

### چکیده

تحلیل و طراحی دیوارهای حائل از جمله مسائل رایج در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. در تحقیق حاضر الگوریتم جدیدی برای طراحی دیوارهای حائل طره‌ای در شرایط زلزله به روش مرز بالای تحلیل حدی ارائه شده است. از این الگوریتم می‌توان برای طراحی و کنترل شرایط پایداری دیوارها، بر اساس مکانیسم‌های ارائه شده استفاده نمود. از ویژگی‌های این الگوریتم تعیین شرایط بحرانی گوه‌های گسیختگی برای رسیدن به حداقل ضرایب اطمینان پایداری و ماکزیم نیروی محرک وارد بر دیوار، هم‌زمان با تعیین راستای بحرانی ضرایب شتاب زلزله طرح می‌باشد. در تحقیق حاضر بر اساس الگوریتم پیشنهادی راستای بحرانی ضرایب شتاب زلزله تعیین شده است. در این حالت راستای بحرانی ضریب شتاب زلزله نه فقط بر اساس ماکزیم‌سازی نیروی محرک وارد بر دیوار، بلکه به منظور حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری نیز تعیین می‌شوند. در تعیین شرایط بحرانی گوه‌های گسیختگی از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده و نتایج عددی به دست آمده به منظور تعیین اعتبار پاسخ‌های تحلیلی، با نتایج دیگر روش‌ها مقایسه شده است.

**واژگان کلیدی:** دیوار حائل، روش‌های حدی، ضرایب لرزه‌ای، ضرایب اطمینان پایداری، الگوریتم ژنتیک.

## تحلیل شبه استاتیکی پایداری دیوارهای حائل به روش مرز بالا

### اسداله رنجبر کرکانکی

دانشجوی دکتری تخصصی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### نوید گنجیان (نویسنده مسئول)

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، n.ganjian@srbiau.ac.ir

### فرج اله عسکری

دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### ۱- مقدمه

مدفون پایه بر روی پایداری دیوارها پرداخته‌اند اما در تمام این بررسی‌ها، دیوارها از نوع بدون وزن (مدل ورق) در نظر گرفته شده‌اند [۱-۴]. با توجه به تأثیر گذاری هم‌زمان وزن و عمق مدفون دیوارها بر روی ضرایب اطمینان پایداری، این‌گونه فرضیات باعث ایجاد خطا در بررسی پایداری دیوارها، به خصوص در حالت لرزه‌ای می‌شود. در سال ۲۰۱۰ لی و همکاران [۵] به روش مرز بالای تحلیل حدی با در نظر گرفتن یک گوه گسیختگی در پشت دیوار وزنی، پایداری دیوار را در مقابل لغزش بررسی نمودند. همچنین در سال (۲۰۱۵) کلوکیناس و همکاران [۶] با استفاده از روش تعادل حدی و آزمایش میز لرزان به تحلیل پاسخ لرزه‌ای و پایداری دیوار حائل طره‌ای پرداختند.

در حالت طراحی لرزه‌ای دیوارهای حائل طره‌ای، جهت تعیین نیروی محرک و مقاوم وارد بر دیوار از روش مونونوبه-اکابه استفاده می‌شود [۷-۹]. در این روش که توسعه تئوری

دیوارهای حائل طره‌ای زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که دیوارهای وزنی غیر اقتصادی باشند. در مناطق لرزه‌خیز استفاده از دیوارهای حائل طره‌ای با توجه به عملکرد مناسب‌تر این دیوارها نسبت به دیوارهای وزنی ارجحیت دارد. بررسی پایداری و تعیین نیروی محرک وارد بر دیوارهای حائل، یکی از بحث‌های کلاسیک در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. محققین از روش‌های مختلفی برای بررسی پایداری و بهینه‌سازی دیوارهای حائل استفاده نموده‌اند. در تمام این روش‌ها، برای تعیین نیروی محرک و مقاوم وارد بر دیوار از روش‌های تعادل حدی استفاده می‌شود. در مسائل مربوط به دیوارهای حائل، هدف از تعیین نیروی محرک و مقاوم وارد بر دیوارها، بررسی پایداری داخلی و خارجی می‌باشد. در اغلب کارهای انجام شده برای بررسی پایداری دیوارهای حائل، از فشار مقاوم خاک جلوی دیوار صرف نظر شده است. محققین دیگری به بررسی تأثیر عمق

تحلیل حدی بوده است [۸، ۱۴]. در روش مرز بالا، مسائل با لحاظ کردن شرایط سینماتیکی حل می‌شوند. در این روش با در نظر گرفتن یک میدان سرعت فرضی و مساوی قرار دادن نمو کار نیروهای داخلی و خارجی، جواب مسائل حدی (همچون: نیروهای وارد بر دیوارهای حائل، ظرفیت باربری پی‌ها، پایداری شیب‌ها و ...) محاسبه می‌شود. هنگام تعیین نیروهای لرزه‌ای وارد بر دیوارهای حائل در روش‌های تحلیل حدی (مرز بالا) و تعادل حدی، به عنوان یک قانون کلی همیشه بایستی در بدو امر، به جستجوی مکانیسم گسیختگی بحرانی پرداخت. در این راستا می‌توان شکل سطح گسیختگی را به صورت خطی یا دایره‌ای و مکانیسم گسیختگی را از نوع انتقالی، دورانی و یا گسیختگی‌های پیچیده‌ای که تمامی این فرآیندها را در بردارد، در نظر گرفت. در تحلیل دیوارهای حائل و بررسی پایداری به روش حد بالا، نیروهای وارد بر دیوار وابستگی زیادی به مکانیسم گسیختگی انتخابی دارند [۱۵].

در تحقیق حاضر به تعیین شکل گوه‌های گسیختگی هم‌زمان با تعیین راستای بحرانی ضرایب لرزه‌ای شبه استاتیکی دیوارهای حائل پرداخته شده است. در تعیین شرایط بحرانی گوه‌های گسیختگی از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده و نتایج عددی به دست آمده به منظور تعیین اعتبار پاسخ‌های تحلیلی، با نتایج دیگر روش‌ها مقایسه شده است.

## ۲- فرمولاسیون مورد استفاده

مسائل اساسی مکانیک خاک به دلیل نحوه توسعه علم مکانیک جامدات و همچنین سهولت کاربرد، غالباً در دو شرایط کاملاً متمایز بررسی و به دو گروه جدا از هم تقسیم می‌شوند. این دو گروه عبارتند از:

الف) پایداری (در حالت حدی نهایی).

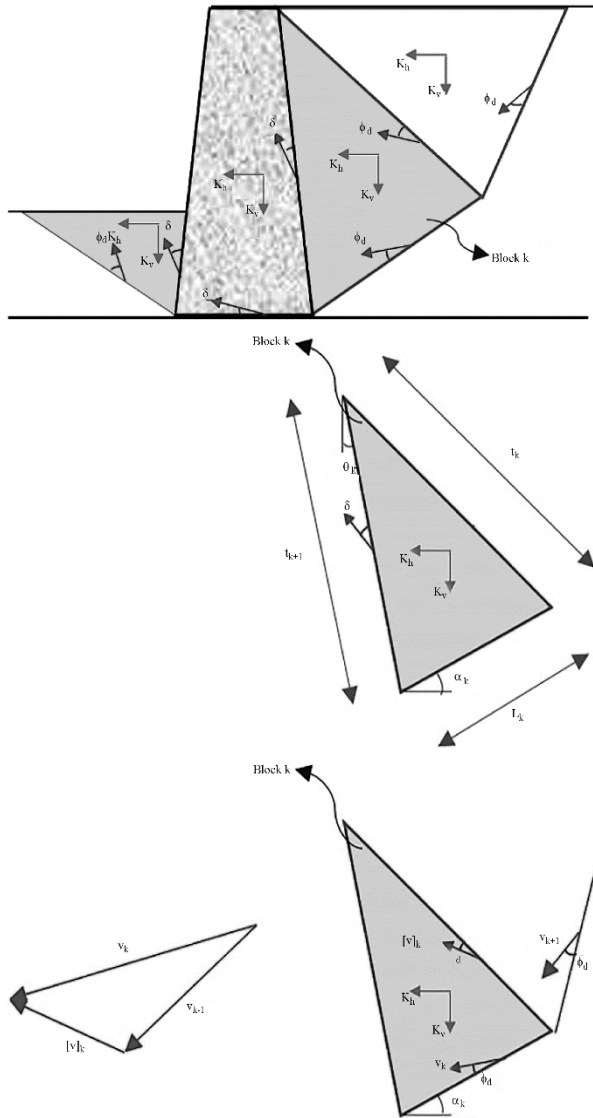
ب) تغییر شکل‌ها (در شرایط بهره‌برداری).

در مسائل، پایداری وضعیت خاک در لحظه گسیختگی بررسی می‌شود. تعیین نیروی رانش وارد بر دیوارهای حائل، ظرفیت باربری پی‌ها و بررسی پایداری شیروانی‌ها در زمره

کولمب است نیروی محرک وارد بر دیوار به روش شبه‌استاتیکی محاسبه شده و امتداد نیروی محرک وارد بر دیوار به دلیل وجود پاشنه در این نوع دیوار، با فرض عبور صفحه‌ای عمودی که از انتهای پاشنه دیوار عبور می‌کند تعیین می‌شود. دی‌سانتالو و اونجلیستا [۱۰] در سال ۲۰۱۱ نشان دادند با تغییر راستای این صفحه با امتداد قائم مقدار نیروی محرک وارد بر دیوار تغییر خواهد نمود؛ بنابراین هم‌زمان با ماکزیمم‌سازی نیرو می‌بایست امتداد صفحه گذرنده از پشت پاشنه دیوار (در واقع امتداد نیروی وارد بر دیوار) نیز بهینه‌سازی شود تا بحرانی‌ترین حالت را برای پایداری دیوار ایجاد نماید. در تمامی تحقیقات مذکور، تعیین گوه‌های گسیختگی بحرانی بر اساس ماکزیمم‌سازی نیروی محرک در شرایط زلزله انجام شده است؛ اما با توجه به اینکه در طراحی دیوارهای حائل هدف از محاسبه نیروی محرک و مقاوم وارد بر دیوارها، بررسی پایداری داخلی شامل کنترل: ضرایب اطمینان لغزش، واژگونی و ظرفیت باربری دیوار و بررسی پایداری خارجی شامل کنترل: خمش، برش و ... در بدنه دیوار می‌باشد، در تحقیق حاضر تعیین گوه‌های گسیختگی بحرانی بر اساس حداقل‌سازی ضرایب اطمینان پایداری به روش مرز بالای تحلیل حدی و ماکزیمم‌سازی نیرو انجام شده است.

فین [۱۱] در سال ۱۹۶۷ پیشنهاد نمود که قابلیت اطمینان به روش تحلیل حدی، با در نظر گرفتن سطح لغزش طبیعی مشاهده شده در مدل‌های آزمایشگاهی می‌تواند افزایش یابد. عموماً تفاوت مکانیسم گسیختگی‌ها در بحث دیوارهای حائل، وابسته به انواع متفاوت حرکت دیوار می‌باشد. این بحث به روشنی توسط مشاهدات تجربی جیمز و برامزبی [۱۲] برای فشار محرک و مقاوم بررسی شده است. چن [۱۳] نیروهای وارد بر دیوارهای حائل در حالت استاتیکی و لرزه‌ای را به روش حد بالا محاسبه و نتایج تحقیق خود را با تئوری‌های موجود مقایسه نمود. مکانیسم گسیختگی استفاده شده توسط چن با مشاهدات جیمز و برامزبی در هر دو حالت محرک و مقاوم تطبیق داده شده است. اغلب روش‌های تحلیلی استفاده شده برای تعیین نیروی محرک وارد بر دیوارهای حائل بر پایه روش تعادل حدی یا روش مرز بالای

مکانیسم گسیختگی متشکل از چهار بلوک در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): نمایش نمونه‌ای از مکانیسم گسیختگی فرضی، بردارهای سرعت و پارامترهای مورد استفاده در روابط.

کاربرد قضیه مرز بالا نیازمند محاسبه نمو کار نیروهای داخلی و خارجی است. نمو کار نیروهای داخلی (E) و نمو کار نیروهای خارجی شامل کار ناشی از وزن توده خاک ( $W_g$ ) می‌باشند. کار نیروهای داخلی از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$E = C_d \cdot \cos(\phi_d) \cdot \sum_{k=1}^n (L_k \cdot V_k + t_k \cdot [V]_k) \quad (1)$$

در این رابطه  $L_k$  طول خط بر روی گوه گسیختگی در تماس با

این گونه مسائل هستند. در این گروه از مسائل، رفتار خاک عمدتاً به صورت پلاستیک کامل در نظر گرفته می‌شود و ارزیابی تغییر شکل‌ها مد نظر نیست. از سوی دیگر در مسائل گروه دوم وضعیت تنش‌ها و تغییر شکل‌های توده خاک در شرایط بهره‌برداری تعیین می‌گردد. حل کامل مسائل پایداری در مکانیک خاک غالباً نیازمند در نظر گرفتن هر دو رفتار و انتقال از حالت ارتجاعی به خمیری است. به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد این گونه راه‌حل‌ها و با توجه به اینکه در بسیاری از مسائل مکانیک خاک تعیین بار حدی مورد نظر است، روش‌هایی که بتوان با آنها بارهای حدی را بدون نیاز به حل کامل مسئله به دست آورد همواره مورد توجه مهندسان و محققان بوده است. این گونه روش‌ها به روش‌های حدی موسوم‌اند و در پاسخ به اساسی‌ترین مسائل پایداری در علم مکانیک خاک گسترش فراوانی داشته‌اند. به‌طور کلی، روش‌های حدی را می‌توان به سه گروه: تعادل حدی، خطوط مشخصه و تحلیل حدی تقسیم نمود. روش‌های حدی روش‌هایی تقریبی جهت حل مسائل مقدار مرزی می‌باشند. در میان روش‌های حدی، روش تحلیل حدی به دلیل اینکه جایگاه و دقت پاسخ‌های حاصل از آن مشخص است، از اهمیت بیشتری برخوردار است. استفاده از روش تحلیل حدی در مسائل مهندسی ژئوتکنیک به حدود ۸۰ سال پیش برمی‌گردد. فرضیات برقراری رفتار صلب-پلاستیک مصالح، اصل کار خمیری حداکثر (اصل هیل) و برقراری قانون نرمالینه یا قانون جریان وابسته، در اثبات روش مرز بالا و پائین مورد استفاده قرار گرفته‌اند که اعتبار نسبی آنها برای حل مسائل پایداری در محیط‌های خاکی توسط محققان مختلف به اثبات رسیده است [۱۶]. در تحقیق حاضر از روش مرز بالای روش تحلیل حدی برای بررسی پایداری دیوارهای حائل استفاده شده است. نمونه‌ای از مکانیسم مورد استفاده برای تعیین ضریب اطمینان لغزش دیوارهای حائل طره‌ای در حالت لرزه‌ای به روش مرز بالا در شکل (۱) نشان داده شده است. این مکانیسم متشکل از چندین بلوک با وجوه مساوی است که بلوک‌ها صرفاً دارای حرکت انتقالی بوده و تعداد آنها را می‌توان تغییر داد. در این قسمت برای توضیح درباره روابط مورد استفاده در روش مرز بالا،

معادله مقدار ضریب اطمینان از رابطه (۴) به روش سعی و خطا محاسبه می‌گردد:

$$F_s = \frac{C_d \cdot \cos \phi_d \cdot \sum_{k=1}^n \{L_k \cdot V_k + t_k \cdot [V]_k\}}{\sum_{k=1}^n [G_k (1 + k_v + k_h \cdot \cot(\alpha_k - \phi_d)) \cdot v_k \cdot \sin(\alpha_k - \phi_d)]} \quad (4)$$

برای بهینه‌سازی گوه‌های گسیختگی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک روشی جهت بهینه‌سازی است که با الهام از اصل بقای شایسته‌ترین در موجودات زنده عمل می‌کند. در تحقیق حاضر پارامترهای ورودی ژنتیک به صورت زیر انتخاب شده‌اند:

$$P_{\text{cross}} = 0.7, P_{\text{mutation}} = 0.05, \text{Max}_{\text{gen}} = 700, N_{\text{pop}} = 2000$$

که  $N_{\text{pop}}$  تعداد جمعیت،  $\text{Max}_{\text{gen}}$  حداکثر تعداد نسل‌ها،  $P_{\text{cross}}$  احتمال انجام ادغام،  $P_{\text{mutation}}$  احتمال انجام جهش می‌باشند.

### ۳- مکانیسم‌های گسیختگی پیشنهادی

۳-۱- تعیین ضرایب اطمینان پایداری لغزش و گسیختگی برشی عمیق مکانیسم گسیختگی در نظر گرفته شده برای تعیین ضریب اطمینان لغزش در حالت لرزه‌ای به روش مرز بالا مطابق با شکل (۲) می‌باشد.

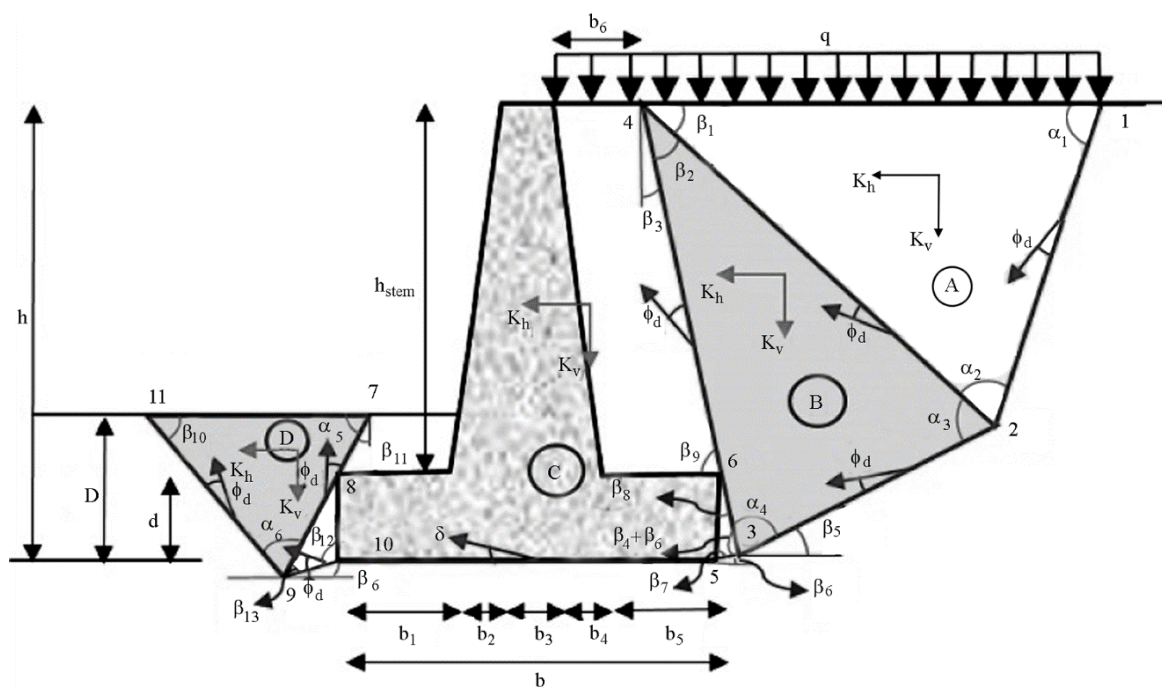
محیط پیرامونی،  $t_k$  طول خط ناپوستگی بین بلوک  $k$  و  $k-1$  و  $V_k$  سرعت مطلق بلوک  $k$ ،  $[V]_k$  سرعت نسبی بین بلوک‌های  $k$  و  $k-1$  و  $C_d$  و  $\phi_d$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش یافته خاک می‌باشند که از رابطه (۲) محاسبه می‌شوند. زاویه بین خطوط گسیختگی و بردارهای سرعت برابر با  $\phi_d$  است که در محل تماس این خطوط گسیختگی با سطوح بتنی این مقدار برابر با  $\phi = \delta_d$  در نظر گرفته شده است.

$$F_s = \frac{\tan(\phi)}{\tan(\phi_d)} = \frac{C}{C_d} \quad (2)$$

همچنین کار خارجی از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$W_g = \sum_{k=1}^n \{G_k [1 + k_v + k_h \cdot \cot(\alpha_k - \phi_d)] \cdot V_k \cdot \sin(\alpha_k - \phi_d)\} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $G_k$  وزن بلوک و  $\alpha_k$  زاویه بلوک  $k$  با افق و  $k_v, k_h$  به ترتیب ضرایب شبه استاتیکی نیروی زلزله در راستای افقی و قائم هستند. با توجه به قضیه مرز بالا، از مساوی قرار دادن کار نیروهای داخلی و خارجی و جایگذاری  $C_d$  و  $\phi_d$  بر حسب  $C$  و  $\phi$  از  $F_s$  رابطه‌ای که از این تساوی به دست می‌آید مقدار ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. در این رابطه  $C$  و  $\phi$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشند. با توجه به وجود  $F_s$  در دو طرف



شکل (۲): مکانیسم گسیختگی فرضی در نظر گرفته شده برای تعیین حداقل ضریب اطمینان لغزش.

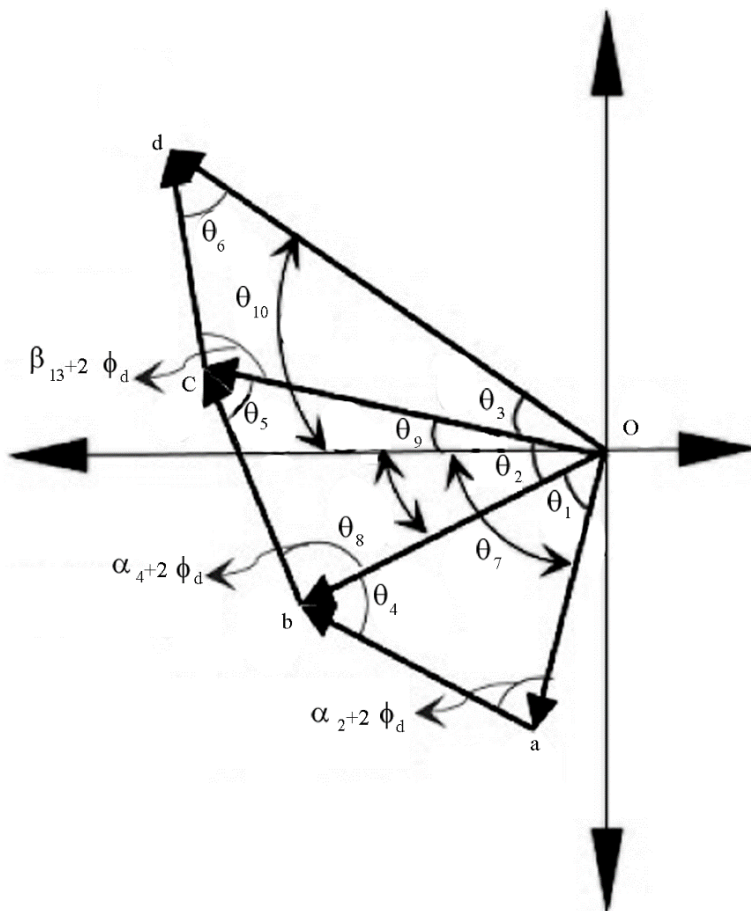
$$\begin{aligned}
 W_g = & \frac{1}{2} \gamma \{ (L_{12} L_{14} \sin \alpha_1 \bar{o} \bar{a} \sin \theta_7) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_7) + \\
 & (L_{23} L_{24} \sin \alpha_3 \bar{o} \bar{b} \sin \theta_8) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_8) + \\
 & L_{711} L_{911} \sin \beta_{10} \bar{o} \bar{d} \sin \theta_{10} \cdot (-1 - k_v + k_h \cdot \cot \theta_{10}) \\
 & + (\bar{c} \sin \theta_9) \cdot (-1 - k_v + k_h \cdot \cot \theta_9) \} \\
 & \left[ \frac{\gamma_c}{\gamma} (2b_{base} \cdot d + (b_2 + 2b_3 + b_4) h_{stem}) \right. \\
 & \left. + (b_5 + b_6) h_{stem} + L_{35} L_{56} \sin \beta_7 + 2b_1 (D - d) + \right. \\
 & \left. L_{810} L_{910} \sin \beta_{12} \right] + q (L_{14} \bar{o} \bar{a} \sin \theta_7 - b_6 \bar{c} \sin \theta_9)
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$E = c_d \cos \phi_d \quad (6)$$

$$\left[ \begin{array}{l} L_{12} \bar{o} \bar{a} + L_{23} \bar{o} \bar{b} + (L_{35} + L_{910}) \bar{o} \bar{c} + \\ L_{911} \bar{o} \bar{d} + L_{24} \bar{a} \bar{b} + L_{34} \bar{b} \bar{c} + L_{79} \bar{c} \bar{d} + \\ L_{510} \bar{o} \bar{c} \frac{c_d \cos \delta}{c_d \cos \phi_d} \end{array} \right]$$

در روابط ارائه شده  $L$  طول خطوط گسیختگی،  $\gamma$  وزن مخصوص خاک،  $\gamma_c$  وزن مخصوص بتن،  $\bar{o} \bar{a}$ ،  $\bar{o} \bar{b}$  و ... بردارهای سرعت گوه‌های گسیختگی مطابق شکل (۳)،  $q$  سربار گسترده وارد بر بالای خاک ریز پشت دیوار می‌باشند.

بر این اساس، مکانیسم گسیختگی از سه بلوک مثلثی و یک بلوک چند وجهی  $C$  تشکیل شده است. بلوک  $C$  شامل وزن قسمت بتنی دیوار و وزن خاک پشت و جلوی دیوار می‌باشد که برای تشکیل مکانیسم صحیح گوه‌های گسیختگی، بردار سرعت در قسمت پایین بلوک  $C$  می‌بایست زاویه  $\delta$  با سطح افق بسازد. با توجه به اینکه زاویه اصطکاک بین خاک و بتن ( $\delta$ ) با زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته خاک ( $\phi_d$ ) متفاوت است برای تشکیل مکانیسم صحیح، می‌بایست سطح گسیختگی در قسمت پایه بلافاصله در جلو و پشت دیوار دچار شکستگی به اندازه  $(\phi_d - \delta)$  نسبت به افق شود. در این مکانیسم نمو کار نیروهای داخلی ( $E$ ) و نمو کار نیروهای خارجی ( $W_g$ ) از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آیند:



$$\begin{aligned}
 \theta_7 &= \alpha_1 - \phi_d \\
 \theta_8 &= \beta_5 - \phi_d \\
 \theta_9 &= \delta \\
 \theta_{10} &= \beta_{10} + \phi_d \\
 \theta_1 &= \theta_7 - \theta_8 \\
 \theta_2 &= \theta_8 - \theta_9 \\
 \theta_3 &= \theta_{10} - \theta_9 \\
 \theta_4 &= \pi - \theta_1 - \alpha_2 - 2\phi_d \\
 \theta_5 &= \pi - \theta_2 - \alpha_4 - 2\phi_d \\
 \theta_6 &= \pi - \theta_3 - \beta_{13} - 2\phi_d
 \end{aligned}$$

شکل (۳): بردارهای سرعت ترسیم شده با توجه به مکانیسم گسیختگی فرضی در نظر گرفته شده.

ضریب اطمینان لغزش تعیین نمود. در این حالت در شکل (۲) زوایای معلوم با علامت  $(\alpha)$ ، زوایای مجهول با علامت  $(\beta)$ ، گره‌ها با شماره ۱ تا ۱۱ و هر بلوک گسیختگی با حرف لاتین نمایش داده شده است.

در روش مرز بالا با مساوی قرار دادن نمو کار خارجی و داخلی و با توجه به بردارهای سرعت ترسیمی می‌توان مقدار ضریب اطمینان را به روش سعی و خطا بر اساس زوایای متغیر ورودی  $(\alpha)$ ها، محاسبه نمود. برای تعیین حالت بحرانی سطوح گسیختگی (حداقل مقدار ضریب اطمینان لغزش)، روابط مرز بالا و روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب کد نویسی شده است. در این حالت بهینه‌سازی زوایای گسیختگی باید به گونه‌ای انجام شود که مقدار ضریب اطمینان لغزش حداقل گردد. همچنین مکانیسم گسیختگی در نظر گرفته شده برای تعیین ضریب اطمینان پایداری گسیختگی برشی عمیق در حالت لرزه‌ای به روش مرز بالا مطابق با شکل (۴) می‌باشد. مطابق شکل (۴) مکانیسم گسیختگی از چهار بلوک مثلثی و یک بلوک چند وجهی C تشکیل شده است. بلوک C شامل وزن

مقادیر  $C_d$  و  $\phi_d$  از معادلات (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند:

$$\phi_d = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \phi}{F_s} \right) \quad (7)$$

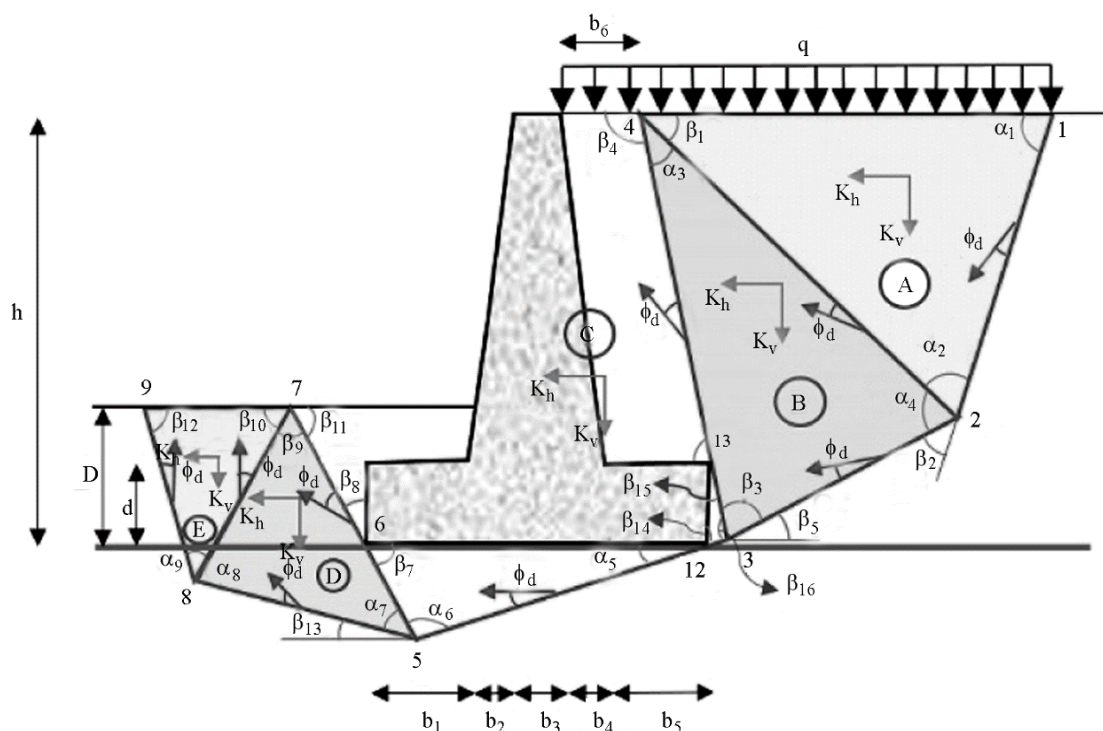
$$C_d = \left( \frac{c}{F_s} \right) \quad (8)$$

$\phi_d$  و  $C_d$  به ترتیب زاویه اصطکاک و چسبندگی کاهش یافته خاک و  $F_s$  ضریب اطمینان در مقابل لغزش دیوار می‌باشند. همچنین مقادیر چسبندگی بین بتن و خاک از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند:

$$\delta = k \cdot \phi_d \quad (9)$$

$$c_\delta = k \cdot c_d \quad (10)$$

در این روابط  $\delta$  و  $c_\delta$  به ترتیب زاویه اصطکاک و چسبندگی کاهش یافته بین بتن و خاک و  $k$  ضریب ثابت بین ۰ تا ۱ می‌باشد. روابط نوشته شده در روش مرز بالا نشان می‌دهند در مکانیسم فرضی در نظر گرفته شده، با مشخص نمودن شش متغیر می‌توان سایر زوایا و پارامترهای مجهول را با هدف حداقل سازی



شکل (۴): مکانیسم گسیختگی در نظر گرفته شده برای تعیین حداقل ضریب اطمینان پایداری گسیختگی برشی عمیق.

سایر زوایا و پارامترهای مجهول را با هدف حداقل سازی ضریب اطمینان پایداری گسیختگی برشی عمیق تعیین نمود. بردارهای سرعت در نظر گرفته شده مطابق شکل (۵) قابل تعیین می‌باشند. با مساوی قرار دادن نمو کار خارجی و داخلی و با توجه به بردارهای سرعت ترسیمی می‌توان مقدار ضریب اطمینان را به روش سعی و خطا به گونه‌ای تعیین نمود که مقدار ضریب اطمینان پایداری گسیختگی برشی عمیق حداقل گردد. برای حداقل سازی مقادیر ضرایب اطمینان از کدنویسی روابط در محیط نرم افزار متلب و روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

### ۳-۲- مکانیسم گسیختگی پیشنهادی برای تعیین نیروی محرک لزه‌ای وارد بر دیوار حائل

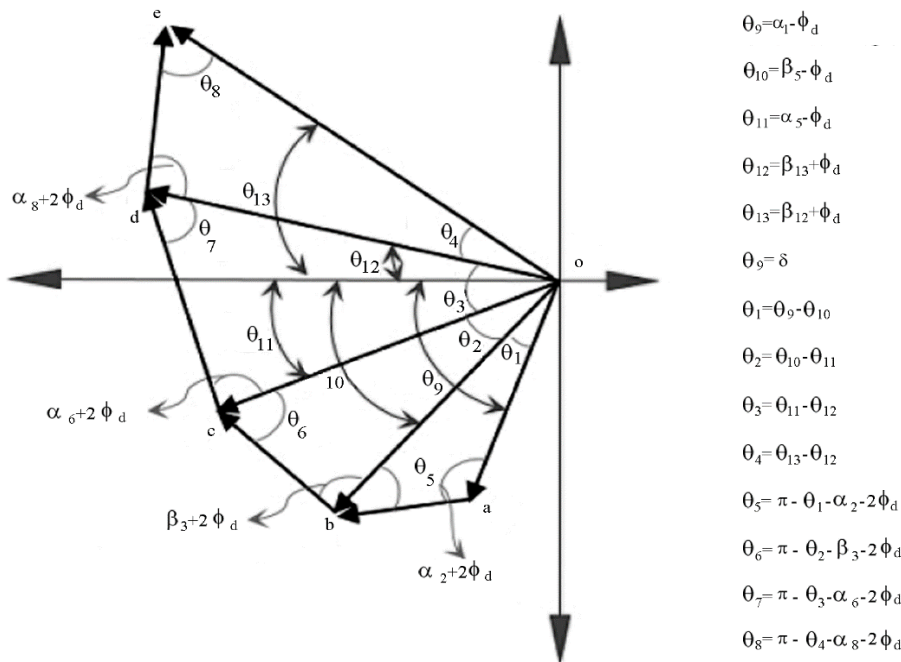
برای تعیین ضریب اطمینان واژگونی و همچنین کنترل پایداری داخلی دیوار حائل (کنترل مقاومت سازه‌ای) نیاز به محاسبه نیروی محرک وارد بر دیوار می‌باشد. مکانیسم گسیختگی در نظر گرفته شده برای تعیین نیروی محرک وارد بر دیوار حائل به روش مرز بالا مطابق با شکل (۶) می‌باشد.

قسمت بتنی دیوار و وزن خاک پشت، زیر پایه و جلوی دیوار می‌باشد. در این مکانیسم، نمو کار نیروهای داخلی (E) و نمو کار نیروهای خارجی ( $W_g$ ) می‌باشند و از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند:

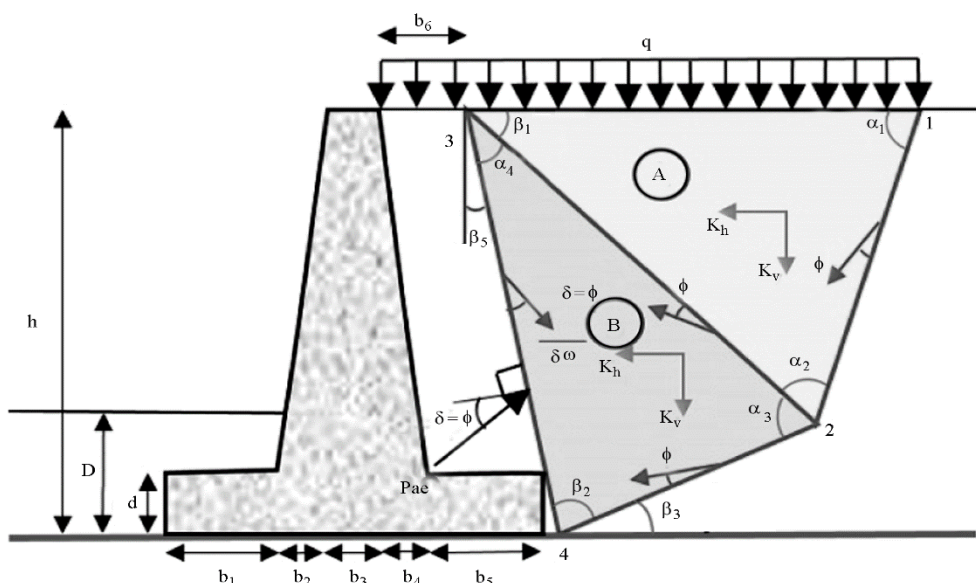
$$W_g = \frac{1}{2} \gamma \{ (L_{12} L_{24} \sin \alpha_2 \cdot \bar{o} \bar{a} \cdot \sin \theta_9) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_9) + (L_{23} L_{24} \sin \alpha_4 \bar{o} \bar{b} \sin \theta_{10}) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_{10}) + (\bar{o} \bar{c} \sin \theta_{11}) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_{11}) + [L_{512} L_{56} \sin \alpha_6 + L_{67} D \cdot \sin \beta_8 + 2b_{base} \cdot d \frac{\gamma_c}{\gamma} + (b_2 + 2b_3 + b_4) h_{stem} \frac{\gamma_c}{\gamma} + 2(D - d)b_1 + (b_5 + b_6) h_{stem} + L_{312} L_{313} \sin \beta_{16}] + (\bar{o} \bar{d} \sin \theta_{12} L_{57} L_{58} \sin \alpha_7) \cdot (-1 - k_v + k_h \cdot \cot \theta_{12}) - (\bar{o} \bar{e} \sin \theta_{13} L_{78} L_{89} \sin \alpha_9) \cdot (-1 - k_v + k_h \cdot \cot \theta_9) \} + q(L_{14} \bar{o} \bar{a} \sin \theta_9 + b_6 \bar{o} \bar{c} \sin \theta_{11}) \quad (11)$$

$$E = c_d \cos \phi_d [L_{12} \bar{o} \bar{a} + L_{23} \bar{o} \bar{b} + (L_{312} + L_{512}) \bar{o} \bar{c} + L_{58} \bar{o} \bar{d} + L_{89} \bar{o} \bar{e} + L_{24} \bar{a} \bar{b} + (L_{413} + L_{313}) \bar{b} \bar{c} + L_{57} \bar{c} \bar{d} + L_{78} \bar{d} \bar{e}] \quad (12)$$

روابط نوشته شده در روش مرز بالا نشان می‌دهد در مکانیسم فرضی در نظر گرفته شده، با مشخص نمودن هشت متغیر می‌توان

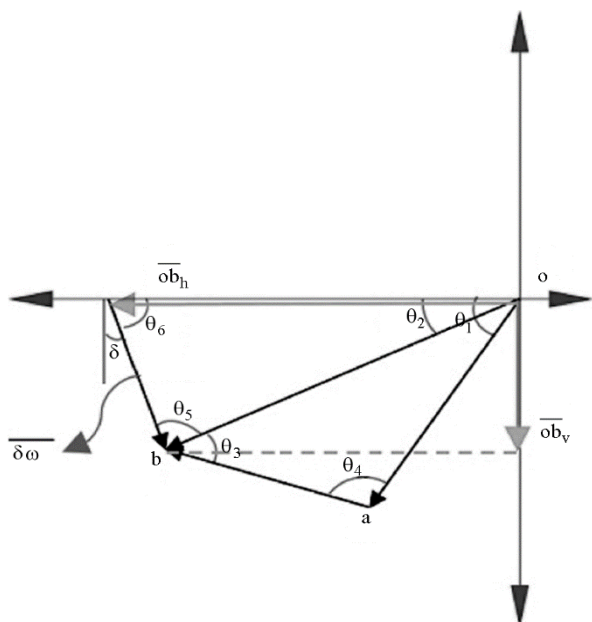


شکل (۵): بردارهای سرعت ترسیم شده با توجه به مکانیسم گسیختگی فرضی در نظر گرفته شده.



شکل (۶): مکانیسم گسیختگی فرضی در نظر گرفته شده برای تعیین نیروی محرک وارد بر دیوار حائل.

روابط نشان می‌دهند در مکانیسم فرضی در نظر گرفته شده، با مشخص نمودن چهار متغیر ورودی ( $\alpha$ ها) می‌توان نیروی وارد بر دیوار را با هدف حداکثرسازی نیروی محرک لرزه‌ای وارد بر دیوار تعیین نمود. بردارهای سرعت در نظر گرفته شده مطابق شکل (۷) تعیین می‌شوند.



$\theta_1 = \alpha_1 - \phi$	$\theta_2 = \beta_3 - \phi$	$\theta_4 = 2\phi + \alpha_2$
$\theta_3 = \pi - \theta_4 - \theta_1 + \theta_2$	$\theta_6 = \pi/2 - \delta$	$\theta_5 = \pi - \theta_6 - \theta_2$

شکل (۷): بردارهای سرعت ترسیم شده با توجه به مکانیسم گسیختگی فرضی در نظر گرفته شده.

در شکل (۶)، مکانیسم گسیختگی از دو بلوک مثالی A, B و قسمت بتنی دیوار تشکیل شده است. در این مکانیسم برای تعیین کار داخلی بر روی گوه گسیختگی در محل تماس با دیوار (خط گسیختگی ۳-۴) نیاز به تعیین بردار سرعت نسبی بلوک B و دیوار می‌باشد؛ بنابراین فرض شده است که بردار سرعت دیوار در قسمت پایه زاویه  $\delta$  نسبت به افق بسازد. در مکانیسم پیشنهادی مقدار نیروی محرک وارد بر دیوار با مساوی قرار دادن نمو کار نیروهای داخلی و خارجی از رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$P_{ae} = \frac{W_g - E}{\cos(\beta_5 + \delta) \cdot [\delta_v \tan(\beta_5 + \delta) + \delta_h]} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، E نمو کار نیروهای داخلی و  $W_g$  نمو کار نیروهای خارجی ناشی از وزن گوه‌های گسیختگی می‌باشند که از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند:

$$W_g = \frac{1}{2} \gamma \bar{o} a \sin \theta_1 \left[ \frac{2}{\gamma} q L_{13} + (L_{12} L_{23} \sin \alpha_2) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_1) + \left( \frac{\bar{o} b \sin \theta_2}{\bar{o} a \sin \theta_1} L_{23} L_{24} \sin \alpha_3 \right) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_2) \right] \quad (14)$$

$$E = c \cos \phi \left( L_{12} \bar{o} a + L_{24} \bar{o} b + L_{23} \bar{a} b + L_{34} \bar{\delta} \frac{c \delta \cos \delta}{c \cos \phi} \right) \quad (15)$$



در روش مرز بالا مطابق با مکانیسم ترسیمی، می توان مقدار ماکزیمم نیروی محرک لرزه ای وارد بر دیوار حائل را بر اساس زوایای متغیر ورودی ( $\alpha$ ها)، محاسبه نمود. در جدول (۱) تغییرات مقادیر ماکزیمم ضریب نیروی محرک وارد بر دیوار ( $k_{ae} = \frac{P_{ae}}{1/2\gamma h^2}$ ) با توجه به مکانیسم گسیختگی فرضی، ارائه شده است.

مطابق با شکل (۶) زاویه گوه گسیختگی B با امتداد افق در پشت دیوار برابر با  $\beta_1 + \alpha_4$  می باشد. در جدول (۱) تغییرات ضریب نیروی محرک وارد بر دیوار برای حالتی که زاویه ( $\beta_1 + \alpha_4$ ) با امتداد افق کمتر و یا بیشتر از  $90^\circ$  درجه می باشد ارائه شده است. نتایج نشان می دهد با کاهش زاویه  $\beta_1 + \alpha_4$  نسبت به افق، مقدار ضریب نیروی محرک افزایش می یابد و نتایج در جدول (۱) با نتایج حالت خاص که این زاویه برابر با  $90^\circ$  درجه می باشد مقایسه شده است. ملاحظه می شود گوه گسیختگی پشت دیوار به منظور ماکزیمم سازی نیرو، تمایل به ساخت زاویه ای کوچک تر از  $90^\circ$  درجه

#### ۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج سایر محققان

روش های اجزای محدود و تعادل حدی از جمله روش های معمول برای کنترل ضرایب اطمینان پایداری لغزش و ظرفیت باربری دیوارهای حائل می باشند. در تحقیق حاضر نتایج به دست آمده از روش مرز بالای تحلیل حدی با روش های اجزای محدود و تعادل حدی مقایسه و نتایج آن در جدول های (۲) و (۳) ارائه شده است. در مدلسازی اجزای محدود مشخصات مصالح و مدل های رفتاری استفاده شده در تحلیل ها مطابق جدول (۴) می باشد. ابعاد هندسی در نظر گرفته شده برای دیوار با ارتفاع ۶ متر به صورت زیر است:

$$(b_1=2.5 \text{ m}, b_2=0.1 \text{ m}, b_3=0.3 \text{ m}, b_4=0.1 \text{ m}, b_5=2.5 \text{ m},$$

$$d=0.6 \text{ m}, D=1 \text{ m})$$

برای مش بندی مدل ها از المان های مثلثی ۱۵ گره ای استفاده

شده است.

جدول (۱): تغییرات مقادیر ضریب نیروی محرک وارد بر دیوار بر اساس مکانیسم گسیختگی فرضی.

$k_v=0, \delta=\phi, q=0, C=0$									پارامتر بهینه شده
$k_h=0.2$			$k_h=0/1$			$k_h=0$			
$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=20^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=20^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=20^\circ$	
۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۶۵	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۵۲	۰/۲۱	۰/۳۰	۰/۴۳	$K_a (\beta_1+\alpha_4=90^\circ)$
۰/۶۹	۰/۷۶	۰/۸۹	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۷۳	۰/۴۳	۰/۵۰	۰/۶۱	$K_a (\beta_1+\alpha_4=70^\circ)$
۰/۱۹	۰/۳۲	۰/۵۳	۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۴۰	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۳۱	$K_a (\beta_1+\alpha_4=110^\circ)$

جدول (۲): مقایسه مقادیر ضرایب اطمینان لغزش برای بررسی پایداری دیوار حائل در روش های مختلف.

$h=6\text{m}, D=1\text{m}, d=0.6\text{m}, b_1=2.5\text{m}, b_2=0.2\text{m}, b_3=0.3\text{m}, b_4=0.2\text{m}, b_5=2.5\text{m}, \gamma=18\text{KN/m}^3, \gamma_c=24\text{KN/m}^3$										پایداری لغزش
$k_h=0.1, k_v=0.5k_h, \delta=0.67\phi, C_\delta=0.67C$				$\delta=0.5\phi, C=0, k_v=0$						
$C=10\text{KPa}$		$C=5\text{KPa}$		$k_h=0.2$		$k_h=0.1$		$k_h=0$		
$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	
۲/۱۴۷	۱/۶۲۶	۱/۸۹۹	۱/۳۶۷	۱/۲۳۲	۰/۸۶۲	۱/۵۱۴	۱/۰۴۳	۱/۸۵۴	۱/۲۹۷	روش اجزای محدود
۲/۳۸۹	۱/۸۱۷	۲/۱۵۸	۱/۵۸۸	۱/۳۷۳	۰/۹۷۲	۱/۶۱۸	۱/۱۴۶	۱/۹۶۴	۱/۳۹۱	تعادل حدی (بیشاب)
۲/۵۸۷	۱/۹۶۸	۲/۳۴۵	۱/۷۲۶	۱/۵۶۵	۱/۱۰۵	۱/۷۴۶	۱/۲۳۷	۲/۰۵۶	۱/۴۶۰	تعادل حدی (مورگنسترن)
۲/۲۷۶	۱/۷۲۴	۲/۰۱۶	۱/۴۶۵	۱/۲۸۹	۰/۸۸۵	۱/۵۲۳	۱/۰۴۸	۱/۸۵۹	۱/۲۶۸	تحقیق حاضر

جدول (۳): مقایسه مقادیر ضرایب اطمینان پایداری گسیختگی برشی عمیق برای بررسی پایداری دیوار حائل در روش‌های مختلف.

h=6m, D=1m, d=0.6m, b <sub>1</sub> =2.5m, b <sub>2</sub> =0.2m, b <sub>3</sub> =0.3m, b <sub>4</sub> =0.2m, b <sub>5</sub> =2.5m, γ=18kN/m <sup>3</sup> , γ <sub>c</sub> =24kN/m <sup>3</sup>										پایداری گسیختگی عمیق
k <sub>n</sub> =0.1, k <sub>v</sub> =0.5k <sub>n</sub> , δ=0/67φ, C <sub>δ</sub> =0.67C				δ=0.5φ, C=0, k <sub>v</sub> =0						
C=10KPa		C=5KPa		k <sub>n</sub> =0.2		k <sub>n</sub> =0.1		k <sub>n</sub> =0		
φ=۴۰°	φ=۳۰°	φ=۴۰°	φ=۳۰°	φ=۴۰°	φ=۳۰°	φ=۴۰°	φ=۳۰°	φ=۴۰°	φ=۳۰°	
۲/۸۱۶	۲/۰۸۳	۲/۵۴۱	۱/۸۰۴	۱/۸۶۱	۱/۲۶۳	۲/۲۴۶	۱/۵۱۳	۲/۷۰۵	۱/۸۴۱	روش اجزای محدود
۲/۷۳۳	۲/۰۲۱	۲/۵۰۵	۱/۷۹۵	۲/۰۲۶	۱/۳۱۷	۲/۳۰۸	۱/۶۰۳	۲/۳۰۵	۱/۸۶۷	تعادل حدی (بیشاب)
۳/۴۶۴	۲/۵۳۱	۳/۲۳۷	۲/۲۹۶	۳/۰۹۲	۲/۱۳۲	۳/۰۸۱	۲/۱۳۰	۳/۱۵۱	۲/۱۸۵	تعادل حدی (مورگسترن)
۲/۷۹۹	۲/۰۷۱	۲/۵۷۴	۱/۸۴۲	۲/۰۳۳	۱/۴۵۹	۲/۳۵۷	۱/۶۰۹	۲/۷۳۹	۱/۸۸۳	تحقیق حاضر

جدول (۴): مشخصات مصالح و مدل رفتاری استفاده شده در مدلسازی نرم‌افزار اجزای محدود.

مدل رفتاری	مشخصات مصالح	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	زاویه اصطکاک (°)	چسبندگی (KPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون
موهر-کولمب	خاک ریز	۱۸	۳۰	۱۰	۳۰	۰/۳
الاستیک خطی	بتن دیوار	۲۴	-	-	۲۵۰۰۰	۰/۲

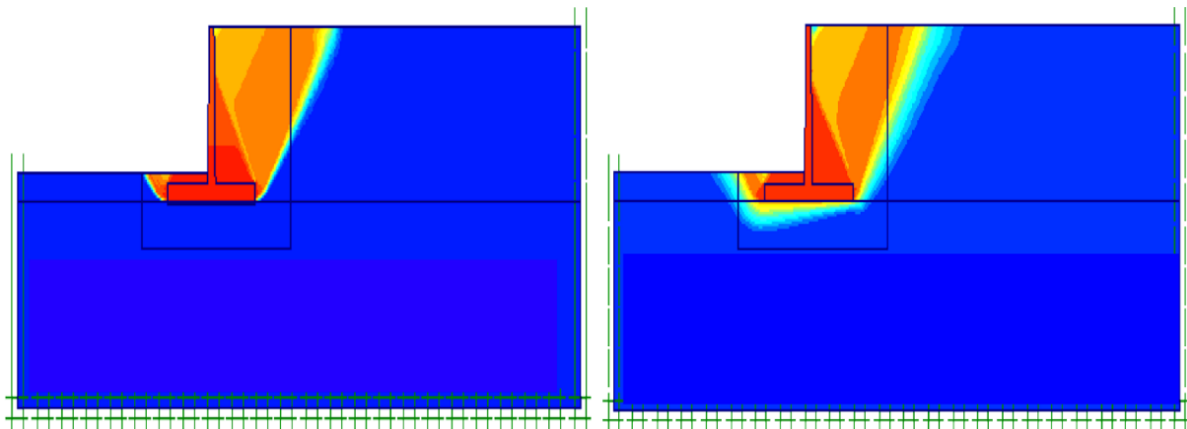
به‌دست آمده از روش اجزای محدود و روش بیشاب تطابق خوبی دارند. در شکل (۸) گوه‌های گسیختگی به‌دست آمده از روش‌های حد بالا و تحلیل اجزای محدود نشان داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که مکانیسم‌های گسیختگی پیشنهادی در تحقیق حاضر، با مکانیسم گسیختگی به‌دست آمده از تحلیل‌های اجزای محدود تطابق مناسبی دارند.

برای تعیین دقت مکانیسم گسیختگی پیشنهادی و اعتبارسنجی نتایج، مقادیر ضریب نیروی محرک لرزه‌ای به‌دست آمده در این تحقیق با سایر روش‌های مشهور در جدول (۵) مقایسه شده است. مقادیر نشان می‌دهد نتایج تحقیق حاضر کاملاً منطبق بر نتایج به‌دست آمده از روش‌های مونونوبه-اکابه [۸-۹] [۱۹۲۹] و روش تحلیل حدی چانگ و چن [۱۵] [۱۹۸۲] می‌باشد.

در سال ۲۰۱۵ کلوکیناس و همکاران [۶] به بررسی پاسخ لرزه‌ای دیوارهای حائل طره‌ای با استفاده از تست میز لرزان و روش تعادل حدی پرداختند. نتایج تحقیق حاضر با نتایج این تحقیق برای سه مدل ارائه شده با ابعاد نمونه آزمایشگاهی، در جدول (۶) مقایسه شده است.

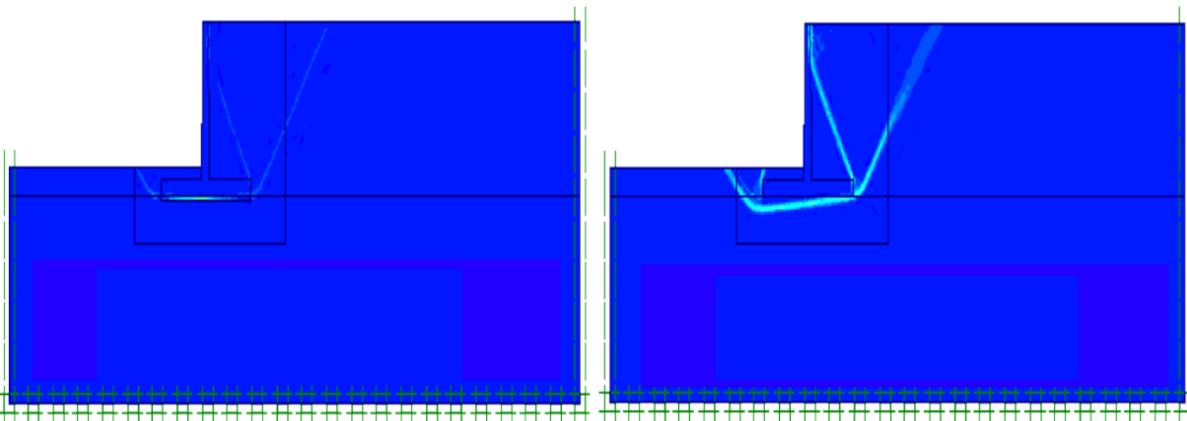
همچنین با توجه به اینکه در روش‌های مختلف تعادل حدی، می‌توان سطوح گسیختگی را دایره‌ای یا مسطح در نظر گرفت جهت انجام تحلیل‌ها، سطوح گسیختگی در روش‌های مورگسترن و پرایس [۱۷] و بیشاب [۱۸]، در دو حالت دایره‌ای و چند ضلعی در نظر گرفته شده است و از بین ضرایب اطمینان به‌دست آمده، حداقل مقادیر ضرایب اطمینان در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. در تحقیق حاضر همچنین مقادیر ضرایب اطمینان با استفاده از روش متداول تعادل حدی نیز محاسبه شده است. در این حالت، ضریب اطمینان لغزش به‌صورت نسبت مجموع نیروهای محرک به مجموع نیروهای مقاوم (روش متداول در طراحی دیوارهای حائل طره‌ای) و ضریب اطمینان پایداری ظرفیت باربری به‌صورت نسبت ظرفیت باربری به حداکثر تنش ماکزیمم زیر پایه دیوار تعریف شده است و برای محاسبه ظرفیت باربری، از روش مایر هوف [۱۹] استفاده شده است.

همان‌طور که در جدول‌های (۲) و (۳) ملاحظه می‌شود مقادیر ضرایب اطمینان به‌دست آمده در روش مرز بالا نسبت به روش تعادل حدی و روش مورگسترن کمتر می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد، مقادیر به‌دست آمده از این تحقیق با نتایج



(الف) جابه‌جایی کلی دیوار (مکانیسم گسیختگی عمیق)

(ب) جابه‌جایی کلی دیوار (مکانیسم گسیختگی لغزشی)



(پ) کرنش برشی (مکانیسم گسیختگی عمیق)

(ت) کرنش برشی (مکانیسم گسیختگی لغزشی)

شکل (۸): مکانیسم گسیختگی به دست آمده در نرم افزار اجزای محدود. جابه‌جایی کلی دیوار: (الف) گسیختگی برشی پایداری عمیق. (ب) گسیختگی پایداری لغزشی کرنش برشی کلی. کرنش برشی کلی: (پ) گسیختگی پایداری عمیق و (ت) گسیختگی برشی پایداری لغزشی. برای تعیین دقت مکانیسم گسیختگی پیشنهادی و اعتبارسنجی نتایج، مقادیر ضریب نیروی محرک لزه‌ای به دست آمده در این تحقیق با سایر روش‌های مشهور در جدول (۵) مقایسه شده است. مقادیر نشان می‌دهد نتایج تحقیق حاضر کاملاً منطبق بر نتایج به دست آمده از روش‌های مونونوبه - آکابه [۸-۱۹] (۱۹۲۹) و روش تحلیل حدی چانگ و چن [۱۵] (۱۹۸۲) می‌باشد.

جدول (۵): مقایسه مقادیر ضرایب نیروی محرک لزه‌ای وارد بر دیوار حائل در روش‌های مختلف

$k_v=0, \delta=\phi, C=0, k_i=0.1$		$k_v=0, \delta=\phi, C=0, \beta_1+\alpha_4=90^\circ$								روش‌های تحلیل
$\beta_1+\alpha_4=120^\circ$		$\beta_1+\alpha_4=75^\circ$		$k_i=0.2$		$k_i=0.1$		$k_i=0$		
$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	
۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۳۰	روش مونونوبه - آکابه
۰/۰۹	۰/۱۸	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۳۰	روش چانگ و چن
۰/۰۹	۰/۱۸	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۳۰	تحقیق حاضر

**جدول (۶): تعیین شتاب شبه‌استاتیکی بحرانی و تعیین ضرایب اطمینان پایداری لغزش و گسیختگی برشی عمیق.**

$h=600 \text{ mm}, \gamma=15/1 \text{ KN/m}^3, \gamma_f=15/1 \text{ KN/m}^3, \gamma_{AL}=27 \text{ KN/m}^3, \phi=33/5^\circ, \phi_f=42/5^\circ$												روش‌های تحلیل
<b>مدل ۳:</b> $b_1=b_2=b_4=0, b_3=30\text{mm}, b_5=250\text{mm}, d=30\text{mm}, \delta=28.5^\circ$				<b>مدل ۲:</b> $b_1=b_2=b_4=0, b_3=30\text{mm}, b_5=250\text{mm}, d=30\text{mm}, \delta=23.5^\circ$				<b>مدل ۱:</b> $b_1=70\text{mm}, b_2=b_4=0, b_3=30\text{mm}, b_5=300\text{mm}, d=30\text{mm}, \delta=23.5^\circ$				
FS <sub>SL</sub> a <sub>i</sub> =a <sub>BC</sub>	a <sub>i</sub> .BC	FS <sub>BC</sub> a <sub>i</sub> =a <sub>SL</sub>	a <sub>i</sub> .SL	FS <sub>SL</sub> a <sub>i</sub> =a <sub>BC</sub>	a <sub>i</sub> .BC	FS <sub>BC</sub> a <sub>i</sub> =a <sub>SL</sub>	a <sub>i</sub> .SL	FS <sub>SL</sub> a <sub>i</sub> =a <sub>BC</sub> (۴)	a <sub>i</sub> .BC (۳)	FS <sub>BC</sub> a <sub>i</sub> =a <sub>SL</sub> (۲)	a <sub>i</sub> .SL (۱)	
۱/۱۴۰	۰/۱۷۰g	-	۰/۲۳۰g	۰/۹۳۰	۰/۱۷۰g	-	۰/۱۴۰g	۰/۶۸۰	۰/۳۵۰g	-	۰/۱۸۰g	روش کلوکیناس
۱/۰۷۸	۰/۱۷۵g	۱/۲۲۹	۰/۲۱۹g	۰/۹۲۹	۰/۱۷۵g	۱/۴۰۲	۰/۱۲۷g	۰/۷۲۹	۰/۳۴۲g	۱/۷۶۹	۰/۱۶۶g	اجزای محدود
۱/۰۲۵	۰/۱۸۳g	۱/۴۳۵	۰/۲۲۵g	۰/۸۸۱	۰/۱۸۳g	۱/۵۲۱	۰/۱۳۱g	۰/۶۹۸	۰/۳۷g	۱/۷۵۴	۰/۱۶۹g	تحقیق حاضر

(۱): شتاب افقی بحرانی مربوط به مد لغزش.

(۲): ضریب اطمینان ظرفیت باربری مربوط به شتاب بحرانی لغزش.

(۳): شتاب افقی بحرانی مربوط به مد گسیختگی عمیق برشی.

(۴): ضریب اطمینان لغزش مربوط به شتاب بحرانی ظرفیت باربری.

گوه‌های گسیختگی (حالت لغزش، گسیختگی برشی عمیق و واژگونی دیوار)، مقدار و راستای این نیرو و ماکزیمم‌سازی شود تا در واقع بحرانی‌ترین وضعیت را با زاویه و مقداری که به دست خواهد آمد برای دیوار ایجاد کند.

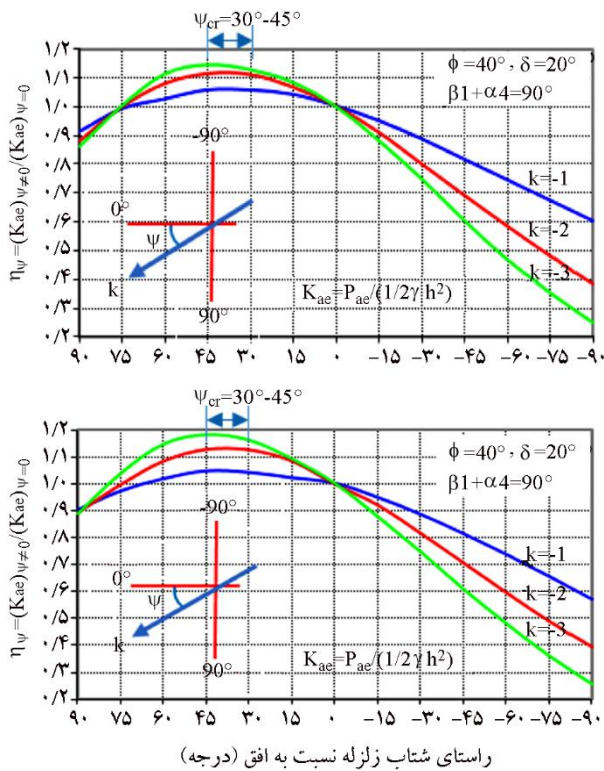
### ۵- تعیین راستای ضریب شتاب بحرانی زلزله

هنگام طراحی دیوارهای حائل در روش مرز بالای تحلیل حدی و تعادل حدی با انتخاب یک مکانیسم فرضی، حداقل ضرایب اطمینان برای کنترل پایداری دیوار تعیین می‌شوند. در طراحی لرزه‌ای دیوارها علاوه بر شکل مکانیسم گسیختگی، مقدار و راستای ضرایب لرزه‌ای نیز بر روی نتایج تأثیر گذار است. اگرچه هاسنر [۲۰] نشان داد که مقدار  $k_v = (\frac{1}{2} - \frac{2}{3})k_h$  برای اغلب زلزله‌ها می‌تواند فرض مناسبی باشد، در این فرض اساساً راستای شتاب حداکثر به صورت افقی در نظر گرفته شده است. بنابراین نتایج به دست آمده متأثر از راستای شتاب حداکثر خواهد بود. چن و لیو [۲۱] به تعیین راستای بحرانی ضریب شتاب زلزله پرداختند. در تحقیق چن و لیو [۲۱]، هدف تعیین راستایی از شتاب زلزله می‌باشد که ماکزیمم نیروی محرک را برای دیوار فراهم کند. این

در جدول (۶) وزن مخصوص خاک ریز،  $\gamma_f$  وزن مخصوص زیر پایه،  $\gamma_{AL}$  وزن مخصوص دیوار از جنس آلومینیوم،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک ریز،  $\phi_f$  زاویه اصطکاک داخلی خاک زیر پایه،  $\delta$  زاویه اصطکاک بین خاک و پایه دیوار و  $a_h$  شتاب افقی زلزله می‌باشند.

در جدول (۶) مقادیر شتاب بحرانی برای حالتی که مقادیر ضرایب اطمینان پایداری برابر با ۱ می‌باشند محاسبه و با نتایج روش‌های تعادل حدی و اجزای محدود مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده در تطابق نزدیکی با نتایج این روش‌هاست. همچنین در جدول (۶) مقادیر ضرایب اطمینان پایداری بر اساس ضرایب شبه‌استاتیکی بحرانی محاسبه شده است.

البته باید توجه نمود که به طور کلی هدف از محاسبه نیروی محرک، استفاده از آن به منظور بررسی واژگونی و کنترل مقاومت سازه‌ای دیوار بوده و هدف فقط ماکزیمم‌سازی نیرو نیست یعنی علاوه بر مقدار نیرو باید راستای نیرو به منظور تعیین وضعیت بحرانی دیوار بهینه شود و زمانی می‌توان گفت این نیرو بحرانی‌ترین وضعیت را برای پایداری دیوار ایجاد می‌کند که هم‌زمان با بهینه شدن شکل



شکل (۹): تغییرات راستای شتاب زلزله نسبت به پارامتر  $\eta\psi$  برای حداکثر ضریب نیروی محرک.

دیوار و تعیین شرایط بحرانی دیوار هستیم؛ و ماکزیمم سازی نیرو نیز برای رسیدن به همین هدف انجام می شود. بنابراین راستای بحرانی شتاب زلزله راستایی است که حداقل پایداری را برای دیوار حاصل کند؛ پس تعیین راستای بحرانی شتاب زلزله می بایست به منظور حداکثر سازی مقدار نیروی محرک وارد بر دیوار و همچنین حداقل سازی ضرایب اطمینان لغزش، گسیختگی برشی عمیق و واژگونی دیوار به طور هم زمان باشد. در شکل (۱۰) تغییرات راستای شتاب زلزله نسبت به پارامتر  $\eta\psi$  ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که مقدار  $(F_s)_{\psi=\psi_{cr}}$  در  $30^\circ - 15^\circ$  رخ می دهد.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که هنگام تعیین راستای شتاب بحرانی زلزله وقتی هدف حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری می باشد مقدار این زاویه برابر با  $30^\circ - 15^\circ$  نسبت به افق خواهد بود؛ بنابراین می توان این مقادیر را به عنوان راستای بحرانی برای طراحی دیوارها به منظور حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری دیوارهای حائل طره ای پیشنهاد نمود.

در حالی است که هدف از ماکزیمم سازی نیرو ایجاد حداقل ضرایب اطمینان پایداری برای دیوار می باشد. بنابراین در تحقیق حاضر راستای بحرانی ضریب شتاب زلزله به منظور حداکثر سازی نیروی محرک وارد بر دیوار و حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری تعیین می شوند. اگر مقدار برآیند شتاب زلزله با رابطه (۱۶) تعریف شود:

$$k = \sqrt{(k_h)^2 + (k_v)^2} \quad (16)$$

که در آن  $k_h$  ضریب شتاب افقی زلزله و  $k_v$  ضریب شتاب قائم زلزله می باشند. در این حالت راستای شتاب زلزله از رابطه (۱۷) قابل محاسب خواهد بود.

$$\psi = \tan^{-1} \left( \frac{k_v}{k_h} \right) \quad (17)$$

برای تعیین راستا و مقدار بحرانی برای نیروی زلزله پارامتر

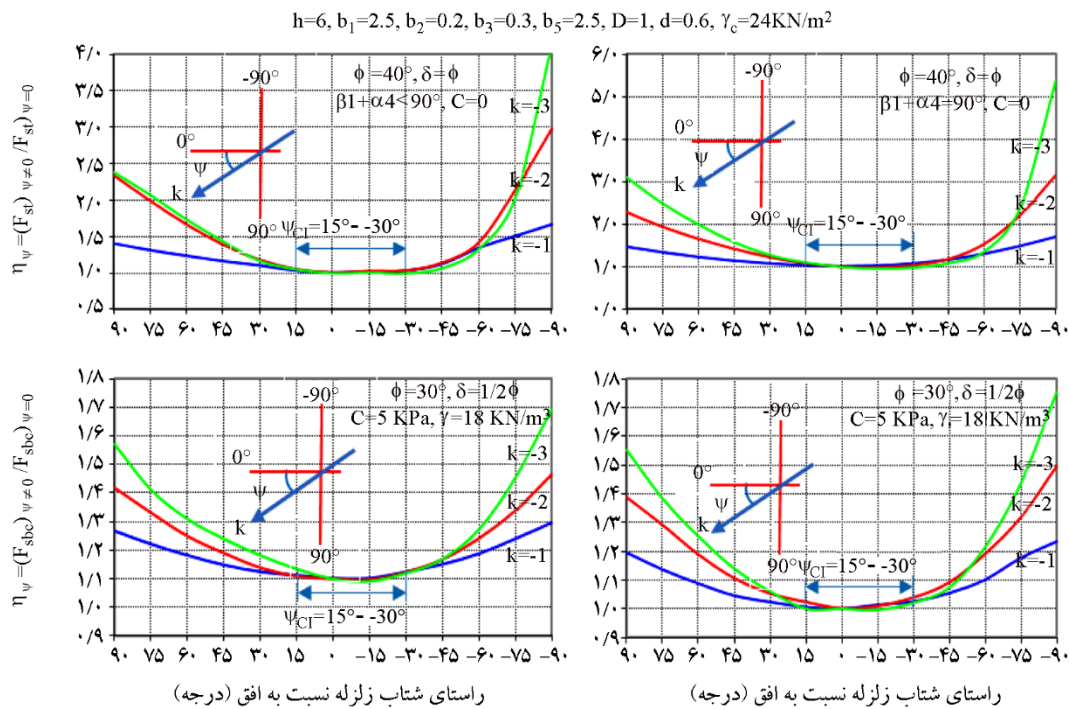
$(\eta\psi)$  به صورت رابطه (۱۸) تعریف می شود:

$$\eta\psi = \frac{(k_{ae})_{\psi \neq 0}}{(k_{ae})_{\psi = 0}} \quad (18)$$

در این رابطه  $(k_{ae})_{\psi=\psi_{cr}}$  مقدار ضریب نیروی محرک زلزله را در حالتی که ضریب شتاب زلزله  $(k)$  در راستای افق وارد می شود نشان می دهد. با تغییر مقدار راستای زلزله نسبت به افق مقدار پارامتر  $(\eta\psi)$  تغییر خواهد نمود. راستای بحرانی شتاب زلزله  $(\psi_{cr})$  زمانی حاصل می شود که مقدار پارامتر  $(\eta\psi)$  حداکثر باشد. با توجه به مکانیسم های گسیختگی ارائه شده در قسمت های قبل، تغییرات پارامتر  $(\eta\psi)$  بر اساس راستای ضریب شتاب زلزله  $(\psi)$  در شکل (۹) نشان داده شده است.

نتایج نشان می دهد که مقدار  $(k_{ae})_{\psi=\psi_{cr}}$  در  $30^\circ - 45^\circ$  رخ می دهد. این نتایج برای حالتی که گوه گسیختگی در پشت دیوار کاملاً قائم یا غیر قائم در نظر گرفته شود در شکل (۹) ارائه شده است.

در کارهای انجام شده توسط محققین مختلف در گذشته، تعیین مقدار بحرانی راستای شتاب زلزله با هدف ماکزیمم سازی نیرو انجام شده است [۲۰-۲۱]. این در حالی است که در طراحی دیوارهای حائل ما به دنبال بررسی پایداری داخلی و خارجی



شکل (۱۰): تغییرات راستای شتاب زلزله نسبت به پارامتر  $\eta\psi$  برای محاسبه حداقل ضرایب اطمینان واژگونی، لغزش و ظرفیت باربری.

حالت بحرانی گسیختگی خاک در نظر گرفته شوند.

نتایج نشان می‌دهند در نظر گرفتن شتاب قائم زلزله علاوه بر افزایش بزرگای برآیند شتاب زلزله، باعث تغییر راستای شتاب زلزله، برآیند به سمت راستای بحرانی و کاهش ضرایب اطمینان پایداری دیوار می‌شود. هنگام تعیین راستای شتاب بحرانی زلزله وقتی هدف حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری می‌باشد مقدار این زاویه برابر با  $15^\circ$  تا  $30^\circ$  - نسبت به افق خواهد بود؛ بنابراین می‌توان این مقادیر را به عنوان راستای بحرانی برای طراحی دیوارها به منظور حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری دیوارهای حائل طره‌ای پیشنهاد نمود.

### مراجع

1. Powrie, W. (1996) Limit equilibrium analysis of embedded retaining walls. *Geotechnique*, **46**(4), 709-723.
2. Diakoumi, M. and Powrie, W. (2013) Mobilisable strength design for flexible embedded retaining walls. *Geotechnique*, **63**(2), 95-106.
3. Atik, L.AL. and Sitar, N. (2010) Seismic earth

### ۶- نتیجه گیری

- در تحقیق حاضر الگوریتم جدیدی برای طراحی شبه‌استاتیکی دیوارهای حائل طره‌ای به روش مرز بالای تحلیل حدی پیشنهاد شده است. از این الگوریتم می‌توان برای کنترل شرایط پایداری دیوار بر اساس مکانیسم‌های گسیختگی پیشنهادی استفاده نمود.

- مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج سایر محققان نشان می‌دهد مکانیسم گسیختگی ارائه شده جهت تعیین نیروی محرک و ضرایب اطمینان پایداری دیوار در عین سادگی، کاملاً دقیق می‌باشد.

- نتایج نشان می‌دهند طول پاشنه دیوار بر روی اندازه و امتداد مکانیسم گسیختگی در پشت دیوار، ضرایب اطمینان و نیروی محرک وارد بر دیوار حائل طره‌ای تأثیرگذار است؛ بنابراین با توجه به اینکه در روش‌های حدی هدف تعیین بحرانی‌ترین مکانیسم گسیختگی (متناظر با حداقل ضرایب اطمینان و حداکثر نیروی محرک) است، بنابراین باید هم‌زمان با بهینه نمودن گوه‌های گسیختگی، ابعاد بهینه دیوار نیز برای حصول

- Earthquake Forces*. School of Civil Engineering, Purdue University.
16. Hill, R. (1948) Editor A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society.
  17. Morgenstern, N. and Price, V.E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, **15**, 79-93.
  18. Bishop, A.W. (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, **5**, 7-17.
  19. Meyerhof, G.G. (1951) The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, **2**(4), 301-332.
  20. Housner, G.W. (1974) 'Strong ground motion'. In: Wiegel, R.L. (Ed.) *Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, New York, NY, 75-91.
  21. Chen, W.F. and Liu, X. (1990) *Limit Analysis in Soil Mechanics*. **52**, Elsevier, Amsterdam.
1. pressures on cantilever retaining structures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**(10), 1324-1333.
  4. Aulbach, B., Ziegler, M., and Schuttrumpf, H. (2013) Design aid for the verification of resistance to failure by hydraulic heave. *Procedia Engineering*, **57**, 113-119.
  5. Li, X., Wu, Y., and He, S. (2010) Seismic stability analysis of gravity retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(10), 875-878.
  6. Kloukinas, P., di Santolo, A.S., Penna, A., Dietz, M., Evangelista, A., Simonelli, A. L., and Mylonakis, G. (2015) Investigation of seismic response of cantilever retaining walls: Limit analysis vs shaking table testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **77**, 432-445.
  7. Mononobe, N. (1924) Considerations into earthquake vibrations and vibration theories. *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, **10**(5), 1063-1094.
  8. Okabe, S. (1924) General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam. *J. of Japan Society of Civil Engineers*, **10**(6), 1277-1323.
  9. Mononobe, N. (1929) On determination of earth pressure during earthquake. *Proc. of the World Engrg. Congress*, Tokyo, **9**, 177-185.
  10. Di Santolo, A.S. and Evangelista, A. (2011) Dynamic active earth pressure on cantilever retaining walls. *Computers and Geotechnics*, **38**(8), 1041-1051.
  11. Finn, W.D. (1967) Applications of plasticity in soil mechanics. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*
  12. James, R. and Bransby, P.L. (1970) Experimental and theoretical investigations of a passive earth pressure problem. *Geotechnique*, **20**, 17-37.
  13. Chen, W. and Rosenfarb, J. (1973) Limit analysis solutions of earth pressure problems. **13**, 45-60.
  14. Richards, J., Rowland, H.C., and Fishman, K.L. (1999) Seismic earth pressure on retaining structures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**, 771-778.
  15. Chang, M. and Chen, W.F. (1981) *Lateral Earth Pressures on Rigid Retaining Walls Subjected to*

## Pseudo-Static Stability Analysis of Retaining Walls Using Upper-Bound Approach

Asadollah Ranjbar Karkanaki<sup>1</sup>, Navid Ganjian<sup>2\*</sup>, and Faradjollah Askari<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: n.ganjian@srbiau.ac.ir
3. Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

Given the extensive use of cantilever retaining walls in construction and development projects, optimal design and analysis of these walls with due attention to static and seismic loads is a typical engineering problem. As a general rule, a designer seeking to use the Upper Bound Limit Analysis and Limit Equilibrium Method to determine the forces acting on a retaining wall should first search for the mechanism of critical failure. During this procedure, the shape of failure surface can be considered to be planar or circular and failure mechanism can be considered to be translational, rotational, or a combination of multiple scenarios. In the present study, the Upper Bound Limit Analysis Method is used to determine the active pressure on the wall. The failure mechanism consists of two triangular wedges used to determine the active pressure on the wall, and a genetic algorithm is used to optimize the failure wedges. The current results show a good agreement with the results of Coulomb and Rankine Method.

The first step for optimal design of cantilever retaining walls is to check their internal and external stability against overturning, sliding, and bearing capacity failure based on a set of assumed dimensions. This initial design should be then completed by checking the wall's internal stability against shear and bending failures. In case of any change in wall dimensions, the design should be modified such that all factors of safety remain higher than allowable limits and the cost of concrete and steel bars be minimized. All previous works on this subject have only focused on optimizing the structural components of retaining wall, irrespective of the state of its backfill. In the present study, the upper bound limit analysis method was used to determine the shape of critical failure wedges of a retaining wall and its optimal dimensions, and then the formulas provided by ACI 318-05 were used to check its internal stability. The factors of safety against overturning, sliding, and bearing capacity failure were assessed by the limit equilibrium and limit analysis techniques. Given the reciprocal influence of factors of safety and wall dimensions and geometry, the wall's optimum dimensions the shape of critical failure wedges needed to be determined simultaneously. The results of (upper bound) limit analysis on the stability of retaining wall showed a good agreement with the results of limit equilibrium method and finite element analysis. These results showed that when using limit analysis to determine the most critical instability states of a retaining wall, the critical conditions of failure mechanisms should be checked simultaneously with the optimal structural conditions. This study also used the proposed algorithm to determine the critical direction of earthquake acceleration coefficients. The critical direction of earthquake acceleration coefficient was defined as the direction that maximizes the active force exerted on the wall and minimizes the safety factor for wall stability. The results obtained in this study are in good agreement with the results of similar studies that have been based on limit equilibrium method and finite element analysis. The critical failure mechanism was determined through optimization with genetic algorithm and analysis was validated by comparing the obtained results with the results of other methods. Also, the results show that the geometric dimensions of the wall affect its safety factors and the active pressure on the wall. Consequently, for determination of the most critical state of failure (the lowest safety factors and the highest active pressure), the failure wedges should be optimized while simultaneously determining the optimal wall geometry that can induce the critical state of soil failure. As the results show, in all cases, the values for the safety factors against stability obtained by the Upper Bound Limit Analysis are higher than the allowable values specified by regulations and are in good agreement with the results from the Finite Element Method.



Therefore, the use of the limit analysis method (based on the proposed algorithm) with an allowable safety factor higher than values specified by regulations can return results close to those of the conventional methods commonly used for the design of cantilever retaining walls. The results suggest that complementary studies on the subject may produce allowable safety factors for checking the external stability of cantilever retaining walls through the use of the Upper Bound Limit Analysis Method.

**Keywords:** Retaining Wall; Upper-bound Limit Analysis; Safety Factor; Seismic Coefficients; Genetic Algorithm.