

کاربرد شبیه‌سازی مونت کارلو در تحلیل خطر زمین لغزش‌های ناشی از زمین لرزه (مطالعه موردی: زمین لرزه منجیل)

علی محمد رجبی^{۱*}، ماشاءاله خامه‌چیان^۲ و محمدرضا مهدوی‌فر^۳

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

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۱/۲۰

چکیده

یکی از مهم‌ترین اثرات زمین لرزه ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ منجیل ($M=7.7$)، ایجاد و تحریک زمین لغزش‌های بی‌شمار در مناطق زلزله‌زده بوده است. بررسی و تحلیل این زمین لغزش‌ها در محدوده متأثر از این زلزله در شناخت مناطق مستعد زمین لغزش، در زمین لرزه‌های آینده اهمیت بالایی دارد. در این مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو محدوده‌ای شامل چهارگوش‌های چلکاسر و چهار محل (منطقه‌ای در نزدیکی رومرکز زمین لرزه منجیل) به مساحت ۳۰۹/۳۰ کیلومتر مربع، مورد بررسی احتمالاتی برای پیش‌بینی زمین لغزش‌های ناشی از زمین لرزه قرار گرفته است. مقایسه پهنه‌های با خطر بالا در نقشه احتمالاتی به‌دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، با زمین لغزش‌های ناشی از زمین لرزه منجیل در محدوده مورد مطالعه همپوشانی قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، مونت کارلو، زمین لرزه منجیل، زمین لغزش‌های ناشی از زمین لرزه، احتمالاتی

*نویسنده مسئول: علی محمد رجبی

E-mail: amrajabi@ymail.com

۱- پیش‌گفتار

به‌طور کلی زمین لغزش‌ها به‌ویژه زمین لغزش‌های ناشی از زلزله، پدیده‌هایی هستند که سبب زیان‌های زیادی برای بشر، طی سال‌های اخیر شده است. (Plakfer & Galloway, 1989; Jibson et al., 2000; Jibson, 2007) هر چند به‌طور عام مطالعات زیادی در زمینه شناسایی و توصیف زمین لغزش‌ها انجام شده است ولی بررسی زمین لغزش‌های ناشی از زلزله به‌ویژه در ایران بسیار جوان است. زمین لرزه منجیل (۳۱ خرداد ۱۳۶۹ با بزرگای در مقیاس سطحی ۷/۷ ریشتر) از نظر بزرگی و رخداد زمین لغزش‌های ناشی از آن یکی از مهم‌ترین زلزله‌های تاریخ ایران به‌شمار می‌رود که طی مطالعات مختلف، مهم‌ترین زمین لغزش‌های ناشی از آن فهرست شده‌اند. گسترش مطالعات کمی و کیفی زمین لرزه‌هایی که مسبب زمین لغزش‌های زیادی بوده‌اند (مانند زلزله‌های منجیل، آوج و فیروزآباد کجور)، سبب افزایش شناخت از این‌گونه رویدادهای طبیعی و در نتیجه مدیریت خطرات ناشی از آنها می‌شود. امروزه تحلیل خطر زمین لغزش‌ها به‌روش‌های مختلف کیفی و کمی (تعینتی و احتمالاتی) انجام می‌شود. در روش‌های کمی یکی از دلایل پیدایش خطا در نتایج قطعیت نداشتن متغیرهای ورودی است. برای شبیه‌سازی نبود قطعیت‌های متغیرهای ورودی ساده‌ترین روش نمونه‌برداری تصادفی (تولید نمونه‌های تصادفی) از هر کدام از متغیرها به تعداد لازم (چندین تکرار) است تا توزیع واقعی آن متغیر مطابق با توزیع احتمالاتی تعریف شده به‌دست آید. معمول‌ترین روش برای این منظور روش شبیه‌سازی مونت کارلو است. در این نوشتار ابتدا به‌طور خلاصه به زمین‌شناسی و زمین لغزش‌های ناشی از زمین لرزه منجیل در چهارگوش‌های چهارمحل و چلکاسر در نزدیکی رومرکز زمین لرزه یاد شده به مساحت ۳۰۹/۳۰ کیلومتر مربع پرداخته شده است. در ادامه با استفاده از مدل احتمالاتی، با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو پهنه‌بندی خطر زمین لغزش برای بخش‌هایی از شمال ایران که تحت تأثیر زمین لرزه منجیل بوده‌اند، انجام شده است. در این مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ رومی و سپس نقشه DEM (مدل رقومی ارتفاعی) از نقشه توپوگرافی با همین مقیاس تهیه شده است. این نقشه پایه استخراج دیگر نقشه‌ها بوده است.

۲- موقعیت جغرافیایی منطقه

منطقه مورد مطالعه میان طول‌های ۳۰' ۴۹° و ۴۵' ۴۹° و عرض‌های ۰۰' ۴۵' ۳۵° و ۰۰' ۵۲' ۳۵° به مساحت ۳۰۹/۳۰ کیلومتر مربع قرار دارد (شکل ۱). نزدیک‌ترین و دورترین فاصله رومرکز زمین لرزه منجیل به منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۲۰/۶۴ و ۴۲/۴۳ کیلومتر است. به گونه‌ای که مرکز سطحی زمین لرزه در ۲۰/۶۴ کیلومتری گوشه شمال باختری منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳- زمین‌شناسی منطقه

در منطقه مورد مطالعه گوناگونی بالایی از مصالح زمین‌شناسی، در سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین تا رسوبات کواترنر دیده می‌شود. در البرز رسوبات ماسه‌سنگ سرخ‌رنگ تقریباً همه جا روی اینفراکامبرین قرار گرفته و هیچ‌گونه تغییراتی در رسوب‌گذاری و ویژگی‌های زمین‌ساختی در پالئوزویک رخ نداده است (آقاباتی، ۱۳۸۳).

در این منطقه رسوبات سیلورین و کربنیفر وجود ندارد که نشان‌دهنده ۲ دوره بالآمدگی در زمان‌های یاد شده است. سنگ‌های تریاس نیز با ناپوستگی فرسایشی روی نهشته‌های پرمن قرار می‌گیرند. ماسه‌سنگ‌ها، شیل‌ها و کنگلومراهای سازند شمشک که روی سطح فرسایش یافته قرار گرفته‌اند، به دلیل وجود فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های فراوان، سبزی بسیار متغیری را نشان می‌دهند. سنگ‌آهک لار (ژوراسیک میانی- بالایی) با سطح تماس هم‌شیب، سازند شمشک را پوشانده است. نهشته‌های دوره کرتاسه در بردارنده سنگ‌آهک، مارن و گدازه آتشفشانی هستند. سنگ‌های پالئوژن (بیشتر ائوسن) کنگلومرا، آهک نومولیت‌دار و مجموعه سنگی سازند کرج است که بیشترین رخنمون را در منطقه دارند. رسوبات کواترنر در حوضه‌های میان کوهستانی، پادگانه‌های آبرفتی و مخروطه‌افکنه‌ها با ناپوستگی فرسایشی، رسوبات کهن‌تر را پوشانده‌اند (آقاباتی، ۱۳۸۳). شکل ۲ نقشه واحدهای زمین‌شناسی رومی شده محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۴- زمین لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه منجیل

زمین لغزش‌های زیادی در اثر زمین‌لرزه منجیل ایجاد شده است که برخی از آنها موجب بسته شدن جاده‌های کوهستانی و بخش‌هایی از جاده اصلی قزوین-رشت شده‌اند. افزون بر این، شمار بسیار زیادی از خانه‌های روستایی، باغات، مزارع و سامانه‌های آب‌رسانی در اثر رخداد لغزش‌ها، ویران شده و بیش از ۲۰۰ نفر از اهالی به طور مستقیم در اثر این پدیده جان خود را از دست داده‌اند (کمک‌پناه و حافظی‌مقدس، ۱۳۷۲). مهدوی‌فر (۱۳۸۵) ضمن بررسی مطالعات دیگر پژوهشگران و بررسی‌های صحرایی و مطالعه عکس‌های هوایی، ۵۱ زمین‌لغزش ناشی از این زمین‌لرزه را در محدوده مورد مطالعه گزارش کرده است (شکل ۳).

۵- مدل احتمالاتی

در مباحث ژئوتکنیک، مسایل مربوط به پایداری شیب‌ها عدم قطعیت زیادی دارند؛ بی‌هنجاری‌های زمین‌شناسی، تغییرپذیری محلی و ذاتی ویژگی‌های مواد سازنده شیب‌ها، نبود داده‌های شاخص کافی، تغییر شرایط محیطی، سازوکارهای گسیختگی پیش‌بینی‌نشده، ساده‌سازی‌ها و تقریب‌زنی‌های پذیرفته شده در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیک و اشتباهات انسانی در طراحی و اجرا، فاکتورهای هستند که در عدم قطعیت‌ها سهم دارند. فاکتور ایمنی و در نتیجه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر که به وسیله روش‌های تعیینی (Deterministic) مرسوم محاسبه می‌شوند، به طور مستقیم نمی‌توانند اثر عدم قطعیت‌های موجود را وارد کنند. بنابراین برای کاهش نبود قطعیت‌های همراه با مدل‌های تعیینی، مدل‌های احتمالاتی (Probabilistic) گسترش یافته‌اند. در این روش‌ها خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه ابتدا به صورت کمی در می‌آید و سپس به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر ارائه می‌شوند، به‌ویژه با ترکیب کردن تغییرپذیری برخی از متغیرهای ورودی به مدل، این روش‌ها به صورت احتمالاتی خطر رخداد زمین‌لغزش‌ها را در زلزله‌های آینده پیش‌بینی می‌کنند. در ادامه تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از متغیرهای ژئوتکنیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک درونی) با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو در منطقه‌ای متأثر از زلزله منجیل مورد مطالعه قرار گرفته و سپس نقشه احتمالاتی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه بر پایه مقادیر شبیه‌سازی شده ارائه شده است.

۶- شبیه‌سازی مونت‌کارلو

برای شبیه‌سازی نبود قطعیت‌های متغیرهای ژئوتکنیکی ساده‌ترین شکل، نمونه‌برداری تصادفی (تولید نمونه‌های تصادفی) از هر کدام از متغیرها به تعداد لازم (چندین تکرار) است تا توزیع واقعی آن متغیر مطابق با توزیع احتمالاتی تعریف شده به دست آید. معمول‌ترین روش برای این منظور روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو است.

در تحلیل پایداری شیب‌ها، متغیرهای با درجات بالاتر عدم قطعیت به صورت تصادفی شبیه‌سازی می‌شوند. این متغیرها در بردارنده زاویه اصطکاک درونی، چسبندگی، وزن واحد حجم توده لغزشی و ژرفای سطح آب زیرزمینی است. در این روش شمار زیادی از متغیرهای خاک از راه توزیع احتمالاتی سازگار تولید می‌شوند. برای هر سری از متغیرهای ورودی مقدار مربوط به ضریب اطمینان با استفاده از مدل شیب بی‌نهایت یا مدل بلوک لغزشی نیومارک به دست می‌آید. در شبیه‌سازی مونت‌کارلو شمار زیادی از مقادیر ضریب اطمینان برای نمونه ۱۰۰۰ مقدار با تکرار ورود داده‌های متغیر تصادفی تولید می‌شود. در این مورد خروجی پایانی شبیه‌سازی حدود ۱۰۰۰ فاکتور ضریب اطمینان و یا مقادیر جابه‌جایی نیومارک است که می‌تواند به صورت نمودار و نقشه‌هایی نشان داده شود. شبیه‌سازی مونت‌کارلو دارای چهار مرحله زیر است:

۱) برای هر کدام از متغیرهای تصادفی ورودی، یک مقدار تصادفی با توجه به تابع چگالی احتمال آن انتخاب می‌شود.
 ۲) مقدار فاکتور ایمنی با استفاده از مدل‌های موجود (برای نمونه روش نیومارک) و با توجه به مقدار عددی انتخاب‌شده در مرحله اول، به دست می‌آید.
 ۳) مراحل ۱ و ۲ به تعداد بسیار زیادی تکرار می‌شوند و مقدار فاکتور ایمنی برای هر تکرار، به دست می‌آید.
 ۴) با استفاده از مقادیر عددی فاکتور ایمنی که از شبیه‌سازی مونت‌کارلو نتیجه شده‌اند (مراحل ۱، ۲ و ۳)، می‌توان احتمال رخداد شرایط نامطلوب (برای نمونه مقادیر جابه‌جایی بیشتر از یک مقدار آستانه‌ای) را به دست آورد.

۷- ارزیابی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه به روش احتمالاتی در منطقه مورد مطالعه

۷-۱. مدل نیومارک برای ارزیابی احتمالاتی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه: به دلیل مشکلات همراه با تعیین ضریب اطمینان دینامیکی، مدل جابه‌جایی نیومارک (Newmark, 1965)، به جای بسیاری از روش‌های معمول شبه‌استاتیکی در مدل‌های تحلیل پایداری لرزه‌ای شیب مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه برای تعیین جابه‌جایی نیومارک از رابطه ۱ (پیشنهادی برای منطقه البرز و ایران مرکزی؛ مهدوی‌فر، ۱۳۸۵) استفاده شده است.

$$\log D_N = 1.087 \log I_a - 7.176 a_g + 1.398 \pm 0.397 \quad (1)$$

که در آن D_N جابه‌جایی شیب بر پایه مدل نیومارک بر حسب سانتی‌متر، I_a شدت آریاس بر حسب متر بر ثانیه و a_g شتاب بحرانی بر حسب g است. شدت آریاس (Arias, 1970) نیز به‌عنوان متغیر زمین‌لرزه برای هر نقطه در پهنه مورد مطالعه با استفاده از رابطه لگاریتمی تجربی ارائه شده توسط مهدوی‌فر (۱۳۸۵)، برای منطقه البرز و ایران مرکزی (رابطه ۲)، مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\log I_a = -3.880 + 0.810M - \log R - 0.002R \quad (2)$$

که در آن I_a شدت آریاس بر حسب متر بر ثانیه، M بزرگی گشتاوری و R فاصله بر حسب کیلومتر است. روابط یادشده، در این بخش به عنوان ابزارهای محاسباتی ساده و قابل قبول برای ارزیابی جابه‌جایی نیومارک با داشتن متغیرهای ژئوتکنیکی و لرزه‌ای مشخص در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است.

۷-۲. انتخاب تابع توزیع مناسب: مدل نیومارک نیاز به در اختیار بودن چندین متغیر دارد که برخی از آنها از بازبدها و ارزیابی‌های صحرایی (مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک)، برخی از رکوردهای لرزه‌ای (شدت آریاس) و برخی از داده‌های توپوگرافی (برای نمونه نقشه شیب تهیه شده در محیط GIS) به دست آمده‌اند. در رابطه با داده‌های ژئوتکنیکی ویژگی‌های انواع خاک‌ها از روش‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند و تغییرپذیری مکانی آنها از راه نقشه‌های زمین‌شناسی استخراج می‌شوند. تعیین دقیق یک چنین ویژگی‌های معمولاً مشکل است، همچنین معمولاً مرز دقیق واحدهای سنگ‌شناسی در نقشه‌های زمین‌شناسی گزارش نمی‌شوند و فرض بر این است که این متغیرها برای واحدهای سنگ‌شناسی مختلف همگن است. افزون بر این معمولاً نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس منطقه‌ای دقت پایینی در توزیع مکانی متغیرها دارند. به دلایل بالا در نظر گرفتن متغیرهای مدل به صورت احتمالاتی منطقی‌تر از تعیینی و مقادیر ثابت است.

برای تحلیل احتمالاتی پایداری سطوح شیب‌دار باید نبود قطعیت موجود در متغیرهای ورودی تعیین شوند. این عدم قطعیت‌ها به وسیله توابع توزیع احتمال و مؤلفه‌های احتمالاتی (مانند مقدار میانگین و انحراف معیار و ...) بیان می‌شوند. انتخاب نوع تابع توزیع برای مدل کردن عدم قطعیت‌ها بخش مهمی از تحلیل است. در بیشتر طرح‌های ژئوتکنیک، اطلاعات کافی برای تعیین شکل تابع توزیع احتمال

شوند. مطابق با (Capolongo et al. (2002), Refice & Capolongo (2002) برای تعیین مقادیر کمینه متغیرهای ژئوتکنیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک درونی) برای هر یک از واحدهای موجود در منطقه مورد مطالعه، فرض وجود توده سنگ کاملاً خرد شده و برای مقادیر بیشینه، مقادیر به دست آمده برای سنگ دست نخورده برای هر یک از واحدها در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۱ متغیرهای آماری مورد استفاده در شبیه‌سازی مونت کارلو را نشان می‌دهد. بر پایه توزیع در نظر گرفته شده، جدول‌هایی از مقادیر عددی در بردارنده متغیرهای آماری ژئوتکنیکی برای هر یک از واحدها در نظر گرفته شده است.

این متغیرها برای انجام یک سری شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است؛ به گونه‌ای که نمونه‌های تصادفی از هر یک از این متغیرها با توزیع مورد نظر تولید و سپس با معادلات نیومارک ترکیب می‌شوند تا توزیع احتمالاتی جابه‌جایی نیومارک پایانی را به دست دهند. از متغیرهای دیگر مورد نیاز برای تحلیل نیومارک و در پایان محاسبه فاکتور ایمنی، مقدار وزن واحد حجم مربوط به هر یک از واحدهای زمین‌شناسی و تأثیر آب زیرزمینی است. در این مطالعه مقدار وزن واحد حجم برای هر یک از واحدها ثابت در نظر گرفته شده است. کمترین مقدار m (نسبت ستبرای صفحه که اشباع شده است) برابر با شرایط خشک (صفر) و بیشترین مقدار آن برابر با اشباع کامل (یک) و محتمل‌ترین مقدار آن برابر با $0/5$ در نظر گرفته شده است.

۷-۵. روش تحلیل: همان‌گونه که گفته شد، در این مطالعه عدم قطعیت‌های ناشی از متغیرهای ژئوتکنیکی در بردارنده زاویه اصطکاک درونی و چسبندگی بررسی شده است. به این منظور برای هر مجموعه از مقادیر مشخص برای هر یک از واحدهای موجود در منطقه مورد مطالعه، نمونه‌های آماری تصادفی با در نظر گرفتن تابع توزیع β -PERT به دست آمده است. روش تحلیل در بردارنده مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده در محیط MATLAB است که احتمال‌های آماری جابه‌جایی نیومارک را برای هر یک از واحدهای شبیه منطقه مورد مطالعه به دست می‌آورد. شکل ۴ کدهای نوشته شده و مسیر اجرایی برنامه را نشان می‌دهد. در این شکل بخش‌های "ب" و "د" برنامه‌های نوشته شده و بخش‌های "الف، ج، و" به ترتیب ورودی‌ها، کمیت‌های میان برنامه‌ای و خروجی‌های برنامه را نشان می‌دهند. در بخش "الف" متغیرهای ورودی در بردارنده نقشه شیب، شدت آریاس، متغیرهای ژئوتکنیکی و m به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. در بخش "ب"، کدی به نام MCS نوشته شده که برنامه از آن برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو بر پایه تابع توزیع احتمال یاد شده (β -PERT) استفاده می‌کند. در این مرحله تعداد ۱۰۰۰ داده برای هر یک از متغیرهای مورد بررسی (در هر واحد زمین‌شناسی و در محدوده تعریف شده بر پایه متغیرهای آماری) تولید می‌شود (ج). در مرحله بعد به ازای هر یک از مقادیر تصادفی تولید شده و با استفاده از دیگر متغیرهای مورد نیاز برای هر واحد (مثل γ ، وزن واحد حجم) و یا کل محدوده مورد مطالعه (مثل t ، ستبرای صفحه مستعد لغزش)، فاکتور ایمنی به صورت احتمالاتی برای هر سلول به دست می‌آید. این مرحله، از کدهای نوشته شده به نام‌های F_s ، a_c ، $Dn-A-CI$ model و $Dn-Probabilistic$ استفاده می‌کند. شکل ۵ تحلیل انجام شده را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود داده‌های ورودی رستری، در بردارنده نقشه شیب و نقشه شدت آریاس است که به عنوان بخشی از داده‌های ورودی در نظر گرفته می‌شود. همچنین نقشه سنگ‌شناسی معرف واحدهای زمین‌شناسی (از ۱ تا N) در این شکل نشان داده شده است که به ازای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی از ۱ تا N می‌توان شمار M متغیر ژئوتکنیکی را به عنوان ورودی در نظر گرفت. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد در این مطالعه بررسی عدم قطعیت‌های ۳ متغیر c ، ϕ و m در نظر گرفته شده است. هر یک از این متغیرها دارای متغیرهای آماری مورد نیاز بر پایه توزیع در نظر گرفته شده هستند، به گونه‌ای که در توزیع مورد بررسی در این مطالعه ۳ متغیر آماری کمینه، محتمل‌ترین مقدار و

متغیرهای ورودی موجود نیست، بنابراین انتخاب تابع توزیع احتمال برای متغیرها بر پایه نتایج پروژه‌های یکسان و یا نتایج مطالعات پژوهشگران صورت می‌گیرد (Chowdhury, 1984).

گرچه معمول‌ترین و ساده‌ترین این توابع، تابع یکنواخت ساده یا عادی است ولی این روش برای کاربردهای عملی به‌ویژه برای پایداری شیب‌ها خیلی ساده به نظر می‌رسد؛ از سوی دیگر استفاده از این مدل نیازمند در اختیار داشتن مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌های ورودی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک است که محاسبه آنها نیاز به در اختیار داشتن شمار زیادی داده دارد که با توجه به منطقه‌ای بودن مقیاس مورد مطالعه و گوناگونی واحدهای زمین‌شناسی امکان‌پذیر نیست. همچنین بسیاری از داده‌های معمول و طبیعی را نمی‌توان با توابع توزیع بهنجار مدل کرد. این مسئله به‌ویژه برای کمیت‌هایی که از راه بازدیدهای پی‌درپی صحرایی و در شرایط ناهمگن (هتروژن) و یا از راه قضاوت مهندسی به دست می‌آیند، اهمیت بیشتری دارد. در چنین مواردی بیشتر ترجیح داده می‌شود که توابع توزیع عمومی تری برای مدل کردن عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گیرد؛ به این منظور استفاده از توابع توزیع بتا (β) به‌ویژه برای تعیین متغیرهای ژئوتکنیکی توسط بسیاری از پژوهشگران توصیه شده است (Vose, 1996).

تابع توزیع β بیشتر به خاطر سادگی و آسانی به صورت شکل اولیه آن و یا به صورت β -PERT مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع از تابع توزیع β از ۳ متغیر کمینه (Minimum)، بیشترین احتمال (Most likely) و بیشینه (Maximum) مقادیر به عنوان ورودی استفاده می‌کند که امکان دسترسی به آنها ساده‌تر است. بنابراین در شرایطی که از نظر آماری شمار داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها کم باشد این توزیع توصیه می‌شود (Vose, 1996). در این پژوهش با توجه به کمبود داده‌های ژئوتکنیکی در محدوده مورد مطالعه از این نوع توزیع برای استفاده در تحلیل شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است.

۷-۳. کدهای نوشته شده در محیط MATLAB و داده‌های ورودی: مسیر انجام برنامه با جزئیات بیشتر در شکل ۴ نشان داده شده است. کدهای نوشته شده به منظور انجام فرایند شبیه‌سازی مونت کارلو و در پایان احتمالاتی کردن نتایج، در ورودی خود داده‌های مورد نیاز را برای انجام تحلیل نیومارک می‌پذیرند. این داده‌ها در بردارنده ویژگی‌های زمین‌شناسی واحدهای مختلف (مانند نقشه زمین‌شناسی)، متغیرهای لرزه‌ای و متغیرهای ژئوتکنیکی هستند. این داده‌ها یک سری نقشه‌های رستری همچون نقشه‌های شیب و نقشه شدت آریاس و معرف اطلاعاتی هستند که دقت آنها در حد سلول‌های رستری است.

نقشه شیب منطقه مورد مطالعه پیش‌تر با استفاده از DEM، و نقشه شدت آریاس حاصل از نگاشت‌های لرزه‌ای، با استفاده از رابطه ۲ مدل شده است. متغیرهای ژئوتکنیکی واحدهای موجود در منطقه مورد مطالعه (جدول ۱) نیز به عنوان ورودی دیگر به صورت جدول‌هایی از متغیرهای آماری ذخیره شده در یک فایل وارد شده‌اند.

۷-۴. چگونگی تعیین مقادیر آماری متغیرهای ژئوتکنیکی: همان‌گونه که گفته شد، برنامه تهیه شده برای شبیه‌سازی مونت کارلو مقادیر متغیرهای ژئوتکنیکی را به صورت متغیرهای آماری می‌پذیرد. به این منظور برای استفاده از تابع توزیع β -PERT، برای ۳ متغیر چسبندگی، زاویه اصطکاک و نسبت صفحه اشباع شده، از ۳ مقدار کمینه، بیشترین احتمال و بیشینه استفاده و دیگر متغیرها ثابت فرض شده‌اند. این انتخاب به خاطر ساده شدن تحلیل و تمرکز بیشتر روی تغییرپذیری متغیرهای ژئوتکنیکی نسبت به دیگر متغیرها انجام شده است. به این منظور متغیرهای چسبندگی و زاویه اصطکاک درونی بر پایه مطالعات صحرایی و استفاده از نرم افزار Roclab به دست آمده‌اند. خروجی به دست آمده از این مقادیر به عنوان محتمل‌ترین مقدار متغیرهای ژئوتکنیکی در نظر گرفته می‌شوند. این مقادیر باید در اینجا به عنوان مقادیر معرف که بیشترین احتمال نزدیکی را به کمیت واقعی دارند در نظر گرفته

که در آن L_i درصدی از سطح کل زمین‌لغزش‌های موجود در منطقه است که در پهنه مورد نظر قرار گرفته و A_i درصدی از سطح منطقه است که توسط پهنه اشغال شده است. از این رو DR برابر ۱ بدین مفهوم است که تراکم زمین‌لغزش‌ها در پهنه مورد نظر برابر تراکم زمین‌لغزش میانگین منطقه است. به همین صورت DR بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۱ بیانگر تراکم‌های بیشتر یا کمتر زمین‌لغزش‌ها در پهنه مورد نظر نسبت به متوسط تراکم لغزش‌هاست. پس از محاسبه مقدار DR برای همه زیرگروه‌ها مقدار QS از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$QS \sum_{i=1}^n (DR_i - 1)^2 \times \%A_i \quad (4)$$

که در آن DR_i و A_i به ترتیب نسبت تراکم و درصد سطح هر پهنه و n تعداد پهنه‌ها در نقشه مورد نظر است. بدین ترتیب متغیر QS مجموع مجذور اختلافات نسبت تراکم هر پهنه را نسبت به متوسط آنها (تراکم متوسط منطقه) به دست می‌دهد.

برای استفاده از این روش، نقشه به دست آمده از روش احتمالاتی (شکل ۸) و روش تعیینی (مهدوی‌فر، ۱۳۸۵) به دو گروه یا پهنه با خطر بالا (مناطق با احتمال بیش از ۰/۵، گروه ۱) و خطر پایین (مناطق با احتمال کمتر از ۰/۵، گروه ۲) تقسیم شده‌اند. در جدول ۲ خلاصه محاسبات انجام‌شده و مقدار متغیر QS برای این روش در مقایسه با روش تعیینی (مهدوی‌فر، ۱۳۸۵) آمده است. با توجه به جدول ۲ هر چند روش تعیینی پوشش مناسبی از زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه را در منطقه با خطر بالا نشان می‌دهد (۶۸/۸۵ درصد)، ولی با در نظر گرفتن مقادیر متغیر QS به توجه به بالاتر بودن این متغیر برای مدل احتمالاتی نسبت به مدل تعیینی (۲۶۴/۸۳ در برابر ۵۹/۴۰)، این روش همخوانی بهتری میان مدل و واقعیت با استفاده از توزیع β -PERT داشته و در نتیجه، نتایج به دست آمده از این روش واقع بینانه‌تر است.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی برای تهیه نقشه‌های احتمالاتی خطر برای زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه معرفی شده است. به این منظور از شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌عنوان ابزاری برای کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از دیگر مدل‌ها مانند مدل‌های تعیینی و کمی استفاده شده است. بررسی این روش نشان می‌دهد روش احتمالاتی بر پایه تحلیل نیومارک، این امکان را فراهم می‌سازد که برخی از عدم قطعیت‌های ناشی از داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناختی و لرزه‌ای به‌صورت توابع توزیع آماری در مدل وارد شوند. روش یادشده اطلاعات و هیستوگرام حاصل از مقادیر به‌دست آمده را محاسبه و مقادیر عددی آنها را برای هر سلول ذخیره می‌کند؛ سپس نقشه‌های آستانه احتمالاتی برای متغیرهای معرف، مانند جابه‌جایی نیومارک به‌عنوان نماینده‌هایی از توزیع مکانی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه در سراسر ناحیه مورد مطالعه به‌دست می‌آیند. کار برد این روش در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که این روش در پیش‌بینی مناطق خطر در مقایسه با دیگر روش‌ها همچون روش تعیینی مؤثرتر است؛ هر چند بسیاری از مشکلات و مسائل به دلیل پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه هنوز حل نشده است. این روش که بر پایه مجموعه‌ای از کدهای نوشته‌شده در محیط MATLAB تدوین شده است، انعطاف‌پذیر بوده و می‌توان به آسانی آن را گسترش داد و مسائل پیچیده‌تری را به آن وارد کرد. برای نمونه افزودن مدل نیومارک، دیگر مدل‌ها را نیز می‌توان مورد استفاده قرار داد یا می‌توان از توابع توزیع مختلفی استفاده کرد و یا متغیرهای بیشتری را مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان مدل را به دیگر مناطق نیز تعمیم داد.

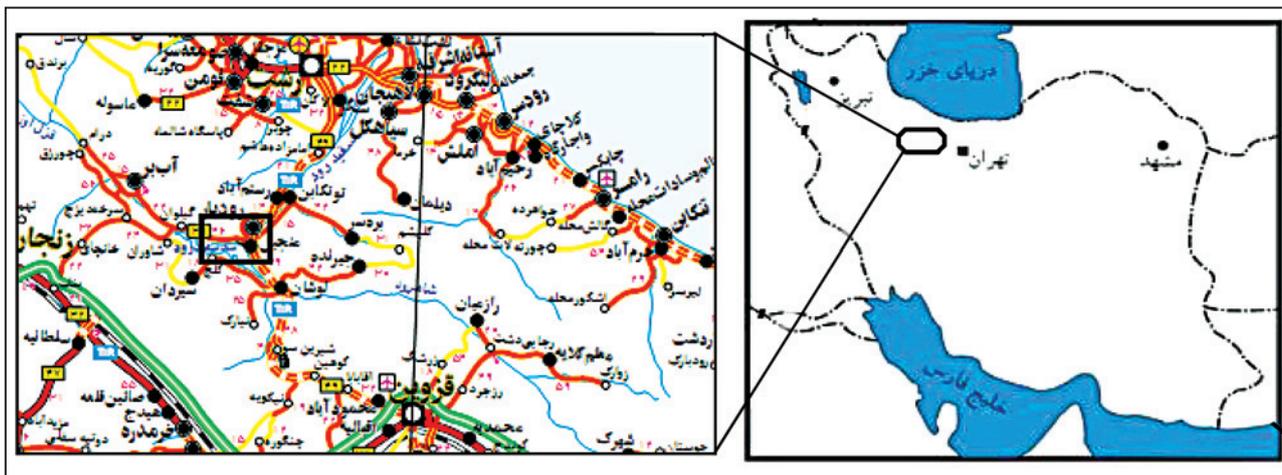
بیشینه مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق شکل به ازای هر یک از این داده‌ها در یک فرایند شبیه‌سازی مونت‌کارلو و با در نظر گرفتن تابع توزیع اعمال شده روی برنامه، ۱۰۰۰ نمونه تولید می‌شود. برای نمونه برای واحد زمین‌شناسی با ویژگی Eat (توف‌های داسیتی-آندزیتی-آگلومرا) با مقادیر کمینه، محتمل‌ترین مقدار و بیشینه زاویه اصطکاک درونی به ترتیب برابر ۱۴، ۲۰، ۳۸ درجه و چسبندگی ۲۳، ۲۸، ۴۰ کیلوپاسکال و نسبت ستبرای صفحه اشباع‌شده به‌ترتیب ۰، ۰/۵ و ۱ است. نمودار توزیع احتمالی نمونه‌های تصادفی تولید شده برای این واحد با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر پایه مقادیر متغیرهای آماری ورودی مطابق با شکل ۶ است. در مرحله بعد برای هر یک از نمونه‌های تولید شده (یعنی ۱۰۰۰ داده به‌ازای هر متغیر از هر یک از واحدهای زمین‌شناسی) افزودن بر محاسبه فاکتور ایمنی و شتاب بحرانی، بر پایه مدل جابه‌جایی نیومارک با در نظر گرفتن مقدار آستانه‌ای ۲ سانتی‌متر، احتمال این که جابه‌جایی در هر سلول از محدوده مورد مطالعه (بر پایه نقشه رقومی شده محدوده مورد مطالعه) از مقدار آستانه‌ای فراتر رود محاسبه شده است. شکل ۷ برای نمونه توزیع احتمالاتی افزایش جابه‌جایی نیومارک از مقدار آستانه‌ای ۲ سانتی‌متر را برای واحد زمین‌شناسی Eat نشان می‌دهد.

۷-۶. خروجی برنامه (نقشه احتمالاتی): همان‌گونه که گفته شد، خروجی برنامه را می‌توان به صورت شمار زیادی از نمودارهای احتمالاتی (۱۰۰۰ داده در این مطالعه) و یا یک نقشه احتمالاتی برای منطقه مورد نظر گزارش کرد. برای نمونه این نقشه‌ها می‌توانند به‌صورت نقشه‌هایی که در آن مقادیر احتمالاتی برای هر واحد شبیبی از یک مقدار آستانه‌ای جابه‌جایی نیومارک بیشتر شود، ارائه شوند. همان‌گونه که گفته شد، در این مطالعه مقدار آستانه‌ای جابه‌جایی نیومارک برابر با ۲ سانتی‌متر نظر گرفته شده است که کمینه مقدار جابه‌جایی برای زمین‌لغزش‌های ناپیوسته است (Wilson & keefer, 1985). شکل ۸ نقشه احتمالاتی D_n را بر پایه مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از توزیع β -PERT برای محدوده‌ای از منطقه متأثر از زمین‌لرزه منجیل بر پایه تحلیل انجام‌شده نشان می‌دهد. نقشه احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو سطوح باز خطر زمین‌لغزش را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به این بررسی ۹۹/۴ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده با احتمال خطر بالا (احتمال بیش از ۵۰ درصد) قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده کارایی مناسب نقشه احتمالاتی خطر در پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه است.

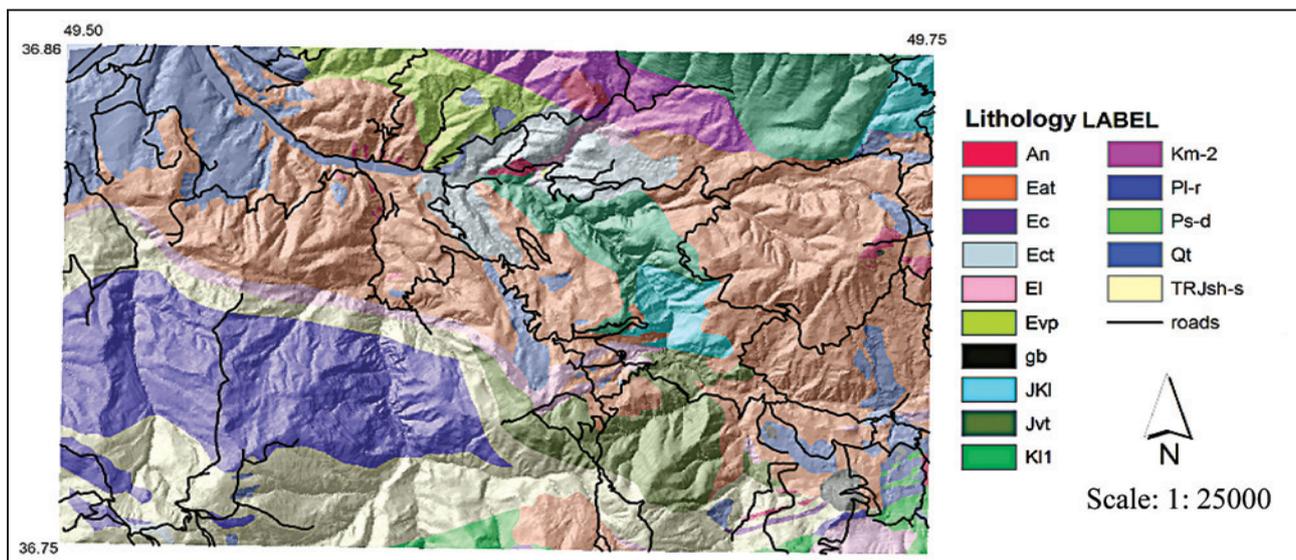
۷-۷. مقایسه با نتایج به دست آمده از روش تعیینی: نقشه احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو سطوحی از خطر زمین‌لغزش را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقایسه نقشه تهیه شده به روش احتمالاتی بر پایه شبیه‌سازی مونت‌کارلو (همین مطالعه) و مدل تعیینی (مهدوی‌فر، ۱۳۸۵) نشان می‌دهد که نقشه به دست آمده از روش احتمالاتی نسبت به روش تعیینی، مناطق بیشتری از واحدهای شبیبی و در نتیجه شمار بیشتری از زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه منجیل را در بر می‌گیرد و به شرایط واقعی نزدیک‌تر است.

برای کمی کردن این مقایسه، در این مطالعه از روش ارائه شده توسط Gee (1992) استفاده شده است که درجه کارایی نقشه پهنه‌بندی خطر را به‌وسیله متغیری به نام QS ارزیابی می‌کند. در این متغیر که بر پایه محاسبه میزان پراکنش داده‌ها پیرامون میانگین است نقشه‌ای بهتر خواهد بود که QS آن بیشتر باشد. در این روش ابتدا متغیری به نام نسبت تراکم (Density Ratio) برای هر پهنه محاسبه می‌شود (رابطه ۳):

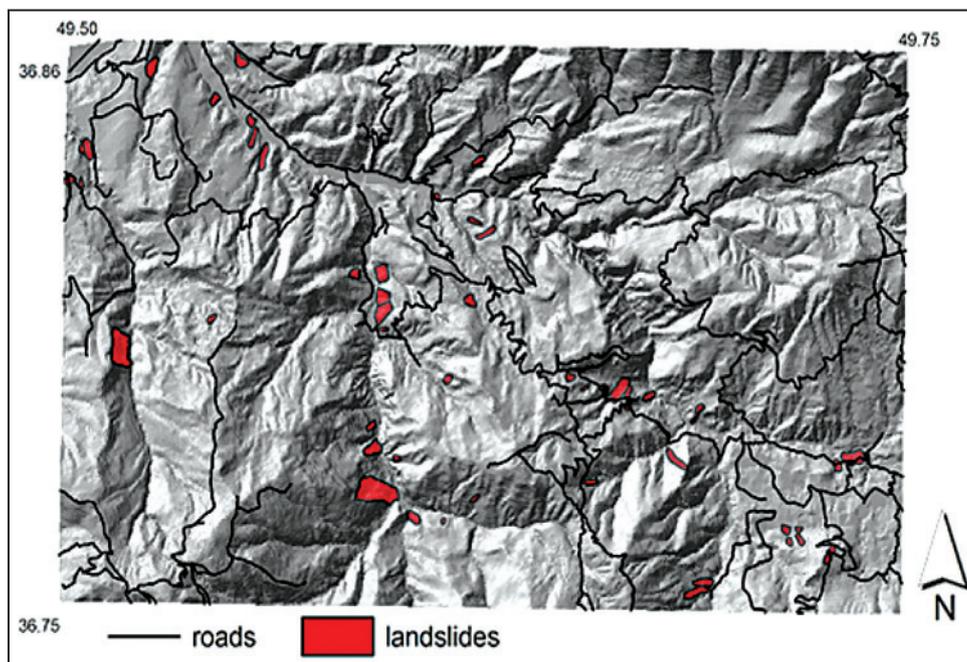
$$DR = \frac{\%L}{\%A} \quad (3)$$



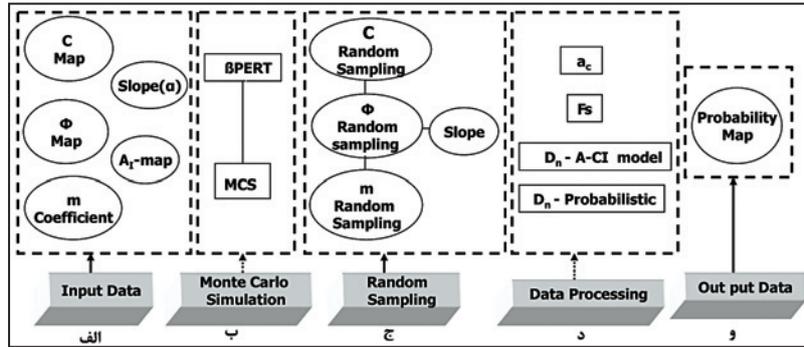
شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه



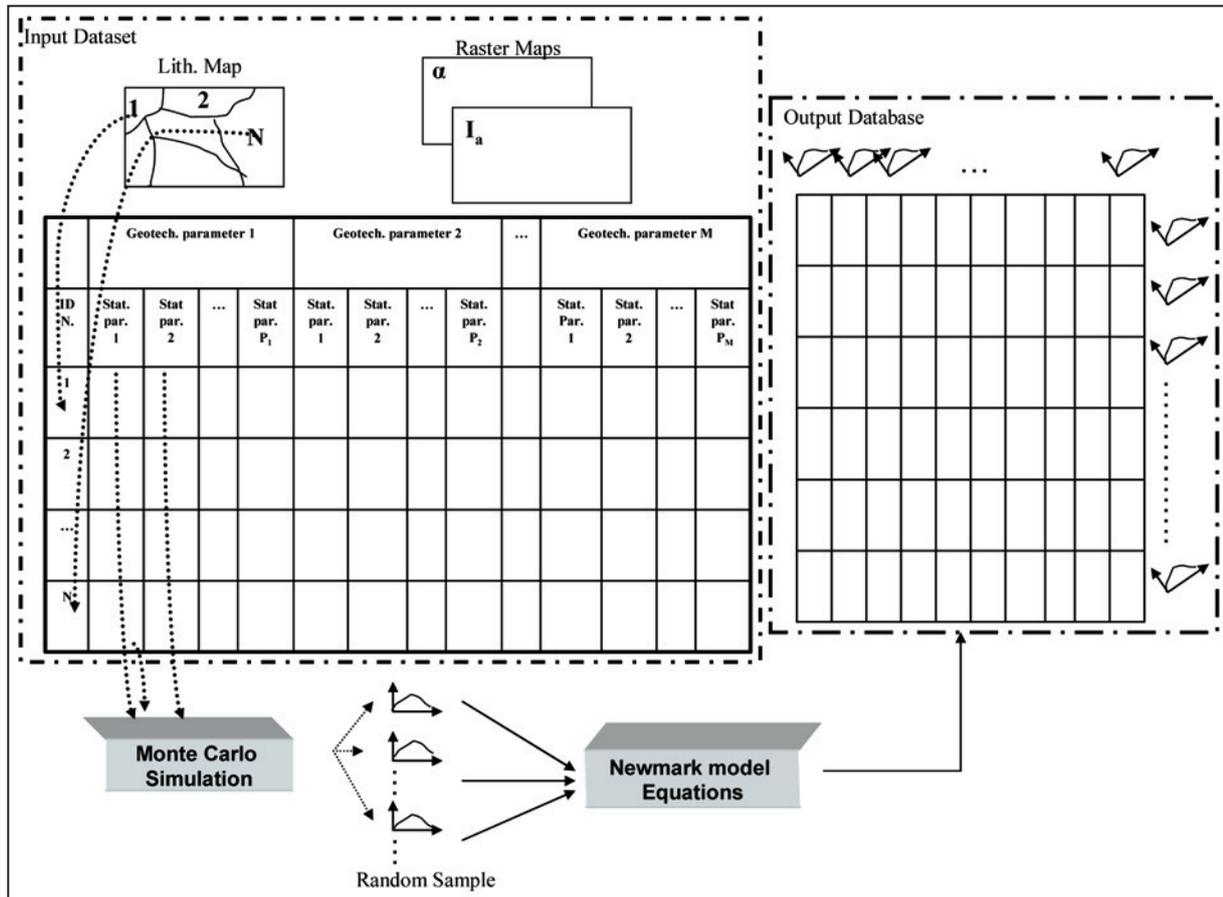
شکل ۲- نقشه واحدهای زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (برای توصیف نشانه‌ها به جدول ۱ مراجعه شود)



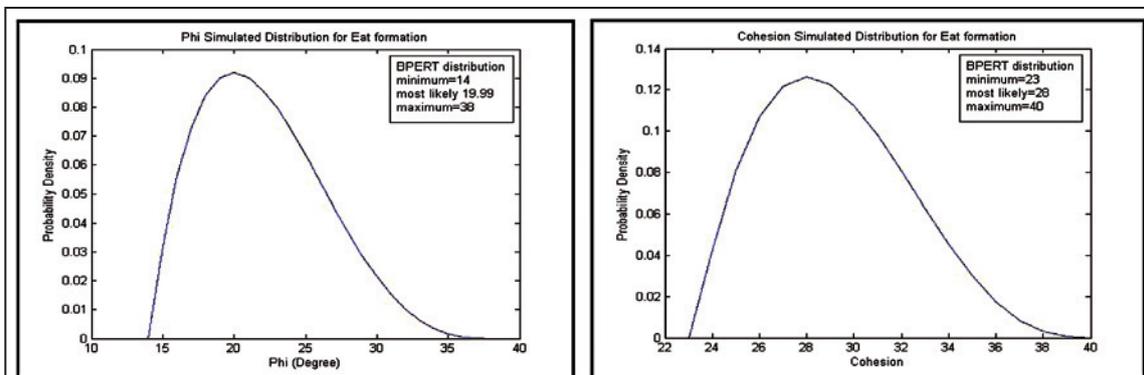
شکل ۳- نقشه فهرست زمین لغزش‌های ناشی از زمین لرزه منجیل (مهدوی‌فر، ۱۳۸۵)



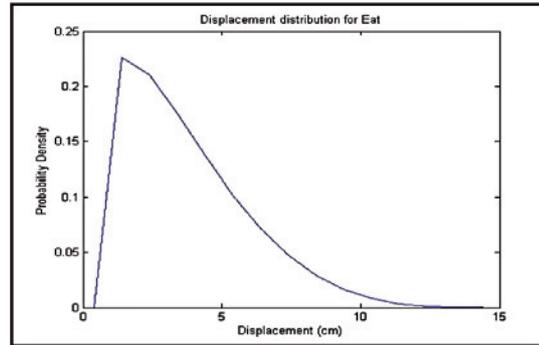
شکل ۴- نمودار گردش نمادین کدهای نوشته‌شده و مسیر اجرای برنامه



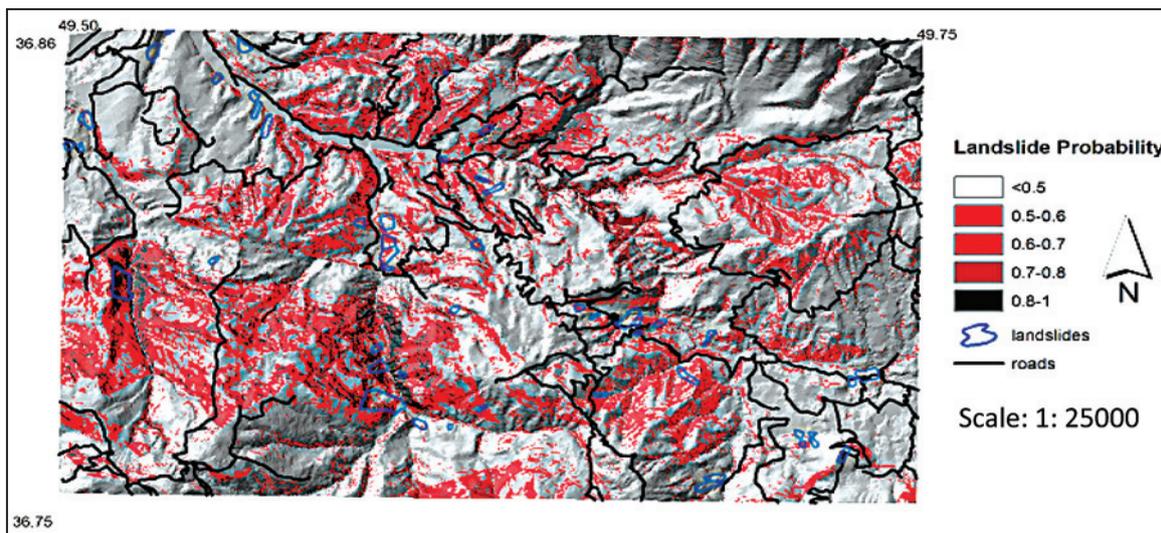
شکل ۵- شکلی نمادین از تحلیل‌های انجام شده با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو از داده‌های ورودی تا خروجی



شکل ۶- نمودار توزیع احتمالی نمونه‌های تصادفی تولیدشده با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر پایه مقادیر متغیرهای آماری ورودی برای واحد Eat (توف‌های داسیتی - آندزیتی - آگلومرا)



شکل ۷- توزیع احتمالاتی افزایش جابه‌جایی نیومارک از مقدار آستانه‌ای برابر با ۲ سانتی‌متر برای واحد زمین‌شناسی Eat (توف‌های داسیتی - آندزیتی)



شکل ۸- نقشه احتمالاتی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه بر پایه مقادیر به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای مقادیر آستانه‌ای جابه‌جایی نیومارک (D_n) برابر ۲ سانتی‌متر برای محدوده‌ای از منطقه متأثر از زمین‌لرزه منجیل ۱۳۶۹.

جدول ۱- متغیرهای آماری مورد استفاده در شبیه‌سازی مونت کارلو (m: نسبت ستبرای صفحه‌ای که اشباع شده است، ϕ^0 : زاویه اصطکاک درونی و C' چسبندگی و γ وزن واحد حجم است. Min، Most likely و Max به ترتیب کمینه، محتمل‌ترین مقدار و بیشینه مقدار برای هر متغیر است).

m			ϕ^0			c'(Kpa)			γ (gr/cm ³)	واحد زمین‌شناسی	توصیف واحد زمین‌شناسی
Max	Most likely	Min	Max	Most likely	Min	Max	Most likely	Min			
۱	۰/۵	۰	۲۳	۲۰	۱۲	۲۵	۲۰	۱۵	۲/۶	Ect	توف‌های آندزیتی، داسیتی
۱	۰/۵	۰	۵۴	۵۲	۳۴	۱۶۰	۱۵۰	۱۲۰	۲/۶	Dc-An	توده‌های آتشفشانی داسیتی
۱	۰/۵	۰	۲۶	۲۲	۲۰	۵۰	۳۰	۲۰	۲/۵	P1r	آهک‌های ستبر تا متوسط
۱	۰/۵	۰	۲۵	۲۲	۲۰	۴۰	۳۰	۲۰	۲/۲	Psd	شیل و ماسه سنگ
۱	۰/۵	۰	۱۹	۱۷	۱۴	۲۵	۲۰	۱۵	۲/۲	Evp	توف‌های آندزیتی، داسیتی
۱	۰/۵	۰	۳۸	۲۰	۱۴	۴۰	۲۸	۲۳	۲/۶	Eat	توف‌های بازالتی
۱	۰/۵	۰	۳۲	۳۱	۲۰	۱۰۰	۵۰	۲۰	۲/۶	Jvt	سنگ‌های آتشفشانی بازالتی
۱	۰/۵	۰	۴۲	۳۹	۳۴	۱۲۰	۷۰	۶۰	۲/۴	TRjs	شیل و ماسه سنگ
۱	۰/۵	۰	۵۰	۴۸	۳۱	۳۴۰	۳۰۰	۲۵۰	۲/۵	Jkl	آهک‌های فسیل دار
۱	۰/۵	۰	۵۱	۴۸	۳۲	۳۲۰	۳۰۰	۲۴۰	۲/۷	K1l	سنگ آهک
۱	۰/۵	۰	۲۴	۲۲	۱۸	۴۰	۳۰	۲۵	۲/۷	K2m	آهک هوازده شده و مارن
۱	۰/۵	۰	۶۰	۵۹	۴۰	۲۷۰	۲۵۰	۲۲۰	۲/۸	Gb	گابرو
۱	۰/۵	۰	۴۵	۳۹	۳۴	۸۰	۷۰	۵۰	۲/۵	Ec	کنگومرا
۱	۰/۵	۰	۴۶	۴۴	۴۲	۱۲۰	۱۰۰	۷۵	۲/۵	El	آهک خاکستری و توف
۱	۰/۵	۰	۴۵	۳۴	۲۵	۳۵	۲۰	۱۷	۱/۹۶	Qt	رسوبات عهد حاضر

جدول ۲- محاسبه متغیرهای روش Gee (1992) برای مقایسه روش‌های تعیینی و احتمالاتی

QS	DR	L(%)	L(km ²)	A (%)	A(km ²)	گروه	روش
۵۹/۴۰	۲/۰۹	۶۸/۸۵	۲/۵۲	۳۲/۶۹	۸۶	(۱)	تعیینی (مهدوی‌فر، ۱۳۸۵)
	۰/۴۶	۳۱/۱۴	۱/۱۴	۶۷/۳۰	۱۷۷	(۲)	
۲۶۴/۸۳	۵/۱۰	۶۹/۳۹	۲/۵۴	۱۳/۶۰	۳۶	(۱)	احتمالاتی (مطالعه حاضر)
	۰/۳۵۴	۳۰/۶۰	۱/۱۲	۸۶/۳۱	۲۲۷	(۲)	

کتابنگاری

آفانیاتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۳۸۷ ص
 کمک‌پناه، ع. و حافظی‌مقدس، ن.، ۱۳۷۲- پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزه در ایران، جلد ششم: شناسایی و به نقشه در آوردن زمین‌لغزه‌های مهم تحریک شده در زمین‌لرزه خرداد ۱۳۶۹ منجیل، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
 مهدوی‌فر، م. ر.، ۱۳۸۵- ارزیابی تحلیلی و طراحی سامانه مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور، پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

References

- Arias, A., 1970- A measure of earthquake intensity. In: Hansen RJ, editor. Seismic design for nuclear power plants. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 438-483.
- Capolongo, D., Refice, A. & Mankelov, J., 2002- Evaluating earthquake-triggered landslide hazard at the basin scale through GIS in the upper Selle River Valley. Surveys in Geophysics, vol. 23, pp. 595-625.
- Chowdhury, R. N., 1984- Recent Developments in Landslide Studies: Probabilistic Methods, state-of-the-art-report-session VII (a). Proceedings of the 4th International symposium on Landslides, Toronto, Canada, September 16-21. 1: 209-228.
- Gee, M. D., 1992 - Classification of Landslide Hazard Zonation Methods and a Test of Predictive Capability. Proceeding of 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, vol. 2, pp. 947-952.
- Jibson, R. W., 2007- Regression models for estimating coseismic landslide displacement. Engineering Geology, 91: 912-918.
- Jibson, R. W., Harp, E. L. & Michael, J. A., 2000- A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. Engineering Geology, 58: 271-289.
- Newmark, N. M., 1965- Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15: 139-159.
- Plafker, G. & Galloway, J. P., 1989- Lessons learned from the Loma Prieta, California earthquake of October 17, and extracted specific data sets from them. US Geol. Surv. Circ. 1045 1989.
- Refice, A. & Capolongo, D., 2002 - Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. Computer and Geosciences, vol. 28, pp. 735-749.
- Vose, D., 1996- Quantitative Risk Analysis: A Guide to Monte Carlo Simulation Modeling. Wiley, Chichester, England, 328p.
- Wilson, R. C. & Keefer, D. K., 1985- Predicting the areal limits of earthquake-induced landsliding. In: Ziony JI, ed. evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region-an earth science perspective, US Geological Survey, Prof. Paper 1360, pp. 316-345.

Application of the Monte Carlo Simulation in Analysis of Earthquake-Induced Landslides (Case Study: the Manjil Earthquake)

A. M. Rajabi ^{1*}, M. Khamsehchiyan ² & M. R. Mahdaviifar ³

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Qom University, Qom, Iran

² Associate Professor, Engineering Geology Department, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Received: 2010 October 02

Accepted: 2012 April 08

Abstract

One of the most important effects of the Manjil earthquake ($M=7/7$, 20/6/1990) has been triggering of the numerous landslides in the area affected by the earthquake. To predict landslides locations during the future earthquakes, it is essential to analyze the distribution of landslides triggered by the Manjil earthquake. In this paper, by employing the Monte Carlo Simulation, an area with 309 km² including Chahar – Mahal and Chalkasar rectangles (near the Manjil Epicentre) was investigated in order to achieve a probabilistic model to predict earthquake-induced landslides. There is a good correlation between the provided map and the inventory map of landslides occurred during the Manjil earthquake.

Keywords: Simulation, Monte Carlo, Manjil earthquake, Landslides caused by earthquakes, Probabilistic.

For Persian Version see pages 3 to 10

*Corresponding author: A. M. Rajabi; E-mail: amrajabi@ymail.com