



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۷۵ تا ۲۹۰
Vol. 48, No. 3, Fall 2016, pp. 275-290



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science & Research
Civil and Environmental Engineering
(ASJR-CEE)

بررسی عدم قطعیت‌های موجود در روابط تجربی و پیش‌بینی احتمالاتی گسترش جانبی ناشی از روانگرایی

یاسر جعفریان^{۱*}، احسان نصری^۲

۱- استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- کارشناس ارشد مکانیک خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

(دریافت: ۱۳۹۲/۳/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲۷)

چکیده

یکی از روش‌های پرکاربرد در ارزیابی میزان گسترش جانبی ناشی از روانگرایی که در نواحی با شیب ملایم رخ می‌دهد، استفاده از روش‌های تجربی است. عدم قطعیت‌های بسیاری به صورت ذاتی در مدل‌های تجربی وجود دارد که ناشی از عدم وجود مشاهدات کافی و همچنین پیچیدگی مسئله است. اگرچه مدل‌های تجربی متعددی برای پیش‌بینی مقدار تغییر مکان حاصل از گسترش جانبی ارائه شده، اما مطالعه‌ی جامعی در ارتباط با عملکرد آن‌ها در یک ساختار مقایسه‌ای انجام نگرفته است. مطالعات انجام‌شده در این مقاله را می‌توان به دو بخش عمده تقسیم‌بندی کرد: در بخش اول پس از مطالعه تعدادی از روابط تجربی پیشنهاد شده برای گسترش جانبی، به بررسی پایگاه داده‌های آن‌ها پرداخته شده و با استفاده از رگرسیون چند متغیره (MLR) رابطه‌ای پیشنهاد می‌شود. مدل پیشنهادی نسبت به دیگر روابط موجود از دقت مناسب‌تری برخوردار است. سعی شده است تا در ارائه این مدل، بخشی از عدم قطعیت‌های موجود با حذف بخشی از داده‌های تک گمانه‌ای به حداقل رسانده شود. در بخش دوم تأثیر عدم قطعیت‌های موجود در کمیت ژئوتکنیکی گزارش‌شده در پایگاه داده‌ها به کمک روش‌های اعتمادپذیری مرتبه اول (FORM)، مرتبه دوم (SORM) و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده نشان داده می‌شود و نتایج حاصل از این سه روش با هم مقایسه می‌گردند. نتایج این مقاله، اهمیت میزان خطا در عوامل ورودی بر مقادیر پیش‌بینی‌شده تغییر مکان جانبی زمین را به صورت واضح نشان می‌دهد و در نتیجه، امکان استفاده از احتمال فراگذشت از یک تغییر مکان مجاز دلخواه را فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی:

عدم قطعیت، روانگرایی، گسترش جانبی، رگرسیون چند متغیره، شبیه‌سازی مونت کارلو

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:
Jafarian, Y., and Nasri, E., 2016. "Evaluation of Uncertainties in the Available Empirical Models and Probabilistic Prediction of Liquefaction Induced Lateral Spreading". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), pp. 275-290.
DOI: 10.22060/ceej.2016.674
URL: http://ceej.aut.ac.ir/article_674.html

E-mail: yjafarianm@iies.ac.ir نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات:



۱- مقدمه

یکی از تبعات روانگرایی در خاک‌ها، گسترش جانبی بوده که در زلزله‌های پیشین خسارات قابل توجهی را به همراه داشته است. مطابق توصیف بارت و یود [۳،۴] گسترش جانبی ناشی از روانگرایی در شیب‌های ملایم (۳/۵ تا ۵ درصد) با تراز آب زیرزمینی بالا و لایه زیرین متشکل از ماسه سست (خاک غیرچسبنده مستعد روانگرایی) رخ می‌دهد. این پدیده در طی تکان‌های لرزه‌ای اتفاق افتاده و با اتمام آن‌ها نیز متوقف می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که وقوع روانگرایی در زیر زمین‌هایی با شیب متوسط تا تند می‌تواند منجر به لغزش‌های جریان^۱ گسترده‌ای شود که این لغزش‌ها حرکت‌های عظیم رو به پایین شیب و یا جریان خاک کاملاً گسیخته‌شده در فواصل به نسبت طولانی را به همراه دارند؛ در حالی که گسترش جانبی به حرکت‌های ملایم‌تر زمین‌هایی با شیب کم باز می‌گردد. بنابراین وجه تمایز آن با گسیختگی‌های جریانی باید مد نظر قرار گیرد. گسترش جانبی می‌تواند در نواحی با شیب کم و یا در نواحی مسطح مجاور سطوح آزاد رخ دهد. این شرایط زمین‌شناسی مناسب برای وقوع گسترش جانبی به طور متعدد در امتداد رودخانه‌ها و دیگر کناره‌های موجود در نهشته‌های رسوبی یا دلتایی جدید و همچنین خاکریزهای ماسه‌ای اشباع ریخته‌شده به صورت سست یافت می‌شوند. یود و هوس [۱۸] بیان کردند که در هر دو حالت تنش‌های برشی ایستایی وجود دارند که تمایل به ایجاد تغییر شکل در جهت رو به پایین شیب را دارند.

عدم قطعیت^۲ به معنی نداشتن اطلاعات کافی و آگاهی در یک موضوع است. در تمام موضوعات مرتبط با علوم مهندسی، عدم قطعیت‌هایی وجود دارند که باید برای حصول نتایج قابل قبول به نحو مطلوبی مورد ملاحظه قرار گیرند. این عدم قطعیت به خصوص در مهندسی ژئوتکنیک ملموس‌تر است که اغلب به علت خطاهای آزمایشگاهی، کمبود داده‌ها، عدم یکنواختی خصوصیات مصالح خاکی و بعضاً کمبود دانش کافی برای مدل کردن مسئله ایجاد می‌شوند. در فرایند ارزیابی مدل‌های تجربی، به متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه و محل احتیاج است. همواره ماهیت اندازه‌گیری، مستعد به وجود آمدن خطا است و این مشکل به طور طبیعی به عدم قطعیت‌هایی در داخل مدل تبدیل می‌شود.

در مسئله گسترش جانبی ناشی از روانگرایی، روش‌های تجربی جایگاه مناسبی را در پژوهش‌ها یافته‌اند. عدم قطعیت‌های گفته‌شده در روابط تجربی گسترش جانبی نیز وجود دارند. این نوع عدم قطعیت، ناشی از وجود خطا در برآورد عواملی مانند LSI و ϕ'_{eqv} و Z_{cr} و T_{15} و F_{15} و D_{5015} و M_w (به ترتیب شاخص شدت روانگرایی، زاویه اصطکاک داخلی معادل برای خاک روانگرا شده، فاصله عمقی از بالای سطح زمین برای بحرانی‌ترین زیرلایه، ضخامت تجمعی لایه‌های دانه‌ای اشباع با عدد نفوذ اصلاح‌شده (N_{160}) کم‌تر از ۱۵ (متر)، متوسط مقدار ریزدانه برای مصالح دانه‌ای موجود در T_{15} (درصد)، اندازه متوسط ذرات برای مصالح

^۱ Flow Failure

^۲ Uncertainty

۲- گسترش جانبی ناشی از روانگرایی

دانه‌ای قرار گرفته در لایه‌های خاک تشکیل‌دهنده T_{15} (میلی‌متر) و بزرگای گشتاوری زلزله) و ثبت میزان گسترش جانبی است. علاوه بر این کمیت‌ها، پیش‌بینی و یا اندازه‌گیری میزان ارتعاش زمین که در طول زلزله در یک محل مشخص اتفاق می‌افتد، می‌تواند مستعد خطاهای اندازه‌گیری باشد. کمترین میزان خطا که می‌توان به خوبی از آن صرف‌نظر نمود، هندسه زمین و شیب بوده که با دقت بالایی قابل اندازه‌گیری است.

در مقاله حاضر، پس از مطالعه روابط تجربی پیشنهاد شده توسط یود و همکاران [۱۷]، کاننیر [۱۱]، باواب [۱۵] و جوادی و همکاران [۱۰] به بررسی پایگاه داده‌های آن‌ها برای گسترش جانبی پرداخته می‌شود و همچنین با استفاده از رگرسیون چند متغیره (MLR) رابطه‌ای پیشنهاد می‌گردد که علاوه بر دقت بالای آن نسبت به دیگر روابط، سعی شده تا عدم قطعیت موجود در مدل را (که به علت وجود فاصله بین نقطه مرجع (مکانی که گسترش جانبی به وقوع پیوسته است) با گمانه‌هایی که مشخصات کامل آن گزارش شده به وجود آمده است)، با حذف داده‌های تک گمانه‌ای با فاصله بیشتر از ۵ متر از پایگاه داده‌ها به حداقل رسانده شود. با توجه به شرایط مرزی عدم قطعیت گسترش جانبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌شده نمی‌توان به طور یقین در برآورد کمیت مدل، تعریف مناسبی از شرایط مرزی گسترش جانبی داشت. دقت عوامل مدل برآورد شده بستگی به اطلاعات نقاط قابل دسترسی و قابل اطمینان دارد. اثر میزان خطای موجود در عوامل ورودی بر تابع تغییر مکان به کمک روش‌هایی همانند روش اعتمادپذیری مرتبه اول ($FORM$)، مرتبه دوم ($SORM$) و روش شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داده می‌شود. با فرض توزیع نرمال برای تغییر مکان اهمیت در نظرگیری خطاهای مذکور در برآورد نهایی مقدار تغییر مکان زمین بررسی و نتایج حاصل از سه روش احتمالاتی فوق با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

گسترش جانبی ناشی از روانگرایی به صورت تغییر مکان جانبی و محدود زمین‌های با شیب ملایم و در نتیجه افزایش فشار منفذی یا روانگرایی در نهشته‌های کم عمق در طی زلزله تعریف می‌شود. در شکل‌گیری گسترش جانبی، نیروهای محرک ایستایی از مقاومت برشی کاهش یافته خاک در امتداد سطح لغزش بیش‌تر نشده و در نتیجه، زمین در معرض لغزش جریانی قرار نمی‌گیرد. در مقابل، نیروهای محرک فقط در بخش‌هایی از بارگذاری لرزه‌ای که نیروهای اینرسی خالص را در جهت رو به پایین شیب اعمال می‌کنند، از نیروهای مقاوم بیش‌تر می‌شوند. گسترش جانبی می‌تواند در نواحی با شیب کم و یا در نواحی مسطح مجاور سطوح آزاد رخ دهد. در هر دو حالت تنش‌های برشی ایستایی وجود دارد که تمایل به ایجاد تغییر شکل در جهت رو به پایین شیب را دارند. اندازه تغییر شکل‌های ناشی از گسترش جانبی تحت تأثیر تقابل پیچیده عوامل متعددی مانند رفتار خاک روانگرا شده در ناحیه گسترش جانبی، حرکت آب منفذی در این ناحیه، تغییر شکل در لایه روانگرا شده و اثرات مرزی و

قابلیت اعتماد تبدیل گردیده است.

- روش قابلیت اعتماد مرتبه دوم ($SORM$): به دنبال یافتن روش‌هایی با دقت بیشتر و داشتن مراحل تکرار کمتر نسبت به روش FORM، این روش یک تقریب مرتبه دوم به دست آمده است.

- روش شبیه‌سازی مونت کارلو [۱]

۳-۱- روش شبیه‌سازی مونت کارلو

«مونت کارلو» توسط اولهام و متروپولیس در منهن پراجکت در جنگ جهانی دوم ابداع شد. شبیه‌سازی مونت کارلو در برگزیده انواع مختلف روش‌های نمونه‌گیری آماری است که برای حل تقریبی مسائل کمی به کار گرفته می‌شود. این روش (شبیه‌سازی) برای به دست آوردن راه‌حل‌های عددی برای مسائلی با حل تحلیلی بیش از حد پیچیده، بسیار مفید است. طیف گسترده‌ای از رشته‌های مهندسی و علوم پایه از روش‌های شبیه‌سازی مبتنی بر ورودی‌های تصادفی (متغیر تصادفی) استفاده می‌کنند که اغلب این روش‌ها، با عنوان روش مونت کارلو معرفی می‌شوند. این نوع روش‌ها معمولاً هم برای مطالعه سیستم‌های تصادفی و هم قطعی به کار می‌روند. اولین گام در شبیه‌سازی مونت کارلو، انتخاب مناسب تابع عملکرد قطعی است. گام بعدی، تعریف متغیرهای ورودی برای تابع عملکرد و همچنین انتخاب توزیع احتمال برای هر یک از متغیرها است. به عنوان مثال، توابع توزیع احتمال بتا، گاما، نرمال، لاگ نرمال، یکنواخت و غیره در شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از یک مولد شبه تصادفی (تولیدکننده اعداد تصادفی) برای هر یک از متغیرهای ورودی یک مقدار تصادفی انتخاب می‌شود. سپس از مقادیر تصادفی انتخاب شده برای هر یک از متغیرها در حل تابع عملکرد استفاده می‌شود. مجدداً عدد تصادفی دیگری برای کمیت ورودی انتخاب و دوباره سیستم بر اساس آن تحلیل می‌شود. با تکرار این روند به تعداد n بار، n جواب تصادفی برای مسئله حاصل شده و در انتها برای جواب‌های حاصله نمودارهای تابع چگالی احتمال (PDF) و تابع تجمعی احتمال (CDF) رسم و احتمال خرابی و یا احتمال برای یک مقدار اطمینان مورد نظر (اندیس قابلیت اطمینان) تعیین می‌شود [۱].

۳-۲- تحلیل قابلیت اعتماد

قابلیت اعتماد یک سیستم عبارت است از احتمال عملکرد رضایت‌بخش سیستم در شرایط محیطی مشخص و در زمان معین. از آنجایی که اندازه‌گیری مؤلفه‌های لازم برای ارزیابی گسترش جانبی در مکان و زمان‌های متفاوت دارای فراوانی‌های متفاوتی است، پیش‌بینی مقدار گسترش جانبی (تابع رفتار مدل) به عنوان پدیده‌ای که دارای عدم قطعیت‌هایی است، بدون هیچ الگوی مشخصی با عبارتی همچون احتمال وقوع آن بیان می‌شود. اولین قدم در ارزیابی قابلیت اعتماد، تعیین رفتار پاسخ سیستم و همچنین عوامل دخیل در آن است. متغیرهای پایه در سیستم در واقع تشکیل‌دهنده تابعی هستند که معیار عملکرد صحیح

اینرسی قرار دارد. روش‌های گوناگونی به منظور تخمین تغییر مکان‌های ناشی از گسترش جانبی وجود دارد. منحنی‌های کرنش برشی بیشینه به دست آمده بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی، تنها در چند سال اخیر برای تخمین تغییر مکان افقی ناشی از گسترش جانبی به کار گرفته شده‌اند که فرق چندانی ندارند. تلاش‌های گذشته برای تخمین تغییر مکان جانبی را می‌توان در قالب ۱- مدل‌های تجربی و نیمه تجربی، ۲- مدل‌های تحلیلی و ۳- مدل‌های ساختاری دسته‌بندی نمود [۱۸، ۱۴، ۱۲].

مدل‌های تجربی فقط براساس تحلیل‌های انجام شده بر روی رخدادهای موردی محلی گسترش‌های جانبی ناشی از روانگرایی بوده و اغلب در ایجاد ابزارهای پیش‌بینی‌کننده تجربی حاصل، از سازو کارهای بنیادی این پدیده بهره‌ای نبرده‌اند. در روش نیمه تجربی برخلاف روش قبلی، از دانش کسب شده در آزمون‌های آزمایشگاهی در راستای اصلاح و بهبود تلاش‌های تجربی برای مدل کردن گسترش جانبی استفاده می‌شود [۱۳]. از سویی دیگر، مدل‌های تحلیلی و ساختاری بر مبنای یک دیدگاه تئوری فرمول بندی شده و سپس درستی آن‌ها با استفاده از نتایج مدل‌های فیزیکی مانند آزمایش‌های سانتریفوژ یا میز لرزه و یا مطالعات موردی محلی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲].

۳-۳- قابلیت اعتماد

در مسائل مربوط به مهندسی عمران به ویژه مهندسی ژئوتکنیک با عوامل و متغیرهایی مواجه می‌شویم که دارای مقادیر ثابت و معین نبوده و ماهیت تصادفی دارند. بنابراین ارزیابی این مسائل با نوعی عدم قطعیت مواجه می‌گردد. در این گونه مسائل، با تعریف تابعی از متغیرهای تصادفی به عنوان تابع شرایط حدی (کارایی) که مرز بین سلامت و خرابی را مشخص می‌کند، ارزیابی احتمال خرابی و یا مکمل آن یعنی قابلیت اعتماد امکان پذیر خواهد بود. تحقیقات زیادی در دهه‌های اخیر با توجه به اهمیت قابلیت اعتماد در طراحی به منظور محاسبه قابلیت اعتماد انجام شده و روش‌های مختلفی نیز پیشنهاد گردیده است. مسئله اساسی در تئوری قابلیت اعتماد، محاسبه انتگرال احتمال بوده که عبارت است از:

$$P_f = \text{Pr ob} \left[G(x) \leq 0 \right] = \int_{G(x) \leq 0} f(x) dx \quad (1)$$

که در آن، P_f احتمال خرابی $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$ برداری شامل متغیرهای تصادفی است که کمیت‌های دارای عدم قطعیت را بیان می‌کنند، $f(x)$ تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای تصادفی و $G(x)$ تابع شرایط حدی (کارایی) است. انتگرال گیری روی مقادیر $G(x) \leq 0$ بیانگر بازه‌ای است که احتمال خرابی در آن وجود دارد. دشواری محاسبه این انتگرال موجب پیدایش روش‌های تقریبی زیادی شده است و به عنوان مثال می‌توان به روش‌های زیر اشاره نمود:

- روش قابلیت اعتماد مرتبه اول ($FORM$): که یکی از قابل اطمینان‌ترین روش‌های محاسبه‌ای است. این روش پس از مطالعات فراوان انجام شده در سه دهه گذشته به یک روش پایه برای ارزیابی

پیش‌بینی

در ادامه، داده‌ها به دو دسته تقسیم‌بندی شدند: ۱- داده‌های موجود در زمین‌های با شیب ملایم و ۲- داده‌های ثبت‌شده در شیب‌هایی با وجه آزاد. سپس معادلات جداگانه‌ای برای پیش‌بینی هر دسته از داده‌ها به دست آمد؛ به این صورت که یک مجموعه اطلاعات وسیع از موارد تغییر شکل‌های جانبی در گذشته را به کار بردند تا روابطی تجربی میان جابه‌جایی‌های جانبی زمین و تعدادی از عوامل منبع زلزله برقرار سازند. مجموعه اطلاعات مربوط به ساختگاه‌هایی از آمریکای غربی و ژاپن برای فواصل منبع تا ساختگاه تا ۹۰ کیلومتر تحت اثر زلزله‌هایی با بزرگای M_w بین ۶/۴ تا ۹/۲ بوده است. آن‌ها به منظور تعیین عواملی که قوی‌ترین اثر را بر تغییر مکان‌های جانبی زمین دارند، از تحلیل رگرسیون استفاده کردند. در نتیجه، مدل تجربی مبتنی بر این فاکتورها پایه‌گذاری شد. کاربرد این روابط در خصوص اطلاعات مربوط به موارد گذشته، نشان داده است که ۹۰ درصد از تغییر مکان‌های مشاهده‌شده با ضریب ۲ در محدوده مقادیر محاسبه‌شده بوده‌اند. دامنه عوامل ورودی که نتایج محاسبه‌شده بر اساس آن‌ها با تغییر مکان‌های مشاهده‌شده در گذشته مقایسه و در جدول (۱) ارائه شده است [۳-۶].

در جدیدترین اصلاح صورت گرفته بر روی مطالعات یود و بارتلت [۶]

جدول (۱): محدوده مؤلفه‌های ورودی

کمیت‌های ورودی	محدوده مقادیر
بزرگای گشتاوری	$0.6 < M_w < 0.8$
ضریب جبهه آزاد (درصد)	$0.1 < W < 2.0$
ضخامت لایه سست (متر)	$3.0 < T_{15} < 12$
درصد ریزدانه (درصد)	$0 < F_{15} < 50$
اندازه متوسط ذرات (میلی‌متر)	$1.0 < (D_{5015}) < 1$
شیب زمین (درصد)	$1.0 < S < 6$
عمق تا پایین مقطع (متر)	$15 < \text{عمق تا پایین زون روانگرا شده}$

در خصوص تخمین تغییر مکان ناشی از گسترش جانبی، یود و همکارانش [۱۷] خطاهای متعدد موجود در پایگاه داده‌های اصلی را اصلاح کرده و تلاش نمودند تا متغیرهای مورد استفاده در رابطه پیش‌بینی MLR را به صورت رابطه‌های (۳) و (۴) بهینه کنند:

Free face :

$$\log(D_H) = -16.713 + 1.532M_w - 1.406 \log R^* - 0.012R + 0.592 \log W + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D_{5015} + 0.1 \text{ mm}) \quad (3)$$

سیستم خواهند بود. در حالت کلی، تابع رفتار مدل ممکن است تابعی خطی یا غیرخطی از متغیرهای پایه باشد. اگر تابع رفتار مدل تابع خطی از متغیرهای ناهمبسته نرمال و یا یک تابع غیرخطی، ولی با تقریب خطی (درجه اول) قابل قبول از متغیرهایی شبیه نرمال باشد، روش $FORM$ در محاسبه انتگرال اساسی قابلیت اطمینان، مناسب خواهد بود. همچنین $SORM$ احتمال وقوع تابع رفتار مدل را با تخمین درجه دوم، تابع رفتار مدل غیرخطی و همچنین در نظر گرفتن توزیع دلخواه محاسبه می‌کند.

۴- معرفی مدل‌های تجربی و نیمه تجربی گسترش جانبی

هامادا و همکارانش^۱ [۹] با گردآوری یک پایگاه داده برای رخدادهای موردی شامل ساختگاه‌هایی که در آن‌ها طی زلزله‌های نیگاتا^۲ (۱۹۶۴)، سان فرناندو^۳ (۱۹۷۱) و نیهونکای-چوبا^۴ (۱۹۸۳) گسترش جانبی رخ داده بود، نخستین گام اساسی را در این راستا برداشتند و رابطه (۲) را ارائه دادند:

$$D_H = 0.75 \times H^{0.5} \times \theta^{1/3} \quad (2)$$

که در آن، H ضخامت لایه‌ی روانگرا (متر) و θ بیشینه دو مقدار شیب سطح زمین یا شیب مرز پایینی لایه روانگرا (درصد) است [۹]. همزمان با مطالعات قبلی، یود و پرکلین [۱۶] یک پایگاه داده از رخدادهای موردی گسترش جانبی را که در محدوده وسیعی از دشت‌های سیلابی، دلتاها یا دیگر مناطق با شیب کم متشکل از نهشته‌های رودخانه‌ای دوره هولوسن در غرب ایالات متحده رخ داده بود، جمع‌آوری نمودند و داده‌هایی را که در شرایط زمین‌شناسی متفاوت و یا نقاط دیگر رخ داده بود، کنار گذاشتند. این مطالعه تلاشی بود برای هم‌پایه‌سازی شاخص شدت روانگرایی (LSI) که به صورت بیشینه مقدار تغییر مکان تفاضلی زمین گسیخته‌شده بر حسب اینچ در منطقه‌ای مشخص با شرایط زمین‌شناسی مورد نظر، تعریف می‌شود. با هم‌پایه‌سازی پایگاه داده‌ها، LSI منحصراً به صورت تابعی از مؤلفه‌های لرزه‌ای معرفی شد. یود و بارتلت^۵ [۶] روش تجربی هامادا و همکارانش^۶ [۹] و مفهوم LSI را با انجام موارد زیر توسعه دادند:

- اضافه‌نمودن رخدادهای موردی جدید به پایگاه داده‌ها
- تغییر در تعریف رخداد موردی؛ به این صورت که به جای در نظر گرفتن هر رخداد (تغییر مکان) در هر مقطع، هر بردار تغییر مکان اندازه‌گیری‌شده منفرد به عنوان یک نقطه داده‌ای در نظر گرفته می‌شود؛ به طوری که روی هر عارضه کلی گسترش جانبی می‌تواند تعداد زیادی از چنین بردارهای تغییر مکانی وجود داشته باشد.
- در نظر گرفتن مجموعه گسترده‌تری از متغیرهای ورودی در معادله

¹ Hamada et al.

² Niigata

³ San Fernando

⁴ Nihonkai-Chubu

⁵ Youd and Bartlett

⁶ Hamada et al.

البواب [۱۵] از کشور ترکیه در سال ۲۰۰۵ پایگاه داده‌های جامع‌تری را با متغیرهای جدید (مانند: LSI و a_y/a_{max} و $\tan\beta/\tan\phi_{eqv,LT}$ و غیره) برای پایگاه داده‌های جدید موجود تهیه کرد. در پایگاه داده جدید رخدادهای موردی مربوط به زلزله‌های ۱۹۷۶ گواتمالا، ۱۹۷۷ آرژانتین، ۱۹۸۳ آمریکا^۲، ۱۹۸۹ آمریکا^۳، ۱۹۹۰ فیلیپین^۴، ۱۹۹۴ آمریکا^۵، ۱۹۹۹ تایوان^۶، ۲۰۰۳ آمریکا^۷ و ژاپن^۸ اضافه شده‌اند [۱۵]:

$$\log(D_H) = [(\theta_1 LSI + \theta_2) + (\theta_3 LSI + \theta_4) + (\theta_5 LSI + \theta_6) \log Z_{cr} + (\theta_7 LSI + \theta_8) \log M_w + (\theta_9 LSI + \theta_{10}) a_{max} + (\theta_{11} LSI + \theta_{12}) \log S + (\theta_{13} LSI + \theta_{14}) \log W + (\theta_{15} LSI + \theta_{16})]$$

جدول (۲): ضرایب رگرسیون

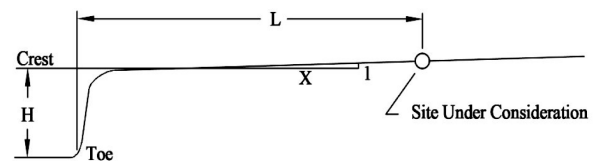
$W>0$ & $S>0$	$S=0$	$W=0$	θ
۰/۱۷۷	۰/۱۳۳	۰/۰۲۹	۱
-۲/۳۸۶	-۱/۲۷۹	-۰/۱۰۸	۲
-۱/۷۵۱	صفر	۰/۰۱۲	۳
۵/۵۴۲	صفر	-۰/۸۹۱	۴
-۰/۱۹۸	۰/۱۳۸	۰/۰۳	۵
۱/۶۴۱	۰/۷۵۳	۰/۱۴۳	۶
-۹/۹۴۹	-۱۱/۳۵۰	-۱/۲۷۷	۷
۲۲/۸۴۵	۶۵/۶۶۱	۲/۲۹۰	۸
-۰/۶۲۱	-۲/۷۴۳	-۰/۱۰۴	۹
۱/۳۶۶	۱۴/۶۳۴	۰/۰۱۹	۱۰
۰/۲۴۰	صفر	-۰/۰۱۲	۱۱
-۱/۰۹۵	صفر	۰/۵۳۶	۱۲
-۰/۰۹۵	-۰/۱۱۷	صفر	۱۳
۱/۱۸۲	۱/۴۸۲	صفر	۱۴
۹/۳۱۱	۱۰/۶۳۸	۱/۱۷۸	۱۵
-۲۲/۵۸۷	-۶۱/۴۱۱	-۱/۹۳۶	۱۶

در سال‌های اخیر، روش‌های هوش مصنوعی در زمینه ارائه روابطی برای تخمین تغییر مکان جانبی توسعه یافته و توانسته است که با استفاده از پایگاه داده‌های ایجاد شده به وسیله یود و همکارانش [۱۷] پیش‌بینی دقیق‌تری را نسبت به روابط این محققان ارائه کند. این روش‌ها شامل روش شبکه عصبی و روش GP هستند که به ترتیب توسط بازیار و قربانی^۹ [۷] و جوادی و همکارانش^{۱۰} [۱۰] پیشنهاد شده‌اند. رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) توسط جوادی و همکارانش [۱۰] و با استفاده از روش GP ارائه شده است:

Sloping ground :

$$\log(D_H) = -16.213 + 1.532 M_w - 1.406 \log R^* - 0.012 + 0.338 \log S + 0.540 \log T_{15} + 3.413 \log(100 - F_{15}) - 0.795 \log(D_{5015} + 0.1 \text{ mm})$$

که در آن D_H تغییر مکان جانبی تخمین زده شده (متر)، M_w بزرگای گشتاوری زلزله، R نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای (کیلومتر)، W نسبت وجه آزاد که به صورت ارتفاع وجه آزاد تقسیم بر فاصله کف تا نقطه مورد بررسی تعریف می‌شود (مطابق شکل (۱)).



L = Distance From Toe Of Free Face To Site Under Consideration

H = Height Of Free Face (Crest Elev. - Toe Elev.)

W = Free-Face Ratio = (H/L)(100), in percent

S = Slope Of Natural Ground Toward Channel = (1/X)(100), in percent

شکل (۱): نسبت وجه آزاد

در این شکل، S شیب زمین (درصد)، T_{15} ضخامت تجمعی لایه‌های دانه‌ای اشباع با عدد نفوذ اصلاح شدهی ($N_{1,60}$) کمتر از ۱۵ (متر)، F_{15} متوسط مقدار ریزدانه برای مصالح دانه‌ای موجود در T_{15} (درصد)، D_{5015} اندازه متوسط ذرات برای مصالح دانه‌ای قرار گرفته در لایه‌های خاک تشکیل دهنده T_{15} (میلی‌متر) است [۱۶، ۱۷].

$$R^* = R_0 + R ; R_0 = 10^{0.89M - 5.64}$$

کانبیر [۱۱] با اضافه‌نمودن رخدادهای موردی جدید مربوط به زلزله ۱۹۹۹ از میر ترکیه^۱ به پایگاه داده‌های یود و همکارانش [۱۷]، رابطه‌ای را پیشنهاد کرد که دقت بالاتری دارد [۱۱]:

Free face :

$$\log(D_H) = -20.71 + 25.32 \log M_w - 1.39 \log R^* - 0.009R + 1.15 \log W + 0.19 T_{15}^{0.5} - 0.02 F_{15} - 0.84 \log(D_{5015} + 0.1 \text{ mm})$$

Sloping ground :

$$\log(D_H) = -7.52 + 8.44 \log M_w + 0.001 R^* - 0.23R + 0.11S + 0.6 \log T_{15} - 0.22 F_{15} - 0.89 \log D_{5015}$$

Combined Free face and ground Slope :

$$\log(D_H) = -18.84 + 23.37 M_w - 1.31 \log R^* - 0.009R + 0.06S + 0.09W + 0.46 \log T_{15} - 0.02 F_{15} - 0.90 \log(D_{5015} + 0.1 \text{ mm})$$

^۱ The Lake Sapanca Area

^۲ Borah Peak

^۳ Loma Prieta

^۴ Luzon

^۵ Northridge

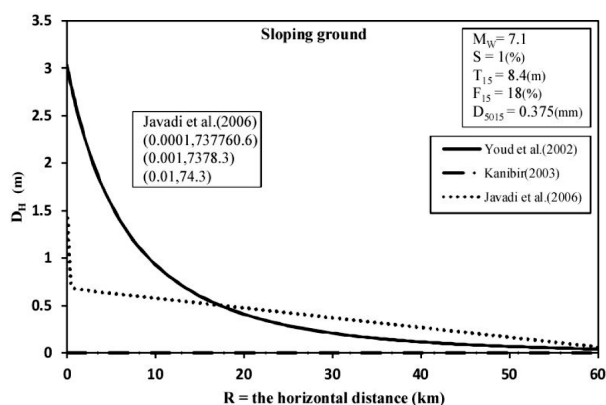
^۶ Chi-Chi

^۷ San Simeon

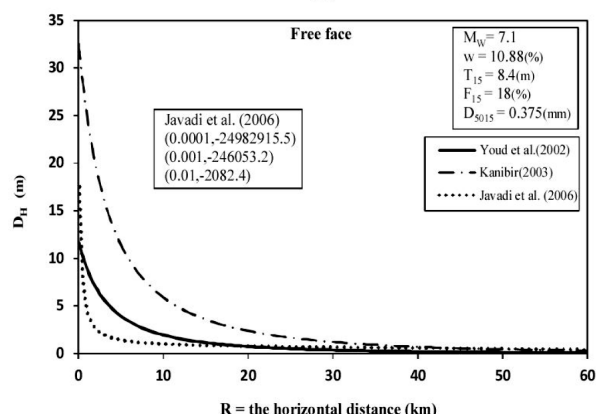
^۸ Tokachi-Oki

^۹ Baziar and Ghorbani

^{۱۰} Javadi et al.



(a)



(b)

شکل (۲): تأثیر R (نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای) در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده توسط روابط مختلف

است که مقدار عوامل ورودی هر رابطه به غیر از متغیری که قرار است تغییرات آن مورد بررسی قرار گیرد، ثابت در نظر گرفته می‌شود. همچنین سعی شد تا برای مقایسه بهتر بین نمودارها، از مشخصات یکسانی برای هر حالت استفاده گردد.

شکل (۳) تأثیر R (نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای) با مقادیر گشتاوری مختلف در میزان گسترش جانبی را در رابطه یود و همکارانش [۱۷] نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود و در شکل‌های (۳-ا) و (۳-ب) نیز قابل مشاهده است، در یک مقدار مشخص R (نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای)، میزان گسترش جانبی با افزایش بزرگای گشتاوری افزایش می‌یابد که این موضوع، نشان‌دهنده رفتار قابل قبول از یک مدل تجربی است که یود و همکارانش [۱۷] برای پیش‌بینی گسترش جانبی پیشنهاد کرده‌اند. اختلاف میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده در دو حالت *Sloping ground* و *Free face* به ترتیب به مقدار S (شیب زمین) و W (نسبت سطح آزاد) برمی‌گردد.

شکل (۴) تأثیر فاصله با بزرگای گشتاوری‌های مختلف در میزان گسترش جانبی را در رابطه کانیبیر [۱۱] نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) نیز توضیح داده شد، انتظار می‌رود تا در شکل (۴) نیز

Free face :

$$Dh_c = -234.1 \frac{1}{M^2 R W} - 156 \frac{1}{M^2} - 0.008 \frac{F_{15}}{R^2 T_{15}} + 0.01 \frac{W T_{15}}{R} - 2.9 \frac{1}{F_{15}} - 0.036 \frac{M T_{15}^2 D_{5015}^2}{R^2 W} + 9.4 \frac{M}{R F_{15}} - 4 \times 10^{-6} \frac{M R^2}{D_{5015}} + 3.84 \quad (10)$$

Sloping ground :

$$Dh_c = -0.027 \frac{T_{15}^2 F_{15}}{M^2} + 0.05 \frac{R T_{15}}{M^2 D_{5015}} + 0.44 \frac{1}{M R^2 S T_{15}} - 0.03 R - 0.02 \frac{M}{S T_{15}} - 5 \times 10^{-5} \frac{M R}{D_{5015}^2} + 0.075 M^2 - 2.4 \quad (11)$$

۵- مطالعه پارامتریک

به دلیل سادگی و با توجه به عدم وجود اطلاعات، بعضی از متغیرها در مدل‌های پیشنهادی برای میزان گسترش جانبی گنجانده نمی‌شوند؛ مانند دانه‌بندی خاک، نفوذپذیری افقی و عمودی لایه‌های بالایی و زیرین و همچنین فراوانی مشخصات لرزه‌ای زمین لرزه و غیره. این متغیرها ممکن است منبع خطا در نتایج پیش‌بینی‌ها باشند. علاوه بر این، فرمول‌بندی نادرست و عدم توجه به اثر متقابل متغیرها بر روی یکدیگر، ممکن است منبع برخی از اشتباهات اضافی در تخمین رفتار باشند.

در ادامه به بررسی تأثیر هر کدام از متغیرهای موجود در ارزیابی میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده توسط هر کدام از روابط پرداخته می‌شود. هدف از این بخش، بررسی جنبه فیزیکی روابط تجربی پیشنهاد شده برای پیش‌بینی میزان گسترش جانبی است.

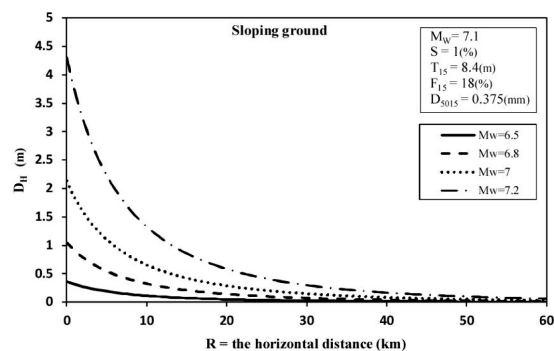
شکل (۲) تأثیر تغییرات R (نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای) در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده در دو حالت *Free face* و *Sloping ground* را در روابط یود و همکارانش [۱۷]، کانیبیر [۱۱] و جوادی و همکارانش [۱۰] نشان می‌دهد. با افزایش نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای، انتظار می‌رود تا میزان گسترش جانبی به علت کاهش انرژی زلزله کاهش یابد. البته همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود، تأثیرپذیری مقدار گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده در رابطه جوادی و همکارانش [۱۰] نسبت به فاصله‌های افقی نزدیک مانند (۰/۰۰۰۱، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱) بسیار بیشتر از دو رابطه موجود است. همچنین شکل (۲-ا) نشان می‌دهد که رابطه کانیبیر [۱۱] نتوانسته تغییرات گسترش جانبی را نسبت به نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای به خوبی دو رابطه موجود پیش‌بینی کند.

نحوه ترسیم تمام نمودارهای موجود در این بخش به این صورت

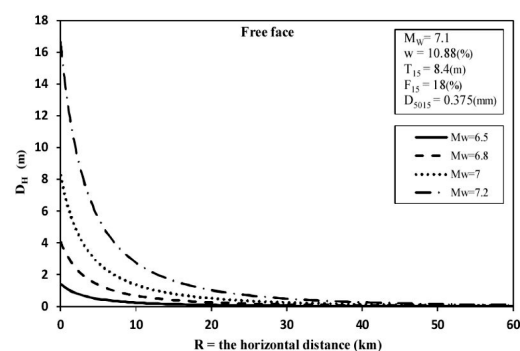
بتوان چنین رفتاری را از مدل تجربی کانیبیر [۱۱] مشاهده نمود؛ با این تفاوت که در این رابطه و در حالت *Sloping ground* (شکل (۴-ا)) گسترش جانبی بسیار کمتری را نسبت به حالت *Free face* و حتی کمتر از حالت *Sloping ground* حاصل از رابطه یود و همکارانش [۱۷] (شکل (۳-ا)) به دست می‌آید.

در شکل (۵) سعی شد تا مانند شکل‌های (۳) و (۴) نموداری رسم شود که در آن، اثر تغییرات R با بزرگای گشتاوری‌های مختلف در میزان گسترش جانبی در رابطه جواد و همکارانش [۱۰] مورد بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در شکل‌های (۵-ا) و (۵-ب) نیز مشاهده می‌شود، مقدار گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده توسط رابطه جواد و همکارانش [۱۰] با فیزیک مسئله در تضاد است. زیرا گسترش جانبی را کمتر از صفر پیش‌بینی می‌نماید. درستی این موضوع را می‌توان در نمودارهای قبلی (شکل‌های (۳) و (۴)) که با همین شرایط رسم شده‌اند و همچنین رخدادهای موردی موجود در پایگاه داده‌ها مشاهده نمود.

شکل (۶) به ترتیب اثر تغییرات S (شیب زمین) و W (نسبت سطح آزاد) را در میزان گسترش جانبی ناشی از روانگرایی در چهار رابطه تجربی یود و همکارانش [۱۷]، کانیبیر [۱۱]، البواب [۱۵] و جواد و همکارانش [۱۰] نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً در شکل‌های (۲-ا) و (۴-ا) نیز ارائه شد و همچنین می‌توان دوباره در شکل (۶-ا) نیز مشاهده نمود،

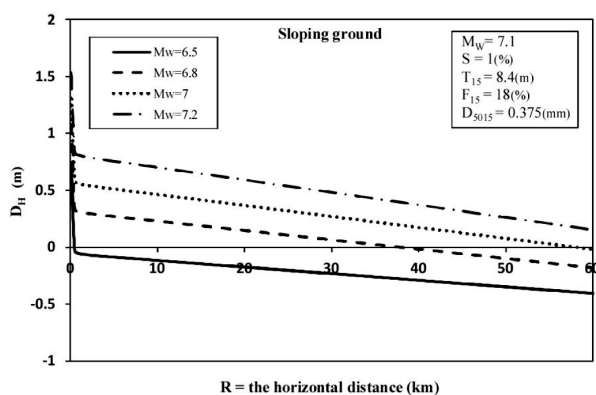


(a)

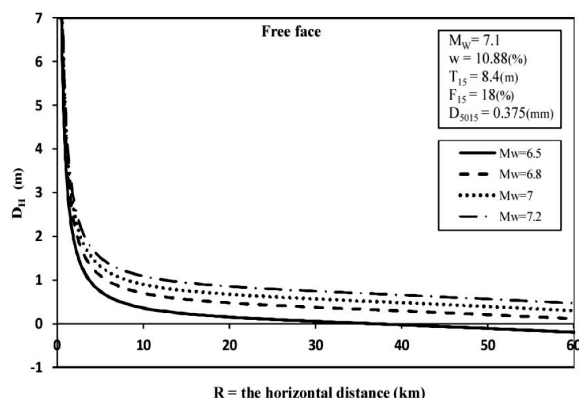


(b)

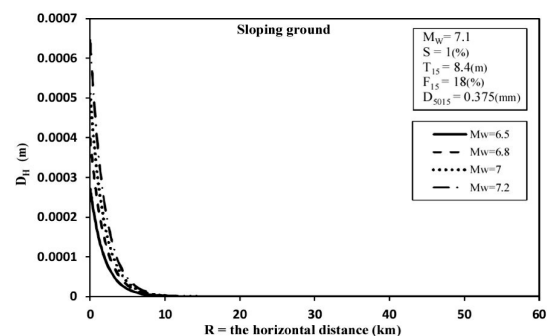
شکل (۳): تأثیر R (نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای) و بزرگای زلزله در گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده توسط روابط مختلف [۱۷]



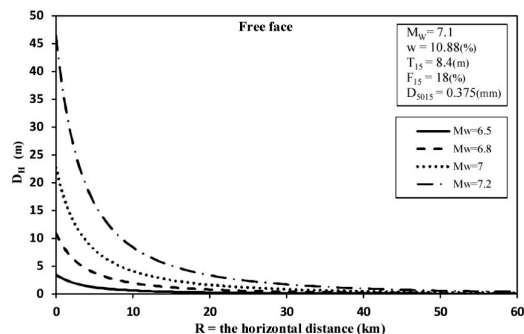
(a)



(b)



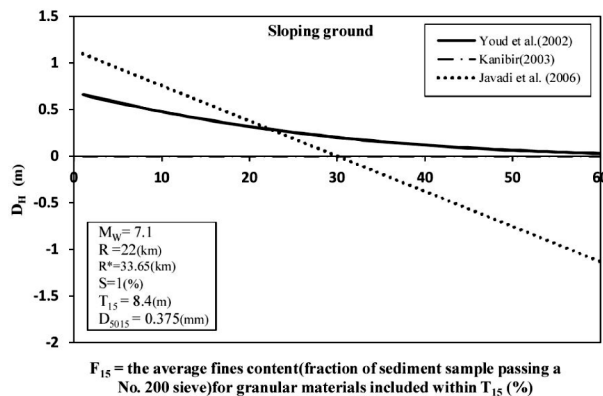
(a)



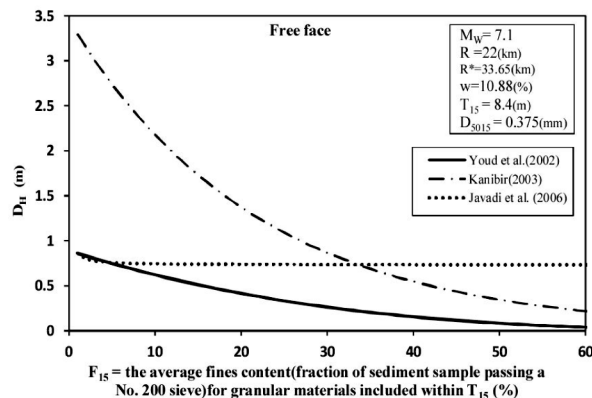
(b)

شکل (۴): تأثیر R (نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای) و بزرگای زلزله در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده [۱۱]

شکل (۵): تأثیر R (نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای) و بزرگای زلزله در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده [۱۰]

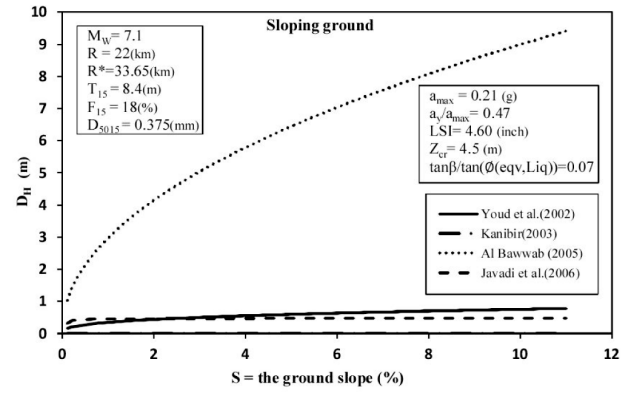


(a)

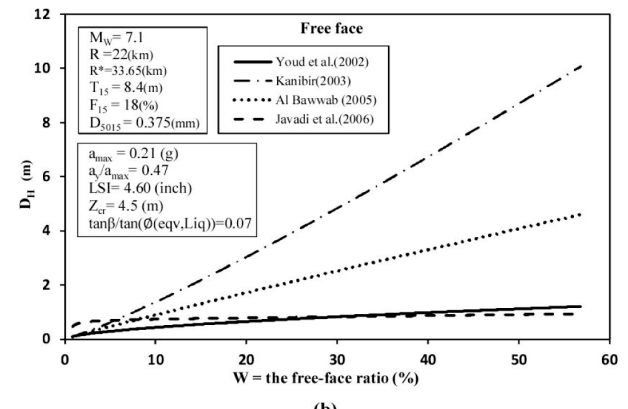


(b)

شکل (۷): تأثیر تغییرات F_{15} در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده

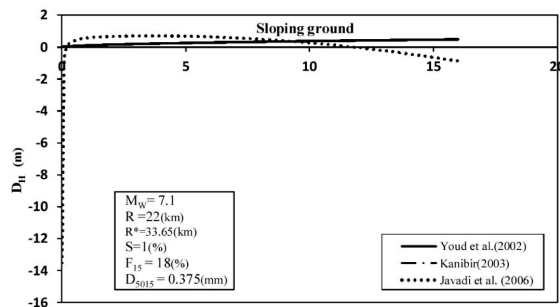


(a)

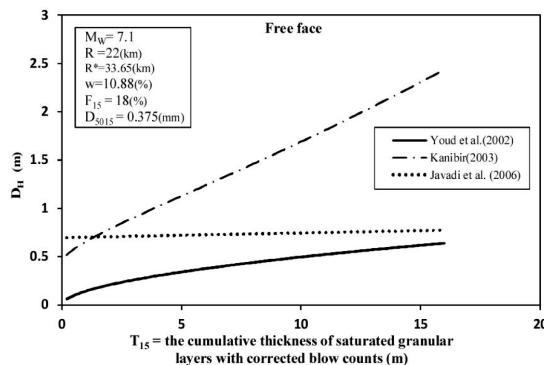


(b)

شکل (۸): تأثیر S (شیب زمین) و W (نسبت سطح آزاد) در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده



(a)



(b)

شکل (۹): تأثیر تغییرات T_{15} در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده

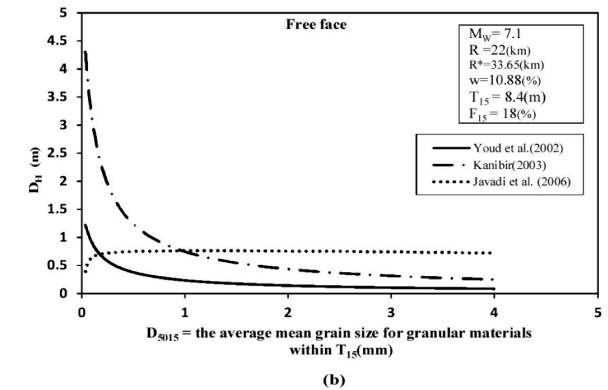
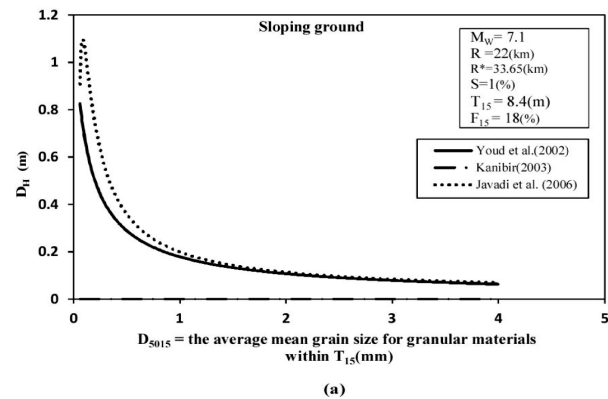
مقدار گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده توسط رابطه کانیبیر [۱۱] بسیار کمتر از مقداری است که توسط روابط دیگر پیش‌بینی می‌شوند. می‌توان از شکل‌های (۶-ا) و (۶-ب) این‌طور برداشت نمود که تأثیرپذیری میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده توسط رابطه جواد و همکارانش [۱۰] از S (شیب زمین) و W (نسبت سطح آزاد) بسیار ناچیز است.

از آن‌جایی که البواب [۱۵] در مدل پیشنهادی خود از عوامل دیگری همچون LSI شاخص شدت روانگرایی، $\phi'_{eqv, liq}$ زاویه اصطکاک داخلی معادل برای خاک روانگرا شده، Z_{cr} فاصله عمقی از بالای سطح زمین برای بحرانی‌ترین زیرلایه و نسبت‌های a_y/a_{max} و $\tan\beta/\tan\phi_{eqv, LT}$ برای پیش‌بینی گسترش جانبی استفاده نمود و نیز بر این باور بود که میزان گسترش جانبی بیشتر تحت تأثیر این عوامل است و به همین علت بود که در شکل‌های (۷) تا (۹) از این رابطه استفاده نشد. شکل (۷) اثر تغییرات F_{15} (متوسط مقدار ریزدانه برای مصالح دانه‌ای موجود در ناحیه T_{15} (درصد)) در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده در سه رابطه یود و همکارانش [۱۷]، کانیبیر [۱۱] و جواد و همکارانش [۱۰] را نشان می‌دهد. شکل (۷) حاکی از آن است که با افزایش F_{15} ، مقدار گسترش جانبی کاهش می‌یابد.

شکل (۸) اثر تغییرات T_{15} (ضخامت تجمعی لایه‌های دانه‌ای اشباع با عدد نفوذ اصلاح‌شده $(N_{1,60})$ کم‌تر از ۱۵ (متر) در میزان گسترش

را نشان می‌دهد که این مدل در حالت *Sloping ground* رفتاری را بروز می‌دهد که برخلاف تمامی مدل‌هایی است که تا به این‌جا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. چون از نظر فیزیکی انتظار می‌رود تا در یک شیب ثابت با افزایش بزرگای گشتاوری، میزان گسترش جانبی رو به افزایش باشد؛ در حالی که در شکل (۱۰-ا) رفتار کاملاً متفاوت است.

مطالعه انجام‌شده بر روی هر کدام از روابط در حالت *Sloping ground* و *Free face*، این امکان را فراهم ساخت تا رفتار هر کدام از مدل‌ها را تحت تأثیر تغییر کمیت ورودی مشاهده و بررسی کرد که نتایج حاصل از هر مدل چقدر با مشاهدات طبیعی سازگار است. در نهایت نیز می‌توان گفت که از بین مدل‌هایی که در این بخش مورد بررسی قرار گرفتند، مدل یود و همکارانش [۱۷] سازگاری بیشتری را با وقوع گسترش جانبی در طبیعت داشت. اما در این مدل به عدم قطعیت‌هایی که به علت وجود فاصله بین نقطه مرجع با گمانه‌هایی که مشخصات کامل آن گزارش شده است، توجهی نشده است. در ادامه سعی می‌شود تا در ابتدا با پایگاه داده‌های جدیدی که با حذف بعضی از داده‌های تک‌گمانه‌ای از پایگاه داده‌های یود و همکارانش [۱۷] تهیه شد، تأثیر وجود داده‌های تک‌گمانه روی مقدار R^2 و $RMSE$ (ریشه متوسط مربع خطاها) بررسی شود و سپس رابطه همبستگی جدیدی ارائه گردد. همچنین در ارائه این رابطه، تلاش بسیار زیادی صورت گرفت تا مدل از نظر فیزیکی با مشاهدات

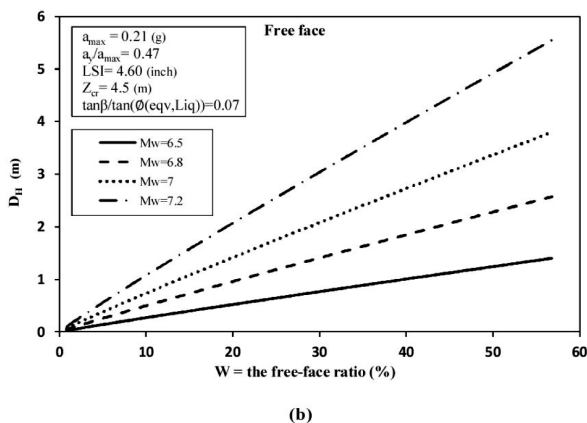
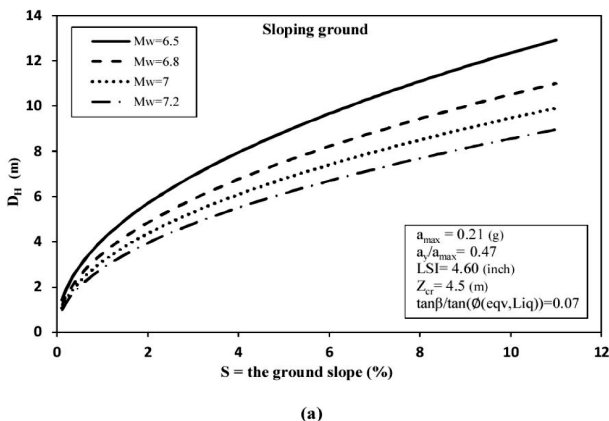


شکل (۹): تأثیر تغییرات D_{5015} در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده

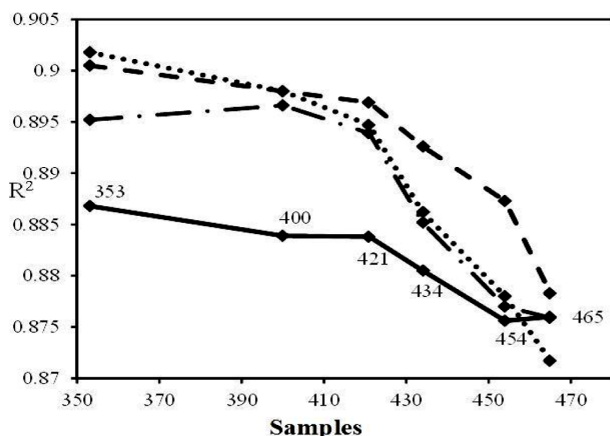
جانبی پیش‌بینی‌شده در سه رابطه مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸-ا) نیز قابل مشاهده است، نتایج حاصل از رابطه جواد و همکارانش [۱۰] از نظر فیزیکی با مشاهدات طبیعی سازگار نیست. اما با افزایش ضخامت تجمعی لایه‌های دانه‌ای اشباع با عدد نفوذ اصلاح‌شده ($N_{1,60}$) کمتر از ۱۵ (متر) گسترش جانبی افزایش می‌یابد که این موضوع، به صورت غیرمستقیم به میزان تأثیر این عامل روی پتانسیل خاک برای وقوع روانگرایی و تغییر مکان خاک وابسته است. یود و همکارانش [۱۷] در شکل‌های (۷) و (۸) توانسته‌اند در هر دو حالت *Sloping ground* و *Free face* تا حد قابل‌قبولی رفتار درستی از پدیده گسترش جانبی نشان دهند.

شکل (۹) اثر تغییرات D_{5015} (اندازه متوسط ذرات برای مصالح دانه‌ای قرار گرفته در لایه‌های خاک تشکیل‌دهنده T_{15} میلی‌متر) در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده در سه رابطه مذکور را نشان می‌دهد. با افزایش D_{5015} انتظار می‌رود تا گسترش جانبی کاهش یابد. در شکل (۹-ب) نیز می‌توان چنین رفتاری را در مدل‌های یود و همکارانش [۱۷] و کانیبیر [۱۱] مشاهده نمود. اما در مدل جواد و همکارانش [۱۰]، در ابتدا گسترش جانبی افزایش یافته و سپس با شیب بسیار ملایم با افزایش D_{5015} مقدار گسترش جانبی کاهش می‌یابد که ظاهراً از نظر فیزیکی این نوع رفتار برای این مدل قابل‌قبول نیست.

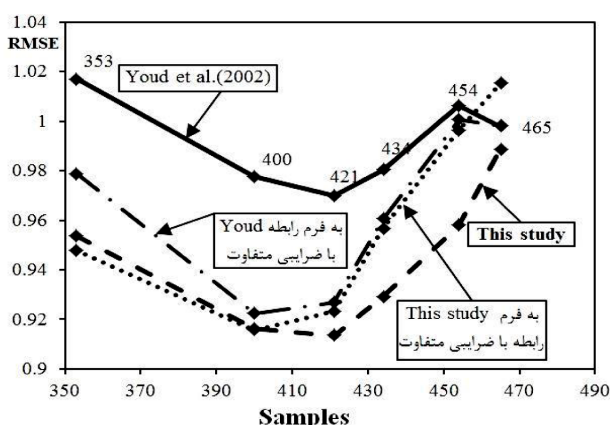
شکل (۱۰) تأثیر S (شیب زمین) و W (نسبت سطح آزاد) با بزرگای گشتاوری‌های مختلف در میزان گسترش جانبی در رابطه البواب [۱۵]



شکل (۱۰): تأثیر تغییرات S شیب زمین و W نسبت سطح آزاد و بزرگای زلزله در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده [۱۵]



شکل (۱۲): مقدار R^2 پایگاه داده‌ها



شکل (۱۳): مقدار $RMSE$ پایگاه داده‌ها

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right) (x_i - \bar{X})^2}{(N' - 1) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)}} \quad (13)$$

که در آن، d_i فاصله بین گمانه کمکی و نقطه مرجع، N' تعداد گمانه‌های مورد استفاده و x_i مقدار کمیت موردنظر است. تعدادی رخداد نیز در بین رخدادهای موردی پیدا می‌شود که فقط از یک گمانه کمکی برای دست آوردن مشخصات ژئوتکنیکی نقطه مرجع استفاده شده است که این نقاط، بیشترین عدم قطعیت را وارد مدلسازی می‌کنند؛ به ویژه در صورتی که فاصله تک‌گمانه مورد استفاده از محل وقوع گسترش جانبی زیاد باشد. می‌توان رخدادهای موردی یک پایگاه داده‌ای را بر اساس میزان عدم قطعیتی که به علت فاصله و تعداد گمانه‌ها (کمبود داده) وارد مدلسازی می‌شود، به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

- استفاده از ۴ گمانه کمکی با کمترین فاصله از نقطه مرجع
- استفاده از ۳ گمانه کمکی با کمترین فاصله از نقطه مرجع
- استفاده از ۲ گمانه کمکی با کمترین فاصله از نقطه مرجع
- استفاده از ۱ گمانه کمکی با کمترین فاصله از نقطه مرجع

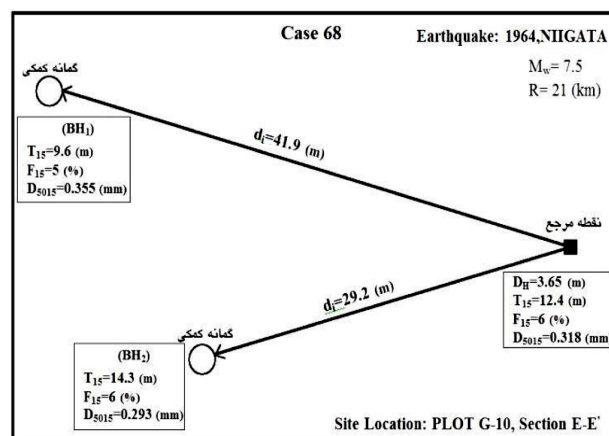
طبیعی سازگار باشد (شکل‌های (۱۷) تا (۱۹)) و علاوه بر داشتن رابطه، از دقت بالایی نیز برخوردار باشد (شکل‌های (۱۲) و (۱۳)).

۶- ارائه رابطه همبستگی جدید

لازم به توضیح است که عوامل ژئوتکنیکی گزارش شده برای رخدادهای موردی موجود در پایگاه داده‌ها (مانند T_{15} و F_{15} و D_{5015}) بیانگر مقدار دقیق آن‌ها نیست. چون مشخصات ژئوتکنیکی نقاطی که در آن گسترش جانبی اتفاق افتاده، گزارش نگردیده است. بلکه از گمانه‌های کمکی حفر شده و یا گمانه‌هایی که از قبل در اطراف محل وقوع گسترش جانبی وجود داشته است برای جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی استفاده شد (شکل (۱۱)). این موضوع اولین عامل برای ورود عدم قطعیت عوامل در مدلسازی است.

با بررسی پایگاه داده‌ها، نکات زیر مورد توجه قرار می‌گیرند: محققینی که روابط شرح داده شده را ارائه دادند، مقدار عوامل ژئوتکنیکی در هر محل را به کمک میانگین عکس فاصله‌ها برای نقاطی که در اطراف آن گمانه کمکی وجود دارد، تخمین زدند. آن‌ها حداکثر از اطلاعات چهار گمانه و حداقل از یک گمانه کمکی که کمترین فاصله را تا محل وقوع گسترش جانبی دارند، استفاده نموده‌اند.

- میانگین عکس فاصله‌ها:



شکل (۱۴): نمای شماتیک از محل قرارگیری گمانه‌های کمکی و نقطه مرجع (محلی که گسترش جانبی اتفاق می‌افتد)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \left(\frac{1}{d_i} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)} \quad (12)$$

- انحراف معیار عکس فاصله‌ها:

- استفاده از ترم‌های مشابه با رابطه مذکور، ولی با ضرایب رگرسیونی که بعد از تحلیل رگرسیون به دست خواهند آمد.

- در رابطه همبستگی جدید که در این مقاله ارائه شده است، از همان عبارات رابطه یود و همکارانش [۱۷] استفاده می‌شود. البته با این تفاوت که به جای عبارت $(a \times R)$ از $(\log(R+a))^{(b)}$ استفاده می‌شود.

- استفاده از عبارت $(\log(R+a))^{(b)}$ به جای عبارت $(a \times R)$ با ضرایب رگرسیونی که بعد از تحلیل رگرسیون به دست خواهند آمد. پایگاه داده‌ای که در رابطه همبستگی جدید مورد استفاده قرار گرفت، شامل ۴۰۰ رخداد موردی گسترش جانبی است که در مناطق جهان اتفاق افتاده است (جدول (۴)).

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نتایج تحلیل‌های مختلف رگرسیون انجام‌شده را برحسب ضریب همبستگی و خطا برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. بر این اساس، بهینه‌ترین حالت اتخاذ شده و همبستگی جدید زیر ارائه شده است:

Free face :

$$\log D_H = -17.95 + (1.605 M_w) - (1.8673 \log R^*) - (\log(R+20))^{(-3.3836)} + (0.5471 \log W) + (0.4431 \log T_{15}) + (4.1873 \log(100 - F_{15})) - (0.7666 \log(D_{5015} + 0.1)) \quad (15)$$

Sloping ground :

$$\log D_H = -19.63 + (2.0137 M) - (2.6124 \log R^*) - (\log(R+20))^{(-2.7004)} + (0.3147 \log S) + (0.6985 \log T_{15}) + (4.1954 \log(100 - F_{15})) - (0.6772 \log(D_{5015} + 0.1)) \quad (16)$$

جدول (۴): خلاصه‌ای از رخداد موردی پایگاه داده‌ای مورد استفاده در همبستگی جدید

سال	زلزله	Case	Free face	Gently sloping ground
۱۹۰۶	سانفرانسیسکو (کالیفرنیا)	۱	۱	صفر
۱۹۶۴	آنکوراج (آلاسکا)	۲	۲	صفر
۱۹۶۴	نیگاتا (ژاپن)	۲۵۰	۹۹	۱۵۱
۱۹۷۱	سانفراندو (کالیفرنیا)	۲۳	۱۸	۵
۱۹۷۹	دره امپریال (کالیفرنیا)	۳۱	۲۹	۲
۱۹۸۳	نیهونکای چوبا (ژاپن)	۶۲	صفر	۶۲
۱۹۸۳	قله براه (ایداهو)	۴	صفر	۴
۱۹۸۷	سوپرستیشن هیل (کالیفرنیا)	۶	۶	صفر
۱۹۸۹	لوما پریتا (کالیفرنیا)	۲	۲	صفر
۱۹۹۵	هیوگو-کن نامبا کوبه (ژاپن)	۱۹	۱۹	صفر

در روابط تجربی که تا به حال توسط محققین مختلف ارائه داده شده است، از تمام رخداد‌های موردی استفاده گردیده است که در طبقه‌بندی بالا قرار می‌گیرند.

رگرسیون چند متغیره (MLR) یک روش آماری است که به ما اجازه پیش‌بینی کمیت مشخصی (متغیر مورد نظر) را بر اساس سایر متغیرها می‌دهد. MLR برای یافتن ارتباط بین متغیرهای مستقل یا متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و یک متغیر وابسته به کار گرفته می‌شود.

رابطه MLR به صورت زیر است:

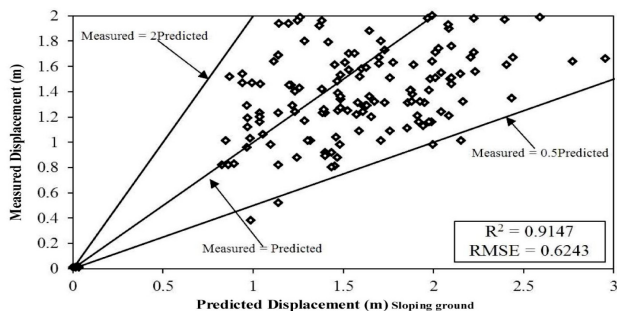
$$y = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + c \quad (14)$$

که در آن، $[b_1, b_2, \dots, b_n]$ ضرایب رگرسیون، y تابع مورد نظر، $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ متغیرهای مستقل و c عرض از مبدأ تابع y است. با توجه به توضیحات بالا، با حذف داده‌های تک‌گانه‌ای با فاصله بیشتر از ۵ متر از پایگاه داده‌ها، رابطه همبستگی جدیدی برقرار شد که از دقت خوبی برخوردار است. البته تمام تلاش بر این بود که فقط از جمله‌های رابطه یود و همکارانش [۱۷] استفاده شود. زیرا در این بخش فقط از پایگاه داده‌های این رابطه استفاده شد و در مطالعه مدل‌های قبلی نیز مشاهده گردید که نتایج این رابطه، سازگاری بیشتری را با طبیعت پدیده گسترش جانبی ناشی از روانگرایی در واقعیت دارد. این موضوع را می‌توان در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) نیز مشاهده نمود. در صورت داشتن فرم مناسب برای رابطه، می‌توان دقت خوبی (R^2 بالا با کمترین مقدار $RMSE$) را از رابطه انتظار داشت. برای این منظور، از چهار فرم به شرح زیر در تحلیل رگرسیون استفاده شد:

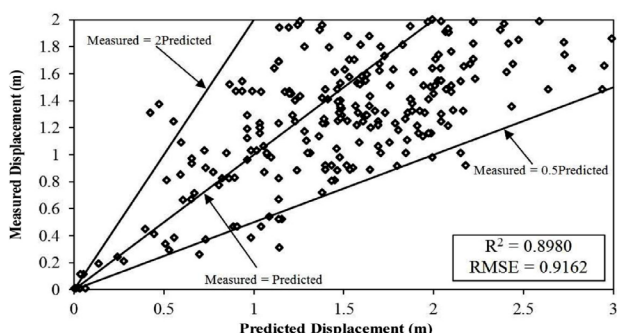
- استفاده از جمله‌های مشابه با رابطه مذکور برای کمیت ورودی و ضرایب رگرسیونی که در فرم رابطه پیشنهاد شده بود.

جدول (۳): پایگاه داده‌های تهیه‌شده از داده‌های یود و همکارانش با حذف داده‌های تک‌گانه‌ها [۱۷]

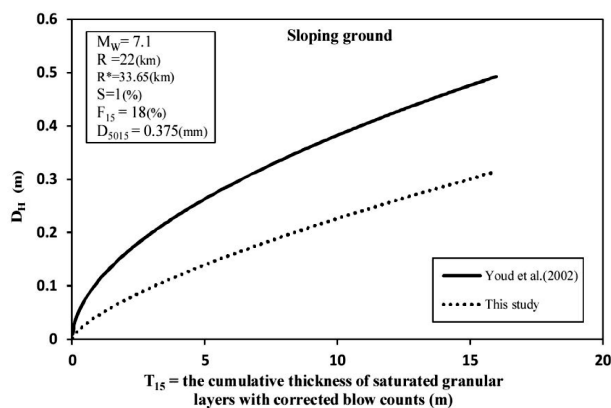
رگرسیون چند متغیره	تعداد کل Case	free face	gently sloping ground
۱ بدون وجود تک‌گانه‌ها	۳۵۳	۱۴۱	۲۱۲
تک‌گانه	...	...	...
۲ تک‌گانه‌هایی با فاصله کمتر از ۵ متر	۴۰۰	۱۷۶	۲۲۴
تک‌گانه	۴۷	۳۵	۱۲
۳ تک‌گانه‌هایی با فاصله کمتر از ۲۵ متر	۴۲۱	۱۸۷	۲۳۴
تک‌گانه	۶۸	۴۶	۲۲
۴ تک‌گانه‌هایی با فاصله کمتر از ۵۰ متر	۴۳۴	۱۹۸	۲۳۶
تک‌گانه	۸۱	۵۷	۲۴
۵ تک‌گانه‌هایی با فاصله کمتر از ۱۰۰ متر	۴۵۴	۲۱۱	۲۴۳
تک‌گانه	۱۰۱	۷۰	۳۱
۶ وجود تمام تک‌گانه‌ها	۴۶۵	۲۱۹	۲۴۶
تک‌گانه	۱۱۲	۷۸	۳۴



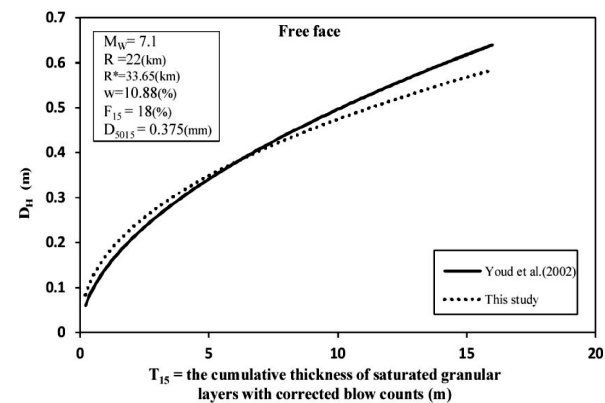
شکل (۱۵): تغییر مکان‌های پیش‌بینی شده در مقابل گزارش شده در حالت *Sloping ground* در مدل همبستگی جدید



شکل (۱۶): تغییر مکان‌های پیش‌بینی شده در مقابل گزارش شده در مدل همبستگی جدید



(a)



(b)

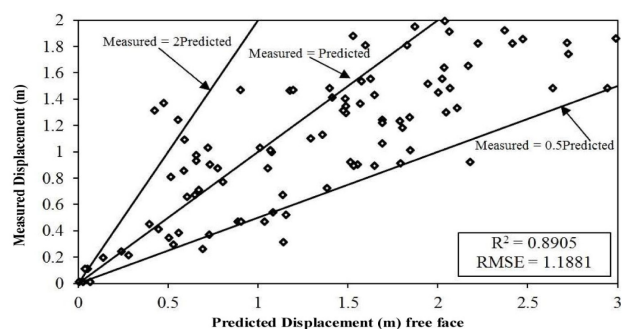
شکل (۱۷): تأثیر تغییرات T_{15} در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی شده

شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) به ترتیب مقدار گسترش جانبی گزارش شده در مقابل مقدار گسترش جانبی پیش‌بینی شده در حالت *Free face*، حالت *Sloping ground* و در حالت کلی (ترکیب نتایج *Free face* با نتایج *Sloping ground*) که توسط رابطه همبستگی جدید به دست آمده است را نشان می‌دهد. در هر کدام از نمودارها سعی شد تا به کمک دو مؤلفه R^2 و $RMSE$ میزان دقت و خطا برای هر کدام از حالت‌ها نشان داده شود و همچنین به کمک خطوط ۰/۵، ۱ و ۲ برابر با مقادیر گسترش جانبی پیش‌بینی در مقابل گزارش شده، محدوده تغییرات بین آن‌ها نشان داده شود.

در ادامه، مقایسه‌ای بین رابطه یود و همکارانش [۱۷] و رابطه همبستگی جدید انجام خواهد شد. همان‌طور که در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) مشاهده می‌شود، نتایج رابطه همبستگی جدید همانند رابطه یود و همکارانش [۱۷] از سازگاری خوبی برخوردار است. شکل (۱۷- a) تغییرات T_{15} (ضخامت تجمعی لایه‌های دانه‌ای اشباع با عدد نفوذ اصلاح شده $(N_{1,60})$ کم‌تر از ۱۵ متر) در مقابل میزان گسترش جانبی پیش‌بینی را نشان می‌دهد، با این فرض که بزرگای گشتاوری ۷/۱، نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای ۲۲ کیلومتر، شیب زمین یک درصد، نسبت سطح آزاد ۱۰/۸۸ درصد، F_{15} متوسط مقدار ریزدانه برای مصالح دانه‌ای موجود در (T_{15}) برابر با ۱۸ درصد و اندازه متوسط ذرات برای مصالح دانه‌ای قرار گرفته در لایه‌های خاک تشکیل‌دهنده (T_{15}) برابر با ۰/۳۷۵ میلی‌متر باشند. در حالت *Sloping ground* رابطه همبستگی میزان گسترش جانبی کمتری را نسبت به رابطه یود و همکارانش [۱۷] پیش‌بینی می‌کند؛ در حالی که در حالت *Free face* شکل (۱۷- b) تا مقدار T_{15} کمتر از حدود ۶ متر عکس این موضوع را بیان می‌کند.

در حالت *Free face* شکل (۱۸- b) میزان گسترش جانبی پیش‌بینی شده تا F_{15} کمتر از حدود ۱۲ درصد (توسط رابطه همبستگی جدید) بیشتر از رابطه یود و همکارانش [۱۷] است که این موضوع نیز در حالتی که اثر T_{15} شکل (۱۷- b) بررسی شد، مشاهده گردید.

شکل (۱۹) تأثیر تغییرات D_{5015} (اندازه متوسط ذرات برای مصالح دانه‌ای قرار گرفته در لایه‌های خاک تشکیل‌دهنده T_{15} (میلی‌متر))



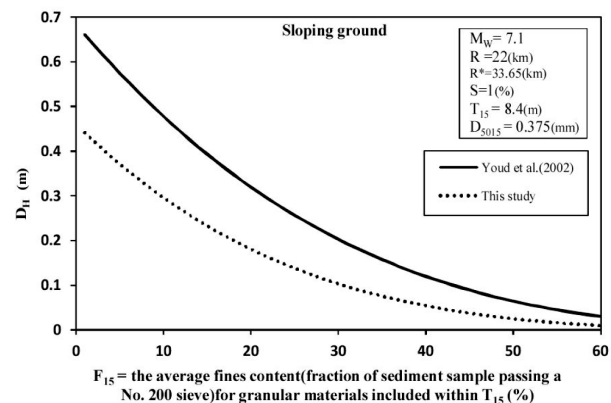
شکل (۱۴): تغییر مکان‌های پیش‌بینی شده در مقابل گزارش شده در حالت *Free face* در مدل همبستگی جدید

در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده در دو رابطه یود و همکارانش [۱۷] و رابطه همبستگی جدید را نشان می‌دهد. در حالت *Free face* (شکل ۱۹-ب) نتایج دو رابطه برهم منطبق است و هر دو نمودار، با شبیهی ملایم اثر تغییر D_{5015} را در میزان گسترش جانبی نشان می‌دهند. شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) سازگاری بسیار مناسب رابطه پیشنهادی با فیزیک مسئله و همچنین رابطه یود و همکارانش [۱۷] (که قبلاً عملکرد مناسب آن تشریح شد) را بیان می‌کنند. علاوه بر این، دقت رابطه پیشنهادی نیز قابل قبول بوده و از رابطه سال ۲۰۰۲ بیشتر است؛ هرچند که هدف اصلی این بخش از مقاله افزایش میزان دقت در رابطه تجربی سال ۲۰۰۲ نبوده و آن‌چه که مد نظر است، بررسی عدم قطعیت‌ها و کاهش آن‌ها بوده که در ادامه بحث خواهد شد.

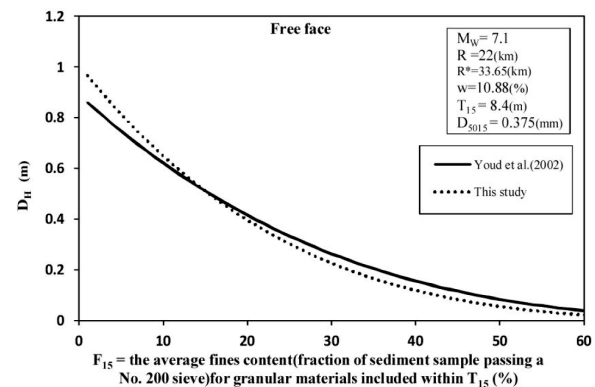
۷- نتایج تحلیل قابلیت اعتماد

وجود عدم قطعیت در عوامل ژئوتکنیکی باعث طراحی‌های غیرمطمئن و گاهی منجر به استفاده از ضرایب اطمینان بالا و تحمیل هزینه‌های اضافی در یک پژوهش می‌شود. هدف اصلی از ارزیابی قابلیت اعتماد، تعیین میزان تأثیر عدم قطعیت‌ها در شروع یک پدیده ناگوار و ارائه راهکار برای کاهش آن است. همواره در مدلسازی و طراحی‌های ژئوتکنیکی، از ضرایب اطمینان برای بررسی ایمنی و پایداری سازه‌ها استفاده می‌شود. در صورتی که قرار باشد تا احتمال خرابی سازه به حداقل مقدار خود برسد و در کنار آن طرح از نظر اقتصادی نیز بهینه شود، امکان استفاده از عوامل قطعی به عنوان ورودی در مدلسازی، شاید وجود نداشته و در نتیجه سبب استفاده از ضرایب اطمینان بالا و در بعضی موارد غیراقتصادی شدن طرح می‌شود. در واقع تحلیل عدم قطعیت نشان دادن عدم قطعیت پاسخ خروجی، ناشی از عدم قطعیت در عوامل ورودی است. برای نشان دادن عدم قطعیت در پاسخ می‌توان از نمودار، شکل یا عدد استفاده نمود. با داشتن میانگین و انحراف معیار استاندارد و نیز بهره‌گیری از تابع توزیع احتمال می‌توان میزان عدم قطعیت در پاسخ را ناشی از عدم قطعیت در عوامل ورودی محاسبه نمود. همچنین مجموع احتمال وقوع همه مقادیر واقع در دامنه تغییرات متغیر تصادفی واحد است و تابعی که چگونگی توزیع احتمال را به ازای همه مقادیر واقع در دامنه تغییرات متغیر تصادفی را بیان می‌کند، تابع توزیع احتمال نامیده می‌شود. پس با داشتن میانگین و انحراف معیار استاندارد می‌توان تابع توزیع احتمالی را به کمک تولید اعداد تصادفی رسم نمود و با داشتن آن، امکان محاسبه احتمال تجاوز از یک مقدار مشخص فراهم می‌شود. در نهایت نیز به جای داشتن یک مقدار، احتمال وقوع آن مقدار حاصل می‌شود که نشان‌دهنده میزان عدم قطعیت آن است.

هر کدام از روش‌های اعتمادپذیری مرتبه اول (*FORM*)، مرتبه دوم (*SORM*) و روش شبیه‌سازی مونت کارلو که در این مطالعه استفاده شده‌اند، از شیوه خاصی برای در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت‌های عوامل ورودی در مقدار خروجی تابع حالت (پاسخ سیستم) بهره گرفته‌اند.

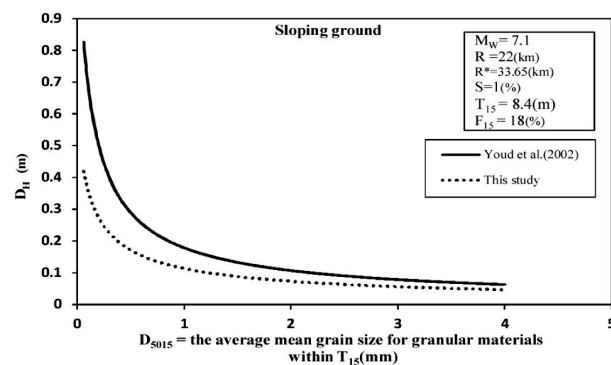


(a)

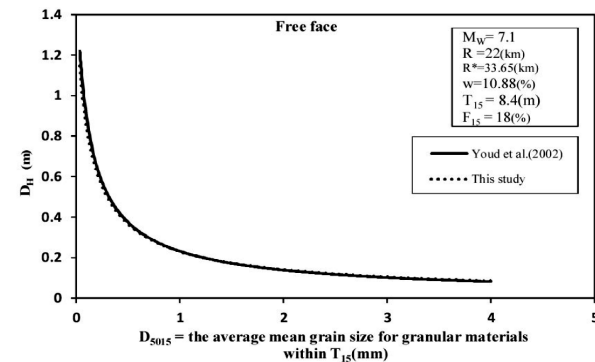


(b)

شکل (۱۸): تأثیر تغییرات F_{15} در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده

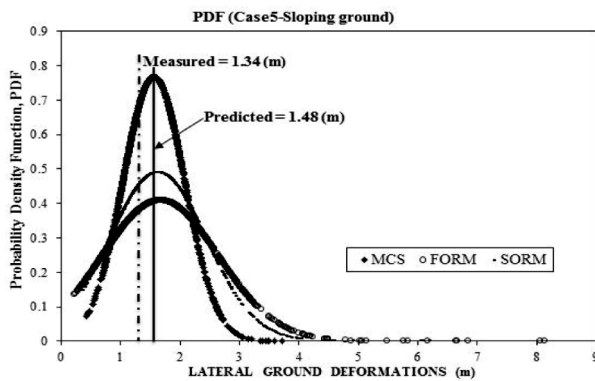


(a)

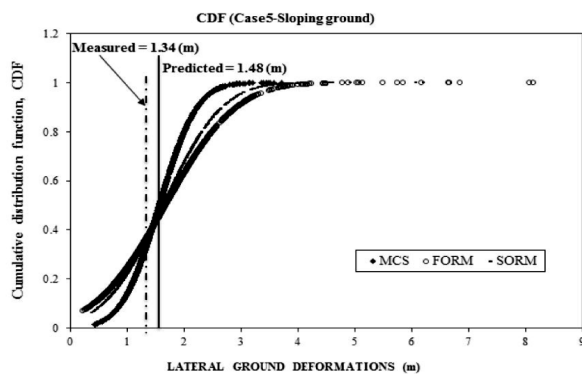


(b)

شکل (۱۹): تأثیر تغییرات D_{5015} در میزان گسترش جانبی پیش‌بینی‌شده



توزیع احتمال (a)



توزیع تجمعی (b)

شکل (۲۱): رخداد موردی شماره ۵ در حالت *Sloping ground* حاصل از تحلیل قابلیت اطمینان

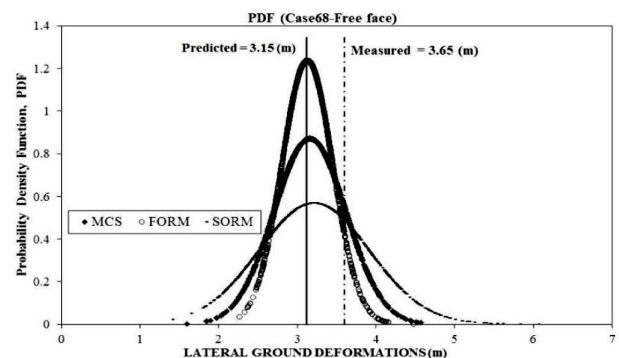
فراگذشت گسترش جانبی از مقدار ۳۰ سانتی‌متر را برای حالتی که بزرگای گشتاوری برابر با $7/1$ ، نزدیک‌ترین فاصله افقی تا منبع انرژی لرزه‌ای ۲۲ کیلومتر، T_{15} ضخامت تجمعی لایه‌های دانه‌ای اشباع با عدد نفوذ اصلاح شده $(N_{1,60})$ کم‌تر از ۱۵ (متر) برابر با $8/4$ متر، F_{15} متوسط مقدار ریزدانه برای مصالح دانه‌ای موجود در T_{15} برابر با ۱۸ درصد و اندازه متوسط ذرات برای مصالح دانه‌ای قرار گرفته در لایه‌های خاک تشکیل دهنده (T_{15}) 0.375 میلی‌متر محاسبه نمود. شکل (۲۲-ب) نیز احتمال فراگذشت گسترش جانبی از ۷۰ سانتی‌متر حاصل از رابطه همبستگی جدید را در حالت *Free face* نشان می‌دهد. در واقع با استفاده از رابطه پیشنهادی و روش احتمالاتی می‌توان احتمال رخداد تغییر مکان جانبی زمین را از هر مقدار دلخواه مجاز در یک سایت دلخواه به دست آورد.

۸- نتیجه‌گیری

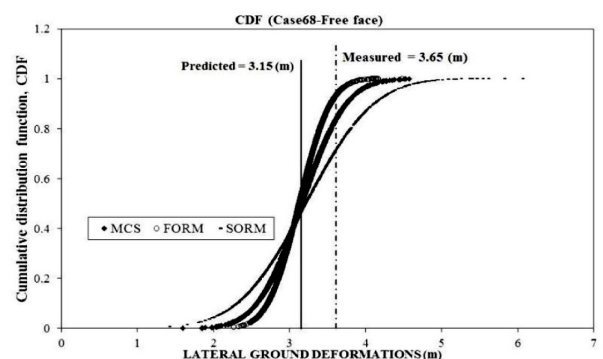
در این مقاله، بررسی تعدادی از روابط تجربی پیشنهاد شده برای ارزیابی میزان گسترش جانبی ناشی از روانگرایی که هدف بررسی همخوانی فیزیکی مدل‌ها با مشاهدات طبیعی بود، انجام گرفت. مدل بود و همکارانش سازگاری بیشتری را با واقعیت فیزیکی گسترش جانبی در طبیعت داشت. با در نظر گرفتن منشأ عدم قطعیت‌هایی که به طور مستقیم و غیرمستقیم وارد مدل می‌شوند، اثر عدم قطعیت‌های غیرمستقیم (وجود

شکل (۲۰-ا) تابع توزیع احتمال را برای مقدار خروجی تابع حالت (رابطه همبستگی جدیدی که در این مقاله به عنوان یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی گسترش جانبی پیشنهاد شد) با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در عوامل ژئوتکنیکی ورودی برای یکی از رخدادهای موردی (شماره ۶۸) موجود در پایگاه داده‌ها (مربوط به یک سایت مشخص با مشخصات مربوط به آن) رسم کرده است. شکل (۲۰-ب) تابع توزیع تجمعی را برای رخداد موردی (شماره ۶۸) در حالت *Free face* نشان می‌دهد. این نمودار امکان داشتن مقدار مستقیم احتمال وقوع گسترش جانبی را در این سایت (رخداد موردی شماره ۶۸) به دست می‌دهد. شکل‌های (۲۱-ا) و (۲۱-ب) نیز به ترتیب تابع توزیع احتمال و تابع توزیع تجمعی را برای رخداد موردی (شماره ۵) در حالت *Sloping ground* نشان می‌دهند.

با داشتن S (شیب زمین) و W (نسبت سطح آزاد) می‌توان احتمال وقوع گسترش جانبی را محاسبه نمود. شکل (۲۲-ا) احتمال وقوع گسترش جانبی حاصل از رابطه همبستگی جدید را در حالت *Sloping ground* برای دو تا از رخدادهای موردی (شماره ۵ و ۱۶۲) در پایگاه داده‌ها نشان می‌دهد. برای رسم این نمودار نیاز به داشتن نتایج تحلیل مونت‌کارلو است. انحراف استاندارد حاصل از تحلیل مونت‌کارلو برای رخدادهای موردی شماره‌های ۵ و ۱۶۲ به ترتیب $0.28/0$ و $0.56/0$ است. بنابراین با داشتن شیب سطح زمین در شکل (۲۲-ا)، می‌توان احتمال



توزیع احتمال (a)



توزیع تجمعی (b)

شکل (۲۰): رخداد موردی شماره ۶۸ در حالت *Free face* حاصل از تحلیل قابلیت اطمینان

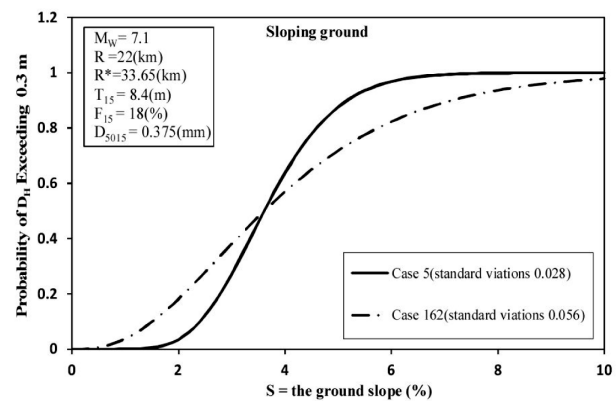
جدول (۵): مؤلفه‌های آماری در مدل‌های مختلف

مدل ارائه شده	ضریب همبستگی (R^2)	RMSE
هامادا و همکارانش (۱۹۸۶)	۱۳/۲٪	-
باردت و همکارانش (۱۹۹۹)	۶۹٪	۱/۴
یود و همکارانش (۲۰۰۲)	۷۱/۲٪	۱/۴
کانیپیر (۲۰۰۳)	۷۴/۵۱٪	-
البواب (۲۰۰۵)	۸۰/۱٪	-
جوادی و همکارانش (۲۰۰۶)	۸۱/۶٪	۱/۳
بازیار و همکارانش (۲۰۱۳)	۸۸/۶٪	۰/۸
مطالعه حاضر	۹۰٪	۰/۹۲

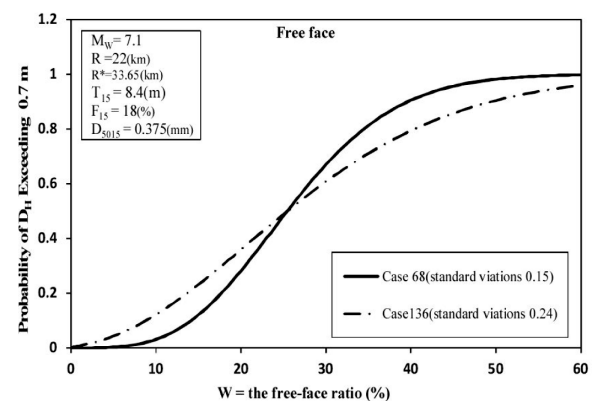
شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد که با مقایسه نتایج حاصل از این سه تحلیل بتوان میزان خطای موجود در کمیت‌های ورودی و اثر آن‌ها بر روی مقدار تغییر مکان جانبی زمین پیش‌بینی‌شده توسط رابطه همبستگی جدید را به صورت واضحی توسط تابع توزیع احتمال (PDF) و تابع توزیع تجمعی (CDF) نشان داد. پس از انجام تحلیل قابلیت اعتماد برای یکی از رخدادهای موردی موجود در پایگاه داده در دو حالت *Free face* و *Sloping ground* نتایج با هم دارای طول همپوشانی بودند و اختلاف ناچیزی را داشتند. علاوه بر این، مقدار پیش‌بینی‌شده با تقریب خوبی با مقدار اندازه‌گیری‌شده قابل پیش‌بینی است. همچنین از نتایج تحلیل مونت کارلو برای محاسبه احتمال فراگذشت گسترش جانبی از یک مقدار مشخص برای تعدادی از رخدادهای موردی موجود در پایگاه داده‌های یود و همکارانش [۱۷] استفاده شد. بنابراین، با داشتن S (شیب زمین) در حالت *Sloping ground* و W (نسبت سطح آزاد) در حالت *Free face*، می‌توان احتمال فراگذشت گسترش جانبی از یک مقدار مشخص را در یک سایت با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در عوامل ژئوتکنیکی و لرزه‌ای محاسبه نمود.

۹- مراجع

- [1] Bardet, J. P.; Tobita, T.; Hu, J. and Mace, N.; "Database of Case Histories on Liquefaction-Induced Ground Deformation," A Report to PEER/PG&E, Task 4, Phase 2, Civil Engineering Department, University of Southern California, Los Angeles, 1999.
- [2] Bardet, J. P.; Mace, N. and Tobita, T.; "Liquefaction-Induced Ground Deformation and Failure," A Report to PEER/PG&E, Task 4A, Phase 1, Civil Engineering Department, University of Southern California, Los Angeles, 1999.
- [3] Youd, T. L. and Hoose, S. N.; "Liquefaction During 1906 San Francisco Earthquake," *J. Geotech. Engrg.*



(a) Sloping ground



(b) Free face

شکل (۲۲): احتمال وقوع گسترش جانبی حاصل از رابطه همبستگی جدید

فاصله بین نقطه مرجع با گمانه‌هایی که مشخصات کامل آن گزارش شده است) با تهیه پایگاه داده‌های مختلفی که با حذف بعضی از داده‌های تک‌گمانه‌ها از پایگاه داده‌های یود و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت که تأثیر وجود داده‌های تک‌گمانه‌ها روی مقدار R^2 و $RMSE$ بیانگر وجود عدم قطعیت‌های غیرمستقیم در مدل یود و همکارانش است. با حذف داده‌های تک‌گمانه‌ای با فاصله بیشتر از ۵ متر از پایگاه داده‌ها و تغییر جزئی در فرم رابطه یود و همکارانش رابطه همبستگی جدیدی به کمک رگرسیون چند متغیره برای پایگاه داده‌ای آن که از دیدگاه مؤلفین این مقاله بازمینی و اصلاح شده بود، ارائه شد که دارای R^2 بالا با کمترین مقدار $RMSE$ است. در جدول (۵) سعی شد تا به کمک دو مؤلفه R^2 و $RMSE$ مقایسه‌ای بین مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی ارائه‌شده توسط محقق مختلف انجام داد که بر این اساس، می‌توان دقت مناسب رابطه همبستگی جدید پیشنهاد شده در این مقاله را مشاهده نمود.

در ارائه این رابطه تلاش بسیار زیادی صورت گرفت تا مدل از نظر فیزیکی با مشاهدات طبیعی سازگار باشد. در نهایت نیز برای نشان دادن عدم قطعیت‌هایی که به صورت مستقیم (عدم قطعیت‌های موجود در عوامل ژئوتکنیکی و لرزه‌ای) وارد مدل می‌شوند، از روش‌های اعتمادپذیری مرتبه اول (FORM)، مرتبه دوم (SORM) و روش

- Liquefaction-Induced Lateral Spreads using Strength Ratios," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No. 8, pp. 1035–1049, 2008.
- [11] Kramer, S. L.; "Geotechnical Earthquake Engineering. Upper Saddle River (NJ)," *Prentice-Hall*, 1996.
- [12] Baecher, G. B. and Christian, J. T.; "Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering," *New Jersey: John Wiley and Sons*, 2003.
- [13] Hamada, M.; Yasuda, S.; Isoyama, R. and Emoto, K.; "Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacement," *Report for the Association for the Development of Earthquake Prediction*, Japan, 1986.
- [14] Youd, T. L. and Perkins, D. M.; "Mapping of Liquefaction Severity Index," *J. Geotech Eng.*, Vol. 113, No. 11, pp. 1374–1391, 1987.
- [15] Bartlet, S. F. and Youd, T. L.; "Empirical Analysis of Horizontal Ground Displacement Generated by Liquefaction-Induced Lateral Spreads," *Technical Report No. NCEER-91-0021*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY, 1992.
- [16] Bartlet, S. F. and Youd, T. L.; "Empirical Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread," *J. Geotech Eng. Div.*, Vol. 121, No. 4, pp. 316–329, 1995.
- [17] Baziar, M. H. and Ghorbani, A.; "Evaluation of Lateral Spreading Using Artificial Neural Networks," *J. Soil Dyn Earthquake Eng.*, Vol. 25, pp. 1–9, 2005.
- Div.*, ASCE, Vol. 102, No. 5, May, pp. 425–439, 1976.
- [4] Youd, T. L.; Hansen, C. M. and Bartlett, S. F.; "Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement," *J. Geotech Geoenviron Eng.*, Vol. 128, No. 12, pp. 1007–1017, 2002.
- [5] Kanibir, A.; "Investigation of the Lateral Spreading at Sapanca and Suggestion of Empirical Relationships for Predicting Lateral Spreading," *M.Sc. Thesis*, Department of Geological Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey (in Turkish), 2003.
- [6] Al-Bawwab, W. M. K.; "Probabilistic Assessment Of Liquefaction-Induced Lateral Ground Deformations," *PhD Thesis*, the Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, p. 125, 2005.
- [7] Javadi, A. A.; Rezanian, M. and Mousavi Nezhad, M.; "Evaluation of Liquefaction Induced Lateral Displacements Using Genetic Programming," *J. Computers and Geotechnics*, Vol. 33, pp. 222–233, 2006.
- [8] Oommen, T. and Baise, L. G.; "Model Development and Validation for Intelligent Data Collection for Lateral Spread Displacements," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 467–477, 2010.
- [9] Seed, H. B. and Idriss, I. M.; "Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes," *EERI*, Berkeley, CA, p. 134, 1982.
- [10] Scott, M.; Olson and Cora; Johnson, I.; "Analyzing