

تحلیل برگشتی گسیختگی شیب لسی در زلزله رودبار منجیل (خرداد ۱۳۶۹) و استفاده از نمودارهای شتاب - ضریب اطمینان استاتیکی جهت پهنه‌بندی مقدماتی لغزش شيروانیها

سیدمجدالدین میرمحمد حسینی

استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سعید منتظرالقائم

کارشناس ارشد خاک و پی

چکیده:

در این مقاله نتایج مربوط به تحلیل برگشتی یکی از گسیختگی‌هایی که در شيروانیهای لسی در زلزله ۱۳۶۹ منجیل-رودبار بوقوع پیوسته است بطور خلاصه ارائه می‌شود. در این تحلیل منحنی‌های شتاب- ضریب اطمینان در هنگام زلزله برای مقطع گسیخته شده شيروانی تهیه گردیده و از روی آنها شتاب گسیختگی مقطع بدست آمده است. در ادامه این مقاله نمودارهای مربوط به تغییرات حداقل شتاب لازم جهت گسیختگی بر حسب ضرائب اطمینان و زاویه متوسط سطح لغزش شيروانیها در بارگذارهای زلزله (تهیه شده توسط Ishihara) معرفی گردیده و نشان داده شده است که سازگاری خوبی بین اطلاعات زمین لغزه مورد مطالعه با نمودارهای فوق برقرار است. در پایان روشی جهت پهنه‌بندی (Zonation) مقدماتی خطر لغزشهای ناشی از زلزله با استفاده از نمودارهای فوق پیشنهاد گردیده و بر مبنای آن نقشه‌های مقدماتی پهنه‌بندی خطر زمین لغزه‌های ناشی از زلزله برای ایران تهیه شده‌اند.

The Analysis of a Failed Loess Slope During Manjil Earthquake and Macrozonation of Land Slides Using Acceleration- Safety Factors Diagrams

S.M.Mir Mohammad Hosseini, Ph.D.

Assistant Prof. of Civil Eng. Dept. Amirkabir University of Technology

S. Montazerolghaem, M.Sc.

M.Sc. International Inst. of Earthquake Eng. and Scismology

ABSTRACT

In this paper the results of analysis of a failed loess slope during Manjil-Roodbar earthquake is presented. In this method the acceleration- safety factors curves for failure surface during earthquakes are provided and the critical acceleration of the slope causing failure is determined consequently. The variation of the failure acceleration versus safety factors and the average angle of slope during earthquake

loadings are plotted and it is shown that there is a good agreement between the field data of the failed land slide and the above curves. Finally a method is suggested for the macrozonation of land slides, according which a cursory level of zonation for the probable land slides during future earthquakes has been carried out.

مقدمه

یکی از عوارض مهم ژئوتکنیکی زلزله‌های با بزرگی ۵ ریشتر و بیشتر وقوع لغزش و گسیختگی‌های شیپها در حین زلزله می‌باشد. به طوری که بعضاً خسارات جانی و مالی قابل توجهی ناشی از این امر به وجود می‌آید و این موضوع بیشتر به دلیل ناگهانی بودن وقوع آنها می‌باشد.

بهمن سنگ و واریزه (Rock & debris avalanche) در استان گانزوی چین در ۱۷۸۹ که منجر به هلاکت ۷۶۰ نفر گردید را می‌توان یکی از قدیمی‌ترین زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله دانست که در سوابق و مدارک تاریخی به آن اشاره شده است.

زمین‌لرزه‌های بزرگ غالباً قادر به ایجاد بزرگترین گسیختگی در شیپها و یا زمین‌لغزه‌ها بوده، به گونه‌ای که در ارزیابی زمین‌لغزه‌های بزرگ قدیمی که دلایل قطعی جهت وقوع آنها ارائه نشده، احتمال دخالت زلزله‌های شدید کاملاً وجود دارد.

Hansen و Franks (1991) با بررسی زمین‌لغزه سیه‌مره در کوه‌های زاگرس در استان لرستان آن را با احتمال قوی یکی از بزرگترین زمین‌لغزه جهان دانسته و بدلیل عظمت آن و همچنین زلزله‌خیز بودن ایران، عامل احتمالی آن را وقوع زلزله ذکر کرده‌اند. این زمین‌لغزه بصورت لغزش توده‌ای سنگ آهک (Rock Block Slide) بر روی لایه‌های کم‌ضخامت و سنگ آهک با زاویه صفحه گسیختگی ۲۰ درجه نسبت به افق اتفاق افتاده است. طول، عرض و ضخامت اولیه توده لغزش یافته به ترتیب ۱۵Km، ۵Km و ۳۰۰m بوده و واریزه‌های ناشی از آن به چنان سرعتی رسیده که تا ارتفاع ۶۰۰ متر از کف دره مجاور بالا رفته‌اند. حجم توده گسیخته شده در این لغزش حدود ۲۰Km^3 تخمین زده شده که سطحی معادل ۱۶۰ کیلومتر مربع تا عمق ۱۳۰ متر را در بر می‌گیرد.

زمین لغزه بسیار عظیم Nevados-Huascaran در پرو که از نوع بهمن سنگی (Rock Avalanche) بوده و به هنگام زلزله ۱۹۷۰ پرو، دو شهر و چند آبادی را ویران و ۱۸۰۰۰ نفر تلفات برجای گذاشت را می‌توان به عنوان یکی از فاجعه‌بارترین زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله در سالهای اخیر دانست.

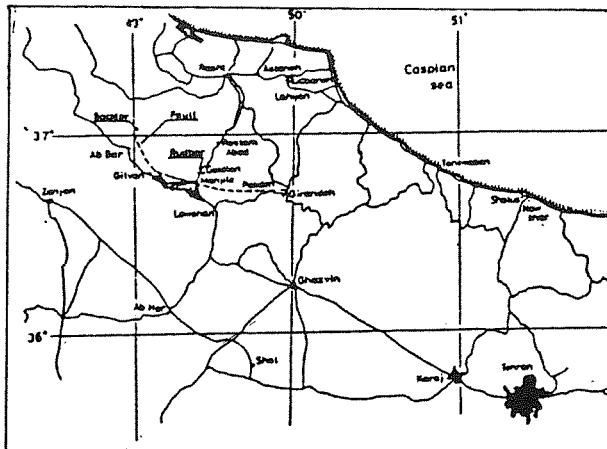
در زلزله سال ۱۳۶۹ رودبار - منجیل که با بزرگی ۷/۳ ریشتر (شکل ۱) بوقوع پیوست تا شعاع حدود ۸۰ کیلومتر از

کانون زلزله، لغزش و گسیختگی‌های زیادی در شیپها و شیروانیها بوجود آمد که به دلیل تغییرات شدید شرایط توپوگرافیک و زمین‌ساختی در مناطق زلزله‌زده، زمین‌لغزه‌ها نیز از تنوع زیادی برخوردار بوده‌اند. وقوع این لغزشها باعث تخریب روستاها و راهها، آسیب رساندن به مزارع، زمین‌های کشاورزی و فعالیتهای معدنی و همچنین تأسیسات سد سفیدرود گردید و رقمی بیش از ۲۰۰ نفر کشته برجای گذاشته و همچنین در بعضی مناطق از قبیل باکلور، وقوع زمین‌لغزه باعث انسداد آبراه و ایجاد سد طبیعی در محل گردید.

یکی از انواع شایع زمین لغزه‌های ایجاد شده در زلزله فوق، خصوصاً در حاشیه رودخانه‌های سیاه‌رود و سفیدرود و آبراههای فرعی آنها لغزش بلوکی توده لس بر روی تشکیلات زیرین می‌باشد. در مقاله حاضر بعضی از جنبه‌های مورد مطالعه در تحلیل برگشتی یکی از زمین‌لغزه‌های بزرگ از نوع فوق‌الذکر در منطقه گاوخسب تشریح گردیده است.

۱- مشخصات اصلی زمین لغزه گاوخسب:

زمین لغزه گاوخسب در دامنه جنوبی مسلط به رودخانه سیاه‌رود، در نزدیکی محل تلاقی با رودخانه سفیدرود و مقابل روستای گاوخسب اتفاق افتاده است (شکل ۲) طول این زمین لغزه حدود ۳۰۰ و عرض آن بین ۴۰۰ متر در تغییر بوده است. عمق سطح



شکل ۱ - موقعیت گسل محرك زلزله و شهرهای عمده واقع در منطقه زلزله‌زده

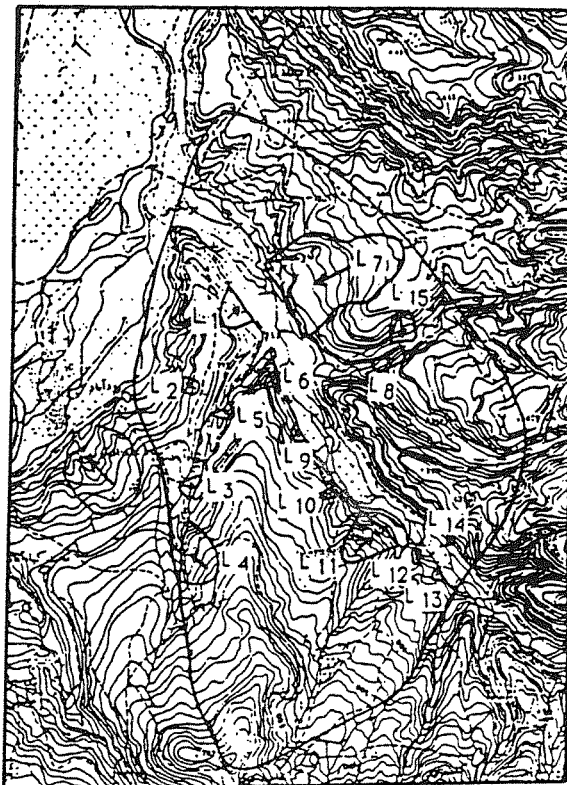
در شیب مورد بررسی نهشته‌های لسی با سن مربوط به دوره پس از یخچالی با سرعتی حدود ۱۵ سانتیمتر در هر هزار سال بر روی پوشش استپی زیرین خود تشکیل می‌شوند و شبکه پیچیده‌ای از ریشه‌های گیاهان را در خود مدفون می‌سازند. این شبکه که امتداد عمومی آن قائم است، در توده لسی کلیواژهای قائمی را ایجاد می‌کند، به طوری که شیب‌های واقع در توده‌های لس عموماً در امتداد قائم می‌ایستند.

به علت چسبندگی شیمیائی ضعیفی که در اثر مواد آهکی و نیز ذرات ریز رس در بین ماسه‌ریز و سیلت تشکیل دهنده توده وجود آمده، لس تا ده‌ها متر بصورت قائم می‌ایستد.

توده لس بر روی سازند هزار دره که کنگلومرای جوانی است تشکیل شده و بعلت وضعیت خاص نهشته شدن شکل هندسی سطح زیرین را حفظ کرده است. کنگلومرای هزار دره دارای سماتاسیون خوبی است و امکان لغزش در آن چنین شیب‌هایی به جز در امتداد سطوح ناپیوستگی مربوط به رویدادهای تکنونیک قبلی منتفی است. این سازند بر روی تشکیلات کرج که عمدتاً شامل توالی از توف و گدازه می‌باشد تشکیل یافته است.

بررسی‌های انجام شده شامل مطالعات ژئوسایز میک آنکساری، ژئوالکتریک و انجام نمونه‌برداریهای دست نخورده و دست‌خورده از دیوارهای افراز اصلی و چال‌های حفر شده می‌باشد. در شکل ۲ پلان زمین لغزه همراه با مقاطع ژئوسایز میک و ژئوالکتریک و محل‌های نمونه‌برداری و موقعیت یکی از چال‌ها نشان داده شده است. آزمایشات انجام شده شامل تعیین رطوبت و دانسیته طبیعی، دانه‌بندی و هیدرومتری، حدود خمیری و روانی، فشار تک محوری روی نمونه‌های دست نخورده و دست‌خورده آزمایش برش مستقیم، تراکم و تحکیم بوده است. با توجه به یکنواختی نسبی لس‌ها، نتایج حاصله تشکیل یک جامعه آماری را داده‌اند که بر روی آنها تحلیل آماری انجام پذیرفته است. خلاصه نتایج این تحلیل در جدول شماره ۱ ارائه شده است. در این جدول تعداد نمونه‌ها و مقادیر متوسط واریانس و انحراف استاندارد و همچنین مقادیر حداقل و حداکثر و محدوده‌های با اطمینان ۹۵ درصد و ۶۸ درصد ارائه شده است. همچنین ضریب تغییرات (CV) که بصورت نسبت انحراف استاندارد به میانگین (برحسب درصد) تعریف می‌شود نیز محاسبه و در جدول ۱ داده شده است. جهت مقایسه تغییرپذیری داده‌ها مقادیر CV توصیه شده برای استاندارد نیز محدوده CV گزارش شده در مراجع دیگر نیز در این جدول ارائه شده‌اند.

به دلیل مشابه بودن خصوصیات نهشته‌های لس در نقاط مختلف جهان، نتایج آزمایشات انجام شده با خصوصیات لس‌های تیبیک سایر نقاط جهان مقایسه شده است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهند که لس مورد مطالعه جزء لس‌های متراکم و مقاوم تر



شکل ۲ - نقشه توپوگرافی محل تلاقی رودخانه‌های سیاه‌رود و سفیدرود که تعدادی از زمین‌لغزه‌های واقع در آن با علامت‌های L۱ تا L۱۵ مشخص گردیده‌اند، زمین‌لغزه مورد مطالعه در مقاله حاضر (زمین لغزه گاوخسب) با L۱ مشخص شده است.

لغزش که در بررسی‌های ژئوسایز میک منطبق بر مرز لیتولوژیکی لس و کنگلومرای زیرین تشخیص داده شده است در عمیق‌ترین قسمت حدود ۴۵ متر تخمین زده می‌شود. قطعات و مصالح حاصل از این لغزش تا فاصله ۱۲۰ متر از محل پنجه شیب جابجا شده و افراز اصلی با ارتفاع بین ۳ تا ۱۵ متر از خود برجای گذاردند. توپوگرافی محل بعد از گسیختگی و لغزش از پله‌ها و ترکهای متعدد در بین بلوکهای جدا شده تشکیل گردیده است. در قسمت‌های مجاور توده لغزش یافته ترکهای طولی با عرض حدود ۳۰ سانتیمتر و طول ده‌ها متر بعد از زلزله ایجاد شده که خود مبین ناپایداری این مقاطع بوده ضمن اینکه جابجائی و تغییر شکلهای ویران‌کننده‌ای نداشته‌اند. این زمین‌لغزه باعث انهدام مزارع و زمینهای کشاورزی در قسمتهای پائین دست و بعضاً بالادست شیروانی شده است.

۲- خلاصه بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی:

تعداد نمونه‌ها	متوسط	انحراف استاندارد	حداکثر	محدوده با اطمینان ۹۵%	محدوده با اطمینان ۹۸%	ضریب تغییرات CV	توصیه شده برای استاندارد CV	گزارش شده در مرجع دیگر CV	گشتاور سوم	گشتاور چهارم
۳۹	۲۶/۷	۶۱/۴۸	۸۱/۵	۱۰/۷-۱۲/۷	۱۸/۱-۳۴/۸	۳۰/۵	۲۵	۹-۷۰	-۰/۲	-۰/۷
۳۹	۳۳/۵۹	۸۷/۸۳	۹۳/۷	۱۵/۲-۵۲/۰	۲۴/۲-۴۳/۰	۲۷/۹			-۰/۲۴	+۰/۸
۳۹	۷۰/۱	۱۰۶/۲۲	۳۷	۴۹/۹-۹۰/۳	۵۹/۸-۸۰/۴	۱۴/۷			-۰/۰۴	۲/۴۴
۲۹	۵/۷۲	۶/۴۹	۰	۰/۷-۱۰/۷	۳/۲-۸/۳	۴۴/۱	۳۰	۷-۷۹	-۰/۱۶	-۰/۴۱
۳۷	۲۵/۱	۵/۴۷	۲۲	۲۱-۳۰/۲	۲۳/۲-۲۷/۹	۹/۱	۱۰	۲-۴۸	۰/۷۳	-۰/۰۵
۲۹	۰/۲۸	۰/۰۴	۰	۰-۰/۶۷	۰/۰-۰/۴۸	۷۱/۴			۱/۵۷	۲/۷۹
۳۲	۱/۵۶	۰/۰۰۷	۱/۴۱	۱/۴-۱/۷۲	۱/۴۸-۱/۶۴	۵/۱	۳	۱-۱۰	۱/۳۱	۱/۵
۳۴	۴۲/۳۴	۸/۹۲	۳۵/۴	۳۱/۵-۴۸/۲	۳۹/۴-۴۵/۳	۷/۱	۲۵	۱۳-۴۲	-۰/۷۱	۰/۲۲
۱۶	۴/۰۶	۹/۷۴	۳/۱۲	۰-۱/۲	۰/۹۴-۷/۱۸	۷۶/۸	۴۰	۶-۱۰۰	۰/۹۹	۰/۱۳

است. همچنین روابط همبستگی میان خصوصیات مختلف خاک با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته و نشان می‌دهد که مقاومت تک‌محوری و دانسیته طبیعی نمونه‌ها با افزایش درصد رسی از افزایش می‌یابند اما با اندیس خمیری، اجزاء ریز دانه (عبوری از الک 200) رابطه مشخصی ندارند. همچنین مقایسه میان مقاومت تک‌محوری نمونه‌های دست نخورده با نمونه‌های بازسازی شده نهشته‌های لسی مورد مطالعه را از نظر حساسیت حساس تا بسیار حساس نشان می‌دهد.

بررسی‌های لرزه‌ای انکساری و ژئوالکتریک موقعیت سطح لغزش و همچنین سرعت موج عبوری از آنها را تعیین نمودند. مطابق این بررسی‌ها سطح لغزش بر مرز لیتولوژیکی لس و کنگلومرا قرار دارد و عمق آن از سطح اولیه زمین بین ۴۰ تا ۴۵ متر است.

با توجه به نتایج آزمایشات انجام شده پارامترهای زیر بعنوان پارامترهای متوسط مقاومتی در سطح لغزش انتخاب شده‌اند:

پارامترهای مقاومت استاتیکی ماکزیمم (Peak)

$$\phi = 30^\circ \text{ و } C = 0.7 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

پارامترهای مقاومت استاتیکی پس ماند (Residual)

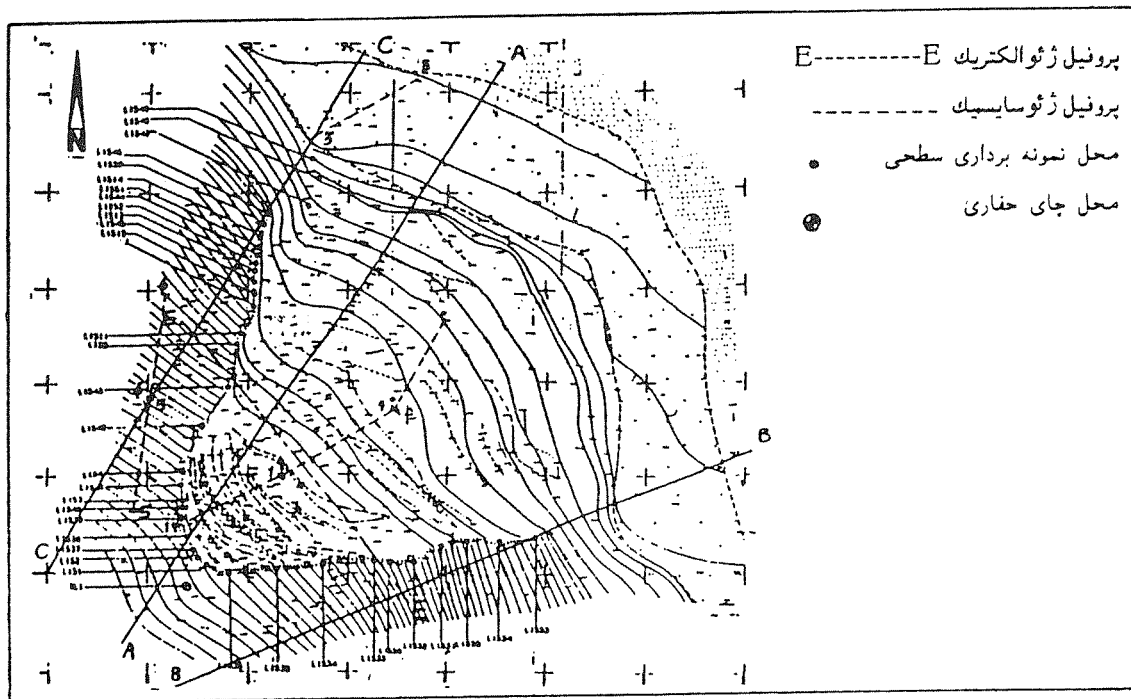
$$\phi = 20^\circ \text{ و } C = 0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

وضعیت آب زیرزمینی:

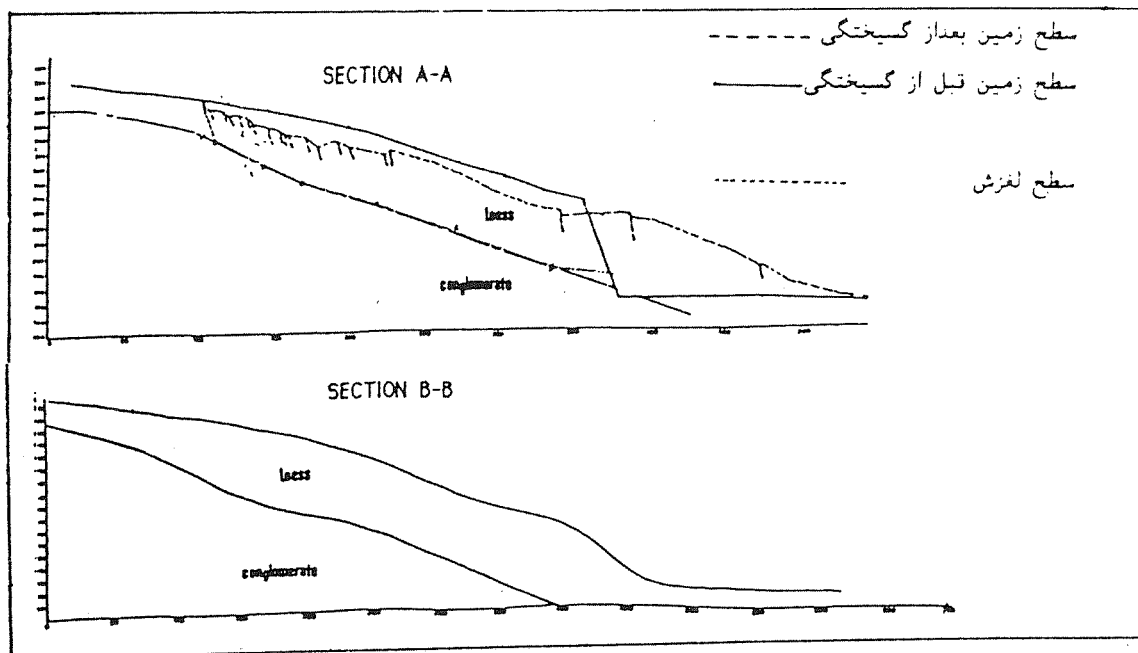
با توجه به کم بودن فاصله از مناطق بالادست (تغذیه‌کننده) تا پائین‌دست (تخلیه‌کننده) بنظر نمی‌رسد که در هنگام وقوع زلزله (مصادف با اواائل فصل تابستان) زون اشباع مهمی در سطح لغزش که منطبق بر مرز لس و کنگلومرا هست وجود داشته است این نتیجه‌گیری با عدم ظهور آب در بعد از زمین‌لغزه در هیچ یک از نقاط توده گسیخته شده تأیید می‌شود. با این حال به دلیل تراکم نسبتاً زیاد مصالح لسی در شیب مورد مطالعه، حتی در صورت وجود یک زون اشباع محدود در سطح گسیختگی، تغییرات زیادی در خصوصیات مقاومتی این مصالح به ویژه در تنش‌های بین ۷ تا ۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع موجود در سطح لغزش مورد انتظار نمی‌باشد.

۳- تحلیل برگشتی:

در شکل ۳ مقاطع A-A و B-B و C-C بر روی پلان زمین‌لغزه نشان داده شده‌اند. مقطع A-A در توده گسیخته شده و مقاطع B-B و C-C در قسمتهای ترک خورده مجاور زده شده‌اند. مقاطع A-A و B-B در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. نتایج تحلیل پایداری گسیختگی در امتداد مرز لس هزار دره در مقاطع A-A و B-B در حالت‌های استاتیکی و زلزله ۱۳۶۹ منجیل در جدول شماره ۲ خلاصه شده است. در تحلیل‌های فوق از برنامه Pentas که قادر به تعیین ضریب اطمینان پایداری در سطوح گسیختگی غیردایره‌ای (Generalised failure surface)



شکل ۳ - پلان زمین لغزه گاو خسب محل های نمونه گیری سطحی و چال. مقاطع ژئوسایزیمیک و ژئوالکتریک و نیز مقاطع A-A و B-B و C-C در این پلان نشان داده شده اند.



شکل ۴ - (a) مقطع A-A با گسیختگی کلی و جابجایی زیاد و (b) مقطع B-B با ترک خوردگی و جابجایی محدود.

است استفاده شده، در روش بکار گرفته شده در این برنامه، برای جبران مجهولات اضافی موجود در تحلیل فرض شده است که نسبت بین تنش عمودی وارد بر سطح گسیختگی به وزن مصالح بالای آن در هر باریکه مطابق زیر است:

$$\mu_1 + \mu_2 \tan \alpha$$

α زاویه کف باریکه با محور افقی و μ_1 و μ_2 ضرایبی هستند که در هر سطح گسیختگی مفروضی ثابت می‌باشند و در جریان تحلیل پایداری همراه با ضریب اطمینان تعیین می‌شوند. این برنامه تأثیر زلزله را با روش شبه‌استاتیکی به شکل نیروی افقی معادل برتوده گسیخته می‌پذیرد. در روش شبه‌استاتیکی متداول پارامترهای مقاومتی استاتیکی منظور می‌شود و در عوض بجای شتاب حداکثر ثبت شده در زلزله کسری از آن (در این مطالعه ۶۵٪ آن) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ایشی هارا (1985) براساس آزمایشات مقاومتی دینامیکی برچند نمونه مصالح زمین‌لغزه، پیشنهاد کرد که مقدار C دینامیکی به میزان پنجاه تا شصت درصد نسبت به حالت استاتیکی افزایش یابد و در عوض از شتاب حداکثر ثبت شده در زلزله استفاده شود. وی همچنین مقدار زاویه اصطکاک را در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی یکسان در نظر گرفت. در جدول شماره ۲، تحلیل پایداری حین زلزله با روشهای شبه‌استاتیکی متداول و ایشی هارا ارائه شده‌اند. برای مقایسه، نتایج تحلیل شبه‌استاتیکی با استفاده از پارامترهای مقاومتی استاتیکی و بدون کاهش شتاب حداکثر ثبت شده زلزله نیز در جدول فوق بنام روش پایه ارائه شده است.

در مقایسه روشهای شبه‌استاتیکی فوق در تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها در حین زلزله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- هیچ یک از روشهای ایشی هارا و شبه‌استاتیکی متداول در تعیین ضریب KS، توجهی به محتوای تاریخچه زمانی حرکات شدید زمین ندارند. به عنوان مثال، هر یک از این روشها برای دو زلزله با تداوم زمان حرکات شدید متفاوت اما شتاب حداکثر ثبت شده یکسان، ضرایب زلزله یکسانی را توصیه می‌کنند. به عبارت دیگر گذرا بودن بارگذاری زلزله در تعیین ضریب KS در روش شبه‌استاتیکی متداول به صورت ناقص در نظر گرفته شده و در روش شبه‌استاتیکی ایشی هارا بکلی در نظر گرفته نشده است.

۲- روش ایشی هارا مقدار پارامتر C را در حالت دینامیکی نسبت به استاتیکی افزایش می‌دهد و در عوض مقدار شتاب حداکثر ثبت شده را در تعیین نیروی افقی معادل بکار می‌برد. در حالی که در روش شبه‌استاتیکی متداول، کاهش مقدار شتاب حداکثر ثبت شده در تعیین نیروی افقی معادل، بدون توجه به مقدار پارامترهای C صورت می‌پذیرد. در این رابطه روش ایشی

هارا را می‌توان به عنوان گامی در جهت استفاده از پارامترهای مقاومتی در واکنش دینامیکی شیب در نظر گرفت. با این حال روش ایشی هارا این اشکال را دارد که تمام بار افزایش نیروها در اثر زلزله را به C افزایش یافته منتقل کرده است. در حالی که همانگونه در بند ۲ فوق گفته شد گذرا بودن بار زلزله نیز تنها با افزایش مقدار C جبران شده است.

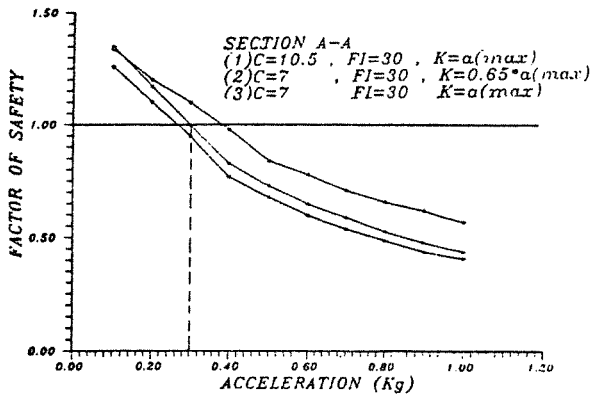
۳- روش ایشی هارا را در حالت C کم یا عمق سطح گسیختگی زیاد در (خاکهایی که مقدار C با عمق افزایش مهمی ندارد) به حالت سوم تحلیل‌های فوق نزدیک می‌شود و در حالت C=0 خاک‌های کاملاً اصطکاکی یا مقاومت پس‌ماند در سطوح گسیختگی موجود از قبل) کاملاً به آن منطبق می‌شود. این به آن معناست که روش ایشی هارا برای مصالح بدون چسبندگی، انجام تحلیل را براساس حداکثر شتاب ثبت شده و بدون تغییر در پارامترهای مقاومتی توجه می‌کند. همانطور که گفته شد ایشی هارا نتایج فوق را از یک سری آزمایشات سه محوری دینامیکی با بارگذاری نامنظم بدست آورده است. با این حال صحت کاربرد این روش در مصالح بدون چسبندگی بایستی با انجام تحلیل‌های برگشتی بر روی شیب‌های واقعی یا آزمایشات مدل تأیید شود.

۴- بطور کلی روش ایشی هارا تأثیر زلزله بر شیب‌های متشکل از مصالح غیرچسبنده را بیشتر از شیب‌های دیگر می‌بیند. در حالی که روش شبه‌استاتیکی متداول تفاوتی را در واکنش لرزه‌ای شیب‌ها بر حسب نوع مصالح متشکله آنها در نظر نمی‌گیرد.

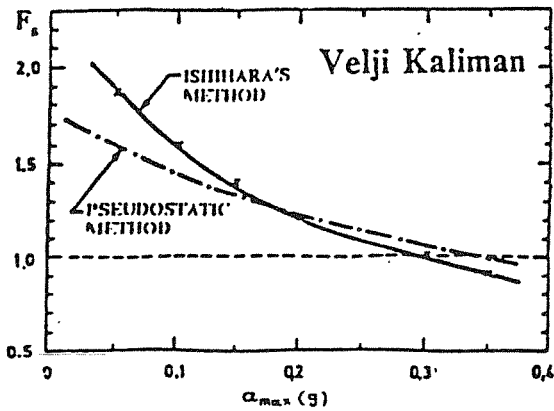
نتایج خلاصه شده در جدول ۲ نشان می‌دهند که ضرائب اطمینان استاتیکی هر دو مقطع به میزان قابل توجهی از واحد بیشتر است. همچنین ضرائب اطمینان حالت زلزله هر دو مقطع از واحد به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر است.

جدول ۲- خلاصه نتایج تحلیل برگشتی مقاطع A-A و B-B در شرایط استاتیکی در زلزله با روشهای مختلف شبه‌استاتیکی

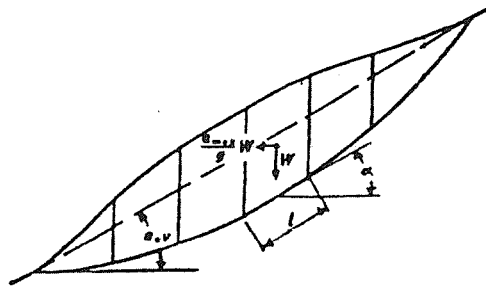
پارامتر	روش تحلیل			
	زلزله- شبه‌استاتیکی			
	استاتیکی	متداول	ایشی هارا	پایه
C(kg/cm ^۲)	۰/۷	۰/۷	۱/۰۵	۰/۷
$\phi(^\circ)$	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
a_s	۰	۵/۲	۵/۲	۵/۲
K_s	۰	۳/۳۸	۳/۳۸	۳/۳۸
A-A مقطع F_s	۱/۵۲	۰/۸۲	۰/۷۱	۰/۶۶
B-B مقطع F_s	۲/۱۱	۰/۹۷	۰/۸۱	۰/۷۳



شکل ۵ - تغییرات ضریب اطمینان در مقابل شتاب زلزله در مقطع A-A با روش شبه استاتیکی ایشی هارا، شبه استاتیکی متداول و پایه.



شکل ۶ - تغییرات ضریب اطمینان با ضریب زلزله در تحلیل برگشتی زمین لغزه VELJI KALIMAN یوگسلاوی که توسط زلزله ۱۹۷۹ مونتو نگر و تحریک گردید.



شکل ۷ - علامت‌های بکار رفته در تحلیل پایداری شیب در سطح گسیختگی کلی در حین زلزله با روش شبه استاتیکی.

موردی، رابطه‌ای میان ضریب اطمینان استاتیکی F_s و شتاب افقی ایجاد کننده لغزش (مقدار شتاب a_{max} که به ازاء آن $F_s=1$)

بنابراین روشهای به کار گرفته شده در تحلیل برگشتی به درستی وضعیت پایداری قبل و بعد از زلزله را توجیه می‌کنند. با این وجود در حالی که مقاطع فوق هر دو در هنگام زلزله ناپایدار شده‌اند اما در مقطع A-A این ناپایداری به تغییر مکان زیاد شیب و انهدام کلی آن منجر شده است در حالی که در مقطع B-B ناپایداری در حد ترک خوردگی متوقف شده و به ناپایداری کلی نیانجامیده است. این موضوعی است که روشهای بکار گرفته شده قادر به پیش‌بینی آن نیستند هرچند که ضرائب اطمینان مربوط به مقطع A-A را از ضرائب اطمینان مربوطه در مقطع B-B کوچکتر نشان می‌دهند. توجیه واقعیت فوق بایستی با در نظر گرفتن مقدار تغییر مکان‌های ایجاد شده و تغییر پارامترهای مقاومتی در اثر ایجاد تغییر مکان‌های ناشی از زلزله انجام شود که در مرجع شماره ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین منحنی تغییرات ضریب اطمینان با شتاب زلزله با روشهای شبه استاتیکی فوق‌الذکر در شکل ۵ نشان داده شده است.

از این شکل مقدار شتاب تسلیم برای سطح گسیختگی مقطع A-A با روش شبه استاتیکی ایشی هارا معادل ۳۰۰ gal بدست می‌آید.

چنانچه انتظار می‌رود، نتایج حالت سوم پائین‌ترین ضرائب اطمینان را برای يك شتاب مفروض می‌دهد. همچنین دیده می‌شود که نتایج روش ایشی هارا عموماً ضرائب اطمینان کمتری را در يك شتاب مفروض نسبت به روش شبه استاتیکی متداول می‌دهد. نتیجه فوق در تطابق با نتایج بدست آمده توسط (Matasovic (1991) در تحلیل برگشتی پایداری لرزه‌ای زمین لغزه VELJI Kaliman یوگسلاوی که توسط زلزله ۱۹۷۹ مونتو نگر و تحریک گردیده است می‌باشد (شکل ۶).

۴- استفاده از نمودارهای ایشی هارا در تحلیل برگشتی زمین لغزه گاوخسب:

چنانچه اشاره شد ایشی هارا (۱۹۸۵) پیشنهاد کرده است که در تعیین ضریب اطمینان گسیختگی شیب‌ها در حالت زلزله، مقدار C معادل C_{dyn} در نظر گرفته شود اما ϕ همان ϕ_{stat} باشد. در عین حال وی از شتاب حداکثر ثبت شده در زلزله برای تعیین نیروی معادل زلزله استفاده نموده بنابراین ضریب اطمینان گسیختگی شیب در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی برای سطوح گسیختگی کلی از فرمولهای زیر قابل تعیین هستند (شکل ۷):

$$F_s = \frac{\sum [W \tan \Phi + CL \cos \alpha] / [\cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \tan \Phi / F_s)]}{\sum W \tan \alpha}$$

$$F_s = \frac{\sum [W \tan \Phi + C_p L \cos \alpha] / [\cos^2 \alpha (1 + \tan \alpha \tan \Phi / F_s)]}{\sum [W \tan \alpha + (a_{max} / g) W]}$$

ایشی هارا (۱۹۸۶) پیشنهاد کرد که براساس نتایج چند مطالعه

می شود) برقرار شود.

در خاکهای $\Phi = 0^\circ$ وی با قرار دادن $F_s = 1$ در رابطه ضریب اطمینان دینامیکی فوق و استفاده از معادله مربوط به F_s ، رابطه زیر را به دست آورد:

$$\frac{a_{max}}{g} = \left(\frac{C_D}{C} F_s - 1 \right) \frac{\Sigma W \tan \alpha}{\Sigma W}$$

سپس وی α_{av} را به صورت زاویه خط مستقیمی که بالا و پائین یک سطح لغزش منحنی را بهم وصل می کند تعریف کرد و رابطه فوق را به شکل زیر ساده نمود:

$$\frac{a_{max}}{g} = \left(\frac{C_D}{C} F_s - 1 \right) \tan \alpha_{av}$$

نتیجه ضمنی این رابطه آن است که در یک شیب مفروض، در صورتی که مقدار ضریب اطمینان استاتیکی ثابت باشد مقدار شتاب زلزله مورد نیاز برای ایجاد گسیختگی با تند شدن زاویه شیب افزایش می یابد. وی همچنین با جمع بندی نتایج چند مطالعه موردی گسیختگی شیب های طبیعی در اثر زلزله در ایتالیا و ژاپن رابطه میان F_s و α_{max} ایجاد کننده لغزش برای سه دسته زاویه شیب متوسط α_{av} را بشکل منحنی هائی ارائه کرد که در شکل ۸ دیده می شوند.

برای کاملتر کردن داده های این روابط و نیز بررسی درستی این روابط در مورد زمین لغزه گاوخسب که در اثر زلزله ۶۹ منجیل ایجاد شد مشخصات مربوط به این زمین لغزه (مقطع A-A) بشرح زیر تعیین و با منحنی های فوق مقایسه می شوند:

$$\alpha = 20^\circ$$

$$F_s = 1/52 \text{ استاتیکی}$$

$$a_{max} = 520 \text{ (gal)}$$

با توجه به اینکه α_{av} در زمین لغزه L۱ در مرز بین دو محدوده $(20^\circ - 5^\circ)$ و $(30^\circ - 20^\circ)$ قرار دارد، مقدار شتاب حداکثر زلزله ایجاد کننده لغزش برای هر یک از این دو محدوده زاویه با داشتن $F_s = 1/52$ از منحنی های فوق الذکر بصورت زیر تعیین می شوند:

$$F_s = 1/52 \rightarrow \alpha_{max} = \begin{cases} 240 \text{ gal} : \alpha_{av} = 5^\circ - 20^\circ \\ 310 \text{ gal} : \alpha_{av} = 20^\circ - 30^\circ \end{cases}$$

از طرفی چنانکه دیده شد از منحنی تغییرات ضریب اطمینان با شتاب زلزله که برای زمین لغزه L۱ محاسبه شده است (شکل ۵) مقدار شتاب مربوط به $F_s = 1$ برای روش شبه استاتیکی ایشی هارا چنین تعریف می شود:

$$F_s = 1 \rightarrow a = 300 \text{ gal}$$

مقدار ۳۰۰ تطابق خوبی با اعداد مربوط به $20^\circ - 30^\circ$ α_{av} دارد. بنابراین روابط تهیه شده توسط ایشی هارا بین F_s و a_{max}

ایجاد کننده لغزش به خوبی می تواند وقوع لغزش را در زمین لغزه L۱ پیش بینی کند. چنانچه بجای ۳۰۰ gal مقدار حداکثر شتاب مربوط به شتاب نگاشت تصحیح شده ایستگاه آب-ر- یعنی ۵۲۰ gal در منحنی های ایشی هارا قرار گیرد، مقدار ضریب اطمینان استاتیکی مربوطه چنین خواهد بود:

$$a_{max} = 520 \text{ gal} \rightarrow F_s = \begin{cases} 2/60 : \alpha_{av} = 5^\circ - 20^\circ \\ 2/10 : \alpha_{av} = 20^\circ - 30^\circ \end{cases}$$

بنابراین مطابق روابط ایشی هارا بین F_s و a_{max} ایجاد کننده گسیختگی، زلزله ۶۹ منجیل قادر بوده است که شیب هایی با زاویه بین $20^\circ - 5^\circ$ را که ضریب اطمینان استاتیکی پایداری آنها ۲/۶ بوده است گسیخته نماید. همچنین این زلزله قادر بوده است که شیب هایی با زاویه هایی بین $30^\circ - 20^\circ$ را با ضریب اطمینان استاتیکی پایداری تا ۲/۱ گسیخته نماید. از طرف دیگر می توان نتیجه گرفت که ضریب اطمینان استاتیکی پایداری شیب هایی که این زلزله را به خوبی تحمل کرده اند برای شیب های با زاویه بین $20^\circ - 5^\circ$ از ۲/۶ و برای شیب های با زاویه بین $30^\circ - 20^\circ$ از ۲/۱ بیشتر بوده است.

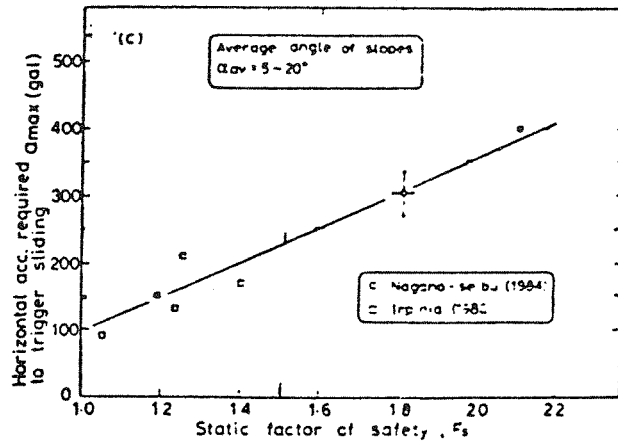
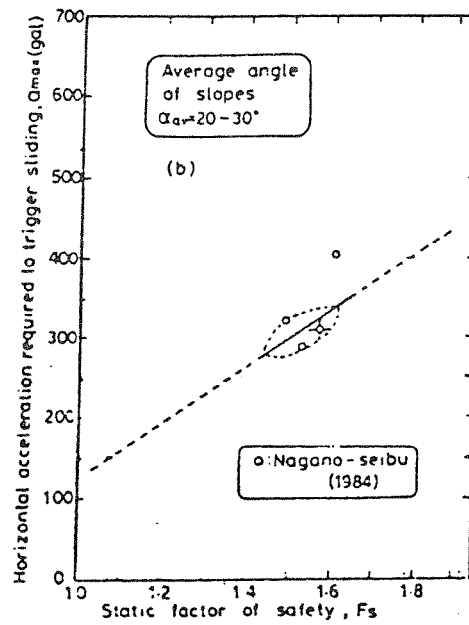
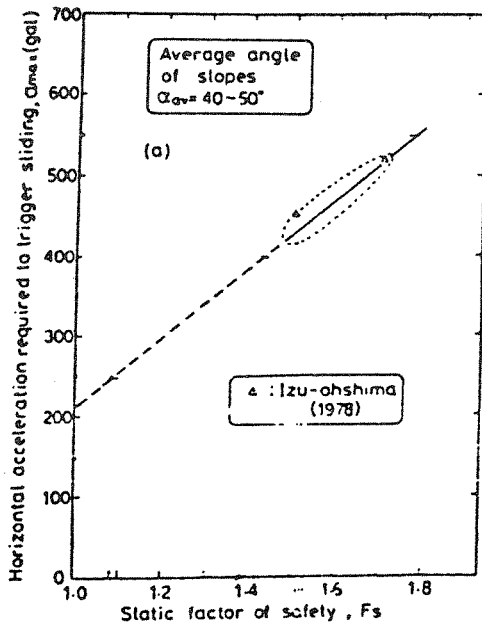
روش به کار برده شده در این نتیجه گیری می تواند در مورد ارزیابی کلی وضعیت پایداری شیب های موجود در منطقه و تهیه نقشه های خطر و پهنه بندی به خوبی به کار رود.

در صورتی که در سالهای نزدیک آتی زلزله ای با همین شدت در منطقه روی دهد، با احتمال زیاد شیب های موجود در منطقه آن را به خوبی تحمل خواهند کرد، زیرا شیب هایی که چنین قدرت تحملی را نداشته اند در زلزله قبلی گسیخته شده اند. استثناء های فاعده فوق شیب هایی هستند که:

- ۱- یا در اثر زلزله اخیر سست شده و ضریب اطمینان استاتیکی و در نتیجه زلزله ای آنها کم شده است.
 - ۲- یا در اثر زلزله اخیر بوجود آمده اند و ضریب اطمینان آنها نسبت به اعداد گفته شده فوق پائین است.
 - ۳- و یا در اثر تغییر عوامل مؤثر در پایداری (در اثر تغییرات طبیعی یا مصنوعی) در فاصله بین دو زلزله، ضریب اطمینان آنها از حد مربوط به زمان زلزله ۶۹ منجیل پائین تر آمده است.
- علاوه بر سه دسته فوق می توان شیب هایی را نیز ذکر کرد که در زلزله اخیر در مرز پایداری بوده اند ولی علائم گسیختگی از خود بروز نداده اند.

همچنین با توجه به کثرت شیب های گسیخته شده در این زلزله (هرچند که فرآیندهای ناپایدار کننده شیب های طبیعی در این منطقه که از نظر تکنونیک و فرسایشی فعالیت زیادی دارد، در مقیاس زمین شناسی با سرعت زیادی عمل می کنند) می توان فاصله زمانی وقوع زلزله ای مشابه را در منطقه نسبتاً زیاد دانست.

نتیجه دیگر مقایسه مشخصات زمین لغزه L۱ با منحنی های ایشی هارا آن است که زمین لغزه L۱ در شتابی کمتر از آنچه که در



شکل ۸ - رابطه ضریب اطمینان استاتیکی و شتاب افقی مورد نیاز برای ایجاد گسیختگی برای زاویه‌های مختلف شیب.

۵- استفاده از نمودارهای ایشی‌هارا در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله (پهنه‌بندی مقدماتی خطر زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله در ایران):

نمودارهای ایشی‌هارا برای زاویه‌های مختلف شیب سطح لغزش، شتاب حداکثر لازم زلزله را برای ایجاد گسیختگی در ضریب اطمینان استاتیکی موجود می‌دهند. حال چنانچه احتمال شتاب‌های افقی زلزله در نقاط مختلف یک منطقه مشخص باشد، بر مبنای این احتمال‌ها و نمودارهای ایشی‌هارا می‌توان در رابطه با پایداری شیب‌های مختلف موجود در منطقه اظهار نظر نمود. این روش می‌تواند به عنوان مبنای یک پهنه‌بندی مقدماتی از خطر زمین‌لغزه در هنگام زلزله در یک منطقه بکار رود.

این زلزله به وقوع پیوسته است می‌توانسته گسیخته شود. این نتیجه در تطابق با نتایج حاصله از منحنی تغییرات ضریب اطمینان با شتاب زلزله برای زمین‌لغزه LI است. منحنی اخیر ضریب اطمینان زمین‌لغزه LI را در مقطع A-A هنگام زلزله ۶۹ منجیل حدود ۰/۷۱ می‌دهد. هر چند که نمی‌توان بین مقدار ضریب اطمینان حین زلزله و مقدار تغییر مکان حاصله از زلزله ارتباط قطعی برقرار کرد اما تغییر مکان چند ده متری توده گسیخته در زمین‌لغزه LI حکایت از آن دارد که مقدار ضریب اطمینان حین زلزله بایستی به میزان قابل ملاحظه‌ای از واحد کمتر بوده باشد. بنابراین عدد ۰/۷۱ برای ضریب اطمینان حین زلزله در مقطع گسیخته شده از این نظر قابل انتظار است.

حداکثر محتمل افقی تفکیک شده است:

- I : $0.55g < a_{max}$
 II : $0.4g < a_{max} < 0.55g$
 III : $0.25g < a_{max} < 0.4g$
 IV : $a_{max} < 0.25g$

با استفاده از نمودارهای ایشی هارا برای ۴ منطقه تعریف شده فوق مقدار ضریب اطمینان استاتیکی که در آن با اعمال حداکثر شتاب محتمل دوره طرح، شیب‌های به سه دسته زاویه $5^\circ-20^\circ$ و $20^\circ-30^\circ$ و $30^\circ-40^\circ$ گسیخته می‌شوند داده شده است.

منطقه	حداکثر شتاب محتمل	مقدار ضریب اطمینان استاتیکی		
		زاویه متوسط سطح گسیختگی		
		$5^\circ-20^\circ$	$20^\circ-30^\circ$	$30^\circ-40^\circ$
I	$0.7g$	$3/36$	$2/62$	$2/13$
II	$0.55g$	$2/75$	$2/20$	$1/77$
III	$0.4g$	$2/16$	$1/78$	$1/42$
IV	$0.25g$	$1/60$	$1/36$	$1/08$

با استفاده از نقشه‌های مقدماتی پهنه‌بندی تهیه شده به روش فوق می‌توان در هر منطقه موردنظر برای زلزله با دوره بازگشت ۵۰ یا ۵۰۰ سال، ضریب اطمینان استاتیکی حداقل را برای سه دسته زاویه متوسط سطح گسیختگی داده شده تعیین کرد. در صورتی که ضریب اطمینان در حالت استاتیکی از حداقل فوق کمتر باشد، شیب مورد بررسی برای زلزله با دوره بازگشت موردنظر ایمن نمی‌باشد. مناطق تفکیک شده با روش پهنه‌بندی فوق در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.

به عنوان مثال از جدول‌های تهیه شده در فوق می‌توان دریافت که شیبی با زاویه متوسط سطح گسیختگی بین ۵ تا ۲۰ درجه در منطقه IV (با خطر زلزله کم) با ضریب اطمینان استاتیکی $1/60$ برای زلزله با دوره بازگشت ۵۰۰ ساله نیاز به ضریب اطمینان استاتیکی حداقل $3/36$ دارد.

نتایج فوق نشان می‌دهند که برای رسیدن به درجه معینی از ایمنی در هنگام وقوع زلزله‌های آتی، شیب‌های ملایم‌تر بایستی با ضریب اطمینان استاتیکی بیشتری نسبت به شیب‌های تندتر طراحی شوند.

همچنین جداول فوق نشان می‌دهند که در صورتی که ضریب اطمینان استاتیکی $F_s = 1/5$ بعنوان ضریب اطمینان قابل قبول در طرح شیب‌ها پذیرفته شود (ضریب اطمینان استاتیکی $F_s = 1/5$ در غالب مراجع و کدهای طراحی توصیه می‌شود) آنگاه این معیار به تنهایی کافی نخواهد بود و شیب حتماً بایستی برای زلزله طرح کنترل شود. به علاوه نتایج ارائه شده در جداول

در مطالعه حاضر با استفاده از نقشه‌های خطر زمین لرزه در ایران (ارسلان مهاجر اشجعی ۱۳۶۴)، سازمان انرژی اتمی ایران) و نمودارهای فوق چنین پهنه‌بندی انجام گردیده است. نقشه‌های خطر زمین لرزه فوق برای دو حالت:

- ۱- دوره بازگشت ۵۰ ساله معادل ۶۴٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال.
 ۲- دوره بازگشت ۵۰۰ ساله معادل ۱۰٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال تهیه شده‌اند.

حالت اول اغلب به عنوان زمین لرزه میناء طرح و حالت دوم به عنوان شدیدترین زلزله قابل فرض برای مستحذات با طول عمر مفید ۵۰ سال محسوب می‌شوند. در زیر روش بکار رفته برای انجام این پهنه‌بندی مقدماتی تشریح شده است:

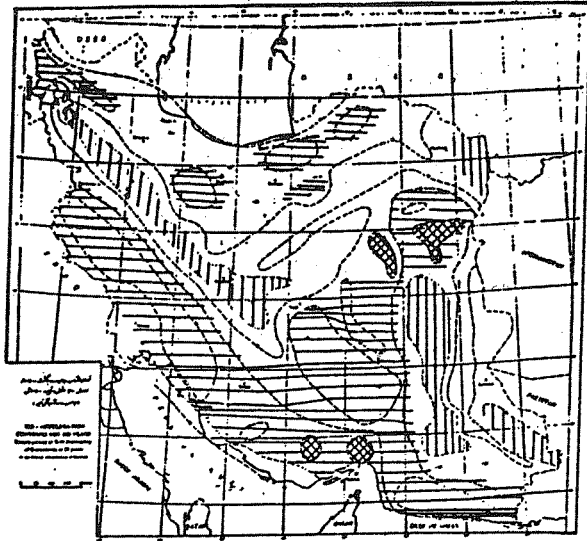
الف- نقشه پهنه‌بندی مقدماتی خطر زمین لرزه در اثر زلزله برای دوره بازگشت ۵۰ سال معادل ۶۴٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال؛
 با استفاده از نقشه خطر زمین لرزه در ایران برای دوره بازگشت ۵۰ سال، ۴ منطقه در این نقشه براساس شتاب حداکثر افقی محتمل تفکیک گردیده است:

- I : $0.35g < a_{max}$
 II : $0.25g < a_{max} < 0.35g$
 III : $0.15g < a_{max} < 0.25g$
 IV : $a_{max} < 0.15g$

با استفاده از نمودارهای ایشی هارا، برای ۴ منطقه تعریف شده فوق مقدار ضریب اطمینان استاتیکی که در آن با اعمال حداکثر شتاب محتمل دوره طرح، شیب‌های با سه دسته زاویه $5^\circ-20^\circ$ و $20^\circ-30^\circ$ و $30^\circ-40^\circ$ درجه گسیخته می‌شوند داده شده است:

منطقه	حداکثر شتاب محتمل	مقدار ضریب اطمینان استاتیکی		
		زاویه متوسط سطح گسیختگی		
		$5^\circ-20^\circ$	$20^\circ-30^\circ$	$30^\circ-40^\circ$
I	$0.4g$	$2/16$	$1/78$	$1/42$
II	$0.35g$	$1/97$	$1/64$	$1/31$
III	$0.25g$	$1/60$	$1/36$	$1/08$
IV	$0.15g$	$1/19$	$1/08$	$1/00$

ب- نقشه پهنه‌بندی مقدماتی خطر زمین لرزه در اثر زلزله برای دوره بازگشت ۵۰۰ ساله معادل ۱۰ درصد احتمال وقوع در ۵۰ سال؛
 با استفاده از نقشه خطر زمین لرزه در ایران برای دوره بازگشت ۵۰۰ سال، ۴ منطقه در این نقشه براساس شتاب

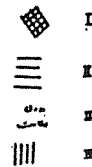


شکل ۱۰ - نقشه مقدماتی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله در ایران برای دوره برگشت ۵۰ ساله معادل ۱۰٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال.

زلزله‌ای مقاطع تخریب شده و ترك خورده زمین لغزه گاوخسب را بخوبی پیش‌بینی می‌کنند. در این میان روش شبه‌استاتیکی پیشنهادی ایشی‌هارا برای تعیین پایداری لرزه‌ای شیب‌ها جواب‌های مناسب‌تری می‌دهد. در این روش، شتاب حداکثر شتاب نگاشت در تعیین نیروی افقی وارده بر توده لغزان مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین با فرض عدم تغییر مقدار ϕ در شرایط زلزله نسبت به حالت استاتیکی مقدار چسبندگی دینامیکی به میزان پنجاه درصد نسبت به چسبندگی استاتیکی افزایش می‌یابد.

۲- با این حال روش‌های مورد اشاره در بند فوق قادر به توضیح علت ایجاد تغییر مکان‌های زیاد و تخریب کلی در مقطع تخریب شده و محدود ماندن تغییر مکان‌های ناشی از زلزله و عدم تخریب کلی در مقطع ترك خورده نمی‌باشد.

۳- شتاب تسلیم بدست آمده در تحلیل برگشتی شیب گسیخته شده مورد مطالعه با نمودارهای شتاب ضریب اطمینان استاتیکی تهیه شده توسط ایشی‌هارا مطابقت خوبی دارد. به عبارت دیگر نمودارهای اخیر قادر به پیش‌بینی گسیختگی شیب مورد بررسی در هنگام زلزله ۶۹ منجیل می‌باشند.



شکل ۹ - نقشه مقدماتی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله در ایران برای دوره برگشت ۵۰ ساله معادل ۶۴٪ احتمال وقوع در ۵۰ سال.

فوق نشان می‌دهند که در بیشتر حالات، بارگذاری زلزله و نه بارگذاری استاتیکی کنترل‌کننده طرح می‌باشد.

با انجام مطالعات بیشتر می‌توان نقشه‌های مقدماتی پهنه‌بندی فوق را کاملتر نمود. از جمله این مطالعات موارد زیر قابل ذکر هستند:

۱- ایجاد داده‌های بیشتر برای دقیق‌تر کردن نمودارهای ایشی‌هارا. این کار می‌تواند با تحلیل برگشتی زمین‌لغزه‌های تحریک شده توسط زلزله انجام شود. با این ترتیب می‌توان منحنی‌های ایشی‌هارا را دقیق‌تر نموده و این نمودارها را در محدوده‌های کوچکتری از نظر زاویه متوسط سطح گسیختگی تعیین نمود.

۲- در صورتی که در مطالعات پهنه‌بندی با مقیاس بزرگ، بتوان نقشه توزیع شیب یا نقشه توزیع ضریب اطمینان استاتیکی را در شیب‌های موجود منطقه مورد نظر تهیه نمود. نقشه پهنه‌بندی حاصله اطلاعات بیشتری را به استفاده‌کننده می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری و خلاصه:

۱- روش‌های استاتیکی متداول، پایداری و ناپایداری

۴- با استفاده از نمودارهای ایشی-هارا و منحی‌های هم‌شتاب زلزله، نقشه‌های مقدماتی پهنه‌بندی زمین لغزه‌های ناشی از زلزله در کشور ایران تهیه گردید؛ این نقشه‌ها نشان می‌دهند که

در اکثر شرایط، بارگذاری زلزله عامل تعیین‌کننده در پایداری شیب‌ها در کشور می‌باشند.

مراجع:

- ۱- س: منتظرالقائم (۱۳۷۱) ارزیابی پایداری شیب‌های طبیعی در زلزله. مطالعه موردی، پایان‌نامه ارائه شده به دانشگاه صنعتی امیرکبیر برای دریافت درجه کارشناسی ارشد.
- 2- Ishihara, K. et al. (1992). "Geotechnical Aspects of the June 20, 1990 Manjil Earthquake in Iran" *Soils and Foundations*. Vol. 32, No.3, pp. 61-78.
- 3- Ishihara, K. (1985). "Stability of Natural Deposits During Earthquakes". *Proc. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Fransisco, Vol. 1, pp. 321-376.*
- 4- Matasovic, N. (1991). "Selection of Method for Seismic Slope Stability Analysis" *proc. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri.*
- 5- Hansen Franks, C.A.M. (1991) "Characterization and Mapping of Earthquake-Triggered Landslides for Seismic Zonation.", *Proc. Fourth International Conference on seismic Zonation, STANFORD, CALIFORNIA, Vol. I, pp. 149-195.*
- 6- Kenji Ishihara and Hai-Lung Hsa (1986) "Considerations for Landslides in Natural Slopes Triggered by Earthquakes". *Proc. of Isce No. 376/III-6 (Geotechnical Eng). December 1986.*