

کاربرد مدل نسبت فراوانی در پیش‌بینی زمین لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل

علی محمد رجبی^(*)، محمدرضا مهدوی^۲ و ماشاءاله خامه‌چیان^۳

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه قم، قم
۲. استادیار پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران
۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۱/۲/۱۱

چکیده

یکی از مهمترین اثرات ناشی از زلزله ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ منجیل ($M=7.7$)، ایجاد و تحریک زمین لغزش‌های متعدد در مناطق زلزله زده بوده است. بررسی و تحلیل مشخصات این زمین‌لغزش‌ها و نحوه توزیع آنها در محدوده متأثر از این زلزله در شناخت مناطق مستعد زمین لغزش، در زلزله‌های آینده اهمیت بسزایی دارد. در این مطالعه مهمترین پارامترهای موثر در وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در چهارگوش‌های چلکاسر و چهارمحل (منطقه‌ای در نزدیکی رومرکز زلزله منجیل) به مساحت $309/30$ کیلومتر مربع بررسی شده است؛ سپس با استفاده از مدل نسبت فراوانی مناطق مستعد زمین‌لغزش در قالب یک نقشه ارائه شده است. مقایسه این نقشه با فهرست زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل همپوشانی قابل قبولی را نشان می‌دهد. با توجه به این نقشه، استعداد منطقه مورد مطالعه به وقوع زمین لغزش به پنج پهنه تقسیم شده است.

واژه‌های کلیدی: مدل نسبت فراوانی، زلزله منجیل، زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، سیستم اطلاعات جغرافیایی

مقدمه

آوج، به معرفی چند زمین لغزش پرداخته است. Mahdavifar et al., (2002) با ارائه برخی مشخصات زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله آوج، رابطه بین بزرگی زمین لغزش، فاصله از رو مرکز و فاصله از گسلش سطحی و فراوانی زمین لغزش‌های ناشی از این زلزله را مورد بررسی قرار داده‌اند. مطالعاتی توسط امینی حسینی و همکاران (۱۳۸۴) در ارتباط با زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله فیروز آباد کجور (هشتم خرداد ماه ۱۳۸۳) انجام شده است. در همه این مطالعات به معرفی موقعیت برخی از زمین‌لغزش‌ها و برخی از مشخصات آنها پرداخته شده است. مهدویفر (۱۳۸۵) ضمن ارزیابی تحلیلی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌های منجیل، آوج و فیروز آباد کجور سامانه‌ای را جهت مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور طراحی کرده است. زلزله منجیل به لحاظ بزرگی و وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی

بطورکلی زمین‌لغزش‌ها بخصوص زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله از جمله پدیده‌هایی هستند که باعث خسارات زیادی، طی سال‌های اخیر شده است (Plakfer and Galloway, 1989; Keefer, 1984; Jibson et al., 2000, Jibson, 2007) هر چند مطالعات زیادی در خصوص شناسایی و توصیف زمین‌لغزش‌ها بطورعام انجام شده است اما بررسی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله بخصوص در ایران بسیار جوان است. مطالعاتی توسط حائری و ستاری (۱۳۷۲)، کمک‌پناه و حافظی‌مقدس (۱۳۷۲)، نوگل سادات (۱۳۷۵)، جعفری و همکاران (۱۳۷۹)، تنها در خصوص تهیه فهرست و برخی از مشخصات زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل انجام شده است. توفیق ریحانی (۱۳۸۱) در خصوص زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله اول تیر ماه ۱۳۸۱

* نویسنده مرتبط amrajabi@ymail.com

زمین لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل

صدها زمین لغزش در اثر زلزله منجیل ایجاد گردیده است که برخی از آنها موجب بسته شدن جاده‌های کوهستانی و بخش‌هایی از جاده اصلی قزوین - رشت شد. علاوه بر این، تعداد بسیار زیادی از خانه‌های روستایی، باغات، مزارع و سیستم‌های آبرسانی در اثر وقوع لغزش‌ها تخریب و بیش از ۲۰۰ نفر از اهالی مستقیماً در اثر بروز این پدیده جان خود را از دست داده‌اند (کمک پناه و حافظی مقدس، ۱۳۷۲). در محدوده مورد مطالعه زمین لغزش‌های زیادی فهرست شده‌اند. انواع مختلف زمین لغزش اعم از زمین لغزش‌های خاکی و سنگی در این محدوده گزارش شده‌اند اما با توجه به اینکه این زمین لغزش‌ها توسط محققین مختلف و ماه‌ها پس از زلزله منجیل ثبت شده‌اند، آثار زمین لغزش‌های کوچک از بین رفته و لذا تنها زمین لغزش‌های بزرگ گزارش شده‌اند. مهدویفر (۱۳۸۵) ضمن بررسی مطالعات سایر محققین و بررسی‌های صحرایی و مطالعه عکس‌های هوایی تعداد ۵۱ زمین لغزش ناشی از این زلزله را در محدوده مورد مطالعه گزارش کرده است (شکل ۱).

کاربرد مدل نسبت فراوانی

نسبت فراوانی برای هر فاکتور (یا هر کلاس از هر فاکتور) عبارت از درصد سلول‌های لغزش یافته به ازای آن فاکتور (یا هر کلاس از آن فاکتور) به درصد سلول‌های کل مربوط به آن فاکتور است. درصد سلول‌های لغزش یافته به ازای هر فاکتور عبارت از نسبت سلول‌های لغزش یافته در هر فاکتور به کل سلول‌های لغزش یافته و درصد سلول‌های کل برای هر فاکتور عبارت از نسبت تعداد سلول‌های هر فاکتور به کل سلول‌های موجود است. جداول شماره ۲ تا ۷ نسبت فراوانی را برای هر یک از فاکتورها یا هر کلاس از فاکتور نشان می‌دهد. نسبت فراوانی برای هر فاکتور یا هر کلاس از هر فاکتور نهایتاً جمع شده و با استفاده از آن شاخص استعداد زمین لغزش LSI^۱ محاسبه می‌شود:

$$LSI = \sum FR \quad (1)$$

که در آن FR عبارت از نسبت فراوانی برای هر فاکتور یا هر کلاس از هر فاکتور است (Lee and Min, 2001) اگر مقدار LSI بالا باشد، نشان دهنده پتانسیل بالا برای وقوع زمین لغزش است و مقدار پایین نشان دهنده پتانسیل پایین زمین لغزش است. نهایتاً با استفاده از مقادیر نسبت فراوانی برای هر فاکتور، با استفاده از انحراف معیار محدوده خطرات مختلف از نظر LSI تعیین می‌شود.

تحلیل رابطه بین توزیع زمین لغزش‌ها و فاکتورهای مؤثر بر اساس نسبت فراوانی

تأثیر پارامترهای مختلف در وقوع زمین لغزش‌ها در مناطق

از آن یکی از مهمترین زلزله‌های تاریخ ایران محسوب می‌گردد که طی مطالعات مختلف، مهمترین زمین لغزش‌های ناشی از آن فهرست شده‌اند. توسعه مطالعات کمی و کیفی روی زلزله‌هایی که مسبب زمین لغزش‌های زیادی بوده‌اند (نظیر زلزله‌های منجیل، آوج و فیروز آبادکجور)، باعث افزایش شناخت ما از اینگونه حوادث طبیعی و در نتیجه مدیریت خطرات ناشی از آنها می‌شود.

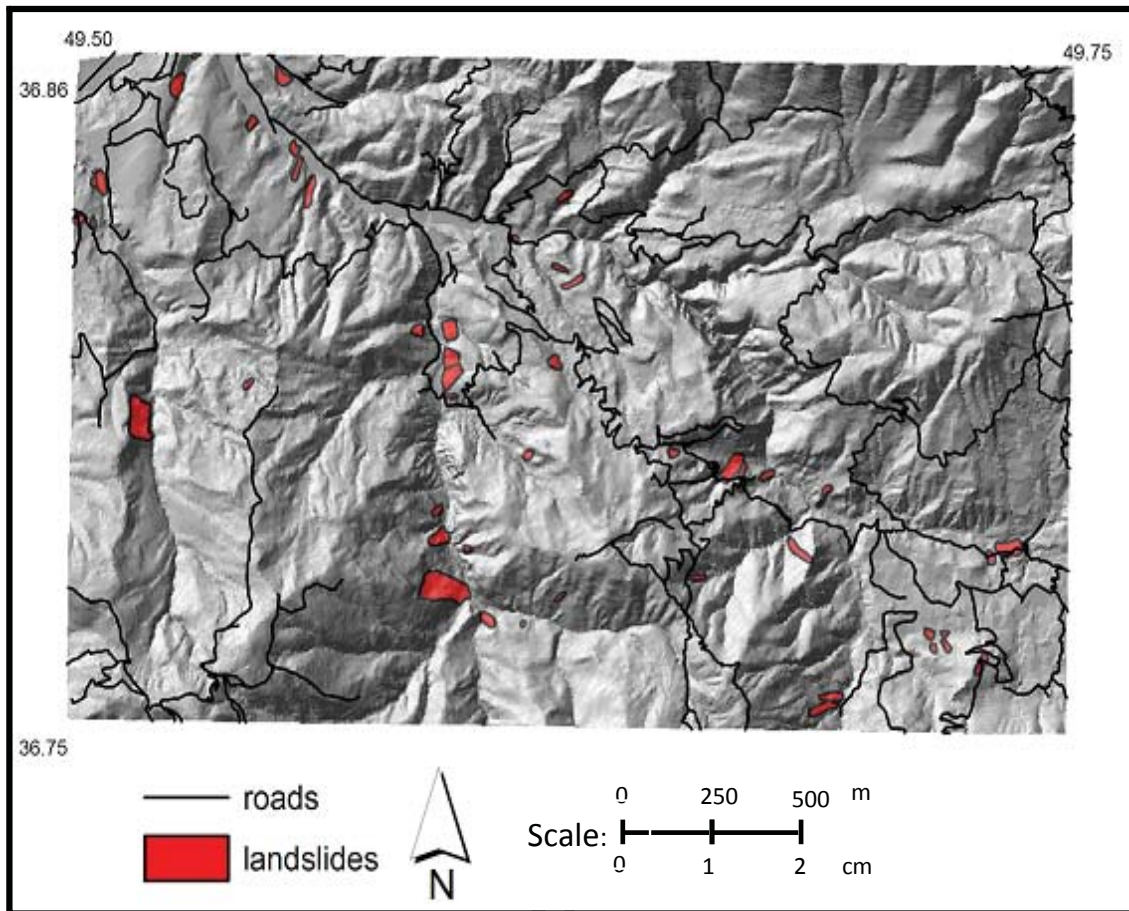
در این مقاله ابتدا به طور خلاصه به زمین شناسی و زمین لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل در چهارگوش‌های چهارمحل و چلکاسر در نزدیکی رو مرکز زلزله مذکور، به مساحت ۳۰۹/۳۰ کیلومتر مربع پرداخته شده است؛ در ادامه برخی از مهمترین پارامترهای مؤثر در وقوع این زمین لغزش‌ها از جمله لیتولوژی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، گسل و شدت آریاس با استفاده از GIS بررسی می‌شود. نهایتاً با استفاده از مدل نسبت فراوانی، روابط مکانی بین محل زمین لغزش‌ها و هر یک از فاکتورهای مؤثر بررسی شده و با استخراج ضرایب تأثیر هر یک از این فاکتورها معادله‌ای جهت پیش‌بینی زمین لغزش‌های آینده ارائه گردیده است. در نهایت نقشه استعداد واحدهای مختلف به وقوع زمین لغزش تهیه شده و با نقشه زمین لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل مقایسه گردیده است. در این مطالعه نقشه‌های زمین شناسی و توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ با فواصل ۳۰*۳۰ متر مربع رقومی شده‌اند. سپس نقشه DEM (مدل رقومی ارتفاعی) از نقشه توپوگرافی با همین مقیاس تهیه شده است. این نقشه مبنای استخراج سایر نقشه‌ها نظیر نقشه شیب، جهت شیب، ارتفاع و شدت آریاس بوده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بین طول‌های ۴۹°۳۰' و ۴۹°۴۵' و عرض‌های ۳۵°۴۵'۰۰" و ۳۵°۵۲'۳۰" به مساحت ۳۰۹/۳۰ کیلومتر مربع واقع شده است. نزدیکترین و دورترین فاصله رومرکز زلزله منجیل به منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۲۰/۶۴ و ۴۲/۴۳ کیلومتر است. مرکز سطحی زلزله در ۲۰/۶۴ کیلومتری گوشه شمال غربی منطقه مورد مطالعه واقع شده است.

زلزله منجیل

در تاریخ ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ شمسی، زلزله‌ای به بزرگی ۷/۷ ریشتر منطقه وسیعی از شمال غربی ایران واقع در استان‌های گیلان و زنجان را به شدت تکان داد. شدت زلزله در شهر منجیل برابر با X در مقیاس مرکالی بوده که موجب ویرانی کامل آن گردید؛ شهرهای رودبار، لوشان، گنجه و بیشتر از هزار آبادی پر جمعیت شمال ایران نیز متحمل خسارات کلی گردیدند؛ غیر از اثرات مستقیم زلزله، زمین لغزش‌های ناشی از زلزله به تعدادی از روستاهای محدوده مورد نظر آسیب‌های اساسی وارد نمودند (جعفری و همکاران، ۱۳۷۹).



شکل ۱. نقشه موقعیت زمین لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل در محدوده این مطالعه (مهدویفر، ۱۳۸۵)

با ناپیوستگی فرسایشی، رسوبات قدیمی را پوشانده‌اند. محاسبه نسبت فراوانی نشان می‌دهد که کمترین نسبت فراوانی برابر با صفر و مربوط به واحدهایی است که هیچ زمین لغزشی در آنها به وقوع نپیوسته است و بیشترین آن برابر با ۲/۲۶ و مربوط به گابرو است که به نسبت مساحت این نوع لیتولوژی در محدوده مورد مطالعه، بیشترین زمین لغزش در این واحد اتفاق افتاده است (جدول ۲).

رابطه بین شدت آریاس و وقوع زمین لغزش

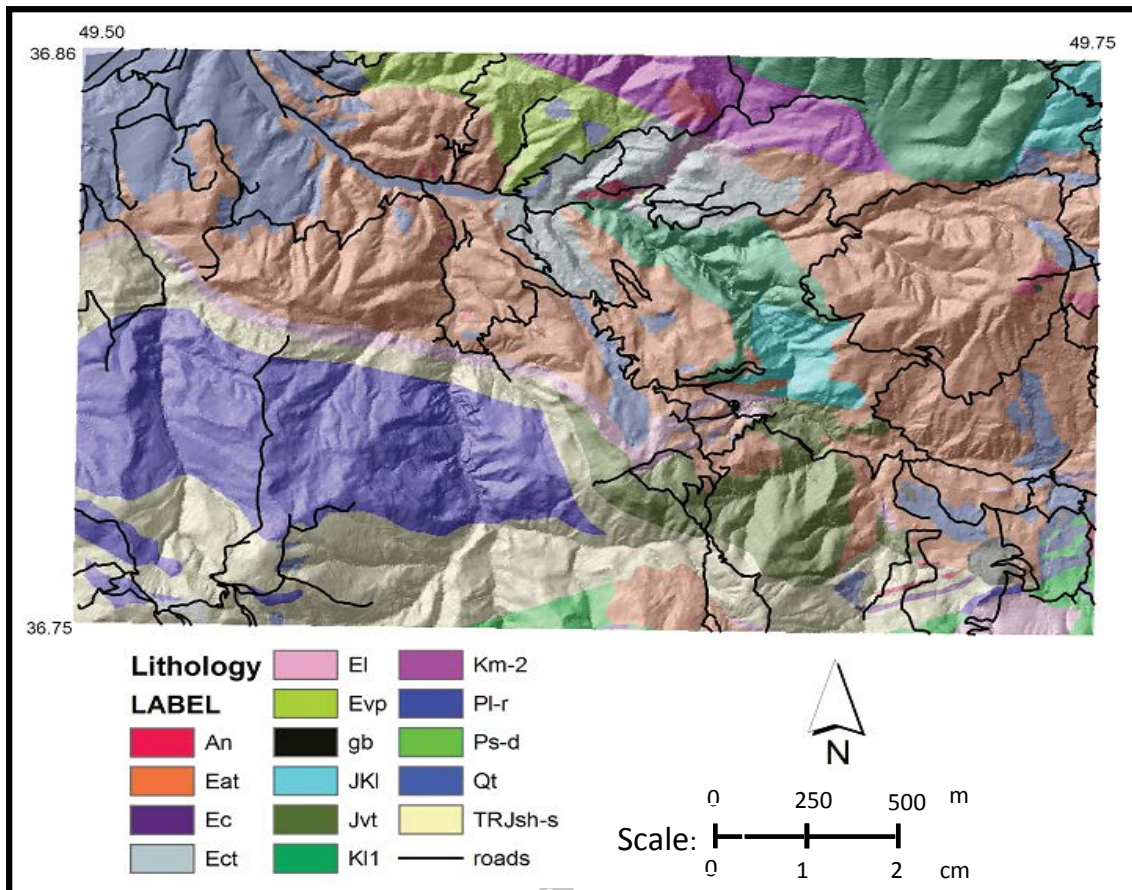
ناحیه مورد مطالعه در نتیجه زلزله منجیل در معرض سطح بالایی از جنبش قوی زمین بوده است. فاصله رو مرکز زلزله تا نزدیکترین و دورترین نقطه منطقه به ترتیب ۲۰/۶۴ و ۴۲/۴۳ کیلومتر است. در این مطالعه از شدت آریاس (Arias, 1970) به عنوان پارامتر جنبش قوی زمین استفاده شده است. شدت آریاس عبارت از مجموع انرژی جذب شده در واحد حجم یک سری ایده‌آل و بینهایت از نوسانگرها با یک درجه آزادی و فرکانس طبیعی از صفر تا بینهایت است و از کل رکورد شتاب در هر دو مولفه افقی زمین (میانگین هر دو مولفه یا مولفه با بیشترین مقدار) استخراج می‌شود (Arias, 1970). از آنجا که شدت آریاس هر دو مشخصات دامنه و داوم زلزله

مختلف بسته به شرایط مختلف زمین‌شناسی متفاوت است، اما معمولاً توزیع زمین لغزش‌های ناشی از زلزله متأثر از جنبش قوی زلزله، زاویه شیب، جهت شیب، ارتفاع و نوع واحدهای زمین‌شناسی است (Ayalew and Yamagishi, 2005). در این بخش چگونگی تاثیر این پارامترها در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

رابطه بین واحدهای زمین‌شناسی و وقوع زمین لغزش

شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی رقومی شده و جدول ۱ نحوه توزیع واحدهای زمین‌شناسی را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. فراوانترین سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه شامل توف‌های سازند کرج است. ماسه سنگ‌ها، شیل‌ها و کنگلومراهای سازند شمشک که بر روی سطح فرسایش یافته قرار گرفته‌اند و آهک‌های ضخیم تا متوسط لایه سازند نسن از دیگر سنگ‌های موجود در منطقه هستند.

در منطقه مورد بررسی، مجموعه سنگ‌های ترشیری گسترش زیادی دارند. سنگ‌های پالئوژن (عمدتاً آئوسن) شامل کنگلومرا، آهک نومولیت‌دار و مجموعه سنگی سازند کرج می‌باشد که بیشترین رخنمون را در منطقه دارند. رسوبات کواترنر در حوضه‌های بین کوهستانی، پادگانه‌های آبرفتی و مخروطه‌افکنه‌ها



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (جهت توصیف علائم به جدول ۱ مراجعه شود)

و Ia شدت آریاس برحسب متر بر ثانیه است. با توجه به بزرگی زلزله و نزدیکی چهارگوش مورد مطالعه به رو مرکز زلزله، شدت آریاس بالایی مورد انتظار است. نقشه شدت آریاس القایی در محدوده مورد مطالعه مطابق با شکل ۳ در محیط GIS تهیه شده است.

در منطقه مورد مطالعه شدت آریاس برای هر یک از سلول‌های لغزشی محاسبه شده است. (Harp and Wilson, 1995) با مطالعه زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌های مختلف، آستانه شدت آریاس مورد نیاز جهت شروع لغزش را برای زمین‌لغزش‌های ناپیوسته^۱ مثل سنگ‌ریزش‌ها و زمین‌لغزش‌های پیوسته^۲ مثل لغزش‌های خاکی و جریان‌ها به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۳۲ متر بر ثانیه پیش‌بینی کرده‌اند؛ این در حالیست که در محدوده مورد مطالعه حداقل و حداکثر و میانگین شدت آریاس به ترتیب ۴/۴۰۵، ۱۱/۷ و ۱۱ متر بر ثانیه بوده است. این سطح از شدت آریاس بسیار بالاتر از شدت آستانه‌ای مورد نیاز جهت شروع زمین‌لغزش است. با در نظر گرفتن رابطه مربوط به شدت آریاس (رابطه ۱) و وابستگی این پارامتر به دو عامل بزرگای زلزله و فاصله از رومرکز، بالا بودن شدت آریاس از مقدار آستانه‌ای به دلیل بزرگای قابل توجه زلزله منجیل (۷/۷) و نزدیکی محدوده مورد مطالعه به رومرکز زلزله

را برای دامنه کامل فرکانس‌های ثبت شده توسط زلزله شامل می‌شود، لذا جهت ارزیابی اثرات تکان ناشی از زلزله برای اهداف مهندسی در مقایسه با پارامترهایی که تنها براساس مقادیر اوج حرکت قوی زمین (بیشینه شتاب زمین) تعریف می‌شوند، مناسب‌تر است. استفاده از این پارامتر در تحلیل زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله نتایج قابل اعتمادی را بدست داده و توسط بسیاری از محققین پیشنهاد شده است (مهدویفر، ۱۳۸۵، Jibson et al., 2000; Del Gaudio and Wasowski, 2004).

با توجه به اینکه رکورد‌های زلزله تنها برای مناطق محدود و تعداد کمی از زلزله‌ها در دسترس می‌باشد، محققین مختلف روابط تجربی مختلفی را برای تخمین شدت آریاس به عنوان تابعی از بزرگای زلزله و فاصله از منشاء لرزه‌ای معرفی نموده‌اند. برای بدست آوردن این پارامتر برای زمین‌لغزش‌های مورد مطالعه از رابطه کاهندگی ارائه شده توسط مهدویفر (۱۳۸۵) به صورت زیر استفاده شده است:

$$\log I_a = -\frac{3}{88} + \frac{0}{81} M - \log R - \frac{0}{1002} R \quad (2)$$

در این رابطه M بزرگی، R فاصله از رو مرکز زلزله به کیلومتر

1. Disrupted Landslides
2. Coherent Landslides

جدول ۱. توصیف واحد های زمین شناسی و درصد رخنمون آنها در منطقه مورد مطالعه

واحد لیتولوژی	توصیف	مساحت رخنمون (کیلومتر مربع)	درصد رخنمون (درصد)
An	توده های ولکانیکی آندزیت و بازالت	۲/۷۰	۰/۸۷
Eat	توفهای آندزیتی ، داسیتی و آگلوئرا	۹۷/۲۹	۳۱/۴۶
Ec	کنگلوئرا	۰/۴۲	۰/۱۴
Ect	توفهای آندزیتی و بازالتی	۱۱/۱۴	۳/۶۰
El	سنگ آهک خاکستری و توف	۱۰/۰۵	۳/۲۵
Evp	توفهای آندزیتی ، داسیتی و آگلوئرا	۸/۸۲	۲/۸۵
Gb	گابرو	۱/۱۲	۰/۳۶
Jk1	آهکهای فسیل دار	۶/۸۷	۲/۲۲
Jvt	ولکانیکهای آندزیت ، بازالت و توف	۱۴/۸۲	۴/۷۹
Kl-r	سنگ آهک	۲۰/۹۹	۶/۷۹
2-Km	سنگ آهک، مارن و ماسه سنگ	۹/۴۸	۳/۰۷
Pl-r	(آهک ضخیم تا متوسط لایه سازند نسن)	۴۲/۹۱	۱۳/۸۸
Ps-d	(شیل و ماسه سنگ) سازند درود	۳/۸۵	۱/۲۵
Qt	رسوبات عهد حاضر و پادگانه های آبرفتی	۳۱/۷۲	۱۰/۲۶
TRJSH-s	(شیل و ماسه سنگ) سازند شمشک	۴۷/۰۴	۱۵/۲۱

منشا زمین لغزش) در گروه های ۱۰ درجه ای بررسی گردیده اند. جدول ۴ نشان دهنده نسبت های فراوانی برای جهت شیب است. بطور کلی با توجه به جهت تابش خورشید بایستی در جهات شمال، شمال شرق و شمال غرب بیشترین زمین لغزش اتفاق افتاده باشد. کمترین نسبت مربوط به شمال و برابر با صفر است اما باید در نظر داشت که در جهت شمال واحد زمین شناسی وجود نداشته است و لذا مقدار لغزش هم صفر بدست آمده است. بیشترین نسبت نیز برابر با ۲/۳۲ و مربوط به جهت شرق است.

رابطه بین زاویه شیب و وقوع زمین لغزش

تاثیر زاویه شیب در زمین لغزشها بخصوص زمین لغزش های ناشی از زلزله توسط بسیاری از محققین مورد تاکید قرار گرفته و معمولاً در ارزیابی زمین لغزشها در نظر گرفته می شود (Guz-zetti et al., 1999; Lee and Min, 2001; Dai and Lee, 2002; Ohlmacher and Davis, 2003).

است (همانطور که ذکر شد، نزدیک ترین فاصله رومرکز به محدوده مورد مطالعه برابر با ۲۰/۶۴ کیلومتر است). در منطقه مورد مطالعه توزیع شدت آریاس به عنوان جنبش قوی زمین برای هر یک از سلول های لغزشی به منظور یافتن رابطه ای منطقی مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۳ نسبت های فراوانی بدست آمده را برای شدت آریاس نشان می دهد. هر چه این نسبت کمتر باشد نشان دهنده استعداد کمتر به وقوع زمین لغزش است. کمترین نسبت برابر با ۰/۰۳ مربوط به بازه ۸/۱ تا ۸/۵ متر بر ثانیه و بیشترین نسبت مربوط به بازه ۱۰/۶ تا ۱۱ متر بر ثانیه و برابر با ۱۲/۵۳ است.

رابطه بین جهت شیب و وقوع زمین لغزش

جهت شیب کنترل کننده میزان تمرکز رطوبت و فشار آب منفذی در دامنه هاست (Ayalew and Yamagishi, 2005). به منظور بررسی هر گونه رابطه بین سلول های لغزشی و جهت شیب در منطقه مورد مطالعه سلول های لغزشی (سلول های

جدول ۲. نسبت فراوانی بدست آمده برای فاکتور لیتولوژی

کلاس	a**	b	c	d	e
An	۱۳۵۴	۰/۳۹	۰	۰	۰
Eat	۱۰۸۰۹۶	۳۱/۴۶	۸۳۱	۷۳/۲۰	۰/۶۶
Ec	۴۶۶	۰/۱۴	۰	۰	۰
Ect	۱۲۳۸۱	۳/۶۰	۱۱۸	۲/۹۴	۰/۸۲
El	۱۱۱۷۰	۳/۲۵	۲۶۸	۶/۶۹	۲/۰۶
Evp	۹۷۹۵	۲/۸۵	۰	۰	۰
Gb	۱۲۴۲	۰/۳۶	۳۸	۰/۹۵	۲/۶۲
Jkl	۷۶۳۳	۲/۲۲	۰	۰	۰
Jvt	۱۶۴۷۰	۴/۷۹	۲۶۹	۶/۷۱	۱/۴۰
Kl-r	۲۳۳۲۵	۶/۷۹	۰	۰	۰
Km-2	۱۰۵۳۵	۳/۰۷	۰	۰	۰
P1-r	۴۷۶۸۳	۱۳/۸۸	۱۱۳۶	۲۸/۳۴	۲/۰۴
Ps-d	۴۲۸۲	۱/۲۵	۰	۰	۰
Qt	۳۵۲۴۷	۹/۴۱	۹۰۵	۲۲/۵۸	۲/۴۰
TRjsh-s	۵۲۲۶۷	۱۵/۲۱	۴۴۳	۱۱/۰۵	۰/۷۳
جمع	۳۴۳۵۹۳	-	۴۰۰۸	-	۱۲/۷۲

تعداد سلول‌های لغزشی: c؛ *۱۰۰ (تعداد کل سلول‌ها / a)؛ b درصد سلول‌های هر کلاس؛ تعداد کل سلول‌های هر کلاس: a**؛
 *۱۰۰ (تعداد کل سلول‌های لغزشی / d)؛ b درصد سلول‌های هر کلاس؛ e = d/b: نسبت فراوانی

رابطه بین توزیع زمین‌لغزش‌ها و ارتفاع، سلول‌های لغزشی در فواصل ۱۰۰ متری ارتفاع مورد بررسی قرار گرفتند. بر اساس جدول ۶، بیشترین نسبت احتمال مربوط به بازه ارتفاعی ۱۵۰۱ تا ۱۶۰۰ متر و برابر با ۴/۰۳ و کمترین نسبت برابر با ۰/۰۸ و مربوط به بازه ۲۰۱ تا ۳۰۰ متر است. با توجه به جدول ۶، افزایش کلاس‌های ارتفاعی با نسبت فراوانی روند منظمی را نشان نمی‌دهند. با توجه به مطالعات انجام شده در این خصوص، هر چند مناطق مرتفع‌تر، شیب‌ساز هستند، اما لزوماً با افزایش ارتفاع فراوانی زمین‌لغزش افزایش پیدا نمی‌کند.

در بسیاری از موارد مشاهده شده است که حتی شیب‌های ۹۰ درجه، پایداری قابل توجهی از خود نشان داده‌اند. این موضوع به دلیل تاثیر سایر فاکتورهای موثر در زمین‌لغزش از جمله پارامترهای مقاومت برشی (مثل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) است. با بررسی‌های انجام شده در محدوده مورد مطالعه و برآورد پارامترهای مقاومت برشی واحدهای زمین‌شناسی، مشخص شده است که مناطق مرتفع‌تر که فراوانی کمتری در وقوع زمین‌لغزش نشان داده‌اند، متشکل از واحدهای زمین‌شناسی با مقادیر بالاتری از پارامترهای مقاومت برشی هستند.

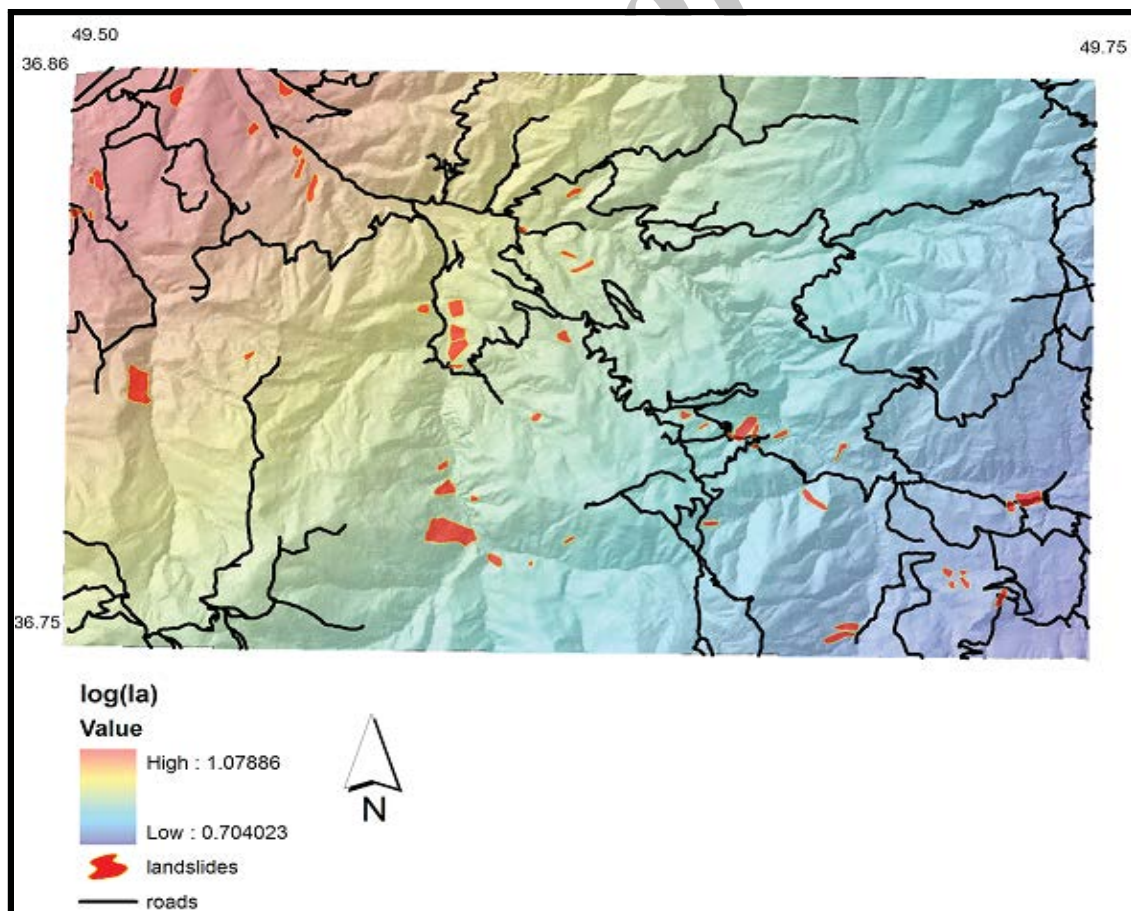
در صورت یکسان بودن سایر شرایط، دامنه‌های با شیب بیشتر استعداد بیشتری نسبت به وقوع زمین‌لغزش دارند. در مقیاس محلی زاویه شیب باعث افزایش تمرکز رطوبت و فشار آب منفذی می‌شود. در مقیاس بزرگتر زاویه شیب توزیع جریان هیدرولیکی را کنترل می‌کند (Ayalew and Yamagishi, 2005). در این مطالعه تاثیر زاویه شیب با طبقه‌بندی سلول‌های لغزشی در کلاس‌های مختلف شیب در نقشه فهرست و کل محدوده مورد مطالعه بررسی شده است. جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین نسبت فراوانی مربوط به بازه شیب بین ۵۱ تا ۵۵ درجه و برابر با ۲/۸۴ و کمترین نسبت مربوط به بازه شیب بین ۶ تا ۱۰ درجه و برابر با ۰/۵۳ است.

رابطه بین ارتفاع و وقوع زمین لغزش

یکی از پارامترهای موثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها، ارتفاع است. این پارامتر توسط بسیاری از محققین بکارگرفته شده است (Guz-zetti et al., 1999; Lee and Min, 2001; Dai and Lee, 2002; Ohlmacher and Davis; 2003). در محدوده مورد مطالعه ارتفاع نقش مهمی در تحریک زمین‌لغزش‌ها داشته است. به منظور یافتن

جدول ۳. نسبت فراوانی بدست آمده برای فاکتور شدت آریاس

e	d	c	b	a*	کلاس (متر بر ثانیه)
۰/۰۳	۰/۵	۳۱۶	۱۶/۴۶	۳۰۶۳۲	۴/۴-۶
۰/۴۹	۰/۰۱۳	۳۹	۲/۷۱	۵۰۴۳	۶/۱-۶/۵
۰/۴۹	۰/۷۵	۲۲	۱/۵۳	۲۸۵۵	۶/۶-۷
۰/۶۶	۵/۸۵	۸	۸/۸۷	۱۶۴۹۸	۷/۱-۷/۵
۰/۶۹	۹/۸۵	۲۸۷	۱۴/۲۸	۲۶۵۸۴	۷/۶-۸
۰/۷۲	۱۲/۹۲	۳۷۷	۱۷/۹۵	۳۳۴۰۷	۸/۱-۸/۵
۱/۰۴	۱۵/۲۱	۴۴۵	۱۴/۶۳	۲۷۲۳۵	۸/۶-۹
۱/۴۹	۶/۰۷	۱۷۸	۴/۰۸	۷۵۹۳	۹/۱-۹/۵
۱/۶۵	۱۹/۴۵	۵۷۰	۱۱/۸۰	۲۱۹۶۰	۹/۶-۱۰
۱/۷۶	۱۱/۹۱	۳۴۹	۶/۷۵	۱۲۵۷۱	۱۰/۱-۱۰/۵
۱۲/۵۳	۱۱/۶۰	۳۴۰	۰/۹۳	۱۷۲۳	۱۰/۶-۱۱
۲۱/۵۳	-	۲۹۳۱	-	۱۸۶۱۰۱	جمع



شکل ۳. نقشه رقومی شده توزیع شدت آریاس حاصل از زلزله منجیل در محدوده مورد مطالعه (رومرکز زلزله در فاصله ۲۰/۶۴ کیلومتری گوشه شمال شرقی نقشه قرار دارد).

جدول ۴. نسبت فراوانی بدست آمده برای فاکتور جهت شیب

e	d	c	b	a*	کلاس
۱/۱۳	۶/۶۵	۳۱۸	۵/۹۱	۲۴۴۸۰	Flat
۰	۰	۰	۰	۰	N
۱/۷۰	۲۸/۱۴	۱۳۴۵	۱۶/۵۹	۶۸۷۵۲	NE
۲/۳۲	۲۷/۱۰	۱۲۹۵	۱۱/۶۶	۴۸۳۰۶	E
۰/۴۸	۴/۲۵	۲۰۳	۸/۷۷	۳۶۳۲۵	SE
۰/۲۰	۲/۲۸	۱۰۹	۱۱/۵۲	۴۷۷۲۸	S
۰/۵۰	۶/۶۵	۳۱۸	۱۳/۱۸	۵۴۶۰۹	SW
۰/۷۲	۱۱/۲۴	۵۳۷	۱۵/۵۲	۶۴۳۰۵	W
۰/۸۱	۱۳/۶۸	۶۵۴	۱۶/۸۶	۶۹۸۷۵	NW
۷/۸۷	۴۷۷۹	-	۴۱۴۳۸۰	-	جمع

نتیجه فراوانی زمین لغزش‌ها کمتر می‌شود. در این رابطه کمترین نسبت فراوانی وقوع زمین لغزش مربوط به بازه فاصله ۴۵۰۱ تا ۵۰۰۰ متر از گسل‌های اصلی و برابر با صفر و بیشترین نسبت فراوانی مربوط به بازه صفر تا ۱۰۰ متر و برابر با ۸/۹۶ است (جدول ۷).

رابطه بین فاصله از گسل و وقوع زمین لغزش
 خردشدگی ناشی از وجود گسل‌ها از عوامل تسهیل‌کننده وقوع زمین لغزش است. به این منظور نزدیکترین فاصله زمین لغزش‌ها از گسل‌های اصلی موجود در محدوده مورد مطالعه محاسبه شده است. طبق جدول ۷ با افزایش فاصله از گسل خردشدگی و در

جدول ۵. نسبت فراوانی بدست آمده برای فاکتور شیب

e	d	c	b	a*	کلاس (درجه)
۰/۹۹	۷/۵۱	۴۳۳	۷/۵۶	۳۷۳۳۴	۰-۵
۰/۵۳	۴/۳۴	۲۵۰	۸/۱۷	۴۰۳۵۳	۶-۱۰
۰/۷۴	۱۱/۱۴	۶۴۲	۱۵/۰۸	۷۴۵۲۰	۱۱-۱۵
۰/۹۵	۱۷/۵۴	۱۰۱۱	۱۸/۴۶	۹۱۲۰۵	۱۶-۲۰
۰/۸۷	۱۵/۷۵	۹۰۸	۱۸/۱۵	۸۹۶۹۴	۲۱-۲۵
۱/۰۴	۱۴/۸۰	۸۵۳	۱۴/۲۶	۷۰۴۴۸	۲۶-۳۰
۱/۳۰	۱۱/۸۸	۶۸۵	۹/۱۶	۴۵۲۳۷	۳۱-۳۵
۱/۳۷	۶/۶۳	۳۸۲	۴/۸۴	۲۳۹۱۶	۳۶-۴۰
۲/۲۵	۵/۱۲	۲۹۵	۲/۲۸	۱۱۲۵۰	۴۱-۴۵
۲/۶۷	۲/۸۳	۱۶۳	۱/۰۶	۵۲۳۷	۴۶-۵۰
۲/۸۴	۱/۶۰	۹۲	۰/۵۶	۲۷۷۷	۵۱-۵۵
۲/۳۰	۰/۶۶	۳۸	۰/۲۹	۱۴۱۳	۵۶-۶۰
۱/۶۴	۰/۲۳	۱۳	۰/۱۴	۶۷۹	۶۱-۶۵
-	-	۱۹/۴۸	-	۴۹۴۹۷۳	جمع

جدول ۶. نسبت فراوانی بدست آمده برای فاکتور ارتفاع

e	d	c	b	a*	کلاس (متر)
۱/۳۷	۰/۳۰	۹	۰/۲۲	۵۱۷	۱۰۱-۲۰۰
۰/۰۸	۷/۵۲	۲۲۹	۱/۸۷	۴۴۸۳	۲۰۱-۳۰۰
۱/۸۳	۷/۵۵	۲۳۰	۴/۱۳	۹۹۱۸	۳۰۱-۴۰۰
۲/۴۹	۱۲/۵۱	۳۸۱	۵/۰۲	۱۲۰۴۸	۴۰۱-۵۰۰
۰/۸۱	۱۴/۵۳	۱۳۸	۵/۶۱	۱۳۴۵۶	۵۰۱-۶۰۰
۰/۴۹	۲/۷۶	۸۴	۵/۶۵	۱۳۵۵۶	۶۰۱-۷۰۰
۰/۷۵	۴/۲۷	۱۳۰	۵/۶۸	۱۳۶۲۶	۷۰۱-۸۰۰
۲/۲۹	۱۳/۶۹	۴۱۷	۵/۹۸	۱۴۳۴۹	۸۰۱-۹۰۰
۲/۳۷	۱۶/۵۵	۵۰۴	۶/۹۸	۱۶۷۶۰	۹۰۱-۱۰۰۰
۱/۸۲	۱۴/۵۸	۴۴۴	۷/۹۹	۱۹۱۸۶	۱۰۰۱-۱۱۰۰
۰/۸۸	۷/۰۶	۲۱۵	۸	۱۹۱۹۴	۱۱۰۱-۱۲۰۰
۰/۶۲	۴/۸۹	۱۴۹	۷/۸۶	۱۸۸۸۰	۱۲۰۱-۱۳۰۰
۰/۳۱	۲/۲۷	۶۹	۷/۲۷	۱۷۴۴۷	۱۳۰۱-۱۴۰۰
۰/۱۷	۱/۰۸	۳۳	۶/۳۲	۱۵۱۷۴	۱۴۰۱-۱۵۰۰
۴/۰۳	۰/۴۶	۱۴	۵/۷۲	۱۳۷۲۸	۱۵۰۱-۱۶۰۰
۰	۰	۰	۴/۹۹	۱۱۹۸۵	۱۶۰۱-۱۷۰۰
۲۰/۳۲	-	۳۰۴۶	-	۱۴۰۰۷۰	جمع

(به عنوان پارامتر حرکت قوی زمین) بیشترین تاثیر و پس از آن ارتفاع، فاصله از گسل (تاثیر خردشدگی ناشی از گسل‌ها)، لیتولوژی، شیب، و جهت شیب به ترتیب کمترین تاثیر رادر وقوع زمین لغزش‌های ناشی از زلزله داشته‌اند. بر اساس این معادله نقشه استعداد وقوع زمین لغزش ناشی از زلزله برای محدوده مورد مطالعه بدست آمد (شکل ۴).

در این نقشه بر اساس مقادیر بدست آمده، استعداد منطقه مورد مطالعه به وقوع زمین لغزش به پنج بازه تقسیم شده است. قسمت‌هایی که در نقشه با رنگ تیره نشان داده شده است با توجه به شش پارامتر مورد بررسی (لیتولوژی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، شدت آریاس و فاصله از گسل) نشان دهنده استعداد بیشتر به وقوع زمین لغزش است و سایر رنگ‌ها به ترتیب در درجات بعدی اهمیت از نظر احتمال وقوع زمین لغزش قرار دارند.

نتیجه گیری

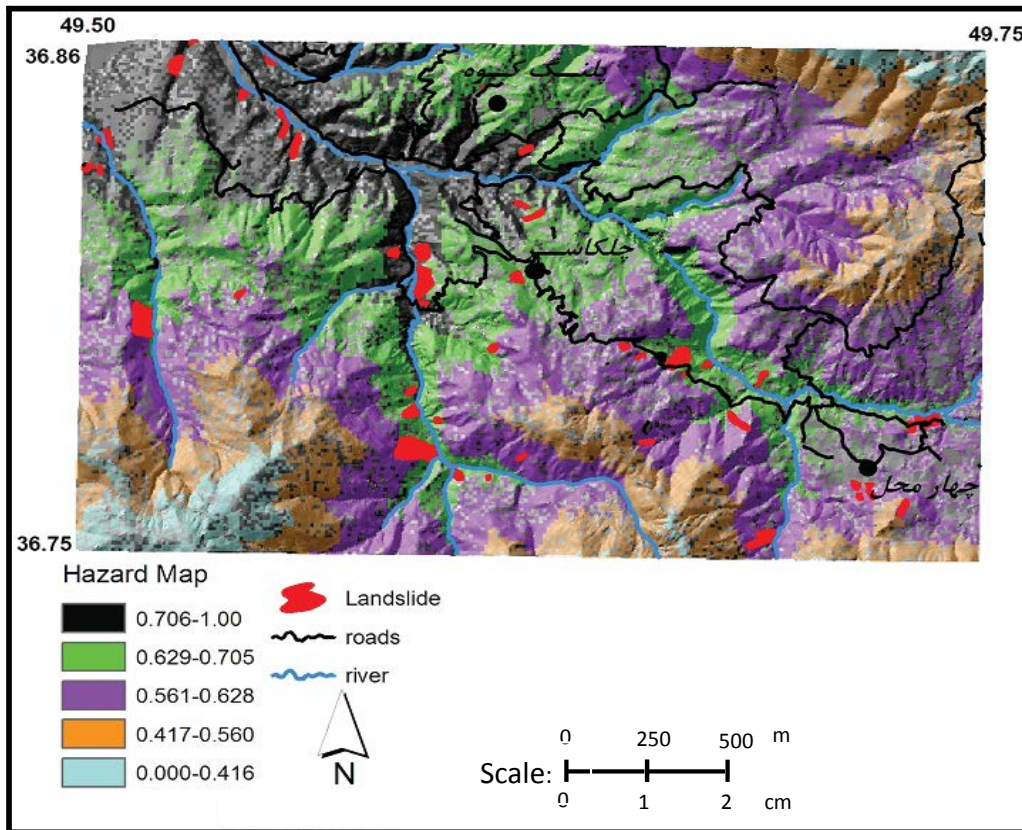
بررسی زمین لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل، اطلاعات مفیدی را از نقطه نظر مقایسه اهمیت پارامترهای مستعدکننده زمین لغزش (مانند نوع واحدهای زمین‌شناسی، شیب، ارتفاع، فاصله از گسل)

تعیین استعداد وقوع زمین لغزش‌ها

به منظور تهیه نقشه استعداد منطقه به وقوع زمین لغزش، با استفاده از انحراف معیار حاصل از مقادیر نسبت‌های فراوانی مربوط به هر یک از فاکتورهای مورد بررسی (مقادیر e در جداول ۲ تا ۷)، ضرایب تاثیر هر یک از فاکتورها با استفاده از تحلیل رگرسیونی بدست آمده است. این ضرایب برای فاکتورهای شدت آریاس، ارتفاع، فاصله از گسل، لیتولوژی، شیب و جهت شیب به ترتیب برابر با ۳/۵۵، ۲/۷۳، ۱/۹۸، ۰/۹۶، ۰/۷۷ و ۰/۷۴ است که پس از نرمالیزه کردن ضرایب به بالاترین ضریب (۳/۵۵)، رابطه شاخص استعداد زمین لغزش LSI برای منطقه مورد مطالعه به شرح ذیل بدست می‌آید:

$$(3) \quad LSI = (0.331 \text{ (شدت آریاس)}) + (0.254 \text{ (ارتفاع)}) + (0.185 \text{ (لیتولوژی)}) + (0.089 \text{ (فاصله از گسل)}) + (0.069 \text{ (شیب)}) + (0.072 \text{ (جهت شیب)})$$

در این معادله ضرایب بیشتر برای هر فاکتور، نشان دهنده تاثیر بیشتر آن در وقوع زمین لغزش است. بر این اساس شدت آریاس



شکل ۴. نقشه استعداد زمین لغزش بر اساس مدل نسبت فراوانی

جدول ۷. نسبت فراوانی بدست آمده برای فاکتور فاصله از گسل

e	d	c	b	a*	کلاس (متر)
۸/۹۶	۳/۲۴	۱۸۷	۰/۳۶	۸۶۷	۰ - ۱۰۰
۶/۵۴	۸/۴۸	۴۹۰	۱/۳۰	۳۱۱۵	۱۰۱ - ۳۰۰
۱/۷۸	۳/۳۹	۱۹۶	۱/۹۰	۴۵۶۴	۳۰۱ - ۶۰۰
۱/۳۱	۱۹/۸۱	۱۱۴۴	۱۵/۱۰	۳۶۲۵۶	۶۰۱ - ۱۰۰۰
۱/۰۵	۲۵/۹۳	۱۴۹۸	۲۴/۸۱	۵۹۵۶۳	۱۰۰۱ - ۱۵۰۰
۰/۸۴	۱۴/۶۳	۸۴۵	۱۷/۳۶	۴۱۶۶۸	۱۵۰۱ - ۲۰۰۰
۰/۸	۲/۴۸	۱۴۳	۲/۹۵	۷۰۸۶	۲۰۰۱ - ۲۵۰۰
۰/۷۷	۰/۳۶	۲۱	۰/۴۷	۱۱۲۸	۲۵۰۱ - ۳۰۰۰
۰/۷۲	۱۹/۳۰	۱۱۱۵	۲۶/۶۷	۶۴۰۳۵	۳۰۰۱ - ۳۵۰۰
۰/۴۶	۰/۳۵	۲۰	۰/۷۵	۱۷۹۲	۳۵۰۱ - ۴۰۰۰
۰/۲۵	۲/۰۳	۱۱۷	۸/۲۰	۱۹۶۹۳	۴۰۰۱ - ۴۵۰۰
۰	۰	۰	۰/۱۳	۳۰۳	۴۵۰۱ - ۵۰۰۰
۲۳/۵۳	-	-	-	۲۴۰۰۷۰	جمع

plants. Cambridge, MA: MIT Press, 438–483.

- Ayalew, L. and 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.

- Dai, F.C. and Lee, C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213–238.

- Del Gaudio, V.J. and Wasowski, J., 2004. Time probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard in Irpinia (Southern Italy). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 915–928.

- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181–216.

- Harp, E. and Wilson, R.C., 1995. Shaking Intensity Thresholds for rock falls and slides. Evidens from the 1987 Whitter Narrow and Superstition Hill Earthquake Strong Motion Records. *Bulletin of Seismological Society of America*, 85, 1739–1757.

- Jibson, R.W., Harp, E.L. and Michael, J.A., 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58, 271–289.

- Jibson, R.W., 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91, 912–918.

- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society American Bulletin*, 95, 406–421.

- Lee, S. and Min, K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40, 1095–1113.

- MahdaviFar, M.R., Solaymani, S. and Jafari, M.K., 2002. Landslides triggered by the Avaj, Iran earthquake of June 22. *Engineering Geology*, 86, 166–182.

- Ohlmacher, C.G. and Davis, C.J., 2003. Using multiple regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69, 331–343.

- Plafker, G. and Galloway, J.P., 1989. Lessons learned from the Loma Prieta, California earthquake of October 17, and extracted specific data sets from them. *United State Geological Survey*, 1045 1989.

و پارامترهای زلزله به عنوان عامل تحریک کننده (شدت آریاس) در خصوص توزیع زمین لغزش های ناشی از زلزله در محدوده مورد مطالعه در اختیار قرار می دهد.

وزن های بدست آمده در این مطالعه می تواند به عنوان مبنایی برای پیش بینی محل زمین لغزش های مورد انتظار در زلزله های آینده در مناطق مجاور مورد استفاده قرار گیرد؛ بدین صورت که پس از وقوع زلزله در این منطقه نقشه پهنه بندی زمین لغزش های ناشی از آن پس از تهیه نقشه شدت آریاس و با استفاده از ضرایب معرفی شده در این مطالعه قابل تهیه خواهد بود.

با توجه به گسترش واحدهای زمین شناسی موجود در منطقه مورد مطالعه در بخش های وسیعی از البرز، نتایج این تحقیق را می توان در پیش بینی زمین لغزش های ناشی از زلزله های آینده در مناطق مشابه در البرز، با احتیاط، مورد استفاده قرار داد.

منابع

- امینی حسینی، ک.، مهدویفر، م.ر.، کشاورز بخشایش، م.، خزاعی، ب.، آزادی، الف.، سهرابی بیدار، ع.، روانفر، س.الف.، کمالپور، ف.، رخشنده، م. و بانکی، ش.، ۱۳۸۴. گزارش شناسایی زمین لغزش های ناشی از زلزله ۱۳۸۳/۳/۸ فیروزآباد - کجور، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۷، ۲.

- توفیق ریحانی، م.ح.، ۱۳۸۱. پی آمدهای زمین شناختی زلزله چنگوره - آوج، مجموعه مقالات سمینار درس هایی از زلزله چنگوره - آوج، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

- جعفری، م. ک.، منتظرالقائم، س.، مهدویفر، م. ر. و حیدری، م.، ۱۳۷۹. مطالعات زمین لغزش های مرتبط با زلزله در البرز (گزارش مرحله اول)، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

- حائری، س.م. و ستاری، م.ح.، ۱۳۷۲. لغزش های بزرگ بوقوع پیوسته بر اثر زلزله ۳۱ خرداد ماه ۱۳۶۹ منجیل، مرکز مطالعات مقابله با سوانح طبیعی ایران، معاونت شهرسازی و معماری وزارت مسکن و شهرسازی.

- کمک پناه، ع. و حافظی مقدس، ن.، ۱۳۷۲. پهنه بندی خطر زمین لغزه در ایران، جلد ششم: شناسایی و به نقشه در آوردن زمین لغزه های مهم تحریک شده در زلزله خرداد ۱۳۶۹ منجیل، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

- مهدویفر، م.ر.، ۱۳۸۵. ارزیابی تحلیلی و طراحی سامانه مدیریت ریسک زمین لغزش های ناشی از زلزله در کشور، پایان نامه دکترا، پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

- نوگل سادات، م.، ۱۳۷۵. طرح جامع خطر رانش استان گیلان، کارفرما: زیر کمیته زلزله و لغزش لایه های زمین معاونت شهرسازی و معماری وزارت مسکن و شهرسازی.

- Arias, A., 1970. A Measure of Earthquake Intensity. In: Hansen RJ. editor. *Seismic design for nuclear power*