



## Evaluation of Landslide Susceptibility Zonation applying Fuzzy Gamma Operators in Taleghanroud Watershed of Qazvin Province

Jamal Mosaffaie<sup>1\*</sup>, Amin Salehpour Jam<sup>1</sup>, Faramarz Sarfaraz<sup>2</sup>, Samad Shadfar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of watershed management, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of natural resources, Qazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of soil conservation, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

Article Type: Research article

#### Article history:

Received 13 October 2020

Accepted 9 December 2020

Available online 15 December 2020

#### Keywords:

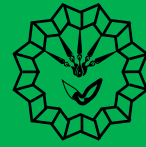
Fuzzy Membership Values, Frequency Ratio, Hazard Zoning, Density Ratio, Sum of Quality.

*Citation:* Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Sarfaraz, F., Shadfar, S. (2020). Evaluation of Landslide Susceptibility Zonation applying Fuzzy Gamma Operators in Taleghanroud Watershed of Qazvin Province. *Geography and Sustainability of Environment*, 10 (3), 71-90.

doi: [10.22126/GES.2020.5787.2297](https://doi.org/10.22126/GES.2020.5787.2297)

### ABSTRACT

Landslide is one of the most destructive types of erosion on slopes, which causes a lot of financial and human losses. Since it is difficult to predict the occurrence of landslides, it is very important to identify landslide-sensitive areas and the zoning of these areas based on the potential risk of this phenomenon. Evaluation of landslide susceptibility is one of the basic tools for managing and reducing potential damages. The present study has attempted to assess the efficiency of various fuzzy gamma operators for landslide susceptibility zonation in Taleghanroud watershed of Qazvin province. Therefore, the landslide distribution map and also 11 effective factor were first prepared which include layers including slope, slope direction, altitude, land use, lithology, distance to road, distance to stream, distance to fault, earthquake acceleration, precipitation, and maximum daily precipitation. A total of 15 landslides were identified, 70% of which were used to model and 30% of which were used to evaluate the results of the models. Then, after determining the values of Frequency Ratio and fuzzy membership for different classes of effective factors, landslide susceptibility maps were produced using fuzzy gamma operators (for gamma values equal to 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 and 1). The evaluation process using Density Ratio and Sum of Quality indices showed that the gamma of 0.7 has higher accuracy than other gamma values in the study area. The landslide hazard zoning map of the superior model will be useful in land use planning and reducing the landslide risk of the region.



## پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از عملگرهای گامای فازی در آبخیز طالقان رود استان قزوین

جمال مصفايي<sup>۱\*</sup>، امین صالح‌پورجم<sup>۱</sup>، فرامرز سرفراز<sup>۲</sup>، صمد شادفر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مدیریت حوزه‌های آبخیز، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، قزوین، ایران

<sup>۳</sup> گروه حفاظت خاک، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

### چکیده

### مشخصات مقاله

زمین لغزش که شامل جدایش‌های خاک و مواد سنگی به سمت پایین دامنه است، یکی از انواع مخرب فرسایش در دامنه‌ها است که موجب خسارت‌های مالی و جانی فراوانی می‌شود. از آنجاکه پیش‌بینی زمان وقوع زمین لغزش‌ها مشکل است؛ از این رو شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش و پهنه‌بندی این مناطق براساس پتانسیل خطر ناشی از بروز این پدیده، اهمیت فراوانی دارد. تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به زمین لغزش از ابزارهای اساسی مدیریت و کاهش خسارات احتمالی است. در پژوهش حاضر سعی شده است مخاطره زمین لغزش در آبخیز طالقان استان قزوین با استفاده از عملگرهای گامای فازی پهنه‌بندی شود. برای این منظور، ابتدا نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها و نیز یازده لایه اطلاعاتی شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از غسل، شتاب زمین‌لرزه، مقدار بارش، حداکثر بارش روزانه تهیه شد. در مجموع از پانزده زمین لغزش شناسایی شده، ۷۰٪ برای مدل‌سازی و ۳۰٪ برای ارزیابی نتایج مدل‌ها استفاده شد. پس از تعیین مقادیر نسبت فراوانی و عضویت فازی برای طبقات نقشه عوامل مختلف، نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مقادیر مختلف گامای فازی (۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱) تهیه شد. نتایج ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر با استفاده از شاخص‌های نسبت تراکم و مجموع مطلوبیت، نشان داد که عملگر فازی با مقدار گامای ۰/۷ از دقت بالاتری نسبت به سایر مقادیر گاما در منطقه مورد مطالعه برخوردار است. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مدل برتر کاربرد مهمی را در فرایند آمایش کاربری‌های اراضی منطقه مورد بررسی و کاهش ریسک زمین لغزش منطقه خواهد داشت.

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۲ مهر ۱۳۹۹

پذیرش ۱۹ آذر ۱۳۹۹

دسترسی آنلاین ۲۵ آذر ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

مقادیر عضویت فازی، نسبت فراوانی، پهنه‌بندی خطر، نسبت تراکم، مجموع مطلوبیت.

استناد: مصفايي، جمال؛ صالح‌پورجم، امین؛ سرفراز، فرامرز؛ شادفر، صمد (۱۳۹۹). پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از عملگرهای گامای فازی در آبخیز طالقان رود استان قزوین. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۳۶ (۳)، ۷۱-۹۰.

doi: 10.22126/GES.2020.5787.2297

## مقدمه

زمین لغزش شامل همه جابه‌جایی‌ها و جداشدگی‌های خاک و مواد سنگی در امتداد سطح گسیختگی و به سمت پایین دامنه است (رشوند و همکاران، ۱۳۹۲). زمین لغزش به‌طور عمده براساس تلفیقی از فرآیندهای مختلف در مناطقی که توپوگرافی کوهستانی و لیتولوژی رسوبی دارند رخ می‌دهد (صالح‌پور جم و همکاران، ۱۳۹۸ الف و ب)؛ از جمله عوامل طبیعی مؤثر در وقوع زمین لغزش‌ها می‌توان به بارش، سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، گسل، میزان رطوبت و مانند آن اشاره کرد (مصفايي و همکاران، ۱۳۹۶ الف). این پدیده موجب خسارت به انواع سازه‌های مهندسی، مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی و در پی آن، ایجاد رسوب و سیلاب‌های گل‌آلود و در نهایت پرشدن مخازن سدها می‌شود (مصفايي و همکاران، ۱۳۹۶ ب)؛ افزون بر این، اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از وقوع این پدیده، مانند مهاجرت و بیکاری را نباید نادیده گرفت. از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶، در مجموع ۵۵۹۹۷ نفر در ۴۸۶۲ رویداد لغزش در سراسر جهان بر اثر وقوع زمین لغزش‌ها کشته شده‌اند (هی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). در کشور ایران نیز مطالعاتی در مورد خسارت‌های ناشی از حرکات توده‌ای و زمین لغزش صورت گرفته است. براساس گزارش جمع‌بندی داده‌ها و خسارت‌های مربوط به ۴۹۰۰ زمین لغزش، میزان خسارت ناشی از زمین لغزش در حدود ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد شده است (مصفايي و طالبي، ۱۳۹۳).

زمین لغزش‌ها، با توجه به ماهیت، تنوع و نیز ایجاد مخاطره و آثار زیان‌باری که برای جان و مال انسان‌ها دارند، همواره مورد توجه و مطالعه پژوهشگران رشته‌های مختلف علوم زمین از جمله زمین‌شناسی مهندسی، ژئومورفولوژی، آبخیزداری، ژئوتکنیک و غیره بوده است. پیچیدگی و مرکب‌بودن عوامل مؤثر در پدیده زمین لغزش، باعث مشکل شدن تعیین درصد احتمال وقوع آن شده است (جویباری و همکاران، ۱۳۹۶). تعیین احتمال واقعی وقوع زمین لغزش، مستلزم به‌کارگیری مدل‌های پیچیده و تحلیل تمامی عوامل مؤثر در ایجاد آن است. از آنجاکه پیش‌بینی زمان وقوع زمین لغزش‌ها مشکل است، از این رو شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش و پهنه‌بندی این مناطق براساس پتانسیل خطر ناشی از بروز این پدیده، اهمیت فراوانی دارد. مفهوم پهنه‌بندی عبارت است از تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی این مناطق براساس پتانسیل خطر ناشی از بروز زمین لغزش (شعاعی، ۱۳۹۵: ۲۳۸). تاریخچه کاربرد نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش‌ها مربوط به دهه ۱۹۷۰ است و روش‌های متعددی نیز در این ارتباط وجود دارد (پرادهان و لی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰).

روش‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش را می‌توان براساس ماهیت آن‌ها به دو دسته کلی تجربی و آماری تقسیم کرد. مدل‌های تجربی در شرایط جغرافیایی ویژه‌ای ارائه می‌شوند به‌طوری که عوامل هر مدل متناسب با شرایط خاص آن منطقه بوده یا بر بعضی عوامل تأکید بیشتری شده است و ممکن است برای مناطق دیگر چندان مناسب نباشد. دسته دیگر مدل‌های آماری هستند که در آن‌ها میزان اهمیت طبقات مختلف عوامل مؤثر در ناپایداری با توجه به نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها تعیین و بعد حساسیت زمین لغزش پهنه‌بندی می‌شود؛ از جمله روش‌های تجربی می‌توان به مدل حائری - سمیعی (آرمین و همکاران، ۱۳۹۸)، تحلیل سلسله‌مراتبی (یوشیماتسو و آبه<sup>۳</sup>، ۲۰۰۶؛ یالسین<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۱؛ هاسکیو گالری و ارکان اوغلو<sup>۵</sup>،

1- He

2- Pradhan &amp; Lee

3- Yoshimatsu &amp; Abe

4- Yalcin

5- Hasekio gullari &amp; Ercanoglu

۲۰۱۲؛ پورقاسمی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ کریمی سنگچینی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۶؛ کومار و آنبالاگان<sup>۳</sup>، ۲۰۱۶؛ استنلی و کریشباوم<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷؛ آبا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ هی و همکاران، ۲۰۱۹؛ نگوین<sup>۶</sup> و لیو<sup>۷</sup>، ۲۰۱۹ و از جمله مدل‌های آماری نیز به رگرسیون چندمتغیره و لجستیک (مصفا<sup>۸</sup> و همکاران، ۱۳۸۸؛ مصفا<sup>۹</sup> و اونق، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳؛ آلتوآینی<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۴)، منطق فازی و گامای فازی (تنگستانی<sup>۱۱</sup>، ۲۰۰۴؛ لی، ۲۰۰۷؛ بوی<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۵؛ مرادی و همکاران، ۱۳۸۹)، شبکه عصبی مصنوعی (کانیانی<sup>۱۱</sup> و همکاران ۲۰۰۸، کانفورتی<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ دو<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵)، مدل نسبت فراوانی (یالسن و همکاران، ۲۰۱۱؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳؛ و خشوری و زارع<sup>۱۴</sup>، ۲۰۱۶)، روش جنگل تصادفی<sup>۱۵</sup> (تری‌جیلا<sup>۱۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۲؛ کاتانی<sup>۱۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۳؛ چن<sup>۱۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ یوسف<sup>۱۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۵) اشاره کرد.

در روش اپراتورهای فازی گاما، پژوهش‌های گذشته مقادیر مختلفی از گاما را برای بهترین نقشه پهنه‌بندی ارائه کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به گامای ۰/۹۷۵ در آبخیز هراز (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹)، گامای ۰/۷ در لاجیم مازندران و طالقان استان تهران (متکان و همکاران، ۱۳۸۸؛ متولی و اسماعیلی، ۱۳۹۱)، گامای ۰/۹ در بخش مرکزی شهرستان جم بوشهر (صفاری و همکاران، ۱۳۹۴)، گامای ۰/۹۴ در آبخیز کلان استان فارس (تنگستانی، ۲۰۰۴)، گامای ۰/۹۷۵ در منطقه‌ای در کره (لی، ۲۰۰۷)، گامای ۰/۹۷۵ در ناگالند هندوستان (هینوتولی سما<sup>۲۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۷) اشاره کرد. شریعت‌جعفری (۱۳۸۷) نیز برای تبیین تأثیر عملگرهای گاما در ارزیابی توان زمین در مقابل لغزش در البرز مرکزی، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را بررسی و نتیجه گرفت که با افزایش مقدار گاما در عملگر گامای فازی، درصد‌های بیشتری از سطح منطقه تحت کلاس‌های خطر بالاتر قرار می‌گیرند و بر این اساس، برای کاربری‌های مختلف مد نظر، مقادیر مختلفی از گاما را به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر ارائه و پیشنهاد داده است.

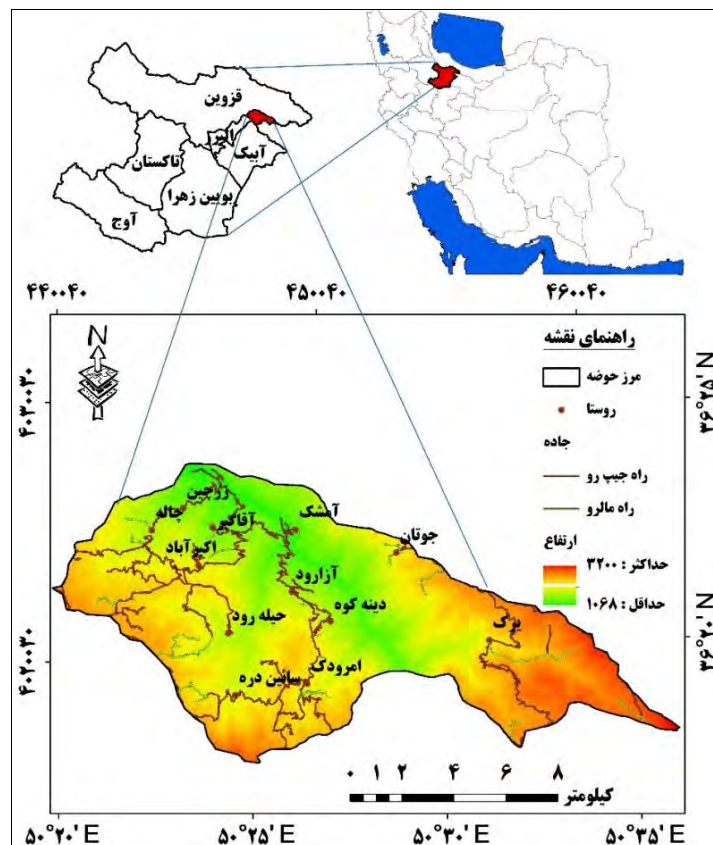
مرور منابع بیان‌گر آن است که با توجه به خسارت‌های ناشی از وقوع این پدیده، لازم است که در مناطق حساس، نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با روش مناسبی صورت پذیرد است. آبخیز طالقان از جمله بخش‌های کوهستانی و مستعد به زمین‌لغزش در استان قزوین است که با توجه به خسارت‌های فراوان جانی و مالی زمین‌لغزش، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین طی تفاهم‌نامه‌ای با پژوهشکده

- 1- Pourghasemi
- 2- Karimi Sangchini
- 3- Kumar & Anbalagan
- 4- Stanley & Kirschbaum
- 5- Abay
- 6- Nguyen
- 7- Liu
- 8- Althuwaynee
- 9- Tangestani
- 10- Bui
- 11- Caniani
- 12- Conforti
- 13- Dou
- 14- Vakhshoori & Zare
- 15- Random Forest
- 16- Trigila
- 17- Catani
- 18- Chen
- 19- Youssef
- 20- Hinotoli Sema

حفاظت خاک و آبخیزداری، خواستار انجام پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در این حوضه شده است. روش اپراتورهای فازی گاما نیز از جمله روش‌های مرسوم و کمابیش جدید پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش است که به دلیل استفاده از منطق فازی، فاقد محدودیت‌های عملگرهای جمع و ضرب جبری لایه‌ها است؛ بنابراین هدف از نوشتار پیش رو تعیین مناسب‌ترین ضریب گامای فازی و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوضه طالقان استان قزوین است. نتایج حاصل از پژوهش می‌تواند در آینده برای ارائه راهکارهای مقابله‌ای و اجرایی استفاده شده و اطلاعات مناسبی را برای مدیریت مناطق حساس به زمین‌لغزش فراهم سازد.

### معرفی منطقه مورد بررسی

آبخیز طالقان رود (قسمت واقع در استان قزوین) بخشی از حوضه سفیدرود است که با وسعت ۱۳۰۰۰ هکتار بین مختصات ۲۰' ۵۰° تا ۳۶' ۵۰° طول شرقی و ۱۸' ۳۶° تا ۲۳' ۳۶° عرض شمالی و در فاصله حدود ۸۰ کیلومتری شمال شرق شهر قزوین قرار دارد. محدوده مورد مطالعه از شمال به آبخیز الموت رود (کوه‌های شاه‌البرز)، از جنوب به حوضه شور و شهرستان آبیک، از شرق به استان البرز و از غرب به حوضه رودخانه شاهرود محدود شده که از منطقه شیرکوه (محل تلاقی الموت رود با طالقان رود) به حوضه شاهرود زهکش می‌شود. آبخیز طالقان رود یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه شاهرود است که دارای ارتفاع حداقل ۱۰۶۹، ارتفاع حداکثر ۳۲۰۰ و متوسط ارتفاع ۲۰۲۳ متر از سطح دریای آزاد است. سطح حوزه را به‌طور عمده کوه‌هایی تشکیل می‌دهند که در بخشی از سال پوشیده از برف هستند. رودخانه اصلی و دائمی طالقان رود از میان این حوزه می‌گذرد که به دلیل شرایط مناسب، در حاشیه آن کشاورزی، باغداری، شالی‌کاری و غیره در سطح گسترده‌ای رواج دارد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت آبخیز طالقان رود در استان قزوین و ایران

## مواد و روش‌ها

## تهیه نقشه عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش

در نوشتار پیش رو از عوامل مختلفی از جمله ارتفاع، میزان شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، متوسط بارش سالانه و پتانسیل لرزه‌خیزی به‌عنوان عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش استفاده شد. منابع اطلاعاتی برای تهیه نقشه عوامل پیش‌گفته، مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ده متر، نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه پوشش گیاهی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و تصاویر گوگل‌ارث<sup>۱</sup> بود.

برای تهیه نقشه حداکثر بارش روزانه، ابتدا مقادیر حداکثر بارش روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی برای سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۷ در هر سال استخراج شد و بهترین توزیع برای برازش به داده‌های هر ایستگاه در نرم‌افزار ایزی‌فیت<sup>۲</sup>، انتخاب و آماره‌های مربوط به آن استخراج شد. در مرحله بعد، در هر ایستگاه، مقادیر حداکثر بارش روزانه با استفاده از بهترین توزیع برای دوره بازگشت ۲۵ سال برآورد شد و در نهایت، نقشه حداکثر بارش روزانه با دوره بازگشت ۲۵ سال از مقادیر نقطه‌ای ایستگاه‌های مختلف تهیه شد.

برای تعیین ضریب عامل شدت زمین‌لرزه، از نقشه رقومی شتاب افقی زمین‌لرزه در محدوده قزوین تهیه‌شده به‌وسیله سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شد (پژوهش و بررسی نوزمین‌ساخت، لرزه‌زمین‌ساخت و خطر زمین‌لرزه - گسلش در گستره قزوین بزرگ و پیرامون، ۱۳۷۱)؛ همچنین داده‌های رقومی شتاب بیشینه زمین<sup>۳</sup> یا مربوط به محدوده استان قزوین نیز برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال تهیه شد (موسوی بفرولی و همکاران، ۱۳۹۳).

## تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش

برای تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها (در نوشتار پیش رو تنها از لغزش‌های با نوع جریان<sup>۴</sup> و چرخشی<sup>۵</sup> استفاده شد) از عکس‌های هوایی منطقه با مقیاس‌های مختلف ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۴۰۰۰۰، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای گوگل‌ارث و سایر منابع اطلاعاتی از جمله نقشه‌های زمین‌لغزش سازمان جنگل‌ها مشتمل بر فرم‌های تک‌صفحه‌ای و چهارصفحه‌ای، استفاده شد و پس از شناسایی زمین‌لغزش‌ها، نقشه ابتدایی پراکنش زمین‌لغزش‌ها تهیه شد؛ پس از انجام بازدیدهای گسترده میدانی، تمامی زمین‌لغزش‌های شناسایی‌شده، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها روی نقشه‌های توپوگرافی تطبیق نهایی شد.

## ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از عملگرهای گامای فازی

ابتدا در محیط نرم‌افزار آرک جی.آی.اس<sup>۶</sup> نقشه هر یک از عوامل مؤثر، با نقشه پراکنش زمین‌لغزش قطع داده شد و مساحت و درصد زمین‌لغزش در هر طبقه از نقشه عوامل مؤثر مشخص شد. در مرحله بعد، با استفاده از رابطه نسبت فراوانی<sup>۷</sup> (رابطه ۳)، میزان اهمیت هر یک از طبقات عوامل مؤثر محاسبه شد (پالسن و همکاران، ۲۰۱۱؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳؛ کریمی سنگچینی و همکاران، ۲۰۱۶). لازم به ذکر است که تاکنون

- 1- Google Earth
- 2- Easy fit
- 3- Peak Ground Acceleration (PGA)
- 4- Flows
- 5- Rotational landslide
- 6- Arc GIS
- 7- Frequency Ratio (FR)

روابط مختلفی برای محاسبه میزان اهمیت طبقات عوامل ارائه شده است که حاصل و خروجی تمامی آن‌ها اعداد بدون بعدی است که گویای میزان اهمیت واحدهای هر عامل در پتانسیل وقوع زمین‌لغزش است. از جمله این روابط عبارت‌اند از:

الف: نسبت درصد لغزش واحد به درصد لغزش تمام واحدها:

$$\text{رابطه ۱} \quad (\text{مساحت کل لغزش} / \text{مساحت کل منطقه}) / (\text{مساحت واحد} / \text{مساحت لغزش واحد}) = \text{اهمیت طبقه}$$

ب: نسبت فراوانی سطح لغزشی واحد به سطح فاقد لغزش واحد:

$$\text{رابطه ۲} \quad (\text{مساحت فاقد لغزش واحد} / \text{مساحت لغزشی واحد}) = \text{اهمیت طبقه}$$

ایراد این رابطه این است که چنانچه تمامی سطح یک واحد دچار لغزش شده باشد، عدد اهمیت طبقه برای آن واحد بی‌نهایت خواهد شد و در نتیجه ادامه تحلیل را با مشکل همراه می‌نماید.

پ: نسبت فراوانی درصد لغزش واحد به درصد مساحت واحد:

$$\text{رابطه ۳} \quad (\text{مساحت کل منطقه} / \text{مساحت کل لغزش}) / (\text{مساحت واحد} / \text{مساحت لغزش واحد}) = \text{اهمیت طبقه}$$

در ادامه با توجه به محدودیت‌های عملگرهای جمع و ضرب جبری، در پژوهش حاضر از عملگرهای گامای فازی به‌منظور تلفیق نقشه‌های براساس نسبت فراوانی (اهمیت) استفاده شد. از آنجاکه برای استفاده از عملگرهای گامای فازی، ضروری است که لایه‌های اهمیت نیز دارای مقادیری بین صفر تا یک باشند؛ بنابراین مقادیر نسبت فراوانی لایه‌ها با استفاده از تابع خطی (رابطه ۴) به این دامنه عددی تبدیل شد و مقادیر حاصل، به‌عنوان مقادیر عضویت فازی طبقات عوامل مؤثر (که عددی است بین صفر و یک) در نظر گرفته شد.

$$\text{رابطه ۴} \quad \text{مقدار عضویت فازی} = (X - \text{MIN}_x) / (\text{MAX}_x - \text{MIN}_x)$$

در رابطه ۴، X: همان مقدار نسبت فراوانی و  $\text{MAX}_x$  و  $\text{MIN}_x$  نیز به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر نسبت فراوانی طبقات هر یک از عوامل مؤثر هستند. در نهایت برای تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش، لایه‌های فازی باهم تلفیق شدند. روش‌های تلفیق داده‌های فازی که دارای مقادیری بین صفر تا یک هستند، براساس تحلیل تئوری مجموعه‌ها است. این روش‌ها عبارت‌اند از: fuzzy And, fuzzy Or, fuzzy Product, fuzzy Sum, and fuzzy Gamma که هر روش جنبه‌های مختلفی را برای عضویت هر سلول نسبت به لایه‌های ورودی چندگانه ارائه می‌دهد.

روش تلفیق Fuzzy And، مقدار حداقل را برای مجموعه سلول‌های مربوط به یک مکان ارائه می‌دهد. این روش زمانی مفید است که تعیین کمترین مقادیر عضویت در بین تمامی لایه‌های ورودی لازم است. Fuzzy And از تابع رابطه ۵ برای ارزیابی استفاده می‌کند:

$$\text{رابطه ۵} \quad \text{Fuzzy And Value} = \min(\text{arg1}, \dots, \text{argn})$$

روش تلفیق Fuzzy Or، مقدار حداکثر را برای مجموعه سلول‌های مربوط به یک مکان ارائه می‌دهد. این روش زمانی مفید است که تعیین بیشترین مقادیر عضویت در بین تمامی لایه‌های ورودی نیاز است. Fuzzy Or از تابع رابطه ۶ برای ارزیابی استفاده می‌کند:

$$\text{رابطه ۶} \quad \text{Fuzzy Or Value} = \max(\text{arg1}, \dots, \text{argn})$$

روش تلفیق Fuzzy Product، مقدار ضرب فازی را برای مجموعه سلول‌های مربوط به یک مکان ارائه می‌دهد که تعیین ارتباط نسبی مقادیر لایه خروجی با مقادیر لایه‌های ورودی نیز به‌طور معمول مشکل است. Fuzzy Product از تابع رابطه ۷ برای ارزیابی استفاده می‌کند:

$$\text{Fuzzy Product Value} = \text{product}(\text{arg1}, \dots, \text{argn}) \quad \text{رابطه ۷}$$

روش تلفیق Fuzzy Sum، مقدار جمع فازی را برای مجموعه سلول‌های مربوط به یک مکان ارائه می‌دهد (جمع فازی متفاوت از جمع جبری لایه‌ها است). Fuzzy Sum از تابع رابطه ۸ برای ارزیابی استفاده می‌کند:

$$\text{FuzzySumValue} = 1 - \text{product}(1 - \text{arg1}, \dots, 1 - \text{argn}) \quad \text{رابطه ۸}$$

روش تلفیق Fuzzy Gamma، مقدار حاصل ضرب جبری جمع فازی و ضرب فازی که هر دو بخش به توان گاما (عددی بین صفر تا یک) رسیده‌اند را برای مجموعه سلول‌های مربوط به یک مکان ارائه می‌دهد. عملکرد کلی این روش به‌شکل رابطه ۹ است:

$$\mu(x) = (\text{FuzzySum})^\gamma * (\text{FuzzyProduct})^{1-\gamma} \quad \text{رابطه ۹}$$

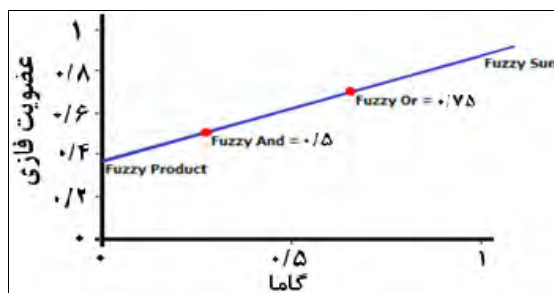
در روش گامای فازی در واقع اثرات افزایشی جمع فازی و نیز اثرات کاهشی ضرب فازی به‌صورت توأمان در نظر گرفته می‌شود. در حالتی که گاما برابر با یک باشد، خروجی برابر با همان جمع فازی است و در حالتی که گاما برابر صفر باشد، خروجی برابر با همان ضرب فازی است. روش Fuzzy Gamma از تابع رابطه ۱۰ برای ارزیابی استفاده می‌کند:

$$\text{Fuzzy GammaValue} = \text{pow}(1 - ((1 - \text{arg1}) * (1 - \text{arg2}) * \dots), \text{Gamma}) * \text{pow}(\text{arg1} * \text{arg2} * \dots, 1 - \text{Gamma}) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

این تابع در مواقعی که نیاز به مقادیری بزرگ‌تر از ضرب و در عین حال کوچک‌تر از جمع باشد، استفاده می‌شود. رابطه مقادیر مختلف گاما با توابع Or, And, Sum و Product در نمودار زیر به‌صورت گرافیکی ارائه شده است. در نوشتار پیش رو با استفاده از روش‌های تلفیق فازی (0.1, ..., 0.9) Sum, Product, Gamma حساسیت به وقوع زمین‌لغزش تعیین و براساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها کلاسه‌بندی شد.

### ارزیابی کارایی و صحت‌سنجی مدل‌ها

برای ارزیابی کارایی و صحت‌سنجی مدل‌های مورد استفاده از شاخص‌های نسبت تراکم<sup>۱</sup> (رابطه ۱۱) و مجموع مطلوبیت<sup>۲</sup> استفاده شد. نقشه خطر مناسب، نقشه‌ای است که بهترین جدایش را بین مناطق با تراکم بالای زمین‌لغزش و مناطق با تراکم پایین زمین‌لغزش ایجاد نماید.



شکل ۲. نمودار رابطه توابع فازی با مقادیر مختلف گاما

1- Density Ratio (Dr)  
2- Quality sum (Qs)



ارزیابی مدل برتر پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش، براساس ۳۰٪ از مساحت زمین‌لغزش‌های به‌وقوع پیوسته که در تهیه نقشه پهنه‌بندی استفاده نشده‌اند، انجام شد.

برای مقایسه رده‌های مختلف خطر از تراکم زمین‌لغزش‌ها در هر یک از رده‌های خطر یا نسبت تراکمی خطر استفاده می‌شود. در یک روش (نقشه پهنه‌بندی)، تراکم لغزش در کلاس خطری که نسبت تراکم برابر یک است، معادل با متوسط تراکم لغزش در کل منطقه و تراکم لغزش در کلاس خطری که نسبت تراکم برابر دو است، معادل با دو برابر متوسط تراکم لغزش در کل منطقه است؛ بنابراین تراکم زمین‌لغزش در نقشه‌های خطری که به‌طور صحیح تهیه شده‌اند، از رده کم‌خطر تا رده‌های پرخطر به‌صورت صعودی است.

$$Dr = \frac{Si/Ai}{\sum_1^n Si / \sum_1^n Ai} * 100 \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن  $Dr$ : شاخص تراکم لغزش در هر کلاس خطر،  $Ai$ : مساحت هر کلاس خطر،  $Si$ : مساحت زمین‌لغزش‌ها در هر کلاس خطر و  $n$ : تعداد کلاس‌های خطر است. هرچه تفکیک بین رده‌های خطر به‌وسیله شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، آن روش (نقشه) دارای دقت یا مطلوبیت بیشتری خواهد بود. مقدار مجموع کیفیت که از راه رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود، نشان‌دهنده صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش برای کل منطقه است. از نظر تئوریک حدی برای مقدار این شاخص وجود ندارد؛ همچنین اختلاف بین مقادیر شاخص جمع مطلوبیت کمتر از ۰/۱ در نظر گرفته نشده و مدل‌ها یکسان فرض می‌شوند. در واقع شاخص نسبت تراکم از جنس واریانس است و اگر انحراف مقادیر شاخص نسبت تراکم از میانگین پهنه‌های مختلف، به هم نزدیک باشند، نشان‌دهنده آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها در کلاس‌های مختلف نزدیک به یکدیگر بوده و مقدار شاخص جمع مطلوبیت نیز پایین خواهد بود و برعکس هرچه انحراف مقادیر شاخص نسبت تراکم از میانگین پهنه‌های مختلف بیشتر باشد، بیانگر آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها با یکدیگر تفاوت داشته و مقدار شاخص جمع مطلوبیت نیز بزرگ‌تر خواهد بود؛ بنابراین به‌طور کلی هرچه مقدار شاخص جمع مطلوبیت بیشتر باشد آن روش از صحت بالاتری برخوردار بوده و برای منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر است.

$$Qs = \sum_{i=1}^n [(Dr - 1)^2 \times S] \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$Qs$ : شاخص جمع مطلوبیت؛  $S$ : درصد مساحت رده خطر از کل منطقه است.

## نتایج

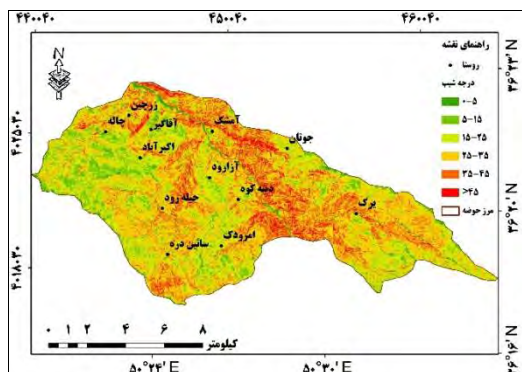
### نقشه‌های عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش

از آنجاکه برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش به لایه‌های اطلاعاتی عوامل مؤثر بر آن نیاز است؛ بنابراین در نوشتار پیش رو نقشه‌های رقمی این عوامل شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، کاربری زمین، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، شتاب زمین‌لرزه، مقدار بارش و حداکثر بارش روزانه تهیه شد (شکل ۳).

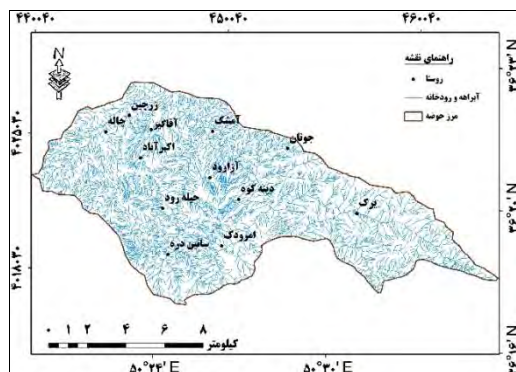
### نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها

نقشه نهایی پراکنش زمین‌لغزش‌های آبخیز طالقان رود (شکل ۴) نشان می‌دهد که در این حوضه در مجموع پانزده زمین‌لغزش با مساحت مجموع ۱۶۶۹۳۷۷ مترمربع ثبت شد که مساحت حداقل آن‌ها برابر با ۳۰۲۷

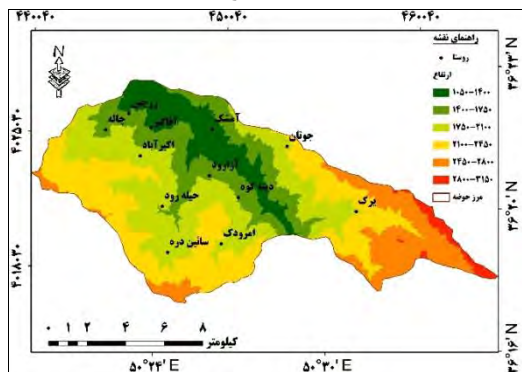
مترمربع، حداکثر آن‌ها برابر با ۵۳۴۷۷۹ مترمربع، میانگین مساحت ۱۳۴۶۰۱ مترمربع برای هر زمین‌لغزش و انحراف معیار از مساحت آن‌ها برابر با ۱۲۹۹۸۸ مترمربع است.



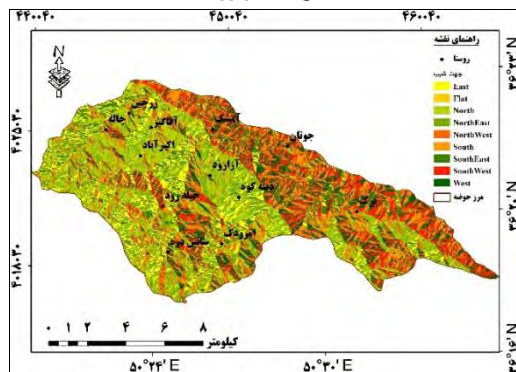
ب: شیب (درجه)



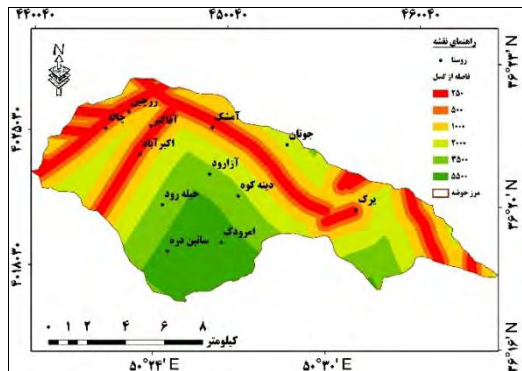
الف: آبراهه‌ها و رودخانه



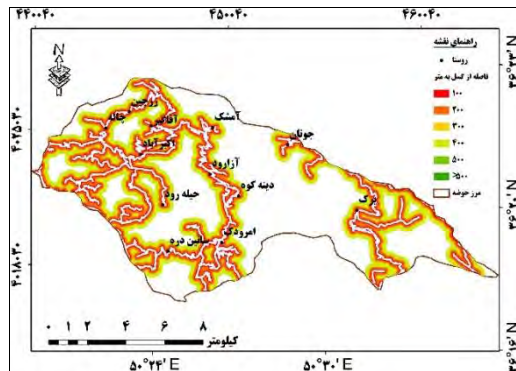
ت: طبقات ارتفاع (متر)



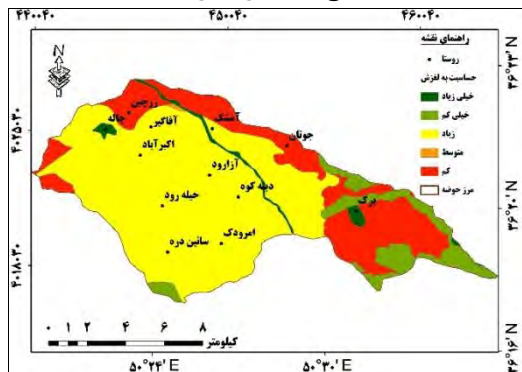
پ: جهت شیب



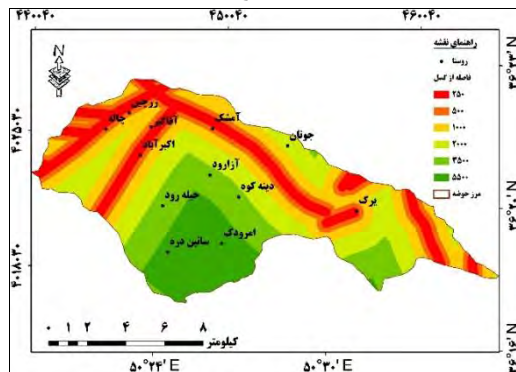
ج: فاصله از جاده



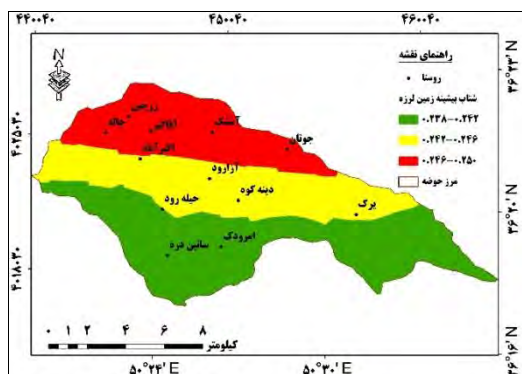
ث: فاصله از جاده



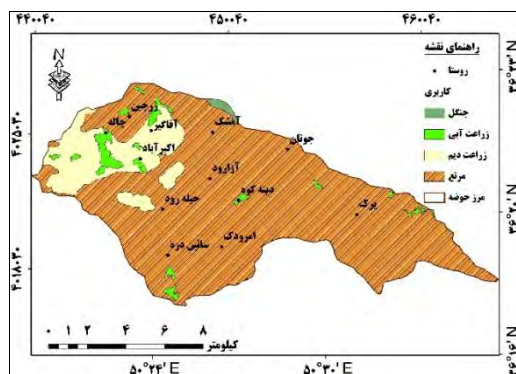
ح: واحدای سنگ‌شناسی



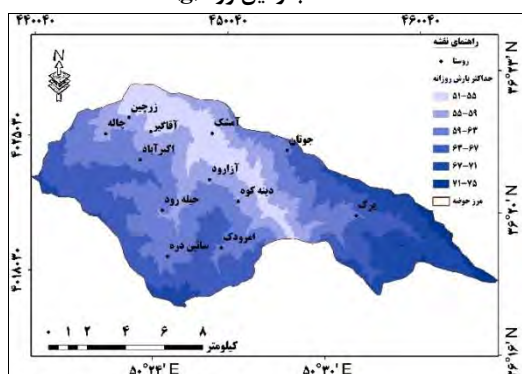
چ: فاصله از جاده (متر)



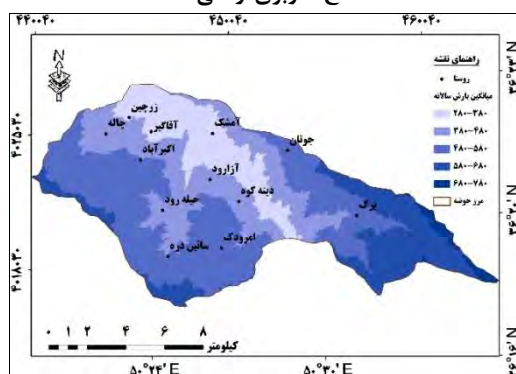
د: شتاب زمین‌لغزه (g)



خ: کاربری اراضی

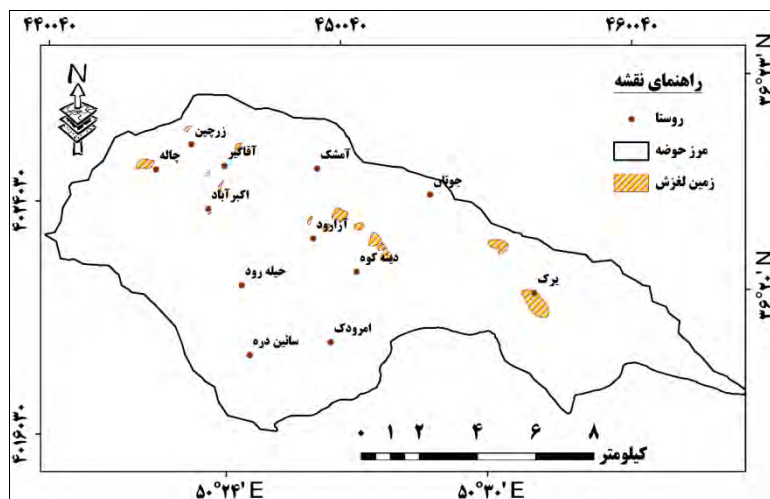


ز: حداکثر بارش ۲۴ ساعته (میلی‌متر)



ذ: میانگین بارش سالانه (میلی‌متر)

شکل ۳. نقشه‌های پایه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در آبخیز طالقان رود



شکل ۴. نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های موجود در آبخیز طالقان رود

خلاصه آماری زمین‌لغزش‌های به‌وقوع‌پیوسته آبخیز طالقان رود (جدول ۱) بیانگر آن است که زمین‌لغزش‌های به‌وقوع‌پیوسته به دو بخش تقسیم شده‌اند به‌طوری که ۷۰٪ آن‌ها برای تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش و ۳۰٪ آن‌ها برای ارزیابی نقشه‌های خطر استفاده شد.

جدول ۱. تفکیک زمین‌لغزش‌های به‌وقوع‌پیوسته آبخیز طالقان رود برای مراحل ساخت و ارزیابی مدل‌ها

| صحت‌سنجی (۳۰٪) |                     | ساخت مدل (۷۰٪) |                     | کل    |                     |
|----------------|---------------------|----------------|---------------------|-------|---------------------|
| تعداد          | مجموع سطح (مترمربع) | تعداد          | مجموع سطح (مترمربع) | تعداد | مجموع سطح (مترمربع) |
| ۵              | ۵۳۴۷۷۸              | ۱۰             | ۱۱۳۴۵۹۹             | ۱۵    | ۱۶۶۹۳۷۷             |

### ارزیابی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با استفاده از عملگرهای گامای فازی

در جدول ۲، مساحت طبقات نقشه‌های عوامل، مساحت زمین‌لغزش در هر طبقه و نسبت فراوانی محاسبه‌شده برای هر طبقه از نقشه‌های عوامل در آبخیز طالقان رود ارائه شده است.

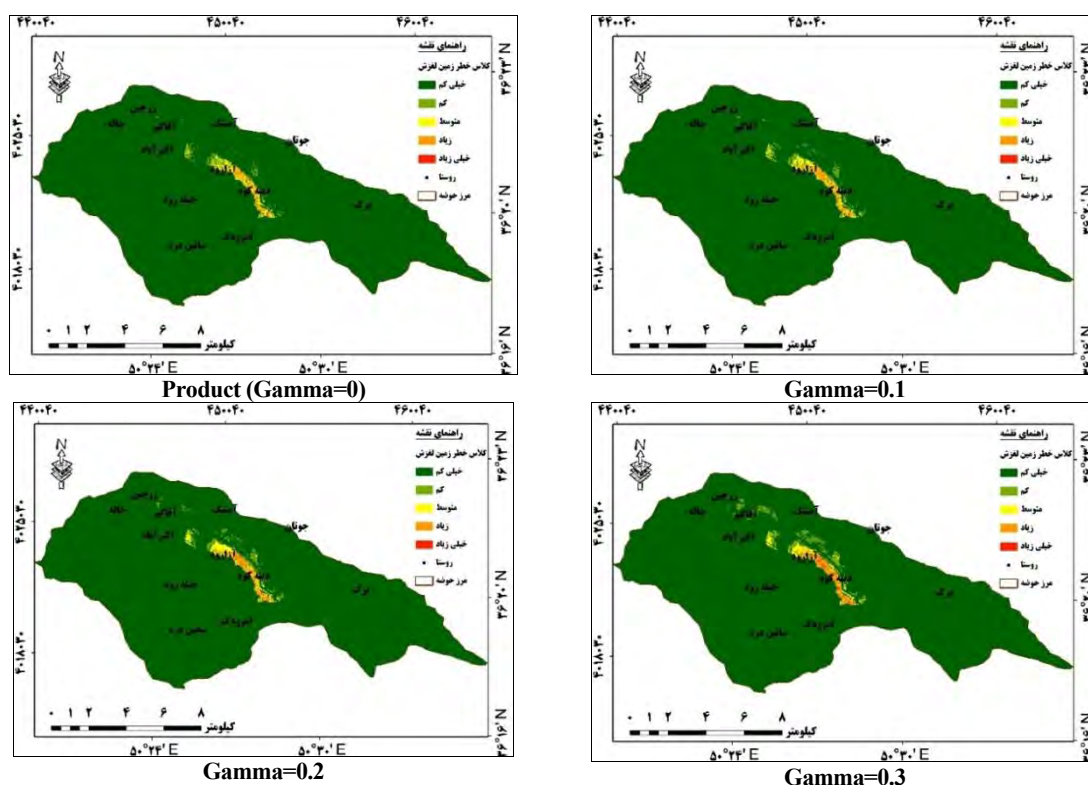
جدول ۲. مساحت طبقات نقشه‌های عوامل، زمین‌لغزش و نسبت فراوانی هر طبقه در آبخیز طالقان رود

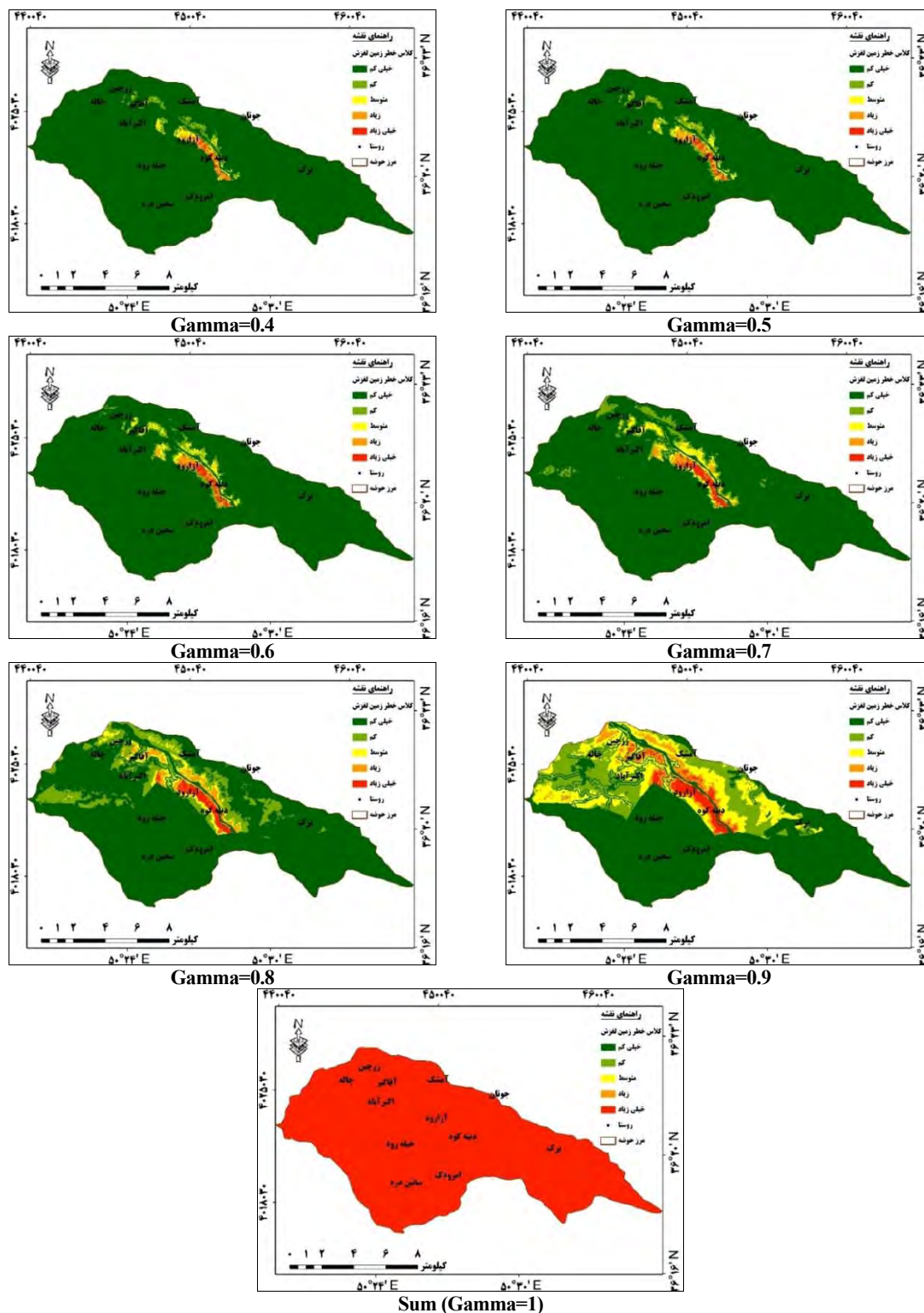
| عامل                          | طبقات       | مساحت (هکتار) | مساحت زمین‌لغزش (هکتار) | نسبت فراوانی | عضویت فازی |
|-------------------------------|-------------|---------------|-------------------------|--------------|------------|
| شیب (درجه)                    | ۰-۵         | ۲۲۷/۷         | ۰                       | ۰            | ۰          |
|                               | ۵-۱۵        | ۱۶۶۰/۵        | ۸/۱۷                    | ۰/۸۷         | ۰/۷۸۴      |
|                               | ۱۵-۲۵       | ۳۷۹۷          | ۲۲/۲۹                   | ۱/۰۴         | ۰/۹۳۵      |
|                               | ۲۵-۳۵       | ۴۷۵۱/۵        | ۲۸/۵۲                   | ۱/۰۶         | ۰/۹۵۶      |
|                               | ۳۵-۴۵       | ۲۳۱۰/۳        | ۱۴/۵                    | ۱/۱۱         | ۱          |
|                               | ۴۵>         | ۶۶۰/۷         | ۲/۴۲                    | ۰/۶۵         | ۰/۵۸۲      |
| جهت شیب                       | F           | ۲۷/۲          | ۰                       | ۰            | ۰          |
|                               | N           | ۲۲۲۰/۶        | ۱۶/۱۳                   | ۱/۲۸         | ۰/۷۹       |
|                               | NE          | ۲۱۱۵/۵        | ۱۹/۴۵                   | ۱/۶۲         | ۱          |
|                               | E           | ۱۵۳۳/۵        | ۱۱/۲                    | ۱/۲۹         | ۰/۷۹۴      |
|                               | SE          | ۱۱۸۳/۳        | ۴/۹۲                    | ۰/۷۳         | ۰/۴۵۲      |
|                               | S           | ۱۳۱۹          | ۳/۲۳                    | ۰/۴۳         | ۰/۲۶۷      |
|                               | SW          | ۱۶۶۳/۹        | ۶/۸                     | ۰/۷۲         | ۰/۴۴۵      |
|                               | W           | ۱۶۰۸/۹        | ۹/۳۱                    | ۱/۰۲         | ۰/۶۳       |
|                               | NW          | ۱۷۳۷/۱        | ۴/۸۶                    | ۰/۴۹         | ۰/۳۰۴      |
| ارتفاع از سطح دریا (متر)      | ۱۰۵۰-۱۴۰۰   | ۱۵۶۹/۲        | ۱۹/۰۸                   | ۲/۱۵         | ۱          |
|                               | ۱۴۰۰-۱۷۵۰   | ۲۲۳۴/۱        | ۱۵/۵۴                   | ۱/۲۳         | ۰/۵۷۲      |
|                               | ۱۷۵۰-۲۱۰۰   | ۳۸۳۷/۳        | ۱۸/۱۲                   | ۰/۸۳         | ۰/۳۸۸      |
|                               | ۲۱۰۰-۲۴۵۰   | ۳۸۰۹/۸        | ۳۸/۵۴                   | ۱/۷۹         | ۰/۸۳۲      |
|                               | ۲۴۵۰-۲۸۰۰   | ۱۷۲۹          | ۰                       | ۰            | ۰          |
|                               | ۲۸۰۰-۳۱۵۰   | ۲۳۰/۹         | ۰                       | ۰            | ۰          |
| بارش (میلی‌متر)               | ۲۸۰-۳۸۰     | ۲۱۱۹/۵        | ۴۸/۸۸                   | ۴/۰۸         | ۰/۸        |
|                               | ۳۸۰-۴۸۰     | ۳۳۲۳/۴        | ۵/۶۶                    | ۰/۳          | ۰/۰۵۹      |
|                               | ۴۸۰-۵۸۰     | ۵۴۸۶/۷        | ۱۴/۴۱                   | ۰/۴۶         | ۰/۰۹۱      |
|                               | ۵۸۰-۶۸۰     | ۲۲۹۳/۷        | ۶/۹۴                    | ۰/۵۳         | ۰/۱۰۵      |
|                               | ۶۸۰-۷۸۰     | ۱۸۷/۱         | ۰                       | ۰            | ۰          |
| حداکثر بارش روزانه (میلی‌متر) | ۵۱-۵۵       | ۱۵۶۹/۲        | ۴۵/۲۱                   | ۵/۰۹         | ۱          |
|                               | ۵۵-۵۹       | ۲۲۳۴/۱        | ۹/۳۳                    | ۰/۷۴         | ۰/۱۴۵      |
|                               | ۵۹-۶۳       | ۳۸۳۷/۳        | ۰/۳                     | ۰/۰۱         | ۰/۰۳       |
|                               | ۶۳-۶۷       | ۳۸۰۹/۸        | ۲۰/۵۲                   | ۰/۹۵         | ۰/۱۸۷      |
|                               | ۶۷-۷۱       | ۱۷۲۹          | ۰/۵۳                    | ۰/۰۵         | ۰/۰۱۱      |
|                               | ۷۱-۷۵       | ۲۳۰/۹         | ۰                       | ۰            | ۰          |
| شتاب زمین (g)                 | ۰/۲۳۸-۰/۲۴۲ | ۵۸۱۱/۶        | ۰                       | ۰            | ۰          |
|                               | ۰/۲۴۲-۰/۲۴۶ | ۴۲۵۱/۲        | ۴۹/۷۲                   | ۲/۰۷         | ۱          |
|                               | ۰/۲۴۶-۰/۲۵۰ | ۳۳۲۸/۹        | ۲۶/۰۶                   | ۱/۳۸         | ۰/۶۶۹      |
| فاصله از گسل (m)              | ۰-۲۵۰       | ۱۸۸۸/۲        | ۵/۹۹                    | ۰/۵۶         | ۰/۲۳۸      |
|                               | ۲۵۰-۵۰۰     | ۱۷۱۳/۸        | ۱۳/۳۵                   | ۱/۳۸         | ۰/۵۸۳      |
|                               | ۵۰۰-۱۰۰۰    | ۲۸۵۰/۳        | ۱۷/۷۸                   | ۱/۱          | ۰/۴۶۷      |
|                               | ۱۰۰۰-۲۰۰۰   | ۲۸۹۴/۲        | ۳۸/۶۷                   | ۲/۳۶         | ۱          |
|                               | ۲۰۰۰-۳۵۰۰   | ۲۰۷۵/۴        | ۰                       | ۰            | ۰          |
|                               | ۳۵۰۰-۵۵۰۰   | ۱۹۷۰/۴        | ۰                       | ۰            | ۰          |

ادامهٔ جدول ۲. مساحت طبقات نقشه‌های عوامل، زمین‌لغزش و نسبت فراوانی هر طبقه در آبخیز طالقان رود

|       |       |       |         |           |                     |
|-------|-------|-------|---------|-----------|---------------------|
| ۰/۸۳۴ | ۱/۰۶  | ۳۲/۵۸ | ۵۴۳۳/۲  | ۰-۲۵      | فاصله از آبراهه (m) |
| ۰/۷۵۹ | ۰/۹۶  | ۲۱/۷۶ | ۳۹۸۸/۹  | ۲۵-۵۰     |                     |
| ۰/۷۰۲ | ۰/۸۹  | ۱۶/۰۴ | ۳۱۷۶/۹  | ۵۰-۱۰۰    |                     |
| ۱     | ۱/۲۷  | ۵/۴۱  | ۷۵۲/۹   | ۱۰۰-۲۰۰   |                     |
| .     | .     | .     | ۴۰/۴    | ۲۰۰>      |                     |
| ۰/۰۳۱ | ۰/۰۵۳ | ۰/۲۳  | ۷۵۰/۸   | ۰-۲۵      | فاصله از جاده (m)   |
| ۰/۰۱۲ | ۰/۰۲  | ۰/۰۸  | ۶۷۰/۶   | ۲۵-۵۰     |                     |
| .     | .     | .     | ۱۱۸۶/۴  | ۵۰-۱۰۰    |                     |
| ۰/۱۳۸ | ۰/۲۳۸ | ۲/۶۸  | ۱۹۸۷/۷  | ۱۰۰-۲۰۰   |                     |
| ۰/۵۱۶ | ۰/۸۹۲ | ۱۴/۰۹ | ۲۷۹۲/۴  | ۲۰۰-۴۰۰   |                     |
| ۱     | ۱/۷۲۸ | ۵۸/۷۱ | ۶۰۰۴/۴  | ۴۰۰>      |                     |
| ۱     | ۱/۰۹۹ | ۱۰/۸۸ | ۱۷۴۹/۵  | زراعت دیم | کاربری زمین         |
| .     | .     | .     | ۶۱/۳    | جنگل      |                     |
| ۰/۰۴۶ | ۰/۰۵  | ۰/۱   | ۳۶۴/۹   | زراعت آبی |                     |
| ۰/۹۲۹ | ۱/۰۲۱ | ۶۴/۸۱ | ۱۱۲۱۶/۶ | مرتع      |                     |
| .     | .     | .     | ۱۱۶۳/۵  | ۱         | سنگ‌شناسی           |
| ۰/۰۹۱ | ۰/۱۳۵ | ۲/۴۵  | ۳۱۹۷/۱  | ۲         |                     |
| .     | .     | .     | ۱۴/۸    | ۳         |                     |
| ۱     | ۱/۴۸۵ | ۷۳/۳۴ | ۸۷۲۷/۲  | ۴         |                     |
| .     | .     | .     | ۲۸۹/۸   | ۵         |                     |

در ادامه با استفاده از عملگرهای مختلف گامای فازی، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش تعیین و بر اساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها کلاسه‌بندی شد. در شکل پنج، نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش و در جدول ۳، مساحت طبقات نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای اعداد مختلف گاما در آبخیز طالقان رود ارائه شده است.





شکل ۵. نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش برای ضرایب مختلف گاما

ارزیابی مدل برتر پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش، براساس ۳۰٪ از مساحت زمین‌لغزش‌های به‌وقوع‌پیوسته که در تهیه نقشه پهنه‌بندی استفاده نشده‌اند، انجام شد. در جدول ۴ مقادیر مساحت زمین‌لغزش و نیز شاخص نسبت تراکم در هر کلاس خطر و جمع مطلوبیت برای هر یک از مدل‌های گاما در آبخیز طالقان رود ارائه شده است.

جدول ۳. مساحت طبقات نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای ضرایب مختلف گاما

| گاما    | مساحت کلاس خطر (مترمربع) |          |          |         |           |
|---------|--------------------------|----------|----------|---------|-----------|
|         | ۱                        | ۲        | ۳        | ۴       | ۵         |
| ۱ (جمع) | ۰                        | ۰        | ۰        | ۰       | ۱۳۳۷۲۴۴۱۸ |
| ۰ (ضرب) | ۱۳۱۱۵۱۰۷۲                | ۱۰۳۳۳۲۷  | ۸۳۳۶۳۱   | ۶۷۲۵۶۶  | ۳۳۵۴۶     |
| ۰/۱     | ۱۳۰۸۴۳۹۶۷                | ۱۱۲۶۸۶۹  | ۸۷۵۹۹۳   | ۸۴۴۰۹۶  | ۳۳۲۲۲     |
| ۰/۲     | ۱۳۰۴۲۰۴۳۵                | ۱۳۲۴۷۱۰  | ۹۶۳۳۳۸   | ۹۲۷۱۳۴  | ۸۸۵۳۰     |
| ۰/۳     | ۱۲۹۷۳۲۲۴۵۱               | ۱۸۶۰۹۹۸  | ۸۳۶۵۵۲   | ۱۰۸۸۱۱۴ | ۲۰۶۰۰۱    |
| ۰/۴     | ۱۲۸۹۵۹۶۹۵                | ۲۳۳۵۴۲۸  | ۹۷۹۸۵۶   | ۱۱۰۵۳۳۵ | ۳۴۳۸۰۱    |
| ۰/۵     | ۱۲۷۶۵۱۲۷۹                | ۳۰۷۶۱۸۸  | ۱۲۳۹۲۹۸  | ۱۲۲۸۸۳۹ | ۵۲۸۳۸۵    |
| ۰/۶     | ۱۲۶۳۲۳۶۳۹                | ۳۴۰۷۷۲۵  | ۱۸۹۰۰۶۳  | ۱۲۲۶۸۱۶ | ۸۷۳۸۹۷    |
| ۰/۷     | ۱۲۲۱۳۳۵۰۹                | ۵۸۱۶۴۳۶  | ۲۹۹۰۵۴۸  | ۱۴۴۳۱۷۵ | ۱۳۳۸۷۸۴   |
| ۰/۸     | ۱۰۹۰۰۶۸۸۹                | ۱۵۹۶۳۶۵۰ | ۴۲۰۳۶۸۶  | ۲۶۳۰۷۱۸ | ۱۹۱۵۲۲۷   |
| ۰/۹     | ۸۳۰۹۹۸۰۵                 | ۲۰۷۸۰۹۹۵ | ۱۹۲۹۲۱۵۰ | ۶۷۳۹۴۷۱ | ۳۸۰۶۳۸۷   |

جدول ۴. مساحت زمین‌لغزش (مترمربع) و شاخص نسبت تراکم در هر کلاس خطر

| Qs      | ۱      |      | ۲     |      | ۳     |      | ۴      |       | ۵      |        | کلاس خطر<br>گاما |
|---------|--------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|--------|--------|------------------|
|         | مساحت  | Dr   | مساحت | Dr   | مساحت | Dr   | مساحت  | Dr    | مساحت  | Dr     |                  |
| ۰/۰     | ۰      | ۰/۰  | ۰     | ۰/۰  | ۰     | ۰/۰  | ۰      | ۰     | ۰/۰    | ۹۱۱۲۹۲ | ۱ (جمع)          |
| ۰ (ضرب) | ۷۲۲۵۱۱ | ۰/۸۲ | ۹۳۸۳  | ۰/۵۹ | ۱۸۹۹۳ | ۲/۸۴ | ۱۰۳۹۲۱ | ۱۳/۷۹ | ۵۶۴۵۲  | ۲۴/۰۹  | ۲۷۸/۱            |
| ۰/۱     | ۶۵۵۴۰۸ | ۱/۱۶ | ۵۰۱۹۵ | ۰/۳۵ | ۱۰۶۹۲ | ۰/۰۸ | ۶۶۹۲   | ۰/۱۵  | ۱۸۸۳۰۵ | ۷/۲۶   | ۱۳۵/۳            |
| ۰/۲     | ۷۱۶۶۰۷ | ۰/۸۶ | ۵۹۱۵  | ۰/۱۵ | ۵۸۹۳  | ۰/۲۹ | ۲۷۴۷۰  | ۲/۷۹  | ۱۵۵۳۷۵ | ۱۷/۰۳  | ۲۶۶/۶            |
| ۰/۳     | ۷۲۳۱۰۰ | ۰/۸۲ | ۱۱۴۳۸ | ۰/۹  | ۲۲۹۳۹ | ۴/۰۲ | ۱۲۱۷۸۸ | ۱۶/۴۲ | ۳۱۹۹۶  | ۲۲/۷۹  | ۲۷۵/۵            |
| ۰/۴     | ۷۲۲۹۷۲ | ۰/۸۱ | ۱۶۳۴۵ | ۱/۸۱ | ۳۶۴۵۱ | ۵/۵۵ | ۱۲۴۸۲۶ | ۱۹/۷۵ | ۱۰۶۰۳  | ۱۷/۵۷  | ۲۸۰/۹            |
| ۰/۵     | ۷۲۲۶۳۳ | ۰/۸۴ | ۴۱۱   | ۰/۰۲ | ۱۲۴۰۰ | ۰/۹۶ | ۵۱۹۶۲  | ۶/۲۱  | ۱۲۳۷۹۱ | ۲۰/۷۸  | ۲۸۵/۵            |
| ۰/۶     | ۷۲۷۱۷۳ | ۰/۸۲ | ۱۶۵۲۵ | ۲/۱۵ | ۴۳۵۷۴ | ۷/۳  | ۱۲۳۳۰۹ | ۲۱/۴۳ | ۶۱۶    | ۲/۷۲   | ۲۹۴/۰            |
| ۰/۷     | ۷۲۲۵۹۲ | ۰/۸۳ | ۴۱۵۳  | ۰/۲  | ۱۷۰۲۷ | ۲/۰۲ | ۷۵۴۳۱  | ۹/۰۱  | ۹۱۹۹۴  | ۲۵/۵۴  | ۳۰۶/۹            |
| ۰/۸     | ۷۳۱۷۵۹ | ۰/۸۲ | ۱۶۳۷۸ | ۲/۳۳ | ۵۴۰۳۵ | ۹/۵۱ | ۱۰۸۲۲۶ | ۲۳/۶۱ | ۸۰۰    | ۳/۵    | ۳۰۲/۱            |
| ۰/۹     | ۷۱۴۱۸۰ | ۰/۹۶ | ۸۳۲۷  | ۰/۰۸ | ۵     | ۰    | ۱۸۹۳۸  | ۱/۰۶  | ۱۶۹۸۴۲ | ۱۳/۰۱  | ۲۲۰/۱            |

### بحث

در پژوهش حاضر برای تعیین میزان اهمیت هر یک از طبقات عوامل مؤثر، ابتدا مساحت و درصد زمین‌لغزش در هر طبقه از نقشه عوامل مؤثر مشخص و میزان اهمیت با استفاده از رابطه نسبت فراوانی محاسبه شد. دامنه اعداد مربوط به ستون نسبت فراوانی و عضویت فازی برای عوامل مختلف مؤثر در زمین‌لغزش (جدول ۲) بیانگر آن است که در منطقه مورد مطالعه، طبقات شیب ۳۵ تا ۴۵ درجه، جهت شیب شمال شرقی، ارتفاع ۱۰۵۰ تا ۱۴۰۰، بارش ۲۸۰ تا ۳۸۰، حداکثر بارش روزانه ۵۱ تا ۵۵ میلی‌متر، شتاب زمین‌لرزه ۰/۲۴۲ تا ۰/۲۴۶، فاصله ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متری از گسل، فاصله ۱۰۰ تا ۲۰۰ متری از آبراهه، فاصله بیش از ۴۰۰ متری از جاده، کاربری زراعت دیم و واحدهای سنگ‌شناسی کلاس ۴ (حساسیت زیاد)، دارای بیشترین نسبت فراوانی لغزش‌های منطقه بوده و بنابراین این طبقات بیشترین میزان اهمیت را در تهیه نقشه‌های خطر به خود اختصاص خواهند داد. در جدول ۲ با افزایش میزان شیب تا ۴۵ درجه، اعداد نسبت فراوانی افزایش و برای طبقه شیب بیش از ۴۵ درجه، کاهش یافته است. این موضوع به دلیل افزایش تنش برشی مواد دامنه‌ای در شیب‌های تندتر است که کلک<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) نیز در بررسی رابطه شیب و زمین‌لغزش به رابطه تنش برشی و

میزان شیب پرداخته و افزایش زمین‌لغزش در شیب‌های بالاتر را به این دلیل نسبت داده است. علت کاهش نسبت فراوانی در شیب‌های بیش از ۴۵ درجه نیز می‌تواند به دلایلی از جمله ناچیز بودن عمق خاک و وجود بسترهای مقاوم یا سنگی، نبود واحدهای سنگ‌شناسی حساس به زمین‌لغزش و نفوذ کمتر بارش و خروج سریع‌تر رواناب از این محدوده‌ها نسبت داد. جدول ۲ همچنین نشان می‌دهد که به‌طور کلی اعداد نسبت فراوانی برای جهت‌های شیب شمالی و شرقی از مقادیر بزرگ‌تری نسبت به شیب‌های جنوبی و غربی برخوردار بوده و در جهت‌های شمالی و شرقی تراکم لغزش بالاتر است. این موضوع به دلیل میزان رطوبت بیشتر ناشی از زاویه تابش آفتاب به دامنه‌های شمالی و شرقی است؛ افزون بر این زمان ماندگاری برف که باعث افزایش نفوذ رواناب آن به مواد دامنه‌ای می‌شود نیز در شیب‌های شمالی و شرقی بیشتر از شیب‌های جنوبی و غربی است.

تأثیر بیشتر جهت‌های شیب شمالی و شرقی در وقوع زمین‌لغزش‌ها نسبت به جهت‌های جنوبی و غربی در پژوهش‌های گذشته نیز به اثبات رسیده است (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳). در مورد عوامل ارتفاع از سطح دریا، میزان بارش و حداکثر بارش روزانه اگرچه فرض بر این است که با افزایش مقادیر طبقات این عوامل احتمال وقوع و فراوانی زمین‌لغزش نیز افزایش یابد، اما نتایج نوشتار پیش رو و نسبت‌های فراوانی محاسباتی نشان می‌دهند که این موضوع در منطقه مورد مطالعه مصداق کامل ندارد و به‌ویژه در طبقات ارتفاع ۱۰۵۰ تا ۱۴۰۰، میزان بارش ۲۸۰ تا ۳۸۰ و حداکثر بارش روزانه ۵۱ تا ۵۵ میلی‌متر که بنابر فرض احتمال وقوع زمین‌لغزش‌های کمی وجود دارد، برعکس انتظار بالاترین مقادیر نسبت فراوانی و عضویت فازی محاسبه شده است. این موضوع به دلیل قرارگیری واحدهای سنگ‌شناسی حساس در مناطق کم‌ارتفاع و کم‌بارش حوضه بوده و می‌توان بیان کرد که نقش این عوامل در بروز زمین‌لغزش به نوعی تحت تأثیر عوامل مؤثرتری همچون شیب و به‌ویژه سنگ‌شناسی قرار گرفته است. در مورد عوامل خطی فاصله از گسل، آبراهه و جاده نیز هرچند انتظار این است که با افزایش میزان فاصله از این عوارض، احتمال وقوع زمین‌لغزش کاهش یابد، ولی مقادیر نسبت‌های فراوانی مربوط به این عوامل در جدول ۲ نشان می‌دهند که رابطه خاصی بین مقادیر نسبت فراوانی و میزان فاصله از این عوارض وجود نداشته؛ بنابراین نقش این عوامل نیز تحت تأثیر سایر عوامل مستعدکننده قرار گرفته است.

سایر پژوهشگران نیز (یالسنین و همکاران، ۲۰۱۱؛ برومندی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۵؛ کومار و آنبالگان، ۲۰۱۶) نقش عوامل کلیدی سنگ‌شناسی و شیب را نسبت به عواملی همچون ارتفاع، بارش و عوارض خطی همچون گسل، آبراهه و جاده مهم‌تر ارزیابی کرده‌اند. در مورد عامل کاربری زمین بیشترین نسبت فراوانی متعلق به طبقه زراعت دیم بوده که دلیل آن شخم‌خوردن این محدوده‌ها و نفوذ بیشتر آب باران به داخل توده خاک و از طرفی قرارگیری اراضی دیم در محدوده واحدهای سنگ‌شناسی حساس‌تر است. علت پایین بودن مقدار نسبت فراوانی برای طبقه زراعت آبی نیز قرارگیری محدوده‌های زراعت آبی در مجاورت رودخانه اصلی حوضه که شیب کمی نیز دارند، است.

نتایج پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (شکل ۵ و جدول ۳) بیانگر آن است که با افزایش مقادیر گاما از صفر (معادل ضرب فازی) تا یک (معادل جمع فازی)، درصد مساحت تحت کلاس‌های با خطر بالا به‌طور مرتب افزایش یافته است، به طوری که در عملگر ضرب فازی بیشتر سطح منطقه دارای خطر خیلی کم و در عملگر جمع فازی اکثر سطح منطقه دارای خطر خیلی زیاد برآورد شده است. این موضوع به دلیل ماهیت کاهش‌ی



عملگر ضرب فازی و برعکس ماهیت افزایشی عملگر جمع فازی است. در واقع در روش‌های تلفیق فازی، از آنجا که مقادیر تمامی لایه‌های ورودی کوچک‌تر از یک است، عملگر ضرب فازی باعث می‌شود که مقادیر لایه خروجی کمتر از مقادیر تمامی لایه‌های ورودی باشد؛ بنابراین تابع مورد استفاده در این روش دارای ماهیتی کاهنده بوده و در مواردی که تعداد لایه‌های ورودی زیاد باشد، مقادیر لایه خروجی، به‌طور معمول مقادیری بسیار کوچک خواهند بود. برعکس عملگر جمع فازی لایه‌ها باعث می‌شود که مقادیر لایه خروجی بزرگ‌تر از مقادیر تمامی لایه‌های ورودی باشد؛ بنابراین عملگر جمع فازی دارای ماهیتی افزایشی است. سایر پژوهشگران نیز به نتایج مشابهی در خصوص ماهیت عملگرهای ضرب و جمع فازی دست یافته‌اند (لی، ۲۰۰۷؛ و خشوری و زارع، ۲۰۱۶).

نتایج ارزیابی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش (جدول ۴) نشان می‌دهد که دامنه مقادیر شاخص جمع مطلوبیت برای مدل‌های مختلف تلفیق فازی بین ۰ (مربوط به گامای برابر با یک یا جمع فازی) تا ۳۰۶/۹۳ (مربوط به گامای برابر با ۰/۷) متغیر است؛ پس روش تلفیق فازی با گامای برابر با ۰/۷، بهترین نتیجه را برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در آبخیز طالقان رود ارائه کرده است؛ افزون بر این، مقادیر شاخص نسبت تراکم در تلفیق فازی با گامای ۰/۷ نشان از سیر صعودی مقادیر این شاخص برای کلاس‌های خطر به ترتیب از ۱ (خیلی کم) تا ۵ (خیلی زیاد) دارد که بیانگر آن است که نقشه خطر مدل برتر (گامای برابر با ۰/۷) به‌طور صحیح طبقه‌بندی شده است. متکان و همکاران (۱۳۸۸) در آبخیز لاجیم استان مازندران و متولی و اسماعیلی (۱۳۹۱) در آبخیز طالقان (بخش واقع در استان تهران) نیز گامای برابر با ۰/۷ را به‌عنوان بهترین ضریب برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش معرفی کرده‌اند؛ البته سایر پژوهش‌های پیشین نیز به نتایج مشابهی در خصوص کارایی بالاتر مدل‌های تلفیق گامای فازی نسبت به مدل تلفیق تنها جمع یا ضرب فازی دست یافته‌اند (شریعت‌جعفری، ۱۳۸۷؛ متکان و همکاران، ۱۳۸۸؛ مرادی و همکاران، ۱۳۸۹؛ متولی و اسماعیلی، ۱۳۹۱؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۴؛ تنگستانی، ۲۰۰۴؛ لی، ۲۰۰۷؛ و خشوری و زارع، ۲۰۱۶؛ هینوتولی و همکاران، ۲۰۱۷).

### نتیجه‌گیری

با توجه به خسارت‌های ناشی از وقوع زمین‌لغزش، لازم است که در مناطق حساس، نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش که از ابزارهای اساسی مدیریت و کاهش خسارات احتمالی این پدیده است، با روش مناسبی صورت پذیرد. روش اپراتورهای فازی گاما از جمله روش‌های مرسوم و کمابیش جدید پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش هستند که به دلیل استفاده از منطق فازی، فاقد محدودیت‌های عملگرهای جمع و ضرب جبری لایه‌ها هستند. آبخیز طالقان رود از جمله مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش در استان قزوین است که در این پژوهش نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از عملگرهای گامای فازی برای آن تهیه و ارزیابی شد. در این راستا، افزون بر لایه پراکنش زمین‌لغزش، یازده لایه اطلاعاتی شامل درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، شتاب زمین‌لرزه، مقدار بارش و حداکثر بارش روزانه استفاده شد. برای تعیین بهترین نقشه حساسیت زمین‌لغزش، نتایج عملگرهای مختلف گامای فازی با استفاده از شاخص‌های نسبت تراکم و جمع مطلوبیت مقایسه شد. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که از میان یازده مدل تلفیق فازی مورد استفاده، مدل تلفیق گامای فازی با گامای معادل ۰/۷ بهترین و مدل جمع فازی بدترین نقشه حساسیت زمین‌لغزش را ارائه کرده است.

نتایج نوشتار پیش رو برای ارزیابی ریسک زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه و کاهش آن سودمند است. با

این حال مناطق تحت کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد باید پیش از طرح‌های توسعه‌ای با دقت بالاتری به‌وسیله زمین‌شناسان مهندسی، مطالعه شوند تا شرایط و میزان ناپایداری آن‌ها به‌طور دقیق‌تری تعیین شود؛ بنابراین نقشه حساسیت به زمین‌لغزش حاصل، اطلاعات مناسبی را در خصوص تعیین مناطق مستعد زمین‌لغزش در اختیار طراحان، مدیران، سیاست‌گذاران و مهندسان قرار می‌دهد که می‌توانند به‌کمک آن، اقدامات مختلف کاهش ریسک زمین‌لغزش را برای منطقه مورد مطالعه تدوین کنند.

### سپاسگزاری

نوشتار پیش رو در قالب پروژه تحقیقاتی با کد ۹۷۰۱۵۸-۲۹-۲۹-۰۰۸-۰۴ در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و با استفاده از اعتبارات مالی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین به انجام رسیده است و نگارندگان بدین‌وسیله از تمامی دست‌اندرکاران و به‌ویژه از پشتیبانی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

### منابع

- آرمین، محسن؛ مصفایی، جمال؛ قربان‌نیا خیری، وجیهه؛ خیری، افسانه. (۱۳۹۸). پهنه‌بندی زمین‌لغزش و برنامه مدیریت کنترل خطر آن در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل حائری - سمیعی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۷ (۴)، ۱۷۶-۱۹۶.
- جویباری، جمشید؛ کاویان، عطاء...؛ مصفایی، جمال (۱۳۹۶). بررسی تأثیر کاربری اراضی بر میزان حرکت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: زمین‌لغزش توان استان قزوین). *مجله پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۰ (۳)، ۱۰-۲۰.
- رشدوند، سعید؛ مصفایی، جمال؛ درویش، محمد؛ رفیعی امام، عمار (۱۳۹۲). بررسی پتانسیل بیابان‌زایی از منظر زوال پوشش گیاهی (مطالعه موردی: حوضه رود شور قزوین). *مجله تحقیقات مرتع و بیابان*، ۲۰ (۱)، ۳۸-۴۹.
- شریعت جعفری، محسن (۱۳۸۷). ارزیابی ریسک ویژه زمین‌لغزش در بخشی از البرز جنوبی. *نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، ۱ (۳-۴)، ۱-۱۴.
- شعاعی، ضیاءالدین (۱۳۹۵). *زمین‌لغزش‌ها (شناخت، ارزیابی و کنترل)*. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- صالح‌پور جم، امین؛ پیروان، حمیدرضا؛ طباطبایی، محمودرضا؛ سررشته‌داری، امیر؛ مصفایی، جمال (۱۳۹۸ الف). بررسی پتانسیل تخریب اراضی با کاربرد روش TOPSIS (مطالعه موردی: مراتع مشرف به شهر اشتهارد، استان البرز). *مجله پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۲ (۴)، ۷۲-۹۳.
- صالح‌پور جم، امین؛ مصفایی، جمال؛ طباطبایی، محمودرضا (۱۳۹۸ ب). بررسی اثر معیار خاک‌شناسی بر پتانسیل بیابان‌زایی مخروط‌افکنه‌ها با کاربرد آزمون‌های ناپارامتریک (مطالعه موردی: بخش جنوبی حوزه آبخیز رودخانه شور). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۶ (۳)، ۱-۱۴.
- صفاری، امیر؛ رعیتی شوازی، منیره؛ جان‌احمدی، مریم؛ شیرزاد ملایری، لیلا (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی و منطق فازی (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان جم). *جغرافیای طبیعی*، ۸ (۳۰)، ۱۵-۳۰.
- متکان، علی‌اکبر؛ سمیعا، جلال؛ پورعلی، سیدحسین؛ صفایی، مهرداد (۱۳۸۸). مدل‌های منطق فازی و سنجش‌ازدور جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز لاجیم. *زمین‌شناسی کاربردی*، ۵ (۴)، ۳۱۸-۳۲۵.
- متولی، صدرالدین؛ اسماعیلی، رضا (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۲ (۸)، ۱-۲۰.
- مرادی، حمیدرضا؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید؛ مهدوی‌فر، محمدرضا (۱۳۸۹). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز هراز). *علوم محیطی*، ۷ (۴)، ۱۲۹-۱۴۲.

- مصفايي، جمال، اونق، مجيد (۱۳۸۸). GIS ابزاری کارآمد در تعیین سیاست‌ها و برنامه‌های خطر زمین‌لغزش. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۶ (۲)، ۲۷-۳۶.
- مصفايي، جمال؛ اونق، مجيد؛ مصداقي، منصور؛ شريعت‌جعفري، محسن (۱۳۸۸). مقایسه کارایی مدل‌های تجربی و آماری پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: آبخیز الموت رود). *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۶ (۴)، ۴۳-۶۱.
- مصفايي، جمال؛ اونق، مجيد (۱۳۹۰). ارزیابی و پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش به کمک مدل رگرسیونی و تحلیل سلسله‌مراتبی. *مجله مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۳ (۳)، ۱۴۹-۱۵۸.
- مصفايي، جمال؛ طالبی، علی (۱۳۹۳). نگاهی آماری به وضعیت فرسایش آبی در ایران. *مجله ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۲ (۵)، ۹-۱۸.
- مصفايي، جمال؛ اختصاصی، محمدرضا؛ صالح‌پور جم، امین (۱۳۹۶ الف). مقایسه نقشه‌های موجود زمین‌شناسی با نقشه حاصل از مطالعات دورسنجی. *مجله مرتع و آبخیزداری*، ۷۰ (۴)، ۱۰۰۵-۱۰۱۳.
- مصفايي، جمال؛ صالح‌پور جم، امین؛ طباطبایی، محمودرضا (۱۳۹۶ ب). مقایسه کارایی مدل سنجه رسوب و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد بار کف رودخانه‌ها. *مجله جغرافیا و پایداری محیط*، ۷ (۳)، ۳۳-۴۴.
- موسوی بفرولی، سید حسن؛ میرزائی، نوربخش؛ شعبانی، الهام؛ اسکندری قادی، مرتضی (۱۳۹۳). پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۰ (۴)، ۱۵-۳۸.

## References

- Abay, A., Barbieri, G. & Woldearegay, K., (2019). GIS-based land slide susceptibility evaluation using analytical hierarchy process (AHP) approach: the case of Tarmaberdistrict, *Ethiopia. Momona Ethiopian J. Sci.* 11 (1), 14-36.
- Althuwaynee, O. F., B. Pradhan, H. J. Park & Lee, J. H. (2014). A novel ensemble decision tree-based Chisquared Automatic Interaction Detection (CHAID) and multivariate logistic regression models in landslide susceptibility mapping. *Landslides*, 11 (6), 1063-1078.
- Armin, M., Mosaffaie, J., Ghorbannia Kheybari, V. & Khairi, A. (2019). Landslide zoning and its risk management plan in Kohgiluyeh and Boyerahmad province using Haeri-Sami model. *Quantitative Geomorphological Research*, 7 (4), 176-196. (In Persian)
- Boroumandi, M., Khamehchian, M. & Nikoudel, M. R. (2015). Using of analytic hierarchy process for landslide hazard zonation in Zanjan province, Iran. In: *Engineering geology for society and territory - volume 2*, Iollino G, Giordan D, Crosta GB, et al. (Eds.). Springer international publishing, Cham, 951-955.
- Bui, D. T., Pradhan, B., Revhaug, I., Nguyen, D. B., Pham, H. V. & Bui, Q. N. (2015). A novel hybrid evidential belief function-based fuzzy logic model in spatial prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Lang Son city area (Vietnam). *Geomat. Nat. Hazards Risk*, 6, 243-271.
- Caniani, D., Pascale S., Sado F. & Sole, A. (2008). Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. *Nat. Hazards*, 45, 55-72.
- Catani, F., Lagomarsino D, Segoni S & Tofani V. (2013). Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards Earth System Science*, 13, 2815-2831.
- Çellek, S. (2020). Effect of the slope angle and its classification on landslide. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 1-23.
- Chen, W., Li, X., Wang, Y., Chen, G. & Liu, S. (2014). Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges. China. *Remote Sensing of Environment*, 152, 291-301.
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G. & Sdao, F. (2014). Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). *Catena*, 113, 236-250.

- Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H. R., Yunus, A.P., Song, X., Xu, Y. & Zhu, Z. (2015). An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. *Nat. Hazards*, 78, 1749-1776.
- Hasekio Gullari, G. D. & Ercanoglu, M. (2012). A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: A case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). *Natural Hazards*, 63, 1157-1179.
- He, H., Hu, D., Sun, Q., Zhe, L. & Liu, Y. (2019). A landslide susceptibility assessment method based on GIS technology and an AHP-weighted information content method: A case study of Southern Anhui, China. *ISPRS Int. J. GeoInf.* 8, 266.
- Hinotoli Sema, V., Balamurugan, G. & Ramesh, V. (2017). Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3, 499-514.
- Joybari, J., Kaviani, A. & Mosaffaie, J. (2017). An Evaluation of the effect of land use on the amount of landslide movement (Case study: Tavan landslide of Qazvin). *Watershed Management journal*, 30 (3), 29-39. doi:10.22092/wmej.2017.116713 (In Persian)
- Karimi Sangchini, E., Emami, S.N., Tahmasebipour, N., Pourghasemi, H. R., Naghibi, S. A., Arami, S. A. & Pradhan, B. (2016). Assessment and com-parison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharma-hal-e-Bakhtiari Province, Iran. *Arab. J. Geosci.*, 9:15
- Kumar, R. & Anbalagan, R. (2016). Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process (AHP) in Tehri Reservoir Rim Region, *Uttarakhand. J. Geol. Soc. India*, 87, 271-286.
- Lee, S. (2007). Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology* 52, 615-623.
- Morady, H. R., Pourghasemi, H. R., Mohammadi, M. & MahdaviFar, M. R. (2010). Landslide hazard zoning using Gamma fuzzy operator, with a case study of Haraz watershed. *Environmental Sciences*, 7 (4), 129-142. (In Persian)
- Mosaffaie, J. & Ownegh, M. (2011). Landslide hazard zonation by AHP and regression model, Case study: Alamout watershed. *Watershed Engineering and Management*, 3 (3), 149-158. doi:10.22092/ijwmse.2011.101942 (In Persian)
- Mosaffaie, J. & Talebi, A. (2014). A Statistical View to the Water Erosion in Iran. *Extension and Development of Watershed Management*, 2 (5), 9-17. (In Persian)
- Mosaffaie, J., Ekhtesasi, M. R. & Salehpour Jam, A. (2018). Comparison of the existing and RS geological maps (Case study: Vartavan catchment). *Journal of range and watershed management*, 70 (4), 1005-1013. (In Persian)
- Mosaffaie, J. & Ownegh, M. (2009). GIS an efficient tool for identifying policies and programs of landslide hazard management. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 16, 303-314. (In Persian)
- Mosaffaie, J., Ownegh, M., Mesdaghi, M. & Shariat Jafari, M. (2009). Comparing the efficiency of statistical and empirical landslide hazard zonation models in Alamout watershed. *Journal of Water and Soil Conservation*, 16 (4), 43-61. (In Persian)
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A. & Tabatabaei, M. R. (2020). Comparing the Efficiency of Sediment Rating Curve and ANN Models in Estimating River Bed-load. *Geography and Sustainability of Environment*, 7 (3), 33-44. (In Persian)
- Motevalli, S. & Esmaili, R. (2013). Landslide Hazard Zoning using Gamma Fuzzy Operator (A Case Study: Taleghan Watershed). *Environmental Erosion Researches*, 2 (8), 1-20. (In Persian)
- Motkan, A. A., Samia, J., Pourali, S. H. & Safaei, M. (2009). Fuzzy logic models and RS for landslide hazard zonation in Lajim watershed. *Journal of Geotechnical Geology*, 5 (4), 318-325. (In Persian)
- Mousavi Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., Shabani, E. & Eskandari-Ghadi, M. (2014). Seismic hazard zoning in Iran and estimating peak ground acceleration in provincial capitals. *Journal of Earth and Space Physics*, 40 (4), 15-38. (In Persian)
- Nguyen, T. T. N. & Liu, C.-C. (2019). A new approach using ahp to generate landslide susceptibility

- maps in the chen-yu-lan watershed, taiwan. *Sensors* 19, 505.
- Pourghasemi, H. R., Moradi H. R. & Fatemi Aghda S. M. (2013). Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Nat Hazards*, 69, 749-779.
- Pradhan, B. & Lee, S. (2010). Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: Backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environ. Model. Softw.* 25, 747-759.
- Rashvand, S., Mosaffaie, J., Darvish, M. & Rafiei Emam, A. (2013). Investigation on potential of desertification in terms of decay of vegetation. Case study: rude shoor, Qazvin. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 20 (1), 38-49. (In Persian)
- Safari, A., Rayati Shavvazi, M., Jan Ahmadi, M. & Shirzad Malayeri, I. (2015). Landslide hazard zonation using the Frequency ratio model and fuzzy logic (Case Study: Central Section of Jam Township). *Journal of National Geography*, 8 (30), 15-30. (In Persian)
- Salehpour Jam, A., Peyrowan, H., Tabatabaei, M. R., Sarreshtehdari, A. & Mosaffaie, J. (2019 a). An assessment of the land degradation potential using the TOPSIS method (Case study: rangelands overlooking the city of Eshtehard, the province of Alborz). *Watershed Management Journal*, 32 (4), 72-93. doi:10.22092/wmej.2019.126535.1227 (In Persian)
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J. & Tabatabaei, M. R. (2019 b). Investigation of pedological criterion affecting on desertification in alluvial fans using nonparametric tests, case study: south of Rude-Shoor watershed area. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6 (3), 1-14. (In Persian)
- Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M. R., Sarreshtehdari, A. & Mosaffaie, J. (2019). Investigation of drought characteristics in north-west of Iran using Deciles Index. *Journal of watershed engineering and management*, 10 (4), 552-563. doi:10.22092/IJWMSE.2018.115672.1360 (In Persian)
- Shariat Jafari, M. (2008). Landslide specific risk assessment on part of southern Alborz, Iran. *Engineering Geology*, 1 (3), 1-14. (In Persian)
- Shoaei, Z. (2016). *Landslides (Recognition, Assessment and Mitigation)*, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (In Persian)
- Stanley, T. & Kirschbaum, D. B. (2017). A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Nat. Hazards*, 87, 145-164.
- Tangestani, M. H. (2004). Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma approach in a GIS, Kakan catchment area, southwest Iran. *Australian Journal of Earth Sciences* 51, 439-450.
- Trigila, A., Catani, F., Casagli, N., Crosta, G., Esposito, C., Frattini, P., Iadanza, C., Lagomarsino, D., Lari, S., Scarascia Mugnozza, G., Segoni, S., Spizzichino, D. & Tofani, V. (2012). The landslide susceptibility map of Italy at 1: 1 Million scale. *In EGU General Assembly Conference Abstracts*, 14, 7655.
- Vakhshoori, V. & Zare, M. (2016). Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7, 1731-1752.
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A.C. & Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* 85, 274-287
- Yoshimatsu, H. & Abe, S. (2006). A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (ahp) method. *Landslides*, 3, 149-158.
- Youssef, A. M., Pourghasemi H. R., Pourtaghi Z. S. & Al-Katheeri, M. M. (2015). Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*, 13 (5), 839-856.