

Investigation of the Effect of Urban Wastewater Network Implementation on Groundwater Flow Dynamics (Case Study: Kerman City)

Bahareh Mirkamandar¹, Mohammad Bagher Rahnama², Mohammad Zounemat Kemani^{3*}

¹Phd Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

²Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

^{3*}Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Corresponding Author's E-mail: zounemat@uk.ac.ir

Received: 22 July 2025 Accepted: 26 Sep. 2025

Revised: 13 Aug. 2025 Published: 29 Oct. 2025



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: The impact of climate change and reduced rainfall on the groundwater resources of the Kerman plain with its arid and semi-arid climate has led to a severe decline in groundwater level over the years. The purpose of this research is to model the groundwater levels over 22 years (2002–2024) and forecast them for 10 years (2025–2034) using the MODFLOW code. According to the 10 years forecast, the maximum annual decline will occur in the eastern and southeastern parts of the aquifer at 2 meters per year, while the minimum decline of 0.78 meters per year is expected in the central, northeastern, and southern sections of the aquifer. Furthermore, the lack of natural wastewater drainage through absorption wells, combined with the implementation and transfer of Kerman city's sewage network outside the area, has led to the prediction that groundwater will reach the bedrock in approximately 12 years.

Keywords: Modeling, Groundwater Level, Kerman Aquifer, Bedrock.

Introduction: In recent years, excessive extraction from the Kerman plain aquifer through both authorized and unauthorized wells for agricultural, industrial, domestic, and urban purposes has resulted in a severe decline in the groundwater level, land subsidence, and the intrusion of various pollutants into the aquifer. These problems highlight the critical state of groundwater reserves, necessitating comprehensive studies and appropriate policies to improve the aquifer's condition. Given the crucial role of groundwater in supplying water for various uses monitoring of the Kerman plain aquifer through groundwater level modeling is essential for developing appropriate management strategies, and planning for the future. The groundwater flow in the shallow aquifer system of the Mahanadi Delta (East Coast, India) was evaluated using the MODFLOW model (Kumar Behera et al., 2022). According to their results, the net outflow from groundwater to the Bay of Bengal ranged from 8.92 to 9.64 MCM. They simulated and analyzed the groundwater level fluctuations of the Shahdad aquifer in Kerman Province using MODFLOW model (Sohrabi et al. 2020). The investigations showed the groundwater level of the aquifer indicate a decline in water levels in the northern, eastern, southern, and parts of the central. In this study, the groundwater level of the Kerman plain has been modeled and forecasted. Furthermore, the effects of both recharging and not recharging the aquifer through natural drainage of wastewater on groundwater storage within the Kerman city area have been investigated.

Methodology: In this study, in order to model the groundwater level using Groundwater Modeling System (GMS) software and the MODFLOW numerical code, a conceptual model was first developed based on the available hydrological and physical data for the region, which had been prepared as information layers in the GIS environment. The conceptual model was discretized using a uniform grid with cell dimensions of 500 × 500 meters. The information layers produced in GIS were assigned to each cell of this grid so that, according to the governing

equations, mathematical relationships could be computed for each cell. After verifying the accuracy of the simulated model, the model was run for 80% of the data under both steady-state and transient conditions. The geographic location and distribution of the observation and abstraction wells are shown in Fig. 2. In addition, Fig. 3 presents the map of groundwater inflow and outflow at the aquifer boundaries. To evaluate the agreement between observed and simulated data, validation was performed using 20% of the available data. The assessment and prediction of the effects of recharge or lack thereof due to natural drainage were carried out by calculating the drawdown gradient from the observed water level and the time required to reach the average bedrock level of the region.

Results and Discussion: The results presented during the calibration stage for both steady and transient state modeling periods were associated with errors within the acceptable range. The Mean Error (ME), Mean Absolute Error (MAE), and Mean Squared Error (MSE) were calculated for the steady-state, transient-state, and validation periods and were found to be within acceptable ranges. For instance, these Errors for the validation period are 0.61, 0.54, and 0.06, respectively, confirming the satisfactory performance of the model. The modeling results indicated that the hydraulic conductivity ranged from a minimum value of 11.2 to a maximum value of 44.12 meters per day. Specifically, the northern, western, and a limited area in the eastern parts of the aquifer due to the coarse-grained soil texture and high permeability exhibit high hydraulic conductivity values (ranging from 30 to 44.12 meters per day). In contrast, the central, southern, and southeastern regions of the aquifer characterized by fine-grained sediments and low permeability display the lowest hydraulic conductivity values (ranging from 11.2 to 10 meters per day). The calibrated specific yield coefficient varies from 0.01 to 0.295. The zoning maps of hydraulic conductivity (HK) and specific yield (SY) illustrate the spatial distribution of these parameters at the final calibration step. Various charts were plotted to analyze the aquifer's status during the 22-year modeling period, revealing that the maximum average annual drawdown occurred in the western and eastern regions of the aquifer at 1.23 meters per year, while the central and southern regions experienced the lowest average annual drawdown at 0.27 meters per year. The groundwater level forecasts for a ten-year period indicated that the maximum annual decline in groundwater level averaging 2 meters per year will occur in the eastern and southeastern parts of the study area, while the minimum annual decline, at 0.78 meters per year, will be observed in the central, northeastern, and southern regions of the aquifer. Fig. 10 presents the spatial distribution of groundwater level drawdown for both the modeling period and the forecast period in the Kerman Plain. The results of the drawdown gradient calculation indicated a 1.5% monthly decline under natural drainage conditions and an 11% monthly decline under conditions with wastewater transfer. This wastewater transfer and increased gradient have been identified as the cause of the sudden groundwater level decline in the plain over the last seven years. Currently, considering the existing wastewater transfer conditions and the lack of aquifer recharge, the time to reach bedrock is projected to be within the next 12 years (by 2037).

Conclusion: Natural wastewater drainage through absorption wells is an effective factor in reducing the groundwater level drawdown gradient in the Kerman city area and other regions. This factor, under natural wastewater drainage conditions, reduces the groundwater level drawdown gradient by up to 7.4% monthly, consequently delaying the time for groundwater in Kerman city to reach bedrock for an extended period. Unfortunately, with the current implementation of the Kerman wastewater collection network and its transfer outside the area, which began in 2018, calculations indicate that well Nodhri (No. 14) in the northern part of the plain will reach bedrock within the next 12 years, exhibiting an 11% monthly drawdown gradient. Existing wells in the Kerman region and the northern areas of the aquifer are also projected to become dry. Thus, the drying of wells and the loss of this valuable resource could severely impact the region's agriculture.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی اثر اجرای شبکه فاضلاب شهری بر دینامیک جریان آب زیرزمینی (مطالعه موردی: شهر کرمان)

بهاره میرکماندار^۱، محمدباقر رهنما^۲، محمد ذونعمت کرمانی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۲ دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۳ استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: zounemat@uk.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۸/۰۷

چکیده: تاثیر تغییر اقلیم، کاهش بارندگی و خشک‌سالی بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، منجر به برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها شده است. آبخوان دشت کرمان نیز از جمله نواحی است که طی این سال‌ها افت شدید سطح آب زیرزمینی را تجربه می‌کند. این در حالی است که تامین آب مصارف مختلف کشاورزی، صنعت و شرب منطقه از این آبخوان است. در پژوهش حاضر مدل‌سازی ۲۲ ساله تراز آب زیرزمینی دشت با استفاده از نرم‌افزار GMS مدل عددی MODFLOW ارائه و وضعیت تراز آب در سال‌های آتی تا رسیدن به سنگ کف دشت جهت بهبود مدیریت و تصمیم‌گیری در زمان بحران پیش‌بینی شده است. مطابق نتایج مدل‌سازی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴ بیشترین میزان افت در نواحی غربی و شرقی سالانه ۱/۲۳ متر و کمترین میزان افت در مرکز و جنوب آبخوان سالانه ۰/۲۷ متر مشاهده شد. مطابق پیش‌بینی تراز برای یک دوره ۱۰ ساله، حداکثر میزان افت در شرق و جنوب شرقی آبخوان سالانه ۲ متر و حداقل آن ۰/۷۸ متر در بخش مرکزی، شمال شرقی و جنوب آبخوان است. همچنین بررسی‌ها نشان داد عدم زه‌کشی طبیعی فاضلاب توسط چاه‌های جذبی موجود در منطقه، اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری کرمان و انتقال آن به خارج از محدوده موجب افزایش ۱۱٪ شیب افت تراز آب زیرزمینی در هر ماه شده و زمان رسیدن به سنگ کف و خشکی زود هنگام چاه‌های آب منطقه حدوداً ۱۲ سال آینده پیش‌بینی شده است. این عامل کشاورزی منطقه را به شدت تحت تاثیر خواهد گذاشت.

کلیدواژه‌گان: مدل‌سازی، تراز آب زیرزمینی، آبخوان کرمان، سنگ کف

Bahir et al. 2018, 2019; Baki et al. 2017; Carreira)
(et al. 2018; Nouayti et al. 2020

در چند دهه اخیر بروز عواملی همچون توسعه کشاورزی، صنعت، فرهنگ و شهرنشینی، افزایش استحصال از آب زیرزمینی، خشک‌سالی و عدم مدیریت درست در

۱- مقدمه

در بسیاری از کشورها، منابع آب سطحی محدود بوده است. و آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تامین آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت محسوب می‌شوند

ارزیابی شد. در این منطقه ساحلی کم عمق ضریب هدایت هیدرولیکی و مقادیر آبدهی ویژه به ترتیب بین ۴۰ تا ۴۵ متر بر روز و ۰/۰۵ تا ۰/۰۷ متغیر است. منطقه مورد مطالعه را با استفاده از این پارامترها برای سال‌های (۲۰۰۴-۲۰۰۵) کالیبره کرده و سپس برای چهار سال (۲۰۰۶-۲۰۰۹) اعتبارسنجی شد. مدل عددی کالیبره شده برای ارزیابی تغذیه خالص و تعادل آب‌های زیرزمینی در این منطقه مورد مطالعه به کار گرفته شده است. مطابق نتایج ایشان تغذیه خالص آب‌های زیرزمینی به آبخوان ساحلی برآورد شده، در سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۷ بین ۲۴۷/۸۹ تا ۲۶۲/۶۳ میلیون مترمکعب (MCM) متغیر بوده است. همچنین مدل نشان داد جریان خالص خروجی به میزان ۸/۹۲ تا ۹/۶۴ میلیون مترمکعب (MCM) از آب‌های زیرزمینی به خلیج بنگال است. علاوه بر این، جریان خروجی به دریا از ورود آب دریا به سیستم آبخوان ساحلی کم عمق جلوگیری می‌کند و برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی منطقه برای فعالیت‌های کشاورزی موجب کاهش سطح آب‌های زیرزمینی منطقه شده است.

در مطالعه (Reyhani et al. 2023) آبخوان دشت کاشان با مدل MODFLOW مدل‌سازی و صحت‌سنجی شده است. در راستای ارائه راهکارهای مدیریتی پیش‌بینی‌شده خاموشی یک‌ماهه‌ی چاه‌های مشاهداتی منطقه، موجب افزایش MCM ۰/۱۴۷ حجم ذخیره آبخوان خواهد گشت. (Zamzam et al. 2012) کیفیت آب زیرزمینی دشت رفسنجان در استان کرمان را با مدل‌های MODFLOW و MT3DMS ارزیابی کردند. در این پژوهش مدل‌های کمی و کیفی تهیه‌شده برای این آبخوان با داده‌های صحرایی اندازه‌گیری‌شده، مقایسه و مدل‌سازی شد. سپس از مدل برای پیش‌بینی ۲ و ۵ سال آینده استفاده شد. مطابق نتایج میزان پارامترهای مختلف در آب زیرزمینی و افت تراز آب زیرزمینی در کل دشت، چه در گذشته و چه در آینده روندی افزایشی دارد و این افزایش در حوالی شهر انار بیشتر مشاهده شده است.

(Sohrabi et al. 2020) نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان شهداد در استان کرمان را با استفاده از نرم‌افزار GMS و مدل MODFLOW شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار دادند.

بهره‌برداری از آب زیرزمینی شرایط لازم جهت فرونشست، پیشروی آب‌های شور به سمت آب‌های شیرین و کاهش کمیت و کیفیت این منابع را فراهم کرده است.

افت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی لزوم حفاظت از این منابع ارزشمند آب و مدیریت بهره‌برداری از آن را دوچندان می‌کند و به‌عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی کشور باید مدنظر قرار گیرد (Sohrabi et al. 2020).

برداشت بی‌رویه از آبخوان دشت کرمان طی سال‌های اخیر، از طریق چاه‌های مجاز و غیرمجاز برای مصارف کشاورزی، صنعتی، شرب و شهری، منجر به افت شدید سطح آب، نشست زمین و ورود آلاینده‌ها به آبخوان شده است. بروز این مشکلات بیانگر بحرانی بودن وضعیت ذخیره آب زیرزمینی و بااهمیت‌تر شدن مطالعات جامع در این زمینه گردیده تا جهت بهبود شرایط آبخوان منطقه سیاست‌های مناسب اتخاذ گردد.

شناخت و پایش منابع آب زیرزمینی از نظر کمی به‌سادگی امکان‌پذیر نبوده و در عمل نیازمند صرف وقت و هزینه‌های زیاد است. لذا استفاده از مدل‌های عددی و مدل‌سازی‌های مربوطه به‌عنوان ابزار و راهکاری برای بررسی و مطالعه این منابع مهم و ارزشمند می‌تواند مفید باشد.

روش‌های تحلیلی و عددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی برای چاه‌های دارای چند اسکرین با استفاده از MODFLOW مقایسه و تایید شد رابط MNW حاضر در مدل MODFLOW نمی‌تواند جهت شبیه‌سازی جریان غیرماندگار کوتاه‌مدت توصیه شود (SZUCS at al. 2013). تغییرات سطح آب دریا و آب زیرزمینی در آبخوان‌های محصور نشده ساحلی با استفاده از رابط SEAWAT در مدل GMS بررسی و مشخص شد با تغییرات دبی خروجی از چاه می‌توان به محاسبه پیشروی آب شور پرداخت و نتایج نشان داد موانع به‌طور قابل‌توجهی می‌تواند از پیشروی آب شور جلوگیری کند (Vafaei et al. 2014).

دینامیک جریان آب زیرزمینی در سیستم آبخوان کم‌عمق دلتای ماهانادی هند (ساحل شرقی)، با استفاده از مدل MODFLOW توسط (Kumar Behera at al. 2022)

لازم‌الاجراست.

یک مدل شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مانند مدل MODFLOW نسخه‌ی ساده‌شده‌ای از سیستم واقعی آب‌های زیرزمینی است که به‌طور گسترده در مطالعات کلی جریان آب زیرزمینی کاربرد دارد (Bejranonda et al. 2009; Dafny et al. 2010; Koch et al. 2012; Lyazidi et al. 2020). در این پژوهش تراز آب زیرزمینی دشت کرمان برای آگاهی بهتر از وضعیت بحرانی آن، مدیریت و ارائه راهکارهای مفید در جهت بهبود میزان ذخیره، با نرم‌افزار 10.8.8 GMS کد عددی MODFLOW مدل‌سازی و پیش‌بینی شده است. تغذیه آبخوان از طریق زه‌کشی طبیعی فاضلاب، روشی است که در آن پساب‌ها به‌منظور تغذیه ذخایر آب زیرزمینی به داخل آبخوان هدایت می‌شوند. این روش می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای مقابله با کمبود آب و فرونشست زمین در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در ادامه به پیش‌بینی و بررسی تاثیر استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده در محدوده شهر کرمان بر میزان ذخیره آب آبخوان پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت کرمان در دامنه دو رشته‌کوهی که از شمال شرقی و جنوب غربی آن می‌گذرد گسترده شده است. امتداد این دو رشته‌کوه از شمال غربی به جنوب شرقی است. این دشت نیز در امتداد جهت جنوب شرقی - شمال غربی و شیب آن‌هم از جنوب شرقی به‌طرف شمال غربی است. منطقه مورد مطالعه‌ی دشت کرمان در محدوده جغرافیایی ۵۶ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۵۶ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۰۱ دقیقه عرض شمالی در محدوده مطالعاتی کرمان-باغین و حوضه آبریز کویر در انجیر با مساحت ۱۶۱۲.۱۵ کیلومتر مربع قرار دارد. محدوده شهری کرمان در شرق و شمال شرقی منطقه مورد مطالعه به مساحت ۱۵۴ کیلومتر مربع واقع شده است. ارتفاع این دشت متغیر و حداکثر ۲۱۰۰ متر در نواحی جنوب شرقی، حداقل ۱۶۵۰ متر در نواحی شمال غرب و به‌طور متوسط

بررسی‌ها نشان داد تغییرات سطح ایستابی آبخوان بیانگر افت سطح ایستابی در قسمت شمال، شرق، جنوب و قسمتی از نواحی مرکزی آبخوان است. آنالیز حساسیت، نشان داد مدل نسبت به پارامتر دبی خروجی از چاه‌های بهره‌برداری بیش از تغذیه سطحی و ضریب هدایت هیدرولیکی حساسیت دارد و جهت کاهش افت سطح ایستابی لازم است میزان برداشت ماهانه از چاه‌های بهره‌برداری ۳۰ درصد کاهش یابد.

(Jafary et al. 2021) تاثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم را بر نوسانات آب زیرزمینی دشت کرمان مورد بررسی قرار دادند. ایشان از نرم‌افزار GMS برای مدل‌سازی کمی آب زیرزمینی این دشت استفاده کردند. در این مطالعه تراز آب مهرماه سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۲ برای دوره پایدار، از تراز آب سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۲ در ۱۲۰ گام زمانی برای دوره ناپایدار و برای دوره صحت‌سنجی از تراز آب سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۵ بهره گرفته شده است. مطابق نتایج گزارش شده سناریوهای مختلف در دوره آبی (۲۰۳۰-۲۰۱۶) نسبت به تراز سطح آب در سال ۲۰۰۳-۲۰۰۲ به ترتیب به میزان ۷/۱۹ و ۷/۲۶ و ۷/۳۳ متر در کل محدوده کاهش می‌یابد. همچنین پیشنهاد شده مسئولین در مقابله با بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی تمهیداتی از طریق اصلاح الگوی کشت و روش‌های نوین آبیاری اتخاذ نمایند.

در مطالعه‌ای (Sabah Nia et al. 2024) با استفاده از مدل MODFLOW و نرم‌افزار مدل‌سازی آب زیرزمینی آبخوان شمیل در استان هرمزگان را مدل‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد نواحی شمالی، مرکزی و جنوبی این آبخوان دارای بیشترین ضریب هدایت هیدرولیکی (بین ۲۰ الی ۵۰ متر بر روز) است و مطابق پیش‌بینی انجام شده با ادامه روند جاری در ده سال آینده میزان افت تراز آب زیرزمینی به میزان ۰/۴ متر در هر سال خواهد بود. با توجه به نقش آب‌های زیرزمینی در تامین آب مصارف مختلف به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود مواجه هستند، پایش کمی آبخوان دشت کرمان از طریق مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی جهت مدیریت بهینه، ارائه راهکارهای مناسب مدیریتی و برنامه‌ریزی برای آینده این منابع ارزشمند

سانتی‌گراد گزارش شده است. میانگین تبخیر تعرق طولانی‌مدت برای منطقه مورد مطالعه ۲۵۳۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. به‌طور کلی این منطقه دارای آب‌وهوای سرد و خشک بوده، زمستان‌های آن سرد تا شدیداً سرد و تابستان‌هایی معتدل، نیمه گرم و خشک است (سالنامه هواشناسی، ۲۰۱۹).

رودخانه اصلی و دائمی که در محدوده مورد مطالعه جریان دارد رودخانه چاری است که از جنوب غربی آبخوان به سمت شرق جریان داشته و به دشت باغین می‌ریزد. دبی سیلاب ۲۵ ساله در ایستگاه هیدرومتری گلی‌گوتو موجود بر روی رودخانه چاری ۸۷/۷ مترمکعب در ثانیه گزارش شده است (گزارش مطالعات هیدرولوژی شرکت آب منطقه‌ای کرمان، ۲۰۲۱). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت کرمان، محدوده شهر کرمان و چاه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. چاه نوذری واقع در شمال آبخوان دشت کرمان به‌عنوان چاه معرف وضعیت تراز آب زیرزمینی شمال دشت با موقعیت مکانی مشخص است.

دارای ارتفاع ۱۸۳۰ متر از سطح دریا است. همچنین این دشت توسط کوه‌های جوپار از جنوب و کوه‌های دارمانو و تیز از شمال، کوه‌های بید و وبادامو از مغرب و کوه‌های نامور و نصر از مشرق محدود و محاصره شده است. وجود ناهمواری‌های مشرق کرمان که در فاصله نزدیک شهر قرار گرفته‌اند باعث جلوگیری از رشد و توسعه شهر در این قسمت گردیده است.

دشت کرمان شامل ۱ ایستگاه سینوپتیک واقع در فرودگاه کرمان، ۷ ایستگاه باران‌سنجی خودکار وابسته به سازمان هواشناسی و ۱ ایستگاه باران‌سنجی معمولی وابسته به شرکت آب منطقه‌ای استان کرمان است. بارندگی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر منابع آب زیرزمینی است. میانگین درازمدت بارندگی در دشت کرمان ۱۲۸ میلی‌متر برآورد شده است. همچنین میانگین حداکثر دمای رخ داده در ایستگاه سینوپتیک کرمان در پنجاه سال اخیر ۴۲ درجه سلسیوس، میانگین حداقل دما ۳۰ درجه سلسیوس و میانگین دمای سالانه این منطقه از ۱۵ تا ۲۰ درجه

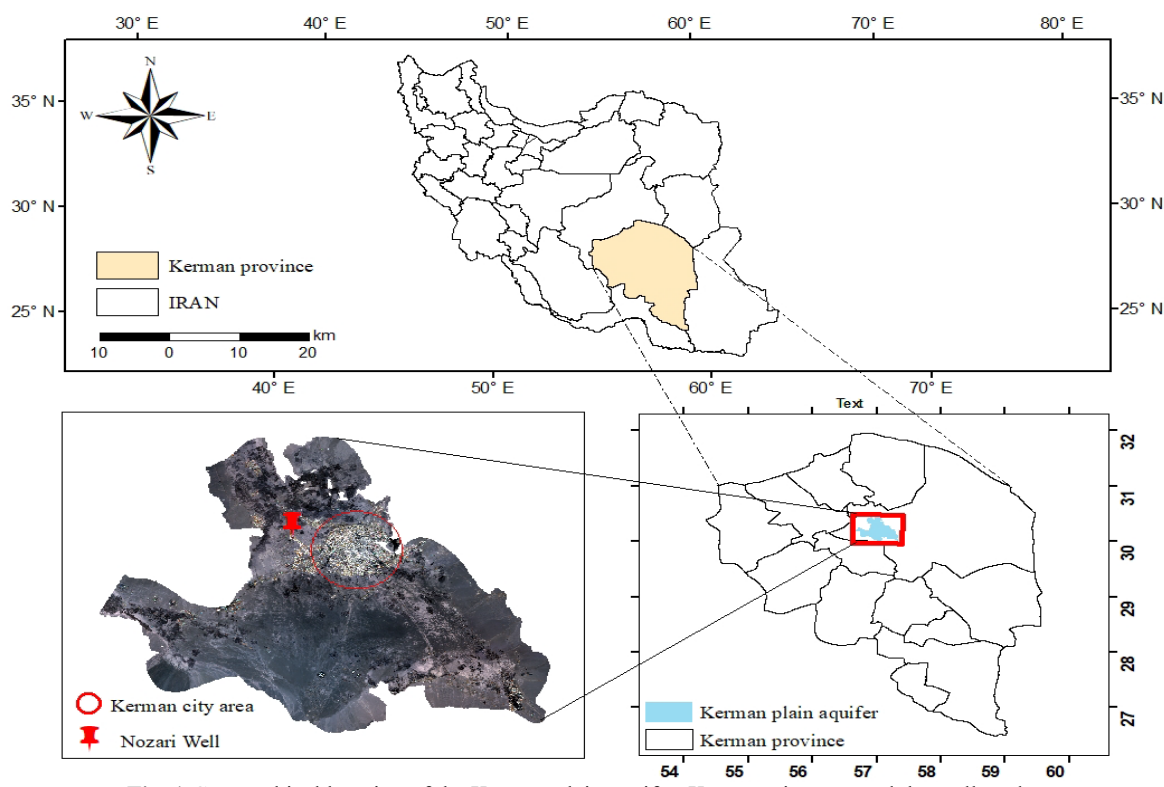


Fig. 1 Geographical location of the Kerman plain aquifer, Kerman city area and the well study

شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آبخوان دشت کرمان، محدوده شهر کرمان و چاه مورد مطالعه

$$\frac{\partial}{\partial x}(-k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(-k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(-k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm q_s \quad (1)$$

h : بار هیدرولیکی (m)، t : زمان (s)، k : ضریب هدایت هیدرولیکی ($\frac{m}{s}$)، q_s : میزان آب اضافه یا برداشت شده به واحد حجم آبخوان ($\frac{m^3}{s}$)، S_s : بار هیدرولیکی ($\frac{1}{m}$)

در صورتی که محیط جریان همگن و یکنواخت فرض شود (k مستقل از z, y, x) رابطه فوق به شکل معادله (۲) نوشته می‌شود. و اگر جریان آب ماندگار و در فاصله‌ی دو مقطع انتخاب شده چشمه و چاه وجود نداشته باشد، معادله جریان مطابق معادله (۳) ساده شده و به معادله لاپلاس معروف است.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \pm q_s \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

در پژوهش حاضر جهت حل معادلات دیفرانسیلی و شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی از روش تفاضل محدود در کد عددی MODFLOW در حالت پایدار و ناپایدار استفاده شده است. نمودار جریان گام‌به‌گام روند انجام پژوهش حاضر جهت نمایش بهتر در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۳-۲- ایجاد مدل مفهومی

ابتدایی‌ترین و مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی تهیه مدل مفهومی است. داده‌ها و اطلاعات کاربردی جهت مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی به دو دسته هیدرولوژیکی و فیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند (Anderson and Woessner, 1992). مقصود از تهیه مدل مفهومی ساده‌سازی شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه که شامل داده‌های هیدرولوژیکی (تراز سطح ایستابی آبخوان، میزان هدایت هیدرولیکی و توزیع ضریب انتقال، میزان تخلیه ناشی از چاه‌های بهره‌برداری، تغذیه ناشی از بارندگی و جریان‌های سطحی) و داده‌های فیزیکی (مرز آبخوان

۲-۲- معرفی نرم‌افزار مدل‌سازی تراز آب زیرزمینی GMS

هر سیستمی که بتواند عکس‌العمل ذخیره آب زیرزمینی را در مقابل استرس‌های وارده (تخلیه و تغذیه) نشان دهد مدل آب زیرزمینی گفته می‌شود. به کار بردن مدل و کنترل نتایج حاصل از آن اصطلاحاً شبیه‌سازی گفته می‌شود. در واقع مدل آب زیرزمینی وسیله‌ای جهت ارائه بیان تفهیمی یا ترسیمی از دستگاه‌های فیزیکی در درون زمین با استفاده از معادلات ریاضی است. به وسیله‌ی این مدل مکانیزم‌ها و شرایط مختلف و مؤثر بر منابع آب زیرزمینی و تغییراتی که در حجم آب ذخایر زیرزمینی و سطح آب سفره به وجود می‌آید را می‌توان جهت برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح و توسعه کامل، تحت کنترل دقیق و پیش‌بینی‌های به موقع قرار داد و وضعیت آینده سفره را پیش‌بینی کرد. به عبارت کلی‌تر مدل آب زیرزمینی وسیله است جهت بیان و تفسیر ساده‌ای از تغییراتی که در اثر وجود آب زیرزمینی در ساختار زمین است که می‌تواند جهت پیش‌بینی‌های لازم به منظور مدیریت بهره‌برداری از منابع آب مورد استفاده قرار گیرد (Anderson and Woessner, 1992).

بسته مدل‌سازی GMS یک محیط کاربری گرافیکی جامع برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی که توسط موسسه تحقیقاتی مهندسی آب ارتش آمریکا تهیه شده است. این محیط مدل‌ساز انواع مختلف مدل‌های عددی را پشتیبانی کرده و امکان اشتراک‌گذاری اطلاعات بین مدل‌های مختلف و ورود انواع داده‌ها با فرمت‌های گوناگون از نرم‌افزارهای مختلف را فراهم می‌سازد. GMS شامل ابزارهایی متعدد برای توصیف منطقه مورد مطالعه، تهیه مدل مفهومی، تولید مش و گرید و پردازش و پس پردازش است که عمدتاً به روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود به مدل‌سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی می‌پردازد. این نرم‌افزار متشکل از ده‌ها کد ریاضی برای اهداف مختلف شبیه‌سازی است که به صورت ماژولار در کنار هم قرار گرفته‌اند.

معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل از ترکیب دو معادله پیوستگی و داری به دست می‌آید و فرم کلی آن به صورت زیر است:

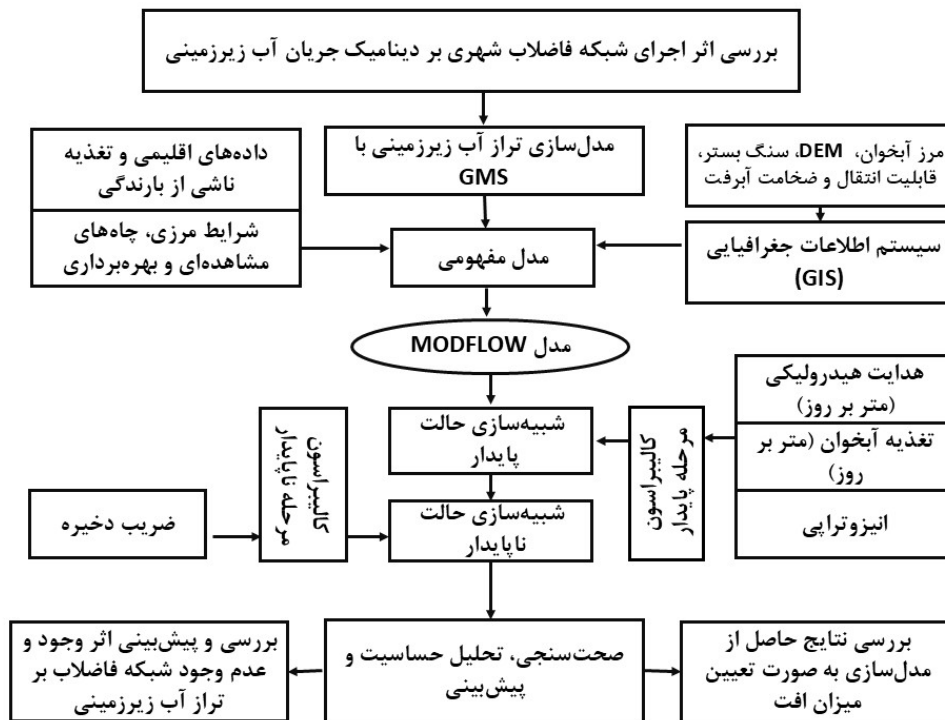


Fig. 2 Flowchart of the steps for conducting the present research

شکل ۲ نمودار جریان مراحل اجرای پژوهش حاضر

در مدل سازی لازم است. این شرایط شامل مقادیر بار هیدرولیکی برای هر سلول فعال و سلول دارای بار هیدرولیکی ثابت برای مدل است (Chitsazan and Kashkouly, 2002). مرزهایی که در نقشه زمین شناسی با عنوان مرزهای تراوا مشخص شده و جریان از آن ها عبور می کند را مرز ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی می گویند. مرزهای ورودی و خروجی جریان به آبخوان به صورت مرزهای تراوا و ناتراوا از نقشه زمین شناسی منطقه در نظر گرفته شده است. معمولاً در مدل سازی آب زیرزمینی با توجه به آمار و اطلاعات در دسترس می توان ابعاد سلول ها را از ۲۵۰ متر تا ۲ کیلومتر انتخاب کرد. ابعاد هر سلول می تواند در کل سطح آبخوان به صورت یکنواخت یا متغیر انتخاب شود (Kholghi, 2001).

جهت ساخت مدل مفهومی از آمار تراز آب ۲۷ چاه مشاهداتی، ۸۴۶ چاه بهره برداری، خصوصیات هیدروژئولوژی آبخوان، اطلاعات مرتبط با نوع مرزهای ورودی، سنگ کف و توپوگرافی منطقه استفاده شده است.

مورد مطالعه، موقعیت رودخانه موجود، اطلاعات مرتبط با تراز سنگ بستر، نقشه های زمین شناسی و توپوگرافی، مرزهای ورودی آب به آبخوان و خروجی از آن، لاگ حفاری چاه های بهره برداری و مشاهداتی) و داده های کمکی است.

اطلاعات مورد نیاز جهت مدل سازی دشت کرمان شامل لاگ حفاری چاه های بهره برداری و مشاهده ای، میزان بارندگی و تبخیر و تعرق، میزان تخلیه چاه های بهره برداری، تراز آب زیرزمینی چاه های مشاهده ای یا پیژومترهای موجود در سطح دشت، قابلیت انتقال و ضخامت لایه آبرفتی منطقه با مراجعه به شرکت آب منطقه ای کرمان و اداره مطالعات منابع آب استان کرمان دریافت شد.

تعریف شرایط مرزی ابتدایی برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی در آب زیرزمینی ضروری است تا مدل بتواند به وسیله اعداد و ارقام اولیه و واقعی که طراح برای آن تعریف کرده است محاسبات را از جایی آغاز کرده، هد هیدرولیکی را تولید و ادامه دهد. شرایط اولیه از دو جهت مکانی و زمانی

مدل اجرا و مقادیر مجهول محاسبه می‌شوند. پس از ورودی اطلاعات اولیه و ساخت مدل مفهومی مدل برای حالت پایدار اجرا گردید. موقعیت جغرافیایی و پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری در **شکل ۳** قابل مشاهده است. همچنین **شکل ۴** نقشه ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی به مرزهای آبخوان را نشان می‌دهد.

۲-۴- مدل‌سازی حالت پایدار و ناپایدار

در ادامه ساخت مدل مفهومی، مدل‌سازی حالت پایدار با توجه به اعداد و ارقام ابتدائی که تعریف شده بود اجرا و پس از آن پارامترهای انیزوتروپی، هدایت هیدرولیکی و تغذیه ناشی از بارندگی مورد واسنجی قرار گرفت. واسنجی مدل تا رسیدن به بهترین نتیجه و کاهش خطای تراز آب محاسباتی نسبت به مقادیر مشاهداتی ادامه یافت.

اجرای حالت ناپایدار پس از درون‌یابی پارامترهای آبدی ویژه، ضریب ذخیره، هدایت هیدرولیکی و پلیگون‌بندی

پس از شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه با استفاده از بسته PCG2¹ شبکه یکنواختی با ابعاد سلولی ۵۰۰×۵۰۰ متر ایجاد شد.

بسته PCG2 یک الگوریتم حل تکراری است که در این نرم‌افزار برای حل دستگاه معادلات خطی حاصل از مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی استفاده می‌شود. این بسته با بهره‌گیری از روش گرادینان مزدوج پیش شرط‌گذاری شده، موجب افزایش سرعت همگرایی و حداکثر تعداد تکرارها براساس دقت تنظیم شده توسط کاربر می‌گردد. علت انتخاب این ابعاد برای شبکه‌بندی، مساحت وسیع آبخوان و جلوگیری از زمان‌بر بودن محاسبات است.

اطلاعات گردآوری شده در قالب لایه‌های اطلاعاتی به صورت مجزا در نرم‌افزارهای مختلفی چون GIS تهیه گردیده است. سپس این لایه‌های تولیدی به هر یک از سلول‌ها وارد شد تا مطابق معادلات حاکم، روابط ریاضی برای هر سلول محاسبه گردد. پس از بررسی صحت مدل شبیه‌سازی شده،

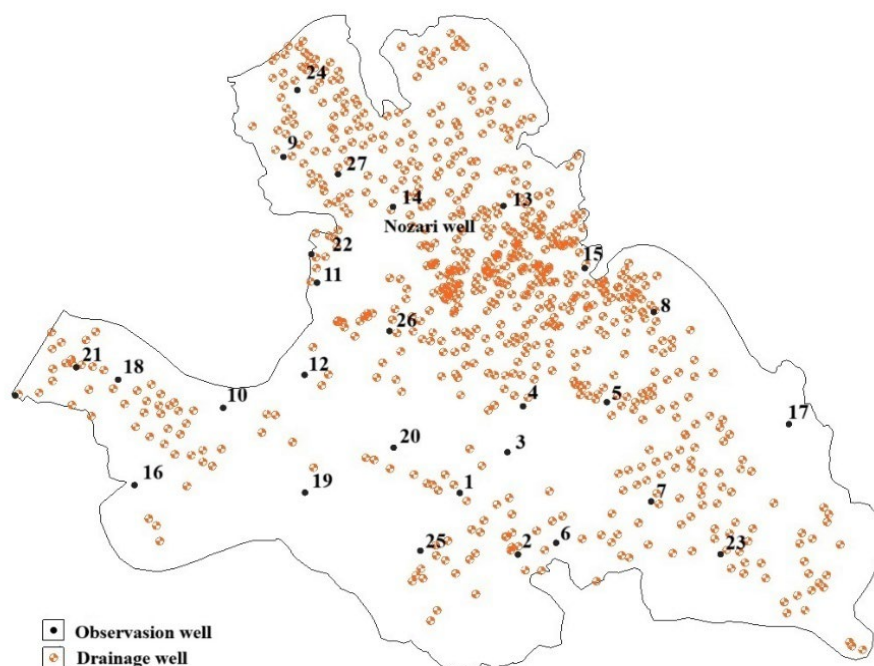


Fig. 3 Geographic location and distribution of observation and drainage wells in the Kerman plain aquifer

شکل ۳ موقعیت جغرافیایی و پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری در آبخوان دشت کرمان

اطلاعاتی به صورت مجزا تهیه و اجرا شد.

میزان تغذیه آبخوان در نرم‌افزار ARC GIS در قالب لایه‌ی

¹ Preconditioned Conjugate Gradient version 2

هدایت هیدرولیکی

ضریب هدایت هیدرولیکی^۱، با جایگذاری مقادیر قابلیت انتقال و ضخامت آبرفت در نقاط مختلف آبخوان دشت کرمان در رابطه (۴) محاسبه شد. بدین صورت مقادیر اولیه‌ای از قابلیت انتقال و ضخامت آبرفت از گزارش مطالعات منابع آب کرمان (۲۰۱۷) که هر یک با مختصات متفاوتی تعیین شده بود، برداشت شد. سپس با درون‌یابی کریجینگ^۲ در نرم‌افزار Gis مقدار پارامتر قابلیت انتقال در سایر نقاط سطح آبخوان برآورد گردید. قابلیت انتقال حاصل

از خطوط هم ارزش درون‌یابی شده و مقادیر ضخامت آبرفت در نقاط مختلف با یکدیگر مطابقت داده شد و با رابطه (۴) هدایت هیدرولیکی این نقاط محاسبه گشت. این مقادیر به‌عنوان نقاط پراکنده^۳ مجدداً با درون‌یابی کریجینگ وارد مدل شده و مقادیر بهینه متناظر آن‌ها محاسبه می‌گردد. در **جدول ۱**، محاسبات مربوط به هدایت هیدرولیکی در چهار نقطه متفاوت از آبخوان برای نمونه درج شده است.

$$K = T/b \quad (4)$$

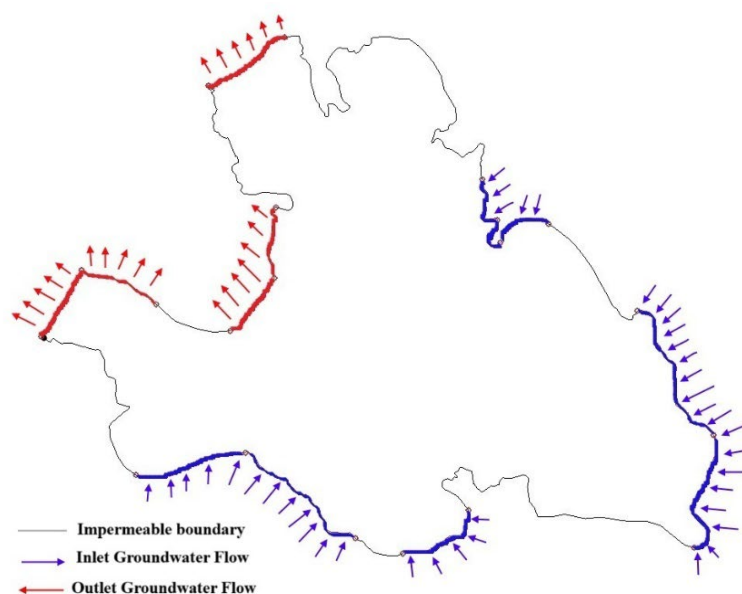


Fig. 4 Plan of Inlet and Outlet Groundwater Flow in aquifer boundary

شکل ۴ نقشه ورودی و خروجی جریان آب زیرزمینی به مرز آبخوان

جدول ۱ نرود محاسبه ضریب هدایت هیدرولیکی در نقاط مختلف آبخوان

Table 1 The process of calculating the hydraulic conductivity at different points in aquifer

Row	Longitude (UTM)	Latitude (UTM)	Place name	b (m)	T ($\frac{m^2}{day}$)	k ($\frac{m}{day}$)
1	503736	3338122	Joupar	125	700	5.6
2	480793	3338024	Baghin	134	550	4.1
3	526267	3338159	Bolboluye	100	1500	14
4	511278	3349856	DaryaguliBeg Takht	119.7	750	6.3

مختلف (گزارش مطالعات منابع آب کرمان (۲۰۱۷))،

در **جدول فوق**: b ضخامت آبخوان مورد مطالعه در نقاط

³ Scatter Point

¹ Hydraulic conductivity

² Kriging interpolation

این معادله (معادله فائو (۵)) به صورت ماهانه برای ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود در منطقه محاسبه گردید. همچنین دبی ۲۵ ساله نفوذی به آبخوان مانند دوره پایدار برآورد شد. مجموع مقادیر این دو تغذیه در هر دو دوره پایدار و ناپایدار از روش تیسن^۳ در نرم‌افزار Gis پلی‌گون‌بندی شده و نتایج آن به کل آبخوان تعمیم داده شده است. **شکل ۵** نحوه‌ی پلی‌گون‌بندی و تفکیک حوضه به روش چندضلعی تیسن و مقادیر اولیه تغذیه برای دوره پایدار را نمایش می‌دهد. **جدول ۲** به‌طور مثال روند محاسبه مجموع تغذیه ناشی از بارندگی و دبی ۲۵ ساله را برای یک ماه (یک گام زمانی) نشان می‌دهد.

$$F = 0.8(P - C * \log E)^{0.5} \quad (5)$$

در معادله **فوق**: E تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه برحسب میلی‌متر، C ضریب ثابتی که اندیس نفوذ یا اندیس حرارتی نفوذ نامیده می‌شود و به درجه حرارت بستگی دارد. این ضریب شامل مقادیر $[0 < C < 1]$ است و در این پژوهش $C = 0.5$ در نظر گرفته شده است. P بارندگی ماهانه برحسب میلی‌متر، F میزان نفوذ ماهانه برحسب میلی‌متر است.

۲-۵- کالیبراسیون یا واسنجی مدل

کالیبراسیون یا واسنجی یکی از مهم‌ترین مراحل انجام مدل‌سازی است. در برخی موارد این مرحله بسیار وقت‌گیر بوده و حتی بایستی شرایط مرزی و بخشی از پارامترها تغییر یابند. در فرآیند کالیبراسیون پارامترهای مدل با یک مقدار از پیش تعیین‌شده تغییر داده می‌شوند تا شرایط روی زمین را ایجاد کنند. در حقیقت مقایسه جواب‌های مدل با داده‌های واقعی در روی زمین را کالیبراسیون می‌گویند. پارامترهایی که در کالیبراسیون می‌توان تغییر داد شامل هدایت هیدرولیکی، میزان تغذیه، بار هیدرولیکی و سطح آبی است که در چاه مشاهداتی اندازه‌گیری شده است.

T ضریب قابلیت انتقال آب در خاک (گزارش مطالعات منابع آب کرمان (۲۰۱۷)) و K ضریب هدایت هیدرولیکی (محاسباتی) است.

آبدهی ویژه و ضریب ذخیره

آبدهی ویژه^۱ به حجم آبی اشاره دارد که با تغییر یک واحد ارتفاع سطح آب در یک واحد سطح از یک آبخوان ناپیوسته آزاد می‌شود. ضریب ذخیره^۲ به حجم آبی گفته می‌شود که در اثر پایین یا بالا رفتن سطح فشار به اندازه یک واحد از هر واحد سطح آکifer خارج شده و یا به ذخیره در آبخوان تحت فشار افزوده می‌شود. مقادیر اولیه آبدهی ویژه و ضریب ذخیره از گزارش نشان‌واره حفاری چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی دشت کرمان ۵٪ در نظر گرفته شد (گزارش‌ها شرکت آب منطقه‌ای کرمان، ۲۰۲۱)

تغذیه آبخوان

تبخیر طولانی‌مدت برای منطقه مورد مطالعه ۲۵۳۰ میلی‌متر در سال است که از گزارش اقلیم‌شناسی، سازمان هواشناسی استان کرمان برداشت شد. همچنین میزان تقریبی تغذیه دبی ۲۵ ساله برای آبخوان ۸۷/۷ مترمکعب بر ثانیه است، که از براساس گزارش مطالعات منابع آب این استان مشخص شده است. براساس میزان تبخیر طولانی‌مدت و میزان تقریبی تغذیه دبی ۲۵ ساله، تغذیه آبخوان برای دو دوره پایدار و ناپایدار به صورت زیر محاسبه شد. ابتدا اطلاعات مربوط به متوسط طولانی‌مدت بارندگی هر ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری از اداره هواشناسی و مطالعات منابع آب استان کرمان دریافت و تغذیه ناشی از بارندگی با استفاده از معادله فائو (۵) (معادله ارائه شده توسط سازمان جهانی FAO نشریه شماره ۱۹) برای دوره پایدار محاسبه گردید. همچنین دبی ۲۵ ساله نفوذی به آبخوان با تقسیم بر مساحت آبخوان برآورد شد.

در دوره ناپایدار میزان نفوذ حاصل از بارندگی با استفاده از

³ Thiessen Polygons

¹ Specific Yeild

² Specific Storage

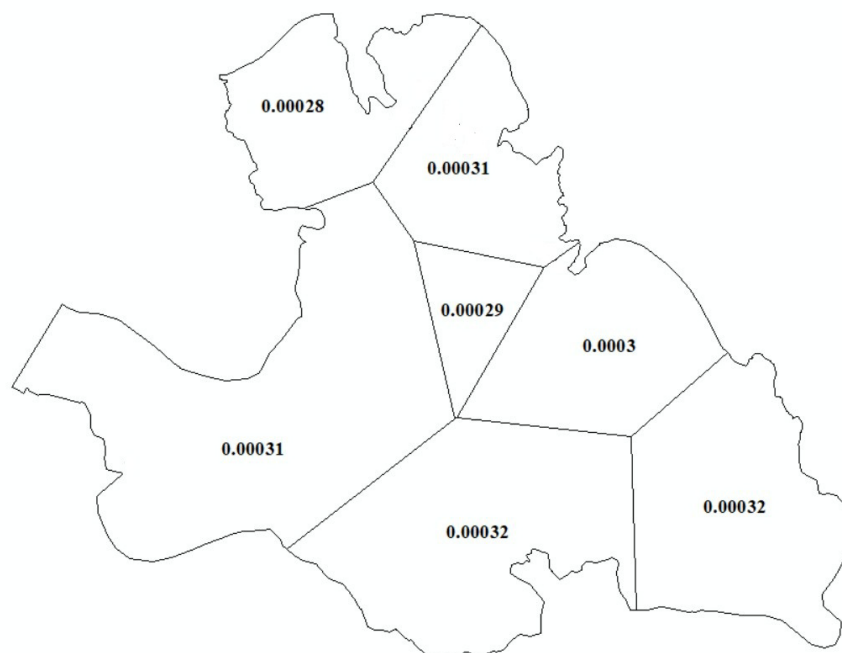


Fig. 5 The polygon-zoned map of the aquifer based on rainfall recharge using the Thiessen method in the steady-state period
 شکل ۵ نقشه‌ی پلی‌گون‌بندی شده‌ی آبخوان بر مبنای تغذیه ناشی از بارندگی از روش تیسن در دوره پایدار

جدول ۲ روند محاسبه مجموع تغذیه ناشی از بارندگی و دبی ۲۵ ساله برای یک گام زمانی

Table 2 The process for calculating total Recharge from rainfall and 25-year flood flow rate for a time step

	Rain (mm/month)	Long-term evap- otranspiration (mm/year)	Long-term evapo- transpiration (mm/month)	FAO Equation (mm/month)	Recharge Rain (m/ day)
Recharge Rain	38.9	2530	210.83	4/87	0.00013
	Flood rate (Q) (m ³ /s)	Flood rate (Q) (m ³ /day)	Area of Aquifer (A) (m ²)	Approximate Re- charge rate of earth (m ³ /day)	(Q/A) m/day)
Recharge of 25-year flood flow rate	87.7	7577280	1617910000		0.00014
Sum Recharge					0.00027

مشاهداتی) با بار هیدرولیکی محاسبه شده مقایسه و مقادیر پارامترهای موردنظر داده می‌شوند تا زمانی که مقدار شبیه‌سازی شده یا محاسباتی به بار هیدرولیکی و سطح آب اندازه‌گیری شده نزدیک شود.

معیارهای متفاوتی برای ارزیابی نتایج به دست آمده وجود دارد. از جمله آنها به ترتیب فرمول‌های محاسبه مقادیر میانگین خطا^۲، میانگین خطای مطلق^۳ و ریشه میانگین

واسنجی حالت ناپایدار و حالت پایدار با ترکیب دو روش خودکار PEST و سعی و خطا انجام گرفته است. PEST یک برنامه واسنجی به نام برآورد پارامتر^۱ است که فرآیند تخمین پارامتر را انجام می‌دهد (Doherty, 2020). با برنامه PEST در حالت واسنجی، پارامترهایی که برای واسنجی معرفی شد با بهترین تطابق اصلاح گردید. در هنگام شبیه‌سازی بار هیدرولیکی یک گره (مربوط به یک چاه

³ Mean Absolute Error

¹ Parameter estimation

² Mean Error

باشد میله رنگی قرمز خواهد شد. نمودار میله‌ای شکل ۶ برای نمایش شاخص واسنجی در نرم‌افزار GMS مورد استفاده قرار می‌گیرد.

براساس استاندارد ASTM D6۰۳۳,۱۹۹۶ برای واسنجی مدل‌های جریان آب زیرزمینی، در صورتی که فرآیند واسنجی صحیح است که مقادیر باقی‌مانده‌ها بخش کوچکی از اختلاف بین بیشترین و کمترین بار هیدرولیکی مشاهده شده در محل باشد، در صورتی که ۱۰ درصد این اختلاف به‌عنوان این بخش کوچک در نظر گرفته شود.

۶-۲- تحلیل حساسیت، صحت‌سنجی و پیش‌بینی

مدل

صحت‌سنجی از نظر مفهومی با کالیبراسیون یکسان است ولی زمانی که صحت‌سنجی صورت می‌گیرد با زمان انجام کالیبراسیون یکسان نیست و همچنین در مرحله کالیبراسیون می‌توان بسیاری از پارامترهای مدل را تغییر داد. ولی در مرحله صحت‌سنجی فقط می‌توان تغییرات جزئی اعمال کرد. به‌عنوان مثال می‌توان تغییرات مربوط به هدایت بارندگی را در مدل وارد کرد ولی نمی‌توان پارامتر هدایت هیدرولیکی و یا شرایط مرزی را تغییر داد پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۲۴ به مدت ۱۰ سال انجام شد. نتایج حاصل از پیش‌بینی در ادامه ارائه شده است.

مربعات خطا^۱ در زیر آورده شده است و با استفاده از آن‌ها مقادیر خطای باقیمانده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. دقت مرحله واسنجی مدل با پارامترهای آماری نامبرده بررسی شد (رابطه‌های (۶) تا (۸)).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i| \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2} \quad (8)$$

جهت مقایسه اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در هنگام واسنجی با توجه به میزان خطای قابل قبول در نظر گرفته شده، باید نقاط مشاهداتی (چاه‌های پیژومتری) با گسترش مکانی مناسب به مدل وارد گردند. با وارد نمودن این نقاط کنترلی و اجرای مدل، در محل این نقاط، در نرم‌افزار GMS، میله‌های رنگی نمایان می‌گردد که نمایانگر میزان خطای واسنجی است و مرکز آن منطبق بر مقادیر مشاهده‌ای است.

اگر خطا در محدوده خطای قابل قبول قرار گیرد میله به رنگ سبز خواهد بود و اگر خطا بیش از خطای قابل قبول ولی کمتر از ۲۰۰٪ خطای قابل قبول باشد میله رنگی زرد و در صورتی که مقدار خطا بیشتر از ۲۰۰٪ خطای قابل قبول

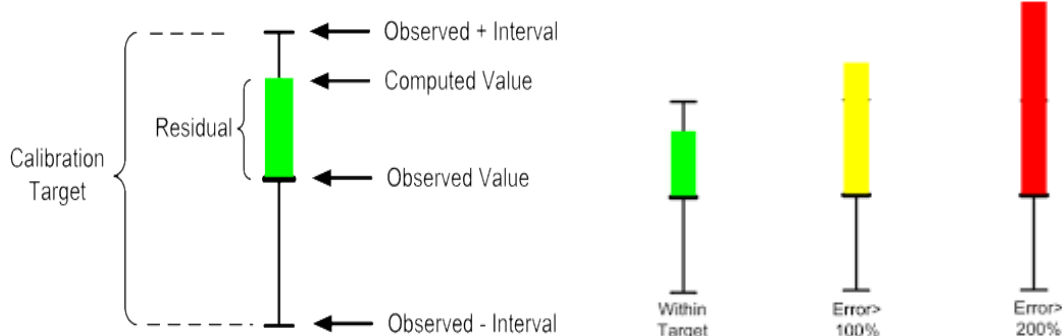


Fig. 6 Calibration index and observational error bands

شکل ۶ شاخص واسنجی و نوارهای خطای مشاهداتی

¹ Root Mean Square Error

۷-۲- تغذیه آبخوان با استفاده از زه‌کشی طبیعی فاضلاب شهری

انتقال فاضلاب شهری تصفیه‌شده به سفره‌های آب زیرزمینی برای تغذیه آبخوان‌های مختلف، تغذیه مصنوعی با فاضلاب تصفیه‌شده است. این روش در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند پس از ایجاد تصفیه اضافی بر روی سیال از طریق خاک موجب کنترل و پیشگیری از فرونشست زمین، کاهش تبخیر و تلفات، کاهش هزینه فرآیند تصفیه فاضلاب پیشرفته و پرهزینه و راهکاری مناسب جهت مقابله با چالش‌های کم‌آبی شود (Eslamian et al. 2009).

پساب تصفیه‌شده به‌عنوان منبع آب شامل دو مزیت است: ۱- عمدتاً متاثر از خشک‌سالی‌ها نبوده و منبعی مطمئن محسوب می‌شود. ۲- می‌تواند جایگزین مناسبی برای منابعی باشد که می‌بایست از طریق احداث سد یا تاسیسات انتقال آب با صرف هزینه زیاد و خسارت‌های زیست‌محیطی استحصال شود. امروزه استفاده از این منابع بازیافتی و تخصیص آن‌ها به تغذیه مصنوعی یک ضرورت در مدیریت آب محسوب می‌شود (Hasanpour et al. 2018).

پساب شهر کرمان از ابتدا تا سال ۲۰۱۸ به‌صورت طبیعی از طریق چاه‌های جذبی فاضلاب به سمت نقاط خروجی آبخوان و تصفیه‌خانه واقع در شهر کرمان در راستای شیب طبیعی زمین زه‌کشی گشته است. فرآیند تخلیه و زه‌کشی طبیعی فاضلاب شهری طی این سال‌ها موجب تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و کاهش خطرات ناشی از آلودگی منابع آب شده است. مجموع تغذیه ناشی از بارندگی، دبی طولانی‌مدت سیلاب (جدول ۲) و تغذیه از طریق زه‌کشی طبیعی فاضلاب تا سال ۲۰۱۸ شیب افت تراز سطح آب زیرزمینی را کاهش داده و در کاهش سرعت افت تراز و رسیدن آب به سنگ کف منطقه مورد مطالعه مؤثر بوده است. از سال ۲۰۱۸ به بعد، فاضلاب این شهر با حجم تقریبی ۲۴۱۳۸۰۰۰ مترمکعب در سال به شبکه خطوط و لوله‌های انتقال فاضلاب متصل شده و به حوضه‌های آبی مجاور انتقال داده می‌شود. متأسفانه انتقال فاضلاب طی این

سال‌ها و عدم زه‌کشی طبیعی موجب شده شیب افت تراز سطح آب در شمال آبخوان افزایش یابد. نتایج حاصل از بررسی تاثیر انتقال و عدم انتقال فاضلاب بر افت تراز آب زیرزمینی در ادامه ارائه شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- واسنجی حالت پایدار

شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی برای حالت پایدار یا ماندگار، به زمان وابسته نیست و با شرایط مرزی و اولیه ثابت انجام می‌شود. دوره پایدار متوسط تراز آب برای ۳ ماه اول سال ۲۰۰۲ در نظر گرفته شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده مقادیر قابل قبول میانگین مربع خطاها (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE^1) و خطای میانگین (ME^2) بعد از واسنجی برای حالت پایدار در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۷ میزان خطای واسنجی شده در هر چاه مشاهده‌ای را با نوارهای سبز و زرد و نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی در دوره پایدار نمایش می‌دهد. مطابق نقشه حداکثر تراز سطح آب ۱۸۸۶/۶ متر در جنوب شرقی آبخوان و حداقل آن، با تراز ۱۶۵۵ متر در شمال و شمال غربی نمایش داده شده است. نواحی شرق، جنوب و غرب آبخوان بازه تراز آب ۱۶۴۰ تا ۱۷۷۰ متر را در بر دارند.

۳-۲- واسنجی حالت ناپایدار

برای حالت ناپایدار یا غیرماندگار شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی به زمان وابسته بوده و شامل شرایط مرزی و اولیه وابسته به زمان است. دوره ناپایدار از ماه چهارم سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۹ بر روی ۸۰٪ داده‌ها در ۲۱۰ گام زمانی مدل‌سازی شد و از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ برای ۲۰٪ داده‌های موجود در ۶۰ گام زمانی صحت‌سنجی انجام شد. مقدار خطای RMSE، MAE و ME در مراحل واسنجی ناپایدار و صحت‌سنجی در محدوده قابل قبول است و نتایج مربوطه در جدول ۳ ارائه شده است. در این دوره به دلیل برخی خشکی چاه‌ها و یا عدم اندازه‌گیری سطح برخورد با آب، تعداد چاه‌ها از دوره پایدار محدودتر است.

¹ Mean Absolute Error

² Mean Error

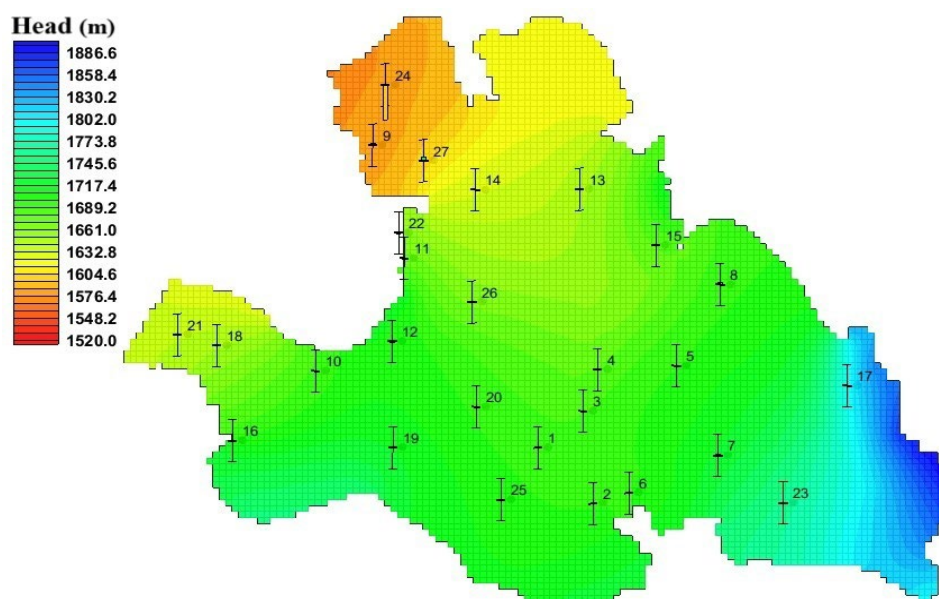


Fig. 7 Plan of Geographical location of observation wells and groundwater level zone in the Kerman Plain in steady period

شکل ۷ نقشه موقعیت جغرافیایی چاه‌های مشاهداتی و پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی دشت کرمان در دوره پایدار

جدول ۳ مقادیر خطای میانگین، میانگین خطای مطلق، میانگین مربع خطاها

Table 3 Result of Root Mean Square Error, Mean Absolute Error and Mean Error in 3 periods

Periods	RMSE	MAE	ME
Steady period	0.3	0.06	0.048
Unsteady period	0.59	0.21	-0.01
Validation period	0.06	0.54	0.61

۹ b مقادیر ۰/۰۱ تا ۰/۲۹۵ را شامل می‌شوند. بیشترین مقدار این ضریب در نواحی غرب و شمال غربی و کمترین مقدار آن در شرق، جنوب شرقی و محدوده کوچکی از غرب دیده می‌شود.

وضعیت کلی تراز آب زیرزمینی آبخوان مشاهداتی و مدل‌سازی شده توسط مدل Modflow طی سه دوره پایدار، ناپایدار و صحت‌سنجی (۲۰۲۴-۲۰۰۲) در نمودارهای شکل ۱۰ نمایش داده شده است. این نمودارها وضعیت بهترین انطباق داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده تراز آب، بازه‌ای که تراز آب در هر ناحیه شامل می‌شود را در ۴ چاه معرف شمال، جنوب، شرق و غرب آبخوان بیان می‌کنند. شماره هر چاه جهت ارائه موقعیت مکانی آن در نقشه مجاور نام آن آورده شده است. مطابق نمودار رسم شده از داده‌های

شکل ۸ موقعیت مکانی چاه‌های مشاهداتی موجود در دوره ناپایدار و نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. نقشه پهنه‌بندی پارامترهای هدایت هیدرولیکی (HK) و آبدهی ویژه (SY) واسنجی شده نیز در شکل ۹ a و b ارائه گردیده است. مطابق شکل ۹ a میزان ضریب هدایت هیدرولیکی بین کمترین مقدار ۲/۱۱ و بیشترین مقدار ۴۴/۱۲ متر بر روز متغیر است. بدین صورت که نواحی شمالی، غربی و به وسعت محدودی از شرق آبخوان به علت وجود بافت درشت‌دانه خاک و نفوذپذیری بالا از هدایت هیدرولیکی بالایی (بین ۳۰ تا ۴۴/۱۲ متر بر روز) برخوردار است. در مقابل نواحی مرکزی، جنوب و جنوب شرقی آبخوان با وجود رسوبات ریزدانه و نفوذپذیری کم حداقل مقادیر هدایت هیدرولیکی (بین ۲/۱۱ تا ۱۰ متر بر روز) را نمایش می‌دهد. ضریب واسنجی شده آبدهی ویژه در شکل

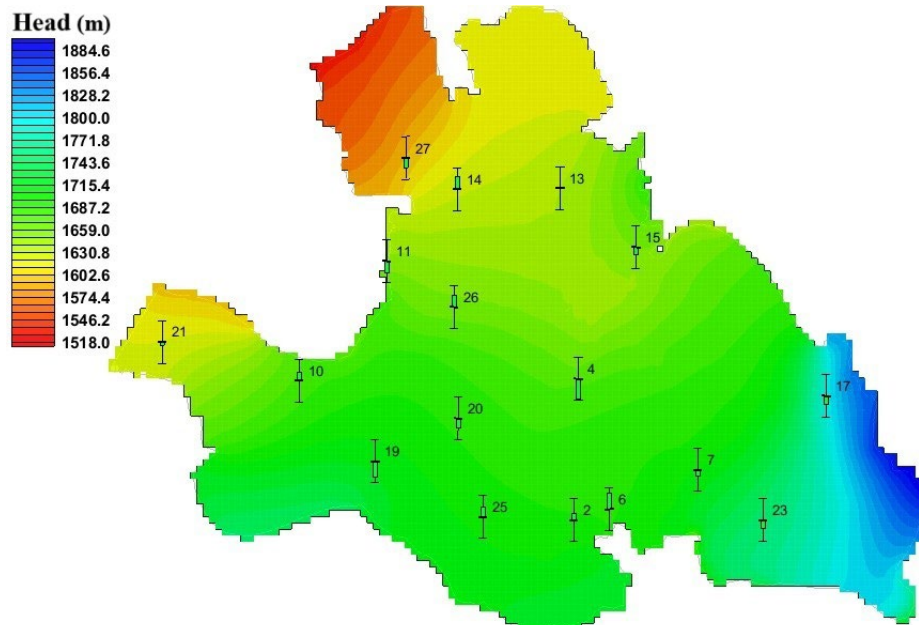


Fig. 8 Plan of Geographical location of observation wells and groundwater level zone in the Kerman Plain in Unsteady period

شکل ۸ نقشه موقعیت جغرافیایی چاه‌های مشاهداتی و پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی دشت کرمان در دوره ناپایدار

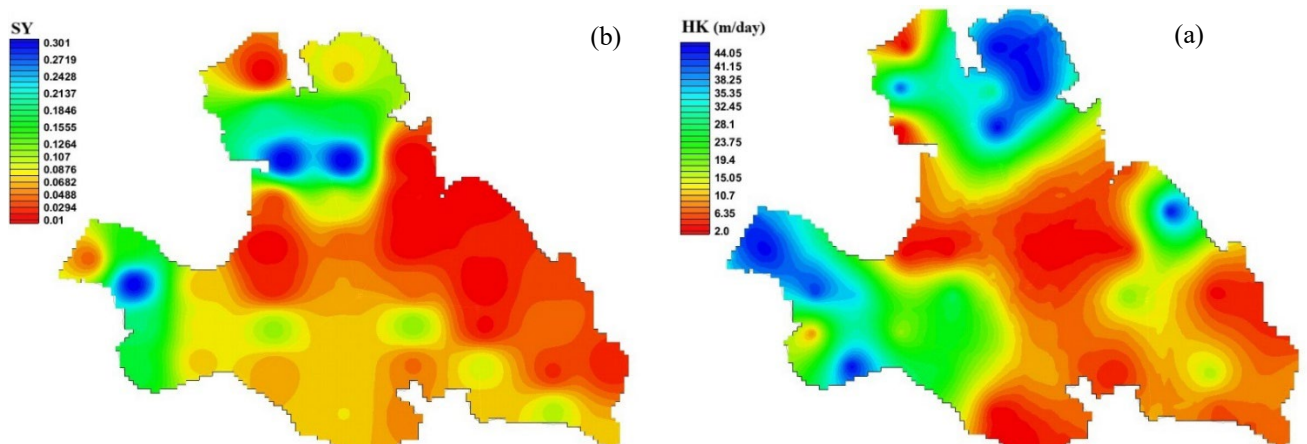


Fig. 9 Plan of (a) Hydraulic conductivity and (b) Specific Yield zones in the Kerman Aquifer in Unsteady period

شکل ۹ نقشه پهنه‌بندی (a) هدایت هیدرولیکی و (b) آبدهی ویژه آبخوان کرمان در دوره ناپایدار

چاه نوذری واقع در شمال آبخوان از ۱۵۹۳ تا ۱۶۰۶ متر نشان می‌دهد. با بررسی افت تراز در دوره ۶ ساله صحت‌سنجی در این چاه‌ها، مشخص شد که بیشترین افت در چاه نوذری رخ داده است.

تراز آب چاه بلبلوئیه واقع در شرق آبخوان حداکثر تراز آب در بازه ۱۸۰۰ تا ۱۸۱۵ متر قرار دارد. چاه سعدی واقع در غرب آبخوان از ۱۶۱۰ تا ۱۶۴۲ متر و چاه جاده جویاری، واقع در ناحیه جنوبی آبخوان تراز آب این ناحیه را در محدوده ۱۶۹۱ تا ۱۶۹۷ متر بیان می‌کند. حداقل تراز را

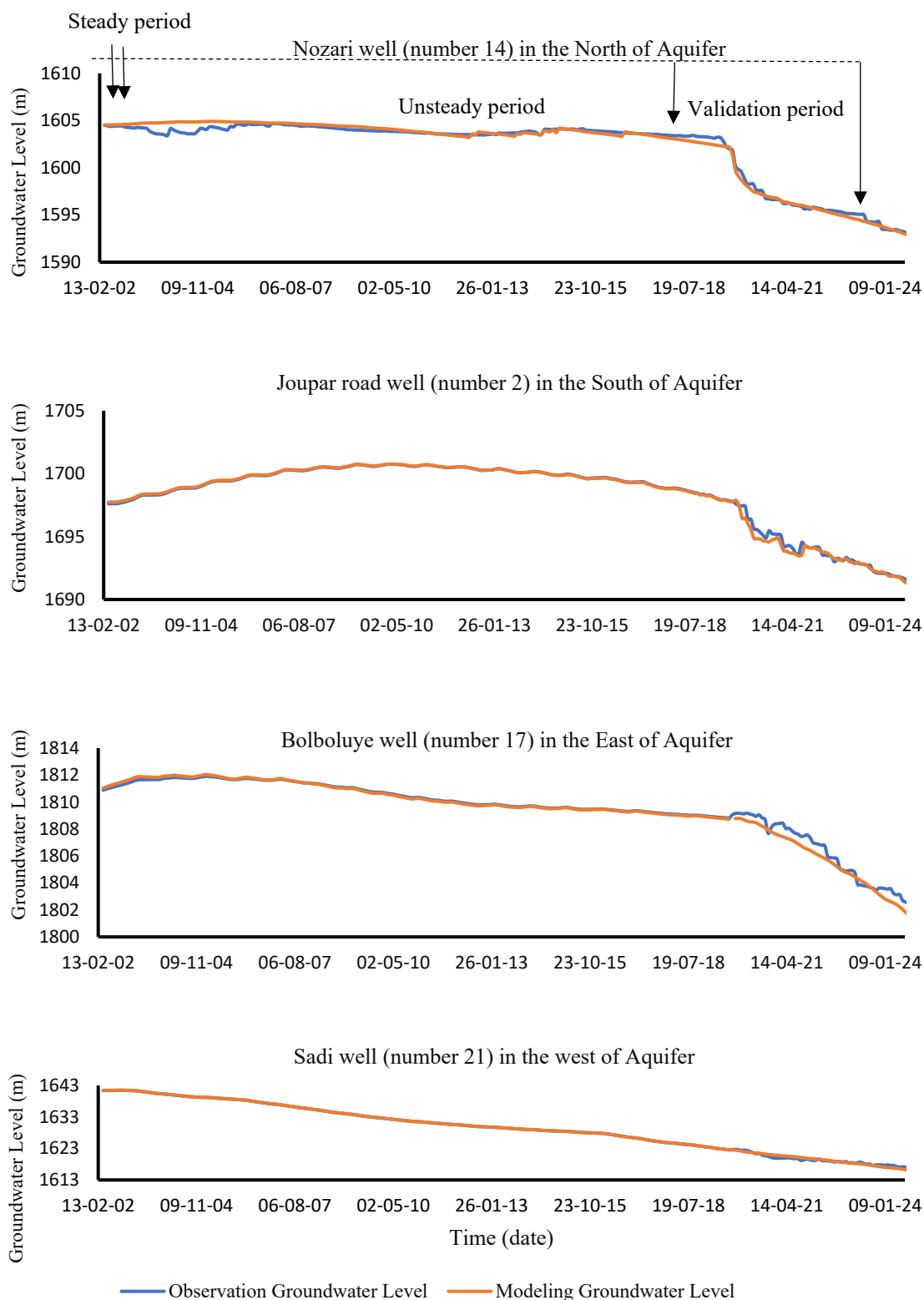


Fig. 10 Chart of Observation and Modeling Groundwater Level 4 wells in the North, South, East and West of Aquifer

شکل ۱۰ نمودار تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و مدل‌سازی شده ۴ چاه معرف واقع در شمال، جنوب، شرق و غرب آبخوان

۳-۳- پیش‌بینی ۱۰ساله تراز آب زیرزمینی و بررسی میزان افت

پس از مدل‌سازی ۲۲ ساله تراز آب زیرزمینی، وضعیت آینده آبخوان برای یک دوره ۱۰ ساله (اکتبر ۲۰۲۴ تا اکتبر ۲۰۳۴) پیش‌بینی شد. **شکل ۱۱** نمودارهای افت تراز آب زیرزمینی مدل‌سازی شده را از ابتدای دوره پایدار تا انتهای دوره صحت‌سنجی و دوره‌ی ۱۰ ساله پیش‌بینی نمایش می‌دهد. مطابق این نمودارها حداکثر افت در دوره ۲۲ ساله مدل‌سازی محدوده غربی و شرقی آبخوان برای هر سال به‌طور متوسط ۱/۲۳ متر رخ داده و حداقل میزان افت را مرکز و جنوب آبخوان به‌طور متوسط ۰/۲۷ متر طی هر سال تجربه کرده است. جهت پیش‌بینی و بررسی وضعیت آتی آبخوان شرایط پایدار تغذیه و تخلیه از چاه‌های بهره‌برداري منطقه بدون تغییرات و منطبق با آخرین گام زمانی در دوره صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. نتایج پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی برای یک دوره ۱۰ ساله نشان داد حداکثر میزان افت تراز آب زیرزمینی در شرق و جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه در هر سال به‌طور متوسط ۲ متر و حداقل آن سالانه ۰/۷۸ متر در بخش مرکزی، شمال شرقی و جنوب

آبخوان اتفاق خواهد افتاد. پهنه‌بندی دوره مدل‌سازی و دوره پیش‌بینی میزان افت تراز آب زیرزمینی دشت کرمان جهت نمایش و مقایسه بهتر وضعیت گذشته و آینده آبخوان در **شکل ۱۲** ارائه شده است.

۳-۴- پیش‌بینی و مقایسه میزان افت تراز آب زیرزمینی در شرایط وجود یا عدم وجود زه‌کشی طبیعی فاضلاب شهر کرمان توسط چاه‌های جذبی

برگشت فاضلاب از طریق چاه‌های جذبی و زه‌کشی طبیعی فاضلاب، همچنین استفاده از پساب تصفیه‌شده جهت تغذیه مصنوعی دشت‌های ممنوعه‌ای که با مشکلات بحران آب مواجه هستند، راهکاری کم‌هزینه، کارآمد با بازدهی بالا و روش مدیریتی مناسب و آگاهانه در بهبود وضعیت بحرانی آبخوان شناخته‌شده است. از دیرباز تا سال ۲۰۱۸ شهر کرمان از جمله شهرهایی بوده که فاضلاب آن از طریق چاه‌های جذبی به‌صورت طبیعی به داخل زمین زه‌کشی گشته است. حرکت طبیعی فاضلاب زه‌کشی شده و جریان آب زیرزمینی طی این سال‌ها به سمت شمال آبخوان و چاه نوذری (شماره ۱۴) بوده است.

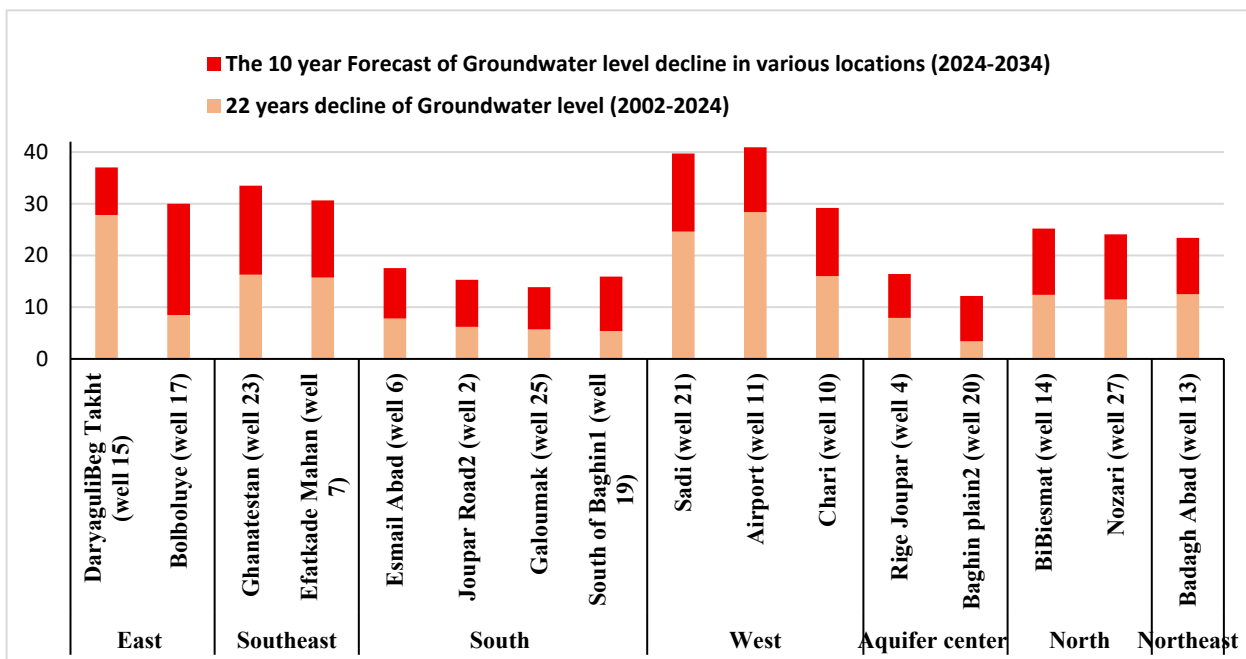


Fig. 11 Chart of 10 years forecast and decline of water Groundwater Level in Keramn plain Aquifer

شکل ۱۱ نمودار پیش‌بینی ۱۰ ساله و افت تراز آب زیرزمینی ۲۲ ساله در آبخوان دشت کرمان

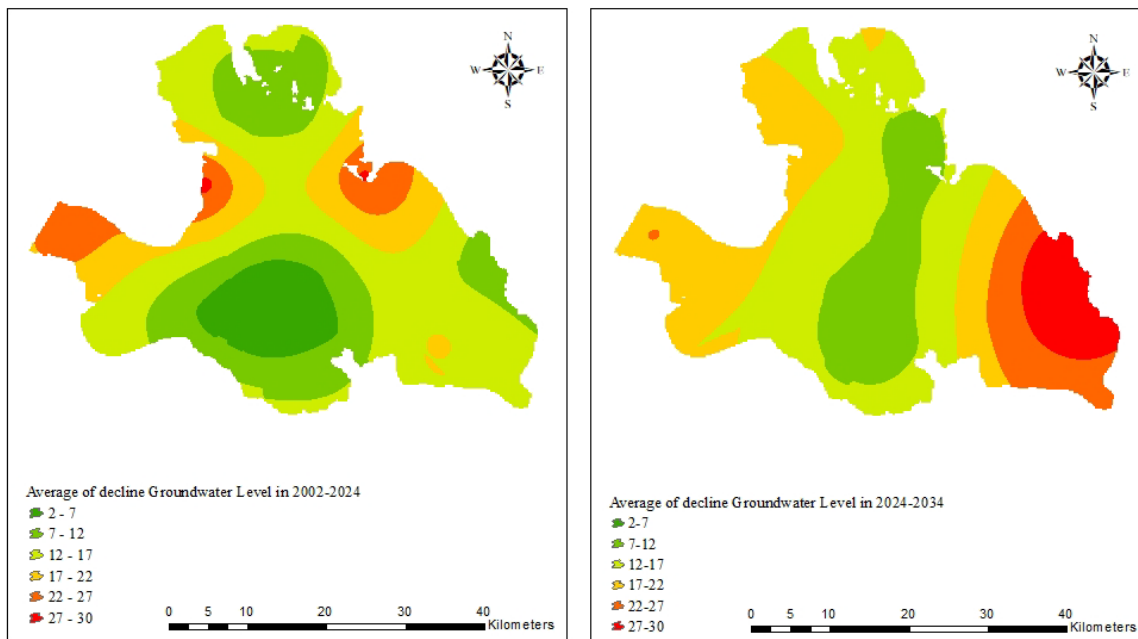


Fig. 12 Comparison of zoning for the observation period and the forecasting of Groundwater Level decline in the Kerman Plain

شکل ۱۲ مقایسه پهنه‌بندی دوره مدل‌سازی و پیش‌بینی میزان افت تراز آب زیرزمینی دشت کرمان

سال اخیر بوده است. شکل ۱۳ روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و ارتباط آن با تراز متوسط سنگ‌بستر را تحت دو سناریو متفاوت در دوره‌های گذشته و آینده نشان می‌دهد.

شکل ۱۳ a رفتار طولانی‌مدت تراز آب زیرزمینی را در دوره ۲۲ ساله (۲۰۰۲-۲۰۲۴) نمایش می‌دهد. تغییر رفتار ناگهانی تراز آب از سال ۲۰۱۸ (سال انتقال فاضلاب) با شیب افت افزایشی موجب شد تا جهت بررسی دقیق‌تر رفتار تراز آب نموداری با شیب افت قبل از سال ۲۰۱۸ (نمودار نارنجی) و بعد از آن (نمودار زرد) ترسیم شود.

قسمت بزرگ‌نمایی شده پایین شکل ۱۳ b روند پیش‌بینی شده را تحت این دو سناریو با شیب‌های متفاوت به تصویر کشیده است. خط سبز نمایش داده شده در این شکل متوسط تراز سنگ‌بستر منطقه را با مقدار ۱۵۷۵ متر از سطح دریا مشخص می‌کند. در شرایط طبیعی، در صورتی که زه‌کشی طبیعی فاضلاب کرمان ادامه پیدا کرده بود فاصله زمانی رسیدن آب زیرزمینی منطقه و چاه موردنظر به سنگ کف نامحدود و در فاصله‌ی زمانی طولانی اتفاق می‌افتاد (نمودار نارنجی). اما در حال حاضر، با عنایت

از سال ۲۰۱۸ به بعد فاضلاب تصفیه شده این شهر در شرق دشت ممنوعه کرمان به سیستم خطوط جمع‌آوری فاضلاب متصل شده و به حوضه‌های مجاور انتقال می‌یابد. در حال حاضر این انتقال فاضلاب موجب افزایش شیب افت تراز آب زیرزمینی شهر کرمان و ناحیه شمالی آبخوان شده است. این تغییرات در شکل ۱۰ نمودار مربوط به چاه نودری قابل مشاهده است. در ادامه به بررسی و پیش‌بینی تاثیر تغذیه و عدم تغذیه ناشی از فاضلاب بر میزان افت تراز آب زیرزمینی دشت پرداخته شده است. بدین منظور، شیب نمودار تراز آب زیرزمینی چاه نودری، چاه معرف شمال آبخوان، یک بار برای داده‌های مشاهداتی قبل از سال ۲۰۱۸ باوجود زه‌کشی طبیعی و بار دیگر در شرایط عدم وجود زه‌کشی طبیعی از سال ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۴ محاسبه شد.

همچنین، با حفظ شیب افت تراز، پیش‌بینی در هر دو شرایط فوق تا رسیدن به متوسط تراز سنگ کف منطقه انجام شد. نتایج محاسبه شیب نشان داد افت تراز در شرایط وجود زه‌کشی طبیعی ۱/۵٪ و در شرایط انتقال فاضلاب ۱۱٪ در هر ماه رخ داده که این انتقال فاضلاب و افزایش شیب، عامل افت تراز ناگهانی آب زیرزمینی دشت طی ۷

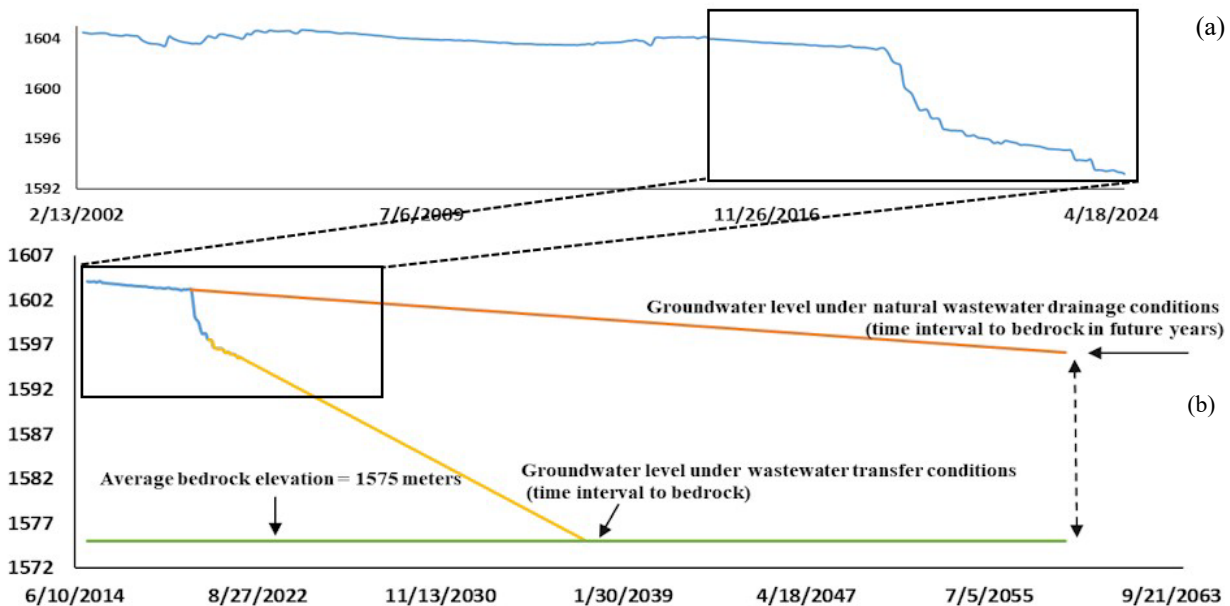


Fig. 13 Chart of predicting and comparing the amount of groundwater level decline under conditions of wastewater transfer and non-transfer in the city of Kerman, based on water level data from the Nozari well

شکل ۱۳ نمودار پیش‌بینی و مقایسه میزان افت تراز آب زیرزمینی در شرایط انتقال و عدم انتقال فاضلاب شهر کرمان، براساس داده‌های تراز آب چاه نوذری

جذبی، از عوامل مؤثر در کاهش شیب افت تراز آب زیرزمینی در محدوده شهر کرمان و سایر مناطق است. این عامل در شرایط زه‌کشی طبیعی فاضلاب شیب افت تراز آب زیرزمینی را ماهانه تا ۷/۴٪ کاهش می‌دهد و زمان رسیدن آب زیرزمینی شهر کرمان به سنگ کف منطقه مورد مطالعه را تا مدت طولانی به تأخیر خواهد انداخت.

اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر کرمان و انتقال آن به خارج از محدوده از سال ۲۰۱۸، موجب افزایش شیب افت تراز آب به ۱۱٪ در ماه شده است. محاسبات نشان می‌دهد چاه نوذری (شماره ۱۴) در شمال دشت طی ۱۲ سال آینده به سنگ کف رسیده و چاه‌های منطقه خشک خواهند شد. همان‌گونه که ذکر شد، آبخوان دشت کرمان از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشکی است که منبع اصلی تامین آب کشاورزی آن، ذخایر آب زیرزمینی است.

با علم به این موضوع که هرچه زمان رسیدن به سنگ کف کاهش یابد، چاه‌های بهره‌برداری از آبخوان به خطر افتاده و در زمانی نه‌چندان دور خشک و بی‌آب خواهند شد. لذا، خشکی چاه‌ها و فقدان این منبع ارزشمند می‌تواند

به‌وجود شرایط انتقال فاضلاب و عدم تغذیه آبخوان زمان رسیدن به سنگ کف ۱۲ سال آینده (سال ۲۰۳۷) پیش‌بینی خواهد شد (نمودار زرد). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، اختلاف زمانی که تراز سطح آب زیرزمینی در دو شرایط فوق برابر متوسط تراز سنگ کف منطقه مورد مطالعه شود، تاثیر تغذیه ناشی از فاضلاب و عدم تغذیه را مشخص می‌کند. همچنین این تحلیل بیانگر اثرگذاری مدیریت فاضلاب بر افت تراز آب زیرزمینی و زمان رسیدن به سنگ کف در آینده است.

۴- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی ۲۲ سال اخیر نشان داد حداکثر افت در آبخوان دشت کرمان در محدوده غربی و شرقی به‌طور متوسط در هر سال ۱/۲۳ متر رخ داده است. همچنین مطابق پیش‌بینی وضعیت ۱۰ سال آتی آبخوان حداکثر میزان افت تراز آب زیرزمینی در شرق و جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه به‌طور متوسط ۲ متر در سال اتفاق خواهد افتاد. مطابق بررسی انجام‌شده زه‌کشی طبیعی فاضلاب توسط چاه‌های

محدوده شهر و سایر نقاطی که شرایط مشابه دارند، توصیه می‌شود. این روش راهکار مدیریتی مناسب و کارآمد در مواجهه با بحران خشک‌سالی و کم‌آبی شمرده می‌شود.

کشاورزی منطقه را به‌شدت تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، جهت مقابله با وضعیت بحرانی حال حاضر و آینده این آبخوان تغذیه با ورود فاضلاب و پساب به‌صورت طبیعی از طریق چاه‌های جذبی و مصنوعی به سفره‌های آب زیرزمینی

5- List of symbols

h (m)	Hydraulic load
t (s)	Time
k ($\frac{m}{s}$)	Hydraulic conductivity coefficient
q_s ($\frac{m^3}{s}$)	Water withdrawn from a unit volume of aquifer
S_s ($\frac{1}{m}$)	Hydraulic load
b (m)	Aquifer thickness
T ($\frac{m^2}{day}$)	Soil water transport coefficient
E ($\frac{mm}{month}$)	Potential evapotranspiration
C	Thermal penetration index
P ($\frac{mm}{month}$)	Rainfall
F ($\frac{mm}{month}$)	Infiltration
h_m	Modeled data
h_s	Observational data
n	Number of data
ME	Mean error
MAE	Mean absolute error
$RMSE$	Root mean square error

Acknowledgments

We would like to express our deepest gratitude and appreciation for the cooperation of the Kerman Regional Water Organization in providing the information required for this research.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, (M. B. R.); Methodology (M. B. R. and B. M.); Software (B. M., M. B. R. and M. Z. K.); data analysis, (B. M.); Writing-Original Draft Preparation (B. M.); Writing-Review and Editing, (B. M., M. B. R., M. Z. K.); Supervision, (M. B. R., M. Z. K.). All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No financial support was received from any organization for this research.

Data Availability Statement

Data Availability Statement The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon request.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anderson M. P., Woessner W. W. 1995. APPLIED GROUNDWATER MODELING, Simulation of Flow and Advective Transport (Second Edition), pp. 68.
- Bahir M., Ouhamdouch S., Carreira M. 2018. Isotopic and geochemical methods for studying water-rock interaction and recharge mode: application to the Cenomanian-Turonian and Plio-Quaternary aquifers of Essaouira Basin, Morocco, Marine and Freshwater Research, 69(8): 1290-1300.
- Bahir M., Ouazar D., Goumih A., Ouhamdouch S. 2019. Evolution of the chemical and isotopic composition of groundwater under a semiarid climate; the case of the Cenomano-Turonian aquifer within the Essaouira basin (Morocco), Environmental Earth Sciences, 78:353. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8349-2>
- Baki S., Mohamed Hilali M., Kacimi I., Kassou N., Nouiyti N., Bahassi A. 2017. Assessment of Groundwater Intrinsic Vulnerability to Pollution in the Pre-Saharan Areas - The Case of the Tafilalet Plain (Southeast Morocco). Procedia Earth and Planetary Science. Volume 17, pp. 590-593.
- Bejranonda W., Koch M., Koontanakulvong S. 2009. Improving traditional conjunctive use management with surface water and groundwater dynamic interactions modeling. In *International Symposium on Efficient Groundwater Resources Management (IGS-TH 2009)*, Bangkok, Thailand.
- Carreira P. M., Bahir M., Salah O. 2018. Tracing salinization processes in coastal aquifers using an isotopic and geochemical approach: comparative studies in western Morocco and southwest Portugal. *Hydrogeol J* 26, pp. 2595-2615. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1815-1>
- Chitsazan M., Kashkuli H. 2002. Groundwater modeling and solving hydrogeological problems, Shahid Chamran University of Ahvaz, First Edition, (In Persian).
- Dafny E., Burg A., Gvirtzman H. 2010. Effects of

- Karst and geological structure on groundwater flow: The case of Yarqon-Taninim Aquifer, Israel. *Journal of Hydrology*. Volume 389(3-4), pp. 260-275.
- Doherty, J. 2016. *Model-independent parameter estimation user manual Part I: PEST, SENSAN and global optimisers*. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia. 390.
- Hasanpour M., Khozaymehnezhad H. 2018. Placement of nutrient wells for artificial nutrition and improvement of aquifer quality in Birjand plain using wastewater treated wastewater. *Journal of Research in Environmental Health*, Volume 4(3), pp. 215-226. <https://doi.org/10.22038/jreh.2018.33951.1235> (In Persian).
- Islamian S. S., Hedayat E., Tarkesh Esfahani S. 2009. Reuse of treated wastewater through groundwater recharge to sustainably increase water Resource, First International Conference on Water Resources with a Regional Approach, Shahrood. <https://civilica.com/doc/83167> (In Persian).
- Jafari Gadeneh M., Salajegheh A., Malekian A. 2021. Investigating the Impact of Different Climate Change Scenarios on Groundwater Fluctuations in Arid and Semi-Arid Regions (Case Study: Kerman Plain), *Journal of Irrigation and Water Engineering*, Volume 11, No 44(4), pp. 252-275. [10.22125/iwe.2021.133762](https://doi.org/10.22125/iwe.2021.133762) (In Persian).
- Kholghi M. 2001. *Mathematical Models in Groundwater Flow: From Theory to Application*, Tehran University Press, Department of Irrigation Engineering, Tehran, Iran, (In Persian).
- Koch M., Arlai P., Lukjan A. 2012. Modeling Investigation on the future Permissible Yield in upper Chiang Rai Aquifers System, *Procedia Engineering*, 32, pp. 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1238>
- Kumar Behera A., Mohan Pradhan R., Kumar S., Chakrapani G., Kumar P. 2022. "Assessment of Groundwater Flow Dynamics Using MODFLOW in Shallow Aquifer System of Mahanadi Delta (East Coast), India" *Water*, 14:611.
- Lyazidi R., Abdelbaset Hessane M., Filali Moutei J., Bahir M. 2020. Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the visual MODFLOW techniques in groundwater modeling system, *Groundwater for Sustainable Development*. 11. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100471>
- Nouayti N., Nouayti A., Khattach D., Hilali M. 2020. Geostatistical Approach for Evaluating Heavy Metal Contamination in Groundwater in the High Ziz Basin (Morocco), 4th Edition of International Conference on Geo-IT and Water Resources 2020, Geo-IT and Water Resources 2020, DOI:[10.1145/3399205.3399249](https://doi.org/10.1145/3399205.3399249)
- Rahnama M. B., Sohrabi N., Barani Gh. A. 2020. Investigation of Groundwater Level Variations in Shahdad Aquifer Using Groundwater Modeling System (GMS) Software, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, Volume 14, No 5. pp. 1650-1663.(In Persian)
- Reyhani E. 2023. *Modeling the Impact Of Manangement Scenario On the Kashan Aquifer Using Mathematical Model of Modflow and Seawat*, *Journal of Ecohydrology*, 10(1): pp. 17-32.
- Sabah Nia D., Sadeghi-Lari A. 2024. Quantitative Modeling of Groundwater Using GMS-MODFLOW (Case Study: Shamil Aquifer in the Hormozgan Province), *Hydrogeology*, Volume 9, No 1. pp.71-85. [10.22034/hydro.2024.62911.1318](https://doi.org/10.22034/hydro.2024.62911.1318) (In Persian).
- Szucs P., Szekely F., Zakanyi, B. 2013. *Comparison of analytical and numerical approaches for simulating groundwater flow to multi screen wells*. *Carpathian J. Earth Environ. Sci*, 2013. 8(2): pp. 69-76.
- Vafaei F., Abolghasemi H. 2013. Investigation of changes in sea level and groundwater level on salinity advance in open coastal aquifers, First National Conference on Environment, Energy and Biodefense, Tehran, <https://civilica.com/doc/264857> (In Persian).
- Zamzam A., Rahnama M. B. 2012. Evaluation of Groundwater Quality Using the MT3DMS Mathematical Model (Case Study: Rafsanjan Plain), *Iranian Water Research Journal*, Volume 1, No 6. <https://civilica.com/doc/1379143> (In Persian).