[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

ارزیابی فرونشست زمین به‌کمک تلفیق روش تداخل‌سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد

فهیمه صالحی متعهد، ناصر حافظی مقدس، غلامرضا لشکری پور؛ دانشگاه فردوسی، دانشکدهٔ علوم، گروه زمین‌شناسی،
مریم دهقانی؛ دانشگاه شیراز، دانشکدهٔ مهندسی، گروه عمران و محیطزیست

تاریخ: دریافت ۹۶/۱۱/۰۸ پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

چکیده

مشهد دومین کلان شهر ایران است. به‌دلیل برداشت بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی، عوارض فرونشست به‌صورت شکاف زمین و ترک در دیوار سازه‌های مسکونی در حریم شمالی شهر مشهد مشاهده شده است. هدف از این پژوهش پایش دقیق نرخ فرونشست سالانه به‌کمک تمامی داده‌های موجود و علت‌یابی این پدیده با توجه به‌ویژگی‌های زمین‌شناختی و هیدروژئولوژیکی منطقه است. ابتدا به‌کمک روش ترازیابی دقیق که قدیمی‌ترین داده‌ها را از فرونشست زمین در اختیار قرار می‌دهد، سابقه فرونشست بررسی شده است. سپس پردازش تداخل‌سنجی راداری برای کل دشت مشهد به‌کمک ۲۳ تصویر ماهواره ENVISAT انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که دو کاسه فرونشستی یکی از شمال‌غرب و دیگری از جنوب‌شرق وارد حریم شهر مشهد شده است و در دشت مشهد در سال ۲۰۱۰ محدوده‌ای به‌وسعت ۱۳/۷ km^2 با میزان بیش از ۲۰cm/year در حال فرونشست بوده است. بررسی مقاطع زمین‌شناسی که به‌صورت طولی و عرضی دشت را قطع کرده‌اند، نشان می‌دهد، بیش‌ترین میزان فرونشست در مناطق با افت شدید سطح آب زیرزمینی، بافت خاک تناوب ریزدانه و درشت‌دانه و ضخامت زیاد آبرفت ایجاد شده است. هسته مرکزی شهر مشهد نیز از نظر زمین‌شناسی بسیار مستعد فرونشست است و پیش‌بینی می‌شود در صورت کاهش ورودی پساب به آبخوان شهری در آینده فرونشست چشم‌گیری در این مناطق ایجاد شود.

* نویسنده مسئول nhafezi@um.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

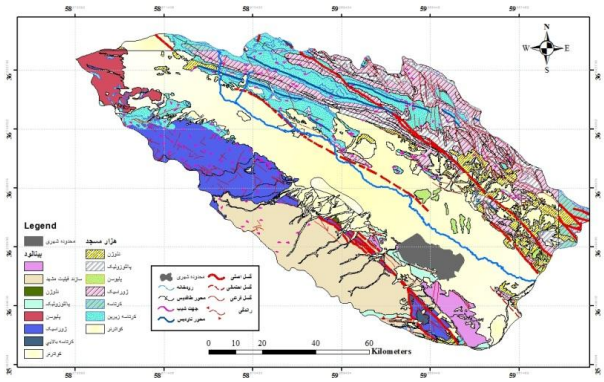
واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری، ترازیابی دقیق، آب زیرزمینی، شهر مشهد

مقدمه

دشت مشهد غرب حوضهٔ آبریز قره‌قوم واقع شده است، وسعت آن ۹۹۵۷/٤٥ کیلومتر مربع و ارتفاع متوسط ۱٤۹۷ متر از سطح دریا دارد. مهم‌ترین زهکش دشت رودخانه کشف‌رود است. میانگین بارندگی سالانه در دشت برابر ۲۳٦ میلی‌متر به‌دست آمده است و پرباران‌ترین ماه سال با ٤۳ میلی‌متر در فروردین ماه است و کم باران‌ترین ماه با ۱/۸ میلی‌متر در مرداد ماه است [۱]. دشت مشهد به‌لحاظ جایگاه زمین‌شناسی در حد فاصل دو زون زمین‌شناسی کپه‌داغ و بینالود واقع شده است [۲]. رخساره‌های زون کپه داغ تماما از سنگ‌های رسوبی تشکیل شده که به‌صورت هم‌شیب از ژوراسیک زیرین تا الیگوسن روی هم قرار گرفته است. زون بینالود با روند شمال غرب-جنوب شرق، ادامه زون ساختاری البرز است (شکل ۱). در این زون علاوه بر رخساره‌های رسوبی، بر خلاف زون کپه‌داغ سنگ‌های دگرگونی و سنگ‌های آذرین متعلق به دوره‌های مختلف زمین‌شناسی رخنمون دارند [۳].

مشهد دومین کلان‌شهر ایران، با ۳۲۸ کیلومترمربع مساحت در جنوب‌شرق این دشت واقع شده است. در محدودهٔ دشت مشهد برداشت بی‌رویه از سفرهٔ آب زیرزمینی باعث افت ۲۲/۵ متری طی دورهٔ سی‌ساله از سال آبی ۱۳٦۳-۱۳٦٤ تا سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹٤ شده است [٥]. اثرات افت آب در آبخوان غیرمتراکم به‌صورت افزایش فشار آب حفره‌ای و در نتیجه از بین رفتن خاصیت شناوری ذرات جامد خاک در بخشی از سفره که سطح آب در آن پائین افتاده است [٦]. این امر سبب تراکم لایه‌های خاک شده و باعث ایجاد فرونشست و ترک‌های سطحی در روی زمین می‌شود [۷]. در ۸۰٪ موارد علت اصلی فرونشست زمین استخراج بیش از حد آب از سفره‌های آب زیرزمینی است [۸]. فرونشست سطح زمین بر اثر افت آب‌های زیرزمینی غالباً وسعت زیادی دارد و با تأخیر زمانی از شروع افت سطح آب ایجاد می‌شود. در صورت افت ممتد سطح آب، فرونشست به‌صورت برگشت ناپذیر است. در اثر افت ناموزون سطح آب زیرزمینی و توپوگرافی سنگ بستر و تفاوت در ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها، فرونشست ناموزون رخ می‌دهد. فرونشست ناموزون سطح زمین می‌تواند

باعث ایجاد شکاف در سطح زمین و آسیب به زیرساخت‌های شهری و سازه‌ها شود. تاکنون ترک‌های ناشی از فرونشست زمین در دشت مشهد مشاهده شده است [۹].



شکل ۱. نقشه واحدهای زمین‌شناسی دشت مشهد [٤]

هم‌چنین در شمال مشهد در منطقهٔ خین عرب که جزو حریم شهری مشهد محسوب می‌شود، نشانه‌هایی از فرونشست زمین و ایجاد شکاف در زمین و ترک در دیوار مناطق مسکونی گزارش شده است [۱۰].

تا کنون پژوهش‌های زیادی برای بررسی فرونشست زمین در ایران و جهان انجام شده است، اولین بار ترزاقی در سال ۱۹۲۵ در مورد تئوری تنش مؤثر صحبت کرد. او بیان کرد اگر در بافت آبخوان لایه‌های از رسوبات ریزدانه تحکیم نشده وجود داشته باشد، هم‌زمان با افت سطح هیدرولیکی تنش مؤثر افزایش یافته و پدیدهٔ تحکیم رخ می‌دهد که نتیجه آن به‌صورت نشست در سطح زمین نمایان می‌شود [۷]. بعد از آن در سال ۱۹۲٦ تحقیقاتی به‌وسیلهٔ پرت[1] و جونز[2] در مورد تراکم رس تحت تأثیر برداشت گاز و نفت انجام شد [۱۱]. سپس پژوهش‌هایی در این زمینه، در قرن بیستم انجام شده که خروج آب از آبخوان و تحکیم خاک در آن‌ها مدل شده است. می‌توان به پژوهش مینزر[3] (۱۹۲۸) و تولمن[4] و پولند[5] (۱۹٤۰) و رایلی[6] (۱۹٦۹) اشاره کرد [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]. هم‌چنین معتق و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی

1. Pratt
2. Johnson
3. Meinzer
4. Tolman
5. Poland
6. Riley

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

نشست دشت مشهد را به‌کمک اطلاعات ترازیابی دقیق، ایستگاه دائم GPS و تداخل‌سنجی راداری تصاویر ماهواره ENVISAT در بازهٔ زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۳ بررسی کرده‌اند [۹]. دهقانی و همکاران (۲۰۱۳) به‌کمک تداخل‌سنجی راداری و ترازیابی دقیق، فرونشست دشت تهران را بررسی کرده‌اند [۱۵]. نامقی(۱۳۹۲) انطباق خوبی بین- نقشهٔ توزیع ضخامت ریزدانه‌ها با نقشهٔ میانگین نشست سالانه دشت نیشابور به‌دست آورده است [۱۶]. کاستلازیا[1] و همکاران (۲۰۱۶) برای بررسی فرونشست و خسارات ناشی از آن در پنج شهر مهم مکزیک از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده کرده‌اند [۱۷]. آمیغ پی و همکاران (۲۰۱۶) به‌همراه ابزار تداخل‌سنجی راداری، از ترازیابی دقیق هم برای بررسی فرونشست زمین در دشت یزد-اردکان استفاده کرده‌اند [۱۸]. سان و همکاران (۲۰۱۷) نیز به‌کمک تداخل‌سنجی راداری به ارزیابی فرونشست زمین در دشت لیهو[2] در چین پرداخته‌اند [۱۹]. هم‌چنین معتق و همکاران (۲۰۱۷) به‌وسیلهٔ ابزار تداخل‌سنجی راداری فرونشست زمین در دشت رفسنجان را بررسی کرده‌اند [۲۰].

در این پژوهش از آخرین تصاویر Envisat موجود در آرشیو آژانس فضایی ESA برای دشت مشهد استفاده شد و تمامی داده‌های ترازیابی و GPS موجود در دشت مشهد در بازه‌های زمانی مختلف، با نتایج تداخل‌سنجی راداری تلفیق و نرخ فرونشست سالانه با دقت زیاد به‌دست آمد. هم‌چنین برای اولین بار در این پژوهش به ارزیابی علل زمین‌شناختی پدیده فرونشست در محدودهٔ شهر مشهد و حریم اطراف آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

برای ارزیابی سابقه فرونشست در محدودهٔ دشت مشهد و بررسی اثرات آن بر شهر مشهد، از سه روش تداخل‌سنجی راداری[3] ، ترازیابی دقیق[4] و ایستگاه‌های دائم ژئودینامیک (GPS) استفاده شده است. مزیت‌ها و معایت هر یک از این سه روش در جدول ۱ آمده است.

1. Castellazzia
2. Liaohe
3. InSAR
4. leveling

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

در روش ترازیابی، به‌کمک ابزار نقشه‌برداری و با داشتن حداقل دو بازهٔ مشاهداتی امکان بررسی تغییرات سطح زمین و فرونشست زمین در مسیر ترازیابی وجود دارد [۲۱]. سیستم موقعیت‌یاب جهانی GPS[1] سیستمی راهبری و مسیریابی ماهواره‌ای است که از شبکه‌ای با ۲۴ ماهواره تشکیل شده است. ماهواره‌های این سیستم روزی دوبار در مداراتی دقیق به دور زمین می‌گردند و اطلاعاتی را به زمین مخابره می‌کنند. گیرنده‌های GPS این اطلاعات را دریافت و با انجام محاسبات هندسی فاصله‌گیرنده با ماهواره تعیین می‌شود و در پایش فرونشست سطح زمین استفاده می‌شود [۲۲]. روش تداخل‌سنجی راداری، قادر است جابه‌جایی‌های سطح زمین را با قدرت تفکیک زیاد و با پوشش وسیع اندازه‌گیری کند. این روش در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین مورد توجه قرار گرفته است [۲۳]. مهم‌ترین مزیت این روش این است که تغییر شکل در زمان و مکان قابل اندازه‌گیری است. اما به‌دلیل خطاهای زیادی که در حین پردازش تصاویر رادار وجود دارد دقت این روش از دو روش قبلی کم‌تر است و دقتی در حدود ۱-۲cm دارد.

جدول ۱. مقایسه سه روش ترازیابی، تداخل‌سنجی و GPS [۲۴]

	Leveling	Continuous GPS	InSAR
Spatial resolution	1.5—2 Km	10—15 km	25m
Measurement frequency	1 year	1 day	35 day
Measurement (vertical) accuracy	0.5—1 cm	0.5—1 cm	2 cm

ارزیابی فرونشست زمین در دشت مشهد به‌کمک روش‌های ذکر شده در سه بازهٔ زمانی انجام شده است. قدیمی‌ترین اطلاعاتی است که از فرونشست زمین در منطقه موجود است، مربوط به‌روش ترازیابی دقیق است که به‌وسیلهٔ سازمان نقشه‌برداری کشور در دو بازهٔ زمانی ۲۰۰۳-۱۹۹۴ انجام شده است. برای بررسی وسعت و الگوی فرونشست به‌کمک تداخل سنجی راداری، تصاویر ماهواره Envisat برای بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۳ پردازش شده و میزان فرونشست محاسبه شده است. سه ایستگاه دائم GPS، نیز تغییرات سطحی زمین را در

1. Global Positioning System

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

بازهٔ زمانی ۲۰۱٤-۲۰۰۵ ثبت کرده‌اند که جدیدترین داده‌هایی است که برای بررسی فرونشست و هم‌چنین صحت‌سنجی نتایج تداخل‌سنجی راداری استفاده می‌شود.

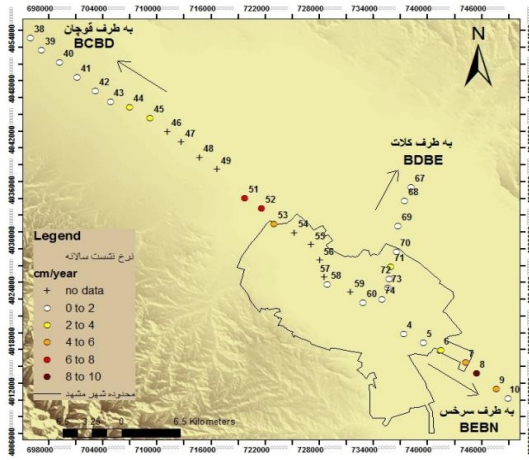
در آخرین بخش به‌منظور بررسی علل رخداد پدیده فرونشست در محدودهٔ بررسی شده، شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی دشت از جمله افت آب زیرزمینی و موقعیت گسل‌ها و مخروطه افکنه‌ها بررسی شده است. هم‌چنین شرایط زیرسطحی، به‌وسیلهٔ مقاطعی طولی و عرضی از بافت خاک تا عمق بیش از ۲۰۰ متری بررسی شده است. در نهایت با توجه به تغییرات تراز آب در آینده، نرخ فرونشست و جهت توسعه فرونشست در محدودهٔ شهر مشهد تخمین زده شده است.

ارزیابی فرونشست زمین در دشت مشهد

مطالعه فرونشست زمین به‌کمک روش ترازیابی در بازهٔ زمانی ۲۰۰۳- ۱۹۹٤

مسیرهای ترازیابی اغلب به موازات جاده‌ها انجام می‌شود. برای دشت مشهد سه خط ترازیابی در سه مسیر مشهد-قوچان(BCBD)، مشهد-کلات (BDBE) و مشهد-سرخس (BEBN) به‌وسیلهٔ سازمان نقشه‌برداری کشور انجام شده است. اولین برداشت در این سه مسیر در سال ۱۹۹٤ انجام شده و دومین برداشت مربوط به سال ۲۰۰۳ است. در شکل ۲ این سه مسیر ترازیابی که به موازات جاده مشهد به‌سمت قوچان، کلات و سرخس است آورده شده است. هر چه رنگ دایره‌ها که بیانگر موقعیت ایستگاه‌های ترازیابی است، تیره‌تر باشد، میزان نشست سالانه بیش‌تر است. مسیر مشهد-قوچان و مشهد-سرخس دشت را به‌صورت طولی و مسیر مشهد-کلات دشت را به‌صورت عرضی قطع می‌کنند. کم‌ترین نرخ نشست سالانه در مسیر مشهد-کلات که دشت را به‌صورت عرضی قطع می‌کند، دیده شده است.

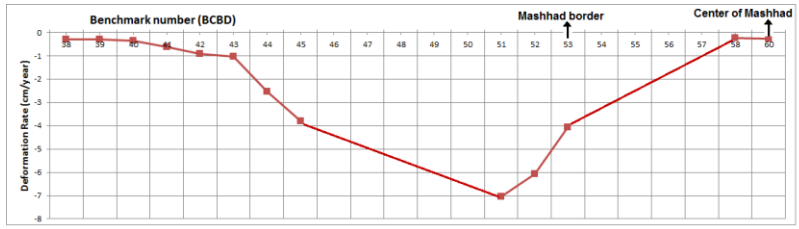
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]



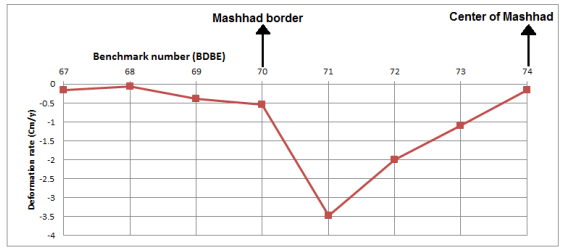
شکل۲. میانگین نرخ نشست در سه مسیر ترازیابی مشهد–قوچان، مشهد–کلات و مشهد–سرخس در بازهٔ زمانی ۲۰۰۳–۱۹۹٤

شکل ۳ میانگین نرخ نشست سالانه در مسیر مشهد–قوچان از بنچ مارک شمارهٔ ۳۸ تا ٦۰ را نشان می‌دهد. بعضی از ایستگاه‌های ترازیابی در طول این سال‌ها تخریب شده‌اند که به‌صورت علامت + در شکل مشخص شده‌اند. به‌طور متوسط فاصلهٔ بنچ مارک‌های ترازیابی حدود km ۲ است. بیش‌ترین نرخ نشست در این مسیر در بازهٔ زمانی ۹ ساله (۲۰۰۳–۱۹۹٤) در بنچ مارک شمارهٔ ۵۱ به‌میزان cm/year ۷ رخ داده است. در مسیر مشهد–کلات بیش‌ترین نرخ نشست در بنچ مارک شمارهٔ ۷۱ و به‌میزان cm/year ۳/۵ است (شکل ٤). هم‌چنین بنچ مارک شمارهٔ ۸ در مسیر مشهد–سرخس بیش‌ترین نرخ نشست را به‌میزان cm/year ۸/۱ نشان می‌دهد (شکل ۵). در مسیر مشهد–قوچان و مشهد–سرخس نرخ نشست بیش‌تری مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۲ و نتایج داده‌های ترازیابی می‌توان بیان کرد که فرونشست زمین در دشت مشهد از ۲۰ سال گذشته شروع شده است. به‌دلیل این‌که قبل از سال ۱۹۹٤ هیچ داده‌ای از فرونشست در دست نیست نمی‌توان در مورد سال ۱۹۹٤ به قبل اظهار نظر کرد. اما هیدروگراف واحد دشت نشان می‌دهد که به‌دلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی از سال ۱۹۸٤ تا کنون افت پیوستهٔ تراز آب زیرزمینی اتفاق افتاده است.

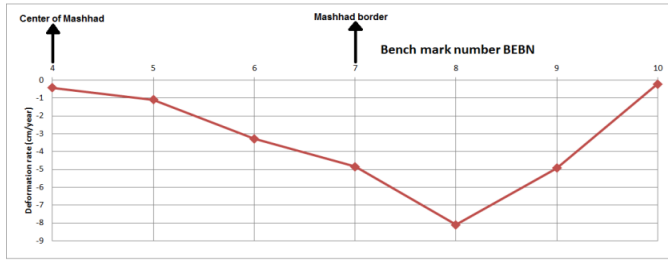
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]



شکل ۳. نمودار میانگین سالانه فرونشست در مسیر ترازیابی مشهد-قوچان BCBD (۲۰۰۳-۱۹۹٤)



شکل٤. نمودار میانگین سالانه فرونشست در مسیر ترازیابی مشهد-کلات BDBE (۲۰۰۳-۱۹۹٤)



شکل ۵. نمودار میانگین سالانه فرونشست در مسیر ترازیابی مشهد-سرخس BEBN (۲۰۰۳-۱۹۹٤)

بررسی فرونشست به‌کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری

تداخل‌سنجی راداری InSAR[1] یکی از روش‌هایی است که در این پژوهش و بسیاری از پژوهش‌های اخیر استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از تصاویر راداری برداشت شده از یک منطقه در زمان‌های مختلف، جابه‌جایی سطح زمین در آن منطقه محاسبه می‌شود. تداخل‌سنجی از ضرب یک تصویر SAR مختلط در مزدوج مختلط تصویر دوم تولید

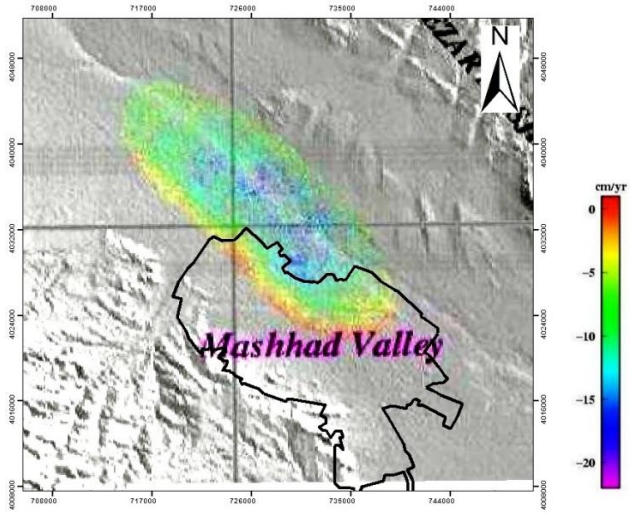
1. Synthetic Aperture Radar Interferometry

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

می‌شود و باعث ایجاد تداخل نگاشت[1] می‌شود. تداخل نگاشت تصویری است که از اختلاف فاز دو تصویر به‌دست آمده در دو زمان مختلف که از نظر هندسی به‌طور دقیق روی هم منطبق شده‌اند، حاصل می‌شود [۲۵]. اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر گویای اختلاف فاصلهٔ عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است. به‌کمک مقدار اختلاف فاز می‌توان متغییرهای مختلف از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین تا کسری از سانتی‌متر را استخراج کرد.

قدیمی‌ترین تصاویر راداری که برای بررسی فرونشست دشت مشهد استفاده شده است، داده‌های راداری مربوط به ماهواره ERS2 برای گذر پایین در بازه‌ای ۹ ماهه از ۱۹۹۸/۰۹/۱٤ تا ۱۹۹۹/۰٦/۲۱ است [۲٦]. در این بازهٔ زمانی، پردازش تداخل‌سنجی راداری به‌روش Stacking و به‌کمک نرم‌افزار Doris با ٤ تداخل نگاشت انجام شده است و مشاهدات تداخل‌سنجی برای این بازه حاکی از رخداد فرونشست است. شکل ٦ نقشه متوسط نرخ فرونشست را برای دشت مشهد نشان می‌دهد. بیش‌ترین نرخ فرونشست ۲۲cm/year به‌دست آمده است [۲٦]. در جدول ۲ لیست بررسی‌های فرونشست با استفاده از داده‌های راداری در دشت مشهد ارایه شده است.



شکل ٦. متوسط نرخ فرونشست برای داده‌های ERS2 در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۱۹۹۹ [۲٦]

1. Interferogram

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

جدول ۲. مشاهدات تداخل‌سنجی راداری و بیش‌ترین نرخ فرونشست سالانه به‌دست آمده در محدودهٔ دشت مشهد

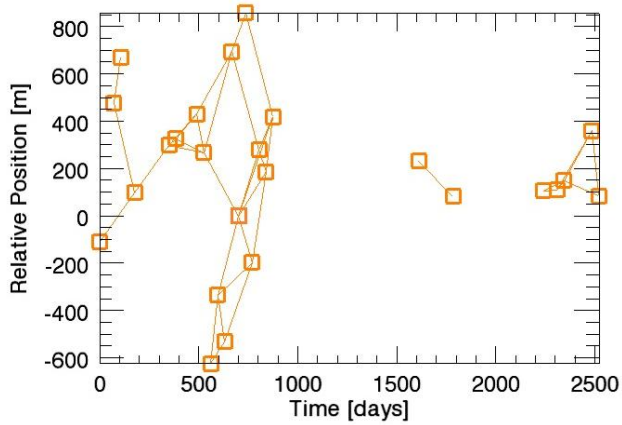
منبع	بازهٔ زمانی	نرم‌افزار	بیش‌ترین نرخ فرونشست سالانه (cm/year)
اکبری ۱۳۸۷	۱۹۹۸–۱۹۹۹	Doris	۲۲
حسینی ۱۳۸٦	۲۰۰۳–۲۰۰۵	GAMMA	۲٤
معتق و همکاران ۲۰۰۷	۲۰۰۳–۲۰۰۵	Doris	۲۸–۳۰
دهقانی و همکاران ۲۰۰۹	۲۰۰۳–۲۰۰٦	GAMMA	۲٤
اکبری و معتق ۲۰۱۱	۲۰۰٤–۲۰۰۷	Doris	۲۵
پژوهش حاضر	۲۰۰۳–۲۰۰۵	SARscape	۲۹
پژوهش حاضر	۲۰۰۹–۲۰۱۰	SARscape	۳۲

بررسی فرونشست زمین به‌کمک روش تداخل‌سنجی راداری در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰ - ۲۰۰۳

در این پژوهش، ۲۳ تصویر راداری ماهواره ENVISAT ASAR, C-band در سطح SLC[1] پردازش شده‌اند. این تصاویر مربوط به گذر ۳۹۲ در بازهٔ زمانی ٦ ژوئن ۲۰۰۳ تا ۲٤ می ۲۰۱۰ و از نوع تصاویر گذر پایین[2] هستند. لازم به یاداوری است که این تصاویر، پس از ارسال پیشنهاد به آژانس فضایی اروپا ESA[3] و بررسی و پذیرش آن به‌وسیلهٔ آژانس در اختیار قرار گرفت و برای پردازش استفاده شد. تحلیل سری زمانی بر مبنای طول خط مبنای مکانی کوتاه انجام شده است. در این روش نقشه سرعت متوسط جابه‌جایی و سری زمانی جابه‌جایی برای نقاط مد نظر به‌دست می‌آید. خط مبنای مکانی کم‌تر از ٤۰۰ متر و خط مبنای زمانی نیز کم‌تر از ٦ ماه در نظر گرفته شده است. خط مبنای زمانی باید تا حد ممکن کوتاه باشد تا اثرات عدم هم‌بستگی زمانی به کم‌ترین مقدار خود برسد. با در نظر گرفتن این شروط، ۳۸ تداخل نگاشت به‌کمک نرم‌افزار ENVI 4.8 و SARscape 4.3 پردازش

1. Single Look Complex
2. Descending
3. European Space Agency

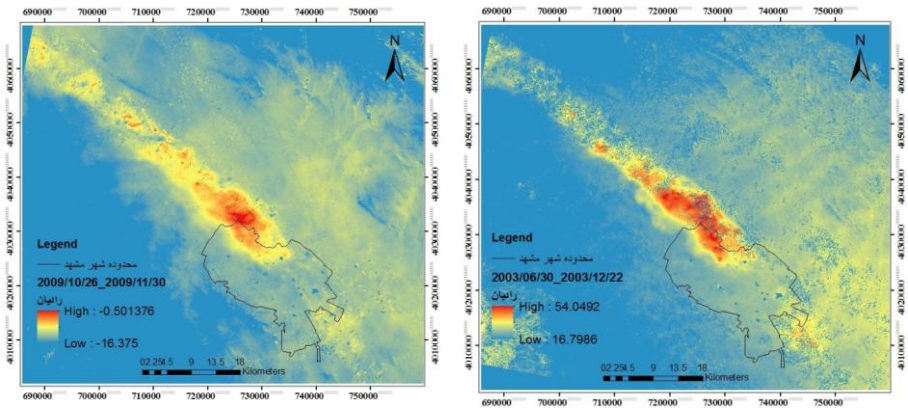
شدند. هندسه اخذ تصاویر راداری و تداخل نگاشت‌های پردازش شده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. هندسه اخذ تصاویر راداری در منطقهٔ بررسی شده

در شکل ۸ دو نمونه تداخل نگاشت قبل از حذف خطای باقی‌مانده مداری و کالیبره شدن با نقطه مرجع آورده شده است.

یکی از این تداخل نگاشت‌ها طول خط مبنای زمانی ۱٦۲ روزه و دیگری ۳٤ روزه دارد. سیگنال مربوط به جابه‌جایی حتی در شکل ۸ ب که خط مبنای زمانی کوتاه دارد، به‌وضوح در مرکز شکل به‌رنگ قرمز مشاهده می‌شود. اعداد لژاندار واحد رادیان دارند.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

شکل ۸. الف) تداخل نگاشت پردازش شده به تاریخ ۲۰۰۳/۱۲/۲۲-۲۰۰۳/۰٦/۳۰

شکل ۸. ب) تداخل نگاشت پردازش شده به تاریخ ۲۰۰۹/۱۱/۳۰-۲۰۰۹/۱۰/۲٦

مرحلهٔ بعدی ایجاد سری زمانی تغییر شکل با استفاده از تداخل نگاشت‌ها است. فاز تداخل نگاشت دارای اثر توپوگرافی، خطای مداری، جابه‌جایی هدف و تأثیرات اتمسفر است. برای حذف اثر توپوگرافی، از مدل ارتفاعی رقومی SRTM[1] با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شده است. هم‌چنین به‌منظور کاهش اثرات اتمسفر و خطای بازیابی فاز، یک شرط نرم‌کنندگی به مسئلهٔ معکوس‌سازی حل کم‌ترین مربعات اضافه شده است. مراحل مختلف الگوریتم مورد استفاده در شکل ۹ آورده شده است. اصول این الگوریتم به‌وسیلهٔ براردینو (۲۰۰۲) [2]ارائه شده است [۳۰].



شکل ۹. نمودار روش تحلیل سری زمانی جابه‌جایی

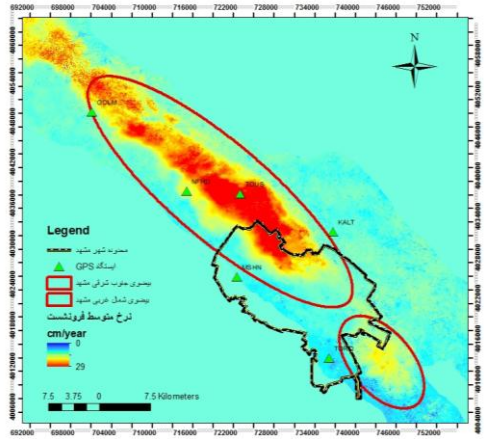
چنان‌که در شکل ۷ مشاهده می‌کنید، تصاویر از لحاظ زمانی پیوستگی ندارند، به‌همین دلیل تحلیل سری زمانی در دو بازهٔ زمانی ۲۰۰۳/٦/۳۰ تا ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ و ۲۰۰۹/۸/۱۷ تا ۲۰۱۰/۵/۲٤ به‌طور مجزا انجام شد. برای مشخص کردن عوارض شاخص فرونشست در سطح زمین و بررسی رفتار بلند مدت فرونشست، نقشه نرخ متوسط فرونشست به‌کمک نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی استخراج شد.

بازهٔ زمانی اول، بازه‌ای دوسال و ۵ ماهه است. بازهٔ زمانی دوم بازه‌ای نه ماهه مربوط به ماه آگوست میلادی معادل شهریور تا ماه می میلادی معادل خرداد است که فصل‌های پاییز و زمستان و بهار را در بر می‌گیرد. بیش‌ترین نرخ فرونشست در اولین بازهٔ زمانی به‌میزان ۲۹ cm/year و در دومین بازهٔ زمانی ۳۲ cm/year است. در جدول ۲ بیش‌ترین نرخ فرونشست سالانه به‌دست آمده از پژوهش حاضر با پژوهش‌های قبلی انجام یافته در دشت

1. Shuttle Radar Topography Mission
2. Berardino

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

مشهد، با توجه به بازهٔ زمانی و نوع نرم‌افزار استفاده شده مقایسه شده است. شکل ۱۰ نقشهٔ نرخ متوسط فرونشست از تاریخ ۲۰۰۳/٦/۳۰ تا ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. نقشهٔ نرخ متوسط فرونشست ۲۰۰۳/٦/۳۰ تا ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ و موقعیت ایستگاه‌های دائم GPS

در این تصویر دو کاسه فرونشستی یکی واقع در شمال غرب و دیگری مربوط به جنوب شرق شهر مشهد مشخص است. بدین‌معنی که از دو جهت فرونشست وارد حریم شهر مشهد می‌شود. منطقه در حال فرونشست جنوب شرق مشهد با بیضوی کوچک مشخص شده و در جنوب روستای قلعه خیابان از توابع بخش رضویه شهرستان مشهد واقع شده است. از سازه‌های مهمی که در این منطقه واقع شده است می‌توان به فرودگاه بین‌المللی شهید هاشمی‌نژاد که روزانه بیش از ۲۰۰ پرواز در آن انجام می‌گردد اشاره کرد. منطقه در حال فرونشست شمال غرب مشهد با بیضوی بزرگ‌تر مشخص شده و جاده مشهد- قوچان در حاشیهٔ جنوب غربی این بیضوی واقع شده است و روستاهای زیادی از جمله عبدل‌آباد، جلالی، قره‌جنگل، عباس‌آباد، بازمرگان و کلاته برفی و هم‌چنین، منطقهٔ توس که آرامگاه فردوسی در آن واقع شده در این بیضوی قرار دارد.

بررسی فرونشست زمین به‌کمک ایستگاه‌های دائم GPS در بازهٔ زمانی ۲۰۰۵ -۲۰۱٤

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

شش ایستگاه دائم GPS به‌وسیلهٔ سازمان نقشه‌برداری کشور برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین در محدودهٔ دشت مشهد نصب شده است. از این میان سه ایستگاه NFRD ، GOLM، TOUS فرونشست زمین را ثبت کرده‌اند و سه ایستگاه دیگر فرونشستی را به ثبت نرسانده‌اند. سری زمانی فرونشست زمین در این سه ایستگاه برای بررسی دقت روش تداخل‌سنجی راداری و مقایسهٔ تغییرات ارتفاعی زمین حاصل از اندازه‌گیری دو روش، در شکل ۱۱ الف، ب و ج آورده شده است. در جدول ٤ مشخصات این ایستگاه‌ها آورده شده است. در شکل ۱۰ نیز موقعیت ایستگاه‌ها نسبت به شهر مشهد آورده شده است. از بین این سه ایستگاه، بیش‌ترین نرخ نشست سالانه را ایستگاه TOUS به‌میزان cm/year ۲۱/۲ ثبت کرده است. ایستگاه NFRD نرخ نشست سالانه cm/year ۷/۸ و ایستگاه GOLM نیز cm/year ۱/۱ را اندازه‌گیری کرده‌اند. نتایج سری زمانی فرونشست زمین تغییرات فصلی مهمی را نشان نمی‌دهد، بدین‌معنی که در طول پائیز و زمستان آبخوان تغذیه نمی‌شود در نتیجه رفتار فرونشست یک رفتار خطی است و رفتار سینوسی ناشی از تغذیه و تخلیه مشاهده نمی‌شود.

جدول ۳. مشخصات ایستگاه‌های دائم GPS واقع در دشت مشهد که فرونشست ثبت کرده‌اند.

نام ایستگاه GPS	بازهٔ زمانی برداشت ایستگاه		کل نشست تجمعی برداشت شده (cm)	میانگین نشست سالانه (cm/year)
TOUS	۲۰۱۱/۱۰/۸۰	۲۰۰۵/۰۱/۰۱	۱٤۳	۲۱
NFRD	۲۰۱۲/۰۵/۰۸	۲۰۰۷/۱۲/۳۰	۳٤	۷/۸
GOLM	۲۰۱٤/۱۲/۲۹	۲۰۰۵/۱۱/۳۰	۹/۹	۱/۱

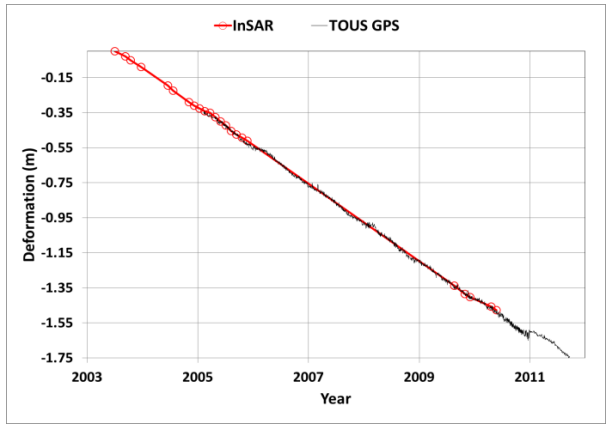
کمیت آماری مجذور میانگین مربعات خطا RMSE[1] که در رابطهٔ ۱ آمده است، خطای پردازش تداخل‌سنجی راداری را به‌کمک نتایج به‌دست آمده از ایستگاه‌های دائم GPS به‌دست می‌آورد. در این فرمول x_i ,$\hat{x}_i$ میزان فرونشست محاسبه شده از دو روش تداخل‌سنجی و GPS است.

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\hat{x}_i)^2} \qquad (۱)$$

1. Root Mean Squared Error

مقدار خطای محاسبه شده برای ایستگاه TOUS، ۰/۹ cm و برای ایستگاه NFRD، ۰/۲cm و برای ایستگاه GOLM, ۰/۳ cm است. با نگاهی به کمیت‌های محاسبه شده می‌توان فهمید که نتایج تداخل‌سنجی راداری تطابق بسیارخوبی با داده‌های GPS داشته و اختلاف میزان فرونشست محاسبه شده در دو روش مذکور کم‌تر از ۱ cm است. این امر مؤید این موضوع است که خطاهای موجود در روش تداخل‌سنجی راداری از جمله خطای اتمسفر و خطای بازیابی فاز تا حد زیادی تعدیل شده است.

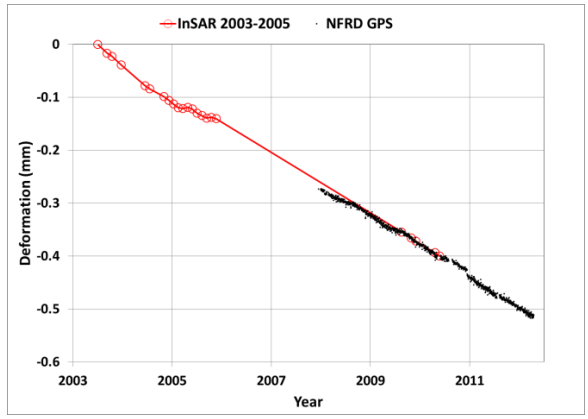
تداخل‌سنجی راداری تغییرات تراز زمین را تا سال ۲۰۱۰ بررسی کرده است. اما ایستگاه‌های GPS اطلاعات جدیدتری را که برای ایستگاه گلمکان تا اواخر سال ۲۰۱٤ است در اختیار قرار می‌دهد. بررسی سری زمانی فرونشست تصاویر ۱۱ الف، ب و ج نشان می‌دهد که سطح زمین با همان نرخی که در بازه ۲۰۱۰-۲۰۰۳ در حال فرونشست بوده است از سال ۲۰۱۰ به بعد نیز فرونشست کرده است. با توجه به این‌که فرونشست زمین در محدودهٔ بررسی شده یک رفتار خطی نشان می‌دهد و این‌که افت سطح آب زیرزمینی در حال افزایش است، می‌توان بیان کرد که تا زمانی که خاک به مرحلهٔ تحکیم ثانویه برسد، با همین نرخ فرونشست ادامه خواهد داشت.



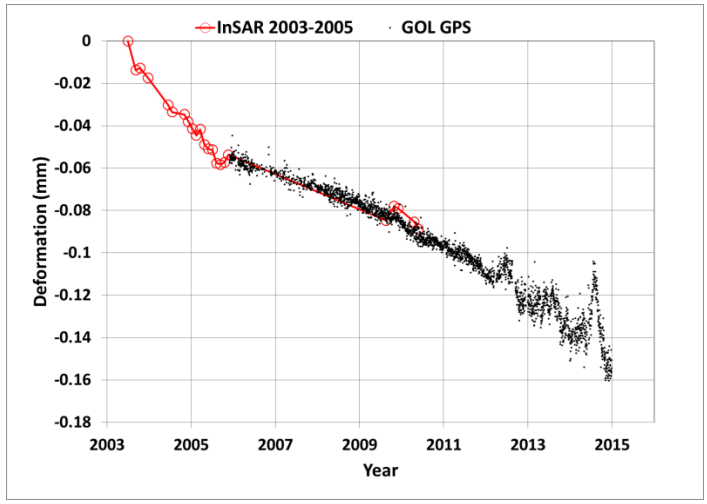
شکل ۱۱. الف) مقایسهٔ مشاهدات پیوسته ایستگاه دائم ژئودینامیک TOUS با نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]



شکل ۱۱. ب) مقایسهٔ مشاهدات پیوسته ایستگاه دائم ژئودینامیک NFRD با نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری



شکل ۱۱. ج) مقایسهٔ مشاهدات پیوسته ایستگاه دائم ژئودینامیک GOL با نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

بحث

زون‌بندی فرونشست

برای بررسی دقیق‌تر پدیده فرونشست و هم‌چنین مقایسهٔ رفتاربلند مدت فرونشست، نقشه‌های نرخ متوسط فرونشست به‌دست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری زون‌بندی شده است. فاصله طبقات در نقشهٔ زون‌بندی نشست cm/year ٥ است که بر این اساس ٦ زون تعریف شده است. شکل ١٢ نقشهٔ زون‌بندی فرونشت مربوط به دو بازهٔ زمانی ٢٠٠٥-٢٠٠٣ و ٢٠١٠-٢٠٠٩ برای کل دشت مشهد را نشان می‌دهد. در جدول ٤، مساحت هر یک از زون‌های هفت‌گانه آورده شده است.

با مقایسهٔ شکل ١٢ الف و ب و هم‌چنین به‌کمک جدول ٤، افزایش نرخ فرونشست و افزایش مساحت مناطق با نرخ بالای فرونشست در طول زمان قابل مشاهده است. چنان‌چه در صد پوشش مساحتی زون‌های شمارهٔ ٥ و ٦ که نرخ فرونشستی بیش از cm/year ٢٠ را دارند، از سال ٢٠٠٥-٢٠٠٣ تا سال ٢٠١٠-٢٠٠٩ روند افزایشی نشان می‌دهد و در صد پوشش مساحتی این مناطق از ٠/٦٣٪ به ٠/٨٧٪ رسیده است.

دقت پژوهش‌ها و عدم قطعیت

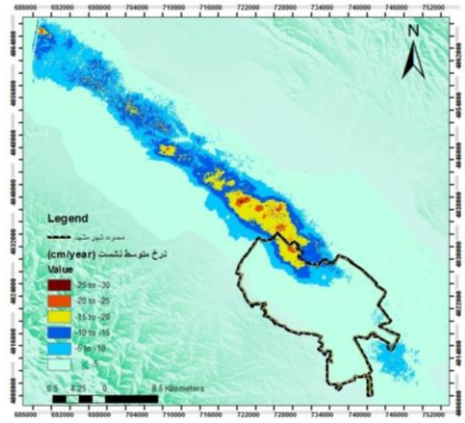
به‌منظور بررسی دقت بررسی‌ها و داده‌های استفاده شده، مختصری به عدم‌قطعیت‌ها در داده‌ها و روش‌های استفاده شده می‌پردازیم. در روش ترازیابی، به‌کمک ابزار نقشه‌برداری و با داشتن دو اپک مشاهداتی فرونشست اندازه‌گیری می‌شود. سری اول مشاهدات در سال ١٩٩٤

جدول ٤. زون‌بندی مساحتی دشت مشهد براساس نرخ فرونشست سالانه

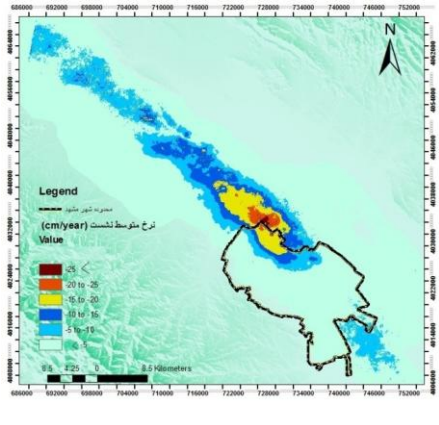
شمارهٔ زون	نرخ نشست سالانه (cm/year)	در صد پوشش مساحتی بازهٔ زمانی ٢٠٠٣-٢٠٠٥	در صد پوشش مساحتی بازهٔ زمانی ٢٠٠٩-٢٠١٠
١	≤٥	٪٧١	٪٧٥/٥
٢	٥-١٠	٪١٥	٪١٤/٤
٣	١٠-١٥	٪٨/٨	٪٦

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435] [DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8] [Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

٤	۱۵–۲۰	٪٤/٥٧	٪۳/۲۳
٥	۲۰–۲٥	٪۰/٦	٪۰/۷٤
٦	۲٥≤	٪۰/۰۳	٪۰/۱۳



شکل ۱۲. الف) زون‌بندی فرونشست بازهٔ زمانی ۲۰۰۵/۱۱/۲۱ تا ۲۰۰۳/٦/۳۰



شکل ۱۲. ب) زون‌بندی فرونشست بازهٔ زمانی ۲۰۱۰/٥/۲٤ تا ۲۰۰۹/۸/۱۷

با دستگاه N3 WILD با دقت ۰/۲ میلی‌متر در یک کیلومتر و سری دوم مشاهدات در سال ۲۰۰۳ با دستگاه DINI12 ZEISS با دقت ۳ میلی‌متر در یک کیلومتر به‌صورت ترازیابی رفت و برگشت انجام شده است [۲۱]. تغییرات ارتفاعی زمین به‌دست آمده از این روش دقت زیادی دارد. اما برداشت‌ها به‌صورت نقاطی در طول یک مسیر خطی و با دوبار تکرار زمانی انجام شده است. روش دیگر استفاده از نتایج تغییرات ارتفاعی زمین به‌دست آمده از ایستگاه‌های دائم GPS است که در این روش نیز خطاهایی همانند خطاهای ایجاد شده تحت تأثیر اتمسفر مؤثر بر انتشار امواج فرستنده از ماهواره و یا تغییرات سازه‌ای و نشست‌های سازه‌ای ایستگاه GPS وجود دارد به‌طورکلی دقت این روش از روش ترازیابی کم‌تر است و دقتی در حدود cm ۱ دارد. اما مزیت این روش این است که داده‌ها به‌صورت روزانه و پیوسته در زمان برداشت می‌شوند. در روش تداخل‌سنجی راداری خطاهای اتمسفری، خطاهای باقی‌مانده توپوگرافی ناشی از DEM، خطای ناشی از عدم هم‌بستگی زمانی و مکانی،

خطا در مرحلهٔ تحلیل سری زمانی، خطاهای مداری و خطا در مرحلهٔ بازیابی فاز وجود دارد که تا حد امکان در این پژوهش تعدیل شده‌اند. به‌گونه‌ای که در مقایسهٔ نرخ فرونشست به‌دست آمده از تداخل‌سنجی راداری و GPS به‌کمک روش میانگین مجذور کم‌ترین مربعات خطا، خطایی کم‌تر از ۱ cm بین دو روش وجود داشته است. مهم‌ترین مزیت این روش این است که تغییر شکل در زمان و مکان قابل اندازه‌گیری است.

بررسی علل فرونشست

برای بررسی تأثیر پارامترهای زمین‌شناختی بر فرونشست، دو مقطع طولی و عرضی از دشت ترسیم شده است. در این مقاطع بافت خاک در گمانه‌های عمیق بهره‌برداری آب و پیزومتری بررسی شده است. هم‌چنین افت آب زیرزمینی در بازهٔ ۲۰۱۰-۱۹۸۷ و نرخ فرونشست سالانه زمین در بازهٔ ۲۰۱۰-۲۰۰۳ که از نتایج داده‌های راداری به‌دست آمده و عمق سنگ کف که از نتایج ژئوفیزیک استخراج شده است نیز محاسبه و ترسیم شده است. به دلیل وجود تأخیر زمانی میان افت آب و فرونشست، بازهٔ زمانی طولانی‌تری برای تغییرات تراز آب انتخاب شده و از قدیمی‌ترین داده‌های موجود استفاده شده است.

موقعیت مقاطع نسبت به محدوده فرونشست در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شکل موقعیت گسل‌های اصلی منطقه نیز مشخص است. گسل‌های منطقه از جنوب به شمال شامل گسل سنگ بست شاندیز، گسل F1 و F2 و F3 و گسل کشف‌رود هستند [۳۱]. چنان‌که در این شکل مشخص است محدودهٔ فرونشست از جنوب محدود به گسل F2 و از شمال محدود به گسل کشف‌رود است که در این محدوده بافت خاک تناوب ریزدانه و درشت دانه است. شکل ١٤ مقطع طولی را نشان می‌دهد که به‌موازات گسل‌های منطقه و رودخانه کشف‌رود در جهت شمال‌غرب جنوب‌شرق است و بیضوی فرونشست را در بخش‌هایی که بیش‌ترین نرخ فرونشست دارد به‌صورت طولی قطع می‌کند. شکل ۱۵ مقطع عرضی از دشت مشهد است که بیضوی فرونشست، رودخانه کشف‌رود و گسل‌های F2 و گسل کشف رود را در جهت جنوب‌غرب- شمال‌شرق قطع می‌کند. پروفیل طولی (شکل ١٤) از نظر نرخ فرونشست به ٤ بخش تقسیم می‌شود. با حرکت از شمال‌غرب به‌سمت

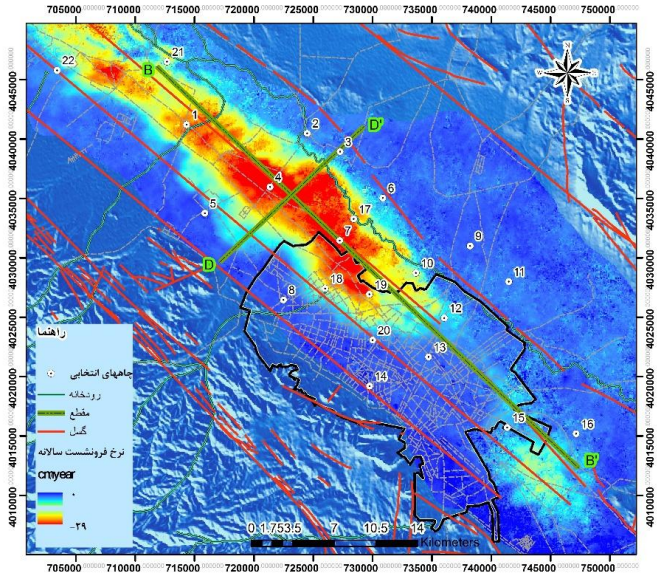
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

جنوب‌شرق، اولین بخش نرخ فرونشست متوسط دارد. در ابتدای مقطع در محدوده گمانه شمارهٔ ۲۱ بافت خاک عمدتاً درشت‌دانه با کمی ریزدانه و افت آب متوسط و ضخامت آبرفت در حدود ۲۰۰ متر است. بنابراین نرخ فرونشست کم‌تر از ۱۵cm/yr ایجاد شده است. بخش دوم از محدوده گمانهٔ شمارهٔ ٤ تا گمانه شمارهٔ ۷ است. در این بخش بافت خاک تناوبی از ریزدانه و درشت‌دانه است و افت آب به بیش از ۳۵ متر با نرخ افت آب سالانه بیش از ۱/۵ متر می‌رسد و ضخامت آبرفت در حدود ۳۰۰ متر است و بیش‌ترین نرخ فرونشست تا بیش از ۳۰ cm/yr در این بخش ایجاد شده است.

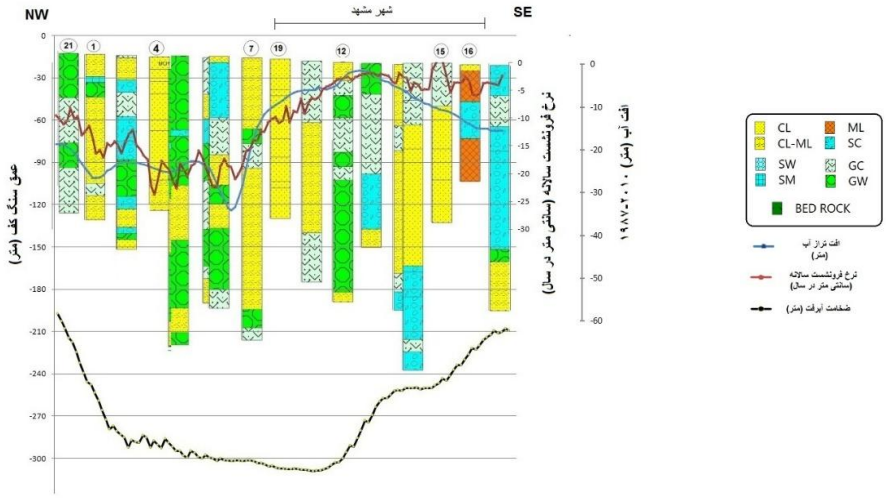
بخش سوم در محدودهٔ شهر مشهد است که از گمانهٔ شمارهٔ ۱۹ شروع می‌شود. در این بخش بافت خاک ریزدانه و رسی است. تحت تأثیر تغذیه آبخوان از پساب شهری، افت آب کاهش می‌یابد و به همان نسبت نیز نرخ فرونشست کاسته می‌شود. بخش چهارم از گمانهٔ شمارهٔ ۱۵ تا انتهای جنوب‌شرقی مقطع است. که مجدداً تراز آب افت کرده اما نرخ فرونشست به‌طور میانگین در حدود ۵ cm/yr است که به‌دلیل بافت درشت‌دانه خاک و ضخامت کم‌تر آبرفت با وجود افت تراز آب، نرخ فرونشست کمی ایجاد شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

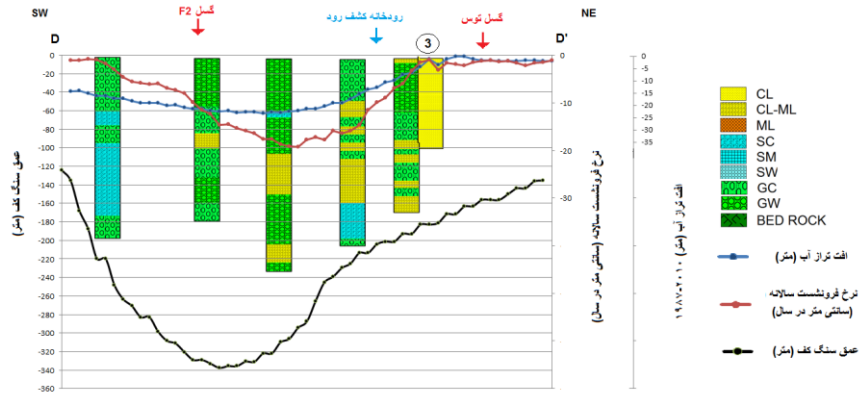


شکل ۱۳. موقعیت مقاطع طولی و عرضی نسبت به محدودهٔ فرونشست به‌همراه موقعیت گسل‌ها و رودخانه



شکل ١٤. مقطع طولی B-B' از بافت خاک به‌همراه نرخ سالانه فرونشست (۲۰۱۰-۲۰۰۳) و افت تراز آب زیرزمینی (۲۰۱۰-۱۹۸۷) و ضخامت آبرفت

در مقطع عرضی شکل ۱۵ با حرکت از جنوب‌غرب به‌سمت شمال‌شرق، از ارتفاعات فاصله گرفته و به کشف‌رود نزدیک‌تر شده و خاک ریزدانه‌تر می‌گردد. در محدودهٔ قبل از گسل F2 با وجود افت آب متوسط ۲۰ متری، به‌دلیل درشت‌دانه بودن خاک و واقع شدن در پای ارتفاعات، نرخ فرونشست کم است. بیش‌ترین نرخ فرونشست بین گسل F2 و رودخانه کشف‌رود است این امر به‌دلیل فراوانی بیش‌تر خاک ریزدانه و افزایش ضخامت آبرفت و افت آب زیرزمینی است. بعد از گمانهٔ شمارهٔ ۳ تا انتهای شمال شرقی مقطع، افت آب و فرونشست مشاهده نمی‌شود و ضخامت آبرفت نیز به کم‌تر از ۱۵۰ متر کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵. مقطع عرضی D-D' از بافت خاک به‌همراه نرخ سالانه فرونشست (۲۰۱۰-۲۰۰۳) و افت تراز آب زیرزمینی (۲۰۱۰-۱۹۸۷) و ضخامت آبرفت

پیش‌بینی نشست در شهر مشهد در آینده با توجه به تکمیل شبکه فاضلاب

فرونشست زمین از محدودهٔ دشت مشهد وارد حریم شمالی شهر مشهد شده است و با توجه به افت فزاینده سطح آب زیرزمینی در منطقه، پیش بینی فرونشست در محدودهٔ شهر مشهد امری ضروری است.

از سال ۲۰۰۶ سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری مشهد، راه‌اندازی شده است [۳۲]. بدین‌معنی که پس از راه‌اندازی آن، فاضلابی که قبلا به‌صورت چاه‌های جذبی وارد آبخوان محدوده مشهد می‌شد، به‌مرور از آبخوان حذف شده است. در سال ۲۰۱۶، ۶۳٪ از جمعیت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

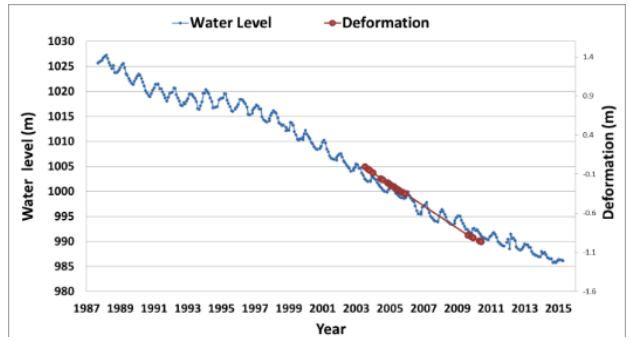
شهر زیر پوشش شبکه فاضلاب بوده است و تا سال ۲۰۳۱ باید کل شهر تحت پوشش شبکه جمع‌آوری فاضلاب قرار گیرد [۳۲]. بدین‌معنی که در سال ۲۰۳۱، ۳۷٪ از فاضلابی که آبخوان را تغذیه می‌کرده است، که حجمی در حدود ٦۲ میلیون مترمکعب دارد، از آبخوان محدودهٔ شهر مشهد حذف می‌شود. اشجاری ۱۳۹٤، اثر سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری مشهد بر آبخوان را مدل کرده است و به این نتیجه رسیده است که پس از تکمیل سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری، در بعضی از بخش‌های آبخوان تا بیش از ۲۰ متر افت تراز آب زیرزمینی ایجاد می‌شود. در نتیجه بالاآمدگی موضعی آب در محدودهٔ شهر مشهد از بین رفته و تبدیل به افت تراز آب می‌شود [۳۲]. در سال‌های اخیر حجم آب انتقالی از سد دوستی کاهش یافته است و به مرور چاه‌های بهره‌برداری آب درون شهر فعال شده است که خود عاملی در افزایش افت تراز آب در محدوده شهری است.

ارزیابی زمین‌شناختی پدیدهٔ فرونشست نشان می‌دهد که بخش‌هایی از شهر مشهد که در جنوب گسل F2 واقع شده‌اند، به‌دلیل کاهش ضخامت آبرفت و بافت درشت‌دانه خاک مستعد فرونشست نیست. اما در بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی شهر که در بین دو گسل F2 و گسل کشف‌رود واقع شده‌اند احتمال رخداد فرونشست در اثر افت تراز آب وجود دارد. بنابر این نرخ افت سالانه سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست سالانه، در سه پیزومتر عسگریه، کلاته برفی و تخم مرز که در مرکز کاسه فرونشستی و در حد فاصل بین گسل F2 و گسل کشف‌رود واقع شده‌اند و از نظر زمین‌شناختی با محدودهٔ شمال‌شرقی شهر مشهد مشابهت دارند، بررسی شده‌اند. موقعیت این سه پیزومتر در شکل ۱۳ (۱ و ٤ و ۷) مشخص است. هیدروگراف سه پیزومتر مذکور به‌همراه سری زمانی فرونشست زمین در محل این سه پیزومتر که از نتایج تداخل‌سنجی راداری استخراج شده است، در شکل ١٦ الف، ب و ج آورده شده است.

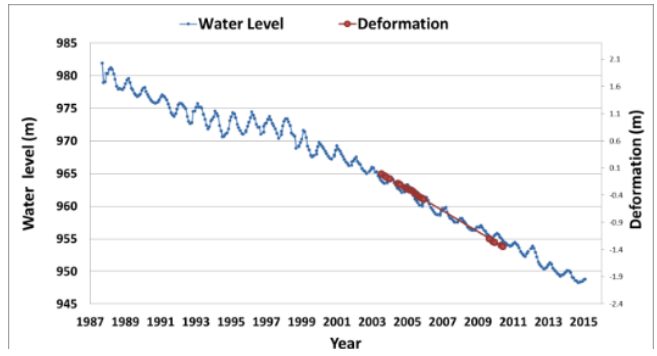
میانگین سالانه افت سطح آب زیرزمینی در این سه پیزومتر ۱/۳ m/year و متوسط نرخ سالانه فرونشست در محل این سه پیزومتر ۱۸ cm/year است. به‌عبارت دیگر به‌ازای هر یک متر افت سطح آب زیرزمینی به‌طور میانگین ١٤ cm فرونشست رخ داده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

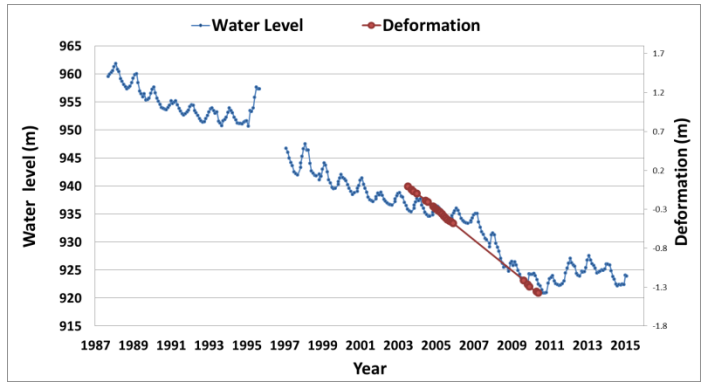
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]



شکل ۱۶. الف) سری زمانی فرونشست و هیدروگراف پیزومتر عسکریه (داده‌های نشست استخراج شده از نتایج پردازش تداخل‌سنجی راداری)



شکل ۱۶. ب) سری زمانی فرونشست و هیدروگراف پیزومتر کلاته برفی (داده‌های نشست استخراج شده از نتایج پردازش تداخل‌سنجی راداری)



شکل ۱۶. ج) سری زمانی فرونشست و هیدروگراف پیزومتر تخم مرز (داده‌های نشست استخراج شده از نتایج پردازش تداخل‌سنجی راداری)

مشابه فرونشستی که در این سه پیزومتر در اثر افت آب ایجاد شده است، احتمالاً در بخش‌های شمال‌شرقی شهر مشهد نیز در اثر حذف پساب شهری از آبخوان و افت تراز آب ایجاد شده و فرونشست چشم‌گیری ایجاد خواهد شد. به‌عبارت دیگر بیضوی فرونشست شمال‌غربی و جنوب‌شرقی که در شکل ۱۰ مشخص است به یک‌دیگر متصل می‌شود. این میزان فرونشست می‌تواند مشکلات زیادی را برای سازه‌ها و زیرساخت‌های شهری ایجاد کند.

نتیجه‌گیری

با ارزیابی طولانی‌مدت فرونشست به‌کمک ابزارهای ترازیابی، تداخل‌سنجی و ایستگاه‌های ژئودینامیک می‌توان نتیجه گرفت که فرونشست زمین در دشت مشهد روندی فزاینده دارد. قدیمی ترین داده‌هایی که از فرونشست زمین در اختیار است مربوط به ترازیابی دقیق است که بیش‌ترین نرخ فرونشست دشت را در بازهٔ زمانی ۲۰۰۳-۱۹۹٤ به‌میزان cm/year ۸ نشان می‌دهد. پردازش تداخل‌سنجی راداری بیش‌ترین نرخ فرونشست سالانه دشت مشهد را در سال ۱۹۹۹-۱۹۹۸، cm/year ۲۲ و در سال ۲۰۰۵-۲۰۰۳، cm/year ۲۹ و در سال ۲۰۱۰-۲۰۰۹، cm/year ۳۲ محاسبه کرده است. سری زمانی ایستگاه‌های دائم GPS نیز ادامه‌ی روند خطی فرونشست را بعد از سال ۲۰۱۰ تأیید می‌کنند. روند توسعه فرونشست تابع شرایط زمین‌شناسی است. با فاصله گرفتن از ارتفاعات و نزدیک شدن به کشف‌رود، توالی رسوبات ریزشونده است. به‌طورکلی در دشت مشهد مستعدترین مناطق برای فرونشست محدوده بین گسل کشف‌رود و گسل F2 است که عمق سنگ کف زیاد و تناوب نهشته‌های ریزدانه و درشت‌دانه داشته و سطح آب زیرزمینی افت شدیدی نشان می‌دهد. به‌استثنا محدودهٔ شهر مشهد که بالاآمدگی سطح آب زیرزمینی دارند، در دیگر بخش‌های دشت بیش‌ترین نرخ فرونشست در همین نواحی دیده شده است. مدل‌های آب زیرزمینی که تغییرات تراز آب زیرزمینی در شهر مشهد را پیش‌بینی کرده‌اند نشان می‌دهند که در صورت تکمیل شبکه فاضلاب شهری و حذف فاضلاب از آبخوان شهر مشهد، افت شدید تراز آب در محدودهٔ شهر مشهد رخ می‌دهد. که این افت آب می‌تواند سبب رخداد فرونشست در بخش‌های شمال شرقی شهر مشهد شود به‌عبارت دیگر. فرونشست از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

شمال‌غرب و جنوب‌شرق به شهر مشهد سرایت می‌کند که می‌تواند مشکلاتی برای این مناطق به‌وجود آورد.

قدردانی

بدین‌وسیله از همکاری آژانس فضایی اروپا (ESA) برای ارسال تصاویر راداری تشکر کرده و هم‌چنین از مرکز پژوهش‌های شورای اسلامی شهر مشهد به‌دلیل حمایت مالی قدردانی می‌کنیم.

منابع

۱. "شرکت مدیریت منابع آب ایران"، شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی (۱۳۹٤)

۲. آقانباتی س. ع.، "زمین‌شناسی ایران"، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ دوم (۱۳۸۵).

۳. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مهندسین مشاور طوس آب، "گزارش آب‌های زیرزمینی مدیریت بهم پیوسته منابع آب حوضه آبریز کشف‌رود" (۱۳۸۷).

٤. "آلبوم نقشه‌ها آب‌های زیرزمینی مدیریت بهم پیوسته منابع آب حوضه آبریز کشف‌رود"، شرکت مهندسی مشاور طوس آب (۱۳۸۷)

۵. شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی، "آمار و اطلاعات پایه منابع آب"، (۱۳۹۵)

٦. هرمن ب، رحمانیان د، "نشست زمین و ایجاد شکاف بر اثر تخلیه آب‌های زیرزمینی"، مجلهٔ آب، شمارهٔ (۱۳٦٤) ۵ ۲۵-۳۵.

7. Terzaghi K., "Principles of soil mechanics: IV- settlement and consolidation of clay", Engineering News-Record., Vol. 95, No. 19, (1925) 874-878.

8. Gambolati G., Teatini P., Ferronato M., "Anthropogenic Land Subsidence", Encyclopaedia of Hydrological Sciences, M.G. Anderson (ed), J. Wiley, Chapter 158, IV (2005) 2444-2459.

9. Motagh M., Djamour Y., Walter T. R., Wetzel H.-U., Zschau J., Arabi S., "Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from

InSAR, levelling and GPS", Geophysical Journal International, Vol. 168, No. 2, (2007) 518-526.

۱۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت منطقهٔ شمال‌شرق، "گزارش بازدید انجام شده از پدیدهٔ نشست زمین و شکاف ایجاد شده در روستای فریزی (منطقه خین عرب) شمال مشهد"، توسط جعفر رکنی (۱۳۸۹).

11. Pratt W. E., Johnson D. W., "Local subsidence of the Goose Creek oil field. Journal of Geology", Vol. 34, No. 7, (1956) 577-590.

12. Meinzer O. E., "Compressibility and elasticity of artesian aquifers", Economic Geology, Vol. 23, No. 3, (1928) 263-291.

13. Tolman C. F., Poland J. F., "Ground-water infiltration and ground-surface recession in Santa Clara Valley, Santa Clara County",California, Transactions American Geophysical Union, Vol. 21, (1940) 23-34.

14. Riley F.S., "Analysis of borehole extensometer data from central California, In Land Subsidence", International Association of Scientific Hydrology, Publication Vol. 89 (1969) 423-431.

15. Dehghani M., "Valadan Zoej M. J., Hooper A., Hanssen R., Entezam I., Saatchi S., "Hybrid conventional and Persistent Scatterer SAR interferometry for land subsidence monitoring in the Tehran Basin", Iran, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.79, (2013) 157-170.

١٦. نامقی ه.، "بهینه‌سازی چندهدفه در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با رویکرد کاهش نشست"، پایان‌نامه دکتری، گروه عمران-هیدرولیک، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۲).

17. Castellazzia P., Arroyo-Domínguezb N., Martela R., Calderheada A., Normandc J., Gárfiasb J., Rivera A., "Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 47, (2016) 102-111.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]

18. Amighpey M., Arabi S., "Studying landsubsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and leveling measurements", Remote Sensing Applications, Society and Environment, Vol. 4, (2016) 1-8.

19. Sun H., Zhang Q., Zhao C., Yang C., Sun Q., Chena W., "Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique", Remote Sensing of Environment, Vol. 188, (2017) 73-84.

20. Motagh M., Shamshiri R., Haghshenas Haghighi M., Wetzel H., Akbari B., Nahavandchi H., Roessner S., Arabi S., "Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements", Engineering Geology, Vol. 218, (2017) 134-151.

۲۱. آمیغ پی م.، عربی س.، طالبی ع.، جمور ی.، "بررسی مناطق فرونشست در ایران با استفاده از روش ترازیابی دقیق"، نشریه نقشه‌برداری، سال بیستم، شمارهٔ ۱۰٤ (۱۳۸۸).

22. Buckley S. J., Mills J. P., Clarke P. J., Edwards S. J., Pethick J. S., Mitchell H. L., "Synergy of GPS, digital photogrammetry and InSAR in coastal environments", Miami. Florida. USA (2002).

23. Fruneau B., Sarti F., "Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation from atmospheric", Geophysical Research Letters, Vol. 27, No. 24, (2000) 3981-3984.

24. Hung W. C., Hwang C., Chang C. P., Yen J. Y., Liu C. H., Yan W. H., "Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan", Environmental Earth Sciences, Vol. 59, (2010) 1535-1548.

25. Daniel R. C., Maisons C., Carnec S., Mouelic L., King C., Hosford S., "Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry

on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement", Remote Sensing of Environment, Vol. 88, (2003) 468-478.

٢٦. اکبری و.، "نظارت بر فرونشست زمین ناشی از استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد با استفاده از سری زمانی تکنیک تداخل‌سنجی راداری و مقایسه با مشاهدات ژئودتیک"، دانشگاه تهران، گروه مهندسی نقشه‌برداری و ژئوماتیک (١٣٨٧).

٢٧. حسینی م.، "تلفیق داده‌های InSAR و GPS در تعیین جابه‌جایی ناشی از فرونشست"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی (١٣٨٦).

28. Dehghani M., Valadan Zouj M. J., Saatchi S., Biggs J., Parsons B., Wright T., "Radar Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence", Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 37, (2009) 191-200.

29. Akbari V., Motagh M., "Improved Ground Subsidence Monitoring Using Small Baseline SAR Interferograms and a Weighted Least Squares Inversion Algorithm", IEEE geoscience and remote sensing, Vol. 9, No. 3, (2011) 437-441.

30. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., "A New algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, (2002) 2375-2383.

31. Hafezi Moghaddas, N., Leo, C., Rahimi, B., Azadi, A., "Morpho-tectonics and geoelectric method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain", Northeast of Iran, Geopersia, Vol. 8, No. 1 (2018) 13-26. doi: 10.22059/GEOPE.2017.230489.648312

٣٢. اشجاری ج.، "اثر سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری مشهد بر آبخوان با استفاده از مدل ریاضی"، سی و چهارمین گردهمایی و دومین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم‌زمین، ایران-تهران (١٣٩٤).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.3.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435]