

## نیروی محرک لرزه‌ای در دیوارهای حایل

فرج ا. عسکری،\* امهدی مومنی رق آبادی<sup>۲</sup> و اورنگ فرزانه<sup>۳</sup>

استادیار پژوهشکده ژئوتکنیک پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۸/۰۱/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۸۹/۰۱/۲۳، تاریخ تصویب ۱۳۸۹/۱۱/۲۶)

### چکیده

در این مقاله، الگوریتمی جهت محاسبه نیروی محرک وارد بر دیوارهای حائل در شرایط لرزه‌ای ارائه شده است. در این الگوریتم که فرمولاسیون آن بر اساس روش مرز پائین آنالیز حدی پایه ریزی شده است، با در نظر گرفتن یک ناپیوستگی تنش و یافتن میادین تنش قابل قبول در دو سمت آن، نیروی محرک در حالت کلی، یعنی با در نظر گرفتن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و نیز لحاظ نمودن چسبندگی و اصطکاک بین خاک و دیوار محاسبه می‌شود. نتایج در حالاتی خاص با دیگر محققان مقایسه شده که صحت اعتبار الگوریتم ارائه شده را بخوبی نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** نیروی محرک لرزه‌ای، آنالیز حدی، روش مرز پایین، دیوارهای حائل

### مقدمه

پیش برمی‌گردد. فرضیات برقراری رفتار صلب - پلاستیک مصالح، اصل کار خمیری حداکثر (اصل هیل) و برقراری قانون نرمالیت یا قانون جریان وابسته در اثبات مرز بالا و پائین بودن پاسخ‌های این روش مورداستفاده قرار گرفته‌اند که اعتبار نسبی آنها برای حل مسائل پایداری در محیط‌های خاکی توسط محققان مختلف به اثبات رسیده است [۲].

غالب روشهای استفاده شده برای تعیین نیروی محرک لرزه‌ای وارده بر دیوارهای حائل بر پایه تحلیل‌های شبه استاتیکی و بر اساس روش تعادل حدی [۳، ۴، ۵] یا روش مرز بالای آنالیز حدی بوده است [۶] و تاکنون روش مرز پایین در این زمینه مورد استفاده عام قرار نگرفته است. در روش مرز پائین، با یافتن میادین تنش قابل قبول و ارضای شرایط پیوستگی تنش بر روی سطوح ناپیوستگی تنش، مرز پائین جواب مسائل مطروحه، (همچون ظرفیت باربری پی‌ها، ضریب اطمینان شبیها و نیروهای وارده از خاک بر دیوارهای حائل) بدست می‌آید.

این تحقیق به تعیین نیروی محرک لرزه‌ای وارده بر دیوارهای حائل در زمان زلزله با استفاده از روش مرز پائین آنالیز حدی پرداخته است. بدین منظور ابتدا محیط خاک پشت دیوار به دو ناحیه که توسط یک ناپیوستگی تنش از یکدیگر جدا شده‌اند تقسیم شده و میادین تنش قابل قبول برای دو ناحیه فوق‌الذکر تعیین گردیده است. جهت یافتن نتایج عددی از نرم افزار Mathematica استفاده شده و به منظور تعیین اعتبار پاسخ‌های تحلیلی بدست آمده، نتایج در حالاتی خاص با نتایج دیگر روش‌ها مقایسه شده است.

باتوجه به افزایش نیروی محرک خاک در پشت دیوارهای حائل در زمان وقوع زلزله، طراحی مطمئن دیوارهای حائل در نواحی لرزه‌خیز نیازمند تخمین درست ضریب فشار جانبی محرک در حالت لرزه‌ای می‌باشد. یکی از طرق مناسب برای محاسبه این فشار، استفاده از روش‌های حدی است.

بطور کلی، روش‌های حدی را می‌توان به سه گروه شامل روش‌های تعادل حدی، خطوط مشخصه و آنالیز حدی تقسیم نمود. روش‌های حدی روش‌هایی تقریبی جهت حل دقیق مسائل مقدار مرزی می‌باشند [۱].

در روش تعادل حدی با انتخاب معیار گسیختگی و در نظر گرفتن یک مکانیسم گسیختگی فرضی، بار حدی به کمک حل تمام یا بخشی از معادلات تعادل در توده خاک گسیخته شده بدست می‌آید. در روش خطوط مشخصه، ابتدا معیاری برای رفتار خمیری خاک در نظر گرفته می‌شود (مثلاً معیار مور - کولمب). از ترکیب این معیار با معادلات تعادل، دستگاهی از معادلات دیفرانسیل هذلولی بدست می‌آید که به معادلات تعادل خمیری موسوم هستند. حل این معادلات با در نظر گرفتن شرایط مرزی منجر به تعیین میدان تنش در توده خاک مورد بررسی و در نهایت تعیین بار حدی می‌گردد.

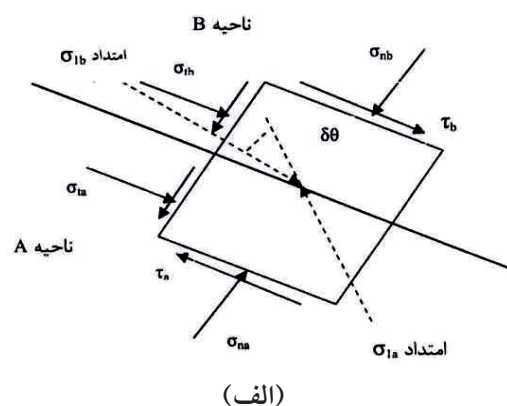
در میان روش‌های حدی، روش آنالیز حدی بدلیل اینکه جایگاه و دقت پاسخ‌های حاصل از آن مشخص است، از اهمیت بیشتری برخوردار است. استفاده از روش آنالیز حدی در مسائل مهندسی ژئوتکنیک به حدود ۷۰ سال

## روش مرز پایین و ناپیوستگی‌های تنش

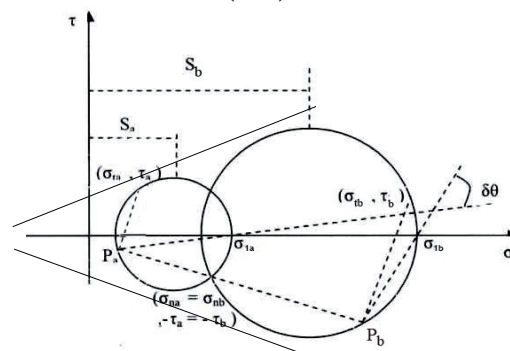
بر اساس روش مرز پائین آنالیز حدی، اگر میدان تنش  $\sigma_{ij}$  یک میدان تنش قابل قبول باشد، آنگاه بار خارجی در تعادل با آن از بار حدی (که منجر به گسیختگی یا انهدام سیستم می‌شود) کمتر است. برای قابل قبول بودن یک میدان تنش، ارضای معادلات تعادل در تمامی محیط و از جمله سازگاری تنشها با شرایط مرزی ضروری است. همچنین نباید مقدار تنش در هیچ نقطه‌ای از محیط از سطح تسلیم فراتر رود ( $f(\sigma) \leq 0$ ).

یکی از راه‌های حل مسائل پایداری به روش مرز پائین، تقسیم محیط به نواحی مناسب و در نظر گرفتن یک میدان تنش قابل قبول برای هر ناحیه است. در شکل (الف)، المانی از محیط در مرز دو ناحیه A و B که هر یک دارای میدان تنشی قابل قبول هستند، نشان داده شده است. در شکل (ب) نیز دواير موهر مربوط به میدان تنش در هر یک از این نواحی دیده می‌شود. برای قابل قبول بودن تنش بر روی این مرز، کافی است که:

$$\begin{aligned} \tau_a &= \tau_b - \text{الف} \\ \sigma_{na} &= \sigma_{nb} - \text{ب} \end{aligned}$$



(الف)



(ب)

شکل ۱: الف- وضعیت دو المان کنار هم در یک ناپیوستگی تنش. ب- دواير موهر المانهای انتخابی در سطح ناپیوستگی تنش

بدین ترتیب الزامی به برابری تنش‌های  $\sigma_{ib}$  و  $\sigma_{ia}$  با یکدیگر نمی‌باشد. با برقراری شروط الف و ب و در صورت عدم برابری  $\sigma_{ib}$  و  $\sigma_{ia}$  بر روی مرز در نظر گرفته شده، این مرز یک ناپیوستگی تنش خواهد بود. با توجه به شکل ۱- ب میتوان رابطه زیر را میان دواير موهر در دو ناحیه A و B نوشت:

$$\frac{S_b + C \cdot \cot \phi}{S_a + C \cdot \cot \phi} = \frac{\cos(\delta\theta - \rho)}{\cos(\delta\theta + \rho)} \quad (1)$$

که در آن:

$S_b$  = طول مرکز دایره موهرالمان تنش انتخابی از سطح ناپیوستگی تنش در ناحیه B.  
 $S_a$  = طول مرکز دایره موهرالمان تنش انتخابی از سطح ناپیوستگی تنش در ناحیه A.  
 $C$  = چسبندگی خاک.

$\phi$  = زاویه اصطکاک داخلی خاک.

$\delta\theta$  = زاویه چرخش جهت تنش اصلی از ناحیه A به ناحیه B در سطح ناپیوستگی تنش و  $\rho$  زاویه‌ای کمکی می‌باشد که از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$\sin \rho = \cos \delta\theta \cdot \sin \phi \quad (2)$$

رابطه بالا در حالت خاک‌های چسبنده ( $\phi=0$ ) به صورت مبهم در می‌آید که با رفع ابهام آن خواهیم داشت:

$$S_b - S_a = 2C \cdot \sin \delta\theta \quad (3)$$

## هندسه دیوار حائل مورد مطالعه و میدان‌های تنش انتخابی

هندسه انتخابی دیوار حائل در شکل ۲- الف ارائه شده است. در این شکل میادین تنش انتخابی A و B که با یک سطح ناپیوستگی تنش از یکدیگر مجزا شده‌اند، معرفی گردیده‌اند. تنشهای برشی بر روی صفحات افقی و قائم ناحیه I به صورت ضریبی از تنش قائم آن تراز اعمال شده است. این ضریب منعکس کننده اثر زلزله به صورت معادل استاتیکی آن است. در ناحیه II برای المان تنش A، تنش‌های قائم ( $p_{av}$ ) و برشی ( $p_{ah}$ ) می‌تواند با فرض برقراری معیار موهر- کولمب به صورت رابطه (۴) به یکدیگر مرتبط شوند:

$$p_{av} = C_w + p_{ah} \tan(\phi_w) \quad (4)$$

مقادیر  $C_w$  و  $\phi_w$  غالباً بین  $\frac{1}{2}$  تا  $\frac{2}{3}$  چسبندگی و

زاویه اصطکاک داخلی خاک پشت دیوار در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله به جای عبارت  $\tan(\phi_w)$  از پارامتر  $\mu$  استفاده شده است.

همانگونه که از شکل ۲- ب مشخص می‌گردد، زاویه بین راستای اثر تنش اصلی حداکثر در محیط A ( $\sigma_{1A}$ ) و

جدول ۱: مراحل محاسبه به ازای:  
 $\gamma = 20(kN/m^3)$ ,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $C = 5kPa$ ,  
 $\mu = \tan(\varphi/2)$ ,  $k_h = 0.2$

z(m)	$S_b$	$S_a$	$\delta\theta$	$\rho$	$(kN/m^2) p_{ah}$
۲	۲۸/۱	۳۴/۵	-۰/۲	۰/۳۴	۱۸/۳۹
۴	۶۰/۴	۷۲/۴	-۰/۲۲	۰/۳۴	۴۳/۹۷
۶	۹۲/۷	۱۱۰/۴	-۰/۲۲	۰/۳۴	۶۹/۷۳
۸	۱۲۵	۱۴۸/۳	-۰/۲۲	۰/۳۴	۹۵/۵

روش عددی حل می‌گردند.

در جدول ۱، مراحل یافتن پاسخ مسئله مورد مطالعه در حالت کلی برای مقادیر عددی نمونه‌ای ارائه شده است. در ادامه ابتدا حل تحلیلی در حالت زهکشی نشده ( $\varphi=0$ ) ارائه شده است و سپس در حالت خاک‌های دانه‌ای، جواب‌های حاصل از راه حل ارائه شده با پاسخ‌های ارائه شده توسط دیگر محققان مقایسه شده است. برای تمامی حالات مقدار  $C_w$  برابر با صفر فرض گردیده است.

### حالت زهکشی نشده ( $\varphi=0$ )

در شرایط زهکشی نشده، معادلات ۱-۲ و ۱-۴ (ارائه شده در پیوست) به فرم ساده معادلات زیر تبدیل می‌گردند:

$$S_b = \gamma \cdot z - \sqrt{C^2 - (k_h \cdot \gamma \cdot z)^2} \quad (\text{الف-۱-۸})$$

$$S_a = p_{ah} + \sqrt{C^2 - p_{ah}^2 \cdot \mu^2} \quad (\text{ب-۱-۸})$$

با جایگزینی مقادیر  $S_b$  و  $S_a$  از معادله ۱-۸ در معادله ۱-۷ و سپس اعمال نتیجه در معادله ۱-۳ و حل معادله بر حسب  $P_{ah}$  خواهیم داشت:

$$p_{ah} = \gamma \cdot z - C \quad (۹)$$

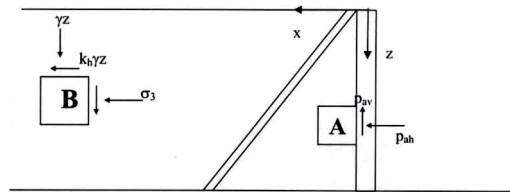
$$+ 2C \sin\left(0.5 \arctan\left(\frac{\gamma \cdot z \cdot k_h}{\sqrt{C^2 - \gamma^2 \cdot z^2 \cdot k_h^2}}\right)\right)$$

$$- \sqrt{C^2 - z^2 \cdot \gamma^2 \cdot k_h^2}$$

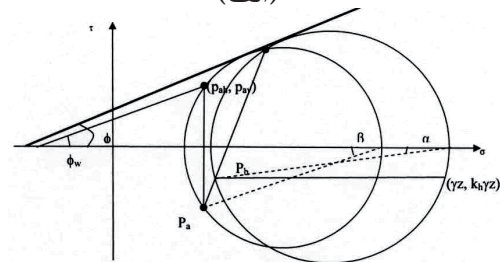
بعنوان نمونه‌ای عددی برای حالت زهکشی نشده، مقادیر  $p_{ah}$  به ازای  $\gamma = 20(kN/m^3)$  و  $C = 20(kN/m^2)$  برای مقادیر مختلف ضریب افقی شتاب زلزله و در اعماق مختلف، در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

### مقایسه نتایج با دیگر محققان

اکابه [۳] و مونونوبه و ماتسائو [۷] مبانی تحلیلی شبه استاتیکی را برای محاسبه رانش لرزه‌ای خاک بر سازه‌های حائل پایه‌ریزی کرده‌اند. این روش که در مقیاس وسیعی مورد استفاده مهندسان قرار گرفته بنام روش مونونوبه-اکابه معروف گردیده است. روش مذکور در واقع



(الف)



(ب)

شکل ۲: الف: هندسه دیوار حائل مورد بررسی، تقسیم‌بندی نواحی و میادین تنش انتخابی A و B ب: دایره موهر تنش در المانهای A و B

راستای اثر تنش اصلی حداکثر در ناحیه B ( $\sigma_{1B}$ ) که با  $\delta\theta$  نمایش داده می‌شود، برابر است با:

$$\alpha \beta = \delta\theta \quad (۵)$$

مقادیر زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  با رابطه زیر قابل دستیابی هستند:

$$\tan(2\beta) = p_{av} / (S_a - p_{ah}) \quad (\text{الف-۶})$$

$$\tan(2\alpha) = k_h \cdot \gamma \cdot z / (\gamma \cdot z - S_b) \quad (\text{ب-۶})$$

در روابط ۶-الف و ۶-ب،  $S_a$  و  $S_b$  به ترتیب معرف مختصات مرکز دایره موهر A و B هستند. مقدار  $\delta\theta$  برای شکل ۲-ب برابر است با:

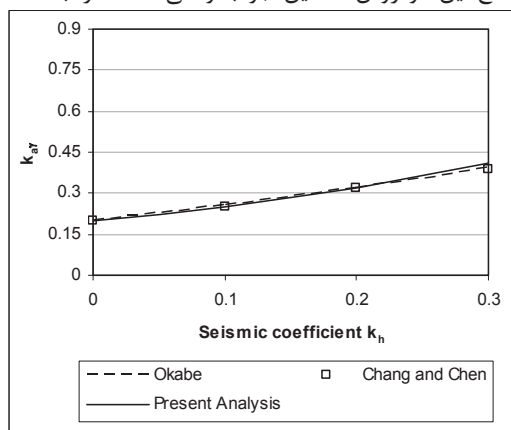
$$\delta\theta = 0.5 [\text{Arc tan}(p_{av} / (S_a - p_{ah})) - \text{Arc tan}(k_h \cdot \gamma \cdot z / (\gamma \cdot z - S_b))] \quad (۷)$$

برای تعیین فشار محرک در حالت لرزه‌ای با معلوم بودن شرایط تنش ناحیه B و پارامترهای مقاومت برشی خاک، باید ابتدا با توجه به شکل ۲-ب مقادیر  $S_a$  و  $S_b$  را بدست آورد.  $S_b$  با توجه به اینکه دایره موهر B با مرکز  $S_b$  و شعاع  $r_b$  از نقطه با مختصات  $(\gamma \cdot z, k_h \cdot \gamma \cdot z)$  عبور می‌کند و بر پوش گسیختگی موهر - کلمب مماس است، بدست می‌آید. به نحوی مشابه،  $S_a$  با توجه به اینکه دایره موهر A با مرکز  $S_a$  و شعاع  $r_a$  از نقطه  $(p_{ah}, \mu \cdot p_{ah})$  عبور می‌کند و بر پوش گسیختگی موهر - کلمب مماس است، بدست می‌آید.

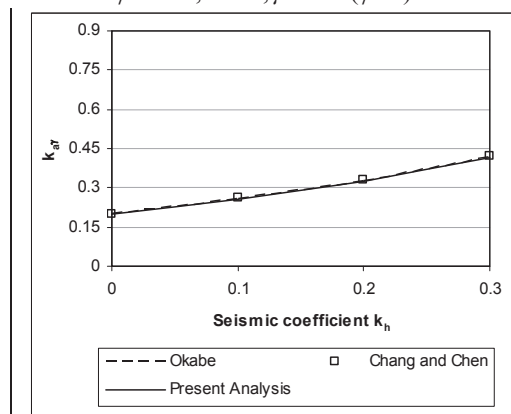
با توجه به آنچه گفته شد، حل کامل مسئله مورد مطالعه با حل دستگاه معادلات متشکل از معادلات (۱)، (۲)، (۴)، (۷)، (۸) و (۹) که مجهولات آنها  $S_a$ ،  $S_b$ ،  $\rho$ ،  $\delta\theta$ ،  $P_{ha}$  و  $P_{av}$  می‌باشند، امکان‌پذیر است. حل معادلات مذکور بطور تحلیلی مشکل بوده و این معادلات در حالت کلی به

در شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر ضریب فشار جانبی افقی لرزه‌ای محرک خاک‌های دانه‌ای برای زاویه اصطکاک داخلی  $20^\circ$  درجه و برای دو حالت  $\mu = \tan(\varphi/3)$  و  $\mu = \tan(2\varphi/3)$  با نتایج دیگر محققان مقایسه شده است. در هر حالت پاسخ  $p_{ah}$  به ازای مقادیر مختلفی از ضریب زلزله در اعماق مختلف محاسبه و مقدار ضریب فشار محرک افقی لرزه‌ای در تمامی حالات از رابطه  $k_{ah} = p_{ah}/(\gamma \cdot z)$  تعیین و ترسیم گردیده است.

در شکل‌های شماره ۶ و ۷ نیز مقایسه‌ای مشابه میان نتایج برای زاویه اصطکاک داخلی برابر با  $40^\circ$  درجه آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در تمامی حالات نتایج روش ارائه شده در این تحقیق به مقادیر نظیر در روش مونونوبه-اکابه [۳] و همچنین چانگ و چن [۶] بسیار نزدیک بوده و اختلاف عددی آنها با یکدیگر بسیار ناچیز است. علاوه بر این، با توجه به آنکه روش چانگ و چن و روش تحقیق حاضر مرزهای بالا و پایین جواب را تعیین می‌کنند، نزدیکی پاسخ این دو روش تخمین جواب واقعی مسئله را با دقت



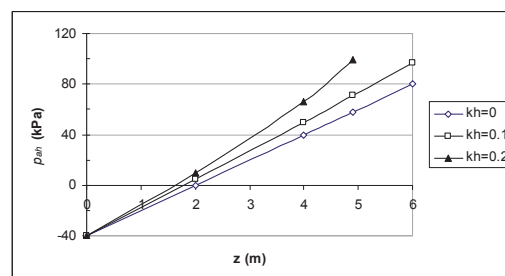
شکل ۶: مقایسه ضرایب فشار جانبی محرک لرزه‌ای برای:  $\varphi = 40^\circ$ ,  $C = 0$ ,  $\mu = \tan(\varphi/3)$



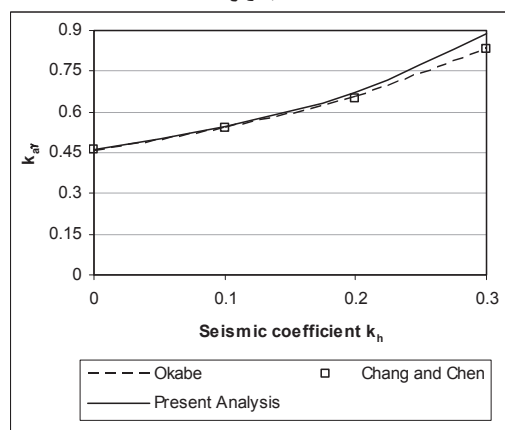
شکل ۷: مقایسه ضرایب فشار جانبی محرک لرزه‌ای برای:  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\mu = \tan(2\varphi/3)$

بسط مستقیم تئوری استاتیکی کولمب برای شرایط شبه استاتیکی می‌باشد.

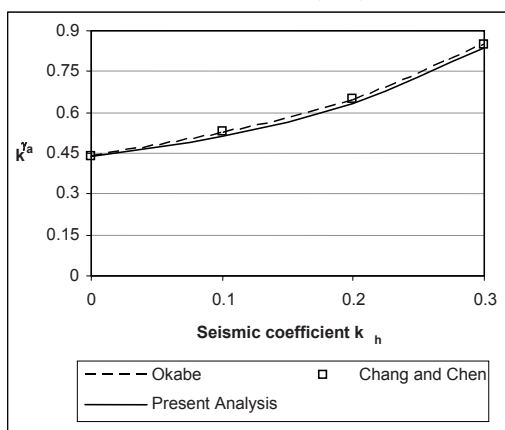
چانگ و چن [۶] با استفاده از روش مرز بالای آنالیز حدی، مسائل تعیین فشارهای مقاوم و محرک وارد بر دیوارهای حائل را در حالت لرزه‌ای حل نموده‌اند.



شکل ۳: تغییرات فشار جانبی نسبت به عمق در حالت محرک برای خاک چسبنده به ازای  $\gamma = 20 (kN/m^3)$  و  $C = 20 (kN/m^2)$  برای مقادیر مختلف ضریب افقی شتاب زلزله



شکل ۴: مقایسه ضرایب فشار جانبی محرک لرزه‌ای برای  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\mu = \tan(\varphi/3)$



شکل ۵: مقایسه ضرایب فشار جانبی محرک لرزه‌ای برای  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\mu = \tan(2\varphi/3)$

جدول ۲: ضرایب فشار جانبی خاک در حالت محرک برای خاک‌های دانه‌ای ( $C=0$ )

$k_h$	$\phi$ (درجه)	$\mu$	
		$\tan(\phi/3)$	$\tan(2\phi/3)$
۰	۲۰	۰/۴۶	۰/۴۴
	۳۰	۰/۳۱	۰/۲۹
	۴۰	۰/۲۰	۰/۱۸
۰/۱	۲۰	۰/۵۵	۰/۵۱
	۳۰	۰/۳۷	۰/۳۴
	۴۰	۰/۲۵	۰/۲۳
۰/۲	۲۰	۰/۶۷	۰/۶۳
	۳۰	۰/۴۶	۰/۴۳
	۴۰	۰/۳۲	۰/۲۹
۰/۳	۲۰	۰/۸۹	۰/۸۴
	۳۰	۰/۵۸	۰/۵۵
	۴۰	۰/۴۱	۰/۳۸

### نتایج عددی

بمنظور امکان کاربرد نتایج تحقیق حاضر، در جدول ۲ مقادیر ضرایب فشار جانبی خاک‌های دانه‌ای در حالت لرزه‌ای برای ضرایب شتاب صفر، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳، زاویه اصطکاک داخلی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه و در نظر گرفتن دو مقدار  $\frac{1}{3}\phi$  و  $\frac{2}{3}\phi$  برای زاویه اصطکاک میان خاک و دیوار آورده شده است.

به خوبی ملاحظه می‌شود که مقادیر ضرایب فشار جانبی با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و همچنین با افزایش زاویه اصطکاک میان خاک و دیوار کاهش می‌یابد. همچنین نرخ کاهش این ضریب با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک در خور توجه است. برای مثال، افزایش ۱۰۰ درصدی زاویه اصطکاک داخلی خاک (از ۲۰ به ۴۰ درجه) منجر به کاهش ۵۳ درصدی ضریب فشار جانبی (از ۰/۸۹ به ۰/۴۱) در حالت ضریب زلزله برابر با ۰/۳ شده است، لیکن افزایش ۱۰۰ درصدی زاویه اصطکاک بین خاک و دیوار (از  $\frac{1}{3}\phi$  به  $\frac{2}{3}\phi$ ) در همان شرایط، حدود ۷ درصد از ضریب فشار جانبی کاسته است.

### جمع بندی و نتیجه گیری

در مقاله حاضر با استفاده از تئوری روش مرز پائین آنالیز حدی، فرمولاسیون لازم جهت تعیین مقادیر ضرایب فشار جانبی محرک خاک در شرایط لرزه‌ای تعیین گردیده است. نتایج حاصله عبارتند از:

- ۱- الگوریتم ارائه شده قادر به تعیین مقدار فشار لرزه‌ای محرک افقی در هر عمق، حتی در کلی‌ترین حالت می‌باشد.
- ۲- پاسخ روش به کار گرفته شده در این تحقیق با نتایج دیگر محققان هماهنگی خوبی دارد.

بسیار بالا میسر می‌سازد. پاسخ تحلیلی مسئله با استفاده از روش مرز پائین در حالتی که  $k_h$  برابر با صفر باشد و برای خاک‌های دانه‌ای ( $C=0$ ) مطابق رابطه (۱۰) می‌باشد [۲].

$$P_{ah} = \gamma \cdot z \tan^2(45 - \phi/2) \quad (10)$$

مطابق روش ارائه شده در این تحقیق نیز پاسخ در شرایط مشابه محاسبه و انطباق کامل پاسخ با رابطه (۱۰) وجود دارد.

### مراجع

- 1- Askari, F. and Moghaddam, R., F., "Surcharge effect on seismic passive earth pressure by characteristic lines method.", Research Project (in persian), 2009.
- 2- Chen, W. F. and Liu, X. L. (1990), "Limit analysis in soil mechanics", Elsevier.
- 3- Okabe, S. (1926), "General theory of earth pressure", J. Japanese Soc. of Civ. Engrs, Tokyo, 12(1).
- 4- Richards, R., C. Huang, and K. L. Fishman (1999), "Seismic earth pressure on retaining structures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 125(9), 771-778.
- 5- Sherif, M. A. and Y. S. Fang (1984) «Dynamic earth pressure on walls rotating about top», Soils and Foundations, 24 (4), 109-117.
- 6- Chang, M. F. And Chen, W. F., (1982), "Lateral earth pressures on rigid retaining walls subjected to earthquake forces", Solid mechanic archives, Vol. 7, Martinus nijhoff publishers, the Hague, the Netherlands, pp. 315-362
- 7- Mononobe, N., and H. Matsuo (1929) On the determination of earth pressures during earthquakes. Proc., World Engrg. Conf., 9, 176.