

ارزیابی عددی توزیع تنش بر روی سپر حائل طره‌های مدفون در خاک دانه‌ای برای شرایط زمین لرزه

محمد حسین جهانگیر*^۱، زهرا خسروی^۲

۱- استادیار دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی طبیعت، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

mh.jahangir@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۰/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۲/۱۶]

چکیده - تاکنون بیشتر روش‌های کاربردی برای تعیین چگونگی توزیع تنش‌های جانبی حاصل از نیروهای لرزه‌ای بر اساس فرضیات ساده‌کننده رانکین و کولمب مطرح شده‌اند. طراحی لرزه‌ای سازه‌های حائل بر اساس نیروهای لرزه‌ای به وسیله‌ی مونونوبه-اکابه که مبتنی بر روش شبه استاتیکی است و نیروی اینرسی ضرایب شتاب افقی و قائم لرزه‌ای یکنواخت بوده، تجزیه و تحلیل شده است و در روش کولمب نیز شرایط همین طور است. در این سال‌ها ارائه تئوری وانگ برای دیوارهای حائل با خاکریز فعال، پژوهشگران را بر آن داشت تا در مورد نوع خاکریز مقاوم آن و بررسی حالت لرزه‌ای این تئوری برای دیوارهای حائل تلاش‌هایی صرف نمایند. در این مقاله تلاش می‌شود تا تئوری وانگ برای بررسی توزیع فشار جانبی خالص روی سپر بدون مهار جانبی نیز بکار بسته شود. پس مطابق این تئوری، دانستن چگونگی تشکیل سطوح گسیختگی در خاک‌های لایه‌ای و در مناطق فعال و مقاوم اهمیت پیدا می‌کند. همچنین سعی شده تا توزیع فشار جانبی تحت تأثیر پارامترهای مختلف مکانیکی خاکریز پشت سپر بررسی شود. در ادامه محل اثر برآیند نیروهای جانبی حاصل از این تئوری محاسبه و نشان داده می‌شود که مقدار برآیند وابسته به ضریب جانبی فشار k (استفاده شده در تئوری وانگ) نیست، با وجود اینکه توزیع فشار جانبی روی سپر با تغییر پارامتر k تفاوت می‌کند. البته محل اثر برآیند نیروهای جانبی وارد بر سپر با تغییر توزیع فشار جابه‌جا می‌شود ولی مقدار برآیند آن در مقایسه با روش کولمب یکسان باقی می‌ماند. بارگذاری لرزه‌ای در اینجا با ضرایب لرزه‌ای مدل شده است که ماکزیمم شتاب زلزله را طراحی کرده است. در نتیجه این بحث می‌توان گفت که تعمیم تئوری وانگ در بررسی توزیع فشار لرزه‌ای روی سپرهای بدون مهار جانبی نیز به‌خوبی جواب می‌دهد و می‌توان از آن به‌عنوان یک روش جدید محاسباتی در تحلیل و طراحی سپرها استفاده نمود.

کلمات کلیدی: سپر حائل طره‌ای، روش کولمب، توزیع فشار لرزه‌ای، تئوری وانگ، گوه گسیختگی، محل اثر برآیند.

۱- مقدمه

گسترده برای سازه‌های نگهدارنده توده‌های خاکی استفاده می‌شود. پژوهش‌های بیشتر در مورد روش مونونوب-اکابه به وسیله‌ی سید و ویتمن در سال ۱۹۷۰ انجام شد [۳]. آنها پس از مقایسه نتایج آزمایشگاهی بر ضرایب فعال این روش صحه گذاشتند و روشی را نیز برای تعیین محل اثر برآیند نیروی جانبی ارائه کردند. پس از سید و ویتمن محققان دیگری نیز برای کنترل و مقایسه روش‌های پیشنهادی خود و یا بنا به نیاز روش مونونوبه-اکابه را ارزیابی کردند. از آن جمله می‌توان به گزارش فنگ و چن در مورد چگونگی اعمال ضرایب زلزله نام برد [۴]. روش مونونوبه-اکابه اساساً فقط برای تعادل نیروها

بررسی توزیع فشار زمین در حالت لرزه‌ای به منظور طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌های حائل در نواحی لرزه‌خیز از اهمیت زیادی برخوردار است. اوکابه در سال ۱۹۲۶ و مونونوبه و ماتسو در سال ۱۹۲۹، روشی را برای تعیین ضرایب رانش خاک‌های دانه‌ای در حالت زلزله ارائه کردند [۲-۱]. پس در میان روش‌های متعددی که برای تجزیه و تحلیل توزیع فشار زمین در حالت لرزه‌ای به کار می‌روند، روش شناخته شده مونونوبه-اکابه بر اساس تجزیه و تحلیل شبه استاتیکی و نظریه تعادل محدود و با توجه به سادگی آن هنوز هم به‌طور

این‌گونه از دیوارها به توزیع مکانی فشار زمین روی آن در حالت بحرانی نیاز است. حالت بحرانی معمولاً به صورت بارگذاری لرزه‌ای و با اعمال ضرایب لرزه‌ای که عملکرد بیشینه شتاب مرتبط با زلزله را نشان می‌دهند، مطرح می‌شود. بررسی فشار لرزه‌ای خاک وارد بر دیوار حائل موضوعی مهم برای طراحی ایمن سپر در مناطق لرزه‌خیز است. لکن در عمل شتاب لرزه‌ای حاصل از زلزله در جهات عمودی و افقی به صورت نیروهای استاتیکی معادل و اصطلاحاً به شکل شبه‌استاتیکی در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که بدان اشاره شد با استفاده از روش معادل شبه‌استاتیکی، پژوهشگران چند روش مختلف برای تعیین فشار جانبی زمین‌لرزه روی دیوارهای حائل توسعه داده‌اند. براین مبنا بیشتر محاسبات و طراحی‌های مربوط به سپرهای بدون مهار جانبی با کمک روش‌های رایج مبتنی بر نظریات کولمب و رانکین انجام گرفته است.

در سال‌های گذشته ارائه تئوری وانگ برای دیوارهای حائل با خاکریز فعال، پژوهشگران را بر آن داشت تا در مورد نوع خاکریز مقاوم آن و بررسی حالت لرزه‌ای این تئوری برای دیوارهای حائل تلاش‌هایی انجام دهند. اهمیت بررسی و تعمیم این روش در چند ویژگی خلاصه می‌شود. اولین مورد پیوستگی مقادیر تنش جانبی وارد بر دیوار حائل است که نسبت به تئوری کولمب با شکستگی‌های ناگهانی در وضعیت‌هایی چون تغییر لایه‌های خاک و یا تراز آب زیرزمینی ارجحیت داشته و به واقعیت فیزیکی نزدیکتر است. مورد بعد عدم وجود برش اضافی در پای دیوار یا سپر می‌باشد که ناشی از تفاوت سازوکار لغزش در دو روش وانگ و کولمب بوده و به محل تعیین شده برای دوران با ممان صفر وابسته نیست. در واقع اساس اختلاف دو روش در چگونگی ارتباط تنش افقی و قائم در پهنه توده گسیختگی است که برای کولمب با پارامترهای مقاومتی خاک تعریف شده و در روش وانگ فقط با ضریب فشار جانبی k ربط داده شده است. در این مقاله نیز هدف اصلی، تعمیم تئوری وانگ بمنظور ارزیابی عددی و چگونگی توزیع تنش جانبی بر روی سپر بدون مهار جانبی با وجود لایه‌های فعال و مقاوم متعدد در توده خاک و تحت اعمال شرایط شبه استاتیکی برای وجود زمین لرزه می‌باشد.

بکار گرفته شده و بنابراین نمی‌تواند اطلاعات دیگری مانند برآیند نیروها و تغییر توزیع فشار زمین در طول دیوار حائل را ارائه دهد. روش اصلاح شده کولمب نیز که از تخمین نیروی اینرسی روی گوهی لغزنده ایجاد شده به وسیله‌ی شتاب زلزله گرفته شده است، بیشتر در برآورد میزان انرژی لرزه‌ای کارایی دارد [6-5]. همچنین مانند روش مونونوبه- اوکابه، سطح شکست در تئوری کولمب نیز مسطح و صاف فرض شده است، صرفنظر از این واقعیت که سطح لغزش بحرانی ممکن است به شکل منحنی باشد. همچنانکه یکی از الزامات اساسی تمامی این نظریه‌ها این است که دیوار برای ایجاد حالت تعادل حدی در خاکریز، باید به اندازه‌ی کافی حرکت کند. این بدین معنی است که این روش‌ها فقط برای تعیین فشار لرزه‌ای زمین در حالت محدود مناسب‌اند. بطوریکه سطح توزیع فشار جانبی حاصل از آن به صورت منحنی ترسیم خواهد شد [8-7]. شریف و فانگ با نتایج تجربی دریافتند که تحرک دیوار و توزیع فشار جانبی زمین غیرخطی است [9]. وانگ توزیع فشار جانبی روی دیوار حائل را در شرایط استاتیکی و قضاوی و صفر زاده در حالت لرزه‌ای بررسی کردند [10-11]. آنها نیز به همین نتایج با تحلیل ریاضی دست یافتند. تئوری وانگ شکلی منحنی‌وار به سطوح توزیع تنش بر روی دیوار حائل داده است، لکن این روش هنوز در ابتدای راه بوده و اصطلاحاً خام است و برای تعمیم به سایر سازه‌های حائل و انجام اصلاحات بیشتر به زمان نیاز دارد [10]. در این پژوهش سعی شده است تا با تعمیم روش وانگ برای یک دیوار سپری بدون مهار، منحنی توزیع فشار جانبی خاک در حالت لرزه‌ای تعیین و با نتایج حاصل از روش کولمب مقایسه شود.

۲- فشار لرزه‌ای بر روی سپر حائل طره‌ای

دیوارهای سپری در پروژه‌های ساحلی به‌عنوان موج‌شکن، دیوار آب‌بند و یا اسکله بندر کاربرد زیادی دارند. همچنین از سپرکوبی برای حفاظت از حاشیه ساحل در مقابل فرسایش، تثبیت شیب‌های زمین به‌ویژه برای جاده‌ها (به جای استفاده از دیوارهای نگهدارنده)، به عنوان دیوار حایل ترانشه‌ها و دیگر گودها و برای فرازبندها استفاده می‌شود. از این رو برای طراحی

ضریبی از شتاب جاذبه زمین، برای تعیین نیروهای اینرسی ناشی از زمین لرزه استفاده می‌شود. این روش تخمینی به وسیله مونونوبه و اوکابه توسعه یافت، به گونه‌ایی که اثر زلزله به صورت نیروهای شبه استاتیکی و با شتاب‌های ثابت و معین افقی و قائم اعمال می‌شود. برای محاسبه فشارهای خاک می‌توان از ضرایب فشار جانبی خاک رانکین یا کولمب استفاده کرد، اما معمولاً مقادیر کولمب ترجیح دارد [۶-۵]. امروزه از هر دو روش کولمب و رانکین به وسعت برای محاسبه فشار جانبی خاک بر روی سپرها استفاده می‌شود، اما در کل از نظریه کولمب به علت سادگی و محافظه کارانه‌تر بودن نسبت به روش رانکین استقبال بیشتری می‌شود. در روش کولمب ضرایب فشار لرزه‌ای محرک و مقاوم برای محاسبه توزیع فشار در اطراف سپر و همچنین فشارهای وارد شده بر طول سپر و عمق نفوذ سپر در خاک استفاده می‌شود و در پایان نمودار توزیع فشار جانبی سپر رسم می‌شود. (شکل ۱-۱) رفتار و تغییر شکل جانبی یک سپر کوبیده شده در توده خاک دانه‌ای در زیر خط لایروبی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود نواحی فعال و مقاوم در اطراف سپر روی شکل نشان داده شده‌اند و سپر می‌تواند حول نقطه O دوران کند. با توجه به تعادل فشارهای هیدرواستاتیک در دو طرف ارتفاع سپر مورد نظر، فقط فشار مؤثر خاک در محاسبات وارد خواهد شد.

پس مطابق این تئوری، دانستن شکل صحیح تشکیل سطوح گسیختگی در خاک‌های لایه‌ای و در مناطق فعال و مقاوم اهمیت پیدا می‌کند. همچنین سعی شده تا توزیع فشار جانبی تحت تأثیر پارامترهای مختلف مکانیکی خاکریز پشت سپر بررسی می‌شود. در ادامه مقدار برآیند نیروهای جانبی حاصل از این تئوری با روش کولمب مورد مقایسه قرار گرفته و نشان داده می‌شود که این مقدار وابسته به ضریب جانبی فشار k (استفاده شده در تئوری وانگ) نیست، با وجود اینکه توزیع فشار جانبی روی سپر با تغییر پارامتر k تفاوت می‌کند. البته محل اثر برآیند نیروهای جانبی وارد بر سپر با تغییر توزیع فشار جابه‌جا می‌شود ولی مقدار برآیند آن در مقایسه با روش کولمب یکسان و ثابت است. و در نتیجه کار می‌توان ادعا نمود که تئوری وانگ در ارائه توزیع فشار روی سپرهای بدون مهار جانبی به طرز مطلوبی جواب می‌دهد و می‌توان از آن به عنوان یک روش جدید محاسباتی در تحلیل و طراحی سپرهای طره‌ای در شرایط لرزه‌ای استفاده نمود [۱۲].

۱-۲- تئوری کولمب در حالت لرزه‌ای

به طور کلی در شرایط زلزله، خاک فشار جانبی بیشتری بر سپرها و دیوارهای حائل نسبت به حالت استاتیکی وارد می‌نماید. شیوه معمول ارزیابی لرزه‌ای دیوارهای حائل بر اساس روش شبه استاتیکی است که در آن ضرائب زلزله، برحسب

شکل ۱- شمای کلی از توزیع فشار جانبی واقعی و فرضی روی سپر بر اساس روش کولمب

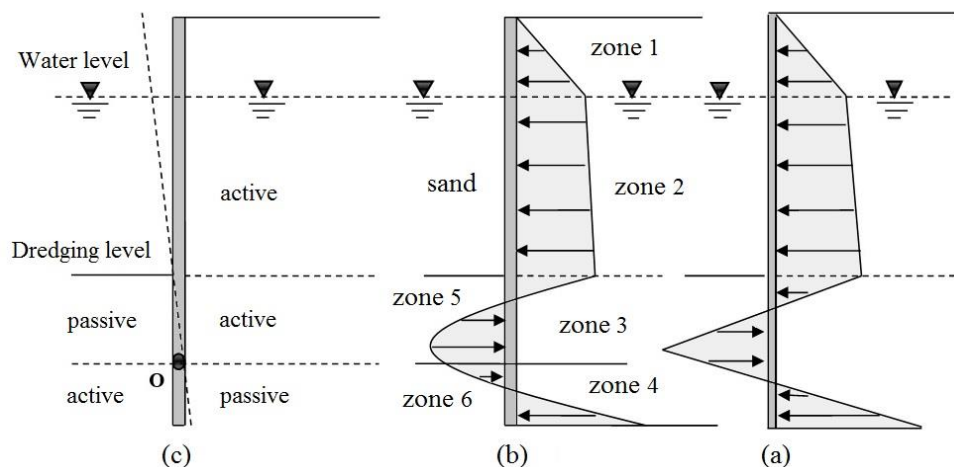


Fig.1. Schematic of the actual and hypothetical distribution of lateral earth pressure on the sheet pile wall by Coulomb method

شکل ۲- سطوح گسیختگی فرضی وقوع یافته در طرفین سپر طره‌ای کوبیده شده در خاک دانه‌ای

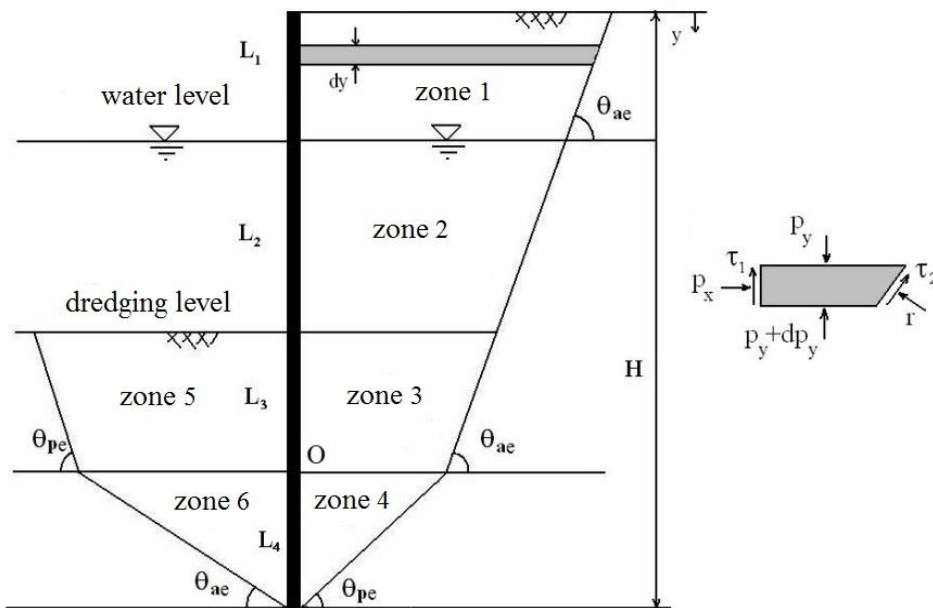


Fig. 2. The hypothesis failure surfaces in the both sides of cantilever sheet pile wall penetrating in coarse-grained

مقادیر ضرایب فشار جانبی به تئوری وانگ اضافه می‌شود. حال چنانچه خاکریزهای پشت و جلوی دیوار به شش ناحیه تقسیم شوند، به گونه‌ای از روش تحلیلی الگوی چرخش حول نقطه دوران فرضی O، استفاده شود، در واقع سپر به صورت پای مفصلی که در شکل (۱-ج) نشان داده شده مد نظر قرار می‌گیرد. پس براساس شکل (۲)، با دانستن این مطلب که خاک در نواحی ۱ تا ۳ و ۶ به صورت فعال و در نواحی ۴ و ۵ به صورت مقاوم رفتار می‌کند، می‌توان معادلات تعادل حاکم بر هر ناحیه را با شرایط جدید بازنویسی و مقدار تنش جانبی وارد بر سپر را در طول آن محاسبه نمود.

به عنوان نمونه با تعمیم تئوری وانگ در ناحیه (۱)، می‌توان مقدار تنش جانبی وارد بر سپر از سوی خاکریز فعال را که گوه گسیختگی آن به شکل یک دوزنقه است، محاسبه نمود. برای این کار ابتدا یک المان دوزنقه‌ای شکل مطابق شکل (۱) از گوه جدا کرده و با قرار دادن نیروهای مورد نظر روی آن تعادل در دو جهت افقی و قائم نوشته می‌شود. نیروهای وارد شده بر این المان ناشی از وزن خود المان، تنش برشی وارد بر سطوح، نیروهای قائم وارد بر المان از بالا و پایین و عکس‌العمل خاک اطراف است. معادلات تعادل برای یک المان از ناحیه مورد بحث در راستای افق و قائم به صورت زیر به دست می‌آید:

در شکل (۱-ب) توزیع و فشار خالص واقعی روی سپر نشان داده شده است ولی برای طراحی، این توزیع فشار با فرضیه‌هایی ساده‌کننده به صورت شکل (۱-الف) در نظر گرفته می‌شود. ولی همان‌گونه که گفته شد به تازگی یک روش جدید به وسیله وانگ برای محاسبه توزیع فشار روی دیوار حائل به دست آمده است که در محاسبات توزیع فشار جانبی روی دیوار حائل، ضریب فشار لرزه‌ای را یک عدد ثابت فرض کرده است [۱۰].

۲-۲- تعمیم تئوری وانگ برای سپر

در این مقاله با استفاده از روش وانگ، به جای استفاده از ضرایب فشار جانبی محرک و مقاوم به کار رفته در روابط کولمب، از یک ضریب ثابت برای ارتباط تنش افقی و قائم استفاده می‌شود و محاسبات براساس گوه‌های گسیختگی تشکیل شده در هر یک از نواحی فعال و مقاوم ایجاد شده در طرفین سپر حائل طره‌ای انجام می‌گیرد. مطابق شکل (۲)، نواحی گسیختگی ایجاد شده در دو طرف یک سپر کوبیده شده بدون مهار در خاک دانه‌ای در یک حالت خاص نشان داده شده است. همچنین شرایط لرزه‌ای با اعمال زوایای مشخص برای گوه‌های گسیختگی تشکیل شده در اطراف سپر و تغییر در

$$\sum F_x = P_x + \tau_2 \cdot \cot \theta_{ae} - r = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = P_y (L_1 - y) \cot \theta_{ae} + P_y L_4 \cot \theta_{pe} + (L_3 + L_2) \cot \theta_{ae} P_y + dw - (P_y + dP_y)(L_1 - y - dy) \cot \theta_{ae} +$$

$$- (P_y + dP_y)[L_4 \cot \theta_{pe} + (L_3 + L_2) \cot \theta_{ae}] - \tau_1 dy - \tau_2 \frac{dy}{\sin \theta_{ae}} \sin \theta_{ae} - r \frac{dy}{\sin \theta_{ae}} \cos \theta_{ae} = 0 \quad (2)$$

در روابط بالا ملاحظه می‌شود که زوایای سطوح شکست در نواحی مقاوم و فعال مورد استفاده قرار گرفته است. این زوایا به شدت زمین لرزه، زاویه اصطکاک داخلی خاک،

$$\theta_{ae} = \varphi - \psi + \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\varphi - \psi - \alpha) + C}{D} \right) \quad (3)$$

$$C = \sqrt{\tan(\varphi - \psi - \alpha) [\tan(\varphi - \psi - \alpha) + \cot(\varphi - \psi)]} \cdot [1 + \tan(\delta + \psi) \cot(\varphi - \psi)]$$

$$D = 1 + \tan(\delta + \psi) [\tan(\varphi - \psi - \alpha) + \cot(\varphi - \psi)]$$

گسیختگی در نواحی مقاوم، زاویه شکست به صورت زیر مطرح می‌شود [۱۳-۱۴]:

که در آن، $\Psi = \tan^{-1}(k_H/(1-k_v))$ شدت زلزله را برحسب ضرایب افقی و قائم زمین لرزه بیان می‌کند. همچنین برای گوه

$$\theta_{pe} = \psi - \varphi + \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\varphi - \psi - \alpha) + E}{F} \right) \quad (4)$$

$$E = \sqrt{\tan(\varphi - \psi + \alpha) [\tan(\varphi - \psi + \alpha) + \cot(\varphi - \psi)]} \cdot [1 + \tan(\delta - \psi) \cot(\varphi - \psi)]$$

$$F = 1 + \tan(\delta + \psi) [\tan(\varphi - \psi + \alpha) + \cot(\varphi - \psi)]$$

مشخص می‌توان نوشت:

برای دیفرانسیل وزن المان دوزنقه‌ای با وزن مخصوص

$$dw = \gamma' \cdot \left[\frac{(L_1 - y - dy) \cot \theta_{ae} + B + (L_1 - y) \cot \theta_{ae} + B}{2} \right] dy = \gamma' \cdot [(L_1 - y) \cot \theta_{ae} + B] dy \quad (5)$$

$$B = L_4 \cot \theta_{pe} + (L_3 + L_2) \cot \theta_{ae}$$

$$\tau_1 = (r - r \cdot \tan \varphi \cot \theta_{ae}) \cdot \tan \delta \quad (9)$$

و برای عکس‌العمل خاکریز روی گوه با استفاده از روابط فرض شده، می‌توان نوشت:

$$(10)$$

در ادامه با مشخص شدن مجهولات تعادل در راستای قائم و با ساده‌سازی و مرتب نمودن معادله فوق، رابطه دیفرانسیلی زیر براساس مشخصات مکانیکی خاکریز، ضرایب شتاب زمین لرزه و زوایای گسیختگی حاصل می‌شود:

$$\frac{dP_y}{dy} = \gamma' + P_y [1 - k \cdot a] \frac{1}{\tan \theta_{ae} \cdot [(L_1 - y) \cot \theta_{ae} + B]} \quad (11)$$

حال با ضرب تنش قائم در یک ضریب عددی ثابت مانند k مقدار تنش افقی حاصل می‌شود. همچنین مقدار تنش برشی ناشی از اصطکاک بین خاک و سپر به وسیله‌ی تانژانت زاویه اصطکاک خاک و دیوار δ ، با تنش افقی مرتبط می‌شود و تنش برشی گوه گسیختگی با خاکریز پشت سپر با تانژانت زاویه اصطکاک خاک φ ، به عکس‌العمل خاکریز ربط داده شده است. [۱۰]

$$P_x = k \cdot P_y \quad (6)$$

$$\tau_1 = P_x \cdot \tan \delta \quad (7)$$

$$\tau_2 = r \cdot \tan \varphi \quad (8)$$

با تلفیق روابط بالا مقدار تنش برشی حاصل از اصطکاک بین خاک و سپر به صورت زیر درمی‌آید:

معادله دیفرانسیل جدا شده است:

که مقدار پارامتر a در رابطه ارائه شده به صورت زیر از

$$a = \frac{\cos \varphi \cdot \sin \theta_{ae}}{\sin(\theta_{ae} - \varphi)} (-\tan \varphi \cdot \tan \delta + \tan \delta \cdot \tan \theta_{ae} + \tan \varphi \cdot \tan \theta_{ae} + 1) \quad (12)$$

حل کلی معادله دیفرانسیل بالا بصورت زیر پیشنهاد می‌شود و با قرار دادن شرایط مرزی پارامتر A نیز به دست می‌آید:

$$P_y = A \cdot \frac{1}{k} [(L_1 - y) \cdot \cot \theta_{ac} + B] \tan \theta_{ac}]^{ak-1} + \frac{\gamma'}{ak-2} [(L_1 - y) \cot \theta_{ac} + B] \cdot \tan \theta_{ac} \quad (13)$$

مهار $L_1=2\text{ m}$ و $L_2=3\text{ m}$ برای خارج از خاک فرض شده است. ضرایب شتاب زلزله نیز به صورت $k_H=0.2$ و $k_V=0$ فرض شده‌اند. سایر پارامترهای مجهول با استفاده از روابط محاسبه می‌شوند. در گام نخست برای درستی آزمایشی نتایج به دست آمده منحنی توزیع تنش با روابط کولمب مورد قیاس واقع شده‌است. با مقایسه نتایج حاصل در شکل (۳) بر اساس تئوری وانگ، و مقادیر به دست آمده برای نیروهای برآیند پشت سپر مطابق با روش کولمب مشاهده می‌شود، تفاوت محسوسی میان مقادیر بدست آمده در هر دو روش وجود نداشته و با اختلاف اندکی از یکدیگر تبعیت می‌کنند و فقط اختلاف در چگونگی توزیع تنش‌های جانبی روی سپر است. همچنین محل اثر و مقدار بیشینه برش بوجود آمده روی سپر نیز در دو روش متفاوت بوده و به تبع محل ممان صفر که مرکز لغزش دورانی هم است، با یکدیگر فرق دارد. همچنانکه منحنی توزیع تنش برخلاف تئوری کولمب، برای روش استفاده شده در پای سپر به مقدار صفر میل می‌نماید که این موضوع مستقل از طول کلی سپر است. نتیجه اخیر به لحاظ برقراری تعادل در نوک سپر به دست آمده است، همان‌گونه که برای بالای سپر نیز مقدار تنش جانبی صفر است. اما تغییر لایه‌های خاک و سطوح شکست سبب تغییر مقدار منحنی توزیع و جابه جایی آن در دو طرف سپر حائل به صورت مقاوم و فعال خواهد شد.

در ادامه یک مطالعه پارامتریک در خصوص چگونگی تأثیر هر یک از پارامترهای مکانیکی خاک روی توزیع فشار جانبی خاک بر سپر بدون مهار انجام شده است، به گونه‌ای با تغییر کمیت‌های مختلف و ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها، حساسیت-سنجی رفتار خاک دانه‌ای نسبت به منحنی تنش در طول سپر انجام می‌شود.

الف- مقادیر ضریب جانبی در روش کولمب برای نواحی فعال و مقاوم برای حالت زمین لرزه به زوایای α ، ϕ و δ بستگی

رابطه به دست آمده با اعمال شرایط مرزی برای P_y به صورت یک معادله برای محاسبه بار قائم بر روی المان گوه گسیختگی خاک پشت سپر به دست می‌آید. بدین ترتیب که باید برای $y=0$ مقدار P_y برابر با سربار q قرار بگیرد:

$$q = \frac{A}{k} [L_1 + B \tan \theta_{ac}]^{ak-1} + \frac{\gamma'}{ak-2} [L_1 + B \cdot \tan \theta_{ac}] \quad (14)$$

بنابراین مقدار پارامتر A از تساوی بالا حاصل می‌شود:

$$A = k \times \frac{\left[q - \frac{\gamma'}{ak-2} (L_1 + B \cdot \tan \theta_{ac}) \right]}{(L_1 + B \tan \theta_{ac})^{ak-1}} \quad (15)$$

بنابراین مقدار تنش جانبی P_x که خاکریز فعال در (ناحیه ۱) روی سپر اعمال می‌کند با استفاده از رابطه (۴) در ارتفاع سپر محاسبه می‌شود. به همین ترتیب برای سایر نواحی گسیختگی مشخص شده در شکل (۲) نیز روابط تعادل نوشته شده و رابطه‌ای مشابه ناحیه (۱)، برای هریک حاصل خواهد شد.

۳- اثر پارامترهای مؤثر بر توزیع فشار جانبی برای سپر حائل طره‌ای در شرایط لرزه‌ای

در ادامه کار با مشخص نمودن مقادیر پارامترهای مؤثر خاک و سپر، نمودار توزیع فشار جانبی روی سپر طره‌ای در حالت لرزه‌ای با توجه به معادلات به دست آمده با کمک نرم افزار متلب رسم شد. فرض بر این است که سپر در خاک دانه‌ای با مشخصات $\gamma = 18\text{ kN/m}^3$ ، $\gamma_{sat} = 20\text{ kN/m}^3$ ، $\alpha = 0$ کوبیده شده است. زاویه اصطکاک بین خاک دانه‌ای و سپر حدود $\delta = 0.67\phi$ در نظر گرفته شده است. همچنین ارتفاع سپر بدون-

شکل ۳- مقایسه منحنی توزیع فشار لرزه‌ای وارد بر سپر براساس تئوری

وانگ با روش کولمب

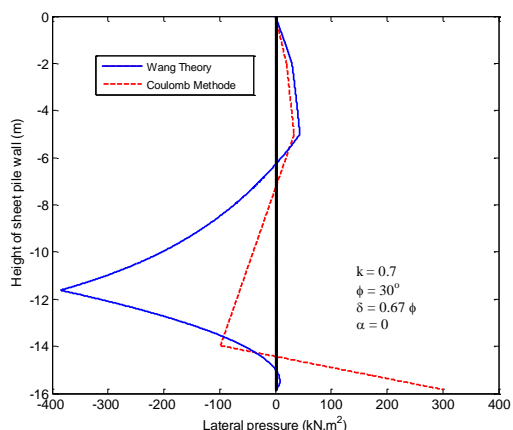


Fig. 3. Compare of the lateral earth pressure distribution curve on the sheet pile wall by the Wang's theory and Coulomb method

شکل ۴- تغییرات توزیع فشار لرزه‌ای خاک وارد بر سپر طره‌ای به‌ازای

مقادیر مختلف از ضریب فشار جانبی k

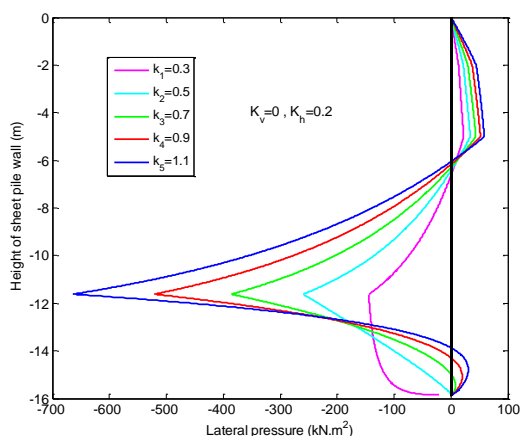


Fig. 4. Variation of the lateral earth pressure distribution on sheet pile wall into different values of lateral stress coefficient, k

شکل ۵- اثر تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر توزیع فشار لرزه‌ای خاک

وارد بر سپر طره‌ای

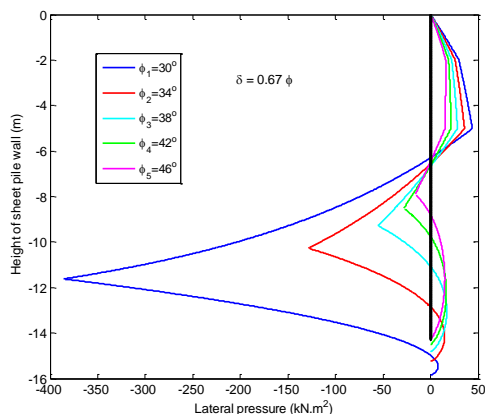


Fig. 5. Change effect of the internal friction angle on the lateral earth pressure distribution towards sheet pile wall

دارد، درحالی‌که در روش وانگ به صورت یک عدد ثابت فرض می‌شود به گونه‌ای با تغییر ضریب وانگ (k)، نمودار توزیع فشار به عمق مدفون سپر همچون روش کولمب ثابت می‌ماند. پس مطابق شکل (۴) با افزایش مقدار ضریب جانبی k بر بیشینه مقدار فشار در ناحیه مدفون افزوده شده و بطور کلی می‌توان اثری افزایشی برای توزیع مقدار تنش روی سپر طره‌ای در نظر گرفت، هرچند مکان وقوع بیشینه فشار تغییری نکرده است. نکته قابل توجه دیگر، تجاوز منحنی توزیع فشار به قسمت مثبت نمودار و سپس میل آن به صفر است که بیانگر تغییر رویکرد رفتار خاک اطراف سپر است. پس می‌توان نتیجه گرفت که ضریب جانبی وانگ تابعی از مشخصات مکانیکی توده خاک است به گونه‌ای که افزایش آن مقاوم بودن خاک را دربردارد.

ب- بطور معمول با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک برای شرایط مشخص از زمین لرزه، طول مدفون مورد نیاز سپر در خاک دانه‌ای کاهش می‌یابد و به تبع آن، مقدار فشار جانبی حداکثر وارد بر دیوار به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۵) با تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک، نسبت نیروی جانبی خاک به طول سپر تغییر می‌کند. بدیهی است برای مقادیر زاویه اصطکاک بیشتر از 38° در شرایط فعلی به دلیل افزایش بیش از حد فشار جانبی خاک و برآیند کل وارد بر سپر باید از روش‌های مختلف برای مهار سپر استفاده نمود.

ج- در شرایط زمین لرزه، خاک فشار جانبی بیشتری بر سپر اعمال می‌کند به گونه‌ای که نیروی آن مطابق روش‌های شبه استاتیکی به صورت ضریبی از شتاب ثقل وارد بر جرم توده خاکی در نظر گرفته می‌شود. تغییرات این ضرایب شتاب بر مقدار عمق مدفون سپر بی‌تأثیر و بر میزان فشار جانبی بیشینه خاک تأثیر زیادی دارد. همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با تغییر مقدار ضریب شتاب قائم و ثابت نگه داشتن ضریب شتاب افقی $k_h = 0.2$ ، بیشینه فشار جانبی و برآیند نیروهای کل وارد بر سپر افزایش می‌یابد، ولی تغییرات زیادی در عمق مدفون دیده نمی‌شود، به گونه‌ای که برای $k_v = 0.4$ افزایشی در حدود $1/1$ برابر نسبت به حالت استاتیکی رخ داده است.

عدم استفاده از هیچگونه سیستم مهاربندی، کاهش پایداری سپر را در پی خواهد داشت. بنابراین در این شرایط پیشنهاد می‌شود از سپر پای گیردار استفاده، و طراحی ایمن لحاظ شود.

شکل ۸- بررسی توزیع فشار لرزه‌ای خاک وارد بر سپر طره‌ای برای چند زاویه از شیب خاکریز پشت سپر

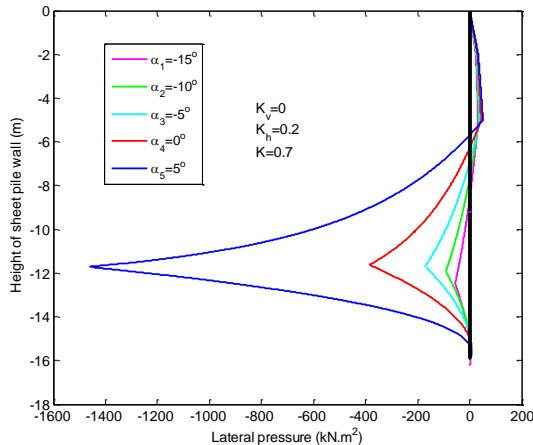


Fig. 8. Study of lateral stress distribution for multi- inclination angle of the backfill

د- تا این مرحله مقدار زاویه شیب خاکریز پشت سپر صفر فرض شده بود. اما باید دقت داشت که با کاهش زاویه α عمق مدفون سپر نیز افزایش می‌یابد و سبب کاهش پایداری بلند مدت سپر می‌شود. در شکل (۸) نمودار توزیع فشار جانبی به ازای مقادیر مختلف از زاویه شیب پشت خاکریز رسم شده است. بزرگی توزیع فشار جانبی وارد بر سپر با افزایش مقادیر اندکی از زاویه شیب خاکریز پشت سپر به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد. این امر ناشی از کاهش زاویه سطوح لغزش با افق و بزرگ شدن گوه گسیختگی حاصل شده و افزایش قابل ملاحظه نیروهای ثقلی و زلزله مؤثر بر آن می‌شود. لیکن با کاهش این زاویه و کسب مقادیر منفی برای آن، مقادیر فشار جانبی تغییر نسبی زیادی نخواهد داشت. پس افزایش یا کاهش زاویه α بر عمق مدفون سپر بدون اثر و بر تنش جانبی طراحی سپر غیرقابل چشم‌پوشی کردن است.

ر- در شکل (۹) منحنی توزیع فشار جانبی برای محدوده کوچکی از تغییرات وزن مخصوص خاک دانه‌ای برای زاویه اصطکاک و چسبندگی مشخص از توده خاکی ترسیم و مشاهده می‌شود که عمق نفوذ سپر در خاک افزایشی اندک خواهد

شکل ۶- توزیع فشار لرزه‌ای خاک وارد بر سپر طره‌ای نسبت به تغییر ضریب شتاب قائم زمین لرزه

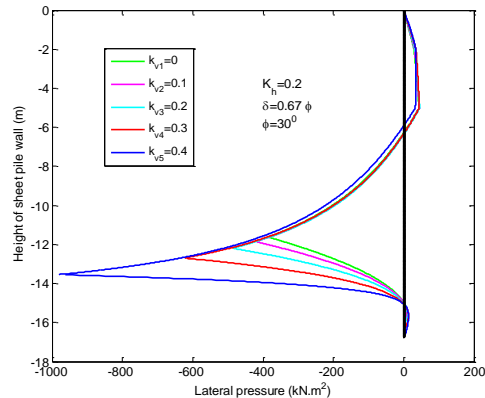


Fig. 6. Distribution of the lateral earth pressure on sheet pile wall into variation of vertical earthquake coefficient

شکل ۷- توزیع فشار لرزه‌ای خاک وارد بر سپر طره‌ای برای مقادیر متفاوت از ضریب شتاب افقی زمین لرزه

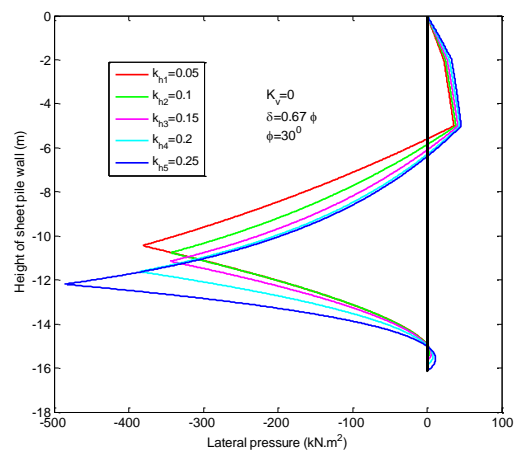


Fig. 7. Distribution of the lateral earth pressure on sheet pile wall into variation of horizontal earthquake coefficient

د- نمودار توزیع فشار جانبی سپر در شرایط زمین لرزه با فرض عدم وجود شتاب قائم زلزله $k_v = 0$ و تغییر میزان ضریب شتاب افقی با گام‌های کوچک در شکل (۷) رسم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، شدت تغییرات برای مقادیر کوچکتر از 0.15 برای شتاب افقی، روندی کاهشی داشته و بعد از آن رویکرد منحنی توزیع افزایشی خواهد بود. همچنین مقدار عمق مدفون سپر در خاک نیز دستخوش تغییرات اندکی است. برای نمونه در مقدار $k_h = 0.05$ طول کلی سپر $15/3$ متر است که با افزایش ضریب شتاب افقی افزایش می‌یابد. محل اثر فشار جانبی حداکثر وارد بر سپر نیز با افزایش k_h در عمق پایین‌تری رخ خواهد داد که در صورت

مقدار مختلف از ضریب جانبی وانگ (k) ارائه شده است. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش ضریب جانبی نسبت تنش‌ها، بدلیل افزایش مقدار برآیند کل نیروها در ناحیه مقاوم تشکیل شده، محل اثر برآیند به نوک سپر نزدیک‌تر می‌شود. همچنین برای یک مقدار ثابت از ضریب جانبی وانگ، با افزایش سهم نیروی معادل برآیند، محل اثر آن در عمق پائین‌تری از خاک واقع می‌شود. این مطلب می‌تواند برای طراحی انواع دیوارهای حائل در خاک‌های لایه‌ای مدنظر قرار گیرد.

شکل ۱۰- تغییرات محل اثر نیروی برآیند فشار جانبی نسبت به برآیند نرمالیزه شده با تغییر ضریب جانبی وانگ

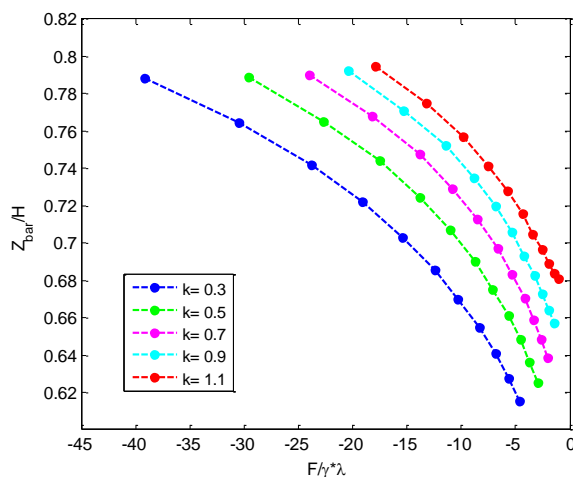


Fig. 10. Change the effect point of lateral pressure resultant respect to normalized resultant with Wang's lateral coefficient changes

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با توسعه روابط وانگ از شرایط استاتیکی به حالت لرزه‌ای برای سپر حائل طره‌ای مدفون در خاک دانه‌ای، چگونگی تشکیل سطوح فعال و مقاوم بررسی و تأثیر زوایای گسیختگی در شرایط زلزله بر رابطه محاسباتی فشار جانبی وارد بر سپر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در روش کولمب برای هریک از نواحی فعال و مقاوم یک ضریب جداگانه که به پارامترهای مختلف خاک و سازه حائل وابسته‌اند، تعریف می‌شود و در محاسبات و رسم نمودار توزیع فشار لرزه‌ای در اطراف سازه در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که تئوری وانگ یک عدد ثابت به جای این دو ضریب فرض می‌کند و توزیع

یافت. هرچند تغییرات زیادی در شمای کلی نمودار توزیع ملاحظه نمی‌شود، لکن بیشینه فشار جانبی محاسباتی افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب برای وزن مخصوص $\gamma_t = 14 \text{ kN/m}^3$ مقدار عمق مدفون سپر طره‌ای در خاک دانه‌ای از $15/46$ متر به بیشینه $15/77$ متر برای $\gamma_t = 22 \text{ kN/m}^3$ می‌رسد. در نتیجه می‌توان اظهار داشت که تغییر وزن مخصوص خاک اثر چندانی بر توزیع فشار جانبی لرزه‌ای بر سپر طره‌ای نخواهد گذاشت.

شکل ۹- توزیع فشار لرزه‌ای خاک وارد بر سپر طره‌ای به‌ازای تغییر وزن مخصوص مرطوب خاک دانه‌ای

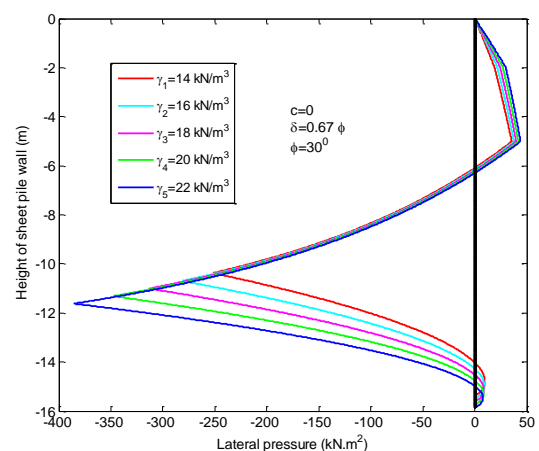


Fig. 9. Distribution of the lateral earth pressure on sheet pile wall for variation of wet density of sand

۴- محل اثر برآیند فشار لرزه‌ای

در حالت لرزه‌ای با توجه به غیرخطی بودن توزیع فشار جانبی روی سپر حائل، محل اثر برآیند نیروها برخلاف تئوری کولمب و روش مونونوبه- اوکابه در یک سوم ارتفاع دیوار برای هر ناحیه از مسأله واقع نمی‌شود، بلکه مستلزم استفاده از انتگرال‌گیری برای هریک از بخش‌ها خواهد بود. بدین منظور باید محل اثر برآیند تنش‌های جانبی هر یک از نواحی فعال و مقاوم به‌ازای مساحت اشغال شده زیر منحنی توزیع فشار نسبت به ارتفاع کل سپر بدون مهار محاسبه شود. اما با توجه به برقراری تعادل نیروها برای سپر طره‌ای مفروض در روش کولمب، نمی‌توان محل اثر برآیند نیروهای لرزه‌ای حاصل از به کارگیری تئوری وانگ را با آن مقایسه نمود. در (شکل ۱۰)، منحنی نسبت محل اثر برآیند نیروهای جانبی وارد بر سپر طره‌ای به طول کل در مقابل مقدار نرمالیزه شده برآیند برای چند

[۵] داس، براجا. ام، (۱۳۷۵)، "دینامیک خاک، ترجمه‌ی سید ابوالحسن نائینی،" انتشارات دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

[۶] میر محمد حسینی، م، (۱۳۷۲)، "دینامیک خاک،" موسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

[7] Paik, K. H. & Salgado, R. (2003), "Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects," *Geotechnique* 53, No.7, 643-653.

[8] Harrop-Williams, K. O. (1989), "Geostatic wall pressures. *J. Geotech. Engng.*" ASCE 115, No.9, 1321-1325.

[9] Sherif, M.A. & Fang, Y.S., (1984). "Dynamic earth pressure on walls rotating about the top, soils and foundations". 24:4,109-117.

[10] Wang Y.Z., Tang Z.P., and Zheng B. 2004. "Distribution of active earth pressure of retaining wall with wall movement of rotation about top," *applied mathematics and mechanics*, vol 25, NO (7), pp. 760-788.

[11] Ghazavi, M., Safarzadeh, Z., (2003). "Distribution of seismic active earth pressure on rigid retaining walls," *Forth International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (SEE4), IIEES, Tehran, Iran, Vol. I, Paper No. SF15, 563-570.*

[۱۲] جهانگیر، م. ح. و مقدس تفرشی، ن. (۱۳۸۸)، "تعیین عمق مدفون در سپرهای بدون مهار جانبی در شرایط بارگذاری لرزه‌ای،" هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز.

[۱۳] بولز، ج، (۱۳۷۹)، "تحلیل و طراحی پی،" ترجمه‌ی اردشیر اطمیابی، "نشر جویبار.

[14] Zarrabi, Kashani. (1979). "Sliding of gravity retaining wall during earthquakes considering vertical accelerations and changing inclinations of failure surface" S.M. Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

[15] Jahangir M., H and Khosravi Z.(2014). "Wang's Theory Usage in Distribution of Seismic Pressure of Sandy Soil on Sheet Pile Wall," 11th International Conference on Coasts, Ports & Marine Structures. Tehran, Iran. (ICOPMAS2014) (in Persian with English abstract)

[16] Joseph E.B. 1968. "Foundation Analysis and Design," McGraw-Hill, Inc. New York.

[17] Cernica John N. (1995). "Geotechnical Engineering: Foundation Design," John Wiley & sons. New York.

[18] Scott, R. F. (1973), "Earthquake-induced pressures on retaining walls," *Proc. 5th World Conf. on*

فشار را در اطراف دیوار حائل بررسی می‌نماید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برخلاف توزیع خطی فشار جانبی لرزه‌ای در روش کولمب، منحنی تنش وارد بر سپر در روش به کار رفته با چشم‌پوشی از تغییر ماهیت ناحیه گسیختگی، به صورت پیوسته و غیرخطی عمل کرده و در پایان در نوک سپر به مقدار صفر می‌رسد. بنابراین تنش جانبی حداکثر قابل وقوع در روش وانگ بمراتب بیشتر از روش کولمب و محل اثر آن به نوک سپر نزدیک‌تر است. همچنین اثر تغییر هریک از کمیت‌های مؤثر بر ضرایب فشار جانبی در روش کولمب، بطور مستقل بر منحنی توزیع تنش لرزه‌ای وارد بر سپر بدون مهار دیده شده است. از اینرو می‌توان فهمید که ضریب فشار وانگ که بیانگر نسبت تنش‌ها در توده خاک دانه‌ای است، مستقل از ضرایب شتاب زمین لرزه و پارامترهای مقاومتی بوده و فقط منحنی توزیع را باز یا بسته می‌کند. بنابراین عمده تفاوت دو روش در چگونگی لحاظ نمودن اثر بار لرزه‌ای در شکل توزیع تنش‌ها و محل اثر برآیند حاصل مشاهده می‌شود. برآیند نیروهای جانبی وابسته به ضریب جانبی فشار k استفاده شده در تئوری وانگ نیست، با وجود اینکه توزیع فشار جانبی روی سپر با تغییر پارامتر k تفاوت می‌کند. البته محل اثر برآیند نیروهای جانبی وارد بر سپر با تغییر توزیع فشار جابه‌جا می‌شود ولی مقدار برآیند آن در مقایسه با روش کولمب یکسان و ثابت است. پس انتظار می‌رود تا از نتایج به کارگیری این روش در تحلیل و طراحی سپرهای بدون مهار جانبی در شرایط لرزه‌ای، بدلیل سادگی ارتباط ضرایب شتاب زمین لرزه با نواحی گسیختگی به وسعت استفاده شود.

References

۶- مراجع

- [1] Okabe, S. (1926). "General theory of earth pressures," *Journal of the Japan Society Civil Engineering*. 12(1).
- [2] Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). "On the determination of earth pressures during earthquakes," *Proceedings, World Engineering Congress*.
- [3] Seed, H.B. Whitman, R.V. (1970). "Design of earth and retaining structures for dynamic loads," *ASCE Specialty Conference: Lateral Stresses in the Design of Earth Retaining Structures*, pp. 103-147
- [4] Fang Y-S, Chen T-J. (1995). "Modification of Mononobe-Okabe theory" *Geotechnique*, 45(1), pp. 165-167.

Subba Rao, K. S., Nayak, S. & Choudhury, D. (2004), "Determination of displacement-related passive earth Pressure," *Geotech. Eng. J.* 35(2): 79–85

[22] Choudhury, D. & Singh, S. (2006), "New approach for estimation of static and seismic active earth pressure," *Geotech. Geol. Eng.* 24: 117–127

[23] Song, F. & Zhang, J. M. (2008), "Evaluation of Seismic Earth Pressures at the Passive Side," The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Earthquake Engineering (Tokyo: Int. Assoc. Earthquake Eng.) 2: 1611–1620

[19] Veletsos, A. S. & Younan, A. H. (1994), "Dynamic soil pressures on rigid vertical walls," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 23: 275–301

[20] Choudhury, D. & Subba Rao, K. S. (2002), "Displacement related active earth pressure," *Proc. Int. Conf. on Advances in Civil Engineering (ACE 2002)* 2: 1038–1047

[21] Chopra, A. K. (2003), "Dynamics of structure theory and application to earthquake engineering," 2nd edn (New Delhi: Prentice Hall of India).

Numerical Evaluation of Stress Distribution on the Cantilever Sheet Pile Wall in Earthquake Conditions

Mohammad Hossein Jahangir^{1*}, Zahra Khosravi²

1- Assistant Professor, Faculty of New Sciences & Technologies, University of Tehran

2- Student of Master, Faculty of New Sciences & Technologies, University of Tehran

mh.jahangir@ut.ac.ir

Abstract:

Estimation of seismic earth pressures is the practical significance for the earthquake resistant design of the retaining structures such as retaining walls, sheet pile walls, basement walls of buildings and bridge. Mononobe-Okabe method among the several approaches which have developed to solve the dynamic earth pressure problems, is well known based on pseudo-static analysis and limit equilibrium theory is still the most widely used to determine the seismic earth pressure on a retaining structure due to its definite advantage of the simplicity. The other method used is a modification of Coulomb's wedge theory which is taking into account the inertia forces on a sliding soil wedge caused by earthquake accelerations. The spatial distribution of the earth pressure against a sheet pile wall is critical for designing procedures of these walls. Until now, the analysis and design of the cantilever sheet pile walls are done with general Rankin and Coloumb methods. Seismic design of the earth retaining structures is usually based on the seismic forces and pressures estimated by the Mononobe-Okabe method that is known based on pseudo-static analysis and the inertial forces corresponding to uniform horizontal and vertical accelerations. The applied method is based on the modification of Coulomb's classical earth pressure theory for dry sand to account for the inertial forces corresponding to uniform horizontal & vertical accelerations. During recent years the Wang theory's offers for retaining wall with active backfill and the other attempts of researchers is lead to be applied this theory for retaining wall and the other types of the passive backfill in seismic conditions. In this paper, it is tried in Wang theory's toward the searching distribution of net lateral earth pressure on the cantilever sheet pile wall, also is employed. In this study, we develop relationships of Wang's theory from static to seismic in terms of developing a program in MATLAB, and how formation of active and passive soil levels on both sides of sheet pile wall for granular soils and effect earthquake angles of failure on the distribution of lateral pressure on a sheet pile wall is studied. Therefore within this theory, it is considered the stable coefficient and calculation was established on the basis of the trapezoid - shaped wedges is right around the cantilever sheet pile. We show the result of lateral forces to the lateral pressure coefficient does not depend on k (using in Wang's theory) although the distribution of lateral pressure by varying the parameter k differs on sheet pile. However, the resultant effect of lateral forces acting on sheet pile is moved by changing the pressure distribution in comparison, but the outcome is the same and constant like Coulomb's theory. Therefore, it can be argued that Wang's theory provided the pressure distribution on sheet pile walls is well answered and can be used as a new method of calculation in the analysis and design of this retaining structure. Seismic loading is usually modeled with seismic coefficients, which are a function of the maximum accelerations associated with the design earthquakes. The present study develops the Wang method for determination of magnitude, distribution and the height of the point of application of total active thrust on sheet piles in seismic condition.

Keywords: sheet pile wall, Coloumb method, lateral earth pressure, Wang theory, trapezoid - shaped wedge, the resultant effect point.