

ارزیابی تخریب سرزمین با تأکید بر افت آب زیرزمینی و فرونشست در دشت قزوین (مقاله پژوهشی)

۱- مریم نعیمی*، دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

naeimi@rifr-ac.ir

۲- عادل جلیلی، استاد پژوهشی، بخش تحقیقات گیاه‌شناسی، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۳- سمیرا زندی‌فر، دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

چکیده

تخریب سرزمین در دشت‌های آبرفتی تحت تأثیر هم‌افزایی افت سطح آب زیرزمینی و پاسخ‌های ژئومکانیکی آبخوان قرار دارد. در این پژوهش، با هدف ارزیابی دقیق‌تر روند تخریب در دشت قزوین، مدل سنتی IMDPA با ادغام نرخ فرونشست زمین (استخراج‌شده از تحلیل‌های InSAR) ارتقا یافته و مدل توسعه‌یافته IMDPAS ارائه گردید. یافته‌های حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی راداری نشان داد که پهنه‌ای به وسعت ۸۷۰ کیلومترمربع از دشت تحت تأثیر فرونشست قرار دارد که ۸۶ درصد از این مناطق، نرخ نشست بین ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال را تجربه می‌کنند. نتایج حاصل از مدل سنتی IMDPA (مبتنی بر شاخص‌های هیدروژئولوژیک) نشان داد که ۷۸ درصد از مساحت منطقه در طبقه تخریب «متوسط» و ۲۲ درصد در طبقه «کم» قرار دارند و این مدل قادر به شناسایی پهنه‌های بحرانی نبود. با این حال، با پیاده‌سازی مدل توسعه‌یافته IMDPAS و لحاظ کردن متغیر فرونشست، یک جابه‌جایی ساختاری در توزیع کلاس‌ها رخ داد؛ به‌طوری‌که سهم کلاس تخریب «شدید» با جهشی معنادار به ۷۸ درصد (معادل ۵۳۰،۵۳ کیلومترمربع) رسید و کلاس تخریب «کم» به‌طور کامل حذف گردید. این نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های کلاسیک به دلیل نادیده گرفتن پیامدهای ژئومکانیکی و تراکم برگشت‌ناپذیر رسوبات، شدت واقعی بحران را با «کم‌برآوردی» جدی نشان می‌دهند. مدل IMDPAS با آشکارسازی تخریب ساختاری و پنهان آبخوان، ابزاری استراتژیک برای مدیریت پایدار منابع آب و اولویت‌بندی مناطق بحرانی در دشت‌های در حال فرونشست پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: تخریب سرزمین، فرونشست زمین، افت تراز ایستابی، مدل IMDPAS، دشت قزوین.

مقدمه

در این میان، افت سطح آب زیرزمینی و پیامدهای ناشی از آن، به‌ویژه در دشت‌های متکی بر کشاورزی آبی، از مهم‌ترین سازوکارهای تشدیدکننده تخریب سرزمین در نواحی خشک محسوب می‌شود. بهره‌برداری فراتر از توان اکولوژیک سرزمین، همراه با خشکسالی‌های مکرر و تغییرات اقلیمی، نه‌تنها موجب افت ذخایر آبخوان می‌شود، بلکه از طریق تضعیف

تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که غالباً با عنوان بیابان‌زایی شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی جهان معاصر به شمار می‌رود. این پدیده حاصل برهم‌کنش پیچیده عوامل طبیعی و انسانی است و به‌تدریج موجب کاهش ظرفیت تولیدی سرزمین، افت کیفیت منابع خاک و آب و کاهش پایداری اکوسیستم‌ها می‌شود [۱۰، ۲۳].

پایداری خاک، کاهش رطوبت، افت پوشش گیاهی و تشدید فرسایش بادی، روند تخریب سرزمین را تسریع می‌کند.

در میان فرآیندهای مختلف تخریب سرزمین، فرونشست زمین یکی از بارزترین نمودهای تغییرات فیزیکی سطح زمین است که ارتباط نزدیکی با افت سطح آب زیرزمینی دارد. این پدیده در اثر کاهش فشار آب منفذی و تراکم تدریجی لایه‌های رسوبی رخ می‌دهد و علاوه بر تغییر شکل سطح زمین، می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای برای زیرساخت‌ها، اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی به همراه داشته باشد [۱۶]. در سال‌های اخیر، فرونشست زمین از یک مسئله صرفاً ژئومکانیکی فراتر رفته و به موضوعی چندبعدی با ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تبدیل شده است [۱۴]. گزارش‌های جهانی نشان می‌دهد که این پدیده در بیش از ۱۵۰ کشور جهان مشاهده شده و نرخ‌های قابل توجهی از آن در مناطقی مانند دره سن‌خوآکین در کالیفرنیا [۱۷]، مکزیکوسیتی [۹]، دلتای نیل در مصر [۱]، اندونزی [۵]، هند و بنگلادش [۶] و دشت‌های شرقی چین [۸، ۷] ثبت شده است.

ایران به دلیل قرارگیری در کمربند خشک جهانی و وابستگی گسترده به منابع آب زیرزمینی، یکی از مناطق مستعد بروز فرونشست زمین در خاورمیانه محسوب می‌شود. برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها طی دهه‌های اخیر موجب افت قابل توجه سطح ایستابی در بسیاری از دشت‌های کشور شده است؛ به‌گونه‌ای که براساس مطالعات انجام‌شده، بخش قابل‌توجهی از دشت‌های ایران با خطر فرونشست زمین مواجه هستند [۱۱، ۲۰]. پیامدهای این پدیده شامل تخریب زیرساخت‌های عمرانی، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها، آسیب به اراضی کشاورزی و تهدید سکونتگاه‌های انسانی است [۱۶، ۳۰]. از این‌رو، در سال‌های اخیر استفاده از فناوری‌های سنجش از دور، به‌ویژه تکنیک تداخل‌سنجی راداری، به‌عنوان یکی از ابزارهای کارآمد برای پایش تغییر شکل سطح زمین و

ارزیابی نرخ فرونشست در مناطق مختلف مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲۶، ۳۲].

دشت قزوین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی ایران، طی دهه‌های اخیر با فشار فزاینده بر منابع آب زیرزمینی و کاهش قابل توجه سطح آبخوان مواجه شده است. مطالعات مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری نشان داده‌اند که این دشت طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ نرخ‌های قابل توجهی از فرونشست زمین را تجربه کرده است [۲]. همچنین تحلیل سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های زیرمجموعه خط مبنای کوچک^۱ و پراکنش‌کننده‌های دائمی^۲ بیانگر تداوم تغییر شکل سطح زمین در بخش‌های مختلف دشت قزوین است [۳]. بررسی‌های انجام‌شده در مقیاس استانی نیز نشان داده‌اند که تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی ارتباط مستقیمی با الگوی مکانی فرونشست در استان قزوین دارد [۱۴]. افزون بر این، پژوهش‌های اخیر در محدوده بوئین‌زهره نشان می‌دهد که افت شدید سطح آب زیرزمینی عامل اصلی بروز نرخ‌های بالای فرونشست در این بخش از دشت قزوین است [۲۹]. همچنین نتایج مطالعه مهنوش و همکاران (۲۰۲۵) نشان می‌دهد که فرونشست زمین می‌تواند بر فرآیندهای هیدروژئولوژیکی آبخوان نیز اثر بگذارد و با کاهش تخلخل مؤثر لایه‌های آبرفتی، میزان تغذیه و آب برگشتی به آبخوان را کاهش دهد؛ فرآیندی که در نهایت به تشدید چرخه افت سطح آب زیرزمینی و کاهش ظرفیت ذخیره‌پذیری آبخوان منجر می‌شود [۱۳].

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افت سطح آب زیرزمینی تنها به بروز فرونشست محدود نمی‌شود، بلکه از طریق افزایش شوری، تغییر در ساختار فیزیکی خاک، کاهش رطوبت و افت پوشش گیاهی، می‌تواند فرآیند تخریب سرزمین را نیز تشدید کند. این تغییرات با کاهش پایداری خاک و کاهش آستانه سرعت اصطکاکی باد، زمینه افزایش فرسایش بادی و

^۱ Small Baseline Subset InSAR (SBAS-InSAR) methods

^۲ PS - Permanent Scatterers

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، اصلاح الگوی بهره‌برداری از آبخوان و کاهش مخاطرات محیط‌زیستی در دشت قزوین فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان قزوین با مساحتی حدود ۱۵۸۰۰ کیلومتر مربع در بخش مرکزی ایران و در محدوده مختصات جغرافیایی ۴۸/۷۶ تا ۵۰/۸۳ درجه طول شرقی و ۳۵/۶۱ تا ۳۶/۷۵ درجه عرض شمالی واقع شده است. در میان واحدهای ژئومورفولوژیک استان، دشت قزوین مهم‌ترین پهنه دشتی منطقه محسوب می‌شود که بخش عمده فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری از منابع آب در آن متمرکز شده است. منطقه مورد مطالعه، دشت قزوین با وسعتی در حدود ۴۵۰ هزار هکتار (معادل حدود ۴۵۰۰ کیلومتر مربع) یکی از بزرگ‌ترین دشت‌های آبرفتی کشور به شمار می‌رود و آبخوان آبرفتی گسترده آن از رسوبات حاصل از جریان‌های سطحی کوهستان‌های اطراف تغذیه می‌شود. این دشت در محدوده طول‌های شرقی حدود ۴۹/۴۲ تا ۵۰/۵۸ درجه و عرض‌های شمالی ۳۵/۴۲ تا ۳۶/۴۲ درجه قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا بین حدود ۱۱۵۰ تا ۱۵۰۰ متر متغیر است. در مقابل، ارتفاع نواحی کوهستانی اطراف دشت در شمال‌شرق به بیش از ۲۹۰۰ متر و در جنوب به حدود ۲۶۰۰ متر می‌رسد. شیب عمومی دشت به سمت شرق بوده و در نواحی پای‌دامنه‌ای به حدود ۳ درصد می‌رسد، درحالی‌که در بخش‌های مرکزی و مناطق باتلاقی به کمتر از یک درصد کاهش می‌یابد. این شیب ملایم همراه با ساختار رسوبی آبرفتی سبب شکل‌گیری یکی از مهم‌ترین آبخوان‌های آبرفتی کشور در این دشت شده است که نقش اساسی در تأمین منابع آب منطقه ایفا می‌کند [۲۲].

منبع آب سطحی موجود، آب انتقالی از سد مخزنی طالقان می‌باشد. براساس دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۸-۱۳۹۸) متوسط بارندگی در دشت قزوین حدود ۶۲۰ میلی‌متر در سال و متوسط دمای

شکل‌گیری کانون‌های گردوغبار را فراهم می‌سازد. ازاین‌رو، افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین را باید نه دو پدیده مستقل، بلکه دو مؤلفه مرتبط در یک چرخه تخریبی دانست که می‌توانند به‌صورت هم‌افزا پایداری محیطی دشت‌های خشک را تحت تأثیر قرار دهند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که توسعه کشاورزی آبی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق خشک ایران از عوامل اصلی تشدید بیابان‌زایی به شمار می‌رود [۱۵، ۳۲].

با وجود انجام مطالعات متعدد درباره پایش فرونشست در دشت قزوین، اغلب این پژوهش‌ها بر بررسی نرخ فرونشست یا الگوی مکانی آن متمرکز بوده‌اند و کمتر به ارزیابی یکپارچه ارتباط میان فرونشست زمین، افت سطح ایستابی، کیفیت آب زیرزمینی و شدت تخریب سرزمین در قالب یک مدل جامع توجه شده است. درحالی‌که تحلیل هم‌زمان این مؤلفه‌ها می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت پایداری سرزمین و شدت آسیب‌پذیری آبخوان در دشت قزوین ارائه دهد، نبود یک چارچوب تلفیقی برای ترکیب این شاخص‌ها، همچنان یکی از خلأهای موجود در مطالعات این منطقه است.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر توسعه مدل ^۳IMDPA از طریق افزودن شاخص فرونشست و ارائه مدل ^۴IMDPAS (مدل تعیین شدت بیابان‌زایی با استفاده از نرخ فرونشست) به‌منظور ارزیابی هم‌افزایی افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در پهنه‌بندی شدت تخریب سرزمین در دشت قزوین است. در این مطالعه، با ادغام داده‌های هیدروژئولوژیکی شامل افت سطح ایستابی و کیفیت آب زیرزمینی با داده‌های ژئودتیکی مربوط به نرخ فرونشست، تلاش شده است الگوهای فضایی تخریب سرزمین شناسایی و پهنه‌های حساس به تشدید فرآیندهای بیابان‌زایی مشخص شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در

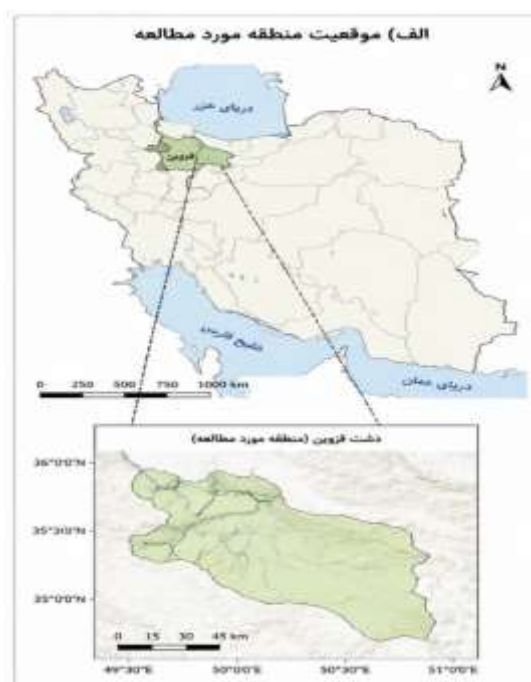
^۳ Iranian Model of Desertification Potential Assessment

^۴ Iranian Model of Desertification Potential Assessment with Subsidence

شناخته می‌شود و حدود ۴۸۹ هزار هکتار از اراضی استان به فعالیت‌های کشاورزی اختصاص یافته است. با وجود آنکه سهم استان از مساحت خاک کشور کمتر از یک درصد است، بیش از $\frac{3}{5}$ درصد از تولیدات کشاورزی کشور در این منطقه تولید می‌شود و سالانه حدود چهار میلیون تن محصولات زراعی، باغی و دامی در استان تولید می‌گردد. محصولات عمده این منطقه شامل گندم، جو، ذرت، یونجه، صیفی‌جات و انواع محصولات باغی نظیر پسته، بادام، گردو، زیتون و سیب است [۱۸]. در پژوهش حاضر با توجه به داده‌های موجود منطقه مورد مطالعه شامل بخش‌های دارای فرونشست دشت قزوین و آوج می‌باشد. همچنین، درصد مساحت هر یک از کلاس‌های معیار آب زیرزمینی براساس نسبت مساحت آن کلاس به کل مساحت استان قزوین $(\frac{3705}{74})$ کیلومتر مربع محاسبه شده است.

ماهانه ۱۱ درجه می‌باشد. اقلیم منطقه براساس روش دومارتن نیمه خشک می‌باشد. وسعت شبکه آبیاری دشت قزوین حدود ۲۲ هزار هکتار است که آب مورد نیاز آن از سد طالقان و چاه‌های تلفیقی موجود در سطح شبکه تأمین می‌گردد [۱۸].

منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب در دشت قزوین محسوب می‌شوند و آبخوان آبرفتی این دشت بخش عمده نیازهای کشاورزی، صنعتی و شرب منطقه را تأمین می‌کند. در کنار آبخوان دشت قزوین، سفره‌های آب زیرزمینی کوچک‌تری نیز در مناطق آوج، الموت و طارم سفلی وجود دارند که ظرفیت ذخیره آن‌ها نسبت به آبخوان اصلی دشت محدودتر است. با این حال، توسعه کشاورزی آبی و افزایش تقاضای آب در دهه‌های اخیر موجب افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی شده است. دشت قزوین به عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی کشور



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

تحلیل تخریب سرزمین در نظر گرفته شدند. چارچوب کلی روش تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. در این چارچوب، ابتدا شاخص‌های مرتبط با هر معیار استخراج و تحلیل شدند و سپس با استفاده از

روش تحقیق

در این پژوهش به منظور ارزیابی شدت تخریب سرزمین از مدل پایه IMDPA استفاده شد و دو معیار اصلی شامل وضعیت آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین به عنوان شاخص‌های کلیدی در

تلفیق فضایی آن‌ها، نقشه نهایی شدت تخریب سرزمین تهیه گردید.

برای تحلیل معیار آب زیرزمینی سه شاخص شامل افت سطح آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم مورد از طریق داده‌های چاه‌های پیزومتری و مشاهده‌ای موجود در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ به‌منظور از وزارت نیرو دریافت گردید و برای تهیه نقشه پهنه‌بندی و تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور تعیین میزان افت سالانه سطح آب زیرزمینی، ابتدا عمق سطح ایستابی در چاه‌های پیزومتری محاسبه و سپس میانگین تغییرات سالانه آن‌ها استخراج شد. داده‌های کمی مورد استفاده در این تحقیق از شبکه پایش شرکت آب منطقه‌ای قزوین شامل ۱۶۸ ایستگاه پیزومتر فعال استخراج گردیده است.

این ایستگاه‌ها با پراکنش مناسب در کل محدوده دشت قزوین، وظیفه پایش تراز آب زیرزمینی را بر عهده دارند. در بازه زمانی مورد مطالعه (۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷)، مجموعاً ۲۲,۰۴۲ رکورد عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت که پس از حذف داده‌های پرت و ایستگاه‌های فاقد آمار کامل، تحلیل‌های نهایی بر مبنای ۱۸,۸۴۱ قرائت معتبر انجام شد. همچنین برای ارزیابی کیفی در بازه زمانی مذکور، از شبکه پایش منابع آب استان شامل ۱۷۴ منبع آبی منتخب استفاده شده است. این شبکه شامل ۷۸ حلقه چاه عمیق، ۴۲ حلقه چاه نیمه‌عمیق، ۲۵ رشته قنات و ۲۹ دهانه چشمه می‌باشد که پراکنش آن‌ها به‌طور کامل محدوده مطالعاتی را پوشش می‌دهد. در این تحلیل، مجموعاً ۵,۲۸۶ داده کیفی استخراج و پردازش گردید. در این پژوهش، داده‌های مرتبط با محدوده مطالعه از میان اطلاعات این شبکه انتخاب و برای تحلیل‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی استفاده شد.

در ادامه، به‌منظور بررسی نقش فرونشست زمین در فرآیند تخریب سرزمین، از لایه اطلاعاتی تغییرشکل/فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه

استفاده شد. این لایه بر پایه داده‌های راداری Sentinel-1A مربوط به بازه زمانی مرداد ۱۳۹۵ تا آذر ۱۳۹۵ و اخذشده از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شد. با توجه به محدودیت تعداد داده‌های در دسترس، لایه مذکور صرفاً برای شناسایی الگوی مکانی پهنه‌های در معرض فرونشست و تلفیق آن با سایر شاخص‌های مورد استفاده در مدل به‌کار رفت. از این‌رو، نتایج این بخش بیانگر وضعیت تغییرشکل زمین در یک بازه زمانی مشخص است و نباید به‌عنوان تحلیل سری زمانی بلندمدت یا تخمین نرخ پایدار فرونشست تلقی شود. در نهایت، لایه فرونشست پس از آماده‌سازی و یکپارچه‌سازی، برای طبقه‌بندی شدت نسبی فرونشست و استفاده در مدل نهایی ارزیابی تخریب سرزمین در محیط GIS به‌کار گرفته شد.

پس از استخراج شاخص‌های مورد نظر، مقادیر مربوط به نرخ فرونشست زمین و شاخص‌های کیفیت و کمیت آب زیرزمینی براساس طبقه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۱ امتیازدهی شدند تا شدت تأثیر هر یک از شاخص‌ها در فرآیند تخریب سرزمین مشخص شود. سپس، نقشه‌های مربوط به هر شاخص در محیط نرم‌افزار ESRI ArcGIS Pro نسخه ۳.۵.۳ تهیه گردید.

به‌منظور تولید سطوح پیوسته مکانی از داده‌های نقطه‌ای، از روش زمین‌آماري کریجینگ معمولی^۵ استفاده شد. این رویکرد به‌دلیل توانایی در تحلیل اتوکرولاسیون فضایی و ارائه بهترین برآورد خطی ناریب^۶، بر روش‌های درونیابی قطعی ارجحیت دارد. در فرآیند مدل‌سازی، تنظیمات جستجوی همسایگی به‌صورت استاندارد و در قالب ساختار چهار ربعی با زاویه ۴۵ درجه تعریف شد؛ به‌گونه‌ای که حداقل ۲ و حداکثر ۵ نقطه مؤثر در برآورد مقادیر هر بلوک مشارکت داشتند. دامنه جستجو در راستای اصلی و فرعی برابر با ۱۸۷۹۳ متر و زاویه چرخش صفر در نظر گرفته شد. برازش واریوگرام با استفاده از مدل

^۵ Kriging

^۶ BLUE

واریوگرام^۷، مبتنی بر ۹ وقفه^۸ و طول وقفه ۲۰۸۸/۱۱ متر انجام شد. مقادیر اثر قطعه ای^۹ و آستانه جزئی^{۱۰} به ترتیب ۲۶/۶۸ و ۳۲/۵۵ برآورد گردید و هیچ گونه روند^{۱۱} یا ناهمسانگردی^{۱۲} در مدل نهایی لحاظ نشد. این تنظیمات با هدف افزایش دقت برآورد، شفافیت علمی و تضمین قابلیت بازتولید نتایج، با استفاده از افزونه زمین آمار^{۱۳} در محیط ArcGIS تعیین و پیاده سازی گردید.

پس از تهیه نقشه های شاخص های مربوط به معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین، نقشه نهایی شدت تخریب سرزمین با استفاده از میانگین هندسی این معیارها محاسبه شد. برای این منظور از رابطه (۱) استفاده گردید [۲۱].

$$\text{رابطه (۱): } DM = (GWI \times SRI)^{(1/2)}$$

که در آن GWI بیانگر شاخص آب زیرزمینی، SRI نشان دهنده شاخص نرخ فرونشست زمین و DM نمایانگر وضعیت فعلی شدت تخریب سرزمین است.

در ادامه، براساس محدوده امتیازهای تعریف شده در مدل، طبقات مختلف شدت تخریب سرزمین تعیین شد. محدوده و طبقات هر شاخص در جدول ۱ ارائه شده است، درحالی که امتیاز عددی اختصاص یافته به هر طبقه برای ورود به مدل در جدول ۲ آمده است. در نهایت، به منظور تحلیل وضعیت تخریب سرزمین در منطقه مورد مطالعه، امتیازدهی شاخص ها و تعیین شدت تخریب سرزمین با استفاده از هر دو مدل IMDPA و مدل توسعه یافته IMDPAS و براساس داده های در دسترس انجام شد.

لازم به ذکر است، در مدل پایه IMDPA، ارزیابی شدت تخریب سرزمین بر مبنای شاخص های مرتبط با آب زیرزمینی انجام می شود، در حالی که در مدل توسعه یافته IMDPAS، شاخص فرونشست نیز

به عنوان نماینده ای از پاسخ مکانیکی آبخوان به افت فشار آب منفذی وارد مدل شده است. بدین ترتیب، مدل IMDPAS افزون بر ابعاد کمی و کیفی آب زیرزمینی، اثر تغییر شکل سطح زمین را نیز در پهنه بندی شدت تخریب سرزمین لحاظ می کند.

نتایج

ارزیابی وضعیت فعلی تخریب سرزمین در هر

یک از شاخص ها

معیار نرخ فرونشست زمین

نتایج حاصل از تحلیل داده های تداخل سنجی راداری نشان می دهد که مجموع پهنه های تحت تأثیر فرونشست در منطقه مورد مطالعه شامل بخش هایی از دشت قزوین و آوج حدود ۸۶۹/۷ کیلومتر مربع است که ۸/۲ درصد از مساحت کل استان را شامل می شود. بررسی توزیع فضایی این پدیده بیانگر تمرکز عمده فرونشست در آبخوان اصلی دشت قزوین است؛ به طوری که از این مقدار، حدود ۸۵۳/۲ کیلومتر مربع در دشت قزوین و تنها ۱۶/۴ کیلومتر مربع در محدوده آوج قرار دارد. این اختلاف معنادار، نشان دهنده تمرکز بالای فشار بهره برداری از منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین و حساسیت بیشتر این آبخوان نسبت به تراکم رسوبات است.

⁷ Circular

⁸ Lag

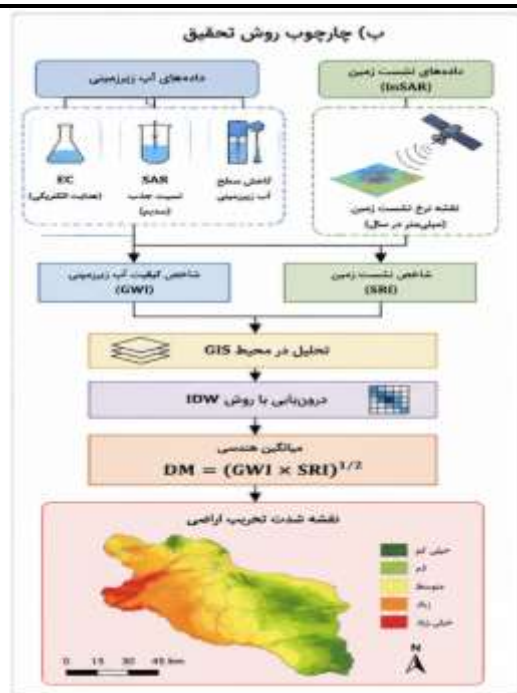
⁹ Nugget

¹⁰ Partial Sill

¹¹ Trend type

¹² Anisotropy

¹³ Geostatistical Analyst



شکل ۲- چارچوب روش‌شناسی پژوهش و مراحل تحلیل شاخص‌های آب زیرزمینی و فرونشست در مدل‌های IMDPA و IMDPAS

جدول ۱- شاخص‌های ارزیابی معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین مؤثر بر شدت تخریب سرزمین در مدل اصلی و توسعه‌یافته [۲۱].

شاخص ارزیابی	کم	متوسط	شدید	بسیار شدید
افت آب زیرزمینی cm/yr	< 20	$20-30$	$30-50$	> 50
نسبت جذب سدیم	< 18	$18-26$	$26-32$	> 32
هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر)	< 750	$750-2250$	$2250-5000$	> 5000
نرخ فرونشست زمین (سانتی‌متر در سال)	$< -1/49$	$-1/5$ تا $-2/99$	-3 تا $-5/99$	> -6

جدول ۲- طبقات کلاس‌های شدت تخریب سرزمین در مدل اصلی و توسعه‌یافته [۲۱].

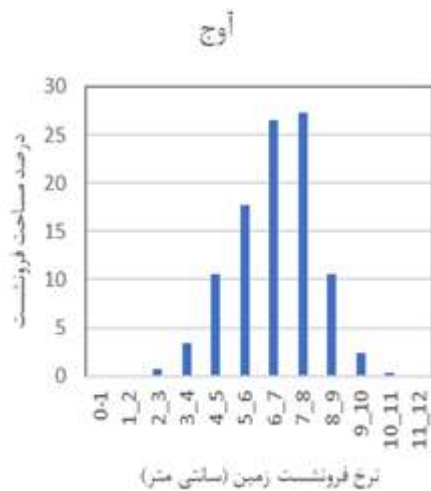
ردیف طبقه شدت تخریب سرزمین دامنه امتیاز در مدل IMDPA دامنه امتیاز در مدل IMDPAS				
۱	کم	$0 - 1/49$	$0 - 0/99$	
۲	متوسط	$1/5 - 2/49$	$1 - 1/99$	
۳	شدید	$2/5 - 3/49$	$2 - 2/99$	
۴	بسیار شدید	$3/5 - 4$	$3 - 4$	

تحلیل کلاس‌های نرخ فرونشست در شکل ۳ نشان می‌دهد که بیشترین گستره فضایی مربوط به کلاس‌های ۶ تا ۷ و ۵ تا ۶ سانتی‌متر در سال است که به ترتیب حدود $295/9$ و $249/8$ کیلومتر مربع از پهنه‌های فرونشستی را شامل می‌شوند. پس از آن، کلاس ۷ تا ۸ سانتی‌متر در سال با مساحتی حدود $151/4$ کیلومتر مربع در رتبه بعدی قرار دارد. در

مجموع، حدود $87/9$ درصد از پهنه‌های فرونشستی در محدوده نرخ ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال قرار دارند که بیانگر غلبه نرخ‌های متوسط تا نسبتاً شدید فرونشست در منطقه، به‌ویژه در دشت قزوین، است. در مقابل، کلاس‌های با نرخ کمتر از ۳ سانتی‌متر در سال تنها حدود $0/45$ درصد از کل پهنه‌های فرونشستی را تشکیل می‌دهند و عمدتاً در حاشیه‌های

حدود ۱۳ تا ۱۴ سانتی‌متر در سال نشان‌دهنده شکل‌گیری نواحی بحرانی فرونشست در بخش‌هایی از دشت است.

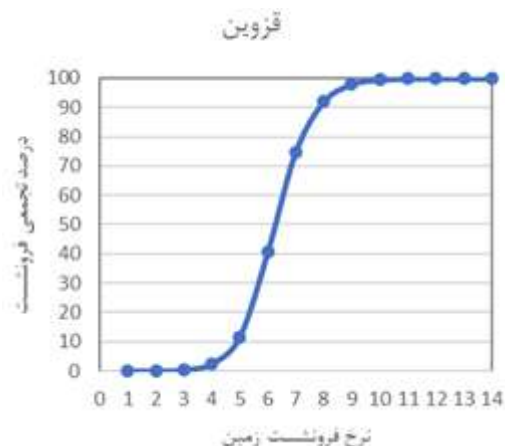
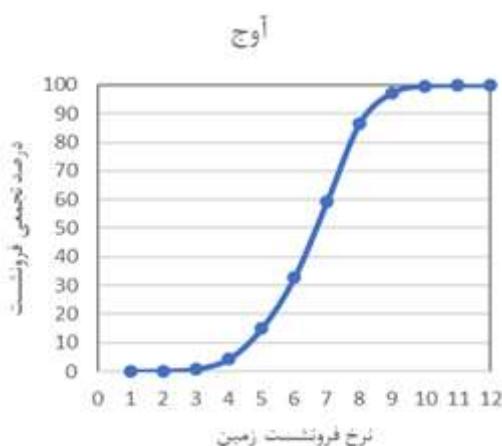
آبخوان مشاهده می‌شوند. همچنین، اگرچه نرخ‌های بیش از ۱۰ سانتی‌متر در سال از نظر مساحتی بسیار محدود هستند، وجود این کانون‌ها با بیشینه‌ای در

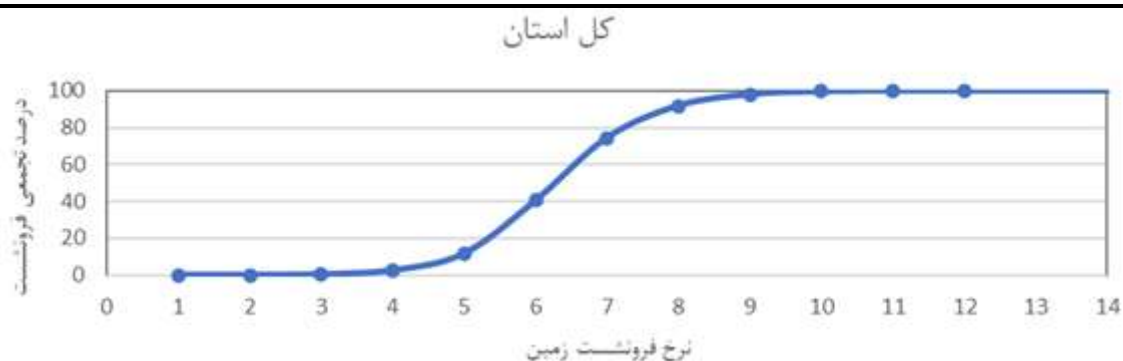


شکل ۳- توزیع کلاس‌های نرخ فرونشست در محدوده‌های آوج و قزوین.

سطح منطقه است. روندی مشابه، هرچند با ابعاد بسیار محدودتر، در محدوده آوج نیز مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که حدود ۵۹/۳ درصد از پهنه‌های فرونشستی این محدوده در کلاس‌های ۷ تا ۹ سانتی‌متر در سال قرار دارند و این مقدار برای نرخ‌های کمتر از ۹ سانتی‌متر در سال به حدود ۹۷/۳ درصد افزایش می‌یابد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه کلاس‌های بالاترین نرخ فرونشست از نظر مساحت سهم اندکی دارند، حضور آن‌ها بیانگر شکل‌گیری کانون‌های بحرانی موضعی است که نیازمند توجه و مدیریت جدی هستند.

تحلیل منحنی درصد تجمعی (شکل ۴) نشان می‌دهد که در دشت قزوین، حدود ۷۴/۷ درصد از پهنه‌های فرونشستی در کلاس‌های ۷ تا ۹ سانتی‌متر در سال انباشته شده‌اند و این مقدار برای نرخ‌های کمتر از ۸ سانتی‌متر در سال به حدود ۹۱/۹ درصد می‌رسد. همچنین، حدود ۹۹/۵ درصد از مساحت تحت‌تأثیر، دارای نرخ فرونشست کمتر از ۱۰ سانتی‌متر در سال است. این الگو نشان می‌دهد که رژیم غالب تغییرشکل در دشت قزوین نه حاصل چند کانون محدود با نرخ‌های بسیار بالا، بلکه ناشی از گسترش وسیع فرونشست با نرخ‌های متوسط تا نسبتاً شدید در

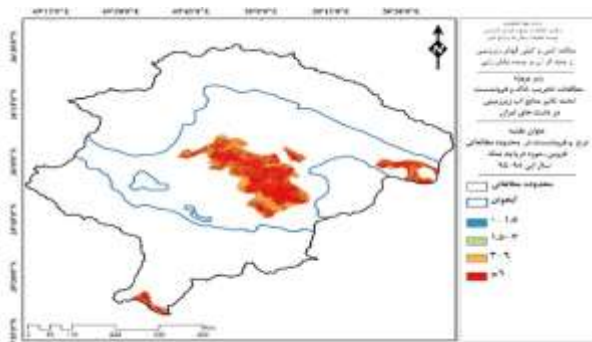




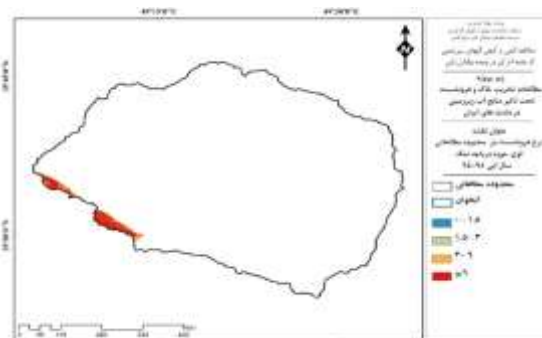
شکل ۴- منحنی درصد تجمعی کلاس‌های نرخ فرونشست زمین در دشت قزوین. این منحنی سهم تجمعی مساحت پهنه‌های فرونشستی را در کلاس‌های متوالی نرخ فرونشست نشان داده و غلبه نرخ‌های متوسط تا نسبتاً شدید تغییر شکل را در منطقه مطالعاتی برجسته می‌کند.

فشار آب منفذی در لایه‌های آبرفتی ریزدانه، منجر به تراکم تدریجی رسوبات و بروز فرونشست شده است؛ به‌طوری‌که حدود ۵۹ درصد از پهنه‌های فرونشستی در سال ۱۳۹۵ با کلاس «شدید» تخریب سرزمین منطبق هستند.

با توجه به شکل ۵، نتایج امتیازدهی شاخص فرونشست در چارچوب مدل IMDPAS حاکی از آن است که بخش عمده اراضی دارای فرونشست در طبقات «شدید» تا «بسیار شدید» تخریب سرزمین قرار می‌گیرند. تمرکز این طبقات با بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی همپوشانی دارد. این کاهش



(ب)



(الف)

شکل ۵- وضعیت بالفعل بیابانزایی براساس شاخص فرونشست در محدوده مطالعاتی (الف) قزوین و (ب) آوج- سال آبی ۹۵-

۱۳۹۴

معکوس و معنادار بین این دو پارامتر در هر دو محدوده مطالعاتی است (شکل ۶). در محدوده مطالعاتی قزوین، نوسانات تراز آب زیرزمینی شدت بیشتری داشته و افت تراز آب در برخی سال‌ها (مانند سال آبی ۹۳-۱۳۹۲) با جهش ناگهانی در میزان شوری همراه بوده است. بیشترین میزان افت تراز در این محدوده تا ۳۷/۵ متر ثبت شده است که منجر به تخلیه بخش‌های فوقانی آبخوان و نفوذ احتمالی

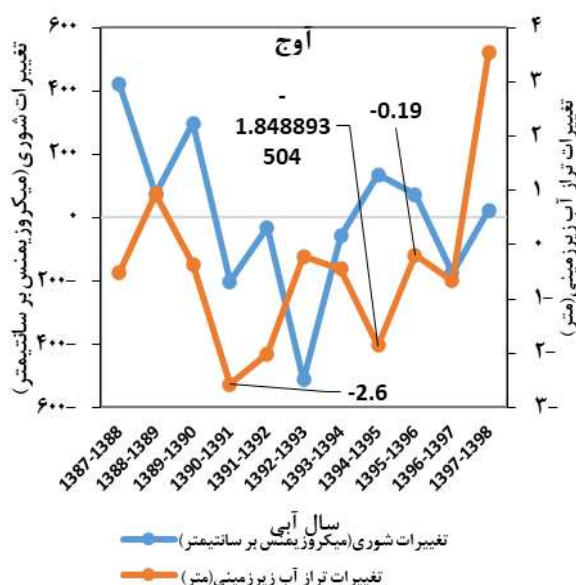
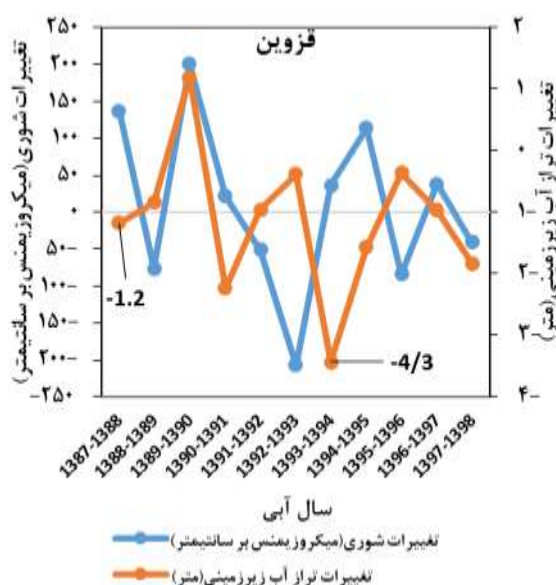
نتایج بررسی میزان افت سطح تراز زیرزمینی طی بازه زمانی مورد مطالعه (سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ تا ۹۸-۱۳۹۷) برای هر یک از محدوده‌های مطالعاتی به‌صورت مجزا نشان داد سطح آب زیرزمینی در آبخوان قزوین ۳ سانتی‌متر تا ۵/۳۷ متر و آوج ۰/۱۹ تا ۲/۶ متر کاهش یافته است.

بررسی روند تغییرات زمانی تراز آب زیرزمینی و شوری (در قالب هدایت الکتریکی) در بازه زمانی ده ساله (۱۳۸۷-۱۳۹۸) نشان‌دهنده وجود یک رابطه

آب‌های شور از لایه‌های رسی یا مناطق حاشیه‌ای دشت شده است.

در محدوده مطالعاتی آوج، اگرچه دامنه افت تراز آب (بین ۰/۱۹ تا ۲/۶ متر) نسبت به دشت قزوین محدودتر است، اما تطابق زمانی بین افت تراز و افزایش شوری به وضوح مشاهده می‌شود. در سال‌هایی که تراز آب با افت شدید مواجه شده (مانند سال‌های ۹۱-۱۳۹۰ و ۹۵-۱۳۹۴)، منحنی تغییرات شوری بلافاصله روند صعودی به خود گرفته است.

در مجموع، نتایج حاصل از این نمودارها تأیید می‌کند که تخریب کیفیت آب (افزایش شوری) به‌طور مستقیم تابعی از تخریب کمی آبخوان (افت تراز) است. با کاهش تراز آب و افت فشار هیدرولیکی در آبخوان، پدیده “تداخل آب‌های شور” یا “انحلال کانی‌های تبخیری” شدت یافته که این امر یکی از شاخص‌های کلیدی در پیشرفت فرآیند تخریب سرزمین در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود.



شکل ۶- رابطه میان تغییرات شوری و سطح تراز آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی قزوین و آوج [۳۱].

با توجه به نتایج در جدول ۳، ارزیابی وضعیت تخریب سرزمین براساس شاخص افت تراز آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۴-۱۳۹۵ در محدوده‌های مطالعاتی قزوین و آوج در کلاس خیلی شدید قرار می‌گیرد.

ارزیابی وضعیت فعلی تخریب سرزمین براساس معیار آب زیرزمینی شاخص افت سطح آب زیرزمینی

جدول ۳- امتیاز معیار کمیت آب زیرزمینی- افت تراز در محدوده‌های مطالعاتی طی دوره آماری ۹۵-۱۳۹۴

محدوده مطالعاتی	میانگین افت	امتیاز وضعیت تخریب سرزمین	وضعیت فعلی
قزوین	-۱/۵	۴	خیلی شدید
آوج	-۲	۴	خیلی شدید

تخریب سرزمین نشان می‌دهد. به‌منظور ارزیابی این شاخص، مقادیر افت سطح آب زیرزمینی براساس چارچوب مدل IMDPA امتیازدهی و در چهار کلاس

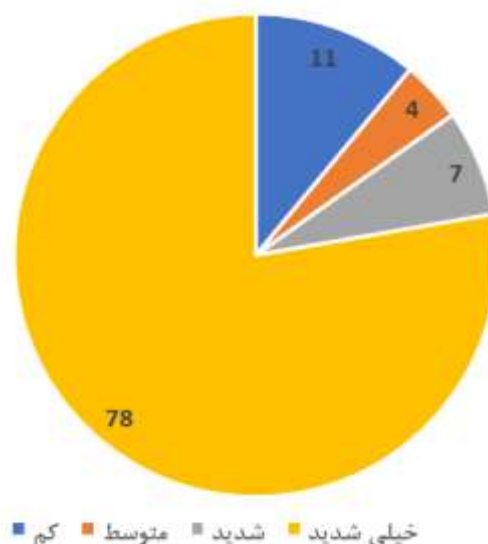
شکل ۷، طبقه‌بندی شدت تخریب سرزمین در استان قزوین را از منظر شاخص افت سطح آب زیرزمینی و سهم مساحت هر یک از کلاس‌های شدت

وسیع از منطقه است، به گونه‌ای که تنها بخش محدودی از اراضی در کلاس‌های کم و متوسط قرار دارند و سهم این کلاس‌ها نسبت به کل مساحت منطقه محدود است.

با توجه به اینکه افت شدید سطح آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فشار بر منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود، گستردگی کلاس خیلی شدید در دشت قزوین می‌تواند نشان‌دهنده بهره‌برداری فزاینده از منابع آب زیرزمینی و تشدید فرآیندهای تخریب سرزمین در این منطقه باشد.

کم، متوسط، شدید و خیلی شدید طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین سهم مساحت مربوط به کلاس خیلی شدید با مقدار ۷۸ درصد از محدوده مورد مطالعه است. پس از آن کلاس کم با ۱۱ درصد، کلاس شدید با ۷ درصد و کلاس متوسط با ۴ درصد قرار دارند.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در محدوده مورد بررسی در دشت قزوین، بخش عمده‌ای از پهنه‌های متأثر از افت سطح آب زیرزمینی در کلاس خیلی شدید تخریب سرزمین قرار گرفته‌اند. این وضعیت بیانگر افت قابل توجه سطح ایستابی در بخش



شکل ۷- کلاسه‌بندی تخریب سرزمین از منظر شاخص افت سطح آب زیرزمینی بر اساس مدل IMDPA و درصد مساحت هر یک از کلاس‌های شدت تخریب سرزمین در دشت قزوین.

با توجه به نتایج در جدول ۴، ارزیابی وضعیت تخریب سرزمین براساس شاخص هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در محدوده‌های مطالعاتی قزوین و آوج در کلاس متوسط قرار می‌گیرد.

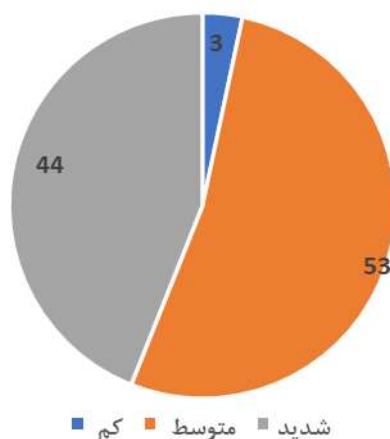
ارزیابی وضعیت تخریب سرزمین براساس شاخص هدایت الکتریکی آب زیرزمینی شاخص هدایت الکتریکی (EC)

جدول ۴- امتیاز معیار کیفیت آب زیرزمینی- هدایت الکتریکی در محدوده‌های مطالعاتی طی دوره آماری ۹۵-۱۳۹۴ تا ۹۶-۱۳۹۵

محدوده مطالعاتی	میانگین EC (میکروموس بر سانتی‌متر)	امتیاز وضعیت تخریب سرزمین	وضعیت فعلی
قزوین	۱۵۸۹/۸۳	۲	متوسط
آوج	۱۵۴۰/۲۴	۲	متوسط

شکل ۸، طبقه‌بندی شدت تخریب سرزمین در دشت قزوین را از منظر شاخص هدایت الکتریکی آب زیرزمینی و سهم مساحت هر یک از کلاس‌های شدت تخریب سرزمین نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبه این شاخص، مقادیر هدایت الکتریکی آب زیرزمینی براساس چارچوب مدل IMDPA امتیازدهی و در طبقات شدت تخریب سرزمین تحلیل شدند.

براساس نتایج، بیشترین سهم مساحت مربوط به کلاس متوسط با مقدار ۵۳ درصد از مساحت محدوده مورد مطالعه است. پس از آن کلاس شدید با ۴۴ درصد قرار دارد، درحالی‌که کلاس کم تنها ۳ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شود و کلاس خیلی شدید در محدوده مورد بررسی مشاهده نشد.



شکل ۸- کلاسه‌بندی تخریب سرزمین از منظر شاخص هدایت الکتریکی آب زیرزمینی براساس مدل IMDPA و درصد مساحت پهنه‌های متأثر در دشت قزوین.

با توجه به توزیع فضایی نتایج، در بازه زمانی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ می‌توان بیان کرد که اگرچه بخش قابل توجهی از منطقه در کلاس‌های متوسط و شدید قرار دارد، اما عدم مشاهده کلاس خیلی شدید نشان می‌دهد که شدت شوری آب زیرزمینی در بیشتر نقاط هنوز به مرحله بحرانی نرسیده است. با این حال، گستردگی کلاس‌های متوسط و شدید می‌تواند بیانگر روند افزایش املاح محلول در آب زیرزمینی و کاهش تدریجی کیفیت آب در برخی بخش‌های دشت قزوین باشد (شکل ۶ و شکل ۸). تداوم این روند در صورت مدیریت نامناسب منابع آب می‌تواند به کاهش کیفیت آب آبیاری، افت حاصلخیزی خاک و تشدید فرآیندهای تخریب سرزمین در منطقه منجر شود.

طبقه‌بندی شدت تخریب سرزمین در دشت قزوین را از منظر شاخص نسبت جذب سدیم در آب زیرزمینی و سهم مساحت هر یک از کلاس‌های شدت تخریب سرزمین در جدول ۵ نشان می‌دهد که براساس نتایج، کل محدوده مورد مطالعه در دشت قزوین در کلاس کم قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که ۱۰۰ درصد از مساحت منطقه (۳۷۰۵/۷۴ کیلومتر مربع) در این کلاس طبقه‌بندی شده و هیچ بخشی از منطقه در کلاس‌های متوسط (۱۸-۲۶) و شدید (۲۶-۳۲) مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد که از نظر شاخص نسبت جذب سدیم، کیفیت آب زیرزمینی در محدوده مورد بررسی در شرایط مطلوب قرار داشته و خطر تخریب سرزمین ناشی از این شاخص در منطقه مشاهده نمی‌شود.

شاخص نسبت جذب سدیم

جدول ۵- امتیاز معیار کیفیت آب زیرزمینی- نسبت جذب سدیم در محدوده های مطالعاتی طی دوره آماری ۹۵-۱۳۹۴ تا ۹۶-

۱۳۹۵

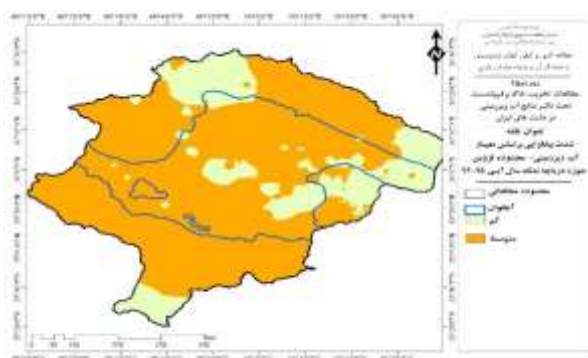
محدوده مطالعاتی	میانگین نسبت جذب سدیم	امتیاز وضعیت تخریب سرزمین	وضعیت فعلی
قزوین	۳/۰۴	۱	کم
آوج	۲/۳۷	۱	کم

ارزیابی شدت تخریب سرزمین

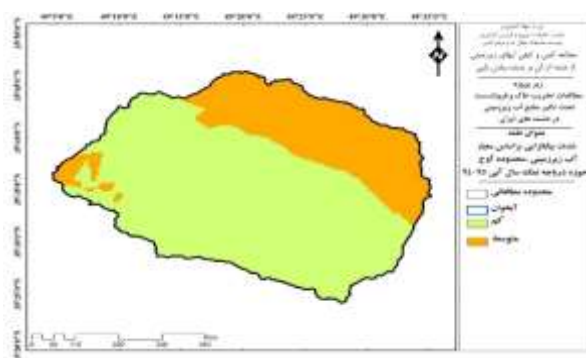
به منظور تحلیل جامع شدت تخریب سرزمین، ابتدا ارزیابی براساس مدل اصلی IMDPA (مبتنی بر شاخص های آب زیرزمینی) انجام شد و سپس با افزودن نرخ فرونشست زمین و بازتعریف آستانه های طبقات، مدل توسعه یافته IMDPAS مورد استفاده قرار گرفت. در این مرحله، دو معیار «آب زیرزمینی» و «نرخ فرونشست زمین» از طریق هم پوشانی مکانی و با استفاده از رابطه (۲) تلفیق شدند و نتایج در قالب دو سناریو مقایسه گردیدند.

نتایج مدل اصلی (IMDPA)

براساس نتایج حاصل از مدل سه فاکتوره IMDPA (شکل ۹ و ۱۰)، حدود ۷۸ درصد از مساحت منطقه در طبقه «متوسط» و ۲۲ درصد در طبقه «کم» قرار دارد. در این مدل، طبقات «شدید» و «خیلی شدید» سهم قابل توجهی نداشتند. این توزیع نشان می دهد که در چارچوب مدل سنتی مبتنی بر شاخص های کیفی و کمی آب زیرزمینی، بخش عمده منطقه در وضعیت هشدار قرار دارد، اما هنوز به سطح بحرانی وارد نشده است.



(ب)

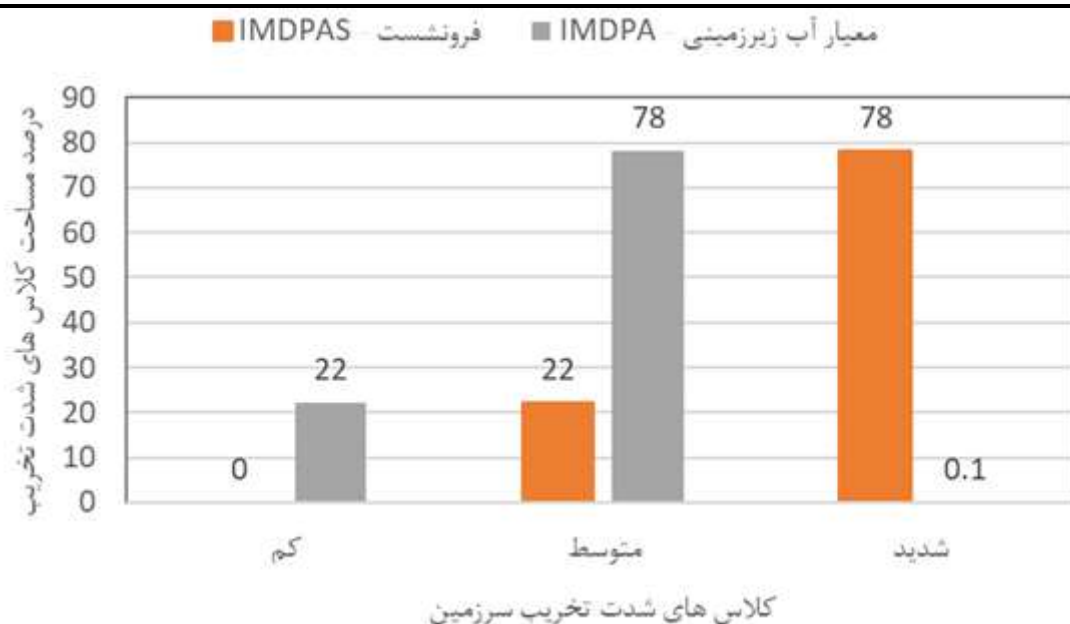


(الف)

شکل ۹- شدت بیابانزایی برطبق معیار آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی الف) قزوین و ب) آوج.

شکل های ژئومکانیکی سطح زمین را در نظر نمی گیرد.

با این حال، این برآورد صرفاً منعکس کننده شرایط هیدروژئوشیمیایی و افت تراز آب بوده و تغییر



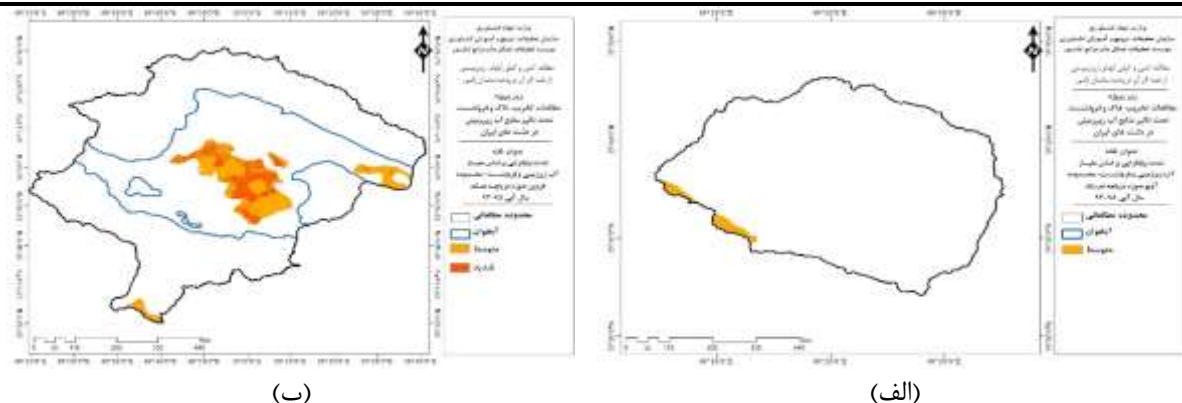
شکل ۱۰- کلاسه بندی شدت تخریب سرزمین با استفاده از معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در دشت قزوین با استفاده از مدل اصلی (IMDPA) و مدل جدید (IMDPAS).

غیرقابل بازگشت تخلیه آبخوان، حساسیت به مراتب بالاتری در شناسایی پهنه های بحرانی نسبت به شاخص های صرفاً هیدروژئولوژیکی دارد و مدل ارتقایافته توانسته است واقعیت های عینی تخریب سرزمین در دشت قزوین را با دقت بیشتری برآورد نماید.

نتایج مدل توسعه یافته (IMDPAS)

با ورود نرخ فرونشست زمین به عنوان فاکتور چهارم و بازتعریف آستانه های طبقات (جدول ۲)، تغییر معناداری در الگوی شدت تخریب مشاهده شد (شکل ۱۱). در این مدل، وسعت طبقه «شدید» با افزایش به ۷۸ درصد رسید، درحالی که سهم طبقه «متوسط» ۷۲ درصد کاهش یافت.

مقایسه تطبیقی بین معیار آب زیرزمینی در مدل سنتی IMDPA و معیار فرونشست در مدل ارتقایافته IMDPAS در شکل ۱۰، تفاوت های بنیادینی را در قدرت تشخیص این دو رویکرد آشکار می سازد. براساس نتایج معیار آب زیرزمینی، بخش اعظمی از منطقه (۷۸ درصد) در کلاس تخریب متوسط قرار گرفته و تنها سهم ناچیزی (۰/۱ درصد) به کلاس شدید اختصاص یافته است؛ درحالی که با جایگزینی و تحلیل معیار فرونشست زمین در مدل IMDPAS، یک جابه جایی آشکار در شدت تخریب مشاهده می شود، به طوری که ۷۸ درصد از مساحت منطقه در کلاس تخریب شدید قرار گرفته و سهم کلاس متوسط به ۲۲ درصد تقلیل یافته است. این تغییر جهت در نتایج، نشان دهنده آن است که شاخص فرونشست زمین به دلیل بازنمایی اثرات تجمعی و



شکل ۱۱- شدت بیابانزایی برطبق معیار آب زیرزمینی و فرونشست در محدوده مطالعاتی الف) قزوین و ب) آوج.

طبقات «کم» و «متوسط» قرار داشت؛ درحالی که در مدل چهارفاکتوره IMDPAS، ۷۸ درصد از مساحت منطقه (معادل حدود ۶۳۰ کیلومتر مربع) به طبقه «شدید» منتقل شد.

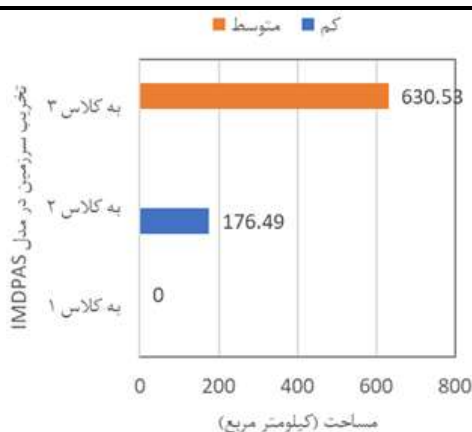
تحلیل کلاس‌های تخریب سرزمین براساس خروجی مدل IMDPAS نشان می‌دهد که محدوده مورد مطالعه به‌طور جدی تحت تأثیر فرآیندهای تخریبی قرار گرفته است. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۱۱، بیشترین گستره مساحتی با مقدار ۶۳۰/۵۳ کیلومتر مربع متعلق به کلاس ۳ (تخریب شدید) است و پس از آن، کلاس ۲ (تخریب متوسط) مساحتی معادل ۱۷۶/۴۹ کیلومتر مربع را به خود اختصاص داده است. عدم وجود اراضی در طبقه تخریب کم (کلاس ۱) در این مدل، حاکی از آن است که کل محدوده مطالعاتی از شرایط پایداری خارج شده و در سطوح مختلفی از بحران قرار دارد.

این تغییر نشان می‌دهد که فرونشست در دشت قزوین یک پدیده ثانویه یا حاشیه‌ای نیست، بلکه عامل اصلی و تعیین‌کننده در تشدید تخریب سرزمین است. مدل‌های سنتی که صرفاً بر شاخص‌های آب زیرزمینی تکیه دارند، قادر به آشکارسازی کامل شدت واقعی تخریب نیستند؛ زیرا پیامدهای ژئومکانیکی افت سطح آب زیرزمینی را لحاظ نمی‌کنند.

این جابه‌جایی ساختاری در توزیع کلاس‌ها نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از پهنه‌هایی که در مدل اصلی در آستانه طبقه «متوسط» قرار داشتند، با لحاظ نرخ فرونشست به طبقه «شدید» منتقل شده‌اند. به بیان دیگر، مدل جدید حساسیت بیشتری نسبت به مخاطره‌های ژئودینامیکی نشان داده و وضعیت واقعی تخریب را با دقت بالاتری آشکار می‌کند.

در ادامه، شدت تخریب سرزمین براساس دو معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین که در مرحله قبل تعیین گردید، ارزیابی شد (شکل ۱۱). به این منظور، با هم‌پوشانی معیار آب زیرزمینی و فرونشست و با استفاده از رابطه (۲)، ابتدا ارزیابی با استفاده از کلاسه‌بندی مدل IMDPA و بار دیگر با تغییر کلاسه‌بندی با استفاده از مدل IMDPAS صورت گرفت. در ادامه، تفاوت‌های شدت تخریب سرزمین در هر دو طبقه‌بندی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مقایسه مستقیم تغییرات کلاس‌های شدت تخریب سرزمین با استفاده از دو مدل (شکل ۱۲) بیانگر آن است که افزودن فاکتور فرونشست نه تنها موجب تغییر درصد کلاس‌ها شده، بلکه ساختار ارزیابی را نیز بازتعریف کرده است. در مدل سه‌فاکتوره، تقریباً کل منطقه (حدود ۹۹ درصد) در



شکل ۱۲- تغییرات کلاس‌های شدت تخریب سرزمین با ورود نرخ فرونشست زمین در دشت قزوین با استفاده از مدل جدید (IMDPAS).

معرض فشار شدید بر آبخوان آبرفتی خود قرار دارد. چنین وضعیتی با الگوی عمومی تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک همخوان است؛ جایی که بهره‌برداری فراتر از ظرفیت اکولوژیک، همراه با خشکسالی‌های پی‌درپی، موجب تشدید بیابان‌زایی، کاهش پایداری اکوسیستم و افزایش آسیب‌پذیری سرزمین می‌شود [۳۰، ۱۱، ۱۹].

نتایج حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی راداری برای سال ۱۳۹۵ نشان داد که حدود ۸۷۰ کیلومتر مربع از محدوده مورد مطالعه تحت تأثیر فرونشست زمین قرار دارد و حدود ۸۶ درصد از پهنه‌های فرونشستی در بازه ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال واقع شده‌اند. تمرکز مکانی فرونشست در محدوده آبخوان اصلی دشت قزوین نشان می‌دهد که این بخش از دشت، به دلیل برداشت شدید آب زیرزمینی، افت مداوم سطح ایستابی و وجود رسوبات آبرفتی ریزدانه، از حساسیت بالایی نسبت به تراکم و نشست برخوردار است. بنابراین، فرونشست در دشت قزوین را نمی‌توان صرفاً یک پیامد سطحی یا موضعی دانست، بلکه این پدیده بیانگر تغییرات ساختاری در درون آبخوان و کاهش تدریجی توان تنظیم‌گری هیدرولوژیک آن است. این نتیجه با مطالعات پیشین انجام‌شده در دشت قزوین که ارتباط میان افت آب زیرزمینی، ویژگی‌های آبخوان و فرونشست را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد [۲، ۳، ۱۳].

بازتعریف آستانه‌های طبقات در مدل IMDPAS بر این واقعیت استوار است که مدل اصلی IMDPA بر مبنای شرایط دهه‌های گذشته طراحی شده بود؛ درحالی‌که طی سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، تشدید برداشت از منابع آب زیرزمینی و بروز فرونشست گسترده، ساختار مخاطرات محیطی منطقه را دگرگون کرده است. کلاسه‌بندی جدید حاصل اجرای مدل توسعه‌یافته IMDPAS است و بازتاب‌دهنده شرایط کنونی سیستم آبخوان و پاسخ مکانیکی رسوبات آبرفتی به افت فشار آب منفذی در محدوده مطالعه می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که دشت قزوین وارد مرحله «تخریب ساختاری سرزمین» شده است؛ مرحله‌ای که در آن، علاوه بر افت کمی و کیفی آب زیرزمینی، تغییر شکل دائمی سطح زمین نیز به‌عنوان شاخص قطعی تخریب ظاهر شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تخریب سرزمین در دشت قزوین حاصل برهم‌کنش هم‌افزای فشارهای اقلیمی، برداشت فزاینده از منابع آب زیرزمینی و پاسخ ژئومکانیکی آبخوان به افت سطح ایستابی است. دشت قزوین به‌عنوان یکی از کانون‌های مهم کشاورزی کشور، به دلیل قرارگیری در اقلیم نیمه‌خشک، کاهش نزولات جوی و وابستگی گسترده نظام بهره‌برداری کشاورزی به منابع آب زیرزمینی، در

ایران، پدیده‌ای فراگیر و ساختاری است که ریشه اصلی آن را باید در ناپایداری نظام بهره‌برداری از آبخوان‌ها جست‌وجو کرد.

در مقیاس جهانی نیز نتایج این مطالعه با شواهد گزارش‌شده از آبخوان‌های تحت تنش در مناطق مختلف جهان قابل مقایسه است. مطالعات انجام‌شده در دشت سن‌واکین کالیفرنیا نشان داده‌اند که برداشت شدید آب زیرزمینی می‌تواند به فرونشست گسترده و کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان منجر شود [۱۷]. در دلتای نیل نیز تغییر در نرخ برداشت و تغذیه آبخوان به‌عنوان عامل کنترل‌کننده سرعت فرونشست معرفی شده است [۱]. همچنین شواهد ژئودتیکی از برخی حوضه‌های شهری و کشاورزی اندونزی نشان می‌دهد که افت آب زیرزمینی می‌تواند موجب تغییر شکل پایدار سطح زمین و افزایش مخاطرات محیطی شود [۵]. بر همین اساس، پژوهش‌های جهانی تأکید می‌کنند که فرونشست باید به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی تخریب سرزمین و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شود [۸].

از دیدگاه هیدروژئولوژیک، افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌هایی از آبخوان دشت قزوین 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 داشته و طی دو دهه اخیر به بیش از ۱۸ متر رسیده است [۱۹].

در این پژوهش، شاخص افت سطح آب زیرزمینی بخش عمده‌ای از محدوده را در طبقه تخریب «خیلی شدید» قرار داد و نشان داد که افت کمی منابع آب زیرزمینی مهم‌ترین محرک تخریب سرزمین در منطقه است. از نظر کیفی، شاخص هدایت الکتریکی در برخی بخش‌ها در طبقات متوسط و شدید قرار گرفت، در حالی که شاخص نسبت جذب سدیم عمدتاً در طبقه کم ارزیابی شد. این الگو نشان می‌دهد که اگرچه شوری آب زیرزمینی و پیامدهای آن در تشدید تخریب نقش دارند، اما بحران اصلی در دشت قزوین

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات و گزارش‌های جدیدتر نشان می‌دهد که فرونشست زمین در دشت قزوین احتمالاً وارد مرحله‌ای شتاب‌دار شده است. درحالی‌که داده‌های پایه این پژوهش در سال ۱۳۹۵، نرخ فرونشست را عمدتاً در بازه ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال نشان می‌داد، نتایج و گزارش‌های سال‌های اخیر، از جمله مطالعه جناب و همکاران درباره اثر فرونشست بر میزان آب برگشتی به آبخوان دشت قزوین، بیانگر تشدید نرخ فرونشست در کانون‌های بحرانی و گزارش مقادیری بالاتر، تا حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال، است [۱۳]. این افزایش می‌تواند نشان‌دهنده ورود آبخوان به مرحله تراکم پیشرفته و تا حد زیادی برگشت‌ناپذیر رسوبات باشد؛ مرحله‌ای که در آن کاهش فشار آب حفره‌ای باعث افزایش تنش مؤثر بر اسکلت خاک، تراکم لایه‌های ریزدانه و افت دائمی ظرفیت ذخیره آبخوان می‌شود [۳۰، ۱۷]. از این منظر، فرونشست نه‌تنها پیامد افت آب زیرزمینی است، بلکه خود به عاملی برای کاهش نفوذپذیری، کاهش آب برگشتی و تضعیف توان بازآبایی طبیعی آبخوان تبدیل می‌شود و یک چرخه بازخورد مثبت میان افت آب، تراکم آبخوان و تشدید تخریب سرزمین ایجاد می‌کند [۱۳].

نتایج این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در سایر دشت‌های آبرفتی ایران نیز همخوانی دارد. حسین‌زاده و همکاران در دشت مرکزی قاین نشان دادند که افت سطح آب زیرزمینی و تمرکز برداشت‌های کشاورزی، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی مکانی فرونشست دارند [۱۲]. شرافت و همکاران نیز با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای پایا در دشت ابرکوه یزد، ارتباط میان برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و تغییر شکل تدریجی سطح زمین را تأیید کردند [۲۵]. همچنین روستایی و همکاران در دشت مرنده نشان دادند که الگوی فرونشست به‌شدت تحت تأثیر شرایط هیدروژئولوژیک، تراکم چاه‌های بهره‌برداری و افت سطح آب زیرزمینی قرار دارد [۲۴]. همسویی نتایج دشت قزوین با این مطالعات نشان می‌دهد که فرونشست در دشت‌های آبرفتی

در مرحله کنونی، افت کمی آب زیرزمینی و پیامد ژئومکانیکی آن، یعنی فرونشست زمین، است. تداوم این روند می‌تواند با کاهش رطوبت خاک، تضعیف پوشش گیاهی، افزایش شوری خاک، ناپایداری ساختمان خاک و افزایش حساسیت سطح زمین نسبت به فرسایش بادی و تولید گردوغبار همراه شود [۲۸،۲۶].

مقایسه نتایج مدل کلاسیک IMDPA با مدل توسعه‌یافته IMDPAS نشان داد که افزودن شاخص فرونشست زمین، تصویر متفاوت و واقع‌بینانه‌تری از شدت تخریب سرزمین ارائه می‌دهد [۲۳]. در مدل کلاسیک IMDPA که تنها بر شاخص‌های آب زیرزمینی شامل افت سطح آب، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم متکی است، بخش عمده‌ای از منطقه در طبقات تخریب کم و متوسط قرار گرفت. اما با افزودن شاخص نرخ فرونشست و بازتعریف طبقات در مدل IMDPAS، حدود ۷۸ درصد از محدوده در طبقه تخریب شدید قرار گرفت و حدود ۶۳۰ کیلومتر مربع از اراضی از طبقه متوسط به طبقه شدید منتقل شد. این تغییر نشان می‌دهد که حذف شاخص‌های ژئومکانیکی از ارزیابی تخریب سرزمین می‌تواند به کم‌برآوردی جدی شدت بحران در دشت‌های کشاورزی وابسته به آب زیرزمینی منجر شود. این نتیجه با مطالعاتی که بر ضرورت تلفیق فرونشست با مدل‌های ارزیابی تخریب و بیابان‌زایی تأکید کرده‌اند، سازگار است [۲۷، ۲۴، ۲۳، ۱۵].

نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه مدل IMDPAS است. در این مدل، فرونشست زمین نه به‌عنوان پیامدی فرعی، بلکه به‌عنوان یک شاخص ژئودتیکی و تصمیم‌ساز در چارچوب ارزیابی تخریب سرزمین وارد شده است. مدل‌های متداول می‌توانند تغییرات هیدرولوژیک و هیدروشیمیایی را آشکار کنند، اما معمولاً قادر به بازنمایی پاسخ مکانیکی اسکلت آبخوان نیستند. مدل IMDPAS با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای فرونشست و شاخص‌های آب زیرزمینی، امکان شناسایی تخریب پنهان و ساختاری آبخوان را فراهم می‌کند. بر این اساس، در دشت

قزوین فرونشست زمین یک نشانه هشداردهنده از ورود آبخوان به مرحله تراکم برگشت‌ناپذیر، افت ظرفیت ذخیره و کاهش توان احیاءپذیری است [۱۱، ۱۶]. در این پژوهش، معیار مقایسه مدل پایه IMDPA و مدل توسعه‌یافته IMDPAS بر مبنای توان مدل در بازنمایی همزمان فشار هیدروژئولوژیک و پاسخ ژئومکانیکی آبخوان در نظر گرفته شد. از آنجا که فرونشست زمین یکی از پیامدهای مستقیم افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی است، مدلی که این متغیر را نیز وارد ارزیابی کند، از نظر تبیین فرآیند تخریب سرزمین دارای جامعیت بیشتری است. بنابراین، افزایش انطباق مکانی پهنه‌های تخریب شدید با نواحی دارای افت بیشتر سطح آب و وقوع فرونشست، به‌عنوان نشانه‌ای از بهبود قابلیت تفسیر مدل توسعه‌یافته در نظر گرفته شد. با این حال، اعتبارسنجی نهایی کمی این مدل نیازمند داده‌های میدانی مستقل است.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دشت قزوین وارد مرحله‌ای پیشرفته از تخریب ساختاری سرزمین شده است؛ مرحله‌ای که در آن افت آب زیرزمینی، تراکم رسوبات آبرفتی، فرونشست زمین، کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان و افزایش حساسیت اراضی به تخریب، به‌صورت هم‌افزا عمل می‌کنند. تداوم بهره‌برداری کشاورزی بدون کنترل برداشت آب زیرزمینی، نه‌تنها پایداری تولید را تهدید می‌کند، بلکه می‌تواند ظرفیت طبیعی آبخوان برای بازسازی و ذخیره آب را نیز به‌طور دائمی کاهش دهد. بنابراین، اجرای سیاست‌های مدیریتی فوری شامل کنترل و محدودسازی برداشت از چاه‌ها، انسداد چاه‌های غیرمجاز، اصلاح الگوی کشت، افزایش بهره‌وری آبیاری، تغذیه مصنوعی آبخوان، پایش مستمر فرونشست با داده‌های InSAR و استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی IMDPAS برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی ضروری است. مدل IMDPAS می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری، مدیریت پایدار آبخوان و کاهش

۹۹۰۵۴۳-۹۹۰۲۵-۰۳۰-۰۹-۰۹-۰۱ و مصوب در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور است. نویسندگان این مقاله بر خود فرض می‌دانند از همکاری و پشتیبانی آن مؤسسه، همچنین، از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی و وزارت نیرو جهت اخذ داده‌های فرونشست زمین و کمیت و کیفیت آب زیرزمینی سپاسگزاری و قدردانی نمایند.

مخاطرات تخریب سرزمین در دشت قزوین و سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک مشابه به‌کار گرفته شود.

سپاسگزاری

این اثر بر گرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی با عنوان «مطالعات تخریب خاک و فرونشست تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی در دشت‌های ایران»، با کد

References

- [1]. Abd-Elhamid, H. F., Abd-Elkader, B. S., Wahed, O., Zeleňáková, M., & Abd-Elaty, I. (2022). Assessment of changing the abstraction and recharge rates on the land subsidence in the Nile delta, Egypt. *Water*, 14(7), 1096. <https://doi.org/10.3390/w14071096>
- [2]. Babaei, S., Mousavi, Z., Masoumi, Z., Malekshah, A.H., Roostaei, M. and Aflaki, M. (2020). Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 41(12), pp.4780-4798, <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1724345>.
- [3]. Babaei S S, Mousavi Z, Roostaei M. (2016). Time Series Analysis of SAR Images Using Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer (PS) Approaches to Determining Subsidence Rate of Qazvin Plain. *JGST*, 5 (4): 95-111 [in Farsi].
- [4]. Bulukazari, S., Babazadeh, H., Ebrahimipak, N., Mousavi-Jahromi, S. H., & Ramezani_etedali, H. (2021). Development of production functions for important cereals of Qazvin plain under water shortage and salinity stress using AquaCrop model and artificial neural network. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(2), 123-137, <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.354490.867>[in Farsi].
- [5]. Bramanto, B., Gumilar, I., Sidiq, T. P., Rahmawan, Y. A., & Abidin, H. Z. (2023). Geodetic evidence of land subsidence in Cirebon, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 100933. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100933>
- [6]. Brown, S., & Nicholls, R. J. (2015). Subsidence and human influences in mega deltas: The case of the Ganges–Brahmaputra–Meghna. *Science of the Total Environment*, 527–528, 362–374, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.124>.
- [7]. Chai, L., Wei, L., Cai, P., Liu, J., Kang, J., & Zhang, Z. (2024). Risk assessment of land subsidence based on GIS in Suzhou City, China. *Scientific Reports*, 14, 11377, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62108-w>
- [8]. Fang, J., Nicholls, R. J., Brown, S., Lincke, D., Hinkel, J., Vafeidis, A. T., Du, S., Zhao, Q., Liu, M., & Shi, P. (2022). Benefits of subsidence control for coastal flooding in China. *Nature Communications*, 13, 6946, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34525-w>
- [9]. Fernández Torres, E. A., Cabral Cano, E., Salazar Tlaczani, L., & Solano Rojas, D. (2025). Economic risk of differential subsidence in Mexico City (2014–2022). *Natural Hazards*, 121(3), 2507–2534, <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06891-9>
- [10]. Golshiriasfahani, Z., & Sarai, M. (2013). An investigation of human activities affecting desertification in arid rural areas. *Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 1(1), 35–52 [in Farsi].
- [11]. Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in

- Iran. *Science Advances*, 10(19), <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3039>
- [12]. Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., Mohammadpour, Z. (2023). Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), pp. 99-126
<https://doi.org/10.22067/geoeoh.2022.75138.1169>.
- [13]. Janab, M., Mehnoosh, F., Ramazani Etedali, A., Omid, H., & Khoshyar, M. (2025). Study of the effect of land subsidence on the amount of return water to the aquifer of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 19(2), 263–274 [In Farsi].
- [14]. Janbaz Fotamy, M., Kholghi, M., Abdeh Kolahchi, A. and Roostaei, M., 2020. Land subsidence assessment due to groundwater exploration by using differential radar interferometry technique, case study: Qazvin province. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), pp.133-14, <https://doi.org/10.1001.1.17352347.1399.16.3.10.8> [in Farsi].
- [15]. Khosravi, H., Zehtabian, Gh. R., Ahmadi, H., Azarnivand, H., & Ghaiebi, H. Gh. (2014). Hazard assessment of desertification as a result of soil and water resource degradation in Kashan region, Iran. *Desert*, 19(1), 44–55.
- [16]. Kok, S., & Costa, A. L. (2021). Framework for economic cost assessment of land subsidence. *Natural Hazards*, 106(3), 1931–1949, <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04520-3>
- [17]. Lees, M., & Knight, R. (2024). Quantification of record-breaking subsidence in California's San Joaquin Valley. *Communications Earth & Environment*, 5, 677, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01778-w>.
- [18]. Mardani Najafabadi, M., & Mirzaei, A. (2019). Evaluation of the impact of policy programs toward achieving the goal of water resource sustainability in Qazvin Plain. *Journal of Agricultural Research*, 11(3), 155–176 [in Farsi].
- [19]. 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), pp. 469-487 [in Farsi].
- [20]. Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35, L16403, <https://doi.org/10.1029/2008GL033814>
- [21]. Naeimi, M., Jalili, A., Shahbazi, R., Zandifar, S., Lotfinasabas, S., & Gohardoust, A. (2025). Numerical assessment of land degradation considering the land subsidence rate in 11 watersheds of Iran. *Town and Country Planning*, 16(2), 363–382
<https://doi.org/10.22059/jtcp.2025.386471.670485>.
- [22]. Qazvin Regional Water Company. (2008). Report on groundwater studies of Qazvin Province [in Farsi].
- [23]. Rafi Sharifabad, J., & Alipour, A. (2023). Formulation and evaluation of desertification control strategies using SWOT model. *Amad and Defense Technology Quarterly*, 5(2), 47–70.
- [24]. Rostaei, S., Hejazi, S. A., Mokhtari, D., & Amani, D. (2026). Assessment of land subsidence in Marand Plain using radar interferometry (InSAR). *Geography and Environmental Hazards*, 15(1), 72–9, <https://doi.org/10.22067/geoeoh.2026.97067.1633>.
- [25]. Sajjad, M. M., Wang, J., Afzal, Z., Hussain, S., Siddique, A., Khan, R., Ali, M., & Iqbal, J. (2023). Assessing the impacts of groundwater depletion and aquifer degradation on land subsidence in Lahore, Pakistan: A PS-InSAR approach for sustainable urban development. *Remote Sensing*, 15(22), 18–54, <https://doi.org/10.3390/rs15225418>

- [26]. Saleh, I., Khazaei, M., & Naeimi, M. (2023). Desertification intensity affected by groundwater and land subsidence in Maharloo-Bakhtegan watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 171–184, <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11906.1187> [in Farsi].
- [27]. Sharafat, M., Ansari, A., Mojtahedzadeh, S. H., & Ghorbani, A. (2020). Monitoring land subsidence in Abarkuh Plain, Yazd, using persistent scatterer interferometric radar technique. *Arid Biome*, 9(2), 121–136[in Farsi].
- [28]. Soleimanpour, S. M., Naeimi, M., Rahmati, O., & Moatamednia, M. (2024). Investigation of desertification using groundwater and subsidence criteria by the IMDPA model (case study: Rafsanjan watershed). *Environmental Erosion Research Journal*, 14(2), 126–140, <https://doi.org/10.61186/jeer.14.2.8> [in Farsi].
- [29]. Soltani, M. M., Soltani, H., & Golouei, M. (2025). Land subsidence due to groundwater level decline in Qazvin Plain (Buin Zahra area) using radar interferometry. *Geographical Researches*, 40(3), <https://doi.org/10.58209/geores.40.3.221> [in Farsi].
- [30]. Sun, H., Grandstaff, D., & Shagam, R. (1999). Land subsidence due to groundwater withdrawal. *Environmental Geology*, 37(4), 290–296, <https://doi.org/10.1007/s002540050386>
- [31]. Zandifar, S. (2023). Studies on soil degradation and subsidence under the influence of underground water resources in the plains of Iran (Salt Lake basin), final report, Research Institute of Forests and Rangelands [in Farsi].
- [32]. Zehtabian, Gh., & Esfandiari, M. (2010). Investigation of the effects of agricultural development and exploitation of groundwater resources in desertification of the Tashk region (Fars Province). *Arid Biome*, 1(2), 1–8 [in Farsi].

Land Degradation Assessment with Emphasis on Groundwater Depletion and Land Subsidence in the Qazvin Plain (Research Paper)

1- Maryam Naeimi*, Research Associate Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran.

naeimi@rifra.ac.ir

2- Adel Jalili², Research Professor, Botany Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran.

3- Samira Zandifar, Research Associate Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran.

Received: 23 Jun. 2026

Accepted: 27 Aug. 2026

Abstract

Land degradation in alluvial plains is driven by the synergistic effects of groundwater depletion and the resulting geomechanical responses of the aquifer. This study aimed to enhance the accuracy of degradation assessments in the Qazvin Plain by integrating land subsidence rates—derived from InSAR analysis—into the conventional IMDPA model, leading to the development of the IMPDAS (Modified IMDPA for Subsidence) model. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) results revealed that a total area of 870 km² is affected by land subsidence, with 86% of these regions experiencing subsidence rates between 5 and 10 cm/year. Results from the conventional IMDPA model (based solely on hydrogeological indicators) classified 78% of the area as “moderate” and 22% as “low” degradation, failing to identify any critical zones. However, implementation of the developed IMPDAS model by incorporating the subsidence variable triggered a structural shift in class distribution; the “severe” degradation class surged to 78% (equivalent to 630.53 km²), while the “low” degradation class was entirely eliminated. These findings demonstrate that classical models significantly underestimate the actual severity of the crisis by neglecting geomechanical consequences and irreversible sediment compaction. The IMPDAS model, by revealing structural and hidden aquifer degradation, is proposed as a strategic tool for sustainable water resource management and the prioritization of critical zones in plains prone to land subsidence.

Keywords: Land degradation, Land subsidence, Water table drawdown, IMPDAS model, Qazvin Plain.