



Zoning of Slope Instability Using SWARA and CRITIC Decision-Making Methods in the Tabriz City Region

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam¹ , Nasrin Samandar² , Tohid Rahimpour³

1. (Corresponding Author) Department of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: rezmogh@tabrizu.ac.ir

2. Department of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: nasrin.samandar@gmail.com

3. Department of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: rahimpour1990@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

27 April 2024

Received in revised form:

2 July 2025

Accepted:

10 August 2025

Available online:

15 September 2025

Keywords:

Tabriz;

MCDM;

CRITIC Model;

SWARA Model;

Slope Instability.

ABSTRACT

Slope instability represents one of the most severe natural hazards, leading to substantial economic damage and human casualties each year, while also posing considerable challenges for infrastructure development. This study seeks to identify the key factors driving slope instability and to outline preventive strategies within the metropolitan area of Tabriz, a case of particular significance for environmental and urban planning. The research applied the SWARA and CRITIC multi-criteria decision-making methods to weight and evaluate the selected criteria, and subsequently produced a hazard zonation map using ArcGIS. The analysis considered multiple criteria, including slope, aspect, elevation, proximity to faults, rivers, and roads, as well as lithology, land use, and precipitation. Following the weighting process, the criteria were standardized and converted into thematic layers. These layers were then integrated and overlaid to generate the final zonation map identifying areas susceptible to slope movements. The results indicate that the unstable zones delineated by both models largely correspond to locations of previously recorded landslides. Specifically, neighborhoods such as Silab, Malazināl, Yusefabad, Kuy-e Valiasr, and Kuy-e Golpark, along with residential districts including Baghmesheh, Yaghchiyan, Fajr, Khavaran, and Sayyad Shirazi, are located within very high- and high-hazard zones. By contrast, the western, northwestern, and southwestern sectors of the city are classified as safe zones, whereas the central and eastern sectors are predominantly categorized as low-hazard.

Cite this article: Rezaei Moghaddam, M. H., Samandar, N., & Rahimpour, T. (2025). Zoning of Slope Instability Using SWARA and CRITIC Decision-Making Methods in the Tabriz City Region. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (2), 39-55.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2025.399814.1007899>



Extended Abstract

Introduction

Landslide hazard zoning is a fundamental instrument for risk management and strategic decision-making in environmental planning, a task of particular importance in mountainous regions with complex and dynamic terrain. The metropolis of Tabriz, constrained by its geomorphological and topographical conditions, has historically pursued a sectoral development model. This growth strategy has driven the extensive construction and expansion of satellite towns around the city's periphery. Many of these newly developed settlements—most notably Eram Town—are located in close proximity to the active fault line north of Tabriz. This precarious location exposes them to multiple natural hazards, including earthquakes, flash floods, and diverse forms of mass movements. These factors are widely acknowledged as critical indicators in geomorphological hazard assessments, a concern further compounded by the fact that many of these settlements are built on unstable slopes composed of weak and erodible lithology.

Due to the city's mountainous topography and the prevalence of clay-rich, unstable soils, Tabriz is highly susceptible to diverse types of slope movements, from shallow landslides to deep-seated instabilities. Accordingly, this study pursued two main objectives: (1) to assess and zone slope instability within the metropolitan area of Tabriz, and (2) to develop a robust, generalizable model for systematic landslide hazard zoning. The proposed model is designed for application not only to Tabriz but also to neighboring areas with comparable geomorphological characteristics. To this end, the evaluation integrated nine key causative factors and employed two multi-criteria decision-making (MCDM) methods—Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC)—to derive precise weightings.

Methodology

SWARA is a MCDM technique designed to determine the relative weights of criteria and sub-criteria.

- **Step 1:** A decision model is developed based on the interrelationships among parameters. The criteria used to construct the slope instability zoning map are then ranked in descending order according to their perceived importance.

- **Step 2:** The weights of the criteria are calculated as follows: beginning with the second criterion, the evaluator specifies the relative importance of criterion j in comparison with the preceding criterion ($j-1$). This procedure is repeated sequentially for all remaining criteria.

In contrast to many other approaches, the CRITIC method does not rely extensively on expert judgment. Indeed, its independence from subjective expert assessments is regarded as one of its principal strengths. The method evaluates data by measuring the degree of contrast and correlation among criteria. Each criterion is represented as a vector characterized by statistical parameters, including the standard deviation, which captures the variability in its values.

Results and Discussion

To assess the potential for slope movements, nine key factors were identified as critical triggers of instability in the region: slope gradient, aspect, lithology, land use, precipitation, proximity to faults, proximity to rivers, and proximity to roads. The historic urban core of Tabriz was established on relatively flat terrain with gentle slopes. However, rapid urban expansion has extended development onto adjacent steep slopes, particularly in newly established satellite towns. These towns are predominantly located in the northern and southeastern sectors of the city, both of which are characterized by steep terrain. The most erosion-prone geological units include marl, shale interbedded with sandstone, and recent fluvial alluvium. By contrast, sandstone and red marl units display comparatively higher resistance to erosion, contributing to the rugged topography and elevated relief of the basin. The eastern and northern sectors of the city are especially prone to landslides because of their distinctive geological composition. The prevalence of highly saturable marl and clay layers in these areas creates conditions that are highly conducive to slope

instability. Precipitation intensifies slope instability through the combined effects of hydrological and mechanical processes. These effects are further amplified in areas characterized by steep gradients, erosion-prone lithology, and sparse vegetation cover. Zones located near fault lines are particularly vulnerable owing to concentrated tectonic stresses, intensified rock fracturing, and an elevated probability of micro-seismic activity.

The rapid physical expansion of the city has also generated severe traffic congestion. To address this issue, beltways were constructed to divert transit traffic beyond the urban limits, leading to the development of two major highways in northern and southern Tabriz. Although originally designed exclusively for transit purposes, these corridors have progressively acquired urban functions as the city expanded along their axes.

Conclusion

A careful comparison of the final hazard map with the landslide distribution map confirms the reliability of this study, as the high-risk zones correspond closely with historically recorded landslide events. Therefore, the methodology and model proposed in this study offer an effective framework for urban landslide hazard zoning. In particular, areas within the neighborhoods of Silab, Malazinal, Yousef Abad, Valiasr Alley, Baghmisheh Town, Golpark Alley, Shahid Yaghchian Town, Fajr Town, Khavaran Town, and Sayyad Shirazi Town fall within very high- and high-risk zones. Conversely, the southern and western sectors are largely classified as safe zones, whereas substantial portions of the northern and eastern sectors are designated as low-risk areas.

Considering the ongoing physical and structural expansion of Tabriz, along with its increasing population, urban development requires careful management. Specifically, uncontrolled urban expansion into areas affected by the North Tabriz Fault System has heightened the city's susceptibility to earthquakes and related geomorphological hazards, including slope instability. To mitigate future hazards, long-term urban planning should impose restrictions on development within high-

risk zones. Furthermore, policymakers are advised to establish incentive programs that encourage at-risk residents to relocate to safer locations, thereby reducing their exposure to landslides and other geological hazards.

Funding

Tabriz Metropolitan Islamic Council Research Center.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper. This article is the result of research conducted at the University of Tabriz with financial support from the Islamic Council of Tabriz Metropolitan Research Center. The authors hereby sincerely thank the efforts of the Technology Management of the University of Tabriz, especially Dr. Nadiri and Mr. Hessami, the Director of the Islamic Council of Tabriz Metropolitan Research Center, Dr. Rouhollah Rashidi, and the Deputy Director of Research, Dr. Ahad Ebrahim Pour-Lanbaran, as well as the scientific supervisors of the project, Dr. Morad Ali Shafaghi and Dr. Roghieh Salek.

پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری SWARA و CRITIC در محدوده شهر تبریز

محمدحسین رضائی مقدم^۱ ✉، نسرين سمندر^۲ , توحید رحیم‌پور^۳ 

۱- نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: rezmogh@tabrizu.ac.ir

۲- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: nasrin.samandar@gmail.com

۳- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: rahimpour1990@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۰۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۱۹

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۶/۲۴

واژگان کلیدی:

تبریز،

تصمیم‌گیری چند

معیاره،

مدل CRITIC،

مدل SWARA،

ناپایداری دامنه‌ای.

ناپایداری دامنه‌ای از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی محسوب می‌شود که سالانه خسارت‌های مالی و جانی قابل توجهی به همراه دارد و اجرای پروژه‌های عمرانی را با چالش‌های جدی مواجه می‌کند. این مطالعه با هدف شناسایی عوامل مؤثر در بروز ناپایداری دامنه‌ای و ارائه راهکارهای پیشگیرانه در کلان‌شهر تبریز انجام شده است، موضوعی که در برنامه‌ریزی‌های محیطی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، از روش‌های تصمیم‌گیری SWARA و CRITIC برای وزن دهی و ارزیابی معیارها استفاده شد و نقشه پهنه‌بندی خطر با کمک نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. معیارهای مورد بررسی شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، لیتولوژی، کاربری اراضی و میزان بارش بودند که پس از وزن دهی، به صورت لایه‌های استاندارد شده درآمدند. در نهایت، با تلفیق و رویهم‌گذاری این لایه‌ها، نقشه نهایی پهنه‌بندی مناطق مستعد حرکات دامنه‌ای تهیه شد. بررسی نتایج نشان داد که پهنه‌های ناپایدار در هر دو مدل، با مناطق وقوع لغزش‌های پیشین مطابقت دارد. به‌طور مشخص، محلاتی نظیر سیلاب، ملازینال، یوسف‌آباد، کوی ولیعصر، کوی گلپارک، شهرک‌های باغمیشه، یاغچیان، فجر، خاوران و صیاد شیرازی در محدوده‌های با خطر بسیار بالا و بالا قرار گرفته‌اند. در مقابل، مناطق غربی، شمال غربی و جنوب غربی شهر در پهنه‌های بی‌خطر جای دارند، درحالی‌که بخش‌های مرکزی و شرقی عمدتاً در محدوده‌های کم‌خطر طبقه‌بندی شده‌اند. بنابراین جهت کاهش نسبی خطرات و افزایش میزان پایداری دامنه‌ها لازم است تا حد ممکن از تغییر اکوسیستم و کاربری اراضی اجتناب کرد.

استناد: رضائی مقدم، محمدحسین؛ سمندر، نسرين و رحیم‌پور، توحید. (۱۴۰۴). پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری SWARA و CRITIC در محدوده شهر تبریز. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۲)، ۵۵-۳۹.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2025.399814.1007899>

مقدمه

مطالعه علمی و جامع پدیده زمین‌لغزش، در دنیا به دلیل تحمیل خسارات جانی و مالی وارده بر اجتماعات انسانی، یکی از مسائل مهم محسوب می‌گردد. خطر زمین‌لغزش در سازه‌های آبی و سدها به علت تأثیر مستقیم و غیرمستقیم حضور آب در وقوع زمین‌لغزش اهمیت زیادی دارد (روستایی و حسین زاده، ۱۴۰۱: ۲). شناسایی و پهنه‌بندی نواحی مستعد لغزش، گامی مهم در ارزیابی خطرات محیطی به شمار رفته و نقش انکارناپذیری در مدیریت بحران ایفا می‌کند (Sakar et al., 1995: 309). هدف از پهنه‌بندی، تقسیم سطح زمین به نواحی همگن و درجه‌بندی آن‌ها برحسب میزان واقعی یا پتانسیل خطر لغزش است (Varnes, 1984). تاکنون روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ارائه شده که این روش‌ها را می‌توان به ۲ دسته اصلی روش‌های کمی و کیفی تقسیم‌بندی کرد (Ercanoglu et al., 2004: 3). روش‌های کیفی بیشتر بر نظر شخصی مبتنی است و در این روش‌ها بر اساس قضاوت کارشناسان به ارزیابی خطر یا حساسیت می‌پردازند (Aleotti & Chowdhury, 1999: 24). در روش‌های کمی نظر متخصص کمتر دخیل بوده و بیشتر بر اساس مقادیر عددی حاصل از آنالیزهای اطلاعات مختلف بنا گذاشته شده‌اند (Guzzetti et al., 1999: 184).

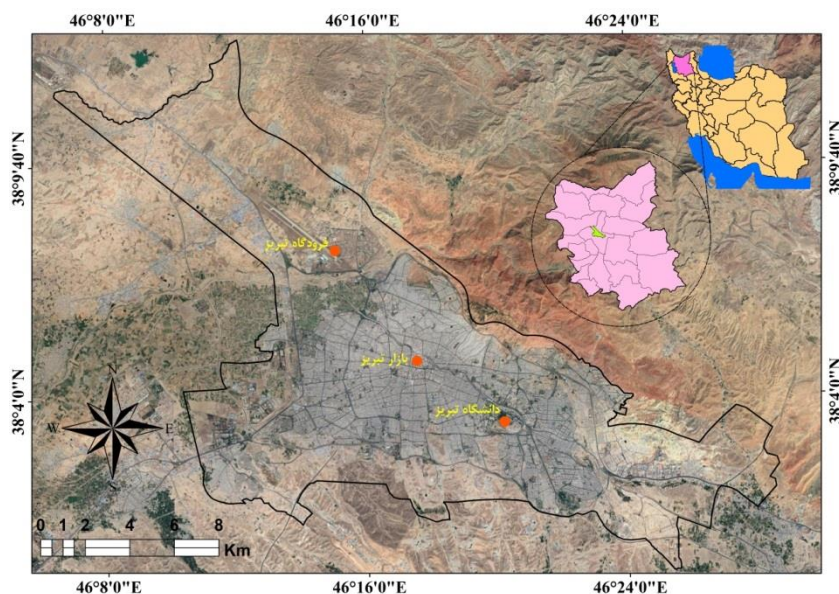
تحقیقات متعددی جهت پایش، مدل‌سازی و مدیریت ناپایداری‌های دامنه‌ای در ایران و جهان مورد استفاده قرار گرفته که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. سمندر و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی عملکرد روش‌های آماری رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی چندلایه پرسپترون در پیش‌بینی وقوع حرکات توده‌ای حوضه آبریز کمانج‌چای (علیا) پرداختند. با توجه به نتایج مدل‌ها درصد پهنه‌هایی با خطر بسیار بالا در مدل شبکه‌ی عصبی و رگرسیون لجستیک به ترتیب برابر با ۵/۶ و ۸/۳ درصد می‌باشد که عمدتاً محدوده‌های نزدیک به شبکه‌های زهکشی را شامل می‌گردد. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۰) به مدل‌سازی حرکات توده‌ای و مدیریت مناطق حساس به وقوع این حرکات، با استفاده از الگوریتم‌های آماری و شبکه عصبی در حوضه آبریز اوجان‌چای پرداختند. دره شوری و یزدی (۱۴۰۱) به شناسایی مناطق مستعد به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های فرا ابتکاری پرداختند. ۱۴ فاکتور برای این مطالعه در نظر گرفته شد. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل خصوصیات هیدروژئومورفیک حوضه آبریز الندچای به‌منظور اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی پرداختند. در این تحقیق از روش وزن دهی نوین SWARA استفاده شده و وزن نسبی هر یک از پارامترها برای ۱۵ زیر حوضه مورد مطالعه مشخص گردید. هوانگ و همکاران (Huang et al., 2017) به بررسی پدیده ریزش سنگ در دامنه‌های شهر هووانگ دگ با مدل ابر مرکب DEMATEL-CRITIC پرداختند. نتایج نشان داد که شیب سنگ واژگونی نسبتاً ایمن با حاشیه ایمنی کم بود. جیائو و همکاران (Jiao et al., 2019) عملکرد چهار مدل مبتنی بر GIS را به منظور تهیه نقشه مناطق مستعد زمین‌لغزش در جنوب غرب چین بررسی کردند. آن‌ها برای این کار از چهار مدل MaxEnt، IVM، Bioclim و Domain استفاده کردند. براساس نتایج به دست آمده، بین مدل‌های استفاده شده، مدل MaxEnt بهترین عملکرد را دارد. لی زو و همکاران (Li Zhu et al., 2020) به مدل‌سازی پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از سنجش‌ازدور و الگوریتم تکرار آبشار موازی در شبکه عصبی در استان جیانگشی چین پرداختند. تسفا و سونت (Tesfa and Sewnet, 2024) در پژوهشی با استفاده از روش AHP به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه گوجام واقع در کشور اتیوپی پرداختند. بر اساس یافته‌های این تحقیق، سه عامل کلیدی شامل فاصله از رودخانه، شدت بارندگی و دخالت‌های انسانی به‌عنوان محرک‌های اصلی زمین‌لغزش در این ناحیه شناسایی شدند.

کلان‌شهر تبریز به دلیل محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی، به سمت توسعه‌ی قطاعی و احداث شهرک‌های اقماری در حاشیه‌ی شهر گرایش یافته است. بسیاری از این شهرک‌ها، به‌ویژه شهرک ارم، در مجاورت گسل فعال شمال تبریز و در

معرض تهدیدات طبیعی همچون زلزله، سیلاب و حرکات توده‌ای قرار دارند. این عوامل از جمله شاخص‌های کلیدی در ارزیابی مخاطرات ژئومورفولوژیکی محسوب می‌شوند. علاوه بر این، این شهرک‌ها عمدتاً در مناطق شیب‌دار با لیتولوژی ناپایدار و متشکل از سازندهای میوسن (شامل مارن‌های آهکی و نمک‌دار، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و لایه‌های آهکی) احداث شده‌اند (مختاری و امامی کیا، ۱۳۹۳: ۹۶). با توجه به این شرایط، مطالعه‌ی پدیده‌ی زمین‌لغزش و حرکات دامنه‌ای از نظر نظری و عملی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین در پژوهش حاضر به پهنه‌بندی مناطق مستعد ناپایداری دامنه‌ای با تأکید ویژه بر زمین‌لغزش با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره SWARA و CRITIC در محدوده‌ی شهر تبریز پرداخته شده است.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش شهر تبریز می‌باشد. شهر تبریز در شمال غربی ایران واقع شده است و مرکز استان آذربایجان شرقی است. تبریز، در مقام یکی از کلان‌شهرهای ایران، بر اساس آخرین آمار در سال ۱۴۰۰ جمعیتی بالغ ۱۶۴۳۹۶۰ نفر دارد. شهر تبریز به‌عنوان بزرگ‌ترین کلان‌شهر شمال غرب ایران در موقعیت جغرافیایی $38^{\circ} 01'$ تا $38^{\circ} 09'$ عرض شمالی و $46^{\circ} 11'$ تا $46^{\circ} 23'$ طول شرقی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی شهر تبریز را در کشور و استان آذربایجان شرقی بر روی تصویر گوگل ارث (۲۰۲۲) نشان می‌دهد. از جمله لغزش‌های رخ داده در تبریز می‌توان به زمین‌لغزش شهرک باغمیشه در شهریور سال ۱۳۹۸ اشاره کرد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

روش پژوهش

در پژوهش حاضر جهت تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره SWARA و CRITIC استفاده شده است.

مدل SWARA^۱

مدل SWARA یا تحلیل نسبت ارزیابی وزن دهی تدریجی در سال ۲۰۱۰ توسط کرسولین و همکاران (Keršulienė et al., 2010) ارائه شد. این مدل به عنوان یک تکنیک تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) برای محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها استفاده می‌شود. روش تعیین وزن با استفاده از SWARA در گام‌های زیر ذکر شد است:

گام اول: ایجاد یک مدل تصمیم‌گیری بر اساس رابطه بین پارامترها. در این مرحله معیارهای مورد استفاده در تهیه نقشه پهنه‌بندی حرکات دامنه‌ای بر اساس اهمیت مورد انتظارشان به صورت نزولی مرتب می‌شوند. برای تعیین اهمیت هر پارامتر از روش قضاوت کارشناس که توسط کندال (Kendall, 1970)، زاوادسکاس و ویلاتین (Zavadskas and Vilutienė, 2006) و زاوادسکاس و همکاران (Zavadskas et al., 2010) ارائه شده است استفاده می‌شود.

گام دوم: وزن معیارها به صورت زیر محاسبه می‌شوند: از معیار دوم شروع می‌شود، پاسخ‌دهنده اهمیت نسبی معیار j را در ارتباط با معیار قبلی ($j - 1$) بیان می‌کند و این کار را برای هر معیار تکرار می‌کند. طبق کرسولین و همکاران (۲۰۱۰) این نسبت اهمیت مقایسه‌ای مقدار میانگین S_j نامیده می‌شود که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن n تعداد کارشناسان؛ A_i رتبه‌های ارائه شده توسط کارشناسان برای هر پارامتر و j نشان‌دهنده تعداد پارامترها می‌باشد.

گام سوم: ضریب K_j از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ S_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad \text{رابطه ۲}$$

گام چهارم: وزن مجددی q_j از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{k_j - 1}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad \text{رابطه ۳}$$

گام پنجم: وزن نسبی معیارها از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W_j = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن W_j نشان‌دهنده وزن نسبی معیار j و n نشان‌دهنده تعداد کل معیارها می‌باشد (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۹: ۶۷).

روش CRITIC^۲

روش CRITIC، که توسط دیاکولاکي^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۵ ارائه شد روش عینی برای تعیین وزن معیارهاست که شامل شدت تضاد و ناسازگاری بین اجزای یک مسئله تصمیم‌گیری است. این دو مقوله در آمار به وسیله ضرایب همبستگی و انحراف معیار صورت می‌گیرد. در واقع انحراف معیار مربوط به مقادیر هر معیار می‌باشد و ضریب همبستگی مربوط به جفت معیارها می‌باشد (زندى و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۵۰).

اولین گام در این روش تشکیل ماتریس تصمیم است. اهمیت معیارها مبتنی بر همبستگی درونی معیارها است.

1. Stepwise weight assessment ratio analysis
2. CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation
3. Diakoulaki

گام ۱: همچون رابطه (۵) ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. در این ماتریس n سطر، تعداد مکان‌های کاندید m ستون، بیانگر تعداد معیارهای مورد استفاده جهت تصمیم‌گیری می‌باشد (زندى و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۵۰).

$$X_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۵)}$$

نرمال‌سازی در روش CRITIC

گام ۲: توسط رابطه (۶) برای معیارهای دارای فایده و رابطه (۷) برای معیارهای دارای هزینه در تصمیم‌گیری ماتریس تصمیم نرمال می‌شود (ساسان پور و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۶۹).

$$x^*_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad \text{رابطه (۶)}$$

رابطه (۷)

$$x^*_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

محاسبه اوزان

گام ۳: با در نظر گرفتن انحراف معیار و همبستگی آن با سایر معیارها وزن‌ها محاسبه می‌شود.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^m C_j} \quad \text{رابطه (۸)}$$

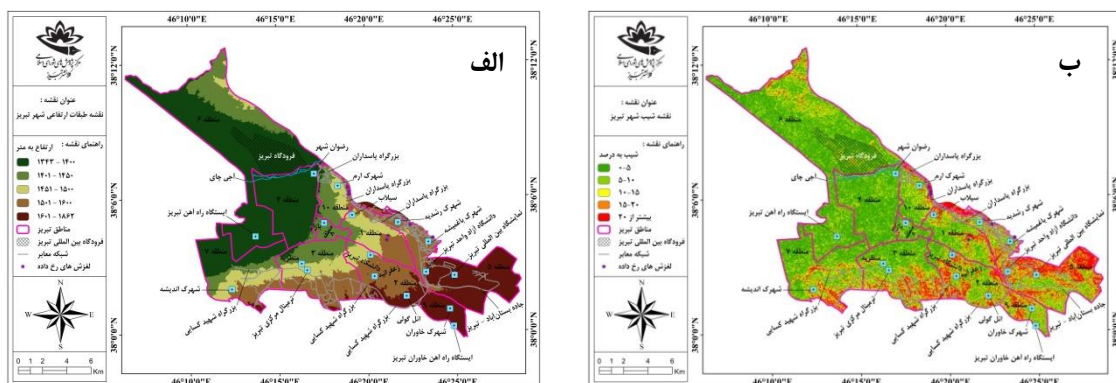
$$C_j = \sigma_j \times \sum_{i=1}^m 1 - r_{ji} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در روابط بالا σ_j انحراف معیار j امین معیار بوده و r_{ji} ضریب همبستگی اسپیرمن بین معیار j -ام و معیار i -ام می‌باشد (زندى و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۵۰).

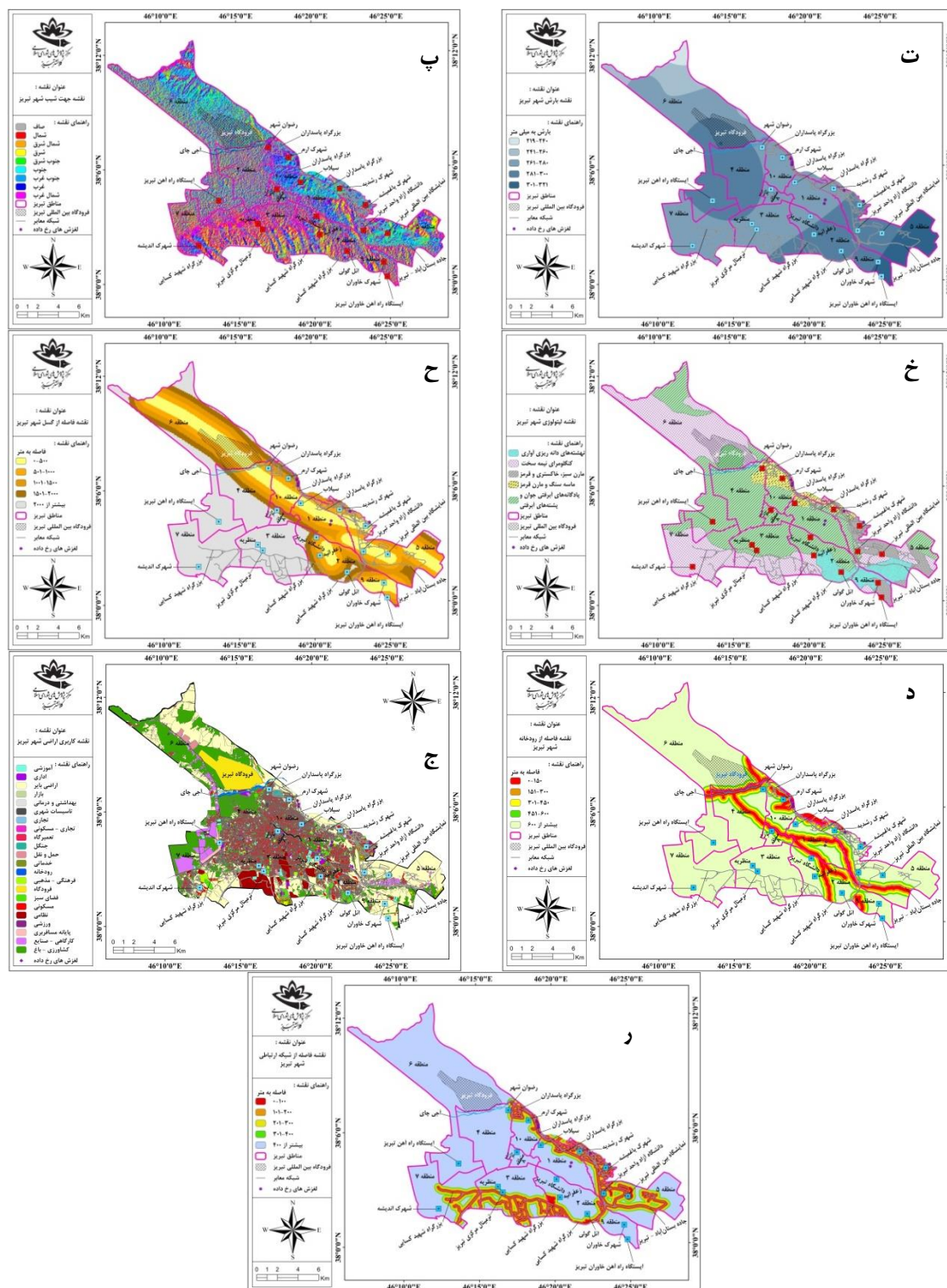
با توجه به روابط فوق، معیارهایی که دارای C_j بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. همچنین در رابطه بالا σ_j انحراف معیار j امین معیار است و r_{ji} همبستگی بین دو معیار i و j می‌باشد.

یافته‌ها

جهت بررسی پتانسیل وقوع حرکات دامنه‌ای ۹ عامل طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، میانگین بارش سالانه، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای منطقه تشخیص داده شدند (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه لایه‌های اطلاعاتی (الف: ارتفاع؛ ب: شیب)

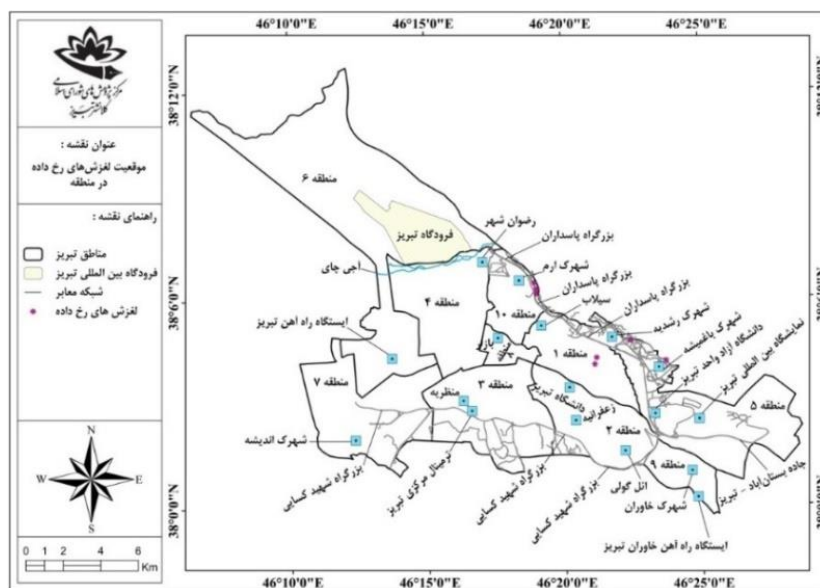


ادامه شکل ۲. نقشه لایه‌های اطلاعاتی

(پ: جهت شیب؛ ت: بارش؛ ح: فاصله از گسل؛ خ: لیتولوژی؛ ج: کاربری اراضی؛ د: فاصله از رودخانه؛ ر: فاصله از جاده)

نقاط لغزش یافته

موقعیت مکانی لغزش‌های رخ داده در منطقه با استفاده از سامانه Google Earth مشخص شده که همراه با بازدیدهای میدانی نیز بوده است (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه لغزش‌های رخ داده در محدوده شهر تبریز

وزن دهی معیارها با روش SWARA

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، در مرحله اول روش سوارا، از متخصصان (اساتید مجرب و با تکیه بر مبانی نظری) خواسته شد تا معیارها را بر اساس اهمیت، به‌صورت نزولی رتبه‌بندی کنند. مراحل دوم تا چهارم این روش نیز به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده‌اند. در نهایت، پس از اجرای گام آخر روش سوارا و نرمال‌سازی وزن‌ها، ارزش و وزن نهایی معیارهای تأثیرگذار بر ناپایداری دامنه‌ای در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۱. رتبه‌بندی معیارهای مدل SWARA

معیار	لیتولوژی	شیب	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	بارش	فاصله از گسل	ارتفاع	کاربری اراضی	جهت شیب
رتبه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

جدول ۲. محاسبه اهمیت معیارها یا S_j و محاسبه ضریب K_j مدل SWARA

معیار	لیتولوژی	شیب	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	بارش	فاصله از گسل	ارتفاع	کاربری اراضی	جهت شیب
K_j	۱	۱/۹۵	۱/۹	۱/۹۵	۱/۹	۱/۹	۱/۸۵	۱/۹	۱/۸
S_j	-	۰/۹۵	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹	۰/۹	۰/۸۵	۰/۹	۰/۸

جدول ۳. محاسبه وزن اولیه هر معیار (Q_j) مدل SWARA

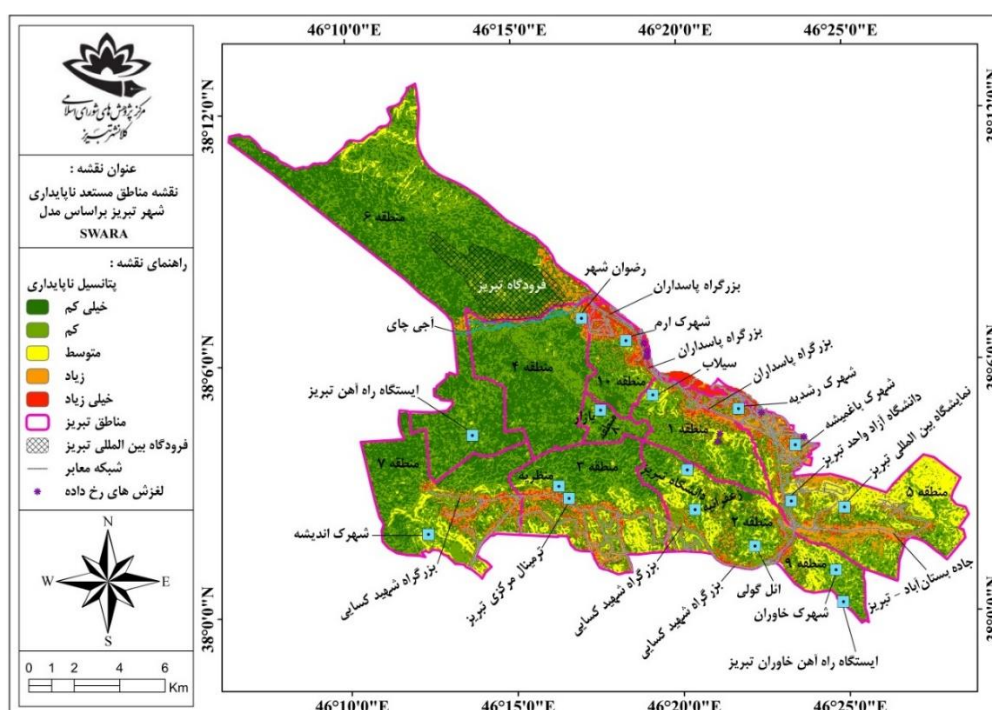
معیار	لیتولوژی	شیب	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	بارش	فاصله از گسل	ارتفاع	کاربری اراضی	جهت شیب
Q_j	۱	۰/۵۱	۰/۲۷	۰/۱۴	۰/۷	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۶
مجموع وزن اولیه	۲/۰۶								

جدول ۴. محاسبه وزن نهایی معیارها (W_j) مدل SWARA

معیار	لیتولوژی	شیب	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	بارش	فاصله از گسل	ارتفاع	کاربری اراضی	جهت شیب
W_j	۰/۴۸۶	۰/۲۴۸	۰/۱۳۱	۰/۰۶۷	۰/۰۳۴	۰/۰۱۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳

نتایج وزن دهی معیارها نشان می‌دهد که پارامترهای لیتولوژی، شیب و فاصله از جاده به ترتیب دارای بیشترین وزن بوده و از بالاترین حساسیت در برابر ناپایداری برخوردارند. در مقابل، جهت شیب و کاربری اراضی کمترین تأثیر را در

ناپایداری دامنه‌ای دارند. شکل ۴ نقشه‌ی حساسیت ناپایداری دامنه‌ای محدوده‌ی شهر تبریز را بر اساس مدل SWARA نمایش می‌دهد. با بررسی دقیق نقشه‌ی نهایی و تطابق آن با پراکندگی مناطق ناپایدار، مشاهده می‌شود که پهنه‌های ناپایدار عمدتاً با موقعیت لغزش‌های ثبت‌شده همخوانی دارند. بر اساس این نقشه، بخش‌هایی از محلات سیلاب، ملازینال، یوسف‌آباد، کوی ولیعصر، شهرک باغمیشه، کوی گل‌پارک، شهرک یاغچیان، شهرک فجر، شهرک خاوران و شهرک صیاد شیرازی در محدوده‌های با خطر بسیار بالا و بالا قرار گرفته‌اند. در مقابل، مناطق غربی، شمال غربی و جنوب غربی شهر عمدتاً در پهنه‌های بی‌خطر واقع شده‌اند. همچنین، بخش‌های مرکزی و شرقی شهر عموماً در محدوده‌های کم‌خطر قرار دارند.



شکل ۴. نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر ناپایداری دامنه‌ای با مدل SWARA

جدول ۵. مساحت پهنه‌های خطر با استفاده از مدل SWARA

طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
خیلی کم	۱۰۰	۴۰
کم	۹۰	۳۶
متوسط	۲۵	۱۰
زیاد	۳۴	۹/۵
خیلی زیاد	۱۱/۵	۴/۵

وزن دهی معیارها با روش CRITIC

نتایج وزن دهی معیارها با روش کریتیک در جداول ۶ تا ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۶. ایجاد ماتریس تصمیم برای معیارهای مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای در مدل CRITIC

گزینه معیار	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از گسل	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	لینتولوژی	بارش	کاربری اراضی
A1	۴	۶	۳	۶	۶	۵	۹	۵	۴
A2	۳	۴	۱	۴	۵	۴	۹	۳	۲
A3	۲	۷	۲	۵	۵	۴	۸	۳	۲
A4	۴	۶	۲	۷	۴	۳	۷	۵	۳
A5	۳	۵	۴	۴	۴	۵	۹	۴	۵

جدول ۷. ایجاد ماتریس نرمال برای معیارهای مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای در مدل CRITIC

گزینه معیار	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از گسل	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	لینتولوژی	بارش	کاربری اراضی
A1	۱	۰/۶۶۷	۰/۶۶۷	۰/۶۶۷	۱	۱	۱	۱	۰/۶۶۷
A2	۰/۵۰۰	۰	۰	۰	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۱	۰	۰
A3	۰	۱	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۰	۰
A4	۱	۰/۶۶۷	۰/۳۳۳	۱	۰	۰	۰	۱	۰/۳۳۳
A5	۰/۵۰۰	۰/۳۳۳	۱	۰	۰	۱	۱	۰/۵۰۰	۱

جدول ۸. ایجاد همبستگی بین معیارها برای معیارهای مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای در مدل CRITIC

معیار	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از گسل	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	لینتولوژی	بارش	کاربری اراضی
ارتفاع	۱	-۰/۱۵۷	۰/۱۵۷	۰/۶۴۲	-۰/۰۷۱	-۰/۰۷۱	-۰/۱۳۴	۰/۸۹۶	۰/۴۱۳
شیب	-۰/۱۵۷	۱	۰/۱۵۴	۰/۵۷۲	-۰/۱۵۷	-۰/۱۵۷	-۰/۵۳۹	۰/۲۱۹	-۰/۱۰۱
جهت شیب	۰/۱۵۷	۰/۱۵۴	۱	۰/۰۶۷	-۰/۱۵۷	۰/۶۸۱	۰/۲۹۴	۰/۴۳۹	۰/۹۴۲
فاصله از گسل	۰/۶۴۲	۰/۵۷۲	-۰/۰۶۷	۱	۰/۰۴۶	-۰/۵۰۴	-۰/۷۲۹	۰/۷۶۷	-۰/۰۳۹
فاصله از جاده	۰/۰۷۱	۰/۱۵۷	-۰/۱۵۷	۰/۰۴۶	۱	۰/۴۲۹	۰/۴۶۸	۰	-۰/۱۸۳
فاصله از رودخانه	-۰/۰۷۱	-۰/۱۵۷	۰/۶۸۱	-۰/۵۰۴	۰/۴۲۹	۱	۰/۸۶۹	۰	۰/۶۴۲
لینتولوژی	-۰/۱۳۴	-۰/۵۳۹	۰/۲۹۴	-۰/۷۲۹	۰/۴۶۸	۰/۸۶۹	۱	-۰/۲۸۰	۰/۳۴۳
بارش	۰/۸۹۶	۰/۲۱۹	۰/۴۳۹	۰/۷۶۷	۰	۰	-۰/۲۸۰	۱	۰/۵۷۵
کاربری اراضی	۰/۴۱۳	-۰/۱۰۱	۰/۹۴۲	-۰/۰۳۹	-۰/۱۸۳	۰/۶۴۲	۰/۳۴۳	۰/۵۷۵	۱

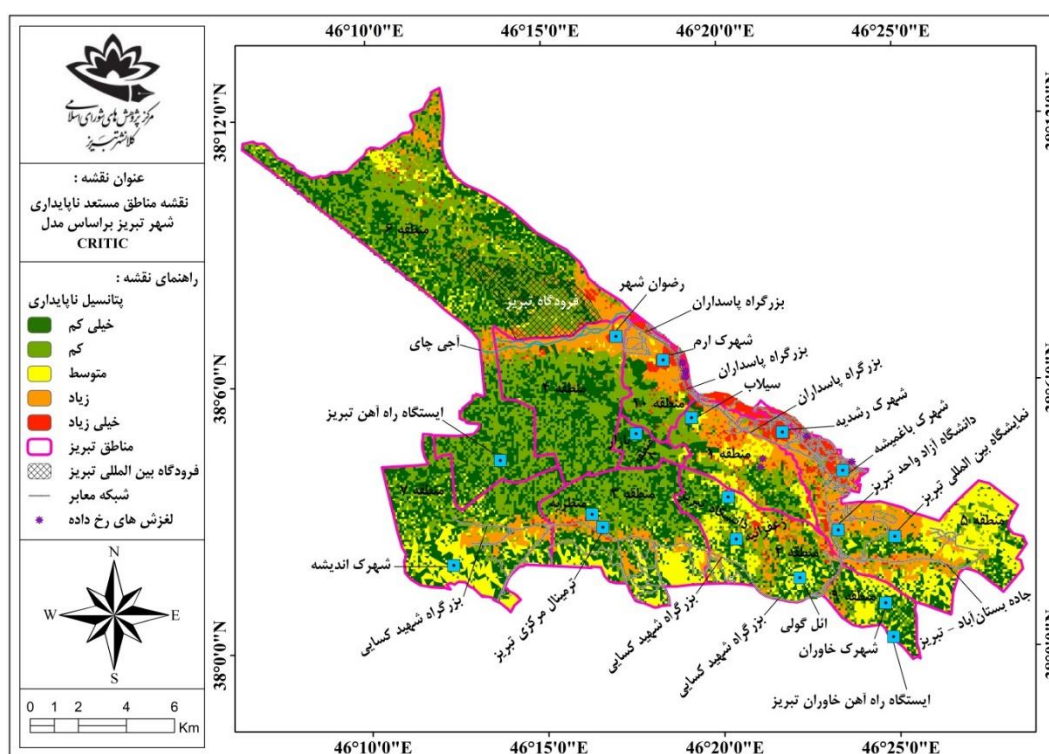
جدول ۹. ایجاد مقادیر همبستگی منهای یک برای معیارهای مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای در مدل CRITIC

معیار	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از گسل	فاصله از جاده	فاصله از رودخانه	لینتولوژی	بارش	کاربری اراضی
ارتفاع	۰	۱/۱۵۷	۰/۸۴۳	۰/۳۵۸	۰/۹۲۹	۱/۰۷۱	۱/۱۳۴	۰/۱۰۴	۰/۵۸۷
شیب	۱/۱۵۷	۰	۰/۸۴۶	۰/۴۲۸	۰/۸۴۳	۱/۱۵۷	۱/۵۳۹	۰/۷۸۱	۱/۱۰۱
جهت شیب	۰/۸۴۳	۰/۸۴۶	۰	۱/۰۶۷	۱/۱۵۷	۰/۳۱۹	۰/۷۰۶	۰/۵۶۱	۰/۰۵۸
فاصله از گسل	۰/۳۵۸	۰/۴۲۸	۱/۰۶۷	۰	۰/۹۵۴	۱/۵۰۴	۱/۷۲۹	۰/۲۳۳	۱/۰۲۹
فاصله از جاده	۰/۹۲۹	۰/۸۴۳	۱/۱۵۷	۰/۹۵۴	۰	۰/۵۷۱	۰/۵۳۲	۱	۱/۱۸۳
فاصله از رودخانه	۱/۰۷۱	۱/۱۵۷	۰/۳۱۹	۱/۵۰۴	۰/۵۷۱	۰	۰/۱۳۱	۱	۰/۳۵۸
لینتولوژی	۱/۱۳۴	۱/۵۳۹	۰/۷۰۶	۱/۷۲۹	۰/۵۳۲	۰/۱۳۱	۰	۱/۲۸۰	۰/۶۵۷
بارش	۰/۱۰۴	۰/۷۸۱	۰/۵۶۱	۰/۲۳۳	۱	۱	۱/۲۸۰	۰	۰/۴۲۵
کاربری اراضی	۰/۵۸۷	۱/۱۰۱	۰/۰۵۸	۱/۰۲۹	۱/۱۸۳	۰/۳۵۸	۰/۶۵۷	۰/۴۲۵	۰

جدول ۱۰. جمع سطری مقادیر همبستگی منهای یک، انحراف معیار مقادیر ماتریس نرمال شده، مقادیر انحراف معیار ضرب در جمع سطری مقادیر همبستگی منهای و وزن نهایی معیارها برای معیارهای مؤثر در ناپایداری دامنه‌ای در مدل CRITIC

کاربری اراضی	بارش	لیتولوژی	فاصله از رودخانه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	شیب	ارتفاع	معیار
۵/۳۹۹	۵/۳۸۳	۷/۷۰۸	۶/۱۱۳	۷/۱۷۰	۷/۳۰۳	۵/۵۵۸	۷/۸۵۳	جمع مقادیر
۰/۳۸۹	۰/۴۴۷	۰/۴۰۰	۰/۳۷۴	۰/۳۷۴	۰/۳۸۹	۰/۳۴۰	۰/۳۷۴	انحراف معیار
۲/۰۹۹	۲/۴۰۷	۳/۰۸۳	۲/۲۸۷	۲/۶۸۳	۲/۸۳۹	۱/۸۸۹	۲/۶۶۹	Cj
۰/۰۹۴	۰/۱۰۸	۰/۱۳۸	۰/۱۰۳	۰/۱۲۰	۰/۱۲۷	۰/۰۸۵	۰/۱۲۰	وزن

نتایج حاصل از وزن دهی به روش CRITIC نشان داد که معیارهای لیتولوژی، شیب و فاصله از گسل بیشترین وزن نسبی را به خود اختصاص داده‌اند، درحالی‌که کاربری اراضی و جهت شیب کمترین وزن را داشته‌اند. همچنین، تحلیل‌ها بیانگر آن است که عوامل لیتولوژی، فاصله از گسل و شیب بیشترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه ایفا کرده‌اند. تحلیل شکل ۵ حاکی از آن است که بیشترین رخداد لغزش‌ها در بخش‌های شمالی و شمال شرقی شهر تبریز متمرکز شده است. تطابق دقیق نقشه نهایی با نقشه پراکندگی ناپایداری‌های دامنه‌ای، نشان‌دهنده همخوانی قابل توجه بین پهنه‌های ناپایدار و مناطق وقوع لغزش‌ها می‌باشد. بر اساس داده‌های جدول ۱۱، حدود ۱۱/۵ درصد از مساحت کل منطقه در طبقه‌بندی مناطق با خطر ناپایداری بسیار بالا قرار گرفته است.



شکل ۵. نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر ناپایداری دامنه‌ای با مدل CRITIC

جدول ۱۱. مساحت پهنه‌های خطر با استفاده از مدل CRITIC

طبقه	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
خیلی کم	۷۹/۵	۳۱/۵
کم	۸۵	۳۴
متوسط	۳۷/۵	۱۵
زیاد	۳۷/۵	۱۵
خیلی زیاد	۱۱/۵	۴/۵

ارزیابی نتایج مدل‌ها

در پژوهش حاضر جهت صحت سنجی نتایج مدل‌ها از موقعیت لغزش‌های رخ داده در منطقه استفاده شد. نتایج این ارزیابی در جدول ۱۲ ارائه شده است. مقایسه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی و نقاط پراکنش زمین‌لغزش گویای این مطلب است که در هر دو مدل بیش از ۷۱ درصد لغزش‌ها در پهنه‌های خطر خیلی زیاد اتفاق افتاده‌اند.

جدول ۱۲. ارزیابی لغزش‌های رخ داده در پهنه‌های خطر

پهنه‌های خطر	مدل SWARA		مدل CRITIC	
	تعداد لغزش‌ها	درصد تعداد لغزش‌ها	تعداد لغزش‌ها	درصد تعداد لغزش‌ها
خیلی زیاد	۵	۷۱/۴	۵	۷۱/۴
زیاد	۲	۲۸/۶	۱	۱۴/۳
متوسط	-	-	-	-
کم	-	-	۱	۱۴/۳
خیلی کم	-	-	-	-

بحث

برای تهیه نقشه طبقات ارتفاعی، شیب و جهت شیب منطقه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر و در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۲ الف) مشاهده می‌شود ارتفاع منطقه از غرب به شرق افزایش می‌یابد و بین ۱۳۴۳ متر تا ۱۸۶۲ متر متغیر است. این تغییرات ارتفاعی، همراه با شیب و جهت شیب، نقش تعیین‌کننده‌ای در توزیع فرآیندهای ژئومورفولوژیک و شکل‌زایی منطقه ایفا می‌کنند. در محدوده مورد مطالعه شیب‌ها به ۵ طبقه ۰-۵ (شیب خیلی کم)، ۵-۱۰ (شیب کم)، ۱۰-۱۵ (شیب متوسط)، ۱۵-۲۰ (شیب زیاد) و بالاتر از ۲۰ (شیب خیلی زیاد) تقسیم شده‌اند (شکل ۲ ب). طبق اطلاعات شیب ۰-۵ درجه با ۳۸ درصد بیشترین درصد از مساحت منطقه در حدود را به خود اختصاص داده، درحالی‌که شیب‌های بسیار تند بالای ۲۰ درجه با حدود ۱۰ درصد از منطقه را در برمی‌گیرد. در محدوده مورد مطالعه مانند عامل طبقات ارتفاعی، به‌طور کلی عامل شیب از غرب به شرق افزایش می‌یابد. جهت شیب به‌عنوان جهات افقی از یک کوه یا منظر شیب یک تپه بیان می‌شود. جهت شیب می‌تواند اقلیم محلی ناحیه را که ناشی از برخورد اشعه‌های خورشید بر زمین هست را متأثر نماید (سمندر، ۱۴۰۰). طبق شکل (۲ پ) جهات شیب دامنه‌ها به ۹ طبقه طبقه‌بندی شده است که جهت شیب شمال و شمال‌شرقی ۳۶ درصد از مساحت محدوده مورد مطالعه را در برمی‌گیرد. مطالعات متعددی درباره فرسایش‌پذیری واحدهای سنگی صورت پذیرفته است. پایه و اساس کار، جنس سنگ‌ها بوده و سایر پارامترهای مؤثر در فرسایش‌پذیری نیز سبب تغییر در دامنه مقاومت سنگ‌ها شده‌اند و بدین ترتیب برای هر واحد سنگی دامنه‌ای از مقاومت در برابر فرسایش‌پذیری عنوان شده است (سمندر، ۱۴۰۰). شکل (۲ خ) و جدول (۱۳) لیتولوژی منطقه مورد مطالعه، مساحت و درصد را نشان می‌دهد. با توجه به جدول می‌توان

گفت پادگانه‌های آبرفتی جوان و پشته‌های آبرفتی با ۴۷/۵ درصد بیشترین مساحت منطقه را پوشانده‌اند و ماسه‌سنگ و مارن قرمز با ۵/۵ درصد کمترین مساحت منطقه مورد مطالعه را پوشانده‌اند.

جدول ۱۳. ویژگی‌های لیتولوژی محدوده شهر تبریز

نوع لیتولوژی	مساحت هر واحد سنگی (کیلومترمربع)	درصد مساحت هر واحد سنگی
نهشته‌های دانه‌ریز آواری	۱۷	۷
کنگلومرای نیمه سخت	۸۷	۳۴
مارن سبز، خاکستری و قرمز	۱۴/۵	۶
ماسه‌سنگ و مارن قرمز	۱۳/۵	۵/۵
پادگانه‌های آبرفتی جوان و پشته‌های آبرفتی	۱۲۰	۴۷/۵

بیشترین حساسیت به فرسایش را واحد مارن، شیل با درون لایه‌هایی از ماسه‌سنگ و آبرفت‌های جوان و رودخانه‌ای دارند؛ واحدهای ماسه‌سنگ و مارن قرمز، نسبتاً مقاوم به فرسایش هستند و مورفولوژی خشن و ارتفاعات حوضه را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق سنگ‌ها از نظر فرسایش‌پذیری به ۵ دسته تقسیم شده که عبارت‌اند از: سنگ‌های بدون مقاومت، مقاومت کم، مقاومت متوسط، مقاومت تا حدی خوب، مقاومت خوب. مناطق شرقی و شمالی شهر به دلیل ویژگی‌های زمین‌شناختی منحصربه‌فرد، از حساس‌ترین نقاط مستعد رانش زمین محسوب می‌شوند. وجود لایه‌های مارنی و رسی با قابلیت اشباع‌پذیری بالا در این نواحی، زمینه را برای ناپایداری‌های دامنه‌ای فراهم کرده است. مناطق شرقی که همسو با توسعه‌های شهری جدید شکل گرفته‌اند، در کنار مناطق شمالی با سکونتگاه‌های غیررسمی، به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه در معرض تهدیدات طبیعی قرار دارند. کاربری اراضی در یک منطقه به‌طور غیرمستقیم بر پایداری شیب تأثیر می‌گذارد (Van Westen et al, 2006: 71). وجود باغات و پوشش گیاهی در شیب‌های تند می‌تواند سبب افزایش احتمال وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای شود، زیرا ریشه‌های گیاهان در صورت وجود بارندگی نمی‌توانند به خاک متصل شوند و در نتیجه، فرسایش خاک به راحتی اتفاق می‌افتد. شکل ۲ ج نوع کاربری اراضی منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه فوق مشاهده می‌شود که بیشترین مساحت منطقه شامل مناطق مسکونی، کشاورزی و باغ و زمین‌های خالی از سکنه می‌باشد. در کنار عوامل دیگر، بارندگی نیز یکی از مؤثرترین عوامل برای وقوع ناپایداری‌های دامنه است. به‌طور کلی، نفوذ آب حاصل از بارندگی در دامنه، سبب بالا رفتن مقدار فشار منفذی، کاهش مکش خاک و افزایش وزن واحد خاک می‌شود و در نهایت از مقاومت برشی خاک می‌کاهد و دامنه را مستعد لغزش می‌کند (Zavadskas & Vilutiene, 2006: 628). طبق شکل (۲ ت) از شمال غرب به جنوب شرق میزان بارندگی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در جنوب شرقی‌ترین قسمت محدوده بارندگی به ۳۰۱-۳۲۱ میلی‌متر (طبقه خیلی زیاد) می‌رسد. در محدوده مورد مطالعه پس از تهیه نقشه گسل‌های موجود، نقشه فاصله از گسل‌ها در ۵ طبقه با فواصل منظم ۵۰۰ متری تهیه گردید. با توجه به این شکل قسمت‌های زیادی از منطقه در فاصله بیش از ۲۰۰۰ متری از گسل قرار گرفته است. به علت تأثیر مستقیم گسل بر روی ناپایداری دامنه‌ای معیار فاصله برای گسل تعیین شد تا تأثیر فاصله از گسل بر شدت و ضعف رخداد ناپایداری مشخص شود. گسل شمال تبریز که به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین و فعال‌ترین گسل‌های ایران شناخته شده است دارای یک شاخه اصلی در شمال و شاخه‌های فرعی در شرق و شمال شرقی است. شاخه شمالی آن طبق نقشه تقریباً منطبق با اتوبان پاسداران است که در مسیر خود از فرودگاه تبریز شروع شده و به سهرای اهر و شهر جدید شهریار ختم می‌شود که در این مسیر محلات حاشیه‌نشین شمالی و شهرک‌های رشدیه، باغمیشه، ولی امر، نصر، بعثت، مرزداران و ولیعصر ۲ و بسیاری از نواحی دیگر را در بردارد. شاخه فرعی آن نیز در برگیرنده شهرک‌های ولیعصر

شمالی، زعفرانیه و... می‌باشد. نقشه لیتولوژی (شکل ۲ خ) و فاصله از گسل (شکل ۲ ح) منطقه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰ (برگه‌ی تبریز) برگرفته از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شده است. در محدوده مورد مطالعه یک رودخانه اصلی از وسط منطقه می‌گذرد که جاده احداث شده نیز از کنار و به موازات آن می‌گذرد، بنابراین فاصله از رودخانه می‌تواند به‌عنوان عاملی مهم در وقوع ناپایداری‌های دامنه‌ای باشد. در این محدوده فاصله بیش از ۶۰۰ متری بیشترین مساحت از منطقه را شامل می‌شود (شکل ۲ د). ساخت‌وساز جاده‌ها خصوصاً در مناطق کوهستانی با دامنه‌های پرشیب باعث تحریک ناپایداری‌های دامنه‌ای می‌شود (Ayalew & Yamagishi 2005:19) جهت تهیه نقشه شبکه ارتباطی از سامانه Google Earth پس از تهیه شبکه ارتباطی راه‌ها، اطلاعات جمع‌آوری شده جهت تهیه پایگاه داده وارد نرم‌افزار ArcGIS شدند. در نهایت با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی نقشه فاصله از شبکه ارتباطی منطقه در پنج کلاس تهیه شد (شکل ۲ ر). علت انتخاب معیار فاصله به جهت تأثیر مستقیم این عامل بر شدت و ضعف نوع خطر و ناپایداری می‌باشد. در واقع فواصل کمتر تأثیر معیار بیشتر و برعکس.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پهنه‌بندی پتانسیل ناپایداری‌های دامنه‌ای شهر تبریز مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام این مطالعه، از مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی مؤثر در ناپایداری‌های دامنه‌ای منطقه همراه با مدل‌های سوارا و کریتیک استفاده شد. براساس نقشه پهنه‌بندی تهیه‌شده، بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی، قسمت کوچکی از مرکز و چند ناحیه در جنوب منطقه، بیشترین پتانسیل را برای وقوع ناپایداری‌ها دارند، درحالی‌که مناطق مرکزی و جنوب‌غربی با حدود ۷۰ درصد از مساحت محدوده، کمترین خطر را نشان می‌دهند. بر مبنای مدل سوارا، ۱۴ درصد از منطقه در طبقه خطر زیاد قرار دارد، درحالی‌که ۴۰ درصد در گروه خطر خیلی کم جای می‌گیرد که عمدتاً بخش‌های میانی تا شمال‌غربی را شامل می‌شود. مطابق مدل کریتیک نیز ۱۹/۵ درصد از منطقه دارای پتانسیل خطر زیاد و ۳۱/۵ درصد در طبقه خیلی کم قرار دارد. از نظر ارتفاعی، بیشترین لغزش‌ها در محدوده ۱۵۰۱ تا ۱۸۶۲ متری رخ داده که به دلیل شیب‌های تند (بیش از ۲۰ درصد) و جهت‌های مختلف، به‌ویژه دامنه‌های غربی و جنوب‌غربی است. از میان واحدهای لیتولوژی، ماسه‌سنگ و مارن بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌ها داشته‌اند. آبراهه‌ها نیز با شست‌وشوی خاک‌های دامنه، عامل نگهدارنده پای دامنه را تضعیف کرده و شیب‌ها را تشدید می‌کنند. بارش‌های شدید زمستانه و بهاری با نفوذ به درون خاک، سبب کاهش چسبندگی مواد و افزایش تنش برشی می‌شوند که این امر وزن مواد دامنه را افزایش داده و حرکات دامنه‌ای را در فاصله ۰ تا ۱۵۰ متری از آبراهه‌ها رقم زده است. همچنین، بیشترین لغزش‌ها به دلیل جذب رطوبت و فرسایش زیرسطحی، در فاصله ۱۰۰ تا ۵۰۰ متری از گسل‌ها رخ داده‌اند. نتایج این پژوهش با تحقیقات پیشین از جمله روستایی و همکاران (۱۳۹۳)، رحیم‌پور و همکاران (۱۳۹۶)، معزز و همکاران (۱۳۹۸)، مختاری و همکاران (۱۳۹۹)، دهنوی ثیلاق و پهلوانی (۱۴۰۳) و رضائی‌مقدم و رحیم‌پور (۱۴۰۴) همسو است. این محققان روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را به‌عنوان ابزاری مؤثر برای تهیه نقشه‌های خطر انواع مخاطرات محیطی، به‌ویژه زمین‌لغزش و سیل معرفی کرده‌اند. یافته‌های پژوهش حاضر نیز تأییدکننده نتایج این مطالعات است.

حامی مالی

پژوهش حاضر با پشتیبانی مالی مرکز پژوهش‌های شورای اسلامی کلانشهر تبریز به انجام رسیده است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل پژوهشی است که در دانشگاه تبریز و با پشتیبانی مالی مرکز پژوهش‌های شورای اسلامی کلانشهر تبریز به انجام رسیده است. نویسندگان بدین‌وسیله از زحمات مدیریت فناوری دانشگاه تبریز بویژه آقای دکتر ندیری و آقای مهندس حسامی و از رئیس مرکز پژوهش‌های شورای اسلامی کلانشهر تبریز آقای دکتر روح‌الله رشیدی و معاون پژوهشی مرکز آقای دکتر احد ابراهیم پور لنبران و همچنین از ناظران علمی طرح آقای دکتر مرادعلی شفق و خانم دکتر رقیه سالک صمیمانه سپاسگزاری می‌کنند.

منابع

- دره شوری، محمدامین و یزدی، مهران. (۱۴۰۱). شناسایی مناطق مستعد به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های فرا ابتکاری. نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ۱۲ (۱)، ۱۱۱-۱۲۵.
- دهنوی ئیلاق، مسلم و پهلوانی، پرهام. (۱۴۰۳). ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ویکور و میانگین وزنی مرتب‌شده مطالعه موردی شهرستان سوادکوه. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶ (۱)، ۴۱-۵۹. doi: 10.22059/jphgr.2024.366517.1007792
- رجایی، عبدالحمید (۱۳۸۲)، کاربرد ژئومورفولوژی در آمایش سرزمین و مدیریت محیط، چاپ دوم، نشر قومس، تهران.
- رحیم‌پور، توحید؛ روستایی، شهرام؛ نخستین‌روخی، مهسا، (۱۳۹۶)، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و GIS (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز سردول چای، استان اردبیل)، هیدروژئومورفولوژی، ۴ (۱۳)، ۲۰-۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1396.4.13.1.6>
- رضائی‌مقدم، محمدحسین و رحیم‌پور، توحید. (۱۴۰۴). کاربرد روش‌ها و فنون تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدل‌سازی مخاطرات محیطی. چاپ اول، تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز.
- رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ مختاری، داوود و سمندر، نسرين. (۱۴۰۰). مدل‌سازی حرکات توده‌ای و مدیریت مناطق حساس به وقوع این حرکات، با استفاده از الگوریتم‌های آماری و شبکه عصبی (مطالعه موردی: حوضه آبریز اوجان چای). جغرافیا و توسعه، ۶۳ ۱۷۴-۱۴۷. doi:10.22111/j10.22111.2021.6190
- رضائی‌مقدم، محمدحسین؛ حجازی، سید اسدالله؛ ولیزاده کامران، خلیل و رحیم‌پور، توحید. (۱۳۹۹). تحلیل خصوصیات هیدروژئومورفیک حوضه آبریز الوندچای به منظور اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹ (۱)، ۶۱-۸۳. doi: 10.22067/geo.v9i1.84675
- رضائی‌مقدم، محمدحسین و رحیم‌پور، توحید. (۱۴۰۴). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش آماری SI. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۶ (۱)، ۲۷-۴۲. <http://dx.doi.org/10.61882/jwmr.2024.1265>

- روستائی، شهرام؛ خدائی قشلاق، لیلا و خدائی قشلاق، فاطمه (۱۳۹۳)، ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و تحلیل چندمعیاره مکانی در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سدها (مطالعه موردی: سد قلعه‌چای). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۶(۴)، ۴۹۵-۵۰۸. doi: 10.22059/jphgr.2014.53000
- زندى، ایمان؛ پهلوانی، پرهام و بیگدلی، بهناز. (۱۴۰۱). رتبه‌بندی بهینه سایت‌های کانديد بیمارستان با استفاده از تلفیق روش‌های وزن دهی عینی و تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی. *آمایش سرزمین*، ۱، ۳۴۷-۳۶۹. doi: 10.22059/jtcp.2021.327203.670238
- ساسان پور، فرزانه؛ محبی، فاطمه و کاظم، امیرحسین. (۱۴۰۰). تحلیل و پهنه‌بندی مخاطره سیل (مطالعه موردی: حوضه آبخیز طالقان، *اطلاعات جغرافیایی سپهر*، ۱۱۹، ۱۷۳-۱۵۹. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.247892>
- سمندر، نسرين. (۱۴۰۰). *ارزیابی اثر تغییرات هیدروژئومورفولوژیک بر جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه‌ی آبریز اوجان‌چای با استفاده از مدل نیمه توزیعی SWAT* رساله‌ی دکتری ژئومورفولوژی، به راهنمایی دکتر محمدحسین رضائی مقدم، دانشگاه تبریز، تبریز.
- سمندر، نسرين و حجازی، سیداسدالله. (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد روش‌های آماری رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی چندلایه پرسپترون در پیش‌بینی وقوع حرکات توده‌ای (حوضه آبریز کمانج‌چای علیا). *فضای جغرافیایی*، شماره ۶۶، ۹۷-۷۷.
- مختاری، داود؛ رضائی مقدم، محمدحسین؛ رحیم‌پور، توحید و معزز، سمیه، (۱۳۹۹). تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز گمناب‌چای با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS. *اکوهیدرولوژی*، ۷(۲)، ۵۰۹-۴۹۷. doi: 10.22059/ije.2020.298759.1298
- مختاری، داوود، امامی کیا، وحید، (۱۳۹۳). پهنه‌بندی کاربری اراضی شهری شهرک ارم تبریز بر اساس شاخص‌های اساسی مخاطرات ژئومورفولوژیک. *آمایش جغرافیایی فض*، ۱۲، ۱۶۹-۹۲.
- معزز، سمیه؛ روستائی، شهرام و رحیم‌پور، توحید. (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز نهندچای با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۸(۲)، ۳۷-۲۳. doi:10.29252/jwmr.7.14.87

References

- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 58, 21 – 44. doi:10.1007/s100640050066
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Darreshuri, M. A., & Yazdi, M. (2012). Identification of landslide-prone areas using geographic information systems and a combination of machine learning models and meta-heuristic algorithms. *Scientific Research Journal of Surveying Sciences and Technologies*, 12 (1), 111-125. [In Persian]
- Dehnavi Eelagh, M., & Pahlavani, P. (2024). Landslide Susceptibility Assessment using VIKOR and Ordered Weighted Averaging Methods A Case Study of Savadkuh County. *Physical Geography Research*, 56(1), 41-59. doi: 10.22059/jphgr.2024.366517.1007792 [In Persian]
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., & Van Asch, T. W., (2004). Landslide susceptibility zoning north of Yenice (Nw Turkey) by multivariate statistical techniques. *Natural Hazards*, 32, 1 - 23. doi :10.1023/B:NHAZ.0000026786.85589.4a
- Faming, H., Kunlong, Y., Jinsong, H., Lei, G., & Peng, W., (2017). Landslide susceptibility mapping based on self-organizing-map network and extreme learning machine”. *Engineering Geology*, 223(5), 11-22. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.013>

- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P., (1999). Landslide hazard evaluation: a review of Current techniques and their application in a multi - scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 1(31), 181 - 216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Huang, F., Yin, K., Huang, J., Gui, L., & Wang, P. (2017). Landslide susceptibility mapping based on self-organizing-map network and extreme learning machine. *Engineering Geology*, 223(5), 11-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.013>
- Jiao, Y., Zhao, D., Ding, Y., Liu, Y., Xu, Q., Qiu, Y., & Li, R. (2019). Performance evaluation for four GIS-based models purposed to predict and map landslide susceptibility: A case study at a World Heritage site in Southwest China. *Catena*, 183(2), 104221-104235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.104221>
- Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243–258. <http://dx.doi.org/10.3846/jbem.2010.12>
- Li, Zh., Lianghao, H., Linyu, F., Jinsong, H., Faming, H., Jiawu, Ch., Zihe, Zh., & Yuhao, W., (2020). *Landslide Susceptibility Prediction Modeling Based on Remote Sensing and a Novel Deep Learning Algorithm of a Cascade-Parallel Recurrent Neural Network*. *Sensors (Basel)*. 20(6), 1576. <http://dx.doi.org/10.3390/s20061576>
- Moazzez, S., roostaei, S., & Rahimpour, T. (2019). Landslide Hazard Zonation Using ANP model and GIS technique in the Nahand Chai Basin. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(2), 23-37. [in persian]
- Mokhtari, D., & Emamikia, V., (2014), Zoning of urban land use of Eram town of Tabriz based on basic indicators of geomorphological hazards. *Geographical Space Planning*, 12-169-92. [In Persian]
- Mokhtari, D., Rezaei Moghaddam, M.H., Rahimpour, T., & Moazzez, S., (2020). Preparing the Risk Map of Flood Occurrence in the Ghomnab Chai Basin Using ANP Model and GIS Technique. *Journal of Ecohydrology*, 7(2), 497-509. doi: 10.22059/ije.2020.298759.1298 [in persian]
- Rahimpour, T., Roostaei, S., & Nakhostinrouhi, M., (2018). Landslide Hazard Zonation Using Analytical Hierarchy Process and GIS A Case Study of Sardool Chay Basin, Ardabil Province. *Journal of Hydrogeomorphology*, 4(13), 1-20. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1396.4.13.1.6> [in persian]
- Rajaei, A. (2003). *Application of geomorphology in land use planning and environmental management*. 2nd edition, Tehran: Ghomes Publishing. [In Persian]
- Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, S. A., Vlaizadeh Kamran, K., & Rahimpour, T. (2020). Analysis of Hydrogeomorphic Properties of Aland Chai Basin to Prioritize Sub-Basins in terms of Flood Sensitivity. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(1), 61-83. doi: 10.22067/geo.v9i1.84675 [in persian]
- Rezaei Moghaddam, M. H., & Rahimpour, T., (2025). *Application of Multi-Criteria Decision Making Methods in Environmental Hazards Modeling*. University of Tabriz, 210 Pages. [in persian]
- Rezaei Moghaddam, M. H., & Rahimpour, T., (2025). Evaluation and Zoning of Flood Hazard in the Aji Chai Basin Using the Multi-Criteria Decision-Making Technique and a Statistical Method (SI). *JWatershed Manage Res*, 16(1), 27-42. DOI: 10.61186/jwmr.2024.1265 [in persian]
- Rezai Moghadam, M.H., Mokhtari, D., & Samandar, N. (2019). Modeling Mass Movements and Managing Areas Sensitive to These Movements, Using Statistical Algorithms and Neural Networks (Case Study: Ojanchay River Basin). *Geography and Development*, 63. 147-174. doi:10.22111/j10.22111.2021.6190 [in persian]
- Roostaei, S., Khodaei Geshlag, L., & Khodaei Geshlag, F. (2014). Assessment of Analysis Network Process and Heuristic Method in the Investigation of Landslide Potential in the Axis Range and Reservoir Dams (Case Study: Ghalea Chai Dam). *Physical Geography Research*, 46(4), 495-508. doi: 10.22059/jphgr.2014.53000 [In Persian]
- Roy, C., & Sidle, H. (2006). *Landslides; processes, prediction, and land use*, American Geophysical union.

- Sakar, S., Kanungo, D.P., & Mehrotar, G.S. (1995). Landslide Zonation: A Case Study in Garhwal Himalaya, India. *Mountain Research and Development*, 15 (4), 301-309. https://www.researchgate.net/publication/257650539_Landslide_hazard_zonation_A_case_study_in_Garhwal_Himalaya_India
- Samandar, N. (2011). *Evaluation of the Effect of Hydrogeomorphological Changes on Surface and Groundwater Flow of Ojanchai Watershed Using the Semi-Distributed SWAT Model*. PhD Thesis, University of Tabriz, Tabriz. [In Persian]
- Samandar, N., & Hejazi, S.A. (2019). Performance Evaluation of Logistic Regression Statistical Methods and Multilayer Perceptron Neural Network in Predicting the Occurrence of Mass Movements (Upper Kamanjchai Watershed). *Geographical Space*, 66, 77-97. [In Persian]
- Sasanpour, F., Mohebbi, F., & Kazem, A. (2011). Analysis and Zoning of Flood Hazard (Case Study: Taleghan Watershed). *Sepehr Geographic Information*, 119, 159-173. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.247892> [In Persian]
- Tesfa, C., & Sewnet, D. (2024). GIS-based MCDM approach for landslide hazard zonation mapping in east Gojjam zone, central Ethiopia. *Quaternary Science Advances*, 15, 100210.
- Van Westen, C.J., Asch, T.W.J., & Soeters. R. (2006). Landslide hazard and risk zonation- why is it still so difficult. *Geology*, 65, 67- 184. [doi:10.1007/s10064-005-0023-0](https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0)
- Varnes D. J. (1984). *Landslide Hazard Zonation: a review of Princitice and practice*: UNESCO Press, Paris, 176 .
- Zandi, I., Pahlavani, P., & Bigdali, B. (2022). Optimal ranking of hospital candidate sites using a combination of objective weighting methods and multi-criteria decision making based on geographic information systems. *Land Planning*, 1, 347-369. [doi: 10.22059/jtcp.2021.327203.670238](https://doi.org/10.22059/jtcp.2021.327203.670238) [In Persian]
- Zavadskas, E. K., & Vilutiene, T. (2006). A multiple criteria evaluation of multi-family apartment block's maintenance contractors: I-model for maintenance contractor evaluation and the determination of its selection criteria. *Building and Environment* .41(5), 621–632. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.019>