Science Popularization

Investigating the Capability of Sentinel-1 in Monitoring the Land Subsidence Phenomenon

Alireza Mahmoodi[1,*], Elmira Asadi-Fard[2], Seyedeh Zeynab Safavi[1]

Article Info

Article type:
Popularization of Science

Article history:
Receive Date
30 June 2025
Revise Date
21 September 2025
Accept Date
09 October 2025
Available online:
21 December 2025

Keywords:
Land Subsidence, Monitoring, Synthetic Aperture Radar Interferometry, Sentinel-1.

Land Subsidence (LS), this uninvited geological phenomenon, has affected nearly every corner of the globe, leaving a trail of destruction in infrastructure and facilities. This silent yet devastating event has increasingly highlighted the necessity for continuous monitoring and surveillance. Fortunately, significant advancements in all sections including remote sensing technology, particularly in the field of Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry, have opened new windows for the precise analysis of the intensity, patterns, and temporal trends of subsidence. This study, while examining the fundamentals and principles of radar systems and their sensors, also scrutinizes the capabilities of the Sentinel-1 satellite in the Interferometric Wide (IW) operational mode and explores its potential in monitoring this phenomenon. Given the widespread occurrence of subsidence across the country, it is hoped that by leveraging the capabilities of this satellite and the easy, free access to its imagery, effective steps will be taken by executive bodies to control and manage this phenomenon.

Cite this article: mahmoodi A., Asadi-Fard E., Safavi S. Z. (2025). 'Investigating the Capability of Sentinel-1 in Monitoring the Land Subsidence Phenomenon', Science Cultivation, 15 (2), 207-214.

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: Foundation for the Advancement of Science and Technology in Iran (FAST-IRAN) and Iran Society of Biophysical Chemistry (ISOBC)

* Corresponding Author. Assistant professor, Tel: (071)53606207, Fax: (071)53546476, mail: alirezamahmoodi@saadi.shirazu.ac.ir
[1] Department of Range and watershed management, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran.
[2] Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

Print ISSN 2008-935X Online ISSN 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

بررسی قابلیت Sentinel-۱ در پایش پدیده فرونشست

علیرضا محمودی*[۱]، المیرا اسدی فرد[۲]، زینب صفوی[۱]

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله ترویجی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت
۰۹ تیر ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری
۳۰ شهریور ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش
۱۷ مهر ۱۴۰۴
تاریخ انتشار
۳۰ آذر ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:
فرونشست، نظارت، تداخل‌سنجی راداری دریچه مصنوعی، Sentinel-۱.

چکیده

فرونشست، این مهمان ناخوانده‌ی زمین‌شناختی، تقریباً همه‌جای جهان را درنوردیده و ردپایی از تخریب بر زیرساخت‌ها و تأسیسات بر جای گذاشته است. این پدیده خاموش اما ویرانگر، ضرورت پایش و نظارت مستمر را بیش از پیش آشکار ساخته است. خوشبختانه، پیشرفت‌های چشمگیری در بخش‌های مختلف ازجمله فناوری سنجش از راه دور، به ویژه در حوزه‌ی تداخل‌سنجی رادار دریچه مصنوعی، پنجره‌ای نوین به سوی تحلیل دقیق شدت، الگوها و روندهای زمانی فرونشست گشوده است. این پژوهش ضمن بررسی مبانی و اصول سیستم‌های راداری و سنجش‌گرهای آن و روش‌های مختلف پایش این پدیده، قابلیت‌های ماهواره‌ی Sentinel-1 را در حالت عملیاتی IW (Interferometric Wide) زیر ذره‌بین برده و توانایی‌های آن را در پایش این پدیده، مورد واکاوی قرار می‌دهد. با توجه به گستردگی فرونشست در سراسر کشور، امید است که با بهره‌گیری از توانمندی‌های این ماهواره و دسترسی آسان و رایگان به تصاویر آن، گام‌های مؤثری توسط نهادهای اجرایی برای مهار و مدیریت این پدیده برداشته شود.

استناد: محمودی علیرضا, اسدی فرد المیرا, صفوی سیده زینب. (۱۴۰۴). 'بررسی قابلیت سنتینل-۱ در پایش پدیده فرونشست', نشاء علم، ۱۵ (۲)، ۲۰۷-۲۱۴.

ناشر: بنیاد پیشبرد علم و فناوری در ایران و انجمن بیوشیمی فیزیک ایران
© نویسندگان حق نشر و کلیه حقوق انتشار را برای خود حفظ می‌کنند.

* عهده‌دار مکاتبات: استادیار، تلفن: ۵۳۶۰۶۲۰۷(۰۷۱)، دورنگار : ۵۳۵۴۶۴۷۶ (۰۷۱)، آدرس الکترونیکی: alirezamahmoodi@saadi.shirazu.ac.ir
[۱] دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران.
[۲] دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران.

مقدمه

بلایای طبیعی و رویدادهای ناگوار زیست محیطی، خسارت‌های جبران‌ناپذیری را بر جوامع جهانی تحمیل کرده‌اند؛ خسارت‌هایی که گاه با جان انسآن‌ها و گاه با ویرانی‌های گسترده‌ی مالی همراه بوده است. در این میان، فعالیت‌های انسانی بدون ارزیابی و برنامه‌ریزی دقیق، همچون سوختی بر آتش، بر شدت و فراوانی این رخدادها افزوده‌اند. یکی از این پدیده‌های نگران‌کننده، پدیده فرونشست زمین است که به‌عنوان یک خطر ژئومورفولوژیک شناخته می‌شود [۱].

یونسکو این پدیده را به عنوان فروریختن یا پایین آمدن سطح زمین در مقیاس وسیع تعریف کرده است [۲]. از جمله دلایل اصلی این پدیده می‌توان به برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز و حتی زمین لغزش‌ها اشاره کرد [۳]. این عوامل، هر یک به‌تنهایی یا در کنار هم، زمین را به سوی فروپاشی تدریجی سوق می‌دهند و آینده‌ی محیط زیست و زندگی انسآن‌ها را با چالش‌های جدی مواجه می‌کنند.

در ایران افزایش جمعیت و به تبع آن افزایش نیاز آبی برای مصارف مختلف (کشاورزی، شرب و صنعت) منجر به برداشت بی‌رویه آب از ذخایر زیرزمینی شده است. این وضعیت باعث افت سطح آب‌های زیر زمینی و بروز پدیده فرونشست در مقیاس ملی شده است [۴]، از سوی دیگر، شرایط خاص هیدرولوژی و ژئومورفولوژی ایران نیز به افزایش شدت این پدیده دامن زده است [۵]. لازم به ذکر است که در گذشته، تنها استآن‌های کرمان و یزد با این معضل مواجه بودند؛ اما در حال حاضر اکثر دشت‌های ایران تحت‌تأثیر این پدیده قرار گرفته‌اند [۶].

پیامدهای زیست‌محیطی و هزینه‌های مرتبط با فرونشست زمین به دلیل خسارات وارده به ساختمآن‌ها، زیرساخت‌ها، شکاف‌های زمین، رواناب سطحی و افزایش خطر سیل و تهدید جان انسآن‌ها بسیار زیاد است [۶,۷]، در نتیجه پایش مستمر این پدیده برای مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از آن، امری بسیار ضروری و حیاتی است.

پیشرفت‌های اخیر در فناوری سنجش از راه دور علی‌الخصوص سنجش از راه دور به وسیله امواج مایکروویو سبب ارتقا توانایی ما برای نظارت، پایش و تحلیل شدت الگوها و روندهای زمانی فرونشست شده است [۸]. در این راستا تکنیک تداخل‌سنجی رادار دیافراگم مصنوعی[1] (InSAR) و تداخل‌سنجی رادار دیافراگم مصنوعی تفاضلی[2] (DIn-SAR) که توسط محققان مختلفی در سراسر جهان مورد بررسی قرار گرفته است [۸,۹]، این توانایی را دارد که اطلاعات فازی راداری یک منطقه را در دو زمان مختلف کسب کند و با تحلیل آن‌ها هرگونه جابه‌جایی زمینی رخ داده شده را به دقت شناسایی کند [۸].این روش با دقتی در حد میلی‌متر، روشی بسیار توانمند برای اندازه‌گیری فرونشست در تمامی شرایط جوی به شمار می‌آید [۱۰,۱۱] که جزئیات بیشتری از آن در بخش ۲ ارائه شده است.

تاریخچه استفاده از تصاویر راداری به دهه ۱۹۹۰ بر می‌گردد که بدین معناست که حجم داده‌های کافی در این حوزه بایگانی شده و برای پایش، نظارت و تحلیل این معضل، در دسترس عموم قرار گرفته است [۱۲]. ماهواره‌های راداری که از دیرباز تاکنون در این حوزه استفاده شده‌اند عبارت‌اند از: SEASAT، ERS-1[3]، ERS-2، JERS-1[4]، RADARSAT-1، ENVISAT[5]، ALOS-1[6]، ALOS-2، TerraSAR-X، TanDEM-X، COSMO-SkyMed، Sentinel-1، SAOCOM[7]، NISAR[8] [۳-۸،۱۳].

البته شایان ذکر است که Sentinel-1 به دلیل توانایی تصویربرداری راداری، پوشش گسترده و تناوب زمانی نسبتاً کوتاه در حد ۱۲ روز، همراه با قابلیت تداخل‌سنجی (InSAR) دقیق، به عنوان یکی از مؤثرترین ماهواره‌ها برای پایش و نظارت بر فرونشست زمین شناخته می‌شود [۱۱].

در این راستا، پژوهش پیش رو ضمن توضیح مبانی و اصول سیستم‌های راداری و سنجش‌گرهای آن، در بخش آخر به بررسی پدیده فرونشست از طریق روش‌های مختلف و قابلیت‌های ماهواره Sentinel-1 پرداخته و توانایی‌های آن را در شناسایی و رصد این پدیده مورد بررسی قرار داده است. امید است که داده‌ها و یافته‌های سنجش از راه دور ارائه شده در این پژوهش، همچون چراغی،

[1] Interferometric Synthetic Aperture Radar
[2] Differential InSAR
[3] European Remote-Sensing Satellite
[4] Japanese Earth Resources Satellite
[5] Environmental Satellite
[6] The Advanced Land Observing Satellite
[7] Satélite Argentino de Observación COn Microondas
[8] NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

روشن‌گر تاریکی‌های اطلاعاتی این حوزه باشد و راه را برای اقداماتی عملی و اثربخش هموار کند. باشد که این یافته‌ها، انگیزه‌ای برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان باشد تا کنترل و مدیریت این چالش بزرگ را در اولویت برنامه‌های خود قرار دهند.

مبانی و اصول سیستم‌های راداری

محدوده‌ای از طیف الکترومغناطیس که به وسیله سنجش‌گرهای راداری پایش می‌شود ناحیه مایکروویو (۱ سانتی‌متر تا ۱ متر) است. این سیستم سنجش از راه دور نسبت به سایر بخش‌های این فناوری، جدیدتر محسوب می‌شود که از اواخر دهه اول قرن ۱۹ بر روی کار آمده است [۱۴,۱۵].

امواج مایکروویو قابلیت بسیار بالایی برای نفوذ در ابر، باران، دود و غبار را دارند. یکی دیگر از مشخصه‌های آن نیز قابلیت کنترل پارامترهای مختلف (از جمله طول موج، بسامد سیگنال ارسالی، پلاریزاسیون و...) آن است [۱۴] و طول‌موج آن به باندهای مختلفی تقسیم می‌شود که جزئیات آن در جدول ۱ ارائه شده است [۱۵].

جدول ۱: باندهای ماکروویو و کاربردهای آن [۱۵]

باند	طول موج (cm)	فرکانس (GHz)	برخی از موارد استفاده
X	۲/۳ -۴/۸	۸ - ۱۲	شناسایی علوم نظامی، نقشه برداری زمینی
C	۳/۷ – ۸/۵	۴ -۸	مطالعات پوشش های کشاورزی
L	۱۵ -۳۰	۱ -۲	استخراج پارامترهای جنگل
P	۷۵ - ۱۳۳	۲۲۵ -۴۰۰	استخراج اطلاعات از کف جنگل، استخراج اطلاعات زیرسطحی

سیستم تصویربرداری راداری

تفکیک این سیستم‌ها بر اساس نوع آنتن آن‌هاست که اغلب طراحی مستطیل شکلی دارد که به آن دریچه یا گشودگی [1] گفته می‌شود. این بخش به دو دسته دریچه واقعی و دریچه مصنوعی تقسیم شده است [۱۶]. در سیستم رادار با دریچه واقعی [2] بر اساس مدت زمان رفت و برگشتی موج، اطلاعات اصلی از جمله فاصله و دامنه موج برگشتی و شدت بار تابش حاصل می‌شود. این سیستم جزو سیستم غیرهمبسته است زیرا به اطلاعات فازی نیاز ندارد. همچنین این نوع سیستم یک سیستم راداری استاندارد است و معمولا بر روی هواپیما نصب می‌شود. آنتن در این سیستم یک طول مشخص دارد و نیاز به هیچ پردازش جانبی ندارد [۱۷].

از سوی دیگر در سیستم رادار با دریچه مصنوعی [3] آنتن‌ها به صورت مجازی بزرگ می‌شوند و به پردازش‌های جانبی فراوانی نیاز دارند. در این سیستم، دید شب بسیار خوبی حاصل می‌شود و در مشاهدات جهانی، زیست‌محیطی، نظامی و امنیتی کارایی دارد [۱۸,۱۹].

سنجش‌گرهای مایکروویو

سنجش‌گرهای این بخش به دو دسته فعال مانند رادار و غیرفعال رادیومترها تقسیم شده که هر دو گروه دارای آنتن، گیرنده و فرستنده هستند. در سنجش‌گر فعال راداری نیز همانند بخش سنجش‌گر اپتیک، امواج رادار به شکل مصنوعی تولید می‌شوند [۱۴]. جزئیات طبقه‌بندی آن‌ها در جدول زیر (شماره ۲) ارائه شده است.

جدول ۲: دسته بندی سنجنده های ماکروویو [۱۴]

دسته بندی سنجنده های ماکروویو		
	فعال (رادار)	غیرفعال (رادیومتر)
دریچه واقعی	SLAR	رادیومتر
	پراکنش سنج	
	ارتفاع سنج	ساندر
	رادار هواشناسی	
دریچه مصنوعی	SAR	یک بعدی
	ISAR	
	InSAR	دو بعدی

تداخل‌سنجی راداری

نوع خاصی از پردازش داده‌های دریچه مصنوعی یا همان SAR است که از آن‌ها در جهت تهیه نقشه توپوگرافی، اندازه‌گیری جابه‌جایی عمودی سطوح استفاده [۱۴] و بر پایه اندازه‌گیری فاصله با طول موج الکترومغناطیس حاصل می‌شود. اگر یک سنجش‌گر SAR یک

[1] Aperture
[2] Real Aperture Radar (RAR)
[3] Synthetic Aperture Radar (SAR)

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

سیگنال را به سمت یک شی خاص ارسال کند، پالس بازگشت را ذخیره می‌کند و اختلاف زمانی بین این دو پالس، فاصله بین جسم تا سنجش‌گر را نشان می‌دهد [۱۷].

روندهای توسعه سیستم‌های SAR

در نیم قرن اخیر سنجش‌گرهای SAR پیشرفت‌های بسیار چشمگیری داشته‌اند. سیستم‌های SAR جدید، دارای قابلیت تصویربرداری در چند بسامد، چند پلاریزاسیون و چند باند یکپارچه هستند. این فناوری جدید، دامنه اطلاعات دریافتی را ارتقا داده‌اند که همگی در شش دسته طبقه‌بندی می‌شوند که شامل: سیستم‌های SAR با نوار برداشت گسترده و قدرت مکانی بالا، SAR تداخل‌سنجی (InSAR)، SAR پلاریمتری (PolSAR)، SAR پلاریمتری-تداخل‌سنجی (PollnSAR)، SAR سه‌بعدی (3D-SAR)، شناساگر هدف متحرک (MTI) ترکیب شده با SAR [۱۴].

سیستم‌های SAR با نوار برداشت گسترده و قدرت مکانی بالا: این سیستم قدرت تفکیک بالا با محدوده‌ی تصویربرداری وسیعی دارد که با دستیابی به پیشرفت‌های فنی در ایجاد سیگنال‌های پهن باند و باندهای فوق‌العاده گسترده، قدرت تفکیک جانبی آن به دسی‌متر و یا سانتی‌متر رسیده است [۱۴].

SAR تداخل‌سنجی (InSAR):

InSAR یا تداخل‌سنجی رادار دیافراگم مصنوعی، از تفاوت فاز بین دو مشاهده راداری پیچیده (SAR) که از موقعیت‌های کمی متفاوت گرفته شده‌اند بهره می‌برد و اطلاعاتی درباره سطح زمین استخراج می‌کند. یک سیگنال SAR شامل اطلاعات دامنه و فاز است. دامنه نشان‌دهنده قدرت پاسخ رادار است و فاز، کسری از یک چرخه کامل موج سینوسی (یک طول موج واحد SAR) می‌باشد. فاز تصویر SAR عمدتاً توسط فاصله بین ماهواره و اهداف زمینی تعیین می‌شود. با ترکیب فاز دو تصویر می‌توان یک تداخل‌نگاشت تولید کرد که فاز آن به شدت با توپوگرافی زمین همبستگی دارد [۱۱,۱۴].

تکنیک تداخل در این بخش سبب ایجاد تصاویر سه بعدی می‌شود. InSAR اطلاعات ارتفاع زمین را از طریق مجموعه‌ای از جفت تصاویر SAR مختلط مربوط به یک منطقه که از زوایای مختلف مشاهده شده‌اند، دریافت می‌کند. SAR تداخل‌سنج تفاضلی (DInSAR) بر مبنای InSAR ایجاد می‌شود که می‌تواند تغییرات ارتفاع سطح زمین را اندازه‌گیری کند [۱۱,۱۴]. شایان ذکر است این دو حالت در پایش فرونشست توسط محققان داخلی و خارجی استفاده شده‌اند.

SAR پلاریمتری (PolSAR):

در این حالت به‌جای یک پلاریزاسیون، از چندین پلاریزه استفاده می‌شود و در نتیجه تصاویر پلاریزاسیون مختلف با هم ادغام می‌شوند که منجر به بهبود طبقه‌بندی تصاویر SAR می‌شود [۱۴].

SAR پلاریمتری-تداخل‌سنجی (PollnSAR):

در اینجا، پلاریزاسیون و تداخل‌سنجی با هم ترکیب می‌شوند که بیشتر در بررسی پارامترهای مختلف پوشش گیاهی و برآورد زیست‌توده جنگل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴].

SAR سه‌بعدی (3D-SAR):

از بعد نظری، هر مد SAR سه بعدی باید یک آرایه نمونه سه بعدی توزیع شده در فضا را تشکیل دهد. در این حالت به‌جای توانایی در اندازه‌گیری ارتفاع، قابلیت تفکیک مکانی ارتفاعی نیز ارائه می‌گردد [۱۴].

شناساگر هدف متحرک ترکیب شده با SAR:

این سیستم در شناسایی اهداف متحرک مخصوصاً در بخش نظامی کارایی دارد. در این بخش تصاویر میدان جنگ به سرعت و با قدرت تفکیک بالایی ارائه می‌گردد [۱۴].

روش‌های مطالعه پدیده فرونشست

بررسی و کمی‌سازی فرونشست به عنوان یک پدیده تدریجی و بزرگ مقیاس، بسیار دشوار است. روش‌های متعددی برای بررسی پدیده فرونشست وجود دارد که جزئیات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است [۱۹].

جدول ۳: روش های مطالعه پدیده فرونشست [۱۹]

روش های مطالعه پدیده فرونشست	
مستقیم	غیر مستقیم
ترازیابی دقیق	مدلسازی ریاضیاتی
مشاهدات GPS	مدلسازی رستر‌پایه
ابزار تراکم سنج	
روش تداخل سنجی دریچه مصنوعی	

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

روش اول- استفاده از مشاهدات ترازیابی دقیق: این روش جزو قدیمی‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های ژئودتیکی در جهت کنترل و بررسی پدیده فروشست به شمار می‌رود. ضمن ثابت درنظرگرفتن ارتفاع نقاط خارج از محدوده پدیده، اطلاعات دقیقی از تغییرات‌ارتفاعی نقاط ترازیابی حاصل می‌شود. به طور معمول بررسی این روش دقت بالایی دارد؛ اما از سوی دیگر هزینه‌بر است [۱۹,۲۰].

روش دوم- استفاده از مشاهدات GPS [1]: این روش جزو یکی از معمولی‌ترین روش‌ها برای بررسی مستقیم فرونشست زمین به حساب می‌آید. استفاده از این دست مشاهدات، پیوسته و درعین‌حال هزینه‌بر است [۲۰].

روش سوم- استفاده از ابزار تراکم‌سنج: این ابزار شامل یک حسگر است که به یک لوله یا کابل متصل می‌شود و به داخل لوله جداره‌ی چاه فرستاده می‌شود. کابل یا لوله مرتبط با این ابزار از سطح زمین تا عمق لایه‌های متراکم پیش می‌رود و از میان این لایه‌ها عبور می‌کند. نمایشگر نصب شده بروی ابزار که در بالای چاه قرار دارد، تغییرات بین سطح زمین و حسگر را نشان می‌دهد، در حالیکه کابل و لوله جداره‌ی چاه به طور کامل از میان لایه‌های متراکم عبور کرده و تراکم رسوبات را به طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌کند. داده‌های به‌دست‌آمده از این طریق می‌توانند برای تحلیل خصوصیات لایه‌ها مورداستفاده قرار گیرند و در پیش‌بینی فرونشست‌های آینده مؤثر باشند [۲۱].

روش چهارم- تداخل‌سنجی دریچه مصنوعی: روش تداخل‌سنجی راداری با دیافراگم مصنوعی (InSAR) یکی دیگر از روش‌های مستقیم است که بر اساس تصاویر راداری طراحی شده است. طبق تصاویر راداری، نقشه‌هایی از مناطق دچار فرونشست با قدرت تفکیک در حد سانتی‌متر حاصل می‌شود [۲۰,۲۱].

روش‌های غیرمستقیم بررسی فرونشست زمین: این بخش بر اساس مدل‌سازی و طبق پارامترهای مؤثر در این فرایند از جمله افت سطح آب زیرزمینی، جنس رسوبات در منطقه اشباع و غیراشباع و... انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها شامل مدل‌سازی ریاضیاتی و مدل‌های رستر پایه است [۲۱].

ماهواره Sentinel-1 [2]

مأموریت Copernicus Sentinel-1 به‌عنوان یک مجموعه دو ماهواره‌ای شامل ماهواره‌های Sentinel-1A و Sentinel-1B که هر کدام از آن‌ها دارای یک ابزار راداری پیشرفته برای ارائه تصویر از سطح زمین، به‌صورت شبانه‌روزی و در تمام شرایط آب‌وهوایی می‌باشد. Sentinel-1A در ۳ آوریل ۲۰۱۴ Sentinel-1B، در ۲۵ آوریل ۲۰۱۶ و Sentinel-1C در ۵ دسامبر سال ۲۰۲۴ در مدار قرار گرفتند و پیش‌بینی شده است که در نیمه دوم سال ۲۰۲۵ هم Sentinel-1D به فضا پرتاب خواهد شد. این ماهواره چهار حالت عملیاتی دارد که جزئیات آن در جدول ۴ ارائه شده است [۱۱].

حالت عملیاتی IW در پایش پدیده فرونشست

حالت عملیاتی IW، اصلی‌ترین حالت تصویربرداری از زمین در ماهواره Sentinel-1 است. در این حالت، داده‌ها با عرض ۲۵۰ کیلومتر و وضوح فضایی ۵ در ۲۰ متر جمع‌آوری می‌شوند. حالت IW، سه sub-swath را با استفاده از تکنیک مشاهده سطح زمین با اسکن‌های پیشرفته [3] (TOPSAR) ثبت می‌کند [۱۱].

جدول ۴: چهار حالت عملیاتی سنتینل-۱ [۱۱]

شماره	چهار حالت عملیاتی		مخفف	بزرگنمایی مکانی	بزرگنمایی زمانی	عرض برداشت
۱	حالت نوار عریض تداخل سنجی	Interferometric Wide Swath Mode	IW	۵ متر * ۲۰ متر	۱۲ روز	۲۵۰ کیلومتر
۲	حالت نوار بسیار عریض	Extra Wide Swath Mode	EW	۲۰ متر * ۴۰ متر	۱۲ روز	۴۰۰ کیلومتر
۳	حالت موجی	Wave Mode	WV	۲۰ متر * ۲۰ متر	۱۲ روز	۲۰ متر * ۲۰ متر
۴	حالت نقشه نواری	Strip Map Mode	SM	۵ متر * ۵ متر	۱۲ روز	۸۰ کیلومتر

[1] Global Positioning System
[2] Sentinel-1- Radar vision for Copernicus
[3] Terrain Observation with Progressive Scans SAR

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

مزایایی حالت عملیاتی IW

الف) حالت عملیاتی IW در Sentinel-1 می‌تواند برای تشخیص دقیق حرکات زمین و الگوهای تغییر شکل زمین با وضوح فضایی بالا برای مناطق وسیع استفاده شود [۱۰]. ب) عرض نوار IW حدود ۲۵۰ کیلومتر است که امکان نظارت بر مناطق بزرگ را فراهم می‌کند و از سوی دیگر زمان بازبینی آن نیز کوتاه است که می‌تواند از سطوح بسیار وسیعی پشتیبانی کند و نظارت پیوسته‌ای از سطح زمین ارائه دهد [۱۴]. ج) داده‌های IW با استفاده از روش جدید مشاهده زمین با اسکن‌های پیش‌رونده در آزیموت (TOPS) تکنیک تصویربرداری SAR را اعمال می‌کند [۲۰].

در جدول ۵ نیز خلاصه‌ای از چندین مورد تحقیق صورت‌گرفته در حوزه نظارت و پایش فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی دریچه مصنوعی و ماهواره Sentinel-1 ارائه شده است.

جدول ۵: بررسی تحقیقات صورت گرفته

شماره	اسامی نویسندگان	سال	ماهواره	توضیحات
۱	Van der Horst et al	۲۰۱۸	Sentinel-1	در تحقیقشان به بررسی شدت و وسعت خطر فرونشست در یانگون، واقع در حاشیه دلتا ایرراوادی در میانمار، پرداخته اند. با استفاده از تحلیل زمان‌سنجی (PSI)[1] بر روی داده‌های Sentinel-1 در بازه زمانی دسامبر ۲۰۱۵ تا آوریل ۲۰۱۷، چهار منطقه با نرخ جابجایی عمودی بیش از ۲۰ میلی‌متر در سال شناسایی شد[22] .
۲	سعیدی و همکاران	۲۰۱۸	Sentinel-1 Envisat	با استفاده از تصاویر ماهواره‌های Envisat و Sentinel-1 در سال‌های۲۰۱۰ – ۲۰۰۳ و ۲۰۱۷ – ۲۰۱۴ محدوده‌های فرونشست در دشت کاشمر بردسکن در استان – خراسان رضوی و گسترش شکاف‌های آن را بررسی کردند[4].
۳	Azarakhsh et al	۲۰۲۲	Sentinel-1	در این پژوهش، برآورد فرونشست زمین با استفاده از تکنیک PS-InSAR [2] و سپس مدل‌سازی و پیش‌بینی آن از طریق روش‌های یادگیری ماشین صورت گرفت. از تصاویر سری‌زمانی سنتینل-۱ برای استخراج فرونشست زمین از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ استفاده شد[23].
۴	Navarro-Hern´andez et al	۲۰۲۳	Sentinel-1	در تحقیقشان به بررسی نقش فعالیت‌های تکتونیکی و برداشت آب‌های زیرزمینی در فرونشست زمین پرداخته و از الگوریتم P-SBAS[3] برای تحلیل ۲۲۱ تصویر Sentinel-1 استفاده کرده است[24].
۵	Qiao et al	۲۰۲۳	Sentinel-1	از روش InSAR با نقاط پراکنده پایدار (PS) برای پردازش چهار دسته از تصاویر SAR Sentinel-1 که بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ ثبت شده‌اند، استفاده کردند و فرونشست‌های بزرگ‌مقیاس را در سواحل تگزاس نقشه‌برداری شد[25].
۶	رجبی و همکاران	۲۰۲۴	Sentinel-1	در تحقیقشان از ۵ تصویر ماهواره Sentinel-1 برای بازه‌ی زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ جهت اندازه‌گیری و محاسبه فرونشست زمین در دشت کرمانشاه استفاده شد[26].

نتیجه‌گیری

پدیده فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیکی جدی، نه‌تنها در ایران بلکه در سطح جهانی، تهدیدی بزرگ برای زیرساخت‌ها، محیط‌زیست و جان انسان‌ها محسوب می‌شود. این پدیده که عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، استخراج منابع نفتی و گازی، و فعالیت‌های انسانی دیگر است، در ایران به دلیل شرایط خاص هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، شدت بیشتری یافته است. با توجه به گسترش

[1] Persistent Scatterer Interferometry

[2] Permanent scatterers

[3] The parallel solution of the SBAS algorithm

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

این پدیده به اکثر دشت‌های ایران، ضرورت پایش و مدیریت آن بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا، فناوری‌های نوین سنجش از راه دور، به‌ویژه تداخل‌سنجی رادار دریچه مصنوعی (InSAR)، ابزاری قدرتمند برای نظارت و تحلیل فرونشست زمین فراهم کرده‌اند. ماهواره‌های راداری مانند Sentinel-1 با قابلیت‌های تصویربرداری پیشرفته، پوشش گسترده و دقت بالا، امکان پایش مستمر و دقیق تغییرات سطح زمین را در مقیاس‌های بزرگ فراهم می‌کنند. این ماهواره‌ها با استفاده از تکنیک‌هایی مانند DInSAR و PS-InSAR، قادر به شناسایی جابه‌جایی‌های زمینی در حد میلی‌متر هستند که این امر مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از فرونشست را تسهیل می‌کند. با توجه به پیشرفت‌های فناوری و دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای، می‌توان از هوش مصنوعی و Machine learning برای پیش‌بینی و مدل‌سازی فرونشست زمین استفاده کرد. این روش‌ها می‌توانند با تحلیل داده‌های تاریخی و شناسایی الگوی تغییرات، به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک کنند تا اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی را به موقع اجرا کنند. همچنین، ایجاد سیستم‌های هشدار سریع، مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند به کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از فرونشست کمک کند. برای مقابله با این پدیده، علاوه بر پایش مستمر، باید به سمت مدیریت پایدار منابع آب و کاهش برداشت بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی حرکت کرد. این امر نیازمند همکاری بین‌المللی، انتقال فناوری و آموزش جوامع محلی است. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین همچون ماهواره Sentinel-1 و سایر ماهواره‌های راداری باید در دستور کار سازمان‌های زیست محیطی و مدیریت بحران قرار گیرد تا بتوان به طور مؤثری با این چالش جهانی مقابله کرد. در نهایت، ترکیب دانش سنتی با فناوری‌های نوین و همکاری بین‌المللی می‌تواند راه‌حلی پایدار برای کاهش اثرات فرونشست زمین و حفاظت از محیط زیست و جوامع انسانی ارائه دهد.

اعلامیه

نویسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله توسط هوش مصنوعی نگارش نشده است و کل و یا بخش از آن نیز در هیچ‌کدام از پایگاه‌های اطلاعاتی منتشر نشده است.

فهرست منابع

[1]. کریمی، مرتضی.، قنبری علی اصغر.، امیری شهرام (۱۳۹۲). سنجش خطر پذیری سکونتگاه‌های شهری از پدیده فرونشست زمین مطالعه موردی: منطقه ۱۸ شهر تهران، برنامه ریزی فضایی، دوره سوم، شماره ۱، صص ۳۷-۵۶.

[2]. شریفی کیا، محمد (۱۳۸۹). بررسی پی آمدهای ناشی از پدیده فرونشست در اراضی و دشت های مسکونی ایران، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره سوم، شماره ۴-۳، صص ۴۳-۵۸.

[3]. عمادالدین، سمیه.، شاهی، ویدا.، آرخی، صالح.، آق‌آتابای، مریم (۱۴۰۱). تعیین میزان فرونشست زمین در محدوده مخروط افکنه جاجرود با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۴، شماره ۲، صص ۱۶۹-۱۸۳.

[4]. سعیدی، حمید.، لشکری پور، غلامرضا.، غفوری، محمد (۱۳۹۸). ارزیابی درز و شکاف‌های حاصل از فرونشست زمین در دشت کاشمر-بردسکن در شمال شرق ایران، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۱۰، شماره ۳۵، صص ۷۴-۸۸.

[5]. صفری نامیوندی، مهدی.، اسدی، معصومه.، ایرانی هریس، صیاد، امینی ابوالفضل (۱۴۰۳). تحلیل نقش عوامل انسانی در وقوع فرونشست با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و راداری (مطالعه موردی: شهر پیشوا)، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۱۵، شماره ۵۷، صص ۳۹-۲۳.

[6]. Chaussard E., Amelung F., Abidin H., & Hong S. H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. Remote sensing of environment, Vol. 128, 150-161.

[7]. Dehghani M., Valadan Zoej M. J., Entezam I., Mansourian A., & Saatchi S. (2009). InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. Geophysical Journal International, Vol.178, No.1, 47-56.

[8]. Farías C. A., Lenardón Sánchez M., Bonì R., & Cigna F. (2024). Statistical and Independent Component Analysis of Sentinel-1 InSAR Time Series to Assess Land Subsidence Trends. Remote Sensing, Vol.16, No. 21, 1-28.

[9]. Rafiei F., Gharechelou S., Golian S., & Johnson B. A. (2022). Aquifer and land subsidence interaction assessment using sentinel-1 data and DInSAR

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

Technique. ISPRS International Journal of Geo-Information, Vol. 11, No. 9, 1-29.
[10].https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1 (1 - February- 2025)
[11]. Cigna F., & Tapete D. (2021). Sentinel-1 big data processing with P-SBAS InSAR in the Geohazards Exploitation Platform: An experiment on coastal land subsidence and landslides in Italy. Remote Sensing, Vol. 13, No.5, 1-25.
[12]. Raspini F., Caleca F., Del Soldato M., Festa D., Confuorto P., & Bianchini S. (2022). Review of Satellite Radar Interferometry for Subsidence Analysis. Earth-Science Reviews, Vol. 235, 104239.
[13]. Sowter A., Amat M. B. C., Cigna F., Marsh S., Athab A., & Alshammari L. (2016). Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results Using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 52, 230-242.
[14]. متکان، علی اکبر.، حاجب، محمد.، آذرخش، زینب. (۱۳۹۹). مقدمه ای بر سنجش از راه دور راداری. انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۳۸۶ صفحه.
[15]. مقصودی، یاسر.، مهدوی، ساحل. (۱۴۰۳). مبانی سنجش از راه دور راداری. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ۳۴۰ صفحه.
[16]. Roozban, A. (2017). Subsidence Investigation Using Dinsar Method and the New SENTINEL Sensor Data: Ministry of Science, Research and Technology, Iran, Graduate University of Advanced Technology Faculty of Civil and Surveying Engineering Epartment of Surveying Engineering, A Thesis for Degree of Master of Science (M.Sc.) In Remote Sensing Engineering, P. 110.
[17]. Alibakhshi, H. (2016). An Investigation Evaluation of Varamin Plan Subsidence with Using Geodetic Technique Like-Leveling, Observation GPS And Insar: Islamic Azad University, Science and Research Brach - Shahrood, Faculty of Engineering – Department of Surveying, Thesis for Receiving «M.Sc» Degree on Geodesy, V. 148.
[18]. Maleki, M. (2015). Comparison of Optic and Radar Data for Terrain Feature Extraction: Kharazmi University Fluctory of Geography Science Remote Sensing and Geographic Information Seystem (GIS) Departemant, V. 100.
[19]. نصیری خانقاه، علیرضا.، شریفیان عطار، رضا. (۱۳۹۸). کاربرد تداخل‌سنجی رادار در مطالعه فرونشست. انتشارات مهر جالینوس، مشهد، ۲۹۴ صفحه.
[20]. Amig Pe, M., And Arabi, S. (2009). Report of Research Project of Yazd Subsidence Survey Using Radar Interference and Precision Alignment Technique: National Mapping Agency, P. 46.
[21]. Ravanfar, S. M. (2015) Evaluation of Land Subsidence Using Rastering Model in GIS Environment: Islamic Azad University Marvdasht Branch Faculty of Engineering Department of Civil, Thesis for Receiving (M.Sc) Degree on Civil Engineering, P. 133.
[22]. Van der Horst T., Rutten M. M., van de Giesen N. C., & Hanssen R. F. (2018). Monitoring land Subsidence in Yangon, Myanmar Using Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry and Assessment of Driving Mechanisms. Remote Sensing of Environment, Vol. 217, 101-110.
[23]. Azarakhsh Z., Azadbakht M., & Matkan A. (2022). Estimation, modeling, and prediction of land subsidence using Sentinel-1 time series in Tehran-Shahriar plain: A machine learning-based investigation. Remote Sensing Applications: Society and Environment, Vol. 25, 100691.
[24]. Navarro-Hernández M. I., Tomás R., Valdes-Abellan J., Bru G., Ezquerro P., Guardiola-Albert C., Elçi A., Batkan E.A., Caylak B., ¨Oren A.H., Meisina C., Pedretti L., & Rygus M. (2023). Monitoring Land Subsidence Induced by Tectonic Activity and Groundwater Extraction in the Eastern Gediz River Basin (Türkiye) Using Sentinel-1 observations. Engineering Geology, Vol. 327, 107343.
[25]. Qiao X., Chu T., Tissot P., & Holland S. (2023). Sentinel-1 InSAR-derived land subsidence assessment along the Texas Gulf Coast. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 125, 103544.
[26]. رجبی، معصومه.، روستایی، شهرام.، مطاعی، سارا (۱۴۰۲). ارزیابی خطر فرونشست‌زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۸، شماره ۸۸، صص ۳۲۸-۳۰۸.

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir