

مدل سازی عددی میز لرزان و اثر روانگرایی بر اسکله

سعید نعمتی نژاد^{۱*}، سید احسان سیدی حسینی نیا^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد، eng.nematinejad@yahoo.com

۲- استادیار گروه آموزشی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، eseyedi@um.ac.ir

چکیده

اقتصاد تعداد زیادی از کشورهای صنعتی بر پایه واردات و صادرات کالا از طریق اسکله‌ها است. در صورت گسیختگی و آسیب آن، فعالیت‌های مهم بندر به دلیل آسیب وارده به سازه‌های مجاور اسکله همچون جراثیل متوقف خواهد شد. به همین دلیل بررسی نحوه رفتار سازه‌های ساحلی در برابر عوامل خرابی همچون زلزله و روانگرایی ناشی از آن اهمیت بالایی دارد. تحلیل عملکرد اسکله در برابر روانگرایی معمولاً در حالت دوبعدی انجام می‌شود، حال آنکه تحلیل آن، مسئله‌ای کاملاً سه‌بعدی بوده و تحلیل آن به صورت دوبعدی خالی از اشکال نیست. در این مقاله با کمک نرم‌افزار Flac^{3D} که دارای قابلیت تحلیل غیرخطی تنش مؤثر و تولید اضافه فشار آب حفره‌ای در محیط پیوسته خاک است، به شبیه‌سازی روانگرایی با کمک مدل رفتاری Finn پرداخته شده است. در نهایت نتایج اضافه فشار آب حفره‌ای، جابه‌جایی‌های خاک، لنگر خمشی و نیروی جانبی شمع، جابه‌جایی و خمش دیوار ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد گسترش جانبی از پشت دیوار شروع شده و بیشترین نیروها به‌دیف شمع‌های نزدیک دیوار وارد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: اسکله، روانگرایی، تحلیل دیواره، تحلیل گروه شمع، Flac^{3D}

۱- مقدمه

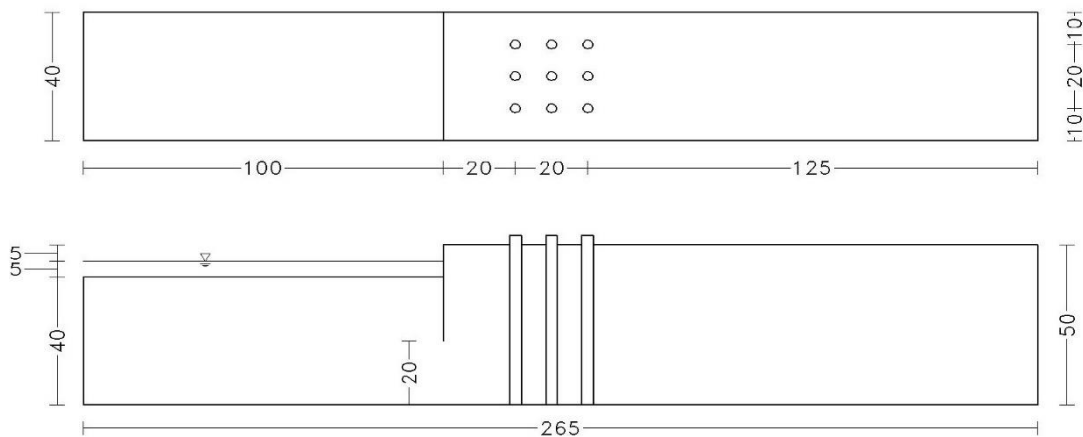
روانگرایی یکی از مهم‌ترین عناوین مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای است. هنگامی که دو زلزله در آلاسکا (۱۹۶۴) و نیگاتا ژاپن (۱۹۶۴) رخ داد، در هر دو زلزله نمونه‌های جالبی از خرابی ناشی از زلزله مانند گسیختگی شیب‌ها، گسیختگی شالوده و پل‌ها و شنواری سازه‌های مدفون بر اثر روان شدن خاک بستر اتفاق افتاد. همچنین در زلزله منجیل ایران (۱۹۹۰) نیز خرابی‌های زیادی که ناشی از روانگرایی بوده مشاهده شده است. پس از این زلزله‌ها روانگرایی توسط محققان بررسی و مطالعه شده است. زلزله نیگاتا ژاپن را می‌توان نمادی از اولین رخداد در جهان دانست که سبب ویرانی زیرساخت‌های مدرن گردید که بعدها بنام پدیده روانگرایی مطرح شد. هم‌اکنون بسیاری از سازه‌های موجود و یا در حال ساخت همانند بندرها، اسکله‌ها، پل‌ها و بسیاری دیگر از سازه‌های متکی بر شمع در نواحی مستعد روانگرایی و گسترش جانبی واقع شده‌اند. اثرات گسترش جانبی زمین بر شمع‌ها و سازه‌های مرتبط با آن‌ها بسیار مخرب است.

مطالعات انجام گرفته بر روی اثرات روانگرایی بر اسکله و دیواره و شمع پشت آن بسیار کم صورت گرفته و بیشتر مطالعات به بررسی تحلیل لرزه‌ای دیواره بسنده کرده‌اند. بیشتر مطالعات در این زمینه آزمایشگاهی بوده و تعداد محدودی نیز مطالعات عددی نیز وجود دارد که این مطالعات اثرات روانگرایی بر سطح زمین و یا شمع و یا دیواره را مورد بررسی قرار داده‌اند. از جمله مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به از آزمایشات سانتریفیوژ (Abdoun و همکاران [۱]؛ Imamura و همکاران [۲]؛ Brandenburg و همکاران [۳]، آزمایشات میز لرزان (Cubrinovski و همکاران [۴]؛ Haeri و همکاران [۵]؛ Motamed و همکاران [۶]؛ Tang و همکاران [۷]) و آزمایشات برجای انفجاری (Rollins و همکاران [۸]؛ Ashford و همکاران [۹]) و از جمله مطالعات عددی می‌توان به مطالعات Chaloulos و همکاران [۱۰] و Su و همکاران [۱۱] به اشاره نمود.

در این مقاله به شبیه‌سازی عددی آزمایش میز لرزان پرداخته شده است. در این آزمایش به کمک میز لرزان و اعمال شتاب به مدلی شامل شمع و دیواره، روانگرایی صورت گرفته و نتایج برداشت شده است. جهت شبیه‌سازی عددی این آزمایش، از نرم‌افزار اختلاف محدود Flac3D استفاده شده است. این نرم‌افزار اختلاف محدود قادر به شبیه‌سازی فشار آب حفره‌ای و اجزای سازه‌ای است. در انتهای مقاله نیز نتایج حاصل از نرم‌افزار ارائه شده است.

۲- مشخصات آزمایش مدل

در این مقاله به شبیه‌سازی عددی اسکله و اثر زلزله بر آن پرداخته شده است. بدین منظور فرض شده است اسکله‌ای با ابعاد کوچک مقیاس بر روی میز لرزان قرار گرفته و با اعمال شتاب به کف آن روانگرا شده است. شکل ۱ ابعاد مدل و موقعیت شمع و دیواره را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، مدل دارای ابعادی به طول ۲۶۵ سانتیمتر و عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. جهت رخداد روانگرایی فرض شده است که خاک از نوع ماسه‌ای با تراکم ۳۰ درصد باشد که در جدول ۱ مشخصات کامل خاک درج شده است. همچنین شمع‌هایی به طول ۵۳ سانتیمتر به فاصله ۲۰ سانتیمتری از دیوار ساحلی قرار گرفته است که در جدول ۲ مشخصات شمع و در جدول ۳ مشخصات دیوار ارائه شده است.



شکل ۱: پلان و مقطع شبیه‌سازی شده

جدول ۱: مشخصات ماسه

وزن مخصوص (g/cm ³)	نسبت تخلخل حداکثر (e _{max})	نسبت تخلخل حداقل (e _{min})	ضریب یکنواختی (C _u)	میانگین ذرات دانه (D ₅₀) (mm)	ضریب پواسون (ν)	زاویه اصطکاک (φ°) برای تراکم ۳۰٪	سرعت موج برشی V _s (m/s)
۲/۶۴۶۳	۰/۷۴۱	۰/۴۷۰	۲/۲۳۷	۰/۳۰۲	۰/۲۳	۳۲/۰	۱۲۰

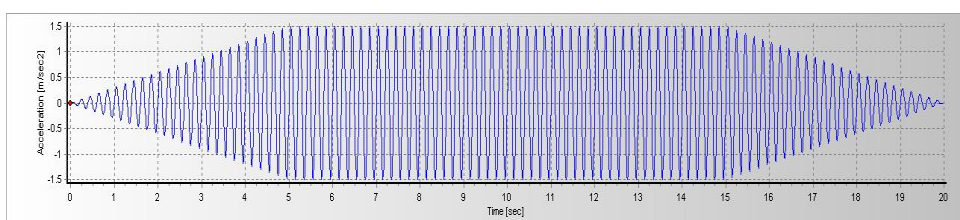
جدول ۲: مشخصات مصالح شمع‌ها

نوع و جنس	ارتفاع (cm)	مان اینرسی (cm ⁴)	مدول الاستیسیته (N/cm ²)	چگالی وزنی (t/m ³)	قطر بیرونی و داخلی (cm)	ضریب پواسون (ν)
پلی کربنات	53	I=2.5385 × 10 ⁻⁴	E=27 × 10 ⁴	ρ=1.2	3.2/2.7	ν=0.3

جدول ۳: مشخصات مصالح سپرهای فولادی

نوع و جنس	ارتفاع (cm)	عرض (cm)	ممان اینرسی برای عرض 38.5 cm (m ⁴)	مدول الاستیسیته (N/cm ²)	چگالی (t/m ³)	ضریب پواسون
آلمینیوم	32	38.5	I=0.02566	E=27 ×10 ⁴	ρ=2.7	ν=0.3

بارگذاری دینامیکی وارده بر کف مدل اعمال می‌شود. این بار از نوع بار سینوسی است که دارای فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۱/۵ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد؛ به طوری که دامنه آن در ۵ ثانیه اول افزایش می‌یابد و در مدت ۱۰ ثانیه ثابت بوده و در ۵ ثانیه آخر کاهش پیدا می‌کند. شکل ۲ بار اعمالی به مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۲: بار دینامیکی وارده به مدل

۳- شبیه‌سازی عددی به کمک Flac^{3D}

نرم‌افزار Flac^{3D} یک برنامه اختلاف محدود صریح در فضای سه‌بعدی و از مجموعه نرم‌افزارهای شرکت Itasca است. Flac^{3D} بر روش محاسبات لاگرانژی صریح استوار است و حد تسلیم و جریان پلاستیک به دقت در آن مدل می‌شود. از آنجاکه در فرآیند تحلیل هیچ‌گونه ماتریسی ساخته نمی‌شود، محاسبات پرحجم سه‌بعدی بدون نیاز به حافظه اضافی قابل انجام است. به منظور شبیه‌سازی به دلیل وجود تحلیل دینامیکی، برنامه به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول به تحلیل استاتیکی مدل و بخش دوم به تحلیل دینامیکی آن می‌پردازد. در بخش اول ابتدا هندسه و المان‌ها مدل شده و بعد از تخصیص مدل رفتاری و شرایط مرزی و اولیه، مدل به تعادل می‌رسد و در انتها جابه‌جایی‌های ناشی از حالت استاتیکی صفر شده است. در بخش دوم ابتدا مدل رفتاری معرفی شده و بعد از اعمال بارگذاری و تعیین خصوصیات مرزها، مدل حل شده و به تعادل می‌رسد. جزئیات فرآیندها در ادامه آورده شده است.

۳-۱ مدل‌سازی ابعاد و مشخصات

در ابتدا ابعاد مدل با توجه به ابعاد شکل ۱ هندسه سازی شده است. برای مدل‌سازی شمع و دیواره به ترتیب از دو المان سازه‌ای تعریف شده‌ی شمع و صفحه استفاده شده است. برای معرفی پارامترهای این دو المان، چالش برانگیزترین گام، انتخاب خصوصیات فصل مشترک است. این خصوصیات شامل اختصاص سختی‌های نرمال و برشی است. سختی معادل (واحد تنش بر واحد جابه‌جایی) برای یک زون در جهت عمود بر برابر است با [۱۲].

$$k = \max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3}G \right)}{\Delta z_{min}} \right] \quad (1)$$

در رابطه بالا K و G به ترتیب برابر با مدول بالک و برشی و Δz_{min} کمترین ضخامت زون مجاور فصل مشترک در جهت قائم (Z) است. با توجه به مشخص بودن مقادیر مدول برشی و بالک، بعد از انتخاب شبکه‌بندی و مشخص شدن Δz_{min} مقدار سختی فصل مشترک مشخص شده است.

در تحلیل مسائل دینامیکی به دلیل وقوع پدیده انتشار امواج، انتخاب ابعاد هر المان باید مورد توجه ویژه قرار بگیرد. محتوای فرکانسی موج ورودی و نیز سرعت انتشار امواج در خاک بر دقت مدل‌سازی عددی انتشار موج تأثیرگذار خواهد بود. Kuhlemeyer and Lysmer نشان دادند که برای مدل‌سازی دقیق انتشار موج در یک مدل، اندازه هر بعد از المان باید کوچک‌تر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج متناظر با بیشترین محتوای فرکانسی موج ورودی باشد که می‌توان آن را به کمک رابطه‌ی زیر بیان نمود [۱۲].

$$\Delta l \leq \frac{v_s}{10f} \quad (2)$$

در روابط بالا، V_s سرعت موج برشی در خاک و f فرکانس متناظر با بیشترین محتوای فرکانسی موج ورودی است. آشکار است که کمترین مقدار برای Δl با استفاده از رابطه‌ی بالا، زمانی حاصل می‌شود که V_s کمینه و f بیشینه شود. با توجه به اینکه سرعت موج برشی برابر مقدار ۱۲۰ متر بر ثانیه و فرکانس موج ورودی برابر ۵ هرتز بوده است، اندازه بزرگ‌ترین المان نباید از ۲/۴ متر بزرگ‌تر باشد که این مقدار ارضاء شده است.

۳-۲ مدل رفتاری

مدل انتخابی در حالت استاتیکی، مدل موهر کولمب است که یک مدل الاستیک-پلاستیک کامل می‌باشد. این مدل برای حالت استاتیکی مناسب است اما برای حالت دینامیکی مناسب نمی‌باشد. به این دلیل که مدل مور کولمب قادر به تولید و شبیه‌سازی فشار آب حفره‌ای نمی‌باشد. بدین جهت نرم‌افزار $Falc^{3D}$ مدل Finn را در خود جای داده است. این سازوکار به خوبی توسط Byrne [۱۳] در سال ۱۹۹۱ شرح داده شده است. آن‌ها رابطه تجربی زیر را برای ارتباط میان کاهش حجم توده ($\epsilon \Delta_{vd}$) و میزان بزرگی کرنش‌های برشی متناوب (γ) به دست آوردند.

$$\frac{\Delta \epsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \cdot \exp(-C_2 \cdot \frac{\epsilon_{vd}}{\gamma}) \quad (3)$$

که در این رابطه C_1 ، C_2 ثابت‌های رابطه هستند. رابطه زیر جهت محاسبه این ثابت‌ها ارائه شده است.

$$C_1 = 7600 (D_r)^{-2.5} \quad (4)$$

$$C_2 = 8.7 (N_1)_{60}^{-1.25} \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (6)$$

D_r بین تراکم نسبی خاک و $(N_1)_{60}$ عدد حاصل از آزمایش نفوذ استاندارد اصلاح شده است. به این نکته باید توجه کرد این ثابت‌ها برابر با مقدار ورودی مدل در نرم‌افزار $Flac^{3D}$ نیستند و به دلیل اینکه ورودی معرفی شده به نصف سیکل کرنش برشی اعمال می‌شود، آن‌ها نیز باید نصف گردند [۱۴].

مدل رفتاری ساخته شده Finn ترکیبی از روابط Martin و Byrne با مدل استاندارد پلاستیک مور-کولمب است. در هر دو رابطه ارائه شده از یک مکانیسم مشخص برای روانگرا شدن ماسه استفاده می‌شود. در تحلیل روانگرایی، علاوه بر اعمال پارامترهای معمول خاک باید چهار ثابت رابطه Martin و یا سه ثابت برای رابطه Byrne به نرم‌افزار معرفی شود [۱۴].

۳-۳ بارگذاری دینامیکی

در صورتی که از داده‌های خام حاصل از رکورد زلزله، به عنوان تاریخچه شتاب و یا سرعت ورودی جهت اعمال بارگذاری دینامیکی به مدل استفاده شود، مدل در $Flac^{3D}$ ممکن است جابه‌جایی پیوسته و یا ماندگاری را پس از اتمام حرکت نشان دهد. دلیل این امر می‌تواند صفر نشدن انتگرال کامل تاریخچه زمانی باشد. تصحیح خط مبنا معمولاً فقط به موج‌های پیچیده‌ای که از اندازه‌گیری‌های محلی به دست می‌آیند اعمال می‌شود. در صورت کاربرد موج ساده و مصنوعی، اجرای فرآیندی که منجر به تولید موج مصنوعی دیگری به گونه‌ای که جابه‌جایی نهایی صفر شود، بسیار آسان است [۱۴].

رکوردها به طور طبیعی ترکیبی از پدیده‌ها (انواع مختلف امواج ترکیبی) را در خود دارند. مناسب‌تر آن است که فقط مؤلفه‌ای از آن که تحت مطالعه و بررسی ما می‌باشد استخراج گردد. این عمل به وسیله فیلترهای اعمال شده انجام می‌شود. به وسیله یک فیلتر، می‌توان یک سری موج ورودی را صاف کرده و تبدیل به موج خروجی نمود. در این پژوهش نیز بار دینامیکی مدنظر به نرم افزار SeismiSignal معرفی شده و پس از اعمال تصحیح خط مبنا و فیلتر کردن داده‌ها، مشاهده شد که در موج اصلاح شده تغییری حاصل نشده است. دلیل این امر، مصنوعی بودن زلزله است که زلزله واقعی رخ داده در طبیعت را دربر نمی‌گیرد.

۳-۴ شرایط مرزی

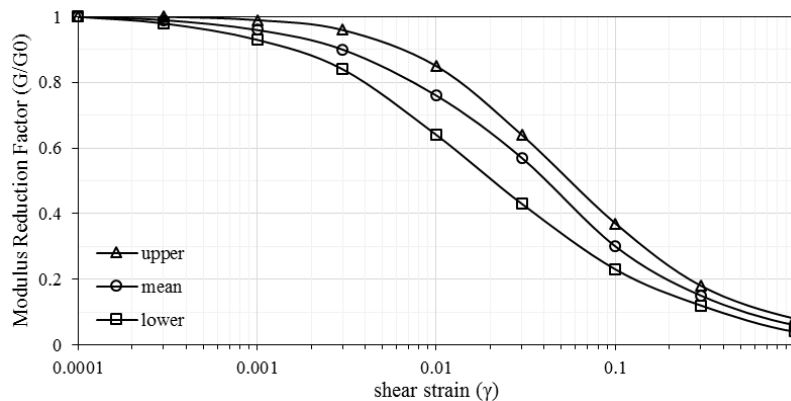
شرایط مرزی در حالت استاتیکی جهت ایجاد تنش برجا گیردار منظور شده است؛ اما در حالت دینامیکی مرز کف به دلیل اعمال شتاب و دارا بودن حرکت آزاد شده است و مرزهای کناره، مرز میدان آزاد اعمال شده است. در عمل مرزهای کنار باید در فاصله‌ای مناسب قرار گیرند تا بازتاب موج را کم کنند. در حالی که وقتی میرایی مصالح کم باشد، فاصله مورد نیاز به مدلی غیر اجرایی منجر خواهد شد. یک روش جایگزین، اعمال حرکت میدان آزاد به صورتی است که مرزها خصوصیات غیر انعکاسی خود را حفظ کنند (بدین معنا که امواج خروجی که از سازه ساطع می‌شوند، به طور مناسب جذب شوند) که در $Flac^{3D}$ همین روش توسعه یافته است. در شرایط مرزی میدان آزاد، انتشار امواج صفحه‌ای به سمت بالا بدون هیچ گونه اعوجاج انجام خواهد شد [۱۴].

۳-۵ میرایی

در نرم افزار $Flac^{3D}$ ، میرایی در حل تحلیل‌های مختلف دینامیکی که شامل تحلیل‌های شبه استاتیکی و دینامیکی است کاربرد دارد. توجه به این نکته ضروری است که در تحلیل‌های شبه استاتیکی به میرایی بیشتری جهت حصول سریع‌تر به شرایط تعادل نیاز است. جهت تحلیل دینامیکی، میرایی در مدل‌سازی عددی با توجه به افت انرژی در سیستم طبیعی هنگامی که تحت تأثیر بارگذاری دینامیکی قرار می‌گیرد حاصل شود [۱۴].

در این پژوهش از میرایی هیسترتیک موجود در نرم افزار استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که میرایی هیسترتیک فقط در بازه رفتار کشسان اعمال می‌شود و میرایی طبیعی با استفاده از مدل رفتاری بکار گرفته شده در محدوده خمیری ایجاد می‌شود. از میان توابع موجود برای میرایی هیسترتیک در نرم افزار $Flac^{3D}$ ، در این پژوهش از رابطه میرایی Hardin-Drnevich استفاده شده است.

در دستور اعمال میرایی هیسترتیک Hardin-Drnevich فقط مقدار کرنش مرجع از کاربر خواسته می‌شود. کرنش مرجع در مدل میرایی هیسترتیک Hardin-Drnevich را می‌توان این طور بیان کرد که در نمودار $G/G_{max}-\gamma$ هنگامی که $G/G_{max}=0.5$ شود، آنگاه کرنش متناظر آن، همان کرنش مرجع ($\gamma=\gamma_{ref}$) خواهد بود [۱۴]. بدین منظور نیاز به نمودار $G/G_{max}-\gamma$ می‌باشد. این نمودار از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی برای هر نمونه خاک حاصل می‌شود. با توجه به اینکه در داده‌های آزمایشگاهی در دسترس در این پژوهش، این نمودار موجود نیست، از نمودارهای تهیه شده در دیگر مقالات استفاده شده است. یکی از این مقالات که این نمودار را برای ماسه ارائه کرده است، مقاله Seed and Idriss [۱۵] در سال ۱۹۷۰ می‌باشد. در این مقاله برای ماسه سه محدوده‌ی پایین، متوسط و بالا همانند شکل ۳ ارائه شده است. با انتخاب حد میانی برای این پژوهش و با توجه به شیوه تعیین کرنش مرجع توضیح داده شده، کرنش مرجع مقدار 0.04 اختیار شده است.



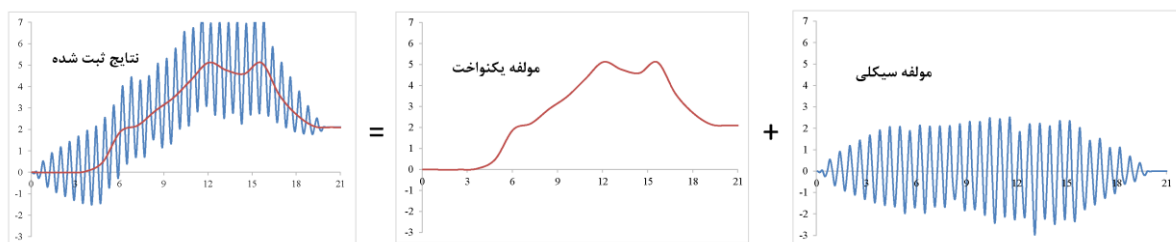
شکل ۳: تغییرات مدول برشی در مقابل کرنش برشی برای ماسه [۱۵]

۴- ارائه نتایج

یکی از نکات مهم این مقاله این است که به خاطر اعمال لرزش به کف و گسترش جانبی در همان جهت، نتایج ثبت شده بخصوص برای شمع و دیوار شامل مؤلفه‌های سیکلی^۱ و یکنواخت^۲ هستند که مؤلفه سیکلی به خاطر فشار اینرسی^۳ خاک وارده بر اجزاء و مؤلفه یکنواخت به خاطر فشار جنبشی^۴ آن می‌باشد. فشار اینرسی خاک به خاطر نوسانات زمین و فشار جنبشی به خاطر جریان جانبی خاک به وجود می‌آید. اساساً گسترش جانبی رخدادی بعد از روانگرایی است که منجر به جابه‌جایی‌های یکنواخت بزرگ در خاک می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، مطالعه اثر گسترش جانبی است که تنها مؤلفه یکنواخت فشار خاک را شامل می‌شود. بدین منظور نتایج ثبت شده به دو مؤلفه یکنواخت و سیکلی تجزیه شده‌اند. مؤلفه یکنواخت به وسیله روند هموارسازی^۵ بر پایه روش میانگین متحرک^۶ استخراج شده و سپس مؤلفه سیکلی (به‌عنوان مثال برای خمش) برای از رابطه زیر به دست آمده است.

$$M(z, t)_{cyclic} = M(z, t) - M(z, t)_{monotonic} \quad (1-4)$$

شکل ۴ یک نمونه نتایج ساده خمش برای شمع را نشان می‌دهد که نتایج به وسیله نرم‌افزار اکسل با میانگین‌گیری در بازه زمانی یکسان به دو مؤلفه یکنواخت و سیکلی تجزیه شده است.



شکل ۴: تجزیه نتایج ثبت شده به مؤلفه‌های یکنواخت و سیکلی

^۱ Cyclic

^۲ Monotonic

^۳ Inertial

^۴ Kinematic

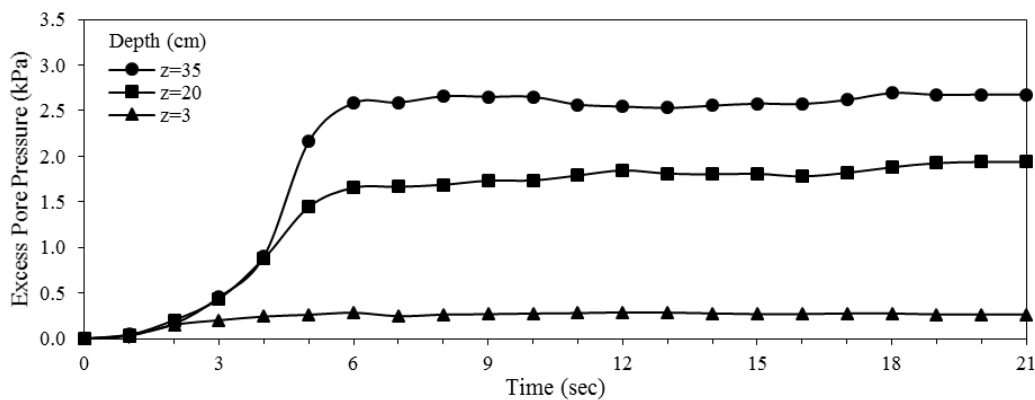
^۵ Smoothing

^۶ Moving Average Method

۴-۱ فشار آب حفره‌ای

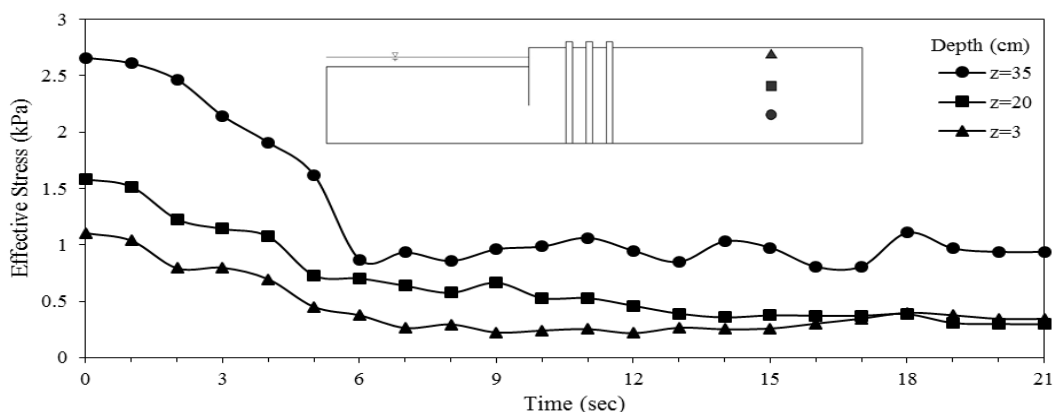
دلیل اصلی روانگرایی کاهش مقاومت برشی در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ای است؛ بنابراین به کمک بررسی فشار آب حفره‌ای می‌توان به روانگرا شدن خاک پی برد. همچنین می‌توان به کمک نحوه افزایش آن، زمان وقوع روانگرایی خاک را در طول مدت اعمال زلزله مشاهده نمود.

شکل ۵ اضافه فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ای دور از شمع‌ها و در عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها می‌توان این‌طور برداشت کرد که روانگرایی به‌طور میانگین در حدود ثانیه چهارم رخ داده است. از مقایسه این نمودارها می‌توان فهمید که با افزایش عمق خاک زمان وقوع روانگرایی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در عمق ۳ سانتی‌متر روانگرایی در ثانیه دوم و در عمق ۳۵ سانتی‌متر در ثانیه پنجم رخ می‌دهد. دلیل این موضوع را می‌توان افزایش تراکم خاک در عمق دانست که باعث روان شدن زودتر خاک در سطح می‌شود.



شکل ۵: تاریخچه زمانی فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف دور از گروه شمع

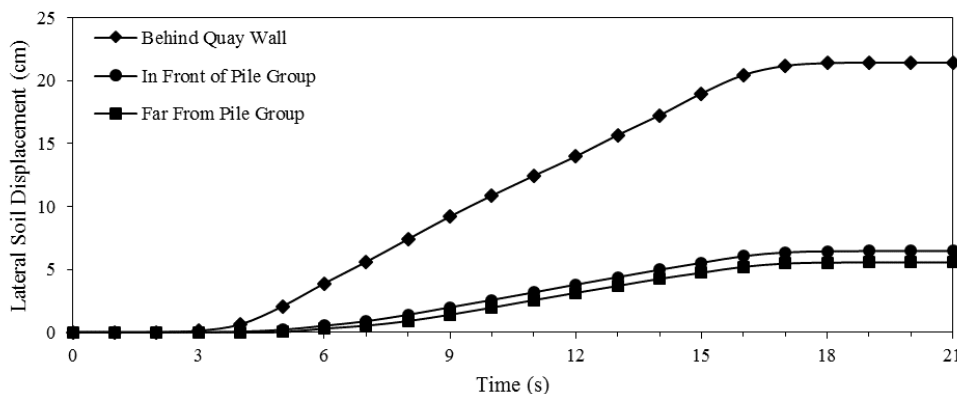
همان‌طور که گفته شد، افزایش فشار آب حفره‌ای می‌تواند سبب روانگرایی شود؛ اما مهم‌ترین شرط روانگرایی کاهش تنش مؤثر خاک است. با کاهش تنش مؤثر است که مقاومت برشی خاک کاهش پیدا می‌کند. به همین جهت در این پژوهش به بررسی آن پرداخته شده است. نرم‌افزار Flac^{3D} قادر به اندازه‌گیری تنش مؤثر نیست. بدین منظور از زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار (Fish) استفاده شده است که از طریق تفاضل فشار آب حفره‌ای از میانگین تنش کل، تنش مؤثر را در هر لحظه به دست می‌آورد. نمونه‌ای از نتایج این Fish در شکل ۶ آورده شده است که نمایانگر کاهش تنش مؤثر هم‌زمان با افزایش فشار آب حفره‌ای است.



شکل ۶: تاریخچه زمانی تنش مؤثر در اعماق مختلف دور از گروه شمع

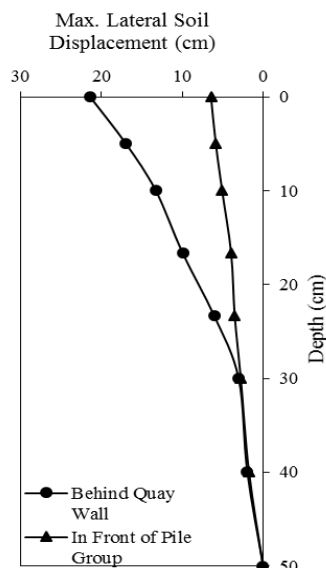
۲-۴ جابه‌جایی‌های خاک

گسترش جانبی از پشت گود شروع می‌شود. این رخداد که از آن به‌عنوان جریان جانبی خاک روانگرا^۱ یاد می‌شود، منجر به حرکت خاک به سمت گود می‌شود؛ بنابراین قابل پیش‌بینی است که این جریان با حرکت به سمت گود جابه‌جایی بیشتر خاک را حاصل شود؛ بنابراین می‌توان گفت مهم‌ترین جابه‌جایی که قاعدتاً باید بیشترین جابه‌جایی جانبی باشد، جابه‌جایی لبه گود است. شکل ۷ تاریخچه زمانی جابه‌جایی سطحی نقاط مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۷: تاریخچه زمانی جابه‌جایی جانبی سطحی در نقاط مختلف

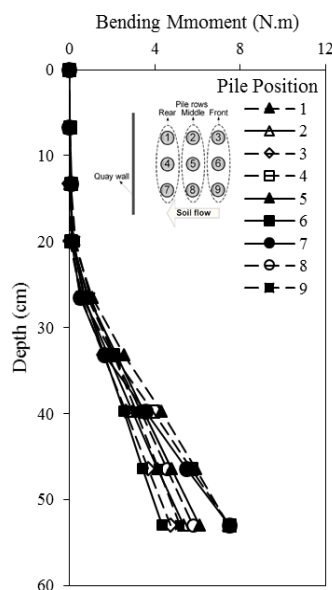
شکل ۸ پروفیل جابه‌جایی جانبی را برای دونقطه از سطح نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که افزایش عمق، کاهش جابه‌جایی را در پی دارد. همچنین جابه‌جایی در عمق برای نقاط دور از دیوار تقریباً خطی است درحالی‌که برای نقطه پشت دیوار جابه‌جایی در عمق خاک غیرخطی است. این موضوع بیانگر این است که نرخ کاهش جابه‌جایی جانبی در عمق با دور شدن از دیوار بیشتر می‌شود.



شکل ۸: پروفیل جابه‌جایی جانبی پسماند خاک

۳-۴ ممان خمشی شمع

در این پژوهش مدل آزمایشگاهی مدنظر جهت تحلیل عددی دارای شمعی است که انتهای آن به کف مدل متصل شده و گیردار است. انتظار می‌رود که خمش شمع به دلیل گیردار بودن آن، در معرض بار جانبی همانند تیر طره عمل کرده و مقدار حداکثر آن در پای شمع رخ دهد. به طوری که خمش شمع از نوک بالای آن به سمت پای شمع به تدریج افزایش پیدا کند. شکل ۹ ممان خمشی شمع‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود همان‌طور که دیده می‌شود، شمع نزدیک به دیوار (Rear) خمش بیشتری نسبت به شمع میانی (Middle) و شمع دور از دیوار (Front) به خود می‌گیرد. دلیل این رفتار را می‌توان شروع روانگرایی و بیشترین جابه‌جایی خاک در پشت دیوار و کاهش جابه‌جایی بافاصله گرفتن از دیوار عنوان نمود که سبب به وجود آمدن بیشترین جابه‌جایی و خمش در شمع نزدیک دیوار شده است.



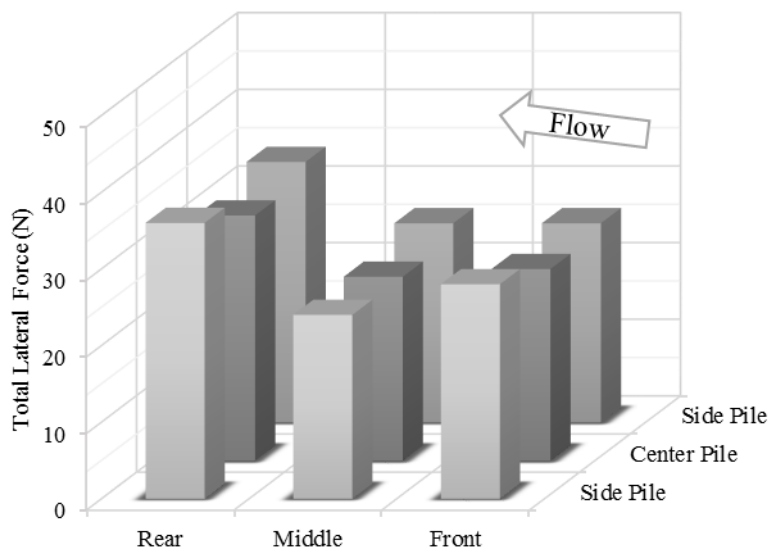
شکل ۹: پروفیل تغییرات ممان خمشی شمع‌ها در ثانیه ۱۲

۴-۴ نیروی جانبی وارده بر شمع

در روش دوم برای محاسبه مقادیر نیروی وارد بر شمع‌ها در گروه شمع از خروجی نرم‌افزار $Flac^{3D}$ استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به ارائه مستقیم مقادیر نیروی کل وارده به هر شمع نمی‌باشد، بلکه فقط نیروهای برشی در هر گره از تقسیمات شمع را ارائه می‌دهد. برای استخراج مقادیر نیروی کل وارد بر شمع از اصول تحلیل سازه استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد به دلیل اینکه شمع در این پژوهش در پای خود و در کف مدل گیردار است، همانند تیر طره عمل می‌کند که مقادیر خمش و برش در تکیه‌گاه آن حداکثر است. برش به وجود آمده در تکیه‌گاه تیر طره معادل برآیند نیروهای وارده بر تیر طره است؛ بنابراین با توجه به اینکه نرم‌افزار تنها نیروهای برشی را ارائه می‌دهد، بنابراین نیروی برشی ارائه شده برای گره در پای شمع، مقدار نیروی وارده بر کل شمع را نشان می‌دهد. برای صحت از این نتیجه‌گیری همان‌طور که میدانیم در یک تیر طره با حرکت از نوک آزاد تیر به سمت تکیه‌گاه، نیروی برشی افزایش می‌یابد که در نتایج نرم‌افزار نیز این روند به خوبی دیده می‌شود.

شکل ۱۰ حداکثر مقادیر برداشت شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، شمع‌های ردیف جلو (Rear) نیروهای جانبی بزرگ‌تری در گروه شمع تحمل می‌کنند. در حالی که کمترین نیروها بر شمع‌های ردیف عقب (Front) وارد شده است. این رفتار به دلیل روند و رفتار سرعت و جابه‌جایی خاک که در بخش جابه‌جایی خاک ذکر شده است، می‌باشد. سرعت و

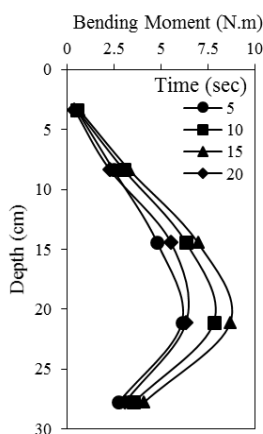
جابه‌جایی خاک بیشترین مقدار را در پشت دیوار داشته که مقادیر آن با فاصله گرفتن از دیوار و حرکت به سمت خشکی کاهش می‌یابد. دکت‌ر حائری و همکارانش [۵] در پژوهش‌های خود نیز این رفتار شم‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند و بیان کردند که اثر سایه^۱ باعث تحمل نیروی بیشتر شم‌های جلو شده و شم‌های پشت درصد کمتری از نیروها را تحمل می‌کنند.



شکل ۱۰: توزیع حداکثر نیروی جانبی کل در گروه شم

۴-۵ ممان خمشی دیوار

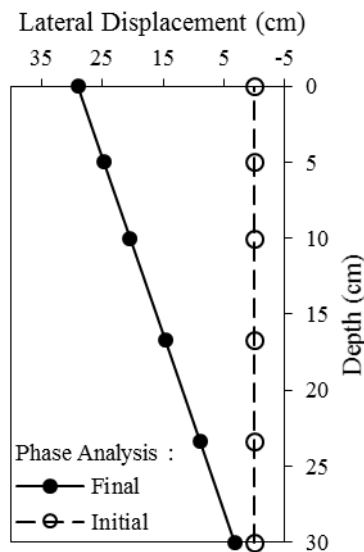
یکی از فاکتورهایی که در طراحی دیوار اهمیت بسزایی دارد ممان خمشی است. ممان خمشی به وجود آمده در دیوار می‌تواند سبب خرابی آن شود. در نرم‌افزار Flac^{3D} امکان استخراج نیروی وارده بر دیوار دیده نشده است اما می‌توان ممان خمشی را به دست آورد. با توجه به اینکه نرم‌افزار Flac^{3D} ممان خمشی بر واحد طول ارائه می‌دهد، برای به دست آوردن ممان خمشی صفحه باید مقدار خروجی نرم‌افزار را در عرض صفحه ضرب نمود. شکل ۱۱ این نتایج را برای مدل عددی در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که حداکثر مقدار ممان خمشی برای دیوار به مقدار ۸/۷ کیلو نیوتون متر در ثانیه ۱۵ ام در عمق ۲۰ سانتیمتری رخ داده است.



شکل ۱۱: پروفیل ممان خمشی دیوار در زمان‌های مختلف

۴-۶ جابه‌جایی و تغییر شکل دیوار

دیوار مدل شده کاملاً آزاد و شناور مدل شده که تغییر شکل جانبی همراه با خاک روانگرا شده دارد. در شکل ۱۱ دیده می‌شود که حرکت جانبی دیوار و چرخش آن به سمت گود است؛ بنابراین انتظار می‌رود که بیشترین مقدار برای جابه‌جایی در لبه گود باشد. شکل ۱۲ پروفیل جابه‌جایی جانبی دیوار در مدل عددی را نشان می‌دهد. در بخش قبل دیده شد که بیشترین مقدار ممان خمشی در عمق ۲۰ سانتی‌متری به وجود می‌آید؛ بنابراین انتظار می‌رود که پروفیل جابه‌جایی دیوار خطی نباشد، اما همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود پروفیل تغییر شکل دیوار خطی است. دلیل این امر این است که به دلیل ممان خمشی کوچک دیوار، تأثیر آن بر تغییر شکل دیوار در عمق ۲۰ سانتی‌متری بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر است.



شکل ۱۲: پروفیل جابه‌جایی جانبی دیوار

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل‌سازی فیزیکی اسکله بر روی میز لرزان پرداخته شد. برای مدل‌سازی عددی این آزمایش و پدیده روانگرایی به وجود آمده در آن از نرم‌افزار اختلاف محدود Flac^{3D} استفاده شد که قادر به شبیه‌سازی فشار آب حفره‌ای و المان‌های سازه‌ای است. با توجه به مدل انجام‌شده، به بررسی شرایطی که باید در نرم‌افزار جهت مدل‌سازی درست آزمایش صورت بگیرد پرداخته شد. بررسی نتایج حاصل از نرم‌افزار نشان داد که روانگرایی در خاک اتفاق افتاده و گسترش جانبی ناشی از آن سبب جابه‌جایی خاک به سمت گود شده و در لبه گود حداکثر جابه‌جایی‌ها رخ داده است. خمش و نیروی وارده بر شمع نیز نشان می‌دهد که ردیف شمع‌های نزدیک دیوار بیشترین مقادیر را تحمل می‌کنند. همچنین نتایج نشان می‌دهد بیشترین جابه‌جایی دیوار در نوک آن اتفاق می‌افتد و نیز بیشترین ممان خمشی به وجود آمده در دیوار در عمق ۲۰ سانتی‌متری رخ می‌دهد.



**4th. International Congress on Civil Engineering , Architecture
and Urban Development
27-29 December 2016, Shahid Beheshti University , Tehran , Iran**

مراجع

- [1] T. Abdoun, R. Dobry, T. O'Rourke, and S. Goh, "Pile Response to Lateral Spreads: Centrifuge Modeling," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 129, pp. 869-878, 2003.
- [2] 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. 39-55, 2004.
- [3] 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. 131, pp. 1378-1391, 2005.
- [4] 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. 26, pp. 275-286, 2006.
- [5] 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 Earthquake Engineering*, vol. 38, pp. 25-45, 2012.
- [6] R. Motamed and I. Towhata, "Shaking table model tests on pile groups behind quay walls subjected to lateral spreading," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, pp. 477-489, 2010.
- [7] L. Tang, X. Zhang, X. Ling, L. Su, and C. Liu, "Response of a pile group behind quay wall to liquefaction-induced lateral spreading: a shake-table investigation," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 13, pp. 741-749, 2014/12/01 2014.
- [8] K. M. Rollins, J. D. Lane, and T. M. Gerber, "Measured and computed lateral response of a pile group in sand," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, pp. 103-114, 2005.
- [9] S. A. Ashford, T. Juirnarongrit, T. Sugano, and M. Hamada, "Soil-pile response to blast-induced lateral spreading. I: field test," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, pp. 152-162, 2006.
- [10] Y. K. Chaloulos, G. D. Bouckovalas, and D. K. Karamitros, "Pile response in submerged lateral spreads: Common pitfalls of numerical and physical modeling techniques," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 55, pp. 275-287, 2013.
- [11] L. Su, L. Tang, X. Ling, X. Zhang, X. Gao, and C. Liu, "Numerical Study on Dynamic Behavior of Pile Group in Liquefiable Soils," *International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering*, pp. 624-631, 2013.
- [12] Flac^{3D}, "Manual: Structural Elements," 5.01 ed: Itasca Consulting Group, Inc., 2012.
- [13] P. M. Byrne, "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for Sand," presented at the Proceedings: Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Missouri, 1991.
- [14] Flac^{3D}, "Manual: Dynamic Analysis," 5.01 ed: Itasca Consulting Group, Inc., 2012.
- [15] H. B. Seed and I. M. Idriss, "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley UCB/EERC-70/10, 1970.



چهارمین کنگره بین المللی

عمران، معماری و توسعه شهری

دانشگاه شهید بهشتی - تهران

تاریخ : 1395-06-14

شماره : AB-00717-BAC/TC

پیوست : ندارد

گواهینامه موقت پذیرش، چاپ و ارائه مقاله

سرکار خانم / جناب آقای سعید نعمتی نژاد، سید احسان سیدی حسینی نیا

بدینوسیله به استحضار می رساند مقاله جنابعالی با کد پیگیری "AB-00717-BAC" و تحت عنوان:

مدل سازی عددی میز لرزان و اثر روانگرایی بر اسکله

با توجه به نظر کمیته داوری چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری جهت چاپ و ارائه در

این کنگره که در تاریخ 7 الی 9 دی ماه 1395 در دانشگاه شهید بهشتی تهران برگزار خواهد شد پذیرفته گردیده

است. توفیق روزافزون حضرتعالی را از درگاه خداوند متعال مسئلت می نمایم.

با تقدیم احترام

دکتر افشام کیوانی

دبیر علمی کنگره



4th.
International Congress on

**CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE &
URBAN DEVELOPMENT**

SHAHID BEHESHTI University IRAN-TEHRN