

مقایسه ای بین روابط تحلیلی و عددی تعیین نیروهای وارده بر پوشش تونل تحت اثر بارگذاری لرزه ای

محمدرضا مومن زاده^۱، محمد رضا منصوری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

mr.momenzadeh@srbiau.ac.ir

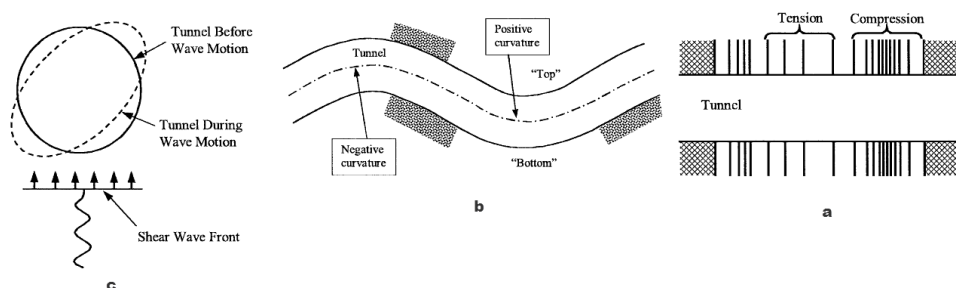
خلاصه

تجربه نشان داده که میزان آسیب ناشی از زلزله بر روی سازه های زیرزمینی نسبت به سازه های روسطحی کمتر بوده ولی موارد فراوانی وجود دارد که نیروی زلزله باعث وارد آوردن صدمات جبران ناپذیری به فضاهای زیرزمینی گردیده است. این امر لزوم پرداختن به تحلیل لرزه ای فضاهای زیرزمینی را دو چندان می کند. در این مقاله روابط فرم بسته حاصل از اثر متقابل اندرکنش خاک و سازه در تونل های دایره ای تحت بارگذاری لرزه ای، که توسط Wang(1993) و Penzien(2000) ارائه شده است را با نتایج حاصل از نرم افزار المان محدود Plaxis 2D در شرایط کرنش مسطح با هم مقایسه می کنیم.

کلمات کلیدی: بارگذاری لرزه ای، تونل دایره ای، اندرکنش خاک و سازه، روابط فرم بسته

۱. مقدمه

در تحلیل و طراحی لرزه ای سازه های زیرزمینی ملاک اصلی تحلیل، تغییر شکل سازه و خاک است. در حالت عمومی تاثیر بارهای طراحی لرزه ای برای سازه های زیرزمینی محصور با خاک، در بخش کرنش ها و تغییر شکل های سازه مورد ارزیابی قرار می گیرد، که متاثر از اثر متقابل خاک و سازه می باشد. محققین زیادی به ارزیابی اثر زلزله بر روی پوشش تونلها پرداخته اند. [1] Park at el(2008)، تغییر شکل بیضی شدن پوشش تونل های دایره ای شکل را در شرایط بدون لغزش مورد مطالعه قرار دادند. Owen and Scholl (1986) [2]، تغییر شکل های موجود در سازه های زیرزمینی تحت اثر بارگذاری لرزه ای را به سه دسته تقسیم کردند: الف) انبساط و فشردگی طولی ب) خمش طولی ج) تغییر شکل های بیضی شدن. (شکل ۱)



شکل ۱- تغییر شکل های به وجود آمده در تونل تحت بارگذاری لرزه ای

a- تغییر شکل محوری در امتداد تونل b- خمش طولی c- تغییر شکل بیضی شدگی (ovaling) [3]

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
^۲ عضو هیئت علمی گروه مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

تغییر شکل بیضی شدگی (ovaling) تونل از مهمترین تغییر شکل های تونل تحت بار زلزله می باشد. این تغییر شکل هنگامی که موج برشی عمود بر محور تونل انتشار یابد ایجاد می گردد و باعث ایجاد نیرو و تغییر شکل در سطح مقطع تونل می شود. طراحی پوشش تونل توسط این تغییر شکل باید در شرایط کرنش مسطح انجام پذیرد. [۳]

از جمله معتبرترین روابط فرم بسته که برای پوشش تونلهای دایره ای تحت بارگذاری لرزه ای ارائه شده است، روابط Wang(1993) و Penzien(2000) می باشد. این دو محقق روشهای فرم بسته مشابهی برای ماکزیمم نیروهای پوشش تونل، هنگام تغییر شکل بیضی شدن تونل ارائه دادند. این روابط با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، نیروی محوری ماکزیمم، لنگر خمشی ماکزیمم، نیروی برشی ماکزیمم و تغییر شکل بیضی شدن پوشش تونل را محاسبه می کند.

۲. روش Wang(1993)

ونگ راه حل های موجود برای محاسبه معادلات ایجاد شده تحت بارگذاری لرزه ای را مورد بازبینی قرار داد. براساس مطالعات مختلف انجام شده توسط ونگ، لغزش کامل در سطح مشترک خاک و پوشش تونل، تنها زمانی که خاک نرم باشد و یا بار لرزه ای شدید باشد، امکان پذیر است. برای اغلب تونل ها شرایط سطح مشترک خاک و پوشش تونل حد میان شرایط بدون لغزش و لغزش کامل می باشد. بنابراین باید هر دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل در نظر گرفته شود تا بتوان تغییر شکل ها و نیروهای بحرانی پوشش تونل را مشخص نمود. اما فرض لغزش کامل باعث می گردد تا نیروی فشاری بطور قابل ملاحظه ای کمتر تخمین زده شود، پس برای تخمین حداکثر نیروی فشاری باید از شرایط بدون لغزش استفاده نمود. تونل های دایره ای شکل در اثر مؤلفه قائم بارهای دینامیکی تغییر شکل داده و اصطلاحاً مقطع شان تخم مرغی شکل می شود. مسأله تغییر شکل مقطع این تونل ها را می توان به دو صورت بررسی نمود؛ در حالت اول این مورد مطرح است که حتی اگر تونل و حفاری وجود نداشته باشد و در یک محیط الاستیک، فقط یک تونل فرضی در نظر گرفته شود (شکل ۲-ا)، در اثر موج دینامیکی، تغییر شکلی در مقطع تونل فرضی بوجود خواهد آمد، که این تغییر شکل فقط به کرنش برشی بوجود آمده در اثر بار لرزه ای، وابسته بوده و از فرمول زیر به دست می آید: [۴ و ۸]

$$\frac{\Delta d}{d} = \pm \frac{\gamma_{max}}{2} \quad (1)$$

که در آن:

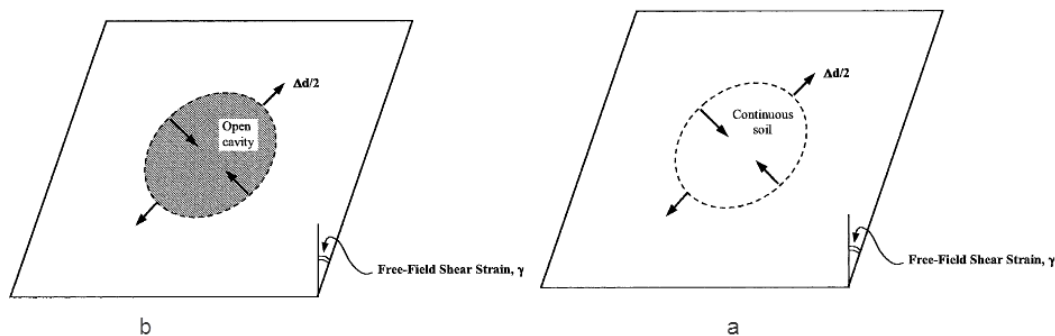
γ_{max} : بیشینه کرنش برشی آزاد در مواد اطراف حفاری فرضی :

Δd : تغییر قطر تونل

d : قطر تونل

در یک حفاری واقعی (شکل ۲-ب) تغییر شکل مقطع (تخم مرغی شدن) علاوه بر کرنش برشی، به نسبت پواسون مواد اطراف تونل نیز وابسته است که مقدار این تغییر شکل از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\Delta d}{d} = \pm 2\gamma_{max}(1-\nu_m) \quad (2)$$



شکل ۲- ا- محیطی الاستیک بدون حضور تونل - b- محیطی الاستیک با حضور تونل دایره ای شکل [۳]

در روابط ۱ و ۲ اثر اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته نشده است. برای محاسبه اندرکنش بین تونل و خاک ابتدا باید سختی نسبی تونل نسبت به زمین مشخص گردد. این سختی توسط ضریب فشردگی C و ضریب نرمی F تعریف می گردند که عبارتند از:

$$C = \frac{E_m \cdot (1 - \theta^2)_L \cdot R}{E_L \cdot t_L \cdot (1 + \theta_m) \cdot (1 - 2\theta_m)} \quad (3)$$

$$F = \frac{E_m \cdot (1 - \theta^2)_L \cdot R^3}{6E_L \cdot I_L \cdot (1 + \theta_m)} \quad (4)$$

با فرض شرایط لغزش کامل داریم:

$$\gamma_{free-field} = \frac{V_s}{C_s} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta D_{max}}{D} = \pm \frac{1}{3} K_1 F \gamma_{free-field} \quad (6)$$

$$M_{max} = \pm \frac{1}{6} k_1 \frac{E_m}{1 + \theta_m} R^2_L \times \gamma_{free-field} \quad (7)$$

$$T_{max} = \pm \frac{1}{6} k_1 \frac{E_m}{(1 + \theta_m)} r \gamma_{free-field} \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{12(1 - \theta_m)}{2F + 5 - 6\theta_m} \quad (9)$$

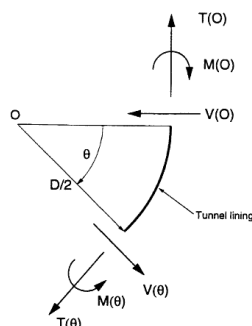
که در آن: $\gamma_{free-field}$: کرنش برشی میدان آزاد، $\frac{\Delta D_{max}}{D}$ تغییر شکل مقطع، M_{max} لنگر خمشی ماکزیمم روی پوشش تونل، T_{max} نیروی محوری ماکزیمم روی پوشش تونل

طبق مطالعات انجام شده، لغزش بین زمین و پوشش در تونل های واقع در خاک نرم یا تونل هایی که تحت زلزله شدید قرار می گیرند، اتفاق می افتد. در بیشتر تونل ها، شرایط لغزش، حالتی بین لغزش کامل و بدون لغزش می باشد، در نتیجه بهتراست برای بدست آوردن نیروهای بحرانی هر دو حالت محاسبه شوند. فرضیات لغزش کامل تحت برش خالص، نیروی محوری کمتری نسبت به حالت بدون لغزش می دهد، در نتیجه پیشنهاد می شود از فرمول زیر برای محاسبه نیروی محوری ماکزیمم در پوشش تونل ها استفاده شود.

$$T_{max} = \pm k_2 \frac{E_m}{2(1 + \theta_m)} R_L \times \gamma_{free-field} \quad (10)$$

$$k_2 = 1 + \frac{F[(1 - 2\theta_m) - (1 - 2\theta_m)C] - \frac{1}{2}(1 - 2\theta_m)^2 C + 2}{F[(3 - 2\theta_m) + (1 - 2\theta_m)C] + C[\frac{5}{2} - 8\theta_m + 6\theta_m^2] + 6 - 8\theta_m} \quad (11)$$

که در آن: E_m مدول الاستیسیته موثر خاک، θ_m : ضریب پواسون خاک، R : شعاع اسمی پوشش تونل، t_L : ضخامت پوشش تونل، θ_L : ضریب پواسون پوشش تونل، I_L : ممان اینرسی پوشش در واحد عرض، E_L : مدول الاستیسیته پوشش تونل، γ_{max} : کرنش برشی ماکزیمم، V_s : سرعت ماکزیمم زمین و C_s : سرعت انتشار موج برشی موثر می باشد.
در شکل ۳ مقطعی از نیروهای بوجود آمده در تونل های دایره ای شکل می بینیم.

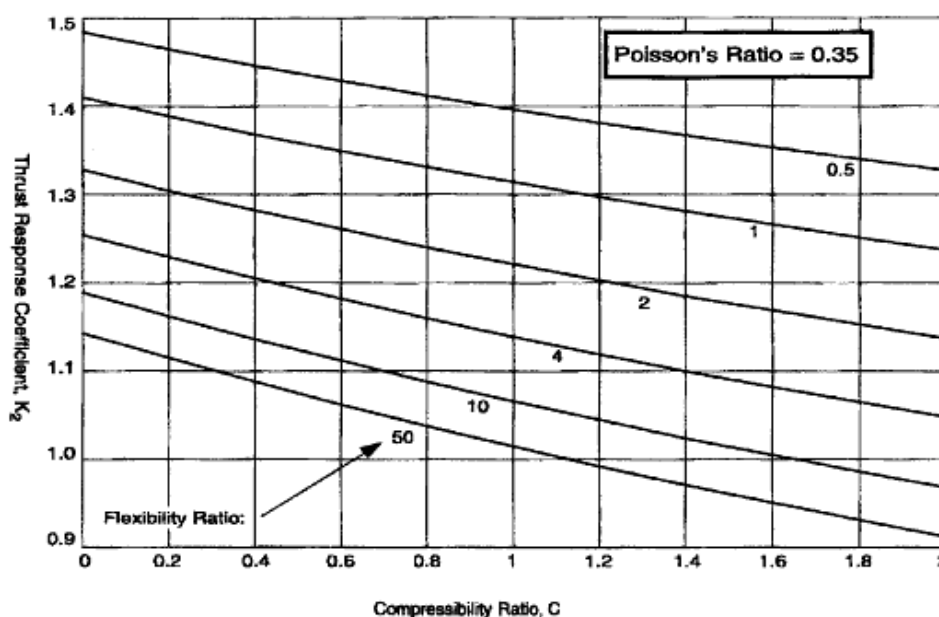
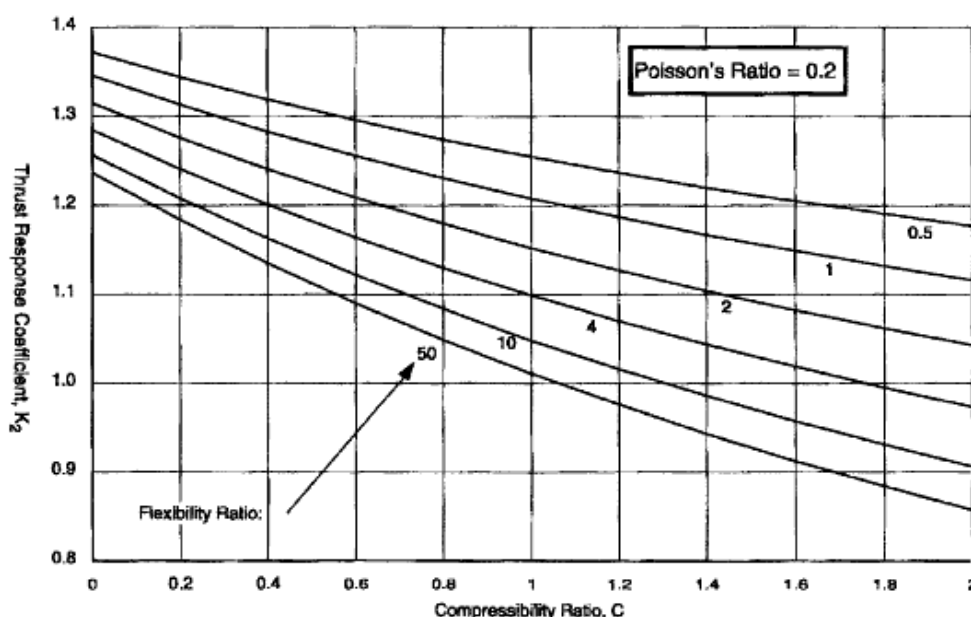


شکل ۳- نیروهای بوجود آمده در تونل های دایره ای

نسبت تغییر شکل پوشش به تغییر شکل میدان آزاد از رابطه زیر بدست می آید. همچنین می توان برای تعیین این نسبت از شکل ۴ استفاده کرد.

$$\frac{\Delta D_{\text{lining}}}{\Delta D_{\text{free-field}}} = \frac{2}{3} K_1 F \quad (12)$$

نتایج نشان می دهند وقتی که نسبت انعطاف پذیری F تقریباً کمتر از ۱ است پوشش تمایل به مقاومت دارد. لذا کمتر از حالت آزاد تغییر شکل پیدا می کند. این وضعیت زمانی ممکن است که یک پوشش سخت در خاک نرم تا خاک خیلی نرم ساخته شود. چنانچه نسبت انعطاف پذیری افزایش یابد پوشش بیشتر از حالت آزاد منحرف می شود و ممکن است چنانچه نسبت انعطاف پذیری افزایش یابد پوشش بیشتر از تغییر شکل آزاد انحناء پیدا می کند تا اینکه به یک حد بالا (Upper Limit) می رسد. حد بالای انحناء تغییر شکل زمین سوراخ شده است و مربوط به پوشش کاملاً انعطاف پذیر می باشد.



شکل ۴- تغییر شکل پوشش تونل نسبت به زمین در برابر افزایش نرمی در شرایط لغزش کامل

۳. روش Penzien(2000)

Penzien پاسخهای عددی ساده شده توسعه یافته ای راروی پوشش تونل ارائه داد. با فرض شرایط لغزش کامل پاسخهایی برای نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در پوشش تونلهای دایره ای با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه تحت بارگذاری زلزله به شکل زیر ارائه داد: [۵ و ۸]

$$\Delta d^n_{lining} = R^n \Delta d_{free-field} = R^n \frac{d}{2} \gamma_{max} \quad (13)$$

$$T_{max} = \pm \frac{12E_I I \Delta d^n_{lining}}{d^3(1-\theta_l^2)} = \pm \frac{6E_I I R^n \gamma_{max}}{d^2(1-\theta_l^2)} \quad (14)$$

$$M_{max} = \pm \frac{6E_I I \Delta d^n_{lining}}{d^2(1-\theta_l^2)} = \pm \frac{3E_I I R^n \gamma_{max}}{d(1-\theta_l^2)} \quad (15)$$

$$V_{max} = \pm \frac{24E_I I \Delta d^n_{lining}}{d^3(1-\theta_l^2)} = \pm \frac{12E_I I R^n \gamma_{max}}{d^2(1-\theta_l^2)} \quad (16)$$

نسبت اعوجاج خاک - تونل به صورت زیر تعریف می شود:

$$R^n = \pm \frac{4(1-\theta_m)}{(\alpha^n+1)} \quad (17)$$

$$\alpha^n = \frac{12E_I I (5-6\theta_m)}{d^3 G_m (1-\theta_l^2)} \quad (18)$$

با فرض شرایط عدم لغزش روابط بالا به شکل زیر اصلاح می شوند:

$$\Delta d_{lining} = R \cdot \Delta d_{free-field} = R \cdot \frac{d}{2} \gamma_{max} \quad (19)$$

$$T_{max} = \pm \frac{12E_I I \Delta d_{lining}}{d^3(1-\theta_l^2)} = \pm \frac{6E_I I R \gamma_{max}}{d^2(1-\theta_l^2)} \quad (20)$$

$$M_{max} = \pm \frac{6E_I I \Delta d_{lining}}{d^2(1-\theta_l^2)} = \pm \frac{3E_I I R \gamma_{max}}{d(1-\theta_l^2)} \quad (21)$$

$$V_{max} = \pm \frac{24E_I I \Delta d_{lining}}{d^3(1-\theta_l^2)} = \pm \frac{12E_I I R \gamma_{max}}{d^2(1-\theta_l^2)} \quad (22)$$

$$R = \pm \frac{4(1-\theta_m)}{(\alpha+1)} \quad (23)$$

$$\alpha = \frac{12E_I I (5-6\theta_m)}{d^3 G_m (1-\theta_l^2)} \quad (24)$$

که پارامترهای آن در روش Wang تعریف شده است.

۴. مشخصات هندسه و مصالح خاک و تونل

مدل سازی سیستم خاک و تونل در نرم افزار المان محدود PLAXIS 2D انجام شده است. مشخصات خاک و سازه به صورت خطی والاستیک در نظر گرفته شده است. پوشش تونل دایره ای شکل به شعاع ۳ متر است. به منظور لحاظ کردن اثر ترک خوردگی، ضریب ۰/۵ را در محاسبه ممان اینرسی پوشش تونل اثر می دهیم.

مشخصات خاک استفاده شده در این تحلیل در جدول ۱ و مشخصات لاینینگ تونل در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱ - مشخصات خاک الاستیک

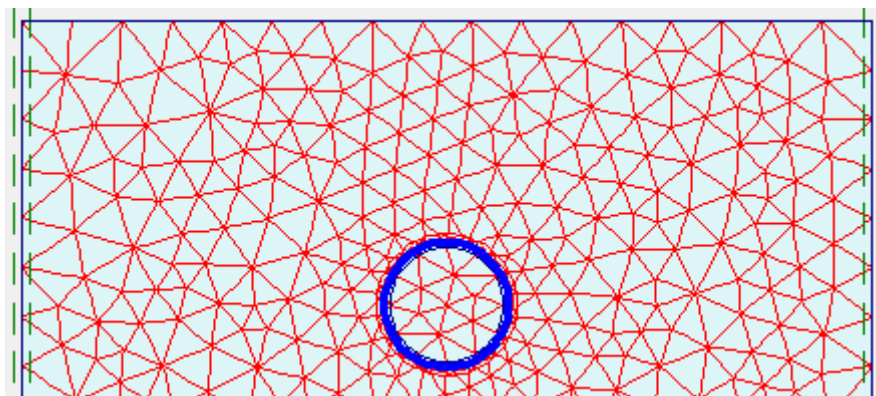
کرنش برشی ماکزیمم (γ_{max})	مدول الاستیسیته ($\frac{KN}{m^2}$)	ضریب پواسون
	300000	0.3

جدول ۲ - مشخصات پوشش تونل دایره ای

شعاع (m)	مدول الاستیسیته ($\frac{KN}{m^2}$)	ضریب پواسون	سطح مقطع در واحد عرض ($\frac{m^2}{m}$)	ممان اینرسی ($\frac{m^4}{m}$)	ضخامت (m)
3	25000000	0.25	0.3	0.00250	0.3

۵. شرایط مدل سازی

مدل plane strain با المانهای ۱۵ گره ای مثلثی، ابعاد خاک مدل سازی شده ۴۵×۶۰ متر می باشد. باید به این نکته توجه داشت که در مدل سازی نرم افزاری شرایط بدون لغزش حاکم است. تونل در ارتفاع ۱۰ متری سطح زمین قرار دارد. بخشی از مدل مش بندی شده آنالیز را در شکل ۵ می بینیم.



شکل ۵ - بخشی از مدل المان محدود

از آنجائیکه هدف مقایسه پاسخهای فرم بسته Wang و Penzien، با مدل سازی المان محدود است باید همان فرضیهایی که در روش تحلیلی استفاده شده است برای مدل المان محدود نیز استفاده گردد. شرایط کرنش صفحه ای (plane strain) و بارگذاری لرزه ای به صورت برش خالص در ابتدا و انتهای مرزها به صورت مثلثی انجام می گیرد. در مورد شرایط بارگذاری در مدل سازی باید به این نکته توجه داشت که ابتدا باید کرنش برشی ماکزیمم را برای خاک مورد بررسی محاسبه کنیم، که برای خاک مورد مطالعه مامقدارش ۰/۰۰۲۰۳ می باشد. سپس با چندین آنالیز سعی و خطا در مدل المان محدود به این کرنش برشی ماکزیمم برسیم.

نکته دیگری که در مدل سازی باید دقت شود ساخت مرحله ای (Stage construction)، تونل می باشد. قبل از اعمال بارگذاری برشی، باید تونل در چند فاز، بسته به روش های مدل سازی ساخت تونل، حفاری شود تا خروجی های تحلیل شده توسط نرم افزار به نتایج واقعی نزدیکتر باشند. [۶]

در مدل سازی باید دقت شود المان سطح مشترک (Interface) به درستی تعریف شود. سطوح مشترک به صورت خط تیره در سمت راست خط هندسی برای نشان دادن طرفی که در آن اندرکنش با خاک صورت می پذیرد نشان داده می شود. زیری اندرکنش به وسیله انتخاب اندازه مناسب بر ضریب کاهش مقاومت، مدل می شود (R_{inter}). این فاکتور مقاومت سطح مشترک (اصطکاک دیوار و چسبندگی) را به مقاومت خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک) مربوط می سازد. عموماً برای اندرکنش خاک و سازه واقعی، سطح مشترک ضعیفتر و دارای انعطاف پذیری بیشتری نسبت به لایه خاک وابسته به آن است. این بدان معنی است که اندازه R_{inter} باید کمتر از یک باشد. معمولاً R_{inter} را برابر $\frac{2}{3}$ در نظر می گیرند. مشخصات سطح مشترک از مشخصات خاک در داده های وابسته به آن و با استفاده از فاکتور کاهش مقاومت بنا به قوانین زیر محاسبه می شود: [۷]

$$C_i = R_{inter} C_{soil} \quad (25)$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil} \quad (26)$$

۶. مقایسه پاسخهای المان محدود با روابط فرم بسته

نتایج مربوط به روابط فرم بسته تونل های دایره ای که توسط Wang و Penzien ارائه شده اند، در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- نیروها و لنگرهای محاسبه شده با روابط فرم بسته در تونل های دایره ای

نیروها	Wang		Penzien		درصد اختلاف (%)	
	لغزش کامل	بدون لغزش	لغزش کامل	بدون لغزش	لغزش کامل	بدون لغزش
	57.29	998.45	54.64	109.153	4.85	814.73
M	171.88	171.88	163.92	163.73	4.86	4.98
	-	-	109.28	109.153	-	-

با دقت در جدول ۳ به نتایج زیر می رسیم:

- ۱- پاسخ های Wang مقادیر بسیار بزرگتری را برای نیروی محوری ماکزیمم می دهد.
- ۲- ماکزیمم لنگر خمشی Penzien در حالت لغزش کامل و عدم لغزش تقریباً با هم برابرند.
- در جدول ۴ مقایسه ای بین نتایج المان محدود و نتایج روابط فرم بسته در حالت بدون لغزش آمده است.

جدول ۴- مقایسه نتایج المان محدود با روابط فرم بسته در شرایط بدون لغزش

نیروها	plaxis	Wang	درصد اختلاف (%)	Penzien	درصد اختلاف (%)
	بدون لغزش	بدون لغزش	plaxis با Wang	بدون لغزش	plaxis با Penzien
	1234.56	998.45	23.65	109.153	1031
M	187.5	171.88	9.09	163.73	14.52
	115.78	-	-	109.153	5.73

با دقت در جدول ۴ به نتایج زیر می رسیم:

- ۱- پاسخهای Wang با نتایج المان محدود همخوانی بیشتری دارد
- ۲- مقایسه ها ثابت کرده که Penzien پاسخ نیروهای محوری را خیلی کم در نظر گرفته و در نتیجه پاسخ Wang نتایج واقعی تری را برای محاسبه نیروهای محوری پوشش های تونل برای شرایط بدون لغزش تخمین می زند.

۷. نتیجه گیری

با توجه به آنالیزهای تحلیلی و عددی در مورد تونل های دایره ای تحت بارگذاری لرزه ای به نتایج زیر می رسیم:

- ۱- در حالت لغزش کامل نیروهای محوری و لنگر خمشی ماکزیمم در روابط ارائه شده توسط Wang و Penzien تقریباً یکسانند.
- ۲- مقدار نیروی محوری بدست آمده از رابطه Wang در شرایط بدون لغزش بسیار بیشتر از پاسخ رابطه Penzien، و به پاسخ المان محدود نزدیکتر است. علت این امر در نظر گرفتن نسبت فشردگی (C) و نسبت انعطاف پذیری (F) در روابط Wang است. نسبت انعطاف پذیری نمایانگر توانایی پوشش بتنی در برابر ارتعاش حاصل از زلزله می باشد، درحقیقت میزان نسبی سختی تونل نسبت به محیط اطراف خود، توسط نسبتهای فشردگی و انعطاف پذیری در روابط گنجانده شده است. هر چه نسبت انعطاف پذیری کمتر باشد، میزان انحراف و شکست در تونل بالا رفته و این امکان وجود دارد که تغییر شکل حاصل از شکست تونل تا سطح زمین ادامه یابد. با توجه به دلایل بالا توصیه شده که پاسخ پنزیل برای شرایط عدم لغزش استفاده نشود



۳- تحلیل های ارائه شده توسط Wang و Penzien تنها در صورتی با روش المان محدود قابل مقایسه هستند که شرایط زیر در مدل سازی برقرار باشد:

- الف) شرایط کرنش مسطح (plane strain) برقرار باشد.
- ب) مشخصات مصالح پوشش تونل و خاک الاستیک و خطی در نظر گرفته شوند.
- ج) بارگذاری لرزه ای به صورت برش خالص اعمال گردد.
- ۴- در تحلیل اعوجاج تونل ها، استفاده از روابط فرم بسته اندرکنش خاک و سازه فقط برای تونل های دایره ای وجود دارد. در نتیجه برای سایر مقاطع پوشش تونل ها، برای بدست آوردن نیروهای روی پوشش باید از مدل های نرم افزاری المان محدود استفاده کنیم.

۸. مراجع

1. Park, K. H., Tantayopin, K., Tontavanich, B. and Owatsiriwong, A. 2009, "analytical solution for induced ovaling of circular tunnel lining under no-slip interface conditions" A revisit" Tunneling Underground Space Technology, 24, (2) 231-235. DOI:10.1016/j.tust.2008.07. USA.
2. Owen, G.N., Scholl, R.E., 1981. "Earthquake Engineering of large underground structures". Report no. FHWA/RD-80/195. Federal Highway Administration and National science Foundation.
3. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B., Yao, J. I. 2001, "Seismic design and analysis of underground structures". Tunneling and underground space Technology 16,(4), 247-293. DOI: 10.1016/S0886-7798(01)00051-7.
4. Wang, J. N. (1993). "Seismic Design of Tunnels": A State-of-the-art Approach, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc. New York, NY.
5. Penzien, J., 2000. "Seismically induced racking of tunnel lining". Int. J. of Earthquake Engr and Struct. Dyn. 29, 683-691.
6. PLAXIS-B.V., 2002. PLAXIS: "Finite element Package for Analysis of Geotechnical Structures", Delft, Netherland.
۷. باباگلی، ر. (۱۳۹۰)، "ارزیابی ظرفیت در تحلیل و طراحی تونل های متروی شهری تحت اثر امواج لرزه ای"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، سمنان.
8. Hashash, Y. M., Park, D. and Chiang Yao, J. I. (2005). "Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures", Tunneling & Underground Space Tech., Pergamon, Vol. 20, pp. 435-441.