

مقایسه روش‌های تعادل حدی در پایداری شیروانی‌های خاکی

محمد حاجی عزیزی^۱، فواد کیلاننه‌ئی^۲، پیمان کیلاننه‌ئی^۳

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
peymankilanehei@yahoo.com

خلاصه

تحلیل پایداری شیب‌های خاکی یکی از مباحث مهم در مهندسی عمران و از جمله مسائل اساسی در طراحی سدهای خاکی، راه‌ها، کانال‌ها، خاکریزها و ترانشه‌ها می‌باشد. از جمله روش‌هایی که به تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی می‌پردازد، روش‌های تعادل حدی است. در این تحقیق ابتدا مبانی تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی بیان شده است سپس روش‌های مختلف تعادل حدی و فرضیات مربوط به آن ارائه شده و در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Geo Studio چند شیروانی خاکی با مشخصات مختلف تحلیل شده است. در انتها نیز ضرایب اطمینان و نیروهای برشی بین قطعه‌ای محاسبه شده توسط روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: پایداری شیروانی خاکی، ضریب اطمینان، روش‌های تعادل حدی

۱. مقدمه

سطوح شیب‌دار خاکی یکی از عوارض طبیعی یا مصنوعی مهم می‌باشند که پایداری آنها در مسائل مهندسی ژئوتکنیک از اهمیت خاصی برخوردار است. شیب‌های خاکی مصنوعی در اجرای بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند سدهای خاکی، خاکریز بستر راه و راه آهن، مخازن ذخیره آب، دایک‌های حفاظتی، خاکریز کانال و ... احداث می‌شوند و شیب‌های خاکی طبیعی در دامنه کوه‌ها و تپه‌ها و یا در هنگام اجرای عملیات خاکبرداری ایجاد می‌گردند. به طور کلی عوامل ناپایدار کننده شیب‌های خاکی را می‌توان به دو گروه الف) عواملی که باعث کاهش نیروهای مقاوم می‌شوند و ب) عواملی که موجب افزایش نیروهای محرک می‌گردند، تقسیم نمود. از جمله عوامل گروه "الف" می‌توان به افزایش رطوبت خاک (به صورت طبیعی مانند بارندگی یا به صورت مصنوعی مانند نشت آب از مخازن کانالهای خطوط لوله و ...) و انجام حفاری در پایین دست شیب اشاره کرد. عواملی مانند زلزله یا سایر نیروهای دینامیکی، حرکات زمین ساختی (مانند فعال شدن گسل)، بارگذاری طبیعی یا مصنوعی، از جمله عوامل متعلق به گروه "ب" می‌باشند. نتیجه لغزش یا شکست یک شیب می‌تواند باعث از دست رفتن عملکرد در نظر گرفته شده برای آن شیب و یا حتی باعث از دست رفتن جان عده‌ای انسان گردد. به همین دلیل در اغلب موارد، مهندسین عمران پایداری شیروانیهای طبیعی و نیز ترانشه‌ها و خاکریزهای متراکم را کنترل می‌نمایند. این کنترل شامل تعیین و مقایسه تنش برشی موجود در امتداد سطح ممکن و محتمل گسیختگی با مقاومت برشی خاک است. این عمل اصطلاحاً بررسی پایداری شیروانیهای خاکی نامیده می‌شود. تحلیل و بررسی پایداری شیروانی خاکی کار چندان آسانی نیست. بررسی و تعیین متغیرهایی چون لایه‌بندی خاک و پارامترهای مقاومت برشی در جای آن، کاری بس مشکل و دشوار است. عبور آب از داخل شیروانی و انتخاب سطح بالقوه گسیختگی در کنار پیچیدگی موضوع مزید بر علت می‌باشند. در تحقیق حاضر ابتدا روش‌های مختلف تعادل حدی و فرضیات مربوط به آن ارائه گردیده است. در ادامه چند حالت با استفاده از نرم‌افزار Geo Studio تحلیل و در نهایت ضرایب اطمینان و نیروهای برشی بین قطعه‌ای محاسبه شده توسط روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

۲. مبانی تحلیل پایداری شیب

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه رازی، کرمانشاه

^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

به طور کلی روشهای مورد استفاده در تحلیل پایداری شیب‌ها در یکی از دو گروه "روشهای حدی مبتنی بر رفتار صلب خمیری" و "روشهای عددی مبتنی بر رفتار ارتجاعی-خمیری" جای دارند. روش‌های حدی شامل روش خطوط مشخصه، روش تعادل حدی و روش آنالیز حدی هستند که بر مدلی نسبتاً ساده از رفتار خاک استوارند و مزیت عمده آنها یافتن حلی بسته و عام در مسائل کاربردی است. در این روشها تاثیر پارامترهای مختلف مقاومت خاک و هندسه زمین به خوبی نمایان می‌گردد. در مقابل، در روشهای تحلیل عددی مانند روش اجزای محدود، استفاده از مدل‌ها و روابط رفتاری دقیق-تر برای خاک امکان پذیر است و تغییر شکل‌های قبل از گسیختگی را می‌توان به خوبی محاسبه کرد اما حجم محاسبات بیشتر و بررسی تأثیر پارامترها در محاسبات بسیار مشکل‌تر است.

۳. روش تعادل حدی

روشهای تعادل حدی از جمله ی قدیمی‌ترین روشها در تعیین سطح لغزش بحرانی و کمینه ضریب اطمینان می‌باشند. اکثر روشهای محاسبه پایداری شیب بر اصول تعادل خمیری پایه گذاری شده‌اند. در این روش فرض می‌شود شکست در یک سطح گسیختگی معین رخ می‌دهد و لذا تنش برشی لازم برای حفظ تعادل با مقاومت برشی خاک مقایسه شده و ضریب اطمینان پایداری شیب محاسبه می‌گردد. این فرآیند برای چندین سطح مختلف انجام و سطحی که دارای ضریب اطمینان کمتری باشد به عنوان سطح گسیختگی احتمالی و ضریب اطمینان مربوط به آن به عنوان جواب مسئله پذیرفته می‌شود. شکل سطح گسیختگی بسته به نوع مصالح تشکیل دهنده شیب، متفاوت می‌باشد و می‌تواند مستوی، دایره‌ای، منحنی لگاریتمی یا ترکیبی از آنها باشد. در صورتیکه مصالح تشکیل دهنده همگن باشند، سطح گسیختگی نزدیک به دایره خواهد بود. از سوی دیگر به دلیل سادگی تعیین روابط هندسی برای شکل دایره‌ای نسبت به سایر شکلها، در اکثر مسائل کاربردی فرض می‌شود که سطح گسیختگی دایره‌ای است. همچنین در اکثر مدل‌های کامپیوتری تهیه شده برای تحلیل پایداری شیب محاسبات گسیختگی در چنین سطحی انجام می‌شود. در اغلب روشهای تعادل خمیری حدی، فقط اصول استاتیکی به کار برده می‌شود و بجز در تعدادی حالتها بسیار ساده، مسئله از نظر استاتیکی نامعین بوده و در نتیجه فرضیاتی برای معین نمودن مسئله و بدست آوردن ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب بسته به فرضیات مورد استفاده روش‌های متعددی که ضرایب اطمینان متفاوتی را بدست می‌دهند ارائه شده است. که از جمله این روشها می‌توان به روش فلنیوس (Fellenius, 1936)، روش بی‌شاب اصلاح شده (Bishop, 1955)، روش تعادل نیروها (لاو و کارافه (Lowe and Karafiath, 1959)، جامبو اصلاح شده (Janbu, 1973)، گروه مهندسی ارتش آمریکا (U.S. Army Corps of Engineers, 1970)، روش اسپنسر (Spencer, 1967)، مورگن اشترن - پرایس (Morgenstern and Price, 1965) و روش سارما (Sarma, 1973) اشاره کرد. در ادامه فرضیات هر یک از این روشها و روابط مربوط به آن به اختصار بیان می‌شود.

۱-۳ روش معمولی قطعات (فلنیوس)

در روش فلنیوس [1] از نیروی جانبی بین قطعات صرف‌نظر می‌شود. شکل (۱-الف) دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر یک قطعه در روش فلنیوس را نشان می‌دهد. برای محاسبه ضریب اطمینان، تعادل لنگرها حول مرکز دایره لغزش به کار گرفته می‌شود، در نتیجه:

$$W \cdot x = s \cdot R \quad (1)$$

با جایگزینی $x = R \sin \alpha$ و $s = \tau \cdot L$ در معادله (۱) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W \cdot \sin \alpha = \tau \cdot L \quad (2)$$

از آنجا که: $\tau = \frac{\tau_f}{F}$ و $\tau_f = C + \left(\frac{P}{L} - U\right) \tan \phi$ ، نتیجه می‌شود:

$$W \cdot \sin \alpha = \frac{[C.L + (P - U.L) \cdot \tan \phi]}{F} \quad (3)$$

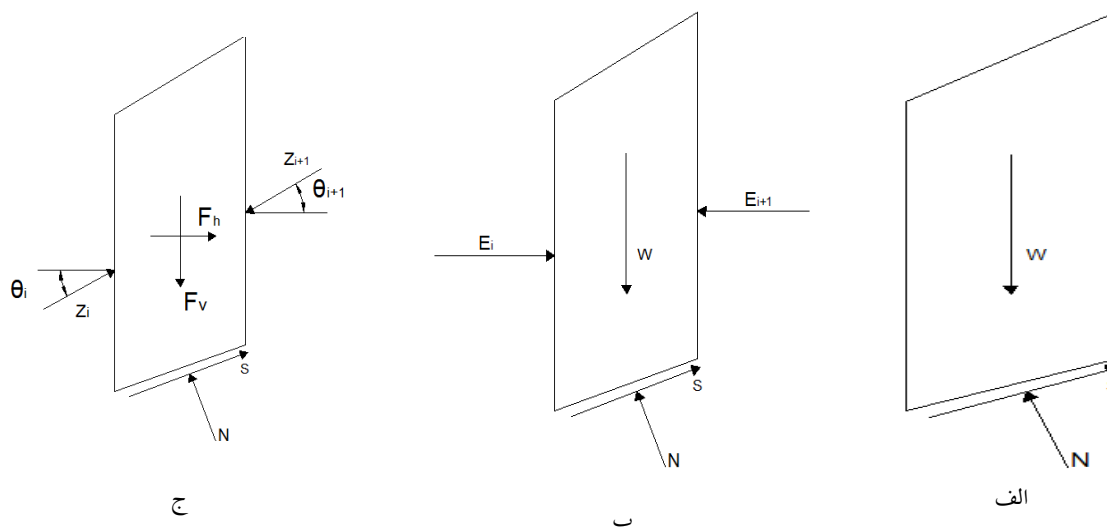
با جایگزینی $P = W \cdot \cos \alpha$ و استفاده از معادله (۳) در کلیه قطعات، ضریب اطمینان به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$F = \frac{\sum [C.L + (W \cdot \cos \alpha - U.L) \tan \phi]}{\sum (W \cdot \sin \alpha)} \quad (4)$$

حل معادله (۴) بسیار ساده بوده و کافی است که در تمام قطعات پارامتری C, ϕ, U, W, α, L محاسبه شوند و از مجموع آنها F بدست آید.

۲-۳ روش بی‌شاب اصلاح شده

در روش بی‌شاب اصلاح شده [2] از مولفه مماسی بین قطعات صرف‌نظر می‌شود. شکل (۱-ب) دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر یک قطعه را در روش بی‌شاب ساده شده نشان می‌دهد. برای بدست آوردن ضریب اطمینان در این روش از تعادل لنگرها و تعادل نیروهای قائم استفاده می‌شود.



شکل ۱ دیاگرام آزاد نیروها در روش الف) فلیوس، ب) بی‌شاب و ج) تعادل نیرو

از تعادل لنگرها حول مرکز دایره لغزش و با صرف نظر کردن از لنگر نیروی افقی بین قطعات مطابق روش فلیوس، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F = \frac{\sum [C.L + (P - U.L) \tan \phi]}{\sum (W \sin \alpha)} \quad (5)$$

از تعادل نیروهای قائم نیز رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$W = P \cos \alpha + S \sin \alpha \quad (6)$$

همچنین:

$$= \frac{[C.L + (P - U.L) \tan \phi]}{F} S = \tau \cdot L = \frac{\tau_f L}{F} \quad (7)$$

با جایگزینی مقدار (S) در رابطه (6) نتیجه می‌شود:

$$W = P \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{F} \right) + \left(\frac{C.L \sin \alpha - U.L \sin \alpha \tan \phi}{F} \right) \quad (8)$$

چنانچه در رابطه (8)، مقدار $M = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{F}$ قرار داده شده و معادله بر حسب P حل شود:

$$P = \left(W - \frac{C.L \sin \alpha - U.L \sin \alpha \tan \phi}{F} \right) \frac{1}{M} \quad (9)$$

با تعیین P از معادله (9) و جایگزینی در معادله (5) و با استفاده از معادله حاصل برای کلیه قطعات (پس از ساده نمودن)، ضریب اطمینان به صورت زیر بدست می‌آید:

$$F = \frac{\sum [C.L + (W - U.L) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} \cdot \left(\frac{1}{M} \right) \quad (10)$$

که در آن:

$$M = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{F} \quad (11)$$

همانطور که مشاهده می‌شود، حل مستقیم معادله (10) برای تعیین ضریب اطمینان (F) امکانپذیر نبوده و برای حل آن باید روش سعی و خطا مورد استفاده قرار گیرد. به این صورت که ابتدا یک ضریب اطمینان برای پایداری توده خاک فرض می‌گردد. با استفاده از ضریب اطمینان فرضی، مقدار M از معادله (11) محاسبه و برای تعیین ضریب اطمینان در رابطه (10) قرار داده می‌شود. معادله (10) ضریب اطمینان جدیدی را ارائه می‌دهد که چنانچه

اختلاف آن با ضریب اطمینان اولیه ناچیز باشد به عنوان جواب مسئله پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت با ضریب اطمینان جدید عملیات تکرار می‌شود تا جائیکه اختلاف مطلوبی حاصل گردد.

۳-۳ روش تعادل نیروها

در روشهای تعادل نیرو فقط شرایط تعادل نیرو تامین می‌گردد و از تعادل لنگر صرف‌نظر می‌شود. در این روشها معادلات تعادل نیرو در دو جهت عمود بر هم برای تعیین ضریب اطمینان، نیروهای وارد بر کف هر قطعه و نیروهای بین قطعه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور معین کردن مسئله (تعداد معادلات و تعداد مجهولات برابر گردد) و یافتن ضریب اطمینان، شیب نیروی بین قطعات فرض شده است و بر اساس این فرض ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. محققین مختلف شیب‌های مختلفی برای این نیروها در نظر گرفته‌اند که در ادامه به آنها اشاره می‌گردد:

- لاوکارافه [3] (۱۹۵۹): زاویه نیروی بین قطعات از شیب متوسط سطح زمین و سطح گسیختگی پیروی می‌کند و این شیب از یک قطعه به قطعه دیگر متفاوت است.
- جامبو اصلاح شده [4] (۱۹۵۹): نیروی بین قطعات، افقی فرض می‌شود و تنش برشی بین قطعات وجود ندارد.
- گروه مهندسی ارتش امریکا [5] (۱۹۷۰): نیروهای بین قطعه‌ای با شیب متوسط خاکریز موازی است.

حال با توجه به شکل (۱-ج) و نوشتن معادله تعادل نیرو در دو جهت x و y و ترکیب این دو معادله رابطه بازگشتی تعادل نیرو بدست می‌آید. در ادامه می‌توان با استفاده از آزمون و خطا به محاسبه ضریب اطمینان پرداخت به طوری که با فرض یک مقدار اولیه برای ضریب اطمینان و Z_i اولیه صفر به محاسبه Z_i انتهایی اقدام نمود. اگر Z_i انتهایی صفر بود که مقدار ضریب اطمینان درست فرض شده است در غیر اینصورت مقدار دیگر برای ضریب اطمینان فرض گردیده و پروسه فوق تکرار می‌شود تا زمانی که Z_i انتهایی صفر گردد، به این ترتیب ضریب اطمینان محاسبه می‌گردد.

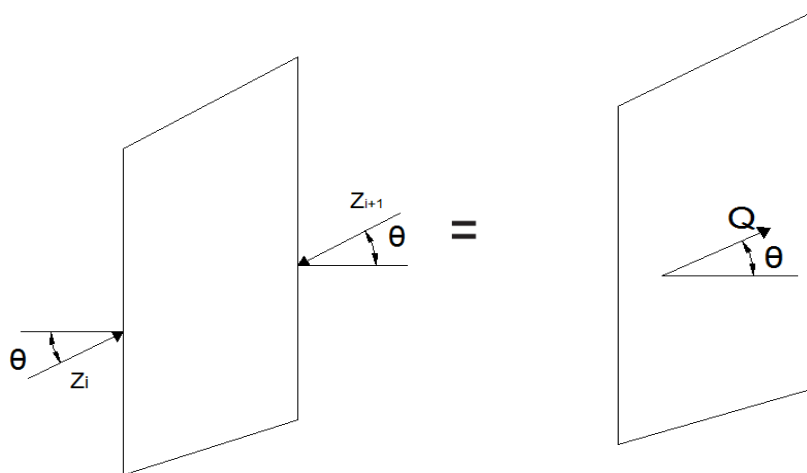
$$Z_{i+1} = \frac{F_V \sin \alpha + F_H \cos \alpha + Z_i \cos(\alpha - \theta) - [F_V \cos \alpha - F_H \sin \alpha + U \Delta L + Z_i \sin(\alpha - \theta)](\tan \frac{\theta}{F} + c \Delta L / F)}{\cos(\alpha - \theta_{i+1}) + [\sin(\alpha - \theta_{i+1}) \tan \theta] / F} \quad (12)$$

۴-۳ روش‌های تعادل کامل

چندین روش مختلف قطعات وجود دارد که معادلات تعادل استاتیکی را به طور کامل تامین می‌کنند. هر کدام از این روش‌ها فرضیات مختلفی برای محاسبه ضریب اطمینان دارند از جمله این روش‌ها می‌توان به روش اسپنسر، مورگن اشترن- پرایس و سارما اشاره کرد که هر یک از این روش‌ها در ادامه توضیح داده می‌شود.

✓ روش اسپنسر

همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، در روش اسپنسر [6] فرض می‌شود که زاویه نیروی بین قطعات تمامی یکسان و برابر (θ) است. این زاویه به عنوان یک مجهول بوده که در پروسه حل معادلات تعادل محاسبه می‌گردد. همچنین در این روش فرض می‌شود که نیروی عمودی تکیه‌گاه در مرکز کف هر قطعه وارد می‌شود.



شکل ۲. نیروهای بین قطعه‌ای در روش اسپنسر

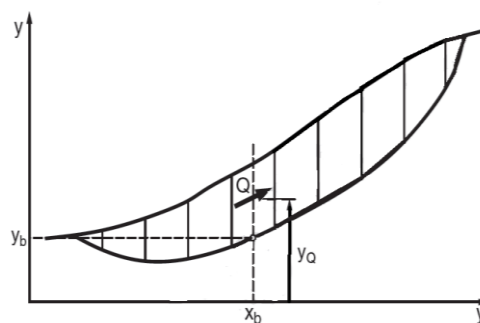
معادله تعادل نیرو می‌تواند به صورت $\sum Q_i = 0$ نوشته شود که در آن (Q_i) برآیند نیروی بین قطعه‌ای می‌باشد.

$$\sum Q_i = 0 \quad (13)$$

$$Q_i = Z_i - Z_{i+1}$$

(Z_i, Z_{i+1} نیروی بین قطعه‌ای روی سمت چپ و راست قطعه است)

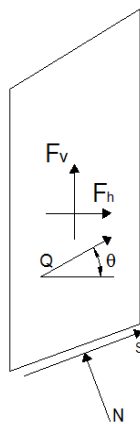
و برای تعادل لنگر، می‌توان حول هر نقطه اختیاری مجموع لنگر قطعات را برابر صفر در نظر گرفت. حال با نوشتن معادله تعادل لنگر حول نقطه ($X=0$) ($Y=0$)، دستگاه کارترین معادله تعادل لنگر به شکل زیر حاصل می‌شود.



شکل ۳. سیستم مختصات استفاده شده در روش اسپنسر

$$\sum Q(X_b \sin \theta - Y_Q \cos \theta) = 0 \quad (14)$$

که در این رابطه: X_b : مختصات X مرکز کف هر قطعه، Y_Q : مختصات Y محل اعمال نیروی Q که درست روی مرکز کف قطعه قرار دارد می‌باشد. با نوشتن معادله تعادل نیرو در دو جهت موازی و عمود بر کف هر قطعه و استفاده از رابطه موهر-کولمب برای تعیین نیروی برشی (S) و ترکیب این دو رابطه مقدار (Q) محاسبه می‌شود.



شکل ۴. دیاگرام آزاد نیروها در روش اسپنسر

$$Q = \frac{-F_v \sin \alpha - F_h \cos \alpha - (\dot{C} \Delta L / F) + (F_v \cos \alpha - F_h \sin \alpha + U \Delta L) (\tan \hat{\theta} / F)}{\cos(\alpha - \theta) + [\sin(\alpha - \theta) \tan \hat{\theta} / F]} \quad (15)$$

حال با استفاده از روش سعی و خطا باید (F) و (θ) ایی محاسبه گردد که روابط (۱۳) و (۱۴) را تامین کند. شکل (۴) دیاگرام آزاد نیروها در روش اسپنسر را نشان می‌دهد.

✓ مورگن اشتون - پرایس

در روش مورگن اشتون - پرایس [7] فرض می‌شود که نیروی برشی بین قطعات به نیروی عمودی وابسته است و ارتباط بین نیروی قائم و برشی با استفاده از رابطه زیر بیان می‌گردد.

$$X = \lambda f(x)E$$

(۱۶)

در این رابطه X و E نیروهای قائم و افقی بین قطعات، λ ضریب مقیاس (مجهول) و $f(x)$ یک تابع فرضی که مقادیر را در هر مرز قطعه تعیین می‌کند می‌باشد. مجهولاتی که در روش مورگن اشترون- پرایس حل می‌شوند عبارتند از ضریب اطمینان (F)، ضریب مقیاس (λ)، نیروهای قائم در کف هر قطعه (N)، نیروی افقی بین قطعه‌ای (E) و موقعیت نیروی بین قطعه‌ای. روش مورگن اشترون- پرایس شبیه به روش اسپنسر می‌باشد تنها تفاوت در بخش مجهولات است که در روش مورگن اشترون- پرایس ضریب (λ) مجهول است در حالی که در روش اسپنسر شیب نیروی بین قطعات (θ) مجهول می‌باشد. اگر در روش مورگن اشترون- پرایس تابع $f(x)$ ثابت فرض شود نتایج روش اسپنسر و مورگن اشترون- پرایس برابر می‌گردد.

✓ روش سارما

روش سارما [8] با تمام روش‌هایی که قبلاً بحث شد متفاوت است. چون در این روش ضریب زلزله مجهول و ضریب اطمینان معلوم در نظر گرفته می‌شود. در این روش یک مقدار برای ضریب اطمینان فرض شده و ضریب زلزله‌ای که این مقدار ضریب اطمینان را نتیجه می‌دهد، محاسبه می‌گردد. معمولاً ضریب اطمینان را یک در نظر گرفته و ضریب زلزله را محاسبه می‌کنند و این مقدار به عنوان ضریب لرزه‌ایی که باعث لغزش می‌شود ارائه می‌کنند. در روش سارما نیروی برشی بین قطعات به مقاومت برشی وابسته است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$X = \lambda f(x)S_v$$

(۱۷)

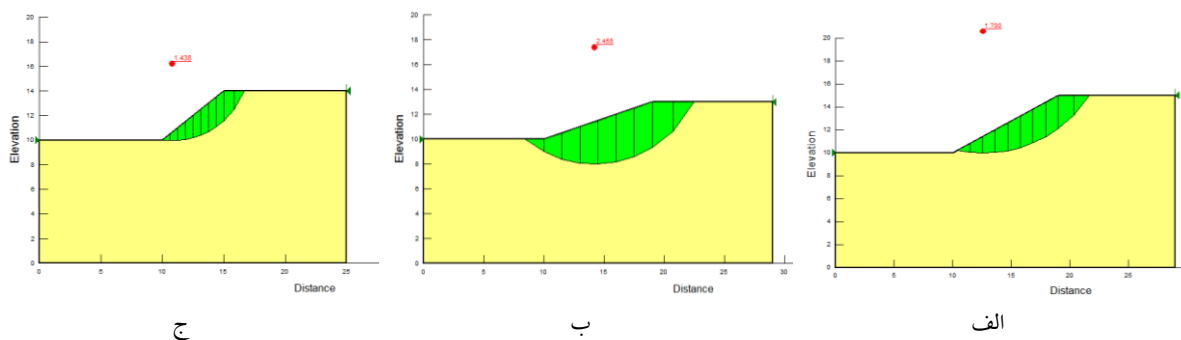
در این رابطه (S_v) نیروی برشی قابل دسترس روی مرز قطعه، (λ) ضریب مقیاس (مجهول) و $f(x)$ تابع فرضی است که مقادیر را در مرز قائم هر قطعه تعیین می‌کنند. در روش سارما ضریب زلزله و دیگر مجهولات می‌تواند به طور مستقیم محاسبه گردد و نیازی به استفاده از روش تکراری یا روش سعی و خطا برای محاسبه مجهولات نیست. در این روش می‌بایست با فرض مقادیر مختلف برای ضریب اطمینان و محاسبه ضریب زلزله، ضریب اطمینانی را یافت که ضریب زلزله موجود را نتیجه دهد و به این ترتیب ضریب اطمینان محاسبه می‌شود.

۴. تحلیل چند شیروانی خاکی

در این بخش به منظور بررسی روشهای مختلف، سه حالت در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به ذکر است که تمامی تحلیل‌ها در نرم‌افزار Geo Studio نسخه ۲۰۰۷ انجام گرفته است. مشخصات شیروانی‌های خاکی مورد بررسی در جدول ۱ آمده است. هندسه شیروانیها برای حالت‌های ۱ تا ۳ نیز به ترتیب در شکل ۵- الف تا ۵- ج ارائه شده است. مقادیر ضریب اطمینان محاسبه شده توسط روش‌های مختلف در جدول ۲ آمده است. در جداول ۳ تا ۵ نیز مقایسه مقدار نیروهای برشی بین قطعه ای آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات شیروانی‌های خاکی حالت‌های ۱ تا ۳

شماره حالت	ارتفاع شیروانی، متر	وزن مخصوص، KN/m^3	چسبندگی، kPa	زاویه اصطکاک، درجه	مختصات مرکز دایره گسیختگی	
					Y_c	X_c
۱	۵	۱۶	۱۰	۱۵	۱۲/۶	۲۰/۶
۲	۳	۱۸	۱۲	۱۰	۱۴/۲	۱۷/۴
۳	۳	۱۶	۱۰	۱۰	۱۰/۸	۱۶/۲



شکل ۵. هندسه شیروانی الف (حالت ۱، ب) حالت ۲، ج) حالت ۳

جدول ۲. ضریب اطمینان محاسبه شده توسط روش‌های مختلف برای حالت‌های ۱ تا ۳

شماره حالت	اسپنسر	مورگن اشترن- پرایس	جانبو	بی شاب	فلنیوس
۱	۱,۷	۱,۷	۱,۶۰۹	۱,۷۰۳	۱,۶۴۹
۲	۲,۴۵۵	۲,۴۵۵	۲,۲۱	۲,۴۵۷	۲,۳۳
۳	۱,۴۳۸	۱,۴۳۸	۱,۳۹۵	۱,۴۴	۱,۴۱۵

جدول ۳. نیروهای برشی بین قطعه‌ای محاسبه شده توسط روش‌های مختلف برای حالت یک

اسپنسر	لاو و کارافه	گروه مهندسی ارتش آمریکا	تابع بین قطعه ای نیم سینوسی	تابع بین قطعه ای ثابت
-۰/۰۵	۰,۰۵	۰,۰	-۰/۰۲۱	-۰/۰۵
۴/۷۶	۸,۲۴	۸,۲۷	۴,۰	۴/۷۶
۸/۷۳	۱۳,۸۲	۱۵,۲۳	۹,۱۱	۸/۷۳
۱۱/۲۳	۱۶,۱۲	۱۹,۸۷	۱۳,۱	۱۱/۲۳
۱۲,۱۲	۱۵,۴۴	۲۱,۷۸	۱۴,۴۶	۱۲,۱۲
۱۱,۴۳	۱۲,۶	۲۰,۹	۱۲,۷۸	۱۱,۴۳
۹,۳۹	۸,۶۶	۱۷,۴۸	۸,۸	۹,۳۹
۶,۳۸	۶,۰۵	۱۲,۱	۴,۲۴	۶,۳۸
۲,۹۷	۳,۴۰۷	۵,۷۴	۱,۰	۲,۹۷

جدول ۴. نیروهای برشی بین قطعه‌ای محاسبه شده توسط روش‌های مختلف برای حالت دو

اسپنسر	لاو و کارافه	گروه مهندسی ارتش آمریکا	تابع بین قطعه ای نیم سینوسی	تابع بین قطعه ای ثابت
۲,۶۶	۵,۲	۰,۰	۱,۴۴	۲,۶۶
۹,۴۲	۲۲,۴۸	۲۰,۵۸	۸,۸۶	۹,۴۲
۱۳,۸۹	۲۷,۱۲	۳۰,۳۸	۱۶,۳۶	۱۳,۸۹
۱۵,۹	۲۳,۱۸	۳۵,۱۶	۲۰,۶۲	۱۵,۹
۱۵,۴	۱۹,۳۴	۳۴,۵۸	۱۹,۶۲	۱۵,۴
۱۲,۶۹	۲۳,۶۴	۲۸,۸۳	۱۴,۱۲۵	۱۲,۶۹
۸,۴	۲۱,۵۳	۱۹,۲۳	۶,۸۵	۸,۴
۳,۷۳	۶,۷۹	۰,۰	۱,۶	۳,۷۳

جدول ۵. نیروهای برشی بین قطعه‌ای محاسبه شده توسط روش‌های مختلف برای حالت ۳

اسپنسر	لاو و کارافه	گروه مهندسی ارتش آمریکا	تابع بین قطعه ای نیم سینوسی	تابع بین قطعه ای ثابت
۱,۴۸	-۱,۳۹	۰,۰	-۰/۷۸	۱,۴۸
۱,۵۸	۳,۰۹	۳,۵۷	۱,۱۶	۱,۵۸
۴,۰	۶,۹۸	۸,۴۲	۳,۷۷	۴,۰
۵,۵۹	۹,۰۳	۱۱,۸۱	۵,۸۳	۵,۵۹
۶,۲۷	۹,۳۱	۱۳,۴۹	۶,۶۷	۶,۲۷
۶,۱	۸,۱۹	۱۳,۴۲	۶,۰۶	۶,۱
۵,۱۷	۶,۱۶	۱۱,۶۹	۴,۳۲	۵,۱۷
۳,۶۸	۳,۷۹	۸,۵۴	۲,۱۹	۳,۶۸
۱,۸۴	۲,۰۸	۴,۴۱	۰,۵۶	۱,۸۴

همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، کمترین مقدار ضریب اطمینان مربوط به رابطه جانبی است که فقط با تامین معادله تعادل نیرو به محاسبه ضریب اطمینان می‌پردازد و از نیروی برشی بین قطعات صرف نظر می‌کند. پس از آن رابطه فلنیوس کمترین مقدار ضریب اطمینان را دارد. همچنین با تامل در جدول مذکور می‌توان به این مهم دست یافت که رابطه بی شاب اصلاح شده مقدار ضریب اطمینان را با دقت خوبی نزدیک به رابطه مورگن اشترن_ پرایس و اسپنسر تخمین می‌زند. در جداول (۳) تا (۵) که مربوط به محاسبه نیروی برشی بین قطعات است، در تمامی روش‌های ذکر شده مقادیر نیروهای بین قطعه‌ای از مقدار نزدیک به صفر شروع به افزایش می‌کند و این افزایش تا میانه قطعات ادامه دارد و پس از آن با کاهش این مقدار در آخرین قطعه به مقدار صفر همگرا می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر نیروهای برشی در روش اسپنسر و مورگن اشترن_ پرایس با فرض تابع بین قطعه‌ای ثابت، برابر می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشهای مختلف تعادل حدی و فرضیات مربوط به آن به منظور محاسبه ضریب اطمینان ارائه شد. مقایسه نتایج مثالهای ارائه شده نشان می‌دهد روشهایی که کلیه معادلات تعادل را تامین می‌کنند و از فرضیات ساده شده کمتری بهره می‌برند نسبت به روشهایی که کلیه معادلات تعادل را ارضا نمی‌کنند یا فرضیات ساده کننده زیادی دارند از دقت بیشتری برخوردارند. روش جانبی و فلنیوس به دلیل فرضیات ساده کننده و تامین یکی از معادلات تعادل نیرو یا لانگر ضریب اطمینان را نسبت به روشهای دیگر کمتر محاسبه می‌کنند. از میان روشهایی که کلیه معادلات تعادل را ارضا نمی‌کنند روش بی‌شاب با دقت خوبی ضریب اطمینان را محاسبه می‌کند و ضریب اطمینان محاسبه شده توسط این روش نزدیک به روشهایی است که کلیه معادلات تعادل را ارضا می‌کنند. همچنین روشهای اسپنسر و مورگن اشترن_ پرایس با فرض تابع ثابت بین قطعه‌ای نتایج مشابه در محاسبه ضریب اطمینان و نیروهای بین قطعه‌ای دارند.

۶. مراجع

1. Fellenius, W. " Calculation of the stability of earth dams." in: Transactions of the 2nd Congress on Large Dams, vol. 4, 445-459.(1936)
2. Bishop." The use of the slip circle in the stability analysis of slopes." Geotechnique, 5: 7-17. A.W.(1954)
3. Lowe, J., and Karafiath, L." Stability of Earth Dams upon Drawdown." Proceedings of the First PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexican Society of Soil Mechanics, Mexico D.F., pp 537-552.(1960)
4. Janbu, N. " Slope stability computations." In Hirschfield, E. and Poulos, S.(Editors), Embankment Dam Engineering, Casagrande Memorial Volume: Wiley, New York: 47-86. (1973)
5. U.S. Army Corps of Engineers." Stability of Earth and Rock-Fill Dams." EM 1110-2-1902. U.S. ArmyEngineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.(1970)
6. Spencere. " A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces." Gtotechnique, 17, pp.11-26. (1967)
7. Morgensternn., R., and Price, V . E. "The analysis of the stability of general slip surfaces." Gtotechnique, 15, pp. 79-93.(1965)
8. Sarma, S. K." Stability analysis of embankments and slopes." GCotechnique, 23, pp. 423-433. (1973)