

بررسی ظرفیت روانگرایی در تونل‌ها مطالعه موردی: قطعه شرقی - غربی تونل خط هفت متروی تهران

مسعود احمدوند^{۱*}؛ امیرحسین منجمی^۲؛ حامد قدمی^۳

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک؛ مدیر واحد ژئوتکنیک، شرکت مهندسی مشاور طرح جامع

۲- کارشناس ارشد زمین شناسی مهندسی؛ دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-خاک؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران-آب منطقه ای استان البرز

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۹/۲۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2017.1416.1149

واژگان کلیدی	چکیده
روانگرایی	روانگرایی یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین پدیده‌هایی است که حین زلزله اتفاق افتاده و سبب آسیب و
تونل	یا تخریب سازه‌های مختلف می‌شود. نهشته‌های دانه‌ای سست و اشباع در مناطق زلزله‌خیز، مستعد این
عدد نفوذ استاندارد	پدیده هستند هر چند پدیده روانگرایی و تأثیر آن بر سازه‌های سطحی به کرات مورد مطالعه قرار گرفته،
لرزه خیزی	اما تأثیر آن بر سازه‌های زیرزمینی کمتر مورد توجه بوده است. همچنین با توجه به گسترش فضاهای زیر
	زمینی مانند مترو و تونل‌های ماشین‌رو در کشورهای رو به توسعه مانند ایران و قرار گرفتن کشور در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا ضرورت مطالعه
	در این زمینه آشکار می‌شود. در این پژوهش پتانسیل روانگرایی در قطعه شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته است. به
	منظور سهولت در بررسی‌ها این قطعه از تونل به ۶ بخش تقسیم شده است و هر بخش بطور مجزا مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش
	از سه روش که بر پایه عدد SPT هستند استفاده شده است که عبارتند از روش سید، روش جدید ونکوور و روش متوسط که میانگینی از چند
	روش ارزیابی است. سپس پتانسیل روانگرایی بر پایه سرعت امواج برشی در خاک مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت یک مقطع از تونل با
	استفاده از نرم افزار المان محدود Plaxis مدل‌سازی و تحلیل شده است. در پایان مقادیر بدست آمده از این روش‌ها با هم مقایسه شده است.

۱- مقدمه

سست و اشباع رخ می‌دهد موجب از بین رفتن یا کاهش مقاومت زمین شده و می‌تواند باعث آسیب به سازه‌ها شود. گرچه به طرق مختلف و با انجام هزینه‌های متفاوت می‌توان نسبت به تقویت و به‌سازی ساختگاه‌ها برای مقاوم سازی آنها در برابر روانگرایی اقدام نمود، لیکن ارزیابی و شناسایی مناطق مستعد روانگرایی در خلال زلزله‌های آتی یکی از مهمترین و ضروری‌ترین کارها قبل از هر گونه اقدام برای به‌سازی خواهد بود. این اقدام که به عنوان پهنه‌بندی ساختگاه در برابر

بخش قابل ملاحظه‌ای از خسارات وارده به تاسیسات و سازه‌های شهری در اغلب زلزله‌های مهم پیشین در اثر بروز پدیده‌هایی در ساختگاه نواحی زلزله زده بوده است که امروزه به نام ژئوتکنیک لرزه‌ای شناخته می‌شود. یکی از پدیده‌های مخرب و ویرانگر ناشی از زلزله که سهم بسزایی در تخریب سازه‌ها داشته است روانگرایی است. این پدیده که به هنگام وقوع زلزله‌های نسبتاً سنگین در ساختگاه‌هایی با مصالح ریزدانه

* تهران، بزرگراه حقانی شمال، خیابان کوشا، تقاطع ساسانی‌پور، پلاک ۱۱، طبقه سوم، کدپستی: ۱۵۴۴۸۴۵۳۱۱؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۲۶۴۰۰۸۷۴؛

نمابر: ۰۲۱-۲۶۴۰۰۸۶۶؛ آدرس پست الکترونیک: ahmadvand.g.e@gmail.com

جنوب شرق تهران آغاز شده و در امتداد بزرگراه محلاتی به سمت خیابان ۱۷ شهریور، میدان قیام و از آنجا در امتداد خیابان مولوی به سمت میدان محمدیه، خیابان ولی‌عصر و سپس بزرگراه نواب ادامه می‌یابد. طول این بخش حدود ۱۲ کیلومتر و در امتداد آن ۱۳ ایستگاه پیش‌بینی شده است. برای سهولت انجام کار با توجه به حجم بالای اطلاعات و همچنین سهولت ارائه آنها طول ۱۲ کیلومتری تونل به ۶ بخش ۲ کیلومتری تقسیم شده و اطلاعات ارائه شده در بخش‌های مختلف در پایان هر قسمت به صورت جمع بندی ارائه شده است. تقسیم بندی بخش‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

روانگرایی نامیده می‌شود به عنوان یکی از اقدامات مهم قبل از هرگونه تصمیم‌گیری در مورد ساختگاه مورد مطالعه خواهد بود و زمینه را برای اصلاح و یا تغییر کاربری ساختگاه فراهم می‌آورد.

۲- موقعیت طرح

مسیر تونل خط ۷ شامل دو قطعه شرقی - غربی و شمالی - جنوبی می‌باشد. در تحقیق پیش رو به بررسی خطر بروز پدیده روانگرایی و اثرات آن در بخش شرقی - غربی آن پرداخته شده است. این قطعه از شهرک امیرالمومنین (قصر فیروزه) در



شکل ۱- تقسیم بندی بخش‌ها در مسیر شرقی - غربی مترو خط ۷ تهران (Geotechnic Report, 2007)

۳- آزمایش‌های لرزه‌ای

در تعدادی از گمانه‌ها آزمایش‌های لرزه‌ای درون چاهی انجام شده است و سرعت امواج P و S برای اعماق مختلف به دست آمده است. از اطلاعات این آزمایش‌ها نیز به منظور مقایسه با عدد استاندارد و مقایسه همبستگی آنها استفاده می‌شود. اطلاعات این گمانه‌ها در نمودار شکل ۲ ارائه شده است. به منظور استفاده از سرعت موج

با نتایج آزمایشات و مطالعات انجام شده، مستعدترین نواحی از نظر پتانسیل روانگرایی بخش چهارم و پنجم و قسمتی از بخش سوم تقسیم بندی است. روانگرایی در برخی گمانه‌های موجود در این نواحی مورد بررسی قرار گرفته است که در بخش ۲-۴ به توضیح آن پرداخته شده است (Geotechnic Report, 2007).

برشی در تحلیل روانگرایی اصلاح سربار روی سرعت موج برشی انجام شده که بر مبنای تنش مؤثر قائم است (Geotechnic Report,2007).

۴- روش‌های ارزیابی روانگرایی

به منظور ارزیابی پتانسیل روانگرایی در نواحی مستعد این پدیده از سه نوع تحلیل استفاده شده است که عبارتند از:

(۱) تحلیل بر پایه میزان تراکم خاک (SPT)

(۲) تحلیل بر پایه سرعت موج برشی

(۳) تحلیل عددی

۴-۱- تحلیل بر پایه میزان تراکم خاک (عدد SPT)

- معرفی روش محاسبه ضریب اطمینان

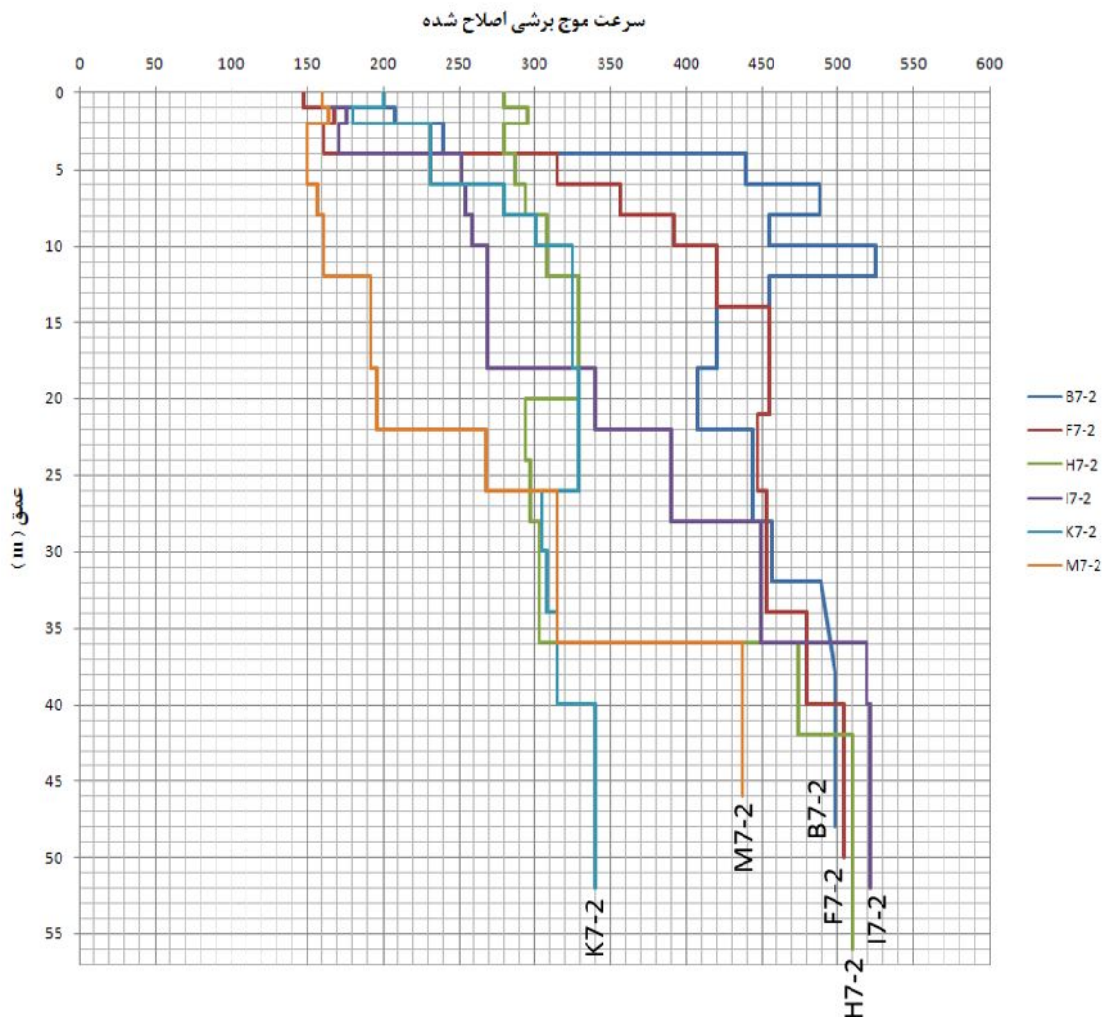
در این نوع تحلیل ضریب اطمینان خاک

در برابر روانگرایی از حاصل تقسیم نسبت

مقاومت سیکلی به دست آمده از آزمایش نفوذ

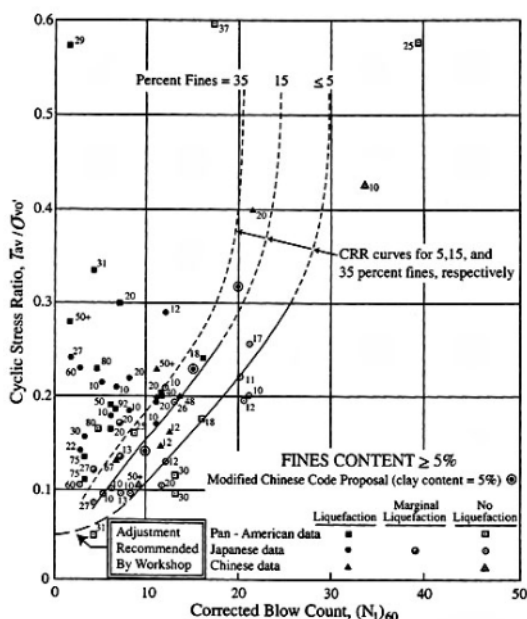
استاندرد (CRR) بر نسبت تنش سیکلی ناشی از

زلزله (CSR) به دست می‌آید.



شکل ۲- نمودار سرعت موج برشی اصلاح شده برای اعماق مختلف (Geotechnic Report,2007)

بر اساس نسبت انرژی چکش، قطر گمانه، نوع نمونه‌گیر و طول میله حفاری اصلاح شده است. همچنین با توجه به نمودار، تاثیر محتوای ریزدانه مصالح نیز در پارامتر CRR دیده شده است به طوری که سه منحنی برای سه درصد ریزدانه ۵، ۱۵ و ۳۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که درصد ریزدانه بیشتر از ۳۵ درصد عملاً فاقد روانگرایی شناخته می‌شود.



شکل ۴- CRR بر حسب عدد نفوذ استاندارد (*LiquefyPro, 2000*)

۴-۱-۱- تعیین بخش‌های مستعد روانگرایی

بررسی عوامل اصلی ایجاد روانگرایی در هنگام وقوع زلزله (شامل نوع خاک، دانه بندی و حدود اتربرگ، نفوذپذیری، موقعیت سطح آب زیرزمینی و میزان تراکم خاک) در بخش‌های شش گانه مذکور انجام شده است. مناطق مستعد روانگرایی، شامل ۵ توده با گسترش نسبتاً زیاد، شناسایی شده‌اند. در این مناطق، تمامی پارامترهای روانگرایی در محدوده مستعد قرار داشته و به منظور بررسی دقیق، محاسبات روانگرایی بر روی آنها صورت گرفته است. در جدول ۱ موقعیت این بخش‌ها ذکر شده است.

مقدار پارامتر CSR از رابطه (۱) به دست می‌آید (*Seed, et al., 2000*).

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 r_d \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \quad (1)$$

که در آن:

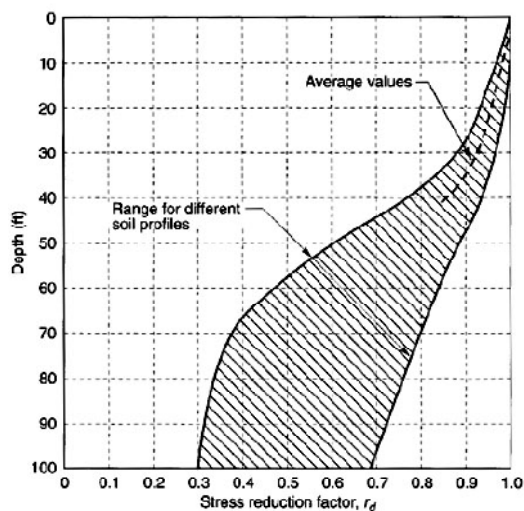
CSR = نسبت تنش دوره‌ای بدون بعد

a_{max} = بیشینه شتاب افقی در سطح زمین (PGA) که توسط زمین لرزه تولید می‌شود.

σ_{v0} = تنش کل قائم در عمقی که تحلیل روانگرایی صورت می‌گیرد.

σ'_{v0} = تنش موثر قائم در عمقی که تنش کل محاسبه شده است.

r_d = ضریب کاهش تنش در عمق است که از نمودار شکل ۳ به دست می‌آید.



شکل ۳- ضریب کاهش تنش بر حسب عمق (*LiquefyPro, 2000*)

مقدار ترم مقاوم در محاسبه ضریب اطمینان در برابر روانگرایی (CRR) به صورت تابعی از عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده از منحنی شکل ۴ به دست می‌آید:

در نمودار شکل ۴، مقدار عدد نفوذ استاندارد

جدول ۱- محل توده‌های مستعد روانگرایی مشخص شده در مقطع زمین شناسی مهندسی

مکان	ردیف
بخش سوم (حداصل میدان آیت الله محلاتی تا خیابان ۱۷ شهریور)	توده‌ی اول
بخش چهارم (حداصل خیابان ۱۷ شهریور تا میدان پانزده خرداد)	توده‌ی دوم
بخش چهارم (حداصل میدان پانزده خرداد تا چهارراه مولوی)	توده‌ی سوم
بخش پنجم (حداصل چهارراه مولوی تا خیابان خیام)	توده‌ی چهارم
بخش پنجم (حداصل خیابان وحدت اسلامی تا خیابان ولیعصر)	توده‌ی پنجم

۴-۱-۲- تعیین پتانسیل روانگرایی با استفاده از عدد نفوذ استاندارد (SPT)

به منظور تعیین پتانسیل روانگرایی در هر یک از توده‌های مذکور فاکتورهای موثر در وقوع روانگرایی در چندین گمانه در هر توده مورد بررسی قرار گرفته است که در ادامه بررسی‌های انجام شده در یکی از گمانه‌های مربوط به توده اول به عنوان نمونه آورده شده است. در باقی توده‌ها به ارایه نتیجه بررسی اکتفا شده است.

الف) توده اول

توده اول مستعد روانگرایی حدفاصل میدان آیت الله محلاتی تا خیابان ۱۷ شهریور قرار دارد و در بخش سوم مطالعه واقع شده است. ضخامت این توده ۱۴ متر و طول آن در مقطع ۶۰ متر می‌باشد. خاک این قسمت از نوع ماسه سیلتی ریز دانه است.

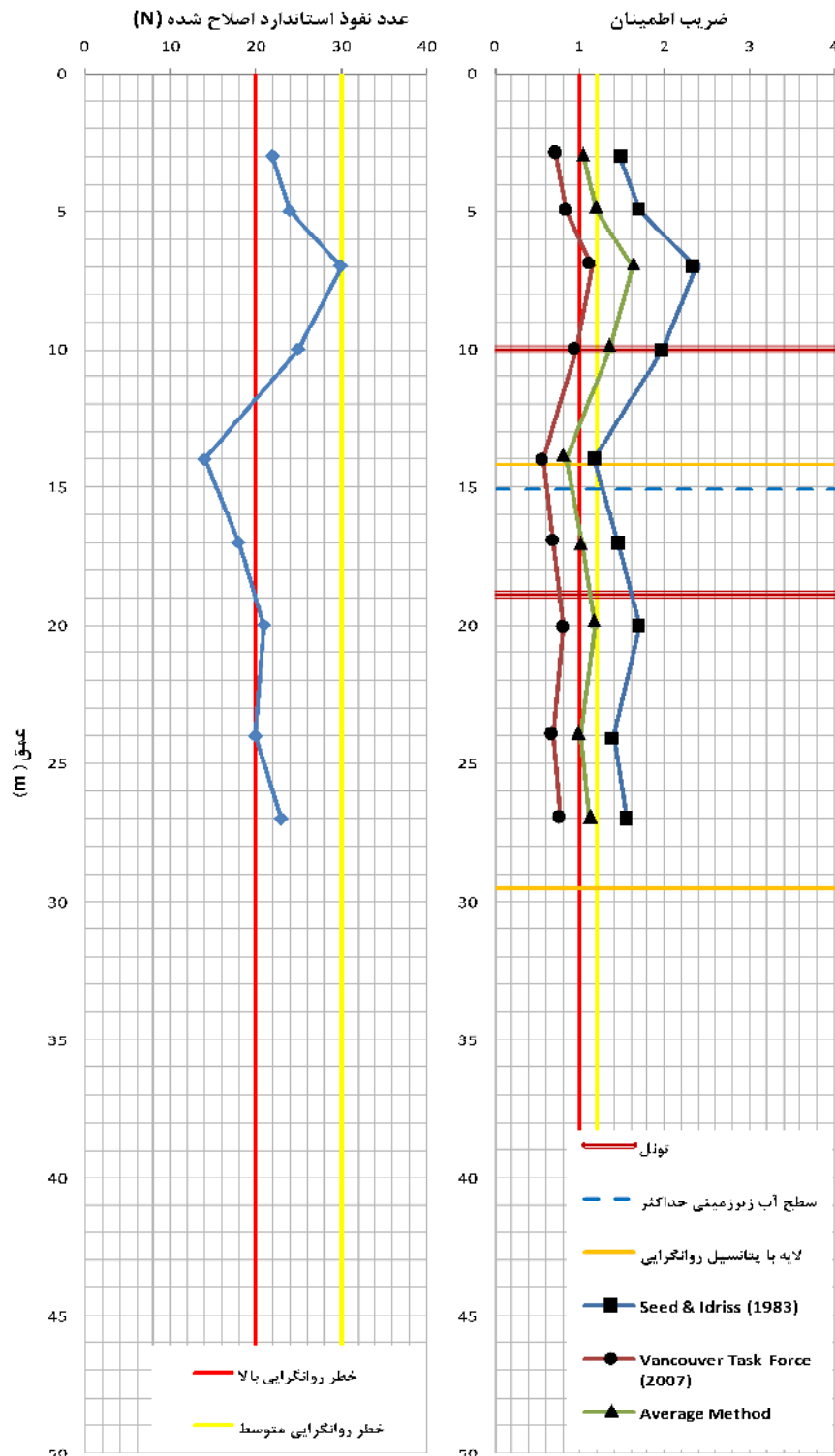
گمانه‌های موجود در این بخش *F7-1*، *F7-2* و *F7-3* هستند که به عنوان نمونه چگونگی محاسبات روانگرایی صورت گرفته در گمانه *F7-1* در زیر شرح داده شده است.

محاسبه روانگرایی در گمانه *F7-1*

خاک در این قسمت غیر خمیری بوده و درصد ریزدانه آن کمتر از ۷/۵ درصد است. در گمانه *F7-1* لایه روانگرا از عمق ۱۴/۲ تا ۲۷/۵ متری طبق نمودار شکل ۵ دارای ضریب اطمینان ۰/۶ تا ۰/۸ از روش ونکوور، ۱/۲ تا ۱/۷ از روش سید و ادریس و ۰/۹ تا ۱/۲ از روش میانگین است. نتایج ارزیابی‌های انجام شده بر روی گمانه‌های این توده در جدول ۲ آورده شده است (Seed, et al., 2000) و (Andrus, et al., 2000).

جمع بندی محاسبات روانگرایی در توده اول

در توده اول، محاسبات روانگرایی به روش ونکوور نشان دهنده روانگرا بودن توده می‌باشد و روش سید روانگرایی را در توده مورد نظر نشان نمی‌دهد. روش میانگین در محدوده ضریب اطمینان ۱ تا ۱/۲ قرار می‌گیرد و نشان دهنده روانگرایی در توده مورد نظر است که نشان دهنده لزوم ایجاد تمهیداتی برای جلوگیری از بروز این پدیده در این بخش است.



شکل ۵- نمودار محاسبات روانگرایی در گمانه F7-1

میانگین ۱۲ متر و طول آن ۵۵ متر در مقطع ارائه شده می‌باشد. گمانه‌های موجود در این بخش BH7-2 و BH7-7 است که نتایج ارزیابی‌های صورت گرفته برای آنها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- حداقل ضریب اطمینان در گمانه‌های مورد بررسی در توده سوم

گمانه‌ها	روش و نکوور	روش سید و ادریس	روش میانگین
گمانه BH-7-2	۰٫۶۵	۱٫۲	۰٫۸۵
گمانه BH-7-7	۱	۲	۱٫۵

- جمع بندی محاسبات روانگرایی در توده سوم در این بخش به طور میانگین خطر روانگرایی متوسط و بالا بوده و نیازمند تمهیداتی برای مقابله با این پدیده در این قسمت است.

ت) توده چهارم

توده چهارم مستعد روانگرایی در حد فاصل چهارراه مولوی تا خیابان خیام قرار داشته و در بخش پنجم مورد مطالعه واقع شده است. ضخامت میانگین این توده ۱۳ متر و طول آن در مقطع ارائه شده ۷۱ متر است. گمانه‌های موجود در این بخش BH-8-7، BH-4-7، BH-3-7 و BH-2-7 می‌باشد که نتایج ارزیابی‌های صورت گرفته در این گمانه‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

- جمع بندی محاسبات روانگرایی در توده چهارم در این توده خطر روانگرایی بالا و در عمق ۱۰ تا ۳۵ متر خاک به طور میانگین در محدوده تراکم متوسط و در بعضی از اعماق سست می‌باشد. خاک این بخش پتانسیل وقوع روانگرایی را دارا بوده و محاسبات انجام شده این موضوع را تأیید می‌کند. این بخش از خاک نیازمند بهسازی و انجام تمهیداتی برای کاهش خطر روانگرایی و بالا بردن ضریب اطمینان در برابر آن می‌باشد.

جدول ۲- حداقل ضریب اطمینان در گمانه‌های مورد

بررسی در توده اول

گمانه‌ها	روش و نکوور	روش سید و ادریس	روش میانگین
گمانه F7-1	۰٫۶	۱٫۲	۰٫۸
گمانه F7-2	۰٫۷	۱٫۵	۱
گمانه F7-3	۰٫۶	۱٫۳	۰٫۹

ب) توده دوم

توده دوم مستعد روانگرایی حد فاصل خیابان ۱۷ شهریور تا میدان پانزده خرداد قرار دارد و در بخش چهارم مطالعه قرار گرفته است. ضخامت این توده به طور میانگین ۱۷ متر و طول آن در مقطع ۶۵ متر می‌باشد. گمانه‌های موجود در این بخش BH-5-7، BH-6-7 و BH-2-7 است. نتایج ارزیابی‌های انجام شده بر روی گمانه‌های موجود در توده دوم در جدول ۳ آورده شده است.

- جمع بندی محاسبات روانگرایی در توده دوم در توده دوم مجموع محاسبات نشان دهنده غیر روانگرا بودن توده مورد نظر است و تنها در گمانه H7-2 در عمق ۱۱٫۸ تا عمق ۲۳ متری دارای خطر روانگرایی پایین می‌باشد.

جدول ۳- حداقل ضریب اطمینان در گمانه‌های مورد

بررسی در توده دوم

گمانه‌ها	روش و نکوور	روش سید و ادریس	روش میانگین
گمانه BH-5-7	۲٫۱۲	۴٫۵	۲٫۱۲
گمانه BH-6-7	۳٫۱	۴٫۵	۳٫۲
گمانه H7-2	۰٫۸	۱٫۵	۱٫۴

ب) توده سوم

توده سوم مستعد روانگرایی حدفاصل میدان پانزده خرداد تا چهارراه مولوی قرار دارد و در بخش چهارم مطالعه قرار گرفته است. ضخامت این توده به طور

بوده و خطر روانگرایی در این بخش‌ها وجود ندارد. در بخش‌های سوم و چهارم و پنجم مناطق دارای پتانسیل وقوع روانگرایی به وسیله محاسبات مشخص شده‌اند که این بخش‌ها نیازمند انجام بهسازی و روش‌های کاهش اثرات روانگرایی هستند.

۴-۲- تعیین ضریب اطمینان روانگرایی به وسیله

سرعت موج برشی

در بخش‌هایی از توده‌های مستعد روانگرایی که محاسبات بر پایه عدد SPT در آن صورت گرفته است، آزمایش‌های لرزه‌ای درونچاهی انجام شده و میزان سرعت موج برشی در آنها به دست آمده است. برای محاسبه میزان CRR با استفاده از سرعت موج برشی از رابطه (۴) استفاده می‌شود (Day, 2000):

$$CRR_{7.5} = 0.022 \left[\frac{V_{S1}}{100} \right]^2 + 2.8 \left[\frac{1}{215 - V_{S1}} - \frac{1}{215} \right] \quad (4)$$

$$V_{S1} = V_s \cdot C_v = V_s \cdot \left(\frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.25} \quad (5)$$

به منظور اطمینان از صحت نتایج پتانسیل روانگرایی به دست آمده از روش‌های مبتنی بر عدد نفوذ استاندارد، در برخی از توده‌های مستعد روانگرایی، درون برخی گمانه‌ها آزمایش لرزه‌ای درون چاهی انجام شده و تحلیل‌های روانگرایی مبتنی بر سرعت امواج صورت گرفته است که برای نمونه در ادامه، نتایج این تحلیل‌ها برای گمانه $F7-1$ در توده اول ارائه گردیده است.

الف) توده اول

در توده اول در گمانه $F7-1$ آزمایش‌های لرزه‌ای درون‌چاهی انجام گرفته است. نتایج به دست آمده از سرعت موج برشی در محل و سرعت موج برشی تصحیح شده به همراه ضریب اطمینان محاسبه شده در نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. ضریب اطمینان محاسبه شده در لایه روانگرا در محدوده ۱ تا ۱٫۲ قرار دارد و جدول ۶ روانگرایی توده را تأیید می‌کند. در مقایسه با ضریب اطمینان محاسبه شده به وسیله عدد SPT ، بیشترین نزدیکی را با ضریب اطمینان محاسبه شده توسط روش میانگین دارد.

جدول ۵- حداقل ضریب اطمینان در گمانه‌های مورد

بررسی در توده چهارم

گمانه‌ها	روش و نکوور	روش سید و ادريس	روش میانگین
گمانه $BH-8-7$	۱	۱٫۹	۱٫۳۸
گمانه $I7-2$	۱	۱٫۸۲	۱٫۴
گمانه $I7-3$	۰٫۵	۰٫۸	۰٫۶
گمانه $I7-4$	۰٫۴۱	۰٫۷۹	۰٫۶۱

ث) توده پنجم

توده پنجم مستعد روانگرایی در حد فاصل خیابان وحدت اسلامی تا خیابان ولیعصر قرار داشته و در بخش پنجم مطالعه قرار دارد. ضخامت میانگین این توده ۵ متر و طول آن در مقطع ۳۴ متر می‌باشد. گمانه‌های موجود در این بخش $K7-1$ ، $K7-2$ و $K7-3$ می‌باشد. نتایج ارزیابی‌های انجام شده در گمانه‌های این توده در جدول ۶ آورده شده است.

- جمع بندی محاسبات روانگرایی در توده پنجم

در این توده در عمق ۲۷ تا ۳۱ متری خاک تراکم کم تا متوسط داشته و خطر روانگرایی در آن بالا می‌باشد. این بخش نیازمند بهسازی و روش‌های پیشگیرانه در برابر روانگرایی می‌باشد.

جدول ۶- حداقل ضریب اطمینان در گمانه‌های مورد

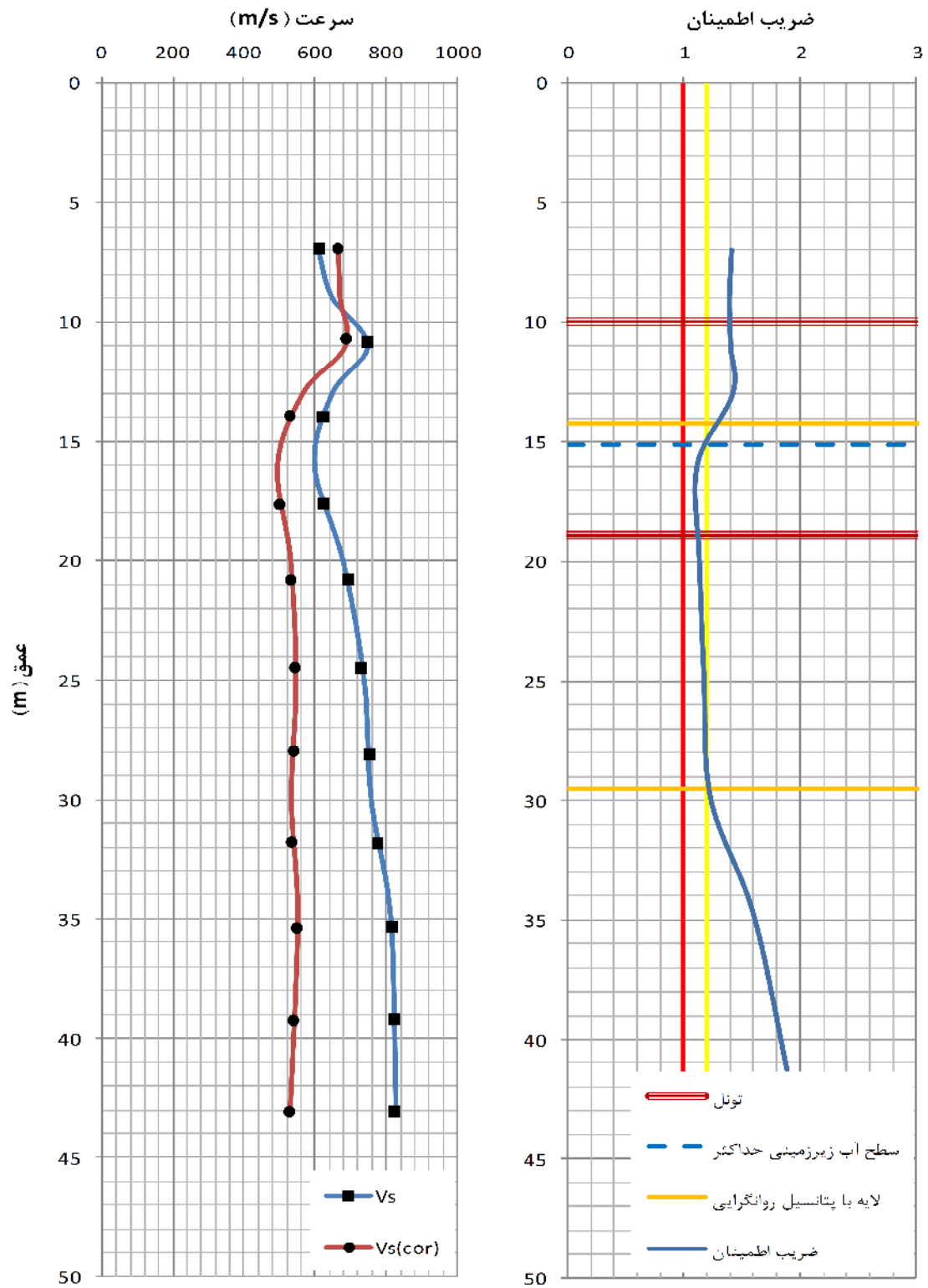
بررسی در توده پنجم

گمانه‌ها	روش و نکوور	روش سید و ادريس	روش میانگین
گمانه $K7-1$	۰٫۶۱	۱٫۱۵	۰٫۸۳
گمانه $K7-2$	۱٫۲	۲٫۲	۱٫۶۵
گمانه $K7-3$	۰٫۷۵	۱٫۳	۱

ج) جمع بندی بررسی پتانسیل روانگرایی با استفاده از

عدد نفوذ استاندارد SPT

در شش بخش مطالعاتی در خط ۷ متروی تهران بخش شرقی - غربی، بخش اول، دوم و ششم فاقد پتانسیل روانگرایی



شکل ۶- ضریب اطمینان محاسبه شده در گمانه F7-1

ب) توده دوم

در توده دوم در گمانه H7-2 آزمایش‌های لرزه‌ای درون چاهی انجام گرفته است. نتایج نشان دهنده روانگرا بودن لایه از عمق ۱۲ تا ۳۴ متری بوده و ضریب اطمینان در این عمق در محدوده ۱ تا ۱/۲ قرار می‌گیرد که با نتایج بدست آمده از محاسبات SPT به روش ونکوور در این توده مطابقت دارد.

پ) توده چهارم

در توده چهارم در گمانه I7-2 آزمایش لرزه‌ای درون چاهی انجام گرفته است. ضریب اطمینان در برابر روانگرایی در لایه مستعد طبق محاسبات اعداد بالایی را نشان می‌دهد و بیان کننده غیر روانگرا بودن این عمق در لایه مورد نظر می‌باشد. نتایج بدست آمده از عدد SPT نیز در محاسبات انجام گرفته به وسیله روش میانگین و سید این موضوع را تأیید می‌کند.

ت) توده پنجم

در توده پنجم در گمانه K7-2 آزمایش لرزه‌ای درون چاهی انجام گرفته است. ضریب اطمینان در لایه مستعد روانگرایی در عمق ۲۸ تا ۴۰ متری حدود ۱ می‌باشد که با محاسبات صورت گرفته در روش SPT همخوانی دارد و هر دو محاسبات روانگرا بودن این توده را در این عمق تأیید می‌کند.

ث) جمع بندی نتایج حاصل از سرعت موج برشی

محاسبات صورت گرفته در روش سرعت موج برشی همخوانی بالایی با محاسبات انجام گرفته در روش عدد نفوذ استاندارد داشته و بیشترین همپوشانی را با روش میانگین دارا می‌باشد. نتایج بدست آمده از سرعت موج برشی نیز روانگرایی بخش‌های مشخص شده از روش قبلی را تأیید می‌کند.

مزیت استفاده از روش سرعت موج برشی نسبت به عدد نفوذ استاندارد بشرح زیر است:

۱) پیوسته بودن داده‌ها: داده‌های بدست آمده از آزمایش موج برشی دارای پیوستگی در اعماق مختلف می‌باشد حال آنکه نتایج آزمایش عدد نفوذ استاندارد نقطه‌ای بوده و قابل تعمیم به دیگر نقاط نمی‌باشد.

۲) سادگی محاسبات: محاسبات انجام شده توسط روش سرعت موج برشی به علت داشتن

تصحیحات کمتر نسبت به روش عدد نفوذ استاندارد دارای سادگی بیشتری می‌باشد.

عواملی که در این روش ایجاد خطا کرده و باعث ارائه نتایج نادرست می‌شوند بشرح زیر می‌باشد:

۱) وجود نوفه در محیط: وجود نوفه در محیط بخصوص در مناطق شهری باعث می‌شود که نگاشت‌ها کیفیت لازم را نداشته و غیر قابل استفاده باشد که این امر باید مد نظر قرار گیرد.

۲) وجود لایه پنهان: قرار گرفتن لایه‌های سست در بین لایه‌هایی باتراکم متوسط ممکن است باعث تفسیر نتایج غلط در این زمینه شده و لایه سست شناسایی نشود که با کوچک کردن بازه‌های بررسی می‌توان این مشکل را مرتفع نمود. در بررسی‌های دقیق روانگرایی تلفیقی از هر دو روش عدد نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی به طور مکمل مورد نیاز می‌باشد. با بررسی و کاربرد هر دو روش و بررسی‌های زمین شناسی از منطقه می‌توان با اطمینان بالایی شرایط روانگرایی را در محدوده مطالعاتی مشخص کرد.

۴-۳- مدلسازی و بررسی عددی اثر روانگرایی بر

تونل

در این بخش به منظور بررسی کردن نتایج به دست آمده از روش‌های مبتنی بر عدد نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی، یک مقطع از تونل به صورت عددی نیز مورد تحلیل قرار گرفت. برای انجام تحلیل عددی از نرم افزار المان محدود Plaxis 8.2 استفاده شده است. از جمله ویژگی‌های این

نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

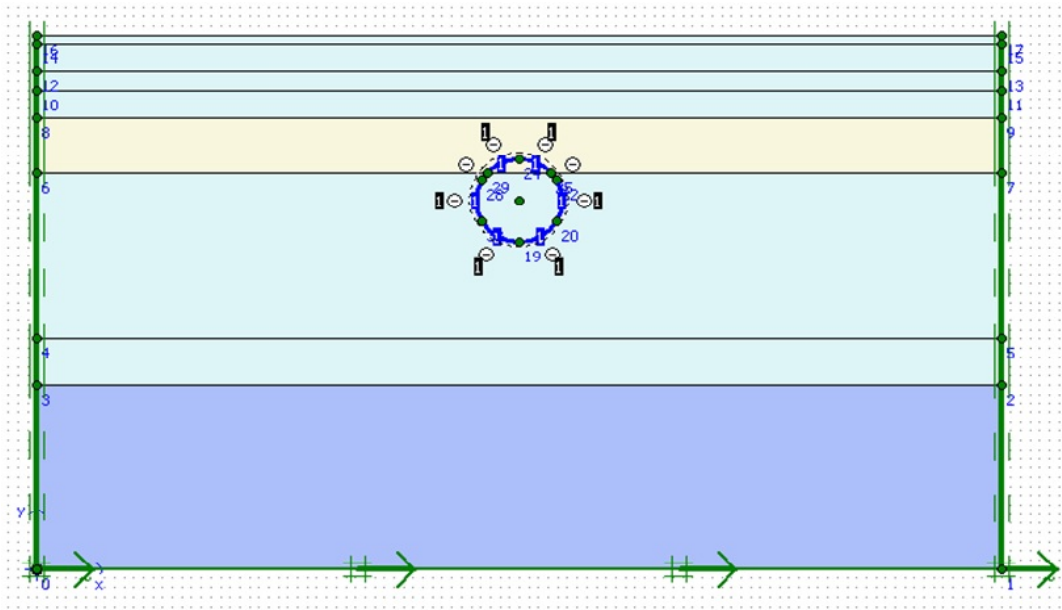
- برخورداری از مدل‌های رفتاری متنوع
- توانایی مدلسازی قدرتمند
- معرفی مناسب اندرکنش خاک و سازه
- تعریف مناسب شرایط آب در خاک
- برخورداری از المان‌های ژئوگرید و پلیت
- برخورداری از ویژگی ساخت مرحله ای سازه
- انجام قدرتمند تحلیل دینامیکی

مقطع انتخاب شده مقطع عبوری از گمانه F7-1 است

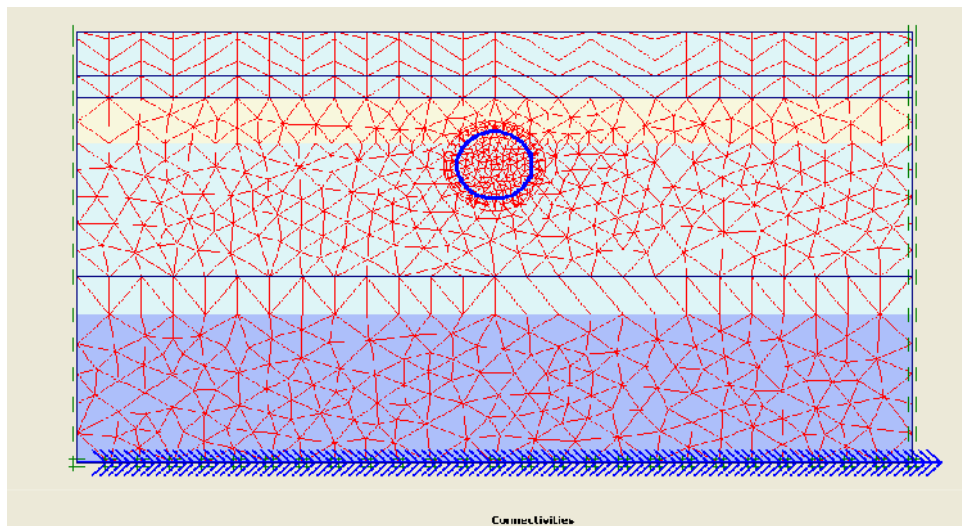
که در توده اول در بخش سوم مسیر تونل در کیلومتر ۴+۹۵۰

انتخاب شده و لایه‌ها و سطح آب زیرزمینی به همراه محل قرارگیری تونل در آن رسم شده است. در شکل ۷ مدل رسم شده به همراه لایه‌ها و موقعیت تونل نشان داده شده است. پس از رسم مدل، مش‌بندی آن انجام می‌گیرد. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود به منظور بالا بردن دقت، مش‌بندی اطراف تونل کوچک‌تر انتخاب شده است.

قرار دارد. در این قسمت طبق محاسبات از روش عدد نفوذ استاندارد خطر روانگرایی بالا ارزیابی شده است. در این قسمت هشت لایه مختلف وجود داشته و ضخامت لایه روانگرا ۱۵ متر در عمق ۱۴ تا ۲۹ متری می‌باشد. محور مرکزی تونل در عمق ۱۴٫۵ متری سطح زمین قرار گرفته است. قطر داخلی تونل ۸٫۸ متر و قطر خارجی آن ۹٫۱۵ متر است. برای مدل کردن تونل در خاک ابعاد ۱۰۰×۵۰ متری



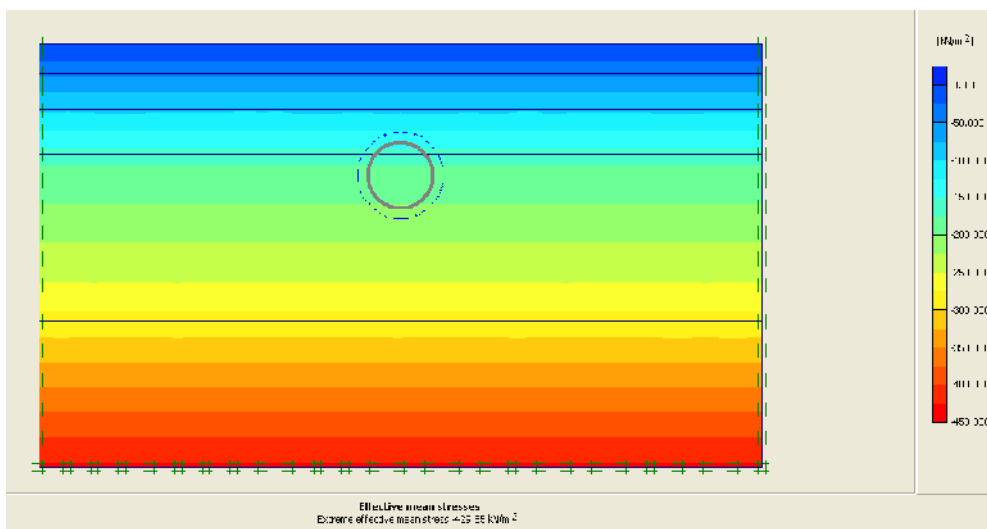
شکل ۷- هندسه رسم شده به همراه لایه‌ها و موقعیت تونل



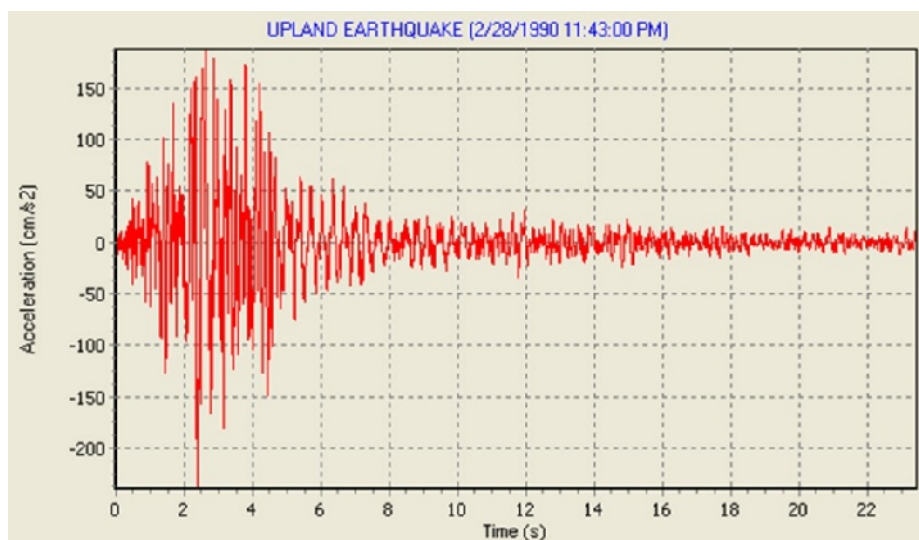
شکل ۸- شبکه بندی مدل به المان های محدود برای انجام محاسبات

سانتیمتر بر ثانیه است. به منظور جلوگیری از اثر انعکاس امواج در این مدل محدود از مرزهای جاذب در دو طرف مدل استفاده شده است. مشخصات لایه های خاک که از آزمایش‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی به دست آمده است، در جدول ۷ و مشخصات پوشش بکار رفته در مدل در جدول ۸ ارائه شده است.

در شکل ۹ تنش مؤثر اولیه در خاک بدون حضور تونل محاسبه و نمایش داده شده است. اطلاعات تحریکات لرزه‌ای اعمال شده به مدل مربوط به زلزله ۱۹۹۰ در آپلند کالیفرنیا در آمریکا است که انتخاب این زلزله بر اساس ماکزیمم شتاب بدست آمده از پهنه بندی لرزه‌ای انجام شده در شعاع ۳۵ کیلومتری منطقه انجام شده است. شکل ۱۰ شتاب نگاشت حاصل از این زلزله به همراه اطلاعات آن را نشان می‌دهد. مدت زمان اعمال بار ۲۰ ثانیه و حداکثر شتاب اعمالی ۲۳۹٫۹



شکل ۹- تنش مؤثر اولیه در خاک بدون حضور تونل در خاک



شکل ۱۰- شتاب نگاشت مورد استفاده در تحلیل دینامیکی مدل

جدول ۷- مشخصات لایه های خاک بکار رفته در مدل

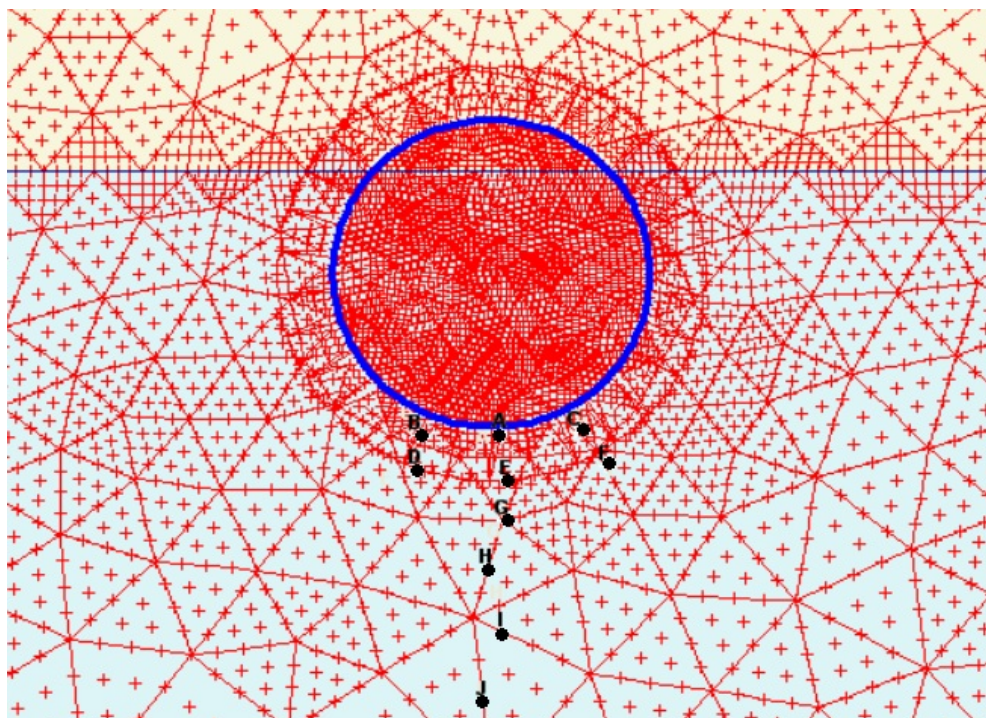
واحد	لایه اول								نشانه	پارامتر
	SC	SC-SM	SM	GM	ML	GM	SM	Fill.M		
-	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	Model	Material Model
-	Drained	Drained	Undrained	Drained	Undrained	Drained	Drained	Drained	Type	Material Type
KN/m^3	۱۷,۵	۱۷,۷	۱۷,۴	۱۷	۱۶	۱۶	۱۵,۶	۱۵	γ_{dry}	Dry Soil Weight
KN/m^3	۲۱	۲۰,۲	۱۹,۳	۱۸,۷	۱۸	۱۸	۱۷,۵	۱۶,۵	γ_{wet}	Wet Soil Weight
m/day	$۲,۲ \times 10^{-۴}$	$۱,۳ \times 10^{-۳}$	$۱,۳۲ \times 10^{-۴}$	۰,۲۴	$۱,۳ \times 10^{-۴}$	۰,۲	$۱,۱ \times 10^{-۴}$	-	kx	H.Permiability
m/day	$۲,۲ \times 10^{-۴}$	$۱,۳ \times 10^{-۳}$	$۱,۳۲ \times 10^{-۴}$	۰,۲۴	$۱,۳ \times 10^{-۴}$	۰,۲	$۱,۱ \times 10^{-۴}$	-	ky	V.Permiability
KN/m^2	۱۰۰۰۰	۶۲۰۰	۴۵۰۰	۷۰۰۰	۵۵۰۰	۱۰۰۰۰	۱۵۰۰	۸۰۰	E_{ref}	Young modulus
KN/m^2	-	-	-	-	-	۱۰۰۰	۶۵۰	-	E_{inc}	Increase E
-	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳۳	۰,۳۳	۰,۳۵	ν	Poisson ratio
KN/m^2	۲,۳	۱,۴	۰,۲۳	۰	۱,۲	۰,۵	۱,۱	۱	C_{ref}	Cohesion
°	۳۱	۳۱	۲۹	۳۳	۲۸	۳۳	۳۱	۲۳	ϕ	Friction angle
°	۳	۲,۱	۰	۲,۱	۰	۱,۴	۱	-	ψ	Dilatancy angle

جدول ۸- مشخصات پوشش استفاده شده در مدل

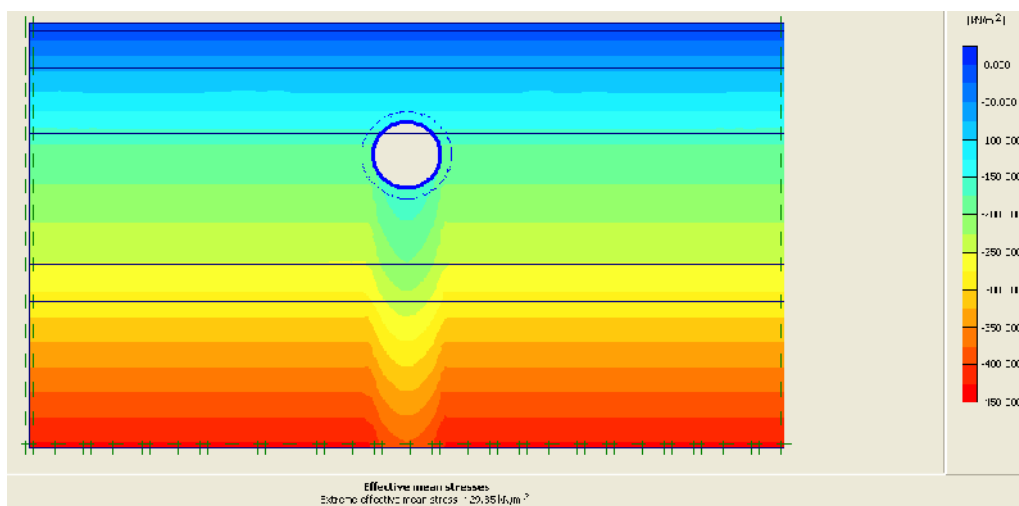
واحد	مقدار	نشانه	پارامتر
-	Elastic	-	Type of behavior
KN/m	$۱,۴ \times 10^۷$	EA	Normal Stiffness
KNm^2/m	$۱,۴ \times 10^۵$	EI	Flexural rigidity
m	۰,۳۵	d	Equivalent thickness
KN/m^3	۲۲,۴	γ	Weight
-	۰,۱۹	ν	Poisson ratio

تونل پس از انجام حفاری کاهش پیدا کرده است. پدیده اول بالا آمدگی تونل بوده که ناشی از افزایش بسیار زیاد فشار آب منفذی تولید شده که باعث ایجاد حالت شناوری در تونل می‌شود. پدیده دیگری که ممکن است در تونل‌های حاضر در خاک روانگرا رخ دهد، نشست ناشی از بروز این پدیده می‌باشد.

این امر به دلیل کاهش ناگهانی مقاومت خاک رخ داده و باعث ایجاد نشست‌های قابل توجه در سازه تونل خواهد شد. برای بررسی این موضوع، مطابق شکل ۱۱ یکسری نقاط شاهد در ناحیه زیر تونل در نظر گرفته شد. شکل ۱۲ تاثیر حفاری تونل بر شرایط تنش در منطقه را قبل از اعمال بار دینامیکی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود میزان تنش موثر در ناحیه زیر



شکل ۱۱- موقعیت نقاط شاهد در زیر تونل



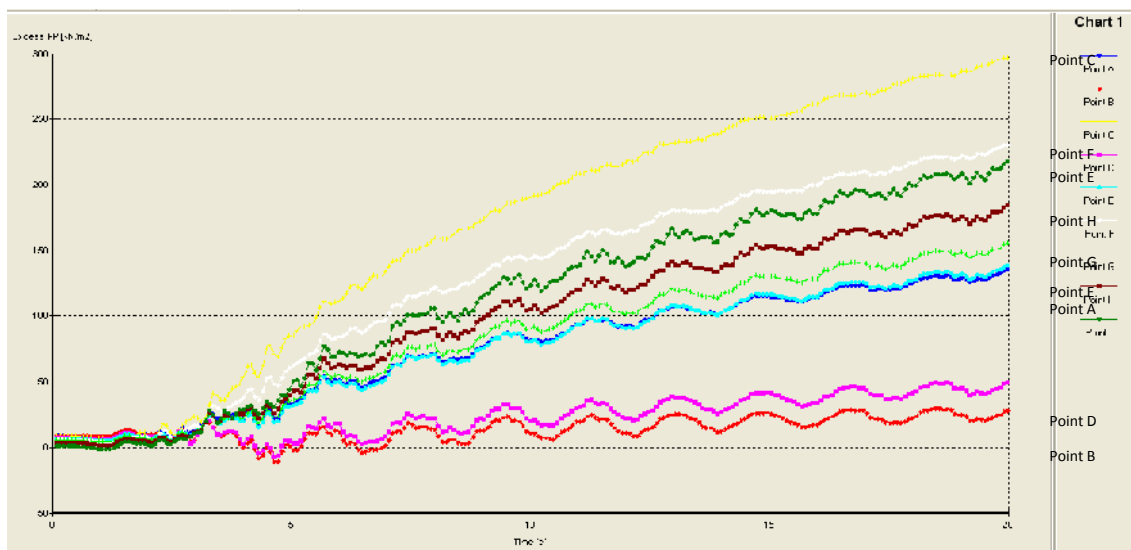
شکل ۱۲- تنش مؤثر محاسبه شده در مدل در حضور تونل قبل از اعمال بار دینامیکی

دینامیکی مقدار فشار آب منفذی در تمامی نقاط شاهد افزایش می‌یابد که سرعت این افزایش در نقاط مختلف متفاوت است که این امر وقوع روانگرایی در این مقطع را تایید می‌کند. تاریخچه تغییرمکان قائم در زیر تونل و در محل نقاط

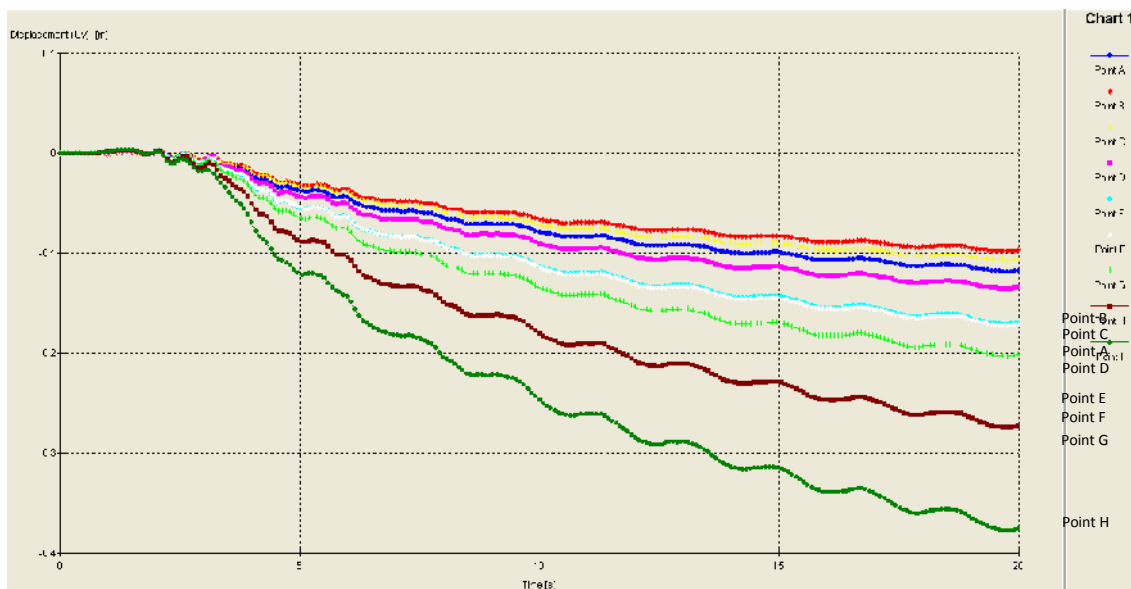
شکل ۱۳ مربوط به تاریخچه زمانی افزایش فشار آب منفذی در نقاط شاهد در طول زمان تحلیل است. این شکل به زیبایی نشان می‌دهد که تا قبل از اعمال بار دینامیکی افزایشی در فشار آب منفذی ایجاد نشده است و با شروع بار

با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز عددی در گمانه $F7-1$ ، افزایش فشار آب منفذی و صفر شدن مقدار تنش موثر در هنگام وقوع زلزله حاکمی از وقوع پدیده روانگرایی در این ناحیه است که با نتایج بدست آمده از روش تحلیلی تطابق دارد.

شاهد، در نمودار شکل ۱۴ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل جابه‌جایی نقاط به صورت منفی در نمودار ظاهر شده است که به خوبی بیانگر نشست در قسمت زیر تونل و به تبع آن نشست تونل می‌باشد. میزان نشست در این قسمت به طور متوسط ۱۷ سانتیمتر است.



شکل ۱۳- فشار آب منفذی تولید شده در نقاط شاهد زیر تونل



شکل ۱۴- جابه‌جایی نقاط شاهد زیر تونل نسبت به زمان

۵- نتیجه گیری

- نتایج آزمون نفوذ استاندارد متغیر بوده و لایه‌هایی با تراکم بالا، متوسط و کم در محدوده مورد مطالعه حضور دارد. بخش میانی محدوده مورد مطالعه دارای لایه‌های سست و تراکم پایین بیشتری بوده و در بخش ابتدایی مقطع لایه‌ها دارای تراکم بالا می‌باشد.

- مطالعات زمین‌شناسی مهندسی با استفاده از اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌های گوناگون انجام شده و گمانه‌ها و چاهک‌های متعدد حفر شده نشان می‌دهد که محدوده مورد مطالعه به صورت دشت سیلابی بوده و لایه‌بندی شاخصی در آن یافت نمی‌شود و خاک به صورت لیز مانند گسترش یافته و خصوصیات خاک در محدوده مورد مطالعه به شدت متغیر است.

- مستعدترین ناحیه که دارای پتانسیل روانگرایی بالا است، از ابتدای بخش چهارم تا نواحی میانی بخش پنجم (محدوده حدفاصل خیابان ۱۷ شهریور تا خیابان خیام) در طول مسیر تونل می‌باشد. در این محدوده میزان سیلت و ماسه ریز دانه خاک زیاد بوده و تراکم در قسمت‌هایی سست و در مجموع متوسط می‌باشد. خاک این قست اشباع بوده و لایه دارای پتانسیل روانگرایی در زیر تونل قرار دارد.

- نتایج بدست آمده از محاسبات روانگرایی به وسیله سرعت موج برشی همخوانی بالایی با نتایج آزمایش نفوذ استاندارد دارد اما حساسیت این روش زیاد بوده و در صورت صحیح انجام نگرفتن آن نتایج غلط در این زمینه حاصل می‌شود. به علت حساسیت بالای این روش مبتنی بر عدد نفوذ استاندارد ارجحیت داشته و از روش موج برشی می‌توان در بررسی‌های اولیه روانگرایی استفاده کرد.

- نتایج بدست آمده از محاسبات عددی به خوبی وقوع روانگرایی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد و تطابق مناسبی با نتایج بدست آمده از روش مبتنی بر آزمایش نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی دارد.

- نتایج بدست آمده از محاسبات عددی قدرت نرم‌افزار *Plaxis* را در مدلسازی و تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی نشان داده و این نرم‌افزار را به عنوان یک نرم‌افزار با نتایج کاملاً قابل اطمینان معرفی می‌کند.

- با توجه به دقت نرم افزار *Plaxis* در انجام تحلیل‌های روانگرایی در خاک و سنگ می‌توان با اطمینان از این نرم‌افزار

به منظور بررسی صحت نتایج تحلیل‌های دستی و یا حتی انجام تحلیل به تنهایی استفاده کرد.

- مدلسازی و محاسبات عددی نشان می‌دهد که تحریکات لرزه عمق به سطح تا عمق ۵۰ متری دارای تأثیرات مخرب روی تونل‌ها است و در اعماق بیشتر از ۵۰ متر تونل در شرایط ایمن نسبت به اثرات مخرب زلزله قرار دارد. این امر لزوم بررسی‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای را در تونل‌های کم عمق اثبات می‌کند.

- بررسی روانگرایی در تونل‌های کم عمق که در مناطق مستعد روانگرایی قرار دارد ضروری می‌باشد که مدلسازی‌های عددی این امر را اثبات می‌کند.

- قرار گرفتن کشور ایران در منطقه‌ای زلزله‌خیز با توجه به اینکه وقوع زلزله یکی از اصلی‌ترین فاکتورهای وقوع پدیده روانگرایی است، بررسی این پدیده در سازه‌های ژئوتکنیکی امری اجتناب ناپذیر است.

۶- سیاهه‌ی نمادها

نمادهای مورد استفاده در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
<i>CSR</i>	-	نسبت تنش دوره ای
<i>CSR</i>	-	پارامتر مقاوم در برابر روانگرایی
a_{max}	$\frac{m}{s^2}$	بیشینه شتاب افقی زلزله در سطح زمین
σ_{v0}	$\frac{KN}{m^2}$	تنش کل قائم در عمق مورد بررسی
σ'_{v0}	$\frac{KN}{m^2}$	تنش موثر قائم در عمق مورد بررسی
r_d	-	ضریب کاهش تنش در عمق
$CRR_{7.5}$	-	نسبت مقاومت سیکنی برای زلزله ای با بزرگی ۷٫۵
V_{S1}	-	سرعت موج برشی اصلاح شده برای سربار
V_S	-	سرعت موج برشی اندازه گیری شده در محل
C_V	-	ضریب اصلاح برای فشار سربار

۶- مراجع

- Andrus, R. D., Stokoe, K. H., (2000). Liquefaction Resistance of Soil from Shear-Wave Velocity. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 126, 1015-1025.
- Andrus, R. D., Zhang, J., Juang, C. H., (2003). *Comparing Liquefaction Evaluation Method Using Penetration -Vs Relationship*. USA: Department of Civil Engineering, Clemson University.
- Day, R. W., (2002). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. USA: McGraw-Hill.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of Soil Mechanics & Foundation Division, ASCE*, 97, 1249-1273.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., (2001). Liquefaction of Soil, Summary Report from the 1996 NCEER & 1998 NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soil. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 127, 297-313.
- Geotechnic Report*, (2007), Sahel Consultant Engineering, Iran, Tehran.
- LiquefyPro, Software Manual, 2011, United States of America.