فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
زمستان ۱۳۸۶، شماره‌ی چهلم، ص. ۱۳-۱۷

تحلیل ریسک وقوع زلزله در پروژه‌های ساخت برای نقاط مختلف ایران با استفاده از رگرسیون‌های درجه دوم و خطی GLS و کمک از تست‌های آماری و مدل آماری پواسن

مرتضی شکری‌قصبه (دانشجوی دکتری)
مدیریت پروژه، دانشگاه ساوث استرالیا
عباس بخشیانی (استادیار)
دانشکده فنی، دانشگاه تهران
مسعود مفید (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار برای هر پروژه‌ی ساختمانیِ واقع در مناطق بیست‌گانه‌ی زلزله‌خیز ایران ــ در مرحله‌ی طرح، یا در زمان اجراء و حتی برای یک پروژه‌ی پایان یافته ــ عددی به‌عنوان ضریب ریسک پروژه برای احتمال وقوع زلزله‌یی خاص در طول زمان بهره‌برداری از آن پروژه به‌دست می‌آید. برای یافتن این عدد برای هرکدام از مناطق فوق، از رابطه‌ی خطی گوتنبرگ-ریشتر برای مرتبط کردن بزرگی زلزله و تعداد زلزله‌های با بزرگی برابر و بزرگ‌تر از مقداری خاص، و همچنین برای به‌دست آوردن معادله‌ی خط مذکور از رگرسیون خطی کلاسیک استفاده شده است. از آزمون‌هایی برای بررسی ناهمسانی واریانس‌ها و وجود خود همبستگی در مورد داده‌های موجود استفاده شده که این دو خصلت در تعیین معادلات یک خط توسط رگرسیون خطی کلاسیک در نظر گرفته نشده‌اند. در صورت وجود هرکدام از دو خصلت، از طریق راه‌های درمانیِ مربوط به هریک، که به‌نام رگرسیون GLS خوانده می‌شود، بهترین خط رگرسیون برای رابطه‌ی گوتنبرگ-ریشتر محاسبه شده است. همچنین رابطه‌ی بزرگی زلزله و تعداد آن به‌صورت یک معادله‌ی درجه دوم نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از توزیع آماری پواسن و با داشتن زلزله‌ی طرح پروژه و مدت بهره‌برداری از پروژه که با همان مفاهیم پارامترهای بزرگی زلزله و دوره بازگشت زلزله در معادلات به‌کار گرفته می‌شوند، می‌توان پارامتر سوم که همان ریسک زلزله طرح است را برای پروژه ساخت خاص در محلی خاص و برای مدت بهره برداری مد نظر از آن پروژه محاسبه کرد. این نوشتار در راستای دانش مهندسی مدیریت ساخت به نگارش در آمده است.

مقدمه

ایران در نوار جغرافیایی هیمالیا-آلپ مشهور به «آلپاید» ــ که از نگاه زمین ساختی (یا تکتونیکی) و همچنین لرزه‌خیزی، بسیار ناآرام و پرتکاپو است ــ قرار دارد. از این رو در مورد طرح‌های بزرگ عمرانی و صنعتی مانند ساخت سدها، نیروگاه‌های مختلف انرژی، پالایشگاه‌ها و...، خسارت‌های ایجاد شده توسط زلزله، علاوه بر جنبه‌ی اقتصادی، از لحاظ اجتماعی، بهداشتی و حتی سیاسی و استراتژیک نیز تأثیراتی دارد. برآورد خطر زلزله در نقاط زلزله‌خیز، خصوصاً برای تأسیسات مهم، در محل اجرای پروژه واقعاً حساس و پر اهمیت است و نباید به آسانی از آن گذشت. از این رو با در نظر داشتن خطر وقوع زلزله، که در ایران نسبت به بلایای طبیعی دیگر خطرات و اثرات بیشتری دارد، می‌توان برای هر پروژه‌ی مطرح شده در ایران با در دست داشتن احتمال وقوع آن در طی عمر مفید سازه‌ی حاصل از پروژه، یکی از عوامل مهم مؤثر بر ریسک نهایی یک پروژه را در دست داشت. این نوع تحقیقات را می‌توان به دو رشته از شاخه‌های تخصصی مهندسی عمران، یعنی زلزله و مدیریت ساخت، نسبت داد. در شاخه‌ی زلزله این تحقیقات برای کشور ایران توسط محققین خارجی و داخلی مختلف و با شیوه‌های بررسی گوناگون انجام پذیرفته است [۱] تحقیق حاضر، به‌بحث درباره‌ی «مدیریت ساخت» خواهد پرداخت.

روابط بزرگی زلزله و تعداد رخداد آن

بهترین رابطه‌یی که برای بیان ارتباط بین تعداد زلزله‌ها و بزرگی آنها وجود دارد توسط ریشتر و گوتنبرگ در سال ۱۹۴۱ تعیین شده است که رابطه‌یی خطی و به‌صورت:

$$Log(N) = A - bM$$

است[۱] که در آن N تعداد زلزله‌های با درجه بزرگی بیشتر یا مساوی M در مدت زمان مورد بررسی و A و b ثابت‌های زلزله برای هر منطقه خاص می‌باشند. با داشتن تعداد زلزله‌های فوق در یک محدوده زمانی معین مثلاً از صد سال قبل تاکنون و یا مدت زمان مناسب دیگر

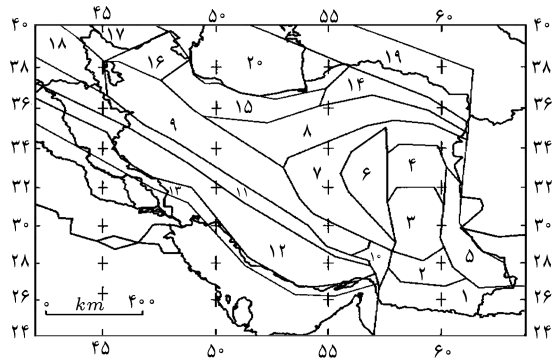
می‌توان ضرایب ثابت A و b را با روشی مانند کاربرد رگرسیون خطی یا روش کم‌ترین مربعات تخمین زد. مثلاً برای زلزله‌های ایران خط $Log(N) = ۵/۷۹ - ۰/۶۷M$، برای دوره ۶۹ ساله پیشنهاد شده است.[۲] از طرفی می‌توان فرضیات دیگری برای رابطه‌ی میان بزرگی زلزله و لگاریتم تعداد رخداد آن در نظر گرفت که یکی از آنها برقراری رابطه‌ی درجه‌ی دوم بین بزرگی زلزله و تکرر آن در دوره‌ی زمانی معین است. (این روش کم‌تر در ایران مورد بررسی قرار گرفته است). ممکن است رابطه‌ی درجه دوم از این قرار باشد:

$$Log(N) = A + bM + cM^{۲}$$

معمولاً این رابطه ضریب همبستگی بهتری در مقایسه با مدل خطی آن نتیجه می‌دهد ولی میل این فرمول هم به سوی رابطه‌ی خطی است و در بسیاری از موارد عدد c کوچک است و به سمت صفر میل می‌کند. این روابط ممکن است برای یک منطقه‌ی کوچک تکتونیکی یا مناطق بزرگ‌تر بیان شود. درمورد ایران محققین مختلف نظرات متفاوتی دارند. مثلاً برخی در تحقیقات خود ایران را به‌ترتیب به ۹، ۴ و ۴ منطقه تقسیم کرده‌اند[۳و۴] و محقق دیگر ۲۳ منطقه را برای انجام تحقیقات پیشنهاد کرد و این تحقیق را بر روی آنها آزمود.[۵] اما در جدیدترین تقسیم‌بندی، در سال ۱۹۹۶ برای ایران ۲۰ منطقه پیشنهاد شد[۶] (شکل ۱). این تقسیم‌بندی را می‌توان برتر از تقسیمات سایر محققین دانست زیرا در این تقسیم‌بندی ۲۰ گانه علاوه بر توجه به ساختار تکتونیکی هر منطقه به این نیز توجه شده است که هر یک از این مناطق ۲۰ گانه شامل یک یا چند گسل مهم و فعال ایران باشد.

در مرحله‌ی بعد، از یک مدل ریاضی برای توزیع احتمالی زلزله‌ها استفاده می‌شود؛ مدلی که بیشتر محققین از آن بهره می‌گیرند، «مدل پواسن» نام دارد. این مدل برای وقوع فقط یک زلزله با بزرگی M، و بیشتر در زمانی خاص به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_T(t) = ۱ - e^{-N.t}$$



شکل ۱. تقسیم‌بندی ۲۰ منطقه‌ی لرزه‌خیزی ایران.[۶]

که در آن $P_T(t)$ عبارت است از درصد احتمال وقوع یک زلزله با بزرگی M یا بیشتر در فاصله زمانی t. هدف اساسی در روش یاد شده برآورد احتمال وقوع یک زلزله با بزرگی مشخص در یک نقطه است. در این راستا، پارامتر بزرگی امواج سطحی زلزله (M_S) مطرح می‌شود که بسیار قابل اعتماد است. اغلب آمارهای زلزله‌های ثبت شده پس از سال ۱۹۶۳ از مقیاس بزرگی M_b استفاده کرده‌اند و چون این مقیاس برای مطالعات لرزه‌خیزی و برآورد خطر زلزله مناسب نیست، پس لازم است که با یافتن رابطه‌هایی بین این دو مقیاس بزرگی، همه‌ی آمارها را با یک مقیاس بزرگی (یعنی M_S) بیان کنیم که برای کار بر روی زلزله‌شناسی ایران مناسب‌ترند. رابطه‌ی کلی که برای این دو مقیاس در نظر است عبارت است از[۷]:

$$M_S = d.M_b + c$$

که در آن پارامترهای d و c، ثابت‌اند. برای چهار منطقه‌ی کلی ایران چهار معادله‌ی کلی ارائه شده است.

فرضیات رگرسیون خطی و نقض آنها

ناهمسانی واریانس‌ها[۲]

اگر وجود ناهمسانی واریانس‌ها در داده‌ها اثبات شود، آنگاه روش رگرسیون خطی معمولی فاقد اعتبار خواهد بود و باید از روش رگرسیون خطی با درنظرگرفتن تأثیر ناهمسانی واریانس استفاده کرد؛ این روش ملقب به روش رگرسیون خطی، رگرسیون خطی تعمیم‌یافته، یا GLS [۳] است. معتبرترین و کاربردی‌ترین آزمون موجود در تشخیص ناهمسانی واریانس‌ها، آزمون گلدفلد-کوانت است و جواب حاصل از مراحل این آزمون که با پارامتر λ نشان داده می‌شود باید با پارامتر F بحرانی که از توزیع F به دست می‌آید مقایسه شود.

اگر مقدار عددی λ از F بیشتر باشد ناهمسانی واریانس وجود دارد. و البته اگر کم‌تر از آن باشد، مسئله با همان شکل رگرسیون خطی معمولی دارای اعتبار بیشتری است.[۸] چون معمولاً در مسائل پیش‌رو واریانس‌ها مجهول‌اند، برای حل این مشکل، ابتدا فرضی برای ایجاد رابطه‌یی بین امید ریاضی، مجذورات باقیمانده‌های رابطه اصلی و واریانس‌ها در نظرگرفته می‌شود. سپس رابطه‌ی اصلی، به رابطه‌یی با قابلیت کاربری در رگرسیون خطی معمولی تبدیل می‌شود؛ یعنی دارای همسانی واریانس‌ها شود و بعد از آن برای داده‌های رابطه‌ی جدید رگرسیون خطی محاسبه می‌شود و در نهایت برای خط جدید ضریب همبستگی را به‌دست می‌آوریم.

خودهمبستگی[۴]

فرض مهم دیگر، عدم وجود خودهمبستگی است؛ یعنی اجزاء اخلال یا باقی‌مانده‌ها (U_i) به‌هم وابستگی دارند. خودهمبستگی به این معنی

است که باقیمانده‌ها هیچگونه وابستگی به‌هم ندارند و مستقل‌اند و جزء اخلال یا باقی‌مانده‌ی هر مشاهده، تحت تأثیر باقی‌مانده‌ی مربوط به مشاهده‌ی دیگر قرار نمی‌گیرد. رابطه‌ی بین باقی‌مانده‌های این توابع چنین بیان می‌شود[۸]:

$$U_t = \rho U_{t-1} + \varepsilon_t$$

که در آن پارامتر ρ دوباقیمانده‌ی متوالی را به‌صورت خطی به هم مرتبط می‌سازد. برای کشف خودهمبستگی از چند آزمون آماری می‌توان بهره گرفت که معروف‌ترین آن‌ها، آزمون d دوربین- واتسون است.[۸] پس از یافتن پارامتر d دوربین- واتسون، با توجه به سه عامل «تعداد داده‌ها»، «درصد فاصله اطمینان» و «تعداد متغیرهای توضیحی»، دو عدد ثابت d_U و d_L را معرفی می‌کند و با شرایطی مشخص می‌کند که آیا داده‌های مورد نظر دارای خود همبستگی (از نوع منفی یا مثبت) هستند یا خیر. در عمل به‌ندرت ρ (ضریب ارتباط باقی‌مانده‌ها) معلوم است و باید ضریبی را به‌صورتی کاملاً ابداعی جانشین آن کرد. روش تعیین ρ براساس d دوربین- واتسون از سایر روش‌ها معروف‌تر است. در مواردی که تعداد نمونه‌ها کم باشد به جای این پارامتر از پارامتر دیگری به همین نام، که توسط ثیل-ناگار بیان شده، استفاده می‌شود. با استفاده از پارامتر ρ معادله‌ی خط به‌صورتی نوشته می‌شود که فاقد خودهمبستگی باشد که درنتیجه با وایازی این رابطه‌ی جدید در واقع عمل رگرسیون GLS اجرا می‌شود.

روش انجام تحقیق و نتایج آن بر روی زلزله‌های ایران

جمع‌آوری و پردازش آمارهای زلزله‌های ایران

در این تحقیق، رکوردهای زلزله از مراجع مختلف[۹] و سایت الکترونیکی پژوهشکده‌ی زلزله، و از ابتدای سال ۱۹۰۴ تا انتهای سال ۲۰۰۳ (یعنی طی یک دوره‌ی صد ساله) جمع‌آوری شد که بالغ بر ۷۵۲۷ مورد گزارش شده بود. از آنجا که می‌توان پارامتر mb را به پارامتر M_S تبدیل کرد، با تبدیل آمارهای دارای بزرگی mb که دارای M_S مستقل نیستند، می‌توان تمام زلزله‌ها را با یک واحد سنجش M_S مورد بررسی قرار داد.[۷] از طرف دیگر، زلزله‌هایی که بین سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۶۴ میلادی حادث شده نیز به دلیل پیشرفته نبودن دستگاه‌های ثبت این زلزله‌ها، از اعتبار کم‌تری برخوردارند. از این رو برای این تحقیق زلزله‌هایی معتبرند که شرط $M_s >= 5$ یا Mb برای زلزله‌های رخ داده بین سال‌های ۱۹۰۴ تا ۱۹۶۴ میلادی و شرط $M_s >= 4$ یا Mb برای زلزله‌های پس از شروع سال ۱۹۶۴ میلادی رعایت شده باشد. پس از این مرحله، هر زلزله‌یی که دارای شروط یاد شده باشد به یکی از مناطق ۲۰ گانه که زلزله در آن رخ داده تخصیص یافت. سپس تعداد زلزله‌هایی که بزرگ‌تر یا مساوی ۴ تا ۷ ریشتر بودند، با فواصل بزرگی ۰/۳ ریشتر محاسبه شد. ویژگی تفکیک زلزله‌ها با فواصل بزرگی ۰/۳ ریشتر آن است که با زیاد شدن تعداد آمار، شرایط مناسب برای انجام آزمون‌های آماری پدید می‌آید.[۱۰] مرحله‌ی بعدی، انجام عمل رگرسیون بر روی آمار مناطق ۲۰ گانه زلزله خیز ایران است. با استفاده از روش رگرسیون خطی معمولی فرمول گوتنبرگ-ریشتر برای هر منطقه‌ی ایران و برای داده‌های حاصل از تفکیک بزرگی زلزله‌ها با ۰/۳ ریشتر به دست آمد. همچنین، جدول ۱ رگرسیون درجه دوم را برای داده‌های مذکور نمایش می‌دهد.

نقض فرض‌های رگرسیون خطی

اگر رگرسیون خطی حاصله بر پایه‌ی هر کدام از فرض‌های همسانی واریانس‌ها، نسبت به دیگر فرض‌ها، ضریب همبستگی نزدیک‌تر به عدد ۱ را ارائه دهد، نسبت آن رابطه صادق‌تر بوده و رگرسیون حاصل از آن نیز دقیق‌تر است. درمورد قسمت دوم، یعنی بررسی وجود خودهمبستگی، برای اثبات خودهمبستگی، داده‌های موجود توسط آزمون d دوربین- واتسون مورد بررسی قرار گرفتند، و در نهایت عدد d حاصله با اعداد از پیش معلوم شده (به دست آمده از جدول دوربین- واتسون و با در نظرگرفتن فاصله اطمینان ۵٪) مقایسه شد و با استفاده از روش دوربین- واتسون و با بهره‌گیری از پارامتر ρ ثیل-ناگار برای حل این مشکل اقدام شد. در مجموع معتبرترین رگرسیون موجود برای این داده‌ها از بین سه رگرسیون خطی معمولی، رگرسیون حاصل از حل مشکل ناهمسانی واریانس‌ها، و رگرسیون حاصل از حل مشکل خودهمبستگی، رگرسیونی خواهد بود که ضریب همبستگی نزدیک‌تر به عدد ۱ را نتیجه دهد. نتایج این دو آزمون برای داده‌های با فواصل بزرگی ۰/۳ ریشتر تفکیک شد و درنتیجه بهترین خط برای زلزله‌های هر منطقه ایران به دست آمد که در جدول ۲ نشان داده شده است. مثلاً، فرمول زلزله برای منطقه‌ی ۱۱ با استفاده از ناهمسانی واریانس‌ها و با فرض $\sigma \sim (1/X)$ به دست آمده است.

استفاده از توزیع پواسن

با استفاده از فرمول‌های به دست آمده و به‌کار بردن توزیع پواسن احتمال وقوع زلزله‌یی با مقیاس بزرگی M_S معین در دوره‌ی زمانی خاص مشخص می‌شود. رابطه‌ی پواسن که از معتبرترین مدل‌های آماری است، چنین نوشته می‌شود:

$$P_T(t) = 1 - e^{-Nt}$$

که با استفاده از آن احتمال وقوع پدیده‌یی با فراوانی N در مدت زمان t به دست می‌آید.

جدول ۱. معادلات درجه دوم حاصله از رگرسیون خطی معمولی برای مناطق ۲۰ گانه‌ی زلزله‌خیز ایران با توجه به مقیاس‌های بزرگی با فواصل ۰٫۳ ریشتر.

مناطق	معادله حاصل از رگرسیون درجه دوم	ضریب همبستگی
۱	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۷۵۸ - ۰٫۷۲۳\ M + ۰٫۰۰۲M^{۲}$	۰٫۹۶۹
۲	$\mathrm{Log}\ (N) = ۶٫۲۳۹ - ۱٫۵۷۹\ M + ۰٫۰۹۵M^{۲}$	۰٫۹۷۲
۳	$\mathrm{Log}\ (N) = ۵٫۴۶۷ - ۱٫۲۶۵\ M + ۰٫۰۶۹M^{۲}$	۰٫۹۷۸
۴	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۸۳۲ - ۰٫۹۳۴\ M + ۰٫۰۴۶M^{۲}$	۰٫۹۹۰
۵	$\mathrm{Log}\ (N) = -۲٫۰۰۸ + ۱٫۸۲۲\ M - ۰٫۲۳۳M^{۲}$	۰٫۹۷۲
۶	$\mathrm{Log}\ (N) = ۱٫۵۴۲ + ۰٫۴۸۷\ M - ۰٫۱۰۱M^{۲}$	۰٫۹۹۴
۷	$\mathrm{Log}\ (N) = ۱٫۹۹۴ + ۰٫۲۶۱M - ۰٫۰۷۹M^{۲}$	۰٫۹۸۴
۸	$\mathrm{Log}\ (N) = -۰٫۴۳۵ + ۱٫۰۹۱M - ۰٫۱۵۰M^{۲}$	۰٫۹۷۳
۹	$\mathrm{Log}\ (N) = ۰٫۰۳۷ + ۰٫۹۹۰\ M - ۰٫۱۵۰M^{۲}$	۰٫۹۷۰
۱۰	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۰۰۳ - ۰٫۳۱۷\ M - ۰٫۰۴۹M^{۲}$	۰٫۹۸۴
۱۱	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۱۱۷ - ۰٫۳۶۶\ M - ۰٫۰۳۵M^{۲}$	۰٫۹۷۳
۱۲	$\mathrm{Log}\ (N) = ۱٫۷۱۸ + ۱٫۰۰۸\ M - ۰٫۱۸۰M^{۲}$	۰٫۹۹۵
۱۳	$\mathrm{Log}\ (N) = ۵٫۴۷۴ - ۱٫۰۶۰\ M + ۰٫۰۴۳M^{۲}$	۰٫۹۹۵
۱۴	$\mathrm{Log}\ (N) = ۰٫۳۲۱ + ۱٫۰۹۳M - ۰٫۱۸۲M^{۲}$	۰٫۹۷۸
۱۵	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۶۸۱ - ۰٫۶۸۸\ M + ۰٫۰۰۸M^{۲}$	۰٫۹۸۷
۱۶	$\mathrm{Log}\ (N) = ۳٫۵۴۸ - ۰٫۶۴۴\ M + ۰٫۰۱۶M^{۲}$	۰٫۹۷۷
۱۷	$\mathrm{Log}\ (N) = ۰٫۵۲۱ + ۰٫۸۳۴\ M - ۰٫۱۴۸M^{۲}$	۰٫۹۱۸
۱۸	$\mathrm{Log}\ (N) = ۳٫۲۶۸ - ۰٫۲۱۴\ M - ۰٫۰۳۴M^{۲}$	۰٫۹۶۵
۱۹	$\mathrm{Log}\ (N) = ۲٫۸۲۰ + ۰٫۰۰۲\ M - ۰٫۰۵۰M^{۲}$	۰٫۹۸۳
۲۰	$\mathrm{Log}\ (N) = -۱٫۱۰۳ + ۱٫۶۹۵\ M - ۰٫۲۴۹M^{۲}$	۰٫۹۹۸
کل مناطق کشور	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۰۱۶ + ۰٫۱۳۲\ M - ۰٫۰۷۸M^{۲}$	۰٫۹۹۷

جدول ۲. فرمول بهترین خط رگرسیون برای مناطق مختلف لرزه‌خیز ایران همراه با معرفی روش‌های رسیدن به جواب با توجه به مقیاس‌های بزرگی با فواصل ۰٫۳ ریشتر.

مناطق	بهترین خط	ضریب همبستگی و روش آن
۱	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۶۹۲ - ۰٫۶۹۷\ M$	۰٫۹۶۹
۲	$\mathrm{Log}\ (N) = ۳٫۶۸۴ - ۰٫۵۸۲\ M$	۱٫۰۱۱ ($\mathrm{Het}\sigma \sim X^{۲}$)
۳	$\mathrm{Log}\ (N) = ۳٫۴۳۹ - ۰٫۵۰۵\ M$	۰٫۹۶۵
۴	$\mathrm{Log}\ (N) = ۳٫۴۹۱ - ۰٫۴۳۱\ M$	۰٫۹۸۲
۵	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۱۶۱ - ۰٫۶۰۴\ M$	۰٫۹۱۰
۶	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۵۰۰ - ۰٫۶۲۲\ M$	۰٫۹۷۶
۷	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۱۹۳ - ۰٫۵۸۳\ M$	۰٫۹۷۴
۸	$\mathrm{Log}\ (N) = ۳٫۶۰۴ - ۰٫۴۸۳\ M$	۰٫۹۸۴ ($\mathrm{Het}\sigma \sim (۱/X)$)
۹	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۲۱۸ - ۰٫۶۱۵\ M$	۰٫۹۳۸
۱۰	$\mathrm{Log}\ (N) = ۵٫۳۰۷ - ۰٫۸۲۹\ M$	۰٫۹۸۲
۱۱	$\mathrm{Log}\ (N) = ۵٫۱۷۶ - ۰٫۷۵۸\ M$	۰٫۹۸۴ ($\mathrm{Het}\sigma \sim (۱/X)$)
۱۲	$\mathrm{Log}\ (N) = ۶٫۷۲۸ - ۰٫۹۱۵\ M$	۰٫۹۷۴
۱۳	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۵۱۱ - ۰٫۶۵۰\ M$	۰٫۹۹۴
۱۴	$\mathrm{Log}\ (N) = ۵٫۲۱۲ - ۰٫۸۱۳\ M$	۰٫۹۹۵ ($\mathrm{Het}\sigma \sim (۱/X\hat{}۲)$)
۱۵	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۴۴۹ - ۰٫۶۰۱\ M$	۰٫۹۸۷
۱۶	$\mathrm{Log}\ (N) = ۳٫۱۳۶ - ۰٫۴۷۷\ M$	۰٫۹۷۷
۱۷	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۵۰۰ - ۰٫۷۱۷\ M$	۰٫۹۳۴ ($\mathrm{Het}\sigma \sim (۱/X)$)
۱۸	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۲۷۷ - ۰٫۵۸۷\ M$	۰٫۹۷۷ ($\mathrm{Het}\sigma \sim (۱/X)$)
۱۹	$\mathrm{Log}\ (N) = ۴٫۲۷۷ - ۰٫۵۴۴\ M$	۰٫۹۷۷
۲۰	$\mathrm{Log}\ (N) = ۵٫۱۳۰ - ۰٫۸۲۰\ M$	۰٫۹۶۶
کل مناطق ایران	$\mathrm{Log}\ (N) = ۶٫۳۰۹ - ۰٫۷۲۷\ M$	۰٫۹۸۹

با استفاده از این توزیع و تعمیم آن به بحث زلزله، اگر بخواهیم بدانیم احتمال آن که زلزله‌یی به‌قدرت M ریشتر در مقیاس M_S در شهری خاص رخ دهد و پروژه‌یی با عمر مفید T سال را هدف قرار دهد چقدر است، ابتدا لازم است عدد N را از فرمول بهترین خط رگرسیون منطقه‌ی مذکور حفظ می‌کنیم. بنابر پیشنهاد برگی، باید عدد N را بر ۱۰۰ تقسیم کرده و حاصل را در رابطه‌ی پواسن قرار داد تا ریسک زلزله‌ی مورد نظر به‌دست آید.[۱]

نتیجه‌گیری

تحقیقات آماری بر روی عوامل مؤثر بر نتیجه‌گیری از یک پروژه، که در ایران زلزله و سیل از مهم‌ترین آنها هستند، از جمله تحقیقاتی هستند که باید به‌روزرسانی شوند و سپس به‌وسیله‌ی یک محقق مهندسی مدیریت ساخت برای پروژه‌های ساخت انجام شود. نتیجه‌یی که از این نوع تحقیقات عاید خواهد شد گامی است برای رسیدن به معیاری مناسب برای ارزشیابی پروژه‌ها. تحقیق انجام گرفته، صرف‌نظر از بحث علم زلزله و عکس‌العمل سازه در برابر این پدیده، به اهمیت بررسی زلزله به‌عنوان یکی از عوامل مهم در مرحله‌ی تصمیم‌گیری مربوط به یک پروژه‌ی حیاتی در ایران می‌پردازد. از این رو عدد حاصل برای هر منطقه‌ی زلزله‌خیز، نشان‌گر اهمیت ریسک زلزله برای محل اجرای پروژه‌یی خاص است. برای مثال، دانستن خطر زلزله برای یک پروژه‌ی نیروگاه هسته‌یی یا یک سد حائز اهمیت، می‌تواند در تصمیم‌گیری برای محل اجرای این نوع پروژه‌ها تأثیری به‌سزا داشته باشد. قابل ذکر است که با استفاده از فرمول‌های ابداعی دیگر و دخالت عوامل مختلف در این فرمول‌ها و همچنین استفاده از مباحث آماری دیگر و کمک گرفتن از این علم در پروژه‌های ساخت می‌توان به نتایج بهتر و دقیق‌تری نیز رسید.

پانوشت

۱. از Stoklin، Banisadr، Takin، Berberian، Nowroozi، Tavakoli، Moinfar می‌توان به‌عنوان‌انجام دهندگان این کار برای منطقه از جمله کشور ایران نام برد.

2. heteroscedasticity
3. generalized least square
4. autocorrelation

منابع

۱. برگی، خسرو. اصول مهندسی زلزله، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۷۹).

2. Banisadr, M. "The seismicity of Iran (1900-1969), plan organization of the government of Iran", *Tech. Res & Standard Bureau* (1971).

3. Stocklin, J. Structural History and Tectonics of Iran; *A Review Bull Am. Assoc Petrol. Geol.,* 52, pp. 1229-1258 (1968).

4. Takin, M. "Iranian Geology and continental Drift in the Middle East", *Nature,* **235**(5334), pp. 147-150 (1972).

5. Nowroozi, A. Seismotectonic Provinces of Iran, *Bull. Seism. Soc.* Am.66, pp. 1249-1276 (1976).

6. Tavakoli, B. and Ghafoori Ashtiany, M. "Seismic hazard assessment of Iran", [Online, assessed 7 Sep. 2002] (2002). URL: WWW.IIEES.com

۷. میرزایی، نوربخش. پارامترهای مبنایی زمین لرزه‌های ایران، انتشارات دانش‌نگار (۱۳۸۱).

8. Gujarati, D. N. *Basic Econometrics,* Mc Graw-Hill International Edition (1995).

۹. بربریان، مانوئل. نخستین کاتالوگ زلزله و پدیده‌های طبیعی ایران زمین جلد نخست: خطرهای طبیعی پیش از سده بیستم، انتشارات احیاء کتاب (۱۳۷۴).

10. Judge, G. G., Griffiths, W. E., Carter Hill, R. and Lee, T. C., *The theory and practice of econometrics,* John Wiley & Sons Ltd (1985).