

تعیین فشار فعال استاتیکی وارد شونده بر دیوارهای مسلح شده در خاک‌های اصطکاکی و چسبنده

علی قنبری^{۱*}، سعید شکاریان^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت معلم

۲- کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت معلم

*تهران، صندوق پستی ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹

ghanbari@tmu.ac.ir

(دریافت مقاله: آذر ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۷)

چکیده - محاسبه فشار خاک وارد شونده بر دیوارهای حایل یکی از مسائل اساسی در مهندسی ژئوتکنیک است. در این نوشتار بر مبنای روش‌های تحلیلی، تعیین فشار وارد شونده بر دیوارهایی که توده‌های خاک مسلح در پشت آنها قرار می‌گیرد، مطالعه شده است. به این منظور روش قطعات افقی مورد بازنگری و تدقیق قرار گرفته و فرمول‌بندی کامل آن برای خاک‌های اصطکاکی ارائه شده است. بر مبنای این فرمول‌بندی فشار خالص وارد شونده بر دیوار محاسبه شده و با نتایج به‌دست آمده از روش‌های دیگر مقایسه شده است. همچنین فرمول‌بندی جدیدی برای ارزیابی فشار واردشونده بر دیوار در خاک‌های چسبنده ارائه و نتایج آن با روش رانکین مقایسه شده است. بررسی‌های نشان می‌دهد که روش قطعات افقی از قابلیت مناسبی برای تحلیل دیوارهای حائل در شرایط مختلف برخوردار است.

کلید واژگان: فشار برابند خالص، روش قطعات، دیوار حایل، خاک مسلح.

۱- مقدمه

تقسیم سهم فشار جانبی کل بین مسلح‌کننده و دیوار باعث ایجاد امکان استفاده از مسلح‌کننده‌هایی ارزاتر در شیب‌های خاک مسلح و کاهش فشار واردشونده بر دیوار در دیوارهای صلب می‌شود. لذا مطالعه رفتار این دیوارها و ضرورت تعیین فشار خالص واردشونده بر دیوار که در طراحی سازه‌ای آن بسیار مؤثر است، حائز اهمیت است. همچنین تعیین فشار واردشونده بر دیوارهای صلب معمولاً مبتنی بر روش‌های است که در آنها چسبندگی و زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار در تعیین فشار واردشونده بر دیوار نقش چندانی ندارد. لذا در این مطالعه سعی شده با ارائه روش‌های تحلیلی جدیدی بر مبنای تقسیم گوه گسیختگی به قطعات افقی، فشار خالص واردشونده بر دیوارهای صلب خاک مسلح و غیرمسلح مطالعه شود.

از چهار دهه گذشته اجرای دیوارهای خاک مسلح برای کاهش حجم عملیات خاکریزی و استفاده بهینه از مصالح متداول شده است. در این روش، نوارهای مسلح‌کننده از پشت به دیوار متصل شده و فشار جانبی خاک را تحمل می‌کنند. در واقع سیستم به نحوی طراحی می‌شود که کل فشار وارد شده از طرف خاک بر دیوار به وسیله نیروی کششی مسلح‌کننده خشی شود. در برخی از کشورها به دلیل گران بودن مصالح مسلح‌کننده، یا مشکلات اجرایی اجرای این سیستم توسعه نیافته است. روش جایگزین در این مواقع استفاده از دیوار حایل صلب در جلوی توده مسلح‌شده است که در این حالت معمولاً المان‌های مسلح‌کننده به دیوار متصل نمی‌شوند.

۲- مطالعات محققان پیشین

هاسمن و لی (۱۹۷۸) [1] ثابت کردند که در خاک‌های دانه‌ای مسلح‌شده، فشار جانبی واردشونده بر دیوار کاهش یافته و در نتیجه لنگر پای دیوار کاهش قابل توجهی نسبت به حالت مسلح نشده دارد. مطالعات آزمایشگاهی لارال و همکاران (۱۹۹۲) [2] بر روی مدل‌هایی با مقیاس کوچک، حاکی از کاهش فشار فعال خاک و پایداری بیشتر به دلیل استفاده از مسلح‌کننده است که این روند با افزایش تعداد مسلح‌کننده‌ها در هر لایه و کاهش ضخامت خاک بین مسلح‌کننده‌ها، بیشتر می‌شود.

ساران و همکاران (۱۹۷۹ و ۱۹۹۲) [3]، کاهش فشار واردشونده بر دیوار ناشی از استفاده از مسلح‌کننده را بررسی کرده‌اند. در تحقیق مذکور روشی برای طراحی این‌گونه دیوارها با فرض خاک دانه‌ای (شرایط $c = 0$) و همگن، گوه گسیختگی صفحه‌ای ارائه شده است. همچنین معادلات تعادل استاتیکی با صرف‌نظر کردن از مشتقات مرتبه دوم و بالاتر برای جزء المان از گوه گسیختگی ارائه شده است. فشار خاک با انتگرال‌گیری از رابطه فشار خاک روی کل ارتفاع دیوار به‌دست می‌آید. بر این اساس برای سه حالت مختلف، بسته به طول مسلح‌کننده و زاویه گوه گسیختگی بحرانی با سطح افق، سه رابطه متفاوت برای محاسبه فشار خاک ارائه شده که بر حسب تغییرات ϕ از 30° تا 40° نتایج ارائه شده است. در مطالعات آنان نشان داده شده که لنگر واژگونی در حالت خاک مسلح کمتر از لنگر واژگونی خاکریز غیرمسلح است. نقطه اثر فشار وارد شونده در این روش در حدود یک سوم ارتفاع دیوار به‌دست می‌آید.

همچنین گرگ (۱۹۹۸) [4]، دیوار حایل صلب با ارتفاع ۱۱ متر را مورد مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی قرار داده است. در این بررسی خاک پشت دیوار همگن، ایزوتروپ و دانه‌ای در نظر گرفته شده و سطح گسیختگی به‌صورت صفحه‌ای فرض شده است. به‌کمک منحنی‌های بدون بعد ارائه شده در این مقاله برآیند فشار واردشونده بر دیوار و نقطه اثر آن قابل محاسبه است. نتایج ارائه شده در تحقیق مذکور منطبق بر

نتایج تحقیق ساران و همکاران (۱۹۹۲) است.

در ارتباط با تعیین فشار واردشونده بر دیوارهای صلب مسلح شده و غیرمسلح روش‌های تحلیلی مختلفی ارائه شده است. میلوناکیس و همکاران (۲۰۰۷) [5]، با ارائه روشی مبتنی بر تنش پلاستیک ضریب فشار فعال و مقاوم را در خاک‌های چسبنده بررسی کردند. چن و لیو (۱۹۹۰) [6]، (1990) با ارائه روش تحلیل حدی، فشار واردشونده بر دیوارهای صلب را مطالعه کردند. همچنین حبیب آگهی و قهرمانی (۱۹۷۷) [7]، با ارائه روشی که در شمار روش‌های تحلیل حدی قرار نمی‌گیرد، ضریب فشار واردشونده بر دیوار را بررسی کرده‌اند. نتایج به‌دست آمده از روش‌های مختلف اختلافی کمتر از ۱۰ درصد دارند و نتایج حبیب آگهی و قهرمانی (۱۹۷۷) اختلاف بیشتری با سایر روش‌ها دارد.

۳- معادلات اساسی و فرض‌های به‌کار رفته در تعیین فشار واردشونده بر دیوار در خاک‌های دانه‌ای

ایده اولیه روش قطعات افقی توسط شاهقلی و همکاران (۲۰۰۱) [8] ارائه شده است. این روش برای شبیه‌های خاکی مسلح شده، بر مبنای تقسیم توده بالای خط گسیختگی به تعدادی قطعه افقی ابداع شده و در آن براساس معادلات و مجهولات ارائه شده در فرمول‌بندی ساده شده، با در نظر گرفتن مقداری معلوم برای $\sum T_i$ مجهولات N_i و S_i و F_s روی گوه گسیختگی به‌دست می‌آید. $\sum T_i$ برابر با مجموع مقادیر نیروهای کششی روی گوه گسیختگی است. در جدول (۱) معادلات و مجهولات فرمول‌بندی ساده شده این روش آورده شده است.

در این جدول، τ_f و τ_m به‌ترتیب مقاومت برشی متوسط خاک و تنش برشی بسیج شده در سطح لغزش است. معادلات و مجهولات فرمول‌بندی کامل روش قطعات افقی توسط نوری و همکاران (۲۰۰۵) [9] ارائه شده است. در مطالعه مذکور فرمول‌بندی‌هایی با $3n$ و $5n - 1$ معادله و مجهول برای محاسبه $(\sum T_i)_{\max}$ ارائه شده و

عبارتند از:

(۱) برای به دست آوردن تنش قائم بر روی هر قطعه از رابطه تحلیلی ارائه شده توسط سگرسیتین و همکاران (۱۹۹۲) [10]، استفاده شده که بر اساس آن مقدار تنش قائم در هر نقطه از شیروانی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sigma_v = \gamma z \cdot \tanh(au + b)$$

$$u = \frac{x}{z}$$

$$a = 2 \tan \alpha \cdot \text{Log} \left(\frac{2K_a}{K_a + K_\alpha} \right)$$

$$b = (\text{Log} \frac{K_a + K_\alpha}{K_a - K_\alpha}) / 2$$

که در آن z, x به ترتیب فواصل طول از مبدأ و عمق نقطه مورد نظر است. همچنین توابع K_a و K_α به صورت زیر تعریف می شوند. جزئیات این روابط توسط شکاریان و همکاران (۲۰۰۸) [11]، ارائه شده است.

$$K_\alpha = \left[\frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sin \alpha + \sqrt{\sin \alpha \cos(\alpha - \varphi) \sin \varphi}} \right]^2$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

(۲) نقطه اثر نیروی عمودی بین قطعات، مرکز سطح توزیع تنش محاسباتی از بند (۱) است.

(۳) سطح گسیختگی به صورت صفحه ای در نظر گرفته شده است.

(۴) تحلیل بر مبنای روش تعادل حدی انجام شده است.

(۵) مقدار ضریب اطمینان برای تمامی قطعات یکسان در نظر گرفته شده است.

(۶) توده خاک در محاسبات به صورت همگن در نظر گرفته شده است.

(۷) فرض شده که سطح گسیختگی از پای دیوار عبور می کند.

(۸) تحلیل انجام شده برای خاک دانه ای (شرایط $c = 0$) ارائه شده است.

(۹) در معادلات و مجهولات فرمول بندی ارائه شده توسط

در آن مقدار F_s در روی گوه گسیختگی بحرانی برابر واحد در نظر گرفته شده است. در فرمول بندی $3n$ ،

مجهولات مورد نظر نیروهای N_i ، S_i ، H_i و T_i و H_i نیروی برشی بین قطعات است.

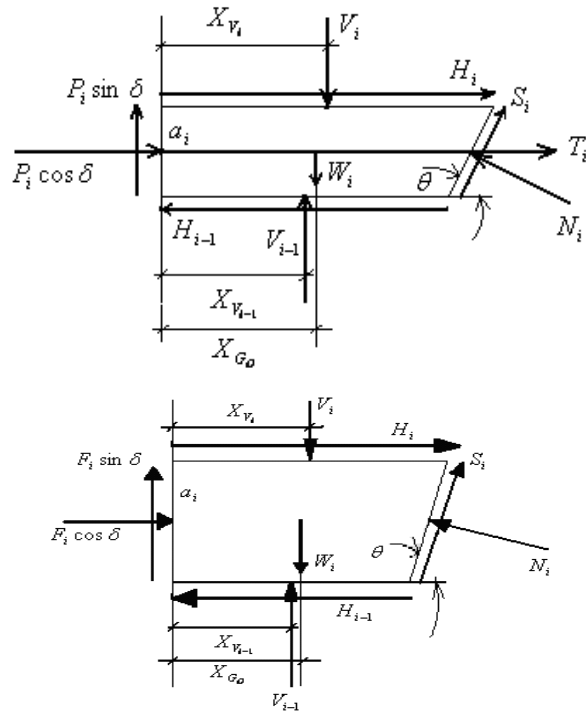
در فرمول بندی $5n-1$ ، علاوه بر مجهولات مذکور پارامترهای V_i ، X_{V_i} و λ به مجموعه مجهولات مسأله اضافه می شود که V_i نیروی قائم بین قطعات، X_{V_i} نقطه اثر نیروی قائم و λ ضریب مورگنسترن و پرایس است.

جدول ۵ معادلات و مجهولات فرمول بندی ساده شده

برای تحلیل شیروانی های مسلح شده [8]

تعداد	معادلات	تعداد	مجهولات
n	N_i نیروی عمود واردشونده بر کف قطعات	n	(برای هر قطعه) $\sum F_y = 0$
n	S_i نیروی برشی واردشونده بر کف قطعات	n	(برای هر قطعه) $\tau_m = \tau_f / F_s$
۱	F_s ضریب اطمینان	۱	(برای هر قطعه) $\sum F_x = 0$

به دست آوردن فشار واردشونده بر دیوارهای صلب درحالتی که توده خاک پشت آنها با المان های مسلح کننده تقویت شده باشد، از اهمیت بالایی در طراحی این دیوارها برخوردار است. محققان پیشین پیشنهادهایی را برای طراحی این نوع دیوارها و تعیین ضریب فشار وارد بر خاک ارائه کرده اند که معمولاً با توجه به فرضیه های مورد نظر در هر دو روش، فشار واقعی وارد بر دیوار را به دست نمی دهند. در این مطالعه سعی شده بر اساس روشی تحلیلی، با تقسیم توده گسیختگی به قطعات افقی و برقراری تعادل استاتیکی روی تمامی قطعات، فشار خالص اعمال شده از طرف هر قطعه به دیوار به دست آید. در نهایت با جمع نیروی وارد شده از طرف قطعات بر دیوار، فشار برابند خالص اعمال شده به دیوار به دست می آید. در این روش تعادل لنگر و نیروها برای تمامی قطعات در نظر گرفته می شود. فرضیه ها در این روش



شکل ۲ نیروهای واردشونده بر قطعه افقی مسلح شده (بالا) و قطعه افقی بدون مسلح کننده (پایین)

معادلات تعادل نیروها در جهت افقی و قائم و همچنین معادله تعادل لنگر برای قطعه i به صورت زیر نوشته می شود.

$$\begin{aligned} \sum \overleftarrow{\oplus} F_x &= 0 \Rightarrow P_i \cos \delta + T_i + S_i \cos \theta - N_i \sin \theta = 0 \\ \sum \overrightarrow{\oplus} F_y &= 0 \Rightarrow P_i \sin \delta + V_{i+1} + S_i \sin \theta + N_i \cos \theta - V_i - W_i = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum \overleftarrow{\oplus} M_o &= 0 \Rightarrow V_{i+1} \cdot X_{V_{i+1}} - V_i \cdot X_{V_i} - W_i \cdot X_{G_o} + \\ & (N_i / \sin \theta - P_i \cos \theta - T_i) \cdot (\sum_1^{i-1} h_i + \frac{h_i}{2}) = 0 \end{aligned}$$

در روابط ارائه شده $\frac{N_i \tan \varphi}{F_s}$ برابر نیروی برشی وارد

نگارندگان از نیروی افقی بین قطعات صرف نظر شده

است. ($H_i = H_{i-1}$)

(۱۰) محل اثر نیروی N_i وسط کف قطعه است.

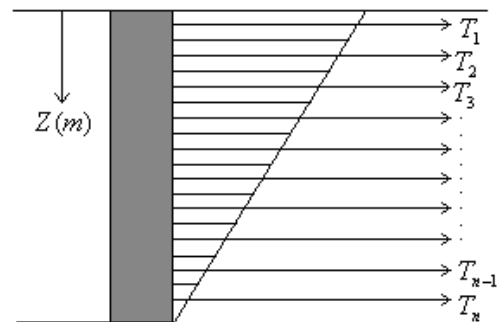
(۱۱) نقطه اثر نیروی P_i نقطه a_i یعنی میانه ابتدای قطعه است.

با توجه به فرض های ذکر شده، معادلات و مجهولات فرمول بندی کامل این روش در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ معادلات و مجهولات فرمول بندی کامل روش قطعات افقی برای محاسبه فشار افقی واردشونده بر دیوار صلب خاک مسلح

تعداد	مجهولات
n	$\sum F_x = 0$ (برای هر قطعه)
n	$\sum F_y = 0$ (برای هر قطعه)
n	$\sum M_o = 0$ (برای هر قطعه)
n	$\tau_m = \tau_f / F_s$ (برای هر قطعه)
تعداد	مجهولات
n	نیروی مسلح کننده (T_i)
n	نیروی عمود وارد بر کف قطعه (N_i)
n	نیروی برشی وارد بر کف قطعه (S_i)
n	نیروی خالص واردشونده بر دیوار (P_i)

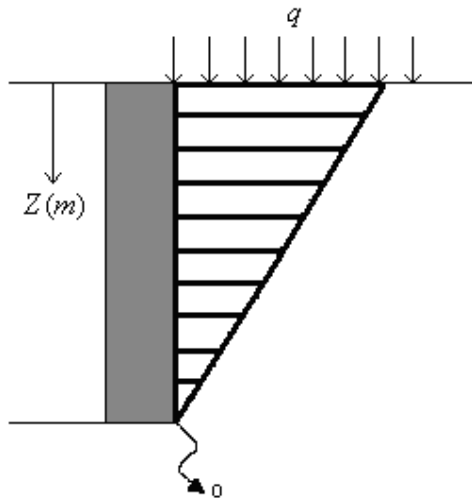
در این روش n مجهول با حل n معادله تعیین می شود. در شکل های (۱) و (۲) نمای کلی دیوار و نیروهای واردشونده بر قطعه مسلح شده نشان داده شده است.



شکل ۱ نمای کلی دیوار و نیروهای مسلح کننده

جدول ۳ معادلات و مجهولات فرمول‌بندی کامل روش قطعات افقی برای به‌دست آوردن فشار واردشونده بر دیوار صلب

تعداد	معادلات
n	$\sum F_x = 0$ (برای هر قطعه)
n	$\sum F_y = 0$ (برای هر قطعه)
1	$\sum M_o = 0$ (برای کل توده)
n	$\tau_m = \tau_f / F_s$ (برای هر قطعه)
n-1	H_i
تعداد	مجهولات
n-1	$H_i = \lambda V_i$
n	نیروی عمود وارد بر کف قطعه (N_i)
n	نیروی برشی وارد بر کف قطعه (S_i)
n	فشار واردشونده بر دیوار (P_i)
1	ضریب λ



شکل ۳ تقسیم دیوار بدون مسلح‌کننده به قطعات افقی

معادلات تعادل نیروها در جهت افقی و قائم برای قطعه i به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\Rightarrow \\ F_i \sin \delta + V_{i+1} + S_i \sin \theta + N_i \cos \theta - V_i - W_i &= 0 \\ \sum F_x = 0 &\Rightarrow \\ F_i \cos \delta - H_{i+1} + S_i \cos \theta - N_i \sin \theta + H_i &= 0 \end{aligned}$$

بر کف قطعه i یعنی S_i است. تمامی پارامترها در شکل (۲) آورده شده است.

$$\begin{aligned} X_{V_i} &= \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{2 \tan \theta} \\ X_{V_{i-1}} &= \frac{\sum_{i=1}^{i-1} h_i}{2 \tan \theta} \\ X_{G_o} &= \frac{\sum_{i=1}^{i-1} h_i + h_i/2}{2 \tan \theta} \end{aligned}$$

در این روابط:

θ با توجه به مقدار $\sum T_i$ بر روی گوه گسیختگی به‌دست می‌آید. برای به‌دست آوردن θ بحرانی،

$$\frac{\partial (\sum (T_i + P_i))}{\partial \theta} = 0$$

را محاسبه کرده و مقدار $\theta_{critical}$ به‌دست می‌آید.

P_i برای قطعه i ام از حل چهار معادله، چهار مجهولی به‌دست می‌آید. کل فشار برابند خالص واردشونده بر دیوار از مجموع نیروهای اعمالی از طرف قطعات بر دیوار حاصل می‌شود.

۴- معادلات اساسی و فرض‌های به کار رفته برای تعیین فشار واردشونده بر دیوار صلب در خاک‌های چسبنده اصطکاکی

فرض‌های در نظر گرفته شده در این روش مشابه فرض‌های روش قبل است، با این تفاوت که در این حالت خاک دارای چسبندگی بوده و این مشخصه و نیروی افقی بین قطعات در فرمول‌بندی منظور شده است. معادلات و مجهولات در نظر گرفته شده برای این روش در جدول (۳) ارائه شده است.

در این روش ϵn معادله و ϵn مجهول با فرمول‌بندی متفاوت به‌منظور تعیین فشار واردشونده بر دیوار استفاده شده است. در شکل (۲) دیاگرام نیروهای واردشونده بر قطعه افقی در دو حالت با و بدون مسلح‌کننده و در شکل (۳) نمای کلی دیوار بدون مسلح‌کننده آورده شده است.

لچنسکی (۲۰۰۶) [12] ارائه شده و دارای اعتبار بین‌المللی است - مقایسه شد. جزئیات دیوار خاک مسلح در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴ مشخصات در نظر گرفته شده برای دیوار خاک مسلح

وزن مخصوص خاک (γ)	20 KN/m^3
چسبندگی (C)	۰
زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)	$20^\circ - 35^\circ$
زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار (δ)	10°
ارتفاع دیوار (H)	$5 \text{ m} - 10 \text{ m}$

در این مقایسه به ازای دیوارهای با ارتفاع و زاویه اصطکاک داخلی متغیر مقادیر فشار خالص وارد شونده بر دیوار به دست آمده و با نتایج به دست آمده از نرم افزار مذکور مقایسه شده است (جدول ۵ و شکل ۴).

در این روابط S_i نیروی برشی وارد شونده بر کف قطعه

$$i \text{ یعنی } \frac{N_i \tan \phi + C(h_i / \sin \theta)}{F_s} \text{ است. تمامی}$$

پارامترها در شکل (۲) آورده شده است.

θ با توجه به $\sum P_i$ بر روی گوه گسیختگی به دست می‌آید. برای به دست آوردن θ بحرانی، $\frac{\partial(\sum P_i)}{\partial \theta} = 0$ را محاسبه کرده و $\theta_{critical}$ را به دست می‌آوریم.

۵- مقایسه نتایج روش تحلیلی با روش‌های موجود برای خاک‌های غیرچسبنده

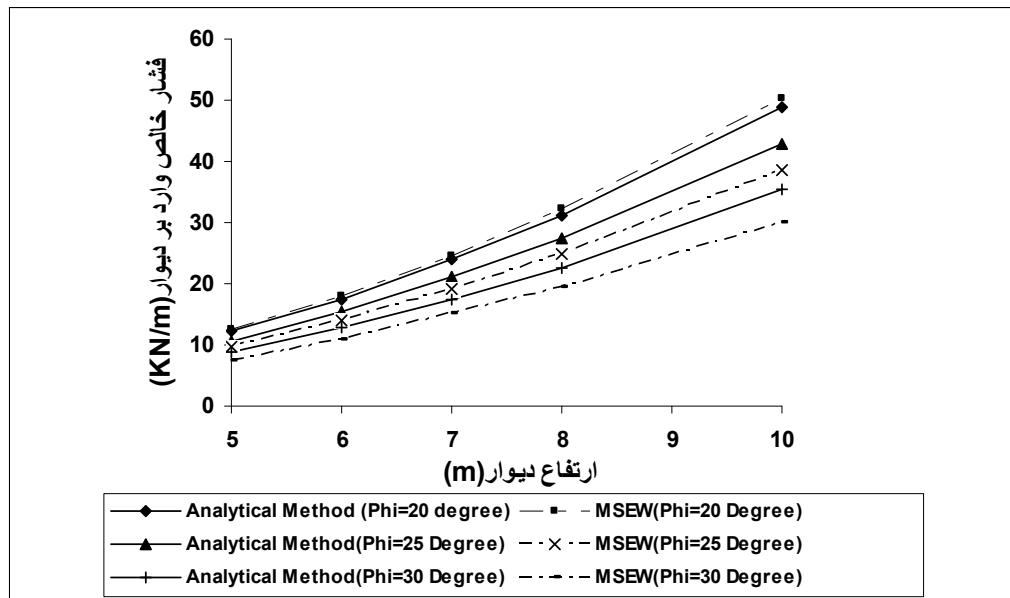
به منظور ارزیابی روش تحلیلی قطعات افقی برای تعیین فشار برآیند وارد شونده بر دیوار، این نتایج با نتایج نرم افزار MSEW - ویرایش جدید آن توسط

جدول ۵ مقایسه مقادیر فشار بر آئیند وارد شونده بر دیوار در دو روش تحلیلی و نرم افزار MSEW

ارتفاع دیوار (متر)	$20^\circ \phi =$		$25^\circ \phi =$		$27/5^\circ \phi =$		$30^\circ \phi =$		$35^\circ \phi =$	
	تحلیلی	نرم افزار	تحلیلی	نرم افزار	تحلیلی	نرم افزار	تحلیلی	نرم افزار	تحلیلی	نرم افزار
۵	۱۲/۱۸	۱۲/۶۰	۱۰/۶۰	۹/۷۵	۹/۸۶	۸/۵۳	۸/۸۶	۷/۵۶	۷/۰۶	۶/۱۳
۶	۱۷/۵۵	۱۸/۱۲	۱۵/۴۸	۱۴/۰۰	۱۴/۱۹	۱۲/۲۷	۱۲/۷۶	۱۰/۸۶	۱۰/۱۶	۸/۴۸
۷	۲۳/۸۸	۲۴/۶۱	۲۱/۰۷	۱۹/۰۹	۱۹/۳۰	۱۶/۶۲	۱۷/۳۸	۱۵/۰۸	۱۳/۸۳	۱۱/۸۷
۸	۲۱/۲۰	۳۲/۲۲	۲۷/۵۰	۲۴/۸۵	۲۵/۲۴	۲۱/۸۰	۲۲/۶۸	۱۹/۳۲	۱۸/۰۷	۱۵/۵۶
۱۰	۴۸/۷۴	۵۰/۳۴	۴۳/۰۰	۳۸/۶۰	۳۹/۴۴	۳۴/۱۲	۳۵/۴۴	۳۰/۱۲	۲۸/۳۰	۲۴/۴۶

پیشنهادی توسط سازمان FHWA [13] - که در سال ۲۰۰۱ ارائه شده - برای مسلح کننده‌های مختلف مقایسه شده است، که در آن K_a ضریب فشار فعال کولومب است. در مقایسه اخیر ارتفاع دیوار ۸ متر و زاویه اصطکاک 30° و 35° درجه در نظر گرفته شده است. تغییرات ضریب فشار خاک در عمق با نتایج پیشنهادی برای ژئوستتیک‌ها، شبکه‌های سیمی جوش شده و نوارهای فلزی مقایسه شده است (جدول ۶).

در شکل (۵) مقادیر ضریب فشار اعمال شده بر دیوار در دو حالت توده مسلح شده و توده خاک بدون مسلح کننده مقایسه شده است. در ادامه با تعریف فشار برآیند خاک وارد شونده از طرف هر قطعه بر دیوار برابر $P_i = \frac{1}{2} \gamma z^2 K_r$ - که z عمق کف قطعه مورد نظر است - میزان K_r به عنوان ضریب فشار اعمالی خاک بر دیوار به دست آمده است. برای تعیین تغییرات ضریب فشار، $\frac{K_r}{K_a}$ برای توده مسلح شده با نمودارهای

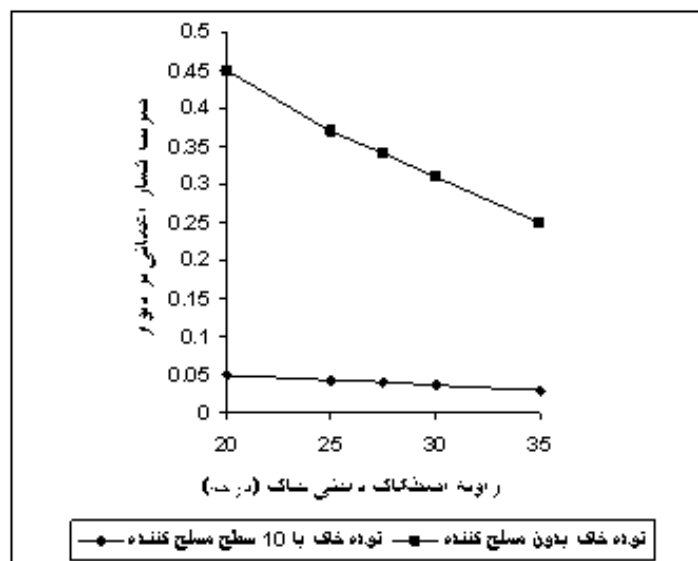


شکل ۴ مقایسه مقادیر فشار برآیند وارد بر دیوار از دو روش تحلیلی و نرم افزار MSEW به ازای $\phi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$

۶- مقایسه نتایج روش تحلیلی با روش‌های موجود برای خاک‌های چسبنده اصطکاکی

به منظور بررسی صحت فرمول‌بندی ارائه شده در خاک‌های چسبنده اصطکاکی، ابتدا نتایج این روش با روش‌های متداول تحلیلی ارائه شده برای خاک‌های اصطکاکی مقایسه شده و سپس با ملحوظ کردن اثر چسبندگی بار دیگر ارزیابی انجام شده است. در جدول (۷) نتایج روش پیشنهادی به ازای زوایای اصطکاک داخلی برابر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه و به ازای مقادیر مختلف δ برای خاک‌های اصطکاکی مقایسه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، نتایج به دست آمده در این تحقیق انطباق بسیار مناسبی با نتایج سایر محققان برای خاک‌های اصطکاکی دارد. همچنین در جدول (۸) برای خاک‌های چسبنده و اصطکاکی به ازاء مقادیر مختلف چسبندگی نتایج حاصل از این روش با نتایج روش رانکین [14] مقایسه شده است. همان گونه که دیده می‌شود فرمول‌بندی روش قطعات افقی از قابلیت مناسبی برای محاسبه فشار واردشونده بر دیوار در خاک‌های چسبنده برخوردار است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ضریب فشار اعمال شده به دیوارهای مسلح شده در روش تحلیلی، در اعماق مختلف دیوار نمونه برای $\phi = 30^\circ$ بین ۰/۳۳ تا ۰/۳۹ و برای $\phi = 35^\circ$ بین ۰/۲۷ تا ۰/۳۲ متغیر است، در حالی که روش تقریبی FHWA همین مقدار را برای مسلح کننده ژئوستتیک به ترتیب برای $\phi = 30^\circ$ برابر ۰/۳۰ و برای $\phi = 35^\circ$ برابر ۰/۲۵۳ پیشنهاد کرده است. نتایج تحلیلی برای تعیین ضریب فشار فعال در نیمه بالایی دیوار حداکثر ۲۳٪ با روش FHWA در تعیین ضریب فشار فعال خاک برای توده مسلح شده با ژئوستتیک اختلاف داشته است. البته در نیمه پایینی دیوار این اختلاف کمتر می‌شود. در عین حال به نظر می‌رسد که این اختلاف در نیمه بالایی دیوار ناشی از خطای روش FHWA در یکنواخت گرفتن ضریب فشار فعال در اعماق مختلف برای توده مسلح شده با ژئوستتیک باشد. در فرمول‌بندی پیشنهادی برای دیوارهای صلب نتایج به ازای زوایای اصطکاک داخلی مختلف، انطباق مناسبی را با روش‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۵ مقایسه مقادیر ضریب فشار اعمالی بر دیوار در دو حالت توده مسلح شده و توده بدون مسلح کننده

۷- نتیجه گیری

الف) در این تحقیق با استفاده از مبانی روش قطعات افقی، روشی تحلیلی برای محاسبه فشار واردشونده بر دیوارهای حائل مسلح و غیرمسلح در دو حالت اصطکاکی و چسبنده ارائه شده است. در این روش تعادل استاتیکی برای تمامی قطعات ارضا شده و فشار برابند واردشونده بر دیوار با استفاده از معادلات و مجهولات فرمول‌بندی $4n$ معادله و $4n$ مجهول به دست می‌آید.

ب) مقایسه نتایج تحلیلی در خاک‌های اصطکاکی با نرم‌افزار MSEW حاکی از آن است که نتایج به دست آمده به ازای ϕ های پایین اختلاف بسیار کمی با نتایج نرم‌افزار دارد و با بالا رفتن ϕ این اختلاف افزایش یافته و حداکثر به ۱۳ درصد می‌رسد. صرف نظر کردن از نیروی برشی بین قطعات، تعداد قطعات در نظر گرفته شده و توزیع تقریبی تنش قائم وارد بر هر قطعه، از برخی دلایل اختلاف نتایج است.

ج) بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از ۱۰

لایه مسلح کننده فشار فعال واردشونده بر دیوار ۸ متری را ۸۰ تا ۹۰ درصد کاهش می‌دهد و حداکثر کاهش در خاک‌های ضعیف‌تر اتفاق می‌افتد.

د) مقایسه ضریب فشار توده‌های مسلح شده با نمودارهای پیشنهادی FHWA برای مسلح کننده‌های مختلف نشان می‌دهد که ضریب فشار اعمال شده به دیوارهای مسلح شده در روش تحلیلی، بیش از اعداد ارائه شده در FHWA برای مسلح کننده ژئوستتیک و کمتر از سایر مسلح کننده‌هاست.

ه) به منظور محاسبه فشار واردشونده بر دیوار در خاک‌های دارای چسبندگی فرمول‌بندی جدیدی ارائه شد. به منظور بررسی صحت نتایج فرمول‌بندی مذکور، ابتدا برای شرایط خاک اصطکاکی نتایج تحلیلی با نتایج روابط سایر محققان مقایسه شد، که این مقایسه حاکی از دقت روش در این حالت است. نتایج روش تحلیلی همچنین با نتایج روش پیشنهادی رانکین برای محاسبه فشار فعال در خاک‌های چسبنده انطباق دارد.

جدول ۶ مقایسه مقادیر ضریب فشار خاک از روش تحلیلی با روش FHWA برای مسلح کننده‌های متفاوت

عمق دیوار (متر)	مقادیر ضریب فشار فعال خاک							
	نتایج روش تحلیلی		نتایج روش FHWA (2001)					
	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	ژئوسنتیک‌ها		نوارهای فلزی		شبکه سیمی جوش شده	
			$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$	$\phi = 30^\circ$	$\phi = 35^\circ$
۱/۶	۰/۳۹	۰/۳۲۳	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۴۷	۰/۴۰۵	۰/۶۴۶	۰/۵۴۵
۲/۴	۰/۳۷	۰/۳۰	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۴۵	۰/۳۸۵	۰/۵۹۴	۰/۵۰۱
۳/۲	۰/۳۵	۰/۲۸۵	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۴۳	۰/۳۶۳	۰/۵۴۲	۰/۴۵۷
۴	۰/۳۴۴	۰/۲۸	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۴۱	۰/۳۴۶	۰/۴۹	۰/۴۱۳
۴/۸	۰/۳۴	۰/۲۷۶	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۳۹	۰/۳۲۹	۰/۴۳۸	۰/۳۶۹
۵/۶	۰/۳۴	۰/۲۷۴	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۳۷	۰/۳۱۲	۰/۳۸۶	۰/۳۲۶
۶	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۳۶	۰/۳۰۴	۰/۳۶	۰/۳۰۴
۸	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۳	۰/۲۵۳	۰/۳۶	۰/۳۰۴	۰/۳۶	۰/۳۰۴

جدول ۷ مقایسه نتایج ضریب فشار فعال از روشهای مختلف

ϕ (درجه)	۲۰		۳۰		۴۰	
δ (درجه)	۰	۱۰	۰	۱۰	۰	۱۰
Habibaghahi and Ghahramani (1977)	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۱۷
Chen and Liu (1990)	۰/۴۹	۰/۴۴۸	۰/۳۳۳	۰/۳۰۳	۰/۲۱۷	۰/۲۰
Mylonakis et al.(2007)	۰/۴۹	۰/۴۵۱	۰/۳۳۳	۰/۳۰۵	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷
روش پیشنهادی	۰/۴۹	۰/۴۴۷	۰/۳۳۳	۰/۲۹۹	۰/۲۱۸	۰/۲۰

جدول ۸ مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش رانکین

ϕ (درجه)	۲۰		۳۰		۴۰	
چسبندگی (کیلو نیوتن بر متر مربع)	۵	۱۰	۵	۱۰	۵	۱۰
روش رانکین	۴۲۰	۳۵۰	۲۷۵/۲۹	۲۱۷/۵۹	۱۷۰/۴۲	۱۲۳/۸۳
روش پیشنهادی	۴۲۰/۴۴	۳۵۰/۴	۲۷۵/۷۸	۲۱۸/۰۳	۱۷۰/۹۹	۱۲۴/۳۴

۹- منابع

- [8] Shahgholi, M., Fakher, A., Jones, C.J.F.P. (2001). "Horizontal slice method of analysis." *Geotechnique* 51(10), 881-885.
- [9] Nouri, H., Fakher, A., Jones, C.J.F.P. (2005). "Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls." *Geotextile and Geomembranes*. 24, 175-187.
- [10] Segrestin, P. (1992). "Design of sloped reinforced fill structure." Proceedings of the conference retaining structures organized by institution of civil engineers and held at robinson college, Cambridge.
- [11] Shekarian, S., Ghanbari, A., and Farhadi, A. (2008). "New Seismic Parameters in the Analysis of Retaining Walls with Reinforced Backfill", *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 350-356
- [12] Leshchinsky, D. (2006). "Manual of MSEW software." Version(2.0).
- [13] FHWA-NHI-00-043. Elias, V. & Christopher, B. (2001). U.S. department of transportation federal highway administration. "Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design & construction guidelines."
- [14] Rankine, W. (1857) "On the stability of loose earth", *Philosophical transaction of the royal society of London*, Vol. 147.
- [1] Hausmann, M. R., and Lee, K. L. (1978). "Rigid model wall with soil reinforcement." *Proc., Symp. On Earth Reinforcement*, ASCE, 400-428.
- [2] Lareal, P., Benameur, F., Collas, P. (1992). "Active earth pressure reducing pneusol: experimental tests." Proceedings of the conference retaining structures organized by institution of civil engineers and held at robinson college, Cambridge.
- [3] Saran, S., Garg, K. G., Bhandari, R.K. (1992). "Retaining wall with reinforced cohesionless backfill." *J. Geotech. Eng. ASCE*, 118, 1869-1888, GT 12.
- [4] Garg, K. G., (1998). "Retaining wall with reinforced backfill – a case study." *Geotextile and Geomembranes* 16, 135-149.
- [5] Mylonakis, G., Kloukinas, P., Papatonopoulos, C., 2007. An alternative to the Mononobe-Okabe equation for seismic earth pressures. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, 27(10), 957-969.
- [6] Chen, W.F., Liu, X.L., (1990). "Limit Analysis in Soil Mechanics." Elsevier, Amsterdam.
- [7] Habibagahi, K., Ghahramani, A., (1977). "Zero extension theory of earth pressure." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(GT7), 881-96.