

آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم، با استفاده از تصاویر Sentinel-1A و ENVISAT-ASAR، برای برآورد پدیده فرونشست شهر تهران

فاطمه فروغ‌نیا^{۱*}، صادق نعمتی^۲، یاسر مقصودی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۳. استادیار گروه آموزشی فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۵/۷

چکیده

تهران، در برابر پدیده‌ای همچون استخراج بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، با مسئله فرونشست بالای زمین روبه‌روست. استخراج آب‌های زیرزمینی در دشت تهران، بر اثر فعالیت‌های کشاورزی و یا صنعتی، موجب شده است تهران همواره در معرض خطر فرونشست و خسارات آن قرار بگیرد. در پایش فرونشست مناطقی که دچار تغییرات ظاهری سریع شده‌اند و تصاویر در دسترس نیز دارای همبستگی زمانی و مکانی مناسب نیستند، روش تداخل‌سنجی معمول روش مناسبی نخواهد بود. از این‌رو، در این مطالعه، از تکنیک تداخل‌سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی برای آنالیز تداخل‌سنجی استفاده شده است. از آنجاکه عوامل فرونشست در منطقه شهری تهران نیز به چشم می‌خورد، در این مقاله، به پایش تغییرات در بخش جنوبی شهر تهران، با هدف محاسبه میانگین نرخ تغییرات سالیانه فرونشست، در مجموعه زمانی بلندمدتی، با استفاده از مجموعه داده‌های سنجنده‌های Sentinel-1A (S-1A)، برای اولین بار، و ENVISAT-ASAR پرداخته شده است. پیکسل‌های پراکنشگر دائم در فواصل زمانی و مکانی بلند هم‌دوس باقی می‌مانند و از عدم همبستگی تصاویر راداری کمتر تأثیر می‌پذیرند. با وجود این، توزیع زمانی نامناسب داده‌ها در این تکنیک نیز، به‌منزله عامل محدودیت، پارامتر ابهام را به فاز وارد می‌کند. از این بابت، استفاده از داده‌های S-1A، با فاصله زمانی کوتاه دریافت تصویر، دستیابی به توزیع مناسب داده‌ها در زمان را برای حل ابهام فاز فراهم می‌آورد. نتایج بیانگر فرونشست چشمگیری، در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه، برای همه آنالیزهای سری زمانی است و این نشان می‌دهد که فرونشست دشت تهران به مناطق شهری اطراف آن نیز رسیده است. درنهایت، اعتبارسنجی صحت نتایج، با تحلیل داده‌های مسیرهای متفاوت و نیز داده‌های میدانی ترازیبی و GPS، به انجام رسید.

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنجی راداری، پراکنشگرهای دائم، فرونشست، Sentinel-1A، ENVISAT-ASAR.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک. تلفن: ۰۹۱۱۲۹۲۰۴۶۱
Email: m.foroughnia@email.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

پدیده‌های گوناگون طبیعی، از دیرباز، در کیفیت زندگی بشر تأثیر بسزایی داشته‌اند. بررسی این پدیده‌ها، شناسایی الگوی رفتاری آنها و پی‌بردن به چگونگی جلوگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از آنها امری مهم در تأمین آسایش و زندگی بهتر، به‌منظور افزایش کیفیت زندگی بشری، محسوب می‌شود. یکی از این نوع پدیده‌های طبیعی پدیده تغییر شکل و جابه‌جایی سطح زمین، از جمله پدیده فرونشست^۱، است. طبق تعریف یونسکو، پدیده فرونشست عبارت است از فروریزش یا نشست سطح زمین که در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد. معمولاً این اصطلاح به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین، که ممکن است با بردار افقی همراه باشد، گفته می‌شود (Poland, 1984). در کشور ایران نیز در سال‌های اخیر، به دلیل برداشت بی‌رویه آب در فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، در حوزه غیرشهری و دشت‌ها، و نیز ساخت‌وسازهای شهری و حفر تونل‌ها، در حوزه شهری، با پدیده فرونشست روبه‌رویم. تهران، پایتخت کشور و با جمعیت بیش از سیزده میلیون نفر نیز، با مسئله ناپایداری زمین و سازه‌ها بر اثر عواملی همچون حفر تونل‌های شهری و مترو، استخراج آب‌های زیرزمینی، سرعت زیاد شهرسازی و گسل‌ها مواجه است.

برای پایش سطح زمین روش‌های بسیاری، شامل روش‌های زمینی و فضایی، وجود دارد. استفاده از روش‌های معمول زمینی، همچون ترازیبی و سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۲، در پایش کامل تغییرات سطح زمین در مناطق شهری با محدودیت مواجه‌اند (Dehghani, 2015). اگرچه ترازیبی تکنیک بسیار خوبی برای پایش جابه‌جایی است، بسیار پرزحمت و پرهزینه است و در مواردی که اندازه‌گیری در مناطق پرخطر انجام می‌گیرد، امنیت را تهدید می‌کند. همچنین، تراکم پایین نقاط ایستگاه‌های GPS برای تحلیل زمانی پدیده فرونشست کفایت نمی‌کند. در مقابل، میان روش‌های فضایی، تکنیک تداخل‌سنجی

راداری (InSAR)^۳ توانایی خود را در زمینة اندازه‌گیری‌های دقیق از تغییر شکل سطح زمین، در سطح گسترده و با رزولوشن مکانی بالا، به اثبات رسانده است (Dehghani et al., 2010). به دلیل برآورد و حذف اثر سیگنال اتمسفر و تراکم بالای نقاط پراکنشگر دائمی (PS)^۴ در منطقه شهری (حدود ۷۰۰ نقطه در کیلومترمربع، در منطقه شهری)، برای این مطالعه، روش تداخل‌سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی استاندارد (PSI)^۵ انتخاب شده است. در این تکنیک، با هدف غلبه بر محدودیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی معمول (عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثر اتمسفر)، از نقاط هم‌دوس در طول بازه زمانی آنالیز استفاده می‌شود که دقت پایش میلی‌متری فرونشست را، در نقاط پراکنشگر دائم، حاصل می‌کند (Ferretti et al., 2001).

در این مقاله، برای پایش پدیده فرونشست تهران و تحلیل سری زمانی تغییر شکل، روش PSI، با به‌کارگیری تصاویر سنجنده‌های ENVISAT-ASAR و S-1A، اعمال شد. با توجه به اینکه کارهای گذشته برآورد فرونشست منطقه دشت جنوب‌غرب تهران، با استفاده از مجموعه داده‌های ENVISAT-ASAR (Dehghani et al., 2013; Sadeghi et al., 2013)، شامل می‌شود؛ به دلیل رخداد پدیده فرونشست در منطقه شهری تهران، این مطالعه فرونشست در ناحیه شهری و بخشی از دشت جنوب‌غرب آن و تأثیر فرونشست دشت در منطقه شهری را بررسی می‌کند. فقط یک بررسی از فرونشست منطقه شهری جنوب‌غرب تهران برای بازه یک‌ساله در سال ۲۰۱۲ به انجام رسید (میرشاهی، ۱۳۹۲) که از داده‌های TerraSAR-X در آن استفاده شد. در این تحقیق، سعی داریم با به‌کارگیری داده‌های سری زمانی سنجنده S-1A که تا کنون در مطالعه فرونشست تهران استفاده

1. subsidence
2. Global Position System
3. SAR Interferometric
4. Persistent Scatterer
5. Persistent Scatterer Interferometry

نظر گرفته شده است. بخش جنوب غرب تهران، که شامل ناحیه شهری و غیرشهری می‌شود، به دلیل برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و خشکسالی‌های مداوم در سال‌های اخیر، با نرخ فرونشست بالا مواجه است. مخروط‌افکنه تهران و کهریزک، که غالب بر بخش مرکزی دشت تهران است، توانایی هدایت هیدرولیکی خوبی دارد (Mahmoudpour et al., 2013). کاهش سطح آب زیرزمینی در این بخش عاملی برای رخداد فرونشست محسوب می‌شود.

از مهم‌ترین محدودیت‌هایی که در به‌کارگیری تکنیک تداخل‌سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی وجود دارد، توزیع نامناسب داده‌های راداری در زمان است. بنابراین در این مطالعه، از داده‌های S-1A با فاصله زمانی دریافت تصاویر طی ۲۳ روز، استفاده شده تا نتایج حاصل از آن با نتایج به‌کارگیری مجموعه داده‌های ENVISAT-ASAR، طی دوره بازدید طولانی‌تر (۳۵ روز)، مقایسه شود. مطابق شکل ۱، داده‌های تصویری سنجنده S-1A شامل دو مجموعه داده از مسیرهای بالاگذر (مسیر ۲۸) و پایین‌گذر (مسیر ۳۵)، به تعداد ۲۶ و ۲۷ تصویر به ترتیب برای هر دو مسیر، در بازه زمانی اواخر ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ و دو مجموعه داده، دارای ۲۴ و ۲۷ تصویر دریافتی در مسیر بالاگذر (مسیر ۴۱۴) و پایین‌گذر (مسیر ۱۴۹)، با استفاده از سنجنده ENVISAT-ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰، می‌شود. مشخصات تصاویر مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

نشده است، برای نخستین هدف تحقیق، میانگین نرخ سالیانه فرونشست را برآورد کنیم. در این زمینه، با استفاده از مجموعه داده‌ای از تصاویر S-1A در بازه زمانی اواخر ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶، سری زمانی تحلیل شد. تصاویر سنجنده S-1A دارای پوشش مکانی بالا، دسترسی رایگان و خط مبنا زمانی^۱ کوتاه‌اند و از تکنیک تصویربرداری جدید TOPS^۲ دریافت شده‌اند (Torres et al., 2012). بنابراین، هدف دوم تحقیق بررسی پتانسیل داده‌های این سنجنده، برای تحلیل سری زمانی در پایش تغییرات زمین، در نظر گرفته شد. هدف سوم تحلیل سری زمانی برای منطقه مورد مطالعه، با استفاده از داده‌های ENVISAT-ASAR مربوط به بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰، بود که به‌منظور مقایسه الگوی رفتاری فرونشست در دو سال اخیر با سال‌های گذشته به انجام رسید.

۲- مواد و روش‌ها

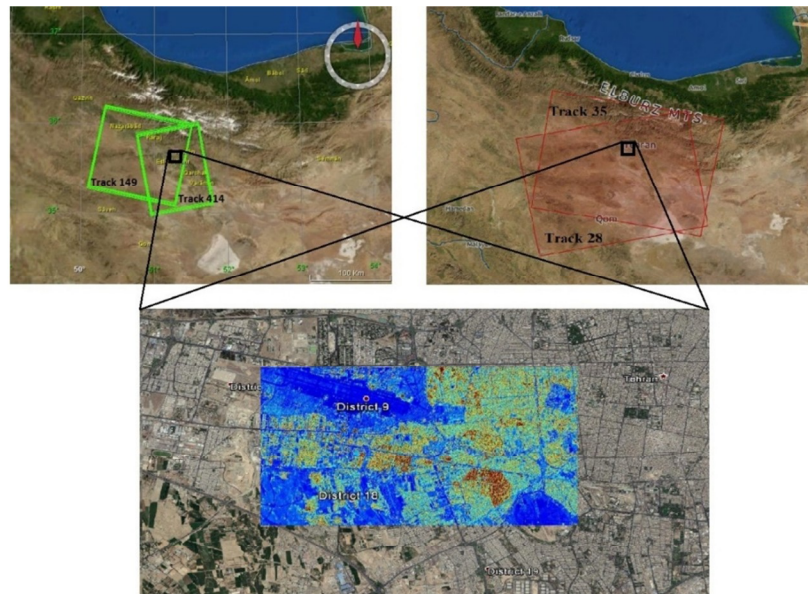
۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

مطابق شکل ۱، منطقه مورد مطالعه در بخش جنوب غرب شهر واقع شده است که از شمال به فرودگاه مهرآباد، از شرق به بوستان ولایت، از غرب به منطقه ۲۱ تهران و از جنوب به دشت تهران منتهی می‌شود. این منطقه، با ابعاد حدود ۴×۴ کیلومتر، بین طول‌های جغرافیایی ۵۱/۲۸۵۳۵۳ و ۵۱/۳۸۵۱۳۵ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵/۶۹۴۷۲۲ و ۳۵/۶۴۳۳۰۱ درجه شمالی، شامل مناطق ۹، ۱۷ و ۱۸ شهر تهران، در

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده

سنجنده	باند	تعداد		مد تصویربرداری	دوره بازدید	قطبش
		بالاگذر	پایین‌گذر			
ENVISAT-ASAR	C	۲۴	۲۷	SM ^۳	۳۵ روز	۷۷
Sentinel-1A	C	۲۷	۲۶	IW ^۴	۲۳ روز	۷۷

1. temporal baseline
2. Terrain Observation by Progressive Scans
3. Strip-Map
4. Interferometric Wide swath



شکل ۱. منطقه موردی و تصاویر مورد استفاده. تصاویر سمت راست و چپ، به ترتیب، موقعیت دو مسیر داده بالا گذر و پایین گذر دریافتی از سنجنده‌های S-1A و ENVISAT-ASAR را نشان می‌دهند. شکل پایین تصویر میانگین دامنه حاصل از یکی از مجموعه تصاویر است که منطقه مطالعاتی را، با بزرگ‌نمایی، نشان می‌دهد.

۲-۲- تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم

به قصد پایش تغییرات زمانی پدیده تغییر شکل سطح زمین، تحلیل مجموعه زمانی تداخل سنجی راداری به انجام رسید. دسترسی نداشتن به مجموعه داده‌های مناسب با مبنای مکانی و زمانی کوتاه استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به شیوه رایج را با محدودیت مواجه می‌کند (Sadeghi et al., 2013). در واقع، عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی مانع تولید تداخل‌نماهای تفاضلی^۱ می‌شود. در این مورد، ممکن است استفاده از تکنیک مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی برای اهداف سری زمانی مفید باشد. در اواخر دهه ۱۹۹۰ م، مشخص شد که برخی عوارض سطح زمین ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً پایدار، در طول چندین ماه و حتی چندین سال، دارند (Usai and Hanssen, 1997). ابعاد این عوارض اغلب از یک پیکسل کوچک تر است و از عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی تصاویر

SAR^۲ کمتر تأثیر می‌پذیرند. این عوارض، که حتی در حدود بحرانی خطوط مبنای زمانی و مکانی نیز هم‌دوسی بالایی دارند، پراکنشگرهای دائم نامیده می‌شوند (Prati et al., 1994). تکنیک مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی را نخستین بار فرتی^۳ و همکاران (۲۰۰۱) مطرح کردند. این روش استحکام فاز پیکسل‌ها را، در مجموعه‌ای از تداخل‌نماها، تحلیل می‌کند و پیکسل‌هایی را که در طول زمان، به لحاظ فاز، ثابت مانده‌اند به منزله نقاط پراکنشگر دائمی برمی‌گزینند.

برای تحلیل مجموعه زمانی، تصاویر مختلط پردازش نشده، که تصویر مختلط تک‌منظر (SLC)^۴ نامیده می‌شوند، در قیاس با تصویری پایه^۵، ثبت هندسی می‌شوند. ثبت هندسی تصاویر لازمه تشکیل تداخل‌نما در مرحله بعدی است که تضمین می‌کند هر

1. differential interferogram
2. Synthetic Aperture Radar
3. Ferretti
4. Single Look Complex
5. master

مجموعه‌ای از تداخل‌نماهاست (Ferretti et al., 2001; Hooper et al., 2006). پیکسل‌هایی به‌منزله نقاط پراکنشگر دائم انتخاب می‌شوند که رفتار فاز آنها در طول زمان ثابت باشد. مقادیر کوچک شاخص پراکنندگی دامنه برآورد خوبی از پراکنندگی فاز محسوب می‌شوند (Ferretti et al., 2001)؛ بنابراین، هر پیکسل، زمانی نقطه پراکنشگر دائمی در نظر گرفته می‌شود که شرط زیر را برآورده کند:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \approx \sigma_V < 0.25 \quad \text{رابطه (۲)}$$

به‌طوری‌که، σ_A و m_A انحراف معیار و میانگین دامنه و σ_V انحراف معیار فاز شمرده شوند. در این مرحله، PSهای کمتر، ولی با امکان اطمینان بالا برای برآورد اتمسفر، انتخاب می‌شوند.

پیکسل‌های انتخاب‌شده، طی فرایند مثلث‌بندی دلونی (DT) ^۵، به هم مرتبط می‌شوند. شکل ۲ نمونه‌ای از شبکه نقاط حاصل از آنالیز داده‌های ENVIAT-ASAR از منطقه مطالعاتی مورد تحقیق را نمایش می‌دهد. در این حالت، بین هر دو پیکسل همسایه، ارتباطی برقرار خواهد شد که، به‌علت مجاورت پیکسل‌ها (حداکثر ۱ کیلومتر فاصله) و همبسته‌بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین پیکسل‌های همسایه شامل فاز اتمسفری نخواهد بود (Hanssen, 2001). با حذف خطای مداری و فاز توپوگرافی، اختلاف فاز تداخل‌سنجی برای دو پیکسل مجاور P و P_0 ، $\Delta\phi_{P,P_0}^{int}$ در شبکه نقاط به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta\phi_{P,P_0}^{int} = d\phi_P^{int} - d\phi_{P_0}^{int} = d\phi_{H,P,P_0}^{int} + d\phi_{V,P,P_0}^{int} + d\phi_{noise,P,P_0}^{int} \quad \text{رابطه (۳)}$$

خطای باقی‌مانده توپوگرافی، $d\phi_{V,P,P_0}$ فاز جابه‌جایی و $d\phi_{noise,P,P_0}$ فاز نویز روی یال بین دو پیکسل‌اند.

تارگت زمینی به پیکسلی مشابه، با مختصات آزیموت و رنج یکسان در هر دو تصویر پایه و پیرو، مربوط است. برای دستیابی به دقت زیرپیکسل، تصاویر به دو روش سخت^۱ و نرم^۲ ثبت هندسی می‌شوند. با محاسبه شیفت تصاویر پایه و پیرو به‌نسبت یکدیگر، یک پلی‌نومیال برای بازنمونه‌برداری تصویر پایه در مقایسه با تصویر پیرو برآورد می‌شود (Hanssen, 2001). تصویر پایه طوری انتخاب می‌شود که تأثیر عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی مینیمم شود (Kampes, 2005). در این تحقیق، به‌منظور تحلیل مجموعه زمانی تداخل‌سنجی، از نرم‌افزار SARPROZ^۳ استفاده شد (Perissin et al., 2010). پس از ثبت هندسی تصاویر، تداخل‌نماها تولید می‌شوند. هر تداخل‌نما اطلاعات اختلاف فاز دو تصویر را، که مبین اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان دریافت تصویر است، شامل می‌شود. به‌کمک مقادیر اختلاف فاز، می‌توان پارامترهای متفاوت، از جمله میزان جابه‌جایی سطح زمین یا توپوگرافی آن، را استخراج کرد. مطابق معادله (۱)، فاز تداخل‌نما افزون‌بر سیگنال مربوط به جابه‌جایی شامل مؤلفه‌های دیگر مانند فاز ناشی از تأخیر اتمسفری، فاز مربوط به خطاهای مداری، فاز ناشی از توپوگرافی و نویز نیز می‌شود (Hooper et al., 2006)؛ بنابراین، اگر هدف برآورد میزان جابه‌جایی سطح زمین ناشی از پدیده مطرح فرونشست است، باید مقادیر هریک از این فازها را شناسایی و از فاز اندازه‌گیری‌شده کسر کرد تا به مقدار فاز ناشی از فرونشست دست یافت.

$$d\phi_{int} = d\phi_{orbit} + d\phi_{topo} + d\phi_{defo} + d\phi_{atm} + d\phi_{noise} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$d\phi_{int}$ فاز تداخل‌سنجی در هر تداخل‌نما، $d\phi_{orbit}$ فاز ناشی از خطاهای مداری، $d\phi_{topo}$ فاز ناشی از توپوگرافی، $d\phi_{defo}$ فاز ناشی از جابه‌جایی، $d\phi_{atm}$ فاز ناشی از اتمسفر و $d\phi_{noise}$ فاز ناشی از نویز شمرده می‌شوند.

معیار انتخاب پیکسل‌های پراکنشگر دائم برای آنالیز PSI استفاده از شاخص پراکنندگی دامنه (ADI)^۴ روی

1. coarse
2. fine
3. SAR processor by prIZ
4. Amplitude Dispersion Index
5. Delaunay Triangulation

کاندید و حذف تصویر اثر اتمسفر از روی مجموعه تداخل نماها، حد آستانه بالاتری، همچون ۰/۴، روی شاخص پراکنندگی دامنه اعمال می شود. این بار، پارامترهای مجهول سرعت جابه جایی و تصحیح ارتفاعی، برای نقاط بیشتری، دوباره برآورد خواهند شد و با استفاده از معیار همدوسی^۲ زمانی و اعمال حد آستانه ۰/۹، روی آنها، نقاط نویزی حذف و نقاط پراکنشگر دائمی نهایی انتخاب می شوند. مراحل کلی تحلیل تداخل سنجی در شکل ۳ آورده شده است. در نهایت σ_v را می توان، با استفاده از رابطه (۵)، در جایگاه انحراف معیار نرخ تغییرات برآورد شده برآورد کرد (Ibid.):

$$\sigma_v^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{\sigma_\phi^2}{M \sigma_{B_i}^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

σ_ϕ^2 و $\sigma_{B_i}^2$ پراکنندگی فاز نویز و خط مبنای زمانی و M تعداد تداخل نماها محسوب می شوند.

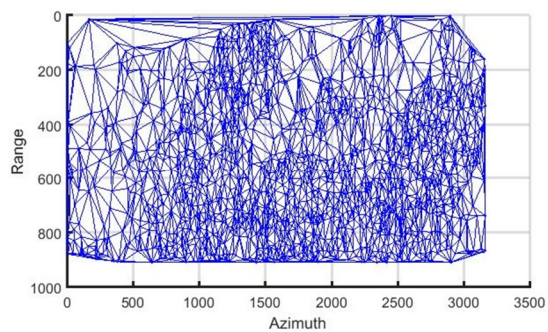
۳- نتایج

۳-۱- تحلیل تداخل سنجی مجموعه داده S-1A

برای تداخل سنجی داده های TOPS، الگوریتم ثبت هندسی بسیار دقیق در راستای آزیموت مورد نیاز است (Prats et al., 2010). برای دستیابی به این هدف، نرم افزار از الگوریتمی سه مرحله ای استفاده می کند. گام نخست اتصال نوارهای تصویری^۳، در راستای آزیموت، برای بازسازی تصویری پیوسته است. در گام دوم، جبران اثر ترم فاز آزیموتی با عملیات De-ramping، از طریق ضرب تصویر اصلی در یک تصویر فاز مناسب از پیش تعریف شده، به انجام می رسد. در گام سوم، پرش فازهای باقی مانده بین مرز نوارها را، با سطح دقتی دلخواه، حذف می کند (Grandin, 2015). تصویر پایه به گونه ای انتخاب شده که مجموع عدم همبستگی،

1. integration
2. coherency
3. burst

در صورتی که تراکم نقاط PS بالا باشد و اختلاف فاز بین دو نقطه مجاور از نصف طول موج کمتر باشد (شرط نایکوئیست)، در برآورد پارامترهای مجهول، می توان از فاز بازیابی نشده، از طریق حل مسئله پرودوگرام در فضای جست و جوی دوبعدی، استفاده کرد (Ferretti et al., 2001).



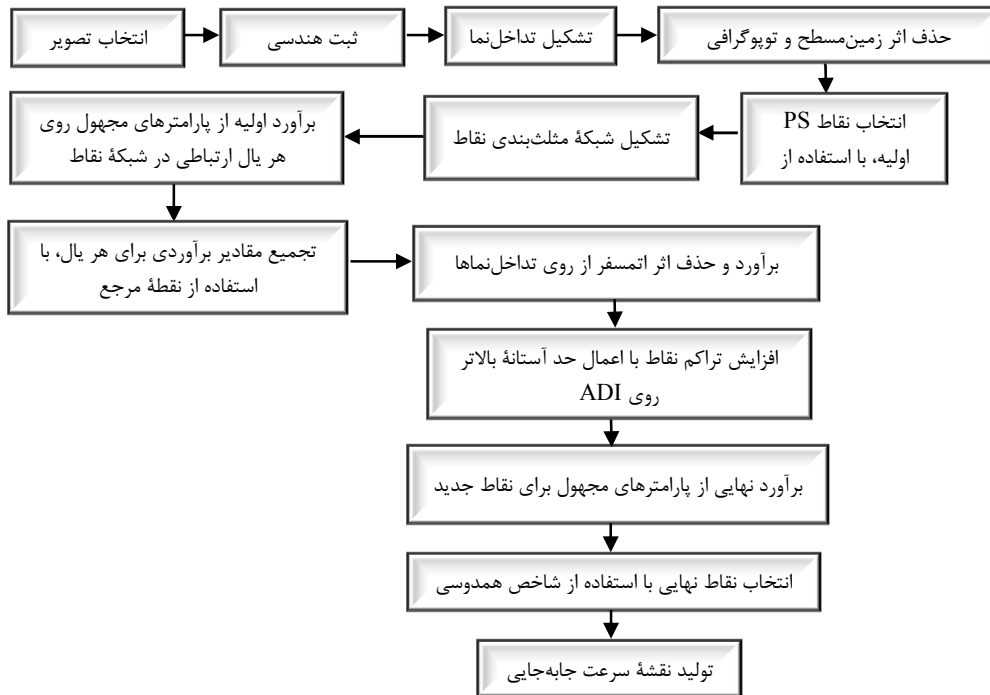
شکل ۲. شبکه نقاط مربوط به تحلیل داده های مسیر ۴۱۴ ENVISAT-ASAR

مقادیر پارامترهای مجهول سرعت جابه جایی و تصحیح ارتفاعی، برای هر یال ارتباطی، از طریق ماکزیم سازی همدوسی زمانی، مطابق رابطه (۴)، برآورد می شوند.

$$\hat{\xi}_{P,P_0} = \frac{1}{M} \sum_{(int)} e^{j(\Delta\phi_{P,P_0}^{int} - \Delta\phi_{H,P,P_0}^{int} - \Delta\phi_{V,P,P_0}^{int})} \quad \text{رابطه (۴)}$$

M تعداد تداخل نما و ماکزیم مقدار مطلق $\hat{\xi}_{P,P_0}$ کوه رنسی زمانی، برای یال بین دو پیکسل، P_0 و P نامیده می شود (Perissin et al., 2012).

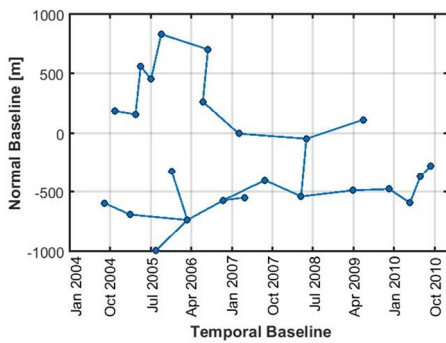
با انتخاب یک نقطه مرجع، مقادیر برآورد شده برای هر یال با هم تجمیع^۱ می شوند تا برآوردی از مقادیر پارامترهای مجهول در هر نقطه از شبکه حاصل شود. در نهایت، به منظور تخمین آثار اتمسفری، با توجه به اینکه اتمسفر در مکان همبسته و نویز یعنی هرگونه عوامل عدم همبستگی مکانی و زمانی در مکان ناهمبسته است، با به کارگیری فیلتر پایین گذر مکانی، آثار نویز از سیگنال اتمسفر جدا می شود. پس از جداسازی سهم فاز اتمسفر در نقاط پراکنشگر دائمی



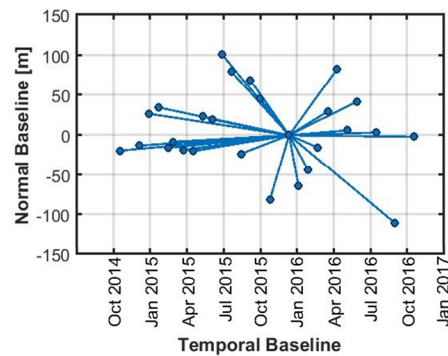
شکل ۳. فلوچارت شیوه کار

توپوگرافی از فاز تصاویر، به کار رفت. برای انتخاب نقاط پراکنشگر دائمی کاندیدا براساس شاخص پراکنشگری دامنه، با مقدار حد آستانه 0.2 ، 6653 نقطه پراکنشگر در نظر گرفته شد. در بسیاری از دشت‌های ایران از جمله دشت تهران، به دلیل برداشت مداوم از سفره،

یعنی تابعی از خط مبنای مکانی و زمانی و فرکانس مرکزی داپلر، در تمامی تداخل‌نماها کمینه شود. مطابق شکل ۴، با استفاده از تصویر پایه مربوط به ۱۳ دسامبر ۲۰۱۵ و گراف تصاویر ستاره‌ای^۱، ۲۶ تداخل‌نما تشکیل و مدل ارتفاعی رقومی SRTM^۲، برای حذف اثر



ب



الف

شکل ۴. گراف تصاویر الف) گراف ستاره‌ای از مجموعه داده S-1A (مسیر ۲۸)؛

ب) گراف MST از مجموعه داده ENVISAT-ASAR (مسیر ۴۱۴)

1. star graph
2. Shuttle Radar Topography Mission

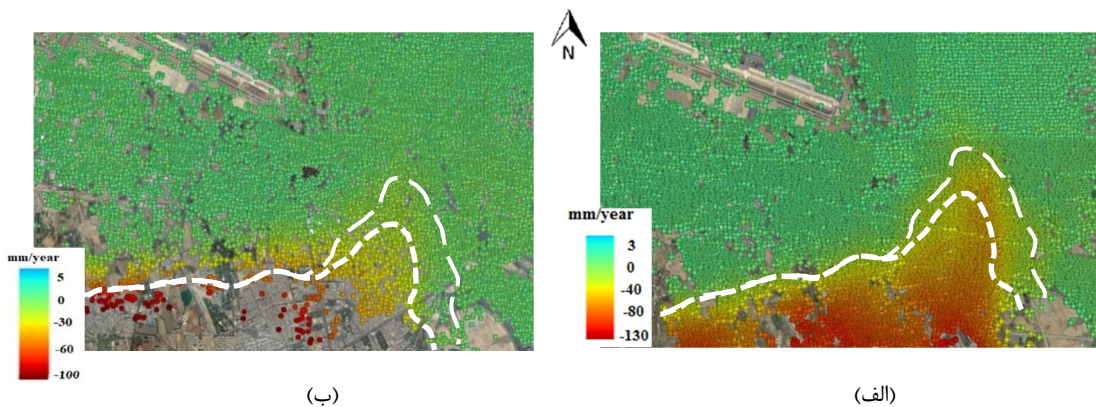
است (Perissin et al., 2012). گراف MST، تشکیل‌شده از تصاویر ENVISAT-ASAR، در شکل ۴ آمده است. در تحلیل تداخل‌سنجی داده‌های ENVISAT-ASAR، پس از جبران اثر توپوگرافی، ۲۳ تداخل‌نما تولید شدند. براساس شاخص پراکنندگی دامنه که قبلاً بدان اشاره شد، ۱۹۶۶ نقطه کاندیدا در نظر گرفته شدند. درنهایت، با انتخاب ۹۴۸۸ نقطه، پارامترهای مجهول خطای مدل رقومی ارتفاعی و نرخ تغییرات برآورد شد. شکل ۵(ب) نقشه نرخ تغییرات حاصل از تحلیل مجموعه زمانی را نشان می‌دهد که بیشترین مقدار سرعت تغییرات LOS حدود ۱۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است.

مطابق شکل ۵، نتایج تحلیل مجموعه زمانی ارتباط پرنگی را، بین رفتار فرونشست در دو سال اخیر و بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۱۰، نشان می‌دهد. طبق این نتایج واضح است که، در بخش جنوبی منطقه مطالعاتی، الگوی رفتاری مشابهی برای فرونشست وجود دارد. دلیل نرخ بالای فرونشست دشت تهران استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی (Dehghani et al., 2013) در منطقه مطالعاتی تلقی خواهد شد.

مقدار مؤلفه خطی فرونشست در مقایسه با تأثیرات فصلی بالاست (Dehghani et al., 2010)؛ بنابراین، برای برآورد نرخ تغییرات، مدل جابه‌جایی خطی در نظر گرفته شد. پس از برآورد پارامترهای مجهول و حذف اثر اتمسفر، ۳۰۷۹۳ نقطه به‌منزله نقاط پراکنشگر دائمی نهایی، براساس تحلیل استحکام فاز، انتخاب شدند. شکل ۵(الف) نقشه نرخ تغییرات برآوردشده از منطقه را نشان می‌دهد. مطابق آن، منطقه مطالعاتی تحت تأثیر فرونشست چشمگیری در نزدیکی دشت تهران است و بیشترین فرونشست، در راستای خط دید سنجنده، ۱۱۴ میلی‌متر در سال برآورد شده است.

۳-۲- تحلیل تداخل‌سنجی مجموعه داده ENVISAT-ASAR

به‌دلیل بزرگی باز مکانی و زمانی بین تصاویر مربوط به سنجنده ENVISAT-ASAR، اتصالات مربوط به گراف ستاره‌ای دچار همدوسی پایین‌اند. بنابراین، از گراف درخت پوشای کمینه (MST)^۱ برای این مجموعه داده، با هدف تولید تداخل‌نما، استفاده شد که از طریق حداکثرسازی میانگین همدوسی اتصالات حاصل شده



شکل ۵. نقشه نرخ تغییرات. (الف) نقشه نرخ تغییرات منطقه مطالعاتی حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی مجموعه داده مسیر ۲۸ S-1A؛ (ب) نقشه نرخ تغییرات منطقه مطالعاتی حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی مجموعه داده مسیر ۴۱۴ ENVISAT-ASAR. برای نمایش بهتر، نتایج تغییرات روی نقشه Google Earth قرار داده شده است. نرخ تغییرات، در مقایسه با یک نقطه مرجع خارج از ناحیه فرونشست، برآورد شده که مقادیر منفی آن افزایش رنج خط دید سنجنده (LOS)^۱ را متناظر با فرونشست زمین نشان می‌دهد.

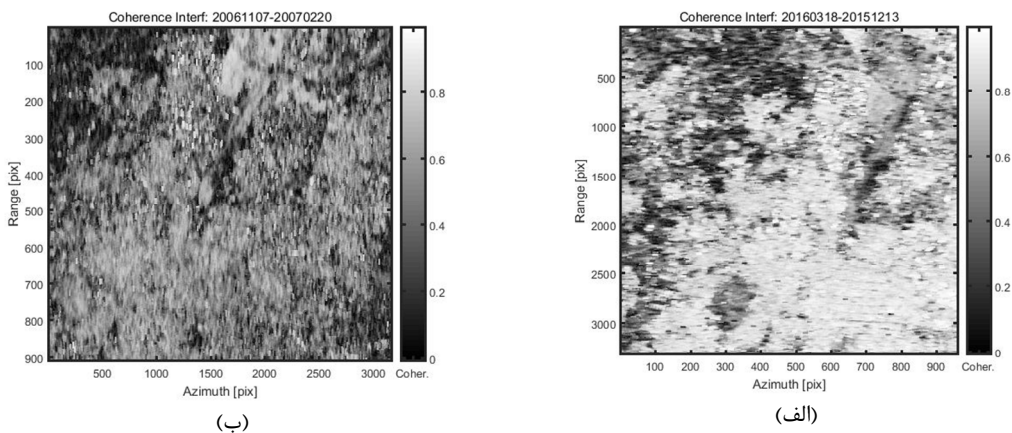
1. Minimum Spanning Tree

۳-۳- بررسی پتانسیل داده S-1A

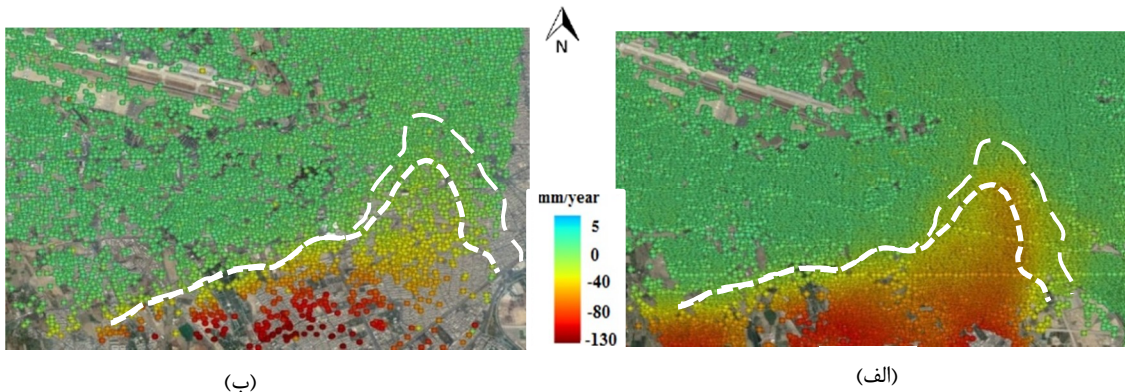
مطابق تعریف، نقاط PS نقاطی اند که، در طول زمان، همدوس باقی بمانند؛ در نتیجه، انتظار می‌رفت تعداد نقاط حاصل از تحلیل داده‌های دوساله S-1A، در قیاس با داده‌های شش‌ساله ENVISAT-ASAR، بیشتر باشد. نتایج حاصل در شکل‌های ۵(الف) و ۵(ب) این قضیه را تأیید می‌کنند اما پردازش داده‌های دوساله از ENVISAT-ASAR بار دیگر نقاطی کمتر از پردازش مجموعه داده دوساله از S-1A را نتیجه داده است. این امر بیانگر همبستگی مکانی بیشتر تصاویر S-1A (شکل ۴(الف)) به نسبت تصاویر ENVISAT-ASAR (شکل ۴(ب)) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط مبنای مکانی بین تصاویر S-1A در بازه ۱۵۰- تا ۱۵۰ متر قرار گرفته است. این مسئله منجر به همدوسی بالای تصاویر S-1A (شکل ۶(الف)) شده که دلیلی بر تراکم بالای نقاط PS در نتایج حاصل از تحلیل تصاویر S-1A است. در شکل ۶، دو تصویر همدوسی حاصل از S-1A و ENVISAT-ASAR نشان داده شده است. هر دو آنها از تصاویر با خط مبنای زمانی سه‌ماه حاصل شده‌اند. می‌بینیم که تصویر همدوسی S-1A بیشتر از تصویر حاصل از ENVISAT-ASAR است. در واقع، تصاویر ENVISAT-ASAR دچار عدم همبستگی‌های مکانی‌اند. از آنجاکه نقاط PS بر اساس شاخص پراکندگی دامنه انتخاب شده است،

در مجموع، تراکم نقاط حاصل از تحلیل مجموعه داده ENVISAT-ASAR مطابق شکل ۵(ب) کمتر حاصل شده است که علت مهم آن را در بخش ۳-۳ توضیح خواهیم داد اما، در محدوده جنوبی منطقه مورد مطالعه که فرونشست بالا برآورد شد، تعداد نقاط PS کاهش محسوسی داشته است. علت آن ساخت‌وسازها و تغییراتی است که در فاصله شش‌ساله دریافت تصاویر ENVISAT-ASAR در منطقه تحقیقاتی روی داده است. این در حالی است که، در بازه زمانی دریافت تصاویر S-1A از منطقه مطالعاتی، نقاط پراکنشگر ثابت مانده‌اند.

مقایسه نتایج شکل‌های ۵(الف) و ۵(ب) نشان می‌دهد محدوده پدیده فرونشست، در مقایسه با سال‌های پیش از ۲۰۱۰، وسعت بیشتری داشته است. همچنین، مقادیر میانگین فرونشست، برای نواحی انتخاب‌شده مطابق جدول‌های بخش ۵، درستی این نکته را تأیید می‌کند. میزان فرونشست برآوردشده، مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰، کمتر از نرخ برآوردی در دو سال اخیر است. این نکته برای نتایج مسیر ۱۴۹ و ۳۵، که در شکل ۷ نشان داده شده‌اند، نیز صادق است. از این‌رو، نرخ و گستره پدیده فرونشست در تهران رو به افزایش است و بررسی رفتار این پدیده، برای جلوگیری از خسارات احتمالی در منطقه شهری، امری مهم تلقی می‌شود.



شکل ۶. تصاویر همدوسی. الف) تصویر همدوسی با استفاده از گراف ستاره‌ای برای داده S-1A (۲۰۱۵/۱۲/۱۳ - ۲۰۱۶/۰۳/۱۸؛ ب) تصویر همدوسی با استفاده از گراف ستاره‌ای ENVISAT-ASAR (۲۰۰۶/۱۱/۰۷ - ۲۰۰۷/۰۲/۲۰)



شکل ۷. نقشه تغییرات. الف) نقشه نرخ تغییرات منطقه مطالعاتی حاصل از تحلیل تداخل سنجی مجموعه داده مسیر ۳۵ S-1A؛ ب) نقشه نرخ تغییرات منطقه مطالعاتی حاصل از تحلیل تداخل سنجی مجموعه داده مسیر ۱۴۹ ENVISAT-ASAR

S-1A و مسیر ۱۴۹ از سنجنده ENVISAT-ASAR، به منزله مجموعه داده متفاوت، به ترتیب، برای ارزیابی نتایج حاصل از سری زمانی مجموعه داده های اول و دوم، استفاده شد. در مرحله بعدی، ارزیابی نتایج با به کارگیری مشاهده های میدانی به انجام رسید.

نقشه نرخ تغییرات حاصل از نتایج تحلیل های سری زمانی این دو مجموعه داده در شکل ۷ آمده است. نتایج الگوی رفتاری مشابهی را، برای فرونشست منطقه، نشان می دهد. بیشترین مقدار فرونشست در راستای خط دید سنجنده، برای مسیر ۳۵، ۱۱۴ میلی متر در سال و برای مسیر ۱۴۹، ۱۳۰ میلی متر در سال برآورد شده است.

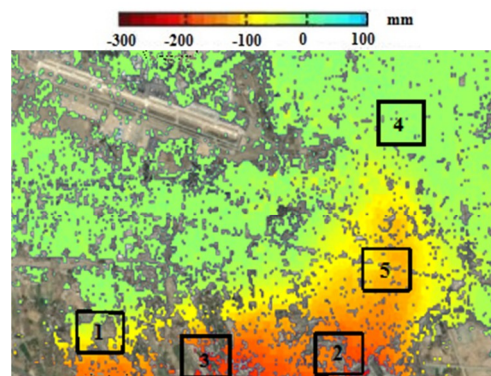
برای مقایسه کمی و تحلیل نتایج، پنج ناحیه در منطقه مورد مطالعه تعریف شده است. این نواحی به شعاع حدودی ۷۰۰ متر، با محدوده های مربع شکل با شماره های ۱ تا ۵، در شکل ۸ مشخص شده اند.

تعداد نقاط به همدوسی تصاویر مورد استفاده ربط خواهد داشت. از دیگر سو، با توجه به بیشتر بودن نسبت سیگنال به نویز در حالت تصویربرداری 2015 Veci (TOPS) تراکم بالای نقاط PS و کارایی بهتر داده حالت TOPS را، در مقایسه با داده حالت Strip-Map نتیجه داده است.

به دلیل خط مبنای زمانی کوتاه داده های S-1A، تغییرات اتفاق افتاده در بازه زمانی کوتاه تر را نیز می توان شناسایی کرد. از این فاکتورها نتیجه می گیریم داده های سنجنده S-1A، برای تحلیل مجموعه زمانی، مورد اعتماد خواهند بود.

۵- بحث و بررسی

از روش های ارزیابی صحت نتایج حاصل، استفاده از روش های میدانی یا به کارگیری از مجموعه داده متفاوت است. در ابتدا، از تصاویر دریافتی در مسیر ۳۵ از داده



شکل ۸. نواحی انتخاب شده برای ارزیابی نتایج. برای نمایش بهتر، از نقشه فرونشست منطقه در پس زمینه استفاده شده است.

است. برای نمونه مطابق جدول ۲، فرونشست ناحیه دشت، با برآورد میانگین حدود ۸۰ میلی‌متر در سال، بیشتر از برآورد فرونشست برای ناحیه مرز بین شهر و دشت، یعنی ناحیه ۱، با برآورد میانگین حدود ۴۷ میلی‌متر در سال است. برای نواحی ۲، ۴ و ۵ که معرف مناطق شهری‌اند، مقادیر برآورد فرونشست، با توجه به نزدیک بودن ناحیه مورد نظر به دشت تهران، متغیر بوده است. میانگین فرونشست برای ناحیه ۲، به سبب فاصله کمتر، حدود ۷۴، برای ناحیه ۵ که در میانه واقع شده، حدود ۵۱ و برای ناحیه ۴ که در دورترین ناحیه از دشت تهران انتخاب شده، ۱ میلی‌متر در سال برآورد شده است. این موضوع در تمامی تحلیل‌ها نتیجه‌گیری شده و در جدول‌هایی که در ادامه خواهند آمد، مشهود است.

مطابق جدول‌های ۲ و ۳، نتایج حاصل از تحلیل مجموعه زمانی تصاویر مسیره‌های ۲۸ و ۳۵ سنجنده S-1A و مطابق جدول‌های ۴ و ۵، نتایج حاصل از تحلیل مجموعه زمانی تصاویر مسیره‌های ۴۱۴ و ۱۴۹ سنجنده ENVISAT-ASAR همدیگر را تأیید می‌کنند.

پنج ناحیه در منطقه مشترک زیر پوشش هر چهار مجموعه داده انتخاب شده‌اند. ناحیه ۳ در منطقه دشت، ناحیه ۱ در منطقه مرزی بین دشت و شهر و نواحی ۲، ۴ و ۵ در محدوده شهری در نظر گرفته شدند. میانگین نرخ تغییرات در راستای خط دید سنجنده این نواحی در جدول‌های ۲ تا ۵ درج شده است. در هر جدول، سطر دوم تعداد نقاط پردازش شده در هر ناحیه، سطر سوم میانگین نرخ تغییرات LOS در هر ناحیه و سطر آخر دقت نرخ برآورد شده در هر ناحیه را نشان می‌دهند.

مطابق نتایج ارزیابی، رفتار فرونشست در همه تحلیل‌های مجموعه زمانی مشابه است. فرونشست در منطقه دشت بیشتر از منطقه شهری برآورد شده که حاکی از استخراج آب‌های زیرزمینی در مناطق کشاورزی است. با استفاده از میانگین نرخ فرونشست در نواحی تعریف شده، می‌توان نتیجه گرفت که هرچه از منطقه دشت به سمت منطقه شهری نزدیک می‌شویم، از میزان فرونشست کاسته می‌شود و فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی به منطقه شهری نیز رسیده

جدول ۲. میانگین نرخ تغییرات برآوردی از داده مسیر ۲۸ S-1A

S-1A Track 28	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵
تعداد PS	۸۹۰	۱۱۵۵	۴۱۷	۱۵۳۹	۱۱۴۴
میانگین نرخ فرونشست (mm/year)	-۴۷/۷	-۷۴/۳	-۸۱/۱	-۱/۱	-۵۱/۴
σ_v	۱/۱۹۹۹	۱/۲۱۶۵	۱/۲۱۰۵	۱/۱۸۸۹	۱/۲۰۲۷

جدول ۳. میانگین نرخ تغییرات برآوردی از داده مسیر ۳۵ S-1A

S-1A Track 35	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵
تعداد PS	۹۰۱	۱۲۵۲	۲۹۳	۱۴۶۰	۱۳۶۶
میانگین نرخ فرونشست (mm/year)	-۴۶/۳	-۷۰/۸	-۷۷/۹	-۰/۸	-۴۸/۸
σ_v	۱/۰۳۴۲	۱/۰۳۹۸	۱/۰۴۳۲	۱/۰۳۳۹	۱/۰۳۱۳

جدول ۴. میانگین نرخ تغییرات برآوردی از داده مسیر ۴۱۴ ENVISAT-ASAR

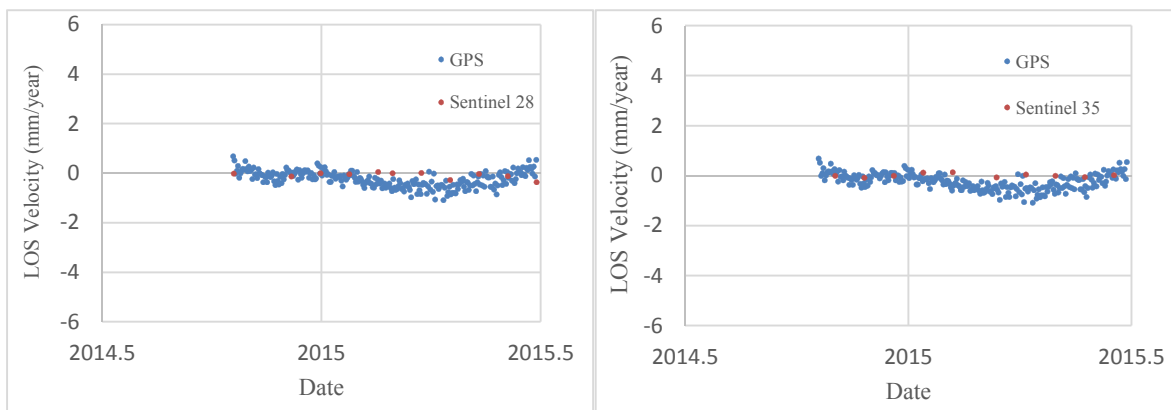
ENVISAT-ASAR Track-414	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵
تعداد PS	۷۲	۲	۰	۳۹۵	۲۸
میانگین نرخ فرونشست (mm/year)	-۳۰/۵	-۳۸/۶	-	-۱/۶	-۱۷/۰
σ_v	۰/۳۶۸۱	۰/۳۷۵۰	-	۰/۳۶۲۴	۰/۳۸۳۲

جدول ۵. میانگین نرخ تغییرات برآوردی از داده مسیر ۱۴۹ ENVISAT-ASAR

ENVISAT-ASAR Track-149	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳	ناحیه ۴	ناحیه ۵
تعداد PS	۲۵	۱	۰	۱۴۴	۱۰
میانگین نرخ فرونشست (mm/year)	-۴۱/۷	-۴۳/۵	-	-۱/۵	-۲۴/۸
σ_v	۰/۳۶۱۲	۰/۳۵۰۰	-	۰/۳۵۲۸	۰/۳۵۳۰

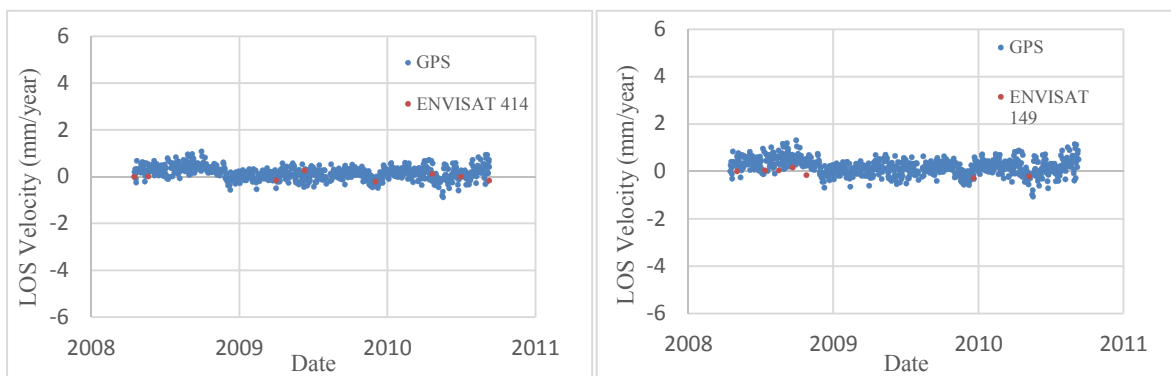
در منطقه مورد مطالعه قرار دارند. از این رو، برای ارزیابی نتایج حاصل از مجموعه داده‌های ENVISAT-ASAR، مشاهدات دو ایستگاه ترازیبی و یک ایستگاه GPS و برای ارزیابی صحت تحلیل مجموعه داده‌های S-1A، فقط مشاهدات ایستگاه GPS به کار گرفته شد. با انتخاب نزدیک‌ترین نقطه پراکنشگر دائمی به هریک از این ایستگاه‌ها، نمودار رفتار مجموعه زمانی تداخل سنجی و مشاهدات زمینی، مطابق شکل ۹، ارائه شده است. الگوی رفتاری فرونشست برای تحلیل تداخل سنجی چهار مجموعه داده و مشاهدات ایستگاه GPS یکدیگر را تأیید می‌کنند. ایستگاه GPS یادشده در منطقه شهری و بدون فرونشست قرار گرفته است. مشاهدات این ایستگاه، با استفاده از مشاهدات راستای شمال- جنوب، شرق- غرب و قائم به راستای خط دید چهار مسیر مورد مطالعه، تبدیل شده است.

σ_v معرف دقت برآورد نرخ تغییرات در نواحی انتخاب شده است (Ferretti et al., 2001) که، با توجه به رابطه (۵)، مقادیر آن برای تحلیل مجموعه‌های زمانی داده‌های مورد استفاده را می‌توان توجیه کرد. چون پراکنندگی خط مبنای زمانی مورد استفاده در تحلیل تداخل سنجی داده‌های S-1A کوچک‌تر از باز زمانی داده‌های ENVISAT-ASAR است، دقت محاسبه شده در جدول‌های بالا منطقی خواهد بود. برای ارزیابی با استفاده از داده‌های زمینی، مشاهده‌های ترازیبی دقیق و سامانه تعیین موقعیت جهانی به کار برده شد. از بین خطوط ترازیبی، مسیر ترازیبی بزرگراه آیت‌الله سعیدی و فقط دو ایستگاه از این مسیر، در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰، و از بین ایستگاه‌های سامانه تعیین موقعیت جهانی، فقط یک ایستگاه «IPGN»، واقع در سازمان نقشه‌برداری کشور،



(ب)

(الف)



(د)

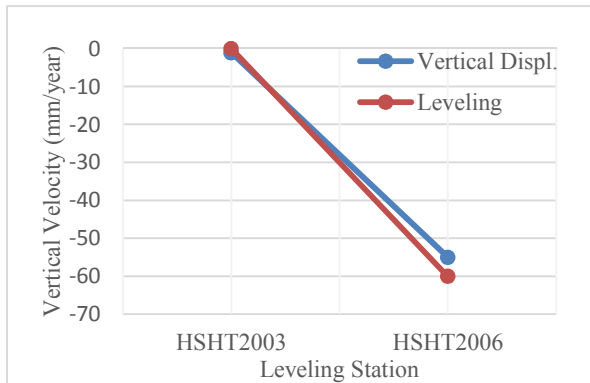
(ج)

شکل ۹. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی و مشاهدات ایستگاه GPS. (الف) مقایسه نرخ جابه‌جایی در راستای خط دید سنجنده مسیر S-1A ۲۸ و مشاهدات GPS؛ (ب) مقایسه نرخ جابه‌جایی در راستای خط دید سنجنده مسیر S-1A ۳۵ و مشاهدات GPS؛ (ج) مقایسه نرخ جابه‌جایی در راستای خط دید سنجنده مسیر ENVISAT-ASAR ۱۴۹ و مشاهدات GPS؛ (د) مقایسه نرخ جابه‌جایی در راستای خط دید سنجنده مسیر ENVISAT-ASAR ۴۱۴ و مشاهدات GPS

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای برآورد نرخ پدیده فرونشست در بخش جنوبی شهر تهران، از تکنیک PSI، با به‌کارگرفتن مجموعه داده‌های S-1A و ENVISAT-ASAR استفاده شد. تکنیک PSI با استفاده از مجموعه داده‌ای از S-1A پردازش شد و بیشترین نرخ فرونشست برای منطقه مطالعاتی حدود ۱۳۰ میلی‌متر در سال برآورد شد. به دلیل نزدیک بودن منطقه مطالعاتی به دشت تهران، فرونشست در این منطقه به چشم می‌خورد. به‌منظور مقایسه الگوی رفتاری پدیده فرونشست در بازه

همان‌طور که بیان شد، برای ارزیابی تحلیل تداخل‌سنجی مجموعه داده ENVISAT-ASAR، افزون‌بر ایستگاه GPS، از دو ایستگاه ترازیبی دقیق HSHT2003 و HSHT2006 نیز استفاده شد. با تلفیق داده‌های مسیر بالاگذر و پایین‌گذر داده ENVISAT-ASAR، نرخ جابه‌جایی در راستای قائم محاسبه و با مشاهدات ترازیبی مقایسه شد. مقایسه نتایج حاصل از تداخل‌سنجی و مشاهدات ترازیبی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. می‌بینیم که مقادیر نرخ جابه‌جایی در راستای قائم و مقادیر نرخ جابه‌جایی ترازیبی یکدیگر را تأیید می‌کنند.



(ب)

(الف)

شکل ۱۰. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی و مشاهدات ترازیبی دقیق. (الف) مسیر ترازیبی مورد استفاده و دو ایستگاه مورد نظر؛ (ب) مقایسه نرخ جابه‌جایی در راستای قائم، حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی داده‌ی ENVISAT-ASAR و مشاهدات ایستگاه‌های ترازیبی

همچنین، در این تحقیق، پتانسیل داده‌ی S-1A برای پردازش تداخل‌سنجی راداری بررسی شد. مطابق نتایج، در مقایسه با تصاویر ENVISAT-ASAR، همدوسی بالای این تصاویر موجب حصول تعداد نقاط پراکنشگر همواره بیشتر و در نتیجه، نقشه‌ی فرونشست مترکم‌تری شده است. افزون‌بر آن، به دلیل خط مبنای زمانی کوتاه این تصاویر، تغییراتی که در بازه‌ی زمانی کوتاه‌تری اتفاق افتاده‌اند نیز برآورد شده است.

۷- منابع

- میرشاهی، ف.، ولدان‌زوج، م.ج.، ۱۳۹۲، اندازه‌گیری جابجایی سطح زمین به کمک تصاویر سنجنده TerraSAR-X با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- Dehghani, M., 2015, **Landslide Monitoring Using Hybrid Conventional and Persistent Scatterer Interferometry**, Indian Society of Remote Sens., 44(4).
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M.J., Entezam, I., Saatchi, S. & Shemshaki, A., 2010, **Interferometric Measurements of Ground Surface Subsidence Induced by Overexploitation of Groundwater**, Journal of Applied Remote Sens., 4(1).

دوساله ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ با رفتار فرونشست برای سال‌های بین ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰، از تصاویر ENVISAT-ASAR استفاده شد. به دلیل همدوسی پایین یال‌های گراف ستاره‌ای حاصل از تصاویر ENVISAT-ASAR، برای تشکیل تداخل‌نما در این تحلیل، گراف تصاویر MST به کار رفت. نتایج، برای هر دو مجموعه داده، الگوی رفتاری مشابهی را نشان دادند؛ با این تفاوت که نرخ فرونشست در تهران، از سال ۲۰۰۳ تا کنون، افزایش یافته و دلیل مهم آن برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، برای مصارف کشاورزی در منطقه دشت است.

با هدف ارزیابی کار پردازش‌شده، نرخ تغییرات مورد برآورد با نتایج حاصل از تحلیل مجموعه‌ی زمانی داده‌های مربوط به مسیرهای متفاوت و مشاهدات میدانی ترازیبی دقیق و یک ایستگاه از سامانه تعیین موقعیت جهانی مقایسه شد و رفتار فرونشست مشابهی برای تمامی تحلیل‌های مجموعه‌ی زمانی به دست آمد. بدین‌منظور، در منطقه مطالعاتی، چندین ناحیه به صورت تصادفی انتخاب شدند و میانگین نرخ فرونشست برای هر ناحیه با ناحیه‌های دیگر مقایسه شد. بیشترین نرخ تغییرات برآوردی مربوط به ناحیه دشت و مناطق نزدیک آن است.

- Dehghani, M., Valadan Zoej, M.J., Hooper, A., Hanssen, R., Entezam, I. & Saatchi, S., 2013, **Hybrid Conventional and Persistent Scatterer SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring in the Tehran Basin, Iran**, ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing, 79, PP. 157–170.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2001, **Permanent Scatterer in SAR Interferometry**, IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 39(1), PP. 8–20.
- Grandin, R., 2015, **Interferometric Processing of SLC Sentinel-1 TOPS Data**, FRINGE 2015 Frascati Rome Italy.
- Hanssen, R.F., 2001, **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis**, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Hooper, A., Segall, P. & Zebker, H.A., 2006, **Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos**, Journal of Geophysical Research.
- Kampes, B., 2005, **Displacement Parameter Estimation Using Permanent Scatterer Interferometry (Ph.D. Dissertation)**, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Mahmoudpour, M., Khamsehchiyan, M., Nikudel, M. & Ghasemi, M., 2013, **Characterization of Regional Land Subsidence Induced by Groundwater Withdrawals in Tehran, Iran**, JGeope.
- Perissin, D. & Wang, T., 2012, **Repeat-Pass SAR Interferometry with Partially Coherent Targets**, IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 50(1), PP. 1–10.
- Perissin, D., Wang, Z. & Wang, T., 2010, **The SARPROZ InSAR Tool for Urban Subsidence/Manmade Structure Stability Monitoring in China**, ISRSE Sydney Australia.
- Poland, J.F., 1984, **Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal**, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Unesco.
- Prati, C., Rocca, F., Monti Guarnieri, A. & Pasquali, P., 1994, **Interferometric Techniques and Applications** (No. Contract N.3–7439). Ispra, Italy.
- Prats, P., Marotti, L., Wollstadt, S. & Scheiber, R., 2010, **Investigations on TOPS Interferometry with TerraSAR-X**, Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS IEEE International.
- Sadeghi, Z., Valadan Zoej, M.J. & Dehghani, M., 2013, **An Improved Persistent Scatterer Interferometry for Subsidence Monitoring in the Tehran Basin**, IEEE Journal of Selected Topic Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 63, PP. 1571–1577.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., Potin, P., Rommen, B., Floury, N., Brown, M., Trave, I., Deghaye, P., Duesmann, B., Rosich, B., Miranda, N., Bruno, C., L'abbate, M., Croci, R., Pietropaolo, A., Huchler, M. & Rostan, F., 2012, **GMES Sentinel-1 Mission**, Remote Sensing Environment, Vol. 120, PP. 9–24.
- Usai, S. & Hanssen, R., 1997, **Long Time Scale InSAR by Means of High Coherence Features**, European Space Agency-Publications-ESA SP 414, Vol. 1, PP. 225–228.
- Veci, L., 2015, **TOPS Interferometry Tutorial**, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/toolboxes/sentinel-1/tutorials>.