

محاسبه‌ی تحلیلی اثر سربار در فشار فعال خاک در دیوارهای حائل با استفاده از روش قطعات افقی

مهیار طاهری (کارشناس ارشد)

علی قنبری* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوری ۲-۴۹، شماره ۳، ص. ۱۵-۱۰۷، (پادداشت فنی)

در بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی لازم است که فشار فعال ایجادشده در یک دیوار حائل، با توجه به سربار وارده بر خاکریز پشت دیوار محاسبه شود. در این تحقیق بر مبنای روش‌های تحلیلی، روش قطعات افقی مورد بازنگری و تدقیق قرار گرفته و فرمول‌بندی کامل آن برای به‌دست‌آوردن اثر سربار در دیوارهای خاک مسلح برای خاک‌های اصطکاکی و چسبنده‌ی اصطکاکی ارائه شده است. بر مبنای این فرمول‌بندی جدید، فشار خالص ناشی از اثر سربار وارد در دیوارهای حائل محاسبه و با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های دیگر مقایسه شده است. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر است به خوبی تأثیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی را در فشار فعال ناشی از سربار برآورد کند.

mahyar_bmct@yahoo.com.au
ghanbari@tmu.ac.ir

واژگان کلیدی: فشار فعال خاک، روش قطعات افقی، دیوار حائل، سربار.

مقدمه

دیوار حائل یکی از روش‌های بسیار متداول برای احداث ابنیه‌ی نگهدارنده‌ی خاک در ایران و جهان است. در عمل با توجه به وارد شدن انواع سربار بر روی خاکریز این دیوارها، نیاز به روشی مناسب برای محاسبه‌ی اثر سربار در فشار فعال خاک در دیوارهای حائل در طول چندین دهه دیده می‌شود. روش‌های سنتی در محاسبه‌ی فشار فعال خاک با توجه به اثر سربارهای خطی یا نواری بدین گونه عمل می‌کنند که ابتدا اثر سربار در خاکریز به‌صورت جداگانه با استفاده از تئوری کشسانی محاسبه و سپس نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تحلیل دیوار در غیاب سربار جمع شده است. در این مطالعه سعی شده است با ارائه‌ی فرمولاسیونی جدید بر مبنای روش قطعات افقی، راهکاری جدید برای محاسبه‌ی فشار فعال ناشی از اثر سربار وارده در دیوارهای صلب خاک مسلح و غیرمسلح ارائه شود.

مطالعات پژوهشگران پیشین

در سال ۱۹۲۹ و ۱۹۳۸ محققان با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس، رابطه‌ی ۱ را برای تعیین فشار جانبی وارده بر دیوار حائل به‌علت یک بار متمرکز ارائه کرده‌اند.^[۱]

$$\sigma_x = \frac{1.77Q}{H^2} \times \frac{m^2 n^2}{(m^2 + n^2)^2} \quad (1)$$

در این رابطه، Q سربار متمرکز وارد بر دیوار، H ارتفاع دیوار، m فاصله‌ی افقی سربار ارتفاعی از دیوار است که تنش افقی ناشی از سربار در آن محاسبه می‌شود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۲/۵، اصلاحیه ۱۳۹۰/۵/۲۳، پذیرش ۱۳۹۰/۸/۲۸

همچنین در سال ۱۹۸۱ برای سربارهای نواری،^[۲] و در سال ۱۹۸۰ برای سربارهای خطی،^[۳] با استفاده از تئوری کشسانی برای محاسبه‌ی فشار جانبی ناشی از سربار رابطه‌ی ارائه شده است که بر پایه‌ی آن، تنش افقی در عمق Z بر روی یک سازه‌ی حائل به ارتفاع H به‌دست می‌آید.^[۴]

$$\sigma_x = \frac{q}{H} (\beta - \sin \beta \cos 2\alpha) \quad (2)$$

در این رابطه، زوایای α و β با توجه به فاصله‌ی سربار از دیوار تعیین می‌شوند. در سال ۱۹۹۴ نیز برای سربارهای گسترده‌ی یکنواخت، روشی با استفاده از بسط فرمولاسیون کلمب ارائه شده است که در آن فشار فعال وارد بر دیوار تحت اثر سربار با توجه به زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی به‌دست آمده است.^[۵]

مبنای تمام این روش‌ها استفاده از تعادل حدی به‌صورت برقراری تعادل نیروها روی گوه‌ی گسیختگی فرضی است. همچنین پژوهشگرانی در سال ۲۰۰۰ پایداری لرزه‌یی دیوارهای حائل را با توجه به اثر سربار،^[۶] و برخی دیگر نیز اثر لرزه‌ی وارده بر دیوار را به‌صورت شبه استاتیک بر مبنای روش‌هایی که در سال‌های ۱۹۲۹ و ۱۹۲۶ ارائه شده بود،^[۷،۸] بررسی کردند. این پژوهشگران اثر فاصله‌ی سربار و مقدار آن و زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی را نیز مورد بررسی قرار دادند.

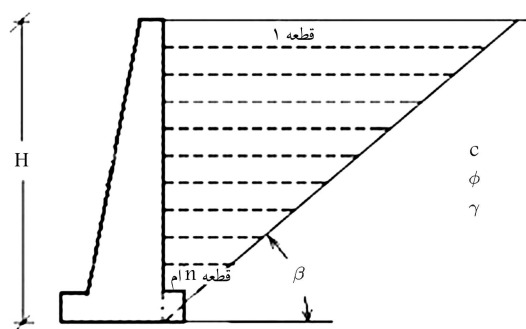
پژوهشگران دیگری (۲۰۰۲) هم سربار زنده‌ی ناشی از بار ترافیک بر دیوارهای حائل را مورد مطالعه قرار دادند؛ و با استفاده از روش لنگر خمشی معادل، یک راهکاری تحلیلی برای محاسبه‌ی فشار فعال افقی بر دیوار حائل ارائه کردند.^[۹،۱۰] همچنین برخی دیگر نتایج اندازه‌گیری فشار وارد بر سپری‌های تحت سربار نواری را با نتایج حاصل از روش‌های مختلف از جمله توزیع تنش کشسان و روش تقریبی شیب ۴۵

۳. در تحلیل‌های انجام‌شده با توجه اینکه مجموع لنگرها در هر قطعه‌ی حول پای دیوار برابر با صفر قرار می‌گیرد ($\sum M_o = 0$)؛ مد گسیختگی، همان مد دوران است.
۴. سطح گسیختگی به صورت صفحه‌یی در نظر گرفته شده است.
۵. تحلیل بر مبنای روش تعادل حدی انجام شده است.
۶. توده‌ی خاک در محاسبات به صورت همگن در نظر گرفته شده است.
۷. فرض شده است که سطح گسیختگی از پای دیوار عبور کند.
۸. نیروی برشی بین قطعات نابرابر در نظر گرفته شده است ($H_i \neq H_{i+1}$).
۹. محل اثر نیروی N_i وسط کف قطعه است.
۱۰. نقطه‌ی اثر نیروی P_i نقطه‌ی میانه‌ی ارتفاع هر قطعه است.

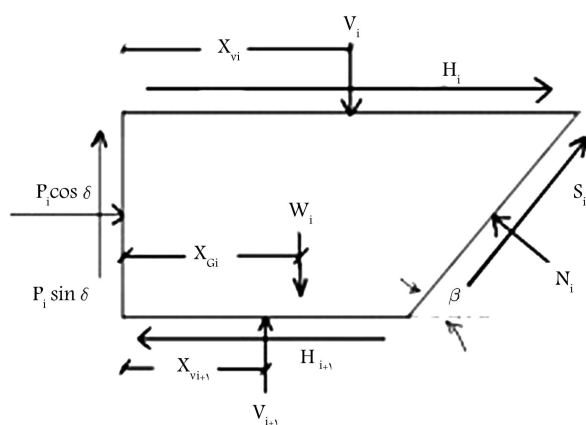
با توجه به فرضیات ذکرشده، معادلات و مجهولات فرمول‌بندی کامل این روش در جدول ۱ ارائه شده است.

در شکل ۱، یک دیوار حائل که خاک پشت آن به اجزاء افقی تقسیم شده است و گوه‌ی گسیختگی آن با محور افقی زاویه‌ی β می‌سازد، نشان داده شده است. نیروهای وارده بر قطعه‌ی i از دیوار مذکور در شکل ۲ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن شرایط تعادل حدی در صورتی که خاک پشت دیوار دارای n قطعه‌ی افقی با ارتفاع مساوی باشد، ارتفاع هر قطعه از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$h_i = \frac{H}{n} \quad (3)$$



شکل ۱. تقسیم گوه‌ی گسیختگی به قطعات افقی.



شکل ۲. تعادل نیروها در قطعه‌ی i .

درجه و همچنین نتایج روش کلمب مقایسه کردند.^[۱۰] براساس نتایج این تحقیق، روش کشسان اختلاف قابل توجهی با مقادیر واقعی دارد. همچنین برخی از پژوهشگران با استفاده از تئوری کلمب اثر سربار نواری بر فشار فعال وارد بر دیوارهای حائل را بررسی و روشی تحلیلی برای محاسبه‌ی میزان فشار و نقطه‌ی اثر برابند آن ارائه کردند.^[۱۱-۱۴]

آیین‌نامه‌هایی همچون آشتو (۲۰۰۷)،^[۱۵] گروه مهندسان ارتش آمریکا (۲۰۰۵)،^[۱۶] و دستورالعمل بتن آلمان (۲۰۰۲)،^[۱۷] نیز روش‌هایی تحلیلی برای محاسبه‌ی اثر سربار ارائه داده‌اند که در ادامه از فرمولاسیون آن‌ها برای بررسی صحت روش پیشنهادی استفاده خواهد شد.

روش قطعات افقی

ایده‌ی اولیه‌ی روش قطعات افقی در سال ۲۰۰۱ ارائه شد.^[۱۸] این روش برای شیب‌های خاکی مسلح‌شده، بر مبنای تقسیم توده‌ی بالای خط گسیختگی به تعدادی قطعه‌ی افقی ابداع شده است.

معادلات و مجهولات فرمول‌بندی کامل روش قطعات افقی در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ ارائه شده است.^[۱۹، ۲۰] پژوهشگرانی در سال ۲۰۰۸ با استفاده از روش قطعات افقی به بررسی توزیع فشار فعال در طول ارتفاع دیوار و برآورد زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی،^[۲۱] و برخی دیگر نیز با استفاده از روش قطعات افقی به تعیین فشار فعال استاتیکی وارد بر دیوارهای مسلح‌شده در خاک‌های اصطکاک‌ی و چسبنده پرداختند.^[۲۲] پژوهشگران دیگری هم از روش قطعات افقی برای تعیین فشار فعال لرزه‌یی وارد بر دیوارهای مسلح‌شده در خاک‌های چسبنده‌ی اصطکاک‌ی استفاده کردند.^[۲۳، ۲۴]

به دست آوردن فشار وارد بر دیوارهای صلب در حالتی که توده‌ی خاک پشت آن‌ها شامل سربار باشد، اهمیت بالایی در طراحی این دیوارها دارد. لذا، پژوهشگران پیشین پیشنهادهایی برای طراحی این نوع دیوارها و تعیین فشار ناشی از سربار وارد بر خاک ارائه کرده‌اند که غالباً با توجه به فرضیات موردنظر در هر روش، فشار واقعی وارد بر دیوار را ارائه نمی‌دهند. در این مطالعه سعی شده است براساس یک روش تحلیلی، با تقسیم توده‌ی گسیختگی به قطعات افقی و برقراری تعادل استاتیکی بر روی تمام قطعات فشار خالص اعمالی از طرف هر قطعه به دیوار به دست آید. در نهایت با جمع نیروی وارده از طرف قطعات بر دیوار، فشار برابند خالص اعمالی بر دیوار به دست می‌آید. در این روش تعادل لنگر و نیروها برای تمام قطعات در نظر گرفته می‌شود.

فرمولاسیون روش قطعات افقی برای محاسبه‌ی اثر سربار

در دیوارهای مسلح‌نشده

فرضیات موردنظر در این روش عبارت‌اند از:

۱. پاشنه‌ی دیوار از مصالح با مقاومت برشی نزدیک خاک ساخته می‌شود. بنابراین اثر سازه‌یی آن در محاسبات منظور نشده است.
۲. تنش قائم وارده بر قطعه‌ی اول از تقسیم سربار وارده در سطح قطعه به دست می‌آید، و در سایر قطعات به صورت مجهول فرض می‌شود و از فرمولاسیون به دست می‌آید.

جدول ۱. تعداد معادلات و مجهولات در روش قطعات افقی برای محاسبه‌ی اثر سربار.

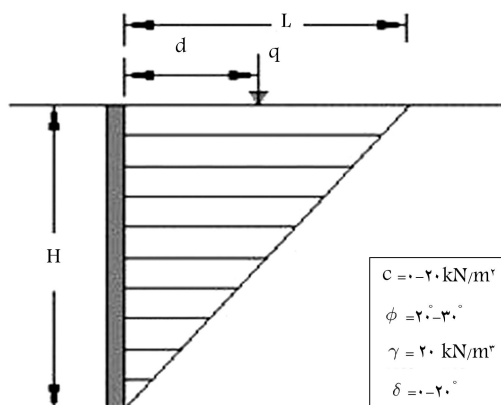
مجهولات	تعداد	معادلات (معلومات)	تعداد
H_i نیروی برشی بین قطعات	n	$\sum F_x = 0$ برای هر قطعه	n
N_i نیروی قائم وارد بر کف هر قطعه	n	$\sum F_y = 0$ برای هر قطعه	n
S_i نیروی برشی وارد بر کف قطعات	n	$\sum M_o = 0$ برای هر قطعه	n
P_i نیروی خاص وارد بر دیوار	n	$S_i = N_i(\tan \phi) + C$ برای هر قطعه	n
V_i نیروی وارد بر بالای هر قطعه	$n - 1$	$H_i = \lambda V_i$	$n - 1$
مجموع	$5n - 1$	مجموع	$5n - 1$

شده است. از حل دستگاه معادلات مذکور فشار وارد بر دیوار که با وجود سربار به دست خواهد آمد. در معادلات ارائه شده δ زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار است.

نتایج

در این قسمت، ابتدا نتایج حاصل از تحلیل برای دیوار نشان داده شده در شکل ۳، در حالتی که سربار وارده برابر صفر است، به دست آمده و با نتایج پژوهشگران قبلی در جدول ۲ مقایسه و مشاهده شده است که در این حالت نتایج فرمولاسیون پیشنهادی تطبیق خوبی با نتایج پژوهشگران دیگر دارد. سپس دیوار برای حالتی که بار وارده بر آن برابر 50 kN/m و 100 kN/m است و برای فواصل مختلف سربار تا پای دیوار و همچنین در حالات مختلف چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تحلیل شده است. در انتها، مقادیر فشار خالص ناشی از سربار محاسبه و با نتایج پژوهشگران قبلی و همچنین نتایج آیین نامه های آشتو (۲۰۰۷)، گروه مهندسان ارتش آمریکا (۲۰۰۵) و دستورالعمل بتن آلمان (۲۰۰۲) مقایسه شده است.

احمد آبادی و قنبری (۲۰۰۹)^[۲۳] و داس و پوری (۱۹۹۶)^[۲۶] فشار فعال وارد بر دیوار حائل را فقط تحت اثر وزن خاکریز و بدون هیچ گونه سربار بررسی کرده اند.



شکل ۳. نمای شماتیک دیوار تحلیل شده با خاکریز بدون مسلح کننده به همراه سربار خطی.

در شکل ۲، فواصل X_{V_i} ، $X_{V_{i+1}}$ و X_{G_i} فاصله‌ی نیروهای قائم از دیوار هستند. با توجه به قطعه‌ی نشان داده شده در شکل ۲ و با فرض اینکه نیروهای قائم در وسط هر قطعه وارد می شود، از هندسه‌ی هر قطعه رابطه های ۴ الی ۶ به دست می آیند:

$$X_{V_i} = \frac{h_i}{2 \tan \beta} + \frac{\sum_{j=i+1}^n h_j}{2 \tan \beta} \quad (4)$$

$$X_{V_{i+1}} = \frac{\sum_{j=i+1}^n h_j}{2 \tan \beta} \quad (5)$$

$$X_{G_i} = \frac{(X_{V_i} + X_{V_{i+1}})}{2} \quad (6)$$

سه معادله‌ی اول جدول ۱ به شرح رابطه های ۷ الی ۹ هستند:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow s_i \cos \beta - N_i \sin \beta + p_i \cos(\delta) + H_i - H_{i+1} = 0 \quad (7)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow P_i \sin \delta + V_{i+1} - V_i - W_i + N_i \cos \beta + s_i \sin(\beta) \quad (8)$$

$$\sum M_o = 0 \Rightarrow -V_i \times X_{V_i} + V_{i+1} \times X_{V_{i+1}} - W_i \times X_{G_i} + \left[\frac{N_i}{\sin(\beta)} - P \cos(\delta) \right] \left[\sum_{j=i+1}^n h_j + \frac{h_j}{2} \right] + h_{i+1} \left[\sum_{j=i+1}^n h_j \right] - h_i \left[\sum_{j=1}^n h_j \right] = 0 \quad (9)$$

در این معادلات، W_i وزن قطعه‌ی i است که از رابطه‌ی ۱۰ به دست می آید:

$$W_i = A_i \times \gamma \times 1 \quad (10)$$

معادله‌ی چهارم جدول ۱ در واقع همان معیار تسلیم موهر-کلمب است که برای نقاط روی گوه‌ی گسیختگی قابل استفاده است. معادله‌ی پنجم جدول ۱ رابطه‌ی ارائه شده توسط مورگنسترن و پرایس^[۲۵] است. برای محاسبه‌ی ثابت λ ، فرض شده است که مقدار ثابت مذکور در دیوارهای بدون سربار با مقدار آن در دیوارهای دارای سربار مساوی است و از مقادیر گزارش شده‌ی احمدآبادی و قنبری (۲۰۰۹)^[۲۳] استفاده

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با روش قنبری و احمدآبادی (۲۰۰۹) و داس و پوری (۱۹۹۶) در حالت $q = 0$ (kN/m).

$C = 0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$			$q = 0 \text{ (kN/m)}$	
روش پیشنهادی	قنبری و احمدآبادی (۲۰۰۹)	داس و پوری (۱۹۹۶)		
۵۱٫۱	۵۱	۵۱٫۱	β	$\phi = 20^\circ$
۴۴۶٫۷	۴۴۶٫۷	۴۴۶٫۷	P_a	
۵۷٫۷	۵۷٫۷	۵۷٫۸	β	$\phi = 30^\circ$
۳۰۸٫۴	۳۰۹٫۱	۳۰۸٫۴	P_a	
$C = 10 \text{ (kN/m}^2\text{)}$				
۵۲٫۷	۵۲٫۶	۵۰٫۶	β	$\phi = 20^\circ$
۳۱۸	۳۱۸٫۱	۳۱۴٫۳	P_a	
۵۸٫۸	۵۸٫۵	۵۶٫۵	β	$\phi = 30^\circ$
۲۰۱٫۲	۲۰۱٫۸	۱۸۴٫۶	P_a	
$C = 20 \text{ (kN/m}^2\text{)}$				
۵۳٫۹	۵۳٫۷	۵۰٫۶	β	$\phi = 20^\circ$
۱۹۰٫۴	۱۹۰٫۴	۱۹۰٫۴	P_a	
۵۹٫۵	۵۹٫۲	۵۵٫۷	β	$\phi = 30^\circ$
۹۴٫۴	۹۵	۶۵٫۶	P_a	

لذا مقایسه‌ی نتایج روش پیشنهادی با روش‌های ذکرشده در حالت بدون سربار ($q = 0$) بدین منظور انجام گرفته است، تا از صحت فرمولاسیون ارائه‌شده برای فشار فعال و زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی در وضعیتی که خاک ریز پشت دیوار فقط تحت اثر وزن خود است، اطمینان حاصل شود.

مطابق جداول ۳ و ۴، با افزایش فاصله‌ی سربار از پای دیوار از فشار فعال خاک کاسته و افزایش پارامترهای مقاومتی خاک نیز سبب کاهش فشار خاک ناشی از اثر سربار می‌شود. درحالتی که زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک برابر 30° است، در فاصله‌ی ۶ متری از دیوار، سربار وارده در خارج از گوه‌ی گسیختگی قرار می‌گیرد و تأثیری در فشار فعال ندارد.

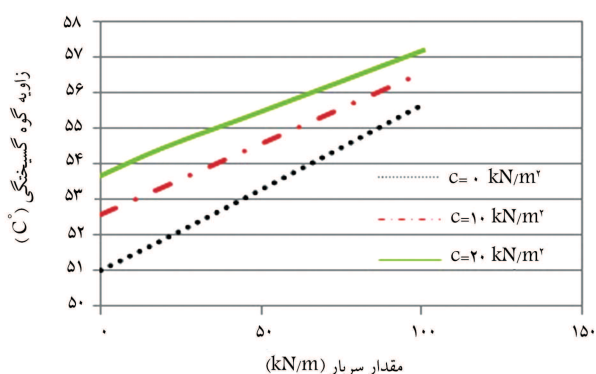
برای تعیین زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی در خاک‌های چسبنده‌ی اصطکاک‌ی، مقدار فشار جانبی کل وارد بر دیوار برای زوایای گسیختگی مختلف محاسبه و زاویه‌ی که بیشینه‌ی فشار را به‌دست می‌دهد، به‌عنوان زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی ثبت می‌شود. مطابق شکل‌های ۴ و ۵، تغییرات زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی در برابر سربار

جدول ۳. مقادیر فشار فعال ناشی از سربار 50 kN/m به ازای فواصل مختلف سربار.

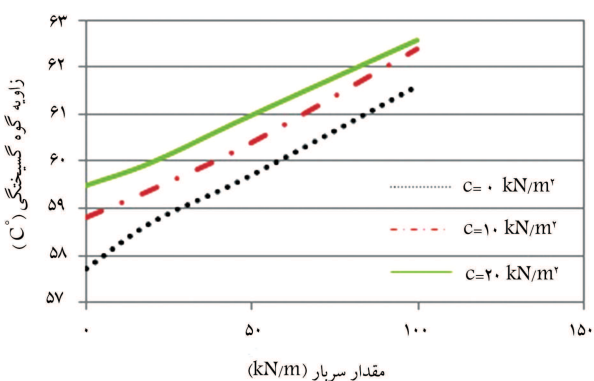
$C = 0$ (kN/m ^۲)			$q = 50$ (kN/m)	
$d = 6$ (m)	$d = 4$ (m)	$d = 2$ (m)		
۴۵۲٫۱	۴۷۲٫۴	۴۹۲٫۷	P_a	$\phi = 20^\circ$
-	۳۲۱٫۶	۳۴۳٫۸		$\phi = 30^\circ$
$C = 10$ (kN/m ^۲)				
۳۲۰	۳۳۸٫۹	۳۵۷٫۹	P_a	$\phi = 20^\circ$
-	۲۱۲٫۱	۲۳۰٫۵		$\phi = 30^\circ$
$C = 20$ (kN/m ^۲)				
۱۹۰٫۴	۲۰۷٫۱	۲۲۳٫۶	P_a	$\phi = 20^\circ$
-	۱۰۳٫۱	۱۱۷٫۴		$\phi = 30^\circ$

جدول ۴. مقادیر فشار فعال ناشی از سربار 100 kN/m به ازای فواصل مختلف سربار.

$C = 0$ (kN/m ^۲)			$q = 100$ (kN/m)	
$d = 6$ (m)	$d = 4$ (m)	$d = 2$ (m)		
۴۴۲٫۳	۴۹۱٫۴	۵۴۰٫۶	P_a	$\phi = 20^\circ$
-	۳۳۴٫۷	۳۸۰٫۲		$\phi = 30^\circ$
$C = 10$ (kN/m ^۲)				
۳۲۲٫۹	۳۶۰٫۸	۳۹۸٫۶	P_a	$\phi = 20^\circ$
-	۲۲۳٫۳	۲۶۰٫۲		$\phi = 30^\circ$
$C = 20$ (kN/m ^۲)				
۱۸۰٫۴	۲۱۹٫۲	۲۵۸٫۱	P_a	$\phi = 20^\circ$
-	۱۱۱٫۸	۱۴۰٫۳		$\phi = 30^\circ$



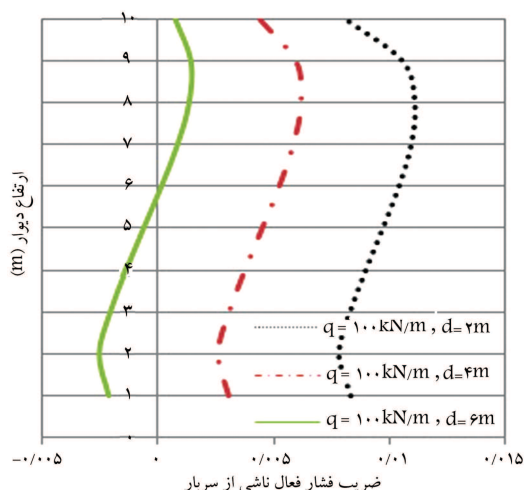
شکل ۴. تغییرات زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی با تغییرات سربار وارده برای چسبندگی‌های مختلف ($\phi = 20^\circ$, $\delta = 10^\circ$).



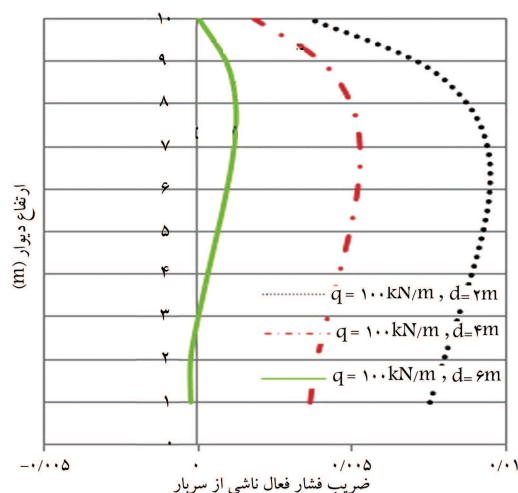
شکل ۵. تغییرات زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی با تغییرات سربار وارده برای چسبندگی‌های مختلف ($\phi = 30^\circ$, $\delta = 10^\circ$).

به‌صورت خطی است و با افزایش سربار، این زاویه افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج حاصله حاکی از آن است که برای یک سربار خاص با افزایش فاصله‌ی سربار از لبه‌ی دیوار، زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی تقریباً ثابت است و تغییر نمی‌کند. در این قسمت برای بررسی تأثیر سربار در فشار فعال خاک در طول ارتفاع دیوار، ضریب فشار فعال ناشی از سربار به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:

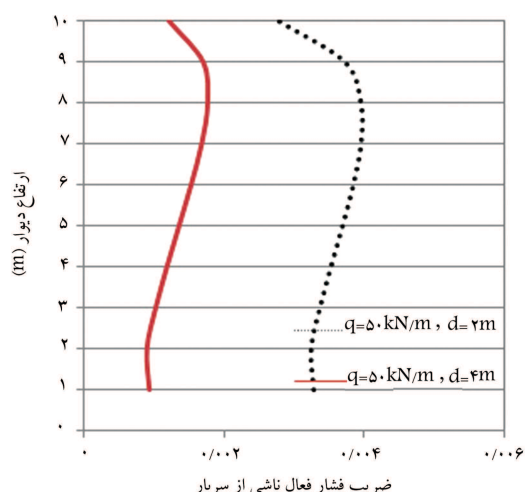
$$K_{aq} = \frac{P_{aq}}{\frac{1}{2}\gamma H^2} \quad (11)$$



شکل ۸. نمودار تغییرات K_{aq} برای سربار 100 kN/m ($\phi = 20^\circ$, $\delta = 10^\circ$) و $c = 0 \text{ kN/m}^2$.

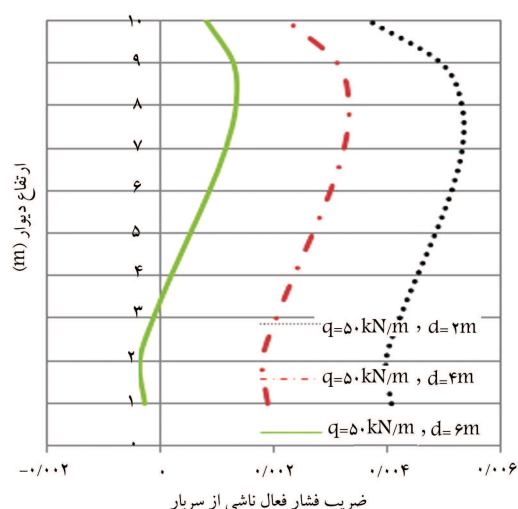


شکل ۹. نمودار تغییرات K_{aq} برای سربار 100 kN/m ($\phi = 20^\circ$, $\delta = 10^\circ$) و $c = 10 \text{ kN/m}^2$.

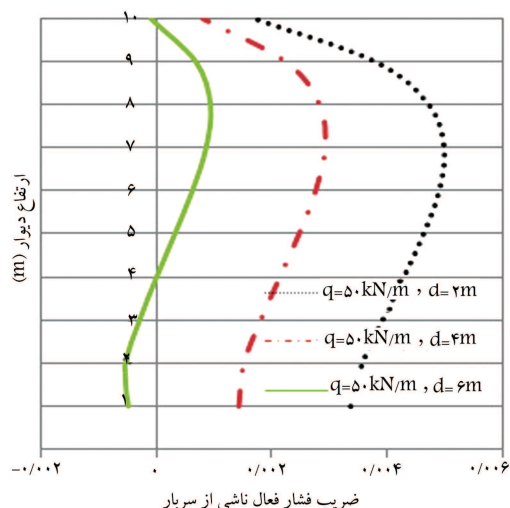


شکل ۱۰. نمودار تغییرات K_{aq} برای سربار 50 kN/m ($\phi = 30^\circ$, $\delta = 10^\circ$) و $c = 0 \text{ kN/m}^2$.

در این رابطه، K_{aq} ضریب فشار فعال خاک، P_{aq} فشار فعال ناشی از سربار وارد شده بر خاکریز دیوار، γ وزن مخصوص خاک، و H ارتفاع دیوار است. با توجه به شکل های ۶ الی ۱۱ که تغییرات K_{aq} را برای دیوار حائل نشان می دهد، مشاهده می شود که اثر سربار با بیشتر شدن فاصله از دیوار کاهش می یابد. همچنین هنگامی که سربار متمرکز در فاصله ۶ متری از سر دیواری که زاویه اصطکاک داخلی خاک آن $\phi = 20^\circ$ است، قرار گرفته است؛ در قسمتی از نمودار، مقداری کاهش فشار در طول ارتفاع دیوار مشاهده می شود که این مورد با افزایش مقدار سربار بیشتر دیده می شود. درواقع به نظر می رسد که افزایش فاصله سربار باعث می شود که نیروی سربار، لنگری مقاوم برای جلوگیری از دوران گوهی گسیختگی ایجاد کند. این لنگر به صورت کاهش فشار ناشی از سربار (فشار منفی) خود را نشان می دهد. از سوی دیگر، مورد اخیر در سربارهای بزرگ تر و خاک با چسبندگی کمتر به مقدار بیشتری دیده می شود، ولی با افزایش زاویه اصطکاک داخلی از $\phi = 20^\circ$ به $\phi = 30^\circ$ کمتر شده است.



شکل ۶. نمودار تغییرات K_{aq} برای سربار 50 kN/m ($\phi = 20^\circ$, $\delta = 10^\circ$) و $c = 0 \text{ kN/m}^2$.



شکل ۷. نمودار تغییرات K_{aq} برای سربار 50 kN/m ($\phi = 20^\circ$, $\delta = 10^\circ$) و $c = 10 \text{ kN/m}^2$.

جدول ۵. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با موتا (۱۹۹۴) برای مقادیر گوه‌ی گسیختگی.

(زاویه گوه گسیختگی)		q (kN/m) میزان سربار	
موتا (۱۹۹۴)	روش پیشنهادی	$\phi = 20^\circ$	$\phi = 30^\circ$
۵۱٫۴	۵۱٫۹	۲۰	۵۰
۵۷٫۳	۵۷٫۲		
۵۲٫۱	۵۳٫۳	۵۰	۱۰۰
۵۸٫۱	۵۹٫۷		
۵۲٫۹	۵۵٫۷	۱۰۰	۱۰۰
۵۹	۶۱٫۶		

جدول ۶. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با موتا (۱۹۹۴) برای $\phi = 30^\circ$.

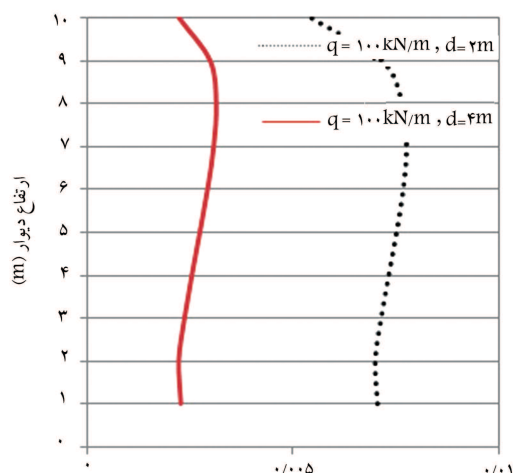
(kN/m^2) فشار فعال دیوار		$\phi = 30^\circ$	
موتا (۱۹۹۴)	روش پیشنهادی	d فاصله سربار متمرکز از دیوار (m)	میزان سربار q (kN/m)
۳۲۳٫۹	۳۲۲٫۴	۲	۲۰
۳۱۸٫۹	۳۱۵٫۰۸	۴	
۳۴۷	۳۴۳٫۸	۲	۵۰
۳۳۴٫۹	۳۲۱٫۷	۴	
۳۵۸٫۶	۳۸۰٫۱	۲	۱۰۰
۳۶۱٫۶	۳۳۴٫۷	۴	

جدول ۷. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با موتا (۱۹۹۴) برای $\phi = 20^\circ$.

(kN/m^2) فشار فعال دیوار		$\phi = 20^\circ$	
موتا (۱۹۹۴)	روش پیشنهادی	d فاصله سربار متمرکز از دیوار (m)	میزان سربار q (kN/m)
۴۶۹	۶۴۶٫۸	۲	۲۰
۴۶۳٫۵	۴۵۷٫۵	۴	
۵۰۲٫۵	۴۹۲٫۷	۲	۵۰
۴۸۸٫۹	۴۷۲٫۴	۴	
۵۵۸٫۴	۵۴۰٫۶	۲	۱۰۰
۵۳۱٫۵	۴۹۱٫۴	۴	

جدول ۸. مقایسه‌ی نتایج فشار فعال کل ناشی از سربار (P_{aq}) حاصل از روش‌های مختلف برای $d = 4$ m.

q (kN/m)	روش پیشنهادی		بتن کالاندر (۲۰۰۲)	ارتش آمریکا (۲۰۰۵)	آشتو (۲۰۰۷)
	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 20^\circ$			
۵۰	۲۴٫۶۷	۱۲٫۷۲	۲۲٫۶۲	۳۶٫۰۷	۲۶٫۷۸
۱۰۰	۴۳٫۰۸	۲۵٫۰۵	۴۵٫۳۱	۵۴٫۷۶	۵۴



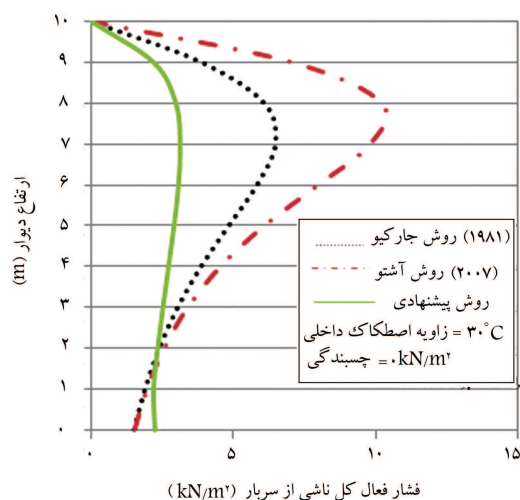
شکل ۱۱. نمودار تغییرات k_{aq} برای سربار 100 kN/m ($\phi = 30^\circ$, $\delta = 10^\circ$) و نتایج ارائه‌شده در آیین‌نامه‌های آشتو (۲۰۰۷)، گروه مهندسان ارتش آمریکا (۲۰۰۵)، و دستورالعمل بتن آلمان (۲۰۰۲) مقایسه شده است.

در جدول‌های ۵ الی ۷ نتایج روش پیشنهادی با نتایج روش ارائه‌شده‌ی موتا (۱۹۹۴) مقایسه، و تطابق خوبی بین نتایج ۲ روش مشاهده شده است. این تطابق می‌تواند به دلیل انتخاب روش تعادل حدی موتا (۱۹۹۴) و تحقیق حاضر باشد. با این حال برتری و نوآوری روش پیشنهادی نسبت به روش موتا در آن است که در روش پیشنهادی توزیع فشار در ارتفاع دیوار نیز به‌دست می‌آید. در صورتی که در روش موتا فقط برآیند فشار محاسبه می‌شود. اختلاف بین زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی حاصل از روش پیشنهادی با روش موتا بین 0.1° تا 2.8° درجه است، و با افزایش ϕ اختلاف ۲ روش کاهش یافته است. همچنین اختلاف فشار فعال ناشی از سربار در ۲ روش نیز با افزایش ϕ کاهش یافته است.

مقایسه با نتایج پژوهشگران پیشین

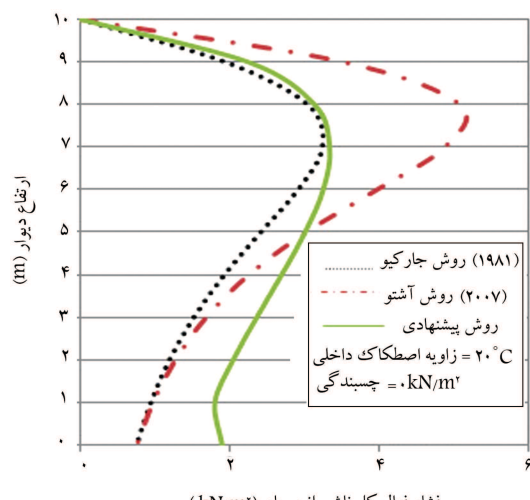
همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ الی ۱۷ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی، حد پایین روش‌های قبلی را به‌دست می‌دهد. مهم‌ترین مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر لحاظ‌شدن پارامترهای مقاومتی خاک در فرمولاسیون آن است، در صورتی که در دیگر روش‌ها این پارامترها دیده نشده‌اند. همچنین در روش پیشنهادی، تغییرات فشار جانبی در اثر تغییرات فاصله‌ی سربار به‌طور واضح وارد شده است. این تذکر لازم است که منحنی‌های ارائه‌شده در شکل‌های ۱۲ الی ۱۷ برای فاصله‌ی $d = 4$ m ارائه و در تمام موارد به‌منظور ایجاد شرایط یکسان برای مقایسه از چسبندگی خاک صرف‌نظر شده است. با این حال روش پیشنهادی قادر است به ازای چسبندگی‌های مختلف و فواصل مختلف سربار از دیوار، فشار فعال خاک ناشی‌شده از اثر سربار را به دست دهد.

در جدول ۸، به مقایسه‌ی نتایج فشار فعال کل ناشی از اثر سربار (P_{aq}) در روش‌های مختلف پرداخته شده است. مطابق این جدول، روش پیشنهادی در حالت $\phi = 20^\circ$ ، تطابق خوبی با روش‌های آشتو (۲۰۰۷) و بتن کالاندر دارد. در حالت $\phi = 30^\circ$ بین نتایج روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها اختلاف دیده می‌شود، که می‌تواند ناشی از درنظر گرفته‌شدن اثرات پارامترهای مقاومتی



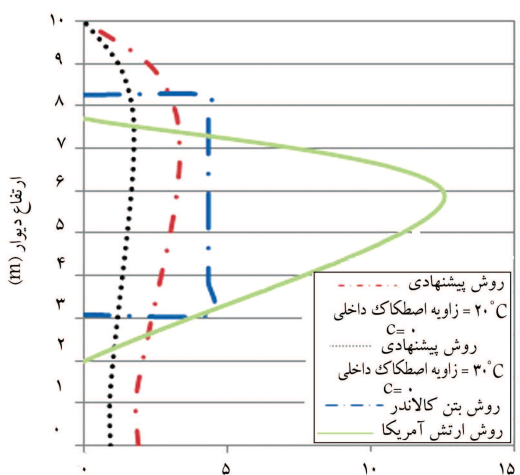
فشار فعال کل ناشی از سربار (kN/m²)

شکل ۱۱. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با آیین آشتو و روش جارکیو برای حالت $(q = 100 \text{ kN/m}^2 \text{ و } d = 4 \text{ m}, \phi = 30^\circ)$.



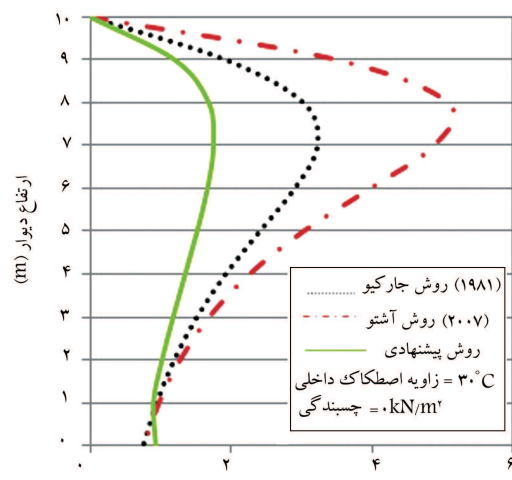
فشار فعال کل ناشی از سربار (kN/m²)

شکل ۱۲. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با آیین آشتو و روش جارکیو برای حالت $(q = 50 \text{ kN/m}^2 \text{ و } d = 4 \text{ m}, \phi = 20^\circ)$.



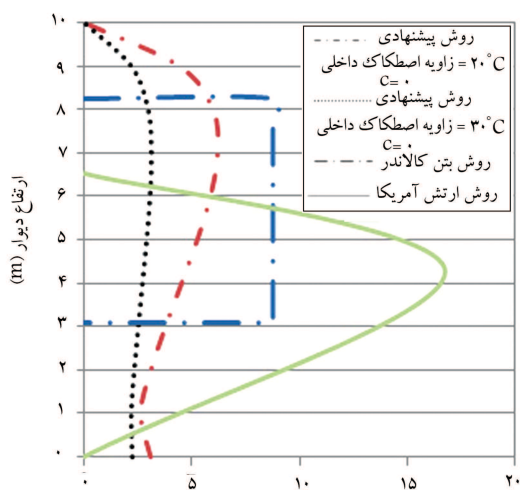
فشار فعال کل ناشی از سربار (kN/m²)

شکل ۱۳. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با آیین آشتو و روش جارکیو برای حالت $d = 4 \text{ m}$ و $(q = 100 \text{ kN/m}^2 \text{ و } \phi = 30^\circ)$.



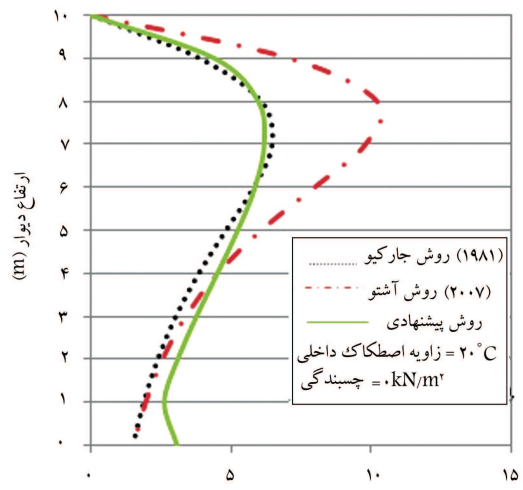
فشار فعال کل ناشی از سربار (kN/m²)

شکل ۱۴. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با آیین آشتو و روش جارکیو برای حالت $(q = 50 \text{ kN/m}^2 \text{ و } d = 4 \text{ m}, \phi = 30^\circ)$.



فشار فعال کل ناشی از سربار (kN/m²)

شکل ۱۵. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با آیین آشتو و روش جارکیو برای حالت $(q = 100 \text{ kN/m}^2 \text{ و } d = 4 \text{ m})$.



فشار فعال کل ناشی از سربار (kN/m²)

شکل ۱۶. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با آیین آشتو و روش جارکیو برای حالت $(q = 100 \text{ kN/m}^2 \text{ و } d = 4 \text{ m}, \phi = 20^\circ)$.

جدول ۹. مقایسه‌ی برابند فشار خاک حاصل از روش پیشنهادی با داده‌های صحرایی.

مقطع D	مقطع C	مقطع B	
۴۲	۶۷	۶۴	اندازه‌گیری شده (kN/m)
۶۹			روش پیشنهادی (kN/m)

خاک در روش پیشنهادی باشد. در روش‌های دیگر این اثرات لحاظ نشده است.

علاوه بر موارد مذکور، نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج اندازه‌گیری شده برای یک دیوار ۴ متری در صحرای (۱۹۹۹)^[۲۷] مقایسه و در جدول ۹ ارائه شده است. بر این اساس در ۲ مقطع از دیوار همخوانی خوبی بین نتایج این تحقیق و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. ارتفاع در نظر گرفته شده در محاسبات (سومین مقطع) با اختلاف قابل ملاحظه‌ی دیده می‌شود. با توجه به آنکه مقدار اندازه‌گیری شده در مقطع D حتی از مقدار فشار فعال خاک در حالت سکون نیز کمتر است، به نظر می‌رسد شرایط اجرایی موجب تمایل رفتار دیوار مذکور به سوی حالت مقاوم شده است. قابل ذکر است که تحلیل‌های این مقایسه برای شرایط سربار $d = 1/5 \text{ m}$ ، $q = 100 \text{ kN/m}$ انجام شده است، با این حال شکل دیوار و سربار اندکی با مدل ایده‌آل مورد نظر این تحقیق اختلاف دارد که معادل آن در محاسبات منظور شده است.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار برای محاسبه‌ی فشار فعال ناشی از سربار، راهکاری جدید مبتنی بر

روش قطعات افقی ارائه شد، که می‌تواند برای محاسبه‌ی اثر سربار در دیوارهای حائل در خاک‌های اصطکاکی و چسبنده‌ی اصطکاکی استفاده شود.

برای تبیین روش پیشنهادی از یک فرمولاسیون جدید مبتنی بر $5n - 1$ معادله و $5n - 1$ مجهول استفاده شده است و براساس آن فشار فعال ناشی از سربار و همچنین زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی محاسبه می‌شود. نتایج برای تغییرات زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی با اندازه‌ی سربار حاکی از آن است که افزایش مقدار سربار سبب افزایش زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی می‌شود، ولی با تغییرات فاصله‌ی سربار وارده از دیوار، زاویه‌ی گوه‌ی گسیختگی تغییری نمی‌کند.

نتایج نمایانگر آن است که با افزایش فاصله‌ی سربار از دیوار، از فشار جانبی خاک کاسته می‌شود و با خارج شدن سربار از گوه‌ی گسیختگی، تأثیری بر روی فشار فعال خاک ندارد. مقادیر منفی مشاهده‌شده در نمودار ضریب فشار فعال ناشی از سربار به این دلیل است که نیروی سربار لنگری مقاوم برای جلوگیری از دوران گوه‌ی گسیختگی ایجاد کند. این لنگر به صورت کاهش فشار ناشی از سربار (فشار منفی) خود را نشان می‌دهد. از سوی دیگر مورد اخیر در سربارهای بزرگ‌تر و خاک با چسبندگی کمتر به مقدار بیشتری دیده می‌شود، ولی با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی از $\phi = 20^\circ$ به $\phi = 30^\circ$ کمتر شده است.

مقایسه‌ی این روش با روش‌های پیشین نشان‌دهنده‌ی این مطلب است که نتایج روش پیشنهادی حد پایین روش‌های توصیه‌شده در آیین‌نامه‌های آشتو (۲۰۰۷) و آیین‌نامه‌ی ارتش آمریکا (۲۰۰۵) است. با این حال روش پیشنهادی از تطابق خوبی با روش موتا (۱۹۹۴) قرار دارد. تحلیل‌های انجام‌شده بیانگر قابل‌اعتماد بودن روش قطعات افقی در ارزیابی اثر سربار در دیوارهای حائل است.

منابع (References)

- Spangler, M.G. "Horizontal pressure on retaining walls due to concentrated surface loads", Iowa State University Eng. Experiment Station, Bulletin No.140 (1983).
- Jarquio, R. "Total lateral surcharge pressure due to strip load", *J. Geotech. En. Division, ASCE*, **107**(10), pp. 1424-1428 (1981).
- Misra, B. "Lateral pressures on retaining walls due to loads of surface of granular backfill", *Soils Found.*, **20**(2), pp. 31-44 (1980).
- Motta, E. "Generalized coulomb active-earth pressure for distanced surcharge", *J. Geotech. Eng. ASCE*, **120**(6), pp. 1072-1079 (1994).
- Caltabino, S., Cascone, E. and Maugeri, M. "Seismic atability of retaining walls with surcharge", Faculty of Civil Eng., University of Catania, Italy (2000).
- Mononobe, N. and Matsuo, H. "On the determination of earth pressure during earthquakes", *In: Proceeding of the World Eng. Congress, Tokyo*, **9**, pp. 179-187 (1929).
- Okabe, S. "General theory of earth pressures", *J. Japan. Soc., Civil Eng.*, **12**(1), (1926).
- Baker, R. and Klein, Y. "An integrated limiting equilibrium approach for design of reinforced soil retaining structures, part I: Formulation", *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(3), pp. 119-150 (2004a).
- Baker, R. and Klein, Y. "An integrated limiting equilibrium approach for design of reinforced soil retaining structures, part III: Optimal design", *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(6), pp. 455-479 (2004b).
- Georgiadis, M. and Anagnostopoulos, C. "Lateral pressure on sheet pile walls due to Strip load", *J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE*, **124**(1), pp. 95-98 (1998).
- Greco, V.R. "Active earth thrust by backfills subject to a line surcharge", *Can. Geotech. J.*, **42**(5), pp. 1255-1263 (2005).

12. Greco, V.R. "Lateral earth pressure due to backfill subject to a strip surcharge", *Geotechnical and Geological Eng.*, Springer, **24**, pp. 615-636 (2006).
13. Greco, V.R. "Active earth thrust on cantilever walls in general conditions", *Soils Found.*, **39**(6), pp. 65-78 (1999).
14. Greco, V.R. "Pseudo-static analysis for earth thrust computations", *soils Found.*, **43**(2), pp. 132-140 (2003).
15. AASHTO, *Interims: Standard Specifications for Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA (2007).
16. U.S Army Corps of Engineerries, Stability Analysis of Concrete Structures, EM 1110-2-2100 (December 2005).
17. Beton Kalendar, Verlag von Wihelm Ernest and Sohn, Munich, Germany (2002).
18. Shahgholi, M., Fakher, A. and Jones, C.J.F.P. "Horizontal slice method of analysis", *Geotechnique*, **51**(10), pp. 881-885 (2001).
19. Nouri, H., Fakher, A. and Jones, C.J.F.P., "Development of horizontal slices method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**, pp. 175-187 (2006).
20. Nouri, H., Fakher, A. and Jones, C.J.F.P. "Evaluating the effects of the magnitude and amplification of pseudo-static acceleration on reinforced soil slopes and walls using the limit equilibrium horizontal slices method", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(3), pp. 263-278 (2008).
21. Azad, A., Yasrobi, S. and Pak, A. "Seismic active earth pressure distribution behind rigid retaining walls", *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, **28**(5), pp. 365-375 (2008).
22. Shekarian, S., Ghanbari, A. and Farhadi, A. "New seismic parameters in the analysis of retaining walls with reinforced backfill", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**, pp. 350-356, 0266-1144 (2008).
23. Ahmadabadi, M. and Ghanbari, A. "New procedure for active earth pressure calculation in retaining walls with reinforced cohesive-frictional backfill", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(6), pp. 456-463 (2009).
24. Ghabnari, A. and Ahmadabadi, M. "New analytical procedure for seismic analysis of reinforced retaining wall with cohesive-frictional backfill", *Geosynthetics Int.*, **17**(6), pp. 364-379 (2010).
25. Morgenstern, N.R., and PR.ce, V.E. "The analysis of the stability of general slipsurface ", *Geotechnique*, **15**, No.1, pp.79-93 (1965).
26. Das, B.M. and Puri, V.K. "Static and dynamic active earth pressure", *Geotechnical and Geological Eng.*, **14**, pp. 353-366 (1996).
27. Medeiros, L.V., Garga, V.K., Gerscovich, D.M.S., Sayao, A.S.F.J. and Andrade, M.H.N., "Analysis of the instrumentation of reinforced scrap tires retaining wall", *Revista De Ciencia and Tecnologia*, **14**, pp. 9-16 (1999).

ANALYTICAL CALCULATION FOR EFFECT OF SURCHARGE ON ACTIVE EARTH PRESSURE OF RETAINING WALLS

M. Taheri

mahyar_bmct@yahoo.com

A. Ghanbari(corresponding author)

ghanbari@tmu.ac.ir

Faculty of Engineering

Kharazmi University

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 3, Page 107-115, Research Note

© Sharif University of Technology

- Received 25 April 2011; received in revised form 14 August 2011; accepted 19 November 2011.

Abstract

The use of retaining walls is one of the most common approaches for construction of retaining soil structures around the world. These walls have remarkable flexibility against earthquake loads and are less sensitive to settlement. In many retaining wall problems, it is necessary to determine the additional earth pressure produced by surcharge loads acting on the soil surface behind the wall. Considering the application of various surcharge loads on the backfill in such systems, the necessity has been felt, over recent decades, to find an appropriate method for calculating the effect of surcharge on active earth pressure in retaining walls.

In this study, based on analytical methods, previous formulations of horizontal slices methods are improved, and a new formulation has been proposed for estimating the effect of surcharge on the active earth pressure of retaining walls with a cohesive-frictional backfill. Using a

comparison of the analytical results obtained from the proposed method with those of previous research, it was concluded that the analytical procedure proposed reliably calculates active earth pressure due to surcharge in cohesive-frictional soil.

The variations of angle of failure wedge versus intensity of surcharge indicate that an increase in the intensity of the surcharge causes an increase in the angle of the failure wedge, but, a change in the distance of the surcharge from the wall does not affect the angle of the failure wedge significantly. Also, the results show that by an increase in the distance of the surcharge from the wall, lateral pressure decreases, and that moving the surcharge out of the failure wedge has no effect on active earth pressure. Comparisons show that the results from the suggested method are a lower bound for values obtained by recommended methods in ASHTOO (2007) and U.S Army Corps (2005) codes. The suggested method is also in good agreement with that of Motta (1994).

Key Words: Active earth pressure, horizontal slice method, retaining wall, surcharge.