تاریخ دریافت: 92/12/10
تاریخ پذیرش: 93/03/28

ارزیابی تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای شیب‌های خاکی

یاسر جعفریان (نویسنده مسؤول)، استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،
E-mail: yjafarianm@iiees.ac.ir
علی لشگری، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، گروه ژئوتکنیک، دانشگاه سمنان

چکیده: *مطالعات گسترده‌ای برای تخمین تغییرمکان ماندگار سازه‌های خاکی در اثر زلزله انجام شده است. به‌طورکلی این مطالعات را می‌توان به سه گروه مطالعات تحلیلی و نیمه‌تحلیلی، مطالعات عددی و مطالعات تجربی (مدل‌سازی فیزیکی و میدانی) تقسیم‌بندی نمود. یکی از دلایل پیچیده بودن ارزیابی دقیق تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای سیستم‌های ژئوتکنیکی، محدوده وسیع تغییر مکان‌ها است، به‌نحوی‌که در مطالعات موردی تغییرمکانهای لرزه‌ای گزارش شده از چند میلی‌متر تا چند صد متر بوده‌اند. ازاین‌رو علی‌رغم مطالعات گسترده، این موضوع همچنان زمینه پژوهش فعالی را به خود اختصاص داده است. در این مقاله تلاش می‌شود تا روند توسعه مطالعات تخمین تغییرمکان ماندگار شیب‌های خاکی تحت بارهای لرزه‌ای بر اساس روش‌های مذکور بیان و کاربرد این روش‌ها شرح داده شود. همچنین مزایا و معایب روش‌های معتبر گذشته شرح داده شده و مطالعات انجام‌شده در سال‌های اخیر توسط نویسندگان نیز گزارش می‌شوند.*

کلیدواژه‌ها: *زلزله، شیب‌های خاکی، زمین‌لغزش، تغییرمکان*

1 - مقدمه

در سال‌های اخیر، بحث طراحی لرزه‌ای سازه‌های ژئوتکنیکی و تغییرمکان ماندگار این سازه‌ها توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس ارزیابی تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای سازه‌های ژئوتکنیکی مانند خاک‌ریزها و شیب‌های خاکی برای مهندسین حائز اهمیت است. اولین پیشنهاد برای محاسبه رفتار سازه‌های خاکی در برابر زلزله توسط ترزاقی [1] بیان شد که در آن نیروی زلزله با روشی ساده به توده خاک اعمال و با تحلیل تعادل حدی ضریب اطمینان پایداری سازه مورد بررسی قرار می‌گرفت که اصطلاحاً به این روش، روش شبه‌استاتیکی (pseudo static) می‌گویند. در روش شبه‌استاتیکی محاسبه تغییرمکان ماندگار مقدور نیست و فقط می‌توان ضریب اطمینان را محاسبه نمود. همچنین معرفی اثرات دینامیکی پیچیده به‌وسیله یک ضریب شبه استاتیکی بسیار تقریبی خواهد بود. بنابراین روش مذکور، روشی تقریبی است و تجربه نشان داده که این روش مناسبی برای طراحی نیست (به‌عنوان مثال خسارت اسکله‌های صندوقه‌ای بندر کوبه در طی زلزله هیوگوکن نامبو (Hyogoken-Nanbo) در سال 1995). نیومارک [2] روش ساده‌ای را برای پیش‌بینی تغییرمکان ماندگار شیب‌ها پیشنهاد نمود. به علت آن‌که این روش بسیار ساده و کارآمد بود مورد استقبال بسیاری از مهندسان قرار گرفت و با گذشت زمان، محدودیت‌های این روش توسط محققین تا حدودی برطرف گردید. این روش‌ها به روش‌های تحلیلی تخمین تغییرشکل ماندگار معروف هستند. به‌طورکلی می‌توان روش‌های موجود برای پیش‌بینی تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای را بر اساس ماهیت روش‌ها به سه گروه: روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی، روش‌های عددی و روش‌های تجربی تقسیم‌بندی نمود. در این مقاله روند توسعه این روش‌ها به‌خصوص روش‌های دسته اول و سوم به‌اختصار شرح داده

خواهد شد. به‌علاوه، برخی از کارهای آزمایشگاهی و میدانی انجام‌شده در زمینه مطالعاتی مذکور بیان خواهد شد.

2 - تخمین تغییرمکان ماندگار شیب‌ها

نمونه‌ای از زمین‌لغزش ناشی از زلزله در شکل (1) نشان داده شده است. این شکل تصویر زمین‌لغزش نیکاوا (Nikawa) که در زلزله کوبه (1995) رخ داده است را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، حرکت توده لغزش به‌صورت دورانی بوده است. مشاهده می‌شود که گسیختگی این شیب در زلزله، تهدیدی برای سازه‌های مجاور ایجاد نموده است. مواردی ازاین‌دست به‌وفور در زلزله‌های پیشین قابل پیگیری است. گسترش شهرها به مناطق مرتفع و چین‌خورده که در بسیاری از مواقع در مجاورت گسل‌ها قرار می‌گیرند اهمیت بررسی پایداری و تغییرمکان لرزه‌ای شیب‌های خاکی را نمایان می‌کند.

روش‌های مختلفی در زمینه پیش‌بینی تغییرمکان لرزه‌ای شیب‌ها ارائه شده است. از جمله این روش‌ها، روش‌های عددی می‌باشند. امروزه روش‌های عددی همچون تفاضل محدود (finite difference) و اجزای محدود (finite element) با بهره‌گیری از مدل‌های رفتاری پیشرفته‌ای که قابلیت در نظرگیری پیچیدگی‌هایی همچون ناهمسانی بارگذاری سیکلی (cyclic loading) بر مصالح مختلف را دارند مقبولیت بسیاری را کسب نموده‌اند. روش عددی اجزای مجزا نیز توسعه خوبی یافته است که در آن پاسخ ماکرومکانیکی توده خاک از حرکات انفرادی یک ذره و اندرکنش میکرومکانیکی (micro mechanic) تعداد زیادی از المان‌های مجزا به دست می‌آید. به‌عنوان مثالی از کاربرد روش‌های عددی، جعفریان و همکاران [3] یک اسکله صندوقه‌ای آسیب‌دیده در زلزله کوبه را با استفاده از تحلیل عددی تفاضل محدود مورد بررسی قرار دادند و پاسخ‌های مناسبی را در مقایسه با واقعیت رخداده مشاهده نمودند. با گزارش‌های بسیاری که توسط محققین مختلف در مورد موفقیت روش‌های عددی دیده می‌شوند، می‌توان اذعان داشت که درواقع روش‌های عددی تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای سیستم‌های خاکی را نسبتاً دقیق پیش‌بینی می‌کنند [4، 5]، هرچند این روش‌ها معمولاً به پارامترهای ورودی بسیاری برای تحلیل نیاز دارند و کار با آن‌ها مشکل است. کالیبره کردن (calibration) پارامترهای این مدل‌ها برای مسأله مورد بررسی نیازمند تلاش ویژه‌ای است و در بسیاری از مواقع نیاز به صرف وقت و هزینه قابل‌تأملی دارد. از طرف دیگر تغییرمکان ثبت‌شده در زمین‌لغزه‌های ناشی از زلزله گاهی به چند صد متر می‌رسد و پیش‌بینی چنین تغییر مکان‌هایی با روش‌های عددی متداول غیرممکن به نظر می‌رسد.

شکل (1): *تصویر زمین‌لغزش نیکاوا بعد از خرابی که خط ممتد هندسه شیب قبل از خرابی و خط‌چین هندسه شیب بعد از خرابی را نشان می‌دهد [5].*

فارغ از روش‌های پیچیده عددی همانند اجزای محدود، تفاضل محدود و اجزای مجزا و استفاده از مدل‌های رفتاری سازگار با رفتار لرزه‌ای خاک‌ها، روش‌های ساده‌تر بیشتر مورد اقبال مهندسین قرار گرفته‌اند. این تحلیل‌های ساده‌شده را می‌توان بر پایه نوع مطالعات به دو گروه زیر تقسیم‌بندی نمود:

1) مطالعات تحلیلی

2) مطالعات نیمه‌تحلیلی

پایه‌گذار روش‌های تحلیلی تخمین تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای نیومارک [2] بود و بسیاری از کارهای انجام‌شده بعدی در این زمینه به‌نوعی بر مبنای این روش هستند.

2-1- مطالعات تحلیلی

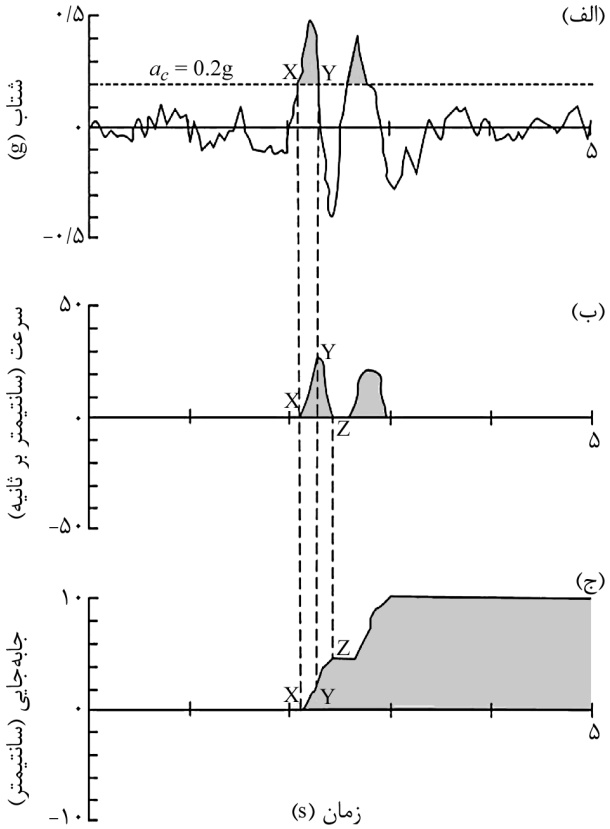
در این مطالعات، مدل‌هایی به‌صورت تحلیلی برای تخمین تغییرمکان پیشنهاد شده است. با توجه به محدودیت‌هایی که در روش نیومارک [2] وجود داشت (مانند در نظر نگرفتن پاسخ سازه) برخی از محققان سعی در برطرف نمودن این محدودیت‌ها نموده‌اند و با توسعه این مدل، مدل‌های اصلاح‌شده دیگری را پیشنهاد داده‌اند. طبق مدل‌های ارائه‌شده در این زمینه می‌توان مطالعات تحلیلی را به سه گروه زیر دسته‌بندی نمود:

1) روش بلوک صلب نیومارک (rigid block)
2) روش‌های وابسته (coupled methods)
3) روش‌های غیروابسته (decoupled methods)

در ادامه، هر یک از این روش‌ها و توسعه آن‌ها توضیح داده خواهد شد.

2-1-1- روش بلوک صلب

روش بلوک صلب ابتدا توسط نیومارک در سال 1965 در کنفرانس رانکین ارائه شد. در این روش، توده لغزش به‌صورت یک بلوک صلب که بر روی یک سطح شیب‌دار قرار دارد، فرض می‌شود. حرکت توده لغزش زمانی آغاز می‌شود که شتاب وارده به آن توسط زمین‌لرزه، بزرگ‌تر از شتاب بحرانی (ضریب گسیختگی) توده لغزش شود. ضریب گسیختگی (k_y) یک مقدار شتاب شبه استاتیکی است که موجب ناپایداری بلوک خواهد شد. به‌عبارت‌دیگر، ضریب شبه‌استاتیکی که با آن ضریب اطمینان پایداری شیب برابر 1 شود، معرف ضریب گسیختگی خواهد بود. با محاسبه شتاب نسبی بلوک و دو بار انتگرال‌گیری از آن، تغییرمکان بلوک محاسبه می‌شود. در شکل (2)، چگونگی محاسبه تغییرمکان در روش بلوک صلب نیومارک نشان داده شده است.



شکل (2): *افزایش تغییرمکان دائمی یک شیروانی تحت اثر زلزله [9]: (الف) شتاب‌های ورودی زلزله با شتاب گسیختگی 0/2g؛ (ب) سرعت نسبی حاصل از انتگرال‌گیری از شتاب نسبی؛ (ج) جابه‌جایی شیب حاصل از انتگرال‌گیری از سرعت نسبی.*

با توجه به این‌که در طی بارگذاری زلزله، فشار آب در برخی شرایط افزایش پیدا می‌کند [6] و این افزایش تا زمانی که گسیختگی در شیب رخ دهد، ادامه یافته و بعدازآن ثابت می‌ماند [6، 7]، بنابراین ضروری است در سازه‌های خاکی که به‌صورت اشباع هستند و احتمال افزایش فشار آب حفره‌ای وجود دارد، اثر فشار آب در تحلیل تغیر مکان دیده شود. سارما [8] اثر فشار آب حفره‌ای را در حالت استاتیکی بر روی شتاب بحرانی (critical acceleration) مورد بررسی قرار داد. هرچند که سارما اثر فشار آب حفره‌ای را در محاسبات تغییرمکان لرزه‌ای با اصلاح شتاب بحرانی در نظر گرفت، ولی ازآنجاکه شتاب بحرانی اصلاح‌شده بر اساس افزایش فشار آب در حالت استاتیکی است، نمی‌تواند معرف تغییرات فشار آب حفره‌ای در حالت دینامیکی باشد.

در اثر حرکت رو به پایین و دورانی توده لغزش، زاویه گسیختگی شیب در طول حرکت این توده کاهش می‌یابد و

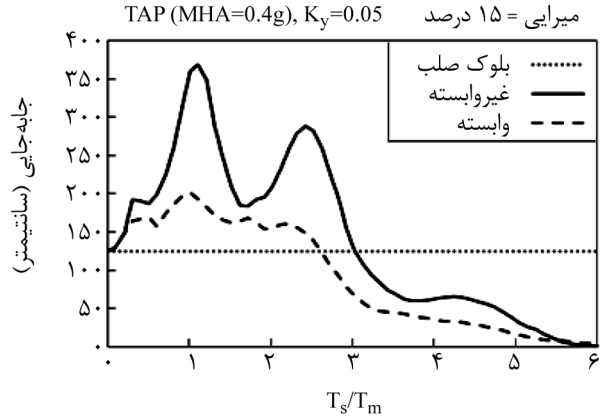
ضریب گسیختگی (yield coefficient) افزایش پیدا می‌کند. استماتاپولوس [10] اثر حرکت دورانی شیب‌ها را مورد مطالعه قرار داد و شتاب گسیختگی را اصلاح نمود.

علی‌رغم اصلاحات فوق‌الذکر باید اذعان داشت که روش بلوک لغزنده نیومارک دارای ضعف‌های بسیار دیگری است که ازجمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- عدم لحاظ نمودن زوال مقاومت و سختی خاک در حین ارتعاشات و همچنین در لغزش. باید توجه داشت که مدل بلوک لغزنده یک مدل صلب- پلاستیک کامل است؛
- عدم لحاظ نمودن تغییرشکل‌های داخلی بلوک؛
- عدم لحاظ نمودن لغزش بلوک بر پاسخ سیستم.

2-1-2- روش غیر وابسته و وابسته

روش بلوک صلب دارای برخی محدودیت‌ها ازجمله فرض صلب بودن توده لغزش، در نظر نگرفتن اثر لغزش بر پاسخ سیستم و لحاظ نکردن بزرگنمایی امواج در بدنه شیب یا خاک‌ریز است. ازاین‌رو روش‌های غیر وابسته و وابسته با هدف مرتفع کردن این محدودیت‌ها توسط محققین پیشنهاد شد. روش غیر وابسته احتمالاً اولین بار توسط مکدیسی و سید [11] ارائه شده است. این روش بر پایه روش بلوک صلب است ولی با استفاده از مقادیر پاسخ دینامیکی سیستم، شتاب‌های معادل محاسبه‌شده و شتاب‌های معادل جایگزین شتاب‌های ورودی در روش بلوک صلب می‌شوند. به دلیل آن‌که این تحلیل در دو مرحله مجزا انجام می‌شود (تحلیل پاسخ و تحلیل بلوک صلب)، هر مرحله فرضیات و محدودیت‌های مخصوص به خود را دارد. از اصلی‌ترین محدودیت‌های روش غیر وابسته، لحاظ نکردن اثر لغزش در پاسخ دینامیکی است، درحالی‌که در واقعیت لغزش بر روی پاسخ دینامیکی مؤثر است. به همین دلیل روش دیگری به نام روش وابسته پیشنهاد شده که اثر لغزش در پاسخ دینامیکی را لحاظ می‌نماید. به دلیل در نظر گرفتن پاسخ سیستم در این روش‌ها، رفتار توده لغزش بر خلاف روش بلوک صلب، به صورت انعطاف‌پذیر خواهد بود. در شکل (3) روش بلوک صلب، وابسته و غیروابسته با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد در نسبت‌های پریود (نسبت پریود سیستم به پریود میانگین موج ورودی) کمتر از 3 روش وابسته و غیر وابسته تغییر مکان‌ها را از روش بلوک صلب بیشتر پیش‌بینی می‌کنند و از نسبت پریود 3 به بعد روش بلوک صلب نتایج را نسبت به دو روش دیگر محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند [12].



***شکل (3)**: مقایسه بین روش بلوک صلب، وابسته و غیر وابسته [12].*

به‌طورکلی پیشنهاد می‌شود به‌منظور رعایت محافظه‌کاری برای لغزش‌های بسیار سطحی از روش بلوک صلب استفاده شود. چون فرض صلب‌بودن بلوک لغزنده مطابق با واقعیت است. برای لغزش‌های نیمه‌عمیق که معرف پریودهای کم تا متوسط در سیستم هستند، استفاده از روش بلوک لغزنده صلب غیرمحافظه‌کارانه است. در جدول (1)، روش مناسب برای تحلیل تغییر شکل ماندگار نشان داده شده است.

***جدول (1)**: راهنمای انتخاب روش مناسب تحلیل تغییر شکل ماندگار لرزه‌ای [13].*

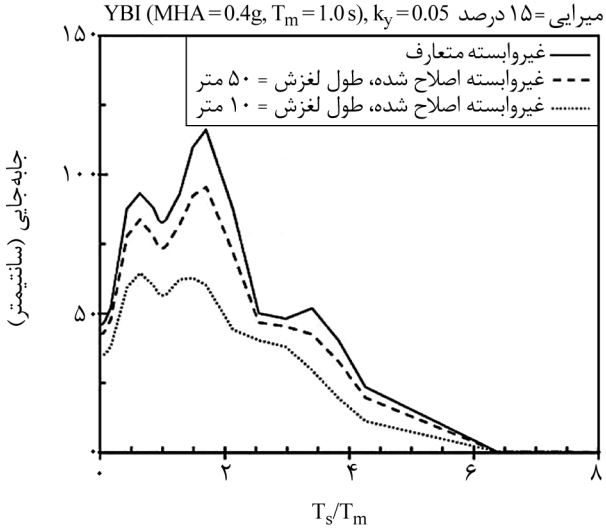
نوع لغزش	T_S / T_m*	روش بلوک صلب	روش غیر وابسته
لغزش‌های سخت و سطحی	0-0/1	بهترین نتایج	نتایج مناسب
	0/1-1	غیرمحافظه‌کارانه	محافظه‌کارانه تا خیلی محافظه‌کارانه
لغزش‌های نرم و عمیق	1-2	محافظه‌کارانه	محافظه‌کارانه
	>2	خیلی محافظه‌کارانه	محافظه‌کارانه تا غیرمحافظه‌کارانه

* T_s پریود اساسی سیستم و T_m پریود میانگین حرکت ورودی هستند.

مکدیسی و سید [11] با استفاده از شتاب‌های معادل محاسبه‌شده به طریق روش تحلیلی بلوک لغزش چوپرا [14] تغییرشکل‌های دائمی ناشی از زلزله مربوط به سدها و خاک‌ریزها را محاسبه نمودند و با اعمال فرضیات ساده‌کننده در نتایج تحلیل‌های تیر برشی و اجزای محدود دینامیکی برای چندین سازه، روش غیروابسته‌ای برای تخمین تغییرمکان ماندگار ارائه نمودند. رازجه و بری [15] با استفاده از مطالعات لین و ویتمن [16] که بر روی سطوح لغزش عمیق انجام‌شده بود و با اصلاح روش تحلیل چوپرا و ژانگ [17] مدل وابسته و غیروابسته‌ای برای تخمین تغییرمکان پیشنهاد دادند. این مدل بر اساس پاسخ سیستم یک درجه آزادی (SDOF) همراه با توزیع سختی و جرم در ارتفاع است. آن‌ها بیان کردند، زمانی که $k_y / k_{\max} < 0.6$ است و یا پریود اساسی سیستم کمتر از دو برابر پریود متوسط حرکت ورودی باشد، تحلیل غیروابسته نتایج را محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند و برای سیستم‌هایی با $k_y / k_{\max}$ بزرگ یا پریود اساسی بالا، تحلیل غیروابسته نتایج را محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. شایان‌ذکر است که $k_{\max}$ بیشینه شتاب پاسخ توده لغزش است که در اثر موج ورودی مرتعش می‌شود. رازجه و بری [18] با توسعه کارهای قبلی خود برای محاسبه پاسخ دینامیکی از سیستم چند درجه آزادی استفاده نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها برای پروژه‌های مهم نزدیک گسل که حرکات شدید زمین به آن‌ها وارد می‌شود و یا تحت زلزله با بزرگنمایی زیاد هستند، روش وابسته کاملاً غیرخطی برای تخمین تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای مناسب است.

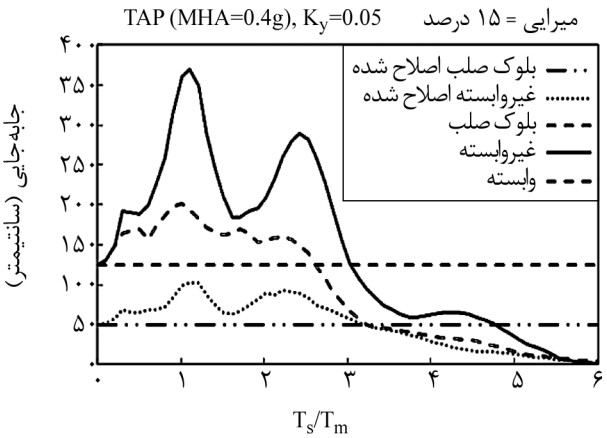
بازیار و جعفریان [19] تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای هشت سد خاکی و سنگریزه‌ای ایران که دارای ارتفاعی بین 50 تا 170 متر بودند را با استفاده از دو روش بلوک صلب نیومارک و غیروابسته مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای روش غیروابسته از تحلیل خطی معادل در روش اجزا محدود استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده با گراف‌های مکدیسی و سید [11] که در تحلیل لرزه‌ای سدهای همگن با ارتفاع تقریبی بین 30 تا 60 متر مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارزیابی شده است و محافظه‌کارانه و غیرمحافظه‌کارانه بودن این گراف‌ها را برای این سدها مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، در مقادیر $k_y / k_{\max}$ کوچک (که به‌نوعی نشان‌دهنده مصالح سست نیز هست)، نمودار طراحی مکدیسی و سید [11] نتایج را محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. همچنین مقایسه بین نتایج تحلیل بلوک صلب و غیروابسته نشان می‌دهد که در نسبت پریودهای مختلف، اختلاف بین این دو تحلیل متغیر است به‌گونه‌ای که بیش‌ترین اختلاف بین دو تحلیل در نسبت پریود نزدیک به یک رخ می‌دهد. بر اساس مطالعات استماتاپولوس [10] دوران توده لغزش بر روی تغییرمکان بلوک صلب مؤثر است و موجب کاهش آن می‌شود. بازیار و همکاران [20] یک روش تحلیلی برای بررسی اثر رو به پایین توده لغزش با استفاده از تحلیل غیروابسته ارائه نمودند. در مدل یک درجه آزادی تعمیم‌یافته آن‌ها، پاسخ سیستم در حالی محاسبه می‌شود که توده لغزش به‌صورت یک زنجیر، به‌آرامی بر روی سطح لغزش به سمت پایین حرکت می‌کند [10]. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که در نسبت پریودهای نزدیک به یک و به‌طورکلی در طول‌های لغزش کوچک، اثر روش پیشنهادی آن‌ها مشهود و مهم است. مطالعات آن‌ها نشان داد که در $k_y / k_{\max}$ کوچک، اختلاف روش غیر وابسته متعارف [15] با غیروابسته اصلاح‌شده افزایش می‌یابد و روش غیر وابسته متعارف نتایج را محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند. همچنین با افزایش نسبت پریود نتایج این دو تحلیل به یکدیگر نزدیک می‌شود. شکل (4) مقایسه بین روش غیر وابسته متعارف را با روش غیروابسته اصلاح‌شده نشان می‌دهد.

لشگری و جعفریان [12] با در نظر گرفتن اثر دوران، تحلیل بلوک صلب نیومارک و غیروابسته را مورد بازنگری و اصلاح قرار دادند. آن‌ها نتایج روش‌های مختلف مانند بلوک صلب، غیروابسته و وابسته متعارف [15] را با روش‌های بلوک صلب و غیروابسته اصلاح شده [20] مورد مقایسه قرار دادند. شایان ذکر است که در روش بلوک صلب اصلاح‌شده، ضریب گسیختگی توسط رابطه استماتاپولوس [10] اصلاح‌شده



شکل (4): *مقایسه بین روش غیروابسته متعارف با روش غیروابسته اصلاح‌شده [20].*

و به‌این‌ترتیب اثر دوران در نظر گرفته شده و تغییرمکان به وسیله روش بلوک صلب محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج آن‌ها که در شکل (5) نشان داده شده است، روش غیروابسته تا نسبت پریود 3 تغییرمکان را بیشتر از روش بلوک صلب پیش‌بینی می‌کند. در نسبت پریودهای بزرگ‌تر از 3 تغییرمکان روش وابسته و غیروابسته به هم نزدیک می‌شوند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که به‌طور واضح نمی‌توان اختلاف بین روش وابسته و غیروابسته اصلاح‌شده را بیان کرد. هرچند که روش غیروابسته اصلاح‌شده، تغییرمکان‌ها را تا سطح روش وابسته کاهش می‌دهد.



شکل (5): *مقایسه بین روش‌های بلوک صلب، غیروابسته و وابسته متعارف با روش‌های بلوک صلب و غیروابسته اصلاح‌شده در طول لغزش 10 متر [12].*

به‌طورکلی می‌توان گفت که تأثیر دوران در طول‌های کوچک بسیار مهم است. همچنین مورد مهم دیگری که باید به آن توجه نمود، خصوصیات موج ورودی است، زیرا این خصوصیات می‌تواند بر روی نتایج تأثیرگذار باشد.

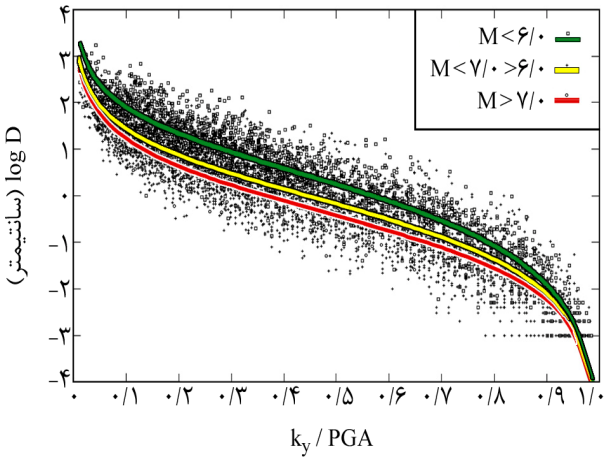
با اینکه مطالعات تحلیلی روش‌های ساده‌ای برای تخمین تغییرمکان ماندگار بودند؛ اما نیاز به روابط ساده‌تری احساس می‌شد که در عین سادگی دارای دقت مناسب نیز باشند. درواقع مطالعات نیمه‌تحلیلی بر اساس تحلیل‌های آماری بر روی مطالعات تحلیلی حاصل می‌شوند. شروع روند شکل‌گیری مطالعات نیمه‌تحلیلی در سال 1980 بود. این روش‌ها بر مبنای مطالعات آماری بر روی پاسخ‌های روش بلوک صلب، وابسته و یا غیروابسته هستند که درنهایت مدلی ساده‌شده با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف برای پیش‌بینی تغییرمکان لرزه‌ای ارائه می‌کنند. کارهای صورت گرفته توسط محققین به‌قرار زیر است:

آمبرسیز و منو [21] روش بلوک صلب را بر پایه پنجاه رکورد، ناشی از یازده زلزله تحلیل کردند. برای کاهش عدم قطعیت رکوردها، فقط رکوردهای نزدیک به محل (R<45km) با بزرگای سطحی کم (M_s = 7/7-5/7) را مورد استفاده قرار دادند. با انجام تحلیل رگرسیون از نتایج حاصل‌شده رابطه‌ای برحسب k_y / PGA برای تخمین تغییرمکان ماندگار ارائه نمودند. توصیه می‌شود که از این رابطه در محدوده $0.1 < k_y / PGA < 0.9$ استفاده شود. از محدودیت‌های این مدل می‌توان به تعداد کم رکوردهای استفاده‌شده، اشاره نمود. فرانکلین و چانگ [22] با به‌کارگیری روش بلوک صلب و با استفاده از 179 رکورد، مدلی برای محاسبه تغییرمکان پیشنهاد کردند. بزرگای حرکات ورودی (M_L) بین 7/7-5/2 بود که به PGA=0/5g و PGV= 76/2cm/s مقیاس شده بودند. بر اساس نتایج آن‌ها، شرایط ساختگاه و بزرگای زلزله تأثیر قابل‌توجهی بر روی نتایج دارد. یگین و همکاران [23] از رکوردهای فرانکلین و چانگ [22] برای تعیین مدل نیمه‌تحلیلی خود بر اساس روش بلوک صلب استفاده

نمودند، با این تفاوت که این داده‌ها مقیاس شده نبوده است. بر پایه مطالعات آن‌ها تغییرمکان علاوه بر نسبت k_y / PGA به پریود غالب و تعداد سیکل‌های معادل موج‌های ورودی نیز بستگی دارد.

آمبرسیز و سربلوف [24] در ادامه کار قبلی خود، این بار از رکوردهای بیشتری نسبت به کار قبلی استفاده کردند و رکوردهای ورودی را به 286 رکورد، ناشی از 76 زلزله افزایش دادند. آن‌ها با استفاده از روش نیومارک رابطه نیمه‌تحلیلی ارائه نمودند که تغییرمکان علاوه بر نسبت k_y / PGA به بزرگای سطحی و فاصله از کانون زلزله نیز بستگی داشت. بری و رازجه [25] با استفاده از نرم‌افزار *D-MOD* تحلیل‌های غیرخطی را به‌صورت یک‌بعدی روی چندین مدفن زباله شهری انجام داده و حداکثر شتاب معادل (*MHEA*) را محاسبه نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها روش غیروابسته در نسبت پریودهای بالا (T_s / T_m) و در نسبت‌های گسیختگی کوچک (k_y / k_{max}) قابل‌اطمینان نیست. بر همین اساس رابطه‌ای برحسب محتوای فرکانسی و خصوصیات پاسخ دینامیکی ارائه نمودند. واتسون- لمپری و ابراهامسون [26] با استفاده از پایگاه داده وسیع، مشتمل بر 6185 رکورد و به‌کارگیری روش بلوک صلب مدلی برای تخمین تغییرمکان ماندگار ارائه نمودند.

با توجه به اینکه تاکنون مدل‌های ارائه شده برای تخمین تغییرمکان ماندگار، دارای تنوع زیادی بوده و اکثر آن‌ها بر اساس روش بلوک صلب نیومارک می‌باشند، بری و تراواسارو [27] از یک جامعه آماری وسیع از رکوردهای زلزله (688 رکورد) با بزرگای کمتر از 7/6 بهره بردند و مدلی را برای توده‌های لغزش انعطاف‌پذیر (با پریود اساسی بین 0/05-0/25) و توده‌های صلب (با پریود اساسی کمتر از 0/05) بر اساس روش وابسته ارائه دادند. مطالعه بر روی شانزده تاریخچه موردی نشان داد که مدل آن‌ها پیش‌بینی نسبتاً خوبی از تغییرمکان را داراست. تلاش‌های زیادی برای ارائه مدل نیمه‌تحلیلی بر پایه روش بلوک صلب انجام شده است ولی اکثر آن‌ها از پایگاه داده‌های کم استفاده نموده‌اند و اثر پارامترهای لرزه‌ای در روابط دیده نشده است. جیبسون [28] در ادامه کارهای قبلی خود [29] با استفاده از 2270 رکورد ناشی از سی زمین‌لرزه، چهار مدل بر اساس چهار پارامتر نسبت شتاب بحرانی (k_y / PGA)، نسبت شتاب بحرانی و بزرگا، شدت و شتاب بحرانی و نسبت شتاب بحرانی و شدت بر اساس روش بلوک صلب نیومارک ارائه نمود. در شکل (6) نمودار تغییرات تغییرمکان در مقابل تغییرات نسبت ضریب گسیختگی به بیشینه شتاب زلزله برای مدل نسبت شتاب بحرانی و بزرگا نشان داده شده است که تغییرمکان‌ها با استفاده از این مدل محاسبه شده و در شکل به‌صورت نقاط مشکی نشان داده شده‌اند. برای بررسی جزئیات بیشتر به جیبسون [28] مراجعه شود. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد با افزایش سختی خاک تغییرمکان کاهش می‌یابد.

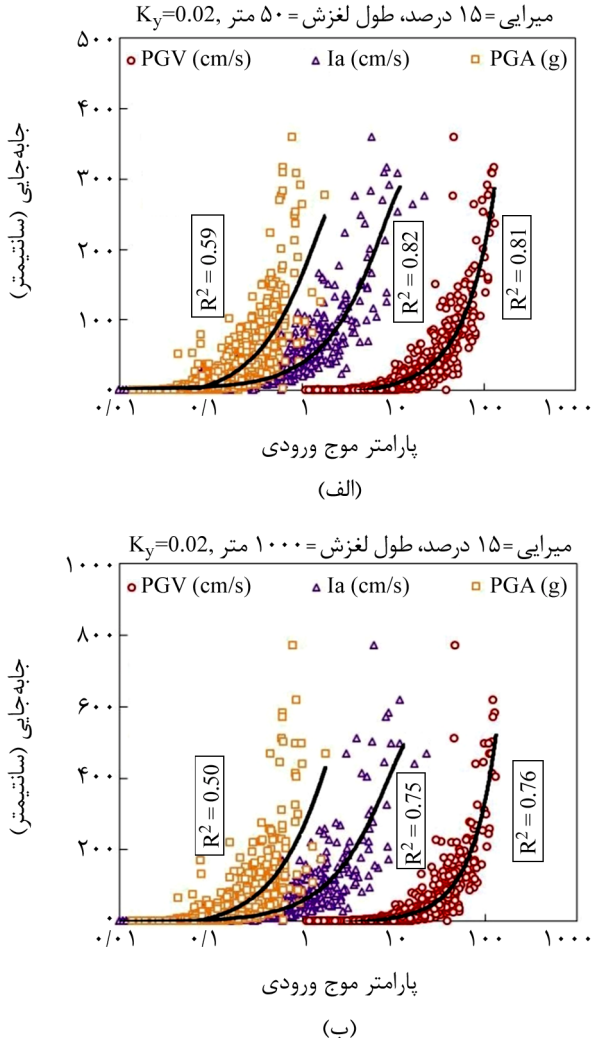


شکل (6): *تغییرات جابه‌جایی در مقابل نسبت شتاب گسیختگی در بزرگاهای مختلف [28].*

مدل‌هایی که تاکنون ارائه شده معمولاً بر اساس یک پارامتر است که اصطلاحاً به مدل‌های اسکالر معروف هستند. درصورتی‌که فقط یک پارامتر لرزه‌ای بر روی جابه‌جایی‌ها مؤثر نیست و ترکیب مجموعه‌ای از پارامترهای لرزه‌ای بر روی تغییرمکان اثرگذار است که به این مدل‌های ترکیبی مدل‌های برداری می‌گویند. سیگلی و رازجه [30] از 2383 رکورد زلزله و چهار شتاب گسیختگی بهره بردند و دو مدل به‌صورت اسکالر و برداری با ضرایب همبستگی مناسب برای پیش‌بینی تغییرمکان لرزه‌ای پیشنهاد کردند.

آن‌ها در ادامه کار خود، در سال 2009 [31]، با استفاده از یک چارچوب احتمالاتی مدل دیگری برای پیش‌بینی تغییرمکان ارائه نمودند. مدل احتمالاتی آن‌ها، پارامترهای مهمی که باعث ناپایداری شیب‌ها می‌شوند (از جمله: شدت و خصوصیات زمین‌لرزه) را دارا است. در مدل جیبسون به شرایط ساختگاه (سنگی یا خاکی) توجه نشده بود به همین دلیل هسیه و لی [32] از 343 رکورد استفاده کردند و معادلات جیبسون [28، 29] را توسعه دادند. آن‌ها با متمایز کردن پاسخ ساختگاه‌ها مدل‌هایی با ضریب همبستگی مناسب برای تخمین تغییرمکان ماندگار پیشنهاد نمودند. اکثر روابط برای توده‌های لغزش سطحی از روش بلوک صلب و از روش غیروابسته برای توده‌های لغزشی انعطاف‌پذیر عمیق استفاده می‌شود. درواقع برای فاصله بین این دو حالت به‌طور خاص مشخص نیست که از چه رابطه‌ای باید استفاده نمود. رازجه و انتوناکوس [33] با استفاده از دو مدل سایگلی و رازجه [30] و رازجه و سایگلی [31] به تحقیق در این خصوص پرداختند. در مدل آن‌ها به جای استفاده از تاریخچه پاسخ شتاب- زمان از تاریخچه سرعت- زمان استفاده شده و مدلی برای توده‌های انعطاف‌پذیر ارائه شده است.

پارامترهای موج ورودی (مانند *PGA*، *PGV* و یا سایر پارامترها) بر روی تغییرمکان ماندگار شیب‌ها تأثیرگذار است و تغییرمکان به پارامترهای موج ورودی وابسته است. اثر پارامترهای موج ورودی بر روی تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای توسط محققین [26-33] مورد ارزیابی قرار گرفته و روابطی در این خصوص ارائه شده است. بر اساس نتایج بازیار و همکاران [20] و لشگری و جعفریان [12] توجه به طول لغزش شیب نیز ضروری است؛ بنابراین نیاز است که اثر این کمیتها مورد بررسی بیشتری قرار بگیرد. به این منظور از 1363 رکورد ناشی از 29 زلزله رخداده در جهان [34] استفاده و تغییرمکان ماندگار برای طول‌های لغزش 50 و 1000 متر با استفاده از روش بلوک صلب اصلاح‌شده محاسبه شده است که نتایج آن در شکل (7) ارائه گردیده است.



شکل (7): *تغییرات جابه‌جایی در مقابل پارامترهای موج ورودی برای (الف) طول لغزش 50 متر، (ب) طول لغزش 1000 متر.*

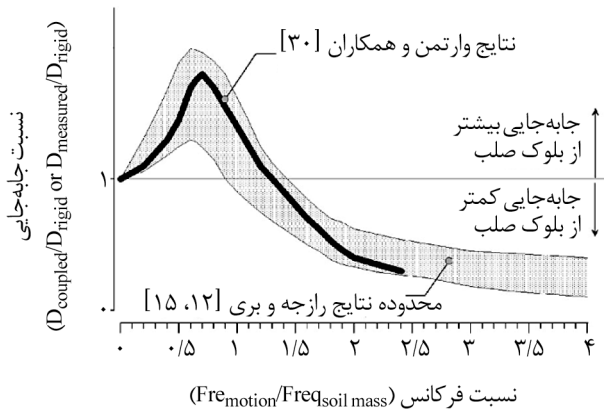
با توجه به روند پاسخ‌ها، برای بررسی بهتر تأثیر پارامترها از مدل چندجمله‌ای برای برازش استفاده شده است. شکل (7- الف) نشان می‌دهد که در یک طول و ضریب گسیختگی ثابت، در *PGA* و I_a (شدت آریاس) پراکندگی نتایج بیشتر است، در مقابل پراکندگی نتایج در *PGV* کمتر از دو پارامتر دیگر است و همین امر باعث می‌شود که ضریب همبستگی بالایی به‌خصوص برای پارامتر *PGA* حاصل نشود. اما مسئله‌ای که باید به آن توجه نمود این است که یک رابطه با ضریب همبستگی بالا دلیلی بر دقت بالای رابطه نیست. به‌طور مثال، در این شکل ضریب همبستگی برای پارامترهای *PGV* و I_a نزدیک به یکدیگر است، ولی به علت پراکندگی نتایج پارامتر I_a (به‌خصوص در I_a بزرگ‌تر از 8) دقت رابطه

برازش شده کاهش می‌یابد. در مقابل پراکندگی نتایج پارامتر PGV نسبت به I_a کمتر است و نقاط نزدیک به خط برازش شده هستند؛ بنابراین انتظار می‌رود که پارامتر PGV تغییرمکان را نسبت به پارامترهای PGA و I_a با دقت بالاتری پیش‌بینی نماید. مسئله دیگری که باید به آن توجه نمود، طول لغزش است. مقایسه بین شکل‌های (7-الف) و (7-ب) نشان می‌دهد که با افزایش طول لغزش تغییرمکان نیز افزایش یافته که می‌توان گفت که تغییرات طول لغزش باعث تغییر دو برابری تغییرمکان‌ها (در حالت بیشینه) شده است.

3 - مدل‌سازی فیزیکی و مطالعات میدانی

یکی از مواردی که مورد پرسش بسیاری از محققین قرار گرفته، میزان دقت و اعتبار روش بلوک صلب است. به همین دلیل مدل‌سازی‌هایی در محیط آزمایشگاه انجام گرفته است و یا توسط چندین تاریخچه موردی، تغییرمکان بررسی شده است. مطالعات صورت گرفته توسط محققین به شرح زیر است:

وارتمن و همکاران [35] با استفاده از آزمایش‌های میز لرزه (shaking table) پاسخ دینامیکی دو توده لغزش صلب و ستون خاک (توده‌ی انعطاف‌پذیر) را با استفاده از یک سطح شیب‌دار مورد مطالعه قرار دادند. در شکل (8) نتایج این آزمایش نشان داده شده است. بر اساس این شکل تا نسبت فرکانس 1/5 توده انعطاف‌پذیر تغییرمکان را محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند و از این نسبت به بعد توده



شکل (8): *مقایسه بین نتایج وارتمن و همکاران با نتایج رازجه و بری [35].*

انعطاف‌پذیر نتایج را غیرمحافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌نماید. به علت اختلاف در پاسخ دینامیکی توده صلب و انعطاف‌پذیر تغییرمکان این دو توده با یکدیگر متفاوت است. طبق نتایج آن‌ها در مقادیر k_y / PGA کوچک، اختلاف بین تغییرمکان بلوک صلب و ستون خاک افزایش می‌یابد.

وارتمن و همکاران [36] با هدف ارزیابی صحت و کاربرد روش بلوک صلب نیومارک، چهار شیب را بر روی میز لرزه مدل نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها جابه‌جایی پیش‌بینی‌شده توسط بلوک لغزنده نیومارک به‌طور متوسط در محدوده 75 درصد جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در مجموعه آزمایش‌ها است و روش نیومارک برای مدل‌هایی که تغییرشکل‌های بزرگ را تجربه کرده‌اند، قابل‌اعتماد است. همچنین به دلیل اهمیت ضریب گسیختگی و تأثیر زیاد آن در روش بلوک صلب، لازم است که در هر پروژه برای محاسبه ضریب گسیختگی تحلیل معکوس انجام شود.

پرادل و همکاران [37] یک مطالعه موردی انجام دادند و برای تغییرمکان لرزه‌ای از روش بلوک صلب نیومارک بهره بردند. بر اساس نتایج آن‌ها تغییرمکان محاسبه‌شده توسط روش بلوک صلب در محدوده 20 تا 90 میلی‌متر (با میانگین 46 میلی‌متر) است که در مقایسه با مشاهدات واقعی که تغییرمکان 50 میلی‌متر بوده است، مناسب به نظر می‌رسد.

تا سال 2007 استفاده از تاریخچه موردی (case history) برای مدل‌های نیمه‌تحلیلی متداول نبوده است. سینگ و همکاران [38] با استفاده از 122 تاریخچه موردی و برآورد شتاب گسیختگی توسط نرم‌افزار XSTABL و تخمین پریود اساسی برای تاریخچه موردی، مدلی برای پیش‌بینی تغییرمکان لرزه‌ای ارائه کردند. بر اساس مدل سینگ و همکاران [38] تغییرمکان فقط به نسبت k_y / PGA وابسته است که این صحیح به نظر نمی‌رسد. به همین علت وحیدفر و میهان [39] با کمک همان 122 تاریخچه موردی، مدل سینگ و همکاران را توسعه دادند. بر اساس نتایج آن‌ها تغییرمکان به پارامترهایی همچون شتاب بحرانی، نسبت شتاب بحرانی، ارتفاع شیب، حداکثر سرعت حرکت، طیف شتاب و پریود غالب وابسته است.

4 - نتیجه‌گیری

در روش شبه استاتیکی نیروی زلزله توسط یک ضریب به شیب یا خاک‌ریز مورد بررسی وارد می‌شود و نمی‌تواند تغییرمکان ماندگار لرزه‌ای را پیش‌بینی نماید. به کمک روش‌های عددی می‌توان پیش‌بینی صحیحی از رفتار شیب تحت بار زلزله داشت، اما مدل‌های رفتاری خاک که برای تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی رفتار خاک در بارگذاری سیکلی مناسب هستند پیچیدگی‌های زیادی دارند و به تعداد پارامتر زیادی نیاز دارند.

مطالعات تحلیلی و نیمه‌تحلیلی تخمین تغییرشکل ماندگار در عین سادگی تغییرمکان لرزه‌ای را نسبتاً دقیق پیش‌بینی می‌کنند. بر اساس فرضیات محدودکننده، این مطالعات را می‌توان به سه روش بلوک صلب، غیروابسته و وابسته تقسیم‌بندی نمود. برای تحلیل لغزش‌های سطحی ($T_s/T_m<0/1$) بهتر است از روش بلوک صلب نیومارک استفاده شود زیرا نتایج بهتری به همراه خواهد داشت. دلیل این امر آن است که در لغزش‌های سطحی رفتار توده خاک به‌صورت صلب است و این با فرضیات روش بلوک صلب که توده لغزش را به‌صورت صلب در نظر می‌گیرد، مطابقت دارد. همچنین در تمامی نسبت‌های پریود مقدار آن ثابت است که این با واقعیت تطابق ندارد. برای لغزش‌های عمیق ($T_s/T_m>0/1$)، استفاده از روش وابسته و غیروابسته توصیه می‌شود به این دلیل که در این لغزش‌ها رفتار توده لغزش مطابق با فرضیات این روش و به‌صورت انعطاف‌پذیر است. در این روش‌ها تا نسبت $0<T_s/T_m<0/1$ تغییرمکان روش بلوک صلب، روش وابسته و غیر وابسته به یکدیگر نزدیک است و در نسبت $0/1<T_s/T_m<1$ اختلاف بین این سه روش به بیشترین مقدار خود می‌رسد (به دلیل پدیده تشدید) و از این نسبت پریود به بعد اختلاف کاهش می‌یابد و تقریباً از نسبت پریود 2 به بعد روش نیومارک نتایج را محافظه‌کارانه پیش‌بینی می‌کند.

نتایج نشان داده که پارامترهای لرزه‌ای اثر بسیار زیادی بر میزان تغییرمکان ماندگار دارند به‌گونه‌ای که در یک ساختگاه تغییرمکان ناشی از دو نوع شتاب‌نگاشت، ممکن است اختلاف زیادی با یکدیگر داشته باشند. به همین دلیل نیاز به بررسی بیشتر و دقیق‌تر این پارامترها احساس می‌شود. بر پایه این روش‌ها و انجام تحلیل‌های آماری با مجموعه وسیعی از داده‌ها، روابطی برای محاسبه تغییرمکان ارائه شده است. اکثر روابط ارائه شده در این خصوص بر اساس روش نیومارک هستند که معمولاً به‌صورت اسکالر می‌باشند. به‌عبارت‌دیگر فقط یک پارامتر رکورد ورودی مانند بیشینه شتاب را مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعات سال‌های اخیر نشان داده شده است که مجموعه‌ای از پارامترهای لرزه‌ای بر روی تغییرمکان مؤثر است، به همین دلیل روابطی بر مبنای ترکیب چند پارامتر (بیشینه شتاب، بیشینه سرعت، شدت) شکل گرفته است.

در تحقیقات انجام‌شده توسط نویسندگان، بررسی تأثیر پارامترهای لرزه‌ای 1363 رکورد ناشی از 29 زلزله بر روی تغییرمکان بلوک صلب اصلاح‌شده نشان داد که پراکندگی نتایج در پارامتر PGV نسبت با پارامترهای PGA و I_a کمتر است؛ بنابراین انتظار می‌رود که این پارامتر تغییرمکان را با دقت مناسبی پیش‌بینی نماید. همچنین افزایش طول گسیختی منجر به افزایش تغییرمکان می‌شود.

روش دیگر مطالعات تخمین تغییرشکل ماندگار، مطالعات تجربی هستند. این مطالعات بر مبنای مدل‌سازی فیزیکی و یا مطالعات موردی می‌باشند. بر اساس این مطالعات روش بلوک صلب در نسبت فرکانس‌های کوچک تغییرمکان را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین اختلاف بین تغییرمکان توده لغزش صلب و انعطاف‌پذیر، در نسبت‌های فرکانس بالا افزایش می‌یابد؛ بنابراین در استفاده از روش مناسب برای پیش‌بینی تغییرمکان باید دقت نمود. مطالعات صورت گرفته بر روی تاریخچه‌های موردی نشان داده که تغییرمکان به پارامترهایی همچون شتاب بحرانی، نسبت شتاب بحرانی، ارتفاع شیب، حداکثر سرعت حرکت، طیف شتاب و پریود غالب وابسته بوده و نیاز است که در طراحی‌ها به این موارد توجه شود.

مراجع

1. Terzaghi, K. (1950) ‘Mechanism of landslides’. In: Paige, S. (Ed.), *Application of Geology to*

Engineering Practice (Berkey Volume), Geological Society of America, New York, NY, 83-123.

2. Newmark, N.M. (1965) Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique*, **15**, 139-159.

3. جعفریان، یاسر، لشگری، علی، میرایی، محسن و محملی ابیانه، رضا (1392) عوامل مؤثر بر پاسخ لرزه‌ای و تغییرمکان‌های اسکله کیسونی با استفاده از تحلیل‌های عددی تفاضل محدود، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان.

4. Miraei, M. and Jafarian, Y. (2013) Fragility curves for assessing the seismic vulnerability of gravity quay walls. *4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island*, Greece.

5. Sassa, K., Fukuoka, H., Scarascia-Mugnozza, G., and Evans, S. (1996) Earthquake-induced landslides: distribution, motion and mechanisms. *Soils and Foundations*, Special Issue, 53-64.

6. Seed, H.B. and Lee, K.L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, **92**(SM6), 105-134.

7. Shaal, B.Z. (1972) *The behaviour of cohesionless soils in simple shear under cyclic loading*. Ph.D. Thesis, University of London.

8. Sarma S.K. (1975) Seismic stability of earth dams and embankments. *Geotechnique*, **25**(4), 743-761.

9. Wilson, R.C. and Keefer, D.K. (1985) 'Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding'. In: *Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region*, Ziony, J. 1., ed., U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Professional Paper 1360, 317-345.

10. Stamatopoulos, C.A. (1996) Sliding system predicting large permanent co-seismic movements of slopes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**(10), 1075-1093.

11. Makdisi, F.I. and Seed, H.B. (1978) Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, **104**, 849-867.

12. Lashgari, A. and Jafarian, Y. (2013) 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.

13. Jibson, R.W. (2010) Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes-A retrospective. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **91**, 209-218.

14. Chopra, A.K. (1966) *Earthquake Effects on Dams*. Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

15. Rathje, E.M. and Bray, J.D. (1999). An examination of simplified earthquake-induced displacement procedures for earth structures. *Canadian Geotechnical Journal*, **36**, 72-87.

16. Lin, J.S. and Whitman, R.V. (1983) Decoupling Approximation to the evaluation of earthquake-induced plastic slip in earth dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**, 667-678.

17. Chopra, A.K. and Zhang, L. (1991) Earthquake-induced base sliding of concrete gravity dams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **117**(12), 3698-3719.

18. Rathje, E.M. and Bray, J.D. (2000) Nonlinear coupled seismic sliding analysis of earth structures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**, 1002-1014.

19. Baziar, M.H. and Jafarian, Y. (2006) 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.

20. Baziar, M.H., Rezaeipour, H., and Jafarian, Y. (2012) Decoupled solution for seismic permanent displacement of earth slopes using deformation-dependent yield acceleration. *Journal*

134, 790-803.

31. Rathje, E.M. and Saygili, G. (2009) Probabilistic assessment of earthquake-induced sliding displace-ments of natural slopes. *Bulletin of the New Zealand Society of Earthquake Engineering*, **41**, 18-27.
32. Hsieh, S.Y. and Lee, C.T. (2010) Empirical estimation of the Newmark displacement from the Arias intensity and critical acceleration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **122**, 34-42.
33. Rathje, E.M. and Antonakos, G. (2011) A unified model for predicting earthquake-induced sliding displacements of rigid and flexible slopes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **122**, 51-60.
34. لشگری، علی (1392) اصلاح روش بلوک لغزنده برای تخمین تغییرمکان ماندگار شیب‌های خاکی تحت بار زلزله. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان.
35. Wartman, J., Bray, J.D., and Seed, R.B. (2003) Inclined plane studies of the Newmark sliding block procedure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**, 673-684.
36. Wartman, J., Seed, R.B., and Bray, J.D. (2005) Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 610-622.
37. Pradel, D., Smith, P.M., Stewart, J.P., and Raad, G. (2005) Case history of landslide movement during the Northridge earthquake. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 1360-1361.
38. Singh, R., Roy, D., and Das, D. (2007) A correlation for permanent earthquake-induced deformation of earth embankments. *Engineering Geology*, **90**, 174-185.
39. Vahidfar, M. and Meehan, C.L. (2003) A multi-parameter correlation for predicting the seismic displacement of an earth dam or embankment. *Geotechnical and Geological Engineering*, **29**, 1023-1034.

of Earth-quake Engineering, **16**, 917-936.

21. Ambraseys, N.N. and Menu, J.M. (1988) Earthquake-induced ground displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**, 985-1006.
22. Franklin, A.G. and Chang, F.K. (1977) Earthquake resistance of earth and rock-fill dams, *U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station*. Miscellaneous Paper S-71-17, 59.
23. Yegian, M.K., Marciano, E.A., and Ghahraman, V.G. (1991) Earthquake-induced permanent deformations probalitic approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **117**, 35-50.
24. Ambraseys, N.N. and Srbulov, M. (1994) Attenuation of earthquake-induced ground displacements. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**(5), 467-487.
25. Bray, J.D. and Rathje, E.M. (1998) Earthquake-induced displacements of solid-waste landfills, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 242-253.
26. Watson-Lamprey, J. and Abrahamson, N. (2006) Selection of ground motion time series and limits on scaling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**(5), 477-482.
27. Bray, J.D. and Travasarou, T. (2007) Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**, 381-392.
28. Jibson, R.W. (2007). Regression models for estimating coseismic landslide displacement. *Engineering Geology*, **91**, 209-218.
29. Jibson, R.W. (1993). Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. *Transportation Research Record*, **1411**, 9-17.
30. Saygili, G. and Rathje, E.M. (2008) Empirical predictive models for earthquake-induced sliding displacements of slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,