نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال هشتم، شماره ۳، پاییز ۱٤۰۰

صفحات ۱۸۷ – ۲۰۰

اثرات چاه‌های بهره‌برداری آب زیرزمینی بر تغییرپذیری پهنه‌های فرونشست دشت نیشابور و پیامدهای ژئومورفیک آن

فاطمه محمودی نسب ؛ دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

ندا محسنی؛[1] استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

دریافت مقاله : ۱۳۹۹/۱۲/۲۲ پذیرش نهایی:۱۴۰۰/۰۸/۲۶

چکیده

با وجود مطالعات بسیار در زمینه ارتباط بین فرونشست زمین و نوسان سطح ایستابی، تحقیقات اندکی در رابطه با اثرات فاصله از چاه های پمپینگ بر تغییرپذیری گسترش مکانی محدوده های کم خطر و پر خطر فرونشست انجام شده است. علاوه بر این مطالعات کمی به بررسی اثرات تغییر در نرخ فرونشست بر میزان گسترش شکاف های سطحی بصورت ترکیبی از پردازش تصاویر رادار و پیمایش میدانی پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر پیامدهای ژئومورفیک بهره برداری بی رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با تاکید بر اثرات فاصله از چاه های پمپینگ بر تغییرپذیری نرخ فرونشست بررسی شده است. در ابتدا منطقه مورد مطالعه از لحاظ گسترش مکانی بخش‌های پرخطر و کم خطر فرونشست پهنه‌بندی شد. این پهنه بندی براساس پردازش تصاویر رادار مربوط به سال ۲۰۲۰ انجام شد. بعد از پهنه بندی منطقه از لحاظ شدت وقوع فرونشست، براساس اطلاعات گرفته شده از سازمان آب منطقه ای استان خراسان رضوی، ۳۰ چاه پمپینگ در منطقه شناسایی و بعد از تطبیق آنها با منطقه از طریق پیمایش میدانی، نقاط GPS از استقرار چاه ها روی نقشه پهنه بندی فرونشست منطقه تعیین شد. سپس بافرهایی در فواصل ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۱۳۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر در اطراف چاه ها مشخص شدند. در مرحله بعد، از طریق پیمایش میدانی شکاف‌های فرونشست در سطح محدوده مورد مطالعه شناسایی و موقعیت مکانی آن‌ها ثبت گردید. سپس موقعیت شکاف‌ها به نقشه پهنه یندی فرونشست انتقال داده شد. نتایج نشان داده است که فاصله از چاه های پمپینگ اثرات قابل توجهی بر گسترش مکانی محدوده‌های پرخطر و کم خطر فرونشست دارد. به طوریکه با نزدیک شدن به چاه‌های پمپینگ وسعت محدوده‌های پر خطر افزایش یافته و بر عکس با دور شدن از چاه بر گسترش محدوده‌های کم خطر فرونشست افزوده می‌شود. سایر نتایج نشان داد که گسترش نرخ فرونشست بطور معنی داری توزیع تراکم شکاف‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بطوریکه بیشترین تراکم این شکاف‌ها با پهنه‌های پر خطر فرونشست انطباق داشته است.

واژه های کلیدی: چاه پمپینگ، شکاف‌های فرونشست، پیمایش میدانی، پهنه‌های پرخطر.

۱: نویسنده مسئول : Email: nedamohseni@um.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

مقدمه

فرونشست زمین به عنوان یک مخاطره آنتروپوژنیک-ژئومورفیک نقش چشمگیری در بر هم زدن تعادل چشم اندازها دارد. بی‌شک عوامل محیطی متعددی در توسعه این مخاطره موثر هستند. شایع ترین عامل آن برداشت بی رویه از آب‌های زیرزمینی در اکثر مناطق به ویژه در سرزمین‌های خشک و نیمه خشک جهان می‌باشد. این مخاطره محیطی در بیشتر شهرهای ایران و جهان، سالیانه در حال گسترش است، بطوریکه باعث نابودی بسیاری از زیرساخت‌های شهری و زمین‌های کشاورزی یا عاملی برای تغییر مسیر خطوط ریلی و جاده‌ها و حتی در مواقعی کانالی برای انتقال آلودگی‌ها به منابع آب زیرزمینی می‌شود (Chen et al., ۲۰۲۰; Corbau et al., ۲۰۱۹; Sun et al., ۲۰۱۷). ظهور شکاف‌هایی در سطح زمین و گسترش آن‌ها در طول زمان می‌تواند نشانه‌ای از توسعه‌ی بحرانی فرونشست باشد. پروفیل خاک در امتداد یک سیستم آبخوان متشکل از فضاهای خالی ریز و درشتی است، که تعداد و اندازه‌ی این منافذ تعیین کننده‌ی توزیع متعادل هوا و آب درون خاک دانه‌ها می‌باشد. زمانی که برداشت از منابع آب زیرزمینی افزایش می‌یابد و سطح ایستابی از حد تعادلی خود پایین تر می‌رود، این شرایط ویژگی‌های فیزیکی خاک را از لحاظ توزیع و اندازه‌ی منافذ ریز و درشت تحت تأثیر قرار می‌دهد، بطوریکه این رخداد از یک طرف منجر به بسته شدن حجم بیشتری از منافذ شده و در نتیجه به مرور زمان لایه‌های خاک روی یکدیگر نشست پیدا می‌کنند که اصطلاحاً به این پدیده فشردگی خاک گفته می‌شود. بنابراین فرایند فشردگی خاک به دنبال افت بیش از اندازه‌ی سطح آب زیرزمینی که ناشی از تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی خاک (مانند تغییر در اندازه و حجم تخلخل و سایر ویژگی‌ها نظیر رطوبت، نفوذپذیری و وزن مخصوص ظاهری خاک) است، منجر به جابه جایی‌های معنی دار در ارتفاع سطح زمین یا اصطلاحاً فرونشست می‌شود. فرونشست‌ها می‌توانند هم به صورت برگشت پذیر و هم برگشت ناپذیر در سیستم‌های آکیفر عمل کنند (Hoffmann, ۲۰۰۳). اگر کاهش سطح آب زیرزمینی منجر به کاهش فشار هیدرواستاتیک و متعاقبا افزایش تنش‌های موثر گردد، قاعدتاً احتمال برگشت پذیری فرونشست (بالاآمدگی سطح زمین) حتی اگر سطح آب زیرزمینی مجدداً افزایش یابد، وجود نخواهد داشت که اصطلاحاً به این نوع از فرونشست‌ها، فرونشست‌های برگشت ناپذیر گفته می‌شود(Haghshenas Haghighi and Motagh, ۲۰۱۹). به عبارت دیگر کاهش برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی یا ورود اکوسیستم به دوره ترسالی در روند کاهش فشردگی لایه‌های خاک یا برگشت به شرایط قبلی اثرگذار نخواهد بود. در صورتی که اگر کاهش سطح آب زیرزمینی قبل از گذر لایه های خاک سیستم آکیفر از آستانه‌های ناتعادلی به نوعی کنترل شود، امکان جبران فرونشست به صورت بالاآمدگی در پاسخ به ریکاوری سطح آب زیرزمینی وجود خواهد داشت. به این شرایط اصطلاحاً فرونشست‌های برگشت پذیر گفته می‌شود (Ezquerro et al., ۲۰۱٤). علاوه بر تاثیر نوسانات سطح آب زیرزمینی بر فشردگی خاک و متعاقباً میزان جابه جایی سطح زمین، ویژگی‌های ذاتی محیط آبخوان مانند موقعیت ژئومورفیکی که آبخوان روی آن گسترده شده است و یا جنس سازندهای تشکیل دهنده‌ی محیط آبخوان بر پاسخ فشردگی خاک و فرونشست‌های ناشی از آن به تغییرات سطح ایستابی اثرگذار می‌باشد. به عنوان مثال میزان نشست زمین در پاسخ به نوسان سطح آب زیرزمینی در مخروط‌افکنه‌ها و یا مناطق واقع در پایین دست مخروط افکنه‌ها و دشت‌سرها یا مناطق جلگه رسی واکنش‌های متفاوتی دارند. برای مثال آبخوان‌های واقع در مناطق جلگه رسی به طور ذاتی سطح ایستابی پایین‌تری در مقایسه با آبخوان‌های موجود در مخروط‌افکنه‌ها دارند. در مثالی دیگر می‌توان به سازندهایی از جنس دولومیت،آهک و یا شن در مقایسه با پهنه‌های رسی اشاره کرد. این سازندها به دلیل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

حجم فراوانی از منافذ و فضاهای خالی و درز و شکاف های سطحی ضریب نفوذپذیری بیشتری داشته و سطح ایستابی به طور معنی داری در این سازندها بالاتر است (Xing et al., ۲۰۱۸).

مطالعات بسیاری به بررسی ارتباط بین فرونشست زمین و تغییرپذیری سطح ایستابی منابع آب های زیرزمینی با استفاده از پایش تصاویر ماهواره‌ای پرداخته اند. محمدخان و همکاران (۱۳۹۸) تاثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست را با استفاده از تصاویر Sentinel-۱ در دشت قروه مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که به دلیل برداشت-های بی رویه در این دشت سالانه حدود ۱۰ سانتی‌متر فرونشست را شاهد هستیم. جعفری و محمدی (۱۳۹۸) در مطالعه ای به پهنه بندی خطر وقوع فروچاله‌های ناشی از برداشت بی رویه از منابع آب‌های زیرزمینی و بررسی سایر عوامل ژئومورفیک موثر بر وقوع این مخاطره در دشت کبودر آهنگ همدان پرداختند. دهقانی بیدگلی و همکاران با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر Sentinel-۱A، فرونشست دشت سمنان که ناشی از برداشت بی رویه آب‌های زیرزمینی است را ارزیابی کردند. آن‌ها اذعان داشتند که با استفاده از این تصاویر می‌توان دقیق‌ترین اطلاعات پایش از پدیده فرونشست را برداشت نموده و اساسی ترین عامل را در گسترش فرونشست، برداشت‌های بی رویه آب زیرزمینی به ویژه در این منطقه با اقلیم خشک دانستند. عالی پور و همکاران به پهنه‌بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی پرداخته و دریافتند که در طول سه دهه گذشته افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی در دشت اردبیل باعث افت بحرانی سطح آب‌های زیرزمینی و پدیدار شدن علائم فرونشست در منطقه شده است. بابایی و همکاران به آنالیز سری زمانی تصاویر رادار با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده‌های دائمی (PS) به تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین پرداختند. آن‌ها مهمترین عامل فرونشست در منطقه مورد مطالعه را استخراج بیش از حد منابع آب زیرزمینی ذکر کردند. جلینی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی ارتباط بین مورفومتری ترک‌های حاصل از فرونشست با تغییرپذیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در دشت نیشابور پرداختند. نتایج، حاکی از همبستگی آماری بین رطوبت خاک و هدایت الکتریکی و گسترش ابعاد شکاف‌ها بوده است. رکنی و همکاران (۱۳۹۵ و ۱۳۹۸) توزیع فضایی شکاف‌های حاصل از فرونشست زمین در دشت نیشابور را بررسی و اثرات این مخاطره را بر تحولات ژئومورفیک دشت‌های تراکمی ارزیابی نمودند. این مطالعات نشان داده‌اند که ناهمگنی ساختمان آبخوان و مکانیزم کشیدگی‌های کششی از مهمترین عوامل تشکیل شکاف‌های حاصل از فرونشست در دشت نیشابور می‌باشند. المدرسی و حشمتی (۱۳۹۴) با استفاده از تکنیک تداخل سنجی رادار، فرونشست‌های دشت نیشابور را پایش و مدلسازی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که به ازای هر ۳ سانتی متر افت سطح چاه پیزومتری ۰/۸۱۶ سانتی متر فرونشست خواهیم داشت. عامریان و وثوقی (۱۳۹۰) با استفاده از اطلاعات شبکه دائم ایستگاه‌های GPS تغییر انحنای متوسط ناشی از فرونشست را در دشت مشهد و نیشابور مطالعه کردند. الگوهای حاصل از نتایج عددی این مطالعه، بیانگر روند تغییر شکل‌های ارتفاعی منطقه به‌دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی بوده است. در دنیا نیز برخی از محققین تغییر شکل سیستم آبخوان را بر اساس نوسانات سطح آب زیرزمینی و عملکرد آن برای کنترل فرونشست زمین برای مثال در منطقه ساحلی تیانجین مطالعه نمودند. آنها علاوه بر درک ارتباط بین دو عامل برداشت از منابع آب زیرزمینی و گسترش فرونشست، به این نتیجه رسیدند که نوسانات سطح آب زیرزمینی نسبت به تغییرات قبل از تثبیت، منجر به تغییر شکل برگشت پذیر خواهد شد (Chen et al., ۲۰۲۰). همچنین در مطالعه ای دیگر برخی از محققین به مطالعه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در دراز مدت و توسعه-

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

ی فرونشست زمین در بخش‌های مختلف چین پرداختند (Shi et al., ۲۰۱۹). آن‌ها خشکسالی‌های اخیر را به عنوان یک عامل اثر گذار در کاهش ذخیره آب‌های زیرزمینی دخیل می‌دانند. مطالعات دیگری به بررسی تاثیر تغییرات در استخراج آب‌های زیرزمینی و تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی در محیط پیچیده‌ی هیدروژئولوژیک پرداختند (Van Engelenburg et al., ۲۰۱۸). نتایج این پژوهش نشان داد که تاثیر تغییرات اقلیمی ممکن است از تاثیر استخراج آب‌های زیرزمینی بر توزیع مجدد حجم آب بیشتر باشد. سایر مطالعات به بررسی تصاویر فرونشست ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی در چین با استفاده از روش تداخل سنجی رادار اقدام نمودند (Luo et al., ۲۰۱٦; Chen et al., ۲۰۲۰). نتایج این مطالعات نشان داد که فرونشست در این منطقه متغیر و روند رو به رشدی داشته است. محققین دیگری با استفاده از تکنیک‌های تداخل سنجی راداری به بررسی تغییرات در نرخ جابجایی سطح زمین در سایر کشورها پرداختند (Shi et al., ۲۰۱۹). برخی دیگر از مطالعات به بررسی فرونشست‌های برگشت پذیر و برگشت ناپذیر در دشت تهران با استفاده از تکنیک‌های تداخل سنجی رادار پرداخته و دریافتند که این جابجایی‌ها بیشترین ارتباط را با نوسانات سطح آب زیرزمینی داشته است (Haghshenas Haghighi and Motagh, ۲۰۱۹).

همچنانکه به برخی از پژوهش‌های اخیر اشاره شد، اکثر مطالعات در این زمینه به بررسی ارتباط بین فرونشست و نوسانات سطح ایستابی از طریق پایش تصاویر ماهواره‌ای و یا سایر روش‌ها مانند استفاده از داده‌های ایستگاه‌های GPS اقدام کرده‌اند. همچنین علیرغم مطالعات انجام شده در زمینه پایش فرونشست‌های دشت نیشابور و سایر دشت‌های بحرانی ایران، مطالعات مشخصی در ارتباط با اثرات فاصله از چاه‌های پمپینگ بر تغییرپذیری گسترش مکانی محدوده-های کم خطر و پر خطر فرونشست، به علاوه بررسی اثرات تغییرپذیری مساحت پهنه‌های فرونشست بر میزان گسترش شکاف های سطحی با استفاده از رویکرد ترکیبی تصاویر رادار و پیمایش میدانی انجام نشده است. با توجه به فقدان پژوهشی مذکور، در مطالعه حاضر از یک سو، اثرات فاصله از چاه های پمپینگ بر تغییرپذیری نرخ پهنه‌های فرونشست و از سوی دیگر، اثرات تغییرپذیری در نرخ پهنه‌های فرونشست بر میزان گسترش مکانی شکاف‌ها بعنوان یکی از پیامدهای ژئومورفیک این مخاطره بررسی شده است. در این تحقیق سعی شده است به ۲ سوال اساسی که نقش بسزایی در رویکردهای مدیریتی در عرصه دشت‌های بحرانی از لحاظ فرونشست دارند، پاسخ داده شود:

۱. آیا محدوده‌ی بهره‌برداری آب زیرزمینی (گسترش چاه‌های پمپینگ) می‌تواند گسترش پهنه های کم خطر و پر خطر فرونشست را تحت تاثیر قرار دهد؟
۲. آیا تغییر در نرخ جابجائی‌ها و پهنه‌هایی با سطح خطرپذیری متفاوت از لحاظ نشست زمین می‌تواند توزیع شکاف‌های مرتبط با این پدیده را تحت تاثیر قرار دهند؟

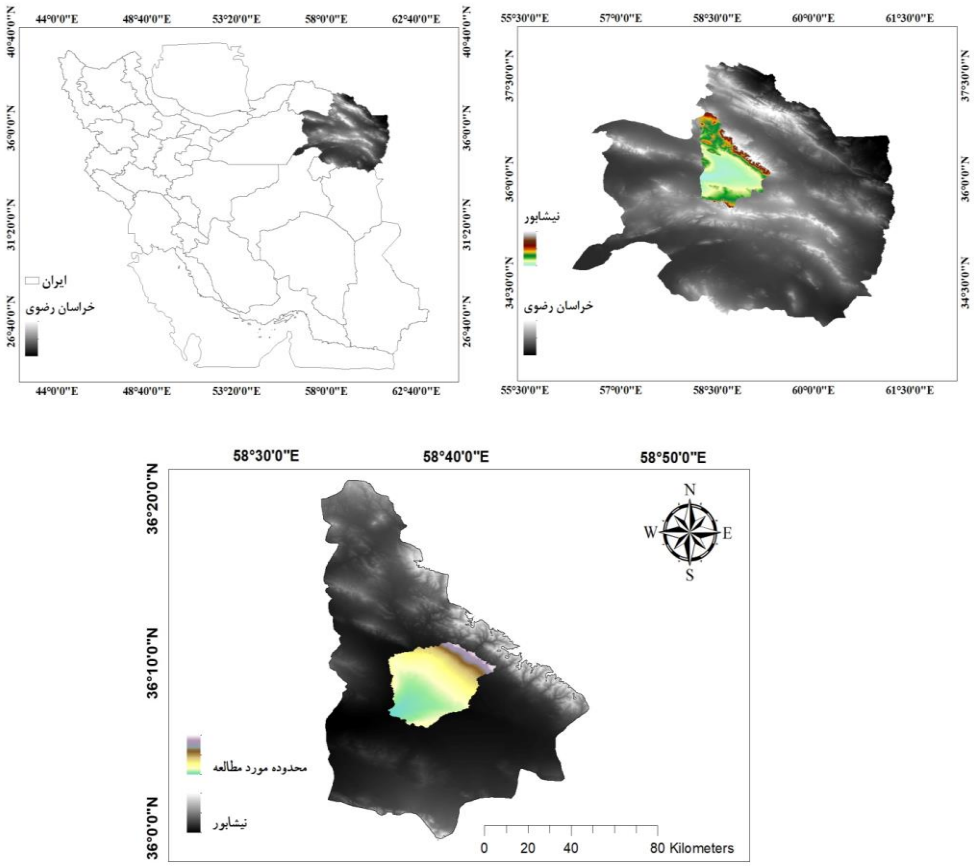
داده ها و روش کار

الف) منطقه مورد مطالعه

دشت نیشابور در محدوده جغرافیایی با طول ´۱۷ °۵۷ تا ´۳۰ °۵۹ و عرض ´۴۰ °۳۵ تا ´۳۹ °۳۶ واقع شده است (شکل ۱). در تقسیم بندی آب و هوای کشور، نیشابور جزو محدوده‌های اقلیمی ایران مرکزی و نیمه بیابانی محسوب می‌شود. میانگین درجه حرارت ماهانه در دو ایستگاه بار (منطقه کوهستانی) و فدیشه (منطقه دشتی) به ترتیب ۱۳ و ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود. میانگین سالانه بارش در ارتفاعات این منطقه حداکثر ۶۰۰ میلی متر و برای دشت نیشابور حدود ۲۳۴ میلی متر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

دشت نیشابور در بخش جنوبی ارتفاعات بینالود قرار دارد. رودهایی که از این کوه‌ها سرچشمه گرفته‌اند، باعث تشکیل مخروط افکنه‌هایی در دامنه جنوبی این رشته کوه شده‌اند. رسوبات آبرفتی حاصل از جریانات می‌توانند منبع اساسی در ایجاد سفره‌های آبخوان در این دشت باشند. تراکم رسوباتی با قابلیت نفوذ زیاد، منبع مناسبی را جهت ذخیره آب‌های زیرزمینی در دشت نیشابور فراهم کرده است. برداشت‌های بی رویه از منابع آب زیرزمینی، خشکسالی های پی در پی، کاهش حجم منابع آب‌های سطحی و به دنبال آن تغذیه ناکافی سفره‌های زیرزمینی یکی پس از دیگری در حال وقوع هستند. آبخوان‌های دشت نیشابور هر کدام از نظر جنس سازندهای تشکیل دهنده، عمق سنگ کف، ضخامت متفاوت لایه‌های حاوی آب ویژگی‌های مشخصی دارند که باعث تمایز آن‌ها نسبت به یکدیگر می‌شود. آبخانه‌ی شمالی، جنوبی، شرقی، اصلی و بینالود آبخوان‌هایی هستند که برخی از آن‌ها نیز ارتباط هیدرولیکی با یکدیگر دارند. آبخوان اصلی با وسعتی معادل ۲۳۲۲ کیلومتر مربع بزرگترین و بینالود با ۹۰ کیلومتر مربع کوچکترین آبخوان دشت نیشابور می‌باشند. آبخوان شمالی و شرقی تقریباً وسعتی برابر و معادل ۴۰۰ کیلومتر مربع را دارا می‌باشند. کاهش تغذیه و افزایش تخلیه این آبخوان‌ها به دلیل پمپاژ بیش از حد و افزایش دما در پی خشکسالی‌های گذشته و کاهش نزولات جوی، باعث شده تا از حجم آن‌ها بطور معنی داری کاسته شود.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

ب) روش کار

در مطالعه حاضر ۶ تصویر رادار Sentinel-۱ از سال ۲۰۲۰ دانلود و بر آن اساس نرخ میانگین سالانه جا به جایی سطح زمین محاسبه شد. تصاویر تهیه شده از نوع A و در حالت صعودی با پلاریزاسیون VV می‌باشند. بعد از گردآوری تصاویر Sentinel-۱، با استفاده از نرم افزار SNAP میزان جابه‌جایی‌های سطح زمین را پردازش کرده و در GIS خروجی نهایی تصاویر محاسبه شد. برای پردازش زوج تصویر SLC Sentinel-۱ بعد از فراخوانی به محیط نرم‌افزار اولین مرحله split اعمال شد. در این مرحله یکی از باندهای IW۱, IW۲ و IW۳ متناسب با موقعیت منطقه انتخاب گردید. برای تصاویر مورد نیاز این پژوهش از Sub swath، IW۳ با پلاریزاسیون VV و از باند ۴ تا ۶ استفاده شد. در مرحله بعد، رجستری کردن یا هم مرجع کردن دو داده قبلی انجام گردید. بعد از آن برای تشکیل اینترفروگرام، دستور مربوطه را اجرا کرده و داده‌ای با پسوند Ifg و تداخل سنجی زوج داده‌های S۱ را خواهیم داشت. در این تصویر، رنگ سفید معرف منطقه همبستگی خوب و بهترین مکان برای کسب اطلاعات فازی و منطقه سیاه، منطقه‌ای است که ارتباط نزدیکی با پوشش گیاهی دارد. دستور بعدی جهت حذف نویزهای موجود با روش Deburst و حذف فازهای توپوگرافی با پسوند Dinsar بوده است. همچنین برای کاهش نویزها از دستور Goldstein phase filtering استفاده شد. مرحله بعد، انجام Unwrapping در فرمت SnapHu است. در بخش بعدی با فراخوانی داده‌های Goldstein و Unwrapping، فازهای مربوط به جا به جایی زمین تولید شد. مرحله نهایی به منظور اصلاح دامنه داپلر زمین صورت می‌گیرد. این بخش با فرمت Geo Tiff ذخیره تا در محیط دو نرم‌افزار GIS و SNAP قابل فراخوانی باشد.

بعد از پهنه بندی منطقه از لحاظ شدت وقوع فرونشست، با استفاده از اطلاعات گرفته شده از سازمان آب منطقه ای خراسان رضوی، ۲۷ چاه پمپینگ در منطقه شناسایی و بعد از تطبیق آنها از طریق پیمایش میدانی، نقاط GPS از استقرار چاه‌ها روی نقشه پهنه بندی فرونشست منطقه انداخته شد. به منظور بررسی اثرات چاه‌های پمپینگ در ارتباط با استحصال آب بر میزان گسترش پهنه‌های کم خطر و پر خطر فرو نشست، در نرم‌افزار GIS برای هر کدام از چاه‌ها بافرهایی در فواصل مشخص تعیین شد. این بافرها در فواصل ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۱۳۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر می‌باشند. سطوح نشست زمین با پهنه‌بندی در ۲ سطح به عنوان پهنه‌هایی با خطر زیاد و کم تعیین شدند. در مرحله نهایی، علاوه بر بررسی اثرات فاصله از چاه‌های پمپینگ بر میزان گسترش پهنه‌های کم خطر و پر خطر فرونشست، موقعیت چاه‌های پیزومتری بر اساس مختصات جغرافیایی آن‌ها بر روی نقشه فرونشست منطقه مشخص شد تا تفاوت سطح آب زیرزمینی و میزان افت برای هر کدام از محدوده‌های پر خطر و کم خطر فرونشست بطور مجزا نشان داده شود. همچنین، برای بررسی اثرات تغییرپذیری در نرخ پهنه‌های فرونشست بر میزان گسترش مکانی شکاف ها، یک پیمایش مکانی گسترده در سطح محدوده مورد مطالعه انجام و شکاف‌های فرونشست با GPS ثبت شد. سپس تراکم و پراکندگی شکاف‌های حاصل از نشست بر روی تصویر پهنه‌بندی فرونشست منطقه انداخته و بررسی شد.

شرح و تفسیر نتایج

همان‌طور که در اشکال ۲ و ۳ الف مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از چاه‌ها وسعت محدوده‌های کم خطر گسترش می‌یابد، برعکس با نزدیک شدن به چاه‌ها وسعت محدوده‌های کم خطر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از چاه، وسعت محدوده‌های پرخطر فرونشست به طور چشمگیری کاهش یافته است. بیشتر، مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی در پهنه‌های پر خطر و کم خطر فرونشست بیانگر این موضوع است که نوسانات سطح آب

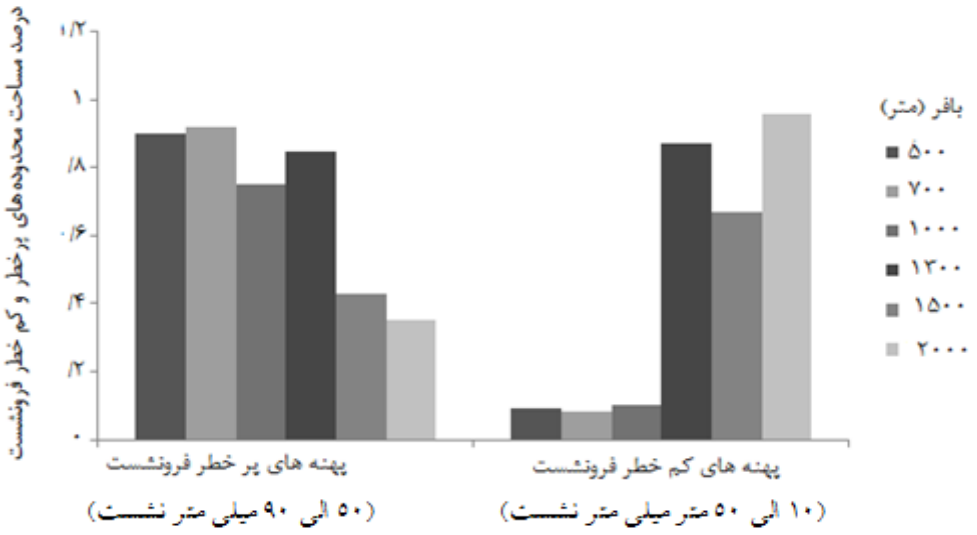
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

زیرزمینی منجر به اثرگذاری فاصله از چاه‌ها بر سطح گسترش پهنه‌های کم خطر و پر خطر فرونشست شده است (شکل ۴). همچنانکه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بر اساس داده‌های محاسبه شده از ۱۲ چاه پیزومتری در محدوده مورد مطالعه، میانگین عمق سطح آب برای سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۹۹ در محدوده کم خطر ۴۰/۶۷ متر و در محدوده پر خطر ۷۷/۰۷ متر بوده است. همچنین میزان افت سطح ایستابی از سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹ به میزان ۲/۴۵ متر در محدوده‌های پر خطر و مقادیر افت در همین بازه به میزان ۱/۱۵ متر در محدوده‌های کم خطر فرونشست بوده است. این نتایج به خوبی توضیح می‌دهد که چگونه ارتباط معناداری می‌تواند بین سطح ایستابی، افت آب زیرزمینی و میزان فاصله از چاه‌ها با کاهش یا افزایش پهنه‌هایی با نرخ‌های متفاوت فرونشست در مناطق مستعد این مخاطره وجود دارد. با نگاهی جزئی تر می‌توان اثر نوسان آب زیرزمینی را با توجه به ارتباط فاکتورهای تعیین شده بر ساختمان خاک نیز مطرح نمود. بطوریکه تاثیر نوسانات سطح آب قبل از هر چیز بر خاک محدوده‌های اطراف این چاه‌ها نمایان می‌شود. محدوده های پرخطر اطراف چاه‌ها، انعکاسی از نوسانات سطح آب هستند که میزان نشست زمین را به وضوح نشان می‌دهند. با فاصله گرفتن از چاه و افزایش محدوده‌های کم خطر و به همان نسبت کاهش محدوده های پرخطر نیز حاکی از تاثیر کمتر این نوسانات سطح آب هر چاه بر ساختمان خاک محیط آبخوان می‌باشد. این امر کاهش خطر نشست زمین را نیز متصور می‌سازد. هر چند مطالعات بسیاری در ارتباط با اثرات نوسان منابع آب‌های زیرمینی بر نرخ فرونشست صورت گرفته است، اکثر مطالعات در این زمینه به پایش نوسانات سطح ایستابی و نرخ جابجایی زمین در سری‌های زمانی پرداخته‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ حاجب و همکاران، ۱۳۹۹؛ حقیقت مهر و همکاران، ۱۳۹۱؛ شریفی کیا، ۱۳۹۱؛ مرادی، ۱۳۹۹). مطالعات اندکی برای اثبات بیشتر ارتباط بین این دو متغیر مستقل و وابسته با بررسی اثرات فاصله از چاه‌ها بر نرخ پهنه‌های پر خطر و کم خطر فرونشست اقدام کرده‌اند. برای مثال، بابایی و همکاران در سال ۱۳۹۵، برای تعیین نرخ فرونشست زمین در دشت قزوین، با آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده‌های دائمی (PS) به این نتیجه رسیده‌اند که ارتباط معناداری بین نوسان سطح آب و تغیرپذیری نرخ فرونشست وجود داشته، بطوریکه بیشترین میزان نشست زمین را در مناطقی که بیشترین تراکم چاه‌ها است مشاهده کرده‌اند (حاجب و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین برخی از تحقیقات بر اساس مطالعه‌ی اثرات بالقوه‌ی تغییرات اقلیمی بر سطح آب زیرزمینی در دشت کردی شیرازی، با نتایج پژوهش پیش رو مطابقت دارد (Zamanirad et al., ۲۰۱۸). برخی دیگر از مطالعات پدیده فرونشست زمین را متأثر از افت سطح آب-های زیرزمینی با استفاده از تصاویر رادار مورد پردازش قرار دادند، آن‌ها نیز نتیجه مشابهی را در این زمینه بدست - آوردند (Chen et al., ۲۰۲۰; Gong et al., ۲۰۱۸).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]



شکل ۲. تغیرپذیری درصد مساحت محدوده‌های کم خطر و پرخطر فرونشست براساس داده های مستخرج از تصاویر سنتینل در مقابل فاصله از چاه‌های پمپینگ

مطالعه و بررسی پدیده فرونشست بدون در نظر گرفتن مسائل پدوژئومورفیک را می‌توان ناقص تلقی کرد. تغییرات پدوژئومورفیک لازمه شناخت و مدیریت مخاطراتی هستند که متأثر از آن در مراحل بعد به وجود می‌آیند. این موضوع زمانی قابل درک می‌باشد که تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند تغییرات در حجم تخلخل کل، برهم خوردن تعادل در توزیع فضاهای خالی ریز و درشت و در نهایت تغییر در پتانسیل نفوذپذیری و متعاقبا رطوبت خاک منجر به فشردگی لایه‌های خاک و متعاقباتغییر ویژگی‌های توپوگرافیک سطح زمین و نهایتا ظهور مخاطره نشست زمین می‌شود. بهره‌برداری بی رویه از آب‌های زیرزمینی و افت شدید سطح ایستابی در گذر زمان یکی از مهم‌ترین دلایل فشردگی خاک و مخاطرات ناشی از آن می‌باشد. در این مرحله اگر اقدامات بازدارنده جهت برداشت بی رویه و یا تغذیه آبخوان صورت گیرد، ساختمان خاک که فضای آبخوان روی آن گسترده شده است می‌تواند پاسخ مثبت به بالاآمدگی سطح آب نشان دهد و به اصطلاح در این شرایط وضعیت نشست خاک کاهش یافته و به نوعی شاهد بالاآمدگی ارتفاع زمین خواهیم بود. در غیر این صورت با ادامه‌ی برداشت‌ها و کاهش بارندگی که می‌تواند در تغذیه‌ی آبخوان‌ها نقشی کلیدی را ایفا کنند، سیستم وارد مرحله‌ای می‌شود که امکان برگشت نشست زمین به شرایط بالاآمدگی قبلی وجود نخواهد داشت. با از بین رفتن پوشش گیاهی به دلیل خشکسالی‌های پی در پی مناطق خشک و نیمه خشک و همچنین ناشی از فشردگی و نفوذناپذیری لایه‌های خاک، گسترش رواناب‌ها در سطح زمین افزایش می‌یابند. تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی خاک که در بالا بدان‌ها اشاره شد، فقدان پوشش گیاهی و افزایش رواناب در این مناطق، مقدمه‌ای برای جولان فرسایش آبی و بادی می‌باشد.

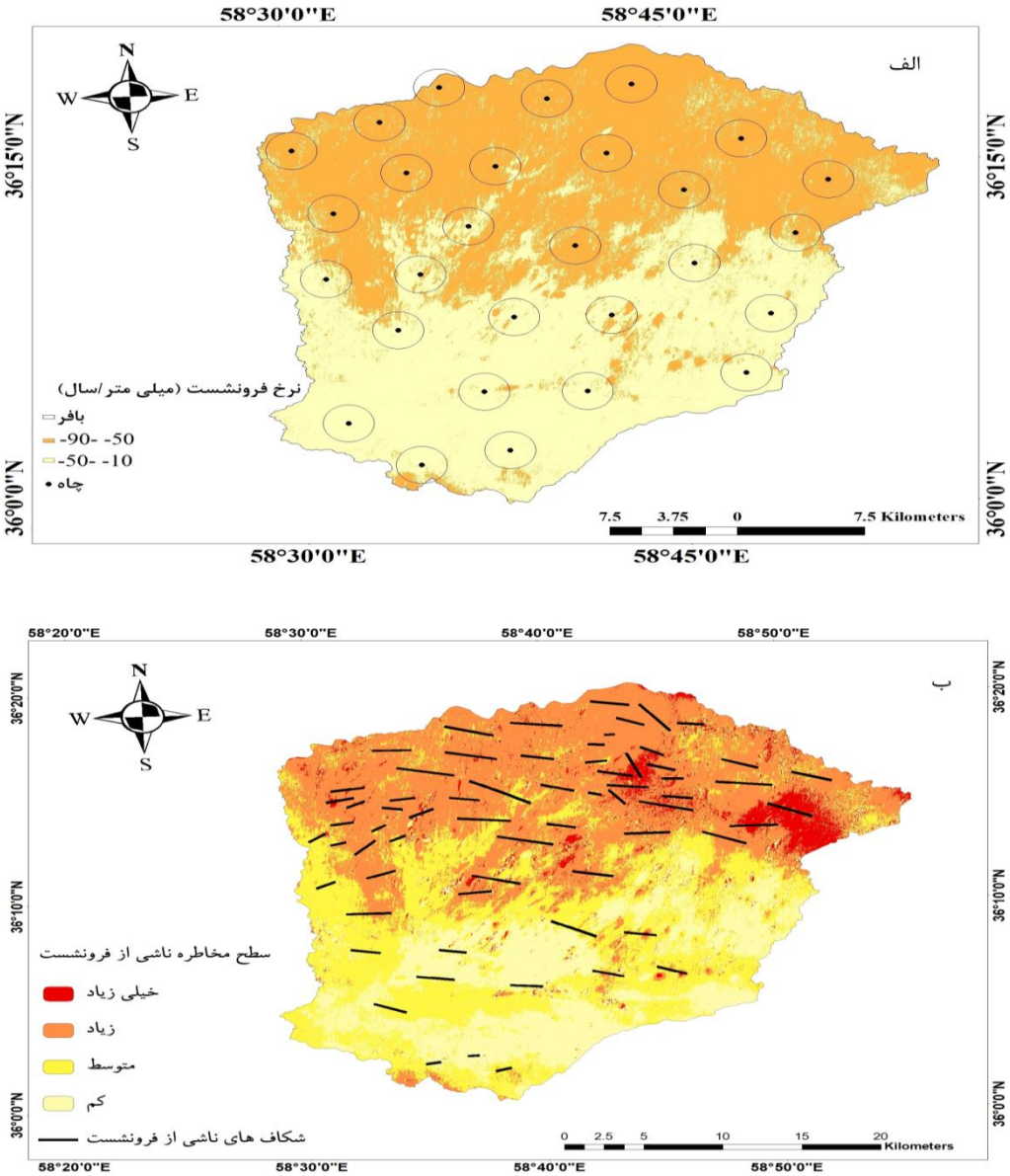
نفوذ ناپذیری خاک و متراکم شدن لایه‌های آن، کیفیت و کمیت منافذ ریز و درشت درون خاکدانه‌ها را که عاملی موثر در توزیع متعادل هوا و آب درون لایه‌های خاک هستند، دچار اختلال می‌کند. در این شرایط، خاک نسبت به فرایندهای فرسایشی حساسیت بیشتری نشان داده و به مرور زمان شاهد واکنش‌هایی متفاوت در عرصه چشم انداز خواهیم بود. چنین تغییرات ژئومورفیک و پدولوژیک ناشی از ظهور فرونشست‌ها می‌تواند زمینه ساز ظهور شکاف‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

فرونشست (تبعات ژئومورفیک فرونشست‌ها) و متعاقبا گسترش فرسایش گالی باشد. به دنبال فشردگی خاک ناشی از افت شدید سطح ایستابی، توپوگرافی زمین دستخوش تغییر شده که منجر به جا به جایی معنی دار در ارتفاع سطح زمین و به عبارت دیگر نشست زمین می‌شود. این جا به جایی‌های ناشی از فشردگی خاک در برخی از مواقع به صورت نشست همگن زمین ظاهر می‌شود که با عوارضی مثل لوله زایی در سطح زمین می‌توان این پدیده را تشخیص داد اما در بسیاری دیگر از مواقع شاهد نشست ناهمگن در ارتفاع سطح زمین هستیم. این نشست ناهمگن به صورت شکاف‌ها و درزهای سطحی بروز پیدا می‌کند. ناهمواری‌های بوجود آمده در سطح زمین پارامترهایی مانند ارتفاع، شیب و جهت آن را با تغییراتی رو به رو می‌کند که در برخی مواقع برگشت پذیری آن غیرممکن خواهد بود. این تغییرات توپوگرافی ناشی از فرسایش، چشم انداز محیط را دچار تغییر کرده و اشکال متفاوت فرسایشی را در سطح زمین بوجود می‌آورند. این شواهد با گسترش نرخ پهنه‌های پرخطر فرونشست بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. در بخش دوم این تحقیق، تحلیلی از پیامدهای ژئومورفیک ناشی از نشست زمین انجام شده است. شکاف‌های فرونشست زمین یکی از شواهد عینی می‌باشد که می‌توانند گسترش معنادار نرخ فرونشست و افت بحرانی سطح آب زیرزمینی را بطور کیفی نشان دهند. همچنان که در شکل ۳ ب مشاهده می‌شود میزان تراکم شکاف‌های فرونشست که با استفاده از پیمایش میدانی و ثبت آن‌ها با GPS بر روی تصویر پهنه‌بندی فرونشست منطقه انداخته شده است، بخوبی حاکی از ارتباط گسترش نرخ فرونشست با گسترش شکاف‌ها است. در این تصویر دو پهنه اصلی با نرخ نشست کم و زیاد قابل مشاهده است. تعدادی شکاف نیز مطابق با بازدید میدانی که در منطقه مورد مطالعه با استفاده از GPS مشخص و برداشت شد (شکل ۵)، روی نقشه پهنه‌بندی انداخته شد، تا میزان تراکم شکاف‌ها در هر یک از سطوح تعیین شده ارزیابی گردد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تعداد شکاف‌ها و بیشترین تراکم آن‌ها در سطوحی با خطر زیاد متمرکز شده‌اند. برعکس، علیرغم داشتن یک پیمایش میدانی جامع در کل منطقه، وسعت شکاف‌ها و سطح پراکنش آن‌ها در محدوده‌های کم خطر از لحاظ نرخ فرونشست کاهش چشمگیری نشان داده است. این نتایج ارتباط بین تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی خاک را که متاثر از افت سطح ایستابی است، نشان می‌دهد. به عبارتی دیگر تغییر در خصوصیات فیزیکی و سطح فشردگی خاک که منجر به فرونشست‌های بحرانی در منطقه شده است، با ظهور شکاف‌ها خودنمایی می‌کنند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

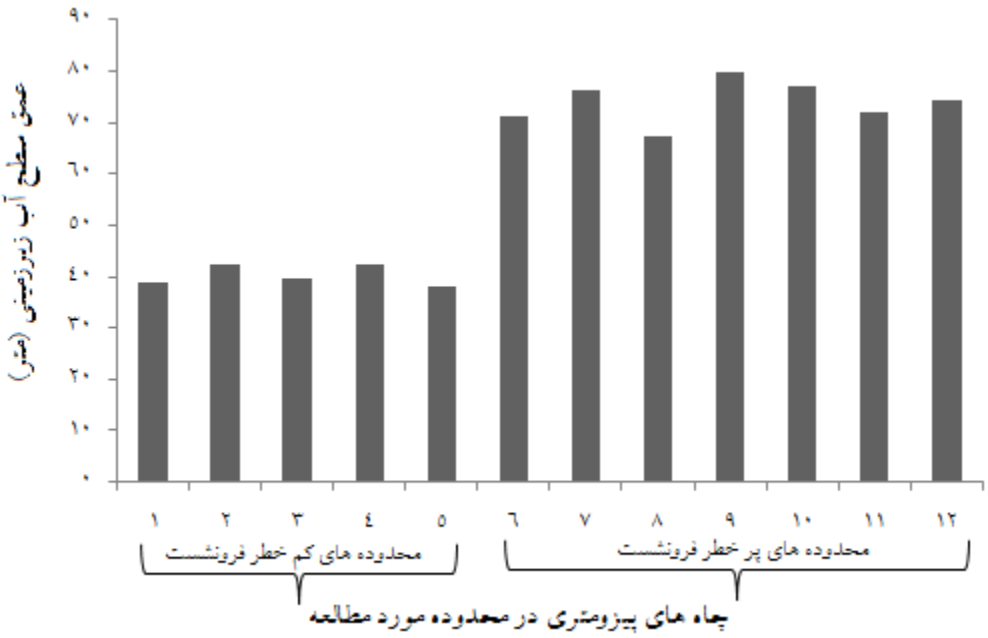
[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]



شکل ۳. الف: توزیع چاه‌های پمپینگ و بافرها مورد مطالعه در دو پهنه با نرخ‌های متفاوت فرونشست براساس اطلاعات استخراج شده از تصاویر سنتینل. ب: نقشه پهنه بندی نرخ فرونشست و موقعیت شکاف‌های مرتبط با آن در محدوده مورد مطالعه براساس اطلاعات استخراج شده از تصاویر سنتینل و پیمایش میدانی.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]



شکل ۴. مقایسه سطح آب زیرزمینی در ۲ پهنه کم خطر و پر خطر فرونشست.

بنابراین تاثیر نشست زمین بر لایه‌های خاک، عارضه‌ی ترک‌ها را که مخاطره‌ای پدوژئومورفیک است، بوجود می‌آورد. با توجه به شکل ۳ب، میزان تراکم و اندازه شکاف‌ها و قرارگیری آن‌ها در هر کدام از پهنه‌های فرونشست زمین، نشان دهنده گسترش این مخاطره‌ی پدوژئومورفیک در محدوده‌ی مورد مطالعه است. بطوریکه بیشترین شکاف‌ها را در پهنه-های پرخطر فرونشست مشاهده می‌کنیم. به همان میزان با توجه به بازدیدهای میدانی، شکاف‌هایی با ابعاد کوچکتر و تعداد کمتر در پهنه‌هایی با خطر فرونشست کمتر دیده می‌شوند. شکاف‌های ناشی از نشست زمین در وهله اول به دلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک صورت می‌گیرد. تغییراتی در خصوصیات خاک که به دنبال آن شاهد تغییرات ژئومورفیک هستیم. عوامل محیطی اثرگذار که نظم خلل و فرج خاک را بر هم می‌زند و سبب تغییرات در سطح فشردگی خاک می‌شوند. بنابراین تغییر در خصوصیات و فشردگی خاک که منجر به فرونشست‌های بحرانی در منطقه شده است، با ظهور شکاف‌ها خودنمایی می‌کنند. در نهایت، تاثیر نشست زمین بر ساختمان خاک، عارضه‌ی ترک‌ها را که مخاطره‌ای پدوژئومورفیک است، بوجود می‌آورد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

شکل ۵. نمونه‌ای از شکاف‌های فرونشست در منطقه مورد مطالعه.

نتیجه گیری

مطالعات صورت گرفته در دشت نیشابور حاکی از آن است که پدیده فرنشست زمین ناشی از برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی می‌باشد. نتایج به دست آمده از تصاویر رادار در ارتباط با میزان جابه جایی‌ها در سال ۲۰۲۰ و بررسی توزیع چاه‌ها در منطقه نشان دهنده ارتباط معنی داری بین تغیرپذیری نرخ پهنه‌های فرونشست و پراکندگی چاها و متعاقبا نوسانات آب زیرزمینی دارد. نتایج حاصل از پهنه بندی تصاویر رادار به محدوده‌های با خطر کم تا زیاد جهت تعیین بافرهای ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۱۳۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متر نشان‌دهنده‌ی اهمیت چاه‌های بهره برداری (بعنوان شاخصی برای سنجش اثرات آب زیرزمینی بر روی نرخ فرونشست) بر تغییرپذیری نرخ فرونشست است. بدین صورت که محدوده‌های پر خطر نشست زمین با کاهش فاصله از چاه‌ها به طور چشمگیری از لحاظ پراکنش مکانی افزایش نشان داده‌اند. برعکس، وسعت محدوده‌های کم خطر در نزدیکی چاه‌ها کمتر و با فاصله گرفتن از چاه‌ها بیشتر شده است. بیشتر، نتایج حاصل از ترکیب مطالعات میدانی و داده‌های فرونشست مستخرج از تصاویر سنتینل، حاکی از افزایش گسترش مکانی و تراکم شکاف‌های فرونشست در پهنه‌هایی با نرخ‌های افزایش یافته این مخاطره است. این نتایج بیانگر اثرات چشمگیر گسترش فرونشست بر افزایش سطح تخریب خاک در منطقه می‌باشد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

منابع

المدرسی، سیـــدعلی و شیما حشمتی. ۱۳۹۴. مدل‌سازی فرونشست دشت نیشابور با استفاده از سری‌های زمانی و تکنیک DINSAR. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۶(۱): ۶۷-۸۴.

احمدی، نعیمه؛ زهرا موسوی، زهره معصومی ۱۳۹۷. مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن. *نشریه سنجش از دور و GIS ایران*، ۱۰(۳): ۳۳-۵۲.

بابایی، سید ساسان؛ زهرا موسوی، مه‌آسا روستایی. ۱۳۹۵. آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنی کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین. *نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری*، ۵(۴): ۹۵-۱۱۱.

رکنی، جعفر؛ حسین زاده، سید رضا؛ لشکری پور، غلامرضا؛ ولایتی، سعداله. ۱۳۹۵. بررسی فرونشست زمین، چشم اندازها و تحوّلات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت های تراکمی (مطالعه ی موردی: دشت نیشابور). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۶ (۲۴):۳۸-۲۱.

رکنی، جعفر؛ حسین زاده، سید رضا؛ لشکری پور، غلامرضا؛ ولایتی، سعد اله. ۱۳۹۸. تحلیل توزیع فضایی و ساز و کار تشکیل شکاف‌های ناشی از فرونشست زمین در دشت نیشابور. *نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران*، ۱۲(۳): ۶۵-۸۲.

جعفری، غلام حسن؛ هژیر محمدی. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطرفروچاله‌ها با استفاده از روش وزن شواهد (مطالعه موردی: دشت کبودر آهنگ –فامنین). *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات مخاطرات محیطی*، ۶(۳): ۷۱-۸۸.

جلینی، مریم؛ سپهر، عادل؛ لشکری پور، غلامرضا؛ راشکی، علیرضا. ۱۳۹۶. بررسی همبستگی مورفومتری ترک‌های حاصل از فرونشست با تغییرپذیری ادافیک در دشت نیشابور. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*، ۵(۴): ۵۹-۷۵.

حاجب، زهرا؛ زهرا موسوی، زهره معصومی، ابوالفضل رضایی. ۱۳۹۹. مطالعه فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان. *فصلنامه علوم زمین*، ۲۹(۱۱۴): ۲۵۱-۲۵۸.

حقیقت مهر، پریسا؛ محمدجواد ولدان زوج، رضا تاجیک، سعید جباری، محمودرضا صاحبی، رضا اسلامی، مریم دهقانی. ۱۳۹۱. تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سامانه موقعیت یابی جهانی. *نشریه علوم زمین*، ۲۲(۸۶): ۱۰۵-۱۱۴.

دهقانی بیدگلی، رضا؛ حمیدرضا کوهبنانی، محمودرضا یزدانی. ۱۳۹۹. پهنه‌بندی فرونشست دشت سمنان ناشی از برداشت بی‌رویه آبهای زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر Sentinel-۱A . *نشریه آبیاری و آب ایران*، ۳(۱۰): ۱۷۵-۱۸۷.

شریفی کیا، محمد. ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان. *نشریه برنامه ریزی و آمایش فضا*، ۱۶(۷۵): ۵۵-۷۷.

عامریان، یزدان؛ وثوقی، بهزاد. ۱۳۹۰. کنترل فرونشست دشت مشهد و نیشابور بر مبنای روش تجزیه و تحلیل تغییر انحنا با استفاده از میدان جابه‌جایی حاصل از مشاهدات GPS. *فصلنامه علمی علوم زمین*، ۲۱(۸۲):۱۳۳-۱۳۸.

عالی پور اردی، مهدی؛ بهرام ملک محمدی، حمیدرضا جعفری. ۱۳۹۶. پهنه بندی ریسک فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). *نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۱(۳۹): ۲۵-۳۴.

محمد خان، شیرین؛ حمید گنجائیان، لیلا گروهی، زهرا زنگنه‌تبار. ۱۳۹۸. ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری Sentinel-۱ محدوده مورد مطالعه: دشت قروه. *فصلنامه علوم جغرافیایی*، ۲۸(۱۱۲):۲۱۹-۲۲۹.

مرادی، آیدین؛ سمیه عمادالدین، صالح آرخی، خلیل رضائی. (۱۳۹۹). تحلیل فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات چاه‌های ژئوتکنیکی و پیزومتری (مطالعه موردی: منطقه شهری۱۸تهران). *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۷(۱): ۱۵۳-۱۷۶.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]

Chen, B.; H. Gong, Y. Chen, X. Li, C. Zhou, K. Lei, X. Zhao, L. Duan, and X. Zhao. ۲۰۲۰. Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China. *Science of the Total Environment*, ۷۳۵: ۱۳۹۱۱۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۲۰,۱۳۹۱۱۱

Corbau, C.; U. Simeoni, C. Zoccarato, G. Mantovani, and P. Teatini. ۲۰۱۹. Coupling land use evolution and subsidence in the Po Delta, Italy: Revising the past occurrence and prospecting the future management challenges. *Science of the Total Environment*, ٦٥٤:۱۱۹٦-۱۲۰۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۱۸,۱۱,۱۰٤

Ezquerro, P.; G. Herrera, M. Marchamalo, R. Tomás, M. Béjar-Pizarro, and R. Martínez. ۲۰۱٤. A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study. *Journal of Hydrolology*, ٥۱۹:۱۱۹۲–۱۲۰٤. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.jhydrol.۲۰۱٤,۰۸,۰٤۰

Gong, H.; Y. Pan, L. Zheng, X. Li, L. Zhu, C. Zhang, and C. Zhou. ۲۰۱۸. Long-term groundwater storage changes and land subsidence development in the North China Plain (۱۹۷۱–۲۰۱٥). *Hydrogeology Journal*, ۲٦(٥): ۱٤۱۷-۱٤۲۷. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۰٤۰-۰۱۸-۱۷٦۸-٤

Haghshenas Haghighi, MH.; and M. Motagh. ۲۰۱۹. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, ۲۲۱: ٥۳٤-٥٥۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rse.۲۰۱۸,۱۱,۰۰۳

Hoffmann, J.; DL. Galloway, and HA. Zebker. ۲۰۰۳. Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. *Water Resources Research*, ۳۹(۲):۱۰۳۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۲۹/۲۰۰۱WR۰۰۱۲٥۲

Luo, Q.; D. Perissin, Y. Zhang, and Y. Jia. ۲۰۱٤. L-and X-band multi-temporal InSAR analysis of Tianjin subsidence. *Remote Sensing*, ٦(۹): ۷۹۳۳-۷۹٥۱. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/rs٦۰۹۷۹۳۳

Shi, X.; C. Yang, L. Zhang, H. Jiang, M. Liao, L. Zhang, and X. Liu. ۲۰۱۹. Mapping and characterizing displacements of active loess slopes along the upstream Yellow River with multi-temporal InSAR datasets. *Science of the Total Environment*, ٦۷٤:۲۰۰-۲۱۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.scitotenv.۲۰۱۹,۰٤,۱٤۰

Sun, H.; Q. Zhang, C. Zhao, C. Yang, Q. Sun, and W. Chen. ۲۰۱۷. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote Sensing of Environment*, ۱۸۸: ۷۳-۸٤. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rse.۲۰۱٦,۱۰,۰۳۷

Van Engelenburg, J.; R. Hueting, S. Rijpkema, AJ. Teuling, R. Uijlenhoet, and F. Ludwig. ۲۰۱۸. Impact of changes in groundwater extractions and climate change on groundwater-dependent ecosystems in a complex hydrogeological setting. *Water Resources Management*, ۳۲(۱): ۲٥۹-۲۷۲. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۱۲٦۹-۰۱۷-۱۸۰۸-۱

Xing, L.; L. Huang, Y. Yang, J. Xu, W. Zhang, G. Chi, and X. Hou. ۲۰۱۸. The blocking effect of clay in groundwater systems: a case study in an inland plain area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, ۱٥(۹): ۱۸۱٦. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/ijerph۱٥۰۹۱۸۱٦

Zamanirad, M.; H. Sedghi, A. Sarraf, A. Saremi, and P. Rezaee. ۲۰۱۸. Potential impacts of climate change on groundwater levels on the Kerdi-Shirazi plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, ۷۷(۱۱): ٤۱٥. https://doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۲٦٦٥-۰۱۸-۷٥۸٥-۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.52547/jsaeh.8.3.187]