

## Landslide sensitivity assessment using fuzzy logic approach and GIS in Neka Watershed

Mehrab Zali<sup>1\*</sup>, Kaka Shahedi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

### Abstract

#### Introduction

Landslide is an important geological hazard and one of the natural disasters that are constantly happening around the world. The factors that cause landslides are numerous and complex. Today, due to the importance of landslides and the effects of not paying attention to this issue, risk prevention has become an important tool in land use planning and management. Given the sensitivity and importance of this issue, the preparation of zoning maps of landslide sensitivity is very important and should be considered. These maps show landslide-prone areas and safe areas. Effective use of the landslide map can reduce the potential damage to the event and thus avoid many hazards. Landslides are natural events, but they can become dangerous and cause casualties and damage to man-made and natural structures.

#### Materials and Methods

The study area is the Neka Watershed located in the east of Mazandaran Province. To study landslides in this study, from nine maps including land use, slope, geology, slope direction, land curvature, distance from faults, communication routes, sewage from the river, and rainfall were selected and each map was extracted to produce the final landslide map. Finally, the maps were finalized in GIS software and the final map was prepared using the fuzzy logic method. In the fuzzy model, each of the pixels in the map is given a value between zero and one. To perform fuzzy in ArcGIS software the fuzzy Membership tool was applied. In this research, the Shannon entropy method was also used. Finally, the landslide map was extracted and evaluated. According to the final map and its studies, landslide-sensitive areas were identified.

#### Results and Discussion

Various factors, in relation to each other and in relation to local characteristics, cause domain instability. Instability factors with different contributions to the occurrence of mass movements, especially in the occurrence of landslides. To study landslides in this study, from 9 maps including land use, slope, geology, slope direction, land curvature, distance from the fault, communication paths (sewage from the road), sewage from the river and rainfall, and the map of each separately. The final landslide map was extracted to prepare the map. The maps were prepared in the final GIS software and the final map was prepared using the fuzzy logic method. The fuzzy model was performed using Arc GIS software and each of the pixels in the map was given a value between zero and one. The Shannon entropy method was used in this study. Finally, the landslide map was extracted and evaluated. According to the final map and its studies, landslide-sensitive areas were identified.

#### Conclusion

Based on the knowledge-based approach, the evaluation of several parameters such as geology, slope, land cover, slope direction, land curvature, rainfall, distance to flow, distance to road, and distance to fault were overlaid and the landslide map was extracted. A numerical scale (1-5) from very high to very low impact was used. Areas with high and very high sensitivity have been recorded in areas without vegetation and with high slopes and high rainfall. Sub-watersheds N2 and N1 are ranked 1st and 2nd, respectively, in terms of high landslide potential. The reason for the high intensity of landslides in these two sub-watersheds is low vegetation and a high slope.

**Keywords:** Entropy Method, Fuzzy Logic, GIS, Landslide

**Article Type:** Research Article

\*Corresponding Author, E-mail: Mehrabzali4955@gmail.com

**Citation:** Zali, M., & Shahedi, K. (2021). Landslide sensitivity assessment using fuzzy logic approach and GIS in Neka Watershed. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(1), 67-80.

DOI: 10.22098/MMWS.2021.1183

DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.1.6.4

Received: 11 May 2021, Accepted: 23 May 2021

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2021, Vol. 1, No. 1, pp. 67-80

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از رویکرد منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز نکارود

مهراب زالی<sup>۱\*</sup>، کاکا شاهدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

### چکیده

زمین لغزش نتیجه فرآیندهای مختلف ژئودینامیکی است و نوع مهمی از بلای طبیعی را نشان می‌دهد. این پدیده با آسیب رساندن به زیرساخت‌ها و ساختمان‌ها موجب خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی می‌شود. زمین لغزش‌ها عمدتاً توسط عوامل متعددی شامل زمین‌شناسی، خصوصیات شیب، و سایر عوامل که در ایجاد زمین لغزش تأثیر دارند، حادث می‌شوند. زمین لغزش شایع‌ترین پدیده در شمال ایران است که هر ساله خسارت‌های مالی و جانی قابل توجهی به بار می‌آورد. یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد برای کاهش این خسارت‌ها، تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش با استفاده از روش‌های مناسب و انتخاب عوامل مناسب است. در این پژوهش در حوزه آبخیز نکارود در استان مازندران با استفاده از روش منطق فازی در نرم‌افزار Arc GIS و ادغام نقشه‌هایی که در شناسایی مناطق زمین لغزش تأثیر زیادی دارند، مناطقی با پتانسیل بالا تا کم از مقدار یک تا پنج به زمین لغزش اختصاص داده شد. نتایج نشان داد زیرحوضه N1 با مقادیر ۳۷/۵۹ (بسیار ضعیف)، ۳۵/۵۵ (ضعیف)، ۲۵/۲۱ (متوسط)، ۱۷/۴۱ (خوب) و ۱۱/۲۵ (بسیار خوب) درصد در اولویت اول مستعد وقوع زمین لغزش قرار دارد. با مقایسه زیرحوضه‌ها با یکدیگر از لحاظ زمین لغزش، زیرحوضه N12 با مقادیر ۷/۳۷ (بسیار ضعیف)، ۱۴/۱۲ (ضعیف)، ۲۳/۳۳ (متوسط)، ۲۶/۴۹ (خوب) و ۲۸/۶۹ (بسیار خوب) در وضعیت بهتری از لحاظ وقوع زمین لغزش قرار دارد. زیرحوضه‌های N3، N4، N5 و N6 با توجه به میزان حساسیت به زمین لغزش حالت متوسط به بالا و متوسط دارند و از زیرحوضه N7 تا N11 از میزان حساسیت زمین لغزش‌ها کاسته می‌شود. نتایج به دست آمده به وضوح نشان می‌دهد که تراکم حوادث رانش زمین با درجه حساسیت عواملی مانند شیب، فقدان پوشش گیاهی و نیز افزایش میزان نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج جهت کاهش زمین لغزش جلوگیری از تغییرات کاربری اراضی و انجام مطالعات قبل از انجام هر گونه کار عمرانی مانند احداث جاده الزامی است. نتایج این پژوهش برای برنامه‌ریزان، تصمیم‌گیران، پژوهش‌گران و برنامه‌ریزان عمومی استفاده از زمین در منطقه مورد مطالعه مفید و اساسی است.

واژه‌های کلیدی: روش آنتروپی، زمین لغزش، منطق فازی، GIS

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mehrazali4955@gmail.com

استناد: زالی، م.، و شاهدی، ک. (۱۴۰۰). ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از رویکرد منطق فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوزه آبخیز نکارود. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۱)، ۶۷-۸۰.  
DOI: 10.22098/MMWS.2021.1183  
DOR: 20.1001.1.27832546.1400.1.1.6.4



تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۰، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۶۷ تا ۸۰  
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی  
© نویسندگان

## ۱- مقدمه

زمین لغزش در سطح جهان، یکی از جدی ترین و قابل توجه ترین خطرات طبیعی محسوب می شود (Chen and Chen, 2021). خطرات و بلاای طبیعی همیشه اثرات منفی بر نحوه زندگی انسان ها دارند. زمین لغزش یک فاجعه طبیعی است و علاوه بر به خطر افتادن جان انسان ها، باعث از بین رفتن منابع طبیعی نیز می شود (Ali et al., 2021). عواملی که باعث ایجاد زمین لغزش می شوند، بسیار زیاد و در عین حال پیچیده هستند. پژوهش گران در رابطه با پدیده زمین لغزش نظرات متفاوت و تعریف های متفاوتی را بیان کرده اند. برای نمونه، طبق (Hutchinson 1988)، رانش زمین به معنای دقیق آن یک هدررفت سریع جرم است که باعث حرکت توده از مواد به سمت پایین شیب زمین شده که توسط محرک هایی ایجاد می شود. تعریف جدیدی نیز در سال های اخیر توسط (Courture 2011) ارائه شد. طبق تعریف ایشان، زمین لغزش حرکتی از توده خاک یا سنگ در جهت شیب به سمت پایین است. حرکت های توده زمین، ناشی از شرایط طبیعی مرتبط با توپوگرافی، زمین شناسی و هیدروژئولوژی، به عنوان زمین لغزش تعریف می شوند (Pham et al., 2019).

زمین لغزش از خطرناک ترین فرآیندهای طبیعی است که سالانه در جهان باعث خسارت های اقتصادی و اجتماعی عظیمی می شود و آسیب های زیادی را به بار می آورد (Roccati et al., 2021). رانش زمین و آوارهای کم عمق یکی از مهم ترین دلایل تخریب سازه ها و زیرساخت ها، مجروحان و تلفات در مناطق کوهستانی است. بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط مرکز تحقیقات در مورد بلاای طبیعی، رانش زمین و فرآیندهای مربوطه به آن باعث کشته شدن بیش از ۶۱۰۰۰ نفر بین سال های ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۹ شده است (EMDAT, 2010). طبق نتایج (Brabb 1993)، در صورت شناسایی رویداد زمین لغزش قبل از وقوع، می توان از حداقل ۹۰ درصد از تلفات زمین لغزش جلوگیری کرد. از این رو، در مقیاس های مختلف مکانی نیاز مبرم به ارزیابی خطر لغزش وجود دارد. علاوه بر شرایط طبیعی مانند بارش های شدید و یا زلزله، فعالیت های انسانی مربوط به ساخت و ساز، استخراج معادن و جنگل زدایی و تخریب اراضی نیز می تواند به زمین لغزش کمک کند (Wang et al., 2015). امروزه با توجه به اهمیت موضوع زمین لغزش و تأییراتی که در پی عدم توجه به این موضوع ایجاد می کند، جلوگیری از خطرات و آسیب های آن به ابزاری مهم در برنامه ریزی و مدیریت کاربری اراضی تبدیل شده است (Hadmoko et al., 2010). نقشه برداری از حساسیت به زمین لغزش به شناسایی و هدف قرار دادن اقدامات پیش گیرانه از رانش زمین

کمک می کند و در نتیجه تلفات احتمالی را به حداقل می رساند (Pawan et al., 2021).

با توجه به حساسیت و اهمیت این موضوع تهیه نقشه های منطقه بندی حساسیت به زمین لغزش (LSZ)<sup>۱</sup> از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و باید به آن توجه شود. این نقشه ها مناطق مستعد رانش زمین و مناطق امن را نشان می دهند. استفاده مؤثر از نقشه زمین لغزش می تواند آسیب احتمالی رویداد را کاهش دهد و در نتیجه از بسیاری از خطرات جلوگیری کند (Pourghasemi et al., 2012). نقشه برداری از حساسیت زمین لغزش بر اساس شناختی است که باید از حرکت آن در جهت شیب و عوامل کنترل کننده آن داشت. بنابراین، قابلیت اطمینان این نقشه ها عمدتاً به کمیت و کیفیت داده های موجود، مقیاس کار و انتخاب روش مناسب بستگی دارد (Ayalew and Yamagishi, 2005). یکی از اولین مراحل در مدیریت زمین لغزش ایجاد نقشه حساسیت به لغزش است که از طریق آن می توان سطح لغزش های احتمالی را بررسی کرد (Thiery et al., 2020). یک نقشه حساسیت به زمین لغزش به عنوان مرجعی برای مدیریت حوادث است (Khan et al., 2020). ارزیابی و نقشه برداری از حساسیت به زمین لغزش در دهه های گذشته با استفاده از روش های مختلف توسعه یافته است. این تکنیک ها به منظور دستیابی به نتایج دقیق تر و بهتر طراحی شده اند و امروزه مورد استفاده قرار می گیرد (Lee, 2007).

روش های کیفی جزء روش های توصیفی و ذهنی هستند. این روش ها بر اساس دانش تخصصی در مورد حساسیت به زمین لغزش و نقشه برداری از خطر این پدیده ساخته شده اند (Mandaglio et al., 2016). رویکرد کیفی به دو گروه طبقه بندی می شود: ۱- دسته اول تجزیه و تحلیل ژئومورفولوژی است که یک روش مستقیم مبتنی بر شناخت و تجربه پژوهش گران در نقشه برداری از حساسیت لغزش به طور مستقیم است. ۲- دسته دوم نشان دهنده روش های غیرمستقیم است که در آن ها همه متغیرهای تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش رتبه بندی می شوند و یک مقدار وزن بر اساس روش منطق فازی از روش ترکیبی خطی وزنی (WLC)<sup>۲</sup> برای ترکیب عوامل مختلفی استفاده شده است که در آن هر متغیر در وزن اختصاص یافته خود ضرب می شود. روش کیفی به نقشه موجودی برای نقشه برداری از حساسیت زمین لغزش نیاز ندارد (Vakhshoori et al., 2019).

رانش زمین رویدادی طبیعی است، اما ممکن است به خطر تبدیل شود و باعث تلفات جانی و خسارت به سازه های ساخته شده

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبخیز رودخانه نکا واقع در شرق استان مازندران است که بخشی از آن (رودخانه نکا) که در بالادست این حوضه واقع شده است، در امتداد شرق به غرب و بخش دیگری از آن که از داخل شهر نکا عبور می‌کند، در امتداد شمال به جنوب به سمت دریای خزر جریان دارد. این منطقه حدوداً بین ۵۳ درجه و ۱۷ دقیقه الی ۵۴ درجه و ۴۴ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه الی ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این حوزه آبخیز از شمال به حوزه آبخیز قره‌سو و حوزه آبخیز کوچک خلیج گرگان و از غرب به حوزه آبخیز رودخانه تجن و از شرق به حوزه آبخیز قره‌سو گرگان و از جنوب به حوزه آبخیز تجن و حوزه آبخیز استان سمنان منتهی می‌شود. حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه از ۹۰- تا ۳۸۰۶ متر تغییر می‌کند. متوسط بارش منطقه ۶۰۰ میلی‌متر است. حوزه آبخیز نکا از لحاظ پوشش گیاهی شامل جنگل‌های انبوه و متراکم است. شیب منطقه از جنوب شرق به سمت شمال غرب است. قسمت شمال غرب منطقه، جلگه ساحلی و نیز از لحاظ توپوگرافی یک منطقه نسبتاً همواری دارد، در حالی که سایر بخش‌های حوزه آبخیز توپوگرافی کوهستانی دارد. با توجه به نقشه‌های هیدرولوژیکی خاک آبخیز نکارود، غالب سطح حوزه آبخیز در گروه هیدرولوژیکی C قرار گرفته است. سازند زمین‌شناسی حوضه غالباً از لایه نازک آهکی تشکیل شده است. به جز ایستگاه نوذآباد که در برخی از ماه‌های آن، جریان صفر است (به‌علت استفاده از آب برای مصارف کشاورزی)، شبکه رودخانه در بقیه ایستگاه‌ها دارای شرایط دائمی است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

نقشه زمین‌لغزش یک گام اساسی و بسیار مهم برای پیش‌بینی حساسیت و شناسایی مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش است (Del Ventisette et al., 2014). از این نقشه می‌توان برای جلوگیری از وقایعی که ممکن است در مناطق ناپایدار رخ دهد و مقایسه آن‌ها با نقشه حساسیت به زمین‌لغزش استفاده شود. نقشه زمین‌لغزش می‌تواند در مقیاس محلی، منطقه‌ای یا ملی تولید شود که برداشت و تهیه آن اساساً به دامنه مطالعات بستگی دارد (Cardinali et al., 2002). پژوهش‌گران روش‌های مختلفی را برای تهیه نقشه زمین‌لغزش پیشنهاد کرده‌اند. برای مطالعه زمین‌لغزش در این پژوهش، از نه نقشه شامل کاربری زمین، شیب، زمین‌شناسی، جهت دامنه، انحنای زمین، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و بارش انتخاب و نقشه هر کدام به‌صورت مجزا جهت تولید نقشه نهایی زمین‌لغزش، استخراج و مورد ارزیابی واقع شد

توسط بشر و طبیعی شود. بارش‌های زیاد به‌عنوان یک عامل محرک می‌تواند در بسیاری از نقاط جهان موجب ایجاد زمین‌لغزش‌ها شود که در طول سال می‌تواند رخ دهد. این روش از یک روش چند متغیره استفاده می‌کند که هم‌زمان همه عوامل مؤثر در بی‌ثباتی را با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در نظر می‌گیرد. حساسیت زمین‌لغزش با محاسبه تراکم زمین‌لغزش با توجه به ترکیب عوامل مختلف بی‌ثباتی تعیین می‌شود. در شمال کشور نیز با توجه به بارش‌های زیادی که اتفاق می‌افتد، می‌تواند یکی از مهم‌ترین عامل‌ها در ایجاد زمین‌لغزش باشد. نقشه‌برداری از حساسیت لغزش برای مدیریت مناسب کاربری زمین و ارزیابی ریسک ضروری است. هدف از این مطالعه شناسایی مناطق حساس به زمین‌لغزش از طریق تهیه نقشه، می‌تواند ورودی مهمی در برنامه‌ریزی توسعه کاربری زمین باشد. بررسی زمین‌لغزش، به‌منظور شناخت مناطقی که دارای پتانسیل بالای زمین‌لغزش هستند حائز اهمیت است. با شناخت زمین‌های مستعد به زمین‌لغزش جهت شناسایی مکان‌های امن برای انجام فعالیت‌های انسانی از جمله ساخت راه، بخش‌های تأسیساتی و نیز در سایر بخش‌ها، اطلاعاتی را در اختیار کارفرمایان جهت تصمیم‌گیری درست با توجه به ویژگی منطقه قرار می‌دهد.

با مطالعاتی که در شرق استان مازندران در حوزه آبخیز نکا انجام گرفته است، بارندگی‌های با شدت‌های بیش‌تر را در این حوزه آبخیز عامل زمین‌لغزش دانسته‌اند (Mohammadi Vavsari et al., 2014). لذا استفاده از سامانه‌های جغرافیایی می‌تواند در حداقل زمان با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی، مناطق حساس به زمین‌لغزش را با دقت بالایی شناسایی کند. GIS ابزارهای قدرتمندی برای استخراج نقشه حساسیت به زمین‌لغزش و ارزیابی حساسیت لغزش را فراهم می‌کند (Psomiadis et al., 2020).

در این پژوهش با استفاده از GIS، مناطق دارای زمین‌لغزش در حوزه آبخیز نکا شناسایی شدند. با توجه به مشکل لغزش در شمال کشور و اینکه حوزه آبخیز نکا یکی از حوضه‌های آبخیز بزرگ مشترک بین استان‌های گلستان و مازندران است و موقعیت بسیار مهمی دارد، بررسی موضوع لغزش می‌تواند در آن برای مدیریت بهینه مفید و مؤثر باشد، این محل برای مطالعه انتخاب شده است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، شناسایی مناطقی با پتانسیل زمین‌لغزش بالا در حوزه آبخیز نکارود استان مازندران جهت جلوگیری از خطرات ناشی از این بالای طبیعی و مانع از ایجاد خسارت به‌صورت مالی و جانی است.

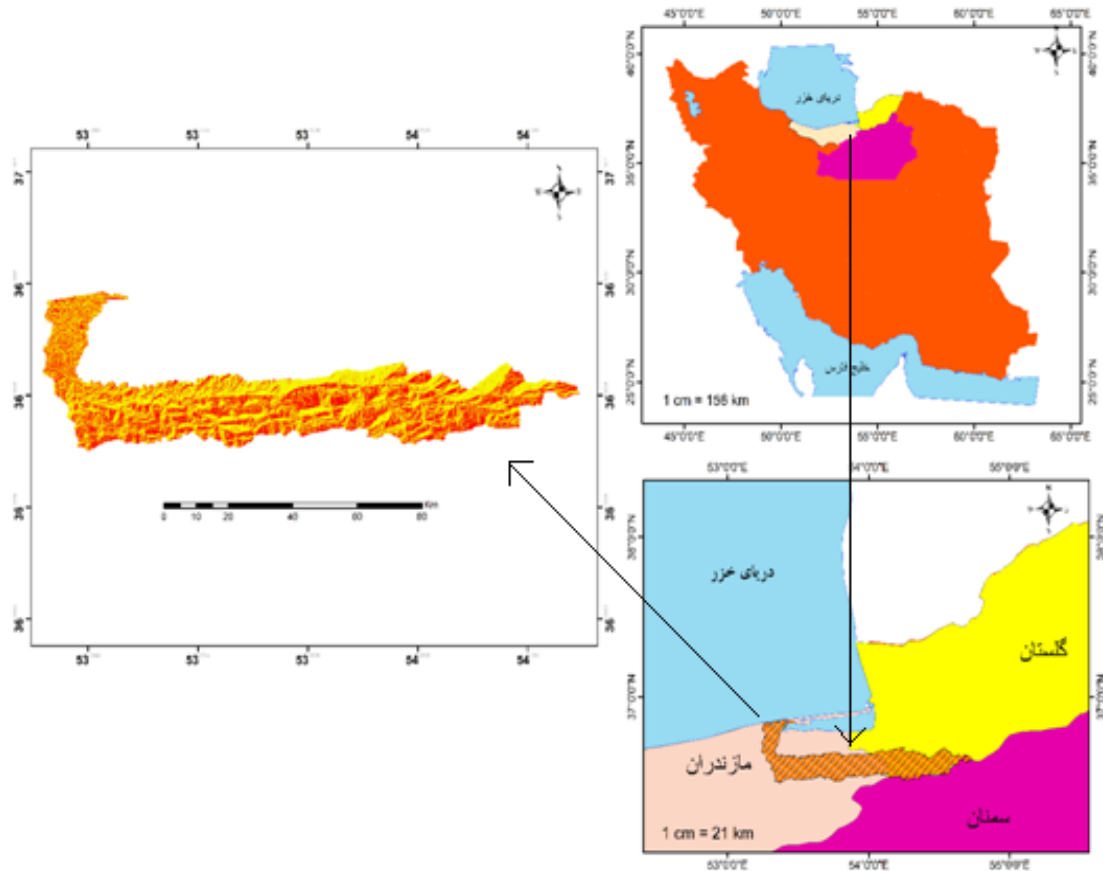
اطلاعات متغیرهای لازم برای استخراج نقشه زمین لغزش در جدول ۱ آورده شده است.

زمین‌شناسی متغیر مهمی در وقوع و نقشه‌برداری زمین لغزش است. ساختارهای زمین‌شناسی و ارتباط آن‌ها با پدیده‌های رانش زمین به‌طور مستقیم بر اساس مشخصات ژئومکانیکی، اتصالات ساختاری و ناپیوستگی‌های آن‌ها، رفتارهای هیدروژئولوژیکی و به‌طور غیرمستقیم کنترل عمق خاک و پوشش گیاهی فرآیندهای فرسایش را پوشش می‌دهد (Kouli et al., 2009). برای نقشه زمین‌شناسی با استفاده از ماهواره سنتینل (sentinel-1)، نقشه زمین‌شناسی تهیه شد (شکل ۳).

(Hong et al., 2007; Ahmed, 2015; Xiao et al., 2020).  
شکل ۲ روش پژوهش زمین لغزش و جدول ۱ اطلاعات کامل متغیرها را نشان می‌دهد.

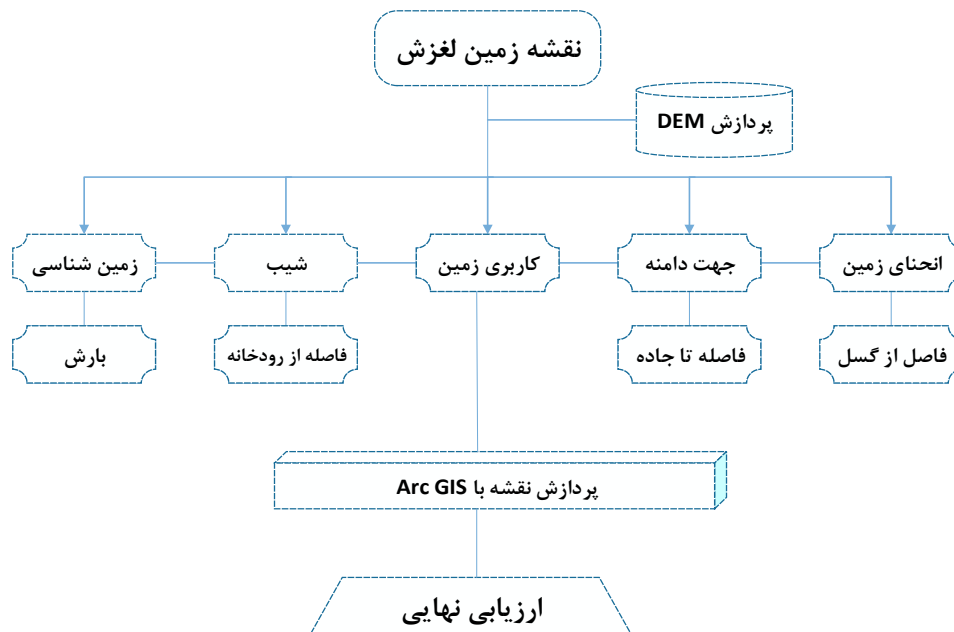
## ۲-۲ لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده

تهیه نقشه زمین لغزش و شناخت ویژگی‌های زمین لغزش از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. انتخاب نوع و مقیاس نقشه نیز به عوامل زیادی بستگی دارد، که از جمله این عوامل می‌توان به هدف نهایی پژوهش‌ها اشاره کرد. جهت تهیه و انتخاب متغیرهای لازم برای استخراج نقشه نهایی زمین لغزش نیز باید دقت کافی را داشت.



شکل ۱- موقعیت منطقه در ایران و استان مازندران

Figure 1- Location of the region in Iran and Mazandaran Province



شکل ۲- نمودار جریان‌ی مطالعه زمین لغزش حوزه آبخیز نکا  
Figure 2- Flowchart of landslide study of Neka Watershed

مکانی بالا دریافت و مورد ارزیابی واقع شد. منطقه مورد مطالعه با توجه به شرایط منطقه به پنج طبقه تقسیم شد. شکل ۵ نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز نکا را نشان می‌دهد.

جهت شیب یک بخش مهم ژئومورفولوژیکی در پژوهش‌های زمین لغزش است، زیرا این بخش به صورت غیرمستقیم در ناپایداری شیب تأثیر دارد. جهت شیب عمدتاً به عوامل آب و هوایی از جمله بارش، سطح رواناب، قرار گرفتن در معرض آفتاب و باد خشک مربوط می‌شود که متعاقباً بر رطوبت خاک، پوشش گیاهی و در نهایت بر وقوع زمین لغزش تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، جهت شیب نیز از SRTM DEM با ۳۰ متر وضوح مکانی با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS استخراج شده و به پنج طبقه تقسیم می‌شود. این پنج کلاس شامل تخت، شمال، شرق، جنوب و غرب است (شکل ۶).

انحنای زمین که به عنوان سرعت تغییر زاویه یا جهت شیب تعریف می‌شود، می‌تواند سه شکل شیب داشته باشد که شامل تخت، محدب و مقعر است. مقادیر زیاد انحنای زمین مربوط به شکل محدب است و بر عکس، مقادیر کم انحنای زمین به معنی مقعر بودن است (Senouci et al., 2021). این عامل اثر قابل توجهی بر سطح رواناب دارد. به طور کلی، مناطق محدب رواناب را به طور مساوی پراکنده می‌کند و در نتیجه بر پایداری شیب تأثیر نمی‌گذارد. با این حال، سطوح مقعر به تجمع آب در بخش‌های پایین دست کمک می‌کند و منجر به وقوع زمین لغزش می‌شود. در این مطالعه، انحنای صفحه از SRTM DEM در یک محیط GIS

در مطالعات زمین لغزش، شیب منطقه نیز یکی دیگر از مهم‌ترین متغیرهای مهم در نظر گرفته شده است. جهت شیب نیز یک جزء بسیار مهم ژئومورفولوژیکی در پژوهش‌های زمین لغزش است (Roşian et al., 2016). این نقشه از مدل رقومی ارتفاع<sup>۳</sup> مأموریت مکان‌نگاری شاتل رادار (SRTM DEM)<sup>۴</sup> با ۳۰ متر وضوح مکانی دریافت شد و در نرم‌افزار Arc GIS کلاس‌بندی و در نهایت نقشه شیب بر اساس آن تهیه شد (شکل ۴).

استفاده از زمین یا به عبارت دیگر کاربری زمین یکی از عوامل اصلی تأثیرگذار بر پایداری دامنه‌هاست. توزیع غیر سازمان‌یافته ساخت‌وسازها در زمین‌های با پایداری کم و شیب‌دار می‌تواند وقوع زمین لغزش را افزایش دهد. پوشش نیز به دلیل ساختار ریشه‌ای آن، نقش مهمی در کاهش حوادث رانش زمین دارد که به خاک قدرت می‌بخشد و مقاومت زمین را فراهم می‌کند؛ به عبارتی خاک را تثبیت می‌کند. بنابراین، اثر فرسایشی عوامل هیدرولوژیکی از طریق تثبیت خاک و جلوگیری از جدا شدن ذرات و از طریق افزایش پایداری، وقوع زمین لغزش را کاهش می‌دهد (Saha et al., 2002). در این پژوهش، ارزیابی اثر انواع پوشش زمین در وقوع زمین لغزش با پردازش یک تصویر ماهواره‌ای از OLI<sup>۵</sup> از طریق GEE<sup>۶</sup> با دقت

3- Digital Elevation Model

4- Shuttle Radar Topography Mission

5- Landsat-8 Operational Land Imager

6- Google Earth Engine

جدول ۱- اطلاعات متغیرها جهت تولید نقشه زمین لغزش  
Table 1- Information of variables used for landslide mapping

منبع	مقیاس زمانی-مکانی	میانگین بارش (سالانه)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه	نقشه
USGS/Sentinel_1	-	-	-	-	-	زمین‌شناسی
USGS/SRTM	-	-	-	-	-	شیب
USGS/SRTM	-	-	-	-	-	جهت شیب
USGS/SRTM	-	-	-	-	-	انحنای زمین
Landsat-8	2020/01/01 - 2021/01/01	-	-	-	-	کاربری اراضی
		637	53 25	36 68	نیروگاه نکا	
		640	53 31	36 65	آبلو	
UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY	2000/01/01 - 2021/01/01	661	53 33	36 63	زرندین پایین	
		695	53 41	36 53	کرداب	بارش
		1218	54 50	36 56	شاه کوه بالا	
		878	53 61	36 58	گلورد	
		690	53 73	36 58	پچیم	
		700	53 91	36 60	سفید چاه	
		780	54 03	36 63	بارکلا	
		577	53 76	36 61	اوارد	
USGS/SRTM	-	-	-	-	-	رودخانه
Global Roads Open Access Data Set (gROADS), v1	-	-	-	-	-	راه
Central Asia Fault Database	-	-	-	-	-	گسل

شد و در نهایت در نرم‌افزار Arc GIS با استفاده از IDW<sup>۱</sup> استخراج و مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۸ نشان‌دهنده نقشه باران حوزه آبخیز نکا است.

فاصله تا رودخانه نقش مهمی در پدیده‌های رانش زمین دارد. این عامل می‌تواند بر ناپایداری دامنه تأثیر بگذارد، این عامل در جایی که رودخانه‌ها قسمت پایین خاک را اشباع می‌کنند و سطح آب آن را افزایش می‌دهند نقش مهمی در بی‌ثباتی دامنه ایفا می‌کند

<sup>۱</sup> به‌دست آمده است (شکل ۷).

باران یکی از مهم‌ترین عوامل وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته شده است. نفوذ آب باران باعث افزایش رطوبت خاک و متعاقباً کاهش مقاومت برشی و انسجام خاک می‌شود که باعث ناپایداری آن می‌شود (Anis et al., 2019). در استان مازندران، بارندگی‌های قابل‌توجهی رخ می‌دهد. برای برآورد داده‌های باران از داده‌های ماهواره‌ای UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY در GEE برآورد

اطمینان در این روش به‌وسیله یک توزیع احتمال بیان می‌شود (Shannon, 1948).

## ۲-۵- روش آنتروپی شانون

**گام اول:** شامل تشکیل ماتریس به‌صورت رابطه ۱ است:

$$X = [X_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & X_{2m} \\ \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه،  $n$  نمونه برای ارزیابی ( $i=1,2,3,\dots,n$ ) وجود دارد، به‌طوری‌که هر نمونه  $m$  متغیر ارزیابی ( $1,2,\dots,m$ ) داشته باشد.

**گام دوم:** نرمال کردن ماتریس است. برای نرمال‌سازی درایه هر ستون بر مجموع آن تقسیم شد.

**گام سوم:** محاسبه آنتروپی هر شاخص است که با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \times \ln P_{ij} \quad (2)$$

$$i = 1.2 \dots m$$

$K$  مقداری ثابت است و به‌منظور این‌که بین صفر و یک باشد، اعمال می‌شود.  $E_j$  از توزیع احتمال  $P_{ij}$  بر اساس مکانیزم آماری، محاسبه شده است.  $K$  به‌عنوان مقدار ثابت به‌صورت رابطه ۳ محاسبه شد:

$$K = \frac{1}{\ln(m)} \quad (3)$$

**گام چهارم:** مقدار  $d_j$  (درجه انحراف) از رابطه ۴ محاسبه شد:

$$d_j = 1 - E_j \quad (4)$$

**گام پنجم:** سپس مقدار وزن  $W_j$  از رابطه ۵ محاسبه شد:

$$W_j = \frac{d_j}{\sum d_j} \quad (5)$$

در نهایت نقشه زمین‌لغزش استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نقشه نهایی و بررسی‌های آن مناطق حساس به زمین‌لغزش مشخص شدند (Senouci et al., 2021).

## ۳- نتایج و بحث

خطرات زمین‌لغزش محدودیت‌های زیادی را برای توسعه اقتصادی-اجتماعی تحمیل می‌کند. روش‌های زیادی برای منطقه‌بندی لغزش‌ها از جمله رویکردهای کمی و کیفی وجود دارد. رویکرد دانش‌محور یک روش کیفی است که می‌تواند مستقیم یا غیرمستقیم باشد. روش مستقیم شامل نقشه‌برداری زمینی عوارض ژئومورفیک و ویژگی‌های هندسی مرتبط با زمین‌لغزش است. با این‌حال، روش غیرمستقیم بر اساس تعیین رتبه‌ها و وزن‌ها بستگی به تأثیر عوامل کنترل‌کننده برای ایجاد زمین‌لغزش دارد. موفقیت این رویکرد عمدتاً مبتنی بر دانش متخصص است. در این پژوهش

(Chen and Huang, 2012). نقشه رودخانه حوزه آبخیز از طریق SRTM DEM استخراج و در نهایت یک بافر چند جریان، با استفاده از ابزارهای نرم‌افزاری Arc GIS ایجاد شد و به پنج کلاس با فاصله ۵۰ متر تقسیم شد (شکل ۹).

از عوامل مهم دیگر در زمین‌لغزش می‌توان راه‌های ارتباطی را نام برد. شبکه راه یک ویژگی مهم انسانی است که می‌تواند بر پایداری زمین نیز تأثیر بگذارد. در این روش مطالعه، شبکه جاده در نرم‌افزار Arc GIS، یک بافر چندگانه در یک محیط نرم‌افزار ایجاد شد که در آن پنج کلاس با فاصله ۵۰ متر قرار گرفتند (شکل ۱۰). مناطق نزدیک به گسل‌های فعال از لحاظ پایداری و ثبات ضعیف هستند، در نتیجه حساسیت آن‌ها به لغزش افزایش می‌یابد (Hu et al., 2021). نقشه گسل‌ها نیز با نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. یک بافر با استفاده از ابزار Arc GIS با فاصله ۱۰۰ متر تهیه شد. فاصله تا گسل در پنج کلاس گروه‌بندی شد. شکل ۱۱ نقشه گسل حوزه آبخیز را نشان می‌دهد. برای ارزیابی زمین‌لغزش، در نهایت همه نقشه‌ها در نرم‌افزار Arc GIS مورد ارزیابی نهایی قرار گرفت و نقشه نهایی با استفاده از روش منطق فازی تهیه شد.

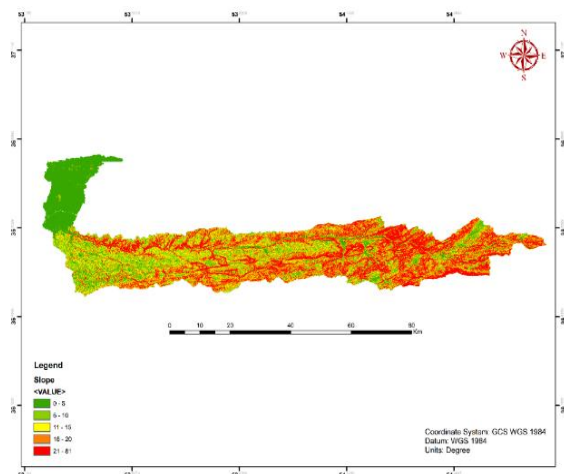
## ۲-۳- فازی‌سازی

فازی‌سازی روشی است که در آن عبارات‌های کلامی و مقادیر کیفی با اعداد فازی به‌صورت کمی در می‌آیند. در فازی‌سازی به هر یک از پیکسل‌ها در نقشه یک مقدار بین صفر و یک داده می‌شود. این میزان بیان‌گر میزان ارزش آن با توجه به هدفی است که در پی دارد و هر چه از لحاظ اهمیت ارزش پیکسل بالاتر باشد، در نتیجه عدد بالاتری به آن تعلق خواهد گرفت (Ma et al., 2006). برای انجام فازی‌سازی در نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از ابزار Fuzzy Membership، فازی‌سازی انجام می‌گیرد.

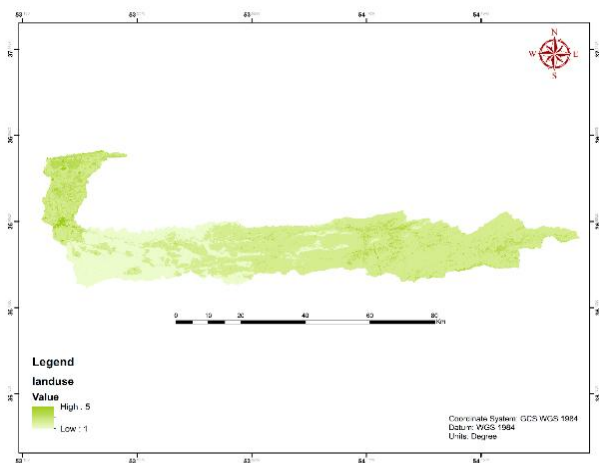
## ۲-۴- تعیین وزن

روش‌های مختلفی برای تعیین وزن وجود دارد. در این پژوهش روش آنتروپی شانون مورد استفاده قرار گرفت. روش آنتروپی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای محاسبه وزن معیارهاست. این روش توسط Shannon (1948) مطرح شد. شانون در مفهوم آنتروپی به میزان عدم اطمینان موجود در پیام دریافتی اشاره دارد و آن را با یک تئوری احتمال بیان کرده است. منطقه مورد مطالعه با توجه به شرایط منطقه به پنج طبقه تقسیم شد. شکل ۵ نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز نکا را نشان می‌دهد. عدم

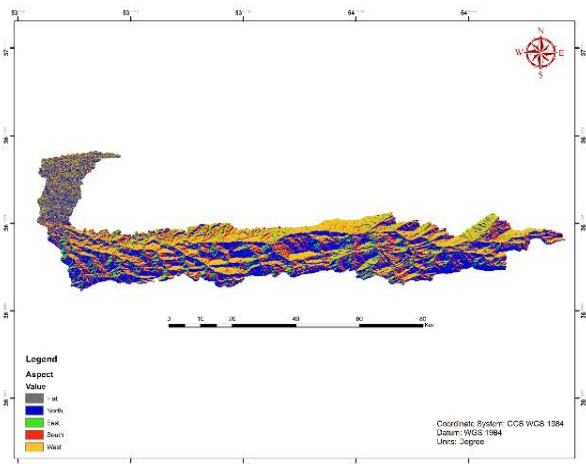




شکل ۴- نقشه شیب حوزه آبخیز نکا  
Figure 4 – Slope map of Neka Watershed



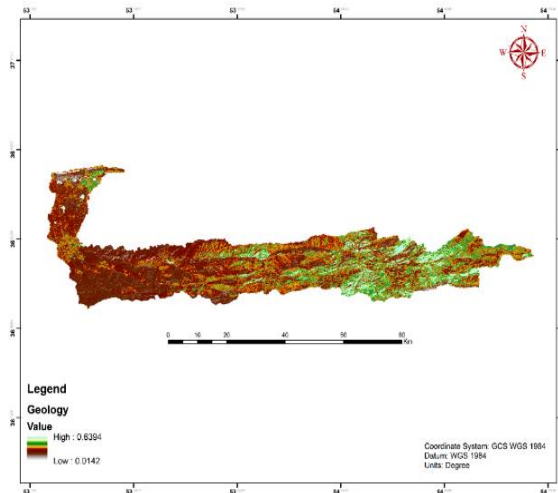
شکل ۵- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز نکا  
Figure 5 - Land use map of Neka Watershed



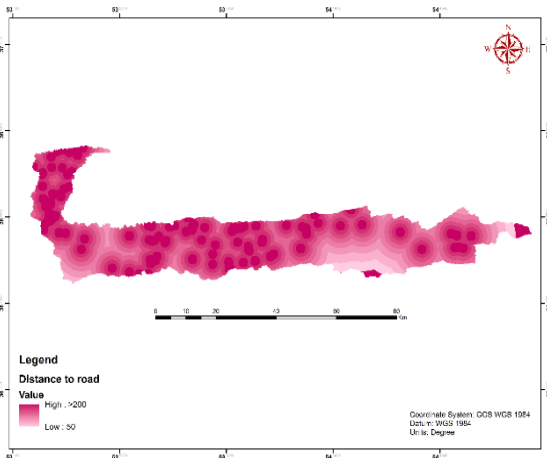
شکل ۶- نقشه جهت شیب حوزه آبخیز نکا  
Figure 6 - Direction slope map of the Neka Watershed

مقادیری بین یک تا پنج به زمین لغزش با حساسیت‌های متفاوت اختصاص داده شد. هر چه مقادیر یک عامل بیش‌ترین تأثیر را بر زمین لغزش داشته باشد مقدار یک و اگر کم‌ترین تأثیر را داشته باشد، مقدار پنج به آن تعلق می‌گیرد. به‌عنوان مثال، در نقشه شیب هر چه شیب بیش‌تر، در کلاس‌بندی عدد یک به آن اختصاص می‌یابد و هرچه شیب کم‌تر می‌شود عدد پنج به آن تعلق می‌گیرد. این عامل در تمامی نقشه‌ها با توجه به میزان تأثیرشان اعمال شد. کم‌ترین مقدار به عوامل و زیرگروه‌های آن‌ها با تأثیر مهم در وقوع زمین لغزش و بیش‌ترین مقدار به زیرگروه‌هایی که کم‌ترین میزان تأثیر در زمین لغزش را دارند اختصاص داده شد (Michael et al., 2016; Rabehi et al, 2018).

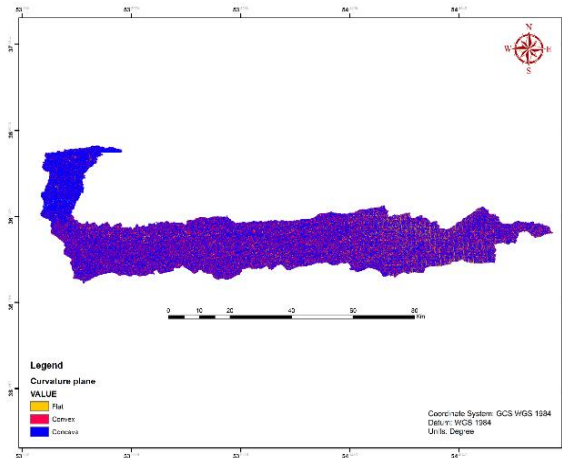
نقشه حساسیت به زمین لغزش با استفاده از ابزار Raster Calculator از نرم‌افزار Arc GIS تولید شده است. نقشه نهایی حاصل از مجموع نقشه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در نهایت کل حوزه آبخیز به ۱۲ زیرحوضه تقسیم شد و با توجه به مساحت کلاس‌ها در داخل هر زیرحوضه، مناطقی که از لحاظ زمین لغزش حساس هستند، تعیین شدند.



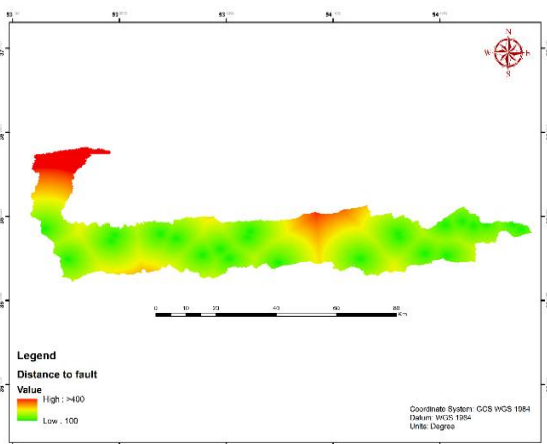
شکل ۳- نقشه زمین شناسی حوزه آبخیز نکا  
Figure 3- Geological map of Neka Watershed



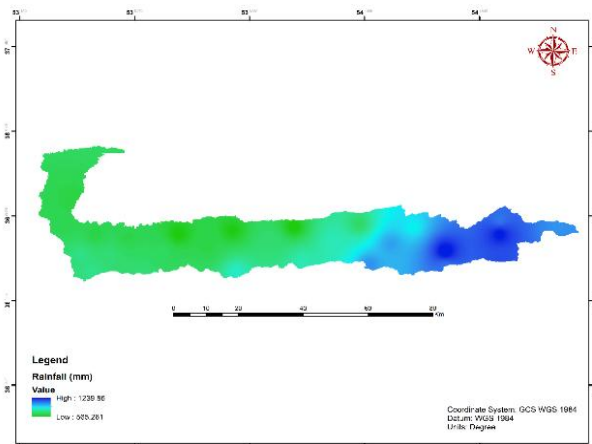
شکل ۱۰- نقشه تراکم جاده حوزه آبخیز نکا  
Figure 10- Road density map of Neka Watershed



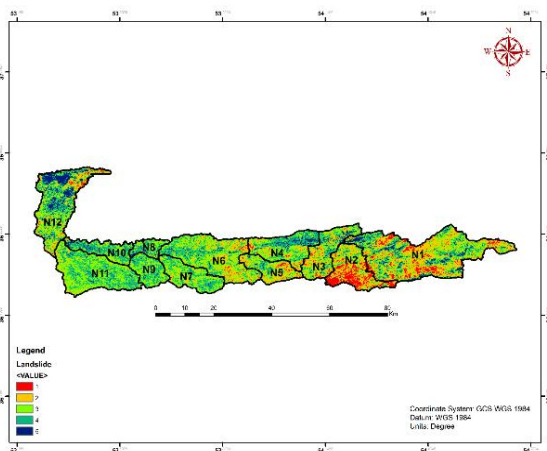
شکل ۷- نقشه انحنای زمین حوزه آبخیز نکا  
Figure 7- Curvature map of Neka Watershed



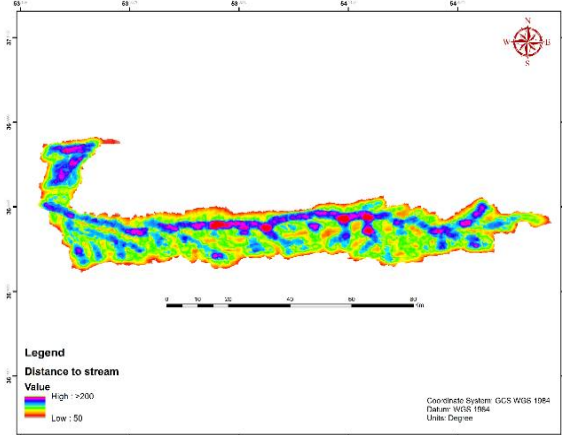
شکل ۱۱- نقشه تراکم گسل حوزه آبخیز نکا  
Figure 11- Fault density map of Neka Watershed



شکل ۸- نقشه بارندگی حوزه آبخیز نکا  
Figure 8- Rainfall map of Neka Watershed



شکل ۱۲- نقشه زمین لغزش حوزه آبخیز نکا  
Figure 12- Landslide map of Neka Watershed



شکل ۹- نقشه تراکم رودخانه حوزه آبخیز نکا  
Figure 9- River density map of Neka Watershed

جدول ۲ اطلاعات حاصل از نقشه نهایی را نشان می‌دهد. عوامل مختلفی در ارتباط با یکدیگر و در رابطه با ویژگی‌های محلی، موجب ناپایداری دامنه‌ها می‌شوند. عوامل ناپایداری با سهم متفاوت در وقوع حرکات توده‌ای، به‌خصوص در وقوع لغزش‌ها نقش دارد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل زمین لغزش نشان می‌دهد که میزان شیب تأثیر قابل توجهی بر میزان زمین لغزش دارد. هرچه میزان شیب افزایش پیدا کند تأثیر آن بر زمین لغزش نیز بیش تر خواهد شد. از عوامل مؤثر دیگر، نقشه بارش در حوزه آبخیز است. با توجه به نقشه بارش، میزان بارندگی در شرق حوزه آبخیز نسبت به غرب بیش تر است؛ بنابراین، این منطقه مستعد برای زمین لغزش است. با توجه به نقشه کاربری اراضی در مناطقی که دارای پوشش گیاهی خوب به صورت جنگل یا مرتع خوب هستند، میزان زمین لغزش بسیار کم است. در مناطقی که عاری از پوشش گیاهی هستند، یا توسط بشر تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی قرار گرفته‌اند و یا جاده‌سازی در آن‌ها صورت گرفته است، همگی جز مناطق با حساسیت زیاد نسبت به وقوع زمین لغزش هستند.

مناطق نزدیک گسل نیز در زمان وقوع زلزله می‌توانند جزء عوامل مهم در زمین لغزش باشند، ولی بیش تر لغزش‌ها در زمانی که گسل هیچ فعالیتی ندارد اتفاق می‌افتند. زمین‌شناسی منطقه نقش بسیار مهمی در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین لغزش ایفا می‌کند. زیرا واحدهای سنگ‌شناسی مختلف در ناپایداری دامنه و وقوع زمین لغزش متفاوت عمل می‌نمایند. انحنای دامنه امکان برجسته نمودن هم‌گرایی (انحنای مقعر) و واگرایی (انحنای محدب) جریان آب را فراهم می‌کند. با توجه به نتایج، بیش تر زمین لغزش‌ها در دامنه‌هایی که حالت مقعر دارند اتفاق می‌افتد. جهت دامنه نیز در میزان حساسیت به لغزش تأثیر زیادی دارد؛ به طوری که دامنه‌های شمالی (پشت به آفتاب) نسبت به دامنه‌های جنوبی (رو به آفتاب) از ناپایداری بیش تری برخوردار هستند.

متغیر مؤثر دیگر در ناپایداری دامنه‌ها، تراکم زهکشی رودخانه است. هر چه تراکم زهکشی بیش تر باشد، در نتیجه نفوذپذیری کم تر و سرعت جریانات سطحی افزایش می‌یابد. شبکه رودخانه با شستن کناره‌های دامنه و اشباع بخش تحتانی اثر معکوسی بر پایداری دامنه‌ها دارد. در نهایت با توجه به نقشه نهایی و ادغام نه نقشه در نرم‌افزار Arc GIS نقشه نهایی تهیه شد. پس از اولویت‌بندی حوزه آبخیز نکا به ۱۲ زیرحوضه، مناطقی که از حساسیت بالایی برای لغزش برخوردار هستند مشخص شدند. با توجه جدول ۲ زیرحوضه N1 با مقادیر ۳۷/۵۹ (بسیار ضعیف)، ۳۵/۵۵ (ضعیف)، ۲۵/۲۱ (متوسط) ۱۷/۴۱ (خوب) و ۱۱/۲۵ (بسیار

خوب) درصد در اولویت اول مستعد برای زمین لغزش قرار دارد. با مقایسه زیرحوضه‌ها با یکدیگر از لحاظ زمین لغزش، زیرحوضه N12 با مقادیر ۷/۳۷ (بسیار ضعیف)، ۱۴/۱۲ (ضعیف)، ۲۳/۳۳ (متوسط)، ۲۶/۴۹ (خوب) و ۲۸/۶۹ (بسیار خوب) درصد در وضعیت بهتری از لحاظ زمین لغزش قرار دارد. نتایج به دست آمده در این پژوهش با مطالعات انجام گرفته توسط Devara et al. (2021) مطابقت دارد. از تأثیرگذارترین عوامل میزان نفوذپذیری با توجه به خاصیت زمین‌شناسی و جهت شیب همراه با پوشش گیاهی را می‌توان نام برد. میزان شیب از مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار است که به تسریع و افزایش حساسیت به زمین لغزش کمک می‌کند. همان‌طور که در مطالعات کالیفرنای جنوبی مشخص شد که شیب زمین از مهم‌ترین عامل‌های تأثیرگذار بر حساسیت لغزش است (He and Beighley, 2008).

با توجه به میزان بارش‌هایی که در شمال کشور و مخصوصاً در حوزه آبخیز نکا رخ می‌دهد، مطالعه این موضوع نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج به دست آمده از مطالعه تأثیر بارندگی بر زمین لغزش که در کشور چین انجام گرفته است، با این مطالعه مطابقت دارد (Rong et al., 2020). می‌توان گفت که انحنای زمین، فاصله تا رودخانه و فاصله از جاده نیز با توجه به لغزش تا حدودی به یک اندازه مهم هستند. فاصله از گسل‌ها نیز احتمال وقوع زمین لغزش را افزایش می‌دهد. با این حال، در منطقه مورد مطالعه، این عامل کمک زیادی به ایجاد زمین لغزش نمی‌کند؛ چرا که بیش تر زمین لغزش‌ها در حالت عدم فعالیت گسل‌ها نیز رخ می‌دهند. پوشش گیاهی نقش مهمی در افزایش پایداری شیب و کاهش حساسیت به زمین لغزش را دارد. مناطقی که کم‌ترین میزان حساسیت به زمین لغزش را دارند، بیش تر در مناطق جنگلی و یا در مناطقی که شیب بسیار کم است وجود ندارد. به طور کلی، این مناطق مسطح هستند و هیچ خطری این مناطق را تهدید نمی‌کند. مناطق با حساسیت زیاد و بسیار زیاد در مناطق فاقد پوشش گیاهی و با شیب بالا و بارندگی زیاد ثبت شده‌اند. نتایج به دست آمده به وضوح نشان می‌دهد که تراکم حوادث رانش زمین با درجه حساسیت عواملی مانند شیب، فقدان پوشش گیاهی و نیز افزایش میزان نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. نیاز به منطقه‌بندی خطر زمین لغزش همراه با این درک که برنامه‌ریزی مناسب با استفاده از زمین به میزان قابل توجهی هزینه ساخت و نگهداری سازه‌های مهندسی را کاهش می‌دهد، وجود دارد.

با توجه به نتایج پژوهش حاضر، زیرحوضه‌های N1 و N2 به ترتیب رتبه‌های ۱ و ۲ را از لحاظ پتانسیل بالای زمین لغزش به

میزان حساسیت زمین‌لغزش‌ها کاسته می‌شود، به‌ویژه در زیرحوضه N12 مقدار شیب بسیار کاهش می‌یابد.

علی‌رغم پیشرفت قابل‌توجه در زمینه علوم رانش زمین و آمادگی در برابر خطر لغزش، هنوز نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های فاجعه‌بار وجود دارد، مانند زمین‌لغزش بزرگ و کشنده اخیر اوسو در واشنگتن (ایالات متحده آمریکا) و زمین‌لغزش بدخشان در افغانستان، یا تعداد بسیار زیاد زمین‌لغزش در بوسنی و هرزگوین و صربستان (جنوب اروپا) ناشی از حوادث خاص آب و هواشناسی در ماه می ۲۰۱۴ بوده است که خسارات زیادی را چه به‌صورت جانی و یا مالی به وجود آورده است (Mihalić Arbanas and Arbanas, 2015).

خود اختصاص می‌دهند. علت بالا بودن میزان شدت زمین‌لغزش در این دو زیرحوضه پوشش گیاهی کم و بالا بودن درجه شیب را می‌توان نام برد. همان‌طور که مشخص است، احتمال وقوع زمین‌لغزش در جایی که شیب تندتر است، در مقایسه با مناطقی که از شیب ملایم‌تری برخوردار هستند، بیش‌تر است. زیرحوضه‌های N3، N4، N5 و N6 با توجه به میزان حساسیت به زمین‌لغزش حالت متوسط به بالا و متوسط را دارند. این زیرحوضه‌ها دارای پوشش تقریباً خوب هستند که در نگهداری خاک نقش مهمی را ایفا می‌کنند. از زیرحوضه N7 تا N12 با توجه به افزایش میزان پوشش گیاهی در این زیرحوضه‌ها که باعث نگهداشت خاک از طریق ریشه‌های گیاهی خود شده و نیز کاهش شیب در این نقاط از

#### جدول ۲- نتایج حاصل از نقشه زمین‌لغزش حوزه آبخیز نکا

Table 2- Results of landslide map of Neka Watershed

کلاس					شماره زیرحوضه
5	4	3	2	1	
11.25	17.41	25.21	30.55	15.59	N1
2.90	7.90	17.35	34.25	37.59	N2
10.65	22.48	27.82	27.65	11.40	N3
13.23	32.77	29.63	19.43	4.94	N4
4.89	18.89	30.81	34.79	10.62	N5
5.87	25.31	38.16	24.58	6.08	N6
4.76	35.54	41.61	16.23	1.86	N7
11.26	39.88	37.12	10.56	1.18	N8
6.44	39.21	44.19	9.17	0.99	N9
12.17	43.78	33.38	9.70	0.98	N10
5.57	35.80	44.37	13.21	1.06	N11
28.69	26.49	23.33	14.12	7.37	N12

شد. با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) علاوه بر افزایش میزان دقت، در حداقل زمان مناطق حساس به زمین‌لغزش قابل شناسایی هستند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده جهت کاهش زمین‌لغزش در مناطق مستعد باید از تغییر کاربری اراضی و تبدیل مناطق جنگلی و مرتعی به اراضی کشاورزی جلوگیری شود. هم‌چنین لازم است جهت احداث هر گونه جاده و انجام کارهای عمرانی مطالعات حساسیت به زمین‌لغزش انجام بگیرد. بنابراین، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان قبل از هر اقدامی، باید مطالعه لازم را در رابطه با این پدیده طبیعی انجام دهند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف از پیشرفت مطالعات زمین‌لغزش و استفاده از فن‌آوری‌های نوآورانه، ارائه دانش و درک از پدیده‌ها و فرآیندهای رانش زمین است که امکان حل مشکلات را فراهم می‌کند و پروژه‌ها را سریع‌تر، ارزان‌تر و بهتر انجام می‌دهد. بر اساس رویکرد دانش‌محور، ارزیابی چندین متغیر، مانند زمین‌شناسی، شیب، پوشش زمین، جهت شیب، انحنا، زمین، بارندگی، فاصله تا جریان، فاصله تا جاده و فاصله تا غسل را که با یک‌دیگر ادغام و در نهایت نقشه زمین‌لغزش تهیه شد. همه این عوامل بر اساس اهمیت آن‌ها رتبه‌بندی و وزن‌دهی شدند. مقیاس عددی (۱-۵) از تأثیر زیاد تا کم استفاده

محمدی و اوسری، م.، شعاعی، غ.، شهیدی، ف. (۱۳۹۳). تعیین آستانه شدت-مدت بارندگی به‌منظور پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های

#### منابع

مازندران). زمین‌شناسی مهندسی، ۷(۱-۲)، ۱۵-۲۸.

کم‌عمق در حوضه آبریز رودخانه‌های تجن و نکارود (شرق)

## References

- Ahmed, B. (2015). Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*, 12(6), 1077-1095.
- Ali, S.A., Parvin, F., Vojteková, J., Costache, R., Thuy Linh, N.A., Pham, Q.B., Vojtek, M., Gigović, L., Ahmad, L.A., & Ghorbani, M.A. (2021). GIS-based landslide susceptibility modeling: A comparison between fuzzy multi-criteria and machine learning algorithms. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 857-876.
- Anis, Z., Wissem, G., Vali, V., Smida, H., & Essghaier, G.M. (2019). GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical methods in North-western Tunisia. *Open Geoscience*, 11, 708-726.
- 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, 15-31.
- Brabb, E. (1993). Proposal for worldwide landslide hazard maps. Proceedings of 7th International Conference and field workshop on landslide, 28 August-15 September 1993, Czech and Slovak Republics, pp 15-27.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M., & Salvati, P. (2002). A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 2, 57-72.
- Chen, C.Y., & Huang, W.L. (2012). Land use change and landslide characteristics analysis for community-based disaster mitigation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 4125-4139.
- Chen, X., & Chen, W. (2021). GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods. *Catena*, 196, 104833.
- Courtire, R. (2011). Landslide terminology-national technical guidelines and best practices on landslides. *Geological Survey of Canada*, 12 p.
- Crozier, M. (1986). Landslides-causes, consequences and environment. Croom Helm Ltd, London and Sydney, pp 0.7097-0.7099.
- Del Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238-246.
- Devara, M., Tiwari, A., & Dwivedi, R. (2021). Landslide susceptibility mapping using MT-InSAR and AHP enabled GIS-based multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12, 675-693.
- EMDAT. (2010). Emergency Disasters Data Base. Volume 2010: Brussels, Belgium, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Ecole de Santé, Publique Université Catholique de Louvain, <https://www.emdat.be/>.
- Hadmoko, D.S., Lavigne, F., Sartohadi, J., & Hadi, P. (2010). Winaryo Landslide hazard and risk assessment and their application in risk management and landuse planning in eastern flank of Menoreh Mountains, Yogyakarta Province, Indonesia. *Natural Hazards*, 54, 623-642.
- He, Y., & Beighley, R.E. (2008). GIS-based regional landslide susceptibility mapping: a case study in southern California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, pp. 380-393.
- Hong, Y., Hong, Y., Adler, R., & Huffman, G. (2007). Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility. *Natural Hazards*, 43(2), 245-256.
- Hu, M., Wu, Zh., Reicherter, K., Ali, S., Huang, X., & Zuo, J. (2021). A historical earthquake-induced landslide damming event at the Qiaojia Reach of the Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implication for the seismic hazard of the Xiaojiang Fault. *Frontiers in Earth Science*, 9, 18 p.
- Hutchinson, J. (1988). Fairbridge R (ed) The Encyclopedia of Geomorphology. Reinold, pp 688-695.
- Khan, A., Gupta, S., & Gupta, S.K. (2020). Multi-hazard disaster studies: monitoring, detection, recovery, and management, based on emerging technologies and optimal techniques. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47, 1-53.
- Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P., & Vallianatos, F. (2009). Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. *Natural Hazards*, 52, 599-621.
- Lee, S. (2007). Landslide susceptibility mapping using an artificial neural network in the Gangneung area, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 4763-4783.
- Ma, Sh., Feng, J., & Cao, H. (2006). Fuzzy model of regional economic competitiveness in GIS spatial analysis: Case study of Gansu, Western

- China. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 5, 99–111.
- Mandaglio, M.C., Giofrè, d., pitasi, a., & moraci, n. (2016). Qualitative landslide susceptibility assessment in small areas. *Procedia Engineering*, 158, 440–445.
- Michael, E.A., & Samanta, S. (2016). Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 1–15.
- Mihalić Arbanas, S., & Arbanas, Z. (2015). Landslides: A Guide to Researching Landslide Phenomena and Processes. *Handbook of Research on Advancements in Environmental Engineering*, 37 pages.
- Mohammadi Wawsari, M., Shoaie, Gh., & Shahidi, F. (2014). Determining the intensity-duration threshold of rainfall in order to predict shallow landslides in the catchment area of Tajan and Neka rivers (east of Mazandaran). *Journal of Iranian Geological Engineering Association*, 7, 15-28 (in Persian).
- Pawan, G., Kubota, T., Sapkota, L., & Shinohara, Y. (2021). Landslide susceptibility mapping with GIS in high mountain area of Nepal: a comparison of four methods. *Environmental Earth Sciences*, 80, 359.
- Pham, B.T., Shirzadi, A., Shahabi, H., Omidvar, E., Singh, S.K., Sahana, M., Asl, D.T. Ahmad, B.B., Quoc, N.K., & Lee, S. (2019). Landslide susceptibility assessment by novel hybrid machine learning algorithms. *Sustainability*, 11, 16.
- Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012), Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz Watershed, Iran. *Natural Hazards*, 63, 965-996.
- Psomiadis, E., Charizopoulos, N., Efthimiou, N., Soulis, K., & Charalampopoulos, L. (2020). Earth observation and GIS-based analysis for landslide susceptibility and risk assessment. *International Journal of Geo-Information*, 9(9), 552.
- Rabehi, W., Guerfi, M., & Mahi, H. (2018). Cartographie de la vulnérabilité des communes de la baie d'Alger. Approche socio-économique et physique de la côte. *Journal of Mediterranean Geography (Méditerranée)*, Urban Spaces, <http://journals.openedition.org/mediterranee/862> 5.
- Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., & Turconi, L. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. *Land*, 10, 162.
- Rong, R., Li, K., Han, L., Alu, S., Zhang, J., & Zhang, Y. (2020). Hazard mapping of the rainfall–landslides disaster chain based on geodetector and ayesian network models in Shuicheng County, China. *Water*, 12, 2572.
- Roşian, G., Csaba, H., Kinga-Olga, R., Boţan, C.N., & Gavrilă, I.G. (2016). Assessing landslide vulnerability using bivariate statistical analysis and the frequency ratio model. Case study: Transylvanian Plain (Romania). *Zeitschrift Geomorphologie*, 60, 359–371.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., & Arora, M.K. (2002). GIS-based Landslide Hazard Zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 357–369.