فشار فعال استاتیکی ناشی از سربار نواری بر دیوارهای مایل

مجتبی احمدآبادی: دانشگاه ازاد اسلامی واحد سپیدان
گروه مهندسی عمران
Ahmadabadi.m@gmail.com
علی قنبری: دانشگاه تربیت معلم گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۸۸/٦/۲٤ **پذیرش**۸۹/۱۰/۷

چکیده:

در این مقاله محاسبهٔ توزیع فشار فعال استاتیکی دیوارهای مایل در خاک‌های اصطکاکی و همچنین خاک‌های چسبنده اصطکاکی مورد توجه واقع شده است. در این دیوارها شیب دیوار نسبت به محور قائم خوابیده‌تر است. بر مبنای معادلات تعادل حدی برای گوه گسیختگی بحرانی و همچنین بر مبنای روش قطعات افقی دو فرمولاسیون پیشنهاد شده است و نتایج حاصل با نتایج روابط ارائه شده سایر محققان مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش قطعات افقی با دقت زیادی قادر است توزیع فشار وارد بر دیوار و زاویهٔ گوه گسیختگی را به دست آورد. ضمن آنکه این روش برای شرایط مختلف خاک و دیوار کارایی دارد و قادر است زاویهٔ اصطکاک بین خاک و دیوار، چسبندگی خاک، زاویهٔ شیب زمین پشت دیوار و اثر سربار را به صورت توام در نظر گیرد. بر مبنای فرمولاسیون حاصل از روش قطعات افقی توزیع فشار فعال خاک برای دیوار مایل در هر دو نوع خاک بررسی شده غیرخطی است و محل اثر برآیند نیز پایین‌تر از یک سوم ارتفاع است. در این مقاله فرمولاسیونی برای محاسبهٔ فشار وارد بر دیوارهای مایل، با اثر سربار نواری ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: دیوار حائل، دیوار مایل، فشار فعال خاک، روش قطعات افقی، خاک چسبنده - اصطکاکی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

مقدمه

محاسبهٔ فشار فعال بر دیوارهای حائل از مباحث حائز اهمیت در مهندسی ژئوتکنیک است. برای دیوارهای قائم برآیند و توزیع فشار وارد بر دیوار و همچنین زاویهٔ گوه گسیختگی بحرانی در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده به خوبی تبیین شده است. رانکین (1857) با صرف نظر از زاویهٔ اصطکاک بین خاک و دیوار و با فرض آن‌که گوه گسیختگی بحرانی با افق زاویه‌ای معادل $45+\phi/2$ می‌سازد، پارامترهای مذکور را برای دیوارهای قائم به‌دست آورد. همچنین کلومب[۱] (۱۷۷٦) برای خاک‌های فاقد چسبندگی فشار وارد بر دیوار را محاسبه کرده است.

ماتسو[۲](۱۹۲۹)، **مونونوب**[۳] و اوکاب[٤] (۱۹۲٦) با استفاده از حل کلومب (۱۷۷٦) برای شرایط شبه‌استاتیکی و به فرض خاک فاقد چسبندکی، فشار فعال وارد بر دیوار را محاسبه کرده‌اند. همچنین ضرابی کاشانی (۱۹۷۹) رابطه‌ای برای تعیین زاویهٔ گوهٔ گسیختگی در روش **مونونوب** و اوکاب ارائه کرد. نهایتاً چانگ[۵] (۲۰۰۳) توزیع فشار فعال برای دیوارهای قائم را بررسی کرد. با این حال دیوارهای مایل، مخصوصاً در حالتی که به شکل خوابیده اجرا شوند، به‌ندرت مورد توجه محققان پیشین واقع شده است. گوش[٦] (۲۰۰۸) با استفاده از روش تعادل حدی به محاسبه فشار فعال وارد بر دیوار مایل توجه کرده است. با این حال راه حل ارائه شده این محقق صرفاً برای خاک‌های دانه‌ای بوده است و در آن محل اثر نیروی برآیند و زاویهٔ گوه گسیختگی نیز بررسی نشده است. برای این منظور از روش تعادل حدی با فرض تعادل یک گوه و همچنین از روش قطعات افقی استفاده شده است. با استفاده از روش پیشنهاد شده می‌توان برآیند و توزیع فشار فعال، زاویهٔ گوه گسیختگی و محل اثر نیروی برآیند را برای دیوارهای مایل به دست آورد. در این دیوارها شیب دیوار نسبت به محور قائم خوابیده‌تر است. بر مبنای معادلات تعادل حدی برای گوه گسیختگی بحرانی و همچنین بر مبنای روش قطعات افقی دو فرمولاسیون پیشنهاد شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش قطعات

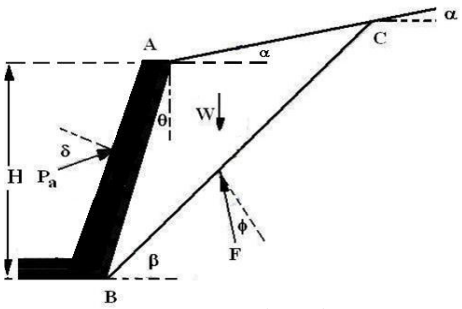
۱.Coulomb ۲.Matsuo ۳.Mononobe ۴.Okabe
۵.Chang ۶.Ghosh

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

افقی با دقت زیادی قادر است توزیع فشار وارد بر دیوار و زاویهٔ گوه گسیختگی را به دست آورد. ضمن آن‌که این روش برای شرایط مختلف خاک و دیوار کارایی دارد و قادر است زاویهٔ اصطکاک بین خاک و دیوار، چسبندگی خاک، زاویهٔ شیب زمین پشت دیوار و اثر سربار را به صورت توام در نظر گیرد. بر مبنای فرمولاسیون حاصل از روش قطعات افقی، توزیع فشار فعال خاک برای دیوار مایل در هر دو نوع خاک بررسی شده غیرخطی است و محل اثر برآیند نیز پایین‌تر از یک سوم ارتفاع است.

تحلیل دیوارهای مایل بر اساس روش تعادل حدی

دیواری مایل مطابق شکل ۱ که در آن θ زاویهٔ شیب دیوار نسبت به راستای قائم است در نظر گرفته شود. فرض می‌شود که زاویهٔ نیروی وارد بر دیوار با راستای عمود بر دیوار معادل زاویهٔ اصطکاک بین دیوار و محور عمود بر آن (δ) باشد و صفحهٔ گوه گسیختگی فرضی با افق زاویه β را می‌سازد.



شکل ۱. تعادل نیروها در گوه گسیختگی فرضی

در صورتی که تعادل نیروها برای گوه ABC نوشته شود، خواهیم داشت:

$$Pa = \frac{1}{2}\gamma H^2 \frac{\cos(\theta+\beta)\cos(\theta+\alpha)\sin(\beta-\phi)}{\cos^2\theta\sin(90+\delta-\theta-\beta+\phi)\sin(\beta-\alpha)} \qquad (۱)$$

که می‌توان به اختصار آن را به صورت زیر نشان داد:

$$Pa = \frac{1}{2}\gamma H^2 Ka_I \qquad (۲)$$

که در آن:

$$Ka_I(\beta) = \frac{\cos(\theta+\beta)\cos(\theta+\alpha)\sin(\beta-\phi)}{\cos^2\theta\sin(90+\delta-\theta-\beta+\phi)\sin(\beta-\alpha)} \qquad (۳)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

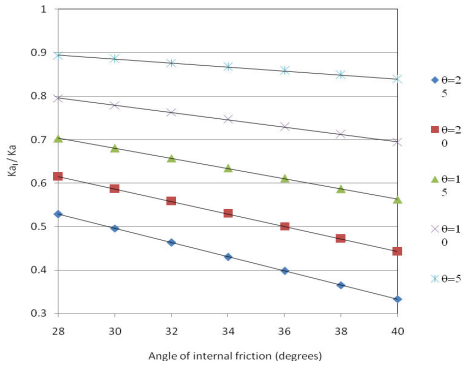
در رابطهٔ فوق Ka_I ضریب فشار فعال برای دیوار مایل است و برای یک خاک دانه‌ای در شرایط استاتیکی است. در صورتی که از رابطهٔ (۲) نسبت به β مشتق گرفته شده و برابر صفر قرار گیرد، زاویهٔ گوه گسیختگی برای دیوارهای مایل مطابق زیر را به‌دست می‌آید:

$$\beta = \phi + Arc\tan\frac{AB \pm \sqrt{A(1+AB)(B-C)}}{C+ABC-B} \qquad (٤)$$

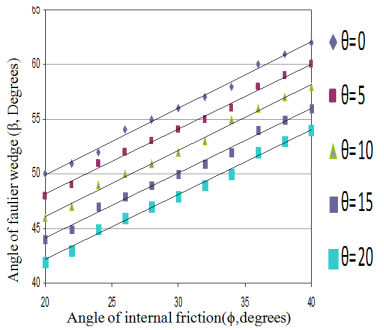
که در آن:

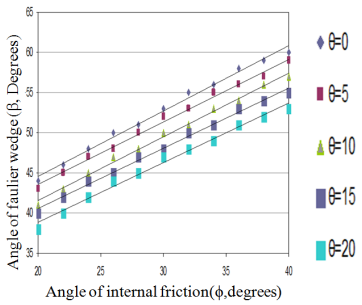
$$A = \tan(\phi - \alpha) \qquad B = \tan(\phi + \theta) \qquad C = \tan(\theta - \delta)$$

در شکل۲ نسبت ضریب فشار فعال دیوار مایل به دیوار قائم ارائه شده است. در این شکل ضرایب فشار فعال برای زوایای ۵ درجه تا ۲۵ درجه ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود رابطهٔ بین نسبت مذکور و زاویه اصطکاک داخلی خاک خطی است.

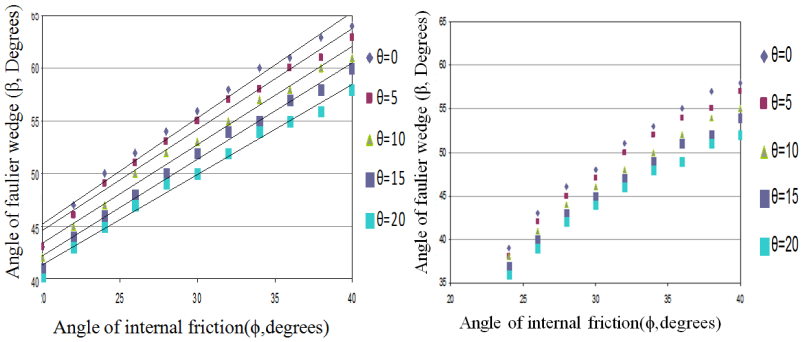


شکل ۲. نسبت ضریب فشار فعال دیوار مایل به دیوار قائم برای زوایای اصطکاک داخلی مختلف



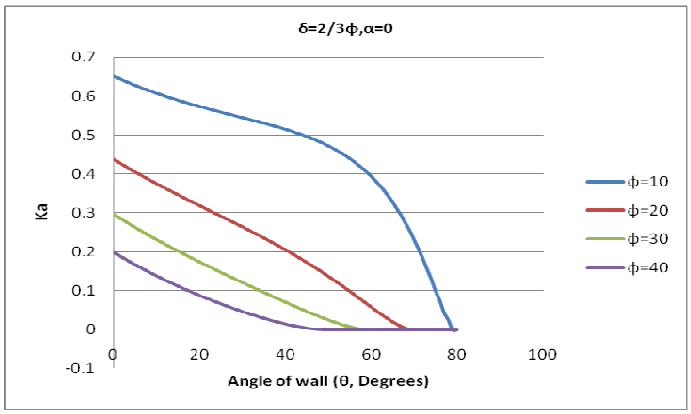


[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]



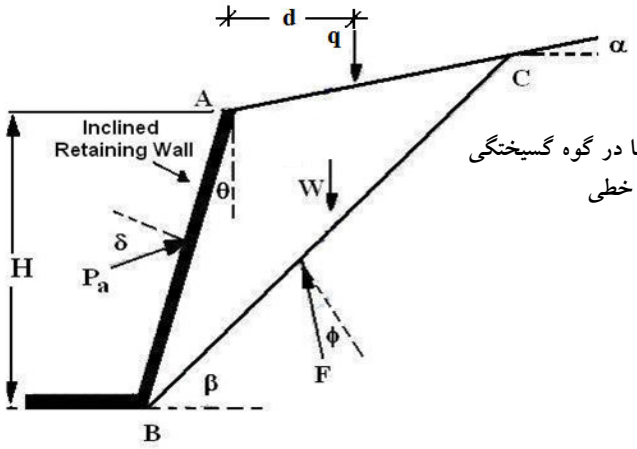
شکل ۳. زاویهٔ گوه گسیختگی دیوار بر مبنای تعادل حدی دیوار برای زوایای اصطکاک داخلی مختلف

در شکل ۳ بر مبنای رابطهٔ (٤) و با فرض $\delta = {}^{2}\!/_{3}\,\phi$ زاویهٔ گوه گسیختگی برای دیوار با شیب‌های مختلف نشان داده شده است. چنان که در شکل ٤ مشخص است هر چه شیب دیوار افزایش می‌افتد فشار وارد بر دیوار کاهش می‌یابد و در نهایت به مقدار صفر می‌رسد و هر چه زاویهٔ اصطکاک داخلی بیش‌تر باشد فشار وارد بر دیوار در زوایای کم‌تری به صفر می‌رسد. همچنین در شکل ٤ روند کاهش فشار وارد بر دیوار مایل با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک نشان داده شده است.



شکل ٤. روند کاهش ضریب فشار فعال دیوارهای مایل با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی بر مبنای نتایج تعادل حدی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]



شکل ۵. تعادل نیروها در گوه گسیختگی فرضی با تأثیر سربار خطی

به منظور بررسی اثر سربار در زاویهٔ گوه گسیختگی و فشار وارد بر دیوارهای مایل، بار خطی q مطابق شکل ۵ به فاصلهٔ d از لبهٔ دیوار قرار داده شده است. در این صورت با نوشتن معادلات تعادل برای گوه گسیختگی در خاک پشت دیوار رابطهٔ زیر برای محاسبه فشار فعال خاک در حالت استاتیکی به‌دست می‌آید:

$$Pa = \left[\frac{1}{2}\gamma H^2[g(\beta)] + q\right] f(\beta) \qquad (۱۱)$$

که در آن توابع $f(\beta)$ و $g(\beta)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f(\beta) = \frac{\sin(\beta - \phi)}{\sin(90 - \theta + \gamma - \beta + \phi)} \qquad (۱۲)$$

$$g(\beta) = \frac{\cos(\theta + \beta)\sin(90 + \theta + \alpha)}{\cos^2\theta \sin(\beta - \alpha)} = \frac{\cos(\theta + \beta)\cos(\theta + \alpha)}{\cos^2\theta \sin(\beta - \alpha)} \qquad (۱۳)$$

در صورتی که از رابطهٔ (۱۱) نسبت به β مشتق گرفته شده و برابر صفر قرار گیرد، رابطهٔ (۱٤) برای محاسبهٔ زاویهٔ گوه گسیختگی دیوارهای مایل با روش وجود سربار به‌دست می‌آید. با این حال این رابطه به‌طور مستقیم زاویهٔ گوه گسیختگی را به دست نمی‌دهد و لازم است با روش سعی و خطا حل گردد. برای این منظور بهتر است از فرض اولیه $\beta = \phi$ استفاده شود.

$$\frac{\gamma H^2 B}{2(FDE)^2}\left[DE(IG - AC) + IC(MD - KE)\right] = \frac{-q}{E^2}\left[GE + CM\right] \qquad (۱٤)$$

ضرایب معادل G (۱٤) از جدول ۱ به‌دست می‌آید:

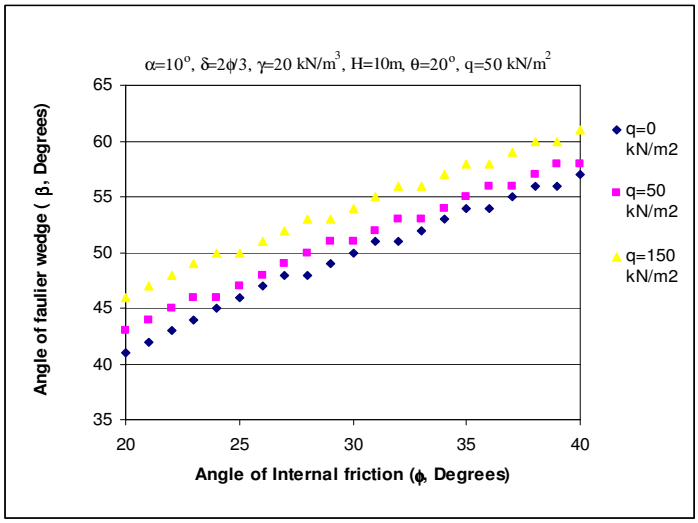
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

جدول ۱. ضرایب معادل G (۱٤)

ضرایب	روابط	ضرایب	روابط
A	$\sin(\theta-\beta)$	F	$\cos(\theta)$
B	$\cos(\theta+\alpha)$	G	$\cos(\beta-\phi)$
C	$\sin(\beta-\phi)$	I	$\cos(\theta+\beta)$
D	$\sin(\beta-\alpha)$	K	$\cos(\beta-\alpha)$
E	$\cos(\theta-\delta+\beta-\phi)$	M	$\sin(\theta-\delta+\beta-\phi)$

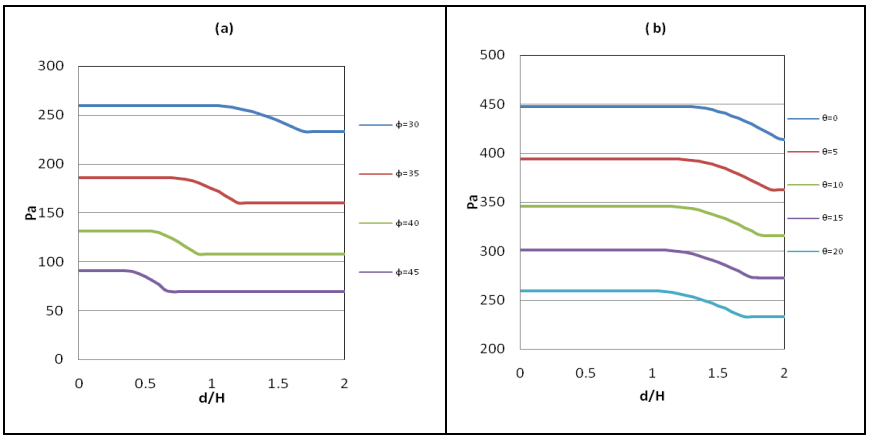
در شکل ٦ روند افزایش زاویهٔ گوه گسیختگی با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی برای یک دیوار ۱۰ متری در دو حالت با و بدون سربار نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود افزایش مذکور در سربارهای مختلف دارای روند خطی است. همچنین در شکل ۷ تأثیر سربار در فشار وارد بر دیوار مایل نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای مذکور در وجود سربار موجب افزایش فشار وارد بر دیوار می‌شود، با این حال اگر سربار در فاصله‌ای خارج از گوه گسیختگی قرار گیرد بر توزیع فشار وارد بر دیوار تأثیر ندارد. نسبت فاصلهٔ بحرانی سربار به ارتفاع دیوار تابع مشخصات مکانیکی مصالح و مشصات هندسی دیوار است و برای شرایط معمول بین یک تا ۲ است.



شکل ٦. روند افزایش β با افزایش ϕ برای دو حالت با و بدون سربار

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]



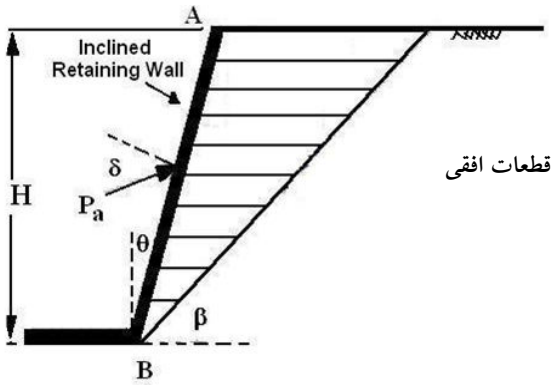
شکل ۷. تأثیر فاصله سربار در فشار وارد بر دیوار مایل با تغییر (b) : زاویه اصطکاک داخلی خاک (c) : شیب دیوار

جدول ۲. مشخصات دیوار مورد استفاده در تحلیل‌ها

سری تحلیل	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (کیلو نیوتن بر متر مربع)	ارتفاع دیوار (متر)	زاویه شیب دیوار (درجه)	زوایه اصطکاک بین خاک و دیوار (درجه)	وزن مخصوص خاک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	زاویه شیب زمین (درجه)	شدت سربار (کیلو نیوتن بر متر مربع)
(b)	30-45	0	10	20	20	20	20	100
(c)	30	0	10	0-20	20	20	20	100

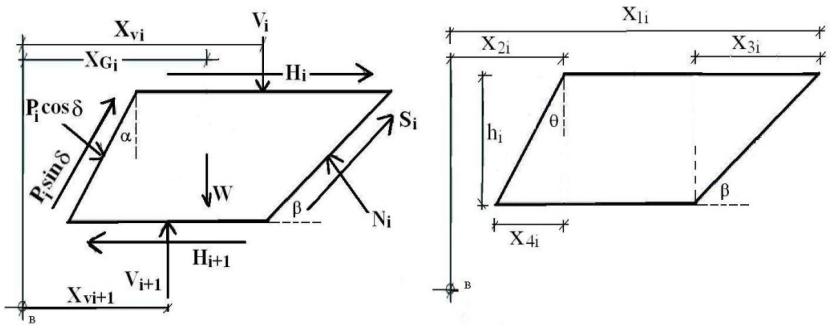
تحلیل دیوارهای مایل بر اساس روش قطعات افقی:

مطابق فرضیه‌های ارائه شده در قسمت (۲) داریم:



شکل ۸. تقسیم گوه گسیختگی به قطعات افقی در دیوارهای مایل

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]



شکل ۹. تعادل نیروها در قطعه i

در شکل ۸ برای یک دیوار مایل گوه گسیختگی به قطعات افقی تقسیم شده است. اگر تعداد قطعات برابر n باشد، آن‌گاه:

$$h_i = \frac{H}{n} \qquad (۱۵)$$

بر اساس روابط مثلثاتی، فواصل نشان داده شده در شکل 9 از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

$$X_{1i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} hj}{\tan(B)} \qquad (۱۶)$$

$$X_{2i} = \left[\sum_{j=i}^{n} hj\right] \tan(\theta) \qquad (۱۷)$$

$$X1_{i+1} = \frac{\sum_{j=i+1}^{n} hj}{\tan(\beta)} \qquad (۱۸)$$

$$X_{3i} = \frac{h(i)}{\tan\beta} \qquad (۱۹)$$

$$X_{4i} = h(i)\tan\theta \qquad (۲۰)$$

همچنین، فاصله X_{Gi} و وزن هر قطعه از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

$$X_{G_i} = \frac{x1_i}{2} + \frac{x2_i}{2} - \frac{x3_i}{4} - \frac{x4_i}{4} \qquad (۲۱)$$

$$W_i = \{(X_{1i} - X_{2i} - X_{3i}) + 0.5(X_{3i} + X_{4i})\}h_i\gamma_i \qquad (۲۲)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

برای به‌دست آوردن تنش قائم (V_i) بر روی هر قطعه از رابط G تحلیلی ارائه شده سگرستون[۱] (۱۹۹۲) استفاده شده است که بر اساس آن تنش قائم در هر نقطه از یک شیروانی از رابط G زیر به‌دست می‌آید.

$$V_i = \gamma z_i \cdot \tanh(au + b) \qquad (۲۳)$$

که در آن ضرایب به قرار زیر است:

$$u_i = \frac{x_j}{z_i} \qquad (۲٤)$$

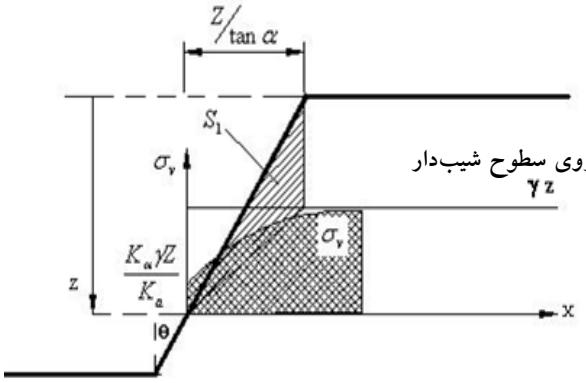
$$a = 2\tan(\frac{\pi}{2} - \theta) \cdot \log(\frac{2K_a}{K_a + K_b}) \qquad (۲۵)$$

$$b = (\log\frac{K_a + K_\alpha}{K_a - K_\alpha})/2 \qquad (۲٦)$$

در توابع بالا x فاصله طول از مبداء و z عمق نقطه مورد نظر مطابق شکل ۱۰ است. توابع K_a و K_α به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_b = \left[\frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \theta - \varphi)}{\cos(\theta) + \sqrt{\cos(\theta)\cos(\frac{\pi}{2} - \theta - \varphi)\sin\varphi}}\right]^2 \qquad (۲۷)$$

$$K_a = \tan^2(45 - \frac{\varphi}{2}) \qquad (۲۸)$$



شکل ۱۰. توزیع تنش قائم بر روی سطوح شیب‌دار

۱. Segrestin

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

با نوشتن معادلات تعادل نیروها و لنگر و مقومت برشی برای هر قطعه مجهولات چهارگانه مسئله به‌دست خواهند آمد. در جدول (۳) معادلات و مجهولات فرمولاسیون مورد نظر به اختصار ارائه شده است.

جدول ۳. تعداد معادلات و مجهولات روش قطعات افقی

مجهولات	تعداد	معادلات	تعداد
H_i	n	$\sum F_x = 0$	n
N_i	n	$\sum F_y = 0$	n
S_i	n	$\sum M_0 = 0$	n
P_i	n	$S_i = N_i \tan\phi$	n
----------	4n	----------	4n

معادلات به قرار زیر است:

$$\sum F_x = 0 \longrightarrow H_i - H_{i+1} + S_i \cos\beta - N_i \sin\beta + P_i \cos\delta\cos\theta + P_i \sin\delta \quad (۲۹)$$

$$\sum F_y = 0 \longrightarrow V_i + V_{i+} - W_i + S_i \sin\beta + N_i \cos\beta - P_i \cos\delta\sin\theta + P_i \sir \quad (۳۰)$$

$$\sum M_o = 0 \longrightarrow V_i X_{V_i} + V_{i+1} X_{V_{i+1}} - W_i X_{G_i} + \left[\frac{N_i}{\sin\beta_i} - \frac{P_i \cos\delta}{\cos\theta}\right] \times \left[\sum_{j=i+1}^{n} hj + \frac{h_i}{2}\right] + H \quad (۳۱)$$

$$S_i = \left[N_i \tan\ \phi + Cl_i\right] \quad (۳۲)$$

$$l_i = h_i / \sin\ \beta \quad (۳۳)$$

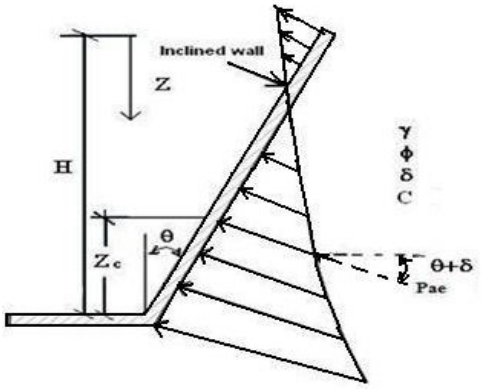
P کل برابر مجموع Pi به‌دست آمده از هر قطعه می‌شود.

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i \quad (۳٤)$$

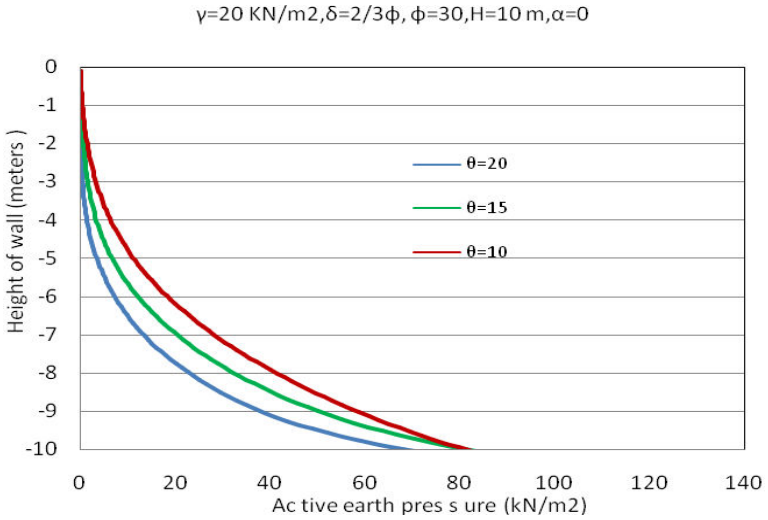
با استفاده از فرمولاسیون روش قطعات افقی فشار وارد بر دیوار مایل، زاویهٔ گوه گسیختگی و محل اثر برایند فشار وارد بر دیوار برای یک دیوار ۱۰ متری محاسبه شده و در شکل‌های ۱۱ تا ۱٤ نشان داده شده است. در شکل۱۲ هر چه زاویهٔ شیب دیوار بیش‌تر شود

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

فشار وارد بر دیوار کم‌تر خواهد شد و محل اثر نیروی برآیند به سمت پایین دیوار حرکت می‌کند. در شکل ۱۳ با افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، روندی مشابه روند زاویهٔ شیب دیوار دارد. چنان که که انتظار داشتیم و در شکل ۱٤ هم مشخص است افزایش چسبندگی خاک باعث کاهش فشار وارد بر دیوار می‌شود و همچنین هر چه چسبندگی افزایش یابد عمق ترک کششی بیش‌تر می‌شود. لازم به ذکر است که در خاک‌های چسبندهٔ اصطکاکی فشار وارد بر دیواردر نقطه بالای دیوار برابر صفر است.

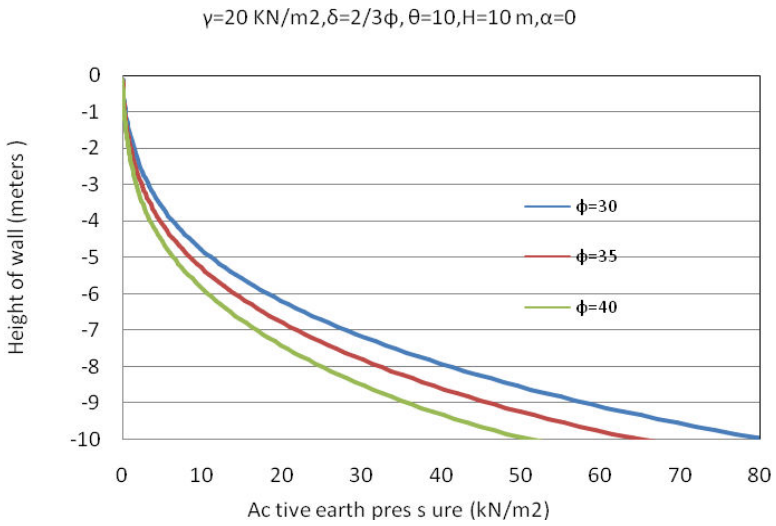


شکل ۱۱. توزیع تنش و نیروی وارد بر دیوار مایل و محل اثر

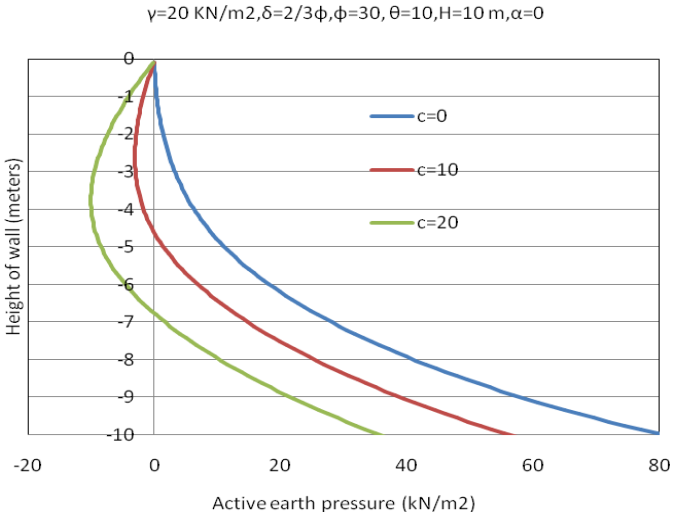


شکل ۱۲.توزیع تنش برای تغییرات زاویهٔ شیب دیوار مایل برای روش HSM

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]



شکل ۱۳. توزیع تنش برای تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی برای روش HSM



شکل ۱٤. توزیع تنش برای تغییرات چسبندگی خاک برای روش HSM

محل اثر نیروی وارد بر دیوار بسته به نوع توزیع تنش متفاوت است؛ برای مثال، در دیوارهایی که زاویهٔ اصطکاک بین خاک و دیوار و چسبندگی صفر شود، توزیع تنش مثلثی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

شده و محل اثر نیروی وارده بر دیوار در ثلث دیوار می‌شود. اما برای دیوارهای مایل فرمولاسیون محل اثر نیرو مطابق زیر می‌گردد.

$$\sum_{i=1}^{n}\{p_i\cos(\delta+\theta)\times[\sum_{j=i}^{n}h_j+\frac{h_i}{2}]\}=p_a\cos(\delta+\theta)\times z_c \qquad (۳۵)$$

$$z_c=\frac{\sum_{i=1}^{n}\{p_i\times[\sum_{j=i}^{n}h_j+\frac{h_i}{2}]\}}{p_a} \qquad (۳۶)$$

نتیجه‌گیری و بررسی صحت فرمول‌بندی پیشنهادی

دیوارهای مایل در ساخت سازه‌های ساحلی و دیوارهای جانبی سرریزها کاربرد دارند، با این حال در منابع علمی‌پیشین کم‌تر مورد توجه واقع شده‌اند. در این مقاله ابتدا با استفاده از اصول تعادل حدی برای گوه گسیختگی پشت دیوار فشار فعال و زاویهٔ گوه گسیختگی برای یک خاک فاقد چسبندگی ارائه شد. سپس بر مبنای روش قطعات افقی گوه گسیختگی به تعدادی قطعه افقی تقسیم شده و با نوشتن معادلات تعادل توزیع فشار وارد بر دیوار به دست آمد. به‌منظور بررسی صحت فرمولاسیون پیشنهادی نتایج حاصل با نتایج سایر پژوهش‌گران، برای دیوارهای قائم و مایل در شرایط مساوی، مقایسه شده است. اثر سربار بر توزیع فشار وارد بر دیوار و همچنین تغییر زاویهٔ گوه گسیختگی بررسی شد و بر اساس تعادل حدی برای گوه گسیختگی فرمول‌بندی جدیدی به‌دست آمد. رابطهٔ جدیدی برای محاسبه توزیع فشار با وجود سربارهای خطی و نواری در دیوارهای صلب ارائه شد. در استخراج این رابطه شیب دیوار، شیب زمین و زاویهٔ اصطکاک بین خاک و دیوار هم لحاظ گردید.رابطهٔ جدیدی برای محاسبه زاویهٔ گوه گسیختگی با وجود سربار به‌دست آمده و با روابط موجود برای حالت بدون سربار مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که وجود سربار موجب غیرخطی شدن توزیع فشار جانبی وارد بر دیوار شده و محل اثر برآیند فشار جانبی خاک نیز از یک سوم پایینی دیوار به طرف نیمه ارتفاعی آن جابه‌جا می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برخلاف آن‌چه در دیوارهای قائم دیده می‌شود، توزیع فشار فعال خاک بر دیوارهای مایل از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

یک منحنی غیرخطی تبعیت می‌کند و بنا بر این نقطه اثر نیروی برآیند فشار وارد بر دیوار نیز کم‌تر از یک سوم ارتفاع دیوار از پای دیوار فاصله دارد.

به‌منظور بررسی صحت روابط ارائه شده برای دیوار مایل، ابتدا نتایج حاصل از این روابط با روابط ارائه شده برای دیوارهای قائم در شرایط مساوی مقایسه شده و پس از آن با نتایج روش گوش (۲۰۰۸) که برای دیوار مایل ارائه شده است، نیز مقایسه انجام شده است. در جدول ٤ نتایج دو روش استفاده شده در این مقاله برای یک دیوار مایل در خاک فاقد چسبندگی مقایسه شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است ضریب فشار فعال خاک و زاویهٔ گوه گسیختگی بحرانی در هر دو روش مقادیر تقریباً مشابه‌ای دارند، با این حال نقطه اثر نیروی برآیند در روش قطعات افقی به مقدار چشم‌گیری پایین‌تر از روش تعادل حدی است. این اختلاف ناشی از دقت روش قطعات افقی در محاسبه توزیع فشار وارد بر دیوار است. در جدول‌های ٥ و ٦ مقایسهٔ نتایج روش‌های پیشنهادی با روش‌های کلمب (۱۷۷٦) و چانگ (۲۰۰۳) برای تعیین ضریب فشار وارد بر دیوار مایل و همچنین زاویه گوه گسیختگی ارائه شده است. نتایج مذکور با تقریب قابل قبولی نزدیک به هم هستند. در جدول ۷ نتایج ضریب فشار فعال وارد بر دیوار مایل دو روش پیشنهادی با دو روش ارائه شده به‌وسیلهٔ گوش(۲۰۰۸) و کاکوت[۱] و کرشیل[۲] (۱۹٤۸) ارائه شده است. این نتایج نیز مقادیر مشابهی را نشان می‌دهند. در جدول ۹ برای یک دیوار قائم در خاک چسبنده نتایج روش قطعات افقی با نتایج روش ارائه شده به‌وسیلهٔ داس[۳] و پوری[٤] (۱۹۹٦) و همچنین نتایج چانگ (۲۰۰۳) مقایسه شده است. هر سه روش مذکور نتایج مشابهی برای ضریب فشار فعال خاک بر دیوار ارائه کرده‌اند، با این حال مقادیر زاویهٔ گوه گسیختگی در روش قطعات افقی بین یک تا سه درجهٔ کم‌تر از نتایج دو روش دیگر است.

۱. Caquot ۲. Kerisel ۳. Das ۴. Puri

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

جدول ٤. مقایسهٔ روش قطعات افقی و تعادل حدی

LEM: Proposed Method (Based on Limit equilibrium)

HSM: Proposed Method (Horizontal slice method)

$\alpha = 0^\circ, c = 0, \delta = {}^{2}/_{3}\,\phi$

		$\theta=10$			$\theta=15$			$\theta=20$		
		K_a	β	Z_c	K_a	β	Z_c	K_a	β	Z_c
$\phi=30$	LEM	.2317	52.16	3.33	.2022	50.16	3.33	.1743	48.10	3.33
	HSM	.2309	50.75	2.08	.2033	48.9	1.81	.1806	47.3	1.48
$\phi=35$	LEM	.1804	55.09	3.33	.1522	53.07	3.33	.1259	50.99	3.33
	HSM	.1856	54	2.064	.1615	52.2	1.75	.1394	50.55	1.47
$\phi=40$	LEM	.1386	58	3.33	.1124	55.95	3.33	.0884	.5384	3.33
	HSM	.1473	57.25	2.05	.1254	55.4	1.74	.1050	53.6	1.47

جدول ۵. مقایسهٔ روش‌های پیشنهادی با روش کلومب (۱۷۷٦) و روش چانگ (۲۰۰۳) برای تعیین ضریب فشار وارد بر دیوار مایل

LEM: Proposed Method (Based on Limit equilibrium)
HSM: Proposed Method (Horizontal slice method)
Coulomb: Coulomb (1776)
Chang (2003) Chang:

$\alpha = 0^\circ, c = 0, \delta = {}^{2}/_{3}\,\phi, \theta = 0$

	LEM	HSM	Coulomb	Chang
Φ=20	.4379	.4396	.4379	.4261
Φ=25	.3608	.3622	.3608	.3456
Φ=30	.2973	.2985	.2973	.2793

جدول ٦. مقایسهٔ روش‌های پیشنهادی با روش کلومب (۱۷۷٦) و روش چانگ (۲۰۰۳) برای تعیین زاویهٔ گوه گسیختگی

LEM: Proposed Method (Based on Limit equilibrium)
HSM: Proposed Method (Horizontal slice method)
Coulomb: Coulomb (1776)
Chang(2003) :Chang

$\alpha = 0^\circ, c = 0, \delta = {}^{2}/_{3}\,\phi, \theta = 0$

	LEM	HSM	Coulomb	Chang
Φ=20	50	50	50	50
Φ=25	53	53	53	53
Φ=30	55	53	56	56

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

جدول ۷. مقایسهٔ روش‌های پیشنهادی با روش پریانکا گوش[1](۲۰۰۸) و روش کاکوت و کریسل(۱۹٤۸) برای تعیین ضریب فشار وارد بر دیوار مایل

LEM: Proposed Method (Based on Limit equilibrium)
HSM: Proposed Method (Horizontal slice method)
PG:Priyanka Ghosh(2008)
C-K:Caquot and Kerisel(1948)

$\alpha = 0^\circ, c = 0, \theta = 10$

	δ	LEM	HSM	PG	C-K
ϕ=20	0	.432	.400	.433	.420
	ϕ	.360	.359	.360	.370
ϕ=30	0	.270	.240	.270	.270
	ϕ	.227	.232	.227	.240
ϕ=40	0	.158	.167	.158	.160
	ϕ	.141	.142	.142	.150

جدول ۸. مقایسهٔ روش‌های پیشنهادی با روش چانگ (۲۰۰۳) و روش داس و پوری(۱۹۹٦) برای تعیین ضریب فشار وارد بر دیوار مایل

HSM: Proposed Method (Horizontal slice method)
Chang (2003) :Chang
P: Das and Puri (1996)-D

$\alpha = 0^\circ, \delta = \frac{2}{3}\phi, \theta = 0, \phi = 20^o, H = 10m, \gamma = 20kN/m^2$

c (kN/m^2)		D-P	Chang	HSM
c=0	P_a	443	440	446
	β	50	51	51
c=10	P_a	314	313	318
	β	50.6	53	52.6
c=20	P_a	190	187	190
	β	50.6	54	53.7

منابع

1. Ahmadabadi, M. and Ghanbari, A., 2009. New procedure for active earth pressure calculation in retaining walls with reinforced cohesive-frictional backfill. *Geotextiles and Geomembranes,* 27 (2009) 456-463.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

2. Ahmadabadi, M., Ghanbari, A., "An analytical method for calcula-tion of lateral earth pressure due to surcharge load", 8th International Conference on Civil Engineering,. Shiraz, Iran, May 11-13 (2009) (In Persian).
3. Ahmadabadi, M., Ghanbari, A.,"An Analytic Method to Measure the Earth Pressure Resulting From the Surcharge on Retaining Walls", Geotechnical Challenges in Megacities, International Geotechnical Conference, GeoMos 2010, Moscow, Russia (Accepted) (2010).
4. Azad, A., Yasrobi, S., Pak, A., Seismic active earth pressure distribution behind rigid retaining walls. *Soil Dyn. and Earthquake Eng*. 28(5) (2008) 365-375.
5. Cheng, Y. M., Seismic lateral earth pressure coefficients for *C-φ* soils by slip line method. *Computers and Geotechnics* 30 (2003) 661-670.
6. Coulomb, C. A., Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelqes de stratique relatifs al' architecture, in: Memoires de mathematique et de physique. Presentes al' academie royale des sciences, Paris 7 (1776) 343-82.
7. Das, B. M., Puri, V. K., Static and dynamic active earth pressure. *Geotechnical and Geological Eng*. 14 (1996) 353-366.
8. Ghanbari, A. and Ahmadabadi, M., "New analytical procedure for seismic analysis of reinforced retaining wall with cohesive-frictional backfill", Geosynthetics International. No 17(6) (2010)1-16.
9. Ghanbari, A. and Ahmadabadi, M., "Pseudo-Dynamic Active Earth Pressure Analysis of Inclined Retaining Walls Using Horizontal Slices Method", Scientia Iranica, Vol. 17, No.2 (2010) 118-130.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

10. Ghanbari, A. and Ahmadabadi, M., ”Active earth pressure on inclined retaining walls in static and seismic conditions” Interna-tional Journal of Civil Engineering , Vol.8, No.2 (2010) 159-173.
11. Ghosh, P., Seismic active earth pressure behind non-vertical retaining wall using pseudo-dynamic analysis, *Canadian Geotechnical Journal,* 45(1) (2008) 117-123.
12. Mononobe N., Matsuo H. On the determination of earth pressure during earthquakes, in: Proc. of the World Engineering Congress, Tokyo 9 (1929) 179-187.
13. Nimbalkar, S. and Choudhury, D., Seismic design of retaining wall by considering wall-soil inertia for active case, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2 (4) (2008) 319-328.
14. Nouri, H., Fakher, A., Jones, C.J.F.P., Development of horizontal slices method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls. *Geotextiles and Geomembranes* 24 (2006) 175-187.
15. Nouri, H., Fakher, A., 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) (2008) 263-278.
16. Okabe, S., General theory of earth pressures, J. Japan Soc. Civil Engineering 12 (1) (1926).
17. Prakash, S., and Saran, S., Static and dynamic earth pressure behind retaining walls. *In* Proceedings of the Third Symposium on Earthquake Engineering, University of Roorkee, India (1966)1: 277-88.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]

18. Rankine, W.J.M. On the mathematical theory of the stability of earthwork and masonry. Proc. of the Royal Society 8 (1857).
19. Segrestin, P. Design of sloped reinforced fill structure, in: Proc. Conference on Retaining Structures, Inst. of Civil Eng., Robinson College, Cambridge (1992) 574-584.
20. Shahgholi M, Fakher A, Jones C.J.F.P. Horizontal slice method of analysis, *Geotechnique*, 51(2001) (10): 881-885.
21. Shekarian, S., Ghanbari, A., A pseudo-dynamic method to analyze retaining wall with reinforced and unreinforced backfill. *JSEE*, 10 (1) (2008) 41-47.
22. Shekarian, S., Ghanbari, A., Farhadi, A., New seismic parameters in the analysis of retaining walls with reinforced backfill. *Geotextiles and Geomembranes* 26 (2008) 350–356.
23. Zarrabi-Kashani, K., Sliding of gravity retaining wall during earthquakes considering vertical accelerations and changing inclination of failure surface, Ms thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1979).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.1.9]