تحلیل فضایی–زمانی فرونشست در تالاب میانگران با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری(InSAR) و بررسی پیامدهای اکولوژیک–ژئومورفیک

فرشاد سلطانی[1]
هیوا علمیزاده[2*]
۱. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران.
۲. دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران.

* **نویسنده مسئول مکاتبات**
Elmizadeh@kmsu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰

این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد می‌باشد.

چکیده

تالاب میانگران به‌عنوان یکی از زیست‌بوم‌های ارزشمند تالابی غرب ایران، در سال‌های اخیر با پدیده فرونشست زمین مواجه شده است. این مطالعه به تحلیل فضایی–زمانی پدیده فرونشست در تالاب میانگران با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (SBAS-InSAR) و بررسی پیامدهای بوم‌شناختی–ژئومورفیک آن می‌پردازد. داده‌های مورد استفاده شامل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ لغایت سال ۲۰۲۴ و مطالعات میدانی است. پردازش داده‌ها در نرم‌افزار SNAP شامل مراحل تولید اینترفروگرام، اصلاح توپوگرافی، اعمال فیلتر Goldstein و تصحیح اثرات اتمسفری بوده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ فرونشست در منطقه بین ۳ تا ۱۸ میلی‌متر در سال (با انحراف معیار ۳ میلی‌متر) متغیر است و بیشترین میزان آن در بخش‌های مرکزی تالاب مشاهده شده است. تحلیل‌های آماری رابطه معناداری بین فرونشست و عوامل محیطی شامل فاصله از گسل‌ها (ضریب تعیین ۰/۳۷۶)، شیب زمین، و لیتولوژی را نشان می‌دهد. به‌طور خاص، نزدیکی به گسل اصلی و قرارگیری در واحدهای رسوبی کواترنر و ماسه‌سنگ‌های گچی، بیشترین تأثیر را بر تشدید فرونشست دارند. همچنین، مناطق با شیب کمتر از ۲ درصد و ارتفاع زیر ۱۰۰۰ متر، نرخ فرونشست بالاتری را دارند. یافته‌ها حاکی از آن است که تعامل پیچیده‌ای بین عوامل انسانی (برداشت آب) و طبیعی (گسل‌زایی، لیتولوژی) بر پویایی این پدیده حاکم است. نتایج پژوهش نشان داد که فرونشست در تالاب میانگران پدیده‌ای چندعاملی بوده که نیازمند نگرشی سیستمی است و پیامدهای بوم‌شناختی–ژئومورفیک متعددی شامل اختلال در سیستم زهکشی طبیعی تالاب، تهدید تنوع‌زیستی، و کاهش ظرفیت ذخیره آب در پی دارد. این مطالعه با تلفیق روش‌های سنجش از دور و تحلیل‌های GIS، چارچوبی علمی برای پایش و مدیریت فرونشست در تالاب‌ها ارایه می‌دهد. پیشنهاد می‌شود با اجرای سیستم‌های پایش ترکیبی (InSAR و پیزومتری)، اعمال محدودیت برداشت آب در مناطق بحرانی و مطالعات دقیق‌تر بر نقش گسل‌ها در جریان آب زیرزمینی از تشدید این پدیده جلوگیری شود.

واژگان کلیدی: فرونشست، تالاب میانگران، InSAR ، تحلیل فضایی–زمانی، تأثیرات اکولوژیکی.

مقدمه

پدیده فرونشست به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین مخاطرات ژئومورفولوژیک در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود، به‌ویژه زمانی که در محیط‌های حساس تالابی رخ دهد (Zhang *et al*., 2023; Huang *et al*., 2024). سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS, 2022) این پدیده را به عنوان حرکت قائم رو به پایین سطح زمین با نرخ‌هایی در محدوده میلی‌متر تا سانتیمتر در سال تعریف می‌کند که عمدتاً ناشی از تراکم لایه‌های آبخوان در اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است. این مخاطره در محیط‌های تالابی پیامدهای دوچندانی دارد، چرا که همزمان بر دو جنبه اساسی ساختار ژئومورفولوژیک منطقه و عملکرد بوم‌شناختی تالاب (Islam, 2024; Zhang *et al*., 2024) تأثیر می‌گذارد. مطالعات نشان می‌دهد که فرونشست می‌تواند هم به صورت تدریجی و هم ناگهانی رخ دهد، که معمولاً با جابجایی‌های افقی ناچیزی همراه است (Ibrahim *et al*., 2024; Arabameri *et al*., 2022). مکانیسم‌های اصلی ایجاد این پدیده شامل فشردگی رسوبات زیرسطحی، انحلال سازندهای زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در کنار ویژگی تدریجی بودن این پدیده در بسیاری از موارد باعث می‌شود تا زمانی که خسارات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

وارد نشود، مورد توجه جدی قرار نگیرد (Fotoohi *et al*., 2021). این موضوع اهمیت پایش مستمر و مدیریت پیشگیرانه این پدیده را در محیط‌های حساسی مانند تالاب‌ها دوچندان می‌سازد.

فرونشست زمین می‌تواند ناشی از عوامل متعدد طبیعی مانند زمین‌لرزه‌ها، فرآیندهای کارستی (انحلال سنگ‌های آهکی)، تراکم طبیعی رسوبات، فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات تنش مؤثر در لایه‌های زیرسطحی و فعالیت‌های انسان‌ساخت مانند برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، معدن‌کاری و ساخت و سازهای سنگین ایجاد شود (Minasny *et al*., 2024; Hemati *et al*., 2023). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل برداشت بیش از حد برای مصارف کشاورزی و شهری، اصلی‌ترین عامل فرونشست محسوب می‌شود (Sedaghat *et al*., 2020).

فرونشست زمین می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای از جمله تخریب زیرساخت‌های شهری، شکاف‌های زمین، تغییر در سیستم‌های زهکشی طبیعی و افزایش خطر سیلاب داشته باشد (Rahmani *et al*., 2021). در مناطق کشاورزی، این پدیده سبب کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها و در نتیجه افت کیفیت خاک می‌شود. از این رو، مدیریت یکپارچه منابع آب، کنترل برداشت از چاه‌ها و استفاده از روش‌های آبیاری کارآمد از جمله راهکارهای کلیدی برای کاهش نرخ فرونشست محسوب می‌شوند. همچنین، پایش مستمر با استفاده از فناوری‌های نوین و برنامه‌ریزی کاربری اراضی بر اساس ظرفیت بوم‌شناختی منطقه می‌تواند در کاهش اثرات این پدیده مؤثر باشد. فرونشست زمین به عنوان یک چالش چند بعدی، نیازمند رویکردی جامع در سطوح علمی، فنی، و مدیریتی است. با توجه به تأثیرات گسترده این پدیده بر محیط‌زیست و جوامع انسانی، اتخاذ سیاست‌های پایدار در مدیریت منابع آب و خاک ضروری است. در این راستا، تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با مطالعات میدانی می‌تواند به درک بهتر مکانیسم‌های فرونشست و ارائه راهکارهای مؤثر منجر شود (Fotoohi *et al*., 2021; Ding *et al*., 2023).

در دهه‌های اخیر، فناوری‌های سنجش از دور به ویژه تداخل‌سنجی راداری (InSAR) به عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای پایش فرونشست زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Zhang *et al*., 2023). این روش با استفاده از امواج راداری ماهواره‌ای، قادر است تغییرات میلی‌متری سطح زمین را با دقت بالا اندازه‌گیری کند و الگوهای فرونشست را در مقیاس‌های وسیع شناسایی نماید (Wang *et al*., 2024). علاوه بر این، روش‌های زمینی مانند ترازیابی دقیق، شبکه‌هایGPS و پایش سطح آب چاه‌ها نیز برای ارزیابی دقیق‌تر این پدیده به کار می‌روند. در این میان تداخل‌سنجی راداری (InSAR) به‌ویژه تکنیک SBAS به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش فرونشست در مقیاس منطقه‌ای شناخته شده است (Nur *et al*., 2024; Wei *et al*., 2022; Hardy *et al*., 2021). مطالعات متنوعی در زمینه فرونشست زمین در ایران و جهان انجام شده است. در مقیاس جهانی، پژوهش‌هایی مانند Zhang و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از چهارده عامل مؤثر در فرونشست شامل ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و انسانی و ترکیب داده‌های راداری و مدل‌های یادگیری ماشین به دقت ۹۶.۶ درصد در پیش‌بینی فرونشست دست یافتند Ding و همکاران (۲۰۲۳) با با استفاده از تکنیک SBAS-InSAR و داده‌های سنتینل، الگوی دوره‌ای فرونشست با میانگین نرخ ۰.۶- میلی‌متر در سال در شهر سونگیوان چین را شناسایی نمودند. Kouider و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر پدیده فرونشست در صحرای الجزایر را با تکنیک‌های سنجش از دور بررسی کردند و نتیجه گرفتند گسل‌های فعال بر جریان آب‌های زیرزمینی و تشکیل محیط‌های تالابی موثر است. Yin و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات فرونشست تالاب‌های شمالی چین ناشی از فعالیت‌های معدنی را با داده‌های راداری پایش نمودند. Nur و همکاران (۲۰۲۴) با به‌کارگیری روش PS-InSAR و داده‌های سنتینل-۱، نرخ فرونشست تا ۲ سانتی‌متر در سال در مناطق شهری تگزاس را شناسایی کردند که ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی بود. این پژوهش تأکید می‌کند که تغییرات مکانی-زمانی فرونشست عمدتاً تحت تأثیر برداشت محلی آب‌های زیرزمینی ناشی از توسعه شهری است. Zhang و همکاران (۲۰۲۴) نیز در مطالعه تالاب‌های رود زرد، از قابلیت‌های سنجش از دور و مدل MSPA برای پایش تغییرات مکانی فرونشست استفاده نمودند. Ibrahim و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تکنیک PSI در محیط SNAP-StaMPS، فرونشست‌های تأثیرگذار بر شبکه راه‌های دلتای نیل را پایش کردند. نتایج نشان داد که فرونشست سالانه خسارات

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

قابل توجهی به زیرساخت‌های حمل و نقل وارد می‌کند و در برخی موارد منجر به اختلال کامل در عملکرد راه‌ها برای مدت‌زمان طولانی می‌شود. Ding و همکاران (۲۰۲۵) با تحلیل تصاویر راداری و به‌کارگیری دو مدل ارزش اطلاعاتی و عامل قطعیت، نتیجه گرفتند که رانش زمین عمدتاً در فاصله ۳۰۰ متری از گسل‌ها و در شیب‌های مجاور جاده‌ها و ساختمان‌ها رخ می‌دهند که نشانگر تأثیر همزمان عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی است. Dai و همکاران (۲۰۲۵) در ارزیابی ظرفیت تحمل محیطی از تلفیق داده‌های راداری و GIS استفاده کردند. Saha و همکاران (۲۰۲۴) اگرچه بیشتر بر سیلاب تمرکز داشتند، ولی از روش‌های زمین‌مکانی برای تحلیل مخاطرات چندگانه بهره بردند. در ایران نیز مطالعاتی مانند رجبی و همکاران (۱۴۰۰) در دشت همدان، روستایی و همکاران (۱۴۰۱) در دشت شبستر و رضایی و همکاران (۱۴۰۱) در تالاب پریشان، نرخ‌های بالای فرونشست را گزارش کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهد که تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور راداری مانند PS-InSAR و SBAS-InSAR با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، ابزارهای مؤثری برای پایش مستمر پدیده فرونشست در مقیاس‌های مختلف هستند. نتایج این پژوهش‌ها حاکی از آن است که تلفیق داده‌های راداری با GIS و روش‌های آماری می‌تواند ابزار قدرتمندی برای مدیریت مخاطرات محیطی فراهم کند و دقت ارزیابی‌های مخاطرات را به طور چشمگیری افزایش دهد. با این حال، مطالعات اندکی به بررسی همزمان ابعاد ژئومورفولوژیک و بوم‌شناختی فرونشست در تالاب‌های ایران پرداخته‌اند. پژوهش حاضر با ترکیب داده‌های Sentinel-1 در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ لغایت سال ۲۰۲۴ و مطالعات میدانی، این خلأ پژوهشی را پر می‌کند.

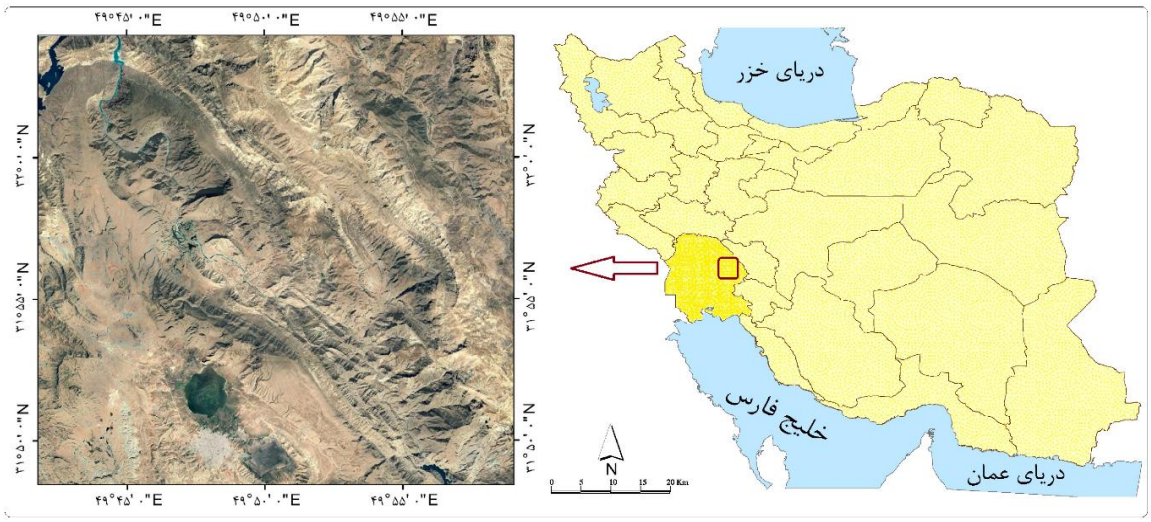
با توجه به این که ایران از جمله کشورهایی است که با نرخ بالای فرونشست زمین مواجه می‌باشد (Haghighi *et al*., 2024; Assadi *et al*., 2024; Haghighi *et al*., 2024) ، از این رو پژوهش حاضر به بررسی فرونشست تالاب میانگران در چاله ایذه می‌پردازد. این چاله نقش حیاتی در تأمین آب شرب، کشاورزی و تغذیه آب‌های زیرزمینی منطقه ایفا می‌کند. تالاب میانگران نیز به عنوان بخشی از این سیستم هیدرولوژیک، علاوه بر کارکردهای اکولوژیک، در حفظ تنوع‌زیستی منطقه اهمیت ویژه‌ای دارد. با این حال، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و بروز پدیده فرونشست، تعادل این بوم‌سازگان حساس را به شدت تحت تأثیر قرار داده است (امیری و همکاران، ۱۴۰۲؛ کیانپور و همکاران، ۱۴۰۲). این پدیده که عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است، پیامدهای مخرب اکولوژیک و ژئومورفولوژیک به همراه دارد. این محدوده به دلیل برخورداری از ویژگی‌های منحصر به فرد ژئومورفولوژیک، اکولوژیک و هیدروژئولوژیک، بستری ایده‌آل برای پژوهش‌های میان رشته‌ای محسوب می‌شود. مطالعه حاضر با هدف تحلیل جامع پدیده فرونشست در تالاب میانگران، از تلفیق تکنیک تداخل‌سنجی راداری (SBAS-InSAR) با مطالعات میدانی و ژئومورفولوژیک بهره می‌برد تا تصویر جامعی از وضعیت فرونشست در منطقه ارایه شود. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق ابعاد مختلف فرونشست و پیامدهای اکولوژیک-ژئومورفیک آن را فراهم می‌سازد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند چارچوبی جامع برای ارزیابی پیامدهای بوم‌شناختی-ژئومورفیک و تحلیل ابعاد مختلف این پدیده ارایه دهد و به عنوان مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب و تدوین راهکارهای کاهش اثرات فرونشست در منطقه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، روش‌شناسی به کار رفته در این تحقیق می‌تواند الگویی برای مطالعات مشابه در سایر مناطق در معرض فرونشست باشد.

مواد و روش‌ها

تالاب میانگران در امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس، بخشی از ناودیسی را تشکیل می‌دهد که در منطقه شمال شرقی خوزستان در چاله ایذه از شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده است. این تالاب از شرق و شمال شرق به دامنه‌های کوه کژگرد (با ارتفاع ۲۱۷۲ متر) و کوه چپور از ارتفاعات شرقی شهرستان ایذه محدود شده و با مساحتی متغیر (در حدود ۲۴۰۰ هکتار) در جنوب غربی کوهپایه زاگرس و در فاصله یک و نیم کیلومتری شمال ایذه واقع شده است (امیری و همکاران، ۱۴۰۲). تالاب میانگران یکی از تالاب‌های میان خشکی مطرح کشور است که در ناودیسی بسته با گسل‌های متعدد، با محور شمال غرب-جنوب شرق (منطبق بر محور اصلی زاگرس) قرار گرفته و از رسوبات

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

آبرفتی کواترنر با ضخامت تا ۲۰۰ متر پوشیده شده است. از نظر توپوگرافی، محدوده مورد مطالعه دارای یک دشت آبرفتی و یک منطقه کوهستانی است که به استثنای دو نقطه خروجی اولیه آبراهه‌ها، دور تا دور دشت ایذه را احاطه کرده است (شکل ۱). حداکثر عمق تالاب در فصول پرآب تا ۳/۵ متر و عمق متوسط ۱/۷۵ متر برآورد شده و جنس بستر آن از رسوبات دانه ریز تشکیل شده است. منبع تغذیه این تالاب، آب‌های سطحی است که از طریق مسیل‌ها و آبراهه‌های ارتفاعات مشرف به آن وارد تالاب می‌شوند (کیانپور و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.

این پژوهش یک تحقیق بنیادی-کاربردی است که با هدف بررسی شواهد ژئومورفیکی فرونشست و تغییرات سطح اساس در تالاب میانگران از داده‌های تصاویر سنجنده سنتینل-۱ با فرمت SLC در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۱/۲۵ تا ۲۰۲۴/۰۱/۲۸ از ۱۶ زوج تصویر استفاده شده‌است. در فرایند پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای رادار (سنجنده سنتینل-۱)، تصاویر ماهوره لندست ۸، مدل ارتفاع رقومی منطقه، تصاویر گوگل ارث و نرم‌افزارهای ArcGIS ، SNAP و Google Earth استفاده شد. به منظور ارزیابی میزان فرونشست در تالاب میانگران از روش تداخل‌سنجی و سری زمانی SBAS استفاده شد که در آن برای انجام پردازش‌های تداخل‌سنجی، حداکثر فاصله زمانی مجاز بین جفت تصاویر، (Baseline زمانی) ۱۲ ماه و حداکثر فاصله مکانی عمود بر مسیر تصویربرداری (Baseline مکانی) ۱۵۰ متر در نظر گرفته شد. پردازش تصاویر با روش SBAS-InSAR در نرم‌افزار SNAP انجام شد که شامل مراحل تولید اینترفروگرام، اصلاح توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع SRTM با دقت ۱ ثانیه قوسی، اعمال فیلتر Goldstein و تصحیح اثرات اتمسفری بود. در این روش، برای تشکیل هر تداخل‌نما از جفت تصویری که دارای کمترین طول خط مبنا از نظر زمانی و مکانی هستند، استفاده می‌شود. در تکنیک تداخل‌سنجی راداری، تصاویر مختلف راداری که دارای مقادیر فاز و دامنه موج برگشتی از عارضه به سمت سنجنده هستند با یکدیگر تلفیق شده و تصویر تداخل‌نگاشت (اینترفروگرام) ایجاد می‌گردد. تصویر تداخل‌نگاشت از اختلاف فاز دو تصویر به دست آمده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به طور دقیق بر روی هم منطبق شده‌اند، حاصل شد. در تداخل‌نگاشت اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است، وجود دارد و به کمک مقدار اختلاف فاز متغیرهای مختلف از جمله میزان جابه-جایی سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. در نرم افزار SNAP با شبیه‌سازی تداخل‌نما از DEM منطقه و کم کردن آن از تداخل‌نمای پردازش شده، خطاهای توپوگرافی با استفاده از تکنیک SRTM 1sec HTG اصلاح و حذف شد (Nur *et al*., 2024; Ding *et al*., 2023). برای بررسی ارتباط بین میزان فرونشست و پارامترهای محیطی، از پارامترهای فاصله از گسل، شیب زمین و پوشش‌گیاهی استفاده شد که برای تهیه لایه فاصله از گسل از عملگر فاصله اقلیدوسی بهره گرفته شد. همچنین برای تکمیل تحلیل‌ها، از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 به منظور بررسی تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از شاخصNDVI ، مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر برای استخراج لایه شیب، و نقشه

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

گسل‌های منطقه استفاده شد. برای بررسی روابط بین متغیرها از روش‌های آماری تحلیل رگرسیون خطی چندمتغیره، آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین نرخ فرونشست در واحدهای مختلف زمین‌شناسی، تحلیل واریانس یکطرفه (ANOVA) برای بررسی تفاوت‌های بین گروهی و ضریب همبستگی پیرسون برای سنجش روابط خطی بین متغیرها استفاده گردید. در نهایت تحلیل‌های فضایی برای بررسی ارتباط بین الگوی فرونشست و عوامل محیطی شامل فاصله از گسل‌ها، شیب زمین و تغییرات پوشش گیاهی انجام پذیرفت.

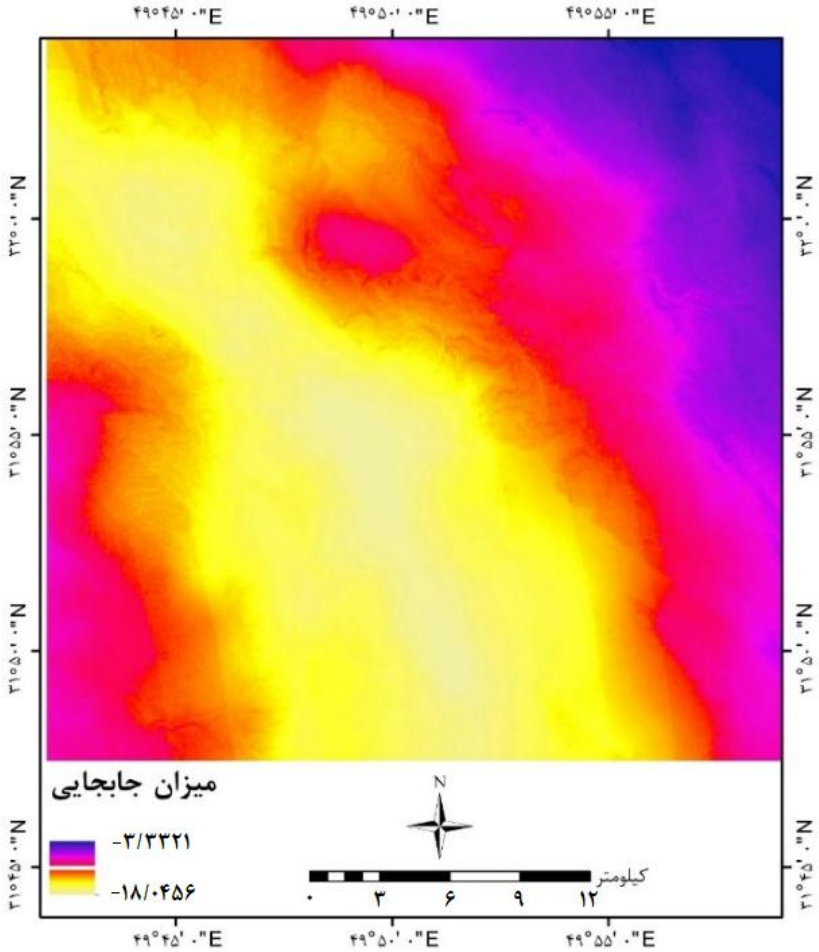
نتایج

در مرحله اول این پژوهش، بررسی‌های میدانی جامعی به منظور شناسایی و مستندسازی شواهد عینی پدیده فرونشست در محدوده مورد مطالعه انجام شد. تیم تحقیقاتی با انجام پیمایش‌های سیستماتیک در سطح منطقه، موفق به شناسایی و ثبت انواع رخنمون‌های ژئومورفولوژیکی مرتبط با نشست زمین شد. از جمله مهم‌ترین این شواهد می‌توان به بروز ترک‌ها و شکستگی‌های کششی در لبه فرنچ‌ها، تغییرات محسوس در شیب طبیعی زمین و ایجاد فروافتادگی‌های موضعی اشاره کرد (شکل۲).

شکل ۲- تصاویر فرونشست در محدوده مورد مطالعه.

نتایج حاصل از پردازش تصاویر راداری با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، الگوی فضایی و مقادیر کمی دقیقی از نرخ فرونشست در منطقه مورد مطالعه را ارایه نموده است. بر اساس این تحلیل‌ها، نرخ فرونشست سالانه در محدوده تالاب میانگران در محدوده ۳ تا ۱۸ میلی‌متر در سال قرار دارد که نشان‌دهنده وسعت قابل توجه این پدیده در سطح منطقه است (شکل ۳). محاسبات آماری انجام شده بر روی داده‌های خروجی، میانگین نرخ فرونشست منطقه را ۱۲ میلی‌متر در سال با انحراف معیار ۳ میلی‌متر نشان داد که بیانگر تغییرپذیری نسبی این پدیده در سطح منطقه است. تحلیل توزیع فضایی فرونشست نشان داد که بیشترین میزان فرونشست در بخش‌های مرکزی و دشت‌گونه منطقه متمرکز شده است (شکل ۳). این الگوی توزیع می‌تواند ناشی از عوامل متعددی از جمله ضخامت بیشتر رسوبات آبرفتی، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص این بخش‌ها باشد. تطابق قابل توجه بین کانون‌های فرونشست شناسایی شده در تصاویر ماهواره‌ای و شواهد میدانی مشاهده شده، بر قابلیت اعتماد روش‌شناسی به کار گرفته شده در این پژوهش تأکید دارد.

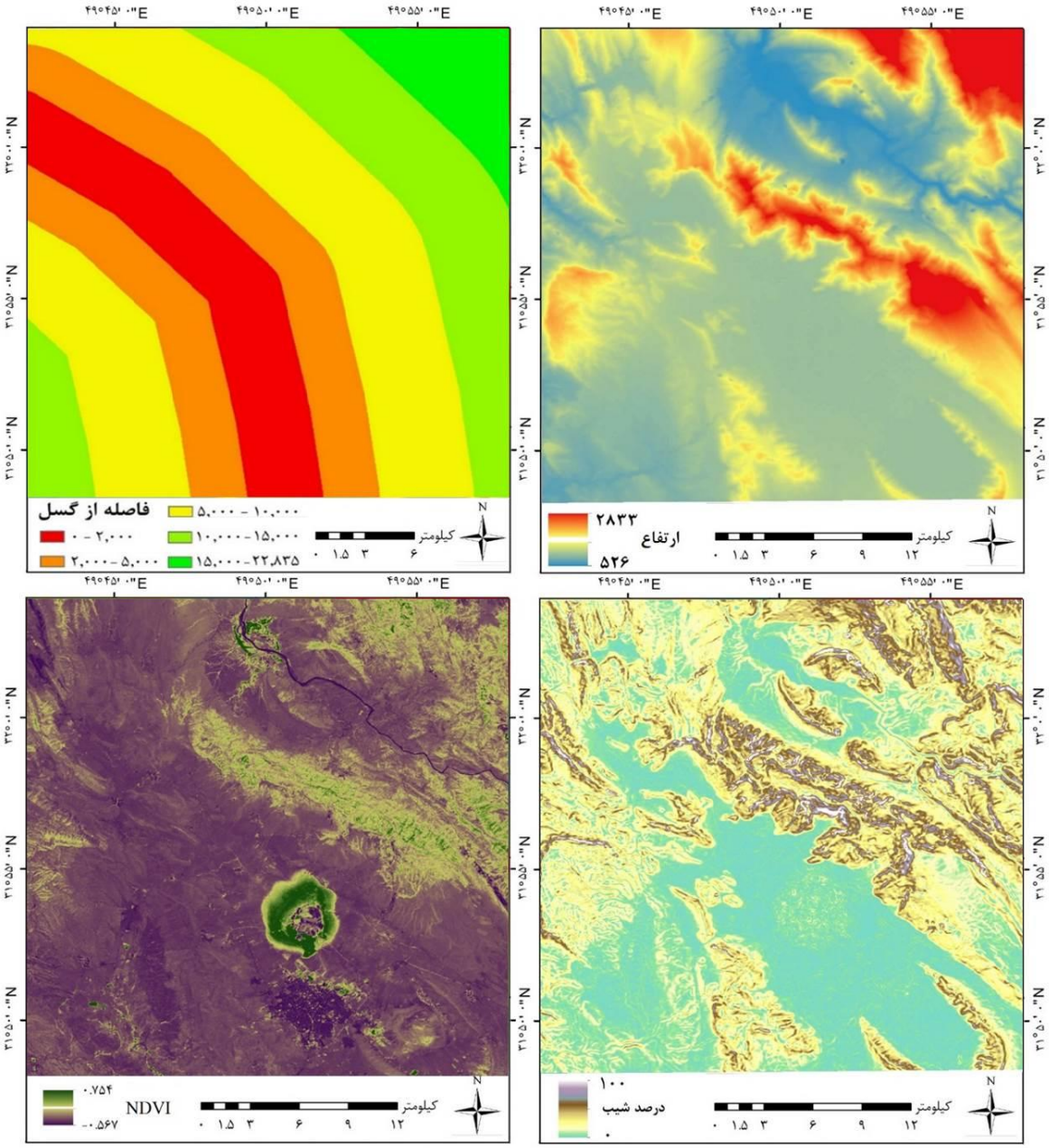
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]



شکل ۳- نقشه میزان فرونشست در محدوده حوضه تالاب میانگران بر حسب میلی‌متر.

در این پژوهش، پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ فرونشست تالاب میانگران شامل فاصله از گسل، شیب زمین و پوشش‌گیاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل این عوامل، از روش‌های سیستماتیک و ابزارهای پیشرفته GIS استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که گسل اصلی منطقه که از مرکز و حاشیه شمال غربی محدوده مطالعاتی عبور می‌کند (شکل ۴)، تأثیر معناداری بر توزیع فضایی فرونشست دارد. این گسل احتمالا می‌تواند یکی از دلایل ایجاد تالاب (به دلیل ایجاد گرابن ایجاد شده توسط گسل) باشد (سلطانی، ۱۴۰۰). تحلیل‌های آماری با استفاده از ضریب تعیین (R^2=۰/۳۷۶) حاکی از رابطه معکوس قوی بین فاصله از گسل و نرخ فرونشست است. این یافته‌ها نشان داد که با کاهش فاصله از گسل اصلی، نرخ فرونشست به طور محسوسی افزایش یافت. این پدیده ناشی از تأثیر گسل بر جریان‌های زیرزمینی و ایجاد ساختارهای زمین‌شناسی مستعد فرونشست باشد (Luo *et al*., 2024; Anees *et al*., 2024; Cheraghi *et al*., 2024).

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]



شکل ۴- نقشه ارتفاع، فاصله از گسل، درصد شیب و پوشش گیاهی محدوده مورد مطالعه.

بررسی پارامترهای آماری در طبقات مختلف نشان داد که تمامی معیارهای مورد مطالعه رابطه معناداری با نرخ فرونشست دارند. بر اساس (جدول ۱)، میانگین نرخ فرونشست در فاصله کمتر از ۲۰۰۰ متر از گسل اصلی (۱۷/۰۲ میلی‌متر با انحراف معیار ۰/۹۰ میلی‌متر) به طور معناداری بیشتر از مناطق دورتر از گسل (۶/۱۵ میلی‌متر با انحراف معیار ۱/۰۴ میلی‌متر در فاصله بیش از ۱۵۰۰۰ متر) بود. این یافته تأثیر قوی سیستم گسلی منطقه بر توزیع مکانی فرونشست را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

جدول ۱- پارامترها آماری فرونشست در ارتباط با فاصله از گسل

فاصله از گسل (متر)	کمینه (میلی‌متر)	بیشینه (میلی‌متر)	دامنه تغییرات (میلی‌متر)	میانگین±انحراف معیار (میلی‌متر)
۲۰۰۰-۰	۱۳/۹۹	۱۸/۵۱	۴/۵۲	۱۷/۰۲±۰/۹۰
۵۰۰۰-۲۰۰۰	۱۰/۵۹	۱۸/۱۸	۷/۵۹	۱۵/۲۵±۱/۲۵
۱۰۰۰۰-۵۰۰۰	۸/۹۲	۱۵/۸۹	۶/۹۷	۱۳/۱۰±۱/۲۵
۱۵۰۰۰-۱۰۰۰۰	۶/۱۷	۱۳/۳۶	۷/۱۹	۱۰/۱۷±۱/۴۷
۱۵۰۰۰<	۲/۲۷	۹/۲۰	۶/۹۳	۶/۱۵±۱/۰۴

توزیع فضایی شیب‌های منطقه (شکل ۴) نشان می‌دهد که بیشتر مساحت منطقه را اراضی با شیب کم (زیر ۵ درصد) تشکیل می‌دهد. تحلیل آماری رابطه بین شیب و فرونشست (R^2= ۰/۱۵۴) بیانگر آن است که در مناطق با شیب کمتر، نرخ فرونشست به مراتب بیشتر از مناطق پرشیب است. تحلیل داده‌های (جدول ۲) حاکی از آن است که مناطق با شیب کمتر از ۲ درصد با میانگین فرونشست ۱۵ میلی‌متر بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. این در حالی است که مناطق با شیب بیش از ۲۰ درصد میانگین فرونشست ۱۰/۳۱ میلی‌متر را تجربه کرده‌اند. دامنه تغییرات گسترده (۱۳/۴۹-۱۴/۸۱ میلی‌متر) در تمام طبقات شیبی، نشان‌دهنده پیچیدگی رفتار فرونشست در منطقه است (جدول ۲).

جدول ۲- پارامترها آماری نرخ فرونشست بر اساس شیب زمین

رده شیب (درصد)	کمینه (میلی‌متر)	بیشینه (میلی‌متر)	دامنه تغییرات (میلی‌متر)	میانگین±انحراف معیار (میلی‌متر)
۲-۰	۵/۰۲	۱۸/۵۱	۱۳/۴۹	۱۵/۰۰±۲/۲۲
۵-۲	۴/۲۰	۱۸/۴۹	۱۴/۲۹	۱۳/۱۰±۲/۶۸
۱۰-۵	۳/۴۱	۱۸/۱۰	۱۴/۶۹	۱۲/۱۶±۳/۰۶
۲۰-۱۰	۲/۸۷	۱۷/۶۱	۱۴/۷۴	۱۱/۰۶±۳/۳۱
۲۰<	۲/۲۷	۱۷/۰۷	۱۴/۸۱	۱۰/۳۱±۳/۱۱

بررسی شاخص NDVI (شکل ۴) نشان داد که میانگین پوشش گیاهی منطقه در حد متوسط (۰/۳۹) است. تحلیل رابطه بین پوشش گیاهی و فرونشست (R^2= ۰/۰۹) حاکی از تأثیر نسبی پوشش گیاهی در کاهش نرخ فرونشست است. این تأثیر احتمالاً از طریق مکانیسم‌هایی مانند کاهش تبخیر و تعرق و افزایش پایداری خاک اعمال می‌شود.

بر اساس (جدول ۳)، مناطق با پوشش گیاهی ضعیف (NDVI 0-0.1) با میانگین فرونشست ۱۵/۷۷ میلی‌متر بیشترین میزان و مناطق آبی با میانگین ۱۰/۰۴ میلی‌متر کمترین میزان فرونشست را نشان دادند. جالب توجه اینکه با افزایش شاخص NDVI از ۰/۱ به بالا روند کاهشی معناداری در نرخ فرونشست مشاهده نشد. این نتیجه نشان می‌دهد پوشش گیاهی به‌تنهایی عامل تعیین‌کننده اصلی فرونشست نیست و عوامل دیگری مانند گسل‌ها نقش پررنگ‌تری دارند.

جدول ۳- پارامترها آماری نرخ فرونشست بر اساس شاخص پوشش گیاهی(NDVI)

رده NDVI	کمینه (میلی‌متر)	بیشینه (میلی‌متر)	دامنه تغییرات (میلی‌متر)	میانگین±انحراف معیار (میلی‌متر)
-۰/۵۷-۰	۸/۷۹	۱۶/۸۲	۸/۰۳	۱۰/۰۴±۱/۵۷
۰/۱-۰	۴/۹۹	۱۸/۵۱	۱۳/۵۲	۱۵/۷۷±۲/۴۷
۰/۲-۰/۱	۲/۲۷	۱۸/۵۰	۱۶/۲۳	۱۳/۴۳±۲/۹۰
۰/۳-۰/۲	۳/۳۰	۱۸/۱۶	۱۴/۸۶	۱۱/۹۴±۳/۱۸
۰/۳<	۳/۷۳	۱۷/۹۰	۱۴/۱۷	۱۲/۴۳±۳/۷۷

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

توزیع ارتفاعی منطقه (شکل ۴) نشان می‌دهد که بیشتر مساحت منطقه در ارتفاعات کمتر از ۱۰۰۰ متر قرار دارد. تحلیل آماری (R^2=۰/۲۵) بیانگر رابطه معکوس معنادار بین ارتفاع و نرخ فرونشست است، به طوری که در اراضی پست‌تر، نرخ فرونشست به مراتب بیشتر است. تحلیل داده‌های (جدول ۴) نشان داد که طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۸۰۰ متر با میانگین فرونشست ۱۴/۵۲ میلی‌متر بیشترین و مناطق بالای ۱۸۰۰ متر با میانگین ۶/۶۷ میلی‌متر کمترین نرخ فرونشست را دارند. این یافته‌ها با تئوری‌های مربوط به تأثیر ارتفاع بر پتانسیل فرونشست همخوانی دارد (Ling *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024).

جدول ۴: پارامترها آماری نرخ فرونشست بر اساس طبقات ارتفاعی

رده ارتفاع (متر)	کمینه (میلی‌متر)	بیشینه (میلی‌متر)	دامنه تغییرات (میلی‌متر)	میانگین±انحراف معیار (میلی‌متر)
۸۰۰-۵۲۶	۵/۶۲	۱۸/۱۱	۱۲/۵۰	۱۲/۲۸±۲/۱۰
۱۰۰۰-۸۰۰	۵/۱۶	۱۸/۵۱	۱۳/۳۵	۱۴/۵۲±۲/۷۵
۱۳۰۰-۱۰۰۰	۴/۰۸	۱۸/۲۳	۱۴/۱۵	۱۲/۱۸±۲/۹۶
۱۸۰۰-۱۳۰۰	۳/۵۸	۱۶/۰۲	۱۲/۴۴	۱۰/۰۹±۲/۸۱
۱۸۰۰<	۲/۲۷	۱۳/۸۸	۱۱/۶۲	۶/۶۷±۲/۳۸

بررسی پارامترهای آماری فرونشست در واحدهای مختلف زمین‌شناسی نشان داد (جدول ۵) که اگرچه تفاوت میانگین فرونشست بین واحدهای مختلف زمین‌شناسی محدود (۱۰/۹۰-۱۴/۴۲ میلی‌متر) است، اما واحد ماسه‌سنگ‌های گچی با میانگین ۱۴/۴۲ میلی‌متر و رسوبات کواترنری با ۱۳/۹۳ میلی‌متر بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. همچنین سازندهای آهکی با ۱۰/۹۰ میلی‌متر در سال کمترین میزان فرونشست را تجربه کرده‌اند. دامنه تغییرات گسترده در سازندهای آهکی (۱۵/۲۵ میلی‌متر) نشان‌دهنده ناهمگنی زیاد در رفتار فرونشست این واحد است، در حالی که ماسه‌سنگ‌های گچی با دامنه تغییرات ۴/۵۸ میلی‌متر، رفتار یکنواخت‌تری از خود نشان داده است. رسوبات کواترنری (۱۳/۹۳ میلی‌متر) و مارن‌های میوسن (۱۳/۲۳ میلی‌متر) نیز از جمله واحدهای با نرخ فرونشست بالا محسوب می‌شوند. جالب توجه اینکه واحدهای با انحراف معیار پایین مانند مارن‌های پلیوسن (۰/۹۴) و مارن‌های میوسن (۰/۸۹) الگوی فرونشست یکنواخت‌تری داشته‌اند، در حالی که واحدهایی مانند سازندهای آهکی (انحراف معیار ۴/۸۹) تغییرپذیری مکانی زیادی در نرخ فرونشست نشان می‌دهند.

جدول ۵- پارامترها آماری فرونشست در ارتباط با واحدهای زمین شناسی

واحد زمین‌شناسی	کمینه (میلی‌متر)	بیشینه (میلی‌متر)	دامنه تغییرات (میلی‌متر)	میانگین±انحراف معیار (میلی‌متر)
ماسه‌سنگ‌های گچی	۱۱/۹۱	۱۶/۵۰	۴/۵۸	۱۴/۴۲±۰/۹۵
سازندهای آهکی مزوزوئیک	۱۰/۱۹	۱۶/۱۱	۵/۹۳	۱۲/۴۳±۰/۸۹
کنگلومرای کرتاسه	۳/۳۳	۱۸/۴۹	۱۵/۱۶	۱۱/۸۲±۳/۵۹
سازند ماسه‌ای نئوژن	۶/۴۰	۱۸/۴۴	۱۲/۰۴	۱۲/۸۵±۳/۵۶
واحدهای شیلی-ماسه‌ای	۷/۴۶	۱۸/۱۱	۱۰/۶۵	۱۱/۲۳±۲/۵۴
مارن‌های میوسن	۱۰/۹۴	۱۵/۰۳	۴/۰۹	۱۳/۲۳±۰/۸۹
مارن‌های پلیوسن	۹/۰۹	۱۳/۹۷	۴/۸۸	۱۱/۱۶±۰/۹۴
نهشته‌های آواری قدیمی	۸/۹۲	۱۷/۰۳	۸/۱۰	۱۲/۹۲±۱/۶۱
رسوبات کواترنری	۳/۵۸	۱۸/۵۱	۱۴/۹۳	۱۳/۹۳±۳/۱۳

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

این یافته‌ها حاکی از آن است که اگرچه برخی واحدهای زمین‌شناسی مانند ماسه‌سنگ‌های گچی به طور کلی مستعد فرونشست بیشتری هستند، اما درون‌همانی (homogeneity) رفتار فرونشست در واحدهای مختلف می‌تواند تفاوت چشمگیری داشته باشد. این موضوع اهمیت بررسی ویژگی‌های محلی هر واحد را در ارزیابی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد.

مقادیر RMSE محاسبه شده (جدول ۶) نشان می‌دهد که معیار فاصله از گسل با RMSE= ۳/۱۴ دقیق‌ترین پیش‌بینی کننده نرخ فرونشست است، در حالی که شاخص پوشش گیاهی با RMSE= ۱۴/۴۱ کمترین دقت را دارد. این نتایج با ضرایب تعیین محاسبه شده در بخش‌های قبلی همخوانی کامل دارد.

جدول ۶: خطای مربعات میانگین ریشه (RMSE) برای معیارهای مختلف

معیار	RMSE (mm)
فاصله از گسل	۳/۱۴
ارتفاع	۳/۲۴
شیب	۳/۵۴
پوشش گیاهی	۱۴/۴۱

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تالاب میانگران با نرخ فرونشست ۳ تا ۱۸ میلی‌متر در سال (میانگین ۱۲±۳ میلی‌متر) مواجه است که الگوی فضایی آن به‌طور معناداری تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیک و مورفودینامیک قرار دارد. تمرکز فرونشست در بخش‌های مرکزی و دشت‌گونه تالاب، همخوانی واضحی با ضخامت رسوبات آبرفتی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی دارد. این یافته‌ها با مطالعات مشابهی مانند Arabameri و همکاران (۲۰۲۲) و Zhang و همکاران (۲۰۲۳) که مدل‌های مختلف را برای تهیه نقشه حساسیت فرونشست مقایسه کردند، همخوانی دارد. تحلیل‌های آماری نشان داد که فاصله از گسل اصلی (با ضریب تعیین ۰/۳۷۶ و ۳/۱۴ میلی‌متر =RMSE) به عنوان کلیدی‌ترین پارامتر کنترل‌کننده نرخ فرونشست عمل می‌کند، به طوری که در فاصله کمتر از ۲۰۰۰ متر از گسل، نرخ فرونشست به ۱۷/۰۲±۰/۹۰ میلی‌متر در سال افزایش می‌یابد. این پدیده احتمالاً ناشی از تأثیر گسل بر جریان آب زیرزمینی و ایجاد ساختارهای زمین‌شناسی مستعد فرونشست است. این نتیجه با یافته‌های Kouider و همکاران (۲۰۲۳) در مورد تأثیر شکستگی‌ها و خطواره‌ها بر فرونشست در مناطق خشک و Xiong و همکاران (۲۰۲۴) همسو است.

از سوی دیگر، ویژگی‌های مورفومتریک نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع فضایی فرونشست ایفا می‌کنند. مناطق با شیب کمتر از ۲ درصد (میانگین فرونشست ۱۵±۲/۲۲ میلی‌متر) و ارتفاعات زیر ۱۰۰۰ متر (۱۴/۵۲±۲/۷۵ میلی‌متر) بیشترین آسیب‌پذیری را نشان دادند که می‌تواند مرتبط با ضخامت بیشتر رسوبات نرم و نرخ بالاتر برداشت آب در این نواحی باشد. این یافته‌ها با نتایج Zhang و همکاران (۲۰۲۱) در مورد مفهوم و ارزیابی اتصال هیدرولوژیکی در مقیاس‌های مختلف و Wang و همکاران (۲۰۲۴) در مورد تغییرات فضایی-زمانی تالاب‌های کوچک و میکرو در مناطق با عرض جغرافیایی بالا مطابقت دارد. همچنین، مطالعات Wei و همکاران (۲۰۲۲) در مورد تحول فضایی-زمانی تالاب‌های ساحلی در حاشیه دریای بوهای چین و Li و همکاران (۲۰۲۴) در محیط‌های تالابی طبیعی چین، اهمیت ویژگی‌های مورفومتریک را در پویایی سیستم‌های تالابی تأیید می‌کنند.

در میان واحدهای زمین‌شناسی، ماسه‌سنگ‌های گچی (۱۴/۴۲±۰/۹۵ میلی‌متر) و رسوبات کواترنری (۱۳/۹۳±۳/۱۳ میلی‌متر) بالاترین نرخ فرونشست را تجربه می‌کنند، در حالی که سازندهای آهکی با وجود تغییرپذیری بالا (دامنه ۱۵/۲۵ میلی‌متر)، میانگین کمتری (۸۹/۹۰±۴/۱۰ میلی‌متر) دارند. این نتایج بر اهمیت ترکیب ویژگی‌های لیتولوژیک و ساختاری در ارزیابی خطر فرونشست تأکید می‌کند. این

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

نتایج با یافته‌های Matiatos و همکاران (۲۰۱۸) و مطالعات Dai و همکاران (۲۰۲۵) در مورد ارزیابی ظرفیت تحمل محیطزیست زمین‌شناسی، اهمیت ویژگی‌های لیتولوژیک را در ارزیابی خطر فرونشست تأیید می‌کند. همچنین، مطالعات Nur و همکاران (۲۰۲۴) که از تکنیک PS-InSAR برای پایش فرونشست زمین استفاده کردند، اهمیت عوامل زمین‌ساختی را در توزیع فضایی فرونشست تأیید می‌کنند.

اگرچه پوشش گیاهی (با ضریب تعیین ۰/۰۹) اثر محدودی بر کاهش نرخ فرونشست نشان داد، اما مناطق با پوشش ضعیف (NDVI< ۰/۱) به‌طور میانگین ۱۵/۷۷±۲/۴۷ میلی‌متر فرونشست را تجربه کردند که احتمالاً به دلیل کاهش پایداری خاک و افزایش تبخیر است. با این حال، نبود رابطه خطی بین افزایش NDVI و کاهش فرونشست، نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب نسبت به احیای پوشش گیاهی، راهبرد مؤثرتری برای کنترل این پدیده است. این یافته با مطالعات مشابه در دیگر مناطق فرونشستی جهان مانند Ganju و همکاران (۲۰۲۴) و He و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد.

این مطالعه با تلفیق داده‌های InSAR ، مشاهدات میدانی و تحلیل‌هایGIS، چارچوبی علمی درباره دامنه و الگوی فضایی فرونشست و ارزیابی چندمعیاره آن ارایه می‌نماید. یافته‌ها حاکی از آن است که تعامل پیچیده‌ای بین عوامل انسانی (برداشت آب) و طبیعی (گسل‌زایی، لیتولوژی) بر پویایی این پدیده حاکم است. نتایج پژوهش نشان داد که فرونشست در تالاب میانگران پدیده‌ای چندعاملی است که نیازمند نگرشی سیستمی است و پیامدهای بوم‌شناختی-ژئومورفیک متعددی در پی دارد:

- تغییرات هیدرولوژیک: فرونشست می‌تواند با ایجاد شکاف‌های کششی، الگوی زهکشی طبیعی تالاب را مختل کند.
- تهدید تنوع‌زیستی: تغییر ارتفاع نسبی و ایجاد فروچاله‌ها ممکن است زیستگاه‌های آبی را تحت تأثیر قرار دهد.
- تشدید اثرات تغییر اقلیم: کاهش ظرفیت ذخیره آب در تالاب، آسیب‌پذیری منطقه را در برابر خشکسالی افزایش می‌دهد.

برای کاهش ریسک فرونشست، پیشنهاد می‌شود از سیستم‌های پایش بلندمدت یکپارچه در مورد مجموعه داده‌های ذخیره آب زمینی استفاده شود. همچنین، اعمال محدودیت برداشت آب در واحدهای زمین‌شناسی آسیب‌پذیر (مثل رسوبات کواترنری) و مطالعات دقیق‌تر درباره تأثیر گسل‌ها بر جریان آب زیرزمینی و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی ضروری به نظر می‌رسد. برای پژوهش‌های آینده، مطالعه تأثیرات بلندمدت فرونشست بر ذخایر کربن تالاب و همچنین بررسی امکان استفاده از آب‌های غیرمتعارف برای احیای تالاب پیشنهاد می‌شود. این پژوهش الگویی برای مطالعات مشابه در دیگر تالاب‌های در معرض خطر فرونشست ارایه می‌دهد و می‌تواند با رویکردهای بین‌رشته‌ای مانند درک وضعیت سلامت بوم‌شناختی مناطق نیمه‌خشک و خشک و کشاورزی تالابی تکمیل شود. همچنین، استفاده از تکنیک‌های نوین در مورد ارزیابی حساسیت تالاب‌ها با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی و ضریب اطمینان و بهبود اتصال چشم‌انداز تالاب از طریق بهینه‌سازی چندعاملی می‌تواند به ارتقای دقت مطالعات آینده کمک کند و در مطالعات آتی، تأثیر متقابل این عوامل با استفاده از روش‌های چند متغیره مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این مطالعه می‌تواند به عنوان الگویی برای پایش سایر تالاب‌های در معرض خطر فرونشست مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها می‌تواند مبنای علمی ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های محیطی و مدیریت ریسک فرونشست در منطقه و ابزار قدرتمندی برای پایش و مدیریت تالاب‌های در معرض خطر باشد.

قدردانی

این مقاله مستخرج از نتایج پایان نامه اجرا شده در دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر می‌باشد.

منابع

امیری، مینا.، دشتی، سولماز.، بهباش، روشنا.، ۱۴۰۱. تدوین راهبردهای مدیریتی حفاظت با استفاده از روش AHP و SWOT مطالعه‌ی موردی: تالاب میانگران. اکوبیولوژی تالاب. ۱۴ (۱)، صفحات ۸۷-۱۰۰.

رجبی، م.، روستایی، ش. و **جوادی، س.م.، ۱۴۰۰.** ارزیابی نرخ فرونشست دشت همدان-بهار و ارتباط آن با پارامترهای محیطی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، ۱۰ (۳)، صفحات ۱۸۶-۱۷۵.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

رضایی توابع، ک.، حیدری، ا. و **سیاح‌پور، م.ج.، ۱۴۰۱.** بررسی تراز آب زیرزمینی و شبیه‌سازی سناریوهای پیش‌بینی در حوضه آبریز پریشان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، ۱۱ (۲)، صفحات ۲۱۰-۲۲۸.

روستایی، ش.، رضایی مقدم، م.ح.، یاراحمدی، ج. و **نجف‌وند، س.، ۱۴۰۱.** بررسی مناطق مستعد ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از روش FUZZY-AHP (مطالعه موردی: دشت شبستر-صوفیان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، ۱۲ (۳)، صفحات ۳۵-۵۸.

سلطانی، ف.، ۱۴۰۰. بررسی شواهد ژئومورفیکی تغییرات سطح اساس در چاله ایذه (تالاب میانگران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر. صفحات ۱-۱۰۷.

کیانپور، حسین.، دشتی، سولماز.، بهباش، روشنا.، ۱۴۰۲. ارزیابی خدمات اکوسیستمی تالاب میانگران بر اساس چارچوب DPSIR جهت تدوین راهبردهای مدیریتی. اکوبیولوژی تالاب، ۱۵ (۱)، صفحات ۳۵-۴۸

Anees, A., Zhang, H., Ashraf, U., 2024. Structural styles and impact of fault subsidence in the Lake Fuxian Basin and adjacent area. Marine Geophysical Research, 45, 11. https://doi.org/10.1007/s11001-024-09544-5

Arabameri, A., Santosh, M., Rezaie, F., 2022, Application of novel ensemble models and k-fold CV approaches for Land subsidence susceptibility modelling, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 36, 201–223, https://doi.org/10.1007/s00477-021-02036-7.

Assadi, M.A.Z., Nasiri, A., Zandi, R., 2024. Impact of crop types on land subsidence: a case study of Nourabad aquifer, Iran. Environmental Monitoring and Assessment 196, 1271. https://doi.org/10.1007/s10661-024-13453-w

Cheraghi, H., Hinderer, J., Ebrahimi, S., 2024. Gravity Change and Its Relation to Land Subsidence and Underground Water Table Variation at Kerman, Iran. Pure and Applied Geophysics 181, 3443–3461. https://doi.org/10.1007/s00024-024-03605-x

Dai, R., Xiao, C., Liang, X., 2025, Evaluation of ecological geological environment carrying capacity and analysis of driving mechanisms based on normal cloud model and geodetector model, Scientific Reports, 15, 2800, https://doi.org/10.1038/s41598-025-85761-1.

Ding, D., Wu, Y., Wu, T., 2025, Landslide susceptibility assessment in Tongguan District, Anhui, China using information value and certainty factor models, Scientific Reports, 15, 12275, https://doi.org/10.1038/s41598-025-93704-z.

Ding, M., Li, X., Jin, Z., 2025, Identifying landscape features within upland thermo-erosion gullies on the Tibetan Plateau via UAV-based machine learning, Journal of Soils and Sediments, 25, 222–237, https://doi.org/10.1007/s11368-024-03939-y.

Ding, Q., Wang, F., Huang, X., 2023. Monitoring and Analysis of Surface Deformation in Songyuan City, Jilin Province Based on Time Series InSAR. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 51, 2167-2185. https://doi.org/10.1007/s12524-023-01746-5

Fotoohi, S., Negaresh, H., Delaram, R., Sistani Badooei, M. 2021. The Role of Anthropogenic Effects in Subsidence of Normanshir-Fahraj Plain. Journal of Radar and Optical Remote Sensing, 4(2), 25-38.

Ganju, N.K., Defne, Z., Schwab, C., 2024, Horizontal Integrity a Prerequisite for Vertical Stability: Comparison of Elevation Change and the Unvegetated-Vegetated Marsh Ratio Across Southeastern USA Coastal Wetlands, Estuaries and Coasts, 47, 2135–2145, https://doi.org/10.1007/s12237-023-01221-x.

Gerdener, H., Kusche, J., Schulze, K., 2023, The global land water storage data set release 2 (GLWS2.0) derived via assimilating GRACE and GRACE-FO data into a global hydrological model, Journal of Geodesy, 97, 73, https://doi.org/10.1007/s00190-023-01763-9.

Haghighi, M.H., Motagh, M., 2024. Land Subsidence in Iran Estimated from a Nationwide InSAR Analysis of Sentinel-1 Observations 2014–2020. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10815578

Haghighi, M.H., Motagh, M., 2024. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. Science Advances, 10, eadk 3039. https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3039.

Hardy, T., Wu, W., 2021, Impact of different restoration methods on coastal wetland loss in Louisiana: Bayesian analysis, Environmental Monitoring and Assessment, 193, 1, https://doi.org/10.1007/s10661-020-08746-9.

He, A., Huang, J., Sun, Z., 2025, Morphology and vegetation dynamics in a macro-tidal tropical estuary with high fluvial discharge: A case study of the Salween River Delta, Journal of Geographical Sciences, 35, 577–597, https://doi.org/10.1007/s11442-025-2335-2.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

Hemati, M., Hasanlou, M., Mahdianpari, M., **2023**, Iranian wetland inventory map at a spatial resolution of 10 m using Sentinel-1 and Sentinel-2 data on the Google Earth Engine cloud computing platform, Environmental Monitoring and Assessment, 195, 558, https://doi.org/10.1007/s10661-023-11202-z.

Huang, W., Li, C., Rivera-Monroy, V.H., **2024**, Cold fronts control multiscale spatiotemporal hydroperiod patterns in a man-made subtropical coastal delta (Wax Lake Region, Louisiana USA), Ocean Dynamics, 74, 355–372, https://doi.org/10.1007/s10236-024-01608-9.

Ibrahim, H.B., Salah, M., Zarzoura, F., 2024. Persistent scatterer interferometry (PSI) technique for road infrastructure monitoring: a case study of the roadway network of the Nile Delta (Egypt). Innovative Infrastructure Solutions, 9, 119. https://doi.org/10.1007/s41062-024-01415-7

Islam, M.M., **2024**, Unravelling the complexities of wetland agriculture, climate change, and coping mechanisms: an integrative review using economics and satellite approaches, Environment, Development and Sustainability, https://doi.org/10.1007/s10668-024-05152-w.

Kouider, M.H., Dahou, M.E.A., Nezli, I.E., **2023**, Fractures and lineaments mapping and hydrodynamic impacts on surface and groundwater occurrence and quality in an arid region, Oued M'ya basin-Southern Sahara, Algeria, Environmental Earth Sciences, 82, 538, https://doi.org/10.1007/s12665-023-11128-2.

Li, J., Hao, T., Yang, M., **2024**, Key processes of carbon cycle and sink enhancement paths in natural wetland ecosystems in China, Science China Earth Sciences, 67, 2444–2459, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1347-8.

Ling, W., Feng, X., Wang, L., 2024. Prediction method of surface subsidence induced by block caving method based on UAV oblique photogrammetry. Scientific Reports, 14, 24630. https://doi.org/10.1038/s41598-024-74864-w

Luo, J., Li, Y., Guo, Q., **2024.** Research on the surface subsidence characteristics and prediction models caused by coal mining under the reverse fault. Scientific Reports, 14, 25316. https://doi.org/10.1038/s41598-024-75182-x

Mallick, J., Alqadhi, S., Alkahtani, M., **2025**, Understanding the Ecological Health Status of a Semi-Arid and Arid Region of Saudi Arabia in the Era of Rapid Urbanization, Earth Systems and Environment, https://doi.org/10.1007/s41748-025-00573-7.

Matiatos, I., Paraskevopoulou, V., Lazogiannis, K., **2018**, Surface–ground water interactions and hydrogeochemical evolution in a fluvio-deltaic setting: The case study of the Pinios River delta, Journal of Hydrology, 561, 236–249, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.067.

Minasny, B., Adetsu, D.V., Aitkenhead, M., **2024**, Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale, Biogeochemistry, 167, 383–425, https://doi.org/10.1007/s10533-023-01084-1.

Nur, A.S., Nam, B.H., Choi, S., 2024. Monitoring of ground subsidence using PS-InSAR technique in the Southeast Texas (SETX) Region. Geo-Engineering, 15, 13. https://doi.org/10.1186/s40703-024-00215-3

Quandt, A., Larsen, A.E., Bartel, G., **2023**, Sustainable groundwater management and its implications for agricultural land repurposing, Regional Environmental Change, 23, 120, https://doi.org/10.1007/s10113-023-02114-2.

Rahmani, G., Chitsazan, M., Ghafouri, H. 2021. Determining the relationship between groundwater level drawdown and land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and Analytical models. Advanced Applied Geology.doi: 10.22055/aag.2021.36217.2190

Saha, G., Kabir, M.N., Islam, M.S., 2024. Flash flood potential risk zonation mapping using GIS-based spatial multi-index model: a case study of Sunamganj District, Bangladesh. Arabian Journal of Geosciences 17, 100. https://doi.org/10.1007/s12517-024-11907-6

Sedaghat, M., Ghazifard, A., Ajalloeian, R., & Shirani, K. 2020. Evaluation of the subsidence hazard due to groundwater withdrawal in Isfahan Metropolis. Geotechnical and Geological Engineering 38, 297‑318.

Springer, A., Lopez, T., Owor, M., **2023**, The Role of Space-Based Observations for Groundwater Resource Monitoring over Africa, Surveys in Geophysics, 44, 123–172, https://doi.org/10.1007/s10712-022-09759-4.

Wang, P., Zhu, Z., Guo, L., 2024. Investigation of ground subsidence response to an unconventional longwall panel layout. International Journal of Coal Science & Technology, 11, 68. https://doi.org/10.1007/s40789-024-00719-4

Wang, Y., Sun, J., Wu, Y., **2024**, Spatiotemporal Variation of Small and Micro Wetlands and Their Multiple Responses to Driving Factors in the high-latitude Region, Wetlands, 44, 126, https://doi.org/10.1007/s13157-024-01882-9.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

Wei, F., Han, M., Han, G., **2022**, Reclamation-oriented spatiotemporal evolution of coastal wetland along Bohai Rim, China, Acta Oceanologica Sinica, 41, 192–204, https://doi.org/10.1007/s13131-022-1987-3.

Xiong, Y., Abdulraheem, M.I., Li, L., **2024**, Spatial analysis techniques for assessing groundwater vulnerability: a strategic approach to proactive conservation and mitigation strategies, Environmental Earth Sciences, 83, 621, https://doi.org/10.1007/s12665-024-11930-6.

Yin, Y., Lan, L., Wang, D., 2024. Formation environment and hydrocarbon potential of the Paleogene Enping Formation coal measures in the Zhu I Depression of northern South China Sea. Acta Oceanologica Sinica, 43, 119-135. https://doi.org/10.1007/s13131-024-2333-8

Zhang, H., Liu, G., He, J., 2024. Enhancing Wetland Landscape Connectivity through Multi-Factor Optimization: a Case Study in Maduo County, Qinghai Province, China. Wetlands, 44, 88. https://doi.org/10.1007/s13157-024-01845-0

Zhang, L., Arabameri, A., Santosh, M., **2023**, Land subsidence susceptibility mapping: comparative assessment of the efficacy of the five models, Environmental Science and Pollution Research, 30, 77830–77849, https://doi.org/10.1007/s11356-023-27799-0.

Zhang, Q., Cao, Z., Wang, Y., **2024**, Carrying Capacity and Coupling Coordination of Water and Land Resources Systems in Arid and Semi-arid Areas: A Case Study of Yulin City, China, Chinese Geographical Science, 34, 931–950, https://doi.org/10.1007/s11769-024-1460-7.

Zhang, Y., Huang, C., Zhang, W., **2021**, The concept, approach, and future research of hydrological connectivity and its assessment at multiscales, Environmental Science and Pollution Research, 28, 52724–52743, https://doi.org/10.1007/s11356-021-16148-8.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]

Spatiotemporal Analysis of Subsidence in Miangaran Wetland Using Radar Interferometry (InSAR) Techniques and Assessment of Ecological-Geomorphological Impacts

Farshad Soltani[1]

Heeva Elmizadeh*[2]

1. Department of Marine Geology, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Iran.

2. Associate Professor, Department of Marine Geology, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Iran.

***Corresponding author:**

Elmizadeh@kmsu.ac.ir

Received date: May/02/2025

Reception date: June/20/2025

Abstract

Miangaran Wetland, as one of the valuable wetland ecosystems in western Iran, has been facing land subsidence in recent years. This study examines land subsidence patterns in the Miangaran Wetland using the SBAS-InSAR technique and assesses its ecological and geomorphological impacts. Sentinel-1 satellite data (2017–2024) and field surveys were employed to assess subsidence rates and contributing factors. The annual subsidence rate ranges from 3 to 18 mm, averaging 12±3 mm, mainly in the central plains of the wetland. Statistical analyses revealed significant correlations between subsidence and environmental parameters, including proximity to faults (R^2=0.376), slope, and lithology. Areas within 2,000 m of major faults, with Quaternary sediments and gypsum sandstone, are most vulnerable to subsidence, with rates reaching up to 17.02±0.90 mm/year. Low-slope terrains (<2%) and elevations under 1000 m were more susceptible to subsidence, and vegetation cover had little impact on this issue. The ecological consequences include disrupted hydrological regimes, biodiversity loss, and reduced water storage capacity. This research shows how both human activities, like groundwater over-extraction, and natural factors, such as faulting and rock type, contribute to subsidence. Integrating InSAR with GIS-based spatial analysis provides a robust framework for monitoring and mitigating subsidence risks in wetland ecosystems. Key recommendations: The study highlights the need for ongoing monitoring using InSAR and piezometric data, reducing groundwater extraction in high-risk areas, and examining the impact of faults on groundwater flow. This study illustrates the use of remote sensing in wetland management and presents a model for arid and semi-arid regions worldwide. Research should explore subsidence impacts on carbon sequestration and evaluate alternative water sources for wetland restoration.

Keywords: Subsidence, Miangaran Wetland, InSAR, Spatiotemporal analysis, Ecological impacts.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2025-09-13]