

Research Paper

Estimating the Spatial and Temporal Variations of Aquifer Recharge in Jiroft Plain using Water Level Fluctuation Method

Mohammad Faryabi^{1*}

¹ Associate Professor, Department of Ecological Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Iran

[10.22125/iwe.2025.555022.1904](https://doi.org/10.22125/iwe.2025.555022.1904)

Received:
November 1, 2025
Accepted:
January 31, 2026
Available online:
June 25, 2026

Keywords:
Groundwater, Recharge,
Water table fluctuation, Jiroft
Plain

Abstract

Estimating groundwater recharge is one of the important challenges in groundwater resource management. Various techniques have been developed in recent years to estimate aquifer recharge. The water level fluctuation (WTF) method is one of the simplest and most practical of these techniques. In this study, the recharge rate of the Jiroft Plain aquifer was estimated by examining groundwater level fluctuations over a 24-year period. The results of this study showed that the minimum, average, and maximum annual aquifer recharge during this period were 0.97, 51.18, and 186.58 mm, respectively. The lowest recharge rate occurred in the southern part of the aquifer, while the highest recharge rate occurred in its northeastern margin. Factors such as surface geomorphological features, soil texture, and characteristics of the unsaturated zone have influenced the spatial distribution of aquifer recharge. Hydrological drought has a significant impact on aquifer recharge. Additionally, increased aquifer pumping due to the expansion of agricultural fields has also contributed to an increase in aquifer recharge.

1. Introduction

In groundwater science, recharge refers to the deep penetration of water into an aquifer and the addition of water to its storage. Based on the water cycle, some of the rainfall infiltrates into the soil. This water continues its deep penetration and eventually reaches the groundwater level. The recharge water causes the groundwater level to rise. Surface water bodies (such as rivers and lakes), agricultural return flows, subsurface water flows, and the injection of water into the aquifer (artificial recharge) can also serve as sources of aquifer recharge. Climatic factors (such as rainfall, floods, and drought) and anthropogenic factors (land use, artificial recharge, and pumping from aquifers) have a significant impact on groundwater recharge. Estimating groundwater recharge is a key step in water resource management in arid and semi-arid regions like the Jiroft Plain. The main objective of this study is to estimate the recharge rate of the Jiroft Plain aquifer in southeastern Iran. The most important factors affecting the temporal and spatial variation of aquifer recharge are also examined in this study.

2. Materials and Methods

The water level fluctuation method was used to estimate the recharge rate of the Jiroft Plain aquifer. In this method, the total recharge of the groundwater system is calculated. By examining water level variations over different time periods and considering the aquifer storage coefficient, the recharge rate is calculated using the following equation:

$$R = S_y \cdot \Delta h / \Delta t \quad (1)$$

where R is the groundwater recharge, S_y is the specific yield, Δh is the groundwater level rise during the recharge period, and Δt is the recharge time period.

In this study, water level data from observation wells were examined over a 24-year period (1999–2022). The water level rise in these wells was determined annually, and the annual recharge rate was calculated

based on the aquifer storage coefficient. Factors affecting the rate of aquifer recharge, such as geological characteristics, drought, aquifer withdrawal, and land use changes, were also investigated in this study.

3. Results

The minimum and maximum annual aquifer recharge rates are 0.4 and 636 mm over a 24-year period. The highest aquifer recharge rate occurred in the northeastern part of the plain, and the lowest occurred in the southern part. Large alluvial fans exist on the eastern margin of the plain. These alluvial fans and their coarse-grained sediments play an important role in aquifer recharge. The fine-grained surface sediments in the southern part of the aquifer have reduced the groundwater recharge potential. The Sabzevaran fault, with a north-south trend, has affected the spatial distribution of aquifer recharge. Sediments of different types and thicknesses are located on both sides of the fault, influencing groundwater recharge rates. The recharge rates east of the fault are greater than those in the areas located to its west. The grain size of the sediments in the unsaturated zone decreases from north to south across the plain. This situation also indicates a decrease in permeability and aquifer recharge in the southern regions. The correlation coefficients of groundwater recharge rates with meteorological and hydrological drought indices are 0.13 and 0.39, respectively. The correlation coefficient between aquifer pumping rates and groundwater recharge is 0.48. In 2019, compared to 2002, the area of rangelands decreased by 13 percent, while the area of agricultural lands and urban areas increased by 9.8 percent and 2 percent, respectively. These changes have been accompanied by a relative increase in aquifer recharge.

4. Discussion and Conclusion

This research showed that factors such as surface geological features, soil texture, and sediment types in the unsaturated zone have affected the spatial distribution of aquifer recharge. Examining the relationship between aquifer recharge and drought indices (meteorological and hydrological indices) showed that hydrological drought has a greater impact on groundwater recharge. Land use changes and the conversion of pastures to cultivation areas have increased water pumping from the aquifer. As a result, the volume of irrigation return flows has increased, and consequently, the amount of groundwater recharge has also increased. However, this increased recharge has not compensated for the water table drawdown resulting from aquifer pumping, and the water level continues to decline. Therefore, making management decisions to optimize cultivation patterns and reduce aquifer abstraction is of great importance.

5. Six important references

Fisher, L.H., Healy, R.W., 2008. Water movement within the unsaturated zone in four agricultural areas of the United States. *Journal of Environmental Quality*, 37(3): 1051-1063.

Healy, R.W., 2010. *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press, 324 p.

Labrecque, G., Chesnaux, R., Boucher, M.A., 2020. Water-table fluctuation method for assessing aquifer recharge: application to Canadian aquifers and comparison with other methods. *Hydrogeology Journal*, 21: 521-533.

Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39.

Scanlon, B.R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, W.M., Simmers, I., 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20: 3335-337.

Zomlot, Z., Verbeiren, B., Huysmans, M., Batelaan, O., 2015. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4: 349-368.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

This study was supported by University of Jiroft under the grant No 4813-03-01-39804. University of Jiroft is gratefully acknowledged for the financial support of this research.



برآورد تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آبخوان دشت جیرفت با استفاده از روش نوسانات سطح آب زیرزمینی

محمد فاریابی^۱

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

مقاله پژوهشی

چکیده

برآورد تغذیه آب زیرزمینی یکی از چالش‌های مهم در مدیریت منابع آب زیرزمینی است. در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای برآورد میزان تغذیه آبخوان‌ها توسعه یافته‌اند. یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین این روش‌ها، بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی است. در این پژوهش، میزان تغذیه آبخوان دشت جیرفت با استفاده از مطالعه نوسانات سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای در یک دوره ۲۴ ساله (۱۴۰۱-۱۳۷۸) برآورد شده و عوامل موثر بر تغییرات مکانی و زمانی آن بررسی شده است. با توجه نتایج این تحقیق، حداقل، متوسط و حداکثر تغذیه آبخوان دشت جیرفت در این دوره ۲۴ ساله به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۵۱/۱۸ و ۱۸۶/۵۸ میلی‌متر در سال است. کمترین میزان تغذیه در بخش جنوبی آبخوان و بیشترین میزان تغذیه در حاشیه شمال شرقی آن رخ داده است. عواملی مانند ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی سطحی، بافت خاک و جنس رسوبات بخش غیراشباع آبخوان توزیع فضایی تغذیه آبخوان را تحت تاثیر قرار داده‌اند. خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی هواشناسی تاثیر بیشتری بر میزان تغذیه آبخوان داشته است. افزایش پمپاژ از آبخوان و افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی نیز باعث افزایش تغذیه آبخوان شده است، اما این افزایش تغذیه نتوانسته افت حاصل از پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری را جبران کند و روند نزولی تراز سطح آب در آبخوان همچنان ادامه دارد.

واژه های کلیدی: آب زیرزمینی، تغذیه، نوسانات سطح آب، دشت جیرفت.

^۱ دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. ایمیل: faryabi@ujiroft.ac.ir، تلفن: ۰۹۱۳۳۴۹۴۶۹۴



مقدمه

آب سطحی و منطقه غیراشباع معمولاً تخمینی از تغذیه پتانسیل را ارائه می‌کنند در حالی که روش‌های مبتنی بر آب‌زیرزمینی، مقادیر واقعی تغذیه را برآورد می‌کنند (Scanlon et al., 2006). روش نوسانات سطح آب^۲ یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین تکنیک‌های مبتنی بر آب‌زیرزمینی است که از داده‌های زمانی سطح آب‌زیرزمینی برای تخمین میزان تغذیه آبخوان استفاده می‌کند. محققان زیادی در سرتاسر دنیا این روش را در مطالعات منابع آب‌زیرزمینی به کار برده‌اند. مسموعی و همکاران میزان تغذیه به آبخوان هرات در استان یزد را با بررسی نوسانات سطح آب‌زیرزمینی مطالعه کرده و میزان متوسط تغذیه سالانه را ۱۵/۲۹ میلیون مترمکعب برآورد کردند. غفاری و همکاران (۱۳۹۷) میزان تغذیه آبخوان دشت اردبیل را با استفاده از روش نوسان سطح آب بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که به طور متوسط، ۱۶/۸ درصد بارندگی و ۲۲/۵ درصد آب آبیاری در تغذیه آبخوان نقش دارد. متوسط سالانه تغذیه آبخوان نیز ۱۹۱ میلیون مترمکعب محاسبه شد. ارجمند شریف و جعفری (۱۴۰۰) تغذیه آبخوان مشهد - چناران را در یک دوره ۱۵ ساله برآورد کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیند تغذیه در این منطقه الگوی مشخصی داشته و تابعی از میزان بارندگی است. روند افزایش میزان تغذیه آبخوان در پاییز و زمستان تداوم یافته و با شروع فصل بهار کاهش می‌یابد. متوسط تغذیه سالانه نیز ۱۲۲ میلیون مترمکعب برآورد شده است. فیجانی و همکاران (۱۴۰۲) میزان تغذیه آبخوان دشت گرمسار را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد میزان تغذیه سالانه آبخوان از ۱/۹۵ میلی‌متر در سال در نواحی جنوبی تا ۴۷۸ میلی‌متر در سال در مجاورت مخروط افکنه شمالی دشت متغیر است. (Varni et al., 2013) متوسط تغذیه آب زیرزمینی دشت پمپا^۳ در آرژانتین را ۲۱۰ میلی‌متر در سال تخمین زدند که شامل ۲۱ درصد بارندگی سالانه است. (VuV and Merkel (2019) تغذیه آب‌زیرزمینی در هانویی^۴ کشور ویتنام را ۳۴۰ میلی‌متر در سال تخمین

در علم آب‌زیرزمینی، تغذیه معرف نفوذ عمقی آب آبخوان و اضافه شدن آب به ذخیره آن است (Healy, 2010). بر اساس چرخه آب، مقداری از آب ناشی از بارندگی به دورن زمین نفوذ می‌کند. این آب به نفوذ عمقی خود ادامه داده و سرانجام به سطح آب‌زیرزمینی می‌رسد. ورود آب تغذیه‌ای باعث صعود سطح آب‌زیرزمینی در آبخوان می‌شود. آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، آب‌برگشتی کشاورزی، جریان‌های آب زیرسطحی و تزریق آب به آبخوان (تغذیه مصنوعی) نیز می‌توانند به عنوان منابع تغذیه آبخوان نقش داشته باشند. عوامل اقلیمی (مانند بارندگی، سیلاب و خشکسالی) و عوامل انسانی (کاربری اراضی، تغذیه مصنوعی و پمپاژ از آبخوان) تاثیر مهمی بر میزان تغذیه آب‌زیرزمینی دارند. تغییرات زمانی و مکانی تغذیه در حوضه ناشی از تغییرات زمانی و مکانی بارش، تبخیر و تعرق و همین‌طور مقدار تخلخل و آبدهی ویژه آبخوان می‌باشد (زینالی و همکاران، ۱۴۰۲).

برآورد میزان تغذیه منابع آب‌زیرزمینی یک گام اساسی در مدیریت منابع آب مناطق خشک و نیمه‌خشک است (غفاری و همکاران، ۱۳۹۷). تغذیه یکی از مهمترین اجزاء بیلان آبخوان است، اما به علت تغییرپذیری زمانی و مکانی و سختی برآورد آن، هنوز یکی از مؤلفه‌های کمتر شناخته شده بیلان آب است (Healy, 2010). در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای برآورد تغذیه آب‌زیرزمینی توسعه یافته است. این روش‌ها را می‌توان در سه دسته اصلی قرار داد (Scanlon et al., 2002): روش‌هایی که بر آب‌های سطحی تمرکز دارند (مانند پایش مکانی و زمانی دبی نهرها و رودخانه‌ها، مدل‌سازی رابطه بارش و رواناب)، روش‌های مبتنی بر بخش غیراشباع آبخوان (مانند استفاده از لایسی‌متر^۱ها و ردیاب‌های طبیعی و مصنوعی) و روش‌های متمرکز بر بخش اشباع آبخوان (مانند محاسبه بیلان جرمی کلراید، بررسی نوسانات سطح آب، بیلان آبخوان و مدل‌سازی ریاضی جریان آب‌زیرزمینی). روش‌های مبتنی بر

³ Pampa

⁴ Hanoi

¹ Lysimeter

² Water table fluctuation (WTF)



زده‌اند که شامل ۲۰ درصد بارندگی سالانه است. به عقیده این محققان، روش نوسانات سطح ایستابی نسبت به روش‌هایی مانند تجزیه هیدروگراف و روابط تجربی مقادیر واقعی تری از تغذیه را برآورد می‌کند. Labrecque et al. (2020) نتایج حاصل از برآورد تغذیه به روش نوسان سطح ایستابی در شرق کانادا را با روش‌های دیگر تخمین تغذیه مانند محاسبه بیلان، تجزیه هیدروگراف و معادلات تجربی مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش نوسانات سطح آب برای چاه‌های مشاهده‌ای مختلف در یک آبخوان و محاسبه میانگین تغذیه برای آن‌ها نتایج مشابهی با سایر روش‌های محاسبه تغذیه ارائه خواهد کرد. این محققان بیان کردند که روش نوسان سطح ایستابی را می‌توان در یک مقیاس منطقه‌ای برای برآورد تغذیه بکار برد، البته در صورتی که شبکه مناسبی از چاه‌های مشاهده‌ای موجود باشد.

میزان تغذیه آبخوانی در شمال لهستان را با استفاده از روش نوسان سطح ایستابی و مدل‌سازی بخش غیراشباع برآورد کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان تغذیه محاسبه شده توسط این دو روش تطابق خوبی با هم دارد. نگاهی به نتایج پژوهش‌های قبلی، مفید بودن روش نوسانات سطح آب برای برآورد تغذیه آب‌زیرزمینی را مشخص می‌کند. تخمین میزان تغذیه آب‌زیرزمینی و عوامل موثر بر آن در مدیریت پایدار منابع آب دشت جیرفت نقش مهمی دارد. هدف اصلی این مطالعه نیز برآورد میزان تغذیه آبخوان دشت جیرفت است. در این مطالعه برای اولین بار، تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آبخوان و مهمترین عوامل موثر بر آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت جیرفت با مساحتی حدود ۱۴۰۵ کیلومتر مربع و اقلیمی نیمه خشک با میانگین بارندگی سالانه ۱۷۰ میلی‌متر، در جنوب شرقی ایران واقع شده است. ارتفاع آن از سطح دریا بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر متغیر بوده و شیب کلی آن از شمال به سمت جنوب است. دشت جیرفت بخشی از

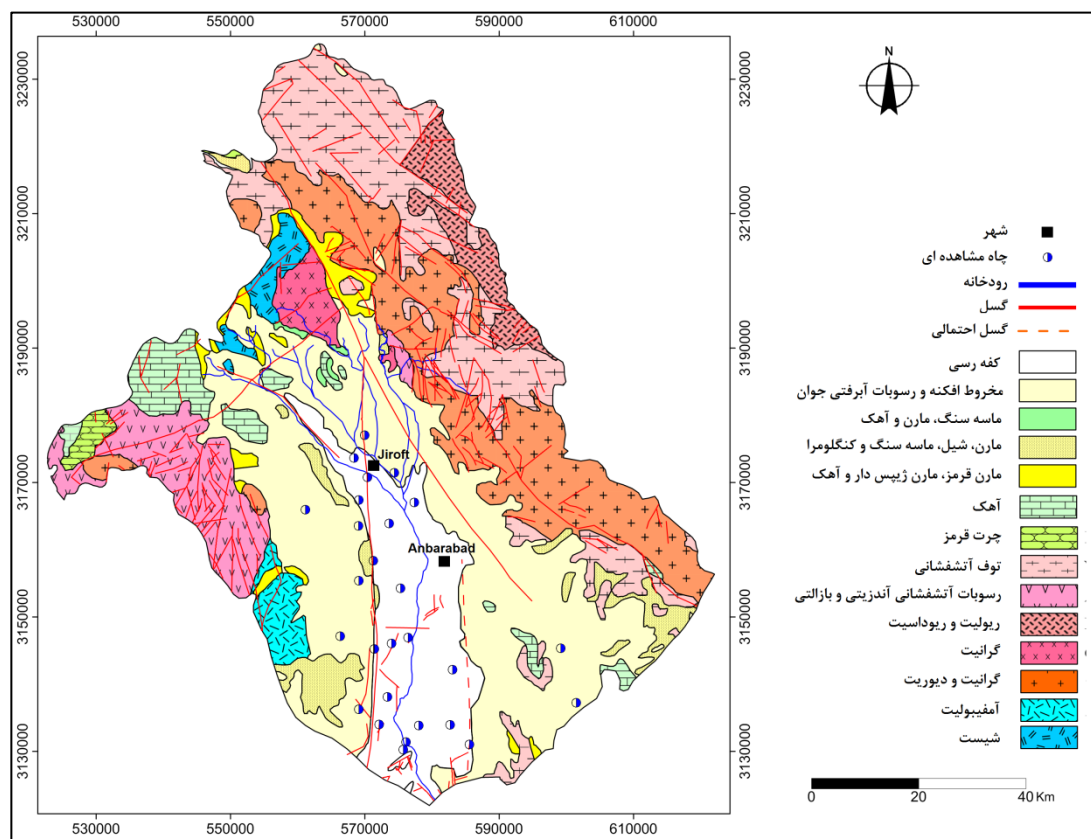
روش تحقیق

دشت جیرفت از روش نوسانات سطح آب برای برآورد میزان تغذیه آبخوان دشت جیرفت استفاده شده است. در این روش، تغذیه کل (تغذیه غیرخالص) به سیستم آب‌زیرزمینی محاسبه می‌شود. این تغذیه شامل منابع مختلفی از جمله بارندگی، منابع آب سطحی مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، آب برگشتی کشاورزی، تغذیه مصنوعی و .. می‌شود. در روش نوسان سطح آب، با اندازه‌گیری تغییرات سطح آب در دوره‌های زمانی مختلف و با در نظر گرفتن

در این رابطه R تغذیه آب زیرزمینی، S_y آبدهی ویژه، Δh میزان بالآمدگی سطح آب زیرزمینی در دوره تغذیه و Δt دوره زمانی تغذیه می‌باشد. نحوه محاسبه پارامتر Δh در شکل ۲ نشان داده شده است.

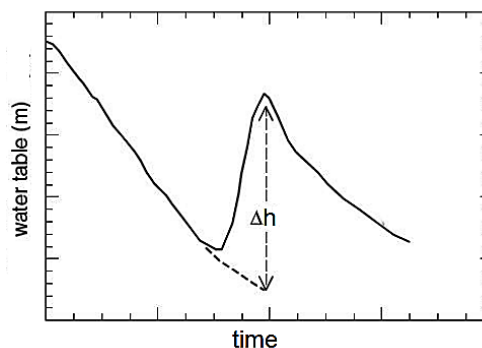
عواملی مانند نفوذپذیری خاک و ضریب ذخیره، میزان تغذیه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Healy, 2010):

$$R = S_y \cdot \Delta h / \Delta t \quad (1)$$

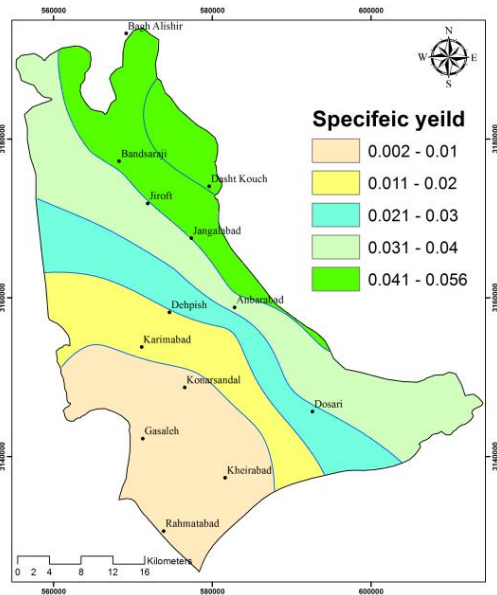


شکل (۱): نقشه زمین‌شناسی منطقه همراه با موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای

در این تحقیق داده‌های سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهده‌ای در یک دوره ۲۴ ساله (۱۴۰۱-۱۳۷۸) مورد بررسی قرار گرفته است. موقعیت این چاه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. مجموع میزان بالآمدگی سطح آب در این چاه‌ها در دوره تغذیه به صورت سالانه محاسبه شده و با توجه به مقادیر آبدهی ویژه آبخوان، میزان تغذیه سالانه محاسبه شده است. سپس با استفاده از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی، توزیع فضایی آن، پهنه‌بندی شده است. عوامل موثر بر میزان تغذیه آبخوان مانند ویژگی‌های زمین‌شناسی، خشکسالی، برداشت از آبخوان و تغییرات کاربری اراضی نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های



شکل (۲): نحوه محاسبه میزان صعود سطح آب زیرزمینی در روش نوسان سطح آب (Healy, 2010)



شکل (۳): توزیع فضایی پارامتر آبدهی ویژه آبخوان دشت جیرفت (فاریابی، ۱۴۰۴ الف)

میزان بالآمدگی سطح آب زیرزمینی در سال‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، کمترین میزان صعود سطح آب در سال ۱۳۸۷ و بیشترین میزان بالآمدگی سطح آب در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ رخ داده است. توزیع مکانی میانگین بالآمدگی سطح آب زیرزمینی در دوره ۲۴ ساله در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، بیشترین میزان صعود سطح آب (بیش از ۲/۵ متر) در نیمه شمالی و نیمه غربی دشت رخ داده است. عملکرد گسل‌ها بر میزان صعود سطح آب به ویژه در بخش غربی دشت تأثیر گذاشته است. در این بخش عملکرد گسل باعث جابجایی رسوبات و تغییرات شدیدی در ضخامت آبخوان شده است (فاریابی، ۱۴۰۴ ب). کمترین میزان بالآمدگی سطح آب نیز در بخش جنوبی آبخوان مشاهده می‌شود. حضور رسوبات ریزدانه در این بخش آبخوان باعث کاهش تغذیه آب زیرزمینی و کاهش صعود سطح آب در دوره تغذیه شده است.

زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی آبخوان با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث بررسی شدند. نوع و جنس رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان نیز با استفاده از اطلاعات لوگ حفاری چاه‌ها مشخص شده است. برای بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی از شاخص بارش استاندارد^۱ و شاخص دبی استاندارد^۲ استفاده شده است. داده‌های پمپاژ سالانه آبخوان از آرشیو شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان استخراج شده‌اند. نقشه‌های کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست^۳ در نرم‌افزار ENVI 5.3 استخراج شدند. تصحیحات رادیومتر و اتمسفری برای این تصاویر اعمال شد. سپس از روش طبقه‌بندی نظارت شده^۴ بیشینه درست‌نمایی^۴ برای تعیین کاربری‌های مختلف دشت جیرفت استفاده شد. برای بکارگیری این تکنیک، تمامی مراحل پیش‌پردازش و نمونه‌برداری زمینی بایستی انجام شده باشد (آذره و همکاران، ۱۴۰۳). در این تحقیق، نمونه برداری زمینی با استفاده از مشاهدات صحرایی و تصاویر گوگل ارث انجام شده است.

نتایج و بحث

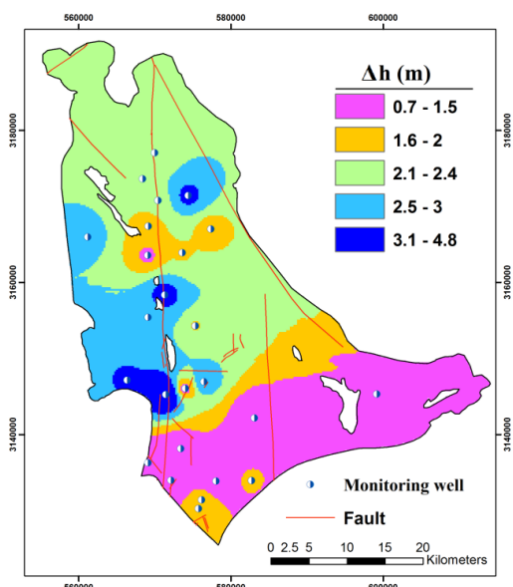
شکل ۳ الگوی تغییرات مکانی آبدهی ویژه آبخوان دشت جیرفت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل میزان آبدهی ویژه آبخوان بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵۶ (۰/۲ تا ۵/۶ درصد) متغیر است. بیشترین میزان آبدهی ویژه در حاشیه شرقی دشت مشاهده می‌شود. رسوبات آبخوان در این بخش عمدتاً رسوبات مخروط‌افکنه‌ای درشت‌دانه هستند. کمترین میزان آبدهی ویژه نیز مربوط به رسوبات ریزدانه رسی در بخش جنوبی آبخوان است (شکل ۳). به طور کلی با کاهش اندازه رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان از شمال به سمت جنوب دشت، آبدهی ویژه آبخوان کاهش می‌یابد (فاریابی، ۱۴۰۴ الف).

³ Landsat

⁴ Maximum likelihood

¹ Standardized Precipitation Index (SPI)

² Standardized Discharge Index (SDI)

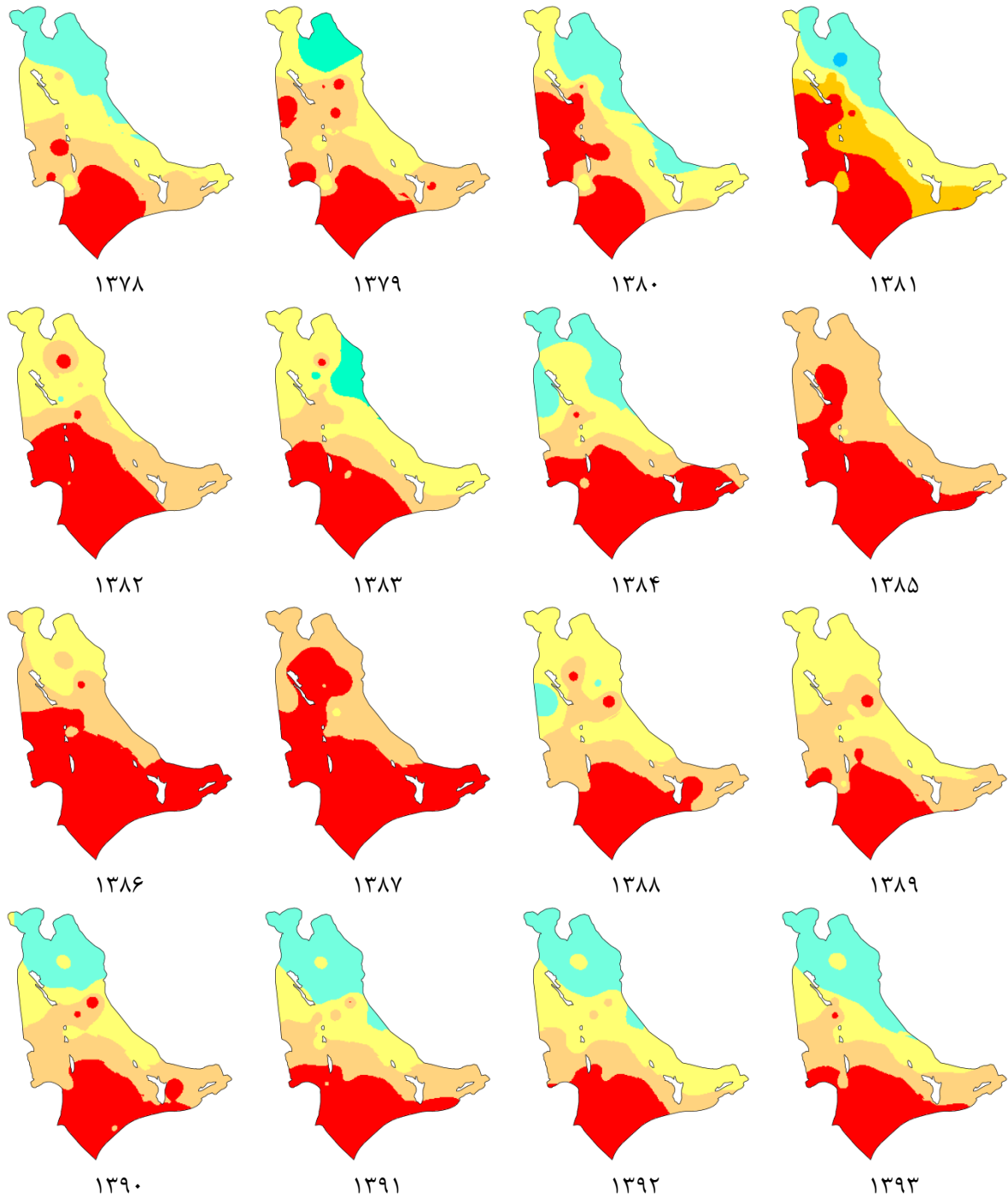


شکل (۵): پراکنندگی مکانی میانگین میزان بالآآمدگی سطح آب در دوره تغذیه

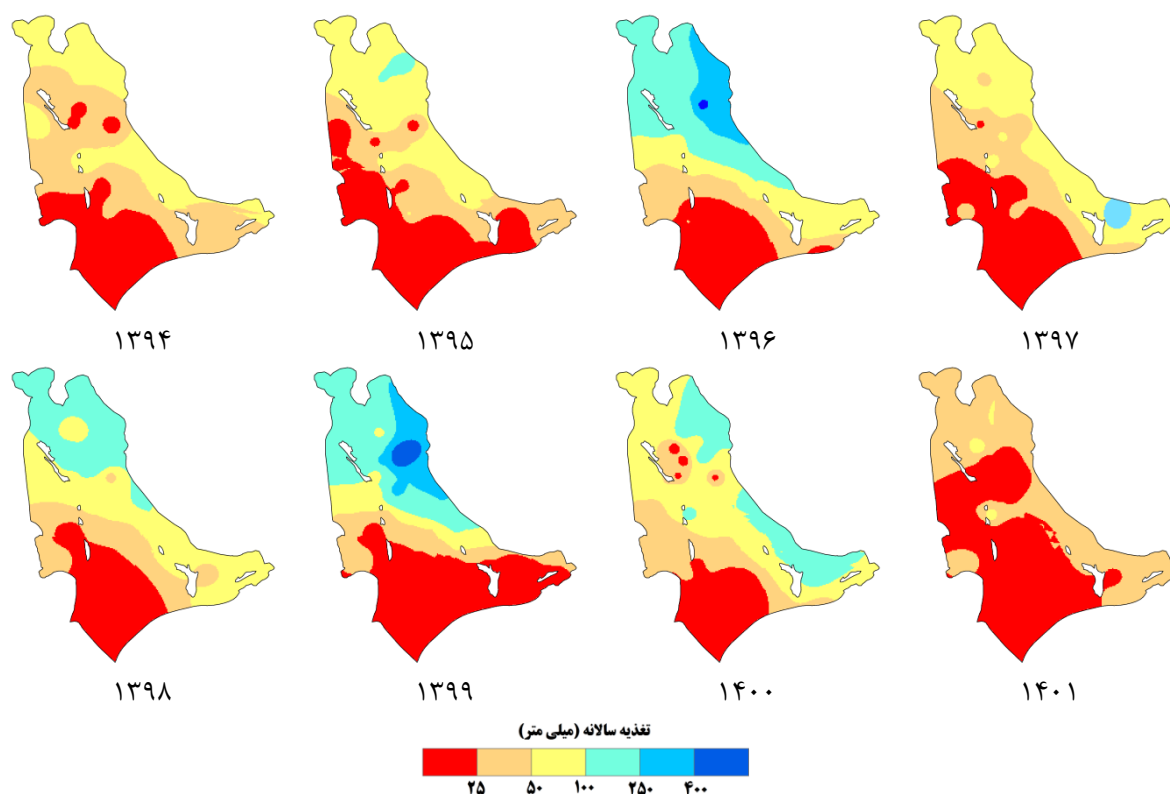


شکل (۴): میانگین میزان بالآآمدگی سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای در دوره تغذیه

با تلفیق میزان صعود سطح آب در دوره تغذیه و آبدهی ویژه آبخوان، توزیع فضایی میزان تغذیه آبخوان در سال‌های مختلف محاسبه و در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حداقل و حداکثر میزان تغذیه آبخوان در دوره ۲۴ ساله برابر با $0/4$ و 636 میلی‌متر در سال است. از لحاظ تغییرات مکانی نیز بیشترین میزان تغذیه آبخوان در بخش شمال شرقی و کمترین مقدار آن در بخش جنوبی دشت رخ داده است. جدول ۱ پارامترهای آماری میزان تغذیه آبخوان در دوره آماری مورد مطالعه را ارائه می‌کند. کمترین میزان تغذیه آبخوان در سال ۱۳۸۵ و بیشترین آن در سال ۱۳۹۶ به ترتیب با متوسط تغذیه سالانه $24/1$ و $106/1$ میلی‌متر رخ داده است (جدول ۱). بیشترین تغییرات مکانی تغذیه آبخوان نیز مربوط به سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۹ است. انحراف معیار تغذیه در این دو سال بیش از $0/1$ است. کمترین تغییرات مکانی تغذیه با انحراف معیاری برابر با $0/01$ مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۷ می‌باشد.



شکل (۶): الگوی تغییرات مکانی تغذیه آبخوان دشت جیرفت در سال‌های مختلف



شکل (۶): ادامه، الگوی تغییرات مکانی تغذیه آبخوان دشت جیرفت در سال‌های مختلف

جدول (۱): پارامترهای آماری میزان تغذیه آبخوان در دوره آماری مورد مطالعه

میزان تغذیه (میلی‌متر)				سال	میزان تغذیه (میلی‌متر)				سال
انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل		انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	
0.04	52.1	192.2	0.6	1390	0.05	64.1	219.6	0.8	1378
0.05	60.7	239.8	0.8	1391	0.04	47.4	239.8	1.2	1379
0.04	60.1	177.5	0.9	1392	0.04	59	187.8	0.6	1380
0.05	62.8	198.8	1.1	1393	0.06	58.7	317.5	1.2	1381
0.02	36.9	83.3	1	1394	0.02	33.9	109.2	0.9	1382
0.03	41.5	105.4	0.6	1395	0.03	49.2	179.1	1.3	1383
0.10	106.1	434.4	0.8	1396	0.04	52	177.6	0.7	1384
0.03	41.9	113.3	1.3	1397	0.01	24.1	55.3	0.8	1385
0.04	62.9	203.6	3.2	1398	0.02	25.5	87	0.9	1386
0.11	99.4	636.4	0.2	1399	0.01	18.5	58.3	0.6	1387
0.04	60.4	140.2	1.1	1400	0.03	44.5	166.6	1.3	1388
0.01	24.2	64.2	0.4	1401	0.02	42.5	91	0.9	1389

عوامل موثر بر تغذیه آبخوان

ویژگی‌های زمین‌شناسی

است. کمترین میزان تغذیه آبخوان در دوره آماری مورد مطالعه در بخش جنوبی دشت با مقدار کمتر از ۲۰ میلی‌متر

توزیع مکانی میانگین تغذیه آبخوان دشت جیرفت در دوره ۲۴ ساله (۱۴۰۱-۱۳۷۸) در شکل ۷ الف نشان داده شده



رسوبات ریزدانه سطحی، پتانسیل تغذیه آبخوان را کاهش داده‌اند.

شکل ۷د جنس رسوبات بخش غیراشباع آبخوان را نشان می‌دهد. اندازه رسوبات بخش غیراشباع آبخوان از شمال به سمت جنوب دشت کاهش می‌یابد. این وضعیت نیز بیانگر کاهش نفوذپذیری و تغذیه آبخوان در مناطق جنوبی است، زیرا آب نفوذیافته به درون خاک، باید از میان رسوبات بخش غیراشباع عبور کند تا وارد آبخوان شود. (Zomlot et al. 2015) نیز بافت خاک و نوع رسوبات را از مهمترین عوامل موثر بر تغذیه آب‌زیرزمینی در کشور بلژیک معرفی کرده‌اند.

خشکسالی و برداشت آب‌زیرزمینی

شکل ۸ رابطه تغییرات میانگین تغذیه آبخوان در مقابل شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیکی (SDI) در مقیاس سالانه را نشان می‌دهد. این شاخص‌های خشکسالی در تحقیقی دیگری توسط نگارنده محاسبه شده‌اند. بررسی رابطه بین میزان تغذیه آبخوان و شاخص‌های خشکسالی مذکور (شکل ۸ الف و ب) نشان می‌دهد که تاثیر خشکسالی هیدرولوژیکی بر میزان تغذیه آب‌زیرزمینی بیش از خشکسالی هواشناسی است. به طوری که ضریب همبستگی تغذیه آب‌زیرزمینی با شاخص خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به ترتیب برابر با ۰/۱۳ و ۰/۳۹ است. از آنجایی که این شاخص به ترتیب با استفاده از داده‌های بارندگی و دبی رودخانه محاسبه شده‌اند، می‌توان گفت که میزان تغذیه آبخوان دشت جیرفت وابستگی بیشتری به نوسانات دبی رودخانه هلیل‌رود (نسبت به نوسانات بارندگی) دارد. خسروی و یزدانی (۱۴۰۴) نیز در مطالعه حوزه دامغان‌رود نشان دادند که افزایش شدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی باعث کاهش تغذیه آب‌زیرزمینی شده است.

تغییرات میزان پمپاژ سالانه و میانگین تغذیه سالانه آبخوان دشت جیرفت در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به این شکل می‌توان بیان کرد که افزایش پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری میزان تغذیه آبخوان را افزایش داده است. ضریب همبستگی بین مقدار پمپاژ آبخوان و تغذیه آب‌زیرزمینی برابر با ۰/۴۸ است. آب پمپاژ شده عمدتاً برای آبیاری

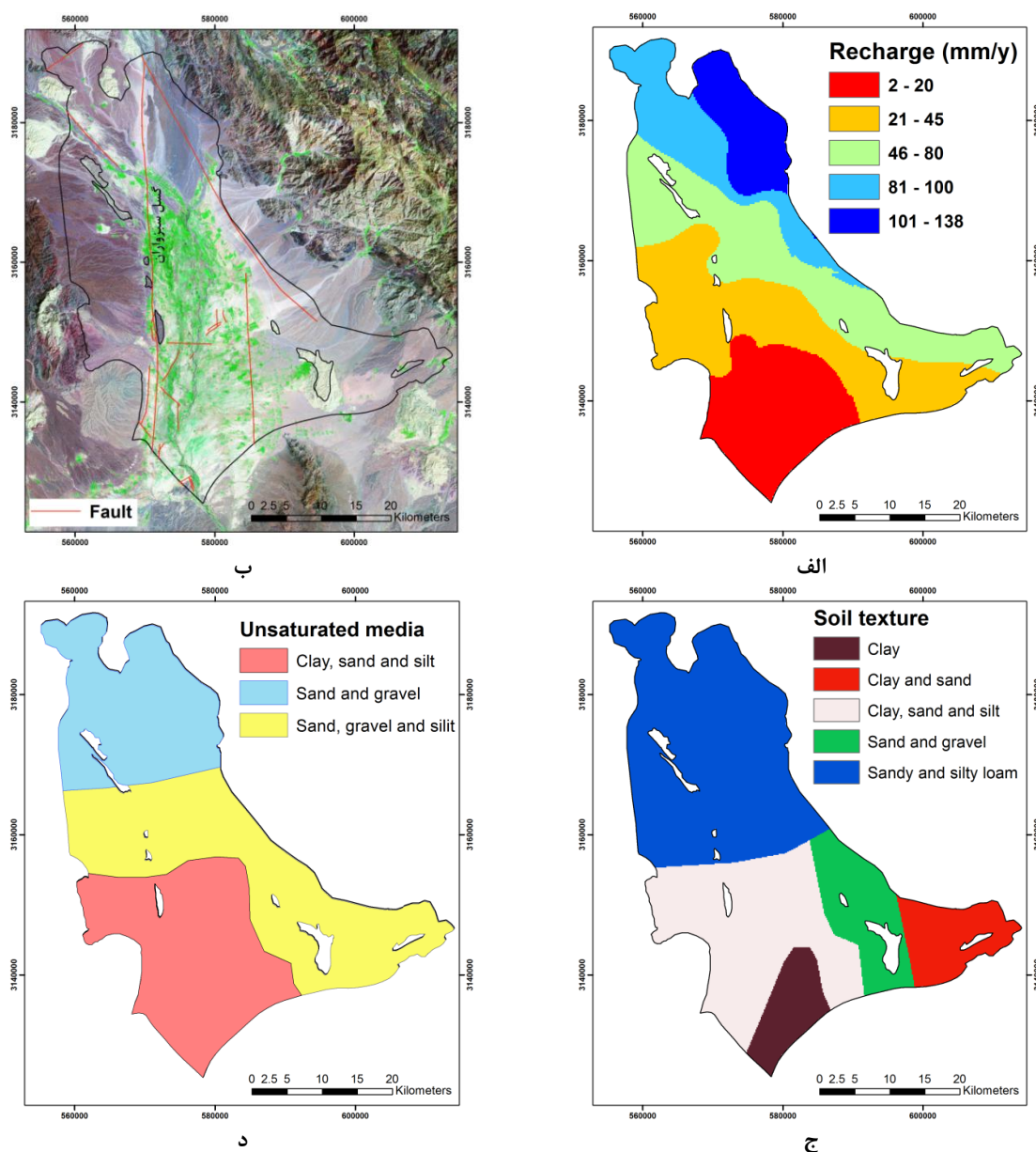
در سال مشاهده می‌شود. بیشترین میزان تغذیه نیز در حاشیه شمال شرقی دشت رخ داده است (بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در سال). تصویر ماهواره‌ای دشت جیرفت در شکل ۷ب ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مخروط‌افکنه‌های بزرگی در حاشیه شرقی دشت وجود دارند. این مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات درشت‌دانه آن‌ها نقش مهمی در تغذیه آبخوان دارند. این رسوبات درشت‌دانه عمدتاً از جنس ماسه و گراول بوده و آبدهی ویژه بالایی دارند. بنابراین انتظار می‌رود که تغذیه بیشتری در این مناطق رخ دهد. رسوبات سطحی بخش جنوبی آبخوان عمدتاً ریزدانه هستند (رس و سیلت ماسه‌ای) و به همین دلیل باعث کاهش پتانسیل تغذیه آب‌زیرزمینی شده‌اند. فیجانی و همکاران (۱۴۰۲) نیز به اهمیت مخروط‌افکنه‌ها در افزایش تغذیه آب‌زیرزمینی در دشت گرمسار اشاره کرده‌اند.

گسل‌ها نیز الگوی مکانی تغذیه آبخوان را تحت تاثیر قرار داده‌اند. با مقایسه شکل‌های ۷الف و ۷ب، تاثیر گسل سبزواران با راستای شمالی - جنوبی بر تغییرات مکانی تغذیه آبخوان قابل درک است. بررسی تغییرات مکانی تغذیه آبخوان در شکل ۶ نیز موید این موضوع است. گسل سبزواران، رسوباتی با جنس متفاوت را در کنار هم قرار داده و باعث تغییرات زیادی در ضخامت آبخوان شده است (فاریابی، ۱۴۰۴). حضور رسوبات با جنس و ضخامت متفاوت در دو سمت گسل، میزان تغذیه آب‌زیرزمینی را تحت تاثیر قرار داده است. به طوری که میزان تغذیه در مناطق موجود در شرق گسل بیش از مناطق واقع در بخش غربی آن است. علیجانی و همکاران (۱۳۹۷) نیز به نقش مهم گسل دورود بر وضعیت آبخوان دشت دورود- بروجرد در استان لرستان اشاره کرده‌اند.

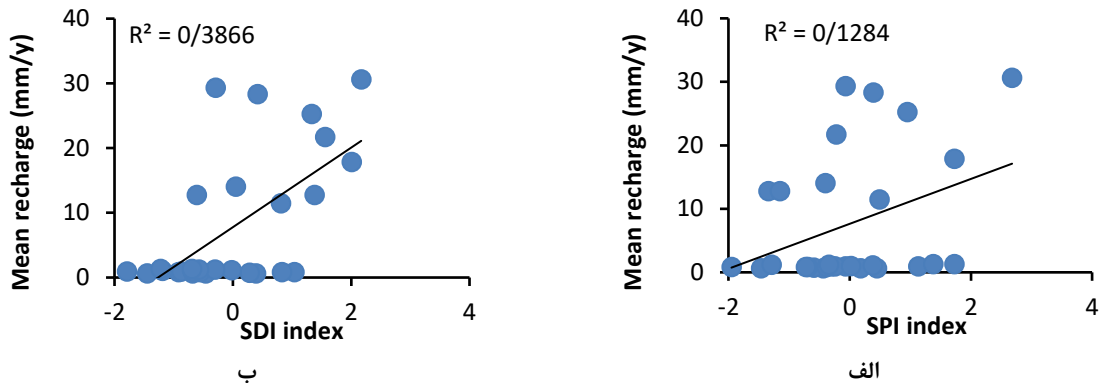
نقشه بافت خاک دشت جیرفت در شکل ۷ج ارائه شده است. بافت خاک در بخش شمالی و حاشیه شرقی دشت، عمدتاً درشت‌دانه بوده و شامل رسوباتی مانند گراول، ماسه و مقداری سیلت است. این رسوبات درشت‌دانه، نفوذپذیری بالایی دارند و باعث افزایش تغذیه آبخوان می‌شوند. در بخش‌های جنوبی دشت، بافت خاک عمدتاً ریزدانه بوده و شامل رسوباتی مانند رس، سیلت و مقداری ماسه است. این

آبیاری محصولات کشاورزی، میزان تغذیه آبخوان افزایش می‌یابد. اما میزان تغذیه آب‌زیرزمینی از این طریق بسیار کمتر از میزان تخلیه (پمپاژ) آبخوان است، زیرا فقط بخش کوچکی از آب آبیاری به داخل خاک نفوذ کرده و سرانجام به سطح آب‌زیرزمینی می‌رسد. بنابراین افت بیشتر و روند نزولی سطح آب زیرزمینی در آبخوان همچنان ادامه دارد.

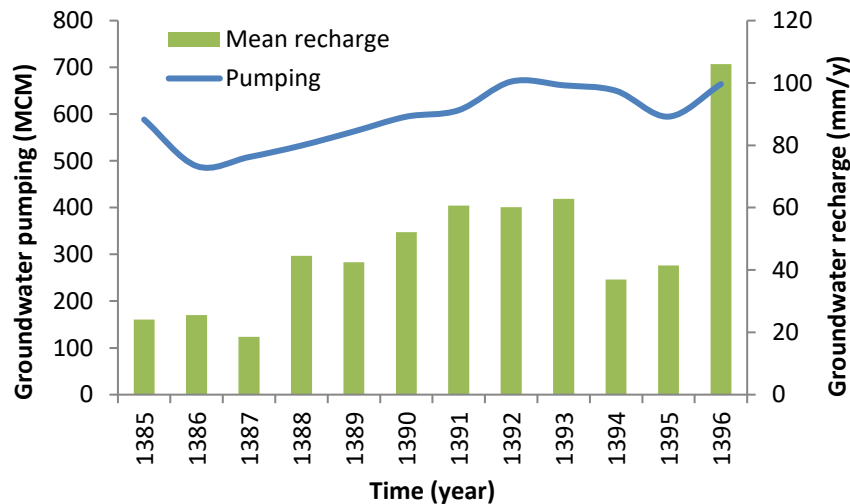
محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. در نتیجه میزان آب برگشتی کشاورزی افزایش یافته و آب بیشتری به درون خاک نفوذ می‌یابد. پژوهش‌های (Scanlon و Healy (2010) و et al. (2006) نیز موید این است که پمپاژ آب‌زیرزمینی برای آبیاری محصولات کشاورزی، میزان تغذیه آبخوان را افزایش می‌دهد. در اثر افزایش پمپاژ از آب‌زیرزمینی و



شکل (۷): میانگین تغذیه آبخوان (الف)، تصویر ماهواره‌ای (ب)، بافت خاک (ج) و جنس بخش غیراشباع آبخوان (د) در دشت جیرفت



شکل (۸): رابطه بین میزان تغذیه آب زیرزمینی و شاخص بارش استاندارد (الف) و شاخص دبی استاندارد (ب)

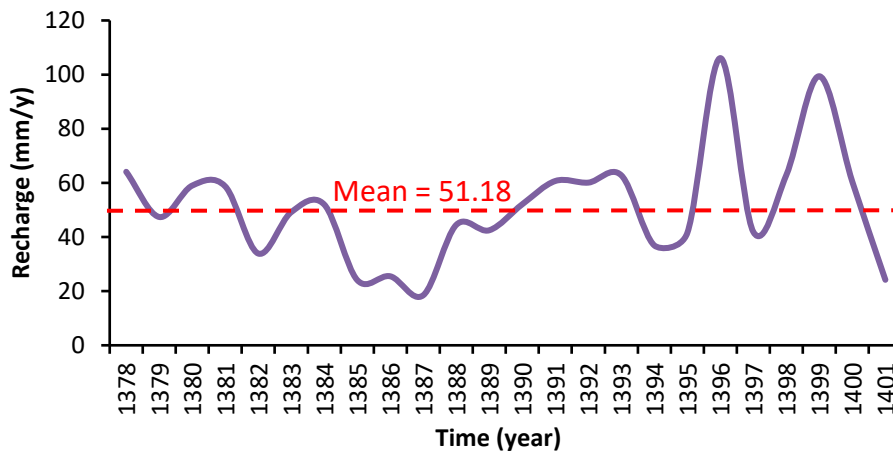


شکل (۹): تغییرات زمانی پمپاژ از آبخوان و میزان تغذیه آبخوان

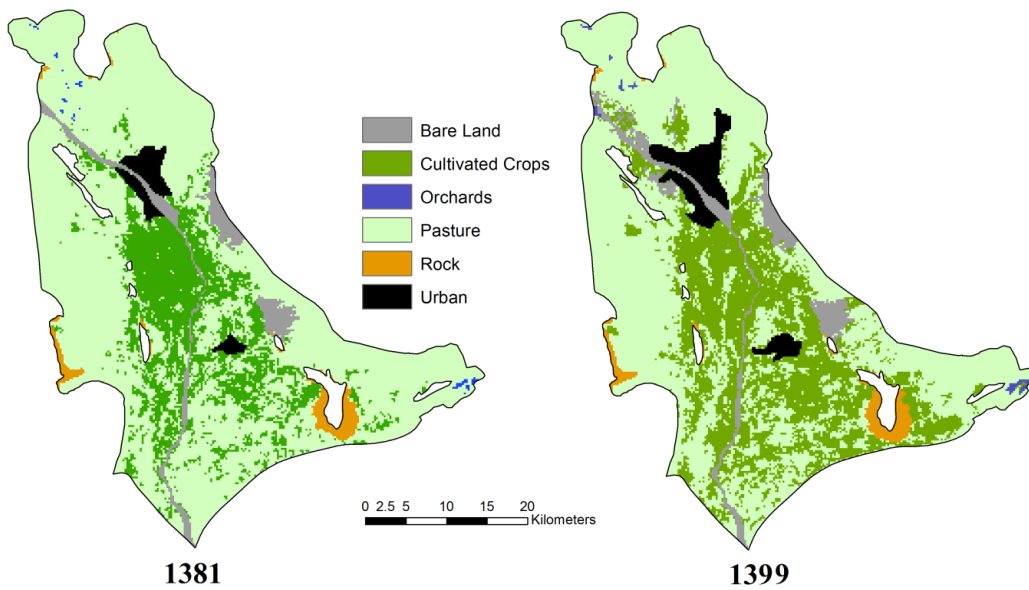
افزایش یافته است. در واقع در سال ۱۳۹۹ نسبت به سال ۱۳۸۱، وسعت مراتع ۱۳ درصد کاهش، اما وسعت اراضی کشاورزی و مناطق شهری به ترتیب ۹/۸ و ۲ درصد افزایش داشته است (شکل ۱۲). این تغییرات کاربری و به‌ویژه افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی که همراه با افزایش برداشت از آبخوان بوده است، منجر به افزایش میزان تغذیه آب زیرزمینی شده است. در این شرایط آب‌برگشتی کشاورزی نقش مهمی در تغذیه آبخوان دارد. Fisher and Healy, 2008 در مطالعه نفوذ آب در مناطق مختلف ایالات متحده آمریکا، نیز بیان کردند که تبدیل مراتع و مناطق جنگلی به زمین‌های کشاورزی باعث افزایش تغذیه آب زیرزمینی از طریق نفوذ آب‌های برگشتی کشاورزی شده است. این موضوع در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت زیادی دارد.

تغییرات کاربری اراضی

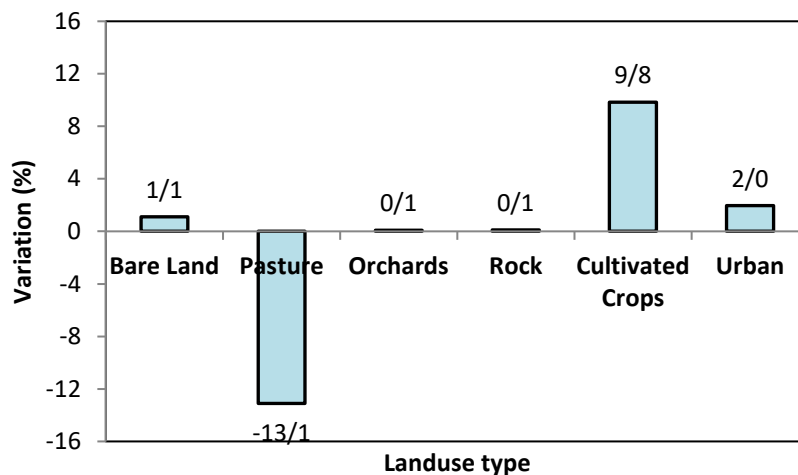
شکل ۱۰ تغییرات زمانی میانگین تغذیه سالانه آبخوان دشت جیرفت را نشان می‌دهد. میانگین بلندمدت تغذیه آب زیرزمینی نیز روی این شکل با مقدار ۵۱/۱۸ میلی‌متر مشخص شده است. با توجه به این مقدار میانگین، می‌توان دو دوره مشخص در تغییرات زمانی تغذیه آبخوان مشخص کرد: دوره اول از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۹ که میزان تغذیه آبخوان اغلب کمتر از میانگین درازمدت آن است. دوره دوم از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ که میزان تغذیه آبخوان در اغلب موارد بیش از میانگین درازمدت آن است. نقشه کاربری اراضی در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۹ به عنوان نمادی از این دو دوره در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با گذشت زمان مساحت مراتع کاهش و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و مناطق شهری



شکل (۱۰): تغییرات زمانی میانگین تغذیه آبخوان



شکل (۱۱): کاربری اراضی دشت جیرفت در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۹



شکل (۱۲): درصد تغییرات کاربری اراضی سال ۱۳۹۹ نسبت به سال ۱۳۸۱

نتوانسته افت حاصل از پمپاژ آب زیرزمینی را جبران کند و تراز سطح آب زیرزمینی همچنان روند نزولی دارد. بنابراین اتخاذ تصمیمات مدیریتی برای اصلاح الگوی کشت در کشاورزی و کاهش برداشت از آبخوان اهمیت بسیار زیادی دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش نوسان سطح آب زیرزمینی، روش مناسبی برای برآورد تغذیه آبخوان است. البته باید تغییرات مکانی آبدهی ویژه آبخوان به دقت مورد مطالعه قرار گیرد. از آنجایی که روش مدونی برای برآورد تغذیه در تهیه مدل‌های ریاضی جریان آب زیرزمینی وجود ندارد، پیشنهاد می‌شود که تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آبخوان، به عنوان یکی از پارامترهای ورودی این مدل‌ها، با استفاده از روش نوسان سطح آب مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

این مطالعه در قالب طرح پژوهشی به شماره ۳۹۸۰۴-۰۱-۰۳-۴۸۱۳ و با بهره‌مندی از اعتبارات پژوهشی دانشگاه جیرفت انجام شده است. از دانشگاه جیرفت جهت حمایت مالی این پژوهش قدردانی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تغییرات مکانی و زمانی تغذیه آبخوان دشت جیرفت و مهمترین عوامل موثر بر آن مورد بحث و بررسی قرار گرفت. الگوی فضایی میزان تغذیه آبخوان نشان‌دهنده این است که بیشترین تغذیه در بخش شمال شرقی آبخوان و کمترین مقدار تغذیه در بخش جنوبی آن رخ داده است. وجود مخروط افکنه‌های بزرگ و رسوبات درشت‌دانه آن‌ها در بخش غیراشباع آبخوان نقش مهمی در افزایش تغذیه سیستم آب زیرزمینی در حاشیه شرقی دشت دارد. حضور رسوبات سطحی و زیرسطحی ریزدانه در بخش جنوبی دشت، پتانسیل تغذیه آبخوان را کاهش داده است. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان تغذیه آبخوان از خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی هواشناسی تاثیرپذیری بیشتری دارد. تغییرات کاربری اراضی و تبدیل مراتع به زمین‌های کشاورزی، باعث افزایش برداشت از آبخوان شده است. در نتیجه میزان آب برگشتی ناشی از آبیاری محصولات کشاورزی افزایش یافته و به تبع آن میزان تغذیه آب زیرزمینی بیشتر شده است، اما این افزایش تغذیه

منابع

آذره، ع.، رفیعی ساردوئی، ا.، میرچولی، ف.، (۱۴۰۳). تحلیل و پیش‌بینی روند تخریب پوشش زمین و تعیین تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین با استفاده از سنجش از دور. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال چهارم، شماره ۴، ص ۳۲-۱۵.

- ارجمند شریف، م.، جعفری، ه.، ۱۴۰۰. برآورد تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان مشهد - چناران با استفاده از روش نوسانات سطح ایستابی (الگوریتم MRC). هیدروژئولوژی، سال ششم، شماره ۲، ص ۱۶۸-۱۵۱.
- خسروی، م.، یزدانی، م.، ر.، ۱۴۰۴. بررسی اثرات خشک‌سالی روی الگوی زمانی تغذیه آبخوان ها در آبخیز دامغان رود. پژوهش های آبخیزداری، سال سی و هشتم، شماره ۱، ص ۶۰-۳۸.
- زینالی، ب.، جلالی عنصردی، ط.، مصطفوی، ح.، ۱۴۰۲. بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغذیه ناشی از بارش در حوضه آبریز شیرامین. مطالعات علوم محیط زیست، سال هشتم، شماره ۲، ۶۶۰۲-۶۵۸۹.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کرمان، ۱۳۹۸. گزارش ادامه مطالعات و ممنوعیت دشت جیرفت. ۵۶ ص.
- علیجانی، ف.، ناصری، ح.، ر.، امیرافضلی، م.، و شماسی، ع.، ۱۳۹۷. تاثیر گسل دورود بر هیدروژئولوژی آبخوان آبرفتی دشت دورود - بروجرد، لرستان. تحقیقات منابع آب ایران، سال چهاردهم، شماره ۲، ص ۱۸۱-۱۶۷.
- غفاری، ح.، رسول زاده، ع.، رئوف، م.، اسمعیلی عوری، ا.، ۱۳۹۷. برآورد تغذیه طبیعی آب زیرزمینی با استفاده از روش WTF (مطالعه موردی: آبخوان دشت اردبیل). نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، شماره ۹۰، ص ۵۲-۴۳.
- فاریابی، م.، ۱۴۰۴ الف. الگوی تغییرات مکانی پارامتر آبدهی ویژه در آبخوان آبرفتی دشت جیرفت، جنوب استان کرمان. سیزدهمین همایش ملی محیط زیست، انرژی و منابع طبیعی، جهاد دانشگاهی واحد شهید بهشتی، تهران.
- فاریابی، م.، ۱۴۰۴ ب. بررسی رفتار هیدروژئولوژیکی گسل سبزواران با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی، پارامترهای کیفی و ایزوتوپ‌های محیطی (^{18}O ، ^3H و ^{14}C). مدل سازی و مدیریت آب و خاک. سال پنجم، شماره ۱، ص ۱۲۲-۱۰۷.
- فیجانی، ا.، میثمی، س.، مظفری، م.، ۱۴۰۲. ارزیابی پتانسیل و مقادیر تغذیه آب زیرزمینی آبخوان دشت گرمسار به روش‌های نوسانات سطح ایستابی و پیسکوپو. مهندسی عمران فردوسی، سال سی و ششم، شماره ۱، ص ۱۸-۱.
- مسموعی، م.، جعفری، ه.، امیریگی، م.، ۱۳۹۳. تجزیه و تحلیل بلند مدت نوسانات سطح ایستابی آبخوان هرات در یک دوره بیست ساله. اولین کنفرانس ملی جغرافیا، گردشگری، منابع طبیعی و توسعه پایدار، تهران.
- Fisher, L.H., Healy, R.W., 2008. Water movement within the unsaturated zone in four agricultural areas of the United States. *Journal of Environmental Quality*, 37(3): 1051-1063.
- Healy, R.W., 2010. Estimating groundwater recharge. Cambridge University Press, 324 p.
- Kawecka, A.G., Beata J.S., Adam, S., Wioletta G.L., Małgorzata, P.C., Rafael, J., Jirka, S., 2022. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology*, 605: 127283
- Labrecque, G., Chesnaux, R., Boucher, M.A., 2020. Water-table fluctuation method for assessing aquifer recharge: application to Canadian aquifers and comparison with other methods. *Hydrogeology Journal*, 21: 521-533.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39.
- Scanlon, B.R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, W.M., Simmers, I., 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20: 3335-337.
- Varni M., Comas, R., Weinzettel, P., Dietrich, S., 2013. Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina, *Hydrological Sciences Journal*, 58(7): 1445-1455.
- VuV, H., Merkel, B.J., 2019. Estimating groundwater recharge for Hanoi, Vietnam. *Science of the Total Environment*, 651: 1047-1057.
- Zomlot, Z., Verbeiren, B., Huysmans, M., Batelaan, O., 2015. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4: 349-368.