

تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح به روش آنالیز حدی مرز بالا

هادی محمدزاده رومیانی^۱، اورنگ فرزانه^۲ و فرج‌الله عسکری^{۳*}

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

^۳ استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۴/۲۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۰۷/۲۷، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۰/۲۴)

چکیده

موضوع تحقیق حاضر، تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح تحت بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی و تعیین مقدار و طول مورد نیاز جوشن جهت مقابله با گسیختگی این شیروانی‌ها است. با استفاده از روش آنالیز حدی مرز بالا الگوریتمی تدوین شده که با مدل کردن مکانیزم لغزش و بهینه‌سازی آن، پایداری شیروانی‌های خاک مسلح را تحلیل می‌کند. در این تحقیق از بلوک‌های لایه‌ای برای تشکیل مکانیزم گسیختگی استفاده شده است. این امر باعث ساده‌سازی فرمولاسیون و سهولت اعمال شتاب‌های ناشی از زلزله در حالت سه‌بعدی می‌گردد. مکانیزم مذکور از چند بلوک که هر کدام شامل یک لایه جوشن از جنس ژئوسینتتیک می‌باشد، تشکیل شده است. توزیع جوشن در ارتفاع شیروانی به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده در این تحقیق به صورت نمودارهای بدون بعد جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: شیروانی خاک مسلح، مکانیزم گسیختگی، تحلیل پایداری شیروانی، تحلیل حدی مرز بالا، بلوک‌های لایه‌ای

مقدمه

امروزه استفاده از روش تعادل حدی جهت تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح ارائه کردند [۳]. در این روش از مکانیزم اسپیرال لگاریتمی استفاده شده و گوه گسیختگی به تعدادی قطعه افقی تقسیم می‌شود که از فصل مشترک این قطعات هیچ جوشنی عبور نمی‌کند، بنابراین جوشن‌ها هیچ تأثیر مستقیمی در نیروی بین قطعات ندارد. در این روش تمامی معادلات تعادل نیروها و لنگرها برای هر قطعه با حل $5N-1$ معادله حل شده و نیروی جوشن‌ها تعیین شده است. N تعداد قطعات مورد استفاده می‌باشد.

استفاده از روش تحلیل حدی جهت بررسی پایداری شیروانی‌ها به مراتب کمتر از روش تعادل حدی بوده است. تحقیقات میخالفسکی در سال‌های ۱۹۹۷ [۴] و ۱۹۹۸ [۵] جزو مهم‌ترین کارهای انجام شده در این زمینه می‌باشد. وی روشی جهت تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح بر اساس روش تحلیل حدی سینماتیکی (مرز بالا) با استفاده از مکانیزم اسپیرال لگاریتمی در دو حالت توزیع یکنواخت و مثلثی جوشن‌ها در ارتفاع شیروانی ارائه کرد. در این تحقیقات مکانیزم گسیختگی اسپیرال لگاریتمی جهت تعیین نیرو و طول مورد نیاز جوشن‌ها

امروزه استفاده از تسمه‌های فولادی یا لایه‌های ژئوسنتتیک جهت مسلح کردن خاک در سازه‌های خاکی مانند شیروانی‌ها و دیوارها به عنوان یک روش عملی و مناسب در بسیاری از پروژه‌های عمرانی مورد توجه قرار می‌گیرد. در طول سه دهه اخیر، تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح به طور گسترده مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته و روش‌های تحلیلی و عددی مختلفی جهت بررسی پایداری این شیروانی‌ها ارائه شده است [۱]. روش تعادل حدی به عنوان یکی از روش‌های تحلیلی رایج در بررسی پایداری شیروانی‌ها به طور گسترده توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۱۹۹۷ لینگ (Ling) و همکاران روشی جهت طراحی شیروانی‌های خاک مسلح بر مبنای مکانیزم گسیختگی چرخشی اسپیرال لگاریتمی با استفاده از روش تعادل حدی ارائه کردند [۲]. آنها نیروی زلزله را به صورت شبه استاتیکی بر گوه لغزنده اعمال کردند و پایداری داخلی و خارجی شیروانی را جهت تعیین نیروی جوشن‌ها و طول مورد نیاز آنها مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۵ نوری و همکاران مکانیزم متفاوتی را با

موهر-کولمب به عنوان سطح تسلیم خاک در نظر گرفته شود، با پذیرفتن قانون نرمالیت، مقدار زاویه اتساع با زاویه اصطکاک داخلی خاک برابر خواهد بود. در این حالت بردار سرعت نسبت به سطح ناپیوستگی سرعت، زاویه‌ای برابر با زاویه اصطکاک داخلی خاک خواهد داشت [۶].

در قضیه مرز بالا، نرخ کار نیروهای داخلی و نرخ کار نیروهای خارجی وارد بر محیط با یکدیگر مساوی قرار داده می‌شود. در یک محیط خاک مسلح با توجه به این قضیه، رابطه زیر را می‌توان نوشت:

$$\int_S T_i \cdot v_i dS + \int_V F_i \cdot v_i dV = \int_V \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}^p dV \quad (1)$$

در این رابطه، T_i نیروی کشش جوشن، F_i نیروی

حجمی، v_i سرعت در سطح ناپیوستگی سرعت، ε_{ij}^p نرخ کرنش پلاستیک، σ_{ij} تانسور تنش مربوط به کرنش ε_{ij}^p و S و V به ترتیب سطح مرزی و حجم تحت بار می‌باشد. در ساخت شیروانی خاک مسلح معمولاً از خاک دانه‌ای استفاده می‌شود. با فرض دانه‌ای بودن خاک و تبعیت رفتار خاک از معیار موهر-کولمب، سمت راست معادله (۱) یعنی نرخ کار جذب شده توسط توده خاک در ناحیه خمیری برابر صفر است [۷]. در این صورت خواهیم داشت:

$$\int_V F_i \cdot v_i dV = - \int_S T_i \cdot v_i dS \quad (2)$$

در شکل ۱- الف مکانیزم ناپایداری در یک شیروانی خاک مسلح و وضعیت قرارگیری جوشن‌ها نسبت به سطح گسیختگی به صورت شماتیک نشان داده شده‌است. در شکل ۱- ب محل تقاطع یکی از جوشن‌ها با سطح گسیختگی به صورت دقیق‌تر مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، اگر سطح گسیختگی در محل قطع جوشن به صورت یک نوار برشی با ضخامت t و با زاویه η نسبت به جوشن در نظر گرفته شود، نقطه A بر روی توده لغزنده نسبت به نقطه B بر روی محیط صلب با سرعت V حرکت می‌کند و در طول جوشن در بین نقاط A و B کرنش طولی (ε_l) ایجاد می‌شود. کار نیروی کشش

برای پایداری شیروانی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر مکانیزم مذکور، لغزش توده خاک مسلح بر روی جوشن انتهایی نیز جهت تعیین طول مورد نیاز جوشن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌است.

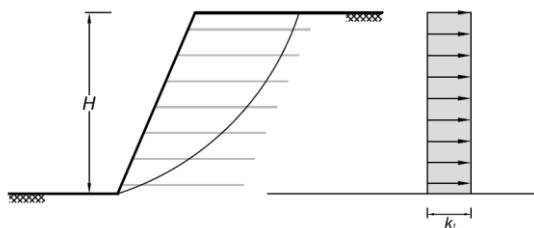
در تحقیق حاضر، روش تحلیل حدی مرز بالا جهت محاسبه مقدار و طول مورد نیاز جوشن جهت مقابله با ناپایداری شیروانی به کار گرفته شده‌است. مکانیزم گسیختگی از تعدادی بلوک افقی تشکیل می‌یابد. هر بلوک شامل یک لایه جوشن از جنس ژئوسینتتیک است. لایه‌های جوشن به صورت افقی در نظر گرفته شده‌اند به گونه‌ای که هیچ یک از جوشن‌ها از مرز بین بلوک‌ها نگذشته و تأثیر مستقیم در مقادیر نیروی بین بلوک‌ها ندارند. مکانیزم‌های گسیختگی مختلف مورد توجه قرار گرفته و برای هر یک از این مکانیزم‌ها، فرمولاسیون مورد نیاز برای پایداری بر اساس روش تحلیل حدی سینماتیکی ارائه شده‌است. مقایسه نتایج بدست آمده در حالت دوبعدی با نتایج سایر محققین جهت کنترل صحت نتایج ارائه شده‌است. نتایج بدست آمده در حالت سه‌بعدی به منظور بررسی تأثیر نیروی زلزله، خصوصیات مقاومتی خاک و پارامترهای هندسی شیب در پایداری شیروانی‌های خاک مسلح به صورت نمودارهای پایداری ارائه شده‌است.

روش تحلیل حدی سینماتیکی در خاک مسلح

روش تحلیل حدی از حدود ۲۰ سال پیش در خاک مسلح به دو روش مختلف استفاده شده‌است. در روش اول توده خاک مسلح به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در این روش ابتدا محیط همگن سازی شده و سپس روابط حاصل از روش تحلیل حدی بر محیط همگن غیر همسان اعمال می‌شود. در روش دوم که به روش سازه‌های مشهور است، خاک و جوشن به عنوان دو المان سازه‌ای مجزا در نظر گرفته می‌شوند [۵]. با توجه به استفاده از روش دوم در تحقیق حاضر، در ادامه نحوه اعمال تحلیل حدی در روش سازه‌ای به اختصار شرح داده می‌شود.

در روش تحلیل حدی سینماتیکی (روش آنالیز حدی مرز بالا)، رفتار خاک و جوشن به صورت صلب-خمیری کامل در نظر گرفته می‌شود و فرض بر این است که تغییر شکل‌های حاصل در خاک و جوشن در شرایط حدی از قانون جریان خمیری وابسته پیروی کند. اگر معیار

گسیختگی بحرانی مکانیزمی است که مقدار $\frac{k_t}{\gamma H}$ برای آن ماکزیمم باشد. بنابراین جواب‌های بدست آمده از این روش، مقادیر مرز پایین برای جواب‌های واقعی می‌باشند [۴]. در محاسبات انجام شده، توزیع مقدار جوشن در ارتفاع شیروانی به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده‌است که با فرض رفتار صلب-خمیری کامل برای کلیه جوشن‌ها در مرز ناپیوستگی در هنگام گسیختگی، توزیع نیروی جوشن‌ها در ارتفاع یکنواخت خواهد بود (شکل ۲).



شکل ۲: شیروانی با توزیع یکنواخت جوشن‌ها در ارتفاع

در شکل ۲، کشش جوشن در واحد ارتفاع k_t شیروانی و در پهناى واحد، جهت مقابله با ناپایداری شیب می‌باشد. این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_t = \frac{nT_t}{H} \quad (5)$$

در این رابطه n تعداد لایه‌ها، T_t مقاومت کششی لایه جوشن در واحد عرض و H ارتفاع شیب می‌باشد. این رابطه می‌تواند به صورت پارامتر بدون بعد تعریف شود.

$$\frac{k_t}{\gamma H} = \frac{nT_t}{\gamma H^2} \quad (6)$$

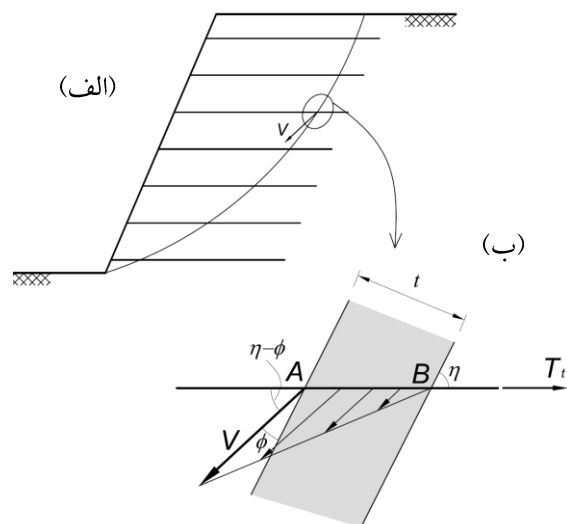
مکانیزم گسیختگی مورد استفاده در تحقیق حاضر متشکل از تعدادی بلوک افقی است که هر بلوک شامل یک لایه جوشن می‌باشد. بر اساس روش شبه استاتیکی، نیروی مؤثر زلزله وارد بر توده لغزنده، به صورت نیروهایی بر مرکز جرم بلوک‌ها اعمال می‌شود. خاک شیروانی دانه‌ای و همگن در نظر گرفته شده‌است. هر لایه جوشن می‌تواند

جوشن در طول نوار برشی (مرز ناپیوستگی سرعت) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{D} = \int_0^{t/\sin\eta} T_t |\dot{\epsilon}_l| dx \quad (3)$$

در این رابطه، T_t نیروی کشش جوشن و $\dot{\epsilon}_l$ نرخ کرنش طولی جوشن می‌باشد. با فرض ثابت بودن نرخ کرنش طولی جوشن بین نقاط A و B ، تغییرات سرعت در این بازه به صورت خطی بوده و رابطه ۳ به صورت زیر نوشته می‌شود:

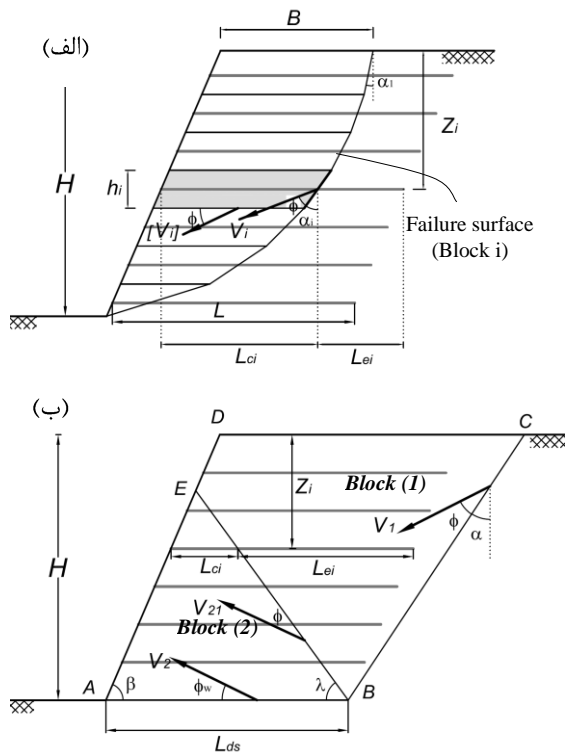
$$\dot{D} = T_t |\dot{\epsilon}_l| (t/\sin\eta) = T_t v \cos(\eta - \phi) \quad (4)$$



شکل ۱: بردار سرعت در محل قطع جوشن با سطح گسیختگی [۸]

روش تحلیل در تحقیق حاضر

هدف اصلی این تحقیق، تعیین مقدار و طول مورد نیاز جوشن برای تأمین پایداری شیروانی است. روش تحلیل حدی سینماتیکی جهت تعیین این پارامترها در حالات استاتیکی و شبه استاتیکی مورد استفاده قرار گرفته‌است. کار انجام شده توسط نیروی کششی جوشن‌ها منفی می‌باشد ($-\dot{D}$). هرچه گوه گسیختگی بدون جوشن ناپایدارتر باشد، نیروی کششی و طول مورد نیاز جوشن جهت پایداری گوه بیشتر است. در واقع مکانیزم



شکل ۴: مکانیزم‌های گسیختگی مورد استفاده در تحقیق حاضر

الف) مکانیزم بلوک‌های لایه‌ای

ب) مکانیزم دوبلوکی با لغزش مستقیم بر روی یک لایه جوشن

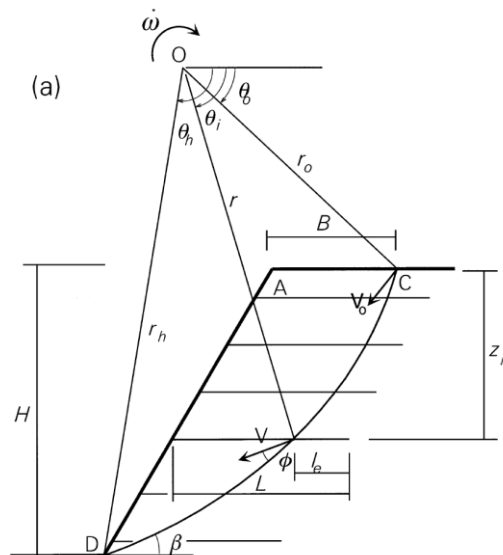
پارامترهای ارائه شده در شکل ۴ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- L : طول جوشن.
- L_{ds} : طول جوشن مورد نیاز برای مقابله با لغزش مستقیم توده خاک مسلح.
- L_{ei} : طولی از جوشن i ام که در پشت سطح گسیختگی قرار می‌گیرد (طول گیرداری جوشن i ام).
- L_{ci} : طولی از جوشن i ام که بین سطح گسیختگی و سطح شیب قرار می‌گیرد.
- Z_i : عمق لایه جوشن i ام.
- B : فاصله بین سطح گسیختگی و لبه شیب در بالادست شیب.

در ادامه این مکانیزم‌ها به همراه فرمولاسیون‌های مورد نیاز جهت تعیین مقدار و طول جوشن مورد نیاز برای پایداری شیروانی شرح داده می‌شود.

در این تحقیق برای تعیین نیروی مورد نیاز جوشن‌ها از مکانیزم با بلوک‌های لایه‌ای استفاده شده‌است. همانگونه

نیروی مقاومی در راستای افق ایجاد کند که از مقاومت کششی جوشن یا نیروی بیرون کشیدگی ناشی می‌شود. اکثر تحقیقات قبلی انجام شده در زمینه تحلیل پایداری شیروانی‌های خاک مسلح بر اساس مکانیزم چرخشی اسپیرال لگاریتمی (شکل ۳) بوده‌است. در تحقیق حاضر از گوه گسیختگی متشکل از بلوک‌های افقی بر اساس مکانیزم انتقالی مطابق شکل (۴-الف) استفاده شده‌است. در طول روند بهینه‌یابی، زاویه کف هر یک از بلوک‌ها (α_i) تغییر می‌کند تا مکانیزم بهینه به دست آید. این مکانیزم انعطاف‌پذیری بالایی دارد و می‌تواند انواع گسیختگی با شکل‌های مختلف را پوشش دهد. هر چه تعداد بلوک‌های افقی بیشتر باشد، دقت روش افزایش می‌یابد. تجربه نشان داده‌است که علاوه بر مکانیزم مذکور، نوع دیگری از ناپایداری به نام لغزش مستقیم می‌تواند در شیروانی‌های مسلح شده توسط ژئوسنتتیک رخ دهد. در این مکانیزم، توده خاک مسلح بر روی یکی از لایه‌های جوشن که معمولاً لایه انتهایی می‌باشد، می‌لغزد. در شکل ۴ مکانیزم‌های لایه‌ای و لغزش مستقیم مورد استفاده در این تحقیق به همراه پارامترهای به کار رفته در روابط تعیین نیرو و طول جوشن نشان داده شده‌اند.



شکل ۳: مکانیزم چرخشی اسپیرال لگاریتمی [۵]

نیروی زلزله، نرخ کار نیروهای وزن و زلزله به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W} = \dot{W}_\gamma + \dot{W}_e = \sum_{i=1}^n w_i V_i [\cos(\alpha_i + \varphi) + k_h \sin(\alpha_i + \varphi)] \quad (8)$$

در این رابطه، \dot{W}_γ نرخ کار نیروی وزن، \dot{W}_e نرخ کار نیروی زلزله، w_i و V_i به ترتیب نیروی وزن در واحد عرض و سرعت مطلق بلوک i ام، k_h ضریب شتاب افقی زلزله، α_i زاویه سطح گسیختگی در بلوک i ام نسبت به امتداد قائم، φ زاویه اصطکاک داخلی خاک و n تعداد لایه‌های جوشن می‌باشد.

برای محاسبه نیروی مورد نیاز جوشن‌ها، طول آنها در مقایسه با ارتفاع شیروانی بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود، به گونه‌ای که در هنگام ناپایداری شیروانی، نیروی اصطکاک بین جوشن و خاک آن قدر زیاد باشد که همه جوشن‌ها به صورت سازه‌ای گسیخته شوند. علاوه بر این در اینجا فرض شده است که این نیروها به صورت یکنواخت در ارتفاع توزیع می‌شوند. بر اساس این دو فرض، نرخ کار نیروی کششی جوشن‌ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{D} = \sum_{i=1}^n T_i V_i \sin(\alpha_i + \varphi) \quad (9)$$

رابطه ۵ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

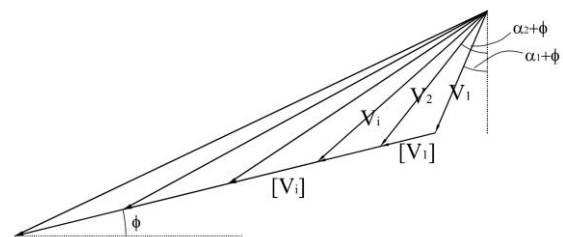
$$T_t = \frac{H}{n} k_t \quad (10)$$

با تلفیق روابط (۹) و (۱۰) نرخ کار نیروی کششی جوشن‌ها به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{D} = \frac{H}{n} k_t \sum_{i=1}^n V_i \sin(\alpha_i + \varphi) \quad (11)$$

با جاگذاری نرخ کار نیروی کششی جوشن‌ها (رابطه ۱۱) در سمت راست رابطه (۴) و نرخ کار نیروهای وزن و زلزله (رابطه ۸) در سمت چپ رابطه (۴)، نیروی متوسط مورد

که در شکل ۴-الف ملاحظه می‌شود، بردار سرعت بلوک i ام با سطح گسیختگی (نسبت به توده صلب پیرامونی) زاویه φ تشکیل می‌دهد. علاوه بر این اگر زاویه سطح گسیختگی بین اولین بلوک و توده صلب پیرامونی را نسبت به امتداد قائم α_1 بنامیم، رعایت شرط نرمالیته ایجاب می‌کند که بردار سرعت این بلوک با سطح گسیختگی زاویه φ و با امتداد قائم زاویه $\alpha_1 + \varphi$ بسازد. با توجه به اینکه این شرایط برای بلوک ۲ نیز باید برقرار باشد و از طرف دیگر، بردار سرعت نسبی بین بلوک ۱ و بلوک ۲ یعنی $[V_i]$ نیز باید با سطح مشترک این دو بلوک، که افقی فرض می‌شود، همان زاویه φ را بسازد، با داشتن امتداد سطح گسیختگی بین بلوک ۲ و محیط پیرامون، یعنی α_2 ، مقدار مطلق سرعت \vec{V}_2 به صورت تابعی از امتداد و مقدار \vec{V}_1 به گونه‌ای تعیین می‌شود که بردار نسبی $\vec{V}_2 - \vec{V}_1$ با امتداد افق زاویه φ بسازد. در شکل ۵ بردارهای سرعت در مرزهای ناپیوستگی نشان داده شده‌است.



شکل ۵: هدرگراف سرعت برای مکانیزم چند بلوکی مورد استفاده

با توجه به این شکل، مقادیر سرعت مطلق و نسبی V_{i+1} و $[V_i]$ بر حسب V_i برای بلوک i ام با استفاده از روابط مثلثاتی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{cases} V_{i+1} = \frac{\cos(\alpha_i + 2\varphi)}{\cos(\alpha_{i+1} + 2\varphi)} V_i \\ [V_i] = \frac{\cos(\alpha_1 + 2\varphi) \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i)}{\cos(\alpha_{i+1} + 2\varphi) \cos(\alpha_i + 2\varphi)} V_i \end{cases} \quad (12)$$

نرخ کار نیروهای وزن و نیروی اینرسی شبه استاتیکی می‌تواند به صورت مجموع کار این نیروها برای تمام بلوک‌ها محاسبه شود. با صرف نظر کردن از مؤلفه قائم

مکانیزم چند بلوکی مورد استفاده به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{D} = \sum_{i=1}^k T_{pi} V_i \sin(\alpha_i + \varphi) + \sum_{i=k+1}^n T_i V_i \sin(\alpha_i + \varphi) \quad (14)$$

در این رابطه k تعداد لایه‌هایی از جوشن است که قبل از گسیختن، دچار بیرون کشیدگی شده‌اند. با جاگذاری نرخ کار نیروی کششی جوشن‌ها (رابطه ۱۴) در سمت راست رابطه (۴) و نرخ کار نیروهای وزن و زلزله (رابطه ۸) در سمت چپ رابطه (۴)، نیروی متوسط مورد نیاز جوشن در ارتفاع شیروانی جهت پایداری به صورت زیر بدست می‌آید:

$$k_t = \frac{n \sum_{i=1}^n w_i V_i [\cos(\alpha_i + \varphi) + k_h \sin(\alpha_i + \varphi)]}{H \sum_{i=1}^n V_i \sin(\alpha_i + \varphi)} + \frac{\sum_{i=1}^k T_{pi} V_i \sin(\alpha_i + \varphi)}{\sum_{i=1}^n V_i \sin(\alpha_i + \varphi)} \quad (15)$$

میخالفسکی [۵] نشان داده‌است که طراحی شیروانی خاک مسلح زمانی بهینه است که مقدار k_t بدست آمده از رابطه (۱۵) با مقدار آن در رابطه (۱۲) برابر باشد [۴]. نیروی بیرون کشیدگی را می‌توان به صورت تابعی از طول جوشن (L) نوشت. بنابراین با تساوی روابط (۱۲) و (۱۵)، معادله‌ای به دست می‌آید که تنها مجهول آن به طور ضمنی L می‌باشد. با حل این معادله به روش سعی و خطا، یک مقداری برای طول جوشن به دست می‌آید که بر اساس قضیه مرز بالا شیروانی مسلح شده با این طول جوشن حتماً گسیخته خواهد شد. بنابراین جواب به دست آمده یک مقدار مرز پایین برای طول مورد نیاز جوشن جهت پایداری شیب می‌باشد. دست یافتن به بهترین جواب نیازمند استفاده از یک روش بهینه‌یابی جهت پیدا کردن جواب ماکزیمم برای L نسبت به پارامترهای α_i و B (شکل ۴- الف) می‌باشد.

نیاز جوشن در ارتفاع شیروانی جهت پایداری به صورت زیر بدست می‌آید:

$$k_t = \frac{n}{H} \times \frac{\sum_{i=1}^n w_i V_i [\cos(\alpha_i + \varphi) + k_h \sin(\alpha_i + \varphi)]}{\sum_{i=1}^n V_i \sin(\alpha_i + \varphi)} \quad (12)$$

این رابطه مقدار مرز پایین برای نیروی مورد نیاز جوشن جهت پایداری شیب را به دست می‌دهد. دست یافتن به بهترین جواب نیازمند استفاده از یک روش بهینه‌یابی جهت پیدا کردن جواب ماکزیمم برای k_t نسبت به پارامترهای α_i و B که در محاسبه w_i وارد می‌شود (شکل ۴- الف)، می‌باشد.

رابطه (۱۲) نیروی مورد نیاز جوشن را با فرض رخ دادن گسیختگی کششی در همه جوشن‌ها به دست می‌دهد. گسیختگی کششی در همه جوشن‌ها زمانی رخ می‌دهد که طول جوشن‌ها به اندازه کافی زیاد باشد. اما در عمل طول جوشن‌ها در حدی است که ممکن است در هنگام ناپایداری شیروانی تعدادی از جوشن‌ها از درون خاک بیرون کشیده شوند، بدون اینکه خود جوشن‌ها، گسیخته شوند. برای محاسبه طول مناسب جوشن‌ها، روش مورد استفاده توسط میخالفسکی در سال ۱۹۹۷ به کار گرفته شده‌است [۴]. نیروی بیرون کشیدگی برای لایه جوشن موجود در بلوک افقی i ام به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$T_{pi} = 2\gamma z_i L_{ei} f_b \tan \varphi \quad (13)$$

در این رابطه، z_i و L_{ei} به ترتیب عمق و طول گیرداری جوشن i ام (شکل ۴- الف) می‌باشد که در شکل (۴- الف) نشان داده شده‌اند و $f_b \tan \varphi$ ضریب اصطکاک بین خاک و جوشن است که به صورت کسری از ضریب اصطکاک داخلی خاک اطراف جوشن تعریف می‌شود ($f_b < 1$). نرخ کار نیروی جوشن‌ها با در نظر گرفتن اثر بیرون کشیدگی در برخی از جوشن‌ها در

نرخ کار نیروی وزن و زلزله به صورت مجموع نرخ کار این نیروها در بلوک‌های ۱ و ۲ تعریف می‌شود.

$$\dot{W} = w_1 V_1 \cos(\alpha + \varphi) + w_2 V_2 \cos(90 + \varphi_w) + k_h [w_1 V_1 \sin(\alpha + \varphi) + w_2 V_2 \cos \varphi_w] \quad (20)$$

در این رابطه w_1 و w_2 وزن بلوک‌های ۱ و ۲ و α پارامتر هندسی می‌باشد. نرخ کار نیروی جوشن‌ها به صورت مجموع نرخ کار نیروی جوشن‌هایی که سطح BE آنها را قطع می‌کند با در نظر گرفتن اثر نیروی گسیختگی خود جوشن‌ها در برخی از لایه‌ها و نیروی بیرون کشیدگی در برخی دیگر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{D} = \sum_{i=n-d+1}^{n-d+k} T_{pi} V_{21} \cos(\lambda - \varphi) + \sum_{i=n-d+k+1}^n T_i V_i \sin(\alpha_i + \varphi) \quad (21)$$

در این رابطه T_{pi} نیروی بیرون کشیدگی در لایه جوشن i ام، T_i مقاومت کششی جوشن در واحد عرض، n تعداد لایه‌های جوشن، n_d تعداد جوشن‌هایی که سطح BE آنها را قطع می‌کند و k تعداد لایه‌هایی است که قبل از گسیختن دچار بیرون کشیدگی شده‌اند. با جاگذاری نرخ کار نیروی کششی جوشن‌ها (رابطه ۲۰) در سمت راست رابطه (۴) و نرخ کار نیروهای وزن و زلزله (رابطه ۲۱) در سمت چپ رابطه (۴)، معادله‌ای به دست می‌آید که تمام پارامترهای مجهول آن تابعی از طول مورد نیاز جوشن L_{ds} می‌باشند. با حل این معادله، تعیین می‌شود. دست یافتن به بهترین جواب نیازمند استفاده از یک روش بهینه‌یابی جهت پیدا کردن جواب ماکزیمم برای L_{ds} نسبت به پارامترهای α و λ (شکل ۴-ب) می‌باشد.

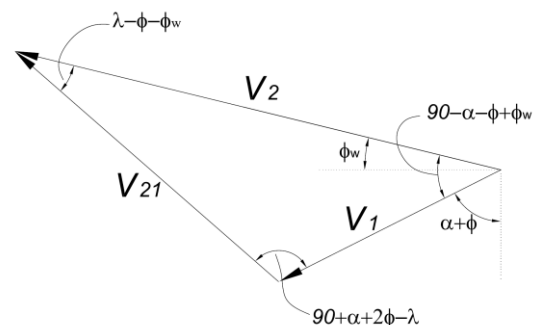
مقایسه نتایج با سایر محققین

در این بخش نتایج حاصل از الگوریتم حاضر برای نیروی جوشن‌ها و طول لازم جوشن‌ها با نتایج سایر محققین مقایسه شده‌است. در سال ۱۹۹۸ میخالفسکی نتایج تحقیقات خود را به صورت نمودارهای بدون بعد

در شکل ۴- ب مکانیزم لغزش مستقیم نشان داده شده‌است. در این مکانیزم، وزن توده خاک بر روی یکی از لایه‌های جوشن می‌لغزد. سطح گسیختگی سطح ABC می‌باشد که توده خاک مسلح (بلوک $ABCD$) باید بر روی سطح BC با سرعت V_1 و بر روی سطح AB با سرعت V_2 نسبت به توده صلب پیرامون حرکت کند. این امر منجر به عدم ارضای معادلات سازگاری سرعت در محیط می‌شود. جهت حل این مشکل از مکانیزم انتقالی متشکل از دو بلوک صلب به صورت شکل ۴- ب استفاده می‌شود. در این مکانیزم بلوک ۱ بر روی سطح BC با سرعت V_1 حرکت می‌کند. بلوک ۲ نیز بر روی سطح AB با سرعت V_2 و با زاویه φ_w نسبت به افق و بر روی سطح BE با سرعت نسبی V_{21} می‌لغزد. φ_w زاویه اصطکاک بین خاک و جوشن است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tan \varphi_w = f_b \tan \varphi \quad (16)$$

بردارهای سرعت در مرزهای ناپیوستگی به صورت شکل ۶ به دست می‌آید [۷]:



شکل ۶: هداگراف سرعت برای مکانیزم لغزش مستقیم

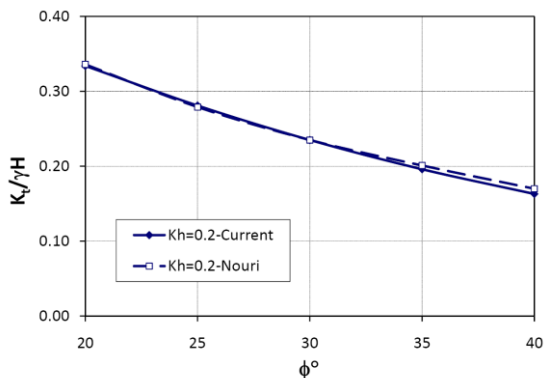
مقدار این سرعت‌ها به صورت روابط زیر به دست می‌آید:

$$V_1 = \frac{1}{\cos(\alpha + \varphi)} \quad (17)$$

$$V_2 = \frac{\cos(\alpha + 2\varphi - \lambda)}{\sin(\lambda - \varphi - \varphi_w)} \quad (18)$$

$$V_{21} = \frac{\cos(\alpha + \varphi - \varphi_w)}{\sin(\lambda - \varphi - \varphi_w)} \quad (19)$$

میان نتایج تحقیق حاضر با تحقیق نوری و همکاران می‌باشد.

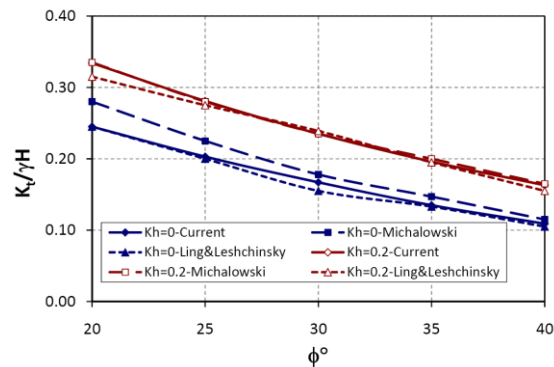


شکل ۸: مقایسه نیروی جوشن بدست آمده از الگوریتم حاضر با نتایج نوری و همکاران در حالت شبه استاتیکی برای شیب قائم ($k_h = 0.2$)

میخالفسکی در تحقیقات خود علاوه بر نیروی جوشن، طول جوشن مورد نیاز را نیز به صورت نمودارهای بدون بعد $\frac{L}{H} - \varphi$ برای شتاب‌های مختلف زلزله ارائه کرده‌است. در شکل ۹ نتایج به دست آمده از الگوریتم حاضر برای تعیین طول جوشن در حالت گسیختگی کلی در مقایسه با نتایج میخالفسکی در حالت شبه استاتیکی با ضریب شتاب زلزله $k_h = 0.2$ برای شیروانی قائم ارائه شده‌است. برای مقایسه صحیح نتایج، تعداد لایه‌های جوشن و مقدار جوشن با مقادیر مورد استفاده توسط میخالفسکی یکسان در نظر گرفته شده و از ۲۴ لایه جوشن استفاده شده‌است. این نمودار تطابق نسبتاً خوبی میان نتایج الگوریتم حاضر و نتایج میخالفسکی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل در خاک‌های دانه‌ای با زاویه اصطکاک داخلی کمتر، الگوریتم حاضر نتایج بهتری نسبت به نتایج میخالفسکی به دست می‌دهد. البته اختلاف میان جواب‌های این دو روش کم بوده و حداکثر ۴ درصد می‌باشد. در تحقیق حاضر سعی شده‌است تمام حالات ممکن برای نیروی کششی جوشن‌ها در طول گوه گسیختگی در نظر گرفته شده و تا حد ممکن از فرض‌های ساده کننده و محافظه کارانه پرهیز شود.

برای شتاب‌های مختلف زلزله ارائه کرده‌است $\frac{K_t}{\gamma H} - \varphi$

[۵]. در سال ۱۹۹۷ نیز لینگ و همکاران این نمودارها را به روش تعادل حدی ارائه کردند [۲]. در شکل ۷ نتایج بدست آمده از الگوریتم حاضر در این زمینه در مقایسه با نتایج تحقیقات مذکور در حالت شبه استاتیکی با شتاب زلزله $k_h = 0.2g$ و $k_h = 0$ برای شیروانی قائم ارائه شده‌است. با توجه به این نمودارها میخالفسکی بهترین جواب‌ها را به دست آورده‌است و نتایج به دست آمده از الگوریتم حاضر عمدتاً مابین نتایج میخالفسکی و لینگ قرار گرفته‌است که نشان دهنده صحت و اعتبار روش مورد استفاده و تطابق بسیار خوب میان نتایج الگوریتم حاضر و نتایج این محققین می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه نیروی جوشن بدست آمده از الگوریتم حاضر با نتایج میخالفسکی و لینگ در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی برای شیب قائم

نوری و همکاران در سال ۲۰۰۵ نتایج تحقیقات خود را به صورت نمودارهای بدون بعد $K - \varphi$ برای شیب‌های مختلف ارائه کردند [۳]. K نشان دهنده نیروی متوسط جوشن می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K = \sum T_j / (0.5\gamma H^2) \quad (22)$$

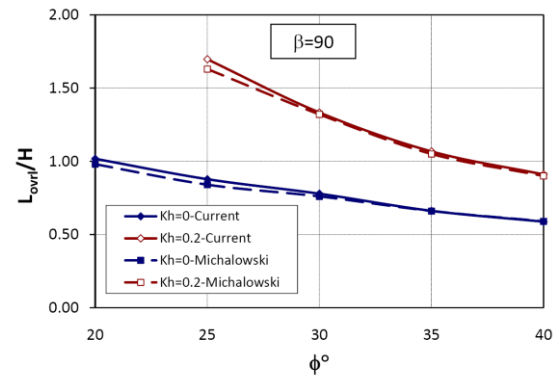
T_j نیروی جوشن j ام می‌باشد. در شکل ۸ نتایج بدست آمده از الگوریتم حاضر برای نیروی جوشن‌ها در مقایسه با نتایج تحقیقات نوری و همکاران در حالت شبه استاتیکی با شتاب زلزله $k_h = 0.2$ برای شیروانی قائم ارائه شده‌است. مقایسات نشان دهنده تطابق بسیار خوبی

ارائه نمودارهای کاربردی

در این بخش نمودارهایی ارائه می‌گردد که می‌تواند برای شیروانی‌های خاک مسلح با شیب تند و جهت تعیین مقدار و طول جوشن مورد نیاز جهت پایداری آنها مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این نمودارها، نیروی مورد نیاز و طول جوشن در دو حالت گسیختگی کلی و لغزش مستقیم با توجه به زاویه اصطکاک داخلی خاک و برای شیروانی‌های ۸۰ و ۹۰ درجه به دست می‌آید. خاک دانسه‌ای غیر چسبنده و ضرایب شتاب افقی زلزله (K_h) برابر با صفر، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ در نظر گرفته شده و نتایج به دست آمده به صورت شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ ارائه شده‌است. در این شکل‌ها، $k_t = \frac{nT_t}{H}$ نیروی متوسط مورد نیاز جوشن، L_{ovrl} طول مورد نیاز جوشن در حالت گسیختگی کلی، L_{ds} طول مورد نیاز جوشن در حالت لغزش مستقیم، H ارتفاع شیروانی، β شیب شیروانی، γ وزن مخصوص خاک و φ زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد. لازم به ذکر است که در محاسبه طول مورد نیاز جوشن در حالت گسیختگی کلی تعداد لایه جوشن ۱۰ عدد در نظر گرفته شده‌است. همچنین در محاسبه طول مورد نیاز جوشن در حالت گسیختگی کلی و لغزش مستقیم مقدار جوشن از نمودارهای ۱۱ و ۱۲ به دست آمده و در روابط استفاده شده‌است. نمودارهای ۱۱ و ۱۲ نیروی متوسط جوشن مورد نیاز را به دست می‌دهند که با مشخص بودن جنس جوشن، مقدار جوشن به دست می‌آید.

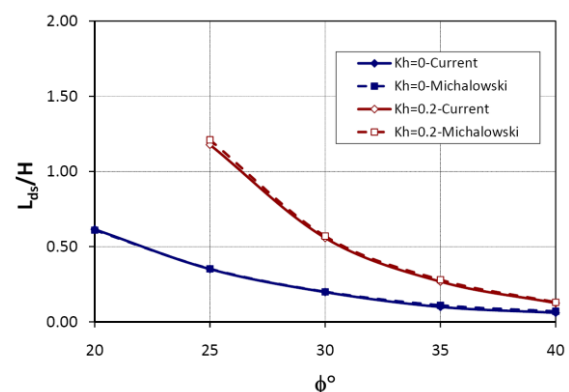
نتایج بدست آمده از تحلیل‌های انجام شده به صورت زیر ارائه می‌شود:

- در یک شیروانی در حالت استاتیکی با کاهش شیب از ۹۰ به ۸۰ درجه، مقدار جوشن مورد نیاز جهت پایداری شیروانی، حداقل ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. در حالت شبه استاتیکی، تأثیر کاهش شیب بر کاهش مقدار جوشن مورد نیاز جهت پایداری کمتر از حالت استاتیکی است، به طوری که در یک شیروانی تحت زلزله با ضریب شتاب افقی $K_h = 0.3$ مقدار کاهش جوشن ناشی از کاهش شیب از ۹۰ به ۸۰ درجه به حدود ۹ درصد تقلیل می‌یابد.
- هر چه زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد، تأثیر کاهش شیب در کاهش مقدار جوشن مورد نیاز جهت پایداری افزایش می‌یابد.

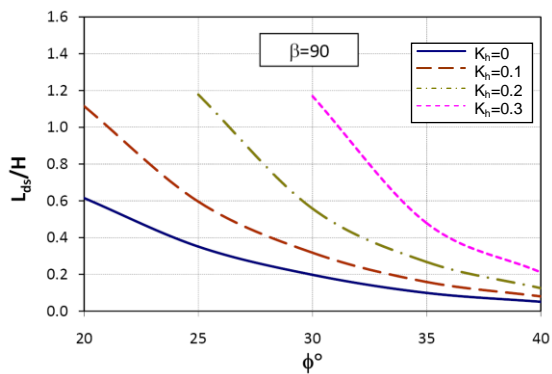


شکل ۹: مقایسه طول جوشن‌های بدست آمده از الگوریتم حاضر با نتایج میخالفسکی در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی برای شیروانی‌های قائم (مکانیزم گسیختگی کلی)

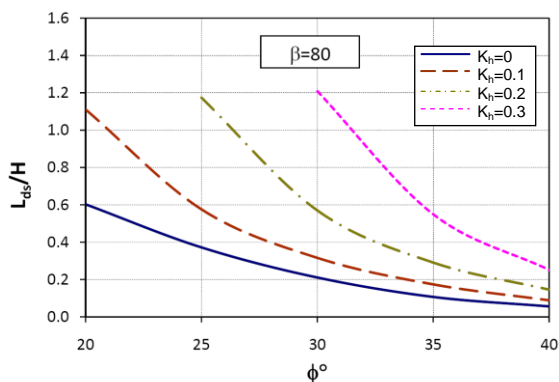
در تعیین طول جوشن، مکانیزم گسیختگی لغزش مستقیم نیز می‌تواند تعیین کننده باشد. شکل ۱۰ جهت مقایسه نتایج به دست آمده در طول این تحقیق با نتایج میخالفسکی ارائه شده‌است. برای مقایسه صحیح نتایج، مقدار جوشن با مقادیر مورد استفاده توسط میخالفسکی یکسان در نظر گرفته شده‌است. با توجه به این شکل تطابق بسیار خوبی میان طول جوشن به دست آمده بر اساس مکانیزم لغزش مستقیم از تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات میخالفسکی به خصوص برای حالت استاتیکی وجود دارد. در حالت استاتیکی نتایج به دست آمده از این دو روش تا حدود $\varphi = 35$ تقریباً بر روی هم منطبق هستند ولی برای $\varphi > 35$ ، روش میخالفسکی نتایج بهتری را نشان می‌دهد. در حالت شبه استاتیکی اختلاف بین نتایج تا حداکثر ۴ درصد افزایش می‌یابد.



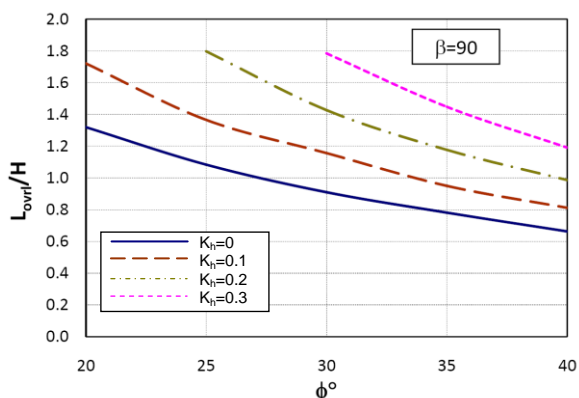
شکل ۱۰: مقایسه طول جوشن‌های به دست آمده از الگوریتم حاضر با نتایج میخالفسکی در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی برای شیروانی‌های قائم (مکانیزم لغزش مستقیم)



شکل ۱۳: طول مورد نیاز جوشن برای مقابله با لغزش مستقیم نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک و ضریب شتاب زلزله برای شیب ۹۰ درجه



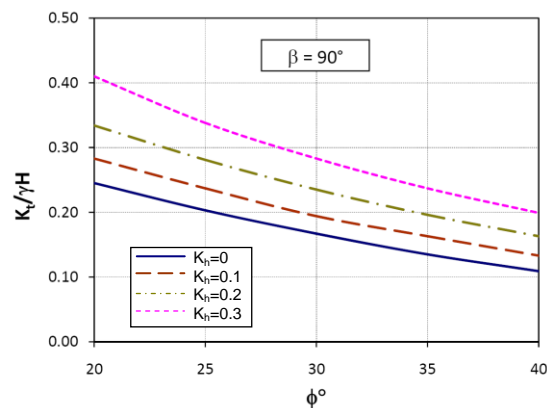
شکل ۱۴: طول مورد نیاز جوشن برای مقابله با لغزش مستقیم نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک و ضریب شتاب زلزله برای شیب ۸۰ درجه



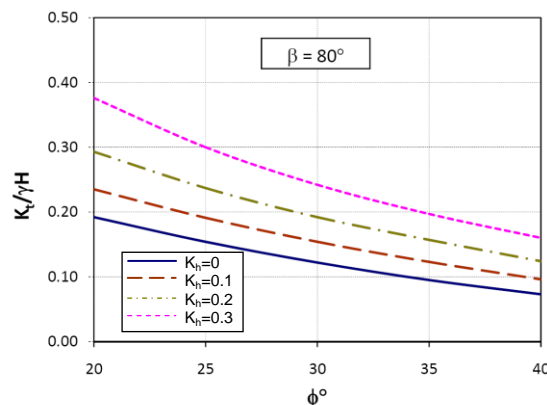
شکل ۱۵: طول مورد نیاز جوشن برای مقابله با گسیختگی کلی نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک و ضریب شتاب زلزله برای شیب ۹۰ درجه

۳) در شیروانی‌های با شیب تند، طول مورد نیاز جوشن جهت مقابله با گسیختگی کلی از طول مورد نیاز جوشن جهت مقابله با لغزش مستقیم بیشتر است. بنابراین در تعیین طول مورد نیاز جوشن برای شیروانی‌های با شیب تند، معمولاً مکانیزم گسیختگی کلی حاکم است.

۴) در مکانیزم لغزش مستقیم، تأثیر افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک در کاهش طول مورد نیاز جوشن جهت پایداری نسبت به مکانیزم گسیختگی کلی بیشتر است. به عنوان مثال با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک از ۲۵ به ۳۰ درجه، طول مورد نیاز جوشن جهت پایداری در مکانیزم لغزش مستقیم حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد در صورتی که این کاهش در مکانیزم گسیختگی کلی حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد است.



شکل ۱۱: نیروی مورد نیاز جوشن نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک و ضریب شتاب زلزله برای شیب ۹۰ درجه

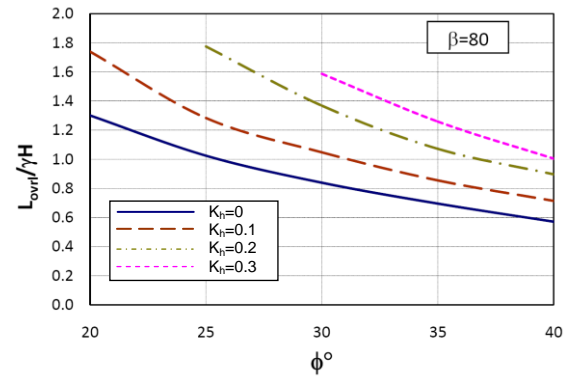


شکل ۱۲: نیروی مورد نیاز جوشن نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک و ضریب شتاب زلزله برای شیب ۸۰ درجه

می‌باشد. تحلیل‌های متعددی بر روی شیروانی‌های مختلف صورت گرفته و نتایج به صورت نمودارهای کاربردی جهت تعیین پارامترهای طراحی ارائه شد. بر اساس نتایج بدست آمده در شیروانی‌های با شیب تند، کاهش شیب تأثیر بسزایی در کاهش مقدار جوشن مورد نیاز برای پایداری شیروانی دارد. در حالی که تغییرات طول جوشن مورد نیاز برای پایداری شیروانی تقریباً مستقل از تغییرات شیب بوده و کاهش شیب نمی‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش طول جوشن داشته باشد.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از نتایج پایان نامه کارشناسی ارشد مؤلف اول در دانشکده فنی دانشگاه تهران است که در زمینه پایداری شیروانی‌های خاک مسلح و در راستا و ادامه پروژه "تحلیل لرزه‌ای سه بعدی پایداری شیروانی‌های خاک مسلح به روش آنالیز حدی" به شماره ۷/۲۹۷ کد ۶۳۱۱ در پژوهشکده ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله به انجام رسیده‌است.



شکل ۱۶: طول مورد نیاز جوشن برای مقابله با گسیختگی کلی نسبت به زاویه اصطکاک داخلی خاک و ضریب شتاب زلزله برای شیب ۸۰ درجه

جمع بندی و نتیجه گیری

در تحقیق اخیر پایداری شیروانی‌های خاک مسلح با زاویه تند با استفاده از روش تحلیل حدی سینماتیکی و به کارگیری مکانیزم گسیختگی انتقالی متشکل از بلوک‌های لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج بدست آمده با سایر تحقیقات انجام شده در این زمینه رضایتبخش

مراجع

1. Ling, H. I., Leshchinsky, D. and Tatsuoka F., (2003); "Reinforced soil engineering", *Marcel Dekker*.
2. Ling, H.I., Leshchinsky, D., Perry, E. B., (1997); "Seismic design and performance of geosynthetic-reinforced soil structures", *Geotechnique*, 47(5), P 933-952.
3. Nouri, H., Fagher, A., Jones, C.J.F.P., ((2006)); "Development of Horizontal Slice Method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls", *Geotextiles and Geomembranes*, 24, P 175-187.
4. Michalowski, R. L., June (1997); "Stability of uniformly reinforced slopes" *ASCE, J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(6), P 546-556.
5. Michalowski, R. L., (1998); "Soil reinforcement for seismic design of geotechnical structures", *Computers and Geotechnics*, 23, P 1-17.
6. Askari, F., (1999); "Three dimensional analysis of homogenous and non-homogenous in static and dynamic conditions using limit analysis method", *Thesis for Ph.D degree*, Tehran University.
7. Atkinson, J. H., (1981); "Foundations and Slopes", *McGraw-Hill*, UK.
8. Michalowski, R. L. and Viratjandr C., June (2005); "Limit analysis of reinforced soils and loads on reinforced soil slabs", *Journal of Geosynthetics & Geosynthetic-Engineered Soil Structures*, *ASCE*, P 39-59.