



A Study on Land Subsidence in West of Tehran Using Sentinel-1 Images and Persistent Scatterers Interferometry

Y. Maghsoudi^{1*}, R. Amani² and H. Ahmadi³

Abstract

During the past decades, Tehran metropolitan has suffered from land subsidence crisis. Prolonged droughts and excessive exploitation of groundwater for agricultural and industrial purposes have reduced the level of water in aquifers and reduced the density of the subsurface soil layers. This study focused on monitoring the displacement of the ground in west of Tehran which is affected by subsidence of Shahriyar and Tehran plains. A time series of 30 Sentinel-1 images were processed by radar interferometry technic based on the persistent scatterers in two years. Average annual displacement map was prepared for the region under study. The result indicated 15 centimeters of displacement in southern part of the study area where it reaches Shahriyar and Tehran plains. However, displacement is not limited to plains and non-urban areas. It has also scattered through industrial and urban areas. In industrial and residential areas, cumulative displacement of 9 to 13 centimeter was recorded in two years especially in Fath Highway which experienced more than 4 centimeters of displacement each year. Relative evaluation of results was made based on the data gathered from underpass 35. Considering the small difference in the estimates obtained from tracks 28 and 35, these areas had little Horizontal displacement. Displacement vector was high in vertical movement. Vertical displacement was computed for ascending and descending tracks in the second study region and was verified by the data from a GPS station.

Keywords: Radar Interferometry, Permanent Scatterers, Subsidence, Sentinel-1.

Received: February 3, 2018

Accepted: December 18, 2019

بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی

یاسر مقصودی^{۱*}، رضا امانی^۲ و حسن احمدی^۳

چکیده

تهران طی چند دهه اخیر با بحران فرونشست روبرو بوده است؛ خشکسالی‌های پیاپی و استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و صنعتی موجب کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و تراکم لایه‌های خاک، در نتیجه پدیده فرونشست شده است. در این مقاله یک سری زمانی دو ساله شامل ۳۰ تصویر سنجنده سنتینل-۱، با استفاده از روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی در دو ناحیه مطالعاتی مورد پردازش قرار گرفت. نقشه جابجایی متوسط سالانه برای مناطق مطالعاتی تولید گردید. نتایج، جابجایی سالانه ۱۵ سانتی متری در جنوب منطقه مورد مطالعه، جایی که به دشت‌های شهریار و تهران منتهی می‌شود را نشان می‌دهد، اما جابجایی تنها محدود به مناطق دشتی و غیر شهری نبوده بلکه به مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. بطوری که در مناطق دارای واحدهای صنعتی و مسکونی، طی دو سال، شاهد جابجایی تجمعی ۹ تا ۱۳ سانتی متری هستیم بخصوص در محورهای ارتباطی نظیر بزرگراه فتح که در چندین بخش از این بزرگراه جابجایی بالای ۴ سانتی متر در سال را داریم. ارزیابی نسبی نتایج در منطقه اول با استفاده از داده‌های مسیر پایین‌گذر ۳۵ انجام گرفت که با توجه به اختلاف ناچیز برآورد دو مسیر ۲۸ و ۳۵، نواحی مذکور جابجایی افقی بسیار کمی داشته و عمده بردار جابجایی را حرکت قائم تشکیل می‌دهد. همچنین، جابجایی قائم با استفاده از دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر برای منطقه مطالعاتی دوم برآورد گردید که با بهره‌گیری از داده‌های یک ایستگاه GPS صحت‌سنجی شد.

کلمات کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، پراکنشگرهای دائم، فرونشست، سنتینل-۱.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۹/۲۷

1- Assistant Professor, Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. Email: ymaghsoudi@kntu.ac.ir

2- Ph.D. Student, School of Civil Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی عمران-گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکان‌پذیر است.

۱- مقدمه

فرونشست^۱ عبارت است از حرکت قائم یا نشست تدریجی و یا فرو رفتن ناگهانی سطح زمین، که به علت‌های گوناگونی نظیر انحلال، آب شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات پوسته زمین و خروج گدازه‌ها از پوسته جامد زمین و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و یا نفت رخ می‌دهد. ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک با نزولات جوی بسیار اندک است که منبع اصلی تأمین نیازهای کشاورزی، شرب و نیز صنعتی، آبهای زیرزمینی است و در زمره کشورهای مواجه با بحران کمبود آب قلمداد می‌شود (Asadzadeh et al., 2016).

در ایران بروز خشکسالی‌های فراوان به ویژه در شرق و مرکز کشور از یک سو و استفاده بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی برای گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی از سوی دیگر موجب بروز پدیده فرونشست در بسیاری از دشت‌های ایران از جمله دشت‌های رفسنجان، مشهد، کرمان، کبودرآهنگ، ورامین، تهران و نیشابور شده است.

استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی باعث افت سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار سیال و در نتیجه افزایش فشار میان ذره‌ای می‌شود که منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست زمین می‌گردد (Terzaghi, 1925). افت ناموزون سطح آب زیرزمینی و ناهمگنی بافت، ضخامت، ویژگی آبرفت‌های منطقه نیز موجب فرونشست ناموزون سطح زمین می‌شود و شکاف‌هایی در پوسته زمین به وجود می‌آورد.

بررسی این فرآیند نه تنها برای مطالعه منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از تبعات منفی ناشی از استخراج مدیریت نشده آب از آبخوان‌های کشور (به دلیل تغییر در توپوگرافی و خصوصیات هیدرولوژیکی منطقه) که برای جلوگیری از اثرات زیانبار آن در تخریب سازه‌ها و زیر ساخت‌های شهری نظیر ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو لازم و ضروری است. ضمن اینکه بهره‌برداری غیر اصولی از آب‌های زیرزمینی و فرونشست ناشی از آن موجب فشردگی، تخریب و شکست لایه‌های زیرین می‌گردد که از جمله عوامل موثر در افزایش تخریب ساختمان‌ها و سازه‌ها هنگام بروز زلزله و بلایای طبیعی دیگر است. لذا نظارت و مدیریت بر فرونشست زمین به منظور مقاوم‌سازی و کاهش تخریب و خسارات سازه‌ها و ساختمان‌ها در درجه اهمیت بالایی قرار دارد، بخصوص در مناطق شهری که به دشت‌ها منتهی می‌شوند. مناطق شهری به سبب تراکم جمعیت، وجود ساختمانها و شریان‌های حیاتی به طور ویژه در برابر فرونشست زمین آسیب پذیرتر می‌باشند. این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگراه‌ها آسیب وارد

آورده و سازه‌های مهم مانند پالایشگاه، نیروگاه، فرودگاه، تأسیسات گاز را تهدید نموده، کارایی خطوط آبرسانی، نفت، بنزین، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان‌ها آسیب رسانده و موجب ترک خوردگی در آن‌ها گردد. خطوط راه آهن، سدهای خاکی، تصفیه خانه‌ها و کانال‌های آبیاری در این شرایط از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردارند.

تهران نیز به عنوان پایتخت ایران با جمعیت بالای ۱۳ میلیون نفر در سال‌های اخیر به دلایل برداشت بی‌رویه آب در فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در حوزه غیرشهری و دشت‌ها شاهد وقوع پدیده فرونشست می‌باشد که به مناطق شهری با جمعیت بالا نیز گسترش یافته است و مناطق جنوب و جنوب غربی را تحت تأثیر قرار داده است، از این رو نه تنها گسترش شهری را با مشکل پایداری و مقاومت زمین مواجه ساخته بلکه با توجه به مهم بودن منطقه مذکور از نظر اقتصادی، زیرساخت‌ها و سرمایه‌های خصوصی و غیر خصوصی را در این ناحیه تهدید می‌کند. نواحی جنوبی و غربی تهران استان تهران شامل دشتهای تهران و شهریار است که به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی دارای بالاترین نرخ فرونشست در این استان می‌باشند؛ اما با توجه به تداوم فرونشست در این دشت‌ها دامنه این پدیده شهر تهران را نیز تحت تأثیر قرار داده است. لذا در این تحقیقات به دنبال بررسی رفتار فرونشست زمین و میزان نفوذ این پدیده در نواحی غربی شهر تهران هستیم.

عمومی‌ترین روش برای تعیین نشست در ایران استفاده از ترازبایی دقیق و ایجاد شبکه ملی می‌باشد که اولین بار بررسی جابجایی زمین با استفاده از داده‌های ترازبایی توسط (Amighpey et al., 2006) انجام شد. اندازه‌گیری‌های دوره‌ای ترازبایی اگرچه دقت مورد نیاز را در تشخیص نشست‌های منطقه‌ای و محلی تأمین می‌کنند، اما به دلیل صرف وقت و هزینه بالا روش مناسبی برای پایش فرونشست و تولید اطلاعات سری زمانی نیستند، ضمن اینکه آخرین برداشت ترازبایی مربوط به سال ۲۰۱۰ می‌باشد. شبکه ایستگاه‌های دائم GPS نیز از تراکم و پراکندگی بسیار پایینی برخوردار است به طوری که سازمان نقشه‌برداری کشور تنها ۶ ایستگاه فعال در تهران دارد. در سال‌های اخیر تکنیک تداخل‌سنجی راداری به میزان قابل توجهی برای نمایش، شناسایی و اندازه‌گیری دگرشکلی زمین مورد توجه قرار گرفته است (Osmanoğlu et al., 2016). این تکنیک با پوشش‌های مکرر و وسیع، دقت قابل قبول و قدرت تفکیک بالای تصاویر رادار در مطالعه پدیده‌های زمین‌شناسی همچون زلزله (Motagh et al., 2006)، فرونشست (Dehghani et al., 2009; Dehghani et al., 2013; Farina et al., 2007; Sadeghi et al., 2013)، زمین لغزش (Liu et al., 2013)، جابجایی سایت‌های زمین گرمایی (Maghsoudi

۲- روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی (PSI)

هدف اصلی روش PSInSAR شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که در فواصل زمانی طولانی هم‌دوس^{۱۰} می‌باشند که اصطلاحاً به آن‌ها پراکنش‌گرهای دائمی (PS) می‌گویند و اغلب زمانی اتفاق می‌افتد که ابعاد PSها کوچکتر از قدرت تفکیک مکانی تصویر SAR باشد. این پیکسل‌ها حتی در تداخل‌نماهایی با خط‌مبنای مکانی بزرگتر از حالت بحرانی نیز هم‌دوسی^{۱۱} مناسبی دارند (Ferretti et al., 2001). پراکنش‌گرهای دائمی بر پایه تحلیل دامنه تصاویر SAR در کل سری زمانی و از طریق محاسبه شاخص پراکنندگی دامنه (ADI)^{۱۲} انتخاب می‌شوند. شاخص پراکنندگی دامنه برای پیکسل m با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$D_n = \frac{\sigma_n}{m_n} \quad (1)$$

در این رابطه σ_n و m_n به ترتیب انحراف معیار و میانگین مقادیر دامنه برای پیکسل m در کل سری زمانی می‌باشد. با انتخاب پراکنش‌گرهای دائمی تداخل‌نماهای تمام تصاویر SAR نسبت به یک تصویر پایه^{۱۳} در نقاط PS محاسبه می‌گردد. لذا برای یک سری زمانی متشکل از $N+1$ تصویر، N تداخل‌نما تولید می‌شود. تصویر پایه تصویری خواهد بود که هم‌دوسی تجمعی کل تداخل‌نماها نسبت به آن تصویر بیشترین مقدار باشد (Maghsoudi & Mahdavi, 2015). هم‌دوسی تجمعی تابعی از خط‌مبنای مکانی قائم، خط‌مبنای زمانی و فرکانس مرکز داپلر^{۱۴} می‌باشد و از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد (Kampes, 2006):

$$\gamma^k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(B_{\perp}^{i,k}, B_{\perp, \max}) \cdot g(T_{\max}^{i,k}, T_{\max}) \cdot g(f_{dc}^{i,k}, f_{dc, \max}) \quad (2)$$

$$g(x, c) = \begin{cases} 1 - \frac{|x|}{c} & \text{for } |x| \leq c \\ 0 & \text{for } |x| > c \end{cases}$$

در رابطه (۲)، γ^k هم‌دوسی تجمعی برای تصویر پایه k ام و $B_{\perp, \max}$ ، T_{\max} و $f_{dc, \max}$ به ترتیب مقادیر بیشینه برای خط‌مبنای مکانی قائم، خط‌مبنای زمانی و فرکانس مرکزی داپلر می‌باشند. پس از انتخاب تصویر پایه و تشکیل تداخل‌نماها، فاز تداخل‌نما برای هر PS در تداخل‌نمای تشکیل‌شده از تصویر پیرو^{۱۵} m ام و تصویر پایه k به صورت رابطه (۳) خواهد بود:

(۳)

$$\Delta\phi_{i,k} = \Delta\phi_{i,k}^{\text{flat}}(p) + \Delta\phi_{i,k}^{\text{height}}(p) + \Delta\phi_{i,k}^{\text{disp}}(p) + \Delta\phi_{i,k}^{\text{atmo}}(p) + \Delta\eta_{i,k}(p)$$

(et al., 2017) و غیره ابزار مفیدی برای محققان محسوب می‌شود. فرکانس بالای مشاهدات مکانی و زمانی روش تداخل‌سنجی راداری، در مقایسه با ترازبایی می‌تواند دید جامعی از فرآیند تغییر شکل را در اختیار قرار دهد. علاوه بر فراوانی مکانی و زمانی مشاهدات، استفاده از این روش باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه نیز می‌گردد. روش‌هایی نظیر تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، تداخل‌سنجی تفاضلی (DInSAR)^۲ و تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی (PsInSAR)^۳ با هدف تولید مدل رقومی ارتفاعی و برآورد جابجایی زمین از طریق تصاویر رادار با روزه مجازی (SAR)^۴، توسعه یافته‌اند؛ که هر کدام از روش‌های توسعه‌یافته سعی در پوشش محدودیت‌های روش‌های قبلی داشته‌اند تا متناسب با مناطق و داده‌های راداری مختلف برآورد دقیق‌تری از جابجایی ارائه نمایند. از جمله محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی سنتی (DInSAR) به منظور برآورد جابجایی زمین می‌توان به موارد زیر اشاره نمود (Ferretti et al., 2001):

- ۱- عدم همبستگی زمانی^۵، عدم وابستگی مکانی در مناطق با پوشش گیاهی امکان اندازه‌گیری با استفاده از روش DInSAR را غیر ممکن می‌سازد، به طوری که با تغییر زمان، مشخصات مغناطیسی و موقعیت پراکنش‌گرها در داخل پیکسل تغییر می‌کند.
- ۲- ناهمبستگی مکانی^۶: تعداد جفت تصاویر مناسب برای تولید تداخل‌نماهای^۷ مناسب را محدود می‌کند و امکان بهره‌برداری کامل از مجموعه داده‌های موجود را ندارد.
- ۳- اثر جو: ناهمگونی‌های اتمسفر بر روی هر تصویر SAR فازی ایجاد می‌کند که اصطلاحاً به آن APS^۸ گفته می‌شود و می‌تواند محاسبه دقیق جابجایی را مختل نماید. در حقیقت APS نشانگر رفتار طیفی موج در هنگام گذر سیگنال از جو (با توجه به توزیع بخار آب موجود در تروپوسفر) می‌باشد.

با توجه به محدودیت‌های بیان شده در تحقیق حاضر به منظور برآورد فرونشست زمین از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی (PSInSAR) استفاده شده است (Ferretti et al., 2001) که با استفاده از نقاط پراکنش‌گر دائمی (PS)^۹ ضمن غلبه بر محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی سنتی، امکان پردازش پدیده فرونشست در یک سری زمانی بلند مدت را فراهم می‌نماید. تمامی پردازش‌ها با استفاده از ابزارهای طراحی شده در نرم‌افزار SARPROZ انجام شده است.

رابطه (۳) به ترتیب شامل فازهای زمین مسطح^{۱۶}، توپوگرافی، جابجایی در راستای خط دید سنجنده (LOS)^{۱۷}، اثر اتمسفر و نویز می‌باشد. ترم اول (فاز زمین مسطح) با استفاده اطلاعات دقیق مداری قابل حذف است. ترم دوم رابطه (۳) فاز ناشی از توپوگرافی می‌باشد که با استفاده از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

$$\Delta\varphi_{i,k}^{\text{height}}(p) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{n,i}}{R_k} \frac{\Delta h(p)}{\sin \theta} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)، $B_{n,i}$ خط مبنای مکانی قائم، Δh ارتفاع هدف p نسبت به نقطه رفرنس، θ زاویه فرودی و R_k فاصله سنسور تا هدف در تصویر پایه می‌باشند. ترم سوم رابطه (۳) جابجایی در راستای خط دید سنجنده است، روش رایج به منظور مدل کردن جابجایی، خطی فرض کردن این ترم در زمان می‌باشد که می‌توان آن را به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$\Delta\varphi_{i,k}^{\text{disp}}(p) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta v(p) B_{t,i} \quad (5)$$

در رابطه (۵) $\Delta v(p)$ سرعت هدف p نسبت به نقطه رفرنس و $B_{t,i}$ خط مبنای زمانی می‌باشد (Ferretti et al., 2001). ترم چهارم رابطه (۳)، فازی ناشی از اتمسفر است که پارامتری همبسته^{۱۸} در مکان برای فواصل کمتر از ۱ کیلومتر و ناهمبسته در زمان می‌باشد؛ لذا با استفاده از فیلتر پایین‌گذر مکانی و بالاگذر زمانی، می‌توان سهم فاز اتمسفر را از باقیمانده فاز جدا نمود، که باقیمانده فاز حاصل کم کردن فاز جابجایی و توپوگرافی از تداخل نماها می‌باشد. در صورتی که ابعاد منطقه مورد مطالعه کوچکتر از $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ باشد، می‌توان از اثر اتمسفر صرف نظر کرد لذا در رابطه (۳) با صرف نظر کردن از فاز اتمسفر مجهولات مسئله $\Delta h(p)$ و $\Delta v(p)$ خواهند بود. با توجه به این نکته که سمت چپ معادله (۳) بین $-\pi$ و π مدوله (اصطلاحاً Wrap) می‌باشد ولی سمت راست این رابطه شامل فازهای Unwrap است، لذا سیستم غیر خطی خواهد بود. برای حل مسئله از جست و جو در فضای فرکانسی دو بعدی (که بعدها این فضا $\Delta h(p)$ و $\Delta v(p)$ هستند) و بیشینه کردن تابع پریودوگرام^{۱۹} (رابطه ۶) استفاده می‌شود (Ferretti et al., 2001):

$$\xi[\Delta v(p), \Delta h(p)] = \frac{1}{N_I} \sum_{i=1}^{N_I} e^{j[\Delta\varphi_{i,k}(p) - C_v \Delta v(p) B_{t,i} - C_h \Delta h(p) B_{n,i}]} \quad (6)$$

که در معادله (۶)، $C_v = \frac{4\pi}{\lambda}$ و $C_h = \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta}$ می‌باشد. جواب مسئله $\Delta h(p)$ و $\Delta v(p)$ خواهد بود که به ازای آنها مقدار مطلق پریودوگرام بیشینه شود:

$$\Delta v(p), \Delta h(p) = \arg \max \{ |\xi[\Delta v(p), \Delta h(p)]| \} \quad (7)$$

در صورتی که منطقه مورد پردازش از ۱ کیلومتر مربع بزرگتر باشد نمی‌توان از فاز اتمسفر صرف نظر کرد لذا از یک شبکه مکانی بین نقاط پراکنش گرهای دائم و محاسبه اختلاف فاز بین PSهای مجاور استفاده می‌شود (Kampes, 2006). در این حالت مجهولات مسأله با همان روش پریودوگرام بر روی یال‌های با طول کمتر از ۱ کیلومتر برآورد شده و به روی نقاط PS منتقل می‌شود؛ در نتیجه سرعت جابجایی و خطای توپوگرافی در نقاط PS محاسبه می‌گردد. با کسر فاز دو پارامتر محاسبه شده، از تداخل نماها، فاز باقیمانده شامل اتمسفر و نویز خواهد بود با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر مکانی و بالاگذر زمانی سهم فاز اتمسفر نیز جدا می‌شود. به این ترتیب پس از جداسازی سهم اتمسفر، فاز باقیمانده فقط شامل نویز خواهد بود که به منظور ارزیابی صحت مدل مورد استفاده برای برآورد پارامترهای مجهول از رابطه (۸) که معروف به همدوسی زمانی^{۲۰} است، استفاده می‌شود و هرچه مقدار این کمیت به یک نزدیکتر باشد نشان دهنده انطباق مدل با داده‌های مورد استفاده خواهد بود:

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{i\phi} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، ϕ باقیمانده فاز تداخل نماها پس از کسر سهم فاز پارامترهای جابجایی، خطای توپوگرافی و اتمسفر می‌باشد.

۳- محدوده مورد مطالعه و مواد و داده‌ها

شهر تهران، غرب تهران و بخصوص منطقه چیتگر، از جمله مناطق در حال گسترش از نظر ساخت و سازهای مسکونی است که دشت شهریار در جنوب این منطقه واقع شده است. با توجه به گسترش دامنه نشست از مناطق غیرشهری به مناطق شهری و مسکونی و اهمیت ایمنی ساختمان‌ها بررسی فرونشست منطقه مورد نظر حایز اهمیت می‌باشد از این رو دو منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۱ در غرب کلان شهر تهران انتخاب شده است. که ناحیه مطالعاتی اول (منطقه A) شامل منطقه ۲۲ شهرداری (چیتگر)، بخشی از منطقه ۲۱ شهرداری و شهر قدس می‌باشد. این منطقه از شمال محدود به رشته کوه‌های البرز مرکزی، از غرب به انتهای شهر قدس و شهریار، از شرق به فرودگاه مهرآباد و از جنوب به دشت تهران و شهریار منتهی می‌شود. این منطقه با ابعاد 15×15 کیلومتر مربع، در بین طول‌های جغرافیایی $51^\circ 30' 51''$ و $51^\circ 16' 36''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $38^\circ 35' 46''$ و $38^\circ 44' 34''$ شمالی قرار دارد.

منطقه مورد مطالعه دوم (منطقه B)، شامل فرودگاه مهرآباد و نواحی جنوبی این فرودگاه می‌باشد که به دشت تهران منتهی می‌گردد و با ابعاد 5×10 کیلومتر مربع در بین طول‌های جغرافیایی $51^\circ 41' 16''$

۲۸ اخذ شده‌اند. داده‌های مسیر ۲۸ برای برآورد جابجایی و مسیر ۳۵ به منظور ارزیابی نسبی نتایج این تحقیقات در منطقه مطالعاتی اول و برآورد مؤلفه‌ی قائم در منطقه مطالعاتی دوم، با هدف مقایسه با داده‌های GPS، مورد استفاده قرار گرفتند. مسیر ۲۸ شامل ۳۰ تصویر از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۲۳ تا ۲۰۱۶/۱۲/۰۷ است که در حالت بالاگذر^{۲۲} اخذ شده‌اند. مسیر ۳۵ نیز شامل ۳۰ تصویر می‌باشد که از تاریخ ۲۰۱۴/۱۱/۰۱ تا ۲۰۱۶/۱۲/۲۰ و در حالت پایین‌گذر^{۲۳} اخذ گردیده‌اند. مد تصاویر سنجنده سنتینل-۱ برای کاربردهای تداخل‌سنجی IW^{۲۴} می‌باشد که با استفاده از روش پیشرفته TOPSAR^{۲۵} اخذ می‌شوند. سایر مشخصات سنجنده سنتینل-۱ در جدول ۱ و اطلاعات کامل داده‌های مورد استفاده در جدول ۲ درج شده است.

"۵۱°۲۱'۲" شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۳۷°۳۵'۳" و "۳۵°۴۱'۵۷" شمالی قرار گرفته است. در محدوده شهر تهران تنها ۶ ایستگاه دائم GPS وجود دارد که تنها یکی از این ایستگاهها در بازه زمانی مورد مطالعه این تحقیقات داده اخذ نموده است، از این رو با هدف ارزیابی نتایج حاصل از این تحقیقات با استفاده از این ایستگاه GPS، منطقه مطالعاتی دوم انتخاب شده است که ایستگاه دائم GPS در محدوده این منطقه قرار دارد.

در تحقیق حاضر به منظور پایش جابجایی منطقه مورد مطالعه از داده‌های سنجنده سنتینل-۱^{۲۱} استفاده گردید که در دو مسیر ۳۵ و

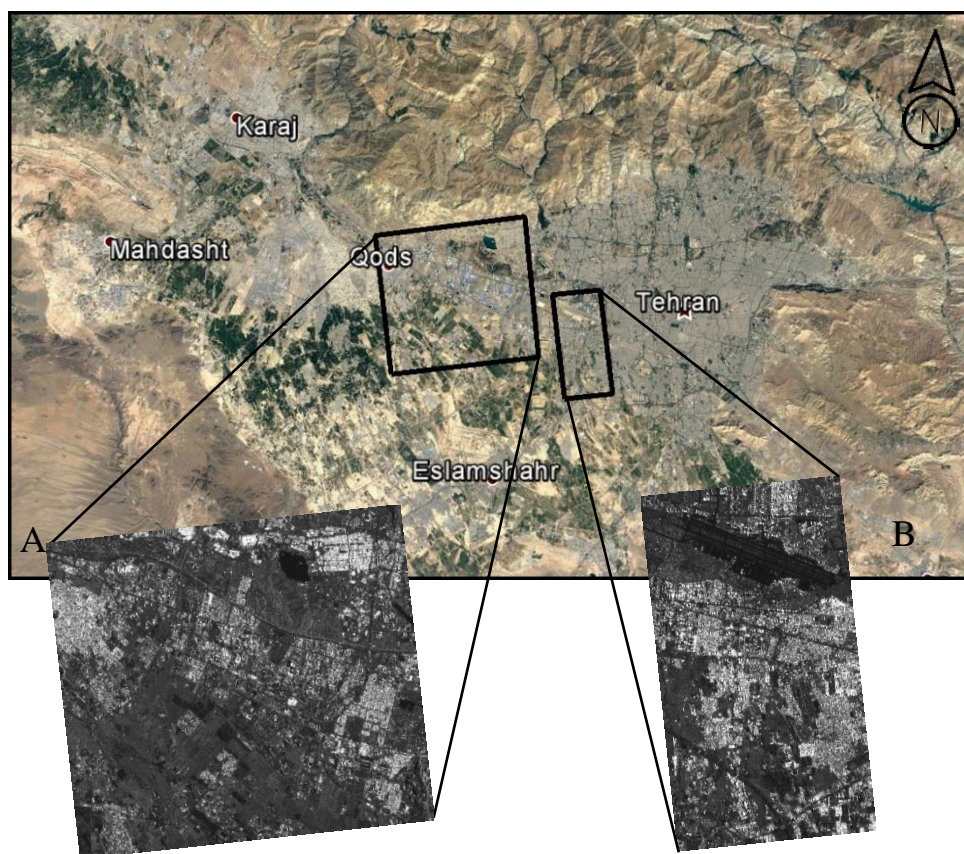


Fig. 1- (A) Average intensity of all images in first study region. (B) average intensity of all images in second study region.

شکل ۱- (A) تصویر میانگین دامنه تمامی تصاویر در منطقه مطالعاتی اول و (B) تصویر میانگین دامنه تمامی تصاویر در منطقه مطالعاتی دوم

Table 1- The characteristics of Sentinel-1A sensor
جدول ۱- مشخصات سنجنده سنتینل-۱

Sensor	Resolution (m)	Polarization	Revisit (day)	Incidence Angle (deg)	Wavelength (cm)	Mode
Sentinel-1	5×20	VV	12	20 - 46	5.547	IW

Table 2- The characteristics of data sets
جدول ۲- مشخصات داده‌های دو مسیر ۲۸ و ۳۵

	Images No.	Time series period	Incidence Angle (deg)	Pass	Polarization
Track 28	30	2015/01- 2016/12	39.409	Ascending	VV
Track 35	30	2014/11- 2016/12	39.3549	Descending	VV

۴- نتایج پردازش

اطلاعات دقیق مداری به منظور حذف فاز ناشی از زمین مسطح استفاده شد و DEM^{۲۶} ۳۰ متری ALOS با دقت ارتفاعی ۷ متر به منظور حذف فاز توپوگرافی از روی تداخل نماها مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۳ یکی از تداخل نمای تشکیل شده پس از حذف فاز زمین مسطح و توپوگرافی را در منطقه مطالعاتی اول، نشان می‌دهد.

با اعمال حد آستانه ۰/۲۵ بر روی شاخص پراکندگی دامنه (ADI)، به ترتیب تعداد ۸۰۰۷ و ۱۹۰۴ پیکسل به عنوان PSهای کاندید در مناطق A و B انتخاب شدند. با توجه به ابعاد بزرگ مناطق انتخابی (بزرگتر از ۱ کیلومتر مربع) نمی‌توان از فاز اتمسفر صرف نظر کرد لذا از شبکه مثلث‌بندی دلونی^{۳۷} بین PSها و محاسبه اختلاف فاز بر روی یال‌های این شبکه استفاده شد.

به منظور پردازش سری زمانی داده‌های مسیر ۲۸، مطابق شکل ۱ ناحیه اول به ابعاد ۱۵×۱۵ کیلومتر مربع و ناحیه دوم به ابعاد ۱۰×۵ کیلومتر مربع در غرب تهران مطابق توصیفات که در بخش قبلی ارائه شد، انتخاب گردید. در هر دو منطقه مطالعاتی کلیه تصاویر نسبت به تصویر ۲۰۱۶/۰۵/۰۵ (تصویر پایه) ثبت هندسی شدند. تصاویر پایه براساس همدوسی تجمعی کل تداخل‌نماها مطابق رابطه (۲) انتخاب شده‌است. تداخل‌نماهای مربوط به ۲۷ تصویر پیرو نسبت به تصویر ۲۰۱۶/۰۵/۰۵ براساس گراف نمایش داده شده در شکل ۲ تشکیل شدند. شکل ۲ وضعیت تصاویر پیرو نسبت به تصویر پایه را در فضای دوبعدی خط مبنای مکانی و زمانی، نمایش می‌دهد که خط بین دو تصویر نمایان‌گر یک تداخل‌نما و رنگ آن خط نشان دهنده همدوسی آن تداخل‌نما در منطقه مورد مطالعه اول است.

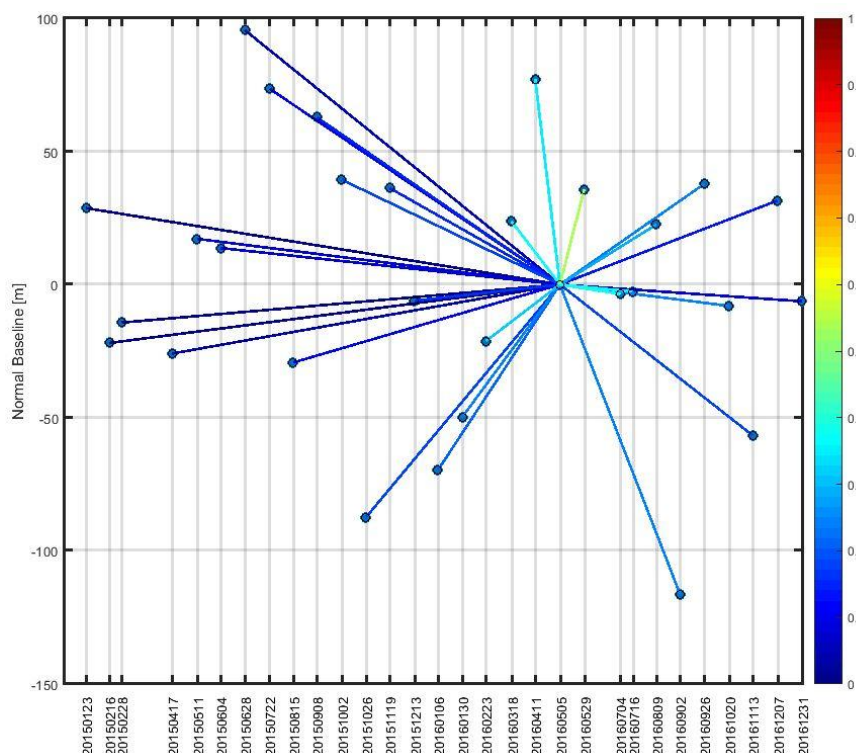


Fig. 2- Slave images with respect to master images (5 May 2016) in two-dimensional space of spatial perpendicular baseline and temporal baseline

شکل ۲- وضعیت تصاویر پیرو نسبت به تصویر پایه (۲۰۱۶/۰۵/۰۵) در فضای دوبعدی خط مبنای مکانی قائم و خط مبنای زمانی

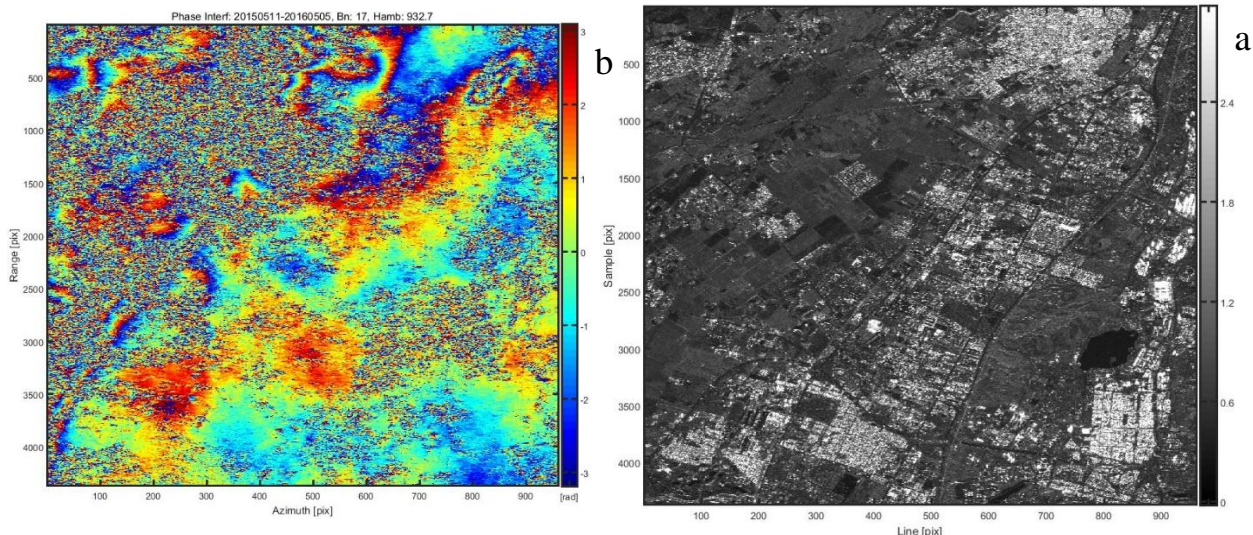


Fig. 3- (a) Study region in SAR system, (b) generated interferogram using images taken on 11 May 2015 and 5 May 2016

شکل ۳- (a) منطقه مورد مطالعه در سیستم مختصات سنجنده و (b) تداخل‌نمای تولید شده متناظر با آن بین تصاویر ۲۰۱۶/۰۵/۰۵ و ۲۰۱۵/۰۵/۱۱

و خطای توپوگرافی در نقاط پراکنش‌گر اولیه محاسبه گردید. لازم به ذکر است با توجه به اینکه عموماً رفتار نشست به دلیل استخراج آبهای زیرزمینی، تدریجی بوده و بازه اخذ تصاویر (دو سال) بلند مدت نمی‌باشد، لذا به منظور برآورد جابجایی از یک مدل خطی استفاده گردید. در نقاط PS، فاز جابجایی و خطای توپوگرافی از روی تداخل‌نماها کسر گردیده و با اعمال یک فیلتر بالاگذر زمانی و پایین‌گذر مکانی بر روی باقیمانده تداخل‌نماها سهم فاز اتمسفر محاسبه شد.

با توجه به تراکم مناسب و فواصل کوتاه PS‌های مجاور در شبکه مثلث‌بندی می‌توان از فاز اتمسفر بر روی یال‌های شبکه صرف نظر کرد، لذا مجهولات باقی مانده برای هر یال شبکه سرعت جابجایی در راستای LOS و خطای توپوگرافی خواهند بود. شبکه مثلث‌بندی برای داده‌های مسیر ۲۸ و منطقه مطالعاتی A در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد که شامل ۲۳۹۷۹ یال بین پراکنش‌گرهای کاندید می‌باشد. برای هر یال شبکه سرعت جابجایی و خطای توپوگرافی با استفاده از پریودوگرام محاسبه شده و از طریق عملیات یکپارچه‌سازی^{۲۸} جابجایی

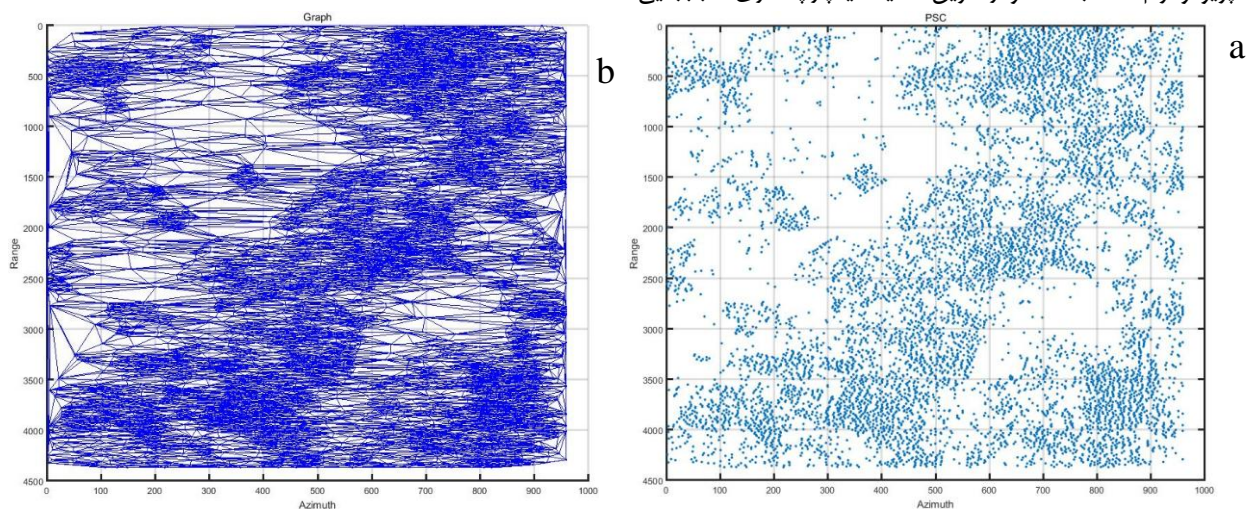


Fig. 4- (a) 8007 PS candidate points which are chosen with a threshold of 0.25 on API, (b) related Delaunay triangulation of PSCs

شکل ۴- (a) نشان دهنده ۸۰۰۷ نقطه PS کاندید اولیه است که با حد آستانه ۰/۲۵ بر روی شاخص پراکنندگی دامنه انتخاب شده‌اند و (b) شبکه مثلث‌بندی دلونی متناظر با PS‌های اولیه می‌باشد.

است که مقادیری نزدیک به $0/9$ را تقریباً در اکثر PSها نشان می‌دهد و به این معنی است که باقیمانده فاز تداخل‌نماها پس از کسر فازهای جابجایی، خطای توپوگرافی و APS مقادیری بسیار کوچکی بوده و تأییدی بر صحت مدل مورد استفاده برای برآورد پارامترهای مذکور می‌باشد.

پس از اطمینان از برآورد صحیح فاز اتمسفر سری دوم نقاط پراکنش گر دائمی با حد آستانه $0/3$ بر روی شاخص پراکنندگی دامنه به تعداد 145707 و 45246 در دو منطقه مورد مطالعه ی A و B انتخاب شدند.

پس از محاسبه فاز اتمسفر در نقاط PS با استفاده از درون‌یابی کریجینگ^{۲۹} (Wackernagel, 2013) فاز یکپارچه اتمسفر (APS) برای هر کدام از تصاویر پیرو نسبت به تصویر پایه برآورد شد. نمونه‌ای از APSهای برآورد شده نسبت به تصویر پایه، در منطقه مطالعاتی A در شکل ۵ قابل مشاهده است. به منظور اطمینان از صحت APSهای برآورد شده از همدوسی زمانی در نقاط پراکنش گر دائمی استفاده شد. به طوری که فاز اتمسفر برآورد شده از باقیمانده فاز تداخل‌نماها کسر گردید و همدوسی زمانی با استفاده از رابطه (۸) برآورد شد. همدوسی زمانی PSهای کاندید پس از حذف اتمسفر در شکل ۵ قابل مشاهده

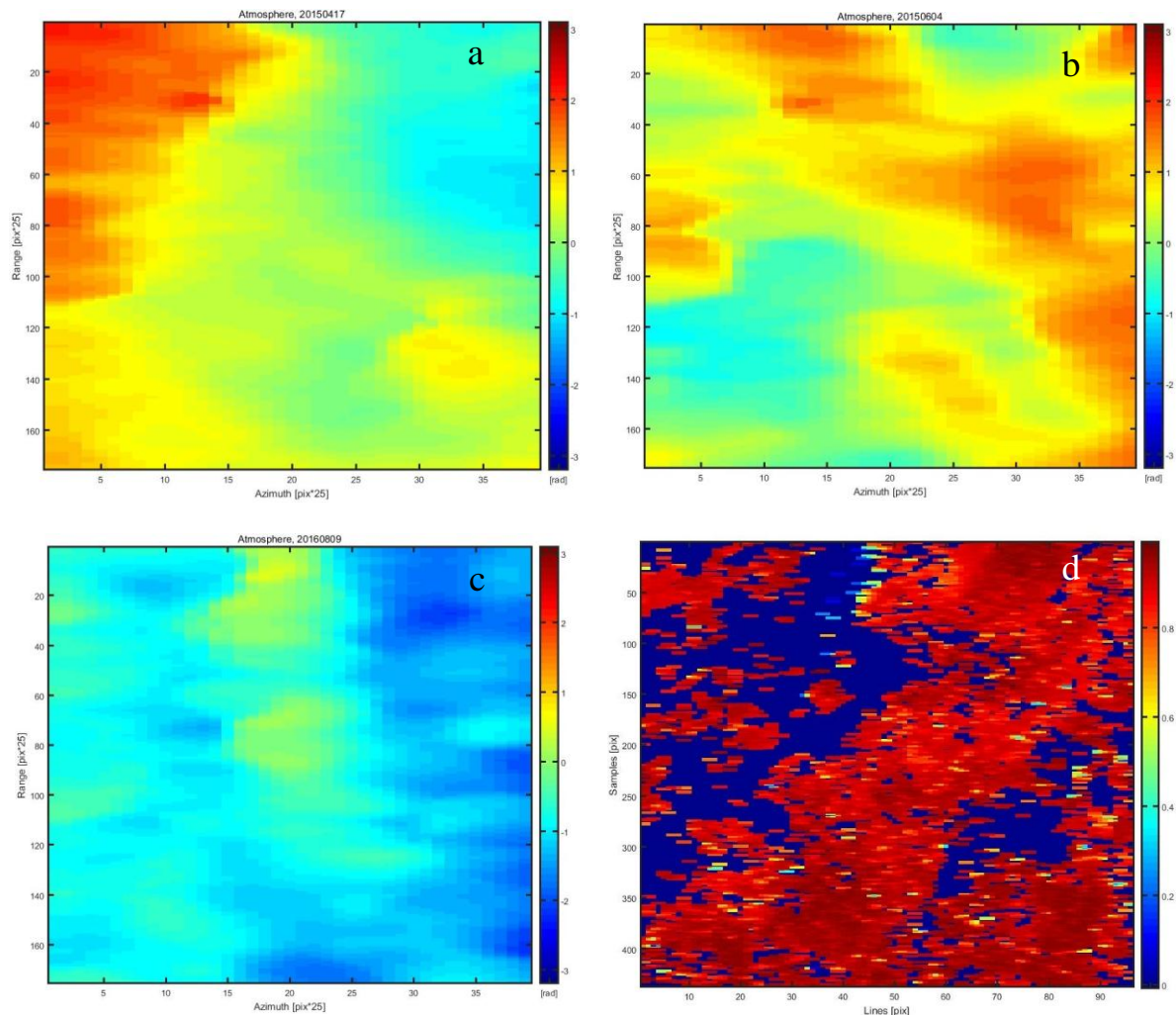


Fig. 5- (a), (b) and (c) The APS of images from 4 June 2015, 17 April 2015 and 9 August 2016 related to master images. (d) Temporal coherence of the residual phases after removing APS from all the interferograms

شکل ۵- سه تصویر a و b و c به ترتیب APS برآورد شده برای تصاویر $2016/08/09$ ، $2015/04/17$ ، $2015/06/04$ نسبت به تصویر پایه می‌باشند و تصویر d همدوسی زمانی فازهای باقیمانده پس از کسر APSها از تمامی تداخل‌نماها را نشان می‌دهد.

که مسلماً دلیل جابجایی زمین در چنین محدوده وسیعی نمی‌تواند ساخت و ساز یا عامل دیگری باشد.

برای مشاهده بهتر جابجایی در مناطق شهری محدوده طیف رنگی نقشه ارائه شده در شکل ۶ را که از ۱۰ تا ۱۵۰- میلیمتر است، به ۱۰ تا ۵۰- میلیمتر تغییر داده شد تا نسبت به جابجایی‌های کوچکتر حساس شود (لازم به ذکر است مقادیر نشست همان ۱۰ تا ۱۵۰- میلیمتر است فقط طیف رنگی نقشه نمایش داده شده را تغییر می‌یابد). با توجه به شکل ۷ نواحی B و C در مرز بین منطقه شهری و غیر شهری واقع شده‌اند و ناحیه A در انتهای غربی شهر تهران قرار دارد که هر سه ناحیه دارای مناطق مسکونی و یا صنعتی هستند. ناحیه A دارای جابجایی متوسط ۴/۷ سانتی‌متر در سال و جابجایی تجمعی ۹ سانتی‌متری طی دو سال است و مرکز جابجایی این ناحیه دقیقاً زیر بزرگراه فتح و بسیار نزدیک به پل تقاطع غیر همسطح این بزرگراه و خیابان لشکری می‌باشد. البته دلیل بروز چنین نشستی می‌تواند مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد که آیا دلیل آن برداشت کاهش سطح آبهای زیرزمینی است یا دلیل دیگری دارد که در تحقیقات آتی قابل بررسی است. ناحیه B در جنوب شهر قدس قرار دارد و مرز این شهر با زمینهای کشاورزی دشت شهریار را تشکیل می‌دهد که منطقه‌ای صنعتی- مسکونی می‌باشد همانگونه که از شکل ۷ مشخص است، دارای جابجایی ۲ تا ۷ سانتی‌متر بوده و از جمله مناطق شهر تهران است که فرونشست ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی به مناطق شهری و مسکونی (شهر قدس) گسترش یافته است.

مجدداً پارامترهای سرعت جابجایی و خطای توپوگرافی برای نقاط جدید برآورد گردید، با این تفاوت که در این مرحله APS‌های برآورد شده در مراحل قبل از روی تداخل‌نماها کسر شده است. به این ترتیب تعداد نقاط پراکنش گر بیشتری وارد پردازش شده و تراکم نقشه‌های خروجی را موجب می‌شود. در نهایت برای کنار گذاشتن نقاط نویزی و غیرقابل اعتماد از حد آستانه ۰/۸ بر روی همدوسی زمانی باقیمانده فاز استفاده گردید. که با اعمال حد آستانه ۰/۸ بر روی همدوسی زمانی تعداد PS‌های نهایی برابر ۱۳۸۱۹۲ شد. شکل ۶ نقشه نهایی جابجایی در راستای خط دید سنجنده برای مسیر ۲۸ را نمایش می‌دهد.

منطقه مطالعاتی قسمت‌هایی از دشت شهریار را نیز پوشش می‌دهد که با توجه به نقشه نشست (شکل ۶) در این نواحی دارای بیشینه فرونشست سالانه ۱۵ سانتی‌متر در راستای خط دید سنجنده می‌باشد. که براساس تحقیقات قبلی که در محدوده استان تهران انجام شده (Amighpey et al., 2006; Dehghani et al., 2013; Sadeghi et al., 2013)، دلیل عمده و اصلی فرونشست در این منطقه (محدوده استان تهران) برداشت بی رویه از آب‌های زیرزمینی و کاهش سطح این آبها می‌باشد که این جابجایی زمین به قسمت‌های شهری و مسکونی شهر تهران نیز گسترش یافته است. الگوی کلی فرونشست بدست آمده در (شکل ۶) نیز این قضیه را نشان می‌دهد چرا که این الگو نشان دهنده روند جابجایی کاهشی از دشت به سمت شهر تهران است و این امر در محدوده وسیعی به طول ۱۵ کیلومتر مشاهده می‌شود

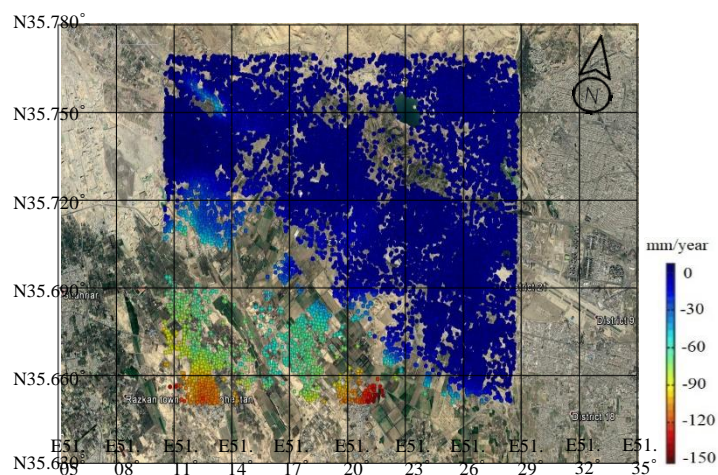


Fig. 6- Average annual velocity map for the study region using 30 images of Sentinel-1A track 28
 شکل ۶- نقشه جابجایی متوسط سالانه برای منطقه مطالعاتی در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ که با استفاده از ۳۰ تصویر مسیر ۲۸ سنجنده سنتینل-۱ برآورده شده است.

خواهند بود. با توجه به توضیحات بیان شده ارزیابی نسبی نتایج با استفاده از داده‌های مسیر ۳۵ سنجنده سنتینل-۱ که در حالت پایین‌گذر اخذ شده‌اند، انجام گرفت. مقایسه نتایج پردازش دو مسیر ۲۸ و ۳۵ سنجنده سنتینل-۱ الگوی نشست مشابهی را در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که مقایسه تصاویر نمایش داده شده در شکل ۸ مبین همین مطلب می‌باشد. برای مقایسه عددی نتایج دو مسیر، ۳ ناحیه مربعی شکل به شعاع ۱ کیلومتر در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. نواحی مذکور در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند. میانگین نرخ جابجایی متوسط سالانه برای PS‌هایی که در داخل هر کدام از این سه ناحیه قرار می‌گیرند حساب شد و این کار برای هر دو مسیر ۲۸ و ۳۵ انجام گرفت که جدول ۲ مقایسه نرخ جابجایی متوسط سالانه، برای دو مسیر مذکور در هر کدام از نواحی انتخابی را نشان می‌دهد.

همچنین میانگین جابجایی تجمعی در تاریخ‌های تصاویر اخذ شده نسبت به اولین تصویر (مبدا سری زمانی) برای هر سه ناحیه و در دو مسیر ۲۸ و ۳۵ برآورد شده و نمودار سری زمانی برای هر سه ناحیه در شکل ۹ نمایش داده شد.

در نهایت ناحیه C در مرکز منطقه مطالعاتی قرار دارد و در این ناحیه جابجایی زمین با بزرگی ۲ سانتیمتر در سال در مناطق شهری تهران نفوذ کرده است. در جنوب غربی ناحیه C مجموعه‌های صنعتی نیز داریم که با جابجایی متوسط حدود ۴ سانتیمتر در سال روبرو هستند. لذا جابجایی زمین در دشت‌های اطراف تهران محدود به مناطق کشاورزی و غیر شهری نیست بلکه به نواحی شهری و صنعتی نیز گسترش یافته است و در نواحی مورد بحث تهدیدی جدی می‌باشد.

۵- ارزیابی

با توجه به اینکه در بازه زمانی مورد بررسی (ابتدای ۲۰۱۵ تا انتهای سال ۲۰۱۶) در منطقه مورد مطالعه A داده ترازایی یا GPS دسترس نمی‌باشد لذا امکان ارزیابی مطلق با استفاده از داده‌های واقعیت زمینی وجود ندارد؛ از این رو به منظور ارزیابی نتایج پردازش در این منطقه از روش اعتبارسنجی نسبی استفاده گردید. بطوریکه پردازش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از مسیری با گذر متفاوت انجام می‌شود و در صورتی که نتایج دو مسیر بالاگذر و پایین‌گذر همدیگر را تایید نمایند، فرآیند انجام شده به صورت نسبی (در قیاس با هم) معتبر

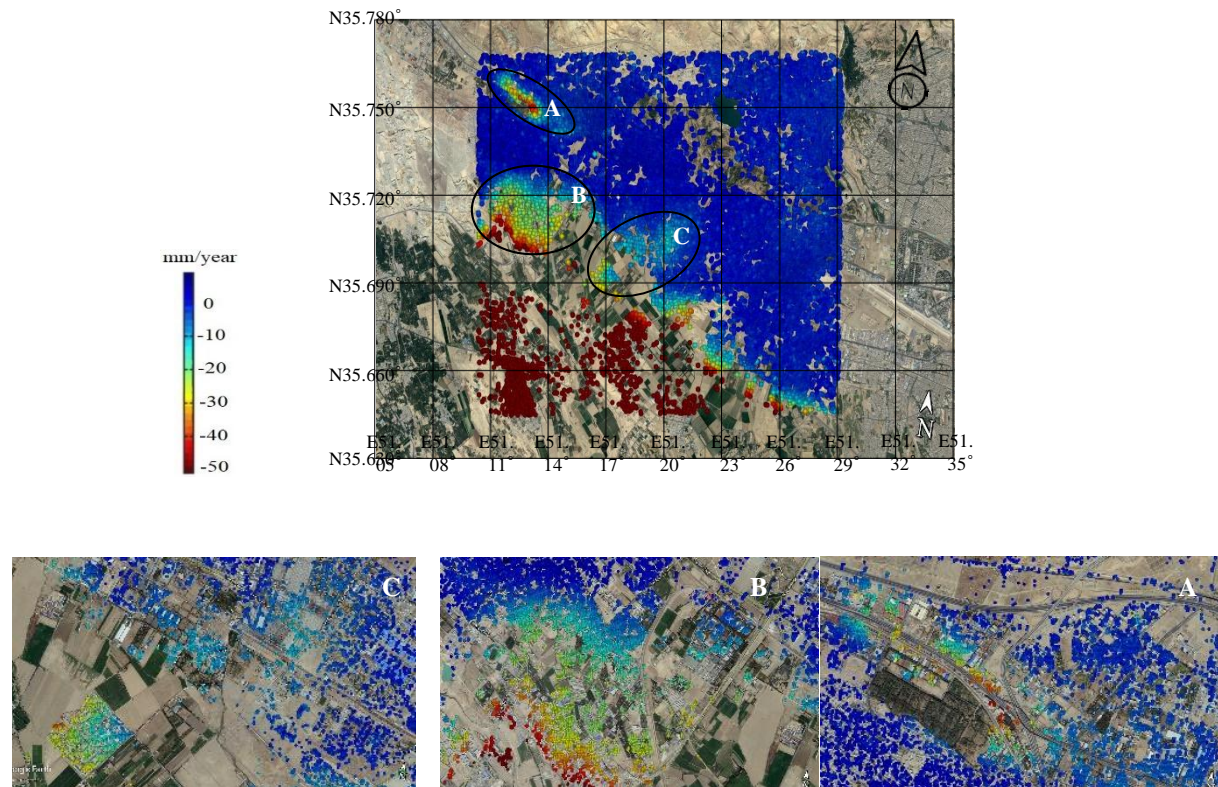


Fig. 7- Average annual velocity map for the study region with 10 to 50 millimeter color spectrum (up) and The zoomed images of regions A, B and C marked in oval (down)

شکل ۷- تصویر بالا نشان دهنده جابجایی متوسط سالانه برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از طیف رنگی ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر می‌باشد و تصاویر پایین بزرگ‌نمایی نواحی A، B و C هستند که با بیضی مشخص شده‌اند.

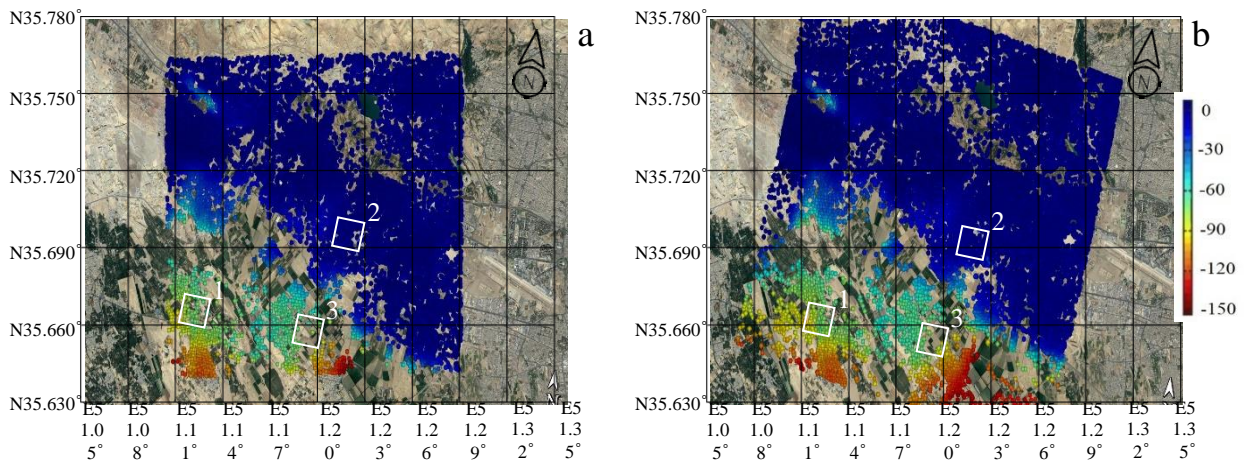


Fig. 8- (A) The Average annual velocity map of track 35 and (B) The Average annual velocity map of track 28

شکل ۸- (a) نقشه نرخ جابجایی متوسط سالانه برای مسیر ۳۵ و (b) نقشه نرخ جابجایی متوسط سالانه برای مسیر ۲۸

و پایین گذر با اختلاف میلی متری همدیگر را تأیید می نمایند و به این معناست که مقدار بردار جابجایی در راستای افقی (شرقی-غربی) بسیار کوچک می باشد، لذا منطقه مورد مطالعه جابجایی افقی بسیار کمی (کمتر از چند میلی متر) دارد. همانگونه که قبلاً نیز اشاره کردیم در محدوده منطقه مطالعاتی B یک ایستگاه دائم GPS وجود دارد که در بازه زمانی تصاویر مورد استفاده داده اخذ نموده است، که موقعیت ایستگاه GPS در شکل ۸ قابل مشاهده می باشد.

Table 3- The average annual displacement rate in area 1, 2 and 3 using track 28 and 35

جدول ۳- نرخ جابجایی متوسط سالانه در سه ناحیه ۱، ۲ و ۳

برای دو مسیر ۲۸ و ۳۵

	Area 1	Area 2	Area 3
Track 28	-4.1	-57.4	-71.35
Track 35	-4.9	-57.1	-71.4

با توجه به جدول ۲ و شکل ۹ نتایج دو مسیر ۲۸ و ۳۵ به صورت نسبی همدیگر را تأیید می نمایند. جابجایی در راستای LOS دو مسیر بالاگذر

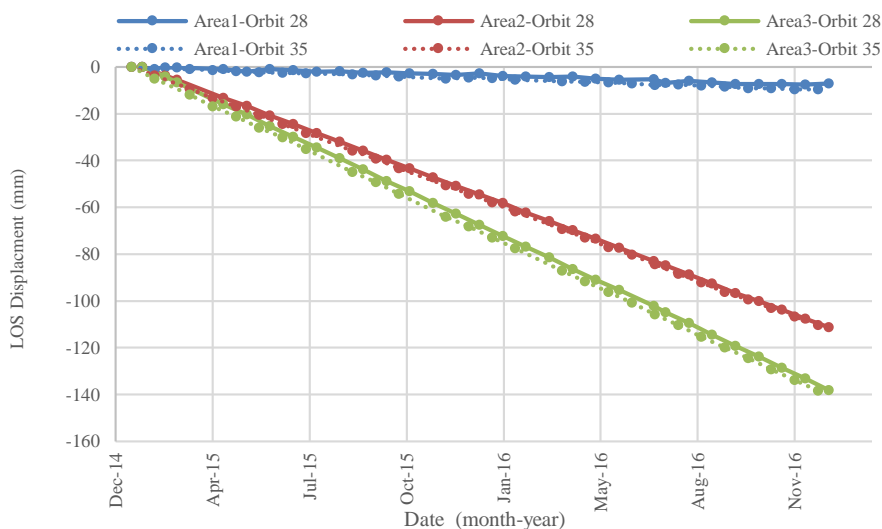


Fig. 9- Comparison of cumulative average displacement according to starting point of time series in three regions of 1, 2 and 3 for tracks 28 and 35 of Sentinel-1

شکل ۹- مقایسه میانگین جابجایی تجمعی نسبت به مبدأ سری زمانی، در سه ناحیه ۱، ۲ و ۳ برای دو مسیر ۲۸ و ۳۵

سنجده سنتینل-۱

تحقیقات منابع آب ایران، سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸

Volume 15, No. 1, Spring 2019 (IR-WRR)

آب‌های زیرزمینی به مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. به طوری که در مناطق دارای واحدهای صنعتی و مسکونی، طی دو سال، شاهد جابجایی جمعی ۹ تا ۱۳ سانتی‌متری نیز هستیم، که در این مقاله به سه محدوده دارای فرونشست در داخل مناطق شهری و مرز دشت و منطقه شهری اشاره گردید. فرونشست زمین در تهران خود نتیجه کاهش سطح آب‌های زیرزمینی است ولی خود فرونشست همان‌گونه که در مقدمه نیز اشاره شد تبعاتی به مراتب خطرناک‌تر خواهد داشت از جمله بالا رفتن خسارات ناشی از بلایایی نظیر زلزله و سیل در نواحی که لایه‌های زیرین خاک به صورت مداوم در حال نشست هستند؛ همچنین با پایین رفتن سطوح فوقانی زمین آبخوان‌های این منطقه نیز بخشی از ظرفیت خود را از دست خواهند داد که به هیچ عنوان قابل بازگشت نیست. ارزیابی نتایج با استفاده داده‌های مسیر پایین‌گذر ۳۵ و سری زمانی GPS انجام گرفت. با توجه به اختلاف ناچیز برآورد دو مسیر ۲۸ و ۳۵ در سه ناحیه انتخابی می‌توان نتیجه گرفت جابجایی افقی بسیار کمی داشته و عمده بردار جابجایی را حرکت قائم تشکیل می‌دهد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Subsidence
- 2- Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
- 3- Permanent Scatterers InSAR
- 4- Synthetic Aperture Radar
- 5- Temporal Decorrelation
- 6- Spatial Decorrelation
- 7- Interferogram
- 8- Atmosphere Phase Screen
- 9- Permanent Scatterers
- 10- Coherent
- 11- Coherence
- 12- Amplitude Dispersion Index
- 13- Master
- 14- Doppler Centroid
- 15- Slave
- 16- Flat Terrain
- 17- Line of Sight
- 18- Correlate
- 19- Periodogram
- 20- Temporal Coherence
- 21- Sentinel-1
- 22- Ascending
- 23- Descending
- 24- Interferometric Wide Swath
- 25- Terrain Observation by Progressive Scan SAR
- 26- Digital Elevation Model
- 27- Delaunay Triangulation
- 28- Integration
- 29- Kriging Interpolation

به منظور مقایسه نتایج حاصل از روش پراکنش‌گرهای دائمی با سری زمانی اندازه‌گیری‌های GPS منطقه مطالعاتی B علاوه بر داده‌های مسیر ۲۸ با استفاده از داده‌های مربوط به مسیر ۳۵ نیز مورد پردازش قرار گرفت به این ترتیب با استفاده از دو بردار جابجایی در راستای خط دید سنجنده در دو حالت بالاگذر (۲۸) و پایین‌گذر (۳۵) می‌توانیم مؤلفه جابجایی در راستای قائم را برآورد نماییم:

$$d_r = d_u \cos(\theta_{inc}) - \sin(\theta_{inc}) [d_n \cos(\alpha_h - \frac{3\pi}{2}) + d_e \sin(\alpha_h - \frac{3\pi}{2})]$$

در رابطه (۹)، d_r بردار جابجایی در راستای خط دید سنجنده، d_u مؤلفه‌ی جابجایی در راستای قائم، d_n مؤلفه‌ی جابجایی در راستای شمالی-جنوبی، d_e مؤلفه‌ی جابجایی در راستای شرقی-غربی، θ_{inc} زاویه فرودی و α_h زاویه آزیموت ماهواره می‌باشد (Hanssen, 2001). با توجه به خورشید آهنگ بودن مدار ماهواره ترم مربوط به مؤلفه‌ی شمالی-جنوبی بسیار کوچک بوده و قابل صرف نظر کردن است، لذا مجهولات این معادله تنها مؤلفه‌های قائم و شرقی-غربی خواهند بود که با دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر قابل حل می‌باشند. نرخ جابجایی متوسط در راستای LOS برای دو مسیر بالاگذر و پایین‌گذر، ۲۸ و ۳۵ سنجنده سنتینل-۱ و مؤلفه‌ی قائم برآورد شده از طریق این دو مسیر را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد.

جابجایی قائم برآورد شده برای پراکنش‌گرهای نزدیک به ایستگاه GPS با سری زمانی حاصل از اندازه‌گیری‌های این ایستگاه مقایسه گردید که نمودار جابجایی قائم برای روش پراکنش‌گرهای دائمی و GPS در شکل ۸ قابل مشاهده می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور پایش جابجایی در بخش غربی تهران از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی با فرض یک مدل خطی استفاده گردید و سری زمانی حاصل از ۳۰ تصویر سنجنده سنتینل-۱ (مسیر بالاگذر ۲۸) در بازه دو ساله مورد استفاده قرار گرفت که با توجه به رایگان بودن این تصاویر و دوره بازدید ۱۲ روزه منبع بسیار ارزشمندی به منظور پردازش‌های راداری از جمله روش تداخل‌سنجی با هدف برآورد جابجایی است. پردازش‌های انجام گرفته با استفاده از روش PSInSAR بیشینه جابجایی سالانه ۱۵ سانتی‌متری در جنوب منطقه مورد مطالعه، جایی که به دشت‌های شهریار و تهران منتهی می‌شود، نشان می‌دهد که دلیل عمده آن می‌تواند کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و تراکم لایه‌های خاک باشد. اما فرونشست زمین تنها محدود به مناطق دشتی و غیر شهری نبوده و با ادامه روند کاهش

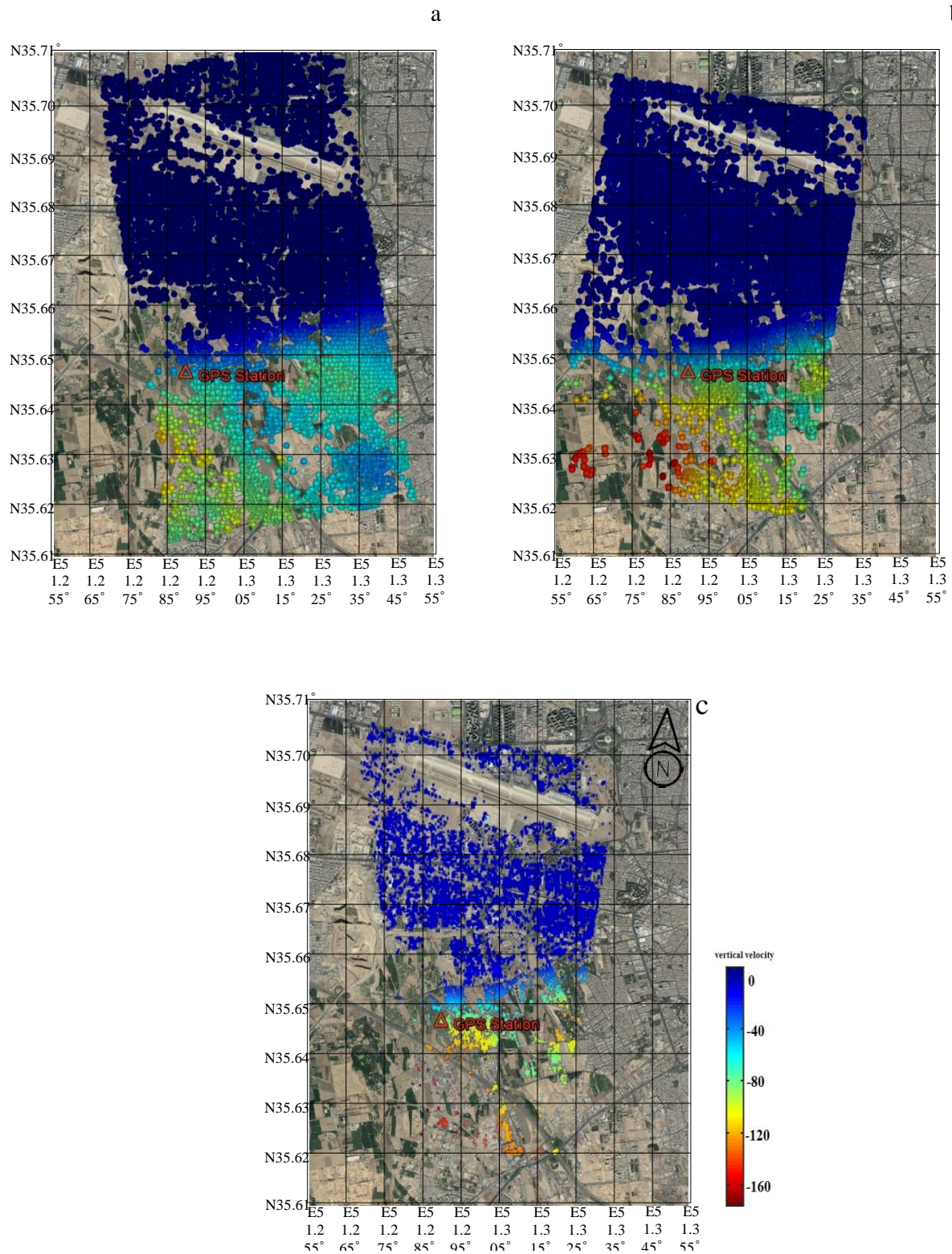


Fig. 10- (a) The Average annual velocity map along LOS for track 28, (b) The Average annual velocity map along LOS for orbit 35 and (c) The Average annual perpendicular velocity map for study region B
 شکل ۱۰- (a) نقشه نرخ جابجایی متوسط سالانه در راستای LOS برای مسیر ۲۸، (b) نقشه نرخ جابجایی متوسط سالانه در راستای LOS برای مسیر ۳۵ و (c) نقشه نرخ جابجایی متوسط سالانه در راستای قائم برای منطقه مطالعاتی B

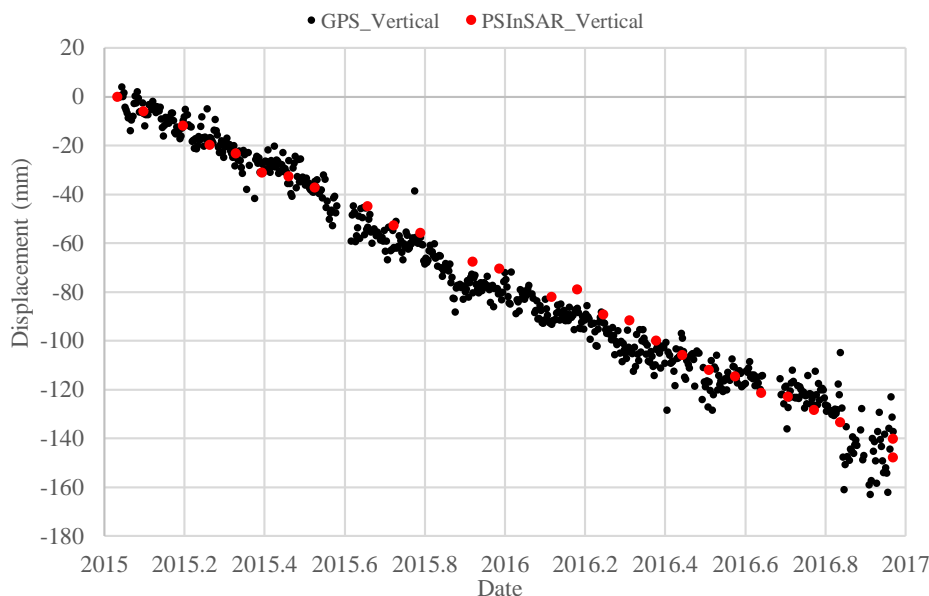


Fig. 11- Comparison of GPS time series perpendicular displacement and PSInSAR perpendicular displacement near GPS station

شکل ۱۱- مقایسه جابجایی قائم حاصل از سری زمانی GPS و روش PSInSAR برای ایستگاه GPS

Hanssen R F (2001) Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media

Kampes B M (2006) Radar interferometry. Springer

Liu P, Li Z, Hoey T, Kincal C, Zhang J, Zeng Q, Muller J P (2013) Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 21:253-264

Maghsoudi Y, Mahdavi S (2015) The principles of radar remote sensing. K. N. Toosi University of Technology (In Persian)

Maghsoudi Y, van der Meer F, Hecker C, Perissin D, Saepuloh A (2017) Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation

Motagh M, Klotz J, Tavakoli F, Djamour Y, Arabi S, Wetzel H U, Zschau J (2006) Combination of precise leveling and InSAR data to constrain source parameters of the Mw= 6.5, 26 December 2003 Bam earthquake. Pure and Applied Geophysics 163(1):1-18

Osmanoğlu B, Sunar F, Wdowinski S, Cabral-Cano E (2016) Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 115:90-102

۷- مراجع

Amighpey M, Arabi S, Talebi A, Djamour, Y (2006) Elevation changes of the precise leveling tracks in the Iran leveling network. Scientific report published in National Cartographic Center (NCC) of Iran, Tehran (In Persian)

Asadzadeh F, Kaki M, Shakiba S, Raei B (2016) Impact of drought on groundwater quality and groundwater level in Qorveh-Chardoli Plain. Water Resources Research 12(3):153-165 (In Persian)

Dehghani M, Valadan Zoj M J, Entezam I, Mansourian A, Saatchi S (2009) InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. Geophysical Journal International 178(1):47-56

Dehghani M, Zoj M J V, Hooper A, Hanssen R F, 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 and Remote Sensing 79:157-170

Farina P, Casagli N, Ferretti A (2007) Radar-interpretation of InSAR measurements for landslide investigations in civil protection practices. Paper presented at the First North American Landslide Conference

Ferretti A, Prati C, Rocca F (2001) Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(1):8-20

Terzaghi K (1925) Principles of soil mechanics, IV- Settlement and consolidation of clay. Engineering News-Record 95(3):874-878

Wackernagel H (2013) Multivariate geostatistics: an introduction with applications. Springer Science & Business Media

Sadeghi Z, Zoj M J V, Dehghani M (2013) An improved persistent scatterer interferometry for subsidence monitoring in the Tehran Basin. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 6(3):1571-1577