

رانش خاک در حالت سکون تحت اثر سربارهای تناوبی

سیدمحمدالدین میرمحمدحسینی (دانشیار)

افشین امینی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بررسی رانش دینامیکی خاک به دلیل ابهاماتی که در شناخت مقدار و نحوه‌ی توزیع رانش بر دیوارهای حائل وجود دارد، هنوز جای تحقیق و بررسی زیادی دارد و تاکنون نظریه و روش دقیقی که مورد توافق اکثر محققین باشد در این موضوع توصیه نشده است. امروزه شاید یکی از مناسب‌ترین راه‌ها برای تعیین رانش دینامیکی خاک، ساخت مدل‌های آزمایشگاهی باشد که البته بسیار زمان‌بر و هزینه‌بر است. اصولاً در موارد عملی طراحی دیوارهای حائل (به‌خصوص در کناره‌ی راه‌ها)، به دلیل نبود تحقیقات دقیق و جامع و نیز برای سهولت کار، سربارهایی معادل به‌صورت سربارگسترده در نظر گرفته می‌شود. هرچند تحقیقات گسترده‌ی انجام شده در مورد بارهای زلزله دستاوردهای مهمی در پی داشته، در مورد سربارهای تناوبی که شایع‌ترین آن بارهای زنده‌ی وسایل نقلیه از قبیل اتومبیل و قطار این‌گونه عمل نشده است. نوشتار حاضر نشان‌دهنده‌ی تلاشی است برای مدل کردن صحیح برهم‌کنش خاک و دیوار حائل به‌وسیله‌ی یک برنامه‌ی تخصصی ژئوتکنیک (Plaxis) که از روش اجزاء محدود استفاده می‌کند. در این برنامه، به دلیل امکان انجام تحلیل دینامیکی گسترده، سربارهایی با بزرگی متفاوت در فاصله‌های مختلف و با فرکانس‌های مختلف به‌صورت تناوبی (تکراری) بر خاک پشت دیوار حائل صلب وارد شده و توزیع رانش جانبی کل روی این دیوارها مشخص شده است. در نهایت، نتایج به دست آمده با مدل آزمایشگاهی دیوار حائل در دانشگاه امیرکبیر، که تقریباً شرایط یکسانی با مدل‌سازی عددی داشته، مقایسه شده است و نتایجی در باب توزیع رانش جانبی و بزرگی آن در مقایسه با سربارهای استاتیکی انجام شده است.

مقدمه

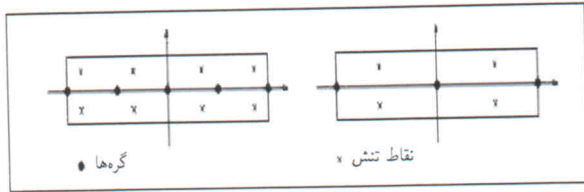
در این تحقیق سعی شده است با استفاده از نرم‌افزار Plaxis، که یک برنامه‌ی تخصصی ژئوتکنیک است و از روش اجزاء محدود بهره می‌گیرد، یک مدل عددی مناسب از دیوار حائل، خاک و سربار تناوبی قائم تعریف شود، به‌گونه‌ی که به کمک آن کلیه‌ی پارامترهای مؤثر بر رانش در این شرایط قابل مطالعه باشند، و از این طریق به شناخت دقیق‌تری از رانش جانبی وارد بر دیوار حائل دسترسی پیدا کنند.

برنامه و مراحل تحلیل رانش خاک در حالت سکون

برای مطالعه‌ی اثر سربار تناوبی وارد بر خاک پشت دیوار حائل صلب در حالت سکون یک مدل عددی با روش اجزاء محدود، برنامه Plaxis ۷/۲ مورد استفاده قرار گرفته است. ابعاد این مدل چنان انتخاب شده که علی‌رغم شرایط دوطرفه‌ی برنامه، بتواند شرایطی مشابه مدل فیزیکی دیوار حائل، که در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه امیرکبیر طراحی و ساخته شده است، فراهم آورد. در شکل ۱ ابعاد هندسی مدل عددی و شرایط مرزی نشان داده شده است. با توجه به نسبت طول به ارتفاع دیوار در مدل آزمایشگاهی ذکر شده — که بزرگ‌تر از ۱/۵ است — انجام تحلیل در شرایط کرنش صفحه‌ی قابل قبول است. صفحه‌ی

در زمینه‌ی رانش خاک در حالت سکون کارهای زیادی توسط محققین انجام شده است که از آن جمله می‌توان به کارهای دقیق مدل آزمایشگاهی انجام شده در سال ۱۹۸۲ اشاره کرد.^[۱] در مواردی که سربار نیز بر خاک پشت وارد می‌شود روابط کشسانی اولین بار در سال ۱۸۷۶ ارائه^[۲] و سپس در سال ۱۹۷۴ تکمیل شد.^[۳] در همین زمینه برای ارزیابی بارهایی که به منظور متراکم کردن خاک پشت دیوارهای حائل وارد می‌شود و نیز اثر آن بر رانش جانبی، در سال ۱۹۹۱ تحقیقات جامعی انجام شده است.^[۴]

در سال ۱۹۷۶ محققین بر روی خاک پشت یک مدل دیوار حائل سربار نواری و تناوبی وارد کردند و به نتایج جالبی حاصل از تأثیر این سربار تناوبی بر دیوار حائل صلب رسیدند.^[۵] همچنین در سال ۲۰۰۲ در تحقیق مفصلی به بررسی اثر سربار زنده بر دیوارهای حائل نزدیک بزرگراه پرداختند، و برای در نظر گرفتن سربار معادل استاتیک در مورد این نوع بارها توصیه‌هایی ارائه کردند.^[۶] اما در تمام تحقیقات ذکر شده تأثیر مستقیم وجود یک سربار تناوبی بر رانش جانبی دیوار مورد مطالعه قرار نگرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بر نحوه‌ی توزیع و مقدار رانش مشخص نشده است.



شکل ۳. المان تیر در Plaxis و نقاط تنش و گره‌های این المان.

المان‌های واسطه

المان‌های واسطه برای مدل‌کردن اندرکنش (اثر متقابل) خاک و سازه در محل تماس خاک و دیوار و نیز خاک و صفحه‌ی بارگذاری استفاده می‌شوند. سختی اندرکنش (اثر متقابل) با انتخاب مقدار ضریب مناسب برای کاهش سختی المان خاک صورت می‌گیرد. این عامل بستگی دارد به اصطکاک بین خاک و دیوار، اصطکاک داخلی خاک و چسبندگی آن. R_{inter} همان ضریب یادشده است که برای تعریف سختی مدل کشسانی - خمیری المان‌های واسطه استفاده می‌شود:

$$\psi_i = 0^\circ \text{ for } R_{inter} < 1$$

$$tg\varphi_i = R_{inter} tg\varphi_{soil}$$

$$C_i = R_{inter} C_{soil}$$

ψ_i ، C_i و φ_i مربوط به المان‌های اندرکنش هستند.

نوع مدل خاک

مدل انتخابی برای خاک، با توجه به نوع ماسه‌ی خشک که در مطالعات آزمایشگاهی مدل فیزیکی استفاده شده، مدل سخت‌شونده^۱ است که مدلی است هیپربولیک و کشسانی - خمیری و از درجه‌ی دوم. مدل سخت‌شونده خود شامل دو بخش است: سخت‌شوندگی برشی و سخت‌شوندگی فشاری. سخت‌شوندگی برشی برای مدل‌کردن کرنش‌های غیرقابل برگشت به دلیل تنش‌های انحرافی است، و سخت‌شوندگی فشاری برای بارگذاری تک‌محوره‌ی همسانگرد، مانند آزمایشات ادمومتریک، مناسب است.

مدل استفاده شده در این برنامه براساس کار Schanz^[۸] است.

پارامترهای این مدل علاوه بر c ، φ ، ν و Ψ به شرح زیر است.

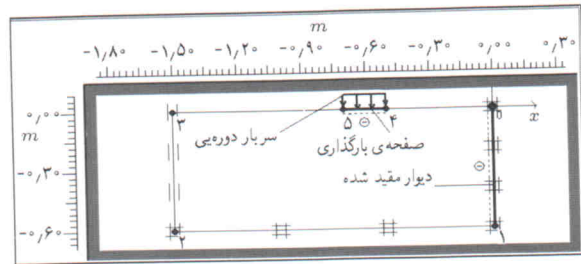
$$E_{\Delta_0}^{ref} [kN/m^2] \text{ سختی وتری (سکانتی) در آزمون سه محوره‌ی } :$$

استاندارد

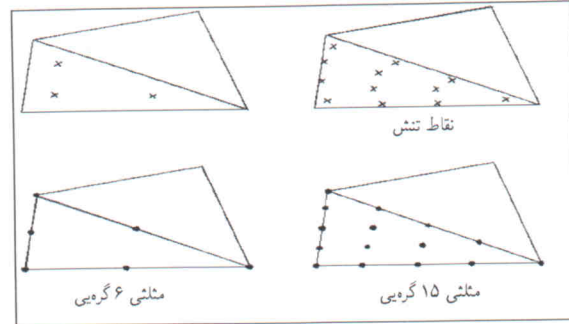
$$E_{oed}^{ref} [kN/m^2] \text{ سختی حماسی (تانژانتی) برای بارگذاری ابتدایی} :$$

پارامترهای خاک نمونه

نظر به این که در این مطالعه سعی شده است مشخصات مصالح و هندسه‌ی مدل، مشابه مدل فیزیکی مطالعه شده در آزمایشگاه مکانیک



شکل ۱. ابعاد هندسی و شرایط مرزی مدل نمونه.



شکل ۲. المان خاک و نقاط تنش و گره‌ها در Plaxis.

بارگذاری نیز به صورت صفحه‌ی صلب و موازی دیوار در نظر گرفته شده است.^[۷]

مشخصات و نحوه‌ی مدل‌سازی عددی در این مطالعه در بخش‌های زیر تشریح شده است.

المان خاک

برای المان خاک از دو نوع المان مثلی ۶ و ۱۵ گره‌یی استفاده شده است. المان ۶ گره‌یی درون‌یابی درجه‌ی دوم برای جابه‌جایی‌ها استفاده می‌شود و ماتریس سختی آن به وسیله‌ی انتگرال عددی سه‌نقطه‌یی گوس تشکیل می‌شود (شکل ۲).

برای المان ۱۵ گره‌یی مثلی، از درون‌یابی درجه چهار که ۱۲ نقطه تنش را شامل می‌شود استفاده می‌کنند.

المان دیوار و صفحه بارگذاری

این المان‌ها از نوع المان عمومی تیر (Beam) در Plaxis است که سختی محوری و سختی خمشی دارد و توانایی مدل‌کردن صفحه و تیر را نیز دارد. برنامه به تیر اجازه‌ی تغییر طول المان و خاصیت پلاستیک را نیز می‌دهد (هرچند که در این تحقیق از این خاصیت استفاده نشده است). خصوصیات مصالح تیر شامل سختی خمشی (EI) و سختی محوری (EA) است. شکل ۳ المان تیر را نشان می‌دهد. در این مطالعه پارامترهای المان تیر به نحوی انتخاب شده‌اند که دیوار حالت صلب داشته باشد.

استفاده شده برای پنج دوره‌ی اول به صورت بزرگی سربار قائم در برابر زمان، در شکل ۵ آمده است.

دیگر نکته‌ی حائز اهمیت در این ارتباط، ظرفیت باربری خاک است. اصولاً در شرایط دینامیکی به دلیل لحظه‌یی و گذرا بودن بارها، مقادیر بزرگ‌تری نسبت به شرایط استاتیکی می‌توان بر صفحه‌ی بارگذاری بار وارد کرد. بنابراین، خاک در این حالت ممکن است هنوز گسیخته نشده و در نتیجه اجرای برنامه متوقف نخواهد شد.

از دیگر پارامترهای دینامیکی ضریب میرایی (Damping) خاک است. لازم به توضیح است که برنامه‌ی plaxis برای شبیه‌سازی میرایی در خاک و برای تشکیل ماتریس میرایی از ترکیب خطی ماتریس‌های جرم و سختی استفاده می‌کند:

$$C = \alpha M + \beta K$$

که در آن α و β ضرایب رایلی (Rayleigh)، M ماتریس جرم، K ماتریس سختی و C ماتریس میرایی است. هرچقدر α بیشتر باشد، فرکانس‌های پایین‌تر بیشتر میرا می‌شوند و هر چقدر β بیشتر باشد فرکانس‌های بالاتر بیشتر میرا می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر ضرایب میرایی سیستم با توجه به نوع خاک به صورت $\alpha = 0.001$ و $\beta = 0.008$ انتخاب شده‌اند. [۸]

مراحل و نحوه‌ی تحلیل

در این مطالعه با توجه به در دست داشتن نتایج قابل ملاحظه‌ی حاصل از آزمایشات استاتیکی بر روی مدل فیزیکی در آزمایشگاه، ابتدا صرفاً اقدام به تحلیل مدل عددی برای این حالت شد. سپس با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی و حساسیت‌سنجی پارامترها، مدل عددی کالیبره شده و آنگاه به اعمال تغییرات پارامترهای مختلف و مطالعه‌ی میزان و نحوه‌ی تأثیر آنها بر کم و کیف رانش پرداخته شده است.

به منظور دست‌یابی به محدوده‌ی تأثیر پارامترها در هر حالت، مطالعات در دو حالت سربارهای استاتیکی و سربارهای دینامیکی (تناوبی) صورت پذیرفته است. شایان ذکر است که بخاطر هدف و تمرکز اصلی این مطالعه بر مسائل مربوط به رانش خاک در حالت سکون دیوار در تمامی حالات به صورت کاملاً ثابت و بدون کوچک‌ترین امکان حرکت در نظر گرفته شده است. اثر تنش‌های درجا با انتخاب K مناسب، با توجه به نتایج رانش سکون مدل فیزیکی، لحاظ شده است. در بخش‌های بعدی به تشریح و ارزیابی نتایج این بررسی می‌پردازیم. کلیه‌ی پارامترها و علائمی که در این نوشتار به کار رفته و در بخش‌های بعدی مورد استفاده قرار خواهد گرفت در شکل ۶ معرفی شده‌اند.

خاک دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد، پارامترهای در نظر گرفته شده برای خاک چنین است:

$$\begin{aligned} \gamma_{dry} &= 15.1 \frac{KN}{m^3} & e_{init} &= 0.71 & \varphi &= 36.5^\circ \\ E &= 4.108 \times 10^4 \frac{KN}{m^2} & Dr &= 0.47 & \psi &= 6^\circ \\ \nu &= 0.3 & C &\approx \frac{KN}{m^2} & R_{inter} &= 0.6 \end{aligned}$$

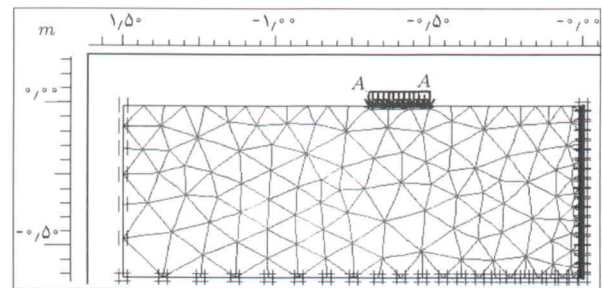
(مقادیر R_{inter} و ψ با توجه به توصیه‌ی برنامه و برای کالیبره کردن مدل عددی با نتایج مدل واقعی انتخاب شده است.)

نحوه‌ی مش‌بندی^۲

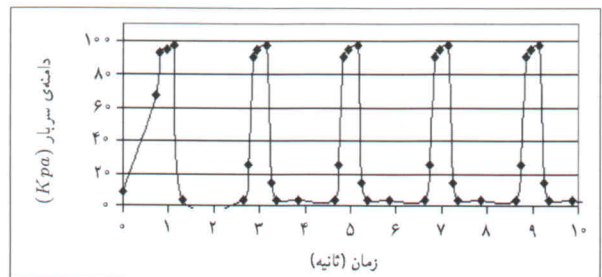
مش‌بندی مدل در Plaxis به‌طور خودکار و به صورت المان‌های مثلثی، با توجه به تشخیص برنامه صورت می‌گیرد، ولی کاربر این امکان را دارد که در ناحیه‌هایی که تمرکز تنش بیشتر است مش‌بندی را ریزتر کند تا جواب‌های صحیح‌تری به دست آورد. در شکل ۴ یک نمونه از این مش‌بندی که در اطراف دیوار و صفحه‌ی بارگذاری المان‌ها ریزتر شده، نشان داده شده است.

نوع سربار دینامیکی

به دلیل سعی در شبیه‌سازی سربارهایی مانند بارهای ترافیک، فرض می‌شود که بار تناوبی یک‌طرفه فشاری بوده و سربار توسط تاریخچه‌ی زمانی و در یک فایل اطلاعاتی (data) به برنامه معرفی شده است. مقدار و فرکانس این بار می‌تواند تغییر کند، اما شکل نمونه‌ی سربار



شکل ۴. یک نمونه از مش‌بندی مدل.



شکل ۵. منحنی سربار تناوبی استفاده شده در برابر زمان برای پنج دوره‌ی نخست.

و نیز خصوصیات غیرالاستیک خاک، میزان رانش به دست آمده از مدل عددی کم‌تر از مدل نظری است، و نقطه‌ی اثر آن کمی پایین‌تر از رانش نظری است. البته خصوصیات دیوار (صلب بودن دیوار در این حالت) در شکل و میزان رانش مؤثر خواهد بود.

نتایج سربارهای تناوبی

در شکل ۸ تغییر تنش جانبی در اعماق مختلف دیوار، در مقابل زمان، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، به تدریج و با گذشت زمان، بر میزان رانش وارد بر دیوار افزوده می‌شود. این افزایش دائمی نیست و بعد از تعداد دوره‌های معینی منحنی رانش به حالتی ثابت می‌رسد.

این نتیجه کاملاً با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی محققین مطابقت دارد. [۵] در عمق‌های پایین دیوار، تغییرات مقادیر بیشینه و کمینه رانش خاک کم‌تر و نوسانات آن یکنواخت‌تر می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در اعماق زیاد (بزرگ‌تر از ۲ برابر عرض صفحه‌ی بارگذاری) به دلیل استهلاک اثرات موضعی سربار، نوسانات رانش کاملاً مشابه نوسانات سربار شده و در حقیقت بیشتر از تنش‌های استاتیکی (وزن خاک) تأثیر می‌پذیرند.

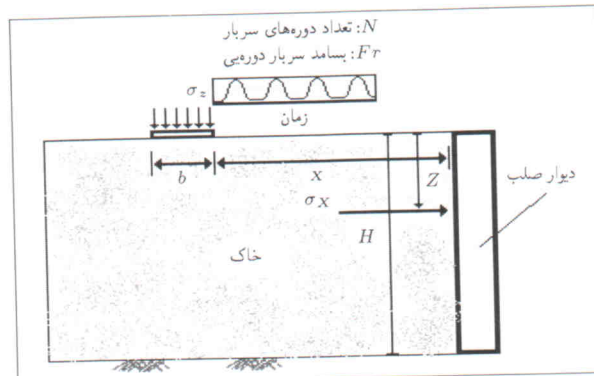
در بخش‌های بعدی اثر پارامترهای مختلف بر رانش تناوبی بررسی می‌شود.

تأثیر فرکانس سربار تناوبی بر رانش جانبی دیوار ساکن نوسانات رانش در عمق میانی دیوار ($z=3\text{ cm}$) ناشی از سربارهای تناوبی با دامنه‌ی ثابت 5 kPa و فرکانس‌های مختلف در شکل ۹ رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نوسانات رانش در فرکانس‌های پایین‌تر منظم و یکنواخت‌تر بوده و در فرکانس‌های بالاتر به نوعی دچار غیریکنواختی و اغتشاش می‌شوند. این امر ممکن است به دلیل بازتاب و انعکاس امواج تنش از مرزها در فرکانس‌های بالاتر صورت پذیرد.

تأثیر فاصله‌ی سربار تناوبی بر رانش جانبی دیوار

نوسانات رانش در عمق میانی دیوار ($z=3\text{ cm}$) ناشی از سربارهای تناوبی با دامنه و فرکانس ثابت ($F_r=0.5\text{ Hz}$ و $\sigma_n=5\text{ kPa}$) در فواصل مختلف از دیوار در شکل ۱۰ رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دامنه‌ی نوسانات رانش با دور شدن سربار تناوبی از دیوار حائل به مقدار قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد، ولی الگوی نوسانات رانش در فواصل مختلف اعمال سربار تناوبی از دیوار، تغییرات چندانی زیادی نخواهد داشت.

در شکل ۱۱، به منظور تعیین رابطه میان حداکثر رانش و فاصله‌ی سربار، منحنی تغییرات حداکثر رانش در دوره‌ی پانزدهم در برابر فاصله‌ی

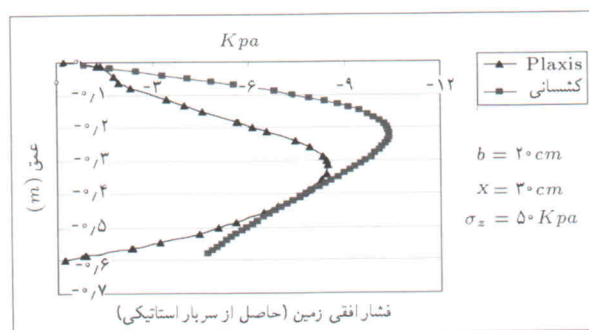


شکل ۶. معرفی پارامترها و علائم استفاده شده.

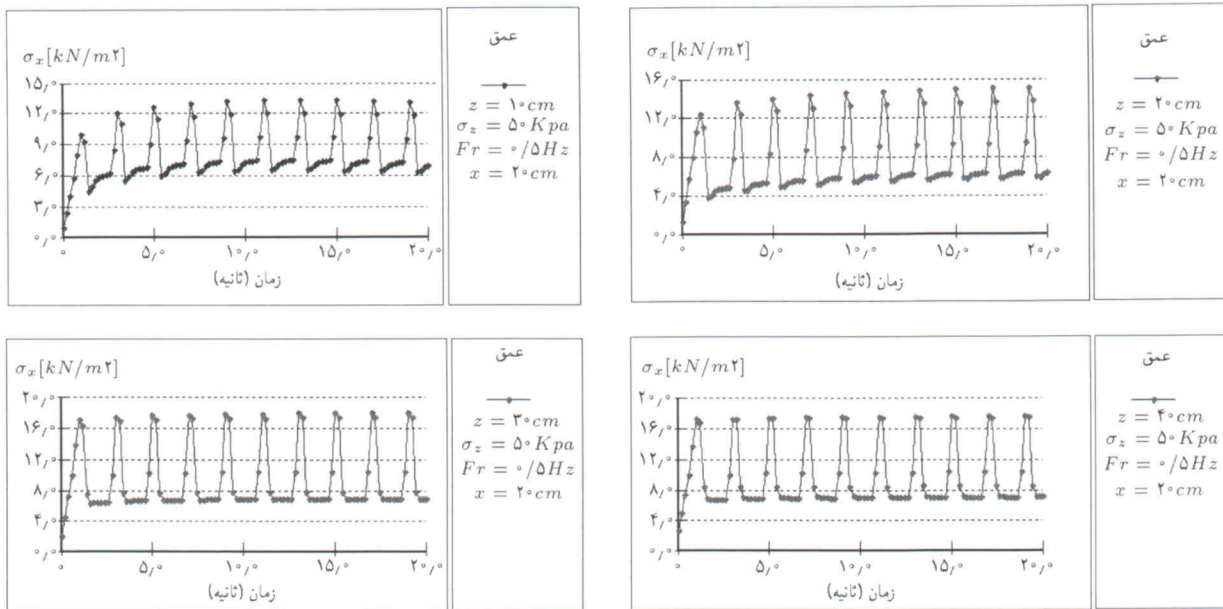
نتایج سربارهای استاتیکی

در این حالت به منظور ارزیابی اثر شدت، طول و فاصله‌ی سربارهای استاتیکی گسترده بر روی رانش خاک در حالت سکون، مطالعات مختلفی بر روی دیوارهای حائل صورت گرفته است. نتایج به دست آمده با مبانی و مفاهیم رانش خاک در حالت سکون، که در گذشته توسط مراجع مختلف مطرح و پیشنهاد شده است، سازگاری نسبتاً خوبی داشته و به نحو مطلوبی توانسته است شرایط خاک و دیوار را مدل کند. به دلیل عدم وجود ابهام و نارسایی‌های قابل ملاحظه در معرفی و شناخت این رانش در گذشته، نیازی به بحث و بررسی دقیق پیرامون نتایج این حالت نیست و تنها به منظور مقایسه، منحنی تغییرات رانش با عمق دیوار را برای یک سربار با شدت 5 kPa و عرض 2 cm که در فاصله‌ی 4 cm از دیوار بر بالای سطح خاک اعمال شده است، به همراه منحنی تغییرات رانش برای همین سربار که از نظریه‌ی کشسان بودن (بوسینیسک) به دست آمده در شکل ۷ نشان داده‌ایم. (در اینجا مدل Plaxis برای خاک موهر - کولمب است.)

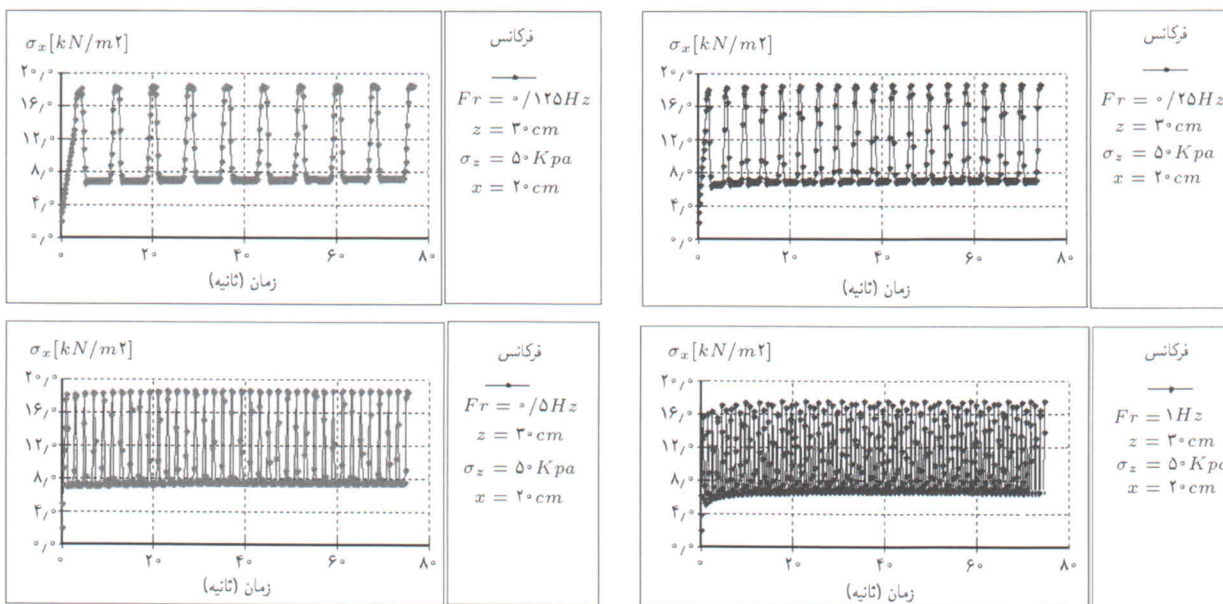
چنان‌که ملاحظه می‌شود، روند تغییرات کاملاً سازگار و مشابه مبانی کشسانی است اما به لحاظ تأثیر پذیری مقادیر رانش از هندسه‌ی مدل



شکل ۷. مقایسه‌ی رانش جانبی فقط حاصل از سربار بین نظریه‌ی کشسانی و نتایج Plaxis.



شکل ۸. تأثیر سربار تناوبی نمونه بر رانش خاک در اعماق مختلف دیوار در حالت سکون.



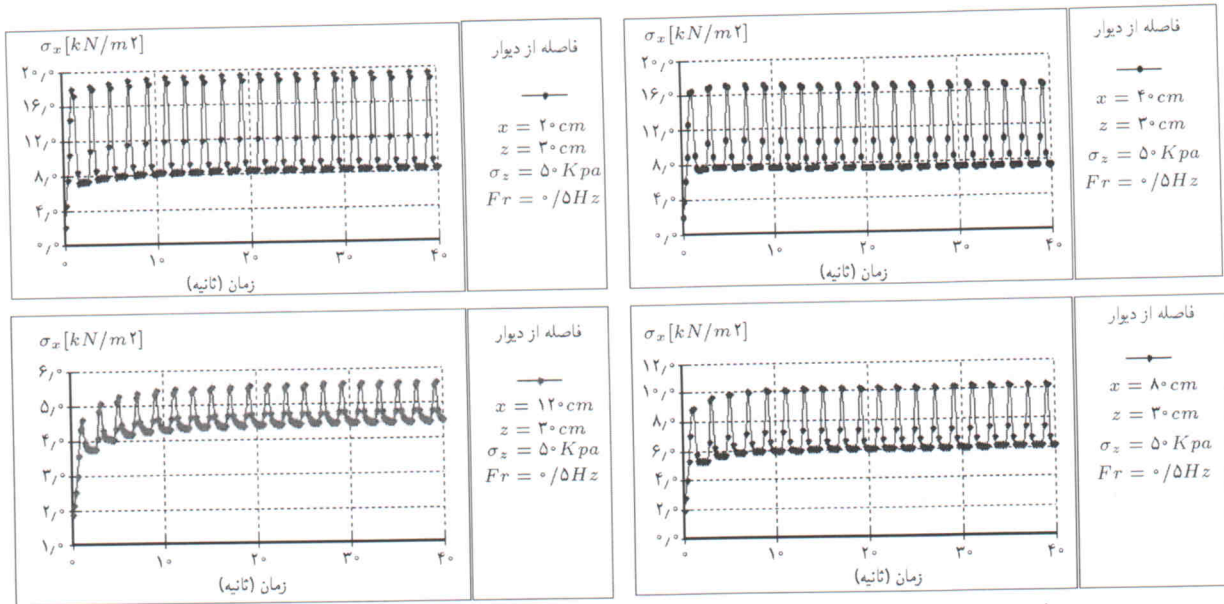
شکل ۹. تأثیر فرکانس سربار دوره‌یی بر تنش افقی در عمق میانی.

چنان که ملاحظه می‌شود با ازدیاد تعداد دورها رانش خاک افزایش یافته و نقطه‌ی اثر رانش نیز به سمت پایین حرکت می‌کند. این موضوع می‌تواند به دلیل متراکم‌تر شدن خاک به علت تعداد دورهای بیشتر باشد. در شکل ۱۳ مقایسه‌ی توزیع رانش کل بین نتایج آزمایشگاهی مدل دیوار حائل^[۱۰] و نتایج تحلیل عددی در حالت سربار تناوبی بعد از ۳۰ دور نشان داده شده است. در شکل مشخص است که بین این دو نتیجه سازگاری نسبتاً خوبی وجود دارد، هرچند که در تحلیل عددی عمق برآیند رانش بیشتر، و مقدار رانش کل کمی کم‌تر از نتایج آزمایشگاهی

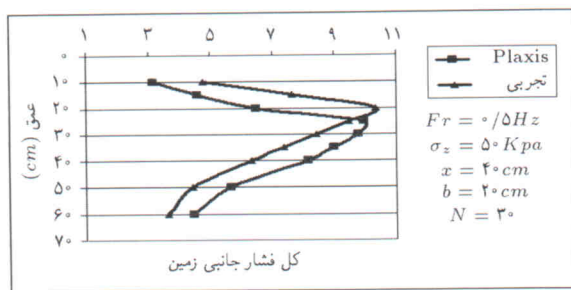
سربار از دیوار رسم شده است که بیانگر یک رابطه‌ی تقریباً خطی است.

تأثیر تعداد دوری سربار بر منحنی رانش جانبی دیوار

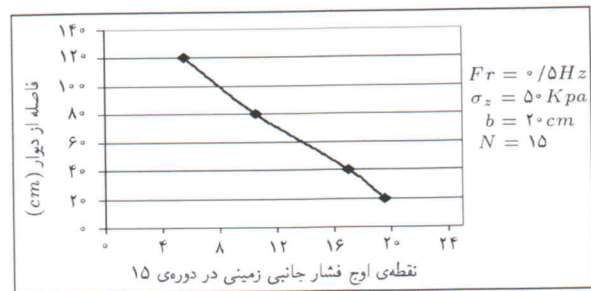
نمودار رانش خاک در عمق تحت اثر سربارهای تناوبی با فرکانس، دامنه و فاصله‌ی ثابت از دیوار حائل ($\sigma_n = 5 \text{ kPa}$, $Fr = 0/5 \text{ Hz}$, $x = 4 \text{ cm}$) در دوره‌های مختلف در شکل ۱۲ رسم شده است.



شکل ۱۰. تأثیر فاصله‌ی سربار دورهی بر رانش جانبی خاک و مقایسه‌ی نقطه‌ی اوج رانش جانبی در دوره‌ی ۱۵ برای این حالات.



شکل ۱۳. نمودار رانش کل خاک بعد از ۳۰ دور سربار براساس تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی.

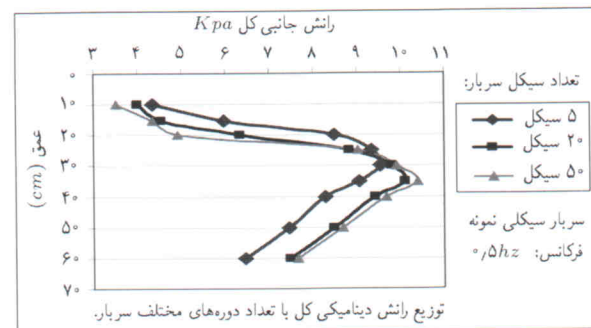


شکل ۱۱. تأثیر فاصله‌ی سربار از دیوار بر مقدار حداکثر فشار جانبی.

آن مورد تحقیق قرار گرفته است. مصادیق عملی این شرایط دیوارهای حائل زیرزمین ساختمان‌ها است که علاوه بر رانش خاک ریز پشت خود بایستی اضافه رانش تناوبی ناشی از توقف یا تردد وسایل نقلیه را نیز تحمل کنند. در روش‌های سنتی به دلیل عدم شناخت کافی از اثر این سربارهای زنده، از سربارهای معادل استاتیکی در طراحی این‌گونه دیوارها استفاده می‌شود.

در این تحقیق با استفاده از یک مدل عددی به روش اجزاء محدود توسط برنامه‌ی Plaxis سعی در شناخت تأثیر سربار تناوبی بر توزیع رانش جانبی خاک شده است. در این تحقیق نوع خاک بدون چسبندگی و در شرایط خشک، و ابعاد این مدل چنان انتخاب شده که مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج مدل مشابه آزمایشگاهی دیوار حائل که در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شده امکان‌پذیر باشد. برخی از نتایج مهم به دست آمده در خصوص دیوارهای حائل صلب که در شرایط سکون قرار دارند چنین است:

۱. اثر سربارهای دورهی بر رانش خاک در اعماق کم محسوس بوده



شکل ۱۲. تأثیر تعداد دوره‌های سربار بر شکل منحنی رانش خاک با عمق.

این موضوع شاید به این دلیل باشد که در واقعیت به خاطر شرایط سه‌بعدی، تأثیر میرایی خاک در عمق بیشتر است و در اعماق پایین‌تر تنش درجا مؤثرتر است.

نتیجه‌گیری

تأثیر سربار تناوبی بر خاک پشت دیوار حائل موضوعی است که به دلیل ابهام در شناخت مقدار و نحوه‌ی توزیع رانش دینامیکی حاصل از

- و در اعماق زیاد (بزرگ‌تر از ۲ برابر عرض صفحه‌ی بارگذاری) مستهلک شده و رانش موجود بیشتر از وزن خاک و سربار مرده تبعیت می‌کند.
۲. دامنه و شکل نوسانات رانش تناوبی کاملاً متأثر از دامنه و شکل سربار تناوبی است. اما چنانچه فاصله‌ی سربار تناوبی بیش از ۱/۵ برابر عرض صفحه‌ی بارگذاری باشد، مقدار این دامنه به کم‌تر از ۵٪ شدت دامنه سربار تناوبی تقلیل خواهد یافت.
۳. نقطه‌ی اثر اضافه رانش دینامیکی ناشی از سربارهای تناوبی در محدوده‌ی کوچکی بالاتر از وسط ارتفاع دیوار حائل خواهد بود.
۴. با افزایش تعداد دورهای سربار، دامنه‌ی رانش تناوبی افزایش کمی می‌یابد، اما پس از چند دور به حالت پایدار و نسبتاً ثابتی می‌رسد. (در مدل فیزیکی نیز این موضوع مشهود است.)

پانوش

1. Hardening Soil Model
2. meshwork

منابع

1. Sherif, M.A. and Ishibashi, I. "Earth pressure against rigid retaining wall" *Geot. Eng, ASCE*. **108** (5), pp.649-695 (1982).
2. Boussinesq, M. J. "Theoretical essay on the equilibrium of elasticity of pulverulent masses and on the pressure of earths without cohesion." *Memoires Couronnes Acad. R. Sci. Belg.*, **40** (4) (1876).
3. Poulous, H. G., Davis, E. H. "Elastic solutions for soil and rock mechanics", Wiley, New York (1974).
4. Day, R. "Estimation earth pressure due to compaction", *J.Geot, Eng, ASCE* **115** (10), pp.1481-1486 (1991).
5. Sherif, M. M. and Mackey, R. D. "Pressure on retaining wall with repeated loading", *J.Geot, Eng, ASCE*. **103** (11), pp.1341-1343 (1977).
6. Kim, S. and M. R. Barker, "Effect of live load surcharge on retaining wall and abutment", *J.Geot, Eng, ASCE*. **128** (10), pp.803-813 (2002).
7. Plaxis Reference Manual (version 7.2).
8. Schanz, T., "On the stiffness of sands" *Geotechnique* **48**, pp. 383-387 (1998).
9. Zerwer, A. and Casacante, G., "Parameter estimation in finite element simulations of rayleigh waves", *J.Geot, Eng, ASCE*. **128** (3), pp. 250-261 (2002).
10. Nikkhah, S.M. "The study of earth pressure under cyclic surcharges", Ph D Thesis, University of Amir-Kabir, Iran (2003).

