

پیش بینی زمین لغزش های ناشی از زلزله با مدل های نیومارک و شبیه سازی مونت کارلو

علی محمد رجیبی^۱، ماشاءاله خامه چیان^{۲*}، حمیدرضا مهدوی فر^۳

دریافت مقاله: ۹۰/۹/۷

پذیرش مقاله: ۹۱/۶/۴

چکیده

در این مطالعه در یک محدوده متاثر از زلزله منجیل (۱۳۶۹) که نقشه فهرست زمین لغزش های ناشی از آن تهیه شده است، مطالعات تحلیل خطر زمین لغزش های ناشی از زلزله، به دو روش تعیینی و احتمالاتی انجام شده است. در روش تعیینی، با بهره گیری از تحلیل جابه جایی نیومارک و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در وقوع زمین لغزش به صورت ثابت، نقشه خطر زمین لغزش های ناشی از زلزله در محدوده مورد مطالعه تهیه و با نقشه فهرست مقایسه شده است.

در مرحله بعد، به منظور وارد کردن تأثیر عدم قطعیت های ناشی از یک روش تعیینی، روشی احتمالاتی با استفاده از توابع توزیع و به کار بردن شبیه سازی مونت کارلو معرفی شده است. در این روش عدم قطعیت های ناشی از پارامترهای ژئوتکنیکی و تأثیر اشباع شدگی شیب، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نقشه ای احتمالاتی براساس پارامتر جابه جایی نیومارک به منظور بررسی توزیع مکانی خطر زمین لغزش های ناشی از زلزله، در منطقه مورد مطالعه تهیه شده و با نقشه حاصل از روش تعیینی مقایسه شده است. این عملیات بر پایه ی مجموعه ای از کدهای نوشته شده در محیط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

کلید واژه ها: زمین لغزش، زلزله، مدل، نیومارک، مونت کارلو، شبیه سازی

۱. دانش آموخته دانشگاه تربیت مدرس، استادیار گروه عمران، دانشگاه قم

۲. دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، khamechm@modares.ac.ir

۳. استادیار مرکز تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین المللی مهندسی زلزله و زلزله شناسی

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

به طور کلی زمین لغزش‌ها به خصوص زمین لغزش‌های ناشی از زلزله از جمله پدیده‌هایی هستند که باعث خسارات زیادی به بشر، طی سال‌های اخیر شده است (Plakfer & Galloway, 1989, Keefer, 1984, Jibson, 2007). هر چند مطالعات زیادی در خصوص شناسایی و توصیف زمین لغزش‌ها به طور عام انجام شده است اما بررسی زمین لغزش‌های ناشی از زلزله بخصوص در کشور ایران بسیار جوان است.

زلزله منجیل (۳۱ خرداد ۱۳۶۹ با بزرگای سطحی ۷/۷ ریشتر) به لحاظ بزرگی و وقوع زمین لغزش‌های ناشی 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 زمین لرزه‌هایی که مسبب زمین لغزش‌های زیادی بوده‌اند (نظیر زلزله‌های منجیل، آوج و فیروزآباد کجور)، باعث افزایش شناخت ما از این‌گونه حوادث طبیعی و در نتیجه مدیریت خطرات ناشی از آنها می‌شود.

در بررسی زمین لغزش‌های ناشی از زلزله، روش تعیینی معمولاً شامل تحلیل شبه-استاتیک و جابه‌جایی نیومارک است. در این روش با استفاده از برخی شاخص‌ها و پارامترهای شیب و ویژگی‌های زلزله مورد نظر، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش‌های ناشی از زلزله بر اساس فاکتور ضریب اطمینان انجام می‌شود. این روش به دلیل میزان بالاتر اطلاعات و مدل کردن بهتر حرکت زمین، توسط محققین زیادی پذیرفته شده است. (مهدوی‌فر ۱۳۸۵; Capolongo, Refice & Van Westen, 2000; Mankelov, 2002; Xie et al., 2003).

مسئله اساسی در این روش این است که داده‌های ورودی برای محاسبه تعیینی ضریب اطمینان ذاتاً با عدم قطعیت همراه است. برخی از این داده‌ها که به شدت دارای عدم قطعیت بوده و نسبت به مکان متغیر هستند عبارت از پارامترهای مقاومتی خاک و سنگ، عمق لغزش، عمق آب زیرزمینی و وزن واحد حجم مصالح می‌باشند.

روش‌های احتمالاتی برای تحلیل پایداری زمین لغزش‌های ناشی از زلزله مناسب‌تر هستند. چرا که برخی از این روش‌ها، عدم قطعیت‌ها و متغیرهای مکانی را در همه پارامترهای مؤثر در زمین لغزش‌های ناشی از زلزله در نظر می‌گیرند. یکی از روش‌های احتمالاتی، استفاده از مدل تحلیل احتمالاتی با استفاده از توابع توزیع است. این روش از مدل تعادل حدی و روش احتمالاتی به منظور اعمال ویژگی تصادفی بودن پارامترهای ورودی استفاده می‌کند. در این مطالعه با استفاده از دو مدل تعیینی و احتمالاتی، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش برای بخش‌هایی از شمال ایران که تحت تأثیر زلزله منجیل بوده است انجام خواهد شد. به دلیل کاهش عدم قطعیت‌های پارامترهای خروجی حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو، استفاده از این روش در مسائل ژئوتکنیک در حال گسترش است (Capolongo, Refice & Mankelov, 2002; Refice & Capolongo, 2002).

۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بین طول‌های $49^{\circ}30'$ و $49^{\circ}45'$ و عرض‌های $35^{\circ}45'00''$ و $35^{\circ}52'30''$ و دارای مساحت $309/30$ کیلومترمربع است. نزدیک‌ترین و دورترین فاصله تا مرکز زلزله منجیل به منطقه مورد مطالعه به ترتیب $20/64$ و $42/43$ کیلومتر است و مرکز سطحی زلزله در $20/64$ کیلومتری گوشه شمال‌غربی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است.

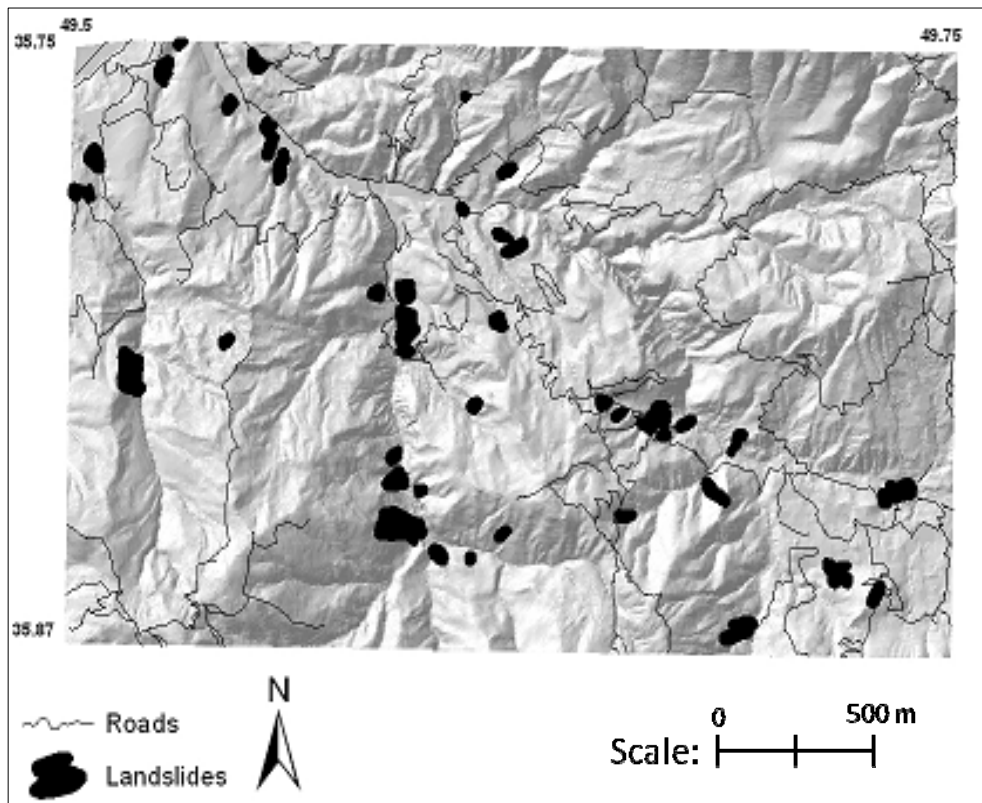
۳. زمین‌شناسی منطقه

در منطقه مورد مطالعه تنوع زیادی از مصالح زمین‌شناسی، از سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین تا رسوبات کواترنر دیده می‌شود. در منطقه البرز، ماسه‌سنگ قرمز رنگ تقریباً همه جا بر روی اینفراکامبرین قرار گرفته و هیچ‌گونه تغییراتی در رسوب‌گذاری و مشخصه‌های زمین‌ساختی در پالئوزویک رخ نداده است. در این منطقه رسوبات سیلورین و کربونیفر وجود ندارد که نشان‌دهنده دو دوره بالآمدگی در زمان‌های مذکور

۴. زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل

صدها زمین‌لغزش در اثر زلزله منجیل ایجاد گردیده است که برخی از آن‌ها موجب بسته شدن جاده‌های کوهستانی و بخش‌هایی از جاده اصلی قزوین-رشت شده‌اند. 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 در اثر بروز این پدیده جان خود را از دست داده‌اند (کمک‌پناه و حافظی مقدس، ۱۳۷۲). مهدوی‌فر (۱۳۸۵) ضمن بررسی مطالعات سایر محققین و بررسی‌های میدانی و مطالعه عکس‌های هوایی، تعداد ۵۱ زمین‌لغزش ناشی از این زلزله را در محدوده مورد مطالعه گزارش کرده است (شکل ۱).

است. سنگ‌های تریاس نیز با ناپیوستگی فرسایشی بر روی نهشته‌های پرمین قرار می‌گیرند. ماسه‌سنگ‌ها، شیل‌ها و کنگلومراهای سازند شمشک که بر روی سطح فرسایش یافته قرار گرفته‌اند به خاطر وجود فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌های فراوان، ضخامت بسیار متغیری را دارند. سنگ آهک سازند لار (ژوراسیک میانی-بالایی) با همبری هم شیب، سازند شمشک را پوشانده است. نهشته‌های دوره کرتاسه شامل سنگ آهک، مارن و گدازه آتشفشانی است. سنگ‌های پالئوژن (عمدتاً ائوسن) شامل کنگلومرا، آهک نومولیت‌دار و مجموعه سنگی سازند کرج می‌باشد و بیشترین رخنمون را در منطقه دارند. رسوبات کواترنر در حوضه‌های بین کوهستانی، پادگانه‌های آبرفتی و مخروطه افکنه‌ها با ناپیوستگی فرسایشی، رسوبات کهن را پوشانده‌اند. جدول ۱ واحدهای زمین‌شناختی محدوده مورد مطالعه و درصد رخنمون آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه فهرست زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل (۱۳۶۹) برای محدوده مورد مطالعه (مهدوی‌فر ۱۳۸۵)

۵. روش تعیینی

در این بخش با استفاده از مدل تعیینی و با بهره‌گیری از تحلیل جابه‌جایی نیومارک، بخشی از پهنه‌ی البرز و ایران مرکزی در یک محدوده‌ی متأثر از زلزله منجیل (۱۳۶۹) که دارای فهرست زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله است، مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱. داده‌های مورد نیاز

داده‌هایی که برای تحلیل دقیق ناحیه‌ای زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله به روش تعیینی مورد نیاز هستند، به شرح زیر می‌باشند:

الف- نقشه زمین‌شناسی دقیق منطقه در مقیاس مناسب؛

ب- نقشه فهرست زمین‌لغزش‌های ناشی زلزله؛

ج- مدل ارتفاعی رقومی یا DEM با قدرت تفکیک بالا؛

د- نقشه شیب منطقه، تهیه شده از DEM؛

ه- داده‌هایی از خصوصیات مهندسی واحدهای زمین‌شناختی؛

و- وجود رابطه‌ای جهت محاسبه پارامتر حرکت قوی زمین (مثل شدت آریاس) در هر نقطه از مرکز زلزله؛

ز- وجود رابطه‌ای برای محاسبه جابه‌جایی نیومارک؛

مراحل تهیه نقشه خطر به صورت خلاصه به ترتیب زیر است:

I- محاسبه ضریب اطمینان استاتیکی

پایداری دینامیکی یک شیب، در روش نیومارک به پایداری استاتیکی آن بستگی دارد. بنابراین ضریب پایداری استاتیکی برای هر واحد بایستی تعیین گردد. به منظور تحلیل در مقیاس منطقه‌ای، استفاده از مدل تعادل حدی ساده که بر اساس شکست صفحه‌ای تدوین شده است توسط (Jibson, Harp & Michael, 2000) پیشنهاد شده است. ضریب اطمینان در این حالت از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$FS = \frac{c'}{\gamma \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \quad (1)$$

که در آن ϕ' زاویه اصطکاک مؤثر، C' چسبندگی مؤثر، α زاویه شیب، γ وزن حجمی مواد، γ_w وزن حجمی آب، t ضخامت عمود بر شیب ورقه گسیخته شده و m نسبت ضخامت ورقه اشباع شده است.

مراحل به دست آوردن ضریب اطمینان به ترتیب زیر است:

الف- استفاده از داده‌های مقاومت برشی؛ نسبت دادن مقاومت برشی نماینده، به هر واحد از نقشه زمین‌شناسی که در آن زاویه اصطکاک و چسبندگی حدودی هر واحد را مشخص می‌سازد.

ب- تهیه نقشه شیب از مدل ارتفاعی رقومی (DEM)

ج- ترکیب مقاومت برشی و داده‌های شیب در معادله ضریب اطمینان، جهت تخمین ضریب اطمینان استاتیکی هر سلول

II- محاسبه شتاب حدی

به دست آوردن شتاب حدی به وسیله ترکیب ضریب اطمینان هر سلول با شیب آن که در واقع بیان‌گر حساسیت نسبت به زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله در آن سلول است. این کار با استفاده از رابطه نیومارک (۱۹۶۵)، انجام می‌گیرد (رابطه ۲).

$$\alpha_c = (F_s - 1)g \sin \alpha \quad (2)$$

که در آن α_c شتاب حدی برحسب g (شتاب ثقل زمین)، F_s ضریب پایداری استاتیکی و α زاویه بین سطح افقی و جهتی است که مرکز ثقل توده لغزشی در امتداد آن حرکت می‌کند.

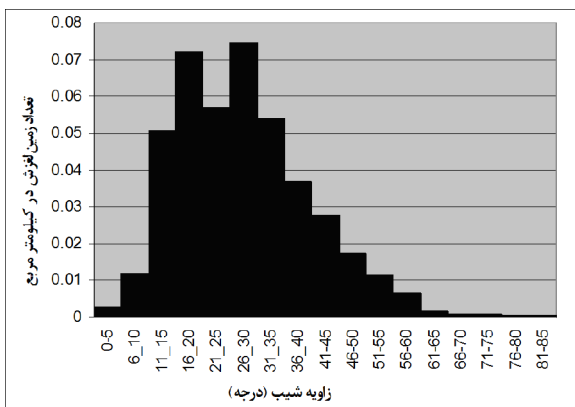
III- تخمین جابه‌جایی نیومارک ناشی از زلزله

با استفاده از یک معادله رگرسیون تجربی، با ترکیب شتاب حدی سلول با مقادیر شدت زلزله به دست می‌آید (مهدوی‌فر، ۱۳۸۵)، (رابطه ۳):

$$\log D_N = 1.087 \log I_a - 7.176 \alpha_c + 1.398 \pm 0.397 \quad (3)$$

که در آن D_N جابه‌جایی نیومارک به سانتی‌متر و I_a شدت آریاس با واحد سرعت است.

ضریب اصطکاک داخلی، چسبندگی و چگالی) نیز به منظور تعیین فاکتور ضریب اطمینان لازم است. در این مطالعه از مقادیر به دست آمده از طریق معیار ارائه شده توسط هوک و براون (۱۹۸۰)، با استفاده از نرم‌افزار Roclab و روش GSI برآورد شده‌اند (جدول ۱).



شکل ۳. رابطه بین تعداد سلول‌های لغزشی در واحد مساحت نسبت به زاویه شیب

۴-۵. محاسبه ضریب اطمینان استاتیکی

پایداری دینامیکی یک شیب، در روش نیومارک به پایداری استاتیکی آن بستگی دارد. بنابراین ضریب اطمینان استاتیکی برای هر واحد بایستی تعیین گردد. به منظور تحلیل در مقیاس ناحیه‌ای، استفاده از مدل تعادل حدی ساده که بر اساس شکست صفحه‌ای تدوین شده است، پیشنهاد شده است (Jibson, Harp & Michael, 2000). ضریب اطمینان در این حالت از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. با روی هم قرار دادن لایه‌های مربوط به پارامترهای مختلف موجود در این رابطه، نقشه ضریب اطمینان به صورت شکل ۴ به دست می‌آید.

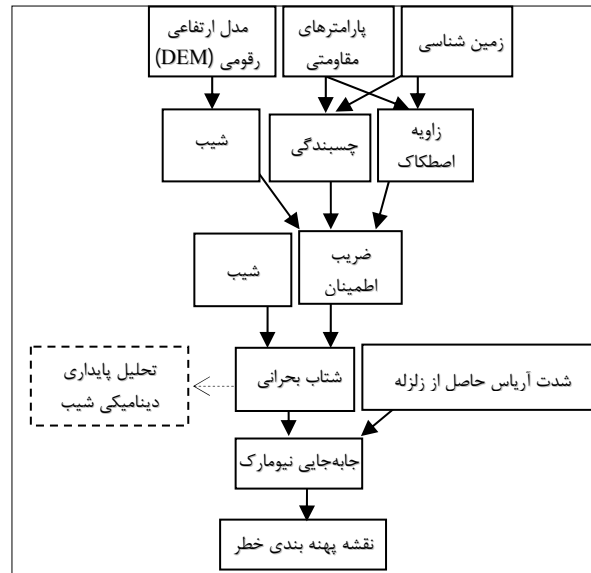
۵-۵. محاسبه شتاب بحرانی

به منظور محاسبه شتاب بحرانی برای هر یک از واحدهای شیبی، با استفاده از رابطه ۲ و با استفاده از نقشه‌های ضریب اطمینان و شیب مقادیر شتاب بحرانی، محاسبه شده است. شکل ۵ چگونگی توزیع شتاب بحرانی را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد.

IV- تهیه نقشه خطر زلزله با استفاده از مقادیر آستانه‌ای

جابه‌جایی نیومارک

در شکل ۲ نمودار جریان‌ی نشان‌دهنده مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله با استفاده از روش تعیینی نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار جریان‌ی مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله با استفاده از روش تعیینی

۲-۵. زاویه شیب

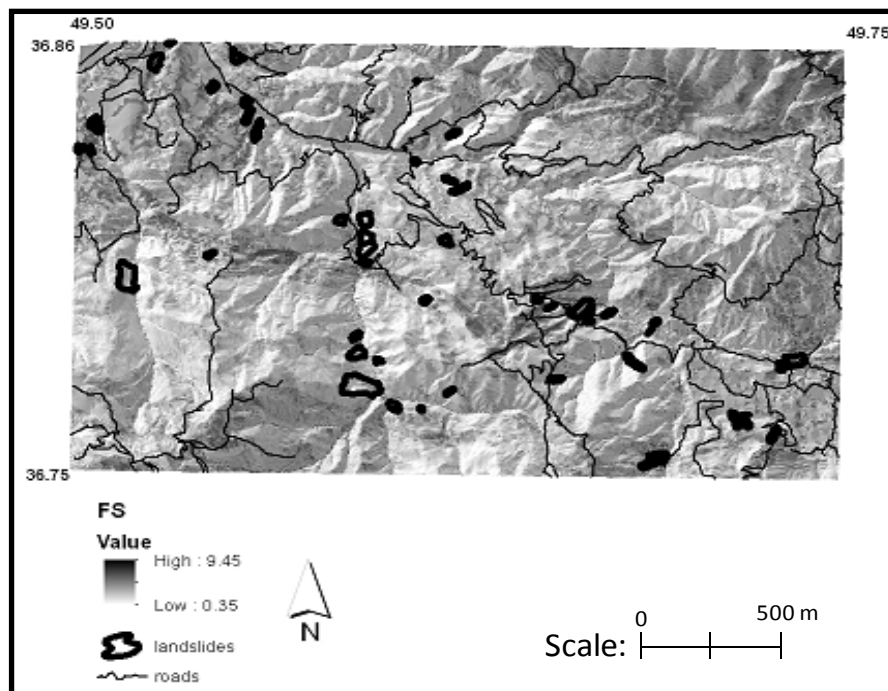
برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله، در ابتدا بایستی سطح زمین به واحدهای شیبی تقسیم شود و سپس تحلیل در هر یک از آن‌ها به صورت جداگانه انجام گیرد. به این منظور نقشه شیب محدوده مورد مطالعه از نقشه DEM تهیه گردیده است. شکل ۳ رابطه بین تعداد سلول‌های لغزشی در واحد مساحت را نسبت به زاویه شیب نشان می‌دهد. بر اساس این شکل بیشترین سلول‌های لغزشی در شیب‌های ۱۶ تا ۳۵ درجه اتفاق افتاده است.

۳-۵. پارامترهای ژئوتکنیکی

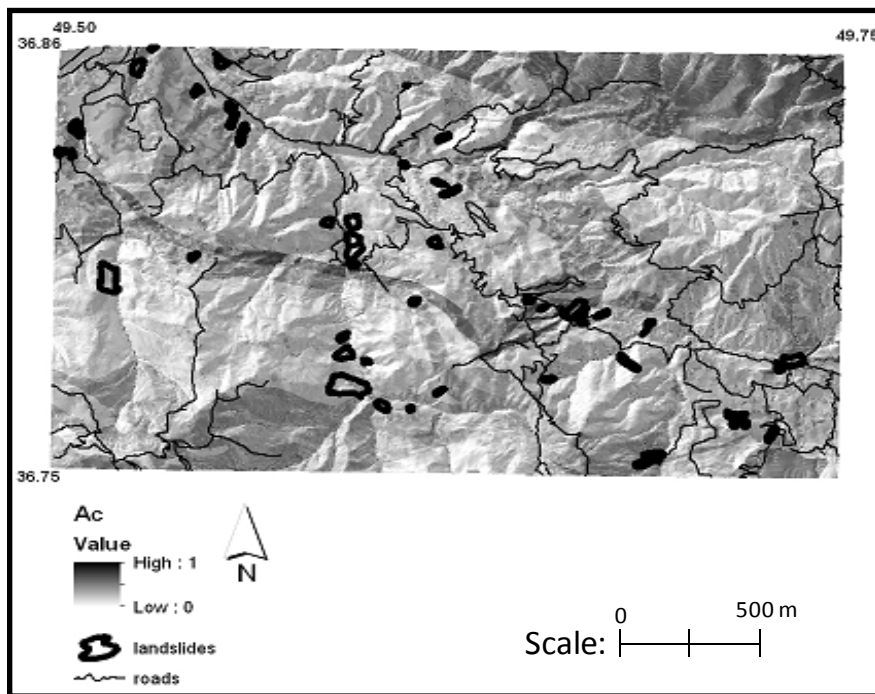
برای تحلیل میزان جابه‌جایی نیومارک و در نهایت تهیه نقشه خطر، داشتن بانک اطلاعاتی حاوی شتاب حدی برای شیب‌های منطقه ضروری است. برای محاسبه شتاب حدی نیز علاوه بر ضرورت وجود یکی از پارامترهای مورفولوژیکی دامنه (زاویه شیب)، پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح دامنه (شامل

جدول ۱. پارامترهای مقاومتی سازندهای مختلف به دست آمده در محدوده مورد مطالعه، با استفاده از معیار هوک و براون (۱۹۸۰) (مهدویفر، ۱۳۸۵)

واحد لیتولوژی	سازند/ سن	توصیف	مساحت رخنمون (km ²)	درصد رخنمون	γ (gr/cm ³)	ϕ°	C (KPa)
An	معادل کرج/ ائوسن	توده‌های ولکانیکی آندزیت و بازالت	۲/۷۰	۰/۸۷	۲/۶	۵۲	۱۵۰
Eat	معادل کرج/ ائوسن	توف‌های آندزیتی، داسیتی و آگلومرا	۹۷/۲۹	۳۱/۴۶	۲/۶	۱۷	۲۰
Ec	معادل کرج/ ائوسن	کنگلوмера	۰/۴۲	۰/۱۴	۲/۵	۳۹	۷۰
Ect	معادل کرج/ ائوسن	توف‌های آندزیتی و بازالتی	۱۱/۱۴	۳/۶۰	۲/۶	۲۰	۲۰
El	معادل کرج/ ائوسن	سنگ آهک خاکستری و توف	۱۰/۰۵	۳/۲۵	۲/۵	۴۴	۱۰۰
Evp	معادل کرج/ ائوسن	توف‌های آندزیتی، داسیتی و آگلومرا	۸/۸۲	۲/۸۵	۲/۲	۱۷	۲۰
Gb	معادل کرج/ ائوسن	الیون گابرو	۱/۱۲	۰/۳۶	۲/۸	۵۹	۲۵۰
Jkl	ژوراسیک	آهک‌های فسیل‌دار	۶/۸۷	۲/۲۲	۲/۵	۴۸	۳۰۰
Jvt	ژوراسیک	ولکانیک‌های آندزیتی، بازالت و توف	۴۰/۸۲	۴/۷۹	۲/۶	۳۱	۵۰
Kl1	کرتاسه	سنگ آهک	۲۰/۹۹	۶/۷۹	۲/۷	۴۸	۳۰۰
Km-2	کرتاسه	سنگ آهک هوازده شده مارن و ماسه سنگ	۹/۴۸	۳/۰۷	۲/۷	۲۲	۳۰
Pl-r	نسن/پرمین بالایی	آهک‌های ضخیم تا متوسط لایه	۴۲/۹۱	۱۳/۸۸	۲/۵	۲۲	۳۰
Ps-d	دروید/پرمین پایینی	شیل و ماسه سنگ	۳/۸۵	۱/۲۵	۲/۲	۲۲	۳۰
Qt	عهد حاضر	رسوبات عهد حاضر و پادگانه‌های آبرفتی	۳۱/۷۲	۱۰/۲۶	۱/۹۶	۳۴	۲۰
TRJsh-s	شمشک/ ژوراسیک	شیل و ماسه سنگ	۴۷/۰۴	۱۵/۲۱	۲/۴	۳۹	۷۰



شکل ۴. نقشه ضریب اطمینان محدوده مورد مطالعه



شکل ۵. نقشه شتاب بحرانی شیب‌های محدوده مورد مطالعه

شروع لغزش برای زمین‌لغزش‌های ناپیوسته (مثل سنگ‌ریزش‌ها) و زمین‌لغزش‌های پیوسته (مثل لغزش‌های خاکی و جریان‌ها) به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۳۲ متر بر ثانیه پیش‌بینی کرده‌اند. این درحالی است که در محدوده مورد مطالعه شدت آریاس بسیار بالاتر از شدت آستانه‌ی مورد نیاز جهت شروع زمین‌لغزش است.

۵-۷. تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل با استفاده از تحلیل نیومارک با استفاده از رابطه ۳ و استفاده از لایه‌های شدت آریاس و شتاب بحرانی، نقشه میزان جابه‌جایی نیومارک برای هر واحد شیبی به صورت نقشه خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله به دست آمده است (شکل ۷). این شکل توزیع جابه‌جایی نیومارک و در نتیجه نقشه خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مقدار آستانه‌ای مشخصی از جابه‌جایی نیومارک به منظور گروه‌بندی مناطق خطر مورد نیاز است. ویلسون و کیفیر (۱۹۸۵) مقدار آستانه جابه‌جایی نیومارک را برای شروع زمین‌لغزش برابر با ۱۰ و ۲ سانتی‌متر به ترتیب

۵-۶. شدت آریاس

به منظور تحلیل میزان جابه‌جایی نیومارک در هر واحد دامنه‌ای، همچنین یکی از پارامترهای حرکت قوی زمین (نظیر شدت آریاس) ضروری است. ناحیه مورد مطالعه در معرض سطح بالایی از جنبش قوی زمین در هنگام زلزله منجیل بوده است. در این مطالعه از شدت آریاس به عنوان پارامتر جنبش قوی زمین استفاده شده است. به منظور بدست آوردن این پارامتر برای زمین‌لغزش‌های مورد مطالعه از رابطه کاهندگی ارائه توسط مهدوی‌فر (۱۳۸۵)، استفاده شده است (رابطه ۴).

$$\log I_a = -3.880 + 0.810 M - \log R - 0.002 R \quad (4)$$

که در آن I_a شدت آریاس بر حسب متر بر ثانیه، M بزرگی گشتاوری و R فاصله بر حسب کیلومتر است. با توجه به بزرگی زلزله و نزدیکی چهارگوش‌های مورد مطالعه به مرکز زلزله، شدت آریاس بالا مورد انتظار است. نقشه شدت آریاس القایی در محدوده مورد مطالعه به منظور استفاده در تحلیل جابه‌جایی نیومارک مطابق با شکل ۶ در محیط GIS تهیه شده است.

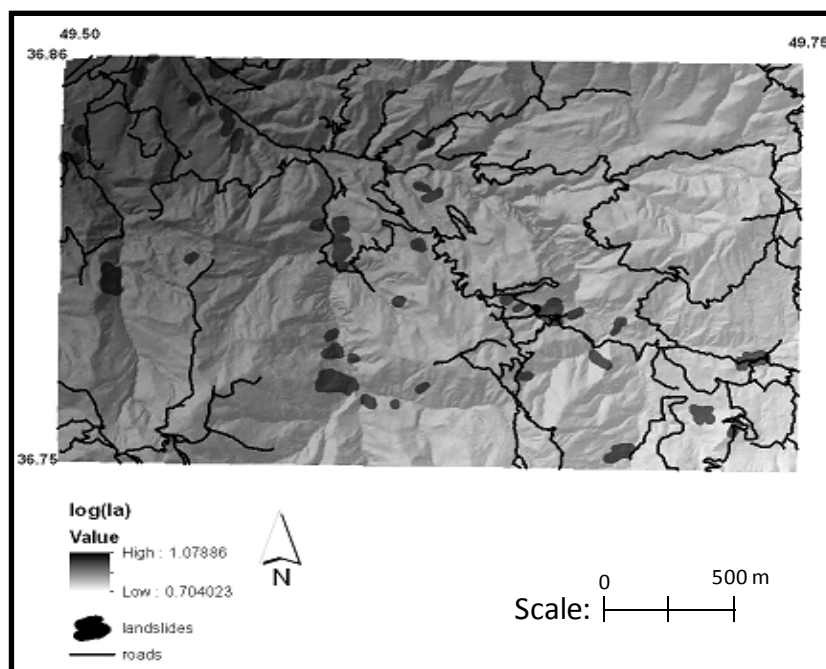
(Keefer & Wilson 1989) با مطالعه زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله‌های مختلف، آستانه شدت آریاس مورد نیاز جهت

تقریب‌زنی‌های پذیرفته شده در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیک و اشتباهات انسانی در طراحی و اجرا، فاکتورهایی هستند که در عدم قطعیت‌ها سهیم هستند. فاکتور ایمنی و در نتیجه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر که به وسیله روش‌های تعیینی مرسوم محاسبه می‌شوند، به طور مستقیم قادر به وارد کردن اثر عدم قطعیت‌های موجود نیستند. لذا به منظور کاهش عدم قطعیت‌های همراه با مدل‌های تعیینی، مدل‌های احتمالاتی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها قادر هستند خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله را ابتدا به صورت کمی درآورده و سپس به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر ارزیابی نمایند؛ به خصوص با ترکیب کردن تغییرپذیری برخی از پارامترهای ورودی به مدل، این روش‌ها به صورت احتمالاتی خطر وقوع زمین‌لغزش‌ها را در زلزله‌های آینده پیش‌بینی می‌کنند. در ادامه تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از پارامترهای ژئوتکنیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو در منطقه‌ای متأثر از زلزله منجیل، مورد مطالعه قرار گرفته و سپس نقشه احتمالاتی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله بر اساس مقادیر شبیه‌سازی شده ارائه شده است.

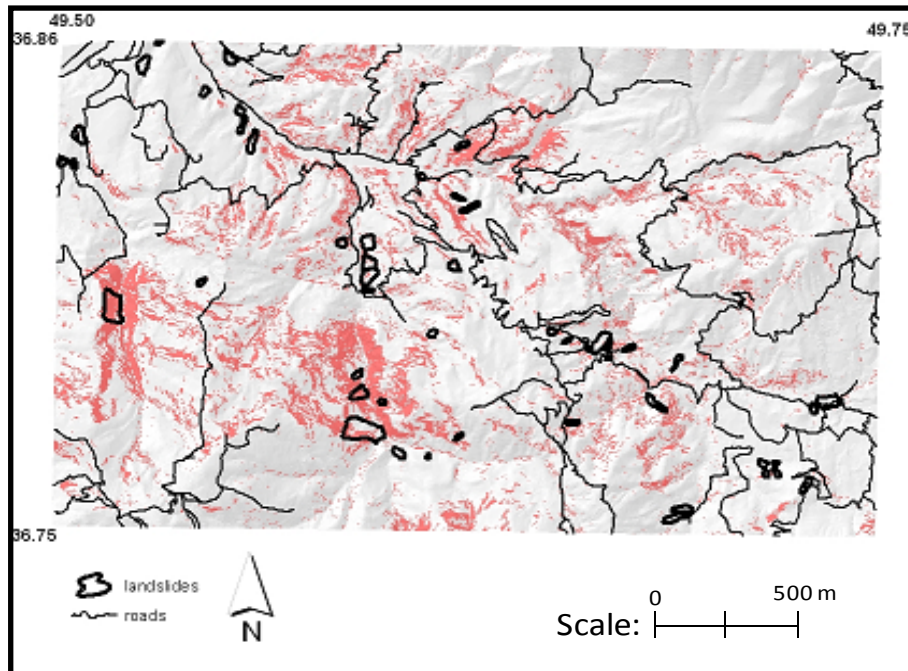
برای زمین‌لغزش‌های پیوسته (لغزش‌های چرخشی، لغزش‌های بلوکی، جریان‌های آهسته) و ناپیوسته (لغزش‌های سنگی، ریزش‌های سنگی و بهمن‌های سنگی) پیشنهاد کردند. با توجه به این شکل، مناطق تیره رنگ، نشان دهنده بخش‌هایی از محدوده مورد مطالعه است که در نتیجه زلزله منجیل جابه‌جایی بیش از ۲ سانتی‌متر را متحمل شده‌اند. با در نظر گرفتن این شکل تعداد ۳۱ زمین‌لغزش، معادل سطحی برابر ۶۸/۸۵ از کل زمین‌لغزش‌های فهرست شده در محدوده مورد مطالعه در مناطق تیره رنگ واقع شده‌اند. این در حالی است که زمین‌لغزش‌های زیاد اما با وسعت کوچک‌تر نیز در محدوده مورد مطالعه بوده است که قابل به نقشه در آوردن نبوده و یا فهرست نشده‌اند.

۶. روش احتمالاتی

در مباحث ژئوتکنیک، مسائل مربوط به پایداری شیب‌ها دارای عدم قطعیت زیادی هستند؛ آنومالی‌های زمین‌شناختی، تغییرپذیری محلی و ذاتی ویژگی‌های مواد تشکیل دهنده شیب‌ها، نبود داده‌های شاخص کافی، تغییر شرایط محیطی، مکانیزم‌های گسیختگی پیش‌بینی نشده، ساده‌سازی‌ها و



شکل ۶. نقشه رقومی شده توزیع شدت آریاس حاصل از زلزله منجیل در محدوده مورد مطالعه (رومکز زلزله در فاصله ۲۰/۶۴ کیلومتری گوشه شمال شرقی نقشه قرار دارد)



شکل ۷. نقشه خطر زمین لغزش‌های ناشی از زلزله به روش تعیینی بر اساس تحلیل نیومارک (بخش‌های تیره رنگ نشان دهنده مناطقی است که جابه‌جایی بیشتر از ۲ سانتی‌متر را تحمل کرده‌اند)

۶-۱. شبیه‌سازی مونت کارلو

ساده‌ترین شکل برای شبیه‌سازی عدم قطعیت‌های پارامترهای ژئوتکنیکی، عبارت از 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 مونت کارلو است. در تحلیل پایداری شیب، پارامترهای با درجات بالاتر عدم قطعیت، به صورت تصادفی شبیه‌سازی می‌شوند. این پارامترها شامل زاویه اصطکاک، چسبندگی، وزن واحد حجم توده لغزشی و ژرفای سطح آب زیرزمینی است. در این روش تعداد زیادی از متغیرهای خاک از طریق توزیع احتمالاتی سازگار تولید می‌شوند. برای هر سری از پارامترهای ورودی، مقدار مربوط به ضریب اطمینان با استفاده از مدل شیب بی‌نهایت یا مدل بلوک لغزشی نیومارک محاسبه می‌شود. در شبیه‌سازی مونت کارلو تعداد زیادی از مقادیر ضریب اطمینان مثلاً ۱۰۰۰ مقدار با تکرار ورود داده‌های متغیر تصادفی تولید می‌شود. در این مورد خروجی

نهایی شبیه‌سازی حدود ۱۰۰۰ فاکتور ضریب اطمینان و یا مقادیر جابه‌جایی نیومارک است که می‌تواند به صورت نمودار و نقشه‌هایی نشان داده شود. شبیه‌سازی مونت کارلو 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 (مثلاً روش نیومارک) و با توجه به مقدار عددی انتخاب شده در مرحله اول، محاسبه می‌گردد.

۳- مراحل ۱ و ۲ به تعداد بسیار زیادی تکرار می‌شوند و مقدار فاکتور ایمنی برای هر تکرار، محاسبه می‌شود.

۴- با استفاده از مقادیر عددی فاکتور ایمنی که از شبیه‌سازی مونت کارلو نتیجه شده‌اند (مراحل ۱ و ۲ و ۳)، می‌توان احتمال وقوع شرایط نامطلوب (مثلاً مقادیر جابه‌جایی بیشتر از یک مقدار آستانه‌ای) را به دست آورد.

برای تحلیل احتمالاتی پایداری سطوح شیبدار می‌بایست عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی تعیین شود. این عدم قطعیت‌ها به وسیله توابع توزیع احتمال و مؤلفه‌های احتمالاتی (مثل مقدار میانگین و انحراف معیار و ...) بیان می‌شوند. انتخاب نوع تابع توزیع، برای مدل‌کردن عدم قطعیت‌ها بخش مهمی از تحلیل است. در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیکی، اطلاعات کافی جهت تعیین شکل تابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی موجود نیست، بنابراین انتخاب تابع توزیع احتمال برای پارامترها بر اساس نتایج پروژه‌های مشابه و یا نتایج مطالعات محققین صورت می‌گیرد (Chowdhury, 1984).

گرچه معمول‌ترین و ساده‌ترین این توابع، تابع یکنواخت ساده یا نرمال است اما این روش برای کاربردهای عملی به خصوص برای پایداری شیب‌ها خیلی ساده به نظر می‌رسد؛ از طرفی استفاده از این مدل مستلزم در اختیار داشتن مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌های ورودی مثل چسبندگی و زاویه اصطکاک است و محاسبه آن‌ها مستلزم در اختیار داشتن تعداد زیادی داده است که با توجه به منطقه‌ای بودن مقیاس مورد مطالعه و تنوع واحدهای زمین‌شناختی امکان‌پذیر نیست. همچنین بسیاری از داده‌های معمول و طبیعی را نمی‌توان توسط توابع توزیع نرمال مدل کرد. این مسئله به خصوص برای کمیت‌هایی که از طریق بازدیدهای مکرر صحرایی و در شرایط هتروژن و یا از طریق قضاوت مهندسی به دست می‌آیند، اهمیت بیشتری دارد. در چنین مواردی اغلب ترجیح داده می‌شود که توابع توزیع عمومی‌تری برای مدل‌کردن عدم قطعیت‌ها مورد استفاده قرار گیرد؛ به این منظور استفاده از توابع توزیع بتا (β) به خصوص برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی توسط بسیاری از محققین توصیه شده است (Vose, 1996).

تابع توزیع β اغلب به خاطر سادگی و سهولت به صورت شکل اولیه آن و یا به صورت β -PERT مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع از تابع توزیع β از سه پارامتر کمینه (Minimum)، بیشترین احتمال (Most likely) و بیشینه (Maximum) مقادیر به عنوان ورودی استفاده می‌کند که امکان

۲-۶. مدل نیومارک برای ارزیابی احتمالاتی خطر زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله به دلیل مشکلات همراه با تعیین ضریب اطمینان دینامیکی، مدل جابه‌جایی نیومارک (Newmark, 1965)، به جای بسیاری از روش‌های معمول شبه استاتیکی در مدل‌های تحلیل پایداری لرزه‌ای شیب مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مطالعه به منظور محاسبه مقادیر جابه‌جایی شیب‌ها در نتیجه زلزله منجیل در پهنه مورد مطالعه، از رابطه ۳ (پیشنهادی برای منطقه البرز و ایران مرکزی؛ مهدوی‌فر، ۱۳۸۵)، استفاده شده است، شدت آریاس (Arias, 1970) نیز به عنوان پارامتر زلزله برای هر نقطه در پهنه مورد مطالعه، اغلب با استفاده از رابطه ۴ مدل می‌شود. روابط مذکور، به عنوان ابزارهای محاسباتی ساده و قابل قبول جهت ارزیابی جابه‌جایی نیومارک با داشتن پارامترهای ژئوتکنیکی و لرزه‌ای مشخص در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است.

۳-۶. انتخاب تابع توزیع مناسب

مدل نیومارک مستلزم در اختیار بودن چندین پارامتر است که برخی از آن‌ها حاصل بازدیدها و ارزیابی‌های صحرایی (مثل چسبندگی و زاویه اصطکاک)، برخی حاصل رکورد‌های لرزه‌ای (شدت آریاس) و برخی حاصل داده‌های توپوگرافی (برای مثال نقشه شیب تهیه شده در محیط GIS) هستند. در رابطه با داده‌های ژئوتکنیکی خصوصیات انواع خاک‌ها از آزمایش‌های آزمایشگاهی به دست آمده و تغییرپذیری مکانی آن‌ها از طریق نقشه‌های زمین‌شناسی استخراج می‌شوند. تعیین دقیق یک چنین خصوصیتی اغلب مشکل است، به علاوه این‌که معمولاً مرز دقیق واحدهای سنگ‌شناختی در نقشه‌های زمین‌شناسی گزارش نمی‌شوند و فرض بر این است که این پارامترها برای واحدهای سنگ‌شناسی مختلف هموزن است. علاوه بر این معمولاً نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس منطقه‌ای دارای دقت پایینی در توزیع مکانی پارامترها هستند. به دلایل فوق در نظر گرفتن پارامترهای مدل به صورت احتمالاتی، منطقی‌تر از تعیینی و مقادیر ثابت است.

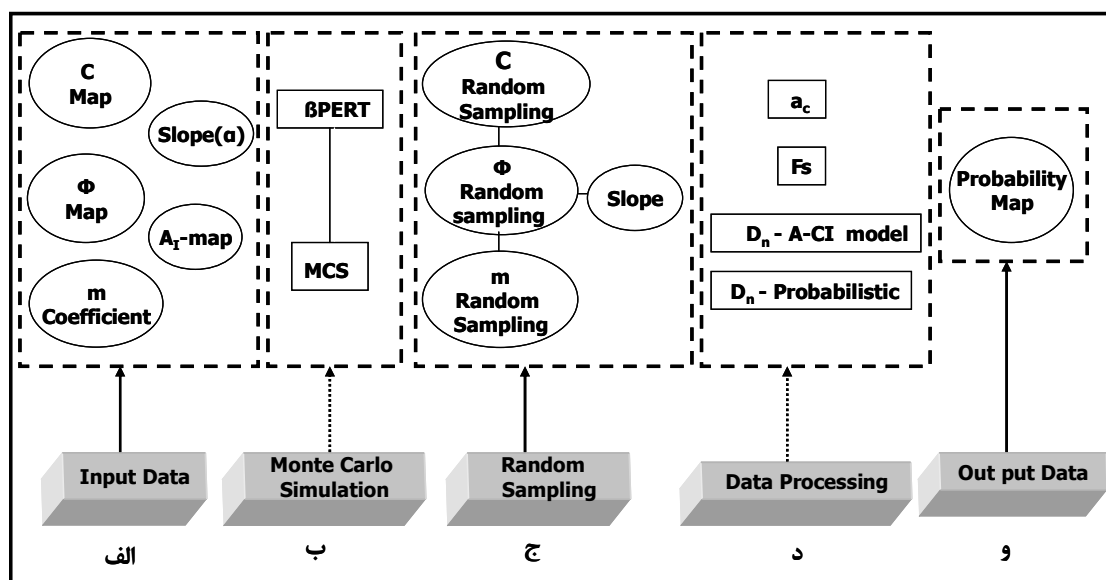
این داده‌ها شامل مشخصات زمین‌شناسی واحدهای مختلف (مثل نقشه زمین‌شناسی)، پارامترهای لرزه‌ای و پارامترهای ژئوتکنیکی هستند. این داده‌ها شامل یک سری نقشه‌های رستری از جمله نقشه‌های شیب و نقشه شدت آریاس می‌باشند که معرف اطلاعاتی که با دقت در حد سلول‌های رستری هستند.

نقشه شیب منطقه مورد مطالعه قبلاً با استفاده از DEM و نقشه شدت آریاس حاصل از نگاشت‌های لرزه‌ای، با استفاده از رابطه ۴ مدل شده است. پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای موجود در منطقه مورد مطالعه (جدول ۲) نیز به عنوان ورودی دیگر، به صورت جداگانه از پارامترهای آماری که در یک فایل ذخیره شده‌اند، وارد شدند.

دسترسی به آنها ساده‌تر است. بنابراین در شرایطی که به لحاظ آماری تعداد داده‌های حاصل از آزمایش‌ها کم باشد این توزیع توصیه می‌شود (Vose, 1996). در این تحقیق با توجه به کمبود داده‌های ژئوتکنیکی در محدوده مورد مطالعه، از این نوع توزیع به منظور استفاده در تحلیل شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است.

۶-۴. کدهای نوشته شده در محیط MATLAB و داده‌های ورودی

مسیر انجام برنامه با جزئیات بیشتر در شکل ۸ نشان داده شده است. کدهای نوشته شده به منظور انجام فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو و نهایتاً احتمالاتی کردن نتایج، در ورودی خود، داده‌های مورد نیاز برای انجام تحلیل نیومارک را می‌پذیرند.



شکل ۸. نمودار گردش شماتیک کدهای نوشته شده و مسیر اجرای برنامه

و حداکثر استفاده شده و سایر پارامترها ثابت فرض شده است. این انتخاب به خاطر ساده شدن تحلیل و تمرکز بیشتر روی تغییرپذیری پارامترهای ژئوتکنیکی نسبت به سایر پارامترها انجام شده است. به این منظور پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر اساس مطالعات صحرایی و استفاده از نرم‌افزار Roclab به دست آمده‌اند. خروجی حاصل از این

۶-۵. چگونگی تعیین مقادیر آماری پارامترهای ژئوتکنیکی همان‌طور که ذکر شد، برنامه تهیه شده برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی را به صورت پارامترهای آماری می‌پذیرد. به این منظور برای استفاده از تابع توزیع β -PERT، برای سه پارامتر چسبندگی، زاویه اصطکاک و نسبت ورقه اشباع شده، از سه مقدار حداقل، بیشترین احتمال

شبیه‌سازی مونت‌کارلو مورد استفاده قرار گرفته است، به طوری که نمونه‌های تصادفی از هر یک از این پارامترها با توزیع مورد نظر تولید و سپس با معادلات نیومارک ترکیب می‌شوند تا توزیع احتمالاتی جابه‌جایی نیومارک نهایی را به دست دهند. از پارامترهای دیگر مورد نیاز برای تحلیل نیومارک و نهایتاً محاسبه فاکتور ایمنی، مقدار وزن واحد حجم مربوط به هر یک از واحدهای زمین‌شناختی 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 ضخامت ورقه که اشباع شده است) برابر با شرایط خشک (صفر) و بیشترین مقدار آن برابر با اشباع کامل (یک) و محتمل‌ترین مقدار آن برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

مقادیر به عنوان محتمل‌ترین مقدار پارامترهای ژئوتکنیکی در نظر گرفته می‌شوند. این مقادیر بایستی در اینجا به عنوان مقادیر معرف که بیشترین احتمال نزدیکی را به کمیت واقعی دارند در نظر گرفته شوند. به منظور تعیین مقادیر حداقل پارامترهای ژئوتکنیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) برای هر یک از واحدهای موجود در منطقه مورد مطالعه فرض وجود توده سنگ کاملاً خردشده و برای مقادیر حداکثر، مقادیر به دست آمده برای سنگ‌بکر برای هر یک از واحدها در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۲ پارامترهای آماری مورد استفاده در شبیه‌سازی مونت‌کارلو را نشان می‌دهد. بر اساس توزیع در نظر گرفته شده، جداولی از مقادیر عددی شامل پارامترهای آماری ژئوتکنیکی برای هر یک از واحدها در نظر گرفته شده است. این پارامترها جهت انجام یک سری

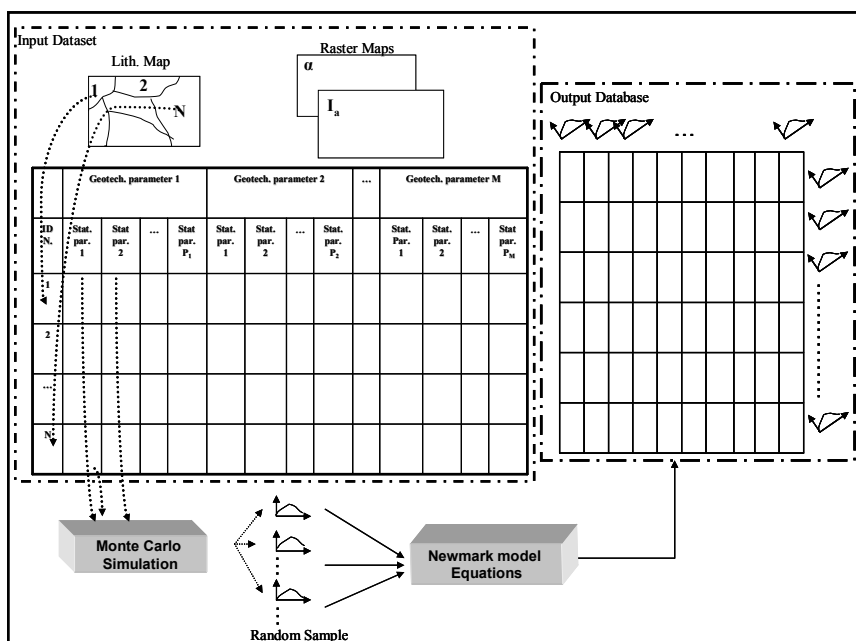
جدول ۲. پارامترهای آماری مورد استفاده در شبیه‌سازی مونت‌کارلو (M : نسبت ضخامت ورقه‌ای که اشباع شده به کل ورقه شیب، ϕ° زاویه اصطکاک داخلی، c' چسبندگی و γ وزن واحد حجم و Min ، $Most\ likely$ و Max به ترتیب حداقل، محتمل‌ترین مقدار و ماکزیمم مقدار برای هر پارامتر است).

m			ϕ°			c'(Kpa)			γ (gr/cm ³)	Geological unite
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
۱	۰/۵	۰	۵۴	۵۲	۳۴	۱۶۰	۱۵۰	۱۲۰	۲/۶	Dc-An
۱	۰/۵	۰	۲۶	۲۲	۲۰	۵۰	۳۰	۲۰	۲/۵	P1r
۱	۰/۵	۰	۲۵	۲۲	۲۰	۴۰	۳۰	۲۰	۲/۲	Psd
۱	۰/۵	۰	۱۹	۱۷	۱۴	۲۵	۲۰	۱۵	۲/۲	Evp
۱	۰/۵	۰	۳۸	۲۰	۱۴	۴۰	۲۸	۲۳	۲/۶	Eat
۱	۰/۵	۰	۳۲	۳۱	۲۰	۱۰۰	۵۰	۲۰	۲/۶	Jvt
۱	۰/۵	۰	۴۲	۳۹	۳۴	۱۲۰	۷۰	۶۰	۲/۴	TRjs
۱	۰/۵	۰	۵۰	۴۸	۳۱	۳۴۰	۳۰۰	۲۵۰	۲/۵	Jkl
۱	۰/۵	۰	۵۱	۴۸	۳۲	۳۲۰	۳۰۰	۲۴۰	۲/۷	K1l
۱	۰/۵	۰	۲۴	۲۲	۱۸	۴۰	۳۰	۲۵	۲/۷	K2m
۱	۰/۵	۰	۶۰	۵۹	۴۰	۲۷۰	۲۵۰	۲۲۰	۲/۸	Gb
۱	۰/۵	۰	۴۵	۳۹	۳۴	۸۰	۷۰	۵۰	۲/۵	Ec
۱	۰/۵	۰	۴۶	۴۴	۴۲	۱۲۰	۱۰۰	۷۵	۲/۵	El
۱	۰/۵	۰	۴۵	۳۴	۲۵	۳۵	۲۰	۱۷	۱/۹۶	Qt

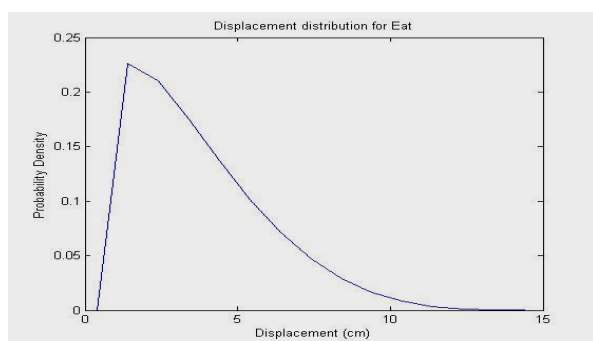
6-7. روش تحلیل

همان‌طور که ذکر شد، در این مطالعه عدم قطعیت‌های ناشی از پارامترهای ژئوتکنیکی شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مورد بررسی قرار گرفته 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 شامل مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده در محیط MATLAB است که احتمال‌های آماری جابه‌جایی نیومارک را برای هر یک از واحدهای شبیه منطبقه مورد مطالعه محاسبه می‌کند. شکل ۸ کدهای نوشته شده و مسیر اجرای برنامه را نشان می‌دهد. در این شکل قسمت‌های "ب" و "د" برنامه‌های نوشته شده و قسمت‌های "الف، ج، و" به ترتیب ورودی‌ها، کمیت‌های میان برنامه‌ای و خروجی‌های برنامه را نشان می‌دهند. در قسمت "الف" پارامترهای ورودی شامل نقشه شیب، شدت آریاس، پارامترهای ژئوتکنیکی و m به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. در قسمت "ب"، کدی به نام MCS نوشته شده که برنامه از آن به منظور انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر اساس تابع توزیع احتمال ذکر شده (β -PERT) استفاده می‌کند و اعداد تصادفی به تعداد ۱۰۰۰ داده برای هر یک از پارامترها در هر واحد زمین‌شناختی در محدوده تعریف شده براساس پارامترهای آماری تولید می‌کند (ج). در مرحله بعد به ازای هر یک از مقادیر تصادفی تولید شده و با استفاده از سایر پارامترهای مورد نیاز برای هر واحد (مثل γ ، وزن واحد حجم) و یا کل محدوده مورد مطالعه (مثل t ، ضخامت ورقه مستعد لغزش)، فاکتور ایمنی به صورت احتمالاتی برای هر سلول محاسبه می‌شود. این مرحله از کدهای نوشته شده به نام‌های F_s ، ac ، $Dn-A-CI$ model و $Dn-Probabilistic$ استفاده می‌کند. شکل ۹ تحلیل انجام شده را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود داده‌های ورودی رستری، شامل نقشه شیب و

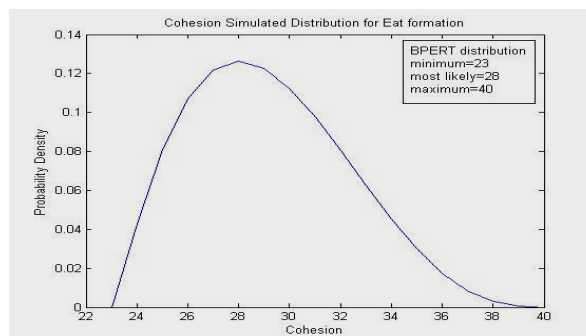
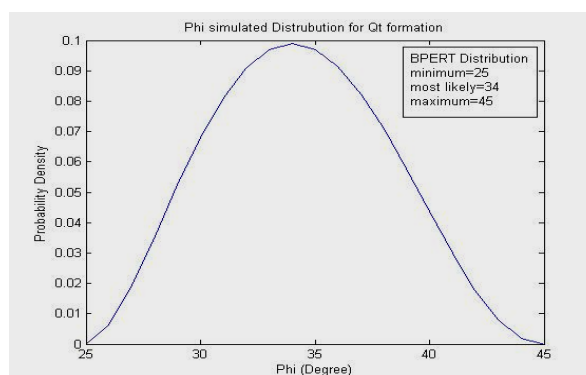
نقشه شدت آریاس می‌باشد که به عنوان بخشی از داده‌های ورودی در نظر گرفته می‌شود. همچنین نقشه لیتولوژی معرف واحدهای زمین‌شناختی (از ۱ تا N) در این شکل نشان داده شده است که به ازای هر یک از واحدهای زمین‌شناختی از ۱ تا N می‌توان تعداد M پارامتر ژئوتکنیکی را به عنوان ورودی در نظر گرفت. همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این مطالعه بررسی عدم قطعیت‌های سه پارامتر ϕ ، c و m در نظر گرفته شده است. هر یک از این پارامترها دارای پارامترهای آماری مورد نیاز بر اساس توزیع در نظر گرفته شده هستند، به طوری که در توزیع مورد بررسی در این مطالعه سه پارامتر آماری حداقل، محتمل‌ترین مقدار و حداکثر مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق شکل به ازای هر یک از این داده‌ها در یک فرآیند شبیه‌سازی مونت‌کارلو و با در نظر گرفتن تابع توزیع اعمال شده به برنامه، ۱۰۰۰ نمونه تولید می‌شود. به عنوان مثال برای واحد زمین‌شناختی با مشخصه Eat (توف‌های داسیتی-آندزیتی-آگلومرا) با مقادیر حداقل، محتمل‌ترین مقدار و حداکثر زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب برابر ۱۴، ۲۰، ۳۸ درجه و چسبندگی ۲۳، ۲۸، ۴۰ کیلوپاسکال و نسبت ضخامت ورقه اشباع شده به ترتیب ۰، ۰/۵ و ۱ است. نمودار توزیع احتمالی نمونه‌های تصادفی تولید شده برای این واحد با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو براساس مقادیر پارامترهای آماری ورودی مطابق با شکل ۱۰ است. در مرحله بعد برای هر یک از نمونه‌های تولید شده (یعنی ۱۰۰۰ داده به ازای هر پارامتر از هر یک از واحدهای زمین‌شناسی) ضمن محاسبه فاکتور ایمنی و شتاب بحرانی، بر اساس مدل جابه‌جایی نیومارک با در نظر گرفتن مقدار آستانه‌ای ۲ سانتی‌متر، احتمال این‌که جابه‌جایی در هر سلول از محدوده مورد مطالعه (براساس نقشه رقومی شده محدوده مورد مطالعه) از مقدار آستانه‌ای تجاوز کند محاسبه شده است. شکل ۱۱ به عنوان مثال توزیع احتمالاتی افزایش جابه‌جایی نیومارک از مقدار آستانه‌ای ۲ سانتی‌متر برای واحد زمین‌شناختی Eat را نشان می‌دهد.



شکل ۹. شماتیکی از تحلیل‌های انجام شده با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو از داده‌های ورودی تا خروجی



شکل ۱۱. توزیع احتمالاتی افزایش جابه‌جایی نیومارک از مقدار آستانه‌ای برابر با ۲ سانتی‌متر برای واحد زمین‌شناختی Eat (توف‌های داسیتی-آندزیتی)



شکل ۱۰. نمودار توزیع احتمالی نمونه‌های تصادفی تولید شده با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو بر اساس مقادیر پارامترهای آماری ورودی برای واحد زمین‌شناختی Eat (توف‌های داسیتی-آندزیتی-آگلومرا)

۶-۷. خروجی برنامه (نقشه احتمالاتی)
همان‌طور که ذکر شد، خروجی برنامه را می‌توان به صورت تعداد زیادی از نمودارهای احتمالاتی (۱۰۰۰ داده در این مطالعه) و یا یک نقشه احتمالاتی برای منطقه مورد نظر گزارش کرد. برای مثال این نقشه‌ها می‌توانند به صورت نقشه‌هایی که در آن مقادیر احتمالاتی برای هر واحد شبیبی، از یک مقدار آستانه‌ای جابه‌جایی نیومارک بیشتر شود، ارائه شوند. همان‌طور که ذکر شد، در این مطالعه مقدار آستانه‌ای جابه‌جایی نیومارک برابر با ۲ سانتی‌متر که حداقل مقدار جابه‌جایی برای

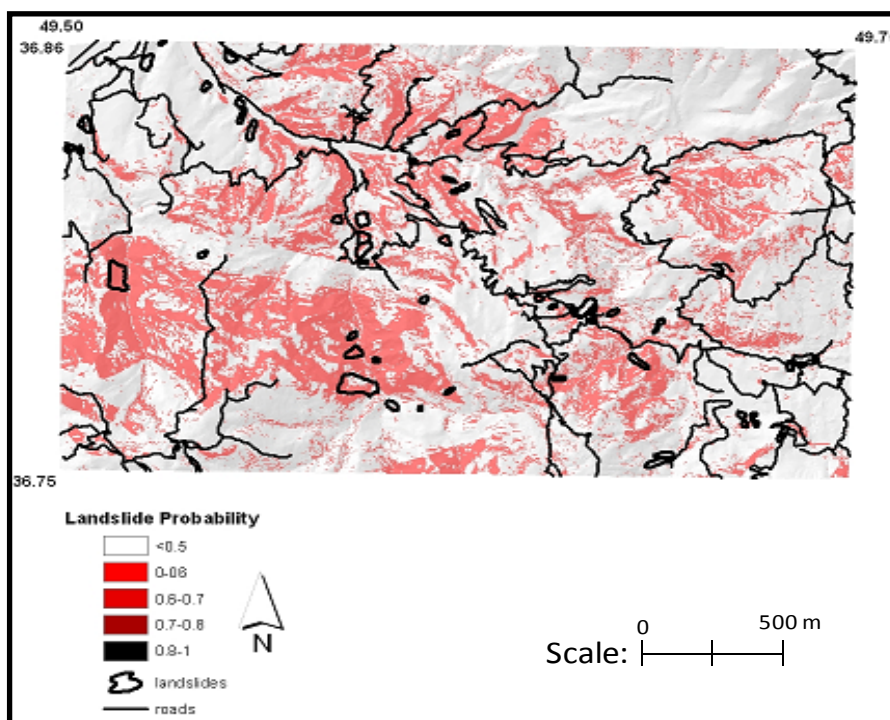
تعیینی (شکل ۷) نشان می‌دهد که نقشه حاصل از روش احتمالاتی نسبت به روش تعیینی، مناطق بیشتری از واحدهای شیبی و در نتیجه تعداد بیشتری از زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله منجیل را شامل شده و به شرایط واقعی نزدیک‌تر است. به منظور کمی کردن این مقایسه، در این مطالعه از روش ارائه شده توسط Gee (1992) استفاده شده است که درجه کارایی نقشه پهنه‌بندی خطر را به وسیله پارامتری به نام QS ارزیابی می‌کند. در این پارامتر که بر اساس محاسبه میزان پراکنش داده‌ها حول میانگین است، نقشه‌ای بهتر خواهد بود که QS آن بیشتر باشد. در این روش ابتدا پارامتری به نام نسبت تراکم (Density Ratio) برای هر پهنه محاسبه می‌شود (رابطه ۵):

$$DR = \frac{\%L}{\%A} \quad (5)$$

که در آن %L درصدی از سطح کل زمین لغزش‌های موجود در منطقه است که در پهنه مورد نظر واقع شده است و %A درصدی از سطح منطقه است که توسط پهنه اشغال شده است.

زمین‌لغزش‌های ناپیوسته است (Wilson & keefer, 1985) در نظر گرفته شده است. شکل ۱۲ نقشه احتمالاتی DN را بر اساس مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از توزیع β -PERT برای محدوده‌ای از منطقه متأثر از زلزله منجیل بر اساس تحلیل انجام شده نشان می‌دهد. نقشه احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو سطوحی از خطر زمین‌لغزش را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به این بررسی ۶۹/۴٪ زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه در محدوده با احتمال خطر بالا (احتمال بیش از ۰.۵۰٪) قرار گرفته‌اند که نشان دهنده کارایی مناسب نقشه احتمالاتی خطر در پیش‌بینی وقوع زمین لغزش‌های ناشی از زلزله است.

۷. مقایسه با نتایج حاصل از روش تعیینی و احتمالاتی
نقشه احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو سطوحی از خطر زمین‌لغزش را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقایسه نقشه تهیه شده بر اساس شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل



شکل ۱۲. نقشه احتمالاتی خطر زمین لغزش‌های ناشی از زلزله بر اساس مقادیر حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مقادیر آستانه‌ای جابه‌جایی نیومارک (D_n) برابر ۲ سانتی‌متر برای محدوده‌ای از منطقه متأثر از زلزله منجیل ۱۳۶۹

تقسیم شده است. نقشه خطر زمین لغزش‌های ناشی از زلزله به روش تعیینی (شکل ۷) به دو پهنه با خطر بالا (تیره رنگ، گروه ۱) و خطر پایین (غیرتیره رنگ، گروه ۲) و نقشه تهیه شده به روش احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو (شکل ۱۲) نیز به دو 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 ۳ خلاصه محاسبات انجام شده و مقدار پارامتر QS برای هر یک از روش‌ها آمده است. با توجه به جدول ۳ هر چند روش تعیینی پوشش مناسبی از زمین لغزش‌های ناشی از زلزله را در منطقه با خطر بالا نشان می‌دهد (۶۸/۸۵٪)، اما با در نظر گرفتن مقادیر پارامتر QS با توجه به بالاتر بودن این پارامتر برای مدل احتمالاتی نسبت به مدل تعیینی (۲۶۴/۸۳ در برابر ۵۹/۴۰)، این روش هم‌خوانی بهتری بین مدل و واقعیت، با استفاده از توزیع β -PERT داشته و در نتیجه، نتایج حاصل از این روش واقع بینانه‌تر است.

جدول ۳. محاسبه پارامترهای روش (Gee, 1992) جهت مقایسه روش‌های تعیینی و احتمالاتی

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

زمین لغزش‌های ناشی از زلزله در سراسر ناحیه مورد مطالعه به دست می‌آیند.

کاربرد این روش در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که این روش در پیش‌بینی مناطق خطر در مقایسه با سایر روش‌ها مؤثرتر است، هر چند بسیاری از مشکلات و مسائل به دلیل پیچیدگی زمین‌شناختی منطقه، هنوز حل نشده است. این روش که بر اساس مجموعه‌ای از کدهای نوشته شده در محیط MATLAB تدوین شده است، انعطاف‌پذیر بوده و می‌توان به آسانی آنرا توسعه داده و مسائل پیچیده‌تری را به آن وارد کرد. برای مثال علاوه بر مدل نیومارک، سایر مدل‌ها را نیز می‌توان مورد استفاده قرارداد یا می‌توان از توابع توزیع مختلفی استفاده کرد و یا پارامترهای بیشتری را مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان مدل را برای سایر مناطق نیز تعمیم داد.

بر این اساس DR برابر یک بدین مفهوم است که تراکم زمین لغزش‌ها در پهنه مورد نظر برابر تراکم زمین لغزش متوسط منطقه است. به همین صورت DR بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از یک بیانگر فراوانی بیشتر یا کمتر زمین لغزش‌ها در پهنه مورد نظر نسبت به متوسط تراکم لغزش‌ها است. بعد از محاسبه مقدار DR برای کلیه زیرگروه‌ها، مقدار QS برای هر مدل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$QS = \sum_{i=1}^n (DR_i - 1)^2 \times \%A_i \quad (6)$$

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 پارامتر QS مجموع مجذور اختلافات نسبت تراکم هر پهنه را نسبت به متوسط آنها (تراکم متوسط منطقه) محاسبه می‌کند. به منظور استفاده از این روش جهت مقایسه روش‌های تعیینی و احتمالاتی (نقشه‌های ۸ و ۱۳) هر دو نقشه به دو گروه یا پهنه

۱. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا یک روش تعیینی جهت تحلیل خطر زمین لغزش‌های ناشی از زلزله در محدوده متأثر از زلزله منجیل ارائه شده و سپس روشی جهت تهیه نقشه‌های احتمالاتی خطر برای زمین لغزش‌های ناشی از زلزله معرفی شده است. مقایسه این دو روش نشان می‌دهد روش احتمالاتی بر اساس تحلیل نیومارک، این امکان را می‌دهد که برخی از عدم قطعیت‌های ناشی از داده‌های زمین‌شناختی، ژئومورفولوژیکی و لرزه‌ای به صورت توابع توزیع آماری در مدل وارد شوند. روش مذکور اطلاعات و هیستوگرام حاصل از مقادیر به دست آمده را محاسبه و مقادیر عددی آن‌ها را برای هر سلول ذخیره می‌کند. سپس نقشه‌های آستانه احتمالاتی برای پارامترهای معرف، نظیر جابه‌جایی نیومارک به عنوان نماینده‌هایی از توزیع مکانی خطر

منابع

- کمک‌پناه، ع. و ن، حافظی مقدس، 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 زمین لغزش‌های ناشی از زلزله در کشور. پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- Arias, A., 1970. A measure of earthquake intensity. In: Hansen R.J. (Ed.), *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*, 23: 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.
- 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.
- Jibson, R.W., 2007. Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, 91: 912-918.
- Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95:406–421.
- Keefer, D.K., Wilson, R.C., 1989. Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments, in: Sadler, P.M., Morton, D.M. (Eds.), *Landslides in a Semi-Arid Environment*, Inland Geological Society, 2: 118–149.
- 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.
- Van Western, C.J., 2000. The modeling of landslide hazards using GIS, *Survey in Geophysics*, Kulwer Academic Publishers, 21:241-225.
- 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.
- Xie, M.W., Esaki, T., Zhou, G.Y., Mitani, Y., 2003. Three-dimensional stability evaluation of landslides and sliding process simulation using a new geographic information systems component, *Environmental Geology*, 43: 503-512.

