

تأثیر پارامترهای مختلف زلزله بر رفتار دینامیکی اسکله

عطاءاله عبدالله زاده^۱؛ نوید هادیانی^{۲*}؛ امیرحسین اقبالی^۳؛ مریم حق بین^۴

- ۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر
- ۲- استادیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر
- ۳- استادیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر
- ۴- استادیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر

Na.hadiani@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶

چکیده

اسکله یک سازه مهندسی است که بیشتر برای بارگیری و باراندازی کالاها ساخته می‌شوند. این سازه با توجه به شرایط کنار سواحل ممکن است روی لایه‌های ضعیف مانند شن و ماسه اجرا شود. در صورت طراحی نادرست این سازه و ایجاد گسیختگی در آن، فعالیت‌های اسکله به دلیل آسیب وارد شده به تاسیسات مجاور آن ممکن است برای مدتها متوقف شود. به همین دلیل بررسی چگونگی رفتار سازه‌های ساحلی در برابر عوامل گسیختگی همچون زلزله و روانگرایی ناشی از آن اهمیت بالایی دارد. تحلیل عملکرد اسکله در برابر روانگرایی معمولاً توسط روش‌های عددی انجام می‌شود. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار Flac2D که دارای قابلیت تحلیل غیرخطی تنش مؤثر و تولید اضافه فشار آب حفره‌ای در محیط پیوسته خاک است، به شبیه‌سازی روانگرایی در خاک اطراف اسکله با کمک مدل رفتاری Finn پرداخته شده است. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف زلزله روی رفتار اسکله بررسی شده است. در نهایت نتایج اضافه فشار آب حفره‌ای، جابه‌جایی افقی و نشست خاک و لنگر خمشی شمع‌ها ارائه شده است. سپس میزان همبستگی این پارامترها با پارامترهای مختلف زلزله بررسی شده است. از آنجایی که معیارهای شدت زلزله اهمیت زیادی در ارزیابی احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای انواع سازه‌ها دارند. بنابراین در این مطالعه به منظور بررسی کیفیت معیارهای شدت زلزله، شاخص‌های تعیین کننده‌ای مانند بهینه و کاربردی بودن، شاخص کارایی، کفایت نسبت به بزرگای زلزله و فاصله از مرکز انتشار زلزله بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد هماهنگی بین پارامترهای زلزله با نشست خاک نسبت به پارامترهای دیگر عموماً بهتر است.

واژگان کلیدی: اسکله، روانگرایی، تحلیل دینامیکی، روش تفاضل محدود

۱- مقدمه

سازه‌های مجاور آن ممکن است برای مدتها متوقف شود. به همین دلیل بررسی چگونگی رفتار سازه‌های ساحلی در برابر عوامل گسیختگی همچون زلزله و روانگرایی ناشی از آن اهمیت بالایی دارد.

اسکله یک سازه مهندسی است که عموماً برای بارگیری و باراندازی کالاها ساخته می‌شود. این سازه با توجه به شرایط کنار سواحل ممکن است روی لایه‌های ضعیف همانند شن و ماسه اجرا شود. در صورت طراحی نادرست این سازه و ایجاد گسیختگی در آن، فعالیت‌های اسکله به دلیل آسیب وارد شده به

پارامترهای شدت جنبش زمین مانند بیشینه شتاب زمین (PGA) یا بیشینه سرعت (PGV) و دیگر پارامترها را بیان میکند. از زمانی که این موضوع مطرح شد، کاربردهای وسیعی در حوزه مهندسی زلزله برای آن تعریف شد که مهمترین آن ارتباط پارامترهای پاسخ و شدت ورودی زلزله است.

یکی از مواردی که توسط تابع تقاضای احتمالاتی لرزه‌ای بیان می‌شود، احتمال مشروط فرا گذشت یک تقاضای سازه‌ای (D) از یک مقدار تعریف شده (d) به ازای یک پارامتر شدت لرزه‌ای (IM) معین است. این مفهوم با استفاده از رابطه (۱) قابل تعریف است [2].

$$P[D \geq d|IM] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(d) - \ln(S_D)}{\beta_{D|IM}}\right) \quad (1)$$

در این رابطه (Φ) بیانگر تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است. همچنین d مقدار بیشینه یا پسماند تقاضا، S_D مقدار میانه تقاضا بر حسب شدت زلزله و $\beta_{D|IM}$ انحراف معیار استاندارد تابع لاگ نرمال است که عموماً به عنوان پراکندگی تعریف می‌شود. ارتباط بین میانه تقاضا و شدت زلزله در فرم توانی به صورت رابطه (۲) قابل بیان است.

$$S_D = a \cdot IM^b \quad (2)$$

رابطه مذکور در فضای لگاریتمی به رابطه (۳) تبدیل می‌شود. در این فضا پارامترهای $\ln(a)$ و b بترتیب بیانگر عرض از مبدا و شیب خط می‌باشند که با استفاده از رگرسیون گیری خطی قابل محاسبه هستند.

$$\ln(S_D) = \ln(a) + b \cdot \ln(IM) \quad (3)$$

همچنین مقدار پارامتر پراکندگی تقاضا از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\beta_{D|IM} \cong \sqrt{\frac{\sum (\ln(d_i) - \ln(S_D))^2}{N - 2}} \quad (4)$$

توابع احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای ارتباط میان بیشینه پاسخ‌ها و پارامترهای شدت را بیان می‌کنند. در این ارتباط تعیین معیار شدت زلزله (IM) بسیار مهم می‌باشد و انتخاب درست و دقیق آن دارای اهمیت زیادی است. در بین پارامترهای شدت، آنهایی که به نوعی دارای ارتباط مناسبتری با پارامتر پاسخ هستند و مقدار دقیق خسارت را پیش‌بینی می‌کنند، بهینه‌ترین پارامترهای شدت

یکی از بهترین چارچوب‌های ارائه شده برای انجام تحلیل احتمالاتی ریسک لرزه‌ای سازه‌های مهندسی، چارچوب ارائه شده توسط مرکز مطالعات مهندسی زلزله (PEER) است. راهکار کلی بکار رفته در این چارچوب جدا کردن عدم قطعیت‌های موجود در مراحل مختلف تحلیل ریسک با استفاده از تئوری احتمال کل است. این عدم قطعیت‌ها در مراحل مختلفی مانند تحلیل خطر زلزله، رفتار سازه (عدم قطعیت‌های موجود در پاسخ سازه و آسیب‌های وارد شده به آن) و پیامدهای زلزله (عدم قطعیت‌های موجود در ایجاد خسارات مالی و زمان از کار افتادگی سازه و غیره) وجود دارد [1]. با استفاده از متغیرهای واسطه شامل معیار شدت (IM)، پارامتر تقاضای مهندسی (EDP) و معیار آسیب‌دیدگی (DM) می‌توان به درک بهتری از مفاهیم ریسک لرزه‌ای دست یافت. در شکل (۱) مراحل کلی تحلیل ریسک لرزه‌ای ارائه شده است. در مراحل ارائه شده معیارهای شدت زلزله دارای اهمیت زیادی هستند و یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم انتخاب معیارهای شدت زلزله برای ارزیابی لرزه-ای سازه مورد نظر و زلزله‌های اعمال شده بر آن است.

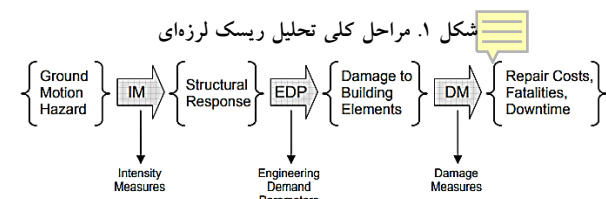


Fig. ۱. the general steps of seismic risk analysis

توابع احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای توسط کرنل و همکاران ارائه شده است. کرنل و همکاران مفاهیم مهندسی زلزله بر پایه عملکرد، را به ۴ گام اصلی زیر تقسیم کرده‌اند [2]:

- تحلیل خطر لرزه‌ای (۲) آنالیز پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها (۳)
- تحلیل آسیب و (۴) تخمین و محاسبه خسارت در یکی از اجزای آن یا کل اجزای سازه.

بدست آوردن تابع احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای (PSDM) برای سازه‌ها دارای اهمیت بالایی است. در مفاهیم احتمالاتی، تقاضا و پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با مفاهیمی چون تابع تقاضای احتمالاتی لرزه‌ای محاسبه می‌شود. این تابع در حقیقت در حالت کلی ارتباط میان بیشینه پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها (به عنوان مثال در سازه اسکله بیشینه جابه‌جایی افقی یا نشست در اعضای مهم و

به حساب می‌آیند. بر این اساس تحقیقات مختلفی در زمینه مشخص کردن پارامترهای شدت بهینه انجام شده است که این پژوهش‌ها بهینه بودن پارامترهای شدت را در زمینه کفایت داشتن، بهینه و کاربردی بودن و همچنین پارامتر ترکیبی کارایی و کفایت نسبی بررسی و مناسبترین پارامتر شدت را برای پیش-بینی آسیب در سازه مورد نظر با توجه با زلزله‌های وارد شده بر آن مشخص می‌کنند.

در مطالعه پیش‌رو تاثیر زلزله‌های پالسی شکل روی رفتار اسکله مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در این پژوهش همبستگی بین پارامترهای پاسخ اسکله (شامل نشست، جابه‌جایی افقی، ممان و فشار منفذی) با پارامترهای مختلف زلزله بررسی شده است. سپس در ادامه پژوهش بهینه بودن پارامترهای شدت در زمینه کفایت داشتن، بهینه بودن و کاربردی بودن و همچنین پارامتر ترکیبی کارایی بررسی شده است که در مطالعات پیشین به این موارد پرداخته نشده است.

۱-۱- بررسی روانگرایی اسکله

روانگرایی یکی از مهمترین مباحث مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای است. زمانی که دو زلزله در آلاسکا و نیگاتا ژاپن در سال ۱۹۶۴ رخ دادند، در هر دو زلزله خرابی‌هایی ناشی از زلزله مانند گسیختگی شیب‌ها، گسیختگی شالوده و پل‌ها و شناور شدن سازه‌های مدفون بر اثر روانگرا شدن خاک بستر اتفاق افتاد. همچنین در زلزله منجیل ایران در سال ۱۹۹۰ نیز خرابی‌های زیادی که ناشی از روانگرایی بوده مشاهده شده است. پس از وقوع این زلزله‌ها روانگرایی توسط محققان مختلف بررسی و مطالعه شده است. زلزله نیگاتا ژاپن را می‌توان نمادی از اولین رخداد در جهان دانست که سبب ویرانی زیرساخت‌های مدرن شد که بعدها این نوع از خرابی پدیده روانگرایی نامگذاری شد. در حال حاضر بسیاری از سازه‌های موجود و یا در حال ساخت مانند بندرها، اسکله‌ها، پل‌ها و بسیاری دیگر از سازه‌های متکی بر شمع در نواحی مستعد روانگرایی واقع شده‌اند. آثار روانگرایی زمین بر روی شمع‌ها و سازه‌های مرتبط با آنها ممکن است بسیار مخرب باشد.

مطالعات اندکی در ارتباط با آثار روانگرایی بر زمین اطراف اسکله و دیواره و شمع پشت آن انجام شده است. در بیشتر مطالعات تنها تحلیل لرزه‌ای این سازه‌ها بررسی شده است. مطالعات انجام شده در این زمینه بیشتر آزمایشگاهی بوده و تعداد محدودی نیز مطالعه عددی وجود دارد که در این مطالعات تاثیر روانگرایی بر سطح زمین و یا شمع و یا دیواره پشت اسکله را مورد بررسی قرار داده‌اند. از جمله مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به آزمایش سانتریفیوژ انجام شده توسط آبدان و همکاران [3]، ایماورا و همکاران [4]، برندنبرگ و همکاران [5]، کوبرینووسکی و همکاران [6]، حائری و همکاران [7]، معتمد و همکاران [8]، تانگ و همکاران [9] و از جمله مطالعات عددی میتوان به مطالعات کالولوس و همکاران [10] و سو و همکاران [11] اشاره نمود.

همچنین مطالعاتی روی رفتار لرزه‌ای اسکله‌ها در یک سطح شیبدار توسط محققین مانند مسکلوف و همکاران [12-14]، شلتر و همکاران [15]، دیکنسون و همکاران [16] انجام شده است. در ادامه این تحقیقات امیرآبادی و همکاران [17-18] و دقول و همکاران [19] یک سری مطالعات عددی روی مدل آزمایشگاهی مسکلوف و همکاران (۲۰۰۴) انجام داده‌اند.

در این مقاله به شبیه سازی عددی روانگرایی در زمین محدوده اطراف اسکله پرداخته شده است. با استفاده از روش‌های عددی و اعمال تنش برشی به مدلی شامل تعدادی شمع، روانگرایی زمین اطراف اسکله مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی عددی، از نرم‌افزار تفاضل محدود Flac2D استفاده شده است. این نرم‌افزار تفاضل محدود قادر به شبیه سازی فشار آب حفره‌ای، تحلیل دینامیکی و المان‌های سازه‌ای مختلف است [20-21].

در ادامه این پژوهش، ۲۰ رکورد زلزله به مدل اعمال شده است و در ادامه همبستگی بین پارامترهای مختلف پاسخ با پارامترهای مختلف زلزله بررسی شده است. سپس بهینه بودن پارامترهای شدت در زمینه کفایت داشتن، بهینه و کاربردی بودن و همچنین پارامتر ترکیبی کارایی بررسی شده است.

۲- هندسه مدل و ویژگی‌های مصالح

داخلی است. مقاومت چسبندگی فنر برشی برابر حاصل ضرب محیط شمع در چسبندگی خاک است. همچنین این پارامتر برای سطح صاف شمع برابر با دو سوم مقدار محاسبه شده برای چسبندگی در نظر گرفته می‌شود. سختی برشی سطح مشترک نیز با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه است [21-22].

$$K_s = K_n \frac{1 - \nu}{2(1 - \nu)} \quad (5)$$

که در رابطه (۵) پارامتر ν ضریب پواسون خاک است. همچنین با استفاده از رابطه (۶) می‌توان مقدار پارامتر سختی نرمال (Kn) را محاسبه نمود [22].

$$K_s < K_n < 10 \times \left(\frac{K + \frac{\nu}{1-\nu} G}{D_{\min}} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، پارامترهای K ، G و $D_{\min}$ به ترتیب معرف مدول حجمی، مدول برشی و کمینه بعد المان می‌باشند. در پژوهش پیش رو سطح تماس بین مصالح مختلف با استفاده از معیار مقاومت برشی موهر-کولمب شبیه سازی شده است.

۳- تحلیل تفاضل محدود

نرم افزار FLAC بر پایه روش تفاضل محدود بنا نهاده شده است. دو ویژگی مهم این نرم افزار که آن را از سایر نرم افزارهای مهندسی ژئوتکنیک متمایز میکند، عبارتند از روش حل صریح و لاگرانژی است که امکان مشاهده رفتار سیستم در تغییر شکل‌های زیاد را فراهم می‌سازد. الگوهای رفتاری موجود در نرم افزار FLAC در مورد بارگذاری استاتیکی بر پایه تنش موثر عمل میکنند، در نرم‌افزار ابتدا تنش کل محاسبه می‌شود، سپس با محاسبه فشار آب حفره‌ای، تنش موثر به دست می‌آید و از این تنش موثر در معادلات رفتاری استفاده می‌شود. بنابراین انجام تحلیل بر اساس تنش موثر توسط نرم افزار FLAC امکانپذیر است. یکی از برتری‌های مهم نرم‌افزار FLAC نسبت به سایر نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی، دارا بودن مدل رفتاری با نام فین برای مدلسازی پدیده روانگرایی است. مارتین و همکارانش رابطه زیر را بین نمو کاهش کرنش‌های حجمی (ϵ_v) و دامنه کرنش برشی دوره‌ای (ϵ_s) ارائه کرده‌اند [23-25].

طرح شماتیک مدل مورد مطالعه در شکل (۲) ارائه شده است. در این مطالعه از مدل JCB [12] انجام شده توسط مسک洛夫 (۲۰۰۱) استفاده شده است [12]. این مدل یک آزمایش میز لرزه-ای اسکله است که متشکل از ۷ عدد شمع قائم در یک شیروانی است و از سه لایه خاک ماسه سست، ماسه متراکم و راک فیل تشکیل شده است. ویژگیهای مصالح در مدلسازی عددی در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین ویژگی‌های عرشه و شمع‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل ۲- شماتیک مدل هندسی مدل JCB-۱

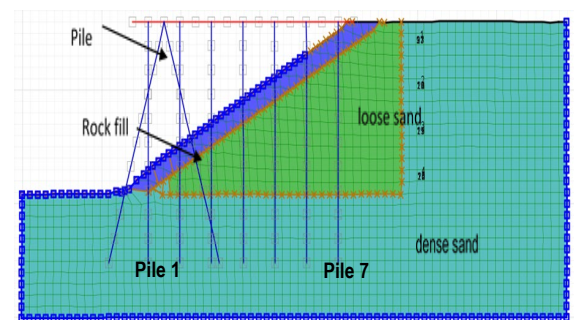


Fig. ۲. schematic of geometrical model of JCB-۱

جدول ۱. ویژگی‌های مصالح در مدلسازی عددی [19]

Soil type	E (Pa)	ν	$\phi(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$
Loose sand	1.638e7	0.3	33.2	7
Dense sand	6.032e7	0.3	37	21
Rock fill	2.232e7	0.2	45	15

Table ۱. Material properties in numerical modeling [18]

جدول ۲. ویژگی‌های عرشه و شمع‌ها در مدلسازی عددی [19]

Structural element	EA (KN/m)	EI (KN.m2/m)	W(KN/m/m)	ν
Pile	۱۶۲,۷۰e۴	۷۰,۴۹e۳	۰,۶۲۳	۰,۲
deck	۱۷,۸۰e۴	۹۶,۷۲e۳	۶,۹۴۳۶	۰,۲

Table ۲. Deck and pile properties in numerical modeling [18]

برای محاسبه پارامترهای مختلف سطح تماس بین خاک و شمع از توصیه‌ها و روابط تجربی ارائه شده در این زمینه استفاده شده است. در نرم افزار FLAC سطح تماس با یک سری فنر مدلسازی می‌شود. با توجه به توصیه‌ها، مقاومت زاویه اصطکاک فنر برشی برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته می‌شود که این پارامتر برای سطح صاف شمع برابر با دو سوم زاویه اصطکاک

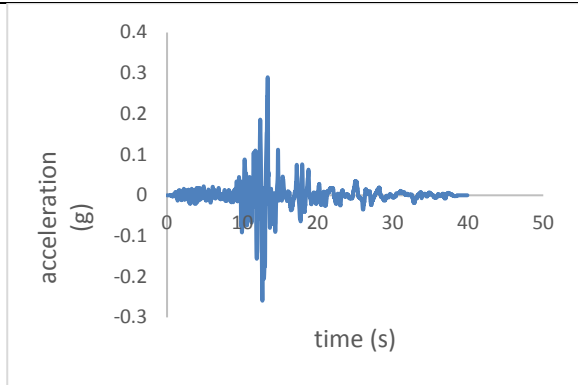


Fig. ۳. Acceleration-time curve of Lomapreira earthquake, □□□□

با توجه به حداکثر بعد مشها در مدل مورد بررسی که برابر ۱ متر است، بیشترین فرکانس مجاز عبوری از مدل با استفاده از رابطه کولمیر و لایسمر [26] برابر ۲۰ هرتز می‌باشد. بنابراین با فیلتر نمودن رکوردهای زلزله به فرکانس ۱۵ هرتز و حذف فرکانس‌های بالا، ضمن حفظ انرژی زلزله، امکان مدلسازی شبکه تفاضلات محدود با حداکثر بعد ۱ متر فراهم می‌شود. همچنین اصلاح خط مبنا به صورت خطی روی شتاب‌نگاشت زلزله انجام شد.

$$f = \frac{C_s}{10\Delta l} \quad (13)$$

در رابطه فوق □ حداکثر بعد مش، f فرکانس مجاز عبوری از شبکه مش‌بندی CS حداقل سرعت موج برشی در خاک است که مربوط به ماسه سست با سرعت ۲۰۳/۴۵ متر بر ثانیه است. پس از ساخت مدل و اعمال مدل روانگرایی فین از میرایی رایلی برای در نظر گرفتن میرایی مصالح استفاده شد. به منظور جلوگیری از انعکاس نامطلوب امواج به داخل مدل از مرزهای منطقه آزاد استفاده شد و مرز پایینی به صورت ویسکوز در نظر گرفته شد. پس از برقرار کردن تعادل استاتیکی مدل و تغییر رفتار خاک از مدل موه‌ر- کلمب به فین با در نظر گرفتن میرایی رایلی مناسب، تحلیل با بارگذاری دینامیکی به صورت تاریخچه زمانی تنش برشی به مرزهای بستر انجام گرفت. برای میرایی رایلی فرکانس طبیعی مدل ۲ هرتز محاسبه شد و ضریب دامپینگ ۰/۵ درصد در نظر گرفته شد.

$$\Delta \varepsilon_{wd} = C_1 (\gamma - C_2 \varepsilon_{wd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{wd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{wd}} \quad (7)$$

که در این رابطه C_1, C_2, C_3, C_4 ضرایب ثابت است. رابطه (۷) به وسیله برن به صورت رابطه زیر اصلاح شد.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{wd}}{\gamma} = C_1 \exp \left(-C_2 \left(\frac{\varepsilon_{wd}}{\gamma} \right) \right) \quad (8)$$

ضرایب ثابت C_1 و C_2 در معادله (۸) متفاوت از ثابت‌های معادله (۷) است. در نرم افزار FLAC برای ایجاد تغییرات فشار حفره‌ای از یک مدل رفتاری با نام فین استفاده می‌شود که دو رابطه (۷ و ۸) در کنار الگوی رفتاری خمیری موه‌ر- کولمب به کار می‌روند. برن ۱۹۹۱، اشاره کرده است که مقدار C_1 می‌تواند با استفاده از رابطه ۹ و پارامتر تراکم نسبی خاک محاسبه شود. در نهایت مقدار عددی C_1 از رابطه ۱۰ به دست می‌آید [23-25].

$$C_1 = 7600 (D_r)^{-2.5} \quad (9)$$

همچنین با استفاده از رابطه تجربی بین تراکم نسبی خاک Dr و عدد اصلاح شده آزمایش نفوذ استاندارد N_{60} ، طبق رابطه (۱۱ و ۱۲)، مقدار عددی C_1 به دست می‌آید.

$$D_r = 15 (N_1)_{60}^{0.5} \quad (10)$$

$$C_1 = 8.7 (N_1)_{60}^{-1.25} \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (12)$$

۴- تحلیل دینامیکی

پس از انجام تحلیل استاتیکی سازه اسکله، در مرحله بعد رفتار دینامیکی آن بررسی شد. برای اعمال بارگذاری لرزه‌ای از رکورد زلزله لوماپریتا^۱ (۱۹۸۹) استفاده شده است. نمودار شتاب- زمان، زلزله اعمال شده در شکل (۳) ارائه شده است.

شکل ۳. نمودار شتاب- زمان زلزله لوماپریتا، ۱۹۸۹.

۵- راستی آزمایی مدل عددی

برای هر مدل عددی اولین مرحله راستی آزمایی نتایج مدل با داده‌های واقعی است. به منظور راستی آزمایی مدل ساخته شده نمودارهای جابه‌جایی، جابه‌جایی در شمع‌ها شکل (۴) و فشار منفذی شکل (۵) انتخاب شده و نتایج آن با نتایج بدست آمده توسط محققین قبلی مقایسه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آنست که مدل عددی توسعه داده شده هماهنگی خوبی با کارهای قبلی دارد. ماکزیمم جابه‌جایی محاسبه شده در شمع‌های ۱ و ۷ با مدل رفتاری موهر-کولمب در پژوهش دقoul (۲۰۲۰) حدوداً ۱۶ سانتی‌متر است که در هر دو شمع مورد بررسی، هماهنگی خوبی بین نتایج برقرار است. همچنین کانتورهای فشار منفذی با مطالعه امیرآبادی و همکاران (۲۰۲۰) مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج حاصله بیانگر آن است این کانتورها دارای شکل مشابه‌ای هستند.

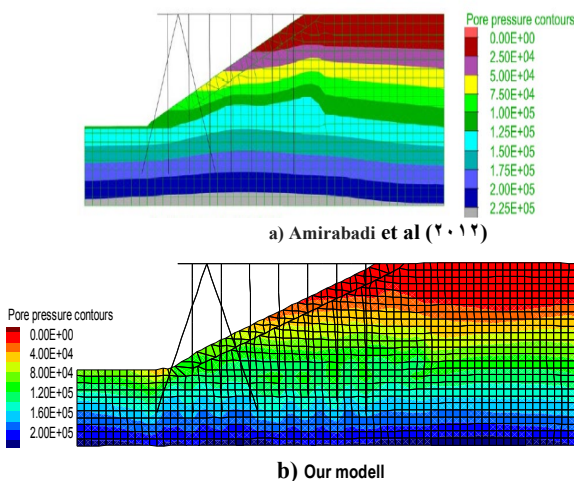


Fig. ۵. Comparison of contours calculated for pore pressure in the present study and Amirabadi et al. □□□□

۶- تحلیل حساسیت

پارامترهای زلزله یا در حوزه زمان و یا در حوزه فرکانس می‌باشند، پارامترهایی که در حوزه زمان هستند شامل برخی از پارامترهای جنبش نیرومند زمین مانند شدت آریاس، نمودار Husid، مدت زمان زلزله Smd، توان لرزه‌ای $P_{\square\square\square}$ هستند. پارامترهای در حوزه فرکانس شامل برخی از پارامترها مانند شدت طیفی و طیف فوریه ترسیم هستند.

پارامترهای جنبش نیرومند زمین که توصیف کننده اثر زلزله در خرابی سازه‌ها هستند عبارتند از پارامترهای وابسته به بیشینه پاسخ زمین مانند بیشینه شتاب زمین PGA، بیشینه سرعت زمین PGV، بیشینه جابه‌جایی زمین PGD، پارامترهای وابسته به فرکانس همچون شدت آریاس، توان لرزه‌ای $P_{\square\square\square}$ و طیف فوریه و پارامترهای وابسته به مدت زمان زلزله مانند مدت زمان موثر سازه (duration Effective)، مدت زمان معنی‌دار سازه (Significant duration) می‌باشند. همچنین پارامترهای زلزله را می‌توان به دو گروه پارامترهای وابسته به سازه مانند $(Sa T_{\square})$ و غیر وابسته به سازه مانند PGV طبقه بندی نمود. در پژوهش پیش رو رفتار اسکله با استفاده از پارامترهای مختلف زلزله بررسی شده است، به صورتی که هم تاثیر پارامترهای وابسته به

شکل ۴. مقایسه نموداری جابه‌جایی کلی محاسبه شده در شمع ۱ و ۷ با نتایج دقoul ۲۰۲۰

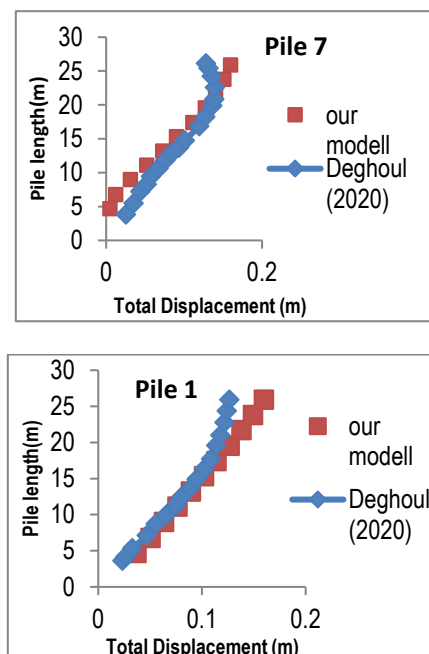


Fig. ۴. Graphical comparison of the total displacement calculated in piles □ and □ with the results of Deghoul, □□□□

با توجه به عدم قطعیت فراوان در ویژگی‌های نداشت‌های پالس شکل و همچنین خاک‌هایی که شمع اسکله‌ها روی آنها بنا می‌شوند دامنه گسترده‌ای از زلزله‌های پالس شکل در این تحقیق در نظر گرفته شده است. در مجموع ۲۰ نداشت پالس شکل موجود در بانک اطلاعاتی **NGA** برای تعیین پارامتر شدت بهینه در پیش‌بینی پارامترهای تقاضای مهندسی اسکله استفاده شده است. نداشت‌های پالس شکل در نظر گرفته شده طیف وسیعی از بزرگا، نوع ساختگاه، سازوکار گسلش و پریود پالس سرعت را شامل می‌شوند علاوه بر این بزرگای زلزله‌های پالس شکل مورد استفاده تا نزدیکترین فاصله ثبت هر نداشت تا محل گسلش در شکل (۷) نشان داده شده است همانگونه که مشاهده می‌شود زلزله‌ها دارای بزرگایی بین ۶ تا ۷/۳ ریشتر و فاصله کانونی ۲ تا ۹۵ کیلومتر می‌باشند که طیف وسیعی برای فاصله در نظر گرفته شده است.

شکل ۷. توزیع بزرگای زلزله و فاصله‌ها در پژوهش حاضر

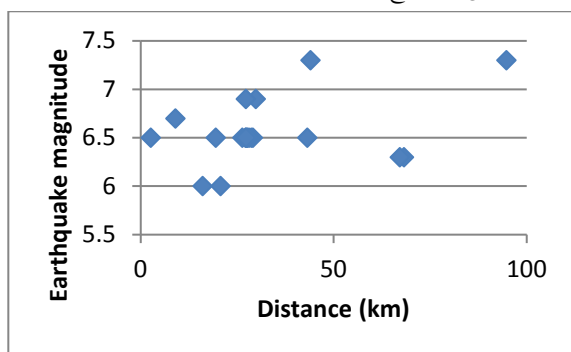


Fig. ۷. Magnitude and distance distribution of the ground motion used in the present study.

جدول ۳. پارامترهای زلزله‌های مورد بررسی

No.	PGA(g)	PGV(m/s)	Arias Intensity (m/s)	Characteristic Intensity (g)	Specific Energy Density (m2/sec)	R(Km)	M
1	0.3	10.55	0.992	0.055	0.196	2.62	6.5
2	0.152	6.3	0.294	0.021	0.202	43.15	6.5
3	0.187	8.63	0.593	0.035	0.443	29.07	6.5
4	0.473	10.3	1.395	0.066	0.944	19.44	6.5
5	0.176	8.03	0.554	0.033	0.379	26.31	6.5
6	0.227	8.3	0.673	0.038	0.202	28.65	6.5
7	0.375	9.77	0.922	0.048	0.929	27.13	6.5
8	0.432	12.65	1.705	0.077	1.492	27.47	6.5
9	0.479	10	1.662	0.076	1.02	27.64	6.5
10	0.419	10.5	1.445	0.068	0.422	28.09	6.5
11	0.42	10	1.783	0.079	0.464	27.23	6.5
12	0.189	7.63	0.326	0.024	0.088	68.18	6.3
13	0.215	7.6	0.353	0.025	0.088	67.16	6.3
14	0.258	7.93	0.474	0.029	0.037	16.04	6
15	0.268	8.75	0.549	0.034	0.047	20.68	6
16	0.391	10.2	1.508	0.07	0.196	29.77	6.9
17	0.324	8.77	1.388	0.065	0.328	27.23	6.9
18	0.546	11.4	2.031	0.102	0.797	8.97	6.7
19	0.139	6.7	0.259	0.019	0.143	94.77	7.3
20	0.686	13.95	4.809	0.159	1.455	44.02	7.3

Table ۳. The parameters of the investigated earthquakes

۷-۱- تاثیر شتاب حداکثر زلزله روی پاسخ اسکله

حرکت زمین مانند **PGA**، **PGV** و ... هم تاثیر پارامترهای وابسته به فرکانس مانند شدت آریاس در نظر گرفته شود.

برای رکوردهای زلزله مورد بررسی ۴ پارامتر جابه‌جایی افقی، نشست قائم، تنش موثر و فشار منفذی بررسی شده است. در شکل زیر نمودار فشار منفذی و تنش موثر در یک متر بالاتر از کف لایه ماسه سست در حضور رکورد زلزله ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده پس از وقوع روانگرایی مقدار تنش موثر در محیط کاهش و فشار منفذی افزایش یافته است.

شکل ۶. نمودار تنش موثر و فشار منفذی در ماسه سست

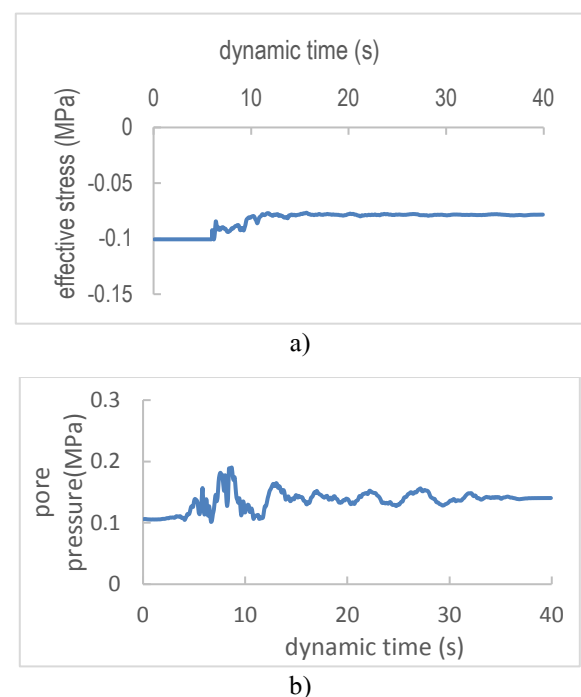


Fig. ۶. Diagram of effective stress and pore pressure in loose sand.

یک روش مناسب برای تعیین میزان تاثیر هر کدام از پارامترها بر روی نتایج انجام آنالیز حساسیت است. در این تحقیق ۵ پارامتر تاثیرگذار روی پاسخ اسکله شامل شتاب حداکثر زلزله، سرعت حداکثر زلزله، شدت زلزله، مشخصه شدت و انرژی زلزله بررسی شد. همچنین مقدار پارامترهای نشست، جابه‌جایی افقی، فشار منفذی و ممان خمشی در اثر تغییرات این پارامترها محاسبه شد. از میان پارامترهای مذکور، بیشترین همبستگی بین پارامترها با نشست و کمترین همبستگی با ممان بدست آمد. پارامترهای رکورد زلزله‌های مورد بررسی در جدول زیر ارائه شده است.

بر روی پاسخ آن محاسبه شد. میزان همبستگی پارامترهای پاسخ اسکله با تغییرات سرعت حداکثر زلزله بررسی شد. مانند شتاب حداکثر، بیشترین همبستگی سرعت حداکثر با پارامتر نشست حاصل شد. ولی برای میزان همبستگی آن مقداری کمتر از ضریب همبستگی شتاب حداکثر- نشست بدست آمد. نکته قابل توجه این است که برای مقدار ضریب همبستگی بین پارامتر جابه‌جایی افقی با سرعت حداکثر مقدار بالاتری نسبت به ضریب همبستگی شتاب حداکثر- جابه‌جایی افقی محاسبه شد.

۳-۷- تأثیر شدت آریاس زلزله روی پاسخ اسکله

شدت آریاس I_A معیاری برای اندازه‌گیری قدرت حرکت زمین است که در واقع شدت لرزش را با اندازه‌گیری شتاب امواج لرزه‌ای گذرا تعیین می‌کند. مشخص شده است که این معیار یک پارامتر نسبتاً قابل اعتمادی برای توصیف لرزش زمین لرزه لازم در ایجاد زمین لغزش‌ها است. این پارامتر توسط Arturo Arias (1998) پیشنهاد شد و به وسیله انتگرال زمانی مربع شتاب زمین تعریف می‌شود. مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \quad (\text{m/s}) \quad (14)$$

در رابطه بالا g شتاب گرانش و T_d مدت زمان سیگنال بالاتر از حد آستانه است.

در این مقاله تأثیر شدت آریاس زلزله تا ۵ متر بر ثانیه روی پاسخ اسکله بررسی شد. میزان وابستگی پارامترهای پاسخ اسکله با تغییرات شدت آریاس زلزله محاسبه شد. با توجه به نتایج با افزایش شدت آریاس مقدار پارامترهای نشست، فشار منفذی و ممان خمشی افزایش پیدا می‌کنند.

۳-۷- تأثیر مشخصه شدت زلزله روی پاسخ اسکله

پارامتر مشخصه شدت زلزله I_C توسط رابطه (Ang, 1998) محاسبه می‌شود. مشخصه شدت با استفاده از رابطه زیر مرتبط با پارامترهای a_{rms} و t_d است.

$$I_C = a_{rms}^{1.5} \cdot t_d^{0.5} \quad (15)$$

که در این رابطه مقدار پارامترهای a_{rms} و t_d بترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

یکی از پارامترهای مهم زمین لرزه، شتاب آن است که در پروژه‌های ژئوتکنیکی از آن استفاده می‌شود. بهترین وسیله برای شناخت ویژگی‌های عکس‌العمل زمین نسبت به امواج لرزه‌ای، ثبت نوسانات شتاب حداکثر زمین (PGA) در هر محل، به وسیله دستگاه شتاب نگار است. شتاب زمین عموماً کسری از g (شتاب ثقل زمین) است. در مطالعه پیش رو تأثیر بازه شتاب حداکثر زلزله روی پاسخ اسکله محاسبه و میزان وابستگی پارامترهای پاسخ اسکله با تغییرات شتاب حداکثر زلزله بررسی شد. نمودار ضریب همبستگی بین شتاب حداکثر زلزله با نشست اسکله در شکل (۸) ارائه شده است. برای ۲۰ زلزله بررسی شده، با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار همبستگی بین شتاب حداکثر با نشست و کمترین همبستگی آن با جابه‌جایی افقی می‌باشد. خلاصه نتایج کلی ضریب همبستگی با پارامترهای مختلف زلزله در شکل (۱۲-ب) ارائه شده است.

شکل ۸. ضریب همبستگی بین شتاب حداکثر زلزله و نشست اسکله

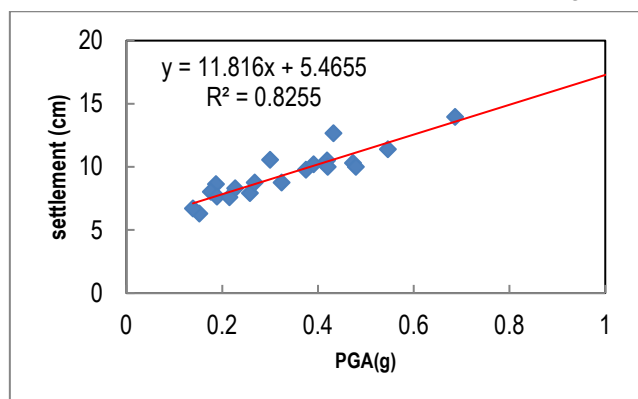


Fig. ۸. Correlation coefficient between maximum earthquake acceleration and wharf settlement.

۲-۷- تأثیر سرعت حداکثر زلزله روی پاسخ اسکله

آسیب وارد شده به سازه‌ها در اثر زلزله هم به بیشترین سرعت زمین (PGV) و هم به مدت زمان زلزله مربوط می‌شود. هر چه لرزش با سرعت بیشتر در مدت زمان بیشتری ادامه داشته باشد، احتمال آسیب وارد شده به سازه بیشتر می‌شود. برای زلزله‌های با شدت متوسط میزان خسارت وارد شده به سازه‌ها با استفاده از شتاب حداکثر قابل محاسبه است. در حالی که برای زلزله‌های با شدت زیاد خسارت وارده توسط سرعت حداکثر قابل تعیین است. برای اسکله مورد مطالعه تأثیر بازه سرعت حداکثر زلزله

اسکله مورد بررسی با استفاده از ۲۰ رکورد زلزله تحلیل شده است و نتایج همبستگی پارامترهای پاسخ با پارامترهای زلزله ارائه شده است. در ادامه این پژوهش برای ارزیابی کیفیت از معیارهای شدت زلزله استفاده شده است. این معیار ها به شرح ذیل می باشند:

بهینه بودن^۲

مفهوم پارامتر بهینه بودن برای یک معیار شدت زلزله بدین صورت است که آن پارامتر موجب پراکندگی کمتر در پیش بینی پاسخ سازه و در حقیقت ارتباط میان پارامتر شدت و پارامتر تقاضای مهندسی می شود. مقادیر پایین تر پارامتر β_{DIIM} نشان از بهینه بودن معیار شدت است. این معیار با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می شود [27].

کاربردی بودن^۳

میزان وابستگی پارامتر تقاضا به معیار شدت توسط پارامتر کاربردی بودن مشخص می شود. این معیار با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می شود. پارامتر b در این معادله بیانگر شیب خط رگرسیون در فضای لگاریتمی است. هنگامی که مقدار این پارامتر برابر با صفر باشد، نشان از آن دارد که معیار شدت در پیش بینی مقدار پاسخ ناتوان و معیار غیر کاربردی است. بر عکس این حالت هر چقدر مقدار پارامتر b به ۱ نزدیک شود، در این صورت، مقادیر بالاتر این پارامتر نشان از کاربردی بودن معیار شدت پیشنهادی است [28]. نمونه ای از چگونگی محاسبه پارامتر بهینه بودن و کاربردی بودن در شکل (۹) ارائه شده است.

شکل ۹- نمونه ای از مدل های احتمالاتی برای محاسبه پارامترهای بهینه بودن و کاربردی بودن برای پارامترهای مختلف (الف) نشست ب) جابه جایی افقی ج) ممان د) فشار منفذی

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_{t_1}^{t_2} a(t)^2 dt}; \quad t_d = t_2 - t_1 \quad (16)$$

$$t_1 = t(5\%AI); \quad t_2 = t(95\%AI) \quad (17)$$

مقدار AI شاخص شدت آریاس می باشد که در بخش قبل به چگونگی محاسبه آن اشاره شد.

برای بررسی تاثیر مشخصه شدت روی پاسخ اسکله، مشخصه شدت تا ۰/۱۶ بررسی شد و میزان وابستگی پارامترهای پاسخ اسکله با تغییرات مشخصه شدت زلزله محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصله مقدار همبستگی مشخصه شدت زلزله با پارامترهای نشست، فشار منفذی و ممان خمشی بیشتر از همبستگی شدت آریاس با پارامترهای مذکور بدست آمد.

۳-۷- تاثیر شدت انرژی مشخصه زلزله روی پاسخ اسکله

شدت انرژی مشخصه زلزله^۱ از انتگرال مربع تاریخچه زمانی سرعت محاسبه می شود. این پارامتر با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود.

$$SED = \int_0^t v(t)^2 dt \quad (18)$$

در رابطه مذکور tf مدت زمان تداوم زلزله و vt تاریخچه زمانی سرعت می باشد. تاثیر انرژی زلزله روی پاسخ اسکله محاسبه شد. میزان وابستگی پارامترهای پاسخ اسکله با تغییرات انرژی زلزله بررسی شد. از آنجایی که PGV و SED هر دو مرتبط با سرعت زلزله می باشند، بنابراین مقایسه ای بین نتایج همبستگی محاسبه شده با هر کدام از این پارامترها انجام شد. با مقایسه بین نتایج همبستگی محاسبه شده مشاهده می شود که میزان همبستگی بین پارامترهای نشست و جابه جایی افقی برای سرعت حداکثر و شدت انرژی مشخصه زلزله تقریباً یکسان می باشند. ولی میزان همبستگی بین فشار منفذی و ممان خمشی کمتر از همبستگی محاسبه شده با سرعت حداکثر می باشد.

۷- بحث و بررسی

رابطه (۳) در رابطه (۱) می‌توان استفاده کرد. که در نهایت می‌توان به رابطه (۱۹) دست یافت [29].

$$P[D \geq d|IM] = \Phi\left(\frac{\ln(IM) - \ln(d) - \ln(a)}{\frac{\beta_{D|IM}}{b}}\right) \quad (19)$$

همچنین برای محاسبه این پارامتر رابطه دیگری تحت عنوان پراکندگی اصلاح شده نیز تعریف شده است که در رابطه (۲۰) این پارامتر ارائه شده است.

$$\zeta = \frac{\beta_{D|IM}}{h} \quad (20)$$

پارامتر ζ (کارایی) در واقع ترکیبی از مقدار پراکندگی بیان کننده پارامتر بهینه بودن و پارامتر شیب خط رگرسیون (کاربردی بودن) می‌باشد. مقادیر پایین تر پارامتر ζ نشان از کارایی بیشتر معیار دارد. در واقع هر میزان که مقدار پراکندگی داده‌ها کم و مقادیر پارامتر b بالا باشد، مقدار کارایی معیار شدت مورد نظر نیز بالاتر خواهد رفت. در شکل (۱۰) نمودار کلی نتایج تحلیل‌های آماری پارامترهای مختلف ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده بهینه ترین معیار مربوط به معیار ارائه شده برای نشست می‌باشد و از لحاظ کاربردی رابطه جابه‌جایی افقی کاربردی تر می‌باشد. همچنین رابطه ارائه شده برای ممان دارای کارایی بالاتری می‌باشد.

شکل ۱۰. نمودارهای الف) بهینه بودن ب) ضریب همبستگی ج) کاربردی بودن و د) کارایی داشتن برای پارامترهای شدت

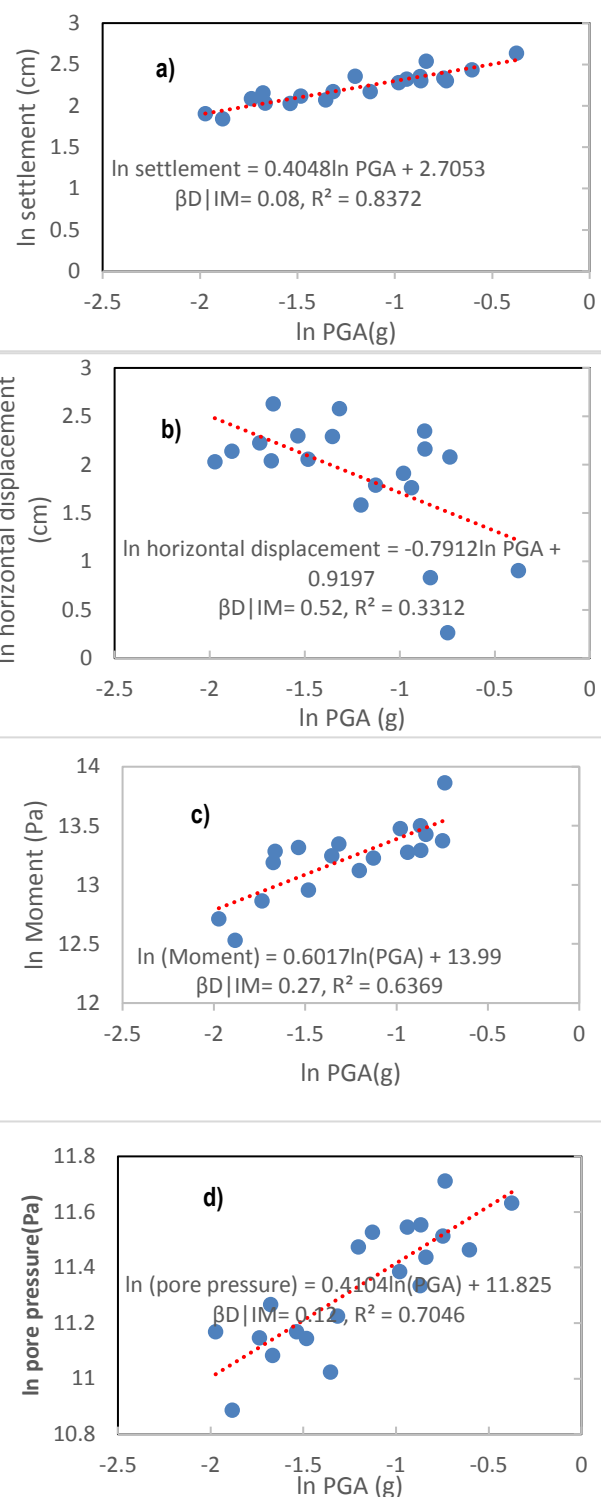
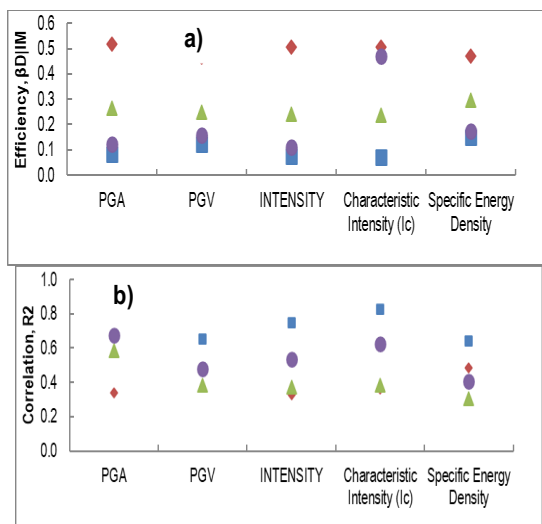


Fig. 9. example of probabilistic models to calculate parameters of Efficiency and Practicality for different parameters

کارایی داشتن^۱

پارامتر کارایی ترکیبی از دو پارامتر کاربردی بودن و بهینه بودن معیار شدت است. در واقع برای محاسبه این معیار از جایگذاری

برای محاسبه مقدار دقیق پارامتر بهینه بودن برای هر معیار شدت نسبت به هر کدام از پارامتر آماری مهم از عدد p -value استفاده می‌شود. این پارامتر در رگرسیون‌ها برای بررسی مستقل بودن پارامترهای ورودی از رابطه استفاده می‌شود اما استفاده از آن برای مفهوم بهینه بودن اندکی تفاوت دارد. این مفهوم بر اساس تحقیقات تانگ و آنگ در سال ۲۰۰۷ به این صورت تعریف شد: مقدار رگرسیون پسماند بین پارامتر تقاضا و معیار شدت (ε_{dlIM}) توزیع شده به صورت رندوم بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی پاسخ (محاسبه شده از PSDM) منجر به یک خط رگرسیون شود به طوریکه این خط کاملاً صاف و بدون شیب باشد، کفایت داشتن آن معیار شدت را بیان می‌نماید [30].

آستانه پارامتر p -value مقدار ۵ درصد می‌باشد که پژوهش پیش رو مورد استفاده قرار گرفته است. این مقدار شناخته‌ترین مقدار در مسایل مربوط به مهندسی زلزله می‌باشد. هر چه مقدار پارامتر p -value کمتر باشد باعث رد شدن آسانتر و قوی‌تر فرضیه پوچ می‌شود و نشان دهنده شیب در رگرسیون و عدم کفایت پارامتر شدت است. مقادیر نزدیک به ۵ درصد و بالاتر از آن نشان دهنده کفایت معیار شدت می‌باشد [31]. در مطالعه پیش رو نمودار رگرسیون باقیمانده خطی برای پارامترهای مختلف بر حسب فاصله و بزرگای زلزله رسم شد. در شکل (۱۱) نمونه‌ای از این نمودارها ارائه شده است.

شکل ۱۱. نمونه‌ای از نمودار باقیمانده رگرسیون خطی (الف) نمودار نشست بر حسب بزرگای زلزله (ب) نمودار فشار منفذی بر حسب بزرگای زلزله (ج) نمودار ممان بر حسب فاصله از مرکز زلزله و (د) نمودار جابه‌جایی افقی بر حسب فاصله از مرکز زلزله

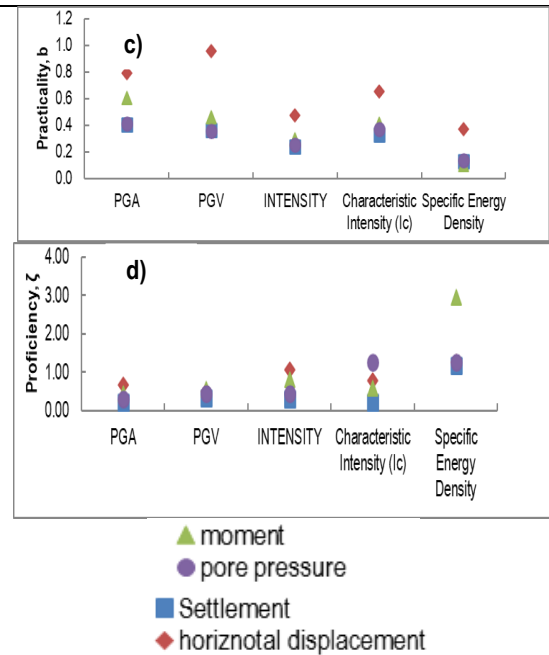
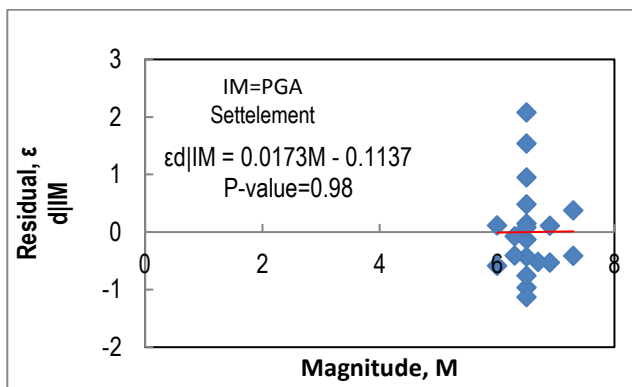


Fig. ۱۰. Diagrams of a) Efficiency b) correlation coefficient c) Practicality and d) Proficiency for intensity parameters

کفایت داشتن^۱

پارامتر کفایت داشتن بدین صورت تعریف می‌شود که معیار شدت مورد نظر به بزرگای زلزله (M) و فاصله آن تا گسل لرزه زا (R) وابستگی ندارد. به عبارت دیگر تغییرات در بزرگی و فاصله روی معیار شدت تاثیر گذار نیست و معیار شدت فارغ از مقدار این دو پارامتر است. در مورد بسیاری از معیارهای شدت گزارش شده تا به امروز بسیاری از آن‌ها تحت تاثیر بزرگای زلزله و فاصله از مرکز انتشار زلزله هستند. پارامتر کفایت داشتن ($Sufficiency$) براساس تئوری کلی احتمال و بر مبنای آنالیز احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای بنا نهاده شده است. بر اساس این فرضیات مقدار میانگین سالانه فرا گذشت از یک مقدار تعریف شده تقاضا (D) به صورت معادله (۲۱) قابل بیان است [29]

$$[IM] \lambda(D) = \int_{IM} P[D \geq d] \quad (21)$$

در این رابطه پارامتر $\lambda[IM]$ بیانگر مقدار میانگین سالانه فرا گذشت از هر مقدار معیار شدت دلخواه $[IM]$ است. احتمال فرا گذشت به صورت ارائه شده در رابطه (۲۲) و بررسی نسبت به پارامترهای بزرگا و فاصله تنها ویژگی‌های لازم برای بررسی مقدار کفایت در معیارهای شدت می‌باشند.

$$[P[D \geq d|IM, M, R] \quad (22)$$

□ Sufficiency

شکل ۱۲. بررسی کفایت پارامترهای مختلف شدت نسبت به الف) فاصله، ب) بزرگای زلزله

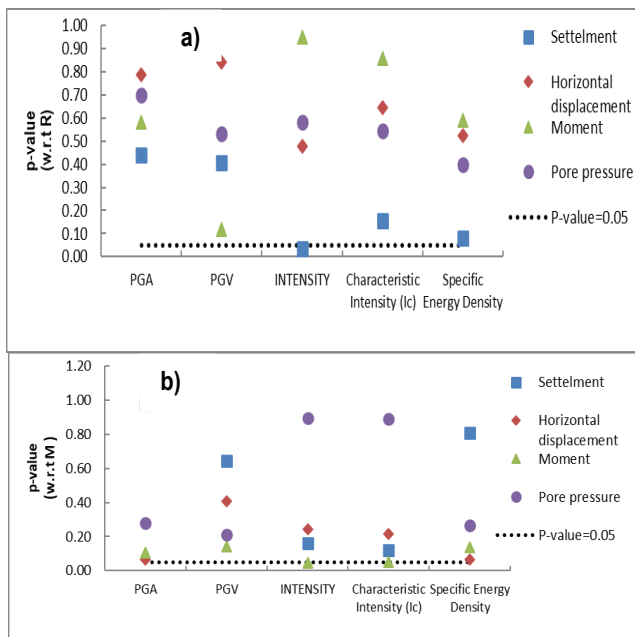


Fig. ۱۲. Examining the Sufficiency of different intensity parameters in relation to a) distance, b) magnitude of the earthquake.

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه همبستگی بین پارامترهای جنبش نیرومند زمین و پاسخ اسکله در یک محیط روانگرا بررسی شده است. بدین منظور در تحلیل دینامیکی از ۲۰ رکورد زلزله انتخابی استفاده شده است و همبستگی بین پارامترهای لرزه‌ای مختلف با پاسخ اسکله بررسی شده است. نتایج آنالیزها نشان داد که همبستگی بین نشست اسکله با پارامترهای لرزه‌ای نسبت به سایر پارامترهای پاسخ اسکله عدد بالاتری می‌باشد. این پارامتر در بهترین حالت دارای همبستگی ۰/۸۳ با شتاب حداکثر زلزله و در بدترین حالت دارای ضریب همبستگی ۰/۶۴ با انرژی زلزله می‌باشد. به طور کلی با افزایش ۵ پارامتر بررسی شده برای زلزله، مقدار پارامترهای ممان، اضافه فشار منفذی و نشست افزایش می‌یابد. همچنین پارامترهای وابسته به حرکت زمین (PGA، PGV) همبستگی بهتری با پاسخ اسکله نسبت به پارامترهای شدت آریاس، شاخص شدت و انرژی زلزله دارا بودند. در ادامه پژوهش به منظور بررسی کیفیت معیارهای شدت زلزله معیارهای تعیین کننده‌ای مانند بهینه بودن، کاربردی بودن و کارایی و کفایت بررسی شد، با توجه به نتایج ارائه شده بهینه ترین معیار

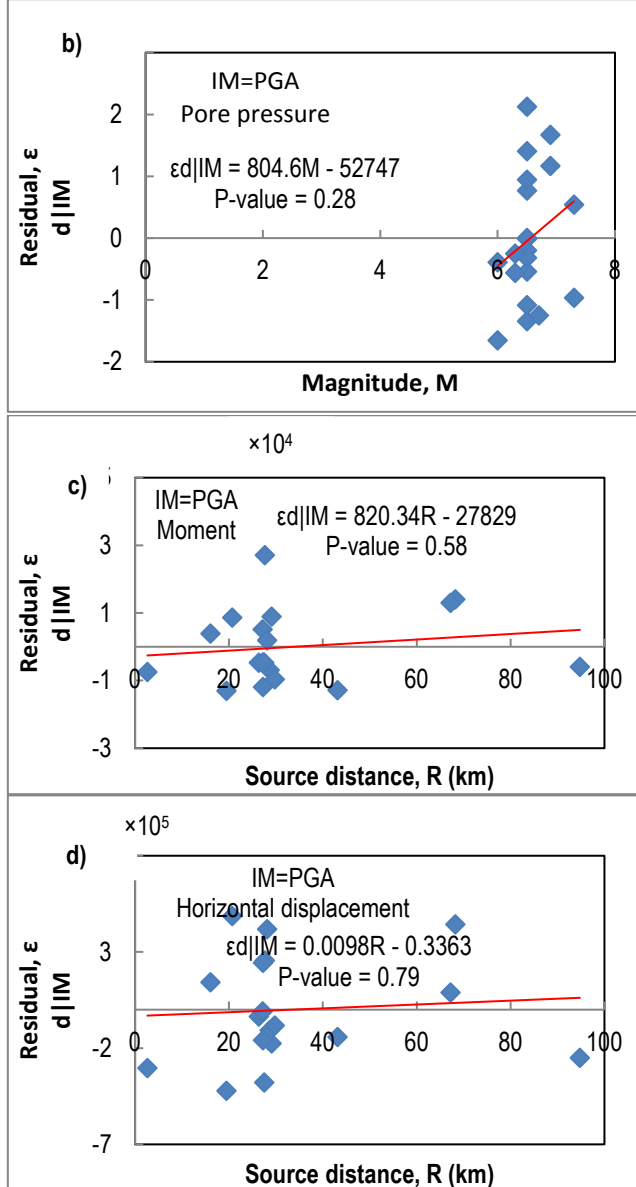


Fig. ۱۱. Example of a linear regression residual plot for different parameters

نتایج بدست آمده برای تمامی مدل‌ها با معیارهای ارزیابی کیفیت بررسی شد. با توجه به تحلیل‌های انجام شده مشاهده می‌شود معیارهای شدت زلزله دارای مقدار شاخص p -value بزرگتر از ۰/۰۵ هستند که نشان از کفایت نسبت به بزرگا (M) و فاصله از چشمه لرزه زا (R) می‌باشد. در شکل (۱۲) نتایج کفایت پارامترهای مختلف نسبت فاصله و بزرگای زلزله ارائه شده است.

- مربوط به معیار ارائه شده برای نشست می‌باشد و از لحاظ کاربردی رابطه جابه‌جایی افقی کاربردی تر است. همچنین رابطه ارائه شده برای ممان دارای کارایی بالاتری می‌باشد. برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود نتایج این پژوهش با استفاده از تحلیل‌های ۳ بعدی توسعه یابد.

- [] Baker, J. W., & Cornell, C. A. (1987). Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis, PEER Report 87-01, Pacific Earthquake Engineering Research Center-College of Engineering, University of California, Berkeley.
- [] Cornell, C. A., Jalayer, F., Hamburger, R. O., & Foutch, D. A. (1999). Probabilistic basis for 1999 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. *Journal of structural engineering*, 125(3), 549-559.
- [] T. Abdoun, R. Dobry, T. O'Rourke, and S. Goh, "Pile Response to Lateral Spreads: Centrifuge Modeling," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, pp. 1033-1043.
- [] S. Imamura, T. Hagiwara, Y. Tsukamoto, and K. Ishihara, "Response of pile groups against seismically induced lateral flow in centrifuge model tests," *Soils and Foundations*, vol. 44, pp. 103-114.
- [] S. J. Brandenberg, R. W. Boulanger, B. L. Kutter, and D. Chang, "Behavior of pile foundations in laterally spreading ground during centrifuge tests," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, pp. 1013-1024.
- [] M. Cubrinovski, T. Kokusho, and K. Ishihara, "Interpretation from large-scale shake table tests on piles undergoing lateral spreading in liquefied soils," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 21, pp. 103-114.
- [] S. M. Haeri, A. Kavand, I. Rahmani, and H. Torabi, "Response of a group of piles to liquefaction-induced lateral spreading by large scale shake table testing," *Soil Dynamics and*

- [1] Martin GR, Finn LWD, Seed HB. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading. Geotechnical engineering, ASCE (GT):. pp.
- [2] Byrne PM, McIntyre J. Deformation in granular soils due to cyclic loading. ASCE GSP Vertical and horizontal deformations of foundation and embankments; p.
- [3] Kuhlemeyer, R. L., Lysmer, J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", Journal of Soil Mechanics & Foundations, ASCE, (), .
- [4] Wang, X., Shafieezadeh, A., & Ye, A. (). Optimal intensity measures for probabilistic seismic demand modeling of extended pile-shaft-supported bridges in liquefied and laterally spreading ground. Bulletin of Earthquake Engineering, (), .
- [5] Mackie, K., & Stojadinovi B. (). Probabilistic seismic demand model for California highway bridges. Journal of Bridge Engineering, (), .
- [6] Padgett, J. E., Nielson, B. G., & DesRoches, R. (). Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios. Earthquake engineering & structural dynamics, (), .
- [7] Jalayer, F., Beck, J. L., & Zareian, F. (). Analyzing the sufficiency of alternative scalar and vector intensity measures of ground shaking based on information theory. Journal of Engineering Mechanics, (), .
- [8] Ang, A. H., & Tang, W. H. (). Probability Concepts in Engineering Planning: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering, John Wiley and Sons.
- Infrastructure. In Seismic Performance and Simulation of Pile Foundations in Liquefied and Laterally Spreading Ground (pp.).
- [9] Amirabadi, R., Bargi, K., & Torkamani, H. H. (). Seismic demands for pile-supported wharf structures with batter piles. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, (), .
- [10] Amirabadi, R., Bargi, K., Dolatshahi Piroz, M., Heidary Torkamani, H., & McCullough, N. (). Determination of optimal probabilistic seismic demand models for pile-supported wharves. Structure and Infrastructure Engineering, (), .
- [11] Deghoul, L., Gabi, S., & Hamrouni, A. (). The influence of the soil constitutive models on the seismic analysis of pile-supported wharf structures with batter piles in cut-slope rock dike. Studia Geotechnica et Mechanica, (), .
- [12] Manual of FLAC3D, Ver. \Dynamic Analysis", Itasca Consulting Group Inc. pp. Meerut, India: Sarita, Roorkee University, India (January).
- [13] Itasca, FLAC., "Fast Lagrangian Analysis of Continua", Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, .
- [14] Mahinroosta, R. \Modeling of hardening and softening behavior of rock masses under shear using multilaminate model", Ph.D. thesis, Sharif University of Technology ().
- [15] Byrne, P., "A Cyclic Shear-Volume Coupling And Pore-Pressure Model For Sand", 1st International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp .

The effect of different earthquake parameters on the dynamic behavior of the wharf

۱. Ataollah Abdollahzadeh^۱; ۲. Navid Hadiani^{۲*}; ۳. Amirhossein Eghbali^۳; ۴. Maryam Haghbini^۴

□ P.H.D Student of Geotechnic, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Islamshahr branch

□ Assistant Professor of Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Islamshahr branch

□ Assistant Professor of Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Islamshahr branch

□ Assistant Professor of Civil Engineering Department, Islamic Azad University, Islamshahr branch

Abstract

Wharf is an engineering structure which is constructed generally for loading or unloading of goods. The structure may be constructed on the weak layers like gravel and sand with respect to the bank conditions. In case of incorrect design of this type of structure and its failure, the wharf activities may be stopped for a long time due to damage to adjacent facilities. For this reason, investigating the behavior of coastal structures against failure factors such as earthquake and the liquefaction due to it, is of great importance. Analysis of wharf performance against liquefaction is done generally using the numerical methods. In this article using the FLAC^{3D} software which has the capability of nonlinear analysis of effective stress and generation of excess pore water pressure in the soil continuum, the liquefaction phenomenon in the soil surrounding the wharf is simulated using the behavioral model Finn. The earthquake records are applied as the shear stress history to the bottom of the model. For numerical simulation of the wharf structure, the studies done by McCullough (1994) on the JCB model are employed. At the first stage of the current research and for validation of the developed model the results obtained from FLAC^{3D} software were compared to those presented by Deghoul (1994) and Amirabadi et al. (1994). The performed investigations reveal that there is a good agreement between the results of the current model and the results obtained by Deghoul (1994) and Amirabadi et al. In continuation, 10 earthquake records were selected and the effect of various earthquake parameters such as the peak ground acceleration and peak ground velocity, Arias intensity, earthquake intensity and earthquake energy on the wharf behavior were investigated. Finally in order to investigate the wharf response in terms of the earthquake records, the results of excess pore water pressure, horizontal displacement, soil settlement and bending moment of piles for different states are presented. Next, the correlation of these parameters with different earthquake parameters is calculated. The analyses results showed that the correlation between the wharf settlement and earthquake parameters exhibits a higher value with respect to other parameters of the wharf response. The parameter in the best case has a correlation coefficient value of 0.95 with the peak ground acceleration and in the worst case has a correlation coefficient value of 0.45 with the earthquake energy. Generally, by increasing the values of investigated parameters corresponding to the earthquake, the values of moment, excess pore water pressure and settlement parameters increase. Furthermore, the parameters dependent on the ground motion (PGV, PGA) had a better correlation with the wharf response compared to the parameters of Arias intensity, earthquake intensity and earthquake energy. As the criteria related to the earthquake intensity have vital importance in probability evaluation of seismic demands of various structures, therefore comprehensive statistical studies were carried out in the present article. For the purpose of investigating the quality of earthquake intensity criteria, the determining indices such as Efficiency, Practicality and Proficiency, also sufficiency in terms of earthquake magnitude and distance from the center of earthquake propagation (epicenter) were examined. According to the presented results, the best criterion corresponds to the criterion presented for the settlement. Also the calculate relationship for the moment had a higher efficiency with respect to the other response parameters

Keywords: Wharf, liquefaction, dynamic analysis, finite difference method.