نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۲
Vol.11, No.3, Autumn 2023
۵۹ -۸۴
مقاله پژوهشی

شناسایی مناطق دارای فرسایش شدید خاک با استفاده از همدوسی تداخل سنجی راداری ماهواره سنتینل- ۱ (منطقه مورد مطالعه: استان خوزستان)

سمیه ابراهیم‌زاده [۱]، مسعود سلیمانی [۱]، سارا عطارچی [۲*]، مهدی سعادت‌نوین [۱]، سید حسن شعبانیان [۱]

۱- دانشجوی دکتری سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
۲- دانشیار گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

چکیده

فرسایش خاک پدیده‌ای است که پیامدهای مخرب و جبران‌ناپذیری بر زندگی بشر دارد. ازاین‌رو انجام اقدامات مدیریتی در جهت کنترل یا کاهش این پدیده در مناطق درگیر فرسایش شدید، ضرورت دارد. تحقق این امر مستلزم شناسایی مناطقی است که درگیر فرسایش خاک شدید است؛ زیرا امکان اجرای طرح‌های حفاظت خاک در همه مناطق وجود ندارد و مناطق دارای فرسایش شدید در اولویت انجام اقدامات حفاظت خاک قرار دارند. آشکارسازی مناطق دارای فرسایش مبتنی بر روش‌های میدانی بسیار دشوار و هزینه‌بر بوده و با محدودیت‌های فراوانی روبروست. بنابراین امروزه بهره‌گیری از قابلیت‌های داده‌های سنجش‌ازدور اهمیت یافته است. بطورکلی این پژوهش، مناطق با فرسایش شدید را با استفاده از تجزیه و تحلیل تصاویر همدوسی حاصل از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (*InSAR*) مبتنی بر سری زمانی تصاویر سنتینل ۱ استخراج می‌کند. به منظور پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی، محدوده‌ای از استان خوزستان به عنوان یکی از مناطق با نرخ فرسایش خاک زیاد مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از عوامل از دست رفت یا کاهش همدوسی در *InSAR* می‌تواند فرسایش خاک شدید ناشی از جداشدگی و جابه-جایی ذرات خاک از بستر باشد. زیرا جدا شدن ذرات خاک از بستر و جا به جایی آن باعث تغییر ویژگی‌های سطح و در نتیجه تغییر در برهمکنش سیگنال رادار با سطح گردیده و در نتیجه مقدار همدوسی در *InSAR* در اثر فرسایش کاهش می‌یابد. بر این اساس در مطالعه حاضر از طریق شناسایی و جداسازی سایر عوامل تاثیرگذار در کاهش همدوسی مانند آب، پوشش گیاهی و توپوگرافی، مناطق با فرسایش خاک شدید با استفاده از سری زمانی یک‌ساله (۱۳۹۸-۱۳۹۷) تصاویر سنتینل-۱ استخراج شد. اعتبارسنجی نتایج بر اساس نقشه معتبر فرسایش خاک استان خوزستان حاکی از آن است که بیش از ۸۶٪ از مناطق با فرسایش شدید استخراج شده منطبق بر واقعیت است. همچنین سازگاری مناطق فرسایش شدید استخراج شده با جنس و مقاومت سازندهای مختلف زمین‌شناسی در منطقه، بر اعتبار نتایج این مطالعه تاکید می‌کند.

کلید واژه‌ها : فرسایش خاک، سنجش‌ازدور، تداخل‌سنجی رادار دریچه مصنوعی، همدوسی، سنتینل-۱.

[*] نویسنده مکاتبه کننده: ایران، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا، گروه سنجش از دور و *GIS*.
تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۳۲۶۸

Email: satarchi@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

۱- مقدمه

خاک به عنوان عنصری مهم در زندگی جوامع بشری، منبع تولیدات کشاورزی و تامین منابع غذایی به شمار می‌رود. کاهش میزان قابلیت حاصلخیزی و کیفیت خاک و در پی آن کاهش منابع غذایی بشر، افزایش خطر جاری شدن سیلاب و تخریب سازه‌های دست‌ساز بشر، بیابان‌زایی و تخریب سرزمین، کاهش ظرفیت سدها و مخازن آب و تخریب منظره زمین از آثار زیان-بار فرسایش خاک به حساب می‌آیند [۱و۲].

با توجه به این که تشکیل ۱ سانتی‌متر خاک حدود ۲۰۰ سال طول می‌کشد ولی تخریب و از دست رفتن[۱] آن توسط فرسایش بسیار سریع است؛ لذا انجام اقدامات پیشگیرانه به منظور جلوگیری از فرسایش و حفظ خاک، ضرورت دارد. به همین منظور روش‌های متعددی برای مدلسازی روند و نرخ تخریب و فرسایش خاک توسعه داده شده است. در این میان مدل‌های فیزیکی و تجربی به عنوان دو روش عمده و متداول در زمینه مدلسازی فرسایش خاک، جهت برآورد میزان فرسایش به شمار می‌روند. مدل‌های تجربی به علت ساده‌تر بودن و نیاز به داده‌های کمتر و در دسترس‌تر، در قیاس با مدل‌های فیزیکی کاربرد بیشتری دارند [۲]. مهم‌ترین و معروف‌ترین مدل تجربی تخمین فرسایش خاک معادله جهانی فرسایش خاک(*USLE*)[۲]است که بر پایه آن تحقیقات زیادی انجام شده است [۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸]. بعدها در کنار مدل‌های دیگر فرسایش خاک مانند مدل روش پتانسیل فرسایش (*EPM*) [۳][۹] ، مدل پسیاک (*PSIAC*) [۴][۱۰] ، ابزار ارزیابی آب و خاک (*SWAT*) [۵][۱۱] ، مدل اپیک (*EPIC*) [۶][۱۲] ، مدل پروژه پیش بینی فرسایش حوزه آبخیز (*WEPP*) [۷] [۱۳] ، بر مبنای مدل *USLE* ، سلسله مدل‌های دیگری مانند نسخه‌های مختلف معادله جهانی هدر رفت خاک اصلاح شده (*RUSLE*) [۸][۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷] و یا معادله جهانی هدر رفت خاک تعدیل یافته (*MUSLE*)[۹] [۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱] توسعه یافته‌اند. البته روشهای دیگری نیز به کمک سنجش از دور توسعه داده شده است که مستقل از مدل‌های یاد شده به بررسی و تخمین فرسایش خاک می‌پردازد [۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷].

به دلایلی از جمله دسترس‌پذیر بودن تصاویر ماهواره-ای، امکان مطالعه در مناطق وسیع، مدلسازی قابل تکرار با داده‌های سری زمانی، به کارگیری الگوریتم‌های نوین و بهبود صحت تخمین و مدلسازی فرسایش خاک نسبت به روش‌های میدانی ، در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در مطالعه فرسایش خاک بوسیله سنجش‌ازدور و *GIS* انجام شده است [۷، ۱۷، ۱۹، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲ و ۳۳]. با این حال، بطورکلی و بر اساس مرور تحقیقات پیشین پیرامون مطالعه فرسایش خاک با استفاده از تکنیک *InSAR*، می‌توان گفت به دلیل کمبود تصاویر مناسب و رایگان رادار، تعداد الگوریتم‌های محدود در مطالعه فرسایش خاک با تصاویر رادار، دشواری و مشکلات پردازش داده‌های راداری و همچنین کمبود متخصصین و نرم افزارهای پردازش داده‌های سنجش از دور راداری، تعداد مطالعات در این زمینه انگشت‌شمار بوده و با وجود کارآمدی *InSAR* (تداخل‌سنجی روی تصاویر *SAR*[۱۰]) در مطالعه فرسایش خاک، محققین بسیار کمی به این

---

[1] *Soil loss*

[۲] *Universal Soil Loss Equation*

[۳] *Erosion Potential Method*

[۴] *Pacific Southwest Interagency Committee Method*

[۵] *Soil and Water Assessment Tool*

[۶] *Erosion-Productivity Impact Calculator*

[۷] *Watershed Erosion Prediction Project*

[۸] *Revised Universal Soil Loss Equation*

[۹] *Modified Universal Soil Loss Equation*

[۱۰] *Synthetic Aperture Radar*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

موضوع پرداخته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به طبقه‌بندی تصاویر همدوسی راداری برای استخراج مناطق با خاک فرسایش یافته [۳۴]، طبقه‌بندی تصویر دامنه رادار در کنار تصاویر سنجنده اپتیک برای پهنه-بندی شدت فرسایش خاک [۳۵]، مدلسازی و تفکیک مولفه‌های همدوسی راداری برای تشخیص مناطق فرسایش [۳۶] ، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک [۳۷] و تحلیل داده‌های جانبی در کنار ترکیب رنگی کاذب از نسبت تصاویر همدوسی راداری برای استخراج مناطق فرسایش یافته [۳۸] اشاره کرد. لیو و همکارانش (۱۹۹۹) با استفاده از ترکیب تصاویر همدوسی تداخل-سنجی راداری حاصل از سه تصویر *ERS* و ایجاد ترکیب رنگی کاذب[1] مناطقی که دچار ازدست‌رفتگی زمانی همدوسی[2]شده بودند را شناسایی کردند، سپس با استفاده از شاخص *NDVI* به صورت بصری تفسیر کردند که کدام یک از این مناطق در اثر پوشش گیاهی و کدام مناطق در اثر فرسایش خاک دچار ازدست-رفتگی همدوسی شده‌اند [۳۸]. آنها این تحلیل را در بازه زمانی ۲۱۰ روزه و با استفاده از تنها سه تصویر همدوسی انجام دادند و از آنجا که به دلیل ماهیت این پدیده، مطالعات مربوط به فرسایش خاک باید در بازه حداقل یک‌ساله انجام شود [۱]، بازه مطالعاتی می-بایست به یک سال یا بیشتر بسط داده می‌شد. همچنین به علت وجود سایر عواملی که ممکن است بر ازدست‌رفتگی همدوسی اثر بگذارد بهتر می‌بود علاوه بر افزایش بازه مطالعاتی، تعداد تصاویر همدوسی به تعدادی افزایش یابد که تحلیل آنها این اطمینان را به محقق بدهد که آنچه تحت مناطق فرسایش شدید شناسایی شده است، متاثر از عوامل دیگر نمی‌باشد. زیرا بررسی تغییرات زمانی تعداد بیشتر تصاویر همدوسی این امکان را برای محقق فراهم می‌کند که به طور دقیق‌تر و با اطمینان بیشتر نوع پدیده‌ها را تعیین و تفسیر کند. علاوه بر این، آنها می‌توانستند با تحلیل مقادیر میانگین و انحراف معیار کمیت همدوسی تحلیل دقیق‌تر برای پدیده‌های مختلف منطقه ارائه دهند زیرا میانگین و انحراف معیار مقادیر همدوسی در یک موقعیت، اطلاعات مفیدی از نوع عارضه فراهم می‌کند. لیو و همکارانش به مقایسه بصری *NDVI* و مناطق دچار ازدست‌رفتگی همدوسی آن هم تنها در برخی مناطق اکتفا کردند؛ درحالیکه از آنجا که گیاه نیز مانند فرسایش خاک باعث ازدست‌رفتگی زمانی همدوسی می‌شود تفکیک کامل این دو پدیده در این مطالعه امری ضروری بود. همچنین آنها در مورد مناطق پوشیده از آب تحلیلی نکردند درحالیکه آب یکی از علل عمده باعث ازدست‌رفتگی همدوسی تداخل‌سنجی راداری است و جای بحث در مورد پوشش آب در تحقیق آنها خالی است. از آنجا که منطقه مطالعاتی آنها کوچک و بدون مناطق ساخته شده (*Built up*) است، یکی از خلاهای تحقیق آنها شناسایی و تفکیک مناطق ساخته‌شده از منطقه مطالعاتی است، زیرا مناطق مطالعاتی بزرگ معمولا دارای مناطق ساخته‌شده است و از آنجا که مناطق ساخته شده شامل فرسایش خاک نمی‌شود باید شناسایی و تفکیک شوند. از آنجا که شناسایی مناطق ساخته شده در این دست مطالعات خود مساله مهمی است، بحث در مورد آن بسیار مفید به نظر می‌رسد. عدم بررسی صحت نتایج یکی از شاخص‌ترین ایراداتی است که به تحقیق لیو و همکارانش وارد است؛ زیرا اعتبارسنجی یکی از مهم-ترین قسمت‌های یک تحقیق است و بدون اعتبارسنجی نتایج، معتبر و مفید بودن روش تحقیق مورد شک است. با وجود کاستی‌های بیان شده، مزایای تحقیق مذکور از جمله عدم نیاز به درگیر شدن با پیچیدگی-های مدلهای فرسایش خاک، داده‌های بسیار کم و در دسترس، عدم نیاز به داده‌های زمینی فرسایش خاک و ارائه روشی مستقیم و ساده برای استخراج مناطق درگیر فرسایش خاک شدید قابل توجه است. بنابراین

[1] *False Color Composite (FCC)*
[2] *Temporal decorrelation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

ارائه رویکردی بر پایه تحقیق نام برده و با رفع کاستی-های آن منجر به ارائه رویکردی می‌شود که در شناسایی سریع و کم‌هزینه مناطق با فرسایش شدید و انجام اقدامات حفاظت خاک در این مناطق موثر و مفید خواهد بود.

بر اساس آنچه گفته شد ، هدف از تحقیق حاضر ارائه رویکردی سنجش‌ازدوری به منظور شناسایی و استخراج مناطق با فرسایش خاک شدید در منطقه‌ای از استان خوزستان با استفاده از تحلیل تصاویر همدوسی حاصل از پردازش‌های *InSAR* مبتنی بر سری زمانی داده‌های ماهواره سنتینل-۱ است. از آنجاکه مدلسازی و تخمین شدت فرسایش خاک معمولا حداقل در مقیاس زمانی یکساله انجام می‌شود (مانند مدل تجربی و شناخته شده *RUSLE* که شدت فرسایش خاک را در واحد تن بر هکتار در سال تخمین می‌زند)، بهتر است پردازش داده‌های راداری در مطالعات فرسایش خاک نیز در طول ۱ سال یا بیشتر صورت گیرد.

بر اساس گزارش اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خوزستان، وضعیت فرسایش خاک در این استان بحرانی و دارای رتبه اول در کشور است. در استان خوزستان حدود ۲٫۳ میلیون هکتار زمین دارای خاک حاصلخیز و مستعد کشاورزی وجود دارد. این درحالیست که فقط ۲۰ درصد آنها برای برای فعالیت-های کشاورزی مناسب هستند و باقیمانده دارای فرسایش خاک شدید هستند. در مناطق مختلف استان، سالانه بین ۴ تا ۵۰ تن در هکتار فرسایش خاک ثبت شده است. همچنین برخی از زمین‌های کشاورزی حاصلخیز، امروزه به دلیل کاهش و عدم تخصیص منابع آب و وجود عواملی همچون طوفان‌های گردوغبار رها شده‌اند و یا ناشی از فرسایش شدید خاک به سرعت در حال تبدیل شدن به شوره‌زار و سپس کانون‌های جدید گردوغبار هستند. در نواحی کوهستانی شمال استان به دلیل وجود توپوگرافی و رخداد بارندگی و رواناب، فرسایش آبی غالب است. در نواحی جنوبی به دلیل وسعت زیاد زمین‌های پست و هموار و همچنین خاک-های فرسایش‌پذیر، فرسایش غالبا به صورت بادی رخ می‌دهد. نقشه نرخ فرسایش خاک سالیانه استان خوزستان تهیه‌شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور در شکل (۱) ارائه شده است. آنچه از وضعیت فرسایش خاک استان گفته شد و وسعت کلاس نرخ فرسایش خاک شدید در آن، گواهی بر حساسیت موضوع مورد بحث است. نقشه مذکور در تحقیق حاضر به عنوان نقشه معیار جهت اعتبارسنجی نتایج رویکرد پیشنهادی به کار رفته است. این نقشه در سازمان جنگل‌ها طی پروژه ای سازمانی با پیاده سازی مدل تجربی فرسایش خاک *EPM*[1] و سپس بازدید میدانی و نیز اعتبارسنجی با ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در چندین استان کشور (از جمله خوزستان) تولید شده است و به عنوان نقشه فرسایش خاک معیار در سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور مورد قبول و دارای سندیت است.

از جمله نوآوری‌های این مطالعه، استخراج مناطق با نرخ فرسایش شدید بدون نیاز به مدلسازی‌های پیچیده فیزیکی و تجربی رایج، استفاده از تصاویر راداری سنتینل-۱ در تخمین شدت فرسایش خاک و ارائه الگوریتمی به نسبت ساده‌تر و با داده‌های بسیار کمتر و دردسترس‌تر از روش‌های رایج سنجش از دور در بررسی فرسایش خاک می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا به معرفی منطقه مطالعاتی پرداخته خواهد شد؛ سپس روند کلی پژوهش پیش رو تشریح شده، آنگاه پس از معرفی داده‌های به‌کار رفته در تحقیق، به جزئیات روش تحقیق پرداخته خواهد شد.

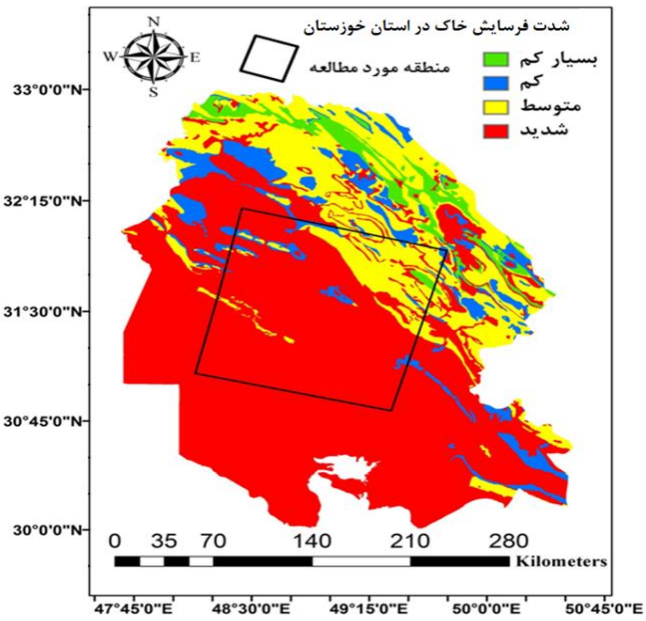
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

با در نظر گرفتن آمار و اطلاعات موجود در خصوص رخداد فرسایش شدید خاک در خوزستان، قسمتی از دشت‌های میانی استان واقع در محدوده جغرافیایی بین

[1] *Erosion Potential Model*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

۴۸ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۰ درجه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی با وسعت تقریبی ۱۶۸۰ کیلومتر مربع به عنوان منطقه موردمطالعه جهت پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی انتخاب گردید (شکل (۲)). با توجه به موقعیت جلگه‌ای منطقه، وجود رود کارون و همچنین وضعیت بارندگی (باران‌های رگباری، درشت‌دانه و سریع) که ظرف مدت کمی سبب آب‌گرفتگی و سیلاب می‌شوند؛ نرخ فرسایش خاک در این منطقه بالا است [۳۳ و ۳۹]. نقشه معیار شدت فرسایش خاک در استان خوزستان، تهیه شده از سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور، در شکل (۱) به نمایش گذاشته شده است.



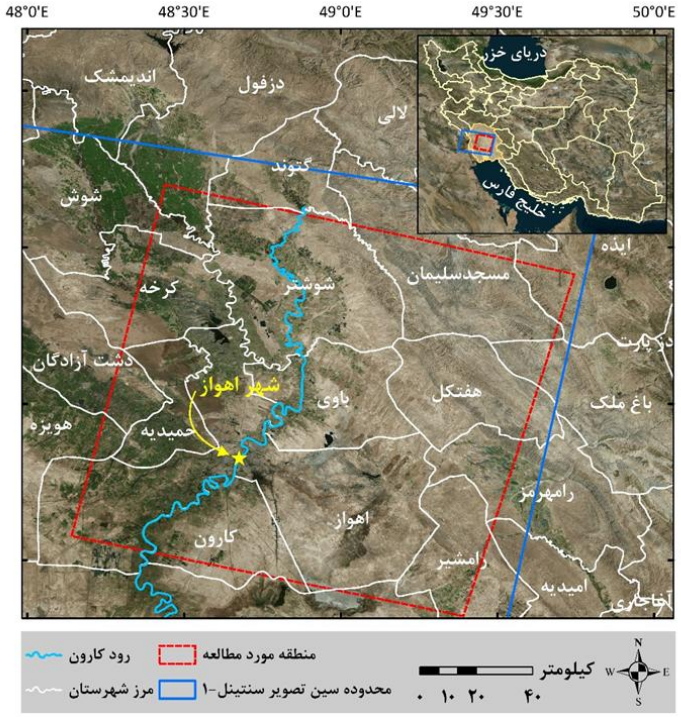
شکل۱: نقشه شدت فرسایش خاک استان خوزستان – تهیه‌شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور

بر اساس شکل (۳)، منطقه مورد مطالعه دارای شش سازند زمین‌شناسی مختلف است که در ادامه تشریح شده‌اند.

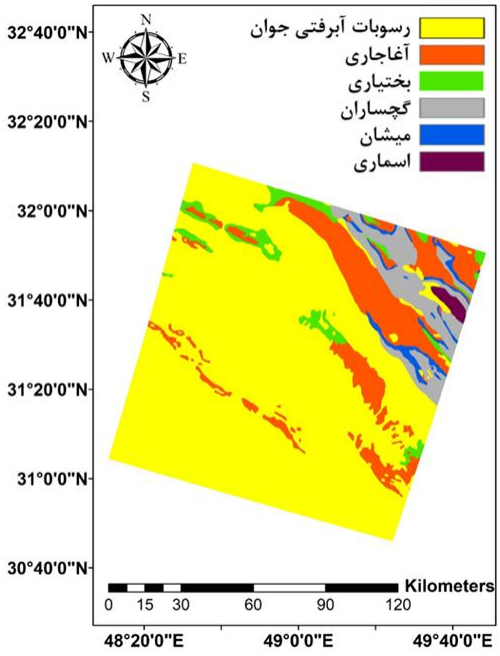
۱- رسوبات آبرفتی جوان (زرد): رخساره‌های این دوره شامل پادگانه‌های آبرفتی بلند و مخروطه افکنه‌های قدیمی که از قلوه سنگ، ماسه و ریگ تشکیل یافته‌اند. این رسوبات مربوط به دوره کواترنری هستند و با توجه به ماهیت آبرفتی این سازندها در مقابل فرسایش بسیار حساس هستند [۴۰].

۲- آغاجاری (نارنجی): از سازندهای زمین شناسی زاگرس است که از ماسه سنگ‌های آهک‌دار قهوه‌ای-خاکستری با رگه‌های گچ، مارن قرمز و سیلتستون می‌باشد. سن این سازند به میوسن فوقانی تا پلیوسن می‌رسد. وجود مارن-های ژیپس دار، این سازند را به فرسایش حساس کرده است ولی به دلیل قرارگیری متناوب مارن و ماسه سنگ و سیلتستون در صورتی که طبقه فوقانی از ماسه سنگ باشد فرسایش تاثیر کمتری روی آنها دارد. تاثیر فرسایش بر ماسه سنگ‌های آهکی خیلی کم، بر روی سیلتستون متوسط و بر روی مارن‌های قرمز ژیپس دار خیلی زیاد است [۴۰]. با توجه به اطلاعاتی که از منطقه در دسترس است، عمده ترکیب این سازند در منطقه آهک بوده و دارای پوشش ماسه‌سنگ می‌باشد. بنابراین این سازند در منطقه دارای مقاومت بسیار زیاد در برابر فرسایش خاک است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]



شکل۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه (مستطیل خط‌چین قرمزرنگ به عنوان بخشی از محدوده تحت پوشش تصویر ماهواره سنتینل – ۱ به شماره برش (۱۱) در استان خوزستان واقع در جنوب‌غربی ایران بر روی تصویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا در ترکیب رنگی طبیعی.



شکل۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

۳- بختیاری (سبز): این سازند ویژگی روسوبات آبرفتی و کوهپایه ای حاصل از فرسایش ارتفاعات را دارد که بیشتر شامل کنگلومرا و ماسه سنگ آهکی است. این سازند جوان‌ترین سازند نهشته شده زاگرس است. سازند کنگلومرای این سازند دارای لیتولوژی سخت بوده و در برابر فرسایش مقاوم است و مهم‌ترین فرسایش بر روی این سازند فرسایش آبراهه‌ای است [۴۰].

۴- گچساران (خاکستری): سن این سازند به میوسن زیرین تا میانی باز می‌گردد و دارای خواص تکنونیکی شکل‌پذیر است و به انحلال حساس می باشد، تحرک زیاد داشته و در مقابل فشارها واکنش نشان می‌دهد. تناوب این سازند از سنگ گچ، مارن آبی تا خاکستری و میان لایه‌های سنگ آهک مارنی کرم رنگ تشکیل شده است. آهک‌های مارنی این سازند حساسیت کم به فرسایش دارند اما در مقابل مارن دارای حساسیت زیاد و شیل‌ها دارای حساسیت متوسط به فرسایش هستند به علاوه ایندریت و نمک در این سازند دارای فرسایش خیلی زیادی هستند [۴۰].

۵- میشان (آبی) : این سازند رخساره دریایی دارد و بیشتر از مارن‌های فرسایش پذیر خاکستری تشکیل شده است. سن آن به میوسن میانی آغازی تا میانی باز می‌گردد. در این سازند دو بخش قابل تشخیص است که لیتولوژی آنها با هم متفاوت است: بخش آهکی و بخش مارنی. بخش آهکی نسبت به فرسایش حساسیت کمی دارد و بخش مارنی دارای حساسیت متوسط نسبت به فرسایش است [۴۰].

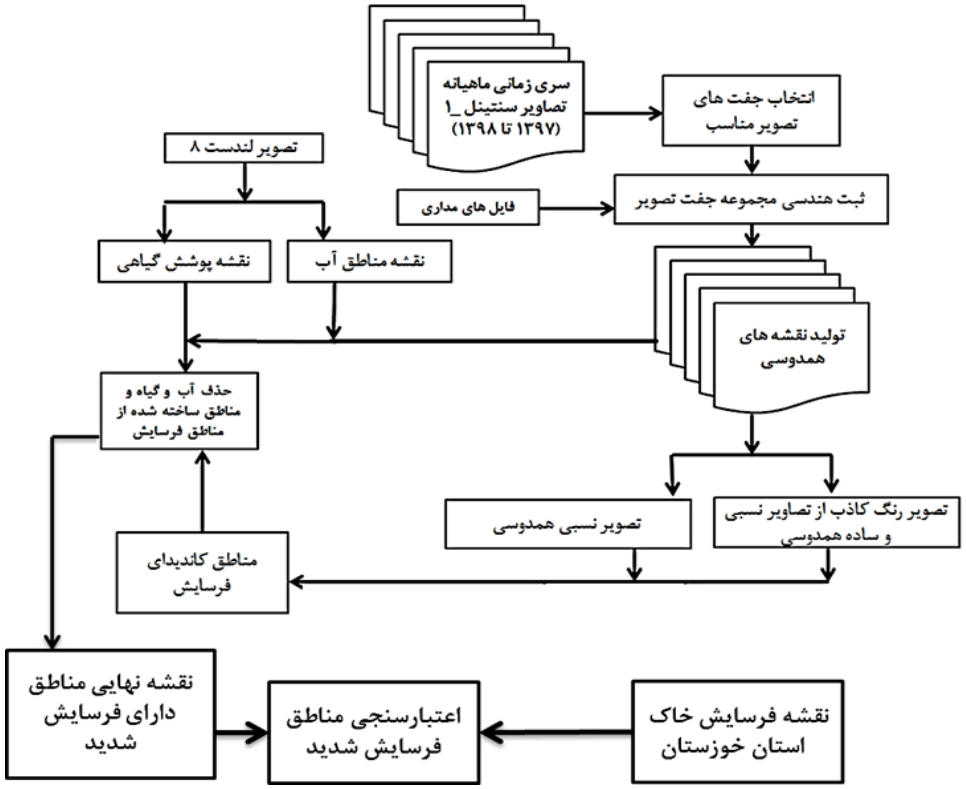
۶- اسماری (بنفش): این سازند شامل سنگ آهک‌های مقاوم کرم تا قهوه ای رنگ با ریخت شناسی صخره ساز و درزهای فراوان به همراه میان لای‌های شیلی می‌باشد. سن آن به الیگو میوسن می‌رسد. سطح حساسیت این سازند نسبت به فرسایش متوسط است [۴۰].

۲-۲- روند کلی پژوهش

روند کلی پردازش‌های انجام شده در این تحقیق به منظور تهیه نقشه مناطق دارای فرسایش شدید در استان خوزستان بر اساس رویکرد پیشنهادی مبتنی بر سری زمانی داده‌های همدوسی *InSAR* در شکل (۴) نشان داده شده است. بدین منظور ابتدا از بین تصاویر *SAR*، زوج‌های مناسب جهت انجام پردازش‌های *InSAR* انتخاب شدند. در ادامه با استفاده از اطلاعات مداری ماهواره، زوج تصاویر انتخابی نسبت به یک مبنای مشترک ثبت هندسی و زمین مرجع شدند. آنگاه جهت تولید تصاویر همدوسی چندزمانه، عملیات تداخل-سنجی بر روی زوج تصاویر منتخب انجام شد. آب و پوشش گیاهی نیز مانند فرسایش خاک باعث افت مقادیر همدوسی می‌شوند. بنابراین، برای شناسایی مناطق فرسایش شدید باید این دو پدیده از سایر مناطق تفکیک شوند. بر همین اساس، با استفاده از تصاویر لندست ۸ و شاخص‌های گیاهی مستخرج از آن شامل *NDVI*[1] و *SAVI*[2]، مناطق دارای پوشش گیاهی و همچنین پهنه‌های آبی شناسایی و سپس از تصاویر همدوسی ماسک شدند. از آنجاکه مناطق ساخته‌شده جزء طبقات فرسایش خاک قرار نمی‌گیرند، بنابراین بر اساس مقادیر بالای میانگین و مقادیر پایین انحراف معیار همدوسی در سری زمانی، از تصاویر همدوسی ماسک و از مناطق فرسایش تفکیک شدند. در پایان مناطق با فرسایش شدید با استفاده از تلفیق و تجزیه‌و-تحلیل تصاویر همدوسی و استخراج مناطق با بیشترین از دست رفت زمانی همدوسی استخراج شدند. نقشه فرسایش خاک تولیدشده، نهایتا با نقشه معتبر و موجود فرسایش خاک استان خوزستان اعتبارسنجی شد.

[1] *Normalized Difference Vegetation Index*
[2] *Soil Adjusted Vegetation Index*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]



شکل۴: مراحل کلی پیاده‌سازی روش پیشنهادی به منظور شناسایی مناطق دارای فرسایش خاک شدید با استفاده از تصاویر همدوسی *InSAR* و اپتیک.

۲-۳- داده‌های ماهواره *Sentinel-1*

داده‌های *SAR* ماهواره *Sentinel–1* به صورت تک پلاریزه[1] (*HH* یا *VV*) و جفت پلاریزه (*VH-VV* یا *HH-HV*) در محدوده *C* باند قابل دسترس هستند. این داده‌ها در چهار حالت تصویربرداری منحصر به فرد اعم از *SM*[2]، *IW*[3]، *EW*[4] و *WV*[5] با قدرت تفکیک مکانی (تا ۵ متر) و پوشش مکانی (حداکثر تا ۴۰۰ کیلومتر) برداشت می‌شوند. در حالت *IW*، با یک قدرت تفکیک مکانی ۵ متر (در راستای برد مایل) در ۲۰ متر (در راستای آزیموت) و عرض برداشت ۲۵۰ کیلومتر داده-برداری انجام می‌گردد. داده‌های *IW* دارای مقادیر فاز و دامنه بوده و جهت کاربردهای *InSAR* استفاده می‌شوند [۴۴]. در این پژوهش، با در نظر گرفتن عواملی همچون دسترسی رایگان، پوشش مکانی و زمانی مطلوب و کارایی در زمینه *InSAR*، از ۱۶ تصویر *IW* ماهواره *Sentinel–1 A* با گذر نزولی مربوط به شماره برش ۱۱، در بازه زمانی ۲۰۱۸/۱۱/۲۱ تا ۲۰۲۰/۰۱/۰۳ (معادل ۱۳۹۷/۸/۳۰ تا ۱۳۹۸/۱۰/۱۳) استفاده شده است. در این تحقیق از پلاریزه *VV* تصاویر *SAR* به منظور ارزیابی قابلیت داده‌های همدوسی چندزمانه جهت پایش فرسایش خاک استفاده شده است. بدیهی است که تصاویر پلاریزه *VH* نیز می‌توانند حاوی اطلاعات ارزشمندی جهت شناسایی نواحی دارای فرسایش خاک باشند. اما در این مطالعه با توجه به هدف اصلی، تنها از داده‌های پلاریزه *VV* که مرسوم‌تر هستند و اطلاعات بیشتری به دست می‌دهند، جهت ارزیابی استفاده شده است.

[1] *Single Polarisation*
[2] *Strip Map*
[3] *Interferometric Wide Swath*
[4] *Extra Wide Swath*
[5] *Wave*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

۲-۴- تداخل‌سنجی راداری

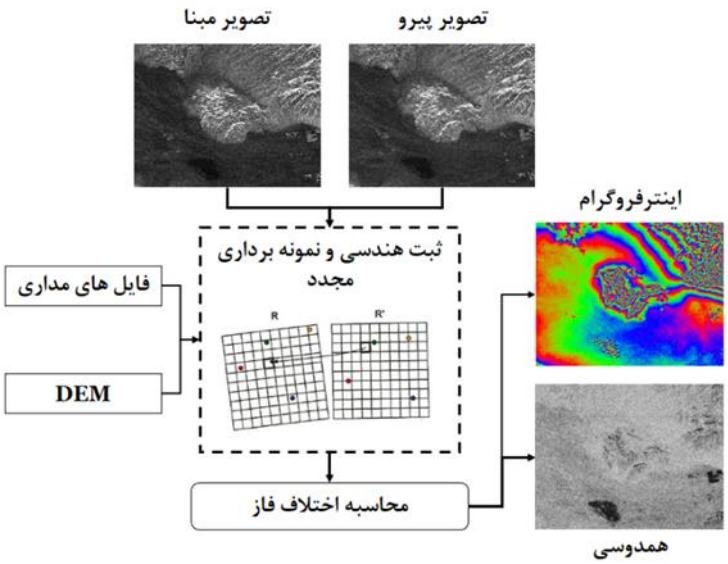
تکنیک *InSAR* مبتنی بر بهره‌گیری از امواج مایکروویو است که بطور مرسوم در علوم سنجش‌ازدور و زمین-شناسی جهت اندازه‌گیری و پایش تغییرات شکل/جابجایی زمین با دقت زیرسانتی‌متر استفاده می-شود [۴۱ و ۴۲]. اساساً سه مفهوم مختلف در رابطه با *InSAR* وجود دارد: ۱) *InSAR* در راستای طول برداشت تک_گذر[۱] ۲) *InSAR* در راستای عرض برداشت تک-گذر[۲] ۳) *InSAR* گذر_تکراری[۳] در روش تک_گذر با استفاده از دو آنتن که روی یک سکو نصب شده‌اند، اطلاعات بطور همزمان جمع آوری می‌شود. در *InSAR* به روش گذر_تکراری سکو فقط حامل یک آنتن است که این آنتن یک منطقه را در دو عبور مختلف با هندسه تقریبا مشابه پوشش می‌دهد [۴۳]. در *InSAR* گذر_تکراری به فاصله بین دو مسیر پرواز در دو برداشت متوالی خط مبنای مکانی[۴] نامیده می‌شود. تغییرات ایجاد شده در سطح زمین باعث ایجاد اختلاف فاز در دو تصویر رادار در دو زمان مختلف می شود. اختلاف فاز به دست آمده از تصاویر نشان دهنده میزان تغییر شکل اتفاق افتاده در فاصله زمانی بین دوگذر ماهواره (خط مبنای زمانی[۵]) در سطح زمین است. در این تکنیک با تفاضل گیری از مقادیر فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری در زمان‌های مختلف، تصویری جدید تحت عنوان تداخل‌نما[۶] حاصل می‌شود. تداخل‌نما علاوه بر اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل زمین، شامل مؤلفه‌های مختلفی ناشی از تاثیر توپوگرافی، کرویت زمین و خطاهای موجود نظیر خطای اتمسفر، خطای ثبت تصاویر، نویز حرارتی و سایر خطاهای پردازشی هستند. به جزء سهم فاز ناشی از تغییر شکل زمین، تاثیر سایر مولفه‌های فاز با بهره‌گیری از فایل‌های مداری، مدل ارتفاعی رقومی (*DEM*[۷])، فیلتر *Goldstein* و ترکیب فیلترهای پایین‌گذر مکانی و بالاگذر زمانی تصحیح می‌شوند [۴۵، ۴۶ و ۴۷]. پس از تصحیحات تداخل‌نماها، مرحله پایانی رفع ابهام فاز[۸] می‌باشد که در این فرآیند مقادیر گسسته فاز به مقادیر پیوسته تبدیل می‌شوند. شکل (۵) بصورت شماتیک مراحل تولید یک تداخل‌نما را نمایش می‌دهد. در این تحقیق پردازش‌های مربوط به *InSAR* در نرم افزار *GMTSAR* انجام گرفت.

۲-۵- تصویر همدوسی

همانطور که در شکل (۳) آمده است، یکی از محصولات *InSAR*، تصویر همدوسی[۹] است که میزان همبستگی فاز میان پیکسل‌های متناظر در دو تصویر پایه[۱۰] و پیرو[۱۱] را نشان می‌دهد. همدوسی بطور مرسوم جهت ارزیابی کیفیت تداخل‌نما مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۹]. دامنه عددی مقادیر تصویر همدوسی بین صفر تا یک متغیر است. همدوسی با افزایش پراکندگی حجمی[۱۲] و تغییرات زمانی کاهش می‌یابد. اگر یک پیکسل متناظر در دو تصویر *SAR* مربوط به دو زمان مختلف نسبت به هم تغییرات اندکی داشته باشند، این عدد به یک نزدیک می‌شود و هرچه تغییرات دو پیکسل نسبت به هم بیشتر باشد؛ این عدد به سمت صفر میل می‌کند [۴۳]. همدوسی خیلی پایین معمولاً نشان-دهنده آب، همدوسی متوسط اغلب نشان‌دهنده گیاهان در حال رشد و همدوسی بالا شهرها و مناطق ساخته-شده را نشان می‌دهد [۳۹ و ۴۴].

[۱] *Single Pass Along - Track Interferometry*
[۲] *Single Pass Cross - Track Interferometry*
[۳] *Repeat - Pass Interferometry*
[۴] *Spatial Baseline*
[۵] *Temporal Baseline*
[۶] *Interfrogram*
[7] *Digital Elevation Model*
[8] *Phase Unwrapping*
[۹] *Coherence*
[۱۰] *Master*
[۱۱] *Slave*
[۱۲] *Volume Scattering*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]



شکل۵: مراحل تولید یک تداخل‌نما و تصویر همدوسی در تکنیک *InSAR*

ضریب همدوسی به عنوان مقدار مطلق ضریب همبستگی بین دو تصویر مختلط تک منظر راداری (مجموعه داده‌های *SLC*[1]) از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۴۵]:

رابطه(۱)
$$\gamma = \frac{E\{ Y_1 Y_2^* \}}{\sqrt{E\{|Y_1|^2\}.E\{|Y_2|^2\}}}$$

در رابطه (۱)، γ میزان همدوسی بین دو تصویر، y_1 تصویر پایه، و y_2^* مزدوج مختلط تصویر پیرو است. این رابطه از ضرب مختلط بین دو تصویر و اعمال امید ریاضی $E\{.\}$ بر روی آن بدست می‌آید.

فرسایش خاک در تصاویر همدوسی به عنوان ویژگی‌هایی ظاهر می‌شود که به تدریج با افزایش خط‌مبنای زمانی، کاهش همدوسی را به دنبال دارد. فرایند فرسایش باعث تغییرات تصادفی در جزئیات توپوگرافی می‌شود. این مهم سبب تغییرات هندسی در بازپراکنش امواج راداری می‌شود. بدین طریق تغییرات به طور تصادفی در فاز و دامنه سیگنال در هر پیکسل ایجاد می‌شوند. پوشش گیاهی انبوه می‌تواند منجر به از دست رفت همدوسی به صورت آنی یا در عرض چند روز شود. از طرف دیگر، طبق تحقیقات میدانی، پوشش گیاهی طبیعی بسیار تنک و خشک (بوته‌ها) به ازای چندین ماه تا یک سال تأثیر قابل توجهی در میزان همدوسی ندارد. فعالیت‌های انسانی مانند شخم زنی، ساخت و ساز مهندسی و معدن سنگ می‌تواند منجر به از دست رفت ناگهانی و غیرمنطقی همدوسی در یک دوره خاص از فرایندهای طبیعی شود [۲۸].

۲-۶- شاخص‌های گیاهی

شاخص *NDVI* یکی از معروف‌ترین شاخص‌های طیفی گیاهی در سنجش‌ازدور به شمار می‌رود. مقادیر این شاخص بین ۱- الی ۱+ متغیر می‌باشد. عدد صفر به معنی عدم پوشش گیاهی و همچنین مقادیر منفی به عنوان سطوحی به غیر از پوشش گیاهی مانند آب و برف تفسیر می‌شوند [۵۱ و ۵۲]. این شاخص از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

رابطه(۲)
$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

در این شاخص برای سطوح دارای پوشش گیاهی طول موج‌های قرمز (*RED*) و مادون قرمز نزدیک (*NIR*) به

[1] *Single Look Complex*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

ترتیب با جذب بالا و بازتاب بالا مشخص می‌شوند. شاخص *SAVI* بر اساس *NDVI* بوده و خطای اثر خاک زمینه را حذف می‌کند و با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است [۵۱ و ۵۲].

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR-RED)}{(NIR+RED+L)} \quad \text{رابطه(۳)}$$

در رابطه (۳)، L معیاری برای کاهش اثرات خصوصیات طیفی خاک روی بازتاب‌های طیفی تاج پوشش است [۵]. دامنه L از ۰ تا ۱ متغیر است. مقادیر L با توجه به شرایط خاص محیطی تعیین می‌شود. مقدار L تحت شایع‌ترین شرایط محیطی در حدود ۰/۵ است [۵۱ و ۵۲]. در این تحقیق به منظور محاسبه شاخص‌های *NDVI* و *SAVI* از داده‌های چندطیفی ماهواره لندست ۸ مربوط به تاریخ ۲۳ آگوست ۲۰۱۹ استفاده گردید. دلیل انتخاب تصویر در ماه آگوست این است که طبق تحقیقات انجام شده، برای بررسی پوشش گیاهی اگر بخواهیم فقط از تصاویر یک ماه از سال استفاده کنیم باید از تصاویر نیمه دوم تابستان یا نیمه اول پاییز یا نیمه اول بهار استفاده کرد که معمولا نماینده خوبی از میانگین همه ماه‌های سال از نظر پوشش گیاهی است [۵۳ و ۴۹]. بدین ترتیب در این مطالعه با استفاده از این دو شاخص گیاهی، مناطق پوشیده از گیاه و آب استخراج شده و از نقشه نهایی فرسایش خاک ماسک می‌شوند.

۳- نتایج و بحث

در این بخش ارائه نتایج و بحث در مورد هر یک از نتایج تواما انجام خواهد گرفت. برای درک بهتر، نتایج تحقیق و بحث در چندین زیربخش ارائه شده است.

۳-۱- نتایج پردازش تداخل‌سنجی راداری

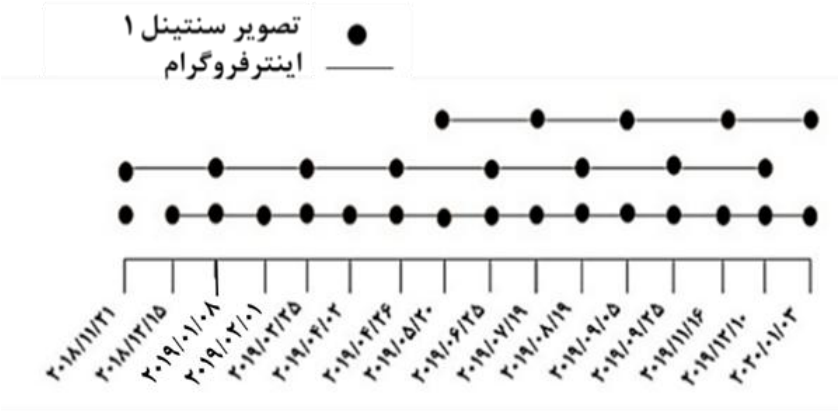
در این مطالعه از ۱۶ تصویر ماهواره سنتینل-۱ در یک بازه زمانی تقریبا ۱۴ ماهه بین نوامبر ۲۰۱۸ تا ژانویه ۲۰۲۰ استفاده شد. با در نظر گرفتن خط مبنای مکانی و زمانی ۲۵ تداخل‌نما طبق شکل (۶) بصورت زنجیره‌وار بین این تصاویر ایجاد گردید. جزئیات تداخل‌نماهای تشکیل‌شده شامل طول خط مبنای مکانی (بر حسب متر) و خط مبنای زمانی (بر حسب روز) در جدول (۱) نمایش داده شده است.

شمای کلی تصاویر همدوسی مربوط به ۲۵ تداخل‌نما تشکیل‌شده در این مطالعه در شکل (۷) نمایش داده شده است. دامنه مقادیر همدوسی راداری بین صفر (عدم همدوسی) و یک (همدوسی کامل) متغیر است. در مناطق ناپایدار و متغیر سطحی مانند پوشش گیاهی، آب، مناطقی که در حال ساخت و ساز یا تخریب هستند و مناطق با نرخ فرسایش قابل‌توجه، به دلیل تغییر در ماهیت برخورد سیگنال رادار با سطح، مقادیر پایین همدوسی مشاهده می‌شوند [۲۸]. بالعکس در مناطق پایدار سطحی مانند بناهای ساخته‌شده، آسفالت و برخی سازندهای زمین‌شناسی مقاوم در برابر فرسایش (مانند دیاباز، بازالت متراکم، دلریت، متاکوارتزیت و کوارتزیت و ...) [۴۰] مقدار همدوسی راداری بالا و نزدیک به مقدار ۱ است [۲۸].

با توجه به الگوی مکانی-زمانی مختلف تصاویر همدوسی در شکل(۷) پرواضح است که مقادیر همدوسی در یک پیکسل (موقعیت) ثابت در تداخل‌نما-های مختلف متغیر است. این مهم ناشی از دو علت عمده اعم از عدم همبستگی زمانی و مکانی فاز تداخل-سنجی راداری است؛ که این عدم همبستگی در تداخل-نماهای مختلف مقادیر متفاوتی دارد. پیکسل‌هایی که در همه تصاویر همدوسی مقادیر بالایی دارند، مناطق پایدار هستند که در طی زمان کمترین تغییرات سطح را داشته اند. در ادامه نشان داده شده است که این مناطق عمدتا منطبق بر مناطق ساخته شده (شهری) و نیز سازندهای زمین‌شناسی مقاوم در برابر فرسایش خاک هستند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]



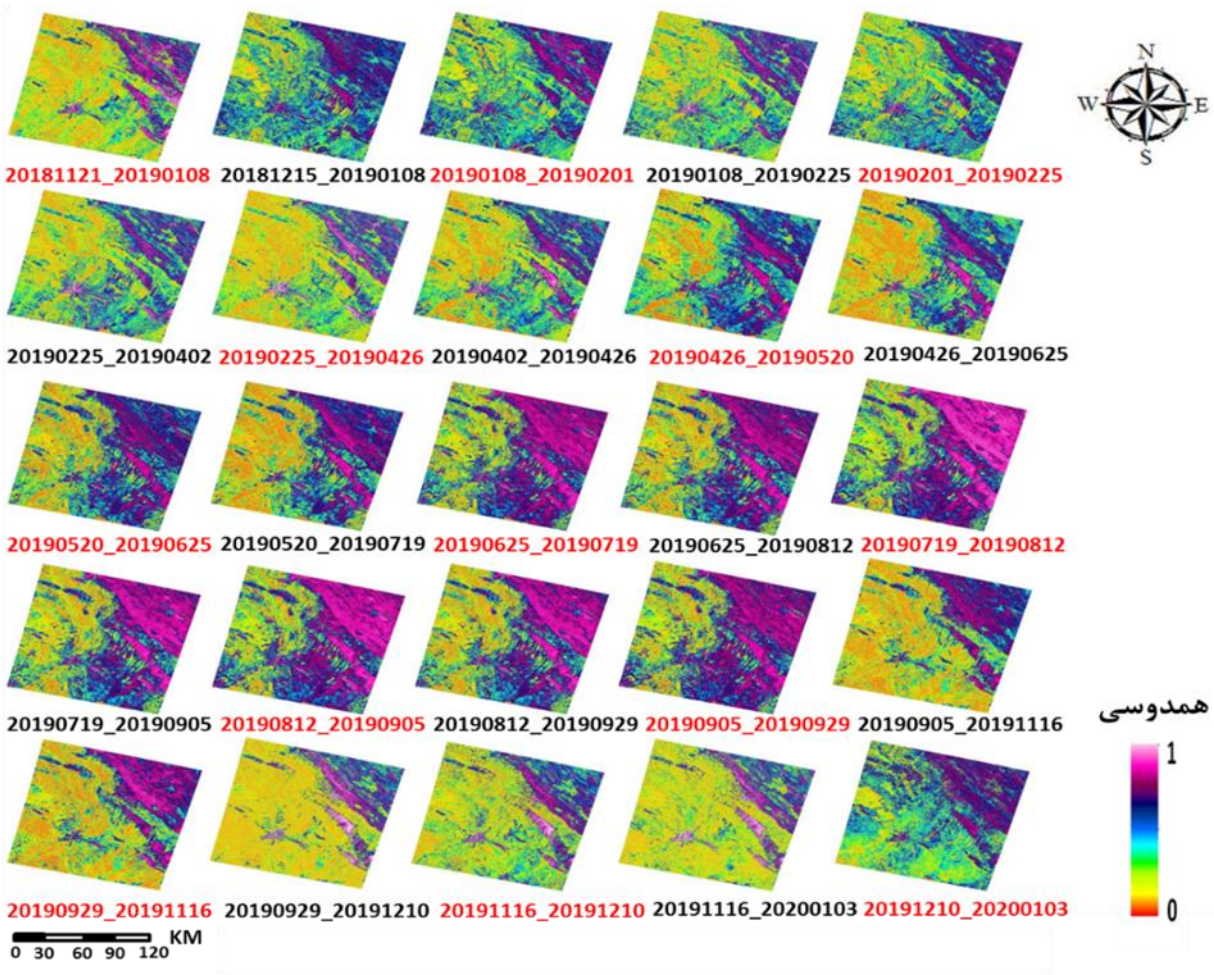
شکل۶: سری زمانی تصاویر ماهواره سنتینل-۱ و شبکه تداخل‌نماهای تشکیل‌شده از آنها

جدول۱: مشخصات شبکه تداخل‌نماهای پردازش‌شده

خط مبنای زمانی (روز)	خط مبنای مکانی (متر)	تصویر پیرو	تصویر پایه	شماره زوج		خط مبنای زمانی (روز)	خط مبنای مکانی (متر)	تصویر پیرو	تصویر پایه	شماره زوج
۴۸	-۱۰۲٫۱۳	۱۲٫۰۸٫۲۰۱۹	۲۵٫۰۶٫۲۰۱۹	**۱۴**		۴۸	۱۶٫۵۲	۰۸٫۰۱٫۲۰۱۹	۲۱٫۱۱٫۲۰۱۸	**۰۱**
۲۴	۱۷٫۶۶	۱۲٫۰۸٫۲۰۱۹	۱۹٫۰۷٫۲۰۱۹	**۱۵**		۲۴	-۱۰۹٫۳۸	۰۸٫۰۱٫۲۰۱۹	۱۵٫۱۲٫۲۰۱۸	**۰۲**
۴۸	-۴۵٫۷۹	۰۵٫۰۹٫۲۰۱۹	۱۹٫۰۷٫۲۰۱۹	**۱۶**		۲۴	-۲۶٫۲۴	۰۱٫۰۲٫۲۰۱۹	۰۸٫۰۱٫۲۰۱۹	**۰۳**
۲۴	-۵۹٫۹۷	۰۵٫۰۹٫۲۰۱۹	۱۲٫۰۸٫۲۰۱۹	**۱۷**		۴۸	-۲۱٫۰۷	۲۵٫۰۲٫۲۰۱۹	۰۸٫۰۱٫۲۰۱۹	**۰۴**
۴۸	-۶۱٫۱۵	۲۹٫۰۹٫۲۰۱۹	۱۲٫۰۸٫۲۰۱۹	**۱۸**		۲۴	۴۴٫۵۵	۲۵٫۰۲٫۲۰۱۹	۰۱٫۰۲٫۲۰۱۹	**۰۵**
۲۴	-۱۲۱٫۱۲	۲۹٫۰۹٫۲۰۱۹	۰۵٫۰۹٫۲۰۱۹	**۱۹**		۳۶	-۴۴٫۶۵	۰۲٫۰۴٫۲۰۱۹	۲۵٫۰۲٫۲۰۱۹	**۰۶**
۷۲	-۹۳٫۵۱	۱۶٫۱۱٫۲۰۱۹	۰۵٫۰۹٫۲۰۱۹	**۲۰**		۶۰	-۱۷٫۲۱	۲۶٫۰۴٫۲۰۱۹	۲۵٫۰۲٫۲۰۱۹	**۰۷**
۴۸	-۳۰٫۱۱	۱۶٫۱۱٫۲۰۱۹	۲۹٫۰۹٫۲۰۱۹	**۲۱**		۲۴	-۲۷٫۴۴	۲۶٫۰۴٫۲۰۱۹	۰۲٫۰۴٫۲۰۱۹	**۰۸**
۷۲	-۷۷٫۸۴	۱۰٫۱۲٫۲۰۱۹	۲۹٫۰۹٫۲۰۱۹	**۲۲**		۲۴	-۳۸٫۸۸	۲۰٫۰۵٫۲۰۱۹	۲۶٫۰۴٫۲۰۱۹	**۰۹**
۲۴	-۵۰٫۶۲	۱۰٫۱۲٫۲۰۱۹	۱۶٫۱۱٫۲۰۱۹	**۲۳**		۶۰	-۹۰٫۰۲	۲۵٫۰۶٫۲۰۱۹	۲۶٫۰۴٫۲۰۱۹	**۱۰**
۴۸	-۹۶٫۰۹	۰۳٫۰۱٫۲۰۲۰	۱۶٫۱۱٫۲۰۱۹	**۲۴**		۳۶	-۱۳۴٫۶۴	۲۵٫۰۶٫۲۰۱۹	۲۰٫۰۵٫۲۰۱۹	**۱۱**
۲۴	-۴۷٫۱۰	۰۳٫۰۱٫۲۰۲۰	۱۰٫۱۲٫۲۰۱۹	**۲۵**		۶۰	-۴۸٫۰۴	۱۹٫۰۷٫۲۰۱۹	۲۰٫۰۵٫۲۰۱۹	**۱۲**
						۲۴	-۸۶٫۷۰	۱۹٫۰۷٫۲۰۱۹	۲۵٫۰۶٫۲۰۱۹	**۱۳**

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

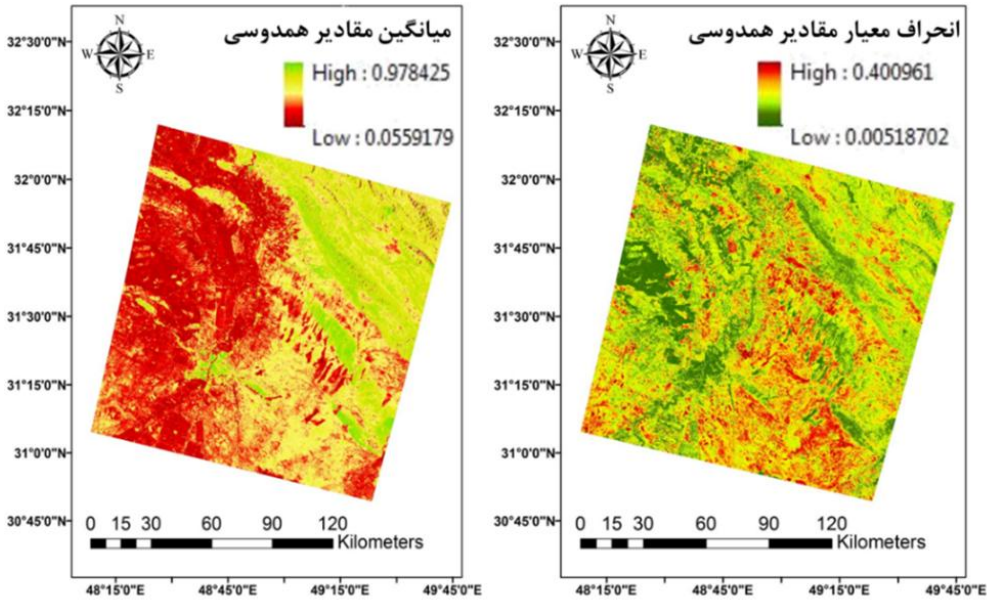


شکل۷: شمای کلی تصاویر همدوسی مربوط به تداخل‌نماهای تشکیل شده در این مطالعه

به منظور درک بهتر از مقادیر همدوسی تداخل‌سنجی در مناطق مختلف و مقدار تغییر آنها، میانگین و انحراف معیار تصاویر همدوسی در شکل (۸) نمایش داده شده است. بر این اساس مناطق با میانگین بالا و انحراف معیار پایین بیانگر مناطق همیشه پایدار مانند مناطق شهری یا سازندهای زمین شناسی مقاوم بدون پوشش گیاهی هستند. از طرف دیگر مناطق با میانگین پایین و انحراف معیار پایین مناطق همواره ناپایدار مانند آب، پوشش گیاهی ثابت (و نه موقت مانند مناطق کشت و زرع) و یا مناطق با نرخ فرسایش بسیار شدید (همواره در حال فرسایش شدید) هستند. مناطق با انحراف معیار بالا مناطقی هستند که پوشش سطحی آن به گونه‌ای است که در برخی بازه‌های زمانی مقادیر همدوسی تداخل‌سنجی بالا و در برخی بازه‌های زمانی همدوسی تداخل‌سنجی پایینی دارند. در مورد آب شاهد این هستیم که میانگین مقادیر همدوسی پایین و انحراف معیار نیز پایین است، بدین معنی که مناطق آب همیشه مقادیر کم همدوسی را به خود اختصاص می‌دهند و در طول زمان همدوسی آن همیشه پایین است و تغییر چندانی ندارد. در مورد گیاه ، میانگین همدوسی در این مناطق پایین است و انحراف معیار همدوسی عمدتا پایین تا متوسط و ندرتا مقادیر بالاتر را به خود اختصاص می‌دهد و این دلیل آن است که در مورد گیاهان مختلف چرخه رشد و نمو متفاوت است و در بازه‌های بین تصاویر رادار ممکن است برخی گیاهان نسبت به برخی دیگر تغییرات کمتری داشته باشند. به

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

طور کلی میانگین و انحراف معیار همدوسی برای آب کمتر از گیاه است، بدین معنی که مناطق آب مقادیر همدوسی همگن‌تر و پایین‌تری را نسبت به گیاه به خود اختصاص می‌دهند.



شکل۸: میانگین و انحراف معیار ۲۵ تصویر همدوسی تداخل‌سنجی راداری تولیدشده

۳-۲- استخراج مناطق پوشش گیاهی و آب

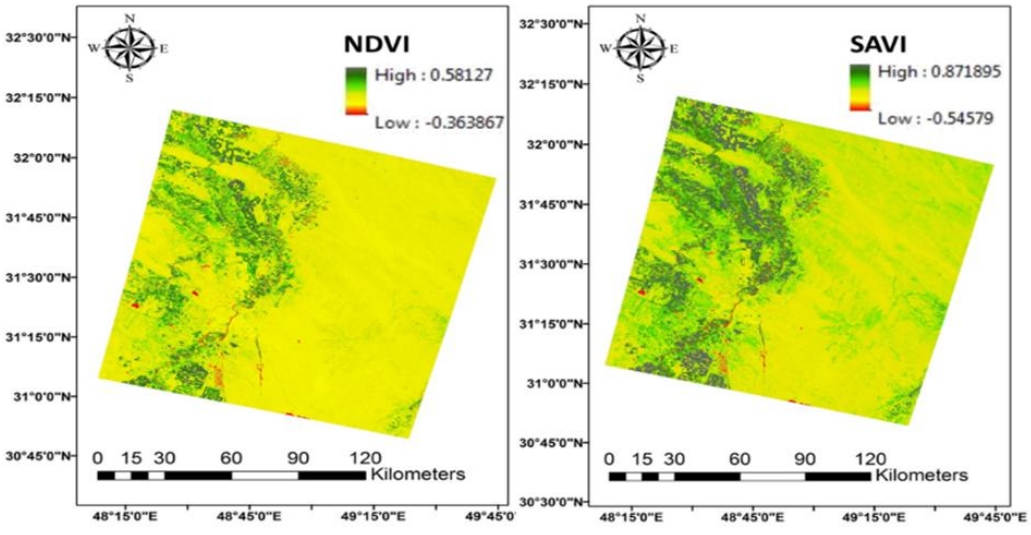
پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی (به عنوان مثال کشاورزی) دو عامل مهم کاهش همبستگی زمانی سیگنال‌های رادار در *InSAR* و کاهش مقدار همدوسی هستند. پوشش گیاهی متراکم می‌تواند باعث از بین رفتن همدوسی به صورت سریع یا در عرض چند روز شود [۲۸]. همچنین فعالیت‌های انسانی مانند شخم-زنی، ساخت و ساز بنا و حفاری معدن سنگ می‌تواند منجر به از بین رفتن ناگهانی همدوسی در یک دوره زمانی خاص و به صورت غیر منطقی از روند طبیعی شود [۲۸]. پوشش گیاهی نقش مهمی در مقدار فرسایش خاک دارد؛ بدین صورت که هرچه پوشش گیاهی متراکم‌تر باشد، مقدار فرسایش خاک کاهش می‌یابد[۵۰]، از طرفی وجود پوشش گیاهی یکی از عوامل کاهش همدوسی تداخل‌سنجی راداری است، پس در این تحقیق مناطق با پوشش گیاهی استخراج و از سایر مناطق تفکیک شد تا به اشتباه جزو مناطق فرسایش شدید قرار نگیرد.

مانند مناطق پوشش گیاهی، مناطق آب نیز مانند مناطق با فرسایش شدید به دلیل پویایی زیاد، دارای مقادیر همدوسی پایین در تداخل‌سنجی راداری هستند. بنابراین اگر این مناطق از مناطق فرسایش ماسک نشوند، ممکن است به اشتباه به عنوان مناطق با فرسایش شدید شناسایی شوند. برای آشکارسازی و سپس ماسک کردن مناطق آب و پوشش گیاهی از شاخص‌های *NDVI* و *SAVI* استفاده شد. بدین صورت که چون آب در تصاویر ماهواره‌ای مقادیر منفی *NDVI* را به خود اختصاص می‌دهد، با جداسازی و ماسک کردن پیکسل‌هایی با *NDVI* منفی، مناطق با پوشش زمینی آب از نقشه متمایز می‌شود. سپس برای جداسازی مناطق با پوشش گیاهی از هر دو شاخص-گیاهی *NDVI* و *SAVI* استفاده شد. بدین ترتیب که با اطلاعاتی که از منطقه در دسترس بود و نیز با بررسی تصویر گوگل ارث که نقشه‌های پوشش گیاهی *NDVI* و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

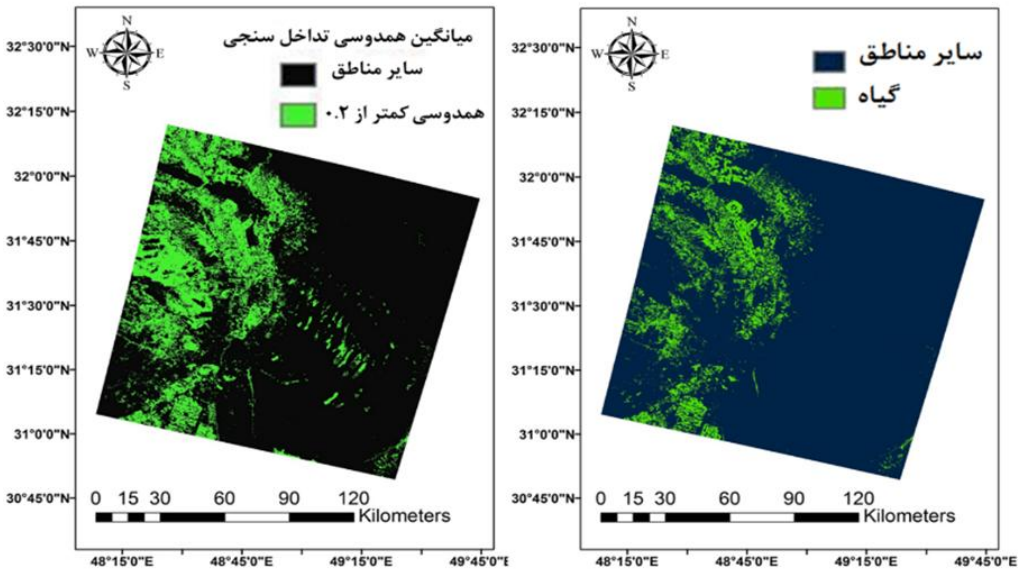
SAVI بر آن همپوشان شده بود، مناطق گیاه شناسایی شده و با تعیین حدآستانه حداقلی برای پوشش گیاهی در نقشه‌های *NDVI* و *SAVI* و سپس اعمال حد آستانه بر این دو نقشه، مناطق با پوشش گیاهی استخراج و ماسک گردید. استفاده از دو شاخص گیاهی باعث افزایش صحت مناطق استخراج شده گیاه می‌شود زیرا مقایسه تصاویر *Google Earth* با مناطق گیاه حاصل از حدآستانه‌گذاری هر یک از شاخص‌ها نشان داد که استفاده از دو شاخص به جای یک شاخص صحت استخراج مناطق با پوشش گیاهی را افزایش می‌دهد، زیرا این دو شاخص مستقلا محاسبه و بررسی شده است. مناطق با *NDVI* بالاتر از ۰/۲ یا *SAVI* بالاتر از ۰/۳۲ به عنوان گیاه درنظر گرفته شد. این حد آستانه‌ها از طریق همپوشانی شاخص‌ها بر تصویر هم تاریخ *Google Earth* و سپس بررسی مقادیر این شاخص‌ها در مناطق گیاه و غیرگیاه تعیین گردید. طی چندین مرحله و در هر مرحله پس از انتخاب اولیه حد آستانه برای هر یک از دو شاخص، مناطق گیاه با حد آستانه گذاری استخراج و با تصویر هم تاریخ *Google Earth* در مناطق گیاه و غیر گیاه صحت سنجی شد؛ در نهایت حد آستانه با بالاترین صحت بصری برای هر یک از شاخص‌ها انتخاب گردید.

در شکل‌های (۹) و (۱۰) نقشه دو شاخص پوشش گیاهی *NDVI* و *SAVI* و نیز مناطق گیاه استخراج شده از این دو شاخص نمایش داده شده است. برای درک بهتر ارتباط مناطق گیاه و کاهش همدوسی تداخل-سنجی، نقشه مقادیر همدوسی کمتر از ۰/۲ در میانگین تصاویر همدوسی در کنار نقشه مناطق گیاه نمایش داده شده است. به عبارت دیگر مناطق گیاه عمدتا منجر به همدوسی پایین (کمتر از ۰/۲) شده است که نباید با همدوسی پایین به علت فرسایش خاک اشتباه گرفته شود. همانطور که در شکل (۱۰)، از مقایسه مناطق استخراج شده گیاه و مناطق با همدوسی کمتر از ۰/۲ پیداست، مناطق با همدوسی کمتر از ۰/۲ شامل مناطق گیاه و گسترده‌تر از آن است؛ بررسی تصاویر چند زمانه گوگل ارث در بازه تصاویر تداخل‌سنجی نشان می‌دهد که این مناطق مازاد عمدتا متعلق به آب، پوشش گیاهی غرقابی (زمین‌های زراعی آبیاری شده با پوشش گیاهی کم) و قسمتی نیز متعلق به زمین لخت با فرسایش بسیار شدید است.



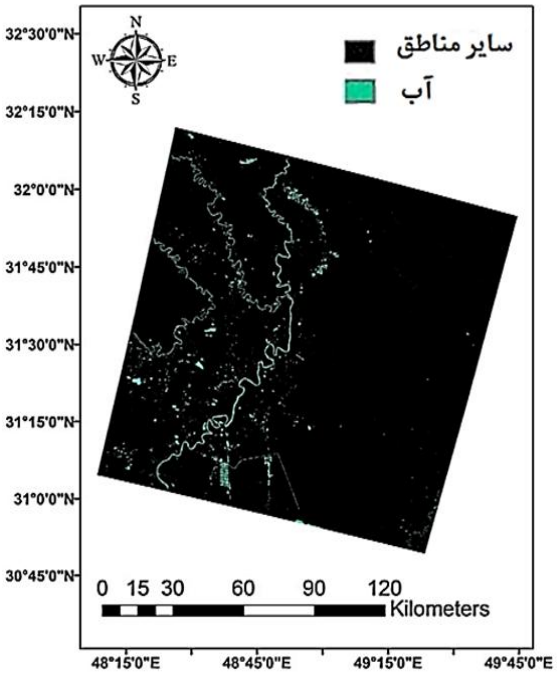
شکل۹: نقشه دو شاخص پوشش گیاهی *NDVI* و *SAVI* در منطقه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]



شکل۱۰: مناطق استخراج شده به عنوان گیاه و همبستگی بالای آن با مقادیر کوچک (کمتر از ۰/۲) در تصویر میانگین همدوسی (مناطق با همدوسی کمتر از ۰/۲ شامل مناطق گیاه و اندکی گسترده‌تر از آن می‌باشد).

برای استخراج آب از مقادیر *NDVI* استفاده شد؛ بدین صورت که چون در تصویر منطقه برف، یخ و ابر نداریم و بنابراین مقادیر منفی *NDVI* متعلق به آب است [۵۱]. مقادیر منفی *NDVI* استخراج شده و به عنوان مناطق با پوشش آب از تصویر خروجی ماسک گردید. در شکل (۱۱) مناطق استخراج شده آب را می‌بینیم. این مناطق مانند مناطق پوشش گیاهی با وجود شباهت به مناطق فرسایش شدید از جهت همدوسی پایین تداخل-سنجی، نباید جزء مناطق فرسایش شدید قرار گیرد زیرا از دست رفتن همدوسی در این مناطق به علت ناپایداری سطح گیاه و آب است. در قسمت جنوبی شکل (۱۱) چینش منظمی از قطعات زمین که در کنار هم قرار گرفته (شبیه قطعات زمین زراعی) را می‌بینیم که به عنوان آب شناسایی شده است؛ با اطلاعات میدانی که از منطقه مورد مطالعه داریم و نیز از آنچه در تصاویر گوگل ارث پیداست، این پدیده مناطق آبی مربوط به یک استخر پرورش ماهی فعال می‌باشد. با رجوع به شکل (۸) در می‌یابیم محدوده آبی استخر پرورش ماهی دارای میانگین همدوسی پایین و نیز انحراف معیار پایین می‌باشد.



شکل۱۱: مناطق استخراج شده به عنوان پوشش آب

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

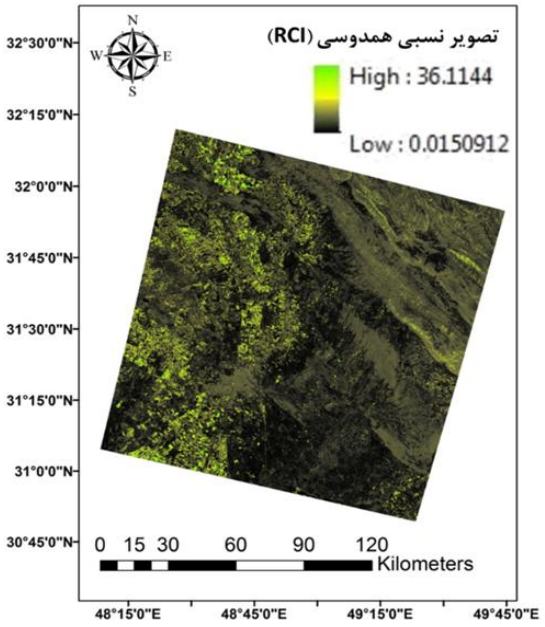
۳-۳- تشکیل تصویر ترکیب رنگی کاذب

به منظور آشکارسازی مناطق با فرسایش شدید باید عدم همبستگی مکانی و زمانی را در تصاویر همدوسی تفکیک کرد؛ زیرا عدم همبستگی مکانی ناشی از توپوگرافی و خط‌مبنای مکانی (اختلاف منظر سنجنده در دو برداشت متوالی) است. در واقع پدیده‌هایی مانند فرسایش خاک که در طول زمان باعث تغییر برهم‌کنش سطح و سیگنال رادار می‌شوند، تاثیری بر عدم همبستگی مکانی ندارند [۲۸]. فرسایش خاک باعث عدم همبستگی زمانی می‌شود و پدیده‌های فرسایش در تصاویر همدوسی به عنوان ویژگی‌هایی که با افزایش جدایی زمانی به تدریج همدوسی را از دست می‌دهند، ظاهر می‌شوند [۲۸]. بنابراین باید به طریقی مناطق با عدم همبستگی زمانی را از مناطق با عدم همبستگی مکانی جدا کرد. برای این کار (بیشینه کردن اثر عدم همبستگی زمانی و کمینه کردن اثر همبستگی مکانی) می‌توان یک تصویر نسبی همدوسی[1] (RCI) تشکیل داد، بدین صورت که تصویر همدوسی با بزرگ‌ترین خط‌مبنای زمانی و کمترین خط‌مبنای مکانی تقسیم بر تصویر همدوسی با بزرگ‌ترین خط‌مبنای مکانی و کوچک‌ترین خط‌مبنای زمانی می‌شود. روش تشکیل تصویر نسبی همدوسی (RCI) در رابطه (۵) آورده شده است [۲۸].

$$RCI = \frac{coh(TB_{\max}, SB_{\min})}{coh(SB_{\max}, TB_{\min})} \qquad \text{رابطه(۵)}$$

در رابطه (۵) منظور از $coh(TB_{\max}, SB_{\min})$ تصویر همدوسی با بزرگ‌ترین خط‌مبنای زمانی[2] و کوچک‌ترین خط‌مبنای مکانی[3] و منظور از ترم مخرج $coh(SB_{\max}, TB_{\min})$ تصویر همدوسی با بزرگ‌ترین خط‌مبنای مکانی و کوچک‌ترین خط‌مبنای زمانی است. در تصویر حاصل از RCI اثر همبستگی زمانی بیشینه و اثر همبستگی مکانی کمینه می‌شود [۲۸].

برای انتخاب ساده‌تر این دو تصویر همدوسی، می‌توان برای هر تصویر همدوسی اندازه خط‌مبنای زمانی را بر اندازه خط‌مبنای مکانی تقسیم کرد. تصویر همدوسی با بزرگ‌ترین مقدار حاصل در صورت رابطه RCI و تصویر همدوسی با کوچک‌ترین مقدار حاصل در مخرج رابطه RCI قرار می‌گیرد. در این مطالعه با بررسی اندازه خط-مبناهای زمانی و مکانی مشخص شد که $coh(TB_{\max}, SB_{\min})$ برابر با تصویر همدوسی $20181121_20190108$ و $coh(SB_{\max}, TB_{\min})$ برابر با تصویر همدوسی $20190905_20190929$ است. در شکل (۱۲) تصویر نسبی همدوسی حاصل را ملاحظه می‌کنید.



شکل۱۲: تصویر نسبی همدوسی (*RCI*)

در تصویر همدوسی نسبی (RCI) ، تن‌های روشن (مقادیر بالا) عمدتا مربوط به عدم همبستگی مکانی بوده و تن‌های تیره (مقادیر پایین) مربوط به عدم همبستگی زمانی مانند پدیده فرسایش شدید است؛ همچنین تن‌های خاکستری (مقادیر متوسط) به مناطق پایدار (مانند مناطق ساخته شده ، آسفالت جاده‌ها و رخساره‌های مقاوم زمین‌شناسی) مربوط است.

[1] *Relative Coherence Image*
[2] *Temporal Baseline*
[3] *Spatial Baseline*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

برای تفکیک بهتر مناطق فرسایش شدید از سایر پدیده‌ها، تصویر رنگ کاذبی را تشکیل می‌دهیم که به جای رنگ قرمز $coh(SB_{max}, TB_{min})$، به جای رنگ سبز $coh(TB_{max}, SB_{min})$ و به جای رنگ آبی تصویر RCI قرار می‌دهیم. نام تصویر رنگی حاصل را ترکیب رنگی کاذب(FCC) می‌گذاریم. خروجی حاصل از این ترکیب رنگی کاذب (FCC) و همان تصویر که مناطق آب و گیاه و شهری(ساخته شده) در آن ماسک شده است، در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. در شکل(۱۳)، مناطق با فرسایش شدید به رنگ قرمز آشکار می‌شود؛ مناطق پایدار به رنگ زرد، مناطق با عدم همبستگی مکانی (همدوسی مکانی پایین) به رنگ فیروزه‌ای، مناطق گیاه_آب (توامان در مناطق زراعی غرقابی) به رنگ آبی روشن و تیره نمایان می‌شود. در ترکیب گیاه_آب هرچه درصد آب بیشتر باشد رنگ آبی روشن‌تر و هرچه درصد گیاه بیشتر باشد، رنگ آبی تیره‌تر می‌باشد. علت اینکه برخی مناطق گیاه که در آب است جزء مناطق گیاه یا آب قرار نگرفت این است که مقدار $NDVI$ در این مناطق بین صفر تا ۰٫۲ (بین مقادیر $NDVI$ آب و گیاه) و نیز شاخص $SAVI$ در این مناطق بین صفر و ۰٫۳۲ (بین مقادیر $SAVI$ آب و گیاه) بوده است. روی تصویر ترکیب رنگ کاذب، مناطق پوشش گیاهی با رنگ سبز، پوشش آب به رنگ صورتی پررنگ و منطقه شهری به رنگ صورتی کمرنگ مشخص و ماسک شده است.

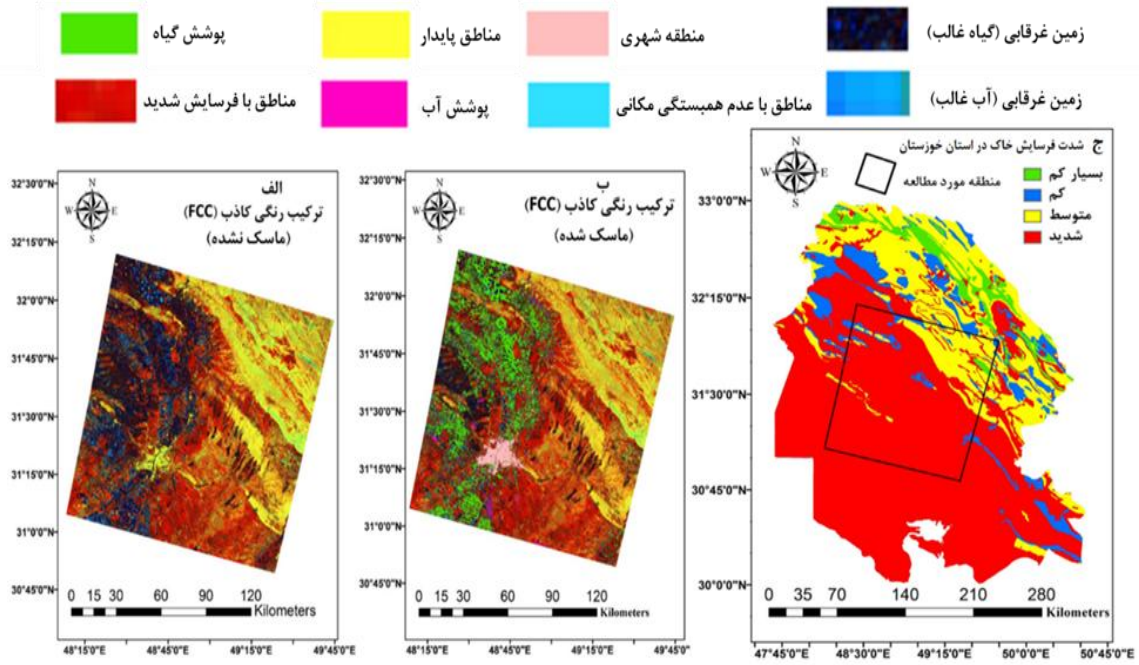
برای بررسی دقیق‌تر نقشه خروجی به منطقه پوشیده از آب استخر پرورش ماهی در جنوب منطقه مطالعاتی می‌پردازیم. در شکل (۱۴) محدوده استخر پرورش ماهی را در الف) تصویر FCC ب) تصویر FCC ماسک شده با آب و گیاه و ج) تصویر حدآستانه گذاری شده $NDVI$ (مقادیر بیشتر از ۰ به عنوان خشکی به رنگ سیاه و مقادیر کمتر از ۰ به عنوان پوشش آب به رنگ آبی) قابل مشاهده است. همانطور که در شکل (۱۴) پیداست، مناطق با آب عمیق (حوضچه‌های پرورش ماهی) به عنوان پوشش آب شناسایی و ماسک شده است (به رنگ صورتی پررنگ در قسمت ب) ؛ همچنین زمین‌های کشاورزی اطراف که پوشش گیاهی پرتراکم داشته‌اند به عنوان پوشش گیاهی شناسایی و ماسک شده‌اند (به رنگ سبز در قسمت ب)؛ اما مناطق کشاورزی با پوشش گیاهی کمتر که غرقاب بوده‌اند جزء هیچ یک از پوشش آب و گیاه قرار نگرفته و ماسک نشده‌اند، این مناطق به رنگ آبی کمرنگ و پررنگ در تصویر FCC ماسک شده باقی مانده است. هرچه گیاه در این مناطق غالب‌تر باشد رنگ آبی تیره‌تر و هرچه آب غالب‌تر باشد رنگ آبی این مناطق روشن‌تر می‌باشد. به عبارتی دیگر مناطق پوشش گیاهی، آب و ترکیب آنها در تصویر FCC به رنگ آبی (روشن و تیره) نمایان می‌شود که بوسیله حدآستانه گذاری روی تصویر $NDVI$ و $SAVI$ می‌توان مناطق گیاه و آب را استخراج و ماسک کرد؛ مناطق غرقابی زراعی نیز که مقادیر آنها در $NDVI$ و $SAVI$ بین مقادیر آب و گیاه است، به صورت ماسک نشده و به رنگ آبی در تصویر FCC ماسک نشده باقی می‌ماند.

۳-۴- تحلیل زمین‌شناسی

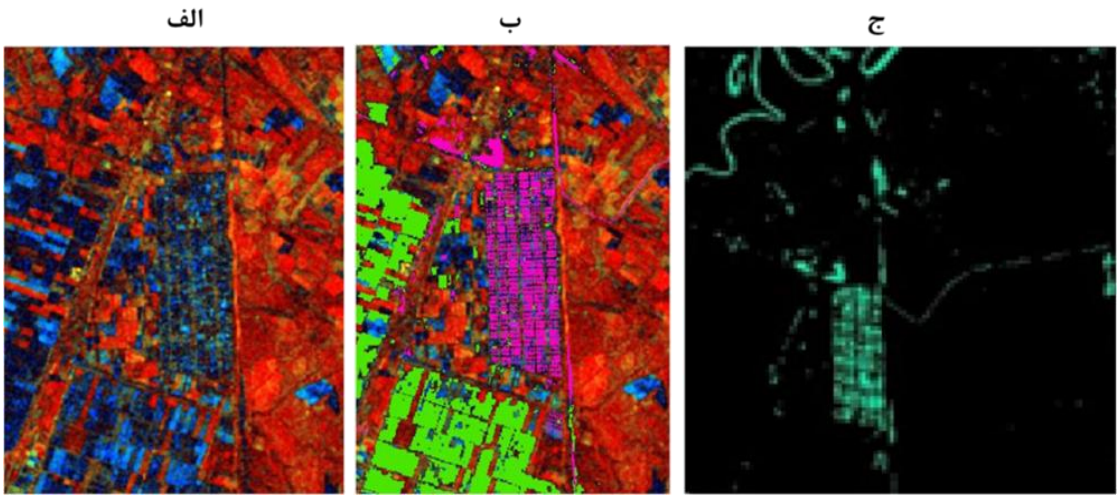
برای بررسی ارتباط سایر مناطق پایدار طبیعی (یعنی مناطق پایدار بجز آسفالت جاده‌ها و منطقه شهری) با سازندها و رخساره‌های زمین شناسی، در شکل (۱۵) نقشه زمین‌شناسی در کنار نقشه ترکیب رنگی کاذب (FCC) قرار گرفته است. همانطور که در شکل (۱۵) نیز مشخص است، همبستگی بالایی بین الگوی موجود در تصویر FCC و طبقات زمین‌شناسی (سازندهای زمین شناسی) وجود دارد؛ مخصوصا در مناطق مقاوم (به رنگ زرد در تصویر FCC) این همبستگی بسیار بالا و واضح است. از آنجا که جنس خاک و زمین بستر عامل بسیار مهمی در نرخ فرسایش خاک است [۲]، این همبستگی بالا بین طبقات زمین‌شناسی و مناطق با نرخ‌های متفاوت فرسایش امری کاملا توجیه‌پذیر می‌باشد.

[1] *False Color Composite*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]



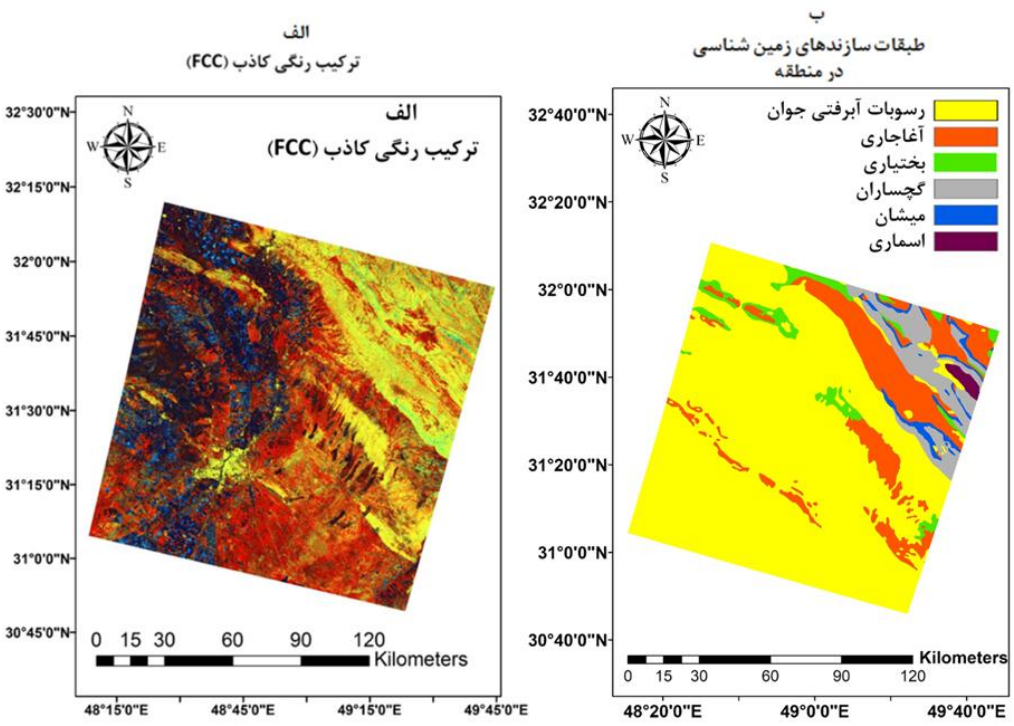
شکل۱۳: ترکیب رنگی کاذب (*FCC*) برای آشکارسازی منطق با فرسایش شدید (الف) بدون ماسک گیاه و آب و منطقه شهری (ب) با ماسک گیاه و آب و منطقه شهری (ج) نقشه معیار شدت فرسایش خاک در استان خوزستان



شکل۱۴: محدوده استخر پرورش ماهی در جنوب منطقه مطالعاتی در(الف) تصویر *FCC* ماسک نشده ، (ب) *FCC* ماسک شده (آب به رنگ صورتی پررنگ و گیاه به رنگ سبز) و (ج) تصویر حدآستانه گذاری شده *NDVI* برای استخراج پوشش آب

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]



شکل۱۵: (الف) تصویر *FCC* ماسک نشده و (ب) طبقات زمین‌شناسی در منطقه مطالعاتی

از آنجا که همبستگی بسیار بالایی بین الگوهای موجود در تصویر *FCC* و طبقات زمین‌شناسی مشاهده می‌شود در ادامه ارتباط نوع و جنس خاک در سازندهای مختلف زمین‌شناسی و مقاوت مختلف آنها در برابر فرسایش که باعث این همبستگی می‌شود را بررسی می‌کنیم. در شکل (۱۵) طبقات مربوط به سازندهای زمین‌شناسی با نام علمی آنها و در رنگ‌های متفاوت متمایز شده است. با توجه به شکل (۱۵) اطلاعات مربوط به جنس سازندها در منطقه مطالعاتی و مقاومت آنها در برابر فرسایش به صورت زیر می‌باشد. در نقشه زمین شناسی:

۱- مناطق زرد رنگ (رسوبات آبرفتی جوان) در مقابل فرسایش بسیار حساس هستند. مناطق قرمز آشکار شده در تصویر *FCC* به عنوان مناطق با فرسایش شدید عمدتا در این سازند قرار دارند که حساسیت بسیار بالا به فرسایش خاک دارد.

۲- مناطق نارنجی رنگ (آغاجاری) در منطقه دارای مقاومت بسیار زیاد در برابر فرسایش خاک است؛ به همین دلیل همانطور که در شکل (۱۵) پیداست مناطق پایدار (زرد رنگ در تصویر *FCC*) طبیعی (و نه منطقه شهری) عمدتا منطبق بر این سازند است.

۳- مناطق سبز (بختیاری) در برابر فرسایش مقاوم است. همانطور که در شکل (۱۵) پیداست، این سازند نه به اندازه سازند آغاجاری ، ولی در تصویر *FCC* جزء مناطق تقریبا پایدار (عمدتا زرد رنگ تا نارنجی) قرار گرفته است.

۴- مناطق خاکستری (گچساران) حساسیت نسبتا زیادی به فرسایش دارند. مطابق با تصویر *FCC* در شکل (۱۵) کاملا مشهود است که با وجود اینکه این سازند در میان سازندهای مقاوم آغاجاری و بختیاری واقع شده است، دارای رنگ نارنجی و گاهی قرمز و ندرتا زرد می‌باشد و این به معنی غالب بودن فرسایش شدید در این سازند است که با جنس سازند کاملا سازگاری دارد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

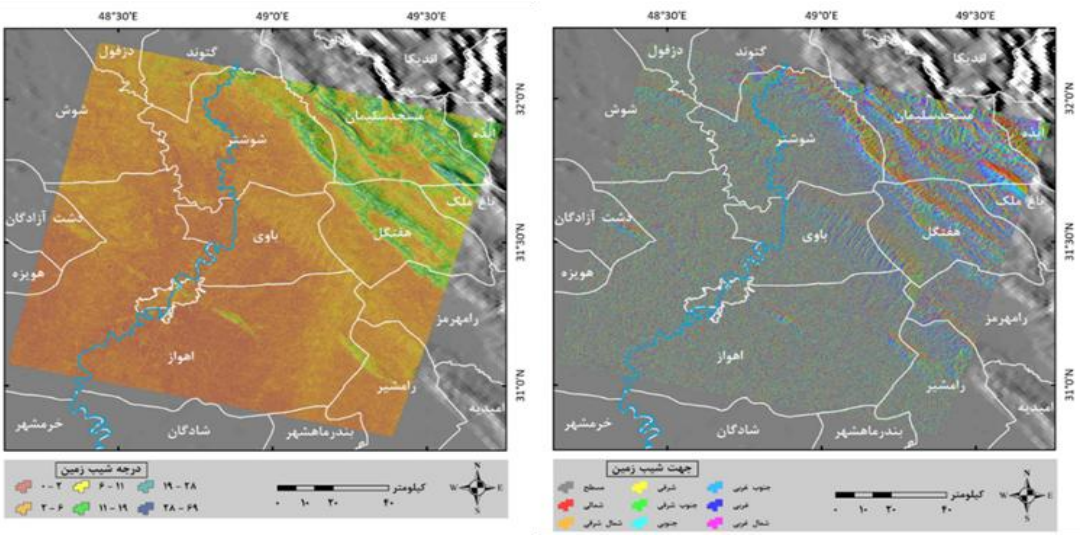
۵- در مناطق آبی (میشان) بخش آهکی نسبت به فرسایش حساسیت کمی دارد و بخش مارنی دارای حساسیت متوسط نسبت به فرسایش است. در شکل(۱۵) این سازند در تصویر *FCC* عمدتا نارنجی مایل به زرد دارد که نشان می‌دهد فرسایش در این سازند متوسط مایل به کم می‌باشد. آنچه در این سازند مورد توجه است قرارگیری رگه‌های فیروزه‌ای رنگ روی این سازند در تصویر *FCC* است که در ادامه بحث خواهیم دید که ظهور این رگه‌های فیروزه ای در تصویر *FCC* به دلیل عدم همبستگی مکانی و توپوگرافی (شیب) می‌باشد.

۶- حساسیت مناطق بنفش (اسماری) در نقشه زمین-شناسی نسبت به فرسایش متوسط است. با توجه به شکل (۱۵)، این سازند در تصویر *FCC* دارای رنگ نارنجی (نرخ متوسط فرسایش) است که کاملا سازگار با فرسایش متوسط در این سازند می‌باشد. رنگ نارنجی در تصویر *FCC* که بین دو رنگ زرد (فرسایش بسیار کم) و قرمز (فرسایش شدید) است، نشانگر فرسایش با شدت متوسط می‌باشد.

بنابرآنچه در این قسمت بحث شد و آنچه در شکل(۱۵) قابل برداشت و مقایسه است، مناطق استخراج شده به عنوان فرسایش شدید، مناطق مقاوم در برابر فرسایش و مناطق با فرسایش متوسط (در تصویر *FCC* به رنگ نارنجی که حاصل تلفیق دو رنگ قرمز و زرد است) کاملا با جنس سازندهای زمین‌شناسی واقع در آن موقعیت‌ها سازگاری دارد که این نیز خود تاییدی بر نتایج این تحقیق است.

۳-۵- تحلیل عدم همبستگی مکانی

آخرین الگویی که در تصویر *FCC* وجود دارد و در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد، رگه‌های فیروزه‌ای رنگ در قسمت شمال شرقی منطقه مطالعاتی است. بطورکلی همبستگی مکانی در *InSAR* تابعی از شیب محلی زمین و طول خط مبنای مکانی است [۲۸]. بر همین اساس، رگه‌های فیروزه‌ای مشهود در تصویر *FCC* ناشی از ناهمبستگی مکانی است و علت همدوسی بسیار پایین نیز به خصوصیات توپوگرافی (شیب و جهت شیب) برمی‌گردد. برای بررسی رابطه این الگوهای فیروزه‌ای با توپوگرافی در شکل (۱۶) نقشه شیب و جهت شیب نمایش داده شده است. لایه-های شیب و جهت شیب در نرم‌افزار *Arcmap* و بر اساس *DEM* با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر محاسبه گردید.



شکل۱۶: نقشه درجه شیب و جهت شیب در منطقه مطالعاتی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

با مقایسه شکل (۱۶) با شکل (۱۳) و بررسی شیب و جهت شیب در محل رگه‌های فیروزه‌ای، کاملا مشهود است که مناطق با رگه‌های فیروزه ای در تصویر *FCC*، منطبق بر مناطق پرشیب (بالای ۲۰ درجه) و در جهت-های خاصی از شیب (عمدتا شرقی و شمال شرقی و ندرتا جنوب شرقی) می‌باشد؛ بنابراین الگوهای فیروزه-ای در شیب‌های تند و در جهت شیب عمدتا شرقی رخ داده‌است. این کاهش همدوسی به علت عدم همبستگی مکانی در شیب‌های تند و عمدتا شرقی به علت تاثیر توام هندسه خاص تصویر برداری سنجنده رادار و توپوگرافی بر همبستگی سیگنال رادار در تصاویر مختلف (همدوسی مکانی) می‌باشد [۲۸، ۴۸، ۵۴، ۵۵ و ۵۶].

در نهایت با مقایسه رقومی مناطق استخراج شده به عنوان فرسایش شدید از تصویر *FCC* با نقشه فرسایش استان خوزستان (نقشه معیار)، این نتیجه حاصل شد که ۸۶٫۱۲ درصد از مناطق فرسایش شدید بر کلاس-های فرسایش شدید (مناطقی با نرخ فرسایش بیش از ۹ تن بر هکتار در سال) از نقشه معیار منطبق است که مبین صحت قابل قبول نتایج این تحقیق می‌باشد. بر خلاف مدل‌های تخمین فرسایش خاک که فرسایش را به صورت پیش‌بینی و از روی پارامترهای مرتبط با آن مدل می‌کنند، روش پیشنهادی در این مطالعه مبتنی بر فرسایش واقعی صورت گرفته در منطقه (آشکارسازی مستقیم مناطق فرسایش‌یافته از واقعیت زمین) است. بنابراین عدم قطعیت نتایج این روش نسبت به مدل‌های تجربی بسیار کمتر است، زیرا در مدل‌های پیش‌بینی فرسایش خاک عدم قطعیت در محاسبه هر یک از عوامل مدلسازی باعث عدم قطعیت در نتایج مدل می-شود [۲]. علاوه بر آن، تعداد و تنوع داده‌های به کار رفته در این روش بسیار کمتر از مدل‌های فیزیکی و تجربی فرسایش خاک است بنابراین در همه مناطق که با کمبود داده‌های لازم برای مدل‌های فیزیکی و تجربی مواجه هستند، روش پیشنهادی به سادگی می‌تواند پیاده سازی شود. از سوی دیگر صحت بالای نتایج این مطالعه حاکی از قابلیت بالای روش پیشنهادی در آشکارسازی مناطق با فرسایش شدید خاک است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از یک رویکرد سنجش‌ازدوری مبتنی بر تجزیه و تحلیل تصاویر همدوسی حاصل از پیاده‌سازی تداخل‌سنجی راداری بر روی ۱۶ تصویر ماهواره سنتینل-۱ در یک بازه زمانی ۱۴ ماهه برای استخراج مناطق با فرسایش شدید در قسمتی از استان خوزستان استفاده شد. همچنین با استفاده از شاخص‌های گیاهی مستخرج از داده‌های اپتیکی ماهواره لندست ۸ شامل *NDVI* و *SAVI*، مناطق گیاه و آب جهت ماسک شدن از نقشه فرسایش استخراج شدند. با تشکیل یک ترکیب رنگی کاذب (*FCC*) از تصاویر همدوسی دارای شرایطی خاص، نقشه خروجی تولید شد؛ که در آن مناطق فرسایش شدید، مناطق پایدار، مناطق آب یا پوشش گیاهی آشکارسازی شدند. مناطق با پوشش آب، گیاه و شهری از نقشه حاصل ماسک و مناطق باقی‌مانده به عنوان کلاس فرسایش شدید درنظر گرفته شدند.

با بررسی همبستگی مکانی نقشه سازندهای زمین-شناسی و نقشه خروجی، صحت مکانی نتایج تایید گردید زیرا مناطق استخراج شده فرسایش شدید و مناطق پایدار با سازندهای موجود در این مناطق سازگاری کامل داشتند. از طرفی بررسی نتایج در موقعیت‌های مختلف منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد که مناطق استخراج شده به عنوان پدیده‌های مختلف (شامل آب، گیاه، ساخته شده، مناطق پایدار، مناطق با فرسایش شدید) با واقعیت زمینی سازگاری دارند. در نهایت برای اعتبار سنجی نهایی نتایج تحقیق، مناطق با فرسایش شدید (مناطق با طیف قرمز در تصویر *FCC*) استخراج و انطباق آن بر کلاس فرسایش شدید نقشه معیار فرسایش خاک استان (نقشه شکل (۲)) بررسی گردید. انطباق ۸۶٫۱۲ ٪ مناطق استخراج شده فرسایش شدید با کلاس‌های فرسایش شدید (بیش از ۹ تن بر هکتار) در نقشه معیار فرسایش استان، حاکی از صحت قابل قبول نتایج این تحقیق است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

با درنظرگرفتن عدم اجرای تحقیقات مشابهی با الگوریتم پیشنهادی و داده‌های به کار رفته در این مطالعه، صحت بالای نتایج در مقایسه با نقشه‌های موجود فرسایش خاک (بیش از ۸۶٪ مطابقت در مناطق فرسایش شدید) و همچنین به علت تعداد و تنوع کمتر داده‌های به کار رفته در این روش نسبت به مدل‌های رایج فیزیکی و تجربی پیش‌بینی فرسایش خاک و نیز حصول نقشه مناطق فرسایش شدید از واقعیت زمین (و نه پیش‌بینی و مدلسازی به وسیله عوامل موثر)، الگوریتم پیشنهادی قابلیت لازم را در مطالعه فرسایش خاک داشته و بهبود آن می‌تواند به نتایج با صحت بسیار بالا در مطالعه فرسایش خاک بیانجامد.

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که فرسایش سریع با استفاده از تصاویر چند زمانه همدوسی تداخل-سنجی راداری می‌تواند به طور موثری تشخیص داده شود. بنابراین با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان علل فرسایش سریع خاک را با کارایی بیشتری بررسی نمود. بر این اساس سازمان‌های ذی‌ربط می‌توانند نسبت به اتخاذ تدابیر مدیریتی حفاظت خاک به منظور جلوگیری از تشدید فرسایش شدید در مناطق آسیب-پذیر اقدام به عمل آورند.

مراجع

[1] *M. Mojarad Ashnabad, A. Rouhani. "Soil erosion; Challenges, costs and benefits of protecting it". people and Environment, Volume 8, Number 3, pp. 47-57. 2010.*

[2] *S. Ebrahimzadeh, M. Motagh, V. Mahboub,F.M. Harijani, "An improved RUSLE/SDR model for the evaluation of soil erosion". Environmental Earth Sciences, 77(12), 1-17, 2018.*

[3] *P.I.A. Kinnell, B. Yu," CLIGEN as a weather generator for predicting rainfall erosion using USLE based modelling systems", CATENA, Volume 194, 104745, ISSN 0341-8162. 2020.*

[4] *T. Yue, Y. Xie, Sh. Yin, B. Yu, Ch. Miao, W. Wang, "Effect of time resolution of rainfall measurements on the erosivity factor in the USLE in China", International Soil and Water Conservation Research, Volume 8, Issue 4, Pages 373-382, ISSN 2095-6339. 2020.*

[5] *T.G Pham, J. Degener, M. Kappas," Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam", International Soil and Water Conservation Research, Volume 6, Issue 2, Pages 99-110, ISSN 2095-6339. 2018.*

[6] *J. Li, M. Xiong, R. Sun, L. Che, "Temporal variability of global potential water erosion based on an improved USLE model", International Soil and Water Conservation Research. 2023.*

[7] *H. Lamane, L. Mouhir, R. Moussadek, B. Baghdad, H. Briak, A. Zouahri, A. El Bilali, " Statistical analysis of a systematic review on soil water erosion assessment in Morocco",.EGU23. Volume 31, Issue 2, Pages 155-165, ISSN 0380-1330. 2023.*

[8] *J. Li, M. Xiong, R. Sun, L. Che, "Temporal variability of global potential water erosion based on an improved USLE model", International Soil and Water Conservation Research. Volume 71, Pages 544-550, ISSN 1470-160X. 2023.*

[9] *M.A. Nearing, J.R. Simanton, L.D. Norton, S.J. Bulygin, J. Stone, "Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. Earth Surface Processes and Landforms", The Journal of the British Geomorphological Research Group, Volume 24, Issue 8, Pages 677-686. 1999.*

[10] *M. Hajigholizadeh, A.M. Melesse, H.R. Fuentes, "Erosion and sediment transport modelling in shallow waters: A review on approaches, models and applications ", International journal of environmental research and public health, Volume 15, Issue 3, Pages 518. 2018.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

2020.

[19] R. Hao, X. Huang, , Z. Cai, H. B. Xiao, J. Wang, Z. H. Shi, "Incorporating sediment connectivity index into MUSLE model to explore soil erosion and sediment yield relationships at event scale", Journal of Hydrology, 614, 128579. 2022.

[20] O. Aygün, C. Kinnard, S. Campeau, "Responses of soil erosion to warming and wetting in a cold Canadian agricultural catchment", Catena, Volume 201, Article 105184. 2021.

[21] S. Lee, G. Lee, D. Yang, Y. Choi, K. J. Lim, W. S. Jang, " Occurrence and behavior analysis of soil erosion by applying coefficient and exponent of MUSLE runoff factor depending on land use", Journal of Wetlands Research, Volume 21(spc), Pages 98-106. 2019.

[22] L.A. James, D.G. Watson, W.F. Hansen, " Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA", Catena, Volume 71, Issue 1, Pages 132-144. 2007.

[23] M. El Haj Tahir, A. Kääb, C.Y. Xu, "Identification and mapping of soil erosion areas in the Blue Nile, Eastern Sudan using multispectral ASTER and MODIS satellite data and the SRTM elevation model", Hydrology and earth system sciences, Volume 14, Issue 7, Pages 1167-1178. 2010.

[24] S. Kumar, S. Gupta, "Geospatial approach in mapping soil erodibility using CartoDEM–A case study in hilly watershed of Lower Himalayan Range", Journal of Earth System Science, Volume 125, Pages 1463-1472. 2016.

[25] M. Tayebi, M.H.Tayebi, A. Sameni, "Soil erosion risk assessment using GIS and CORINE model: a case study from western Shiraz, Iran", Archives of Agronomy and Soil Science, Volume 63, Issue 8, Pages 1163-1175. 2017.

[26] M.K. Hazarika, K. Honda, "Estimation of soil erosion using remote sensing and GIS:

[11] J. Arnold, "SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ", Grassland. Soil and Water Research Laboratory, USDA, Agricultural Research Service. 1994.

[12] J.R. Williams, C.A. Jones, P.T. Dyke, "The EPIC model and its application. In Proc", Int. Symp. on minimum data sets for agrotechnology transfer, Pages 111-121, India: Patancheru. 1984.

[13] J.M. Laflen, L.J. Lane, G.R. Foster, "WEPP: A new generation of erosion prediction technology", Journal of soil and water conservation, Volume 46, Issue 1, Pages.34-38. 1991.

[14] Y.S. Kebede, N.T. Endalamaw, B.G. Sinshaw, H.B. Atinkut, "Modeling soil erosion using RUSLE and GIS at watershed level in the upper beles, Ethiopia", Environmental Challenges, Volume 2, 100009, ISSN 2667-0100. 2021.

[15] S. Mohammed, K. Alsafadi, S. Talukdar, S. Kiwan, S. Hennawi, O. Alshihabi, M. Sharaf, E. Harsanyie, "Estimation of soil erosion risk in southern part of Syria by using RUSLE integrating geo informatics approach", Remote Sensing Applications: Society and Environment, Volume 20, 100375, ISSN 2352-9385. 2020.

[16] Z .Taheri Babadi, B. Moteshaffeh, SH. Roshaan "Assessment The Impact of Land use Changes on Soil Erosion using GIS and Remote Sensing Based on The RUSLE Model (Case Study: Behbahan County) ", Journal of Arid Biome. 2023.

[17] Md. Zafor, K. Moumita, and M. Ramakrishna "Evaluating the soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS: A case study of Dwarakeshwar-Rupnarayan basin, West Bengal, India ", In AIP Conference Proceedings, vol. 2713, no. 1. AIP Publishing. 2023.

[18] D. Gwapedza, N. Nyamela, D.A. Hughes, A.R. Slaughter, S.K. Mantel, B.V.D Waal, "Prediction of sediment yield of the Inxu River catchment (South Africa) using the MUSLE", International Soil and Water Conservation Research, ISSN 2095-6339.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

Its valuation and economic implications on agricultural production", Sustaining the global farm, Volume 1, Pages 1090-1093. 2001.

[27] D.D. Alexakis, D.G. Hadjimitsis, A. Agapiou, "Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of "Yialias" in Cyprus", Atmospheric Research, Volume 131, Pages 108-124. 2013.

[28] J.G. Liu, H. Lee, T. Pearson, "Detection of rapid erosion in SE Spain using ERS SAR interferometric coherence imagery", Proc. SPIE 3868, Remote Sensing for Earth Science, Ocean, and Sea Ice Applications, 1999.

[29] M.J Marques, A. Alvarez, P. Carral, B. Sastre, R. Bienes, "The use of remote sensing to detect the consequences of erosion in gypsiferous soils", International Soil and Water Conservation Research, Volume 8, Issue 4, Pages 383-392, ISSN 2095-6339, 2020.

[30] A. El Jazouli, A. Barakat, R. Khellouk, J. Rais, M. El Baghdadi, "Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco)", Remote Sensing Applications: Society and Environment, Volume 13, Pages 361-374, ISSN 2352-9385. 2019.

[31] D. Bargiel, S. Herrmann, J. Jadczyszyn, "Using high-resolution radar images to determine vegetation cover for soil erosion assessments", Journal of Environmental Management, Volume 124, 82-90, ISSN 0301-4797, 2013.

[32] M. Sharifikia, F. Rabbani. "Source routing and detection of dust storm in the Salt Lake basin of Qom in Iran". Arabian Journal of Geosciences, 13(14), 1-17. 2020.

[33]A. Khademalrasoul and H. Amerikhah, "Investigation of Geomorphometric Parameters to Simplify Water Erosion Modelling (a Case Study: Emamzadeh Watershed, Iran)," Polish Journal of Soil Science, 55(1), 1–18, 2022.

[34] M. FITRZYK. "Determining soil erosion by water using high resolution remotely-sensed data". IAHS-AISH publication, 319-326. 2012.

[35] G. I. Tternicht, J. A. Zinck. "Evaluating the information content of JERS-1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53(3), 143-153. 1998.

[36] J. R. Kim, C. W. Lin, S. Y. Lin. "The use of InSAR phase coherence analyses for the monitoring of eolian erosion. Remote Sensing", 13(12), 2240. 2021.

[37] N. Sar, A. Khan, S. Chatterjee, A. Das, B. S. Mipun. "RETRACTION: Coupling of analytical hierarchy process and frequency ratio based spatial prediction of soil erosion susceptibility in Keleghai river basin, India". 2016.

[38] J. G. Liu, H. Lee, T. Pearson. "Detection of rapid erosion in SE Spain using ERS SAR interferometric coherence imagery". In Remote Sensing for Earth Science, Ocean, and Sea Ice Applications, 3868, 525-535. 1999.

[39] M. Soleimani, S. Attarchi, N. Mahmoodi-Vanolia, F. Bakhshizadeh, H. Ahmadi, "Evaluation of the capability of Sentinel-1 radar interference coherence data to prepare a land cover map". Spatial Information Technology Engineering. 9 (3), 107-85. 2021.

[40] H. Ahmadi, Applied Geomorphology (Water Erosion), University of Tehran Press. 2008.

[41] R.F. Hanssen. "Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)". Springer Science & Business Media. 2001.

[42] M. Simons, P.A. Rosen. "Interferometric synthetic aperture radar geodesy". California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA. 2007.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

[43] Z. Hajeb, Z. Mousavi, Z. Masoumi, A. Rezaei, "Study of subsidence in Qom plain using radar interferometry and hydrogeological characteristics of the aquifer". Journal of Earth Sciences (114) 29. 1398.

[44] R. Papi, S. Attarchi, M. Soleimani. "Time series analysis of land subsidence in the west of Tehran province (Shahriyar plain) and its relationship with groundwater abstraction by radar interference technique". Geography and Environmental Stability, 10 (1), 128-109. 2016.

[45] H. Mehrabi, S. Zaferanieh. "Estimation of Earthquake Damage Through Radar Interferometry (Case study: Bam 2003 Earthquake)". jgit; 7 (4) :157-173. 2020.

[46] S. Babaei, Z. Mousavi, M. Roustaei, N. Ahmadi, "The effect of spatial and temporal base length on the coherence of Sentinel-1A images", Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering, 10: 3. 2015.

[47] A. Mestre-Quereda, J.M. Lopez-Sanchez, F. Vicente-Guijalba, A.W. Jacob, M.E. Engdahl, "Time-Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence and Backscatter for Crop-Type Mapping". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, 4070-4084, 2020.

[48] K. Alavi Panah, "Principles of modern remote sensing and interpretation of satellite images and aerial photographs" University of Tehran Press. 2009.

[49] F. Firoozi, T. Tavosi; P. Mahmoudi. "Sensitivity of NDVI and EVI vegetation indices to droughts and wetlands in arid and semi-arid regions; a case study: Sistan plain of Iran". Geographical Information Quarterly. Volume 28. No. 110. 2019.

[50] Alexandridis, k. Thomas K., et al. "The Effects of Seasonality in Estimating the C - Factor of Soil Erosion Studies." Land Degradation & Development. 26.6. 596-603. 2015.

[51] M. Shariat Jafari, J. Ghayomian, H.R. Peyrovan." Intrinsic Sensitivity of Geological Formations to Weathering and Erosion in Basins Located in the Sedimentary-Structural Zone of Central Iran". 709-722. 2006.

[52] S. Ebrahimzadeh, S.K Alavipanah,V. Mahboub. " Improving the C factor estimation in the RUSLE soil erosion model using gray wolf algorithm". Scientific Quarterly Journal of Geospatial Information Research(geosir). 1(1). 59-82. 2022.

[53] J.R. Jensen, "Introductory digital image processing: a remote sensing perspective (No. Ed. 4)", Prentice-Hall Inc, 2015.

[54] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca. "Permanent scatterers in SAR interferometry". IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 39, no. 1: 8-20. 2001.

[55] H. Lee, J.G. Liu, "Analysis of topographic decorrelation in SAR interferometry using ratio coherence imagery". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(2), 223-232, 2001.

[56] Y. Shi, G. Liu, W. Wang, Q. Liu, R. Zhang, H. Jia, "Assessing the Glacier Boundaries in the Qinghai-Tibetan Plateau of China by Multi-Temporal Coherence Estimation with Sentinel-1A InSAR". Remote Sensing, 11(4), 392, 2019.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.11, No.3, Autumn 2023

Research Paper

Detection of areas with severely eroded soils using Sentinel-1 interferometric SAR coherence (Study area: Khuzestan province)

Somayeh Ebrahimzadeh [1], Masoud Soleimani [1], Sara Atarchi [2 *], Mehdi Saadat Novin [1], Seyed Hassan Shabanian [1]

1- PhD student in remote sensing and Geographic Information System, faculty of geography, University of Tehran.
2- Associate professor, Department of remote rensing and geographic information system, faculty of geography, University of Tehran

Abstract

Soil erosion has devastating and irreversible consequences for human life. Hence, supportive measures are necessary to reduce and control soil erosion in the most affected areas. Achieving this goal requires detecting severely soil-eroded areas (SSEA), because it is not possible to implement the supportive measures throughout the area. The detection of SSEA using field-based methods is very difficult, costly, and faces various limitations. To deal with it, taking advantage of the remote sensing data capabilities has widely received attention today. The interaction of the radar signal with the surface roughness changes can be evaluated through Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) coherence changes. In fact, soil erosion causes the movement of soil particles and decreases the InSAR coherence. Accordingly, the aim of this study is to detect SSEA in Khuzestan province as one of the areas with high soil erosion rates using a processed time series of Sentinel-1 InSAR coherence from 2018 to 2020. The map of SSEA was obtained by detecting and excluding the other effective factors causing InSAR coherence reduction, such as water, vegetation, and topography. The validation of the results based on comparison with the valid soil erosion map of the study area revealed that more than 86% of SSEA detected by the proposed method is consistent with the ground reality. Moreover, the compatibility of SSEA with the genus and resistance of the different geological formations in the region, approves the validity of the results.

Key words: *Soil Erosion, Remote Sensing, InSAR, Coherence, Sentinel-1.*

Correspondence Address*: Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geograph, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel*: +982161113268*
Email: *satarchi@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61186/jgit.11.3.59]