Hydrogeomorphology Vol. 10, Issue. 36, Fall 2023

Research Paper

GIS-based Determining the Landslide Hotspot Occurrence using Getis-Ord Index in Gharnaveh Watershed, Golestan Province

Amirhosein Ghorbani[1], Raoof Mostafazadeh*[2], Mohsen Zabihi[3], and Masoud Jafari Roodsari[4]

This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.

DOI:10.22034/HYD.2023.55449.1679

Refference to this article: Ghorbani, Amirhosein; Mostafazadeh, Raoof; Zabihi, Mohsen; Jafari Roodsari, Masoud. (2023). GIS-based Determining the Landslide Hotspot Occurrence using Getis-Ord Index in Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Hydrogeomorphology*, 10(36): 1 – 18.

Keywords

Getis-Ord Statistics, Spatial Correlation, Clustering, Gharnaveh Watershed, Golestan Province

Receive Date: 2023/02/16

Accept Date: 2023/04/30

Available: 2023/10/30

A B S T R A C T

Landslide, as an important natural hazard, causes damage to infrastructure and leads to economic, social and human losses. In this regard, determining the critical zones of landslides occurrence can be used in planning for damage reduction. The aim of the current research is analyzing and identifying landslide hot spots using Getis-Ord algorithm in Gharnaveh watershed, Golestan province. Therefore, the frequency and characteristics of landslides has been analyzed in different classes of slope, aspect, soil and land uses. The area, length, width, depth and height of the precipice of landslide features have been considered as the basis in hot spot analysis. The results showed that the landslide hot spots are located in the eastern part of the study area, which includes high altitude classes, rangelands and moderate slopes. Results showed that the rangeland and forest land uses, loess soils and 50-75% slope class and the northern aspect had the highest number of landslides. Also, the non-significant landslide points using the Getis-Ord method and considering landslide area criterion located in the middle and downstream of Gharnaveh watershed. Determining the landslide hotspots and affecting factors through the spatial analysis in GIS provides the defining thresholds in the landslide's occurrence. The analysis of the landslide hotspots can be a basis for spatial planning, and risk reduction. The implemented approach can be used in the evaluation of the spatial autocorrelation of natural hazards, and in combination with the areas prone to multiple environmental hazards can predict the risk and severity of damages in the future.

*** Corresponding Author: Raoof Mostafazadeh**
E-mail: Raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

1. M.Sc. Student of Survey Engineering- Geographic Information Systems, Lamei Gorgani Institute of Higher Education, Gorgan, Iran

2. Associate Professor, Department of Watershed Management and Member of Water Management Research Institute, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. Ph.D. of Watershed Management Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

4. M.Sc. in Civil Engineering- Geodesy, Golestan Regional Water Company, Gorgan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Landslide, as an important natural hazard, causes damage to infrastructure and leads to economic, social and human losses. In this regard, determining the critical zones of landslides occurrence can be used in planning for damage reduction. Landslides, as one of the most important natural hazards, are the result of many geodynamic processes and the results of the conducted research indicate the increasing trend of the extent, frequency, and also the social and economic consequences of landslide occurrence in recent years. In this regard, determining the critical areas of landslide occurrence is one of the basic requirements for improving the management strategies of this natural hazard. On the other hand, accurate mapping of landslides and identification of areas affected by landslides are necessary to understand related erosion processes. Spatio-temporal maps of hotspot points of landslide occurrence can be used in developing control measures appropriate to different areas and assessing landscape dynamics. Meanwhile, in many areas, landslides have intensified directly under the influence of various human and natural phenomena and pose a serious threat to residents. Therefore, determining the critical areas of landslide occurrence by examining the spatial pattern and determining its intensity changes can help to better manage this natural hazard in the watershed. The aim of the current research is analyzing and identifying landslide hot spots using Getis-Ord algorithm in Gharnaveh watershed, Golestan province.

Methodology

In this regard, the frequency and characteristics of landslides has been analyzed in different classes of slope, aspect, soil and land uses. The area, length, width, depth and height of the precipice of landslide features have been considered as the basis in hot spot analysis. In order to carry out the present research, the landslide occurrence points were collected and prepared during field visits and recorded by GPS in the Gharnaveh watershed, as well as the landslide information available in the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Golestan province. In the next step, the Getis-Ord Gi∗ method was used in order to investigate the hotspots of landslide occurrence in the study area. Hot spot analysis using the Getis-Ord Gi∗ tool in ArcGIS is used to analyze the degree of concentration of landslides in different areas of a watershed. The mentioned tool provides values related to the clustering of landslides. It should be noted that the Getis-Ord statistic is used to detect spatial clusters.

Results and Discussion

The results showed that the landslide hot spots are located in the eastern part of the study area, which includes high altitude classes, rangelands and moderate slopes. According to the findings, rangeland and forest land uses, loess soils and 50-75% slope class and the northern aspect had the highest number of landslides. Also, the non-significant landslide points using the Getis-Ord method and considering landslide area criterion located in the middle and downstream of Gharnaveh watershed. Based on the results, regarding the determination of landslide hotspots using the Getis-Ord method according to the landslide length criterion, it can be said that there is a relatively similar pattern to the map prepared based on the landslide area criterion. In this regard, the number of cold spots of landslide occurrence based on the criterion of landslide length according to the low value of z-score and negative sign are located around waterways and the middle and downstream areas of the study watershed.

Conclusions

Determining the landslide hotspots and affecting factors through the spatial analysis in GIS provides the defining thresholds in the landslide's occurrence. The analysis of the landslide hotspots can be a basis for spatial planning, and risk reduction. Spatial modeling of landslides risk using statistical methods and data mining in the study watershed in order to prioritize different areas for the implementation of protective

measures is suggested in future studies. The implemented approach can be used in the evaluation of the spatial autocorrelation of natural hazards, and in combination with the areas prone to multiple environmental hazards can predict the risk and severity of damages in the future.

References

Bianchini, S., Cigna, F., Righini, G., Proietti, C., & Casagli, N. 2012. Landslide hotspot mapping by means of persistent scatterer interferometry. Environmental Earth Sciences, 67, 1155-1172.

Hölbling, D., Betts, H., Spiekermann, R., & Phillips, C. 2016. Identifying spatio-temporal landslide hotspots on North Island, New Zealand, by analyzing historical and recent aerial photography. Geosciences, 6(4), 48

Jaedicke, C., Van Den Eeckhaut, M., Nadim, F., Hervás, J., Kalsnes, B., Vangelsten, B. V., ... & Smebye, H. 2014. Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 325-339

Moradi, H.R., Mohammdy, M., Pourghasemi, H.R., Mostafazadeh, R. (2010). Landslide hazard analysis in Golestan Province using Dempster-Shafer theory. Researches in Earth Science, 1(3): 1-14. (in Persian).

Zali, M., & Shahedi, K. 2021. Landslide sensitivity assessment using fuzzy logic approach and GIS in Neka Watershed. Water and Soil Management and Modelling, 1(1), 67-80. doi: 10.22098/mmws.2021.1183. (in Persian).

مقاله پژوهشی

تعیین مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش مبتنی بر GIS با استفاده از شاخص Getis-Ord، مطالعه موردی: حوضه آبریز قرناوه، استان گلستان

امیرحسین قربانی[۱]، رئوف مصطفی‌زاده*[۲]، محسن ذبیحی[۳]، مسعود جعفری رودسری[۴]

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کریتیو کامانز قابل استفاده است.

DOI:10.22034/hyd.2023.55449.1679

ارجاع به این مقاله: قربانی، امیرحسین؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ ذبیحی، محسن؛ جعفری رودسری، مسعود (۱۴۰۲). تعیین مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از شاخص Getis-Ord در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز قرناوه، استان گلستان). *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۰ (۳۶): ۱۸-۱ .

چکیده

زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از خطرات مهم طبیعی، ضمن آسیب رساندن به زیرساخت‌ها، باعث ایجاد خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و جانی فراوان می‌شود. در همین راستا، تعیین پهنه‌های بحرانی وقوع زمین‌لغزش می‌تواند در برنامه‌ریزی کاهش خسارات مورد استفاده قرار گیرد. پژوهش حاضر با هدف تجزیه و تحلیل و شناسایی نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش با استفاده از آمار مکانی و الگوریتم Getis-Ord در حوضه آبریز قرناوه استان گلستان برنامه‌ریزی شده است. در این راستا، فراوانی وقوع زمین‌لغزش براساس طبقات شیب، جهت جغرافیایی، کاربری اراضی، نوع خاک و انواع ویژگی‌های پهنه‌های لغزشی مورد تحلیل قرار گرفته است. در تعیین نقاط داغ و مناطق بحرانی، معیارهای مساحت، طول، عرض، عمق و ارتفاع پرتگاه مبنای تحلیل‌های مکانی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش در محدوده شرقی منطقه مطالعاتی قرار گرفته‌اند که در طبقات ارتفاعی بالا، کاربری اراضی مرتعی و شیب بالا واقع شده است. براساس یافته‌های پژوهش، اراضی مرتعی و جنگلی، خاک‌های بادی-یخچالی لسی و طبقه شیب ۱۸ تا ۲۵ درصد و جهت جغرافیایی شمالی بیش‌ترین تعداد وقوع زمین‌لغزش را به خود اختصاص داده‌اند. هم‌چنین، نقاط وقوع زمین‌لغزش غیرمعنی‌دار از نظر آماری با استفاده از روش Getis-Ord و براساس معیار مساحت زمین‌لغزش در مناطق میانی و پایین‌دست حوضه آبریز مورد مطالعه قرار دارد. تعیین نقاط بحرانی وقوع زمین‌لغزش و نیز تعیین عوامل مؤثر بر آن از طریق تحلیل نقشه‌های مکانی در بستر GIS امکان تعیین آستانه‌های موثر بر وقوع زمین‌لغزش را فراهم می‌نماید. تجزیه و تحلیل نقاط بحرانی وقوع زمین‌لغزش می‌تواند به‌عنوان مبنای برنامه‌ریزی مکانی، شناسایی مناطق بحرانی و کاهش خطر مدنظر قرار گیرد. رویکرد مورد استفاده در ارزیابی خودهمبستگی مکانی مخاطرات طبیعی کاربرد دارد و در تلفیق با پهنه‌های مستعد خطرات چندگانه محیطی می‌تواند مبنای پیش‌بینی شدت خطر و خسارت در آینده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها

آماره جتیس-اورد، ارتباط مکانی، تحلیل خوشه‌ای، حوزه آبریز قرناوه، استان گلستان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸

* نویسنده مسئول: رئوف مصطفی‌زاده
رایانامه: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

۱-دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی نقشه‌برداری-سیستم‌های اطلاعات مکانی، موسسه آموزش عالی لامعی گرگانی، گرگان، ایران.
۲- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۳- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئودزی، شرکت آب منطقه‌ای گلستان، گرگان، ایران.

۱- مقدمه

زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از خطرات مهم طبیعی نتیجه فرآیندهای متعدد ژئودینامیکی هستند که با آسیب رساندن به زیرساخت‌ها و ساختمان‌ها منجر به خسارات اقتصادی، اجتماعی و جانی فراوان (مستقیم و غیرمستقیم) در ایران شده است (زالی و شاهدی، ۱۴۰۰: ۶۹؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۱؛ متولی و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۵۸؛ آریاپور و همکاران، ۱۳۹۸: ۵۸). علاوه بر این، نتایج پژوهش‌های صورت گرفته حاکی از روند افزایشی وسعت، فراوانی و هم‌چنین پیامدهای اجتماعی و خسارت‌های اقتصادی وقوع زمین‌لغزش در سال‌های اخیر است که با گذشت زمان در حال افزایش است (گوزتی[1]، ۲۰۰۰: ۹۰؛ جایدیک[2] و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۲۵). در همین ارتباط، تعیین مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش‌ها از الزامات اساسی برای بهبود راهکارهای مدیریتی این خطر طبیعی است (بیانچینی[3] و همکاران، ۲۰۰۰: ۱۱۵۶). از طرفی، نقشه‌بندی دقیق زمین‌لغزش‌ها و شناسایی مناطق تحت تأثیر زمین‌لغزش برای پیشبرد و درک فرآیندهای فرسایشی مرتبط ضروری است (نجفی ایگدیر و همکاران، ۱۴۰۰، ۲؛ هولبلینگ[4] و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۸). نقشه‌های مکانی-زمانی نقاط بحرانی وقوع زمین‌لغزش می‌تواند در توسعه اقدامات کنترلی متناسب با مناطق مختلف و ارزیابی پویایی منظر مورد استفاده قرار گیرد (عبداله‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۶). لازم به ذکر است که زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یک پدیده ژئومورفولوژیکی و خطر بالقوه محیطی نقش مهمی در تکامل چشم‌انداز دارند (پارکر[5] و همکاران، ۲۰۱۱). این در حالی است که زمین‌لغزش یک مشکل جدی برای جوامع انسانی و زیرساخت‌ها در بسیاری از نقاط جهان به‌شمار می‌رود. در بسیاری از مناطق، زمین‌لغزش‌ها مستقیماً تحت تأثیر پدیده‌های مختلف انسانی و طبیعی تشدید شده و برای ساکنان تهدید جدی ایجاد می‌کنند (الکساندر[6]، ۲۰۰۰: ۱۷۶: عبداله زاده و همکاران، ۱۳۹۵: ۶). لذا، تعیین مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش‌ها با بررسی الگوی مکانی و تعیین تغییرات شدت آن می‌تواند به مدیریت بهتر این خطر طبیعی در حوضه آبریز کمک نماید. پژوهش‌های متعددی در خصوص ارزیابی مناطق مستعد خطر و بحرانی از نظر وقوع زمین‌لغزش صورت گرفته است که به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. با استفاده از تلفیق روش‌های تحلیل شبکه و ترکیب خطی وزنی، مناطق بحرانی خطر زمین‌لغزش توسط عابدینی و پیروزی (۱۳۹۸) در شهرستان خلخال شناسایی شد. بر اساس نتایج ایشان، عوامل شیب، کاربری اراضی، بارش و سنگ شناسی به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را بر ایجاد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه دارند. از طریق تلفیق داده‌های نقشه‌برداری، موضوعی و تداخل سنجی راداری رویکردی توسط بیانچینی و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شد که قادر به تشخیص زمین‌لغزش‌های بسیار آهسته و نقاط بحرانی و مناطق ناپایدار بود. ایشان رویکرد مذکور را در مرکز کالابریا در جنوب ایتالیا به‌صورت موفقیت‌آمیزی آزمون نمودند. با هدف شناسایی نقاط کانونی زمین‌لغزش در جزیره شمالی نیوزلند، هولبلینگ و همکاران (۲۰۱۶) از تحلیل عکس‌های هوایی گذشته و حال حاضر استفاده کردند. ایشان برای شناسایی زمین‌لغزش‌ها از روش شیءگرا استفاده نمودند و تطابق مناسبی میان نتایج روش مذکور و روش نقشه‌برداری زمینی ارائه نمودند. تجزیه و تحلیل آماری برای مکان‌یابی نقاط داغ زمین‌لغزش در حوضه‌های آبخیز کشور تایوان توسط لین[7] و همکاران (۲۰۱۷) به‌کار گرفته شد. تجزیه و تحلیل خودهمبستگی فضایی جهانی و محلی وجود خوشه‌های زمین‌لغزش نشان داد که تجمع نقاط بحرانی زمین‌لغزش ناشی از بارندگی‌های شدید بوده است. با استفاده از یک رویکرد جدید تجزیه و تحلیل نقاط داغ بهینه، لو و همکاران (۲۰۱۹) الگوی پراکنش زمین‌لغزش‌ها را در منطقه ولترا[8] کشور ایتالیا ارزیابی نمودند. تحلیل‌مکانی با آماره خودهمبستگی مکانی آماره جتیس-اورد مشخص نمود که پراکنش زمین‌لغزش‌ها از نظر آماری معنی‌دار هستند. با بررسی داده‌های ۲۰۴ زمین‌لغزش و ابزار جتیس-اورد به تجزیه و تحلیل نقاط بحرانی وقوع زمین‌لغزش در بنگلادش توسط سولتانا[9] (۲۰۲۰) مشخص شد که تحلیل مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش در درک روند علل ناشی از زمین‌لغزش کمک خواهد کرد و در تدوین سیاست‌های مناسب برای جلوگیری از

1 - Guzzetti
2 - Jaedicke
3 - Bianchini
4 -m Hölbling
5 - Parker
6 - Alexander
7- Lin
8 - Volterra
9 - Sultana

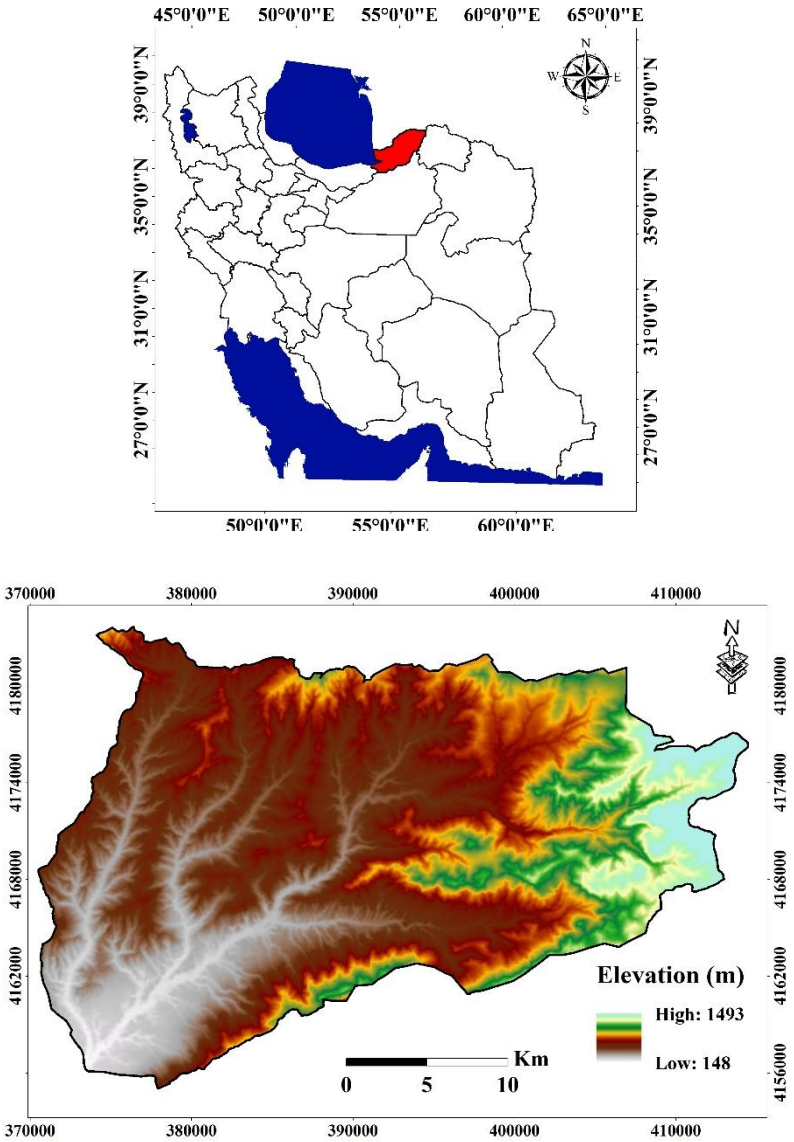
خسارت‌های زمین‌لغزش و افزایش آگاهی جوامع محلی مؤثر خواهد بود. با استفاده از تحلیل عامل قطعیت، وقوع زمین‌لغزش در تایوان توسط وو (۲۰۲۲) مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش ایشان از مقادیر Z آماره جتیس-اورد برای ارزیابی الگوی خوشه‌بندی تکامل زمین‌لغزش در مقیاس‌ها و اندازه‌های مختلف استفاده شد. بر اساس نتایج مشخص شد که مناطق مستعد زمین‌لغزش دارای ارتفاع ۱۰۰۰-۱۷۵۰ متر، شیب بیش از ۴۰ درجه، و دامنه‌هایی با جهت‌های شمالی، شمال شرق، شرق و جنوب شرق بوده و در ۱۰۰ متری رودخانه‌ها واقع شده‌اند. خوشه‌های زمین‌لغزش نشان داد که وقوع زمین‌لغزش‌های بزرگ به‌ترتیب ۲/۴ و ۶/۶ برابر بیش‌تر از زمین‌لغزش‌های متوسط و کوچک بوده است. در همین راستا، ابزارهای تحلیل الگوی مکانی با در نظر گرفتن ویژگی یک عارضه (زمین‌لغزش) در کنار ویژگی‌های عوارض همسایه به تحلیل همبستگی مکانی آن می‌پردازد. به‌عبارتی این ابزارها، الگوی محلی (یک ویژگی هدف و همسایگان آن) را از نظر آماری با الگوی جهانی (همه ویژگی‌های مجموعه داده) مقایسه می‌کنند و در مورد همبستگی مکانی پدیده‌ها و وجود نقاط مشابه و بحرانی قضاوت می‌کنند. وابستگی مکانی ویژگی‌های نزدیک به هم، معمولاً مشابه هستند و این نوع وابستگی در اغلب داده‌های مکانی وجود دارد. تحلیل نقاط داغ یکی از ابزارهایی است که به‌منظور بررسی همبستگی و الگوی مکانی عوارض استفاده می‌شود. در تحلیل نقاط داغ، مقدار آماره جتیس-اورد برای هر ویژگی در یک مجموعه داده محاسبه می‌شود. نتایج مقادیر امتیاز z و سطح معنی‌داری نشان‌دهنده الگوی خوشه‌بندی مکانی ویژگی‌های دارای مقادیر زیاد یا کم هستند. اساس این روش بر مقایسه هر ویژگی نسبت به مقادیر ویژگی‌های نقاط همسایه استوار است. در همین ارتباط، برای اینکه یک نقطه مهم از نظر آماری باشد، یک عارضه با مقدار عددی بالا نسبت به عوارضی با مقادیر بالا که اطراف آن را احاطه نموده اند در نظر گرفته می شود. تجزیه و تحلیل نقاط داغ زمین‌لغزش‌ها در حوضه‌های آبخیز برای ارزیابی رابطه بین پارامترها و الگوهای خوشه‌ای مکانی انجام می‌شود (بیانچینی و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۱۵۵؛ لو[1] و همکاران، ۲۰۱۹). نقاط بحرانی، وسعت و فاصله مناطق لغزش‌ها از یکدیگر را برجسته می‌کنند، در حالی که پارامترهای مرتبط با توزیع مکانی، تراکم و نسبت زمین‌لغزش‌ها در سطح را بیان می‌کنند. استان گلستان نیز به‌دلیل شرایط خاص آب و هوایی، فیزیوگرافی و پوشش گیاهی همواره در معرض خطر وقوع زمین‌لغزش قرار دارد (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹) که نیاز است مورد توجه جدی قرار گیرد. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، هدف پژوهش حاضر، تجزیه و تحلیل و شناسایی مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش و با استفاده از آمار مکانی و الگوریتم جتیس-اورد در حوضه آبریز قرناوه در شهرستان کلاله (استان گلستان) است. در این راستا، عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز قرناوه یکی از زیرحوزه‌های آبخیز گرگانرود با مساحتی حدود ۱۲۵۷ کیلومترمربع در شهرستان کلاله استان گلستان به‌سبب وجود خاک‌های با فرسایش‌پذیری بالا، پوشش گیاهی ضعیف و پتانسیل بالای وقوع زمین‌لغزش به‌عنوان منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر انتخاب شد. حداقل و حداکثر ارتفاع در منطقه مطالعاتی به‌ترتیب برابر با ۱۴۸ و ۱۴۹۳ متر از سطح دریا می‌باشد. منطقه مورد مطالعه دارای توپوگرافی ناهموار است و شیب متوسط حوضه مورد مطالعه ۲۶ درصد است که در بخش‌های پایین‌دست کاهش می‌یابد. متوسط بارندگی در حوزه قرناوه ۴۱۸ میلی‌متر است. کاربری اراضی غالب منطقه زراعت دیم است و بخش‌های زیادی از منطقه هم به‌صورت مرتع در حال بهره‌برداری است (صابر چناری و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۰). خاک حوضه عمدتاً سیلتی لومی و از نظر زمین‌شناسی نیز عمدتاً به‌وسیله رسوبات بادی-یخچالی مثل لس و رسوبات جدید و قدیم آبرفتی پوشیده شده است. خاک‌های لسی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گروه خاک‌های رمبنده، پوشش اصلی بخش شمالی شهرستان کلاله استان گلستان را تشکیل می‌دهند (حافظی‌مقدس و همکاران، ۱۳۹۰: ۴۰). حوزه آبریز قرناوه به‌طور ذاتی دارای فرسایش‌پذیری بالایی است و در برخی مناطق دارای آبراهه‌هایی با عمق زیاد و دیواره‌های عمودی است. موقعیت حوزه آبریز مورد پژوهش در کشور و استان گلستان در شکل ۱ ارائه شده است.

1 - Lu



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان گلستان و ایران

Fig (1): Geographical location of the study area in Golestan province and Iran

۲-۲ روش پژوهش

به‌منظور انجام پژوهش حاضر، نقاط وقوع زمین‌لغزش طی بازدیدهای صحرایی و ثبت توسط GPS در حوضه آبریز قرناوه و نیز اطلاعات زمین‌لغزش موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان جمع‌آوری و تهیه شد. در گام بعد، به‌منظور بررسی نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی از روش Getis-Ord Gi* استفاده شد. تجزیه و تحلیل نقطه داغ با استفاده از ابزار Getis-Ord Gi* در ArcGIS با هدف تحلیل درجه تمرکز زمین‌لغزش‌ها در مناطق مختلف یک حوضه استفاده می‌شود. ابزار مورد اشاره مقادیر مربوط به خوشه‌بندی زمین‌لغزش‌ها را ارائه می‌دهد (سولتانا و همکاران، ۲۰۲۰). لازم به ذکر است که آماره Getis-Ord برای تشخیص خوشه‌های مکانی استفاده می‌شود. این شاخص قادر خواهد بود تا خوشه‌هایی را شناسایی کند که ممکن است هنگام استفاده از آماره مکانی جهانی نشان داده نشوند. آماره Getis-Ord برای ویژگی i توسط رابطه ۱ تا ۳ محاسبه می‌شود:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} W_{ij} X_j - \bar{X} \sum_{j=1}^{n} W_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^{n} W_{ij}^2 - \left[\sum_{j=1}^{n} W_{ij}\right]^2}{n-1}}} \quad (۱)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} X_j}{n} \quad (۲)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} X_j^2}{n}} - (\bar{X})^2 \quad (۳)$$

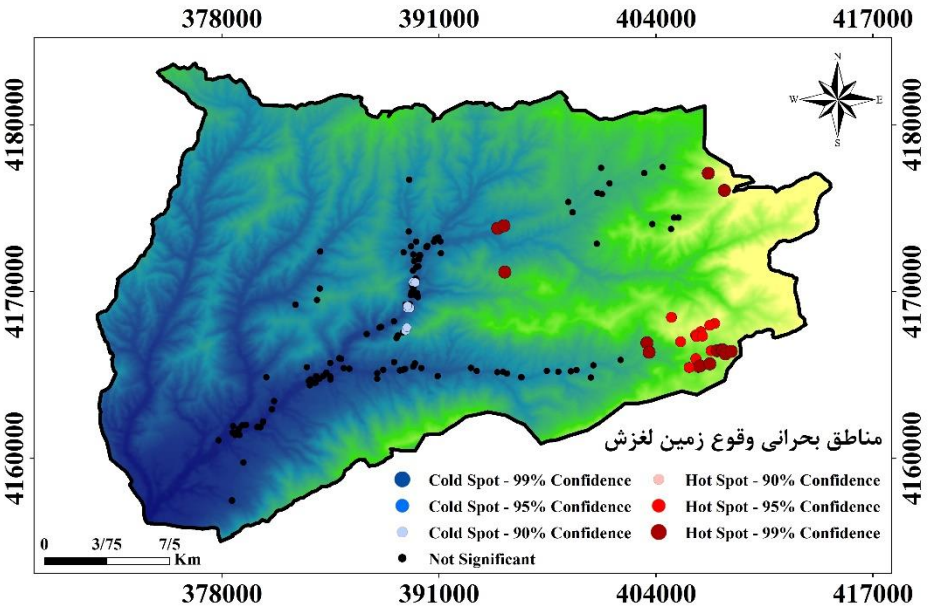
که در آن، آماره Gi* امتیاز z و مبنای تعیین الگوی خوشه‌بندی مکانی است. هم‌چنین، xj مقدار مشخصه مربوط به عارضه j، Wij وزن مکانی میان عارضه i و j و n تعداد کل عارضه‌های مورد بررسی است (اورد و جتیس[1]، ۱۹۹۵: ۲۹۰؛ قربانی و همکاران، ۱۴۰۱). باید اشاره شود که در این پژوهش، مساحت، طول، عرض، عمق و ارتفاع پرتگاه زمین‌لغزش در تعیین شدت وقوع زمین‌لغزش مدنظر قرار گرفت که مبنای خوشه‌بندی مکانی نیز در نظر گرفته شده است. به‌عنوان نمونه در خصوص عامل مساحت باید گفت که اگر یک عارضه زمین‌لغزش با مساحت زیاد که توسط زمین‌لغزش‌هایی با مساحت بالا در اطراف احاطه شده است به‌عنوان یک نقطه داغ و معنی‌دار از نظر آماری تعریف می‌شود. مجموع مساحت یک زمین‌لغزش و زمین‌لغزش‌های اطراف آن متناسب با مجموع کلیه زمین‌لغزش‌های منطقه مقایسه می‌شود. هنگامی که مجموع مساحت‌ها در یک محدوده، بسیار متفاوت از مجموع محلی مساحت‌های مورد انتظار باشد و اگر این تفاوت بیش از حد بزرگ باشد و تصادفی اتفاق نیفتاده باشد، یک امتیاز z آماری معنی‌دار ایجاد می‌شود (پوخارل[2] و همکاران، ۲۰۲۱). هرچه مقدار نمرات z مثبت و بیش‌تر باشد، از نظر آماری معنی‌دار است و خوشه‌بندی مقادیر بالا (نقطه داغ) فشرده‌تر خواهد بود. در مورد نمرات z منفی و معنی‌دار از نظر آماری، هرچه امتیاز z کوچک‌تر باشد، خوشه‌بندی مقادیر پایین (نقطه سرد) فشرده‌تر خواهد بود. اگر امتیاز z نزدیک به صفر باشد به این معنی است که الگوی خوشه‌بندی مکانی مشخصی وجود ندارد. قابل ذکر است که طول و عرض زمین‌لغزش نیز به‌عنوان مشخصه‌های مهم این پدیده متأثر از عوامل محیطی است که می‌تواند مبنای تحلیل مکانی وقوع زمین‌لغزش باشد. علاوه بر موارد گفته شده، عمق و ارتفاع پرتگاه زمین‌لغزش نیز با تأثیرپذیری از طول شیب، عمق خاک و درجه شیب زمین می‌تواند در مناطق مشابه به وقوع بپیوندد که در تحلیل مناطق بحرانی وقوع زمین‌لغزش مدنظر قرار گرفته است. در ادامه، ویژگی‌های زمین‌لغزش‌های مورد مطالعه براساس شکل سطح گسیختگی (چرخشی، واژگونی، انتقالی و غیره)، وضعیت (فعال، تثبیت شده و غیره)، نوع پیش‌روی (پس‌رونده، پیش‌رونده و غیره) و نحوه فعالیت (ساده، پیچیده، متوالی و غیره) وقوع زمین‌لغزش تحلیل شدند. قابل ذکر است که زمین‌لغزش‌های مورد مطالعه براساس موقعیت در طبقات مختلف کاربری اراضی و هم‌چنین نوع خاک بستر مورد بررسی قرار گرفتند. هم‌چنین، تعداد وقوع زمین‌لغزش‌ها در هریک از طبقات شیب زمین و جهت‌های مختلف جغرافیایی مورد تحلیل قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تهیه نقشه توزیع نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیارهای مساحت، طول، عرض، عمق و ارتفاع پرتگاه زمین‌لغزش و روش تحلیلی Getis-Ord در حوضه آبریز قرناوه استان گلستان در شکل‌های ۲ تا ۶ نشان داده شده است.

1 - Ord and Getis

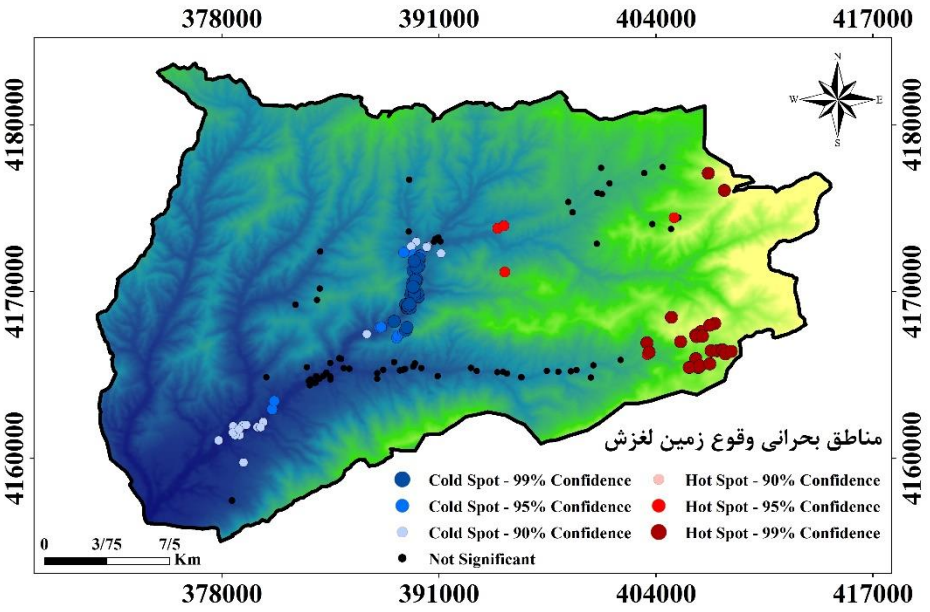
2 - Pokharel



شکل (۲): نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار مساحت پهنه‌های لغزشی و روش Getis-Ord در حوضه آبریز قرناوه

Fig (2): Landslide hot spots based on the landslide area criterion and the Getis-Ord method in the Gharnaveh watershed

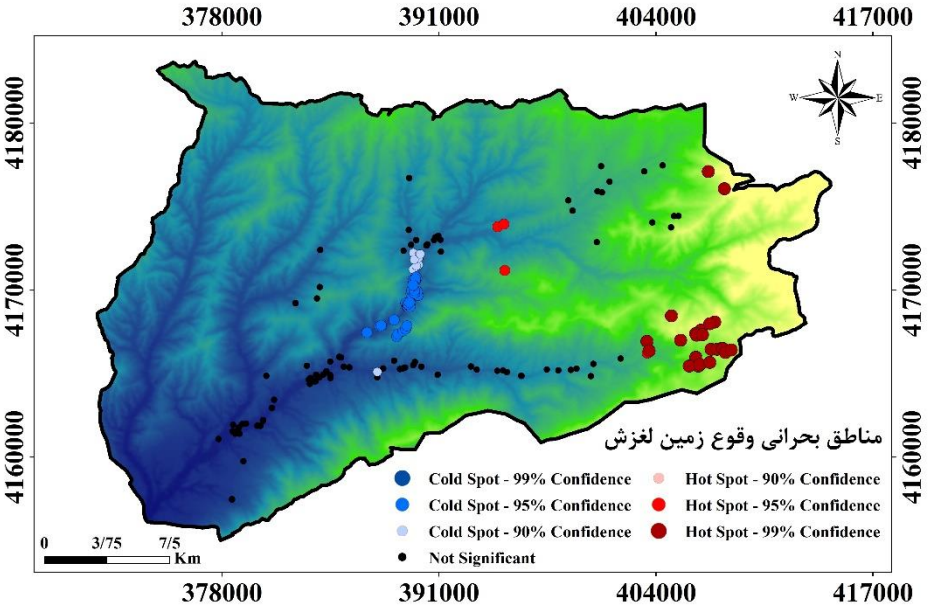
براساس نتایج ارائه شده در شکل ۲، نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش در محدوده شرقی منطقه مطالعاتی قرار گرفته است. این منطقه از نظر ارتفاعی نیز در طبقات ارتفاعی ۹۵۰ تا ۱۵۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. باید اشاره نمود که کاربری اراضی مرتعی و شیب بالا از دیگر ویژگی‌های نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار مساحت زمین‌لغزش در حوضه آبریز قرناوه شهرستان کلاله بوده است. هم‌چنین می‌توان گفت که وجود دامنه‌های حساس در سازندهای زمین‌شناسی حساس و مستعد وقوع زمین‌لغزش باعث شده است که مساحت قابل‌توجهی از پهنه‌های لغزشی شکل گیرد که وقوع زمین‌لغزش را تسهیل نماید. از آن‌جا که نقشه ارائه شده مناطق بحرانی براساس معیار مساحت زمین‌لغزش‌ها بوده است، لذا می‌توان گفت که وقوع زمین‌لغزش‌های متراکم در محدوده مورد نظر باعث ایجاد نقاط بحرانی وقوع لغزش شده است. باید اشاره شود که مناطق مذکور منطبق با مقادیر بالای بارندگی است که وقوع زمین‌لغزش را تسدید نموده است. در همین راستا، نقاط وقوع زمین‌لغزش غیرمعنی‌دار از نظر آماری با استفاده از روش Getis-Ord و براساس معیار مساحت زمین‌لغزش در مناطق میانی و پایین‌دست حوضه آبریز مورد مطالعه قرار دارد.



شکل (۳): نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار طول زمین‌لغزش و روش Getis-Ord در حوضه آبریز قرناوه

Fig (3): Landslide hotspots based on the landslide length criterion and the Getis-Ord method in the Gharnaveh watershed

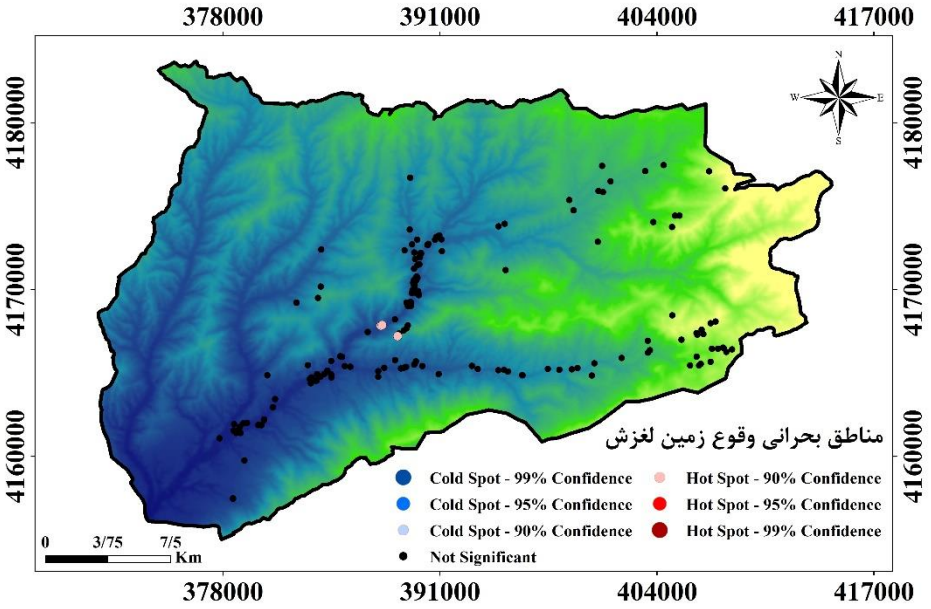
براساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر در خصوص تعیین نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش Getis-Ord مطابق با معیار طول زمین‌لغزش و مندرج در شکل ۳ می‌توان گفت که الگوی نسبتاً مشابهی با نقشه تهیه شده براساس معیار مساحت زمین‌لغزش وجود دارد. در همین ارتباط، تعداد نقاط سرد وقوع زمین‌لغزش براساس معیار طول زمین‌لغزش با توجه به مقدار کم امتیاز z و علامت منفی در اطراف آبراهه‌ها و محدوده میانی و پایین‌دست حوضه آبریز مطالعاتی قرار گرفته‌اند.



شکل (۴): نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار عرض زمین‌لغزش و روش Getis-Ord در حوضه آبریز قرناوه

Fig (4): Landslide hotspots based on the landslide width criterion and the Getis-Ord method in the Gharnaveh watershed

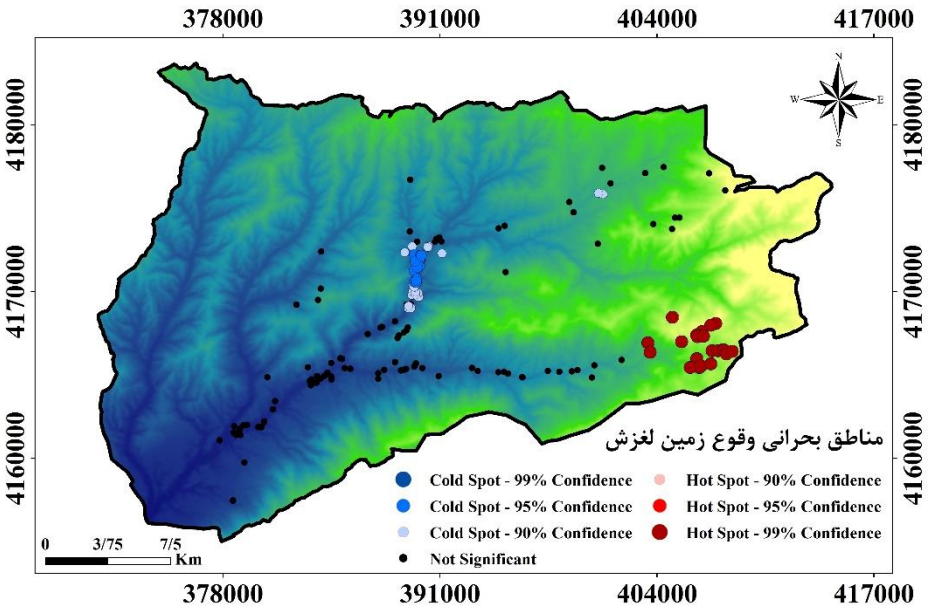
براساس نتایج ارائه شده در شکل ۴ می‌توان گفت که الگوی پراکنش نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز قرناوه مشابه معیار طول زمین‌لغزش است. با توجه به چرخشی بودن غالب زمین‌لغزش‌های ثبت شده در منطقه مورد پژوهش، می‌توان اشاره داشت که طول و عرض زمین‌لغزش‌ها از نظر ابعاد تقریباً با هم متناسب هستند که سبب ارائه الگوی مکانی یکسان با استفاده از روش Getis-Ord برای معیارهای طول و عرض زمین‌لغزش (شکل‌های ۳ و ۴) شده است.



شکل (۵): نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار عمق زمین‌لغزش و روش Getis-Ord در حوضه آبریز قرناوه

Fig (5): Landslide hotspots based on the landslide depth criterion and the Getis-Ord method in the Gharnaveh watershed

یافته‌های حاصل از پژوهش فعلی در خصوص تعیین نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار عمق زمین‌لغزش (شکل ۵) با استفاده از روش Getis-Ord نشان می‌دهد که در حوضه آبریز قرناوه، نقاط وقوع زمین‌لغزش از نظر عمق اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند. باید اشاره شود که تنها چند نقطه وقوع زمین‌لغزش در بخش میانی حوضه آبریز مطالعاتی در سطح اطمینان ۹۹ درصد به‌عنوان نقطه داغ تشخیص داده شده است. پس می‌توان گفت که تفاوت معنی‌داری از نظر همبستگی مکانی میان زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته در حوضه آبریز قرناوه براساس عمق زمین‌لغزش مشاهده نشد.

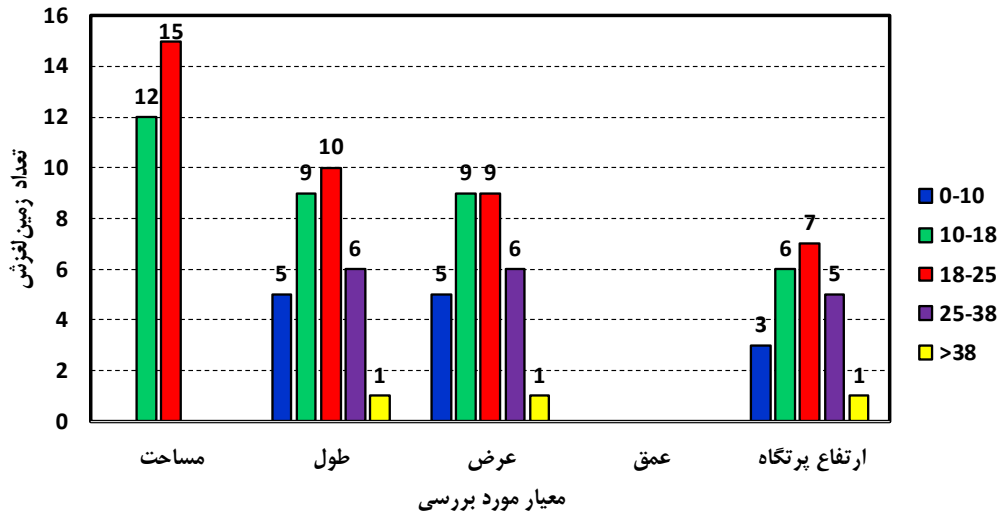


شکل (۶): نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار ارتفاع پرتگاه زمین‌لغزش و روش Getis-Ord در حوضه آبریز قرناوه

Fig (6): Landslide hotspots based on the landslide height of the precipice criterion and the Getis-Ord method in the Gharnaveh watershed

بررسی نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش براساس معیار ارتفاع پرتگاه زمین‌لغزش در حوضه آبریز قرناوه و ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که نقاط داغ مورد اشاره در سطح اطمینان ۹۹ درصد از نظر آماری در بخش جنوب‌غربی حوضه مطالعاتی تجمع پیدا نموده‌اند. در بخش میانی حوضه نیز نقاط سرد وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش Getis-Ord و معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۰ و ۹۵ درصد از نظر معیار مورد بررسی تشخیص داده شدند.

در شکل ۷ تعداد وقوع زمین‌لغزش‌ها در طبقات مختلف درصد شیب براساس معیارهای تعیین مناطق بحرانی (مساحت زمین‌لغزش، طول لغزش، عرض لغزش، عمق لغزش، ارتفاع پرتگاه) در سطح اطمینان ۹۵ درصد در حوضه آبریز مورد پژوهش نشان داده شده است. در این راستا، پس از تعیین توزیع خوشه‌های وقوع زمین‌لغزش و نقاط داغ براساس معیارهای مختلف، تعداد زمین‌لغزش‌ها در طبقات مختلف درصد شیب استخراج و تحلیل شدند.

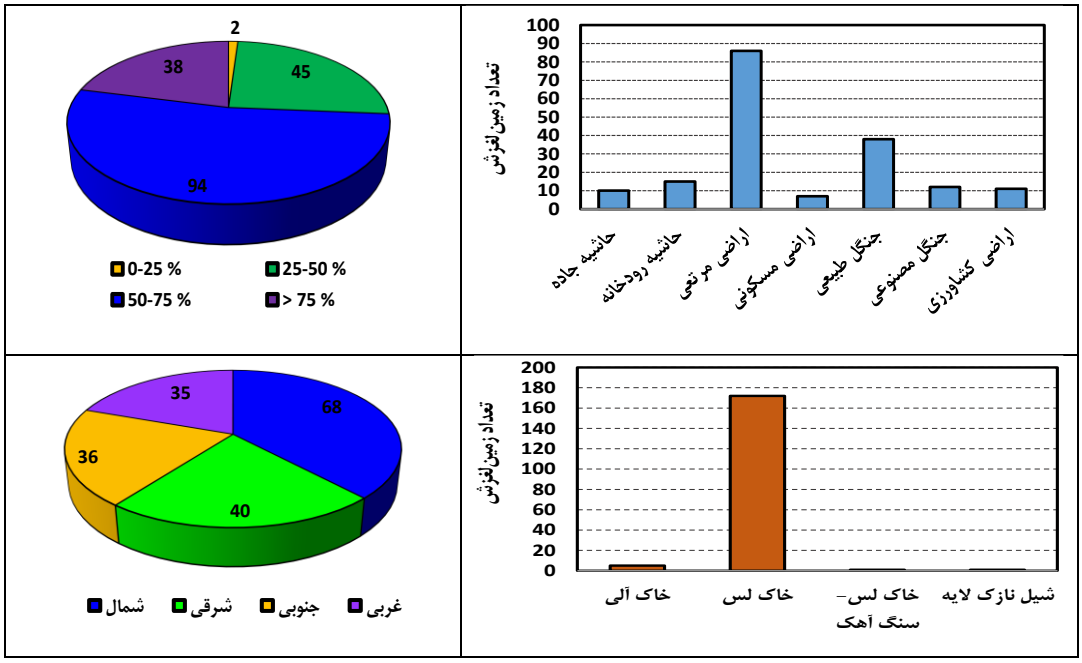


شکل (۷): تعداد وقوع زمین‌لغزش‌ها در طبقات مختلف درصد شیب براساس معیارهای تعیین مناطق بحرانی در سطح اطمینان ۹۵ درصد در حوضه آبریز قرناوه

Fig (7): The number of landslides occurrences in different percent of slope classes based on the critical areas criteria at the 95% confidence level in the Gharnaveh watershed

قابل ذکر است که برای تعیین نقاط داغ، مقادیر آماره جتیس-اورد در دو سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد ارائه می‌شود که مبنای تعیین نقاط داغ و نقاط سرد وقوع زمین‌لغزش خواهد بود. در این راستا، پس از آماره جتیس-اورد و تعیین نقاط داغ و سرد، تعداد زمین‌لغزش‌های واقع در طبقات مختلف درصد شیب استخراج شد. نتایج پراکنش نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش بر اساس معیارهای مختلف مندرج در شکل ۷ نشان می‌دهد که بیش‌تر زمین‌لغزش‌ها در طبقه شیب ۱۸ تا ۲۵ درصد و سپس در دامنه ۱۰ تا ۱۸ درصد قرار گرفته‌اند. در شیب‌های مذکور ضمن وجود عمق مناسب خاک برای وقوع زمین‌لغزش دامنه‌ای، شرایط ناپایداری نیز مهیا خواهد بود. ضمن اینکه دامنه‌های مذکور بیش‌تر در اراضی مرتعی قرار گرفته‌اند که فراوانی کلی وقوع زمین‌لغزش‌ها در کاربری‌های مختلف اراضی نیز این موضوع را تأیید می‌نماید. باید اشاره شود که کم‌ترین تعداد نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش در طبقه شیب بیش‌تر از ۳۸ درصد پراکنده شده‌اند. تعداد کم زمین‌لغزش‌های تشخیص داده شده در خوشه داغ در طبقه شیب مذکور را می‌توان با عمق کم خاک مرتبط دانست. علاوه بر این، در محدوده مذکور کم‌ترین تراکم جاده و نیز دخالت‌های انسانی وجود دارد که شرایط وقوع زمین‌لغزش را محدود نموده است.

یافته‌های حاصل از ارزیابی توزیع مکانی نقاط وقوع زمین‌لغزش در طبقات مختلف کاربری اراضی، خاک، درجه شیب و جهت شیب در حوضه آبریز قرناوه شهرستان کلاله در شکل ۸ ارائه شده است.



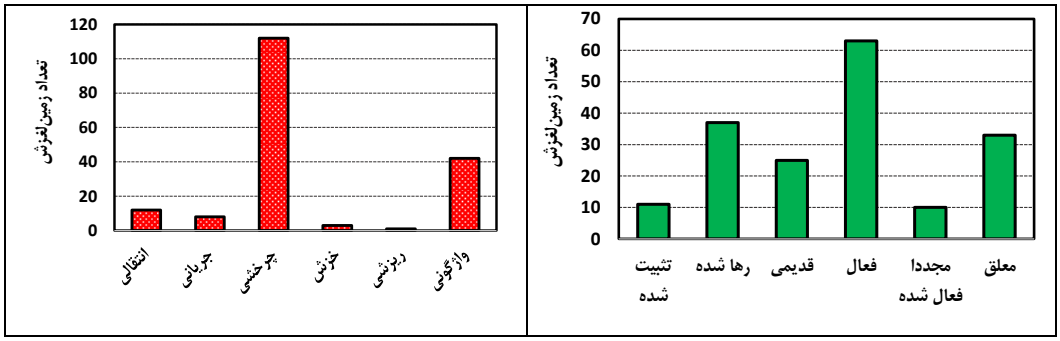
شکل (۸): توزیع زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته شده در حوضه آبریز قرناوه در طبقات مختلف کاربری اراضی، خاک، درجه شیب و جهت جغرافیایی

Fig (8): Number of landslides in Gharnaveh watershed in different land use classes, soil, slope degree and aspect

براساس شکل ۸، بیش‌ترین تعداد وقوع زمین‌لغزش به‌ترتیب در اراضی مرتعی و جنگلی رخ داده است. توزیع زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته براساس نوع خاک در حوضه آبریز قرناوه و مندرج در شکل ۸ نشان می‌دهد که بیش‌ترین فراوانی در خاک‌های بادی-یخچالی لسی اتفاق افتاده است. تحلیل نتایج به دست آمده از توزیع مجموع کل نقاط وقوع زمین‌لغزش در طبقات مختلف درصد شیب و جهت جغرافیایی نشان می‌دهد که طبقه شیب ۵۰ تا ۷۵ درصد (۹۴ مورد) و جهت شمالی (۶۸ مورد) بیش‌ترین تعداد وقوع کل زمین‌لغزش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند.

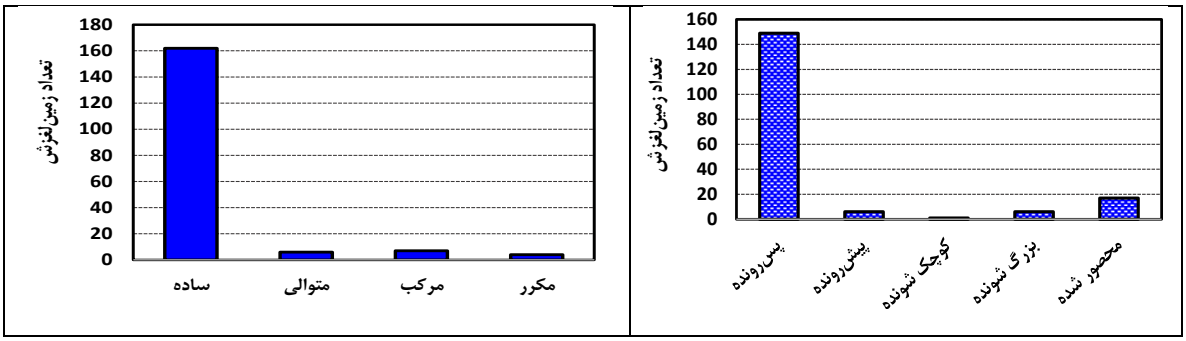
قابل ذکر است که نمودارهای ارائه شده در شکل ۸، صرفا بر اساس تعداد کلیه زمین‌لغزش‌ها در طبقات مختلف شیب، جهت جغرافیایی، کاربری اراضی و نوع خاک ارائه شده است. در حالی که تحلیل نقاط داغ بر اساس در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌لغزش‌ها (مساحت زمین‌لغزش، طول لغزش، عرض لغزش، عمق لغزش، ارتفاع پرتگاه) و در نتیجه مشخص نمودن معنی‌داری خوشه‌های نقاط داغ و سرد بوده است و بدیهی است که تعدادی از زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه ممکن است تشکیل نقاط داغ نداده باشند و از نظر آماری به‌عنوان منطقه بحرانی در نظر گرفته نشوند.

نتایج حاصل از بررسی توزیع زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته در حوضه آبریز قرناوه شهرستان کلاله استان گلستان براساس وضعیت فعالیت، شکل سطح گسیختگی، نوع پیش‌روی و نحوه فعالیت در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.



شکل (۹):توزیع زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته در حوضه آبریز قرناوه براساس شکل سطح گسیختگی و وضعیت فعالیت
Fig (9): Number of landslides in Gharnaveh watershed based on the shape of the rupture surface and activity status

تحلیل یافته‌های حاصل از بررسی وضعیت فعالیت زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته در حوضه آبریز مطالعاتی و ارائه شده در شکل ۹ حاکی از فعال بودن غالب زمین‌لغزش‌ها است. زمین‌لغزش‌های مجددا فعال شده نیز کم‌ترین تعداد را در بین کلیه طبقات از نظر نحوه فعالیت زمین‌لغزش به خود اختصاص داده است. از نظر شکل سطح گسیختگی زمین‌لغزش‌ها در آبخیز مطالعاتی نیز (شکل ۹)، نوع چرخشی و ریزشی به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار وقوع را به خود اختصاص داده است. قابل ذکر است که نوع زمین‌لغزش و سایر ویژگی‌های مرتبط با آن‌ها بر اساس فرم‌های استاندارد ثبت زمین‌لغزش‌ها درج شده است که اطلاعات آن در بانک داده‌های زمین‌لغزش‌های کشور استخراج شده است که بخشی از آن توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری در طول نمونه‌برداری مداوم در طول زمان تهیه و تکمیل شده است. زمین‌لغزش‌های چرخشی معمولاً در رسوبات ضخیم سطحی یا سنگ‌های هوازده مشاهده می‌شوند و ممکن است منشاء طبیعی یا انسانی (ایجاد بریدگی در قاعده یک دامنه ناپایدار) داشته باشند و سطح شکستگی در برش عرضی تقریباً کمانی شکل است. شکستگی واژگونی با چرخش به جلو حول نقطه محوری پایین‌دست، تحت اثر نیروی ثقل و یا نیروی فشار آب بین‌منفذی در شکاف سنگ‌ها اتفاق می‌افتد. زمین‌لغزش‌های انتقالی در امتداد سطح لایه‌بندی یا سطوح ضعیف موجود در سنگ‌ها انجام می‌شود و توده سنگی به موازات این صفحه حرکت می‌کند.



شکل (۱۰): توزیع زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته در حوضه آبریز قرناوه براساس نوع پیش‌روی و نحوه فعالیت
Fig (10): Number of landslides in Gharnaveh watershed based on the type of movement and type of activity

اطلاعات مندرج در شکل ۱۰ نیز حاکی از قرارگیری زمین‌لغزش‌های پس‌رونده و ساده در رتبه نخست وقوع زمین‌لغزش‌ها در آبخیز مورد پژوهش از نظر نوع پیش‌روی و نحوه فعالیت است. بر اساس جهت حرکت، زمین‌لغزش‌ها می‌تواند پسرونده، پیش‌رونده، کوچک‌شونده یا بزرگ‌شونده باشند. در حالت پسرونده، یک چرخش در جلوی دامنه ایجاد می‌شود و در اثر جابجایی توده لغزشی بخش‌های بالایی توده ناپایدار می‌شود و لغزش به سمت عقب (بالادست) حرکت می‌کند. در زمین‌لغزش ساده، توده‌ای از مواد روی یک مقاوم به سمت پایین دامنه لغزش پیدا می‌کند. وجود شرایط زمین‌شناسی مستعد لغزش و وجود ناپیوستگی‌های زمین‌ساختی در بخش بالادست از جمله عوامل ایجاد وقوع زمین‌لغزش ساده است.

۳- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تعیین نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش و تحلیل ویژگی زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته در حوضه آبریز قرناوه شهرستان کلاله استان گلستان صورت پذیرفت. براساس نتایج به دست آمده در این پژوهش نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش در محدوده شرقی منطقه مطالعاتی قرار گرفته است. محدوده نقاط داغ به دست آمده براساس روش Getis-Ord و معیار مساحت زمین‌لغزش در طبقات بالای ارتفاع از سطح دریا و کاربری اراضی مرتعی قرار گرفته است. در همین راستا، در محدوده‌های میانی و پایین دست نقاط وقوع زمین‌لغزش

از نوع لکه‌های سرد و یا غیرمعنی‌دار از نظر آماری تشخیص داده شده‌اند. براساس نقشه‌های مکانی وقوع زمین‌لغزش ارائه شده در شکل‌های ۲ تا ۶ و تحلیل پراکندگی نقاط داغ مشخص شد که الگوی متفاوتی براساس معیارهای مساحت، طول، عرض و ارتفاع پرتگاه وجود دارد. قابل ذکر است که براساس معیار عمق زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی الگوی مشخص مکانی از نظر وجود نقاط داغ و سرد وجود ندارد. قابل ذکر است که مبنای وجود نقاط داغ، معنی‌داری براساس آماره جتیس-اورد در یکی از سطوح اطمینان ۹۵ و یا ۹۹ درصد است. براین اساس، علیرغم قرارگرفتن تعداد قابل توجهی از زمین‌لغزش‌ها در محدوده امتداد و یا اطراف رودخانه‌ها، اما مقادیر آماره جتیس-اورد معنی‌دار نبوده و در دسته‌بندی نقاط داغ و مناطق بحرانی قرار نمی‌گیرند.

نتایج حاصل از نقشه‌های وقوع زمین‌لغزش و تغییرات مکانی آن نشان داد که نقاط سرد وقوع زمین‌لغزش‌ها در فواصل نزدیک رودخانه و جاده قرار گرفته‌اند. در این خصوص می‌توان گفت که عامل رودخانه با زیرشوئی دامنه‌ها و فرسایش مواد دامنه‌ای در ایجاد زمین‌لغزش موثر هستند. در همین راستا، عابدینی و پیروزی (۱۳۹۸) نیز به نتایج مشابهی در منطقه خلخال استان اردبیل دست یافته‌اند. علاوه بر این، احداث جاده با بارگزاری و نیز تغییر شیب دامنه‌ها باعث ایجاد لغزش‌های کوچک شده‌اند که در روی نقشه به‌عنوان مناطق سرد تشخیص داده شده‌اند. پراکنش معنی‌دار نقاط داغ وقوع زمین‌لغزش بر اساس معیارهای مختلف و مندرج در شکل ۷ نشان داد که بیش‌تر زمین‌لغزش‌ها در طبقات شیب ۱۰ تا ۱۸ و ۱۸ تا ۲۵ درصد قرار گرفته‌اند که منطبق با شیب‌های مناسب وقوع لغزش دامنه و کاربری اراضی مرتع است. یافته‌های پژوهش نشان داد که پراکنش زمین‌لغزش‌ها در بخش‌های بالادست منطقه مورد مطالعه که در دامنه‌های محدب و اراضی مرتعی واقع شده‌اند، از نظر آماری تشکیل خوشه‌های نقاط داغ معنی‌دار داده‌اند. در همین راستا لو و همکاران (۲۰۱۹) نیز نتایج مشابهی در تحلیل‌مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه ولترای کانادا با آماره خودهمبستگی مکانی Getis-Ord به‌دست آورده‌اند. تعیین نقاط بحرانی وقوع زمین‌لغزش و نیز تعیین عوامل مؤثر بر آن از طریق تحلیل نقشه‌های مکانی در بستر GIS میسر است. علاوه بر این، می‌توان نسبت به طبقه‌بندی لایه‌های مختلف اطلاعاتی و هم‌چنین تعیین آستانه‌های موثر بر وقوع زمین‌لغزش اقدام نمود. تجزیه و تحلیل نقاط بحرانی وقوع زمین‌لغزش می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص تعیین مناطق ناپایدار مستعد خطر فراهم کند و بنابراین می‌تواند به‌عنوان مبنای برنامه‌ریزی مکانی، شناسایی مناطق بحرانی و کاهش خطر مدنظر قرار گیرد. رویکرد مورد استفاده در مورد بسیاری از مخاطرات طبیعی که دارای ماهیت خودهمبستگی مکانی هستند، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌سازی مکانی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های آماری و داده‌کاوی در حوضه آبریز مطالعاتی به‌منظور اولویت‌بندی مناطق مختلف برای اجرای اقدامات حفاظتی از پیشنهادهای کاربردی منتج از پژوهش حاضر است. تعیین پهنه‌های مستعد خطرات چندگانه محیطی مانند سیلاب، فرسایش خاک، آتش‌سوزی و غیره و تلفیق آن‌ها براساس نقاط داغ می‌تواند در دوره‌های زمانی مختلف انجام گیرد و مبنای پیش‌بینی شدت خطر و خسارت در آینده قرار گیرد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان به سبب همکاری‌ها و مساعدت‌های لازم درخصوص در اختیار قرار دادن اطلاعات زمین‌لغزش حوضه آبریز قرناوه شهرستان کلاله تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

۵- منابع

Abdollahzadeh, A., Ownegh, M., Sadoddin, A., & Mostafazadeh, R. 2016. Comparison of two landslide-prone area determination methods in Ziarat Watershed, Golestan Province. Journal of Emergency Management, 5(1): 5-13. (in Persian).

Abdollahzadeh, A., Ownegh, M., Sadoddin, A., & Mostafazadeh, R. 2014. Development of a landslide management plan under normal and critical scenarios for Ziarat Watershed, Golestan Province. Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi), 27(3):75-84. (in Persian).

Abedini, M., & Piroozi, E. 2020. Landslide hazard zoning with u sing combination methods of hot spot, ANP and WLC (Case study: Khalkhal county). Journal of Geography and Environmental Hazards, 8(4), 19-36. doi: 10.22067/geo.v0i0.81836. (in Persian).

Alavi, S. A., Behnammorshedi, H., & Ashournejad, Q. 2018. The Analysis of Spatial Equality of Tourism Services and Attractions: A Case Study of the Province of Fars. Geography and Urban Space Development, 4(2), 63-80. doi: 10.22067/gusd.v4i2.60203. (in Persian).

Alexander, D. 2005. Vulnerability to landslides. Landslide hazard and risk, 175-198.

Ariapour, M., Bashiri, M., & Golkarian, A. 2019. Modeling of mass movements using data mining methods in the southeast of Neyshabur city, Razavi Khorasan Province. Hydrogeomorphology, 6(19), 57-77. (in Persian).

Bianchini, S., Cigna, F., Righini, G., Proietti, C., & Casagli, N. 2012. Landslide hotspot mapping by means of persistent scatterer interferometry. Environmental Earth Sciences, 67, 1155-1172.

Esfandiyari Darabadi, F., & Beheshti Javid, E. 2016. Landslides susceptibility zoning using Bayes' Theorem-ANP hybrid model (Case study: Heyran Defile). Hydrogeomorphology, 3(8), 93-111. (in Persian).

Ghashghaie, S., & Behzadi, S. 2019. Spatial statistics analysis to identify hot spots using accidental event calls services. Journal of Statistical Research of Iran JSRI, 16(1), 121-141.

Ghorbani, A., Zabihi, M., & Mostafazadeh, R. 2023. Determining the distribution pattern of spatial correlation of flood occurrence in Ardabil province using Moran's Index in GIS. RS and GIS for Natural Resources, 10.30495/GIRS.2023.1977963.2036 (in Persian).

Guzzetti, F. 2000. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. Engineering Geology, 58(2), 89-107.

Hafezi Moghaddas, N., Nikudel, M., & Bahrami, K. 2011. Evaluation of collapsibility of loess deposits of Gharnaveh catchment in north of Kalale, Golestan province. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 4(1&2), 39-46. (in Persian).

Hölbling, D., Betts, H., Spiekermann, R., & Phillips, C. 2016. Identifying spatio-temporal landslide hotspots on North Island, New Zealand, by analyzing historical and recent aerial photography. Geosciences, 6(4), 48.

Jaedicke, C., Van Den Eeckhaut, M., Nadim, F., Hervás, J., Kalsnes, B., Vangelsten, B. V., ... & Smebye, H. 2014. Identification of landslide hazard and risk 'hotspots' in Europe. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 325-339.

Lin, S. C., Ke, M. C., & Lo, C. M. 2017. Evolution of landslide hotspots in Taiwan. Landslides, 14, 1491-1501.

Lu, P., Bai, S., Tofani, V., & Casagli, N. 2019. Landslides detection through optimized hot spot analysis on persistent scatterers and distributed scatterers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 156, 147-159.

Moradi, H.R., Mohammdy, M., Pourghasemi, H.R., Mostafazadeh, R. (2010). Landslide hazard analysis in Golestan Province using Dempster-Shafer theory. Researches in Earth Science, 1(3): 1-14. (in Persian).

Motevalli, A., Pourghasemi, H. R., & Zabihi, M. 2018. Assessment of GIS-based machine learning algorithms for spatial modeling of landslide susceptibility: case study in Iran, 258-280.

Nadian M, Mirzaei R, Soltani Mohammadi S. 2018. Application of Moran'sI Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM2.5 Pollutant (A case Study: Tehran City). Journal of Environmental Health Engineering, 5(3), 197-213. (in Persian).

Najafi Eigdir, A., Roostaei, S., Hejazi, A., Rajabi, M., & Jalali, N. (2021). Landslide hazard zonation using the bivariate statistical models in Nazlo-Chay Basin. Hydrogeomorphology, 8(27), 17-1. doi: 10.22034/hyd.2021.25375.1376 (in Persian).

Ord, J.K. and Getis, A. 1995. Local Spatial Autocorrelation Statistics Distributional Issues and an Application. Geographical Analysis, 27, 286-306.

Parker, R. N., Densmore, A. L., Rosser, N. J., De Michele, M., Li, Y., Huang, R., ... & Petley, D. N. 2011. Mass wasting triggered by the 2008 Wenchuan earthquake is greater than orogenic growth. Nature Geoscience, 4(7), 449-452.

Pokharel, B., Alvioli, M., & Lim, S. 2021. Assessment of earthquake-induced landslide inventories and susceptibility maps using slope unit-based logistic regression and geospatial statistics. Scientific reports, 11(1), 21333.

Saber Chenari K, Bahremand1 A, Berdi Sheikh V, Bairam Komaki C. 2019. Gully erosion hazard Zoning in the Gharnaveh Watershed, Golestan Province. Journal of Engineering Geology, 13 (1), 69-94. (in Persian).

Shahri, M., & Shariat Mohaymany, A. (2022). Identifying Spatio-temporal Patterns of Traffic Congestion Using Data Obtained from Google Maps Service Traffic Image. Iranian Journal of Remote Sensing & GIS, doi: 10.52547/gisj.2022.223633.1055. (in Persian).

Sultana, N. 2020. Analysis of landslide-induced fatalities and injuries in Bangladesh: 2000-2018. Cogent Social Sciences, 6(1), 1737402.

Wu, C. 2022. Certainty Factor Analyses and Spatiotemporal Characteristics of Landslide Evolution: Case Studies in the Chishan River Watershed in Taiwan. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(7), 382.

Zali, M., & Shahedi, K. 2021. Landslide sensitivity assessment using fuzzy logic approach and GIS in Neka Watershed. Water and Soil Management and Modelling, 1(1), 67-80. doi: 10.22098/mmws.2021.1183. (in Persian).