Vol. ?, No. ?, ? ?, p.?-? ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.101636.1710 OPEN ACCESS

Assessment and Analysis of Land Subsidence Risk Based on InSAR and Piezometric Data Changes in Rural Areas of Marivan County Plains

Abdolmajid Ahmadi* [1], **Soran Manoochehri** [2], **Ali Abdolmaleki** [1]

[1] Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran
[2] Department of Geography, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 10 October 2026

Revised: 16 November 2026

Accepted: 27 November 2026

Available Online:

27 November 2026

Keywords:

Risk management

Land subsidence

Marivan County plains

ABSTRACT

Given the complex and unpredictable nature of droughts driven by climate change, adopting a risk management approach within the framework of Integrated Water Resources Management (IWRM) is indispensable to ensure the livelihood sustainability of stakeholders. In Marivan County, the erosive nature of drought combined with the region's relatively high precipitation has led to a strategic oversight in managing withdrawals, which could deal an irreparable blow to the sustainability of the settlement environment. This study, utilizing regional water authority data and InSAR interferometry, examines these risks in the Marivan and Qezelche plains. Findings indicate that the hydrological systems of these plains have shifted from dynamic equilibrium toward a structural crisis. The turning point of this crisis occurred in the 2020-2021 water year, when the link between precipitation and groundwater levels was severed; under the pressure of excessive extraction, the system transitioned from a 2.7m surplus at the start of the statistical period to a 2.5m deficit by 2025. This decline in water levels is distributed heterogeneously. Furthermore, time-series analysis of radar data shows that both plains experienced land subsidence between 2015 and 2025, though the intensity and uniformity of this phenomenon were higher in the Qezelche plain (averaging approximately 5 cm/year) compared to Marivan (approximately 4 cm/year). Crucially, there is a significant synchronization between these subsidence events and the onset of intensive, unregulated extraction starting from the 2020-2021 water year.

* Corresponding author: Abdolmajid Ahmadi E-mail address: a.ahmadi@razi.ac.ir

How to cite this article: Ahmadi, A., Manoochehri, S., & Abdolmaleki, A. (2026). Assessment and Analysis of Land Subsidence Risk Based on InSAR and Piezometric Data Changes in Rural Areas of Marivan County Plains. *Journal of Geography and Environmental Hazards,* ?(?), ?-?. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.100091.1688

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Sustainable livelihood is the cornerstone of rural viability; it implies that a livelihood system must not only preserve and protect strategic assets but also ensure resilience against both sudden shocks and long-term stressors for both present and future generations. Due to their direct and organic link with nature, rural communities are inherently more vulnerable to natural hazards than any other sector. For these communities, hazards such as drought and land subsidence are not merely transient events; rather, they pose a fundamental threat to their livelihoods that can precipitate the collapse of their entire production and life systems.

According to climatic data from the Kurdistan Regional Water Authority, the average precipitation in Marivan County has decreased by approximately 18% over the past two decades compared to the preceding period. This trend exacerbates the region's vulnerability to climatic droughts and elevates the risk of land subsidence. Simultaneously, Marivan—functioning as a hub for tourism, cross-border trade (designated as a Free Trade Zone), and agricultural production, coupled with a high concentration of migrant populations—faces mounting pressure to secure and maintain water quality to sustain these economic activities and meet expanding demands.

The intersection of these competing land uses (urban water supply, over-extraction, drought-sensitive agriculture, and water-dependent tourism and trade) creates a significant conflict in resource allocation. Without proper management, this conflict threatens the collapse of livelihood resilience due to the depletion of soil and water resources. Given the topographical diversity of the county and limited plain areas, population and economic activities are concentrated in the two primary plains—Marivan and Qezelche-Su—thereby intensifying pressure on their respective aquifers.

Despite Marivan being one of the most precipitation-rich regions in the province, with surface and groundwater resources flowing toward Iraq, long-term concerns regarding declining precipitation, over-extraction, unauthorized wells, and land-use changes remain marginalized. A pervasive "strategic negligence" is observable within both administrative and rural communities. Given the prevailing national climatic trend of persistent droughts, the continuation of this status quo risks creating profound economic, social, and environmental instability. Consequently, within the framework of natural hazard risk management, identifying sensitive areas prone to land subsidence and implementing problem-oriented planning is imperative. Accordingly, the core research questions are as follows:

1. What is the dynamic status of groundwater level fluctuations in the Qezelche-Su and Marivan plains, and what behavioral patterns (in terms of sustainability or depletion) do these aquifers exhibit during the study period?
2. What are the prevailing patterns regarding the spatial distribution and temporal evolution of land subsidence in the Marivan and Qezelche-Su plains throughout the study period?

Material and Methods

In this descriptive-analytical study, the calculation of groundwater level fluctuations and land subsidence was required. To this end, statistical data regarding groundwater level variations from 34 observation wells in Marivan County were obtained from the Regional Water Authority, covering the period from 1376 (1997) to the end of the 1404 (2025-2026) water year, and subsequently analyzed. Furthermore, the rate and magnitude of land subsidence in the Qezelche-Su and Marivan plains were assessed by analyzing satellite imagery from 2014 to 2025. This specific time interval was selected considering the challenges in accessing high-quality imagery and the distinct patterns of groundwater level changes observed in the Marivan County plains, which have exhibited a different behavioral trend since 2014 compared to previous water years. Additionally, inferential statistical tests were employed to validate and generalize the research findings.

To investigate regional ground displacement, Sentinel-1 data in Single Look Complex (SLC) format were processed using the SNAP Sentinel software. The imagery was analyzed at annual intervals; specifically, for the initial interferometric analysis, the 2015 image was set as the master image and the 2016 image as the slave image. For the subsequent interferometric analysis, the 2016 image served as the master and the 2017 image as the slave, with this sequential configuration continued through 2025 across the study area.

Results and Discussion

The findings indicate that the Marivan and Qezelche-Su aquifers underwent a phase transition from dynamic equilibrium to structural crisis starting in 2020 (1399 SH). This decline—characterized by a 5.2-meter gap (shifting from a +2.7m surplus to a -2.5m deficit) and an inability to recover naturally—signifies a breakdown in the aquifer's regulatory capacity. Results demonstrate that the hydrological system has decoupled from precipitation patterns, with anthropogenic extraction replacing climate as the primary driver of groundwater level fluctuations.

The crisis pattern within the region is heterogeneous and multi-centric. The Marivan Plain exhibits a gradual decline, whereas the Qezelche-Su Plain shows an accelerated rate of subsidence. Hyper-critical hotspots (such as the villages of Bilu and Ney) are the result of synergistic pressures from water transfers for urban potable supply and agriculture, whereas other areas are primarily affected by unsustainable agricultural management. Furthermore, both plains experienced downward deformation and subsidence between 2015 and 2025. While the intensity, continuity, and spatial uniformity of this phenomenon are more pronounced in the Qezelche-Su Plain (mirroring its groundwater decline), the behavioral patterns differ: the Qezelche-Su Plain (50 cm cumulative subsidence) faces rapid, uniform, and cumulative subsidence, while the Marivan Plain exhibits more oscillatory behavior (40 cm cumulative subsidence).

From a spatial perspective, subsidence is a pervasive, areal phenomenon; more than 65.6% of the total area is currently in a state of unstable geotechnical stress (moderate to high risk). Critical subsidence hotspots coincide with locations that recorded the highest groundwater level declines in hydrologic data. This correspondence proves that the spatial pattern of subsidence in the region is not random but a direct function of groundwater abstraction focal points. The highest rates of subsidence occurred from 2021 onwards, coinciding with the critical period of extreme water level decline and excessive extraction previously noted in the studied plains.

Conclusion

The groundwater depletion and land subsidence in the Marivan plains are driven by a synergy of climatic reductions in natural recharge, intensifying anthropogenic pressures from urban and industrial expansion, and passive management strategies. Addressing this crisis necessitates a strategic pivot from supply-oriented, sectoral governance toward an integrated, basin-based framework that aligns regional development with the watershed's ecological capacity to ensure long-term resilience.

جلد ؟، شماره ؟، ؟ ؟، ص ؟-؟
ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076
نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی
مقاله پژوهشی DOI:10.22067/GEOEH.2026.101636.1710 دسترسی آزاد

سنجش و تحلیل ریسک مخاطره فرونشست مبتنی بر تداخل سنجی راداری و تغییرات داده‌های پیزومتریک در نواحی روستایی دشت‌های شهرستان مریوان

عبدالمجید احمدی*[1]، سوران منوچهری[2]، علی عبدالملکی[1]

[1] گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
[2] گروه جغرافیا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۷/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۸/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۹/۰۶

کلمات کلیدی:
مدیریت ریسک
فرونشست زمین
دشت‌های شهرستان مریوان

چکیده

با توجه به ماهیت پیچیده و پیش‌بینی‌ناپذیر خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم، اتخاذ رویکرد مدیریت ریسک در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب به منظور تضمین پایداری معیشت ذی‌نفعان، ضرورتی انکارناپذیر است. در شهرستان مریوان، ماهیت خزنده خشکسالی و پربارش بودن نسبی منطقه، منجر به نوعی غفلت راهبردی در مدیریت برداشت‌ها شده که می‌تواند ضربه‌ای جبران‌ناپذیر به پایداری فضای سکونتی وارد کند. پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های شرکت آب منطقه‌ای و تداخل‌سنجی راداری، مخاطرات یادشده را در دشت‌های مریوان و قزلچه‌سو بررسی کرده است. یافته‌ها حاکی از آن است که سیستم هیدرولوژیکی این دشت‌ها از تعادل پویا به سمت بحران ساختاری تغییر یافته است. نقطه عطف این بحران از سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ رخ داده؛ جایی که پیوند بارش و تراز ایستابی گسسته شده و سیستم تحت فشار برداشت بی‌رویه از مازاد ۲.۷ متری در شروع دروه آماری به کسری ۲.۵- متری در سال ۱۴۰۴ رسیده است. این افت تراز به‌صورت ناهمگن توزیع شده است. همچنین، تحلیل سری زمانی داده‌های راداری، نشان می‌دهد؛ هر دو دشت در بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ با فرونشست زمین مواجه بوده‌اند؛ اما شدت و یکنواختی این پدیده در دشت قزلچه با میانگین حدود ۵ سانتی‌متر در سال، بیشتر از مریوان با حدود ۴ سانتی‌متر در سال است. نکته حائز اهمیت، همزمانی معنادار این فرونشست‌ها با آغاز دوره برداشت بی‌رویه از سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به بعد است.

* نویسنده مسئول: عبدالمجید احمدی
E-mail: a.ahmadi@razi.ac.ir

مقدمه

جوامع روستایی به دلیل پیوند مستقیم و ارگانیک با طبیعت، بیش از هر بخش دیگری در برابر مخاطرات طبیعی آسیب‌پذیرند. برای این جوامع، مخاطراتی نظیر خشکسالی و فرونشست، صرفاً حوادثی گذرا نیستند، بلکه تهدیدی بنیادین برای معیشت محسوب می‌شوند که می‌تواند کل نظام تولید و زندگی آن‌ها را دچار فروپاشی کند (Rahman, Alam & Shobuj, 2025؛ Kumar , Kothari, Min Thein , Kumar, Chariar & Tsusaka, 2025؛Singh, Sharma & Meena, 2025) . در حالی که در دهه هفتاد میلادی، بیشترین توجه به مؤلفه خطرات طبیعی (شناسایی مخاطره) معطوف بود از دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰(Bonadonna, 2021) به ویژه پس از دو موافقتنامه و سند راهبردی مدیریت خطر بلایا توسط سازمان ملل در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ یعنی؛ چارچوب هیوگو[1] و چارچوب سندای[2](۲۰۱۵-۲۰۳۰)، تغییر قابل توجهی در نحوه مدیریت بلایا مبتنی بر تغییر مدیریت بحران به مدیریت ریسک، رویکرد فرمان-کنترل به فرآیندگرا؛ دیدگاه مدیریتی واکنشی به مدیریت فعالانه و پیشگیرانه مبتنی بر افزایش تاب‌آوری با کاهش سطح آسیب‌پذیری، شکل گرفته است (Alam & Bennett, 2021). ارزیابی ریسک مخاطره، رویکردی آینده‌نگرانه (Razak, Ekhmar & Mazlina, 2024)؛ نیاز توسعه و پایداری آن جهت جلوگیری از ایجاد رابطه ناپایدار انسان و محیط طبیعی و برنامه‌ریزی مسئله محور خواهد بود (Marciano, Peresan Pirni, Pittore, Tocchi & Zaccaria, 2024؛ Jahangiri, Eivazi & Mofazali, 2017).

در دهه‌های آینده، رشد جمعیت و اقتصاد جهانی به افزایش تقاضا برای آب‌های زیرزمینی و به‌تبع آن تخلیه این منابع، منجر خواهد شد و چنانچه این روند با خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم تشدید شود؛ وقوع فرونشست زمین و خسارات یا پیامدهای مرتبط با آن را افزایش خواهد داد (Herrera-García et al., 2021). فرونشست، یک پیامد جانبی اما بسیار خطرناک مدیریت نامناسب منابع آب است که می‌تواند اثرات خشکسالی را به‌صورت زنجیره‌ای تشدید کند (Shirzaei et al., 2021). این مخاطره به‌عنوان یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیکی و محیطی در دشت‌های آبرفتی و تراکمی، مستقیماً با وضعیت هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها و تعادل دینامیک لایه‌های زیرسطحی پیوند خورده است. فرونشست زمین، معمولاً یک فرآیند آهسته با شدت متوسط است که بسته به ویژگی‌های سیستم هیدروژئولوژیکی به تدریج توسعه می‌یابد. زمان لازم برای رسیدن یک به تعادل مجدد پس از یک اختلال می‌تواند صدها سال طول بکشد. میزان فرونشست نیز به عوامل مختلفی از جمله خواص ژئومکانیکی و هیدروژئولوژیکی خاک زیرین، میزان استخراج آب‌های زیرزمینی، مدت زمان بهره‌برداری و بارهای زیرساختی بستگی دارد (Sadeghi et al., 2023؛ Díaz-Nigenda, Morales-Casique, Carrillo-García & Vázquez-Peña, 2026). برخلاف فرآیندهای زمین‌ساختی که معمولاً گسترده و یکنواخت هستند، فرونشست ناشی از فعالیت‌های انسانی، ماهیتی مکان‌مند (فضایی) دارد؛ به این معنا که نرخ فرونشست در هر نقطه، تابعی از شدت برداشت آب، ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان و حساسیت لایه‌های رسوبی در آن نقطه خاص است (Modoni et al., 2013).

از منظر نخست، علت اصلی فرونشست، افت تراز سطح ایستابی و تخلیه ذخایر آب زیرزمینی است. در این فرآیند، کاهش فشار آب منفذی باعث افزایش تنش مؤثر بر ذرات خاک می‌شود که در نهایت به فشرده شدن اسکلت رسوبات ریزدانه و نفوذناپذیر (مانند سیلت و رس) و کاهش حجم آبخوان می‌انجامد. این کاهش حجم در بلندمدت، به‌صورت نشست تجمعی سطح زمین ظاهر می‌شود. از منظر دوم، فرونشست تنها یک تغییر تراز عمودی نیست بلکه یک فرآیند ژئومورفولوژیک است که چشم‌اندازهای جدیدی را در دشت‌های آبرفتی ایجاد می‌کند. تداوم نشست زمین، با ایجاد نیروهای کششی و تنش‌های برشی در لایه‌های سطحی، منجر به ظهور شکستگی‌ها، شکاف‌های بزرگ، فروچاله‌ها و فرورفتگی‌های نامنظم می‌شود. در حقیقت، در دشت‌های تراکمی، به دلیل ناهمگونی در ضخامت و دانه‌بندی آبرفت‌ها، نشست به‌صورت غیریکنواخت رخ می‌دهد که این امر، تنش‌های افقی و عمودی شدیدی را بر پوسته زمین اعمال کرده و منجر به پدیدار شدن عوارض ژئومورفولوژیک می‌شود که پایداری زمین را برای کاربری‌های کشاورزی و زیرساخت‌های عمرانی به شدت تهدید می‌کند (Faunt et al., 2024؛ Jia et al.,2025؛ Ndahangwapo, Thiam & Dinar, 2024).

1- UN’s Hyogo Framework
2- Sendai Framework

ایران امروزه یکی از کشورهایی است که با بالاترین سطح افت آب‌های زیرزمینی و تخلیه آبخوان‌ها مواجه است؛ وضعیتی که با از دست رفتن ظرفیت‌های طبیعی آبخوان‌ها، عواقب زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را برای کشور به همراه دارد و نتیجه آن قرارگیری ایران در بین پنج کشور اول دنیا از لحاظ نرخ فرونشست زمین است (Sabouri & Gorgani ,2025). از مجموع ۶۱۰ آبخوان کشور، ۱۱۸ آبخوان تا سال ۱۴۴۰ در معرض نابودی قطعی قرار دارند که ۳۴ مورد از آن‌ها تنها تا سال ۱۴۱۵ به مرحله‌ی اضمحلال خواهند رسید(Naseri, 2023) .

در این میان، استان کردستان نیز به واسطه تداوم خشکسالی و به دنبال آن برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در دشت‌های مهم خود در قسمت شرق استان با نرخ‌های فرونشست بالا و نگران کننده‌ای روبرو است (Ghahroudi Tali, Khodamoradi & Alinouri, 2023; Ahmadi & Soudmand, 2020; Gholami, Arab-Amiri & Tokhmchi, 2022). این در حالی است که مطالعات آماری در سند آمایش استان، نشان می‌دهد که شهرستان مریوان در غرب استان که پربارش‌ترین، شهرستان هم به شمار می‌رود؛ در صدر شهرستان‌های استان کردستان از نظر میزان برداشت آب زیرزمینی به نسبت جمعیت، قرار دارد. مطابق با داده‌های اقلیمی ارائه شده از شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، میانگین بارش‌های شهرستان مریوان در ۲۰ ساله اخیر قریب به ۱۸ درصد نسبت به میانگین دوره قبل از آن کاهش داشته است. این وضعیت، آسیب‌پذیری منطقه در برابر خشکسالی‌های اقلیمی را تشدید و ریسک فرونشست زمین را بالا خواهد برد. همزمان، مریوان به عنوان قطب گردشگری، تجارت مرزی(تبدیل شدن به منطقه آزاد تجاری) و تولیدکننده مهم محصولات کشاورزی و از سویی شهری با جمعیت مهاجرنشین زیاد؛ نیازمند تامین و حفظ کیفیت منابع آب برای تداوم این فعالیت‌های اقتصادی و تقاضاهای انباشت شده و روبه گسترش است. تداخل این کاربری‌ها (تامین آب برای جمعیت، برداشت بی‌رویه، کشاورزی حساس به خشکسالی و گردشگری و تجارت وابسته به منابع آبی پایدار) یک تضاد کاربری منابع ایجاد می‌کند که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند منجر به فروپاشی تاب‌آوری معیشتی با از بین رفتن منابع آب و خاک شود. با توجه تنوع توپوگرافی شهرستان مریوان و محدودیت نواحی دشتی؛ تمرکز جمعیت و فعالیت‌ها در دو دشت اصلی شهرستان، یعنی دشت مریوان و دشت قزلچه قرار گرفته که فشار را بر آبخوان‌های این دو دشت را افرون نموده است.

این در حالی است که قرار داشتن این شهرستان در زمره پربارش‌ترین منطقه در استان و منابع آب سطحی و تحت الارضی که از این شهرستان مرزی به کشور عراق وارد می‌شوند؛ دغدغه پرداختن به مسئله کاهش بارش‌ها در روندی بلندمدت، برداشت‌های بی‌رویه، تعدد چاه‌های غیرمجاز و تغییرات کاربری اراضی موجود را به حاشیه برده و نوعی غفلت در این زمینه در فضای مدیریتی و درون اجتماعات روستایی، مشاهده می‌گردد که قدر مسلم؛ تداوم آن با توجه به وضعیت اقلیمی پیش‌رو و تسلط خشکسالی‌ها بر پیکره اقلیمی کشور، می‌تواند شرایط ابهام آمیزی در زمینه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی را در آینده منطقه شکل دهد. بر این اساس در چارچوب رویکرد مدیریت ریسک مخاطرات طبیعی، نیاز است که مناطق حساس و در معرض پدیده فرونشست را شناسایی و مورد برنامه‌ریزی مسئله محور قرار داد. بر این اساس، سوال‌های اصلی پژوهش، عبارتند از:

سوال اول: وضعیت دینامیک تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت‌های قزلچه و مریوان چگونه است و تحلیل رفتار آبخوان‌های مذکور در دوره مورد مطالعه، بیانگر چه الگوی رفتاری (از منظر پایداری یا افت منابع) در این پهنه‌ها است؟

سوال دوم: الگوی حاکم بر توزیع فضایی و تکامل زمانی فرونشست در پهنه‌های دشت مریوان و قزلچه در دوره آماری مورد مطالعه چگونه است؟

مطالعات انجام‌شده در سطح جهانی و ملی، نشان می‌دهد که فرونشست زمین بیش از آنکه پدیده‌ای صرفاً زمین‌شناختی باشد، پیامد مدیریت ناپایدار منابع آب و فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی است. پژوهش‌های بابل و همکاران (Babel, Das Gupta & Domingo, 2026)، یواونو و همکاران (Yuwono, Reyhan & Sabri, 2026)، جیا و همکاران (Jia et al., 2025)، حسین و همکاران (Hussain, Chen & Khan, 2024) ، کیگنا و تاپیت (Cigna & Tapete, 2022)، و چن و همکاران (Chen et al., 2013)، در مناطقی

مانند بانکوک، اندونزی، پاکستان و مکزیک، بر نقش تقاضای فزاینده آب در بخش‌های شهری و صنعتی و نیز بارگذاری سازه‌ای ناشی از گسترش شهرها تأکید دارند. بر اساس یافته‌های این پژوهش‌ها، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و توسعه کالبدی شهرها موجب تشدید فرونشست و تهدید پایداری اراضی ساحلی و کوهستانی گردیده‌اند. همین الگو در مناطق کشاورزی قونیه در ترکیه و نیوزیلند نیز دیده‌شده؛ به‌گونه‌ای که در مطالعات توسط اورهان (Orhan, 2021) و هاروی و همکاران (Harvey, Maghsoudi & Rissmann, 2026)؛ تغییر کاربری اراضی، از جمله تبدیل تالاب‌ها به زمین‌های کشاورزی، و برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها با افزایش فرونشست ارتباط دارد. این مطالعات بر لزوم گذار به سمت منابع جایگزین آب و کنترل سخت‌گیرانه برداشت از آبخوان‌ها برای مهار این پدیده تأکید دارند.

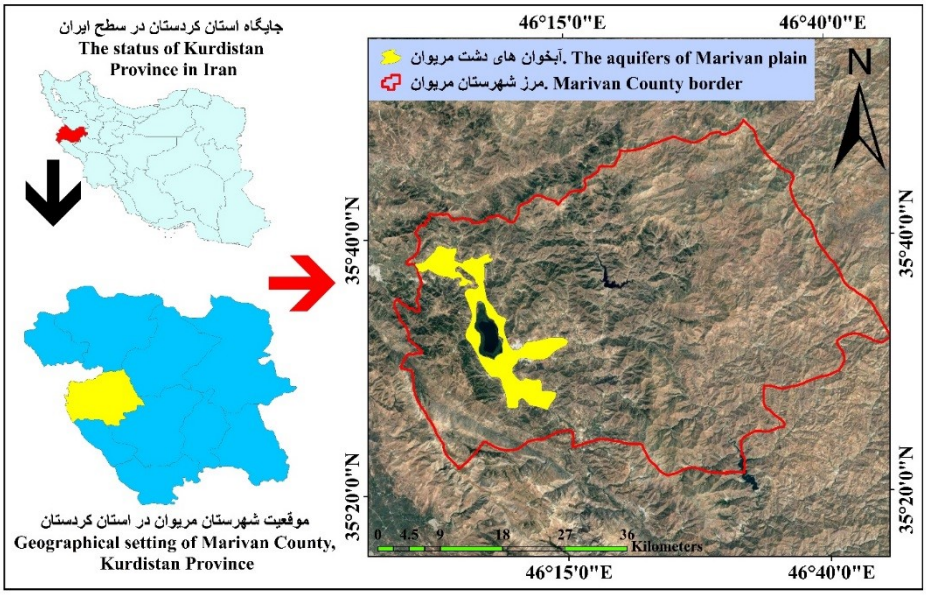
در کنار بررسی عوامل محرک، پژوهش‌ها بر اهمیت استفاده از فناوری‌های نوین سنجش از دور، به‌ویژه تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، برای پایش دقیق و مستمر تغییرات سطح زمین تأکید کرده‌اند. هریراگارسیا و همکاران (Herrera-García et al., 2021) ، مودونی و همکاران (Modoni et al., 2013)، راتب و ابوطالب (Rateb & Abotalib, 2020) و حسین و همکاران (Hussain, Chen & Khan, 2024)، نشان داده‌اند که تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی، امکان پایش دقیق فرونشست را فراهم می‌کند. همچنین، هاوکینز و همکاران (Howkins et al., 2026) نشان می‌دهند که نقشه‌برداری آسیب‌پذیری با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به شناسایی مناطق بحرانی و حرکت از مدیریت واکنشی به برنامه‌ریزی پیشگیرانه کمک کند.

در ارتباط با دشت‌های ایران نیز، پژوهش گل صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2023) ، نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری در برابر فرونشست، ماهیتی چندبعدی دارد و از تعامل عوامل طبیعی، مانند ویژگی‌های زمین‌شناختی، با عوامل انسانی، به‌ویژه مدیریت ناکارآمد آب‌های زیرزمینی و برداشت‌های غیرمجاز، تأثیر می‌پذیرد. رفیعی و همکاران (Rafiei, Gharechelou & Golian, 2022) نیز در دشت سملقان، ارتباط میان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست را تأیید کرده و تغییر الگوی کشت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب را از راهکارهای کنترل این پدیده دانسته‌اند. افزون بر این، صبوری و گرگانی (Sabouri & Gorgani, 2025) نشان داده‌اند که وابستگی اقتصادی سکونتگاه‌های روستایی به کشاورزی و آسیب‌پذیری کالبدی آن‌ها، خطر فرونشست را برای زیرساخت‌ها و معیشت روستایی افزایش می‌دهد. این مسئله در دشت دهگلان نیز مشهود است؛ به گونه‌ای که قهرودی تالی و همکاران (Ghahroudi Tali, Khodamoradi & Alinouri, 2023) با نشان‌دادن هم‌پوشانی پهنه‌های افت شدید آب زیرزمینی و نرخ‌های بالای فرونشست، بر ضرورت مدیریت منابع آب و محدودسازی برداشت‌های غیرمجاز برای حفاظت از زیرساخت‌های کشاورزی و پایداری اکوسیستم منطقه تأکید کرده‌اند.

منطقه مورد مطالعه

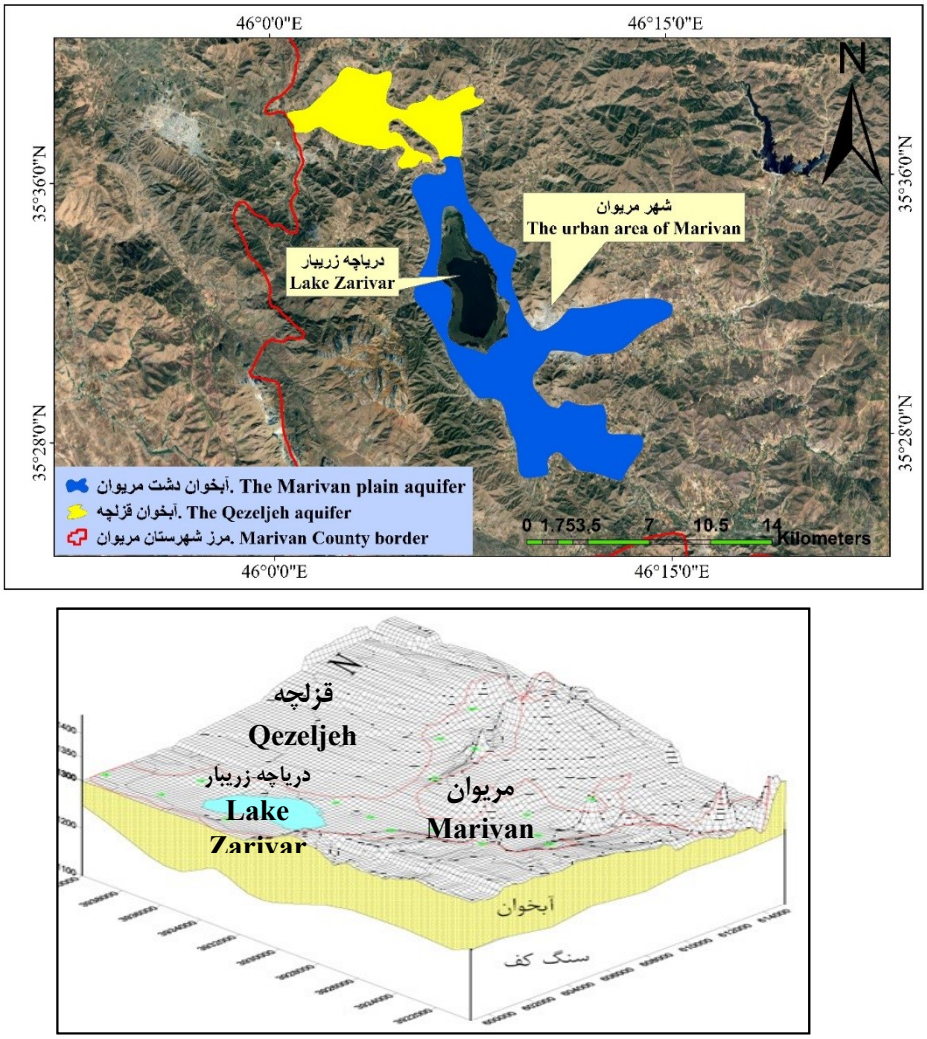
حوزه آبریز دشت‌های مورد مطالعه در شهرستان مریوان استان کردستان، از نظر جغرافیائی بین ۲۶`- ۳۵° تا ۴۲`- ۳۵° درجه عرض شمالی و ۰۰- ۴۶° تا ۱۵`- ۴۶° طول شرقی و در سلسله جبال زاگرس داخلی یا سنندج - سیرجان و در۱۲۰ کیلومتری سنندج (شمال غربی ایران و مرز عراق) واقع شده است. دشت قزلچه سو در شمال دریاچه زریبار بصورت شرقی - غربی گسترش یافته ورودخانه قزلچه سو از میان دشت و با جهت شرقی - غربی جریان داشته و پس از خروج از کشور ، وارد سد دوکان در عراق می‌شود. متوسط حجم رواناب سالانه حوزه آبریز بالغ بر ۴۱ میلیون و مساحت حوزه آبریز مربوطه (۱۳۷/۴ کیلومترمربع) است (شکل۱). حوزه آبریز دشت مریوان، شامل ۴۸ زیر حوزه با مساحت کل ۱۶۵/۶ کیلومترمربع و جمع رواناب سالانه ۶۵/۶۳ میلیون مترمکعب می‌باشد. ضریب ذخیره برمبنای روش دانه‌بندی رسوبات به عنوان آبخوان آزاد برابر ۱ تا ۲/۵ درصد برای دشت مریوان و ۱ تا ۵ درصد برای دشت قزلچه سو بدست آمده است. پایین بودن شاخص‌های مذکور به وضوح گویای غلبه رسوبات ریزدانه نظیر سیلت و رس در ساختار زمین‌شناختی دشت‌های مورد مطالعه است. همچنین، مقادیر تغییرات ضریب انتقال آن در دشت مریوان، اطراف و جنوب دریاچه برابر ۱۲۹ تا ۴۸۰ مترمربع در روز و در دشت قزلچه سو برابر ۲۲۸ تا ۴۹۷ مترمربع در روز بدست آمده است. این ارقام بیانگر آن است که

دشت مریوان و قزلچه‌سو از نظر قابلیت انتقال، وضعیت متوسطی دارند. تنوع اعداد در یک محدوده وسیع، نشان‌دهنده ناهمگنی در بافت آبرفت‌ها است؛ به این معنا که در برخی نقاط آبخوان اجازه حرکت آسان آب را می‌دهد و در برخی نقاط دیگر، به دلیل ریزدانه بودن رسوبات یا کاهش ضخامت آب‌دار، این انتقال با کندی مواجه است. مجموع تغذیه آبخوان در محدوده بیلان دشت مریوان برابر ۶۶/۰۷ میلیون متر مکعب می‌باشد که حدود ۶۰ درصد آن (۴۰ میلیون متر مکعب) مربوط به تغذیه از طریق جبهه‌های ورودی جریان آب زیرزمینی به آبخوان و حدود ۴۰ درصد آن (۲۳/۶۷ میلیون متر مکعب) مربوط به تغذیه از طریق ریزش‌های جوی، روان آب و آب برگشتی چاه‌ها ، چشمه‌ها و ... است. در دشت قزلچه سو، مجموع تـغذیه برابر ۲۳/۹۶ میلیون متر مکعب است که حدود ۴۱ درصد آن (۹/۹۱ میلیون متر مکعب) مربوط به تغذیه از طریق جبهه‌های ورودی جریان آب زیرزمینی به آبخوان و حدود ۵۹ درصد آن (۱۴/۰۵ میلیون متر مکعب) مربوط به تغذیه از طریق ریزش‌های جوی، روان آب و آب برگشتی چاه‌ها، چشمه و .. است (طرح مطالعاتی دشت‌های مریوان و قزلچه مریوان در سال ۱۴۰۰، شرکت آب منطقه‌ای، ۱۴۰۵). تحلیل منابع تغذیه، نشان می‌دهد که ساز وکار بازسازی ذخایر در این دو دشت متفاوت است. در قزلچه‌سو، مدیریت روان‌آب‌های سطحی و افزایش نفوذپذیری اهمیت حیاتی دارد اما در مریوان، پایداری جریان‌های ورودی زیرزمینی تعیین‌کننده است. همچنین؛ مطابق با مطالعات انجام گرفته در سند راهبردی آمایش سرزمین استان کردستان، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی به نسبت جمعیت در سطح شهرستان مریوان، بیشترین مقدار در سطح استان بوده و این شهرستان را در مرز هشدار، قرار داده‌است. بررسی توپوگرافی شهرستان مریوان با دامنه ارتفاعی گسترده ۱۱۸۰ تا ۳۴۸۱ متر، ، نشان دهنده ناهموار بودن بخش عمده‌ای مساحت این شهرستان و محدود بودن منطقه دشتی است که بار اصلی سکونت و برداشت از منابع آبی بر روی دو دشت قزلچه و مریوان قرار دارد.



شکل۱ – نمایش موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Location of the study area

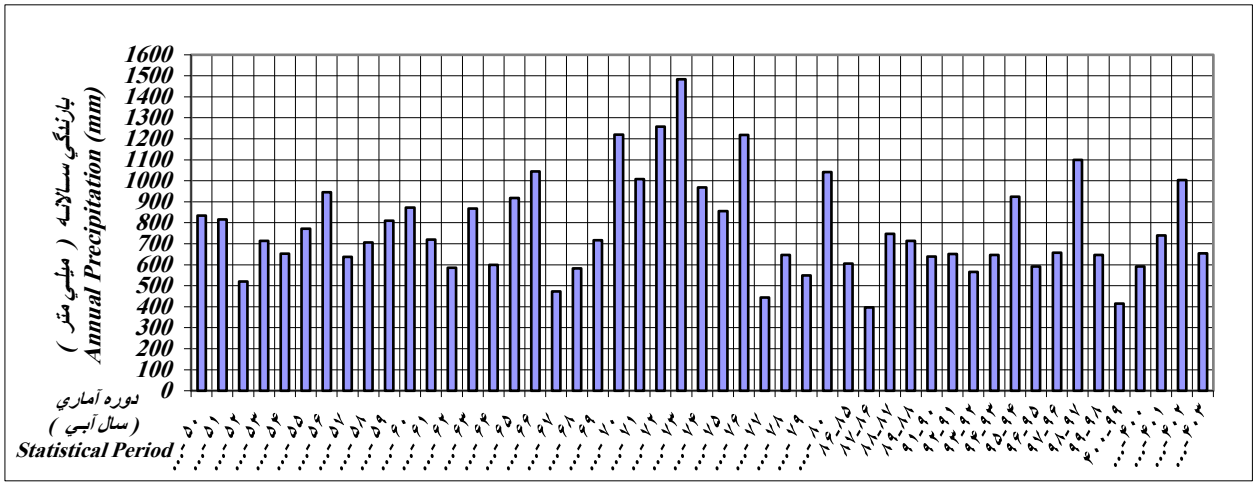


شکل۲ – محدوده و شکل دشت‌های مریوان و قزلچه

Fig. 2. Boundaries and morphology of the Marivan and Qezelche-Su plains

با توجه به تاکید بر روی مولفه برداشت از منابع آب زیرزمینی، نیاز به بررسی وضعیت بارشی در منطقه است. در این ارتباط، بررسی داده‌های ۵۴ ساله (۱۳۵۱ تا ۴۰۵–۱۴۰۴) نشان‌دهنده یک تغییر الگوی معنادار است. میانگین بارش در بازه نخست (تا پایان ۱۳۸۵) حدود ۸۰۳ میلی‌متر بوده است، در حالی که این رقم در بازه دوم (۱۳۸۶ تا ۴۰۵–۱۴۰۴) به حدود ۶۵۵ میلی‌متر، تنزل یافته است. این کاهش حدود ۱۴۸ میلی‌متری (۱۸/۴ درصدی)، گواهی بر وقوع خشکسالی‌های مستمر و کاهش جدی در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و رواناب‌های سطحی منطقه است. تفاوت ساختاری این دو دوره، تنها در کاهش میانگین نیست، بلکه در تداوم خشکسالی نهفته است: در دوره اول، سال‌های با بارش کمتر از ۶۵۰ میلی‌متر حدود ۲۰ درصد از سال‌ها را تشکیل می‌دادند، اما در دوره دوم این نسبت به ۳۷ درصد افزایش یافته است. این یعنی احتمال مواجهه با سال‌های کم‌بارش در دو دهه اخیر، تقریباً دو برابر شده است. همچنین، یکی از خطرناک‌ترین شاخص‌ها برای مدیریت منابع آب، خشکسالی‌های متوالی است. در حالی که در سال‌های گذشته؛

کم‌بارشی‌ها، معمولاً با سال‌های پربارش جبران می‌شد، مشاهده توالی بارش‌های کمتر از میانگین در دوره اخیر، احتمال کاهش تراز را تقویت کرده است.



شکل ۳ – تغییرات بارندگی سالانه ایستگاه مریوان، منبع (داده‌های شرکت آب منطقه‌ای کردستان، ۱۴۰۵)

Fig. 3. Annual precipitation variations at the Marivan station

مواد و روش‌ها

در پژوهش توصیفی-تحلیل حاضر، نیاز بود که تغییرات سطح ایستابی و فرونشست محاسبه گردد. در این راستا، داده داده‌های آماری مرتبط با نوسانات سطح ایستابی ۲۹ چاه مشاهده‌ای شهرستان مریوان از شرکت آب منطقه‌ای از سال ۱۳۷۶ تا پایان سال آبی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ دریافت و تجزیه و تحلیل گردید. همچنین، با تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای مرتبط با دشت‌های قزلچه‌سو و مریوان، نرخ و میزان فرونشست در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۵ مورد سنجش قرار گرفت. تعیین این بازه زمانی با توجه به دشواری دسترسی به تصاویر کارآمد و الگوی تغییرات تراز آبی در دشت‌های شهرستان مریوان صورت گرفت که از سال ۲۰۱۴ به بعد، رفتاری متفاوت نسبت به سال‌های آبی پیشین نشان داده است. همچنین از آزمون‌های آمار استنباطی در نرم‌افزار Spss نیز در راستای تایید و تعمیم یافته‌ها بهره‌گرفته شده است.

به‌منظور بررسی میزان تغییرات جابه‌جایی منطقه، داده‌های سنتینل-۱ با فرمت SLC (Single Look Complex) در نرم‌افزار SNAP SENTINEL پردازش شدند. جهت انجام تداخل‌سنجی، تصاویر در بازه‌های سالانه مورد تحلیل قرار گرفتند؛ به این صورت که برای تداخل‌سنجی نخست، تصویر سال ۲۰۱۵ به‌عنوان تصویر مستر (مرجع) و تصویر سال ۲۰۱۶ به‌عنوان تصویر اسلیو (پیرو) انتخاب گردید. این فرآیند به‌صورت متوالی برای سال‌های بعدی تا سال ۲۰۲۵ تکرار شد، به‌گونه‌ای که در هر مرحله، تصویر سال پیشین به‌عنوان مرجع و تصویر سال بعد به‌عنوان پیرو جهت انطباق هندسی و رادیومتریک مورد استفاده قرار گرفت. فرآیند پردازش تصاویر، هفت مرحله اصلی؛ شامل تبدیل داده‌ها به حالت SLC ، ثبت هندسی، تهیه تداخل‌نگار، حذف اثرات توپوگرافی، اعمال فیلتر، برآورد فاز و در نهایت، زمین‌مرجع‌سازی جهت استخراج نقشه نهایی فرونشست بود.

تلفیق تکنیک تداخل‌سنجی راداری با روش‌های آمار استنباطی، چارچوب روش‌شناختی جامعی را برای سنجش و تحلیل فرونشست زمین در منطقه ایجاد می‌کند که مزایای آن را می‌توان در دو بعد فضایی-دقت محور و تحلیلی-رابطه محور تبیین نمود. از یک سو، فناوری InSAR با ارائه داده‌های پیوسته، پوشش منطقه‌ای وسیع و دقت در مقیاس میلی‌متری، محدودیت‌های شبکه سنتی چاه‌های پیزومتریک (که به نقاط پراکنده محدودند) را برطرف کرده و امکان پایش تاریخی و پویایی‌های مکانی-زمانی سطح زمین را بدون نیاز به دیده‌بانی میدانی مستمر فرآهم می‌سازد. از سوی دیگر، به‌کارگیری آمار استنباطی به این داده‌ها، اعتبار علمی می‌بخشد؛ به گونه‌ای که با استفاده از آزمون‌های آن، می‌توان رابطه میان افت سطح آب زیرزمینی (تخلیه آبخوان) و نرخ فرونشست

زمین و تفاوت‌های فضایی را با ضریب اطمینان آماری بالا سنجش و اثبات نمود. در نتیجه، این هم‌پوشانی نه تنها از خطاهای ذهنی جلوگیری کرده بلکه امکان ارزیابی معناداری تغییرات، پیش‌بینی رفتار آینده آبخوان‌ها و مدیریت ریسک مبتنی بر شواهد مستند را برای دشت‌های بحرانی فراهم می‌آورد.

جدول۱- مشخصات داده‌های اخذشده

Table 1- Specifications of acquired data

ردیف ROW	سنجنده Sensor	نوع تصویر Image type	تاریخ اخذ تصویر Acquisition date	عبور Pass	طول‌موج Pass	قطبش Polarization
1	SENTINEL_1	SLC	23 September 2015	Ascending	6/5	VV+VH
2	SENTINEL_1	SLC	24 September 2016	Ascending	6/5	VV+VH
3	SENTINEL_1	SLC	19 September 2017	Ascending	6/5	VV+VH
4	SENTINEL_1	SLC	26 September 2018	Ascending	6/5	VV+VH
5	SENTINEL_1	SLC	21 September 2019	Ascending	6/5	VV+VH
6	SENTINEL_1	SLC	19 September 2020	Ascending	6/5	VV+VH
7	SENTINEL_1	SLC	22 September 2021	Ascending	6/5	VV+VH
8	SENTINEL_1	SLC	17 September 2022	Ascending	6/5	VV+VH
9	SENTINEL_1	SLC	24 September 2023	Ascending	6/5	VV+VH
10	SENTINEL_1	SLC	18 September 2024	Ascending	6/5	VV+VH
11	SENTINEL_1	SLC	25 September 2025	Ascending	6/5	VV+VH

نتایج و بحث

روند تغییرات سطح تراز آبی و سطح آب در دشت‌های قزلچه و مریوان

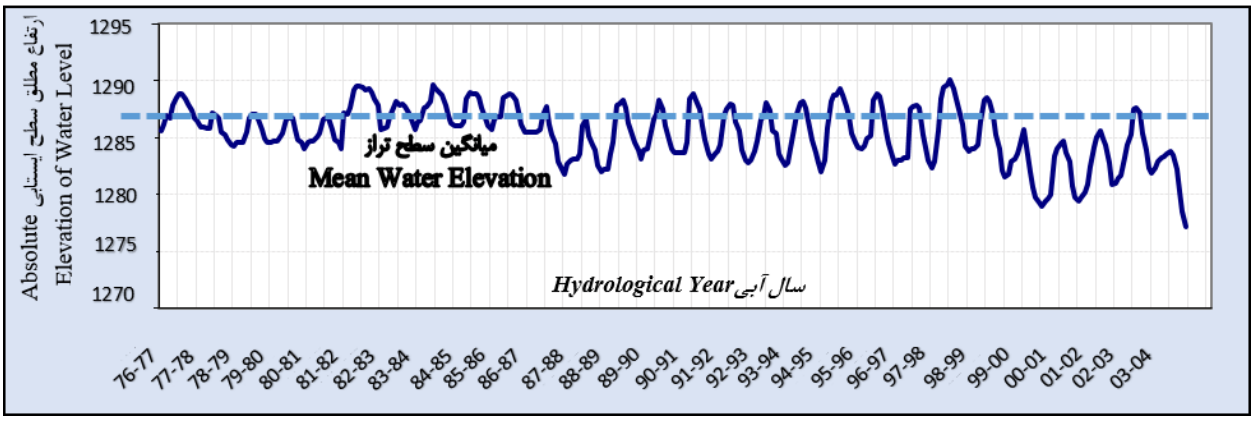
با توجه به داده‌های ارائه‌شده و با در نظر گرفتن تغییرات سطح ایستابی مطلق و سطح آب، می‌توان روند وضعیت آبخوان دشت قزلچه‌سو را در یک بازه زمانی حدود ۲۸ ساله بررسی کرد. این داده‌ها نشان می‌دهند که رفتار سطح آب زیرزمینی در طول دوره مورد مطالعه یکنواخت نبوده و می‌توان آن را به سه فاز اصلی تقسیم کرد: دوره پایداری نسبی، دوره نوسان و کاهش تدریجی و در نهایت دوره افت شدیدتر و نگران‌کننده در سال‌های اخیر(جدول۲).

در فاز نخست (از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۵)، دشت در وضعیت مطلوبی قرار داشت. در این دوره، تراز ایستابی غالباً بالاتر از میانگین بلندمدت (۱۲۸۵/۳ متر) قرار گرفته و در برخی سال‌ها مانند ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۴، تراز به ۱۲۸۸ متر رسیده که نشان‌دهنده مازاد آبخوان نسبت به حالت معمول است. هم‌زمان با این ترازهای بالا، عمق آب در محدوده بسیار مطلوب ۴ تا ۶ متر بود. در واقع، در این دهه، دشت نه تنها دچار بحران نبود، بلکه در وضعیتی از پایداری پویا قرار داشت که در آن تغذیه آبخوان با برداشت بسیار همخوانی داشت. با ورود به دهه هشتاد (از سال ۱۳۸۶ به بعد)، الگوی عملکرد دشت تغییر کرده است. در سال ۱۳۸۶، تراز ایستابی برای نخستین بار به شدت به زیر میانگین بلندمدت، سقوط می‌نماید و به ۱۲۸۲/۷ متر رسیده‌است (انحراف ۲/۸- متری نسبت به میانگین). اگرچه در سال‌های میانی این دهه، تراز ایستابی تلاش کرد تا دوباره به سطح تعادلی یعنی ۱۲۸۵/۳ متر نزدیک شود، اما دقت در داده‌ها نشان می‌دهد که این بازگشت هرگز به پایداری دهه هفتاد نرسید. عمق آب در این دوره نیز از محدوده ۴ تا ۵ متر به محدوده ۷ تا ۸ متر تغییر یافته که نشان‌دهنده شروع فشار مداوم بر ذخایر آب زیرزمینی است. در بازه زمانی اخیر (از سال ۱۳۹۹ به بعد)، دشت وارد فاز نگران‌کننده‌ای شده است. داده‌ها نشان می‌دهند که تراز ایستابی به شکلی مداوم و پیوسته، پایین‌تر از میانگین بلندمدت (۱۲۸۵/۳ متر) قرار گرفته است. در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰، تراز ایستابی به ۱۲۸۱/۸ متر رسید که نشان‌دهنده انحراف شدید ۳/۵ -متری از میانگین بلندمدت است. این افت تراز با افزایش چشمگیر عمق آب از محدوده معمول (زیر ۶ متر) به محدوده بحرانی (۱۱ تا ۱۲ متر) همراه شده است. تحلیل دقیق‌تر بر روی تغییرات نسبت به میانگین بلندمدت، نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، این شاخص به طور مداوم در مقادیر منفی و نزدیک به مرزهای بحرانی (مانند ۳.۷-) ثبت شده است. این واقعیت که تراز ایستابی دیگر قادر نیست حتی در سال‌های با تغذیه بهتر، به سطح مرجع ۱۲۸۵/۳ متر بازگردد، نشان‌دهنده آن است که دشت از حالت نوسان حول میانگین، خارج شده و به حالت افت ساختاری ماندگار وارد شده و نرخ برداشت بسیار فراتر از نرخ تغذیه طبیعی است. افزایش عمق آب از حدود ۴

متر به بیش از ۱۱ متر، صرفاً یک تغییر عدد نیست، بلکه نشان‌دهنده کاهش شدید فشار هیدرواستاتیک در آبخوان و احتمال حرکت دشت به سمت بحران‌های فیزیکی مانند فرونشست است. تداوم ثبت ترازهای زیر ۱۲۸۲ متر در حالی که میانگین بلندمدت دشت ۱۲۸۵.۳ متر است، گواهی بر این است که آبخوان در حال از دست دادن ظرفیت بازسازی خود است و بدون مدیریت سخت‌گیرانه در برداشت، روند نزولی به سمت خشک شدن چاه‌های سطحی و تخریب ساختاری سفره ادامه خواهد داشت.

در ادامه همانگونه که ملاحظه می‌گردد؛ ارتباط معنی‌داری میان متغیرهای تغییرات سطح تراز با سطح آب در منطقه وجود دارد. این ارتباطات همانگونه که که در نتایج آزمون همبستگی دیده می‌شود(جدول۴)؛ منفی و معکوس میان تغییرات تراز آب از میانگین بلندمت و سطح آب(در منطقه وقتی تراز افزایش می‌یابد (مثلاً از ۱۲۸۲ به ۱۲۸۵ می‌رسد)، سطح آب به سطح زمین نزدیک‌تر شده، پس عمق کاهش می‌یابد (مثلاً از ۱۱ متر به ۶ متر می‌رسد). اما نکته قابل تامل، عدم ارتباط معنی‌دار میان میزان بارش‌ها و سطح آب در منطقه است. بررسی میزان بارش‌ها، نشان می‌دهد که هر سالی که میزان بارش بیشتر از حد نرمال بوده و بارش‌های مناسبی روی داده، سطح آب کاهش یافته و حتی به ترازهای مثبت ۱ متر هم نسبت به میانگین بلندمدت رسیده‌ایم(برای مثال سال ۱۳۹۷) اما این ترسالی‌ها در قالب تکانه‌های کوتاه رخ داده‌اند، نه در قالب دوره‌های مرطوب چندساله و بلافاصله و در سال بعد، دوباره ترازهای منفی بر وضعیت منطقه مسلط گردیده است. یعنی، دشت دچار عدم پایداری در ذخیره‌سازی بوده و اثر جبران‌کنندگی بارش‌های زیاد، عملاً صفر است. هر چند که نبایستی از یاد برد که شدت نوسان و فاصله کم بین سال‌های خشک، باعث شده که اثرات منفی خشکسالی‌ها نیز در دشت انباشته شود. در حال حاضر آنچه که از بررسی داده‌ها مشخص است این مطلب می‌باشد که عمق آب نه تابع بارش، بلکه تابع شدت استخراج است. یعنی هرچه خشکسالی شدیدتر می‌شود (بارش کم)، کشاورزان برای جبران کمبود محصول، برداشت از چاه‌ها را تشدید می‌کنند. این رفتار، منجر به افت تراز (افزایش عمق) می‌شود. پس عملاً کم‌بارشی تبدیل به عامل تشدید برداشت شده و این رابطه را به‌صورت معکوس تثبیت کرده است.

در سال‌هایی مثل ۱۳۹۷ و ۱۴۰۲، حجم آب ورودی به آبخوان به واسطه بارش‌های مناسب، افزایش یافته، اما کشاورزی و یا به عبارتی جامع‌تر، برداشت از منابع آبخوان دشت به شکلی تنظیم شده که تمام این آب مازاد، بلافاصله توسط موتورپمپ‌ها جذب و مصرف می‌شود. در واقع، بارش‌های سنگین فقط باعث شده‌اند؛ سرعت افت کمی کند شود، اما به دلیل افزایش شدید سطح زیر کشت یا نیاز آبی در همان سال‌ها، اجازه داده نشده که حجم ذخیره در آبخوان باقی بماند تا تراز بالا بیاید(سال ۱۴۰۲ با وضعی ترسالی شدید محاسبه گردیده اما باز هم سطح تراز منفی ۳ متر بوده‌است) بنابراین، افت تراز در دشت قزلچه‌سو، دیگر تابعی از بارش سالانه نیست، بلکه تابعی از تداوم برداشت است. به عبارتی دیگر؛ منطقه از نظر اقلیمی خشک نیست (میانگین ۶۸۵ میلی‌متر برای کشاورزی مناسب است)، اما از نظر هیدرولوژیکی در حال خشک شدن است. وضعیت کنونی دشت قزلچه‌سو، گویای این است که عامل تعیین‌کننده در تراز ایستابی، نه میزان بارش، بلکه مدیریت برداشت است. تکیه بر بارش‌های سالانه برای پر کردن سفره‌های زیرزمینی، در حالی که الگوی کشت و میزان برداشت همچنان با شدت کنونی ادامه دارد، یک استراتژی شکست‌خورده است. بررسی شاخص SPI (جدول۳) نشان می‌دهد که بسیاری از سال‌ها از لحاظ بارشی منطقه در وضعیت تقریبا نرمال قرار دارد اما نکته کلیدی اینجا است که در یک دشت پایدار، سال‌های نرمال باید باعث ثبات تراز شوند اما در قزلچه‌سو، حتی در سال‌های نرمال، تراز در حال حرکت به سمت پایین است. این یعنی: حتی بارش‌های نرمال برای این دشت کمبود محسوب می‌شوند. این وضعیت، نشان می‌دهد که نقطه تعادل جدید برای این دشت، بسیار پایین‌تر از میانگین بلندمدت است. یعنی دشت برای اینکه حتی، ترازش ثابت بماند (نه اینکه بالا برود)، به بارشی بسیار بیشتر از ۶۵۰ میلی‌متر(میانگین ۲۰ ساله اخیر)، نیاز دارد.



شکل۴- آبنمود دشت قزلچه سو، منبع:(داده‌های شرکت آب منطقه‌ای کردستان، ۱۴۰۵)

Fig. 4. Hydrograph of the Qezelche-Su plain

جدول۲ - تغییرات میزان سطح تراز و سطح آب در دشت قزلچه سو

Table 2- Variations in water level and elevation in the Qezelche-Su plain

سال آبی Hydrological Year	تغییرات تراز Level Variations	تغییرات نسبت به میانگین بلندمدت تراز(۱۲۸۵.۳) Deviation from long-term mean level (1285.3)	سطح آب Water Level
76-77	1287.5	2	3.81
77-78	1285.5	0	5.86
78-79	1285.5	0	6.15
79-80	1285.2	-0.3	6.4
80-81	1285.2	-0.3	5.2
81-82	1288.6	3.1	4.4
82-83	1286.9	1.4	4.4
83-84	1287.8	2.3	4.4
84-85	1287.3	1.8	5.1
85-86	1286.3	0.8	4.9
86-87	1282.7	-2.8	7.3
87-88	1283.3	-2.2	8.9
88-89	1285.1	-0.4	7.3
89-90	1285.3	-0.2	7.3
90-91	1285.5	0	7.2
91-92	1285.3	-0.2	7.2
92-93	1285.1	-0.4	7.7
93-94	1285.2	-0.3	7.3
94-95	1286.6	1.1	5.8
95-96	1285.7	0.2	6.9
96-97	1284.8	-0.7	7.7
97-98	1287.1	1.6	5.4
98-99	1285.4	-0.1	7.2
99-400	1282.4	-3.1	11
400-401	1281.8	-3.7	11.8

سال آبی Hydrological Year	تغییرات تراز Level Variations	تغییرات نسبت به میانگین بلندمدت تراز(۱۲۸۵.۳) Deviation from long-term mean level (1285.3)	سطح آب Water Level
401-402	1282.5	-3	11
402-403	1284.2	-1.3	8.7
403-404	1281.9	-3.6	11.4

جدول۳ – محاسبه شاخص spi در منطقه

Table 3- Calculation of the SPI in the study area

سال آبی Hydrological Year	میزان بارش Precipitation Amount	تفاوت از میانگین بلندمدت Deviation from long-term mean	شاخص Spi SPI Index	وضعیت Status
85-86	606	0.89	0.005	نرمال
86-87	397.3	-285.48	-1.603	خشکسالی شدید
87-88	746.6	63.82	0.358	نرمال
88-89	714	31.22	0.175	نرمال
90-91	638.7	-44.08	-0.248	نرمال
91-92	651	-31.78	-0.178	نرمال
92-93	566	-116.78	-0.656	نرمال
93-94	646.3	-36.48	-0.205	نرمال
94-95	923.8	241.02	1.353	ترسالی متوسط
95-96	592.1	-90.68	-0.509	نرمال
96-97	657.1	-25.68	-0.144	نرمال
97-98	1100.1	417.32	2.344	ترسالی بسیار شدید
98-99	646.1	-36.68	-0.206	نرمال
99-400	415.4	-267.38	-1.501	خشکسالی شدید
400-401	592.3	-90.48	-0.508	نرمال
401-402	739.6	56.82	0.319	نرمال
402-403	1003	320.22	1.798	ترسالی شدید
403-404	654.6	-28.18	-0.158	نرمال

منبع:(محاسبات بر پایه داده‌های شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۴۰۵) **(میانگین ۲۰ ساله برابر ۶۵۵.۸۸mm)

جدول۴ – ارتباط تغییرات میزان بارش؛ سطح تراز و سطح آب در دشت قزلچه

Table 4- Relationship between variations in precipitation, piezometric level, and water level in the Qezelche-Su plain

	تغییرات سطح تراز نسبت به میانگین بلندمدت Water level deviations from the long-term mean	سطح آب Water Level		میزان بارش Rainfall	سطح آب Water Level
همبستگی پیرسون Pearson Correlation	1	-0.722**	همبستگی پیرسون Pearson Correlation	1	.382
معنی‌داری Significance	--	.000	معنی‌داری Significance	--	.096
تعداد Count	28	28	تعداد Count	28	28

همچنین در ادامه با بررسی دقیق تغییرات تراز ایستابی در دشت مریوان و تطبیق آن با میانگین بلندمدت ۱۲۹۹/۷ متر، می‌توان رفتار این آبخوان را در سه فاز زمانی متمایز و بر اساس پاسخ آن به نوسانات اقلیمی (شاخص SPI) تحلیل کرد. این تحلیل، نشان‌دهنده گذار سیستم از یک وضعیت پایداری نوسانی به یک وضعیت افت ساختاری تدریجی است (جدول۵).

۱. فاز پایداری و تعادل پویا (۱۳۷۶ تا حدود ۱۳۸۵)

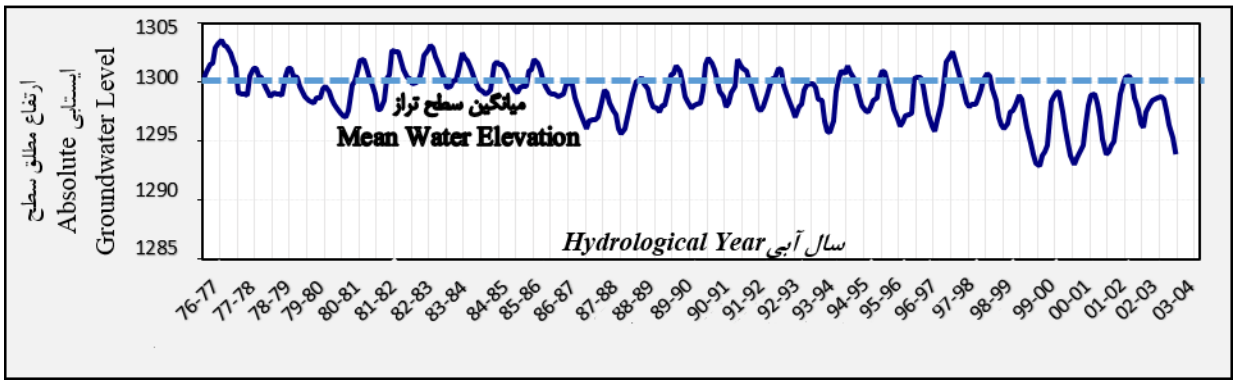
در دهه نخست بررسی، دشت مریوان در وضعیتی از تعادل پویا قرار دارد. در این دوره، تراز ایستابی نه تنها حول میانگین بلندمدت (۱۲۹۹.۷ متر) نوسان می‌کرد، بلکه در چندین سال (مانند ۷۶-۷۷ و ۸۲-۸۳) ترازها به طور مشخص بالاتر از میانگین قرار داشتند. این وضعیت نشان‌دهنده آن است که در این بازه، نرخ تغذیه به خوبی توانسته با میزان برداشت، برابری کند یا حتی از آن فراتر رود که منجر به حفظ ذخایر استراتژیک آبخوان شده بود.

۲. فاز نوسانات کنترل‌شده و گذار (۱۳۸۶ تا ۱۳۹۸)

در این بازه، سیستم هیدرولوژیکی دشت وارد مرحله‌ای شد که در آن نوسانات تراز با تغییرات بارش (شاخص SPI) هم‌خوانی بیشتری دارد، اما شدت این نوسانات در محدوده مدیریت‌پذیر، باقی ماند. اگرچه در برخی سال‌ها (مانند ۸۷-۸۸ یا ۹۶-۹۷) ترازها به زیر میانگین سقوط کردند، اما این افت‌ها ماهیت مقطعی داشتند؛ به این معنا که سیستم توانایی بازگشت به سطح میانگین را در سال‌های بعدی داشته است.

۳. فاز سقوط تجمعی و بحران ساختاری (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۴)

با ورود به سال ۴۰۰-۱۳۹۹، دشت مریوان وارد یک تغییر فاز بحرانی شد. هم‌زمانی خشکسالی شدید (بر اساس شاخص SPI در سال ۱۳۹۹) با یک روند نزولی مداوم، منجر به شکاف میان تراز واقعی و میانگین بلندمدت شد. داده‌ها نشان می‌دهند که از سال ۱۳۹۹، تراز ایستابی از مرز میانگین عبور کرده و به ترازهای منفی (مانند ۳/۸- متر در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲) رسیده است. آنچه در این دوره نگران‌کننده است، فقدان قابلیت بازیابی خودکار است؛ به این معنا که حتی با وقوع بارش‌های مطلوب در سال‌های بعد، تراز آب مریوان نتوانسته به سطح میانگین بلندمدت (۱۲۹۹/۷ متر) بازگردد. این پدیده نشان می‌دهد که ما با یک افت تجمعی روبرو هستیم که در آن، اثرات منفی سال‌های خشک و برداشت‌های مداوم، بر اثرات مثبت سال‌های پربارش غلبه کرده است. نتایج آزمون همبستگی نیز(جدول۶)، نشان می‌دهند که رابطه میان تراز ایستابی و عمق سطح آب در دشت مریوان قوی، معکوس و معنادار است؛ بنابراین هر افت تراز به‌طور مشخص با عمیق‌تر شدن سطح آب همراه می‌شود. اما ارتباط مستقیم هم‌زمان میان بارش و عمق سطح آب از نظر آماری تأیید نشده است. این موضوع، بیان می‌کند که رفتار آب زیرزمینی دشت مریوان نیز همانند دشت قزلچه، تنها تابع بارش سالانه نیست و تحت تأثیر هم‌زمان برداشت یا ویژگی‌هایی چون؛ تأخیر در تغذیه، ویژگی‌های آبخوان، رواناب و تبخیر قرار دارد.



شکل۵ – آبنمود دشت مریوان، منبع:(داده‌های شرکت آب منطقه‌ای کردستان، ۱۴۰۵)

Fig. 5. Hydrograph of the Marivan Plain

جدول ۵ – تغییرات میزان سطح تراز و سطح آب در دشت مریوان

Table 5- Variations in piezometric and water levels in the Marivan plain

سال Hydrological Year	تغییرات تراز Level Variations	تغییرات تراز نسبت به میانگین بلندمدت بیست ساله(۱۲۹۹/٦) Water Level Deviation from the 20-Year Long-Term Mean (1299.6)	سطح آب Water Level
76-77	1302.1	2.4	3.2
77-78	1299.7	0	5.3
78-79	1299.7	0	5.6
79-80	1298.5	-1.2	6.75
80-81	1299.7	0	5.65
81-82	1300.5	0.8	4.05
82-83	1301.6	1.9	4.05
83-84	1300.6	0.9	4.3
84-85	1300.2	0.5	4.8
85-86	1300.3	0.6	4.6
86-87	1298.7	-1	6.25
87-88	1297.4	-2.3	7.65
88-89	1298.5	-1.2	6.45
89-90	1299.2	-0.5	5.55
90-91	1299.6	-0.1	5.25
91-92	1299.7	0	5
92-93	1299.3	-0.4	5.55
93-94	1298.4	-1.3	5.05
94-95	1299.3	-0.4	3.85
95-96	1298.7	-1	4.75
96-97	1298.1	-1.6	5.4
97-98	1299.7	0	3.75
98-99	1298.7	-1	4.85
99-400	1296.5	-3.2	6.95
400-401	1296.1	-3.6	7.45
401-402	1295.9	-3.8	7.4
402-403	1297.8	-1.9	5.65
403-404	1297.3	-2.4	6.05

جدول۶ – ارتباط تغییرات میزان بارش، سطح تراز و سطح آب در دشت مریوان

Table 6- Relationship between variations in precipitation, piezometric level, and water level in the Marivan plain

	تغییرات سطح تراز نسبت به میانگین بلندمدت Water level deviations from the long-term mean	سطح آب Water Level		میزان بارش Rainfall	سطح آب Water Level
همبستگی پیرسون Pearson Correlation	1	-0.637**	همبستگی پیرسون Pearson Correlation	1	0.578
معنی‌داری Significance	--	.000	معنی‌داری Significance	--	0.132

تعداد Count	28	28	تعداد Count	28	28

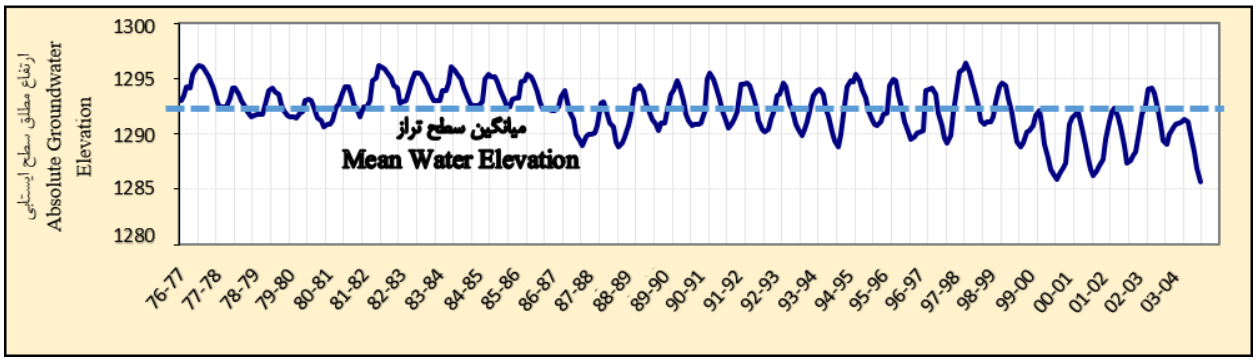
مطالعه تطبیقی هیدروگراف‌های دشت مریوان و دشت قزلچه‌سو، نمایانگر حاکی از گذار به سمت وضعیت کسری بیلان و افت ساختاری تراز آب زیرزمینی است. هیدروگراف دشت مریوان، بیشتر؛ نشان‌دهنده یک روند افت تدریجی و ساختاری است اما دشت قزلچه در انتهای دوره، الگوی افت شتاب‌دار و بحرانی‌تری را نمایان می‌سازد که نیازمند توجه فوری مدیریتی است. اثر هم‌افزای کاهش بارش و فشار مضاعف برداشت بر نوسانات قابل توجه است.

جمعبندی وضعیت آب زیرزمینی شهرستان مریوان

تحلیل علمی و یکپارچه وضعیت هیدرولوژیکی شهرستان مریوان در بازه زمانی ۱۳۷۶ تا ۱۴۰۴، نشان‌دهنده گذار آبخوان‌ها از یک سیستم هیدرولوژیکی پویا و متصل به چرخه اقلیمی، به یک سیستم تحت کنترل برداشت‌های انسانی و در معرض خطر فروپاشی ساختاری است. با بررسی روند زمانی تراز آب زیرزمینی در میانگین بلندمدت ۲۸ ساله برابر ۱۲۹۲/۱؛ میانگین سطح آب در همین بازه زمانی برابر ۵/۶ و شاخص بارش استاندارد شده(SPI) ، می‌توان تحلیل را در قالب دو مرحله زمانی و مفهومی ارائه داد:

۱. دوره پایداری و همگامی با اقلیم (۱۳۷۶ تا حدود ۱۳۹۸): در این بازه، آبخوان‌های مریوان دارای الگوی رفتاری کلاسیک‌اند؛ به طوری که نوسانات تراز با نوسانات بارش همگام است. اگرچه در سال‌های خشکسالی (مانند ۸۶-۸۷ با SPI معادل ۱/۶۰۳-) افت تراز مشاهده می‌شود اما سیستم، توانایی بازیابی خود را دارد. برای نمونه، در سال‌های ترسالی مانند ۹۷-۹۸ (با SPI بسیار شدید ۲.۳۴۴) شاهد هستیم که تراز آب به ۱۲۹۳.۴ متر افزایش می‌یابد که نشان از مطلوبیت نسبی ذخایر و توانایی تغذیه طبیعی دشت دارد.

۲. نقطه عطف و ورود به فاز افت تجمعی (از سال ۱۳۹۹ به بعد): بحران اصلی از سال ۴۰۰-۱۳۹۹ آغاز شد. از این نقطه به بعد، همبستگی میان بارش و تراز آب به‌شدت کاهش یافته و دشت وارد مرحله‌ای شده که در آن برداشت بر تغذیه غلبه کرد. نکته کلیدی و بحرانی در این دوره، مشاهده پدیده عدم بازیابی تراز در سال‌های پربارش است. برای مثال، در سال ۴۰۳-۴۰۲ که شاهد یک دوره ترسالی شدید (SPI برابر ۱/۷۹۸) بودیم، تراز آب تنها توانست از ۱۲۸۹/۲ به ۱۲۹۱ متر برسد و بلافاصله در سال بعد، با بازگشت شرایط به حالت عادی، تراز دوباره به ۱۲۸۹/۶ سقوط کرد. این رفتار نشان می‌دهد که دشت دیگر توانایی بازگشت به ترازهای اولیه را ندارد و در حال تجربه یک افت ساختاری است. همبستگی بسیار قوی میان تراز آب و عمق سطح آب ($r=-0.877$) در مقابل عدم همبستگی و یا همبستگی بسیار ضعیف میان تراز آب و شاخص SPI، گواه قطعی بر این است که عامل اصلی تغییرات هیدرولوژیکی در مریوان، عوامل جوی نیستند، بلکه مدیریت برداشت و نرخ پمپاژ است. در واقع، تراز آب از میانگین بلندمدت خود (۱۲۹۲/۱ متر) فاصله گرفته و در سال‌های اخیر به طور مداوم در محدوده ۱۲۸۹ تا ۱۲۹۱ متر نوسان می‌کند که نشان‌دهنده تخلیه مداوم ذخایر آبی است. بارش‌های سالانه (حتی در صورت نرمال بودن) دیگر برای جبران کسری بیلان آبخوان کافی نیستند. بنابراین، تمرکز مدیریت در مریوان نباید صرفاً بر مدیریت بحران‌های خشکسالی باشد، بلکه باید بر کنترل مداوم نرخ برداشت متمرکز گردد تا روند نزولی تراز که از سال ۱۳۹۹ تشدید شده، متوقف و به سمت تعادل مجدد هدایت شود.



**میانگین بلندمت(۲۰ ساله) سطح آب در شهرستان مریوان برابر ۵.۶

شکل۶ – آبنمود تلفیقی آبخوان‌های دشت قزلچه سو و مریوان، منبع:(داده‌های شرکت آب منطقه‌ای کردستان، ۱۴۰۵)

Fig. 6. Hydrograph of Marivan County based on the integrated aquifers of the Qezelche-Su and Marivan plains

جدول۷ – ارتباط تغییرات میزان بارش(شاخص spi)، سطح تراز و سطح آب در آبخوان‌های شهرستان مریوان

Table 7- Relationship between precipitation variations (SPI), piezometric levels, and water levels in the aquifers of Marivan County

	تغییرات سطح تراز نسبت به میانگین بلندمدت Deviation from Long-term Mean	سطح آب Water Level		میزان بارش Rainfall	سطح آب Water Level
همبستگی پیرسون Pearson Correlation	1	-0.877**	همبستگی پیرسون Pearson Correlation	1	0.454
معنی‌داری Significance	--	.000	معنی‌داری Significance	--	0.061
تعداد Count	28	28	تعداد Count	28	28

جدول۸ – میانگین تغییرات میزان سطح تراز و سطح آب در آبخوان‌های شهرستان مریوان

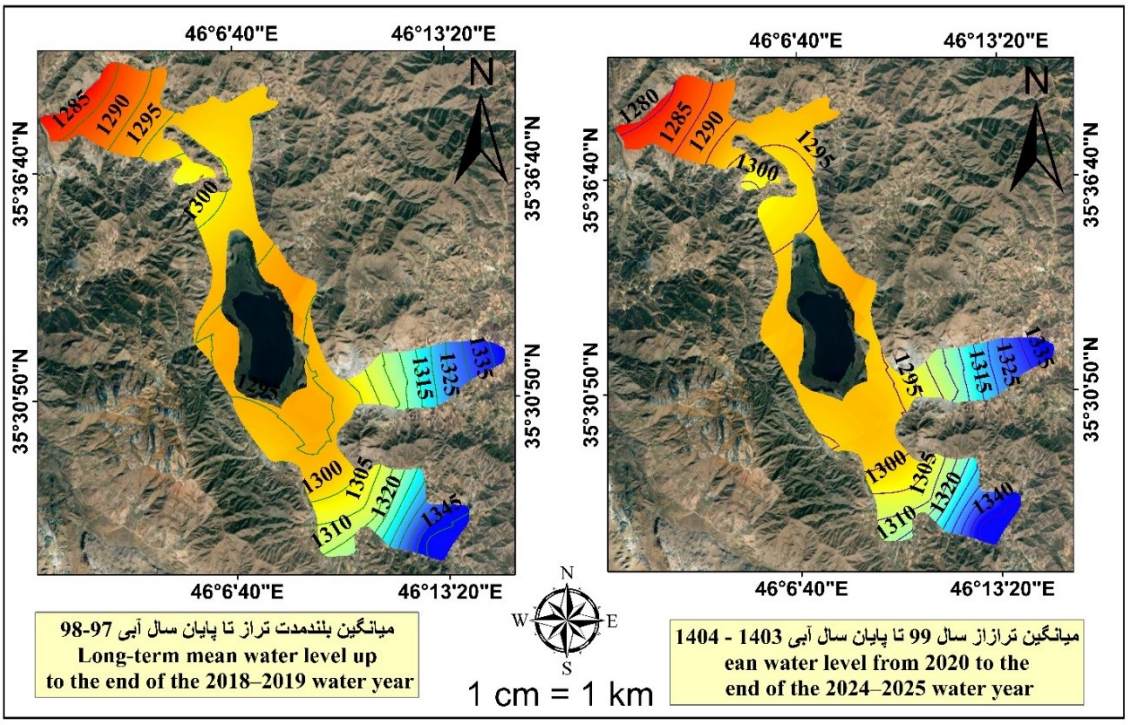
Table 8- Mean variations in piezometric and water levels in the aquifers of Marivan County

سال آبی Hydrological Year	سطح تراز Groundwater Level	تغییرات از میانگین تراز بلندمدت Deviation of Water Level from Long-Term Mean	سطح آب Water Level	تغییر از میانگین بلندمدت سطح آب Deviation of Water Level from Long-Term Mean
76-77	1294.8	2.7	3.51	-2.10
77-78	1292.6	0.5	5.58	-0.02
78-79	1292.6	0.5	5.88	0.28
79-80	1291.9	-0.25	6.58	0.98
80-81	1292.5	0.35	5.43	-0.17
81-82	1294.6	2.45	4.23	-1.38
82-83	1294.3	2.15	4.23	-1.38
83-84	1294.2	2.1	4.35	-1.25
84-85	1293.8	1.65	4.95	-0.65
85-86	1293.3	1.2	4.75	-0.85
86-87	1290.7	-1.4	6.78	1.18
87-88	1290.4	-1.75	8.28	2.68
88-89	1291.8	-0.3	6.88	1.28
89-90	1292.3	0.15	6.43	0.83
90-91	1292.6	0.45	6.23	0.63
91-92	1292.5	0.4	6.10	0.50
92-93	1292.2	0.1	6.63	1.03
93-94	1291.8	-0.3	6.18	0.58
94-95	1293.0	0.85	4.83	-0.78
95-96	1292.2	0.1	5.83	0.23
96-97	1291.5	-0.65	6.55	0.95
97-98	1293.4	1.3	4.58	-1.03
98-99	1292.1	-0.05	6.03	0.43
99-400	1289.5	-2.65	8.98	3.38
400-401	1289.0	-3.15	9.63	4.03

401-402	1289.2	-2.9	9.20	3.60
402-403	1291.0	-1.1	7.18	1.58
403-404	1289.6	-2.5	8.73	3.13

منبع:(محاسبات پژوهش بر مبنای داده‌های آماری شرکت آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۳۹۵)؛ ***میانگین بلندمت(۲۰ ساله) تراز آب در شهرستان مریوان برابر ۱۲۹۲.۱*

تغییرات تراز آبی در دو دشت قزلچه و مریوان در طول دوره آماری نسبت به میانگین بلندمت(مهرماه) در دو تصویر زیر (شکل۷) نشان داده‌شده است. بر مبنای یافته‌های پیشین، دو دوره اصلی تا انتهای سال آبی ۹۸-۹۷ به عنوان دوره پایداری و نوسانات جزئی آبخوان‌ها و از سال آبی ۹۹-۹۸ تا انتهای سال آبی ۴۰۴-۱۴۰۳ به عنوان دوره برداشت افراطی و افت‌های معنادار نشان داده شده‌است. در نقشه سمت چپ (میانگین تراز تا سال آبی ۱۳۹۷-۹۸)، بیشینه تراز آب برابر با ۱۳۴۸.۸۸ متر و کمینه آن ۱۲۸۲/۲۳ متر است. در مقابل، در نقشه سمت راست (میانگین تراز سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۴)، بیشینه تراز به ۱۳۴۳/۶۲ متر و کمینه آن به ۱۲۷۹/۲۱ متر کاهش یافته است. این کاهش عددی در هر دو حد بالا و پایین، گویای این واقعیت است که در مجموع، کل محدوده مورد مطالعه با افت سطح ایستابی مواجه بوده است. با تحلیل نقشه‌ها، مشاهده می‌شود که مساحت پهنه‌های دارای تراز بالاتر (مقادیر عددی بزرگ‌تر)، در نقشه سال ۱۴۰۴ نسبت به دوره قبل کاهش یافته و در مقابل، گستره مناطقی که تراز آب زیرزمینی پایین‌تری دارند، به‌طور محسوسی توسعه یافته‌است. این تغییرات مکانی نشان می‌دهد که افت سطح آب صرفاً محدود به نقاط خاصی نبوده و خطوط هم‌تراز به سمت مقادیر پایین‌تر، عقب‌نشینی کرده‌اند که نشان‌دهنده یک افت گسترده در سطح آبخوان دشت است.



شکل۷ – تغییرات سطح میانگین تراز منطقه مورد مطالعه در طول دوره آماری مورد بررسی

Fig. 7. Variations in the mean groundwater level of the study area during the statistical period

در ادامه، نتایج آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه بر روی داده‌های تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای شهرستان مریوان، نشان‌دهنده یک تغییر الگوی ساختاری در وضعیت هیدرولوژیکی منطقه است. در بازه زمانی نخست (۱۳۷۶ تا ۱۳۹۸)، که به‌عنوان دوره پایداری و

ثبات آبخوان‌های شهرستان تعریف می‌شود، تفاوت میان میانگین تراز آب چاه‌ها و میانگین بلندمدت از نظر آماری معنادار نبود (P>0.05)؛ این امر مؤید حفظ تعادل هیدرولوژیکی در این بازه زمانی است (جدول۸). با این حال، در دوره دوم آماری (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۴) که تحت عنوان دوره بی‌ثباتی و افت تراز آبخوان شناخته می‌شود، نتایج آزمون نشان‌دهنده وجود اختلاف معنادار آماری (P<0.05) میان میانگین ترازهای مشاهده‌شده و میانگین بلندمدت است (جدول۹). این تغییر وضعیت، گویای گذار دشت از رژیم پایداری به رژیم افت تجمعی و از دست رفتن تعادل میان تغذیه و برداشت در سال‌های اخیر است.

این یافته، نشان می‌دهد که افت تراز آبخوان‌ها در شهرستان مریوان، اگرچه به‌صورت کلی در تمامی مناطق رخ داده اما از توزیع یکنواختی برخوردار نیست. به بیان دیگر، شدت افت سطح آب زیرزمینی در نقاط و پهنه‌های مختلف متفاوت بوده و در برخی چاه‌ها اختلاف تراز به‌مراتب بیش از سایر مناطق است؛ بنابراین، با یک الگوی ناهمگن و چندکانونی در افت آبخوان مواجه هستیم. این تفاوت‌های فاحش نقطه‌ای و پهنه‌ای می‌تواند ناشی از عواملی همچون اختلاف در میزان و الگوی برداشت از چاه‌ها، تفاوت در ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی سازندها، تغییرات ضخامت و جنس رسوبات، تفاوت در میزان تغذیه طبیعی و وجود یا نبود ارتباط هیدرولیکی میان واحدهای آبخوان باشد. ازاین‌رو، نمی‌توان وضعیت آبخوان‌های شهرستان را بر اساس میانگین کلی یا یک روند عمومی واحد تفسیر کرد؛ زیرا میان ارتباط زیرزمینی آبخوان‌ها و میزان افت تراز در بخش‌های مختلف، رابطه‌ای پیچیده و وابسته به شرایط محلی وجود دارد.. از دیدگاه هیدرولوژیکی، این مسئله می‌تواند به شکل‌گیری مخروط‌های افت موضعی در اطراف مراکز برداشت منجر شود؛ پدیده‌ای که در ادامه باعث تغییر شیب هیدرولیکی و بازتوزیع جریان زیرزمینی می‌گردد. در نتیجه، ارتباط طبیعی بخش‌های مختلف آبخوان دچار اختلال شده و برخی نواحی به کانون‌های بحرانی افت تبدیل می‌شوند.

جدول۹ – معنی‌داری میانگین تغییرات سطح تراز چاه‌های منطقه(۱۴۰۴-۱۳۹۹)

Table 9- Statistical significance of mean variations in piezometric levels of regional wells (2020–2025)

	مجموع مربعات Sum of Squares	میانگین مربعات Mean Square	آماره F F-value	معنی داری p-value
Between-Groups	157633.631	4636.283	4.998	0.031
Within-Groups	7910212.911	927.558		
Total	8067846.542			

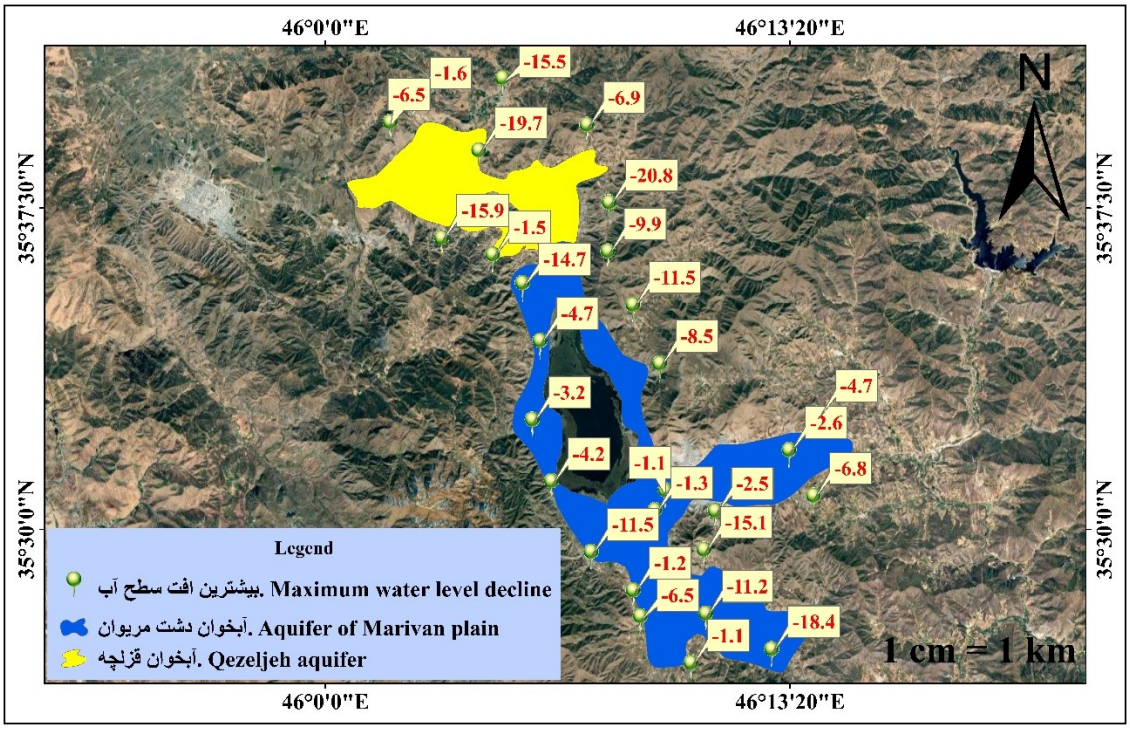
جدول ۱۰– معنی‌داری میانگین تغییرات سطح تراز چاه‌های منطقه(۱۳۹۸-۱۳۷۶)

Table 10- Statistical significance of mean variations in piezometric levels of regional wells (1997–2019)

	مجموع مربعات Sum of Squares	میانگین مربعات Mean Square	آماره F F-value	معنی داری p-value
Between-Groups	1422.687	203.241	.697	0.470
Within-Groups	8753.438	291.781		
Total	10176.126			

در همین ارتباط، بررسی هیدروژئولوژیکی چاه‌های مشاهده‌ای و پیزومترهای منتخب در گستره روستاهای منطقه، بیانگر وقوع افت محسوس و ناهمگن در تراز ایستابی آبخوان، طی دوره آماری مرتبط با برداشت زیاد، یعنی از سال آبی ۹۸-۹۹ به بعد است. تخلیه بی‌رویه منابع آب زیرزمینی از طریق پمپاژ مازاد جهت مصارف کشاورزی و توسعه اراضی، تعادل هیدرودینامیکی سفره را برهم زده و منجر به ایجاد نقاط بحرانی با نرخ افت شدید سطح آب شده‌است. نتایج حاصل از پایش ۲۹ ایستگاه/روستا در سطح حوزه نشان می‌دهد که دامنه تغییرات بیلان منفی هیدرولیکی از افت‌های جزئی (نظیر ایستگاه‌های «کال» با ۱/۱- متر، «کلکه‌جان» با ۱/۲- متر و «ترمینال مریوان» با ۱/۳- متر) تا افت‌های فوق‌بحرانی فراتر از ۱۵ الی ۲۰ متر، متغیر است(جدول ۴-۵). لازم به ذکر است که در اینجا بیشترین سطح افت آب ثبت شده نسبت به میانگین بلندمدت(مهرماه) از سال آبی ۹۹-۹۸ مدنظر بوده است.

تحلیل مکانی داده‌های پیزومتری، نشان‌دهنده شکل‌گیری مخروط‌های افت عمیق در بخش‌های مرکزی، غربی و شمال غربی محدوده مورد مطالعه است. بیشترین نرخ تخلیه آبخوان و افت سطح پیزومتری در ایستگاه‌های «بیلو» (۲۰/۸- متر)، «میرآباد» (۱۹/۷- متر)، «درزیان» (۱۸/۴- متر)، «سعدآباد» (۱۵/۹- متر)، «ساوجی» (۱۵/۵- متر) و «برقلعه» (۱۵/۱- متر) به ثبت رسیده است. علاوه بر کانون‌های بحرانی مذکور، زون‌های میانی با افت متوسط تا شدید نیز در پهنه‌هایی نظیر «برده‌رشه» (۱۴/۷- متر)، «نی» و «سیف» (هر دو ۱۱/۵- متر)، «ریخلان» (۱۱/۲- متر) و «میدان تیر» (۹/۹- متر) قابل‌مشاهده است که حاکی از گسترش شعاع تأثیر مخروط‌های افت به سمت نواحی پیرامونی است. در مقابل، بخش‌هایی مانند «کانی میران»، «خانم کهن»، «ترخان‌آباد»، «پادگان مریوان» و «دره‌تفی» به دلیل ویژگی‌های بافتی آبخوان، نزدیکی به جبهه‌های تغذیه‌ای حوضه یا تراکم کمتر چاه‌های بهره‌برداری، افت کمتری (بین ۱/۱- تا ۳/۲- متر) را تجربه کرده‌اند.



شکل۸ – بیشترین سطح افت آب ثبت شده نسبت به میانگین بلندمدت از سال ۱۴۰۰

Fig. 8. Maximum recorded groundwater level decline relative to the long-term mean since 2021

تحلیل الگوی زمانی – مکانی فرونشست در دشت‌های مریوان و قزلجه (۲۰۲۵ – ۲۰۱۵)

پس از طی مراحل پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری و استخراج نقشه‌های جابه‌جایی، توزیع زمانی و شدت فرونشست در دو دشت استراتژیک قزلجه و مریوان مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی، نشان‌دهنده یک‌روند نزولی مداوم در میزان ارتفاع سطح زمین در هر دو منطقه است که نشان از تداوم فرایند نشست زمین در دهه اخیر دارد.

هر دو دشت مریوان و قزلجه طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ با تغییرشکل نزولی و فرونشست مواجه بوده‌اند؛ با این تفاوت که شدت، تداوم و یکنواختی این پدیده در دشت قزلجه بیشتر از دشت مریوان بوده است. با توجه به اینکه مقادیر جدول نسبت به سال مبنا، یعنی ۲۰۱۵، به‌صورت افزایشی ارائه شده‌اند، این اعداد را باید مقدار تجمعی جابه‌جایی قائم دانست، نه نرخ سالانه فرونشست. بر این اساس، فرونشست تجمعی دشت قزلجه در پایان دوره به ۰/۵۰ متر و در دشت مریوان به ۰/۴۰متر رسیده است. بنابراین، میانگین بلندمدت فرونشست در فاصله ده‌ساله ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در قزلجه حدود ۰/۰۵ متر یا ۵ سانتی‌متر در سال و در مریوان حدود ۰/۰۴

متر یا ۴ سانتی‌متر در سال برآورد می‌شود. در مجموع، فرونشست تجمعی قزلچه در پایان دوره؛ ۱۰ سانتی‌متر، معادل ۲۵ درصد، بیشتر از دشت مریوان است. مهمترین شباهت دو دشت، هم‌زمانی و هماهنگی بسیار زیاد روند فرونشست از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ است. در این دوره، مقدار فرونشست قزلچه از صفر به ۰,۳۲ متر و مقدار فرونشست مریوان از صفر به ۰/۳۱ متر افزایش یافته و اختلاف میان دو دشت در تمام این سال‌ها از یک سانتی‌متر بیشتر نمی‌شود. افزایش سالانه فرونشست قزلچه در این مرحله به‌ترتیب حدود ۶، ۶، ۷، ۶ و ۷ سانتی‌متر و در مریوان حدود ۶، ۶، ۶، ۶ و ۷ سانتی‌متر بوده است.

از سال ۲۰۲۰ به بعد، رفتار دو دشت از یکدیگر فاصله می‌گیرد و مهمترین، تفاوت آن‌ها آشکار می‌شود. در دشت قزلچه، روند فرونشست همچنان افزایشی باقی می‌ماند و هیچ سالی کاهش مقدار تجمعی مشاهده نمی‌شود؛ هرچند سرعت افزایش آن در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ به‌ترتیب به حدود یک و دو سانتی‌متر در سال، کاهش می‌یابد. بنابراین، قزلچه در فاصله ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ وارد یک مرحله کم‌شتاب یا وقفه نسبی در گسترش فرونشست شده، اما این کاهش سرعت به معنای توقف یا بازیابی سطح زمین نیست، زیرا مقدار تجمعی از ۰/۳۲ به ۰/۳۵ متر افزایش یافته است. پس از آن، روند دوباره تشدید می‌شود؛ به‌طوری‌که فرونشست در سال ۲۰۲۳ حدود سه سانتی‌متر، در سال ۲۰۲۴ حدود هشت سانتی‌متر و در سال ۲۰۲۵ حدود چهار سانتی‌متر افزایش می‌یابد و مقدار تجمعی آن به ۰,۵۰ متر می‌رسد. جهش هشت سانتی متری بین سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ شدیدترین افزایش سالانه ثبت‌شده در کل دوره و نشانه‌ای از وقوع یک مرحله تشدید فرونشست در قزلچه است.

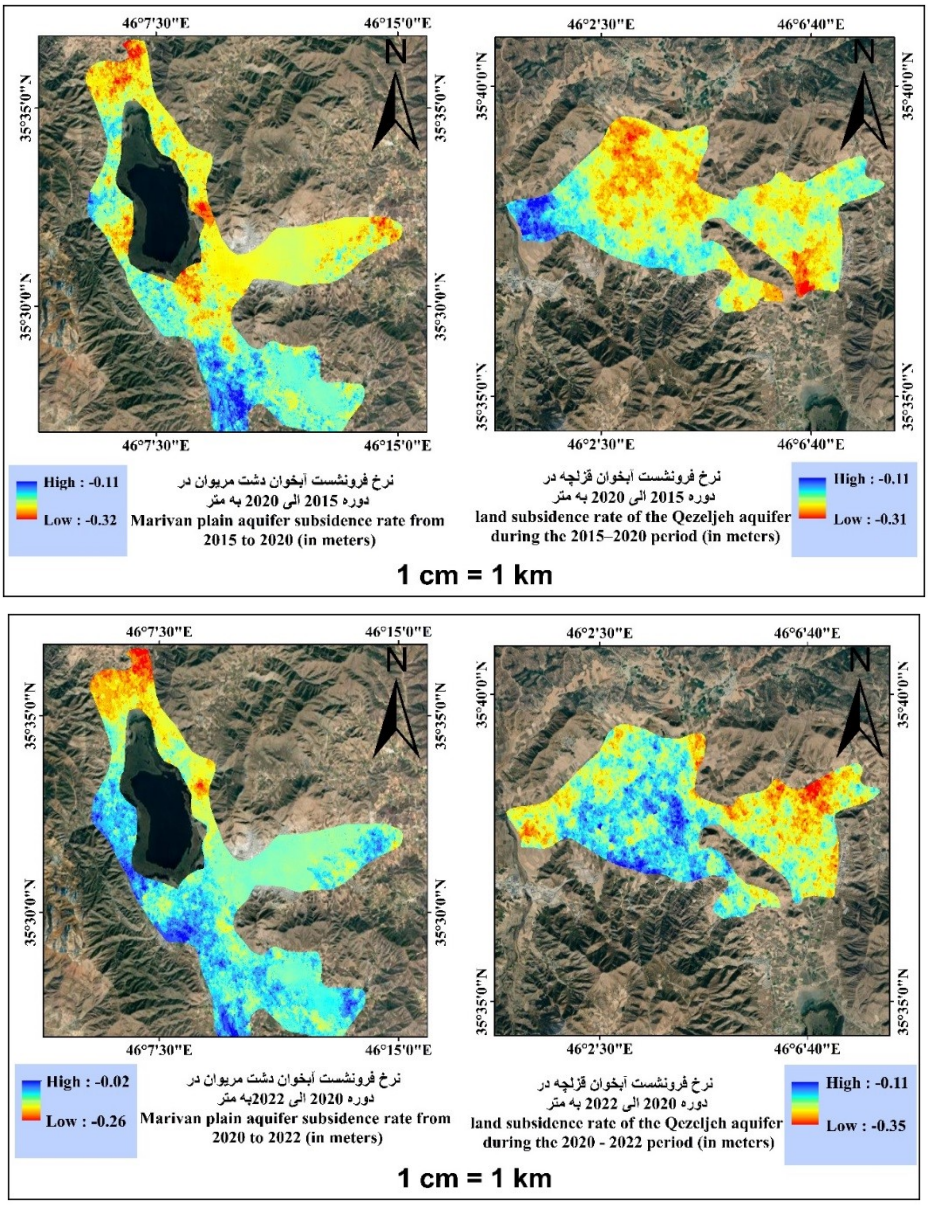
در مقابل، دشت مریوان پس از رسیدن به فرونشست تجمعی ۰/۳۱ متر در سال ۲۰۲۰، طی دو سال بعد رفتار متفاوتی نشان می‌دهد؛ مقدار ثبت‌شده در سال ۲۰۲۱ به ۰/۲۸ متر و در سال ۲۰۲۲ به ۰/۲۶ متر کاهش می‌یابد. از سال ۲۰۲۲، فرونشست مریوان دوباره فعال می‌شود و مقدار تجمعی آن در سال ۲۰۲۳ با افزایشی هفت‌سانتی‌متری به ۰/۳۳ متر، در سال ۲۰۲۴ به ۰/۳۶ متر و در سال ۲۰۲۵ به ۰/۴۰ متر می‌رسد. بنابراین، مریوان پس از یک دوره بازیابی نسبی یا نوسان موقت، مجدداً وارد مرحله فرونشست شده است؛ اما شدت تجمعی آن همچنان کمتر از قزلچه باقی می‌ماند.

در یک جمعبندی روندی، سه مرحله اصلی قابل تشخیص است: مرحله نخست از ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ که با فرونشست سریع، پیوسته و تقریباً مشابه در هر دو دشت مشخص می‌شود؛ مرحله دوم از ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ که در آن قزلچه با کاهش سرعت ولی ادامه فرونشست روبه‌رو است در حالی که مریوان، کاهش مقدار تجمعی و بازیابی نسبی را نشان می‌دهد و مرحله سوم از ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ که فرونشست در هر دو دشت مجدداً تشدید می‌شود، اما شدت و پایداری آن در قزلچه بیشتر است. در مجموع، قزلچه الگویی یکنواخت‌تر، انباشتی‌تر و بحرانی‌تر دارد در حالی که مریوان رفتاری نوسانی‌تر و حساس‌تر به تغییرات کوتاه‌مدت تغذیه، برداشت آب زیرزمینی و شرایط هیدرواقلیمی نشان می‌دهد. با وجود این تفاوت، رسیدن فرونشست تجمعی به ۵۰ سانتی‌متر در قزلچه و ۴۰ سانتی‌متر در مریوان طی ده سال، از فشار جدی بر سامانه آب زیرزمینی و تراکم قابل‌ملاحظه رسوبات حکایت دارد.

جدول۱۱ – مقادیر به‌دست‌آمده از تداخل سنجی راداری برای بازه زمانی (۲۰۱۵ الی ۲۰۲۵)

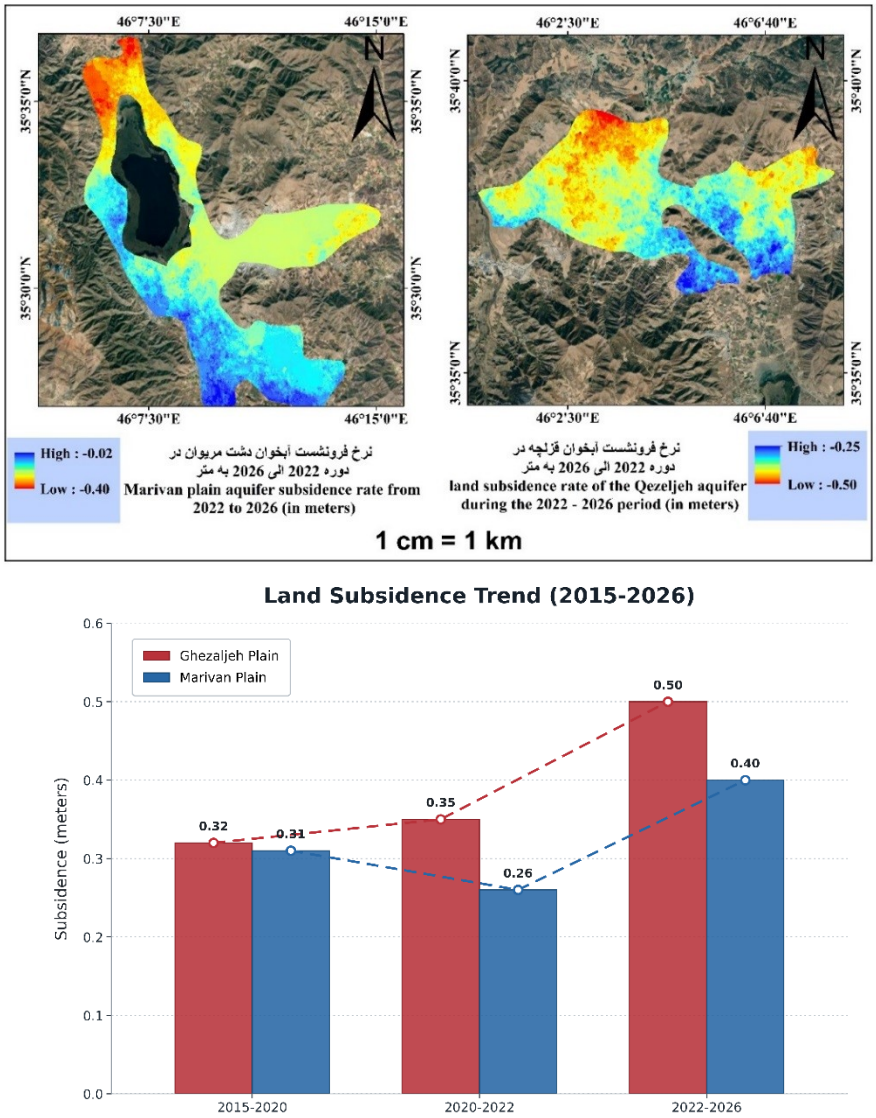
Table 11- Values derived from radar interferometry for the 2015–2025 period

ردیف Row	سال Year	مقدار فرونشست در دشت قزلچه (متر) Land Subsidence in Qezeljeh Plain	مقدار فرونشست در دشت مریوان (متر) Land Subsidence in Marivan Plain
1	2015	0.00	0.00
2	2016	0.06	0.06
3	2017	0.12	0.12
4	2018	0.19	0.18
5	2019	0.25	0.24
6	2020	0.32	0.31
7	2021	0.33	0.28
8	2022	0.35	0.26
9	2023	0.38	0.33
10	2024	0.46	0.36
11	2025	0.50	0.40



شکل ۹- مقدار فرونشست در سطح آبخوان‌های دشت مریوان و قزلچه در بازه زمانی ۲۰۱۵ – ۲۰۲۵

Fig. 9. Land subsidence magnitude across the Marivan and Qezelche-Su aquifers (2015–2025)



ادامه شکل۹- مقدار فرونشست در سطح آبخوان‌های دشت مریوان و قزلچه در بازه زمانی ۲۰۱۵ – ۲۰۲۵

Fig. 9. (Continued)**:** Land subsidence magnitude across the Marivan and Qezelche-Su aquifers (2015–2025)

ارتباط نرخ‌های فرونشست به تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت‌های قزلچه سو و مریوان

نتایج ارائه‌شده در جدول ۱۲، ارتباط آماری میان افت تراز آب زیرزمینی نسبت به میانگین بلندمدت و مقدار فرونشست زمین را طی دوره یازده‌ساله ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ در دو دشت مریوان و قزلچه نشان می‌دهد. در هر دو دشت، علامت ضریب همبستگی پیرسون منفی و از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصدمعنادار است، زیرا مقدار سطح معناداری در دشت مریوان برابر با ۰/۰۲۱ و در دشت قزلچه برابر با ۰/۰۴۸ به‌دست آمده که هر دو کمتر از آستانه خطای ۰/۰۵ هستند. این رابطه معکوس معنادار از نظر هیدروژئولوژی بیانگر آن است که کاهش تراز مطلق ایستابی و عمیق‌تر شدن افت آبخوان نسبت به میانگین بلندمدت، به افزایش مقدار فرونشست تجمعی سطح زمین در هر دو منطقه منجر شده است. این نتیجه گویای آن است که تخلیه مداوم سفره و افت تراز آب، محرک و یکی از عوامل اصلی کنترل‌کننده فرونشست در منطقه مورد مطالعه بوده و سامانه آبخوان به‌شدت نسبت به بیلان منفی، حساسیت نشان داده است.

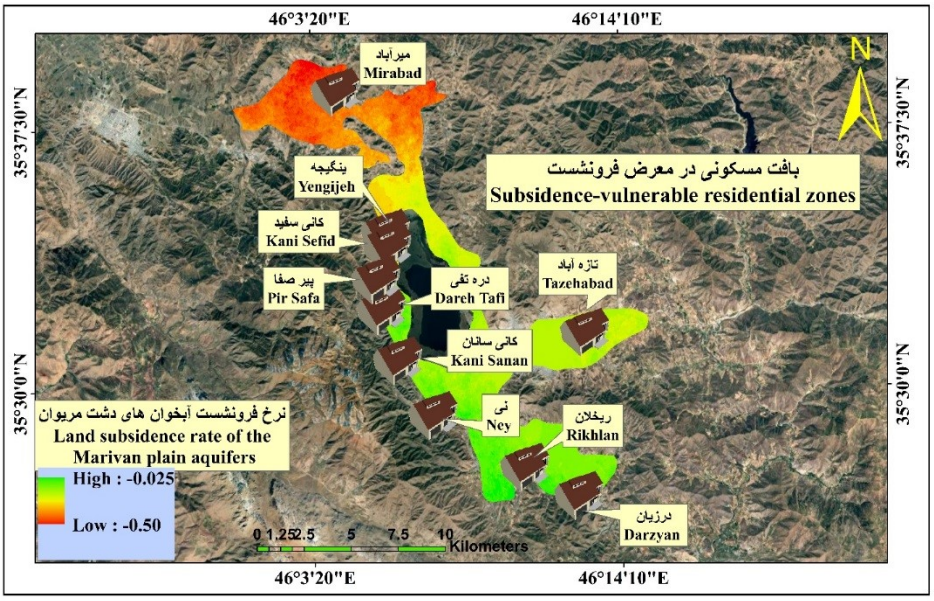
جدول ۱۲ – ارتباط نرخ فرونشست با میزان افت تراز آب زیرزمینی در دشت‌های شهرستان مریوان

Table 12- Relationship between subsidence rates and groundwater level decline in the plains of Marivan County

دشت مریوان Marivan Plain	افت تراز آب نسبت به میانگین بلندمدت Water-Level Decline Relative to the Long-Term Mean	میزان فرونشست Subsidence Amount
ضریب همبستگیCorrelation Coefficient	1	-.671*
معنی‌داریp-value		0.021
2015-2025	11	11
دشت قزلچه	افت تراز آب نسبت به میانگین بلندمدت	میزان فرونشست
Qezeljeh Plain	Water-Level Decline Relative to the Long-Term Mean	Subsidence Amount
ضریب همبستگیCorrelation Coefficient	1	-0.496*
معنی‌داریp-value		0.048
2015-2025	11	11

ارتباط نرخ‌های فرونشست با روستاهای دارای بیشترین افت تراز در دشت‌های قزلچه سو و مریوان

مطابق با نقشه پهنه‌بندی و پراکنش، از میان روستاهای واقع در دشت مریوان و قزلچه، ۹ سکونتگاه به‌طور مستقیم در محدوده فرونشست با نرخ متوسط تا بالا قرار گرفته‌اند که در آن‌ها، بافت مسکونی مستقیماً در کانون خطر جای دارد. در سایر روستاها نیز، اگرچه هنوز بافت مسکونی در حاشیه قرار دارد، اما اراضی معیشتی و پهنه‌های کشاورزی آن‌ها در محدوده‌ی بحرانی فرونشست محصور شده‌اند. اهمیت این موضوع فراتر از خسارات کالبدی و اقتصادی است؛ چرا که قرارگیری بافت مسکونی در این پهنه‌ها، تهدیدی بنیادین برای تاب‌آوری اجتماعی و پایداری سکونتگاه‌ها محسوب می‌شود و تداوم آن می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری را بر ثبات جمعیتی و امنیت زیستی این جوامع تحمیل کند.



شکل ۱۰ – وضعیت قرارگیری روستاهای محدوده دو دشت قزلچه و مریوان در معرض ریسک فرونشست

Fig. 10. Spatial distribution of villages within the Qezelche and Marivan plains exposed to land subsidence risk

در نهایت؛ پهنه‌بندی منطقه از لحاظ ریسک فرونشست زمین در جدول ۱۳، نشان داده شده‌است. شاخص‌ترین ویژگی آماری این جدول، توزیع تقریباً برابر مساحت میان هر سه طبقه ریسک است؛ به‌گونه‌ای که هر یک از پهنه‌ها حدود یک‌سوم از سطح کل منطقه

را به خود اختصاص داده‌اند. پهنه ریسک بالا با وسعت ۳۷/۲۲ کیلومتر مربع (۳۳/۸۶درصد) و پهنه ریسک متوسط با وسعت ۳۴/۹۵ کیلومتر مربع (۳۱/۸۰ درصد)، در مجموع بیش از ۶۵/۶ درصد (حدود دو سوم) از عرصه را در شرایط تنش ژئوتکنیکی ناپایدار قرار داده‌اند. این الگوی گسترده، نشان می‌دهد که فرونشست زمین در منطقه پدیده‌ای موضعی، لکه‌ای یا محدود به چند کانون نقطه‌ای نیست، بلکه نشان‌دهنده یک بحران ساختاری، پهنه‌ای و فراگیر در سراسر آبخوان اما با شدت متفاوت است. از دیدگاه برنامه‌ریزی سرزمینی و مدیریت زیرساخت‌ها، وجود ۳۷/۲۲ کیلومتر مربع پهنه پرخطر پیامدهای مستقیمی بر سازه‌های مهندسی، راه‌های مواصلاتی، شریان‌های حیاتی (خطوط انتقال آب، برق و گاز) و تأسیسات مسکونی و کشاورزی دارد. گرادیان شدید فرونشست میان پهنه‌های کم‌ریسک و پرریسک، عامل اصلی ایجاد ترک‌ها و شکاف‌های زمین‌ساختی و نشست‌های نامتقارن است که پایداری سازه‌ها را تهدید می‌کند. افزون بر این، دگرگونی شیب هیدرولیکی زمین، می‌تواند به برهم خوردن الگوی طبیعی جریان رواناب‌ها و تشدید آسیب‌پذیری منطقه در برابر سیلاب‌های فصلی بینجامد.

انطباق پهنه ریسک بالای فرونشست با محور اصلی توسعه صنعتی، ترانزیت و تجارت مرزی یعنی در دشت قزلچه تا نوار مرزی، ماهیت این مخاطره هیدروژئولوژیکی را از یک معضل زیست‌محیطی صرف به یک بحران راهبردی در حوزه پدافند غیرعامل و امنیت اقتصادی دگرگون می‌سازد. این هم‌پوشانی نامتعادل، تضادی آشکار میان بارگذاری فیزیکی سازه‌ها و ظرفیت باربری خاک منطقه پدید آورده که نیازمند ارزیابی همه‌جانبه مخاطرات و تدوین راهبردهای ریاضتی در ساختار حکمرانی سرزمینی است.

توسعه پرشتاب زیرساخت‌های صنعتی، پایانه‌های مرزی، انبارهای لجستیکی و سازه‌های سنگین در این زون پرخطر، پدیده‌ای دوگانه و مخرب ایجاد می‌کند:

۱. افزایش بارهای استاتیکی و دینامیکی سطحی: بارگذاری ناشی از وزن سازه‌های تجاری و صنعتی، تردد مداوم ناوگان حمل‌ونقل سنگین ترانزیتی و لرزش‌های مداوم ناشی از ترافیک مرزی، تنش‌های برشی و فشاری مضاعفی بر طبقات فوقانی دشت وارد می‌کند که روند تحکیم لایه‌های رسی سست و نیمه‌اشباع را شتاب می‌بخشد.

۲. تشدید تقاضا و برداشت آب زیرزمینی: تمرکز صنایع و مجتمع‌های خدماتی-تجاری به‌طور مستقیم بر حجم استحصال آب از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق می‌افزاید. این کاهش مضاعف در فشار آب منفذی، آبخوان را در یک چرخه بازخورد منفی گرفتار می‌سازد که حاصل آن افت شدیدتر سطح ایستابی و در نتیجه، تعمیق و توسعه پهنه ریسک بالا است.

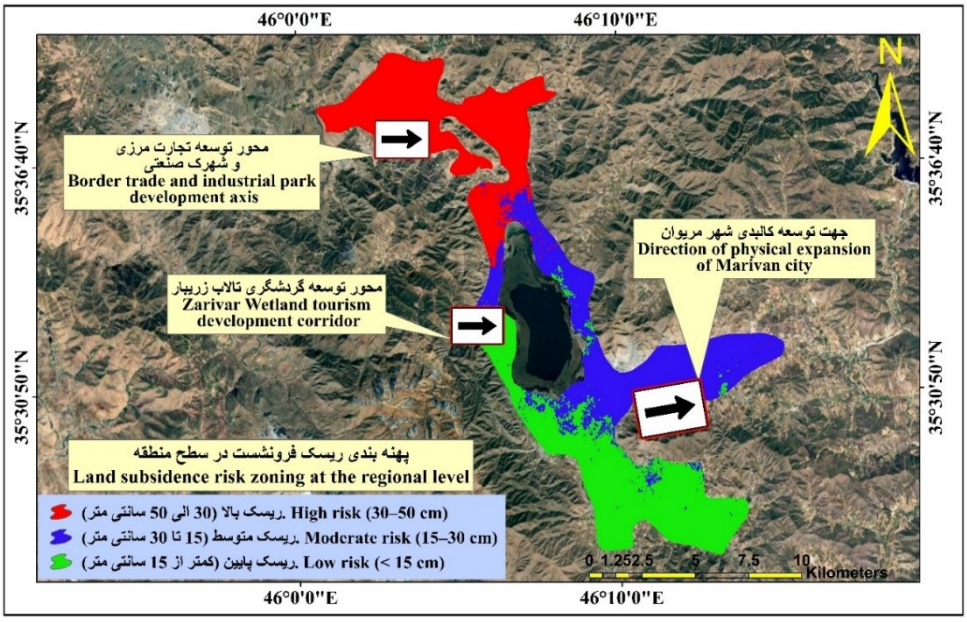
همچنین، توسعه فضایی شهر مریوان که هم اکنون به سمت شرق و اراضی لنج‌آباد و حسن‌آوله می‌باشد با چالش جدی پایداری روبه‌رو است. تحلیل پهنه‌بندی فرونشست، نشان می‌دهد این اراضی در زمره مناطق با ریسک متوسط قرار دارند. هم‌افزایی دو عامل تشدید مهاجرت به شهر مریوان و شتاب‌گیری استقرار سکونتگاه‌های غیررسمی در این اراضی، فشار بارگذاری بر پهنه‌هایی با توان اکولوژیک پایین را به حداکثر خواهد رساند. بارگذاری ساختمانی و توسعه زیرساخت‌های حیاتی در بستری که پایداری ژئوتکنیکی آن با ابهام جدی مواجه است، عملاً به معنای پیش‌خرید مخاطرات آینده است. ساخت‌وسازهای غیررسمی نیز معمولاً از نظر کیفیت مصالح، پی‌سازی و رعایت استانداردهای مهندسی آسیب‌پذیرترند و در برابر نشست‌های نامتقارن خسارت بیشتری می‌بینند. اما مهمتر اینکه؛ تحلیل هم‌پوشانی پهنه‌های سه‌گانه ریسک فرونشست با حوزه نفوذ دریاچه زریوار به عنوان قطب گردشگری استان کردستان، نشان‌دهنده یک وضعیت بحرانی در اکوسیستم و پایداری کالبدی این منطقه است. ریسک مرتبط با توسعه سازه‌ها گردشگری و پایداری هیدرولوژیکی تالاب به شدت افزایش یافته و این امر، معلول افت تراز آبی است که پیامدهای تغییرات افسارگسیخته کاربری اراضی به نفع سازه‌های گردشگری، خانه‌های دوم گردشگری و تداوم کشاورزی سنتی و آب‌بر است(این محور، بیشترین چاه‌های غیرمجاز را دارد). توسعه شتابان و فاقد آمایش در حاشیه تالاب که عمدتاً حول محور احداث خانه‌های دوم، مجتمع‌های اقامتی و گسترش بی‌رویه ویلاها و کشاورزی آب بر، شکل گرفته؛ آسیب‌پذیری منطقه را از دو منظر تشدید می‌کند: نخست، با تغییر کاربری اراضی و افزایش سطوح نفوذناپذیر، نرخ تغذیه طبیعی آبخوان به‌شدت کاهش یافته و سیکل هیدرولوژیک حوضه مختل شده است.

دوم، تمرکز بارگذاری‌های سازه‌ای در پهنه‌هایی که ذاتاً به دلیل ویژگی‌های خاک‌شناسی در معرض نشست هستند، ریسک مخاطرات سازه‌ای و ناپایداری‌های کالبدی را به شدت افزایش داده‌است. تداوم هم‌زمان کشاورزی سنتی آب بر و توسعه کاربری‌های گردشگری ویلایی، نه تنها تراز آبی را به زیر آستانه‌های ایمنی سوق داده، بلکه با تغییر جریان‌های زیرزمینی، سلامت اکولوژیک تالاب را که وابستگی مستقیمی به سطح تراز آب‌های زیرزمینی پیرامونی دارد به شدت در معرض تهدید قرار داده و نمود آن در کاهش ده درصدی مساحت تالاب در ده ساله اخیر مشاهده می‌شود که در گزارش طرح حفاظت مشارکتی تالاب زریوار (۱۴۰۴) به آن اشاره گردیده‌است.

جدول ۱۳ – مقادیر پهنه‌بندی ریسک فرونشست در سطح منطقه

Table 13- Subsidence risk zonation values in the study area

پهنه‌بندی ریسک Risk Zoning	مساحت پهنه Zone Area(KM_2)	درصد Percentage
ریسک کم Low Risk	37.7517	%34.34
ریسک متوسط Medium Risk	34.9549	%31.80
ریسک بالا High Risk	37.2241	%33.86
مجموع Total	109.9307	%100



شکل۱۱ – پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در سطح منطقه

Fig. 11. Land subsidence risk zonation in the study area

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف سنجش وضعیت تغییرات تراز آب زیرزمینی و ریسک فرونشست آن در دشت های قزلچه سو و مریوان شهرستان مریوان به انجام رسید. در همین ارتباط نیز، دو سوال اصلی به شرح زیر، مطرح گردید:

سوال اول: وضعیت دینامیک تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت‌های قزلچه و مریوان چگونه است و تحلیل رفتار آبخوان‌های مذکور در دوره مورد مطالعه، بیانگر چه الگوی رفتاری (از منظر پایداری یا افت منابع) در این پهنه‌ها است؟

یافته‌ها، نشان دادند که آبخوان‌های مریوان و قزلچه‌سو از سال ۱۳۹۹ از وضعیت تعادل پویا به بحران ساختاری تغییر فاز داده‌اند. این سقوط با ثبت شکاف ۵/۲ متری (از مازاد ۲/۷+ تا کسری ۲/۵- متر) و فقدان توان بازیابی طبیعی، گویای شکست ظرفیت تنظیمی آبخوان است. یافته‌ها، نشان می‌دهد که پیوند سیستم هیدرولوژیکی با بارش‌ها گسسته شده و رفتار بهره‌برداران، جایگزین اقلیم به عنوان متغیر اصلی کنترل‌کننده سطح آب شده‌است. الگوی این بحران در منطقه ناهمگن و چندکانونی است. دشت مریوان، با افت

تدریجی و قزلچه‌سو، با افت شتابان، همراه بوده‌است. کانون‌های فوق‌بحرانی (مانند روستاهای بیلو و نی) محصول هم‌افزایی فشارهای ناشی از انتقال جهت تامین شرب شهری و کشاورزی در حالی که سایر پهنه‌ها صرفاً متأثر از مدیریت ناپایدار کشاورزی‌اند.

سوال دوم: الگوی حاکم بر توزیع فضایی و تکامل زمانی فرونشست در پهنه‌های دشت مریوان و قزلچه در دوره آماری مورد مطالعه چگونه است؟

هر دو دشت مریوان و قزلچه طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ با تغییرشکل نزولی و فرونشست مواجه بوده‌اند؛ با این تفاوت که شدت، تداوم و یکنواختی این پدیده در دشت قزلچه بیشتر از دشت مریوان بوده(همانند وضعیت افت تراز) اما با الگوی رفتاری متفاوت؛ بگونه‌ای که دشت قزلچه (۵۰ سانتیمتر فرونشست تجمعی) با فرونشست سریع، یکنواخت و انباشتی مواجه است و دشت مریوان رفتاری نوسانی‌تر را نشان می‌دهد(۴۰ سانتیمتر فرونشست تجمعی). از منظر توزیع فضایی، فرونشست در این منطقه پدیده‌ای پهنه‌ای و فراگیر است به طوری که بیش از ۶۵/۶ درصد از سطح کل منطقه در وضعیت تنش ژئوتکنیکی ناپایدار (ریسک متوسط و بالا) قرار گرفتند.کانون‌های بحرانی فرونشست بر روی مناطقی منطبق بودند که در داده‌های هیدرولوژیک، بالاترین میزان افت تراز آب را ثبت کرده‌اند. این انطباق، ثابت می‌کند که الگوی مکانی فرونشست در منطقه، نه تصادفی، بلکه تابعی مستقیم از نقاط تمرکز برداشت است و بیشترین نرخ‌های فرونشست در سال‌های ۱۴۰۰ به بعد به وقوع پیوسته که همانطور که در قبل نیز اشاره شد؛ دوره بحرانی افت تراز و برداشت افراطی در دشت‌های مورد مطالعه می‌باشد.

در مجموع؛ تغییرات رفتاری و الگوی افت تراز و فرونشست در دشت‌های مریوان، محصول هم‌افزایی کاهش تغذیه طبیعی(تغییر الگوی اقلیمی که با کاهش ۱۸/۴درصدی میانگین بارش (از ۸۰۳ به ۶۵۵ میلی‌متر) و افزایش احتمال خشکسالی‌های متوالی ناشی از تغییرات اقلیمی)، افزایش تقاضای انسانی(توسعه کالبدی شهر مریوان در دشت مریوان) و تغییرات گسترده کاربری اراضی و کشاورزی ناپایدار و سنتی(به ویژه معضل چاه‌های غیرمجاز و ویلایی) تمرکز بارگذاری و تقاضای مصرف آب در کانون‌های استراتژیک(توسعه گردشگری نابسامان رشدگرا در محور تالاب زریبار، گسترش تجارت مرزی با تبدیل منطقه به منطقه آزاد تجاری و ایجاد سازه‌های وابسته به آن از جمله شهرک‌های صنعتی در دشت قزلچه و انتقال آب به شهر مریوان) در تلفیق با مدیریت منفعلانه است که هم‌راستای با نتایج پژوهش‌های بابل و همکاران (Babel, Das Gupta & Domingo, 2026) ، یواونو و همکاران (Yuwono, Reyhan & Sabri, 2026)، ، جیا و همکاران(Jia et al., 2025)، حسین و همکاران(Hussain, Chen & Khan, 2024)، کیگنا و همکاران(Cigna & Tapete, 2022) و چن و همکاران (Chen et al., 2013) می‌باشد.

نتایج این تحلیل سیستمی به یک ضرورت راهبردی اشاره دارد: مدیریت آب در مریوان باید از رویکردهای بخشی، عرضه‌محور و متمرکز، به سمت مدیریت یکپارچه، تقاضامحور و حوضه‌محور تغییر مسیر دهد. این گذار، نه تنها مستلزم نوسازی فنی و زیرساختی، بلکه نیازمند اصلاح در حکمرانی، تقویت مشارکت اجتماعی، بازنگری در الگوهای توسعه اقتصادی و در نهایت، هم‌راستا کردن سیاست‌های توسعه (گردشگری، تجارت و کشاورزی) با ظرفیت‌های اکولوژیک حوضه آبخیز است. تنها در صورت تبدیل شدن این شبکه از روابط تعارضی به روابط هم‌افزا، می‌توان به پایداری منابع آبی و تاب‌آوری محیطی در شهرستان مریوان امیدوار بود. ایجاد یک نهاد تصمیم‌گیرنده با قدرت اجرایی(شورای عالی مدیریت حوضه‌های آبی مریوان) که تمامی مجوزهای تغییر کاربری (از کشاورزی به مسکونی یا صنعتی) را پیش از صدور، از منظر بیلان هیدرولوژیک بررسی کند. این شورا باید حق وتو بر مجوزهایی که منجر به کاهش نفوذپذیری یا تخریب مراتع می‌شوند را داشته باشد و متشکل از تمامی نهادهای مسئول باشد.

توسعه و حمایت از تشکل‌های مردم‌نهاد، به‌ویژه با تمرکز بر حفاظت از منابع آب، یک ضرورت راهبردی است. بهره‌گیری از این الگو، به عنوان بازوی اجرایی در مدیریت حوضه آبریز، نه‌تنها بستر مشارکت عمومی را تقویت می‌کند، بلکه به عنوان حلقه واسط میان سیاست‌گذاری دولتی و کنشگری محلی، ضامن اجرای پایدار برنامه‌های حفاظت از منابع آبی خواهد بود.

با توجه به ریسک بالای فرونشست در دشت قزلچه، اتخاذ سیاست توقف تخصیص مجوزهای جدید حفاری و ساماندهی و کنترل حریم چاه‌های موجود برای مدیریت پایداری سفره‌های زیرزمینی الزامی است. در مناطق با ریسک متوسط و کم هم، باید سیستم مدیریت چاه‌ها از حالت کنترل تعداد به کنترل حجم، تغییر یابد. در این مناطق، مجوز برداشت باید بر اساس تعادل هیدرولوژیکی تعیین شود، نه نیازهای اقتصادی و تعداد متقاضیان.

تعیین قیمت آب در منطقه باید بر مبنای تعادل میان هزینه تمام‌شده و ارزش اقتصادی آب در هر حوزه باشد. تحقق این هدف مستلزم گذار از مدیریت سنتی به سمت ایجاد یک بازار کنترل‌شده آب تحت نظارت دولت است. در این الگو، با بهره‌گیری از ابزارهای اقتصادی و نظارت بر برداشت‌های حجمی، کشاورزان به سمت الگوهای کشت بهینه سوق داده می‌شوند؛ به گونه‌ای که کشاورزان بهره‌ور (با کارایی بالا) از طریق سودآوری تشویق و مصرف‌کنندگان ناکارآمد (با کارایی پایین) از طریق بازدارندگی اقتصادی، مدیریت شوند. این رویکرد در کنار مدرن‌سازی شبکه‌های آبیاری و فرهنگ‌سازی، زیربنای تغییر رفتار مصرف‌کنندگان در مدیریت ریسک فرونشست منطقه خواهد بود.

تکمیل طرح انتقال بار مصرفی از آب زیرزمینی به آب‌های سطحی (تخصیص از سد گاران) که بخشی از انتقال آن به دشت‌های مریوان و قزلچه صورت گرفته در این شرایط نه یک انتخاب برای افزایش بهره‌وری، بلکه یک ضرورت حیاتی برای حفظ ساختار آبخوان است.

زون‌بندی‌های سختگیرانه مبتنی بر ریسک فرونشست و شدت کاهش تراز و اعمال قفل‌های توسعه‌ای در پهنه‌های دارای ریسک بالا به فرونشست در دشت قزلچه و مریوان(بحرانی)، تضمین می‌کند که هیچ پروژه توسعه‌ای، فراتر از توان تاب‌آوری اکوسیستم، مجاز به اجرا نباشد. این، یعنی تحکیم اقتدار اکولوژیک در فرآیند تصمیم‌گیری، که برای تضمین پایداری منابع آب شهرستان، ضرورتی انکارناپذیر است.

چاه‌های غیرمجاز، بخش بزرگی از افت تراز حوضه‌ها به ویژه در مناطق دارای ریسک بالای فرونشست را شامل می‌شوند که بدون هیچ‌گونه نظارتی، حیات آبی منطقه را به یغما می‌برند. اقتصاد سیاسی آب در دشت‌های مریوان به گونه‌ای شکل گرفته که هزینه‌ها بر دوش کشاورز خرد و سودها به جیب سرمایه‌گذاران شهری می‌رود. بنابراین، مسدود کردن چاه‌ها بدون ارائه الگوی جایگزین معیشتی، نه حل مسئله بلکه فرار از آن است. آنچه نیاز است، نه حذف کشاورزی، بلکه بازتعریف آن در چارچوب حوضه آبریز واحدی است که در آن، منابع آب به مثابه امانت عمومی، با سازوکارهای شفاف و مشارکتی مدیریت شود. مدل پیشنهادی می‌تواند از ساماندهی چاه‌های پراکنده در قالب چند چاه عمیق و پایش‌شده، با تخصیص سهمیه شفاف و عادلانه آغاز شود و با توسعه کشت‌های کم‌آب‌بر و بهره‌وری بالاتر ادامه یابد.

تهیه اطلس ریسک آسیب‌پذیری خشکسالی شهرستان. این اطلس، پهنه‌های شهرستان را بر اساس درجه حساسیت به خشکسالی رتبه‌بندی می‌کند. در پهنه‌های با ریسک بالا، هرگونه توسعه کشاورزی جدید ممنوع و الگوی کشت به سمت دیم‌کاری هوشمند یا توقف کشت (رهاسازی زمین در سال‌های خشک) تغییر می‌کند(البته با حمایت مالی از کشاورزان). این کار مدیریت ریسک را عدالت‌محور می‌کند.

تغییر الگوی کشت و فاصله‌گیری از کشت محصولات آب بر در مناطق بحرانی؛روی آوری به حسابرسی و اقتصادی کردن منابع آب بر پایه مصرف و نوع فعالیت؛ حمایت از تشکیل تعاونی‌های آب بران و کشاورزان و خرید تضمینی محصولات با نشان آب دوست و حمایت بیمه‌ای از کشاورزان متمایل به کشاورزی با محصولات نوین و مقاوم(بیمه درآمدی نه بیمه محصول)؛ آموزش سواد اقتصادی و مدیریت ریسک به جای تکنیک‌های صرف زراعی در میان کشاورزان و انجام روش‌های مرتبط با آبخیزداری و تقویت پوشش گیاهی و اقدامات مهندسی، مانند چاه‌های تغذیه‌ای در سال‌های پر بارش به ویژه در مناطق پرریسک محور تالاب زریبار و دشت قزلچه از جمله دیگر، راهکارهای پیشنهادی در راستای ساماندهی وضعیت آبخوان‌های شهرستان مریوان می‌باشد.

تعارض منافع

بنا بر اظهارات نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر در چارچوب طرحی پژوهشی و به سفارش استانداری استان کردستان انجام شده است. بدین‌وسیله از همکاری و حمایت‌های ارزشمند این نهاد در اجرای پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

References

Ahmadi, S., & Soudmand Afshar, R. (2020). Monitoring of land subsidence in Qorveh and Chahardoli plains (Hamadan and Kurdistan provinces) using permanent scatterer interferometry. *Journal of Environment and Water Engineering*, *6*(3), 219-233. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jewe.2020.236939.1375

Alam, E., & Ray-Bennett, N. S. (2021). Disaster risk governance for district- landslide risk management in Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 59(3)*, 1-16. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102220

Babel, M. S., Das Gupta, A., & Sto. Domingo, N. D. (2026). Land subsidence: A consequence of groundwater over-exploitation in Bangkok, Thailand. *International Review for Environmental Strategies, 6*(2), 307–328. http://pub.iges.or.jp/modules/envirolib/view.php?docid=445

Bonadonna, C. (2021). Integrating hazard, exposure, vulnerability and resilience for risk and emergency management in a volcanic context: The ADVISE model. *Applied Volcanology, 10*(7), 2–18. https://doi.org/10.1186/s13617-021-00108-5

Chen, B., Gong, H., Li, X., Lei, K., Lin, Z., & Wang, Y. (2013). The impact of load density differences on land subsidence based on build-up index and PS-InSAR technology. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi, 33*(8), 2198–2202. http://dx.doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2013)08-2198-05

Cigna, F., & Tapete, D. (2022). Urban growth and land subsidence: Multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico. *Science of the Total Environment, 811*, 152169. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152211

Díaz-Nigenda, J. J., Morales-Casique, E., Carrillo-García, M., & Vázquez-Peña, M. A. (2026). Evaluation of groundwater management strategies by optimization under land subsidence constraints. *Groundwater for Sustainable Development, 32*, Article 101569. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101569

Faunt, C. C., Traum, J. A., Boyce, S. E., Seymour, W. A., Jachens, E. R., Brandt, J. T., ... & Marcelli, M. F. (2024). Groundwater sustainability and land subsidence in California's Central Valley. *Water, 16*(8), 1189. https://doi.org/10.3390/w16081189

Ghahroudi Tali, M., Khodamoradi, F., & Alinouri, K. (2023). The effect of groundwater depletion on land subsidence hazards in Dehgolan plain, Kurdistan province. *Environmental Hazards Management*, *10*(1), 57-70. [In Persian] https://jhsci.ut.ac.ir/article_92866.html

Gholami, E., Arab-Amiri, A., & Tokhmchi, B. (2022). *Spatial and temporal zoning and prediction of land subsidence in Qorveh and Chahardoli plains, Kurdistan province, using Sentinel-1 satellite imagery and its validation* [Paper presentation]. 6th International Conference on Technology Development in Materials, Mining and Geological Engineering, Tehran, Iran. [In Persian] https://civilica.com/doc/2457230/

Harvey, M., Maghsoudi, Y., & Rissmann, C. (2026). InSAR shows extensive subsidence of agricultural land in New Zealand. *Anthropocene, 53*(3), 46-61. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2025.100525

Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., & Carreón-Freyre, D. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, *371*(6524), 34–36. https://doi.org/10.1126/science.abb8549

Howkins, J., Schmidt, D. N., Thomas, J., Hayward, R., Lo, Y. E., Neal, J., ... & Oliver, I. (2024). Mapping vulnerability to climate-related hazards to inform local authority action in adaptation: A feasibility study. *Public health in practice, 8*, 100549.https://doi.org/10.1016/j.puhip.2024.100549

Hussain, M. A., Chen, Z., & Khan, J. (2024). Monitoring land subsidence in the Peshawar District, Pakistan, with a multi-track PS-InSAR technique. *Environmental Science and Pollution Research, 31*(8), 12271–12287. https://doi.org/10.1007/s11356-024-31995-x

Jahangiri, K., Eivazi, M. R., & Mofazali, A. S. (2017). The role of foresight in avoiding systematic failure of natural disaster risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 21*, 303–311. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.008

Jia, G., Chuai, Y., Yan, Y., Du, J., Ni, P., Liang, W., Zhu, Z., Lou, K., Gao, Z., & Liu, J. (2025). Groundwater extraction-induced land subsidence in Decheng District: Evolution law and sustainable management strategies. *Water, 17*(22), 3240. https://doi.org/10.3390/w17223240

Kumar, A., Kothari, M., Singh, P. K., Singh, M., Sharma, R. K., & Meena, S. S. (2025). Drought: A critical review of different perspectives under changing climate. *Science of the Total Environment, 985*, 179741. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179741

Marciano, C., Peresan, A., Pirni, A., Pittore, M., Tocchi, G., & Zaccaria, A. M. (2024). A participatory foresight approach in disaster risk management: The multi-risk storylines. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 114(3)*, 76-98. https://scixplorer.org/link_gateway/2024IJDRR.11404972M/doi:10.1016/j.ijdrr.2024.104972

Min Thein, K.Y., Kumar, V., Chariar,V., & Tsusaka.,T. (2025). Assessing livelihood vulnerability to climate change in rural India. *World Development Sustainability*, 7(1), 100249. https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100249

Modoni, G., Darini, G., Spacagna, R. L., Saroli, M., Russo, G., & Croce, P. (2013). Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology, 167*, 59–71. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.014

Naseri, M. (2023). *Investigation and evaluation of factors affecting land subsidence and the role of the Ministry of Interior in addressing this problem*. Department of Civil, Development, and Urban Management Studies, Ministry of Interior. [In Persian] https://civilica.com/doc/2668240/

Ndahangwapo, N. N., Thiam, D. R., & Dinar, A. (2024). Land subsidence impacts and optimal groundwater management in South Africa. *Environmental and Resource Economics, 87*, 1097–1126. https://doi.org/10.1007/s10640-024-00857-y

Orhan, O. (2021). Monitoring of land subsidence due to excessive groundwater extraction using small baseline subset technique in Konya, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment, 193*(4), 174. https://doi.org/10.1007/s10661-021-08962-x

Rafiei, F., Gharechelou, S., & Golian, S. (2022). Aquifer and land subsidence interaction assessment using Sentinel-1 data and DInSAR technique. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 11*(9), 45-59. https://doi.org/10.3390/ijgi11090495

Rahman, M. M., Alam, S., Shobuj, I. A., & et al. (2025). Livelihood disruption and psychological distress following the 2024 flash flood in Bangladesh. *Scientific Reports, 15(1)*, 1-18. https://doi.org/10.1038/s41598-025-13418-0

Rateb, A., & Abotalib, A. Z. (2020). Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel-1 satellites and GPS between 2015 and 2019. *Science of the Total Environment, 729*, 138868. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138868

Razak, A., Ekhmar, S., & Mazlina, M. (2024). Sustainability risk management: Are Malaysian companies ready? *Journal Name, 12*(1), 22–32. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24681

Sabouri, S. M., & Gorgani, S. A. (2025). Spatial analysis of land subsidence hazard in rural settlements of Iran. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, *12*(4), 65-79. [In Persian] https://doi.org/10.61882/jsaeh.12.46.795.67

Sadeghi, H., Golaghaei Darzi, A., Voosoghi, B., Akbari Garakani, A., Ghorbani, Z., & Fazel Mojtahedi, S. F. (2023). Assessing the vulnerability of Iran to subsidence hazard using a hierarchical FUCOM-GIS framework. *Remote Sensing Applications: Society and Environment, 31*, 100989. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100989

Shirzaei, M., Freymueller, J., Törnqvist, T. E., Galloway, D. L., Dura, T., & Minderhoud, P. S. (2021). Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nature Reviews Earth & Environment*, *2*(1), 40-58. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00115-x

Yuwono, B. D., Reyhan, A., Sabri, L. M. (2026). Land subsidence rates and their implications for potential land loss in coastal Semarang-Demak. *Natural Hazards, 122*, 486. https://doi.org/10.1007/s11069-026-08254-y