

تحلیل مکانی خطر وقوع زمین لغزش در مناطق جنوبی شهرستان سراب با تاکید بر زمین لرزه ترکمانچای سال ۱۳۹۸

حمید گنجائیان^۱، علی میرآخوری^۲، مهدی صفری نامیوندی^{۳*}، تکتیم یزدانی^۴

۱- دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (Email: h.ganjaeian@ut.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (Email: ali.mirakhorli@ut.ac.ir)

۳- دکتری ژئومورفولوژی، عضو هیئت علمی دانشگاه علوم انتظامی، تهران، ایران (Email: m.safarinamevandi@khu.ac.ir)

۴- دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (Email: t.yazdani92@gmail.com)

*نویسنده مسئول، (Email: m.safarinamevandi@khu.ac.ir)

چکیده

زمین لغزش یکی از مهم ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در نواحی کوهستانی ایران به شمار می رود که عوامل محیطی و زمین ساختی متعددی در وقوع آن نقش دارند. شناخت دقیق مناطق مستعد و بررسی تأثیر عوامل تحریک کننده ای مانند زمین لرزه، گامی اساسی در مدیریت زمین لغزش محسوب می شود. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در مناطق جنوبی شهرستان سراب با در نظر گرفته تأثیرات زمین لرزه ترکمانچای پرداخته شده است. در این پژوهش، به منظور شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش و بررسی تأثیر زمین لرزه ترکمانچای (۱۳۹۸)، از ترکیبی از داده های سنجش از دور و مدل های تصمیم گیری چندمعیاره استفاده شده است. داده های اصلی شامل تصاویر راداری Sentinel-1، نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۱۲/۵ متر (ALOS PALSAR) بوده اند. تحلیل تداخل سنجی راداری با استفاده از نرم افزار GMT،

مدل‌سازی OWA در محیط TerrSet، تحلیل ANP در نرم‌افزار SuperDecision و پردازش مکانی لایه‌های اطلاعاتی در ArcGIS انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مناطق جنوبی شهرستان سراب، به‌ویژه نواحی میانی، به‌دلیل ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مانند شیب تند و فرسایش رودخانه‌ای، دارای پتانسیل بالایی برای وقوع زمین‌لغزش هستند. از سوی دیگر، عوامل تکتونیکی، به‌ویژه زمین‌لرزه ترکمانچای، باعث جابجایی‌هایی در حدود ۱۹- تا ۸۳- میلی‌متر در این محدوده شده‌اند که نقش مهمی در بی‌ثباتی دامنه‌ها ایفا می‌کنند. تحلیل هم‌پوشانی نقشه‌های جابجایی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نشان داد که بیش‌ترین جابجایی‌ها در مناطقی با پتانسیل زیاد و بسیار زیاد رخ داده است. این هم‌پوشانی نشان‌دهنده تعامل مؤثر میان عوامل زمین‌ساختی و محیطی در تشدید خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

کلمات کلیدی: زمین‌لغزش، تداخل سنجی راداری، ANP، OWA، شهرستان سراب

۱-مقدمه

امروزه مخاطرات طبیعی به‌عنوان یکی از عوامل تهدیدکننده نواحی سکونتگاهی محسوب می‌شود (نگهبان و همکاران، ۱۳۹۸). مخاطرات طبیعی دارای انواع مختلفی هستند و در بسیاری از مواقع، فعالیت‌های انسانی از جمله توسعه ساخت و سازها و تغییرات کاربری اراضی، سبب تشدید احتمال وقوع آن‌ها شده است (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸؛ سالاری و همکاران، ۱۳۹۹). از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی، زمین‌لغزش است. زمین‌لغزش یکی از مخاطرات طبیعی جدی و ویرانگر است که در بسیاری از نقاط جهان به‌ویژه در مناطق کوهستانی و شیب‌دار رخ می‌دهد (Cruden & Varnes, 1996., Xu et al, 2025). این پدیده زمانی روی می‌دهد که توده‌ای از خاک، سنگ یا رسوبات سطحی تحت تأثیر عواملی مانند بارندگی شدید، زلزله، فعالیت‌های انسانی یا فرسایش، تعادل خود را از دست داده و به سمت پایین شیب حرکت می‌کند (Liu et al, 2025., Kumthekar & Patil, 2025). زمین‌لغزش‌ها نه‌تنها باعث تخریب زیرساخت‌های حیاتی مانند جاده‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو می‌شوند، بلکه تهدیدی مستقیم برای جان انسان‌ها و محیط‌زیست محسوب می‌گردند (Highland & Bobrowsky, 2008., Alcantara-Ayala, 2025).

بررسی زمین‌لغزش‌ها از جنبه‌های مختلف زمین‌شناسی، ژئومورفولوژیکی و مهندسی، از اهمیت بالایی برخوردار است (Yang et al, 2023). درک صحیح از مکانیزم وقوع این پدیده، نقش مهمی در پیش‌بینی، پیشگیری و مدیریت بحران‌های ناشی از آن ایفا می‌کند. عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شامل شیب زمین، نوع و ترکیب زمین‌مواد، میزان رطوبت، پوشش گیاهی و تأثیرات انسانی نظیر ساخت‌وسازهای بی‌رویه می‌باشد (Xu et al, 2025).

2013). همچنین در کنار موارد ذکر شده، عوامل تکتونیکی از جمله زمین‌لرزه‌ها نیز نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش دارند (گنجائیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ نگهبان و همکاران، ۱۴۰۰). در طی سال‌های اخیر، با توسعه روزافزون سکونتگاه‌های انسانی در نواحی پرخطر، ضرورت ارزیابی دقیق خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر بیش از پیش احساس می‌شود (Ayalew et al, 2005., Guzzetti et al, 2005., Tanyas et al, 2019., Wang et al, 2024).

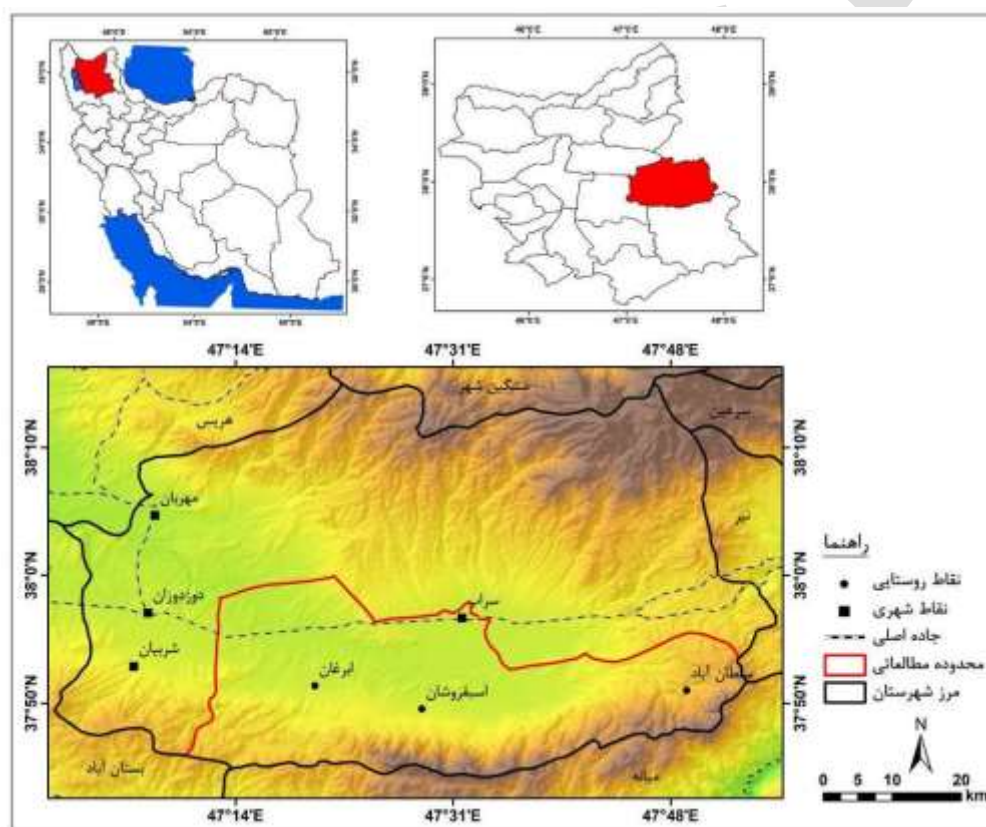
موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا مناطق مختلفی از جمله نواحی شمال غربی آن، مستعد وقوع زمین‌لغزش باشد. این مناطق از جمله مناطق جنوبی شهرستان سراب، به دلیل وضعیت توپوگرافی و زمین‌شناسی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارد. نکته قابل توجه در این منطقه، نقش عوامل تکتونیکی و تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها در تشدید حرکات دامنه‌ای از جمله زمین‌لغزش است. درواقع، این منطقه در طی سال‌های اخیر با زمین‌لرزه‌های زیادی مواجه شده است (گنجائیان و همکاران، ۱۴۰۳) که این زمین‌لرزه‌ها می‌توانند تأثیر زیادی بر ناپایداری دامنه‌ها و آماده حرکت کردن آن‌ها داشته باشد. از جمله زمین‌لرزه‌های مهم این منطقه، زمین‌لرزه ترکمانچای در سال ۱۳۹۸ بوده است که علاوه بر خسارات جانی و مالی، باعث تغییرات محسوس و نامحسوس محیطی طبیعی و خصوصاً دامنه‌های منطقه شده است. با توجه به اینکه تغییرات صورت گرفته در دامنه‌های منطقه می‌تواند باعث ناپایداری و آماده حرکت کردن آن‌ها شود، بنابراین در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مناطق جنوبی شهرستان سراب با در نظر گرفته تأثیرات زمین‌لرزه ترکمانچای پرداخته شده است.

در ارتباط با موضوع مورد مطالعه تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در بعضی از تحقیقات، به بررسی تأثیرات زمین‌لرزه‌ها، ساختار گسل‌ها و فعالیت‌های تکتونیکی بر وقوع زمین‌لغزش پرداخته شده است (Xu et al, 2016., Vaz & Zezere, 2018., Gordo et al, 2019., Shao et al, 2019., Liu et al, 2021., Zhang et al, 2024). در بعضی از تحقیقات، به بررسی نقش پارامترهای محیطی در وقوع زمین‌لغزش‌های پرداخته شده است (Banerjee et al, 2018., Ganjaeian et al, 2021., Nazari bayatiani et al, 2022., Boussof et al, 2023., Beigh & Bukhari, 2024., Jafari & Khodaei, 2024., Pireh & Ganjaeian, 2024., Yousefi et al, 2025., Gilanipoor et al, 2025., Esfandiari Darabad et al, 2025). در بعضی از تحقیقات نیز به بررسی اثرات زمین‌لغزش‌ها پرداخته شده است (Westen et al, 2008., Antronico et al, Bianchini et al, 2015., Guillard-Goncalves et al, 2016., Boroghani et al, 2018., 2015., Cardoso et al, 2023., Chen et al, 2023., Ganjaeian et al, 2024., Sadeghi & Javan, 2025). در راستای تحقیقات پیشین، هدف از این تحقیق، شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های جنوبی شهرستان سراب با در نظر گرفتن تأثیرات زمین‌لرزه ترکمانچای در سال ۱۳۹۸ است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر شامل مناطق جنوبی شهرستان سراب شامل ۳ دهستان ابرغان، ملایعقوب و حومه است. شهرستان سراب از نظر تقسیمات سیاسی در استان آذربایجان شرقی قرار دارد و از اطراف به شهرستان‌های هریس، بستان‌آباد و میانه (استان آذربایجان شرقی)، مشگین‌شهر، سرعین و نیر (استان اردبیل) منتهی می‌شود (شکل ۱). محدوده مطالعاتی از نظر تقسیمات مورفوتکتونیک در واحد شمال غرب و در نزدیکی گسل تبریز قرار دارد و دارای گسل‌های فرعی دیگر از جمله گسل بزغوش و تسوج است (نگهبان و همکاران، ۱۳۹۹). از نظر ژئومورفولوژی نیمه شمالی منطقه را واحد دشت با ارتفاع حدود ۱۷۰۰ متر و نیمه جنوبی آن را واحد کوهستان با ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر دربرگرفته است. همچنین از نظر اقلیمی نیز به دلیل عرض جغرافیایی و ارتفاع زیاد، جزء مناطق سردسیر کشور محسوب می‌شود.



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش تحقیق

در این تحقیق، از داده‌ها و ابزارهای متنوع به منظور شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش و ارزیابی اثرات زمین‌لرزه ترکمانچای استفاده شده است. داده‌های اصلی شامل تصاویر راداری Sentinel-1، لایه رقومی نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۱۲/۵ متر (ALOS PALSAR) می‌باشند. ابزارهای مورد

استفاده شامل نرم‌افزار GMT برای تحلیل تداخل‌سنجی راداری، TerrSet برای اجرای مدل OWA، SuperDecisions برای پیاده‌سازی مدل ANP و ArcGIS برای استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی و تولید نقشه‌های نهایی بوده است. در ادامه به تشریح مراحل تحقیق پرداخته شده است:

مرحله اول (ارزیابی اثرات زمین‌لرزه ترکمانچای): برای ارزیابی اثرات زمین‌لرزه ترکمانچای که در سال ۱۳۹۸ رخ داد، از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) استفاده شد. این روش یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین تکنیک‌ها برای پایش جابجایی‌های سطح زمین در اثر زمین‌لرزه‌ها محسوب می‌شود و امکان استخراج تغییرات میلی‌متری را از طریق تحلیل فاز تصاویر راداری فراهم می‌سازد (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ گنجائیان، ۱۴۰۳). در این پژوهش، داده‌های ماهواره Sentinel-1 متعلق به آژانس فضایی اروپا (ESA) که در حالت تصویربرداری Interferometric Wide Swath (IW) و قطبش VV اخذ شده بودند، مورد استفاده قرار گرفتند. برای کاهش خطا و افزایش دقت، تصاویر مربوط به بازه زمانی ۱۲ روز قبل و بعد از رخداد زمین‌لرزه انتخاب گردید، چراکه انتخاب تصاویر با فاصله زمانی کوتاه، خطاهای ناشی از تغییرات جوی و پوشش سطحی زمین را به حداقل می‌رساند. در گام نخست، تصاویر قبل و بعد از زمین‌لرزه به‌طور دقیق هم‌راستا شدند (Co-registration) تا امکان تشکیل اینترفروگرام فراهم شود. سپس فرآیند تولید اینترفروگرام انجام شد و اختلاف فاز بین دو تصویر محاسبه گردید. برای کاهش نویزهای موجود در داده‌ها، فیلتر گلدشتاین (Goldstein filter) اعمال گردید و به‌منظور حذف اثر توپوگرافی از داده‌ها، مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر (SRTM) مورد استفاده قرار گرفت. پس از این مرحله، با اعمال تصحیحات لازم جهت حذف اثرات مداری و جوی، فاز باقی‌مانده مستقیماً به تغییر مکان سطح زمین در راستای خط دید ماهواره (LOS) تبدیل شد. این تغییر مکان‌ها بیانگر میزان جابجایی ناشی از رخداد زمین‌لرزه در بازه زمانی بررسی‌شده بودند. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از نرم‌افزار GMT پردازش و نقشه جابجایی عمودی سطح زمین تولید گردید. نقشه مذکور نشان‌دهنده الگوهای مکانی تغییرات سطحی در محدوده زمین‌لرزه بود و امکان شناسایی مناطقی با بیش‌ترین میزان جابجایی (اعم از فرونشست و بالاآمدگی) را فراهم ساخت. تحلیل این نتایج نقش مهمی در درک رفتار گسل‌ها، شدت تأثیر زمین‌لرزه و الگوهای تغییر شکل پوسته زمین در منطقه ترکمانچای ایفا می‌کند.

جدول ۱: مشخصات تصاویر مورد استفاده

تاریخ	نوع تصویر	حالت مداری	پلاریزیشن	دوره زمانی
۲۰۱۹/۱۰/۲۸	SLC	نزولی	VV	۰
۲۰۱۹/۱۱/۰۹	SLC	نزولی	VV	۱۲

مرحله دوم (شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش): در این مرحله، با هدف تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه، از ۷ پارامتر محیطی شامل فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، ارتفاع، شیب، جهت شیب،

لیتولوژی و فاصله از گسل استفاده شد. انتخاب این متغیرها بر اساس مرور مطالعات پیشین در حوزه پهنه‌بندی زمین‌لغزش، بررسی شرایط ژئومورفولوژیکی منطقه ترکمانچای و نیز بهره‌گیری از نظرات کارشناسان و متخصصان صورت گرفت تا اطمینان حاصل شود عوامل اصلی مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش در منطقه به‌طور جامع لحاظ شده‌اند. برای هر یک از پارامترها، لایه اطلاعاتی مربوطه در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه گردید. داده‌های مورد استفاده از منابع مختلف شامل نقشه‌های توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) و نقشه‌های زمین‌شناسی استخراج شدند. در گام بعدی، به‌منظور امکان‌پذیر شدن مقایسه و ترکیب لایه‌ها، فرآیند استانداردسازی داده‌ها انجام گرفت. روش مورد استفاده برای استانداردسازی، مقیاس‌بندی خطی در بازه صفر تا یک بود، به گونه‌ای که مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده پتانسیل بالای وقوع زمین‌لغزش و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر پتانسیل پایین بودند. پس از استانداردسازی، وزن‌دهی به لایه‌ها بر اساس روش تحلیل شبکه‌ای (ANP) انجام شد. در این فرآیند، از نظرات ۱۰ کارشناس متخصص در حوزه ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و مدیریت خطر بهره گرفته شد تا اهمیت نسبی هر پارامتر با توجه به شرایط منطقه تعیین شود. روش ANP به دلیل در نظر گرفتن وابستگی‌ها و تعامل میان عوامل، نسبت به روش‌های سنتی وزن‌دهی مانند AHP از دقت و واقع‌گرایی بیش‌تری برخوردار است. در گام نهایی، لایه‌های استانداردشده و وزن‌دار با استفاده از مدل ترکیب خطی وزنی ترتیبی (OWA) در محیط نرم‌افزار TerrSet تلفیق شدند. این مدل به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا با در نظر گرفتن میزان ریسک‌پذیری و گرایش به محافظه‌کاری یا خوش‌بینی، ترکیب متفاوتی از لایه‌ها را اعمال نماید. خروجی نهایی این فرآیند، نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش منطقه بود که پهنه‌های با خطرپذیری بالا، متوسط و پایین را مشخص کرده و امکان تحلیل مکانی دقیق‌تری از استعداد زمین‌لغزش در محدوده ترکمانچای فراهم آورد.

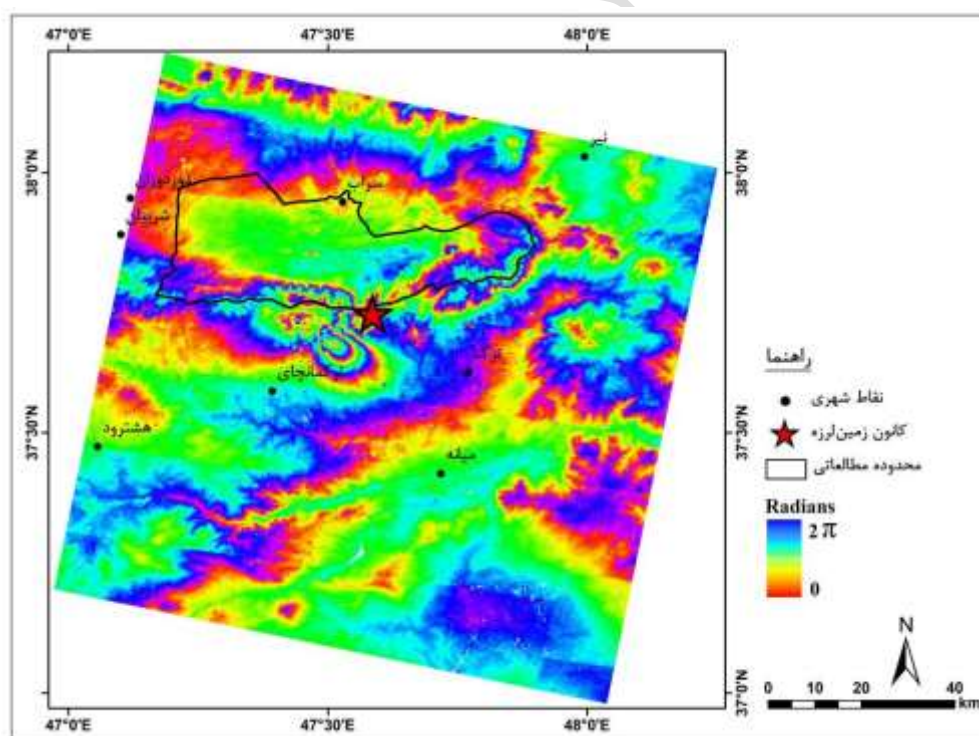
-مرحله سوم (شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین‌لرزه ترکمانچای): در این مرحله، به‌منظور تعیین مناطق دارای بالاترین مخاطره زمین‌لغزش با لحاظ نمودن تأثیرات زمین‌لرزه ترکمانچای، نتایج حاصل از دو نقشه شامل میزان جابجایی عمودی سطح زمین (بر پایه تحلیل تداخل‌سنجی راداری) و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (بر اساس مدل OWA) تلفیق گردید. در این راستا، مناطقی که به‌طور هم‌زمان دارای بیش‌ترین میزان جابجایی عمودی پس از زمین‌لرزه و همچنین در رده‌های بالای آسیب‌پذیری نسبت به زمین‌لغزش قرار داشتند، شناسایی شدند. این نواحی به‌عنوان مناطق بحرانی و در معرض خطر بالای زمین‌لغزش ناشی از زلزله معرفی گردیدند.

-محدودیت‌های تحقیق: از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به وابستگی روش InSAR به شرایط جوی و پوشش گیاهی، محدودیت در انتخاب تصاویر با فاصله زمانی و مکانی مناسب، و نیز دقت وابسته به کیفیت داده‌های ورودی اشاره کرد. در بخش پهنه‌بندی زمین‌لغزش نیز، وزن‌دهی پارامترها بر اساس نظرات کارشناسان تا حدی ماهیت ذهنی دارد و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند ANP و OWA ساده‌سازی واقعیت‌های پیچیده طبیعی محسوب می‌شوند.

۳- یافته‌های تحقیق

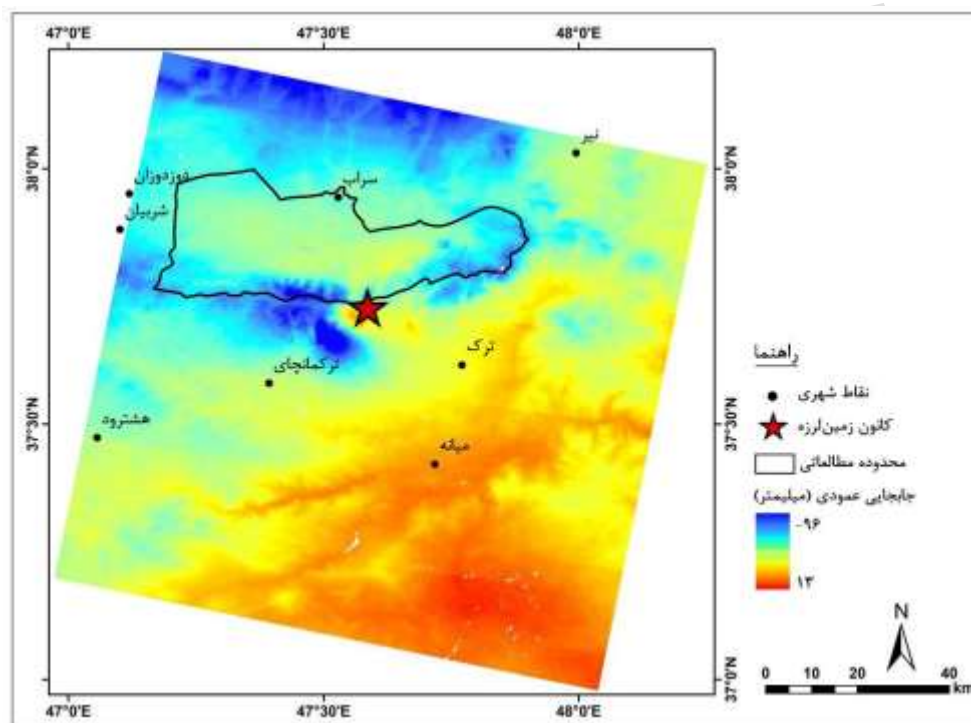
۳-۱- ارزیابی تأثیرات زمین‌لرزه ترکمانچای

زمین‌لرزه ترکمانچای سال ۱۳۹۸ علاوه بر خسارات جانی و مالی، موجب تغییرات قابل توجهی در محیط طبیعی، از جمله جابجایی عمودی سطح زمین شد. بسیاری از تأثیرات این زمین‌لرزه به صورت نامحسوس بوده‌اند. یکی از این تأثیرات پنهان، جابجایی عمودی سطح زمین است که می‌تواند نقش مؤثری در ناپایداری یا تحریک حرکت دامنه‌ها ایفا کند؛ موضوعی که به‌ویژه در نواحی کوهستانی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اهمیت این پدیده، در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ (قبل و بعد از زمین‌لرزه) و تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) به منظور ارزیابی میزان جابجایی عمودی ناشی از زمین‌لرزه ترکمانچای استفاده شده است. پس از تهیه داده‌های لازم و انجام پیش‌پردازش‌های اولیه، نقشه اینترفروگرام منطقه تولید گردید (شکل ۲).



شکل ۲: نقشه اینترفروگرام منطقه از تاریخ ۲۰۱۹/۱۰/۲۸ تا ۲۰۱۹/۱۱/۰۹

پس از تهیه نقشه اینترفروگرام منطقه، نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه تهیه شده است که بر اساس آن، مناطق اطراف کانون زمین لرزه، تحت تاثیر زمین لرزه رخ داده بین ۱۳- تا ۹۶ میلی متر جابجایی داشته اند که رقم قابل توجهی است (شکل ۳). آنالیز مکانی جابجایی صورت گرفته بیانگر این است که بیشترین میزان جابجایی مربوط به نواحی کوهستانی بوده است که با توجه به پتانسیل بالای این مناطق از نظر بروز مخاطره زمین لغزش این مسئله بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۳: نقشه جابجایی عمودی منطقه از تاریخ ۲۰۱۹/۱۰/۲۸ تا ۲۰۱۹/۱۱/۰۹

۲-۳- شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش

الف) تشریح پارامترهای مورد استفاده

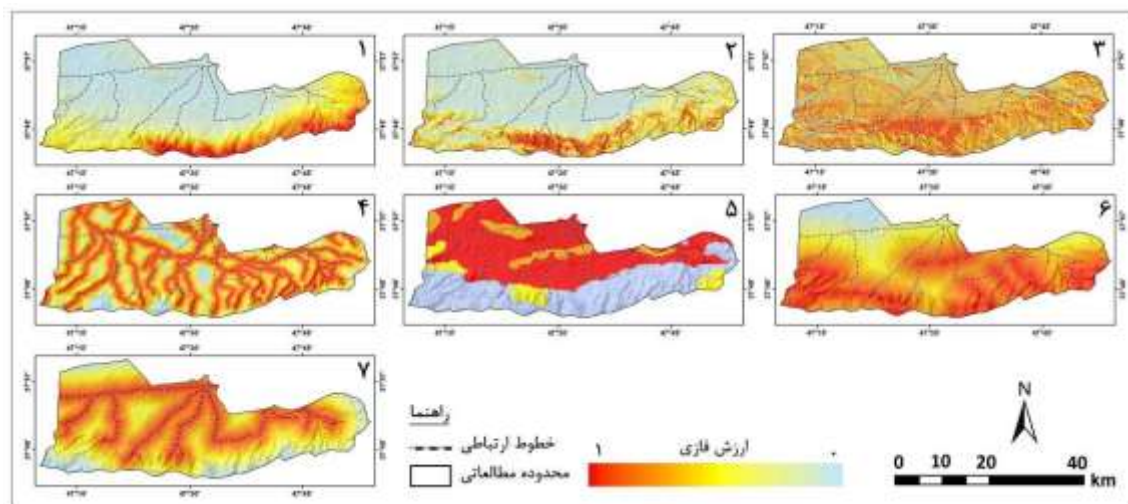
در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، از پارامترهای هیدروژئومورفولوژی، زمین شناسی و انسانی استفاده شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

-**پارامترهای هیدروژئومورفولوژی:** پارامترهای هیدروژئومورفولوژی نقش اصلی را در تعیین پتانسیل وقوع زمین لغزش مناطق دارند. از جمله پارامترهای مورد استفاده، ارتفاع بوده است. ارتفاع به دلیل تاثیر مستقیمی که بر میزان رطوبت یخبندان و فرسایش دارد، از جمله پارامترهای موثر محسوب می شود. به طور معمول مناطق مرتفع پتانسیل بالایی از وقوع زمین لغزش دارند، به همین دلیل به منظور استانداردسازی لایه ارتفاعی، به مناطق با ارتفاع بیشتر، ارزش نزدیک یک داده شده است (شکل ۴-۱). از دیگر پارامترهای مورد استفاده در این بخش، شیب زمین است.

شیب مهم‌ترین پارامتر در تعیین پتانسیل وقوع حرکات دامنه‌ای از جمله زمین‌لغزش است. درواقع، اصلی‌ترین عامل در تعیین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، شیب زمین است و سایر پارامترها نقش تشدیدکننده یا کنترل‌کننده دارند. با توجه به اینکه دامنه‌های با شیب زیاد ناپایدارتر و مستعد حرکت هستند، بنابراین به‌منظور استانداردسازی لایه شیب، به مناطق با شیب زیاد، ارزش نزدیک ۱ داده شده است (شکل ۴-۲). جهت شیب نیز نقش مستقیمی در میزان انرژی دریافتی از خورشید دارد، بنابراین از عوامل موثر بر رطوبت، یخبندان، تراکم پوشش گیاهی و غیره محسوب می‌شود. معمولاً جهات شیب شمالی به دلیل رطوبت و یخبندان بیش‌تر، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند به همین دلیل به‌منظور استانداردسازی این لایه، به جهات شیب شمالی ارزش نزدیک یک داده شده است (شکل ۴-۳). از دیگر پارامتر هیدروژئومورفولوژی مورد استفاده، فاصله از رودخانه است. رودخانه‌ها به دلیل نقش مهمی که در فرسایش و برش پای دامنه‌ها دارند، یکی از عوامل وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شوند. معمولاً دامنه‌های منتهی به رودخانه‌ها، ناپایدارتر و مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند به همین دلیل به‌منظور استانداردسازی این لایه، به مناطق نزدیک رودخانه ارزش نزدیک یک داده شده است (شکل ۴-۴).

-**پارامترهای زمین‌شناسی:** پارامترهای زمین‌شناسی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در پتانسیل وقوع زمین‌لغزش مناطق دارند. در این پژوهش از پارامترهای لیتولوژی و فاصله از گسل به‌عنوان پارامترهای زمین‌شناسی موثر استفاده شده است. معمولاً، مناطقی که دارای سازندهای سست و فرسایش‌پذیر هستند، پتانسیل بیش‌تری از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند. بررسی وضعیت لیتولوژی منطقه مورد مطالعه بیانگر تنوع منطقه از نظر لیتولوژی است به‌طوری‌که در این منطقه انواع سازندهای بازالتی، آندزیتی، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و غیره وجود دارد. با توجه به موارد ذکر شده، پس از تهیه لایه لیتولوژی منطقه، به مناطق دارای لیتولوژی سست (مواد آبرفتی) ارزش نزدیک یک و به مناطق دارای لیتولوژی مقاوم (بازالت و آندزیت) ارزش نزدیک صفر داده شده است (شکل ۴-۵). همچنین خطوط گسلی نیز به دلیل نقش مهمی که در گسترش درز و شکاف‌ها دارند، از جمله عوامل ناپایداری دامنه‌ها محسوب می‌شوند به همین دلیل به‌منظور استانداردسازی این لایه، به مناطق نزدیک به ارزش نزدیک یک داده شده است (شکل ۴-۶).

-**پارامترهای انسانی:** با توجه به وضعیت منطقه مورد مطالعه، در این پژوهش از پارامتر فاصله از خطوط ارتباطی به‌عنوان پارامتر انسانی موثر استفاده شده است. خطوط ارتباطی نقش مهمی در ناپایداری دامنه‌ها و تشدید احتمال وقوع زمین‌لغزش دارد به همین دلیل به‌منظور استانداردسازی این لایه به مناطق نزدیک خطوط ارتباطی، ارزش نزدیک یک داده شده است (شکل ۴-۷).



شکل ۴: نقشه استانداردسازی شده لایه‌های اطلاعاتی ۱-ارتفاع ۲-شیب ۳-جهت شیب ۴-فاصله از رودخانه ۵-لیتولوژی ۶-فاصله از گسل ۷-فاصله از جاده

ب) وزندهی به لایه‌های اطلاعاتی

در این بخش به منظور ارزش‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی، از مدل تحلیل شبکه (ANP) و نظرات کارشناسان استفاده شده است. پس از تشکیل ساختار شبکه‌ای و مقایسه زوجی معیارها، در نهایت وزن‌های هر کدام از پارامترها محاسبه شده است (شکل ۵). بر اساس نتایج به دست آمده، پارامترهای شیب و فاصله از رودخانه به ترتیب با وزن ۰/۳۲۱ و ۰/۱۷۵ دارای بالاترین ارزش اهمیت هستند.

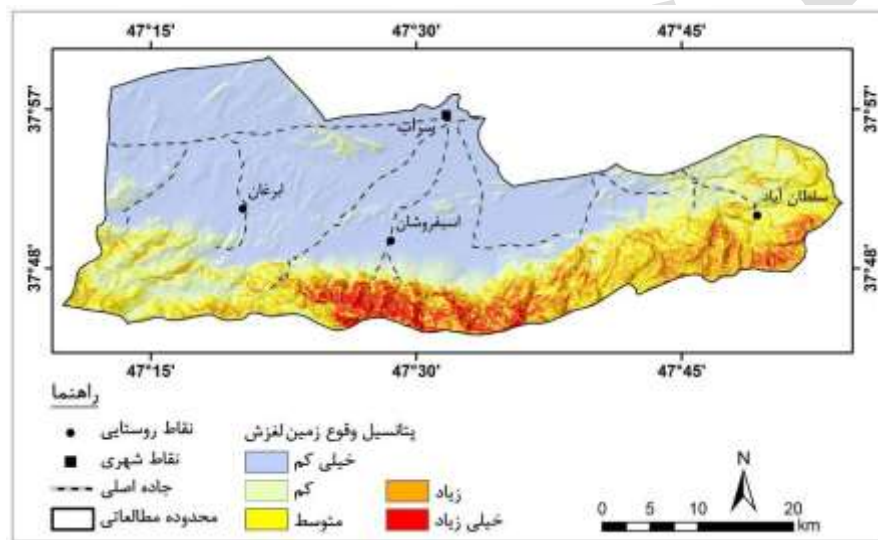
The inconsistency index is 0.0431. It is desirable to have a value of less than 0.1

Aspect	0.065196
Dis. Fault	0.079474
Dis. River	0.175494
Dis. Road	0.143963
Elevation	0.118098
Lithology	0.096880
Slope	0.320894

شکل ۵: وزن لایه‌های اطلاعاتی بر اساس مدل ANP

ج) اجرای مدل OWA

پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی، وزن بدست آمده بر روی هر لایه اعمال شده است و در نهایت لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار TerrSet شده است. در ادامه لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از روش OWA با هم ترکیب شده و به این صورت نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه در ۵ کلاس تهیه شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه تهیه شده، مناطق جنوبی محدوده مطالعاتی پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارند. نتایج آنالیز مساحت طبقات نشان داده است که ۱۷۱ کیلومترمربع از وسعت منطقه (معادل ۱۵ درصد از مساحت منطقه)، به دلیل ارتفاع و شیب زیاد، نزدیکی به جاده و رودخانه، پتانسیل بالایی از نظر وقوع مخاطره زمین لغزش دارد.



شکل ۶: نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه

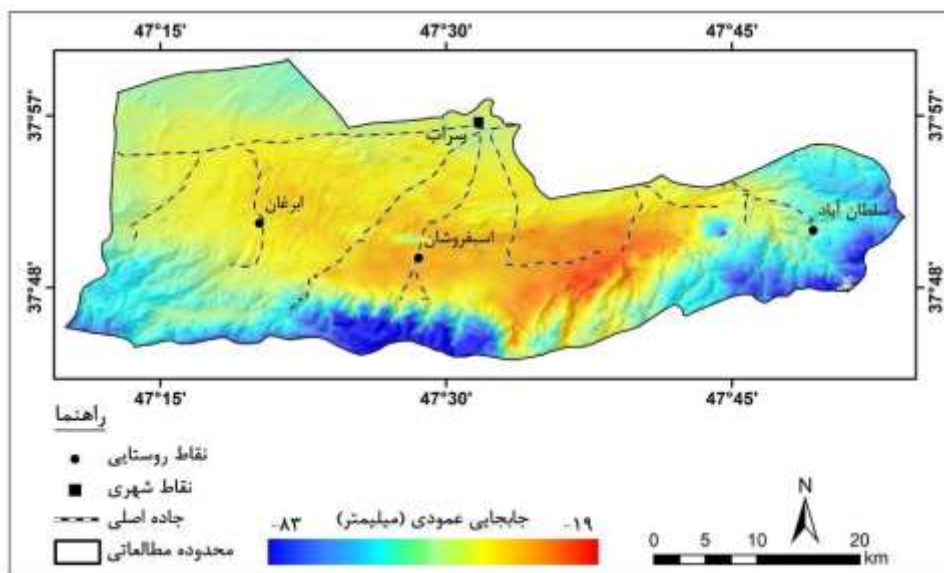
جدول ۲: مساحت و درصد مساحت طبقات

کلاس	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
مساحت	۶۱۱	۱۹۹	۱۶۵	۱۲۱	۵۰
درصد مساحت	۵۳/۳	۱۷/۴	۱۴/۴	۱۰/۶	۴/۴

۳-۳- شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تاثیرات زمین لرزه ترکمانچای

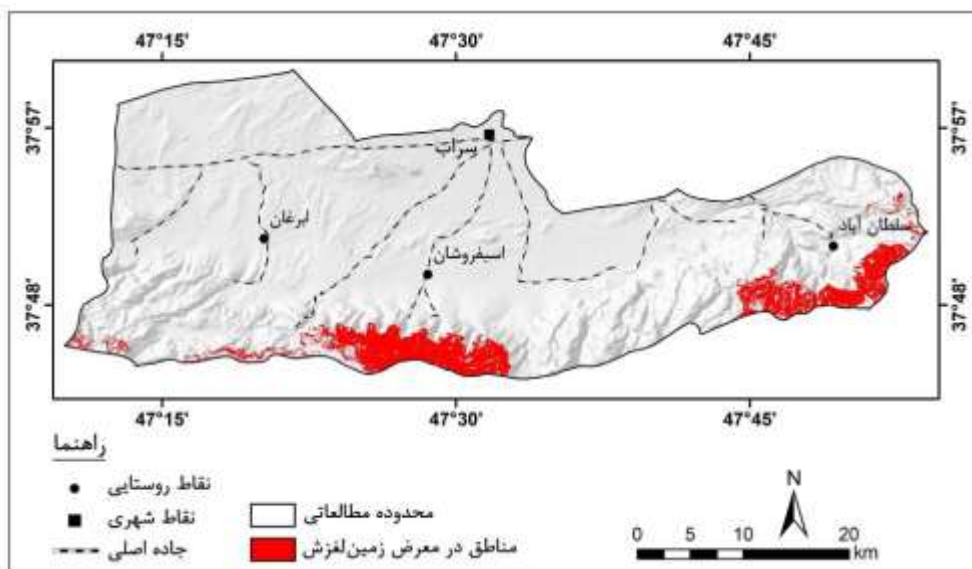
با توجه به اینکه یکی از عوامل اصلی ناپایداری دامنه‌ها و مستعد حرکت کردن آن‌ها، زمین لرزه است، در این بخش به بررسی تاثیرات زمین لرزه ترکمانچای (در سال ۹۸) بر روی دامنه‌های منطقه پرداخته شده است. در شکل ۵ نقشه میزان جابجایی عمودی ناشی از زمین لرزه ترکمانچای در محدوده مطالعاتی نشان داده شده است که بر اساس آن،

این محدوده تحت تاثیر این زمین‌لرزه بین ۱۹- تا ۸۳- میلی‌متر جابجایی عمودی داشته است. آنالیز مکانی جابجایی عمودی صورت گرفته بیانگر این است که بیش‌ترین میزان جابجایی مربوط به مناطق جنوبی محدوده بوده است (شکل ۷).



شکل ۷: ارزیابی وضعیت جابجایی عمودی ناشی از زمین‌لرزه ترکمانچای در منطقه مورد مطالعه

پس از ارزیابی میزان جابجایی عمودی محدوده مطالعاتی، در این بخش، نتایج بدست آمده از مراحل قبل با هم ترکیب شده است به این صورت که مناطقی که در کلاس پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد قرار دارند و دارای جابجایی عمودی بیش از ۵۰ میلی‌متر بوده‌اند به‌عنوان مناطق در معرض زمین‌لغزش انتخاب شده‌اند (شکل ۸). درواقع، این مناطق، مناطقی هستند که هم دارای بیش‌ترین جابجایی عمودی بوده‌اند و هم از نظر پارامترهای محیطی، مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند، بنابراین به‌عنوان مناطق در معرض وقوع زمین‌لغزش شناسایی شده‌اند.



شکل ۸: شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تاثیرات زمین لرزه ترکمانچای

۴- نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از نواحی جنوبی شهرستان سراب همانند مناطق شمالی شهرستان سنندج (پیره و گنجائیان، ۱۴۰۳) و مناطق میانی حوضه داربکلا (یوسفی و همکاران، ۱۴۰۴)، به دلیل شرایط هیدروژئومورفولوژیکی مانند شیب زیاد و فرسایش رودخانه‌ای، مستعد وقوع زمین لغزش هستند. علاوه بر عوامل محیطی، تأثیر پارامترهای تکتونیکی نیز در تشدید خطر زمین لغزش در این منطقه مشهود است. به‌ویژه زمین لرزه ترکمانچای در سال ۱۳۹۸ که منجر به جابجایی‌هایی بین ۱۹- تا ۸۳- میلی‌متر در محدوده مورد مطالعه شده، عامل مهمی در بی‌ثباتی دامنه‌ها به شمار می‌آید. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که دامنه‌های این منطقه، همانند دامنه‌های منطقه جیشیشان چین (Zhang et al, 2021)، تحت تأثیر وضعیت تکتونیکی فعالی که دارند، در معرض مخاطره زمین لغزش هستند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، توصیه می‌شود که مدیریت ریسک زمین لغزش در منطقه سراب با رویکردی یکپارچه و چندبعدی دنبال شود. نخست، هرگونه برنامه‌ریزی برای احداث جاده‌ها، ساختمان‌های مسکونی، تأسیسات حیاتی و زیرساخت‌های ارتباطی باید منوط به انجام مطالعات ژئوتکنیکی و ژئومورفولوژیکی دقیق باشد تا از استقرار کاربری‌های حساس در پهنه‌های پرخطر جلوگیری شود. دوم، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سنجش‌ازدور و سامانه‌های پایش تغییرشکل زمین) مانند InSAR و GPS) به‌منظور پایش مداوم حرکات دامنه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک سامانه هشدار سریع در کاهش خسارات احتمالی موثر واقع شود. سوم، تقویت زیرساخت‌های مهندسی پایدارسازی دامنه‌ها از طریق اجرای پروژه‌های آبراهه‌بندی، زهکشی و تثبیت زیستی با استفاده از پوشش گیاهی بومی توصیه می‌شود. چهارم، افزایش آگاهی و مشارکت جوامع محلی از طریق آموزش‌های عمومی، برگزاری کارگاه‌ها و اطلاع‌رسانی درباره مخاطرات زمین لغزش می‌تواند در ارتقای تاب‌آوری اجتماعی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا کند. نهایتاً،

پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاران و نهادهای ذی‌ربط با تدوین طرح‌های جامع مدیریت خطر و لحاظ کردن نتایج این پژوهش در برنامه‌های کاربری اراضی، گامی مؤثر در کاهش ریسک‌های آتی و توسعه پایدار منطقه بردارند.

Reference

- Alcantara-Ayala, I. (2025). Landslides in a changing world. *Landslides*, 1. •
<https://doi.org/10.1007/s10346-024-02451-1>
- Antronico, L., Borrelli, L., Coscarelli, R., Gulla, G. (2015). Time evolution of •
landslide damages to buildings: the case study of Lungro (Calabria, southern Italy).
Bull Eng Geol Environ, 74, 47–59. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0591-y>
- Asadi, M., Ganjaeian, H., Javedani, M., & Ghaderi Hasab, M. (2021). Evaluation of •
the Relationship between Natural Factors and Subsidence in Ivanaki Plain Using
Radar Imaging. *Hydrogeology*, 6(1), 13–22.
<https://doi.org/10.22034/hydro.2021.13016> [In Persian]
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic •
regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains,
Central Japan. *Geomorphology*, 65(1–2), 15–31.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Banerjee, P., Ghose, M.K., & Pradhan, R. (2018). Analytic hierarchy process and •
information value method-based landslide susceptibility mapping and vehicle
vulnerability assessment along a highway in Sikkim himalaya. *Arab J Geosci*, 11,
139. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3488-4>
- Beigh, I.H., & Bukhari, S.K. (2024). Landslide susceptibility assessment using GIS- •
based multicriteria decision analysis (MCDA) along a part of National Highway-1,
Kashmir-Himalayas, India. *Appl Geomatics*, 16(2), 451–469.
<https://www.researchgate.net/lab/Kaiser-Bukhari-Lab>
- Bianchini, S., Ciampalini, A., Raspini, F., Bardi, F., Di Traglia, F., Moretti, S., •
Casagli, N. (2015). Multi-temporal evaluation of landslide movements and impacts
on buildings in San Fratello (Italy) by means of C-Band and X-Band PSI data. *Pure*
Appl Geophys, 172, 3043–3065. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0839-2>
- Boroghani, M., Pour Hashemi, S., & Zangeneh Asadi, M.A. (2018). The assessment •
of risk and damage landslide in the Baghi Basin with used Certainty Factor and
logistic regression methods. *Geographical Planning of Space*, 8(29), 1–18.
https://gps.gu.ac.ir/article_80350.html?lang=en [In Persian]
- Boussof, S., Fernandez, T., & Hart, A.B. (2023). Landslide susceptibility mapping •
using maximum entropy (MaxEnt) and geographically weighted logistic regression
(GWLR) models in the Rio Aguas catchment (Almeria, SE Spain). *Natural Hazards*,
117, 207–235. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05857-7>
- Cardoso, A., Pereira, S., Ferreira, T.M., Zezere, J.L., Melo, R., Vaz, T., & Reis, E. •
(2023). On the physical vulnerability of buildings exposed to landslide hazards in the
Lisbon metropolitan area. Multi-risk interactions towards resilient and sustainable
cities. *Springer Nature Singapore*, 117–144. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0745-8_7

- Chen, Q., Chen, L., Macciotta, R. Yinm K., Gui, L., Zhao, Y., & Liao, Y. (2023). • Experimental investigation of masonry building damage caused by surface tension cracks on slow-moving landslides. *Natural Hazards*, 119, 1193–1221. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06141-4>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. Special • Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, 247, 36-75. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3044759>
- Esfandiari Darabad, F., Vahabzadeh, M., Shikhler, Z., & Nezafat takle, B. (2025). • Identifying Factors Affecting Landslides on Astara Road to Namin Tunnel Using the MLP Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), 43-60. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87409.1475> [In Persian]
- Ganjaeian, H. (2024). Identification of sinkhole-prone areas using radar images • (Case study: Qorveh Plain). *Environmental erosion research*, 14(2), 87-105. <http://dx.doi.org/10.61186/jeer.14.2.6> [In Persian]
- Ganjaeian, H. (2024). Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the • years 1907 to 2023. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 222-243. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87246.1470> [In Persian]
- Ganjaeian, H. (2024). Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran During the • years 1907 to 2023. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 222-243. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87246.1470> [In Persian]
- Ganjaeian, H. (2025). Evaluating the seismic potential of megacities in • Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(132), 173-188. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2019284.3047> [In Persian]
- Ganjaeian, H., Rezaei Arefi, M., Peysoozi, T., & Emami, K. (2021). Zonning • susceptible areas of landslide using WLC and OWA methods -A case study in Mountain cliff Khan, Iran. *Sustainable Earth Trends*, 1(2), 35-43. <https://doi.org/10.52547/sustainearth.1.2.43>
- Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2020). Analyzing • Tangible and Intangible Effects of Kermanshah Ezgeleh Earthquake on Landforms. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(2), 89-103. <https://doi.org/10.22126/ges.2020.5571.2274> [In Persian]
- Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, M., & Maghsoudi, M. (2024). Evaluating the • Impacts of Earthquake in Ezgele, Kermanshah (Iran) (Occurred on 2017/11/12). *Current Research in Environmental Science and Ecology Letters*, 1(1), 1-10. <https://doi.org/10.33140/CRESEL.01.01.06>
- Gilanipoor, A., Motevalli, S., & Derafshi, K. (2025). Assessment of Landslide • Sensitivity and Determination of Effective Factors in its Occurrence Using the Random Forest Algorithm (Case Study: Glandrood Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), 247-274. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.89542.1514> [In Persian]
- Gordo, C., Zezere, J.L., & Marques, R. (2019). Landslide susceptibility assessment at • the basin scale for rainfall- and earthquake-triggered shallow slides. *Geosciences* 9(6). <https://doi.org/10.3390/geosciences9060268>

- Guillard-Goncalves, C., Zezere, J.L., Pereira, S., & Garcia, R.A.C. (2016). •
Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the
municipal scale: application to the Loures municipality, Portugal. *Natural Hazard*,
16(2), 311–331. <https://doi.org/10.5194/NHESS-16-311-2016>
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). •
Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1-
4), 272–299. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook—A guide to •
understanding landslides. U.S. Geological Survey Circular 1325.
<https://pubs.usgs.gov/circ/1325>
- Jafari, G.H. & Khodaei, R. (2024). Zoning Land Surfaces of Shahroud Basin against •
the Occurrence of Landslides Using the Shannon Model. *Journal of Geography and
Environmental Hazards*, 12(4), 253-274.
<https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75401.1183> [In Persian]
- Kumthekar, M.M., & Patil, C.S. (2025). A Systematic Review of Landslides •
prediction mechanisms and analysis of Landslides in Western Ghats in Kerala and
Maharashtra. *Multimed Tools Appl* 84, 14583–14604.
<https://doi.org/10.1007/s11042-024-19511-2>
- Liu, Qq., Xie, Wl., & Yang, H. (2025). Characteristics of loess landslides under the •
effects of faults and rivers and their correlations with geological and surficial
evolutionary processes. *Bull Eng Geol Environ* 84, 369.
<https://doi.org/10.1007/s10064-025-04375-z>
- Liu, R., Li, L., Pirasteh, S., Lai, Z., Yang, X., & Shahabi, H. (2021). The •
performance quality of LR, SVM, and RF for earthquake-induced landslides
susceptibility mapping incorporating remote sensing imagery. *Arab J Geosci*, 14, 1–
15. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06573-x>
- Mohammahkhan, S., Ganjaeian, H., Garosi, L., & Zanganetabar, Z. (2020). •
Assessing the impact of groundwater drop on the subsidence rate using the Sentinel-
1 Radar images - Case study: Qorveh Plain. *Scientific- Research Quarterly of
Geographical Data (SEPEHR)*, 28(112), 219-229.
<https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.38617> [In Persian]
- Mohammahkhan, S., Ganjaeian, H., Shahri, S., & Abbaszade, A. (2019). Predicting •
the trend of urban development toward hazardous areas using multi temporal images
(Case Study: Marivan City). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data
(SEPEHR)*, 28(110), 107-117. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36615> [In
Persian]
- Nazari bayatiani, F., Jafar Beglou, M., Mohammad Khan, S., & Maghsoudi, M. •
(2022). Landslide Hazard Zonation in Kolor Region Using Bayes' Theorem-ANP
Hybrid Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 1-21.
<https://doi.org/10.22067/geoh.2021.69988.1048> [In Persian]
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Ebrahimi, A. & Emami, K. (2019). Monitoring and •
predicting the trend of changes in residential areas using multi-timed images (Case
study: Songhor city). *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(2), 343-354.
<https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.275076.1007084> [In Persian]

- Negahban, S., Ganjaeian, H., Saeedi, S., & Ghasemi, A. (2020). Study of vertical displacement caused by 2019 Turkmanchay earthquake based on InSAR method. *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3), 445-456. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.295046.1007182> [In Persian]
- Negahban, S., Peysoozi, T., Ganjaeian, H., & Norozi, M. (2021). Identify areas prone to landslide and vertical displacement using Radar images (Case study: Lavasan urban area and urban margin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 1-18. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.71728.1094> [In Persian]
- Pireh, M., & Ganjaeian, H. (2024). Analysis of landslides occurred in connection with environmental factors (Case study: Sanandaj County). *Geography and Human Relationships*, 7(3), 262-278. <https://doi.org/10.22034/gahr.2025.458065.2135> [In Persian]
- Sadeghi, H., & Javan, F. (2025). Vulnerability of Iranian tourism villages in terms of Landslide hazard using GIS. *Geography*, 23(84), 153-170. <https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2055364.1385> [In Persian]
- Salari, M., Nayyeri, H., Ganjaeian, H., & Amani, K. (2020). Assessment and Prediction of the process of expansion of residential areas with Geomorphological Approach and Environmental Management (Case Study: Paveh City). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 86-101. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.109536> [In Persian]
- Shao, C., Li, Y., Lan, H., Li, P., Zhou, R., Ding, H., Yan, Z., Dong, S., Yan, L., & Deng T. (2019). The role of active faults and sliding mechanism analysis of the 2017 Maoxian postseismic landslide in Sichuan, China. *Bull Eng Geol Environ*, 78, 5635–5651. <https://doi.org/10.1007/S10064-019-01480-8/FIGURES/15>
- Tanyas, H., Rossi, M., Alvioli, M., Van Westen, C.J., & Marchesini, I. (2019). A global slope unit-based method for the near real-time prediction of earthquake-induced landslides. *Geomorphology*, 327, 126–146. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.022>
- Vaz, T., & Zezere, J.L. (2016). Landslides and other geomorphologic and hydrologic effects induced by earthquakes in Portugal. *Natural Hazzard*, 81(1), 71–98. <https://doi.org/10.1007/S11069-015-2071-5/FIGURES/11>
- Wang, F., Feng, Y., & Chen, Y. (2024). A liquefied long-runout loess landslide triggered by the Jishishan Ms6.2 earthquake on 18 December 2023 in Qinghai, China. *Landslides*, 21, 3169–3177. <https://doi.org/10.1007/S10346-024-02373-Y/FIGURES/11>
- Westen, C.J., Castellanos, E., Kuriakose, S. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Eng Geol*, 102, 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Xu, C., Xu, X., & Shen, L. (2016.) Optimized volume models of earthquake-triggered landslides. *Scientific Reports*, 6, 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep29797>
- Xu, L., Dai, F.C., Tu, X.B., Javed, I., Woodard, M.J., Jin, Y.L., & Tham, L.G. (2013). Occurrence of landsliding on slopes where flowsliding had previously occurred: an investigation in a loess platform, north-West China. *CATENA*, 104, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.010>

- Xu, Y., Allen, M.B., Zhang, W., Li, W., & He, H. (2020). Landslide characteristics in the loess plateau, northern China. *Geomorphology*, 359. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2020.107150>
- Yang, C., Liu, L.L., Huang, F., Huang L., & Wang, X.M. (2023). Machine learning-based landslide susceptibility assessment with optimized ratio of landslide to non-landslide samples. *Gondwana Res*, 123, 198–216. <https://doi.org/10.1016/J.GR.2022.05.012>
- Yousefi, S., Jokar Sarhangi, E., & Esmaili, R. (2025). Analysis of the Relationship Between Landslide Susceptibility and the Intensity of Soil Erosion and Sediment Yield (Case Study: Darabkola Watershed, Mazandaran Province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 245-265. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.92683.1560> [In Persian]
- Zhang, Z., Zeng, R., Zhao, S. (2024). 2023 Jishishan earthquake-triggered river terrace landslide enabled by tectonic and human activities. *NPJ Nat Hazards*, 1. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00029-4>

Spatial analysis of landslide risk in the southern regions of Sarab County with emphasis on the 2019 Turkmanchay earthquake

Hamid Ganjaeian¹, Ali Mirakhorli², Mehdi Safari Namivandi^{3*}, Toktam Yazdani

Ph. D of Geomorphology, University of Tehran, Tehran (Email: h.ganjaeian@ut.ac.ir)

Ph. D Student of Geomorphology, University of Tehran, Tehran (Email: ali.mirakhorli@ut.ac.ir)

Ph. D of Geomorphology, Member of the faculty of the University of Police Sciences, Tehran, Iran (Email: m.safarinamevandi@khu.ac.ir)

Ph. D of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz (Email: t.yazdani92@gmail.com)

* Corresponding author: (Email: m.safarinamevandi@khu.ac.ir)

Abstract

Landslides are among the most significant geomorphological hazards in the mountainous regions of Iran, influenced by various environmental and tectonic factors. Accurate identification of susceptible areas and assessment of triggering factors such as earthquakes are essential steps in landslide risk management. Given the importance of this issue, the present study aims to identify landslide-prone areas in the southern parts of Sarab County, taking into account the impact of the 2019 Torkmanchay earthquake. To achieve this, a combination of remote sensing data and multi-criteria decision-making models was used. The primary datasets included Sentinel-1 radar imagery, a 1:100,000 scale geological map, and a 12.5-meter resolution Digital Elevation Model (ALOS PALSAR). Radar interferometry analysis was performed using GMT software, OWA modeling was conducted in the TerrSet environment, ANP analysis was implemented in SuperDecisions, and spatial data processing was carried out using ArcGIS. The results indicate that the

southern regions of Sarab County, particularly the central areas, possess a high potential for landslide occurrence due to geomorphological characteristics such as steep slopes and fluvial erosion. Furthermore, tectonic factors have caused ground displacements especially the Torkmanchay earthquake ranging from -19 to -83 mm within the study area, significantly contributing to slope instability. Overlay analysis of displacement maps with landslide hazard zoning maps revealed that the highest displacements occurred in zones with high to very high landslide potential. This overlap highlights the strong interaction between tectonic and environmental factors in intensifying landslide hazards in the study area.

Keywords: Landslide, Radar Interferometry, OWA, ANP, Sarab County