



Assessment of Natural and Anthropogenic Drivers of Groundwater Depletion in the Nazdasht Plain, Southern Iran

Samira Banavand ¹, Ommolbanin Bazrafshan ^{2*}, Mehdi Biniiaz ², Maryam Abbaszadeh ³

1. MSc Graduate in Watershed Management, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2. Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

3. Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

4. Ph.D. Graduate in Watershed Management, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

*Corresponding author: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

Received date: 11/05/2026

Accepted date: 07/08/2026



[10.22034/jdmal.2026.2088527.1528](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2088527.1528)

Abstract

This study aimed to analyze the natural and human factors influencing groundwater decline in the Nazdasht aquifer in northern Hormozgan Province. Groundwater data from six wells from 2002 to 2017, along with hydroclimatic information such as precipitation, temperature, evaporation, and discharge from regional meteorological and hydrometric stations, were examined. The Mann-Kendall and Pettitt tests, a non-parametric approach, were used to assess variable trends, while isohydric maps helped evaluate spatial changes in aquifer status. Land use changes were analyzed using Landsat satellite imagery with supervised classification to assess human impacts. Results indicated a significant decreasing trend in groundwater levels across the entire Nazdasht area, with declines estimated between about 33 and over 48 meters. The Pettitt test identified a hydrogeological regime shift around 2010-2013. Climatic analysis revealed increasing trends in precipitation, temperature, and evaporation at some stations, while river discharge decreased despite rising precipitation—suggesting reduced baseflow due to lower water tables. Land use and water extraction data indicated that more wells, expanded agriculture, and increased groundwater extraction exerted substantial pressure on the aquifer. Overall, the study shows that human activities, especially agriculture and groundwater pumping, are the primary drivers of water level decline, posing risks of land subsidence and threatening the region's water resource sustainability.

Keywords: Climatic variables, Trend analysis, Land use change, Changes aquifer

How to cite this article

Banavand, S., Bazrafshan, O., Biniiaz, M. and Abbaszadeh, M. (2026). Assessment of Natural and Anthropogenic Drivers of Groundwater Depletion in the Nazdasht Plain, Southern Iran. *Desert Management*, 14(1), 1-20. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2088527.1528](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2088527.1528)



Extended Abstract

Introduction

Groundwater resources are vital for supporting agriculture, ecosystems, and socio-economic growth in arid and semi-arid areas. In many developing nations, including Iran, groundwater has become the primary water source due to population growth, rising demand, and climate variability. However, over-extraction, expanding irrigated agriculture, and poor water management have led to notable declines in groundwater levels across many aquifers in Iran. A key consequence of ongoing groundwater depletion is land subsidence, which occurs when excessive pumping lowers pore water pressure, resulting in the compaction of aquifer sediments. The Nazdasht Plain (Fig 1) in northern Hormozgan Province is an important agricultural zone where groundwater use has increased in recent decades, driven by the expansion of irrigated land, more wells, and inefficient irrigation techniques. This plain spans about 132 km², with over 75% covered by mountainous terrain, while the remaining area consists of alluvial deposits that form the primary aquifer. Despite the region's agricultural importance, research on both natural and human influences on groundwater decline remains limited. Additionally, the risk of land subsidence from sustained water level decline has not been thoroughly evaluated. This research aims to examine how both natural and human-related factors contribute to declining groundwater levels and to evaluate the risk of land subsidence in the Nazdasht Plain aquifer. The study analyzes long-term groundwater trends using well data, assesses changes in climate variables such as precipitation, temperature, and evaporation, investigates river discharge patterns and their connection to groundwater fluctuations, and reviews land-use changes and agricultural growth over 30 years. It also identifies the main causes of groundwater depletion and discusses the hydrogeological mechanisms that may cause irreversible compaction and subsidence.

Materials and Methods

To examine the causes of groundwater depletion in the Nazdasht aquifer, data on hydrogeology, climate, hydrology, and land use were analyzed. Groundwater levels from six observation wells, spanning 2002–2017, were provided by the Hormozgan Regional Water Authority. These wells are strategically located across different parts of the plain—north, northwest, south, southwest, and east—along with a representative well that covers the entire area, facilitating spatial analysis of water level variations. Hydro-climatic data including precipitation, temperature, evaporation, and river discharge were collected from meteorological and hydrometric stations in and around the study site. Precipitation data came from five rain gauge stations—Abanama, Kharaji, Roodan, Nazdasht, and Rahdar—while temperature and evaporation data were recorded at synoptic stations such as Sarkam, Minab, and Roodan. River discharge measurements were obtained from two hydrometric stations, Abanama and Sarkam (see Table 1). Temporal trends in groundwater levels and hydro-climatic variables were analyzed using non-parametric statistical tests. The Mann–Kendall test was employed to identify monotonic trends over time, while the Pettitt test aimed to detect change points and abrupt shifts in the data. Significance levels of 95% and 99% confidence were considered. Spatial variability in groundwater conditions was examined through the creation of isohydric maps for 2003 and 2017, which facilitated the analysis of flow patterns, hydraulic gradients, and cones of depression in the aquifer. Land use and land cover changes were studied using Landsat satellite images from 1995 (Landsat 5 TM), 2015 (Landsat 7 ETM+), and 2025 (Landsat 8 OLI). A supervised Maximum Likelihood classification produced five land-use classes: agricultural, barren/rocky, rangeland, urban, and water bodies. Classification accuracy was validated with a confusion matrix and the Kappa coefficient. Data on active wells, groundwater extraction volumes, irrigation practices, and dominant crops were collected from regional water authority reports; these data from 2002, 2009, and 2014 helped evaluate human impacts on groundwater depletion.

Results and Discussion

Groundwater levels in the Nazdasht aquifer have declined significantly and persistently over the past three decades. The Mann–Kendall test indicates a statistically significant decline across all observation wells, with Z-statistics between -18.42 and -22.90 ($p < 0.01$). Groundwater levels have declined by 33 meters in the southern region and over 48 meters in the southwestern part of the aquifer. The average decline rate is about 1.6 to 2.0 meters annually, with no indication of recovery. The Pettitt test identified a significant shift between 2010 and 2013 (mainly in 2012–2013) at most wells, suggesting a transition to a more unstable hydrogeological state and faster groundwater depletion (Table 2). This period aligns with intensified well drilling and increased agricultural activities in the area. Spatial analysis of groundwater contours shows notable changes: in 2003, contours were evenly spaced indicating a natural hydraulic gradient, but by 2017

(Fig 2), contour lines are compressed with local depression cones forming. These features point to pumping centers reversing groundwater flow locally and creating gradients toward well fields, highlighting an imbalance between recharge and extraction. Climatic data indicate significant increases in precipitation at stations like Abanama, Kharaji, and Roodan, with change points around 2003-2004. Temperature showed a rising trend, while evaporation remained statistically unchanged over the long term. Despite higher rainfall, groundwater levels kept falling, highlighting human activities as the primary cause. River discharge at both hydrometric stations has decreased markedly (Mann–Kendall $Z = -9.02$ and -5.28) (Table 3), even with increased rainfall, indicating diminished groundwater input to baseflow (Fig 3). The decoupling of rainfall and runoff clearly indicates that the aquifer can no longer support river flow during dry periods. Remote sensing shows a notable increase in agricultural land from 5.14% in 1995 to 6.80% in 2025 (Figures 4 and 5), along with an increase in active wells from 84 in 2002 to 119 in 2014, and a rise in annual groundwater extraction from approximately 8.2 million m^3 to over 120 million m^3 (Table 4). During this time, agricultural water use expanded from 81% to over 95%. Flood irrigation remains the primary method, and electric pumps have enabled continuous pumping. These findings underscore how agricultural expansion and excessive groundwater extraction are driving aquifer depletion. Ongoing groundwater decline could also heighten the risk of land subsidence caused by the compaction of fine-grained alluvial sediments.

Conclusion

The findings indicate that groundwater depletion in the Nazdasht Plain is mainly driven by human activities, particularly agricultural expansion and excessive groundwater extraction. Climatic variations, including precipitation changes, cannot explain the magnitude of groundwater decline observed in the region. The 33–48m drop in groundwater levels, formation of depression cones, reduction of river baseflow, and expansion of agricultural land all indicate a serious imbalance in the aquifer system. Continued overexploitation may lead to irreversible aquifer damage, increased land subsidence risk, and reduced long-term water availability. Therefore, effective management measures are required, including controlling groundwater extraction, improving irrigation efficiency and strengthening groundwater monitoring using hydrogeological and remote sensing data. Artificial recharge programs and legal restrictions on new well drilling are also urgently needed.

Keywords: Climatic variables, Trend analysis, Land use change, Changes aquifer

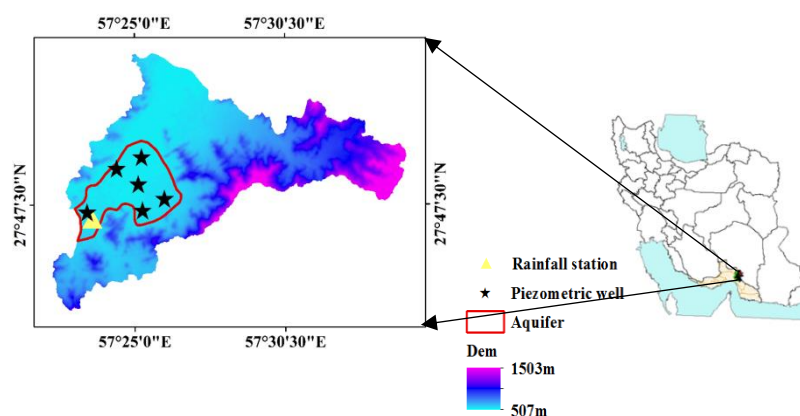


Fig 1. Location map of the study area and meteorological stations.

Table 1. Description of meteorological stations used in this study

Station Name	River	Region	Elevation (m)	Year of Establishment	Station Type
Sarkam	Shirin	Mosafarabad	440	2002	Thermometric
Minab	Minab	Minab	300	1967	Evaporation
Roodan	Roodan	Roodan	250	2001	Evaporation
Abnama	Roodan	Roodan	220	1994	Hydrometric (Class 1)
Kharaji	Roodan	Roodan	190	1979	Rain Gauge (Ordinary)
Roodan	Roodan	Mosafarabad	590	1997	Rain Gauge (Ordinary)
Nazdasht	Roodan	Nazdasht	550	2001	Rain Gauge (Ordinary)
Rahdar	Ziarat Ali	Mosafarabad	460	2019	Rain Gauge (Ordinary)
Abnama	Roodan	Roodan	220	1998	Rain Gauge (Ordinary)

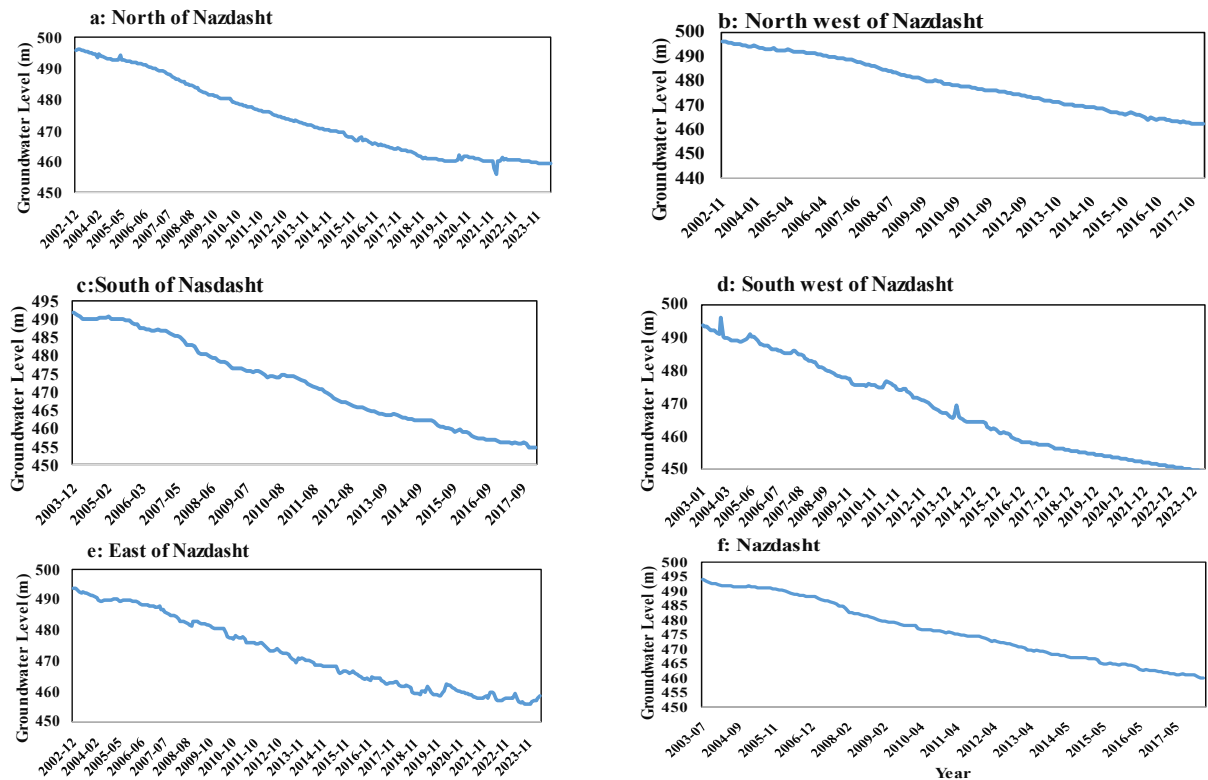


Fig 2. Groundwater levels in (a) North Nazdasht, (b) Northwest Nazdasht, (c) South Nazdasht, (d) Southwest Nazdasht, (e) East Nazdasht, and the entire Nazdasht plain. The horizontal axis shows the year and month of measurement, with the first number indicating the year and the second the month.

Table 2. Mann–Kendall and Pettitt test statistics for groundwater levels in the Nazdasht aquifer. (Significant at the 99% confidence level.)**

Significance (Pettitt)	Pettitt statistic	Change year (AD)	Significance (Mann–Kendall)	Mann–Kendall statistic (Z)	Well name
0.00**	8606	November 2020	0.00**	-18.87	Whole Nazdasht
0.00**	6400	February 2011	0.00**	-18.42	South Nazdasht
0.00**	15002	August 2013	0.00**	-22.11	East Nazdasht
0.00**	15252	July 2013	0.00**	-22.46	North Nazdasht
0.00**	7396	August 2010	0.00**	-19.29	Northwest
0.00**	14998	November 2013	0.00**	-22.9	Southwest Nazdash

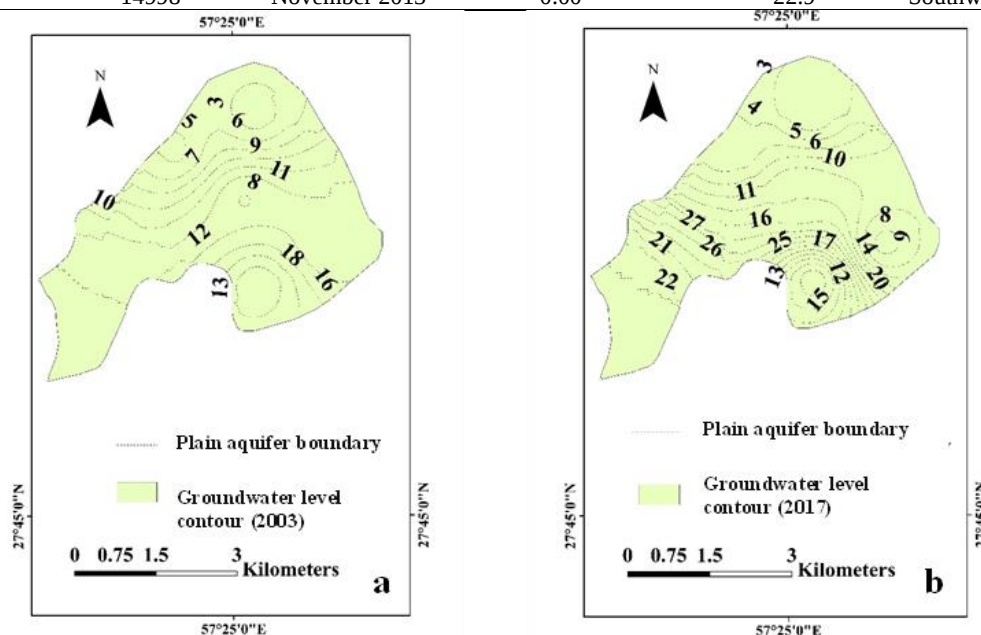


Fig 3. Groundwater level contours in the Nazdasht Plain: (a) 2003 versus (b) 2017.

Table 3. Trend analysis results of hydro-climatic variables in and around the Nazdasht Plain

Parameter	Station name	Mann–Kendall statistic (Z)	P-value (MK)	Pettitt statistic (U)	P-value (Pettitt)	Month	Change year (AD)
Precipitation	Abnama	4.04	0.00**	10548	0.00**	November	2004
Precipitation	Kharaji	4.26	0.00**	10866	0.00**	October	2004
Precipitation	Roodan	4.04	0.00**	10548	0.00**	October	2004
Precipitation	Nazdasht	4.04	0.00**	10548	0.00**	October	2004
Precipitation	Rahdar	4.04	0.00**	10551	0.00**	October	2004
Evaporation	Minab	-0.85	0.390	4188	0.00**	November	2004
Evaporation	Roodan	9.17	0.00**	29082	0.00**	March	2018
Evaporation	Sarkam	8.2	0.00**	27318	0.00**	March	2002
Temperature	Sarkam	2.83	0.00**	21620	0.00**	October	2011
River discharge	Abnama	-9.02	0.00**	12792	0.00**	November	2004
River discharge	Sarkam	-5.28	0.00**	5913	0.00**	February	1999

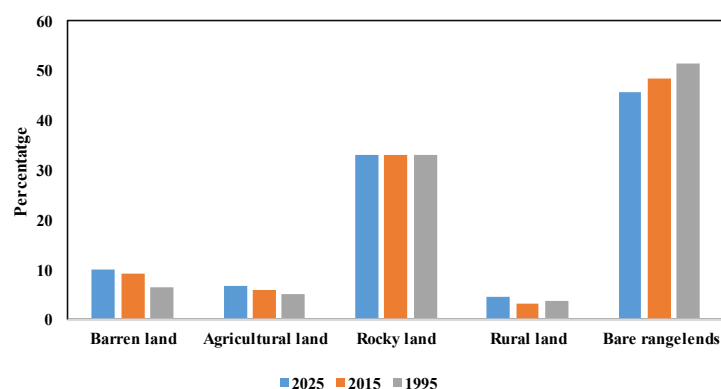
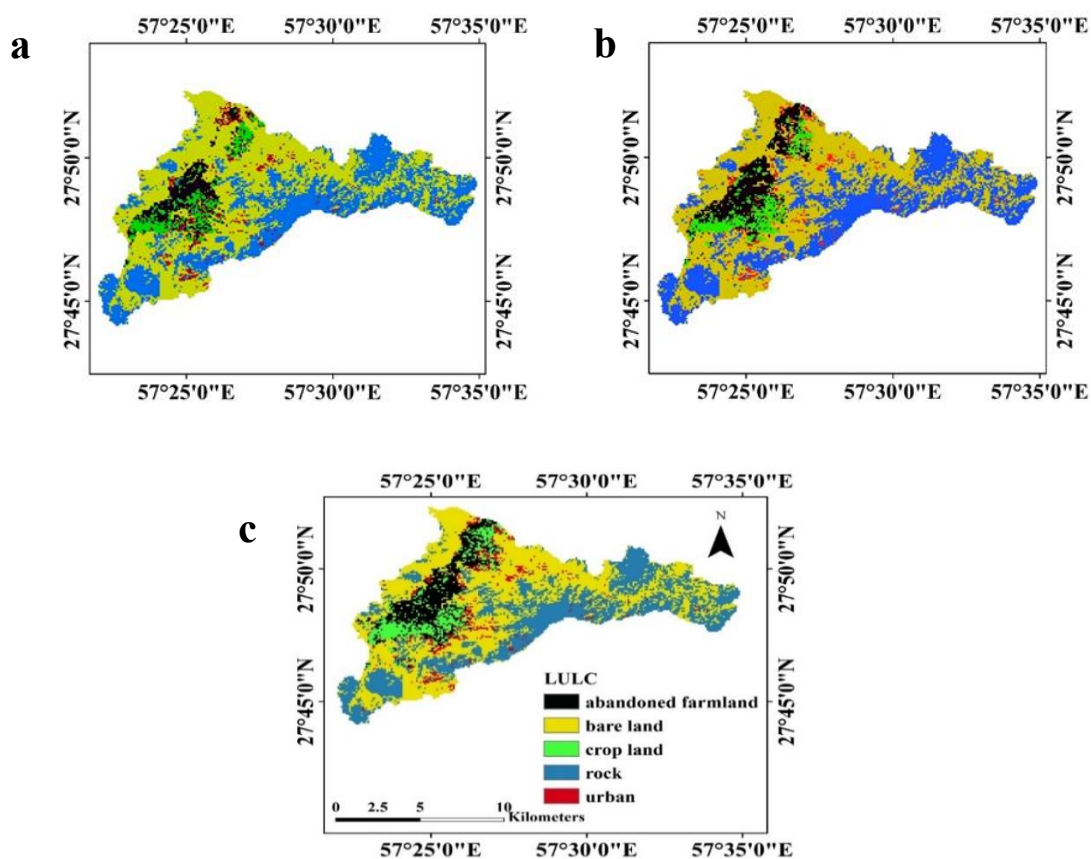
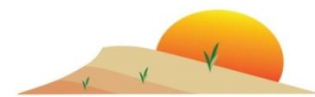
**Fig 4. Percentage change in land use in Nazdasht during the three study periods.****Fig 5. Land use/land cover (LU/LC) changes for the years 2006, 2014, and 2025.**

Table 4. Summary of groundwater withdrawal indicators from authorized wells in the Nazdasht Plain.

Indicator	2002	2009	2014
Number of active wells	84	109	119
Total annual extraction (MCM)	8.2	98.8	120.51
Agricultural water consumption (%)	81	94	>95
Other uses	Low (drinking & services)	Negligible	Negligible
Dominant irrigation method	Flood irrigation	Flood irrigation	Flood irrigation
Dominant pumping power source	Mixed (diesel/electric)	Electricity	Electricity
Dominant crops	Varied (traditional crops)	Field crops and orchards	Date palms*, citrus**, wheat***, alfalfa****
Key characteristics of the period	Small-scale extraction	Peak over-extraction	Continued high extraction

Phoenix dactylifera*, *Citrus spp*, ****Medicago sativa*, *****Triticum aestivum*.



بررسی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر افت آب زیرزمینی نازدشت - جنوب ایران

سمیرا بناوند، ام البنین بذرافشان^{۱*}، مهدی بی نیاز^۲، مریم عباس زاده^۴

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
 ۲. استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
 ۳. استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
 ۴. دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
- * نویسنده مسئول: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶



[10.22034/jdmal.2026.2088527.1528](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2088527.1528)

چکیده

پژوهش حاضر با هدف واکاوی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان نازدشت واقع در شمال استان هرمزگان انجام شد. بدین منظور، داده‌های تراز آب زیرزمینی شش چاه مشاهده‌ای طی دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ به همراه داده‌های هیدرواقليمی شامل بارش، دما، تبخیر و دبی ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منطقه مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحلیل روند تغییرات متغیرها از آزمون‌های ناپارامتری من-کندال و پتیت استفاده شد و تغییرات مکانی وضعیت آبخوان نیز با استفاده از نقشه‌های هم‌تراز ارزیابی شد. همچنین به منظور بررسی نقش عوامل انسانی، تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده تهیه شد. نتایج نشان داد که سطح آب زیرزمینی در تمامی بخش‌های نازدشت دارای روند کاهشی معنی‌دار بوده است. مقدار افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف آبخوان بین حدود ۳۳ تا بیش از ۴۸m برآورد شد. آزمون پتیت نیز وقوع تغییر رژیم هیدروژئولوژیک بین سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ نشان داد. بررسی متغیرهای اقلیمی نشان داد که بارش، دما و تبخیر در برخی ایستگاه‌های منطقه روند افزایشی داشته در حالیکه دبی رودخانه‌ها با وجود افزایش بارش روندی کاهشی داشته است که بیانگر کاهش جریان پایه در اثر افت سطح ایستابی است. نتایج تحلیل تغییرات کاربری اراضی و داده‌های بهره‌برداری از منابع آب نیز نشان داد که افزایش تعداد چاه‌ها، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و افزایش برداشت آب زیرزمینی فشار قابل توجهی بر آبخوان وارد کرده است. به طور کلی، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که افت سطح آب زیرزمینی در دشت نازدشت بیشتر ناشی از عوامل انسان‌زاد به‌ویژه توسعه کشاورزی و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی است و ادامه این روند می‌تواند خطر فرونشست زمین و کاهش پایداری منابع آب منطقه را تشدید کند.

واژگان کلیدی: عوامل اقلیمی، تحلیل روند، تغییرات کاربری اراضی، تغییرات آبخوان

استناد به این مقاله

بناوند، سمیرا، بذرافشان، ام البنین، بی‌نیاز، مهدی و عباس زاده، مریم. (۱۴۰۵). بررسی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر افت آب زیرزمینی نازدشت - جنوب ایران. مدیریت بیابان، ۱۴(۱)، ۱-۲۰. DOI: [10.22034/jdmal.2026.2088527.1528](https://doi.org/10.22034/jdmal.2026.2088527.1528)



■ مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، هستند و نقش اساسی در تأمین آب شرب، توسعه کشاورزی، پایداری بوم‌سازگان‌ها و فعالیت‌های اقتصادی دارند (۶). در بسیاری از مناطق جهان، محدودیت منابع آب سطحی و افزایش تقاضای آب ناشی از رشد جمعیت و توسعه فعالیت‌های انسانی، وابستگی به منابع آب زیرزمینی را به‌طور چشمگیری افزایش داده است. این منابع که در گذشته به‌عنوان ذخایری به‌نسبت پایدار شناخته می‌شدند، طی دهه‌های اخیر زیر تأثیر فشارهای ناشی از توسعه کشاورزی، افزایش برداشت از چاه‌ها، گسترش شهرنشینی و تغییرات اقلیمی با کاهش قابل توجه ذخایر مواجه شده‌اند. در نتیجه، افت مداوم سطح آب زیرزمینی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت منابع آب در بسیاری از آبخوان‌های جهان تبدیل شده است (۸؛ ۲۹).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تغییر اقلیم با کاهش بارش، افزایش دما و تشدید تبخیر و تعرق (۱۹)، نقش مهمی در کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها دارند. این شرایط موجب می‌شود که منابع آب زیرزمینی نسبت به برداشت‌های انسانی آسیب‌پذیری بیشتری پیدا کنند. از سوی دیگر، توسعه کشاورزی آبی، افزایش تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، تغییر کاربری اراضی و افزایش تقاضای آب در بخش‌های مختلف، تعادل میان تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها را برهم زده و موجب افت مستمر سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌ها شده است (۱۰). در همین راستا، مطالعات موردی پایش‌های محلی نیز، روند افت سطح آب زیرزمینی را در واکنش به فشارهای انسانی و تغییرات کاربری در مقیاس‌های خرد تأیید می‌کنند (۳۰). بررسی‌ها در مقیاس جهانی نشان می‌دهد که در بسیاری از آبخوان‌ها، روند افت سطح آب زیرزمینی طی دهه‌های اخیر شدت یافته و به یکی از شاخص‌های اصلی تنش آبی تبدیل شده است.

در ایالات متحده، به‌ویژه در مناطق کشاورزی ایالت کالیفرنیا، برداشت گسترده آب زیرزمینی برای آبیاری موجب افت قابل توجه سطح آبخوان‌ها شده است (۹). در شمال چین نیز افزایش تقاضای آب در بخش‌های شهری و

کشاورزی موجب کاهش شدید ذخایر آب زیرزمینی و افت تراز آب در بسیاری از دشت‌ها شده است (۳۳). همچنین در کشورهای جنوب و جنوب شرق آسیا، از جمله اندونزی، بهره‌برداری فزاینده از منابع آب زیرزمینی در کنار رشد سریع جمعیت و توسعه شهری، فشار زیادی بر آبخوان‌ها وارد کرده است (۲). در ایران نیز در بسیاری از دشت‌ها در استان هرمزگان (۵)، آذربایجان شرقی (۱۱)، فارس (۱۳) و همدان (۱۶) افت قابل ملاحظه‌ای آب‌های زیرزمینی گزارش شده است. این روند در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مشاهده می‌شود و بیانگر آن است که مدیریت ناپایدار منابع آب زیرزمینی می‌تواند پایداری منابع آبی را با تهدید جدی مواجه سازد (۷، ۱۵).

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک جهان، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. میانگین بارندگی سالانه کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی محسوب می‌شود؛ ازاین‌رو بخش عمده نیازهای آبی کشور از طریق آبخوان‌ها تأمین می‌شود. طی دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، توسعه کشاورزی آبی، افزایش برداشت از چاه‌ها و وقوع خشکسالی‌های متوالی، موجب افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور شده است (۱۸، ۲۸). در بسیاری از مناطق، کاهش تراز آب زیرزمینی نه‌تنها باعث کاهش قابلیت بهره‌برداری از منابع آب شده، بلکه پایداری فعالیت‌های کشاورزی و امنیت آبی را نیز تحت تأثیر قرار داده است.

نازدشت به‌عنوان یکی از دشت‌های مهم جنوب ایران، وابستگی قابل توجهی به منابع آب زیرزمینی برای تأمین نیازهای کشاورزی و شرب دارد. طی سال‌های اخیر، افزایش تقاضای آب، توسعه فعالیت‌های کشاورزی، حفر چاه‌های متعدد و کاهش بارش‌ها، موجب افت تدریجی سطح آب زیرزمینی در این دشت شده است. علاوه بر این، تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌تواند الگوی مصرف آب، میزان رواناب و فرآیند تغذیه آبخوان را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی و شناسایی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر آن، نقش مهمی در مدیریت پایدار منابع آب این منطقه دارد. مرور پژوهش‌های پیشین، نشان می‌دهد که اگرچه

دارد که بیشتر در بخش‌های پست‌تر و غربی منطقه قرار گرفته‌اند و محل تجمع رواناب، رسوبات آبرفتی و شکل‌گیری ذخایر آب زیرزمینی محسوب می‌شوند.

از نظر توزیع ارتفاع، محدوده دارای اختلاف ارتفاع قابل‌توجهی است؛ به‌طوری‌که بیشترین و کمترین ارتفاع به‌ترتیب 1068m و 520m است. این اختلاف ارتفاع حدود 550m ، زمینه‌ساز شکل‌گیری شیب‌های مؤثر در مسیر حرکت جریان‌های سطحی، ایجاد آبراهه‌ها و مسیل‌ها، و همچنین کنترل الگوی تغذیه و تخلیه آبخوان است (۲۷). چنین ویژگی‌هایی در بررسی‌های مربوط به تغذیه آب زیرزمینی، تحلیل رواناب، فرسایش خاک و مدیریت منابع آب اهمیت زیادی دارد. همچنین نتایج بررسی کیفیت آب زیرزمینی منطقه نشان می‌دهد که آب زیرزمینی دشت نازدشت در بیشتر مناطق برای مصارف مختلف محدودیت جدی ندارد و می‌تواند برای آبیاری محصولات زراعی و باغی مورد استفاده قرارگیرد.

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل تراز آب زیرزمینی، بارش، دبی، دما و تبخیر است. تغییرات تراز آب زیرزمینی توسط ۶ حلقه چاه مشاهده‌ای که از سال ۱۳۸۱ در منطقه اندازه‌گیری شده‌اند، پایش گردیده است. همچنین ۵ ایستگاه بارانسنجی، ۳ ایستگاه تبخیرسنجی و ۴ ایستگاه هیدرومتری در اطراف حوضه و درون دشت توزیع شده‌اند که داده‌های لازم برای تحلیل عوامل طبیعی مؤثر بر تغییرات آبخوان را فراهم می‌کنند (جدول ۱، شکل ۱ ب). با توجه به مساحت نسبتاً محدود دشت و ماهیت آبرفتی و نسبتاً همگن بخش دشتی آن، شبکه پایش موجود برای بررسی روند زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی و تحلیل عوامل مؤثر بر آن مناسب ارزیابی می‌شود.

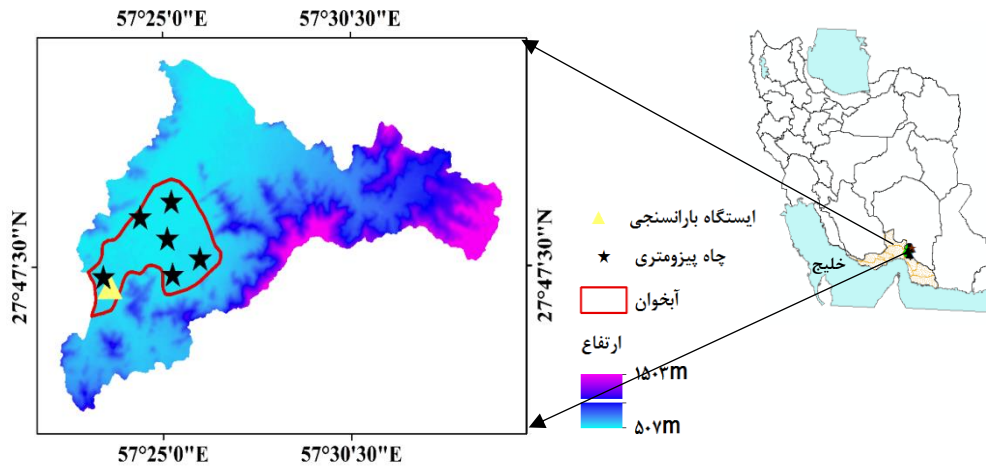
پیش از تحلیل، کلیه سری‌های زمانی از نظر پیوستگی، کیفیت ثبت و وجود داده‌های مفقود بررسی شدند. داده‌های غیرواقعی و پرت شناسایی و حذف شد و داده‌های مفقود مقطعی از طریق درون‌یابی زمانی بازسازی شد؛ سری‌هایی با گسست قابل‌توجه از تحلیل خارج شدند (۲۲)، (۲۶). همگنی سری‌ها با توجه به ثبات موقعیت ایستگاه‌ها و تداوم دوره آماری ارزیابی شد و در پایان، یکسان‌سازی مقیاس زمانی و بازبینی واحدها انجام شد.

پژوهش‌های متعددی درباره تغییرات سطح آب زیرزمینی، شرایط اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی در مناطق مختلف ایران انجام شده است، اما در بسیاری از آنها این عوامل به‌صورت جداگانه بررسی شده‌اند و ارتباط متقابل میان آنها کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. در مورد نازدشت نیز بیشتر بررسی‌ها بر تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی یا بررسی برخی پارامترهای هیدرواقلیمی تمرکز داشته‌اند و پژوهش جامعی که بتواند همزمان تأثیر عوامل طبیعی و انسانی را بر افت سطح آبخوان ارزیابی کند، کمتر انجام شده‌است. همچنین نقش تغییر کاربری اراضی و پوشش گیاهی در تغییر الگوی تغذیه و تخلیه آبخوان در این منطقه به‌صورت دقیق بررسی نشده‌است. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت نازدشت است. در پژوهش حاضر، با تحلیل روند تغییر سطح آب زیرزمینی و بررسی همزمان متغیرهای هیدرواقلیمی، برداشت آب و تغییرات کاربری اراضی، تلاش شده است محرک‌های مؤثر بر کاهش ذخایر آب زیرزمینی شناسایی شوند تا زمینه برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در منطقه فراهم شود.

■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی و معرفی داده‌ها

محدوده مطالعاتی نازدشت دشت در شمال استان هرمزگان واقع شده است (شکل ۱). این منطقه به‌عنوان یکی از نواحی مهم از نظر منابع آب زیرزمینی و فعالیت‌های کشاورزی در جنوب ایران، از دیدگاه هیدرولوژیک و مدیریتی دارای اهمیت ویژه‌ای است و بررسی آن می‌تواند در شناخت روند تغییرات ذخایر آب زیرزمینی و عوامل مؤثر بر آن نقش مهمی ایفا کند. این محدوده در عرض‌های جغرافیایی $27^{\circ}44'$ تا $27^{\circ}53'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $57^{\circ}23'$ تا $57^{\circ}36'$ شرقی قرار دارد و با مساحتی برابر با $131/6\text{km}^2$ ، دارای تنوع توپوگرافی قابل‌توجهی است. از این مقدار، حدود $79/98\text{km}^2$ را نواحی کوهستانی تشکیل می‌دهد که بیشتر دارای شیب‌های تند، سنگ‌های مقاوم و قابلیت زیاد تولید رواناب و فرسایش هستند. در مقابل، $81/32\text{km}^2$ از مساحت منطقه به نواحی دشتی و نسبتاً هموار اختصاص



شکل ۱. محدوده مورد بررسی و ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی

نام ایستگاه	رودخانه	نام محدوده مطالعاتی	ارتفاع (m)	سال تأسیس	نوع ایستگاه
سرکم	شیرین	مسافرآباد	۴۴۰	۱۳۸۱	دماسنجی
میناب	میناب	میناب	۳۰۰	۱۳۴۶	تبخیر سنجی
رودان	رودان	رودان	۲۵۰	۱۳۸۰	تبخیر سنجی
آبنا	رودان	رودان	۲۲۰	۱۳۷۳	آب سنجی درجه ۱
خراجی	رودان	رودان	۱۹۰	۱۳۵۸	بارانسنج معمولی
رودان	رودان	مسافرآباد	۵۹۰	۱۳۷۶	بارانسنج معمولی
نازدشت	رودان	کردی شیرازی	۵۵۰	۱۳۸۰	بارانسنج معمولی
رهدار	زیارتعلی	مسافرآباد	۴۶۰	۱۳۹۸	بارانسنج معمولی
آبنا	رودان	رودان	۲۲۰	۱۳۷۷	بارانسنج معمولی

آزمون من-کندال

که در آن t_p تعداد داده‌های مساوی در گروه p است. سپس آماره استاندارد شده Z به شکل رابطه (۴) محاسبه گردید:

(۴)

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

در صورتی که مقدار $|Z|$ از مقدار بحرانی در سطح معنی‌داری مورد نظر (مثلاً ۰.۰۵) بزرگ‌تر باشد، روند در سری زمانی معنادار تلقی گردید.

آزمون تغییر ناگهانی پتیت

به‌منظور شناسایی تغییر ناگهانی و معنادار در سری

آزمون من-کندال برای تشخیص وجود روند افزایشی یا کاهش در سری زمانی استفاده می‌شود (۲۰). آماره آزمون به صورت رابطه (۱) و با کمک رابطه‌های (۲)، (۳) و (۴) محاسبه شد:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (۱)$$

که در آن:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (۲)$$

در این رابطه x_i و x_j مقادیر مشاهده شده در زمان‌های i و j هستند و n تعداد کل داده‌ها است. واریانس آماره S به صورت رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (۳)$$

بیشترین احتمال اختصاص می‌دهد. فرآیند طبقه‌بندی در محیط نرم‌افزار ENVI 4.8 انجام شد (۱).

نمونه‌های آموزشی برای هر کلاس کاربری از طریق تفسیر بصری تصاویر، نقشه‌های مرجع موجود و بازدیدهای میدانی انتخاب شدند تا نماینده مناسبی از ویژگی‌های طیفی هر کلاس باشند. به‌منظور ارزیابی صحت نقشه‌های کاربری اراضی استخراج‌شده، از ماتریس خطا^۴ استفاده شد. در این راستا، از شاخص ضریب کاپا^۵ و دقت کلی به‌عنوان معیار کمی ارزیابی دقت طبقه‌بندی محاسبه شد. نمونه‌های آموزشی به دو دسته‌ی آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شدند. دسته‌ی آزمون که شامل نقاطی بود که در فرآیند طبقه‌بندی مشارکت نداشتند، برای محاسبه‌ی ماتریس خطا و شاخص‌های دقت به‌کار گرفته شد.

ضریب کاپا در رابطه (۶) میزان توافق بین طبقه‌بندی انجام‌شده و داده‌های مرجع را با در نظر گرفتن احتمال توافق تصادفی بیان گردید (۵).

(۶)

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^j x_{ii} - \sum_{i=1}^j (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^j (x_{i+} \times x_{+i})}$$

که در آن: N : تعداد کل پیکسل‌ها در ماتریس خطا، x_{ii} : مجموع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا؛ x_{i+} : مجموع مقادیر ردیف i ؛ x_{+i} : مجموع مقادیر ستون i ؛ j : تعداد کلاس‌های کاربری اراضی می‌باشد. بر اساس دامنه ضریب کاپا، مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده توافق بسیار بالا و دقت مناسب طبقه‌بندی، و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر دقت پایین و توافق تصادفی هستند.

تهیه نقشه‌های هم‌تراز

به‌منظور تحلیل مکانی وضعیت آبخوان، نقشه‌های هم‌تراز آب زیرزمینی برای سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۹۶ تهیه شد. بدین منظور، داده‌های تراز آب زیرزمینی ۶ حلقه چاه مشاهده‌ای در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 به‌صورت یک لایه‌ی نقطه‌ای وارد شد. سپس با استفاده از

زمانی تراز آب زیرزمینی، از آزمون ناپارامتری پتیت^۱ استفاده شد. این آزمون برای تعیین وجود و زمان وقوع یک نقطه تغییر در سری‌های زمانی همگن توسعه یافت و بر پایه مقایسه رتبه‌ای داده‌ها استوار است. روش پتیت سری زمانی شامل n مشاهده مستقل را به دو زیرسری در هر زمان t تقسیم می‌کند و با مقایسه زوجی داده‌های قبل و بعد از آن زمان، امکان تشخیص تغییر ناگهانی در میانگین سری زمانی را فراهم می‌سازد. آماره آزمون به صورت رابطه (۵) تعریف گردید:

(۵)

$$U_{t,n} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(X_i - X_j)$$

که در آن تابع علامت به صورت مثبت، منفی یا صفر بسته به اختلاف مقادیر تعریف می‌شود. مقدار آزمون پتیت برابر با بیشینه قدر مطلق آماره $U_{t,n}$ در کل طول سری زمانی است و زمان متناظر با این بیشینه، به‌عنوان زمان وقوع تغییر ناگهانی در نظر گرفته شد (۲۳).

تغییرات کاربری اراضی

به‌منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین (LULC^۲)، از تصاویر ماهواره‌ای سری Landsat استفاده شد. تصاویر مورد استفاده شامل تصاویر ماهواره‌ای Landsat 5 TM برای سال ۱۳۷۴، Landsat 7 +ETM برای سال ۱۳۹۴ و Landsat 8 OLI برای سال ۱۴۰۴ بود. کلیه تصاویر از پایگاه داده رسمی سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) تهیه شدند. با توجه به شرایط فیزیوگرافی منطقه و کاربری‌های غالب، پنج طبقه کاربری اراضی شامل اراضی کشاورزی، اراضی سنگی و بدون پوشش، مراتع، مناطق مسکونی، پهنه‌های آبی تعریف شد. برای استخراج نقشه‌های کاربری اراضی، از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده با خوارزمیک (الگوریتم) بیشترین شباهت^۳ استفاده شد. این خوارزمیک با فرض توزیع نرمال داده‌ها، احتمال تعلق هر پیکسل به طبقه‌های مختلف را محاسبه و پیکسل را به طبقه با

^۱ Pettitt test

^۲ Land Use/Land Cover

^۳ Maximum Likelihood Classification

^۴ Confusion Matrix

^۵ Kappa Coefficient

حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ سازگار است؛ به گونه‌ای که حتی کاهش‌های محدود در حجم ذخیره آب می‌تواند موجب افت قابل توجه سطح ایستابی شود. روند افت یکنواخت و فقدان بازیابی پایدار در سری‌های زمانی نشان می‌دهد که تعادل بین تغذیه طبیعی و برداشت در مقیاس دشت به‌طور مزمین برهم خورده و آبخوان در وضعیت اضافه‌برداشت قرار دارد. بررسی‌های متعددی در آبخوان‌های نیمه‌خشک جهان نیز نشان داده‌اند که برداشت بیش از حد از آب زیرزمینی می‌تواند موجب افت پیوسته سطح آب، کاهش کیفیت منابع و تشدید پدیده نشست زمین شود (۴، ۱۲، ۲۶). در ایران نیز پژوهش‌ها نشان داده‌اند که آبخوان‌های آبرفتی مناطق خشک و نیمه‌خشک در صورت عدم تعادل بین تغذیه و برداشت به سرعت دچار افت سطح آب، افزایش شوری و کاهش بهره‌دهی چاه‌ها می‌شوند (۲۱؛ ۱۶). برای اساس، افت تجمعی ۳۳ تا ۴۸ m در دشت نازدشت طی دو دهه اخیر بیانگر وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی در این محدوده است. در چنین شرایطی، دستیابی به پایداری منابع آب زیرزمینی مستلزم اجرای راهکارهایی مانند کنترل برداشت از چاه‌ها، مدیریت تقاضای آب در بخش کشاورزی، افزایش بهره‌وری مصرف آب و توسعه برنامه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان است (۱۰؛ ۱۲).

تحلیل روند تراز آب زیرزمینی

نتایج آزمون من-کندال نشان داد که تمامی چاه‌های مورد بررسی در آبخوان نازدشت روند تغییرات تراز آب زیرزمینی کاهشی و از نظر آماری معنی‌دار است (جدول ۲). مقدار آماره من-کندال در محدوده ۲۲/۹۰- تا ۱۸/۴۲- قرار دارد که بیانگر شدت بالای روند نزولی در کل محدوده آبخوان است. بیشترین شدت افت در جنوب‌غرب نازدشت برابر $Z=-22/90$ و شمال نازدشت برابر $Z=-22/46$ مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار کاهش مربوط به جنوب نازدشت برابر $Z=-18/42$ است؛ با این حال تمامی مقادیر در سطح اطمینان ۹۹٪ معنی‌دار هستند (جدول ۲).

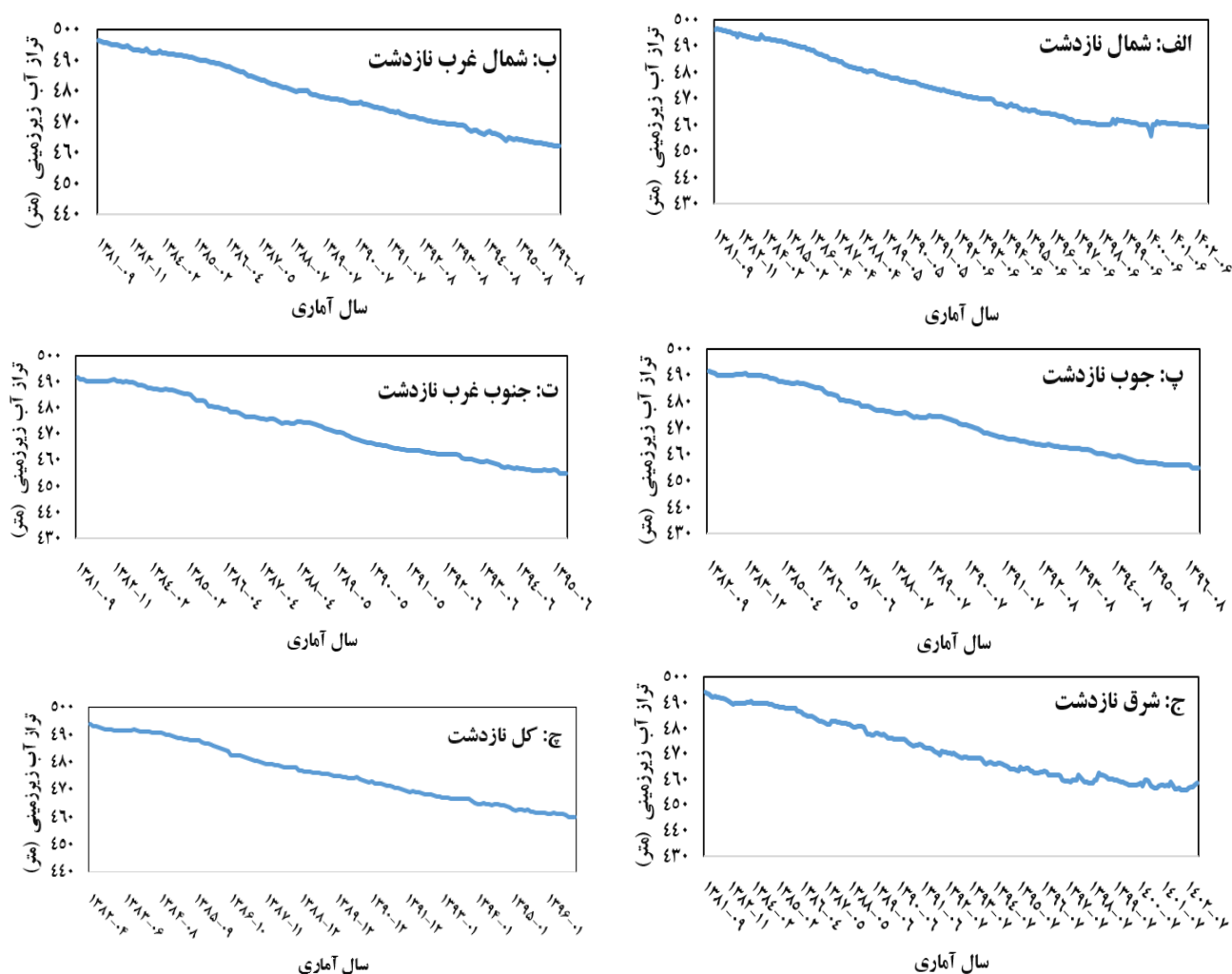
روش درون‌یابی Topo to Raster، سطح پیوسته‌ی تراز آب زیرزمینی بر روی شبکه‌ای با ابعاد سلولی مناسب تولید گردید. در ادامه، با بهره‌گیری از ابزار Contour (Spatial Analyst)، خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی با فاصله‌ی تراز ۵m استخراج شد. نقشه‌های حاصل برای تحلیل الگوی جریان آب زیرزمینی، تعیین شیب هیدرولیکی و شناسایی مخروط‌های افت در آبخوان مورد استفاده قرار گرفت (۲۷).

■ نتایج و بحث

تغییرات آب زیرزمینی

بررسی سری زمانی تراز آب زیرزمینی در زیرمناطق مختلف دشت نازدشت (شکل ۲) نشان می‌دهد که سطح ایستابی در کل محدوده طی دو دهه اخیر با روند کاهشی پیوسته همراه بوده است. در محدوده شمال نازدشت (شکل ۲ الف)، تراز آب زیرزمینی از حدود ۴۹۵m به حدود ۴۶۰m کاهش یافته و افت تجمعی حدود ۳۵m با نرخ متوسط حدود ۱/۵ تا ۱/۷ m در سال ثبت شده است. در شمال‌غرب نازدشت (شکل ۲ ب) نیز طی دوره ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ سطح آب از حدود ۴۹۵m به حدود ۴۶۲m کاهش یافته که بیانگر افت تجمعی حدود ۳۰ تا ۳۳m است. در جنوب نازدشت (شکل ۲ پ) نیز کاهش مشابهی مشاهده می‌شود و تراز آب از حدود ۴۹۰m به حدود ۴۵۵ تا ۴۵۸m رسیده است. در جنوب‌غرب نازدشت (شکل ۲ ت) بیشترین شدت افت مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که سطح آب از حدود ۴۹۵ تا ۴۹۶m به حدود ۴۴۸ تا ۴۵۰m کاهش یافته و افت تجمعی حدود ۴۶ تا ۴۸m را نشان می‌دهد. در شرق نازدشت (شکل ۲ ج) مقدار افت به‌نسبت کمتر است و تراز آب از حدود ۴۹۲ تا ۴۹۵m به حدود ۴۵۵ تا ۴۵۷m رسیده است. همچنین میانگین تغییرات سطح آب در کل دشت نازدشت (شکل ۲ چ) کاهش تراز آب از حدود ۴۹۳ تا ۴۹۵m به حدود ۴۶۰ تا ۴۶۲m را نشان می‌دهد که معادل افت تجمعی حدود ۳۳ تا ۳۵m است.

از دیدگاه هیدروژئولوژیک، الگوی افت مشاهده‌شده با رفتار آبخوان‌های آبرفتی با ضریب ذخیره اندک یعنی



شکل ۲. تراز آب زیرزمینی در الف: شمال نازدشت، ب: شمال غرب نازدشت، پ: جنوب نازدشت، ت: جنوب غرب نازدشت، ج: شرق نازدشت و ج: کل نازدشت (به ترتیب در محور افقی، عدد اول مبین سال و عدد دوم بین ماه اندازه‌گیری است)

نسبتاً پایدار آبخوان با توزیع یکنواخت خطوط تراز و گرادیان هیدرولیکی طبیعی است (شکل ۴-الف). در این سال شواهد مشخصی از تمرکز افت یا تشکیل مخروط‌های افت نیست. در مقابل، نقشه هم‌تراز سال ۱۳۹۶ کاهش چشمگیر تراز آب زیرزمینی و فشردگی خطوط تراز را نشان می‌دهد (شکل ۴-ب). در برخی نواحی، بسته شدن خطوط تراز و تشکیل مخروط‌های افت موضعی بیانگر تمرکز برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و تغییر الگوی طبیعی جریان آب زیرزمینی است. لذا براساس تحلیل نقشه‌های هم‌تراز، آبخوان از وضعیت نسبتاً پایدار در آغاز دوره مطالعه به سمت تشکیل مخروط‌های افت و فشردگی خطوط تراز در سال‌های اخیر حرکت کرده است که نشان‌دهنده تمرکز برداشت از چاه‌ها و تغییر الگوی طبیعی جریان آب زیرزمینی است. بررسی‌های انجام‌شده در

نتایج آزمون پتیت نیز وجود یک نقطه تغییر معنی‌دار در سری زمانی تراز آب زیرزمینی را تأیید می‌کند. مقدار آماره پتیت در محدوده ۶۴۰۰ تا ۱۵۲۵۲ قرار داشته و تمامی مقادیر احتمال کمتر از ۰/۰۵ را نشان می‌دهند (جدول ۲). زمان وقوع این تغییرات بیشتر در بازه ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۲ قرار دارد. به‌طور مشخص، نخستین تغییرات در شمال غرب نازدشت در سال ۱۳۸۹ و جنوب نازدشت در سال ۱۳۹۰ رخ داده، در حالیکه در شرق، شمال و جنوب غرب نازدشت تغییر رژیم هیدرولوژیکی عمده‌تر در سال ۱۳۹۲ ثبت شده است. برای کل محدوده نازدشت نیز سال ۱۳۹۹ به‌عنوان نقطه تغییر تجمعی شناسایی شد که نشان‌دهنده تشدید اثرات افت در مقیاس کل دشت است. تحلیل مکانی تغییرات سطح ایستابی نیز این روند را تأیید می‌کند. نقشه هم‌تراز سال ۱۳۸۲ نشان‌دهنده شرایط

بررسی‌های صورت‌گرفته در دیگر مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران است که نشان می‌دهند با کاهش جریان پایه، حتی در شرایط تثبیت یا افزایش بارش، دبی رودخانه‌ها بازهم دچار کاهش می‌شود (۱۱، ۵، ۳۱).

از سوی دیگر، روند افزایشی و معنی‌دار دما و تبخیر در ایستگاه‌های سرکم و رودان، فشار مضاعفی را بر منابع آب منطقه تحمیل می‌کند. افزایش دما نه تنها میزان تبخیر مستقیم از سطوح آبی و خاک را افزایش می‌دهد، بلکه با افزایش نیاز آبی گیاهان منجر به افزایش تبخیر-تعرق واقعی در سطح نازدشت شده است. در چنین شرایطی، کشاورزان برای جبران کمبود رطوبت خاک و پاسخ به تقاضای تبخیر بالا، ناگزیر به برداشت بیشتر از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق شده‌اند. این چرخه که در آن افزایش دما منجر به پمپاژ بیشتر آب و پمپاژ بیشتر منجر به افت تراز آب و کاهش رواناب سطحی می‌شود، یکی از محرک‌های اصلی ناپایداری هیدرولوژیک در نازدشت است (۲۲، ۲۴).

تحلیل زمانی نقاط تغییر با آزمون پتیت نشان داد که تغییرات ساختاری در دبی جریان طی سال‌های ۱۳۷۸ و ۱۳۸۳ اندکی پیش از نقاط تغییر بارش طی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ یا همزمان با آن آغاز شده است. رخ دادن نقطه تغییر دبی در اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰، دقیقاً با دوره توسعه شتابان اراضی کشاورزی، حفر چاه‌های غیرمجاز و مکانیزه‌شدن پمپاژ در دشت نازدشت مطابقت دارد. این تطابق زمانی اثبات می‌کند که سیستم هیدرولوژیک منطقه پیش از آنکه زیرتأثیر نوسان اقلیمی قرارگیرد، زیر تأثیر مداخلات انسانی دچار گسست ساختاری شده است. در واقع، حتی افزایش بارش رخ داده در سال‌های بعد از ۱۳۸۲ نیز نتوانسته تأثیر مخرب بارگذاری بیش از حد مصارف انسانی بر آبخوان و رواناب سطحی را جبران کند و سیستم هیدرولوژیک نازدشت وارد یک حالت تعادل جدید با مشخصه دبی جریان بسیار کم و بیلان منفی آبخوان شده است.

تأثیر عوامل انسانی بر تراز آب زیرزمینی

پیش از تحلیل تغییرات کاربری اراضی، صحت‌سنجی نقشه‌های استخراج‌شده با استفاده از شاخص‌های آماری

دشت‌های مختلف ایران به‌ویژه جنوب ایران نیز نشان داده‌اند که افزایش تراکم خطوط تراز و تشکیل مخروط‌های افت از مهمترین نشانه‌های برداشت بیش از حد از آبخوان‌ها و برهم خوردن تعادل هیدروژئولوژیک آنها است (۲۱؛ ۲۷).

روند متغیرهای آب و هوایی و هیدرولوژیک

نتایج آزمون‌های ناپارامتری من-کندال و پتیت برای متغیرهای آب و هوایی و هیدرولوژیک (جدول ۳)، نشان‌دهنده واکنش پیچیده و غیرخطی در سیستم هیدرولوژیک نازدشت و حوضه‌های همجوار است. همزمانی نقاط تغییر ساختاری در بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۷، بیانگر یک فاز تغییرات هیدرولوژیک است که تحت تأثیر مشترک سیگنال‌های اقلیمی و مداخله شدید انسانی شکل گرفته است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که در ایستگاه‌های آبنا، خراجی، رهدار، نازدشت و رودان، روند بارش در مقیاس سالانه افزایشی و از نظر آماری معنی‌دار است و نقاط تغییر بیشتر در سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۳ رخ داده‌اند. با این حال، علی‌رغم این روند افزایشی بارش، دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری آبنا و سرکم روند کاهشی شدید و معنی‌داری را تجربه کرده است. این رفتار متناقض که به عنوان تضاد بارش-رواناب شناخته می‌شود و نشان‌دهنده تغییر در ویژگی‌های بیلان آب حوضه است (۱۴، ۲۴). این وضعیت در حوضه‌های آبخیز جنوب کشور (۲۵) تأیید شده است.

در حوضه‌هایی با ارتباط قوی میان آب‌های سطحی و زیرزمینی، بخش عمده‌ای از جریان رودخانه‌ها در فصل خشک توسط جریان پایه تأمین می‌شود که مستقیماً وابسته به تراز آب زیرزمینی است. افت شدید سطح ایستابی در نازدشت به دلیل برداشت‌های بی‌رویه، ارتباط میان آبخوان و رودخانه را قطع کرده است. در این حالت، رودخانه‌ها از حالت تغذیه‌شونده توسط آبخوان به حالت تغذیه‌کننده آبخوان تغییر رفتار می‌دهند. در نتیجه، بخش عمده‌ای از رواناب ناشی از بارش، پیش از رسیدن به ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی یا هیدرومتری، به درون لایه‌های آبرفتی و افت‌یافته آبخوان نفوذ کرده و عملاً جریان سطحی پایدار را از بین می‌برد. این یافته همسو با

ضریب کاپا و دقت کلی انجام شد. مقادیر ضریب کاپا برای سال‌های ۱۳۷۴، ۱۳۹۴ و ۱۴۰۴ به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۸۹ و ۰/۹۱ و دقت کلی متناظر با آن‌ها به ترتیب ۵/۸۹٪، ۲/۹۱٪ و ۸/۹۲٪ به دست آمد. روند صعودی این شاخص‌ها نشان‌دهنده دقت زیاد، انطباق بهینه تصاویر ماهواره‌ای با واقعیت زمینی و قابلیت اعتماد بالای نقشه‌های تولیدشده برای آشکارسازی تغییرات در بازه زمانی مورد مطالعه است.

نتایج کمی حاصل از تحلیل کاربری اراضی دشت نازدشت طی دوره ۳۰ ساله در (جدول ۴)، (شکل ۵) و (شکل ۶) ارائه شده است. اگرچه عمده کاربری اراضی منطقه تحت تسلط کاربری‌های طبیعی و کم‌بازده مانند اراضی لخت و سنگلاخی قرار دارد، اما سیگنال‌های آشکاری از تغییرات ساختاری ناشی از مداخلات انسانی در سه دهه اخیر مشاهده می‌شود.

به‌طوری‌که طبق نتایج، مساحت اراضی فاقدپوشش و مراتع فقیر که در سال ۱۳۷۴ حدود ۵۱/۵۴٪ از منطقه را پوشش می‌داد، با کاهشی مداوم در سال ۱۴۰۴ به ۷۴/۴۵٪ رسیده است. این تغییر کاربری نشان‌دهنده تخریب پوشش گیاهی طبیعی حاشیه دشت و تبدیل آن به کاربری‌های تحت مدیریت انسان است. از دیدگاه هیدرولوژیک، مراتع طبیعی حتی در حالت فقیر، به دلیل داشتن ساختار خاک دست‌نخورده، نقش مهمی در تسهیل نفوذ عمقی بارندگی و کاهش سرعت رواناب سطحی ایفا می‌کنند. تبدیل این اراضی به کشاورزی یا سکونتگاه، ساختار سطحی خاک را دستخوش تغییر کرده و با افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک (تراکم خاک)، پتانسیل نفوذپذیری طبیعی و در نتیجه سهم تغذیه مستقیم آبخوان از بارندگی را کاهش می‌دهد (۵، ۲۷).

جدول ۲. آماره من کندانال و پتیت در تراز آب زیرزمینی

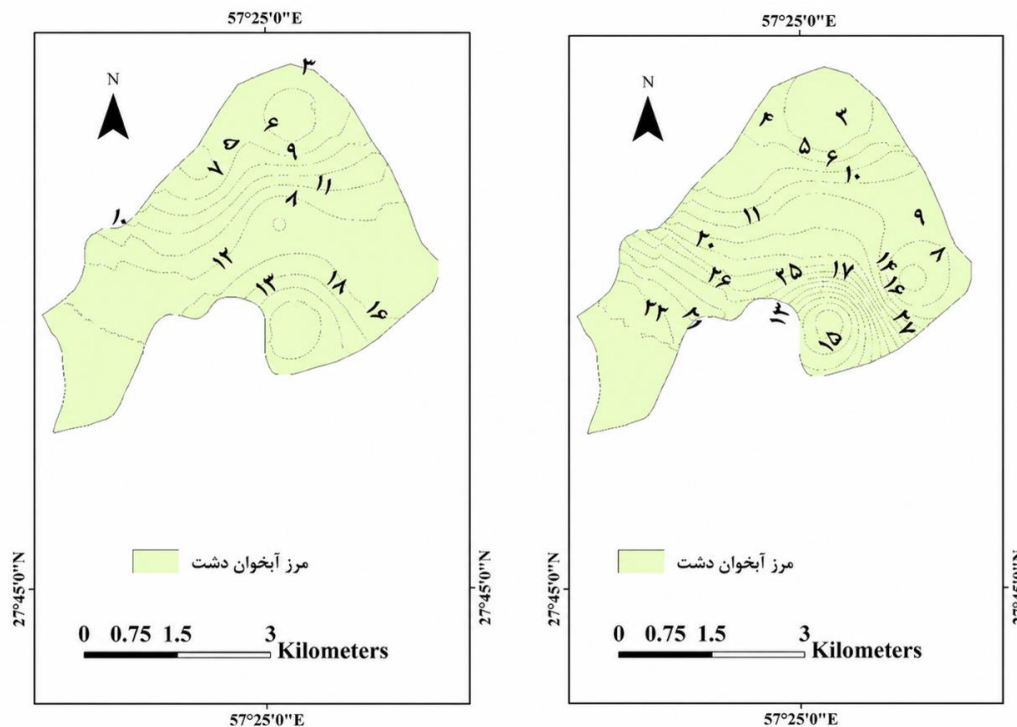
نام چاه	آماره من - کندانال	معنی داری	سال تغییر	آماره پتیت	معنی داری
کل نازدشت	-۱۸/۸۷	**۰/۰۰	۱۳۹۹/۱۱	۸۶۰۶	**۰/۰۰
جنوب نازدشت	-۱۸/۴۲	**۰/۰۰	۱۳۹۰/۲	۶۴۰۰	**۰/۰۰
شرق نازدشت	-۲۲/۱۱	**۰/۰۰	۱۳۹۲/۸	۱۵۰۰۲	**۰/۰۰
شمال نازدشت	-۲۲/۴۶	**۰/۰۰	۱۳۹۲/۷	۱۵۲۵۲	**۰/۰۰
شمال غرب	-۱۹/۲۹	**۰/۰۰	۱۳۸۹/۸	۷۳۹۶	**۰/۰۰
جنوب غرب نازدشت	-۲۲/۹	**۰/۰۰	۱۳۹۲/۱۱	۱۴۹۹۸	**۰/۰۰

**معنی‌دار در سطح اعتماد ۹۹٪

جدول ۳. روند متغیرهای هیدرواقليمی در نازدشت و طراف آن

پارامتر	نام ایستگاه	آمار کندانال Z	پی ویو MK	آماره پتیت U	پی ویو پتیت	سال تغییر	ماه
بارش	آبنا	۴/۰۴	۰/۰۰**	۱۰۵۴۸	۰/۰۰**	۱۳۸۳	آبان
	خراجی	۴/۲۶	۰/۰۰**	۱۰۸۶۶	۰/۰۰**	۱۳۸۳	مهر
	رودان	۴/۰۴	۰/۰۰**	۱۰۵۴۸	۰/۰۰**	۱۳۸۳	مهر
	نازدشت	۴/۰۴	۰/۰۰**	۱۰۵۴۸	۰/۰۰**	۱۳۸۳	مهر
	ره‌دار	۴/۰۴	۰/۰۰**	۱۰۵۵۱	۰/۰۰**	۱۳۸۳	مهر
تبخیر	میناب	-۰/۸۵	۰/۳۹	۴۱۸۸	۰/۰۰**	۱۳۸۳	آبان
	رودان	۹/۱۷	۰/۰۰**	۲۹۰۸۲	۰/۰۰**	۱۳۹۷	فروردین
	سرکم	۸/۲۰	۰/۰۰**	۲۷۳۱۸	۰/۰۰**	۱۳۸۱	فروردین
	سرکم	۲/۸۳	۰/۰۰**	۲۱۶۲۰**	۰/۰۰**	۱۳۸۱	مهر
دبی جریان	آبنا	-۹/۰۲	۰/۰۰**	۱۲۷۹۲	۰/۰۰**	۱۳۸۳	آبان
	سرکم	-۵/۲۸	۰/۰۰**	۵۹۱۳	۰/۰۰**	۱۳۷۸	بهمن

**معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۹٪



شکل ۴. تغییرات عمق سفره در دو دوره مورد بررسی در نازدشت (الف): در سال ۱۳۸۲ و (ب) در سال ۱۳۹۶

پوشش گیاهی و ساختار منسجم خاک، در فصول بارندگی پتانسیل زیادی در تولید رواناب‌های سیلابی با بار معلق زیاد دارند، بدون آنکه نقش مثبتی در تغذیه آب‌های زیرزمینی داشته باشند (۱۶).

نقشه‌های کاربری اراضی نیز به‌خوبی روند این تغییرات را نشان می‌دهند. در سال ۱۳۸۵ (شکل ۶ الف)، بیشتر منطقه را اراضی طبیعی تشکیل می‌داد و نشانه‌های دخالت انسانی هنوز محدود بود. در سال ۱۳۹۳ (شکل ۶ ب)، گسترش لکه‌های کشاورزی و اراضی رهاشده، به‌ویژه در بخش‌های مرکزی دشت، بیشتر نمایان شد؛ موضوعی که با دوره افت شدید سطح آب زیرزمینی در منطقه همزمان است. در سال ۱۴۰۴ (شکل ۶ پ)، این روند آشکارتر شده و افزایش اراضی کشاورزی، توسعه اراضی رهاشده و گسترش سکونتگاه‌های روستایی به‌خوبی دیده می‌شود. به‌طور کلی، این الگوها نشان می‌دهند که در طول زمان، نقش فعالیت‌های انسانی در تغییر سیمای سرزمین بیشتر شده و این تغییرات به احتمال زیاد در افت تراز آب زیرزمینی و تشدید فرونشست زمین مؤثر بوده‌اند.

در کنار تغییرات کاربری اراضی، بررسی داده‌های برداشت آب زیرزمینی از چاه‌های مجاز آبخوان نازدشت

از طرفی، اراضی کشاورزی در طول دوره مطالعه روند افزایشی محدودی را از ۵/۱۴٪ به ۶/۸۰٪ تجربه کرده‌اند. اگرچه این رشد از نظر مساحت ناچیز به نظر می‌رسد، اما تأثیر هیدرولوژیک آن بر بیلان آبخوان دشت نازدشت بسیار عمیق است. با توجه به اقلیم خشک منطقه و عدم کفایت بارش برای تأمین نیاز آبی محصولات کشاورزی، پایداری این اراضی به‌شدت وابسته به پمپاژ آب زیرزمینی است. توسعه اراضی کشاورزی در دشت، مستقیماً به معنای افزایش حفر چاه‌ها، افزایش ساعات کارکرد پمپ‌ها و در نهایت تخلیه شدیدتر آبخوان است. ثبات نسبی اراضی سنگلاخی در حدود ۳۳٪ طی کل دوره، تایید می‌کند که این بخش از حوضه به دلیل محدودیت‌های شدید ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی غیرقابل توسعه بوده و تمرکز فعالیت‌های انسانی و کشاورزی صرفاً بر بخش‌های دشت آبرفتی (نازدشت) متمرکز شده که حساس‌ترین بخش آبخوان نسبت به تخلیه و افت تراز آب است.

رشد چشمگیر مراتع فقیر از ۶/۴۴٪ در سال ۱۳۷۴ به ۹/۹۰٪ در سال ۱۴۰۴ است. این افزایش بیش از ۱/۵ برابری مراتع فقیر، بازتابی از بازخوردهای منفی بحران آب در منطقه است. این اراضی رهاشده به دلیل از دست رفتن

Triticum aestivum و گندم *Medicago sativa*

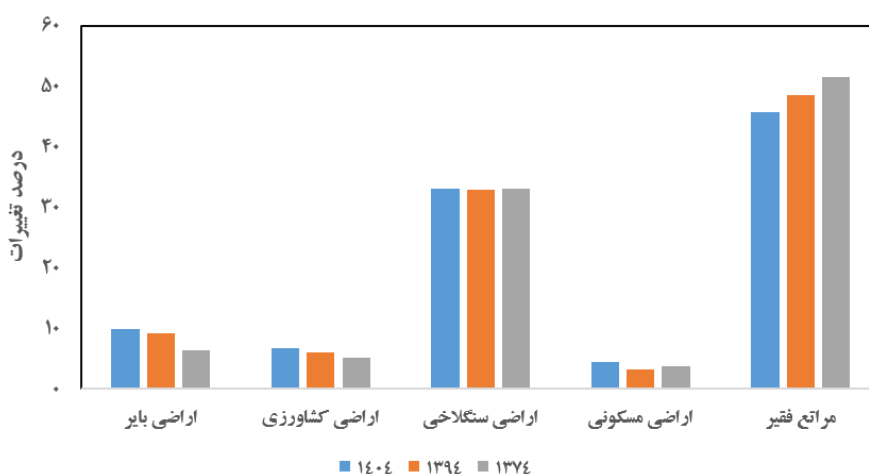
نشان می‌دهد که فشار بهره‌برداری بر منابع آب زیرزمینی در طول زمان افزایش یافته است.

تحلیل هم‌زمان روندها نشان‌دهنده واگرایی کامل میان متغیرهای اقلیمی و پاسخ هیدرولوژیکی آبخوان است. برخلاف روند افزایشی بارش، تراز آب زیرزمینی با افت شدید و جریان پایه رودخانه‌ها با کاهش معنی‌دار مواجه شده‌اند. این واگرایی اقلیمی، در کنار افزایش ۱۵ برابری تخلیه سالانه آبخوان از ۸ به ۱۲۰ میلیون مترمکعب و تخصیص بیش از ۹۵٪ آب به کشاورزی، مؤید این است که عوامل انسانی مانند اضافه‌برداشت و توسعه اراضی محرک اصلی و مطلق افت ذخایر آب زیرزمینی در نازدشت بوده و اثرات مثبت افزایش بارندگی را کاملاً خنثی کرده‌اند.

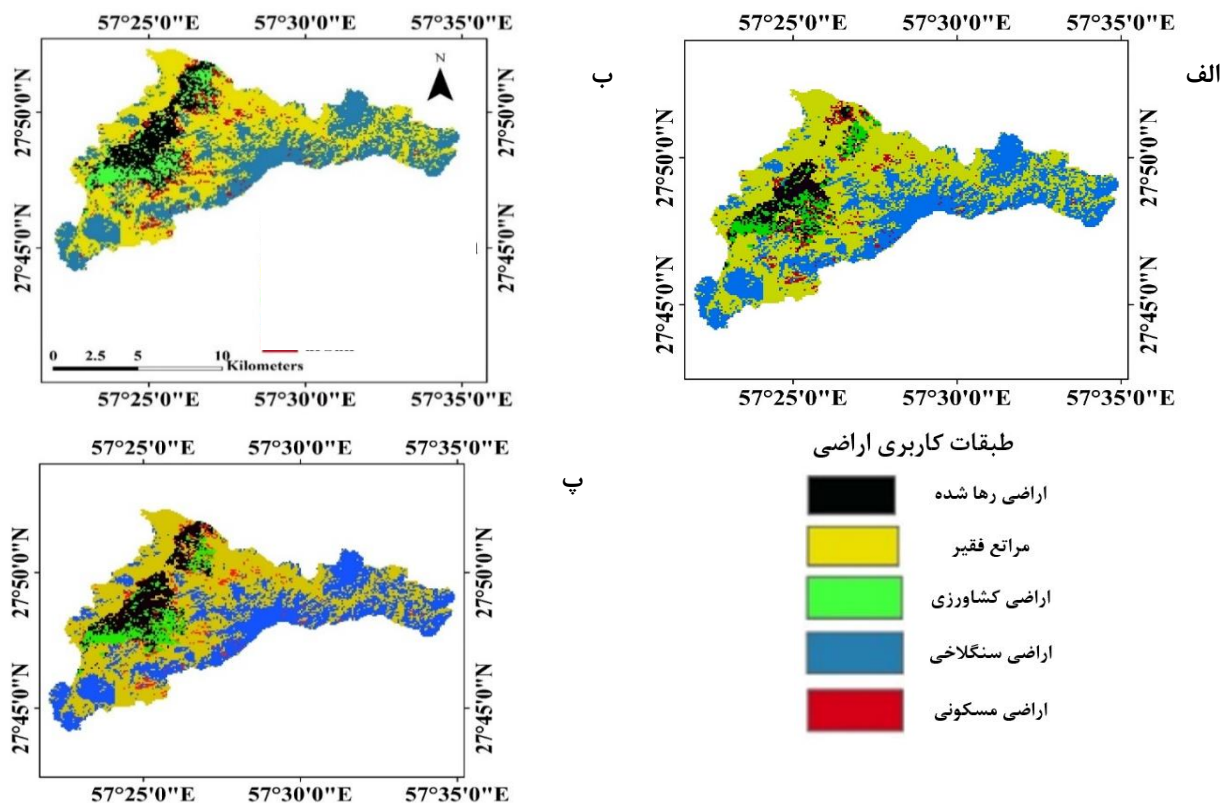
(جدول ۴) نیز نشان‌دهنده افزایش قابل توجه فشار انسانی بر منابع آب زیرزمینی است. تعداد چاه‌های فعال از ۸۴ حلقه در سال ۱۳۸۱ به ۱۱۹ حلقه در سال ۱۳۹۳ افزایش یافته است. هم‌زمان حجم کل تخلیه سالانه از حدود Mm^3 ۸/۲ در سال ۱۳۸۱ به بیش از Mm^3 ۲۰ میلیون در سال ۱۳۹۳ رسیده که نشان‌دهنده رشد چشمگیر برداشت از آبخوان است. بررسی ترکیب مصرف آب نشان می‌دهد که بخش کشاورزی در تمامی دوره‌ها سهم غالب برداشت را داشته و سهم آن از حدود ۸۱٪ در سال ۱۳۸۱ به بیش از ۹۵٪ در سال ۱۳۹۳ رسیده است. علاوه بر این، استفاده گسترده از روش آبیاری غرقابی به‌عنوان روش غالب آبیاری، همراه با تغییر نیروی محرکه چاه‌ها به برق، موجب تداوم و تسهیل برداشت آب و در نتیجه تشدید افت سطح آب زیرزمینی شده است. همچنین تغییر تدریجی الگوی کشت به سمت محصولات نسبتاً پرمصرف آب نخل خرما *Phoenix dactylifera*، مرکبات *Citrus spp*، یونجه

جدول ۴. میزان مصرف آب زیرزمینی از چاه‌های مجاز آبخوان نازدشت

شاخص	۱۳۸۱	۱۳۸۸	۱۳۹۳
تعداد چاه فعال مجاز	۸۴	۱۰۹	۱۱۹
کل تخلیه سالانه (میلیون مترمکعب)	۸/۲	۹۸/۸	۱۲۰/۵۱
درصد مصرف کشاورزی	۸۱	۹۴	بیش از ۹۵
سایر مصارف	شرب و خدمات (سهم کم)	ناچیز	ناچیز
روش آبیاری غالب	غرقابی	غرقابی	غرقابی
نیروی محرکه غالب	ترکیبی	برق	برق
محصولات غالب	متنوع (کشاورزی سنتی)	محصولات زراعی و باغی	نخل، مرکبات، گندم، یونجه
ویژگی شاخص دوره	برداشت کم‌مقیاس	اوج‌گیری شدید برداشت	تداوم برداشت بالا



شکل ۵. درصد تغییرات مساحت کاربری اراضی در نازدشت طی سه دوره مورد بررسی



شکل ۶. تغییرات کاربری اراضی طی سال (الف) ۱۳۸۵؛ (ب) ۱۳۹۳ و (پ) ۱۴۰۴

به‌عنوان نشانه‌ای از کاهش پایداری اقتصادی کشاورزی در شرایط کمبود آب تفسیر شود؛ پدیده‌ای که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نیز گزارش شده است. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تشدید فعالیت‌های انسانی به‌ویژه توسعه کشاورزی مبتنی بر برداشت آب زیرزمینی، نقش مهمی بر تغییرات محیطی منطقه و فشار بر منابع آب زیرزمینی داشته و بدون اصلاح الگوی مصرف آب و مدیریت پایدار کاربری اراضی، احتمال تشدید بحران آب و فرونشست زمین در آینده وجود خواهد داشت.

■ نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افت شدید سطح آب زیرزمینی در آبخوان نازدشت با دامنه ۳۳m تا بیش از ۴۸m عمدتاً ناشی از عوامل انسانی است و تغییرات اقلیمی نقشی تعیین‌کننده در آن نداشته است. تداوم این روند، خطر فرونشست زمین، کاهش کیفیت آب و آسیب‌پذیری پایدار آبخوان را تشدید خواهد کرد. از اینرو، اجرای فوری راهکارهایی چون کنترل برداشت از چاه‌های مجاز، اصلاح

در مجموع پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تغییرات کاربری اراضی و افزایش برداشت آب زیرزمینی، دو عامل انسانی مهم در تشدید فشار بر سامانه هیدروژئولوژیکی نازدشت بوده‌اند. گسترش تدریجی فعالیت‌های کشاورزی و افزایش تعداد چاه‌های بهره‌برداری سبب افزایش برداشت از آبخوان و در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی شده است؛ روندی که در بسیاری از دشت‌های ایران نیز گزارش شده است. مطالعات انجام‌شده توسط محققین (۳، ۱۳) نشان می‌دهد که در بسیاری از دشت‌های کشور، توسعه کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی مهم‌ترین عامل کاهش منابع آب و تغییر رژیم هیدرولوژیکی بوده است.

همچنین نتایج این پژوهش با یافته‌های محققان (۱۷) همخوانی دارد که نشان دادند افت گسترده سطح آب زیرزمینی در ایران موجب کاهش جریان پایه و تضعیف ارتباط هیدرولیکی میان رودخانه‌ها و آبخوان‌ها شده است. در چنین شرایطی حتی افزایش نسبی بارش نیز لزوماً به افزایش دبی رودخانه‌ها یا بهبود وضعیت منابع آب منجر نمی‌شود. از سوی دیگر، افزایش اراضی رهاشده در منطقه می‌تواند

■ سپاسگزاری

بدین وسیله از شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان، به واسطه‌ی در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق کمال سپاس را داریم.

الگوی کشت به‌سوی محصولات کم‌آبر، جایگزینی روش غرقابی با سیستم‌های نوین، مدیریت جامع کاربری اراضی و اجرای برنامه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان، به‌عنوان ضروری‌ترین اقدامات مدیریتی احیای تدریجی منابع آب زیرزمینی منطقه توصیه می‌شود.

■ References

1. Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Mahdavi, R., Sardooi, E. R., & Jamshidi, S. (2023). Modeling future hydrological characteristics based on land use/land cover and climate changes using the SWAT model. *Water Resources Management*, 37(10), 4177–4194. doi.org/10.1007/s11269-023-03545-6
2. Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. E., & Deguchi, T. (2011). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, 59(3), 1753–1771. doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9
3. Ahmadi, A., & Yousefi, A. (2026). Diagnosing groundwater governance using Network of Action Situations and Social Network analysis: A case of over-exploited aquifer in Iran. *Environmental Science & Policy*, 178, Article 104356. doi.org/10.1016/j.envsci.2026.104356
4. Alley, W. M., Reilly, T. E., & Franke, O. L. (1999). *Sustainability of ground-water resources* (U.S. Geological Survey Circular 1186). U.S. Geological Survey. doi:10.3133/cir1186
5. Bahari Meimandi, J., Bazrafshan, O., Esmaelpour, Y., Shekari, M., & Zamani, H. (2023). Study the effect of natural and anthropogenic factors on the ground water falling in the Minab Plain. *Desert Management*, 11(1), 1–18. doi:10.22034/jdmal.2023.2000814.1412 [In Persian]
6. Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2, Article 15. doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9
7. Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., & Carande, R. (2008). Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, 120(11–12), 1556–1566. doi:10.1130/B26001.1
8. Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945–948. doi:10.1038/nclimate2425
9. Faunt, C. C. (Ed.). (2009). *Groundwater availability of the Central Valley aquifer, California* (Professional Paper 1766). U.S. Geological Survey. pubs.usgs.gov/pp/1766/
10. Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5
11. Ghazi, B., Jeihouni, E., Kisi, O., Pham, Q. B., & Durin, S. (2022). Estimation of Tasuj aquifer response to main meteorological parameter variations under Shared Socioeconomic Pathways scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1–2), 25–37. doi.org/10.1007/s00704-022-04025-4
12. Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. (2020). Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(1), 431–463. doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251
13. Golian, M., Saffarzadeh, A., Katibeh, H., Mahdad, M., Saadat, H., Khazaei, M., Dashti Barmaki, M., Gohari, A., Akhoond-Ali, A. M., Talebeydokhti, N., & Zare, A. R. (2021). Consequences of groundwater overexploitation on land subsidence in Fars Province of Iran and its mitigation management programme. *Water and Environment Journal*, 35(3), 975–985. doi.org/10.1111/wej.12688
14. Hamidifar, H. (2024). Water crisis in Iran: Causes, consequences, and solutions. In S. C. Izah, M. C. Ogbu, A. Loukas, & H. Hamidifar (Eds.), *Water crises and sustainable management in the global south* (pp. 85–109). Springer Nature Singapore. doi.org/10.1007/978-981-97-4966-9_3
15. Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vincente, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, M., Lambert, J. P., Teatini, M., Cabral-Cano, E., Erkens, A., Galloway, J., Hung, W. W., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36. doi.org/10.1126/science.abb8549

16. Jalali, M. (2007). Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: An example from Tajarak, western Iran. *Environmental Geology*, 52(6), 1133–1149. doi:10.1007/s00254-006-0551-3
17. Joodaki, G., Wahr, J., & Swenson, S. (2014). Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations. *Water Resources Research*, 50(3), 2679–2692. doi:10.1002/2013WR014633
18. Madani, K. (2026). Water bankruptcy: The formal definition. *Water Resources Management*, 40, Article 78. doi.org/10.1007/s11269-025-04484-0
19. Malaekheh, S. M., Safaie, A., Shiva, L., & Tabari, H. (2022). Spatio-temporal variation of hydro-climatic variables and extreme indices over Iran based on reanalysis data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(11), 3725–3752. doi.org/10.1007/s00477-022-02223-0
20. McLeod, A. I. (2022). *Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test* (Version 2.2.1) [R package]. CRAN. doi.org/10.32614/CRAN.package.Kendall
21. Y., Zamani, H., & Shekari, M. (2024). Risk assessment of meteo-groundwater drought using copula approach in the arid region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(4), 1523–1540. doi.org/10.1007/s00477-023-02641-8
22. Rahimiani Iranshahi, H., Moradi, H. R., & Jalili, K. (2022). Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(2), 1–12. doi.org/10.22098/MMWS.2022.9520.1048 [In Persian]
23. Rybski, D., & Neumann, J. (2011). A review on the Pettitt test. In J. Kropp & H.-J. Schellnhuber (Eds.), *In Extremis: Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology* (pp. 202–213). Springer. doi.org/10.1007/978-3-642-14863-7_10
24. Safdari, Z., Nahavandchi, H., & Joodaki, G. (2022). Estimation of groundwater depletion in Iran's catchments using well data. *Water*, 14(1), Article 131. doi.org/10.3390/w14010131
25. Safeeq, M., & Fares, A. (2016). Groundwater and surface water interactions in relation to natural and anthropogenic environmental changes. In A. Fares (Ed.), *Emerging issues in groundwater resources* (pp. 289–326). Springer International Publishing. doi.org/10.1007/978-3-319-32008-3_11
26. Scanlon, B. R., Zhang, Z., Save, H., Sun, A. Y., Müller Schmied, H., van Beek, L. P. H., Wiese, D. N., Wada, Y., Long, D., Reedy, R. C., McGuire, V. L., Ran, J., Zheng, C., Döll, P., & Bierkens, M. F. P. (2018). Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(6), E1080–E1089. doi.org/10.1073/pnas.1704665115
27. Seihani, R., Gholami, H., Esmailpour, Y., Kamali, A., & Zareh, M. (2024). Interpretation techniques to explain the output of a spatial land subsidence hazard model in an area with a diverted tributary. *Applied Computing and Geosciences*, 23, Article 100191. doi.org/10.1016/j.acags.2024.100191
28. Tabari, H., Madani, K., & Willems, P. (2020). The contribution of anthropogenic influence to more anomalous extreme precipitation in Europe. *Environmental Research Letters*, 15(10), 104077. doi.org/10.1088/1748-9326/abb268
29. Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., & Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. doi.org/10.1038/nclimate1744
30. U.S. Geological Survey. (2020). *Contour dataset of the potentiometric surface of groundwater-level altitudes near the planned Highway 270 Bypass, East of Hot Springs, Arkansas, July–August 2017*. U.S. Geological Survey. doi.org/10.5066/P9N7UJZ0
31. Wada, Y., van Beek, L. P. H., & Bierkens, M. F. P. (2011). Modelling global water stress of the recent past: On the relative importance of trends in water demand and climate variability. *Geophysical Research Letters*, 38(6), 1–15. doi.org/10.5194/hess-15-3785-2011