



Dynamic assessment of the Qazvin plain aquifer vulnerability using non-compensatory spatial operators

Alireza Tajsosi¹ | Nima Moghaddam² | Afshin Ashrafzadeh³

1. Department Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: alirezatajasosi@ut.ac.ir
2. Department Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: nmoghaddam@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: A.Ashrafzadeh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 27 April 2026

Received in revised form

12 May 2026

Accepted 25 June 2026

Published online 22 August 2026

Keywords:

Aquifer Vulnerability

Spatiotemporal Analysis

Qazvin Plain

Synergistic Risk

Non-compensatory Operators

GIS

ABSTRACT

This study presents a novel non-compensatory analytical framework based on spatial multiplication operators to evaluate the cumulative risk of Qazvin Plain aquifer over a 21-year period (2001–2022). Unlike traditional compensatory models that mask critical hotspots through averaging, this approach integrates piezometric and hydrochemical data to identify absolute critical zones suffering simultaneously from quantitative and qualitative degradation. Results reveal a significant regime shift from relative stability to chronic stress, with a critical tipping point in 2010–2012 when high-risk areas expanded from ~30% to over 50% of the plain. By 2022, more than 65% of the aquifer was under critical stress, with 42.5% in high-risk condition. The non-compensatory model unveiled hidden critical cores in the central plain that conventional methods misclassified as moderate risk. Findings indicate a nonlinear self-reinforcing process driven by a positive feedback loop between saturated thickness decline and salinity increase. These results underscore the necessity of shifting from generalized management to place-based management and prioritizing immediate interventions (demand management in the critical eastern zones and artificial recharge in western areas).

Cite this article: Tajsosi, A., Moghaddam, N., & Ashrafzadeh, A. (2026). Dynamic assessment of the Qazvin plain aquifer vulnerability using non-compensatory spatial operators. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (2), 303-323. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413293.1300>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413293.1300>

Publisher: University of Tehran Press.



ارزیابی پویای آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین با بهره‌گیری از عملگرهای فضایی غیر جبرانی

علیرضا تجسسی^۱ | نیما مقدم^۲ | افشین اشرف‌زاده^۳✉

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: alirezatajasosi@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: nmoghaddam@ut.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: A.Ashrafzadeh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱

این پژوهش با ارائه یک چارچوب تحلیلی غیرجبرانی مبتنی بر عملگر حاصل ضرب فضایی، ریسک تجمعی آبخوان دشت قزوین را در بازه ۲۱ ساله (۲۰۲۲-۲۰۰۱) ارزیابی کرد. برخلاف مدل‌های جبرانی سنتی که با میانگین‌گیری، نقاط بحرانی را پنهان می‌سازند، این رویکرد با تلفیق داده‌های پیرومتری و هیدروشیمیایی، کانون‌های بحرانی مطلق را که هم‌زمان از افت کمیت و کیفیت رنج می‌برند، شناسایی می‌کند. نتایج نشان‌دهنده تغییر رژیم آبخوان از پایداری نسبی به تنش مزمن است، با یک نقطه عطف بحرانی در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۲ که مساحت مناطق پرخطر از ۳۰ درصد به بیش از ۵۰ درصد رسید. تا سال ۲۰۲۲، بیش از ۶۵ درصد آبخوان در وضعیت بحرانی و ۴۲/۵ درصد در وضعیت پرخطر قرار داشتند. مدل غیرجبرانی هسته‌های بحرانی پنهانی را در مرکز دشت آشکار کرد که روش‌های سنتی آن‌ها را در کلاس متوسط طبقه‌بندی کرده بودند. یافته‌ها حاکی از یک فرایند غیرخطی خودتغذیه‌شونده است که توسط حلقه بازخورد مثبت میان کاهش ضخامت اشباع و افزایش شوری هدایت می‌شود. این نتایج ضرورت تغییر پارادایم از مدیریت عمومی به مدیریت مکان‌محور و اولویت‌بندی مداخلات فوری (مدیریت تقاضا در شرق و تغذیه مصنوعی در غرب) را آشکار می‌سازد.

کلیدواژه‌ها:

آسیب‌پذیری آبخوان

تحلیل مکانی-زمانی

دشت قزوین

ریسک هم‌افزا

عملگرهای غیرجبرانی

GIS

استناد: تجسسی، علیرضا؛ مقدم، نیما و اشرف‌زاده، افشین (۱۴۰۵). ارزیابی پویای آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین با بهره‌گیری از عملگرهای فضایی غیرجبرانی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۶ (۲)، ۳۰۳-۳۲۳. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.413293.1300>



۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد پرشتاب جمعیت، توسعه ناپایدار اراضی زیرکشت و پیامدهای تغییرات اقلیم، تعادل هیدرولوژیک منابع آب زیرزمینی را به‌طور جدی مختل کرده است. افزایش دما و تشدید تبخیر و تعرق، همراه با کاهش بارش مؤثر و افت تغذیه طبیعی آبخوان‌ها، موجب شده است که برداشت از مخازن زیرزمینی از ظرفیت تجدیدپذیری آن‌ها فراتر رود (Wada & Bierkens, 2019). پیامد این وضعیت، نه‌تنها افت کمی منابع آب، بلکه تشدید تغییرات هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب است؛ فرایندی تدریجی که در بلندمدت امنیت غذایی و پایداری زیست‌بوم‌ها را تهدید می‌کند و لزوم پایش مستمر و بلندمدت این منابع را برجسته می‌سازد (Dalin et al., 2017; Moghaddam, 2024; Cuthbert et al., 2019).

مطالعات متعددی به بررسی تغییرات کمی آب‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. رامیلین و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از داده‌های ماهواره گریس^۱ در حوضه آمازون نشان دادند که اختلاف داده‌های گریس و اندازه‌گیری‌های چاه‌های مشاهده‌ای تا حدود ۴۰۰ میلی‌متر (مثبت و منفی) می‌رسد (Ramlien et al., 2008). دانگ و همکاران (۲۰۱۶) در منطقه آتلانتیک میانی ایالات متحده گزارش کردند که در فاصله ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ افت کلی سطح آب زیرزمینی برابر با ۰/۰۶ متر در سال بوده و بیش‌ترین کاهش در دشت ساحلی و نواحی زراعی متراکم رخ داده است (Dong et al., 2016). ونگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز در منطقه‌ای خشک در شمال‌شرقی چین، کم‌ترین پایداری آب زیرزمینی را در بخش‌های مرکزی و شرقی گزارش کردند (Wang et al., 2019). در ایران نیز ولی‌پور و همکاران (۲۰۱۴) در دشت نجف‌آباد نشان دادند که طی سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۲ سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط ۲۵/۲۴ متر کاهش یافته و در برخی نواحی مرکزی افت تا ۸۵ متر رسیده است. همچنین بررسی ۱۵ چاه فعال نشان داد که بیش‌تر نمونه‌ها برای شرب مناسب نیستند و تنها ۶/۶۶ درصد آب‌ها برای کشاورزی قابلیت استفاده دارند (Valipour et al., 2014).

در زمینه تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی نیز شواهد متعددی از نقش تعیین‌کننده فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه کشاورزی و تغییر کاربری اراضی، ارائه شده است. زالیدیس و همکاران (۲۰۰۲) نشان دادند که بهره‌برداری نادرست از اراضی در مناطق مدیترانه‌ای با فرسایش خاک، کاهش حاصل‌خیزی و آلودگی منابع آب همراه است (Zalidis et al., 2002; Moghaddam et al., 2025). یاری و کوچک‌زاده (۲۰۰۸) در مقایسه روش‌های زمین‌آماری برای پیش‌بینی شوری آب زیرزمینی، روش درون‌یابی معکوس فاصله^۲ با توان دو و نیم و مدل گوسی را دقیق‌تر معرفی کردند (Yari & Kouchakzadeh, 2008). زینالی و همکاران (۲۰۱۵) افت کیفیت آب‌های زیرزمینی را متأثر از کاربری‌های کشاورزی و مسکونی و افزایش برداشت از آبخوان دانستند (Zeinali et al., 2015). سوسی و همکاران (۲۰۲۰) فعالیت کشاورزی و کاربرد محصولات محافظت‌کننده گیاهان را از عوامل مهم آلودگی آب‌های زیرزمینی در مناطق شیب‌دار ایتالیا معرفی کردند (Suciu et al., 2020) و سلمنس و همکاران (۲۰۲۰) نیز نفوذ فاضلاب تصفیه‌نشده تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی را تهدیدی جدی برای دسترسی به آب شیرین دانستند (Clemens et al., 2020). هم‌چنین، تام و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل عددی ارزیابی خاک و آب^۳ نشان دادند که تغذیه آب زیرزمینی در مناطق جنگلی نسبت به اراضی زراعی و تخریب‌شده بیش‌تر است (Tam et al., 2018) و رضایی و همکاران (۲۰۲۱) نیز افزایش اراضی زراعت آبی، دیم و مناطق مسکونی و کاهش اراضی مرتعی را با استفاده از تصاویر لندست مستند کردند (Rezaei et al., 2021).

با وجود این پیشرفت‌ها، بخش قابل‌توجهی از مطالعات پیشین برای ارزیابی وضعیت آبخوان‌ها به روش‌های سنتی تصمیم‌گیری چندمعیاره، مانند فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۴ و ترکیب وزنی خطی، متکی بوده‌اند (Machiwal et al., 2012; Shirazi et al., 2018). این روش‌ها، باوجود کاربرد گسترده، به‌دلیل اتکا به قضاوت کارشناسی، وزن‌دهی ثابت و ماهیت جبرانی، قادر به بازنمایی پویایی‌های غیرخطی و نوسانات زمانی سیستم‌های پیچیده هیدرولوژیکی نیستند و در

بسیاری موارد می‌توانند به طبقه‌بندی خوش‌بینانه و گمراه‌کننده مناطق بحرانی منجر شوند (Khaki et al., 2020). افزون بر این، در اغلب مطالعات، مؤلفه‌های کمی و کیفی آبخوان به‌صورت مجزا بررسی شده و اثرات متقابل آن‌ها، یا پیوندشان با تغییرات کاربری اراضی، کمتر موردتوجه قرار گرفته است.

بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در توسعه یک چارچوب تحلیلی کاملاً داده‌محور و غیرجبرانی برای ارزیابی هم‌زمان ریسک‌های کمی و کیفی آبخوان دشت قزوین نهفته است. در این مطالعه، دو شاخص ترکیبی جدید با عنوان «آستانه شرایط بحرانی» و «سطح ریسک فزاینده» بر پایه داده‌های میدانی و مشاهداتی توسعه یافته‌اند تا اثرات متقابل و تشدیدکننده افت تراز ایستابی و افزایش شوری آب را به‌صورت کمی مدل‌سازی کنند. افزون بر این، با بهره‌گیری از عملگرهای فضایی غیرجبرانی، به‌ویژه عملگر حاصل‌ضرب در جبر نقشه‌های محلی، امکان شناسایی دقیق «هسته‌های بحرانی مطلق» فراهم شده است؛ نواحی‌ای که در آن‌ها تنش‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی به‌صورت هم‌زمان و تشدیدشونده رخ می‌دهند. تلفیق داده‌های ژئوهیدرولوژیکی، هیدروشیمیایی و کاربری اراضی در یک بازه زمانی بلندمدت ۲۱ ساله، همراه با استفاده از روش‌های بصری‌سازی پیشرفته مانند نقشه‌های حرارتی و نمودارهای چندوجهی شعاعی، تصویری واقع‌بینانه‌تر از پویایی‌های مکانی-زمانی آبخوان ارائه می‌دهد و زمینه‌ای دقیق‌تر برای اولویت‌بندی مدیریت بحران و تصمیم‌گیری در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی فراهم می‌سازد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه مطالعاتی

دشت قزوین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های جمعیتی و کشاورزی کشور، در مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این دشت از سمت شمال با رشته‌کوه‌های البرز و از سمت جنوب با کوه‌های راموند احاطه شده است (شکل ۱).

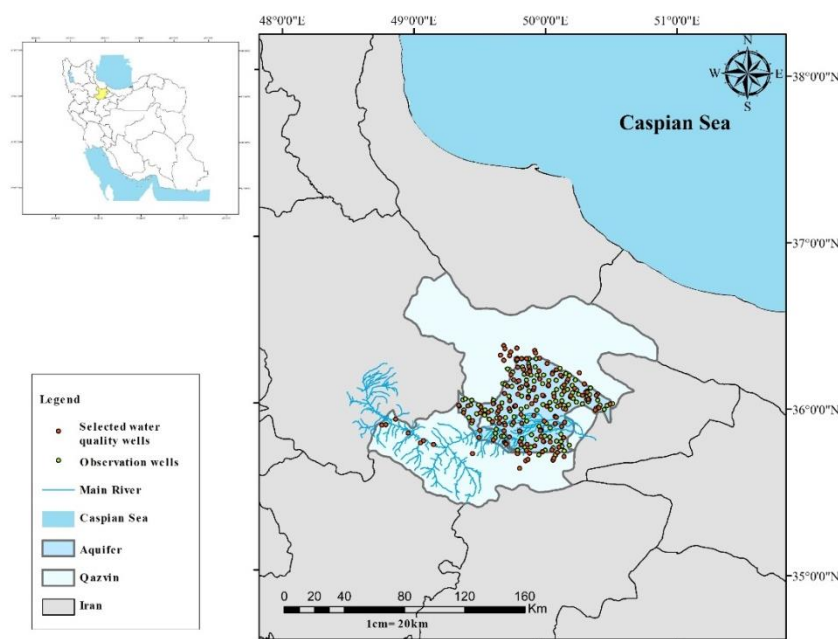


Figure 1. Location map of Qazvin Province and its aquifer, including water quality and observation wells

اقلیم این منطقه نیمه‌خشک بوده و متوسط بارش سالانه آن به طور میانگین حدود ۳۱۷ میلی‌متر است. از منظر هیدروژئولوژی، آبخوان دشت قزوین یک سیستم آبخوان آبرفتی با وسعتی معادل ۳۹۵۲/۴ کیلومترمربع است. این آبخوان که از سال ۱۳۴۱ مورد شناسایی و بهره‌برداری قرار گرفته است، در دهه‌های اخیر به دلیل توسعه روزافزون اراضی کشاورزی و حفر چاه‌های متعدد، با بیلان آبی منفی شدیدی مواجه شده است، به طوری که موجب افت سالیانه بیش از یک متر در سطح آب زیرزمینی و ایجاد کسری مخزن نگران‌کننده و هم‌چنین افزایش شوری بیش از شش درصدی شده است. بیش از ۸۵ درصد از مصارف آب این دشت مربوط به بخش کشاورزی است و با توجه به محدودیت و فصلی بودن منابع آب سطحی، بخش عمده نیاز آبی از طریق استحصال منابع زیرزمینی تأمین می‌گردد (Moghaddam & Kholghi, 2025).

۲.۲. پایگاه داده‌های کمی و کیفی و مدل‌سازی مکانی

به منظور تحلیل فضایی داده‌های هیدرولیکی و هیدروشیمیایی، پس از پایش و پیش‌پردازش اطلاعات، از تکنیک‌های تحلیل زمین‌آمار در محیط نرم‌افزار GIS بهره‌گیری شد. هم‌چنین الگوریتم درون‌یابی قطعی عکس فاصله وزنی به عنوان روشی کارآمد برای تعمیم داده‌های نقطه‌ای به سطوح رستری پیوسته انتخاب گردید تا با لحاظ نمودن ناهمگنی‌های ذاتی آبخوان، گرادیان‌های تغییرات کمی و کیفی با بالاترین دقت شبیه‌سازی شوند. در ادامه، نقشه‌های رستری تولیدشده به منظور استانداردسازی و قابلیت تلفیق، در پنج رده کیفی گسسته‌سازی و کلاس‌بندی شدند. بررسی «نقشه کلاس‌بندی کیفی سطح ایستابی» (شکل ۲-ا) پیکره‌بندی هیدرولیکی متمایزی را در سطح دشت به تصویر می‌کشد، به طوری که هسته مرکزی و پهنه‌های وسیع نیمه شمالی دشت به طور عمده در کلاس‌های «مطلوب» و «بسیار مطلوب» قرار گرفته‌اند که حاکی از عمق کم‌تر برخورد با سطح ایستابی و وجود ضخامت اشباع ایمن‌تر در این نواحی است. در مقابل، با گذار به سمت حاشیه‌های غربی، نوار جنوبی و مناطق کوهپایه‌ای، به دلیل عمق زیاد آب و تمرکز تنش‌های برداشتی، شرایط به شدت افت کرده و این محدوده‌ها در کلاس‌های «نامطلوب» و «بسیار نامطلوب» طبقه‌بندی شده‌اند. به موازات این ارزیابی کمی، پایش کیفی سیستم از طریق بررسی توزیع فضایی متغیر هدایت الکتریکی^۵ صورت پذیرفت. «نقشه کلاس‌بندی کیفی شوری» (شکل ۳-ا) نمایانگر یک گرادیان افزایشی و جهت‌دار از سمت شمال غرب به سوی شرق و جنوب شرق دشت است. پهنه‌های غربی و شمال غربی دشت با قرارگیری در کلاس‌های شوری «بسیار کم» و «کم»، کیفیت مطلوب هیدروشیمیایی و مجاورت با ناحیه‌های اصلی تغذیه را نشان می‌دهند. در نقطه مقابل، لکه‌های بحرانی با تنزل شدید کیفیت در نواحی شرقی، جنوب شرقی و بخش‌هایی از مرکز دشت متمرکز شده‌اند و در کلاس‌های «زیاد» و «بسیار زیاد» جای می‌گیرند. از منظر هیدروژئوشیمیایی، این تجمع شوری در محدوده‌های شرقی بازتابی مستقیم از افزایش زمان ماندگاری آب در سیستم جریان تکاملی، کاهش نفوذپذیری رسوبات در انتهای حوضه و انحلال فزاینده کانی‌های سازندهای تبخیری مجاور در ناحیه‌های تخلیه است. در نهایت، استانداردسازی و تولید این دو نقشه کلاس‌بندی شده (شکل‌های ۲ و ۳)، امکان ارزیابی هم‌زمان ناهنجاری‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی را فراهم آورده و پایه‌ای مستحکم برای تلفیق سیستماتیک لایه‌ها جهت توسعه مدل جامع آسیب‌پذیری و ریسک آبخوان در گام‌های بعدی ایجاد می‌کند.

شکل (۳-ج) (شکل فوق) و تحلیل مقالات نشان می‌دهد که رابطه بین شوری و تراز آب زیرزمینی در دشت‌های قزوین پیچیده و غیرخطی است و تحت تأثیر تعامل چندعاملی هیدرولوژیکی و شیمیایی قرار دارد. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که افزایش شوری پس از دوره‌های خشک‌سالی و سپس بارندگی، به طور عمده از طریق دو مکانیسم اصلی رخ می‌دهد؛ نخست، تماس مستقیم سطح ایستابی با لایه‌های نمکین ناحیه غیراشباع^۶ که منجر به حل شدن ناگهانی نمک‌های انباشته شده می‌شود (Scanlon et al., 2002; Jalali, 2007).

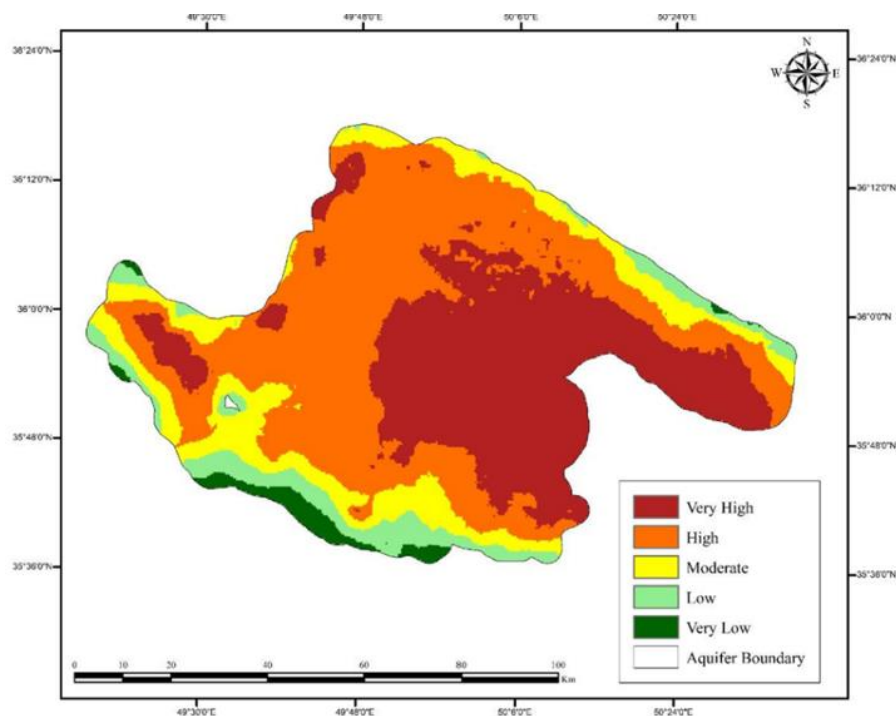


Figure 2-a. Zonation map of mean groundwater level fluctuations during the study period

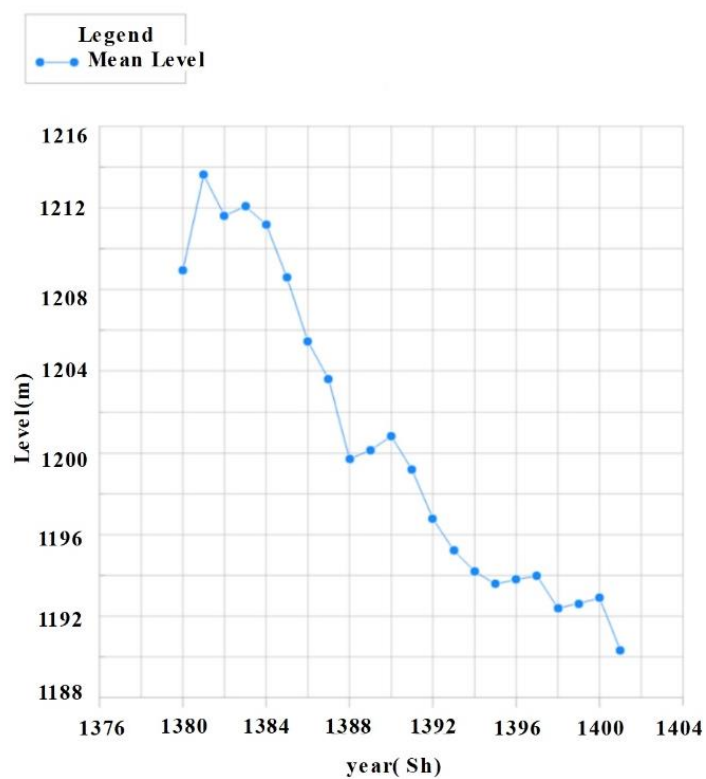


Figure 2-b. Groundwater level fluctuations in Qazvin Plain (2001–2024)(1380Sh-1402Sh) (Moghaddam & Kholghi, 2025)

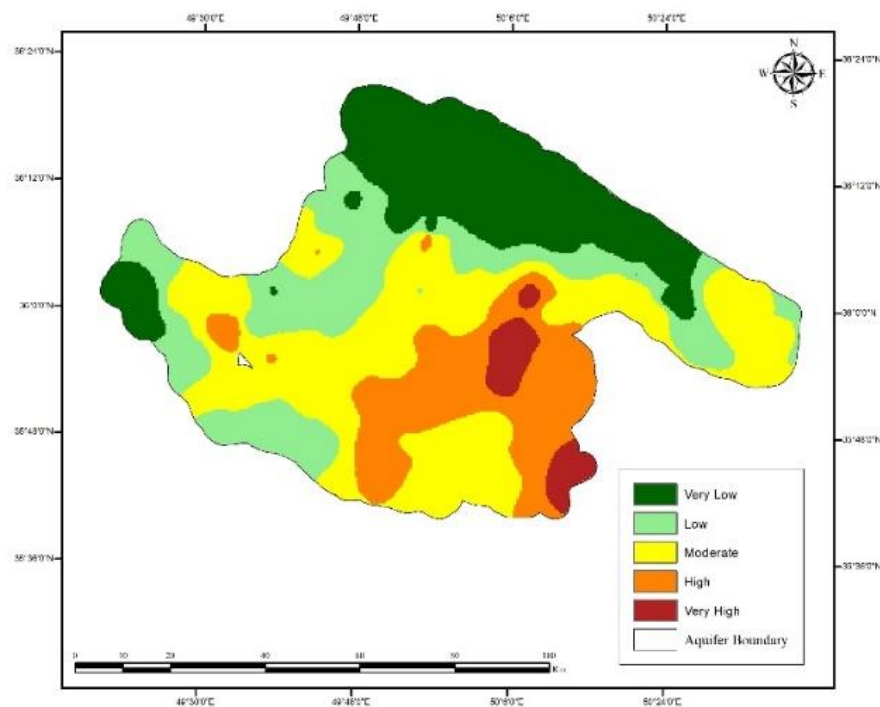


Figure 3-a. Zonation map of mean groundwater salinity fluctuations during the study period

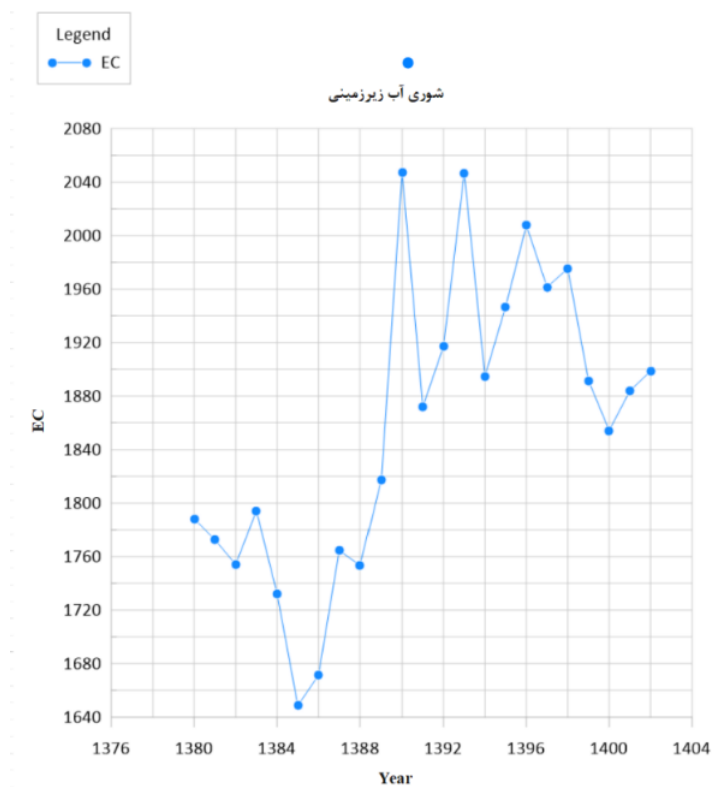


Figure 3-b. Temporal trend of groundwater electrical conductivity (EC) in Qazvin Plain during (2001CE–2024CE)(1380Sh-1402Sh) (Moghaddam & Kholghi, 2025)

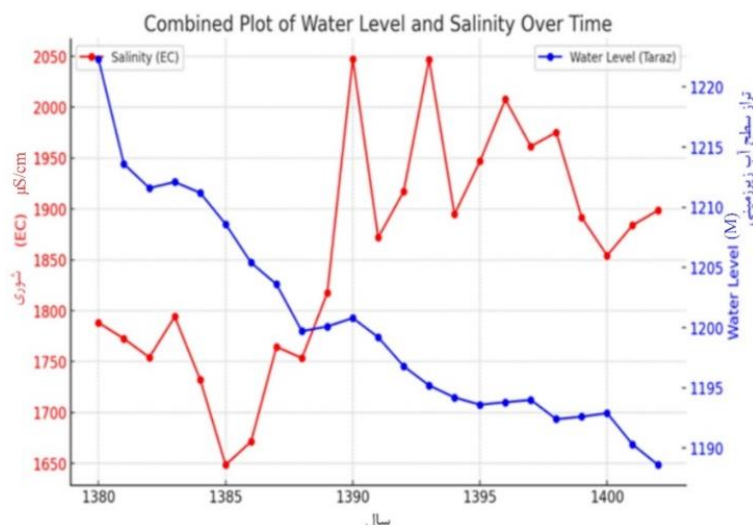


Figure 3-c. Integrated analysis of electrical conductivity (EC) and groundwater level variations in Qazvin Plain (2001CE–2024CE) (1380Sh–1402Sh) (Moghaddam & Kholghi, 2025)

دوم، شست‌وشوی املاح تجمع‌یافته در خاک خشک توسط آب نفوذی به منطقه اشباع (Scanlon *et al.*, 2006; Custodio, 2010). به‌طور کلی، شوری آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی تحت تأثیر سه سازوکار عمده است؛ نوسانات تراز آب که تماس با نمک‌های سطحی را تنظیم می‌کند (Scanlon *et al.*, 2002; Scanlon *et al.*, 2018)، پدیده شورکشی که در آبخوان‌های کم‌عمق با تبخیر بالا منجر به تجمع نمک و افزایش غیرخطی شوری با افزایش مجدد تراز می‌شود (Jalali, 2007; Rengasamy, 2006; Scanlon *et al.*, 2002) و نفوذ مزمن زهاب‌های کشاورزی حاوی نمک و کود. بررسی بازه‌های زمانی نشان می‌دهد که در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴، کاهش تراز آب در دشت منجر به کاهش یا ثبات شوری به دلیل کاهش تماس با لایه‌های نمکی شد، اما در دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹، افزایش مجدد شوری در قزوین ناشی از تشدید شورکشی بود. اوج این پدیده در سال ۱۳۹۰ در قزوین با پیک هدایت الکتریکی (حدود ۲۰۴۷ $\mu\text{S}/\text{cm}$) همراه بود که نتیجه ترکیبی از کاهش ظرفیت رقیق‌سازی به دلیل برداشت شدید، تماس با لایه‌های شور ناشی از زهاب‌ها، و احتمال نفوذ آب شور از نواحی جانبی یا لایه‌های عمیق‌تر به دلیل افت شدید تراز ایستابی بود (Custodio, 2010; Scanlon *et al.*, 2002; Konikow & Kendy, 2005; Alfarrach & Walraevens, 2018; Minderhoud *et al.*, 2018; Yeh *et al.*, 2009; AfradIrani *et al.*, 2025). در نهایت، این تحلیل تأکید می‌کند که برداشت بی‌رویه آب نه تنها با کاهش رقیق‌سازی، بلکه ممکن است با فعال‌سازی لایه‌های شور پیرامونی و عمیق، به‌طور مستقیم بر تشدید شوری تأثیر دارد و خشک‌سالی با کاهش ورودی آب شیرین و افزایش تبخیر، کیفیت آب زیرزمینی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Moghaddam & Kholghi, 2025; Moghaddam & Ashrafzadeh, 2025).

۳.۲. توسعه مدل تلفیقی آسیب‌پذیری آبخوان بر پایه عملگرهای فضایی غیر جبران

به‌منظور ارزیابی جامع خطر و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین، لزوم عبور از رویکردهای سنتی و مبتنی بر قضاوت‌های ذهنی نظیر فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی روی آوردن به تکنیک‌های قطعی‌تر جبر نقشه‌ها^۷ و ارزیابی چندمعیاره مکانی^۸ به‌عنوان یک ضرورت روش‌شناختی در دستور کار قرار گرفت. محدودیت عمده روش‌های مبتنی بر مقایسات زوجی نظیر AHP، ناتوانی آن‌ها در انعکاس دقیق پویایی‌های محلی در مقیاس پیکسل و چشم‌پوشی از اثرات هم‌افزایی متغیرهاست. هم‌چنین در مدل‌های ترکیبی رایج نظیر ترکیب خطی وزنی^۹ خاصیت جبران‌پذیری^{۱۰} بدین معنا که نمره مطلوب یک متغیر

(مانند سطح ایستابی مناسب) می‌تواند نمره ضعیف متغیر دیگر (مانند شوری بالا) را در محاسبات پیکسلی تعدیل کرده و کلاس خطری متوسط و گمراه‌کننده تولید کند. به‌منظور رفع این محدودیت جبران‌پذیری ریاضی و شناسایی دقیق هسته‌های مطلقاً بحرانی، با استناد به منطق عملگرهای غیرجبرانی^{۱۱} قواعد پایه جبر نقشه‌های محلی، مدل حاصل ضرب فضایی طراحی و پیاده‌سازی گردید. در این مدل، ارزش عددی پیکسل‌های لایه کلاس‌بندی شوری به‌صورت مستقیم در ارزش پیکسل‌های لایه سطح ایستابی ضرب می‌شود منطق هیدروژئولوژیکی استفاده از این عملگر ضربی آن است که پدیده آسیب‌پذیری آبخوان ماهیتی تشدیدشونده و هم‌افزا^{۱۲} دارد. افت شدید تراز آب به‌خودی‌خود موجب کاهش حجم ذخیره و افت فشار منفذی می‌شود، اما زمانی که این پدیده با شوری بالا همراه گردد، پدیده تمرکز املاح (به‌دلیل کاهش حجم حلال) رخ داده و بحرانی تصاعدی ایجاد می‌شود که اثرات مخرب آن بر فیزیک خاک و منابع کشاورزی با یک جمع ساده و خطی قابل بیان نیست (Foster & Perry, 2010). خروجی این مدل پیشرفته در نقشه پهنه‌بندی خطر تشدیدیافته آبخوان (شکل ۴) به تصویر کشیده شده است. تحلیل مکانی شکل (۳) نشان می‌دهد که پهنه‌های فوق‌بحرانی (کلاس‌های High و Very High با رنگ‌های نارنجی و قرمز) با الگوی بسیار متمرکزتر، یکپارچه‌تر و با گرادانی تندتر در قلب دشت، نواحی شرقی و بخش‌های جنوب‌شرقی شکل گرفته‌اند. استفاده از رویکرد حاصل ضرب فضایی در تولید شکل (۴) سبب شده است تا مناطقی که به‌طور هم‌زمان از افت شدید سطح آب و تنزل کیفیت شیمیایی رنج می‌برند، بدون آن که ضعف آن‌ها توسط هیچ عامل دیگری پوشش داده شود، به‌عنوان کانون‌های اصلی بحران شناسایی و برجسته شوند. این نقشه ابزاری دقیق برای تخصیص بودجه‌های اضطراری و طراحی مداخلات فوری مدیریتی فراهم می‌آورد. (توجه: در راستای بررسی تطبیقی، مدل دیگری نیز بر پایه تخصیص اوزان نسبی و منطق ترکیب خطی وزنی توسعه یافته است که تمرکز آن بر برگشت‌پذیری ساختار آبخوان است. نتایج این مدل و نقشه پهنه‌بندی حاصل از آن (شکل ۶) جهت مقایسه و استفاده در سیاست‌گذاری‌های کلان و بلندمدت، در بخش پایانی نتایج ارائه و تفسیر شده است.

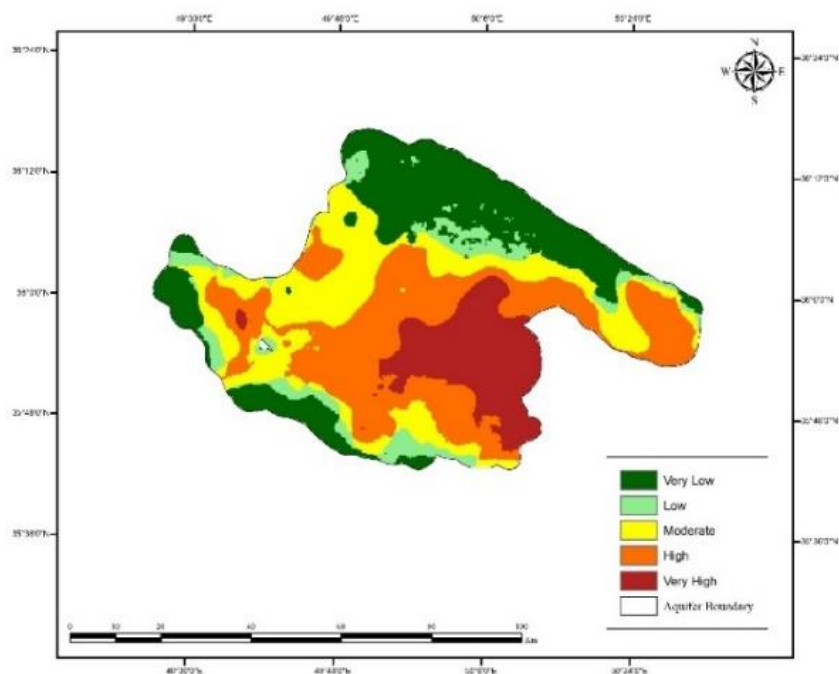


Figure 4. Zonation map of aggravated salinity hazard in the aquifer

۳. یافته‌های پژوهش

۳.۱. تحلیل مکان-زمانی تلفیقی ناهنجاری‌های هیدرودینامیکی و هیدروشیمیایی

الگوهای فضایی ارائه‌شده در شکل (۵) بیانگر روندی تدریجی و غیرخطی در تحول آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین طی دوره مورد مطالعه است.

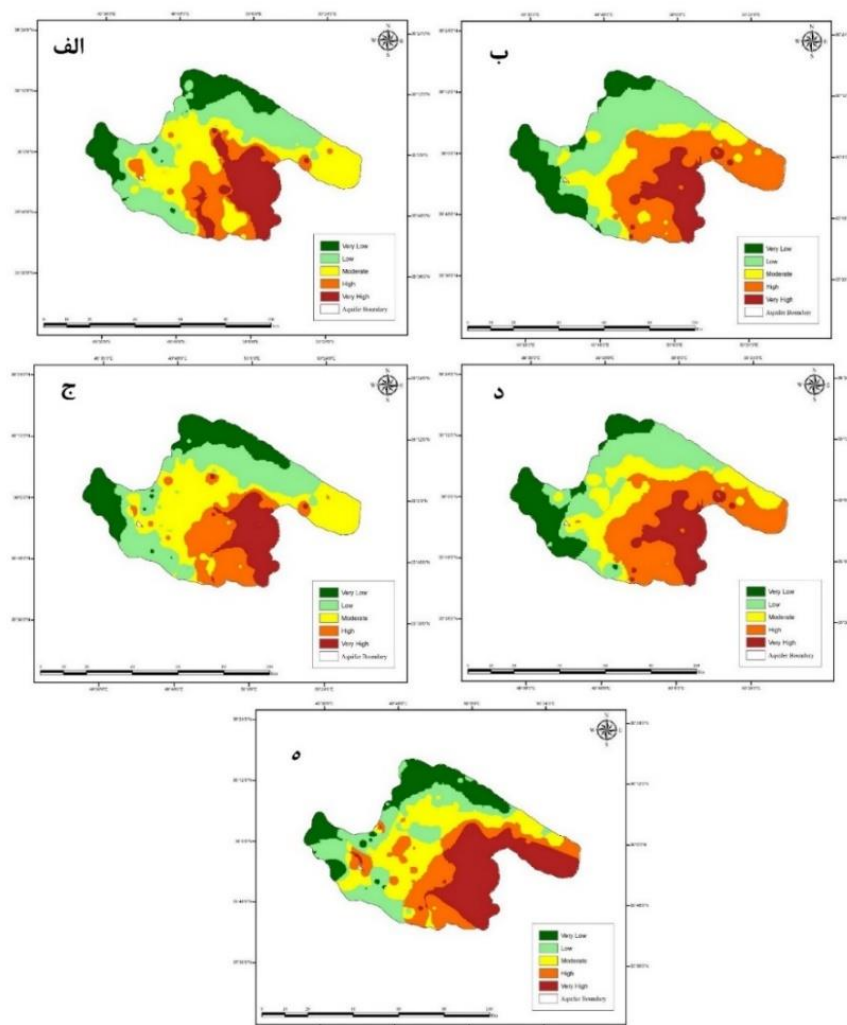


Figure 5. Spatiotemporal evolution of integrated vulnerability using the non-compensatory method in Qazvin Plain aquifer
(a: 1380 Sh/2001 CE, b: 1385 Sh/2006 CE, c: 1390 Sh/2011 CE, d: 1395 Sh/2016 CE, e: 1401 Sh/2022 CE)

در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۵، نواحی با آسیب‌پذیری بالا به‌طور عمده در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی دشت متمرکز بودند، درحالی‌که مناطق تغذیه‌ای غرب و شمال‌غرب دشت همچنان در کلاس‌های آسیب‌پذیری پایین قرار داشتند. این الگو نشان می‌دهد که آبخوان، با وجود افزایش برداشت آب زیرزمینی، هنوز بخشی از تعادل هیدرولیکی طبیعی خود را حفظ کرده بود. در سال ۱۳۹۰ یک تغییر فضایی قابل‌توجه مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که نواحی با آسیب‌پذیری متوسط و زیاد به سمت بخش‌های مرکزی دشت گسترش یافته‌اند. این جابه‌جایی بیانگر اثر تجمعی افت بلندمدت سطح آب

زیرزمینی است و نشان می‌دهد که پاسخ آبخوان دیگر محدود به نواحی موضعی نیست. هم‌زمانی گسترش افت کمی و افزایش شوری آب زیرزمینی نیز حاکی از تشدید ارتباط میان افت هیدرولیکی و تخریب کیفیت آب است. نقشه‌های سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۱ تشدید واضح نواحی آسیب‌پذیر را نشان می‌دهند، به‌ویژه در مناطقی که پیش‌تر در کلاس خطر متوسط قرار داشتند. گسترش کلاس «آسیب‌پذیری بسیار زیاد» بیانگر آن است که تخریب کیفیت آبخوان حتی پس از مراحل اولیه افت کمی نیز ادامه یافته و سیستم آبخوان دارای نوعی «پاسخ تأخیری» نسبت به تنش‌های بلندمدت است. این رفتار با مفهوم «حافظه هیدرولوژیک» سازگار است؛ به این معنا که آثار تنش‌های انباشته‌شده در طول زمان، با تأخیر در ساختار کیفی آبخوان ظاهر می‌شوند. نکته مهم دیگر، کاهش تدریجی نواحی با آسیب‌پذیری پایین در مناطق تغذیه‌ای غرب دشت است. این موضوع نشان‌دهنده تضعیف ظرفیت بازیابی طبیعی آبخوان بوده و بیان می‌کند که سیستم نسبت به سال‌های ابتدایی دوره مطالعه دچار «جابه‌جایی خط‌پایه» شده است. در سال ۱۴۰۱، پیوستگی فضایی نواحی با آسیب‌پذیری بالا نشان می‌دهد که تخریب آبخوان از حالت لکه‌ای و موضعی خارج شده و به یک الگوی منطقه‌ای تبدیل شده است. به‌طور کلی، روند زمانی-مکانی مشاهده‌شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که تداوم برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، به تدریج ساختار هیدرولیکی و هیدروژئوشیمیایی آبخوان را تغییر داده و در نتیجه، تاب‌آوری سیستم کاهش یافته و آسیب‌پذیری آبخوان در مقیاس دشت افزایش پیدا کرده است.

۲.۳. تحلیل الگوی مکانی آسیب‌پذیری در بلندمدت (میانگین ۲۱ ساله)

به‌منظور فیلترکردن نوسانات فصلی و مقطعی و هم‌چنین درک عمیق‌تر از حافظه سیستمی^{۱۳} آبخوان دشت قزوین، نقشه پهنه‌بندی میانگین بلندمدت آسیب‌پذیری تلفیقی به‌روش غیرجبران (هیدرودینامیکی-هیدروشمیایی) برای بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ استخراج گردید شکل (۶) این نقشه، تبلور فضایی تنش‌های مزمن^{۱۴} و اثرات تجمعی اضافه‌برداشت‌ها طی بیش از دو دهه است و تصویری شفاف از دوقطبی بودن وضعیت هیدروژئولوژیکی دشت ارائه می‌دهد. تحلیل توزیع فضایی در شکل (۶) نشان‌دهنده یک گرادیان آسیب‌پذیری شدید از غرب به شرق است. بخش‌های شرقی، جنوب‌شرقی و بخش پهناوری از مرکز دشت، به‌طور مستمر تحت سلطه کلاس‌های آسیب‌پذیری بسیار زیاد و زیاد قرار دارند. تثبیت این پهنه‌های بحرانی در میانگین ۲۱ ساله، اثبات می‌کند که افت تراز ایستابی و زوال کیفیت آب (افزایش شوری) در این مناطق یک پدیده گذرا یا ناشی از خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت نیست، بلکه نشان‌دهنده یک تهی‌شدگی ساختاری^{۱۵} در مخزن است. مجاورت این مناطق با زون‌های تخلیه و کویر مرکزی، در کنار افت مستمر فشار هیدرواستاتیک، شرایط را برای تثبیت جبهه آب‌شور در این نیمه از آبخوان فراهم کرده است. در مقابل، کلاس‌های آسیب‌پذیری بسیار کم و کم تنها به حاشیه‌های غربی و شمال‌غربی دشت محدود شده‌اند. این مناطق که عموماً منطبق بر مخروط‌افکنه‌های اصلی و زون‌های تغذیه^{۱۶} آبخوان هستند، به‌دلیل دریافت جریانات زیرسطحی با کیفیت بالا و دانه بندی درشت‌تر رسوبات، توانسته‌اند در مقیاس بلندمدت تاب‌آوری خود را تا حدودی حفظ کنند. با این وجود، کمربند حائل متوسط که مرز بین مناطق تغذیه و زون‌های بحرانی را تشکیل می‌دهد، نشان‌دهنده جبهه نبرد هیدرولیکی میان آب شیرین و شور است که تحت پمپاژهای مستمر، در معرض خطر پیشروی زون‌های نارجی و قرمز قرار دارد. به‌طور کلی، نقشه میانگین ۲۱ ساله (شکل ۶) به‌عنوان یک نقشه راهبردی برای مدیریت کلان آبخوان عمل می‌کند. این پهنه‌بندی نشان می‌دهد که برنامه‌های آمایش سرزمین، تخصیص منابع آب و استقرار صنایع پرآبر در نیمه شرقی دشت قزوین فاقد توجیه هیدروژئولوژیکی بوده و استراتژی‌های مدیریتی باید به سمت انسداد چاه‌ها، کاهش پروانه بهره‌برداری و تغذیه مصنوعی در مناطق غربی (برای تقویت هد هیدرولیکی) هدایت شود.

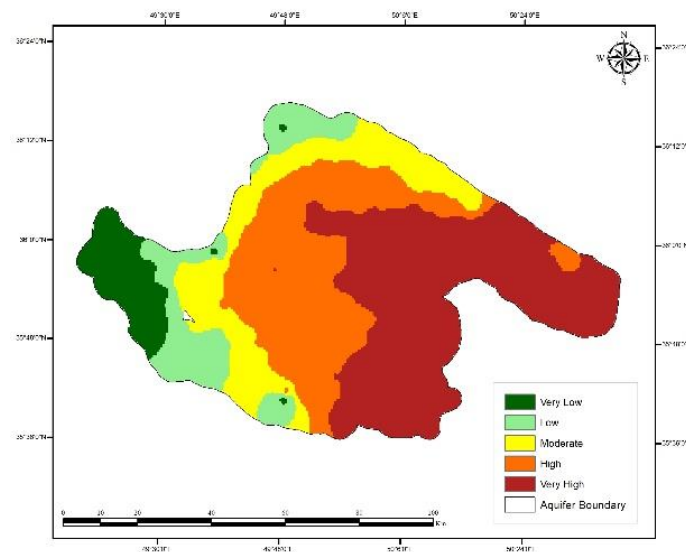


Figure 6. Zonation map of 21-year long-term average integrated quantitative-qualitative vulnerability using the non-compensatory method in Qazvin Plain aquifer (2001–2022CE / 1380–1401 Sh)

۳.۳. تحلیل کمی و دینامیک زمانی-مساحتی پهنه‌های پرخطر و بحرانی آبخوان

به منظور کمی‌سازی تغییرات زمانی-مساحتی وضعیت آبخوان، مساحت کلاس‌های پنج‌گانه آسیب‌پذیری (A_i) برای بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ محاسبه شد. بر این اساس، دو شاخص ترکیبی به عنوان نمایه‌های کلان ریسک تعریف گردید. شاخص «شرایط بحرانی» (I_C) به صورت مجموع مساحت کلاس‌های آسیب‌پذیری متوسط، زیاد و خیلی زیاد (کلاس‌های سه تا پنج) نسبت به مساحت کل آبخوان تعریف شد:

$$I_C = \frac{\sum_{i=3}^5 A_i}{A_{total}} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

هم‌چنین، شاخص «پُرسیک» (I_{HR}) با تمرکز بر شدیدترین سطوح آسیب‌پذیری، از مجموع مساحت کلاس‌های زیاد و خیلی زیاد (کلاس‌های چهار و پنج) محاسبه گردید:

$$I_{HR} = \frac{\sum_{i=4}^5 A_i}{A_{total}} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این روابط، A_i بیانگر مساحت کلاس آسیب‌پذیری i ام و A_{total} مساحت کل منطقه مورد مطالعه است. مقادیر سالانه مساحت کلاس‌ها و شاخص‌های ترکیبی متناظر در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد شاخص I_C از ۹۸/۵۸ درصد در سال ۱۳۸۰ به ۴۱/۶۵ درصد در سال ۱۴۰۱ افزایش یافته است که بیانگر گسترش پایدار پهنه‌های دارای آسیب‌پذیری متوسط تا بسیار زیاد و استقرار آبخوان در یک وضعیت تنش مزمن است. حفظ مقادیر بالاتر از ۶۵ درصد در سال‌های پایانی دوره مطالعه نشان‌دهنده وقوع یک تغییر در خط پایه^{۱۷} در ساختار هیدروژئولوژیکی سیستم است.

از سوی دیگر، شاخص I_{HR} رفتار غیرخطی و واکنش تأخیری آبخوان را آشکار می‌سازد. این شاخص با ثبت مقادیر حداکثری ۱۲/۴۹ درصد در سال ۱۳۸۹ و ۹۲/۵۰ درصد در سال ۱۳۹۱، عبور موقت سیستم از آستانه‌های بحرانی را نشان می‌دهد. این جهش‌ها حاکی از هم‌زمانی اثرات خشک‌سالی‌های پی‌درپی و تمرکز برداشت آب زیرزمینی بوده و به عنوان نمونه‌ای از رفتار غیرخطی و پاسخ تأخیری^{۱۸} آبخوان نسبت به تنش‌های تجمعی قابل تفسیر است.

Table 1. Spatiotemporal distribution of hydrodynamic and hydrochemical vulnerability classes in Qazvin Plain aquifer (2001–2022 / 1380–1401 SH), along with evaluation of cumulative indices in high-risk and critical zones, where critical values consist of the weighted sum of "high," "very high," and "moderate" classes, and high-risk values comprise only the weighted sum of "high" and "very high" classes

Year	Very Low	Low	Moderate	High	Very high	Total (Weighted)	Critical (%)	High-Risk (%)
2001	6381	13230	13692	6698	7807	47808	58.98	30.34
2002	9876	11090	10455	6331	10056	47808	56.15	34.28
2003	9772	11075	10639	6282	10040	47808	56.39	34.14
2004	9799	11007	13236	6922	6844	47808	56.48	28.79
2005	9345	13767	10016	6138	8542	47808	51.66	30.71
2006	6927	13058	6868	14628	6327	47808	58.20	43.83
2007	9499	12498	7158	10324	8329	47808	33.99	39.02
2008	8291	12702	14098	6853	5864	47808	56.09	26.6
2009	8064	12230	14496	7187	5831	47808	57.55	27.23
2010	7757	7425	9143	10728	12755	47808	68.24	49.12
2011	7818	12205	14148	7768	5869	47808	58.12	28.52
2012	7788	7007	8670	11453	12890	47808	69.05	50.92
2013	5360	9753	12042	15674	4979	47808	68.39	43.2
2014	5474	10180	8657	16385	7112	47808	67.26	49.15
2015	5351	12405	8596	16533	4923	47808	62.86	44.88
2016	6846	10800	9744	14087	6331	47808	63.09	42.71
2017	6360	10561	9744	14416	6727	47808	64.61	44.22
2018	6456	10903	11658	13837	4954	47808	63.69	39.31
2019	7304	11892	11185	9475	7952	47808	59.85	36.45
2020	6675	12219	11825	9154	7935	47808	60.48	35.75
2021	4719	11045	11108	15207	5729	47808	67.03	43.79
2022	6972	9563	10939	8575	11759	47808	65.41	42.53

لازم به ذکر است که ستون مجموع ذکرشده در جدول (۱) به منزله مجموع پیکسل‌ها و مساحت آبخوان قزوین نمی‌باشد، بلکه صرفاً مجموع مقادیر وزن‌دار کلاس‌بندی شده کیفیتی می‌باشد.

۴.۳. تحلیل روند زمانی و آماری آسیب‌پذیری

درک پویایی هیدروژئولوژیک در مقیاس حوضه‌های آبریز دشتی، مستلزم گذار از ارزیابی‌های مقطعی ایستا به رهیافت‌های پیوسته و دینامیک است (Gleeson *et al.*, 2012). تحلیل توأمان سری‌های زمانی ۲۱ ساله و پویایی فضایی آسیب‌پذیری در دشت قزوین، نشان‌دهنده واکنش‌های غیرخطی و به‌شدت پیچیده سیستم در برابر برهم‌کنش تنش‌های اقلیمی و فشارهای آنتروپوژنیک (مانند پمپاژ بی‌رویه کشاورزی) است. روند تخریب در این سیستم از یک الگوی خطی پیروی نمی‌کند، بلکه نشان‌دهنده مفهوم هیدروژئولوژیکی شتاب تخریب^{۱۹} است. با افت مداوم سطح ایستابی، ضخامت اشباع آبخوان کاهش یافته و در نتیجه آن، قابلیت انتقال^{۲۰} تقلیل می‌یابد؛ پدیده‌ای که یک چرخه معیوب ایجاد کرده و باعث می‌شود آبخوان قزوین از یک آستانه تحمل بحرانی^{۲۱} عبور کند و توانایی خودپالایی خود را تا حد زیادی از دست بدهد (Wada *et al.*, 2010). به‌منظور ردیابی زمان‌بندی دقیق این ناهنجاری‌ها و درک شدت تنش‌های واردشده بر سیستم، نقشه حرارتی داده‌ها برای دو شاخص «بحرانی» و «پرخطر» در شکل (۷) مورد واکاوی قرار گرفت. تراکم طیف‌های تیره (قرمز پررنگ) در ماتریس سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ وقوع یک جهش بحرانی را در سیستم اثبات می‌کند. براساس داده‌های این نقشه حرارتی، مساحت کلاس بحرانی در سال ۱۳۹۱ به رکورد تاریخی ۶۹/۱ درصد از کل مساحت دشت دست یافته است. هم‌زمان، شاخص پرخطر نیز در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ به ترتیب به مقادیر پیک ۴۹/۱ و ۵۰/۹ درصد رسیده است. بروز چنین شوک‌های ناگهانی و توسعه سریع زون‌های خطر، صرفاً معلول شرایط اقلیمی یک سال خاص نیست، بلکه تجلی بارز اثر تأخیری در زون تهویه^{۲۲} و واکنش حافظه هیدرولوژیک سیستم به انباشت کسری مخزن در دهه‌های پیشین است (Famiglietti, 2014). برای تجسم فضایی-هندسی این انباشت تنش در قالب یک چرخه بسته زمانی،

نمودارهای راداری یا عنکبوتی^{۲۳} برای شاخص‌های «آستانه بحرانی» و «خطر فزاینده» توسعه یافتند (شکل‌های ۸ و ۹). در یک سیستم هیدروژئولوژیک پایدار و دارای تغذیه طبیعی، انتظار می‌رود چندضلعی‌های تشکیل‌شده در چنین نموداری، تقارنی نسبی حول مرکز (مبدأ) داشته باشند. با این وجود، اشکال توسعه‌یافته در این پژوهش، یک اعوجاج سیستمی شدید را به نمایش می‌گذارند. کشیدگی شدید و نامتقارن رئوس چندضلعی قرمز رنگ در شکل (۸) (مربوط به شاخص آستانه بحرانی) به سمت سال‌های ابتدایی و میانی دهه نود (به‌ویژه ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳) و هم‌چنین انبساط محیطی تهاجمی و دندان‌دار چندضلعی آبی رنگ در شکل (۹) (مربوط به شاخص خطر/ پرخطر در همان بازه زمانی)، از نظر هندسی اثبات می‌کند که سیستم نه تنها تحت فشارهای مقطعی قرار گرفته، بلکه حجم کلی «بدهی هیدروژئولوژیک» پایه، در سراسر این حلقه زمانی متورم شده است (Cuthbert et al., 2019). جابه‌جایی مرکز ثقل این نمودارها نسبت به دهه ۸۰، به معنای تغییر دائمی شرایط مرزی و افت خط پایه آبخوان است. تطابق رفتار این شاخص‌ها نشان می‌دهد که کاهش حجم آب شیرین، به دلیل برهم‌خوردن تعادل چگالی، بلافاصله منجر به هجوم آب‌های شورتر از لایه‌های زیرین یا آبخوان‌های مجاور شده است. این بحران کیفی-کمی به‌صورت اثر دومینووار^{۲۴} از طریق تغییر گرادیان‌های هیدرولیکی در سراسر سیستم منتشر شده است (Foster & Perry, 2010). تلفیق این شواهد چندگانه مکانی و آماری، با قاطعیت علمی تأیید می‌کند که دشت قزوین از یک نوسان دوره‌ای قابل جبران عبور کرده و درگیر یک چرخه تخریبی سیستماتیک، برگشت‌ناپذیر و خودتغذیه‌شونده شده است که نیازمند مداخلات مدیریتی بنیادین و فوری است.

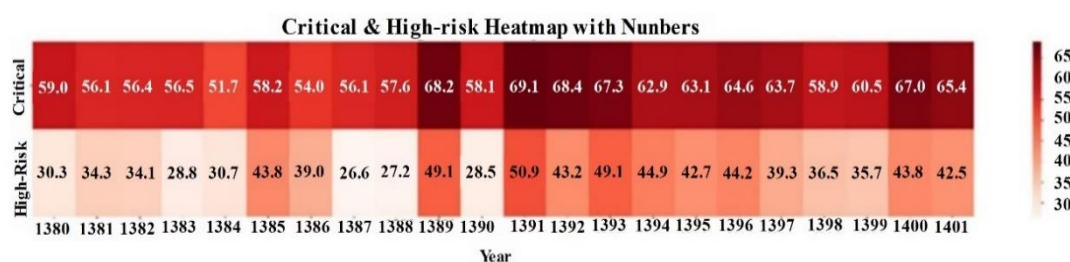


Figure 7. Temporal trend of areal changes (in percentage) of critical cumulative vulnerability indices in Qazvin Plain aquifer during the 21-year period

شکل (۷) الگوی زمانی شاخص‌های «بحرانی» و «پرخطر» را در قالب یک نقشه حرارتی طی دوره ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ نمایش می‌دهد. تمرکز رنگ‌های تیره در بازه ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ بیانگر وقوع یک جهش بحرانی در رفتار آبخوان است، به‌طوری‌که مساحت کلاس بحرانی در سال ۱۳۹۱ به بیشینه تاریخی ۶۹/۱ درصد و شاخص پرخطر در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ به مقادیر اوج ۴۹/۱ درصد و ۵۰/۹ درصد رسیده است. هم‌زمانی این پیک‌ها نشان‌دهنده عبور سیستم از آستانه‌های تحمل کمی-کیفی و بروز یک شوک هیدروژئولوژیک است. تداوم رنگ‌های نسبتاً تیره در سال‌های پس از ۱۳۹۱ و عدم بازگشت به الگوهای کم‌تنش دهه ۱۳۸۰، حاکی از وقوع یک تغییر خط‌پایه (Baseline Shift) و تثبیت آبخوان در سطح بالاتری از تنش مزمن است. این رفتار، بازتابی از پاسخ تأخیری^{۲۵} و عملکرد حافظه‌دار سیستم نسبت به انباشت کسری مخزن و فشارهای برداشت در سال‌های پیشین بوده و نشان می‌دهد که تنش‌ها به‌صورت تجمعی و غیرخطی در مقیاس زمانی-فضایی آبخوان گسترش یافته‌اند. در مجموع، الگوی حرارتی شکل (۷) تأیید می‌کند که دشت قزوین از یک نوسان قابل جبران عبور کرده و وارد یک چرخه تخریبی پایدار با ظرفیت بازگشت طبیعی محدود شده است.

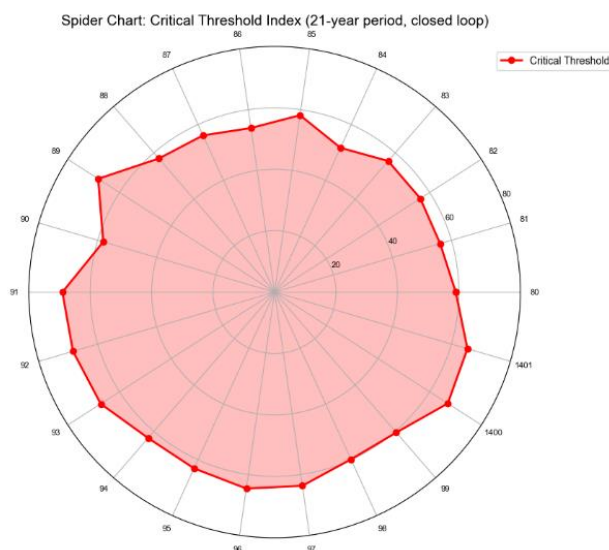


Figure 8. Spider chart of the critical threshold index during the statistical period.

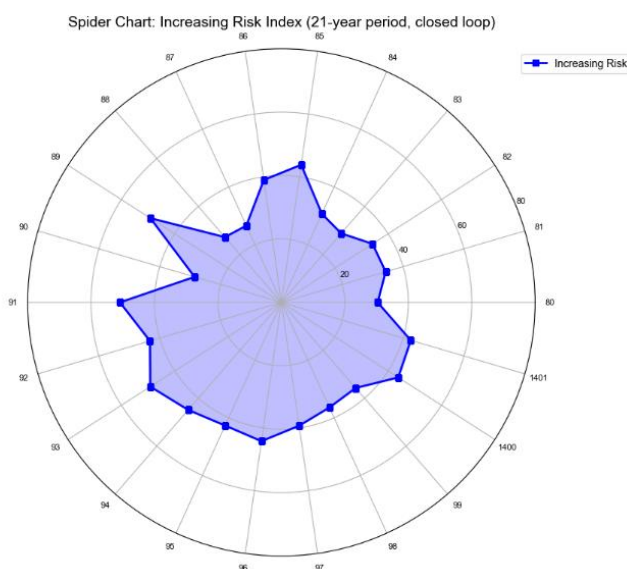


Figure 9. Spider chart of the escalating risk index during the statistical period.

نمودارهای عنکبوتی شکل های (۸) و (۹) الگوی تغییرات شاخص های «خطر فزاینده» و «آستانه بحرانی» را در یک چرخه بسته ۲۱ ساله نشان می دهند و امکان مقایسه هندسی شدت و جهت گیری تنش ها را فراهم می کنند. انتظار می رود در یک سامانه هیدروژئولوژیک پایدار، چندضلعی های حاصل، تقارن نسبی حول مرکز داشته و انحرافات سالانه در محدوده نوسانات طبیعی قرار گیرند. با این حال، هر دو نمودار بازتاب دهنده یک اعوجاج ساختاری شدید هستند که نشان می دهد فشارهای وارد شده بر آبخوان از یک رفتار نوسانی معمول فراتر رفته و به صورت جهت دار، انباشتی و تشدیدشونده عمل کرده اند. در شکل (۹) (آستانه بحرانی)، انبساط محسوس محیط چندضلعی در نیمه نخست دهه ۱۳۹۰ نشان می دهد که آبخوان در این دوره وارد دامنه های بالاتر تنش شده و به طور پایدار در این سطح باقی مانده است، پدیده ای که با مفهوم

جابه‌جایی خط‌پایه هم‌خوانی کامل دارد. همچنین، کشیدگی نامتقارن سطوح بالادست نمودار نسبت به دهه ۱۳۸۰، نشانه‌ای از انباشت بدهی هیدرولوژیک و تضعیف ظرفیت ترمیم طبیعی سیستم است. در شکل (۸) (خطر فزاینده)، هندسه نخراشیده و دنداندار چندضلعی، بازتاب رفتار غیرخطی و حساسیت بالای سیستم به شوک‌های کوچک است، به‌طوری‌که افزایش‌های نسبتاً محدود در تنش اقلیمی یا پمپاژ، سبب جهش‌های بزرگ در مقدار شاخص شده است. تمرکز دندان‌های برجسته در سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ به‌خوبی نمایانگر همان دوره‌ای است که نمودار حرارتی نیز آن را به‌عنوان نقطه اوج تنش تشخیص داده بود. به‌صورت کلی، این دو نمودار تأیید می‌کنند که تغییرات سالانه آسیب‌پذیری در دشت قزوین نه تنها چرخه‌ای و قابل بازگشت نیست، بلکه دارای جهت‌گیری معینی به‌سوی تشدید، ناهمگنی و ناپایداری بلندمدت است؛ روندی که ماهیت خودتغذیه‌شونده داشته و بدون مداخلات مدیریتی ساختاری، به‌طور طبیعی مهار نخواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

۴.۱. ارزیابی دینامیک مکانی-زمانی بحران آبخوان (تحلیل یافته‌های اصلی)

تحلیل توالی مکانی-زمانی داده‌ها از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ حاکی از یک دگرگونی ساختاری و تغییر رژیم در رفتار هیدرودینامیکی آبخوان دشت قزوین است. الگوی پراکنش خطر نشان می‌دهد که نواحی شرقی و جنوب‌شرقی دشت از فاز نوسانات فصلی عبور کرده و به‌عنوان «هسته‌های بحرانی دائمی»^{۲۶} تثبیت شده‌اند؛ پدیده‌ای که با پیشروی تهاجمی به سمت مرکز و غرب دشت همراه بوده است. بررسی دقیق سری‌های زمانی در شکل (۱۲) (روند زمانی تلفیقی شاخص‌های خطر) و شکل (۱۰) (نوسانات شاخص هیدرو-ریسک)^{۲۷} نشان می‌دهد که آبخوان همواره در تلاش برای بازیابی تعادل خود یا تنفس الاستیک^{۲۸} بوده است، اما بازه زمانی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۱ به‌عنوان یک نقطه عطف^{۲۹} فاجعه‌بار عمل کرده است. در این سال‌ها، شاخص HRI با ثبت یک جهش بی‌سابقه از میانگین ۰/۵ عبور کرده و سیستم را از آستانه تاب‌آوری^{۳۰} خود خارج کرده است. مهم‌تر از آن، تحلیل روند در شکل (۱۱) (برازش خطی و درجه دوم)^{۳۱} برای آستانه بحرانی و پرخطر از منظر آکادمیک اثبات می‌کند که گسترش پهنه‌های پرخطر یک رویداد تصادفی نیست. شیب مثبت و پیوسته در برازش‌های ریاضی نشان‌دهنده یک «تغییر خط پایه» و افزایش انباشتی بدهی هیدرولوژیک است؛ روندی که با یافته‌های مطالعات جهانی (مانند Famiglietti, 2014) در خصوص افت ناگهانی آبخوان‌ها در پی انباشت طولانی‌مدت تنش‌ها، کاملاً همسو است.

۴.۲. مقایسه روش غیرجبرانی با رویکردهای سنتی

یکی از چالش‌های بنیادین در مطالعات پیشین ارزیابی آسیب‌پذیری نظیر روش‌های AHP، DRASTIC یا مدل‌های فازی معمول^{۳۲}، تکیه بر عملگرهای جبران‌پذیر^{۳۳} مانند ترکیب خطی وزنی است. در چنین مدل‌هایی، یک متغیر با شرایط مطلوب می‌تواند اثرات مخرب متغیر دیگر را خنثی یا پنهان کند. به‌عنوان مثال، در مدل‌های جبرانی، اگر منطقه‌ای دارای افت شدید تراز آب اما شوری پایین باشد، ممکن است در کلاس آسیب‌پذیری متوسط طبقه‌بندی شود. این امر منجر به بروز خطای نوع دوم^{۳۴} در مدیریت استراتژیک منابع آب می‌شود. نوآوری کلیدی این پژوهش در به‌کارگیری مدل حاصل‌ضرب فضایی^{۳۵} به‌عنوان یک عملگر غیرجبرانی است. در این رویکرد، مقادیر حدی افت سطح آب و افزایش هدایت الکتریکی به‌طور مستقیم در هم ضرب می‌شوند. این مدل به‌دلیل حساسیت بالا به مقادیر حدی، نشان داد مناطقی در مرکز دشت قزوین که پیش‌تر تاب‌آور^{۳۶} تصور می‌شدند، به‌دلیل هم‌افزایی هم‌زمان و پنهان شوری و افت آب، در واقع در وضعیت

فوق بحرانی قرار دارند. بدین ترتیب، مدل حاضر با حذف خاصیت جبران پذیری^{۳۷}، تصویری به مراتب واقع‌بینانه‌تر و سخت‌گیرانه‌تر از نقاط داغ آسیب‌پذیری^{۳۸} ارائه می‌دهد.

۳.۴. مکانیسم‌های هیدروژئوشیمیایی تشدید بحران^{۳۹}

دلیل هم‌حرکتی^{۴۰} و شیب تند نمودارهای بحران در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) را باید در برهم‌کنش‌های هیدروژئوشیمیایی^{۴۱} و فیزیک آبخوان جستجو کرد. در دشت قزوین، تنزل کمی و افت کیفی دو پدیده مجزا نیستند، بلکه در یک حلقه بازخورد مثبت^{۴۲} یکدیگر را تشدید می‌کنند. کاهش پیوسته ضخامت لایه اشباع در اثر اضافه‌برداشت‌ها^{۴۳}، باعث برهم‌خوردن تعادل هیدرودینامیکی و معکوس شدن گرادیان هیدرولیکی^{۴۴} شده است. این تغییرات فیزیکی، دو مکانیسم مخرب را فعال کرده است؛ نخست، پیشروی جانبی^{۴۵} جبهه آب‌های شور از حواشی شرقی و کویری به سمت مرکز دشت؛ و دوم، پدیده بالاآمدگی که طی آن مکش چاه‌های عمیق، آب‌های شور و سنگین فسیلی کف آبخوان را به لایه‌های فوقانی می‌کشد. هم‌زمان، با کاهش حجم آب شیرین در مخزن، اثر تبخیر و تمرکز شدت یافته و غلظت املاح به‌صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد. درک این دینامیک غیرخطی توضیح می‌دهد که چرا نرخ تخریب آبخوان در دهه ۹۰ (مطابق شکل ۱۰) شیب تصاعدی به خود گرفته است.

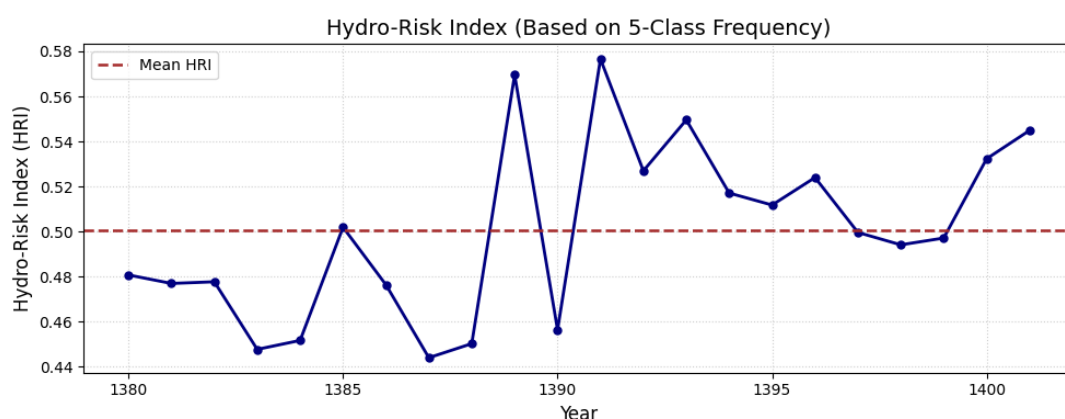


Figure 10. Time series of hydro-risk index fluctuations

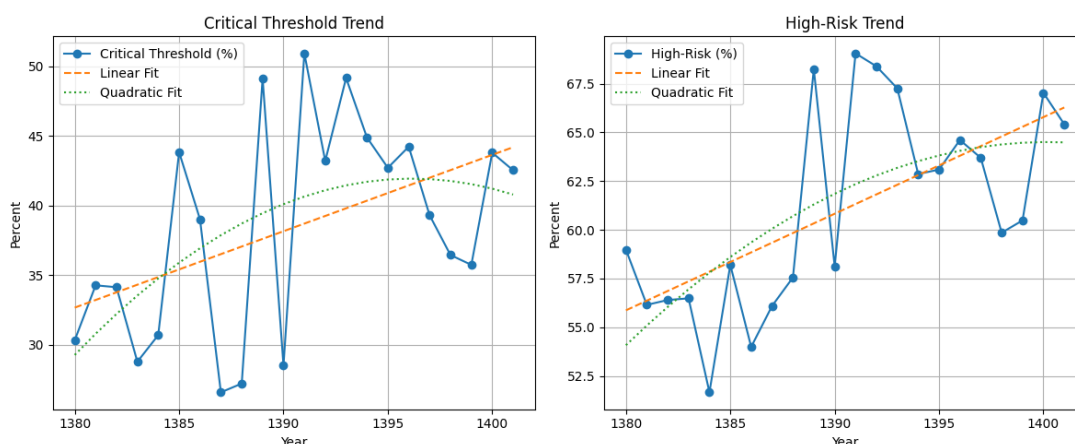


Figure 11. Linear and quadratic fitting for the expansion trend of high-risk and critical zones

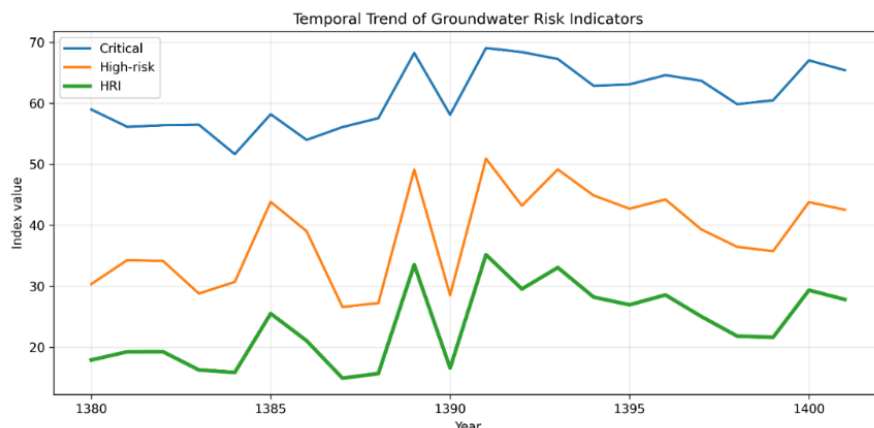


Figure 12. Integrated temporal trend of risk variables (co-movement and positive interaction between saturated thickness decline and salinity increase within a nonlinear dynamic framework)

۵. بحث

چارچوب ارائه شده در این پژوهش با وجود فراهم کردن یک تصویر جامع از پویایی زمانی-فضایی آسیب پذیری، دارای محدودیت هایی است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرند. نخست آن که ساختار شاخص های «بحرانی» و «پرخطر» مبتنی بر داده های موجود و کیفیت نمونه برداری های دوره ای است، بنابراین هرگونه عدم قطعیت در داده های پایه، می تواند به صورت تقویت شده در خروجی های غیرجبرانی بازتاب یابد. دوم آن که مدل سازی غیرجبرانی به طور ذاتی به رفتارهای حدی حساس است و ممکن است در سال هایی که داده ها دارای پراکندگی زیاد یا شکاف زمانی هستند، پاسخ های تیزتر یا اغراق شده ارائه دهد. هم چنین این رویکرد، فرایندهای هیدروژئولوژیکی پیچیده نظیر تبادل بین آبخوان های همجوار، ناهمگنی ریزمقیاس هدایت هیدرولیکی، اثرات تغییر کاربری و پدیده های وابستگی متقابل^{۴۶} را به صورت صریح مدل نمی کند و بیش تر بر الگوهای ریسک و شدت تنش در سطح حوضه تمرکز دارد.

از سوی دیگر، تحلیل های انجام شده با وجود بهره گیری از سری های زمانی ۲۱ ساله، محدود به بازه زمانی مشخصی هستند و امکان نشان دادن الگوهای چنددهه ای یا اثرات تغییر اقلیم در بازه های بسیار بلندمدت را ندارند. افزون بر این، به علت نبود داده های یکنواخت از فلولی پمپاژ، تغذیه مصنوعی و تغییرات کاربری زمین در تمامی سال ها، بخشی از تفسیرها ناگزیر به اتکا بر نشانه های غیرمستقیم است. در نهایت، اگرچه در این مطالعه از ابزارهای تصویری-هندسی مانند نقشه های حرارتی و نمودارهای راداری برای ردیابی اعوجاج های سیستمی استفاده شده است، اما این ابزارها ماهیت تشخیصی دارند و به تنهایی قادر به شبیه سازی سناریوها یا پیش بینی آینده نیستند. با وجود این محدودیت ها، چارچوب پیشنهادی یک نگاه یکپارچه و داده محور به رفتار آبخوان ارائه می کند که قابلیت ارتقا با داده های دقیق تر، مدل های هیدروژئولوژیک فیزیکی و تحلیل عدم قطعیت را دارد. تلفیق این رویکرد با مدل سازی فرایندمحور، می تواند تصویری کامل تر از مسیرهای تخریب یا بازیابی آبخوان ارائه دهد.

اما به طور کلی یکی از مهم ترین مزیت های چارچوب غیرجبرانی به کاررفته در این پژوهش نسبت به روش های متداول جبرانی، حفظ رفتار بحرانی پارامترها و جلوگیری از پنهان شدن تنش های شدید در فرایند تلفیق شاخص هاست. در بسیاری از روش های جبرانی، وضعیت مناسب برخی متغیرها می تواند افت شدید سایر پارامترها را خنثی کرده و در نتیجه شدت واقعی آسیب پذیری آبخوان کمتر از مقدار واقعی برآورد شود. در مقابل، ساختار غیرجبرانی این مطالعه حساسیت بیش تری نسبت به اختلالات آستانه ای و نواحی بحرانی دارد و بنابراین تصویر واقع بینانه تری از روند تجمعی تخریب آبخوان ارائه می کند.

علاوه بر این، رویکرد پیشنهادی توانسته است نواحی متمرکز ریسک و الگوهای ناپایداری زمانی را با دقت بیشتری آشکار کند؛ به‌ویژه در دوره‌هایی که سامانه رفتار غیرخطی و پاسخ‌های جهشی نشان داده است. این ویژگی سبب می‌شود که روش حاضر در مقایسه با رویکردهای مبتنی بر میانگین‌گیری جبرانی، عملکرد تشخیصی قوی‌تری در شناسایی کانون‌های پنهان آسیب‌پذیری و گذارهای بحرانی اولیه داشته باشد.

۶. پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

با توجه به این‌که نیمه شرقی دشت از آستانه غیرقابل بازگشت عبور کرده براساس بحران هیدرولوژیک دشت قزوین، توسعه مطالعات آتی نیازمند رویکردی یکپارچه است که شامل موارد زیر باشد.

- ۱- تلفیق منطق غیرجبرانی با یادگیری عمیق برای مدل‌سازی پیش‌بینانه تحت سناریوهای اقلیمی؛
- ۲- بررسی کمی همبستگی افت تراز آب با پدیده‌های ژئومکانیکی مخرب مانند فرونشست زمین؛
- ۳- انجام ارزیابی‌های میدانی دقیق در زون‌های شرقی برای طراحی استراتژی‌های نوین تغذیه مصنوعی و کنترل شورشدگی؛
- ۴- ارزیابی اثرات بحران بر تاب‌آوری اقتصادی کشاورزی و امنیت غذایی جهت تدوین سیاست‌های سازگاری.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. GRACE
2. Invers Distanced Weight (IDW)
3. Soil and Water Assessment Tool(SWIM)
4. Analytic Hierarchy Process(AHP)
5. Electrical conductivity(EC)
6. Mobilization of Salts
7. Map Algebra
8. Spatial Multi-Criteria Evaluation (SMCE)
9. Weighted Linear Combination (WLC)
10. Compensability
11. Non-compensatory Operators
12. Synergistic
13. Systemic Memory
14. Chronic Stresses
15. Structural Depletion
16. Recharge Zones
17. Baseline Shift
18. Delayed Response
19. Acceleration of Degradation
20. Transmissivity
21. Tipping Point
22. Vadose Zone
23. Spider Charts
24. Domino Effect
25. Delayed Response
26. Permanent Critical Cores
27. Hydro-Risk Index(HRI)
28. Elastic Breathing
29. Tipping Point
30. Resilience Threshold
31. Linear and Quadratic Fitting
32. Conventional Fuzzy Models

33. Compensatory Operators
34. Type II Error - False Negative
35. Spatial Product Model
36. Resilient
37. Compensability
38. Vulnerability Hotspots
39. Hydrogeochemical Mechanisms of Crisis Exacerbation
40. Co-movement
41. Hydrogeochemical Interactions
42. Positive Feedback Loop
43. Overexploitation
44. Reversal of Hydraulic Gradient
45. Lateral Intrusion
46. Coupled Processes

۸. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- AfradIrani, P., Kosari, S., Parsinejad, M., *et al.* (2025). Predicted feasibility of sustainable irrigation best management practices for reducing water consumption and enhancing water productivity. *Sustainable Water Resources Management*, 11, 83. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01255-y>
- Alfarrah, N., & Walraevens, K. (2018). Groundwater overexploitation and seawater intrusion. *Water*, 10(2), 143.
- Bierkens, M. F. P., & Wada, Y. (2019). Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. *Hydrogeology Journal*, 27(2), 363-382.
- Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J., & Lehner, B. (2019). Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. *Nature Climate Change*, 9(2), 137-141.
- Cuthbert, M. O., Taylor, R. G., Favreau, G., Todd, M. C., Shamsudduha, M., Villholth, K. G., & Kukuric, N. (2019). Observed controls on resilience of groundwater to climate variability in sub-Saharan Africa. *Nature*, 572(7768), 230-234.
- Custodio, E. (2010). Aquifer overexploitation: What does it mean? *Hydrogeology Journal*, 18, 269-292.
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M. J. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543(7647), 700-704.
- Dong, Y., *et al.* (2016). Continental-scale assessment of groundwater storage and depletion in the central Atlantic coastal plain. *Water Resources Research*, 52(11), 8623-8642.
- Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945-948.
- Foster, S., & Perry, C. (2010). Improving groundwater resource accounting in irrigated areas: a prerequisite for promoting sustainable use. *Hydrogeology Journal*, 18(2), 291-294.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200.
- Jalali, M. (2007). Salinization of groundwater in arid zones: A case study. *Environmental Geology*, 52(6), 1133-1149.
- Karandish, F., & Šimůnek, J. (2021). Quantitative and qualitative assessment of groundwater under climate change and anthropogenic pressures. *Journal of Hydrology*, 597, 126-141.
- Khaki, M., *et al.* (2020). Data-driven methods for groundwater modeling: a review. *Hydrological Sciences Journal*, 65(8), 1345-1360.
- Konikow, L. F., & Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 317-320.
- Machiwal, D., *et al.* (2018). Assessment of groundwater vulnerability using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Water Resources Management*, 32(5), 1713-1732.

- Minderhoud, P. S. J., et al. (2018). Subsidence and salinization in Mekong Delta. *Science of the Total Environment*, 645, 1348-1361.
- Moghaddam, N. (2024). Managing water resources to mitigate drought impacts due to climate change in the United States with a focus on the state of California. *Iran-Water Resources Research*, 20(2), 194-217. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iwrr.2024.448106.2748>
- Moghaddam, N., & Kholghi, M. (2025). Analysis of Groundwater Table Decline and Salinity Intensification in the Qazvin Plain: Implications from a Water Resources Governance Perspective. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 19(3), 469-487. (In Persian).
- Moghaddam, N., & Ashrafzadeh, A. (2026). Groundwater Salinity Modeling and Prediction in Qazvin Plain Using a Data-Driven and Artificial Intelligence Approach. *Iran-Water Resources Research*, 21(4), 158-175. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.533006.2912>
- Moghaddam, N., Hadizadeh, H., & Ashrafzadeh, A. (2025). Data-driven analysis for estimating and predicting well salinity using artificial intelligence algorithms. *Discoveries & Applications*, 10. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08021-x>
- Ramillien, G., et al. (2008). Interannual groundwater variations in the Amazon basin from GRACE and in-situ data. *Geophysical Research Letters*, 35(12), L12402.
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017-1023.
- Rezaei, M., et al. (2021). Monitoring land use changes and their impact on groundwater resources using Landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100631.
- Rossman, N. R., Zlotnik, V. A., & Rowe, C. M. (2014). Vadose zone lag time and potential 21st century climate change effects on spatially distributed groundwater recharge in the semi-arid Nebraska Sand Hills. *Journal of Hydrology*, 519, 656-668.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 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: An International Journal*, 20(15), 3335-3370.
- Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., & Zhang, L. (2007). Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water resources research*, 43(3).
- Scanlon, B. R., et al. (2018). Enhancing drought resilience in California and Arizona. *Environmental Research Letters*, 13(9), 094010.
- Shirazi, S. M., et al. (2012). A comparative study of AHP and fuzzy AHP for water resources management. *Journal of Water and Climate Change*, 3(4), 305-317.
- Suciu, G., et al. (2020). Groundwater contamination from agricultural activities in Italy. *Water*, 12(3), 841.
- Tam, V. T., et al. (2018). Numerical assessment of groundwater recharge under different land covers using SWAT model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5051-5070.
- Valipour, M., et al. (2014). Investigation of quantitative and qualitative changes of groundwater in Najaf Abad plain. *Journal of Water Research*, 45(2), 123-138.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H., van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20), L20402.
- Wang, Y., et al. (2019). Groundwater sustainability assessment in northeastern China using GRACE data. *Science of the Total Environment*, 676, 514-526.
- Yari, A., & Kouchakzadeh, M. (2008). Comparison of geostatistical methods for predicting groundwater salinity distribution. *Iranian Journal of Science and Technology*, 32(B2), 189-202. (In Persian).
- Yeh, H. F., et al. (2009). Seawater intrusion model: Yun-Lin coast, Taiwan. *Hydrogeology Journal*, 17(6), 1641-1656.
- Zalidis, G., et al. (2002). Impacts of agricultural activities on groundwater quality in Mediterranean regions. *Agricultural Water Management*, 54(3), 249-268.
- Zeinali, M., et al. (2015). Quality decline of groundwater under agricultural and residential land use. *Journal of Environmental Hydrology*, 23, 1-12.