: Challenges and Future Research. *Hydrology*, 11(11).
- Mahmoodzadeh, D., & Karamouz, M. (2022). A hydroeconomic simulation-optimization framework to assess the cooperative game theory in coastal groundwater management. *Journal of Water Resources*



Planning and Management, 148(1).

- Parsa Sadr, H. , Mohammadzadeh, H. and Nassery, H. R. (2016). Numerical simulating of Sabzevar Roudab aquifer and checking of influences of constructing Sabzevar Roudab dam on it. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(1), 119-135. (In Persian).
- Raheem, A., Ahmad, I., Arshad, A., Liu, J., Rehman, Z. U., Shafeeque, M., Rahman, M. M., Saifullah, M., & Iqbal, U. (2024). Numerical Modeling of Groundwater Dynamics and Management Strategies for the Sustainable Groundwater Development in Water-Scarce Agricultural Region of Punjab, Pakistan. *Water (Switzerland)*, 16(1).
- Rezaee, S., Javadi, S. and Kardan moghaddam, H. (2020). Assessment of groundwater resources management solutions by finite element in numerical simulation. *Hydrogeology*, 5(2), 32-42. (In Persian).
- Raja, O. , Parsinejad, M. and Tajrishi, M. (2022). Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain). *Water and Soil*, 36(1), 31-52.
- Shittu, M. T., Usman, M. A., & Ariyo, S. O. (2024). Mathematical Modeling of Transient and Steady-State Groundwater Flow in a Confined Aquifer. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 28(3), 741–755.
- Sheikha Bagem Ghaleh, S. , Babazadeh, H. , Rezaei, H. and Sarai Tabrizi, M. (2023). Numerical Modeling and Trend Analysis of Mahabad Aquifer Quantitative Status. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 1-17. (In Persian).
- Soltani, F., Javadi, S., Roozbahani, A., Massah Bavani, A. R., & Lotfi, S. (2022). Simulation of surface water-groundwater interaction using MODFLOW-OWHM (case study: Shazand plain). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 9(1), 199–210.
- Tao, Z. C., Cui, Z. N., Yu, J. Q., & Khayatnezhad, M. (2022). Finite Difference Modelings of Groundwater Flow for Constructing Artificial Recharge Structures. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 1503–1514.
- Tripura, S. I. N. (2016). Mass Balance With Hydraulic Head Using Groundwater Modeling Estimating Groundwater Volumetric Mass Balance With Hydraulic Head Using Groundwater Modeling System in Tripura, India. 1(August), 19–29.
- Usman, M., Qamar, M. U., Becker, R., Zaman, M., Conrad, C., & Salim, S. (2020). Numerical modelling and remote sensing based approaches for investigating groundwater dynamics under changing land-use and climate in the agricultural region of Pakistan. *Journal of Hydrology*, 581(April 2019), 124408.
- Yifru, B. A., Lee, S., Bak, S., Bae, J. H., Shin, H., & Lim, K. J. (2024). Estimating exploitable groundwater for agricultural use under environmental flow constraints using an integrated SWAT-MODFLOW model. *Agricultural Water Management*, 303(July), 109024.