

بررسی میزان فرونشست سطح زمین و تغییرات آن در محدوده محوطه‌های تاریخی تخت جمشید و نقش رستم

معصومه آمیغ پی^۱، فاطمه قرائیان^۲

amighpey@ncc.org.ir*

۱. رئیس اداره ترازایی دقیق و تداخل سنجی راداری، اداره کل نقشه برداری زمینی، سازمان نقشه برداری کشور

۲. کارشناس پردازش تصاویر راداری، اداره کل نقشه برداری زمینی، سازمان نقشه برداری کشور

چکیده

تخت جمشید را می‌توان نماد شکوه و عظمت ایران باستان دانست. تخت جمشید، در کنار دشت مرو دشت و در کوهپایه کوه رحمت در استان فارس واقع در شهر مرو دشت ایران است. متأسفانه استخراج بی‌رویه آب زیر زمینی در دشت مرو دشت به‌منظور تأمین آب کشاورزی، موجب ایجاد فرونشست در این دشت شده است. نظر به اهمیت حفاظت از آثار باستانی و تاریخی، بررسی میزان فرونشست دشت مرو دشت در محدوده میراث جهانی میراث فرهنگی تخت جمشید و نقش رستم، به‌منظور ارزیابی تأثیر آن بر آسیب‌های محتمل این میراث، حایز اهمیت است. محاسبات نشان‌دهنده فرونشست گسترده دشت مرو دشت با بیشینه نرخ ۲۲/۶ سانتی‌متر در سال است. همچنین، نتایج محاسبات نشان‌دهنده گسترش فرونشست دشت مرو دشت به سمت تخت جمشید و نقش رستم در سالیان اخیر است. از طرف دیگر، تغییرات نرخ فرونشست در نزدیکی این آثار باستانی قابل توجه است. به‌منظور حفظ و نگهداری این آثار باستانی ارزشمند، اقدامات مقابله‌ای با آثار مخرب فرونشست بر آن‌ها و مدیریت پایدار منابع آب زیر زمینی منطقه به‌منظور جلوگیری از روند فرونشست دشت مرو دشت پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی راداری، فرونشست، گرادبان فرونشست، تخت جمشید، نقش رستم

۱. مقدمه

و کم‌آبی از یک سو و بروز سیلاب‌های فصلی از سوی دیگر برای میراث فرهنگی و آثار باستانی تهدید جدی ایجاد کرده است. به‌طور کلی، تغییرات اقلیمی هم‌اکنون یکی از بزرگ‌ترین مخاطرات پیش‌روی فرهنگ، میراث فرهنگی و زیست‌بوم‌های طبیعی جوامع بشری محسوب می‌شود (IPCC, 2021). وقوع تغییرات اقلیمی آتش‌سوزی جنگل‌ها، سیلاب‌های ناگهانی و خشکسالی‌های گسترده را افزایش داده و این رویدادها میراث فرهنگی و معنوی را به خطر می‌اندازند (ICOMOS, 2018). از جمله راهکارهای مؤثر برای کاهش این چالش‌ها، سازگاری با تغییرات اقلیمی در راستای حفظ و نگهداری از محیط زیست است (UNESCO, 2021). یکی از تبعات تغییر اقلیم، کم‌آبی، محدودیت منابع آب سطحی، خشک شدن دریاچه‌ها و تالاب‌ها و فشار بر منابع آب زیرزمینی بوده

آثار باستانی و میراث فرهنگی، به‌عنوان شناسنامه هر کشور، نشانگر قدمت، تاریخچه و تمدن آن هستند. از این‌رو، حفاظت از آثار تاریخی و فرهنگی با به‌کارگیری دانش و هنر به‌عنوان یک امر ضروری مطرح می‌شود (Smith, 2020). کشور ما ایران نیز در رده‌های اول دارنده آثار باستانی و بناهای تاریخی و فرهنگی در جهان است و دارای کهن‌ترین فرهنگ و تمدن جهان است (Jones & Lee, 2018). این امر نیازمند سیاست‌ها و برنامه‌های منسجم حفاظت و مدیریت میراث است تا از گسست فرهنگی جلوگیری شود.

از گذشته، میراث و فرهنگ با اقلیم پیوندی دیرینه داشته است و امروزه توجه به این رابطه و تحکیم آن لازمه توسعه پایدار است. در دهه‌های اخیر، تبعات تغییرات اقلیمی در دنیا در قالب خشکسالی‌های مستمر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۳۰

تعداد صفحات: ۷

شناسه دیجیتال (doi): <https://10.66224/kcr.9.1.60>

فصلنامه علمی- پژوهشی دانش حفاظت و مرمت

شاپای الکترونیکی: ۳۰۶۰-۶۲۱۷

شاپای چاپی: ۶۰۹۳-۲۵۳۸



این نشریه از قوانین Cope پیروی می‌کند. دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

متأسفانه استفاده بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی در دشت حاصلخیز مروودشت باهدف توسعه کشاورزی بدون درنظرگرفتن تاب‌آوری اقلیم منجر به ایجاد فرونشست وسیعی در این دشت شده است که این فرونشست، منجر به ایجاد تهدید جدی برای سلامت آثار باستانی واقع بر آن شده است. در این تحقیق میزان فرونشست سطح زمین در محدوده این ابنیه تاریخی موردبررسی قرار می‌گیرد.

۲. معرفی میراث جهانی تخت‌جمشید و میراث ملی نقش‌رستم

تخت‌جمشید را می‌توان نماد شکوه و عظمت ایران باستان دانست (شکل ۱). تخت‌جمشید، مجموعه‌ای از چند کاخ تودرتو در کنار دشت حاصلخیز مروودشت و در کوهپایه کوه رحمت در استان فارس است. تخت‌جمشید در شهر باستانی پارسه یکی از شهرهای باستانی ایران قرار داشته است که طی سالیان، پیوسته پایتخت تشریفاتی شاهنشاهی هخامنشی بوده است (فدایی و ناصری، ۱۴۰۱). در سال ۵۱۸ پیش از میلاد بنای تخت‌جمشید به‌عنوان پایتخت نو هخامنشیان در پارسه آغاز گردید. بنیان‌گذار تخت‌جمشید داریوش بزرگ بود، هرچند پس از او پسرش خشایارشا و نوه‌اش اردشیر یکم با افزودن بناهای دیگر، این مجموعه را گسترش دادند. بسیاری از آگاهی‌های کنونی که در مورد پیشینه هخامنشیان و فرهنگ آن‌ها در دسترس است، به دلیل سنگ‌نوشته‌ها و گل‌نوشته‌هایی است که در این کاخ‌ها و بر روی دیواره‌ها و لوحه‌های آن حکاکی شده است. اسکندر مقدونی در ۳۳۰ پیش از میلاد، به ایران یورش آورد و تخت‌جمشید را به آتش کشید. بااین‌حال ویرانه‌های این مکان هنوز هم برپا است و باستان‌شناسان از ویرانه‌های آن نشانه‌های آتش و یورش را تأیید می‌کنند. این مکان تاریخی از سال ۱۹۷۹ یکی از آثار ثبت‌شده ایران در یونسکو است. به پس از آمدن اسلام به ایران نیز این جایگاه را گرامی می‌شمردند و آن را هزار ستون یا چهل‌ستون یا چهل‌منار می‌گفتند.

تخت‌جمشید در مرکز استان فارس، ۱۰ کیلومتری شمال شهر مروودشت و در ۵۷ کیلومتری شیراز قرار دارد. ارتفاع از سطح دریا تخت‌جمشید ۱۷۷۰ متر است. طرف شرقی این مجموعه کاخ‌ها بر روی کوه رحمت و سه طرف دیگر در درون جلگه مروودشت پیش رفته است. تخت‌جمشید بر روی صفه یا سکوی سنگی که ارتفاع آن بین ۸ تا ۱۸ متر بالاتر از سطح جلگه مروودشت است، واقع شده است. ابعاد صفه تخت‌جمشید ۴۵۵ متر (جبهه غربی)، ۳۰۰ متر (جبهه شمالی)، ۴۳۰ متر (جبهه شرقی)، ۳۹۰ متر (جبهه جنوبی) است.

است. عدم مدیریت منابع آب زیر زمینی و استخراج بی‌رویه از آن‌ها، خود موجب فرونشست‌های گسترده‌ای در جهان و ایران شده است (Wu et al., 2008, Galloway and Sneed, 2013, al., ۱۴۰۲). فرونشست‌ها از یک سو تهدیدی زیست‌محیطی محسوب می‌شوند که موجب تخریب آبخوان و خاک می‌شوند و از دیگر سو موجب تخریب ابنیه و سازه‌های واقع در محل می‌شوند. بسیاری از فرونشست‌ها به محدوده‌های شهری گسترش پیدا کرده و موجب تخریب و آسیب به آثار باستانی شده‌اند (Rukayah et al. 2021, Hamouda et al. 2021, Alfara et al. 2014).

استان فارس یکی از مهم‌ترین استان‌های ایران از لحاظ مطالعات باستان‌شناسی است و توالی گاه‌نگاری تاریخی منطقه، دوره پارینه‌سنگی میانه تا دوران اسلامی را دربر می‌گیرد. فراوانی نسبی آب رودهای دائمی و فصلی و همچنین وجود خاک حاصلخیز از دلایل مهم سکنی‌گزینی در این منطقه بوده است. رودهای کر و سیوند از رودهای مهم منطقه و استان به‌شمار می‌روند که از جمله عوامل بنیادین در شکل‌گیری استقرارگاه‌های مختلف در این حوزه است (فدایی، ۱۴۰۳).

شهرستان مروودشت، دشتی آبرفتی و هموار بوده که از سمت شمال، غرب و جنوب به واحدهای کوهستانی محدود می‌شود. رشته کوه‌های زاگرس در واحد فارس و بالطبع در شهرستان مروودشت نیز از دو ساختار زمین‌شناسی متمایز تشکیل شده است. رشته کوه‌های موازی باهم با جهت شمال غربی- جنوب شرقی و دارای دشت‌ها و دره‌های باز میان‌کوهی بوده که از مهم‌ترین کوه‌های این شهرستان رشته کوه رحمت است. طول این رشته ۴۱ کیلومتر و عرض آن بین ۵ تا ۸ کیلومتر متغیر و جهت آن مطابق با چین‌های واحد زاگرس فارس است. تخت‌جمشید و نقش‌رستم دو نمونه از آثار باستانی مهم در این شهرستان محسوب می‌شوند.

تخت‌جمشید را می‌توان نماد شکوه و عظمت ایران باستان دانست. تخت‌جمشید، مجموعه‌ای از چند کاخ تودرتو در کنار دشت حاصلخیز مروودشت و در کوهپایه کوه رحمت در استان فارس واقع در شهر مروودشت ایران است. تخت‌جمشید در شمال شهرستان مروودشت، شمال استان فارس (شمال شرقی شیراز) جای دارد. در فاصله شش و نیم کیلومتری از تخت‌جمشید نقش‌رستم است. در نقش‌رستم، آرامگاه‌های شاهنشاهی مانند داریوش بزرگ، خشایارشا، اردشیر یکم و داریوش دوم واقع است. کعبه زرتشت یک بنای سنگی چهارگوش در محوطه نقش‌رستم است.



شکل ۱. نمایی از بنای دروازه ملل در محوطه جهانی تخت‌جمشید
Figure1. A view of the Persepolis World Base



شکل ۲. نمایی از محوطه آثار باستانی نقش‌رستم و کعبه زرتشت
Figure2. A view of the ancient site of Naqsh-e-Rostam and the Kaaba of Zoroaster

از دیرباز این دشت آب‌رفتی، با میزبانی از رود کر و سیوند، محل زیست و کشاورزی جمعیت بالایی از مردمان خطه فارس بوده و هست. شکل ۳ نمایی از اراضی کشاورزی دشت مرو دشت در اطراف تخت‌جمشید و نقش‌رستم را نشان می‌دهد. اما برداشت بی‌رویه آب برای کشت‌وزرع، بیلان آبی این منطقه را نامتوازن کرده و متأسفانه این دشت پهناور و سخاوتمند، طی دهه‌های اخیر در مواجهه با پدیده فرونشست زمین قرار گرفته است، پدیده‌ای غیرقابل جبران که حاصل اقدامات انسانی و سوءبرداشت از سفره‌های آب زیرزمینی است.



شکل ۳. نمایی از اراضی کشاورزی دشت مرو دشت در اطراف تخت‌جمشید و نقش‌رستم (مستخرج از نرم افزار google earth)
Figure3. A view of the agricultural lands of Marvdasht plain around Persepolis and Naqsh-e Rostam

نقش‌رستم، مجموعه‌ای باستانی در زنگی‌آباد واقع در شمال شهرستان مرو دشت استان فارس است که در فاصله ۶ کیلومتری شمال تخت‌جمشید قرار دارد. این محوطه باستانی یادمان‌هایی از ایلامیان، هخامنشیان و ساسانیان را در خود جای داده است و از حدود سال ۱۲۰۰ پیش از میلاد تا ۶۲۵ میلادی همواره مورد توجه بوده است، زیرا آرامگاه چهار تن از شاهنشاهان هخامنشی، نقش‌برجسته‌های پرشماری از وقایع مهم دوران ساسانیان، بنای کعبه زرتشت و نقش‌برجسته ویران شده‌ای از دوران ایلامیان در این مکان قرار دارد. کعبه زرتشت یک بنای سنگی چهارگوش و پله‌دار در محوطه نقش‌رستم در کنار روستای زنگی‌آباد شهرستان مرو دشت استان فارس در ایران است. فاصله کعبه زرتشت تا کوه، ۴۶ متر است و دقیقاً روبه‌روی آرامگاه داریوش دوم قرار دارد و شکلش مکعب‌مستطیل است و تنها یک در ورودی دارد. این بنا امروزه بخشی از محوطه نقش‌رستم است (شکل ۲).

۳. بررسی فرونشست دشت مرو دشت

رشد جمعیت همراه با گسترش بی‌رویه بهره‌برداری از آب به‌ویژه در امور کشاورزی و صنعت، جامعه امروز را با اثرات نامطلوب زیادی در جنبه‌های کمی و کیفی منابع آب مواجه کرده است. از این‌رو لزوم استفاده عقلانی و مدیریت پایدار بهره‌برداری از منابع آب امری آشکار به نظر می‌رسد. افزایش روزافزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آب‌رفتی انباشته گشته‌اند، در مناطق مختلفی از کشور عزیزمان ایران، موجب فرونشست زمین شده است. آمیغ پی و همکاران ۱۴۰۲ مطالعات جامعی از شناسایی مناطق درگیر فرونشست در ایران انجام دادند. طی این تحقیق مشخص شد که مساحتی بالغ بر ۵ درصد وسعت ایران درگیر مخاطره فرونشست است. مخاطرات پدیده فرونشست ابعاد گسترده‌ای دارد که از آن جمله می‌توان به تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم، تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، ایجاد اختلال در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، پیشروی امواج در مناطق پست ساحلی، کاهش برگشت‌ناپذیر مخزن آب زیرزمینی و گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی اشاره کرد. بی‌شک، یکی از مهم‌ترین سازه‌های مورد تهدید در اثر مخاطره فرونشست در ایران، آثار ارزشمند باستانی است. یکی از مهم‌ترین آثار باستانی ایران که متأسفانه در معرض تهدید ناشی از مخاطرات فرونشست قرار گرفته است، میراث جهانی تخت‌جمشید و میراث ملی نقش‌رستم دشت مرو دشت است.

دشت مرو دشت از مهم‌ترین دشت‌های حاصلخیز ایران زمین است که موقعیت مطلوب آن سبب شده تا هزاران سال به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سکونتگاه‌های بشر و پایتخت بزرگ‌ترین امپراتوری جهان انتخاب شود.

۴. بررسی فرونشست تخت جمشید و نقش رستم

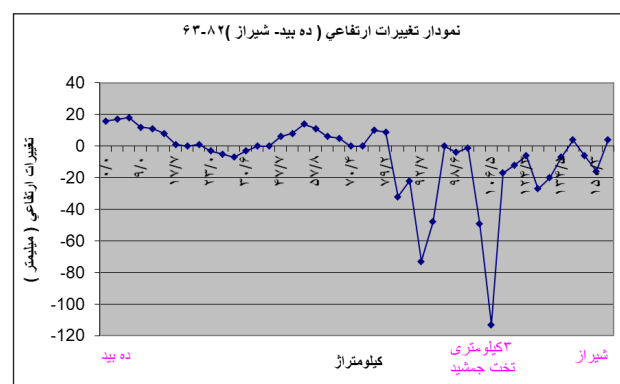
تخت جمشید، در کنار دشت مرو دشت و در کوهپایه کوه رحمت در استان فارس واقع در شهر مرو دشت ایران است. نظر به اهمیت این اثر تاریخی و اهمیت حفظ و نگهداری آن، بررسی فرونشست در محدوده این پایگاه میراث فرهنگی جهانی انجام شد. شکل ۷ نشان دهنده وضعیت فرونشست در محدوده این میراث و اطراف در بازه زمانی مرداد ۱۳۹۷ تا تیرماه ۱۳۹۹ است. همین طور که از این شکل پیداست، در این بازه زمانی تخت جمشید و نقش رستم خارج محدوده فرونشست بوده است. تخت جمشید در این بازه زمانی در فاصله ۳۰ متری از فرونشست دشت مرو دشت بوده است. همچنین فاصله کعبه زرتشت با مرز فرونشست دشت مرو دشت حدود ۴ متر بوده است.

شکل ۸ نشان دهنده وضعیت فرونشست در محدوده تخت جمشید و نقش رستم در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳ است. مطابق شکل ۶ در این بازه زمانی دشت مرو دشت با افزایش نرخ و گسترش محدوده فرونشست مواجه بوده است و مرز فرونشست تا مرز کوه رحمت و کوه حسین گسترش پیدا کرده است. مطابق شکل ۸ در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳ قسمت غربی محوطه میراث جهانی تخت جمشید وارد حریم فرونشست با نرخ یک سانتی متر در سال شده است. همچنین محدوده کعبه زرتشت نیز در این بازه زمانی وارد محدوده فرونشست با نرخ حدود ۱ سانتی متر در سال شده است.

از دیگر سو، علاوه بر نرخ فرونشست در محدوده آثار باستانی، تغییرات نرخ فرونشست یا نشست نامتقارن عامل اساسی آسیب به سازه های محل است. به عبارت دیگر، اگرچه پدیده فرونشست، با اثرات مخرب خود کل پهنه درگیر را مورد تهدید قرار می دهد، اما مناطقی که در پهنه های دارای فرونشست نامتقارن واقع شده اند، نواحی مستعدتری برای ایجاد شکاف و فرو چاله و آسیب به سازه های سطحی و زیرسطحی محسوب می شوند. نقشه گرادیان، بیانگر تغییرات نرخ جابه جایی قائم است. این نقشه، در حقیقت مشتق اول نقشه نرخ جابه جایی قائم است (آمیخ پی و همکاران، ۱۴۰۴). در این راستا و به منظور تهیه نقشه مخاطره فرونشست، نقشه گرادیان سرعت فرونشست زمین در دشت مرو دشت محاسبه شد. شکل ۹ تغییرات نرخ فرونشست در محدوده تخت جمشید و نقش رستم را در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳ بر حسب میلی متر بر متر نمایش داده است. مطابق این شکل، گرادیان بالای ۴۰ درصد در فاصله ۴۰ متری تخت جمشید مشخص است. در محوطه نقش رستم نیز گرادیان بیشینه ۲۹ درصد ایجاد شده است.

به منظور تشخیص و پایش مناطق تحت تأثیر مخاطره فرونشست، از داده ها و روش های ژئودتیکی^۱ همچون تداخل سنجی راداری، داده های GPS و مشاهدات تراز یابی دقیق و ثقل سنجی استفاده می شود. تداخل سنجی راداری با پوشش وسیع و توان تفکیک مکانی بالا در کنار GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا و نیز مشاهدات تراز یابی دقیق و ثقل سنجی با دقت بالا می تواند منبع مناسبی برای مطالعات تغییر شکل سطح زمین باشد (آمیخ پی و همکاران ۱۴۰۲).

به منظور بررسی فرونشست دشت مرو دشت، از تلفیق انواع مشاهدات ژئودتیک در منطقه، شامل تداخل سنجی راداری و تراز یابی دقیق استفاده شد. شکل ۴ تغییرات ارتفاعی مسیر تراز یابی شیراز-ده بید را در بازه زمانی ۱۳۶۳-۱۳۸۲ نشان می دهد. همین طور که از این نمودار مشخص است، دشت مرو دشت در این بازه زمانی در ایستگاه تراز یابی واقع در ۳ کیلومتری تخت جمشید، ۱۱ سانتی متر فرونشست داشته است.

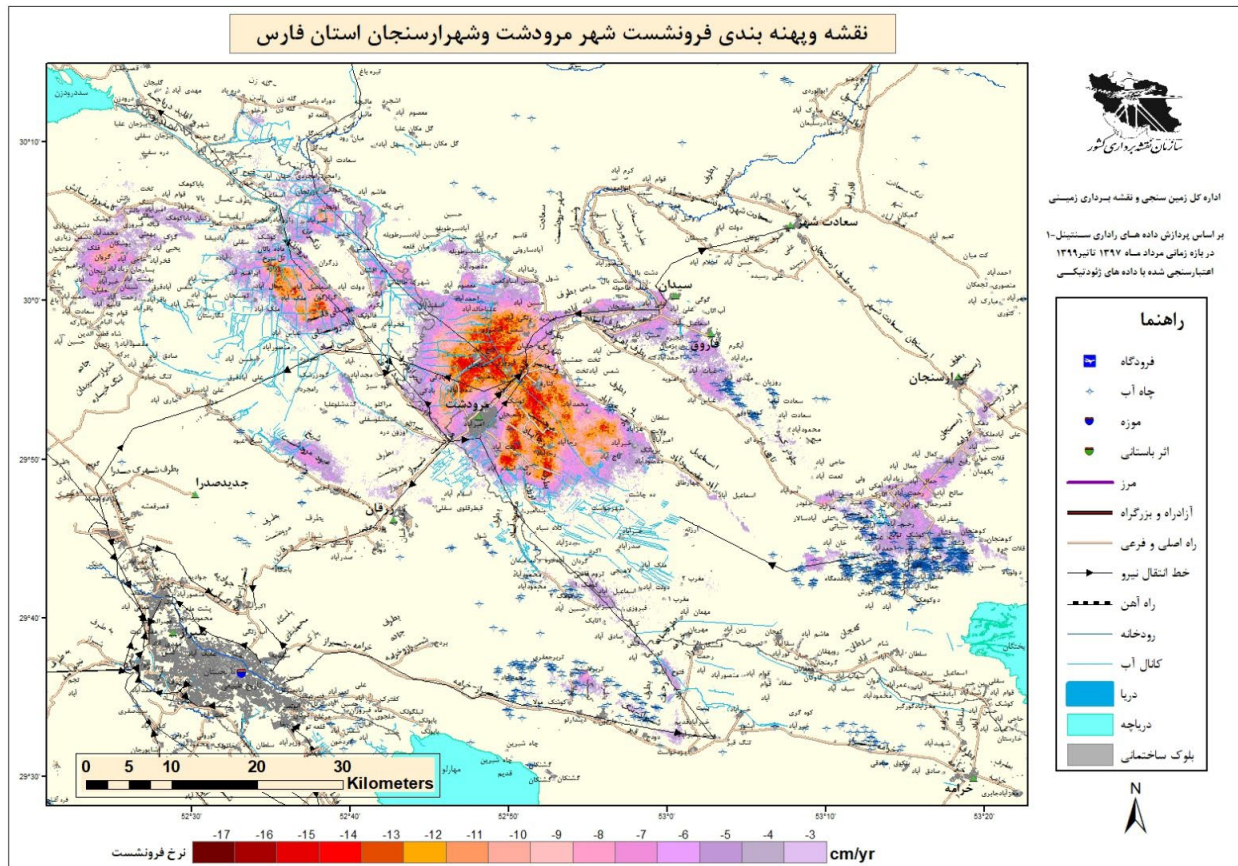


شکل ۴. نمودار تغییرات ارتفاعی مسیر تراز یابی CSDB (ده بید- شیراز) در بازه زمانی ۱۳۶۳-۱۳۸۲

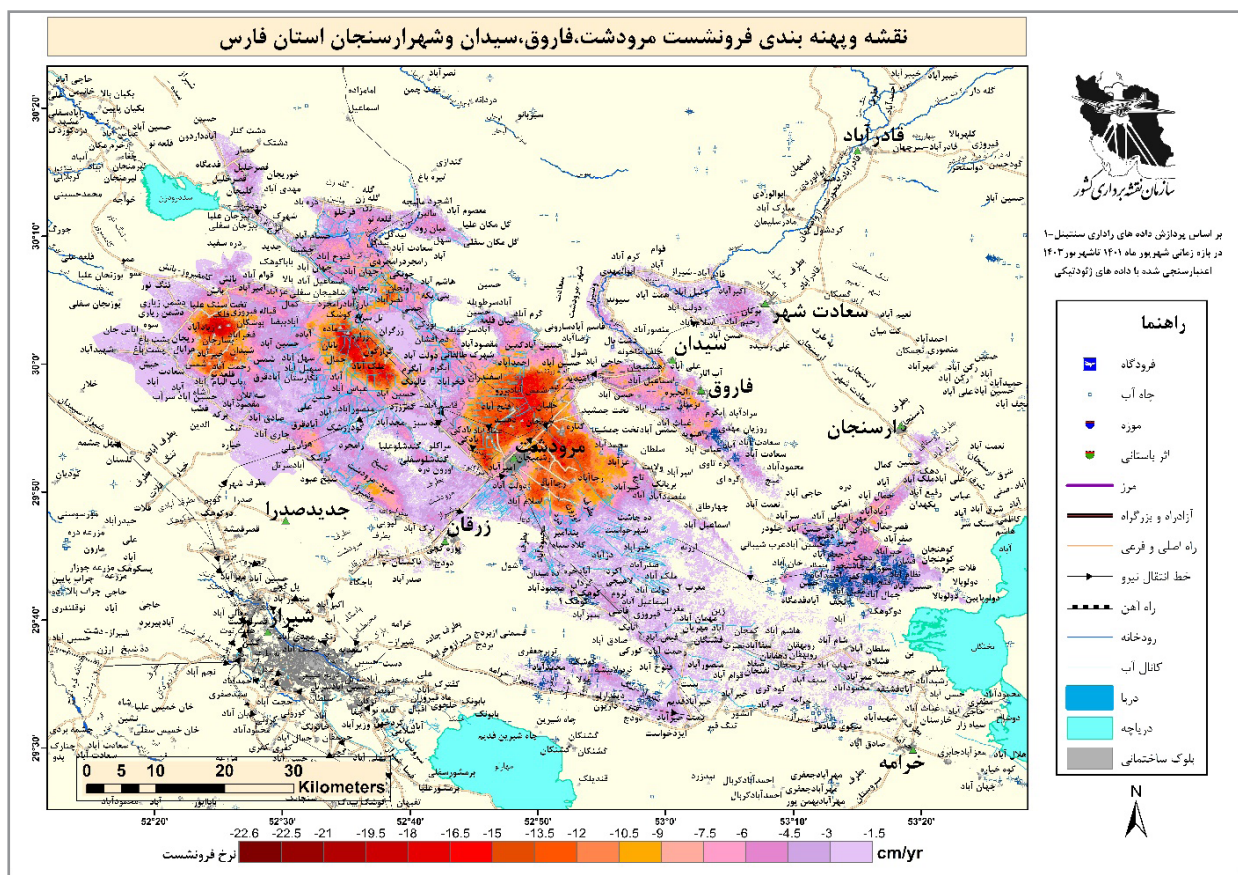
Figure 4. Diagram of elevation changes of the CSDB leveling route (Dehbid-Shiraz) in the period 1988-2007

به منظور بررسی محدوده فرونشست، ۳۰ تصویر راداری سنجنده از ماهواره Sentinel-1 از مرکز فضایی اروپا در بازه زمانی مرداد ۱۳۹۷ تا تیر ۱۳۹۹ اخذ گردید. نتایج حاصل این پردازش های راداری شامل ۱۲۲ اینترفروگرام بود. براساس پردازش های انجام شده در این بازه زمانی، مناطقی به وسعت ۹۵۰ کیلومترمربع در اطراف شهرستان مرو دشت و شهرستان ارسنجان و شهرستان های اطراف و در نواحی شهری کوشک، سپیدان، هرابال (بیضاء)، داریان، سیدان، زرقان، رامجرد، زنگی آباد، فاروق و لپوئی و پاسارگاد دچار فرونشست با بیشترین نرخ ۱۶.۲ سانتی متر در سال است. متأسفانه بخشی از جاده های مواصلاتی و خطوط راه آهن و خطوط انتقال نیرو از پهنه تحت تأثیر فرونشست عبور می نماید.

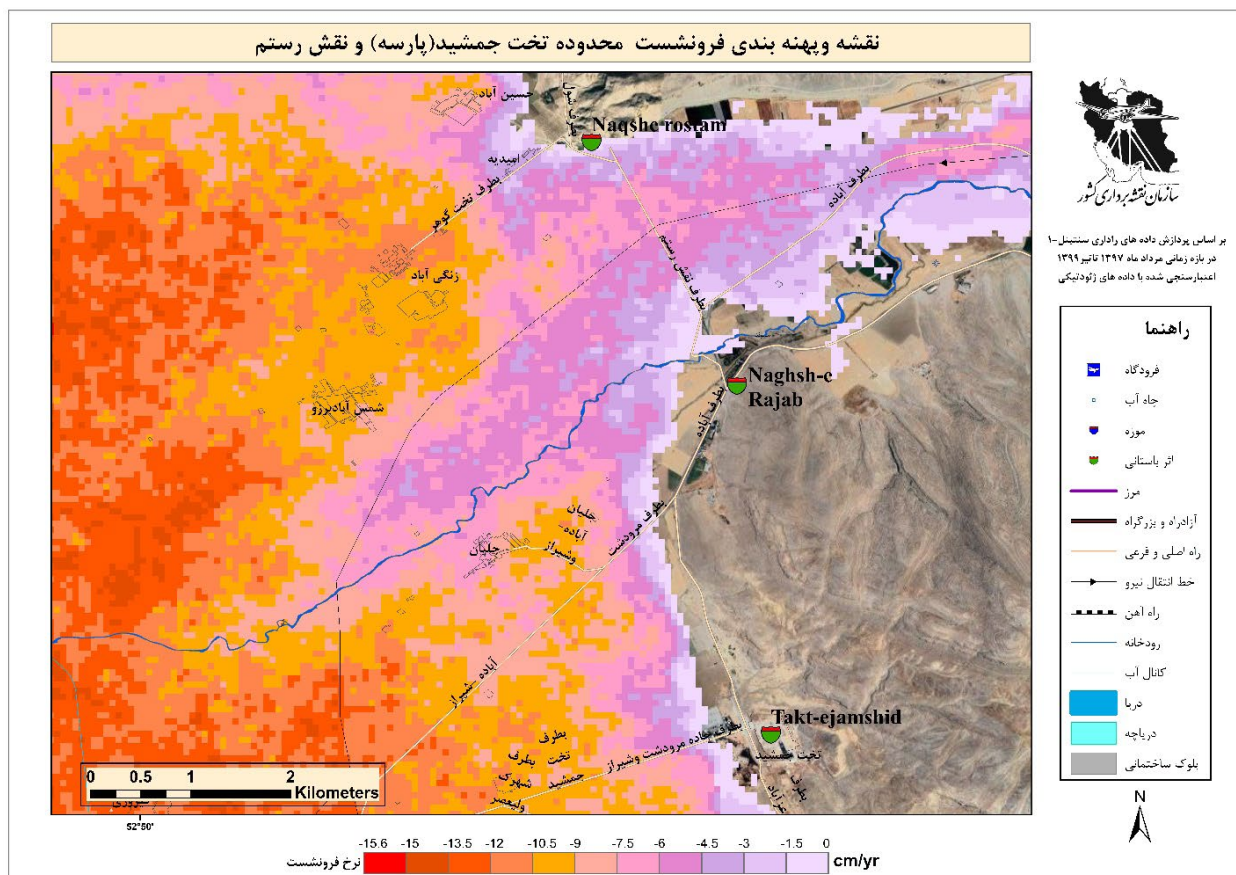
به روزرسانی وضعیت فرونشست دشت مرو دشت در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳ با استفاده از پردازش ۳۲ تصویر راداری و تشکیل ۱۱۳ اینترفراگرام انجام شد. شکل ۶ نقشه فرونشست دشت مرو دشت در این بازه زمانی را نشان می دهد. همان طور که از اشکال ۵ و ۶ مشخص است، بیشینه نرخ فرونشست دشت در این بازه زمانی به ۲۲/۶ سانتی متر در سال افزایش پیدا کرده است. همچنین میزان نرخ فرونشست در برخی مناطق دشت تا ۱۷ سانتی متر در سال افزایش داشته است. مساحت پهنه فرونشست نیز به ۲۹۶۳ کیلومترمربع افزایش پیدا کرده و بیش از ۳ برابر شده است.



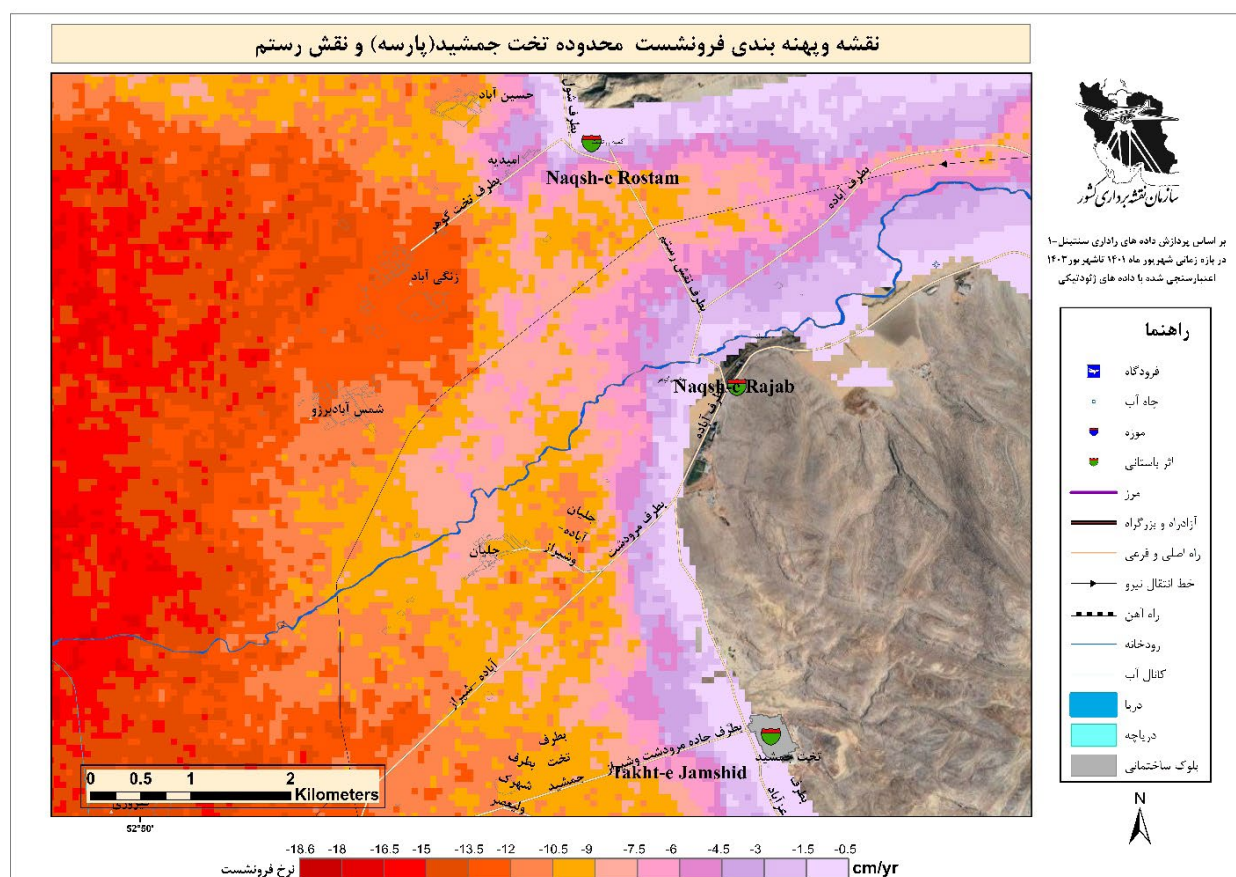
شکل ۵. نقشه فرونشست دشت مرودشت در بازه زمانی مرداد ۱۳۹۷ تا تیرماه ۱۳۹۹ (عکس از نگارنده)
Figure5. subsidence map of Marvdasht plain within 2018-2020 years



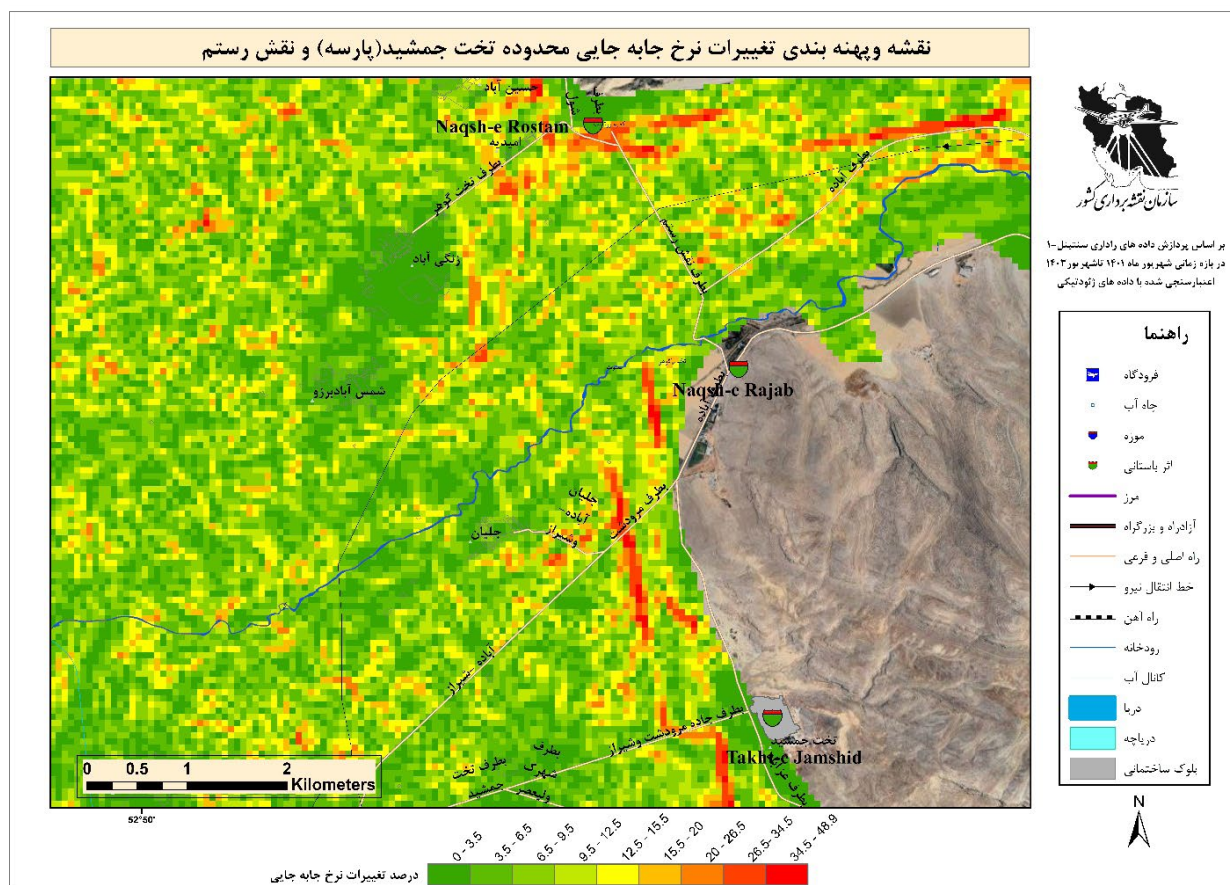
شکل ۶ نقشه فرونشست دشت مرودشت در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳ (عکس از نگارنده)
Figure6. subsidence map of Marvdasht plain within 2022-2024 years



شکل ۷. نقشه فرونشست دشت مرو دشت در محدوده تخت جمشید و نقش رستم در بازه زمانی مرداد ۱۳۹۷ تا تیرماه ۱۳۹۹ (عکس از نگارنده)
Figure7. subsidence map of Marvdasht plain around Persepolis and Naqsh-e Rostam within 2018-2020 years



شکل ۸. نقشه فرونشست دشت مرو دشت در محدوده تخت جمشید و نقش رستم در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳
Figure8. subsidence map of Marvdasht plain around Persepolis and Naqsh-e Rostam within 2022-2024 years



شکل ۹. نقشه تغییرات نرخ فرونشست در محدوده تخت جمشید و نقش رستم در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳

References/مراجع

- Alfare, Loredana & Donnici, Sandra & Marini, Mattia & Moscatelli, Massimiliano & Tosi, Luigi & Vallone, Roberto. (2014). The Impact of Land Subsidence on Preservation of Cultural Heritage Sites: The Case Study of Aquileia (Venetian-Friulian Coastland, North-Eastern Italy). 10.1007/978-3-319-08660-6_34.
- Amighpey, M., Arabi, S. (2024). Studying Land Subsidence in Iran Caused by Groundwater Over Extraction by Preparing the Comprehensive Subsidence Map of the Country. *Iran-Water Resources Research*, 19(5), pp. 145-156. doi: 10.22034/iwrr.2023.186215 (In Persian) [آمیغ پی، معصومه؛ عربی، سیاوش (۱۴۰۲). مطالعه وضعیت فرونشست زمین در اثر استخراج بی‌رویه آبهای زیرزمینی در ایران با استفاده از نقشه جامع فرونشست کشور. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹(۵)، ۱۴۵-۱۵۶]
- Amighpey, A., Arabi, S., Ghoraiyan, F., (2025) Identification of high-risk areas and ground fissures caused by land subsidence using the estimation of horizontal displacement components and subsidence gradient maps, case study: Kashan plain subsidence, Iranian Journal of Soil and Water Research, 56 (3), <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.385160.669836> (In

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق میزان فرونشست زمین در دشت مرودشت و تغییرات آن در محدوده میراث جهانی تخت جمشید و نقش رستم، مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق این مطالعات، گرچه طبق مشاهدات ترازیابی دقیق، قدمت این فرونشست متعلق به قبل دهه ۸۰ شمسی است، اما محاسبات تداخل سنجی راداری نشان دهنده گسترش و افزایش نرخ این فرونشست دشت مرودشت در سالیان اخیر است، به نحوی که بیشینه نرخ فرونشست دشت در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳ به ۲۲۶ سانتی متر در سال افزایش پیدا کرده و مساحت پهنه فرونشست دشت نیز بیش از ۳ برابر شده است. محاسبات مربوط به بازه زمانی مرداد ۱۳۹۷ تا تیرماه ۱۳۹۹ نشان دهنده آن است که تخت جمشید و نقش رستم خارج محدوده فرونشست و در فواصل ۳۰ متری و ۴ متری مرز فرونشست بوده‌اند. در حالی که در محاسبات مربوط به بازه زمانی شهریور ۱۴۰۱ تا شهریور ۱۴۰۳ قسمت غربی محوطه میراث جهانی تخت جمشید و محدوده کعبه زرتشت وارد حریم فرونشست با نرخ یک سانتی متر در سال شده است. از دیگر سو تغییرات نرخ فرونشست که عامل کلیدی در تخریب سازه‌های محل است نیز در نزدیکی این آثار باستانی قابل توجه است.

به منظور حفاظت از این آثار ارزشمند تاریخی، لزوم استفاده از روش‌های تحکیم سازه در آن‌ها امری است که می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. از دیگر سو، اصلاح روش‌های بهره‌برداری از منابع آب زیر زمینی در دشت مرودشت، اصلاح الگوی کشت و منع کشت محصولات پرآب بر کشاورزی، روش‌های تغذیه مصنوعی آبخوان به منظور توقف فرونشست در منطقه موکدا پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از مشاهدات و محاسبات میکرو ژئودزی به منظور بررسی و پایش تغییر شکل این آثار تاریخی پیشنهاد می‌شود.

- [org/xx.xxx/ghr.2018.02.115](https://doi.org/10.21861/ghr.2018.02.115)
- Rukayah, A B Sardjono, M Abdullah and A M A Aziz, (2021), inventory of old buildings and land subsidence in Semarang Old Colonial City, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 623, International Conference on Environment, Sustainability Issues, and Community Development 21 October 2020, Semarang, Indonesia
- Smith, J. (2020). Heritage and national identity: The role of monuments in modern states. *Journal of Cultural Heritage*, 25(3), 210–225. <https://doi.org/10.1016/j.jch.2020.03.210>
- UNESCO. (2021). Culture and climate change: Impacts, adaptation and mitigation. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://unesco.org/culture-and-climate-change>
- Wu J, Shi X, Xue Y, Zhang Y, Wei, Z, Yu J (2008) The development and control of the land subsidence in the Yangtze Delta, China. *Journal of Environmental Geology* 55(8):1725–1735
- Persian)
- [آمیغ پی، معصومه؛ عربی، سیاوش (۱۴۰۴). شناسایی موقعیت مناطق پر مخاطره و شکافهای زمین ناشی از فرونشست با استفاده از برآورد مولفه مسطحاتی جابه جایی و نقشه گردایان فرونشست، مطالعه موردی: فرونشست دشت کاشان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۶]
- Amr Z. Hamouda, Suzan M. El-Gharabawy, Ahmed Fekry, Mohamed A. Nassar, Mahmoud Salah, Subsidence model of the ancient Alexandria Royal port linked to sea-level rise and natural hazards using integrated geophysical methods, *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, Volume 47, Issue 3, 2021, Pages
- Fadaei H, Naseri F. Conservation and Restoration of an Achaemenid Column Base from the Hundred-Column Palace in the Persepolis World Heritage Site. *KCR* 2022; 5 (1) :13-34
- URL: <http://journal.richt.ir/kcr/article-1-109-fa.html> (In Persian)
- [فدایی حمید، ناصری فردین. حفاظت و مرمت پایه‌ستون هخامنشی متعلق به کاخ صدستون در محوطه میراث جهانی تخت جمشید. دانش حفاظت و مرمت. ۱۴۰۱، ۵ (۱): ۱۳-۳۴
- URL: <http://journal.richt.ir/kcr/article1-109-fa.html>]
- Fadaei H. Research Paper the Major Air Pollutants and Their Sources in the Erosion of Stone Materials in the Cultural Heritage Sites of the Marvdasht Plain. *KCR* 2025; 7 (4) :19-45
- URL: <http://journal.richt.ir/kcr/article-1-229-fa.html> (In Persian)
- [فدایی حمید. مهم ترین آلاینده‌های هوا و منابع آن در فرسایش مصالح سنگی در محوطه های میراث فرهنگی دشت مرو دشت. دانش حفاظت و مرمت. ۱۴۰۳، ۷ (۴): ۱۹-۴۵]
- Galloway D L, Sneed M (2013) Analysis and simulation of regional subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 65(1):123–136
- Hamouda, A.Z., El-Gharabawy, S.E., M., Fekry, A., Nassar, M.A., & Salah, M. (2021). Subsidence model of the ancient Alexandria Royal port linked to sea-level rise and natural hazards using integrated geophysical methods, *Egyptian Journal of Aquatic Research*, Volume 47, Issue 3, 2021, Pages 283-292, ISSN 1687-4285
- ICOMOS. (2018). The impact of climate change on monuments and sites. International Council on Monuments and Sites. <https://www.icomos.org/en/focus/climate-change>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- Jones, A., & Lee, K. (2018). Ancient civilizations and modern nation-states: A comparative overview. *Global History Review*, 12(2), 115–130. <https://doi.org/10.1080/17513758.2018.1511111>



Investigating land subsidence and its changes within the Persepolis and Naqsh-e Rostam Heritage Site

Masoome Amighpey^{1*}, Fateme Ghoraiyan¹

1. Land surveying department, National cartographic center of Iran

amighpey@ncc.org.ir*

Received: 2026.02.19

Accepted: 2026.06.20

doi: <https://10.66224/kcr.9.1.60>



Knowledge of Conservation and Restoration

pISSN: 2538-6093 eISSN: 3060-6217

This journal adheres to COPE guidelines.
Access to this article is free for all. Any non-commercial use of it is permitted, provided appropriate attribution is given.

Persepolis is a symbol of the glory and grandeur of ancient Iran. Persepolis is located next to the Marvdasht Plain and at the foot of Mount Rahmat in Fars Province, located in the city of Marvdasht, Iran. Unfortunately, the excessive extraction of groundwater in the Marvdasht Plain to provide water for agriculture has caused subsidence in this plain. Considering the importance of protecting ancient and historical monuments, it is important to investigate the extent of subsidence of the Marvdasht Plain within the Persepolis and Naqsh-e Rostam World Cultural Heritage Site in order to assess its impact on possible damage to this site. Calculations indicate widespread subsidence of the Marvdasht Plain with a maximum rate of 22.6 cm per year. Also, the results of the calculations indicate the expansion of subsidence of the Marvdasht Plain towards Persepolis and Naqsh-e Rostam in recent years. On the other hand, changes in the subsidence rate near these ancient monuments are significant. In order to preserve and protect these valuable ancient monuments, measures to combat the destructive effects of subsidence on them and sustainable management of the region's groundwater resources are proposed to prevent

the subsidence of the Marvdasht Plain.

Keywords: InSAR, subsidence, gradient of subsidence, Persepolis and Naqsh-e Rostam World Cultural Heritage Site.

Introduction

Antiquities and cultural heritage are the identity card of every country. Since antiquities determine the antiquity, history and civilization of every land, the protection of historical and cultural monuments, through a combination of science and art, is essential (Smith, 2020). Iran is also among the first countries to have antiquities and historical and cultural buildings in the world, and has the oldest culture and civilization in the world (Jones & Lee, 2018). Climate change in the world and its consequences in the form of continuous droughts, water shortages, and seasonal floods have cast a shadow over the country's cultural heritage in the past few years.

One of the consequences of climate change has been water scarcity and pressure on groundwater resources. The lack of management of groundwater resources and their uncontrolled extraction has caused widespread subsidence in the world and in Iran

(Wu et al.,2008, Galloway and Sneed,2013, amighpey et al., 2024). On the one hand, subsidence is considered an environmental threat that destroys aquifers and soil, and on the other hand, it destroys buildings and structures located on the site. Many subsidence areas have spread to urban areas and caused destruction and damage to ancient monument (Rukayah et al. 2021, Hamouda et al. 2021, Alfare at al. 2014).

Persepolis is a symbol of the splendor and grandeur of ancient Iran. Persepolis is a complex of several palaces nestled in the fertile plain of Marvdasht and at the foot of Mount Rahmat in Fars Province, located in the city of Marvdasht, Iran. Persepolis is located in the north of Marvdasht County, north of Fars Province (northeast of Shiraz). Six and a half kilometers from Persepolis is Naqsh-e Rostam. In Naqsh-e Rostam, there are tombs of kings such as Darius the Great, Xerxes, Artaxerxes I, and Darius II. The Kaaba of Zoroaster is a rectangular stone structure in the Naqsh-e Rostam area.

Unfortunately, excessive use of groundwater resources in the fertile Marvdasht plain for the purpose of agricultural development without considering climate resilience has led to extensive subsidence in this plain, which has led to a serious threat to the health of the ancient monuments located there. In this study, the rate of land subsidence in the vicinity of these historical buildings was examined.

Materials and Methods

Geodetic observations such as radar interferometry, GPS measurements, and precise leveling methods are used to identify and monitor areas affected by subsidence risk. Radar interferometry with wide coverage and high spatial resolution, along with GPS with high temporal resolution, as well as precise alignment observations and high-precision gravity measurements, can be a suitable source for land surface deformation in the region.

In order to investigate the subsidence of the Marvdasht plain, a combination of geodetic observations in the region, including radar interferometry and precise leveling, was used. Radar interferometry was used in two time periods: August 2018 to July 2019 and September 2019 to September 2024.

Results, & Discussion

The results indicate an expansion in the extent and rate of subsidence in recent years. Therefore, the western part of the Persepolis World Base area and the area of the Kaaba of Zoroaster have also entered the subsidence zone at a rate of about 1 cm per year. Also, according to calculations, the changes in the subsidence rate near these ancient monuments are great.

Conclusion

In order to preserve and maintain these ancient monuments, the need to use structural consolidation meth-

ods in these historical monuments is something that must be considered. On the other hand, management of groundwater resources exploitation in the fertile plain of Marvdasht, modification of the cultivation pattern and prohibition of cultivation of water-intensive crops for agriculture and methods of artificial aquifer feeding are suggested to stop subsidence in the Mukda region. Also, the use of microgeodetic observations and calculations is suggested to investigate and monitor the deformation of these ancient monuments.