

## اثر دوران در تحلیل تغییر مکان ماندگار لرزه‌ای خاکریزها و ترانشه‌های راه‌ها

یاسر جعفریان\*، استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
علی لشگری، کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان  
سید محسن میرایی، کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان

E-mail: yjafarianm@iiees.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۶/۱۲ - پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۰

### چکیده

از آنجایی که عملکرد صحیح سیستم حمل و نقل در مواقع بحرانی بسیار مهم می‌باشد، طراحی صحیح و پیش‌بینی دقیق تغییر مکان لرزه‌ای خاکریزها و ترانشه‌ها در زمینه سیستم‌های حمل و نقل، دغدغه‌ی بسیاری از مهندسين است. برای تحلیل تغییر مکان ماندگار لرزه‌ای خاکریز و ترانشه‌ی راه‌ها روش‌های مختلفی همچون روش شبه استاتیک، عددی، تحلیلی و نیمه تحلیلی وجود دارد. روش بلوک صلب نیومارک به دلیل سادگی مورد توجه اکثر محققین و کاربران قرار گرفته است. اما از آنجایی که این روش دارای محدودیت‌هایی می‌باشد، تغییر مکان را محافظه‌کارانه و یا غیر محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. بنابراین، محققین سعی در مرتفع کردن محدودیت‌های این روش نموده‌اند. یکی از این محدودیت‌ها اثر دوران می‌باشد. در واقع پیش‌بینی می‌شود که حرکت چرخشی رو به پایین توده‌ی لغزش تأثیر قابل توجهی را بر شتاب گسیختگی سطح لغزش دارا خواهد بود. در این مقاله، با در نظر گرفتن اثر دوران، روش نیومارک مورد بازنگری و اصلاح قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های متفاوت مانند بلوک صلب، غیر وابسته و وابسته‌ی متعارف با تحلیل بلوک صلب و غیر وابسته‌ی اصلاح شده مقایسه شده است. بر طبق نتایج این تحقیق، نسبت پریرود (نسبت پریرود اساسی به پریرود میانگین موج ورودی) و طول لغزش تأثیر قابل توجهی بر تغییر مکان ماندگار دارند.

واژه‌های کلیدی: خاکریز و ترانشه، تغییر مکان ماندگار، اثر دوران، بلوک صلب، تحلیل وابسته، تحلیل غیر وابسته.

### ۱. مقدمه

توسط محققین ارائه شده است. روش‌های تحلیلی و نیمه تحلیلی در مقایسه با روش‌های عددی، به دلیل سادگی و پیش‌بینی نسبتاً دقیق، پرکاربرد می‌باشند. یکی از روش‌های پرکاربرد تا قبل از سال ۱۹۶۵ روش شبه استاتیک بوده است (که البته امروزه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد). در این روش، فقط ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. به همین دلیل، نیومارک (۱۹۶۵) مدل بلوک لغزنده را به عنوان اولین روش تحلیلی محاسبه تغییر مکان ماندگار شیب‌ها بیان کرد. در طول سال‌های بعد،

در جهان، خسارت‌های بسیاری از جانب زلزله‌ها روی خاکریز و ترانشه‌ی راه‌ها مشاهده و گزارش شده است. شکل ۱ نمونه‌ای از این خسارت‌ها را نشان می‌دهد. از آنجایی که راه‌ها و سیستم حمل‌نقل جزو شریان‌های حیاتی محسوب می‌شوند، بنابراین بحث طراحی لرزه‌ای این سازه‌های ژئوتکنیکی و تغییر مکان ماندگار آنها مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. برای محاسبه تغییر مکان ماندگار، روش‌های عددی و تحلیلی مختلفی

در این مقاله، ابتدا ضریب اطمینان و ناحیه‌ی گسیختگی یک خاکریز فرضی توسط روش شبه استاتیک به‌وسیله نرم‌افزار Geo-Slope محاسبه شده است. در ادامه، تغییر مکان ماندگار خاکریز فرضی توسط تحلیل‌های بلوک صلب و غیر وابسته محاسبه شده است و با اصلاح اثر دوران در این تحلیل‌ها اثر دوران مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی بیشتر نتایج تحلیل‌ها برای دو مورد: (۱) ضریب گسیختگی ثابت و (۲) ضریب گسیختگی وابسته به تغییر مکان انجام شده است. برای محاسبه تغییر مکان‌ها روابط روش نیومارک، غیر وابسته و وابسته کدنویسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش در محاسبات، تأثیر قابل توجهی بر نتایج خواهد داشت.

## ۲. بررسی منابع

نیومارک (۱۹۶۵) مدل بلوک صلب را به عنوان یک روش ساده برای محاسبه تغییر مکان ماندگار شیب‌های خاکی تحت بار زلزله ارائه نمود. در این روش، توده لغزش به عنوان یک بلوک صلب فرض می‌شود. بر این اساس، حرکت بلوک صلب زمانی آغاز می‌شود که شتاب گسیختگی کمتر از شتاب ورودی باشد. مکدیسی و سید (۱۹۸۷) روشی را پیشنهاد کردند که در آن پاسخ لرزه‌ای خاکریز و لغزش بلوک به صورت غیر وابسته فرض شده است. آنها از شتاب‌های معادل اعمال شده به بلوک که از پاسخ خاکریز به دست می‌آید، بجای موج و روی در روش نیومارک استفاده نمودند. چوپرا و ژانگ (۱۹۹۱) ضعف‌های موجود در روش غیر وابسته را مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که ممکن است این روش در مقادیر بزرگ نسبت گسیختگی ( $k_y/k_{max}$ ) محافظه‌کارانه باشد. استاماتوپولوس (۱۹۹۶) روش بلوک صلب نیومارک را با در نظر گرفتن اثر دوران در شتاب گسیختگی (به نحوی که با حرکت توده لغزش مقدار آن نیز افزایش می‌یابد) اصلاح نمود. بر اساس روش وی، در طول‌های

روش‌های دیگری بر اساس اصلاح مدل بلوک صلب توسط محققین ارائه شده است (لین و ویتمن، ۱۹۸۳؛ چوپرا و ژانگ، ۱۹۷۱؛ کرامر و اسمیت، ۱۹۹۷؛ راتجه و همکاران، ۱۹۹۸). یکی از موضوعات مهمی که باید به آن توجه نمود، در نظر گرفتن پاسخ سیستم طی لغزش می‌باشد که در مدل بلوک صلب از این موضوع صرف‌نظر شده است. راتجه و بری (۱۹۹۹) پاسخ سیستم را در تغییر مکان ماندگار شیب لحاظ کردند و نتایج را در دو حالت غیر وابسته و وابسته با یکدیگر مقایسه نمودند. یکی دیگر از محدودیت‌های روش بلوک صلب، لحاظ نکردن اثر دوران گوه‌ی گسیختگی طی لغزش می‌باشد. زمانی که توده لغزش به سمت پایین حرکت می‌کند، با توجه به اینکه سطح لغزش در بسیاری از موارد به صورت منحنی است، شیب لغزش کاهش می‌یابد (استاماتوپولوس، ۱۹۹۶). بنابراین، شتاب گسیختگی طی حرکت رو به پایین توده لغزش تغییر می‌کند.



(الف)



(ب)

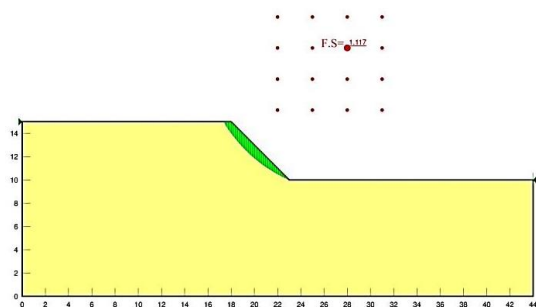
شکل ۱. خرابی خاکریز راه ناشی از: (الف) زلزله Kozani در سال ۱۹۹۵ و (ب) زلزله Iwate Miyagi-Nairiku در سال ۲۰۰۸ (پژوهشگاه ژئوتکنیک نوژ، ۲۰۱۲)

### ۳. انواع تحلیل لرزه‌ای خاکریزها

تحلیل‌های مختلفی برای تحلیل لرزه‌ای خاکریزها وجود دارد. برخی از این تحلیل‌ها (مانند تحلیل شبه استاتیک) ضریب اطمینان پایداری لرزه‌ای را ارائه می‌دهند و برخی دیگر تغییر مکان ماندگار لرزه‌ای (مانند تحلیل بلوک صلب، وابسته و غیر وابسته) را پیش‌بینی می‌کنند. در ادامه، این روش‌ها توضیح داده خواهند شد.

#### ۳-۱. تحلیل شبه استاتیک

در آغاز سال ۱۹۲۰ پایداری سازه‌های خاکی با روش شبه استاتیک مورد تحلیل قرار می‌گرفت که در این روش، اثر یک زلزله با شتاب‌های قائم یا افقی ثابت، به صورت معادل در نظر گرفته می‌شد. تحلیل‌های شبه استاتیک، در معمولی‌ترین شکل خود، اثرهای ارتعاشات زلزله را به وسیله شتاب‌های شبه استاتیک (که نیروهای اینرسی مؤثر بر مرکز توده لغزش می‌باشد) لحاظ می‌کنند. در شکل ۲، ضریب اطمینان لرزه‌ای و ناحیه‌ی گسیختگی یک خاکریز فرضی توسط نرم افزار Geo-Slope با استفاده از موج ورودی Yerba Buena Island (YBI) (ناشی از زلزله Loma Prieta سال ۱۹۸۹ با  $T_m = 1s$  و مؤلفه افقی ۰.۹۰) محاسبه شده، که از مصالح با زاویه اصطکاک ۳۳ درجه و وزن مخصوص  $18 \text{ kN/m}^3$  استفاده شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده، ضریب اطمینان این خاکریز در مقابل لغزش، ۱/۱۱۷ می‌باشد که حکایت از پایداری آن دارد.



شکل ۲. ناحیه‌ی گسیختگی خاکریز تحلیل شده

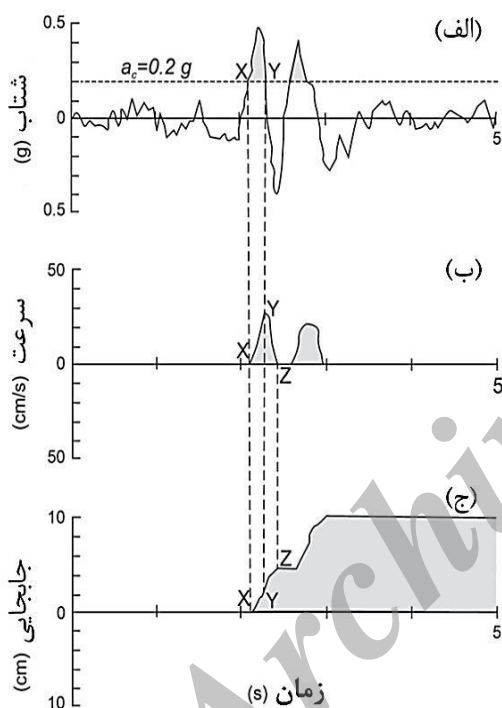
کوچک لغزش، اثر دوران مشهودتر می‌باشد و تغییر مکان کمتر از حالت اصلاح نشده می‌باشد. راتجه و بری (۱۹۹۹) با استفاده از روش چوپرا و ژانگ (۱۹۹۱) به بررسی و اصلاح روش بلوک صلب غیر وابسته و وابسته پرداختند. آنها با استفاده از سیستم یک درجه آزادی و توزیع جرم در ارتفاع توده لغزش، پاسخ سیستم را محاسبه نمودند و بیان کردند که تحلیل غیر وابسته در نسبت‌های پریرود  $(T_s/T_m)$  بزرگتر از یک تغییر مکان را محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. آنها در ادامه کارهای قبلی خود (راتجه و همکاران، ۱۹۹۸؛ راتجه و بری، ۱۹۹۹) با به‌کارگیری سیستم چند درجه آزادی و عملکرد غیر خطی تحلیل غیر وابسته و وابسته را برای این سیستم انجام دادند. آنها دریافتند که تحلیل غیر خطی محاسبه شده به-وسیله لغزش تأثیر قابل توجهی در پریرودهای کوچک دارد (راتجه و بری، ۲۰۰۰). بری و تراواسارو (۲۰۰۷) یک رابطه نیمه تجربی را برای تخمین تغییر مکان مانگار شیب‌های خاکی ارائه نمودند. راتجه و آنتوناکوس (۲۰۱۱) انعطاف‌پذیری بلوک صلب را برای پیش‌بینی تغییر مکان در دو حالت صلب و انعطاف‌پذیر مورد ارزیابی قرار دادند و رابطه‌ای در این خصوص ارائه نمودند.

اولین محققینی که اثر حرکت رو به پایین بلوک صلب را در تحلیل غیر وابسته اصلاح نمودند، بازیار و همکاران (۲۰۱۲) بودند. همانطور که گفته شد، استماتوپولوس اثر دوران را بر روی شتاب گسیختگی مورد تحلیل قرار داد و بازیار و همکاران (۲۰۱۲) با اعمال این شتاب گسیختگی اصلاح شده در تحلیل غیر وابسته، این تحلیل را اصلاح نمودند. آنها دریافتند که اثر دوران در نسبت پریرودهای بلند، نسبت‌های شتاب گسیختگی کوچک و طول گسیختگی‌های کوچک مشهودتر می‌باشد. همچنین، اختلاف بین روش غیر وابسته‌ی اصلاح شده و نشده در طول‌های کوچک لغزش بیشتر می‌باشد.

اساس رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$k_y = \tan(\phi - \beta) \quad (1)$$

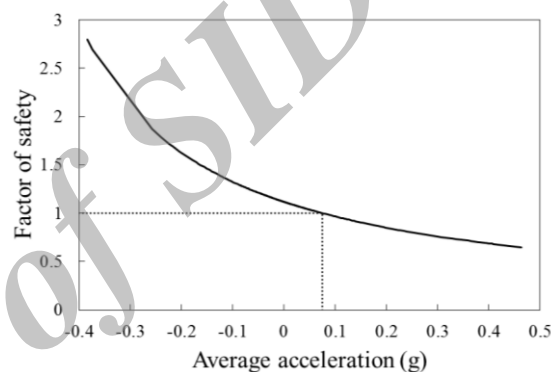
که  $\phi$  زاویه‌ی اصطکاک خاک و  $\beta$  زاویه‌ی شیب لغزش می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد که در یک زاویه‌ی شیب ثابت، هرچه زاویه‌ی اصطکاک بیشتر شود ضریب گسیختگی بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش تراکم خاک باعث افزایش نیروی مقاوم در برابر لغزش می‌شود. از آنجا که این رابطه به صورت تقریبی ضریب گسیختگی را پیش‌بینی می‌کند، پیشنهاد می‌شود برای محاسبه ضریب گسیختگی همانند بخش ۳-۱ عمل شود.



شکل ۴. گسترش تغییر مکان دائمی یک شیروانی تحت اثر زلزله (کرامر و اسمیت، ۱۹۹۷). الف) شتاب‌های ورودی زلزله با ضریب گسیختگی  $0.2g$ ؛ ب) سرعت نسبی حاصل از انتگرال‌گیری از شتاب نسبی؛ ج) جابجایی شیب حاصل از انتگرال‌گیری از سرعت نسبی.

روش بلوک صلب دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که برخی از آنها در زیر ذکر شده است (جیسون، ۲۰۱۰):  
مقاومت برشی استاتیک و دینامیک یکسان در نظر گرفته شده است.

ضریب گسیختگی مورد استفاده در تحلیل شبه استاتیک، شتاب لرزه‌ای است که در آن ضریب اطمینان خاکریز برابر ۱ شود. شکل ۳ نمودار ضریب اطمینان بر حسب شتاب لرزه‌ای را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، مقدار ضریب گسیختگی برابر  $0.075$  می‌باشد. در تحلیل شبه استاتیک خصوصیات لرزه‌ای فقط توسط پارامتر شتاب گسیختگی در محاسبات اعمال می‌شود. تجربیات گذشته داده که روش شبه استاتیک نمی‌تواند به طور صحیحی رفتار لرزه‌ای را پیش‌بینی کند (جعفریان و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین، توسط این روش نمی‌توان تغییر مکان را پیش‌بینی نمود. به همین دلیل روش‌های دیگری در این خصوص ارائه شده است.



شکل ۳. نمودار ضریب اطمینان بر حسب شتاب

### ۳-۲. تحلیل بلوک صلب

روش بلوک صلب ابتدا توسط نیومارک در سال ۱۹۶۵ در کنفرانس رانکین ارائه شد. در این روش، توده‌ی لغزش به صورت یک بلوک صلب که روی یک سطح شیب‌دار قرار دارد فرض می‌شود. حرکت توده لغزش زمانی آغاز می‌شود که شتاب وارده به توده لغزش توسط زمین لرزه، بزرگتر از مقاومت گسیختگی توده‌ی لغزش شود. این حرکت تا زمانی ادامه می‌یابد که سرعت بلوک بزرگتر از صفر باشد. با محاسبه شتاب نسبی بلوک و انتگرال‌گیری از آن، تغییر مکان بلوک محاسبه می‌شود. در شکل ۴، چگونگی محاسبه تغییر مکان در روش بلوک صلب نیومارک نشان داده شده است.

معمولاً مقاومت گسیختگی را با ضریب  $k_y$  نشان می‌دهند. بر اساس پیشنهاد نیومارک، در حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش می‌توان ضریب گسیختگی را بر

شتاب ورودی، نسبت میرایی، توزیع جرم در ارتفاع، شکل مودال شتاب زمین در ارتفاع و فرکانس چرخشی می‌باشند. از طرفی می‌توان رابطه تعادل نیروها را پس از شروع لغزش به شرح زیر نوشت:

$$-M(\ddot{u}_g + \ddot{s}) - L_1 \ddot{Y}_1 = k_y M g \quad (4)$$

### ۳-۴. تحلیل وابسته

روش غیر وابسته که توسط مکدیسی و سید (۱۹۷۸) بیان شد، اثر لغزش را در پاسخ دینامیک در نظر نمی‌گیرد. در حالی که در شیب‌های واقعی، پاسخ دینامیک و پاسخ لغزش بر یکدیگر اثرگذارند. برای اعمال این اثر، راتجه و بری (۱۹۹۹) روابطی را پیشنهاد نمودند. بر اساس روابط آنها، زمانی که بلوک لغزش شروع به حرکت کند، معادله پاسخ سیستم از ترکیب روابط (۳) و (۴) به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$\ddot{Y}_1 + \frac{2\lambda\omega_1}{d_1} \dot{Y}_1 + \frac{\omega_1^2}{d_1} Y_1 = \frac{k_y L_1 g}{d_1 M_1} \quad (5)$$

و

$$d_1 = 1 - \frac{L_1^2}{MM_1} \quad (6)$$

و

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

که شتاب بلوک لغزش می‌باشد. تا زمانی که سرعت بلوک لغزش بزرگتر از صفر باشد معادله پاسخ سیستم، معادله (۵) خواهد بود. در غیر این صورت، معادله (۳) حاکم خواهد شد.

معمولاً از روش وابسته برای تحلیل‌های پیچیده و پروژه‌های مهم استفاده می‌شود. در این روش نیز همانند دو روش دیگر، اثر دوران در نظر گرفته نشده است.

### ۴. اثر دوران

استاماتوپولوس (۱۹۹۶) لغزش دینامیک توده‌ی لغزنده را به صورت یک زنجیر کاملاً انعطاف‌پذیر که در امتداد سطح لغزش حرکت می‌کند و شیب آن به صورت ملایم

ضریب گسیختگی در طول تحلیل ثابت فرض شده است. پاسخ دینامیک خاکریز در محاسبات در نظر گرفته نشده است. اثر دوران در محاسبات دیده نشده است.

### ۳-۳. تحلیل غیر وابسته

این روش توسط مکدیسی و سید (۱۹۸۷) ارائه شد. این روش بر پایه مفهوم بلوک صلب می‌باشد، ولی با مقادیر اصلاح شده پارامتر شتاب ورودی به صورت معادل (HEA) می‌باشد. یعنی بجای وارد کردن شتاب زلزله به بلوک، شتاب پاسخ توده لغزش به بلوک وارد می‌شود و سپس همانند روش بلوک لغزنده با انتگرال‌گیری، سرعت نسبی و تغییر مکان به دست می‌آید. از معایب این روش می‌توان به در نظر نگرفتن اثر لغزش در پاسخ توده‌ی لغزش و لحاظ نکردن اثر دوران اشاره نمود.

راتجه و بری (۱۹۹۹) با استفاده از روش چوپرا و ژانگ (۹۹۱) و پاسخ سیستم یک درجه آزادی روشی برای محاسبه تحلیل غیر وابسته و وابسته ارائه نمودند که در این مقاله نیز مبنای محاسبه تغییر شکل ماندگار این دو تحلیل همان روش راتجه و بری (۱۹۹۹) می‌باشد. بر اساس روش راتجه و بری (۱۹۹۹) حرکت توده لغزش زمانی آغاز می‌شود که نیروی محرک بزرگتر از نیروی اصطکاک حاصل از اندرکنش توده لغزش با سطح لغزش شود. معادله تعادل این نیروها در جهت مثبت به شرح زیر می‌باشد:

$$-M\ddot{u}_g - L_1 \ddot{Y}_1 = k_y M g \quad (2)$$

که  $M\ddot{u}_g$  نیروی شتاب زمین،  $L_1 \ddot{Y}_1$  نیروی پاسخ توده‌ی لغزش و  $k_y M g$  نیروی اصطکاک می‌باشد.

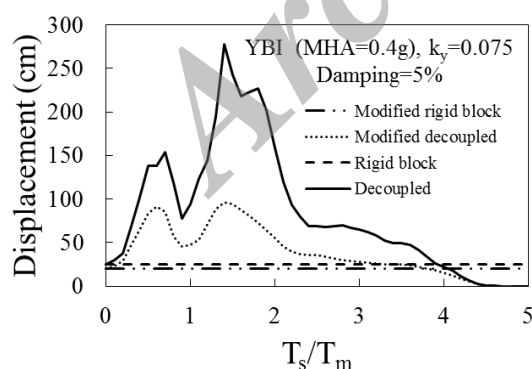
اگر توده لغزش شروع به حرکت کند، معادله پاسخ سیستم به شکل زیر می‌باشد:

$$\ddot{Y}_1 + 2\lambda\omega_1 \dot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1 = -\frac{L_1}{M_1} \ddot{u}_g \quad (3)$$

که  $Y_1$ ،  $\ddot{u}_g$ ،  $\lambda$ ،  $M_1$ ،  $L_1$  و  $\omega_1$  به ترتیب پاسخ سیستم،

تاریخچه‌ی موردی مناسبی از خاکریز راه که در اثر زلزله دچار لغزش شده باشد مشاهده نشد، از یک خاکریز فرضی (که مشخصات آن در بخش ۳-۱ بیان شده) برای انجام تحلیل‌های تغییر مکان استفاده شده است.

در شکل ۵، تغییر مکان ماندگار برای خاکریز فرضی توسط روش‌های بلوک صلب، وابسته و غیر وابسته نشان داده شده است. همچنین، همانطور که در شکل ۲ ناحیه‌ی گسیختگی نشان داده شد، طول گسیختگی محاسبه شده توسط نرم‌افزار Geo-Slope کوچک و برابر ۷/۴۷ متر می‌باشد. بر اساس این طول گسیختگی، اثر دوران در تحلیل وابسته و غیر وابسته اعمال و تغییر مکان‌ها محاسبه شده که در شکل ۴ نشان داده شده است. طبق این شکل، اختلاف بین تحلیل غیر وابسته و غیر وابسته‌ی اصلاح شده در نسبت پریودهای کمتر از ۰/۵ کوچک و در نسبت پریودهای بین ۰/۵ تا ۳ افزایش یافته و از نسبت پریود ۴ به بعد کاهش می‌یابد. بیشترین اختلاف در نسبت پریود نزدیک به ۱ (به علت پدیده‌ی تشدید) که تقریباً ۴ برابر می‌باشد رخ داده است. همچنین، اختلاف بین روش بلوک صلب و بلوک صلب اصلاح شده در نسب پریودهای مختلف ثابت می‌باشد. بنابراین، اثر دوران تأثیر بسیار زیادی بر پیش‌بینی صحیح تغییر مکان دارد، به خصوص زمانی که نسبت پریود نزدیک به ۱ باشد.



شکل ۵. تغییرات جابجایی بر حسب نسبت پریود، برای تحلیل‌های بلوک صلب و غیر وابسته‌ی اصلاح نشده و اصلاح شده.

شایان ذکر است که بر اساس روش شبه استاتیک، ضریب اطمینان محاسبه شده در برابر لغزش برای این خاکریز

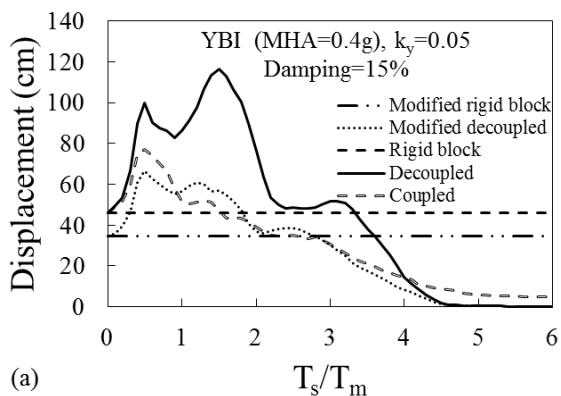
کاهش می‌یابد، در نظر گرفت. به عبارت دیگر، ضریب گسیختگی با کاهش زاویه‌ی شیب کاهش می‌یابد. طبق این روش، ضریب گسیختگی وابسته به زاویه‌ی شیب توده لغزش در هر تغییر مکان و زاویه‌ی شیب لغزش هم وابسته به طول لغزش است، بنابراین، استاماتوپولوس (۱۹۹۶) با اعمال اثر دوران، ضریب گسیختگی را اصلاح نمود. نتایج نشان داد که نادیده گرفتن حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش، باعث پیش‌بینی محافظه‌کارانه‌ی تغییر مکان ماندگار می‌شود. بازیار و همکاران (۲۰۱۲) روش غیر وابسته را با اعمال اثر دوران، اصلاح نمودند و نشان دادند که اثر دوران می‌تواند در پیش‌بینی تغییر مکان لرزه‌ای مهم باشد.

بر اساس مطالعات استاماتوپولوس (۱۹۹۶) و بازیار و همکاران (۲۰۱۲)، در طول‌های لغزش کمتر از ۵۰۰ متر اثر دوران افزایش خواهد یافت. طول گسیختگی خاکریزها و ترانشه‌های خاکی، با توجه به هندسه خاکریزها، از ۵۰۰ متر کوچکتر است. به عنوان مثال، طول گسیختگی خاکریز فرضی در بخش ۳-۱ برابر ۷/۴۷ متر می‌باشد. بنابراین، به دلیل آنکه این طول لغزش تقریباً ۵۰ برابر از طول لغزش ۵۰۰ متر کوچکتر است می‌توان گفت که طول لغزش این خاکریز کوچک می‌باشد.

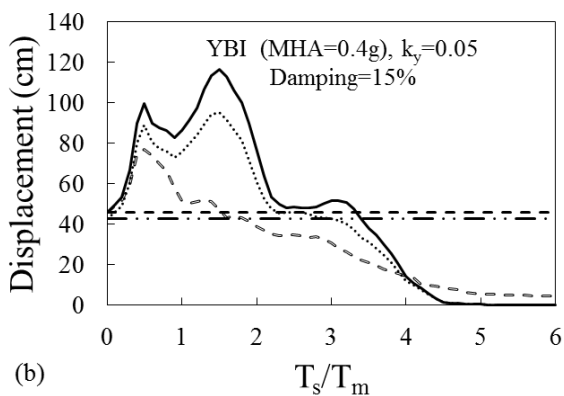
## ۵. تحلیل

در این تحقیق، روش بلوک صلب، وابسته و غیر وابسته، با استفاده در معادلات راتجه و بری (۱۹۹۹) به‌وسیله‌ی نرم‌افزارهای کامپیوتری کد نویسی شده و برای حل معادلات از روش عددی تاریخچه‌ی زمانی (۱۹۵۹) استفاده شده است. همچنین، برای اعمال اثر دوران، ضریب گسیختگی اصلاح شده استاماتوپولوس (۱۹۹۶) مورد استفاده قرار گرفته است. مقایسه‌ی بین نتایج مطالعات موردی و نتایج روش‌های تخمین تغییر مکان ماندگار (مانند راتجه و بری، ۱۹۹۸؛ بری و تراواسارو، ۲۰۰۷) نشان داده که این روش‌ها می‌توانند تغییر مکان لرزه‌ای را به طور مناسبی پیش‌بینی کنند. با توجه به اینکه

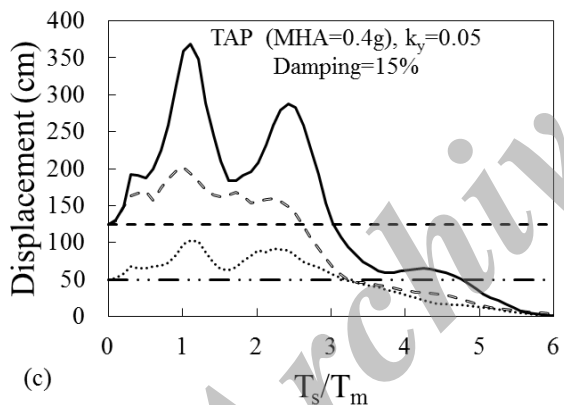
دوران در طول‌های کوچک بسیار مهم است.



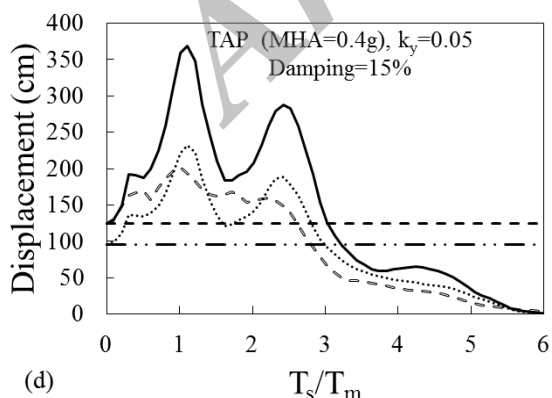
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۶: مقایسه بین تحلیل بلوک صلب، غیر وابسته، وابسته و بلوک صلب اصلاح شده و غیر وابسته اصلاح شده برای: (a) YBI با طول ۱۰ متر، (b) YBI با طول ۵۰ متر، (c)

فرضی ۱/۱۱۷ می‌باشد که نشان دهنده‌ی پایداری لرزه‌ای این خاکریز است. ولی تحلیل‌های بلوک صلب و غیر وابسته گویای این مطلب نمی‌باشند و خاکریز دارای تغییر مکان لرزه‌ای می‌باشد که حتی ممکن است از مقدار مجاز بیشتر شده و منجر به واژگونی خاکریز شود. این مسئله مبین نقص روش شبه استاتیکی می‌باشد. لازم به ذکر است که در تحلیل‌های انجام شده از بار ترافیکی و خستگی خاکریز صرف‌نظر شده که از محدودیت این تحلیل‌ها می‌باشد.

همانطور که در شکل ۵ نشان داده شد، علاوه بر اختلاف بین تحلیل‌های معمولی با تحلیل‌های اصلاح شده، بین نتایج تحلیل‌های مختلف نیز اختلاف وجود دارد. این اختلاف به پارامترهای مختلفی همچون مشخصات موج ورودی، نسبت میرایی، ضریب گسیختگی و طول گسیختگی بستگی دارد (لشگری و جعفریان، ۲۰۱۳). بنابراین نیاز است که این پارامترها مورد بررسی بیشتری قرار گیرند. در شکل ۶ (a-d) تغییر مکان ماندگار محاسبه شده توسط روش‌های بلوک صلب و بلوک صلب اصلاح شده، تحلیل غیر وابسته و غیر وابسته‌ی اصلاح شده و تحلیل وابسته برای دو موج TAP051-W (TAP) (ناشی از زلزله Chi-Chi سال ۱۹۹۹ با  $T_m=0.99s$ ) و YBI برای دو طول لغزش ۱۰ و ۵۰ متر و ضریب گسیختگی  $k_y=0.05g$  ترسیم شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، اصلاح اثر دوران باعث کاهش تغییر مکان می‌شود. تحلیل غیر وابسته تا نسبت پریرود ۳ تغییر مکان را بیشتر از تحلیل بلوک صلب پیش‌بینی می‌کند. در نسبت پریرودهای بزرگتر از ۳، تغییر مکان تحلیل وابسته و غیر وابسته به هم نزدیک می‌شوند. به طور واضح نمی‌توان اختلاف بین تحلیل وابسته و غیر وابسته‌ی اصلاح شده را بیان کرد. هر چند که تحلیل غیر وابسته اصلاح شده، تغییر مکان‌ها را تا سطح تحلیل وابسته کاهش می‌دهد. همچنین این شکل تأثیر خصوصیات موج ورودی را بر نتایج نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، به طور کلی می‌توان گفت که تأثیر

TAP با طول ۱۰ متر و TAP (d با طول ۵۰ متر

## ۶. جمع بندی

روش‌های متنوعی برای پیش‌بینی عملکرد خاکریز و ترانشه‌ی راه‌ها تحت بار زلزله، توسط محققین ارائه شده است. از جمله‌ی این روش‌ها روش شبه استاتیک است که نتایج نشان می‌دهد این روش توانایی کافی در پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های خاکی را ندارد و ممکن است عملکرد لرزه‌ای زیاد و یا کمی را برای سازه‌های خاکی پیش‌بینی کند. از جمله روش‌های پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار لرزه‌ای، روش بلوک صلب نیومارک می‌باشد. اما در این روش پاسخ سیستم در نظر گرفته نشده است. در صورتی که نتایج نشان می‌دهد که این مورد تأثیر بسیار زیادی بر نتایج پیش‌بینی شده دارد. نتایج تحقیقات مشابه قبلی نشان داده که تحلیل غیر وابسته و وابسته همیشه تغییر مکان را نسبت به تحلیل بلوک صلب محافظه‌کارانه پیش‌بینی نمی‌کنند و وابسته به نسبت پررود می‌باشند. نتایج نشان داده که در نسبت پررود بزرگتر از ۳، تحلیل بلوک صلب تغییر مکان را نسبت به تحلیل وابسته و غیر وابسته محافظه‌کارانه پیش‌بینی

می‌کند. همچنین، در این نسبت پررودها، برخلاف نسبت پررودهای کمتر از ۳، نتایج تحلیل بلوک وابسته و غیر وابسته به یکدیگر نزدیک می‌شود.

یکی از موارد دیگری که باید اثر آن مد نظر قرار بگیرد، دوران توده‌ی لغزش در اثر حرکت رو به پایین می‌باشد. در اثر این حرکت، زاویه‌ی گسیختگی افزایش یافته و منجر به افزایش ضریب گسیختگی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که دوران تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج تحلیل بلوک صلب و تحلیل غیر وابسته دارد. دوران باعث کاهش قابل ملاحظه‌ی تغییر مکان‌های ماندگار می‌شود که این اثر در طول‌های کوچک (کمتر از ۵۰۰ متر) به مراتب بیشتر از طول‌های بزرگ (بیشتر از ۵۰۰ متر) می‌باشد. بنابراین، از آنجایی که طول گسیختگی خاکریزها و ترانشه‌ها عموماً کوچک می‌باشد، توجه به نقش دوران در محاسبه‌ی تغییر مکان ماندگار لرزه‌ای ضروری به نظر می‌رسد.

شایان ذکر است که در تحلیل‌های پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار اثر ترافیک و خستگی لحاظ نشده، که از محدودیت‌های این روش‌ها می‌باشد.

## ۷. مراجع

جعفریان، ی.، لشگری، ع.، میرایی، م. و محملی ابیانه، ر. ۱۳۹۲. عوامل مؤثر بر پاسخ لرزه‌ای و تغییر مکان‌های اسکله کیسونی با استفاده از تحلیل‌های عددی تفاضل محدود. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، اردیبهشت، زاهدان.

Baziar, M. H., Rezaeipour, H. and Jafarian, Y. 2012. "Decoupled solution for seismic permanent displacement of earth slopes using deformation-dependent yield acceleration". *J. Earthq. Eng.* 16: 917-936.

Bray, J. D. and Travasarou, T. 2007. "Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements". *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 133(4): 381-392.

Chopra, A. K. and Zhang, L. 1991. "Earthquake-induced base sliding of concrete gravity dams". *J Struct. Eng., ASCE* 117(12): 3698-3719.

Jibson, R. W. 2010. "Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes- A retrospective". *Eng. Geol.* 122: 43-50.

Kramer, S. L. and Smith, M. W. 1997. "Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes". *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE* 123(7): 635-644.

Lashgari, A. and Jafarian, M. 2013. "Role of sliding block rotation on earthquake induced permanent displacement of earth slopes". 4<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece.

Lin, J. S. and Whitman, R. V. 1983. "Decoupling approximation to the evaluation of earthquake induced plastic slip in earth dams". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 11: 667-678.

Makdisi, F. I. and Seed, H. B. 1987. "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake induced deformations". *J. Geotech. Eng., ASCE* 104(GT7): 849-867.

Newmark, N. M. 1959. "A method for computation for structural dynamics". *ASCE J. Eng. Mech. Div.* 85: 67-94.



- Newmark, N. M. 1965. "Effects of earthquakes on dams and embankments". *Geotech.* 15(2): 139-160.
- Norwegian Geotechnical Institute (NGI). 2012. "D3.7- Fragility Functions for Roadway System Elements". Project, Norwegian Geotechnical Institute.
- Pradel, D., Smith, P. M., Stewart, J. P. and Raad, G. 2005. "Case history of landslide movement during the Northridge earthquake". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 131: 1360-1369.
- Rathje, E. M., Abrahamson, N. and Bray, J. D. 1998. "Simplified content estimates of earthquake ground motions". *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE* 124(2): 150-159.
- Rathje, E. M. and Antonakos, G. A. 2011. "Unified model for predicting earthquake-induced sliding displacements of rigid and flexible slopes". *Soil Dynam. Earthq. Eng.* 122(12): 51-60.
- Rathje, E. M. and Bray, J. D. 1999. "An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures". *Can. Geotech. J.* 36(1): 72-87.
- Rathje, E. M. and Bray, J. D. 2000. "Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures". *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, 126(11): 1002-1014.
- Stamatopoulos, C. A. 1996. "Sliding system predicting large permanent co-seismic movements of slope". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 25(10): 1075-1093.
- Wilson, R. C. and Keefer, D. K. 1985. "Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding". PP. 317-345. *In: Ziony, J. L. (Ed.), Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region*, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, Professional Paper 1360.

Archive of SID