

محاسبه‌ی نیروی جانبی استاتیکی وارد بر دیوارهای حائل و محل اثر آن در خاک‌های لایه‌ای*محمود قضاوی^(۱)مسعود مشفق یگانه^(۲)

چکیده در این مقاله با استفاده از معادلات مبتنی بر نظریه‌ی پلاستیسیته‌ی مواد و بر پایه‌ی روش‌های تعادل حدی، روابطی به منظور تخمین نیروی برآیند محرک وارد بر دیوارهای حائل صلب ناشی از خاکریزهای لایه‌ای ارائه می‌گردد. به این منظور با استفاده از معادلات پلاستیسیته‌ی حاکم بر سطوح گسیختگی (معادلات کوتتر) و با در نظر گرفتن اثر نیروهای استاتیک فشار عکس‌العمل، نیروی عکس‌العمل خاک ثابت بر روی گوه خاک محاسبه می‌گردد. علاوه بر روش تحلیلی حل، فرم خلاصه جواب برای زاویه‌ی شکست گوه خاک پشت دیوار حائل و در نتیجه فرم خلاصه برای محاسبه‌ی نیروی کل محرک به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده در این مقاله برای خاکریزهای لایه‌ای نیز بسط داده شده است. با توجه به ایجاد رابطه‌ای برای محاسبه‌ی فشار ناشی از عکس‌العمل خاک از نیروهای ناشی از گوه، به‌صورت ویژه به توضیح قابلیت ویژه‌ی این روش در محاسبه‌ی بازوی نیروی جانبی برآیند به‌صورت تحلیلی در خاکریزهای چندلایه و تک‌لایه بدون در نظر گرفتن فرضیات هندسی پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده از روش حاضر برابری مقدار نیروی برآیند جانبی به‌دست آمده از روش حاضر را با مقدار به‌دست آمده از روش کولمب نشان می‌دهد. همچنین ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند، وابسته به خصوصیات خاک خاکریز می‌باشد. علاوه بر این نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در حالت استاتیکی و با فرض مد حرکت چرخش حول پاشنه برای دیوار حائل، مقادیر لنگر به‌دست آمده از روش کولمب در جهت اطمینان و برای طراحی دیوارهای حائل مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی دیوار حائل، سطح شکست، حالت فعال، پلاستیسیته، روش تعادل حدی، خاک لایه‌ای.

Calculation of Static Lateral Thrust and Its Application Point on Rigid Retaining Walls in Layered Backfill

M. Ghazavi

M. Moshfeq Yeganeh

Abstract In this paper, based on soil plasticity and pseudo-static methods, necessary equations have been derived for determination of total active thrusts due to layered backfill on rigid retaining walls using limit equilibrium approach. For this purpose, the reaction force applied on the failed wedge due to granular backfill has been determined using Kotter's equations. The total lateral thrust and the angle of the failed wedge in the backfill with the horizontal direction has also been computed for both active and passive conditions. In addition, heights of application points of these thrusts have been calculated and compared with those obtained from earlier research work. Moreover, the method has been expanded for layered backfill. The results show that the total resultant thrust obtained from this study is well in accordance with the Coulomb method. In addition, it has been shown that the point of application of the resultant thrust depends on the backfill layering and backfill properties. Moreover, the developed method has shown that for retaining walls rotating sufficiently about their toes, overturning moments computed from the Coulomb method are on the safe side.

Key Words Retaining Wall, Slip Surface, Active Condition, Plasticity, Limit Equilibrium Approach, Layered Backfill.

* تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۱۲/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۱۲/۲۶ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(۲) دانشجوی دکتری دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

مقدمه

محاسبه‌ی فشار جانبی بر روی دیوار حائل از اولین مسائل مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. از تئوری‌های محاسبه‌ی فشار جانبی می‌توان به تئوری کولمب (۱۷۷۶) و رانکین (۱۸۵۷) اشاره نمود که هنوز هم به‌صورت وسیع در محاسبه‌ی فشار جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تئوری‌ها به مرور زمان پیشرفت نمود و روش‌های فراوانی برای محاسبه‌ی به‌تر فشار جانبی براساس تئوری‌های رانکین و کولمب پیشنهاد شده است.

تئوری کولمب علی‌رغم توانایی در برآورد نیروی برآیند در خاکریزهای شیبدار و نیز در نظر گرفتن اصطکاک میان دیوار و خاکریز، بر پایه‌ی تعادل نیروها بنا نهاده شده است و توضیحی در مورد توزیع فشار و ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی جانبی وارد بر پشت دیوارهای حائل ارائه نمی‌دهد. در نظر گرفتن فشار به‌صورت خطی در حالت استاتیکی مرسوم می‌باشد.

کایت و کرسیل (۱۹۴۸) [1] با در نظر گرفتن سطح شکست غیرخطی روشی پیشرفته براساس توسعه‌ی معادلات مولر براسلو ارائه نمودند. این روش نیروها را در شرایط حالت حدی محاسبه می‌نمود ولی هیچ توضیحی در مورد توزیع فشار در پشت دیوارهای حائل ارائه نمی‌نمود.

دبروا (۱۹۶۳) [2] با در نظر گرفتن سطح شکست خطی به ارائه‌ی معادلاتی برای تخمین توزیع فشار جانبی در پشت دیوار حائل در مدهای مختلف حرکت پرداخت. در روش مذکور مقاومت برشی بسیج شده خاک به‌صورت تابعی از عمق در نظر گرفته شده است. اسکولوسکی (۱۹۶۵) [3] با استفاده از روش خطوط مشخصه به محاسبه‌ی روابط میدان‌های تنش در خاک و محاسبه‌ی فشار جانبی پرداخت. در این روش با استفاده از انتگرال گیری بر روی معادلات تنش در میدان پلاستیک، به محاسبه‌ی معادلات میدان تنش در اطراف ناحیه‌ی بارگذاری شده پرداخته شده است.

ضرابی کاشانی (۱۹۶۵) [4] به حل تحلیلی معادلات کولمب پرداخت و روابطی تحلیلی برای محاسبه‌ی زاویه‌ی شکست گوه گسیختگی و نیروی جانبی منتجه ارائه نمود.

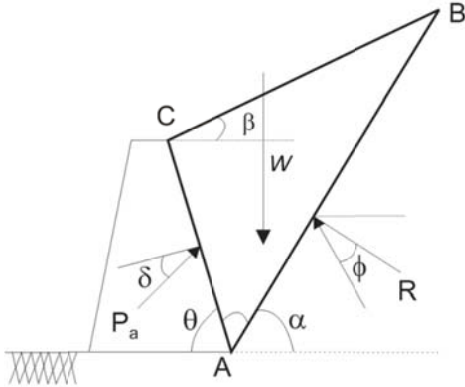
گریکو (۱۹۹۹) [5] با معرفی روشی تحلیلی نشان داد که در صورت استفاده از روش کولمب و رانکین در شرایط مشابه، نیروی جانبی برآیند به‌صورت یکتا حاصل می‌گردد. او هم‌چنین روشی برای حل مسائل با پیچیدگی‌های بیش‌تر ارائه نمود. با این وجود روش مذکور راه حلی برای محاسبه‌ی ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند ارائه نمی‌نمود.

تعدادی از محققان با استفاده از معادلات دیفرانسیل روش‌هایی را به‌منظور محاسبه‌ی فشار جانبی ارائه نمودند. از این میان می‌توان به روش‌های ارائه شده توسط یانسن (۱۸۹۵) [6]، اسپگلر و هندی (۱۹۸۴) [7] و ونگ (۲۰۰۰) [8] اشاره نمود. البته این روش‌ها دارای فرضیات زیاد بوده و هم‌چنین اطلاعات حاصل از این روش‌ها خام و نیاز به بحث و بررسی بیش‌تر دارند.

در سال‌های اخیر روش‌های متعددی بر پایه‌ی روش قطعات افقی (HSM) ارائه شده است. از این میان می‌توان به پژوهش شاهقلی و فاخر (۲۰۰۱) [9] و پژوهش احمدآبادی و قنبری (۲۰۰۹) [10] در خاک‌های اصطکاک‌ی - چسبنده اشاره نمود. روش‌های قطعات افقی موفقیت‌هایی در زمینه‌ی محاسبه‌ی اندازه و توزیع فشار جانبی وارد بر دیوارهای حائل داشته‌اند ولی به دلیل معادلات پیچیده و فرضیات زیاد، کم‌تر در موارد کاربردی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به‌علت اهمیت محاسبه‌ی نیروی برآیند جانبی و هم‌چنین ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند جانبی به موازات پیشرفت روش‌های تحلیلی، مطالعات تجربی به‌منظور بررسی صحت روش‌های تحلیلی انجام پذیرفته است. تعدادی از این مطالعات صحت مقدار نیروی جانبی محاسبه شده از تئوری کولمب را تأیید

گسیختگی به صورت تابعی از α (زاویه شکست گوه خاک) در نظر گرفته می شود. در این صورت تعیین α جزء معلومات مسأله می گردد.



شکل ۱ نیروهای وارد بر گوه خاک در حالت استاتیکی

دو مجهول نیروی عکس العمل خاک وارد بر گوه و نیروی جانبی برآیند وارد بر دیوار با استفاده از دو معادله تعادل افقی و قائم تعیین می گردند. سپس با استفاده از یک روش سعی و خطا و یا صفر قرار دادن مشتق نیرو برآیند نسبت به زاویه گسیختگی ($dP/d\alpha = 0$)، زاویه بحرانی گوه گسیختگی تعیین می شود و با جای گذاری در معادلات تعادل نیروها، نیروی جانبی برآیند بیشینه وارد بر دیوار حاصل می گردد.

محاسبه نیروی عکس العمل خاک روی سطح گسیختگی

تحلیل سطوح لغزش (خطوط مشخصه) در پلاستیسیته در محیط سه بعدی کامل با روش های تحلیلی، به ایجاد معادلات پیچیده و تقریباً غیر قابل حل می انجامد. در حل مسائل، در صورت وقوع شرایط کرنش مسطح، حل معادلات به صورت تحلیل دو بعدی ممکن می گردد. معادلات حاکم بر ناحیه پلاستیک با استفاده از شرایط مرزی و حل هم زمان معادلات تعادل برگرفته از قانون بقای مومتم با ارضا معیار گسیختگی موهر - کولمب حاصل می گردد. این معادلات اولین بار

نموده اند ولی در نظر گرفتن توزیع فشار به صورت خطی را مورد تردید قرار داده اند [11]، [12]. برای نمونه ماتسو (۱۹۷۸) [11] با استفاده از مدل دیوار حائل در سایت به اندازه گیری فشار جانبی وارد بر خاک های ماسه ای و چسبنده پرداخت. مطالعات ماتسو نشان داد که توزیع فشار جانبی وارد بر دیوار حائل غیر خطی است ولی در نظر گرفتن نقطه ای اثر نیروی جانبی در ثلث ارتفاع دیوار از کف در جهت اطمینان می باشد. فنگ و ایشی باشی (۱۹۸۶) [12] نشان دادند که در مد حرکتی چرخش حول پاشنه دیوار، نقطه ای اثر نیروی جانبی به فاصله ای حدود 0.275 ارتفاع دیوار، از پای آن است. آن ها هم چنین نشان دادند که این مقدار تابع مد حرکت دیوار و خصوصیات خاک خاکریز از جمله دانسیته و مقاومت برشی می باشد.

با مطالعه و بررسی بیش تر روش های تحلیلی موجود محاسبه فشار جانبی وارد بر دیوارهای حائل، عدم وجود یک روش ساده و دارای پایه تئوری مشخص برای محاسبه منطبق بر واقع اندازه و ارتفاع نقطه ای اثر نیروی جانبی مشهود می باشد. بر این اساس در مقاله حاضر، با استفاده از معادلات پلاستیسیته حاکم بر سطوح گسیختگی که به نام معادلات کوتر موسوم است با استفاده از روش تعادل حدی به محاسبه اندازه و ارتفاع نقطه ای اثر نیروی جانبی در حالت محرک پرداخته شده است. سپس روند معرفی شده به خاک های لایه ای بسط داده شده است. روش معرفی شده در این مقاله به محاسبه منطبق بر واقع اندازه و نقطه ای اثر نیروی برآیند وارد بر دیوارهای حائل می انجامد و در نتیجه طراحی صحیح دیوار در برابر لغزش و واژگونی میسر می گردد.

تعیین امتداد زاویه شکست گوه خاک با افق

روش مرسوم

نیروی جانبی برآیند و نیروهای شبه استاتیکی لرزه ای در جهات قائم و افقی می باشد. در روش کولمب با در نظر گرفتن هندسه ای مطابق شکل (۱) وزن گوه

$$P = \gamma \sin(\alpha - \varphi) \cdot s + C_1 \quad (3)$$

که در آن s طول قوس از نقطه‌ی B بر روی سطح گسیختگی و C_1 ثابت انتگرال‌گیری است (شکل ۱). معادله‌ی (۳) توزیع فشار عکس‌العمل قسمت پایدار خاکریز را بر روی ضلع AB گوه گسیختگی نشان می‌دهد و ثابت C_1 در معادله‌ی فوق از شرایط مرزی محاسبه می‌گردد. به دلیل عدم وجود فشار در سطح آزاد ($p = 0$ در نقطه B) و با توجه به صفر بودن $s = 0$ در این حالت مقدار C_1 برابر صفر خواهد شد.

نیروی عکس‌العمل خاک روی سطح گسیختگی AB که در رابطه‌ی (۴) با R نشان داده شده است با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌گردد. با استفاده از معادله‌ی فوق مقدار عکس‌العمل مطابق مقدار روبه‌رو در خواهد آمد:

$$R = \int_0^{AB} P ds \quad (4)$$

با جایگزینی مقدار p از رابطه‌ی (۳) در رابطه‌ی (۴) و محاسبه‌ی انتگرال مقدار نیروی عکس‌العمل خاک روی سطح گسیختگی، می‌توان داشت:

$$R = \int_0^{AB} P ds = \frac{1}{2} AB^2 (\gamma) \sin(\alpha - \varphi) \quad (5)$$

با توجه به شکل (۱) و روابط هندسی حاکم بر گوه گسیختگی (مثلث ABC)، طول سطح گسیختگی به صورت زیر حاصل می‌گردد.

$$AB = \frac{H \cdot \sin(\theta + \beta)}{\sin(\alpha - \beta) \cdot \sin(\theta)} \quad (6)$$

با جایگزینی مقدار AB از رابطه‌ی (۶) در رابطه‌ی (۵) مقدار نیروی عکس‌العمل خاک روی سطح گسیختگی به صورت رابطه‌ی (۷) حاصل می‌گردد. مقدار ضریب B برای سادگی با رابطه‌ی (۸) معرفی می‌شود:

$$R = \frac{1}{2} \gamma_s H^2 \frac{\sin^2(\theta + \beta) \sin(\alpha - \varphi_s)}{\sin^2(\theta) \sin^2(\alpha - \beta)} \quad (7)$$

توسط مهندس آلمانی اف. کوتر ایجاد و به همین نام نام‌گذاری گردید [14]. با در نظر گرفتن یک سطح در محیط پیوسته در حالت گسیختگی، فشار برآیند وارد بر سطح گسیختگی (پلاستیک) با استفاده از این معادلات قابل محاسبه می‌باشد. فشار برآیند وارد بر سطح گسیختگی با فرض خاک به صورت همگن، خشک و غیرچسبنده به صورت رابطه‌ی (۱) بیان می‌گردد [14]:

$$\frac{dP}{ds} - 2P \cdot \tan \varphi \frac{d\alpha}{ds} = (\gamma) \sin(\alpha - \varphi) \quad (1)$$

γ : وزن مخصوص خاکریز.

φ : زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاکریز.

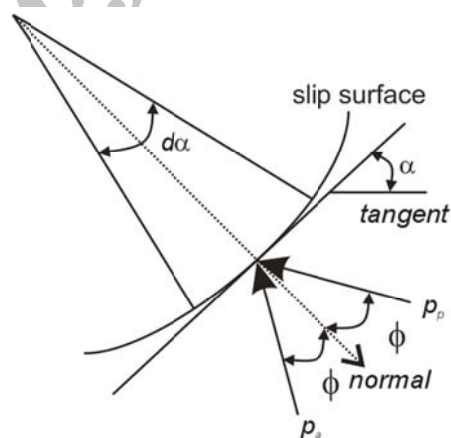
α : زاویه‌ی سطح گسیختگی.

P : فشار روی سطح گسیختگی.

dp : جزء فشار روی سطح گسیختگی.

ds : جزء طول روی سطح گسیختگی.

$d\alpha$: تغییرات زاویه‌ی مماس بر سطح گسیختگی.

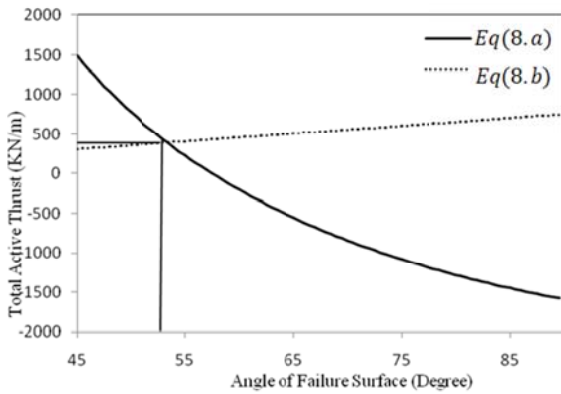


شکل ۲ فشار اعمالی بر سطح گسیختگی خاک در حالت فعال و غیرفعال

در خاک‌های غیرچسبنده و برای سطح گسیختگی صفحه‌ای $\frac{d\alpha}{ds} = 0$ و رابطه‌ی (۱) به رابطه‌ی (۲) تبدیل می‌گردد:

$$\frac{dP}{ds} = (\gamma) \sin(\alpha - \varphi) \quad (2)$$

با انتگرال‌گیری معادله‌ی فوق، می‌توان داشت:



شکل ۳ حل گرافیکی معادله‌ی (۹-ج) و به دست آوردن زاویه‌ی شکست بحرانی

شکل (۳) یکتا بودن جواب به دست آمده از معادلات (۹-الف و ب) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، محل برخورد نیروی جانبی حاصل از معادلات تعادل قائم و افقی مشخص‌کننده‌ی زاویه‌ی شکست بحرانی گوه خاک می‌باشد.

مقدار حجم گوه در طول واحد دیوار به صورت یک سطح در صفحه حاصل خواهد بود. با توجه به روابط هندسی این سطح به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$W = \gamma \cdot A = \frac{\gamma H^2}{2} \times \frac{\sin(\theta + \beta) \sin(\alpha + \theta)}{\sin(\alpha - \beta) \sin^2(\theta)} \quad (10)$$

در این قسمت با استفاده از روابط (۱۱) و (۷) نسبت $\frac{W}{R}$ به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$\frac{W}{R} = \frac{\sin(\alpha - \beta) \sin(\alpha + \theta)}{\sin(\beta + \theta) \sin(\alpha - \varphi)} \quad (11)$$

با ساده‌سازی بیش‌تر و جایگزینی رابطه‌ی (۱۲) در رابطه‌ی (۱۰-ج)، رابطه‌ی (۱۳) به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$\frac{\sin(\alpha + \delta - \theta - \varphi)}{\sin(\alpha - \beta)} = \frac{\sin(\alpha - \beta) \sin(\alpha + \theta)}{\sin(\beta + \theta) \sin(\alpha - \varphi)} \quad (12)$$

محاسبه‌ی زاویه‌ی سطح گسیختگی

برای به دست آوردن زاویه‌ی سطح گسیختگی با افق با استفاده از معادلات کوتر، تعادل قائم و افقی نیروها برقرار می‌گردد. در این حالت نیروی جانبی وارد بر دیوار و زاویه‌ی شکست به عنوان مجهولات مسأله شناخته می‌شوند (شکل ۱).

از معادله‌ی تعادل افقی نیروها می‌توان داشت:

$$P_a = \frac{R \cdot \sin(\alpha - \varphi)}{\sin(\theta - \delta)} \quad (8-الف)$$

از معادله‌ی تعادل قائم نیز می‌توان داشت:

$$P_a = \frac{W - R \cdot \cos(\alpha - \varphi)}{\cos(\theta - \delta)} \quad (8-ب)$$

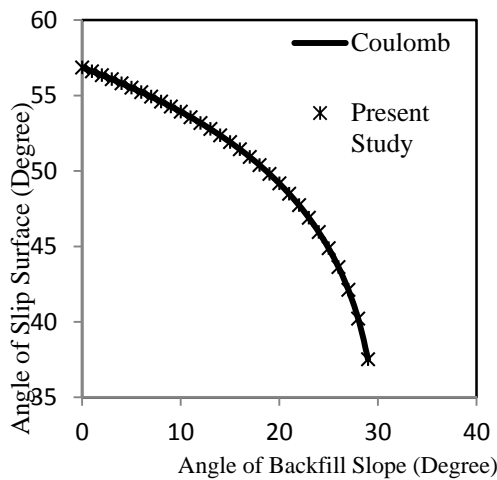
با استفاده از معادله‌ی تعادل افقی با مساوی قرار دادن دو معادله‌ی فوق و با ساده سازی بیش‌تر با روندی به شرح زیر رابطه‌ی (۹-ج) ایجاد می‌گردد.

$$\begin{aligned} R[\sin(\alpha - \varphi) + \cos(\alpha - \varphi) \cdot \tan(-\delta)] \\ = \tan(\theta - \delta) W \end{aligned} \quad (9-الف)$$

$$\begin{aligned} (\sin(\alpha - \varphi) + \cos(\alpha - \varphi) \cdot \tan(\theta - \delta)) \\ = \frac{1}{R} (\tan(\theta - \delta) W) \end{aligned} \quad (9-ب)$$

$$\sin(\alpha - \delta + \theta - \varphi) = \frac{W}{R} \sin(\theta - \delta) \quad (9-ج)$$

باید توجه داشت که در رابطه‌ی (۹-ج) عبارت $\frac{W}{R}$ تابعی از α می‌باشد. بنابراین برای محاسبه‌ی α ابتدا باید به محاسبه‌ی ضریب $\frac{W}{R}$ پرداخت. مقدار نیروی عکس‌العمل خاک روی سطح گسیختگی (R) قبلاً محاسبه شده است، پس تنها نیاز به محاسبه‌ی وزن گوه خاک است. مقدار وزن گوه خاک (W) از هندسه‌ی نشان داده شده در شکل (۱) به دست می‌آید.



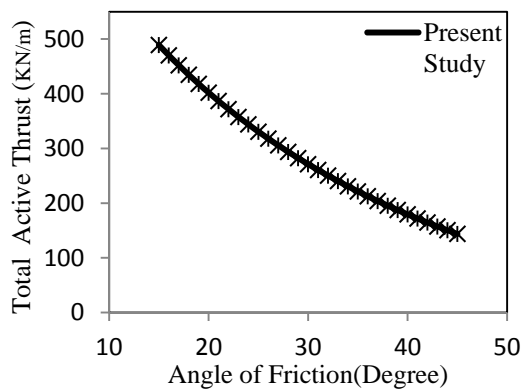
شکل ۶ مقایسه‌ی تغییرات زاویه‌ی لغزش گوه (α) با تغییر زاویه‌ی

شیب گوه (β) در روش حاضر و روش رانکین برای

$$\varphi = 30^\circ, \delta = \frac{\varphi}{2}, \theta = \frac{\pi}{2}, K_h = K_v = 0$$

$$, H = 10 \text{ m}, \gamma = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

شکل (۷) برابری نیروی جانبی برآیند در حالت فعال در روش کولمب و روش حاضر با تغییر زاویه‌ی شکست گوه گسیختگی را نشان می‌دهد.



شکل ۷ مقایسه‌ی تغییرات نیروی جانبی برآیند در حالت فعال در

روش کولمب و روش حاضر برای

$$\delta = \frac{\varphi}{2}, \theta = \frac{\pi}{2}, K_v = \beta = 0, H = 10 \text{ m}, \gamma = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

مقایسه‌ی ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند از کف
اهمیت محاسبه‌ی نقطه‌ی اثر نیروی جانبی وارد بر دیوارهای حائل، در کنترل واژگونی است. در کولمب توضیحی در مورد محل نقطه‌ی اثر نیروی جانبی ارائه نشده است و به‌طور فرضی و با در نظر گرفتن توزیع

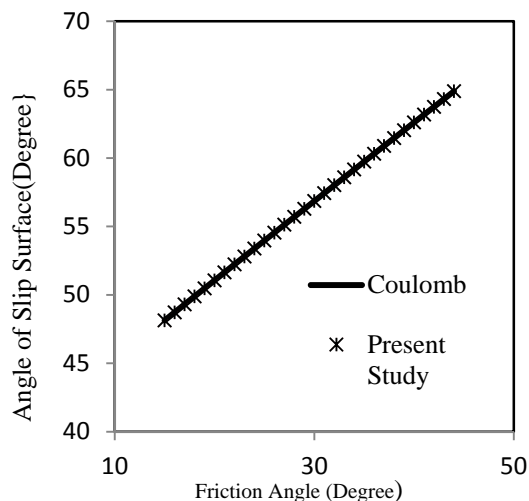
که در آن X_w با استفاده از رسم میانه‌های مثلث حاصل می‌گردد. ضمناً در عبارت فوق r و Y_w نیز به ترتیب معرف مکان اثر R و $K_h \cdot W$ از کف دیوار می‌باشند و به‌صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$r = \frac{1}{3} AB, \quad Y_w = \frac{1}{3} (H + AB \sin \alpha) \quad (19)$$

$$h_a = \frac{H}{3} \frac{\sin(\delta - \theta)}{\sin(\theta) \sin^2(\alpha - \varphi) \cos \delta} (\cos \alpha \sin(\alpha + \theta) - \cos \varphi \sin(\beta + \theta)) \quad (20)$$

بحث و مقایسه

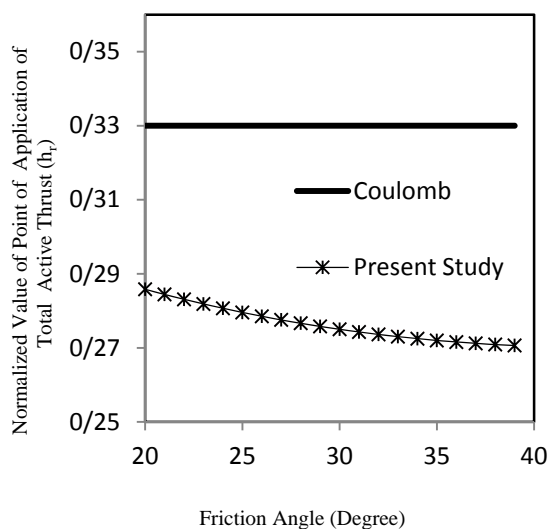
مقایسه‌ی زوایای لغزش گوه گسیختگی و نیروی جانبی برآیند در روش حاضر و روش کولمب
همان‌طور که در روابط تحلیلی ایجاد شده نیز دیده شد روش حاضر و روش کولمب مقادیر زوایای گسیختگی گوه پشت دیوار و نیز نیروی برآیند را به‌صورت برابر تخمین می‌زنند. این برابری در زاویه‌ی گوه گسیختگی و نیروی برآیند جانبی در اشکال (۵) تا (۷) نشان داده شده است.



شکل ۵ مقایسه‌ی تغییرات زاویه‌ی لغزش گوه (α) با تغییر زاویه‌ی

اصطکاک داخلی (φ) در روش حاضر و روش کولمب برای

$$\delta = \frac{\varphi}{2}, \theta = \frac{\pi}{2}, K_h = K_v = \beta = 0, H = 10 \text{ m}, \gamma = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$



شکل ۸. مقایسه‌ی ارتفاع نرمال نقطه‌ی اثر نیروی برآیند به دست آمده از روش حاضر و روش کولمب $\delta = \frac{\varphi}{2}$

فنگ و ایشی باشی (۱۹۸۶) نشان دادند که در مد حرکتی چرخش حول پاشنه دیوار، نقطه‌ی اثر نیروی جانبی به فاصله‌ی حدود $0/275$ ارتفاع دیوار، از پای آن است. آن‌ها هم چنین نشان دادند که این مقدار تابع مد حرکت دیوار و خصوصیات خاک خاکریز از جمله دانسیته و مقاومت برشی می‌باشد. شکل (۸) مقایسه‌ی ارتفاع نرمال نقطه‌ی اثر نیروی برآیند به دست آمده از روش حاضر و روش کولمب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود ارتفاع به دست آمده در بازه‌ی به دست آمده توسط فنگ و ایشی باشی می‌باشد. هم چنین این مقدار به خصوصیات خاک و دیوار وابسته است و با تغییر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک تغییر می‌نماید. این وابستگی با نتایج تجربی به دست آمده توسط ساگالری (۱۹۶۵) [15] در تطابق می‌باشد.

محاسبه‌ی اندازه‌ی و ارتفاع نقطه‌ی اثر فشار جانبی در خاک‌های لایه‌ای

روش مرسوم در محاسبه‌ی فشار در خاک‌های لایه‌ای. با بررسی روش‌های تحلیلی محاسبه‌ی فشار جانبی پشت دیوارهای حائل در اکثر روش‌ها فرض

خطی فشار ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند در یک سوم از پایین دیوار در نظر گرفته می‌شود. این نقطه‌ی اثر فرضی است و به خصوصیات خاکریز وابسته نمی‌باشد. یکی از مزیت‌های مهم استفاده از روش حاضر توانایی در محاسبه‌ی ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند به صورت تحلیلی می‌باشد. جدول (۱) مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های شریف و ایشی باشی (۱۹۸۴) را نشان می‌دهد. همان‌طور در جدول (۱) که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از روش حاضر و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های شریف و ایشی باشی بر هم منطبق بوده است.

جدول ۱. مقایسه‌ی ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند از کف برای خاک با مشخصات: $\delta = 23.5^\circ, \varphi = 40.9^\circ$

مقدار	روش محاسبه‌ی ارتفاع نقطه‌ی اثر
$0/33H$	روش کولمب
$0/25H$	آزمایش شریف و ایشی باشی (۱۹۸۲)
$0/258H$	روش حاضر

جدول (۱) مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های شریف و ایشی باشی (۱۹۸۶) [12] را نشان می‌دهد. همان‌طور در جدول (۱) که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از روش حاضر و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های شریف و ایشی باشی بر هم منطبق بوده است.

جدول (۲) مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های ماتسو (۱۹۷۸) [11] به صورت زیر محاسبه می‌شود نشان می‌دهد. همان‌طور در جدول (۲) نیز مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از روش حاضر و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های ماتسو در تطابق نسبی می‌باشد.

جدول ۲. مقایسه‌ی ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند از کف برای خاک با مشخصات $(\varphi = 50^\circ)$

زاویه‌ی اصطکاک دیوار و خاک	۴۰ درجه	۴۵ درجه	ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند
روش کولمب	$0/33H$	$0/33H$	
آزمایش ماتسو (۱۹۷۸)	$0/21H$	$0/18H$	
روش حاضر	$0/22H$	$0/19H$	

شکل (۹) چگونگی در نظر گرفتن توزیع فشار در یک خاک لایه‌ای در روش‌های مرسوم قبلی را نشان می‌دهد. نیروی جانبی ناشی از لایه‌ی بالایی به صورت وزن بر لایه‌ی پایینی وارد می‌گردد و فشار جانبی به صورت خطی به دیوار اعمال می‌گردد. برای مثال در خاک سه لایه‌ی نشان داده شده در شکل (۹) نیروی جانبی برآیند به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{ae \text{ horizontal}} = \int_0^{H_1} p \cos \delta_1 dy + \int_{H_1}^{H_2} p \cos \delta_2 dy + \int_{H_2}^{H_3} p \cos \delta_3 dy \quad (21)$$

تعیین فشار جانبی به روش حاضر

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در روش حاضر فشار عکس‌العمل خاک بر روی سطح گسیختگی با رابطه‌ی (۱) معرفی می‌گردد که مربوط به یک خاکریز هم‌گن است. برای خاکریزهای لایه‌ای، از وزن مخصوص معادل با در نظر گرفتن سربارها و نیز اثر لایه‌های بالایی به صورت زیر استفاده می‌گردد:

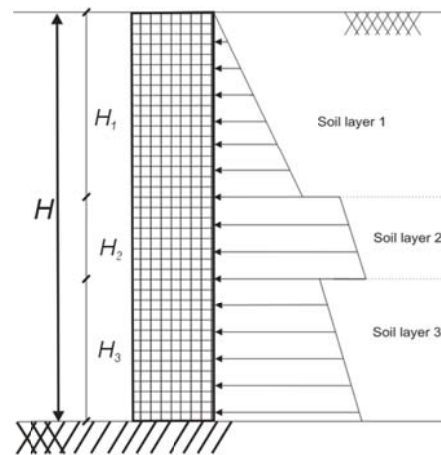
$$\gamma_{eq} = \gamma_n + \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \beta)} \left(\frac{2q}{H} \right) \quad (22)$$

که در رابطه‌ی فوق:

$$q = \gamma_n + (\gamma_1 \times H_1 + \gamma_2 \times H_2 + \dots + \gamma_{n-1} \times H_{n-1})$$

با محاسبه‌ی وزن مخصوص معادل به دست آمده در روش فوق و قرار دادن آن در رابطه‌ی (۱)، نیروی وارد بر سطح گسیختگی در هر لایه تعیین و از آنجا نیروی برآیند کل محاسبه می‌گردد.

وجود خاکریز به صورت یکسان و یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن این فرض به دلیل نوع رسوب‌گذاری و نیز چگونگی ایجاد لایه‌های متفاوت هنگام خاکریزی به‌ویژه از نظر تراکم، قابل توجیه نمی‌باشد.



شکل ۹ توزیع فشار جانبی در نظر گرفته شده در روش‌های مرسوم قبلی

محاسبه‌ی فشار جانبی در خاک‌های لایه از مسائل مهم در طراحی دیوارهای حائل می‌باشد. به دلیل تغییر خواص خاک از لایه‌ای به لایه‌ی دیگر و عدم یکنواختی، محاسبه‌ی فشار جانبی پیچیدگی‌های خاصی برخوردار می‌باشد، هم‌چنین به منظور طراحی دیوارهای حائل با خاکریز لایه‌ای، محاسبه‌ی لنگر کل نیروی محرک از اهمیت ویژه برخوردار می‌باشد. در حالت ساده خاک به لایه‌های افقی تقسیم می‌گردد و به محاسبه‌ی فشار جانبی پرداخته می‌شود. در روش مرسوم اندازه‌ی فشار جانبی وارد بر دیوار حائل از روشی مشابه روش رانکین در هر لایه محاسبه می‌گردد. در این روش از توزیع فشار که به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود به محاسبه‌ی نیروی برآیند و هم‌چنین بازوی آن پرداخته می‌شود.

گسیختگی حاصل می‌گردد.

$$R_{\text{total}} = \sqrt{R_{\text{horizontal}}^2 + R_{\text{vertical}}^2} \quad (\text{الف-۲۳})$$

$$\begin{aligned} R_{\text{horizontal}} &= R_1 \cos \varphi_1 + R_2 \cos \varphi_2 \\ &\quad + R_3 \cos \varphi_3 + \dots + R_n \cos \varphi_n \\ &= \int_A^B p \cos \varphi_1 ds \\ &\quad + \int_B^C p \cos \varphi_2 ds \\ &\quad + \int_C^D p \cos \varphi_3 ds + \dots \end{aligned}$$

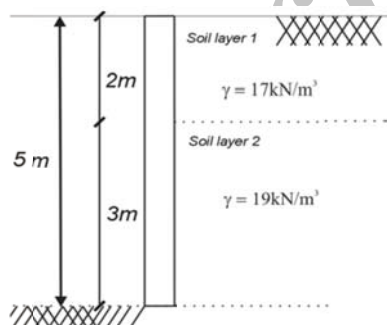
(ب-۲۳)

$$\begin{aligned} R_{\text{vertical}} &= R_1 \sin \varphi_1 + R_2 \sin \varphi_2 \\ &\quad + R_3 \sin \varphi_3 + \dots + R_n \sin \varphi_n \\ &= \int_A^B p \sin \varphi_1 ds \\ &\quad + \int_B^C p \sin \varphi_2 ds \\ &\quad + \int_C^D p \sin \varphi_3 ds + \dots \end{aligned}$$

(ج-۲۳)

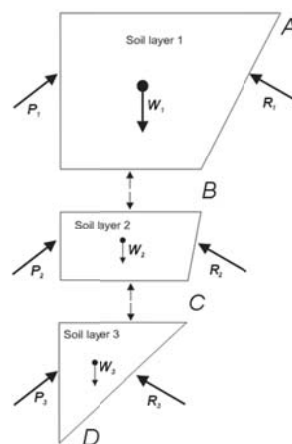
مثال کاربردی

به منظور روشن شدن چگونگی استفاده از روش حاضر و نیز مقایسه‌ی اختلاف مقادیر محاسبه شده در این روش با سایر روش‌های مرسوم، نیروی جانبی و نقطه‌ی اثر آن در یک خاکریز دولایه‌ای مقایسه می‌شوند.



شکل ۱۲ مشخصات لایه‌های خاک پشت دیوار

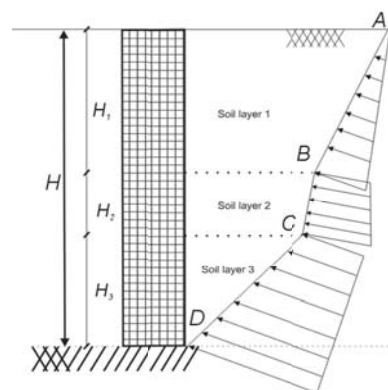
لازم به ذکر است که روش فوق کلی است و قابل بسط به خاکریز با هر تعداد لایه می‌باشد. شکل (۱۲) مشخصات لایه‌های خاک مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ نمودار آزاد نیروهای وارد بر لایه‌های خاک

به منظور محاسبه‌ی نیروی جانبی وارد بر دیوار لایه‌های خاک به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۰) نمودار آزاد نیروهای وارد بر لایه‌های خاک را نشان می‌دهد.

شکل (۱۱) چگونگی توزیع فشار ناشی از عکس‌العمل خاک در یک خاک سه‌لایه‌ای روی سطح گسیختگی را نشان می‌دهد. اهمیت این توزیع فشار در محاسبه‌ی لنگر نیروهای وارد بر دیوار به منظور محاسبه‌ی ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی جانبی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این روش هم مشابه بسیاری از روش‌های تحلیلی از نیروی بین لایه‌ای صرف نظر شده است.



شکل ۱۱ توزیع نیروی عکس‌العمل روی سطح گسیختگی در یک خاکریز لایه‌ای

رابطه‌ی (۲۳-الف) نشان دهنده‌ی نیروی بر آیند کل وارد بر گوه گسیختگی می‌باشد. نیروی عکس‌العمل برآیند از جمع سه نیروی اعمال شده بر سطح

تعدادل حدی به منظور محاسبه‌ی اندازه و ارتفاع نقطه‌ی اثر فشار جانبی وارد از طرف خاک در پشت دیوار حائل خاکریزهای دارای لایه‌بندی در حالت فعال پرداخته است. برای این منظور، از روشی استفاده شد که با فرض خطی بودن سطح لغزش و بدون بیشینه‌سازی به ارائه‌ی فرم خلاصه جواب برای زاویه‌ی شکست گوه خاک و نیز نیروی جانبی برآیند وارد بر دیوار پرداخته شد. نتایج حاصل از روش مقاله حاضر در تطابق کامل با کولمب می‌باشد.

نکته‌ی اساسی در روش حاضر تخمین منطبق بر واقع ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی جانبی وارد بر دیوار می‌باشد، که این امر به محاسبه‌ی صحیح لنگر وارد بر دیوار و در نتیجه طراحی مطمئن دیوارهای حائل منجر می‌گردد. هم‌چنین نقطه‌ی اثر به‌دست آمده در روش فوق وابسته به خصوصیات خاکریز می‌باشد که در تطبیق با آزمایش‌های تجربی برای مد حرکتی چرخش حول پاشنه می‌باشد.

جدول (۳) نیروی جانبی افقی وارد از طرف لایه‌های خاک، نیروی جانبی کل و ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی جانبی کل به‌دست آمده از روش حاضر و روش کولمب در دیوارهایی با خاکریزهای گوناگون را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی برآیند به‌دست آمده از روش حاضر کم‌تر از مقادیر مشابه با در نظر گرفتن توزیع خطی برای فشار جانبی پشت دیوار می‌باشد.

جدول (۴) مقادیر لنگر ناشی از نیروی جانبی برآیند پشت دیوار در روش حاضر و روش کولمب را با در نظر گرفتن توزیع خطی فشار در خاک‌های لایه‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر به‌دست آمده از روش کولمب بیش‌تر از مقادیر به‌دست آمده از روش حاضر می‌باشد و اختلاف مقادیر محاسبه شده از روش‌های فوق در حدود ۲۰ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

این مقاله به ارائه‌ی یک راه حل نظری بر پایه‌ی روش

جدول ۳ مقایسه‌ی نیروی جانبی افقی لایه‌ها، کل و ارتفاع نقطه‌ی اثر نیروی جانبی

$$H = 5\text{m}, H_1 = 3\text{m}, H_2 = 2, \gamma_1 = 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, \gamma_2 = 19 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, \delta = \frac{\phi}{2}$$

Case Number	ϕ_1 (درج)	ϕ_2 (درج)	$P_{act(Totd)}$ (kN/m)	P_{act} (kN/m)	P_{act} (kN/m)	Hr(Coulomb)	H_r (Present Method)
1	۳۰	۳۵	55.13	22.27	32.86	0.35	0.29
2	۳۵	۳۰	58.71	17.95	40.76	0.31	0.25
3	۳۵	۳۷	48.02	17.96	30.07	0.34	0.28
4	۳۷	۳۵	49.29	16.4	32.8	0.32	0.26

جدول ۴ مقایسه‌ی لنگر ناشی از نیروی برآیند در روش حاضر و روش کولمب

$$H = 5\text{m}, H_1 = 3\text{m}, H_2 = 2, \gamma_1 = 17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, \gamma_2 = 19 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}, \phi_1 = 30^\circ, \phi_2 = 37^\circ, \delta = \frac{\phi}{2}$$

Method	Case Number			
	1	2	3	4
Coulomb (Linear Distribution)	19.29	17.9	16.33	15.77
Present Method	16	14.68	13.44	12.81
Derivation%	0.17	0.18	17.69	18.7

حرکت چرخش حول پاشنه برای دیوار، مقادیر لنگر به‌دست آمده از روش کولمب در جهت اطمینان و برای طراحی دیوارهای حائل مناسب می‌باشد.

نتایج به‌دست آمده به‌وسیله‌ی روش معرفی شده در این مقاله نشان می‌دهد مقدار نیروی برآیند جانبی دقیقاً برابر با مقدار به‌دست آمده توسط روش کولمب می‌باشد. هم‌چنین در حالت استاتیکی و با فرض مد

مراجع

1. Caquot, A., Kerisel, F, "Tables for the Calculation of Passive Pressure, Active Pressure and Bearing Capacity of Foundations", Gauthier-Villars, Paris, (1948)
2. Dubrova, G. A., "Interaction of soil and structures", Izd. Rechnoy Transport, Moscow, [Mentioned in Harr], (2007).
3. Sokolovskii, V.V, Statics of Granular Media. Pergamon Press, New York, (1965)
4. Zarrabi-Kashani, K., "Sliding of gravity retaining wall during earthquake: Considering vertical acceleration and changing inclination of failure surface", MS thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, (1979).
5. Greco V. R., "Active earth thrust on cantilever walls in general conditions", Soils and Foundations, Vol.39, NO.6, 65-78. (1999)
6. Janssen, H. A., Versucheubergetreidedruck in silozellen. Zeitschrift, Verein Deutscher Ingenieure 39, 1045–1049, (partial English translation in Proc. Inst. Civ. Engrs, (1986).
7. Spangler, M. G. and Handy, R. L., "Soil engineering", New York; Harper & Row, (1984).
8. Wang, Y.Z., "Distribution of earth pressure on a retaining wall", Geotechnique, Vol. 50, No. 1, pp. 83–88, (2000).
9. Shahgholi, M., Fakher, A., Jones, C. J. F. P., "Horizontal slice method of analysis", Geotechnique 51 (10), pp.881–885, (2001).
10. Ahmadabadi, M. and Ghanbari, A., "New procedure for active earth pressure calculation in retaining walls with reinforced cohesive-frictional backfill", Geotextiles and Geomembranes, No. 27, pp. 456-463, (2009).
11. Matsuo, M., Kenmochi, S., Yagi, H., "Experimental study on earthpressure of retaining wall by field test", Soil Mechanics and Foundation Eng, Vol. 18, No. 3, pp. 27-41, (1978).
12. Sherif, M. A., Ishibashi, I., and Lee, C. D., "Earth pressure against rigid retaining walls", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 108(GT5), pp. 679-693, (1982).
13. Sherif, M. A., and Fang, Y. S., "Ka and Ko behind rotating and non-yielding walls", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 1, 41-56, (1984).
14. Kötter, F., "Die Bestimmung des Drucks an gekrümmten Gleitflächen, eine Aufgabeaus der Lehrevom Erddruck", Sitzungsberichte der Akademieder Wissenschaften, Berlin, pp. 229–233, (1903).
15. Tsagareli, Z. V, "Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back faceand horizontal backfill surface", *J. Soil Mech. Found. Eng*, ASCE 91, No. 4, pp. 197–200, (1965).