



Quantitative assessment of groundwater resources and their relationship with land use changes and climatic factors (Case study: Chamchamal plain)

Mina Nikzad^{1✉}, Hamidreza Moradi², and Khalil Jalili³

1. Corresponding Author, Department of Watershed management, Faculty of natural resources and marine sciences, Tarbiat modares university, Noor, Iran. E-mail: minanikzad@ymail.com
2. Department of watershed management, Faculty of natural resources and marine sciences, Tarbiat modares university, Noor, Iran. E-mail: hmradi@modares.ac.ir
3. Department of Hydraulics and water resources, Academic center for education, Culture and research (ACECR), Kermanshah, Iran. E-mail: jalili@acecr.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 29 March 2025
Received in revised form 02 June 2025
Accepted 05 July 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:

groundwater level,
supervised classification,
drought index,
geostatistics,
Chamchamal plain.

ABSTRACT

Objective The purpose of this study is to analyze the spatiotemporal pattern of groundwater levels using geostatistical methods, investigate the impact of land-use changes on groundwater level fluctuations, and examine hydrological factors (including meteorological drought and groundwater drought) influencing groundwater level variations.

Method: In this study, land use changes and climatic variations were evaluated as the most important human and environmental factors in groundwater level decline, and their relationship with groundwater levels in Chamchamal Plain was examined over a 25-year period. For this purpose, land use maps for three time periods (1990, 2003, and 2015) were obtained from Landsat TM, ETM+, and OLI satellite imagery using the Maximum Likelihood Classification method. Water level data from 21 piezometric wells were interpolated using Ordinary Kriging (OK) with minimum RMSE and MBE. The SPI and GRI indices were used to determine drought and wet periods.

Results: According to the results, agricultural, residential, and industrial areas increased by 2 times, more than 2 times, and more than 8 times, respectively. The maximum groundwater level decline was estimated at 22 meters in the southwestern part of the plain. The water table showed a decreasing trend, with an average decline of about 7 meters across the region. Pearson correlation coefficient between average groundwater level changes and average rainfall indicated that rainfall and groundwater level fluctuations occurred simultaneously with a 2-month lag.

Conclusions: Excessive groundwater extraction during droughts has intensified the decline and prevented recovery during wet periods, resulting in a persistent decreasing trend.

Cite this article: Nikzad, M., Moradi, H., & Jalili, Kh. (2025). Quantitative assessment of groundwater resources and their relationship with land use changes and climatic factors (Case study: Chamchamal plain). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (3), 92-113. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12081.1164>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12081.1164>

Publisher: Razi University.

Introduction

Groundwater resources are known as valuable environmental sources in arid and semi-arid regions. Today, due to the water shortage crisis, the causes of groundwater depletion and its relationship with environmental changes have been studied. Quantitative assessment of groundwater resources and proper understanding of their relationship with land use changes is essential for planning, managing, and sustainable development of water resources in arid and semi-arid regions. Considering the expansion of urban areas, agriculture, and water-intensive industries and their effects on groundwater levels, this research was conducted to analyze the spatial and temporal patterns of groundwater levels using geostatistical methods, investigate temporal and spatial changes in land use through satellite image processing and their impact on groundwater level fluctuations, and examine hydrological factors including meteorological drought (SPI) and groundwater drought (GRI) and their effects on groundwater levels.

Method

In this study, the impact of land use on the quantity of surface and groundwater resources in the Chamchamal plain of Kermanshah province was examined over a 25-year statistical period. To prepare the land use map of the Chamchamal plain, two methods were used: pixel-based classification and object-based classification. The trend of fluctuations in surface and groundwater resources was analyzed on a monthly, seasonal, and annual scale using the non-parametric Mann-Kendall test and the sen's slope estimator. Consequently, the hydrograph representative of the Chamchamal plain aquifer was drawn up. Different interpolation methods were used for estimating the groundwater level, including ordinary kriging (OK), inverse distance weighting (IDW) with powers ranging from one to five, and co-kriging (CK). The variogram with a Gaussian model was chosen as the best-fit model for the spatial structure of the data, and the kriging method was selected as the most suitable method for estimating groundwater level. Groundwater level mapping was performed annually using the kriging method for the study period. The trend of fluctuations in hydrological factors such as precipitation was examined annually using the non-parametric Mann-Kendall test and the sen's slope estimator. The periods of drought and wetness in the region were determined using the SPI and GRI indices. To investigate the effect of land use on surface and groundwater resources in the study area, a combination of the land use change map and the map of the quantitative changes in groundwater level was utilized.

Results

Based on the results of this study, the area of agricultural, residential, and industrial land has increased, respectively, twofold, more than twofold, and more than eightfold. The decline in groundwater levels in most areas of the plain was estimated to be a maximum of 22 meters in the southwestern part of the plain. The water table level in the region is on a downward trend, with an average drop in groundwater levels of about seven meters. Considering the Pearson correlation coefficient between the average changes in water table levels and average rainfall, the overall trend of the fluctuations in the two curves of rainfall and the groundwater level of the plain has occurred simultaneously but with a two-month delay.

Conclusions

Excessive exploitation of groundwater resources during droughts has intensified the decline and has resulted in a lasting downward trend that cannot be compensated for even during wet periods. If the current trend continues, it could lead the plain to face challenges

such as land subsidence, increased depletion of groundwater, and consequently a further decline in the water table level along with a reduction in the quality of groundwater resources.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Not applicable

Acknowledgements

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

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



ارزیابی کمی منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: دشت چمچمال)

مینا نیکزاد^۱، حمیدرضا مرادی^۲، خلیل جلیلی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. minanikzad@ymail.com

۲. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. hmradi@modares.ac.ir

۳. گروه هیدرولیک و منابع آب، جهاد دانشگاهی، کرمانشاه، ایران. jalili@acecr.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: سطح آب زیرزمینی، طبقه‌بندی نظارت شده، شاخص خشکسالی، زمین آمار، دشت بیستون.	هدف: هدف این مطالعه تجزیه و تحلیل الگوی فضایی و زمانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، بررسی روند تغییرات زمانی و مکانی کاربری اراضی و تأثیر آن بر میزان نوسانات تراز آب زیرزمینی و بررسی عوامل هیدرولوژیکی نظیر خشکسالی هواشناسی و زیرزمینی و تأثیر این عوامل بر سطح آب زیرزمینی است. روش پژوهش: در این تحقیق تغییرات کاربری اراضی و نوسانات اقلیمی به عنوان مهم‌ترین عوامل انسانی و محیطی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی ارزیابی و سپس ارتباط این عوامل با سطح آب زیرزمینی دشت بیستون در یک دوره ۲۵ ساله آماری بررسی شد. برای این منظور نقشه کاربری اراضی در سه دوره زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵، از تصاویر سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره لندست و با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال به دست آمد. آمار سطح ایستابی ۲۱ حلقه چاه پیزومتري، با استفاده از روش زمین‌آماري کريجينگ معمولی (OK) با کمترین میزان RMSE و MBE استفاده شد. برای تعیین دوره‌های خشکسالی و ترسالی از شاخص SPI و GRI استفاده شد. برای بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات کاربری اراضی، از هم‌پوشانی و تلفیق نقشه تغییرات کاربری اراضی در دوره آماری مورد مطالعه و نقشه تغییرات کمی افت سطح ایستابی در همین سال‌ها استفاده شد. یافته‌ها: بر اساس نتایج این مطالعه وسعت اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعتی به ترتیب دوبرابر، بیش از دوبرابر و بیش از هشت برابر شده است. همچنین افت سطح آب زیرزمینی در بیشتر نقاط دشت و بیشینه آن معادل ۲۲ متر در قسمت جنوب غربی دشت برآورد شده است. سطح تراز آب در منطقه روند نزولی داشته و متوسط افت تراز آب زیرزمینی در سطح منطقه حدود هفت متر برآورد شده است. با توجه به ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های میانگین تغییرات سطح ایستابی و میانگین بارندگی، روند کلی فراز و نشیب‌های دو منحنی بارندگی و تراز آبخوان دشت هم‌زمان و با تأخیر دوماهه اتفاق افتاده است. نتیجه‌گیری: بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در هنگام وقوع خشکسالی میزان افت را تشدید نموده و موجب شده است تا در دوره ترسالی هم جبران نشود و روند نزولی پایداری پدید آید.

استناد: نیکزاد، مینا؛ مرادی، حمیدرضا؛ و جلیلی، خلیل. (۱۴۰۴). ارزیابی کمی منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: دشت چمچمال). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۳)، ۹۲-۱۱۳.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12081.1164>



مقدمه

منابع آب های زیرزمینی به عنوان منبع ارزشمند محیط زیستی در مناطق خشک و نیمه خشک، شناخته شده و حیات حدود ۲ میلیارد نفر در سراسر دنیا به این منابع وابسته است (برنامه ارزیابی جهانی آب سازمان ملل، ۲۰۱۵). اما امروزه به دلیل بحران کمبود آب، بررسی علت کاهش منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرات زیست محیطی بیش از هر زمان دیگری توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است (لی و همکاران، ۲۰۰۷). در مناطقی که آب های زیرزمینی تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و تغییرات آب و هوایی قرار می گیرند، مدیریت پایدار آب های زیرزمینی چالش بر انگیز و مهم تلقی می شود (کارمونا و همکاران، ۲۰۱۳). لذا داشتن درک دقیقی از تغییرات مکانی و زمانی آب های زیرزمینی و کاربری اراضی برای آگاهی از وضعیت منابع آبی منطقه و اطمینان از پایداری اکوسیستم و مدیریت جامع آنها ضروری است (شیائو و همکاران، ۲۰۰۶). در بسیاری از مطالعات اثر تغییر کاربری و تغییرات آب و هوایی بر روی منابع آب های زیرزمینی نادیده گرفته شده و بیشتر بر روی منابع آب های سطحی پراخته شده است (گلیسون و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال مطالعات اخیر نشان داده است که منابع آب های زیرزمینی نیز به علت تغییرات کاربری اراضی آسیب پذیر هستند (ژو و همکاران، ۲۰۱۲؛ امینی و حسامی، ۲۰۱۷؛ و نارانی و همکاران، ۲۰۱۷) گسترش شهرنشینی و صنعتی شدن، توسعه زمین های کشاورزی، جنگل زدایی، ساخت جاده نمونه هایی از فعالیت های انسانی هستند که منجر به تغییرات زیست محیطی و تغییرات اقلیمی می شوند و منابع طبیعی جهان از جمله آب های زیرزمینی را متأثر می کنند (دنگ و شانگوان، ۲۰۱۶؛ و کیلر و پولاسکی، ۲۰۱۴). از این رو ارزیابی کمیت منابع آب زیرزمینی و درک صحیح رابطه آن با تغییرات کاربری اراضی برای برنامه ریزی، مدیریت و توسعه پایدار منابع آب در در مناطق خشک و نیمه خشک ضروری است (شیه دک و همکاران، ۲۰۰۸؛ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

۱. مطالعات داخلی

امرای (۱۴۰۱) در مطالعه ای با عنوان آشکارسازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر افت سطح ایستابی آبخوان دشت بیرجند دریافتند که سطح ایستابی این منطقه در دوره ۱۳۷۰-۱۳۹۵ با شیب سالانه ۴۷ سانتیمتر کاهش یافته است. پیش بینی ها نشان می دهد تحت سناریوهای تغییر اقلیم، سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۶۵ بین ۱۰ تا ۱۳ متر دیگر افت خواهد کرد که عمدتاً ناشی از کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق است. آریا صدر و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز چم انجیر نشان دادند که افزایش برداشت از چاه ها، کاهش بارندگی و افزایش دما منجر به کاهش سطح آب های زیرزمینی و افزایش شاخص های شیمیایی کیفیت آب مانند SAR و Na شده است. نتایج پیش بینی ها حاکی از کاهش کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در آینده است که لزوم مدیریت یکپارچه منابع آب، اصلاح الگوی کشت و بهبود راندمان آبیاری را ضروری می سازد.

1. WWAP
2. Lee et al
3. Carmona et al
4. Xiao et al
5. Gleeson et al
6. Zhou et al
7. Deng & Shangguan
8. Keeler & Polasky
9. Schiedek et al
10. Wang et al

عمادالدین و نظری گزیک (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان برآورد میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی، با به کارگیری داده‌های ماهواره Sentinel-1A طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ به بررسی نرخ فرونشست در این منطقه پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد در طول دوره مطالعاتی، حدود ۶۴ سانتی‌متر فرونشست در دشت مشهد رخ داده است. پژوهشگران با تحلیل داده‌های چاه‌های پیژومتری در بازه زمانی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۸ دریافتند که افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی به همراه با عوامل دیگری همچون کاهش بارندگی، خشکسالی، کشت محصولات آب‌بر مانند برنج و وجود بافت خاک ریزدانه در مناطقی با ضخامت زیاد آبرفت، از مهم‌ترین دلایل وقوع فرونشست در این منطقه بوده‌اند. یافته‌ها حاکی از آن است که بیشترین نرخ فرونشست دقیقاً در مناطقی رخ داده که با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه بوده است.

اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با عنوان بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS در بخشی از شهرستان سراب، با استفاده از روش تداخل سنجی راداری SBAS و تصاویر سنتینل ۱ به بررسی جابه‌جایی‌های سطح زمین پرداختند. این مطالعه باهدف تحلیل ارتباط بین فرونشست زمین، تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و رویداد زلزله آبان ۱۳۹۸ انجام شد. نتایج نشان داد که میزان فرونشست در مناطق کشاورزی و مراتع به ۹ سانتی‌متر در سال می‌رسد، درحالی‌که در برخی نقاط بالاآمدگی تا ۱۲ سانتی‌متر مشاهده شد. پژوهشگران دریافتند که اگرچه رابطه مستقیمی بین برداشت از آب‌های زیرزمینی و فرونشست وجود دارد، اما تغییرات ناگهانی پس از زلزله نشان‌دهنده تأثیر غالب این رویداد لرزه‌ای بر تغییرات ارتفاعی منطقه است.

نامی و نادری (۱۴۰۳) بررسی میزان فرونشست کلان‌شهر تهران با استفاده از تکنیک تداخل سنجی پراکنش گر دائم و تصاویر راداری سنتینل ۱- با استفاده از پردازش ۳۱ تصویر ماهواره سنتینل ۱- و تکنیک تداخل سنجی پراکنش گر دائم به بررسی نرخ فرونشست کلانشهر تهران پرداختند، یافته‌ها نشان داد بیشترین نرخ فرونشست با ۴۳ میلی‌متر در سال در مناطق جنوب و جنوب‌غربی تهران رخ داده است که با مناطقی که بیشترین افت سطح آب زیرزمینی را داشته‌اند، انطباق فضایی کامل دارد. پژوهشگران نتیجه گرفتند که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل تشدید این پدیده در تهران است که نیازمند مدیریت فوری است.

۲. مطالعات خارجی

بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر تغذیه آب زیرزمینی در هند توسط میشر و کومار^۱ (۲۰۱۵)، نشان داد افزایش در اراضی مسکونی و کاهش پوشش گیاهی به‌طور مستقیم بر کاهش سطح آب زیرزمینی اثر گذار بوده است.

نتایج مطالعات عمیش و همکاران^۲ (۲۰۱۶) در ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر تغییرات سطح آبخوان با استفاده از سنجش‌ازدور در مصر نشان داد بیشترین تغییر کاربری اراضی مربوط به تبدیل اراضی بایر به زراعی و همچنین گسترش اراضی مسکونی بوده است که با حداکثر افت سطح آب زیرزمینی از سه تا ۱۳ متر در طول دوره مورد مطالعه همراه بوده است.

اثر تغییر کاربری اراضی بر منابع آب زیرزمینی شهرستان لینه (در کشور اتریش) توسط وانگ و همکاران^۳ (۲۰۱۶) بررسی گردید و از روش کربجینگ معمولی و مدل نمایی برای پهنه‌بندی مکانی داده‌های آب زیرزمینی و مقایسه و تحلیل تأثیر کاربری بر عمق آب زیرزمینی استفاده شد، در این منطقه به دلیل رشد صنعتی و توسعه کشاورزی، عمق آب زیرزمینی به میزان پنج‌متر کاهش یافته است.

لیو و همکاران^۴ (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر تغییرات کاربری اراضی و تغییرپذیری اقلیم بر هیدرولوژی در حوضه‌ی فلات لُس چین نشان دادند تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی به طور معنی‌دار موجب کاهش رواناب و رطوبت خاک و

1. Mishra& Kumar

2. Ammeish et al

3. Wang et al

4. Liu et al

تبخیر و تعرق شده است و در نهایت تأثیر غالب تغییرات اقلیمی نسبت به تغییر کاربری اراضی بر منابع آب سطحی را تایید می‌کند. این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی هیدرولوژیکی SWAT و تحلیل‌های آماری چند متغیره انجام شد.

آیت مبارک و همکاران^۱ (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر ترکیبی سناریوهای تغییر اقلیم و تغییرات کاربری زمین بر منابع آب در یک حوضه آبریز نیمه‌خشک، با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم و تغییرات کاربری اراضی نشان دادند کاهش بارندگی و افزایش دما با تبدیل اراضی کشاورزی و جنگلی به بایر موجب کاهش رواناب سطحی و همچنین کاهش تغذیه آبخوان شده است.

سجاد و همکاران^۲ (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری زمین بر منابع آب زیرزمینی، مطالعه منطقه فیصل‌آباد پاکستان، نشان دادند گسترش مناطق شهری و برداشت بی‌رویه موجب افت سالانه ۰.۱۱ متری سطح آب زیرزمینی شده است. اگرچه تغییرات اقلیمی تأثیر کمتری داشتند؛ اما تحلیل‌های فضایی حاکی از ارتباط معنادار بین توسعه شهری و کاهش منابع آب زیرزمینی بوده است.

کوچان و همکاران^۳ (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی بین‌حوزه‌ای برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی و مدیریت زمین بر منابع آب‌های زیرزمینی، با استفاده از یک رویکرد مدل‌سازی تلفیقی و باهدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر تولیدات کشاورزی، تقاضای آب برای آبیاری، رواناب و پویایی آب‌های زیرزمینی و همچنین تأثیر ترکیبی تغییرات اقلیمی و تغییرات در مصرف آب کشاورزی بر پویایی آب‌های زیرزمینی انجام شد، نتایج حاکی از تأثیر قابل توجه کاهش بارش‌های تابستانی بر افت سطح آب‌های زیرزمینی است که با مدیریت آبیاری می‌توان آن را کنترل کرد.

ایندانو و همکاران^۴ (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای با عنوان ارزیابی فضایی تأثیرات تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین بر تغذیه آب زیرزمینی در حوضه هت یای تایلند با استفاده از مدل‌های MODFLOW و WetSpss نشان دادند گسترش مناطق شهری موجب کاهش ۳۰ درصدی نرخ تغذیه آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی شده است. درحالی‌که افزایش پوشش گیاهی پایدار مانند جنگل اثر معکوس داشته.

بامال و همکاران^۵ (۲۰۲۴) در پژوهشی با عنوان بهره‌گیری از یادگیری ماشین برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی، با بررسی ۶۵ مقاله پژوهشی (۲۰۲۳-۲۰۱۷) نشان دادند که روش‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی ابزارهای مؤثری برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات اقلیمی (دما، بارش) بر پارامترهای آب زیرزمینی (سطح، کیفیت و ذخیره) هستند.

تحقیقات حجازیان و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثرات تغییرات استفاده از زمین و مدیریت تغذیه آبخوان در عرضه آب‌های زیرزمینی و تحقیقات کورودا و همکاران^۶ (۲۰۱۷) به بررسی اثر تغییر کاربری اراضی ناشی از شهرنشینی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی اشاره دارند.

مطالعات اخیر به‌وضوح نشان می‌دهند که تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی تأثیر مستقیمی بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی دارند. به‌طور خاص، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و شهری به همراه کاهش بارش‌ها منجر به افت شدید سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف جهان شده است. این یافته‌ها با شرایط دشت چمچمال که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است، همخوانی دارد. پژوهش حاضر باتکیه بر روش‌های نوین سنجش‌ازدور و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، به بررسی دقیق‌تر این عوامل در منطقه مورد مطالعه می‌پردازد. این یافته‌ها برای توسعه مدل‌های مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی حیاتی هستند

1. Ait M'Barek et al

2. Sajjad et al

3. Cochand et al

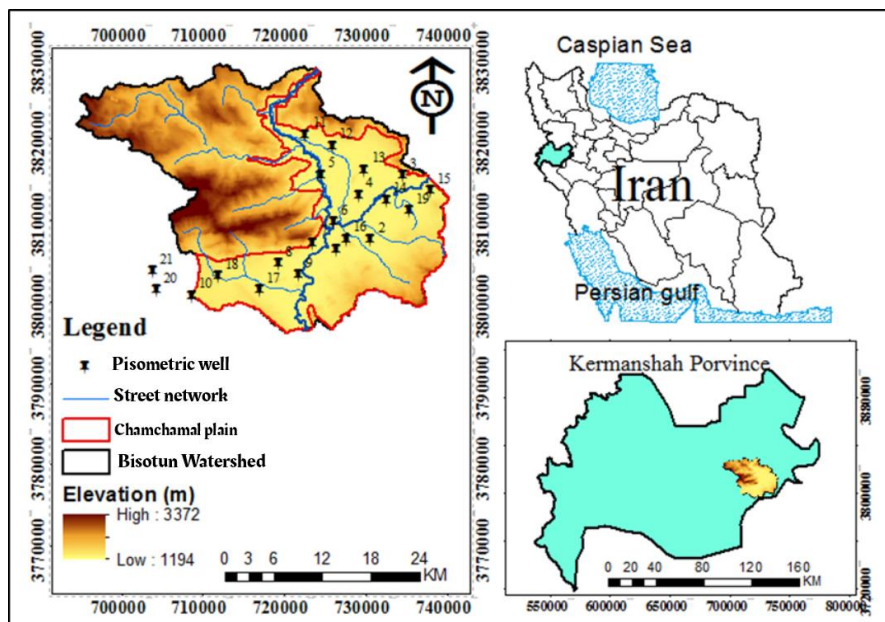
4. Indhanu et al

5. Bamal et al

6. Kuroda et al

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش دشت بیستون با مختصات جغرافیایی $47^{\circ}16'$ تا $47^{\circ}36'$ طول شرقی و $34^{\circ}17'$ تا $34^{\circ}34'$ عرض شمالی در حوزه آبخیز بیستون با مختصات جغرافیایی $47^{\circ}7'$ تا $47^{\circ}36'$ طول شرقی و $34^{\circ}16'$ تا $34^{\circ}34'$ عرض شمالی، در شرق استان کرمانشاه واقع شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. وسعت حوزه آبخیز بیستون $87/6$ کیلومترمربع است که $39/4$ کیلومتر مربع آن را منطقه دشتی و بقیه کوهستانی است. آب و هوای منطقه معتدل و کوهستانی است و بارندگی متوسط سالانه حدود 350 میلی متر است. رودخانه‌های گاماسیاب و دینور از میانه این دشت عبور می‌کنند.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی و ارتفاعی منطقه مورد مطالعه

۱. داده‌های مورد استفاده

برای انجام تحقیق حاضر، داده‌های تراز آب زیرزمینی مربوط به ۲۱ حلقه چاه مشاهده‌ای واقع در دشت بیستون در دوره آماری ۲۵ ساله جمع آوری شد. به منظور بررسی خشک‌سالی هواشناسی داده‌های بارندگی ماهانه در این دوره تهیه شد. پس از انتخاب پایه زمانی مشترک و کنترل کیفیت و صحت آمار، با استفاده از آزمون کلموگروف اسمیرنوف آزمون نرمالیت در محیط نرم افزار SPSS انجام شد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی در دوره ۲۵ ساله مورد مطالعه، با در نظر گرفتن این نکته که تصاویر باید متعلق به یک دوره زمانی مشخص و هم‌زمان در یک ماه بخصوص باشند که بیش‌ترین تفاوت در عارضه‌ها را نمایان سازند، تصاویر سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI ماهواره لندست به ترتیب مربوط به روزهای $1991/06/05$ ، $2003/06/13$ و $2015/06/07$ از سایت USGS استفاده شد.

۲. پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی

برای تعیین تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان افت سطح آب در هر پیزومتر، با کم کردن داده‌های سطح آب زیرزمینی هر یک از چاه‌ها از ارتفاع سطح زمین آن‌ها نسبت به سطح دریا، تراز سطح آب زیرزمینی (ارتفاع پیزومتری) هر یک از چاه‌ها محاسبه شد و به صورت لایه‌ای نقطه‌ای وارد نرم‌افزار ArcGIS شد. در پژوهش حاضر از روش‌های زمین‌آمار برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی تراز سطح آب زیرزمینی استفاده شد.

۳. روش های زمین آماری مورد استفاده

باتوجه به اینکه آگاهی از مدل نیم تغییرنمای تجربی^۱ دقیق به کمک بهترین روش تخمین گر زمین آماری می تواند برآورد صحیحی در بررسی تغییرات مکانی و زمانی سطح آب های زیرزمینی ارائه دهد (ارسلان^۲، ۲۰۱۴). در این مطالعه روش های مختلف زمین آماری (OK^۳، IDW^۴ و COK^۵) برای پیش بینی تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی تغییرات مکانی از نرم افزار GS+5.1 و برای تهیه نقشه پهنه بندی از نرم افزار ArcGIS استفاده شد.

کریجینگ معمولی (OK)

روش کریجینگ معمولی از مهم ترین و مرسوم ترین روش های تخمین زمین آماری است. این روش متکی بر منطق میانگین متحرک وزن دار و بهترین تخمین گر خطی نااریب است (کریستاکوس^۶، ۲۰۰۰) که علاوه بر مقادیر تخمین، میزان خطای تخمین در هر نقطه را نیز مشخص می کند (گووارست^۷، ۱۹۹۷). فرمول مورد استفاده برای تخمین در روش کریجینگ معمولی مطابق رابطه (۱) است:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

که در آن: $Z^*(x_0)$: مقدار تخمین زده شده متغیر Z در نقطه ای به مختصات X_0 . $z(x_i)$: مقدار مشاهده شده متغیر Z در نقطه x_i و n تعداد مشاهدات است (دلبری و همکاران، ۲۰۱۳).

وزن دهی عکس فاصله (IDW)

در این روش نیز همچون روش کریجینگ، مقدار یک متغیر در نقطه ای که نمونه برداری نشده باشد، از روی نقاط مجاورش، با استفاده از رابطه (۲) تخمین زده می شود. در این روش وزن ها باتوجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به موقعیت و چگونگی پراکندگی نقاط حول نقطه تخمین، تعیین می شوند. بدین ترتیب که به نقاط نزدیک تر وزن بیشتر و نقاط دورتر وزن کمتری اختصاص داده می شود (گووارست، ۱۹۹۷).

$$\lambda = \frac{D_i^{-n}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-n}} \quad (2)$$

که در آن: D_i^{-n} : فاصله نقطه i ام تا نقطه تخمین زده شده. n : توان وزن دهی فاصله. n : تعداد مشاهدات است. در این تحقیق از توان یک تا پنج برای تخمین استفاده شد.

کو کریجینگ

تخمین گر کو کریجینگ همان کریجینگ توسعه یافته است که در آن متغیرهای ثانویه نیز لحاظ شده است. با بهره گیری از مقادیر متغیر ثانویه یا کمکی و با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به همبستگی دوجانبه بین متغیرها، می توان تخمین مناسب و دقیق تری از متغیر اصلی به دست آورد. این تخمین گر طبق رابطه (۳) محاسبه شد (گووارست، ۱۹۹۷).

$$Z_v^*(u_0) = \sum_{i=1}^N [a_i Z_v(u_i) + \beta_i Z_w(u_i)] \quad (3)$$

1. Experimental semivariogram

2. Arslan

3. Ordinary Kriging (OK)

4. Inverse Distance Weighted (IDW)

5. CO-Kriging (COK)

6. Christakos

7. Goovaerts

که در آن: $Z_v^*(u_0)$: مقدار تخمین زده شده‌ی متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_0 است. a_i : وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده‌ای متغیر اصلی Z_v در موقعیت u_i است. β_i : وزن نسبت داده شده به مقدار مشاهده‌ی متغیر کمکی Z_w در موقعیت u_i . N : تعداد مشاهدات در اطراف نقطه‌ی مورد تخمین است. در روش کوکریجینگ از متغیر کمکی ارتفاع معادل هرچاه به عنوان متغیر ثانویه استفاده شد. در مطالعه حاضر، روش OK، به عنوان مناسب‌ترین روش مورد استفاده در بررسی‌های زمین‌آماري، انتخاب شد (جَمک و همکاران^۱، ۲۰۰۷؛ و ژو و همکاران^۲، ۲۰۱۲).

مدل‌های نیم‌تغیر نما

نیم‌تغیرنما متداول‌ترین ابزار است که همبستگی مکانی را در زمین‌آمار بررسی می‌کند (کومار و همکاران^۳، ۲۰۰۵). نیم‌تغیرنما میزان عدم تشابه را بین مقادیر یک ویژگی هنگامی که فاصله بین نمونه‌ها افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی نیم‌تغیرنمای تجربی از رابطه (۴) استفاده شد (ایزاک و سریواستوا^۴، ۱۹۸۹).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n [z(x+h) - z(x)]^2 \quad (4)$$

که در آن $\gamma(h)$: مقدار واریوگرام برای جفت نقاطی که به فاصله h از هم قرار دارند. $n(h)$: تعداد جفت نمونه‌های به کاررفته به ازاء یک فاصله h از هم قرار دارند. $z(x)$: متغیر مشاهده شده در نقطه x . $z(x+h)$: مقدار مشاهده شده متغیری که به فاصله h از x قرار دارد.

برای دستیابی به یک درون‌یابی صحیح، مهم‌ترین گام برازش مدلی مناسب بر سمیواریوگرام است. مدل‌های سمیواریوگرام برازش داده شده در این پژوهش شامل مدل‌های نمایی، گوسی، کروی و خطی است.

مقایسه روش‌های درون‌یابی

برای بررسی دقت روش‌های درون‌یابی استفاده شده در تخمین تراز سطح ایستابی از روش اعتبارسنجی متقابل^۵ استفاده شد (ایزاک و سریواستوا^۴، ۱۹۸۹). در فرآیند انجام این روش هر بار یک نقطه مشاهده‌ای به طور موقت حذف شده و برای آن از روی نقاط مجاور، مقداری برآورد شد. سپس مقدار حذف شده به جای خود برگردانده شد و برای بقیه نقاط شبکه، به صورت مجزا این برآورد صورت گرفت. با داشتن این مقادیر باتوجه به مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده، میانگین مربعات خطا (RMSE)^۶ و میانگین انحراف معیار خطا (MBE)^۷ در هر روش بر اساس رابطه‌های (۵) و (۶) محاسبه شد. این عمل در محیط نرم‌افزاری GS+ انجام شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2}{n}} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))}{n} \quad (6)$$

که در آن: $z^*(x_i)$ و $z(x_i)$: به ترتیب مقدار تخمینی و واقعی متغیر Z در نقطه x_i هستند.

۴. تهیه نقشه کاربری اراضی

برای بررسی تغییرات کاربری اراضی منطقه تصاویر سنجنده‌های TM، ETM⁺ و OLI ماهواره لندست به ترتیب مربوط به روزهای ۱۹۹۱/۰۶/۵، ۲۰۰۳/۰۶/۱۳ و ۲۰۱۵/۰۶/۰۷ از سایت USGS دانلود و در نرم‌افزار Idrisi مورد بررسی قرار گرفت. برای

1. Cemek et al
2. Zhou et al
3. Kumar et al
4. Issaks & Srivastava
5. CrossValidation
6. Root mean square error
7. Mean Bias Error

تهیه نقشه تغییرات کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی نظارت شده^۱ و روش حداکثر احتمال استفاده شد. نمونه‌های تعلیمی به روش تصادفی ساده برای کاربری‌های مختلف انتخاب شدند (محمدی و همکاران، ۲۰۱۵). برای ارزیابی صحت نتایج طبقه‌بندی ضریب کاپا و دقت کلی محاسبه شد (ریچاردز و جیا^۲، ۲۰۰۵). ضریب کاپا از رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} * X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} * X_{+i})} \quad (7)$$

که در آن: N تعداد کل پیکسل‌های واقعیت زمینی، X_{i+} مجموع عناصر سطر i ام و X_{+i} مجموع عناصر ستون i ام هستند. به‌منظور محاسبه مساحت کاربری‌ها و تهیه نقشه خروجی از نرم‌افزار Arc GIS استفاده گردید. کاربری‌ها منطقه مورد مطالعه شامل ۶ طبقه (بایر و رخنمون سنگی، مرتع، کشاورزی، مسکونی، پهنه آبی (رودخانه) و صنایع می باشند. سپس با استفاده از روش Cross Tabulation که در واقع یکی از بهترین روش‌های مقایسه پس از طبقه‌بندی در آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی است، لایه‌های کاربری اراضی تهیه شده، به‌صورت ماتریسی و دو به دو در محیط نرم‌افزار IDRISI با یکدیگر مقایسه و میزان و روند تغییرات در کاربری‌ها تعیین گردید.

۵. نوسانات آب‌وهوایی

باتوجه به اینکه عامل اصلی و مهم تغذیه‌ی آبخوان‌ها، نفوذ آب حاصل از بارندگی به درون زمین است. میزان تغذیه آبخوان در هر سال تابع تغییرات بارندگی سالانه است. از مهم‌ترین شاخص‌های مطالعه بارندگی، شاخص بارندگی استاندارد است که توسط (مک کی و همکاران^۳، ۱۹۹۳) تهیه شده است. در پژوهش حاضر ابتدا SPI به‌عنوان نمایه‌ی خشک‌سالی اقلیمی استاندارد شده (مرادی و همکاران، ۲۰۱۱) و GRI به‌عنوان شاخص منابع آب زیرزمینی محاسبه شد (شیرمحمدی و همکاران، ۲۰۱۳) (جدول ۱) همچنین برای بررسی ارتباط آب زیرزمینی و بارندگی از روش شبکه‌بندی تیسن و آزمون پیرسون استفاده شد.

جدول ۱. وضعیت خشک‌سالی و ترسالی‌ها بر حسب مقادیر SPI و GRI (مک کی و همکاران، ۱۹۹۳؛ و مندچینو و همکاران^۴، ۲۰۰۸).

طبقات	وضعیت	مقادیر SPI	مقادیر GRI
1	ترسالی بسیار شدید	۲ و بیشتر	۲ و بیشتر
2	ترسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۱/۹۹
3	ترسالی متوسط	۱ تا ۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹
4	نزدیک به نرمال	-۰/۹۹ تا ۰/۹۹	-۰/۹۹ تا ۰/۹۹
5	خشک‌سالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹	-۱ تا -۱/۴۹
6	خشک‌سالی شدید	-۱/۹۹ تا -۱/۵	-۱/۹۹ تا -۱/۵
7	خشک‌سالی بسیار شدید	-۲ و کمتر	-۲ و کمتر

1. supervised classification

2. Richards & Jia

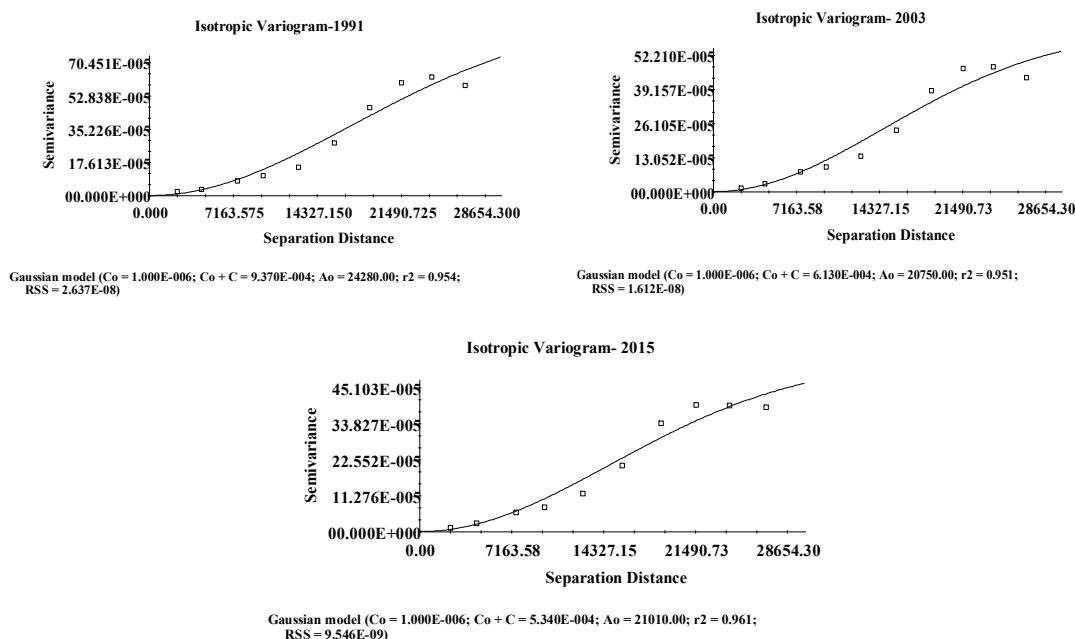
3. McKee et al

4. Mendicino et al

یافته‌های پژوهش

۱. تحلیل تغییرات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی

در این تحقیق، تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش زمین‌آماري و مدل واریوگرامی پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل شد. نتایج برآزش مدل‌ها به نیم‌تغییرنا نشان داد مدل گوسی برای توصیف ساختار مکانی آب زیرزمینی در این منطقه مناسب است که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. نیم‌تغییرنمای تجربی (مربع تو خالی) و بهترین مدل برآزش شده مربوط به سطح آب زیرزمینی

شکل (۲) نشان می‌دهد نیم‌تغییرنا دارای اثر قطعه‌ای (C_0) ناچیز است که نشان‌دهنده پیوستگی سطح آب زیرزمینی و نیز تغییر پذیری اندک در مبدا نیم‌تغییرنا است. مقادیر بالای نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه یا واریانس کل ($(C/C_0 + C)$) و نزدیک بودن آن به عدد یک نشان دهنده ساختار مکانی قوی برای سطح آب زیرزمینی در سال‌های موردبررسی است. شعاع تأثیر ارتفاع ایستابی از ۲۴۲۸۰ متر در سال ۱۹۹۱ به ۲۰۰۱۰ متر در سال ۲۰۱۵ کاهش یافته است. علت کاهش دامنه تأثیر (A_0) افت سطح ایستابی است. در واقع، فاصله‌ای که بتوان متغیر مجهول را تخمین زد در سال‌های آخر دوره مورد مطالعه کمتر شده است. همچنین مناسب‌ترین مدل باتوجه به، مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و ضریب همبستگی (R^2) تعیین می‌گردد (ایزاک و سرپواستوار ۱۹۸۹؛ و گووارتس پی، ۱۹۹۷).

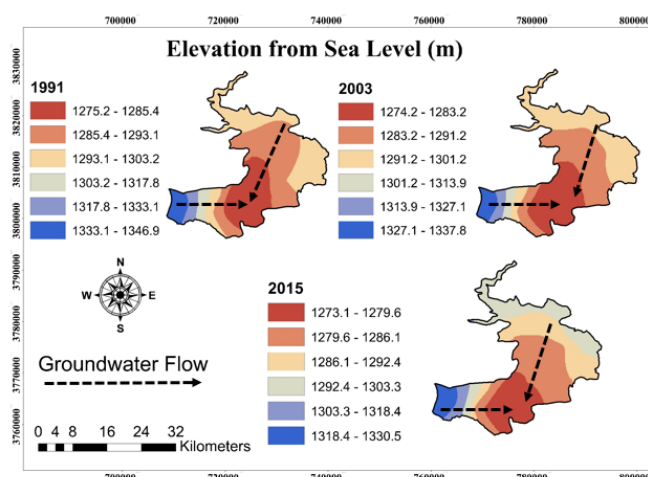
جدول ۲. مقادیر RMSE و MBE هر یک از روش‌های میان‌یابی سطح آب زیرزمینی در دوره آماری

Models	Power/variogram function	MBE	RMSE	R ²	MBE	RMSE	R ²	MBE	RMSE	R ²
		1991			2003			2015		
OK	Gaussian	0.40	4.7	0/95	0.49	5.02	0/96	0.02	5.46	0/94
IDW	1	-4.42	13.87	0.8	-4	12.71	0.77	-3.68	11.99	0.76
IDW	2	-2.44	9	0.82	-2.11	8.59	0.77	-1.88	8.3	0.78
IDW	3	-1.69	7.02	0.84	-1.34	6.96	0.78	-1.13	6.79	0.78
IDW	4	-1.41	6.18	0.88	-1.03	6.4	0.8	-0.83	6.1	0.8
IDW	5	-1.25	5.97	0.89	-0.86	6.26	0.82	-0.67	5.75	0.84
COK	Gaussian	-0.41	6.57	0.92	-0.25	6.9	0.93	-0.2	7.01	0.9

باتوجه به نتایج ارائه شده جدول (۲)، روش کریجینگ معمولی با مدل برازش داده شده گوسی با کمترین میزان RMSE و MBE، و بیشترین مقدار R^2 بهترین برآورد را در منطقه داشته است. نتایج مشابهی در تحقیقات (کامبهمتو و همکاران^۱ ۲۰۱۱؛ عمران^۲، ۲۰۱۲) گزارش شده است. روش وزن دهی عکس فاصله (توان یک) نامناسب ترین تخمین را در برآورد سطح ایستابی داشته است. با افزایش توان وزن دهی به دلیل افزایش شعاع تحت تأثیر، صحت درون یابی افزایش یافته است. بررسی ها نشان داد روش وزن دهی عکس فاصله با توان پنج نیز نتایج قابل قبولی را ارائه می کند.

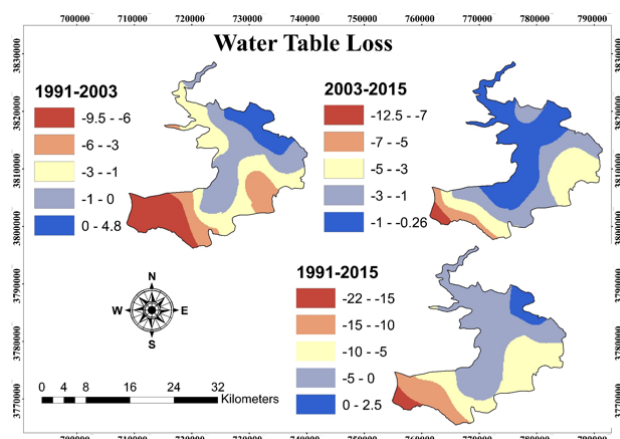
۲. نقشه سطح آب زیرزمینی

پس از انتخاب بهترین روش درون یابی و مدل واریوگرافی مناسب و عامل های آن در نرم افزار GS^+ ، نقشه های پهنه بندی مکانی در محیط نرم افزار ArcGIS ترسیم و در نهایت نقشه هم افت آب زیرزمینی برای سال های ۱۹۹۱، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵ تهیه شد.



شکل ۳. نقشه سطح آب زیرزمینی

به طور کلی از نظر مکانی، جهت جریان آب زیرزمینی از سمت غرب و جنوب غرب و همچنین از سمت شرق و شمال شرق به سمت جنوب و نقطه خروجی دشت است که در شکل (۳) نشان داده شده است. دلیل اصلی این امر بالا بودن ارتفاع مناطق مذکور در مقایسه با بخش خروجی جریان و در نتیجه تبعیت از توپوگرافی منطقه و گرادیان شیب است. از سویی دیگر جهت حرکت آب زیرزمینی نیز نشان می دهد آب از نواحی اطراف آبخوان به مرکز آبخوان در حرکت است؛ از این رو لازم است بر روند برداشت آب زیرزمینی مدیریت قاطع اعمال داشت، زیرا کف کنی و افزایش برداشت توسط چاه های مرکزی دشت، به شدت به ضرر چاه های حاشیه های دشت است و موجب خشک شدن آن ها می شود. پس از پهنه بندی مکانی سطح تراز آب زیرزمینی در مقیاس سالانه، از تفاضل نقشه های تهیه شده در ابتدا و انتهای دوره مورد مطالعه، نقشه هم افت آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه به دست آمد و مکان هایی از آبخوان دشت که بیشترین افت را داشتند مشخص شد و در شکل (۴) آورده شده است.



شکل ۴. منطقه بندی افت سطح آب زیرزمینی

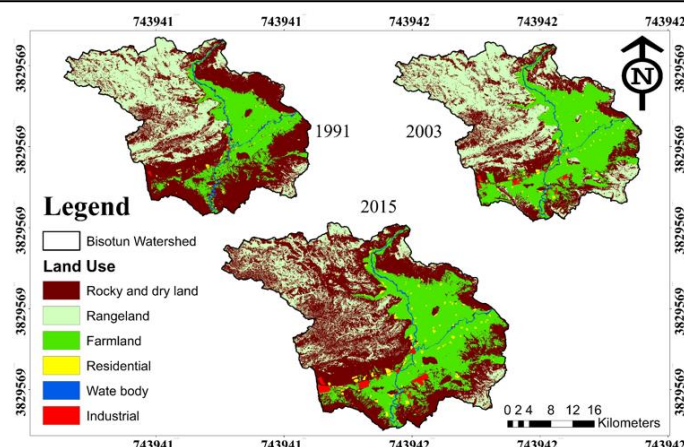
نتایج حاصل از بررسی نقشه‌های هم افت آب زیرزمینی نشان‌دهنده افت سطح ایستابی در اکثر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه است. تغییرات کمی افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۰۳ حاکی از آن است که در قسمت شرقی و شمال شرقی (ورودی رودخانه)، دارای افزایش سطح ایستابی صفر تا ۴/۸۸ متر است. به این ترتیب، بخش شرقی دشت به علت ورود رودخانه به منطقه، سطح آب چاه‌های پی‌زومتری دارای بالا آمدگی است. در حالی که در قسمت مرکزی، جنوب و جنوب غربی دشت افت آب زیرزمینی شدت یافته است دلیل آن را می‌توان برداشت‌های بی‌رویه از رودخانه‌ی تغذیه کننده آب زیرزمینی و نیز افزایش پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری دانست. در سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۵ میزان این افت بیشتر شده است و در سال‌های پایانی دوره مورد مطالعه میزان افت شدیدتر شده است. این مهم نمایان‌گر آن است که یکی از دلایل افت سطح ایستابی می‌تواند بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باشد و نشان می‌دهد این میزان افت در قسمت‌های میانی دشت نیز رخ داده؛ اما آب سطحی توانسته تا حدی باعث جبران آن شود.

۳. تغییر کاربری اراضی

با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای، نقشه کاربری اراضی سال‌های ۱۹۹۱، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵ حاصل شد. نتایج تغییرات کاربری اراضی در سطح حوزه آبخیز بیستون در طی دوره مورد مطالعه در شکل (۵) و جدول (۴) ارائه شد. دقت انجام طبقه‌بندی با استفاده از ضریب کاپا محاسبه گردید و در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. ارزیابی صحت طبقه‌بندی برای نقشه کاربری‌ها استخراج شده در سال‌های مورد بررسی

سال	ضریب کاپا	صحت کلی
۱۹۹۱	۸۶/۳۲	۸۹/۹۲
۲۰۰۳	۸۹/۲۶	۹۰/۲۰
۲۰۱۵	۸۹/۲۶	۹۰/۲۰



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های مورد مطالعه

جدول ۴. مقایسه مساحت و درصد مساحت کاربری‌های مختلف منطقه در سال‌های مورد بررسی

نام کاربری	مساحت ha (۱۹۹۱)	مساحت ha (۲۰۰۳)	مساحت ha (۲۰۱۵)
بایر و رخنمون سنگی	۴۰۲۳۷/۲۹	۲۶۰۰۵/۶۸	۴۲۲۳۹/۱۱
مرتع	۲۸۸۵۳/۲۸	۳۲۴۱۴/۹۴	۱۷۷۷۰/۶۵
کشاورزی	۱۶۸۱۶/۲۳	۳۷۰۷۰/۵۶	۳۴۷۳۰/۹۳
مسکونی	۵۵۵/۷۵	۷۴۹/۰۷	۱۱۷۰/۴۵
پهنه‌آبی	۱۰۶۳/۵۳	۸۸۶/۳۲	۸۶۱/۳۹
صنعت	۱۰۸/۰۹	۵۰۷/۰۶	۸۸۲/۶۳

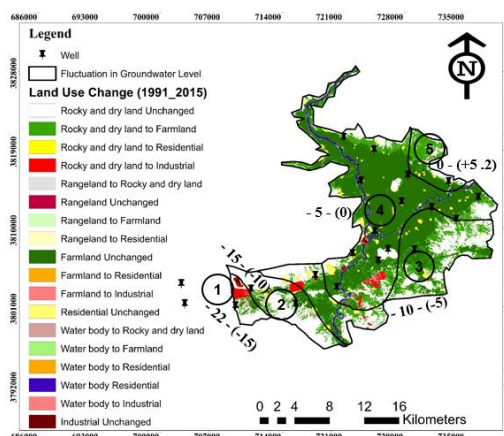
باتوجه به نتایج ارائه شده در جدول (۴) مشاهده می‌شود در دوره اول در سال ۱۹۹۰ اراضی بایر مساحتی حدود ۴۰۲۳۷/۲۹ هکتار از منطقه را در بر گرفته و در سال ۲۰۰۳ بیش از ۶۴ درصد آن در همان وضعیت باقیمانده است در این کاربری تغییرات چندان زیاد نیست. زیرا قسمتی از این طبقه که شامل رخنمون سنگی است در ارتفاعات قرار گرفته و در دسترس بشر قرار ندارد و غیر قابل تغییر به کاربری‌های دیگر است. این دوره همچنین با افزایش مساحت اراضی کشاورزی همراه بوده، از دلایل عمده این تغییر کاربری می‌توان به ایجاد طرح زهکشی اراضی و تجهیز و نوسازی شبکه‌های آبیاری در آن سال‌ها اشاره کرد که به علت مساعد شدن شرایط آبرسانی، توسط کشاورزان منطقه به زیر کشت رفتند. همین امر سبب گردید تا اراضی حاشیه‌ی رودخانه در اختیار کشاورزان قرار گرفته و حریم رودخانه مورد تصرف قرار گیرد. این دوره همچنین با رشد مناطق مسکونی که عمدتاً گسترش مناطق روستایی را شامل می‌شوند همراه بود.

مساحت مناطق صنعتی تقریباً ۴/۵ برابر شده است. از دلایل افزایش کاربری مرتع در پایان این دوره را می‌توان به افزایش بارندگی و ترسالی متوسط در سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۸۲ اشاره نمود. دوره دوم کاهش اراضی بایر، مرتع و افزایش اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعت صورت گرفته است. در این دوره ۴۷ درصد از اراضی مرتعی به بایر تبدیل شدند علت آن را می‌توان کاهش بارندگی و خشک‌سالی متوسط در سال ۸۷-۸۶ و خشک‌سالی شدید در سال ۹۴-۹۳ دانست. پس می‌توان نتیجه گرفت افزایش کاهش بارندگی بیش از هر چیزی مراتع را تحت تأثیر قرار داده است. این دوره با افزایش مساحت مناطق مسکونی و همچنین احداث کارخانه‌ها و صنایع بزرگ همراه بوده است.

به‌طور کلی طی این دوره ۲۵ ساله، وسعت اراضی کشاورزی ۱/۵ برابر، مناطق مسکونی شامل منازل روستایی و شهری دوبرابر و مساحت مناطق صنعتی حدوداً هشت برابر شده است.

۴. اثر کاربری اراضی بر منابع آب زیر زمینی

با انطباق دو نقشه تغییرات کاربری اراضی و نقشه تغییرات کمی سطح آب زیر زمینی در ابتدا و انتهای دوره مورد مطالعه در محیط ArcGIS، نقشه‌ای حاصل شد که از پنج گروه تشکیل شده است و در شکل (۵) نشان داده شده است. سپس تغییرات کاربری اراضی به وجود آمده و میزان تغییرات کمی افت سطح ایستابی در هر یک از گروه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد. این روش می‌تواند روش مناسبی برای مکان‌هایی که کاربری‌ها در هم ادغام شده‌اند باشد.



شکل ۶. هم‌پوشانی میزان و نوع تغییرات کاربری و افت سطح ایستابی (۱۹۹۱-۲۰۱۵)

همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود تغییرات کاربری اراضی قابل ملاحظه‌ای در سطح آبخوان اتفاق افتاده است. برای بررسی جزئیات بیشتر، تغییرات کاربری هر گروه به صورت جداگانه بررسی شد.

نتایج حاصل از تلفیق نقشه تغییرات کاربری اراضی و نقشه افت سطح ایستابی در سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۱۵ نشان داد، در قسمت غربی دشت بیستون که بیشترین میزان افت ۲۲/۵ متر است تغییر از سایر کاربری‌ها به کاربری صنعت و سپس کشاورزی بالاترین میزان تغییرات کاربری اراضی را به خود اختصاص داده است. و با نزدیک شدن به سمت نواحی مرکزی و شرقی دشت، باتوجه به عبور رودخانه گاماسیاب در این قسمت، کاربری اصلی شامل کشاورزی بوده و در این منطقه کارخانجات بزرگی قرار گرفته‌اند و از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده می‌کنند. همچنین سطح ایستابی چاه‌هایی که در حاشیه رودخانه قرار گرفته‌اند نیز کاهش یافته است؛ بنابراین رشد صنعتی و توسعه کشاورزی از دلایل اصلی افت منابع آب زیرزمینی است (وانگ و همکاران^۱ ۲۰۱۶). همچنین بهره‌برداری بی‌رویه از رودخانه و افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی می‌تواند از دلایل اصلی افت سطح آب باشد. نتایج حاصل از تغییرات کمی سطح ایستابی نشان داد سطح آب زیرزمینی در منطقه‌ای که رودخانه وارد دشت می‌شود به دلیل ارتباط هیدرولیکی با رواناب سطحی در بالاترین سطح خود قرار دارد و به تدریج در داخل دشت به دلیل استفاده از آب سطحی به دنبال آن سطح آب زیرزمینی نیز کاهش یافته است. این نتایج با یافته‌های (سینک و کاسانا^۲، ۲۰۱۷).

۵. تحلیل آماری

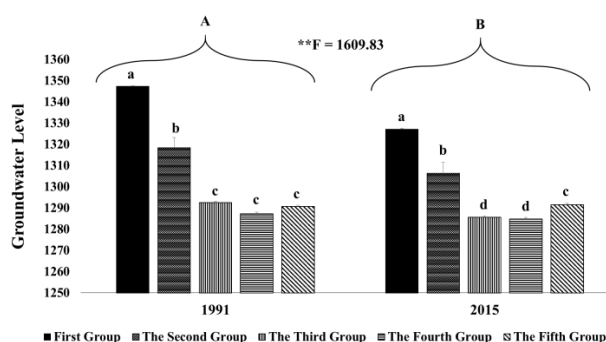
به منظور مقایسه میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی در دو سال ۱۹۹۱ و ۲۰۱۵، از آنالیز واریانس دوطرفه (GLM) استفاده شد. به همین منظور پیرومترهای مورد مطالعه مطابق شکل (۵) در پنج گروه کاربری قرار گرفتند و اختلاف سطح ایستابی در گروه‌های مختلف و همچنین در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۱۵ مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر گروه، سال و اثر

متقابل سال و گروه بر ارتفاع سطح آب زیرزمینی معنی دار بوده است و در جدول (۵) نتایج ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج آزمون تحلیل واریانس دوطرفه (GLM)

سطح معنی داری	آماره ی F	درجه آزادی	
سال	۱۶۰۹/۸۳	۱	۰/۰۰
گروه	۱۰۱/۷۹	۴	۰/۰۰
سال × گروه	۲۷۱/۸۴	۴	۰/۰۰

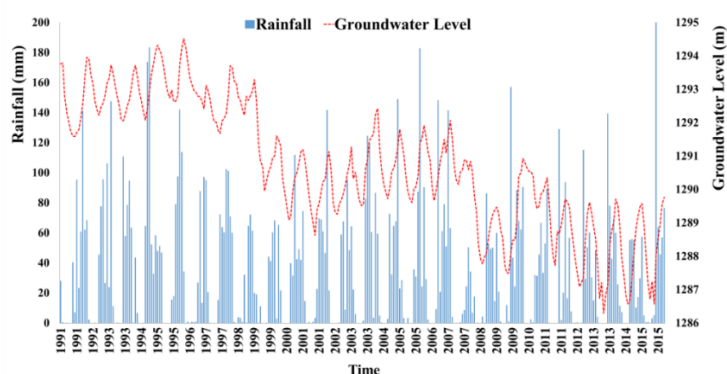
باتوجه به نتایج تحلیل واریانس دوطرفه، اثر سال و اثر متقابل گروه و سال معنی دار شد؛ بنابراین به منظور مقایسه میانگین ها از روش دانکن استفاده شد. باتوجه به نتایج آزمون دانکن در هر دو سال گروه ها بر میانگین سطح ایستابی اثر معنی داری داشتند. همچنین نتایج شکل (۷) حاکی از آن است که تراز سطح ایستابی در سال ۱۹۹۱ با میانگین ۱۲۹۵/۲۰ به طور معنی داری بیشتر از تراز سطح ایستابی در سال ۲۰۱۵ با میانگین ۱۲۸۹/۲۳ است.



شکل ۷. میانگین سطح ایستابی ($\pm$ خطای استاندارد) در متغیرهای سال و گروه (حروف کوچک نشان دهنده معنی داری گروه ها در هر سال، حروف بزرگ نشان دهنده معنی داری بین دو سال، ** نشان دهنده معنی داری در سطح ۰/۰۰۱ است)

۶. ارتباط آب زیرزمینی و بارندگی

تغییرات تراز آب زیرزمینی و بارندگی ماه های مختلف در دوره ۲۵ ساله با استفاده از روش شبکه بندی تیسن تهیه گردید. نتایج بیانگر آن است که سطح تراز آب زیرزمینی در طی سال های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۶ روند افزایشی اما شیب کند دارد و از سال ۱۹۹۶ به بعد روند کاهشی است. شیب این تغییرات در دهه ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۶ کم بوده؛ اما از سال ۲۰۰۶ این تغییرات تشدید می گردد و با یک شیب تند روند کاهشی ادامه می یابد و در پایان دوره آماری به کم ترین مقدار رسیده است. کمینه مطلق این تغییرات در دوره مربوط به سال ۲۰۱۳ است. مطابق شکل (۸) سطح تراز آب در منطقه مورد مطالعه روند نزولی دارد و به طور متوسط در دوره زمانی مورد مطالعه، افت تراز آب زیرزمینی حدود هفت متر است و آبخوان با کسری ذخیره سالانه مواجه بوده و بیلان کاملاً منفی است.



شکل ۸. آبنمود روند نوسانات بارندگی و تراز آب زیرزمینی (از فروردین تا اسفند هر سال) در سال‌های (۱۹۹۱-۲۰۱۵)

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود می‌توان گفت تقریباً روند کلی فراز و نشیب‌های دو منحنی بارندگی و تراز آبخوان دشت هم‌زمان و با تأخیر کمی اتفاق می‌افتد. تغییرات بارشی شدیدی در منطقه قابل تفکیک نیست اما روند کاهشی در سطح آب زیرزمینی بسیار مشخص است و این امر نشان‌دهنده بهره‌برداری بی‌رویه و بیش از حد از منابع آب زیرزمینی است که ناپایداری منابع آبی و توسعه کشاورزی را در پی داشته و بیلان منفی دشت مورد مطالعه را بیانگر است. باتوجه به اینکه محور طولی نمودار ۱۲ ماهه است مقدار تبعیت دو نمودار از یکدیگر مشهود نمی‌باشد، به همین منظور برای نمایش میزان اثرگذاری بارندگی بر تراز آب زیرزمینی در طول دوره آماری و نقش بارندگی در تغییرات عمق سطح ایستابی اقدام به تعیین ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های میانگین تغییرات سطح ایستابی با یک تا چهار ماه تأخیر در میانگین بارندگی ماهانه شد. نتایج حاصله در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶. ماتریس همبستگی بین متغیر بارندگی و تراز آب زیرزمینی ماهانه

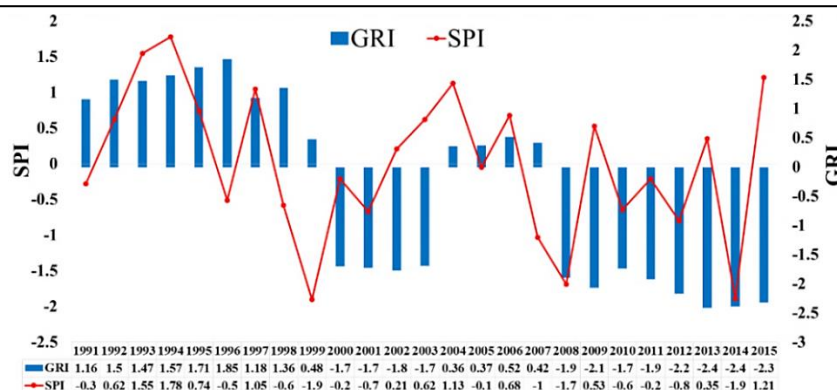
هم‌زمان	تأخیر یک ماه	تأخیر دو ماه	تأخیر سه ماه	تأخیر چهار ماه
ضریب همبستگی پیرسون	۰/۱۴۴*	۰/۲۵۰**	۰/۲۸۴**	۰/۲۷۷**
سطح معنی‌داری	۰/۰۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

* در سطح ۰/۵ درصد معنی‌دار است. ** در سطح ۰/۰۱ درصد معنی‌دار است.

نتایج آزمون پیرسون نشان می‌دهد بارندگی دو ماه قبل بالاترین همبستگی را با سطح آب زیرزمینی دارد. به عبارتی تغییرات بارشی تأثیرات خود را با تأخیر دوماهه بر تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد.

۷. شاخص‌های خشک‌سالی

در این تحقیق با استفاده از روش تبیین تغییرات سالانه سطح آب زیرزمینی و بارندگی در سطح منطقه محاسبه گردید. سپس به منظور بررسی خشک‌سالی هواشناسی از شاخص SPI و برای منابع آب زیرزمینی، شاخص GRI مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصله در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹. انطباق شاخص های خشک سالی هواشناسی و آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

شاخص بارندگی استاندارد (SPI) در تمام سال ها دارای مقداری نزدیک به نرمال و یا ترسالی است به جز سال های ۲۰۰۰-۱۹۹۱، ۲۰۰۸-۲۰۰۹ و ۲۰۱۵-۲۰۱۴ که دارای خشک سالی متوسط تا شدید است. اما نتایج حاصل از شاخص منابع آب زیرزمینی (GRI) نشان داد در سال ۱۹۹۱-۱۹۹۲ تا سال ۱۹۹۱-۲۰۰۰ دارای مقادیر ترسالی متوسط تا شدید و از سال ۱۹۹۱-۲۰۰۰ تا سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ دارای خشک سالی شدید است. و از سال ۲۰۰۳-۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷-۲۰۰۸ دارای مقادیر نزدیک به نرمال است و بعد از آن تا سال ۲۰۱۵-۲۰۱۶ دارای خشک سالی شدید تا بسیار شدید است.

مشاهده می شود در هشت سال اول دوره مورد مطالعه زمانی که SPI دارای مقادیر نزدیک به نرمال است، GRI دارای مقادیر ترسالی متوسط و شدید است. اما در هشت سال انتهایی با وجود اینکه SPI دارای مقادیر نزدیک به نرمال است شاخص خشک سالی آب زیرزمینی دارای خشک سالی شدید تا بسیار شدید است. به نظر می رسد هم زمان با وقوع خشک سالی ها، برداشت از چاه های بهره برداری نیز افزایش پیدا کرده و سبب تشدید افت سطح ایستابی شده است. بهره برداری های بی رویه از منابع آب زیرزمینی میزان افت را تشدید نموده و موجب می شود تا در دوره ترسالی هم جبران نشود و سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه، روبه خشکی گرایش پیدا کند.

بحث

یکی از عوامل اصلی افت منابع آب زیرزمینی، بهره برداری غیر اصولی از این منابع است. با توجه به اینکه بین منابع آب سطحی و زیرزمینی یک ارتباط دوسویه وجود دارد و در تقابل با یکدیگر هستند، برداشت های بی رویه از این منابع برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و شرب بدون شک در آینده بحران های زیادی را موجب خواهد افتاد. در این تحقیق تغییرات کاربری اراضی و نوسانات اقلیمی به عنوان مهم ترین عوامل انسانی و محیطی کاهش سطح آب های زیرزمینی ارزیابی و سپس ارتباط این عوامل با سطح آب زیرزمینی دشت بیستون در یک دوره ۲۵ ساله آماری بررسی شد. برای این منظور نقشه کاربری اراضی در سه دوره زمانی ۱۹۹۰، ۲۰۰۳ و ۲۰۱۵، از تصاویر سنجنده های TM، ETM و OLI ماهواره لندست و با استفاده از روش طبقه بندی نظارت شده حداکثر احتمال به دست آمد. آمار سطح ایستابی ۲۱ حلقه چاه پیژومتری، با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ معمولی (OK) با کمترین میزان RMSE و MBE استفاده شد.

نتیجه گیری

در شرایط فعلی بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، افت سطح آب زیرزمینی به طور متوسط برابر با ۶/۷۸ متر (۶۷/۰ متر در سال) در طول دوره مورد مطالعه (۱۳۹۴-۱۳۷۰) است. کاهش سطح منابع آب منطقه را می توان علاوه بر عوامل انسانی و تغییرات

کاربری اراضی به کاهش بارندگی و خشک سالی های رخ داده در بازه های زمانی مختلف نسبت داد. شدت این افت در مناطق مختلف باتوجه به میزان تغذیه توسط آب رودخانه و تخلیه آبخوان توسط انواع بهره برداری ها، متفاوت است. افزایش سطح اراضی کشاورزی یکی از دلایل اصلی میزان افت منابع آب زیرزمینی منطقه است که با یافته های ژویان و همکاران^۱ (۲۰۰۲) همخوانی دارد. از سوی دیگر توسعه و تمرکز صنایع بزرگ که عمدتاً از نوع صنایع آب بر مانند شهرک صنعتی، کارخانه های تولیدی، مجتمع پتروشیمی و پلیمر و از همه مهم تر نیروگاه حرارتی است که در هر ساعت ۲۰۰۰ مترمکعب آب مصرف می کند و تمامی نیازهای آبی این صنایع، از منابع آب زیرزمینی تأمین می شود. اگر روند فعلی ادامه یابد، در آینده نزدیک می تواند دشت را با معضلاتی همچون فرونشست سطح زمین، تخلیه هرچه بیشتر آب های زیرزمینی و در نتیجه افت بالاتر سطح ایستابی و به تبع آن کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی مواجه نماید. این نتایج با یافته های شیمیلیس و همکاران^۲ (۲۰۱۵) همسو است.

ارزیابی منابع آب زیرزمینی و همبستگی آن با نرخ تغییرات کاربری اراضی / پوشش سرزمین برای درک صحیح مشکلات محیطی موجود در منطقه ضروری است (سینگ و همکاران^۳، ۲۰۱۰)، از این رو یافته های این تحقیق در درک مشکلات موجود در منطقه و شناسایی گزینه های مؤثر مدیریتی در منطقه مورد مطالعه مفید است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد، صفری، شیوا، و ملانوری، الهام. (۱۴۰۳). بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری SBAS در بخشی از شهرستان سراب. *مجله جغرافیا و برنامه ریزی*، ۲۸(۸۹)، ۱-۱۶.
https://geoplanning.abrizu.ac.ir/article_16478.html
- امرای، بهزاد. (۱۴۰۱). آشکارسازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر افت سطح ایستابی آبخوان دشت بیرجند. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۲(۶۴)، ۲۹۱-۳۰۵.
<https://www.sid.ir/paper/965387/fa>
- آریاصدر، مریم، رحیمی، داریوش، امیری، هادی، و زند، مهران. (۱۴۰۳). تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز چم انجیر. *مجله برنامه ریزی فضایی*، ۱۴(۴)، ۵۳-۸۰.
https://sppl.ui.ac.ir/article_28747.html
- عمادالدین، سمیه، و نظری گزیک، زهرا. (۱۴۰۳). برآورد میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخلسنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مشهد). *مجله جغرافیا و توسعه*، ۲۱(۷۳)، ۲۳۹-۲۲۱.
https://gdij.sb.ac.ir/article_8029.html
- نامی، محمد حسن، و نادری، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی میزان فرونشست کلان شهر تهران با استفاده از تکنیک تداخلسنجی پراکنشگر دائم و تصاویر راداری سنتینل-۱. *مجله دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۱۴(۲)، ۱۵۷-۱۳۸.
<http://dx.doi.org/10.32598/DMKP.14.2.866.1>

References

- Ait M'Barek, S., Bouslihim, Y., Rochdi, A., Miftah, A., & Beroho, M. (2024). The combined impact of climate change scenarios and land use changes on water resources in a semi-arid watershed. *Scientific African*, 25, e02319. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02319>
- Amini, A., & Hesami, A. (2017). The role of land use change on the sustainability of groundwater resources in the eastern plains of Kurdistan, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6), 297-305. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6014-3>
- Ammeish, E. S., Mabrouk, B. M., & Morsy, W. S. (2016). RS and GIS based approach for detecting landuse changes and its impact on the groundwater aquifer. *Life Science Journal*, 13(4), 62-74. <https://www.lifesciencesite.com>
- Amraei, B. (2022). Detection of the effect of climate change on the drainage of Aquifer of Birjand plain. *Journal of Geographical Sciences*, 23(64), 291-305. <https://sid.ir/paper/965387/en> (In Persian)
- Arslan, H. (2014). Estimation of spatial distribution of groundwater level and risky areas of seawater intrusion on the coastal region in Çarşamba Plain, Turkey, using different interpolation methods. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(8), 5123-5134. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3764-z>
- Aryasadr, M., Rahimi, D., Amiri, H., & Zand, M. (2024). Impact of Climate Change on Groundwater in Cham Anjir Aquifer. *Spatial Planning*, 14(4), 53-80. <https://doi.org/10.22108/sppl.2024.141550.1790> (In Persian)
- Asghari, S., Safari, S., & mollahouri, E. (2024). Investigating the height changes of the land surface using the SBAS radar interferometry technique in a part of Sarab county. *Journal of Geography and Planning*, 28(89), 1-16. <https://doi.org/10.22034/gp.2023.55307.3099> (In Persian)
- Bamal, A., Uddin, M. G., & Olbert, A. I. (2024). Harnessing machine learning for assessing climate change influences on groundwater resources: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(17), e37073. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37073>
- Carmona, G., Varela-Ortega, C., & Bromley, J. (2013). Supporting decision making under uncertainty: Development of a participatory integrated model for water management in the middle Guadiana river basin. *Environmental Modelling & Software*, 50, 144-157. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.007>
- Cemek, B., Güler, M., Kılıç, K., Demir, Y., & Arslan, H. (2007). Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 124(1-3), 223-234. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9220-y>
- Christakos, G. (2000). Modern spatiotemporal geostatistics. *Oxford University Press Publications*, Oxford, England. https://books.google.com/books/about/Modern_Spatiotemporal_Geostatistics.html?id=dNXnCwAAQBAJ
- Cochand, F., Brunner, P., Hunkeler, D., Rössler, O., & Holzkämper, A. (2021). Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater resources. *Science of the Total Environment*, 798, 148759. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148759>
- Dams, J., Woldeamlak, S. T., & Batelaan, O. (2008). Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(6), 1369-1385. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1369-2008>
- Delbari, M., Motlagh, M. B., Kiani, M., & Amiri, M. (2013). Investigating spatio-temporal variability of groundwater quality parameters using geostatistics and GIS. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 4(12), 3623-3632.

- https://scholar.google.com/scholar?hl=fa&as_sdt=0%2C5&q=Investigating+spatio-temporal+variability+of+groundwater+quality+parameters+using+geostatistics+and+GIS.
- Deng, L., & Shangguan, Z. P. (2016). Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China. *Land Degradation & Development*, 27(2), 144-156. <https://doi.org/10.1002/ldr.2537>
- Emadodin, S., & Nazari gazik, Z. (2023). Estimation of Subsidence Rate and Groundwater Level Changes in Mashhad Plain. *Geography and Development*, 21(73), 221-239. <https://doi.org/10.22111/gdij.2023.8029> (In Persian)
- Gleeson, T., Alley, W. M., Allen, D. M., Sophocleous, M. A., Zhou, Y., Taniguchi, M., & VanderSteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Groundwater*, 50(1), 19-26. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00825.x>
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. *Oxford University Press Publications*, Oxford, England. <https://global.oup.com/academic/product/geostatistics-for-natural-resources-evaluation-9780195115383?cc=ir&lang=en&>
- Hejiazian, M., Gurdak, J. J., Swarzenski, P., Odigie, K. O., & Storlazzi, C. D. (2017). Land-use change and managed aquifer recharge effects on the hydrogeochemistry of two contrasting atoll island aquifers, Roi-Namur Island, Republic of the Marshall Islands. *Applied Geochemistry*, 80, 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.006>
- Indhanu, N., Chalermmyanont, T., & Chub-Uppakarn, T. (2025). Spatial assessment of land use and land cover change impacts on groundwater recharge and groundwater level: A case study of the Hat Yai basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, 102097. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102097>
- Issaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). An introduction to applied geostatistics. *Oxford University Press Publications*, Oxford, England. <https://www.amazon.com/Introduction-Applied-Geostatistics-Edward-Isaaks/dp/0195050134>
- Kambhammettu, B. V. N. P., Allena, P., & King, J. P. (2011). Application and evaluation of universal kriging for optimal contouring of groundwater levels. *Journal of Earth System Science*, 120(3), 413-422. <https://doi.org/10.1007/s12040-011-0075-4>
- Keeler, B. L., & Polasky, S. (2014). Land-use change and costs to rural households: A case study in groundwater nitrate contamination. *Environmental Research Letters*, 9(7), 074002. <https://iopublishing.org/contacts/>
- Kumar, S., & Sondhi, S. K. (2005). Network design for groundwater level monitoring in upper Bari Doab canal tract, Punjab, India. *Irrigation and Drainage*, 54(4), 431-442. <https://doi.org/10.1002/ird.194>
- Kuroda, K., Hayashi, T., Do, A. T., Canh, V. D., Nga, T. T. V., Funabiki, A., & Takizawa, S. (2017). Groundwater recharge in suburban areas of Hanoi, Vietnam: Effect of decreasing surface-water bodies and land-use change. *Hydrogeology Journal*, 25(3), 727-742. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1528-2>
- Lee, J. Y., Yi, M. J., Moon, S. H., Cho, M., Won, J. H., Ahn, K. H., & Lee, J. M. (2007). Causes of the changes in groundwater level at Daegu, Korea: The effect of subway excavations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(3), 251-258. <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0074-x>
- Liu, X., Wang, Y., & Zhang, H. (2009). Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.007>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-184. <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=2099290>

- Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.005>
- Mishra, N., & Kumar, S. (2015). Impact of land use change on groundwater recharge in Haridwar District. *20th International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering*, IIT Roorkee, India. https://www.researchgate.net/publication/289538156_Impact_Of_Land_Use_Change_on_Groundwater_Recharge_in_Haridwar_District
- Mohammdy, M., Moradi, H. R., Zeinivand, H., & Temme, A. J. A. M. (2015). A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1515-1526. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0728-3>
- Moradi, H. R., Rajabi, M., & Faragzadeh, M. (2011). Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran. *Catena*, 84(1-2), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.016>
- Nami, M. H., & Naderi, M. (2024). Assessments of Land Subsidence in the Tehran Metropolitan Using Satellite Radar Interferometry Technique. *Disaster Prev. Manag. Know*, 14 (2), 138-157. <http://dpmk.ir/article-1-695-fa.html> (In Persian)
- Narany, T. S., Aris, A. Z., Sefie, A., & Keesstra, S. (2017). Detecting and predicting the impact of land use changes on groundwater quality, a case study in Northern Kelantan, Malaysia. *Science of the Total Environment*, 599-600, 844-853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.171>
- Omran, E. S. E. (2012). A proposed model to assess and map irrigation water well suitability using geospatial analysis. *Water*, 4(3), 545-567. <https://doi.org/10.3390/w4030545>
- Owuor, S. O., Butterbach-Bahl, K., Guzha, A. C., Rufino, M. C., Pelster, D. E., Díaz-Pinés, E., & Breuer, L. (2016). Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. *Ecological Processes*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0060-6>
- Reghunath, R., Sreedhara Murthy, T. R., & Raghavan, B. R. (2005). Time series analysis to monitor and assess water resources: A moving average approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 109(1-3), 65-72. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-5838-4>
- Richards, J. A., & Jia, X. (2005). Remote sensing digital image analysis. *Springer Publications*, New York City, United States. <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29711-1>
- Sajjad, M. M., Wang, J., Abbas, H., Ullah, I., Khan, R., & Ali, F. (2022). Impact of climate and land-use change on groundwater resources, study of Faisalabad district, Pakistan. *Atmosphere*, 13(7), 1097. <https://doi.org/10.3390/atmos13071097>
- Schiedek, T., Beier, M., & Ebhardt, G. (2008). Monitoring urban impact on groundwater quality: Statistical analyses in Darmstadt, Germany. *Geophysical Research Abstracts*, 10, EGU2008-A-10275. <https://doi.org/10.13140/2.1.1169.3449>
- Shimelis, B. G., Alamirew, T., Merkel, B. J., & Melesse, A. M. (2015). Land use and land cover change impact on groundwater recharge: The case of Haramaya Lake Watershed, Ethiopia. In *Landscape dynamics, soils and hydrological processes in varied climates*, 93-111, *Springer Publications*, New York City, United States. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18787-7_6
- Shirmohammadi, B., Moradi, H. R., Moosavi, V., Taie Semiromi, M., & Zeinali, A. (2013). Forecasting of meteorological drought using Wavelet-ANFIS hybrid model for different time steps (Case study: Southeastern part of east Azerbaijan province, Iran). *Natural Hazards*, 69(1), 386-402. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0716-9>

- Singh, O., & Kasana, A. (2017). GIS-based spatial and temporal investigation of groundwater level fluctuations under rice-wheat ecosystem over Haryana. *Journal of the Geological Society of India*, 89(5), 554-562. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0644-5>
- Singh, S., Singh, C., & Mukherjee, S. (2010). Impact of land-use and land-cover change on groundwater quality in the Lower Shiwalik hills: A remote sensing and GIS based approach. *Open Geosciences*, 2(2), 124-131. <https://doi.org/10.2478/v10085-010-0003-x>
- Wang, J., Gao, Y., & Wang, S. (2015). Land use/cover change impacts on water table change over 25 years in a desert-oasis transition zone of the Heihe River Basin, China. *Water*, 8(1), 11. <https://doi.org/10.3390/w8010011>
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. UNESCO, Paris, France. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2015>
- Xiao, D. N., Li, X. Y., Song, D. M., & Yang, G. J. (2006). Spatial-temporal dynamics simulation of groundwater mining in Minqin Oasis. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(6), 567-578. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-2001-9>
- Xiuwan, C. (2002). Using remote sensing and GIS to analyze land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International Journal of Remote Sensing*, 23(1), 107-124. <https://doi.org/10.1080/01431160010007051>
- Zhou, Z., Zhang, G., Yan, M., & Wang, J. (2012). Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(6), 3697-3710. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2217-1>