



نسخه از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (سال دوازدهم / شماره سوم) پاییز ۱۴۰۰

نمایه شده در سایت: پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، جهاد دانشگاهی، مگ ایران، نورمگز، سیولیکا، گوگل اسکولار
آدرس وب سایت : <http://girs.iaubushehr.ac.ir>



مقاله پژوهشی

ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب‌های زیرزمینی به کمک داده ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد)

سعید قره چلو، حسام اکبری قوچانی، سعید گلین، کامران گنجی

دریافت: ۲ بهمن ۱۳۹۹ / پذیرش: ۱۴ اسفند ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۱ مهر ۱۴۰۰

چکیده

دشت مشهد یکی از دشت‌های مهم در استان خراسان رضوی است که یکی از منابع آبی پشتیبان برای استفاده در کشاورزی و صنعت است. فشار بیش‌ازحد به منابع آب زیرزمینی با پمپاژ زیاد و کمبود بارش باعث شده که تغذیه آبخوان به‌خوبی صورت نگیرد. افت سطح آب زیرزمینی در دشت مشهد اثرات نامناسبی را بر آبدهی چاه‌ها، تخریب قنوات، کیفیت آب و فرونشست زمین را در نتیجه خواهد داشت. در این تحقیق، میزان فرونشست با استفاده از داده ماهواره‌های راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ در ارتباط با افت آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا از داده‌های سری زمانی راداری چندباندی در طول موج L و C برای تعیین فرونشست در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۶ استفاده گردید.

پیشینه و هدف در سال‌های اخیر پمپاژ بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی و همچنین کاهش بارندگی در دشت مشهد فرونشست را ایجاد کرده است که خسارت‌هایی را برای زیرساخت‌ها در پی داشته است. این مشکل به خاطر افزایش تقاضای برداشت آب از چاه‌های عمیق برای کشاورزی، صنایع و شرب است. به دنبال این تقاضای روزافزون حفر چاه‌های غیرمجاز نیز افزایش چندانی پیدا کرده است، بنابراین سطح آب زیرزمینی دشت دایم در حال پایین رفتن بوده و نرخ فرونشست دشت در حال افزایش است.

سعید قره چلو^۱، حسام اکبری قوچانی^۲، سعید گلین^۳، کامران گنجی^۴

۱. استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲. کارشناسی ارشد گروه منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳. دانشیار گروه منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴. کارشناسی ارشد گروه سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات : sgharachelo@shahroodut.ac.ir

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.1.2>

مواد و روش‌ها هدف اصلی این تحقیق یافتن میزان فرونشست مرتبط با آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد بین سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۶ با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری است. برای دست یافتن به این هدف سه سری جفت تصویر از هر یک از داده‌های راداری الوس-۱ و سنتینل-۱ استفاده شد. برای آنالیز افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت مشهد در ارتباط با فرونشست از داده چاه‌های پیژومتری موجود برای بازه سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۵ استفاده گردید تا بر اساس آن مدل نقشه هم‌افت و منحنی تراز افت آب تهیه گردید. این نقشه‌ها برای روشن کردن ارتباط بین افت سطح

به مساحت ۳۱۲ کیلومتر مربع با درازای به طول ۳۹ کیلومتر و پهنای به طول ۸ کیلومتر معرفی نمود. جهت بررسی صحت نتایج حاصل از تداخل سنجی، به دلیل نبود رودخانه دائمی در منطقه عمده نیاز آبی مربوط به کشاورزی، صنعت و شرب به وسیله برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی انجام می‌شود.

نتیجه‌گیری یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که مناطق دارای نرخ حداکثر فرونشست منطبق بر کاربری‌های زراعی و باغات است که بیشترین سهم را در برداشت از آب‌های زیرزمینی دارا می‌باشند. همچنین نقشه و نمودارهای حاصل از بررسی چاه‌های پیژومتری بیانگر کاهش پیوسته سطح آب در طول دوره آماری می‌باشند. براساس نتایج تحقیق مهم‌ترین علت فرونشست در دشت مشهد برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی است. از طرفی نرخ و دامنه فرونشست در منطقه برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ استخراج شده که نشان‌دهنده روند افزایش پدیده فرونشست در منطقه است. همچنین مشاهدات میدانی هم فرضیه افزایش میزان فرونشست در دهه اخیر را تأیید می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: تداخل سنجی راداری، فرونشست زمین، افت آب‌های زیرزمینی، دشت مشهد

آب و فرونشست دشت استفاده شدند. در نهایت نقشه فرونشست دشت با استفاده از مشاهدات زمینی و کارهای گذشته مورد ارزیابی قرار گرفتند. با مقایسه نقشه فرونشست منطقه با نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی همبستگی پذیرفته‌ای به دست آمد که حکایت بر میزان تأثیرپذیری پدیده فرونشست از افت سطح آب زیرزمینی دارد. نتایج نهایی فرونشست با تحقیقات پیشین مقایسه و با مشاهدات زمینی ارزیابی شدند.

نتایج و بحث نتایج تداخل سنجی راداری نتایج حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری برای ماهواره ALOS در این تحقیق، بیانگر بیشینه نشست ۵/۲ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۰۷/۱۰/۱۶ تا ۲۰۰۸/۰۱/۱۶ (طی ۹۲ روز)، بیشینه نشست ۳/۸ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۰۸/۰۱/۱۶ تا ۲۰۰۸/۰۳/۰۲ (طی ۴۶ روز) و بیشینه نشست ۴/۷ از تاریخ ۲۰۰۸/۰۳/۰۲ تا ۲۰۰۸/۰۶/۰۲ (طی ۹۲ روز) است. همچنین نتایج حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری برای ماهواره Sentinel-1 بیانگر بیشینه فرونشست ۱۶/۱ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۲۸ تا ۲۰۱۶/۰۵/۲۲ (طی ۳۶۰ روز)، بیشینه نشست ۱۷/۴ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۱۶/۰۵/۲۲ تا ۲۰۱۷/۰۵/۲۹ (طی ۳۷۲ روز) و بیشینه فرونشست ۲۰/۳ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۱۷/۰۵/۲۹ تا ۲۰۱۸/۰۵/۲۴ (طی ۳۶۰ روز) است. توزیع نواحی فرونشست یافته عمدتاً در منطقه مرکزی و جنوب شرقی دشت (شمال غربی شهر مشهد) مشاهده شده است. همچنین یافته‌های تحقیق دامنه منطقه فرونشست را در سطحی

مقدمه

مخاطره انداختن زندگی، مستعد فرونشست هستند ضروری به نظر می‌رسد (۲).

در ایران این پدیده به دلیل همراه شدن شرایط اقلیمی و همچنین تسلط شرایط بیابانی بر یک‌چهارم از مساحت ایران و سوء مدیریت منابع زیرسطحی به‌ویژه آب، نرخ رو به رشدی داشته است. به‌طوری‌که قریب به نیمی از ۶۰۰ دشت کشور در معرض فرونشست قرار دارد. همچنین مطالعات صورت گرفته در بیش از ۳۵ دشت کشور ارقام نسبتاً بزرگی از نرخ فرونشست را معرفی می‌نماید که در مواردی، روزانه به بیش از یک میلی‌متر نیز می‌رسد (۲۵). دو نوع روش غیرمستقیم و مستقیم برای محاسبه میزان فرونشست زمین وجود دارد، روش غیرمستقیم که شامل، مدل‌سازی ریاضی و مدل‌های رستر پایه است، و روش مستقیم که شامل اندازه‌گیری تغییرات تراز در نقاط تراز ارتفاعی به کمک سیستم موقعیت جهانی (GPS)، ابزار تراکم‌سنج و روش تداخل‌سنجی رادار دریاچه مصنوعی (InSAR) است. تداخل‌سنجی داده‌های راداری (InSAR) در بین روش‌های متنوع و گوناگون آشکارسازی تغییرات پوسته‌ی زمین به‌عنوان بهترین روش اندازه‌گیری پیوسته این تغییرات مطرح است (۶).

از اوایل دهه ۱۹۹۰ با عملیاتی شدن ماهواره‌های راداری، تداخل‌سنجی راداری نیز به‌صورت گسترده مورد استفاده متخصصان علوم زمین قرار گرفت (۱ و ۱۹). این تکنیک برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های حاصل‌شده از زمین‌لرزه، آتشفشان، حرکات توده‌ای، جابه‌جایی یخچال‌ها و پدیده‌های فرونشست و روانگرایی با موفقیت به کار گرفته‌شده است (۱۲). با توجه به اهمیت موضوع فرونشست محققین زیادی در داخل و خارج از کشور به تحقیق پرداختند. مقصودی و همکاران (۱۶) با استفاده از تصاویر Sentinel-1 و ALOS در دو منطقه غرب اندونزی در بازه زمانی ۲۰۰۷-۲۰۰۹ و ۲۰۱۵-۲۰۱۶ با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به پایش زمین اقدام کردند که در این تحقیق در اطراف چاه‌های تزریق منطقه بالآمدگی سطح زمین مشاهده شد.

فرونشست پدیده‌ای مورفولوژیکی است که در اثر پایین رفتن سطح زمین به وجود می‌آید. این پدیده می‌تواند متأثر از عواملی مانند انحلال شیمیایی، برداشت منابع آب زیرزمینی، برداشت منابع معدنی، برداشت منابع نفت و گاز، آتش‌سوزی زیرزمینی و نهایتاً حرکات تکتونیکی روی دهد. هرچند رخداد این پدیده از فرکانس و توالی نسبتاً زیادی برخوردار است، لیکن به‌واسطه حرکت بسیار کند و آرام زمین در اغلب مواقع درک و اندازه‌گیری آن به‌درستی میسر نیست. بدین سبب رویداد این پدیده در اغلب نواحی تنها زمانی قابل‌شناسایی است که در مورفولوژی سطحی و به‌خصوص در تأسیسات و تجهیزات اثر گذارده و تخریب و خسارتی بی‌آورد (۱۴). این پدیده طبیعی در پاره‌ای مواقع به سبب تشدید و تحریک عوامل به وجود آورنده آن مانند افزایش فشار در بهره‌برداری و یا بهره‌برداری خارج از ظرفیت ترمیمی منابع آب زیرزمینی دشت‌ها (بهره‌برداری بی‌رویه)، روند و دامنه گسترده‌ای به خود گرفته، علاوه بر ایجاد ترک‌های فراوان در سطح زمین، تبدیل به مخاطره و تهدید برای انسان و دستاوردهای انسانی می‌شود (۲۴).

ایجاد فروچاله، جابه‌جایی، شکست و ترک در سطح زمین، کج‌شدگی تأسیسات مرتفع، آسیب‌دیدگی تأسیسات کشاورزی تخریب و شکستگی پل‌ها، راه و شبکه معابر شهری و غیره از جمله عمومی‌ترین خسارات و تهدیدات حاصل از تشدید پدیده فرونشست است (۲۳).

این پدیده در سطح زمین به‌صورت جابه‌جایی‌های عمودی نمود دارد که از مقیاس میلی‌متر تا متر و در محدوده‌ای وسیع حادث می‌گردد (۸). طبق گزارش کارشناسان، نزدیک به ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا در معرض این مخاطره قرار دارند. از جمله این مناطق می‌توان به مکزیکوسیتی (مکزیک)، لاس‌وگاس، بانکوک (تایلند) و شانگهای (چین) نام برد (۱۸). نشانه اولیه این پدیده به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی همیشه قبل از وقوع ریزش قابل‌مشاهده نیست، به همین دلیل تشخیص و نمایان‌سازی نواحی که به دلیل خطرپذیری و به

دنبال داشته است. لشکری‌پور و همکاران (۱۵) مکانیسم فرونشست شمال‌غرب دشت مشهد را بررسی کردند و علت اصلی این فرونشست را افت شدید سطح آب زیرزمینی در این ناحیه در طول ۴۰ سال گذشته بیان کردند. بررسی ایستگاه GPS طوس که در شمال‌غرب مشهد واقع است، نرخ نشست ۲۰ سانتی‌متر در سال را نشان داد. مقدار پایین آمده سطح آب با توجه به جنس لایه خاک و اندازه‌ی دانه‌ها متفاوت است و نتایج حاکی از اثر نرخ بیشتر کاهش تراز آب بر فرونشست در مناطق با خاک ریزدانه است که به خاطر پدیده‌ی تحکیم است. صالحی متعهد و همکاران (۲۴) به مطالعه پایش دقیق نرخ فرونشست سالانه دشت مشهد در سال ۲۰۱۰ با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناختی و هیدروژئولوژیکی پرداختند، در این تحقیق با کمک ۲۳ تصویر ماهواره ENVISAT به روش تداخل‌سنجی راداری محدوده‌ای به وسعت ۱۳/۷ کیلومتر مربع با نرخ بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال در حال فرونشست شناسایی شد. بیشترین نرخ فرونشست در مناطق با افت شدید سطح آب زیرزمینی، بافت خاک ریزدانه و ضخامت آبرفت زیاد ایجاد شده است.

زهری و همکاران (۲۸) فرونشست دشت مشهد در مناطق کشاورزی را اندازه‌گیری نمودند، آن‌ها از ۲۶ تصویر راداری ENVISAT بین سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸، ۱۳ تصویر راداری ALOS بین سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ و ۲۴ تصویر TerraSAR-X بین سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ استفاده کردند. ترکیب سه باند C، L و X مورد استفاده قرار گرفت که کل فرونشست در این زمان برابر با ۱۷۰ سانتی‌متر محاسبه شد.

اکبری و متاق (۱) فرونشست دشت مشهد را به روش تداخل‌سنجی راداری با الگوریتم SBAS و روش اصلاحی وزن‌دهی حداقل مربعات انجام دادند. ۱۷ تصویر ماهواره‌ی ENVISAT بین سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ استفاده کردند که ۸۶ سانتی‌متر نشست در ۱۲۸۰ روز (معادل ۲۴ سانتی‌متر در سال) رخ داده است. مقایسه نتایج با داده‌های GPS خطای حداکثری یک سانتی‌متر را نشان داده است.

کالو و همکاران (۵) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به مطالعه منطقه کنیا یکی از مراکز پیشرو در بخش کشاورزی و صنعتی ترکیه پرداختند. در این تحقیق با استفاده از ماهواره ENVISAT منطقه مورد نظر از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن شناسایی منطقه‌ای به مساحت ۱۲۰۰ کیلومتر مربع با نرخ فرونشست سالانه ۱۰ سانتی‌متر مشاهده شد. با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و هواشناسی و چاه‌های پیژومتری منطقه علت فرونشست برداشت از آب زیرزمین بیان شد.

گاوو و همکاران (۹) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به مطالعه دشت پکن اقدام کردند، در این تحقیق ۴۷ تصویر TerraSAR-X از بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ مورد ارزیابی قرار گرفت که حداکثر نرخ سالانه فرونشست زمین از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ برابر ۱۴۶ میلی‌متر در سال اندازه‌گیری شد که علت اصلی آن استفاده از آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی بیان شد.

زارع کمالی و همکاران (۲۷) فرونشست دشت تهران را با استفاده از داده‌های TerraSAR-x و ASAR و تکنیک‌های DInSAR و SBAS مورد مطالعه قرار دادند. بازه زمانی این تصاویر به ترتیب ۱۶۸۰ و ۱۸۷ روز بود. پس از پردازش تصاویر، نقشه‌های جابجایی سطح زمین برای تمامی تاریخ‌ها نسبت به تصویر اولیه محاسبه شد و نقشه میزان جابجایی عمودی سطح زمین در روز برای هر سنجنده تهیه گردید. بررسی نتایج دو سنجنده نشان داد که میزان نشست برای سنجنده ASAR به‌طور میانگین ۰/۷۶۱ میلی‌متر در روز و برای سنجنده TerraSAR-x به‌طور میانگین ۰/۷۷۷ میلی‌متر در روز است.

آروین و همکاران (۴) فرونشست حوضه آبخیز میناب در جنوب کشور را با استفاده از داده‌های راداری Sentinel-1 سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ و روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) مورد بررسی قرار دادند. حوضه میناب در سال‌های گذشته با برداشت بی‌رویه از چاه‌های عمیق موجب عدم تعادل آبخوان منطقه شده و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی را به

مواد و روش‌ها

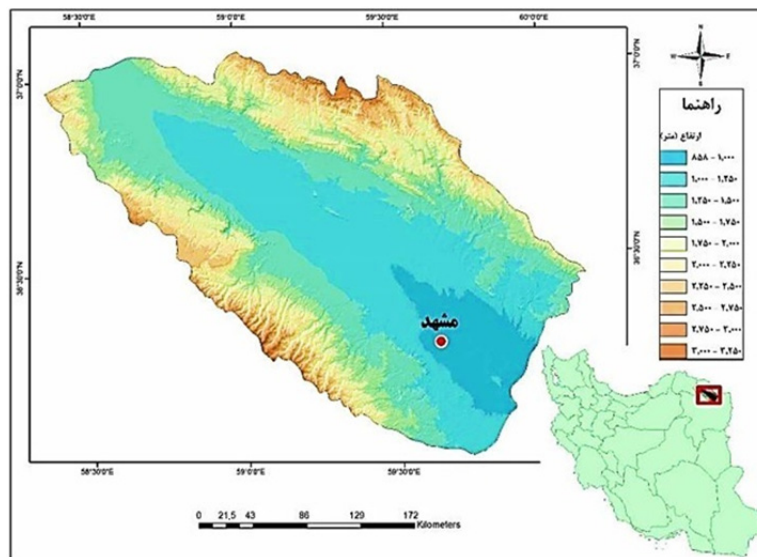
منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی دشت مشهد واقع در استان خراسان رضوی است. این منطقه محل تلاقی ۳ حوضه آبریز قره قوم، کویر مرکزی ایران و اترک است. دشت مشهد در محدوده عرض شمالی $35^{\circ} 59'$ تا $37^{\circ} 02'$ و طول شرقی $58^{\circ} 22'$ تا $60^{\circ} 07'$ جزو حوضه درجه یک قره قوم و در حوضه درجه دو کشف رود قرار دارد. این محدوده در شمال استان خراسان رضوی واقع شده و از شمال به خطالرأس ارتفاعات هزار مسجد (کپه داغ)، از جنوب به ارتفاعات بینالود و از شمال غرب به حوضه آبریز اترک محدود می‌گردد.

مساحت کل محدوده مطالعاتی تا محل خروجی دشت (کال تنگل شور) ۹۹۰۹ کیلومترمربع است که ۳۳۵۱ کیلومترمربع آن را دشت و ۶۵۵۸ کیلومترمربع آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. طول کشیدگی حوضه حدود ۱۵۰ کیلومتر و از اراضی آبرگر، دلو در ۹ کیلومتری شرق جاده قوچان- مشهد شروع و به کال تنگل شور ختم می‌گردد. بلندترین نقطه ارتفاعی حوضه ۳۳۰۰ متر در قله بینالود و کمترین آن ۸۸۰ متر در محل خروجی دشت است. جهت شیب زمین از شمال غرب به جنوب شرق است (شکل ۱).

دشت مشهد مهم‌ترین دشت استان خراسان رضوی است که آب زیرزمینی منبع اصلی جهت تأمین نیازهای آبی خصوصاً کشاورزی محسوب می‌گردد. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی منطقه از یک طرف و کاهش نزولات جوی و به تبع آن کاهش تغذیه مخزن آب زیرزمینی در برخی از سال‌ها از طرف دیگر، سبب گردیده که سطح آب زیرزمینی دشت به طور مستمر افت نماید. افت شدید سطح آب زیرزمینی اثرات نامطلوب مختلفی را در دشت مشهد موجب گردیده است که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش آبدهی و یا خشک شدن تعدادی از چاه‌ها و قنات، کاهش کیفیت آب زیرزمینی و وقوع پدیده فرونشست در برخی از نواحی آن اشاره نمود (۱۷ و ۲۵).

با توجه به مصرف بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد، این منطقه از استعداد فرونشست زیادی برخوردار است که می‌تواند در آینده‌ای نه‌چندان دور باعث به وجود آمدن مشکلات جانی، مالی و حتی اقتصادی در سطح کلان را در پی داشته باشد. در همین راستا هدف تحقیق حاضر محاسبه میزان فرونشست دشت مشهد واقع در شمال خراسان رضوی، به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از داده‌های ماهواره‌های راداری Sentinel-1 در باند C و PALSAR و ALOS در باند L است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، دشت مشهد

Fig.1. Study area location in Iran and Mashhad plain

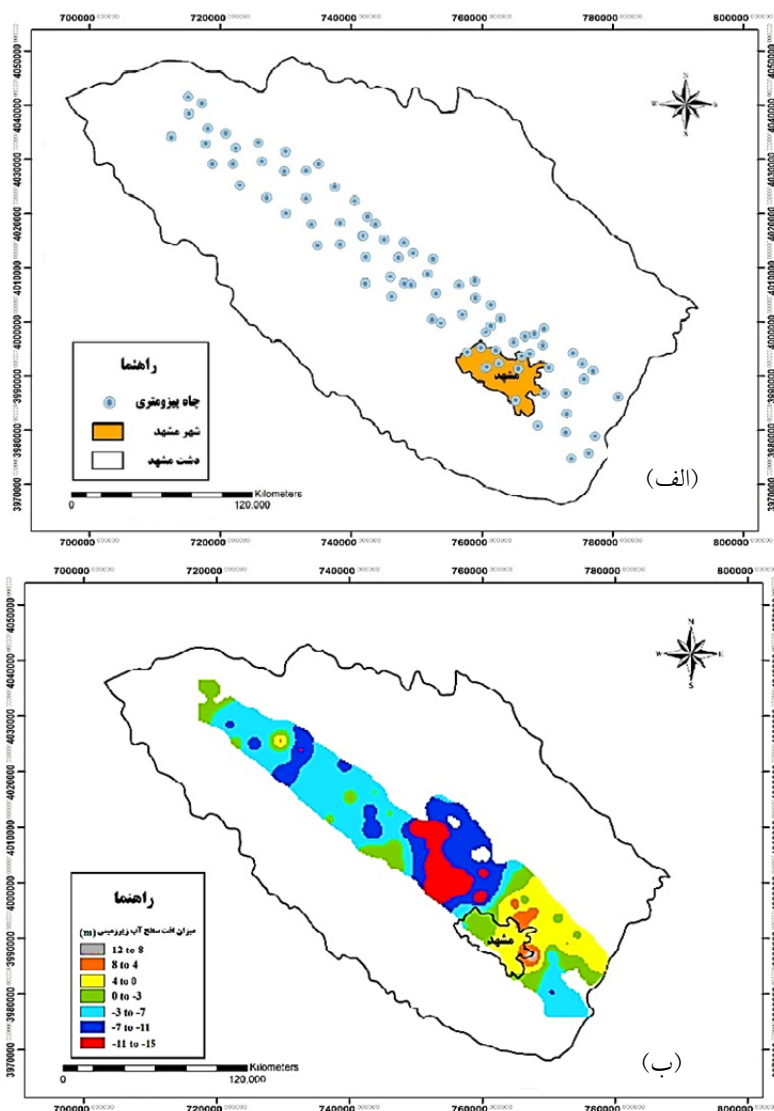
در ارتفاعات و دشت محدوده مشهد به ترتیب $3/3$ و $4/8$ و $3/3$ میلی‌متر برآورد گردیده است. پرباران‌ترین ماه سال، فروردین ماه $47/1$ میلی‌متر و کم باران‌ترین آن در شهریورماه با $1/4$ میلی‌متر محاسبه شده است (۲۲). اقلیم دشت مشهد با توجه به روش دومارتن در اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد.

سفره آب زیرزمینی دشت مشهد با بیش از 3000 کیلومترمربع وسعت از حدود 10 کیلومتری جنوب شرقی شهر قوچان شروع شده و در جهت جنوب شرقی مابین دو رشته‌کوه بینالود و هزار مسجد ادامه می‌یابد. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در دشت مشهد از شمال غرب به سمت جنوب شرق است. از نظر نفوذپذیری دامنه جنوبی دشت ضخیم‌تر و نفوذپذیرتر است. ضخامت لایه آبدار در محدوده دشت مشهد متغیر بوده و دامنه تغییرات آن از 20 متر در محدوده خروجی دشت تا 150 متر در حاشیه ارتفاعات جنوبی تغییر می‌کند. تعداد چاه‌های موجود در دشت 6716 حلقه، چشمه‌ها 656 دهانه و قنات‌ها 1084 رشته است (۲۱). تغییرات و افت سطح آب در طول 11 سال، از سال 1385 تا 1396 با استفاده از داده‌های چاه‌های پیژومتری شکل ۲، از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت و در سطح دشت بررسی و سطح آب در 85 گمانه در یک فایل اکسل تهیه گردید. سپس با استفاده از

محدوده مطالعاتی دشت مشهد به لحاظ جایگاه زمین‌شناسی در حدفاصل دو زون زمین‌شناسی کپه داغ و بینالود واقع می‌شود. زون بینالود با روند شمال غرب- جنوب شرق در امتداد زون البرز شرقی است که تا کشور افغانستان امتداد می‌یابد. زون کپه داغ که قسمت شمالی دشت مشهد را شامل می‌شود، با روند شمال غرب - جنوب شرق کل بخش شمالی حوضه تلفیق قره‌قوم را شامل می‌شود (۲۰). مطالعات اخیر در دشت مشهد نشان می‌دهد که دشت مشهد از نظر ساختاری یک ناودیس باز است که از دو طرف توسط گسل‌های طولی بریده شده است. در سمت شمال دشت گسل معکوس راست‌گرد کشف رود با شیب به طرف شمال سبب بالا آمدن و رخنمون نهشته‌های مارنی شده است. شاخه‌ای از گسل کشف‌رود بعد از ناحیه توس از محدوده شمالی شهر مشهد در ناحیه خواجه ربیع عبور می‌کند که به گسل توس نام‌گذاری شده است (۲۱). همچنین اغلب کاربری اراضی این دشت شامل زمین‌های زراعی، پوشش درختی و باغات، مراتع، اراضی مسکونی، اراضی شور و بایر است. با توجه به آمار بارندگی 40 ساله ایستگاه‌های موجود در محدوده شهر مشهد مشخص شد میزان بارش در شمال (هزار مسجد) و جنوب (بینالود) دشت، نسبت به مرکز دشت بیشتر است. میزان متوسط بارندگی سالانه

بافت قدیمی شهر مشهد به دلیل تغذیه آبخوان از فاضلاب شهری دچار بالاآمدگی سطح آب شده است.

نرم افزار ArcGIS روش درونیابی (IDW) انجام شد و در نهایت مدل ایجاد شده، به شش گروه کلاسه بندی گردید. بیشترین افت بارنگ قرمز در مرکز دشت و همچنین محدوده



شکل ۲. موقعیت چاه‌های پیزومتری (الف) و نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت مشهد (ب)

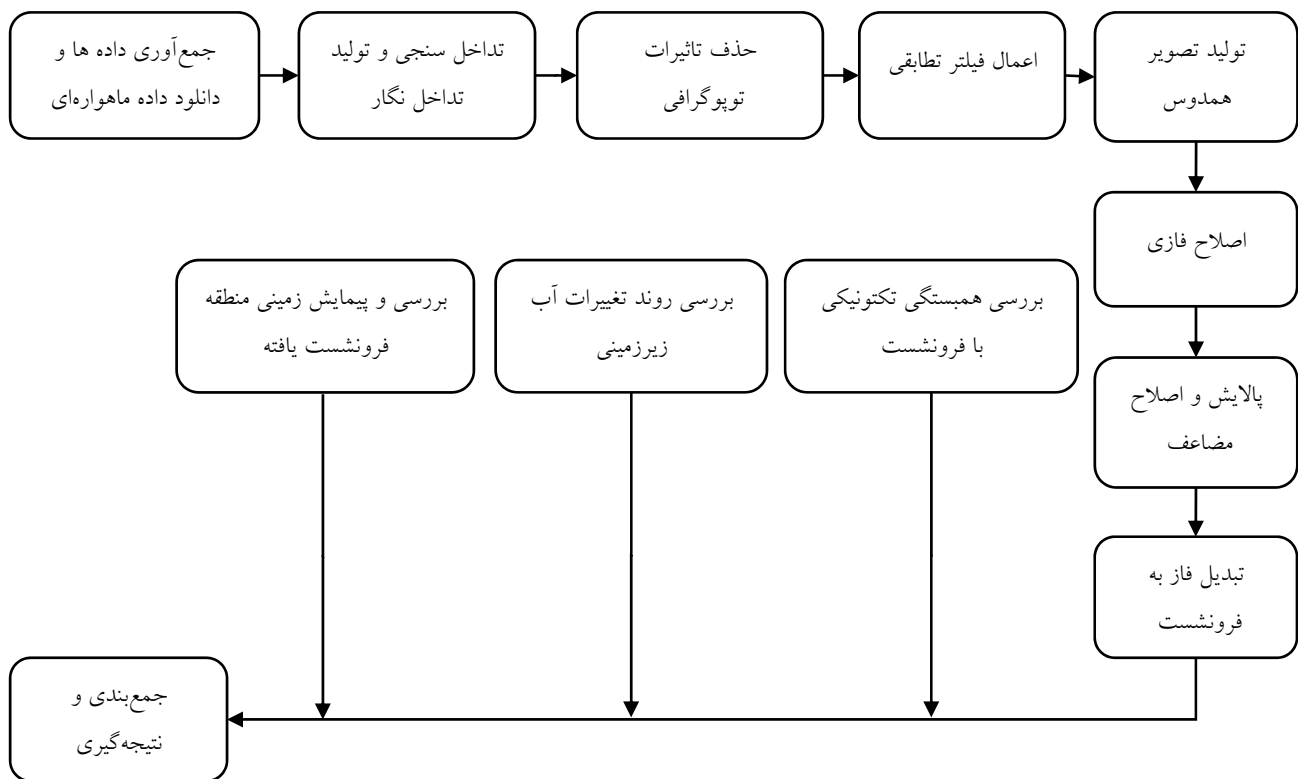
Fig. 2. Location of piezometric well (A) and groundwater level map in Mashhad plain (B)

زمانی مشابه مورد بررسی قرار گرفت، سپس روند تغییرات سطح آب چاه‌های پیزومتری در طول ۱۱ سال (از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶) در منطقه فرونشست یافته محاسبه و با نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی در دشت مشهد به منظور ارتباط با میزان فرونشست به دست آمده مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت

روش تحقیق

به منظور بررسی میزان فرونشست دشت مشهد و ارتباط آن با میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی، ابتدا میزان نرخ فرونشست زمین به روش تداخل سنجی راداری محاسبه شد و همچنین وضعیت لرزه‌خیزی و داده‌های تکتونیکی زمین در بازه

نتایج تحقیق با پیمایش‌های میدانی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. روند کلی تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۳. روند کلی مراحل تحقیق

Fig. 3. Flowchart of research methodology

کیلومتر را فراهم می‌آورد. چهار تصویر که دارای شرایط مناسب برای بررسی پدیده فرونشست بودند انتخاب گردید، مشخصات تصاویر در جدول ۱ آورده شده است. ماهواره ALOS به منظور استفاده در نقشه‌برداری، مشاهده دقیق پوشش‌های زمینی، بررسی منابع و توسعه تکنولوژی، در سال ۲۰۰۶ میلادی به فضا پرتاب شد. سنجنده PALSAR نمونه پیشرفته‌تر سنجنده SAR ماهواره JERS-1 است. PALSAR یک سنجنده ماکروویو فعال است که قادر به تصویربرداری در تمام شرایط جوی در طول شبانه‌روز است. با تغییر در زاویه دید و حالت تصویربرداری، منطقه وسیع‌تری قابل مشاهده خواهد بود. تصاویر راداری ALOS PALSAR از یک ماهواره L-band آرایه افقی باقابلیت برداشت از ۸ تا ۶۰ درجه به دست می‌آید. چهار تصویر مناسب که دارای شرایط

داده‌های مورد استفاده

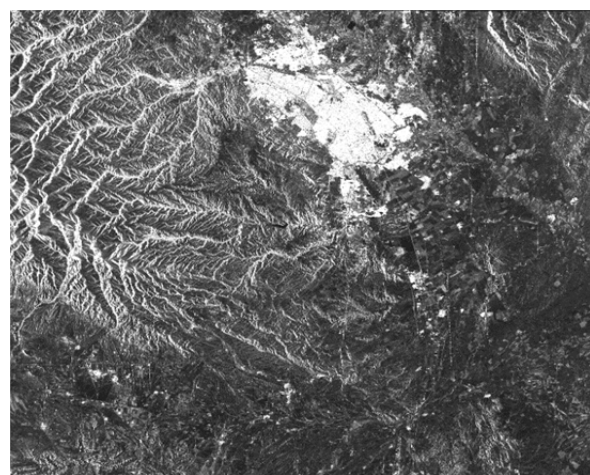
در تحقیق حاضر از داده‌های دو ماهواره Sentinel-1 و ALOS به منظور اندازه‌گیری میزان فرونشست استفاده شد که به ترتیب از درگاه‌های <https://scihub.copernicus.eu> و <https://vertex.daac.asf.alaska.edu> بارگیری گردیدند. ماهواره Sentinel-1 در تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ مأموریت خود را آغاز کرد. این ماهواره مدار قطبی است که به صورت راداری تصویربرداری را انجام می‌دهد و قادر است که پدیده‌ها و عوارض سطح زمین را در شب و روز و در بدترین شرایط آب و هوایی به جمع‌آوری اطلاعات بپردازد. این ماهواره در محدوده طول‌موج ماکروویو و باند C تصویربرداری می‌کند و در چهار حالت مختلف (VV, VH, HH, HV)، تصویربرداری با وضوح قابل قبول تا حد ۱۰ متری و پوششی در عرض ۴۰۰

مناسب برای بررسی پدیده فرونشست بودند انتخاب گردید، تصاویر خام دانلود شده در شکل ۴ نشان داده شده است. مشخصات تصاویر در جدول ۱ آورده شده است. نمونه‌ای از

جدول ۱. مشخصات مربوط به تصاویر مورد استفاده در تحقیق، ماهواره‌های Sentinel-1 و ALOS PALSAR

Table 1. Characteristic of Satellite Data Used in Research, Sentinel-1 and ALOS PALSAR

قطبش Polarize	حالت Mode	نوع تصویر Type of Data	زمان Date	ماهواره Satellite
			۲۰۱۵/۰۵/۲۸	Sentinel-1
VV	IW	SLC	۲۰۱۶/۰۵/۲۲	
VV VH	IW	SLC	۲۰۱۷/۰۵/۲۹	
VV VH	IW	SLC	۲۰۱۸/۰۵/۲۴	
			۲۰۰۷/۱۰/۱۶	
HH HV	FBD	Level 1.0	۲۰۰۸/۰۱/۱۶	ALOS PALSAR
HH	FBS	Level 1.0	۲۰۰۸/۰۳/۰۲	
HH HV	FBD	Level 1.0	۲۰۰۸/۰۶/۰۲	



شکل ۱. تصویر خام ماهواره Sentinel-1 (تصویر سمت چپ)،؛ تصویر خام ماهواره ALOS PALSAR (تصویر سمت راست)

Fig. 1. RAW Data of Sentinel-1 (Left); RAW Data of ALOS PALSAR (Right)

مورد استفاده قرار می‌گیرند و Level 1.5 که تمام تصحیحات روی آن انجام شده و زمین مرجع است. از آنجایی که Level 1.1 در تصاویر انتخاب شده وجود ندارد تصاویر Level 1.0 را از طریق افزونه SARscape در نرم‌افزار ENVI به Level 1.1 تبدیل شدند.

به منظور افزایش دقت در نتایج تصاویر خام ماهواره‌ی Sentinel-1 پیش‌پردازش‌های تصحیح اتمسفری، کالیبراسیون، تصحیح رادیومتریک، و زمین مرجع کردن توسط نرم‌افزار SNAP بر تصاویر اعمال گردید (۱۳). تصاویر ALOS PALSAR دارای ۳ سطح می‌باشند. Level 1.0 که تصویر نوع خام است و هیچ‌گونه تصحیحی روی آن صورت نگرفته است. Level 1.1 که تصاویر SLC هستند و برای پردازش راداری

انتخاب زوج تصاویر SAR جهت تداخل‌سنجی

خط مبنای عمود مکانی، خط مبنای زمانی، فرکانس سنجنده مورد استفاده، هم‌پوشانی مکانی و همچنین هم‌پوشانی طیفی در راستای پرواز (آزیموتال) از عوامل پایه در انتخاب زوج تصاویر می‌باشند. خط مبنای زمانی یا فاصله زمانی بین اخذ دو تصویر راداری نیز از عوامل مهم جهت تشکیل تداخل-نگار است. خط مبنای زمانی بیان‌کننده مقدار فاصله زمانی بین تهیه تصاویر است و باید در موقع انتخاب داده‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شوند که به‌طور کامل مدت‌زمان مدنظر جهت انجام بررسی پدیده را پوشش دهند. بدین‌صورت که با افزایش زمان اخذ دو تصویر امکان بروز تغییرات در اهداف

زمینی بیشتر شده و احتمال وابستگی سیگنال بین دو تصویر کاهش می‌یابد که خود موجب افزایش نویز در تداخل‌نگار نهایی می‌شود (۲۶). لذا بایستی دقت داشت زوج تصاویر در تاریخ‌های سالیانه نزدیک به یکدیگر یعنی در ماه‌های مشابه و به‌دوراز فصول زراعی انتخاب گردند. نکته مهم در مورد خط مبنای زمانی این است که در صورتی که فاصله بین زوج تصاویر راداری بیش‌ازحد زیاد باشد شاهد پایین آمدن میزان هم‌دوسی (Coherence) هستیم که این کاهش میزان هم‌دوسی بر روی نتایج حاصل از تصاویر بسیار تأثیرگذار است (۷). اطلاعات مربوط به زوج تصاویر ماهواره Sentinel-1 و ALOS به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲. اطلاعات زوج تصاویر استفاده‌شده ماهواره Sentinel-1

Table 2. Characteristic of Sentinel-1 pair Data

زوج تصویر Pair Scene	نام اختصاری Symbolic Name	خط مبنای زمانی (روز) Baseline Time (Day)	خط مبنای عمودی (متر) Vertical Baseline (Meter)	خط مبنای بحرانی (متر) Critical Baseline (Meter)
۲۰۱۵/۰۵/۲۸ ۲۰۱۶/۰۵/۲۲	S1	۳۶۰	۱۸/۸۹	۶۴۲۶/۴۵
۲۰۱۶/۰۵/۲۲ ۲۰۱۷/۰۵/۲۹	S2	۳۷۲	۹۵/۲۳	۶۴۲۶/۴۵
۲۰۱۷/۰۵/۲۹ ۲۰۱۸/۰۵/۲۴	S3	۳۶۰	۳۲/۲۵	۶۴۲۶/۴۵

جدول ۳. اطلاعات زوج تصاویر استفاده‌شده ماهواره ALOS

Table 3. Characteristic of Using ALOS Pair Data

زوج تصویر Pair Scene	نام اختصاری Symbolic Name	خط مبنای زمانی (روز) Baseline Time (Day)	خط مبنای عمودی (متر) Vertical Baseline (Meter)	خط مبنای بحرانی (متر) Critical Baseline (Meter)
۲۰۰۷/۱۰/۱۶ ۲۰۰۸/۰۱/۱۶	A1	۹۲	۱۹۲/۶۳	۹۸۱۷
۲۰۰۸/۰۱/۱۶ ۲۰۰۸/۰۳/۰۲	A2	۴۶	۱۹۸/۰۳	۹۸۱۷
۲۰۰۸/۰۳/۰۲ ۲۰۰۸/۰۶/۰۲	A3	۹۲	۱۸۷/۴۲	۹۸۱۷

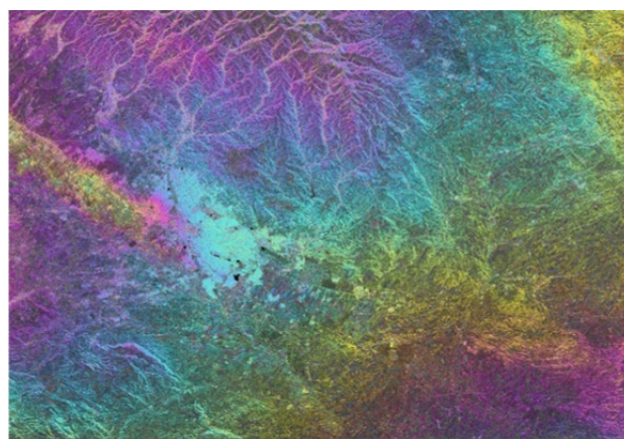
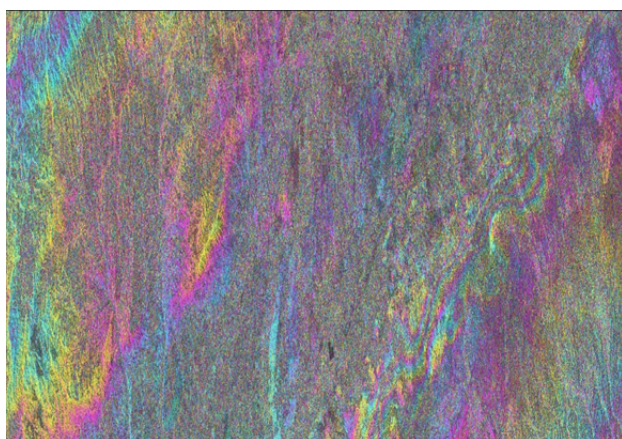
ایجاد تداخل نگار

تولید تداخل نگار جهت نمایش اختلاف فاز ناشی از تغییر فاصله بین پدیده و سنجنده در دو عبور متوالی است. میزان ارتفاع در هر نقطه از منطقه در فاصله زمانی تهیه دو تصویر به وسیله بررسی های میزان اختلاف فاز بین تصاویر تعیین می شود. تداخل نگار در اثر ضرب مختلط تصویر اصلی (Master) در مزدوج تصویر وابسته (Slave) ساخته می شود. فاز حاصل از این ضرب مختلط یک فاز تفاضلی است و حاصل فازهای مربوط به توپوگرافی، فاز مربوط به اختلال اتمسفر، فاز اصلاح شده در نتیجه تغییرات مداری و در نهایت فاز حاصل از جابه جایی احتمالی پوسته سطحی زمین است (۳).

حذف تأثیر فاز توپوگرافی از تداخل نگار

در فرآیند انجام حذف اثر توپوگرافی عامل اصلی و ورودی کلیدی مدل رقومی ارتفاع زمین است. این عملیات

شامل تبدیل مختصات هندسی مدل رقومی ارتفاعی به مختصات هندسی تصویر پایه در زمان اخذ تصویر است. از این رو هرچه دقت مدل ارتفاعی مورد استفاده بهتر و همچنین پارامترهای مداری از دقت بالاتر برخوردار باشد، به همان میزان دقت و صحت عملیات حذف اثرات توپوگرافی بیشتر خواهد بود (۱۱). در این تحقیق از فاز با تواتر بالا استفاده گردید، این فاز می تواند به تغییرات زمانی فاز در طی اخذ تصویر پایه و وابسته (تغییر در سطح زمین و یا اتمسفر) و همچنین اختلاف ارتفاعی مدل رقومی زمین با ارتفاع مبنای مدل بیضوی زمینی مربوط گردد. فاز حاصل فاز مورد نظر است که به فاز تفاضلی و تداخل نگار حاصل به تداخل نگار مسطح (DINT) ملقب است. نمونه ای از تداخل نگار مسطح شد در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمونه تداخل نگار مسطح شده حاصل از پردازش تداخل نگار S3 از ماهواره Sentinel-1 (تصویر سمت چپ)؛ نمونه تداخل نگار مسطح شده حاصل از پردازش تداخل نگار A3 از ماهواره ALOS (تصویر سمت راست)

Fig.5. A Sample of DINT of interferometric Processing on S3 Sentinel-1 Data (left); A Sample of DINT of interferometric Processing on A3 ALOS Data

نویز در تصاویر است. به دلیل کارایی بالای فیلتر گلداشتاین، در این تحقیق از این فیلتر استفاده شده است. این فیلتر به صورت انتخابی عمل نموده و عملیات فیلتر را به صورت محلی اجرا می نماید. فیلتر گلداشتاین با بهره گیری از متغیر عرض بانده که به صورت مستقیم از همبستگی توان طیفی

انجام عملیات فیلترگذاری بر روی تداخل نگار

در منطقه مورد مطالعه به واسطه خط مبنای زمانی طولانی بین دو تصویر و همچنین به دلیل نرخ بالای رشد ساکنین آن شاهد ساخت و ساز و فعالیت های عمرانی زیادی هستیم. علاوه بر این، وجود زمین های کشاورزی و باغات جزو عوامل ایجاد

متغیر است. هرچه میزان هم‌دوسی بین زوج تصاویر بالاتر باشد آن زوج تصویر از جهت انجام تداخل‌سنجی تفاضلی مناسب‌تر هستند و تداخل‌نگار حاصل کیفیت بیشتری دارد. در تصاویری که میزان هم‌دوسی آن‌ها نزدیک به ۰/۵ و یا بالاتر باشد تصاویر مناسبی برای ساخت تداخل‌نگار به شمار می‌آیند. در برخی موارد با مقادیر کمتر از این مقدار هم برای تولید تداخل‌نگار می‌توان استفاده کرد. مقدار هم‌دوسی ۰/۳ مقداری بحرانی است و تصاویری که میزان هم‌دوسی آن‌ها کمتر از این مقدار است برای ساخت تداخل‌نگار مناسب نمی‌باشند (۳). میزان هم‌دوسی زوج تصاویر استفاده‌شده از ماهواره Sentinel-1 و ALOS در جدول ۴ نشان داده شده است.

تداخل‌نگار تفاضلی به دست می‌آید، تنظیم می‌گردد. بدین ترتیب که در مناطق با همبستگی پایین با عرض باند زیاد و تعداد پیکسل بیشتر و در مناطق با همبستگی بالا با عرض باند کم و تعداد پیکسل محدود عمل می‌نماید (۳).

تولید تصویر هم‌دوس

تصویر هم‌دوس (Coherence) تصویری است که از همبستگی توانی (Power) دو تصویر هم مختصات شده SAR ایجاد می‌شود. این تصویر بیانگر شاخص همبستگی بین سیگنال‌های تصویر اصلی و تصویر وابسته است. میزان هم‌دوسی بین صفر (غیر هم‌دوسی) تا یک (هم‌دوسی کامل)

جدول ۴. مقادیر هم‌دوسی برای زوج تصاویر ماهواره‌های Sentinel-1 و ALOS

Table 4. Coherence amounts of pair image of Sentinel-1 and ALOS PALSAR Data

بیشترین مقدار هم‌دوسی Maximum Coherence	میانگین مقدار هم‌دوسی Average Coherence	کمترین مقدار هم‌دوسی Minimum Coherence	زوج تصویر Pair scene	ماهواره Satellite
۰/۹۹۰۴	۰/۵۰۰۲	۰/۰۰۰۵	A1	Sentinel-1
۰/۹۹۰۴	۰/۵۰۱۹	۰/۰۰۱۴	A2	
۰/۹۴۹۱	۰/۴۵۸۶	۰/۰۰۱۶	A3	
۰/۹۹۹۰	۰/۳۳۴۰	۰	S1	ALOS
۰/۹۹۷۷	۰/۳۴۶۳	۰/۰۰۰۱	S2	
۰/۹۹۸۸	۰/۴۱۰۶	۰/۰۰۰۱	S3	

حالی است که ممکن است میزان تغییرات موجود در منطقه (فرآیند جابه‌جایی زمین) از میزان 2π بیشتر گردد، در این صورت در تداخل‌نگار حاصل مقادیر بیشتر از 2π دوباره از نوع آغاز شده و به صورت یک چرخه درخواهد آمد. در حقیقت الگوریتم‌های اصلاح فازی تلاش در جهت رفع ابهام 2π را دارند (۳). الگوریتم جریان با کمترین هزینه برای استفاده با مقادیر هم‌دوسی پایین مناسب است و به دلیل پایین بودن مقادیر هم‌دوسی در زوج تصاویر این تحقیق، از الگوریتم جریان با کمترین هزینه استفاده شده است.

با توجه به این نکته که ماهواره Sentinel-1 در طول موج C تصویربرداری انجام می‌دهد و طول موج این باند برابر $5/6$ سانتی‌متر است به همین دلیل در هنگام برخورد با پوشش گیاهی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و همچنین نسبت به رطوبت بسیار حساس است. لذا بنا به دلایلی که ذکر شد میزان هم‌دوسی بین تصاویر Sentinel-1 کاهش پیدا کرده است.

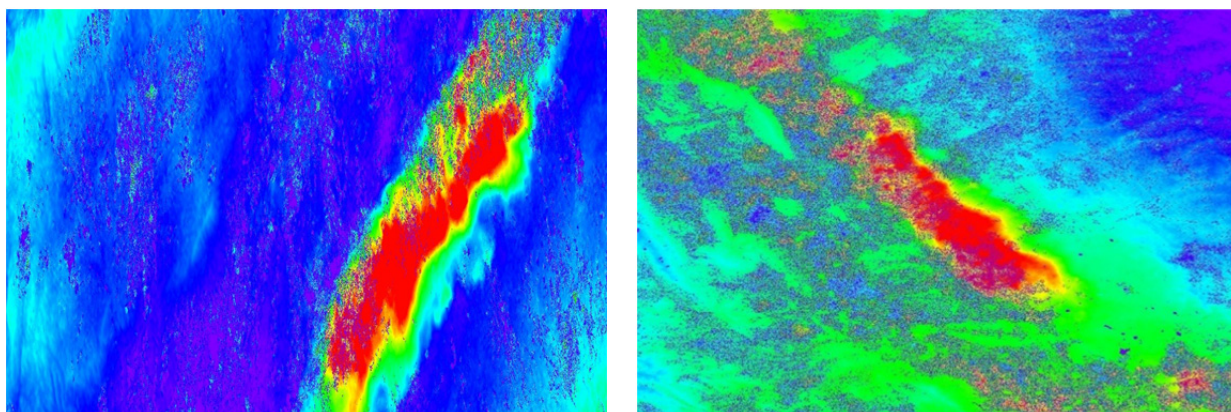
تصحیح مقادیر فاز

مرحله بسیار مهم در فرآیند تهیه میزان فرونشست از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مرحله تصحیح فازی است. میزان تغییرات فاز تنها می‌تواند پیمان‌های 2π بیان گردد. این در

پالایش و تصحیح مضاعف

این عمل برای تداخل نگارهای که نشانه‌هایی از لرزش سکو در فرم پلکان (Ramp) دارند، ضروری است (۲۶). این عمل بر روی فاز تصحیح‌شده در مرحله تصحیح فاز انجام‌گرفته و با کمک مدل DEM منطقه، فاز مصنوعی تولیدشده (فاز با تواتر پایین)، مدل رقومی ارتفاع تبدیل‌شده به

مختصات هندسی تصویربرداری راداری SRDEM (مختصات مایل)، تصاویر همدوسی، پارامترهای مداری تصویر پایه و پیرو SAR و همچنین تعدادی نقاط کنترل زمینی مناسب با درجه چندجمله‌ای مورد استفاده به انجام رسید. برای نمونه نتایج نهایی حاصل از پالایش و تصحیح مضاعف بر روس زوج تصاویر S3 و A3 در شکل ۶ نشان داده شده است.



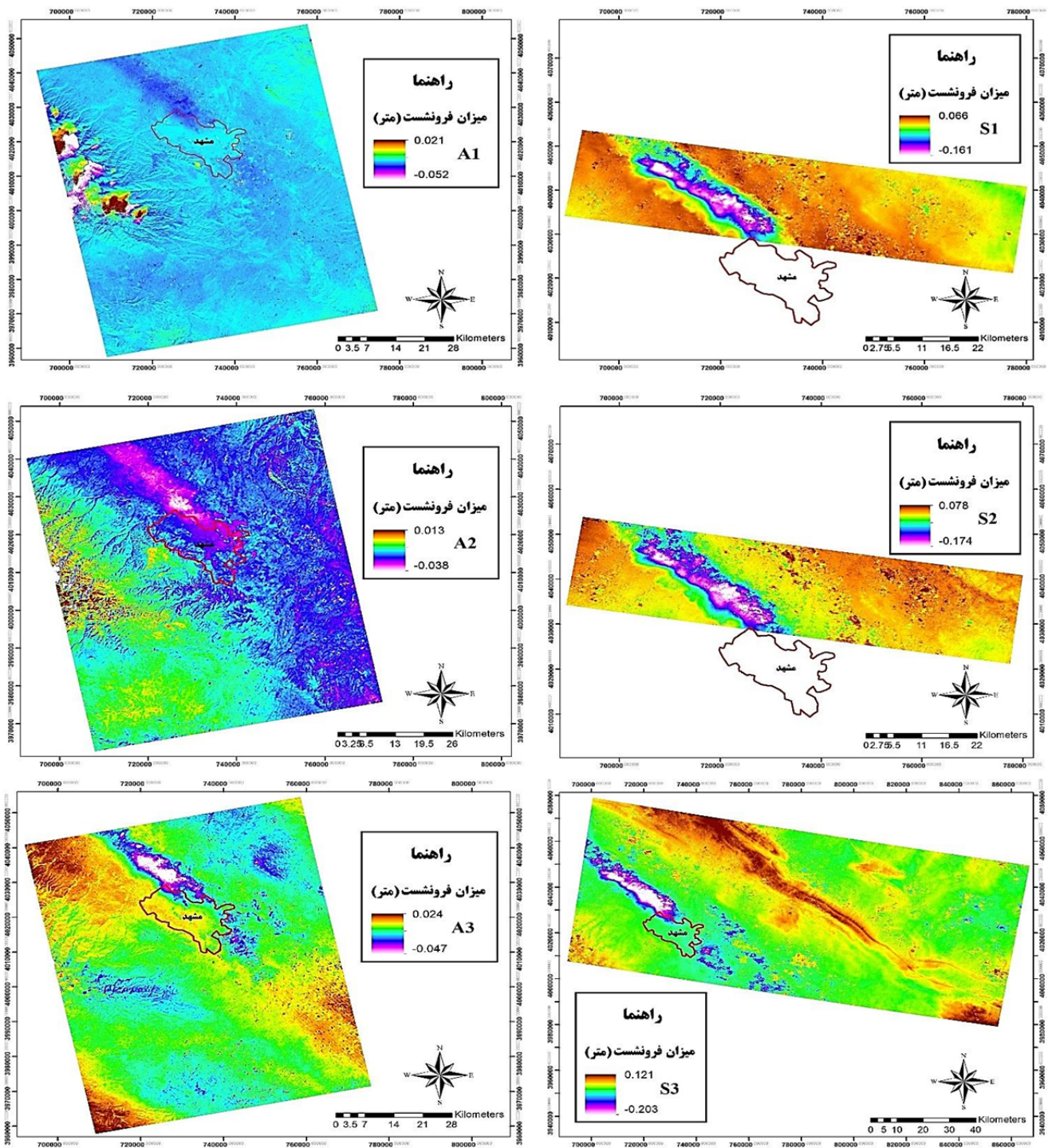
شکل ۶. پالایش و تصحیح مضاعف بر روی فاز اصلاحی زوج تصویر S3 از ماهواره Sentinel-1 (تصویر سمت چپ)؛ پالایش و تصحیح مضاعف بر روی فاز اصلاحی زوج تصویر A3 از ماهواره ALOS (تصویر سمت راست)

Fig. 6. Refinement and Re-flattening on S1 by Sentinel-1 Data (Left); Refinement and Re-flattening on A3 by ALOS Data (Right)

نتایج

کارترین هر پیکسل زمینی هم‌زمان به دست خواهد آمد که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. در نقشه‌های حاصل مقادیر مثبت جابه‌جایی مربوط به حرکت سطح زمین به سمت دید رادار یا همان بالآمدگی و مقادیر منفی بیانگر دور شدن سطح زمین از سنجنده در راستای دید راداری یا فرونشست است.

میزان نرخ فرونشست زوج تصاویر A1، A2 و A3 از ماهواره ALOS و میزان نرخ فرونشست زوج تصاویر S1، S2 و S3 از ماهواره Sentinel-1 با استفاده از فرآیند معادله دامنه داپلر (Dopler) و تبدیلات ژئودتیک (Geodetic) (۳) انجام پذیرفت که با این کار مقدار جابه‌جایی و همچنین مختصات



شکل ۳. میزان نرخ فرونشست زوج تصویر A1 و A2 و A3 از ماهواره ALOS (ستون سمت چپ)؛ میزان نرخ فرونشست زوج تصویر

S1 و S2 و S3 از ماهواره Sentinel-1 (ستون سمت راست)

Fig.7. Subsidence Rate of Couple Pictures A1, A2 and A3 ALOS Satellite Data (Left Column); Subsidence Rate of Couple Pictures S1, S2 and S3 Sentinel-1 Satellite Data (Right Column)

میزان نرخ فرونشست در بازه‌های زمانی مربوط به زوج تصاویر A1، A2 و A3 از ماهواره ALOS و زوج تصاویر S1، S2 و S3 از ماهواره Sentinel-1 در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. نتایج حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری ماهواره‌های Sentinel-1 و ALOS

Table 5. InSAR Results of ALOS PALSAR and Sentinel-1 Data

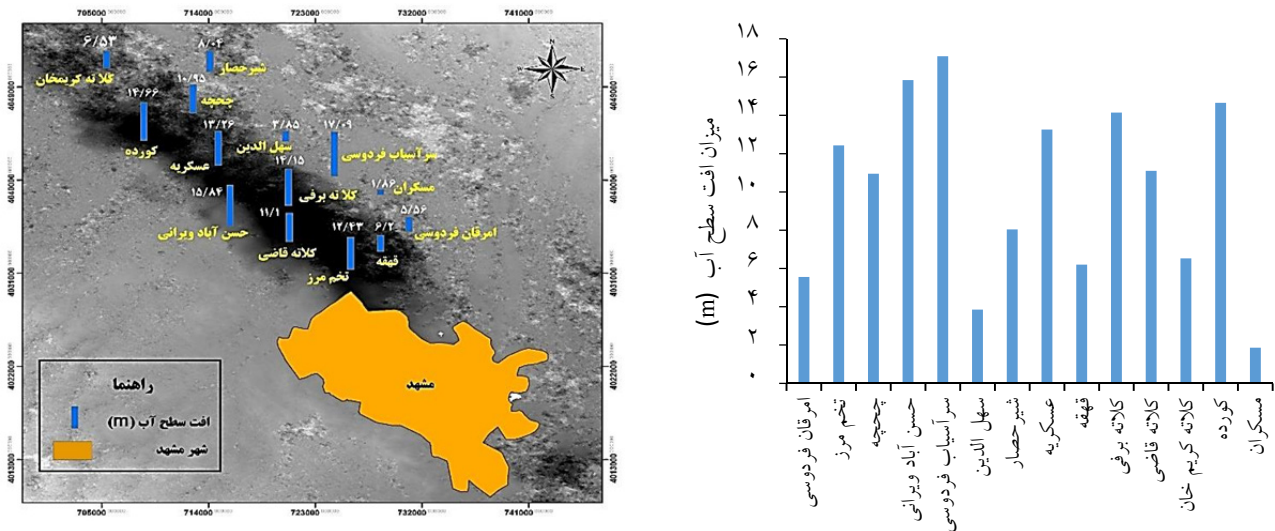
ماهواره Satellite	زوج تصویر Pair scene	نام اختصاری Symbolic Name	بازه زمانی (روز) Time Period (Day)	بیشینه فرونشست (سانتی‌متر) Maximum Subsidence (cm)
ALOS	۲۰۰۷/۱۰/۱۶ ۲۰۰۸/۰۱/۱۶	A1	۹۲	۵/۲
	۲۰۰۸/۰۱/۱۶ ۲۰۰۸/۰۳/۰۲	A2	۴۶	۳/۸
	۲۰۰۸/۰۳/۰۲ ۲۰۰۸/۰۶/۰۲	A3	۹۲	۴/۷
Sentinel-1	۲۰۱۵/۰۵/۲۸ ۲۰۱۶/۰۵/۲۲	S1	۳۶۰	۱۶/۱
	۲۰۱۶/۰۵/۲۲ ۲۰۱۷/۰۵/۲۹	S2	۳۷۲	۱۷/۴
	۲۰۱۷/۰۵/۲۹ ۲۰۱۸/۰۵/۲۴	S3	۳۶۰	۲۰/۳

بررسی روند تغییرات آب زیرزمینی

به منظور بررسی همبستگی و ارتباط فرونشست با تغییرات سطح آب چاه‌های پیژومتری، نمودار تغییرات تراز سطح آب در این چاه‌ها از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ و میزان افت سطح آب در آن‌ها طی ۱۱ سال در شکل ۸ نشان داده شده است.

با توجه با نتایج حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری

ماهواره‌های Sentinel-1 و ALOS، منطقه‌ای با طول در حدود ۳۹ کیلومتر و پهنایی در حدود ۸ کیلومتر واقع در شمال غربی شهر مشهد در حال فرونشست است.

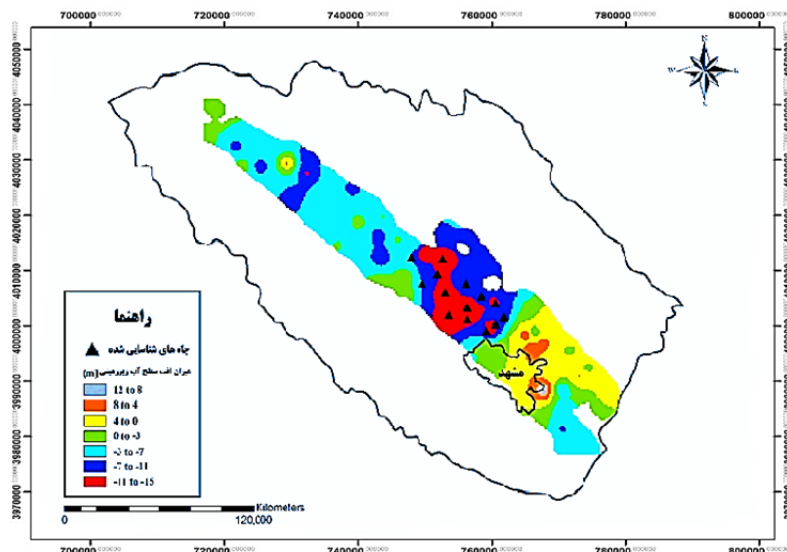


شکل ۴. نقشه موقعیت و میزان افت سطح آب چاه‌های پیزومتری منطقه فرونشست یافته از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ (سمت چپ)؛ میزان افت سطح آب چاه‌های پیزومتری منطقه فرونشست یافته از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ (سمت راست)

Fig. 8. Groundwater Level Depleatoin from Piezometric well in Subsidence Area from 2006 to 2017 (Left); Grounwater Level depletion in Piezometric well in Subsidence Area from 2006 to 2017(Right)

زیرزمینی در دشت مشهد با موقعیت چاه‌های شناسایی شده در منطقه فرونشست یافته شکل ۹ مشخص می‌شود بیشترین افت مربوط به همین منطقه است. بنابراین می‌توان گفت فرونشست در قسمتی از دشت به وجود آمده که دارای بیشترین افت سطح آب زیرزمینی است (۱۰).

روند تغییرات سطح آب چاه‌های پیزومتری در منطقه مورد مطالعه در تمامی سال‌های مورد بررسی از یک‌روند نزولی تبعیت می‌کند. تراز ایستایی آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ به‌طور مداوم در حال نزول بوده و هر سال نسبت به سال قبل دچار افت شده است. با تطبیق نقشه هم‌افت سطح آب



شکل ۵. تطبیق نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی در دشت مشهد با موقعیت چاه‌های شناسایی شده در منطقه فرونشست یافته

Fig. 9. Correlation of groundwater level map in Mashhad plain with piezometric well located in subsided area

پیمایش زمینی و مشاهدات منطقه فرونشست

اعتبارسنجی یافته‌های تکنیک‌های سنجش‌از‌دور فرآیندی ضروری است که می‌بایست از طریق پیمایش میدانی صورت پذیرد. در این تحقیق به منظور تعیین اعتبار یافته‌های تکنیک مورد استفاده و همچنین جمع‌آوری شواهد مکانی، اقدام به پیمایش منطقه توس و کلاته‌برفی در منطقه فرونشست یافته

شده است. بررسی‌های زمینی نشان‌دهنده ایجاد ترک در ساختمان مسکونی و تأسیسات، شکاف در سطح زمین و بیرون‌زدگی لوله‌های تأسیسات ناشی از نشست زمین در منطقه مورد مطالعه است، تصاویر میدانی گرفته‌شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۶. نمونه‌ای از لوله‌زایی ایجادشده در روستای کلاته برفی (الف)؛ ایجاد ترک در ساختمان‌های مسکونی در منطقه توس مشهد (ب)؛ شکاف یا شق به وجود آمده ناشی از پدیده فرونشست در منطقه کلاته برفی دشت مشهد (ج و د) (۹۷/۱۲/۸)

Fig. 7. Sample of well Pipe Uplifting in Kalate Barfi Village; Crack in a House Wall at Toos Mashhad; Split of Terrain Due to Subsidence in Kalate Barfi (2018.02.28)

بحث و نتیجه‌گیری

محور اصلی تحقیق حاضر اندازه‌گیری نرخ فرونشست زمین در دشت مشهد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۸ با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی است. بدین منظور تعداد ۳ زوج تصویر سری زمانی از ماهواره ALOS و تعداد ۳ زوج تصویر سری زمانی از ماهواره Sentinel-1 بکار گرفته شد است. نتایج

حاصل از فرآیند تداخل‌سنجی راداری برای ماهواره ALOS در این تحقیق، بیانگر بیشینه نشست ۵/۲ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۰۷/۱۰/۱۶ تا ۲۰۰۸/۰۱/۱۶ (طی ۹۲ روز)، بیشینه نشست ۳/۸ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۰۸/۰۱/۱۶ تا ۲۰۰۸/۰۳/۰۲ (طی ۴۶ روز) و بیشینه نشست ۴/۷ از تاریخ ۲۰۰۸/۰۳/۰۲ تا ۲۰۰۸/۰۶/۰۲ (طی ۹۲ روز) است. همچنین نتایج حاصل از فرآیند تداخل‌سنجی راداری برای ماهواره Sentinel-1 بیانگر

آماری را نشان می‌دهند. با بررسی نتایج می‌توان ادعا کرد مهم‌ترین علت فرونشست در دشت مشهد برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است. به‌منظور صحت‌سنجی یافته‌های تحقیق با بررسی‌های میدانی انجام‌شده در محدوده مورد مطالعه، نشانه‌هایی از قبیل شکاف در زمین‌های کشاورزی و ترک‌خوردگی در ساختمان‌های مسکونی، بالاآمدگی جدار چاه‌های عمیق آب و بیرون‌زدگی تأسیسات مشاهده شد که نشان‌دهنده پدیده فرونشست در این منطقه است. همچنین طول دوره آماری بیانگر کاهش پیوسته سطح ایستابی آب زیرزمینی در منطقه فرونشست یافته است. میزان نرخ و دامنه فرونشست در دشت مشهد برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ نشان‌دهنده روند افزایش پدیده فرونشست در این منطقه است. صالحی متعهد و همکاران (۲۴) که در سال ۲۰۱۰ میزان فرونشست دشت مشهد را حدود ۲۰ سانتیمتر برآورد کرده بودند، مقایسه گردید که تطابق خوبی بین آن‌ها وجود داشت.

تقدیر و تشکر

از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی بابت در اختیار قرار دادن داده‌های پیژومتری منطقه کمال تشکر و قدردانی را می‌کنیم.

References

1. Akbari V, Motagh M. 2011. Improved ground subsidence monitoring using small baseline SAR interferograms and a weighted least squares inversion algorithm. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(3): 437-441. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2011.217095>.
2. Alkhamis R, Kariminasab S, Ariana F. 2007. Investigating the Effect of Land Subsidence Due to Groundwater Discharges on Well Casing Damage. *Journal of Water and Wastewater*, 17(4): 77-88. (In Persian).
3. Anderssohn J, Wetzel H-U, Walter TR, Motagh M, Djamour Y, Kaufmann H. 2008. Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling. *Geophysical Journal International*, 174(1): 287-294. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03805.x>.

بیشینه فرونشست ۱۶/۱ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۱۵/۰۵/۲۸ تا ۲۰۱۶/۰۵/۲۲ (طی ۳۶۰ روز)، بیشینه نشست ۱۷/۴ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۱۶/۰۵/۲۲ تا ۲۰۱۷/۰۵/۲۹ (طی ۳۷۲ روز) و بیشینه فرونشست ۲۰/۳ سانتی‌متر از تاریخ ۲۰۱۷/۰۵/۲۹ تا ۲۰۱۸/۰۵/۲۴ (طی ۳۶۰ روز) است. توزیع نواحی فرونشست یافته عمدتاً در منطقه مرکزی و جنوب شرقی دشت (شمال غربی شهر مشهد) مشاهده شده است. همچنین یافته‌های تحقیق دامنه منطقه فرونشست را در سطحی به مساحت ۳۱۲ کیلومترمربع با درازای به طول ۳۹ کیلومتر و پهنای به طول ۸ کیلومتر معرفی نمود. جهت بررسی صحت نتایج حاصل از تداخل سنجی، به دلیل نبود رودخانه دائمی در منطقه عمده نیاز آبی مربوط به کشاورزی، صنعت و شرب به‌وسیله برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی انجام می‌شود. با مقایسه نقشه فرونشست منطقه با نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی همبستگی پذیرفته‌ای به دست آمد که حکایت بر میزان تأثیرپذیری پدیده فرونشست از افت سطح آب زیرزمینی دارد. دشت مشهد از رسوبات ریز تا متوسط دانه تشکیل شده است، این رسوبات توانایی بالایی در نفوذپذیری آب را دارا می‌باشند و آب حاصل از بارندگی و جریان‌های سطحی به لایه‌های زیرین نفوذ کرده و سفره آب زیرزمینی را تغذیه می‌کند. با توجه به اینکه ارتباط منطقی بین تغذیه و برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی باید وجود داشته باشد، در صورت عدم رعایت این موازنه شاهد استخراج بیش‌ازحد آب از چاه‌ها و به طبع آن افت سطح آب زیرزمینی هستیم. در اثر کاهش سطح آب زیرزمینی، حفره‌هایی که از آب پر شده‌اند جای خود را به هوا داده که این عمل باعث کاهش میزان فشار منفذی در لایه می‌شود و تعادل بین فشار منفذی و نیروی وارد شده توسط لایه‌های بالایی خاک از بین می‌رود و باعث ایجاد فرونشست می‌شود. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که مناطق دارای نرخ حداکثر فرونشست منطبق بر کاربری‌های زراعی و باغات است که بیشترین سهم را در برداشت از آب‌های زیرزمینی دارا می‌باشند. همچنین نقشه‌ها و نمودارهای حاصل از بررسی چاه‌های پیژومتری، کاهش پیوسته سطح آب در طول دوره

4. Arvin A, Vahabzadeh G, Mousavi SR, Bakhtyari Kia M. 2019. Geospatial modeling of land subsidence in the south of the Minab watershed using remote sensing and GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3): 19-34. http://girs.iaubushehr.ac.ir/article_668468_en.html (In Persian).
5. Caló F, Notti D, Galve JP, Abdikan S, Görüm T, Pepe A, Balik Şanlı F. 2017. Dinsar-Based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey. *Remote Sensing*, 9(1): 83. doi:<https://doi.org/10.3390/rs9010083>.
6. Chatterjee R, Fruneau B, Rudant J, Roy P, Frison P-L, Lakhera R, Dadhwal V, Saha R. 2006. Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2): 176-185. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.006>.
7. Chatterjee RS, Benedicte F, Rudant JP, Roy PS, Pierre-Louis F, Lakhera RC, Dadhwal VK, Ranajit S. 2006. Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 102(1): 176-185. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.006>.
8. Galloway DL, Jones DR, Ingebritsen SE. 1999. Land subsidence in the United States, vol 1182. US Geological Survey, 175 p.
9. Gao M, Gong H, Chen B, Li X, Zhou C, Shi M, Si Y, Chen Z, Duan G. 2018. Regional land subsidence analysis in eastern Beijing plain by insar time series and wavelet transforms. *Remote Sensing*, 10(3): 365. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10030365>.
10. Hafezi Moghaddas N, Leo C, Rahimi B, Azadi A. 2018. Morpho-tectonics and Geoelectrical method applied to active faults characterization in South of Mashhad Plain, Northeast of Iran. *Geopersia*, 8(1): 13-26. doi:<https://dx.doi.org/10.22059/geope.2017.230489.648312>.
11. Herrera G, Tomás R, Lopez-Sanchez J, Delgado J, Vicente F, Mulas J, Cooksley G, Sanchez M, Duro J, Arnaud A. 2009. Validation and comparison of advanced differential interferometry techniques: Murcia metropolitan area case study. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(5): 501-512. doi:<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.008>.
12. Kampes B. 2006. Radar Interferometry, Persistent Scatterer Technique. Springer Netherland, 1-4 pp. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4723-7>.
13. Ketelaar VG. 2009. Satellite radar interferometry: Subsidence monitoring techniques, vol 14. Springer Science & Business Media, <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4723-7>.
14. Lashkaripour G, Ghafoori M, Bagherpoor Moghadam B, Talebian S. 2007. Investigation of Groundwater Depletion on Land Subsidence case study. 1st International Applied Geological Congress May 2007, Mashhad, Iran. Vol 2:15-21. (In Persian).
15. Lashkaripour GR, Ghafoori M, Maddah MM. 2014. An investigation on the mechanism of land subsidence in the Northwest of Mashhad city, NE Iran. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)* Vol, 5: 321-327.
16. Maghsoudi Y, Freek, Christoph H, Daniele P, Asep S. 2018. Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 386-396. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.001>.
17. Mokhtari D, Ebrahimi H, Salmani S. 2019. Land subsidence susceptibility modeling using random forest approach (Case study: Tasuj plane catchment). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3): 93-105. http://girs.iaubushehr.ac.ir/article_668475_en.html (In Persian).
18. Pacheco J, Arzate J, Rojas E, Arroyo M, Yutsis V, Ochoa G. 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, 84(3-4): 143-160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.003>.
19. Raucoules D, Colesanti C, Carnec C. 2007. Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence. *Comptes Rendus Geoscience*, 339(5): 289-302. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.12.00>.
20. Regional Water Authority of Khorasan Razavi. 2011. Final Report Updated the Integration of Water Resources Studies of Qaraqoom Catchment. Toossab Consulting Engineers Company. 3: 95 p. (In Persian).
21. Regional Water Authority of Khorasan Razavi. 2015. Kashfarud Rescue Plan with the Participation of the People, the Deputy for Planning and Management Improvement. 2: 72 p. (In Persian).
22. Regional Water Company of Khorasan Razavi. 2017. Mashhad Drinking Water Status Review Report, Deputy of Planning and Management Improvement. 1: 25 p. (In Persian).
23. Saffari A, Jafari F, TavakoliSaboore M. 2016. Monitoring land subsidence and its relationship with groundwater abstraction (Case study: Karaj-Shahriar plain). *Quantitative Gemorphological Research*, 2: 82-93. (In Persian).

24. Salehimoteahed F, Hafezimoghadas N, Lashkaripoor G, Dehghani M. 2017. Evaluation of geological causes of land subsidence in Mashhad plain and its effects on Mashhad. Second Seminar of Engineering Geology and Environment of Mashhad. Iranian Association of Engineering Geology. (In Persian).
25. Sharifikia M. 2010. Earthquake land surface deformation analysis bases on remote sensing techniques. 4th International Congress of the Islamic World Geograohers. 14-16 April 2010. Zahedan, Iran. (In Persian).
26. Xiaobing Z, Chang N-B, Li S. 2009. Applications of SAR interferometry in earth and environmental science research. *Sensors*, 9(3): 1876-1912. doi:<https://doi.org/10.3390/s90301876>.
27. Zarekamali M, Alhoseini Almodaresi SA, Naghdi K. 2017. Comparing the magnitude of the earth's vertical relocation using the SBAS algorithm in X and C radar bands (Case study: Tehran lands). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(3): 104-120. http://girs.iaubushehr.ac.ir/article_535577.html?lang=en. (In Persian).
28. Zohari M, Esmaili M, Motagh M, Mojaradi B. 2015. Comparison of X-Band, L-Band and C-band Radar images in monitoring subsidence in agricultural area. FRINGE 2015, Proceedings of the workshop held 23-27 March, 2015 in Frascati, Italy. ESA-SP Vol. 731.



Evaluation of land subsidence relationship with groundwater depletion using Sentinel-1 and ALOS-1 radar data (Case study: Mashhad plain)

Saeid Gharechelou, Hesam Akbari Ghoochani, Saeed Golian, Kamran Ganji

Received: 21 January 2021 / Accepted: 4 March 2021
Available online 23 September 2021

Abstract

Background and Objective In recent year's groundwater pumping in the Mashhad plain and decreasing of rainfall in the Mashhad, plain are cause subsidence and creat damage to province infrastructure. This problem is causing more application for deep well water in agriculture, industries, and drinking water. Follow by this demand the number of illegal wells dicking by customers is increasing, therefore the water level of groundwater in Mashhad plain decreasing and the subsidence rate is growing. Mashhad plain is one of the significant plains in the Khorasan Razavi province which is the main water source to support the cropland and industries. High pressure in Groundwater pumping and rainfall is decreasing it causes aquifer recharge reduction.

S. Gharechelou(✉)¹, H. Akbari Ghoochani², S. Golian³, K. Ganji⁴

1. Assistant Professor, Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2. MSc. Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
3. Associate Professor, Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
3. MSc. Department of Hydraulic Structure, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

e-mail: sgharachelo@shahroodut.ac.ir

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.1.2>

Groundwater depletion induced a variety of inadequate in the Mashhad plain such as reducing well discharge, Qanat destructive, Water quality decreasing and land subsidence, etc. In this research, the rate of land subsidence by satellite radar data of ALOS-1 and Sentinel-1 and its relationship with groundwater depletion are investigated. For this purpose the time-series InSAR with multiple SAR data in L and C-bands are used for land subsidence analysis for ten years from 2007 to 2018.

Materials and Methods The main goal of this research is to find the land subsidence rate in relationship with groundwater depletion of the Mashhad plain for a period of 2007-2018 using the InSAR technique. For achieving the research goal the three pairs of SAR images of ALOS data and three pairs of Sentinel-1 data are used. For analyzing the water delation with land subsidence the ten years piezometric well data for a period of 2006-2017 are modeled to create the groundwater table contour line. This map is used for finding the relationship with land subsidence. The final result of the subsidence map was assessed with field observation and previous work.

Results and Discussion InSAR result of ALOS-1 data in this research is shown the subsidence maximum rate of 5.2 cm in the period of 2007.10.16 to 2008.10.16 for 92 days, subsidence maximum rate of 3.8 cm in the period of 2008.01.16 to 2008.03.02 for 46 days, and subsidence maximum rate of 4.7 cm in the period of 2008.03.02 to 2008.06.02 for 92 days.

In addition, the Sentinel-1 data processing for InSAR analysis has shown the subsidence maximum rate of 16.1 cm between 2015.05.28 to 2016.05.22 for a year, subsidence maximum rate of 17.4 cm from 2016.05.22 to 2017.05.29 for 372 days, and subsidence maximum rate of 20.3 cm from 2017.05.29 to 2018.05.24 in a year. The spatial distribution of the subsidence area is mostly in the central and southeast of Mashhad plain. The subsidence area is extended in the area with a 39 km length and 8 km wide. The Mashhad plain does not have a permanent river therefore most of the water demand in agriculture, industries, and drink water is supplying by groundwater pumping. The correlation between the subsidence map and groundwater level contour map obviously has shown that groundwater depletion affects land subsidence. Field observation

was also confirmed the subsidence by wall and building crack, wellhead uplifting in the test site.

Conclusion The result showed that the area with the maximum rate of subsidence is the counterpart to cropland and garden which have more influence on groundwater pumping. In addition, the piezometric well data is shown the groundwater table continuously decreasing. According to the result of this research, the main reason for subsidence is a force to groundwater pumping. The field observation approved that the subsidence is happening in the Mashhad plain by some cracks in the wall, bridge, road, well destructive.

Keywords: InSAR, land subsidence, Groundwater depletion, Mashhad plain

Please cite this article as: Gharechelou S, Akbari Ghoochani H, Golian S, Ganji K. 2021. Evaluation of land subsidence relationship with groundwater depletion using Sentinel-1 and ALOS-1 radar data (Case study: Mashhad plain). Journal of RS and GIS for Natural Resources, 12(3): 40-61. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.1.2>