Scientific journal of Intelligence Horizons

۷

Year 2
Autumn 1404
۱٤۰٤

Research paper

:Date received
۱٤۰۵/۰۵/۰۶
:Date accepted
۱٤۰٤/۰۶/۰۸
Pages: 133-۱۶۸

Assessment of Geological Stability at Imam Khomeini International Airport (IKIA) Using Time-Series InSAR

Mohammad Amin Bakhshi[۱], Shayan Khodamoradi[۲]*, Ali Sarkargar Ardakani[۳], Behnam Asghari Bayrami[٤]

Abstract

Land subsidence, as one of the major environmental hazards, poses a serious threat to the stability of critical infrastructures, particularly airports. The high sensitivity of runways to millimeter-scale ground deformations underscores the necessity of accurate and continuous monitoring of this phenomenon. In this study, the spatiotemporal pattern of land subsidence within the Imam Khomeini International Airport area in Tehran was investigated using time-series analysis of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) data based on the Small Baseline Subset (SBAS) algorithm. To this end, a set of 47 radar images acquired between 2020 and 2025 was processed, and ground surface displacement rates along the sensor's line of sight were extracted. The results indicate that land subsidence in the study area exhibits a heterogeneous and localized behavior, with the highest subsidence rates observed in the eastern part of the region and in the vicinity of airport infrastructures, while the western sectors show relative stability. A focused analysis of the runways reveals the occurrence of asymmetric subsidence with rates of up to approximately 5 cm per year, resulting in significant cumulative subsidence over the five-year period. Furthermore, the analysis of aircraft movement routes confirms localized instability and irregular vertical deformation patterns, particularly along the main runway. Overall, the findings demonstrate the high capability of the SBAS-InSAR approach for continuous monitoring of ground deformation,emphasizing the necessity of applying this method in risk management and preventive maintenance of sensitive airport infrastructures.

Keywords: Land subsidence; Airport; Infrastructure; Radar interferometry; Environmental hazards

۱. PhD student in Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty and Research Institute of the Great Prophet (PBUH), Imam Hussein (PBUH) University, Tehran, Iran

۲. * Master of Science in Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty and Research Institute of the Great Prophet (PBUH), Imam Hussein (PBUH) University, Tehran, Iran

۳. Associate Professor, Center for Geomatics Science and Technology, Faculty and Research Institute of the Holy Prophet (PBUH), Imam Hussein (PBUH) University, Tehran, Iran

٤. PhD in Remote Sensing, Faculty and Research Institute of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran

نشریه علمی آفاق اطلاعات

تقییم الاستقرار الجیولوجی لمطار الامام الخمینی الدولی استخدام السلاسل الزمنیۀ لقیاس التداخل الرادارى

محمد أمین بخشی۱ شایان خودامورادی *۲علی سارکارجار أردکانی۲بهنام أصغری بیرامی۴

۷
السنۀ الثانیه
الخریف ۱٤۰٤
ورقۀ بحثیۀ
تاریخ الاستلام:
۱٤۰٤/۰٥/۰٦
تاریخ القبول:
۱٤۰٤/۰٦/۰۸
الصفحات: ۱۳۳-۱٦۸

ملخص

یُعدّ هبوط الأرض، کأحد المخاطر البیئیۀ، تهدیدًا خطیرًا لاستقرار البنی التحتیۀ الحیویۀ، ولا سیما المطارات. وتُضاعف الحساسیۀ العالیۀ للمدارج للتشوهات الطفیفۀ (بالملیمترات) الحاجۀ إلی رصد دقیق ومستمر لهذه الظاهرۀ. فی هذه الدراسۀ، تمّ تحلیل النمط المکانی والزمانی لهبوط الأرض داخل مطار الإمام الخمینی الدولی فی طهران باستخدام تحلیل السلاسل الزمنیۀ لبیانات التداخل الرادارى وخوارزمیۀ خط الأساس القصیر (SBAS-InSAR). لهذا الغرض، جری تحلیل مجموعۀ من ۴۷ صورۀ رادارية للفترۀ من ۲۰۲۰ إلی ۲۰۲۵، واستُخرجت معدلات إزاحۀ سطح الأرض علی طول خط رؤیۀ المستشعر. وأظهرت النتائج أن هبوط الأرض فی المنطقۀ یتسم بسلوک غیر متجانس وموضعی؛ حیث لوحظت أعلی معدلات الهبوط فی النصف الشرقی من المنطقۀ وحول البنیۀ التحتیۀ للمطار، بینما کانت الأجزاء الغربیۀ مستقرۀ نسبیًا. وتشیر دراسۀ خاصۀ للمدارج إلی حدوث هبوط غیر متماثل بمعدلات تصل إلی یبلغ معدل الهبوط حوالی ۵ سم سنویًا، مما أدی إلی هبوط تراکمی کبیر علی مدی خمس سنوات. کما یؤکد تحلیل مسارات طیران الطائرات عدم استقرار محلی وسلوک غیر منتظم للارتفاع، لا سیما علی المدرج الرئیسی. تُظهر نتائج هذه الدراسۀ الکفاءۀ العالیۀ لطریقۀ SBAS-InSAR فی الرصد المستمر لتشوه الأرض، وتؤکد علی ضرورۀ استخدام هذا النهج فی إدارۀ المخاطر والصیانۀ الوقائیۀ للبنیۀ التحتیۀ الحساسۀ للمطارات ▪

الکلمات المفتاحیۀ: الهبوط، المطار، البنیۀ التحتیۀ، قیاس التداخل الرادارى، المخاطر البیئیۀ

۱ . طالب دکتوراه فی الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافیۀ، کلیۀ ومعهد البحوث التابع لجامعۀ الإمام الحسین (علیه السلام)، طهران، إیران

۲ . * ماجستیر العلوم فی الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافیۀ، کلیۀ ومعهد البحوث التابع لجامعۀ الإمام الحسین (علیه السلام)، طهران، إیران

۳ . أستاذ مشارک، مرکز علوم وتکنولوجیا الجیوماتکس، کلیۀ ومعهد البحوث التابع لجامعۀ الإمام الحسین (علیه السلام)، طهران، إیران

۴ . دکتوراه فی الاستشعار عن بعد، کلیۀ ومعهد البحوث للهندسۀ المدنیۀ والمیاه والطاقۀ، جامعۀ الإمام الحسین (علیه السلام)، طهران، إیران

نشریه علمی آفاق اطلاعات

ارزیابی پایداری زمین‌شناختی فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) با استفاده از سری زمانی تداخل‌سنجی راداری

محمد امین بخشی ۱، شایان خدامرادی ۲*، علی سرکارگر اردکانی۳، بهنام اصغری بیرامی۴

۷
سال دوم
پاییز ۱٤۰٤
مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت:
۱٤۰٤/۰۵/۰۶
تاریخ پذیرش:
۱٤۰٤/۰۶/۰۸
صص: ۱۶۸-۱۳۳

چکیده

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مخاطرات محیطی، تهدیدی جدی برای پایداری زیرساخت‌های حیاتی، به‌ویژه فرودگاه‌ها، محسوب می‌شود. حساسیت بالای باندهای پروازی نسبت به تغییرشکل‌های میلی‌متری، ضرورت پایش دقیق و پیوسته‌ی این پدیده را دوچندان می‌سازد. در این پژوهش، الگوی مکانی- زمانی فرونشست زمین در محدوده‌ی فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) تهران با استفاده از تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم خط‌مبنای کوتاه (SBAS-InSAR) مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، مجموعه‌ای از ۴۷ تصویر راداری مربوط به بازه‌ی زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ پردازش شد و نرخ‌های جابه‌جایی سطح زمین در راستای دید سنجنده، استخراج گردید. نتایج نشان داد که فرونشست زمین در منطقه، رفتاری ناهمگن و موضعی دارد؛ به‌طوری‌که بیش‌ترین نرخ‌های فرونشست در نیمه‌ی شرقی منطقه و در پیرامون زیرساخت‌های فرودگاهی مشاهده می‌شود؛ در حالی‌که بخش‌های غربی، از ثبات نسبی برخوردارند. بررسی اختصاصی باندهای پروازی، بیانگر وقوع نشست‌های نامتقارن با نرخ‌هایی تا حدود ۵ سانتی‌متر در سال است که طی دوره‌ی پنج‌ساله به فرونشست تجمعی قابل‌توجهی منجر شده‌است. تحلیل مسیرهای تردد هواپیماها نیز ناپایداری موضعی و رفتار نامنظم ارتفاعی را، به‌ویژه در باند اصلی پرواز، تأیید می‌کند. نتایج این پژوهش کارایی بالای روش SBAS-InSAR را در پایش مستمر تغییرشکل زمین نشان داده و بر ضرورت به‌کارگیری این رویکرد در مدیریت ریسک و نگهداشت پیشگیرانه‌ی زیرساخت‌های حساس فرودگاهی، تأکید دارد.

واژگان کلیدی: *فرونشست، فرودگاه، زیرساخت، تداخل سنجی راداری، مخاطرات محیطی*

۱ . *دانشجوی دکترای سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده و پژوهشکده پیامبر اعظم (ص)، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران m.a.bakhshi.rs@ihu.ac.ir*

۲ . * *کارشناس ارشد سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده و پژوهشکده پیامبر اعظم (ص)، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران sh.xodamoradi@gmail.com*

۳ . *دانشیار مرکز علم و فناوری ژئوماتیک، دانشکده و پژوهشکده پیامبر اعظم (ص)، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران aliardakani@yahoo.com*

۴ . *دکترای سنجش‌ازدور، دانشکده و پژوهشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران b_asghari@ihu.ac.ir*

۱. مقدمه

فرونشست زمین[1] در ادبیات نوین علوم زمین و ژئوتکنیک، دیگر صرفاً به‌عنوان یک تغییر شکل مورفولوژیکی سطحی تلقی نمی‌شود، بلکه به‌مثابه یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال خزنده‌ترین مخاطرات زیست محیطی شناخته می‌شود که پایداری زیرساخت‌های حیاتی بشر را به‌طور مستقیم تهدید می‌کند. این پدیده با ماهیتی تدریجی، اما پیامدهایی بالقوه فاجعه‌بار، امروزه در بیش از ۱۵۰ کشور جهان گزارش شده و به یکی از چالش‌های جدی توسعه پایدار در مقیاس جهانی بدل شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). ویژگی بارز فرونشست، گسترش خاموش و تدریجی آن است؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از موارد، آثار مخرب آن زمانی آشکار می‌شود که بخش قابل‌توجهی از ظرفیت پایداری زمین و سازه‌های مستقر بر آن از دست رفته است.

تجربه‌های جهانی نشان می‌دهد که پیامدهای فرونشست زمین بسته به نوع کاربری اراضی، از نظر شدت و اهمیت کاملاً متفاوت است. در اراضی کشاورزی، این پدیده اغلب به‌صورت اختلال در زهکشی، تغییر شیب زمین و کاهش بهره‌وری خاک بروز می‌کند؛ اما در محدوده‌های شهری و به‌ویژه در پیرامون زیرساخت‌های حیاتی، ابعاد آن به‌مراتب پیچیده‌تر و نگران‌کننده‌تر است. شریان‌های حمل‌ونقل، خطوط ریلی، بزرگراه‌ها و به‌طور خاص فرودگاه‌ها، به دلیل حساسیت بالا به نشست‌های نامتقارن و تغییرات میلی‌متری تراز سطح زمین، در زمره آسیب‌پذیرترین کاربری‌ها در برابر فرونشست قرار می‌گیرند (اسدی و همکاران، ۱۴۰۰). در این میان، باندهای پرواز و تأسیسات وابسته به آن‌ها به دلیل تلورانس بسیار محدود در تغییرشکل، کوچک‌ترین ناپایداری را به‌صورت ترک‌های سطحی، اعوجاج در سیستم‌های زهکشی و در موارد حاد، تهدید مستقیم ایمنی پرواز نشان می‌دهند. (یی و همکاران، ۲۰۲۵)

در این چارچوب، فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین درگاه هوایی کشور، نقشی کلیدی در شبکه‌ی حمل‌ونقل هوایی ایران ایفا می‌کند و هرگونه مخاطره‌ی ژئوتکنیکی در محدوده‌ی آن، پیامدهایی فراتر از مقیاس محلی خواهدداشت. این فرودگاه در بستر دشت‌های آبرفتی جنوب‌غرب تهران قرار گرفته است؛ ناحیه‌ای که از دیدگاه زمین‌ساختی و

---

[1] Land Subsidence

ژئومورفولوژیکی، مستعد بروز تغییرشکل‌های تدریجی سطح زمین گزارش شده است (آریانفر و دزواره، ۱۴۰۳). چنین موقعیت مکانی، ضرورت پایش مستمر و دقیق تغییرات پوسته زمین در این محدوده را بیش از پیش برجسته می‌سازد، به‌ویژه آنکه اتکا به روش‌های سنتی پایش، نظیر ترازیابی‌های زمینی، به دلیل هزینه بالا، پوشش مکانی محدود و عدم پیوستگی زمانی، پاسخگوی نیازهای مدیریتی زیرساختی در این مقیاس نیست.

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه‌ی سنجش‌ازدور راداری، به‌ویژه توسعه فناوری تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای (InSAR)، افق‌های جدیدی را در پایش تغییرشکل‌های سطح زمین گشوده است. این فناوری با بهره‌گیری از اختلاف فاز امواج راداری در تصاویر چندزمانه، امکان آشکارسازی جابه‌جایی‌های عمودی سطح زمین را با دقتی در حد میلی‌متر و در گستره‌های وسیع، فراهم می‌کند. ظهور سامانه‌های ماهواره‌ای با تناوب زمانی مناسب، نظیر Sentinel-1 و توسعه‌ی روش‌های پیشرفته‌ی پردازش سری زمانی، InSAR را به ابزاری کارآمد برای پایش پیوسته و بلندمدت فرونشست زمین، تبدیل کرده‌است (نرگس و همکاران، ۱۳۹۷؛ باقری گاوکش و همکاران، ۲۰۲۱).

در میان رویکردهای سری زمانی InSAR، الگوریتم خط‌مبنای کوتاه (SBAS)[۱] به دلیل توانایی در کاهش اثرات همدوسی زمانی و نویزهای جوی، نقش ویژه‌ای در استخراج الگوهای مکانی- زمانی تغییرشکل سطح زمین ایفا می‌کند. این روش امکان برآورد نرخ‌های میانگین جابه‌جایی، تحلیل روندهای زمانی و شناسایی نواحی دارای رفتار نامنظم را فراهم می‌سازد؛ این ویژگی برای پایش زیرساخت‌های حساس، از جمله فرودگاه‌ها، اهمیتی اساسی دارد.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پایش و تحلیل الگوی مکانی- زمانی فرونشست زمین در محدوده‌ی فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شد. روش‌شناسی تحقیق بر پایه‌ی پردازش سری زمانی داده‌های تداخل‌سنجی راداری با استفاده از الگوریتم SBAS استوار است تا ضمن برآورد دقیق نرخ جابه‌جایی سطح زمین، کانون‌های بالقوه‌ی ناپایداری در بستر باندها و تأسیسات فنی آن، شناسایی شود. ترسیم چنین الگویی از تغییرشکل زمین، می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی

۱.Short Baseline Subsets

برای پایش مستمر، ارزیابی ریسک خطر و برنامه‌ریزی نگهداری پیشگیرانه در یکی از حیاتی‌ترین زیرساخت‌های حمل‌ونقل کشور، مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مروری بر تحقیقات پیشین

پایش فرونشست زمین به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین اشکال تغییرشکل تدریجی سطح زمین، در دهه‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای در کانون توجه پژوهش‌های سنجش‌ازدور قرار گرفته‌است. ماهیت خزنده، تدریجی و اغلب نامحسوس این پدیده، سبب شده که روش‌های کلاسیک اندازه‌گیری، نظیر ترازیابی دقیق یا شبکه‌های محدود GPS، در بسیاری از موارد، توان پاسخ‌گویی به نیاز پایش پیوسته و گسترده‌ی مکانی را نداشته‌باشند. در مقابل، فناوری تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای (InSAR)با قابلیت استخراج جابه‌جایی‌های با دقت میلی‌متری سطح زمین در مقیاس‌های وسیع، به‌عنوان یکی از کارآمدترین ابزارها برای پایش فرونشست معرفی شده‌است (سینگ‌روی و همکاران، ۲۰۱۵). مطالعات اولیه، نشان دادند که InSAR نه‌تنها قادر به آشکارسازی نرخ تغییرشکل سطح زمین است، بلکه می‌تواند الگوهای مکانی پیچیده‌ی فرونشست را نیز با دقت بالا نمایش دهد. در مراحل ابتدایی توسعه‌ی InSAR، استفاده از روش‌های کلاسیک و تفاضلی (DInSAR)رایج بود؛ با این حال، این رویکردها در پایش‌های بلندمدت با محدودیت‌هایی نظیر همدوسی زمانی، تغییرات پوشش زمین و اثرات جوی مواجه شدند. این چالش‌ها به‌ویژه در مناطق شهری و زیرساختی، که تغییرات سطح زمین اغلب تدریجی و کم‌دامنه هستند، دقت نتایج را کاهش می‌داد. در پاسخ به این محدودیت‌ها، روش‌های سری زمانی InSAR توسعه یافتند که با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از تصاویر به‌صورت سری زمانی، امکان استخراج روندهای پایدار تغییرشکل را فراهم می‌کنند. در این میان، دو رویکرد اصلی شامل روش نقاط پایدار (PS InSAR) و روش خط‌مبنای کوتاه (SBAS) به‌طور گسترده در مطالعات فرونشست مورد استفاده قرار گرفته‌اند (کاراموا‌سیس و کاراتاناسی، ۲۰۲۰).

روش SBAS به دلیل تکیه بر اینترفروگرام‌هایی با خط‌مبنای مکانی و زمانی کوتاه، در کاهش اثرات همدوسی و نویزهای جوی، عملکرد مناسبی از خود نشان داده‌است. همین ویژگی باعث شده که این روش در محیط‌هایی با ناهمگنی پوشش زمین و پراکنش‌گرهای ناپایدار، از جمله

دشت‌های آبرفتی و مناطق شهری، کاربرد گسترده‌ای پیدا کند. مطالعه‌ی کاراموا‌سیس و کاراتاناسی (۲۰۲۰) با مقایسه‌ی چندین الگوریتم متن‌باز سری زمانی نشان داد که روش‌های مبتنی بر SBAS در صورت برخورداری از داده‌های با تناوب زمانی مناسب، قادر به تولید نتایجی هم‌ارز با داده‌های ترازیابی زمینی هستند. این یافته، اعتبار روش SBAS را به‌عنوان ابزاری قابل اتکا برای پایش تغییرشکل سطح زمین، در نبود دیگر روش‌های اعتبارسنجی زمینی را تقویت می‌کند.

در سطح جهانی، پژوهش‌های متعددی از InSAR برای پایش فرونشست در محیط‌های مختلف استفاده کرده‌اند. کورمیک (۲۰۱۹) با بهره‌گیری از داده‌های Sentinel-1 ، پایداری سطح زمین در مناطق شهری واقع بر معادن متروکه‌ی استرالیا را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که InSAR می‌تواند بدون نیاز به استقرار سامانه‌های پرهزینه‌ی زمینی، پایشی مداوم و اقتصادی از مناطق مستعد فرونشست ارائه دهد. اهمیت این رویکرد به‌ویژه در شرایطی آشکار می‌شود که رخدادهای فرونشست، دارای فواصل زمانی طولانی بوده و پایش مستمر با روش‌های سنتی توجیه اقتصادی ندارد. مطالعات انجام‌شده در مناطق دلتایی و کم‌ارتفاع نیز نقش کلیدی InSARرا در آشکارسازی ناهمگنی فضایی فرونشست نشان داده‌اند. پژوهش سارکر و همکاران (۲۰۲۴) در جنوب‌غرب بنگلادش، با استفاده از سری زمانی InSAR، نرخ‌های فرونشست را در بازه‌ای وسیع استخراج و الگوی فضایی آن را تحلیل کرد. نتایج این تحقیق بیانگر تنوع قابل‌توجه نرخ فرونشست در مقیاس منطقه‌ای بود؛ به‌گونه‌ای که برخی نواحی، نرخ‌هایی چندین برابر میانگین منطقه را تجربه می‌کردند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که پایش نقطه‌ای یا محدود، قادر به نمایش کامل رفتار تغییرشکل سطح زمین نبوده و استفاده از روش‌های فضایی پیوسته، ضروری است. بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های بین‌المللی، InSAR را به‌عنوان ابزاری برای پایش زیرساخت‌های حساس معرفی کرده‌اند. سینگ‌روی و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از داده‌های InSARبا قدرت تفکیک بالا، تغییرشکل‌های سطح زمین در کریدورهای حمل‌ونقل، خطوط ریلی و زیرساخت‌های انرژی را پایش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات میلی‌متری سطح زمین، در صورت عدم شناسایی به‌موقع، می‌تواند به بروز خسارات سازه‌ای جدی منجر شود. این مطالعات اهمیت پایش مستمر و با دقت بالا را در زیرساخت‌هایی که تلورانس تغییرشکل محدودی دارند، برجسته می‌سازد. در کنار توسعه کاربردهای InSAR، موضوع کیفیت و قابلیت اطمینان

نتایج نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است. مائو و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که نتایج پایش تغییرشکل، علاوه بر کیفیت داده‌های ورودی، به مراحل پردازش و تخصص تحلیل‌گر، وابسته است. آن‌ها با ارائه‌ی چارچوبی برای ارزیابی کیفیت نتایجPS InSAR ، بر لزوم کنترل خطا و صحت‌سنجی نتایج، به‌ویژه در مطالعات زیرساختی، تأکید کردند. این مسئله در پژوهش‌های پایش‌محور، که هدف اصلی شناسایی نواحی پرریسک است، اهمیتی دوچندان دارد.

در ایران، استفاده از InSAR برای پایش فرونشست زمین سابقه‌ای بیش از یک دهه دارد. پژوهش حقیقت‌مهر و همکاران (۱۳۹۱) به‌عنوان یکی از نخستین مطالعات، قابلیت الگوریتم SBASرا در استخراج سری زمانی تغییرشکل و تطبیق آن با داده‌های GPS نشان داد. پس از آن، با گسترش دسترسی به داده‌های Sentinel-1، مطالعات متعددی در دشت‌ها و شهرهای مختلف کشور انجام شد. نتایج این پژوهش‌ها عموماً بیانگر نرخ‌های قابل‌توجه فرونشست و ناهمگنی مکانی شدید آن در محیط‌های شهری و پیرامونی است (تورانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ رنجبر باروق و فتح‌اله‌زاده، ۲۰۲۲).

مطالعات انجام‌شده در شهرهایی نظیر مشهد، کرج و طرقبه نشان داده‌اند که الگوی فرونشست در محیط‌های شهری ایران به‌صورت پهنه‌ای، یکنواخت نیست و نواحی خاصی دارای نرخ‌های بالاتر تغییرشکل هستند (اسفندیاری درآباد و نظری گزیک، ۲۰۲۵؛ رنجبر باروق و فتح‌اله‌زاده، ۲۰۲۳). اگرچه در بسیاری از این پژوهش‌ها، تلاش شده تا عوامل مؤثر بر فرونشست نیز بررسی شود؛ اما بخش پایشی این مطالعات، به‌خوبی نشان می‌دهد که روش SBAS InSAR توانایی بالایی در شناسایی کانون‌های ناپایداری و استخراج روندهای زمانی تغییرشکل دارد. پژوهش‌های انجام‌شده در دشت‌هایی مانند نورآباد، قاین و شبستر نیز این توانمندی را در مقیاس‌های منطقه‌ای تأیید کرده‌اند (شفیعی و همکاران، ۲۰۲۰؛ صدری‌کیا و کاظمی‌پور، ۲۰۲۵). با وجود گستردگی این مطالعات، بررسی پیشینه‌ی تحقیق نشان می‌دهد که تمرکز عمده‌ی پژوهش‌های داخلی، بر تحلیل علّی فرونشست بوده و مطالعاتی که با رویکردی صرفاً پایشی و با تأکید بر زیرساخت‌های حیاتی انجام شده‌باشند، محدود هستند. این در حالی است که زیرساخت‌هایی نظیر فرودگاه‌ها، پل‌ها، اسکله‌ها و سکوهای نفتی، به دلیل حساسیت بسیار بالا به نشست‌های نامتقارن، نیازمند پایش دقیق، پیوسته و مبتنی بر داده‌های سری زمانی هستند. از این منظر، استفاده از الگوریتم SBAS

InSAR برای تحلیل الگوی مکانی- زمانی فرونشست در محدوده‌ی چنین زیرساخت‌هایی، می‌تواند خلأ موجود در ادبیات پژوهش را تا حد زیادی پوشش داده و مبنای علمی لازم برای پایش و مدیریت ریسک این فضاهای حیاتی را فراهم آورد.

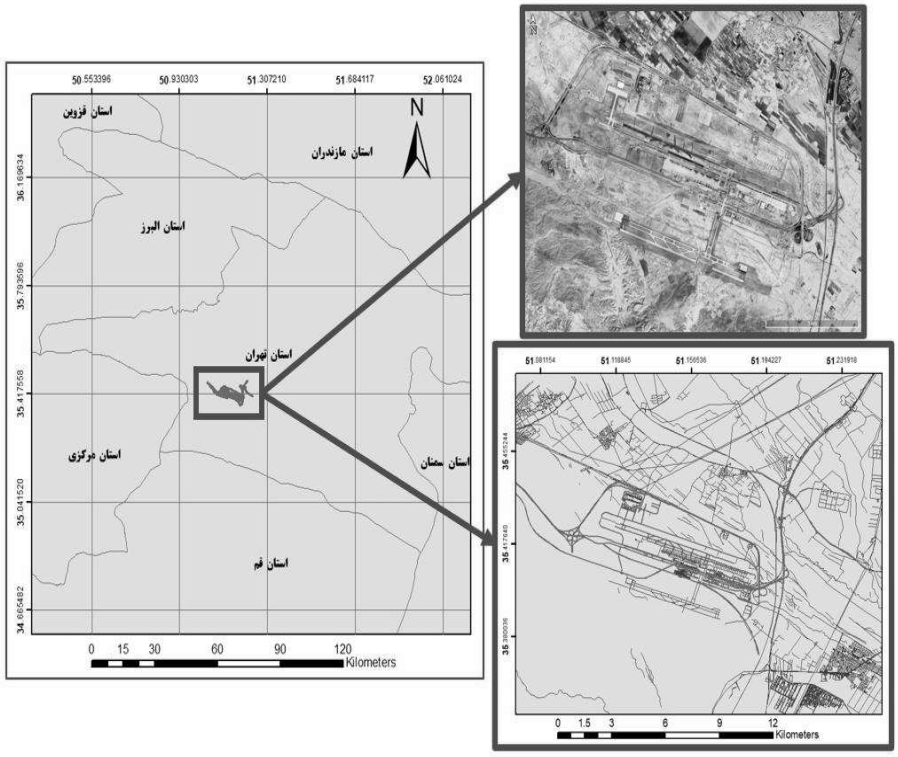
۳. روش‌شناسی

۱-۳- منطقه مطالعاتی

محدوده‌ی مطالعاتی این پژوهش، فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) است که در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۹ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این فرودگاه در ۳۰ کیلومتری جنوب‌غرب تهران، در حدفاصل بزرگراه‌های تهران- قم و تهران- ساوه واقع شده و با مساحتی بالغ بر ۱۳،۵۰۰ هکتار، در ارتفاع تقریبی ۱۰۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است (پروازی ، ۱۳۹۸).

از نظر ژئومورفولوژی، منطقه در بستر دشت‌های آبرفتی جنوب تهران واقع شده که شیب عمومی ملایمی از شمال به جنوب دارد. ساختار زمین‌شناسی سطحی آن، عمدتاً متشکل از نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم (کواترنری) با بافت ریزدانه تا میان‌دانه است. این محدوده شامل دو باند پروازی موازی، ترمینال‌های مسافری و باری وسیع و سطوح بتنی و آسفالتی گسترده است که به دلیل بازتابش مناسب امواج راداری، بستری مطلوب برای پایش‌های سنجش‌ازدور راداری محسوب می‌شود. اقلیم منطقه نیز نیمه‌خشک بوده و پوشش گیاهی طبیعی آن محدود به گیاهان

مقاوم به شوری است (پاکدامن و همکاران، ۱۳۹۳).



شکل ۱- نقشه‌ی منطقه‌ی مطالعاتی- فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۱-۳- داده‌ها

در این پژوهش، به‌منظور پایش دقیق و مستمر جابه‌جایی‌های سطحی و بررسی وضعیت پایداری زمین در محدوده فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، از تصاویر راداری دهانه مصنوعی سنجنده Sentinel-1 استفاده شد. تصاویر مورد استفاده در حالت تصویربرداری تداخل‌سنجی عریض[1] با پلاریزاسیون‌های VV و VH تهیه گردیده‌اند که این ویژگی‌ها امکان بهره‌برداری از داده‌ها را در مطالعات مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری فراهم می‌سازد. مجموعه داده مورد استفاده شامل ۴۷ تصویر راداری بوده که بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ میلادی را پوشش می‌دهد.

[1] Interferometric Wide – IW

انتخاب این بازه زمانی با هدف بررسی وضعیت کنونی پایداری سطح زمین در منطقه مورد مطالعه و تحلیل نرخ‌های فعلی فرونشست صورت پذیرفته است.

به‌منظور اطمینان از صحت هندسی داده‌ها و کاهش خطاهای مداری، در پردازش تصاویر راداری از مدارهای دقیق منتشرشده توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) استفاده شد. به‌کارگیری این مدارها نقش مهمی در بهبود کیفیت هندسی داده‌ها و افزایش قابلیت اعتماد نتایج تداخل‌سنجی ایفا می‌کند و از این‌رو، به‌عنوان بخشی از داده‌های ورودی پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۳- روش تداخل‌سنجی سری زمانی SBAS

روش تداخل‌سنجی سری زمانی با زیرمجموعه خط‌مبنای کوتاه SBAS[1] یکی از رویکردهای متداول و کارآمد برای استخراج و تحلیل جابه‌جایی‌های سطح زمین در بازه‌های زمانی میان‌مدت و بلندمدت است که به‌جای اتکا به یک زوج تصویر تداخل‌سنجی، مجموعه‌ای از تداخل‌سنج‌ها با محدودیت در خطوط مبنای زمانی و مکانی تشکیل می‌شود تا اثرات ناشی از عدم همبستگی زمانی و مکانی کاهش یافته و امکان بازیابی سیگنال‌های جابه‌جایی با رفتار غیرخطی فراهم گردد. این ویژگی، روش SBAS را به گزینه‌ای مناسب برای پایش زیرساخت‌های گسترده و مناطق فاقد پراکنش‌گرهای دائمی قوی تبدیل کرده است.

فاز تداخل‌سنجی حاصل از هر زوج تصویر راداری را می‌توان به‌صورت ترکیبی از مؤلفه‌های مختلف بیان کرد که به‌طور کلی شامل مؤلفه جابه‌جایی سطح زمین، اثر توپوگرافی، خطاهای اتمسفری، خطاهای مداری و نویز است. این رابطه به‌صورت زیر قابل نمایش است:

$$\phi_{int} = \phi_{def} + \phi_{topo} + \phi_{atm} + \phi_{orb} + \phi_{noise} \qquad \text{رابطه ۱ -}$$

ϕ_{def} فاز جابه‌جایی، ϕ_{topo} فاز توپوگرافی، ϕ_{atm} فاز اتمسفری، و ϕ_{noise} نویز است.

در چارچوب روش SBAS ، با اعمال محدودیت بر خطوط مبنای زمانی و مکانی، سهم خطاهای توپوگرافی و کاهش همبستگی فاز تا حد زیادی کنترل می‌شود. سپس با استفاده از شبکه‌ای از تداخل‌سنج‌های کوتاه‌خط‌مبنا، رابطه‌ای خطی میان فازهای تداخل‌سنجی و جابه‌جایی‌های سطح زمین در زمان‌های مختلف برقرار می‌گردد. این روابط در قالب یک سیستم

[1] Small Baseline Subset

معادلات خطی بیان شده و با استفاده از روش کم‌ترین مربعات، سری زمانی جابه‌جایی برای هر پیکسل همدوس برآورد می‌شود.

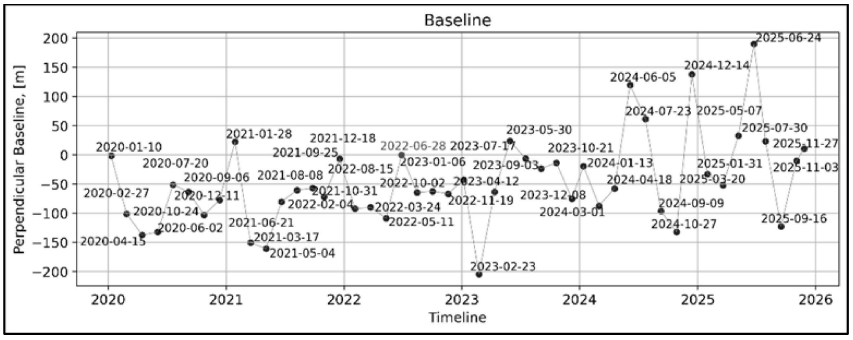
در نهایت، خروجی روش SBAS شامل سری زمانی تغییر مکان و نرخ جابه‌جایی سطح زمین در راستای خط دید ماهواره است که امکان تحلیل روندهای زمانی، شناسایی الگوهای تدریجی تغییر شکل و بررسی پایداری زمین در بازه زمانی مورد مطالعه را فراهم می‌سازد.

۳-۳- روش پیاده‌سازی

به‌منظور پیاده‌سازی عملی روش SBAS-InSAR و استخراج سری زمانی جابه‌جایی‌های سطح زمین در محدوده فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، فرآیند پردازش داده‌های راداری به‌صورت مرحله‌به‌مرحله و با بهره‌گیری از نرم‌افزار PyGMTSAR در مقیاس زمانی بلندمدت برای تحلیل‌های سری زمانی راداری، انجام شد.

در گام نخست، پس از گردآوری تصاویر راداری واجد شرایط، انتخاب زوج‌تصاویر بر اساس اعمال محدودیت‌های مشخص بر خطوط مبنای زمانی و مکانی انجام شد و از انتخاب تصادفی آن‌ها پرهیز گردید. بدین منظور، با انتخاب هوشمندانه‌ی یک تصویر به‌عنوان مرجع اصلی که از نظر موقعیت زمانی در میانه‌ی بازه مطالعاتی قرار داشت و از کم‌ترین میزان نویز اتمسفری برخوردار بود، تلاش شد تا مجموع خطاهای همبستگی‌زدایی در کل شبکه، به حداقل ممکن برسد. در پیکربندی شبکه SBAS، آستانه خط‌مبنای زمانی بر روی مقدار ۱۰۰ روز تنظیم گردید تا ضمن حفظ پیوستگی شبکه، از زوال شدید فاز در پیکسل‌های مربوط به سطوح خاکی پیرامون باندها جلوگیری شود و هم‌زمان، آستانه خط‌مبنای مکانی[۱] نیز محدود به مقادیری گردید که حساسیت تداخل‌سنج‌ها نسبت به خطاهای توپوگرافی باقی‌مانده را کنترل نماید.

[۱] Perpendicular Baseline



شکل ۲- وضعیت تصاویر مورد استفاده در فرآیند محاسبه‌ی فرونشست از نظر بیس‌لاین زمانی و مکانی

پس از تعیین زوج‌تصاویر واجد شرایط، هم‌مرجع‌سازی[1] با دقتی بالا اجرا شد تا انطباق هندسی کامل بین تمامی تصاویر فرعی و تصویر مرجع، تضمین گردد و متعاقب آن، تداخل‌سنج‌های تفاضلی با کسر فاز توپوگرافی شبیه‌سازی‌شده از مدل رقومی ارتفاع SRTM (با تفکیک مکانی تقریبی ۳۸ متر) تولید شدند. یکی از مراحل کلیدی در این پژوهش، غربالگری دقیق پیکسل‌ها بر اساس پارامتر همبستگی بود؛ بدین صورت که نقشه‌های همبستگی برای تمامی جفت‌های تداخل‌سنجی، محاسبه شد و پیکسل‌هایی که میانگین همبستگی آن‌ها در طول سری زمانی، کم‌تر از آستانه تعیین‌شده (۰/۳ برای نواحی عمومی و ۰/۴ برای زیرساخت‌های حساس) بود، به‌عنوان داده‌های غیرقابل‌اعتماد، شناسایی و از فرآیند معکوس‌سازی حذف گردیدند تا نتایج نهایی، صرفاً برآیندی از رفتار بازتاب‌دهنده‌های پایدار، نظیر سطوح آسفالتی و سازه‌های بتنی باشد. پس از فیلتر کردن نویزهای فرکانس بالا (فیلتر گلدشتاین)، مرحله بازگشایی فاز[2] با استفاده از الگوریتم هزینه ی آماری شبکه (SNAPHU) انجام شد تا مقادیر فاز نسبی (در بازه‌ی $\pi-$تا $\pi+$) به مقادیر پیوسته ی جابه‌جایی، تبدیل شوند.

در نهایت، با تشکیل ماتریس طراحی شبکه SBAS و حل دستگاه معادلات خطی با روش کم‌ترین مربعات، سری زمانی جابه‌جایی برای هر پیکسل همدوس، محاسبه گردید و پس از اعمال تصحیحات مربوط به خطاهای اتمسفری (APS) که با استفاده از فیلترهای زمانی و مکانی پایین‌گذر و بالاگذر صورت گرفت، مؤلفه‌های جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره (LOS)

[1] Coregistration

[2] Phase Unwrapping

استخراج شدند. این مقادیر خام در مرحله‌ی آخر فرآیند، از سیستم مختصات راداری[1] به سیستم مختصات جغرافیایی جهانی، زمین‌مرجع شدند تا امکان تلفیق آن‌ها با لایه‌های اطلاعاتی فرودگاه و تولید نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی نرخ فرونشست سالانه و نمودارهای سری زمانی تجمعی، فراهم گردد.

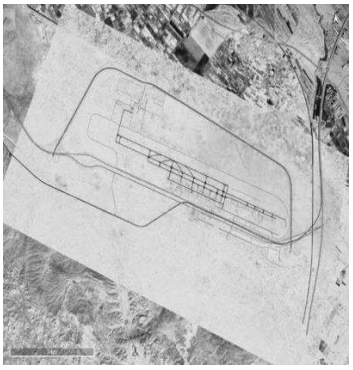
۴. نتایج و بحث

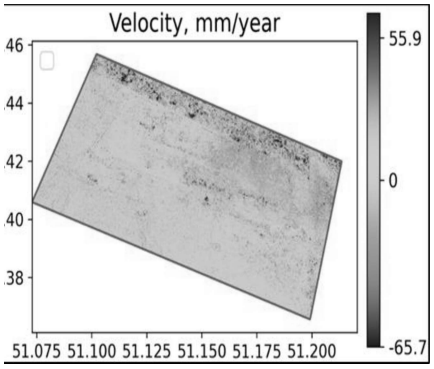
براساس نتایج حاصل از پردازش داده‌های InSAR در محدوده‌ی منطقه‌ی مطالعاتی، تنوع بالای کاربری اراضی و پیچیدگی بافت سطح زمین، شامل زمین‌های بایر، اراضی کشاورزی، مسیر خطوط انتقال نیرو، قنات‌ها، شبکه‌ی راه‌های بزرگراهی و محلی، مسیر راه‌آهن و در نهایت حریم فرودگاه، منجر به مشاهده‌ی الگوهای متنوعی از جابه‌جایی سطح زمین شده‌است. این تنوع کاربری و عوامل مؤثر متعدد، سبب می‌شودتحلیل تداخل‌سنجی در اراضی غیرشهری به دلیل تغییرات فیزیکی و رطوبتی مداوم در پوشش خاک و گیاه، با کاهش شدید همبستگی فاز مواجه گردد. ازاین‌رو، در این مطالعه، تمرکز صرفاً بر پوشش‌های بشرساخت پایدار، به‌ویژه سطوح آسفالتی و بتنی، معطوف شده‌است؛ چراکه این سطوح، از یک‌سو همدوسی راداری بالاتری داشته و از سوی دیگر، از منظر ایمنی و بهره‌برداری، اهمیت راهبردی بالاتری دارند.

مطابق نتایج ارائه‌شده در شکل (۳)، نیمه‌ی شرقی منطقه‌ی مطالعاتی، به‌جز بخش شمالی که عمدتاً شامل اراضی کشاورزی است، بیش‌ترین میزان جابه‌جایی سطح زمین را به‌صورت فرونشست نشان می‌دهد. نرخ این فرونشست در بازه‌ی زمانی پنج‌ساله‌ی مورد بررسی، حداکثر تا حدود ۶۵ میلی‌متر در سال در راستای دید سنجنده (LOS) برآورد شده که بیانگر شدت بالای ناپایداری سطح زمین در این ناحیه می‌باشد.

---

[1] Range-Azimuth



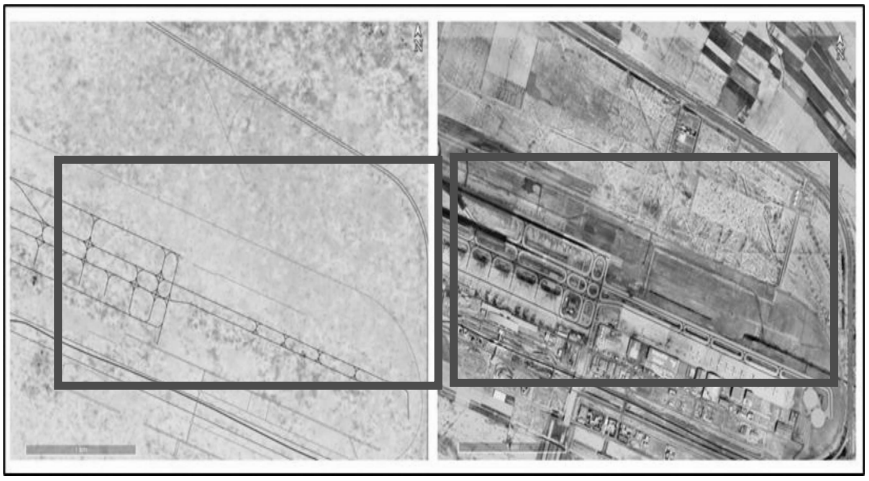


شکل ۳- نقشه‌ی میزان نرخ فرونشست محاسبه‌شده براساس واحد میلی‌متر در سال

بررسی دقیق‌تر الگوی مکانی فرونشست نشان می‌دهد که محدوده‌ی آزادراه خلیج‌فارس، مسیر خروجی فرودگاه و کمربند شمالی فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، از جمله نواحی با بیش‌ترین درگیری با پدیده‌ی فرونشست هستند. در مقابل، بخش‌های غربی و شمال‌غربی منطقه، رفتاری نسبتاً پایدار از نظر تغییرات ارتفاعی سطح زمین نشان می‌دهند؛ هرچند در ناحیه‌ی جنوب‌غربی، روند حرکتی سطح زمین به‌سمت نشست دینامیک، متمایل است. این الگو با نتایج پژوهش‌های پیشین انجام‌شده در دشت شهریار، اسلامشهر و محدوده‌ی فرودگاه امام خمینی (ره) هم‌خوانی دارد که فرونشست زمین را عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه‌ی آب‌های زیرزمینی از طریق چاه‌ها برای مصارف کشاورزی و باغداری گزارش کرده‌اند (پیروزی و اسلامی، ۲۰۱۷؛ حق‌شناس و معتق، ۲۰۲۴).

در بررسی اختصاصی حریم فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، نتایج نشان می‌دهد که رفتار جابه‌جایی سطح زمین در امتداد باند پرواز، یکنواخت نیست. به‌گونه‌ای که در ابتدای باند، فرونشست قابل‌توجهی مشاهده شده و در ادامه‌ی مسیر، لکه‌هایی از نوسانات ارتفاعی و فرونشست به‌صورت متناوب، قابل تشخیص است. پروفیل طولی ترسیم‌شده برای این مسیر (شکل ۴)، به‌وضوح بیانگر رفتار حرکتی- ارتفاعی پیچیده‌ی این عارضه می‌باشد. در کل ناحیه‌ی مشخص‌شده در شکل (۴)، بیش‌ترین نرخ فرونشست در بازه‌ی زمانی بررسی‌شده، حدود ۵ سانتی‌متر در سال برآورد شده که در مجموع طی پنج سال، به حدود ۳۰ سانتی‌متر فرونشست تجمعی منجر

شده‌است؛ مقداری در طول مسیر، پتانسیل ایجاد ترک‌های سطحی را افزایش داده و از منظر استانداردهای ایمنی پرواز، ریسک قابل‌توجهی محسوب می‌شود (داشو و شیرزائی، ۲۰۲۵).



شکل ۴- محدوده‌ی شرقی فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)- بیش‌ترین فرونشست ۵ ساله، در این محدوده می‌باشد.

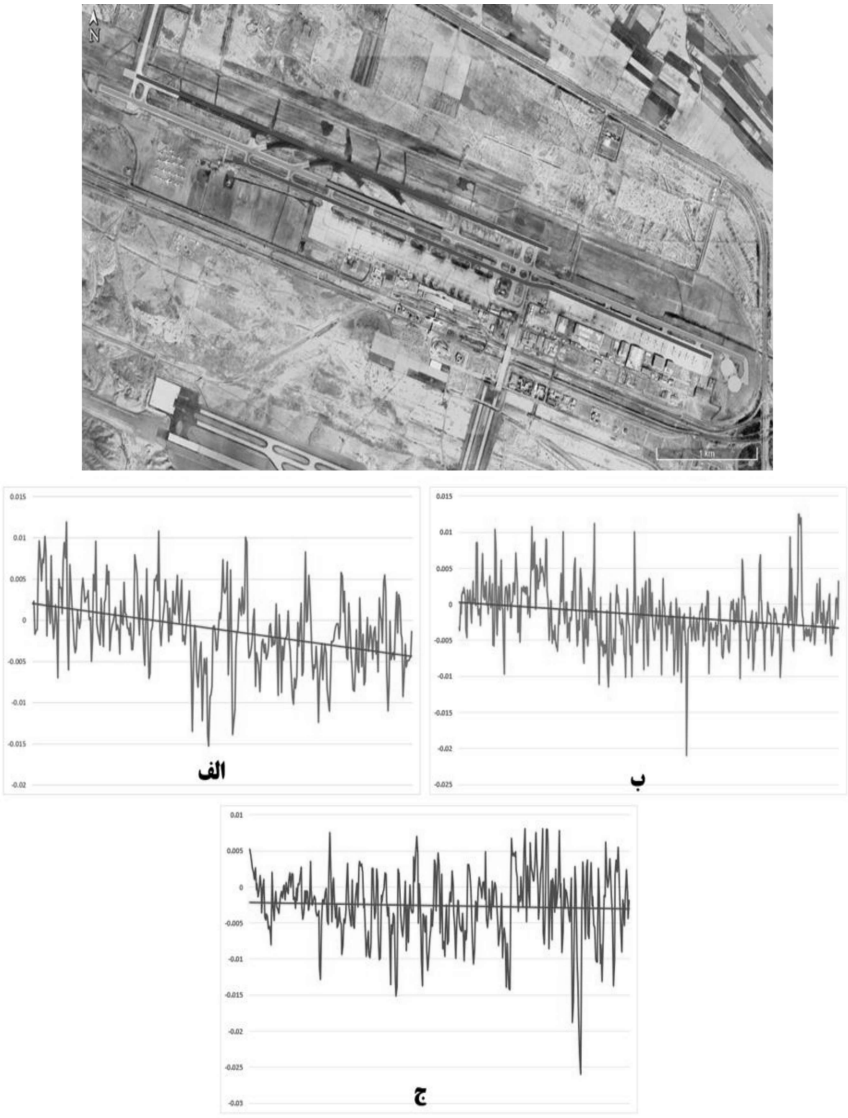
با توجه به وجود سه مسیر اصلی برای تردد هواپیماها و وسایل نقلیه‌ی پشتیبانی یادشده، نمودار جابه‌جایی سطح زمین در امتداد این سه مسیر، ترسیم و رفتار آن‌ها به‌صورت مقایسه‌ای بررسی شد. مطابق شکل (۵) که نمایانگر این نمودارها است، وضعیت سطح زمین در هر سه مسیر، ناپایدار بوده و الگوی تغییرات ارتفاعی نامنظمی را نشان می‌دهد. دامنه‌ی این تغییرات به‌طور کلی، در بازه‌ای تا حدود ۳۰ میلی‌متر در سال مشاهده و اندازه‌گیری شد.

نمودار (الف) در شکل (۵) نشان می‌دهد که مسیر باند اصلی پرواز، بیش‌ترین نرخ فرونشست سالانه را تجربه کرده و در عین حال، از رفتار ارتفاعی نامنظم‌تری نسبت به سایر مسیرها برخوردار است. این ویژگی‌ها، باند اصلی را در زمره‌ی پرریسک‌ترین بخش‌های فرودگاه، از نظر ناپایداری سطح زمین قرار می‌دهد و ضرورت اجرای اقدامات پیشگیرانه و پایش مستمر را برجسته می‌سازد.

مسیر دوم (ب)، که به‌عنوان باند فرعی پروازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اگرچه از نظر میزان فرونشست وضعیت بهتری نسبت به مسیر اول دارد، اما رفتار نامنظم‌تری از نظر تغییرات موضعی

ارتفاع نشان می‌دهد. با توجه به نقش این مسیر در انتقال ناوگان هوایی به باند اصلی پرواز، اهمیت نگهداری و رسیدگی دوره‌ای آن، کاملاً مشهود است.

در نهایت، مسیر سوم (ج)، که به‌عنوان مسیر عبوری و محل توقف ناوگان مورد استفاده قرار می‌گیرد، در بازه‌ی زمانی پنج‌ساله‌ی بررسی‌شده، روند کلی نسبتاً پایداری را نشان می‌دهد؛ بااین‌حال، دامنه‌ی نوسانات ارتفاعی آن به حدود ۴۵ میلی‌متر در سال می‌رسد که بیانگر ناپایداری موضعی قابل‌توجه است. با توجه به حساسیت عملکردی این بخش، اجرای اقدامات اصلاحی و برنامه‌های نگهداری هدفمند برای کاهش ریسک‌های بالقوه، امری ضروری به‌نظر می‌رسد.



شکل ۵- سه مسیر اصلی بررسی‌شده- الف) باند اصلی پرواز. ب) باند انتقال و جابه‌جایی ناوگان. ج) مسیر انتقال به باند پرواز و توقفگاه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش که تغییرشکل سطح زمین در محدوده‌ی فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) با استفاده از تحلیل سری زمانی داده‌های تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم SBAS-InSAR بررسی شد، نشان داد که فرونشست زمین در این محدوده، رفتاری ناهمگن و موضعی دارد و بخش‌هایی از زیرساخت‌های فرودگاهی، به‌ویژه باندهای پروازی و مسیرهای دسترسی، بیش‌ترین تأثیرپذیری را دارند. بیش‌ترین نرخ‌های فرونشست در نیمه‌ی شرقی منطقه‌ی مطالعاتی، مشاهده شد؛ در حالی‌که بخش‌های غربی از ثبات نسبی برخوردارند؛ الگویی که با مطالعات پیشین منطقه، هم‌خوانی داشته و نقش تراکم آبخوان و افت فشار منفذی را تأیید می‌کند. بررسی حریم فرودگاه، حاکی از فرونشست‌های نامتقارن در امتداد باندها با نرخ‌هایی تا حدود ۵ سانتی‌متر در سال است که پتانسیل ایجاد اعوجاج زاویه‌ای و تنش‌های برشی مخرب در روسازی باندها را افزایش داده و ریسک سازه‌ای قابل‌توجهی را تحمیل می‌کند. در مجموع، نتایج بر کارایی بالای روش SBAS-InSAR در پایش دینامیک تغییرشکل با دقت میلی‌متری و ضرورت گذار از پایش سنتی به مدیریت ریسک ژئوتکنیکی مبتنی بر تحلیل نشست نامتقارن در زیرساخت‌های راهبردی فرودگاهی تأکید دارد.

با توجه به شدت و گستردگی فرونشست مشاهده‌شده، اجرای راهکارهای مدیریتی و مهندسی برای کاهش ریسک ضروری است و روش‌های مختلفی برای مقابله با فرونشست زمین در فرودگاه‌ها پیشنهاد شده است. نخست، مدیریت منابع آب زیرزمینی از طریق کاهش برداشت بی‌رویه آب، ترویج حفاظت آب و اجرای برنامه‌های شارژ مصنوعی آبخوان می‌تواند به‌طور مؤثری اثرات فرونشست را کاهش دهد؛ این روش شامل تزریق آب به لایه‌های زیرزمینی برای جبران افت سطح آب و جلوگیری از فشرده‌سازی بیشتر خاک است. همچنین، تکنیک‌های بهبود خاک مانند مخلوط کردن عمیق خاک با مواد تثبیت‌کننده، می‌تواند ظرفیت باربری خاک را افزایش داده و از نشست‌های آتی جلوگیری کند؛ این رویکرد به‌ویژه در مناطق با خاک‌های نرم و ضعیف، مانند دشت‌های آبرفتی اطراف فرودگاه، کاربرد دارد و می‌تواند برای تقویت زیرساخت‌هایی مانند باندها و تاکسی‌وی‌ها استفاده شود. علاوه بر این، تزریق پلیمر یا رزین به‌عنوان یک روش غیرتهاجمی و سریع، امکان تثبیت خاک، پر کردن حفره‌ها و اصلاح نشست‌های موجود را فراهم می‌کند؛ این تکنیک با حداقل اختلال در عملیات فرودگاهی، سطوح

آسفالتی و بتنی را مجدداً تراز کرده و عمر مفید زیرساخت‌ها را افزایش می‌دهد. در سطح برنامه‌ریزی، انجام ارزیابی‌های ریسک منظم، بهبود سیستم‌های زهکشی برای جلوگیری از نفوذ آب سطحی، و استفاده از مواد سبک‌وزن در ساخت و تعمیرات می‌تواند ریسک‌های مرتبط با فرونشست را کاهش دهد. همچنین، ادغام پایش مستمر با فناوری InSAR در استراتژی‌های نگهداری پیشگیرانه، امکان شناسایی زودهنگام نواحی پرریسک و اجرای اقدامات اصلاحی هدفمند را فراهم می‌سازد که در نهایت، اجرای ترکیبی این روش‌ها نه‌تنها پایداری فرودگاه امام خمینی (ره) را تضمین می‌کند، بلکه می‌تواند الگویی برای مدیریت فرونشست در سایر زیرساخت‌های حیاتی کشور باشد، و بر لزوم همکاری بین‌سازمانی میان نهادهای مرتبط با منابع آب، حمل‌ونقل و محیط زیست تأکید دارد.

۵. منابع و مراجع

۱. آریانفر، ف. دزواره، ق. (۱۴۰۳) "تحلیل فرونشست زمین به دلیل برداشت آب از آبخوان های دشت تهران–کرج"، دومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی چالش‌های محیط زیست: صنعت و معدن سبز، تهران

۲. اسدی، م.، گنجائیان، ح.، جاودانی، م. و قادری حسب، م. (۱۴۰۰) "ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار"، هیدروژئولوژی، سال ۶، شماره ۱.

۳. اسفندیاری درآباد، م.، نظری گزیک، ز. (۱۴۰۴)." پایش و ارزیابی میزان فرونشست شهر طرقبه با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری". جغرافیا و روابط انسانی، ۸(۱)، ۶۹–۸۴.

۴. تورانی، م.، آق‌آتابای، ا.، روستایی، م.، مه‌آسا، ن. (۱۳۹۷). "مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری". آمایش جغرافیایی فضا، ۸(۲۷)، ۱۱۷–۱۲۸.

۵. پاکدامن، م. المدرسی، س. سرکارگر اردکانی، ع. (۱۳۹۳) "آشکارسازی ابعاد فرونشست فرودگاه امام خمینی (ره) با استفاده از روش تداخل سنجی راداری"، همایش ملی کاربرد مدل های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش‌ازدور و GIS) در آمایش سرزمین، ۵ اسفند، یزد.

۶. پروازی، م. (۱۳۹۸) "بررسی مکان یابی فرودگاه امام خمینی (ره) با توجه به مطالعات اقلیمی براساس فرایند تحلیلی سلسله مراتبی AHP"، نشریه علوم جغرافیایی (جغرافیای کاربردی)، سال ۱۵، شماره ۳۱، ۱۲۸–۱۳۹.

۷. شفیعی، م.، مختاری، ع.، لیلاگلی، م.، احمدی، ا.، زندی، ع. (۱۳۹۹). "بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری". پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، ۸(۴)، ۹۳–۱۱۱.

۸. رنجبر باروق، م.، فتح‌اله‌زاده، ع. (۱۴۰۱). "بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج)". پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، ۱۰(۴)، ۱۳۸–۱۵۵.

۹ . حقیقت‌مهر، م.، ولدان زوج، ع.، تاجیک، ج.، جباری، م.، صاحبی، م.، اسلامی، م.، گنجیان، م.، دهقانی، ع. (۱۳۹۱). "تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یابی جهانی". فصلنامه علمی علوم زمین، ۲۲(۸۵)، ۱۰۵–۱۱۴.

۱۰. صدری‌کیا، م.، کاظمی‌پور، ع. (۱۴۰۴). "ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تداخل‌سنجی راداری و تحلیل‌های مکانی". جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸(۹۰)، ۱۸۸–۲۰۹.

۱۱. نرگس، ف. ا.، مهدی، آ. ه. و عباس، ب. (۱۳۹۷) " بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل سنجی رادار"، نشریه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، سال۲۷، شماره۱۰۵.

[12] Zhang, Y., et al. (2023) “Correlation between Subway Infrastructure Development and Land Subsidence in Shanghai: A Time-Series Analysis”, Tunnelling and Underground Space Technology, 131, 104-1۱۸.

[13] Bagheri-Gavkosh, M. ،Hosseini, S. M. ،Ataie-Ashtiani, B. ،Sohani, Y. ،Ebrahimian, H. ،Morovat, F. ،Ashrafi, S. (2021) ،Land subsidence: A global challenge ،Science of The Total Environment, 778, 146193.

[14] Singhroy, V., Li, J., & Charbonneau, F. (2015). High resolution rapid revisit InSAR monitoring of surface deformation. Canadian Journal of Remote Sensing, 41(5), 458–472.

[15] Karamvasis, K., & Karathanassi, V. (2020). Performance analysis of open source time series InSAR methods. Remote Sensing, 12(9), 1380.

[16] Cormick, J. (2019). Land subsidence detection and monitoring using InSAR in Australia. University of Southern Queensland.

[17] Sarker, M. S., Kamal, A. M., Rahman, M. Z., & Fahim, A. K. F. (2024). Land subsidence monitoring using InSAR technique in the southwestern region of Bangladesh. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 15(1).

[18] Mao, W., et al. (2022). Quality inspection of surface deformation monitoring results based on PS-InSAR technology. ISPRS Annals, 3, 597–602.

[19] Ye Xinyu, Zhang Jiali, Zhang Sheng, Yu Qian, Chen Jie, The deformation prediction for airport concrete runway under aircraft loading with localized settlement in subsoil: a closed-form solution, Transportation Geotechnics, Volume 55, 2025, 101681, ISSN 2214-3912, https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101681

[20] Ruochong Yang, Chong Zhan, Long Sun, Chenguang Shi, Yulou Fan, You Wu, Jun Yang, Hongbo Liu, Modelling the reflective cracking features of asphalt overlay for airport runway under temperature and airplane load coupling factors, Construction and Building Materials, Volume 451, 2024, 138774, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138774

[21] Pirouzi, A., Eslami, A. Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation and analysis. Geo-Engineering 8, 30 (2017). https://doi.org/10.1186/s40703-017-0069-4

[22] Haghshenas Haghighi M, Motagh M. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. Sci Adv. 2024 May 10;10(19):eadk3039. doi: 10.1126/sciadv.adk3039. Epub 2024 May 10. PMID: 38728396; PMCID: PMC11086625.

[23] Dasho, O., & Shirzaei, M. (2025). Sinking airports: A glance at the state of US transport infrastructure. Earth and Space Science, 12, e2025EA004433. https://doi.org/10.1029/2025EA004433