

چکیده

امروزه روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌ها وجود دارد. در خصوص زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله اما تحقیقات محدودتری انجام شده است. بررسی و تحلیل مشخصات زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله و نحوه توزیع آنها در شناخت مناطق مستعد زمین‌لغزش در زلزله‌های آینده اهمیت به‌سزایی دارد. هدف از این مطالعه شناسایی عوامل مؤثر و پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله به روش‌های ارزش اطلاعاتی و تحلیل سلسله مراتبی در محدوده‌ای در نزدیکی رومرکز زلزله منجیل به مساحت ۳۰۹/۳۰ کیلومتر می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از دو مدل رگرسیون دو متغیره (ارزش اطلاعاتی) و تحلیل سلسله مراتبی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله انجام شده و کارایی این دو روش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. به این منظور، ابتدا با توجه به موقعیت زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته، بررسی‌های تطبیقی و نتایج سایر محققین، هفت عامل شامل شدت آریاس، زاویه اصطکاک داخلی، شیب، چسبندگی، جهت شیب، ارتفاع و انحنای دامنه به‌عنوان مهم‌ترین عوامل وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل شناسایی شده و لایه‌های رستری عوامل مذکور در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه گردید. نقشه‌ی فهرست زمین‌لغزش‌ها نیز با استفاده از عکس‌های هوایی و مشاهدات میدانی تهیه و در کنار سایر اطلاعات قرار گرفت. تمامی اطلاعات و داده‌های تهیه شده جهت تحلیل اولیه وارد محیط GIS شد و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با در نظر گرفتن روش‌های مذکور انجام شد. سپس کارایی دو روش مورد بررسی با استفاده از دو شاخص جمع کیفیت‌ها (QS) و دقت روش (P) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل رگرسیون دو متغیره (روش ارزش اطلاعاتی) نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی روش مناسب‌تری بوده و نتایج آن با واقعیت تطابق بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: زلزله منجیل، زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، تحلیل سلسله مراتبی، ارزش اطلاعاتی

مقایسه‌ی روش‌های ارزش اطلاعاتی و تحلیل سلسله مراتبی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله (مطالعه‌ی موردی)

علی محمد رجبی (نویسنده مسئول)

استادیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تهران

amrajabi@ut.ac.ir

حسین خسروی

کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه قم

۱- مقدمه

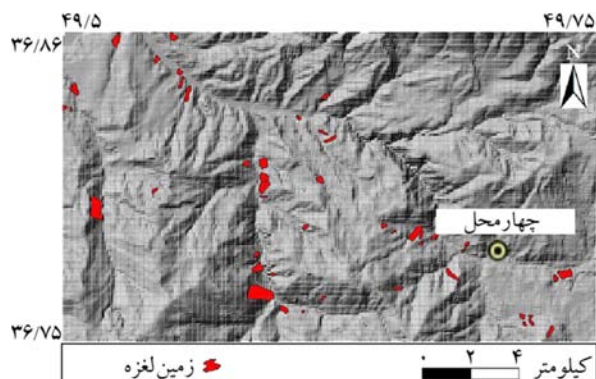
که هرچند مطالعات زیادی در خصوص شناسایی و توصیف زمین‌لغزش‌ها به‌طور عام انجام شده است اما بررسی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله به‌خصوص در ایران بسیار جوان است. مطالعاتی توسط کمک پناه و حافظی مقدس [۲]، نوگل سادات [۳]، جعفری و همکاران [۴]، تنها در خصوص تهیه فهرست و برخی از مشخصات زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل انجام شده است. مهدویفر و همکاران [۵] با ارائه‌ی برخی

به‌طور کلی زمین‌لغزش‌ها به‌خصوص زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، از جمله پدیده‌هایی هستند که باعث خسارات زیادی، طی سال‌های اخیر شده‌اند به‌طوری‌که این پدیده تأثیر بسیار زیادی در افزایش تلفات جانی و خسارات مالی در زمان وقوع زلزله داشته است [۱]. در بسیاری از زلزله‌ها آسیب ناشی از وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله کمتر از خسارات مستقیم ناشی از آن نیست. مرور تاریخچه‌ی تحقیق در این حوزه، نشان می‌دهد

تأثیر زلزله نیز می‌توان به مطالعات چانگ و همکاران [۱۸] اشاره نمود. در این مطالعه وی با جمع‌آوری اطلاعات صحرایی و استفاده از عکس‌های هوایی و نیز پردازش آنها با کمک نرم‌افزار Arc GIS به بررسی توزیع مکانی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی میثیان (۲۰۱۳، Mw=۵/۹) پرداخته است. در خصوص پیش‌بینی معادله‌ی جابه‌جایی نیومارک برای مناطق مختلف جهان، چاسیان تیتیس و همکاران [۱۹]، ۲۰۵ حرکت ثبت شده ناشی از ۹۸ زلزله بین سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۷۳ در کشور یونان را به‌منظور پیش‌بینی معادله‌ی شدت آریاس و جابه‌جایی نیومارک در این منطقه مورد بررسی قرار داده و در نهایت روابط کاهندگی مختص این کشور را به دست آوردند. تعیین نقش بارهای زلزله در وقوع انواع زمین‌لغزش‌ها از جمله مباحث جدید در بحث زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله می‌باشد. در این رابطه ژانگ و همکاران [۲۰] نقش بارهای زلزله را با استفاده از برنامه‌ی شبیه‌سازی DDA در زمین‌لغزش‌ها بررسی نمودند. در همین راستا لاکروکس و همکاران [۲۱] نیز با پردازش عکس‌های ماهواره‌ای و استفاده از نتایج ثبت شده از دستگاه‌های GPS اثر زلزله در وقوع زمین‌لغزش‌های آهسته را مورد ارزیابی قرار دادند. در بحث اثرات زیست‌محیطی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله نیز اخیراً مطالعاتی توسط افراد مختلف انجام شده است. از جمله آنها می‌توان به مطالعات چنگ و همکاران [۲۲] در رابطه با تأثیر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله و نچوان بر محیط‌زیست منطقه از جمله تراکم خاک‌ها و تأثیر بر رشد و ریشه‌ی درختان و پوشش گیاهی منطقه اشاره کرد.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد موضوع اثرات زیست‌محیطی پدیده‌های پس از زلزله هنوز یکی از چالش‌های محققین این حوزه است. با توجه به اهمیت بررسی زمین‌لغزش‌ها به‌خصوص زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در ایران، در این تحقیق نیز تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌ها مورد توجه قرار گرفته است. به این منظور منطقه‌ای در اطراف رومرکز زلزله‌ی منجیل (۱۳۶۹، بزرگای ۷/۷ در مقیاس سطحی) به‌عنوان منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شده است. بر این اساس، در این مقاله ابتدا

مشخصات زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی آوج، رابطه‌ی بین بزرگی زمین‌لغزش، فاصله از رومرکز و فاصله از گسلش سطحی و فراوانی زمین‌لغزش‌های ناشی از این زلزله را مورد بررسی قرار داد. مطالعاتی توسط امینی حسینی و همکاران [۶] در ارتباط با زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی فیروزآباد کجور (هشتم خرداد ۱۳۸۳) انجام شده است. در همه‌ی این مطالعات به معرفی موقعیت برخی از زمین‌لغزش‌ها و مشخصات آنها پرداخته شده است. مهدویفر [۷] ضمن تحلیل زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌های منجیل، آوج و فیروزآباد کجور، سامانه‌ای را جهت مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور طراحی کرده است. رجیبی [۸] با توجه به شرایط متفاوت زمین‌شناسی ایران، نسبت به تهیه مدلی جهت پیش‌بینی احتمالاتی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله اقدام کرده است. باقری [۹] خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در محدوده‌ی تحت تأثیر زلزله‌ی سرعین (۱۳۷۵) را مورد بررسی قرار داده است. در مطالعه‌ای که توسط مهدویفر و همکاران [۱۰] انجام شده، خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی اهر-ورزقان (۱۳۹۱) با سه روش تحلیل سلسله‌مراتبی، روش ارزش اطلاعاتی و روش رگرسیون چند متغیره مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته در خصوص زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در سایر نقاط دنیا می‌توان به مطالعات کيفر [۱۱-۱۲] اشاره نمود. در این مطالعات کيفر ارتباط تعداد و خصوصیات زمین‌لغزش‌ها و پارامترهای زلزله مسبب را بررسی کرده است. جیسون [۱۳، ۱۵] و جیسون و همکاران [۱۴]، مقدار حرکت شیب را با استفاده از جابه‌جایی نیومارک پیش‌بینی کرده و معادلاتی جهت ایجاد ارتباط بین جابه‌جایی نیومارک و خصوصیات زمین و زلزله ارائه نموده است. جیسون [۱۶] در مطالعه‌ای جداگانه به بررسی روش‌های ارزیابی پایداری شیب‌ها در هنگام زلزله پرداخته است. سانگ و همکاران [۱۷] خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در منطقه بیچوان چین را با استفاده از روش ترکیبی BN (Bayesian Network) بررسی کردند. در زمینه‌ی بررسی توزیع آماری زمین‌لغزش‌ها در منطقه‌ی تحت



شکل (۱): نقشه‌ی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی منجیل در محدوده‌ی این مطالعه [۲]

۳- بررسی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌های منطقه‌ی مورد مطالعه

در این مطالعه به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله ضمن بررسی نقشه‌ی فهرست زمین‌لغزش‌های منطقه‌ی مورد مطالعه، با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی، اقلیمی، عوامل انسانی و زیست‌محیطی منطقه و استفاده از مطالعات تطبیقی، هفت عامل مؤثر در وقوع این پدیده شامل ارتفاع دامنه، شیب، شدت آریاس، زاویه‌ی اصطکاک، چسبندگی، انحنا و جهت شیب؛ شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3 تهیه شدند. به این منظور ابتدا لایه‌ی اطلاعاتی مدل ارتفاع رقومی از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه استخراج شده و لایه‌های اطلاعاتی شیب، جهت شیب و انحنا دامنه از روی این مدل به دست آمد. همچنین لایه‌ی اطلاعاتی شدت آریاس از رقومی نمودن نتایج داده‌های اولیه به دست آمده از مطالعات رجی [۸] تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی نیز با تهیه‌ی نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه، بازدیدهای میدانی و تعیین خصوصیات ژئومکانیکی واحدهای زمین‌شناسی و سپس رقومی کردن نتایج به دست آمده تهیه شدند. به این منظور پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی بر اساس تشابه سنگ‌شناسی و مطالعات درزه‌نگاری مطابق با معیار اندیس

عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در منطقه‌ی مورد مطالعه بررسی شده و سپس نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر وقوع این نوع زمین‌لغزش‌ها با استفاده از روش آماری ارزش اطلاعاتی و روش نیمه کیفی تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تهیه شده است.

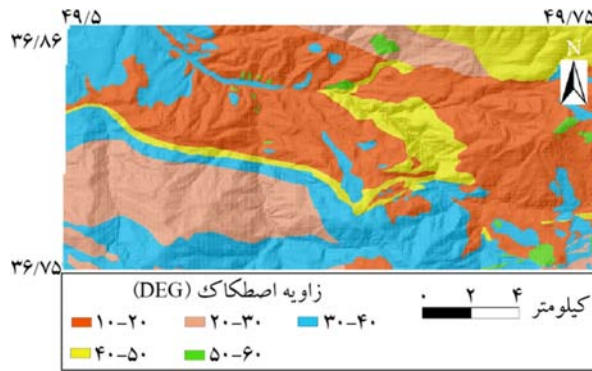
۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه بین طول‌های $۴۹^{\circ}۳۰'$ و $۴۹^{\circ}۴۵'$ و عرض‌های $۳۶^{\circ}۰۰'۴۵''$ و $۳۶^{\circ}۳۰'۵۲''$ به مساحت $۳۰۹/۳۰$ کیلومتر مربع در محدوده‌ی تحت تأثیر زلزله منجیل واقع شده است (شکل ۱). نزدیک‌ترین و دورترین فاصله‌ی رومرکز زلزله‌ی منجیل به منطقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب $۲۰/۶۴$ و $۴۲/۴۳$ کیلومتر است. مرکز سطحی زلزله در $۲۰/۶۴$ کیلومتری گوشه‌ی شمال غربی منطقه‌ی مورد مطالعه واقع شده است. این زلزله به لحاظ بزرگی و وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از آن یکی از مهم‌ترین زلزله‌های تاریخ ایران محسوب می‌گردد که طی مطالعات مختلف، مهم‌ترین زمین‌لغزش‌های ناشی از آن فهرست شده‌اند. در اثر وقوع زلزله‌ی منجیل صدها زمین‌لغزش به وقوع پیوست که برخی از آنها موجب بسته شدن جاده‌های کوهستانی و بخش‌هایی از جاده‌ی اصلی قزوین-رشت شد. علاوه بر این، تعداد بسیار زیادی از خانه‌های روستایی، باغات، مزارع و سیستم‌های آبرسانی در اثر وقوع این زمین‌لغزش‌ها تخریب و بیش از ۲۰۰ نفر از اهالی به‌طور مستقیم در اثر بروز این پدیده جان خود را از دست دادند [۴]. در محدوده‌ی مورد مطالعه زمین‌لغزش‌های زیادی به وقوع پیوسته است اما با توجه به اینکه این زمین‌لغزش‌ها توسط محققین مختلف و ماه‌ها پس از زلزله‌ی منجیل ثبت شده‌اند، آثار زمین‌لغزش‌های کوچک از بین رفته و تنها زمین‌لغزش‌های بزرگ گزارش شده‌اند. مهدویفر [۷] ضمن بررسی مطالعات سایر محققین و بررسی‌های صحرایی و مطالعه‌ی عکس‌های هوایی تعداد ۵۱ زمین‌لغزش ناشی از این زلزله را در محدوده‌ی مورد مطالعه گزارش کرده است (شکل ۱). این زمین‌لغزش‌ها به‌طور عمده در شیب‌های سنگی اتفاق افتاده و معمولاً از نوع زمین‌لغزش‌های گسسته می‌باشند.

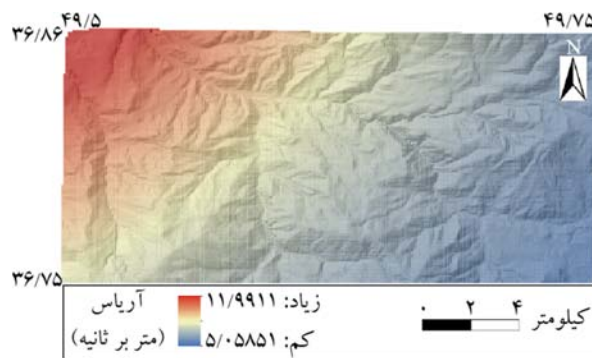
مقاومت زمین شناسی (GSI)؛ و استفاده از نرم افزار Roclab انجام شده است. شکل های (۲) تا (۸) لایه های اطلاعاتی عوامل مؤثر در پهنه بندی زمین لغزش های ناشی از زلزله ی منجیل در منطقه ی چلکاسر و چهار محل را نشان می دهد.

۴- روش تحقیق

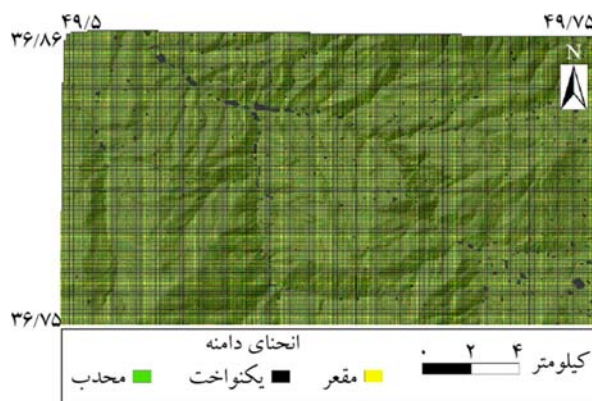
در این مطالعه از روش های تحلیل سلسله مراتبی و ارزش اطلاعاتی به منظور تهیه نقشه ی پهنه بندی زمین لغزش های ناشی از زلزله استفاده شده است.



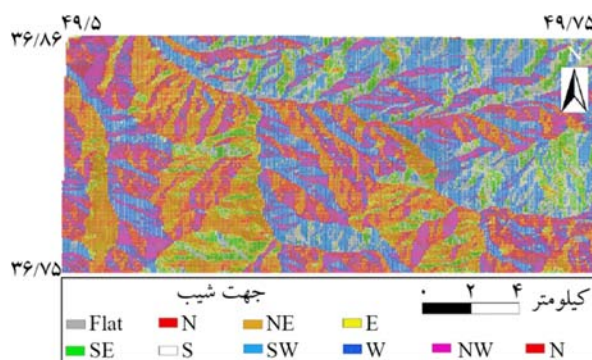
شکل (۵): لایه ی اطلاعاتی زاویه ی اصطکاک در منطقه ی مورد مطالعه



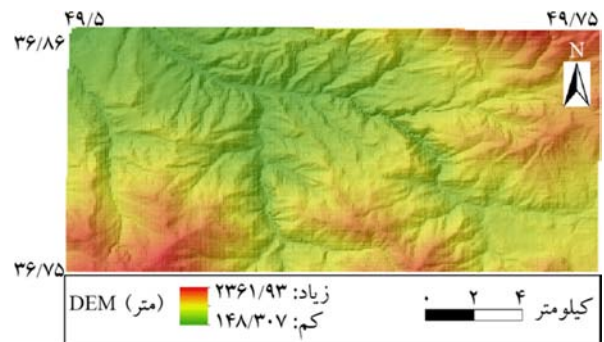
شکل (۶): لایه ی اطلاعاتی شدت آریاس در منطقه ی مورد مطالعه



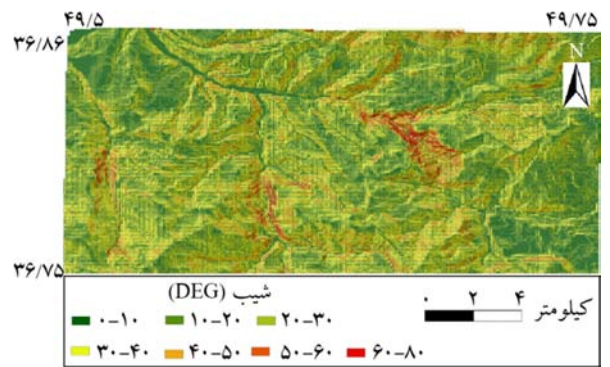
شکل (۷): لایه ی اطلاعاتی انحنای دامنه در منطقه ی مورد مطالعه



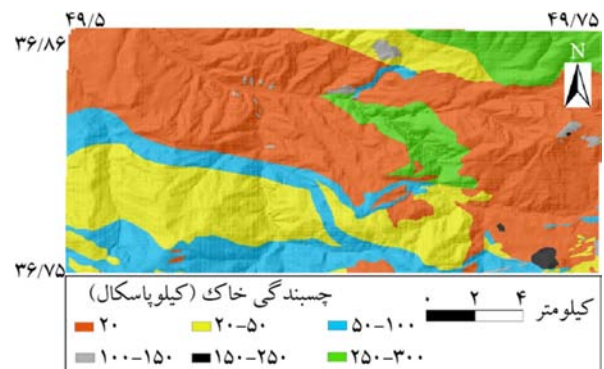
شکل (۸): لایه ی اطلاعاتی جهت شیب در منطقه ی مورد مطالعه



شکل (۲): لایه ی اطلاعاتی ارتفاع در منطقه ی مورد مطالعه



شکل (۳): لایه ی اطلاعاتی شیب در منطقه ی مورد مطالعه



شکل (۴): لایه ی اطلاعاتی چسبندگی در منطقه ی مورد مطالعه

۱-۴- روش تحلیل سلسله مراتبی

یکی از روش‌های استفاده شده در این پژوهش روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است. این روش یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و نیمه کیفی در مطالعه‌ی زمین‌لغزش است که شامل یک ماتریس وزن‌دهی بر مبنای مقایسات زوجی بین عوامل بوده و میزان مشارکت هر یک از عوامل را در وقوع زمین‌لغزش مشخص می‌کند [۲۳]. از مزایای این روش سهولت اعمال نظر کارشناسی توسط افراد خبره و کاهش احتمال خطا است. همچنین در این روش می‌توان تعداد زیادی از عوامل را دخالت داده و با استفاده از نظر کارشناسی وزن هر عامل را به دست آورد [۲۴].

در این روش برای تعیین ارجحیت معیارها و زیرمعیارهای مختلف و تبدیل قضاوت‌های کارشناسی از مقایسه‌ی زوجی استفاده می‌شود، به طوری که تصمیم‌گیرنده ارجحیت یک عامل را نسبت به عوامل دیگر به صورت جدول (۱) در نظر گرفته و این قضاوت‌ها را به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل می‌نماید [۲۵]. سپس نتایج این مقایسه‌ها، برای محاسبه‌ی وزن نسبی معیارها و زیرمعیارها، وزن نهایی زیرمعیارها و نیز محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری به نرم‌افزار Expert Choice 11.0 وارد می‌شود. اگر شاخص ناسازگاری محاسبه شده کمتر از ۰/۱ باشد نتایج قابل قبول بوده و در غیر این صورت باید دوباره در وزن‌دهی تجدید نظر شود. پس از محاسبه‌ی وزن نهایی زیرمعیارها، وزن‌های محاسبه شده را به جدول توصیفی لایه‌های اطلاعاتی عوامل مؤثر اضافه نموده و در نهایت نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ناشی از زلزله در منطقه به دست می‌آید.

جدول (۱): مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی [۲۵]

مقدار عددی	اهمیت پارامترها نسبت به یکدیگر
۱	اهمیت برابر
۳	اهمیت متوسط
۵	اهمیت قوی
۷	اهمیت خیلی قوی
۹	اهمیت فوق‌العاده قوی
۸، ۶، ۴، ۲	اهمیت بین فواصل

۲-۴- روش ارزش اطلاعاتی

این روش ابتدا توسط یان و یان [۲۶] معرفی شد. در این روش رخداد زمین‌لغزش به عنوان متغیر وابسته و هر یک از عوامل ذاتی و محیطی به عنوان متغیرهای مستقل تلقی می‌شوند و میزان اثر هر یک از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، مستقل از دیگری ارزیابی می‌گردد. مطابق با این روش، تحلیل نهایی پتانسیل ناپایداری برای هر واحد از منطقه بر اساس مجموع اثر تمام عوامل موجود در آن انجام شده و وزن‌های واقعی هر رده از لایه‌های اطلاعاتی و ارزش اطلاعاتی هر واحد، به واسطه‌ی جمع مقادیر ارزش برای عوامل مختلف آن لایه اطلاعاتی محاسبه می‌گردد. ارزش اطلاعاتی عوامل مختلف، از تقسیم درصد سطحی لغزشی پارامتر به درصد سطحی لغزشی متوسط منطقه و محاسبه‌ی لگاریتم نبر (Ln) آن نسبت به دست می‌آید. عدد حاصله را ارزش اطلاعاتی تراکم لغزش می‌نامند. در این روش نرخ مربوط به هر طبقه از عوامل مؤثر از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$W_i = Ln\left(\frac{Densclass}{Densmap}\right)^{\frac{1}{n}} = Ln\left(\frac{\frac{Npix(S_i)}{Npix(N_i)}}{\left(\frac{\sum Npix(S_i)}{\sum Npix(N_i)}\right)^{\frac{1}{n}}}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

که در آن W_i ؛ وزن مربوط به طبقه‌ی مشخص از یک پارامتر، $Densclass$ ؛ تراکم زمین‌لغزش در طبقه‌ی مشخص از یک پارامتر، $Densmap$ ؛ تراکم زمین‌لغزش در کل محدوده، $Npix(S_i)$ ؛ تعداد سلول‌ها یا مساحت زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در هر طبقه از پارامتر و $Npix(N_i)$ ؛ تعداد سلول‌ها یا مساحت کل هر طبقه از پارامتر می‌باشند. در نهایت با توجه به نرخ‌های به دست آمده برای کلاس‌های عوامل مختلف، نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی زمین‌لغزش به دست می‌آید. برای این کار ابتدا لایه‌ها با توجه به نرخ‌های به دست آمده تهیه شده و سپس با روی هم‌گذاری و جمع کردن ارزش پیکسل‌ها برای عوامل مختلف نقشه‌ی نهایی به دست می‌آید [۲۷].

۵- یافته‌های تحقیق

۵-۱- وزن دهی به معیارها و زیرمعیارها در روش AHP

پس از اینکه قضاوت بین معیارها و زیرمعیارها توسط کارشناسان و بر اساس جدول (۱) صورت گرفت، نتایج این مقایسه‌ها به منظور محاسبه‌ی وزن نسبی عوامل و طبقات آنها و در نهایت وزن نهایی زیرمعیارها، همچنین تعیین میزان ناسازگاری قضاوت‌ها در نرم‌افزار Expert Choice 11.0 وارد شد. جدول (۲) میزان ناسازگاری قضاوت‌ها را در مدل AHP نشان می‌دهد. تمامی مقادیر ناسازگاری‌ها در جدول (۲) کمتر از ۰/۱ به دست آمده است و به این ترتیب بر اساس شاخص‌های تعریف شده در روش تحلیل سلسله‌مراتبی تمامی قضاوت‌های صورت گرفته قابل قبول است. در جدول (۳) قضاوت صورت گرفته و وزن‌های نسبی محاسبه شده برای معیارها و در جدول (۴) قضاوت صورت گرفته بین زیرمعیارها و همچنین وزن‌های نسبی و نهایی حاصل شده توسط نرم‌افزار ارائه شده است. در این جداول هر چه میزان

جدول (۲): مقادیر نرخ ناسازگاری مدل‌های AHP

مدل‌ها	نرخ ناسازگاری‌ها
شدت آریاس	۰/۰۶
زاویه اصطکاک	۰/۰۲
شیب	۰/۰۲
چسبندگی	۰/۰۲
جهت شیب	۰/۰۲
ارتفاع	۰/۰۴
انحنای دامنه	۰/۰۳
کل سیستم	۰/۰۴

وزن نسبی و نهایی به دست آمده برای معیارها و زیرمعیارها بیشتر باشد تأثیر آن معیار و زیر معیار در بروز زمین لغزش ناشی از زلزله بیشتر است و برعکس عدد کمتر نشان‌دهنده‌ی تأثیر کمتر عامل در بروز زمین لغزش می‌باشد. نکته اینکه، وزن نهایی محاسبه شده برای زیرمعیارها از ضرب وزن نسبی هر عامل مؤثر در وزن نسبی هر زیر معیار از آن عامل به دست می‌آید.

جدول (۳): ماتریس مقایسه‌ی زوجی و وزن‌های نسبی محاسبه شده برای عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش به روش AHP

وزن نسبی	مقایسه‌ی زوجی ماتریس									عوامل مؤثر
	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
										عوامل مؤثر
۰/۳۲			۹	۷	۵	۳	۲	۲	۱	شدت آریاس (۱)
۰/۲۳			۷	۷	۵	۳	۱	۱		زاویه اصطکاک (۲)
۰/۱۹			۷	۵	۳	۲	۱			شیب (۳)
۰/۱۳			۷	۵	۳	۱				چسبندگی (۴)
۰/۰۸			۵	۵	۱					جهت شیب (۵)
۰/۰۳			۳	۱						ارتفاع (۶)
۰/۰۲			۱							انحنای دامنه (۷)

جدول (۴): ماتریس مقایسه‌ی زوجی و وزن‌های نسبی و نهایی محاسبه شده برای زیرمعیارهای عوامل مؤثر به روش AHP

وزن نهایی	وزن نسبی	مقایسه‌ی زوجی ماتریس									زیرمعیارهای عوامل
		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۰/۰۱۱	۰/۲۶			۵	۳	۳	۳	۲	۱	۱	(۱) ۵۰-۶۰
۰/۰۲۱	۰/۲۵			۴	۳	۳	۳	۲	۱		(۲) ۴۰-۵۰
۰/۰۲۹	۰/۱۷			۴	۳	۲	۲	۱			(۳) ۳۰-۴۰
۰/۰۴۳	۰/۱۱			۳	۲	۲	۱				(۴) ۲۰-۳۰
۰/۰۶۶	۰/۰۸			۱	۱	۱					(۵) ۱۰-۲۰
۰/۰۶۷	۰/۰۷			۲	۱						(۶) >۶۰
۰/۰۱۹	۰/۰۴			۱							(۷) ۰-۱۰

ادامه جدول (۴)

وزن نهایی	وزن نسبی	مقایسه‌ی زوجی ماتریس									زیرمعیارهای عوامل	
		۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۰۰۸	۰/۴۸							۵	۱	۱	محدب (۱)	انحنای دامنه
۰/۰۰۷	۰/۴۱							۳	۱		مقعر (۲)	
۰	۰/۱۱							۱			صاف (۳)	
۰/۰۰۴	۰/۲۲	۷	۶	۴	۳	۳	۲	۲	۱	۱	(۱) ۸۰۰-۱۰۰۰	ارتفاع
۰/۰۰۵	۰/۲۱	۶	۵	۳	۳	۳	۳	۲	۱		(۲) ۱۴۰۰-۱۶۰۰	
۰/۰۱۰	۰/۱۸	۶	۵	۴	۴	۳	۲	۱			(۳) ۴۰۰-۶۰۰	
۰/۰۰۳	۰/۱۳	۵	۵	۳	۳	۲	۱				(۴) ۱۰۰۰-۱۲۰۰	
۰/۰۱۲	۰/۰۸	۵	۳	۲	۲	۱					(۵) ۲۰۰-۴۰۰	
۰/۰۰۷	۰/۰۶	۴	۳	۱	۱						(۶) ۱۴۸-۲۰۰	
۰/۰۰۲	۰/۰۶	۳	۳	۱							(۷) ۶۰۰-۸۰۰	
۰/۰۱۲	۰/۰۴	۳	۱								(۸) ۱۲۰۰-۱۴۰۰	
۰/۰۰۱	۰/۰۲	۱									(۹) ۱۶۰۰-۲۳۶۲	
۰/۰۰۷	۰/۴۶				۹	۷	۵	۵	۳	۱	(۱) >۱۰	شدت آریاس
۰/۰۱۲	۰/۲۴				۷	۵	۳	۳	۱		(۲) ۹-۱۰	
۰/۰۲۲	۰/۱۴				۵	۵	۲	۱			(۳) ۸-۹	
۰/۰۳۴	۰/۰۹				۳	۳	۱				(۴) ۷-۸	
۰/۰۶۰	۰/۰۵				۳	۱					(۵) ۶-۷	
۰/۱۱۵	۰/۰۳				۱						(۶) ۵-۶	
۰/۰۴۷	۰/۳۸				۶	۵	۴	۳	۲	۱	(۱) ۰-۲۰	چسبندگی
۰/۰۳۰	۰/۲۵				۵	۴	۳	۲	۱		(۲) ۲۰-۵۰	
۰/۰۱۹	۰/۱۶				۴	۳	۲	۱			(۳) ۵۰-۱۰۰	
۰/۰۱۲	۰/۱۰				۳	۲	۱				(۴) ۱۰۰-۱۵۰	
۰/۰۰۸	۰/۰۶				۲	۱					(۵) ۲۰۰-۲۵۰	
۰/۰۰۵	۰/۰۴				۱						(۶) ۲۵۰-۳۰۰	
۰/۰۸۴	۰/۴۲				۵	۴	۳	۲	۱		(۱) ۰-۲۰	زاویه اصطکاک
۰/۰۵۳	۰/۲۶				۴	۳	۲	۱			(۲) ۲۰-۳۰	
۰/۰۳۲	۰/۱۶				۳	۲	۱				(۳) ۳۰-۴۰	
۰/۰۲۰	۰/۱				۲	۱					(۴) ۴۰-۵۰	
۰/۰۱۲	۰/۰۶				۱						(۵) ۵۰-۶۰	
۰/۰۱۷	۰/۲۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۲	۱	(۱) E	جهت شیب
۰/۰۰۲	۰/۱۹	۷	۵	۴	۴	۳	۲	۱	۱		(۲) NE	
۰/۰۱۸	۰/۱۶	۵	۵	۳	۳	۲	۲	۱			(۳) Flat	
۰/۰۲۸	۰/۱	۴	۳	۳	۲	۱	۱				(۴) NW	
۰/۰۰۵	۰/۰۹	۵	۳	۳	۲	۱					(۵) W	
۰/۰۰۳	۰/۰۵	۳	۲	۱	۱						(۶) SW	
۰/۰۰۵	۰/۰۵	۳	۲	۱							(۷) SE	
۰/۰۰۹	۰/۰۳	۳	۱								(۸) S	
۰/۰۱۰	۰/۰۲	۱									(۹) N	

۵-۲- وزن دهی به زیر معیارها در روش ارزش اطلاعاتی

(۱) در تعیین وزن طبقات مختلف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مربوط به نرخ طبقه‌های مختلف در جدول (۶) بیان شده است. در این جدول هر چه نرخ به دست آمده برای هر یک از طبقات معیارها بیشتر باشد تأثیر آن زیر معیار در وقوع زمین لغزش بیشتر است و عدد کمتر در این جدول تأثیر کمتری در وقوع زمین لغزش‌های ناشی از زلزله دارد. بر اساس نتایج به دست آمده از این جدول زیر معیار ۱۱/۹۹-۱۰ متر بر ثانیه شدت آریاس و زیر معیار صاف از معیار انحنای دامنه به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در ایجاد زمین لغزش‌ها دارا می‌باشند.

در روش ارزش اطلاعاتی برای تعیین نرخ مربوط به هر طبقه از عوامل ابتدا می‌بایست نقشه‌ی فهرست زمین لغزش‌ها با نقشه‌های عوامل مؤثر تلفیق شود. به این منظور در این مطالعه ابتدا دو سوم از زمین لغزش‌های به وقوع پیوسته در منطقه به صورت تصادفی انتخاب شده و یک سوم زمین لغزش‌های باقی مانده برای صحت سنجی نقشه‌های پهنه‌بندی خطر مورد استفاده قرار گرفت. نقشه‌ی دو سوم زمین لغزش‌ها با لایه‌ی اطلاعاتی هر یک از عوامل مؤثر در محیط نرم افزار Arc GIS با یکدیگر تلفیق شده و نتایج حاصل از آن با استفاده از رابطه

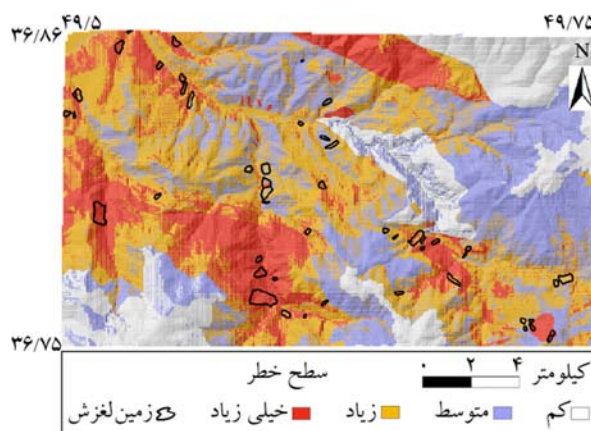
جدول (۶): نرخ محاسبه شده برای طبقات عوامل مؤثر به روش ارزش اطلاعاتی

عوامل مؤثر	طبقات عوامل	نرخ به دست آمده از روش ارزش اطلاعاتی	عوامل مؤثر	طبقات عوامل	نرخ به دست آمده از روش ارزش اطلاعاتی
شدت آریاس	۵-۶	-۰/۱۳۹	شیب	۰-۱۰	-۰/۰۷۵
	۶-۷	-۰/۱۵۱		۱۰-۲۰	-۰/۳۵۳
	۷-۸	۰/۲۲۵		۲۰-۳۰	-۰/۰۵۷
	۸-۹	-۰/۲۲۷		۳۰-۴۰	-۰/۱۰۳
	۹-۱۰	۰/۰۵۵		۴۰-۵۰	۰/۴۶۳
	>۱۰	۰/۴۸۱		۵۰-۶۰	۱/۷۹۴
زاویه اصطکاک	۰-۲۰	-۰/۶۹۶	چسبندگی	>۶۰	۰/۶۶۱
	۲۰-۳۰	۰/۷۲۲		۰-۲۰	-۰/۲۴۹
	۳۰-۴۰	۰/۰۳۹		۲۰-۵۰	۰/۵۸۷
	۴۰-۵۰	-۰/۵۴۸		۵۰-۱۰۰	-۰/۱۵۰
انحنای دامنه	۵۰-۶۰	۱/۳۷۹	جهت شیب	۱۰۰-۱۵۰	۰/۳۹۴
	مقعر	۰/۰۱۴		۲۰۰-۲۵۰	۲/۳۱۵
ارتفاع دامنه	صاف	-۰/۰۰۷	جهت شیب	۲۵۰-۳۰۰	-۵/۶۱۵
	محدب	۰/۰۰۳		FLAT	۰/۱۵۱
	۱۴۸-۲۰۰	-۰/۳۹۴		N	۰/۱۳۶
	۲۰۰-۴۰۰	۰/۸۲۷		NE	۰/۴۸۳
	۴۰۰-۶۰۰	۰/۰۶۵		E	۰/۶۸۴
	۶۰۰-۸۰۰	-۰/۵۱۴		SE	-۰/۸۰۱
	۸۰۰-۱۰۰۰	۱/۰۳۱		S	-۰/۷۸۰
	۱۰۰۰-۱۲۰۰	۰/۳۱۷		SW	-۰/۸۸۷
	۱۲۰۰-۱۴۰۰	-۰/۸۲۵		W	-۰/۶۱۸
	۱۴۰۰-۱۶۰۰	-۱/۳۳۹		NW	-۰/۵۴۴
۱۶۰۰-۲۴۰۰	-۶/۱۵۱	-	-	-	

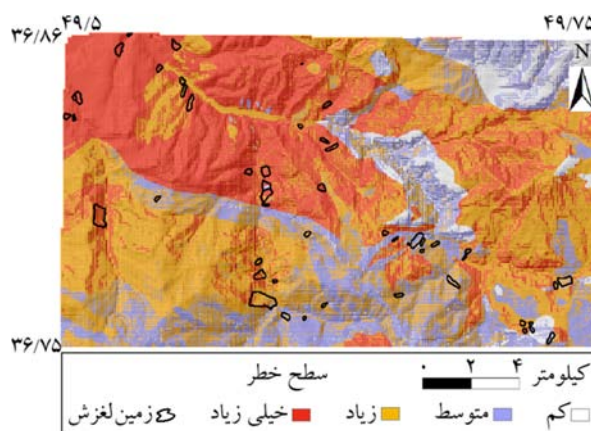
۵-۳- تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به

روش‌های مورد استفاده در این مطالعه

پس از اینکه در هر دو روش تحلیل سلسله مراتبی و ارزش اطلاعاتی وزن‌های هر یک از زیرمعیارهای عوامل مؤثر محاسبه شد، وزن‌های به دست آمده از هر دو روش در غالب یک ستون جدید (هر روش یک ستون) به جدول توصیفی لایه‌های اطلاعاتی عوامل مؤثر اضافه شده و با توجه به نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی با در نظر گرفتن چهار پهنه خطر کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ناشی از زلزله برای منطقه چلکاسر و چهارمحل با استفاده از دو روش تحلیل سلسله مراتبی و ارزش اطلاعاتی تهیه شد (شکل‌های ۹ و ۱۰).



شکل (۹): نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ناشی از زلزله به روش AHP در منطقه‌ی چلکاسر و چهارمحل



شکل (۱۰): نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ناشی از زلزله به روش ارزش اطلاعاتی در منطقه‌ی چلکاسر و چهارمحل

۶- بحث

در این مطالعه به منظور صحت‌سنجی و ارزیابی دقت مدل‌ها از دو شاخص مجموع کیفیت (QS) و دقت روش (P) استفاده شده است. برای این کار ابتدا نقشه‌ی یک سوم زمین‌لغزش‌ها با نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده در این مطالعه قطع داده شده و با استفاده از روابط حاکم بر هر روش مقدار دو پارامتر QS و P محاسبه شده‌اند. به منظور تعیین شاخص QS، ابتدا با استفاده از رابطه (۲) نسبت تراکمی محاسبه می‌گردد.

$$D_r = \frac{\frac{S_i}{A_i}}{\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n A_i}} \quad (2)$$

در این رابطه S_i ؛ مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر رده‌ی خطر، A_i ؛ مساحت زمین رده خطر در یک نقشه پهنه‌بندی و n تعداد رده‌های خطر است. شاخص QS نشان‌دهنده‌ی صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش است. معمولاً مقدار این شاخص برای روش‌های مختلف در گستره‌ی صفر و ۷ قرار می‌گیرد (هرچند از بعد نظری حدی برای آن وجود ندارد). در ارزیابی روش‌ها هر چه QS بیشتر باشد، آن روش صحت یا مطلوبیت بیشتری دارد. مقدار مجموع کیفیت از رابطه (۳) به دست می‌آید [۲۸].

$$Q_s = \sum_{i=1}^n ((D_r - 1)^2 \times S) \quad (3)$$

که در آن، Q_s ؛ مجموع کیفیت، D_r ؛ نسبت تراکم، S ؛ نسبت مساحت هر رده‌ی خطر به مساحت کل منطقه و n ؛ تعداد کلاس خطر می‌باشد.

همچنین مطابق رابطه (۴) شاخص P عبارت است از نسبت مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به مساحت کل آن پهنه‌ها [۲۹].

$$P = \frac{KS}{S} \quad (4)$$

در این رابطه، P شاخص دقت روش در پهنه‌های دارای خطر زیاد

جدول (۷): محاسبه‌ی پارامترهای QS و p به منظور مقایسه‌ی روش‌های مورد استفاده در این مطالعه

P	QS	D_f	L (%)	A (%)	L (Km^2)	A* (Km^2)	گستره لغزشی	روش
۰/۰۰۶	۰/۳۷	۰/۰۷۵	۲۰/۰۲۵	۶/۸۱	۰/۰۱۹	۲۱/۰۵	خطر کم	تحلیل سلسله مراتبی (AHP)
		۰/۱۸۸	۱۴/۹۴۷	۲۰/۱۲	۰/۱۴۰	۶۲/۲۲	خطر متوسط	
		۰/۱۹۵	۳۲/۴۰۱	۴۲/۰۸	۰/۳۰۲	۱۳۰/۱۲	خطر زیاد	
		۰/۴۱۳	۵۰/۶۲۷	۳۰/۹۹	۰/۴۷۳	۹۵/۸۴	خطر خیلی زیاد	
۰/۰۰۸	۰/۵۱	۰	۰/۰۰	۱۸/۵۴۸	۰/۰۰	۵۷/۳۵۶	خطر کم	ارزش اطلاعاتی
		۰/۵۲۴	۱۵/۲۳۶	۲۹/۰۸۸	۰/۱۴۲	۸۹/۹۴۸	خطر متوسط	
		۱/۳۷	۴۶/۷۷۰	۳۴/۱۲۷	۰/۴۳۷	۱۰۵/۵۲۹	خطر زیاد	
		۲/۰۸۳	۳۷/۹۹۴	۱۸/۲۳۷	۰/۳۵۵	۵۶/۳۹۳	خطر خیلی زیاد	

A*: مساحت گستره؛ L: سطح لغزشی؛ D_f : نسبت تراکم؛ QS: مجموع کیفیت؛ P: شاخص دقت

۷- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی زمین‌لغزش‌ها به‌خصوص زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله نوعی حرکات دامنه‌ای هستند که منجر به جابه‌جایی مواد سطحی در دامنه‌های پرشیب می‌شود. داشتن اطلاعات کافی در خصوص مناطق مستعد زمین‌لغزش، جهت کاهش خسارات احتمالی ضروری است و پهنه‌بندی خطر با مدل‌های مناسب یکی از اقدامات اساسی در مدیریت خطر مناطق مختلف کشور محسوب می‌شود. در این مطالعه برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی منجیل در منطقه‌ی چلکاسر و چهارمحل در محدوده‌ی زلزله‌ی منجیل، هفت عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. بعد از تهیه‌ی نقشه‌ی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش، با استفاده از دو روش تحلیل سلسله مراتبی و ارزش اطلاعاتی، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ناشی از زلزله با استفاده از دو روش مذکور برای منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه شد. در روش اول تعیین ارجحیت معیارها و زیرمعیارها طبق نظرات کارشناسی صورت گرفت و در نهایت وزن نهایی زیرمعیارها محاسبه شد؛ و در روش دوم نیز برای وزن‌دهی به زیرمعیارهای هر یک از عوامل مؤثر از زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در روش AHP ارجحیت نسبی عوامل به ترتیب شامل عامل شدت آریاس، زاویه‌ی اصطکاک،

و خیلی زیاد، KS مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های دارای خطر زیاد و خیلی زیاد و K مساحت کل پهنه‌های خطر مرتبط می‌باشد. جدول (۷) نتایج به دست آمده برای شاخص‌های فوق را نشان می‌دهد.

نتایج به دست آمده از مقایسه‌های زوجی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش بر اساس روش AHP نشان می‌دهد که ارجحیت نسبی عوامل مؤثر به ترتیب شامل عوامل شدت آریاس، زاویه‌ی اصطکاک، شیب، چسبندگی، جهت شیب، ارتفاع و انحنا دامنه می‌باشد. بر این اساس بیشترین تأثیر برای زیرمعیار ۱۱/۵۴-۱۰ مربوط به عامل شدت آریاس و کمترین تأثیر نیز برای زیرمعیار صاف از عامل انحنا دامنه می‌باشد. همچنین با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده، در مدل به دست آمده از روش AHP، ۷۳ درصد و در مدل حاصل از روش ارزش اطلاعاتی، ۵۲ درصد از سطح منطقه را پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد تشکیل داده‌اند. طبق نتایج به دست آمده از بررسی و ارزیابی دو روش، در روش تحلیل سلسله مراتبی مقدار شاخص مجموع کیفیت (QS) برابر ۰/۳۷ و مقدار دقت روش (P) برابر با ۰/۰۰۶ به دست آمد. این در حالی است که در روش ارزش اطلاعاتی مقدار مجموع کیفیت و دقت روش به ترتیب برابر ۰/۵۱ و ۰/۰۰۸ محاسبه شد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت، روش ارزش اطلاعاتی کارایی بهتری نسبت به مدل AHP داشته و نتایج حاصل از آن به واقعیت نزدیک‌تر است.

4. Jafari, M.K., Montazerolghaem, S., MahdaviFar, M.M., and Hedari, M. (2000) *Studies Related to the Earthquake in Alborz Landslides*. Institute of Earthquake Engineering and Seismology (in Persian).
 5. 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.
 6. Amini Hosseini, K., MahdaviFar, M.M., Keshavarz Bakhshayesh, M., Khazaei, B., Azadi, A., Sohrabi Bidar, A., Ravanfar, S.A., Kamalpoor, F., Rakhshandeh, M., and Banki, Sh. (2005) *Report of Identifying of Landslide Caused by the Earthquake 2005/6/8 Firozabad Kojour*. Institute of Seismology and Earthquake Engineering Research, **7**(2) (in Persian).
 7. MahdaviFar, M.R. (2006) *Risk Management Assessment System Analysis and Design Landslides Caused by the Earthquake in the Country*. Ph.D. Thesis, Institute of Seismology and Earthquake Engineering (in Persian).
 8. Rajabi, A.M. (2010) *Investigation of the Possible Risk of Landslides Caused by the Earthquake in Iran*. Ph.D. Thesis, Faculty of Science, Tarbiat Modarres University (in Persian).
 9. Bagheri, V. (2012) *Zoning Landslides Caused by Earthquakes (Earthquakes Ardebil Case Study)*. Master Thesis, University of Tehran (in Persian).
 10. MahdaviFar, M., Askari, F., Memarian, P., and Seyedimorad, M. (2016) Earthquake-induced rock fall hazard zonation of Varzeghan-Ahar region in northwest Iran: a comparison of quantitative and qualitative approaches. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **18**(2).
 11. Keefer, D.K. (2000) Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution – the 1989 Loma Prieta, California event. *Engineering Geology*, **58**, 231-249.
 12. Keefer, D.K. (2013) Investigating landslides caused by earthquakes – a historical review. *Surveys in Geophysics*, **23**, 473-510.
 13. Jibson, R.W. (1993) *Predicting Earthquake-*
- شیب، چسبندگی، جهت شیب، ارتفاع و انحنا می‌باشد. همچنین با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده، در روش AHP، ۷۳ درصد و در روش ارزش اطلاعاتی ۵۲ درصد از سطح منطقه را پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد تشکیل داده‌اند که نشان‌دهنده‌ی حساسیت بالای منطقه‌ی مورد مطالعه به پدیده‌ی زمین‌لغزش ناشی از زلزله می‌باشد.
- طبق نتایج به دست آمده از بررسی و ارزیابی دو روش، در روش تحلیل سلسله مراتبی مقدار شاخص مجموع کیفیت (QS) برابر ۰/۳۷ و مقدار دقت روش (P) برابر با ۰/۰۰۶ به دست آمد. این در حالی است که در روش ارزش اطلاعاتی مقدار مجموع کیفیت و دقت روش به ترتیب برابر ۰/۵۱ و ۰/۰۰۸ محاسبه شد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت، روش ارزش اطلاعاتی کارایی بهتری نسبت به مدل AHP داشته و نتایج حاصل از آن به واقعیت نزدیک‌تر است. به علاوه اینکه این روش در تفکیک پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد نیز بهتر عمل می‌نماید.
- ### سپاسگزاری
- نویسندگان در پایان لازم می‌دانند از دکتر پرهام معماریان و مهندس علی عدالت به جهت همکاری‌های ارزشمندشان در انجام این مطالعه کمال تشکر و قدردانی نمایند.
- ### مراجع
1. Keefer, D.K. (1984) Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, **95**(4), 406-421.
 2. Komakpanah, A. and Hafezimoghadas, N. (1993) *Landslide zone in Iran, Volume 6: Identify and to Map Important Landslide Triggered by the Earthquake of May 1369 Manjil*. Institute of Seismology and Earthquake Engineering (in Persian).
 3. Nogolsadat, M. (1996) *Drift Master Plan of Gilan Province*. Client: Earthquakes and Landslides Layer of the Earth Sub-Committee for Planning and Architecture Department of Housing and Urban Development Department (in Persian).

- landslides on soil physical properties and tree growth. *Proceeding of International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology (iCBEB)*.
23. 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.
24. Godsi Poor, H. (2009) *Analytic Hierarchy Process*. Seventh Edition, Tehran's Amirkabir University Press (in Persian).
25. Saaty, T.L. (1986) Axiomatic foundation of analytical hierarchy process. *Journal of Management Science*, **31**(7) 841- 855.
26. Yin, K.J. and Yan, T.Z. (1988) Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceeding of the 5th International Symposium on Landslides Lausanne, Switzerland*, **2**, 1269-1272.
27. Pradhan, B., Singh, R.P., and Buchroithner, M.F. (2006) Estimation of stress and its use in evaluation of landslide prone regions using remote sensing data. *Advances in Space Research*, **37**, 698-709.
28. Gee, M.D. (1992) Classification of river basin, central Italy. *Environmental Management*, **25**, 247-263.
29. Jade, S. and Sarkar, S. (1993) Statistical Models for Slope Instability. *Classifications Engineering Geology*, **36**, 91-98.
14. Jibson, R.W., Harp, E., and Michael, J. (2000) A Method for producing digital Probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, **58**, 271-289
15. Jibson, R.W. (2007) Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, **91**(2-4), 209-218.
16. Jibson, R.W. (2011) Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes-A retrospective. *Engineering Geology*, **122**(1), 43-50.
17. Song, Y., Gong, J., Gao, S., Wang, D., Cui, T., Li, Y., and Wei, B. (2012) Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: A case study in Beichuan, China. *Computer and Geosciences*, **42**, 189- 199.
18. Chong, X., Xiwei, X., Shyu, J., Bruce, H., Zheng, W., and Min, W. (2014) Landslides triggered by the 22 July 2013 Minxian-Zhangxian, China, Mw 5.9 earthquake: Inventory compiling and spatial distribution analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, **92**, 125-142.
19. Chousianitis, K., Del Gaudio, V., Kalogeras, I., and Ganas, A. (2014) Redictive model of Arias intensity and Newmark displacement for regional scale evaluation of earthquake-induced landslide hazardin Greece. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **65**, 11-29.
20. Zhang, Y., Wang, J., Xu, Q., Chen, G., Zhao, J.X., Zheng, L., Han Z., and Yu, P. (2014) DDA validation of the mobility of earthquake-induced landslides. *Engineering Geology*, **198**, 38-51.
21. Lacroix, P., Berthier, E., and Maquerhua E.T. (2015) Earthquake-driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca valley, Peru, detected from Pléiades images. *Remote Sensing of Environment*, **165**, 148-158.
22. Cheng, S., Yu, H., Yang G., Yang, R., Liu, Y., Zhang, Z., Xiong, G., Peng, B., Gao, Y., and Li, J. (2012) Impacts of Wenchuan Earthquake-induced

Comparison of Information Value Method and Analytical Hierarchy Process in the Earthquake-Induced Landslides Hazard Zonation (A Case Study)

Ali Mohammad Rajabi^{1*} and Hossein Khosravi²

1. Assistant Professor, School of Geology, Engineering Geology Department, University of Tehran, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: amrajabi@ut.ac.ir
2. M.Sc. Student, Geotechnical Engineering Department, University of Qom, Qom, Iran

Although many studies have been done on the landslide hazard zonation, landslide caused by the earthquake has received less attention. Analysis of features of landslides caused by the earthquake and their distribution is very important in recognizing landslide-prone areas for future earthquakes. The purpose of this study is to identify the effective factors and zonation of landslides caused by the earthquake through information value and Analytical Hierarchy Process (AHP) methods in the area near the epicenter of the Manjil earthquake with an area of 309.30 km. In this study, landslide hazard zonation caused by earthquake was performed by using bivariate regression (information value) and AHP, and the efficiency of these two methods were studied and compared. Hence, according to the landslides location, comparative studies and the results of other researchers, seven factors including Arias intensity, internal friction, cohesion, slope angle, aspect, direction, elevation and terrain rough, have been identified as the most important factors in the landslides caused by Manjil earthquake. Then, these factors were prepared in a Geographical Information System (GIS). All information and data for the initial analysis were imported into GIS, and zonation maps of the landslide caused by the earthquake were prepared with regard to the above-mentioned methods. For this purpose, in the information value method, the inventory map has been initially integrated with the maps of effective factors in the landslides occurrence. After calculating the weight of each subclass of factors and finally adding the results of the previous stage in the information layer table in the Arc GIS, landslide hazard zonation map was obtained by this method. Through using the expert opinions and the tables used in the AHP method, the effective criteria and sub-criteria in the occurrence of landslide caused by earthquakes in the study area were compared. Afterward, the results of these comparisons were placed in Expert Choice software, and the relative weights of each criteria and sub-criteria was obtained. Then, the obtained final weights were added to the effective factors information layer table. Finally, hazard zonation map of landslide caused by earthquake in the study area was obtained by this method. According to the results of AHP method, Arias intensity and terrain rough factors had highest and lowest impact on the landslide occurrence. The greatest impact for sub-criteria 10–11.54 is related to the Arias intensity, and minimum impact is related to the smooth sub-criteria of terrain rough factor. Further, according to the zonation maps obtained by these two methods, the models obtained from AHP and the information methods, high risk and very high risk zones have respectively constituted 73 and 52 percent of the region. After reviewing the efficiency of procedures employed in this study by using two quality sum (QS) and precision (P) indicators, the results showed that bivariate regression model is more appropriate than AHP method and its results are more consistent with reality.

Keywords: Manjil Earthquakes; Landslides Caused by Earthquake; Hierarchical Analysis; Value of Information