

## پتانسیل فرونشست دشت شازند ناشی از افت آب زیرزمینی با مدل وزن‌دهی و آنالیز صحت‌سنجی آن با استفاده از تداخل‌سنجی راداری

صالح طاهری زنگی<sup>۱</sup>، عبدالرضا واعظی‌هیر<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۷/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۱۱/۲۲)

### چکیده

در پژوهش حاضر عوامل مؤثر بر فرونشست سطح زمین در دشت شازند با به‌کارگیری روش وزن‌دهی و تحلیل سلسله‌مراتبی بررسی شده است. در این مدل هفت پارامتر مؤثر، محیط آبخوان، کاربری زمین، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل و افت سطح آب زیرزمینی طبق نظر کارشناسی ارائه شده، رتبه‌بندی و کلاس‌بندی شد و از تلفیق این پارامترها در محیط ArcGIS نقشه آسیب‌پذیری دشت با شاخص بین ۸۷ تا ۱۷۰ به دست آمد. سپس، به منظور بهینه‌سازی و تطابق بیشتر، هفت لایه مؤثر بر فرونشست فازی‌سازی شده و نقشه نهایی تهیه شد. در مرحله بعد، با اعمال وزن‌های کارشناسی به روش AHP نیز نقشه نهایی پتانسیل فرونشست تهیه شد. میزان آسیب‌پذیری فرونشست دشت با تلفیق لایه‌ها در محیط Arc GIS طی یک سال (۱۳۹۵-۱۳۹۶) به دست آمد و برای صحت‌سنجی این مدل از نقشه ماهواره‌ای InSAR استفاده شد. برای بهبود نتایج به دست آمده و بهینه‌سازی وزن‌های اعمال شده از روش‌های وزن‌دهی و فازی با تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد هر سه روش همبستگی تقریباً یکسانی با داده‌های ماهواره‌ای دارند و از بین آنها، روش فازی بیشترین همبستگی را با داده‌های ماهواره‌ای و فرونشست واقعی نشان می‌دهد. بر اساس این مدل، نواحی شمالی و شمال غربی در معرض فرونشست قرار دارند. شایان یادآوری است که پالایشگاه شازند در منطقه‌ای با پتانسیل فرونشست زیاد قرار دارد و باید برنامه‌های مدیریتی لازم برای کنترل فرونشست در این نواحی اعمال شود.

**کلیدواژگان:** پتانسیل فرونشست، دشت شازند، مدل وزن‌دهی، نقشه ماهواره InSAR.

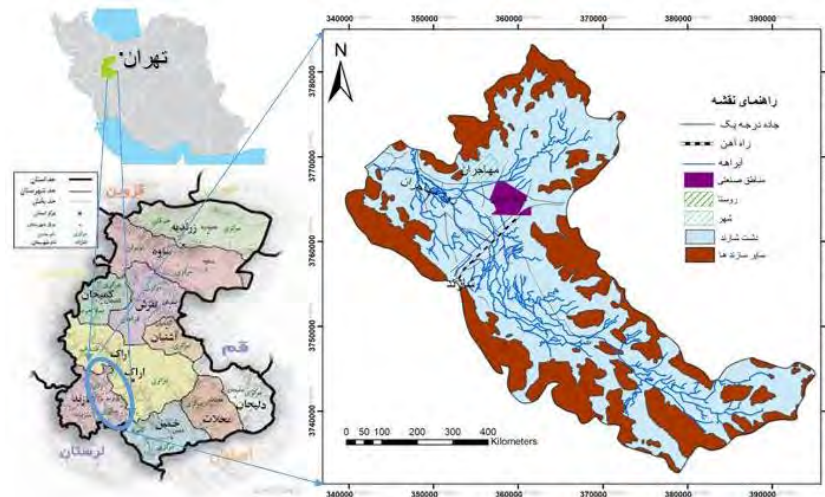
## مقدمه

فرونشست شامل پایین رفتن تدریجی یا ناگهانی سطح زمین، بر اثر برداشت مواد جامد و مایع زیرسطحی است که به دلیل فعالیت‌های طبیعی یا انسانی در ابعاد کوچک یا وسیع رخ می‌دهد [۱]. طبق تعریف یونسکو [۲]، پدیده فرونشست عبارت است از: فروریزش یا نشست سطح زمین که در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد. معمولاً این اصطلاح به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که ممکن است با بردار افقی همراه باشد، گفته می‌شود. علت اصلی فرونشست زمین توسط خروج سیالات، تراکم طبقات فوقانی و کاهش ضخامت لایه‌های سنگ و خاک است. وزن لایه‌های فوقانی سبب تراکم و کاهش ضخامت و درنهایت، فرونشست می‌شود و میزان فرونشست با حجم سیال خارج‌شده از زمین و قابلیت تراکم به‌جامانده نسبت مستقیم دارد. بلورهای موجود در سنگ‌ها، کمترین تراکم را تحمل می‌کنند و کانی‌هایی که ویژگی تراکم زیاد دارند، نظیر کانی‌های رسی یا مواد آلی، فرونشست بسیار زیادی را در زمین ایجاد می‌کنند [۳]. استخراج آب‌های زیرزمینی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، یکی از دلایل مهم فرونشست زمین است که می‌تواند خسارت‌های درخور توجهی به تأسیسات زیربنایی، نقاط حساس و خطوط انتقال نیرو وارد کند [۴]. افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی موجب افزایش سطح آب‌های زیرزمینی شده است [۵]. بر اساس نتایج مطالعات، به دلیل بهره‌برداری بیش از حد مقادیر از سال ۱۳۷۰ دشت شازند به‌عنوان دشت ممنوعه اعلام شده است [۶]. در نقاط مختلف دنیا از روش تداخل‌سنجی راداری برای شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده کرده‌اند [۷-۱۰]. طی چند سال اخیر، در ایران نیز از این روش در پایش تغییر شکل‌های سطح به‌ویژه فرونشست استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به برخی پژوهش‌ها اشاره کرد. Moatag و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ENVISAT با روش طول باز کوتاه، فرونشست دشت مهیار جنوبی اصفهان را ۸/۶ سانتی‌متر در سال محاسبه کردند [۱۱]. در تحقیقی دیگر، افضلی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان را ارزیابی کردند [۱۲]. نادری و همکاران

(۲۰۱۸) با استفاده از یک مدل جدید (GARDLIF)، مناطق فرونشست احتمالی در آبخوان دشت سلماس را شناسایی کردند [۱۳]. همچنین، نادری و همکاران (۲۰۱۸) با ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در دشت شبستر استفاده کردند [۱۴]. خامه‌چیان و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل وزن‌دهی ALPRIFT که نوعی مدل وزن‌دهی ساده است و شامل هفت لایه مؤثر بر فرونشست (جنس لایه‌های زیرین، کاربری زمین، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی) می‌شود، میزان آسیب‌پذیری فرونشست دشت با تلفیق لایه‌ها در محیط Arc GIS را طی یک سال (۱۳۹۴-۱۳۹۵) به دست آوردند و برای صحت‌سنجی این مدل از نقشه ماهواره‌ای InSAR استفاده کردند. سپس، به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و بهینه‌سازی وزن‌ها که با نظر کارشناسی اعمال شده بود، روش‌های بهینه‌سازی Fuzzy-ALPRIFT و AHP-LPRIFT را به کار بردند و درنهایت، برای صحت‌سنجی روش‌های استفاده‌شده و به دست آوردن بهترین نتیجه ممکن، از فرونشست‌های رخ‌داده در منطقه استفاده کردند.

## منطقه مطالعه‌شده

محدوده مطالعاتی دشت شازند در حوضه آبریز قره‌چای قرار گرفته است. این محدوده با وسعتی حدود ۹۸۹/۳۸ کیلومترمربع که ۳۳۵/۶ کیلومترمربع آن را دشت و بقیه را کوهستان تشکیل می‌دهد و در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۹°/۱۶/۷ تا ۴۹°/۵۲/۳ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳°/۴۳/۲۲ تا ۳۴°/۱۱/۶ شمالی قرار گرفته است. محدوده بررسی‌شده (بلوک شازند) از شمال و شمال غرب به محدوده مطالعاتی شرا، از غرب به محدوده‌های مطالعاتی ملایر و تیره - میرقاسم و از جنوب و جنوب شرق به محدوده‌های مطالعاتی ازنا-الیگودرز و خمین و از شرق به محدوده مطالعاتی اراک محدود می‌شود که در ۳۳ کیلومتری جنوب غربی اراک قرار دارد. ارتفاعات سلسله‌کوه‌های زاگرس و ایران مرکزی مشخص‌کننده حدود طبیعی این حوضه آبریز است و ارتفاع دشت بین ۱۷۰۰ تا ۱۹۵۰ متغیر بوده و در منطقه نیمه‌خشک سرد واقع شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده

می‌دهند. بعد آبرفت‌های عهد حاضر هم مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات رودخانه‌ها و مسیل‌ها و آبرفت‌های دشت شازند را تشکیل می‌دهند و در نهایت، سازندها به آبرفت‌های سخت‌نشده عهد حاضر و زمین‌های زراعی دشت شازند ختم می‌شوند. با توجه به نقشه زمین‌شناسی قسمت عمده آبخوان دشت در واحد Qc تشکیل شده است (شکل ۲).

آبخوان دشت شازند از نوع آبخوان آزاد بوده و در دشت شازند رقوم منحنی‌های هم‌عمق آب زیرزمینی بین ۲/۶۵ تا ۴۹/۵ متر متغیر است. حداقل منحنی هم‌عمق سطح آب زیرزمینی در انتهای جنوب غربی دشت با مقدار ۵ متر (سرسختی سلفی) به وجود آمده است. در عین حال، از سمت غرب، جنوب غرب و شمال غرب به سمت شرق به عمق سطح آب افزوده می‌شود. متوسط عمق سطح آب زیرزمینی دشت در سال ۱۳۸۳ و ۱۳۹۶ به ترتیب ۱۹/۹۴ و ۲۴/۶۰ متر برآورد شده است (شکل ۳).

بالترین و پایین‌ترین تراز سطح ایستایی به ترتیب در جنوب شرقی آبخوان (ورودی دشت)، ۱۸۳۸ متر و شمال غربی (خروجی دشت)، ۲۰۰۱ متر قرار گرفته و جهت عمومی جریان آب زیرزمینی منطقه از سمت جنوب شرق به سمت شمال و شمال غرب است (شکل ۴).

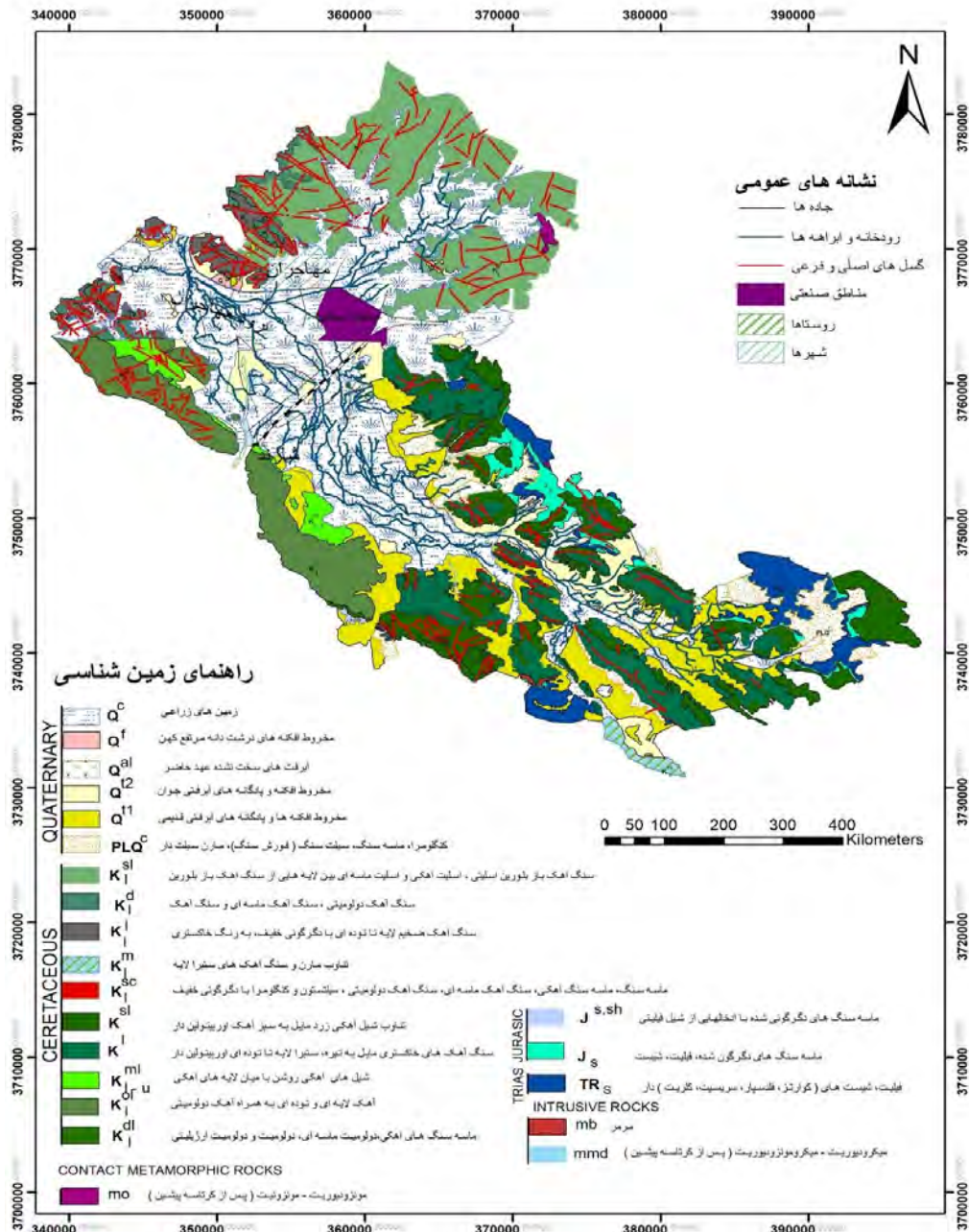
همچنین، طی مرداد ۱۳۸۳ تا مرداد ۱۳۹۶، سطح آب افقی حدود ۰/۳۴ تا ۹/۲۱ در سرتاسر دشت به‌خصوص در مرکزی دشت (شمال آبخوان) واقع در پیژومترهای آبخوان در پیژومترهای شرق نیروگاه (۹/۲۱)، باغ برافتاب (۹/۷۲) و روبه‌روی پتروشیمی (۷/۴۲) دارد؛ که این امر نشان‌دهنده

بر اساس تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری، منطقه بررسی شده در پهنه سنندج- سیرجان قرار دارد که کهن‌ترین نهشته‌های موجود در منطقه مطالعه شده مربوط به دوران مزوزوئیک با واحد اسلیت‌های مربوط به زمان تریاس است که در جنوب شرقی منطقه مطالعه شده قرار دارد و شامل فیلیت و شیست‌ها می‌شود. بعد از آن، ردیف دگرگونی ژوراسیک است که شامل رسوبات سنگی منطقه اسلیت‌های زغالی همراه با رگه‌های ماسه‌سنگ کوارتزیتی می‌شود. در آخر، ردیف سری آهک‌های کرتاسه است که سنگ‌آهک ضخیم لایه و متبلور و آهک‌های اسلیتی و اسلیت‌های آهکی کرتاسه میانی و فوقانی که کل دشت شازند را احاطه کرده‌اند که سازندهای کرتاسه میانی به سنگ‌آهک‌های اربیتولین‌دار معروف‌اند. ضخامت این سازند کارستیک در روستای عمارت به بیش از ۳۵۰ متر می‌رسد و کرتاسه‌های فوقانی از لایه‌هایی با ضخامت کم از آهک متبلور که بین رگه‌ها و لایه‌هایی از اسلیت و یا ماسه‌سنگ همراهی می‌شوند (نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگوش شازند، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور).

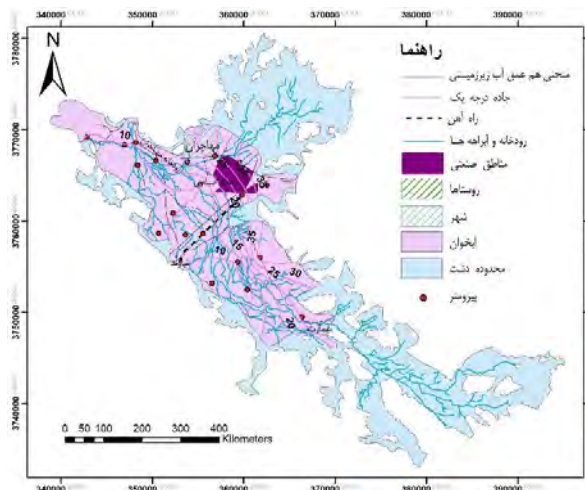
واحدهای زمین‌شناسی دوران سنوزوئیک رسوبات آبرفتی کوارترنر شامل کنگلومرا ماسه‌سنگ، سیلت سنگ و سپس، آبرفت‌های قدیمی و عهد حاضر ( $Q_{t1}$  و  $Q_{t2}$ ) که با رس‌های قرمز رنگ همراه با گراول و گاه خرده‌سنگ‌های گرد شده رخنمون دارند که در دشت شازند به حداقل ۵۰ و حداکثر ۱۰۰ متر می‌رسند و به‌صورت همگن عمده سنگ کف آبرفت‌های عهد حاضر دشت شازند را تشکیل

میلیون مترمکعب است که ۱۷ درصد حجم تخلیه توسط چشمه و قنات و ۸۳ درصد توسط چاه‌ها صورت می‌گیرد و از این حجم تخلیه برای شرب (۴ درصد)، کشاورزی (۹۳/۴ درصد) و صنعت (۲/۶ درصد) استفاده می‌شود. در آزمایش‌های پمپاژ حداکثر ضریب قابلیت انتقال ۲۵۰۰ مترمربع بر روز در مناطق مرکزی دشت محاسبه شده است که به سمت حاشیه دشت، مقدار این ضرایب هیدرودینامیکی به کمتر از ۵۰۰ مترمربع در روز می‌رسد.

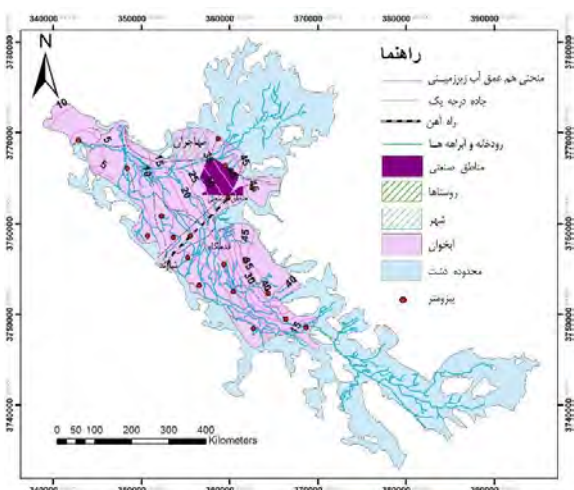
وضعیت بحرانی در این منطقه و تشدید روند افت سطح آب زیرزمینی در منطقه مطالعه شده است. افت سطح ایستابی در مناطق صنعتی حساس می‌تواند خطر فرونشست و وقوع حادثه را ممکن سازد (شکل ۵). بر اساس داده‌های گرفته‌شده از سازمان آب منطقه‌ای استان مرکزی، در دشت سازند تخلیه آب‌های زیرزمینی توسط چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق (۹۸۱ عدد)، قنات‌ها (۷۸ عدد) و چشمه‌ها (۶۰ عدد) که تعداد جمع منابع آبی ۱۱۱۹ است. حجم کل تخلیه (MCM) ۲۶۷/۵۶۱



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده (برگرفته از نقشه سازمان زمین‌شناسی کشور و ذبیحی، ۱۳۸۳ و واعظی‌پور، ۱۳۶۴)

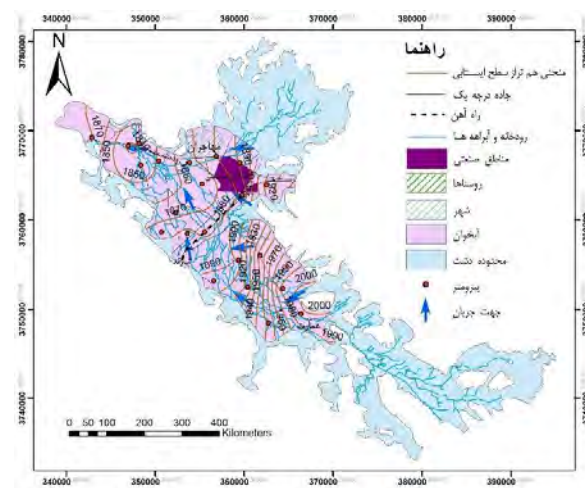


ب

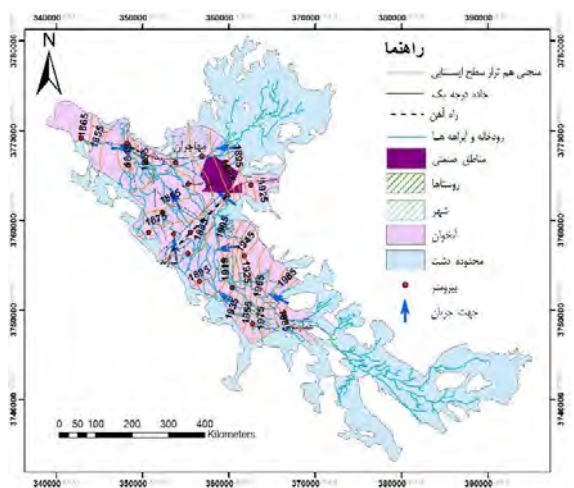


الف

شکل ۳. نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی در مردادماه: الف) سال ۱۳۸۳ و ب) سال ۱۳۹۶

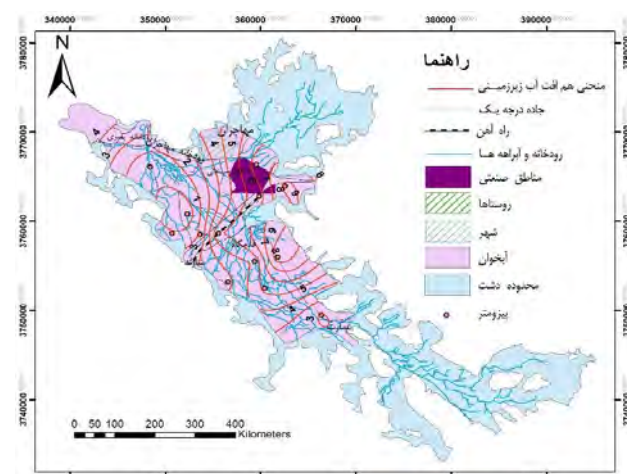


ب



الف

شکل ۴. نقشه هم‌تراز سطح ایستابی و جهت جریان در مردادماه: الف) سال ۱۳۸۳ و ب) سال ۱۳۹۶



شکل ۵. نقشه هم‌افت آب زیرزمینی در مردادماه ۱۳۸۳ تا مردادماه ۱۳۹۶

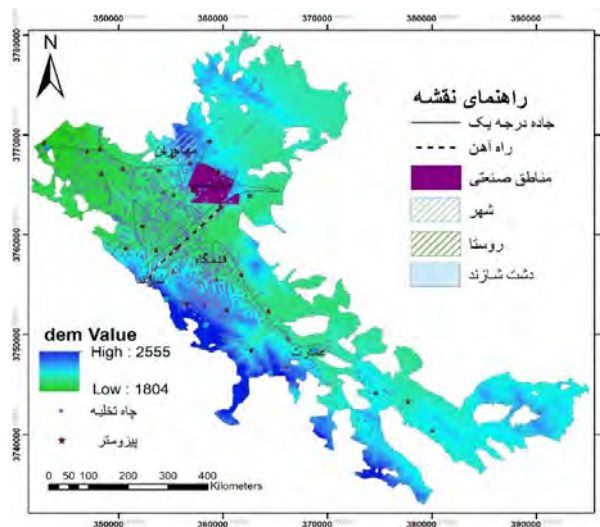
آب زیرزمینی به میزان ۸۷/۰۳ متر و میزان کسری مخزن طی این مدت ۱۳۲/۷ میلیون مترمکعب طی دوره ۱۲ ساله است (شکل ۶).

شکل ۷ نقشه ارتفاعی دشت بررسی شده از سطح آبهای آزاد برحسب متر، موقعیت قرارگیری چاههای پیزومتری و چاههای بهره برداری موجود در دشت را نشان می دهد.

بررسی تغییرات تراز آب زیرزمینی طی دوره آماری ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶ بیانگر آن است که تغییرات تراز آب زیرزمینی در ابتدای دوره آماری یادشده روند نزولی داشته و تا مدتی این نوسان نزولی ادامه داشته و سپس حالت صعودی شده است. بر اساس آبنمود ارائه شده، صرف نظر از فراز و فرودهای فصلی روند اصلی آبنمود این دشت نزولی است که در کل آبنمود، نشان دهنده پایین افتادگی سطح



شکل ۶. میانگین وزنی تغییرات سطح آب در آبخوان دشت شازند طی سالهای آبی ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶



شکل ۷. موقعیت قرارگیری چاههای پیزومتری و چاههای بهره برداری موجود در دشت

به دست آمده از مدل برای صحت آنالیز با نقشه ماهواره‌های به دست آمده سنتینل ۱ (InSAR) استفاده شده است. پس از آن، به منظور دستیابی به نتایج دقیق تر از روش بهینه سازی Fuzzy-ALPRIFT و AHP-LPRIFT استفاده شد. فازی سازی فرایندی است که مقادیر اندازه گیری شده را به متغیرهای زبانی به کار گرفته در قسمت شرط قوانین

### روش تحقیق

در پژوهش حاضر از مدل وزن دهی با مدل ALPRIFT استفاده شده است. لایه های مؤثر بر فرونشست بر اساس رتبه های این مدل، تهیه و وزن دهی شده و سپس با تلفیق و برهم نهی لایه ها در محیط Arc GIS نقشه آسیب پذیری فرونشست دشت شازند به دست آمد. سپس، نقشه نهایی

فرونشست،  $T$  رتبه‌های تعلق گرفته به هر دسته و  $W$  وزن هر عامل را نشان می‌دهد.

#### تهیه لایه‌های اطلاعاتی مدل ALPRIFT

محیط آبخوان (A): محیط آبخوان به مواد زمین‌شناسی تحکیم‌یافته یا تحکیم‌نیافته‌ای گفته می‌شود که بدنه یک آبخوان را تشکیل می‌دهند. هرچقدر مواد دانه‌ریزتر باشند مانند سیلت و رس به دلیل تراوایی بسیار کم، تغذیه مناسب به آبخوان را نمی‌دهند و به همین دلیل، بعد از برداشت آب زیرزمینی در این مواد تحکیم برگشت‌ناپذیری رخ داده و سبب فرونشست بیشتر زمین می‌شود، ولی هرچقدر مواد دانه‌درشت‌تر باشد، نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد و موجب تغذیه بیشتر شده و در نتیجه، فرونشست کمتر می‌شود.

برای تهیه این لایه، از لاگ‌های زمین‌شناسی سازمان آب منطقه‌ای اراک استفاده شد. بر اساس لاگ‌ها نوع رسوبات آبخوان شناسایی شده و طبق جدول ۱ کلاسه‌بندی شد و نوع خاک هر لاگ به دست آمد. سپس، در مرحله بعد اطلاعات لاگ‌ها در فرمت قابل قبول به محیط نرم‌افزار Arc GIS فراخوان شده و با دستور IDW درون‌یابی و لایه رستری محیط آبخوان تهیه شد. نقشه رستری جنس محیط آبخوان در شکل ۸ آمده است.

کاربری اراضی (L): کاربری‌های مختلف زمین می‌توانند تأثیرات مختلفی بر وقوع فرونشست داشته باشند. برای مثال، در مناطق استخراج سیالات مانند نفت و آب سبب ایجاد فضای خالی در اعماق شده و وزن طبقات فوقانی که قبل از استخراج توسط سیال موجود در طبقات تحمل می‌شد، کاهش یافته و امکان فرونشست افزایش می‌یابد. لایه کاربری زمین بر اساس نقشه کاربری کشور تهیه و طبق جدول ۱ کلاسه‌بندی شد. نقشه رستری تهیه‌شده از کاربری زمین در شکل ۸ آمده است.

پمپاژ (P): اگر برداشت آب از چاه‌های بهره‌برداری بیش از میزان تغذیه به آبخوان باشد، سطح آب زیرزمینی کاهش می‌یابد و در نتیجه، شرایط مستعد برای فرونشست فراهم می‌شود. برای تهیه لایه پمپاژ، میزان برداشت سالانه آب از چاه‌های پمپاژ از سازمان آب منطقه‌ای اراک تهیه شد. سپس، وارد محیط Arc GIS شده و با استفاده از روش پلیگون‌بندی تیسن مقدار تخلیه هر چاه پمپاژ به مساحت

فازی تبدیل می‌کند و این کار با استفاده از تعیین تابع عضویت برای ورودی‌ها انجام می‌شود. قوانین فازی ارتباط بین ورودی و خروجی را ایجاد می‌کند. برای تعیین تابع عضویت هر ورودی، مقادیر واقعی پارامترها در جایگاهی که از قبل تعریف شده در نرم‌افزار وارد شده و برای آنها تابع عضویتی بین صفر و یک در نظر گرفته می‌شود. یعنی مشخصه‌زبانی هر پارامتر را از صفر یا یک مطلق خارج می‌کند. در روش AHP فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی شامل سه عنصر هدف، تعدادی معیار و گزینه‌هاست. هدف در این تحلیل، اولویت‌بندی موضوعی و یا انتخاب بهینه سناریوهای مدیریتی است. برای رسیدن به این اهداف به تعدادی گزینه و برحسب معیارهای مؤثر امتیاز داده می‌شود و بر اساس وزن نهایی گزینه برتر انتخاب و اولویت‌بندی می‌شود.

#### مدل ALPRIFT

مدل ALPRIFT به وسیله ندری و همکاران [۱۶] ارائه شده است. برای این کار از منابع اطلاعات گوناگونی از جمله لاگ‌های زمین‌شناسی، داده‌های پیرومتری، استفاده از نتایج چاه‌های پمپاژ، نقشه کاربری اراضی و از گسل‌های فعال منطقه استفاده شده است. در این مدل هفت لایه مؤثر بر فرونشست زمین وجود دارد که عبارت‌اند از: محیط آبخوان (A)، کاربری اراضی (L)، پمپاژ (P)، تغذیه (R)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله از گسل (F) و میزان افت سطح آب زیرزمینی (T). به هر پارامتر وزنی با توجه به اهمیت آن در فرونشست از ۱ تا ۵ داده می‌شود که به بیشترین وزن، تأثیر ۵ و به کمترین وزن، ۱ داده می‌شود. همچنین، هر پارامتر با توجه به اهمیتی که در وقوع فرونشست دارد، به زیردسته‌هایی تقسیم می‌شود که به هر دسته بر اساس میزان تأثیر آن، رتبه‌ای از ۱ تا ۱۰ تعلق می‌گیرد. هرچقدر این رتبه کمتر باشد، کمترین تأثیر بر میزان وقوع فرونشست را داشته است و در نهایت، از مجموع حاصل ضرب وزن هر لایه در رتبه هر لایه با توجه به رابطه ۱، میزان فرونشست در آن نقطه به دست می‌آید.

$$Subsidence\ vulnearability\ index(SVI) = A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + R_r R_w + I_r I_w + F_r F_w + T_r T_w \quad (1)$$

در رابطه یادشده (SVI) شاخص آسیب‌پذیری فرونشست، A, L, P, R, I, F, T هفت عامل مؤثر بر

آبخوان بیشتر باشد، وزن رسوبات فوقانی زیاد شده و بر اثر برداشت آب سبب افزایش بیشتر فرونشست می‌شود. برای تهیه این لایه با در دست داشتن عمق سنگ کف به وجود آمده از لاگ‌های زمین‌شناسی، ضخامت آبخوان در کل منطقه به روش IDW درون‌یابی و لایه کلاسه‌بندی شده و ضخامت آبخوان در فرمت رستر تهیه شد (شکل ۸). فاصله از گسل (F): حرکات تکتونیکی با جابه‌جایی ذرات ریزدانه و درشت‌دانه سبب تراکم بیشتر و در نتیجه، فرونشست می‌شود. هرچقدر فاصله از گسل‌های فعال کمتر باشد، پتانسیل فرونشست بیشتر می‌شود. برای به دست آوردن لایه فاصله از گسل‌های فعال در هر نقطه از منطقه مطالعه شده، از دستور فاصله اقلیدسی<sup>۱</sup> استفاده شده و نقشه نهایی تهیه و کلاسه‌بندی شد (شکل ۸).

میزان افت سطح آب زیرزمینی (T): این پارامتر یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در فرونشست است. افزایش افت سطح ایستابی سبب افزایش تنش مؤثر در لایه‌های فوقانی شده و در نتیجه، سبب افزایش فرونشست می‌شود. برای تهیه میزان افت از اطلاعات سطح ایستابی یک‌ساله (مهر ۱۳۹۵ تا مهر ۱۳۹۶) چاه‌های پیژومتری منطقه استفاده شده و با استفاده از دستور IDW درون‌یابی شد. سپس، بر اساس جدول ۱، کلاسه‌بندی و نقشه نهایی میزان افت یک‌ساله سطح آب منطقه تهیه شد.

پلیگون تقسیم شده و مقدار به‌دست‌آمده به روش IDW درون‌یابی شد. در نهایت، بر اساس جدول ۱ مقدار درون‌یابی شده کلاسه‌بندی شد و میزان پمپاژ برحسب میلی‌متر بر سال برای محدوده مطالعاتی تهیه شد.

تغذیه (R): مقدار آبی است که از سطح زمین به سطح ایستابی می‌رسد. هرچه میزان تغذیه بیشتر باشد، فشار هیدرولیکی بیشتر می‌شود و فاصله بین دانه‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه، تنش مؤثر کاهش می‌یابد و عکس پمپاژ عمل می‌کند و سبب کاهش فرونشست می‌شود. برای تهیه لایه تغذیه از روش پیسکوپو [۱۷] استفاده شد. در این روش سه لایه شیب زمین، بارندگی و نفوذپذیری سطحی خاک (عمق ۰/۵ تا ۲ متری خاک سطحی) تهیه شد. برای تهیه لایه شیب از DEM ۳۰ متری منطقه استفاده شده و برای تهیه لایه بارندگی، آمار ۲۰ ساله سازمان هواشناسی کشور به کار گرفته شد. به منظور تهیه لایه نفوذپذیری، از عمق ۰/۵ تا ۲ متری لاگ‌های زمین‌شناسی منطقه استفاده شد. در نهایت، در محیط نرم‌افزار Arc GIS هر سه لایه در فرمت رستر همپوشانی شده و لایه نهایی تغذیه خالص آب زیرزمینی تهیه شد (شکل ۸).

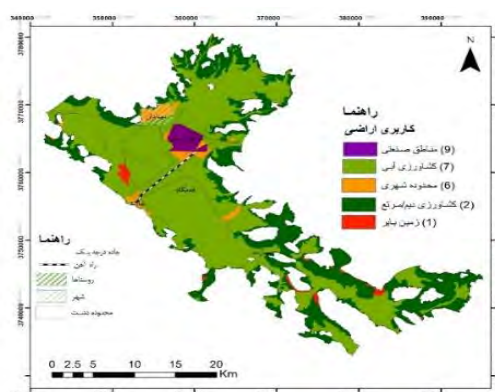
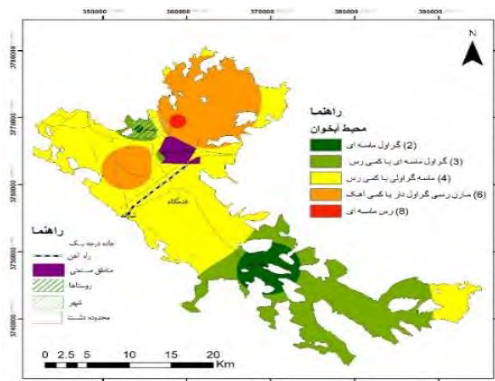
ضخامت آبخوان (I): به فاصله بین سطح زمین تا سنگ کف ضخامت آبخوان گفته می‌شود. هرچقدر ضخامت

جدول ۱. شرح اطلاعاتی لایه‌های ALPRIFT و وزن‌های اختصاص یافته

SVI	افت سطح ایستابی (T) Decline of water table		فاصله از گسل (F) Fault distance		ضخامت آبخوان (I) Impacts of aquifer thickness		تغذیه (R) Recharge	پمپاژ (P) Pumping of groundwater	کاربری اراضی (L) Land use	محیط آبخوان (A) Aquifer media			
	Weight 5		Weight 1		Weight 2		Weight 4	Weight 4	Weight 3	Weight 5			
Level	Band	Rate (m/year)	Rate	فاصله (km)	Rate	ضخامت (متر)	Rate	نرخ (mm/year)	Rate	نرخ (mm/year)	Rate	جنس مواد	
کم	۷۸-۲۴	۱	۰/۲-۱/۷	۱۰	۱-۰	۲	۵۵-۳۸	۱۰	۸-۶	۲	۵-۳/۵	۹	مناطق صنعتی
متوسط	۷۸-۱۳۲	۲	۰/۵-۰/۲	۸	۲-۱	۳	۷۵-۵۵	۹	۱۰-۸	۳	۱۰-۵	۷	کشاورزی آبی
زیاد	۱۳۲-۱۸۶	۳	۰/۹-۰/۵	۶	۳-۲	۴	۹۵-۷۵	۸	۱۳-۱۰	۴	۵۰-۱۰	۶	شهری
خیلی زیاد	۱۸۶-۲۴۰	۴	۱/۴-۰/۹	۴	۴-۳	۵	۱۱۰-۹۵	۵	۲۰۰-۵۰	۵	۲۰۰-۵۰	۲	کشاورزی دیم/ مرتع
		۵	۲-۱/۴	۲	۵-۴	۶	۱۳۶-۱۱۰	۶	۴۰۰-۲۰۰	۶	۴۰۰-۲۰۰	۱	زمین بایر
		۶	۲/۷-۲	۱	>۵			۷	۶۰۵-۴۰۰	۷	۶۰۵-۴۰۰		
		۷	۳/۵-۲/۷					۸	۸۰۰-۶۵۰	۸	۸۰۰-۶۵۰		
		۸	۴/۱-۳/۵					۹	۱۰۰۰-۸۰۰	۹	۱۰۰۰-۸۰۰		
								۱۰	>۱۰۰۰	۱۰	>۱۰۰۰		

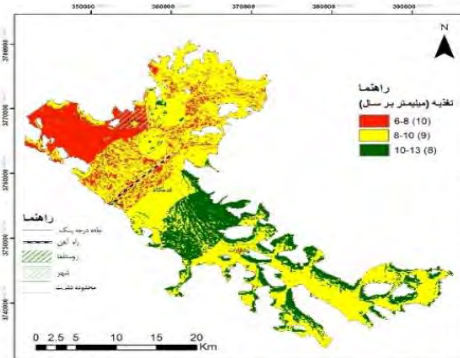
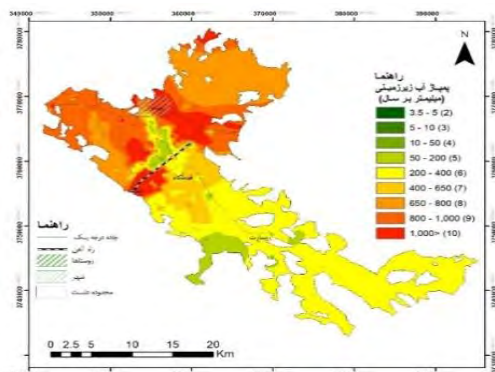
1. Euclidean Distance





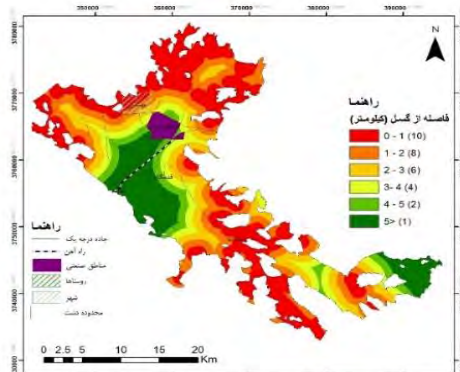
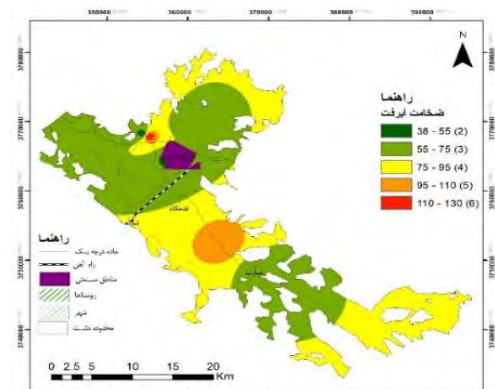
ب

الف



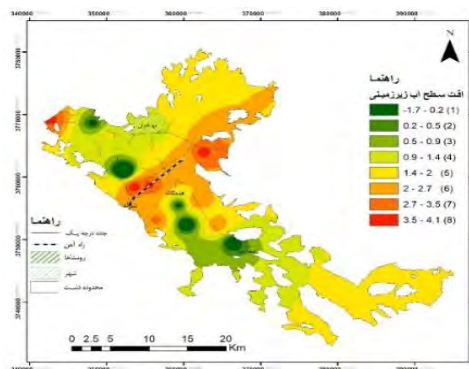
د

ج



ث

ح



ت

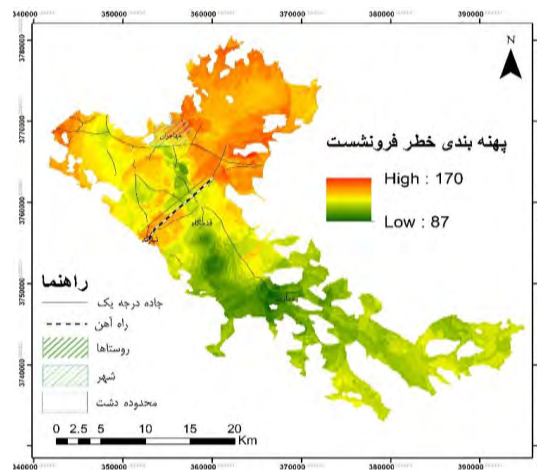
شکل ۸. نقشه لایه‌های تهیه‌شده ALPRIFT در فرمت رستر: (آ) محیط آبخوان، (ب) کاربری زمین، (ج) پمپاژ، (د) تغذیه، (ح) ضخامت آبرفت، (ث) فاصله از گسل، (ت) افت سطح آب زیرزمینی

بحث و نتایج

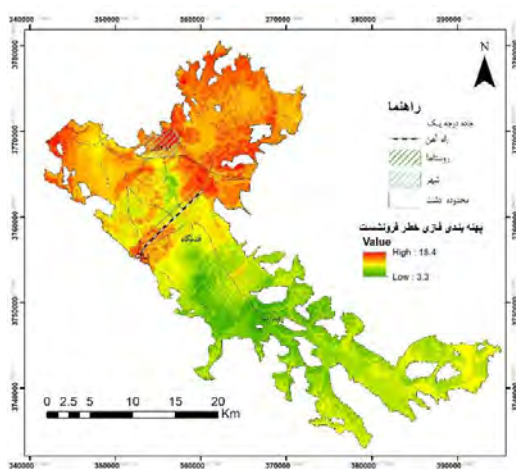
پس از تهیه ۷ لایه اطلاعاتی مؤثر در تعیین پتانسیل فرونشست تمام لایه‌ها طبق رابطه ۱، SVI روی هم قرار گرفته و با در نظر گرفتن رتبه و وزن هر لایه همپوشانی شده و نقشه نهایی پتانسیل فرونشست به روش ALPRIFT تهیه شد. بر اساس این نقشه، شاخص فرونشست برای دشت شازند بین ۸۷ تا ۱۷۰ به دست آمد (شکل ۹).

در مرحله بعد با استفاده از دستور Fuzzy Membership و با استفاده از تابع عضویت Gaussian تعریف شد. سپس، هفت لایه رستری مؤثر در فرونشست به روش ALPRIFT فازبندی شده و به بازه صفر تا یک تبدیل شد. سپس، نقشه نهایی پتانسیل فرونشست بر اساس نقشه رستری

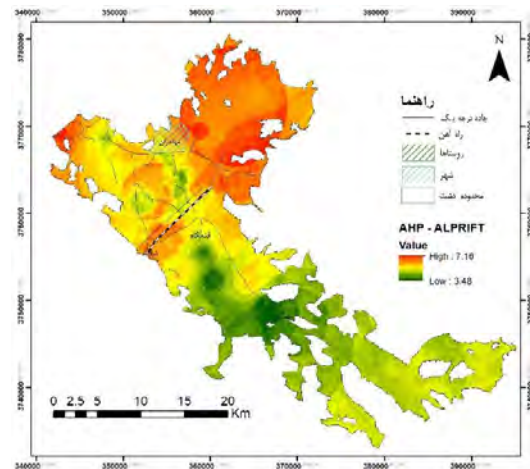
فازی شده تهیه شد. مزیت فازبندی داده‌ها به دلیل تدریجی بودن مرز تغییر ویژگی لایه‌های در منطقه است که با طبیعت همخوانی بیشتری دارد. بر اساس تهیه لایه‌های آسیب‌پذیری به روش فازی، بیشترین مقدار شاخص آسیب‌پذیری ۲۴ و کمترین میزان آن صفر به دست می‌آید؛ که طبق پتانسیل آسیب‌پذیری فازبندی شده بین صفر تا ۶ نشان‌دهنده رده آسیب‌پذیری کم، ۶ تا ۱۲ متوسط، ۱۲ تا ۱۸ زیاد و ۱۸ تا ۲۴ آسیب‌پذیری خیلی زیاد را نشان می‌دهد. آسیب‌پذیری فازبندی مدل ALPRIFT برای منطقه مطالعه شده ۳/۳ تا ۱۸/۴ به دست آمده است. همچنین، مدل آسیب‌پذیری AHP برای منطقه مطالعه شده بین ۳/۴۸ تا ۷/۱۶ به دست آمده است (شکل ۱۰).



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست دشت حاصل از تلفیق لایه‌های مدل ALPRIFT



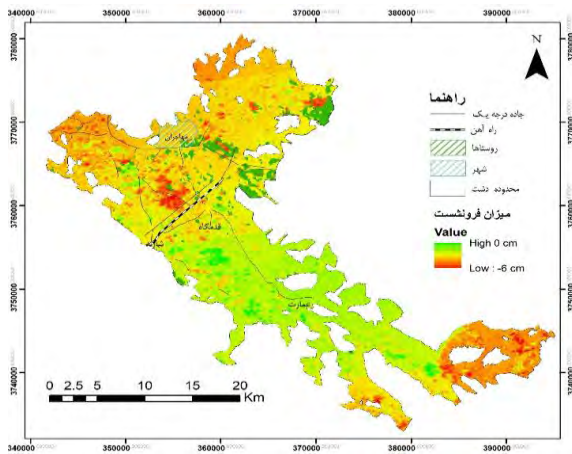
ب



الف

شکل ۱۰. پهنه‌بندی به روش الف (فازی، ب) در مدل AHP

و AHP-ALPRIFT از نمودار  $R^2$  بین نقشه پتانسیل فرونشست این مدل‌ها با فرونشست نشان داده شده از ماهواره InSar استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده از این مقایسه، مدل Fuzzy-ALPRIFT با ضریب همبستگی  $r = 0.57$  بیشترین تطابق با میزان فرونشست واقعی داشته، چون روش فازی دقت و توانایی زیادی دارد و شرایط مرزی را بهتر پوشش می‌دهد. همچنین، مدل AHP-ALPRIFT با  $r = 0.54$  کمترین تطابق و مدل ALPRIFT با  $r = 0.54$  تطابق حد واسط بین دو مدل را نشان داد (جدول ۲).



شکل ۱۱. نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست که بر اساس نقشه ماهواره تهیه شده

جدول ۲. نمودار همبستگی بین مدل‌ها و میزان فرونشست

روش	ضریب همبستگی پیرسون (r)
ALPRIFT	۰/۵۵
Fuzzy-ALPRIFT	۰/۵۷
AHP-ALPRIFT	۰/۵۴

### نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد با توجه به اینکه طی مرداد ۱۳۸۳ تا مرداد ۱۳۹۶ سطح آب افت بیشتری در سرتاسر دشت به خصوص در پیژومترهای شرق نیروگاه (۹/۲۱ متر)، باغ برافتاب (۹/۷۲ متر) و روبه‌روی پتروشیمی (۷/۴۲ متر) دارد، منطقه یادشده دچار وضعیت بحرانی و تشدید روند افت سطح آب زیرزمینی شده و افت سطح ایستابی در مناطق صنعتی حساس، سبب فرونشست شده است. همچنین، با به‌کارگیری مدل ALPRIFT که شامل هفت لایه مؤثر می‌شود، با توجه به این لایه‌ها افت سطح آب زیرزمینی بیشترین تأثیر در مقدار

در بررسی میزان فرونشست از مدل‌ها و روش‌های متفاوت می‌توان استفاده کرد. در پژوهش حاضر از روش D-InSar از سنجنده Sentinel 1 با دقت میلی‌متری استفاده شده است که در بازه‌های زمانی متفاوت و با تصاویر گرفته شده در تاریخ‌های متعدد محاسبه می‌شود.

رادار نوعی روش برای به دست آوردن اطلاعات در مورد اشیاء و پدیده‌های مختلف بر مبنای اندازه‌گیری فاصله است که با استفاده از محاسبه زمان گسیل سیگنال در باند یا باندهای مربوط به سنجنده صورت می‌گیرد. دقت اندازه‌گیری خام رادار برای رسیدن به دقت میلی‌متری کافی نیست، اما روش‌هایی برای راه‌اندازی سیگنال با دقت و رزولوشن زیاد به وجود آمده است تا دقت رادار افزایش پیدا کند. یکی از این روش‌های اثبات شده اینترفرومتری<sup>۱</sup> است که با استفاده از اطلاعات راداری، برای رادارهای هوایی و ماهواره‌ای بسیار استفاده می‌شود. یک کاربرد ویژه آن این است که از اینترفرومتری متفاوتی استفاده می‌کند تا جابه‌جایی‌های کوچک رادار یک مسافت محاسبه کند که این با مفهوم مطرح شده در مدل سازی دینامیسم فعال در محدوده فاریاب با استفاده از تکنیک D-InSAR استفاده شده است. یکی از مزایای مهم D-InSAR قابلیت آن در تهیه نقشه جامعی از تغییر شکل با توجه زمینی و با تعداد نقاط نمونه برداری متراکم‌تر از نقشه برداری دقیق است. اگرچه در روش یادشده می‌توان میزان جابه‌جایی حاصل را به منظور خط دید ماهواره به تمام جهات شمالی-جنوبی، خاوری-باختری و ارتفاعی تصویر کرد، اما از آنجا که حساسیت سنجنده‌های تصویربرداری به جابه‌جایی در راستای قائم به مراتب بیشتر است، تصاویر به دست آمده برای بررسی فرونشست مناسب‌اند. محدوده مطالعه شده در پژوهش حاضر منطقه شازند است. پس از پردازش‌های انجام گرفته معلوم شد در بازه‌های زمانی انتخاب شده (سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۶) میزان پایین‌رفتگی یا فرونشست منطقه مد نظر به کمترین مقدار خود یعنی به منفی ۶ سانتی‌متری رسیده است (این ۶- سانتی‌متر یعنی زمین در این محدوده به اندازه ۶ سانتی‌متر پایین رفته یا فرونشست کرده است) (شکل ۱۱). همان‌طور که گفته شد، دلایل مختلفی مانند استخراج و برداشت آبخوان‌ها سبب ایجاد این پدیده هستند.

برای مقایسه سه مدل Fuzzy-ALPRIFT, ALPRIFT

1. Interferometry

- Groundwater Department. Code 4120. 2010. [Persian].
- [7]. Chang C.P, Chang T.Y, Wang C.T, Kuo C.H, Chen K.S. Land surface deformation corresponding to seasonal ground- water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan, *Mathematics and Computers in Simulation*. 2004; 67(4-5):351-359.
- [8]. Crosetto M, Tscherning C.C, Crippa B, Castillo M. Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering, *Geophysical Research Letters*. 2002; 29 (9).
- [9]. Laura C, Pietro T, Luigi T. Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium. 2004; 51(1-4): 345-353.
- [10]. Ge D, Wang Y, Zhang L, Xia Y, Gue X. Using permanent scattered In SAR to monitors land subsidence along high speed rally way-the first experiment in China, *ESAS*. 2010; P-677.
- [11]. Moatag M, Davoodi J, Momeni M. Hashemi M. Discovery and representation of subsidence of Mahyar plain of Isfahan by interferometry, *Extended Scientific-Engineering Survey and Spatial Information*. 2012; 3(2). [Persian].
- [12]. Afzali A, Sharifi-Kia M, And Shayan S. Assessment of Infrastructure and Settlement Vulnerability from Land Subsidence in Damghan Plain, *Iranian Journal of Applied Geomorphology*. 2013; 1(1) [Persian].
- [13]. Naderi K, Nadiri A.A, Asghari Moghadam A, Kord M. A New Method for Identifying and Determining Areas of Subsidence (Case Study: Salmas Plain Aquifer). *Journal of Ecohydrology*. 2018; 5 (1):85-97 [Persian].
- [14]. Nadiri A.A. , Taheri Z. , Bazegariand Gh, Didehban Kh. A Framework to Estimation of Aquifer Subsidence Potential Using Genetic Algorithm. 2018; 14 (2):174-185 [Persian].
- [15]. Khamechian M, Nadiri A. Manafi Azar A. Comparison of subsidence vulnerability of southwestern Tehran plain with ALPRIFT weighting model and genetic algorithm. 2018; 4(2):199 [Persian].
- [16]. Nadiri A, Taheri Z, Khatibi R, Barzegari G, Dideban Kh. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT" *Science of the Total Environment*. 2018; 628-629:1043-1057.
- [17]. Piscopo G. Groundwater vulnerability map. Explanatory notes Castlereagh Catchment, NSW. Centre for Natural Resources. NSW Department of Land and Water Conservation, Parramatta. 2001.

فرونشست را داشته است که بر اساس این شاخص بین ۸۷ تا ۱۷۰ به دست آمد. به منظور بهینه‌سازی وزن‌های اعمال‌شده از مدل AHP و فازی مدل ALPRIFT تهیه شد و با توجه ضریب همبستگی بین سه روش با داده‌های ماهواره‌ای فرونشست می‌توان گفت که تقریباً هر سه روش همبستگی بین ۰/۵۴ تا ۰/۵۷ را با داده‌های ماهواره‌ای و فرونشست واقعی نشان می‌دهند که بیشترین همبستگی به روش فازی است چون این روش مرزی را بهتر پوشش داده است. همبستگی‌های کم نقشه‌های پتانسیل فرونشست و داده‌های ماهواره‌ای به دلیل تأخیر در زمان فرونشست است. مدل یادشده و نقشه ماهواره‌ای تهیه‌شده نشان می‌دهد نواحی شمالی و شمال غربی در معرض فرونشست قرار دارند. شایان یادآوری است که پالایشگاه شازند در منطقه پتانسیل فرونشست زیاد قرار دارد و باید برنامه‌های مدیریتی لازم برای کنترل فرونشست اعمال شود. پیشنهاد می‌شود با توجه اینکه بیشتر نقاط نشست در رسوبات آبرفتی کواترنر قرار دارد، تخصیص و بهره‌برداری از منابع دشت کاهش یابد و نسبت به افزایش میزان آبیاری و اصلاح الگوی کشت اقدام شود. به دلیل استقرار صنایع بزرگ و حساس نظیر پالایشگاه، پتروشیمی و نیروگاه شازند، این محدودیت‌ها و اقدامات در منطقه شرقی دشت باید بیشتر باشد.

#### منابع

- [1]. Galloway D, Jones D, Ingebritsen SE Land subsidence in the United State. US Geological Survey, Circular 1182.1999.
- [2]. Poland J.F. Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO. 1984.
- [3]. Ghazban F. *Environmental Geology* (7th Ed.). University of Tehran Publications. 2013; 416p. [Persian].
- [4]. Mortazavi M, Suleimani K, Mofeghi F. Water Resources Management and Sustainable Development, Case Study of Rafsanjan Plain, *Journal of Water and Wastewater*. 2010; 3: 131-126. [Persian].
- [5]. Einloo F, Ma'afi R, Malekian A, Ghazavi A, Mohseni Saravi A. Survey of Groundwater Quality in the Zanjan Plain from the Drinking Standards Viewpoint of Geo statistical Approach. 2016; 27: 2 (62) [Persian].
- [6]. Ministry of Power. Extension of Prohibition of Shazand Studies Area. Markazi Province Regional Water Company, Resource Baseline Study,