

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 حداقل‌سازی 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.ganjan@srbiau.ac.ir

فرج ا... عسکری

دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۱- مقدمه

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 تأثیرگذاری هم‌زمان وزن و عمق مدفون دیوارها بر روی ضرایب اطمینان پایداری، این گونه فرضیات باعث ایجاد خطا در بررسی پایداری دیوارها، به‌خصوص 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 مدفون

بالای 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، به‌عنوان یک قانون کلی همیشه بایستی در بدو امر، به جستجوی مکانیسم گسیختگی بحرانی پرداخت. در این راستا می‌توان شکل سطح گسیختگی را به‌صورت خطی یا دایره‌ای و مکانیسم گسیختگی را از نوع انتقالی، دورانی و یا انواع 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 به‌دست آمده به‌منظور 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).

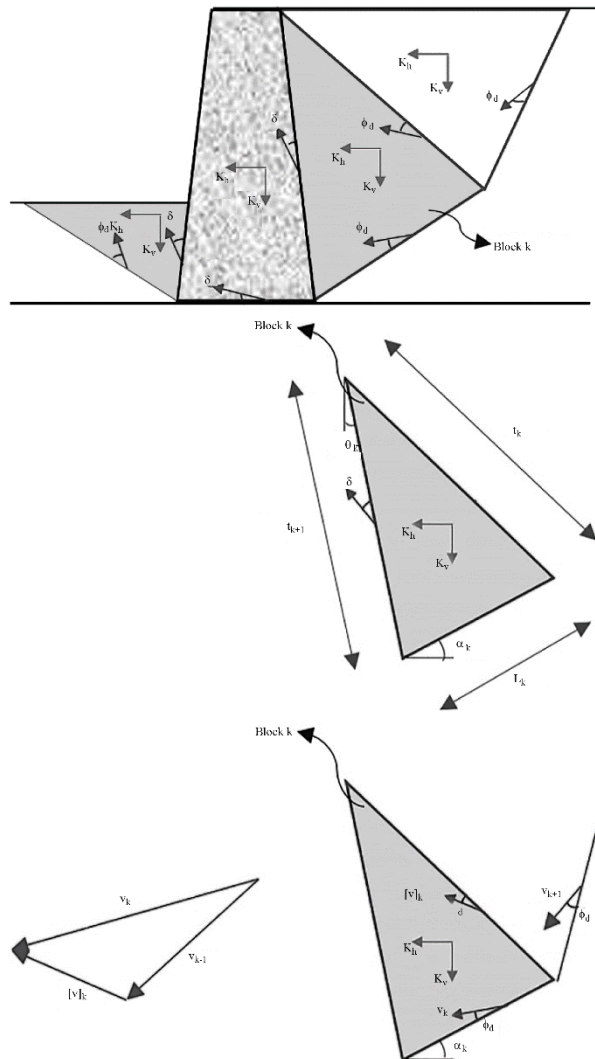
(ب) تغییر شکل‌ها (در شرایط بهره‌برداری).

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

صرفاً دارای حرکت انتقالی بوده و تعداد آنها را می توان تغییر داد. در این قسمت برای توضیح درباره روابط مورد استفاده در روش مرز بالا، 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) می‌باشد. کار نیروهای داخلی از رابطه (۱) به دست می‌آید:

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

این گونه مسائل هستند. در این گروه از مسائل، رفتار خاک عمده‌تاً 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. به طور 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 نرمالیته 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

می‌باشند. با توجه به وجود F_s در دو طرف 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:

$$P_{\text{cross}} = .7, P_{\text{mutation}} = .05, \text{Max}_{\text{gen}} = 700, N_{\text{pop}} = 2000$$

که: N_{pop} تعداد جمعیت، Max_{gen} حداکثر تعداد نسل‌ها، P_{cross} احتمال انجام ادغام، P_{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.

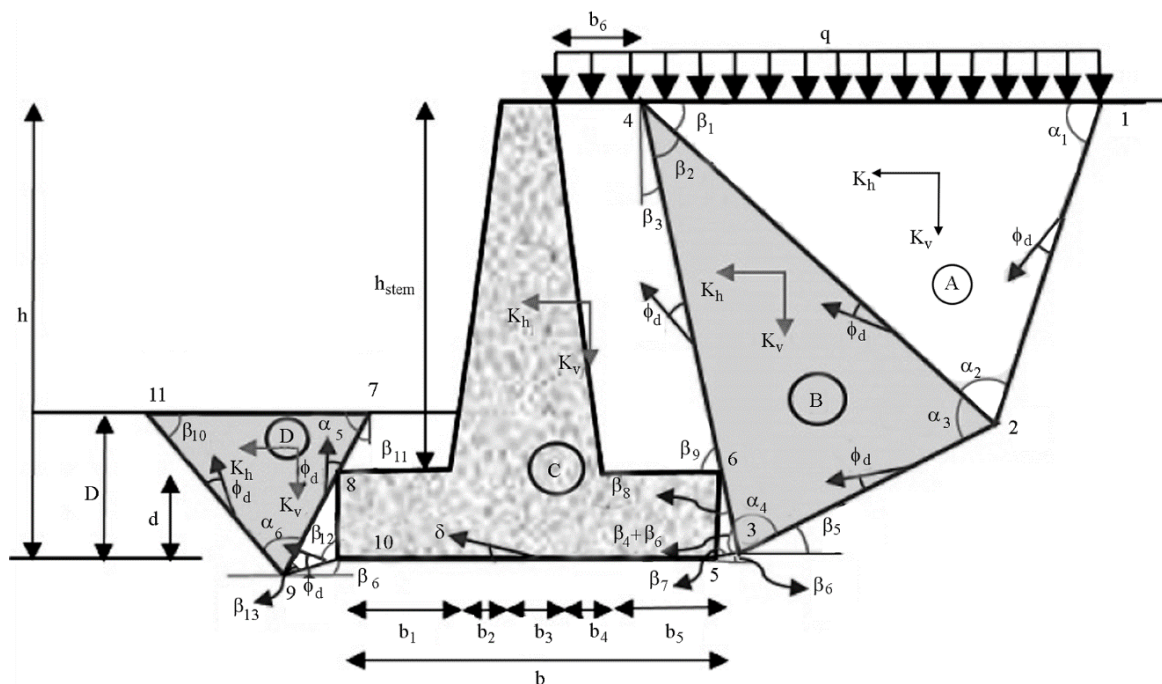
در این رابطه L_k طول خط بر روی گوه گسیختگی در تماس با محیط پیرامونی، t_k طول خط ناپیوستگی بین بلوک k و $k-1$ و V_k سرعت مطلق بلوک k ، $[V]_k$ سرعت نسبی بین بلوک‌های k و $k-1$ ، C_d و ϕ_d به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش یافته خاک می‌باشند که از رابطه (۲) محاسبه می‌شوند. زاویه بین خطوط گسیختگی و بردارهای سرعت برابر با ϕ_d است که در محل تماس این خطوط گسیختگی با سطوح بتنی این مقدار برابر با $\phi = \phi_d$ 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 α_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 ϕ_d بر حسب C و ϕ از رابطه‌ای که از این تساوی به دست می‌آید مقدار ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. در این رابطه C و ϕ به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک



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

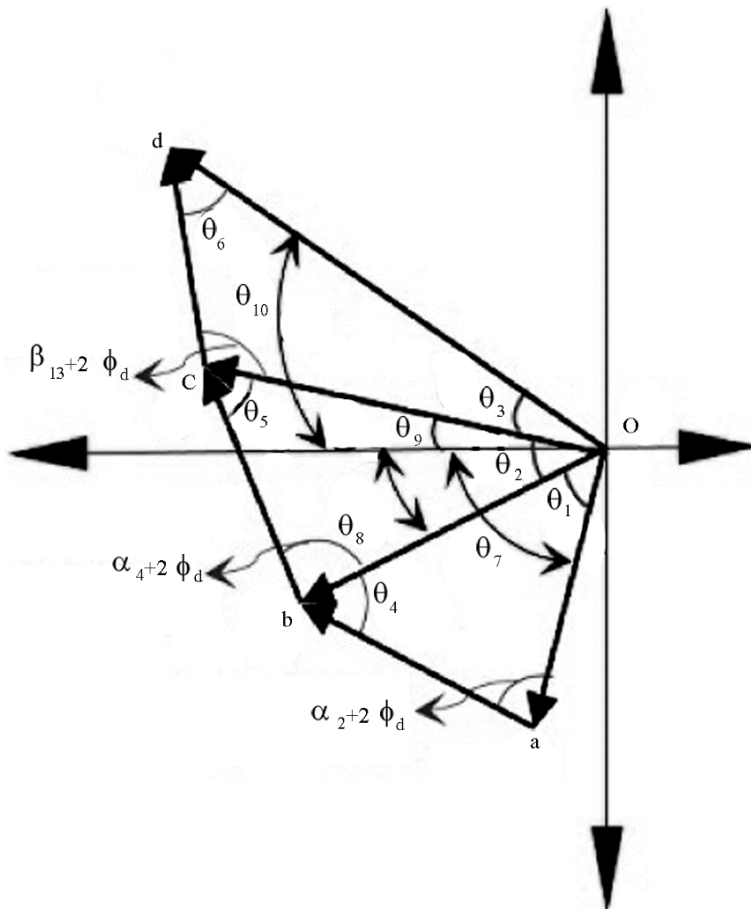
$$W_g = \frac{1}{2} \gamma \{ (L_{12} L_{14} \sin \alpha_1 \bar{o} \bar{a} \sin \theta_7) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_7) + (L_{23} L_{24} \sin \alpha_3 \bar{o} \bar{b} \sin \theta_8) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot \theta_8) + L_{711} L_{911} \sin \beta_{10} \bar{o} \bar{d} \sin \theta_{10}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

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

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

در روابط ارائه شده L طول خطوط گسیختگی، γ وزن مخصوص خاک، γ_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 δ با سطح افق بسازد. با توجه به اینکه زاویه اصطکاک بین خاک و بتن (δ) با زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته خاک (ϕ_d) متفاوت است برای تشکیل مکانیسم صحیح، می‌بایست سطح گسیختگی در قسمت پایه بلافاصله در جلو و پشت دیوار دچار شکستگی به اندازه $\delta - \phi_d$ 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.

اطمینان لغزش تعیین نمود. در این حالت در شکل (۲) زوایای معلوم با علامت (α) ، زوایای مجهول با علامت (β) ، 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 (α) 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 ϕ_d از معادلات (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند:

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

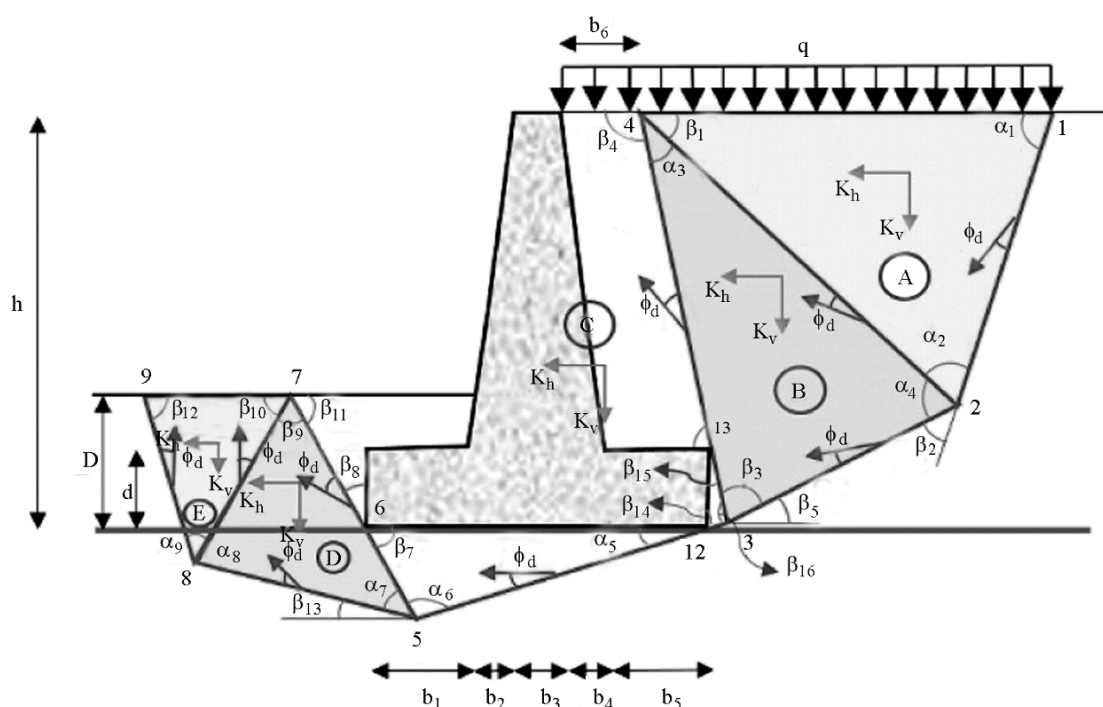
$$C_d = \left(\frac{c}{F_s} \right) \quad (8)$$

ϕ_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 δ و C_δ 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 ضریب



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 می باشد. با مساوی قرار دادن نمو کار خارجی و داخلی و با توجه به بردارهای سرعت ترسیمی می توان مقدار ضریب اطمینان را به روش سعی و خطا به گونه ای 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 لرزه ای

وارد بر دیوار حائل

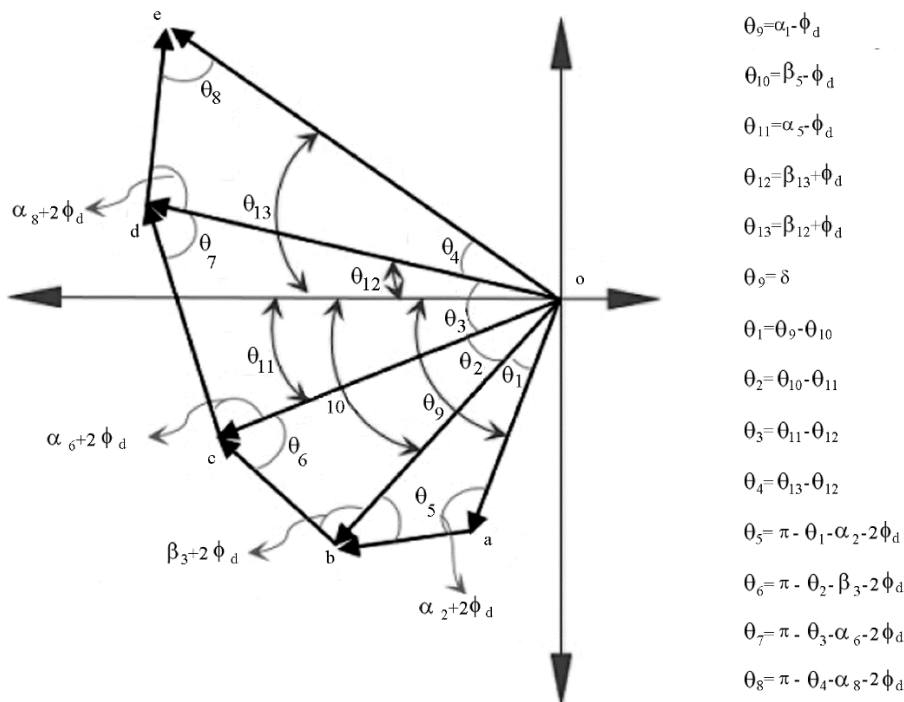
برای تعیین ضریب اطمینان واژگونی و همچنین کنترل پایداری داخلی دیوار حائل (کنترل مقاومت سازه ای) نیاز به محاسبه نیروی محرک وارد بر دیوار می باشد. مکانیسم گسیختگی در نظر گرفته شده برای تعیین نیروی محرک وارد بر دیوار حائل به روش مرز بالا مطابق با شکل (۶) می باشد.

قسمت بتنی دیوار و وزن خاک پشت، زیر پایه و جلوی دیوار می باشد. در این مکانیسم، نمو کار نیروهای داخلی (E) و نمو کار نیروهای خارجی (W_g) می باشند و از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست می آیند:

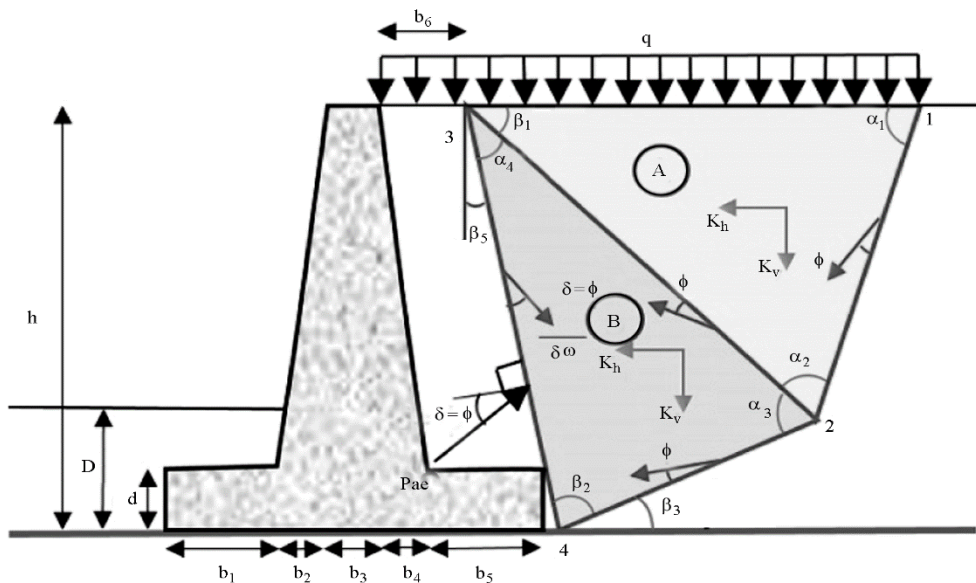
$$W_g = \frac{1}{2} \gamma \{ (L_{12}L_{24}\sin\alpha_2 \cdot \bar{o}a \cdot \sin\theta_9) + (1 + k_v + k_h \cdot \cot\theta_9) + (L_{23}L_{24}\sin\alpha_4 \bar{o}b \sin\theta_{10}) + (1 + k_v + k_h \cdot \cot\theta_{10}) + (\bar{o}c \sin\theta_{11}) \cdot (1 + k_v + k_h \cdot \cot\theta_{11}) + [L_{512}L_{56}\sin\alpha_6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

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

روابط نوشته شده در روش مرز بالا نشان می دهد در مکانیسم فرضی در نظر گرفته شده، با مشخص نمودن هشت متغیر می توان

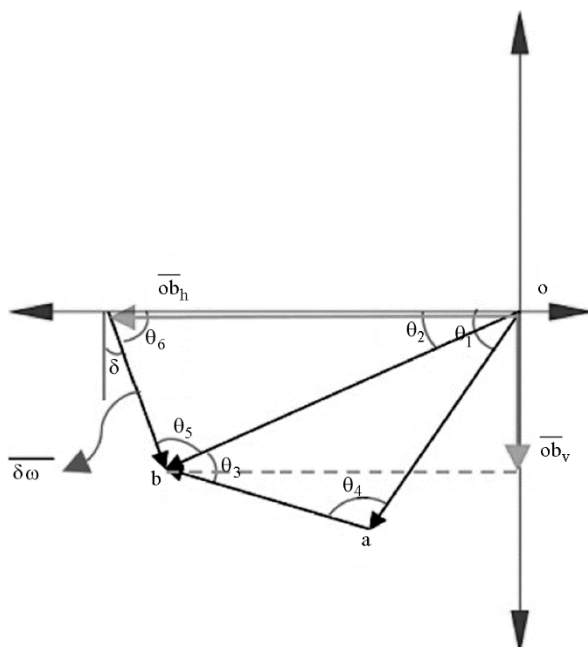


شکل (۵): بردارهای سرعت ترسیم شده با توجه به مکانیسم گسیختگی فرضی در نظر گرفته شده.



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

با مشخص نمودن چهار متغیر ورودی (α ها) می توان نیروی وارد بر دیوار را با هدف حداکثرسازی نیروی محرک لرزه ای وارد بر دیوار تعیین نمود. بردارهای سرعت در نظر گرفته شده مطابق شکل (۷) تعیین می شوند.



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

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

در شکل (۶)، مکانیسم گسیختگی از دو بلوک مثلثی 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 می باشد؛ بنابراین فرض شده است که بردار سرعت دیوار در قسمت پایه زاویه δ 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 می آید:

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

در رابطه (۱۳)، E نمو کار نیروهای داخلی و W_g نمو کار نیروهای خارجی ناشی از وزن گوه های گسیختگی می باشند که از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می شوند:

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

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

روابط نشان می دهند در مکانیسم فرضی در نظر گرفته شده،

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 (α 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.

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 جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. در مدلسازی اجزای محدود مشخصات مصالح و مدل های رفتاری استفاده شده در تحلیل ها مطابق جدول (۲) می باشد. ابعاد هندسی در نظر گرفته شده برای دیوار با ارتفاع ۶ متر به صورت زیر است:
($b_1=2.5$ m, $b_2=0.1$ m, $b_3=0.3$ m, $b_4=0.1$ m, $b_5=2.5$ m, $d=0.6$ m, $D=1$ m)
برای مش بندی مدل ها از المان های مثلثی ۱۵ گره ای استفاده 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 ۹۰ 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 ۹۰ 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 ۹۰ درجه

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): مشخصات مصالح و مدل رفتاری استفاده شده در مدلسازی نرم افزار اجزای محدود.

مدل رفتاری	مشخصات مصالح	وزن مخصوص (kN/m^3)	زاویه اصطکاک ($^\circ$)	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

ماکزیم زیر پایه دیوار تعریف شده است و برای محاسبه ظرفیت باربری، از روش مایر هوف [۱۹] استفاده شده است. همان طور که در جداول (۳) و (۴) ملاحظه می شود مقادیر ضرایب اطمینان به دست آمده در روش مرز بالا نسبت به روش تعادل حدی و روش مور گنسترن کمتر می باشد. همچنین نتایج نشان می دهد، مقادیر به دست آمده از این تحقیق با نتایج به دست آمده از روش اجزای محدود و روش بیشاب تطابق خوبی دارند. در شکل (۸) گوه های گسیختگی به دست آمده از روش های حد بالا و تحلیل اجزای محدود نشان داده شده اند. ملاحظه می شود که مکانیسم های گسیختگی پیشنهادی در تحقیق حاضر، با مکانیسم گسیختگی به دست آمده از تحلیل های اجزای محدود تطابق مناسبی دارند.

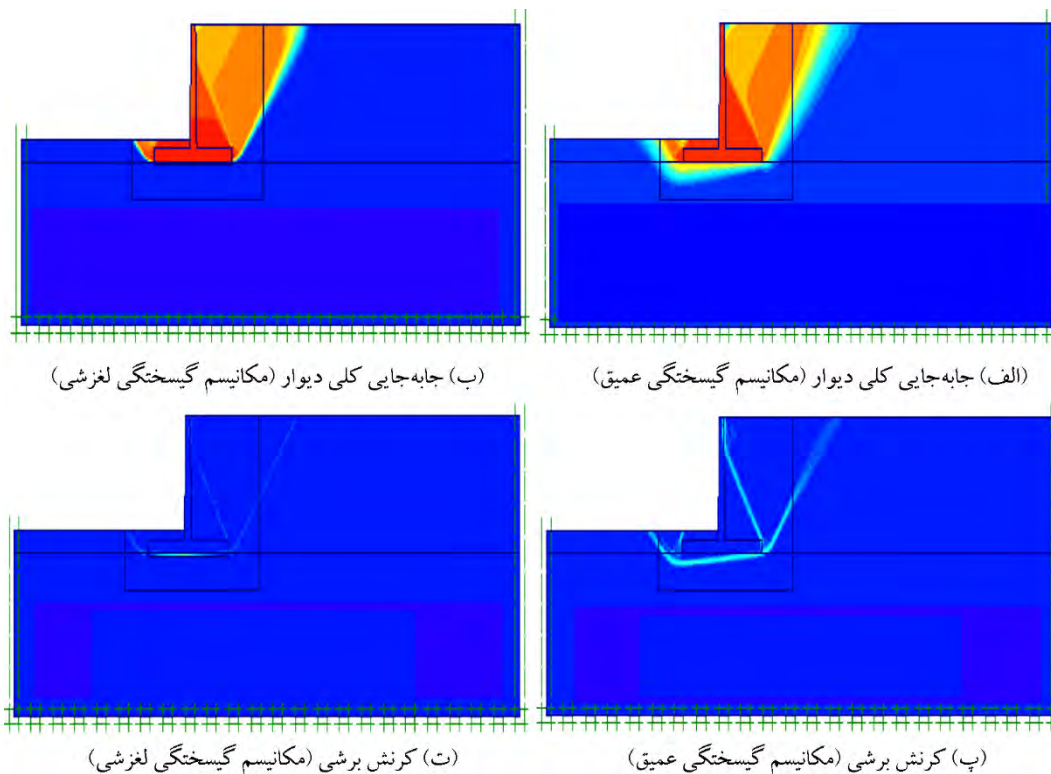
همچنین با توجه به اینکه در روش های مختلف تعادل حدی، می توان سطوح گسیختگی را دایره ای یا مسطح در نظر گرفت جهت انجام تحلیل ها، سطوح گسیختگی در روش های مور گنسترن و پرایس [۱۷] و بیشاب [۱۸]، در دو حالت دایره ای و چند ضلعی در نظر گرفته شده است و از بین ضرایب اطمینان به دست آمده، حداقل مقادیر ضرایب اطمینان در جداول (۳) و (۴) 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 به صورت نسبت مجموع نیروهای محرک به مجموع نیروهای مقاوم (روش متداول در طراحی دیوارهای حائل طره ای) و ضریب اطمینان پایداری ظرفیت باربری به صورت نسبت ظرفیت باربری به حداکثر تنش

جدول (۳): مقایسه مقادیر ضرایب اطمینان لغزش برای بررسی پایداری دیوار حائل در روش های مختلف.

h=6m, D=1m, d=0.6m, b ₁ =2.5m, b ₂ =0.2m, b ₃ =0.3m, b ₄ =0.2m, b ₅ =2.5m, γ=18KN/m ³ , γ _c =24KN/m ³										پایداری لغزش
k _h =0.1, k _v =0.5k _h , δ=0.67φ, C _δ =0.67C				δ=0.5φ, C=0, k _v =0						
C=10KPa		C=5KPa		k _h =0.2		k _h =0.1		k _h =0		
φ=03°	φ=03°	φ=03°	φ=03°	φ=03°	φ=03°	φ=03°	φ=03°	φ=03°	φ=03°	
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 (مور گنسترن)
۲/۲۷۶	۱/۷۲۴	۲/۰۱۶	۱/۴۶۵	۱/۲۸۹	۰/۸۸۵	۱/۵۲۳	۱/۰۴۸	۱/۸۵۹	۱/۲۶۸	تحقیق حاضر

جدول (۴): مقایسه مقادیر ضرایب اطمینان پایداری گسیختگی برشی عمیق برای بررسی پایداری دیوار حائل در روش های مختلف.

h=6m, D=1m, d=0.6m, b ₁ =2.5m, b ₂ =0.2m, b ₃ =0.3m, b ₄ =0.2m, b ₅ =2.5m, γ=18KN/m ³ , γ _c =24KN/m ³										پایداری گسیختگی عمیق
k _h =0.1, k _v =0.5k _h , δ=0/67φ, C _δ =0.67C				δ=0.5φ, C=0, k _v =0						
C=10KPa		C=5KPa		k _h =0.2		k _h =0.1		k _h =0		
φ=40°	φ=30°	φ=40°	φ=30°	φ=40°	φ=30°	φ=40°	φ=30°	φ=40°	φ=30°	
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 (مور گنسترن)
۲/۷۹۹	۲/۰۷۱	۲/۵۷۴	۱/۸۴۲	۲/۰۳۳	۱/۴۵۹	۲/۳۵۷	۱/۶۰۹	۲/۷۳۹	۱/۸۸۳	تحقیق حاضر



شکل (۸): مکانیسم گسیختگی به‌دست آمده در نرم‌افزار اجزای محدود. جابه‌جایی کلی دیوار: (الف) گسیختگی برشی پایداری عمیق. (ب) گسیختگی پایداری لغزش کرنش برشی کلی. کرنش برشی کلی: (ج) گسیختگی پایداری عمیق (د) گسیختگی برشی پایداری لغزشی. 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.

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.

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

$k_v=0, \delta=\phi, C=0, k_h=0.1$		$k_v=0, \delta=\phi, C=0, \beta_1+\alpha_4=90^\circ$								روش‌های تحلیل
$\beta_1+\alpha_4=120^\circ$		$\beta_1+\alpha_4=75^\circ$		$k_h=0.2$		$k_h=0.1$		$k_h=0$		
$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=40^\circ$	$\phi=30^\circ$	
۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۳۶	۰/۴۷	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۳۰	روش مونونوبه-اکابه
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

نیروی محرک، استفاده از آن به منظور بررسی واژگونی و کنترل مقاومت سازه‌ای دیوار بوده و هدف فقط ماکزیمم سازی 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 گوه‌های گسیختگی (حالت لغزش، گسیختگی برشی عمیق و واژگونی دیوار)، مقدار و راستای این نیرو ماکزیمم سازی 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 تأثیرگذار است.

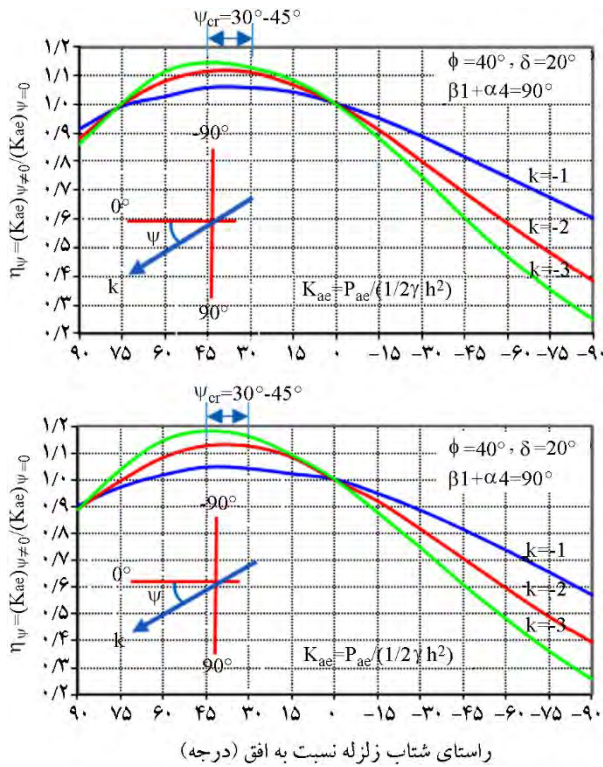
در سال ۲۰۱۵ کلوکیناس و همکاران [۶] به بررسی پاسخ لرزه‌ای دیوارهای حائل طره‌ای با استفاده از تست میز لرزان و روش تعادل حدی پرداختند. نتایج تحقیق حاضر با نتایج این تحقیق برای سه مدل ارائه شده با ابعاد نمونه آزمایشگاهی، در جدول (۶) مقایسه شده است. در این جدول γ وزن مخصوص خاک ریز، γ_f وزن مخصوص زیر پایه، γ_{AL} وزن مخصوص دیوار از جنس آلومینیوم، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک ریز، ϕ_f زاویه اصطکاک داخلی خاک زیر پایه، δ 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 روش هاست. همچنین در جدول (۶) مقادیر ضرایب اطمینان پایداری بر اساس ضرایب شبه استاتیکی بحرانی محاسبه شده است. البته باید توجه نمود که به‌طور کلی هدف از محاسبه

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

h=066 mm, $\gamma=51/5$ KN/m ³ , $\gamma_f=51/5$ KN/m ³ , $\gamma_{AL}=72$ KN/m ³ , $\phi=33/1^\circ$, $\phi_f=27/1^\circ$												روش‌های تحلیل
مدل ۳: $b_1=b_2=b_4=0$, $b_3=30$ mm, $b_5=250$ mm, $d=30$ mm, $\delta=28.5^\circ$				مدل ۲: $b_1=b_2=b_4=0$, $b_3=30$ mm, $b_5=250$ mm, $d=30$ mm, $\delta=23.5^\circ$				مدل ۱: $b_1=70$ mm, $b_2=b_4=0$, $b_3=30$ mm, $b_5=300$ mm, $d=30$ mm, $\delta=23.5^\circ$				
FS _{SL} $a_h=a_{BC}$	a_h, BC	FS _{BC} $a_h=a_{SL}$	a_h, SL	FS _{SL} $a_h=a_{BC}$	a_h, BC	FS _{BC} $a_h=a_{SL}$	a_h, SL	FS _{SL} $a_h=a_{BC}$ (۴)	a_h, BC (۳)	FS _{BC} $a_h=a_{SL}$ (۲)	a_h, SL (۱)	
۱/۱۴۰	g۰/۱۷۰	-	g۰/۲۳۰	۰/۹۳۰	g۰/۱۷۰	-	g۰/۱۴۰	۰/۶۸۰	g۰/۳۵۰	-	g۰/۱۸۰	روش کلوکیناس
۱/۰۷۸	g۰/۱۷۵	۱/۲۲۹	g۰/۲۱۹	۰/۹۲۹	g۰/۱۷۵	۱/۴۰۲	g۰/۱۲۷	۰/۷۲۹	g۰/۳۴۲	۱/۷۶۹	g۰/۱۶۶	اجزای محدود
۱/۰۲۵	g۰/۱۸۳	۱/۴۳۵	g۰/۲۲۵	۰/۸۸۱	g۰/۱۸۳	۱/۵۲۱	g۰/۱۳۱	۰/۶۹۸	g۰/۳۷	۱/۷۵۴	g۰/۱۶۹	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.



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

نتایج نشان می‌دهد که مقدار $(k_{ae})_{\psi=\psi_{cr}}$ در $\psi=30^\circ-45^\circ$ رخ می‌دهد. 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 ماکزیمم‌سازی نیرو انجام شده است [۲۰-۲۱]. این در حالی است که در طراحی دیوارهای حائل ما به دنبال بررسی پایداری داخلی و خارجی دیوار و تعیین شرایط بحرانی دیوار هستیم؛ و ماکزیمم‌سازی نیرو نیز برای رسیدن به همین هدف انجام می‌شود. بنابراین راستای بحرانی شتاب زلزله راستایی است که حداقل پایداری را برای دیوار حاصل کند؛ پس تعیین راستای بحرانی شتاب زلزله می‌بایست به منظور حداکثرسازی مقدار نیروی محرک وارد بر دیوار و همچنین حداقل‌سازی ضرایب اطمینان لغزش، گسیختگی برشی عمیق و واژگونی دیوار به‌طور هم‌زمان باشد. در شکل (۱۰) تغییرات راستای شتاب زلزله نسبت به پارامتر $\eta\psi$ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار $(F_s)_{\psi=\psi_{cr}}$ در $\psi=15^\circ-30^\circ$ رخ می‌دهد.

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 حالی است که هدف از ماکزیمم‌سازی نیرو ایجاد حداقل ضرایب اطمینان پایداری برای دیوار می‌باشد. بنابراین در تحقیق حاضر راستای بحرانی ضریب شتاب زلزله به منظور حداکثرسازی نیروی محرک وارد بر دیوار و حداقل‌سازی ضرایب اطمینان پایداری تعیین می‌شوند. اگر مقدار برآیند شتاب زلزله با رابطه (۱۶) تعریف شود:

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

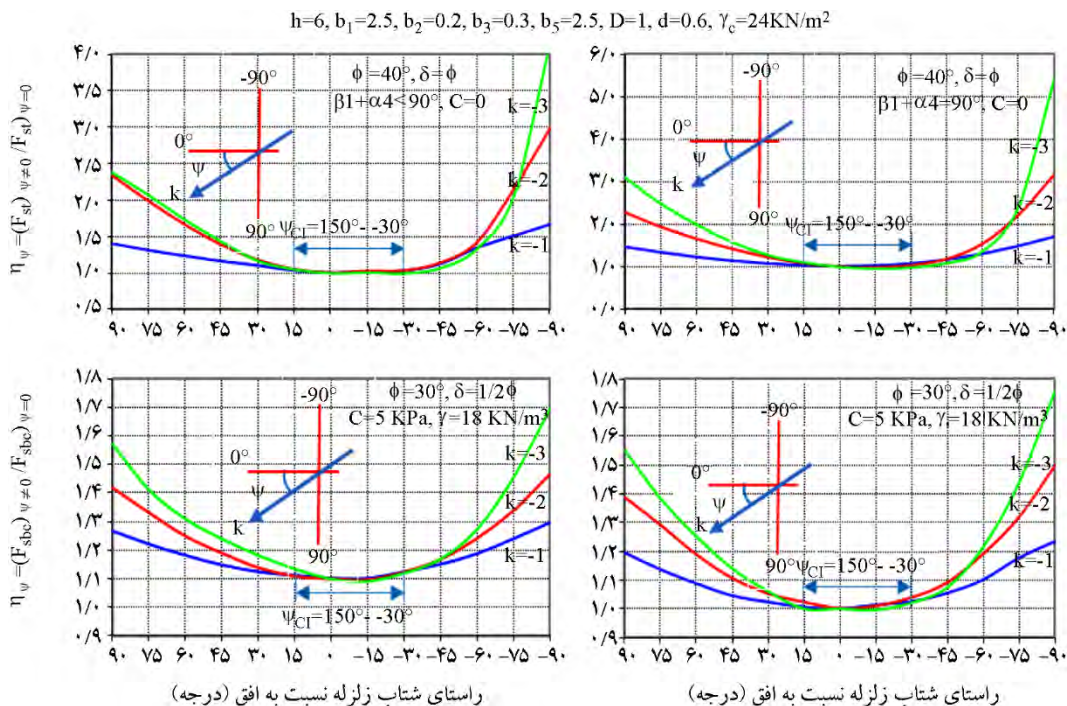
که در آن k_h ضریب شتاب افقی زلزله و k_v ضریب شتاب قائم زلزله می‌باشند. در این حالت راستای شتاب زلزله از رابطه (۱۷) قابل محاسبه خواهد بود.

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

برای تعیین راستا و مقدار بحرانی برای نیروی زلزله پارامتر $(\eta\psi)$ به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود:

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

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 می‌شود نشان می‌دهد. با تغییر مقدار راستای زلزله نسبت به افق مقدار پارامتر $(\eta\psi)$ تغییر خواهد نمود. راستای بحرانی شتاب زلزله (ψ_{cr}) زمانی حاصل می‌شود که مقدار پارامتر $(\eta\psi)$ حداکثر باشد. با توجه به مکانیسم‌های گسیختگی ارائه شده در قسمت‌های قبل، تغییرات پارامتر $(\eta\psi)$ بر اساس راستای ضریب شتاب زلزله (ψ) در شکل (۹) نشان داده شده است.



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

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 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° تا 30° نسبت به افق خواهد بود؛ بنابراین می‌توان این مقادیر را به‌عنوان راستای بحرانی برای طراحی دیوارها به‌منظور حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری دیوارهای حائل طره‌ای پیشنهاد نمود.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که هنگام تعیین راستای شتاب بحرانی زلزله وقتی هدف حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری می‌باشد مقدار این زاویه برابر با $15^\circ - 30^\circ$ نسبت به افق خواهد بود؛ بنابراین می‌توان این مقادیر را به‌عنوان راستای بحرانی برای طراحی دیوارها به‌منظور حداقل سازی ضرایب اطمینان پایداری دیوارهای حائل طره‌ای پیشنهاد نمود.

۶- نتیجه‌گیری

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 به‌دست 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.

مراجع

- 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 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*. Vol. 52. Elsevier, Amsterdam.
 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 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, Vol. 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 & Foundations Div.*
 12. James, R. and Bransby, P.L. (1970) Experimental