

# ارائه‌ی روابطی برای تعیین تغییر مکان لرزه‌ی ماندگار شیروانی‌ها، براساس داده‌های لرزه‌خیزی ایران

مسعود میرابوطالبی (دانشجوی دکتری)

فرج‌الله عسکری\* (استادیار)

بزهنگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

اورنگ فزانه (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تهران

در این نوشتار به منظور ارائه‌ی روابطی برای تعیین تغییر مکان ماندگار لرزه‌ی شیروانی‌ها، با توجه به داده‌های لرزه‌خیزی کشور ایران، ابتدا مدلی هندسی برای دامنه‌های طبیعی با مصالح مختلف در نظر گرفته شده است. سپس تعدادی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های به‌وقوع پیوسته در ایران انتخاب شده و با انجام تحلیل دینامیکی، پاسخ شتاب زلزله در توده‌ی لغزنده‌ی شیروانی برآورد شده، و تغییر مکان ماندگار شیب با استفاده از روش بلوک لغزشی نیومارک به‌دست آمده است. با استفاده از روابط به‌دست آمده می‌توان طراحی شیروانی‌ها را براساس تغییر مکان مورد نظر انجام داد. همچنین این روابط برای برآورد ضریب شبه‌استاتیکی مناسب در طراحی‌های لرزه‌ی قابل استفاده‌اند. نتیجه‌ی بررسی‌های این تحقیق میزان تأثیر پارامترهای مختلف را در میزان تغییر مکان شیروانی‌ها نشان داده و مبین آن است که پارامتر بدون بعد نسبت شتاب بحرانی به شتاب پیشینه‌ی شتاب‌نگاشت ( $k_y/k_{max}$ ) بیشترین تأثیر را در رابطه‌ی تعیین تغییر مکان ماندگار شیروانی دارد. همچنین مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی در تحقیق حاضر با رابطه‌ی پیشنهادی راهنمای ارزیابی خطر لرزه‌ی شیب‌ها در کالیفرنیا حاکی از آن است که تغییر مکان‌های ارائه‌شده در آن دستورالعمل از تغییر مکان‌های به‌دست آمده در کشورمان بزرگ‌ترند.

واژگان کلیدی: تغییر مکان ماندگار، عملکرد لرزه‌ی شیروانی، شتاب توده‌ی لغزش.

## ۱. مقدمه

موضوع تحلیل پایداری لرزه‌ی شیروانی‌ها از جمله مباحثی است که همواره مورد توجه محققین قرار داشته است. همه‌ساله بر اثر وقوع زلزله، خسارت‌های جانی و مالی بسیاری بر اثر لغزش شیروانی‌ها در مناطق مختلف جهان به وجود می‌آید. کشور ایران در یکی از پهنه‌های لرزه‌خیز کره زمین واقع شده است. با توجه به لزوم انجام ساخت و سازهای گوناگون در مناطق کوهستانی و در مجاورت شیروانی‌های طبیعی، توجه به عوامل مؤثر بر پایداری لرزه‌ی شیروانی‌ها در ایران از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است.

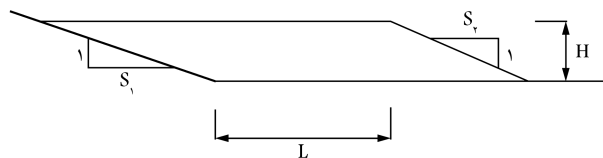
روش‌های تحلیل پایداری لرزه‌ی شیروانی‌ها شامل تحلیل‌های شبه‌استاتیکی، محاسبه‌ی تغییر مکان براساس تحلیل‌های دینامیکی، و روش‌های مبتنی بر محاسبه‌ی تغییر مکان ساده‌شده هستند.

در روش شبه‌استاتیکی اثرات زلزله معادل نیروهای ثابت ناشی از شتاب‌های قائم یا افقی در نظر گرفته می‌شود و با اعمال این نیروهای شبه‌استاتیکی بر توده‌ی لغزش، ضریب اطمینان شبه‌استاتیکی پایداری شیروانی محاسبه می‌شود. با وجود سادگی انجام این روش نسبت به سایر روش‌ها، تعیین مقدار نیروی شبه‌استاتیکی و معرفی اثرات پیچیده و گذرای لرزش‌های زلزله به‌وسیله‌ی آن به‌سادگی میسر نیست. در تحلیل شبه‌استاتیکی -- مشابه سایر روش‌های حدی -- ضریب اطمینان به‌عنوان شاخصی از پایداری ارائه می‌شود، اما هیچ‌گونه اطلاعاتی در زمینه‌ی تغییر شکل‌های زمان‌گسیختگی شیروانی به‌دست نمی‌آید. از آنجا که کارایی شیروانی بعد از وقوع زلزله به تغییر شکل‌های آن در حین وقوع زلزله بستگی دارد، تحلیل‌هایی که قادر به تعیین این تغییر شکل‌ها باشند شاخص‌های بهتری در این ارتباط ارائه می‌دهند.

دقیق‌ترین روش محاسبه‌ی تغییر مکان، تحلیل دینامیکی در فضای زمان با استفاده از روش‌های عددی، نظیر روش اجزاء محدود است. در این روش کرنش‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۲۳/۱۳۸۸، اصلاحیه ۱۲/۲۵/۱۳۸۸، پذیرش ۲/۱۹/۱۳۸۹.



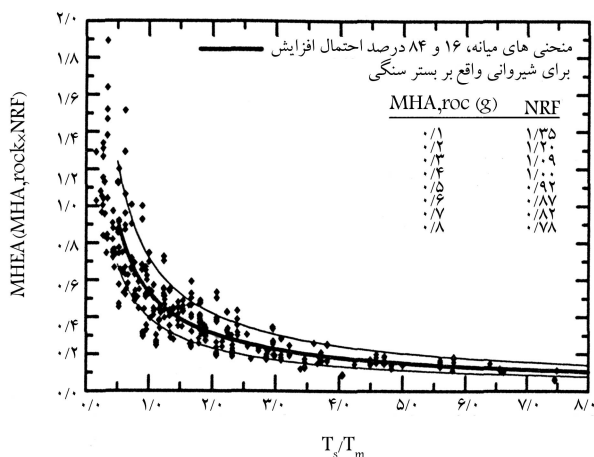
شکل ۱. شیروانی‌های مورد بررسی در تحقیقات [۶].

شیروانی مؤثر است در نظر گرفته می‌شود. در مرحله‌ی بعد، شتاب تسلیم شیروانی (شتاب متناظر با ضریب اطمینان برابر ۱) محاسبه می‌شود و از آنجا، تغییر مکان ماندگار شیروانی با دو بار انتگرال‌گیری از قسمت‌هایی از شتاب‌نگاشت که از شتاب تسلیم شیروانی بیشترند، به دست می‌آید.

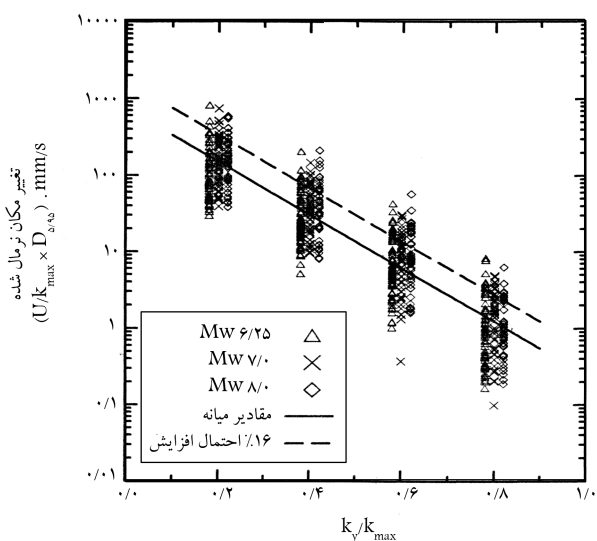
در روش بری و راجه مشخصه‌های اصلی زلزله، شامل شتاب افقی بیشینه (MHA)، پیروید میانگین ( $T_m$ ) و مدت غالب زلزله (۹۵- $D_5$ ) مورد استفاده قرار گرفته است. منظور از ۹۵- $D_5$ ، زمان بین ۵ درصد و ۹۵ درصد سطح انرژی در نمودار شدت اریاس<sup>۱</sup> است.

با تحلیل دینامیکی خاکریزهای مختلف و محاسبه‌ی پیروید اصلی خاکریز ( $T_s$ ) و تعیین  $T_s/T_m$ ، نمودار شکل ۲ حاصل شده است. در این شکل NRF پاسخ غیرخطی است که نسبت به شتاب افقی بیشینه روی سنگ بستر تعریف شده و MHEA نشانگر شتاب افقی بیشینه‌ی توده‌ی لغزنده است، که در ادامه نحوه‌ی محاسبه‌ی آن ارائه خواهد شد. در نهایت با استفاده از نمودار شکل ۳ می‌توان مقدار تغییر مکانی را تعیین کرد (برحسب سانتی‌متر) که به احتمال ۱۶ درصد، تغییر مکان واقعی از آن کم‌تر باشد.

در این نمودار  $k_{max}$  ضریب شتاب بیشینه‌ی توده‌ی لغزنده و برابر با  $MHEA/g$



شکل ۲. رابطه‌ی بیشینه شتاب نرمال شده به پیروید طبیعی نرمال شده [۵].



شکل ۳. تغییر مکان نرمال شده نسبت به تغییرات شتاب بحرانی [۵].

دائمی ناشی از زلزله در هر عضوی از شبکه با یکدیگر جمع شده و تغییر شکل دائمی شیروانی به دست می‌آید. در تحلیل‌های دینامیکی از مدل‌های رفتاری مختلفی می‌توان استفاده برد، اما این تحلیل‌ها در ساده‌ترین حالات خود نیز غالباً پیچیده و وقت‌گیرند.

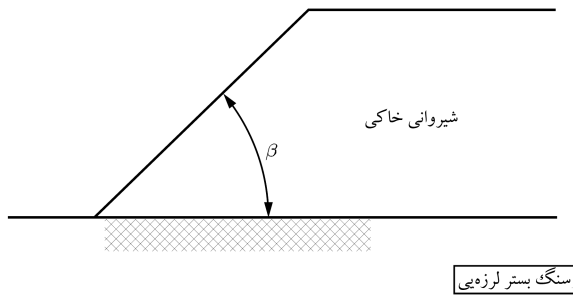
به دلیل آنچه که گفته شد، غالباً تحلیل لرزه‌ی شیروانی‌های خاکی طبیعی و خاکریزها با روش‌های ساده‌شده‌ی تعیین تغییر مکان که بر پایه‌ی کارهای نیومارک (۱۹۶۵)<sup>[۱]</sup> و ماکدیسسی (۱۹۷۸)<sup>[۲]</sup> شکل گرفته ارزیابی می‌شود. تغییر مکان لرزه‌ی به دست آمده از این روش‌ها به دلیل سهولت محاسبه، به عنوان شاخصی از عملکرد لرزه‌ی مورد توجه قرار گرفته است.

برآورد تغییر مکان لرزه‌ی شیب‌ها به دلیل پیچیدگی‌های پاسخ دینامیکی مصالح خاکریز و تغییر پذیری حرکت ورودی زمین بر اثر زلزله به سادگی میسر نیست. با این حال هنگامی که شاخصی از پتانسیل عملکرد لرزه‌ی مد نظر باشد، می‌توان از تغییر مکان لرزه‌ی محاسبه‌شده در روش‌های ساده‌شده برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های خاکی و خاکریزها بهره جست. باید توجه داشت که دقت این روش تا حدود زیادی به دقت برآورد شتاب در شیروانی و توده‌ی لغزنده بستگی دارد. در دو دهه‌ی اخیر، بحث‌های گسترده‌ی از کاربرد این روش در شیب‌ها ارائه شده است. [۱۱-۳]

بری و همکاران تحقیقات خود را بر روی گروه خاصی از شیروانی‌ها، یعنی دپوی ضایعات یا مدفن زباله‌ها با هندسه‌ی نشان داده‌شده در شکل ۱ انجام داده‌اند. [۶] آنان براساس روش نیومارک و استفاده از رکورد ثبت‌شده‌ی زلزله‌های آمریکا، نمودارهایی کاربردی برای تعیین تغییر مکان ماندگار این گروه از شیروانی‌ها ارائه کرده‌اند. در تحقیق حاضر ابتدا مدلی هندسی برای یک شیروانی همگن معرفی شده است. سپس تعدادی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های به‌وقوع پیوسته در ایران که دارای شتاب بیشینه‌ی قابل ملاحظه‌ی بوده‌اند انتخاب شده و با کاربرد مدل موهر - کولمب و انجام تحلیل‌های کشسانی - خمیری دینامیکی، تاریخچه‌ی شتاب در توده‌ی خاک محاسبه شده است. در نهایت با کاربرد روشی که از اصلاح روش بری و راجه حاصل شده و با استفاده از روش نیومارک، تغییر مکان ماندگار شیروانی در زمان وقوع زلزله به دست آمده است. با استفاده از روش ارائه‌شده، به عنوان نمونه‌ی روابط کاربردی به منظور طراحی لرزه‌ی شیروانی‌ها در محدوده‌ی پارامترهای مؤثر در تحلیل ارائه شده‌اند. در ادامه، ابتدا خلاصه‌ی روش بری و راجه بیان شده و سپس مبانی و جزئیات روش تحقیق حاضر و نتایج حاصل از آن ارائه شده است.

## ۲. روش بری و راجه

روش بری و راجه ترکیبی از تحلیل دینامیکی شیروانی‌ها و روش بلوک لغزنده‌ی نیومارک است. نیومارک در سال ۱۹۶۳ برای اولین بار این مفهوم مهم را پیشنهاد کرد که رفتار لرزه‌ی خاکریزها به جای ضریب اطمینان براساس تغییر شکل‌های به‌وجود آمده بررسی شود. در روش نیومارک، ابتدا یک تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله که بر



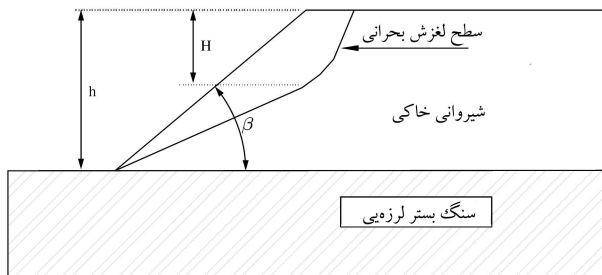
شکل ۴. شبروانی مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

شیب‌های مذکور برای انجام تحلیل‌ها به‌گونه‌ای که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود مدل شده‌اند.

در این مدل، شیبی به ارتفاع  $h$  و زاویه  $\beta$  بر روی سنگ بستر افقی قرار گرفته است. در هر تحلیل شتاب بحرانی و سطح لغزش بحرانی با انجام تحلیل شبه‌استاتیکی تعیین شده و در مرحله‌ی بعد با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، پاسخ هر یک از رکوردهای انتخابی بر روی سطح لغزش بحرانی تعیین و شتاب بیشینه‌ی معادل توده‌ی لغزنده برآورد می‌شود. سپس تغییر مکان ماندگار با استفاده از روش نیومارک تحت اثر هر یک از رکوردها محاسبه شده و روابط تغییر مکان ماندگار شبروانی نسبت به شتاب معادل توده‌ی لغزنده ارائه می‌شود. چنان‌که پیشتر نیز اشاره شد، تحقیق حاضر بر مبنای اصلاح روش بری و راجه (۱۹۹۸) پایه‌ریزی شده است. مهم‌ترین اصلاحات انجام‌شده عبارت‌اند از:

الف) بری و راجه تحقیقات خود را برای خاکریزهای دپوی ضایعات و با مقطع نشان داده شده در شکل ۱ انجام داده‌اند. چنان‌که ملاحظه می‌شود، علاوه بر متفاوت بودن هندسه‌ی مدل مورد استفاده در دو تحقیق، سطح لغزش در مدل ایشان از قبل مشخص است. در تحقیق حاضر سطح لغزش ابتدا با انجام تحلیل شبه‌استاتیکی برای هندسه و پارامترهای مدل انتخابی تعیین می‌شود و محاسبات بعدی بر روی سطح لغزش به‌دست آمده انجام می‌شود.

ب) در روش بری، پرود طبیعی توده‌ی لغزنده از فرمول  $T_s = 4H/V_s$  (مطابق شکل ۱) محاسبه شده است، در حالی‌که در روش حاضر پرود غالب با اعمال رکوردهای هارمونیک به مدل، تغییر فرکانس و به‌دست آوردن فرکانس تشدید تعیین شده است.<sup>[۱۳]</sup> این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS صورت پذیرفته است. بری در مورد شیب‌هایی نظیر شیب مورد استفاده در این تحقیق نیز توصیه کرده که  $T_s$  از رابطه‌ی  $4H/V_s$  تعیین شود، لیکن  $H$  نظیر مقدار نشان داده شده در شکل ۵ و برابر با فاصله‌ی قائم سطح لغزنده‌ی بحرانی تا بالای شیب در محل رأس آن در نظر گرفته شود. صحت این فرض در ادامه‌ی این مطالعه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۵. هندسه‌ی مدل شبروانی مورد مطالعه.

است. منحنی‌های کاربردی شکل‌های ۲ و ۳ برای اولین بار توسط بری و راجه ارائه شده و این روش به‌عنوان راهنمای ارزیابی خطر لرزه‌یی در ایالت کالیفرنیا مورد استفاده قرار گرفته است.<sup>[۱۲]</sup> در این راهنما استفاده از خط میانگین نمودار ۳، براساس معادله‌ی ۱، توصیه شده است:

$$\log \frac{u}{k_{\max} \cdot D_{5-95}} = 1,87 - 3,477 \frac{k_y}{k_{\max}} \quad (1)$$

که در آن  $u$  تغییر مکان میانگین برحسب سانتی‌متر است. برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های روش بری و راجه را می‌توان چنین برشمرد:

- بری و راجه<sup>[۱۲]</sup> تحقیقات خود را برای خاکریزهای دپوی ضایعات<sup>۲</sup> با مقطع نشان داده‌شده در شکل ۱ انجام داده‌اند.

- در روش بری، پرود طبیعی توده‌ی لغزنده از فرمول  $T_s = 4H/V_s$  (مطابق شکل ۱) محاسبه شده است. او برای سایر شیب‌ها نیز محاسبه‌ی  $T_s$  از همین رابطه را توصیه کرده، لیکن  $H$  ارتفاع شیب نیست و به روشی که در ادامه توضیح داده خواهد شد تعیین می‌شود.

- تحلیل‌های دینامیکی انجام‌شده توسط بری به‌صورت یک‌بعدی و با کاربرد روش معادل خطی انجام شده است.

بری و همکاران تحلیل‌های خود را بر روی تعداد ۶ خاکریز با ارتفاع‌های مختلف انجام و نتایج را ارائه کرده‌اند. آنان تاریخچه‌ی شتاب‌های زلزله‌ی مورد استفاده‌ی خود را با فرض مقادیر  $0,7$ ،  $0,4$ ،  $0,6$  و  $0,8$  برای نسبت شتاب تسلیم به شتاب بیشینه‌ی رکورد، مورد تحلیل قرار داده‌اند و تغییر مکان‌های حاصل از تحلیل را با تغییر مکان‌های<sup>[۲]</sup> ایجادشده در چندین خاکریز در زلزله‌ی لوما پرتا<sup>۳</sup> (۱۹۸۹) و نورتریج<sup>۴</sup> (۱۹۹۴) مقایسه کرده‌اند.<sup>[۵]</sup>

با توجه به شرایط لرزه‌خیزی کشور و لزوم انجام ساخت‌وساز در مناطق کوهستانی و شیب‌های طبیعی و نیز خسارت‌های جانی و مالی بسیاری که بر اثر زلزله‌های به‌وقوع پیوسته در کشور، از جمله زلزله‌ی رودبار و کجور، به‌وجود آمده می‌توان به اهمیت تهیه‌ی روابط نظیر رابطه‌ی ۱، با توجه به خصوصیات لرزه‌خیزی ایران برای ارزیابی پایداری شبروانی‌ها در این کشور پی برد. موضوع نوشتار حاضر، تهیه‌ی روابط مزبور با استفاده از اطلاعات لرزه‌خیزی ایران است که این مهم با انجام اصلاحاتی در روش بری و راجه انجام شده است.

### ۳. روش تحقیق حاضر و ویژگی‌های آن

در تحقیق حاضر، ضمن از میان برداشتن برخی از محدودیت‌های موجود در روش بری و راجه، تلاش شده تا روابطی برای تعیین تغییر مکان ماندگار شبروانی با توجه به تعدادی از رکوردهای ثبت‌شده‌ی زلزله در داخل کشور، تهیه شود. بدین‌منظور در ادامه با در نظر گرفتن مدلی دوبعدی از شبروانی و انجام تحلیل‌های دینامیکی، عملکرد شبروانی در محدوده‌ی از هندسه، پارامترهای مقاومت برشی و سرعت موج برشی برای توده‌ی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. این عملکرد با ارزیابی رکورد شتاب در توده‌ی لغزنده (توده‌ی واقع در بالای سطح لغزش بحرانی) و محاسبه‌ی تغییر مکان شیب با استفاده از روش نیومارک صورت پذیرفته است. ابتدا مجموعه رکوردهای ثبت‌شده‌ی موجود و مربوط به زلزله‌های ایران مورد بررسی قرار گرفته و پس از انتخاب رکوردهایی مناسب، در محدوده‌ی معین از پارامترهای مقاومتی و سرعت موج برشی، تحلیل‌ها انجام شده است. این تحقیق برای دامنه‌های همگن با هندسه‌ی ارائه‌شده مطابق شکل ۴ انجام شده است.

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های انتخاب شده. [۱۴]

ایستگاه	موقعیت جغرافیایی		تاریخ	فرکانس غالب (Hz)		P.G.A. (cm/s/s)	بزرگا		
	عرض	طول		مولفه عرضی	مولفه طولی		$M_w$	$M_s$	$M_b$
دیپوک	۳۳,۲۹	۵۷,۵	۱۹۷۸,۹,۱۶	۲,۵	۵	۴۱۰	۷,۴	۶,۴	-
طیس	۳۳,۵۸	۵۶,۹۲	۱۹۷۸,۸,۱۶	۴,۲	۵	۸۹۷	۷,۴	۶,۴	-
آب‌بر	۳۶,۹۲	۴۸,۹۷	۱۹۹۰,۶,۲۰	۸,۳	۶,۳	۶۵۳	۷,۷	۶,۴	-
میمند	۲۸,۸۷	۵۲,۷۵	۱۹۹۴,۶,۲۰	۴,۵	۵,۶	۵۰۳	۵,۷	۵,۹	-
زنجیران	۲۹,۰۷	۵۲,۶۲	۱۹۹۴,۶,۲۰	۱۰	۱۰	۱۰۰۶	۵,۷	۵,۹	-
آوج	۳۵,۵۸	۴۹,۲۲	۲۰۰۲,۶,۲۲	۴,۲	۵	۴۹۸	۶,۴	۶,۲	۶,۵
بم	۲۹	۵۸,۳۳	۲۰۰۳,۱۲,۲۶	۴,۵	۵	۹۸۹	۶,۷	-	-

ج) در روش بری ضرایب شتاب بحرانی شیروانی ( $k_y$ ) به‌طور انتخابی تعیین شده در حالی که در این تحقیق از ضرایب شتاب بحرانی به‌دست آمده از تحلیل‌های شبه‌استاتیکی مربوط به ضریب اطمینان برابر واحد استفاده شده است.

د) تحلیل‌های دینامیکی انجام شده توسط بری به‌صورت یک‌بعدی و با کاربرد روش معادل خطی انجام شده است، در حالی که مدل هندسی مورد استفاده در این تحقیق به‌صورت دوبعدی و مدل رفتاری مورد استفاده برای خاک از نوع غیرخطی کشسانی - خمیری (مدل رفتاری موهر - کولمب) بوده است.

### ۳.۴. انجام تحلیل‌های شبه‌استاتیکی به‌منظور تعیین سطح لغزش و شتاب بحرانی ( $k_y$ )

سطح لغزش و شتاب بحرانی از روش تحلیل حدی مرز بالا و برنامه‌ی TRASS، که براساس روش یادشده برای تعیین ضریب اطمینان پایداری شیب‌ها تهیه شده، [۱۵] تعیین شده است. در این برنامه سازوکار گسیختگی با استفاده از تعدادی بلوک صلب که حرکت انتقالی دارند و توسط ناپوستگی‌های سرعت از یکدیگر جدا شده‌اند مدل می‌شود. با تساوی کار نیروهای داخلی و خارجی و براساس قضیه‌ی مرز بالای تحلیل حدی، ضریب اطمینان شیروانی محاسبه می‌شود. با توجه به مدل هندسی و پارامترهای مقاومتی در نظر گرفته شده و انجام تحلیل‌های شبه‌استاتیکی، ضریب شتاب افقی بحرانی ( $k_y$ ) -- یعنی ضریب شتاب افقی که در آن ضریب اطمینان برابر ۱ می‌شود -- تعیین و مختصات سطح گسیختگی بحرانی مشخص شده است.

### ۴.۴. انتقال رکوردهای شتاب به سطح لغزش بحرانی و تعیین شتاب افقی بیشینه‌ی معادل در توده‌ی لغزنده

یکی از نکاتی که در تحلیل‌های پایداری شیروانی براساس عملکرد به‌روش نیومارک درخور توجه است، انتخاب محل رکورد شتاب زلزله است. در تحقیق حاضر، رکورد شتاب از سنگ بستر به سطح لغزش بحرانی انتقال یافته و رکورد انتقال‌یافته‌ی مذکور برای ارزیابی عملکرد شیب مورد استفاده قرار گرفته است. برای تعیین رکورد شتاب زلزله بر روی سطح لغزش بحرانی از برنامه PLAXIS استفاده شده است.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در این تحقیق تحلیل دینامیکی کشسانی - خمیری با استفاده از مدل موهر - کولمب صورت گرفته است. یادآور می‌شود که برای لحاظ میرایی مادی، ماتریس میرایی  $C$  در تحلیل‌های دینامیکی از روش رایلی و براساس

## ۴. مراحل انجام روش تحقیق حاضر

در این بخش مراحل روش تحقیق تشریح شده است. این مراحل با جهت‌گیری ارائه‌ی روابطی برای تعیین تغییر مکان ماندگار شیروانی تشریح شده است.

### ۱.۴. انتخاب رکوردها

با توجه به محدود بودن رکوردهای با بیشینه شتاب‌های مناسب برای انجام تحلیل‌های تاریخیچه زمانی در کشور، رکوردهای مربوط به زلزله‌های رخ داده در کل کشور با استفاده از فایل رکوردهای اصلاح شده [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت و از بین آن‌ها ۱۴ رکورد مربوط به ۵ زلزله در دو جهت -- شامل ایستگاه‌های بم، آوج، زنجیران، دیپوک، طیس، میمند و آب‌بر که دارای بیشترین بزرگا و شتاب بودند -- برای انجام تحلیل‌های دینامیکی انتخاب شد. مشخصات زلزله‌های انتخابی در جدول ۱ ارائه شده است.

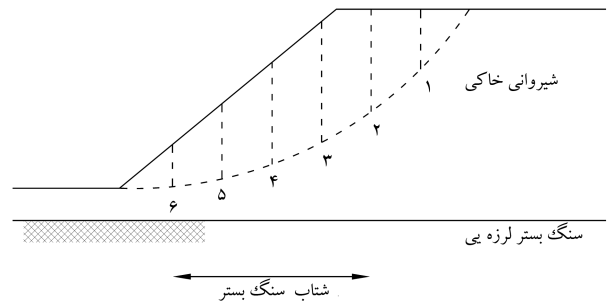
### ۲.۴. انتخاب پارامترهای هندسی شیروانی و مقاومت توده‌ی خاک

با توجه به گستره‌ی نسبتاً زیاد پارامترهای هندسی و مقاومتی شیروانی و زمان نسبتاً زیاد لازم برای تحلیل‌هایی که در مرحله‌ی ۴.۴. بدان اشاره خواهد شد، محدوده‌ی پارامترهای مختلف در نظر گرفته شده و تحلیل‌هایی برای آن‌ها انجام شده است.

به‌منظور انجام تحلیل‌ها، یک گروه شیروانی با زوایای شیب دامنه‌ی برابر ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه،  $(\phi)$  برابر ۳۰ درجه، نسبت  $\gamma/h/c$  برابر ۳، ۴۵ و ۶۰، و نسبت

#### ۵.۴. تعیین تغییر مکان ماندگار براساس روش نیومارک

براساس روش نیومارک، اگر بلوکی را بر روی یک سطح شیبدار در نظر بگیریم و نیروی ناشی از زلزله بر بلوک بیشتر از مقاومت ناشی از اصطکاک در کف بلوک شود، اختلاف نیرو منجر به جابه‌جایی بلوک می‌شود. این ایده که اولین بار توسط نیومارک مطرح شد، بدان معناست که در هنگام وقوع زلزله، توده‌ی لغزنده از لحظه‌ی که ضریب اطمینان کم‌تر از ۱ می‌شود در طول سطح گسیختگی حرکت کرده و در زمانی که تنش اعمال‌شده از زلزله کم‌تر از مقاومت سطح لغزش بحرانی شود، متوقف می‌شود. براساس مقدار تغییر مکان توده‌ی لغزنده، که ممکن است در محدوده‌ی چند سانتی‌متر تا چند متر باشد، پایداری یا ناپایداری شیروانی براساس عملکرد مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تعیین تغییر مکان ماندگار، برنامه‌ی در محیط نرم افزار MATLAB تهیه و براساس روش نیومارک با شتاب بحرانی ( $k_y$ ) به‌دست آمده در بند ۳.۴. تغییر مکان ماندگار شیروانی با دو بار انتگرال‌گیری از بخش‌هایی از منحنی شتاب - زمان (که از شتاب بحرانی بیشتر بوده) محاسبه شد.<sup>[۱۷]</sup>



شکل ۶. تعیین تاریخچه‌ی زمانی متوسط رکورد بر روی سطح لغزش بحرانی براساس رابطه‌ی ۲.

رابطه‌ی ۲ به‌دست آمده است:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  به‌نحوی محاسبه شده‌اند که نسبت میرایی ( $\xi$ ) در چند مود اول و نیز در محدوده‌ی فرکانسی شتاب‌نگاشت، حدود ۵٪ باشد.<sup>[۱۶]</sup> پس از تعیین ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$ ، بانجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، تاریخچه‌ی زمانی شتاب هر یک از زلزله‌ها، برای ۶ نقطه از سطح لغزش تعیین شده است (شکل ۶). یادآور می‌شود که در تحلیل دینامیکی با برنامه‌ی PLAXIS، می‌توان تاریخچه‌ی شتاب را در هر نقطه‌ی دلخواه از مدل مورد تحلیل در نتایج مشاهده کرد. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۳ تاریخچه‌ی زمانی متوسط شتاب زلزله بر روی سطح لغزش بحرانی به‌دست آمده است:

$$HEA(t) = \frac{\sum_{i=1}^n HEA_i(t) m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3)$$

که در آن  $HEA(t)$  شتاب متوسط در لحظه‌ی  $t$  در بلوک لغزنده،  $HEA_i(t)$  شتاب در نقطه‌ی  $i$  در سطح لغزش و  $m_i$  جرم ستون مصالح واقع در بالای نقطه‌ی  $i$  بر روی سطح لغزش است. مقدار بیشینه‌ی این تاریخچه زمانی شتاب به‌عنوان  $MHEA$  برای توده‌ی لغزنده انتخاب شده است.

در روش حاضر پروید طبیعی شیروانی با اعمال رکوردهای هارمونیک به مدل، تغییر فرکانس و به‌دست آوردن فرکانس تشدید تعیین شده است. نتایج محاسبات انجام‌شده به‌روش مزبور نشان می‌دهد که پروید طبیعی شیب‌های مورد بررسی بین  $0.133$  تا  $0.435$  تغییر می‌کند. چنان‌که پیشتر اشاره شد، بری و همکاران برای به‌دست آوردن پروید غالب توده‌ی لغزنده فرمول  $T_s = 4H/V_s$  را پیشنهاد کرده‌اند (مقدار  $H$  در شکل ۵ نشان داده شده است). در مدل‌های مورد مطالعه در این مقاله، مقدار  $T_s$  با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی بری و همکاران در حدود  $0.55$  تا  $0.542$  است. مشاهده می‌شود که محدوده‌ی پاسخ‌های حاصل از فرمول پیشنهادی بری و همکاران با محدوده‌ی پاسخ‌های به‌دست آمده در تحلیل‌های دینامیکی همخوانی ندارد. مقایسه‌ی مورد به مورد مقادیر  $T_s$  از تحلیل تحقیق حاضر با فرمول پیشنهادی بری و راجه نیز گویای همین ناهمخوانی بوده است. برای نمونه، مقدار  $T_s$  با استفاده از فرمول پیشنهادی بری و راجه برای مدل‌هایی که مقادیر  $T_s$  واقعی آن‌ها  $0.133$ ،  $0.345$ ،  $0.417$  بوده، برابر با  $0.55$ ،  $0.157$  و  $0.344$  به‌دست آمده است.

#### ۵. ارائه‌ی روابط تغییر مکان ماندگار شیروانی

در این مرحله از تحقیق، به‌منظور کاربردی‌تر کردن نتایج تحلیل‌ها، نتایج در قالب روابطی نه‌چندان پیچیده ارائه شد. بدین لحاظ روابط مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و با در نظر گرفتن ضریب همبستگی بین پارامترها از یک سو، و سادگی رابطه از سوی دیگر، و نیز با سعی و خطا شکل مناسب روابط مورد نظر انتخاب شد؛ در ادامه این روند با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در رابطه‌ی ۴ تغییر مکان ماندگار شیروانی  $U$  (میلی‌متر)، برحسب پارامترهای  $\beta$  (درجه)،  $(\gamma h/c, T_s/T_m, h/V_s)$  ارائه شده است. در این رابطه تمامی نتایج تحلیل‌ها بدون دسته‌بندی داده‌های زلزله‌های مختلف، برحسب شتاب‌شان مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به ضریب همبستگی به‌دست آمده ( $0.9619$ ) برای این رابطه، می‌توان از آن با تقریب قابل قبولی برای تعیین تغییر مکان آن گروه از شیروانی‌ها که در محدوده‌ی پارامترهای مربوط به تحلیل‌های انجام‌شده قرار می‌گیرند استفاده کرد.

$$\begin{aligned} \ln(U) &= 16.4107 - 0.1594\beta - 0.305 \frac{\gamma h}{c} + 4.9706 \frac{h}{V_s} - \\ & 1.3531 \ln \frac{T_s}{T_m} - 14.2511 \frac{k_y}{k_{max}} \\ R &= 0.9619 \end{aligned} \quad (4)$$

به‌منظور تعیین تأثیر هر یک از پارامترها در رابطه‌ی ۴، اثر حذف هر یک از پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که پارامتر  $\gamma h/c$  کم‌ترین، و پارامتر  $k_y/k_{max}$  بیشترین تأثیر را در رابطه‌ی یادشده دارند، به‌نحوی که با حذف هر یک از دو پارامتر فوق، مقدار ضریب همبستگی به‌ترتیب برابر با  $0.9608$  و  $0.6280$  خواهد بود.

در ادامه‌ی بررسی‌ها، به‌جای یک رابطه، داده‌های ورودی از نظر شتاب بیشینه به دو گروه تقسیم شدند و برای هر گروه از داده‌ها، رابطه‌ی مستقلی به‌دست آورده شد. روابط ۵ و ۶ به‌ترتیب تغییر مکان ماندگار شیروانی را برای زلزله‌های با شتاب‌های بیشتر و کم‌تر از  $0.5$  سانتی‌متر بر مجذور ثابته نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که رابطه‌ی ۵ دارای ضریب همبستگی بیشتری نسبت به رابطه‌ی ۴ است، و رابطه‌ی ۶

مقایسه‌ی این دو خط نشان می‌دهد که تغییر مکان‌های به‌دست آمده از رابطه‌ی دست‌ورعمل کالیفرنیا از تغییر مکان‌های به‌دست آمده در کشورمان بزرگ‌تر است. باید متذکر شد که تحقیق حاضر از دو منظر با روش استفاده شده در کالیفرنیا متفاوت است: ۱. مدل شیب: ۲. رکورد‌های مورد استفاده. با توجه به این دو تفاوت، اصولاً نمی‌توان در مورد اختلاف نتایج به‌دست آمده از دو روش، تحلیل و قضاوت خاصی ارائه داد.

به‌منظور تعیین پارامتر  $k_{max} = MHEA/g$ ، روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب برای زلزله‌های با شتاب‌های بیشتر از  $50^\circ$  سانتی‌متر بر مجذور ثانیه، کم‌تر از  $50^\circ$  سانتی‌متر بر مجذور ثانیه، و تمامی زلزله‌ها ارائه شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود ضرایب همبستگی در این روابط کم‌تر است، اما هنوز در حد قابل قبولی قرار دارد.

$$\frac{MHEA}{MHA_r} = 1,8343 - 0,147\beta - 0,038 \frac{\gamma h}{c} - 1,0454 \frac{h}{V_s} - 0,2209 \ln \frac{T_s}{T_m}$$

$$R = 0,9336 \quad (9)$$

$$\frac{MHEA}{MHA_r} = 2,7576 - 0,223\beta - 0,061 \frac{\gamma h}{c} - 2,0533 \frac{h}{V_s} - 0,4430 \ln \frac{T_s}{T_m}$$

$$R = 0,9203 \quad (10)$$

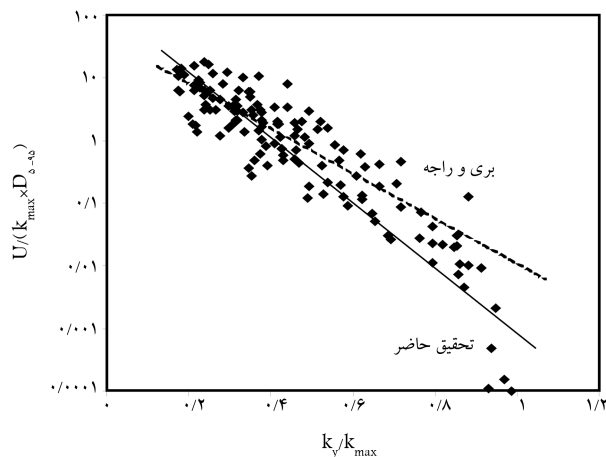
$$\frac{MHEA}{MHA_r} = 2,2245 - 0,185\beta - 0,050 \frac{\gamma h}{c} - 1,6523 \frac{h}{V_s} - 0,2585 \ln \frac{T_s}{T_m}$$

$$R = 0,8763 \quad (11)$$

از این روابط می‌توان به‌عنوان روابط کاربردی در طراحی براساس عملکرد مورد انتظار استفاده کرد. ابتدا با مشخص بودن ساخت‌گاهی که در آن شیب مورد مطالعه قرار دارد و نیز مشخص بودن هندسه‌ی شیب، مقادیر  $T_s$ ،  $T_m$  و  $MHA_r$  تعیین می‌شود و با استفاده از روابط ۹ تا ۱۱، مقدار  $MHEA$  و در نتیجه  $k_{max}$  به‌دست می‌آید. سپس با انجام تحلیل شبه‌استاتیکی، مقدار ضریب شتاب بحرانی شیب مورد نظر تعیین می‌شود و با استفاده از روابط ۵ و ۶ مقدار تغییر مکان ماندگار شیب را تعیین و با تغییر مکان مجاز مقایسه می‌کنیم.

از روابط ارائه‌شده می‌توان برای تعیین ضریب شبه‌استاتیکی ( $k_h$ )، براساس عملکرد استفاده کرد. چنانچه مقداری را به‌عنوان تغییر مکان مجاز شیب در نظر بگیریم (عملکرد مورد انتظار)، مقدار  $MHEA$  و در نتیجه  $k_{max}$  را با توجه به روابط ۹ و ۱۰ به‌دست خواهیم آورد، و سپس با توجه به تغییر مکان در نظر گرفته شده و روابط ۵ و ۶، مقدار  $k_y/k_{max}$  و در نتیجه  $k_y$  به‌دست می‌آید. مقدار  $k_y$  به‌دست آمده همان ضریب شبه‌استاتیکی پیشنهادی برای سطح عملکرد مورد نظر است. اگر ضریب اطمینان شيرروانی مورد مطالعه با در نظر گرفتن  $k_h$  برابر با  $k_y$  بزرگتر از ۱ باشد، عملکرد شیب مورد رضایت است.

در ارتباط با عملکرد درست روابط ارائه‌شده برای حالات مختلف، باید اذعان داشت که در حال حاضر تعداد رکورد‌های ثبت‌شده‌ی مربوط به زلزله‌های نسبتاً شدید در کشور ایران نسبت به منطقه‌ی کالیفرنیا بسیار کم‌تر است و لذا کاربرد روابط ارائه‌شده برای کشورمان در محدوده‌ی بزرگ‌ها و شتاب‌های ارائه‌شده در جدول ۱ و برای شيرروانی‌هایی مشابه هندسه‌ی شکل ۵ قابل توصیه است. بدیهی است گسترش



شکل ۷. مقایسه‌ی رابطه‌ی پیشنهادی در تحقیق حاضر با رابطه‌ی راهنمای ارزیابی خطر لرزه‌ی در کالیفرنیا.

نیز دارای ضریب همبستگی کم‌تری نسبت به آن رابطه است. بنابراین در حالتی که در ساختگاه مورد مطالعه، احتمال وقوع زلزله‌هایی با شتاب بیشتر از  $50^\circ$  سانتی‌متر بر مجذور ثانیه وجود دارد، می‌توان به‌جای رابطه‌ی ۴ از رابطه‌ی ۵ استفاده کرد.

$$\ln(U) = 9,7981 - 0,433\beta - 0,100 \frac{\gamma h}{c} + 2,1683 \frac{h}{V_s} - 2,061 \ln \frac{T_s}{T_m} - 8,4932 \frac{k_y}{k_{max}}$$

$$R = 0,9674 \quad (5)$$

$$\ln(U) = 12,0610 - 0,777\beta - 0,049 \frac{\gamma h}{c} - 0,791 \frac{h}{V_s} - 1,4076 \ln \frac{T_s}{T_m} - 12,7545 \frac{k_y}{k_{max}}$$

$$R = 0,9450 \quad (6)$$

در بررسی اثر پارامترهای رابطه‌ی ۶ ملاحظه شد که حذف پارامترهای  $h/V_s$  و  $\gamma h/c$  تأثیر درخور توجهی بر ضریب همبستگی رابطه ندارند، و بنابراین در محدوده‌ی پارامترهای مورد بررسی رابطه‌ی ۶ به‌شکل ساده‌تر رابطه‌ی ۷ قابل استفاده است:

$$\ln(U) = 11,3964 - 0,665\beta - 1,4183 \ln \frac{T_s}{T_m} - 12,7486 \frac{k_y}{k_{max}}$$

$$R = 0,9450 \quad (7)$$

برای امکان مقایسه‌ی روابط به‌دست آمده با رابطه‌ی ۱ که در راهنمای ارزیابی خطر لرزه‌ی در ایالت کالیفرنیا توصیه شده، رابطه‌ی ۸ براساس داده‌ها و نتایج تحقیق حاضر و مشابه با رابطه‌ی ۱ به‌دست آمده است:

$$\log \frac{u}{k_{max} \cdot D_{0-95}} = 2,1734 - 0,1888 \frac{k_y}{k_{max}}$$

$$R = 0,9412 \quad (8)$$

که در آن  $u$  برحسب سانتی‌متر است. اگرچه ضریب همبستگی رابطه‌ی ۸ از رابطه‌ی ۴ کم‌تر است، اما ملاحظه می‌شود که این اختلاف چندان زیاد نیست و ضریب همبستگی این رابطه نیز در حد مطلوبی قرار دارد. در شکل ۷ شاهد رابطه ۸ و داده‌های مربوط به آن همراه با خط مربوط به رابطه‌ی ۱ هستیم.

- با بررسی روابط به دست آمده چنین به نظر می‌رسد که پارامترهای شیب شیروانی  $(\beta)$ ،  $\gamma h/c$ ،  $T_s/T_m$  و  $h/V_s$  در تعیین میزان تغییر مکان ماندگار شیب مؤثرند. البته زاویه ی اصطکاک داخلی خاک نیز در این تغییر مکان مؤثر است که تأثیر آن در این مقاله مورد بررسی قرار نگرفته است.
- در رابطه ی تعیین تغییر مکان ماندگار شیروانی، پارامتر  $\gamma h/c$  کم‌ترین و پارامتر  $k_y/k_{max}$  بیشترین تأثیر را دارد.
- مقایسه ی رابطه ی پیشنهادی در تحقیق حاضر با رابطه ی مشابه آن در راهنمای ارزیابی خطر لرزه‌ی کالیفرنیا حاکی از آن است که تغییر مکان‌های به دست آمده در روش کالیفرنیا از تغییر مکان‌های به دست آمده در کشورمان بزرگ‌تر است. این موضوع در زلزله‌های با بزرگا و در نتیجه شتاب بیشینه ی بیشتر به طور شاخص‌تری مشهود است.
- از روابط ارائه شده در این نوشتار می‌توان به عنوان روابط کاربردی در طراحی براساس عملکرد مورد انتظار، یا تعیین ضریب شبه‌استاتیکی ( $k_h$ ) براساس عملکرد مورد انتظار استفاده کرد.

## پانویس

1. Arias intensity
2. waste fill
3. Loma Prieta
4. Northridge

## منابع

1. Newmark, N.M. "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, **15**(2), pp. 139-160 (1965).
2. Makdisi, F. and Seed, H. "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations", *J. Geotech. Engrg. Div.*, **104**(7), pp. 849-867 (1978).
3. Ambraseys, N.N. and Menu, J.M. "Earthquake-induced ground displacements", *J. Earthquake Eng.*, **16**, PP. 985-1006 (1988).
4. Bray, J.D.; Augello, A.J.; Leonards, G.A.; Repetto, P.C. and Byrne, R.J. "Seismic stability procedures for solid waste landfills", *J. Geotech. Engrg.*, **121**(2), pp. 139-151 (1995).
5. Bray, J.D. and Rathje, E.R. "Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **124**(3), pp. 242-253 (1998).
6. Bray, J.D.; Rathje, E.M.; Augello, A.J. and Merry, S.M. "Simplified seismic design procedure for geosynthetic-lined-waste landfills", *Geosynthetics International*, **5**(1-2), (1998).
7. Bray, J.D. and Travasarou, T. "Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, **133**(4), pp. 381-392 (2007).

دامنه‌ی کاربرد این روابط در حالات دیگر با استفاده از داده‌های لرزه‌خیزی مربوط به زلزله‌های نسبتاً بزرگ در آینده، و نیز استفاده از مدل‌های تحلیلی دیگر میسر خواهد بود.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار روابطی برای تعیین تغییر مکان ماندگار لرزه‌ی شیروانی‌ها با توجه به داده‌های لرزه‌خیزی کشور ایران ارائه شده است. ابتدا مدلی هندسی برای شیب‌هایی با مصالح مختلف در نظر گرفته شده است. سپس تعدادی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های به وقوع پیوسته در ایران انتخاب شده و با انجام تحلیل دینامیکی، شتاب‌نگاشت زلزله در توده‌ی لرزه‌ی شیروانی برآورد شده و تغییر مکان ماندگار شیب با استفاده از روش بلوک لرزه‌ی نیومارک به دست آمده است. تحلیل‌های انجام شده ما را به این نکات رهنمون می‌سازد:

8. Jibson, R.W. "Predicting earthquake induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis", *Transportation Research Record*. 1411, Transportation Research Board, Washington, D.C. (1993).
9. Kramer, S.L. and Smith, M.W. "Modified newmark model for seismic displacements of compliant slopes", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **123**(7), pp. 635-644 (1997).
10. Lin, J.S. and Whitman, R.V. "Decoupling approximation to the evaluation of earthquake-induced plastic slip in earth dams", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **11**, pp. 667-678 (1983).
11. Lin, J.S. and Whitman, R.V. "Earthquake induced displacements of sliding blocks", *J. Geotech. Eng.*, **112**(1), pp. 44-59 (1986).
12. Blake, T.F.; Hollingsworth, R.A. and Stewart, J.P. "Recommended procedures for implementation of DMG special publication 117 guidelines for analyzing and mitigating landslide hazards in california", *Committee Organized Through the ASCE Los Angeles Section Geotechnical Group Document Published by the Southern California Earthquake Center* (2002).
13. PLAXIS-2D-version 8, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherlands (2006).
14. Sinaeian, F., *Study of Strong Ground Motion in Iran*, Phd Thesis, International Institute of Earthquake Eng. and Seismology (IIEES) (2006).
15. Farzaneh, O. and Askari, F. "Three dimensional analysis of nonhomogenous slopes", *J. Geotech. and Geoenviron. Eng. ASCE*, **129**(2), pp. 137-145 (2003).
16. Park, D. and Hashash, M.A. "Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis", *Journal of Earthquake Eng.*, **8**(2), pp. 249-274 (2004).
17. MATLAB version 7.0.0 19920 (R14), (May 06 2004).

