

Hydrogeological assessment and uncertainty analysis of the groundwater model of the Khorramabad Plain Aquifer

Emad Kahrizi¹ 

1. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran. E-mail: Emad.Kahrizi@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 02 Jul 2025
Revised 12 Aug 2025
Accepted 27 Aug 2025
Published 27 Sep 2025

Keywords:
Climate Change,
Groundwater Modeling,
Uncertainty,
GLUE Method,
Monte Carlo.

ABSTRACT

Objective: This study aims to evaluate the uncertainty associated with temperature and precipitation parameters influencing groundwater flow in the Khorramabad Plain aquifer.

Method: To achieve this objective, a Monte Carlo simulation was employed to investigate the effects of climatic variability on model performance. In this context, the MODFLOW groundwater flow model was utilized, and calibration and validation processes were meticulously conducted using a structured six-step approach. This methodology ensures the model's compatibility with the hydrogeological conditions of the plain, thereby enhancing the reliability of the results. In light of climate change impacts on groundwater resources, temperature and precipitation projections were simulated based on emission scenarios from the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), and groundwater level changes were forecasted for 20 years.

Results: The findings revealed that November exhibited the highest level of uncertainty in precipitation forecasts, with rainfall ranging from 0 to 262 mm and an estimated mean of 41.6 mm.

Conclusion: Regional analysis indicated that Zone 5 is expected to experience the most significant fluctuations in groundwater levels, with a potential decline of up to 13.5 meters. The risk of aquifer depletion in this area is notably higher than in other regions. These results underscore the vulnerability of groundwater exploitation in Zone 5 and highlight the urgent need for precise and sustainable water resource management strategies.

Cite this article: Kahrizi E. Hydrological assessment and uncertainty analysis of the groundwater model of the Khorramabad plain aquifer. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(3): 23-40.
<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.13170.1018>.

Introduction

Groundwater resources play a crucial role in meeting agricultural and domestic water needs, particularly in semi-arid and arid regions like the Khorramabad Plain, situated in western Iran. The intensifying overexploitation of aquifers, coupled with the unpredictable consequences of climate change, has raised critical concerns about the long-term viability of groundwater reserves in this region. Hydrological modeling serves as a robust analytical approach for simulating aquifer dynamics and guiding policy formulation; however, the intrinsic uncertainties of such models—arising from data limitations and variability in key parameters like precipitation and temperature—remain a significant challenge.

This study aims to quantitatively assess the uncertainties associated with groundwater level projections under future climatic conditions. To achieve this, the MODFLOW groundwater simulation model is integrated with a Monte Carlo-based uncertainty assessment framework utilizing the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) methodology. Incorporating climate projections from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), this research endeavors to establish a scientifically grounded and reliable framework for strategic groundwater management in the Khorramabad aquifer system.

Method

The methodological framework of this study is centered on the integration of the MODFLOW groundwater simulation model and the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) approach within the Groundwater Modeling System (GMS) environment. Initially, a three-dimensional groundwater flow model was constructed to simulate hydrological behavior over a decadal period (120 months), utilizing long-term observed hydrological and meteorological datasets. Model calibration was conducted using 75% of the recorded groundwater level data, while the remaining 25% was reserved for validation to ensure model robustness and predictive reliability.

To rigorously examine the impacts of climatic uncertainty on groundwater dynamics, a set of 810 synthetic climate scenarios was generated through a customized Python-based Monte Carlo simulation. This simulation stochastically varied three key climatic inputs—minimum temperature, maximum temperature, and precipitation—based on multi-model ensemble outputs derived from Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). These inputs were aligned with three distinct Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), namely SSP1-2.6 (sustainability-focused), SSP2-4.5 (intermediate pathway), and SSP5-8.5 (fossil-fueled development).

The generated climatic variations served as dynamic forcings for the MODFLOW model, allowing the simulation of groundwater level responses under a wide spectrum of plausible future conditions. Subsequently, the GLUE methodology was applied to quantify uncertainty and characterize the probabilistic distribution of groundwater levels across scenarios. For spatially explicit analysis, the model domain was stratified into five hydrogeological zones,

facilitating localized risk identification and enabling targeted groundwater management strategies.

Results

The results of the uncertainty analysis indicated pronounced variability in groundwater level responses driven by fluctuations in climate input parameters. Among these, precipitation emerged as the most variable factor—particularly in November—exhibiting a wide range from 0 to 262 mm, with a monthly mean of 41.6 mm. In contrast, temperature variations (both minimum and maximum) were comparatively more consistent but still demonstrated notable seasonal dynamics that influenced groundwater recharge patterns.

Spatial analysis across the five delineated hydrogeological zones revealed Zone 5 as the most vulnerable to climatic variability. This zone exhibited water table depths ranging from 7.3 to 25.1 meters, with a 95% probability of substantial aquifer decline projected within the next two decades. The other zones showed relatively moderate or low sensitivity to climatic fluctuations, suggesting spatial heterogeneity in groundwater system resilience.

Among the climate models evaluated, the ACCESS-ESM1-5 simulation demonstrated the highest fidelity to historical climatic records, thereby being identified as the most suitable predictor for long-term groundwater projections in the study area. Notably, simulation runs that excluded anthropogenic groundwater withdrawals yielded relatively stable water level trends, underscoring the dominant role of human extraction in accelerating aquifer depletion and reinforcing the necessity of integrated demand management strategies in future water resource planning.

Conclusion

This research underscores the critical importance of incorporating uncertainty analysis into groundwater modeling, particularly in regions that are simultaneously exposed to climate change impacts and intensive anthropogenic water extraction. The integrated application of MODFLOW, the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) method, and climate projections from Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) has enabled the development of a comprehensive and adaptable framework for assessing future groundwater dynamics in the Khorramabad Plain.

The analytical results identify Zone 5 as a high-priority area for targeted conservation measures, given its pronounced vulnerability to climatic fluctuations and declining aquifer levels. These findings underscore the necessity for policymakers to explicitly account for both climatic uncertainty and human-induced stressors in the formulation of groundwater management strategies.

Moreover, the methodological approach demonstrated in this study is readily transferable to other regions facing similar challenges, where uncertainties in input datasets and future climate trajectories complicate long-term planning. By emphasizing probabilistic forecasting

rather than relying solely on deterministic outputs, the framework provides a more nuanced and realistic foundation for sustainable water resource management and policy development.

Declarations

Ethical Approval

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

Competing interests

Conflict of Interest – None

Availability of data and materials

Data will be made available on the request.

Authors Contributions

Emad Kahrizi developed the theory, performed the computations, and wrote the manuscript. Emad also critically analyzed the results.

Acknowledgements

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

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.



بررسی هیدروژئولوژی و عدم قطعیت مدل آب زیرزمینی آبخوان دشت خرم آباد

عماد کهریزی[✉]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیتالله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران. رایانامه: Emad.Kahrizi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: این پژوهش با هدف ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای دما و بارش بر جریان آب‌های زیرزمینی دشت خرم‌آباد انجام شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱	روش: برای دست‌یابی به این هدف، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد تا اثرات نوسانات اقلیمی بر عملکرد مدل بررسی گردد. در این راستا، مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW به‌کار گرفته شد و با به‌کارگیری یک رویکرد شش‌مرحله‌ای، فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی مدل با دقت انجام شد. این فرآیند تضمین‌کننده تطابق مدل با شرایط آب‌شناسی دشت و افزایش اعتبار نتایج است. با توجه به اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی، دما و بارش براساس سناریوهای انتشار گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) شبیه‌سازی شدند و پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی برای یک دوره ۲۰ ساله ارائه گردید.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱	یافته‌ها: نتایج نشان دادند که ماه نوامبر دارای بیش‌ترین میزان عدم قطعیت در پیش‌بینی بارش است، به طوری که میزان بارش در این ماه در بازه‌ای از صفر تا ۲۶۲ میلی‌متر متغیر بوده و میانگین بارندگی ۴۱/۶ میلی‌متر تخمین زده شده است.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵	نتیجه‌گیری: بررسی‌های منطقه‌ای حاکی از آن است که منطقه ۵ بیش‌ترین تغییرات را در سطح آب زیرزمینی تجربه خواهد کرد. در این منطقه، احتمال کاهش سطح آب زیرزمینی تا ۱۳/۵ متر وجود دارد و خطر خشک شدن آبخوان در مقایسه با سایر نواحی بیش‌تر است. این یافته‌ها نشان‌دهنده خطرپذیری بالای بهره‌برداری در این منطقه و لزوم مدیریت دقیق و پایدار منابع آب است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵	
کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، مدل‌سازی آب زیرزمینی، عدم قطعیت، روش GLUE، شبیه‌سازی مونت کارلو.	
استناد: کهریزی عماد. بررسی هیدروژئولوژی و عدم قطعیت مدل آب زیرزمینی آبخوان دشت خرم‌آباد. <i>منابع آب و تغییر اقلیم</i> . ۱۴۰۴؛ (۳): ۲۳-۴۰. http://doi.org/10.22091/wrcc.2025.13170.1018	



۱- مقدمه

داده‌های مورد استفاده در تهیه مدل‌های ریاضی اغلب با محدودیت‌هایی همراه بوده و همچنین الگوریتم انتخاب‌شده برای مدل‌سازی، نمی‌تواند به‌طور کامل فرآیندهای طبیعی را بازتاب دهد. حتی در مدل‌های پیچیده و واسنجی‌شده، اطلاعات ورودی همچنان دارای سطحی از عدم قطعیت هستند [۵]. بنابراین، ارائه میزان عدم قطعیت در پیش‌بینی نتایج یا شبیه‌سازی آینده، با توجه به اهداف خاص هر مدل، ضروری است [۶]. عدم قطعیت در شبیه‌سازی آینده ریشه در عدم قطعیت‌های موجود در مدل واسنجی‌شده دارد و به‌همین دلیل، امکان ارائه پیش‌بینی‌های دقیق در مورد زمان وقوع رخداد‌های آتی و ارزیابی میزان کارایی و اطمینان‌پذیری مدل در شبیه‌سازی رویدادهای مختلف در آینده وجود ندارد [۷]. با این حال، به‌منظور ارائه یک دیدگاه محتمل از وضعیت آتی، می‌توان از رویکردهای تحلیل قابلیت اطمینان برای ارائه یک شاخص آماری از تغییرات دشت بهره گرفت.

لین^۱ و همکاران در پژوهشی مرتبط با مدل‌سازی آب زیرزمینی و تحلیل عدم قطعیت اشاره کرده‌اند که مدل MODFLOW در حال حاضر، پرستفاده‌ترین ابزار برای شبیه‌سازی جریان در سفره‌های زیرزمینی و مدل‌سازی رفتار آبخوان‌ها به‌شمار می‌آید. به‌منظور ارتقاء سهولت استفاده از MODFLOW، رابط‌های کاربری گرافیکی متعددی برای تدوین فایل‌های تعریف مدل، تجسم نتایج و تفسیر آن‌ها توسعه یافته‌اند. به‌عنوان نمونه، نرم‌افزار GMS با فراهم‌سازی محیطی تحت ویندوز، اجرای فرآیند واسنجی و تسریع مراحل مدل‌سازی را امکان‌پذیر می‌سازد. در این راستا، این محققان رابط FloPy را برای MODFLOW طراحی کرده‌اند که قابلیت بهره‌برداری از داده‌های شبیه‌سازی شده با زبان برنامه‌نویسی پایتون را فراهم می‌سازد. این رابط، تهیه فایل‌های ورودی، اجرای مدل‌ها، خواندن خروجی‌ها و ترسیم نتایج شبیه‌سازی را از طریق اسکریپت‌های پایتون میسر می‌سازد. همچنین، آنان

مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی همواره با سطوح مختلفی از عدم قطعیت همراه است که ناشی از دو منبع اصلی است: نخست، محدودیت در دانش و آگاهی از سامانه‌های زیرسطحی و ویژگی‌های آب‌شناسی آن‌ها؛ و دوم، تغییرپذیری‌های ذاتی و طبیعی در فرآیندهای سامانه و شرایط میدانی. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند به‌دلیل پدیده‌هایی خارج از کنترل پژوهش‌گر نیز بروز یابند. در نتیجه، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی تحت تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از شناخت ناقص سامانه فیزیکی مورد مطالعه، ساختار و ساده‌سازی‌های مدل، و همچنین تغییرات مکانی و زمانی در پارامترهای آب‌شناسی قرار دارد [۱]. همواره مقداری عدم قطعیت در فرآیندهای مدل‌سازی وجود دارد؛ زیرا یک مدل ریاضی، بازنمایی ساده‌شده‌ای از فرآیندهای پیچیده و سامانه‌های واقعی است. در نتیجه، تفاوتی اجتناب‌ناپذیر بین پیش‌بینی‌های مدل و رفتار واقعی سامانه وجود خواهد داشت. شناسایی و ارزیابی این تفاوت‌ها، امکان تعیین میزان کارایی و اعتبار مدل را فراهم می‌آورد. به‌عنوان نمونه، خطاهای ناشی از برداشت‌های مازاد در دشت‌ها، از جمله این تفاوت‌ها هستند. مهم است که عدم قطعیت را نه به‌عنوان محدودیت مدل، بلکه به‌عنوان ابزاری برای توصیف ناشناخته‌های سامانه در نظر گرفت. این رویکرد، امکان اتخاذ تصمیمات آگاهانه براساس نتایج مدل را فراهم می‌کند [۲]. کاهش ظرفیت تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، ناشی از افزایش برداشت‌های موضعی، در شرایطی که مطالعات تغییرات سطح آبخوان با عدم قطعیت‌های متعددی همراه است، می‌تواند با استفاده از روش‌های احتمالاتی و تحلیل قابلیت اطمینان، ارزیابی شود. این رویکرد امکان محاسبه اطمینان‌پذیری ظرفیت سامانه را فراهم می‌کند [۳]. به‌همین دلیل، شناسایی و جانمایی یک پارچه آسیب‌پذیری‌ها می‌تواند هزینه‌های دستیابی به یک زیست‌بوم پایدار را به‌طور چشمگیری کاهش دهد [۴].

^۱- Lin

این تغییرات حاکی از آن است که بخش‌های وسیعی از سفره‌های آب زیرزمینی ساحلی شرقی، مناطق اصلی در امتداد عرض جغرافیایی زاگرس و بخش‌های عمده‌ای از استان فارس، با احتمال بیش از ۹۵ درصد در معرض کاهش سطح آب‌های زیرزمینی قرار دارند [۳].

معصومی و همکاران در پژوهشی، به بررسی مدل شبیه‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی (MODFLOW) با استفاده از رویکرد برازش عدم قطعیت متوالی^۶ (SUFI-2) و واسنجی خودکار پرداختند. هدف این مطالعه، ارزیابی و تنظیم پارامترهای مدل برای آبخوان اردبیل، واقع در شمال غربی ایران، بود. در این راستا، پارامترهای نامشخص شامل هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، نرخ تغذیه مجدد، هدایت هیدرولیکی مواد بستر رودخانه و رسانایی مرزی آبخوان در نظر گرفته شدند. برای حل معادله جریان آب زیرزمینی در شرایط آبخوان آزاد، از روش نیوتن استفاده شد. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم SUFI-2، یک شاخص کل عدم قطعیت نرمال‌سازی شده تعریف گردید. نتایج واسنجی مدل MODFLOW با استفاده از SUFI-2 نشان دادند که ۶۰ درصد از داده‌های مشاهده شده، در بازه اطمینان ۹۵ درصدی قرار می‌گیرند [۱۰].

اریجیت^۷ مدل بهینه‌سازی جدیدی را برای تخمین هم‌زمان چهار پارامتر جریان آب زیرزمینی (هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره‌سازی و نشت) ارائه کرد که قادر به تحلیل مدل‌های پیچیده‌تر با تعداد سلول‌های شبکه بیش‌تر و بازه‌های زمانی طولانی‌تر است. در این پژوهش، الگوریتم انتخاب کلونی اصلاح‌شده (یک روش بهینه‌سازی اکتشافی مبتنی بر سامانه ایمنی مصنوعی) به همراه MODFLOW شبیه‌سازی شده در متلب و با ورودی‌های تولیدشده در GMS برای واسنجی مدل و شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در دو سامانه فرضی دو و سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان دادند که این

برنامه‌ای مبتنی بر پایتون ارائه داده‌اند که امکان تولید مناطق جذب وابسته به زمان^۲ را در شرایط دوبعدی جریان‌های محدود آب زیرزمینی، برای محیط‌های آزاد و دارای یک یا چند چاه، فراهم می‌کند [۸].

در پژوهشی توسط آلیمونت^۳ و همکاران، کمی‌سازی تنوع خاک در دشت به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در مهندسی طبیعی مورد توجه قرار گرفت. این مطالعه با تمرکز بر تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی قابلیت اطمینان، به بررسی اثرات احتمالی فشرده‌گی آبخوان دشت اسکارلینو^۴ پرداخت که به‌واسطه گسترش موانع هیدرولیکی در فرآیند احیاء آب پدید آمده‌اند. توسعه مدل‌های چینه‌شناسی خاک و جریان آب زیرزمینی با بهره‌گیری از یک مدل عددی صورت پذیرفت. همچنین با استفاده از مدل‌های زهکشی آکی‌تارد، افت سطح آب زمین برای تخمین بیشینه جابجایی مجاز، که از آن به‌عنوان معیار آسیب‌پذیری اراضی یاد می‌شود، محاسبه گردید. ارزیابی نهایی با رویکردی سنتی مبتنی بر تحلیل قطعی آغاز شد و در ادامه با بهره‌گیری از مدل قابلیت اطمینان احتمالی تکمیل گردید [۹].

عظیمی و همکاران با به‌کارگیری روش قابلیت اطمینان مرتبه اول^۵ (FORM) به تحلیل احتمالی تکرار شرایط خشک‌سالی در ایران پرداختند. در این پژوهش، داده‌های میانگین بلندمدت در طی دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۰۵ از ۶۰۹ ایستگاه مطالعاتی در سراسر کشور جمع‌آوری و تحلیل گردید. قابلیت اطمینان در این مطالعه به‌عنوان تغییرات شاخص سطح آب زیرزمینی در دوره ۲۰۰۴-۱۹۹۴ تعریف شد. یافته‌ها نشان دادند که حدود ۱۹۰۰ ایستگاه در شرایط قطعی خشک‌سالی قرار داشته و بخش قابل توجهی از ایستگاه‌های باقی‌مانده، با احتمال بیش از ۵۰ درصد، در معرض افزایش تدریجی عمق سطح آب در سفره‌های آب زیرزمینی هستند. بررسی توزیع مکانی

^۶- Sequential Uncertainty Fitting Approach

^۷- Eryigit

^۲- Isochrones

^۳- Alimonti

^۴- Scarlino

^۵- Isochrones

شامل توپوگرافی سطح زمین، ضخامت آبرفت، شبکه هیدرومتری، ضرایب هیدرولیکی دشت (براساس جدیدترین داده‌های اکتشافی)، ساختار شرایط مرزی دشت، منابع استحصال (چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوت) و تمامی عوامل مؤثر بر دشت، از جمله مخازن طبیعی و سازه‌های انسان‌ساخت، انجام می‌گیرد. تغذیه دشت نیز براساس تنوع کاربری و پوشش زمین، ضرایب نفوذ، اطلاعات بارش، تبخیر و بازگشت آب از منابع بهره‌بردار، مدل‌سازی می‌شود.

ارزیابی عدم قطعیت، بخش اصلی تحلیل قابلیت اطمینان است و در این پژوهش به صورت کمی انجام خواهد شد. شاخص‌های اعتبار و احتمال شکست با استفاده از روش قابلیت اطمینان، که یک رویکرد مؤثر و قابل پیاده‌سازی است، تعیین می‌گردند. هدف اصلی تحلیل عدم قطعیت، تعیین خصوصیات آماری مدل به‌عنوان تابعی از پارامترهای ورودی احتمالی است [۷].

در ادامه، براساس نتایج شبیه‌سازی واسنجی شده و با تأیید بردار ویژه^{۱۲} برای اطمینان از صحت مدل، چندین سناریو در محیط اسکریپت پایتون تعریف خواهد شد تا عدم قطعیت پارامترهای مدل در شرایط غیرماندگار بررسی شود. در سناریوی اول، تأثیر عدم قطعیت بارش، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این منظور، سطح آبخوان به چندین ناحیه همگن مطالعاتی در محدوده شبکه آبراه‌ای تقسیم شده و عدم قطعیت پارامتر بارش با استفاده از روش تخمین عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته^{۱۳} (GLUE) ارزیابی می‌شود. در سناریوی دیگر، با در نظر گرفتن دماهای بیشینه و کمینه، اثر پارامتر برداشت به‌عنوان دومین عامل مهم در عدم قطعیت کل مدل، با استفاده از روش GLUE مطالعه می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها به صورت مشابه و متناسب با وضعیت آبخوان تکرار خواهند شد.

علاوه بر این، در پژوهش حاضر از مدل ریاضی و فرآیند واسنجی تغییرات جریان آب زیرزمینی با استفاده از

مدل در تخمین پارامترهای جریان آب زیرزمینی در مدل‌های با وضوح تصویر بالا، کارآمد است [۱۱].

کازمی چولانک و همکاران یک مدل ترکیبی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی^۸ (ANN) را برای شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از داده‌های محدود توسعه دادند. این مدل با ادغام ساختارهای پیشرفته ANN و رویکردهای آب‌شناسی، دقت پیش‌بینی جریان را در حوضه‌هایی با کمبود داده بهبود بخشیده است. مقایسه نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی نشان‌دهنده عملکرد برتر آن نسبت به مدل‌های سنتی است [۱۲].

محتشمی و همکاران با استفاده از مدل‌سازی عددی، رفتار یک آبخوان محصور نشده در منطقه خشک شرق ایران را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک مدل ترکیبی نوین ارائه کردند که مدل‌سازی عددی را با مدل جذب داده‌ها برای کاهش عدم قطعیت در پارامترهای هیدرودینامیکی (ضریب هدایت هیدرولیکی و بازدهی خاص) ادغام می‌کند؛ زیرا عدم قطعیت این پارامترها می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را کاهش دهد. در این پژوهش، از روش پتروف-گالرکین محلی بدون مش^۹ (MLPG) به‌عنوان مدل عددی و فیلتر ذرات^{۱۰} (PF) به‌عنوان مدل جذب داده استفاده شد. مدل PF-MLPG با استفاده از داده‌های سطح آب پیزومترها واسنجی و اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان دادند که مدل پیشنهادی با جذر میانگین مربعات خطا^{۱۱} (RMSE) برابر با ۰/۱۶۶ متر، در مقایسه با روش‌های عددی رایج (تفاضل محدود و MLPG) با RMSE‌های به ترتیب ۱/۱۹۷ و ۰/۷۵۷ متر، عملکرد بهتری در تخمین سطح آب زیرزمینی دارد و ضرورت به‌کارگیری این رویکرد را در مطالعات آبخوان‌ها نشان می‌دهد [۱۳].

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان یک شبیه‌سازی، از روش تحلیل قابلیت اطمینان در محدوده عدم قطعیت قابل قبول برای شاخص مورد نظر استفاده می‌شود. شبیه‌سازی با تکیه بر دسته‌بندی داده‌های مستقل

11- Root Mean Square Error

12- First-Order Reliability Method

13- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

8- Artificial Neural Network

9- Meshless Local Petrov-Galerkin

10- Particle Filter

فضا و زمان بازنمایی می کنند. مدل آب زیرزمینی در واقع، یک فرم ساده شده از سامانه واقعی آب های زیرزمینی است که به طور تقریبی همبستگی بین عمل و واکنش هیدرودینامیکی را در سامانه ارائه می دهد. یکی از مهم ترین مراحل مدل سازی، تهیه یک مدل مفهومی مناسب با ویژگی های سفره است که این امر، به اهداف مدل سازی، منابع موجود و داده های میدانی بستگی دارد. با داشتن چنین روابطی، می توان اثرات پارامترهای مختلف را بر سامانه، بررسی و نتایج را تحلیل کرد. نمودار گردش کار این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.

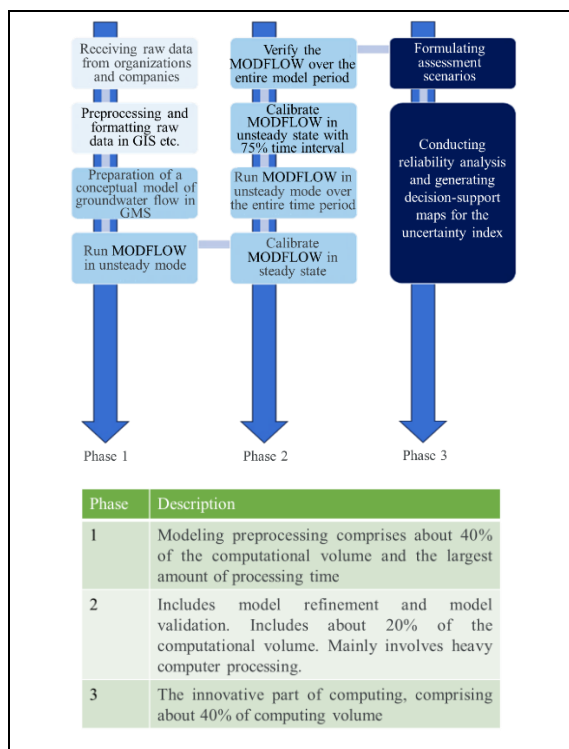


Figure 1. Study workflow diagram

شکل ۱- نمودار گردش کار مطالعات

۱-۲- معرفی نرم افزار GMS

یکی از پیشرفته ترین و جامع ترین بسته های نرم افزاری مدل سازی آب های زیرزمینی، سامانه مدل سازی جغرافیایی^{۱۴} (GMS) است که از انواع مختلف مدل های عددی پشتیبانی می کند. GMS برای تمامی مراحل

کد عددی MODFLOW و ابزار خودکار PEST، با بهره گیری از یک رویکرد شش مرحله ای برای تدقیق، استفاده خواهد شد. در این روش، یک ماه به عنوان شرایط پایدار و ۷۵ درصد از دوره زمانی ۱۲۰ ماهه برای واسنجی و ۲۵ درصد باقی مانده برای صحت سنجی مدل نهایی در نظر گرفته می شود. توسعه ساختار کد، امکان شبیه سازی بلندمدت و دقیق (ماهانه) را با در نظر گرفتن شرایط مرزی در آخرین بازه زمانی فراهم می کند.

همچنین، یک روش نرم افزاری برای تهیه نقشه پیوسته رستری ضریب افت تراز آب آبخوان استفاده خواهد شد. این نقشه براساس مدل مسیریابی و جانمایی افت تراز آب و بر روی مدل MODFLOW توسعه می یابد. سپس، از خروجی مدل MODFLOW برای توسعه یک کد بررسی آماری قابلیت اطمینان استفاده می شود.

در این پژوهش، با در دست داشتن پارامترهای مدل، شرایط مرزی و اولیه، از روش های آماری مانند مونت کارلو و تحلیل عدم قطعیت ورودی-خروجی برای کمی سازی و بررسی عدم قطعیت ها استفاده خواهد شد. بررسی خطاهای ناشی از شبیه سازی و اطمینان از نتایج حاصله، با در دست داشتن عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در مدل سازی، امکان پذیر خواهد بود.

۲- مواد و روش ها

به طور کلی، مدل ها توصیفاتی هستند که به درک پدیده هایی که مشاهده مستقیم آن ها ممکن نیست، کمک می کنند. مدل، فرآیندی است که ارتباط دقیق پارامترهای مختلف یک سامانه را به زبان ریاضی بیان می کند و از طریق این روابط ریاضی، تغییرات و ویژگی های مکانی و زمانی سامانه یا بخش هایی از آن شبیه سازی می شود. در حوزه آب های زیرزمینی، مدل به مجموعه ای از روابط ریاضی گفته می شود که سامانه های طبیعی آبخوان، عوامل تغذیه و تخلیه آن، و تغییرات سطح ایستابی یا پیژومتریک را در

¹⁴- Geographic Modeling System

سامانه اطلاعات جغرافیایی^{۲۰} (GIS) بر روی نقشه‌های پایه تهیه می‌شود. مدل مفهومی با استفاده از عناصر هندسی مانند نقاط (نماینده‌ی چاه‌ها و پیزومترها)، خطوط (نماینده‌ی رودخانه‌ها و گسل‌ها) و چندضلعی‌ها (نماینده‌ی لایه‌های زمین‌شناسی و حریم‌های آلودگی) ایجاد می‌گردد. پس از تعریف مدل مفهومی، با ایجاد یک شبکه‌ی محاسباتی، پارامترهای تعریف‌شده در مدل مفهومی به سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی نسبت داده می‌شوند. این رویکرد امکان وارد کردن خودکار داده‌ها را فراهم نموده و از نیاز به وارد کردن حجم بالایی از پارامترها به صورت دستی و سلول به سلول، جلوگیری می‌کند.

از مزایای استفاده از نرم‌افزار GMS در روش مدل مفهومی، رابط کاربری قوی بوده و قابلیت نمایش بصری خطای اختلاف بین هیدروگراف محاسبه‌شده و شبیه‌سازی‌شده را در حین فرآیند واسنجی ارائه می‌دهد. این ویژگی با رسم اهداف واسنجی در مجاورت پیزومترها امکان‌پذیر شده و به کاربر امکان می‌دهد تا وضعیت واسنجی را پس از هر اجرای مدل ارزیابی کند. در این نرم‌افزار، از یک مقیاس رنگی^{۲۱} برای نمایش میزان خطای واسنجی استفاده می‌شود که براساس میزان انحراف از مقادیر اندازه‌گیری‌شده، رنگ‌های مختلفی را نمایش می‌دهد:

- سبز: خطا در محدوده قابل قبول
 - زرد: خطا در محدوده قابل قبول و کم‌تر از ۲۰ درصد خطای قابل قبول
 - قرمز: خطا بیش‌تر از ۲۰ درصد خطای قابل قبول
- این قابلیت به تسهیل فرآیند واسنجی و بهبود دقت مدل کمک می‌کند.

برای توسعه شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW در محیط GMS، مجموعه

شبیه‌سازی آب زیرزمینی، شامل توصیف منطقه مورد مطالعه، تهیه مدل مفهومی، ایجاد شبکه، زمین‌آمار، واسنجی، تجسم‌سازی و غیره، ابزارهای مناسبی را ارائه می‌دهد. این نرم‌افزار، هم از مدل تفاضل محدود و هم از مدل عناصر محدود پشتیبانی می‌کند. GMS در واقع شامل یک رابط کاربری گرافیکی و مجموعه‌ای از کدهای تحلیلی نظیر MODFLOW، MODPATH، MT3DMS، MODAEM، FEMWATER و غیره است. رابط کاربری GMS توسط آزمایشگاه تحقیقات مدل‌سازی محیط‌زیست دانشگاه بیرگام یانگ^{۱۵} با همکاری مؤسسه تحقیقاتی مهندسی آب ارتش آمریکا^{۱۶} توسعه یافته و به صورت تجاری در دسترس است. یکی از ویژگی‌های برجسته GMS، طراحی ماژولار^{۱۷} آن است که به کاربر امکان می‌دهد تا ماژول‌های مورد نیاز خود را انتخاب کرده و تنها قابلیت‌های ضروری برای مدل‌سازی آب زیرزمینی را فعال کند. در نتیجه، می‌توان قسمت‌های مورد نیاز برنامه را به صورت جداگانه تهیه نمود. برای ساخت مدل جریان آب زیرزمینی در GMS، می‌توان از یکی از دو روش زیر استفاده کرد:

(الف) روش شبکه‌ای^{۱۸}: این روش، تخصیص مستقیم مقادیر پارامترهای آب‌شناسی (مانند هدایت هیدرولیکی، تخلخل موثر، نرخ تغذیه و تخلیه) به هر یک از سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی را شامل می‌شود. به عبارت دیگر، مدل‌ساز به‌طور مستقیم با شبکه‌ی گسسته تعامل داشته و مقادیر مورد نیاز را به صورت مجزا برای هر سلول وارد می‌کند. این رویکرد برای مدل‌های با پیچیدگی پایین و محدوده‌ی مکانی کوچک مناسب است، زیرا نیازمند تلاش و زمان زیادی برای وارد کردن داده‌ها در مدل‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر می‌باشد.

(ب) روش مدل مفهومی^{۱۹}: در این روش، ابتدا یک مدل مفهومی از حوضه‌ی مورد مطالعه با استفاده از ابزارهای

19- Conceptual Model Approach

20- Calibration

21- Colored Bar

15- Brigham Young

16- Us. Army Engineer Waterways Experiments Station

17- Modular

18- Grid Approach

○ ضریب قابلیت انتقال^{۲۲} یا هدایت هیدرولیکی^{۲۳}: تعیین مقادیر این پارامترها در سطح دشت، از طریق داده‌های چاه‌های پیژومتری و یا روش‌های تخمین.

○ آبدهی ویژه^{۲۴} و ضریب ذخیره آبخوان^{۲۵}: برآورد این پارامترها برای تعیین میزان ذخیره آب در آبخوان و پاسخ آن به تغییرات فشار.

۴- داده‌های مشاهداتی و بهره‌برداری:

- داده‌های چاه‌های مشاهداتی: جمع‌آوری اطلاعات سطح آب زیرزمینی در چاه‌های پیژومتری در طول دوره مطالعاتی (به‌صورت ماهانه) برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل.
- داده‌های چاه‌های بهره‌برداری: ثبت میزان برداشت آب از چاه‌های بهره‌برداری، شامل ساعات کارکرد فصلی و دوره‌ای، به‌عنوان یکی از عوامل تخلیه آبخوان.
- دبی‌های ورودی/خروجی: تعیین دبی‌های ورودی و خروجی محل مخازن و یا حوضچه‌های تغذیه آبخوان.

۵- سایر داده‌ها:

- موقعیت گسل‌ها و موانع زیرزمینی: شناسایی گسل‌ها و سایر موانع در مقابل جریان آب، به‌منظور درک بهتر مسیر جریان و اثرات آن‌ها.
- داده‌های کیفی: در صورت نیاز، جمع‌آوری داده‌های مربوط به کیفیت آب زیرزمینی (مانند شوری، نیترات و فلوراید) با توجه به اهداف پژوهش.

نکته: کیفیت و دقت داده‌های ورودی، نقش بسزایی در دقت و قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی دارد. بنابراین، اهمیت جمع‌آوری و پردازش صحیح داده‌ها، امری ضروری است.

داده‌های جامع و دقیقی ضروری بوده که می‌توان آن‌ها را در دسته‌های زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- داده‌های زمین‌شناسی و آب‌شناسی:

- نقشه‌های زمین‌شناسی: اطلاعات مربوط به ساختار زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی، به‌منظور درک ساختار آبخوان و مسیر جریان آب.
- داده‌های ریزمقیاس‌شده گردش جوی: اطلاعات مربوط به بارش، دما و تبخیر و تعرق، به‌عنوان ورودی‌های اصلی برای محاسبه تغذیه و تخلیه آبخوان.
- لایه مکانی مرز آبخوان: تعیین دقیق مرزهای آبخوان در حوضه آبریز، به‌عنوان یکی از شرایط مرزی مدل.

۲- شرایط مرزی و عوامل موثر:

- تعیین شرایط مرزی: تعریف مرزهای فیزیکی آبخوان، شامل رودخانه‌ها (به‌عنوان مرز جریان ورودی/خروجی)، مرزهای غیرقابل نفوذ (مانند کوه‌ها و لایه‌های رسی) و مرزهای با شیب ثابت.
- عوامل انسان‌ساخت: در نظر گرفتن اثرات سازه‌های انسانی مانند سد، بندها، کانال‌ها و شبکه‌های آبرسانی بر جریان آب زیرزمینی.
- تغذیه سطحی: برآورد دقیق میزان تغذیه آبخوان از طریق بارش، تبخیر و تعرق، رواناب‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شرب.

۳- داده‌های شبکه‌بندی و پارامترهای هیدرولیکی:

- شبکه تفاضل محدود: ایجاد شبکه‌های تفاضل محدود مناسب برای نمایش توپوگرافی سنگ کف آبخوان، عوارض سطح زمین و لایه‌های زمین‌شناسی با استفاده از توزیع مکانی مناسب نقاط پراکنده یا خطوط هم‌مقدار.
- پارامترهای هیدرولیکی:

24- Specific Yield

25- Storativity

22- Transmissivity

23- Hydraulic Conductivity

۲-۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

آبخوان خرم‌آباد یکی از مهم‌ترین منابع آب زیرزمینی در استان لرستان است و در دشت خرم‌آباد واقع شده است. این آبخوان از شمال به کوه‌های گرین، از شرق به کوه‌های یافته، از جنوب به کوه‌های زاگرس و از غرب به دشت کمالوند محدود می‌شود:

مشخصات کلی آبخوان

- مساحت: حدود ۱۴۰ کیلومترمربع
- محدوده جغرافیایی: $۲۰^{\circ} ۴۸'$ تا $۴۵^{\circ} ۴۸'$ طول شرقی و $۲۵^{\circ} ۳۳'$ تا $۴۵^{\circ} ۳۳'$ عرض شمالی
- شهرهای نزدیک: خرم‌آباد، الشتر، دورود
- میانگین دمای هوا: ۱۴ درجه سانتی‌گراد
- میزان بارش سالانه: ۵۰۰ میلی‌متر

زمین‌شناسی و لیتولوژی

آبخوان خرم‌آباد از نوع آبخوان آزاد است و لیتولوژی آن شامل سنگ‌های آهکی، دولومیت‌ها، ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها می‌باشد. عمق آبخوان در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ متر متغیر است.

هیدروژئولوژی

- میزان آبدهی: حدود ۱۵/۸۷ میلیون مترمکعب در سال
- منابع تغذیه: رودخانه‌های خرم‌آباد، گلال رود، کرگانه و تیره

تقسیم‌بندی زمین‌شناسی دشت خرم‌آباد

دشت خرم‌آباد از نظر زمین‌شناسی به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود:

- بخش شمالی: رسوبات آبرفتی (شامل شن، ماسه، سیلت و رس)
- بخش جنوبی: سازندهای زمین‌شناسی دوران سوم و چهارم (شامل آهک، دولومیت، مارن و ماسه‌سنگ)

آبخوان خرم‌آباد در سازندهای دوران سوم و چهارم قرار گرفته است که دارای نفوذپذیری مناسبی برای ذخیره‌سازی آب می‌باشند. مهم‌ترین سازندهای زمین‌شناسی دخیل در این آبخوان عبارتند از:

- سازند سروک: آهک و دولومیت (تشکیل‌دهنده سقف آبخوان)
- سازند کشکان: مارن و ماسه‌سنگ (تشکیل‌دهنده کف آبخوان)
- سازند پابده: آهک و دولومیت (مهم‌ترین آبخوان منطقه، منبع آب چاه‌های شرب و کشاورزی)

وضعیت چاه‌های کشاورزی (آمار سال ۱۳۹۸)

- تعداد کل چاه‌های کشاورزی: ۱۴۰۰ حلقه
- تعداد چاه‌های دارای پروانه بهره‌برداری: ۱۲۰۰ حلقه
- تعداد چاه‌های غیرمجاز: ۲۰۰ حلقه
- میانگین عمق چاه‌های کشاورزی: حدود ۱۰۰ متر

روش‌شناسی مطالعه و مدل‌سازی

در این مطالعه، به منظور ارزیابی و تعدیل عدم قطعیت‌ها در شبیه‌سازی دشت خرم‌آباد، مدل‌سازی در دو حالت پایدار و ناپایدار با استفاده از مجموعه داده‌های مطالعات ژئولوژیک انجام خواهد شد. شبیه‌سازی براساس دسته‌بندی داده‌های مستقل شامل توپوگرافی سطح زمین، ضخامت آبرفت، شبکه هیدرومتری، ضرایب هیدرولیکی (براساس آخرین آزمایش‌های اکتشافی)، شرایط مرزی، منابع استحصال (چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات) و سایر عوامل مؤثر انجام می‌شود.

علاوه بر این، میزان تغذیه آبخوان براساس تنوع کاربری و پوشش زمین، ضرایب نفوذ، اطلاعات بارش، تبخیر و آب‌های بازگشتی از منابع بهره‌برداری محاسبه خواهد شد. پس از تولید نتایج مدل در یک دوره بلندمدت و واسنجی پارامترهای نامطمئن در محدوده مطلوب، صحت نتایج با مقایسه با داده‌های پیرومتری مستقل ارزیابی می‌شود. موقعیت مکانی حوضه آبریز در شکل ۲ قابل مشاهده است.

CMIP5 (2013) در حال حاضر، فاز CMIP6 نیز در دست انجام است [۱۹].

تفاوت اساسی بین نسل ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) و نسل‌های پیشین آن، در مجموعه‌ی سناریوهای آینده‌ای است که برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی به کار گرفته شده‌اند. علاوه بر این، GCM‌های شرکت‌کننده در CMIP6، نسبت به CMIP‌های قبلی، از وضوح مکانی بالاتری برخوردار هستند، بازه زمانی طولانی‌تری را برای شبیه‌سازی شرایط تاریخی پوشش می‌دهند و فرآیندهای فیزیکی پیچیده‌تری را در خود جای داده‌اند.

فاز ۶ پروژه مقایسه مدل جفت‌شده (CMIP6)

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) با هدف ایجاد یک مبنای داده‌ای استاندارد از GCM‌ها و تسهیل پژوهش‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی در سطح جهانی، از طریق هماهنگی بین مراکز تحقیقاتی مختلف انجام می‌شود [۲۰].

این پروژه با هدف پاسخگویی به نیازهای رو به رشد جامعه علمی و رفع نواقص موجود در فاز پنجم (CMIP5)، به‌تازگی معرفی شده است. هدف اصلی CMIP6 بیشینه نمودن ارتباط میان پرسش‌ها و پاسخ‌های مهم علمی است که می‌تواند به تسریع پیشرفت در علوم مرتبط با تغییر اقلیم منجر شود. بدین سبب، برنامه تحقیقات جهانی آب و هوا^{۲۷} و چالش‌های علمی بزرگ^{۲۸} به‌عنوان مراکز طراحی CMIP6 برگزیده شدند.

با توجه به چالش‌های علمی بزرگ موجود، CMIP6 بر پاسخ به سه پرسش کلیدی متمرکز است: واکنش سامانه زمین به محرک‌های مختلف، عدم قطعیت سازمان‌دهی شده مدل‌ها و برآورد کمی تغییر اقلیم [۱۹]. براساس ۱۰ معیار مورد تأیید CMIP6، ۲۱ پروژه مقایسه بین مدل‌ها^{۲۹} (MIP) توسط هیئت CMIP6 و WGCM تأیید شده‌اند. این

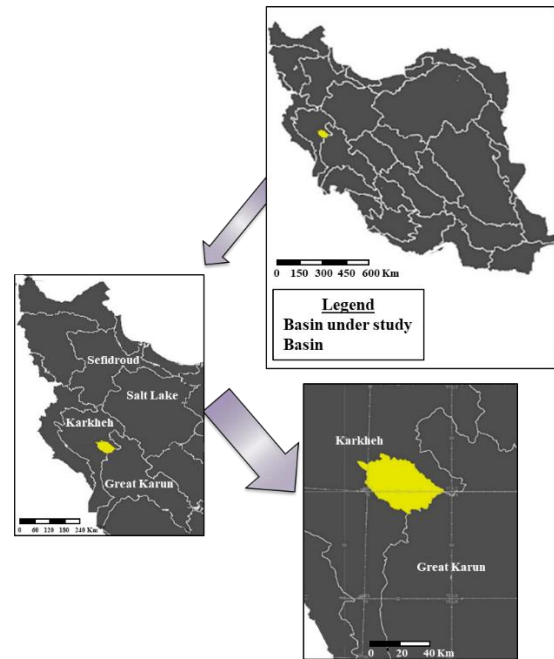


Figure 2. Location of the Khorramabad basin under the country's second-level basins

شکل ۲- موقعیت مکانی حوضه آبریز خرم‌آباد در زیرحوضه‌های درجه دو کشور

۲-۳- تغییر اقلیم

۲-۳-۱- مدل‌های گردش عمومی (GCMs)

مدل‌های گردش عمومی^{۲۶} (GCMs) جهانی سامانه‌های پیچیده‌ای هستند که برای شبیه‌سازی سامانه اقلیم، شامل تعامل بین جو، اقیانوس‌ها، خشکی و یخ، طراحی شده‌اند [۱۴ و ۱۵]. در میان رویکردهای مختلف برای تعیین اقلیم آینده و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی (مانند بارش، دما و تبخیر)، سناریوهای مبتنی بر خروجی‌های GCMs توسط پژوهشگران به دلیل ارائه نتایج با قابلیت اطمینان بالاتر، مورد ترجیح قرار می‌گیرند [۱۶، ۱۷ و ۱۸]. از زمان آغاز پروژه بین‌المللی مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) در سال ۱۹۹۵، استفاده از GCMs به‌طور گسترده‌ای رواج یافته است. این پروژه تاکنون پنج مرحله توسعه را پشت سر گذاشته است: CMIP1، CMIP2 (1997)، CMIP3 (2004)، CMIP4 (2005) و

²⁸- Science Challenges Grand

²⁹- Model Intercomparison Projects

²⁶- General Circulation Model

²⁷- World Climate Research Programme

اجتماعی-اقتصادی، از جمله جمعیت، رشد اقتصادی، الگوهای استفاده از زمین و تحولات انرژی، تغییر خواهند کرد.

تفاوت کلیدی میان سناریوهای RCP و SSP در مبنای طراحی آنها نهفته است. سناریوهای RCP براساس سطوح پیش‌بینی شده غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده شکل گرفته‌اند، در حالی که سناریوهای SSP بر مبنای مسیرهای توسعه اجتماعی-اقتصادی آتی تدوین شده‌اند. این بدان معناست که سناریوهای SSP قادرند طیف گسترده‌تری از نتایج محتمل برای تغییرات اقلیمی را پوشش دهند، از جمله سناریوهای بسیار وخیم که در صورت عدم اقدام فوری برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ممکن است محقق شوند [۲۱].

۲-۴- عدم قطعیت

تمامی مدل‌ها به‌طور ذاتی دارای خطا و عدم قطعیت هستند، اما این خطاها به‌طور حتم به‌معنای بی‌فایده بودن آنها نیستند [۲۲]. مدل‌ها به‌دلیل ساده‌سازی‌هایی که برای افزایش سرعت محاسبات و امکان دستیابی به نتایج عملی به‌کار می‌برند، همواره دارای درجاتی از خطا هستند. با این حال، این مدل‌ها به‌دلیل توانایی‌شان در پیش‌بینی، فهم و توضیح پدیده‌های طبیعی، ارزشمند تلقی می‌شوند. ساده‌سازی‌های انجام‌شده در مدل‌ها منجر به بروز عدم قطعیت در خروجی‌های آنها می‌شود. تحلیل دقیق و جامع عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های کیفی آب به‌ندرت انجام می‌گیرد و به‌دلیل دشواری در بازنمایی کمی و کیفی آب در مقایسه با شرایط واقعی، ارزیابی عدم قطعیت در مدل‌های شبیه‌سازی آب اغلب با چالش مواجه است [۲۳].

۲-۴-۱- مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو یک روش کارآمد برای ارزیابی عدم قطعیت است که از طریق تولید مجموعه‌ای از پارامترهای گسسته براساس توزیع احتمال و اجرای مدل با

MIPها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان درک محرک‌های اصلی و بازخوردها و تأثیر آنها بر تغییر اقلیم را فراهم می‌آورند. هم‌چنین، در CMIP6 چند MIP جدید برای پر کردن خلاءهای علمی CMIP5 معرفی شده‌اند.

۲-۳-۲- سناریوهای تغییر اقلیم

سناریوها نقش بنیادینی در پژوهش و ارزیابی تغییر اقلیم ایفا می‌کنند. این سناریوها امکان می‌دهند تا پیامدهای بلندمدت تصمیمات فعلی درک شوند و به پژوهشگران اجازه می‌دهند تا آینده‌های مختلف و محتمل را به‌همراه عدم قطعیت‌های ذاتی آنها، تصویرسازی کنند. به بیان دیگر، سناریو مجموعه‌ای از پیش‌فرض‌ها و خطوط سیر تحول شرایط اجتماعی، اقتصادی یا فیزیکی-دینامیکی است که در مدل‌ها به‌منظور بررسی روند اقلیم زمین تحت تأثیر عوامل مختلف واداشت‌کننده، به‌کار می‌رود.

در واقع، سناریو ابزاری ساده برای پاسخ به پرسش «اگر این اتفاق بیفتد، چه خواهد شد؟» است. هر سناریو تصویری متمایز، اما مبتنی بر واقعیت‌های اندازه‌گیری‌شده و احتمال وقوع، از توسعه جامعه در آینده ارائه می‌دهد که می‌توان با استفاده از نتایج آن، برای آینده برنامه‌ریزی کرد و از خسارات احتمالی جلوگیری به‌عمل آورد.

سناریوهای تغییر اقلیم به‌طور عمده توسط هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^{۳۰} (IPCC) منتشر می‌شوند و در طول زمان تکامل یافته‌اند. این سناریوها شامل موارد زیر می‌شوند: سناریوهای SRES (گزارش ویژه در مورد سناریوی انتشار) در سومین گزارش IPCC، سناریوهای مسیرهای غلظت نماینده (RCP) در پنجمین گزارش IPCC و سناریوهای مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ششمین گزارش IPCC.

سناریوهای RCP بر مبنای تغییرات پیش‌بینی‌شده در غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده طراحی شده‌اند. در مقابل، سناریوهای SSP رویکردی جامع‌تر دارند و پیش‌بینی می‌کنند که تغییرات اقلیمی چگونه در پاسخ به شاخص‌های

³⁰- Intergovernmental Panel on Climate Change

پارامتری خاص را ارزیابی می‌کند و بدین ترتیب، تمام منابع خطا و اثرات کوواریانس بین مقادیر پارامترها بر عملکرد مدل را به‌طور صریح در نظر می‌گیرد [۲۵].

در GLUE، عدم قطعیت پارامترها به‌عنوان مجموعه‌ای از پارامترهای رفتاری گسسته با وزن‌های احتمال متناظر تعریف می‌شود.

۳- بحث و بررسی نتایج

به‌منظور برآورد دقیق‌تر دبی جریان در دشت خرم‌آباد، تحلیل یک‌پارچه و همگن داده‌ها در سطح کل حوضه آبریز ضروری است. این امر به‌دلیل وجود داده‌های ناقص و پرت در ایستگاه‌های هیدرومتری پایه و تأثیر آن‌ها بر محاسبه تغذیه دشت، لازم است. حوضه آبریز خرم‌آباد در حال حاضر تحت پوشش پنج ایستگاه هیدرومتری است که جزئیات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز خرم‌آباد

Table 1. Specifications of hydrometric stations in the Khorramabad basin

Station Name	Elevation (m)	Area (km ²)	River	Location	
				(Y)	(X)
Doab	950	2450	Khorramabad	775555	3709825
Bahram-Ju	1260	700	Khorramabad	248719	3718319
Cham-Anjir	1140	1590	Khorramabad	243793	3703865
Chenar	1420	234	Kaka Sharaf	268948	3693397
Khoshkeh					

در گام نخست این پژوهش، با تحلیل داده‌های متوسط ماهانه دبی ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز خرم‌آباد، نسبت به شناسایی و تعیین مقادیر مفقود خام داده‌ها اقدام شد. بررسی‌ها نشان دادند که در تمامی سال‌های آبی، برخی ایستگاه‌ها دارای سوابق کامل داده‌های سالیانه بوده، اما در سایر ایستگاه‌ها داده‌های ناقص مشاهده

هر مجموعه پارامتری انجام می‌شود. به‌طور جایگزین، می‌توان از نمونه‌های مجموعه پارامترها و جرم‌های احتمال استخراج‌شده در فرآیند واسنجی استفاده کرد، که این امر نیاز به فرضیه‌های اضافی در مورد فرم توزیع را از بین می‌برد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های متعدد، تقریب نزدیکی به تابع چگالی احتمالاتی را با استفاده از تحلیل فراوانی ارائه می‌دهند و می‌توان به سادگی به این چارچوب، با کمینه ورودی از طراح، دسترسی داشت. به‌همین دلیل، مونت‌کارلو روشی مطلوب برای ارزیابی عدم قطعیت محسوب می‌شود.

با این حال، نقطه ضعف اصلی این روش، نیاز به تعداد زیادی اجرای مدل برای ارائه نتایج قابل‌اعتماد، به‌ویژه در مواردی است که تعداد متغیرهای تصادفی زیاد باشد. روش‌های مختلفی برای برآورد تعداد نمونه‌های مناسب وجود دارد، اما همگرایی و واگرایی در طول فرآیند شبیه‌سازی نیز باید در نظر گرفته شوند. در نهایت، روش مونت‌کارلو خروجی‌های آماری (مانند میانگین و واریانس) را از طریق تکرار شبیه‌سازی‌ها با متغیرهای ورودی و پارامترهای مدل محاسبه می‌کند [۲۴].

۲-۴-۲- روش GLUE در تحلیل عدم قطعیت

در این مطالعه، به‌منظور بررسی عدم قطعیت پارامترها از روش تخمین عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته^{۳۱} (GLUE) استفاده شد. این روش که توسط بون^{۳۲} و بینلی^{۳۳} معرفی گردید [۲۵]، یکی از روش‌های رایج برای تحلیل عدم قطعیت پارامترها در مدل‌های آب‌شناسی است. GLUE برپایه روش زنجیره مارکوف توسعه یافته است و پارامترهای منابع مختلف عدم قطعیت - از جمله عدم قطعیت ورودی، عدم قطعیت ساختاری مدل و عدم قطعیت پاسخ - را در نظر می‌گیرد. این روش، احتمال تطابق بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و خروجی مدل با یک مجموعه

³¹- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

³²- Beven

³³- Binley

تحلیل خروجی مدل عددی و پیش‌بینی وضعیت آبخوان

مدل عددی جریان آب زیرزمینی، پس از گذراندن مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی وضعیت آبی آبخوان و ارزیابی تأثیرات فشارهای مختلف بر منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود. این مدل با قابلیت شبیه‌سازی شرایط آینده، بستری مناسب برای بهبود عملکرد و اتخاذ تصمیمات مدیریتی آگاهانه فراهم می‌آورد.

شکل ۴ تصویرسازی از سطح آب زیرزمینی آبخوان خرم‌آباد در آخرین گام زمانی از بازه شبیه‌سازی ۱۲۶ ماهه ارائه می‌دهد. مقایسه این خروجی با وضعیت ابتدایی دوره که به صورت رستری از شبکه تفاضل محدود نمایش داده شده است، نشان‌دهنده کاهش سطح آب زیرزمینی در طی ۱۰ سال برداشت آب است. این تفاوت قابل توجه، نمایان‌گر افت آبخوان ناشی از برداشت‌های انجام‌شده می‌باشد و اهمیت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی را برجسته می‌سازد.

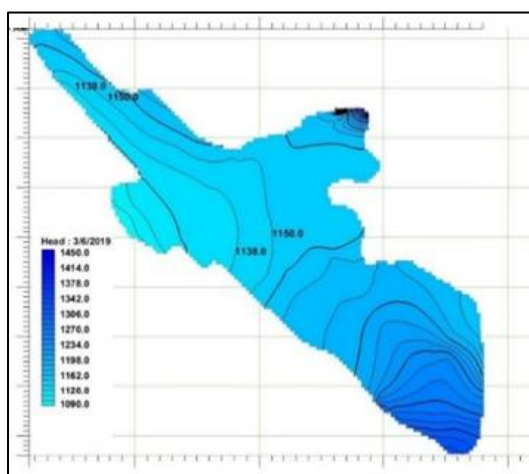


Figure 4. The groundwater level of the Khorramabad aquifer at the end of the period, assuming continuation of the current well extraction trend

شکل ۴- تراز آب زیرزمینی آبخوان خرم‌آباد در پایان دوره با ادامه روند برداشت حاضر از چاه‌ها

می‌شد. برای بازسازی داده‌های مفقود، از میان روش‌های مختلف موجود، روش ضریب تعیین^{۳۴} به دلیل توانایی در برآورد مقادیر نزدیک به داده‌های واقعی و با فرض وجود روابط خطی-رگرسیون قوی، انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به عدم قطعیت گسترده در آمار تغذیه دشت، یکی از عوامل مهم مؤثر در این زمینه یعنی آمار هیدرومتری در محدوده آبخوان خرم‌آباد بر پایه آمار کل حوضه آبریز تدقیق، تصحیح و بازسازی شد که مطابق با رویکرد شکل ۳، به مدل مفهومی در دوره مطالعاتی اطلاق گردید.

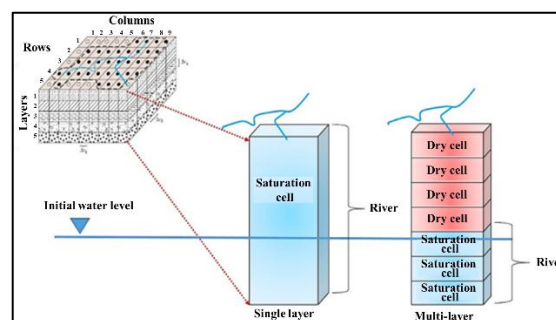


Figure 3. Conceptual model for transferring water stream network data to the MODFLOW model

شکل ۳- مدل مفهومی انتقال اطلاعات شبکه آبراه‌های به مدل MODFLOW

تمرکز بر پارامتر تغذیه آبراه‌های در این مطالعه، ناشی از تمایز قابل توجه در اطلاعات موجود در گزارش بیلان نسبت به سایر عوامل مؤثر بر جریان آب زیرزمینی است. در حالی که می‌توان سایر عوامل نظیر اثرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی را با استفاده از تفکیک مکانی و میانگین‌گیری در طول دوره زمانی مورد مطالعه، مدل‌سازی کرد، داده‌های مربوط به تغذیه آبراه‌های نیازمند بررسی دقیق‌تر و جزئی‌تر هستند. این امر، اهمیت ویژه این پارامتر را در دستیابی به نتایج دقیق و قابل اتکا در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی نشان می‌دهد.

³⁴- Coefficient of Determination

هیدرولیکی ناشی از برداشت زیاد و تغییر در مسیرهای طبیعی جریان آب زیرزمینی است. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت یک پارچه منابع آب و کنترل برداشت از چاه‌ها برای حفظ پایداری آبخوان تأکید دارد.

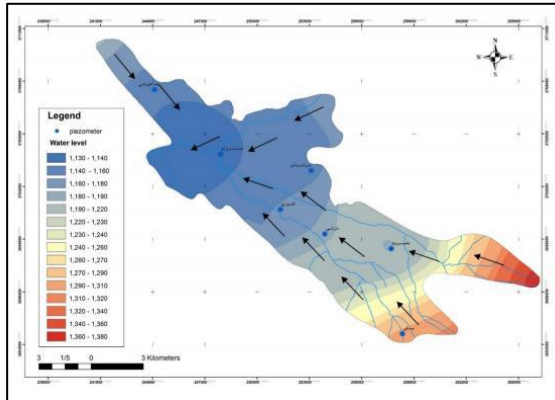


Figure 6. Direction and velocity vectors of the final model of the Khorramabad Plain

شکل ۶- بردارهای جهت و سرعت جریان مدل نهایی دشت خرم‌آباد

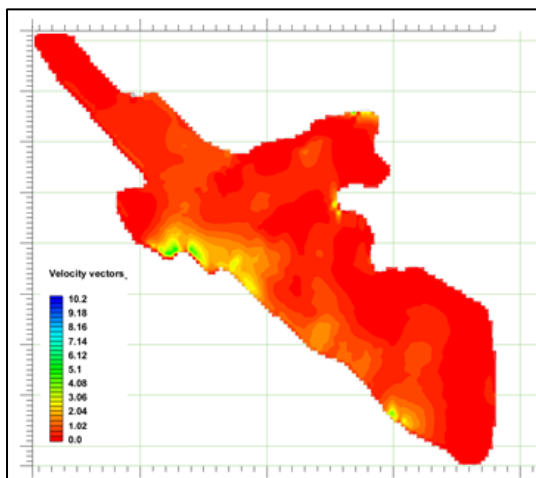


Figure 7. Magnitude of flow velocity in the final model of the Khorramabad Plain

شکل ۷- بزرگی سرعت جریان مدل نهایی دشت خرم‌آباد

تحلیل عدم قطعیت

شکل‌های ۸ (الف) تا ۸ (ب) پیش‌بینی‌های مربوط به دماهای کمینه و بیشینه و میزان بارش را براساس سناریوهای خوشبینانه برای مدل‌های مورد استفاده، ارائه می‌دهند.

مدل عددی جریان آب زیرزمینی، علاوه بر پیش‌بینی تراز آب، امکان بررسی پویایی جریان آب زیرزمینی را نیز فراهم می‌آورد. با بهره‌گیری از ابزارهای موجود در نرم‌افزار GIS، می‌توان خطوط سرعت و جهت جریان آب زیرزمینی را برای کل محدوده آبخوان رسم و براساس مقیاس بزرگی، دسته‌بندی کرد.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، بخش‌های شمالی آبخوان از سرعت جریان بالایی برخوردار است. با این حال، تغییرات قابل توجهی در جهت‌گیری جریان در همین نواحی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده پیچیدگی جریان آب در این بخش است. بیش‌ترین سرعت جریان در نواحی مرزی و حاشیه‌های لایه‌های تراوا قابل مشاهده است، جایی که احتمال نفوذ و خروج آب از آبخوان بیش‌تر است.

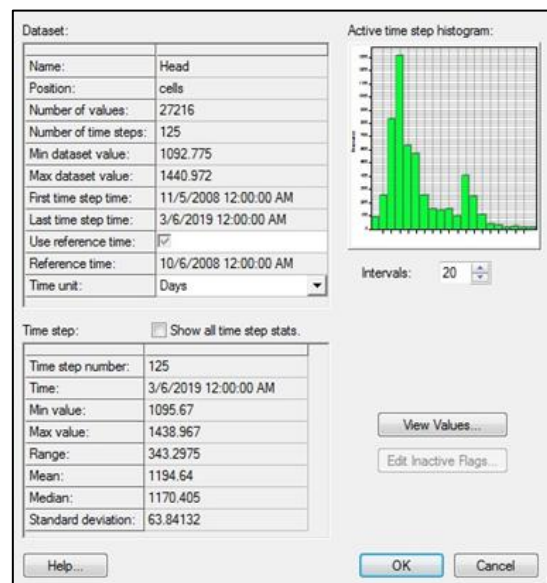


Figure 5. Statistical summary of the water surface outlet layer in the mathematical model of the Khorramabad Plain - end of the period

شکل ۵- خلاصه آماری لایه خروجی سطح آب در مدل ریاضی دشت خرم‌آباد- انتهای دوره

شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که افزایش تعداد چاه‌ها و دبی بالای بهره‌برداری در بخش‌های مرکزی آبخوان، منجر به ایجاد ساختاری ناهمگن در الگوی سرعت جریان شده است. این امر به دلیل ایجاد شیب‌های

بارش براساس سناریوهای مختلف، اهمیت انتخاب سناریوی مناسب و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی‌های اقلیمی را برجسته می‌کند.

به منظور ارزیابی عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی، در این پژوهش از مدل LARS-WG استفاده شده و برای هر مدل و سناریو، ۳۰ سری زمانی تولید گردید. در مجموع، ۲۷۰ سری زمانی برای هر پارامتر (دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش) ایجاد شد. بازه اطمینان هر پارامتر با استفاده از نمودارهای ویلونی و نمودارهای جعبه‌ای در شکل ۹ ارائه شده است.

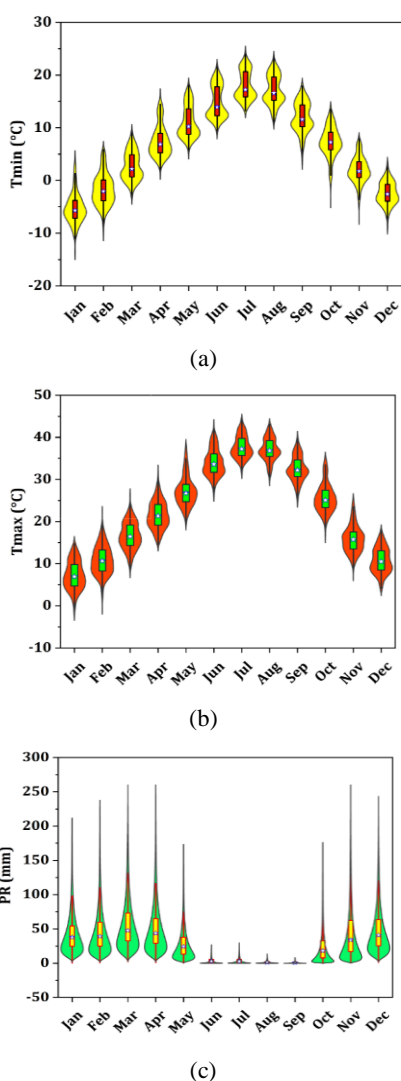


Figure 9. Violin and box plot for (a) minimum temperature, (b) maximum temperature, and (c) precipitation parameters

شکل ۹- نمودار ویلونی و جعبه‌ای برای پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش

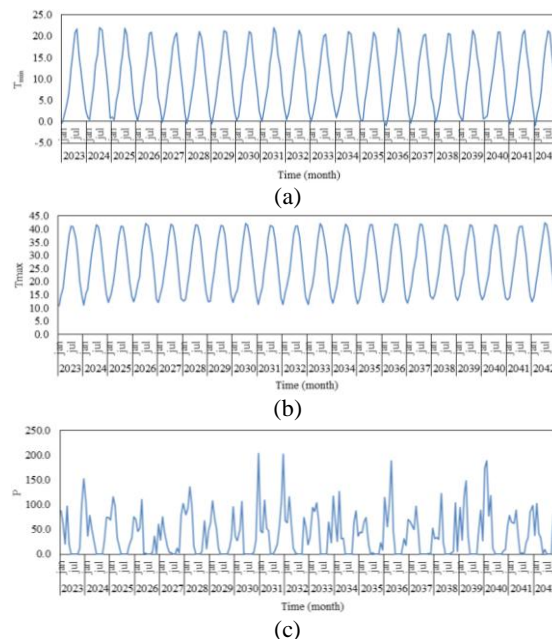


Figure 8. Forecast of (a) minimum temperature, (b) maximum temperature and (c) precipitation

شکل ۸- پیش‌بینی (الف) دمای کمینه، (ب) دمای بیشینه و (پ) بارش

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، در بررسی دماهای کمینه، نوساناتی بین ۲- تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود، که کم‌ترین مقدار آن (۲- درجه سانتی‌گراد) در مارس سال ۲۰۴۲ پیش‌بینی شده است. در مقابل، دماهای بیشینه در بازه ۱۱ تا ۴۳ درجه سانتی‌گراد در نوسان بوده و روندی با شیب ملایم افزایشی از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۲ را نشان می‌دهند. این یافته‌ها نشان‌دهنده احتمال افزایش تدریجی دما در منطقه مورد مطالعه در دهه‌های آتی است.

مطابق شکل ۸، مقادیر بارش پیش‌بینی‌شده در تمامی سناریوها و مدل‌ها در بازه صفر تا ۴۱۵ میلی‌متر در نوسان است. بیش‌ترین میزان بارش مربوط به سناریوی SSP5 8.5 و با استفاده از مدل CMCC است که اوج آن در ماه آوریل سال ۲۰۳۰ و ماه می سال ۲۰۲۳ رخ خواهد داد. در مقابل، کم‌ترین میزان بارش توسط مدل ACCES و تحت سناریوی SSP1 2.6 پیش‌بینی می‌شود. این سناریو نشان‌دهنده روند کاهشی بارش در طول ۲۰ سال آتی است، به‌طوری که بیش‌ترین میزان بارش در سال ۲۰۴۲ به ۸۴ میلی‌متر خواهد رسید. این اختلاف قابل توجه در پیش‌بینی

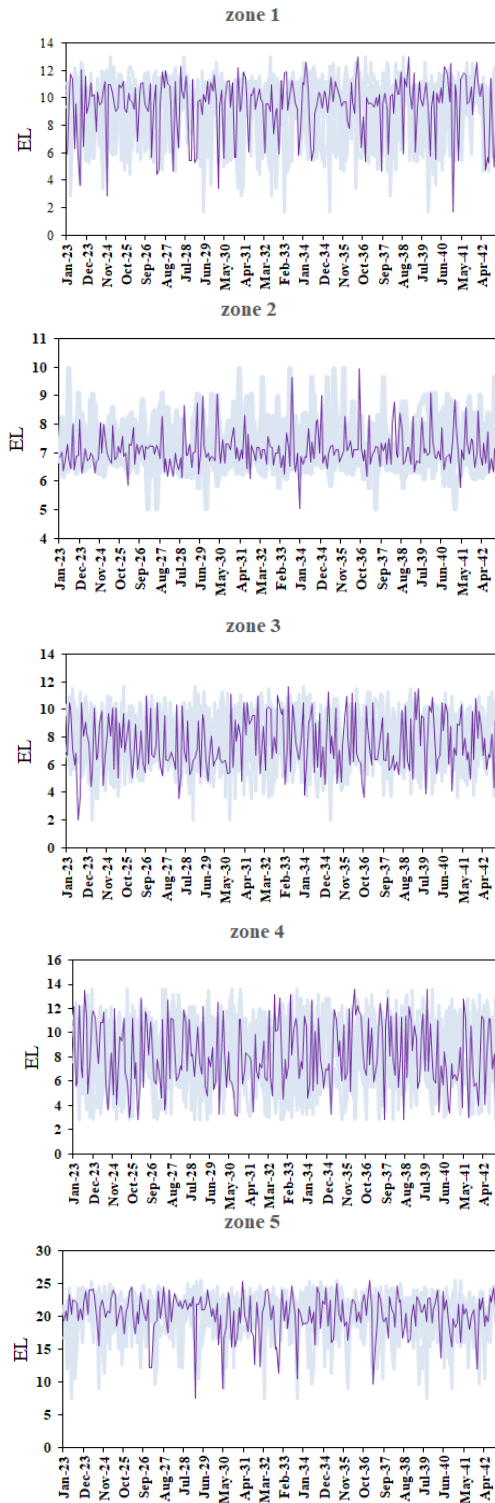


Figure 10. Uncertainty interval of Khorramabad groundwater aquifer divided into 5 areas

شکل ۱۰- بازه عدم قطعیت سفره آب زیرزمینی خرم‌آباد در پنج ناحیه تقسیم‌بندی شده

براساس تحلیل نمودارها در شکل ۹، میانگین دمای کمینه در گرم‌ترین ماه سال (ژوئای) ۱۳ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است، با این حال این مقدار در بازه‌ای از ۷ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد در نوسان است. بیش‌ترین پراکندگی در محدوده ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود و بیش‌ترین عدم قطعیت مربوط به ماه اکتبر بوده و در بازه ۱۰- تا ۱۱ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. این نتایج نشان‌دهنده وجود طیف وسیعی از احتمالات در پیش‌بینی‌های اقلیمی و لزوم در نظر گرفتن این عدم قطعیت در برنامه‌ریزی‌های آبی است.

تحلیل عدم قطعیت در پیش‌بینی بیشینه دما نشان می‌دهد که ماه فوریه بیش‌ترین میزان عدم قطعیت را دارد و دما در این ماه بین ۴- تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد در نوسان خواهد بود. در گرم‌ترین ماه سال (ژوئای)، دما در بازه ۲۴ تا ۴۶ درجه سانتی‌گراد متغیر بوده و میانگین آن ۳۴/۵ درجه سانتی‌گراد برآورد می‌شود.

در مورد بارش، پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که در ماه‌های ژوئن، ژوئای، آگوست و سپتامبر در بازه زمانی ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۲، بارش به‌طور تقریبی صفر خواهد بود. بیش‌ترین عدم قطعیت در پیش‌بینی بارش مربوط به ماه نوامبر است که در بازه صفر تا ۲۶۲ میلی‌متر در نوسان خواهد بود و میانگین بارش در این ماه ۴۱/۶ میلی‌متر است. پراکندگی بارش در این ماه در بازه صفر تا ۲۵ میلی‌متر قرار دارد، که نشان‌دهنده احتمال ۷۵ درصدی وقوع بارندگی در این بازه زمانی است. این نتایج بر اهمیت مدیریت منابع آب در شرایط خشکی و برنامه‌ریزی برای مقابله با کمبود آب در ماه‌های گرم سال تأکید دارد.

شکل‌های ۱۰ بازه عدم قطعیت سطح آب زیرزمینی را در پنج منطقه مشخص شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهند.

شناخت و مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی هستند. در این پژوهش، از مدل GMS برای شبیه‌سازی سفره آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد استفاده شد که نشان داد منطقه ۵ دارای بیش‌ترین میزان بهره‌برداری از سفره است.

در ادامه، تراز سفره تحت تأثیر تغییر اقلیم و الگوهای بارش آینده با استفاده از جدیدترین گزارش‌های CMIP6 و سناریوهای خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که مدل ACCESS-ESM1-5 بهترین عملکرد را برای حوضه آبریز خرم‌آباد دارد.

به‌منظور ارزیابی عدم قطعیت، از هر مدل ۳۰ سری زمانی تولید شد که در مجموع ۸۱۰ سری برای دمای کمینه، بیشینه و بارش به‌دست آمد. توزیع‌های آماری هر سری محاسبه و نمودارهای عدم قطعیت براساس نمودارهای ویولونی رسم گردید. تحلیل این نمودارها نشان داد که بیش‌ترین عدم قطعیت بارندگی در ماه نوامبر وجود دارد که در بازه صفر تا ۲۶۲ میلی‌متر در نوسان است و میانگین بارش در این ماه ۴۱/۶ میلی‌متر است.

سپس، نتایج مدل‌های انتخابی به مدل GMS داده شد و نوسانات تراز سفره تحت تأثیر تغییر اقلیم شبیه‌سازی گردید. برای بررسی نوسانات تراز آب زیرزمینی در ۲۰ سال آینده از مدل عدم قطعیت GLUE استفاده شد. نتایج نشان دادند که نوسانات تراز سفره در مناطق مختلف به‌شرح زیر هستند: منطقه ۱ (۲ تا ۷/۱۲ متر)، منطقه ۲ (۴/۹ تا ۱۰/۵ متر)، منطقه ۳ (۲/۲ تا ۱۱/۹ متر)، منطقه ۴ (۲/۹ تا ۱۳/۹ متر) و منطقه ۵ (۷/۳ تا ۲۵/۱ متر). بنابراین، منطقه ۵ بیش‌ترین میزان تغییرات را نشان می‌دهد.

با توجه به این یافته‌ها، احتمال خطرپذیری بهره‌برداری در منطقه ۵ بیش‌تر از سایر نواحی است و احتمال کاهش سطح سفره تا ۱۳/۵ متر و خشک شدن آن در این ناحیه بالا است. بنابراین، بهره‌برداری اصولی و بهینه در منطقه ۵ باید در اولویت قرار گیرد تا از بروز تنش آبی جلوگیری شود.

در حالت کلی، روند تغییرات سفره در ۲۰ سال آینده با در نظر گرفتن الگوهای بارش و عدم در نظر گرفتن

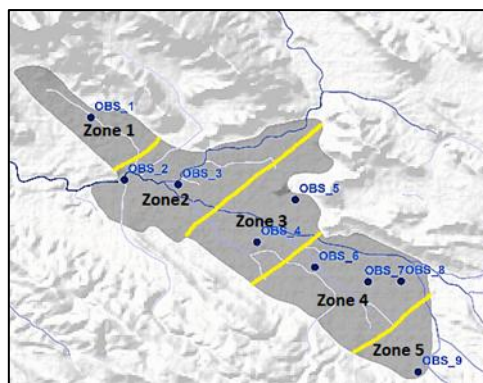


Figure 11. Classification of the studied plain area

شکل ۱۱- طبقه‌بندی منطقه دشت مورد مطالعه

تحلیل شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که نوسانات سطح آب در منطقه ۱ در طول دوره زمانی مورد مطالعه در بازه ۲ تا ۷/۱۲ متر قرار دارد. سطح آب در منطقه ۲ در بازه ۴/۹ تا ۱۰/۵ متر در نوسان است. نوسانات سطح آب در منطقه ۳ در بازه ۲/۲ تا ۱۱/۹ متر ثبت شده است. سطح آب در منطقه ۴ در بازه ۲/۹ تا ۱۳/۹ متر در نوسان است. سطح آب در منطقه ۵ بیش‌ترین تغییرات را نشان می‌دهد و در بازه ۷/۳ تا ۲۵/۱ متر در نوسان است.

بنابراین، منطقه ۵ دارای بیش‌ترین میزان تغییرات در سطح آب زیرزمینی است. در ماه‌های خشک سال (ژولای، آگوست و سپتامبر)، سطح آب در تمامی مناطق به کم‌ترین مقدار خود خواهد رسید. در شرایط سخت و سناریوی بدبینانه، منطقه ۱ بیش‌ترین کاهش سطح آب را خواهد داشت و اغلب در حالت کمینه خود قرار خواهد گرفت. ناحیه ۵ نیز بیش‌ترین کاهش را پس از منطقه ۱ تجربه خواهد کرد. نوسانات در منطقه ۳ به‌نسبت نرمال است و سطح آب این ناحیه تغییرات چشمگیری نسبت به سایر نواحی نشان نمی‌دهد. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت دقیق منابع آب در مناطق آسیب‌پذیر و اتخاذ تدابیر پیشگیرانه برای مقابله با خشک‌سالی تأکید می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و ارزیابی عدم قطعیت در تراز آن، از جمله مهم‌ترین مسائل اساسی برای

مشارکت نویسندگان

عماد کهریزی این نظریه را توسعه داد، محاسبات را انجام داد و نسخه خطی آن را نوشت. عماد کهریزی هم چنین نتایج را به طور انتقادی تحلیل کرد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ گونه کمک هزینه خاصی دریافت نکرده است.

سپاس‌گزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاس‌گزاری می‌شود.

برداشت، روند نزولی غیرمعنی‌داری خواهد داشت. به عبارت دیگر، در صورت حذف دخالت انسانی، سفره در حالت به نسبت ثابتی باقی می‌ماند. با این حال، با در نظر گرفتن نوسانات سفره ناشی از برداشت‌ها، منطقه ۵ به عنوان حساس‌ترین ناحیه شناخته می‌شود و نیازمند مدیریت دقیق‌تر و توجه ویژه است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

References

- [1] Mirzaei M, Huang YF, El-Shafie A, Shatirah A. Application of the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) approach for assessing uncertainty in hydrological models: A review. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2015; 29(5): 1265-1273. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-1000-6>.
- [2] Tieman M. The application of Halal in supply chain management: in-depth interviews. *Journal of Islamic Marketing*. 2011; 2(2): 186-195. <https://doi.org/10.1108/17590831111139893>.
- [3] Azimi S, Azhdary Moghaddam M, Hashemi Monfared SA. Analysis of drought recurrence conditions using first-order reliability method. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019; 16: 4471-4482. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1845-1>.
- [4] Minh HVT, Avtar R, Kumar P, Tran DQ, Ty TV, Behera HCh, Kurasaki M. Groundwater quality assessment using fuzzy-AHP in An Giang Province of Vietnam. *Geosciences*. 2019 Jul; 9(8): 330. <https://doi.org/10.3390/geosciences9080330>.
- [5] Rojas R, Kahunde S, Peeters L, Batelaan O, Feyen L, Dassargues A. Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modelling. 2010 Nov; 394(3-4): 416-435. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.016>.
- [6] Mohan S, Kuipally N. Groundwater and conjunctive use management. In: *Handbook of Water Resources Management: Discourses, Concepts and Examples*. Springer. 2021; p. 735-775.
- [7] Keshtegar B, Bagheri M, Meng D, Kolahchi R, Trung NT. Fuzzy reliability analysis of nanocomposite ZnO beams using hybrid analytical-intelligent method. *Engineering with Computers*. 2021; 37: 2575-2590. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-00965-5>.
- [8] Lin YP, Chen YW, Chang LC, Yeh MS, Huang GH, Petway JR. Groundwater simulations and uncertainty analysis using MODFLOW and geostatistical approach with conditioning multi-aquifer spatial covariance. *Water*. 2017; 9(3): 164. <https://doi.org/10.3390/w9030164>.

- [9] Alimonti C, Lombardi M, Cardarilli M, Soldo E. Reliability analysis applied on land subsidence effects of groundwater remediation: Probabilistic vs. deterministic approach. *Water Resources Management*. 2017 Mar; 31: 1745-1758. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1596-7>.
- [10] Masoumi F, Najjar-Ghabel S, Safarzadeh A, Sadaghat B. Automatic calibration of the groundwater simulation model with high parameter dimensionality using sequential uncertainty fitting approach. *Water Supply*. 2020 Dec; 20(8): 3487-3501. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.241>.
- [11] Eryiğit M. Estimation of parameters in groundwater modelling by modified Clonalg. *Journal of Hydrology*. 2021; 23(2): 298-306. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.139>.
- [12] Kazemi Choolanak A, Modaresi F, Mosaedi A. Assessment of the performance of various wavelet transforms in combined wavelet-neural network modeling for monthly river flow prediction (Case Study: Kardeh Watershed). *Water and Soil*. 2024; 38(2): 191–206. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86414.1371>.
- [13] Mohtashami A, Hashemi Monfared SA, Azizyan G, Akbarpour A. Numerical simulation of groundwater in an unconfined aquifer with a novel hybrid model (case study: Birjand Aquifer, Iran). *Journal of Hydroinformatics*. 2022; 24(1): 160-178. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.113>.
- [14] Bagheri Khanghahi M, Hazar Jaribi A, Kamali MI, Zamani F. Forecasting rainfall in different climatic regions of Iran using the LARS WG7 climate model. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1): 28-39. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11744.1008>.
- [15] Golfam P. Estimation of crop irrigation water demand using climatic data and Cropwat model. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1): 51-61. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11311.1001>.
- [16] Pourali Dougaheh M, Shoaie SM. Assessment of the impact of climate change on water quality using statistical methods and WQI. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(2): 1-10. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12775.1011>.
- [17] Pourali Dougaheh M, Shoaie SM. Qualitative assessment of Darband river water resources under climate change conditions using the TODIM multi-criteria decision-making method. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(2): 43-54. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12792.1012>.
- [18] Ashofteh PS, Pourpashang P, Nabatghods N. Performance evaluation of grey wolf algorithm and particle swarm optimization in reservoir management under climate change with various operational objectives. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(2): 73-85. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12863.1013>.
- [19] Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*. 2016; 9(5):1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- [20] Stolpe MB, Cowtan K, Medhaug I, Knutti R. Pacific variability reconciles observed and modelled global mean temperature increase since 1950. *Climate Dynamics*. 2021; 56(1): 613–634. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05493-y>.
- [21] Lee DK, Park JH, Park C, Kim S. Comparison of the results of climate change impact assessment between RCP8.5 and SSP2 scenarios. *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2017; GC13B-0771. <https://doi.org/10.1002/essoar.10502063.1>.
- [22] Racsco P, Szeidl L, Semenov MA. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*. 1991; 57(1-2): 27-41. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(91\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90053-4).
- [23] Stow CA, Reckhow KH, Qian SS, Lamont EC, Arhonditsis GB, Borsuk ME, Seo D. Approaches to evaluate water quality model parameter uncertainty for adaptive TMDL implementation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2007 Dec; 43(6):1499-1507. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00123.x>.
- [24] Katz RW. Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies. *Climate Research*. 2002; 20(2):167-185. <https://doi.org/10.3354/cr020167>.
- [25] Beven KJ, Binley AM. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*. 1992; 6(3): 279-298. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305>.