

# پیش بینی تغییر مکان ماندگار لرزه‌ی شیب‌های خاکی با شتاب تسلیم متغیر به روش تحلیلی وابسته

Original Article

یاسر جعفریان\* (استادیار)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

علی لشگری (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

روش‌های مبتنی بر روش بلوک صلب نیومارک در تخمین تغییر مکان ماندگار شیب‌های خاکی تحت بار زلزله به دلیل سادگی نسبت به سایر روش‌ها بیشتر مورد توجه مهندسان قرار گرفته‌اند. علی‌رغم مزایایی که روش‌های ذکر شده دارند، محدودیت‌هایی در مبنای آن‌ها نهفته است. یکی از این محدودیت‌ها، ثابت بودن شتاب تسلیم در حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش است. در این نوشتار، تغییر شکل هندسی سطح لغزش در حین تغییر مکان لرزه‌ی به صورت وابسته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش طول گسیختگی منجر به کاهش تغییر مکان می‌شود. همچنین نسبت دوره‌ی تناوب، ضریب گسیختگی، و پارامترهای لرزه‌ی تأثیر قابل توجهی در نتایج دارند. در ادامه، با استفاده از رکوردهای زلزله مشتمل بر ۱۳۶۳ رکورد میدان آزاد از ۲۵ زلزله، تغییر مکان ماندگار شیب‌های خاکی توسط روش تحلیلی وابسته به شتاب تسلیم بررسی و مدل همبستگی در این خصوص ارائه شده است.

**واژگان کلیدی:** زلزله، سازه‌های خاکی، تغییر مکان ماندگار، شتاب تسلیم وابسته به تغییر مکان، روش بلوک صلب، تحلیل وابسته.

## ۱. مقدمه

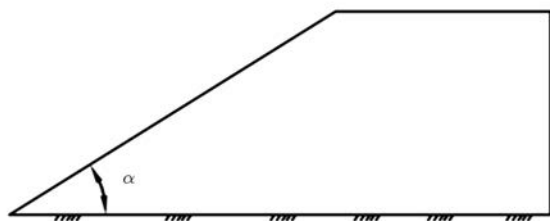
پیش‌بینی کنند. [۱] محققان در ادامه‌ی کارهای قبلی خود، [۲، ۳] با به‌کارگیری سیستم چند درجه آزادی عملکرد غیرخطی تحلیل وابسته و غیروابسته را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که تحلیل غیرخطی نسبت به تحلیل خطی، تأثیرات قابل توجهی در دوره‌های تناوب کوچک دارد. [۴] در ادامه‌ی بررسی‌ها بین روش‌های وابسته و غیروابسته، برخی پژوهشگران نیز مطالعاتی در این خصوص انجام داده‌اند. [۵] یکی دیگر از محدودیت‌های روش بلوک صلب، لحاظ نکردن اثر شتاب تسلیم به صورت وابسته به تغییر مکان گوه‌ی گسیختگی در طی لغزش است. زمانی که توده‌ی لغزش به سمت پایین حرکت می‌کند، با توجه به اینکه سطح لغزش در بسیاری از موارد به صورت منحنی است، شیب سطح لغزش کاهش می‌یابد. [۶] در نتیجه، شتاب تسلیم در طی حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش، متغیر و وابسته به تغییر مکان است. همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۶، [۷] با در نظر گرفتن موضوع ذکر شده، شتاب تسلیم اصلاح شده است. برخی پژوهشگران نیز در پژوهش خود (۲۰۱۲)، [۸] با استفاده از شتاب تسلیم وابسته به تغییر مکان، تحلیل غیروابسته را اصلاح کرده‌اند. در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۳، [۹] با در نظر گرفتن اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییر مکان، تحلیل بلوک صلب نیومارک و غیروابسته، مورد بازنگری و اصلاح قرار گرفته و نشان داده شده است که به طور واضح نمی‌توان اختلاف بین روش وابسته و غیروابسته‌ی اصلاح شده را بیان کرد.

همچنین برخی پژوهشگران در حوزه‌ی روابط نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار، روابطی براساس روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی تغییر مکان با استفاده از

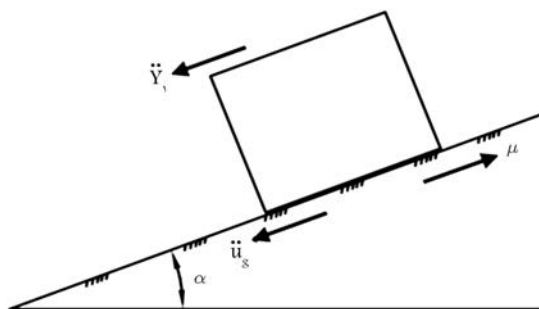
در سال‌های اخیر بحث طراحی لرزه‌ی سازه‌های ژئوتکنیکی و تغییر مکان ماندگار این سازه‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. [۱۰-۱۸] بر این اساس، ارزیابی تغییر مکان ماندگار سازه‌های ژئوتکنیکی مانند خاکریزها و شیب‌های خاکی تحت بار زلزله برای مهندسان بسیار حائز اهمیت است. برخی پژوهشگران برای محاسبه‌ی تغییر مکان ماندگار، روش‌های عددی و تحلیلی و نیمه تحلیلی ارائه کرده‌اند. [۱۹] در مقایسه با روش‌های عددی، روش‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی به دلیل سادگی و پیش‌بینی نسبتاً دقیق، پرکاربرد هستند. در پژوهشی در سال ۱۹۶۵، مدل بلوک لغزنده به عنوان اولین روش تحلیلی محاسبه‌ی تغییر مکان ماندگار شیب‌ها ارائه شده است. [۱] در روش مذکور، توده‌ی لغزش به عنوان یک بلوک صلب فرض می‌شود. بر این اساس حرکت بلوک صلب، زمانی آغاز می‌شود که شتاب ورودی بیشتر از شتاب تسلیم شود. در سال‌های بعد، روش‌های دیگری براساس اصلاح محدودیت‌های مدل بلوک صلب توسط پژوهشگران ارائه شده است. [۲-۷] یکی از موضوعات مهمی که باید به آن توجه کرد، در نظر گرفتن پاسخ سیستم در طی لغزش است، که در مدل بلوک صلب از این موضوع صرف نظر شده است. در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۹، اثر متقابل پاسخ سیستم و لغزش بلوک در تغییر مکان ماندگار شیب لحاظ و نتایج در دو حالت وابسته و غیروابسته با یکدیگر مقایسه و نشان داده شده است که این دو تحلیل می‌توانند تغییر مکان را نسبت به روش بلوک صلب، محافظه‌کارانه و یا غیرمحافظه‌کارانه

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۴/۱۸، پذیرش: ۱۳۹۳/۵/۲۹.



الف) شکل شماتیک یک شیب خاکی؛



ب) نمودار جسم آزاد نیروهای وارد بر بلوک لغزش.

شکل ۱. مکانیزم تحلیل لرزه‌ی شیب‌ها در روش بلوک صلب نیومارک.

براساس رازجه و بری،<sup>[۲]</sup> نیروهای محرک وارد بر بلوک ناشی از شتاب زمین  $(\ddot{u}_g)$  و شتاب پاسخ  $(\ddot{Y}_1)$  هستند، که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند و باعث حرکت بلوک به سمت پایین می‌شوند. در مقابل نیروهای مذکور، نیروی اصطکاک مانع حرکت بلوک می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از حرکت بلوک کافی است مجموع نیروهای محرک وارد بر بلوک برابر و کمتر از نیروهای مقاوم باشد. بر همین اساس معادله‌ی تعادل این نیروها به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$-M\ddot{u}_g - L_1\ddot{Y}_1 = \mu Mg \quad (1)$$

که در آن  $M\ddot{u}_g$ ، نیروی شتاب زمین،  $L_1\ddot{Y}_1$  نیروی پاسخ توده‌ی لغزش،  $\mu$  ضریب گسیختگی،  $M$  جرم کل بلوک،  $\ddot{u}_g$  شتاب زمین،  $\ddot{Y}_1$  شتاب پاسخ سیستم، و  $L_1$  پارامتری است که شتاب زمین را در ارتفاع سیستم با توجه به شکل مودی توزیع می‌کند که به صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$L_1 = \int_0^H m(y)\phi_1(y)dy \quad (2)$$

که در آن،  $H$  ارتفاع سیستم،  $m(y)$  جرم در واحد ارتفاع، و  $\phi_1(y)$  شکل مودال سیستم است. اگر توده‌ی لغزش شروع به حرکت کند، معادله‌ی پاسخ سیستم به شکل رابطه‌ی ۳ است:

$$\ddot{Y}_1 + \frac{2\lambda\omega_1}{d_1}\dot{Y}_1 + \frac{\omega_1^2}{d_1}Y_1 = \frac{\mu L_1 g}{d_1 M_1} \quad (3)$$

که در آن،  $d_1$  از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$d_1 = 1 - \frac{L_1^2}{MM_1} \quad (4)$$

که در آن،  $M_1$  از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$M_1 = \int_0^H m(y)[\phi_1(y)]^2 dy \quad (5)$$

روش‌های بلوک صلب نیومارک،<sup>[۱۳-۱۸]</sup> روش وابسته،<sup>[۱۰]</sup> و روش غیروابسته،<sup>[۱۱]</sup> ارائه کرده‌اند.

در این نوشتار، ابتدا با استفاده از سیستم یک درجه آزادی و مدل توزیع جرم و سختی، تغییرمکان ماندگار توسط تحلیل وابسته و غیروابسته محاسبه شده است. اثر حرکت روبه پایین توده‌ی لغزش در ضریب گسیختگی اعمال شده و بدین ترتیب روش وابسته مورد اصلاح قرار گرفته است. برای محاسبه‌ی تغییرمکان ماندگار، روابط روش نیومارک، وابسته، و غیروابسته برنامه‌نویسی شده و محاسبه‌ی تغییرمکان با استفاده از رکورد زلزله‌های واقعی و طول‌های گسیختگی مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول گسیختگی اثر قابل توجهی در تغییرمکان ماندگار دارد. براساس نتایج این پژوهش با کاهش طول گسیختگی، اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان مشهودتر است. همچنین با افزایش نسبت دوره‌ی تناوب، اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان کاهش خواهد یافت. از آنجایی که پارامترهای موج ورودی در تخمین تغییرمکان مؤثر هستند، در این نوشتار با استفاده از مجموعه‌ی وسیعی از رکوردهای زلزله مشتمل بر ۱۳۶۳ رکورد ناشی از ۲۵ زلزله، ۶ ضریب گسیختگی، ۱۳ نسبت دوره‌ی تناوب، و ۵ طول گسیختگی، تغییرشکل ماندگار شیب‌های خاکی توسط روش تحلیلی وابسته با شتاب تسلیم متغیر مورد بررسی قرار گرفته و مدل همبستگی در این خصوص برای دو ساخت‌گاه سخت و نرم پیشنهاد شده است. مقایسه‌ی پارامتریک انجام‌شده بین نتایج این پژوهش و سایر روابط نشان داده است که این رابطه روند منطقی در پیش‌بینی تغییرمکان دارد.

## ۲. تحلیل وابسته‌ی اصلاح شده

در مدل بلوک صلب نیومارک از اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان توده‌ی لغزش در طی حرکت چرخشی توده‌ی لغزش و پاسخ دینامیکی خاکریز در طی لغزش صرف‌نظر شده است. در روش نیومارک، اندرکنش دینامیکی بلوک لغزش در پاسخ دینامیکی لحاظ نمی‌شود. در روش وابسته و غیروابسته پاسخ دینامیکی در نظر گرفته شده است. تجربیات پیشین نشان می‌دهد،<sup>[۱۰]</sup> که جدا از محدودیت‌هایی که روش وابسته در مدل‌سازی اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان دارد، اما تغییرمکان ماندگار را به خوبی پیش‌بینی می‌کند؛ بنابراین با توجه به پیش‌بینی نسبتاً مناسب تغییرمکان در روش وابسته، می‌توان با اصلاح شتاب تسلیم و لحاظ کردن اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان، روش مذکور را اصلاح و دقت نتایج را افزایش داد. رازجه و بری (۱۹۹۹)،<sup>[۲]</sup> با استفاده از روش چوپرا و ژنگ،<sup>[۶]</sup> و پاسخ سیستم یک درجه آزادی، روشی برای محاسبه‌ی تحلیل وابسته و غیروابسته ارائه کرده‌اند که در این نوشتار نیز مبنای محاسبه‌ی تغییرشکل ماندگار این دو تحلیل، همان روش رازجه و بری،<sup>[۲]</sup> است. براساس روش رازجه و بری،<sup>[۲]</sup> حرکت توده‌ی لغزش زمانی آغاز می‌شود که نیروی محرک بزرگ‌تر از نیروی اصطکاک حاصل از اندرکنش توده‌ی لغزش با سطح لغزش شود. در شکل ۱ الف، به صورت شماتیک یک شیب خاکی نشان داده شده است. با توجه به تئوری روش بلوک صلب نیومارک، توده‌ی لغزش به صورت یک بلوک بر روی یک سطح شیب‌دار (شکل ۱ ب) فرض می‌شود. هنگامی که موج لرزه‌ی به این بلوک وارد می‌شود، نیروهای محرک که شامل نیروی موج ورودی و نیروی پاسخ سیستم هستند، با غلبه بر نیروی اصطکاک که در حالت دینامیکی ناشی از ضریب گسیختگی است، باعث حرکت بلوک می‌شوند. نمودار جسم آزاد نیروهای وارد بر بلوک در شکل ۱ ب نشان داده شده است. در شکل ۱،  $\alpha$  زاویه شیب می‌باشد. سایر پارامترها در ادامه توضیح داده خواهد شد.

که در آن،  $\lambda$ ،  $M_1$  و  $\omega_1$  به ترتیب شتاب پاسخ سیستم، نسبت میرایی، جرم توزیع یافته در ارتفاع سیستم، و بسامد چرخشی هستند. از طرفی می‌توان رابطه‌ی تعادل نیروها را پس از شروع لغزش به صورت رابطه‌ی ۶ نوشت:

$$-M(\ddot{u}_g + \ddot{s}) - L_1 \ddot{Y}_1 = \mu M g \quad (6)$$

با ترکیب دو رابطه‌ی ۳ و ۶، می‌توان شتاب لغزش را با کمک رابطه‌ی ۷ محاسبه کرد:

$$\ddot{s} = -\mu g - \frac{L_1}{M} \ddot{Y}_1 - \ddot{u}_g \quad (7)$$

در این نوشتار، برای حل معادله‌ی ۳ از روش تاریخچه‌ی زمانی نیومارک، [۱۹] استفاده و به صورت رایانه‌ی برنامه‌نویسی شده است. با حل معادله‌ی مذکور، شتاب بلوک محاسبه می‌شود و با انتگرال‌گیری از آن و اعمال شرایط اولیه، سرعت بلوک لغزش به دست می‌آید.

در شکل ۲، تغییرات تغییرمکان ماندگار روش‌های بلوک صلب، وابسته و غیروابسته در نسبت دوره‌های تناوب مختلف  $T_s/T_m$  نسبت دوره‌ی تناوب اساسی سیستم به دوره‌ی تناوب میانگین موج ورودی) برای موج‌های ورودی YBI<sup>۱</sup> (ناشی از زلزله‌ی Loma Prieta (۱۹۸۹) با  $\lambda s = T_m$  و مؤلفه‌ی افقی ۰/۹۹ s) و TAP<sup>۵۱-W</sup> (TAP) (ناشی از زلزله‌ی Chi-Chi (۱۹۹۹) و  $T_m = 0.99$  s با مؤلفه‌ی افقی ۰/۵۱) نشان داده شده است. شتاب‌نگاشت‌ها به  $g/0.4$  مقیاس شده‌اند. شایان ذکر است که نسبت میرایی در نظر گرفته شده در تمامی محاسبات این پژوهش، ۰/۱۵٪ و منظور از تغییرمکان، تغییرمکان ماندگار است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در مقادیر کوچک ضریب گسیختگی ( $k_y$ ) و نسبت دوره‌ی تناوب نزدیک به یک تحلیل غیروابسته، تغییرمکان ماندگار را بیشتر

نیز تقریباً در همین دوره‌ی تناوب رخ می‌دهد. برای لحاظ کردن حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش و تمایل آن به تعادل بیشتر خصوصاً در حالتی که حرکت دورانی غالب است، شتاب تسلیم در معادلات تحلیل وابسته اصلاح می‌شود. با توجه به معادله‌ی شتاب تسلیم اصلاح شده، [۲] روابط تحلیل وابسته به صورت روابط ۸ الی ۱۰ اصلاح می‌شوند:

$$\ddot{Y}_1 + \frac{2\lambda\omega_1}{d_1} \dot{Y}_1 + \frac{\omega_1^2}{d_1} Y_1 = \frac{(\mu g + sk_1)L_1}{d_1 M_1} \quad (8)$$

$$\ddot{s} = -\mu g - sk_1 - \frac{L_1}{M} \ddot{Y}_1 - \ddot{u}_g \quad (9)$$

که در آن،  $k_1$  از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

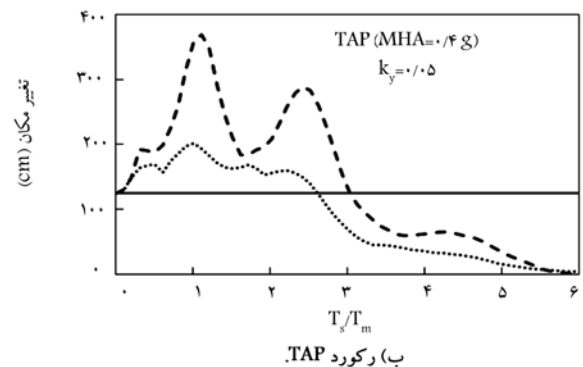
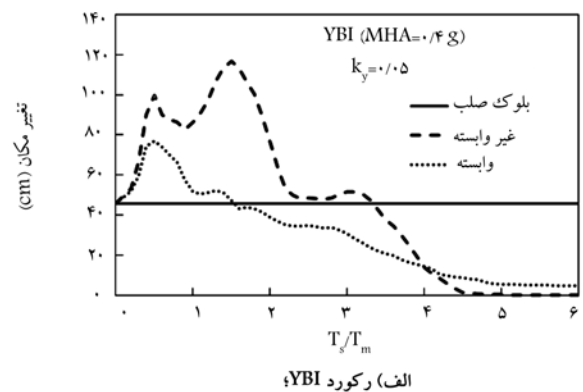
$$k_1 = \frac{11}{b_t} \quad (10)$$

که در آن،  $b_t$  طول گوه‌ی لغزش به متر و  $s$  مقدار تغییرمکان به متر است. استماتاپولوس جزئیات بیشتر در زمینه‌ی اصلاح شتاب تسلیم برای روش بلوک صلب لغزنده را بیان کرده است. [۲] با کدنویسی رابطه‌ی ۸، به کمک روش تاریخچه‌ی زمانی، [۲۳] تغییرمکان ماندگار محاسبه شده است.

### ۳. نتایج عددی و توصیف آنها

در شکل ۳ الف، شتاب‌های معادل بر حسب زمان برای تحلیل وابسته با استفاده از موج TAP، که به صورت  $MHA = 0.4 g$  مقیاس شده است، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، مقدار ضریب گسیختگی در طی حرکت ثابت است. در شکل ۳ ب، شتاب‌های معادل بر حسب زمان برای تحلیل وابسته‌ی اصلاح شده در طول گسیختگی ۱۰ متر رسم شده است. شکل مذکور نشان می‌دهد که در طی حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش، ضریب گسیختگی افزایش می‌یابد، که تفاوت اصلی این دو تحلیل همین مورد است؛ بنابراین با توجه به مورد مذکور، مقدار جابه‌جایی پیش‌بینی شده متفاوت خواهد بود. مقدار تغییرمکان محاسبه شده از ۱۶۲/۴ سانتی‌متر در روش وابسته به ۵۶/۷ سانتی‌متر در روش وابسته‌ی اصلاح شده کاهش می‌یابد.

تغییرات تغییرمکان تحلیل وابسته‌ی متعارف و وابسته‌ی اصلاح شده (در نوشتار حاضر) بر حسب تغییرات نسبت دوره‌ی تناوب برای موج‌های ورودی YBI و TAP در شکل ۴ نشان داده شده است. تحلیل‌ها برای دو طول گسیختگی مختلف ۱۰ و ۵۰ متر انجام شده است. بیشترین پاسخ تغییرمکان در دوره‌ی تناوب نزدیک به دوره‌ی تناوب اساسی زمین رخ می‌دهد، که علت وقوع آن پدیده‌ی تشدید است. براساس شکل ۴، پدیده‌ی مذکور صرف‌نظر از نوع تحلیل و مقدار طول گسیختگی است. مقایسه بین تغییرمکان‌های تحلیل وابسته و وابسته‌ی اصلاح شده نشان می‌دهد که با افزایش طول لغزش اختلاف این دو تحلیل کاهش خواهد یافت. علت این



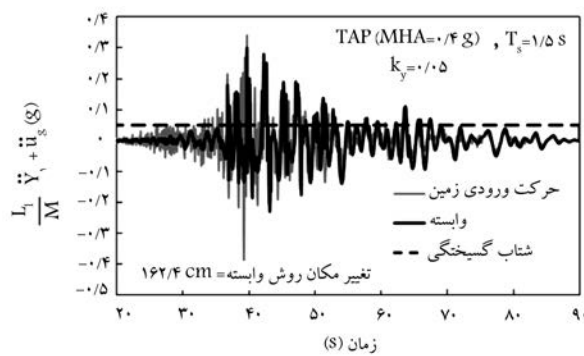
شکل ۲. مقایسه‌ی تغییرمکان ماندگار روش‌های بلوک صلب نیومارک، تحلیل وابسته، و غیروابسته.

اختلاف رابطه‌ی ۸ است، که با کاهش طول لغزش،  $k_y$  افزایش می‌یابد و بنابراین شتاب تسلیم افزایش و تغییرمکان کاهش می‌یابد؛ بنابراین اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان با کاهش طول لغزش مشهودتر می‌شود. مقایسه شکل‌های الف و ب نشان می‌دهد که اختلاف تغییرمکان بین موج‌های ورودی TAP و YBI با یکدیگر متفاوت است، که علت آن به خصوصیات موج‌های ورودی باز می‌گردد. در دو موج ورودی اختلاف بین روش‌ها از نسبت دوره‌ی تناوب ۳ به بعد تمایل به کاهش دارد. همچنین شکل مذکور نشان می‌دهد که در طول‌های لغزش کم، تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، تغییرمکان را نسبت به تحلیل وابسته‌ی متعارف غیرمحافظة‌کارانه (کمتر) پیش‌بینی می‌کند و در طول‌های زیاد تقریباً نتایج به یکدیگر نزدیک می‌شود.

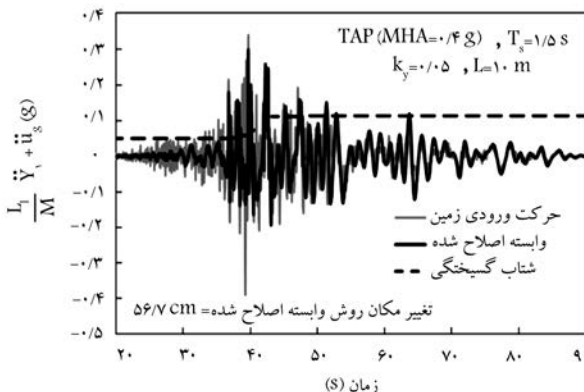
با توجه به موارد بیان‌شده، علاوه بر طول لغزش، شتاب تسلیم بر روی اختلاف بین دو تحلیل وابسته و غیروابسته‌ی اصلاح‌شده مؤثر هستند؛ بنابراین نیاز به بررسی بیشتر این دو پارامتر احساس می‌شود.

در شکل ۵ جابه‌جایی نرمال‌شده‌ی تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده به تحلیل وابسته‌ی متعارف بر حسب طول لغزش نرمال‌شده به ارتفاع توده‌ی لغزش با استفاده از موج‌های ورودی YBI و TAP ترسیم شده است. در این شکل اثر نسبت شتاب تسلیم  $(k_y/k_{max})$  در جابه‌جایی نرمال‌شده برای نسبت دوره‌های تناوب ۱ و ۱/۵ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل مذکور نشان می‌دهد که با کاهش  $k_y/k_{max}$ ، جابه‌جایی نرمال‌شده نیز کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر با کاهش  $k_y/k_{max}$ ، نقش ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان مؤثرتر خواهد شد. بنابراین در شیب‌های خاکی و خاکریزها، که متشکل از مواد سست و نرم هستند (مانند مدفن‌های دفن زباله)، به علت آنکه مقدار  $k_y/k_{max}$  کوچک است، اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان قابل توجه خواهد بود. کمترین مقدار تغییرمکان نرمال‌شده برای نسبت طول به ارتفاع ۱ و موج TAP تقریباً برابر ۲۵٪ است. این مسئله نشان می‌دهد که در طول‌های لغزش کوچک، تغییرمکان وابسته‌ی متعارف چیزی در حدود ۷۵٪ جابه‌جایی را بیشتر پیش‌بینی می‌کند. همچنین شکل مذکور نشان می‌دهد که در یک  $k_y/k_{max}$  مشخص با افزایش نسبت طول لغزش به ارتفاع (تقریباً ۱۰) تغییرمکان دو تحلیل وابسته‌ی متعارف و وابسته‌ی اصلاح‌شده به یکدیگر نزدیک می‌شوند. شکل ۵ نشان می‌دهد که تغییرات نسبت شتاب تسلیم می‌تواند تأثیر قابل توجهی در پیش‌بینی تغییرمکان داشته باشد.

در شکل ۶ تغییرمکان ماندگار محاسبه‌شده توسط روش بلوک صلب اصلاح‌شده،<sup>[۳]</sup> تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده (این پژوهش) و غیروابسته‌ی اصلاح‌شده،<sup>[۱]</sup> بر حسب نسبت دوره‌ی تناوب برای دو طول ۱۰ و ۵۰ متر و برای دو موج YBI و TAP ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که تغییرمکان محاسبه‌شده توسط تحلیل‌های وابسته‌ی اصلاح‌شده و غیروابسته‌ی اصلاح‌شده در نسبت دوره‌های تناوب کوچک‌تر از ۰/۵ و بزرگ‌تر از ۴ به یکدیگر نزدیک می‌شوند. براساس شکل مذکور می‌توان گفت که در نسبت‌های دوره‌ی تناوب بین ۴-۰/۵، تحلیل غیروابسته‌ی اصلاح‌شده، تغییرمکان را نسبت به تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. برای نسبت‌های دوره‌ی تناوب بزرگ‌تر، تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، تغییرمکان را بیشتر پیش‌بینی می‌کند، هر چند که اختلاف بین دو تحلیل در موج TAP بیشتر از موج YBI است. تغییرمکان محاسبه‌شده‌ی روش بلوک صلب اصلاح‌شده،<sup>[۳]</sup> در شکل ۶ نیز ترسیم شده است، که مقادیر تغییرمکان در تمامی نسبت دوره‌های تناوب مقدار ثابتی است. همان‌طور که شکل مذکور نشان می‌دهد، در ابتدا تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، تغییرمکان را بیشتر از روش بلوک صلب اصلاح‌شده پیش‌بینی می‌کند و در نسبت‌های دوره‌های تناوب بزرگ‌تر (بیش از ۲/۵)، این موضوع عکس می‌شود. یکی از مواردی که باید به آن اشاره کرد، این است که نوع موج ورودی در

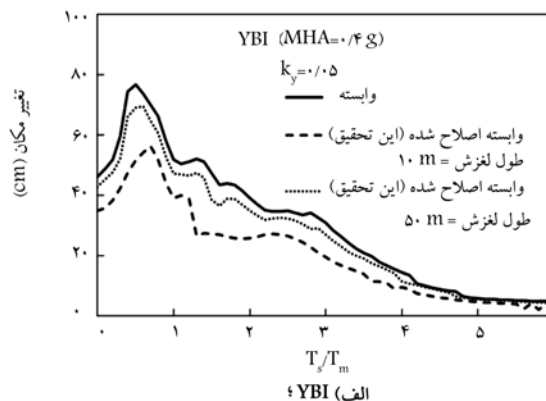


الف) تحلیل وابسته؛

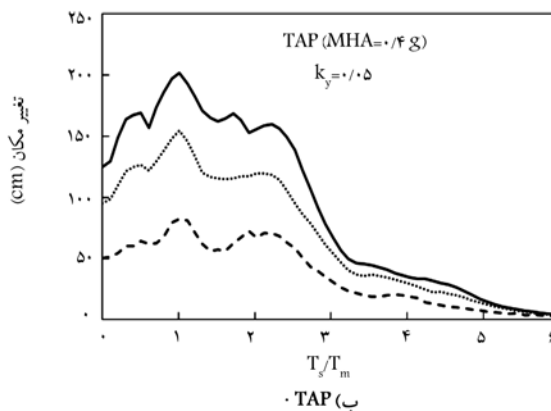


ب) تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده.

شکل ۳. شتاب تسلیم ثابت و متغیر.

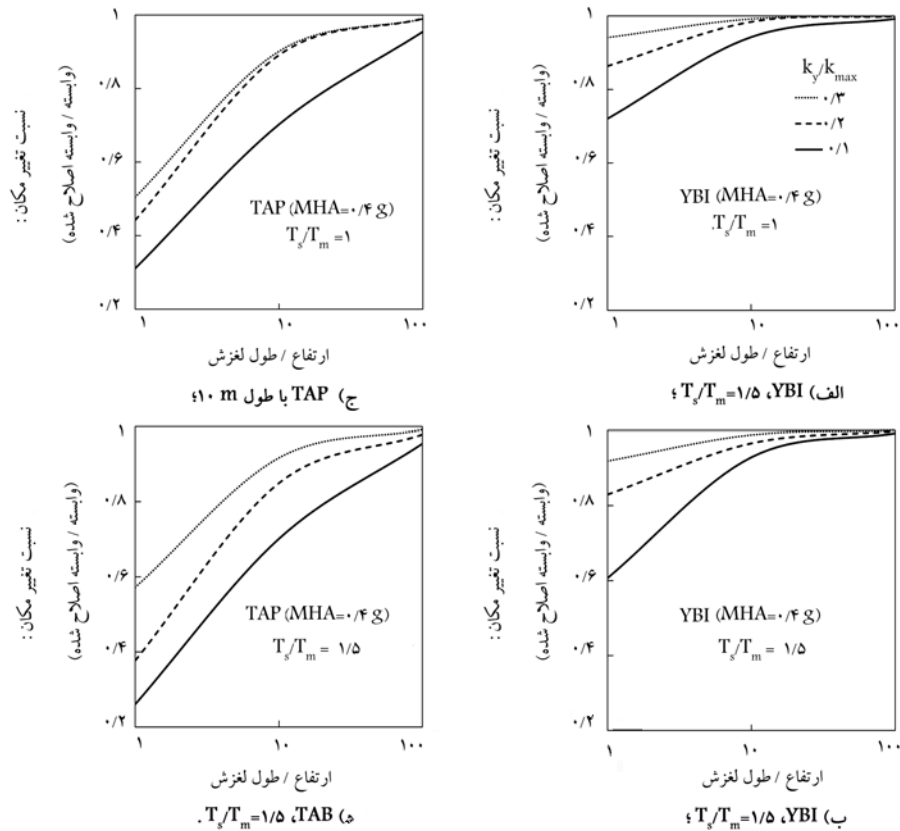


الف) YBI

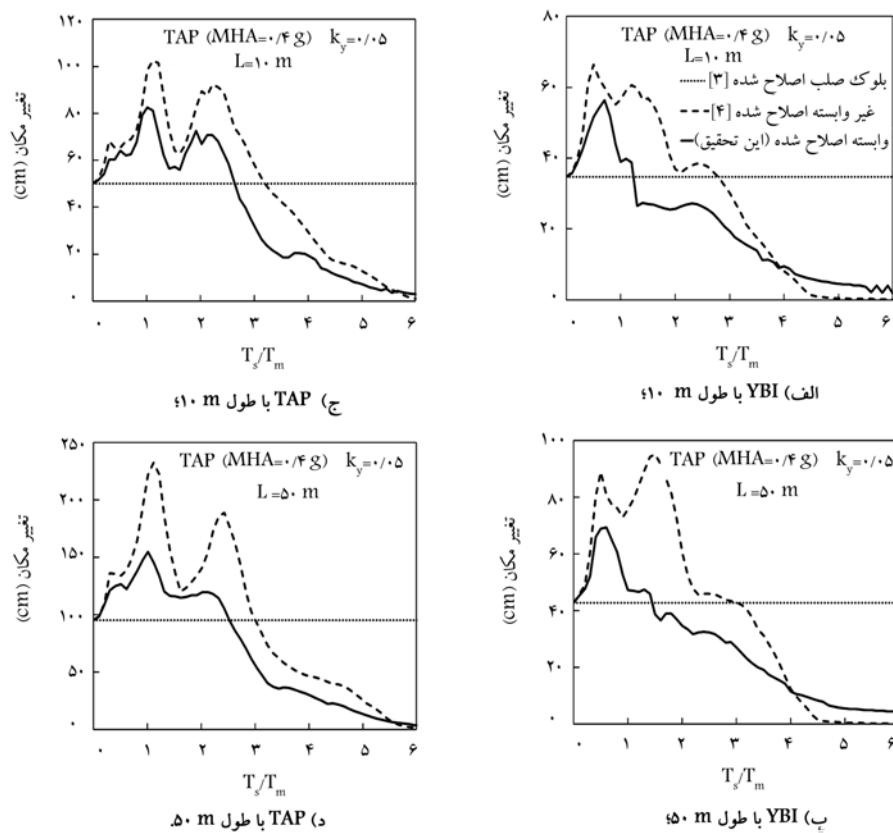


ب) TAP

شکل ۴. مقایسه‌ی تغییرمکان تحلیل‌های وابسته‌ی متعارف و وابسته‌ی اصلاح‌شده.



شکل ۵. نسبت تغییر مکان تحلیل وابسته متعارف به وابسته اصلاح شده برای طولها و نسبتهای مختلف شتاب تسلیم و نسبتهای دورههای تناوب.



شکل ۶. مقایسه‌ی بین روش بلوک صلب، وابسته و غیروابسته اصلاح شده.

شایان ذکر است که در این نوشتار براساس پیشنهاد هسیه و لی،<sup>[۱۸]</sup> رکوردها به دو ساخت‌گاه، سخت (ساخت‌گاه‌های نوع A و B) و نرم (ساخت‌گاه‌های نوع C و D) تقسیم‌بندی شده‌اند.

برای به‌دست آوردن یک مدل همبستگی مناسب جهت پیش‌بینی تغییرمکان، تحلیل وابسته‌ی اصلاح شده از مقادیر مختلف  $k_y$  شامل:  $۰٫۲، ۰٫۱، ۰٫۵، ۰٫۷، ۱، ۱٫۵، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶$  ثانیه و مقادیر مختلف طول گسیختگی  $۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰$  متر به‌کار گرفته شده است.

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که  $k_y/k_{max}$  پاسخ توده‌ی لغزش را به‌طور مناسب پیش‌بینی می‌کند.<sup>[۱۸-۱۳،۱۱]</sup> بنابراین ابتدا اثر نسبت  $k_y/k_{max}$  در روش اصلاح‌شده‌ی وابسته مورد بررسی قرار گرفته است. براساس بررسی‌های انجام‌شده، نسبت  $k_y/k_{max}$  بیشتر به پارامترهای  $T_s/T_m$  و  $k_y/PGA$  وابسته است. شکل ۷ الف و ۷ ب تغییرات نسبت ضریب گسیختگی را نسبت به تغییرات پارامترهای  $T_s/T_m$  و  $k_y/PGA$  در طول‌های لغزش  $۱۰$  و  $۱۰۰۰$  متر نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۷ الف و ۷ ب نشان می‌دهد، ابتدا نسبت ضریب گسیختگی افزایشی است و در نسبت دوره‌ی تناوب نزدیک به  $۱۰$ ، نسبت  $k_y/k_{max}$  به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بعد از آن روند کاهشی دارد. شکل ۷ ج و ۷ د تغییرات ضریب گسیختگی را بر حسب نسبت  $k_y/PGA$  نشان می‌دهد. روند تغییرات ضریب گسیختگی بر حسب نسبت  $k_y/PGA$  به‌صورت نمایی و افزایشی است. می‌توان گفت که در نسبت  $k_y/PGA$  برابر  $۵۰$  با آنکه این نسبت ثابت است، اما نسبت ضریب گسیختگی افزایش می‌یابد. از دلایل این پدیده می‌توان به تأثیر پارامترهای مختلف موج ورودی در پاسخ دینامیکی سازه‌ی حاکی اشاره کرد. شکل ۷ می‌دهد که تغییر طول تأثیر چندانی در ضریب گسیختگی ندارد. همچنین با افزایش ضریب گسیختگی نسبت  $k_y/k_{max}$  افزایش می‌یابد.

از آنجایی که نسبت  $k_y/k_{max}$  به نوعی نشان‌دهنده‌ی پاسخ سیستم است، بر همین اساس در ابتدا به ارائه‌ی رابطه‌ی برای محاسبه‌ی نسبت ضریب گسیختگی پرداخته شده است. با توجه به مدل‌های ارائه‌شده در این خصوص سعی شده است که مدل مناسبی برای تخمین این ضریب ارائه شود. رابطه‌ی ۱۱ برای محاسبه‌ی نسبت ضریب گسیختگی پیشنهاد شده است:

$$\ln\left(\frac{k_y}{k_{max}}\right) = a_1 + a_2 \ln\left(\frac{T_s}{T_m}\right) + a_3 \ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right) + a_4 \ln\left(\frac{T_s}{T_m}\right)^2 + a_5 \ln\left(\frac{T_s}{T_m}\right) \ln\left(\frac{k_y}{PGA}\right) \quad (11)$$

که در آن،  $a_1, a_2, \dots, a_5$  ضرایب ثابت،  $PGA$  و  $k_y$  بر حسب  $g$  هستند. با توجه به معادله‌ی ۱، ضریب همبستگی  $R^2 = ۰٫۸۹$  برای ساخت‌گاه‌های سخت و  $R^2 = ۰٫۸۷$  برای ساخت‌گاه‌های نرم به‌دست آمده و مقادیر ضرایب ثابت برای هر ساخت‌گاه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر ضرایب ثابت رابطه‌ی ۹ برای محاسبه‌ی  $k_y/k_{max}$ .

پارامتر	ساخت‌گاه سخت	ساخت‌گاه نرم
$a_1$	۰٫۴۲۵-	۰٫۳۱۱-
$a_2$	۱٫۲۴۷	۰٫۹۴۲
$a_3$	۰٫۹۱	۰٫۸۹۲
$a_4$	۰٫۲۰۱-	۰٫۸۰۷-
$a_5$	۰٫۹۷	۰٫۱۱

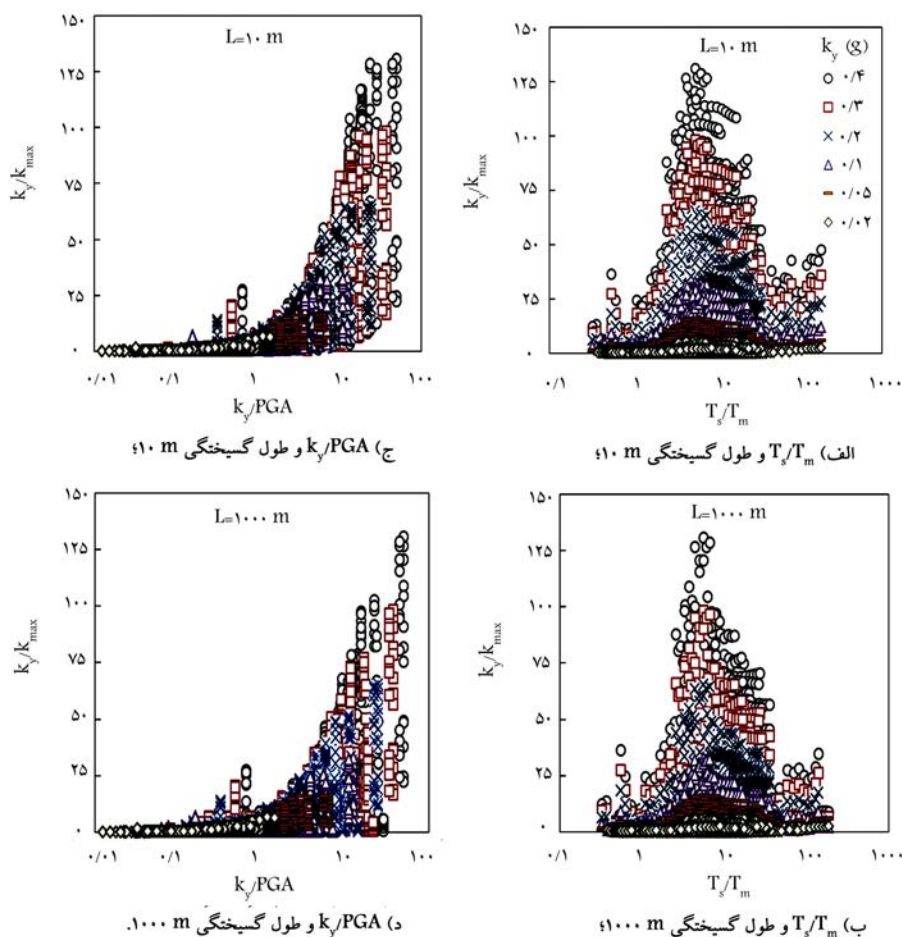
تغییرمکان ماندگار شیب‌ها تأثیرگذار است و اختلاف بین تغییرمکان روش‌ها به نوعی به پارامترهای موج ورودی نیز وابسته است. بنابراین نیاز است که پارامترهای لرزه‌یی به‌طور خاص مورد بررسی قرار گیرند.

#### ۴. تحلیل پارامتری و همبستگی

اثر پارامترهای لرزه‌یی توسط پژوهشگران در روش بلوک صلب مورد ارزیابی قرار گرفته و روابطی در این خصوص ارائه شده است.<sup>[۱۸-۱۳،۱۱]</sup> با توجه به تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده در این پژوهش، پارامترهای لرزه‌یی بر روی نتایج این تحلیل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بدین منظور از ۱۳۶۳ رکورد ناشی از ۲۵ زلزله‌ی رخ داده در جهان استفاده شده و اثر پارامترهای مختلف نظیر  $PGA$ ،  $I_a$ ،  $T_m$  و در جابه‌جایی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱ زلزله‌های استفاده‌شده نشان داده شده است. براساس تقسیم‌بندی نوع ساخت‌گاه (براساس USGS) شتاب‌نگاشت‌ها،  $۴٪$  از نوع A (ساخت‌گاه بسیار متراکم با سرعت موج برشی بیشتر از  $۷۵۰ \text{ m/s}$ )،  $۴۳٪$  از نوع B (خاک‌های سخت با سرعت موج برشی بین  $۳۶۰ \text{ m/s}$  -  $۷۵۰$ )،  $۵۱٪$  از نوع C (خاک‌های با تراکم متوسط با سرعت موج برشی بین  $۳۶۰ \text{ m/s}$  -  $۱۸۰$ )،  $۲٪$  از نوع D (نهبشته‌های نرم با سرعت موج برشی کمتر از  $۱۸۰ \text{ m/s}$ ) هستند.

جدول ۱. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده.

تعداد رکورد	بزرگی (M)	تاریخ	زلزله
۱۲	۷٫۱	۲۵/۰۴/۱۹۹۲	Cape Mendocino, CA
۲۰۲	۷٫۶	۲۱/۰۹/۱۹۹۹	Chi-Chi, Taiwan
۲۰	۶٫۴	۰۵/۰۵/۱۹۸۳	Coalinga, CA
۱۲	۷٫۵	۰۶/۰۸/۱۹۷۹	Coyote Lake, CA
۴۵	۷٫۱	۱۲/۱۱/۱۹۹۹	Duzce, Turkey
۱۰	۶٫۵	۰۶/۰۵/۱۹۷۶	Friuli, Italy
۲	۶	۱۸/۰۵/۱۹۴۰	Imperial Valley, CA
۶۸	۶٫۵	۱۵/۱۰/۱۹۷۹	Imperial Valley, CA
۱۰	۷٫۴	۲۱/۰۷/۱۹۵۲	Kern County, CA
۲۲	۶٫۹	۱۷/۰۱/۱۹۹۵	Kobe, Japan
۲۹	۷٫۴	۱۷/۰۸/۱۹۹۹	Kocaeli, Turkey
۱۲۴	۷٫۳	۲۸/۰۶/۱۹۹۲	Landers, CA
۱۱۱	۶٫۹	۱۷/۱۰/۱۹۸۹	Loma Prieta, CA
۶	۶٫۳	۲۵/۰۵/۱۹۸۰	Mammoth Lakes, CA
۸	۶	۲۷/۰۵/۱۹۸۰	Mammoth Lakes, CA
۵۴	۶٫۲	۲۴/۰۴/۱۹۸۴	Morgan Hill, CA
۶	۶٫۹	۲۳/۱۲/۱۹۸۵	Nahanni, Canada
۲۸۰	۶٫۷	۱۷/۰۱/۱۹۹۴	Northridge, CA
۱۱	۶٫۱	۲۸/۰۶/۱۹۶۶	Parkfield, CA
۶۱	۶٫۶	۰۹/۰۲/۱۹۷۱	San Fernando, CA
۴	۶	۱۳/۰۸/۱۹۷۸	Santa Barbara, CA
۱۰	۶٫۷	۲۳/۱۱/۱۹۸۷	Superstition Hills, CA
۱۴	۷٫۴	۱۶/۰۹/۱۹۷۸	Tabas, Iran
۱۲	۵٫۸	۲۶/۰۴/۱۹۸۱	Westmoreland, CA
۲۳۰	۶	۰۱/۱۰/۱۹۸۷	Whittier Narrows, CA



شکل ۷. تغییرات  $k_y/k_{max}$  ساختگاه سخت، در ضرب‌های مختلف گسیختگی.

تغییرات تغییرمکان‌های ماندگار نسبت به تغییرات پارامترهای مختلف برای ساختگاه‌های سخت (A و B) و طول‌های ۱۰ و ۱۰۰۰ متر در شکل ۸ نشان داده شده است. در شکل مذکور، تأثیرات ضریب گسیختگی در پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ الف نشان می‌دهد که با افزایش  $k_y/k_{max}$  مقدار جابه‌جایی کاهش می‌یابد و از  $k_y/k_{max}$  بزرگ‌تر از ۱/۵، تغییرمکان برابر صفر می‌شود و تقریباً در  $k_y/k_{max} = 0.02$  بیشترین تغییرمکان حاصل شده است. همچنین در  $k_{max}$  ثابت، با افزایش  $k_y$  از مقدار تغییرمکان کاسته می‌شود. شکل ۸ ب نشان می‌دهد که با افزایش بزرگای زلزله (M) مقدار تغییرمکان نیز روند افزایشی دارد. همچنین با افزایش  $k_y$  در یک بزرگای خاص، مقدار جابه‌جایی نیز کاهش می‌یابد، به نحوی که در بیشترین اختلاف (برای طول لغزش ۱۰۰۰ متر) بین ضریب گسیختگی  $0.02$  با ضریب گسیختگی  $0.4$  تقریباً  $20\%$  برابر است. شکل ۸ ج نشان می‌دهد که با افزایش PGA مقدار تغییرمکان نیز افزایش می‌یابد، که در PGA بین  $0.1$  تا  $0.9$  بیشترین تغییرمکان مشاهده می‌شود. در  $PGA < 0.03$  تقریباً مقدار تغییرمکان ناچیز است. در شکل ۸ د، تغییرات جابه‌جایی نسبت به بیشینه‌ی سرعت ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش بیشینه‌ی سرعت تغییرمکان نیز افزایش پیدا می‌کند، به نحوی که در  $PGV = 100$  cm/s، بیشترین تغییرمکان مشاهده می‌شود و در  $PGV < 5$  cm/s مقدار تغییرمکان ناچیز است. شکل ۸ ه، تغییرات جابه‌جایی نسبت به  $I_a$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش  $I_a$  مقدار تغییرمکان نیز افزایش می‌یابد. به نحوی که در  $I_a = 10$  m/s بیشترین

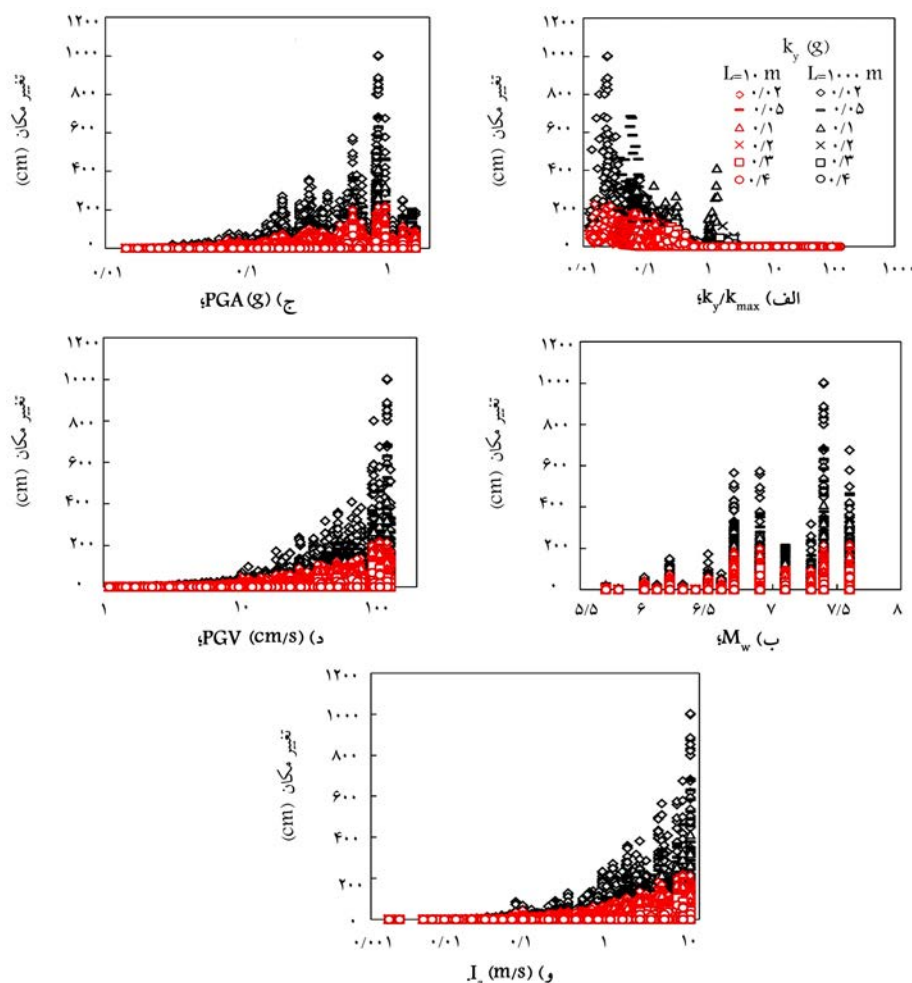
تغییرمکان و در  $I_a < 0.03$  m/s کمترین تغییرمکان مشاهده می‌شود. شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ضریب گسیختگی، روند کاهش تغییرمکان‌ها روند مشابهی است؛ ولی در ضریب گسیختگی  $0.4$ ، این روند کاهشی بیشتر می‌شود. همچنین مقایسه‌ی بین تغییرمکان بین دو طول لغزش ۱۰ و ۱۰۰۰ متر نشان می‌دهد که با افزایش طول گسیختگی، تغییرمکان تقریباً ۵ برابر افزایش می‌یابد. روابط تجربی زیادی برای محاسبه‌ی تغییرمکان ماندگار شیب‌ها و سدهای خاکی ارائه شده است، ولی بیشتر آن‌ها براساس روش بلوک صلب نیومارک هستند که اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان و اثر پاسخ سیستم در آن‌ها دیده نشده است. بر این اساس نیاز است که روابط ذکرشده اصلاح شوند. در این پژوهش، رابطه‌ی تغییرمکان تحلیل وابسته‌ی اصلاح شده با پارامترهای موج ورودی، طول گسیختگی و نسبت ضریب گسیختگی بررسی و روابط ۱۲ الی ۱۴ برای محاسبه‌ی تغییرمکان ماندگار پیشنهاد شده است:

$$\text{اگر } \ln\left(\frac{k_y}{k_{max}}\right) > 1.5$$

$$D = 0 \quad (12)$$

$$\text{اگر } -4 < \ln\left(\frac{k_y}{k_{max}}\right) \leq 1.5$$

$$\ln(D) = a_1 + a_2 \ln\left(\frac{k_y}{k_{max}}\right) + a_3 \ln(L) + a_4 \ln(PGV) + a_5 \ln(I_a) + a_6 M \quad (13)$$



شکل ۸. تغییرات تغییرمکان ساخت‌گاه سخت در ضریب‌های مختلف گسیختگی و طول گسیختگی ۱۰ و ۱۰۰۰ مترنسبت به تغییرات.

جدول ۳. مقادیر ضرایب ثابت رابطه‌های ۱۱ و ۱۲.

پارامتر	ساخت‌گاه سخت	ساخت‌گاه نرم
$a_1$	-۱۷,۱۰۹	-۱۸,۹۱۹
$a_2$	-۵,۰۴۶	-۵,۴۶۴
$a_3$	۰,۱	۰,۱
$a_4$	۰,۱۰۷	۰,۱۲۶
$a_5$	۰,۱	۰,۱
$a_6$	۱,۰۷۹	۱,۳۶۱

$$\ln\left(\frac{k_y}{k_{max}}\right) \leq -4$$

$$\ln(D) = a_1 + a_2(-3,3) + a_3 \ln(L) + a_4 \ln(PGV) + a_5 \ln(I_a) + a_6 M \quad (14)$$

که در آن،  $a_1, a_2, \dots, a_6$  ضرایب ثابت،  $PGV$  بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه،  $L$  بر حسب متر،  $I_a$  بر حسب متر بر ثانیه، و  $D$  بر حسب سانتی‌متر است. در روابط ۱۲ الی ۱۴، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برای ساخت‌گاه‌های سخت ۷۶٪ و برای ساخت‌گاه‌های نرم ۷۲٪ است. مقادیر ضرایب ثابت با توجه به نوع ساخت‌گاه در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به روابط نیمه‌تجربی ارائه شده می‌توان تغییرمکان ماندگار اصلاح شده را، که اثر طول لغزش و پاسخ سیستم در آن لحاظ شده است، پیش‌بینی کرد.

## ۵. بررسی حساسیت روابط محاسبه‌ی تغییرمکان ماندگار

همان‌طور که در قسمت‌های پیشین بیان شده است، روابط زیادی برای تخمین تغییرشکل ماندگار شیب‌ها و سدهای خاکی ارائه شده است، که بخشی از آن‌ها در قسمت پژوهش‌های پیشین بیان شده است. تغییرمکان‌ها در برخی از روابط وابسته

به دو پارامتر و در برخی دیگر، وابسته به چند پارامتر است. بیشتر روابط بر مبنای روش بلوک صلب نیومارک هستند و تعداد کمی براساس روش وابسته و غیروابسته هستند. در شکل ۹، مقایسه‌ی تحلیل پارامتری روابط سایر پژوهشگران با رابطه‌ی ارائه شده در این پژوهش (JL) برای دو طول ۱۰ و ۱۰۰۰ متر نشان داده شده است. در شکل ۹ الف، تغییرات تغییرمکان نسبت به تغییرات بزرگ رسم شده است. براساس شکل مذکور، با افزایش بزرگ تغییرمکان پیش‌بینی شده توسط JL (در هر دو طول گسیختگی)،  $J, 0.7$  [۱۶]،  $BT, 0.7$  [۱۰]، افزایش می‌یابند؛ ولی  $HL, 0.8$  [۱۸]،  $SR, 0.8$  [۱۷]،  $AMAA$  [۱۳]،  $FCVV, 0.7$  [۱۴] و  $HFA, 0.2$  [۲۰] ثابت هستند. مقایسه‌ی بین تغییرمکان دو طول مختلف در بزرگ‌های متفاوت نشان می‌دهد که در بزرگ‌های ۵,۷، اختلاف بین



شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش طول گسیختگی در رابطه‌ی  $JL$ ، تغییرمکان نیز افزایش می‌یابد. در حالی که در سایر روابط تغییرات طول گسیختگی، اثری در تغییرمکان ندارد. همچنین پارامترهای زلزله به صورتی منطقی با یکدیگر در ارتباط هستند و انتظار می‌رود که اثرات تقریباً مشابهی (در شرایط یکسان) داشته باشند. که به این مورد در رابطه‌ی پیشنهادی این پژوهش توجه شده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

ارزیابی تغییرمکان ماندگار ناشی از زلزله‌ی سازه‌های ژئوتکنیکی مانند خاکریزها و شیب‌های خاکی یکی از موارد موردنیاز مهندسان برای شناخت صحیح از عملکرد لرزیهی سازه‌هاست. از جمله روش‌های پیش‌بینی تغییرمکان ماندگار لرزیهی، روش بلوک صلب نیومارک است؛ اما در روش مذکور، پاسخ سیستم در نظر گرفته نشده است. در صورتی که نتایج نشان می‌دهند که روش مذکور تأثیر بسیار زیادی در نتایج پیش‌بینی شده دارد. در تحلیل وابسته و غیروابسته پاسخ سیستم لحاظ شده است. نتایج پژوهش‌های مشابه پیشین نشان داده است که تحلیل وابسته و غیروابسته همیشه تغییرمکان را نسبت به تحلیل بلوک صلب محافظه‌کارانه پیش‌بینی نمی‌کنند و وابسته به نسبت دوره‌ی تناوب هستند.

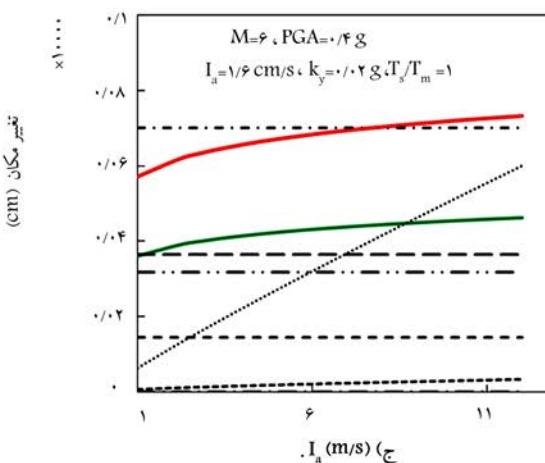
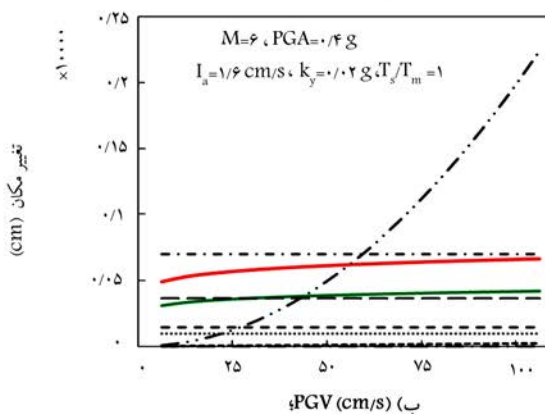
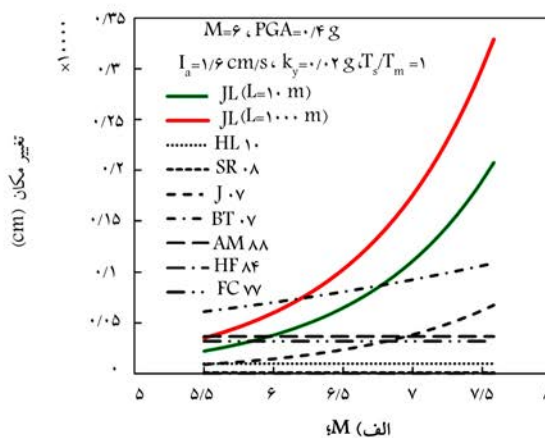
یکی دیگر از محدودیت‌های روش‌های بلوک صلب، وابسته و غیروابسته، در نظر گرفته‌نشدن تغییرات ضریب گسیختگی در طی حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش است. به دلیل دورانی‌بودن سطح گسیختگی، شیب لغزش کاهش می‌یابد؛ بنابراین نیاز به اعمال اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان در روش‌های مذکور است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که با اعمال اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان، با کاهش طول گسیختگی، مقدار تغییرمکان کاهش و در طول‌های گسیختگی کم، اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان افزایش می‌یابد.

در یک شیب با  $T_s/T_m = cte$ ، هر چه  $k_y/k_{max}$  کمتر (مصلح سست‌تر) باشد، اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان بیشتر است. همچنین در یک نسبت ثابت  $k_y/k_{max}$ ، هر چه  $T_s/T_m$  بزرگ‌تر باشد، اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان بیشتر می‌شود، لذا تغییرمکان‌های کمتری پدید می‌آید. این موضوع را می‌توان به این صورت توجیه کرد: زمانی که  $k_y/k_{max}$  ثابت است، هر چه  $T_s/T_m$  بزرگ‌تر باشد، شتاب معادل زلزله کوچک‌تر می‌شود. لذا در شرایط  $k_y$ ،  $k_y/k_{max}$  عدد کوچک‌تری را اختیار می‌کند، (لغزش‌های عمیق) و ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان، تأثیر بیشتری خواهد داشت.

می‌توان گفت که در نسبت‌های دوره‌ی تناوب بین ۰/۵-۴، تحلیل غیروابسته‌ی اصلاح‌شده، تغییرمکان را نسبت به تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. برای نسبت‌های دوره‌ی تناوب بزرگ‌تر، تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، تغییرمکان را بیشتر پیش‌بینی می‌کند. در نسبت دوره‌های تناوب کوتاه، تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، تغییرمکان را بیشتر از روش بلوک صلب شده پیش‌بینی می‌کند و در نسبت‌های دوره‌های تناوب بزرگ‌تر، عکس این موضوع رخ می‌دهد.

به‌طور کلی اصلاح اثر ضریب گسیختگی وابسته به تغییرمکان در روش‌های نیومارک، وابسته و غیروابسته باعث کاهش تغییرمکان می‌شود و در برخی نسبت دوره‌های تناوب، تحلیل غیروابسته‌ی متعارف تغییرمکان را نسبت به تحلیل وابسته‌ی اصلاح‌شده، محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند.

براساس نتایج به‌دست آمده، تغییرمکان محاسبه‌شده‌ی وابسته به نوع خصوصیات موج‌های ورودی نیز است. بدین منظور از ۱۳۶۳ رکورد ناشی از ۲۵ زلزله‌ی رخداده



شکل ۹. مقایسه‌ی پارامتریک رابطه‌ی این پژوهش با سایر روابط.

دو طول گسیختگی کوچک و تقریباً ۱/۱ برابر است و در بزرگای ۷/۵، این مقدار به ۱/۷۵ افزایش می‌یابد. در شکل ۹ ب با افزایش  $PGV$  تغییرمکان پیش‌بینی شده توسط  $JL$  (در هر دو طول گسیختگی) و  $AM 0.8$  به صورت خطی افزایش یافته و  $FC 0.7$  و  $SR 0.8$  به صورت نمایی افزایش می‌یابند. همچنین  $J 0.7$ ،  $HL 10$  و  $BT 0.7$  ثابت هستند. مقایسه‌ی بین تغییرمکان دو طول مختلف در  $PGV$  مختلف نشان می‌دهد که اختلاف بین دو طول گسیختگی در بیشترین  $PGV$  تقریباً ۳ برابر است. شکل ۹ ج نشان می‌دهد که با افزایش  $I_a$  تغییرمکان رابطه‌ی  $JL$  (در هر دو طول گسیختگی)،  $HL 10$  و  $SR 0.8$  افزایش می‌یابد و مابقی روابط ثابت هستند. تغییرات طول گسیختگی منجر به اختلاف ۲ برابری می‌شود.

تغییری در تغییرمکان ایجاد نکرده است. بررسی پارامتریک رابطه‌ی این پژوهش نشان می‌دهد که در بزرگای ۵/۷، اختلاف بین دو طول گسیختگی کوچک و تقریباً ۱/۱ برابر است و در بزرگای ۷/۵، این مقدار به ۱/۷۵ افزایش می‌یابد. مقایسه‌ی بین تغییرمکان در دو طول مختلف و در  $PGV$  و  $I_a$  مختلف نشان می‌دهد که اختلاف بین دو طول گسیختگی در بیشترین  $PGV$  و  $I_a$  تقریباً ۳ و ۵ برابر است.

### تقدیر و تشکر

این پژوهش وابسته به پروژه پژوهشی با کد ۲۷-۹۴-۶۷۲۴-پ و با حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله می‌باشد که از حمایت‌های این پژوهشگاه تشکر و قدردانی می‌شود.

در جهان استفاده شده و اثر پارامترهای مختلف نظیر  $PGA$ ،  $PGV$ ،  $I_a$  و  $T_m$  در جابه‌جایی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مقادیر مختلف طول گسیختگی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش  $PGV$ ،  $I_a$  و  $PGV$ ، تغییرمکان نیز افزایش نشان می‌دهد. مدلی همبستگی مشتمل بر این پارامترها برای محاسبه‌ی تغییرمکان ماندگار ارائه شده است. تحلیل حساسیت بین روابط ارائه‌شده برای تخمین تغییرمکان ماندگار و سایر روابط نشان می‌دهد که با افزایش بزرگای  $PGV$  و  $I_a$  تغییرمکان این نوشتار افزایش می‌یابد، در حالی که در برخی روابط با افزایش این پارامترها، مقدار تغییرمکان افزایش و در برخی دیگر مقدار تغییرمکان ثابت باقی می‌ماند. به دلیل اینکه پارامترهای لرزه‌ی به نوعی به یکدیگر در ارتباط هستند، انتظار بر این است که این پارامترها تأثیرات مشابهی (در شرایط یکسان) داشته باشند. مقایسه‌ی بین روابط نشان می‌دهد که تاکنون در هیچ‌یک از روابط ارائه‌شده، اثر شتاب تسلیم متغیر اعمال نشده و تغییرات طول گسیختگی به جز رابطه‌ی ارائه‌شده در این پژوهش،

### پانویس

1. Yerba Buena Island

### منابع (References)

- Newmark, N.M. "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, **15**(2), pp. 139-159 (1965).
- Rathje, E.M. and Bray, J.D. "An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures", *Canadian Geotechnical Journal*, **36**(1), pp. 72-87 (1999).
- Stamatopoulos, C.A. "Sliding system predicting large permanent co-seismic movements of slopes", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, **25**(10), pp. 1075-1093 (1996).
- Baziar, M.H., Rezaei-pour, H. and Jafarian, Y. "Decoupled solution for seismic permanent displacement of earth slopes using deformation-dependent yield acceleration", *Journal of Earthquake Engineering*, **16**(7), pp. 917-936 (2012).
- Makdisi, F.I. and Seed, H.B. "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations", *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **104**(7), pp. 849-867 (1978).
- Chopra, A.K. and Zhang, L. "Earthquake-induced base sliding of concrete gravity dams", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, **117**(12), pp. 3698-3719 (1991).
- Bray, J.D. and Rathje, E.M. "Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(3), pp. 242-253 (1998).
- Rathje, E.M. and Bray, J.D. "Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**(11), pp. 1002-1014 (2000).
- Baziar, M.H. and Jafarian, Y. "Assessment of earth dams displacement during earthquake using newmark and decoupled approaches", *CD Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland (3-8 September 2006).
- Bray, J.D. and Travasarou, T. "Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(4), pp. 381-392 (2007).
- Rathje, E.M. and Antonakos, G. "A unified model for predicting earthquake-induced sliding displacements of rigid and flexible slopes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **122**(1-2), pp. 51-60 (2011).
- Lashgari, A. and Jafarian, Y. "Role of sliding block rotation on earthquake induced permanent displacement of earth slopes", *4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Kos Island*, Greece (June 2013).
- Ambraseys, N.N. and Menu, J.M. "Earthquake-induced ground displacements", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**(7), pp. 985-1006 (1988).
- Franklin, A.G. and Chang, F.K. "Earthquake resistance of earth and rock-fill dams: U.S. army corps of engineers waterways experiment station", *Miscellaneous Paper S-71-17 rept. 5*, 59 (1977).
- Watson-Lamprey, J. and Abrahamson, N. "Selection of ground motion time series and limits on scaling", *Soil*

- Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**(5), pp. 477-482 (2006).
16. Jibson, R.W. "Regression models for estimating coseismic landslide displacement", *Engineering Geology*, **91**(2-4), pp. 209-218 (2007).
  17. Saygili, G. and Rathje, E.M. "Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(6), pp. 790-803 (2008).
  18. Hsieh, S.Y. and Lee, C.T. "Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **122**(1-2), pp. 34-42 (2010).
  19. Newmark, N.M. "A method for computation for structural dynamics", *ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division*, **85**(1), pp. 67-94 (1959).
  20. Hynes-Griffin, M.E. and Franklin, A.G., *Rationalizing the Seismic Coefficient Method*, Paper GL-84-13, US Army Waterway Experiment Station, Vicksburg (1984).