

# مدل نیمه تحلیلی برای پیش بینی تغییر مکان لرزه‌ی شیب‌ها بر مبنای زلزله‌های ایران

علی لشگری (دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

یاسر جعفریان\* (دانشیار)

پژوهشکده‌ی مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

عبدالاحسن حداد (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۹ (ص. ۱۲۷-۱۳۶)  
دری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۱، ص. ۱۲۷-۱۳۶

فلات ایران، یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان است که به دلیل شرایط توپوگرافی ویژه، همواره در معرض زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله بوده است. در نوشتار حاضر، با استفاده از جمع‌آوری ۳۹۵۴ رکورد لرزه‌ی رخ داده در ایران و تحویل بلوک صلب اصلاح شده بر مبنای اثر دوران و با به‌کارگیری ضرایب گسیختگی و طول‌های لغزش مختلف، یک مدل نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار لرزه‌ی شیب‌های خاکی در فلات ایران پیشنهاد شده است. انحراف معیار خطای مدل در حد قابل قبول و در حدود ۰/۶ بوده است. مقایسه‌ی مدل پیشنهادی با سایر مدل‌ها نشان می‌دهد که انحراف معیار خطای مدل در حدود ۱/۲۵ و ۳/۳۳ برابر کمتر از مدل مشابه ارائه شده برای ایران و جهان است. به‌کارگیری مدل نیمه تحلیلی پیشنهادی می‌تواند کمک شایانی به شناسایی عملکرد لرزه‌ی شیب‌های موجود در کشور انجام دهد.

**واژگان کلیدی:** شیب خاکی، تغییر مکان ماندگار، اثر دوران، بلوک صلب اصلاح

شده، مدل نیمه تحلیلی، زلزله‌های ایران.

## ۱. مقدمه

فلات ایران یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان است که سالیانه زلزله‌های بسیاری در آن رخ می‌دهد. از سوی دیگر، شرایط توپوگرافی فلات ایران، خطر بروز زمین‌لغزش در طی زلزله را بسیار افزایش داده است. در طول سالیان گذشته و در طی زلزله‌های مختلف، خسارت‌های جانی، مالی و آسیب‌های بسیاری ناشی از زمین‌لغزش در کشور گزارش شده است. نمونه‌ی از خسارت‌های مذکور در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در شکل ۱ الف، نمایی از زمین‌لغزش فتلک<sup>۱</sup> نشان داده شده است. زمین‌لغزش فتلک در طی زلزله‌ی رودبار-منجیل (۱۳۶۹) با بزرگای گشتاوری ۷/۷ رخ داد که منجر به خسارت چند روستا و مرگ ۱۳۰ نفر شد.<sup>[۱]</sup> در شکل ۱ ب، خسارت ناشی از زمین‌لغزش مله کیود ناشی از زلزله‌ی سرپل ذهاب (۱۳۹۶) با بزرگای گشتاوری ۷/۳ نشان داده شده است.

روش‌های تحلیلی (شامل بلوک صلب، وابسته و غیروابسته) از جمله‌ی روش‌های پرکاربرد جهت بررسی عملکرد شیب‌های خاکی هستند.<sup>[۲]</sup> روش‌های ذکر شده به دلیل سادگی و دقت قابل قبول برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله استفاده می‌شوند. روش بلوک صلب اصلاح شده،<sup>[۳]</sup> در مقایسه با سایر روش‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۴/۳۰، پذیرش ۱۳۹۷/۵/۱۳.

DOI:10.24200/J30.2018.50518.2319

ali.lashgarii@semnan.ac.ir  
yjafarianm@iiees.ac.ir  
ahadad@semnan.ac.ir

تحلیلی به پارامترهای ورودی کمتری، شامل ضریب گسیختگی و طول لغزش نیاز دارد. همچنین مطالعات انجام شده بر روی روش بلوک صلب و مقایسه‌ی آن با داده‌های آزمایشگاهی و مطالعات موردی نشان داده است که روش بلوک صلب قادر به پیش‌بینی مناسب تغییر مکان است.<sup>[۴]</sup> به همین دلیل روش بلوک صلب، مبنای بسیاری از مدل‌های نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی تغییر مکان لرزه‌ی شیب‌ها می‌باشد.<sup>[۵-۸]</sup>

مدل‌های نیمه تحلیلی براساس روش‌ها و بررسی‌های آماری بر روی داده‌های تحلیلی حاصل می‌شوند.<sup>[۹]</sup> از این رو، پارامترهای ورودی نقش بسیار مؤثری را در جامعیت و کاربردی بودن مدل ایفا می‌کنند. در کنار پارامترهای ژئوتکنیکی و هندسی، یکی از پارامترهای مهم ورودی، پارامترهای لرزه‌ی هستند. به همین دلیل همواره پژوهشگران تلاش کرده‌اند که از رکوردهای محلی در هر منطقه برای دست‌یابی به مدل نیمه تحلیلی بهره گیرند.<sup>[۱۰]</sup> کشور ایران یکی از مناطق لرزه‌خیز جهان است، به طوری که بیش از ۱۰۰۰۰ رکورد لرزه‌ی توسط شبکه‌ی شتاب‌نگاری کشور از بدو تأسیس تاکنون توسط شبکه‌ی شتاب‌نگاری ثبت شده است.<sup>[۱۱]</sup> که نشان از لرزه‌ی خیزی بالای فلات ایران است. در کنار این موضوع، شرایط توپوگرافی کشور ایران پتانسیل وقوع زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله را در کشور افزایش داده است. با این حال، مطالعات بسیار اندکی در زمینه‌ی ارائه‌ی مدل‌های نیمه تحلیلی برای کشور صورت پذیرفته است.



الف) زمین لغزش فتلک؛



ب) زمین لغزش کله کبود.

شکل ۱. نمونه‌ی زمین لغزش‌های ناشی از زلزله در ایران. [۳۲]

(۲۰۰۸)، [۲۱] هسیه<sup>۶</sup> و لی (۲۰۱۱)، [۹] و جوسیانتیک<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۴)، [۱۱] اشاره کرد. اگرچه مدل‌های نیمه تحلیلی بر مبنای روش غیروابسته، [۲۳، ۲۲] و روش وابسته، [۲۴، ۲۵] پیشنهاد شده‌اند، ولی تعداد آن‌ها نسبت به مدل‌های نیمه تحلیلی بر مبنای روش بلوک صلب، اندک است.

مطالعات پیشین در سال ۲۰۱۱، [۹] نشان داده است که به دلیل تفاوت در خصوصیات لرزه‌ی رکوردهای محلی و جهانی، مدل‌های حاصل از رکوردهای محلی دقت مناسب‌تری نسبت به مدل‌های حاصل از رکوردهای جهانی دارند. در کشور ایران نیز تلاش‌هایی در زمینه‌ی ارائه‌ی مدل نیمه تحلیلی با استفاده از داده‌های لرزه‌ی ایران صورت گرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مدل نیمه تحلیلی ارائه شده توسط رجبی و همکاران (۲۰۱۱)، [۲۵] اشاره کرد که با استفاده از ۱۵۹۹ رکورد لرزه‌ی ثبت شده در ناحیه‌ی زاگرس و بر مبنای روش بلوک صلب ارائه شده است. بنابراین با توجه به ارائه‌ی روش‌های اصلاح شده در سال‌های اخیر و همچنین افزایش رکوردهای لرزه‌ی، نیاز به ارائه‌ی مدل‌های به روزتر و با جامعیت عملکردی بیشتر در کشور احساس می‌شود.

### ۳. تحلیل تغییر مکان ماندگار

در کنار روش‌های پیشرفته‌ی عددی، از روش‌های تحلیلی همچون: بلوک صلب نیومارک، وابسته و غیروابسته برای پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار لرزه‌ی شیب‌های خاکی استفاده می‌شود. در میان روش‌های اخیر، روش بلوک صلب به دلیل عدم پیچیدگی و پارامترهای ورودی کم، مورد استقبال بیشتر مهندسان قرار گرفته است. هر چند که روش بلوک صلب به دلیل فرضیات ساده‌کننده، ضعف‌هایی نیز دارد. از جمله‌ی محدودیت‌های ذکر شده می‌توان به اثر دوران توده‌ی لغزش اشاره کرد که این موضوع توسط استاماتاپولس (۱۹۹۶)، [۶] بازبینی و اصلاح شده و براساس پیشنهاد ایشان، رابطه‌ی ۱ برای اصلاح ضریب گسیختگی با در نظر گرفتن اثر دوران استفاده شده است.

$$k_{y,mod}(t) = k_y + \frac{1}{L} D(t) \quad (1)$$

که در آن،  $k_{y,mod}$  ضریب گسیختگی اصلاح شده در طی زمان لغزش،  $k_y$  ضریب گسیختگی اولیه،  $L$  طول لغزش،  $D$  تغییر مکان توده‌ی لغزش در طی زمان لغزش و  $t$  زمان لغزش هستند. رابطه‌ی ۱ با عنوان بخش اصلاحی اثر دوران در روابط روش بلوک صلب به کار برده می‌شود که به روش بلوک صلب اصلاح شده معروف است. در شکل ۲، فلوجارت کد نوشته شده بر مبنای روش بلوک صلب اصلاح شده و همچنین فرمولاسیون آن مشاهده می‌شود. برای مطالعه‌ی جزئیات بیشتر به نوشتار استاماتاپولس، [۶] رجوع شود.

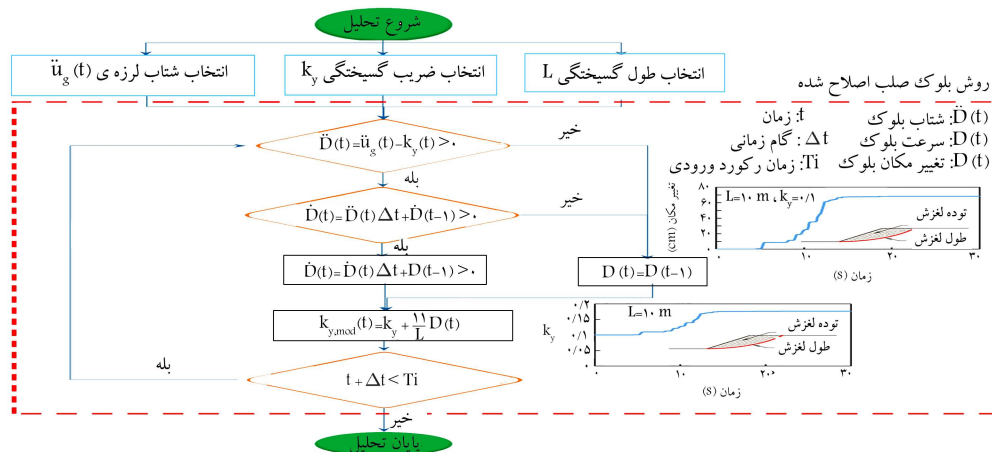
تحلیل بلوک صلب اصلاح شده در کنار پارامترهای لرزه‌ی، به پارامترهایی همچون ضریب گسیختگی و طول لغزش وابسته است. با توجه به این موضوع، استفاده از مجموعه‌ی وسیع و مناسبی از پارامترهای ضریب گسیختگی و طول لغزش می‌تواند شرایط مناسبی را برای دست‌یابی به یک رابطه‌ی نیمه تحلیلی فراهم کند. بر همین اساس، شش ضرایب گسیختگی مختلف شامل ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۷ برای انجام تحلیل‌ها انتخاب شدند. انتخاب ضریب گسیختگی به پارامترهای لرزه‌ی و شرایط منطقه وابسته است. با توجه به اینکه شیب‌های در آستانه‌ی لغزش در کشور زیاد هستند، در پژوهش حاضر سعی شده است که ضرایب گسیختگی کوچک نیز جهت تحلیل شیب‌های در آستانه‌ی لغزش در نظر گرفته شود. از دلایل دیگر انتخاب ضرایب گسیختگی، محدوده‌ی پارامترهای لرزه‌ی رکوردهای انتخاب شده است. به عنوان مثال، به دلیل کوچک بودن میانگین بیشینه‌ی

در نوشتار حاضر، در ابتدا داده‌های لرزه‌ی ثبت شده در کشور جمع‌آوری و سپس ۳۹۵۴ رکورد مناسب جهت انجام تحلیل‌ها انتخاب، پالایش و اصلاح شده‌اند. در ادامه، روش بلوک صلب اصلاح شده در برنامه‌ی Maple کدنویسی شده است. با توجه به انتخاب ضرایب گسیختگی و طول‌های لغزش مختلف، در حدود ۹۴۸۹۶ داده‌ی تغییر مکان حاصل شده است. براساس بررسی‌های انجام شده درخصوص ارتباط بین پارامترهای لرزه‌ی و تغییر مکان، مناسب‌ترین پارامتر لرزه‌ی انتخاب و با بررسی‌های آماری، مدلی نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی تغییر مکان لرزه‌ی شیب‌های خاکی در ایران پیشنهاد شده است. در انتها، نتایج حاصل از مدل مذکور با سایر مدل‌های نیمه تحلیلی ارائه شده برای ایران و جهان مقایسه شده است.

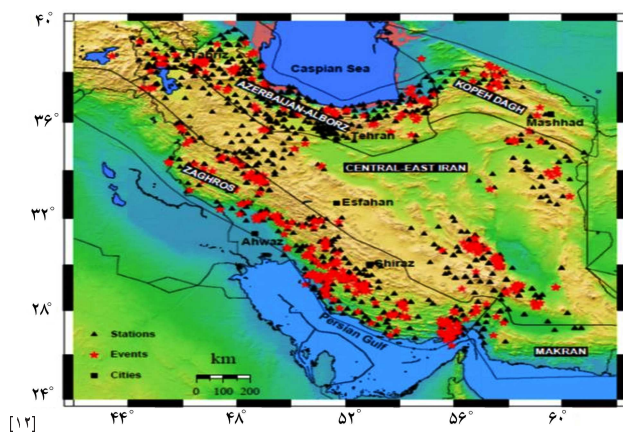
### ۲. پژوهش‌های پیشین

روش‌های تحلیلی که مبنای تولید مدل‌های نیمه تحلیلی هستند، شامل روش‌های بلوک صلب، وابسته و غیروابسته هستند. در ابتدا مدل بلوک صلب به عنوان روشی ساده برای پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار شیب‌های خاکی توسط نیومارک، [۱۳] ارائه شد. به دلیل فرضیات ساده شده‌ی موجود در روش بلوک صلب (مانند عدم لحاظ کردن پاسخ لرزه‌ی توده‌ی لغزش)، روش مذکور توسط پژوهشگران، توسعه پیدا کرده و روش‌های وابسته و غیروابسته ارائه شدند. [۱۴-۱۶] با وجود اصلاحات صورت گرفته در سه روش مذکور، همچنان نیاز به مرتفع کردن برخی محدودیت‌ها احساس می‌شد. یکی از محدودیت‌های اشاره شده، اثر طول لغزش گوه‌ی گسیختگی بر روی تغییر مکان لرزه‌ی است. به دلیل شکل دورانی مسیر لغزش، در طی حرکت رو به پایین توده‌ی لغزش، شتاب گسیختگی افزایش و تغییر مکان در طول‌های لغزش کوچک کاهش می‌یابد. [۱۷] با توجه به این موضوع مدل بلوک صلب، وابسته و غیروابسته به ترتیب توسط: استاماتاپولس<sup>۲</sup> (۱۹۹۶)، [۶] بازاریار و همکاران (۲۰۱۲)، [۱۷] و جعفریان و لشگری (۲۰۱۶)، [۱۸] اصلاح شد. در سال‌های اخیر، نیز اصلاحاتی در زمینه‌ی افزایش فشار آب حفره‌ی در هنگام زلزله و تأثیر آن در تغییر مکان لرزه‌ی شیب‌ها انجام شده است. [۱۸]

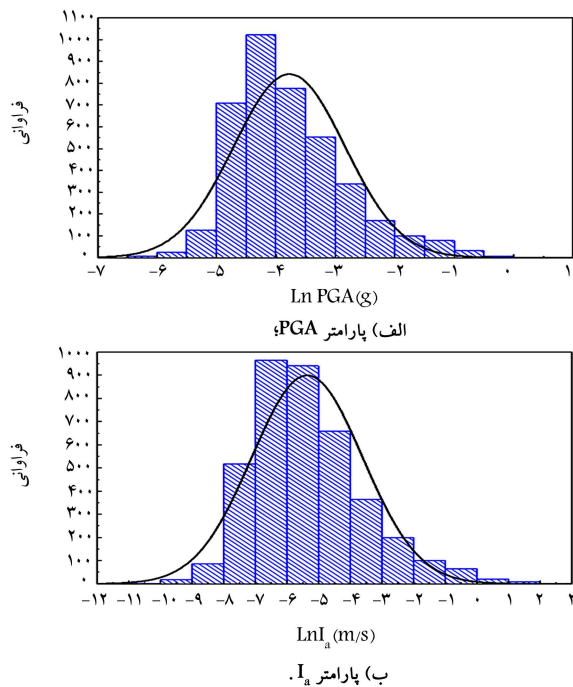
همان‌طور که بیان شد، مبنای مدل‌های نیمه تحلیلی، روش‌های تحلیلی هستند و براساس تحلیل‌های انجام شده توسط روش‌های تحلیلی می‌توان به مدل‌های نیمه تحلیلی با دقت مناسب جهت پیش‌بینی تغییر مکان ماندگار لرزه‌ی دست یافت. از جمله مدل‌های نیمه تحلیلی بر مبنای روش بلوک صلب می‌توان به مدل آمبرسیوزو منو<sup>۳</sup> (۱۹۸۸)، [۱۹] یگین<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۱)، [۲۰] جیبسون<sup>۵</sup> (۲۰۰۷)، [۸] سیگیلی و رازجه



شکل ۲. فلوچارت و فرمولاسیون کد نوشته شده در این مطالعه جهت محاسبه تغییر مکان ماندگار لرزه‌یی یک شیب خاکی بر مبنای روش بلوک صلب اصلاح شده.



شکل ۳. موقعیت ۴۶۱ مرکز زلزله‌ی مورد مطالعه به همراه نواحی تکتونیکی. [۱۲]



شکل ۴. فراوانی پارامترهای لرزه‌یی رکوردهای مورد استفاده.

شتاب‌ها، مقادیر ضریب گسیختگی کوچک نیز جهت انجام تحلیل‌ها انتخاب شده است. همچنین ۴ طول لغزش مختلف شامل ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ متر برای انجام تحلیل‌ها استفاده شده‌اند. شایان ذکر است که اثر طول لغزش از طول لغزش ۵۰۰ متر به بالا، تقریباً کاهش می‌یابد. [۱۱] برای محاسبه‌ی تغییرمکان‌های لرزه‌یی، روش بلوک صلب اصلاح شده در نرم‌افزار Maple کدنویسی شده است.

#### ۴. داده‌های لرزه‌یی

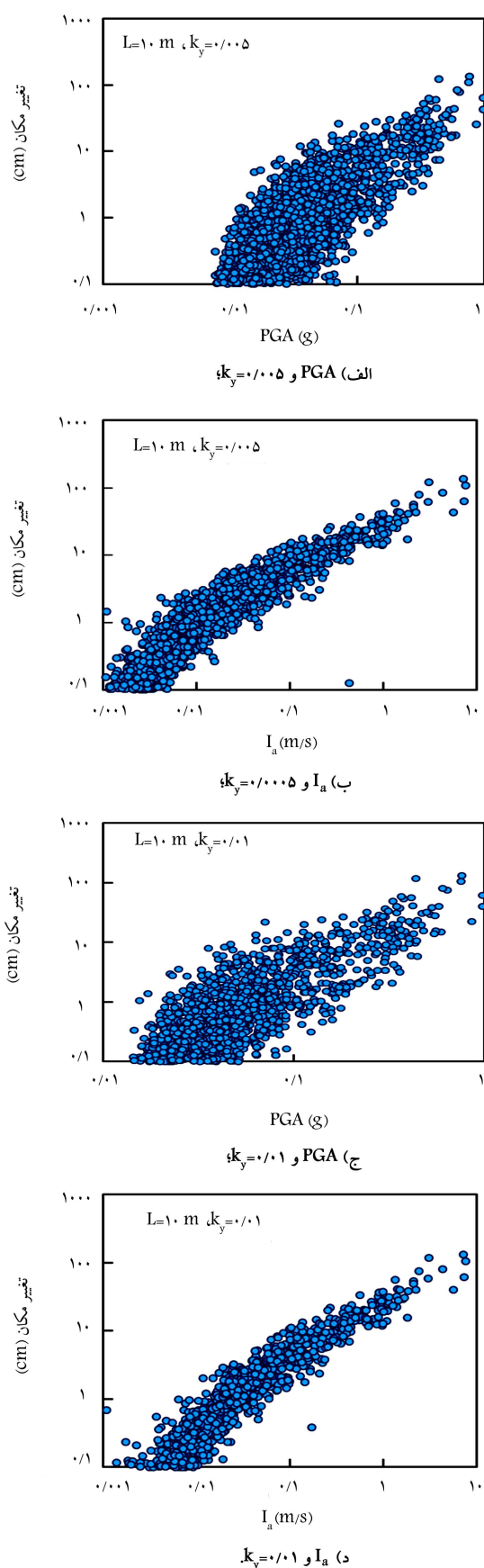
روش بلوک صلب، علاوه بر پارامترهای ژئوتکنیکی به پارامترهای لرزه‌یی نیز وابسته است. به همین دلیل فراهم کردن مجموعه‌یی از داده‌های لرزه‌یی مناسب می‌تواند جامعیت مدل منتج شده از تحلیل‌ها را افزایش دهد. همان‌طور که در بخش پژوهش‌های پیشین اشاره شد، در ایران مطالعاتی در زمینه‌ی پیش‌بینی تغییرمکان ماندگار لرزه‌یی شیب‌ها انجام شده است که با توجه به لرزه‌خیز بودن فلات ایران، امری ضروری به نظر می‌رسد.

در پژوهش حاضر، ۳۹۵۴ رکورد لرزه‌یی (شامل مؤلفه‌ی شمالی - جنوبی و شرقی - غربی) ناشی از ۷۳۸ زلزله انتخاب، پالایش و برای انجام تحلیل‌ها استفاده شده‌اند. در شکل ۳، موقعیت ۴۶۱ مرکز زلزله‌ی مورد استفاده به همراه نواحی تکتونیکی مشاهده می‌شود.

در میان پارامترهای لرزه‌یی، عمده‌ی پارامترهای مؤثر و پرکاربرد در بحث پیش‌بینی تغییرمکان ماندگار لرزه‌یی، شیب‌های خاکی پارامترهای <math>PGA</math> و <math>I\_a</math> هستند. پارامتر <math>PGA</math> معرف بیشینه‌ی شتاب زمین است. متداول‌ترین پارامتری که در طراحی‌های مهندسی استفاده می‌شود، بیشینه‌ی شتاب زمین است. بیشینه‌ی شتاب زمین برای یک مؤلفه‌ی حرکت، بزرگ‌ترین مقدار (قدرمطلق) شتاب به‌دست آمده از مؤلفه‌ی شتاب‌نگاشت است. پارامتر <math>I\_a</math> معرف شدت اریاس است. شدت اریاس پارامتر منفردی است که به نوعی هم آثار دامنه و هم محتوای بسامدی یک حرکت نیرومند زلزله را در بر می‌گیرد و براساس رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود

$$I_a = \frac{\pi}{4} \int [\ddot{u}_g(t)]^2 dt \quad (2)$$

که در آن،  $t$  زمان زلزله و  $\ddot{u}_g(t)$  شتاب زلزله است. شدت اریاس با استفاده از نرم‌افزار Seismosignal پس از اصلاح رکوردها محاسبه شده است. فراوانی دو پارامتر



شکل ۵. تغییرات تغییرمکان در طول لغزش ۱۰ متر در مقابل تغییرات.

$I_a$  و  $PGA$  برای رکوردهای مورد استفاده در شکل ۴ مشاهده می‌شود که مطابق آن، بیشتر رکوردها، بیشینه‌ی شتابی در حدود  $0.6g$  و شدت اریاس در حدود  $0.5 m/s$  دارند. یکی از دلایلی که مقدار ضرایب گسیختگی در محدوده‌های کوچک و پایین انتخاب شده است، نیز همین موضوع است.

## ۵. تحلیل رگرسیون تغییرمکان

تغییرمکان‌های لرزه‌ی حاصل از روش‌های تحلیلی، مانند: روش بلوک صلب، در کنار پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی به پارامترهای لرزه‌ی نیز وابسته است. انتخاب یک پارامتر لرزه‌ی مناسب می‌تواند دقت رابطه‌ی نیمه‌تحلیلی حاصل از داده‌های محاسبه شده را افزایش دهد. پارامترهای لرزه‌ی در کنار پیش‌بینی‌پذیری باید دقت کافی را در پیش‌بینی تغییرمکان لرزه‌ی فراهم کنند. در بین پارامترهای لرزه‌ی، بیشترین پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های نیمه‌تحلیلی (براساس روش بلوک صلب) پارامترهای  $PGA$  و  $I_a$  هستند که می‌توان به مدل‌های جیبسون (۲۰۰۷)، [۸]، هسیه و لی (۲۰۱۱)، [۹] و رجبی و همکاران (۲۰۱۱)، [۲۵] اشاره کرد. از سوی دیگر، دو پارامتر  $PGA$  و  $I_a$  نسبت به سایر پارامترهای لرزه‌ی، قابلیت پیش‌بینی بالاتری دارند. به عبارت دیگر، روابط کاهندگی برای پیش‌بینی آن‌ها بیشتر از سایر پارامترها ارائه شده است. از جمله روابط کاهندگی ارائه شده می‌توان به روابط کاهندگی سقراط و ضیایی فر (۲۰۱۷)، [۲۶] اشاره کرد.

در شکل ۵، تغییرمکان‌های محاسبه شده بر حسب پارامترهای  $PGA$  و  $I_a$  برای ضرایب گسیختگی  $0.005$  و  $0.01$  و طول لغزش ۱۰ متر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، همبستگی بین تغییرمکان و پارامتر  $I_a$  بیشتر از همبستگی بین تغییرمکان و پارامتر  $PGA$  است. همچنین مقایسه بین شکل‌های ۵الف و ۵د نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها بین تغییرمکان و پارامتر  $PGA$  نسبت به پارامتر  $I_a$  بیشتر است و این پراکندگی با تغییر ضریب گسیختگی از  $0.005$  به  $0.01$  تغییر محسوسی نمی‌کند. بنابراین استفاده از پارامتر  $I_a$  در مدل پیش‌بینی تغییرمکان می‌تواند دقت بالاتری نسبت به پارامتر  $PGA$  به همراه داشته باشد.

برای پیش‌بینی تغییرمکان ماندگار لرزه‌ی شیب‌های خاکی، فرم‌های متنوعی توسط پژوهشگران ارائه شده است که هر یک از آن‌ها می‌توانند دقت و ضرایب همبستگی مختلفی را فراهم کنند. در مطالعه‌ی حاضر، فرم‌های معادلاتی پرکاربرد و ساده بررسی شده است. فرم پیشنهادی در رابطه‌ی ۳، دقت قابل قبولی نسبت به سایر فرم‌های معادلاتی دارد. با توجه به اینکه (مطابق شکل ۵) همبستگی مناسبی بین تغییرمکان و پارامتر  $I_a$  وجود دارد، رابطه‌ی ۳ برای پیش‌بینی تغییرمکان براساس پارامتر  $I_a$  پیشنهاد شده است

$$D = a_1 I_a^{a_2} \pm \sigma_{\ln D} \quad (3)$$

که در آن،  $D$  مقدار تغییرمکان بر حسب سانتی‌متر،  $a_1$  و  $a_2$  ضرایب ثابت هستند. همچنین  $\sigma_{\ln D}$  انحراف معیار خطای مدل و برابر با  $0.6$  است.

جهت بررسی ضرایب ثابت، شکل ۶ ترسیم شده است. در شکل‌های ۶ (الف) الی (د)، ضرایب ثابت براساس معادله‌ی ۳ و داده‌های محاسبه شده ارائه شده‌اند و مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی رابطه‌ی ۳ برای ضرایب گسیختگی مختلف، نسبتاً بالا و در حدود ۸۷٪ بوده است. ضریب همبستگی بالا نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در رابطه‌ی ۳، دقت قابل قبولی در تخمین تغییرمکان دارد.

مقایسه‌ی ضرایب ثابت ( $a_1$ ،  $a_2$ ) محاسبه شده برای ضرایب گسیختگی مختلف و طول لغزش ثابت که در شکل ۶ (الف الی د) نشان داده شده است، مؤید این

موضوع است که با تغییر ضریب گسیختگی، ضرایب ثابت نیز با روند یکسانی تغییر می‌کنند. به طور مثال، با تغییر ضریب گسیختگی از  $0/05$ ،  $0/1$ ،  $0/5$  و  $0/7$ ، ضریب  $a_1$  به ترتیب مقادیر  $45/83$ ،  $35/27$ ،  $8/21$  و  $5/45$  را اختیار کرده است. همچنین این مقادیر برای ضریب  $a_2$  به ترتیب برابر با  $0/89$ ،  $1/01$ ،  $1/29$  و  $1/38$  بوده است. بررسی روند تغییرات ضرایب  $a_1$  و  $a_2$ ، نشان‌دهنده‌ی آن است که روند مشخصی بین تغییرات ضریب گسیختگی و تغییرات ضرایب  $a_1$  و  $a_2$  وجود دارد که با بررسی دقیق‌تر می‌توان روند اخیر را پیش‌بینی کرد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ضرایب ثابت، وابسته به تغییرات ضریب گسیختگی (در یک طول ثابت) هستند که از روند مشخصی پیروی می‌کنند و برای بررسی آن، شکل ۷ ترسیم شده است. شکل ۷، تغییرات ضرایب  $a_1$  و  $a_2$  را در مقابل تغییرات ضریب گسیختگی در طول‌های لغزش  $10$  و  $100$  متر نشان می‌دهد. با بررسی فرم معادلات مختلف، روابط ۴ و ۵، به ترتیب برای تخمین ضرایب  $a_1$  و  $a_2$  به دست آمده‌اند

$$a_1 = b_1 k_y^{-b_2} \quad (4)$$

$$a_2 = b_2 k_y^{b_4} \quad (5)$$

که در آن‌ها، ضرایب  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $b_3$ ،  $b_4$  مقادیر ثابت هستند. برازش معادلات ۴ و ۵، بر روی داده‌های ترسیم شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که ضریب همبستگی متوسط معادله‌ی ۴ در حدود  $95\%$  و برای معادله‌ی ۵ در حدود  $87\%$  است. ضرایب همبستگی بالا، نشان‌دهنده‌ی دقت نسبتاً مناسب معادله‌های ۴ و ۵ برای پیش‌بینی ضرایب  $a_1$  و  $a_2$  است. هر چند که فرم معادلی پیچیده‌تر با ضریب همبستگی بالاتر نیز می‌توان پیشنهاد کرد؛ ولی هدف، ارائه‌ی رابطه‌یی با دقت قابل قبول و در عین حال ساده است که کاربرد مهندسی داشته باشد. مقایسه‌ی بین شکل‌های ۷ الف و ۷ ب نشان می‌دهد که با تغییر طول از  $10$  به  $100$  متر، ضریب  $b_1$  به ترتیب مقادیر  $0/24$  و  $0/16$  و ضریب  $b_2$  به ترتیب مقادیر  $1/06$  و  $1/26$  را اختیار کرده‌اند. همچنین مطابق شکل‌های ۷ ج و ۷ د، با تغییر طول از  $10$  به  $100$ ، مقادیر ضریب  $b_3$  به ترتیب برابر با  $1/8$  و  $1/73$  و مقادیر ضریب  $b_4$  به ترتیب برابر با  $0/12$  و  $0/09$  حاصل شده است. روند تغییرات ضرایب  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $b_3$  و  $b_4$  نشان می‌دهد که تغییرات ضرایب مذکور، یک روند مشخص با تغییرات طول لغزش دارد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تغییرات ضرایب  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $b_3$  و  $b_4$  وابسته به تغییرات طول لغزش است. برای بررسی این موضوع، شکل ۸ ترسیم شده است. در شکل ۸، تغییرات ضرایب  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $b_3$  و  $b_4$  در مقابل تغییرات طول لغزش مشاهده می‌شود که مطابق آن، فرم مشخصی بین داده‌ها وجود دارد. با برازش فرم معادلاتی از بین داده‌ها، معادلات ۶ الی ۹ برای تخمین ضرایب  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $b_3$  و  $b_4$  حاصل شده است.

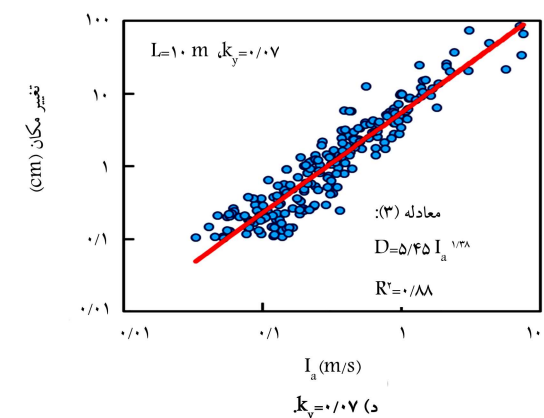
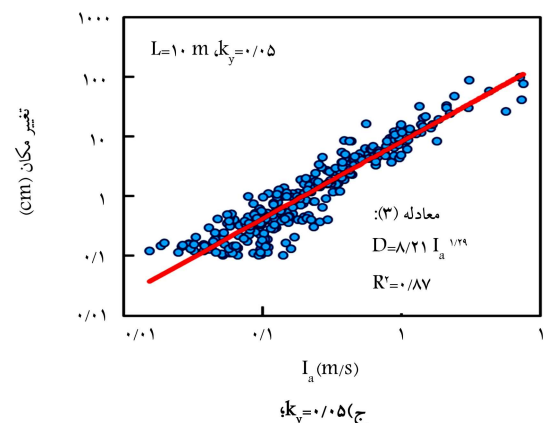
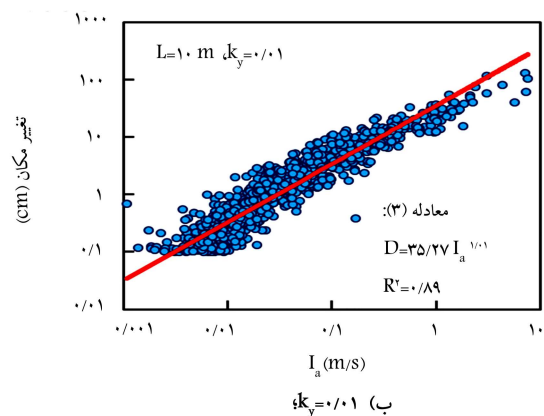
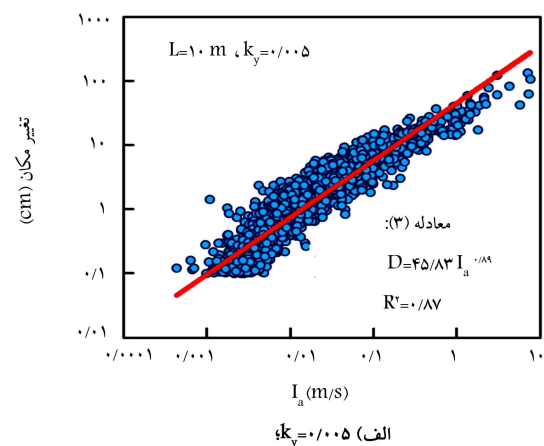
$$b_1 = 0/32 L^{-0/12} \quad (6)$$

$$b_2 = 0/93 L^{-0/06} \quad (7)$$

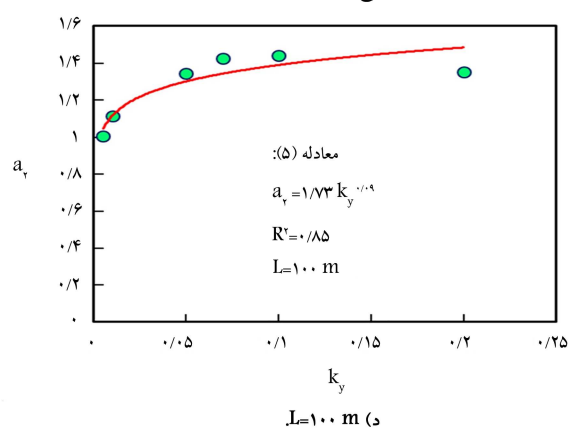
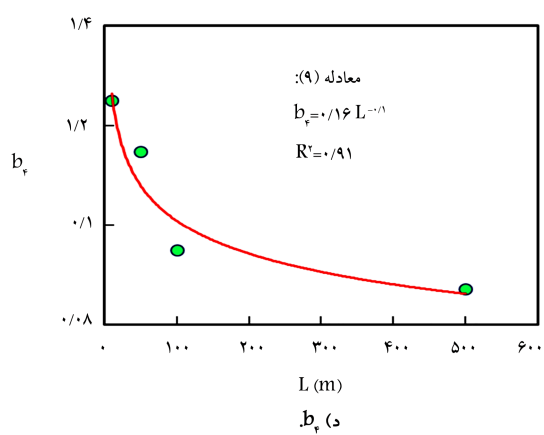
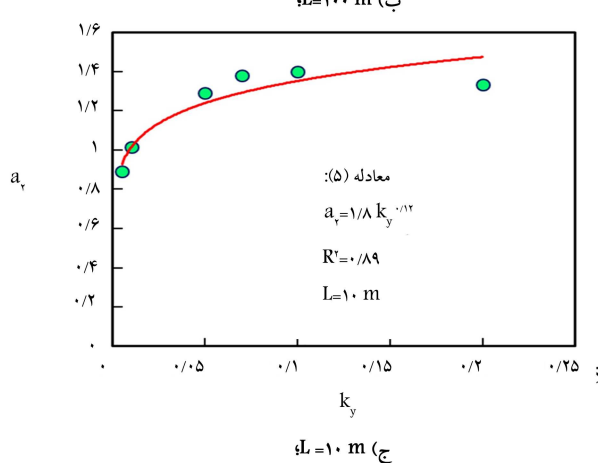
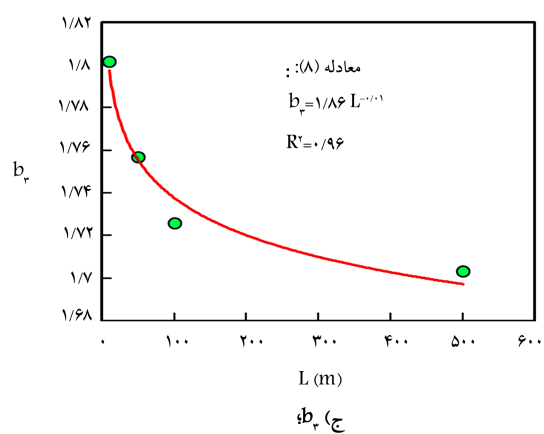
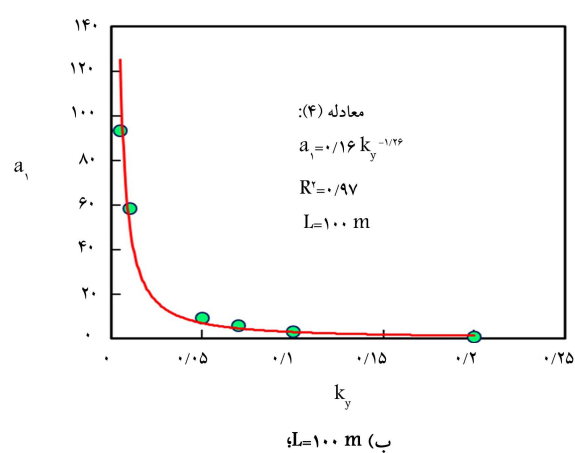
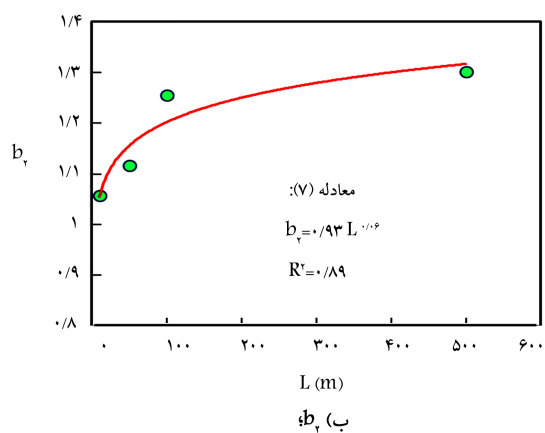
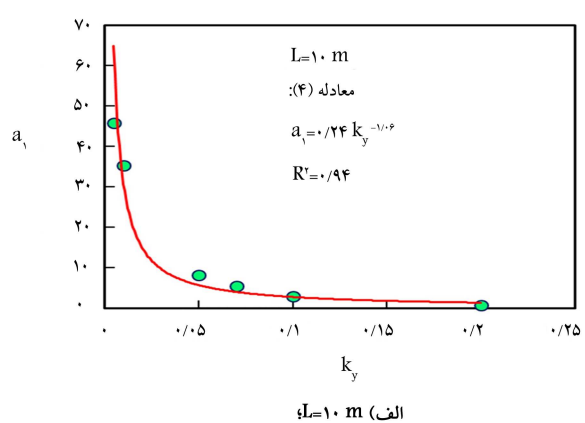
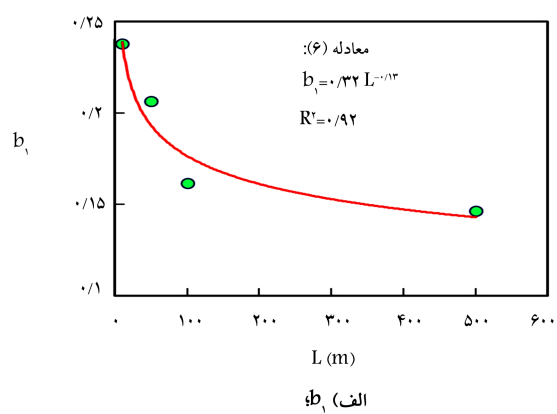
$$b_3 = 1/86 L^{-0/01} \quad (8)$$

$$b_4 = 0/16 L^{-0/01} \quad (9)$$

همان‌طور که در شکل‌های (۸ الف الی د) مشاهده می‌شود، ضرایب همبستگی معادله‌ی برازش شده تقریباً بیش از  $90\%$  است که نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب معادله‌ی برازش شده برای تخمین تغییرات ضرایب  $b_1$ ،  $b_2$ ،  $b_3$  و  $b_4$  است. یکی از معیارهایی که برای بررسی روابط نیمه‌تحلیلی استفاده می‌شود، معیار



شکل ۶. تغییرات تغییرمکان در طول لغزش  $10$  متر در مقابل تغییرات  $I_a$



شکل ۸. تغییرات ضرایب ثابت معادله‌های ۶ الی ۹ در مقابل تغییرات طول برای ضریب.

شکل ۷. مقایسه‌ی تغییرات ضریب  $a_1$  و  $a_2$ .



رگرسیون نهایی جهت تخمین تغییرمکان به صورت معادله ی (۱۰ الف) است.

$$D = a_1 I_a^{a_2} \pm \sigma_{\ln D} \quad (10 \text{ الف})$$

که در آن،  $a_1$  و  $a_2$  از رابطه ی (۱۰ ب) به دست می آیند

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1 k_y^{-b_2} \\ a_2 &= b_3 k_y^{b_4} \end{aligned} \quad (10 \text{ ب})$$

و در آن، ضرایب  $b_1, b_2, b_3$  و  $b_4$  مطابق رابطه ی (۱۰ ج) به دست آمده اند

$$\begin{aligned} b_1 &= 0.32 L^{-0.13} \\ b_2 &= 0.93 L^{0.06} \\ b_3 &= 1.86 L^{-0.01}, \\ b_4 &= 0.16 L^{-0.1} \end{aligned} \quad (10 \text{ ج})$$

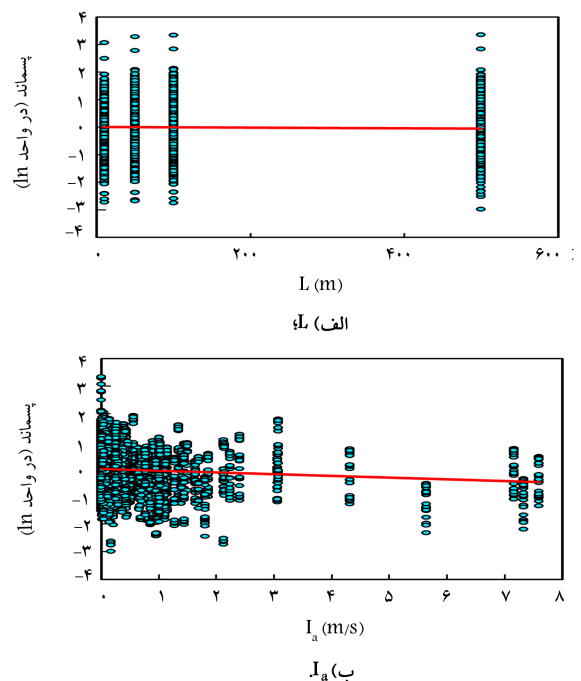
## ۶. بحث و مقایسه

یکی از روش های اعتبارسنجی مدل های نیمه تحلیلی، مقایسه با سایر مدل های نیمه تحلیلی است. برای مقایسه و اعتبارسنجی، مدل نیمه تحلیلی رجیبی و همکاران (۲۰۱۱)، [۲۵] که براساس رکوردهای لرزه یی ایران و روش بلوک صلب بوده است، استفاده شده است. تغییرمکان های محاسبه شده در مقابل تغییرمکان های پیش بینی شده توسط مدل ارائه شده در پژوهش حاضر (رابطه ی (۱۰) و مدل رجیبی و همکاران، [۲۵] و نیز تغییرمکان های محاسبه شده برای طول های لغزش ۱۰ و ۵۰۰ متر در شکل ۱۱ مشاهده می شود. مقایسه ی بین شکل های ۱۱ ب و ۱۱ د نشان می دهد که تغییرمکان پیش بینی شده توسط مدل رجیبی و همکاران، [۲۵] برای طول های لغزش ۱۰ و ۵۰۰ متر ثابت است. به عبارت دیگر، اثر دوران در مدل رجیبی و همکاران، [۲۵] در نظر گرفته نشده است. همچنین مقایسه ی شکل های ۱۱ الف و ۱۱ ب نشان می دهد که محدوده ی داده های حاصل از پژوهش حاضر حول نیمساز شکل گرفته است؛ در صورتی که داده های حاصل از مدل رجیبی و همکاران، [۲۵] با انحراف بیشتری نسبت به داده های پژوهش حاضر شکل گرفته اند. هر چند که با افزایش طول لغزش، انحراف ذکر شده از نیمساز، کاهش یافته است. انحراف معیار حاصل از تغییرمکان پیش بینی شده توسط مدل پیشنهادی پژوهش حاضر و مدل رجیبی و همکاران، [۲۵] در شکل ۱۱ مشاهده می شود. مقایسه ی شکل های ۱۱ الف (الف الی د) نشان می دهد که انحراف معیار خطای ( $\sigma_{\ln D}$ ) مدل پژوهش حاضر در حدود ۱/۲۵ برابر کمتر از انحراف معیار خطای مدل رجیبی و همکاران، [۲۵] برای طول لغزش ۱۰ متر است. این نسبت از اختلاف در طول لغزش ۵۰۰ متر نیز مشاهده می شود. بنابراین مدل پیشنهادی پژوهش حاضر قادر خواهد بود که تغییرمکان لرزه یی شیب ها را با خطای نسبتاً کم در مقایسه با سایر مدل های ارائه شده برای فلات ایران پیش بینی کند. همچنین برخلاف مدل های ارائه شده برای فلات ایران، مانند مدل رجیبی و همکاران، [۲۵] در مدل حاضر اثر تغییرات طول لغزش لحاظ شده است.

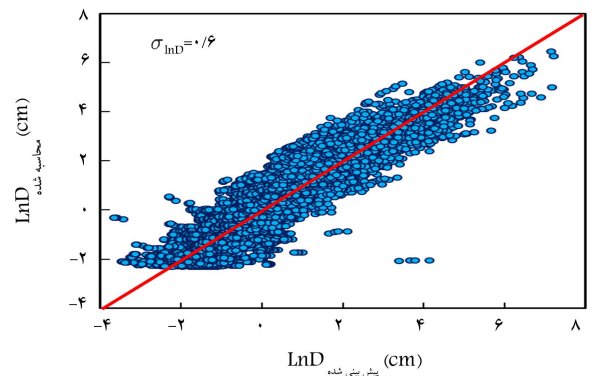
در شکل ۱۲، تغییرمکان های محاسبه شده بر حسب تغییرمکان های پیش بینی شده توسط مدل جیبسون (۲۰۰۷)، [۸] نشان داده شده است. مدل پیشنهادی جیبسون، [۸] بر مبنای روش بلوک صلب و براساس رکوردهای لرزه یی جهانی حاصل شده است. شکل ۱۲ نشان می دهد که در طول های لغزش ۱۰ و ۵۰۰ متر، انحراف معیار خطای مدل به طور متوسط در حدود ۲ است. این انحراف معیار در مقایسه با

کفایت است. این معیار به کمک پسماندها تعیین می شود. پسماندهای مدل نیمه تحلیلی پیشنهادی (معادله ی ۱) در شکل ۹ نشان داده شده است. لگاریتم پسماندها در مقابل پارامترهای  $I_a$  و  $L$  در شکل ۹ نشان می دهد که تمرکز پسماندها حول محور افقی است، به گونه یی که اختلاف کمی بین آن ها و محور افقی وجود دارد. این موضوع نشان می دهد که رابطه ی نیمه تحلیلی پیشنهادی دقت و کفایت قابل قبولی در پیش بینی تغییرمکان لرزه یی شیب ها دارد. تغییرمکان های محاسبه شده و تغییرمکان های پیش بینی شده (براساس معادله ی ۳) در شکل ۱۰ مشاهده می شوند که مطابق آن، محدوده ی داده ها حول نیمساز شکل گرفته اند و داده ها پراکندگی قابل قبولی دارند. همچنین، انحراف معیار خطای مدل پیشنهادی ( $\sigma_{\ln D}$ ) در حدود ۰/۶ است.

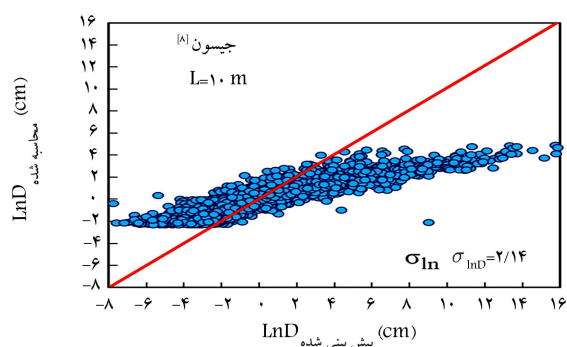
همان طور که بیان شد، با توجه به اینکه تغییرمکان به پارامترهای لرزه یی، ژئوتکنیکی، و هندسی وابسته است، می توان با استفاده از روش های آماری و به صورت مرحله به مرحله، تغییرمکان ماندگار لرزه یی شیب های خاکی را پیشنهاد کرد. به طور خلاصه، مدل



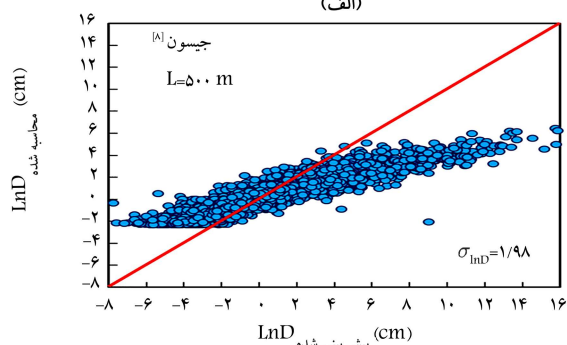
شکل ۹. تغییرات پسماندهای حاصل از مدل نیمه تحلیلی پیشنهادی در مقابل تغییرات.



شکل ۱۰. مقایسه ی داده های محاسبه شده و پیش بینی شده.



(الف)



(ب)

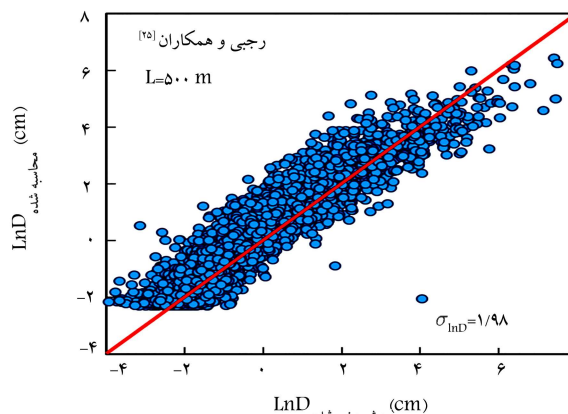
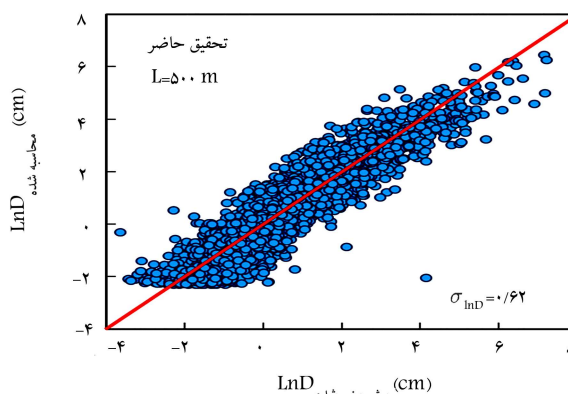
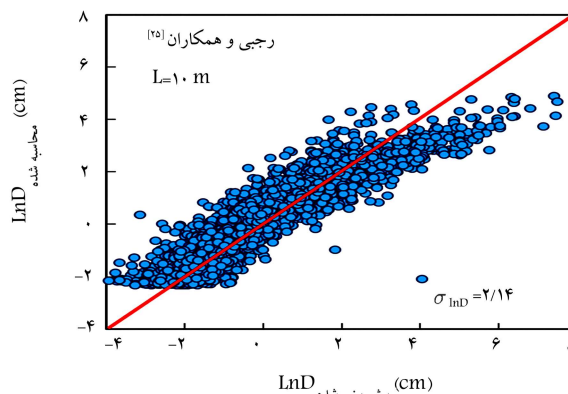
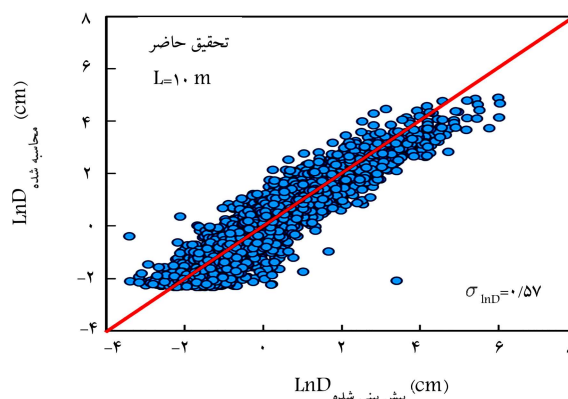
شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با نتایج مدل جیبسون (۲۰۰۷)<sup>[۸]</sup> برای طول‌های مختلف لغزش.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر، که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، مقداری بزرگ‌تری است. به عبارت دیگر، خطای مدل جیبسون<sup>[۸]</sup> در مقایسه با مدل ارائه شده در پژوهش حاضر، در حدود ۳/۳۳ برابر بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های جهانی، از جمله مدل جیبسون<sup>[۸]</sup> برای پیش‌بینی تغییر مکان لرزه‌یی شیب‌های خاکی در فلات ایران، می‌تواند نتایجی با دقت پایین به همراه داشته باشد. شایان ذکر است مدل پیشنهادی بر مبنای روش بلوک صلب اصلاح شده است. براساس فرضیات روش بلوک صلب، پاسخ توده‌ی لغزش در محاسبه‌ی تغییر مکان لحاظ نمی‌شود. بنابراین از جمله محدودیت‌های مدل حاضر، عدم لحاظ پاسخ توده‌ی لغزش است.

## ۷. نتیجه‌گیری

روش‌های نیمه تحلیلی مختلفی براساس روش‌های تحلیلی (مانند روش بلوک صلب اصلاح شده) برای پیش‌بینی تغییر مکان‌های لرزه‌یی شیب‌ها پیشنهاد شده‌اند. مدل‌های نیمه تحلیلی به دلیل تحلیل‌های آماری به پارامترهای ورودی همچون پارامترهای لرزه‌یی وابسته هستند. کشور ایران همواره در معرض زلزله است، به طوری که تاکنون بیش از ۱۰۰۰۰ رکورد لرزه‌یی از بدو تأسیس شبکه‌ی شتاب‌نگاری کشور ثبت و خسارت‌های متعددی در زمینه‌ی مسیرهای ارتباطی گزارش شده است. با توجه به حجم گسترده‌ی وقوع زلزله در کشور، مدل‌های نیمه تحلیلی بسیار اندکی در این زمینه ارائه شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از روش بلوک صلب اصلاح شده و به‌کارگیری رکوردهای لرزه‌یی ایران برای ضرایب گسیختگی و طول‌های لغزش مختلف، تغییر مکان لرزه‌یی محاسبه شده است. بررسی همبستگی بین تغییر مکان لرزه‌یی محاسبه شده



شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج مدل حاضر با نتایج مدل رجیبی و همکاران<sup>[۲۵]</sup> برای طول‌های مختلف لغزش.



طول لغزش حاصل شده که ضریب همبستگی بیش از ۹۰٪ داشتند. بررسی پسماندها نیز نشان داد که تمرکز پسماندها تحت تأثیر تغییرات پارامترها نیست و تقریباً حول مقدار صفر شکل گرفته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل نیمه تحلیلی پیشنهادی کفایت قابل قبولی را در پیش‌بینی تغییرمکان لرزه‌ی شیب‌ها دارد. مقایسه‌ی مدل پیشنهادی با سایر مدل‌های نیمه تحلیلی ارائه شده برای ایران و جهان نشان داد که مدل مذکور می‌تواند تغییرمکان لرزه‌ی را با انحراف معیار خطای کم پیش‌بینی کند. انحراف معیار خطای مدل پیشنهادی در حدود ۱/۲۵ و ۳/۳۳ برابر کمتر از مدل مشابه ارائه شده برای ایران و جهان است.

با پارامترهای لرزه‌ی متداول نشان داد که تغییرمکان لرزه‌ی، همبستگی بالاتری با پارامتر  $I_a$  نسبت به پارامتر  $PGA$  دارد. با توجه به همبستگی مناسب تغییرمکان لرزه‌ی و  $I_a$ ، مدلی جهت پیش‌بینی تغییرمکان ماندگار لرزه‌ی شیب‌های خاکی با ضریب همبستگی بالای ۸۵٪ پیشنهاد شد.

با توجه به وجود ضرایب ثابت در مدل پیشنهادی، بررسی‌ها نشان داد که ضرایب ثابت به پارامترهایی همچون ضریب گسیختگی و طول لغزش وابسته هستند. بر همین اساس و بر مبنای تحلیل‌های آماری در شرایط مختلف ضریب گسیختگی و طول لغزش، روابطی برای پیش‌بینی ضرایب ثابت بر مبنای متغیرهای ضریب گسیختگی و

## پانویس‌ها

1. Fattalak
2. Stamatopoulos
3. Ambraseys & Menu
4. Yegian
5. Jibson
6. Hsieh
7. Chousianitis

## منابع (References)

1. MahdaviFar, M.R. "Analytical evaluation and design of the system (GIS) for seismic landslides hazard management in Iran", PhD Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (In Persian) (2006).
2. Calvi, G.M. and Pinho, R. "LESSLOSS: A european integrated project on risk mitigation for earthquakes and landslides", University of Pavia, Structural Mechanics Department (2004).
3. Preliminary Earthquake Report of November 16, 2018 SarPlo Zahab (V.04), International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (2018).
4. Jafarian, Y. and Lashgari, A. "Recent developments in evaluation of earthquake-induced permanent displacement of earth slopes", *Research Bulletin International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, **17**(2-1), pp. 25-36 (2014).
5. Jafarian, Y. and Lashgari, A. "Cspdosswwyiar", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(1.2), pp. 79-89 (2016).
6. Stamatopoulos, C. "Sliding system predicting large permanent co-seismic movements of slopes", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **25**(10), pp. 1075-1093 (1996).
7. Wartman, J., Bray, J.D. and Seed, R.B. "Inclined plane studies of the Newmark sliding block procedure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**(8), pp. 673-684 (2003).
8. Jibson, R.W. "Regression models for estimating co-seismic landslide displacement", *Engineering Geology*, **91**(2), pp. 209-218 (2007).
9. Hsieh, S.-Y. and Lee, C.-T. "Empirical estimation of the newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration", *Engineering Geology*, **122**(1), pp. 34-42 (2011).
10. Jafarian, Y. and Lashgari, A. "Simplified procedure for coupled seismic sliding movement of slopes using displacement-based critical acceleration", *International Journal of Geomechanics*, **16**(4), 04015101 (2016).
11. Chousianitis, K., Del Gaudio, V., Kalogeras, I. and et al. "Predictive model of arias intensity and newmark displacement for regional scale evaluation of earthquake-induced landslide hazard in Greece", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **65**, pp. 11-29 (2014).
12. Zafarani, H. and Soghrat, M.R. "A selected dataset of the Iranian strong motion records", *Natural Hazards*, **86**(3), pp. 1307-1332 (2017).
13. Newmark, N.M. "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, **15**(2), pp. 139-160 (1965).
14. Makdisi, F.I. and Seed, H.B. "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations", Proc., ASAE Publication No. 4-77, Proceedings of the National Symposium on Soil Erosion and Sediment by Water, Chicago, Illinois (December 12-13, 1977).
15. Chopra, A.K. and Zhang, L. "Earthquake-induced base sliding of concrete gravity dams", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **117**(12), pp. 3698-3719 (1991).
16. 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).
17. Baziar, M.H., RezaeiPour, 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).
18. Jafarian, Y. and Lashgari, A. "Seismic sliding analysis of sandy slopes subjected to pore-water pressure buildup", *International Journal of Geomechanics*, **17**(11), 04017106 (2017).

19. Ambraseys, N. and Menu, J. "Earthquake-induced ground displacements", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **16**(7), pp. 985-1006 (1988).
20. Yegian, M., Marciano, E. and Ghahraman, V. "Earthquake-induced permanent deformations: Probabilistic approach", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(1), pp. 35-50 (1991).
21. Saygili, G. and Rathje, E.M. "Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(6) (2008).
22. Rathje, E.M. and Antonakos, G. "A unified model for predicting earthquake-induced sliding displacements of rigid and flexible slopes", *Engineering Geology*, **122**(1), pp. 51-60 (2011).
23. Tsai, C.-C. and Chien, Y.-C. "A general model for predicting the earthquake-induced displacements of shallow and deep slope failures", *Engineering Geology*, **206**, pp. 50-59 (2016).
24. Bray, J.D. and Travararou, T. "Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(4), pp. 381-392 (2007).
25. Rajabi, A.M., MahdaviFar, M.R., Khamchichian, M. and et al. "A new empirical estimator of coseismic landslide displacement for Zagros Mountain region (Iran)", *Natural Hazards*, **59**(2), pp. 1189-1203 (2011).
26. Soghrat, M.R. and Ziyaeifar, M. "Ground motion prediction equations for horizontal and vertical components of acceleration in northern Iran", *Journal of Seismology*, **21**(1), pp. 99-125 (2017).