

معادل‌سازی بار تصادفی زلزله به بار یکنواخت برای بررسی روانگرایی

محمد آبادی مرند^۱، عباس قلندرزاده^{۲*} و مجید مرادی^۳

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران، گرایش مهندسی خاک و پی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۶/۰۶/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۰۸، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

چکیده

روانگرایی بوجود آمده توسط زلزله، یکی از عوامل عمده تخریب سازه‌های بناشده بر روی ماسه‌ها است. در طول زلزله ساختار زمین و خاک، در معرض لرزش‌های بسیار نامنظم قرار می‌گیرد. بزرگای تنش برشی اعمال شده بر المان خاک، تصادفی و متغیر است. به منظور ارزیابی اثر این نامنظمی، چندین روش میانگین‌گیری به کار گرفته می‌شود تا به وسیله آن‌ها یک تاریخچه‌ی زمانی پیچیده‌ی تنش به تعدادی سیکل تنش هارمونیک با دامنه‌ی ثابت تبدیل شود. علت این معادل‌سازی، ساده‌گی انجام آزمایش با روش بارگذاری معادل هارمونیک است و در اغلب تست‌های آزمایشگاهی از روش بارگذاری معادل استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر، رفتار ماسه در اثر بارگذاری غیرمنظم و تصادفی، مورد بررسی واقع شده است. با ساخت یک دستگاه سه‌محوری سیکلی می‌توانیم هرگونه الگوی تنش انحرافی را بر نمونه‌ی خاک وارد کنیم. در این تحقیق از رکوردهای زلزله کوچالی، بر روی نمونه‌هایی از ماسه‌ی فیروزکوه شماره‌ی ۱۶۱، اعمال گردیده است. نهایتاً ضریب کاهش تنش، به‌منظور تبدیل بارگذاری نامنظم و تصادفی زلزله، به بارگذاری هارمونیک، در آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه شده و با مقادیر توصیه‌شده در آیین‌نامه‌های موجود مقایسه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: روانگرایی، فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده، تغییر جهت در تنش انحرافی، بارگذاری نامنظم و تصادفی زلزله، بارگذاری هارمونیک، تاریخچه‌ی زمانی

معرفی

آزمایشگاهی و صحرایی استوار بوده و بعدها توسط دیگران مثل مجمع *NRC* (۱۹۸۵) و *NCEER* (۱۹۹۷) و یاد و همکاران (۲۰۰۱) بسط و گسترش پیدا کرد. دامنه‌ی بارگذاری وارده توسط زلزله، با نسبت تنش سیکلی (*CSR*) بیان می‌شود. *CSR* را می‌توان برای هر عمق دل‌خواهی به‌دست آورد. البته این نسبت از آنالیز پاسخ زمین به‌دست می‌آید که با ساده‌سازی‌هایی رابط‌ی زیر حاصل می‌شود.

$$CSR = \frac{\tau_{ave}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d \quad (1)$$

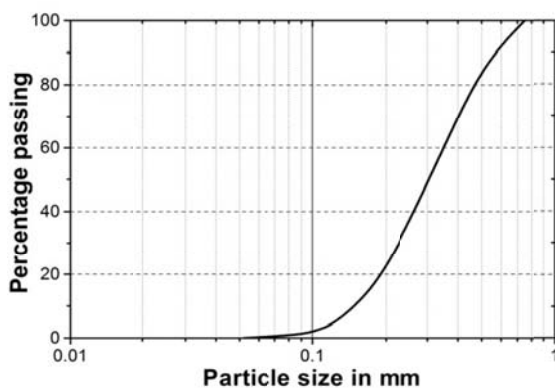
CSR = نسبت تنش سیکلی، که عددی بی‌بعد است.
 a_{max} = شتاب در سطح زمین. g = شتاب جاذبه‌ی زمین.
 σ'_{v0} = تنش هم‌جانبه‌ی مؤثر اولیه قائم در عمق z .
 σ_{v0} = تنش کل قائم در عمق z .
 r_d = ضریب

روش‌های متعددی برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک، پیشنهاد شده است. در این قسمت، هدف کلی، بررسی روش‌هایی است که بر پایه‌ی روش تنش استوار هستند. در بررسی پتانسیل روانگرایی، اصطلاحاتی مانند بار ناشی از زلزله: میزان بارگذاری که توسط زلزله به خاک اعمال می‌شود. (هم دامنه، هم مدت زمان)؛ ظرفیت: میزان بارگذاری لرزشی مورد نیاز، برای رسیدن به حالت روانگرایی؛ ضریب اطمینان: نسبت ظرفیت به بارگذاری؛ تعریف می‌شوند. بنابراین اثر نامنظم بودن بارگذاری زلزله، در همه‌ی روش‌ها در بخش بار ناشی از زلزله خود را نشان می‌دهد. روش سید و ادیسی (۱۹۷۱) و وتیمن (۱۹۷۱)، روش‌هایی هستند که ارزیابی روانگرایی را بر پایه‌ی تنش مورد بررسی قرار می‌دهند و نیز استفاده گسترده از آن‌ها می‌شود. روش تنش بر پایه‌ی تجربیات حاصل از مشاهدات

در این تحقیق سعی داریم تا اثر شکل و فرم شتاب زلزله‌ی ثبت‌شده در روی سطح زمین، که هم‌شکل الگوی بارگذاری تنش برشی تصادفی زلزله است، را در ضریب کاهش تنش، برای معادل کردن بارگذاری نامنظم و تصادفی زلزله به بارگذاری هارمونیک، مورد بررسی قرار دهیم.

مصالح به کار رفته در آزمایش‌ها

در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، از ماسه‌ی شکسته‌ی فیروزکوه شماره‌ی ۱۶۱، جهت تست‌های المان و تست‌های مدل، استفاده شده‌است. هدف از انتخاب ماسه‌ی فیروزکوه شماره‌ی ۱۶۱، معرفی یک ماسه‌ی جدید و دارای خصوصیات لازم، جهت انجام تحقیقات آزمایشگاهی، است. در ضمن این ماسه در ایران در دسترس بوده و در چند سال اخیر، نیز آزمایش‌های زیادی با این ماسه انجام گرفته‌است. این ماسه دارای رنگ زرد متمایل به طلایی است و دانه‌بندی یکنواختی دارد. منحنی دانه‌بندی و مشخصات خاک ماسه‌ای فیروزکوه ۱۶۱ را به- ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ مشاهده می‌کنید.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی فیروزکوه شماره‌ی ۱۶۱

جدول ۱: مشخصات ماسه‌ی فیروزکوه شماره‌ی ۱۶۱

C_c	C_u	FC	D_{50}	e_{max}	e_{min}	G_s
0.97	2.58	0.0	0.3	0.874	0.548	2.65

برنامه‌ی آزمایش‌ها

نمونه‌های آزمایش سه‌محوری قطری برابر با ۵ سانتیمتر و ارتفاعی برابر ۱۰ سانتیمتر دارند. روش

کاهش تنش، که پارامتری بی‌بعد است و به علت تغییر شکل‌پذیری ستون خاک در نظر گرفته می‌شود [۱]. همان‌طور که می‌بینید در روش سید و ادريس ضریب کاهش تنش، ۰/۶۵ فرض شده‌است. این عدد به‌منظور معادل‌سازی نامنظمی بارگذاری زلزله در نظر گرفته می‌شود. ضریب ۰/۶۵ در ابتدا به‌صورت یک قضاوت مهندسی توسط سید و ادريس مطرح شد، ولی بعدها با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی این عدد ۰/۶۵ تایید شد. سید و ادريس در اصلاحاتی که بر روی ارزیابی پتانسیل روانگرایی به روش تنش، در سال ۱۹۸۵ انجام دادند، این ضریب را دوباره همان ۰/۶۵ معرفی کردند. ایشی‌هارا و همکاران (۱۹۸۸) با انجام آزمایش‌های برش ساده دوطرفه، تاثیر نامنظمی و نیز دوجته بودن بارگذاری زلزله را هم‌زمان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در ماسه‌های با تراکم نسبی متوسط ضریب کاهش تنش در اثر نامنظمی بارگذاری زلزله و دوجته بودن آن، در حدود ۰/۶۵ است [۲]. کار مشابهی نیز توسط ویتمن (۱۹۷۱) انجام گرفت. وی دامنه‌ی تنش سیکلی یکنواخت را ۰/۶۷ تنش برشی ماکزیمم در نظر گرفت. وی این عدد را برای حرکت لرزه‌ای با طول ۲۰ ثانیه به‌دست آورد و معتقد بود که با افزایش مدت لرزش این عدد باید افزایش پیدا کند. اگرچه استفاده از این الگوهای منظم بارگذاری کار ما را بسیار ساده می‌کند، ولی گاهی اوقات، منشا خطاهای بزرگی در ارزیابی پتانسیل روانگرایی ماسه نیز هست. بنابراین لازم است بررسی بیشتری بر روی معادل سازی تاریخیچه‌ی زمانی واقعی تنش و نیز طول مدت لرزش انجام گیرد. در سالهای اخیر برخی از محققین سعی داشته‌اند تا روابطی بین افزایش فشار آب حفره‌ای و انرژی وارد شده به خاک با قابلیت روانگرایی ارائه کنند [۳ و ۴]. نعمت ناصر و شکوه جزو اولین کسانی بودند که چنین روابطی ارائه دادند [۵]. علاوه بر آن تحقیقاتی در زمینه روابط بین پارامترهای خاک و انرژی لازم برای روانگرایی با کمک شبکه عصبی توسط بازیار و جعفریان انجام شد [۶]. همچنین ارزیابی دقیق مقاومت خاک در محل در برابر روانگرایی و دخیل نمودن پدیده‌هایی چون بافت خاک، تاریخیچه کرنش و پیش تحکیمی خاک با استفاده از آزمایش‌های درجا و مقایسه‌ی آن با نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی برخی از محققین را به خود مشغول داشته است [۷].

زمانی تنش انحرافی ورودی محرک به دستگاه در شکل‌های ۵ و ۶ آمده‌است.

تاریخچه‌های زمانی تنش انحرافی

برای انجام این تحقیق به تعدادی تاریخچه‌ی زمانی تنش انحرافی (تنش برشی) زلزله، نیاز است. همان‌گونه که در قسمت قبل توضیح داده شد، برای این کار می‌توان از تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله که در سطح زمین ثبت شده- است، استفاده کرد. همان‌طور که می‌دانید، تقسیم‌بندی‌های فرم شتاب زلزله، بسیار گوناگون است. با توجه به مطالبی که در قسمت‌های قبل آمده‌است و قابلیت دستگاه سه‌محوری، اثر فرکانس در روانگرایی، در این تحقیق، مورد نظر نبوده- است. بنابراین تنها به شکل ظاهری آن توجه می‌شود. در مطالعات قبلی در ادبیات فنی چنین نتیجه‌گیری شده‌است که می‌توان تاریخچه‌ی زمانی شتاب، از نظر شکل ظاهری، را به دو گروه عمده تقسیم کرد. این دو گروه عبارتند از نوع لرزشی و نوع شوکی یا ناگهانی. بنابراین برای بررسی اثر نامنظمی در بارگذاری، انتخاب دو فرم شوکی و دو فرم لرزشی کافی به نظر می‌رسد، [۸].

در نوع شوکی یا ناگهانی فقط ۱ یا ۲ پیک بزرگ وجود دارد که به‌صورت ناگهانی وارد می‌شود. ولی در نوع لرزشی چندین پیک متوالی با دامنه‌های نه‌چندان متفاوت، وجود دارد. برای تشخیص نوع شکل تاریخچه‌ی زمانی شتاب، روش‌های گوناگونی وجود دارد. ولی در آسان‌ترین روش تشخیص، سمت هم علامت با شتاب ماکزیمم را در نظر بگیرید. اگر کمتر از سه پیک با دامنه‌ی بزرگتر از ۶۰٪ شتاب ماکزیمم وجود داشته باشد به آن، نوع شوکی یا ناگهانی گفته می‌شود. برخلاف آن اگر بیش از سه پیک بیشتر از ۶۰٪ دامنه‌ی شتاب ماکزیمم را داشته باشند به آن، نوع لرزشی اطلاق می‌شود، [۸]. البته در فرم شتاب لرزشی، تعداد تغییر علامت شتاب، بسیار بیشتر از فرم شوکی یا ناگهانی است. همین منجر به تعداد بیشتر تغییر جهت تنش انحرافی در تاریخچه‌ی زمانی تنش خواهد شد. با بررسی‌های انجام‌شده بر روی رکوردهای شتاب به این نتیجه می‌رسیم که تعداد تغییر جهت در تنش انحرافی در رکوردهای شوکی یا ناگهانی، به‌طوری که حدود ۵۰٪ تنش انحرافی ماکزیمم فشاری ($q_d > 0$) و ۵۰٪ تنش انحرافی کششی ($q_d < 0$) را به یکدیگر تبدیل کند، کمتر از ۱۵ عدد، و برای رکوردهای لرزشی بیشتر از ۱۵ عدد است.

نمونه‌سازی به‌صورت بارش خشک بوده و تراکم نسبی $D_r = 56\%$ دارند و اشباع به‌کمک آب هواگیری‌شده انجام می‌گیرد. سپس نمونه تحت تنش $\sigma'_c = 200kPa$ تحکیم داده می‌شود. سرانجام به‌صورت زهکشی‌نشده بارگذاری می‌گردد.

دستگاه آزمایش

دستگاهی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، دستگاه سه‌محوری سیکلی است. این دستگاه در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، با دانش فنی داخلی، طوری طراحی و ساخته شده‌است و تنها دستگاه موجود در ایران است که می‌تواند هر الگوی بارگذاری تنش انحرافی، با هر شکلی را به نمونه وارد کند. تنش انحرافی با یک سیلندر-پیستون پنوماتیکی تأمین می‌شود. پیستون پنوماتیکی یک ورودی هوا به بالای سیلندر و یک ورودی هوا به پایین سیلندر دارد که این پیستون این دو فضا را از هم جدا می‌کند. وجود اختلاف فشار هوا بین پایین و بالای سیلندر باعث حرکت پیستون می‌شود. در این دستگاه، فشار هوای پایین سیلندر را روی ۱۰۰ کیلوپاسکال ثابت نگهداشته می‌شود. به ورودی بالای سیلندر یک E/P وصل است. به این ترتیب با کم و یا زیاد کردن فشار E/P ، اختلاف فشار لازم بین بالا و پایین پیستون حاصل می‌شود و می‌توان کنترل نیروی محوری را در دست گرفت. به‌علاوه سیستم بارگذاری تنش انحرافی پنوماتیکی، دستگاه مذکور توان بارگذاری با فرکانس بیش از $fr = 0.1Hz$ را ندارد.

تولید بارگذاری تصادفی

برای ایجاد بارگذاری نوع زلزله، از چهار سری عددی استفاده‌شده، که از ثبت شتاب سطح زمین به‌دست آمده‌اند. همان‌طور که می‌دانید بین تنش برشی یک المان از خاک در عمق مشخص و شتاب سطح زمین رابطه‌ای خطی برقرار است، [۱]. این چهار الگوی تنش برشی تبدیل‌شده از شتاب زلزله، در دستگاه سه‌محوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای این‌که بتوان نتایج را با نتایج بارگذاری هارمونیک که فرکانس آن بین $fr = 0.02Hz \sim 0.10Hz$ بود، مقایسه کرد، مدت زمان این چهار الگوی بارگذاری تصادفی از ۱۳ ثانیه به ۱۳۰۰ ثانیه تغییر پیدا کرد. تاریخچه‌هایی

برای بررسی اثر بارگذاری نامنظم، آزمایش‌هایی نیز با بارگذاری سینوسی یکنواخت، نیز انجام گرفته‌است تا با نتایج آزمایش‌های بارگذاری تصادفی مقایسه شود. به‌منظور انتخاب فرم‌های بارگذاری، بهتر این است که از رکوردهای مختلف یک زلزله‌ی مشخص و واحد استفاده شود. از میان زلزله موجود، رکوردهای زلزله‌ی کوچالی ترکیه استفاده شده‌است. علت این انتخاب، تعدد رکوردهای ثبت شده روی سطح زمین، و مشاهده‌ی سایت‌های زیاد روانگرشده در این زلزله است. در این تحقیق ۴ الگوی بارگذاری تصادفی زلزله به‌کار گرفته شده‌است، که الگوهای شماره‌ی ۱ و ۲ به فرم تصادفی شوکی یا ناگهانی و الگوهای شماره‌ی ۳ و ۴ به حالت تصادفی لرزشی یکنواخت نزدیک-اند. با کمی دقت در شکل الگوهای بارگذاری می‌توان دریافت که الگوی شماره‌ی ۱ (شکل ۵)، شوکی‌تر یا ناگهانی‌تر از الگوی شماره‌ی ۲، و الگوی شماره‌ی ۴ (شکل ۶)، لرزشی‌تر از الگوی شماره‌ی ۳ است. مدت زمان این بارگذاری‌ها از اولین $a = 0.02g$ تا آخرین $a = 0.02g$ در رکورد ثبت‌شده، است.

آزمایش‌های بارگذاری نامنظم و تصادفی

ابتدا، یکی از الگوهای بارگذاری نامنظم، (مثلاً الگوی شماره‌ی ۱)، در آزمایش اول، شدت دامنه‌ی بارگذاری را طوری انتخاب شده‌است، که منجر به روانگرایی نمونه در طول بارگذاری نشود. الگوی بارگذاری تنش انحرافی و افزایش فشار آب حفره‌ای رسم شده‌است. همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست فشار آب حفره‌ای تا قبل از تنش ماکزیمم، به آرامی افزایش پیدا می‌کند. ولی در حوالی تنش ماکزیمم، مقدار آن ناگهان افزایش پیدا کرده و بدون تغییر باقی می‌ماند. تنش انحرافی ماکزیمم و نسبت فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده ناشی از آن، مربوط به الگوی بارگذاری شماره‌ی ۱ در شکل ۵ و جدول ۲ و الگوی شماره ۴ در شکل ۶ و جدول ۳ آورده شده‌است.

تغییرات فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده، u' و کرنش محوری ε اندازه‌گیری شده‌است. برای سایر الگوهای بارگذاری زلزله همین کار را انجام می‌دهیم. در تاریخچه‌ی زمانی تنش انحرافی که شکل پیچیده‌ای دارد، بزرگترین تغییرات جایی رخ می‌دهد که تنش انحرافی ماکزیمم (σ_{max}) به نمونه اعمال می‌شود. نسبت تنش انحرافی ماکزیمم به صورت $CSR_{max} = (\sigma_{max} / 2\sigma'_c)$ تعریف می‌شود. به‌کارگیری نسبت تنش انحرافی، مناسب‌تر از خود تنش انحرافی است. در شکل‌های ۳-الف و ۴-الف، نسبت تنش انحرافی ماکزیمم را برای هر الگوی بارگذاری، مشاهده می‌کنید. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، فشار آب حفره‌ای به تدریج در طول بارگذاری افزوده می‌شود ولی اگر بعد از تنش انحرافی ماکزیمم، پیک بارگذاری بزرگی نباشد، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این فشار آب حفره‌ای

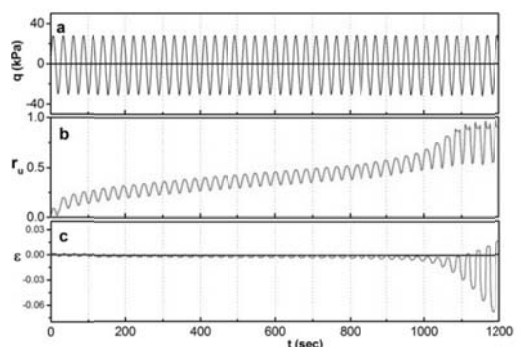
برای بررسی اثر بارگذاری نامنظم، آزمایش‌هایی نیز با بارگذاری سینوسی یکنواخت، نیز انجام گرفته‌است تا با نتایج آزمایش‌های بارگذاری تصادفی مقایسه شود. به‌منظور انتخاب فرم‌های بارگذاری، بهتر این است که از رکوردهای مختلف یک زلزله‌ی مشخص و واحد استفاده شود. از میان زلزله موجود، رکوردهای زلزله‌ی کوچالی ترکیه استفاده شده‌است. علت این انتخاب، تعدد رکوردهای ثبت شده روی سطح زمین، و مشاهده‌ی سایت‌های زیاد روانگرشده در این زلزله است. در این تحقیق ۴ الگوی بارگذاری تصادفی زلزله به‌کار گرفته شده‌است، که الگوهای شماره‌ی ۱ و ۲ به فرم تصادفی شوکی یا ناگهانی و الگوهای شماره‌ی ۳ و ۴ به حالت تصادفی لرزشی یکنواخت نزدیک-اند. با کمی دقت در شکل الگوهای بارگذاری می‌توان دریافت که الگوی شماره‌ی ۱ (شکل ۵)، شوکی‌تر یا ناگهانی‌تر از الگوی شماره‌ی ۲، و الگوی شماره‌ی ۴ (شکل ۶)، لرزشی‌تر از الگوی شماره‌ی ۳ است. مدت زمان این بارگذاری‌ها از اولین $a = 0.02g$ تا آخرین $a = 0.02g$ در رکورد ثبت‌شده، است.

آزمایش‌های بارگذاری هارمونیک

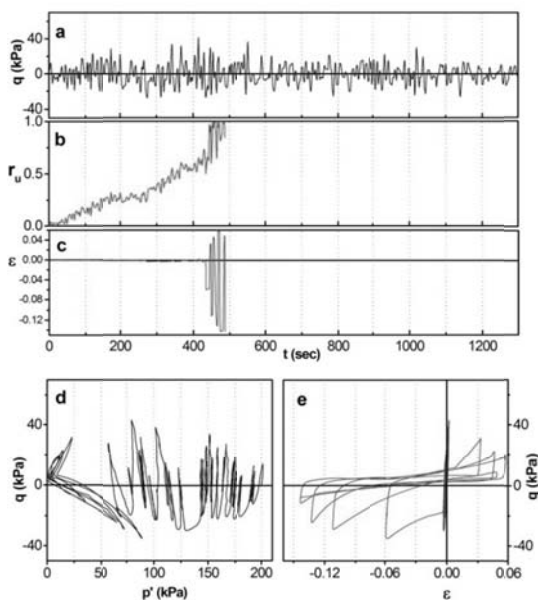
برای ارزیابی و به‌دست آوردن اثر نامنظمی در بارگذاری چند آزمایش با بارگذاری هارمونیک کنترل تنش، انجام - گرفته‌است. با نظر به این‌که بیشتر محققین ۲۰ سیکل را به‌عنوان معیار، تعیین کرده‌اند، در این آزمایش‌ها نیز روانگرایی در تعداد ۲۰ سیکل هارمونیک، در نظر گرفته - شده‌است. نسبت تنش برشی CSR یکنواختی که در طی ۲۰ سیکل خاک را روانگرا کند، با $(\sigma_{dp,l} / 2\sigma'_c)_{20}$ نمایش داده می‌شود.

در این‌جا، همه‌ی آزمایش‌های بارگذاری هارمونیک با تراکم نسبی $D_r = 56\%$ و تنش تحکیمی $\sigma'_c = 200kPa$ است. هرچه نسبت تنش سیکلی CSR وارده به نمونه کوچک‌تر باشد، نمونه در تعداد سیکل‌های بیش‌تر روانگرا می‌شود. با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تنش سیکلی CSR لازم برای روانگرایی نمونه‌ای، با تراکم نسبی و تنش تحکیمی مفروض، در ۲۰ سیکل، یا هر تعداد سیکل مبنا را به‌طور دقیق به‌دست آورد.

در شکل ۴ نمونه‌ای از نتایج آزمایش‌های بارگذاری هارمونیک رسم شده‌است. در شکل ۴-ا فرم هارمونیک تنش انحرافی را مشاهده می‌کنید، که در آن



شکل ۲: نمونه‌ای از نتایج آزمایش با بارگذاری یکنواخت



شکل ۳: نمونه‌ای از نتایج آزمایش با بارگذاری تصادفی لرزشی

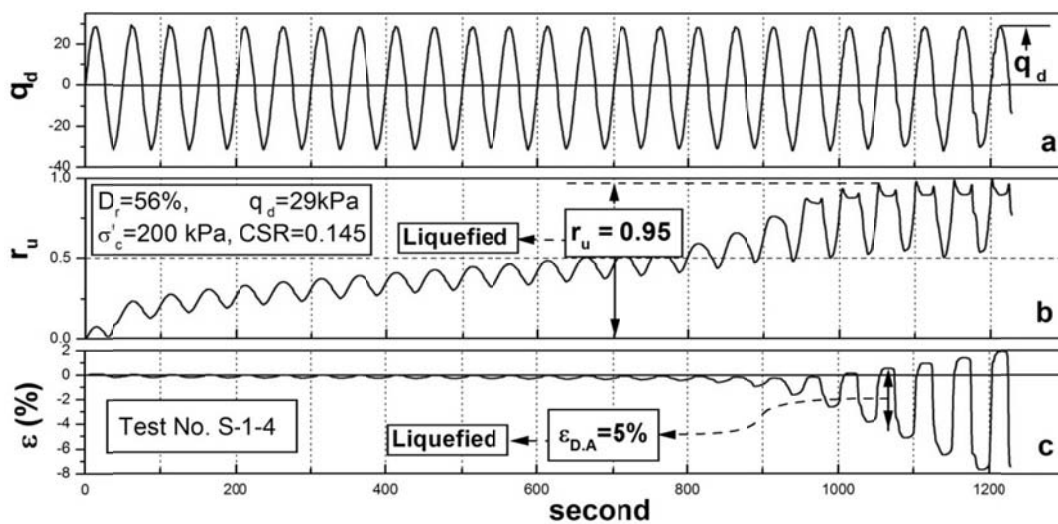
اضافه‌شده در اثر بارگذاری را فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده می‌نامند (u') و نسبت فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده به صورت $r_u = (u' / \sigma'_c)$ تعریف می‌شود. در گام بعدی، شدت بار وارده را اندکی افزایش می‌دهیم، ولی فرم آن را ثابت نگاه می‌داریم. لازم به ذکر است که آزمایش روی نمونه‌هایی با تراکم نسبی و روش ساخت مشابه انجام می‌گیرد. نمودارهای مربوط به نسبت فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده را در شکل‌های ۵-ب و ۶-ب، و کرنش محوری به‌دست آمده را در شکل‌های ۵-ج و ۶-ج مشاهده می‌کنید. این کار را بارها تکرار می‌کنیم یعنی مقدار تنش را در هر مرحله کم‌کم بیشتر از مرحله قبل می‌کنیم. هرچه نسبت تنش وارده را بیشتر کنیم، در نهایت میزان فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده در انتهای آزمایش بیشتر خواهد شد. آزمایش را آنقدر تکرار می‌کنیم که سرانجام افزایش فشار آب حفره‌ای برابر با تنش هم‌جانبه مؤثر اولیه باشد. اینجاست که روانگرایی رخ داده‌است. بیشتر اوقات کرنش محوری ماکزیمم، بعد از وقوع روانگرایی اولیه رخ می‌دهد. قبل از وقوع روانگرایی اولیه، اندازه‌ی کرنش‌ها بسیار کوچک است، ولی بعد از آن به‌علت کاهش شدید در سختی نمونه‌ها، کرنش‌های بزرگ رخ می‌دهد. در هر چهار فرم بارگذاری، پس از دست یافتن به نسبت تنش لازم برای روانگرایی نمونه، دوباره نسبت تنش را بیشتر می‌کنیم. ناگفته پیداست که با اعمال این تنش بزرگ‌تر، نمونه زودتر از آزمایش قبل روانگرا می‌شود.

جدول ۲: نتایج فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده مربوط به الگوی بارگذاری شماره ۱ (شکل ۵).

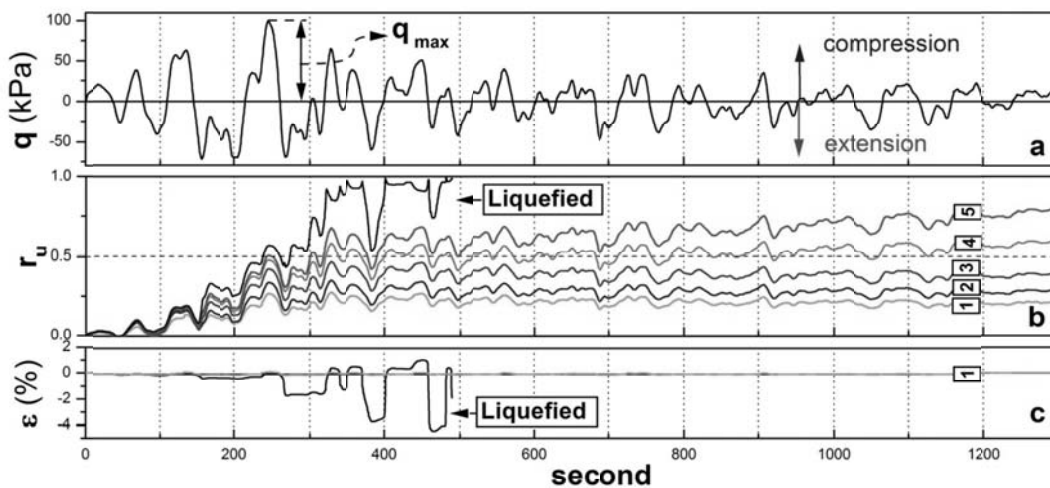
$(\sigma_{\max} / 2\sigma'_c)$	r_u	No.
0.21	0.21	1
0.24	0.286	2
0.26	0.388	3
0.29	0.585	4
0.31	0.790	5
0.32	1.00	6

جدول ۳: نتایج فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده مربوط به الگوی بارگذاری شماره ۴ (شکل ۶).

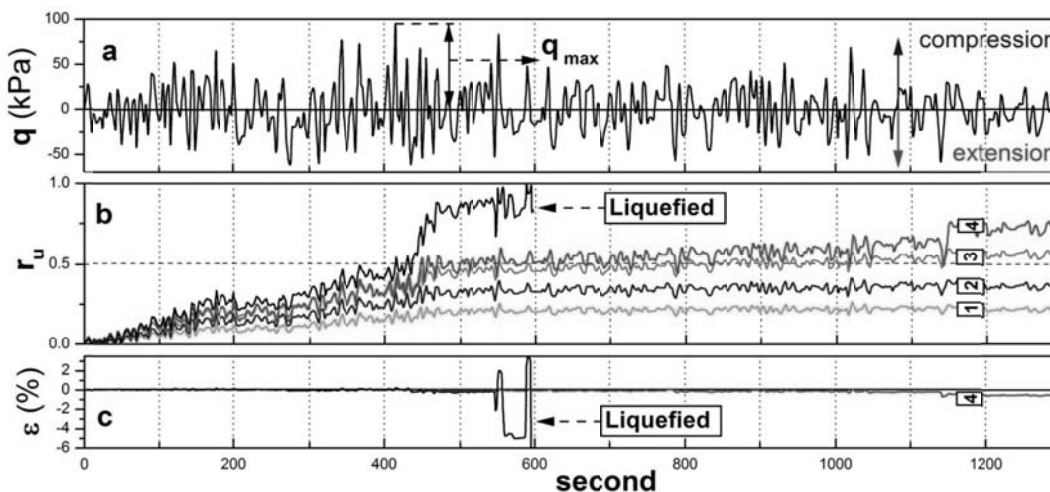
$(\sigma_{\max} / 2\sigma'_c)$	r_u	ردیف
0.16	0.215	1
0.17	0.358	2
0.19	0.566	3
0.20	0.733	4
0.21	1.00	5



شکل ۴: آزمایش سه محوری سیکلی تنش، با بارگذاری یکنواخت. الف) بارگذاری. ب) نسبت فشار آب حفره‌ای. ج) کرنش محوری



شکل ۵: الف) الگوی بارگذاری ۱ از نوع شوکی یا ناگهانی و ب) نسبت فشار حفره‌ای باقی مانده و ج) کرنش محوری



شکل ۶: الگوی بارگذاری ۱ از نوع لرزشی و ب) نسبت فشار حفره‌ای باقی مانده و ج) کرنش محوری

نتایج بارگذاری هارمونیک

این‌جا هدف اصلی یافتن نسبت تنش برشی CSR یکنواختی است که در طی ۲۰ سیکل خاک را روانگرا کند، و با $(\sigma_{dp,l} / 2\sigma'_c)_{20}$ نمایش داده می‌شود. برای این کار تست‌هایی با شرایط ذکر شده فوق و با بارگذاری هارمونیک، انجام گرفته است. در هر تست نسبت تنش سیکلی CSR وارده را تغییر داده و در مقابل تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی رسم می‌کنیم تا شکل ۷ حاصل شود. لازم به‌ذکر است محور N که تعداد سیکل، تا رسیدن به روانگرایی را نشان می‌دهد، بهتر است که در مقیاس لگاریتمی رسم شود. هرچه نسبت تنش سیکلی CSR وارده به نمونه کوچک‌تر باشد، نمونه در تعداد سیکل‌های بیشتر، روانگرا می‌شود. با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تنش سیکلی CSR لازم برای روانگرایی نمونه‌ای، با تراکم نسبی و تنش تحکیمی ثابت، در ۲۰ سیکل را به‌طور دقیق، به‌دست آورد. همان‌طور که از شکل زیر پیداست، مقدار $(\sigma_{dp,l} / 2\sigma'_c)_{20} = 0.148$ حاصل می‌شود. البته از شکل ۷ می‌توان نسبت تنش سیکلی برای هر تعداد سیکل دل‌خواه منجر به روانگرایی را به‌دست آورد. ولی در اکثریت قریب به اتفاق روش‌های موجود در ادبیات فنی از تعداد ۱۰ سیکل یکنواخت و یا ۲۰ سیکل یکنواخت معادل استفاده شده‌است. بنابراین در این تحقیق نیز از تعداد ۲۰ سیکل هارمونیک، به‌عنوان معیار به‌دست آوردن ضریب کاهش تنش و تاثیر نامنظمی بارگذاری ناشی از زلزله، استفاده می‌شود. تمامی آزمایش‌های انجام‌شده با بارگذاری هارمونیک با فرکانس یکسانی انجام نشده‌اند. یعنی فرکانس بارگذاری طوری انتخاب شده‌است که مدت زمان بارگذاری حدود ۱۳۰۰ ثانیه، یعنی برابر مدت زمان بارگذاری تصادفی زلزله شود.

نتایج حاصل از بارگذاری تصادفی زلزله

در این نوع تست‌ها نیز در هر آزمایش، نسبت به آزمایش قبل، تنش برشی را با حفظ فرم تاریخچه زمانی، اندک‌اندک افزایش می‌دهیم. افزایش فشار آب حفره‌ای نیز در هر آزمایش نسبت به آزمایش قبل بیشتر می‌شود. در شکل ۶ نسبت فشار آب حفره‌ای باقی مانده (r_u) را در

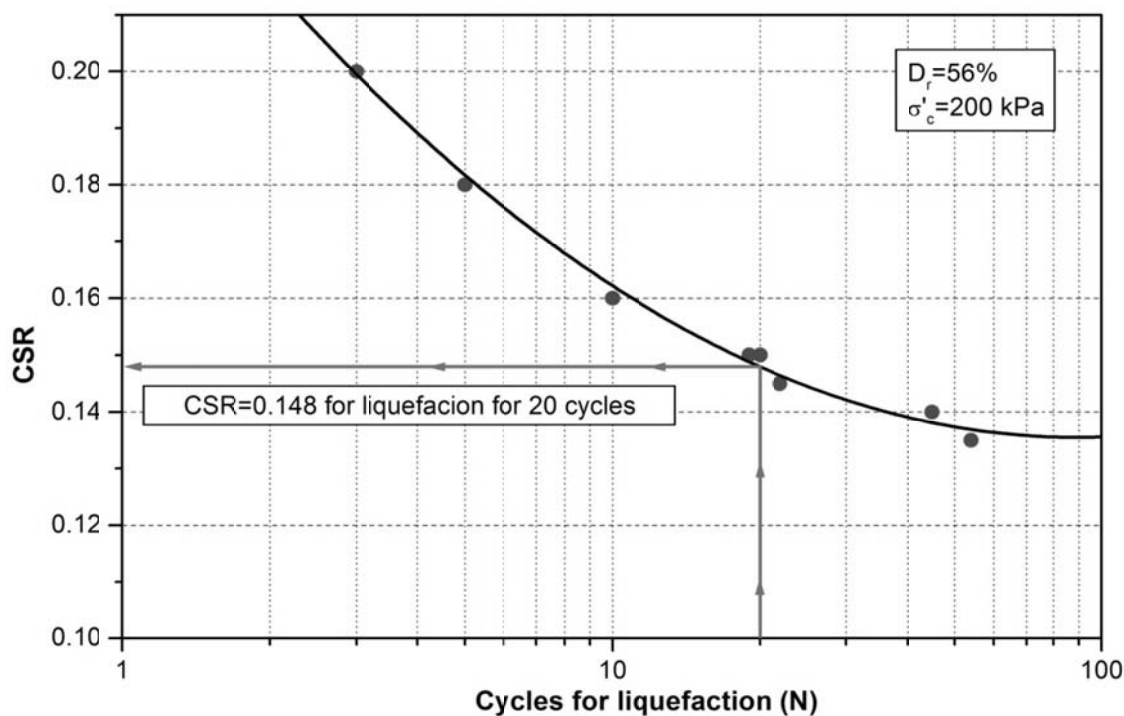
مقابل نسبت تنش انحرافی ماکزیمم $(\sigma_{max} / 2\sigma'_c)$ کشیده شده‌است. ناگفته پیداست که لحظه‌ای که نسبت فشار آب حفره‌ای باقی‌مانده برابر ۱/۰ می‌شود، $(r_u = 1.0)$ ، نسبت تنش انحرافی متناظر با آن کمترین نسبت تنشی است که روانگرایی را حاصل می‌کند. این مقدار را از این پس به‌صورت $(\sigma_{max,l} / 2\sigma'_c)$ نشان می‌دهیم. روش تعیین دقیق این مقدار برای هر چهار الگوی بارگذاری، در شکل ۸ آمده‌است.

ضریب کاهش تنش بارگذاری تصادفی

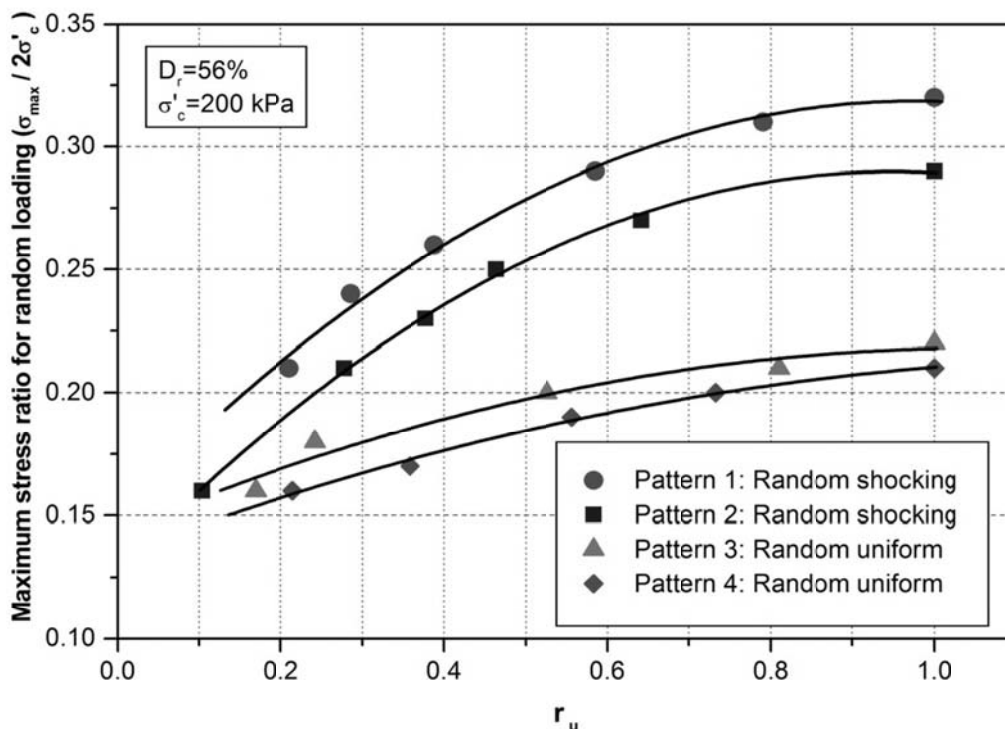
در این تحقیق، فقط از آزمایش‌هایی با شرایط تراکم نسبی $D_r = 56\%$ و تنش تحکیمی $\sigma'_c = 200kPa$ استفاده شده‌است. بنابراین اثر تنش تحکیمی و تراکم نسبی نمونه، در پیدا کردن ضریب کاهش تنش بارگذاری تصادفی، دیده نشده‌است. در این آزمایش‌ها نیز تعداد ۲۰ سیکل یکنواخت و هارمونیک، به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده‌است. نسبت تنش برشی یکنواختی که در طی ۲۰ سیکل، خاک را روانگرا کند، با $(\sigma_{dp,l} / 2\sigma'_c)_{20}$ نمایش داده می‌شود. اثر بی‌نظمی، که به آن ضریب کاهش می‌گویند، از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید.

$$\text{ضریب کاهش تنش} = \frac{(\sigma_{dp,l} / 2\sigma'_c)_{20}}{(\sigma_{max,l} / 2\sigma'_c)} \quad (2)$$

که در آن: $20 =$ تعداد سیکل معادل است. مقدار $(\sigma_{dp,l} / 2\sigma'_c)_{20}$ از شکل ۵ حاصل می‌شود. همان‌طور که مشاهده کردید، هرچه فرم بارگذاری نامنظم، یکنواخت‌تر باشد، ضریب کاهش به ۱/۰ نزدیک‌تر می‌شود که علت اصلی این تفاوت تعداد بیش‌تر تغییر جهت در تنش انحرافی در بارگذاری‌های لرزشی نسبت به بارگذاری‌های شوکی است. مقادیر ضریب کاهش برای الگوهای بارگذاری آزمایش‌شده در جدول ۴ لیست شده است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که برای بارگذاری شوکی یا ناگهانی، میانگین این عدد، برای ۲۰ سیکل معادل، ۰/۴۸۸ است. ولی برای بارگذاری لرزشی، ضریب کاهش حدود ۰/۶۹۲ است.



شکل ۷: تعداد سیکل‌های لازم برای روانگرایی برای نسبت تنش سیکلی مختلف، در بارگذاری یکنواخت سینوسی و به‌دست آوردن $(\sigma_{dp,l}/2\sigma'_c)_{20} = 0.148$ برای تراکم نسبی و تنش تحکیمی مفروض.



شکل ۸: $(\sigma_{\max} / 2\sigma'_c)$ وارد شده به نمونه و r_u متناظر آن مربوط به چهار الگوی بارگذاری. الگوهای شماره‌ی ۱ و ۲ شوکی یا ناگهانی، و الگوهای شماره‌ی ۳ و ۴ لرزشی هستند.

روانگرایی مبتنی بر آیین نامه‌ی کارهای دریایی ژاپن ضریب کاهش تنش برای ۲۰ سیکل هارمونیک معادل، ۰/۵۵ و برای بارگذاری لرزشی ضریب کاهش تنش ۰/۷ ذکر شده است. نتایج به دست آمده از این تحقیق و مقایسه‌ی آن‌ها با آیین نامه‌ی کارهای دریایی ژاپن نشان می‌دهد که ضریب کاهش تنش برای بارهای تصادفی لرزشی مشابه یکدیگر و برای بارهای تصافی شوکی اندکی متفاوت است. با اندکی دقت به شکل ۸، پرواضح است که نرخ افزایش نسبت فشار آب حفره‌ای باقی مانده بیشتر از نرخ افزایش نسبت تنش انحرافی ماکزیمم است. یعنی برای هر الگوی بارگذاری، نسبت تنش انحرافی ماکزیمم که منجر به روانگرایی می‌شود، در مقایسه با نسبت تنش انحرافی که نسبت فشار آب حفره‌ای باقی مانده را به نصف، افزایش می‌دهد، اندکی بیشتر است. یعنی رفتار نسبت به تغییرات $(\sigma_{max} / 2\sigma'_c)$ بسیار حساس است. این حساسیت در بارگذاری لرزشی بیشتر است، به عبارت دیگر شیب این خط به صفر نزدیک تر می‌شود.

جدول ۴: ضریب کاهش محاسبه شده، برای هر چهار الگوی بارگذاری تصادفی زلزله

Average	$\left(\frac{\sigma_{db,l}}{\sigma_{max,l}}\right)_{20}$	$\left(\frac{\sigma_{max,l}}{2\sigma'_c}\right)$	Loading pattern	
0.488	0.465	0.318	Shocking	1
	0.512	0.289		2
0.695	0.679	0.218	Vibrating	3
				0.705

نتیجه گیری

سید و ادريس (۱۹۷۱)، با استفاده از روش تنش، تنش برشی معادل را ۰/۶۵ تنش برشی حداکثر بارگذاری تصادفی، انتخاب کردند. ایشان فقط با قضاوت مهندسی این عدد را پیشنهاد نمودند، [۱]. ایشی‌هارا نیز با انجام آزمایش‌های برش ساده دوجته، اثر نامنظمی و دوجته بودن بارگذاری زلزله را مورد بررسی قرار داد و به ضریب ۰/۶۵ رسید، [۲]. ولی وی تنها از یک الگوی بارگذاری تصادفی استفاده کرد. ولی با نتایج به دست آمده از این تحقیق مشاهده می‌کنید که فرم الگوی بارگذاری، در ضریب کاهش بارگذاری، مؤثر است.

نتایج حاصل شده در این تحقیق، نشان می‌دهد که بارگذاری‌هایی با فرم شوکی یا ناگهانی، حد بالایی برای مقاومت سیکلی هستند، یعنی نمونه در برابر بارهای شوکی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. نمونه‌ها در برابر بارهای از نوع لرزشی، همان‌طور که از این شکل پیداست، به ظاهر مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که مقاومت در برابر روانگرایی در هنگام بارگذاری لرزشی حد پائین مقاومت، در زلزله‌ها است.

همان‌طور مشاهده کردید، هرچه فرم بارگذاری نامنظم، لرزشی‌تر یا یکنواخت‌تر باشد، ضریب کاهش به ۱/۰ نزدیک تر می‌شود. مقادیر ضریب کاهش برای الگوهای بارگذاری آزمایش شده در جدول ۴ لیست شده است. به طور خلاصه می‌توان گفت که برای بارگذاری شوکی یا ناگهانی، میانگین ضریب کاهش تنش برای ۲۰ سیکل هارمونیک معادل، ۰/۴۸۸ است. ولی برای بارگذاری لرزشی ضریب کاهش تنش حدود ۰/۶۹۲ است. در ارزیابی پتانسیل

مراجع

1. Seed, H.B., and I.M. Idriss (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential.", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (SM9), PP. 1249-1273.
2. Ishihara, K. and Negase, H. (1988). "Multi-Directional Irregular Loading tests on Sand." *Soils Dynamics and Earthquake Engineering*, 7, PP. 201-12.
3. Russell A. Green (2001). "Energy-Based Evaluation and Temediation of Liquefiable Soils." Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
4. Figueroa, J.L., A.S. Saada, and L. Liang (1995b). "Liquefaction Under Random Loading: Unit Energy Approach." *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(11), PP. 776-781.
5. Nemat-Naser S, Shokooh A (1979). "A Unified Approach to Densification and Liquefaction of Cohesionless Sand in Cyclic Shearing." *Can Geotech J*, 16(4), PP. 659-78.
6. Baziar M.H, Jafarian Y (2007). "Assessment of Liquefaction Triggering Using Strain Energy Concept and ANN Method: Capacity Energy." *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 27, PP. 1056-1072.
7. Jafarian Y, Sadeghi Abdollahi A, Vakili R, Baziar M.H (2010). "Probabilistic Correction between Laboratory and Field Liquefaction Potentials Using Relative State Parameter Index." *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 30, PP. 1061-1072.
8. Ishihara, K. and Li, S. (1972). "Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test." *Soils and Foundations*, 12, PP. 19-39.