

مقاله علمی-پژوهشی

# الگوی تحلیل افت سطح آب و تشدید شوری آب‌های زیرزمینی در دشت قزوین و پیامدهای آن از منظر حکمرانی منابع آب

نیما مقدم<sup>۱</sup>، مجید خلقی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

## چکیده

در دو دهه اخیر، دشت قزوین با روند نگران‌کننده‌ای از افت سطح آب زیرزمینی و افزایش شوری مواجه بوده که پایداری منابع آبی و معیشت وابسته به آن را به‌طور جدی تهدید می‌کند. این پژوهش باهدف بررسی هم‌زمان تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲، از داده‌های تراز سطح ایستابی، هدایت الکتریکی (EC)، نقشه‌های کاربری اراضی و تحلیل‌های مکانی مبتنی بر GIS بهره گرفته است. نتایج نشان داد که متوسط افت سالانه تراز سطح آب زیرزمینی نزدیک به یک متر و افزایش شوری حدود ۶ درصد بوده که در مناطق شهری و زراعی شدت بیش‌تری داشت. هرچند رابطه مستقیم بین افت تراز و افزایش شوری مشاهده نشد، اما تحلیل‌ها نشان‌دهنده اثرات متقابل آن‌ها در بستر عوامل طبیعی و انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، فاضلاب‌های نفوذی، زهاب کشاورزی و خشک‌سالی بود. در بخش پایانی، با تمرکز بر حکمرانی منابع آب، شکندگی ساختار سیاست‌گذاری موجود و نبود برنامه‌ریزی یکپارچه و تطبیقی آشکار شد. بر این اساس، طراحی راهبردهای مبتنی بر داده، با مشارکت ذی‌نفعان و توجه هم‌زمان به مؤلفه‌های کمی و کیفی منابع آب، ضرورتی راهبردی برای پایداری آینده دشت قزوین به شمار می‌رود.

**واژه‌های کلیدی:** افت سطح ایستابی، شوری آب، تغییر کاربری اراضی، تحلیل مکانی، حکمرانی منابع آب

## مقدمه

گرفتن ارتباط میان مؤلفه‌های کمی و کیفی یا تأثیرات حکمرانی آب انجام‌شده‌اند. درحالی‌که برای مواجهه با بحران‌های پیچیده منابع آب، نیاز به رویکردهای تلفیقی و بین‌رشته‌ای بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

هدف این پژوهش، تحلیل هم‌زمان تغییرات تراز آب و شوری منابع آب زیرزمینی دشت قزوین در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ با بهره‌گیری از داده‌های مکانی، آماری و تصویری، و ارزیابی پیامدهای آن از منظر حکمرانی منابع آب است. این مطالعه می‌کوشد تا با تلفیق داده‌های ژئویدرولوژیک با تحلیل نهادی، تصویری دقیق‌تر از وضعیت کنونی آبخوان ترسیم کرده و ضرورت بازنگری در چارچوب‌های سیاست‌گذاری و حکمرانی منابع آب را نمایان سازد.

زایدیس و همکاران، نشان دادند که فعالیت‌های کشاورزی، به‌ویژه در مناطق مدیترانه‌ای، تأثیر منفی قابل‌توجهی بر کیفیت آب دارد. یکی از مهم‌ترین پیامدهای آن، فرسایش خاک ناشی از بهره‌برداری نادرست و عدم رعایت اصول مدیریت اراضی است که موجب کاهش حاصلخیزی، تخریب ساختار خاک و آلودگی منابع آب می‌شود (Zalidis et al., 2002). رامیلین و همکاران با استفاده از

دشت قزوین به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی و صنعتی کشور، طی دهه‌های اخیر با بحران فزاینده‌ای در منابع آب زیرزمینی روبه‌رو شده است. کاهش محسوس سطح ایستابی، افزایش شوری، و افت کیفیت آب ازجمله نمودهای این بحران‌اند که پیامدهای گسترده‌ای بر پایداری محیط‌زیست، امنیت غذایی و معیشت جوامع محلی داشته‌اند. از طرفی، رشد بی‌رویه شهرنشینی، تغییرات کاربری اراضی، برداشت‌های بی‌رویه، نفوذ فاضلاب، و تداوم خشک‌سالی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وضعیت فعلی منابع آب زیرزمینی در این منطقه هستند. باوجود مطالعات متعدد در زمینه تحلیل تراز و کیفیت آب زیرزمینی، اغلب این پژوهش‌ها به‌صورت منفک و بدون در نظر

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
(\*- نویسنده مسئول: (Email: kholghi@ut.ac.ir)

سطح آب زیرزمینی اثرگذار بوده است. ولی پور و همکاران (۱۳۹۳)، با بررسی تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت نجف‌آباد نشان دادند که بین سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۲، سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط ۲۵/۲۴ متر کاهش یافته است، با بیش‌ترین افت (تا ۸۵ متر) در نواحی مرکزی آبخوان. بررسی ۱۵ چاه فعال نیز نشان داد بیشتر نمونه‌ها برای شرب مناسب نیستند و فقط ۶/۶۶ درصد آب‌ها برای کشاورزی قابل استفاده‌اند. نتایج بر لزوم مدیریت و پایش مستمر منابع آب زیرزمینی تأکید دارد. زینالی و همکاران (۱۳۹۴)، در مطالعات خود افت کیفیت آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر کاربری کشاورزی و مسکونی و افزایش برداشت از سطح آبخوان‌ها می‌دانند. چن و همکاران، بررسی داده‌های ماهواره GRACE طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ را انجام دادند (chen et al., 2016). در این تحقیق از داده‌های مرکز پردازش JPL و CSR، GFEX و استفاده‌شده بود و داده‌های ماهواره GRACE با استفاده از پالایه گوسی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰۰ کیلومتر اصلاح گردیده بود. مقایسه تغییرات ذخیره آب‌داده‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده ماهواره GRACE، نشان‌دهنده بهبود روند تغییرات در داده‌های اصلاح‌شده بود. سپس در مطالعه تام و همکاران، با استفاده از مدل عددی SWIM تغذیه آب زیرزمینی در پوشش‌های اراضی مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که تغذیه آب زیرزمینی به‌طور اساسی وابسته به الگوهای بارش و تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین بوده است به‌نحوی که در مناطق جنگلی تغذیه آب زیرزمینی در مقایسه با اراضی زراعی و تخریب‌شده نسبتاً بالاتر است (Tam et al., 2018). یزدان پناه و همکاران (۱۳۹۷)، مشخص کردند که روش کربجینگ معمولی با دارا بودن کم‌ترین میزان RMSE و بیش‌ترین  $R^2$  بهترین برآورد را در منطقه مورد مطالعه‌شان داشته و نتایج بررسی پارامترهای کیفیت آب نشان داد که هدایت الکتریکی (EC) و مجموع املاح محلول (TDS) در طی سال‌های مورد مطالعه افزایش چشم‌گیری داشته که باعث کاهش کیفیت آب طی این سال‌ها شده است، همچنین نتایج این پژوهش نشان داده علت اصلی کاهش کیفیت آب در دشت مشهد، وجود نواحی صنعتی و مسکونی و توسعه اراضی کشاورزی بوده است. اخیراً، نتایج پژوهش دانگ و همکاران، در منطقه آتلانتیک میانی ایالات متحده نشان داد که کاهش کلی سطح آب زیرزمینی در بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ برابر با ۰/۰۶ متر در سال بوده است (Dong et al., 2016). همچنین بیش‌ترین روند کاهشی سطح آب زیرزمینی به میزان ۴۸ درصد مربوط به مناطق دشت ساحلی است و بخش‌های زراعی متراکم بیش‌ترین مساحت افت آب زیرزمینی را داشته‌اند. ونگ و همکاران، در مطالعه‌ای پایداری آب‌های زیرزمینی را در منطقه‌ای خشک در شمال شرقی چین با استفاده از داده‌های GRACE ارزیابی کردند آن‌ها به

داده‌های ماهواره GRACE، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در حوضه آمازون را طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ بررسی کردند. نتایج نشان داد بین داده‌های GRACE و اندازه‌گیری‌های ایستگاهی از چاه‌های مشاهده‌ای، اختلافی تا حدود ۴۰۰ میلی‌متر (مثبت و منفی) وجود دارد (Ramlien et al., 2008). یاری و کوچک زاده (۱۳۸۷)، با مقایسه روش‌های زمین‌آماری برای پیش‌بینی پراکنش شوری آب زیرزمینی دریافتند که روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW) <sup>۱</sup> با توان دو و نیم و مدل گوسی، بهترین دقت را داشته است. همچنین تقی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷)، در پژوهشی باهدف مطالعه تغییرات مکانی شوی آب‌های زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار و در مطالعه موردی دشت رفسنجان و پس از انتخاب مدل مناسب برای درون‌یابی مشخص کردند که برای پهنه‌بندی شوری آب روش کربجینگ بر روش درون‌یابی معکوس فاصله ارجحیت دارد. مویوو و همکاران، همبستگی بین تغییرات مقادیر آب زیرزمینی به‌دست‌آمده با استفاده از داده‌های GRACE و مدل GLDAS با مقادیر مشاهداتی را در جیلین غربی در چین در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹، مورد بررسی قرار دادند (Moyoo et al., 2012). در این مطالعه، داده‌های نسخه چهارم سطح دو از مرکز تحقیقات فضایی آمریکا (CSR) از GRACE مورد استفاده قرار گرفت و از پالایه گوسی با شعاع ۲۰۰ کیلومتری برای پالایه داده‌ها استفاده شده است. آنالیز عدم قطعیت نشان‌دهنده خطای میانگین کم‌تر از ۱۰ درصد بوده است. همچنین بررسی مقادیر به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه نشان‌دهنده بیش‌ترین همبستگی میان مقادیر فصلی و کم‌ترین همبستگی میان مقادیر ماهانه بوده است. همچنین مطالعه چوی و همکاران، باهدف تحلیل زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی در ارتباط با توسعه اراضی شهری و پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در بخش واگشا <sup>۲</sup> در ایالات متحده انجام شد (Choi et al., 2012). در این پژوهش تحلیل داده‌های برداشت آب زیرزمینی، تراز آب زیرزمینی پوشش زمین و بارش با استفاده از تحلیل همبستگی و رگرسیون وزنی جغرافیایی، تحلیل تغییرات کاربری اراضی و هم‌پوشانی نقشه‌ها نشان داد که گسترش اراضی شهری در مناطق با پتانسیل تغذیه بالای آب زیرزمینی سریع‌تر از مناطق با پتانسیل کم یا متوسط بوده است. همچنین در مطالعه دیگری میسرا و کومار، اثر تغییر کاربری اراضی بر تغذیه آب زیرزمینی در منطقه‌ای در هند ارزیابی شد (Mishra and Kumar., 2015). در این پژوهش گسترش اراضی شهری با استفاده از داده‌های ماهواره IRS برای سال‌های ۱۹۷۲، ۱۹۸۰، ۱۹۹۲، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۱ بررسی شد. نتایج بیان‌گر آن بود که افزایش اراضی مسکونی و کاهش پوشش گیاهی به‌طور مستقیم بر کاهش

1- Inverse Distance Weighting

2- Waukesha

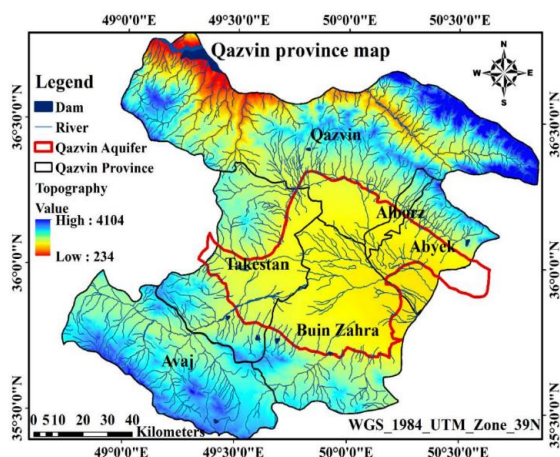
امکان ارزیابی هم‌زمان و یکپارچه وضعیت کمی و کیفی منابع آب را فراهم می‌کند.

### منطقه مطالعاتی

دشت قزوین در محدوده‌ای بین عرض‌های ۳۵ تا ۳۶/۳۱ درجه شمالی و طول‌های ۴۹/۴۰ تا ۵۰/۴۰ درجه شرقی قرار دارد و یکی از مهم‌ترین مناطق کشاورزی، صنعتی و جمعیتی کشور محسوب می‌شود. تنوع کاربری اراضی و فشارهای ترکیبی انسانی و طبیعی این منطقه را به یکی از کانون‌های بحران منابع آب زیرزمینی در ایران تبدیل کرده است.



شکل ۱- نقشه استان قزوین در ایران



شکل ۲- نقشه استان قزوین و آبخوان مرکزی دشت قزوین (جانباژ و همکاران، ۲۰۲۳)

برداشت آب‌های زیرزمینی در چند دهه اخیر به‌ویژه در مناطق خشک به دلیل کمبود آب‌های سطحی و افزایش آبادی و شهرنشینی اشاره و کم‌ترین میزان پایداری آب را در بخش مرکزی و شرقی منطقه شناسایی کردند (Wang et al., 2019). سوسی و همکاران در مطالعه‌ای آب‌های زیرزمینی را در منطقه‌ای در ایتالیا بررسی کردند. این پژوهشگران فعالیت کشاورزی و محصولات محافظت‌کننده گیاهان را از عوامل مهم آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی شیب‌دار عنوان کردند (Suciu et al., 2020). سلمنس و همکاران، نیز نفوذ فاضلاب تصفیه نشده به آبخوان‌های زیرزمینی را تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی مشکل بزرگی در برابر دسترسی انسان به آب شیرین مطرح کرده‌اند؛ به طوری که برخی پژوهشگران افت کیفیت آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر کاربری کشاورزی و مسکونی و افزایش برداشت از سطح آبخوان‌ها می‌دانند (Clemens et al., 2020). همچنین لی و همکاران در مطالعه‌ای تغییرات منحنی رتبه‌بندی در بخش هوایوانکائو<sup>۱</sup> و عوامل آلاینده آن‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. تحلیل‌ها نشان داده‌اند که باوجود روند کاهشی میانگین سالانه سطح آب طی دو دهه گذشته، میانگین دبی سالانه تغییر محسوسی نداشته است. مرور پیشینه پژوهش‌ها بیانگر نقش مؤثر تغییرات کاربری اراضی بر فرآیند تخلیه و تغذیه آب زیرزمینی است؛ به گونه‌ای که توسعه اراضی مسکونی و تبدیل مراتع به اراضی زراعی در اغلب مطالعات، با افت سطح آب زیرزمینی همراه بوده است. از این‌رو، ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر منابع آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای در مدیریت پایدار منابع آبی برخوردار است (Li et al., 2024). همچنین رضایی و همکاران (۱۴۰۰)، با کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست اثبات کردند اراضی زراعت آبی و دیم و مناطق مسکونی شهری روندی افزایشی و اراضی مرتع روندی کاهشی داشته است. در نتیجه ما با بررسی همه این پژوهش‌ها به این نتیجه رسیدیم که با بررسی مشترک عواملی مثل تراز و کیفیت آب زیرزمینی و همچنین بررسی نقشه کاربری اراضی به یک رابطه کیفی میان این عوامل دست‌یافته و سپس به علت تغییرات به وجود آمده از دیدگاهی نسبتاً خوب پی می‌بریم.

### مواد و روش‌ها

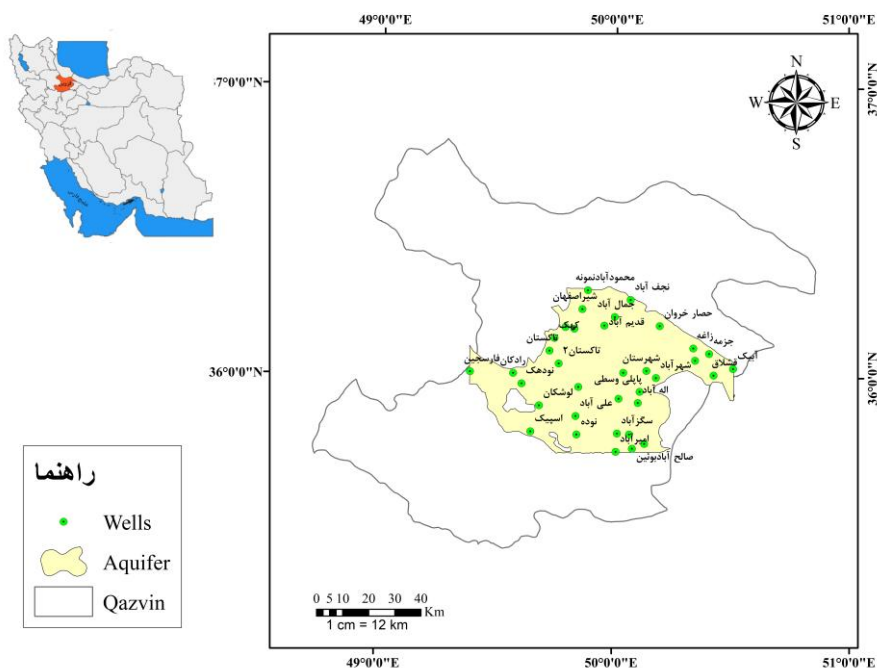
برای تحلیل تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین، داده‌های مربوط به ۳۵ حلقه چاه منتخب طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ گردآوری شد. این داده‌ها شامل تراز سالانه سطح آب زیرزمینی همراه با مختصات مکانی (UTM)، میزان هدایت الکتریکی (EC) به‌عنوان شاخص شوری، نقشه‌های کاربری اراضی سال ۱۴۰۲ و داده‌های مکانی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و لایه‌های GIS برای پهنه‌بندی فضایی تغییرات بود. این مجموعه

1- Huayuankou (HYK)

## داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، به منظور بررسی هم‌زمان تغییرات شوری و سطح آب زیرزمینی، ۳۵ حلقه چاه منتخب در دشت قزوین مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، از داده‌های اندازه‌گیری شده هدایت الکتریکی (EC) و تراز سطح آب زیرزمینی (H) در دو مقطع زمانی ۱۳۸۰ و ۱۴۰۲ استفاده شد. اطلاعات جمع‌آوری شده شامل مقادیر EC و H در طول دوره، به همراه مختصات مکانی چاه‌ها در

سیستم مختصات جهانی (UTM)، بوده که از ایستگاه‌های مختلف برداشت گردیده است. همچنین، نقشه کاربری اراضی مربوط به سال ۱۴۰۲ نیز به منظور تحلیل فضایی و ارزیابی اثرات کاربری زمین بر منابع آب، در فرایند تحلیل وارد شد. در این پژوهش، برای تحلیل، بررسی و مرتب‌سازی داده‌ها از نرم‌افزارهای Microsoft Excel، ArcGIS و Grapher استفاده شد.



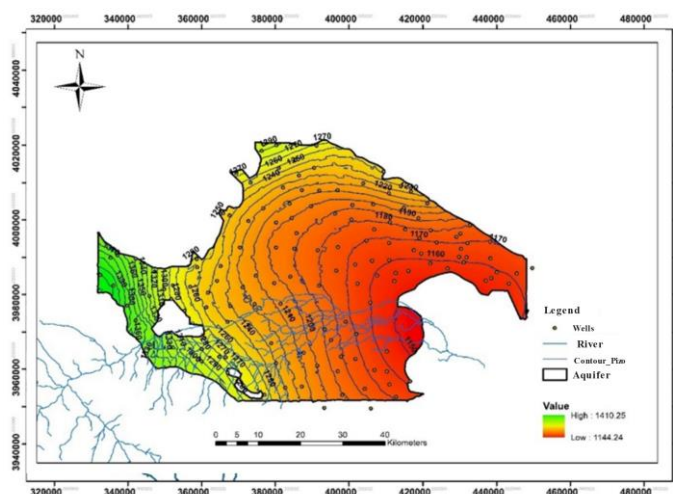
شکل ۳- نام محل و موقعیت مکانی چاه‌های اندازه‌گیری

## بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی

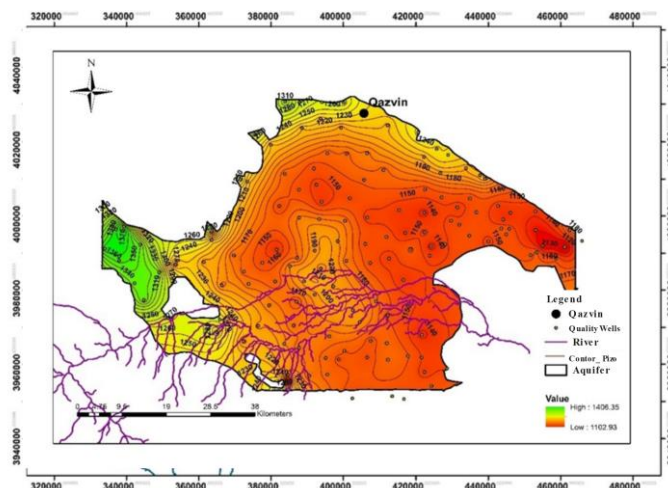
برای این کار ابتدا به پهنه‌بندی ابتدای دوره و انتهای دوره یعنی به ترتیب سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۴۰۲ به وسیله نرم‌افزار ArcMap پرداخته و با روش کریجینگ، پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی برای هر سال را به صورت جداگانه محاسبه کرده و سپس با ابزار رستر calculator در Arc Map اختلاف پهنه‌بندی‌ها را محاسبه و به دست آوردیم. شکل (۳-الف) در شکل (۳-ج)، ملاحظه می‌شود که در طی ۲۲ سال بررسی در این پژوهش بیش‌ترین افت تراز آب زیرزمینی در مناطق دارای زراعت رخ داده است. همچنین این افت در آبیک و بوئین‌زهرها هست، هوای این مناطق به سبب دارا بودن واحدهای صنعتی و نیروگاهی زیاد دارای گازهای گلخانه‌ای زیاد از جمله گازهای  $NO_2$ ،  $CO_2$  و  $NO_x$  هست. به خصوص  $CO_2$  به عنوان گاز گلخانه‌ای می‌تواند باعث افزایش دما و تغییر در الگوهای جوی شود. این تغییرات ممکن است موجب تبخیر بیش‌تر آب و کاهش بارندگی در مناطق مختلف شود. همچنین، دی‌اکسید نیتروژن

و اکسیدهای نیتروژن می‌توانند به تشکیل ذرات معلق در جو کمک کنند که بر فرآیندهای تشکیل ابر و بارندگی تأثیر می‌گذارد و آن را کاهش داده و در نهایت باعث کاهش بارندگی و در صورت ادامه یافتن طولانی‌مدت سبب کاهش تراز آب زیرزمینی می‌گردد.

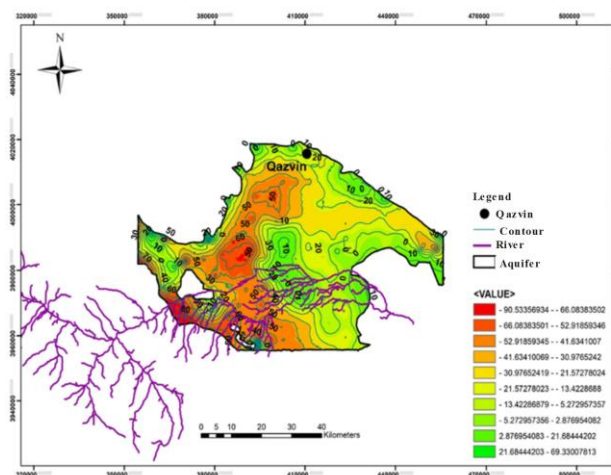
برای نمایش بهتر و ملموس‌تر این تغییرات در نرم‌افزار Microsoft Excel نمودار تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت قزوین را، این بار با بررسی تمام ۲۲ سال طول بازه مورد مطالعه به دست آورده و نشان دادیم (شکل ۳-د). در مرحله بعد، ابتدا با دریافت تراز آب زیرزمینی دشت قزوین تا سال ۱۴۰۲ از شرکت آب منطقه‌ای استان قزوین به بررسی میزان تغییرات این تراز در طی دوره مورد مطالعه یعنی ۱۳۸۰-۱۴۰۲ پرداختیم. تراز آب زیرزمینی دشت قزوین با شیبی نسبتاً تند، رو به کاهش هست و در دو بازه حدودی سال ۱۳۸۵ به بعد و سال ۱۳۹۰ به بعد شیب این کاهش بیش‌تر ملموس هست که به توضیح آن می‌پردازیم.



الف

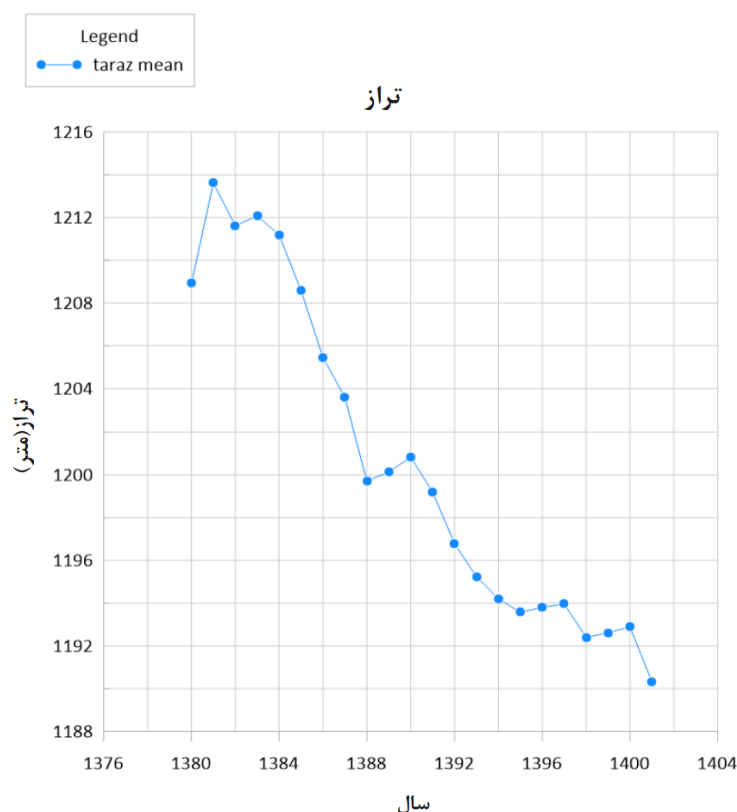


ب



ج

شکل ۴- الف- نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی سال ۱۳۸۰- ب- نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی سال ۱۴۰۲- ج- نقشه هم‌افت و هم‌خیز تراز سطح آب زیرزمینی - آبخوان دشت قزوین (۱۳۸۰-۱۴۰۲)



شکل ۴-د- نمودار تغییرات تراز آب زیرزمینی دوره مطالعاتی- دشت قزوین

#### بازه ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲

در این بازه، تراز آب زیرزمینی از حدود ۱۲۰۹ متر به ۱۲۱۲ متر افزایش یافته است. این افزایش به میزان ۳ متر در طی دو سال رخ داده است. دلیل این افزایش می‌تواند بارندگی مناسب یا کاهش برداشت باشد، که هر دو مورد با توجه به عدم توسعه‌یافتگی کشاورزی در آن زمان و عدم نیاز شدید به خوراک به سبب کم بودن جمعیت نسبت به حال و همچنین وضعیت بهتر آب و هوایی محتمل می‌باشند. در بازه ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵، تراز آب زیرزمینی از حدود ۱۲۱۲ متر به حدود ۱۲۰۸ متر کاهش یافته است. بنابراین، طی سه سال، یک کاهش حدود ۴ متری در تراز آب رخ داده است، یعنی حدوداً سالی ۱/۵ متر. این افت احتمالاً به دلیل افزایش برداشت و کاهش بارندگی بوده است.

در بازه ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹، در این دوره، تراز آب از حدود ۱۲۰۸ متر به حدود ۱۲۰۰ متر کاهش یافته است. بنابراین، طی چهار سال، حدود ۸ متر (متوسط سالی ۲ متر)، افت مشاهده می‌شود. این افت نسبتاً یکنواخت و پیوسته بوده و می‌تواند ناشی از خشک‌سالی و برداشت‌های بیش‌ازحد از منابع زیرزمینی باشد. در بازه ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۰ (آستانه شروع دوره خشک‌سالی)،

#### (۲۰۱۰-۲۰۱۱)

در این بازه که خشک‌سالی شدیدی نیز رخ داده است، درست است که تراز آب از حدود ۱۲۰۰ متر به ۱۲۰۱ متر افزایش یافته، یعنی ۱ متر صعود در طی یک سال، اما تغییرات تراز از سال ۱۳۹۰ به بعد مؤید این خشک‌سالی شدید هست. فخار و کاویانی (۲۰۲۴)، به بررسی میانگین میزان بارش بر اساس مجموعه داده CHIRPS<sup>1</sup> و شاخص SPI-۱۲ حاصل از این مجموعه داده پرداخته‌اند. نتایج به صورت میانگین دو دهه خروجی گرفته شده است. به این معنی که بررسی میانگین میزان بارش در طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ میانگین بارش و بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که خروجی‌های به دست آمده بیانگر این موضوع هست که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ نواحی شمال و شمال غرب دشت دارای میانگین بارندگی به نسبت مناسبی بوده است که این میزان بارش سبب برآورد میزان میانگین شاخص SPI-۱۲ در همین نواحی با میانگین بالاتر از یک شده است؛ که شامل نواحی بدون خشک‌سالی می‌شود اما در دهه

1 Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station Data

فخار و کاویانی (۲۰۲۴)، به بررسی و پایش خشک‌سالی در دشت قزوین با استفاده از فن‌های سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای پرداخته‌اند و از چندین شاخص مانند TCI<sup>۲</sup>، VCI<sup>۳</sup> و VHI<sup>۴</sup> برای ارزیابی وضعیت خشک‌سالی استفاده کرده‌اند. آن‌ها نتایج به‌دست‌آمده را با شاخص SPI<sup>۵</sup> مقایسه کرده و نشان داده‌اند که در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰، نواحی شمال و شمال غرب دشت قزوین بارندگی مناسبی داشته‌اند، اما در دهه دوم (۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰) شاهد کاهش چشم‌گیری در میزان بارش و افزایش شدت خشک‌سالی بوده‌اند. آن‌ها شدت خشک‌سالی را به ۶ کلاس طبقه‌بندی کرده و مساحت هر کلاس در هر سال را تعیین کرده‌اند. آن‌ها همچنین بررسی همبستگی بین این شاخص‌ها را انجام داده و نتیجه‌گیری کرده‌اند که شاخص PDSI بالاترین همبستگی را با SPI دارد. از سال ۲۰۱۴ به بعد، نواحی شرق و جنوب شرقی دشت قزوین با افزایش روند خشک‌سالی مواجه شده و در سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ شدت خشک‌سالی افزایش یافته است. آن‌ها تأکید کرده‌اند که درصدی از خشک‌سالی‌ها ناشی از کاهش بارندگی و افزایش دما در منطقه است. بنابراین این کاهش‌های بارندگی به‌طور غیرمستقیم فشار بیش‌تری به سیستم آب زیرزمینی وارد کرده و باعث افت تراز می‌گردد، همچنین در نواحی نزدیک به مناطق شهری، با توجه به این‌که بیش‌تر برداشت‌ها از آب زیرزمینی ناشی از آب لازمه برای کشاورزی است، لذا افت تراز در مناطق شهری با توجه به افزایش روزافزون جمعیت در شهرها نیز ملاحظه می‌شود ولی به‌شدت مناطق زراعی نیست، همچنین که بخش زیادی از این افت به علت وجود مناطق باغی در اطراف مناطق شهری، به‌خصوص خود شهر قزوین از دیگر دلایل احتمالی افت تراز آب در مناطق شهری هست. علاوه بر این‌ها طبق نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش که هم‌راستا با بررسی‌های رضایی و همکاران (۲۰۲۰)، هست، اراضی زراعی، شهری، شوره‌زارها افزایش داشته و روند تغییر اراضی مراتع کاهشی بوده است.

### بررسی تغییرات هدایت الکتریکی آب زیرزمینی

هدایت الکتریکی (EC) آب زیرزمینی یک ویژگی حیاتی است که به ما کمک می‌کند تا کیفیت آب و ترکیبات شیمیایی موجود در آن را ارزیابی کنیم. رفتار هیدرولوژیکی منابع آب زیرزمینی به نحوه پاسخ سیستم به عوامل طبیعی و انسانی شامل تغذیه، برداشت، تبخیر و تغییر اقلیم اطلاق می‌شود. این رفتار به‌طور مستقیم بر غلظت املاح تأثیر دارد؛ به‌ویژه در مناطق خشک، کاهش تغذیه و افزایش برداشت

دوم سال‌های بررسی‌شده نشان می‌دهد که از میزان بارندگی در دشت به‌شدت کاسته شده و حتی نواحی که در دهه ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ دارای مقدار بارندگی مناسبی بودند در دهه ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ با کاهش چشم‌گیر بارندگی روبرو شده‌اند که همین کاهش بارندگی در تعیین میزان شاخص SPI<sup>۱</sup> نقش مؤثری داشته است، بنابراین یک خشک‌سالی از سال ۲۰۱۱ یا همان ۱۳۸۹-۱۳۹۰ شروع شده است. در بازه ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ (شروع خشک‌سالی)، در این دوره، تراز آب از ۱۲۰۱ متر به حدود ۱۱۹۳ متر کاهش یافته است، یعنی طی ۵ سال حدود ۸ متر افت در تراز آب مشاهده می‌شود. که این مقدار، کم‌ترین مقدار تراز آب زیرزمینی در ۲۰ سال گذشته آن زمان بوده است و نشان از تأثیرات شروع خشک‌سالی ذکرشده در بازه قبلی دارد. در بازه ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰، تراز آب به حدود ۱۱۹۰ متر کاهش یافته است که نسبت به دوره‌های قبل، کاهش کم‌تری را نشان می‌دهد. این کاهش ملایم‌تر شاید نشانه‌ای از تلاش‌های محافظتی، کاهش برداشت‌ها یا اعمال سیاست‌های مدیریت منابع آب باشد. با این حال، ادامه کاهش تراز همچنان بیانگر فشار بر منابع آب زیرزمینی است.

در بازه ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲، در این بازه، تراز آب از ۱۱۹۳ متر به حدود ۱۱۹۰ متر کاهش یافته است، یعنی ۳ متر افت در طی دو سال. برای بررسی بهتر و جامع‌تر دلایل افت تراز آب زیرزمینی شکل‌های (۳-الف)، (۳-ب) و (۳-ج) باید به نقشه کاربری اراضی سال ۱۴۰۲ استان قزوین برای یافتن برخی دلایل احتمالی نیازمندیم.

با توجه به شکل (۴-د) و شکل (۵) می‌توان دریافت که مناطقی که بیش‌ترین کاهش تراز آب زیرزمینی را داشته‌اند مناطق مرکزی اَبخوان دشت قزوین و تا حدودی شمال دشت که نزدیک‌ترین نقطه به مناطق شهری از جمله خود شهر قزوین هست رخ داده است. همچنین در مناطق مرکزی به سمت شرقی دشت وجود زمین‌های لم‌بزرع و بدون پوشش گیاهی این مهم را ثابت می‌کند که یا خاک این مناطق برای کشت و کار مناسب نیست، ولی درست در نزدیک همین مناطق، زمین‌های زراعی به چشم می‌خورند که همگی از آب زیرزمینی برای آبیاری استفاده می‌کنند، بر اساس گزارش مدیرعامل شرکت آب منطقه‌ای قزوین، دکتر منصور ستوده (۱۴۰۰)، در برخی زیر حوضه‌ها، سهم منابع آب زیرزمینی از کل مصرف آبی به حدود ۸۰٪ برای مصارف کشاورزی می‌رسد، اگرچه میانگین کل دشت حدود ۴۵٪ است. توسعه بی‌رویه زمین‌های کشاورزی و تبدیل زمین‌ها به زمین کشاورزی در اثر افزایش جمعیت و در پی آن افزایش نیاز از دیگر دلایل افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی این منطقه و در پی آن افت تراز آب زیرزمینی هست. از عوامل تشدیدکننده دیگر این افزایش افت خشک‌سالی‌های سال‌های اخیر هست، همان‌طور که

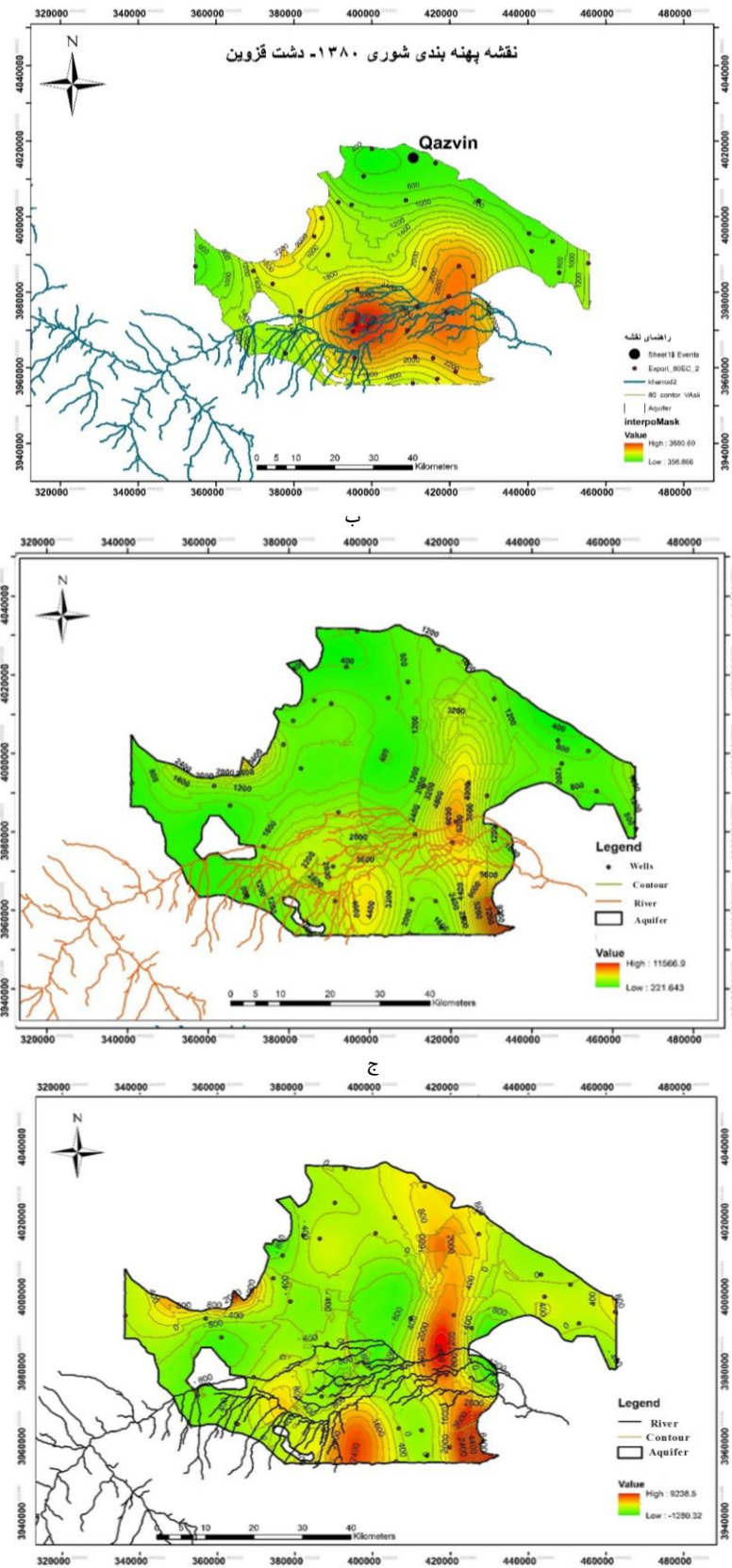
۲- شاخص ترکیبی بارش

۳- شاخص پوشش گیاهی

۴- شاخص سلامت گیاهی

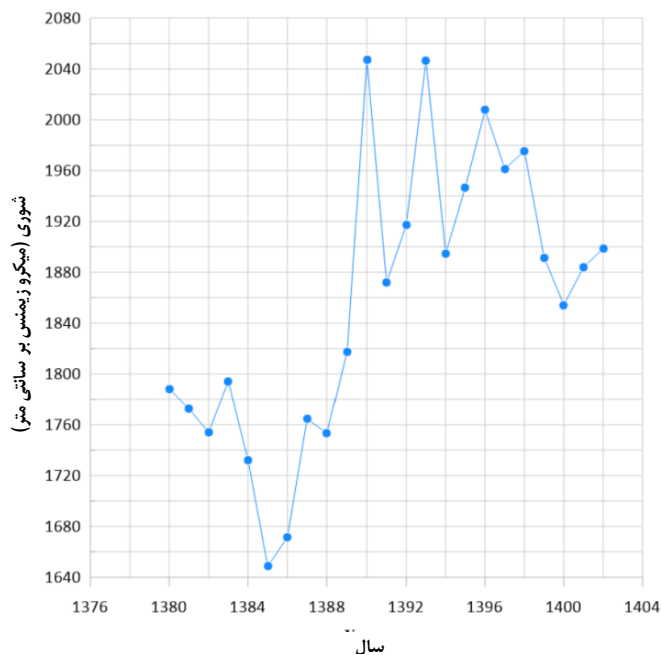
۵- شاخص بارش استاندارد





د

شکل ۶-ب) نقشه پهنه‌بندی هدایت الکتریکی (شوری) آب زیرزمینی در دوره ۱۳۸۰ (ج) دوره ۱۴۰۲ (د) کل دوره ۱۳۸۰-۱۴۰۲



شکل ۷-الف- روند تغییرات هدایت الکتریکی در ۱۳۸۰-۱۴۰۲- دشت قزوین

### تحلیل روند تغییرات

تحلیل دقیق‌تر تغییرات شوری و تراز آب زیرزمینی در دشت قزوین، با توجه به نکات پیچیده‌ای که در مسائل آب زیرزمینی وجود دارد، به درک عمیق‌تر از تأثیرات کشاورزی و رفتار زهاب‌های کشاورزی بر کیفیت آب کمک می‌کند. برای تحلیل این پدیده، ابتدا به توضیح چند مکانیسم مهم در ارتباط بین کاهش و افزایش تراز آب زیرزمینی و تغییرات شوری پرداخته و سپس تحلیل بازه به بازه را ارائه می‌کنیم. بررسی روند تغییرات شوری هم‌زمان با نوسانات تراز آب زیرزمینی در دشت قزوین، به‌ویژه در سال‌هایی که بارندگی افزایش‌یافته اما شوری نیز رشد کرده است، نشان‌دهنده وجود فرآیندهای پیچیده و چندعاملی در سیستم آبخوان است. در چنین مواردی، می‌توان دست‌کم دو تبیین علمی محتمل برای این پدیده در نظر گرفت. نخست، آنچه در این مقاله مطرح شده و در ادبیات علمی نیز به خوبی شناخته شده است، مکانیزم تماس اولیه سطح ایستابی با لایه‌های نمکین ناحیه غیراشباع است. در این حالت، پس از یک دوره خشک‌سالی بلندمدت، نمک‌ها در لایه‌های بالایی خاک تجمع می‌یابند (به‌واسطه تبخیر زیاد، صعود مویرگی و کاهش تغذیه). اگر در یک دوره ترسالی، سطح ایستابی برای نخستین بار طی سال‌های اخیر به اندازه‌ای افزایش یابد که با این لایه‌ها تماس مستقیم پیدا کند، این تماس می‌تواند منجر به حل شدن ناگهانی نمک‌ها و افزایش موقتی شوری شود. این فرآیند با عنوان Mobilization of Salts from the Unsaturated zone در مطالعات بین‌المللی از جمله در تگراس و ایران گزارش شده است. (Scanlon et al., 2002; Jalali, 2007)

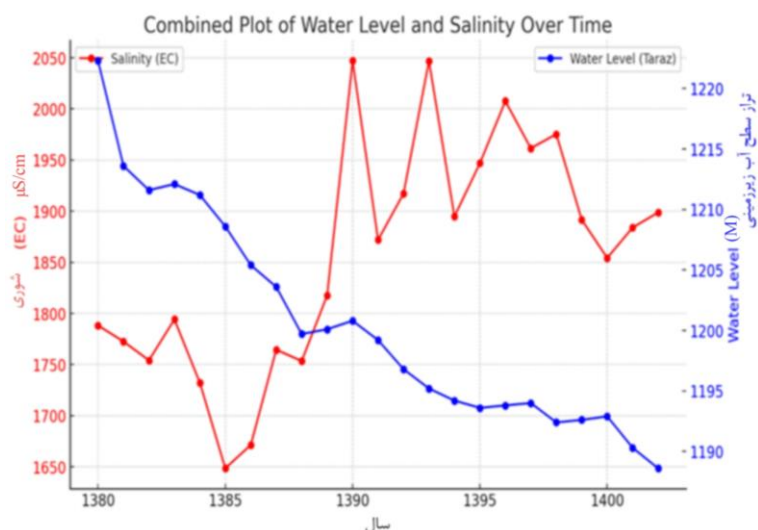
دوم، آنکه، ممکن است افزایش شوری نه به‌واسطه تماس مستقیم سطح ایستابی با لایه‌های نمکی، بلکه در نتیجه شست‌وشوی این نمک‌ها در مسیر ورود آب از ناحیه غیراشباع به ناحیه اشباع رخ داده باشد. به بیان دیگر، آب نفوذی در مسیر خود از بالا به پایین، املاح تجمع یافته در خاک خشک را حل کرده و با خود به منطقه اشباع منتقل کرده باشد. این تبیین نیز در ادبیات هیدروژئوشیمی مناطق خشک پذیرفته شده و بر پایه اصول فرآیند انتقال جرم در سیستم‌های نفوذی قابل دفاع است (Scanlon et al., 2006; Custodio, 2010). با توجه به اینکه فرآیندهای مذکور در ناحیه زیرسطحی رخ می‌دهند و در این مطالعه امکان انجام آنالیزهای ژئوشیمیایی، ردیابی ایزوتوپی یا نمونه‌برداری عمقی از خاک و آبخوان فراهم نبوده است، تشخیص قطعی منشأ افزایش شوری بدون آزمایش‌ها میدانی ممکن نیست. با این حال، هر دو مکانیزم فوق، از نظر علمی معتبر بوده و می‌توانند به احتمال زیاد بسته به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه، به‌طور مستقل یا توأمان در افزایش شوری ایفای نقش کرده باشند. همچنین شوری آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی تحت تأثیر سه سازوکار عمده قرار می‌گیرد. نخست، نوسانات تراز آب زیرزمینی می‌تواند بر تماس آب بانمک‌های انباشته‌شده در ناحیه غیراشباع اثر بگذارد؛ به طوری که در زمان کاهش تراز، تماس با این نمک‌ها کاهش یافته و شوری ممکن است افت کند، اما با افزایش سطح ایستابی، این نمک‌ها به آبخوان وارد شده و منجر به افزایش موقتی شوری می‌شوند (Scanlon et al., 2002; Scanlon et al., 2018). دوم، در پدیده‌ای موسوم به شور کشی، کاهش تراز موجب تبخیر بیشتر و

تراز سطح ایستابی در نتیجه برداشت زیاد، تماس با لایه‌های نمک‌دار خاک تشدید شده و ظرفیت رقیق‌سازی کاهش می‌یابد. لذا در این مطالعه، فرض بر این است که افزایش شوری در سال ۱۳۹۰ می‌تواند نتیجه ترکیبی از عوامل زیر باشد: (۱) کاهش رقیق‌سازی آب در اثر برداشت، و (۲) تماس موضعی با لایه‌های شور حاصل از تجمع زهاب، بدون آن که لزوماً تمام ترکیبات زهاب به عمق آبخوان رسیده باشند. این تحلیل مبتنی بر هم‌زمانی پدیده‌هاست و نیازمند مدل‌سازی عددی دقیق‌تر در مطالعات آتی است (Custodio, 2010; Scanlon et al., 2002; Konikow & Kendy, 2005). افزون بر این، افت تراز سطح ایستابی ناشی از برداشت بی‌رویه می‌تواند موجب جابجایی آب‌شور از نواحی جانبی یا از لایه‌های پایین‌تر به سمت ناحیه اشباع فعال آبخوان شود. این مکانیسم که به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک رایج است، در مطالعات بین‌المللی به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در تشدید پدیده شوری شناسایی شده است (Scanlon et al., 2006; Alfarrach & Walraevens, 2018). مدل‌سازی‌های عددی، مانند مطالعه موردی در دلتای رودخانه میکونگ، مشخص شده که برداشت بی‌رویه باعث نفوذ جبهه آب‌شور تا چندین کیلومتر به درون آبخوان و افزایش محسوس غلظت کلرید شده است (Minderhoud et al., 2018; Yeh et al., 2009). بنابراین، برداشت بیش‌ازحد نه‌تنها می‌تواند ظرفیت رقیق‌سازی را کاهش دهد، بلکه به‌عنوان یک عامل هیدرودینامیکی فعال، موجب فعال شدن لایه‌های شور عمیق یا پیرامونی می‌گردد که در شرایط تراز نرمال در تماس مستقیم با جریان آب زیرزمینی قرار ندارند؛ اما افت تراز ناشی از برداشت بی‌رویه می‌تواند موجب گسترش ناحیه اشباع به اعماق یا پهنه‌هایی شود که حاوی سنگ‌های تخییری، مارن‌های نمک‌دار یا نواحی با شوری بالا هستند. در این شرایط، تماس تازه یا گسترده‌تری میان آب و این لایه‌ها برقرار شده، و ورود املاح به جریان آبخوان را تسهیل می‌کند (Custodio, 2010; Jalali, 2007). بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که برداشت بی‌رویه به‌طور علمی و تجربی یکی از عوامل مهم در افزایش شوری به شمار می‌رود. همان‌طور که در تحلیل نمودار تغییرات تراز آب هم اشاره شد که روند نزولی تراز آب با روندی متوسط رخ داده است. اما در بازه سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۰ بارندگی افزایش‌یافته و نمک‌های ذخیره‌شده در لایه‌های خاک را شسته و به آب زیرزمینی انتقال داده است و علت این پیک افزایش شوری در سال ۱۳۹۰ نیز به‌احتمال زیاد همین هست، علاوه بر آن که زراعت بی‌رویه نیز مزید بر علت هست. کاهش بارش در زمان خشک‌سالی به معنای ورودی کم‌تر آب شیرین به آبخوان‌های آب زیرزمینی است و این کاهش ورودی آب باعث می‌شود که شوری طبیعی آب‌ها، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک، بیش‌تر نمایان شود. همچنین، با کاهش بارش، مقدار آب کم‌تری برای رقیق‌سازی نمک‌ها در آب‌های زیرزمینی وجود دارد که

انباشت نمک‌ها در لایه‌های سطحی خاک می‌شود؛ در چنین شرایطی، ظرفیت رقیق‌سازی آب کاهش‌یافته و غلظت نمک در محلول خاک افزایش می‌یابد. باین‌حال، اگر کاهش تراز ناشی از برداشت شدید آب زیرزمینی باشد، بخشی از نمک همراه با آب برداشت‌شده از آبخوان خارج می‌شود و افزایش شوری لزوماً رخ نمی‌دهد. این وضعیت بیش‌تر در آبخوان‌های نیمه محصور و مناطق خشک مشاهده می‌شود که به دلیل تبخیر سطحی زیاد، نمک‌ها در ناحیه غیراشباع تجمع یافته و با افزایش مجدد تراز، به آبخوان بازمی‌گردند، بنابراین افزایش موقتی و غیرخطی شوری به وجود می‌آید (Jalali, 2007; Rengasamy, 2006; Scanlon et al., 2002). همچنین اثر شور کشی عمدتاً در آبخوان‌های کم‌عمق با سطح ایستابی نزدیک به سطح زمین رخ می‌دهد و در آبخوان‌های عمیق‌تر (بیش از ۱۰۰ متر) این اثر ضعیف‌تر یا با تأخیر زمانی ظاهر می‌شود، هرچند در شرایط خاص امکان وقوع آن وجود دارد (Jalali, 2007; Scanlon et al., 2002). سوم، نفوذ زهاب‌های کشاورزی که حاوی نمک و کودهای شیمیایی هستند، از طریق آبیاری و زه آب‌های سطحی به لایه‌های زیرسطحی و در نهایت به آبخوان وارد می‌شوند و باعث افزایش تدریجی یا مزمن شوری آب زیرزمینی می‌گردند (Scanlon et al., 2007; Suarez, 2001). شناخت هم‌زمان این سه فرآیند برای تحلیل پویای کیفیت آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی ضروری است. دوره ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۴: در این بازه، تراز آب زیرزمینی روندی کاهشی دارد و شوری نیز به تدریج کاهش می‌یابد. این وضعیت می‌تواند به کاهش تماس آب زیرزمینی با لایه‌های نمک‌دار و زهاب‌های کشاورزی اشاره داشته باشد. این دوره می‌تواند نشان‌دهنده کم شدن منابع آب و کاهش تماس با منابع نمکی انباشته در خاک باشد. دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹: در این بازه زمانی، تراز آب زیرزمینی همچنان روند کاهشی دارد و شوری در ابتدا کاهش یافته و سپس به تدریج افزایش می‌یابد. این افزایش مجدد شوری می‌تواند ناشی از افزایش برداشت‌ها و کاهش بیش‌تر تراز باشد که منجر به شور کشی و افزایش غلظت نمک‌ها در آب زیرزمینی می‌شود. همچنین، فعالیت‌های کشاورزی در این دوره می‌تواند باعث افزایش شوری شوند. پیک شوری در سال ۱۳۹۰: در سال ۱۳۹۰، یک جهش قابل توجه در هدایت الکتریکی (EC) مشاهده می‌شود و مقدار آن به حدود  $2047 \mu\text{S}/\text{cm}$  می‌رسد که بالاترین مقدار در بازه مورد مطالعه است. این پیک شوری می‌تواند با شروع دوره خشک‌سالی شدید در سال قبل (۱۳۸۹) مرتبط باشد. در سال‌های منتهی به این خشک‌سالی، برداشت‌های مداوم و بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، همراه با تجمع املاح ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و ورود زهاب‌های حاوی کود و سموم در خاک‌های سطحی، موجب انباشت تدریجی نمک در ناحیه غیراشباع خاک شده است. اگرچه نفوذ این ترکیبات به منطقه اشباع در بازه‌های کوتاه‌مدت (کمتر از یک سال) به دلیل هدایت هیدرولیکی قائم پایین آبخوان، بسیار کند است، اما با کاهش

پایین‌ترین مقدار خود می‌رسد و شوری به‌طور نسبی افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با کاهش تراز و کاهش میزان آب موجود، غلظت نمک‌ها افزایش یافته و شوری بالاتر می‌رود. در این دوره، تأثیرات کشاورزی و زهاب‌های آن می‌تواند به‌صورت تدریجی باعث افزایش شوری شده باشد. مطالعه اثرات افت سطح ایستابی بر میزان شوری آب زیرزمینی در دشت قزوین نشان می‌دهد که کاهش تراز آب زیرزمینی معمولاً با افزایش شوری همراه است، اما این الگو در تمام مناطق صدق نمی‌کند و در برخی شرایط، روند معکوس نیز مشاهده شده است. افت سطح آب با کاهش تغذیه آب شیرین به آبخوان‌ها، شرایطی را برای تجمع نمک‌ها در خاک فراهم می‌کند؛ به‌ویژه در مناطقی با فعالیت کشاورزی گسترده و برداشت شدید از منابع آب زیرزمینی. همچنین، نقشه کاربری اراضی نشان می‌دهد که مجاورت با مناطق شهری فاقد پوشش سبز یا فضای باغی، باکیفیت نامناسب آب‌های زیرزمینی مرتبط است. در این مناطق، ورود فاضلاب‌های خانگی، شهری و صنعتی به آبخوان‌ها موجب افزایش شوری و کاهش کیفیت منابع آب شده است. این وضعیت می‌تواند پیامدهای منفی برای کشاورزی، منابع طبیعی و سلامت زیست‌محیطی منطقه داشته باشد. در نمودار شکل ۸، تغییرات هم‌زمان تراز و شوری آب زیرزمینی در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ به تصویر کشیده شده است. این نمودار نشان‌دهنده‌ی روند غالب افزایش شوری هم‌زمان با افت سطح ایستابی است، به‌ویژه در مناطقی با فعالیت‌های صنعتی و شهری که تخلیه پساب و مصرف بالا، فشار مضاعفی بر منابع آب وارد می‌کند.

این موضوع سبب افزایش غلظت نمک‌ها و در نتیجه شوری آب می‌شود. در دوره‌های خشک‌سالی، کشاورزان و کاربران دیگر به دلیل کمبود آب سطحی، بیش‌تر به استخراج آب از منابع زیرزمینی متکی می‌شوند که این امر می‌تواند منجر به کاهش سطح آب زیرزمینی و افزایش غلظت نمک‌ها گردد. در زمان‌های کم‌آبی، به دلیل تبخیر بالای آب از سطح خاک، نمک‌ها به سطح آمده و در نهایت آب زیرزمینی را شورتر می‌کنند. این عوامل به‌طور جمعی سبب می‌شوند که خشک‌سالی نه‌تنها بر کمیت آب تأثیر بگذارد، بلکه کیفیت آن را نیز به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. در بررسی روند تغییرات شوری آب از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲، در دوره اول نوسانات جزئی دیده می‌شود. سپس در سال ۱۳۹۰ یک پیک قابل توجه مشاهده می‌شود. دوره ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳: این دوره با یک جهش در شوری (سال ۱۳۹۰) و افزایش تراز آب زیرزمینی همراه است. افزایش تراز ممکن است باعث تماس بیشتر آب با لایه‌های نمک‌دار شده باشد و شوری را به اوج خود برساند. پس‌از این افزایش، تراز آب کاهش یافته و شوری نیز کاهش می‌یابد. این الگوی نوسانی نشان می‌دهد که وقتی تراز افزایش یافته و به منابع نمکی تماس پیدا می‌کند، شوری افزایش می‌یابد و با کاهش تراز، تماس کمتر و شوری کاهش می‌یابد. دوره ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹: در این بازه، تراز آب زیرزمینی کاهش می‌یابد و شوری با نوساناتی همراه است. شوری در سال ۱۳۹۶ به بالاترین مقدار خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. این وضعیت می‌تواند ناشی از افزایش برداشت‌ها و کاهش منابع آب باشد که منجر به غلیظ‌تر شدن آب و افزایش شوری شده است. همچنین، دوره‌هایی از شور کشی می‌تواند این الگو را توضیح دهد. دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۲: تراز آب زیرزمینی در این دوره به

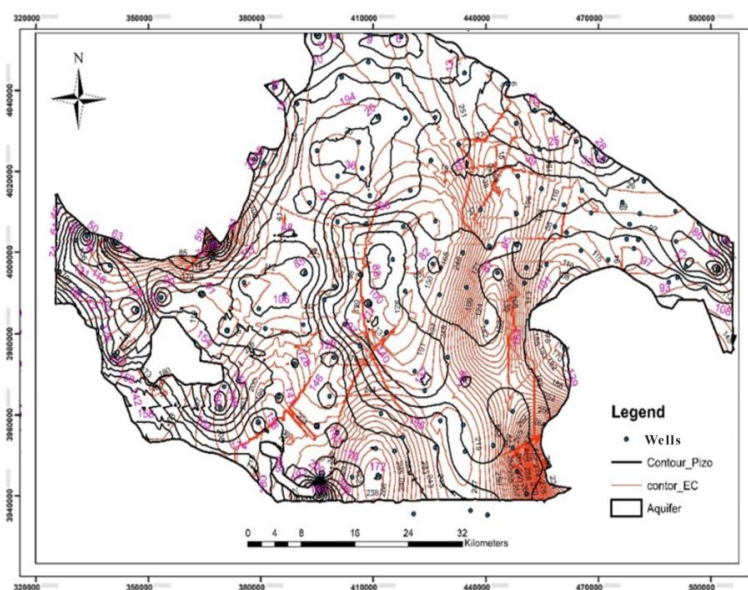


شکل ۸ - ارزیابی توأمان نمودارهای شوری و تراز سطح آب زیرزمینی<sup>۱</sup> - دشت قزوین (۱۳۸۰-۱۴۰۲)

۱ شوی آب زیرزمینی برحسب میکرو زیمنس بر سانتی‌متر و تراز سطح آب زیرزمینی برحسب متر

منطقه، به‌ویژه حضور سازندهای حاوی نمک، در واکنش به کاهش آب زیرزمینی، شوری را افزایش می‌دهد. داده‌های دوره ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ نشان‌دهنده رشد شوری از ۳/۱۷۸۸ به ۷/۱۸۹۸ دسی زیمنس بر متر هستند؛ این افزایش حدود ۶ درصدی، باوجود آن‌که شدید به نظر نمی‌رسد، اما از حیث کشاورزی نگران‌کننده است و می‌تواند بر نوع محصولات قابل کشت اثر بگذارد. چنین وضعیتی، مشابه آنچه در مطالعات بین‌المللی از جمله تحقیق دانگ و همکاران، گزارش شده، تأکیدی است بر آسیب‌پذیری منابع در برابر بهره‌برداری بی‌رویه و تغییر کاربری اراضی. برای درک دقیق‌تر این رابطه، در شکل ۹ نقشه‌های تغییرات تراز سطح ایستابی و شوری آب زیرزمینی برهم‌نهی شده‌اند تا با تحلیل هم‌زمان آن‌ها و بررسی نوع کاربری زمین، پیوندهای فضایی این متغیرها به‌طور روشن‌تری تبیین شوند. یافته‌ها لزوم تدوین و اجرای سیاست‌های پایدار مدیریت منابع آب را نشان می‌دهند؛ سیاست‌هایی که شامل بهینه‌سازی برداشت، کنترل پساب‌ها، حفظ پوشش گیاهی و مشارکت ذی‌نفعان در سطوح محلی و ملی باشند (Dang et al., 2019).

تحلیل روند افت تراز آب زیرزمینی در دشت قزوین و داده‌های هدایت الکتریکی (EC) که از شرکت آب منطقه‌ای قزوین که متولی رسمی پایش و ثبت اطلاعات مربوط به منابع آب زیرزمینی در منطقه اخذ شده، تمامی داده‌ها مطابق دستورالعمل‌های فنی وزارت نیرو گردآوری و ثبت شده‌اند که به‌صورت سالانه با دستگاه‌های کالیبره در محل چاه‌های مشاهده‌ای اندازه‌گیری و ثبت شده‌اند. این داده‌ها که در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ گردآوری شده‌اند، حاکی از آن‌اند که این پدیده، با اندکی تأخیر زمانی، به افزایش شوری منجر می‌شود؛ عمدتاً به دلیل برداشت‌های بیش از ظرفیت و ناتوانی آبخوان در بازایی خود. کاهش سطح ایستابی، فشار هیدرواستاتیک در آبخوان‌های زیرزمینی را کاهش داده و مسیر حرکت آب‌های شور از لایه‌های عمیق یا مناطق هم‌جوار به سمت آب‌های شیرین را هموار می‌سازد. افزون بر این، در شرایط اقلیمی خشک و با نرخ تبخیر بالا، افت سطح آب، همراه با تمرکز املاح در خاک، موجب افزایش غلظت نمک در آب زیرزمینی می‌شود. برداشت‌های مضاعف در کشاورزی و صنعت برای جبران کمبود آب نیز این وضعیت را تشدید می‌کند. زمین‌شناسی



شکل ۹- خطوط هم‌تراز تغییرات شوری آب و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲- دشت قزوین

مرکزی و غربی، افت تراز آب به حدود ۱۰۶-۱۰۸ متر همراه با افزایش شوری قابل توجه است که به دلیل برداشت بی‌رویه آب و تغلیظ نمک‌ها رخ می‌دهد. داده‌های کاربری اراضی نیز تراکم بالای کشاورزی و برداشت شدید منابع زیرزمینی را تأیید می‌کند. در مقابل، نواحی شمالی و شمال شرقی با تراز بالاتر (۲۵-۶۳ متر) و شوری پایین‌تر (>۵۰ میکرو زیمنس/سانتی‌متر) تحت تأثیر منابع آب شیرین

تحلیل نقشه ترکیبی تراز و شوری آب زیرزمینی دشت قزوین نشان‌دهنده ارتباط پیچیده و منطقه‌ای بین تغییرات سطح ایستابی و غلظت املاح محلول است. در نواحی جنوبی و جنوب شرقی، باوجود تراز آب نسبتاً بالا (۱۴۰-۲۰۰ متر)، شوری بالایی نسبت به سایر بخش‌های آبخوان ثبت شده که ناشی از تماس با خاک‌های شور، ورود آب‌های شور یا شست‌وشوی نمک‌های سطحی هست. در مناطق

آب زیرزمینی با افزایش شوری همراه بوده و عوامل ژئوهیدرولوژیک، کاربری اراضی و شرایط اقلیمی نقش مهمی در کیفیت آب دارند. این موضوع ضرورت مدیریت یکپارچه منابع و پایش مستمر را برجسته می‌کند.

ناشی از بارش‌های کوهستانی و رودخانه‌ها قرار دارند. هم‌پوشانی خطوط کنتور شوری و تراز آب، به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوب شرقی، نشان‌دهنده نفوذ آب‌های شور به لایه‌های کم‌عمق تر و کاهش فشار هیدرواستاتیک است. نتایج کلی بیانگر این است که افت سطح

### جدول ۱- ارزیابی وضعیت ابعاد کلیدی حکمرانی آب زیرزمینی دشت قزوین (ارزش‌دهی بر مبنای تحلیل کیفی پژوهشگران)

بُعد حکمرانی	نمره (از ۵)	زیرمجموعه‌ها
عوامل اجتماعی و فرهنگی	۴	فشار شدید مهاجرت و تغییرات جمعیتی
تعارضات کاربری زمین	۳	توسعه کشاورزی بدون مجوز پایدار
ظرفیت نهادی	۲	ضعف هماهنگی بین نهادها
مدیریت فناوری و داده	۴	استفاده از GIS و داده‌های بلندمدت
مشارکت ذی‌نفعان	۲	مشارکت محدود جامعه در تصمیم‌سازی

- مشارکت ذی‌نفعان: میزان دخالت و حضور جامعه محلی، کشاورزان، مهاجران و سایر بازیگران در فرآیندهای حکمرانی.

### تحلیل حکمرانی منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین با رویکرد تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیکی

#### ضرورت تحلیل حکمرانی در شرایط بحرانی منابع آب

در سال‌های اخیر، دشت قزوین با دو بحران جدی مواجه شده است: کاهش سطح منابع آب زیرزمینی و افزایش شوری. این شرایط نه تنها بخش کشاورزی و اقتصاد منطقه را به خطر انداخته، بلکه ضعف‌های بنیادین در ساختار حکمرانی منابع آب را آشکار کرده است. عواملی مانند تغییرات اقلیم، افزایش جمعیت ناشی از مهاجرت، و توسعه نامتوازن اراضی، فشار مضاعفی بر منابع آبی وارد کرده‌اند. بنابراین، مدیریت صرفاً فنی منابع آب، دیگر پاسخگوی این چالش‌ها نیست؛ بلکه لازم است با دیدگاهی جامع و چندوجهی به حکمرانی آب نگاه کرد تا بتوان هم کیفیت و هم کمیت منابع آبی را در مسیر پایداری اجتماعی و اکولوژیکی حفظ کرد.

#### ارزیابی تطبیقی ابعاد حکمرانی در دشت قزوین

بر اساس نظرسنجی از ۱۰ متخصص، هر یک از ابعاد پنج‌گانه حکمرانی منابع آب زیرزمینی دشت قزوین، نمره‌ای از ۵ دریافت کرده‌اند. این ارزیابی تطبیقی (جدول ۲) با معیارهایی مانند تأثیرگذاری، اجرا پذیری و هماهنگی نهادی انجام شده و مبنای تحلیل تصویری شکل ۱۰ قرار گرفته است.

#### تحلیل بُعد اجتماعی و مهاجرت محور در حکمرانی آب

مهاجرت گسترده به دشت قزوین در پنج سال اخیر، شامل ورود بیش از ۹۶ هزار نفر، از جمله ۱۸ هزار مهاجر افغان، فشار زیادی بر منابع آب وارد کرده است. افزایش جمعیت نه تنها تقاضای آب برای مصرف خانگی و شهری را افزایش داده، بلکه به توسعه گسترده اراضی کشاورزی برای تأمین نیازهای غذایی منجر شده که این امر به نوبه خود منجر به افزایش برداشت از آبخوان‌های آب زیرزمینی و افت سطح آب شده است. علاوه بر این، باورهای فرهنگی برخی گروه‌های مهاجر، به‌ویژه در زمینه فرزند آوری، می‌تواند در بلندمدت اثرگذاری مضاعفی بر منابع آب داشته باشد. سیاست‌های فعلی در زمینه مدیریت مهاجرت و ادغام جمعیت با ظرفیت اکولوژیکی منطقه هماهنگ نیست و نیازمند بازنگری و تدوین راهکارهای مبتنی بر حکمرانی تاب‌آوری است (بر اساس گزارش شهردار اقبالیه قزوین، خبرگزاری مهر، ۱۳۹۶).

#### شناخت ابعاد حکمرانی مؤثر بر بحران آب در دشت قزوین

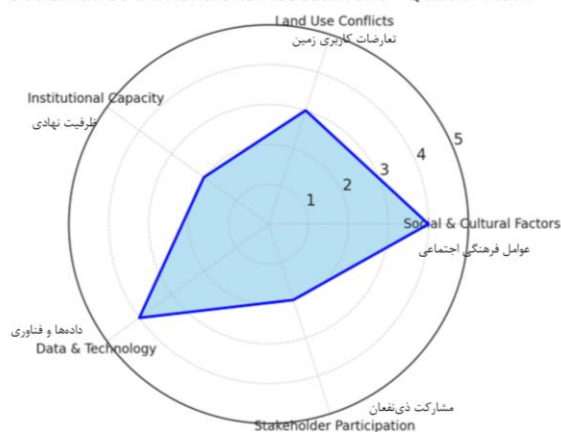
حکمرانی مؤثر منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین نیازمند بررسی پنج بُعد کلیدی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر وضعیت منابع آب تأثیرگذارند:

- ابعاد اجتماعی و فرهنگی: تأثیر مهاجرت گسترده، ساختارهای جمعیتی، و باورهای فرهنگی در مصرف آب و کشاورزی.
- تعارضات کاربری زمین: تغییرات غیرمستقیم در الگوهای استفاده از زمین و اثر آن بر کیفیت و کمیت آب زیرزمینی.
- ظرفیت نهادی و سیاست‌گذاری: میزان انسجام و هماهنگی بین نهادهای مسئول و سیاست‌های مرتبط با مدیریت منابع آب.
- مدیریت دانش و فناوری: توانایی استفاده از داده‌ها و فناوری‌های نوین برای پایش و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد.

جدول ۲- زیرمعیارهای ابعاد حکمرانی

بعد کلیدی حکمرانی	زیرمعیارها (شاخص‌های فرعی)
عوامل اجتماعی و فرهنگی	۱- میزان مهاجرت داخلی و خارجی ۲- باورهای فرهنگی درباره آب و مصرف آن ۳- نرخ رشد جمعیت و فرزند آوری ۴- سطح آگاهی عمومی از بحران آب ۵- وابستگی معیشتی به کشاورزی
تعارضات کاربری زمین	۱- میزان تغییرات غیرمجاز در کاربری اراضی ۲- نسبت زمین‌های زراعی به منابع آب در دسترس ۳- شدت استفاده از کود و سموم ۴- وجود یا نبود طرح پهنه‌بندی کشاورزی ۵- تعارض بین حفاظت و تولید
ظرفیت نهادی و سیاست‌گذاری	۱- هماهنگی بین نهادها (وزارت نیرو، جهاد کشاورزی و ...) ۲- شفافیت قوانین مربوط به برداشت و مصرف آب - قدرت اجرایی و ضمانت اجرایی سیاست‌ها ۳- وجود سازوکارهای تنظیم تعارض ۴- پیوست آبی در برنامه‌ریزی منطقه‌ای
مدیریت دانش و فناوری	۱- دسترسی به داده‌های تاریخی آب ۲- استفاده از فناوری‌های پایش مانند GIS، حس‌گرهای شوری و سطح آب ۳- نظام تصمیم‌گیری مبتنی بر داده ۴- آموزش فنی بهره‌برداران ۵- توسعه سامانه‌های هشدار و پیش‌بینی
مشارکت ذی‌نفعان	۱- میزان مشارکت کشاورزان در تصمیم‌گیری‌ها ۲- شفافیت اطلاعات برای مردم ۳- وجود تشکلهای محلی و شوراهای آب ۴- درک محلی از منافع مشترک ۵- عدالت اجتماعی در توزیع منابع آب

Governance Dimensions Assessment - Qazvin Plain



شکل ۱۰- نمودار ارزیابی ابعاد کلیدی حکمرانی آب زیرزمینی در دشت قزوین

سازمان حفاظت محیط‌زیست، موجب ایجاد خلأهای مدیریتی و سیاست‌گذاری در زمینه آب زیرزمینی شده است (مقدم، ۱۴۰۳). نبود یک ساختار حکمرانی منسجم و مکانیزم‌های اجرایی قوی، باعث شده تا بحران آب به صورت فراگیر در دشت قزوین توسعه یابد. حکمرانی تطبیقی و یکپارچه با تشکیل شورای منطقه‌ای مدیریت منابع آب می‌تواند گامی مؤثر در جهت رفع این مشکلات باشد. همچنین، تدوین سیاست‌های هماهنگ و ایجاد سازوکارهای پاسخگو و شفاف در سطوح مختلف تصمیم‌گیری ضروری است.

#### بررسی وضعیت داده، فناوری و ابزارهای پایش

استفاده از فناوری‌های نوین مانند GIS و کوکریجینگ<sup>۱</sup> در این مطالعه نمونه‌ای از ظرفیت‌های موجود برای مدیریت داده محور منابع

#### تعارضات کاربری زمین و حکمرانی ناکارآمد در استفاده از اراضی

گسترش اراضی کشاورزی بدون مجوزهای قانونی و در بسیاری موارد بدون توجه به ظرفیت آبخوان‌های آب زیرزمینی، یکی از عوامل اصلی افزایش شوری و افت آبخوان‌ها است. استفاده بیش‌ازحد از کودها و سموم کشاورزی منجر به ورود آلاینده‌ها به منابع آب شده که کیفیت آب را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. علاوه بر این، کاهش پوشش گیاهی طبیعی، افزایش تبخیر سطح خاک و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌های آب از دیگر پیامدهای توسعه ناپایدار کاربری زمین است. حکمرانی کارآمد نیازمند تنظیم دقیق و نظام‌مند کاربری اراضی با تأکید بر پایداری اکولوژیکی است.

#### تحلیل ظرفیت نهادی و سیاست‌گذاری‌های موجود

ضعف هماهنگی بین وزارت نیرو، وزارت جهاد کشاورزی و

1- Cokriging

**تعریف سناریو: افزایش دو برابری جمعیت مهاجر**

در حال حاضر، طی ۵ سال گذشته، بیش از ۹۶۰۰۰ مهاجر جدید وارد دشت قزوین شده‌اند که حدود ۱۸۰۰۰ نفر آن‌ها از افغانستان بوده‌اند. حال، اگر این روند ادامه یافته و در دوره مشابه آینده این جمعیت دو برابر شود، باید انتظار داشت که جمعیت مهاجر به بیش از ۱۹۰۰۰۰ نفر برسد. با توجه به اینکه بخش زیادی از این جمعیت درگیر فعالیت‌های کشاورزی معیشتی‌اند و همچنین دارای فرهنگ مصرف آب متفاوت و نرخ باروری بالاتری هستند، این سناریو می‌تواند تأثیرات عمیقی بر منابع آب زیرزمینی منطقه داشته باشد.

آب است. وجود داده‌های بلندمدت (۲۲ ساله) و تحلیل‌های مکانی امکان پایش مستمر و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد را فراهم کرده است.

پیشنهاد می‌شود توسعه سامانه‌های پایش آنالاین و داشبوردهای مدیریتی برای نظارت لحظه‌ای بر کیفیت و کمیت منابع آب اجرا شود تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند به‌صورت سریع و دقیق واکنش نشان دهند. یکی دیگر از سناریوهای محتمل در دشت قزوین، دو برابر شدن جمعیت مهاجر طی پنج سال آینده است؛ موضوعی که باوجود روند فعلی مهاجرت داخلی و خارجی به این منطقه، محتمل به نظر هست.

**جدول ۳- تحلیل پیامدهای سناریو بر حکمرانی و منابع آب**

تعداد مورد تحلیل	پیامدهای محتمل افزایش جمعیت مهاجر
کمیت منابع آب	افزایش شدید مصرف آب شهری و کشاورزی؛ پیش‌بینی افت سالانه بیش از ۱/۵ متر در تراز آب زیرزمینی در صورت تداوم بهره‌برداری فعلی
کیفیت منابع آب	گسترش کشت در اراضی کم کیفیت و مصرف بی‌رویه کود و سموم عامل تشدید شوری، آلودگی و کاهش کیفیت منابع آب
نظام حکمرانی محلی	افزایش فشار مدیریتی بر نهادهای محلی؛ تشدید چاه‌های غیرمجاز و کاهش کنترل دولت بر بهره‌برداری از منابع آبی
تعارضات اجتماعی	افزایش ناراضیاتی جوامع بومی، رقابت بر سر منابع آب، تضعیف اعتماد اجتماعی و کاهش مشارکت در مدیریت مشارکتی آب
امنیت غذایی و اقتصادی	کاهش بهره‌وری آب، افزایش هزینه‌های تولید، فشار مضاعف بر تولیدکنندگان خرد و آسیب‌پذیری بیشتر اقتصاد کشاورز محور منطقه

**نتیجه‌گیری**

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دشت قزوین طی دو دهه اخیر با کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط نزدیک به یک متر در سال و افزایشی در حدود ۶ درصد در شوری مواجه بوده است. این تحولات به‌ویژه در مناطق کشاورزی و شهری، که تحت فشار بیش‌تری از منظر کاربری اراضی، نفوذ فاضلاب و کاهش تغذیه قرار دارند، شدیدتر بوده‌اند. تحلیل‌های مکانی و زمانی نشان می‌دهد که برخلاف تصور عمومی موجود همواره بین کاهش تراز و افزایش شوری رابطه مستقیم و ثابتی وجود ندارد، بلکه آنچه مشاهده می‌شود، تعامل پیچیده‌ای از عوامل طبیعی و انسانی است که فشار بر آبخوان را تشدید می‌کند. حتی گاهی افزایش تراز آب زیرزمینی می‌تواند باعث شسته شدن نمک‌های انباشته‌شده در لایه‌های بالایی خاک ناشی از خشک‌سالی‌های گذشته می‌شود.

از منظر حکمرانی منابع آب، یافته‌های این مطالعه حاکی از وجود شکاف جدی در سیاست‌گذاری است؛ به‌ویژه فقدان چارچوبی یکپارچه، تطبیقی و بلندمدت برای مدیریت هم‌زمان مؤلفه‌های کمی و کیفی

آب زیرزمینی. ساختار نهادی موجود، در مواجهه با نوسانات اقلیمی و برداشت‌های غیراصولی، از شکنندگی ساختاری رنج می‌برد. عبور از این وضعیت بحرانی مستلزم یک تغییر پارادایم در حکمرانی منابع آب است: از رویکردی کنترلی و واکنشی، به مدلی پیش‌نگر، یادگیرنده و مشارکتی. توسعه سیاست‌هایی مبتنی بر داده، با مشارکت ذی‌نفعان و تمرکز برافزایش تاب‌آوری، نه یک توصیه، بلکه ضرورتی حیاتی برای تضمین پایداری زیست‌محیطی و معیشتی در آبخوان قزوین خواهد بود.

**پیشنهادها**

پایداری منابع آب زیرزمینی دشت قزوین مستلزم حکمرانی یکپارچه و آینده‌نگر مبتنی برپایش بلادرنگ مؤلفه‌های کمی و کیفی است. تحقق این هدف نیازمند تقویت نهادهای محلی، مشارکت بهره‌برداران و به‌کارگیری فناوری‌های نوین کشاورزی است. همچنین کنترل آلودگی، بازسازی اکوسیستم‌ها و مدیریت رواناب سطحی در افزایش تاب‌آوری منابع نقشی کلیدی دارند.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان مقاله حاضر وجود ندارد.

## منابع

- و پدافند زیستی. صفحات ۱۰-۲۵.
- یاری، ر. و کوچک زاده، م. ۱۳۸۷. مقایسه روش‌های زمین‌آمار در پیش‌بینی توزیع مکانی شوری آب زیرزمینی. مجموعه مقالات سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تبریز. بازیابی شده از: <https://civilica.com/doc/50202>
- یزدان پناه، ا.، اکبری، م. و بهرامیان، ک. ۱۳۹۷. بررسی تغییرات زمانی-مکانی پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت مشهد). مجله حفاظت آب‌وخاک، ۶(۲۰): ۱-۱۲.
- Alfarrah, N. and Walraevens, K. 2018. Groundwater overexploitation and seawater intrusion. *Water*, 10(2): 143. <https://doi.org/10.3390/w10020143>
- Chen, Q., et al. 2016. Improved GRACE monthly gravity field solution. *Journal of Geodesy*, 90: 503-523.
- Choi, W., Galasinski, U., Cho, S.J. and Hwang, C.S. 2012. A spatiotemporal analysis of groundwater level changes in relation to urban growth. *Geographical Analysis*, 44(3): 219-234.
- Clemens, M., et al. 2020. Groundwater protection under water scarcity in Jordan. *Science of the Total Environment*, 706: 136066.
- Custodio, E. 2010. Aquifer overexploitation: What does it mean? *Hydrogeology Journal*, 18: 269-292. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0535-3>
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. 1990. *Physical and chemical hydrogeology* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Dong, Y., et al. 2019. Groundwater level changes in agricultural areas of the Mid-Atlantic US, 2002-2016. *Environmental Research*, 171: 193-203.
- Garg, K.K., et al. 2020. Land use changes and groundwater in India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31: 100732.
- Jalali, M. 2007. Salinization of groundwater in arid zones: A case study. *Environmental Geology*, 52(6): 1133-1149. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0551-3>
- Konikow, L.F. and Kendy, E. 2005. Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13(1): 317-320. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8>
- Li, M., et al. 2024. Water level prediction at Huayuankou station. *Scientific Reports*, 14(1): 20890.
- Minderhoud, P.S.J., et al. 2018. Subsidence and salinization in Mekong Delta. *Science of The Total Environment*, 645: 1348-1361. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.195>
- تقی‌زاده مهرجردی، ر.، زارعیان جهرمی، م.، محمودی، ش.، حیدری، ا. و سرمیدیان، ف. ۱۳۸۷. بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. نشریه علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، ۲(۵): ۶۳-۷۰.
- جانباغ فاطمی، م.، خلقی، م.، عبده کلاهچی، ع. و رستایی، م. ۱۴۰۲. عملکرد وزن دهی شواهد در GIS برای تعیین عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در دشت قزوین. نشریه تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹(۳): ۱۱۸-۱۳۵.
- رضایی، ر.، قدوسی، ج.، حسینی، ا.، ارجمندی، ر. و وفایی نژاد، ا. ۱۴۰۰. طبقه‌بندی و ارزیابی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat (مطالعه موردی: آبخوان دشت قزوین). فضای جغرافیایی، ۲۰(۷۲): ۱۸۵-۲۰۴.
- زینالی، س.، احمدی، م.، زارعی، م. و تقی‌زاده، ر. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر کاربری‌های کشاورزی و مسکونی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و کاهش سطح آبخوان‌ها. نشریه علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، ۲۴(۳): ۱۳۵-۱۳۳.
- سازمان برنامه‌ریزی و بودجه کشور. ۱۳۹۵. آمار مهاجران استان قزوین. مرکز آمار ایران. قابل دسترسی در: <https://amar.org.ir>
- شریفی پور رفیعی، ج.، نوحه‌گر، ا.، زهتابیان، غ.، خسروی، ح. و غلامی، ح. ۱۳۹۶. ارزیابی اثرات تغییرات کاربری اراضی بر کیفیت آب زیرزمینی در دشت یزد-اردکان. جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، ۶(۲۵): ۱۸۹-۱۹۹.
- فخار، م. و کاویانی، ع. ۱۴۰۳. پایش خشک‌سالی در دشت قزوین با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر MODIS در محیط Google Earth Engine. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۷(۶): ۱۰۸۹-۱۱۰۳.
- مقدم، ن. ۱۴۰۳. مدیریت منابع آب برای کاهش اثرات خشک‌سالی ناشی از تغییر اقلیم با تمرکز بر ایالت کالیفرنیا. نشریه تحقیقات منابع آب ایران، ۲۰(۲): ۱۹۴-۲۱۷.
- ولی‌پور، ح.، بیات، ن.، سیاری، م. و نجفی، ع. ۱۳۹۳. بررسی و ارزیابی وضعیت کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد اصفهان. دومین همایش سراسری محیط زیست، انرژی

- Scanlon, B.R., et al. 2018. Enhancing drought resilience in California and Arizona. *Environmental Research Letters*, 13(9): 094010. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. and Cook, P.G. 2002. Techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 18–39.
- Suarez, D.L. 2001. Impact of agriculture on groundwater: San Joaquin Valley. In: *Agricultural Impacts on Groundwater Quality*, Springer, pp. 39–57.
- Tahoora Sheikhy Narany, T.S.N., et al. 2017. Land use changes and groundwater quality: Northern Kelantan.
- Tam, V.T. and Nga, T.T.V. 2018. Urbanization impact on groundwater in Hanoi. *Journal of Environmental Management*, 227: 107–116.
- Wang, S., et al. 2020. Groundwater sustainability in Hexi Corridor, China. *Science of the Total Environment*, 705: 135829.
- Yeh, H.F., et al. 2009. Seawater intrusion model: Yun-Lin coast, Taiwan. *Hydrogeology Journal*, 17(6): 1641–1656. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0472-z>
- Zalidis, G., Stamatidis, S., Takavakoglou, V., Eskridge, K., & Misopolinos, N. 2002. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 88(2), 137–146.
- Mishra, N. and Kumar, S. 2015. Impact of land use change on groundwater recharge in Haridwar District. 20th International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering.
- Moghaddam, N. 2024. Managing water resources to mitigate drought impacts in California. *Iran-Water Resources Research*, 20(2): 194–217.
- Moiwo, J.P., Tao, F. and Lu, W. 2013. Water storage depletion in North China. *Hydrological Processes*, 27(7): 1011–1020.
- Pour, H.V., Sayari, M., Bayat, N. and Forutan, F. 2014. Evaluation of groundwater in Najafabad region. *JMEAST*, 16: 523–530.
- Ramillien, G., Famiglietti, J.S. and Wahr, J. 2008. Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review. *Surveys in Geophysics*, 29: 361–374.
- Rengasamy, P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5): 1017–1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- Scanlon, B.R., et al. 2006. Global recharge in semiarid/arid regions. *Hydrological Processes*, 20(15): 3335–3370. <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>
- Scanlon, B.R., et al. 2007. Impact of land cover change on water resources. *Water Resources Research*, 43(3). <https://doi.org/10.1029/2006WR005486>
- Scanlon, B. R., et al. (2018). Enhancing drought resilience in California and Arizona. *Environmental Research Letters*, 13(9), 094010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad516>

## Analysis of Groundwater Table Decline and Salinity Intensification in the Qazvin Plain: Implications from a Water Resources Governance Perspective

N. Moghaddam<sup>1</sup>, M. Kholghi<sup>2\*</sup>

Received: May.26, 2025

Accepted: Jul.16, 2025

### Abstract

In the past two decades, the Qazvin Plain has experienced a concerning trend of declining groundwater levels and increasing salinity, posing a serious threat to the sustainability of water resources and the livelihoods dependent on them. This study aims to simultaneously examine the quantitative and qualitative changes in groundwater from 2001 to 2023, utilizing data on groundwater table levels, electrical conductivity (EC), land use maps, and GIS-based spatial analyses. The findings indicate that the average annual decline in groundwater level was nearly one meter, accompanied by a salinity increase of approximately 6%, with greater severity observed in urban and agricultural zones. Although no direct correlation was found between water table decline and salinity increase, the analyses revealed mutual interactions influenced by both natural and anthropogenic factors such as land use change, infiltrating wastewater, agricultural runoff, and drought conditions. In the concluding section, the study highlights the fragility of current water governance structures and the absence of integrated and adaptive planning. Accordingly, the development of data-driven strategies, inclusive of stakeholder participation and considering both quantitative and qualitative dimensions of water resources, is deemed a strategic necessity for the future sustainability of the Qazvin Plain.

**Keywords:** Groundwater table decline, Water salinity, Land use change, Spatial analysis, Water resources governance

---

1- M.Sc. Student, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: NMoghadda@ut.ac.ir

2 - Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(\* - Corresponding Author Email: kholghi@ut.ac.ir)