

تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق - بهرمان

محمد شریفی کیا*

۱- استادیار سنجش از دور و GIS، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت: ۹۰/۷/۱۱ پذیرش: ۹۱/۷/۲۲

چکیده

فرونشست پدیده‌ای مرفولوژیکی است که تحت تأثیر حرکت فرورو زمین پدید می‌آید. علت رخداد این پدیده ممکن است متأثر از عوامل طبیعی و انسانی باشد. در ایران به‌ویژه در محدوده مورد مطالعه، رویداد آن اغلب متوجه فعالیت‌های انسانی و به‌ویژه بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است. محدوده مورد مطالعه در ناحیه بیابانی ایران واقع شده و به‌سبب خشکی محیط و نبود منابع آب سطحی، حیات و فعالیت‌های اقتصادی آن به شدت به منابع آب زیرزمینی وابسته است. به این سبب، تمرکز بهره‌برداری‌های صنعتی - کشاورزی و آب شرب بر منابع آب دشت، بیلان منفی و افت تراز آب زیرزمین را به دنبال داشته است. افت تراز آبی در رسوبات آبرفتی دشت به زایش مسئله نشست زمین منجر شده است. میزان و دامنه پدیده نشست به کمک روش‌های نوین دورسنجی راداری تعیین شده است. بدین منظور، روش تداخل‌سنجی تفاضلی داده‌های راداری (D-InSAR) بر روی داده‌های ماهواره‌ای در دو باند C و L در بازه زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ به کار گرفته شد. یافته‌های تحقیق مؤید حاکمیت میزان فرونشست با متوسط سالیانه حدود ۳۰ سانتی‌متر در پهنه‌ای به گستره ۲۸۱ کیلومتر مربع در بخش میانی دشت است. بررسی تغییرات میزان و دامنه نشست در بازه‌های زمانی فصلی و سالیانه به کمک سری زمانی این تصاویر روشن کرد که به سبب ثابت بودن میزان تأثیرگذاری عوامل ایجابی (فعالیت کشاورزی پسته‌کاری) در رویداد این پدیده، تغییرات فصلی و سالیانه میزان فرونشست بسیار اندک بوده؛ اما دامنه برخورد از حداکثر میزان نشست از نواحی میانی و شرقی در فصل‌های بهار و تابستان به نواحی جنوبی و غربی در فصل‌های زمستان و پاییز تغییر یافته است. منطبق‌سازی الگوی فضایی نشست با نواحی زراعی و مسکونی مؤید انطباق کامل نواحی در معرض نشست با عرصه‌های زراعی است. در حالی که فقط تعداد محدودی از سکونتگاه‌های بخش شرقی بر



روی نواحی در حال نشست قرار دارند. همچنین، مقایسه میزان فرونشست با ارقام تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیژومتری نشان می‌دهد در این دشت هر ۳.۲ سانتی‌متر افت تراز آبی قادر است فرونشستی به میزان ۱ سانتی‌متر ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: آب زیر زمین، تداخل‌سنجی راداری، فرونشست، مخاطره، نوق - بهرمان.

۱- مقدمه

افزایش روزافزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم‌عمق یا دریاچه‌ای تحکیم‌نیافته^۱ انباشته شده‌اند، می‌تواند به نشست^۲ و یا فروریزش سطح زمین منجر شود. پدیده فرونشست ممکن است به صورت نشست تدریجی یا ناگهانی سطح زمین بر اثر تغییر شکل و جابه‌جایی ذرات خاک ایجاد شود. برپایه تعریف انستیتو زمین‌شناسی ایالات متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندک باشد (USGS, 2011). رخداد پدیده مرفولوژیکی فرونشست می‌تواند متأثر از عوامل طبیعی (آتشفشان، ریزش زمین در محل سنگ‌های انحلال‌پذیر، گسل، رانش قاره‌ای، چین‌خوردگی و آتش‌سوزی زیرزمینی) و عوامل انسانی (استخراج معادن، استخراج آب زیرزمینی و نفت و گاز، و ساخت‌وساز) شکل گیرد؛ هرچند محوریت رویداد آن متوجه دو عامل اصلی استخراج آب زیرزمینی و کارستی شدن سنگ‌های انحلال‌پذیر است (Roy et al., 2005; Tony et al., 2005; Margarita et al., 2005). امروزه، نشست زمین بر اثر برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی، معضل و مخاطره‌ای است که جوامع ساکن بر آن را در سطوح بین‌المللی تهدید می‌کند. براساس برآورد کارشناسان، بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه‌یافته تا در حال توسعه در معرض این پدیده‌اند (Huanyin et al., 2005; Hu et al., 2004).

1. unconsolidated
2. subsidence

هرچند رخداد این پدیده از فرکانس و توالی به نسبت زیادی برخوردار است، به واسطه حرکت بسیار کند و بطئی زمین در اغلب مواقع درک و مالا اندازه‌گیری آن به درستی میسر نیست. به همین دلیل، رویداد این پدیده در اغلب نواحی فقط زمانی شناسایی می‌شود که در مرفولوژی سطحی و به ویژه در تأسیسات و تجهیزات تأثیرگذار باشد و تخریب و خسارت به بار آورد. گاهی این پدیده طبیعی به سبب تشدید و تحریک عوامل ایجابی آن مانند افزایش فشار در بهره‌برداری یا بهره‌برداری خارج از ظرفیت ترمیمی منابع آب زیرزمینی دشت‌ها (بهره‌برداری بی‌رویه)، روند و دامنه گسترده‌ای به خود می‌گیرد و علاوه بر ایجاد رخنمون‌های فراوان مرفولوژیکی در سطح زمین، به مخاطره^۱ و تهدید برای انسان و دستاوردهای انسانی تبدیل می‌شود. ایجاد فروچاله^۲، جابه‌جایی پی^۳ و شکست و ترک در ساختمان‌ها، کج‌شدگی تأسیسات مرتفع، آسیب‌دیدگی تأسیسات کشاورزی (تأسیسات ایجادشده در چاه‌های بهره‌برداری، شبکه آبیاری و...)، شکستگی و انهدام پل‌ها و راه‌ها و شبکه معابر شهری و... از عمومی‌ترین خسارت‌ها و تهدیدهای حاصل از تشدید پدیده فرونشست است. چنین شرایطی از تهدید و مخاطره بسیار خسارت‌بار است؛ اما گاهی به واسطه شرایط خاص مکان و مجاورت و برخورداری آن از زیرساخت مخاطره‌آمیز ناشی از سایر مخاطرات طبیعی مانند زمین‌لرزه، قادر است شرایط مخاطره‌آمیز یادشده را فاجعه‌بار کند. به بیان دیگر، همزادی پدیده نشست در نواحی دارای مخاطره لرزه‌ای می‌تواند رویداد زمین‌لرزه نه‌چندان مخرب را به فاجعه‌ای بسیار بزرگ تبدیل کند (شریفی‌کیا، ۱۳۹۰).

در ایران فرونشست زمین سابقه به نسبت طولانی (بیش از چند دهه) دارد. حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های روزافزون صنعتی، کشاورزی و مصارف آب شرب بر منابع آب زیرزمینی، زیرساخت مناسبی برای رویداد این پدیده فراهم آورده است. متأسفانه، تداوم خشک‌سالی و هم‌زمان افزایش میزان وابستگی به منابع آب زیرزمینی در دهه گذشته، دامنه نواحی واقع در معرض نشست را به نواحی به نسبت

1. hazard
2. sinkhole
3. foundation



مرطوب غرب و شمال غربی ایران گسترش داده است. علاوه بر عامل مؤثر بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در رخدادهای پدیده فرونشست، بهره‌برداری غیرصیانی از منابع نفت و گاز در گوشه جنوب غربی کشور عامل ظهور این پدیده بوده است (شریفی کیا، ۱۳۹۰؛ فولادی مقدم، ۱۳۸۸؛ محمدی، ۱۳۸۹؛ حقیقت مهر، ۱۳۸۹).

مطالعات درباره شناسایی پدیده نشست در دشت‌های کشور منسجم و فراگیر نبوده و فقط در برخی نقاط که شرایط حاد و بحرانی داشته‌اند، پژوهش‌هایی انجام شده است. فقط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی در برنامه‌ای بلندمدت مطالعه گسترده فرونشست در دشت‌های کشور را در نظر دارد. به طور کلی، در ایران نزدیک به ششصد دشت وجود دارد که احتمال می‌رود بیش از نیمی از آن‌ها در معرض نشست باشند؛ اما مطالعات منتشرشده نشان می‌دهد فقط در هجده دشت پژوهش‌هایی انجام شده است؛ از جمله دشت‌های رفسنجان، کرمان- زنگی آباد و رزند در استان کرمان (Sharifikia, 2009; Esmaili et al., 2009; Motagh et al., 2008) و یزد در استان یزد (آمیغ پی، ۱۳۸۸؛ کمک پناه، ۱۳۸۶؛ عالمی، ۱۳۸۱)، مشهد، نیشابور و کاشمر- بردسکن در استان خراسان رضوی (لشکری پور، ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷؛ Motagh et al., 2006 & 2007; Anderssohn et al., 2008; Dehghani et al., 2008-2009)، قرچک- ورامین، تهران- اسلام شهر و هشتگرد در استان تهران (شمشکی، ۱۳۸۴؛ فتوت اسکندری، ۱۳۸۷؛ Ashrafianfar et al., 2010; Dehghani et al., 2010; Motagh et al., 2008)؛ کبوترآهنگ در استان همدان (امیری، ۱۳۸۴؛ هاشمی، ۱۳۸۱)، کاشان، گلپایگان و مهیار در استان اصفهان (جنت، ۱۳۸۸؛ مصلحی، ۱۳۸۹) و دو دشت سلمان و مرند در آذربایجان (دهقان سورکی، ۱۳۹۰؛ Molaiene, 2009).

اندازه‌گیری میزان فرونشست در سال‌های نخستین، اغلب براساس مشاهدات محلی و از روی مقادیر بریده‌شده لوله‌های جدار^۱ چاه‌ها تخمین زده می‌شد. نخستین بررسی‌های علمی برای تعیین میزان فرونشست از حدود دو دهه قبل در دشت رفسنجان- که دارای بالاترین

1. casings

سابقه و میزان فرونشست بود- آغاز شد (شفیعی ثابت، ۱۳۷۳؛ Toufigh et al., 1995). در سال‌های بعد با فراگیر شدن این مسئله، در سایر نواحی ایران نیز مطالعات گسترده‌ای با روش‌هایی به‌نسبت متنوع انجام شد. روش‌هایی مانند پایش سنجش از دوری (D-InSAR & GPS)، پایش هیدرولوژیکی و شیوه‌های ژئوتکنیکی از اصلی‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری، مشاهده و پیش‌بینی میزان و دامنه پدیده نشست است.

در دهه گذشته با فراگیر شدن ابزار GPS، امکان پایش^۱ نواحی در معرض فرونشست با هدف تعیین میزان آن مورد توجه قرار گرفت. این روش به‌لحاظ دقت مورد قبول و تأیید بود؛ اما به‌لحاظ مسائلی مانند هزینه زیاد در نصب و استقرار ایستگاه‌های دائم، آسان نبودن تعیین دامنه و گستره فرونشست و نابسامانی در دوره زمانی پایش به‌واسطه تغییر در بودجه و اعتبارات سالیانه توفیق‌آمیز نبوده و از حد چند مورد در دشت تهران، رفسنجان و مشهد و برای تعداد محدودی از سال‌ها برنگذشت (قماشی، ۱۳۷۶؛ موسوی، ۱۳۷۸؛ حسینی، ۱۳۸۶؛ اکبری، ۱۳۸۷؛ Amighpey et al., 2006; Mousavi, 2001; Motagh et al., 2006; Hosseini, 2007). (et al., 2007)

اندازه‌گیری میزان و دامنه فضایی پدیده فرونشست از طریق اطلاعات ماهواره‌ای روش نوینی در پایش این پدیده است که طی دهه پیشین (1990s) مطرح شد. تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR)^۲ تاکنون یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های سنجش از دور، برای شناسایی و نمایش جابه‌جایی‌های به‌وجودآمده در سطح زمین بوده است. علاوه بر آن، در این روش به‌واسطه بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت تکرارپذیری آن، پایش این پدیده در مکان مورد نظر با سهولت و در کوتاه‌ترین زمان و بهینه‌ترین هزینه اجرایی، امکان اجرا دارد. همچنین، این روش بررسی میزان و دامنه فرونشست در تمام محدوده مورد بررسی را امکان‌پذیر کرده و امکان پایش آن را برای تمام نقاط در دوره‌های زمانی مختلف فراهم آورده است.

1. monitoring
2. Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar



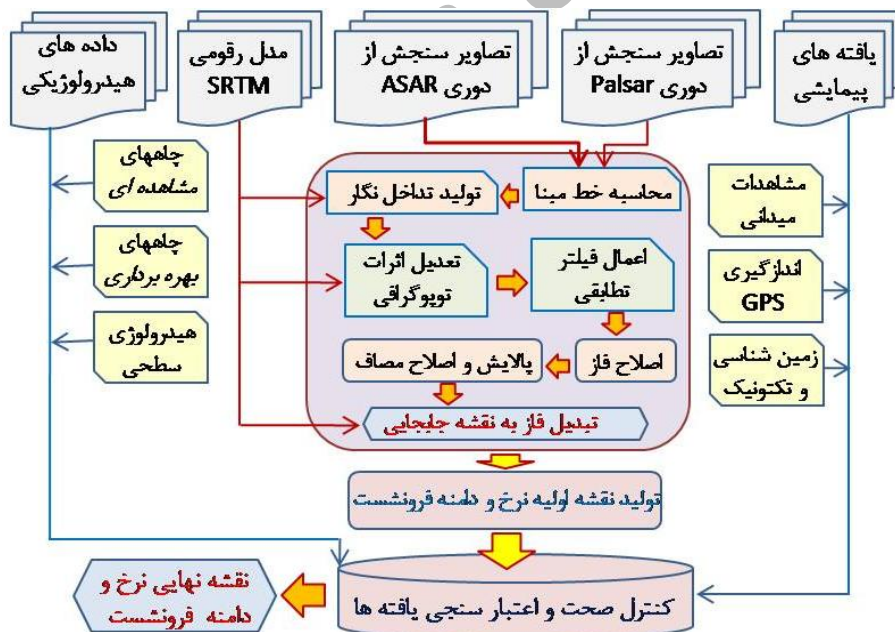
نگارنده در این تحقیق از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری جهت تحلیل و اندازه‌گیری میزان و دامنه پدیده فرونشست در دشت نوق- بهرمان استان کرمان استفاده کرده و به بیان کارایی ابزار و تحلیل دقت خروجی آن پرداخته است.

۲- روش تحقیق و داده‌ها

این پژوهش متکی بر روش آزمایشگاهی- پیمایشی است. نخست روش‌های آزمایشگاهی به‌منظور پردازش داده‌ها و تصاویر انجام گرفت، سپس مبتنی بر یافته‌های مرحله آزمایشگاهی، داده‌های میدانی و ثبتي گردآوری شد. در آخرین مرحله نیز صحت‌سنجی نتایج پردازش‌های آزمایشگاهی با استفاده از داده‌های پیمایشی و ثبتي انجام گرفت. در مرحله پردازش‌های آزمایشگاهی از سری زمانی داده‌های راداری ماهواره اروپایی Envisat سنجنده ASAR در باند C و ماهواره ژاپنی ALOS سنجنده PALSAR در باند L (رک جدول ۱) استفاده شد. بعد از پردازش‌های کامپیوتری از طریق نرم‌افزار اختصاصی SARSCAPE در پلات‌فرم ENVI و به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی، مناطق در معرض نشست تعیین شد. سپس با انجام عملیات پیمایشی و میدانی و با استفاده از ابزار GPS، برای شناخت و پیجویی عوارض ناشی از پدیده نشست، نواحی و مناطق معرفی شده در مرحله آزمایشگاهی در سطح زمین نیز مورد شناسایی و برداشت میدانی قرار گرفت. یافته‌های این مرحله به تعیین صحت نتایج در مرحله نخست بسیار کمک کرد. در مرحله بعد به‌منظور تبیین علل نشست زمین در منطقه مورد مطالعه، داده‌های مربوط به ویژگی‌های زمین‌شناسی سطحی و تحت‌الارضی، کاربری اراضی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی نیز تجزیه و تحلیل شد. همچنین در این تحقیق، یافته‌های روش تداخل‌سنجی راداری برای میزان و دامنه فرونشست با ارقام حاصل از تغییرات سطح ایستایی آب زیرزمینی که به‌وسیله چاه‌های مشاهده‌ای (پیزومتری) تولید شده بود، مورد مقایسه و تحلیل آماری قرار گرفت (شکل ۳-۱).

جدول ۱ داده‌های راداری مورد استفاده برای تداخل‌سنجی تفاضلی

نام سنجنده	حالت مداری	تاریخ اخذ	گذر	نام سنجنده	حالت مداری	تاریخ اخذ	گذر
ASAR	نزولی	۸ مارس ۲۰۰۵	۲۰۶	palsar	نزولی	۱۶ ژانویه ۲۰۰۷	۶۰۰
ASAR	نزولی	۴ اکتبر ۲۰۰۵	۲۰۶	palsar	نزولی	۲۱ ژانویه ۲۰۰۹	۶۰۰
ASAR	نزولی	۲۱ فوریه ۲۰۰۶	۲۰۶	palsar	نزولی	۲۴ ژانویه ۲۰۱۰	۶۰۰
ASAR	نزولی	۲ مارس ۲۰۱۰	۲۰۶	palsar	نزولی	۱۶ ژانویه ۲۰۰۷	۶۱۰
ASAR	صعودی	۱۷ می ۲۰۰۵	۵۶	palsar	نزولی	۲۱ ژانویه ۲۰۰۹	۶۱۰
ASAR	صعودی	۱ می ۲۰۰۸	۵۶	palsar	نزولی	۲۴ ژانویه ۲۰۱۰	۶۰۰



شکل ۱ نمودار مفهومی مراحل تحقیق



۲-۱- تداخل‌سنجی تفاضلی راداری

تصاویر راداری حاصل از رادارهای با روزنه مجازی^۱ (SAR) با دارا بودن قابلیت اندازه‌گیری طول بردار از سنجنده تا سطح زمین، در اندازه‌گیری‌های مربوط به تهیه نقشه رقوم ارتفاعی به‌طور گسترده به‌کار می‌روند (Gabriel & Goldstein, 1988). تکنیک مورد استفاده در این روش به تکنیک تداخل‌سنجی راداری^۲ (InSAR) ملقب است. در تداخل‌سنجی راداری، فاز حاصل از دو تصویر گرفته‌شده از یک منطقه معین جهت تولید تداخل‌نگار^۳ تداخل داده می‌شود. در واقع، تداخل‌نگار حاصل ضرب مختلط دو تصویر راداری است. این دو تصویر ممکن است توسط یک سکوی هوایی یا فضایی که دارای دو آنتن با فاصله معین (خط مبنا) باشد اخذ شده باشند (تداخل‌سنجی با عبور منفرد) و یا دو تصویر با فواصل زمانی مختلف و از یک سکوی مشابه گرفته شوند (روش تداخل‌سنجی با عبور مکرر). اختلاف فاز موجود در دو تصویر به‌صورت لبه یا حاشیه^۴ در تداخل‌نگار نمایش داده شده که هر حاشیه یا لبه مشاهده‌شده به اختلاف فازی به میزان 2π مربوط است. تداخل‌نگار فراهم‌شده به‌روش InSAR قابلیت نمایش تغییرات ارتفاعی و ناهمواری‌ها را دارد. دقت تغییرات مقادیر ارتفاعی (dz) قابل محاسبه از هر حاشیه تابع ویژگی‌های ماهواره مانند طول خط مبنا (B_n)، طول موج یا باند مورد استفاده (λ)، زاویه برخورد (θ) و طول بردار مایل ارتفاع ماهواره تا زمین (p) است ($dz = (\lambda p \sin\theta) / 2B_n$). تصاویر راداری با روزنه مجازی متشکل از دامنه و فاز موج برگشتی از سیگنال ارسالی رادار است. بر مبنای تحقیقات و مشاهدات، فاز ثبت‌شده ($\Delta\phi$) موج حاوی اطلاعات و خصوصیات بهتری نسبت به دامنه موج (Δp) در تصاویر راداری است (Ghiglia & Pritt, 1998). بر اساس این، محاسبه ارتفاع یک نقطه حاصل از اختلاف دامنه آن ($\Delta r = p - p'$) از طریق محاسبه اختلاف فاز بیان‌شده ($\Delta\phi$) در تداخل‌نگار و به‌کمک رابطه زیر امکان‌پذیر است (شکل ۲ الف):

$$Z(x, y) = H - \frac{B^2 - (\lambda \Delta\phi)^2}{2(\lambda \Delta\phi - B \sin(\alpha - \theta))} \cdot \cos \theta \quad (\text{Richards, 2005})$$

1. synthetic aperture radar
2. Interferometric Synthetic Aperture Radar
3. inertfrogam
4. fringe

روش تداخل سنجی راداری (InSAR) امکان تولید مدل های رقومی ناهمواری های زمین را فراهم می آورد که دقت ارتفاعی بهینه آن برای داده C باند با طول موج ۵.۶ سانتی حدود ۵ متر است (Sharifikia, 2006). روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR) را اولین بار گلداستن و زبکر^۱ (1989) ارائه کردند. این اصطلاح به روش اندازه گیری پاره ای پارامترها از قبیل توپوگرافی، تغییرات و جابه جایی سطحی زمین از طریق تداخل فاز دو یا چند تصویر راداری با روزه مجازی (SAR) اخذ شده از منطقه مشابه اطلاق شده است. این روش قادر است با استفاده از حداقل سه (دو تصویر + DEM) یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه های متفاوت با دقت های میلیمتری آشکار سازی کند. در عین حال، این دقت تابع طول موج داده مورد استفاده و معادل نصف آن ($\lambda/2$) خواهد بود.

روش تداخل سنجی راداری در زمینه اندازه گیری تغییرات سطحی پوسته زمین کارایی درخور تحسینی دارد. اصول بنیادین نحوه اندازه گیری این تغییرات در شکل شماره ۲ ب نمایش داده شده است. در این شکل P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست^۲ این فضا را در زمان t_0 ثبت و مقدار فاز آن را اندازه گیری می کند (Φ_m). مقدار نشست فاصله P تا P1 است که طی زمان مشخصی صورت گرفته است (D_t). برای اندازه گیری این مقدار، سنجنده تصویری دومی^۳ در زمان t و با هندسه ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز را بر روی آن اندازه گیری می کند (Φ_s). روش تداخل سنجش تفاضلی، تفاضل فاز Φ_m و Φ_s را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می دهد ($\Delta\Phi_{int}$). در صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر (SP-MP) ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده است و مقدار آن به کمک رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta \phi_{int} = 4\pi \frac{SP - MP}{\lambda}$$

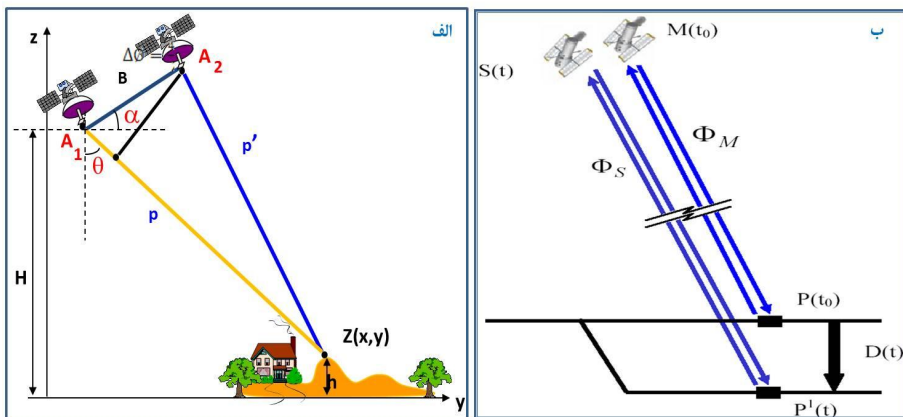
-
1. Goldstein & Zebker
 2. Master
 3. Slave



در اندازه‌گیری مقدار فرونشست به کمک این روش، سطح ناپایدار تصور شده؛ به طوری که سطح از P به $P1$ تنزل یافته است. تعیین مقدار نشست در فاصله زمانی دو تصویر (D_t) تابع اختلاف فاز دو تصویر ($\Phi_{\Delta int}$) به همراه فاز ناشی از اثر توپوگرافی (Φ_{top}) و فاز ناشی از جابه‌جایی سطح (Φ_{Mov}) و همچنین فاز ناشی از اثر اتمفسفر (Φ_{Atm}) خواهد بود (Zebker et al., 1994).

$$\Delta \phi_{int} = 4\pi \frac{PS - PM}{\lambda} = \phi_{Top} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm}$$

در این روش، در صورت در اختیار نداشتن تصویر سوم، به کمک مدل رقومی زمین (DEM) و تبدیل ارتفاع به فاز، یک تداخل‌نگار مصنوعی^۱ تولید می‌شود و از این راه به کمک معکوس اطلاعات DEM، اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف فاز حذف می‌شود. اختلاف فاز باقی‌مانده به اثر جابه‌جایی سطح و اتمسفر تعلق دارد. در نهایت، با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابه‌جایی‌های به میزان بالا (چند سانتی‌متر) و یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی، اختلاف فاز دو تداخل‌نگار ($\Phi_{\Delta D-int}$) (یعنی تداخل‌نگار مصنوعی و اصلی) فقط بیان‌کننده مقادیر جابه‌جایی سطح (نشست) خواهد بود.

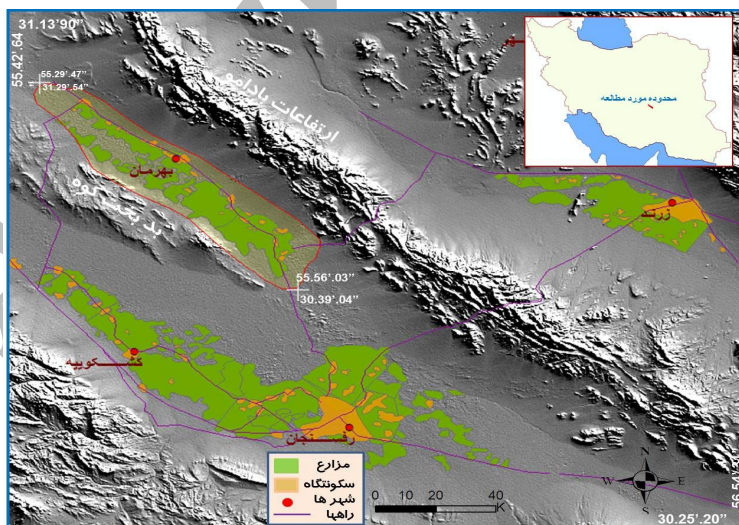


شکل ۲ الف- هندسه روش تداخل‌سنجی، ب- روش تداخل‌سنجی تفاضلی برای اندازه‌گیری نشست محدوده مورد مطالعه

1. syntactic interferogram

۳- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در شمال شهر رفسنجان و استان کرمان واقع است (شکل ۲). این دشت حاصل فرایندهای ساختمانی در زایش و فرسایشی در فرم‌دهی امروزی خود است. به‌لحاظ زمین‌ساختاری، دشت نوق- بهرمان بخش فروافتاده یک ساختار هورست- کرابینی است که بخش پرآمده آن (بدبخت‌کوه) عامل جداسازی‌اش از دشت رفسنجان بوده است. این دشت به‌موازات دشت رفسنجان از جنوب‌شرقی به شمال‌غربی کشیده شده است و ارتفاعات بدبخت‌کوه در جنوب و بادامو در شمال آن را از دو حوضه رفسنجان و زرنند جدا می‌کند. این دشت دارای طول تقریبی ۶۰ و عرض متوسط ۸ کیلومتر است. در این دشت نزدیک به ۲۵۰۰ هکتار زمین‌های زراعی دایر وجود دارد که بیشتر به کشت پسته اختصاص دارد و با آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شود. این دشت فاقد هرگونه منبع آب سطحی دائمی است و آبیاری آن از طریق حوضه آبریزی با مساحت حدود ۳۰۰۰ کیلومتر مربع با متوسط بارندگی سالیانه نزدیک به ۹۰ میلی‌متر و تبخیر سالیانه ۳ متر انجام می‌شود. به‌سبب منفی بودن بیلان آبی، این دشت بیش از سه دهه است که در زمره دشتهای ممنوعه قرار دارد و تراز آبی آن همه‌ساله روند کاهنده‌ای داشته است؛ به‌طوری که در دو دهه ۵۰ تا ۷۰، سالیانه ۵۳ سانتی‌متر و در دو دهه ۷۰ تا ۹۰، سالیانه بیش از ۱.۲ متر افت داشته است (برگرفته از باقرزاده، ۱۳۸۷).



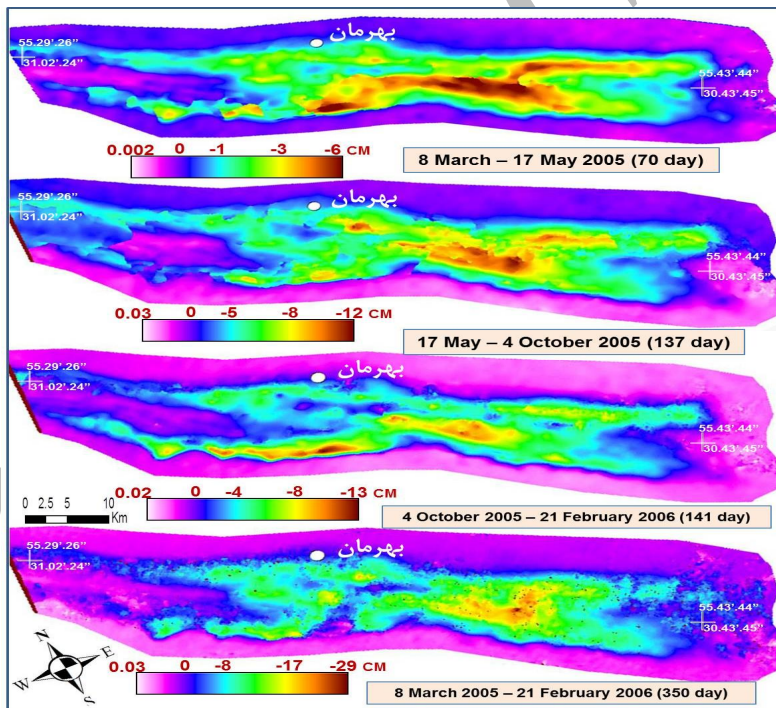
شکل ۳ موقعیت ناحیه مورد مطالعه و ویژگی‌های طبیعی آن



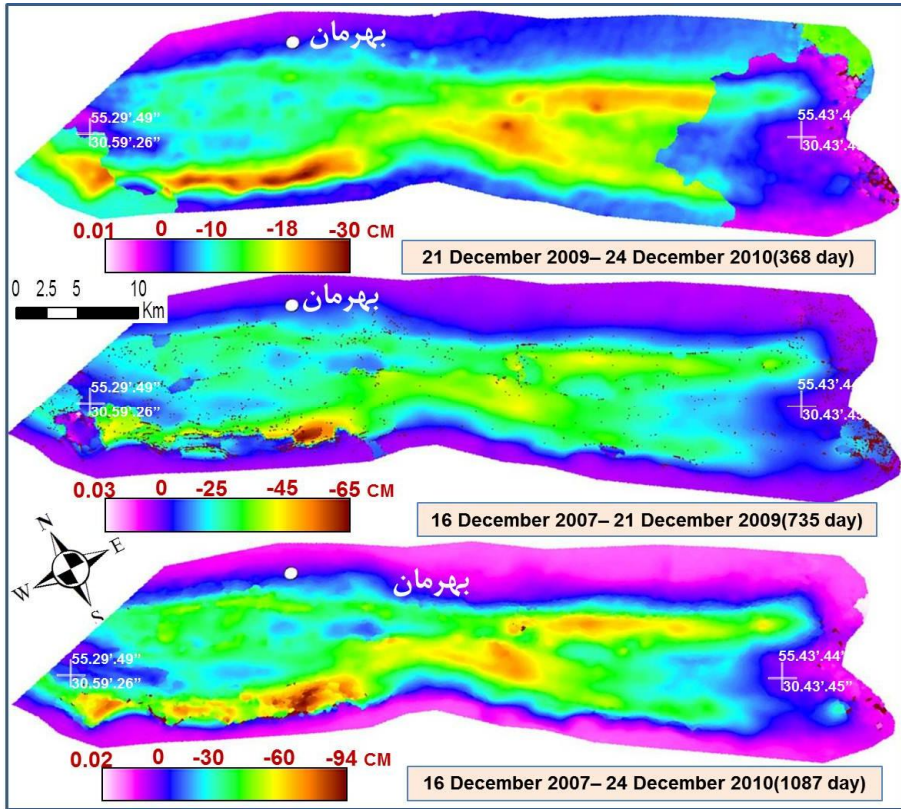
۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌های تحقیق

در این تحقیق، با روش تداخل‌سنجی تفاضلی داده‌های راداری، میزان و دامنه فرونشست را در دشت بهرمان تبیین کردیم. به‌منظور تولید نقشه‌های معرف الگوی فضایی میزان و دامنه نشست از زوج تصویر سنجنده‌های راداری به‌کاررفته در بازه زمانی متفاوت به‌همراه مدل رقومی زمین (DEM) با دقت ۳۰ متر (ASTER DEM) جهت انجام عملیات تداخل‌سنجی استفاده شد. با توجه به تغییرپذیری میزان و دامنه نشست، ناشی از برداشت آب به‌عنوان عامل ایجابی و همچنین نقش موهبت‌های طبیعی (بارش) به‌عنوان عامل تعدیل‌کننده، تصاویر در دوره‌های زمانی منطبق بر تقویم زراعی و فصل‌های بارانی مورد پردازش قرار گرفت. بدین منظور، طی ایام سال منتخب (۱۳۸۴)، سه بازه زمانی بهاره (نیمه اسفند تا اول خرداد به مدت ۷۰ روز)، تابستانه (اول خرداد تا اواخر شهریور به مدت ۱۳۷ روز) و پاییز و زمستان (مهر تا اسفند به مدت ۱۴۱ روز) براساس تقویم زراعی ناحیه انتخاب شد و زوج تصاویر مربوط مورد پردازش قرار گرفت. یافته‌ها مؤید رخداد فرونشست به‌میزان حداکثر سالانه ۲۹ میلی‌متر در عرصه‌ای به مساحت ۲۸۱ کیلومتر مربع است. میزان افت تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیژومتری در این سال افت حداکثری ۱۲۰.۸ سانتی‌متر را معرفی می‌کند. میزان و دامنه فرونشست طی ایام سال تقریباً بدون تغییر بوده و روند یکسانی داشته است (شکل ۴). رخداد چنین پدیده‌ای با توجه به ساختارهای زراعی در سایر نقاط ایران، تا حدود زیادی درخور تأمل است؛ زیرا اصولاً در ایران به‌سبب حاکم بودن تقویم زراعی خاص (آبیاری در بهار و تابستان) و همچنین وجود بارش در زمستان و اوایل بهار، امکان شارژ نسبی سفره و تأثیرگذاری آن در میزان نشست برای دوره‌های بعدی امری پذیرفته و به‌نسبت فراگیر است. یافته‌های پیمایشی در سطح ناحیه نشان می‌دهد: ۱. به‌سبب حاکم بودن خشک‌سالی و ناچیز بودن مقادیر شارژ سالانه به‌نسبت برداشت، تأثیرگذاری این عامل در تعدیل میزان نشست بسیار اندک و نامحسوس بوده است. ۲. به‌سبب خشکی محیط، نوع کشت (پسته‌کاری) و شوری نسبی خاک، آبیاری در تمام ایام سال انجام شده است؛ بنابراین فصل‌های زراعی و غیرزراعی وجود ندارد.

به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی راداری برای اندازه‌گیری میزان و دامنه نشست در بازه‌های زمانی بزرگ (چند ماه) با مشکلات فراوانی در ناهمدوسی^۱ فازی همراه بوده و با از دست دادن فاز، امکان تحلیل و سنجش تغییرات سطح از دست خواهد رفت. اما در ناحیه مورد مطالعه به سبب شرایط خاص بیابانی و فقدان پوشش گیاهی، ناهمدوسی فازی کم و اغلب ناشی از تغییرات سطح متأثر از جابه‌جایی ماسه بادی و رویش گیاهان در بخشی از ایام سال (اواخر زمستان و اوایل بهار) است. بنابراین، به‌کارگیری داده با بازه زمانی بزرگ نیز امکان‌پذیر شد. در این تحقیق، داده‌های C band سنجنده ASAR در بازه زمانی یک‌ساله (۳۵۰ روزه) و داده‌های L band سنجنده Palsar در بازه سه‌ساله (۱۰۷۸ روزه) مورد پردازش قرار گرفت و نتایج رضایت‌بخشی را به دست داد (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴ میزان و دامنه فرونشست، حاصل از پردازش سری زمانی تصاویر سنجنده ASAR



شکل ۵ میزان و دامنه فرونشست، حاصل از پردازش سری زمانی تصاویر سنجنده Palsar

یافته‌های شکل شماره چهار نشان می‌دهد هرچند میزان و دامنه نشست در طی فصل‌ها بدون تغییر است، کانون‌های حداکثری مقادیر نشست جابه‌جا شده‌اند؛ به گونه‌ای که میزان حداکثری نشست در فصل تابستان منطبق بر نواحی میانی و در فصل زمستان متمرکز در بخش غربی و جنوب‌غربی دشت است. تراکم بیشتر چاه‌ها و زمین‌های کشاورزی در بخش میانی سبب شده است کشاورزان در فصل بهار و تابستان حجم بیشتری از منابع آب را بهره‌برداری کنند و در فصل‌های زمستان و پاییز تقویم آبیاری را طولانی‌تر در نظر بگیرند. اما در بخش غربی، شورخاک و نیاز آن به شست‌وشوی مداوم مجالی برای تعدیل دوره آبیاری و یا طولانی‌تر کردن آن در زمستان فراهم نمی‌آورد. از یافته‌های این روش، تأیید تمرکز میزان

حداکثری فرونشست در نوار باریک جنوب‌غربی دشت است. در این بخش هرچند زمین‌های کشاورزی و چاه‌های آب کم‌تراکم‌اند، مقادیر پمپاژ سالیانه به‌همرا بافت درشت‌تر لایه‌های زیرین، عامل رخداد میزان حداکثری نشست شده است.

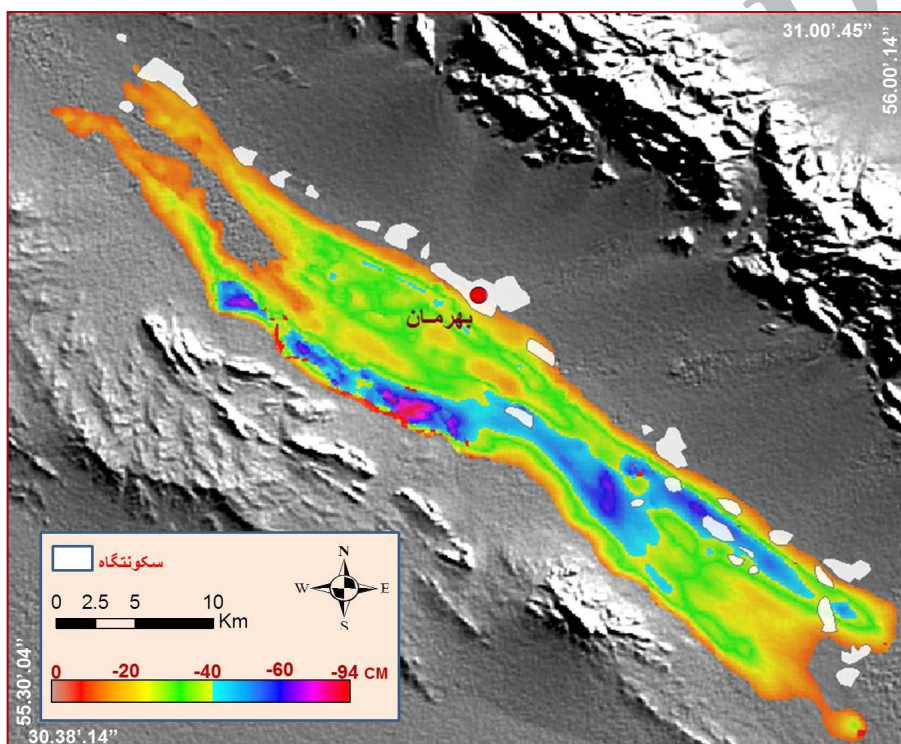
۵- نتیجه‌گیری

به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی راداری در این تحقیق، ظرفیت مناسبی از قابلیت‌های آن در تعیین میزان و دامنه فرونشست در سطح محدوده مورد مطالعه را معرفی کرد. خشکی محیط ناحیه، اثر تغییر فاز ناشی از ترکیبات اتمسفری به‌ویژه مسئله رطوبت را تعدیل کرد و دقت مناسبی از سنجش اختلاف فاز ناشی از جابه‌جایی سطح را فراهم آورد. همچنین، فقدان پوشش گیاهی چالش ناهمدوسی در فاز تصاویر راداری را به حداقل رساند و امکان سنجش تغییرات فاز در بازه‌های زمانی سالیانه برای داده‌های C band و چندساله برای داده‌های L band را میسر کرد. در محدوده مورد مطالعه ناهمدوسی فازی ناشی از رستنی‌های زراعی به‌سبب انتخاب فصل مناسب (زمستان) و همچنین نوع کشت (باغداری) بسیار محدود بود و در سنجش و استخراج میزان و دامنه فرونشست مشکلات چندانی به‌همراه نداشت. این یافته تأکیدی بر کارایی این روش و داده‌های مورد بحث برای مطالعه تغییرات سطحی پوسته زمین در اغلب نواحی کشور است.

یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این روش میزان فرونشست بسیار بالایی را برای ناحیه معرفی کرد (۹۴ سانتی‌متر طی دوره سه‌ساله ۸۶-۸۹). این میزان به‌سبب ثابت بودن شرایط ایجابی، تغییر چندانی نداشته و فقط کانون‌های آن تغییر یافته است. عامل فرونشست در این ناحیه مانند سایر نواحی ایران و همچنین مستند به بررسی‌های مقدم (شفیعی ثابت، ۱۳۷۳؛ Motagh et al., 2008; Toufigh et al., 1995; Sharifikia, 2009)، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و فراهم‌آوری امکان فشردگی لایه‌های زیرین و معالان نشست سطح است. کانون‌های حداکثری نشست منطبق بر بخش شمالی دشت در شرق، بخش میانی در مرکز و بخش جنوبی در غرب دشت است (شکل ۶). نواحی غربی دشت به‌سبب شوری خاک و آب در محل زهکش آن فاقد مرغوبیت لازم است؛ بنابراین با عدم توسعه عرصه‌های



تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک ... کشاورزی و عدم برداشت آب، در معرض نشست قرار ندارد. این مهم با فاصله گرفتن از خطالقه‌ر دشت و بهبود شرایط یادشده، روند متغیری داشته و با استقرار اراضی زراعی و برداشت آب، فرونشستی با میزان اندک داشته است (شکل ۶ و ۳). همچنین، یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد در این دشت به ازای هر ۳.۲ سانتی‌متر افت سطح آب زیرزمینی، فرونشستی به میزان ۱ سانتی‌متر پدید خواهد آمد.



شکل ۶ نقشه نهایی عرصه‌های در معرض نشست مستخرج از روش تداخل‌سنجی تفاضلی (تصاویر Pasar در بازه زمانی ۱۰۸۷ روزه، ۱۶ دسامبر ۲۰۰۷ - ۲۴ دسامبر ۲۰۱۰)

هم‌نهادسازی نقشه نهایی میزان و دامنه فرونشست در این دشت با کانون‌های استقرار سکونتگاه‌ها به منظور تبیین مخاطره و آسیب‌پذیری ناشی از این پدیده روشن کرد که به سبب ارزش زراعی اراضی و مهیا بودن امکان استقرار شهرها و روستاها در خارج از این عرصه،

فقط اندکی از روستاهای بخش شرقی دشت (پیرامون معصوم‌آباد و صادق‌آباد) روی عرصه‌های در معرض نشست قرار دارند. سکونتگاه‌های بخش غربی و به‌ویژه شهر بهرمان در خارج از عرصه‌های در معرض نشست مستقرند؛ بنابراین مخاطره و تهدید اندک‌تری شامل حال آن‌هاست.

به سبب تداوم شرایط ایجابی مسئله نشست در این دشت، تداوم پایش سنجش از دوری و تعبیه ایستگاه‌های اندازه‌گیری ادواری (GPS) می‌تواند ضمن فراهم آوردن امکان پایش تغییرات میزان و دامنه نشست، امکان مناسبی برای سنجش دقت یافته‌های این روش و بهینه‌سازی آن در عرصه ملی فراهم آورد.

۶- منابع

- آمیغ‌پی، معصومه، سیاوش عربی، علی طالبی و یحیی جمور، «کاربرد تکنیک تداخل‌سنجی راداری در مطالعات مناطق فرونشست»، ژنومانیک ۸۸، سازمان نقشه‌برداری کل کشور، ۱۳۸۸.
- اکبری، وحید، 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، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- امیری، منوچهر، «ارتباط بین فروچاله‌های دشت فامنین کبودرآهنگ- نهاوند با سنگ کف منطقه»، فصلنامه علمی و پژوهشی علوم زمین، ش ۵۸، صص ۱۳۴-۱۴۷، ۱۳۸۴.
- جنت، کبری و اکبر قاضی‌فرد، «بررسی ویژگی‌ها و علل فرونشست در دشت گلپایگان با استفاده از تداخل‌سنجی رادار و GIS» در مجموعه مقالات نخستین کنفرانس سراسری آب‌های زیرزمینی، بهبهان، ۱۳۸۸.
- حسینی، مانی، تلفیق داده‌های *InSAR* و *GPS* در تعیین جابه‌جایی ناشی از فرونشست، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۶.



- حقیقت مهر، پریسا، مطالعه فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی و چاه‌های نفتی به کمک تداخل‌سنجی راه‌داری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۹.
- دهقان سورکی، یونس، به‌کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری *D-InSAR* در تعیین نرخ و دامنه فرونشست زمین در دشت مرند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد (سنجش از دور و GIS)، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۰.
- شریفی کیا، محمد، «بررسی پیامد ناشی از پدیده فرونشست در اراضی و دشت‌های مسکون کشور»، مجله علمی و پژوهشی زمین‌شناسی مهندسی، ج ۳، ش ۳ و ۴، صص ۴۳-۵۸، ۱۳۹۰.
- شفیعی ثابت، بهنام، مدل کردن نشست منطقه‌ای زمین بر اثر پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۷۳.
- شمشکی، امیر، محمدجواد بلورچی و فرهاد انصاری، «بررسی فرونشست زمین در دشت تهران- شهریار»، مدیریت زمین‌شناسی مهندسی و زیست‌محیطی، سازمان زمین‌شناسی کشور، نشریه داخلی، ۱۳۸۴.
- فتوت اسکندری، آناهیتا، مدل‌سازی ریاضی فرونشست دشت شهریار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۷.
- فولادی‌مقدم، نگین، پایش میزان فرونشست زمین در میدان نفتی آغاچاری بر پایه تداخل‌سنجی تفاضلی رادار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۱۳۸۸.
- قماش، علی‌رضا، پایش‌بینی نشست منطقه‌ای زمین بر اثر استخراج آب و پایین انداختن ایستایی آب زیرزمینی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۶.

- عالمی، افشین، «بررسی علل نشست در دشت یزد- اردکان» در مجموعه مقالات سومین همایش بین‌المللی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، صص ۴۲۹-۴۳۴، ۱۳۸۱.
- کمک‌پناه، علی، «مطالعه علل گسیختگی زمین در دشت یزد- اردکان»، پژوهشنامه حمل‌ونقل، س ۴، ش ۲، تابستان ۱۳۸۶.
- لشکری‌پور، غلامرضا، حمیدرضا رستمی بارانی، اصغر کهندل و حسین ترشیزی، «افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین در دشت کاشمر» در دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۵.
- لشکری‌پور، غلامرضا، «بررسی علل تشکیل شکاف‌ها و فرونشست زمین در غرب دشت کاشمر»، مجله مطالعات زمین‌شناسی، ج ۱، ش ۱، زمستان ۱۳۸۷.
- محمدی، آرمان، ارزیابی تراکم مخزن و فرونشست سطح میادین هیدروکربوری با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار و مدل‌سازی‌های ژئومکانیکی: مطالعه موردی میدان نفتی درود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۹.
- مصلحی، علی و اکبر قاضی‌فرد، «بررسی فرونشست زمین و پهنه‌بندی خطر فرونشست در دشت کاشان» در مجموعه مقالات همایش ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار، استهبان- دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، ۱۳۸۹.
- موسوی، مرتضی، آنالیز تأثیرات متقابل پارامترهای هیدرولیکی و فرونشست زمین در اثر استخراج آب‌های زیرزمینی (دشت رفسنجان)، رساله دکترا (مهندسی آب)، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۸.
- هاشمی، علی، بررسی علل فرونشست عمومی زمین و تشکیل فروچاله‌ها در دشت فامنین و راه‌های مقابله با آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده صنعت آب و برق، ۱۳۸۱.



- Amighpey, M., S. Arabi, A. Talebi & Y. Djamour, "Elevation Changes of the Precise Leveling Tracks in the Iran Leveling Network", *Scientific Report Published in National Cartographic Center (NCC) of Iran*, Tehran, Iran, 2006.
- Ashrafiyanfar, N., W. Busch, M. Dehghani & P. Haghighatmehr, "Differential SAR Interferometric Technique for Land Subsidence Monitoring due to Ground Water Exploitation in the Hasthgerd", *Proc. 'Fringe 2009 Workshop'*, Frascati, Italy, 30 November- 4 December 2009, ESA SP-677, March 2010.
- Dehghani, M., M. J. Valadan Zouj, S. Saatchi, J. Biggs, B. Parsons & T. Wright, "Radar Interferometry Time Series Analysis of Mashhad Subsidence", *Journal of Indian Society of Remote Sensing (JISRS)*, Vol. 37, Pp. 191-200, 2008.
- Dehghani, M., M. J. ValadanZoej, I. Entezam, S. Saatchi & A. Shemshaki, "Interferometric Measurements of Ground Surface Subsidence Induced by Overexploitation of Groundwater", *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 4, doi: 10.1117/1.3527999, 2010.
- Esmaili, M. & M. Motagh, "Remote Sensing Measurements of Land Subsidence in Kerman Valley, Iran, 2003-2009", *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009*, Abstract, NH43C-1348, 2009.
- Huanyin, Y., R. Hanssen, F. Leijen & P. Marinkovicand, Land Subsidence Monitoring in City Area by Time Series Interferometric SAR Data, *National Natural Science Foundation of China (40301032)*, KGW Project Report, 2005.

- Hua, R. L., Z. Q. Yueb, L. C. Wang & S. J. Wang, "Review on Current Status and Challenging Issues of Land Subsidence in China", *Elsevier Science-Engineering Geology*, Vol. 76, Pp. 65-77, 2004.
- Margarita, M., F. Georgi, Y. Ilia & I. Plamen, UNESCO- bas Project of Land Subsidence Research in the Region of the Sofia, Skopje and Tirana Cities, *Geoinicators*, Pp. 31-33, 2005.
- Molaienea, M. R., *Modeling Land Subsidence due to Ground Water Abstraction*, Ph.D Thesis Summated to Department of Civil Engineering, IIT Delhi -India, 2009.
- Motagh, M., T. R. Walter, M. A. Sharifi, E. Fielding, A. Schenk, J. Anderssohn & J. Zschau, "Land Subsidence in Iran Caused by Widespread Water Reservoir Overexploitation", *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L 16403, doi: 10.1029/2008GL033814, 2008.
- Motagh, M., Y. Djamour, T. R. Walter, H. U. Wetzel, J. Zschau & S. Arabi, Land Subsidence in Mashhad Valley, Northeast Iran; results from InSAR, Levelling and GPS, *Geophys. J. Int.*, 168(2), Pp. 518-526, 2007.
- Motagh, M., Y. Djamour, T. Walter, Z. Moosavi, S. Arabi & J. Zschau, Mapping the Spatial and Temporal Pattern of Landsubsidence in the City of Toos, Northeast Iran, Using Theintegration of InSAR, Continuous GPS and Preciseleveling, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 07881, 2006.
- Mousavi, S. M., A. Shamsai, M. H. E. Naggar & M. Khomehchian, A GPS-based Monitoring Program of Land Subsidence due Togroundwater Withdrawal in Iran, *Can. J. Civ. Eng.*, 28(3), Pp. 452-464, 2001.



- Gabriel, A. K. & R. M. Goldstein, Crossed Orbit Interferometry: Theory and Experimental Results from SIR-B. *Int. J. Remote Sens*, 9 (5), Pp. 857-872, 1988.
- Gabriel, A. K., R. M. Goldstein & H. A. Zebker, "Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas--Differential Radar Interferometry", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, Pp. 9, 183-9, 191, 1989.
- Ghiglia, D. C. & M. D. Pritt, *Two Dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms and Software*, New York: John Wiley and Sons, 1998.
- Richards, M., *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York: McGraw-Hill, 2005.
- Roy, E. Hunt, *Geologic Hazards-A Field Guide for Geotechnical Engineers*, London: Taylor & Francis Group, 2005.
- Sharifikia, M., *DEM Generation & Morphology Feature Extraction - Using InSAR*, PGD Project Submitted to CSSTEAP, 2006.
- Sharifikia, M., *D-InSAR Data Processing and Analysis for Mapping Land Subsidence Phenomenon in Rafsanjan Area*, Iran M.Tech Thesis, Submitted to Andra University -India, 2009.
- Tony, W., G. C. Martin & G. B. Fred, *Sinkhole and Subsidence*, Springer and Praxis Publishing Ltd. UK -Germany, 2005.
- Toufigh, M. M. & B. Shafbeisabet, Prediction of Future Land Subsidence in Kerman, Iran, due to Groundwater Withdrawal, Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague, October 1995, *IAHS Publ*, No. 234, 1995.

- USGS (United States Geological Survey), *Research and Review Information Located, Assess on September 2011: <http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165>*.
- Zebker, H. A., P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel & C. L. Werner, "On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: The Landers Earthquake", *Journal of Geophysical Research*, 99 (B10), Pp. 19617-19634, 1994.