پنجمین همایش فن آوری های نوین صنعت ساختمان
با رویکرد بلندمرتبه سازی
۱۶ و ۱۷ اسفند ماه
The 5th National Conference on Modern Construction Technologies
HIGH-RISE BUILDING
March 07-08 2019

مطالعات و امکان‌سنجی پایش تغییر شکل‌های برج با استفاده از تصاویر راداری

روزبه شاد[۱]، شهرام سراوانی[۲]، حسین اعتمادفرد[۳]*

۱-استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی فردوسی مشهد،r.shad@um.ac.ir
۲- کارشناس ارشد سنجش از دور،shahramsaravani1990@gmail.com
۳-استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی فردوسی مشهد،etemadfard@um.ac.ir

چکیده

با توجه به افزایش تعداد ساختمان‌های بلندمرتبه و سازه‌های مهندسی بزرگ در شهرها، متخصصین همواره درصدد دستیابی به راه‌حل‌های مناسبی برای پایش این سازه‌ها می‌باشند؛ چراکه با به کارگیری راهکارهای مناسب می‌توان از صدمات احتمالی ناشی از تخریب این‌دست سازه‌ها که اغلب خسارات غیرقابل جبرانی درپی دارد، جلوگیری کرد. از آنجایی که پایش سازه با استفاده از روش‌های سنتی بسیار دشوار و هزینه‌زا است، تصاویر راداری به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا، دید وسیع و دقت قابل قبول به عنوان ابزاری مناسب برای این منظور مطرح گردیده‌اند. زمینه‌های کاربردی مختلفی برای تصاویر راداری مورد مطالعه و پیاده‌سازی قرار گرفته است، از جمله کاربردهای آن تخمین ارتفاع ساختمان‌ها با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، مدلسازی تغییر شکل سازه‌های مرتفع با استفاده روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) و روش Polarimetry SAR (PolSAR) به منظور تحلیل و آنالیز مواد و ساختار سازه هستند. در این مقاله ابتدا تئوری مورد نیاز برای استفاده از تداخل‌سنجی راداری برای تعیین تغییر شکل سازه‌ها بیان می‌گردد، سپس عملکرد روش‌های مختلف در مدلسازی جابجایی سازه‌های مشهور نظیر برج ایفل، برج کریستال، برج کِلِر در کشور فرانسه و ساختمان بزرگ (آسمان خراش) شهر پراگ واقع در کشور جمهوری چک را مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از تحلیل تصاویر راداری، مقدار ۵ میلیمتر در سال نشست برای ساختمان بلند شهر پراگ با استفاده از رادار زمینی (IBIS-S) و به ترتیب نشستی برابر با ۴، ۱ و۱ سانتیمتر در سال برای برج ایفل و ساختمان‌های کریستال و کلر که با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی تراسار (TerraSAR-X) بدست داده است که حاکی از آن است که روش‌های مبتنی بر تصاویر راداری کارایی بسیار خوبی جهت پایش ساختمان‌های مرتفع دارند. بنابراین به عنوان یک رویکرد نوین در پایش ساختمان‌های بلند، پیشنهاد می‌گردد از این تکنیک جهت تعیین جابجایی و مدلسازی سازه‌های مرتفع و حساس (نظیر برج میلاد) در کشور ایران استفاده نمود.

کلمات کلیدی: رادار فضایی، رادار زمینی، تداخل سنجی تفاضلی راداری(DInSAR)، مدلسازی نشست برج

۱- مقدمه

سازه‌های مهندسی موجود بدلیل عوامل مختلف از جمله بارگذاری‌های پیش‌بینی نشده و همچنین نشست زمین دچار تغییر شکل شده و مشکلاتی را برهم می‌زنند. این مشکلات با بارگذاری اضافی حاصل از خطرات طبیعی یا مصنوعی مانند زلزله و انفجار، تشدید و منجر به خسارت و خرابی می‌گردند. این خرابی ممکن است بطور ناگهانی و یا در طول زمان رخ دهند. آنچه پس از ساخت و بهره‌برداری از یک سازه بزرگ اهمیت می‌یابد، پایش آن سازه بمنظور جلوگیری از آسیب‌های جانی و مالی می‌باشد.

مهندسان سال‌هاست به تلاش برای دستیابی به روشی بهینه برای این منظور پرداخته‌اند. روش‌هایی که تاکنون برای این منظور استفاده شده است از جمله استفاده از مشاهدات ژئودتیکی و همچنین حسگرهای تغییر شکل هزینه بسیار بالایی در پی دارند و علاوه بر این استفاده از آنها و پیاده‌سازی الگوریتم آنها نیازمند زمان بسیار زیادی می باشد. شهرهای امروزی مملو از سازه‌های بزرگ‌اند که پایش آنها به روش‌های سنتی نیازمند هزینه و زمان بسیار بالایی است. پس از روبرو شدن با این مشکل متخصصین، به فکر استفاده از ابزاری افتادند که در قالب آن بتوانند چند سازه را همزمان و با حداقل هزینه پایش کنند و نیازمند استفاده از تعداد بسیاری حسگر یا تعداد بسیاری ایستگاه‌های مشاهدات ژئودتیکی در اطراف هر سازه نباشند. به همین دلیل ایده استفاده از تصاویر راداری که دقت در حد میلیمتر داشته و با دید وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالای خود توانایی پوشش یک شهر را دارند، مطرح گردید. تداخل‌سنجی راداری یک روش قدرتمند در علم سنجش از دور بوده که توانایی آشکار کردن کوچکترین تغییرات در یک فاصله بسیار بزرگ دارد. کاربردهای متنوعی در مدل‌های مختلف راداری در پایش و مانیتورینگ شهر با نتایج قابل قبولی ارائه گردیده است. از جمله این کاربردها می‌توان به تخمین ارتفاع ساختمان‌ها با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری[1] ، مدلسازی تغییر شکل سازه‌های مرتفع با استفاده روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری[2] و روش رادار پلامیمتری[3] به منظور تحلیل و آنالیز مواد و ساختار سازه هستند. سنجنده-های نظیر تراسار ایکس[4]، تن دم ایکس[5]، سنجنده سارلوپ [6] و ماهواره‌ی کازمواسکای مد [7] زرلوشنی برابر یک متر را ارائه کردند که در گذشته این دقت در دسترس نبوده است[1]. این انقلاب در علم سنجش از دور فرصت نظارت بر سازه‌ها را در مقیاس‌های بزرگ فراهم کرده است. در ادامه به بررسی عملکرد روش‌های مختلف مبتنی بر تصاویر راداری تخمین میزان جابجایی سازه‌های مرتفع پرداخته خواهد شد. بخش دوم این تحقیق اصول تداخل‌سنجی راداری بیان می‌گردد و سپس بخش سوم به معرفی روش‌ها و مطالعات انجام شده مقایسه انها در پایش سازه‌های مرتفع با استفاده از تداخل‌سنجی راداری پرداخته می‌شود. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری و ارزیابی انجام شده از تحقیق ارائه شده است.

۲ –اصول تداخل‌سنجی راداری:

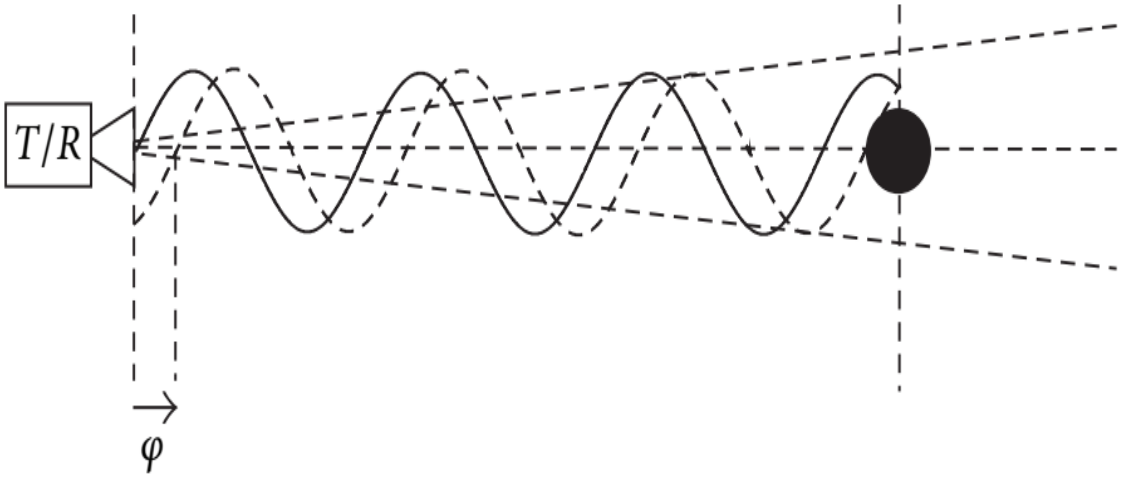
هر تصویر راداری از دو سری اطلاعات به نام فاز و دامنه تشکیل شده است که تداخل‌سنجی راداری بر مبنای اطلاعات فاز تصاویر راداری صورت می‌گیرد. مسئله مورد توجه آن است که عوامل گوناگونی بر فاز بدست آمده از تصاویر راداری تاثیرگذارند. گذر سیگنال راداری از جو، اثر تغییر شکل زمین، نویز، خطای مداری و بالاخره اثر مربوط به توپوگرافی منطقه باعث تغییر در عدد فاز پیکسل‌های تصویر راداری می‌گردد. اگر فاز دو تصویر راداری را از هم کسر شود آنگاه تصویری به نام تداخل نما [8]خواهیم داشت که معادله فاز آن به شکل زیر است[2].

$$\varphi_{int} = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{deformation} + \Delta\varphi_{atmospher} + \Delta\varphi_{orbital} + \Delta\varphi_{noise} \qquad (۱)$$

به منظور دستیابی به میزان تغییر شکل، لازم است اختلاف فازهای ناشی از نویز ($\Delta\varphi_{noise}$)، خطای مداری ($\Delta\varphi_{orbital}$)، جو و توپوگرافی ($\Delta\varphi_{topo}$) تا فاز تداخل (φ_{int}) تصحیح گردند تنها نمای موجود، ناشی از تغییر شکل سازه در بازه زمانی دو تصویر رادار باشد. به منظور تصحیح اثر مداری و توپوگرافی از اطلاعات مداری و مدل ارتفاعی رقومی منطقه استفاده می‌گردد. همچنین نویز

[1] Interferometry SAR
[2] Differential Interferometry SAR
[3] Polarimetry Sar
[4] TerraSAR-X
[5] TanDEM-X
[6] SARLupe
[7] CosmoSkyMed
[8] Interferogram

مربوط به اثرات اتمسفر نیز با استفاده از روش های پیش فرض تا حد بسیاری تصحیح می شود. در شکل زیر مکانیزم تـداخل‌سـنجی نمایش داده شده است.



شکل ۱: نحوه‌ی کار تداخل‌سنجی راداری : T/R (سیگنال ارسالی/دریافتی (transmit/receive)) ، φ : فاز[1].

۳- مطالعات انجام شده در پایش سازه های مرتفع با استفاده از تصاویر راداری

در این بخش تحقیقات انجام شده در پایش سازه‌های مرتفع با استفاده از تصاویر رادارهای فضـایی و زمینـی مـورد بحـث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۱- تداخل‌سنجی با استفاده از رادارهای فضایی(Space-Borne Radar Interferometry)

داده‌های ماهواره‌های راداری زیادی برای تداخل‌سنجی راداری وجود دارد که می‌توان مواردی مانند تصاویر سنجنده فضایی اروپا [۱]، داده های ماهواره انویست[۲] ، داده‌های ماهواره سنتینل[۳] ۱ و تصاویر سنجنده ی کانادایی ، تصـاویر مـاهواره رادارسـت ۱ و ۲ [۴] سنجنده‌ی ژاپنی [۵] و داده‌های سنجنده ایتالیایی تراسار ایکس را نام برد. همچنین سـنجنده‌هـای دیگـر بـرای ماموریـت‌هـای جدیـد طراحی شده‌اند برای مثال سنجنده رادارست با سه ماهواره، سنجنده تراسار ایکس ۲ و سنجنده ارژانتینی سآوکم[۶] با دو ماهواره از این دسته‌اند. در تداخل‌سنجی با استفاده از دادهای رادارهای فضایی ویژگی‌های بازپراکنش شده بـه عوامـل مختلفـی از جملـه رزلوشـن مکانی[۷] ، طول موج [۸]، زاویه تابش سیگنال[۹] ، چرخه بازبینی[۱۰] بستگی دارد. بنابراین انتخاب یک داده راداری با پارامترهای مشاهداتی مناسب، یک نکته اساسی در امر پایش نشست سازه‌های مرتفع است[3].

- **رزلوشن مکانی :**

1 European space Agency's ERS-1/2
2 ENVISAT
3 Sentinel-1
4 Radarsat-1/2
5 J-ERS-1
6 SAOCOM
7 Spatial resolution
8 Wavelength
9 Angle of incidence
10 Revisit cycle

رزلوشن مکانی بالای یک تداخل‌سنج راداری این اجازه را می‌دهد که تغییرشکل‌های بسیار جزئی در حد میلیمتر را کشف و مورد بررسی قرار داد. برای نمونه تداخل‌سنج تفاضلی با رزلوشن مکانی بالا در جهت رنج مانند تراسار ایکس، تن دم ایکس، یا ماهواره‌ی کازمواسکای مد قادر به تشخیص نشست سازه در اندازه میلیمتر است.

- **طول موج(یا فرکانس رادار) :**

با توجه به رابطه اصلی تداخل‌سنجی تفاضلی رادار $\varphi_{def} = \left(-\frac{4\pi}{\lambda}\right) \cdot \Delta R)$ ، دقت تعیین میزان نشست با افزایش طول موج بالاتر می رود. طول موج معمولا چند سانتی متر است. از اینرو تداخل سنجی تفاضلی قادر به مشاهده میزان نشست در حد میلیمتر است[3] .

- **زاویه تابش :**

زاویه تابش بین دو امتداد تابش ورودی و خط عمود بر زمین تعریف می‌گردد. فاکتور مهم و اساسی که بر موج دریافتی از بازپراکنش‌گر اثر گذاشته و اعوجاج هندسی به وجود می‌آورد که تحت عنوان سایه[1] و توقف[2] مطرح می‌گردد. در مناطق سایه هیچ‌گونه مشاهده‌ای از تارگت جهت انجام پردازش تداخل‌سنجی استخراج نمی‌شود. برای حل این مشکل روش توموگرافی رادار با دهانه مصنوعی[3] استفاده می‌شود. بنابراین انتخاب یک سیستم تداخل‌سنجی با زاویه تابش ورودی مناسب نسبت به منطقه مورد مطالعه نقش مهمی در اندازه‌گیری میزان نشست سازه‌های مرتفع دارد[4].

- **چرخه بازید**

چرخه بازید اثر مستقیمی بر دقت مشاهدات تعیین میزان نشست دارد. در جریان یک چرخه بازبینی طولانی ناهمبستگی زمانی باعث تغییر ویژگی‌های سیگنال‌های بازپراکنده شده می‌شود که این امر اثر بخشی و کاربردپذیری تداخل‌سنجی را درپایش میزان نشست سازه را محدود می‌کند. بنابراین برای پایش سریع نشست می‌بایست از داده‌های سنجنده‌های استفاده نمود که چرخه بازبینی کوتاه تری داشته تا جزئیات بیشتر از میزان تغییرات در ساختمان‌ها مشاهده شود[4].

در سال ۲۰۱۱ جی زنی[4] و همکاران با استفاده از تصاویر سری زمانی سنجنده فضایی اورپا و با بهره‌گیری از تکنیک معروف تداخل سنجی سباس[5] میزان میزان نشست ساختمان های موجود در محدوده والری مارکونی[6] در محدوده زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ را بررسی نمودند. نتایج نشان دهنده میزان تغییر نشست یک میلیمتر در سال است[5].

در سال ۲۰۱۶ کو یانگ[7] و همکاران با استفاده از تصاویر تداخل سنج تراسارایکس میزان نشست دو ساختمان مرتفع ساختمان بوهائی[8] با ارتفاع ۲۷۰ متر و ساختمان تئاتر چین را مورد بحث قرار دادند، نتایج میزان ۵,۰۴ -تا ۰,۴۷ میلیمتر نشست را برای ساختمان بوهائی و ۰,۱۴ تا۱۱,۱۱ - میلیمتر نشست در سال را برای ساختمان ساختمان تئاتر گزارش کردند[6]. در سال ۲۰۱۷ فلور وایسگربر[9] و همکاران با بکار گیری دو تصویر سری زمانی تراسار ایکس با طول موج ۳ سانتی متر میزان نشست سازه‌های مشهور نظیر برج ایفل[10] ، برج کریستال[11]، برج کلر[12] و برج میرابیو[1]تخمین زده شد و میزان ذکر شده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. میزان نشست ۴ سانتی‌متر برای برج ایفل و ۱سانتی‌متر برای برج های کوتاه‌تر گزارش شده است[1].

1 Shadow
2 Layover
3 Differential Synthetic Aperture Radar Tomography
4 G Zeni
5 Small Baseline Subset Interferometry
6 Vaile Marconi
7 Kui Yang
8 Bohai Building
9 Flora Weissgerber
10 Eiffel Tower
11 Cristal Tower
12 Keller Tower

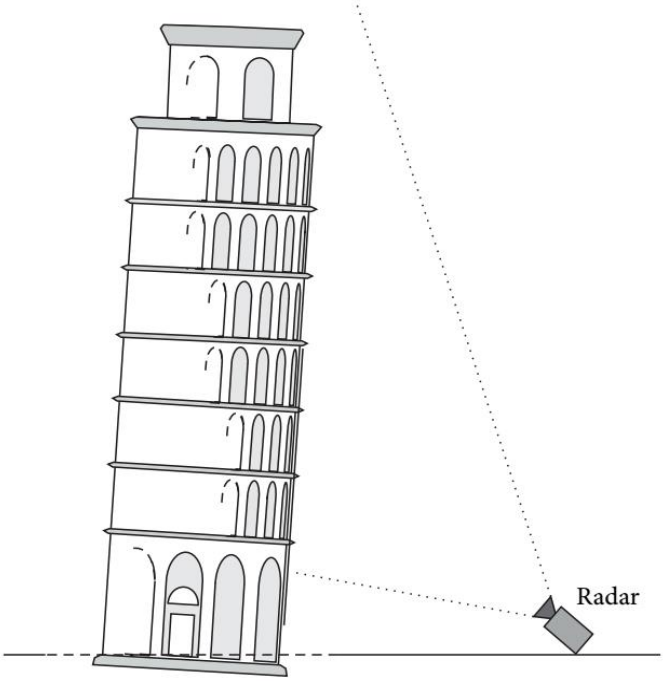
۳-۲- تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی [۲]

تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی با استفاده از رادارهای یک تکنیک شناخته شده است که به طور گسترده‌ای برای پایش تغییر شکل در پدیده‌های طبیعی و سازه‌های مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی رادار زمینی شامل دو حالت کلی استاتیک و دینامیک(پویا) می باشد. در سال های اخیر، تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی ثابت کرده است که یک روش ثابت و قابل اعتماد برای نظارت بر تغییرات ناگهانی در یک منطقه محدود است. در مقایسه با سیستم رادار فضایی، تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی می‌تواند تصاویری از یک منطقه در مقیاس محلی را در فواصل زمانی بسیار کوتاه‌تر فراهم کند (حدود هر ۱۰ دقیقه) با دقت در میلیمتر و یا حتی سطوح زیر میلیمتر[7]. بنابراین، تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی این اجازه را می دهد که جابجایی سریع پدیده‌ها مانند زمین لغزش، نشست را اندازه گیری کرد. علاوه بر این، تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی می تواند در دامنه های شیب دار به راحتی مستقر شده و تصویر برداری کند، این در حالیست که در داده‌های ماهواره ای در مناطق با توقف و نواحی سایه قادر به تصویربرداری مطلوب و دلخواه نیست. علاوه بر این، بازیابی فاز تداخل واقعی ناشی از تغییر شکل سطح در تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی به دو دلیل آسانتر است. اول با توجه به هندسه مشاهدات ثابت، تداخل سنجی با استفاده از رادار زمینی و مستقل بودن تصویربرداری از توپوگرافی منطقه تداخل نگارها بدون انجام تصحیح مسطح سازی انجام شود. دوم اینکه نرخ تصویربرداری به دلیل کوتاه بودن چرخه بازبینی نسبت به تصویر برداری با رادار فضایی بیشتر است و از خطای عدم همبستگی در داده های تداخل سنجی زمانی تاحد زیادی کاسته می شود[7]. در ادامه برخی از مطالعات انجام در پایش سازه های مرتفع را با استفاده رادار زمینی بیان می‌کنیم.

در سال ۲۰۰۰ تراچی[۳] و همکاران برای اولین بار از تداخل‌سنجی راداری زمینی برای پایش سازه‌های مرتفع استفاده نمودند[8]. در سال ۲۰۰۴ پیراسینی[۴] و همکاران برای اولین بار تداخل‌سنج راداری را به جهت پایش حرکات پل‌ها طراحی و مورد ازمایش قرار دادند[9] . در سال ۲۰۰۸ ماریو البا[۵] و همکاران میزان نشست یک سد را در ایتالیا با استفاده از تصاویر رادار زمینی ای بی ای اس [۶]و با نصب چند بازتابنده برروی سد را بدست آوردند که بیشینه نشست ان ۴,۵۵ میلیمتر در سال بوده است[10] کارلو اتزنی[۷] و همکاران جهت تعیین میزان نشست برج معروف پیزا در از یک رادار زمینی استفاده نمودند(شکل ۲). در این تحقیق رادار زمینی در چهار جهت برج پیزا و در فواصل مشخص مستقر شده و تصاویر مورد نیاز برای تولید تداخل‌سنج‌ها ثبت و میزان جابجایی محاسبه شد، که میزان نشست ۵ ± میلیمتر گزارش شده است[11].

---

1 Mirabeau
2 Ground-Based Radar Interferometry
3 Tarchi
4 Pieraccini
5 Mario Alba
6 Ground-Based Radar Interferometry -IBIS
7 Carlo Atzeni



شکل۲- اندازه گیری رادار زمینی IBIS از برج پیزا[11].

در سال ۲۰۱۸ تالیچ و همکاران با استفاده از رادار تداخل سنج زمینی‌ای بی ای اس با رزلوشن ۰/۷۵ متر در جهت رنج و فرکانس ۱۷,۱-۱۷,۱۳ 17.3-گیگا هرتز (باند Ku) میزان جابجایی ساختمان بزرگ شهر پراگ با ارتفاع ۱۰۹ متر و برج فرستنده تلویزیون با ارتفاع ۲۱۶ متر در کشور جمهوری چک را مورد بررسی قرار دادند، میزان ۴,۳۸ میلیمتر جابجایی برای ساختمان بلند شهر پراگ و ۲۳ - تا ۸ میلیمتر برای برج فرستنده گزارش شده است[12].

شکل۲- اندازه گیری رادار زمینی IBIS از ساختمان مرکزی شهر پراگ[12].

جمع‌بندی و نتیجه گیری:

این تحقیق به دنبال معرفی روشی نوین در پایش ساختمان‌های بلندمرتبه بوده است، چرا که با توجه به محدودیت‌های روش سنتی پایش سازه‌های بزرگ مهندسی استفاده از فناوری‌های نوین امری ضروری و غیرقابل چشم‌پوشی است. در این مقاله تکنیک‌های تصویربرداری تداخل سنجی با استفاده از دو نوع داده حاصله از رادارهای فضایی و زمینی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در بخش‌هایی به تحلیل مزایا و معایب هر یک از این دو دسته در تعیین میزان نشست سازه‌های بلند پرداخته شده است. به گونه‌ای که حتی میزان تغییرات و نشست‌های کمتر از ۵ میلیمتر نیز با استفاده از این فناوری قابل دستیابی است. در نهایت به عنوان پیشنهاد و باتوجه اهمیت نگه‌داری سازه‌های مرتفع، تدوین ضوابط و نگارش دستورالعمل همسان در به کارگیری این فناوری علی‌الخصوص رادارهای زمینی، جهت پایش تغییرات و جابجایی های سازه های بلند نظیر برج میلاد توصیه می‌گردد.

مراجع

[1] Weissgerber, F. Colin-Koeniguer, E. Nicolas, J. M., & Trouvé, N., (2017). 3D Monitoring of Buildings Using TerraSAR-X InSAR, DInSAR and PolSAR Capacities. Remote Sensing, 9(10), 1010.

[2] Hooper, A., (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. Geophysical Research Letters, 35(16).

[3] Eineder, M. Adam, N. Bamler, R. Yague-Martinez, N., & Breit, H.,(2009). Spaceborne spotlight SAR interferometry with TerraSAR-X. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(5), 1524-1535.

[4] Chen, F. Lin, H. Li, Z. Chen, Q. & Zhou, J., (2012). Interaction between permafrost and infrastructure along the Qinghai–Tibet Railway detected via jointly analysis of C-and L-band small baseline SAR interferometry. Remote Sensing of Environment, 123, 532-540.

[5] Zeni, G. Bonano, M. Casu, F. Manunta, M. Manzo, M. Marsella, M. & Lanari, R., (2011). Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: The case study of the city of Rome, Italy. Journal of Geophysics and Engineering, 8(3), S1.

[6] Yang, K. Yan, L. Huang, G. Chen, C. & Wu, Z., (2016). Monitoring building deformation with InSAR: Experiments and validation. Sensors, 16(12), 2182.

[7] Pieraccini, M., (2013). Monitoring of civil infrastructures by interferometric radar: A review. The Scientific World Journal, 2013.

[8] Pieraccini, M. Tarchi, D. Rudolf, H. Leva, D. Luzi, G. & Atzeni, C., (2000). Interferometric radar for remote monitoring of building deformations. *Electronics Letters*, *36*(6), 569-570.

[9] Pieraccini, M. Fratini, M. Parrini, F. Macaluso, G. & Atzeni, C., (2004). High-speed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures. Electronics Letters, 40(14), 907-908.

[10] Atzeni, C. Bicci, A. Dei, D. Fratini, M. & Pieraccini, M., (2010). Remote survey of the leaning tower of Pisa by interferometric sensing. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 7(1), 185-189.

[11] Alba, M. Bernardini, G. Giussani, A. Ricci, P. P. Roncoroni, F. Scaioni, M, ... & Zhang, K.,(2008). Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37.,(1374), 133-139.

[12] Talich ,M .,(2018). Monitoring of horizontal movements of high-rise buildings and tower transmitters by means of ground-based interferometric radar.