

## بررسی تأثیر نوع تغییر مکان دیوار بر رانش مقاوم خاک تحت اثر سربارهای استاتیکی و سیکلی

سید مجدالدین میرمحمدحسینی<sup>۱\*</sup> و مسعود شریفزاده اصلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد خاک و پی - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۸۵/۸/۱۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۵/۲۹، تاریخ تصویب ۸۷/۸/۸)

### چکیده

یکی از عوامل اصلی در طراحی و ساخت ایمن دیوارهای حائل، شناخت کمی و کیفی رانش‌های وارد به این دیوارها است. مدل‌های آزمایشی و تحلیلی بسیاری برای تخمین رانش خاک ارائه شده است. نظرها و توصیه‌های مختلفی درباره نحوه توزیع و نقطه اثر رانش خاک وجود دارد، اما نوع تغییر مکان و میزان آن در روابط ارائه شده در نظر گرفته نشده است. در این مقاله ساخت یک مدل عددی به وسیله نرم‌افزار "FLAC 2D" برای مطالعه رانش مقاوم خاک تشریح شده است. به کمک این مدل عددی، تحلیل‌های وسیعی در شرایط مختلف روی یک مدل دیوار حائل انجام گرفته و نتایج قابل ملاحظه‌ای پیرامون کم و کیف رانش خاک بر دیوارهای حائل به دست آمده که بخشی از نتایج مربوط به تعیین رانش خاک تحت اثر تغییر مکان‌های مختلف دیوار در این مقاله ارائه شده است.

**واژه های کلیدی:** رانش مقاوم خاک، دیوار حائل، انتقال، دوران حول رأس، دوران حول پایه، سربار سیکلی، مدل عددی

### مقدمه

دینامیکی در فاصله  $0.55H$  از قاعده دیوار به دست آمده که مستقل از مقدار شتاب ورودی است.

Ishbashi و Fang در سال ۱۹۸۶ رانش فعال خاک ماسه‌ای پشت دیوار صلب را در حالت استاتیکی بررسی کردند. مقایسه توزیع رانش و محل اثر نیروی برآیند برای سه حالت تغییر مکان دیوار شامل دوران حول رأس، دوران حول قاعده و انتقال بیان شده است [۲].

Fang و Ishibashi در سال ۱۹۸۷ رانش فعال دینامیکی وارد به دیوار حائل صلب را بر حسب مشاهدات حاصل از مدل آزمایشگاهی میز ارتعاش برای حالات مختلف تغییر مکان دیوار بررسی کردند [۳]. براساس نتایج این تحقیقات، توزیع رانش فعال دینامیکی برای حالت دوران دیوار حول قاعده و رأس نسبت به عمق غیرخطی است. برای سطح شتاب افقی پایین، توزیع رانش فعال دینامیکی اغلب تحت تأثیر حالت تغییر مکان دیوار قرار دارد. ولی برای سطح شتاب بالا، اثر نیروی اینرسی استاتیکی حاکم بوده و اثر نوع تغییر مکان دیوار قابل صرف نظر است. حداکثر نیروی رانش فعال دینامیکی زمانی ایجاد می‌شود که دیوار در مقابل خاک به سمت داخل دوران کند.

در یک طرح ایمن و اقتصادی لازم است علاوه بر بررسی اثر خاک پشت دیوار، تأثیر سربارهای استاتیکی و دینامیکی بر بالای خاک لحاظ شوند. برای کنترل پایداری دیوار علاوه بر تعیین نیروهای وارده، دانستن نقطه اثر آنها نیز لازم است. رانش جانبی ناشی از خاک پشت دیوار توسط تئوری‌های رانکین و کولمب در حالات مختلف تغییر مکان دیوار بررسی شده است.

نتایج حاصل از تحقیقات به عمل آمده نشان می‌دهد که در حالت دینامیکی، حداکثر ضریب رانش کل حدود ۳۰ درصد بیشتر از مقادیر حاصل از روش تحلیلی Mononobe-Okabe است.

Fang و Sherif در سال ۱۹۸۴ برای درک بهتر مقدار و توزیع رانش فعال دینامیکی پشت دیوارهای حائل دوران کننده حول رأس، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی را ارائه کردند [۱].

نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اثر دوران دیوار، رانش خاک در پشت آن نسبت به حالت سکون در ابتدا به سرعت کاهش یافته و سرانجام به یک مقدار ثابت می‌رسد. توزیع رانش دینامیکی در حالت دوران حول رأس غیرخطی است. محل اثر نیروی رانش کل فعال

بررسی درست عملکرد مدل ابعاد مدل شامل توده خاک به ابعاد  $۱/۵ \times ۰/۶$  متر در نظر گرفته می‌شود تا مشابه شرایط آزمایش در آزمایشگاه باشد، ولی با توجه به آنکه در حالت مقاوم سطح گسیختگی وسعت بیشتری نسبت به حالت محرک دارد، ابعاد مدل برای مطالعات بعدی (حالت مقاوم)  $۲/۰ \times ۰/۶$  متر در نظر گرفته می‌شود تا مرزهای مدل در نتایج به دست آمده تأثیری نداشته باشد. با فرض اینکه  $\phi = 45^\circ$  باشد و صفحه گسیختگی مسطح باشد، طبق نظریه رانکین داریم:

$$\phi = 45^\circ \\ L = H \times \tan(45 + \frac{\phi}{2}), H = 50cm \Rightarrow L = 120cm \quad (1)$$

البته با توجه به اینکه سطح گسیختگی غیر خطی است و وجود سربار نواری نیز باعث تغییر در محدوده گسیختگی می‌شود، طول مدل ۲ متر در نظر گرفته می‌شود. دیوار حائل در مرز سمت راست مدل به ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر قرار گرفته است. ۱۰ سانتی‌متر خاک زیر دیوار به علت عدم تأثیرگذاری مرز پایینی مدل بر نتایج تحلیل در نظر گرفته شده است.

برای مش‌بندی مدل از شبکه‌های مربعی با ابعاد ۵ سانتی‌متر استفاده شد. برای مدل‌سازی رفتار تنش کرنش خاک، مدل ساختاری الاستو پلاستیک، به همراه معیار گسیختگی موهر-کولمب به کار رفته است. یکی از دلایل این انتخاب سادگی مدل است. پارامترهای اصلی این مدل  $C$  و  $\phi$  هستند که از راه آزمایش‌های معمول مکانیک خاک به دست می‌آیند.

در این برنامه پارامترهای دانسیته ( $\gamma$ )، مدول بالک ( $K$ )، مدول برشی ( $G$ )، چسبندگی ( $C$ )، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و زاویه اتساع ( $\psi$ ) برای تعریف مدل خاک مورد نیاز است.

برای خاک پشت دیوار از مصالح ماسه‌ای خشک استفاده شده که وزن مخصوص آن برابر  $۱۵۳۰ \frac{kg}{m^3}$  با توجه به دانسیته نسبی ۵۵٪ (تراکم متوسط) در آزمایشگاه به دست آمده است. پارامترهای الاستیک خاک عبارت از  $E = 4.1 \times 10^7 Pa, \nu = 0.3$  هستند. از آنجا که در برنامه مقادیر مدول برشی و مدول بالک به عنوان ورودی گرفته می‌شود، با استفاده از این روابط می‌توان آنها را به دست آورد:

Fang و همکاران در سال ۱۹۹۴ بخشی از نتایج آزمایش‌های انجام شده روی میز ارتعاش مؤسسه تحقیقاتی وزارت راه ژاپن را ارائه کردند [۴]. نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که برای حالت تغییر مکان انتقالی دیوار، توزیع رانش مقاوم خطی بوده، و توافق به نسبت خوبی با نتایج حاصل از تئوری رانش جانبی خاک ترازقی دارد. در حالی که مقدار و نقطه اثر آن بسته به نوع حرکت متفاوت است.

Fang و همکاران در سال ۱۹۹۷ نتایج آزمایشگاهی رانش فعال و مقاوم استاتیکی خاکریز با سطح شیب‌دار را برای حالت تغییر مکان انتقالی دیوار حائل ارائه کردند [۵]. Mir Hosseini و Nikkha در سال ۲۰۰۳ برای بررسی رفتار دیوارهای حائل در شرایط مختلف اقدام به طراحی و ساخت یک مدل فیزیکی کردند تا بتوانند پارامترهای مهم و مؤثر در رفتار متقابل دیوار و خاک با شرایط کاملاً کنترل شده و مورد نظر را به صورت کمی و کیفی بررسی و ارزیابی کرد [۶].

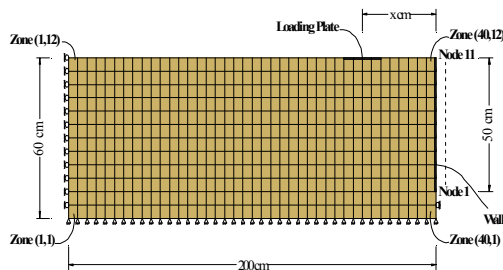
موارد اشاره شده در بالا، نمونه‌هایی از مطالعات فیزیکی انجام شده برای دسترسی به اندرکنش دیوار حائل و خاک در شرایط مختلف بوده است. گرچه مطالعات انجام شده بسیار است و نتایج قابل ملاحظه‌ای در زمینه رانش فعال با شرایط مختلف به دست آمده است، ولی در زمینه رانش مقاوم مطالعات بسیار محدود و اندک انجام گرفته است. از طرفی دیگر با توجه به تنوع و تعداد عوامل مؤثر در رفتار متقابل خاک و دیوار حائل و پیچیدگی خاص مسئله اندرکنش میان این دو محیط در شرایطی که خاک به حالت مقاوم در آید، امکان دستیابی به یک شناخت کامل و همه جانبه که به راحتی بتوان رفتار دیوار حائل را با هر شرایط خاص با دقت تخمین زد، هنوز مهیما نشده است.

با توجه به توضیحات بیان شده و برای بررسی بیشتر موضوع، یک مدل عددی دیوار حائل به وسیله نرم‌افزار تخصصی FLAC ساخته شد و تأثیر عوامل مختلف مؤثر روی رانش مقاوم خاک در شرایط مختلف بررسی شده است.

### مشخصات مدل عددی ساخته شده

ابعاد و هندسه مدل به گونه‌ای انتخاب شده است که مرزها در نتایج تحلیلی مدل تأثیرگذار نباشند. برای

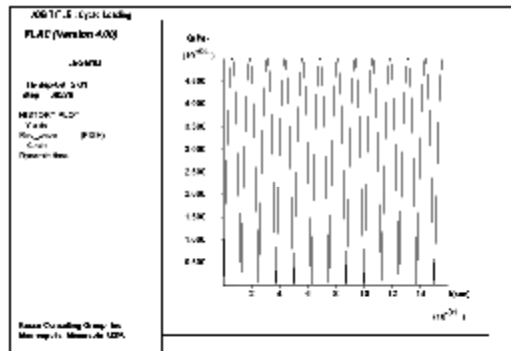
$$\varphi_{int} = \frac{2}{3} \varphi_{soil} = 24.5^{\circ} \quad (6)$$



شکل ۱: شکل کلی مدل ساخته شده.

در این مسئله، بارگذاری دینامیکی به صورت تاریخچه زمانی تنش به عنوان شرایط مرزی خارجی مدل با دستور apply اعمال می‌شود. تابع تاریخچه زمانی در دامنه بار دینامیکی<sup>۴</sup> ضرب می‌شود.

با توجه به اینکه منشأ بار سیکلی منابعی چون عبور وسائل نقلیه در مجاورت دیوار حائل است، در نظر گرفتن کشش در سطح خاک بی‌مورد است و از موج یک طرفه استفاده شده است. در آزمایشگاه نیز از این موج استفاده شده بود.



شکل ۲: بار سیکلی نیمه سینوسی با بزرگی 50 kpa و فرکانس 4 Hz

### کالیبراسیون مدل و کنترل درستی عملکرد آن

همان‌گونه که می‌دانیم یک مدل عددی با استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی و یا نرم‌افزارهای متداول که از روش‌های عددی متنوع مانند اجزاء محدود، تفاضل‌های محدود، اجزاء منفصل و غیره برای تحلیل عددی و حل معادلات استفاده می‌کنند، ساخته می‌شود. این مدل زمانی

$$\begin{cases} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ G = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{cases} \quad (2)$$

بنابراین مقادیر  $K=3.42 \times 10^7 Pa$ ,  $G=1.58 \times 10^7 Pa$  برای پارامترهای الاستیک خاک خواهیم داشت. پارامترهای پلاستیک مدل موهر-کولومب شامل چسبندگی ( $C$ )، زاویه اصطکاک داخلی ( $\varphi$ )، مقاومت کششی ( $T$ ) و زاویه اتساع ( $\psi$ ) هستند که با توجه به دانه‌ای بودن خاک مقادیر زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} C = 0, T = 0 \\ \varphi = 36.5^{\circ}, \psi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

برای مدل‌سازی دینامیکی، میرایی  $D=5\%$  (میرایی محلی) که در بسیاری از مسائل مربوط به خاک لحاظ می‌شود، در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی دیوار از المان‌های خمشی تیر استفاده شد که در آن گره‌ها<sup>۲</sup> به شبکه محاسباتی متصل هستند. از آنجایی که دیوار در مدل فیزیکی شامل یک صفحه فولادی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر بود، بنابراین پارامترهای هندسی این المان در واحد طول دیوار به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

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

برای تعیین مدول الاستیسیته دیوار در شرایط کرنش مسطح باید از رابطه زیر استفاده کرد که با در نظر گرفتن مدول الاستیک و ضرایب پواسون  $E = 2 \times 10^{11} Pa$ ,  $\nu = 0.3$  برای فولاد مقدار این مدول برابر  $E_{PS} = 2.2 \times 10^{11} Pa$  خواهد بود.

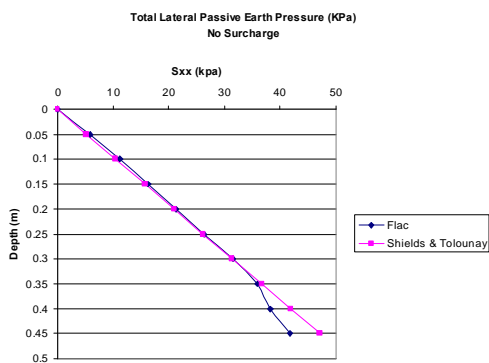
$$E_{Plane Strain} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (5)$$

از آنجا که دیوار در شرایط صلب در نظر گرفته شده است، پس کلیه گره‌های این المان در برابر حرکت انتقالی در راستای افق و قائم و نیز دوران مقید شد. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و دیوار از المان درز<sup>۳</sup> استفاده شد. زاویه اصطکاک المان درز نیز برابر دو سوم زاویه اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شده است. بنابراین:

تا حدی خطا دارند. در ضمن شرایط به صورت دو بعدی و کرنش مسطح در نظر گرفته شده که این خود یک ساده سازی است و در واقعیت چنین نیست. با وجود همه این خطاها، مدل عددی ساخته شده می تواند وسیله مناسبی برای پیش بینی رفتار باشد و با انجام مطالعات پارامتریک می توان نوع و میزان تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر رفتار را پیش بینی کرد که خود در زمینه مهندسی ژئوتکنیک مفید و پر اهمیت است.

### مقایسه با نتایج تحقیقات گذشته

نتایج مدل عددی برای حالت مقاوم را با نتایج تحقیقات کولمب و شیلدز و تولونی (Shields and Tolunay, 1973) مقایسه شد. برای این منظور مدل عددی ساخته شده را برای حالت بدون سربار حل کرده و از روی نمودار رانش مقاوم به دست آمده، مقدار  $K_p = 6.69$  به دست آمد. همچنین مقدار  $K_p$  برای مشخصات خاک و دیوار مدل شده ( $\phi = 36.5^\circ, \delta = 24.5^\circ$ ) از رابطه کولمب 12.42 و از نتایج حاصل از تحقیقات شیلدز و تولونی به طور تقریبی 6.85 به دست آمده است. علت اختلاف زیاد بین نتایج FLAC و رابطه کولمب در این است که رابطه کولمب با خطی در نظر گرفتن سطح لغزش به دست آمده است در حالیکه سطح لغزش در حالت مقاوم غیرخطی است. شیلدز و تولونی سطح لغزش را اسپیرال لگاریتمی در نظر گرفتند و همین طور که ملاحظه می شود، اختلاف بین نتایج مدل عددی و تحقیقات آنها در حدود ۷٪ است.



شکل ۴: مقایسه توزیع رانش مقاوم به دست آمده از مدل عددی در حالت بدون سربار و روش تولونی

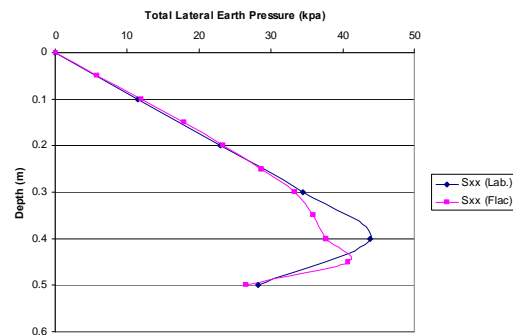
### تعیین تغییر مکان نسبی جانبی

تغییرات نیروی برآیند رانش مقاوم نسبت به تغییر

نتایج ارزشمند و قابل قبولی خواهد داشت که درستی عملکرد مدل ساخته شده با استفاده از نتایج واقعی صحرایی (Field)، نتایج مدل فیزیکی در آزمایشگاه و یا در بعضی موارد با تئوری کنترل شده باشد؛ به عبارت دیگر مدل عددی با استفاده از موارد ذکر شده کالیبره شده باشد. در این قسمت با توجه به اینکه در آزمایشگاه خاک دانشگاه امیرکبیر مدل فیزیکی خاک و دیوار برای بررسی رانش وارده بر دیوار ساخته شده بود، توسط این مدل فیزیکی آزمایش هایی برای حالت مقاوم انجام شد. بنابراین از این داده ها به عنوان معیار کالیبراسیون در تحلیل های استاتیکی استفاده شده است.

### مقایسه با نتایج آزمایشگاه

وزن حجمی خاک استفاده شده در آزمایشگاه  $15.30 \text{ kN/m}^3$  و زاویه اصطکاک داخلی خاک  $\phi = 36.5^\circ$  است. در شکل (۳) نمودار توزیع رانش مقاوم خاک در آزمایشگاه و نتایج حاصل از نرم افزار با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۳: مقایسه توزیع رانش مقاوم اندازه گیری شده در آزمایشگاه و به دست آمده از FLAC.

همان گونه که در شکل مشاهده می شود، کلیات و روند توزیع رانش در هر دو مورد برابر است. مهم تر از آن حداکثر مقدار رانش در مدل و آزمایشگاه اختلاف ناچیزی دارند و درصد خطا در حدود ۱۰ درصد است که در این موضوع قابل قبول خواهد بود. اختلاف های که بین توزیع در این دو مورد وجود دارد، ناشی از خطاهای مدل سازی عددی است. زیرا در مدل عددی به هیچ عنوان نمی توان رفتار را به طور صحیح و مطابق با واقعیت مدل کرد. زیرا مثلاً مدل رفتاری موهر-کولمب که یک مدل الاستوپلاستیک کامل است، نمی تواند بیان گر کاملاً دقیق رفتار خاک باشد. از طرف دیگر روش های عددی نیز خود

## تأثیر تلفیق دو حالت تغییر مکان بر رانش خاک

با توجه به اینکه تغییر مکان دیوار ممکن است تلفیقی از دو حرکت دوران و انتقال باشد، در این بخش نمودارهایی برای حالاتی که دیوار ابتدا انتقال یافته و سپس دوران می‌کنند آورده شده است.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده شد، تغییر مکان لازم برای رسیدن به حالت مقاوم در حالت T در حدود ۰/۵٪ ارتفاع دیوار است. برای بررسی همزمان انتقال و دوران سه حالت در نظر گرفته شده است.

انتقال تا رسیدن به تغییر مکان نسبی ۰/۰۵ درصد و سپس دوران؛

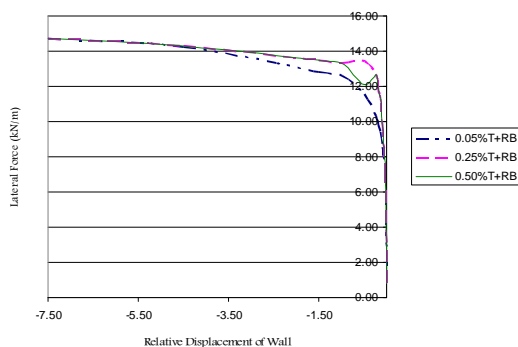
انتقال تا رسیدن به تغییر مکان نسبی ۰/۲۵ درصد و

سپس دوران؛

انتقال تا رسیدن به تغییر مکان نسبی ۰/۵۰ درصد و

سپس دوران.

نتایج به دست آمده در شکل (۷) و (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نحوه تغییر مکان دیوار بر میزان رانش مقاوم تأثیرگذار است. نکته قابل توجه این است که ترتیب انجام تغییر مکان‌ها بر رانش خاک تأثیرگذار است. یعنی نتایج برای حالات زیر تفاوت دارد.

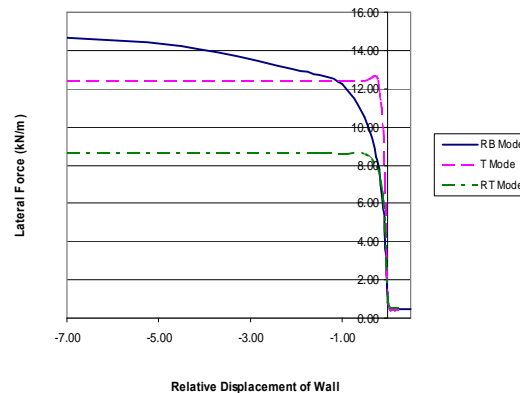


شکل ۷: تأثیر تلفیق تغییر مکان انتقالی و دورانی دیوار (حالت T+RB).

۱- انتقال تا رسیدن به تغییر مکان نسبی ۰/۲۵ درصد و سپس دوران تا تغییر مکان نسبی ۱/۵۰ درصد (شکل (۹-a)).

۲- دوران تا رسیدن به تغییر مکان نسبی ۱/۲۵ درصد و سپس انتقال تا تغییر مکان نسبی ۱/۵۰ درصد (شکل (۹-b)).

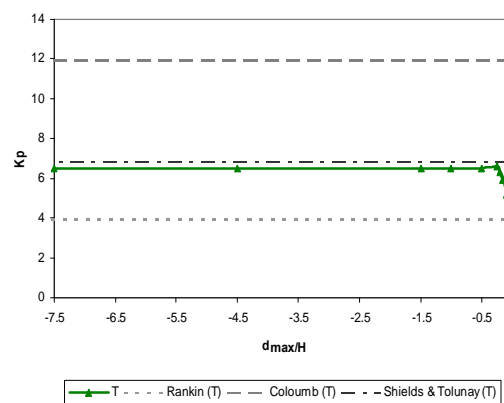
مکان انجام شده، برای حالات مختلف تغییر مکان دیوار (انتقال (T)، دوران حول رأس (RT) و دوران حول پایه (RB)) در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، تغییر مکان لازم برای رسیدن به حداکثر نیروی مقاوم برای حالت T کمترین و برای حالت RB بیشترین میزان است. منظور از تغییر مکان نسبی دیوار نسبت حداکثر تغییر مکان انجام شده به ارتفاع دیوار است.



شکل ۵: تغییرات نیروی وارده بر دیوار در حالات مختلف تغییر مکان دیوار با استفاده از مدل FLAC.

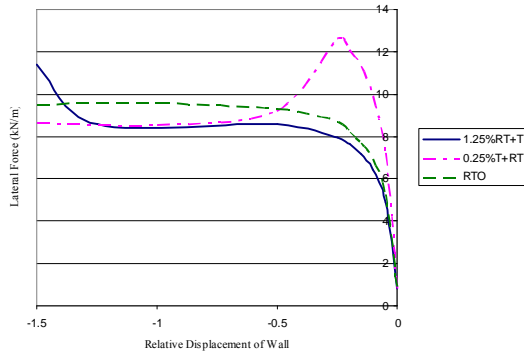
## محاسبه ضریب رانش مقاوم

برای محاسبه ضریب رانش مقاوم خاک و مقایسه آن با روش‌های موجود، شکل (۶) تهیه شده است.



شکل ۶: تغییرات ضریب رانش افقی خاک.

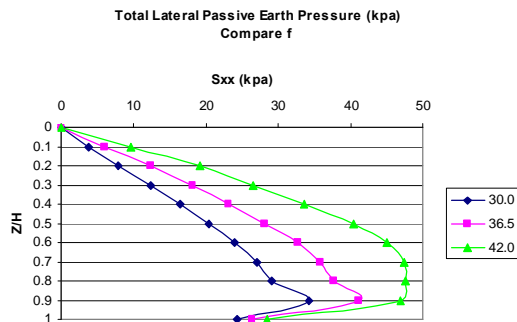
مقدار به دست آمده از روش اسپیرال لگاریتمی تولونی بهترین تطابق را با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار دارد. علت اختلاف زیاد بین روش کولمب و نتایج مدل این است که در روش کولمب سطح گسیختگی سطح فرض می‌شود که با واقعیت تطابق ندارد.



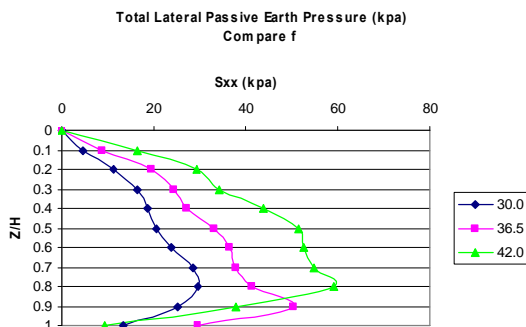
شکل ۱۰: تغییرات رانش در حالات مختلف تغییر مکان دیوار.

### تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک

برای بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی، سه زاویه اصطکاک داخلی ۳۰، ۳۶/۵ و ۴۲ درجه در نظر گرفته شد. زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار ( $\delta$ ) در هر سه مورد  $\frac{2}{3}\phi$  در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده برای هر سه حالت‌های مختلف تغییر مکان دیوار در اشکال (۱۱) و (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.

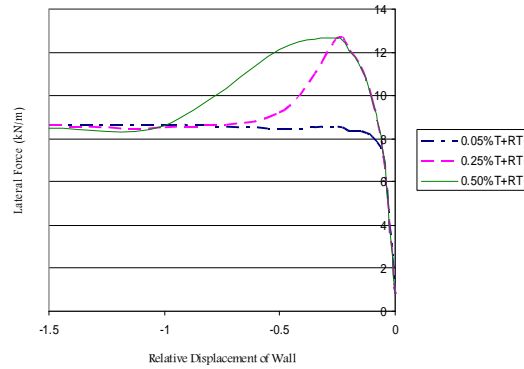


شکل ۱۱: تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر توزیع فشار مقاوم در اعماق مختلف (حالت T).

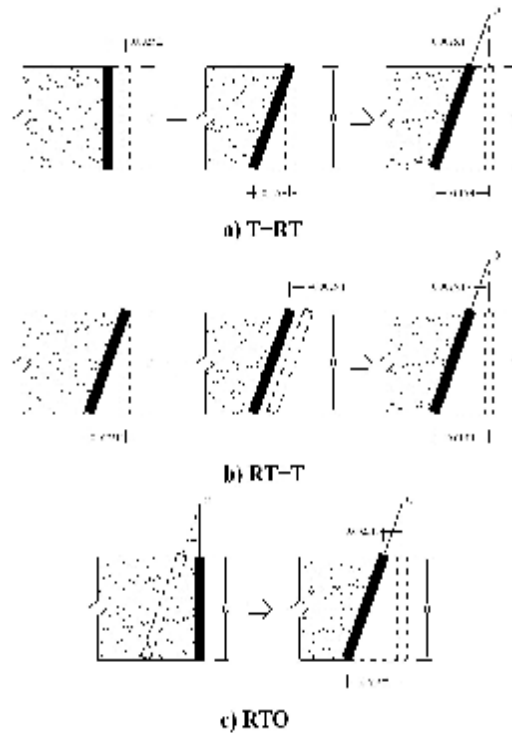


شکل ۱۲: تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر توزیع فشار مقاوم در اعماق مختلف (حالت RB).

۳- دوران حول نقطه فرضی O تا رسیدن به تغییر مکان نسبی ۱/۵۰ درصد (شکل (۹-۰)).  
سه حالت تغییر مکان ذکرشده (تنها برای حالت دوران حول رأس) در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۸: تأثیر تلفیق تغییر مکان انتقالی و دورانی دیوار (حالت T+RT).



شکل ۹: حالات مختلف تغییر مکان دیوار.

در شکل (۱۰) تغییرات رانش نسبت به تغییر مکان نسبی دیوار برای سه حالت بالا نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار رانش مقاوم برای سه حالت a, b و c نشان داده شده در شکل (۱۰) متفاوت است.

### ارائه روشی برای تخمین رانش مقاوم

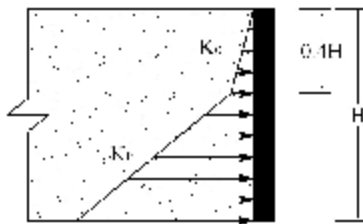
با توجه به تأثیر عوامل گوناگون مثل نحوه تغییر مکان دیوار و مشخصات خاک پشت دیوار بر رانش مقاوم خاک، ارائه یک رابطه ریاضی برای محاسبه رانش برای حالت‌های RB و RT بسیار پیچیده است. بنابراین برای تخمین رانش مقاوم از روی نتایج به دست آمده، چند نمودار برای محاسبه  $K_p$  تهیه شد.

با توجه به این که توزیع رانش در حالت‌های T و RB تقریباً مثلی است،  $K_p$  از راه این رابطه محاسبه شد:

$$R_p = \frac{K_p \gamma H^2}{2} \Rightarrow K_p = \frac{2R_p}{\gamma H^2} \quad (۶)$$

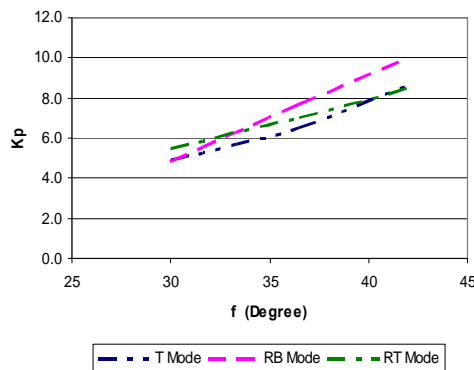
در این رابطه  $R_p$  برآیند رانش مقاوم و  $H$  ارتفاع کل دیوار است.

از طرف دیگر در حالت RT، توزیع رانش در محدوده  $0.4H$  بالای دیوار به دلیل تغییر مکان ناچیز دیوار نزدیک به حالت سکون است. بنابراین توزیع رانش را مشابه شکل (۱۶) در نظر می‌گیریم و  $K_p$  را محاسبه می‌کنیم.

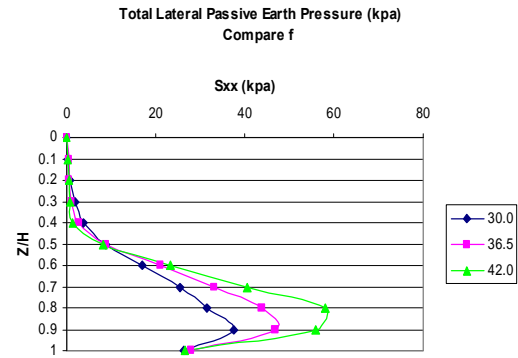


شکل ۱۶: توزیع رانش مقاوم در پشت دیوار (حالت RT).

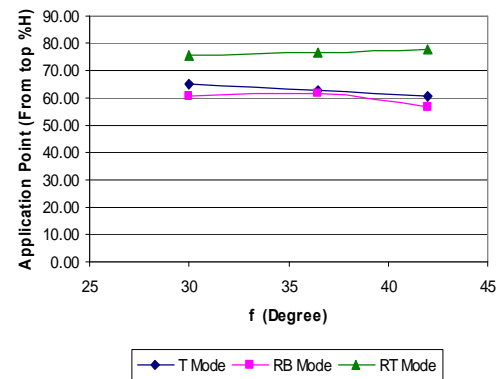
با توجه به توضیحات بالا مقدار  $K_p$  برای سه حالت T، RB و RT با در نظر گرفتن  $\delta = \frac{2}{3}\phi$  محاسبه شده و در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۷: ضریب  $K_p$  برای حالت‌های T، RB و RT.

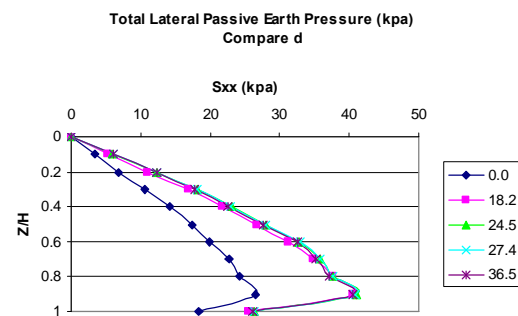


شکل ۱۳: تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر توزیع فشار مقاوم در اعماق مختلف (حالت RT).



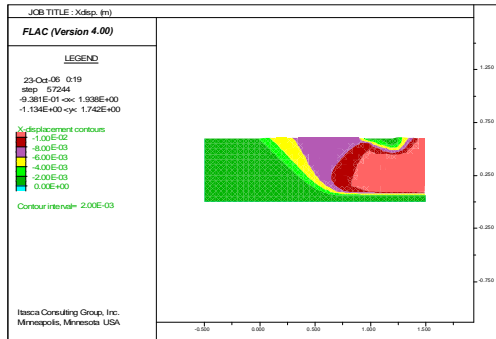
شکل ۱۴: تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر نقطه اثر برآیند توزیع فشار مقاوم در اعماق مختلف.

همانطور که پیش‌بینی می‌شود با افزایش  $\phi$  مقدار رانش مقاوم افزایش می‌یابد. علت افزایش رانش مقاوم، درگیری بیشتر ذرات خاک با افزایش زاویه اصطکاک است. تغییرات زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار در محدوده  $\phi$  تا  $\frac{1}{2}\phi$  بر نتایج، بسیار ناچیز است. به عنوان مثال، تأثیر تغییرات  $\delta$  بر رانش خاک برای حالت T در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

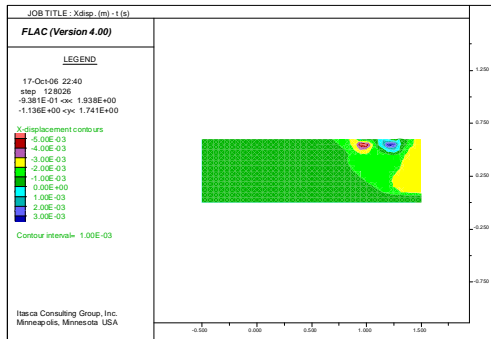


شکل ۱۵: تأثیر زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار بر توزیع فشار مقاوم در اعماق مختلف (حالت T).

سربار استاتیکی می‌شود. علت این اختلاف زیاد در این است که به علت ماهیت سیکی سربار، گوه گسیختگی برای زمانی که سربار به حداقل میزان خود می‌رسد، تشکیل می‌شود و به همین دلیل گوه گسیختگی بسیار کوچک‌تر از زمانی است که بار به صورت ثابت اعمال می‌شود. اشکال (۲۰) و (۲۱) گویای تأثیر بارگذاری سیکی روی ابعاد گوه گسیختگی است.



شکل ۲۰: تغییر مکان افقی خاک پشت دیوار با وجود سربار استاتیکی (حالت T).



شکل ۲۱: تغییر مکان افقی خاک پشت دیوار در زمان ماکزیمم سربار سیکی (حالت T).

### مقایسه نتایج به دست آمده برای انواع مختلف تغییر مکان دیوار

برای مقایسه نتایج به دست آمده در سه حالت انتقال (T)، دوران حول راس (RT)، دوران حول پایه (RB)، نتایج به دست آمده در یک گراف در کنار هم قرار داده شد. (مشخصات بارگذاری در جدول (۱) آمده است).

همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت RB رانش مقاوم بیشترین میزان را در بین سه حالت بررسی شده دارد، ولی نقطه اثر آن نسبت به دو حالت دیگر در ارتفاع بیشتری اثر می‌کند.

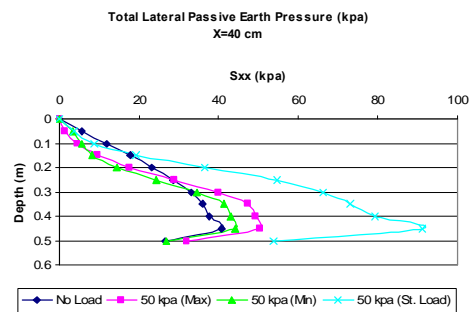
همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، برآیند رانش مقاوم در حالت T و RB تقریباً در  $\frac{1}{3}H$  و در حالت RT در  $\frac{1}{4}H$  اثر می‌کند.

### تأثیر سربار سیکی بر رانش مقاوم

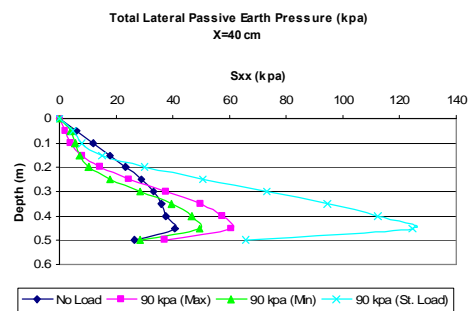
برای بررسی تأثیر بارگذاری سیکی بر رانش مقاوم خاک، برخی از نتایج به دست آمده از تحقیقات انجام شده ارائه می‌شود. مشخصات پیش‌فرض در نظر گرفته شده در مطالعات مطابق جدول (۱) بوده است و در مطالعات پارامتری، پارامتر مورد نظر تغییر یافته است.

### مقایسه مقادیر حداقل و حداکثر رانش

در این قسمت مقادیر حداکثر و حداقل رانش مقاوم برای مقایسه با حالت استاتیکی در اشکال (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۸: مقایسه توزیع رانش مقاوم در حداقل و حداکثر سربار و سربار استاتیکی 50 kPa (حالت T).

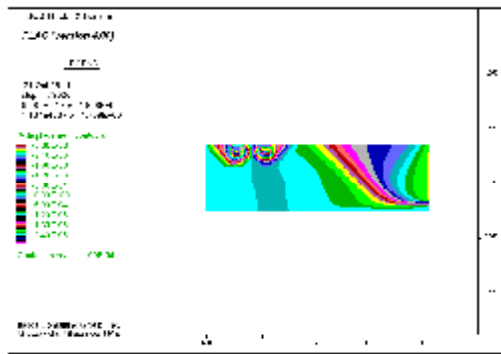


شکل ۱۹: مقایسه توزیع رانش مقاوم در حداقل و حداکثر سربار و سربار استاتیکی 90 kPa (حالت T).

همان‌طور که در اشکال (۱۸) و (۱۹) مشاهده می‌شود، با افزایش شدت بارگذاری میزان رانش مقاوم افزایش می‌یابد. همچنین اعمال بارگذاری سیکی باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار رانش مقاوم نسبت به حالت



علت کاهش رانش در فاصله ۱۲۰ سانتی متر از دیوار این است که نواحی گسیختگی ایجاد شده در زیر صفحه بارگذاری بر روی گوه گسیختگی خاک پشت دیوار تأثیر می‌گذارد. برای روشن شدن بیشتر موضوع در شکل (۲۴) تغییر مکان افقی خاک را برای بارگذاری در فاصله  $X=160$  cm از دیوار ترسیم شده است.



شکل ۲۴: بررسی تأثیر پذیری گوه گسیختگی از صفحه بارگذاری در فاصله  $X=160$  cm.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در  $X=160$  cm نیز، گوه گسیختگی هنوز متأثر از صفحه بارگذاری است.

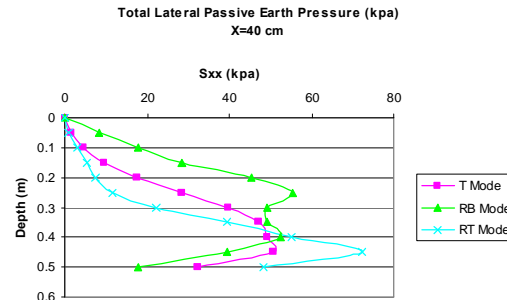
### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از تحقیقات انجام شده بررسی تأثیر تغییر مکان دیوار بر توزیع رانش مقاوم خاک بوده است. برای بررسی رانش مقاوم، یک مدل عددی توسط نرم‌افزار FLAC ساخته شده است.

طبق بررسی انجام شده نحوه تغییر مکان دیوار بر نتایج نهایی رانش تأثیرگذار است. با توجه به پیچیدگی زیاد مسئله در حالتی که حرکت دوران و انتقال با هم انجام می‌گیرد، نتایج تنها برای حالت دوران یا انتقال به صورت مجزا ارائه شده‌اند.

به طور کلی نقطه اثر برآیند رانش مقاوم (بدون در نظر گرفتن اثر سربار) در حالت انتقال (T) بین ۶۰٪ تا ۶۵٪، در حالت دوران حول پایه (RB) بین ۵۷٪ تا ۶۲٪، در حالت دوران حول رأس (RT) بین ۷۵٪ تا ۷۸٪ ارتفاع دیوار از بالای آن است. یعنی می‌توان گفت که نقطه اثر رانش مقاوم در سه حالت بالا به ترتیب در  $\frac{2}{3}$ ،  $\frac{2}{3}$  و  $\frac{3}{4}$  ارتفاع دیوار از بالا اعمال می‌شود.

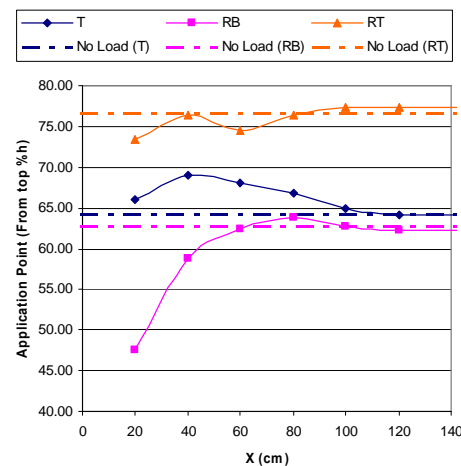
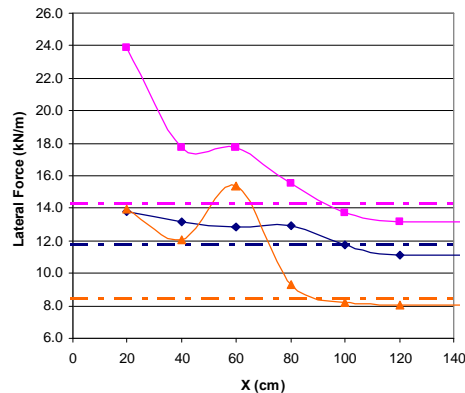
تأثیر سربار سیکلی بر رانش خاک بسیار کمتر از سربار



شکل ۲۲: تأثیر نوع تغییر مکان دیوار بر توزیع فشار مقاوم خاک بر دیوار در اعماق مختلف.

### تأثیر فاصله بارگذاری سیکلی بر رانش مقاوم خاک

به عنوان یک نتیجه گیری کلی می‌توان گفت که اگر سربار سیکلی در فاصله‌ای بیشتر از دو برابر ارتفاع دیوار از دیوار بر خاک اعمال شود، رانش (نسبت به رانش مقاوم در حالت بدون سربار) تغییر زیادی نمی‌کند، در غیر این صورت سربار سیکلی باعث افزایش رانش می‌شود.



شکل ۲۳: تأثیر نوع تغییر مکان دیوار و فاصله سربار از دیوار بر مقدار نیروی وارده و نقطه اثر آن.

جدول ۱: مشخصات در نظر گرفته شده برای مدل عددی.

زاویه اصطکاک داخلی	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	مقدار سربار (kPa)	عرض صفحه بارگذاری (cm)	فاصله صفحه تا دیوار (cm)	فرکانس بارگذاری
۳۶/۵	۱۵/۳۰	۵۰	۲۰	۴۰	۴

بیشتر شود، شیب نمودار کاهش می‌یابد. چنان چه سربار به مقدار قابل ملاحظه‌ای از دیوار دور شود، رانش کل وارد به دیوار حائل برابر رانش حاصل از خاک در حالت مقاوم خواهد بود.

### تقدیر و تشکر

مؤلفان وظیفه خود می‌دانند که از آقایان دکتر محمود نیکخواه، مهندس سعید ابریشمی و مهندس محسن کارگر، برای هم فکری هایی که داشته اند، تشکر و قدردانی کنند.

استاتیکی است. با ازدیاد شدت سربار قائم سیکی، مقدار رانش نیز افزایش می‌یابد. شدت سربار تأثیر چندانی بر شکل توزیع رانش و همچنین محل اثر نیروی برآیند ندارد. هر چه سربار سیکی به دیوار نزدیک‌تر شود، رانش سیکی وارد به دیوار حائل نیز افزایش می‌یابد. محل اثر نیروی برآیند به فاصله سربار تا دیوار بستگی دارد. هر چه سربار به دیوار نزدیک‌تر شود، فاصله محل اثر نیروی برآیند تا پای دیوار حائل افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله و دور شدن سربار از دیوار، مقدار فشار جانبی خاک در ابتدا به شدت کاهش یافته و در صورتی که فاصله سربار از دیوار

### مراجع

- 1 - Sherif, M. A. and Fang, Y. S. (1984). "Dynamic earth pressure on walls rotating about the top." *Journal Japanese Society of Soils and Foundations Eng.* Vol. 24, No.4, PP. 109-117.
- 2 - Fang, Y. S. and Ishibashi, I. (1986). "Static earth pressure with different wall movements." *J. Geot. Eng. ASCE*, Vol. 112, PP. 317-333.
- 3 - Fang, Y. S. and Ishibashi, I. (1987). "Dynamic earth pressure with different wall movements." *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 4, PP. 11-22, 1987.
- 4 - Fang, Y. S., Tsang, J. C. and Wu, B. F. (1994). "Passive earth pressures with various wall movement." *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 8, PP. 68-80.
- 5 - Fang, Y. S., Juing, M. C. and Cheng, Y. C. (1997). "Earth pressure with sloping backfill." *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 3, PP. 250-259.
- 6 - Nikkhah Shahmirzadi, M. (2003). *Evaluation of Earth Pressure on Retaining Walls under Cyclic Surcharges*, PhD. Thesis, Civil & Environmental Engineering Department of Amirkabir University of Technology, Tehran.
- 7 - Sharifzadeh Asli, M. (2006). *Numerical Evaluation of Passive Earth Pressure under Cyclic Surcharges*, M.Sc. Thesis, Civil & Environmental Engineering Department of Amirkabir University of Technology, Tehran, Oct.
- 8 - Sherif, M. A. and Ishibashi, I. and Lee, C. D. (1982). "Earth pressures against rigid retaining wall." *J. Geot. Eng. ACSE*, Vol. 108, No. 5, PP. 649-695.
- 9 - Sherif, M. M. and Mackey, R. D. (1977). "Pressure on retaining wall with repeated loading." *J. Geot. Eng. ASCE*, Vol. 103, No. 11, PP. 1341-1343.
- 10 - Shields, D. H. and Tolunay, A. Z. (1973). "Passive pressure coefficients by method of slices." *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 99, No. SM12, PP. 1043-1053.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Beam Element

2 - Nodes

3 - Interface

4 - Amplitude