

ارزیابی تغییر شرایط محیطی خاک روان‌گرا بر تونل‌های پوشش دار

محمد آزادی (استادیار)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

سیده‌جوادالدین میرمحمدحسینی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

این نوشتار به بررسی اثر روان‌گرایی خاک بر تونل‌های پوشش دار و اثر تغییر شرایط محیطی می‌پردازد. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از مدل رفتاری مناسب برای روان‌گرایی، اثر تغییر نیروهای پوشش تونل و بالآمدگی ناشی از روان‌گرایی مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از نرم‌افزار FLAC که قابلیت این نوع مدل سازی را دارد، استفاده شده است. این نوشتار شامل دو بخش اساسی است؛ در بخش اول به معرفی یک مدل مرجع و بررسی اثر روان‌گرایی خاک در این مدل پرداخته شده است. در بخش دوم نیز با تغییر شرایط محیطی موجود در مدل، نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بررسی اثر پارامترهای مختلف بر تغییر نیروها و تغییر شکل‌های پوشش تونل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

azadi@aut.ac.ir
mirh53@yahoo.com

واژگان کلیدی: روان‌گرایی، تونل، سیکلی، رفتار لرزه‌یی.

مقدمه

ارتباط با این موضوع نیز مطالعاتی انجام گرفته اما به نظر می‌رسد که در مورد اثر روان‌گرایی بر تونل‌های واقع در خاک‌های روان‌گرا این مطالعات محدودند و انجام بررسی‌های بیشتر در این زمینه ضروری است^[۱،۲]. لذا در این نوشتار بخشی از این موضوع بررسی شده است.

مشخصات نرم‌افزار مورد استفاده

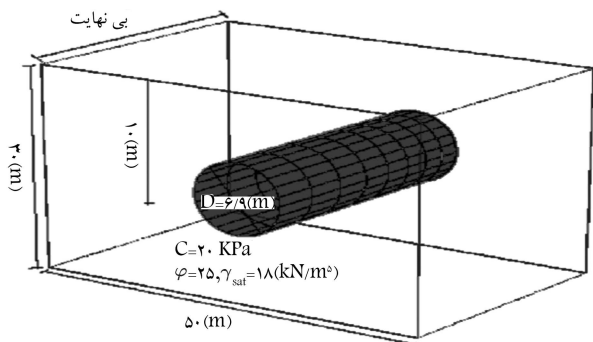
نرم‌افزار مورد استفاده در این مطالعات FLAC-2D است، که اولین بار در سال (۱۹۸۶) توسط پیتر کوندال برای تحلیل مسائل خاک و سنگ مورد استفاده قرار گرفت^[۳]. این نرم‌افزار یک برنامه‌ی دوبعدی براساس تنش مؤثر است که قابلیت مدل‌سازی تحلیل‌های وابسته‌ی کامل را دارد. این نرم‌افزار علاوه بر در نظر گرفتن المان‌های واسطه‌ی قابلیت در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ را نیز دارد. از این رو از این نرم‌افزار در زمینه‌ی شبیه‌سازی روان‌گرایی سیکلی در خلال زلزله نیز استفاده شده است^[۴،۵].

روش آنالیز

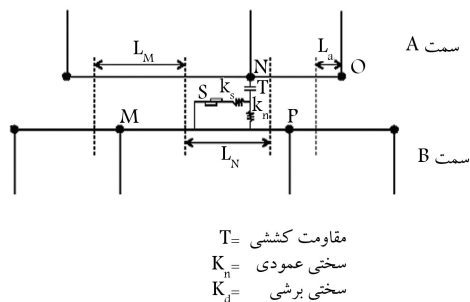
برای مدل‌سازی ابتدا تونل در محیط مدل شده و تعادل استاتیکی برقرار می‌شود. در مرحله‌ی بعد محیط تحت یک بار سیکلی در شرایط دینامیکی قرار می‌گیرد تا مقادیر نیروها و تغییر شکل‌ها مورد بررسی قرار گیرد و اثر روان‌گرایی خاک بر پوشش

یکی از پدیده‌هایی که در طبیعت با خسارات فراوانی همراه است، روان‌گرایی خاک‌ها است. این پدیده به‌عنوان یکی از عوامل اساسی گسیختگی در حین زلزله در نظر گرفته می‌شود. از این رو تاکنون مطالعات وسیعی در ارتباط با روان‌گرایی خاک‌های ماسه‌یی، و حتی ریزدانه‌ها، در کشورهای مختلف جهان انجام پذیرفته است. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که سازه‌های زیرزمینی در برابر زلزله مقاومت خوبی دارند و خرابی‌های ناشی از روان‌گرایی در سازه‌های زیرزمینی کم‌تر از سازه‌های سطحی رخ می‌دهد. علت این امر ممکن است انعطاف‌پذیری این سازه‌ها نسبت به خاک اطراف باشد که سبب می‌شود سازه در حین زلزله به‌طور سازگار با خاک اطراف تغییر شکل دهد. اما چنانچه سازه‌ی زیرزمینی نسبت به خاک اطراف صلب‌تر باشد، سازوکار تغییر شکل‌های آن متفاوت خواهد بود. از جمله‌ی سازه‌های زیرزمینی که کاربرد فراوانی در مناطق شهری و غیرشهری دارند می‌توان به تونل‌ها اشاره کرد. تونل‌هایی که در اعماق کم از سطح زمین ساخته می‌شوند، ممکن است تحت زلزله و روان‌گرایی خاک محل قرار گیرند. در این حالت روان‌گرایی خاک ممکن است باعث ایجاد نشست خاک، تغییر شکل پوشش تونل‌ها و بالآمدگی سازه‌های زیرزمینی شود. گزارشات متعدد منتشره در این زمینه حاکی از خرابی‌های وسیع در تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی است^[۶-۱۰]. به‌عنوان مثال گزارش‌های مربوط به زلزله‌ی (۱۹۹۵) Nanbu-Hyogoken نشان داد که تونل‌های فاضلاب و لوله‌ها تحت تأثیر روان‌گرایی خاک قرار گرفتند و بر اثر آن خرابی‌های فراوانی در منطقه مشاهده شده است. از دیگر حوادثی که خرابی‌های ناشی از روان‌گرایی در سازه‌های زیرزمینی رخ داده است می‌توان به زلزله‌های نیگاتای ژاپن (۱۹۶۴)، Luzon (۱۹۹۰)، (۱۹۹۳) oki-Hokkaido Nansei، Chi-Chi (۱۹۹۹) اشاره کرد^[۱۱-۱۴]. در

تونل ارزیابی شود. برای ارزیابی نتایج، یک حالت خاص به عنوان مدل مرجع معرفی شده و بقیه‌ی حالات با آن مقایسه می‌شود.



شکل ۱. نمایش تونل و مشخصات کلی مدل‌سازی.



شکل ۲. نمایش المان‌های واسطه.

مشخصات مدل مرجع و نحوه‌ی مدل‌سازی

هدف از این مطالعه بررسی اثر روان‌گرایی خاک‌ها بر پوشش تونل است. برای بررسی این موضوع یک تونل را در لایه‌ی خاک روان‌گرا مدل کرده و به ارزیابی تغییر شکل‌ها و نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل می‌پردازیم. در این مدل باید از روان‌گرایی خاک اطمینان حاصل کرد. لذا تغییرات فشار آب حفره‌ی در تعدادی از نقاط کنترل می‌شود تا اثرات آن در حین روان‌گرایی نشان داده شود. با توجه به مشخصات کلی مدل، برای مدل‌سازی باید از برنامه‌ی استفاده کرد که بتواند افزایش فشار آب حفره‌ی در حین روان‌گرایی را در نظر بگیرد. همچنین این برنامه باید بتواند المان‌سازی پوشش تونل را به خوبی انجام دهد. برای این منظور از نرم‌افزار FLAC که قادر است تمامی موارد مذکور را لحاظ کند، استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی روان‌گرایی و افزایش فشار آب حفره‌ی از مدل Finn and Martin (۱۹۷۵) که مدل رفتاری مناسبی برای ارزیابی روان‌گرایی است، استفاده می‌شود. خاک منطقه از نوع ماسه‌سست اشباع مطابق مشخصات جدول ۱ است. در مدل‌سازی‌ها چگالی خشک و نفوذپذیری خاک به ترتیب (Kg/m^3) 1500 و (m/s) 10^{-4} در نظر گرفته می‌شود. سطح آب زیرزمینی نیز هم‌سطح زمین است. مشخصات خاک منطقه براساس مطالعات موجود روان‌گرایی انتخاب شده است [۱۰،۸۳]. ابعاد مدل بیش از ۵ برابر قطر حفاری در نظر گرفته می‌شود تا اثرات شرایط مرزی روی مقطع تونل تا حد ممکن کاهش یابد. لازم به ذکر است، در صورتی که فاصله‌ی مرزها از مدل تا حدود ۵ برابر عرض مدل باشد درصد اثرات خطای ناشی از تنش به حدود ۶ درصد می‌رسد [۹]. لذا از این طریق می‌توان از اثر مرزها بر تحلیل صرف نظر کرد. بار لرزه‌ی به صورت یک شتاب هماهنگ با 10 سیکل رفت و برگشت است که به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

$$\ddot{u}_g(t) = A_g \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

دامنه و فرکانس در مدل مرجع به ترتیب $A_g = 0.1g$ و $f = 1Hz$ مطابق مشخصات بار در مطالعات پیشین در نظر گرفته شده‌اند [۳]. همچنین میرایی از نوع میرایی محلی (Local Damping) و به مقدار (۵ درصد) در نظر گرفته شده است. تونل مورد مطالعه، بخشی از متروی اصفهان است که قطر حفاری آن ۶/۹۱ متر است. پوشش تونل به صورت سگمندی (قطعه‌قطعه) و ضخامت آن ۳۰ سانتی‌متر است. مقدار خاک روی تاج تونل حدود ۳ متر است. رفتار پوشش تونل به صورت

جدول ۱. مشخصات مصالح و مدل مورد نظر.

مشخصات خاک	واحد	
G (مدول برشی)	۲۰	Mpa
B (مدول بالک)	۳۰	Mpa
φ	۲۵	درجه
C	۰	Kpa
C1 (مدل finn)	۰/۷۶	—
C2 (مدل finn)	۰/۵۲	—
C3 (مدل finn)	۰/۲	—
C4 (مدل finn)	۰/۵	—

کشسان خطی، و المان‌های آن از نوع تیر (Beam) است. این المان‌ها دوگرمی هستند و هرگرم سه درجه آزادی دارد. در این نوع المان‌ها مقاومت خمشی سازه قابل مدل‌کردن است. لذا استفاده از این المان‌ها بررسی تغییرات نیروها و لنگر خمشی در پوشش تونل را ممکن می‌سازد. شکل ۱ مشخصات کلی مدل مورد نظر در خاک روان‌گرا را نشان می‌دهد. با توجه به آن که مدل‌سازی تونل در محیط خاکی هدف این نوشتار است، لازم است از المان‌های واسطه (شکل ۲) بین خاک و پوشش تونل استفاده شود. برای این منظور فاصله‌ی بین پوشش تونل و خاک با این المان‌ها پر می‌شود [۹]. المان‌های واسطه در این مدل‌سازی دارای سختی برشی و قائم $63(Mpa)$ و زاویه‌ی اصطکاک 15 درجه هستند. این مقادیر براساس مطالعات پیشین انتخاب شده‌اند [۹۵].

در تحلیل‌های استاتیکی شرایط مرزی انتهای مدل به صورت مفصلی و دو طرف مدل به صورت غلظتی در نظر گرفته می‌شود. ولی در شرایط دینامیکی به علت بازگشت موج در زمان برخورد به مرزها، شرایط مرزی خاصی به منظور جذب اثرات موج در خود مورد نیاز است. برای این منظور از شرایط مرزهای آزاد (FF) استفاده شده است [۱۲]. لازم به ذکر است که این روش در آیین‌نامه‌ی تقاضای محدود پیوسته NESSI ثبت شده و از اعتبار خاصی برخوردار است [۱۳]. با توجه به موارد فوق تحلیل‌هایی انجام پذیرفته که نتایج آن حاکی از روان‌گرایی خاک تحت بار دینامیکی است. برای بررسی‌های بیشتر به چند مورد از نتایج حاصل از این تحلیل‌ها اشاره می‌شود.

پردازش اطلاعات

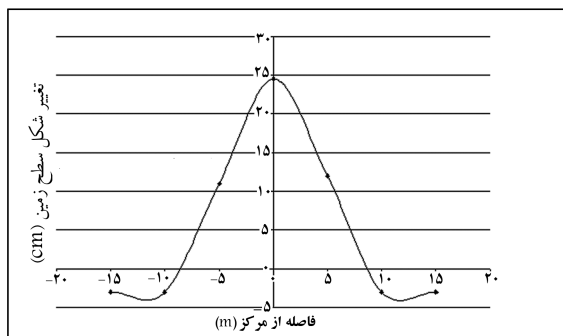
براساس مطالعات انجام شده روی مدل مرجع، پس از اعمال بار دوره‌ی (سیکلی)، تنش مؤثر کاهش یافته و میزان فشار آب حفره‌ی و کرنش برشی به شدت افزایش

می‌یابد. در اشکال ۳ تا ۵ نمونه‌هایی از تغییرات تنش مؤثر، فشار آب حفره‌یی و کرنش برشی (در عمق ۱۹ متری از سطح زمین)، پس از اعمال بار دوره‌یی نمایش داده شده است. با توجه به این اشکال میزان تنش مؤثر کاهش یافته و تقریباً معادل صفر می‌شود. در این حالت افزایش قابل توجهی در فشار آب حفره‌یی و کرنش برشی مشاهده می‌شود. این روند در بقیه‌ی نقاط نیز مشاهده می‌شود.

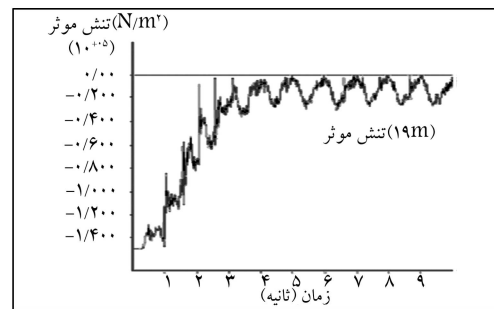
در شکل‌های ۶ و ۷ نیز تغییرات فشار آب حفره‌یی برحسب زمان بارگذاری دینامیکی در تعدادی از نقاط بالا و پایین تونل مورد مطالعه نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود با افزایش زمان بارگذاری، میزان فشار آب حفره‌یی به‌شدت افزایش می‌یابد که این افزایش فشار آب حفره‌یی با کاهش تنش مؤثر (شکل ۳) همراه است. این امر حاکی از روان‌گرایی خاک و افزایش فشار آب حفره‌یی در شرایط زهکشی نشده است. یکی از پارامترهایی که بر اثر روان‌گرایی دچار تغییرات قابل توجهی می‌شود، مقاومت ماندگار است. چنانچه خاک مقاومت ماندگار خود را در حین بارگذاری لرزه‌یی به‌طور کامل از دست بدهد، دچار روان‌گرایی جریانی می‌شود و تغییر شکل‌های محیط به‌شدت افزایش می‌یابد. برای محاسبه‌ی مقاومت ماندگار روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از روش Stark و Mesri (۱۹۹۲) است^[۱۴]. براساس نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده به نظر می‌رسد مقدار مقاومت ماندگار حاصل از این روش پس از اعمال بار دوره‌یی، برای اعماق کم‌تر از ۱۸ متر تقریباً معادل صفر است که این نمایان‌گر روان‌گرایی خاک بر اثر بارورده است. لذا به نظر می‌رسد از حدود عمق ۱۸ متر به بالا خاک کاملاً روان‌گرا شده است.

بالاآمدگی سازه‌ی زیرزمینی بر اثر روان‌گرایی خاک

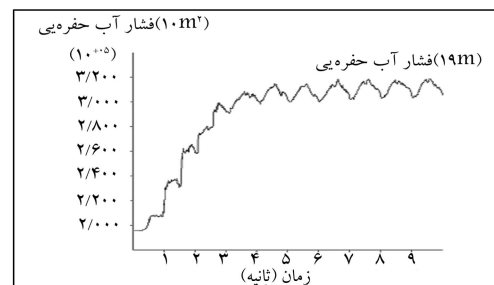
یکی از علل خرابی سازه‌های زیرزمینی در زمان وقوع روان‌گرایی خاک‌ها، بالاآمدگی سازه و اثر آن بر تغییر مکان سطحی است. علت وقوع این پدیده زیادبودن فشار رو به بالای آب حفره‌یی در مقایسه با وزن سازه‌ی توخالی و سربار روی آن است^[۱۵]. این خرابی‌ها علاوه بر سازه‌های زیرزمینی کوچک، در سازه‌های زیرزمینی بزرگ نیز مشاهده شده است^[۱۶]. تحلیل‌های انجام شده در این مطالعات نشان می‌دهد، روان‌گرایی خاک سبب بالاآمدگی سازه‌ی تونل شده است. در انتهای تحلیل مقدار این بالاآمدگی ۴۲٫۷ سانتی‌متر است که به نظر مقدار بزرگی است، ضمن آن‌که با ادامه‌ی تحلیل این روند افزایشی همچنان ادامه دارد و با افزایش زمان بارگذاری در دوره‌های بعدی، احتمال وقوع یک ناپایداری کلی در سیستم مشاهده می‌شود. شکل ۸ تغییر شکل سطح زمین در محل سازه‌ی زیرزمینی را نشان می‌دهد. براساس این شکل میزان بالاآمدگی سطح زمین حدود ۲۴٫۵ سانتی‌متر است که از مقدار بالاآمدگی سازه کم‌تر است.



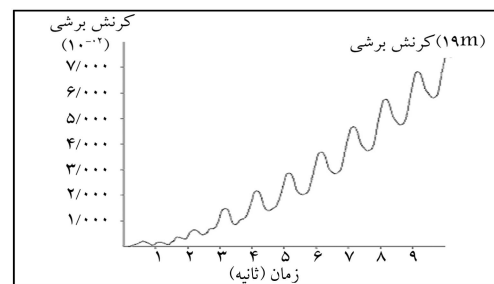
شکل ۸. تغییرات نشست و تورم سطحی نسبت به محور تونل.



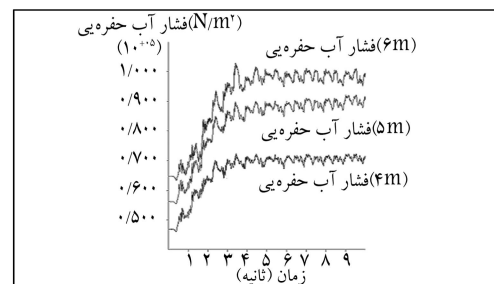
شکل ۳. تغییرات تنش مؤثر در عمق ۱۹ متری.



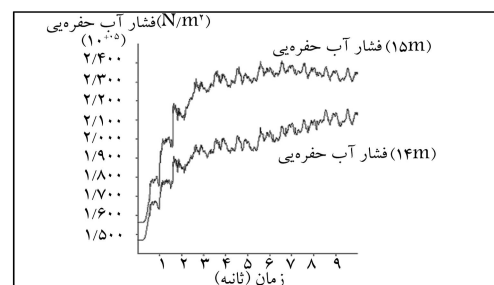
شکل ۴. تغییرات فشار آب حفره‌یی در عمق ۱۹ متری.



شکل ۵. تغییرات کرنش برشی در عمق ۱۹ متری.



شکل ۶. تغییرات فشار آب حفره‌یی در اعماق ۴-۶ متری (بالای تاج تونل).



شکل ۷. تغییرات فشار آب حفره‌یی در اعماق ۱۴ تا ۱۵ متری (پایین تاج تونل).

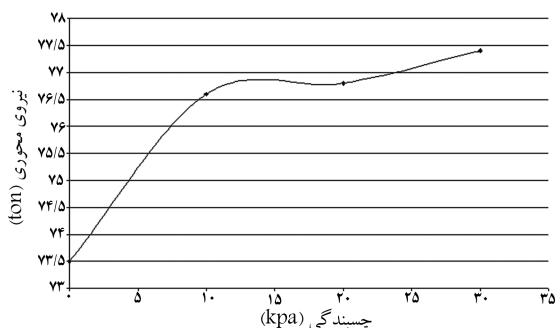
ارزیابی نیروهای داخلی پوشش تونل

براساس نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده روی مدل مرجع، بیشترین مقدار نیروی محوری و نیروی برشی در انتهای تحلیل به ترتیب ۷۳/۵ و ۹/۷ تن می‌شود. همچنین لنگر خمشی پوشش تونل در حین بارگذاری دوره‌یی تا ۱۶/۵ (ton/m) (در ثانیه ۹/۲) افزایش می‌یابد و با ادامه‌ی بارگذاری مقدار آن ۳۳ درصد کاهش می‌یابد و به ۱۱/۱ (ton/m) می‌رسد. به عبارت دیگر با تغییر جهت بارگذاری در دوره‌های مختلف و تغییر مسیر حرکت خاک و سازه، لنگر خمشی در هر مرحله در یک جهت افزایش و در جهت دیگر با کاهش همراه خواهد بود. لذا در دوره‌های متوالی بارگذاری، لنگرهای مثبت و منفی به تدریج افزایش و کاهش می‌یابند. شایان ذکر است که نتایج حاصل از تحقیقات محققین نیز نشان می‌دهد که میزان لنگر خمشی در طول بارگذاری دینامیکی افزایش یافته و پس از چند دوره مقدار آن ۳۷ درصد کاهش می‌یابد^[۳]. این نکته حاکی از هم‌خوانی نتایج حاصله با نتایج تحقیقات ایشان است.

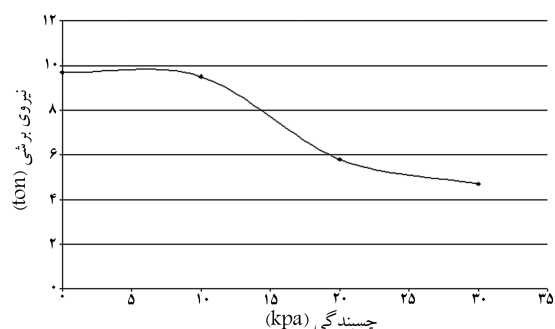
بررسی اثر پارامترهای مختلف خاک

بررسی اثر چسبندگی خاک

یکی از پارامترهای مهمی که در کاهش اثرات روان‌گرایی تأثیر به‌سزایی دارد، چسبندگی خاک است. با افزایش چسبندگی خاک، پتانسیل روان‌گرایی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. لذا انتظار می‌رود با افزایش چسبندگی خاک میزان بالآمدگی سازه، نیروها و تغییر شکل‌های پوشش تونل کاهش یابند. از این رو، تحلیل‌هایی با در نظر گرفتن چسبندگی‌های مختلف (بین صفر تا ۳۰ کیلوپاسکال) انجام شده، و اثر این پارامتر بر تغییرات نیروها و تغییر شکل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۹. نمایش تغییرات حداکثر نیروی محوری پوشش تونل با چسبندگی خاک.



شکل ۱۰. نمایش تغییرات حداکثر نیروی برشی پوشش تونل با چسبندگی خاک.

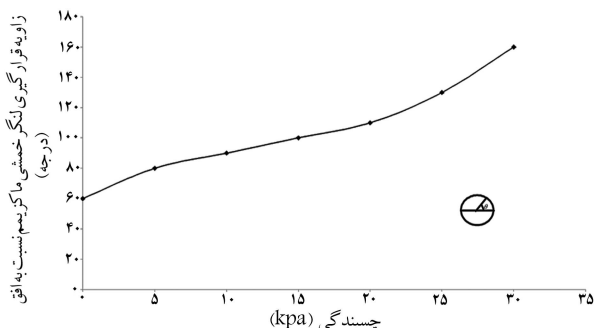
شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات بیشینه‌ی نیروی محوری و برشی با افزایش چسبندگی خاک را نشان می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها، با افزایش چسبندگی خاک میزان نیروی محوری به مقدار محدودی افزایش و مقدار نیروی برشی کاهش می‌یابد. در جدول ۲ درصد تغییرات نیروهای محوری و برشی نسبت به مدل مرجع ارائه شده است. چنان که ملاحظه می‌شود، با افزایش میزان چسبندگی از صفر به ۱۰ و ۳۰ کیلوپاسکال میزان نیروی محوری حدود ۴/۲ و ۵/۳ درصد افزایش می‌یابد. لذا به نظر می‌رسد با افزایش مقدار محدودی چسبندگی، میزان تغییرات نیروی محوری کمی زیاد بوده و پس از آن تغییرات پارامتر اثر ناچیزی روی نیروی محوری دارد. اما نیروی برشی با افزایش چسبندگی خاک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. با افزایش چسبندگی از صفر به ۳۰ کیلوپاسکال میزان این نیرو تا حدود ۵۱/۵ درصد کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که با افزایش چسبندگی خاک اثرات روان‌گرایی کاهش یافته و با تغییر نوع خاک، بار بیشتری به صورت جانبی به سازه وارد می‌شود.

مطالعات انجام شده در خصوص روند تغییرات بیشینه‌ی لنگر خمشی نشان می‌دهد که اگرچه میزان این پارامتر نیز با افزایش چسبندگی خاک کاهش می‌یابد، ولی این روند کاهش در تمامی نقاط مشاهده نمی‌شود. براساس نتایج حاصله افزایش چسبندگی خاک از صفر به ۲۵ کیلوپاسکال با کاهش حدوداً ۵۶ درصدی لنگر خمشی همراه است. در عوض موقعیت این لنگر در پوشش تونل تغییر کرده و به نظر می‌رسد که در خلاف جهت عقربه‌ی ساعت می‌چرخد. به عبارت دیگر، موقعیت لنگر خمشی بیشینه با توجه به چسبندگی خاک تغییر می‌کند. شکل ۱۱ چرخش لنگر خمشی با افزایش چسبندگی خاک را نشان می‌دهد. در این شکل زاویه‌ی θ زاویه‌ی لنگر خمشی بیشینه نسبت به محور افقی گذرنده از محور تونل است.

در شکل ۱۲ بالآمدگی تونل بر اثر تغییرات چسبندگی خاک، که معادل جابه‌جایی قائم سازه تحت فشار آب حفزه‌یی اضافی ناشی از روان‌گرایی است، نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش چسبندگی خاک میزان بالآمدگی سازه به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش در چسبندگی‌های پایین شدت بیشتری

جدول ۲. درصد تغییرات نیروهای محوری و برشی نسبت به مقادیر معادل آنها در مدل مرجع.

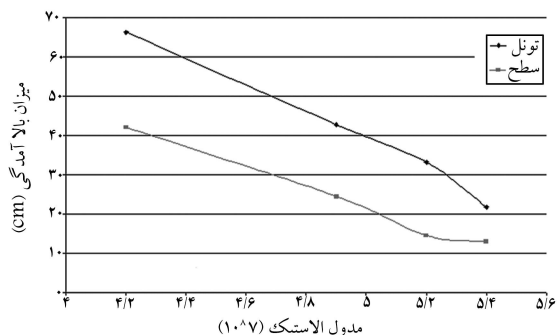
C (kN/m ²)	حداکثر نیروی محوری (ton)	حداکثر نیروی برشی (ton)	حداکثر نیروی محوری (ton)	حداکثر نیروی برشی (ton)
۱۰	۷۶/۶	۹/۵	۷۶/۶	۹/۵
۲۰	۷۶/۸	۵/۸	۷۶/۸	۵/۸
۳۰	۷۷/۴	۴/۷	۷۷/۴	۴/۷



شکل ۱۱. نمایش تغییرات محل قرارگیری حداکثر لنگر خمشی تونل با چسبندگی خاک.

جدول ۳. تغییرات لنگر خمشی بیشینه پوشش تونل با مدول ارتجاعی خاک.

درصد افزایش لنگر به مدل مرجع	لنگر خمشی بیشینه (ton-m)	مدول ارتجاعی $(N/m^2) \times 10^7$
-۴٫۵	۱۰٫۶	۴٫۲
۰	۱۱٫۱	۴٫۹
۹٫۰	۱۲٫۱	۵٫۲
۱۴٫۴	۱۲٫۷	۵٫۴



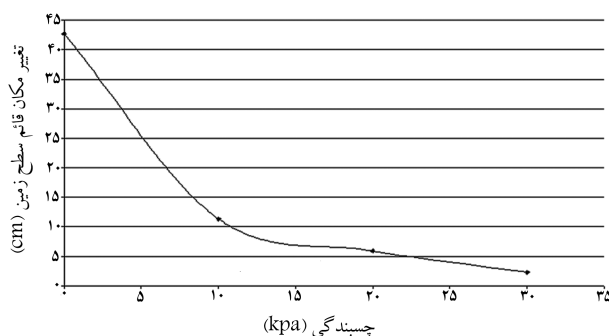
شکل ۱۴. نمایش تغییرات بالآآمدگی تونل و سطحی با تغییرات مدول ارتجاعی خاک.

در جدول ۳ تغییرات لنگر خمشی، و در شکل ۱۴ تغییرات بالآآمدگی سازه و سطح زمین با تغییر مدول ارتجاعی خاک ارائه شده است. براساس نتایج حاصله، افزایش مدول ارتجاعی به تغییر انعطاف پذیری خاک، و در نتیجه کاهش بالآآمدگی سازه و افزایش لنگر خمشی پوشش تونل خواهد انجامید. این تغییرات به اندازه‌ی است که با افزایش ۱۰ درصدی مدول ارتجاعی خاک (نسبت به مدل مرجع)، میزان لنگر خمشی تا ۱۴٫۴ درصد افزایش و میزان بالآآمدگی سازه تا ۴۹ درصد (شکل ۱۴) کاهش می‌یابد. همچنین زمانی که میزان مدول ارتجاعی ۱۴ درصد کاهش می‌یابد، میزان لنگر خمشی ۴٫۵ درصد کاهش و مقدار بالآآمدگی سازه ۵۵ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که نتایج حاصله حاکی از آن است که تغییرات نیروهای محوری و برشی پوشش تونل تغییر چندانی نکرده است. لذا تغییر خواص ارتجاعی خاک بر بالآآمدگی ناشی از روان‌گرایی و تغییرات لنگر خمشی پوشش تونل نقش به‌سزایی دارد. علت این امر افزایش مدول ارتجاعی خاک و در نتیجه تغییر خاصیت انعطاف‌پذیری خاک است.

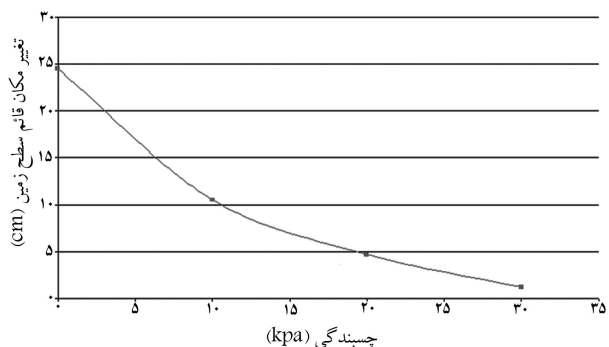
بررسی اثر چگالی اشباع

یکی از پارامترهایی که در تعریف مشخصات خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد، وزن مخصوص حالت اشباع خاک است. برای بررسی اثر این پارامتر بر تغییرات نیروها و تغییر شکل‌های پوشش تونل، تحلیل‌هایی برای مقادیر مختلف وزن مخصوص اشباع خاک انجام شده، که خلاصه‌ی نتایج آن در جدول ۴ و شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ نمایش داده شده است. براساس نتایج حاصله از این تحلیل‌ها با افزایش وزن مخصوص اشباع خاک، میزان لنگر خمشی و نیروهای برشی و محوری پوشش تونل افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش وزن واحد حجم توده‌ی خاک روی تاج تونل است که سبب افزایش نیروهای وارد بر پوشش تونل می‌شود.

همچنین با توجه به وزن خاک روی تونل، میزان تغییر مکان رو به بالای ناشی از فشار آب کاهش می‌یابد. این کاهش تا حدی است که مقدار بالآآمدگی سازه، با تغییر



شکل ۱۲. نمایش تغییرات بالآآمدگی تونل با چسبندگی خاک.



شکل ۱۳. نمایش تغییرات بالآآمدگی سطح زمین با چسبندگی خاک (در محل محور تونل).

داشته و با افزایش این پارامتر میزان بالآآمدگی سازه کاهش می‌یابد. علت این امر کاهش پتانسیل روان‌گرایی با افزایش چسبندگی خاک است که در نتیجه‌ی آن فشار آب حفره‌ی اضافی و میزان بالآآمدگی سازه نیز کاهش می‌یابد. شکل ۱۳ نیز تغییرات بالآآمدگی سطح زمین در محل محور تونل را بر اثر تغییرات چسبندگی خاک نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان دریافت که با افزایش چسبندگی خاک میزان بالآآمدگی سازه و سطح زمین کاهش قابل توجهی می‌یابد. لذا می‌توان با افزایش چسبندگی (سیمانتاسیون) خاک پتانسیل روان‌گرایی آن را کاهش داد و از ناپایداری کلی سیستم به‌علت روان‌گرایی خاک جلوگیری کرد.

اثر تغییر مدول ارتجاعی خاک

از پارامترهایی که انعطاف‌پذیری خاک را نشان می‌دهند، می‌توان به ضرایب ارتجاعی و پواسون خاک اشاره کرد. در نرم‌افزار FLAC این پارامترها با استفاده از مقادیر مدول برشی و مدول بالک به‌صورت رابطه‌های ۲ و ۳ تعریف می‌شوند:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

با توجه به این رابطه‌ها مقادیر ضریب ارتجاعی (E) و ضریب پواسون (ν) از مدول‌های بالک (K) و برشی (G) به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \quad (4)$$

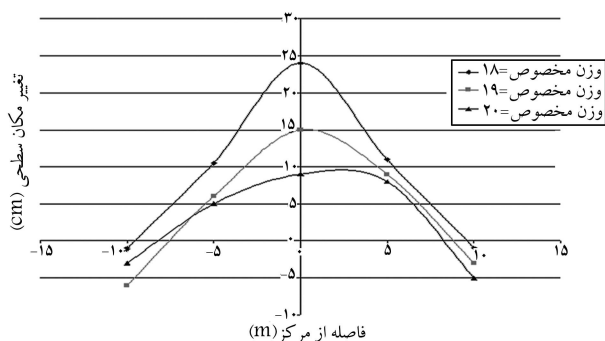
$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (5)$$

جدول ۴. تغییرات بیشینه‌ی نیروها و بالا آمدگی پوشش تونل با وزن مخصوص اشباع خاک.

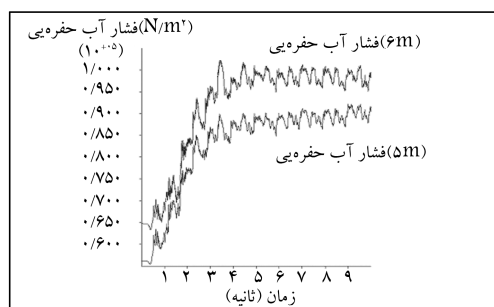
بالا آمدگی سازه (cm)	نیروی برشی (ton)	نیروی محوری (ton)	ممان خمشی (ton/m)	γ_{sat} (kN/m ³)
۴۲٫۷	۹٫۷	۷۳٫۵	۱۱٫۱۴	۱۸
۳۲٫۳	۱۲٫۲	۷۵٫۵	۱۲٫۷۵	۱۹
۲۲٫۵	۱۶٫۰	۷۹٫۹	۱۷٫۲۷	۲۰

جدول ۵. درصد بالا آمدگی سطح زمین به بالا آمدگی سازه.

بالا آمدگی سازه (cm)	بالا آمدگی سطح زمین (cm)	بالا آمدگی سطح زمین به بالا آمدگی سازه (%)	γ_{sat} (kN/m ³)
۴۲٫۷	۲۴	۵۶	۱۸
۳۲٫۳	۱۵	۴۷	۱۹
۲۲٫۵	۹	۳۹	۲۰



شکل ۱۸. نمایش تغییر مکان قائم سطح زمین و اثر وزن مخصوص خاک بر بالا آمدگی سطحی.

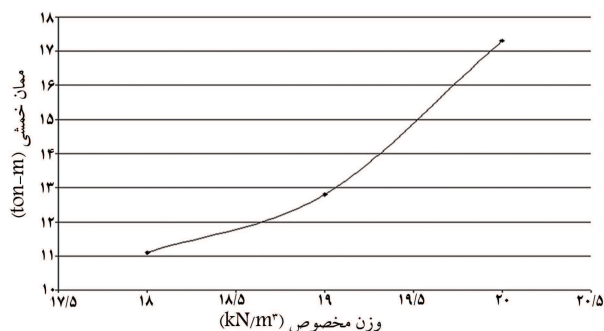


شکل ۱۹. تغییرات فشار آب حفره‌ی در اعماق ۵ و ۶ متری از سطح زمین (بالا تر از تاج تونل، $K = 10^{-4}$).

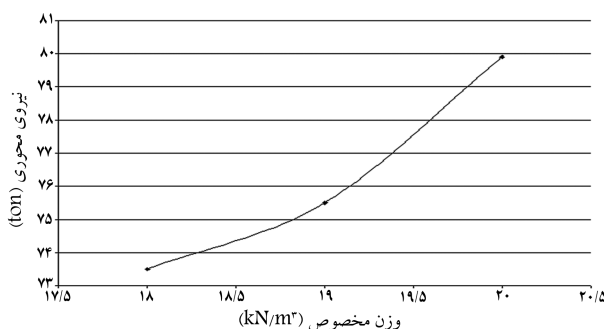
را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، با افزایش میزان وزن مخصوص خاک، درصد بالا آمدگی سطح زمین به بالا آمدگی سازه کاهش می‌یابد.

بررسی اثر نفوذپذیری خاک

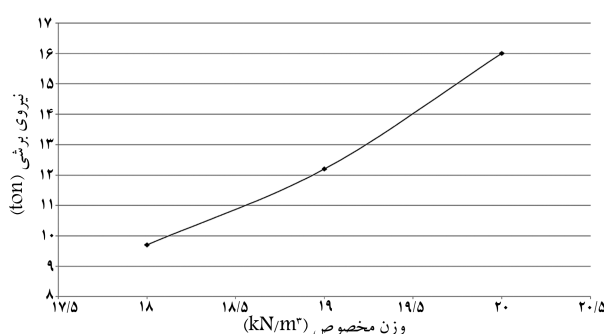
با افزایش نفوذپذیری خاک، فشار آب حفره‌ی کاهش یافته و سبب می‌شود نیروهای وارده به پوشش تونل کاهش یابد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش نفوذپذیری از 10^{-4} (m/sec) به 10^{-3} (m/sec) میزان لنگر خمشی و نیروی برشی به ترتیب ۱۶/۲ و ۵/۳ درصد افزایش می‌یابد، ولی میزان نیروی محوری به اندازه‌ی ۲/۳ درصد کاهش یافته است. همچنین میزان بالا آمدگی تونل بر اثر فشار آب حفره‌ی از ۴۲/۷ سانتی‌متر به ۴۰/۵ سانتی‌متر می‌رسد. لذا میزان بالا آمدگی سازه حدود ۵ درصد کاهش یافته است. شکل ۱۹ تغییرات فشار آب حفره‌ی برای دو نقطه‌ی بالای تاج تونل و نفوذپذیری 10^{-4} (m/sec) و شکل ۲۰ همان نمودار را برای نفوذپذیری 10^{-3} (m/sec) نشان می‌دهد. با توجه به این اشکال سطح فشار آب حفره‌ی با افزایش نفوذپذیری کاهش یافته است. این امر برای دو نقطه‌ی زیر کف تونل نیز



شکل ۱۵. تغییرات حداکثر لنگر خمشی با تغییرات وزن مخصوص خاک.



شکل ۱۶. تغییرات حداکثر نیروی محوری با تغییرات وزن مخصوص خاک.



شکل ۱۷. تغییرات حداکثر نیروی برشی با تغییرات وزن مخصوص خاک.

چگالی اشباع خاک از ۱۸ به ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب از ۴۲٫۷ سانتی‌متر به ۲۲٫۵ سانتی‌متر تغییر می‌کند. شکل ۱۸ میزان بالا آمدگی سطح زمین بر اثر حفاری را برای تغییرات وزن مخصوص اشباع خاک نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود میزان بالا آمدگی سطح زمین با افزایش وزن مخصوص خاک کاهش می‌یابد. این کاهش رابطه‌ی مستقیم با تغییرات تغییر مکان قائم سازه زیرزمینی دارد. جدول ۵ درصد کاهش بالا آمدگی سطح زمین نسبت به سازه‌ی زیرزمینی (تونل مورد بحث)

صحیحی از آنها وجود داشته باشد باعث می شود تحلیل ها تا حد زیادی تحت تأثیر قرار گیرد. بعضی از این پارامترها مفهوم خاصی را به همراه دارند. مثلاً پارامتر C_1 به عنوان شیب خط کرنش حجمی صفر در نظر گرفته می شود. اما در هر صورت این ۴ پارامتر به صورت ضرایب ثابت آزمایش سه محوری دوره‌یی در نظر گرفته می شوند. هدف از بررسی تغییر این ضرایب ارائه‌ی شناخت بیشتر از میزان تأثیر هر یک از این پارامترها در تحلیل دینامیکی است. رابطه‌ی این ضرایب با تغییرات کرنش حجمی به صورت رابطه‌ی زیر بیان می شود:

$$\Delta \epsilon_{vd} = C_1 (\gamma - C_2 \epsilon_{vd}) + \frac{C_3 \epsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \epsilon_{vd}} \quad (6)$$

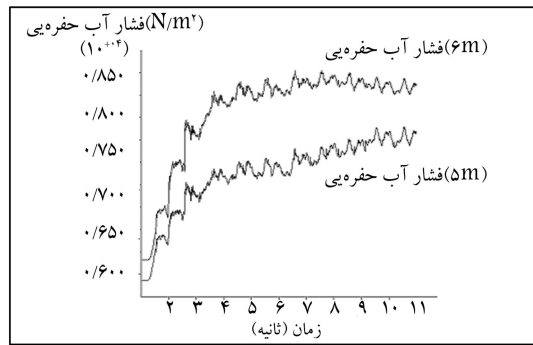
با توجه به این رابطه، تغییرات کرنش حجمی تابعی از این ضرایب ثابت است و تغییر آنها بر تغییرات کرنش حجمی و در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌یی تأثیر به‌سزایی خواهد داشت. از این رو با بررسی تغییرات این ضرایب، تأثیر آنها بر روان‌گرایی محیط ارزیابی می شود. هنگامی که کرنش برشی (γ) صفر می شود مقدار کرنش حجمی ($\Delta \epsilon_{vd}$) نیز صفر می شود که می توان برای بیان ارتباط بین این ضرایب رابطه‌ی زیر را در نظر گرفت:

$$C_1 C_2 C_3 = C_4 \quad (7)$$

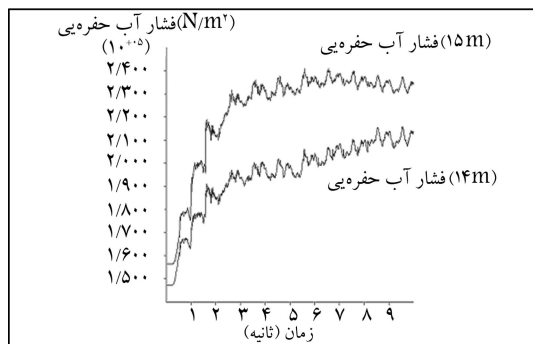
لذا ضریب C_2 تابعی از بقیه‌ی ضرایب خواهد بود و به‌تنهایی محاسبه نمی شود. از این رو تأثیر سه ضریب دیگر (با در نظر گرفتن اثر آنها در مقدار ضریب C_2) بر روان‌گرایی محیط و تغییرات نیروها و تغییر شکل‌های پوشش تونل بررسی می شود. جدول ۶ تغییر لنگر خمشی بیشینه در ثانیه‌ی دهم را با تغییر این ضرایب نشان می دهد. براساس این جدول با کاهش مقدار ضریب C_1 ، مقدار لنگر خمشی نیز کاهش می یابد. مثلاً زمانی که میزان این ضریب حدود ۶۷ درصد کاهش می یابد (نسبت به مدل مرجع)، مقدار لنگر خمشی ۱۱/۷ درصد کاهش خواهد یافت. در این حالت میزان فشار آب حفره‌یی در نقاط مختلف نیز کاهش می یابد. علت کاهش فشار آب حفره‌یی و لنگر خمشی با کاهش ضریب C_1 ، کاهش اثرات روان‌گرایی است. براساس رابطه‌های ۶ و ۷ با افزایش مقدار ضریب C_1 ، مقدار ضریب C_2 و در نتیجه مقدار تغییرات کرنش حجمی افزایش می یابد. لذا به نظر می رسد اثرات روان‌گرایی خاک نیز افزایش خواهد داشت. این افزایش را می توان در نمودارهای فشار آب حفره‌یی (شکل ۲۳ تا ۲۸) که میزان فشار آب حفره‌یی در بالا و پایین تونل را با افزایش ضریب C_1 نشان می دهند، مشاهده کرد. لذا تغییر مکان قائم تونل، و به عبارتی بالا آمدگی‌های سازه کاهش می یابد. در شکل ۲۹ کاهش بالا آمدگی‌های تونل و سطح

جدول ۶. تغییر لنگر خمشی ماکزیمم با تغییر پارامترهای مدل فین.

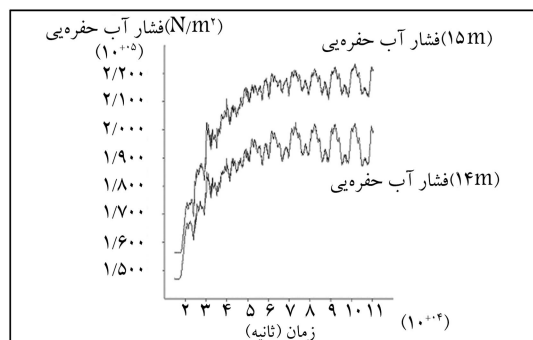
درصد افزایش لنگر نسبت به مدل مرجع	لنگر خمشی بیشینه (ton/m)	C_4	C_2	C_3	C_1
---	۱۱/۱	۰/۵۰	۰/۲۰	۰/۵۲	۰/۷۶
-۱/۸	۱۰/۹	۰/۵۰	۰/۱۳	۰/۵۲	۰/۵۰
-۱۱/۷	۹/۸	۰/۵۰	۰/۰۷	۰/۵۲	۰/۲۵
-۱۴/۴	۹/۵	۰/۵۰	۰/۱	۰/۲۵	۰/۷۶
۲/۷	۱۱/۴	۰/۵۰	۰/۲۹	۰/۷۵	۰/۷۶
۵/۴	۱۱/۷	۰/۲۵	۰/۱۰	۰/۵۲	۰/۷۶
-۰/۹	۱۱/۰	۰/۷۵	۰/۳۰	۰/۵۲	۰/۷۶



شکل ۲۰. تغییرات فشار آب حفره‌یی در اعماق ۵ و ۶ متری از سطح زمین (بالا تر از تاج تونل، $K = 10^{-2}$).



شکل ۲۱. تغییرات فشار آب حفره‌یی در اعماق ۱۴ و ۱۵ متری از سطح زمین (پایین تر از کف تونل، $K = 10^{-2}$).

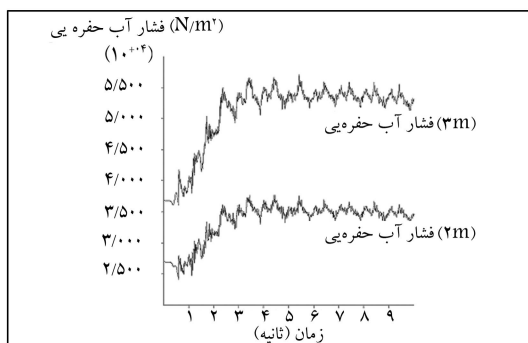


شکل ۲۲. تغییرات فشار آب حفره‌یی در اعماق ۱۴ و ۱۵ متری از سطح زمین (پایین تر از کف تونل، $K = 10^{-2}$).

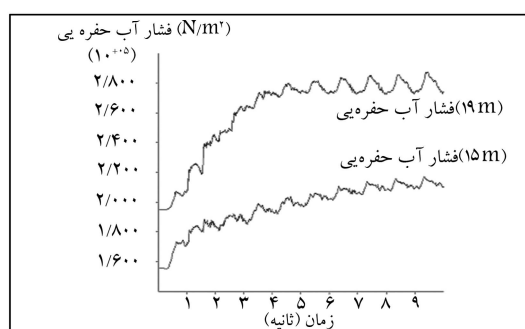
مورد بررسی قرار گرفته که در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نمایش داده شده است. لذا به نظر می رسد با افزایش میزان نفوذپذیری خاک، فشار آب حفره‌یی اضافی ناشی از روان‌گرایی کاهش می یابد. این موضوع توسط دیگر محققین نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از این بررسی مطابقت دارد [۳].

بررسی اثر پارامترهای مدل رفتاری Finn

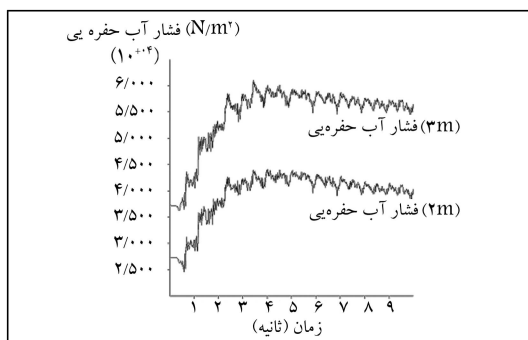
یکی از مواردی که در تحلیل‌های دینامیکی با استفاده از مدل رفتاری Finn با آن مواجه می شویم تغییر پارامترهای C_1 تا C_4 است که از آزمایش‌های سه محوری دوره‌یی حاصل می شود. عدم توجه به تعیین این پارامترها بدون آن که شناخت



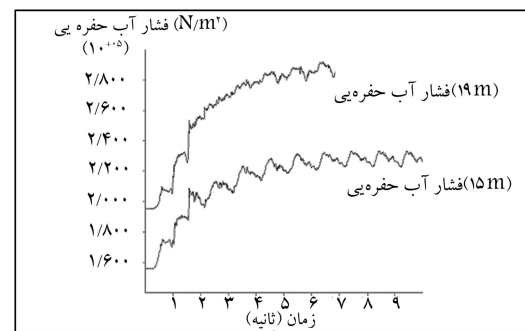
شکل ۲۷. نمایش تغییرات فشار آب حفره برای نقاطی از بالای تونل ($C_1 = 0/50$).



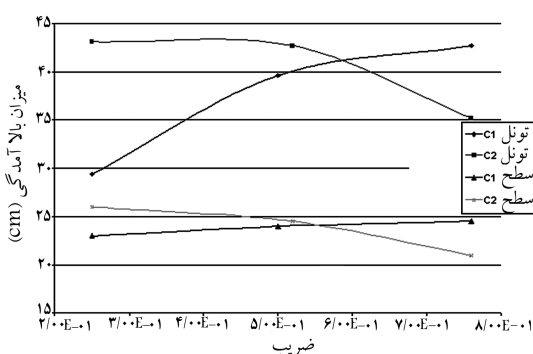
شکل ۲۳. نمایش تغییرات فشار آب حفره برای نقاطی از زیر تونل ($C_1 = 0/25$).



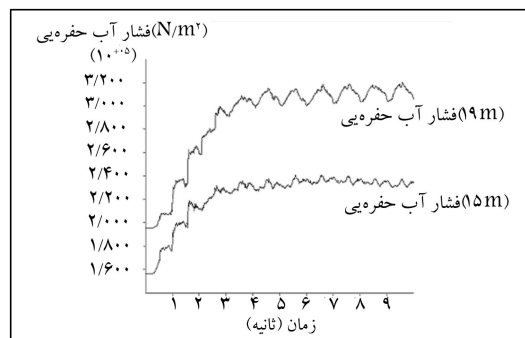
شکل ۲۸. نمایش تغییرات فشار آب حفره برای نقاطی از بالای تونل ($C_1 = 0/75$).



شکل ۲۴. نمایش تغییرات فشار آب حفره برای نقاطی از زیر تونل ($C_1 = 0/50$).

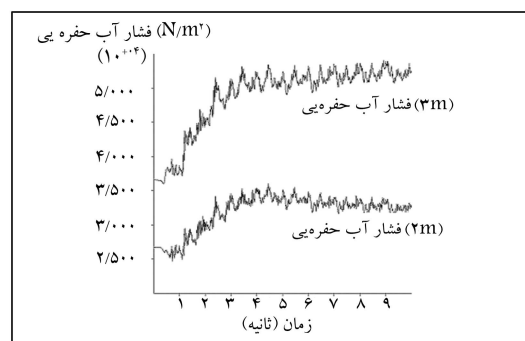


شکل ۲۹. نمایش تغییرات بالادگی سازه و سطح زمین در محل محور تونل با تغییرات ضرایب C_1 و C_2 .



شکل ۲۵. نمایش تغییرات فشار آب حفره برای نقاطی از زیر تونل ($C_1 = 0/75$).

کاهش و بخش دوم آن افزایش را نشان می‌دهد. از این رو تغییر مقدار این ضریب بسته به شرایط تحلیل می‌تواند باعث افزایش یا روان‌گرایی شود. در جدول ۶ تغییر لنگر خمشی بر اثر تغییر این پارامتر ارائه شده است. بر این اساس، در شرایط کنونی با افزایش ضریب C_2 میزان لنگر خمشی افزایش می‌یابد. همچنین مطابق شکل ۲۸، با افزایش میزان این ضریب مقدار بالادگی تونل و سطح زمین کاهش می‌یابد. لذا به نظر می‌رسد با افزایش این ضریب اثرات روان‌گرایی محدود می‌شود. افزایش ضریب C_4 نیز مانند ضریب C_2 ، بخشی از معادله‌ی ۹ را افزایش و بخشی دیگر را کاهش می‌دهد و در تحلیل‌ها روند کاملاً مشخصی ندارد. در تحلیل‌های انجام شده که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است، با افزایش این ضریب میزان لنگر خمشی به مقدار محدودی کاهش یافته است. لذا به نظر می‌رسد افزایش این ضریب برخلاف ضریب C_2 اثرات روان‌گرایی را افزایش می‌دهد. البته روند افزایشی چندان مشخص نیست و بسته به شرایط تحلیل تغییر می‌کند.



شکل ۲۶. نمایش تغییرات فشار آب حفره برای نقاطی از زیر تونل ($C_1 = 0/25$).

زمین بر اثر افزایش این ضریب نشان داده شده است. براساس این شکل با کاهش ۳۴ درصدی ضریب C_1 ، میزان بالادگی سازه حدود ۳۱ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار C_2 ، مقدار C_3 نیز افزایش می‌یابد. لذا بخش اول معادله‌ی ۶

۳. میزان بالآمدگی سازه با افزایش چسبندگی خاک به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش در چسبندگی‌های پایین شدت بیشتری دارد. براساس مطالعات انجام شده، با تغییر چسبندگی از صفر به 10^0 کیلوپاسکال میزان بالآمدگی ۵۵ درصد کاهش می‌یابد که این امر نیز به دلیل کاهش پتانسیل روان‌گرایی با افزایش چسبندگی خاک است.

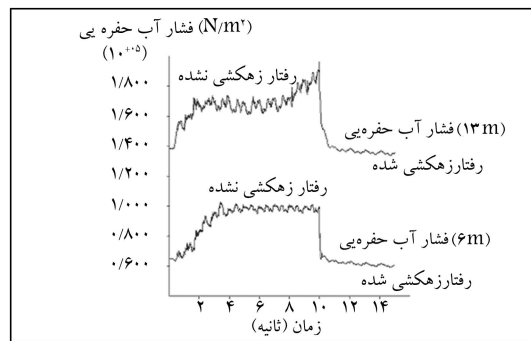
۴. با افزایش مدول ارتجاعی خاک، بالآمدگی سازه کاهش و لنگر خمشی پوشش تونل افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش 10^0 درصدی مدول ارتجاعی خاک میزان لنگر خمشی تا $14/4$ درصد افزایش، و میزان بالآمدگی سازه تا 49 درصد کاهش می‌یابد. همچنین زمانی که میزان مدول ارتجاعی 14 درصد کاهش می‌یابد، میزان لنگر خمشی $4/5$ درصد کاهش و مقدار بالآمدگی سازه 55 درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که تغییرات نیروهای محوری و برشی پوشش تونل تغییر چندانی نکرده است. لذا تغییر خواص ارتجاعی خاک بر اثرات بالآمدگی ناشی از روان‌گرایی و تغییرات لنگر خمشی پوشش تونل نقش به‌سزایی دارد.

۵. میزان تغییر مکان رو به بالای ناشی از فشار آب و میزان بالآمدگی سطح زمین با افزایش وزن مخصوص خاک، کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند زمانی که وزن مخصوص از 18 به 20 کیلونیوتن بر مترمکعب می‌رسد، بالآمدگی سازه حدود 47 درصد کاهش می‌یابد. همچنین درصد بالآمدگی سطح زمین به بالآمدگی سازه از 56 درصد به 39 درصد می‌رسد که این امر حاکی از کاهش درصد بالآمدگی سطح زمین نسبت به سازه‌ی زیرزمینی (تونل مورد بحث)، با افزایش وزن مخصوص سازه است. ضمن آن که میزان نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی پوشش تونل نیز افزایش می‌یابد.

۶. با افزایش نفوذپذیری از 10^{-4} (m/sec) به 10^{-3} (m/sec) میزان لنگر خمشی و نیروی برشی به ترتیب $16/2$ و $9/3$ درصد افزایش می‌یابد ولی میزان نیروی محوری $2/3$ درصد کاهش می‌یابد. در این حالت حدود 5 درصد میزان بالآمدگی سازه کاهش یافته است. لذا به نظر می‌رسد با افزایش نفوذپذیری خاک، فشار آب حفره‌ی کاهش یافته و سبب می‌شود نیروهای وارده به پوشش تونل و بالآمدگی سازه نیز کاهش یابد.

۷. تغییر ضرایب مدل رفتاری Finn تأثیر به‌سزایی در تغییرات کرنش حجمی و در نتیجه افزایش فشار آب حفره‌ی خواهد داشت. مطالعات نشان داد که با کاهش 67 درصدی ضریب C_1 مقدار لنگر خمشی پوشش $11/7$ درصد کاهش می‌یابد. در این حالت میزان فشار آب حفره‌ی در نقاط مختلف محیط و بالآمدگی‌های سازه نیز با کاهش همراه است. همچنین با کاهش 34 درصدی ضریب C_1 میزان بالآمدگی سازه حدود 31 درصد کاهش می‌یابد. این کاهش لنگر خمشی و بالآمدگی سازه به دلیل کاهش اثرات روان‌گرایی خاک با کاهش ضریب C_1 است. ضمن آن که افزایش ضرایب C_2 و C_3 در مدل رفتاری Finn روند کاملاً مشخصی را نشان نمی‌دهند.

۸. با اعمال شرایط زهکشی شده در حالت دینامیکی تا حدود 10^0 درصد از میزان نیروها و لنگر خمشی پوشش تونل کاسته می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان دریافت که اعمال شرایط زهکشی سبب می‌شود فشار آب حفره‌ی اضافی به شدت از بین برود و در نتیجه اثرات روان‌گرایی نیز به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت میزان بالآمدگی سازه و میزان نیروها و لنگر خمشی پوشش تونل نیز به مقدار محدودی کاهش می‌یابند.



شکل ۳. نمایش تغییرات فشار آب حفره‌ی برای دو نقطه در بالا (عمق ۶ متری) و پایین (عمق ۱۳ متری) تونل در شرایط زهکشی نشده و زهکشی شده.

اثر شرایط زهکشی

با توجه به کوتاه بودن مدت زمان زلزله، شرایط حاکم بر محیط به صورت زهکشی نشده است؛ لذا در منطقه فشار آب حفره‌ی اضافی تشکیل می‌شود که این امر سبب تغییر شرایط محیطی و ایجاد روان‌گرایی در خاک می‌شود. اما پس از روان‌گرایی شرایط به حالت زهکشی شده تبدیل می‌شود و فشار آب حفره‌ی اضافی از بین می‌رود. در نتیجه اثرات روان‌گرایی به شدت کاهش می‌یابد. از این رو تحلیل‌هایی برای شرایط زهکشی شده پس از تحلیل‌های روان‌گرایی که در شرایط زهکشی نشده انجام شده، صورت پذیرفته است. در شکل ۳ کاهش فشار آب حفره‌ی پس از روان‌گرایی در خاک ماسه‌ی نمایش داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، میزان فشار آب حفره‌ی پس از اعمال شرایط زهکشی به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت زمان بارگذاری زهکشی نشده 10 ثانیه است. همچنین زمان لازم برای زهکشی تا زمانی که به حالتی پایدار برسد 14 ثانیه در نظر گرفته شده است. در این شرایط به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ی زیر تونل مقداری از بالآمدگی که قبلاً بر اثر شرایط غیر زهکشی رخ داده است کاهش می‌یابد. ضمن آن که از میزان نیروها و لنگر خمشی پوشش تونل با وجود بار دینامیکی (با توجه به اعمال شرایط زهکشی شده) به مقدار محدودی (تا حدود 10^0 درصد) کاسته می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار با بررسی تأثیر روان‌گرایی خاک بر تونل‌های پوشش دار، اثر پارامترهای مختلف بر تغییرات نیروها و تغییر شکل‌های پوشش مورد ارزیابی قرار گرفت، که نتایج حاصله عبارت‌اند از:

۱. با افزایش مقدار محدودی چسبندگی، میزان تغییرات نیروی محوری زیاد شده و پس از آن تغییر این پارامتر اثر ناچیزی بر نیروی محوری دارد. این مطالعات حاکی از آن است که افزایش چسبندگی از صفر به 30 کیلوپاسکال میزان این نیرو را تا حدود $51/5$ درصد کاهش می‌دهد. ضمن آن که نیروی برشی نیز با افزایش چسبندگی خاک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.
۲. تغییر چسبندگی خاک از صفر به 25 کیلوپاسکال، حدود 56 درصد میزان لنگر خمشی را کاهش می‌دهد. همچنین موقعیت لنگر خمشی بیشینه در پوشش تونل با افزایش این پارامتر در خلاف جهت عقربه‌ی ساعت می‌چرخد.

منابع

1. "Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering", Tohoku Branch, Report on the Damage Investigation of the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake; (1986) (in Japanese).
2. Japan Society of Civil Engineers. Reconnaissance Report on the July 16, 1990 Luzon Earthquake, the Philippines; (1993) (in Japanese).
3. Khoshnoudian, F. and Shahroui I. "Numerical analysis of the seismic behavior of tunnels constructed in liquefiable soils", *Soils and Foundations*, **42** (6), pp. 1-8, (2002).
4. Koseki, J.; Matsuo, O.; Ninomiya, Y. and Yoshida, T. Uplift of sewer manholes during the 1993 Kushiro-oki earthquake, *Soil Foundations*, 37, pp. 109-121, (1997).
5. Liu, H. and Song, E. "Seismic response of large underground structures in liquefiable soils subjected to horizontal and vertical earthquake excitations", *Computers and Geotechnics*, **32**, Iss 4, pp. 223-244, (June 2005).
6. Matsumoto, J. "Sanitary facilities", *In: Kawasumi, . editor. General report on the Niigata earthquake of 1964, Tokyo Electrical Engineering College Press* (1968).
7. Tokimatsu, K.; Suzuki, Y. and Tamura, S. "Preliminary report on the geotechnical aspects of 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake", *13th Int. Conf on Soil Mechanics and Foundations Engineering, New Delhi* (1994).
8. Chou, H.; Yang, C.; Hsieh, B. and Chang, S. "A study of liquefaction related damages on shield tunnels", *Tunneling and Underground Space Technology*, 16, pp. 185-193, (2001).
9. Cundall. et al. "Fast Lagrangian Analysis of Continua Manual", Online Manual, (2001)
10. Pashang Pishhe, g. "Mechanism of soil deformation due to double lenses liquefaction and critical depth determination" Msc. Thesis submitted in Civil Eng. Faculty of Amirkabir Univ. of Technology-Iran, (2004).
11. Puebla, H. and Atukorala, U.D. "Effect of liquefaction and soil-structure interaction on response spectra Flac and Numerical Modeling in geomechanics", *Proceedings of the second international flac symposium Lyon, France*, 20-31 (October 2001).
12. Whitman, R.V. and Lambe. P.C. "Effect of boundary conditions upon centrifuge experiments using ground motion simulation", *Geotech Test J* 9, pp. 61-71, (1986).
13. Cundall, P.A.; Hansteen, H.; Lacasse, S. and Selnes, P.B. "NESSI-Soil Structure Interaction Program for Dynamic and Static Problems", Norwegian Geotechnical Institute, Report 51508-9.
14. Kramer, S. "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall, inc, (1996).
15. Hamada, M.; Isoyama, R.; and Wakamatsu, K. "Liquefaction induced ground displacement and its related damage to lifeline facilities", *Soils Foundations*, 36, pp. 81-97, (1996).
16. Schmidt, B. and Hashash, Y.S.T. "US immersed tube retrofit", *Tunnels Tunneling Int*, 30, pp.22-24, (1998).