

بررسی عددی رانش فعال خاک تحت سربار سیکلی پشت دیوار دارای حرکت انتقالی

سید مجدالدین میرمحمد حسینی^{۱*} و سمانه محمدی^۲

^۱دانشیار دانشکده عمران و محیطزیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد خاک و پی دانشکده عمران و محیطزیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت: ۸۴/۹/۱۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۸۹/۱۰/۱، تاریخ تصویب: ۸۹/۱۱/۲۶)

چکیده

به منظور جمع‌بندی و اظهار نظر روشن‌تر درباره رانش خاک در حالت فعال و توزیع و نقطه اثر آن در شرایط بارهای سیکلی، مطالعات همزمان مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مورد نیاز است. بدین منظور در این مطالعه رفتار خاک تحت بارهای استاتیکی و سیکلی در حالت حرکت انتقالی دیوار به کمک برنامه کامپیوتری FLAC بررسی شده و برای کسب اطمینان از صحت مدل، نتایج حاصل با نتایج مدل آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده عمران محیطزیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر [۱] مقایسه شده است؛ سپس تأثیر مقدار، محل اثر، نوع سربار، مشخصات مکانیکی خاک و همچنین شرایط دیوار بر مقدار رانش، شکل توزیع آن و نقطه اثر آن بررسی شده است. افزایش بار و اعمال نزدیک‌تر آن به دیوار و کاهش مشخصات مکانیکی خاک، منجر به افزایش برآیند رانش جانبی شده و این مقدار در حالت سیکلی نسبت به حالت استاتیکی مشابه، بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: دیوار حائل، رانش خاک، سربار سیکلی، مدل عددی، اندرکنش خاک و سازه، برنامه کامپیوتری FLAC

مقدمه

برای بررسی رفتار دیوارهای حائل در شرایط استاتیکی و دینامیکی، مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی توسط محققان مختلف تا به حال انجام گرفته است. اکابه [۲] مطالعاتی در زمینه افزایش رانش خاک ناشی از زلزله انجام داد. پس از او مونونوبه [۲] و ماتسو [۳] این تحقیقات را ادامه دادند. نتیجه این تحقیقات، ارائه روشی تحلیلی بر مبنای تئوری کولمب برای محاسبات فشار دینامیکی جانبی خاک به نام روش مونونوبه - اکابه بود.

مکی و شریف [۴] رانش وارد بر دیوار حائل تحت اثر بار سیکلی با تعداد سیکل‌ها و فواصل مختلف از دیوار در شرایط سکون را به کمک یک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیقات مزبور نشان داده است که رانش وارد بر دیوار در اثر بارگذاری سیکلی به مقدار قابل توجهی نسبت به بارگذاری استاتیکی افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش رانش در اولین سیکل بارگذاری مشاهده شده و با افزایش تعداد سیکل‌ها نرخ افزایش رانش کاهش می‌یابد.

شریف و همکاران [۵] نتایج حاصل از مطالعات آزمایشی برای تعیین رانش خاک در حالت سکون، فعال

شناخت صحیحی از رانش خاک، عامل مهمی در طراحی مسائل ژئوتکنیکی و مهندسی پی است. طراحی و تحلیل پایداری دیوارهای حائل، سپرها، ترانشه‌های محافظ شیب‌های طبیعی، دیوارهای ساحلی، سدهای موقت و مهاربندها در خاکبرداری‌ها، کالورت‌ها و تونل‌ها نیاز به تخمین عددی رانش خاک دارند. برای طراحی ایمن سازه‌های حائل لازم است مقدار و توزیع رانش جانبی وارد به دیوار به طور دقیق تعیین شود. تحقیقات به عمل آمده نشان می‌دهد که رانش خاک به نوع و محل اعمال سربار، جنس مصالح خاکریز و اندرکنش متقابل خاک-سازه بستگی داشته و در ضمن تابعی از تغییر مکان‌ها و تغییر شکل‌های سازه‌های مرتبط با خاک (حالت فعال، حالت سکون و حالت مقاوم) نیز هست. بارهای سیکلی مثل حرکت عبور وسایل نقلیه، انفجار و ضربات ناشی از حرکت ماشین‌آلات سنگین منجر به افزایش نیروهای رانشی، کاهش مقاومت برشی خاک و کرنش‌های ناخواسته شده که به پایداری سازه آسیب می‌رساند. اصطلاح بارگذاری سیکلی به سیستمی اشاره دارد که تا حدودی نشان‌دهنده منظم بودن مقدار و فرکانس بارهای وارده است.

خاک (δ) بر رانش خاک پشت دیوار و تعیین نقطه اثر رانش و حداکثر رانش است. برای کسب اطمینان از درستی نتایج مدل عددی، نتایج با نتایج مدل آزمایشگاهی دیوار حائل ساخته شده در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده عمران محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر [۱] مقایسه شده است. مشخصات مدل آزمایشگاهی نیز در ادامه ارائه شده است.

روش تفاضل محدود

در روش تفاضل محدود هر مشتق در دسته معادلات به طور مستقیم به وسیله عبارت جبری بر حسب متغیرهای فیزیکی (یعنی تنش یا تغییر مکان) در نقاط گسسته فضا جایگذاری می شود که مقدار این متغیرها در المان‌ها مشخص نیست. در مقابل، در روش اجزای محدود مقادیر فیزیکی (تنش، جابه‌جایی) در هر المان بر اساس یک مدل پیش‌بینی شده تغییر می‌کند که به وسیله توابع مشخصی، این عوامل کنترل می‌شوند. شیوه حل مسئله بر مبنای سازگاری این عوامل بر اساس حداقل کردن انرژی یا خطا است. هر دو روش منجر به حل یک سری معادلات جبری می‌شود؛ حتی اگر این معادلات به روش‌های کاملاً متفاوت حل شوند، در بیشتر موارد نتایج برای هر دو روش یکسان خواهد بود. مراحل انجام محاسبات در FLAC بدین ترتیب است: ابتدا بر اساس نیروها و تنش‌های اعمال شده معادلات حرکتی نوشته شده و سرعت‌ها و جابه‌جایی‌ها بر اساس این معادلات محاسبه می‌شوند. سپس تغییرات کرنش بر اساس این سرعت‌ها محاسبه می‌شوند و بر اساس این تغییرات کرنش، تنش‌های جدید به دست می‌آیند. در هر گام زمانی^۱ این حلقه یک بار طی می‌شود. نرم‌افزار FLAC در حل مسائل دینامیکی از روش غیرخطی استفاده می‌کند. در روش غیرخطی فقط یک اجرا انجام گرفته و رفتار غیرخطی تنش - کرنش به طور مستقیم با هر المان تکرار می‌شود. از آنجایی که رفتار غیرخطی، رفتار واقعی مصالح است، بستگی میرایی و مدول برشی روی سطح کرنش، خود به خود در مدل در نظر گرفته می‌شود [۹].

مدل‌سازی

ابعاد و مشخصات دیوار مورد مطالعه و خصوصیات خاکریز پشت با هدف کسب اطمینان از درستی مدل

استاتیکی و دینامیکی و نقطه اثر رانش کل وارد به مدل دیوار حائل صلب در حالت تغییر مکان انتقالی را ارائه کردند. نتایج حاصل از تحقیقات به عمل آمده نشان می‌دهد که در حالت دینامیکی، حداکثر ضریب رانش کل، ۳۰ درصد بیشتر از مقادیر حاصل از راه حل تحلیلی مونونوبه-اکابه است.

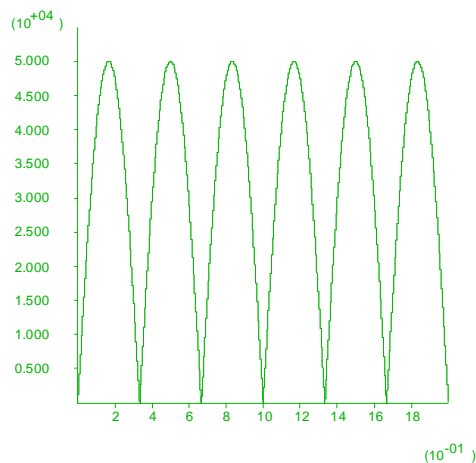
ماتسوزاوا [۱۱] به منظور بررسی تأثیر حالت تغییر مکان دیوار حائل روی رانش دینامیکی خاک، یک روش عددی را با استفاده از فرمول‌بندی نوار برشی دوگانه پیشنهاد کردند. در تحلیل پیشرفت گسیختگی در خاک باید تغییر شکل‌هایی که باعث تمرکز در امتداد نوارهایی که نوار برشی نامیده می‌شود را به حساب آورد.

پیک و سالگادو [۶]، فرمول جدیدی برای محاسبه فشار فعال خاک روی دیوار صلبی که می‌تواند انتقال افقی داشته باشد را با در نظر گرفتن پدیده قوس‌زدگی در خاک نگهداشته شده ارائه کردند.

میرحسینی و نیکخواه [۸ و ۱۰] برای بررسی کمی و کیفی رفتار رانش خاک پشت دیوار حائل تحت اثر سربارهای قائم استاتیکی و سیکی، یک مدل آزمایشگاهی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساختند. مدل دیوار قادر به حرکت به سمت دیوار یا خارج و به ترتیب ایجاد حالت مقاوم و فعال است. با استفاده از این مدل، مقدار، توزیع و محل اثر برآیند رانش خاک برای خاک‌های مختلف و شرایط بارگذاری متنوع مورد مطالعه قرار گرفته است.

با وجود نتایج تجربی و تحلیلی به نسبت قابل ملاحظه‌ای در زمینه دیوار حائل، منحنی توزیع رانش خاک پشت دیوار و نقطه اثر آن تحت بارهای سیکی با ابهاماتی مواجه بوده و در استانداردها و آئین‌نامه‌ها به روشنی ذکر نشده است و محاسبات رانش استاتیک یا شبه استاتیکی با لحاظ کردن ضریب اطمینان انجام می‌گیرد. با این هدف رانش خاک تحت سربارهای استاتیکی و سیکی توسط روش عددی تفاضل محدود به کمک برنامه ژئوتکنیکی FLAC مورد بررسی قرار گرفته است. این برنامه به روش تفاضل محدود به حل معادلات دیفرانسیل می‌پردازد. هدف از مدل‌سازی دیوار حائل در حالت فعال، بررسی اثرات سربار سیکی از جمله مقدار بار، فرکانس، فاصله بار و عوامل مکانیکی خاک همچون وزن مخصوص (γ)، ضریب پواسون (ν)، مدول الاستیسیته (E)، زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و زاویه اصطکاک بین دیوار و

[۱۱] و استفاده از آن ساده‌تر از میرایی رایلی بوده و نیازی به مشخص کردن محدوده فرکانسی ندارد، در نظر گرفته شده است. α_L با در نظر گرفتن میرایی $D=5\%$ / ۰/۱۵۱۷ است [۱۱]. پس از حصول تعادل اولیه^۲ به منظور بررسی اثر سربار بر رانش خاک پشت دیوار، بارگذاری آغاز می‌شود و در عین حال به دیوار اجازه حرکت داده می‌شود تا حالت فعال در خاک به وجود آید. در برنامه عددی FLAC حرکت دیوار با اعمال سرعت به گره‌های روی دیوار در گام زمانی مشخص می‌شود. تغییر مکان در هر لحظه از ضرب $xvel$ در $step$ (time) مسئله در آن لحظه برای گره ذکر شده به دست می‌آید. تنش افقی خاک در این حالت، معادل رانش خاک در دیوار حائل ساخته شده [۱] در حین اعمال سربار سیکی، شرایط مرزهای جاذب انرژی وجود نداشته است و همچنین به دلیل کم بودن فرکانس سربار سیکی در مدل مورد مطالعه، از مرزهای جاذب انرژی استفاده نشده و شرایط مرزی در حالت دینامیکی مشابه حالت استاتیکی است. با توجه به صادق بودن شرایط کرنش مسطح^۳ در مسئله، بارگذاری نیز به شکل نواری در نظر گرفته شده است. بارگذاری سیکی به صورت تاریخچه زمانی تنش قائم بر صفحه فلزی به عرض ۲۰ cm اعمال شده است. با توجه به اینکه منشأ بار سیکی منابعی چون عبور وسائل نقلیه در مجاورت دیوار حائل است، در نظر گرفتن کشش در سطح خاک بی مورد است و از موج یک طرفه استفاده شده است. شکل (۱)



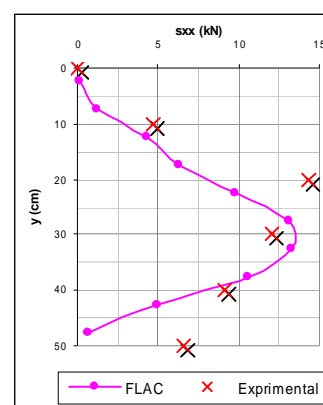
شکل ۱: بار سیکی با بزرگی ۵۰ kPa و فرکانس ۱/۵ Hz.

عددی مشابه مشخصات مدل آزمایشگاهی [۸] انتخاب شده است. ابعاد دیوار فولادی به شرح زیر انتخاب شده است: ۵۰ سانتی‌متر ارتفاع، ۱۰۰ سانتی‌متر عرض و یک سانتی‌متر ضخامت. مشخصات عوامل مکانیکی و شکل‌پذیری خاک با تراکم متوسط عبارتند از: زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) ۳۶/۵، دانسیته (γ) kN/m^3 ۱۵/۳، ضریب پواسون (ν) ۰/۳، مدول الاستیسیته (E) 412 MN/m^2 .

برای مدل‌سازی رفتار تنش کرنش خاک، مدل ساختاری الاستو پلاستیک، به همراه معیار گسیختگی موهر کولمب به کار رفته است. ابعاد مان‌های به کار رفته از نوع چهار گرهی و دوبعدی هستند. ابعاد مان‌های به کار رفته به نحوی انتخاب شده است که ابعاد مربعی شکل باشند. همچنین برای انتقال صحیح موج در مدل‌های عددی ابعاد مان، ΔL ، به طور تقریبی باید از $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{8}$ طول موج λ مربوط به بیشترین فرکانس موج ورودی کمتر باشد [۱۲]. با توجه به حداکثر طول موج در نظر گرفته شده در این مطالعه، ابعاد مجاز مان ۵ سانتی‌متر است. مرزهای جانبی مدل باید آن قدر از دیوار فاصله داشته باشند تا تغییر محسوس از نظر تنش و کرنش در مان‌های مرزی رخ ندهد. با انجام آنالیز حساسیت، خاکریز پشت دیوار تا ۲ متر ادامه پیدا کرده است. در این مسئله، خاک در مرز چپ قابلیت حرکت در جهت قائم را دارد، ولی در مقابل تغییر مکان‌های جانبی محدود است. در حالی که حرکت خاک در مرز مجاور دیوار به وسیله دیوار کنترل می‌شود، تغییر مکان خاک کف (مرز پائین) نیز در جهت قائم و افقی محدود می‌شود. دیوار حائل فولادی با ابعاد و مشخصات مشابه دیوار مدل آزمایشگاهی در FLAC با مان تیر الاستیک (BEAM) مدل‌سازی شده است. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و سازه، سطح تماس بین دیوار و خاک با استفاده از مان‌های مرزی به مدل معرفی می‌شود. نرم‌افزار FLAC در صورت معرفی سختی دیوار و زاویه، قابلیت در نظر گرفتن اندرکنش بین دیوار و خاک را دارد. زاویه اصطکاک دیوار با توجه به فرضیه‌های مربوط به تئوری مونونوبه-اوکابه، ϕ ۲/۳ خاک در نظر گرفته شد. در این مطالعه برای مدل‌سازی دینامیکی با توجه به نوع مصالح، میرایی محلی α_L که تطابق خوبی با میرایی محیط خاکی داشته

کالیبراسیون مدل

برای کسب اطمینان از درستی نتایج مدل عددی مورد مطالعه به کمک نرم افزار ژئوتکنیکی FLAC، نتایج حاصله با نتایج مدل آزمایشگاهی [۱] با شرایط مشابه (مشخصات خاک و ابعاد مدل و دیوار) تحت سربار قائم 50 kPa در فاصله 20 سانتی متر، مقایسه شده و همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، نتایج رانش فعال خاک در حالت انتقالی دیوار، مدل عددی با اختلاف کمتر از 10% درصد با نتایج مدل آزمایشگاهی قابل مقایسه است و این به معنی قابل اعتماد بودن مدل عددی است.



شکل ۲: کالیبراسیون مدل عددی (FLAC) با مدل آزمایشگاهی ($x=20 \text{ cm}, q=50 \text{ kPa}$).

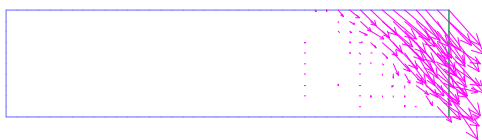
رانش فعال خاک در حالت استاتیکی

یکی از حالت های به وجود آمدن حالت فعال، حرکت انتقالی (T) دیوار است؛ یعنی کل نقاط دیوار، تغییر مکان یکسانی خواهند داشت. دیوار مورد مطالعه، حرکت انتقالی به صورت جسم صلب داشته و سربار قائم نیز به سطح خاکریز اعمال شده است. پس از اعمال سربار در فاصله مورد نظر از دیوار، دیوار حائل حرکت کرده تا خاک با کاهش رانش در نهایت به مرحله فعال برسد.

تعیین ناحیه گسیختگی در خاک

ناحیه گسیختگی، ناحیه ای است که در آن توده خاک به حالت تعادل رسیده است؛ یعنی گسیختگی برشی در آن نقطه در حال رخداد باشد. طبق نظریه رانکین [۷] در عمل تغییر مکان انتقالی و یا دورانی کافی یک دیوار با ارتفاع محدود، در کل توده خاک، نمی تواند حالت فعال ایجاد کند، بلکه تنها در گوه ای از خاک که بین دیوار و

سطح گسیختگی عبورکننده از قاعده دیوار است، رخ می دهد. در حالت محرک زاویه بین سطح گسیختگی و صفحه افقی $\phi/2 + 45^\circ$ درجه است. تحقیقات ماتسوزاوا و همکاران [۱۱] درباره ناحیه گسیختگی به وجود آمده در خاکریز ماسه ای آشکار کرد که در حالت انتقال (T)، ناحیه گسیختگی به طور همزمان از بالا و پایین گسترش یافته و سرانجام برای رسیدن به حالت نهایی متصل می شوند. شکل (۳) ناحیه گسیختگی را در حالت بدون سربار نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، ناحیه گسیختگی به دست آمده از ناحیه پیشنهاد شده توسط رانکین بزرگ تر است. رانکین از اصطکاک بین خاک و دیوار صرف نظر کرده است. شکل (۴) ناحیه گسیختگی را در حالت وجود سربار قائم استاتیکی در فاصله 20 سانتی متری نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، ناحیه گسیختگی غیر خطی بوده و به دلیل وجود سربار، این ناحیه گسترش یافته است.



شکل ۳: تغییر مکان ذرات خاک بدون وجود سربار.

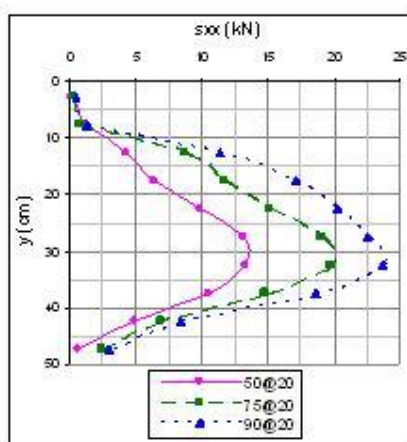


شکل ۴: تغییر مکان ذرات خاک تحت سربار 50 kPa .

تعیین تغییر مکان نسبی جانبی

تغییر مکان دیوار، برای حصول خاک به حالت فعال به عوامل زیادی چون نحوه حرکت دیوار، سربار وارده، دانسیته و زاویه اصطکاک داخلی خاک و همچنین زاویه اصطکاک دیوار بستگی داشته و به سختی قابل استاندارد کردن است. مقدار تغییر مکان جانبی دیوار برای حصول خاک به حالت فعال با عامل S_a نشان داده می شود. منظور از تغییر مکان نسبی، نسبت این عامل به ضخامت خاکریز از پای دیوار (H) است که به طور معمول بر حسب درصد بیان می شود. S_a برای ماسه سست بین 0.2% تا 0.4% درصد و برای ماسه متراکم 0.1% تا 0.2% درصد پیشنهاد شده است [۳]. برای تشخیص تغییر مکان لازم برای فعال شدن خاک، نمودار رانش خاک در هر عمق در

دیوار بیشتر می‌شود. فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل تحت اثر سربارهای ۵۰، ۷۵ و ۹۰ کیلو پاسکال در فاصله ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۳۸، ۳۹ و ۴۰ درصد ارتفاع خاکریز است. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت که با ازدیاد شدت سربار، فاصله محل اثر نیروی برآیند تا قاعده دیوار حائل افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش سربار قسمت بیشتری از رانش تحت تأثیر سربار قرار داشته و در نتیجه نقطه اثر نسبت به قاعده بالاتر می‌آید. نیروی برآیند نیز تحت سربارهای ۵۰، ۷۵ و ۹۰ کیلو پاسکال به ترتیب برابر ۳/۲، ۵/۰ و ۶/۳ کیلو نیوتن است و روند افزایشی رانش با افزایش سربار دیده می‌شود. (شکل ۵)



شکل ۵: تأثیر شدت سربار بر توزیع فشار فعال در برابر ارتفاع دیوار از رأس.

– تأثیر فاصله صفحه بارگذاری (x)

هر چه سربار به دیوار نزدیک‌تر شود، مقدار نیروی رانش فعال کل افزایش یافته و فاصله محل اثر این نیروی برآیند، نسبت به قاعده دیوار بیشتر می‌شود. به عبارتی می‌توان گفت زمانی که فاصله سربار از دیوار حائل کم است، تغییرات آن تأثیر قابل توجهی روی مقدار و شکل توزیع رانش و همچنین مقدار نیروی برآیند و محل اثر آن خواهد گذاشت. با دور شدن سربار از دیوار حائل در ابتدا رانش کل به شدت کاهش می‌یابد و به تدریج با افزایش فاصله سربار تا دیوار حائل، از سرعت کاهش رانش فعال کل کاسته می‌شود. اگر فاصله سربار از دیوار خیلی زیاد شود، رانش فعال وارد به دیوار فقط ناشی از خاک پشت آن خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده

برابر تغییر مکان خاک در عمق نظیر رسم می‌شود. با افزایش جابه‌جایی دیوار، رانش در خاک کاهش یافته و پس از رسیدن به تغییر مکان معینی، رانش‌ها ثابت می‌ماند. رانش ثابت معرف حالت فعال خاک است.

اگر فرض ثنوری کولمب درباره سطح لغزش مسطح و با زاویه $\phi/2 + 45^\circ$ نسبت به افق صحیح در نظر گرفته شود، با ازدیاد زاویه اصطکاک داخلی خاک، ابعاد گوه فعال و سطح گسیختگی کاهش می‌یابد. با کاهش طول سطح شکست، تمام مقاومت برشی خاک زودتر وارد میدان خواهد شد و در نتیجه تغییر مکان کمتری لازم است تا وارد حالت فعال شود. همچنین با ازدیاد دانسیته و در نتیجه تراکم خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز افزایش می‌یابد و بدین ترتیب تغییر مکان کمتری لازم است تا وارد حالت فعال شود. افزایش سربار و نزدیک‌تر شدن سربار به دیوار، مؤلفه نیروی برشی در امتداد صفحه گسیختگی را افزایش می‌دهد؛ افزایش نیروی برشی در امتداد سطح شکست سبب تکمیل سریع‌تر ناحیه گسیختگی می‌شود؛ یعنی در تغییر مکان کمتری حالت فعال رخ می‌دهد. طبق تعریف جدید ایشیاشی و شریف [۵]، حالت فعال وقتی رخ می‌دهد که δ ، زاویه اصطکاک بین دیوار و خاک به حداکثر خود برسد. بدین ترتیب با افزایش زاویه اصطکاک بین دیوار و خاک، حالت فعال زودتر رخ می‌دهد.

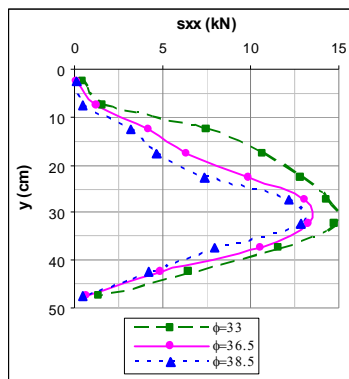
با توجه به تأثیر عوامل متعدد در میزان این تغییر مکان، تغییر مکان بین ۵٪ تا ۷٪ میلی‌متر منجر به فعال شدن خاک شده است.

مطالعه پارامتریک رانش فعال خاک

سربارهای خارجی باعث افزایش فشار افقی وارد به دیوار حائل می‌شوند. رانش کل وارد به دیوار را می‌توان به صورت مجموع رانش حاصل از وزن خاک و حاصل از سربار تنها تعریف کرد. زمانی که یک دیوار حائل از حالت سکون خارج شده و به آن یک تغییر مکان جانبی اعمال می‌شود، مقدار و شکل توزیع فشار جانبی وارد به آن تغییر می‌کند.

– تأثیر شدت سربار (q)

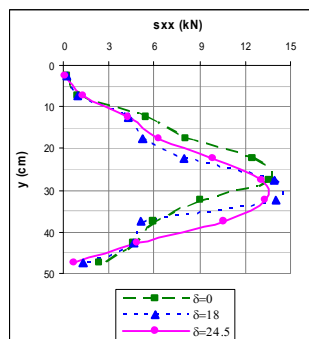
با ازدیاد فشار سربار، مقدار رانش فعال کل افزایش یافته و فاصله محل اثر این نیروی برآیند، نسبت به قاعده



شکل ۷: تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر توزیع فشار فعال در برابر ارتفاع دیوار از رأس ($q=50 \text{ kPa}$ $x=20\text{cm}$).

تأثیر زاویه اصطکاک دیوار (δ)

با افزایش δ ، فشار فعال در قسمت بالایی دیوار افزایش یافته و در نزدیک کف کاهش می‌یابد. یعنی فاصله نقطه اثر برآیند نیروی فشار خاک از کف دیوار با افزایش δ ، افزایش می‌یابد.



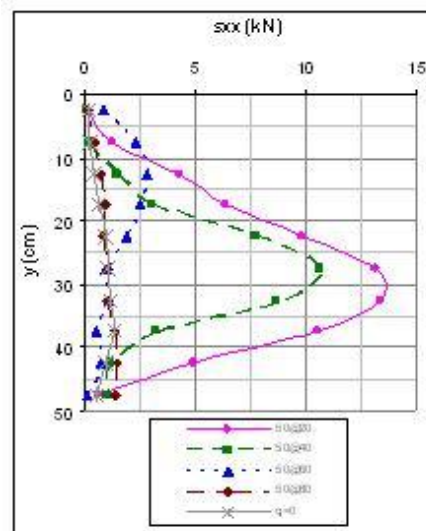
شکل ۸: تأثیر زاویه اصطکاک دیوار بر توزیع فشار فعال در برابر ارتفاع دیوار از رأس ($q=50 \text{ kPa}$ $x=20\text{cm}$).

فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل تحت اثر سربار ۵۰ کیلو پاسکال در فاصله ۲۰ سانتی‌متر، برای زاویه اصطکاک دیوار ۰، $\phi/2$ و ϕ به ترتیب برابر ۴۱، ۳۹ و ۳۸ درصد ارتفاع خاکریز است. نیروی برآیند نیز تحت این سربار برای زاویه اصطکاک دیوار ۰، $\phi/2$ و ϕ به ترتیب برابر ۳/۱، ۳/۱۵ و ۳/۲ کیلو نیوتن است. شکل (۸)

تأثیر عمومی سربار سیکی بر رانش جانبی فعال

آنچه از بررسی خروجی برنامه FLAC پس از تحلیل‌های دینامیکی قابل مشاهده است، این است که

می‌شود، رانش افقی سربار ۵۰ kPa در فاصله ۸۰ cm تا حدودی مشابه رانش افقی خاک بدون سربار است. هر چه فاصله سربار از دیوار حائل بیشتر شود، فاصله محل اثر نیروی برآیند کل نسبت به قاعده دیوار کمتر خواهد شد. فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل تحت اثر سربار ۵۰ کیلو پاسکال در فاصله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۳۸، ۳۹ و ۵۷ درصد ارتفاع خاکریز است. نیروی برآیند نیز تحت این سربار در فاصله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ به ترتیب برابر ۳/۲، ۱/۸۵ و ۰/۷ کیلو نیوتن است.



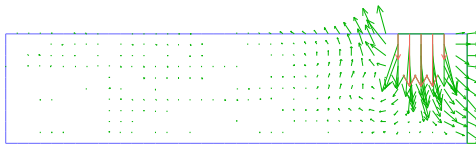
شکل ۹: تأثیر فاصله بر توزیع فشار فعال تحت سربار kPa ۵۰ در برابر ارتفاع دیوار از رأس.

تأثیر زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

با افزایش ϕ ، فشار خاک روی دیوار و ارتفاع مرکز ثقل توزیع فشار خاک فعال کاهش می‌یابد. عامل ϕ به طور مستقیم در مقاومت برشی خاک تأثیر دارد. هر چه مقاومت خاک بیشتر باشد، رانش خاک کمتری در حالت فعال به دیوار وارد می‌شود. فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل تحت اثر سربار ۵۰ کیلو پاسکال در فاصله ۲۰ سانتی‌متری دیوار و زاویه اصطکاک داخلی ۳۳، ۳۶/۵ و ۳۸/۵ به ترتیب برابر ۴۰، ۳۸ و ۵۱ درصد ارتفاع خاکریز است. نیروی برآیند نیز تحت این سربار برای زاویه اصطکاک داخلی ۳۳، ۳۶/۵ و ۳۸/۵ به ترتیب برابر ۴/۱، ۳/۲ و ۲/۷ کیلو نیوتن است شکل (۷).

گوه گسیختگی

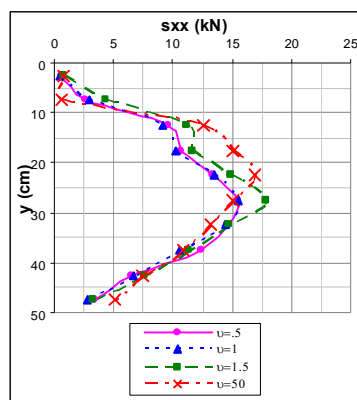
شکل (۱۰) بردارهای تغییرمکان ذرات خاک را نشان می‌دهد. در این شکل سرباری با بزرگی 50 kPa در فاصله 20 cm از دیوار با فرکانس 0.5 Hz به خاکریز اعمال شده است. وجود سربار ناحیه گسترده‌تری از خاک را گسیخته می‌کند. درحالتی که دیوار حرکت می‌کند، این فرصت به المان‌های خاک داده می‌شود تا به سرعت به طرف دیوار حرکت کنند. با دور شدن سربار از دیوار ناحیه گسیختگی نیز گسترش می‌یابد که این موضوع تأثیر سربار بر تشکیل گوه گسیختگی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: تغییرمکان ذرات خاک تحت سربار سیکی
($v=0.5, q=50 \text{ kPa}, x=20 \text{ cm}$)

فرکانس سربار

فرکانس یکی از مهم‌ترین عوامل سربار سیکی است. در محدوده فرکانس‌های کم، تغییرات فرکانس تأثیری جزئی بر افزایش رانش دارد؛ در صورتی که با افزایش فرکانس، رانش وارد بر دیوار در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته و در نهایت ثابت می‌شود. به دلیل فرکانس کم سربار، اثر میرایی خاک به وضوح در منحنی‌های رانش قابل مشاهده نیست.



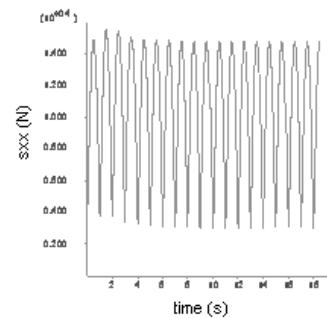
شکل ۱۱: تأثیر فرکانس سربار بر توزیع رانش فعال در برابر ارتفاع دیوار از راس ($q=50 \text{ kPa}, x=20 \text{ cm}$)

افزایش فرکانس بارگذاری منجر به افزایش جزئی مقدار و ارتفاع رانش نسبت به قاعده دیوار می‌شود. بدین ترتیب، فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار

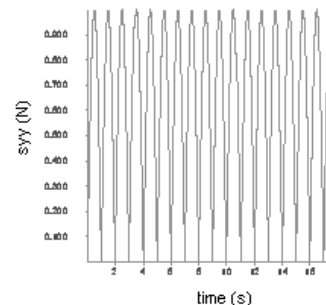
سربار سیکی وارده بر خاکریز پشت دیوار، در پشت دیوار، رانش سیکی ایجاد می‌کند و با وجود اینکه دامنه بار وارده در سیکل‌های مختلف ثابت است، رانش وارد بر دیوار که آن نیز بین یک حداقل و حداکثر تغییر می‌کند، در سیکل‌های مختلف ثابت نیست. با افزایش تعداد سیکل‌ها، رانش وارد به دیوار کاهش می‌یابد تا بعد از تعداد سیکل معینی، منحنی رانش به حالتی ثابت می‌رسد. این حالت ثابت تنش جانبی، مبین حالت فعال در خاک است.

با بررسی تعداد سیکل‌های سربار اعمال شده و تعداد سیکل‌های رانش دینامیکی جانبی دیوار ملاحظه می‌شود که از نظر تعداد مشابه هستند؛ هر چند با وجود اینکه دامنه بار وارده در سیکل‌های مختلف ثابت است، رانش وارد بر دیوار که آن نیز بین یک حداقل و حداکثر تغییر می‌کند، با توجه به وجود میرایی خاک در سیکل‌های مختلف ثابت نیست. (شکل ۹)

با توجه به اینکه پس از چند سیکل خاک به حالت فعال می‌رسد، افزایش تعداد سیکل‌ها تأثیری بر تنش‌های افقی نداشته است، زیرا تنش‌ها در خاک پس از رسیدن به حالت فعال ثابت باقی می‌ماند. هر چند افزایش سیکل‌ها منجر به افزایش کرنش‌های برشی در خاک می‌شود، خاک پس از حدود ۵ سیکل به حالت فعال می‌رسد.



a) تعداد سیکل رانش



b) تعداد سیکل بارگذاری

شکل ۹: مقایسه سیکل‌های بارگذاری و سیکل‌های نظیر رانش خاک ($q=50 \text{ kPa}, x=20 \text{ cm}$)

- تأثیر شدت سربار (q)

روابط بین تنش و کرنش خاک، به عنوان جسمی غیر الاستیک، غیرخطی است. بنابراین نمی‌توان مطمئن بود که بین بزرگی سربار سیکلی و بزرگی رانش دیوار رابطه‌ای مستقیم وجود داشته باشد. شکل (۱۳) نشان‌دهنده تأثیر مقدار سربار بر رانش جانبی در یک نقطه یکسان است.

همان طور که مشاهده می‌شود با افزوده شدن مقدار سربار سیکلی، رانش نیز افزایش می‌یابد. فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل تحت اثر سربارهای ۵۰، ۷۵ و ۹۰ کیلو پاسکال در فاصله ۲۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۴۲، ۴۲ و ۴۲ درصد ارتفاع خاکریز است. یعنی با ازدیاد شدت سربار، فاصله محل اثر نیروی برآیند تا قاعده دیوار حائل تا حدودی ثابت می‌ماند. نیروی برآیند نیز تحت سربارهای ۵۰، ۷۵ و ۹۰ کیلو پاسکال به ترتیب برابر ۴/۹، ۶/۴ و ۸/۰ کیلو نیوتن است و روند افزایشی رانش با افزایش سربار دیده می‌شود.

- تأثیر فاصله سربار سیکلی

تأثیر سربار سیکلی مانند سربار استاتیک در فواصل نزدیک به دیوار بسیار شدید است، اما این تأثیر با دور شدن سربار از دیوار کاهش می‌یابد. با دور شدن سربار سیکلی، مقدار حداکثر و حداقل منحنی‌های رانش در طی زمان کاهش می‌یابد و تأثیر غالب در مقدار و توزیع رانش فعال، خاک است. در این حالت با افزایش فاصله از دیوار، رانش جانبی نیز به سمت سطح حرکت کرده و در نتیجه محل اثر برآیند کل به سمت بالا حرکت کرده است. فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل تحت اثر سربار سیکلی با بزرگی ۵۰ کیلو پاسکال در فاصله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۴۲، ۴۵ و ۴۸ درصد ارتفاع خاکریز است. نیروی برآیند نیز تحت این سربار در فاصله ۲۰، ۴۰ و ۶۰ به ترتیب برابر ۴/۹، ۳/۳ و ۲/۱ کیلو نیوتن است. شکل (۱۴)

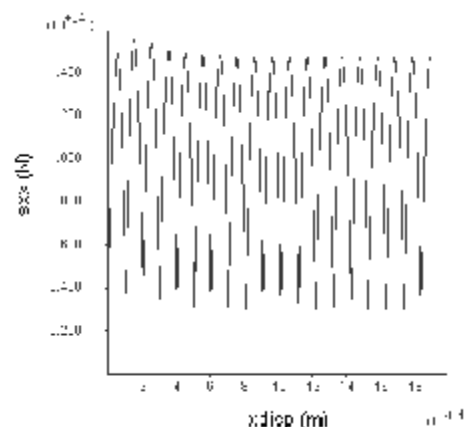
- تأثیر اصطکاک داخلی خاک (φ)

شکل (۱۵) نشانگر تأثیر φ بر منحنی رانش جانبی سیکلی، بر یک نقطه از دیوار است. آنچه که از شکل‌ها مشخص است، این است که با افزایش φ، رانش جانبی وارد بر دیوار کاهش می‌یابد. با افزایش φ خاک، یکپارچگی و

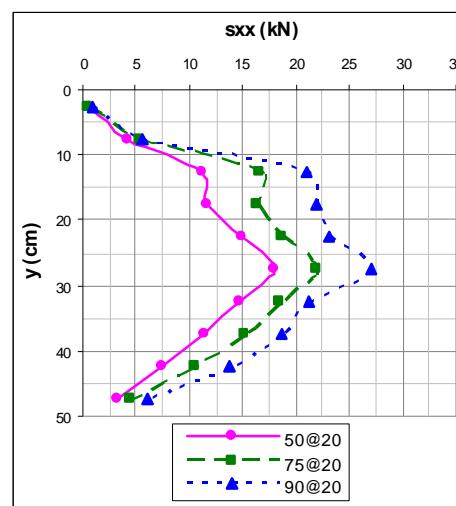
حائل تحت اثر سربار با بزرگی ۵۰ کیلو پاسکال و فرکانس بارگذاری ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۵۰ هرتز در فاصله ۲۰ سانتی‌متری دیوار به ترتیب برابر ۴۰، ۴۱، ۴۲ و ۴۲ درصد ارتفاع خاکریز است. نیروی برآیند نیز تحت سربار ذکر شده با فرکانس بارگذاری ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۵۰ هرتز به ترتیب برابر ۴/۶، ۴/۷ و ۴/۹ و ۵ کیلو نیوتن است. شکل (۱۱)

تعیین تغییر مکان نسبی جانبی

با توجه به اینکه در این حالت نمودار رانش، نموداری سیکلی است، اظهار نظر درباره تغییر مکان دقیق معادل حالت فعال شدن مشکل است. بدین علت تغییر مکان معادل فعال شدن به صورت یک بازه تعریف می‌شود (۰.۴-۰.۸ میلی‌متر شکل (۱۲))



شکل ۱۲: تغییرات رانش افقی خاک نسبت به تغییر مکان افقی دیوار (v=0.5, q=50 kPa, x=20cm).



شکل ۱۳: تأثیر بزرگی سربار سیکلی بر رانش خاک در برابر ارتفاع دیوار از راس (v=1.5 Hz, x=20cm).

نتیجه گیری

نوع و مقدار حرکت دیوار در رانش وارد بر آن مؤثر است. اگر دیوار حائل از خاک دور شود، رانش وارد به آن نسبت به حالت ساکن کاهش می یابد. رانش، حاصل رانش فعال است که با انتقال دوران حول کف و دوران حول رأس دیوار یا ترکیبی از آنها رخ می دهد. به طور کلی تأثیر مقدار، محل اثر، نوع سربار، مشخصات مکانیکی خاک و همچنین شرایط دیوار روی مقدار و شکل توزیع حاصل از سربار، در هر یک از حالت های فعال مشابه است. ولی نقطه اثر آنها در هر حالت متفاوت است.

برآیند رانش جانبی در حالت سربار سیکی نسبت به حالت استاتیکی مشابه، بیشتر است. همچنین ارتفاع نقطه اثر نیروی برآیند نسبت به پای دیوار در این حالت نسبت به حالت استاتیکی مشابه بزرگ تر است؛ هر چند ثابت مانده است جدول (۱).

جدول ۱: مقایسه مقدار و نقطه اثر برآیند رانش جانبی در حالت استاتیکی و سیکی (سربار متغییر).

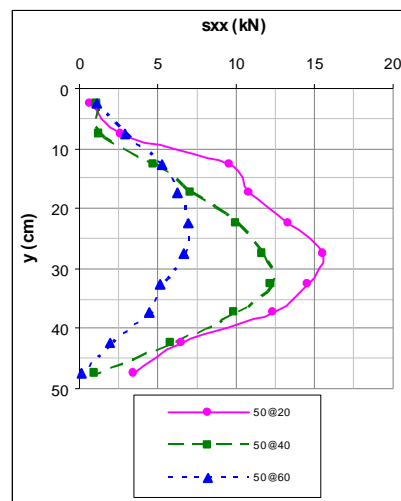
بزرگی سربار (kPa)	نسبت ارتفاع نقطه اثر برآیند رانش از قاعده به ارتفاع دیوار		برآیند رانش جانبی (kPa)	
	استاتیکی	سیکی	استاتیکی	سیکی
۵۰	٪۳۸	٪۴۲	۳/۲	۴/۹
۷۵	٪۳۹	٪۴۲	۵/۰	۶/۴
۹۰	٪۴۰	٪۴۲	۶/۳	۸/۰

جدول ۲: مقایسه مقدار و نقطه اثر برآیند رانش جانبی در حالت استاتیکی و سیکی (فاصله سربار متغییر).

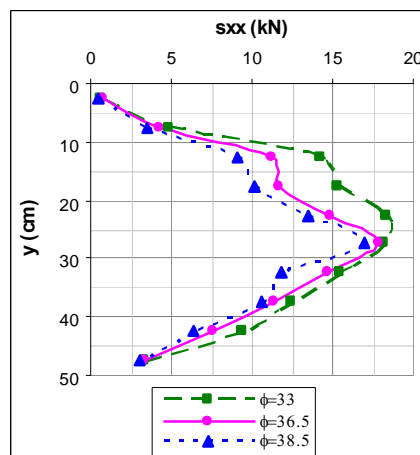
فاصله سربار (cm)	نسبت ارتفاع نقطه اثر برآیند رانش از قاعده به ارتفاع دیوار		برآیند رانش جانبی (kPa)	
	استاتیکی	سیکی	استاتیکی	سیکی
۲۰	٪۳۸	٪۴۲	۳/۲	۴/۹
۴۰	٪۳۹	٪۴۵	۱/۸۵	۳/۳
۶۰	٪۵۷	٪۴۸	۰/۷	۲/۳

نزدیک شدن سربار سیکی به دیوار مانند حالت استاتیک، سبب افزایش رانش جانبی می شود. اما با

مقاومت اصطکاک بین ذرات خاک سبب می شود که ساختمان ذرات خاک مقدار بیشتری از تنش را به مرز پایین و المان های جانبی خاک منتقل کند و در نتیجه رانش کمتری به دیوار حایل وارد می شود. با افزایش ضریب اصطکاک داخلی، نقطه اثر برآیند رانش جانبی به قاعده نزدیک تر می شود. فاصله تقریبی محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل تحت اثر سربار سیکی با بزرگی ۵۰ کیلو پاسکال در فاصله ۲۰ سانتی متری دیوار و زاویه اصطکاک داخلی ۳۳، ۳۶/۵ و ۳۸/۵ به ترتیب برابر ۴۳، ۴۲ و ۴۱ درصد ارتفاع خاکریز است. نیروی برآیند نیز تحت این سربار برای زاویه اصطکاک داخلی ۳۳، ۳۶/۵ و ۳۸/۵ به ترتیب برابر ۵/۶، ۴/۹ و ۴/۳ کیلو نیوتن است.



شکل ۱۴: تأثیر فاصله سربار سیکی بر رانش خاک در برابر ارتفاع دیوار از راس ($v=1.5 \text{ Hz}$, $q=50 \text{ kPa}$).



شکل ۱۵: تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر رانش خاک در برابر ارتفاع دیوار از راس ($v=1.5 \text{ Hz}$, $x=20 \text{ cm}$, $q=50 \text{ kPa}$).

دیوار نیز افزایش می‌یابد و مقدار تغییر مکان نسبی کمتری لازم است تا خاک وارد مرحله فعال شود.

با ازدیاد دانسیته نسبی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و همچنین افزایش مقاومت خاک، مقدار رانش کاهش می‌یابد و مقدار تغییر مکان کمتری لازم است تا خاک به حالت فعال برسد. شکل توزیع فشار جانبی تا حدودی مستقل از دانسیته نسبی، زاویه اصطکاک خاک و دیوار و مقدار فشار خاک است، ولی به محل اعمال بار وابسته است. به طور کلی ارتفاع نقطه اثر برآیند رانش جانبی در حالت انتقال (T) بین ۳۸ تا ۴۰ درصد ارتفاع دیوار نسبت به پای دیوار است.

اعمال سربار سیکلی قائم به سطح خاکریز باعث ایجاد رانش سیکلی روی دیوار حائل می‌شود. تأثیر سربار سیکلی بر خاک پشت دیوار اثری کاملاً محسوس داشته و رانش جانبی تابع زمان ایجاد می‌کند. تأثیر میزان بار و محل اعمال آن و مشخصات مکانیکی خاک و دیوار در حالت استاتیکی و سیکلی تأثیر مشابهی دارند، هر چند در حالت سیکلی مقادیر رانش قابل توجه‌تر هستند.

رانش حاصل از سربار سیکلی تابعی از بزرگی، فاصله، فرکانس و تعداد سیکل‌های سربار اعمال شده است. به دلیل واسطه‌بودن خاک در انتقال اثر سیکلی به دیوار، تفاوت بین حداقل و حداکثر منحنی رانش ثابت نیست و تابع خاصیت پلاستیک و میراکنندگی خاک است. در حالتی که سربار سیکلی وجود دارد و دیوار منتقل می‌شود، تشخیص اینکه در کجا خاک فعال شده است، بسیار مشکل است و تنها می‌توان محدوده‌ای برای این جابه‌جایی در نظر گرفت. به طور کلی ارتفاع نقطه اثر برآیند رانش جانبی در حالت انتقال (T) بین ۴۲ تا ۴۵ درصد ارتفاع دیوار نسبت به پای دیوار است و نسبت به حالت استاتیکی به سطح نزدیک‌تر شده است.

بزرگ‌تر شدن سربار رانش جانبی، به صورت خطی افزایش نمی‌یابد. به همین ترتیب با دور شدن سربار سیکلی از دیوار، دامنه نوسان رانش دینامیکی نیز کاهش می‌یابد. برآیند رانش جانبی و ارتفاع نقطه اثر آن در حالت سربار سیکلی نسبت به حالت استاتیکی مشابه، تا حدودی بیشتر است جدول (۲).

جدول ۳: مقایسه مقدار و نقطه اثر برآیند رانش جانبی در حالت استاتیکی و سیکلی (ϕ متغیر).

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	نسبت ارتفاع نقطه اثر برآیند رانش از قاعده به ارتفاع دیوار		برآیند رانش جانبی (kPa)	
	استاتیکی	سیکلی	استاتیکی	سیکلی
۳۳	٪۴۰	٪۴۳	۴/۱	۵/۶
۳۶/۵	٪۳۸	٪۴۲	۳/۲	۴/۹
۳۸/۵	٪۵۱	٪۴۱	۲/۷	۴/۳

با ازدیاد زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و افزایش مقاومت خاک، مقدار رانش کاهش می‌یابد. توزیع رانش، تابع زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)، نیست. برآیند رانش جانبی در حالت سربار سیکلی نسبت به حالت استاتیکی مشابه، بیشتر است. همچنین ارتفاع نقطه اثر نیروی برآیند نسبت به پای دیوار در این حالت نسبت به حالت استاتیکی مشابه بزرگ‌تر است. جدول (۳)

جمع‌بندی

اعمال سربار استاتیکی قائم منجر به اعمال رانش افقی استاتیکی روی دیوار می‌شود. با ازدیاد شدت سربار و نزدیک کردن محل اعمال آن به دیوار، مقدار رانش وارد به

مراجع

- 1- Mirhosseini, S. M. and Nikkha, M. (). "Development of a physical model to study the lateral earth pressure under static and cyclic surcharges", *Fanni Technical Journal*, Vol. 37, No.1, PP. 47-62
- 2- Okabe, S. (1924). "General theory on earth pressure and seismic stability of retaining walls and dams." *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 6.
- 3- Clough, G. W. and Duncan, J. M. (1971). "Finite element analyses of retaining wall behaviour." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 12, PP. 1657-1673
- 4- Sherif, M. M and R. D. Mackey (1977). "Pressure on Retaining wall with Repeated Loading." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, No. 11, PP. 1341-1343

- 5- Sherif, M. A., Ishibashi, I. and Lee, C.D. (1982). "Earth pressures against rigid retaining walls." *Journal of Geotechnical Engineering*. American Society of Civil Engineers. Vol. 108, No. 5, PP. 679-695.
- 6- Paik, K. H. and Salgado, R. (2003). "Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects." *J. Geotechnique*, Vol. 53, No.7, PP. 643-653
- 7- Rankin, W. J. M. (1857). "Theory on stability of loose earth based on ellipse of stress." *Phil. Trans. Royal Soc.* Vol. 147.
- 8- Nikkhab, M. (2004). *Investigation of earth pressure on retaining walls under cyclic surcharges*, Ph.D. Thesis, Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
- 9- Itasca. (2000) *FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) User's Manuals*. Minneapolis: Itasca consulting Group, Inc.
- 10- Mononobe, N. (1929). "Earthquake proof construction of masonry dams." *Proc. World Engineering Congress*, Tokyo, Vol. 9, PP. 275.
- 11- Matsuzawa, H and Hazarika, H and sugimura, M. (1995). "Wall movement Modes Dependent Dynamic active earth pressure Analysis using cracked element." *Proc. Third Int. Con. on rec. Adv in Geo. Earth. Eng.* PP. 331-334.
- 12- Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969). "Finite dynamic model for infinite media." *J. Eng., Mech.* PP. 859-887.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Time Step
- 2 - Initial Equilibrium
- 3 - Plane Strain