

## تحلیل عددی رانش سکون خاک بر دیوار حائل صلب تحت اثر سربارهای سیکی

سید مجدالدین میر محمد حسینی<sup>۱\*</sup> و محسن کارگر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست- دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- خاک و پی- دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(تاریخ دریافت: ۸۴/۹/۱۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۸۹/۸/۱۷، تاریخ تصویب: ۸۹/۱۱/۲۶)

### چکیده

یکی از عوامل اصلی در طراحی دیوارهای حائل، تعیین رانش وارد بر آنها است. در این مقاله برای مطالعه رانش سکون خاک به دیوارهای حائل صلب، مجموعه خاک و دیوار توسط برنامه FLAC دو بعدی مدل سازی می شود. مدل عددی از لحاظ مشخصات هندسی و مکانیکی، با توجه به مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه، تهیه شده و برای کنترل درستی عملکرد آن، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود. سپس سربارهای سیکی با دامنه و فرکانس های مختلف در فواصل متفاوت از دیوار، بر خاک ماسه خشک پشت دیوار اعمال می شود و شکل توزیع رانش وارد بر دیوار، مقدار نیروی برآیند و نقطه اثر آن مورد بررسی قرار می گیرد. تأثیر عوامل مختلف خاک و بارگذاری نیز بر رانش سیکی مطالعه شده است. نتایج مدل نشان می دهد که توزیع رانش خاک به دیوار حائل تحت اثر سربار، غیر خطی است و مقدار رانش در حالت اعمال بار سیکی در مقایسه با بار استاتیکی، به طور قابل ملاحظه ای افزایش پیدا می کند.

**واژه های کلیدی:** رانش خاک در حالت سکون، دیوار حائل، سربار سیکی، مدل عددی، مدل فیزیکی

### مقدمه

فرض می شود که مقدار مدول برشی و شتاب نسبت به عمق در کل خاکریز ثابت بوده و فقط فاز شتاب تغییر می کند. Sun و Lin فرمولاسیون دینامیکی را برای تعیین رانش دینامیکی خاک ارائه کردند [۴].

تحقیق های متعددی شامل ارائه روش های تحلیلی، ساخت مدل های فیزیکی، مشاهده های عینی در پروژه های واقعی و تحلیل های عددی با استفاده از برنامه نویسی کامپیوتر و یا نرم افزارهای ژئوتکنیکی نیز برای مطالعه رانش استاتیکی و دینامیکی خاک انجام شده است. Ishibashi و Sherif رانش خاک بر دیوارهای حائل صلب را مورد مطالعه قرار دادند [۵]. Nadim و Whitman نیز روش های محاسبه رانش خاک تحت بار زلزله را بررسی کردند [۶، ۷].

Mackey و Sherif در سال ۱۹۷۷ با ساخت یک مدل آزمایشگاهی، رانش وارد بر دیوار حائل تحت اثر بار سیکی با تعداد سیکل ها و فواصل مختلف از دیوار را در شرایط سکون بررسی کردند [۸]. آزمایش ها در مخزنی با صفحات فولادی به ابعاد داخلی ۱۲۰×۱۲۰×۴۷ سانتی متر انجام شده است. مدل دیوار حائل صلب در یکی از وجوه جانبی مخزن قرار داشته و فشارها توسط هشت فشارسنج

یکی از عوامل اصلی در طراحی اقتصادی و ایمن دیوارهای حائل در حالت سکون مانند دیوارهای زیرزمین و کوله پل ها، شناخت کمی و کیفی رانش وارد بر این دیوارها است. روش های تحلیلی و مدل های آزمایشگاهی بسیاری برای تخمین رانش خاک تحت بارگذاری های دینامیکی ارائه شده است. اما به دلیل ابهام هایی که در شناخت مقدار و نحوه توزیع اضافه رانش دینامیکی خاک بر دیوارهای حائل و نیز پیچیدگی مسئله اندرکنش خاک و دیوار وجود دارد، هنوز این مطلب جای تحقیق و بررسی زیادی دارد. از طرفی خرابی تعدادی از دیوارهای حائل که بار وسایل نقلیه سنگین را تحمل می کردند، بیانگر ضرورت شناخت تأثیر سیکی بودن بار بر رانش وارد بر این گونه دیوارها است.

در تحلیل دیوارهای حائل تحت بارهای دینامیکی، استفاده از روش کلاسیک مونونوب-اکابه (Mononobe-Okabe) که یک تحلیل شبه استاتیکی است، متداول است [۲، ۱]. Zeng و Steedman روش تحلیل شبه دینامیکی را ارائه کردند که در آن اثر تغییر فاز شتاب نیز در نظر گرفته شده است [۳]. این روش بر اساس سرعت موج برشی محدود استوار است و در آن

که با استفاده از این مدل می‌توان مورد مطالعه و تحقیق قرار داد. به کمک این مدل آزمایش‌های وسیعی نیز انجام گرفته است. در آزمایش‌های سیکلی تأثیر عواملی مانند دانسیته نسبی خاک (Dr)، شدت سربار (q)، فاصله محل سربار تا دیوار (x)، طول صفحه بارگذاری (L)، تعداد سیکل سربار و فرکانس سربار (f) در رانش سیکلی خاک در حالت سکون مورد ارزیابی قرار گرفته است.

از مجموعه آزمایش‌های سیکلی در حالت سکون دیوار، این نتیجه حاصل شده که اعمال سربار سیکلی قائم به سطح خاکریز باعث ایجاد رانش سیکلی روی دیوار حائل می‌شود. وقتی سربار قائم از مقدار حداقل تا حداکثر مقدار خود در سیکل‌های مختلف تغییر می‌کند، فشارهای جانبی نیز بین حداقل و حداکثر در هر سیکل تغییر می‌کند. با وجود اینکه مقادیر حداقل و حداکثر سربار قائم در سیکل‌های مختلف یکسان و ثابت هستند، مقادیر حداقل و حداکثر رانش ثابت نبوده و در سیکل‌های مختلف تغییر می‌کند. با افزایش تعداد سیکل بار، مقادیر حداکثر فشار جانبی کاهش می‌یابد؛ در حالی که مقادیر حداقل آن رو به افزایش می‌گذارد. سرعت کاهش مقادیر حداکثر و افزایش مقادیر حداقل رانش به تدریج با افزایش سیکل‌ها کاهش یافته و همان‌طور که سیکل‌های بار ادامه می‌یابد، این تغییرات کند شده و رانش به وجود آمده به طرف سیکل‌های ثابت و یکسانی میل می‌کند.

### مدل‌سازی عددی

رانش خاک در حالت سکون تحت اثر سربارهای سیکلی با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. برای تحلیل سیستم خاک و دیوار تحت اثر سربار لازم است شرایط سه بعدی واقعی محیط را در مدل‌سازی عددی نیز مدنظر قرار داد. در مدل‌سازی مجموعه خاک و دیوار موجود در آزمایشگاه، با توجه به اینکه در آزمایش‌ها طول صفحه بارگذاری تا حدودی برابر با عرض دیوار بوده است، بنابراین در هر مقطع عرضی از مدل فیزیکی، شرایط کاملاً یکسان خواهد بود. در نتیجه می‌توان مدل عددی را به شکل دو بعدی و در شرایط کرنش صفحه‌ای در نظر گرفت. بنابراین برای مدل‌سازی، برنامه FLAC دو بعدی که بر مبنای روش تفاضل‌های محدود است، انتخاب شده است.

الکتریکی که در قسمت مرکزی دیوار نصب شده‌اند، اندازه‌گیری شده است. 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. Kim و Barker اثر سربارهای زنده را بر دیوارهای حائل و کوله پل‌ها بررسی کردند و روش تحلیلی غیر کلاسیک برای تخمین شدت رانش خاک بر دیوار حائل ارائه کردند [۹]. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که فشار ایجادشده پشت دیوار در قسمت بالایی دیوار بیشتر بوده و در عمق به شکل غیر خطی مستهلک می‌شود.

رفتار تنش-کرنش خاک تحت بارهای سیکلی با استفاده از دستگاه سه محوری مکعبی ساده (SCTA) مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۰، ۱۱، ۱۲]. این دستگاه شامل محفظه نمونه، سیستم بارگذاری و سیستم ثبت اطلاعات داده است که قابل استفاده برای آزمایش تحت بارگذاری‌های یکنواخت و سیکلی است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تراکم نسبی خاک نقش مهمی را در رانش جانبی خاک ایفا می‌کند. هر چه خاک متراکم‌تر باشد، رانش کمتری وجود خواهد داشت و روند کاهش حداقل رانش سیکلی به دلیل افزایش تراکم خاک با افزایش تعداد سیکل‌ها است.

### مدل فیزیکی

برای بررسی رفتار دیوار حائل بر اثر بارگذاری سیکلی مدل فیزیکی در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه امیرکبیر ساخته شده است. این مدل برای مطالعه رانش خاک تحت اثر سربارهای استاتیکی و سیکلی قائم ساخته شده است و شامل چهار قسمت اصلی مخزن آزمایش، مدل دیوار حائل، سیستم بارگذاری و سیستم قرائت و ضبط داده‌ها است [۱۳].

با استفاده از این دستگاه می‌توان برای خاک‌های مختلف با مقادیر متفاوت تراکم، توزیع رانش، مقدار نیروی برآیند و محل نقطه اثر آن را برای حالت‌های مختلف بررسی کرد. رانش استاتیکی خاک در حالت سکون، تأثیر نوع حرکت دیوار روی رانش فعال، رانش خاک تحت اثر سربارهای قائم استاتیکی و سیکلی از جمله مواردی است

شود، آنگاه طبق محاسبات زیر حداکثر بعد شبکه برای انتقال صحیح امواج در مدل ۰/۰۵ متر خواهد بود:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{1.58 \times 10^7}{1530}} = 101.6 \frac{m}{s}$$

$$\begin{cases} \lambda = \frac{V_s}{f} \\ \Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \end{cases} \Rightarrow \Delta L \leq \frac{V_s}{10f} = \frac{101.6}{10 \times 200} \approx 0.05 m \quad (2)$$

در این روابط  $V_s$  سرعت موج برشی،  $G$  مدول برشی دینامیکی خاک،  $\rho$  چگالی خاک،  $\lambda$  طول موج،  $f$  فرکانس بار و  $\Delta L$  بعد شبکه است. علاوه بر این، انتخاب ابعاد کوچکتر، سبب ایجاد گام زمانی کوچک برای پایدار بودن مدل و در نتیجه افزایش زمان حل مسئله خواهد شد، زیرا حداکثر گام زمانی لازم برای پایداری در آنالیزهای دینامیکی توسط بزرگترین سختی مصالح و کوچکترین ابعاد شبکه در مدل تعیین می‌شود.

برای مدل‌سازی دیوار از المان خمشی تیر (Beam Element) استفاده شده است. از آنجایی که دیوار در مدل فیزیکی شامل یک صفحه فولادی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر بوده است، عوامل هندسی این المان شامل  $A$  سطح مقطع و  $I$  ممان اینرسی در واحد طول دیوار به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{cases} A = 0.1 \text{ m}^2 \\ I = 0.000833 \text{ m}^4 \end{cases} \quad (3)$$

برای تعیین مدول الاستیسیته دیوار در شرایط کرنش مسطح باید از رابطه ۴ استفاده کرد [۱۵] که با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته فولاد  $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$  و ضریب پواسون  $\nu = 0.3$ ،  $E_{PS} = 2.2 \times 10^{11} \text{ Pa}$  خواهد بود. از آنجایی که دیوار در شرایط صلب و ثابت در مسئله مد نظر است، همه گره‌های این المان در برابر حرکت انتقالی در راستای افق، قائم و نیز دوران مقید شده است.

$$E_{Plane Strain} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (4)$$

برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و دیوار از المان درز (Interface) استفاده شده است. این المان با ضخامت صفر در یک وجه به المان تیر و در وجه دیگر به شبکه خاک متصل است. سختی عمودی و برشی این المان با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌شود که بیانگر ۱۰

ابعاد هندسی مدل عددی با توجه به ابعاد در مدل فیزیکی و به‌گونه‌ای انتخاب شده است که مرزها در نتایج تحلیلی مدل تأثیرگذار نباشند. مدل عددی شامل توده خاک به ابعاد ۱/۵ متر عرض و ۰/۶ متر ارتفاع است که دیوار حائل در مرز سمت راست مدل به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر قرار گرفته است. ۱۰ سانتی‌متر خاک زیر دیوار به دلیل عدم تأثیرگذاری مرز پایینی مدل بر نتایج تحلیل است. در مرز قائم سمت چپ که دیوار وجود ندارد و ۱۰ سانتی‌متر پایین مرز سمت راست با قرار دادن تکیه‌گاه غلتکی از حرکت دیوار در راستای افق جلوگیری شده است. در مرز پایینی مدل نیز از تکیه‌گاه مفصلی استفاده شده و از حرکت توده خاک در دو راستای افقی و قائم جلوگیری شده است.

خاک پشت دیوار از مصالح ماسه‌ای خشک است که وزن مخصوص آن برابر  $1530 \text{ kg/m}^3$  با توجه به مشخصات آزمایشگاهی خاک با تراکم نسبی ۵۵ درصد مورد استفاده در مخزن مدل فیزیکی است. مدل رفتاری برای مصالح خاک مدل الاستوپلاستیک کامل موهر-کولومب در نظر گرفته شده است. عوامل الاستیک خاک شامل مدول الاستیسیته و ضریب پواسون عبارت از  $\nu = 0.3, E = 4.1 \times 10^7 \text{ Pa}$  هستند.

عوامل پلاستیک مدل موهر-کولومب شامل چسبندگی  $C$ ، زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$ ، مقاومت کششی  $T$  و زاویه اتساع  $\psi$  هستند که با توجه به مشخصات آزمایشگاهی خاک دانه‌ای مورد استفاده در مدل فیزیکی مقادیر ذیل در نظر گرفته شده است:

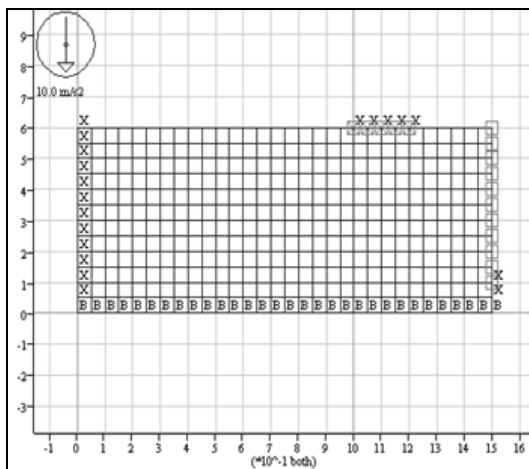
$$\begin{aligned} C = 0, T = 0 \\ \phi = 36.5^\circ, \psi = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

در مدل از شبکه‌های مربعی با ابعاد ۵ سانتی‌متر استفاده شده است، زیرا برای انتقال صحیح امواج در شبکه محاسباتی و بروز پیدا نکردن مشکلات عددی، لازم است بعد هر المان در شبکه محاسباتی از یک‌دهم طول موج مرتبط با بزرگترین فرکانس موج و یا فرکانس حاکم در ارتعاش آزاد سیستم کوچکتر باشد [۱۵]. از آنجایی که طول موج برابر نسبت سرعت انتقال موج در محیط (سرعت موج برشی) به فرکانس است، بزرگ‌ترین ابعاد برای شبکه به بزرگ‌ترین فرکانس بار ورودی بستگی دارد. بنابراین اگر فرکانس بارگذاری حداکثر ۲۰۰ هرتز فرض

بارگذاری در مدل عددی باید به شکل موج‌های سینوسی در نظر گرفته شود. در عمل نیز سیکلی بودن بار می‌تواند مربوط به نزدیک و دور شدن وسیله نقلیه در راهی باشد که در کنار آن دیوار حائل ساخته شده است، ولی به دلیل اینکه بارگذاری سینوسی باعث ایجاد کشش در سطح خاک می‌شود و فرض می‌شود خاک، بار کششی تحمل نمی‌کند، باید از نیم موج‌های سینوسی استفاده شود. بنابراین بارگذاری به شکل رابطه ۸ تعریف می‌شود:

$$\sigma_y = A \cdot \text{abs}[\sin(2\pi f \cdot t)] \quad (۸)$$

در این رابطه  $A$  بیانگر دامنه بارگذاری سینوسی،  $f$  فرکانس بارگذاری و  $\text{abs}$  علامت قدرمطلق است. در شکل ۱ کلیات مدل تعریف‌شده در برنامه FLAC، شبکه‌بندی خاک، قیدهای خاک، دیوار و صفحه بارگذاری نشان داده شده است.



شکل ۱: شکل کلی مدل عددی.

## بررسی نتایج اولیه و کنترل درستی عملکرد مدل عددی

یک مدل عددی زمانی نتایج ارزش‌مند و قابل قبول خواهد داشت که درستی عملکرد مدل ساخته‌شده تأیید شده باشد. در این مقاله، نتایج مدل فیزیکی ساخته‌شده در آزمایشگاه به عنوان معیار تأیید درستی عملکرد مدل عددی قرار گرفته است. لازم به یادآوری است که مدل عددی کاملاً مشابه با مدل فیزیکی از لحاظ مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح بوده و نتایج قابل مقایسه است.

در شکل (۲) نتایج رانش حاصل از سربار استاتیکی  $q = 90 \text{ kPa}$  به عرض  $20$  سانتی‌متر که در فاصله  $x = 20 \text{ cm}$  از دیوار اعمال شده است، با نتایج

برابر سختی معادل کوچک‌ترین شبکه خاک مجاور است [۱۵]:

$$K_n = K_s \approx 10 \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (۵)$$

در این رابطه  $K_n$  و  $K_s$  سختی عمودی و برشی المان درز،  $K$  مدول بالک،  $G$  مدول برشی خاک و  $\Delta Z_{\min}$  کوچک‌ترین اندازه شبکه مجاور در جهت عمود بر المان Interface است. با توجه به رابطه ۵، مقادیر سختی عبارت از  $K_n = K_s = 1.0 \times 10^{10} \text{ Pa/m}$  هستند. زاویه اصطکاک المان Interface نیز برابر دو سوم زاویه اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شده است:

$$\varphi_{\text{int}} = \frac{2}{3} \varphi_{\text{soil}} = 24.5^\circ \quad (۶)$$

مقادیر تنش‌های افقی اولیه  $\sigma_{xx}$ ،  $\sigma_{zz}$  با استفاده از رابطه ۷ به برنامه اعمال می‌شود. هر چند درستی رابطه ۷ فقط برای خاک‌های سست تأیید شده و در خاک‌های متراکم مقادیر تنش‌های افقی اولیه بسته به میزان تراکم نسبی بیشتر است، ولی از آنجایی که در نتایج تحلیل‌ها فقط اثر ناشی از سربار مد نظر بوده و اثر فشار افقی اولیه خاک از فشار افقی مجموعه خاک و سربار کسر شده، از این رابطه استفاده شده است:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = (1 - \sin \varphi) \sigma_{yy} \quad (۷)$$

برای اعمال سربار به خاک پشت دیوار و مدل کردن صفحه بارگذاری، با توجه به وجود صفحه فلزی در مدل فیزیکی، در مدل عددی نیز از Beam Element استفاده شده است. حرکت همه گره‌های این المان در راستای افق و دوران مقید شده است. برای در نظر گرفتن حرکت صلب صفحه بارگذاری و ایجاد نشست‌های یکنواخت، حرکت همه گره‌های المان تیر در راستای قائم با وابسته کردن تغییر مکان گره‌ها در راستای قائم انجام پذیرفته است.

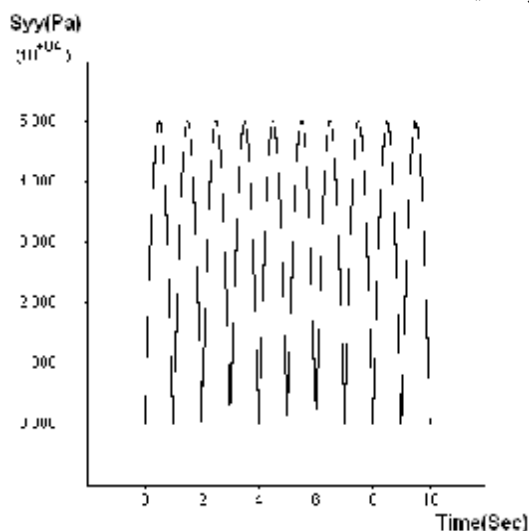
برای میرایی دینامیکی مصالح از میرایی محلی با نسبت میرایی ۵ درصد استفاده شده است. این نوع میرایی مستقل از فرکانس است و نیازی به تخمین فرکانس طبیعی سیستم مدل‌شده نیز ندارد [۱۵].

با توجه به اینکه سیستم بارگذاری سیکلی در آزمایشگاه به صورت بارگذاری و باربرداری متوالی بوده،

## بررسی نتایج مدل عددی در حالت اعمال سربار سیکلی

در شکل (۴) بارگذاری سیکلی نمونه با دامنه  $50 \text{ kPa}$  و فرکانس برابر با  $0.5 \text{ Hz}$  برای  $10$  سیکل بار نشان داده شده است. در شکل (۵) منحنی رانش سیکلی در محل وسط دیوار رسم شده است. شکل نشان‌دهنده آن است که اعمال سربار سیکلی باعث ایجاد رانش سیکلی وابسته به زمان در پشت دیوار خواهد شد که در منحنی رانش سیکلی بین حداقل و حداکثر رانش، رابطه‌ای ثابت برقرار نیست. با افزایش تعداد سیکل‌ها، رانش وارد به دیوار نیز افزایش می‌یابد، ولی اثر این تغییرات در سیکل‌های ابتدایی قابل ملاحظه‌تر است و بعد از تعداد سیکل‌های معینی، منحنی رانش به حالتی ثابت می‌رسد. نتایج نشان داده است که با نزدیک‌تر شدن به پای دیوار، دامنه تغییرات رانش، با زمان کمتر می‌شود زیرا با افزایش عمق، اثر سربار در حال استهلاک است و رانش در پای دیوار بیشتر متأثر از وزن خاک خواهد بود تا سربار.

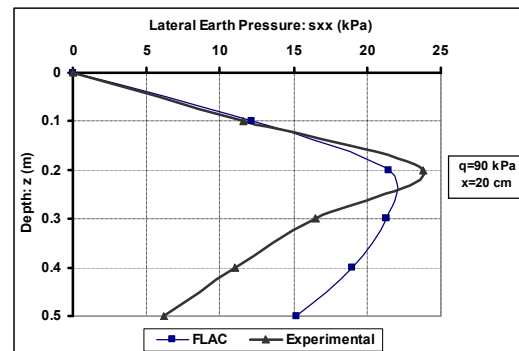
در شکل (۶) منحنی نشست صفحه بارگذاری بر اثر بارگذاری سیکلی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بارگذاری سیکلی نیز سبب ایجاد نشست سیکلی در خاک می‌شود. در هر سیکل مقداری کرنش الاستیک وجود دارد که در نیم سیکل برگشتی (باربرداری) کاملاً قابل بازگشت است و مقداری هم کرنش پلاستیک وجود دارد که غیر قابل بازگشت است که به دلیل رفتار پلاستیک خاک است.



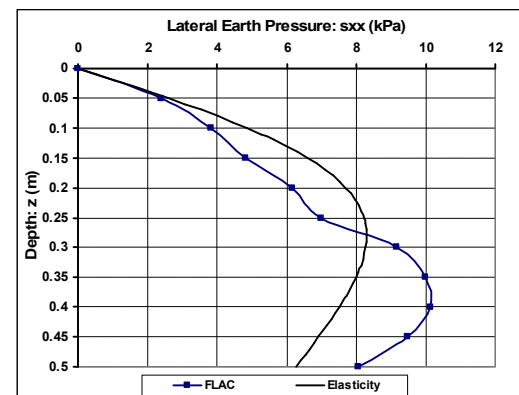
شکل ۴: سربار سیکلی اعمال شده بر صفحه بارگذاری (۱۰ سیکل).

مشابه آزمایشگاهی مقایسه شده است (x فاصله افقی مرکز سربار نواری با دیوار است). همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، کلیات و روند توزیع رانش در هر دو حالت برابر است و حداکثر مقدار رانش در مدل عددی و آزمایشگاه اختلاف ناچیزی دارند. در شکل (۳) نیز نتایج رانش وارد بر دیوار حاصل از تئوری الاستیسیته و مدل عددی در یک شکل رسم شده است. در این نمودارها مقدار سربار استاتیکی برابر  $50$  کیلوپاسکال و فاصله مرکز سربار از دیوار  $40$  سانتی‌متر است. از مقایسه این دو نمودار در شکل (۳) موارد ذیل قابل تشخیص است:

۱- میزان رانش جانبی ایجادشده از برنامه FLAC در نیمه بالای دیوار کمتر و در نیمه پایین دیوار بیشتر از نتایج تئوری الاستیسیته است. ۲- عمق حداکثر مقدار رانش پیک و نیز محل نقطه اثر نیروی برآیند در FLAC به پای دیوار نزدیک‌تر است. ۳- روند کاهش رانش پس از نقطه حداکثر رانش، در برنامه FLAC نسبت به تئوری الاستیسیته سریع‌تر است. به عبارت دیگر تأثیر سربار در عمق در مدل عددی سریع‌تر مستهلک می‌شود.



شکل ۲: مقایسه رانش حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاه و مدل عددی.

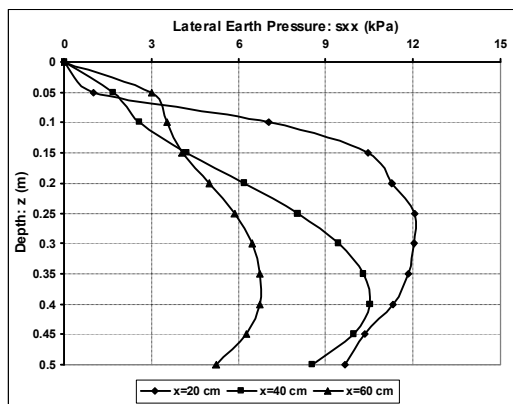


شکل ۳: مقایسه رانش حاصل از مدل عددی و تئوری الاستیسیته.

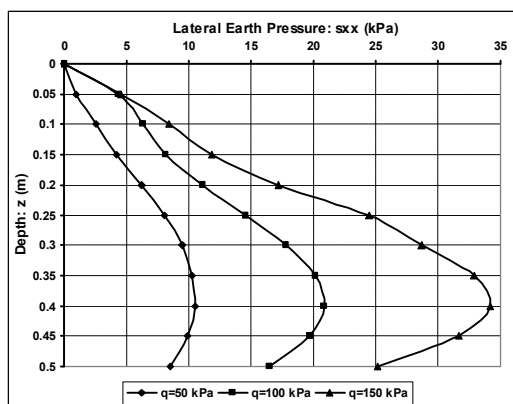
سربار به دیوار محدودیت بیشتری برای حرکت خاک و صفحه بارگذاری ایجاد می‌شود که منجر به کاهش نشست خواهد شد.

### تأثیر بزرگی سربار بر رانش سیکلی

در شکل (۸) توزیع رانش حداکثر سیکل اول بارگذاری بر اثر سربار با دامنه‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل، افزایش بزرگی سربار سیکلی باعث افزایش رانش بر دیوار می‌شود، اما تغییرات حداکثر رانش با بزرگی سربار لزوماً خطی نیست.



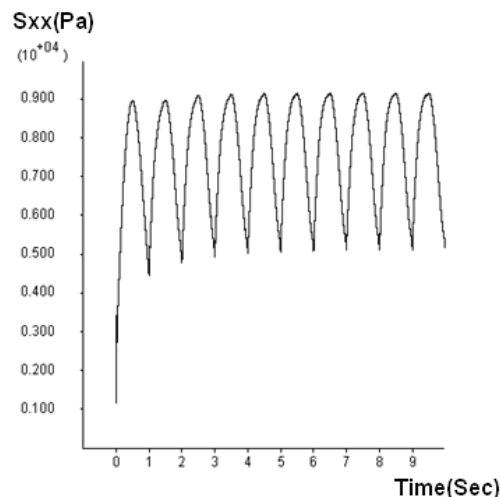
شکل ۷: توزیع رانش حداکثر سیکل اول در فاصله‌های مختلف سربار از دیوار.



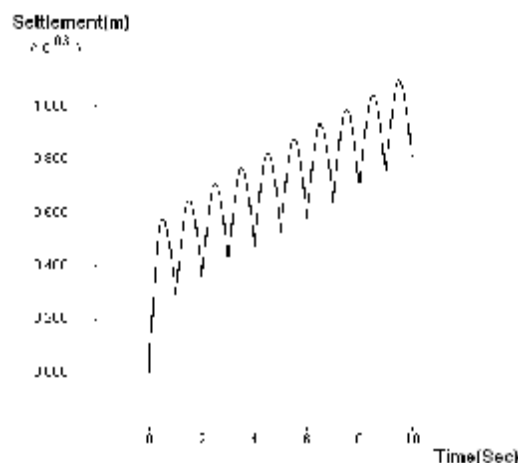
شکل ۸: توزیع رانش حداکثر سیکل اول بر اثر سربار با بزرگی‌های مختلف.

### تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر رانش سیکلی

در شکل (۹) توزیع رانش ناشی از سربار نمونه در حالتی که خاک پشت دیوار زاویه اصطکاک داخلی ۳۶، ۳۸ و ۴۰ درجه دارد، رسم شده است. با توجه به شکل، تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک تأثیر چندانی بر شکل توزیع رانش ندارد، ولی با افزایش زاویه اصطکاک



شکل ۵: رانش سیکلی خاک در وسط دیوار.



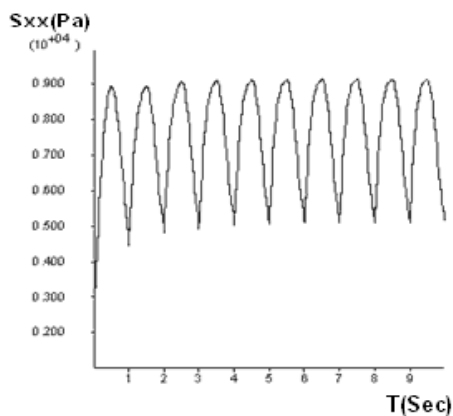
شکل ۶: نشست سیکلی صفحه بارگذاری.

### تأثیر فاصله سربار بر رانش سیکلی

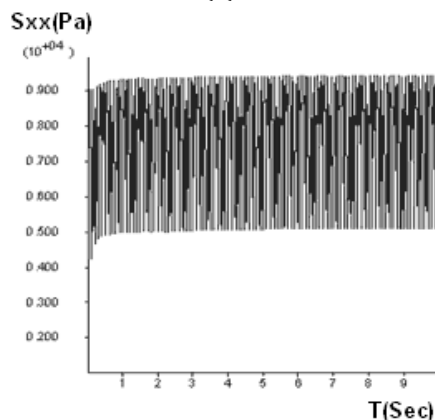
در شکل (۷) توزیع رانش ماکزیمم سیکل اول در فواصل مختلف دیوار نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، هر چه فاصله محل اثر سربار از دیوار بیشتر شود، به طور حتم مقدار رانش بر دیوار کاهش خواهد یافت و با تغییر فاصله سربار، شکل توزیع رانش نیز تغییر پیدا خواهد کرد.

بررسی نتایج در فاصله‌های مختلف سربار از دیوار نشان داده است که برآیند نیروی رانش حداکثر سیکل اول بارگذاری با افزایش فاصله سربار از دیوار کاهش خواهد یافت و نقطه اثر آن به پای دیوار نزدیک‌تر می‌شود. در ضمن با افزایش فاصله سربار از دیوار، میزان نشست حداکثر صفحه بارگذاری در سیکل اول بار افزایش می‌یابد، زیرا با توجه به صلب و ساکن بودن دیوار با نزدیک شدن

است. در شکل (۱۲) توزیع رانش حداکثر سیکل اول ناشی از سربار سیکلی که بر صفحه با عرض‌های مختلف اعمال شده، نشان داده شده است. با توجه به شکل، افزایش عرض صفحه بارگذاری (با ثابت ماندن مقدار کل بارگذاری) باعث کاهش رانش بر دیوار می‌شود. به عبارت دیگر هر چه توزیع سربار روی محدوده وسیع‌تری باشد، مقدار رانش کمتری به دیوار وارد می‌شود. نتایج نشان داده است که افزایش عرض صفحه بارگذاری، مقدار برآیند نیروی رانش حداکثر سیکل اول بارگذاری را کاهش می‌دهد، ولی محل نقطه اثر آن تغییر پیدا نمی‌کند. نشست صفحه بارگذاری نیز با افزایش عرض صفحه کاهش پیدا می‌کند. با توجه به این نکات واضح است که اگر عرض پی ماشین‌آلاتی که مقدار نیروی سیکلی خاصی را تحمل می‌کنند، بیشتر در نظر گرفته شوند، میزان نشست پی و نیز رانش وارد به دیوار حائلی که در کنار آن ساخته شده، کاهش می‌یابد.

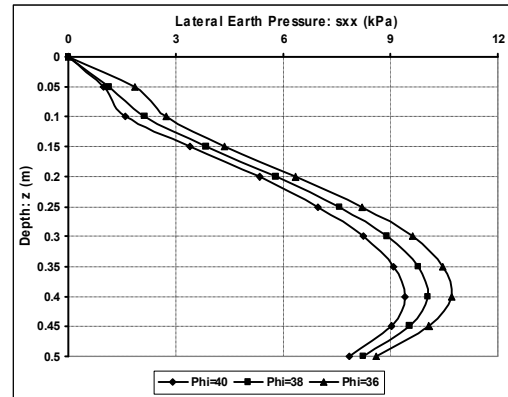


شکل ۱۰: رانش سیکلی در وسط دیوار بر اثر سربار با فرکانس ۰/۵ هرتز.



شکل ۱۱: رانش سیکلی در وسط دیوار بر اثر سربار با فرکانس ۵ هرتز.

داخلی خاک، حداکثر رانش وارد بر دیوار کم می‌شود. نتایج نشان داده است که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، برآیند نیروی رانش حداکثر سیکل اول بارگذاری کاهش پیدا می‌کند و نقطه اثر آن نیز به سمت قاعده دیوار حرکت می‌کند. نشست صفحه بارگذاری نیز با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک کمتر می‌شود.



شکل ۹: توزیع رانش حداکثر سیکل اول در حالت‌های خاک با زاویه اصطکاک داخلی متفاوت.

### تأثیر فرکانس بارگذاری بر رانش سیکلی

پس از بزرگی بار، فرکانس یکی از مهم‌ترین مشخصات یک بارگذاری سیکلی است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) رانش سیکلی وارد بر دیوار در نقطه میانی دیوار ناشی از بارگذاری سیکلی با فرکانس‌های ۰/۵ و ۵ هرتز رسم شده است. با توجه به شکل‌ها در محدوده فرکانس‌های متعارف، تغییر فرکانس تأثیر چندانی بر مقدار رانش ندارد. با توجه به اینکه خاک پشت دیوار، خاک ماسه‌ای و خشک است، فرکانس بارگذاری عامل تأثیرگذاری در رانش وارد بر دیوار نخواهد بود، اما در صورتی که خاک پشت اشباع شود یا نوع خاک تغییر یابد، اثر فرکانس بارگذاری باید مطالعه شده و در نظر گرفته شود.

### تأثیر عرض صفحه بارگذاری بر رانش سیکلی

در مطالعات تأثیر عوامل مختلف خاک و سربار، عرض صفحه بارگذاری ثابت و برابر با ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در این قسمت با ثابت نگه‌داشتن مقدار نیروی کل وارد به صفحه، عرض صفحه بارگذاری تغییر داده شده و اثر آن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته

باید در طراحی دیوارهای حائل که در معرض این گونه سربارها قرار دارند، منظور شود.

۲- در حالت سربار سیکلی در مقایسه با سربار استاتیکی محل نقطه اثر نیروی برآیند به سمت بالای دیوار حرکت می کند که باید در بررسی تعادل دورانی دیوار مورد توجه قرار گیرد، زیرا لنگر خمشی پای دیوار در این حالت افزایش می یابد.

۳- سربار سیکلی باعث ایجاد رانش سیکلی بر دیوار می شود. با افزایش تعداد سیکل ها، رانش جانبی وارد بر دیوار افزایش می یابد، ولی پس از تعداد سیکل معینی مقدار رانش به حد ثابتی می رسد.

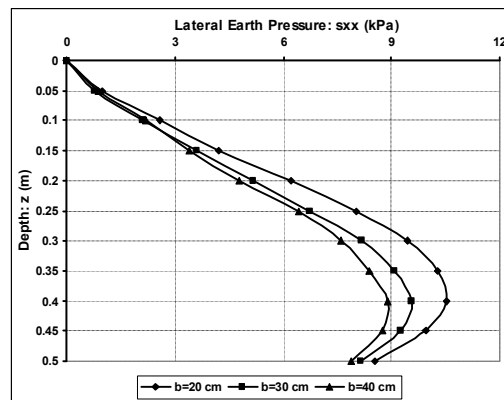
۴- با افزایش فاصله سربار سیکلی از دیوار رانش وارد بر دیوار کاهش می یابد و نشست صفحه بارگذاری بیشتر می شود.

۵- با افزایش بزرگی سربار سیکلی، رانش وارد بر دیوار نیز افزایش می یابد، اما رابطه بین آنها لزوماً خطی نیست.

۶- افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز برآیند رانش وارد بر دیوار حائل را کاهش داده و نقطه اثر نیروی برآیند به سمت قاعده دیوار حرکت می کند.

۷- تغییر فرکانس سربار سیکلی در محدوده های متعارف، با توجه به اینکه خاک پشت دیوار دانه ای و خشک است، تغییر چندانی در رانش وارد به دیوار ایجاد نمی کند.

۸- برای یک بار یکسان، هر چه عرض صفحه بارگذاری بیشتر باشد، رانش وارد بر دیوار کمتر خواهد شد و نشست صفحه بارگذاری نیز کاهش می یابد.



شکل ۱۲: توزیع رانش حداکثر سیکل اول بر اثر بارگذاری با عرض های متفاوت.

## نتیجه گیری

دیوار حائل صلب و ساکن با خاک پشت دانه ای و خشک، با استفاده از برنامه تفاضل محدود دوبعدی FLAC مدل سازی شده است. سربار نواری یکنواخت در حالت های استاتیکی و سیکلی در فاصله های خاص از دیوار اعمال شده است. نتایج مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه امیرکبیر، مقایسه شده و درستی عملکرد مدل تأیید شده است. اثر عوامل مختلف خاک و سربار بر توزیع رانش، برآیند نیروی وارد بر دیوار و نقطه اثر آن مورد مطالعه قرار گرفته و این نتایج حاصل شده است:

۱- در حالت اعمال سربار سیکلی در مقایسه با سربار استاتیکی، رانش جانبی وارد بر دیوار افزایش می یابد که

## مراجع

- 1 - Okabe, S. (1924). "General theory of earth pressures." *Journal of Japanese Society of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, PP. 1277-1323.
- 2 - Mononobe, N. and Matsuo H. (1929). "On the determination of earth pressures during earthquakes." *Proceedings of World Engineering Congress* 9 PP. 177-185.
- 3 - Steedman, R. S. and Zeng, X. (1990). "The influence of phase on the calculation of pseudo-static earth pressure on a retaining wall." *Geotechnique*, Vol. 40, No. 1, PP. 103-112.
- 4 - Sun, K. and Lin, G. (1995). "Dynamic response of soil pressure on retaining wall." *Proceeding of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. 1, PP. 349-350.
- 5 - Sherif, M.A, Ishibashi, I, and Lee, C. D. (1982). "Earth pressures against rigid retaining wall." *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 108, No.5, PP. 649-695.
- 6 - Nadim, F. and Whitman, R. V. (1993). "Seismic analysis and design of retaining walls." *Soil Dynamics and Geotechnical Engineering*.



- 7 - Whitman, R.V. "Seismic design and behavior of gravity retaining walls." *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE Geotechnical Special Publication, No.25, PP. 817-842.
- 8 - Sherif, M. M and Mackey, R. D. (1977). "Pressure on retaining wall with repeated loading." ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 103, No. 11, PP. 1341-1343.
- 9 - Kim, J. S. and Barker, R. M. (2002). "Effect of live load surcharge on retaining walls and abutments." ASCE, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, Vol. 128, No. 10, PP. 803-813.
- 10 - Mirhosseini, S. M. (1987). *Stress-Strain Behavior of Granular Soils under Monotonic and Cyclic Loading Conditions*, PhD Thesis, Civil Engineering Department, University of Leeds.
- 11 - Mirhosseini, S. M. (1987). "Earth pressure variations under cyclic surcharges." *Geotechnical and Strength of Material Journal*, Vol. 73, No. 10, PP. 5-11.
- 12 - Prakash, S. (1981). *Soil Dynamics*, Mc Graw Hill Book Company, Inc.
- 13 - Nikkhah, M. (2003). *The Study of Earth Pressure on Retaining Wall under Cyclic Surcharges*, PhD. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran.
- 14 - Kargar, M. (2005). *Investigation of at-rest earth pressure under dynamic surcharges*, MSc. Thesis, Faculty of Civil and Environmental engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran.
- 15 - FLAC User's Manual, 2000, Minneapolis: Itasca Consulting. Group, Inc.