

نمایش فرونشست خطوط متروی شهری با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای (منطقه مورد مطالعه: بخشی از خط 7 متروی تهران)

علی یونسی سینکی¹، مهدی آخوند زاده هنزائی^{2*}

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی،

دانشگاه تهران

ali.younesi.313@ut.ac.ir

² دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های

فنی، دانشگاه تهران

makhonz@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت: مرداد 1400، تاریخ تصویب: آذر 1401)

چکیده

امروزه روش تداخل‌سنجی راداری نقش مهمی در نمایش تغییر شکل‌های سطح زمین ناشی از پدیده‌هایی مانند زلزله، رانش، برداشت بی‌رویه آب‌های زیر زمینی، حفاری تونل‌های شهری و غیره دارد. پایش نشست‌های ناشی از ایجاد تونل‌های متروی شهری، به علت پیشگیری از خسارت‌های جانی و مالی جبران‌ناپذیر، اهمیت بسزایی دارند. در این مقاله با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پایین‌گذر سنتینل-1 در یک بازه زمانی شش‌ماهه (اردیبهشت تا آبان سال 1398) میزان فرونشست تونل خط 7 متروی تهران (حد فاصل خیابان هفده شهریور تا میدان قیام) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری محاسبه و سپس با نشست‌سنجی میدانی انجام‌شده با استفاده از پین‌های نشست‌سنجی و نقشه‌برداری دقیق، مقایسه می‌گردند. لازم به ذکر است که از میان 22 تصویر موجود در این بازه زمانی، هفت تصویر که طول base line کمتری دارند انتخاب گردیدند. در نهایت، با استفاده از این تصاویر و مقایسه انجام‌شده با داده‌های میدانی، مقدار RMSE برای تصاویر با قطبش VH و VV به ترتیب برابر با 2/19 و 20/79 میلی‌متر بدست آمد.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، فرونشست، خطوط متروی شهری

* نویسنده رابط

1- مقدمه

امروزه پدیده فرونشست به دلایل گوناگون زلزله، آتشفشان، فعالیت گسل‌ها، حفر چاه‌های غیر مجاز، حفاری مکانیزه و دستی تونل‌های مختلف از جمله مترو و غیره ایجاد می‌شوند [1].

فرونشست زمین به علت حفاری تونل‌های مترو به علت اینکه اکثر این تونل‌ها در مناطق شهری حفاری شده‌اند، می‌تواند خطرات و پیامدهای جبران‌ناپذیری برای شهر و شهروندان جامعه داشته باشد [1].

بنابراین نشست‌سنجی تونل‌های مترو یکی از موارد چالش برانگیز و مورد بحث در تمامی سطوح اجرایی، نظارتی و طراحی می‌باشد.

از جمله نمونه‌های فرونشست زمین در تهران به علت حفاری تونل‌های متروی شهری، می‌توان به فرونشست محدوده‌های: کیانشهر در سال 1395 به علت حفاری تونل متروی خط 6، شهر ری در سال 1398 به علت حفاری تونل مترو خط 6 و میدان قیام در آبان ماه سال 1399 به علت حفاری تونل مترو خط 7 اشاره نمود.

روش‌های تداخل‌سنجی¹ با استفاده از مشاهدات فاز، توانایی برآورد فرونشست با دقتی در حدود میلی‌متر را دارا می‌باشند [2، 3، 4 و 5]. خروجی‌های روش‌های تداخل‌سنجی در زمینه سنجش و پایش جابجایی‌های صورت‌گرفته ناشی از فرونشست بعنوان یک روش بسیار مؤثر شناخته شده‌اند. همچنین، خروجی‌های مورد اشاره، در مطالعات مربوط به زمین‌شناسی و بررسی رفتار و الگوی فرونشست در مناطق مختلف بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [6 و 7]. در تداخل‌سنجی راداری عواملی همچون عدم همبستگی زمانی، عدم همبستگی مکانی و اثرات اتمسفری به عنوان محدودیت‌های تکنیک موردنظر شناخته شده‌اند [8، 9 و 10].

نتایج مربوط به مطالعه صورت‌گرفته توسط مقصودی و همکاران در سال 2017 نشان می‌دهد که به منظور دستیابی به خروجی مطلوب در جهت پایش فرونشست در منطقه مطالعاتی با وجود پوشش گیاهی متراکم به دلیل خطای عدم همبستگی زمانی بهتر است که از تصاویر ماهواره‌هایی با طول موج‌هایی بلند به منظور کاهش اثر خطای عدم

همبستگی زمانی استفاده گردد [11]. در سال 2013 سیف الله بوراوی به تجزیه و تحلیل روش‌های سری زمانی² برای جابه‌جایی‌های سطحی کوچک پرداخته‌است [12].

در ایران نیز بحث فرونشست زمین به یک بحران ملی تبدیل شده که در بیشتر موارد ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این خصوص، پژوهشگران مختلفی میزان فرونشست زمین را در مناطق مختلف همانند دشت فامنین، ورامین، تهران، مشهد و رفسنجان به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند.

برای اولین بار شمشکی و همکاران با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در استان تهران در سال 2008 میلادی با استفاده از شش تصویر ماهواره انویست³ به تخمین سرعت و محدوده تغییرات جابجایی پرداختند [13]. حق‌شناس و همکاران در سال 2012 به بررسی و مطالعه فرونشست منطقه جنوب غربی تهران با استفاده از تصاویر ماهواره انویست، الوس⁴ و تراسار-ایکس⁵ پرداختند. که نتایج مطالعه موردنظر نشان‌دهنده این مهم است که تصاویر ماهواره‌هایی با طول موج کوتاه‌تر جهت پایش فرونشست، اثرپذیری بیشتری از خطای عدم همبستگی زمانی دارند [14].

سود افشار و همکاران به پایش فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیر زمینی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به روش پراکنشگرهای دائمی⁶ برای محدوده شهرستان اسد آباد در سال‌های 2015 الی 2018 پرداختند [15]. در سال 2021 آرانو و همکاران به کاربرد روش تداخل‌سنجی پراکنده پایدار (PSI) در پایش سازه‌های زیر زمینی و زیرساخت‌های شهری در جنوب ایتالیا پرداختند [16]. در سال 2015 بابایی و همکاران به آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه⁷ و پراکنش کننده‌های دائمی در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین پرداخته‌اند [17].

2 Multi-temporal InSAR

3 ENVISAT

4 ALOS

5 TerraSAR-X

6 Persistent Scatterer Interferometry

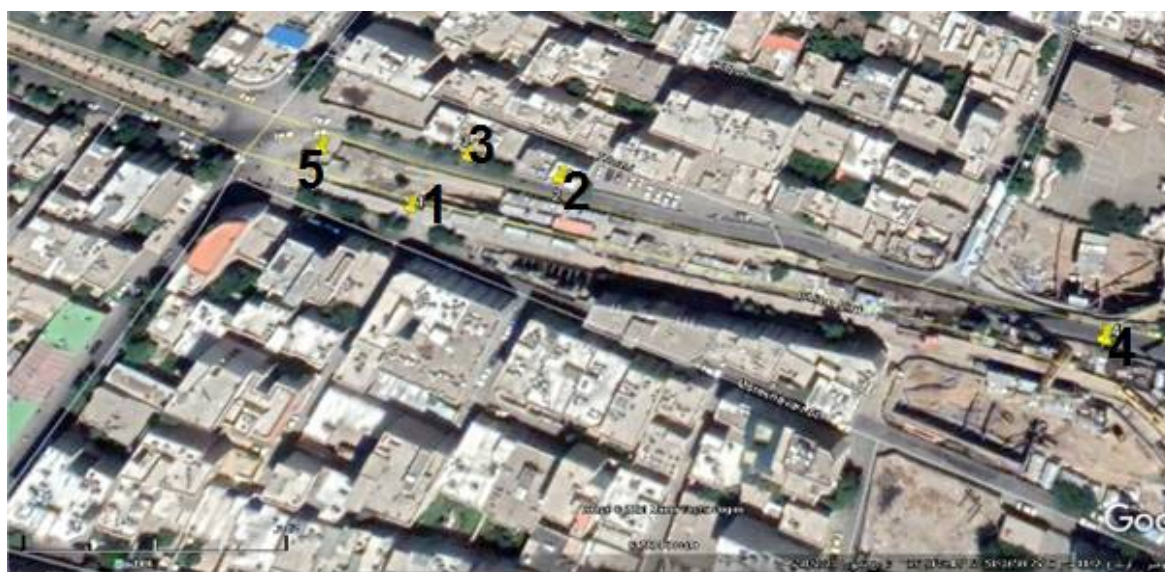
7 Small Base line

1 Interferometry

2- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در قسمت مرکزی شهر تهران واقع شده‌است. مطابق شکل 1 این محدوده از قسمت غربی خیابان هفده شهریور آغاز و به میدان قیام ختم می‌شود. این محدوده بین مدار 51 درجه و 26 دقیقه و 10 ثانیه و 51 درجه و 26 دقیقه و 45 ثانیه طولی شرقی و بین مدار 35 درجه و 40 دقیقه و 7 ثانیه و 35 درجه و 40 دقیقه و 15 ثانیه عرضی شمالی قرار دارد.

در این پژوهش با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری به بررسی فرونشست ناشی از حفاری تونل مترو خط 7 در محدوده خیابان هفده شهریور الی میدان قیام در بازه زمانی اردیبهشت تا آبان ماه 1398 پرداخته شده‌است. پژوهش مورد نظر در چندین بخش با عناوین: بخش 2 محدوده مورد مطالعه، بخش 3 داده‌های ماهواره‌ای، بخش 4 داده‌های میدانی، بخش 5 روش تحقیق، بخش 6 آنالیز نتایج و بخش 7 نتیجه‌گیری ارائه شده‌است.



شکل 1- محدوده منطقه مورد مطالعه و مسیر بلوار قیام و نقاط پین در نظر گرفته‌شده بر روی آن که با شماره‌های سیاه‌رنگ نمایش داده شده‌اند
(<https://earth.google.com/web>)

مضاعف راهرو قنات می‌شود و بالاخره در سطح زمین به‌صورت فرونشست، خود را نمایان می‌کند [18و19]. در خصوص قنات‌های شهر تهران و عملیات حفاری مترو بایستی در نظر داشت که قنات‌های تهران معمولاً آب دارند، چون زهکشی می‌کنند و بارندگی‌ها هم میزان آب آن‌ها را افزایش می‌دهد. از طرفی، آب‌های برگشتی سفره‌های زیرزمینی هم وارد قنات می‌شوند. به همین دلیل، هنگام ساخت تونل‌های مترو باید مطالعات لازم روی قنات‌های اطراف آن انجام پذیرد، چون در صورت توجه نکردن به آن موجب نشت آب به تونل‌های مترو می‌شود. به همین دلیل حداقل برای این که برای خود مترو مشکلی پیش نیاید، باید مسیر قنات‌ها مورد توجه قرار گرفته و اگر مسیر تونل مترو و قنات به تقاطع رسیدند، باید مسیری را برای تخلیه آب آن و ادامه راه آن جایگزین نمود [18و19].

لازم به ذکر است این محدوده دارای بافتی سنتی و فرسوده بوده و اکثر کاربری‌های این محدوده، مسکونی و تجاری می‌باشند که این مهم با توجه به تراکم جمعیت موجود و تردد وسایل نقلیه باعث اهمیت هر چه بیشتر صحت و دقت نشست سنجی شده‌است. نکته بسیار مهم در خصوص محدوده میدان قیام وجود قنات‌های قدیمی می‌باشد. در خصوص این‌که این قنات‌ها تا چه میزان به خودی خود می‌توانند باعث فرونشست بزرگ مقیاس شوند و تاثیر سازه‌های زیر زمینی مثل مترو بر این فرونشست تا چه میزان است باید توجه داشت قنات فی‌نفسه باعث فرونشست در مقیاس بزرگ نمی‌شود. زمانی که قنات‌ها نزدیک به سطح زمین باشند، ممکن است در اطراف آن نشست‌های موضعی در مقیاس کوچک اتفاق بیفتد. اما اگر به هر دلیل مسیر قنات قطع شود، گالری قنات ریزش کرده، تجمع آب موجب ریزش

3- داده‌های ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل 1¹ با فرمت SLC و مد IW در بازه زمانی آوریل 2019 الی اکتبر 2019 در دو قطبش VV, VH که به صورت پایین گذر² اخذ شده‌اند استفاده شده‌است. نکته مهم در انتخاب تصویر طول base line تصاویر و میزان کوهرنسی³ تصاویر است [16و20]. از بین تصاویر موجود هفت تصویری که طول base line کوتاه‌تر و میزان کوهرنسی بیشتری را دارا بودند انتخاب شده‌اند و سپس پردازش‌های لازم به طور زوج تصویر روی این تصاویر انجام می‌گیرد (جدول 1).

4- داده‌های میدانی

در پژوهش حاضر داده‌های میدانی از روش ترازبایی دقیق به وسیله پین‌های نشست‌سنجی حاصل شده‌است که دقتی در حدود دهم میلی‌متر دارا می‌باشند. موقعیت این نقاط پین بر روی شکل 1 مشخص گردیده‌اند. همان طور که در قبل اشاره شد، حفاری فضاهای زیرزمینی و تونل‌ها در پروژه‌های شهری سبب حرکات سقف و در نتیجه نشست سطحی زمین می‌گردد. ساده‌ترین روش برای سنجش تغییرات، اندازه‌گیری نشست سطحی با استفاده از نقشه‌برداری دقیق می‌باشد که برای این منظور از پین‌های نشست‌سنجی استفاده می‌شود. پین‌های نشست‌سنجی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که سطح تماس آن‌ها با میر نقشه‌برداری دائما به صورت نقطه‌ای باشد. این پین‌ها به کمک قطعه کمکی و ضربات چکش وارد زمین می‌شوند و سطح کره‌ای استیل آن در بالا و در سطح زمین به گونه‌ای قرار می‌گیرد که در زمان برداشت، میر نقشه‌برداری روی آن قرار داده می‌شود. سپس، با استفاده از دوربین‌های نقشه‌برداری به صورت روزانه ارتفاع هر کدام از پین‌ها برداشت‌شده و سپس به صورت روزانه نشست تجمعی محاسبه و به صورت بصری گزارش می‌گردد. داده‌های میدانی این پژوهش توسط دوربین ترازبای nak2 که دقتی در حدود 0.3 تا 0.7 میلی‌متر را دارا می‌باشد جمع‌آوری شده‌اند [27]. در شکل‌های 10 تا 15 فرونشست محدوده مورد نظر با استفاده از داده‌های میدانی نمایش داده شده‌است.

1 Sentinel1
2 Descending
3 Modeled coherence

5- روش تحقیق

روش تداخل‌سنجی راداری از اطلاعات اختلاف فاز بین تصاویر رادار به منظور اندازه‌گیری دقیق تغییرات در جهت رنج (جهت عمود بر حرکت ماهواره) و آزیموت (جهت راستای حرکت ماهواره) در نقاط متناظر بر روی چند تصویر استفاده می‌کند. به این صورت که این چند تصویر می‌توانند از چند آنتن در موقعیت‌های متفاوت و یا از یک آنتن در زمان‌ها و موقعیت‌های متفاوت اخذ شده باشند [24].

تکنیک‌های محاسباتی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر استفاده از اطلاعات اختلاف فاز بین تصاویر می‌باشند، که این اختلاف فاز در تصاویر در اثر تغییرات مکانی و زمانی و سایر پارامترها رخ می‌دهد (رابطه 1). با استفاده از اختلاف فاز به دست‌آمده می‌توان محاسبات مربوط به جابه‌جایی‌های سطح و ارتفاعی را به دست آورد که این روند به طور مفصل در ادامه توضیح داده خواهد شد [20].

$$\Phi_{Diff} = \Phi_{flatearth} + \Phi_{topography} + \Phi_{displacement} + \Phi_{atm} + \Phi_{noise} \quad (1)$$

در رابطه 1 $\Phi_{flatearth}$ فاز مربوط به زمین مسطح، $\Phi_{topography}$ فاز ناشی از توپوگرافی زمین، $\Phi_{displacement}$ فاز ناشی از جابجایی، Φ_{atm} فاز ناشی از اثر اتمسفر و در نهایت Φ_{noise} فاز ناشی از عوامل مزاحم همانند خطای عدم همبستگی زمانی و خطای عدم همبستگی مکانی می‌باشد. در رابطه بالا می‌توان از فاز ناشی از اثر اتمسفر و نویز چشم‌پوشی نمود [20].

5-1- موانع بسیار مهم در روش تداخل‌سنجی رادار

مدل تداخل‌سنجی از همبستگی میان دو تصویر به دست می‌آید و این میزان همبستگی با میزان شدت بازتاب از منطقه مورد نظر رابطه مستقیم دارد. بنابراین، بایستی تغییرات پوشش محدوده مورد نظر، هندسه تصویر برداری و اثرات اتمسفری را لحاظ و سپس از محاسبات حذف نمود [20]. برای حل این چالش‌ها می‌بایست از تصاویر با فاصله زمانی کوتاه‌تر و یا با طول base line کوتاه‌تر و از روش‌های multi temporal processing و یا روش‌های آنالیز سری زمانی استفاده نمود [12].

جدول 1- اطلاعات مربوط به تصاویر مورد استفاده در این مطالعه

Master	slave	track	Modeled coherence	Base line
2019/04/21	2019/05/15	35	0.92	72.14
2019/05/15	2019/06/20	35	0.94	36.53
2019/06/20	2019/07/14	35	0.95	34.69
2019/07/14	2019/08/19	35	0.93	39.32
2019/08/19	2019/09/24	35	0.95	17.39

burstها تعیین می‌کند و هم‌زمان نقشه DEM و orbit file را برای محاسبات ارتفاعی در پردازش دخیل کرده و دو تصویر را به صورت دقیق بر یکدیگر align می‌کند. نکته قابل توجه انتخاب قطبش مناسب است که در آنالیز نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرد [23 و 25]. شکل 4 نحوه انتخاب swath و burst های مناسب برای محدوده مورد نظر را در نرم افزار snap نشان می‌دهد.

5-3-2- تشکیل مدل تداخل‌سنجی رادار

به منظور محاسبه تغییرات در یک بازه زمانی نیاز است اختلاف فاز میان دو تصویر SLC محاسبه شود. این اختلاف فاز از حاصل ضرب مزدوج تصویر اول در مزدوج تصویر دوم به دست می‌آید و به تصویر حاصل، تداخل‌سنج می‌گویند [24].



شکل 2- تصویر مدل تداخل‌سنجی راداری

در این مرحله علاوه بر تشکیل مدل تداخل‌سنجی، فاز مربوط به زمین مسطح نیز حذف می‌شود. فاز زمین مسطح موجود در سیگنال تداخل‌سنجی به دلیل انحنای سطح بیضوی مرجع است. فاز زمین مسطح در تعدادی از نقاط

5-2- روش‌های سری زمانی

روش‌های سری زمانی به طور کلی به دو دسته PS (Persistent Scatterers) و SBAS (Small Base Line) یا ترکیبی از این دو به عنوان نمونه روش Stamps تقسیم می‌شوند. در این پژوهش از روش SBAS استفاده شده‌است.

5-1-2- SBAS (small baseline)

در این روش تنها زوج تصویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مولفه‌ی قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنا زمانی آن‌ها نیز کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود [12, 17].

در این پژوهش از پکیج SNAPHU استفاده شده که به صورت مفصل در مورد این روش و الگوریتم مورد استفاده توضیح داده شده‌است [12].

5-3- روند اجرایی پژوهش

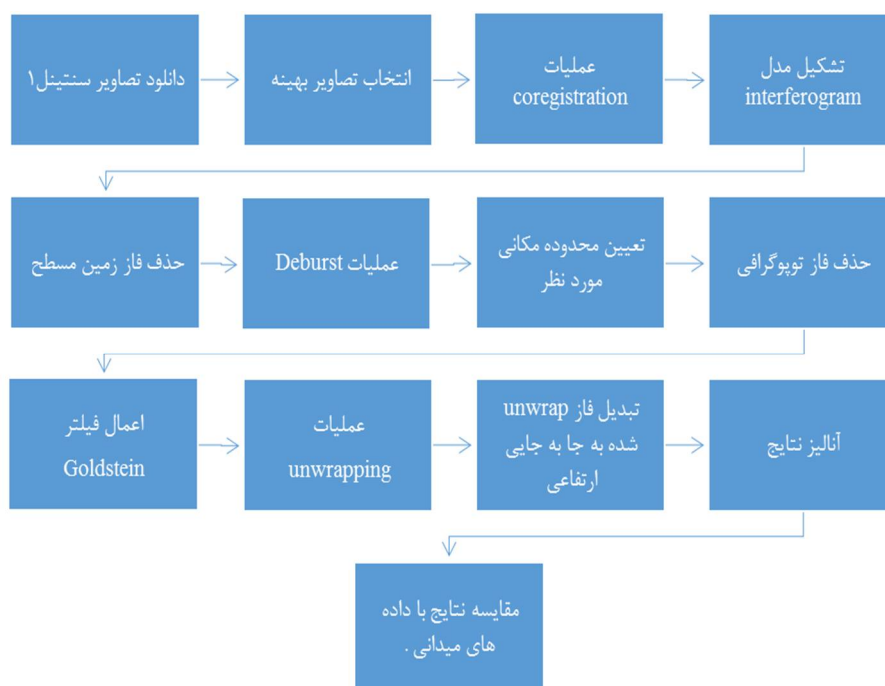
روند اجرایی پژوهش در شکل 3 نشان داده شده‌است.

5-1-3-5- عملیات coregistration

دقت این مرحله در تعیین دقیق اختلاف فاز تاثیر مستقیمی دارد. تصاویر SLC با فرمت IW دارای 3 swath و معمولاً دارای 9 الی 10 burst می‌باشند. این مرحله به طور حدودی محدوده مورد نظر را از میان این swath ها و

توزیع شده روی کل تصویر محاسبه می‌شود، پس از آن یک
چند جمله‌ای دو بعدی (با استفاده از کمترین مربعات) با

مشاهدات متناسب برآورد می‌شود [23 و 25]. شکل 2 تصویر مدل تداخل‌سنجی راداری را نشان می‌دهد.



شکل 3- روند اجرای تحقیق

3-3-5- عملیات Deburst

همانطور که گفته شد، هر تصویر SLC از تعدادی burst تشکیل شده است که بین هر کدام از این ها فاصله می باشد (مطابق شکل 2). به عملیات از بین بردن این فاصله عملیات Deburst می گویند [23 و 25].

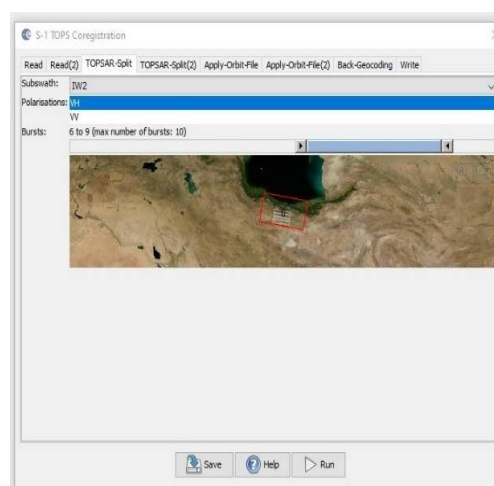
می‌شود که دیگر اثری از خطوط مشکی افقی در شکل 2 وجود ندارد.

4-3-5- تعیین محدوده مکانی مورد نظر

در این مرحله به منظور کاهش حجم محاسبات محدوده مکانی دقیق با توجه به مختصات جغرافیایی تعیین می‌شود.

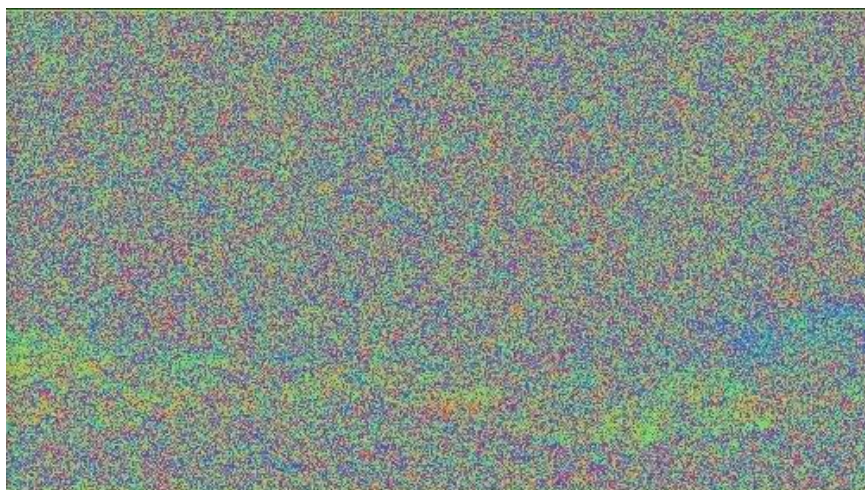
5-3-5- حذف فاز توپوگرافی

در مرحله اول، DEM به سیستم مختصات تصویر اصلی رادار، ثبت هندسی می‌شود. در هر نقطه DEM، مختصات اصلی (با ارزش واقعی) و فاز مرجع محاسبه شده در یک فایل ذخیره می‌شوند. سپس فاز مرجع با شبکه صحیح مختصات اصلی درون‌یابی می‌شود که در اینجا از درون‌یابی خطی بر اساس مثلث‌بندی دلونی استفاده می‌شود [12، 16 و 20]. شکل 6 مدل تداخل‌سنجی راداری بعد از حذف فاز توپوگرافی را نشان می‌دهد. در این پژوهش از مدل ارتفاعی دیجیتال SRTM 3sec استفاده شده است.

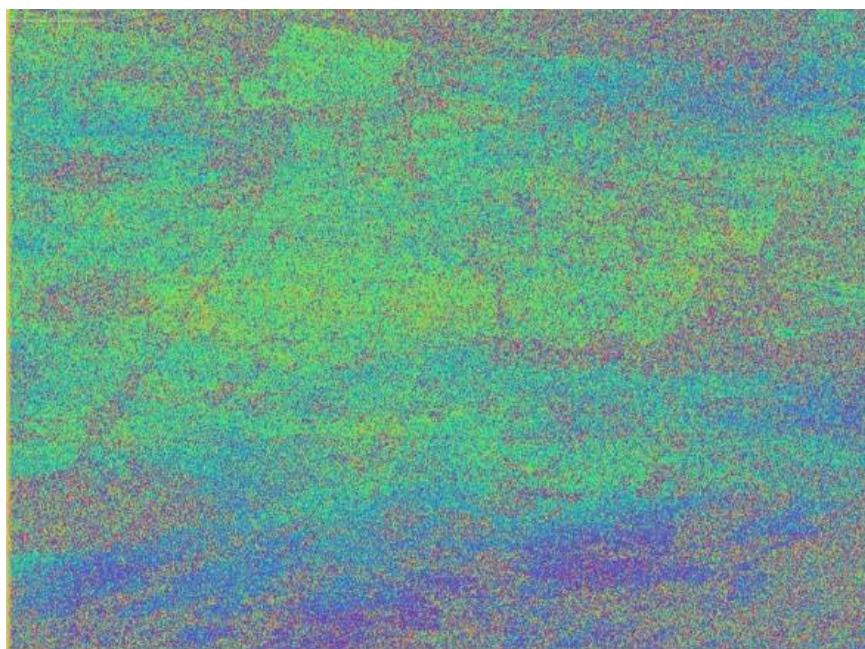


شکل 4- انتخاب swath و burstهای مناسب

در شکل 5 تفاوت بین تصویر Deburst شده و تصویر مدل، تداخل سنجی، مشاهده می‌شود، در این شکل مشاهده



شکل 5- مدل تداخل‌سنجی راداری بعد از عملیات Deburst



شکل 6- نشان‌دهنده اثر حذف فاز توپوگرافی می‌باشد.

شده دارای حلقه‌های رنگی می‌باشد که هر کدام نشان‌دهنده میزان فاز می‌باشند، بعضاً مشاهده می‌شود که فاز موجود به صورت ناگهانی تغییر می‌کند، هدف از انجام unwrapping از بین بردن همین ناپیوستگی‌ها و بازیابی اطلاعات موجود می‌باشد [12و20].

SNAPHU -8-3-5

پکیج SNAPHU ترکیبی از روش SBAS و PS نیز می‌باشد [12]، SNAPHU پیاده‌سازی الگوریتم هزینه آماری و Network-flow برای Unwrap کردن فاز است، این الگوریتم خنثی‌سازی فاز را به عنوان حداکثر یک

Goldstein -6-3-5 اعمال فیلتر

فیلتر فاز یک تکنیک پیش‌پردازش است که دقت phase unwrapping را افزایش می‌دهد، روش پیاده‌سازی شده در این پژوهش، یک الگوریتم تطبیقی غیر خطی است که توسط گلدشتاین و ورنر در سال 1998 پیشنهاد شده‌است [20و26]. در شکل 7 فیلتر گلدشتاین بر روی مدل تداخل‌سنجی راداری اعمال شده‌است.

unwrapping -7-3-5 عملیات

در این قسمت بعضی از داده‌های فاز بدون ابهام بازیابی می‌شود، به زبان ساده‌تر در عملیات تداخل‌سنجی، فاز ایجاد

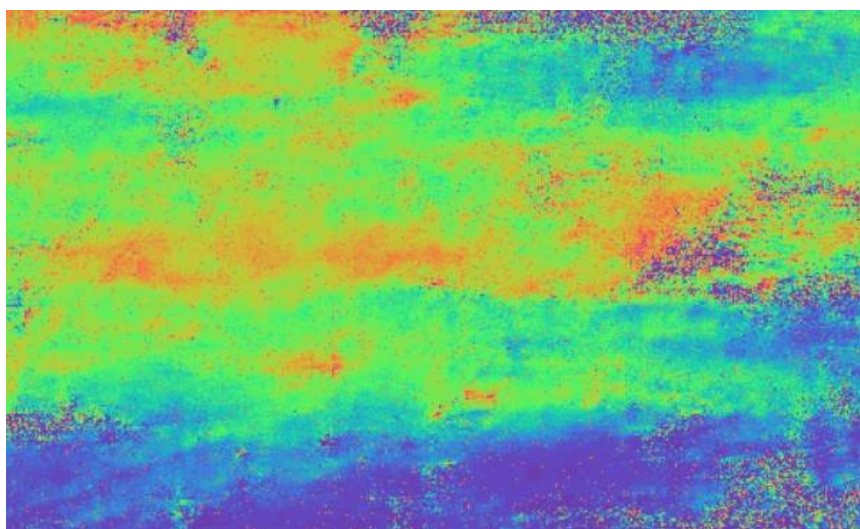
مسئله تخمین احتمال (MAP) مطرح می‌کند و هدف آن محاسبه محتمل‌ترین راه حل unwrapped شده با توجه به داده‌های ورودی قابل مشاهده است. با توجه به داده‌های ورودی فاز Unwrap شده شامل سه مدل آماری داخلی برای داده‌های توپوگرافی، داده‌های تغییر شکل و داده‌های عمومی صاف است. مسئله بهینه‌سازی مطرح‌شده تقریباً با استفاده از تکنیک‌های Network-flow حل می‌شود. از آنجا که SNAPHU از یک روش بهینه‌سازی تکراری استفاده می‌کند، زمان اجرای آن به مدل تداخل‌سنجی بستگی دارد [12و25].

9-3-5- تبدیل فاز unwrap شده به جابه‌جایی ارتفاعی

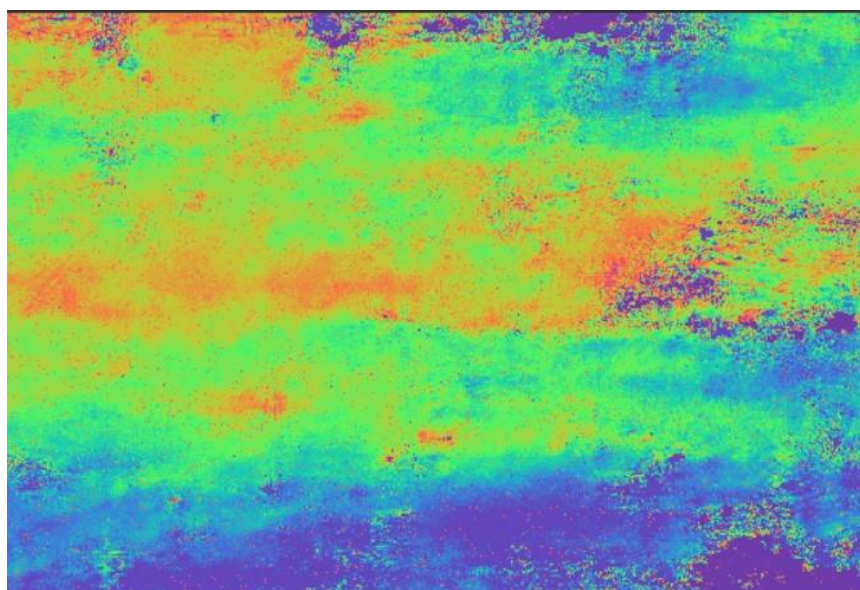
در نهایت برای محاسبه جابه‌جایی ارتفاعی از رابطه 2 استفاده می‌شود.

$$v_{dip} = -\frac{\phi_{unw} * \lambda}{4 * \pi * \cos(i)} \quad (2)$$

در رابطه 2، V_{dip} جابه‌جایی ارتفاعی برحسب میلی‌متر، ϕ_{unw} فاز unwrap شده، λ طول موج برحسب میلی‌متر و i زاویه موج ورودی با نرمال سطح می‌باشد [24].



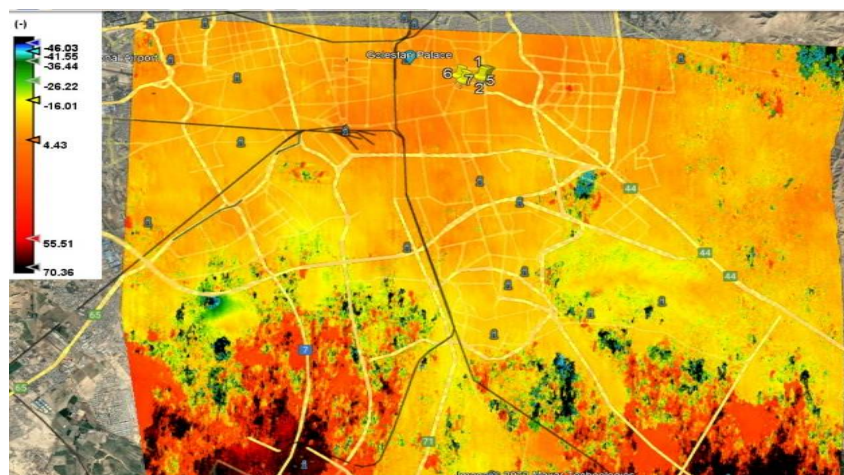
شکل 7- نشان‌دهنده اعمال اثر فیلتر گلدشتاین می‌باشد.



شکل 8- تصویر فاز unwrap شده بوسیله پکیج SNAPHU.

6- آنالیز نتایج

برای این منظور نقاط مشترکی میان داده‌های میدانی و داده‌های ماهواره‌ای مشخص گردیده و در طول بلوار قیام یک پروفیل برای اندازه‌گیری فرونشست در بازه‌های زمانی ترسیم شده‌است (شکل 3). جدول‌های 2 و 3 به ترتیب میزان فرونشست نقاط نمونه را برحسب میلی‌متر با روش تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای با قطبش‌های VH و VV نشان می‌دهند.



شکل 9- نمایش فرونشست در قسمتی از شهر تهران در محدوده منطقه مطالعاتی

اردیبهشت ماه تا انتهای خرداد ماه نقشه فرونشستی را نشان نمی‌دهد، از انتهای خرداد ماه تا انتهای تیر ماه به طور متوسط 2 میلی‌متر، از انتهای تیر ماه تا انتهای مرداد ماه به طور متوسط 4/5 میلی‌متر، از انتهای مرداد ماه تا ابتدای مهر ماه 2/5 میلی‌متر و از ابتدای مهر ماه تا اواسط آبان ماه تغییری مشاهده نمی‌شود.

شکل 13 نقشه فرونشست قطبش VV بر روی محدوده مورد نظر در بازه زمانی خرداد و تیر را به عنوان نمونه نشان می‌دهد که با توجه به تصاویر از ابتدا تا انتهای اردیبهشت‌ماه به طور متوسط 4/5 میلی‌متر، از انتهای اردیبهشت‌ماه تا انتهای خرداد ماه 33/5 میلی‌متر، از انتهای خرداد ماه تا انتهای تیر ماه به طور متوسط 20 میلی‌متر، از انتهای تیر ماه تا انتهای مرداد ماه به طور متوسط 30 میلی‌متر، از انتهای مرداد ماه تا ابتدای مهر ماه 6 میلی‌متر و از ابتدای مهر ماه تا اواسط آبان 34 میلی‌متر تغییر مشاهده می‌گردد. قابل ذکر است که تصاویر بدست‌آمده در بازه‌های زمانی دیگر به دلیل فراوانی تعداد در اینجا نمایش داده نشده‌اند.

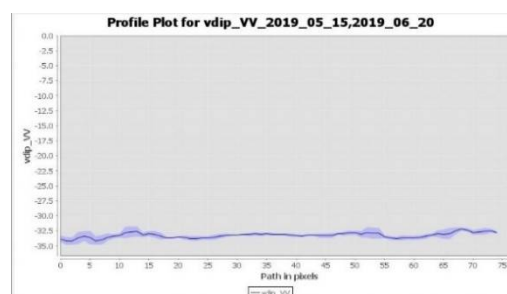
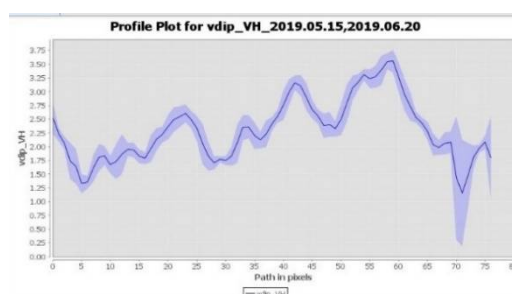
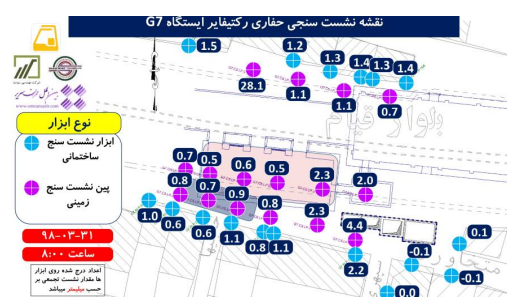
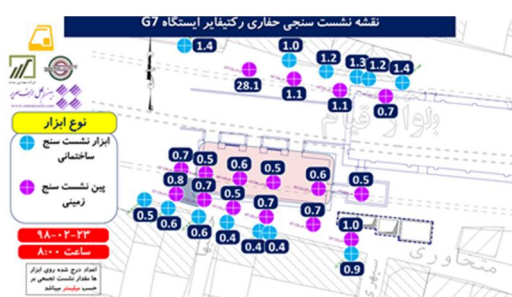
در رابطه 2 مقدار λ با توجه به باند طیفی مورد استفاده در ماهواره که در فایل اطلاعات مداری ماهواره موجود می‌باشد تعیین می‌گردد. در این پژوهش با توجه به اینکه از داده‌های ماهواره سنتینل 1 استفاده شده و باند طیفی مورد استفاده در این داده‌ها باند C می‌باشد مقدار عددی λ برابر با 55/504 میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. در شکل 9 می‌توان میزان جابه‌جایی ارتفاعی را در محدوده مورد نظر مشاهده نمود.

در شکل 10 به عنوان نمونه، داده‌های میدانی و پروفیل رسم‌شده در ماه‌های اردیبهشت و خرداد محدوده زمانی مورد مطالعه بر روی مسیر بلوار قیام با هم مقایسه گردیده‌اند به طوری که محور عمودی پروفیل میزان فرونشست در دو قطبش VH و VV را نشان می‌دهد و تصاویر مربوط به داده‌های میدانی نشست تجمعی پهن‌های نشست‌سنجی و ابزار نشست‌سنجی ساختمانی را نشان می‌دهند که نحوه جمع‌آوری آن‌ها در بخش داده‌های داده میدانی توضیح داده شد. با توجه به داده‌های میدانی مطابق با شکل 11 حداکثر میزان جابه‌جایی در طول بلوار قیام 15/2 میلی‌متر می‌باشد. در این شکل اعداد درج‌شده بر روی نشست‌سنج‌ها (رنگ آبی) مقدار نشست تجمعی بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهند.

شکل 12 نقشه فرونشست قطبش VH بر روی محدوده نظر در بازه زمانی خرداد و تیر را به عنوان نمونه نشان می‌دهد که با توجه به تصاویر بدست‌آمده از ابتدا تا انتهای اردیبهشت ماه به طور متوسط 3 میلی‌متر، از انتهای

جدول 2- میزان فرونشست نقاط نمونه را برحسب میلی‌متر با روش تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای در قطبش VH نمایش می‌دهد.

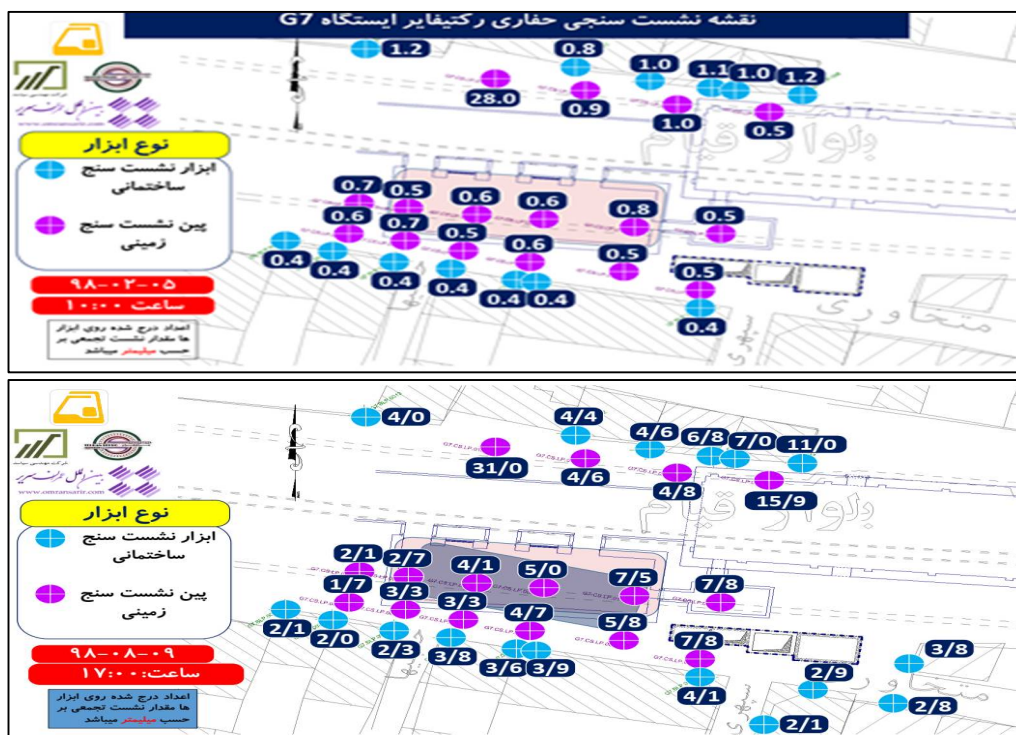
تاریخ	2019/04/21	2019/05/15	2019/06/20	2019/07/14	2019/08/19	2019/09/24	2019/10/30
نقاط							
1	00	-2.56	3.39	-1.79	-4.84	-2.12	0.41
2	00	-3.83	2.49	-1.92	-4.13	-2.22	1.29
3	00	-3.43	2.74	-1.94	-4.51	-2.11	0.46
4	00	-2.50	1.99	-1.91	-3.03	-2.19	-1.98
5	00	-2.39	3.42	-1.88	-5.71	-2.13	-0.01
6	00	-2.82	2.05	-1.84	-1.44	-2.97	0.64



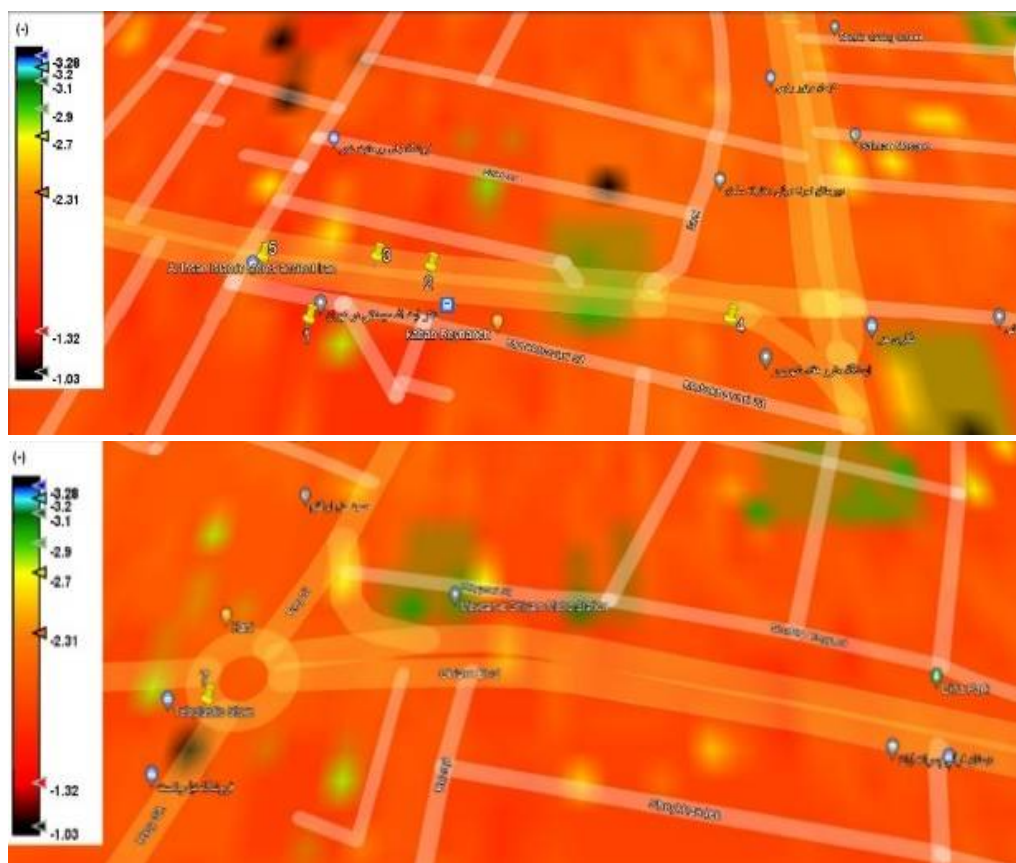
شکل 10- میزان جابه‌جایی در ماه‌های اردیبهشت و خرداد در دو قطبش VV و VH با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مقایسه با داده‌های میدانی.

جدول 3- میزان فرونشست نقاط نمونه را برحسب میلی‌متر با روش تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای در قطبش VV نمایش می‌دهد.

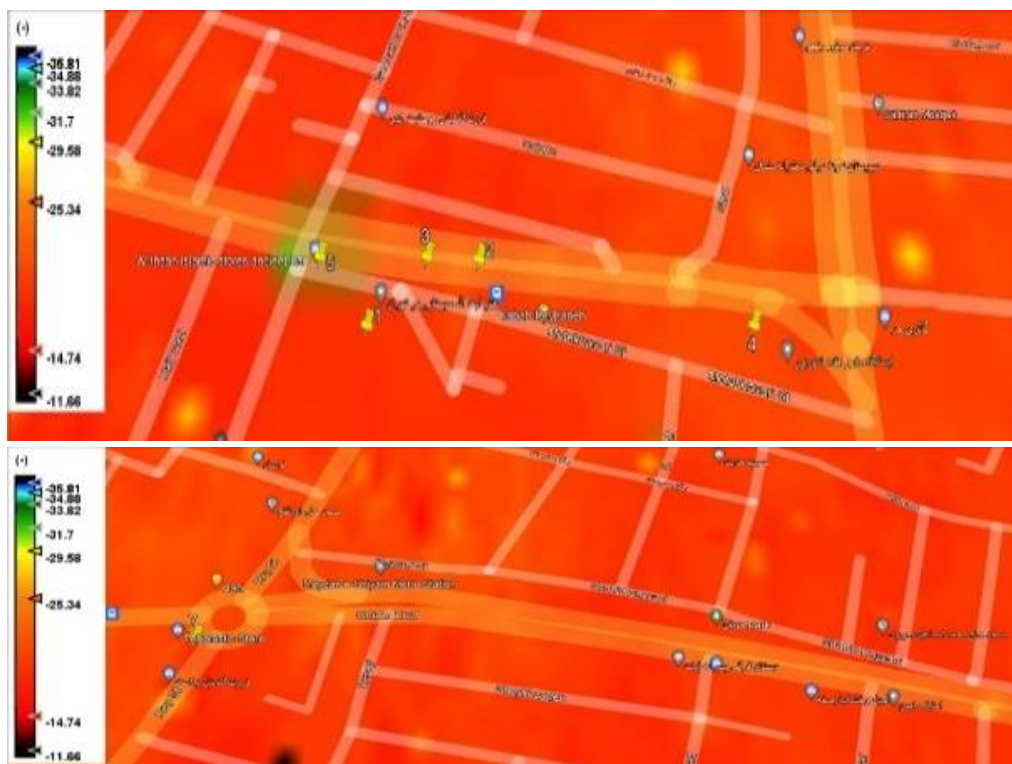
تاریخ	2019/04/21	2019/05/15	2019/06/20	2019/07/14	2019/08/19	2019/09/24	2019/10/30
نقاط							
1	00	-4.35	-33.16	-19.95	-27.46	-5.75	-36.22
2	00	-4.09	-33.27	-18.74	-30.98	-6.11	-31.62
3	00	-4.06	-33.01	-18.81	-31.08	-5.75	-35.65
4	00	-3.93	-33.12	-20.63	-30.61	-5.92	-35.77
5	00	-4.29	-33.75	-19.17	-31.10	-5.77	-36.49
6	00	-4.60	-33.62	-17.55	-32.07	-5.57	-35.49



شکل 11- بیشترین میزان فرونشست در قسمت شمالی بلوار بین ماه‌های اردیبهشت تا آبان.



شکل 12- نشان‌دهنده میزان فرونشست در ماه‌های خرداد و تیر در قطبش VH می‌باشد.



شکل 13- نشان‌دهنده میزان فرونشست در ماه‌های خرداد و تیر در قطبش VV می‌باشد.

با توجه به داده‌های میدانی بیشترین میزان فرونشست بطور متوسط با 4 میلی‌متر مربوط به ماه‌های مرداد و شهریور می‌باشد که در این بین داده‌های ماهواره‌ای با قطبش VH با ثبت متوسط 2 میلی‌متر و با قطبش VV بطور متوسط 32 میلی‌متر می‌باشد. با توجه به جدول 4 از مهر تا آبان ماه بیشترین میزان همخوانی میان داده‌های میدانی و ماهواره‌ای با قطبش VH وجود داشته‌است. جدول 4 نشان‌دهنده میزان RMSE در دو قطبش VH و VV در بازه‌های زمانی مختلف برای نقاط نمونه می‌باشد.

با توجه به شاخص RMSE می‌توان دریافت تصاویر راداری با قطبش VH برای نشست‌سنجی مناطق شهری مناسب‌تر می‌باشند. این شاخص در بیشترین حالت برای قطبش VH، 3/3 میلی‌متر و برای قطبش VV، 34/4 میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به این داده‌های ابزار نشست‌سنجی ساختمانی می‌توان نتیجه گرفت که فرونشست کمتری متوجه ساختمان‌های اطراف بلوار قیام شده‌است. میزان نشست‌سنجی پین‌های نشست‌سنجی نشان‌دهنده فرونشست بیشتر قسمت شمالی بلوار نسبت به مرکز و جنوب بلوار می‌باشد. بیشترین میزان فرونشست به میزان 9/2 میلی‌متر در قسمت شمالی بلوار در بین ماه‌های تیر و مرداد رخ داده‌است و این میزان برای قسمت جنوبی بلوار در بین ماه‌های اردیبهشت و خرداد ماه 3/3 میلی‌متر می‌باشد. با توجه به داده‌های ماهواره‌ای راداری بیشترین میزان فرونشست در قطبش VH در بین ماه‌های تیر و مرداد به طور متوسط به میزان 5 میلی‌متر رخ داده‌است و کمترین میزان فرونشست مربوط به ماه‌های اردیبهشت و خرداد می‌باشد. این میزان برای قطبش VV در ماه‌های مهر و آبان رخ داده‌است که به طور متوسط 35 میلی‌متر می‌باشد.

جدول 4- میزان RMSE بر حسب میلی‌متر برای هر دو قطبش VH و VV

تاریخ	2019/04/21 2019/05/15	2019/05/15 2019/06/20	2019/06/20 2019/07/14	2019/07/14 2019/08/19	2019/08/19 2019/09/24	2019/09/24 2019/10/30
RMSE _{VH}	3.3	2.70	1.86	2.30	2.17	0.82
RMSE _{VV}	4.45	33.20	19.20	27.69	5.82	34.40

7- نتیجه گیری

حداکثر میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری برای این محدوده در طول زمان مورد نظر در قطبش 12 VV 1/5 سانتی متر می باشد که این مقدار در قطبش 12 VV 1/5 سانتی متر می باشد. با توجه به داده های میدانی و مقادیر RMSE این نتیجه حاصل می شود که قطبش VH برای محاسبه فرونشست مناطق شهری مناسب تر می باشد. می توان با استفاده از تصاویر با توان تفکیک مکانی بالاتر مانند تراسارایکس به دقت های بهتری نیز دست پیدا نمود.

مراجع

روش های دیگر سری زمانی و ترکیب های آنها مثل stamps می توانند در افزایش دقت موثر باشند. حذف نویز اسپیکل می تواند دقت را در حد دهم میلی متر بهبود بخشد اما همیشه موثر نیست. پیشنهاد می شود با توجه به هزینه های سنگین نشست سنجی میدانی در مناطق با وسعت بالا از روش تداخل سنجی راداری ماهواره ای همراه با صحت سنجی میدانی استفاده شود تا هم دقت مورد نظر حاصل گردد و هم میزان هزینه ها تا حد چشمگیری کاهش یابد. مدل سازی فاز اتمسفر و فاز نویز و حذف آنها می تواند دقت را با توجه به شرایط محیطی افزایش دهد.

- [1] Matteo Roccheggiani, Daniela Piacentini, Emanuela Tirincanti, Daniele Perissin and Marco Menichetti Detection and Monitoring of Tunneling Induced Ground Movements Using Sentinel-1 SAR Interferometry, MDPI, Vol. 11(6), pp. 639, 2019.
- [2] M. Crosetto, J.A. Gili, O. Monserrat, M. Cuevas-González, J. Corominas, D. Serral, "Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors", Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 13(4), pp. 923-33, 2013
- [3] C. Colesanti, and J. Wasowski, "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry,," Engineering geology, Vol. 88 (3-4), pp. 173-199, 2006.
- [4] D. Perissin, F. Rocca "High-accuracy urban DEM using permanent scatterers," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol 44 (11), pp. 3338-3347, 2006.
- [5] A. Monti-Guarnieri, F. Parizzi, P. Pasquali, C.L. Prati, F. Rocca, "SAR interferometry experiments with ERS-1," Proceedings of IGARSS'93-IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 991-993, 1993
- [6] M. Motagh, Y. Djamour, T.R. Walter, H.U. Wetzel, J. Zschau, S. Arabi. "Landsubside in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS," Geophysical Journal International, Vol. 168 (2), pp. 518-526, 2007
- [7] A.I. Calderhead, R. Therrien, A. Rivera, R. Martel, J. Garfias "Simulating pumping induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico" Advances in Water Resources, Vol. 34 (1), pp. 83-97, 2011.
- [8] H.A. Zebker, J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing Vol. 30(5), pp. 950-959, 1992
- [9] R. Goldstein, "Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry,," Geophysical research letters, Vol. 22(18), pp. 2517-2520, 1995.
- [10] H.A. Zebker, P.A. Rosen, S. Hensley, "Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps" Journal of geophysical research: solid earth, Vol. 102(B4), pp. 7547-7563, 1997.
- [11] Y. Maghsoudi, F. van der Meer, C. Hecker, D. Perissin, A. Saepuloh, "Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia," International journal of applied earth observation and geoinformation, Vol 64, pp. 386-396, 2018
- [12] Seyfallah Bouraoui. Time series analysis of SAR images using PS and SBAS and merged approaches in regions with small surface deformation. Earth Sciences. Universite de Strasbourg, 2013
- [13] A. Shemshaki, M. Blourchi, F. Ansari, "Earth subsidence review at Tehran plain-Shahrivar first report, 2005.
- [14] M. Haghshenas-Haghighi, M. Motagh, and M. Esmaeili, "continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran, as evidenced by C-band, L-band and X-band radar measurements," in the 5th TerraSAR-X Science Team Meeting, 2013.
- [15] Reza Soodmand Afshar, Salman Ahmadi Monitoring of land subsidence due to overexploitation of groundwater using PS-InSAR in the region in hamadan proviance, Iran, Vol 8(1), pp. 79_99, 2020. (Persian)

- [16] Peppe J. V. D'Aranno, Alessandro Di Benedetto, Margherita Fiani, Maria Marsella, Ilaria Moriero and José Antonio Palenzuela Baena An Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Infrastructure Monitoring, MDPI, 13(6), pp.1052, 2021.
- [17] Seyed Sasan Babaei, Zahra Mousavi, Mahasa Roustaei Time series analysis of radar images using SBAS (small baseline) and PS (Persistent Scatterer) methods in determining the subsidence rate of Qazvin plain
- [18] Ali Asghar Semsar Yazdi, Mehdi Dehghani, Saleh Samsar Yazdi, providing a framework for assessing the destructive effects of development projects on aqueducts, (Persian)
- [19] Ali Asghar Semsar Yazdi, Majid Labaf Khaniki, Lessons from Indigenous Knowledge in Aqueduct Management. (Persian)
- [20] Ali Radman, Dr. Mehdi Akhondzadeh, Modeling of land subsidence due to groundwater extraction using satellite data, University of Tehran, 2018
- [21] Mahmoud Diantkha, book of Engineering Surveying (persian)
- [22] Andy Hooper, David Bekaert, Ekbal Hussain, and Karsten Spaans 15th August, StaMPS/MTI Manual, School of Earth and Environment University of Leeds LS2 9JT Leeds United Kingdom, 2018
- [23] Michael Fomelis, Jose Manuel Delgado Blasco, Yves-Louis Desnos, Marcus Engdahl, Diego Fernández, Luis Veci, Jun Lu, Cecilia Wong, ESA SNAP – STAMPS INTEGRATED PROCESSING FOR SENTINEL-1 PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY, presently at SkyWatch Space Applications, Waterloo, Canada, 2018
- [24] Fawwaz T. Ulaby, David G. Long Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing, 2014
- [25] astri polska ESA SNAP WORKBOOK
- [26] Qingqing Feng, Huaping Xu, Zhefeng Wu, Yanan You, Wei Liu, and Shiqi Ge Improved Goldstein Interferogram Filter Based on Local Fringe Frequency Estimation, researchGate, Vol 16(11), pp1976, 2016
- [27] [leica_na2_nak2_bro.pdf \(gefes-leica.cz\)](#)