

ارزیابی پایداری شیب با استفاده از مدل SINMAP و دو نوع مدل رقومی ارتفاع برای خطر زمین لغزش و حفاظت از خاک

مینا قهاری^۱، کامران مروج^{۱*}، محمدرضا عسگری^۱

^۱ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kmoravej@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

DOI: [10.30470/jsp.2025.735554](https://doi.org/10.30470/jsp.2025.735554)

چکیده

گسترش مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی به داخل عرصه‌های منابع طبیعی، بویژه اراضی شیب‌دار رشد چشم‌گیری پیدا کرده‌است. SINMAP یکی از افزونه‌هایی است که در این زمینه مورد توجه می‌باشد. هدف از این پژوهش، طبقه‌بندی منطقه مورد نظر از جهت شدت ناپایداری اراضی شیب‌دار و ارائه پیشنهادات کاربردی برای حفاظت از خاک و جلوگیری از فرسایش و زمین‌لغزش است. وجه تمایز این پژوهش، مقایسه و کاربرد مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده در سازمان نقشه‌برداری کشور با یکی از مدل‌های تولیدشده به‌وسیله ماهواره و قابل دسترس از طریق درگاه‌های رایگان تحقیق است. در این تحقیق از دو نوع مدل رقومی نسل سوم سنجنده ASTER GDEM و مدل رقومی ارتفاعی اخذ شده از سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد. پس از انجام پیش‌پردازش‌های ضروری بر روی داده‌های فوق، اقدام به تولید مهمترین و موثرترین مولفه‌های اولیه و ثانویه مرتبط با موضوع گردید. نقشه حساسیت خاک منطقه با انجام مطالعات خاکشناسی و لایه‌ی کاربری اراضی نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌روز سنجنده Landsat-8 تولید شدند. این تحقیق نشان می‌دهد که مدل SINMAP قابلیت استفاده برای انواع زمین‌لغزش‌ها را ندارد و فقط برای آنهایی مناسب است که لایه کم‌عمقی از خاک را متاثر می‌کنند. شاخص‌های پایداری تولیدشده به‌وسیله آن نمی‌تواند به‌عنوان نتایج دقیق عددی مورد تفسیر قرار گیرند. نتایج نشان داد که منشأ اکثر زمین‌لغزش‌ها در مناطقی با دامنه‌های همگرا و شیب مقعر است. مدل SINMAP اطلاعات کمی و مکانی بسیار خوبی در مورد وضعیت پایداری اراضی شیب‌دار در اختیار کارشناسان قرار می‌دهد. این مدل برخلاف بسیاری از مدل‌های توصیفی متداول، از مبانی علمی و فیزیکی مناسبی برخوردار است و از مدل‌های کلیدی: اشباع خاک، سفیدرود، شیب، زمین‌لغزش، مدل رقومی زمین

Assessment of slope stability using SINMAP model and two types of digital elevation model for landslide hazard and soil conservation

M. Gahari¹, K. Moravej^{1*}, M.R. Asgari¹

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

* Corresponding Author, Email: kmoravej@znu.ac.ir

Received: August 2025 Accepted: November 2025

DOI: [10.30470/jsp.2025.735554](https://doi.org/10.30470/jsp.2025.735554)

Abstract

The expansion of residential, industrial and agricultural areas into natural resources areas, especially sloping lands, has grown significantly. SINMAP is one of the extensions that is interest in this field. The purpose of this research is to classify the desired area in terms of the severity of instability of sloping lands and to provide practical suggestions for soil protection and prevention of erosion and landslides. The distinguishing feature of this research is the comparison and application of the DEM produced in the country's mapping organization with one of the models produced by satellite and accessible through free research portals. In this research were used two types of digital models of the third generation of the ASTER GDEM sensor and the digital elevation model obtained from the country's mapping organization. After performing the necessary pre-processing on the above data, the most important and effective primary and secondary components related to the subject were produced. The soil sensitivity map of the region was produced by carrying out soil studies and land use layer using the latest satellite images of Landsat-8 sensor. This research shows the SINMAP model cannot be used for all kinds of landslides and is only suitable for those that affect the shallow layer of the earth. The stability indices produced by it cannot be interpreted as accurate numerical results. The results showed that the origin of most landslides is in areas with convergent slopes and concave slopes. The SINMAP model provides experts with very good quantitative and spatial information about the stability of sloping lands. Unlike many conventional descriptive models, this model has proper scientific and physical foundations.

Keywords: Digital elevation model, Landslide, Sefid-Rud, Soil saturation, Slope

مقدمه

(al., 2016). اخیراً تولید و دسترسی به انواع مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین (DEM)^۱ باعث بهبود در توسعه روش‌هایی شده‌است که با استفاده از امکانات موجود در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، متغیرهای توپوگرافی مربوط به ناپایداری شیب و زمین لغزش‌ها را به صورت کمی بررسی می‌کنند (Sangchini and Nowjavan, 2015; Sachinthaka et al., 2025). افزونه‌ها^۲ و نرم‌افزارهای مختلفی برای مطالعه دلایل و عوامل مختلف وقوع خطر زمین‌لغزش ارائه شده‌است. یکی از این موارد، مدل فیزیکی شاخص پایداری (SINMAP)^۳ است. SINMAP یک افزونه به محیط GIS است که ارزیابی قابلیت وقوع زمین‌لغزش را تسریع می‌بخشد (Sachinthaka et al., 2025). در این افزونه از تجزیه و تحلیل مدل رقومی ارتفاع برای استخراج برخی از مولفه‌های پستی و بلندی مانند شیب و شاخص رطوبت توپوگرافی^۴ (بررسی وضعیت رطوبت خاک) و سایر عوامل دیگر استفاده می‌شود (Shahri et al., 2015). در سال‌های اخیر، توسعه مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک بالا و دسترسی آزاد به داده‌های ماهواره‌ای، موجب بهبود دقت مدل‌های فیزیکی ارزیابی ناپایداری شیب شده است. مطالعات نشان می‌دهد که حساسیت مدل SINMAP به کیفیت DEM و نحوه استخراج پارامترهای هیدرولوژیک، تأثیر مستقیمی بر قابلیت پیش‌بینی زمین‌لغزش دارد (Chang et al., 2023). همچنین ترکیب این مدل با داده‌های سنجش‌ازدور چندزمانه و تحلیل‌های عدم قطعیت، موجب افزایش قابلیت اطمینان نتایج شده است (Wang et al., 2025). آفندانی و کوسراتموکو (۲۰۱۹) با بررسی قابلیت‌های مدل SINMAP در نقشه‌برداری مناطق حساس به زمین‌لغزش در جاوای غربی دریافتند که مناطق با شاخص فاکتور امنیت (FS) ۵ کمتر از یک، به خطر زمین‌لغزش بسیار حساس هستند. همچنین، داده‌های حساسیت به

زمین لغزش‌ها هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را در نقاط مختلف دنیا به بار می‌آورند (Ghayoomian and Farhadi nejad, 2005; Lee and Lee, 2024). با توجه به وسعت خسارات، می‌توان به صراحت بیان نمود که هزینه بررسی و مطالعه چنین پدیده‌ای برای شناخت و برنامه‌ریزی بهتر برای پیش‌گیری یا کاهش خسارات ناشی از آن، به مراتب کمتر از خسارات آن است (Alimohamadi et al., 2009). در چند دهه اخیر مطالعه علمی و جامع پدیده زمین‌لغزش و عوامل تاثیرگذار بر آن به علت تحمیل خسارت مالی و جانی وارده بر جوامع انسانی، مورد توجه قرار گرفته‌است (Motevalei et al., 2018). ایران به دلیل شرایط جغرافیایی و آب‌وهوایی خاص و داشتن کوهستان‌های فراوان، مستعد به وقوع زمین‌لغزش است (Sidle, 1992). بر اساس داده‌های گروه مطالعات امور زمین‌لغزش‌ها در سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی از سال ۱۳۷۵ لغایت ۱۳۸۶، حجم مواد لغزیده شده در کشور ۵۶۱۶۰ میلیارد مترمکعب بوده است. از جمله خسارات اقتصادی ناشی از آن می‌توان به تخریب ۲۱۳۴ منزل مسکونی، ۵۹۷۴ هکتار اراضی زراعی، ۱۶۸۸۶ هکتار مرتع، ۷۲۰ هکتار باغ، ۲۵۲ کیلومتر راه اصلی، ۴۶ کیلومتر راه خاکی، ۳ کیلومتر راه جنگلی، ۶ کیلومتر راه آهن، ۰/۵۲ کیلومتر لوله انتقال گاز و ۳/۳۸ کیلومتر لوله انتقال آب اشاره نمود (Arabameri1 et al, 2019).

پس از روخداد زمین‌لرزه در خرداد ماه سال ۱۳۶۹ در منطقه منجیل و وقوع تعداد بی‌شماری زمین‌لغزش در پی آن که منجر به خسارات جانی و مالی فراوان گشت، شناخت مناطق دارای ناپایداری شیب و حساس به خطر زمین‌لغزش مورد توجه خاص کارشناسان و برنامه‌ریزان قرار گرفت (Alimohamadi et al., 2009; Hassanzadeh Nafooti1 et al, 2012; Yarahmadi et

⁴ Topographic Wetness Index (TWI)

⁵ Factor of Safety

¹ Digital Elevation Model

² Extensions

³ Stability Index Mapping (SINMAP)

و از آن در تحلیل‌های اولیه برای تعیین میزان احتمال وقوع زمین‌لغزش در یک حوضه آبخیز استفاده کند (Akbari et al., 2014).

با توجه به نظرات محققین مختلف، هدف از این تحقیق (۱) تهیه لایه‌های زیرمجموعه شاخص پایداری شیب بر مبنای دو نوع مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۳۰ متر و مقایسه آنها (۲) ارزیابی خطر زمین‌لغزش بر اساس تجزیه و تحلیل پارامترهای مشتق از این شاخص در یکی از مستعدترین مناطق به موضوع تحقیق.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش

پهنه مورد مطالعه با مساحت ۸۷۸۰۰ هکتار واقع در حوزه آبخیز سفیدرود در جنوب استان گیلان و همجوار با استان قزوین و زنجان واقع شده‌است. این منطقه در محدوده چهار مختصات با طول جغرافیایی ۳۷۶۹۳۱ متر شرقی و عرض جغرافیایی ۴۰۹۴۹۸۸ متر شمالی، ۳۴۷۰۱۸ متر شرقی و ۴۰۸۳۳۰۶ متر شمالی، ۳۵۵۵۸۶ متر شرقی و ۴۰۶۲۸۱۱ متر شمالی و ۳۴۶۷۵۲ متر شرقی و ۴۰۶۸۵۱۳ متر شمالی قرار دارد (شکل ۱). علت انتخاب این منطقه قرار داشتن سه کانون زمین‌لغزش با وسعت بیش از ۱۰۰ هکتار، ۲۸ زمین‌لغزش کوچک و بزرگ و یک زمین‌لغزش با احتمال وقوع تلفات انسانی و نیز عبور سه گسل فعال از منطقه می‌باشد (Shoaić, 2015). خاک‌های منطقه عمدتاً دارای بافت لوم شنی تا لوم رسی بوده و در بخش‌های بالادست کم‌عمق و سنگریزه‌دار (کمتر از ۴۰ سانتی‌متر) و در نواحی پای دامنه دارای عمق متوسط تا زیاد (بیش از ۸۰ سانتی‌متر) می‌باشند. میزان درصد سنگریزه در شیب‌های بالاتر از ۳۰ درصد افزایش یافته که موجب کاهش ظرفیت نگهداری رطوبت می‌شود. از نظر توپوگرافی، شیب منطقه بین ۰ تا بیش از ۶۰ درصد متغیر بوده و میانگین شیب حدود ۲۷ درصد برآورد شد.

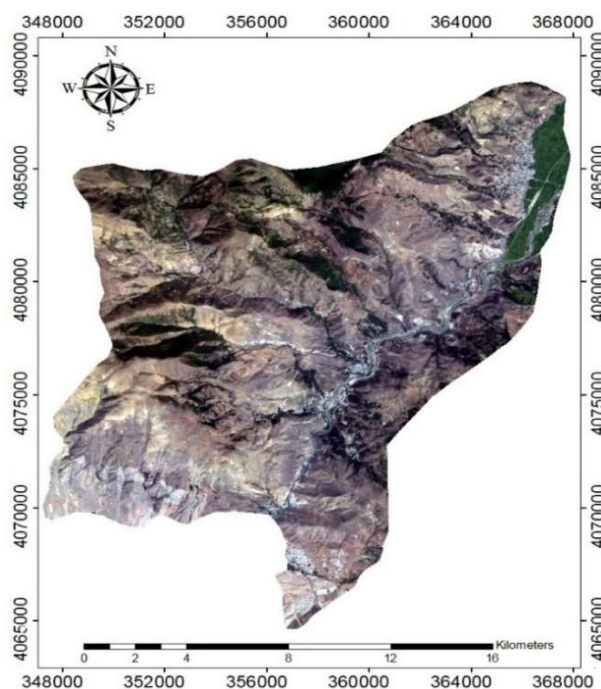
زمین‌لغزش که ماحصل این مدل هستند، منجر به نتایج رضایت‌بخشی با دقت ۶۲/۵٪ برای زمین‌لغزش‌های رخ داده در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ شده‌است (Affandani and Kusratmoko, 2019).

فاوز و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی تحت عنوان مدل‌سازی مکانی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارش باران در جنوب فیلیپین با استفاده از مدل شاخص پایداری به تعیین مکان‌های مستعد زمین‌لغزش حاصل از بارش باران پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با استفاده از این مدل می‌توان ۴۷٪ از منطقه مورد مطالعه را در کلاس مناطق ناپایدار و شبه پایدار در نظر گرفت (Fowze et al., 2007). دب و الکادی (۲۰۰۹) با مطالعه ۲۲۶ نقطه لغزش‌خیز با استفاده از مدل SINMAP در هاوایی، کارآیی و قابلیت مدل را در بررسی مناطق دارای خطر زمین‌لغزش تأیید نمودند. ایشان تأکید داشتند در مواردیکه داده‌های محیطی کم می‌باشد، استفاده از این افزونه با وجود عدم قطعیت نهایی، می‌تواند برای برنامه‌ریزان و مدیریت خطر در مناطق مشکوک به وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرد. ایشان افزودند که نتایج به‌دست آمده بایستی با بررسی‌های ژئوتکنیکی تکمیل گردد (Deb and El-Kadi, 2009). چا (۲۰۱۴) به ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفیک در غالب مدل SINMAP در کشور کره جنوبی پرداخت. نتایج حاصل از تحقیقات ایشان نشان داد که این خصوصیات در مناطق با شیب پایدار و ناپایدار متفاوت می‌باشد و این مدل به‌خوبی قادر به ارزیابی خطر لغزش از نوع جریان واریزه توده‌ای^۱ می‌باشد (Cha, 2014). اکبری و همکاران (۲۰۱۴) معتقدند که مدل شاخص پایداری شیب با استفاده از داده‌های برخی ویژگی‌های خاک، هیدرولوژی و همچنین مدل رقومی ارتفاع و برخی از مولفه‌های مستخرج‌شده از آن مانند شاخص رطوبت توپوگرافی قادر است ساختار منطقه را به لحاظ پایداری یا ناپایداری شیب مورد مطالعه قرارداد

¹ Debris Flow

سانتی‌گراد و میانگین میزان بارندگی ۲۲۲/۸ میلی‌متر و متوسط رطوبت نسبی ۵۷ درصد و حداکثر ارتفاع از سطح دریا ۸۰۰ متر می‌باشد. منطقه از نظر تکتونیکی-رسوبی به پنج زون زمین‌شناسی محلی تقسیم می‌شود که عبارتند از: زون ماگمایی جنوب البرز، زون زمین‌شناسی البرز جنوبی، زون زمین‌شناسی البرز میانی (دره منجیل-شاهرود و رستم آباد-آسیاب-علم کوه)، البرز شمالی و زون زمین‌شناسی دشت گرگان-رشت (Darvishzadeh, 2009).

بیشترین تراکم زمین‌لغزش‌ها در دامنه‌های با شیب ۲۵ تا ۴۵ درصد و در نواحی با انحناى مقعر مشاهده گردید. شاخص همگرایی جریان (Plan curvature) در این نواحی مثبت بوده و تمرکز رطوبت خاک را افزایش می‌دهد. از نظر رژیم رطوبتی، منطقه دارای رژیم رطوبتی اریدیک^۱ و رژیم حرارتی ترمیک^۲ است که در دوره‌های بارش شدید کوتاه‌مدت، تغییرات ناگهانی در درجه اشباع خاک ایجاد می‌کند و نقش کلیدی در فعال‌شدن لغزش‌های کم‌عمق دارد. میانگین دمای سالانه ۲۳/۲ درجه



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

پیش‌پردازش DEM شامل حذف گودی‌های کاذب (Fill) (Sinks) و استخراج جهت و تجمع جریان در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه 9/3 انجام شد. استخراج شاخص‌های توپوگرافی نظیر SPI و TWI در محیط SAGA GIS انجام گرفت. مدل شاخص پایداری شیب با استفاده از افزونه SINMAP در محیط ArcGIS اجرا شد. سپس اقدام به استخراج پارامترهای پستی و بلندی موثر در پایداری شیب با استفاده از نرم‌افزار TAS³ شد. در

شاخص‌های مورد استفاده

برای انجام این تحقیق اقدام به دریافت و پردازش دو نوع مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۰ متر (اخذ شده از سازمان نقشه‌برداری کشور) و مدل رقومی ارتفاع نسل سوم سنجنده ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر شد. هدف از چنین انتخابی، بررسی تاثیر توان تفکیک زمینی چنین داده‌هایی در دقت توزیع درجه اشباع خاک و شاخص پایداری شیب با استفاده از مدل SINMAP می‌باشد.

³ Terrain Analysis System

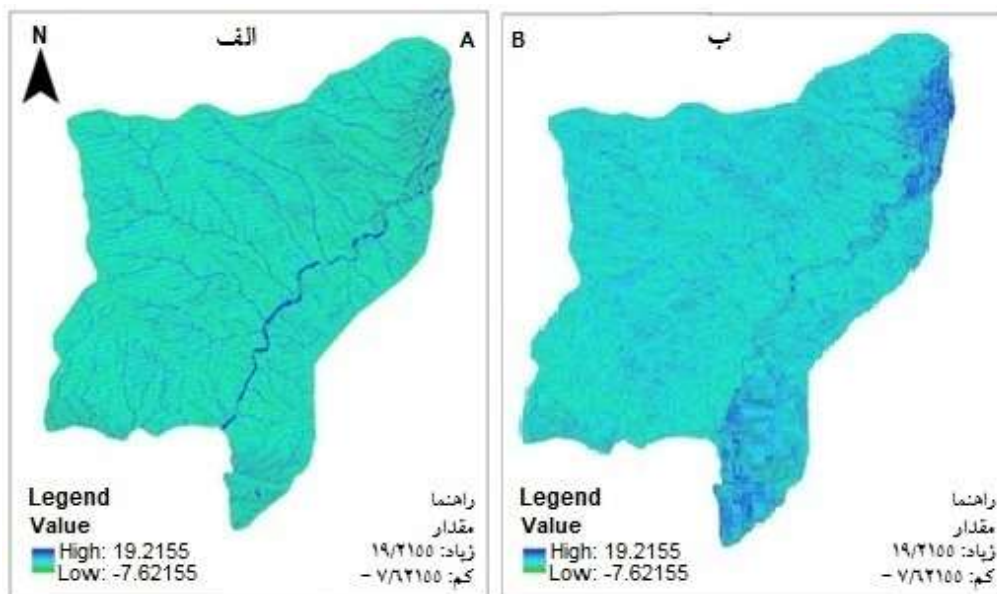
¹ Aridic

² Thermic

مولفه‌های توپوگرافی مستخرج از دو مدل رقومی ارتفاعی مورد استفاده عبارتند از شاخص رطوبت توپوگرافی (شکل-۲)، قدرت جریان^۱ (SPI) (شکل-۳)، درصد شیب (شکل-۴) و جهت شیب (شکل-۵). همچنین نقشه حساسیت خاک منطقه و لایه کاربری اراضی نیز به ترتیب در شکل‌های (شکل - ۶ A) و (شکل - ۶ B) ارائه شده‌اند. در جدول ۱ نیز حساسیت تحت گروه‌های بزرگ خاک در مقابل ناپایداری شیب و زمین‌لغزش بر اساس عواملی مانند عمق خاک، نوع بافت، میزان سنگریزه و سایر عوامل ذکر شده است. افزونه SINMAP، مؤلفه‌های ناپایدارکننده شیب (مانند نیروی ثقل) و پایدارکننده (مانند نیروی اصطحاک و چسبندگی بین ذرات خاک) را بر روی یک سطح شکست به موازات سطح زمین شبیه‌سازی می‌کند. خروجی اصلی این مدل، شاخص پایداری^۲ است که با استفاده از آن، عمل طبقه‌بندی زمین براساس میزان پایداری در سطح هر سلول از منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود (Lago-Hubp and Zamorano, 2010).

این پژوهش نقشه حساسیت خاک منطقه با انجام مطالعات خاکشناسی و مطالعه نتایج سایر محققین و لایه‌ی کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای رقومی و به‌روز سنجنده Landsat-8 و کنترل‌های میدانی تهیه‌شدند (Iverson et al., 2000; Frattini et al., 2004; Shahri et al., 2015). نکته بسیار مهم در انتخاب پارامترهای فوق‌الذکر در قالب لایه‌های اطلاعاتی نخست آن است که در ارزیابی ناپایداری شیب، عوامل زیادی مؤثر هستند. لذا انتخاب آنها باید به گونه‌ای باشد که اولاً صحت نتایج تا حد ممکن افزایش یابد، دوماً جمع‌آوری اطلاعات مرتبط به آن از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه باشد و سوماً استخراج آن عوامل در راستای دستیابی به اهداف تحقیق باشد (Yarahmadi et al., 2016). بنابراین برخی خصوصیات خاک و اقلیم که در ۲ بازه زمانی و مکانی به شدت متغیر هستند، به‌صورت یک دامنه از حدود بالا و پایین آن متغیرها تعریف شدند (Sangchini and Nowjavan, 2015).

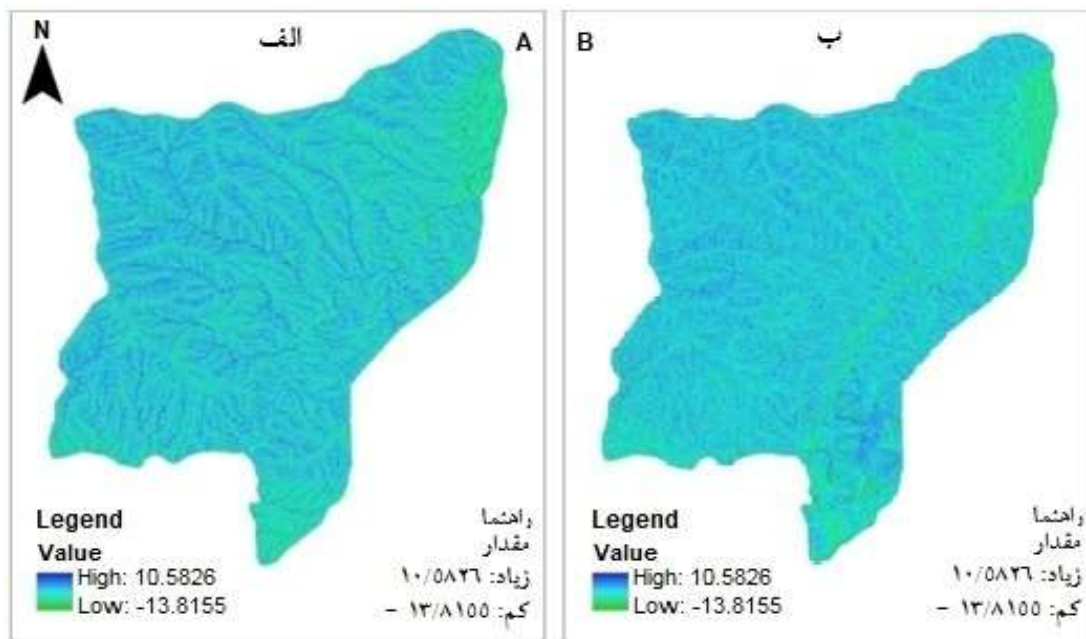
نتایج و بحث



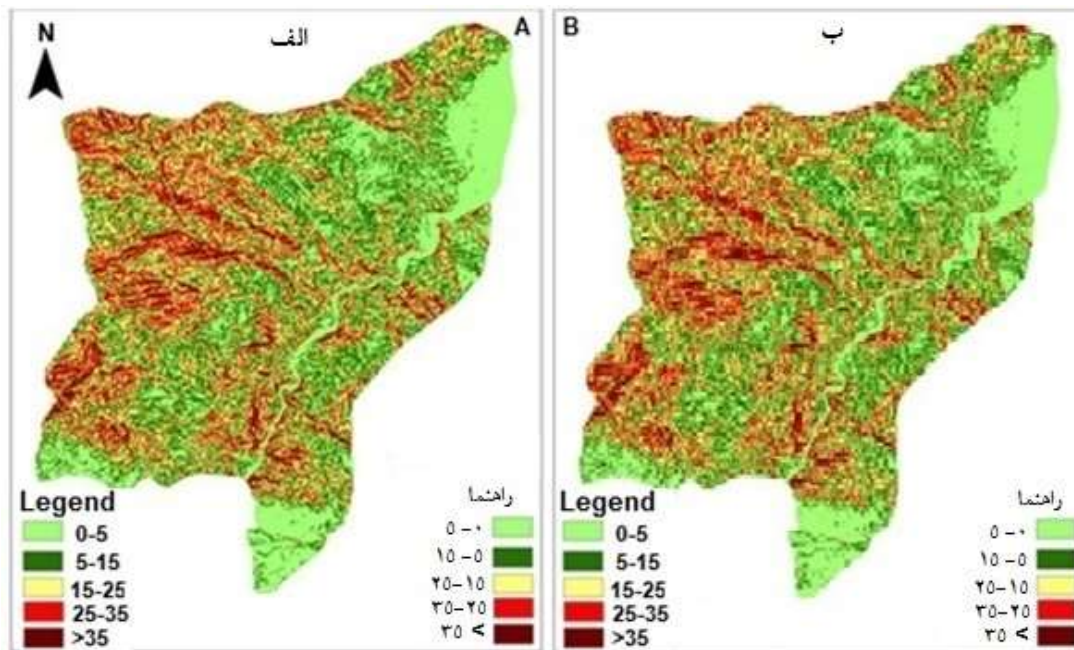
شکل ۲- شاخص TWI مستخرج از دو نوع مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متر (سمت راست) و ۱۰ متر (سمت چپ)

² Stability Index

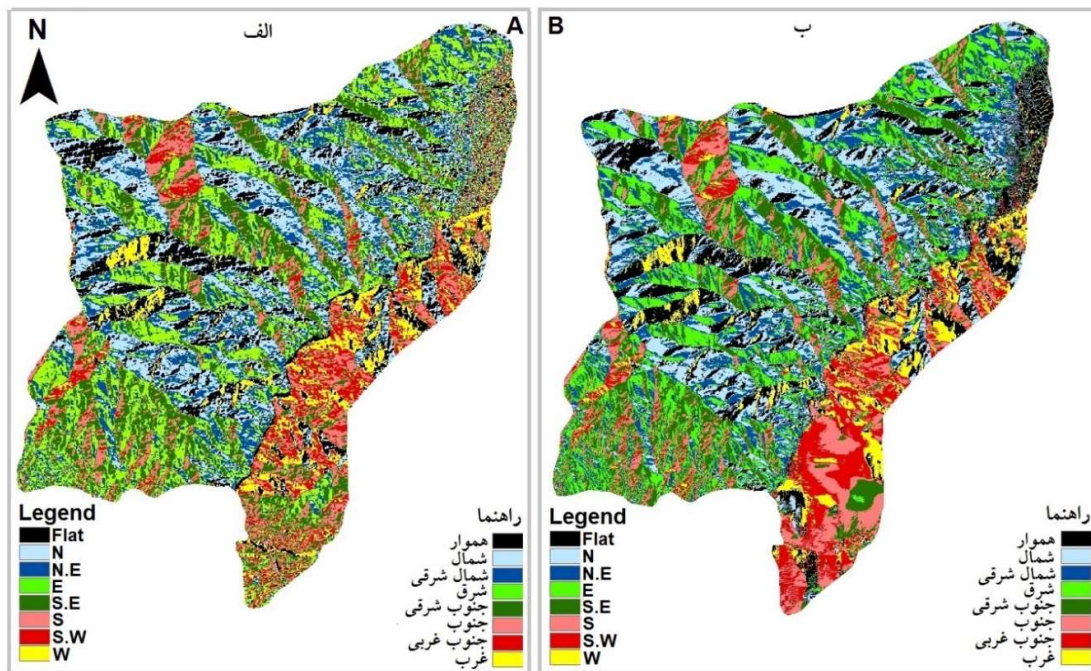
¹ Stream Power Index



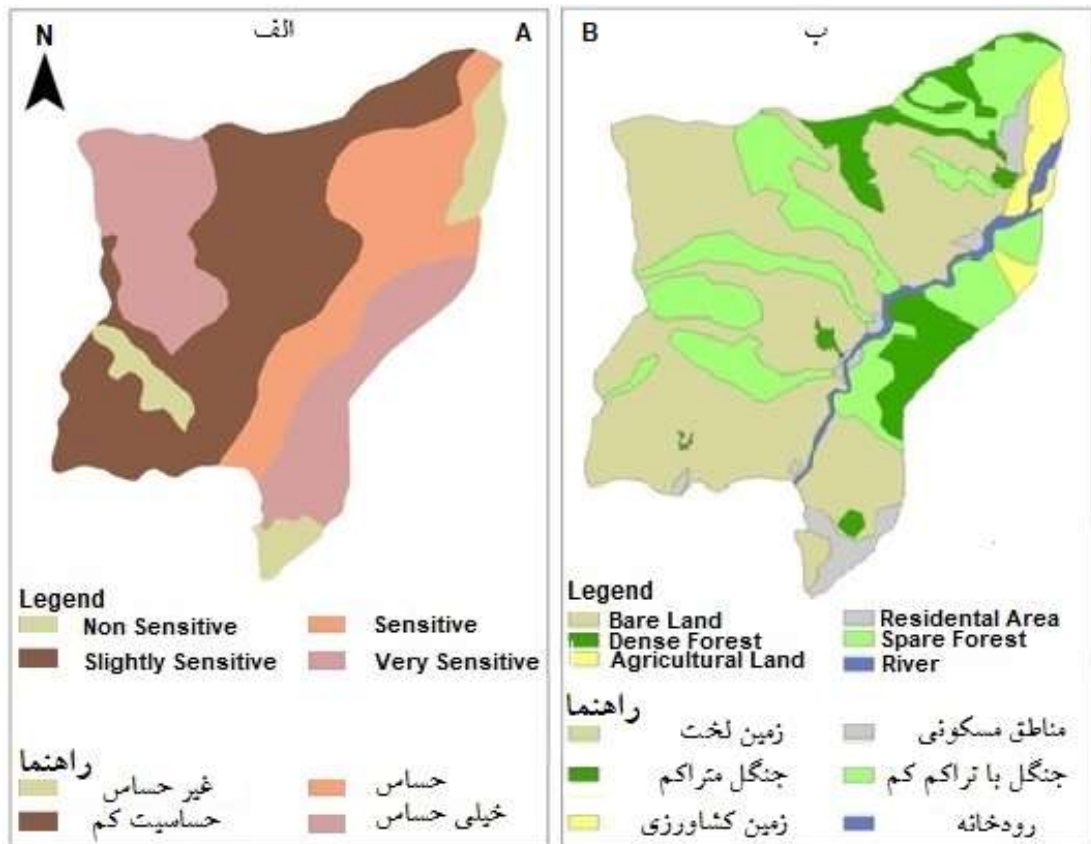
شکل ۳- شاخص قدرت جریان برای دو نوع مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۰ متر (A) و ۳۰ متر (B)



شکل ۴- نقشه درصد شیب برای دو نوع مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۰ متر (A) و ۳۰ متر (B)



شکل ۵- نقشه جهت شیب برای دو نوع مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۰ متر (A) و ۳۰ متر (B)



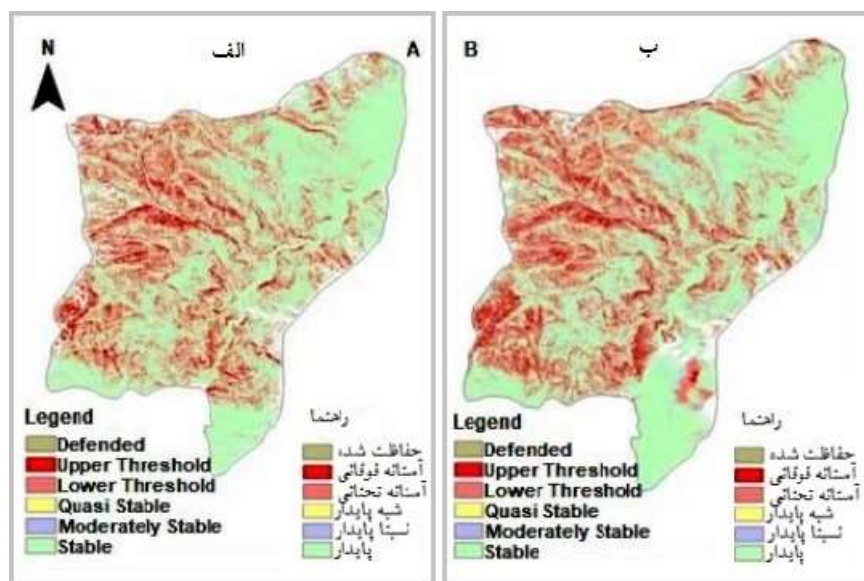
شکل ۶- نقشه حساسیت خاک به زمین لغزش (A) و نقشه کاربری اراضی (B)

جدول ۱- حساسیت زیر گروه‌های بزرگ خاک به زمین لغزش

رده‌بندی خاک	درجه حساسیت
Soil classification	Soil Sensitivity Degree
لیتیک توری اورتنتس Lithic Torriorthents	حساسیت کم Slightly sensitive
تیپیک توری اورتنتس Typic Torriorthents	غیر حساس Non sensitive
تیپیک کلسی جیبسیدز Typic Calcigypsis	غیر حساس Non sensitive
کلسیک هاپلو زرپتس Calcic haploxerpts	خیلی حساس Very sensitive
آکوئیک کلسی زرپتس Aquic calcixerpts	حساس Sensitive
لیتیک هاپلو زرالفس Lithic Haploxeralfs	خیلی حساس Very sensitive
تیپیک هاپلو زرالفس Typic Haploxeralfs	با حساسیت کم Slightly sensitive

به‌کار می‌رود که حتی با وجود حداکثری پارامترهای ناپایدارکننده، باز هم دچار شکست شیب نمی‌شوند.

در شکل ۷ توزیع این آماره برای دو مدل رقومی ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه ارائه شده‌است. واژه‌های پایدار^۱، نیمه‌ناپایدار^۲ و شبه‌پایدار^۳ (شکل ۷) برای مناطقی



شکل ۷- توزیع شاخص پایداری برای دو مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر (A) و ۳۰ متر (B)

شدت و بزرگی عوامل ناپایدارکننده شیب (به عنوان مثال افزایش رطوبت در پای شیب به علت احداث جاده یا

بنابراین شاخص پایداری در این موارد به صورت ضریب اطمینانی تعریف می‌شود که برآوردی است از

³ Quasi-stable

¹ Stable

² Moderately Stable

رنگ زرد^۹ در شکل ۸ شامل خطالراس‌ها، و مناطق بالای دامنه‌ها و ارتفاعات است^{۱۰} (شکل ۹)، اساساً بعثت عدم وجود خاک سطحی یا عمق بسیار کم آن، دارای ذخیره رطوبت کمی است. مناطق سبز رنگ^{۱۱} در شکل ۸ نیز شامل محدوده میانی دامنه‌ها می‌باشد که نسبت به مناطق بالادست دارای شیب کمتر و لایه خاک کم عمقی هستند^{۱۲} (شکل ۹). لذا دارای مقدار ذخیره رطوبت جزئی می‌باشند. مناطق سبز پر رنگ^{۱۳} عمدتاً در پای ارتفاعات و جبهه آنها فراردار^{۱۴} است. این مناطق دارای خاک با عمق متوسط و شیب کمتری بوده و در نتیجه دارای ذخیره رطوبت نزدیک به اشباع هستند. در نهایت رنگ آبی^{۱۵} شامل مناطق اشباع از رطوبت است. این مناطق (به استثناء رودخانه سد سفید رود) شامل خطالقره‌های ارتفاعات و اراضی پایین‌دست آنها می‌باشد که دارای ذخیره رطوبت زیاد در خاک بوده و به سمت ناحیه مقعر شکل و همگرای پایین دامنه‌ها تمایل دارند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، کلیه مناطق فوق‌الذکر در نقشه مستخرج از DEM با توان تفکیک ۱۰ متر بخوبی و با دقت بیشتری نسبت به DEM با قدرت تفکیک زمینی ۳۰ متر شناسایی شده‌است.

با توجه به مطالب گفته‌شده هر چه توده خاک، از درجه اشباع بیشتری از رطوبت برخوردار باشد، ناپایداریتر شده و احتمالاً به سمت پایین دامنه حرکت می‌کند و سبب بروز زمین‌لغزش می‌شود. از بین عوامل توپوگرافی مورد استفاده در این تحقیق، ویژگی قدرت جریان در بررسی تأثیر بارش بر روی آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه‌ها، کارایی مناسبی دارد (Affandani and Kusratmoko, 2019). در واقع پارامتر

بارگذاری بر روی شیب). از سوی دیگر، واژه حد آستانه فوقانی^۱ نشان‌دهنده مناطقی است که در آن احتمال وجود بی‌ثباتی شیب بیشتر از ۵۰ درصد است و نیازی به وجود عوامل خارجی تشدیدکننده جهت ناپایداری شیب نیست و ناپایداری می‌تواند به سادگی با تغییر در ارزش پارامترهای داخلی مدل به دست آید. در مورد واژه حد آستانه تحتانی^۲، موضوع برعکس می‌باشد. واژه شیب حفاظت شده^۳ نیز مناطقی را نشان می‌دهد که هرگونه تغییر در دامنه عددی پارامترهای ورودی، نمی‌تواند از ناپایداری آنها جلوگیری کند زیرا شیب منطقه ناپایدار است (Naqa and Abdelghafoor, 2006). این گونه شیب‌ها متأثر از عواملی هستند که در مدل شبیه‌سازی نمی‌شوند یا قادر به شبیه‌سازی آنها نیست (مانند برآمدگی‌های سنگی با شیب زیاد) (Meisina and Scarabelli, 2007). شکل ۸، توزیع درجه اشباع خاک از رطوبت برای دو مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر (A) و ۳۰ متر (B) را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل و همچنین در شکل ۹ دیده می‌شود، مناطق دارای رطوبت زیاد در خاک و یا اشباع خاک سطحی از آب، تمایل به حرکت به سمت ناحیه مقعر شکل و همگرایی به سمت پایین دامنه‌ها^۴ را دارند (شکل ۹). خاک این منطقه در پایین‌دست، ابتدا ویژگی‌های واریزه‌ای^۵ داشته و بتدریج که به سمت آبراهه اصلی حرکت می‌کند^۶ دارای خصوصیات آبرفتی^۷ می‌شود. لازم به ذکر است که شیب زمین نیز بتدریج کاهش پیدا کرده و بالطبع آن پایداری شیب منطقه افزایش پیدا می‌کند. منشا زمین‌لغزش‌ها اکثراً در مناطق همگرای دامنه‌ها (از لحاظ توپوگرافی) واقع شده‌است (Dietrich et al., 1992; Sidle, 1992; Remondo et al., 2003; Shoaie, 2015).

⁹ Low Saturation

¹⁰ Mountain Top or Summit

¹¹ Partially Wet

¹² Mountain Flank or Shoulder and Back Slope

¹³ Threshold Saturation

¹⁴ Mountain Base or Foot Slope

¹⁵ Saturation Zone

¹ Upper Threshold

² Lower Threshold

³ Defended slope

⁴ Saturation Zone

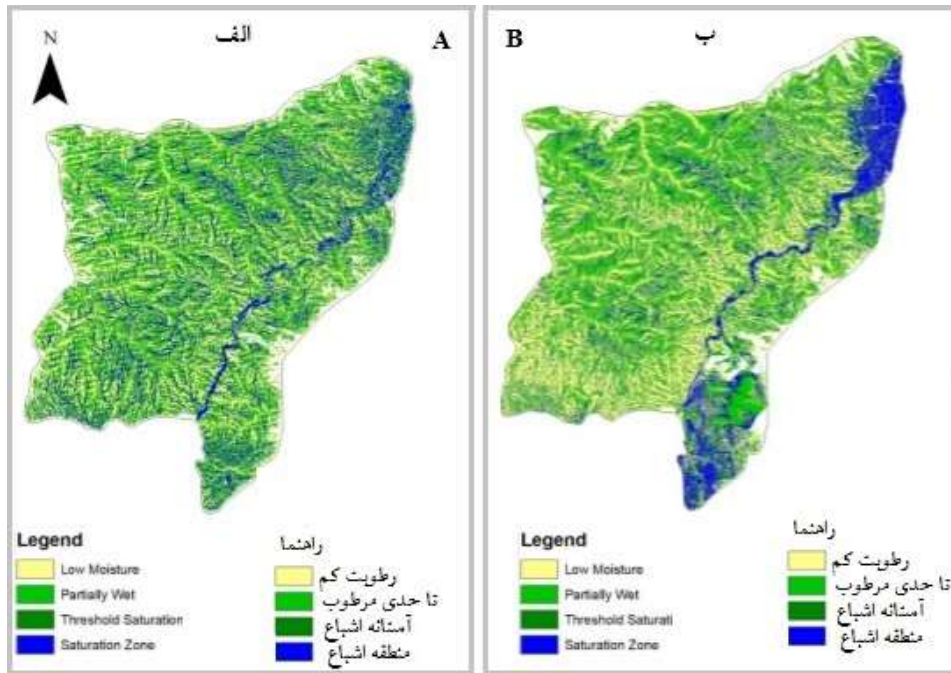
⁵ Valley Floor

⁶ Colluvial

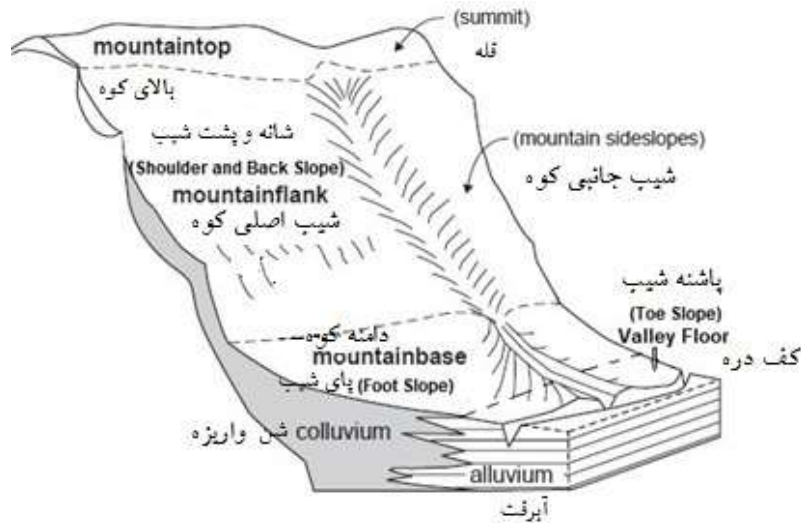
⁷ Valley Floor or Toe Slope

⁸ Alluvium

فوق‌الذکر افزایش خطر فرسایش در اثر جریان آب و احتمال وقوع حرکات توده‌ای را خاطر نشان می‌کند.



شکل ۸- توزیع درجه اشباع خاک از رطوبت برای دو مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر (A) و ۳۰ متر (B)



شکل ۹- بخش‌های مختلف یک دامنه شیبدار در یک کاتنا (۲۵)

۸ نیز تأیید می‌شود، به طوری که محدوده‌های اشباع‌شده در 10 متر DEM با پراکندگی زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده تطابق بیشتری دارد. همچنین مطابق جدول ۱، خاک‌های

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، DEM با قدرت تفکیک ۱۰ متر الگوی دقیق‌تری از تمرکز رطوبت در نواحی مقعر دامنه ارائه می‌دهد. این موضوع در شکل

برای این پارامترها در نظر گرفت. بعبارت دیگر همان مفهوم عدم قطعیت که به صورت طبقات نسبی خطر زمین لغزش ارائه می‌شود، را دربر می‌گیرد (Talebi and Eizaddost, 2011). این تحقیق نشان داد، هرچه مدل رقومی ارتفاعی مورد استفاده دارای توان تفکیک بزرگتری باشد، اعتبار و دقت پارامترهای توپوگرافی مستخرج از آن و تجزیه و تحلیل‌های مرتبط با آن نیز دقیق‌تر خواهد بود. لذا کارایی و دقت نتایج مدل SINMAP به شدت وابسته به کیفیت، دقت و درستی پردازش DEM استفاده شده دارد. اخیراً به دلیل صرفه‌جویی در زمان و هزینه، استفاده از مدل‌های ارتفاعی رقومی آماده و قابل بارگذاری از طریق اینترنت بسیار رواج یافته است. اما نکته‌ای که باید به آن توجه داشت، این است که این نوع داده‌ها برای هر نوع منطقه‌ای با هر وسعت و مقیاس مطالعاتی مناسب نیستند.

لازم به یادآوری می‌باشد که نتایج شکل‌های ۲ تا ۹ نشان داد که کیفیت DEM تأثیر مستقیمی بر دقت برآورد درجه اشباع (شکل ۸) و طبقه‌بندی شاخص پایداری (شکل ۷) دارد. به‌طور خاص، DEM با تفکیک ۱۰ متر توانست نواحی مقعر همگرا را که منشأ اصلی لغزش‌ها هستند (شکل ۹) با دقت بیشتری شناسایی نماید. بر اساس جدول ۱ و تطابق آن با نقشه شیب (شکل ۴)، مشخص شد که حساس‌ترین خاک‌ها در شیب‌های متوسط تا زیاد متمرکز شده‌اند که بیانگر اثر متقابل بافت خاک و توپوگرافی در کنترل ناپیداری است.

Lithic Haploxerpts و Calcic Haploxerpts دارای بیشترین حساسیت بوده‌اند که این کلاس‌ها عمدتاً در دامنه‌های با شیب بیش از ۳۰ درصد (شکل ۴) توزیع شده‌اند. توزیع شاخص پایداری در شکل ۷ نشان می‌دهد که مساحت طبقات Upper Threshold و Lower Threshold در DEM با تفکیک ۱۰ متر نسبت به ۳۰ متر افزایش یافته است، که بیانگر توانایی بیشتر این DEM در آشکارسازی نواحی ناپایدار موضعی است.

نتیجه‌گیری کلی

در بیان قابلیت‌های مدل SINMAP باید گفت که نتایج این مدل زمانی که در مقایسه با سایر روش‌های مشابه برای محاسبه شاخص پایداری اراضی شیب‌دار قرار می‌گیرد و همچنین زمانیکه با حجم کمی از اطلاعات همراه با عدم قطعیت و دامنه نوسان زیاد مواجه هستیم (Wu and Sidle, 1995; Remondo et al., 2003; Meisina and Scarabelli, 2007; Qiao et al., 2013; Sachinthaka et al., 2025). می‌تواند نتایج مفیدی برای محققین در برداشته باشد. نکته مهمی که باید مورد توجه قرارداد این است که این مدل برای تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی زمین‌لغزش‌هایی استفاده می‌شود که توسط جریان‌های آب زیرزمینی کم‌عمق و همگرا کنترل می‌شوند. اجرای این مدل نیاز به برخی داده‌های محیطی مانند اقلیم و خاک دارد که این داده‌ها در هر دو بُعد زمان و مکان متغیر هستند. به همین دلیل آنچه که این مدل را متمایز می‌کند این است که، کاربر نیازی به تعریف دقیق عددی پارامترهای فوق ندارد و می‌توان دامنه‌ای از مقادیر را

REFERENCES

- Affandani, A.Y., & Kusratmoko, E. (2019). Landslide susceptibility mapping using sinmap method in a small hilly area: case study in Cibanteng Village. West Java. *In IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 311(1), 012027.
- Akbari, A., Yahaya, F.B.M., Azamirad, M., & Fanodi, M. (2014) Landslide susceptibility mapping using Logistic regression analysis and GIS tools electronic. *Journal of the Geotechnical Engineering*. 19, 1687-1997.
- Alimohamadi, S., Pashayi Aval, A., Shatayi Jouybari, S., & Parsayi, L. (2009). Evaluation of efficiency of landslide hazard zonation methods on SeyedKalateh Ramian basin. *Journal of Water and Soil Conservation*. 16(1), 59-78.

- Arabameril, A.R., Rezaei, Kh., Yamani, M., & Shirani, K. (2019). Performance assessment of integrated model of data driven EBF model and knowledge driven AHP model in Landslide spatial modeling (Case study: Ferydoun Shahr watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(2), 47-66.
- Cha, A. (2014). A comparison on the identification of landslide hazard using geomorphological characteristics. *Journal of the Korean GeoEnvironmental Society*, 15, 67-73.
- Chang, Z., Huang, F., Huang, J., Jiang, S.-H., Liu, Y., Meena, S. R., & Catani, F. (2023). An updating of landslide susceptibility prediction from the perspective of space and time. *Journal of Geoscience Frontiers*, 14(5), 101619.
- Darvishzadeh, A. (2009). Geology of Iran, Amir Kabir Publication. Pub No: 3. Pp: 343. (In Persian)
- Deb, S.K., & El-Kadi, A.I. (2009). Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events. *Journal of the Geomorphology*, 108, 219-233.
- Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R., McKean, J., and Bauer, R. (1992). Erosion thresholds and land surface morphology. *Geology*, 20, 675-679.
- Fowze, J.S., Buena, D.A., Daag, M.K., & Samarkoon, L. (2007). Spatial modeling of rain-triggered Landslides (A case study in Southern Leyte Province, Philippines). 28th Asian Conference on Remote Sensing. Kuala Lumpur. Pp. 156-163.
- Fratini, P., Crosta, G.B., Fusi, N., & Negro, P. (2004). Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modeling approach for hazard assessment. *Engineering Geology*, 73(3-4), 277-295.
- Ghayoomian, J., & Farhadi nejad, T. (2005). Landslide hazard zonation using GIS (case study in Nozian Sorkhab basin). P 578-579. Second Iranian Engineering Geological and Environmental Conference. (In Persian).
- Hassanzadeh Nafotil, M., Chabok Boldaje, M., & Ebrahimi Khosfi, Z. (2012). Landslide Hazard Zonation Using Spatial Multi Criteria Evaluation Method (SMCE) (Case Study: Shalmanrood Watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(1), 99-116.
- Iverson, R.M., George, D.L., Allstadt, K.M., Reid, E., Collins, B.D., & Godt, J.W. (2000). Landslide mobility and hazards: implications of the 2014 Oso disaster. *Journal of the Earth and Planetary Science Letters*, 412, 197-208.
- Lago-Hubp, J., & Zamorano, J.J. (2010). Effect of pixel size on cartographic representation of shallow and deep-seated landslide, and its collateral effects on the forecasting of landslides by SINMAP and Multiple Logistic Regression landslide models. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 35(3-5), 137-148.
- Lee, S. M., & Lee, S. J. (2024). Landslide susceptibility assessment of South Korea using stacking ensemble machine learning. *Geoenvironmental Disasters*, 11, 7. <https://doi.org/10.1186/s40677-024-00271-y>.
- Meisina, C., & Scarabelli, S. (2007) A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Journal of the Geomorphology*, 87, 207-223.
- Motevalei, A.R., Talebi, A., Safaei, M., & Ekhtesasi, M.R. (2018). The effectiveness of two SINMAP and SHALSTAB physical base models in landslide risk assessment zone (Case Study: Chahardangeh Area, Mazandaran Province). *Journal of the Natural Resources of Iran*, 70(1), 207-218. (In Persian)
- Naqa, A., & Abdelghafoor, M. (2006) Application of SINMAP terrain stability model along Amman-Jerash-Irbid highway, North Jordan. *Electronic Journal of the Geotechnical Engineering*. Bunde B.
- Qiao, G.Lu., Scaioni, M.S., Tong, Xu.S., Feng, Y., & Wang, W. (2013). Landslide investigation with remote sensing and sensor network: From susceptibility mapping and scaled-down simulation towards in situ sensor network design. *Journal of Remote Sensing*, 5, 4319-4346.
- Remondo, J., Gonzalez, A., Teran, J., Cendrero, A., Fabbri, A., & Chung, C. (2003). Validation of landslide susceptibility maps, examples and applications from a case study in northern Spain. *Natural Hazard*, 30(3), 437-449.
- Sachinthaka, R., Kalatehjari, R., & Brook, M. S. (2025). Evolution and critical evaluation of deterministic physically based rainfall-induced landslide susceptibility mapping: a mixed review. *Natural Hazards*, 121, 20795-20818. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07634-0>.
- Sangchini, E.K., & Nowjavan, M.R. (2015) Landslide susceptibility mapping using logistic statistical regression in Babaheydar Watershed. Chaharmahal Va Bakhtiari Province, Iran. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 65(1), 30-40.

- Shahri, A., Malehmir, A., & Juhlin, C. (2015). Soil classification analysis based on piezocone penetration test data—a case study from a quick-clay landslide site in southwestern Sweden. *Engineering geology*, 189, 32-47.
- Shoaie, Z. (2015). *Landslide (Recognition, evaluation and control)*. Geological Survey of Iran. Press. 135p. (In Persian).
- Sidle, R. (1992). A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. *Water Resources Research*, 28(7), 1897-1910.
- Talebi, A., & Eizaddost, M. (2011). An investigation of the efficiency of SINMAP Model in landslide risk assessment (A Case Study of Ilam Dam Watershed). *Journal of the Iran Watershed Science and Engineering*, 5(15), 63-68. (In Persian)
- Wang, P., Teng, H., Wang, M., Deng, Y., Liu, F., & Mu, H. (2025). Hazard Assessment of Shallow Loess Landslides Under Different Rainfall Intensities Based on the SINMAP Model: A Case Study of Yuzhong County. *Applied Sciences*, 15(21), 11556. <https://doi.org/10.3390/app152111556>.
- Wu, W., & Sidle, R.C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested watersheds. *Water Resources Research*, 31(8), 2097-2110.
- Yarahmadi, J., Rostaei, Sh., & Rafiei, M. (2016). Slope instability modeling in Touhav watershed using GIS. *Journal of the Quantitative geomorphology researches*. 4(30): 84-96.