

Semi-empirical Model and Seismic Landslide Hazard Analysis of Earth Slopes Based on Permanent Displacement Using Iranian Strong Ground Motion Records: Application in Tehran

Yaser Jafarian

Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center
yjafarianm@iiees.ac.ir

Ali Lashgari

Landslide-prone areas are among the most hazardous locations during an earthquake. Past events have shown that earthquake-induced landslides can result in displacements ranging from zero to several hundred meters. Reports from the Iranian Seismological Center indicate that annually, more than 175 earthquakes with magnitudes greater than 4 occur in the country, some of which cause significant material and human losses. Moreover, due to its diverse topographical and geometric characteristics, Iran is consistently exposed to the phenomenon of landslides. Earthquake damage reports indicate that sometimes these seismic landslides have caused serious damage in the country. Various methods including numerical and simple methods have been proposed to predict the seismic displacement of slopes. Because numerical methods require numerous input parameters, which lead to significant costs and time consumption, engineers have turned to simpler relationships that, despite their simplicity, possess appropriate accuracy. Among the simple methods are analytical methods (such as rigid block, dependent, and independent) and semi-empirical methods for predicting the permanent seismic displacement of slopes. Many semi-empirical methods proposed are based on Newmark's rigid block method, with a few also based on dependent and independent methods. The essential condition for achieving a semi-empirical model with acceptable accuracy is the use of a comprehensive database of seismic records. This is because the analytical methods, from which semi-empirical models are derived, are sensitive to the input records and its parameters. Based on past experiences, using local records result in different displacements compared to global records. Therefore, in order to achieve semi-empirical models, local records must be used to predict the seismic performance of slopes with acceptable accuracy. Unfortunately, despite the occurrence of many landslides during earthquakes in Iran and the presence of many structures in their vicinity, no appropriate relationship based on the country's seismic data has been proposed for predicting earthquake-induced displacements to date.

In this research, two semi-analytical models for predicting seismic displacement of slopes in Iran have been proposed. In the first step, a seismic record database containing 3,958

ارائه مدل تحلیلی-تجربی و پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش لرزه‌های شیب‌ها بر اساس تغییرمکان ماندگار با استفاده از شتاب نگاشت‌های لرزه‌ای ایران: کاربرد در تهران

یاسر جعفریان

دانشیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک yjafarianm@iiees.ac.ir

علی لشگری

نواحی مستعد زمین‌لغزش یکی از پرخطرترین مکان‌ها در طی وقوع زلزله می‌باشند. حوادث گذشته نشان داده است که زمین لغزش ناشی از زلزله می‌تواند تغییر مکانی بین صفر تا چند صد متر را در بر داشته باشد. گزارش‌های مرکز لرزه‌نگاری ایران نشان می‌دهد که به طور معمول سالیانه بیش از ۱۷۵ زلزله با بزرگای بیش از ۴ در کشور رخ می‌دهد که در برخی موارد منجر به خسارات مادی و جانی قابل توجهی نیز می‌شوند. در کنار این موضوع، کشور ایران به دلیل خصوصیات توپوگرافی و هندسی متفاوت همواره در معرض پدیده زمین‌لغزش می‌باشد. گزارش‌های خسارت زلزله حاکی از این موضوع است که گاهی این زمین‌لغزش‌های لرزه‌ای باعث بروز آسیب‌های جدی در کشور شده‌اند. روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های عددی و ساده، برای پیش‌بینی تغییر مکان لرزه‌ای شیب‌ها ارائه شده است. به دلیل آنکه در روش‌های عددی نیاز به پارامترهای ورودی بسیار می‌باشد که منجر به صرف هزینه و وقت زیاد می‌شود، مهندسين به سمت استفاده از روابط ساده‌تری که در عین سادگی از دقت مناسبی نیز برخوردار باشند، روی آورده‌اند. در میان روش‌های ساده می‌توان به روش‌های تحلیلی (از قبیل بلوک صلب، وابسته و غیر وابسته) و نیمه-تجربی در زمینه پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار لرزه‌ای شیب‌ها اشاره نمود. بسیاری از روش‌های نیمه-تجربی ارائه شده بر مبنای روش بلوک صلب نیومارک و تعداد اندکی نیز بر پایه روش‌های وابسته و غیر وابسته هستند. شرط اساسی برای دستیابی به یک مدل نیمه-تجربی با دقت قابل قبول، استفاده از پایگاه داده‌ای جامع از شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای می‌باشد. زیرا روش‌های تحلیلی که با استفاده از آنها مدل‌های نیمه-تجربی حاصل می‌شود به شتاب‌نگاشت ورودی و پارامترهای آن حساس هستند. بر اساس تجربیات گذشته، استفاده از شتاب‌نگاشت‌ها در مقیاس محلی تغییرمکان‌های متفاوتی نسبت به شتاب‌نگاشت‌های جهانی به همراه دارد. بنابراین برای دستیابی به مدل‌های نیمه-تجربی نیاز است که از شتاب‌نگاشت‌های محلی استفاده شود تا پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای شیب‌ها با دقت قابل قبول انجام شود. متأسفانه علیرغم رخداد زمین لغزش‌های بسیار در طی زلزله‌های ایران و حضور بسیاری از سازه‌ها در مجاورت آنها، تاکنون رابطه مناسبی بر اساس داده‌های لرزه‌ای کشور برای پیش‌بینی تغییرمکان‌های ناشی از زلزله ارائه نشده است.

در این تحقیق، دو مدل نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی تغییرمکان لرزه‌ای شیب‌ها در ایران ارائه شده است. در گام اول بانک یک رکورد لرزه‌ای شامل ۳۹۵۸ رکورد لرزه‌ای (دو مؤلفه افقی) ناشی از ۷۳۸ زلزله رخ داده در ایران در طی سال‌های ۱۳۵۴-۱۳۹۲ جمع‌آوری و اصلاح شده است. در گام دوم تحلیل‌های تغییرمکان لرزه‌ای بر مبنای دو تحلیل اصلاح شده بلوک-صلب دوران و وابسته-دوران به عنوان روش‌های توسعه‌یافته جدید صورت

seismic records (two horizontal components) resulting from 738 earthquakes that occurred in Iran from 1975 to 2013 was collected and corrected. In the second step, seismic displacement analyses were conducted based on two modified analyses: rigid-block rotation and dependent-rotation, as newly developed methods. In the third step, using multi-stage regression methods, the equation form of the predictive models was extracted. The results indicate that the standard deviation of the prediction error is approximately 0.6 and 0.86 for the two predictive models.

Comparing the proposed models with other local and global models shows that the proposed models have acceptable accuracy in predicting displacement compared to other models. Subsequently, to demonstrate and understand the application of the proposed semi-empirical models, the seismic displacement for an area of Tehran was calculated. Figure (1) shows the comparison of the prediction model results based on the rigid-block rotation in this research with other models.

Figure (2) shows the variations in the calculated displacement versus the predicted displacement of the model based on the dependent-rotation method for slip lengths of 10, 100, and 1000 meters compared to other methods. The standard deviation of the prediction for each model across different slip lengths is shown in Figure (2). This figure indicates that the displacements resulting from the proposed model of this research have less dispersion compared to other models at various slip lengths. For instance, at a slip length of 10 meters, the standard deviation of this research is 0.86, whereas the standard deviations for the models by Rajabi et al. (2011), Tsai and Chien (2016), and Lashgari et al. (2018) are 1.59, 1.89, and 1.14, respectively. This trend is also observed in other slip lengths. At a slip length of 1000 meters, the standard deviations of the models by Rajabi et al. (2011), Tsai and Chien (2016), and Lashgari et al. (2018) are 1.77, 1.87, and 1.4 times the standard deviation of this research, respectively. Therefore, the comparison between the models indicates that the model presented in this research provides a lower standard deviation than other local and global models.

In Table (1), the displacements calculated by the two models, rigid-block rotation and coupled stick-slip-rotation, for an area in District 22 of Tehran are shown. As can be seen in Table (1), the displacements resulting from the two methods differ from each other. This difference, in addition to the type of method, also depends on the predicted seismic parameters.

Table 1: Seismic Parameters at a Distance (JB) of 50 kilometers

Model	Return period		
	72	475	2475
RBR (cm)	1.79	8.42	24.01
CSSR (cm)	0.43	1.28	2.27

پذیرفته است. در گام سوم با استفاده از روش‌های رگرسیون چندمرحله‌ای، فرم معادلاتی مدل‌های پیش‌بینی استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد که انحراف معیار خطای پیش‌بینی در حدود ۰/۶ و ۰/۸۶ برای دو مدل پیش‌بینی است. مقایسه مدل‌های پیشنهاد شده با سایر مدل‌های محلی و جهانی نشان می‌دهد که مدل‌های پیشنهاد شده دقت قابل‌قبولی در پیش‌بینی تغییرمکان نسبت به سایر مدل‌ها دارا می‌باشند. در ادامه برای بیان و درک کاربرد مدل‌های نیمه تجربی پیشنهاد شده، تغییرمکان لرزه‌ای برای پهنه‌ای از شهر تهران محاسبه شده است.

در شکل (۱)، مقایسه نتایج مدل پیش‌بینی مبتنی بر بلوک صلب-دوران در این تحقیق با سایر مدل‌ها نشان داده شده است.

شکل (۲) تغییرات تغییرمکان محاسبه شده در مقابل تغییرمکان پیش‌بینی شده مدل مبتنی بر روش وابسته-دوران را در طول‌های لغزش ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متر را در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد. همچنین انحراف معیار پیش‌بینی هر مدل در طول‌های لغزش در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که تغییرمکان‌های حاصل از مدل پیشنهادی این تحقیق، پراکندگی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها در طول‌های لغزش مختلف دارد. به عنوان مثال در طول لغزش ۱۰ متر، انحراف معیار این تحقیق برابر با ۰/۸۶ می‌باشد؛ در حالی که در مدل‌های رجبی و همکاران (۲۰۱۱)، تسای و چن (۲۰۱۶) و لشگری و همکاران (۲۰۱۸) انحراف معیار به ترتیب برابر با ۱/۵۹، ۱/۸۹ و ۱/۱۴ می‌باشد. این روند در سایر طول‌های لغزش نیز مشاهده می‌شود. در طول لغزش ۱۰۰۰ متر، انحراف معیار مدل‌های رجبی و همکاران (۲۰۱۱)، تسای و چن (۲۰۱۶) و لشگری و همکاران (۲۰۱۸) به ترتیب ۱/۷۷، ۱/۸۷ و ۱/۴ برابر انحراف معیار حاصل از این تحقیق می‌باشد. بنابراین مقایسه بین مدل‌های نشان می‌دهد که مدل ارائه شده در این تحقیق نیست به سایر مدل‌های جهانی و محلی، انحراف معیار کمتری را فراهم می‌کند.

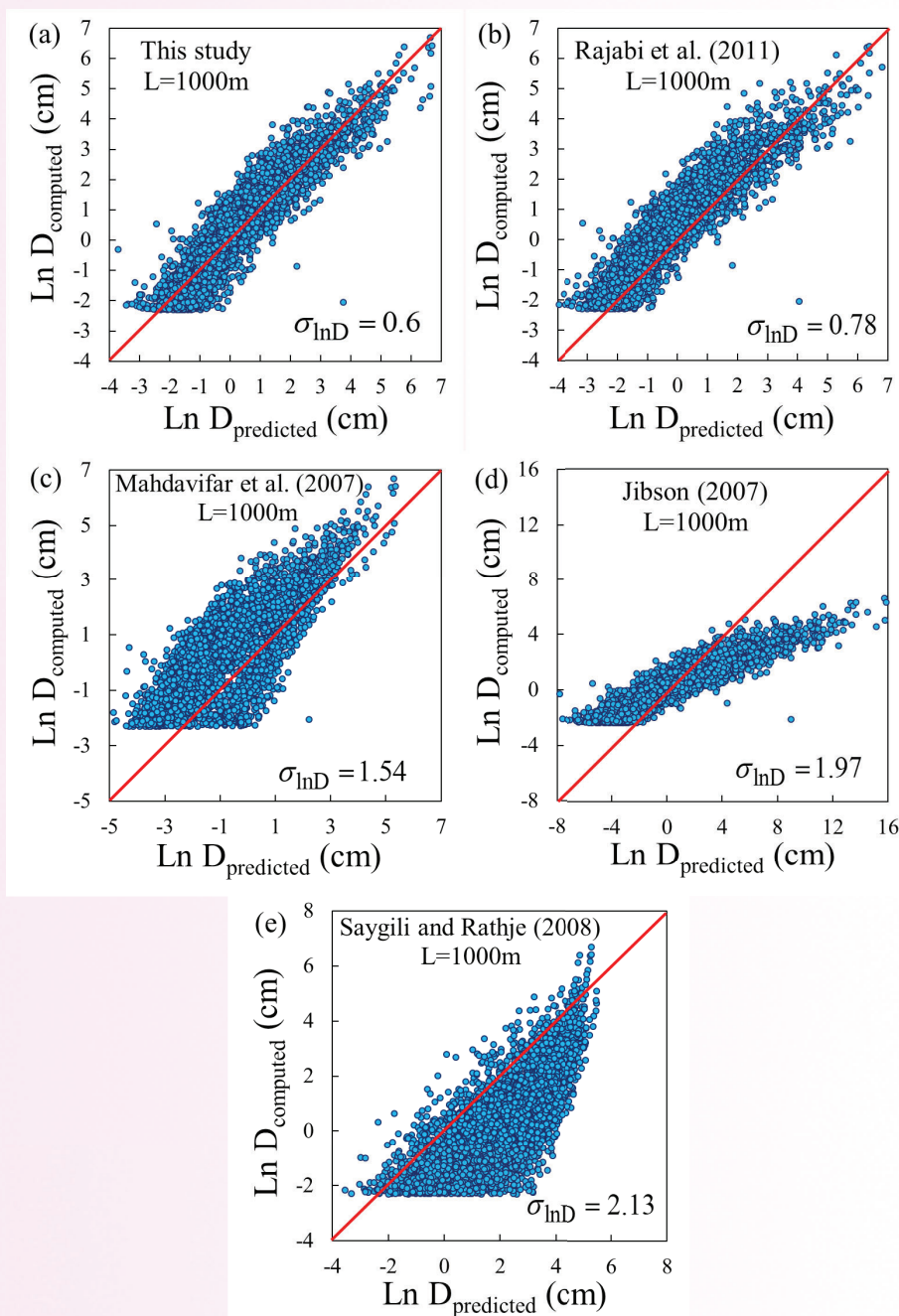
در جدول (۱)، تغییرمکان‌های محاسبه شده توسط دو مدل بلوک صلب-دوران و وابسته دوران برای یک ناحیه از منطقه ۲۲ تهران نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، تغییرمکان‌های حاصل از دو روش با یکدیگر متفاوت می‌باشد که این تفاوت علاوه بر نوع روش، به پارامترهای لرزه‌ای پیش‌بینی شده نیز بستگی دارد.

جدول (۱): پارامترهای لرزه‌ای در فاصله ۵۰ کیلومتر

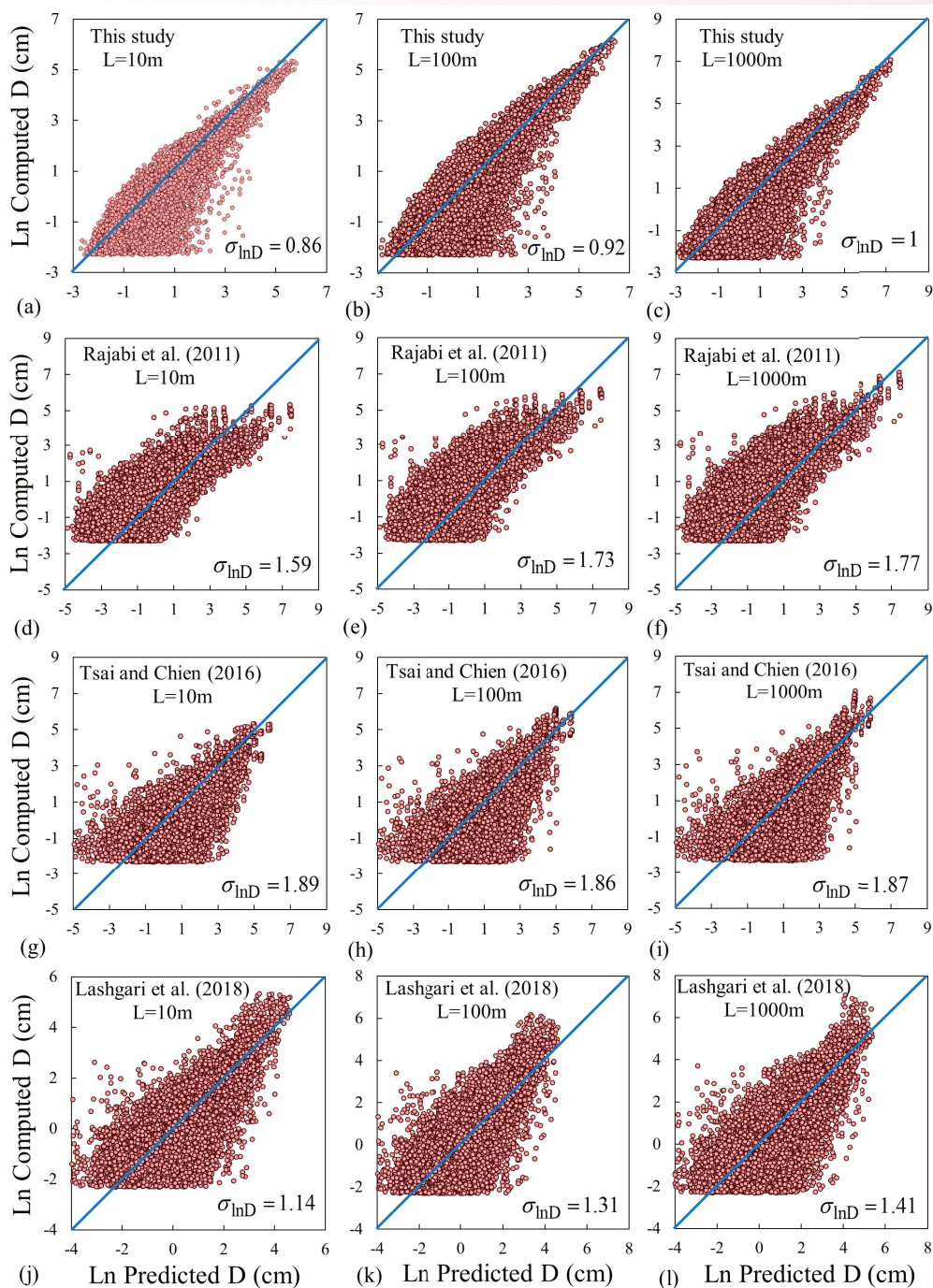
Model	Return period		
	72	475	2475
RBR (cm)	1.79	8.42	24.01
CSSR (cm)	0.43	1.28	2.27

واژه‌های کلیدی: پایداری لرزه‌ای شیب‌ها، تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای، شتاب‌نگاشت‌های ایران، روش‌های تحلیلی، مدل‌های نیمه-تجربی

Keywords: Seismic stability of slopes, Seismic sliding displacement, Iranian accelerograms, Simplified methods, Semi-empirical models



شکل (۱): مقایسه بین تغییر مکان‌های محاسبه شده با تغییر مکان‌های پیش‌بینی شده برای طول لغزش ۱۰۰۰ متر و مدل پیشنهاد شده توسط (a) این تحقیق، (b) رجبی و همکاران (۲۰۱۱)، (c) مهدوی‌فر و همکاران (۲۰۰۷)، (d) جیبسون (۲۰۰۷)، (e) سیگیلی و رازه (۲۰۰۸)



شکل (۲): مقایسه بین تغییرمکان‌های محاسبه شده با تغییرمکان‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های محلی و جهانی برای طول لغزش ۱۰۰۰ متر