

بررسی اثر روانگرایی خاک‌ها بر تونل‌های دوقلو تحت بار هارمونیک

امین اله جام سحر، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

محمد آزادی*، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

*نویسنده مسئول: azadi.mhm@gmail.com

دریافت: ۹۶/۰۹/۰۸ پذیرش: ۹۷/۰۱/۱۸

صفحه ۱۰۵-۱۲۸

چکیده

روانگرایی از جمله پدیده‌های مخربی است که هر ساله باعث وارد شدن خسارات‌های زیادی به سازه‌های موجود در منطقه می‌شود. از جمله سازه‌های مهندسی، تونل‌ها می‌باشند که امروزه یکی از مهمترین و ضروری ترین نیازهای شهرنشینی مدرن هستند. این سازه‌ها بسته به صلیب آنها نسبت به خاک اطرافشان متاثر از تغییر شکل‌های متفاوتی می‌باشند. در خاک‌های ماسه ای اشباع با اعمال بار دینامیکی در شرایط زهکشی نشده، فشار آب حفره ای افزایش، تنش موثر بین ذرات کاهش و مقاومت برشی از بین رفته و خاک بصورت روان در می‌آید. در این حالت نیروهای داخلی وارد بر پوشش تونل، تغییر شکل‌ها و نشست‌های سطحی نسبت به حالت استاتیکی افزایش یافته است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار *FLAC-2D* اقدام به مدل کردن تونل در حالت تک و دوقلو نموده و اثر تغییرات پارامترهای خاک (زاویه اصطکاک، چسبندگی، مدول ارتجاعی و ضریب پواسون)، مشخصات هندسی تونل (قطر، عمق مدفون و فاصله تونل‌ها) و مشخصات بار هارمونیک (فرکانس، دامنه بار) بر نشست سطحی زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل در حالت استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه نشان داد در خاک‌های که مستعد روانگرایی هستند، پارامترهای مذکور تاثیر به سزایی بر نشست سطحی زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل خواهند داشت. نتایج بدست آمده با استفاده از نمودارها و جداول به تفصیل بیان می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل دینامیکی، روانگرایی، نشست سطحی زمین، نیروهای داخلی، *FLAC-2D*

۱- مقدمه

یکی از عوامل گسیختگی در حین زلزله که باعث خسارات فراوانی به طبیعت و زیر ساخت‌های شهری می‌گردد روانگرایی خاک می‌باشد. در بعضی از نقاط جهان خرابی‌های وسیعی بر اثر روانگرایی خاک‌ها در سازه‌های زیرزمینی مشاهده شده است. مشاهده خسارات مشابه در زلزله‌های نیگاتای ژاپن (۱۹۶۰)،

اثر حفاری تونل تک و دوقلو مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد با افزایش قطر، ضخامت پوشش تونل و همچنین با افزایش فاصله بین دو تونل، نشست کاهش می یابد.

(Azadi, M., & Hosseini, S. M. M 2010) با استفاده از آنالیز عددی رفتار لرزه ای تونل در عمق کم در خاک های روانگرا را بررسی کردند و مشاهده نمودند نیروی محوری، نیروی برشی، لنگرخمشی و فشار آب حفره ای با کاهش فرکانس، افزایش می یابد. همچنین افزایش دامنه بار باعث افزایش شتاب افقی در سطح زمین و بالا آمدگی سازه در خاک روانگرا میشود. در این بررسی مشخص گردید ضخامت تونل روی فشار آب حفره ای تأثیر ندارد و میزان بالا آمدگی را کاهش می دهد. در یک (Rezania, M., Faramarzi, A., & Javadi, A. 2011) با استفاده از مدل EPR و شبکه عصبی، پیش بینی وقوع روانگرایی بر اساس داده ها را مورد ارزیابی قرار دادند. بر این اساس، روانگرایی ماسه اشباع وقتی اتفاق می افتد که فشار منفذی با فشار محصور برابر باشد.

(Madabhushi, S. S. C., & Madabhushi, S. P. G. 2015) با استفاده از تست سانتریفوژ پدیده بالا آمدگی تونل در خاک روانگرا تحت بار سیکلی را متأثر از عمق استقرار و مشخصات هندسی سازه دانستند. (Unutmaz, B. 2014) با یک تحلیل سه بعدی به بررسی اثرات روانگرایی خاک اطراف تونل پرداخت و مشخص گردید تونل های عمیق تر، در مقایسه با تونل های سطحی در برابر روانگرایی کمتر آسیب پذیر هستند و پارامترهای ضخامت پوشش تونل و قطر تونل در خاک های مستعد روانگرا بر نیروهای داخلی تونل تأثیر ندارند. در همین راستا (Fattah, M. Y., Al-Neami, M. 2014) در یک مطالعه پارامتریک از جمله اثر دامنه و فرکانس بار هارمونیک با روش المان محدود و مدول الاستیک خطی بر پتانسیل

(1983) Luzon - Chubu, Nihonkai (1990) ، (1995) Kobe (1999) ، Chi-Chi و منجیل (1990) محققین را به مطالعه در این مورد واداشته است. از جمله این تحقیقات می توان به تحقیق (Jennings, P. C. (Ed.). 1980) اشاره نمود که در آن تحقیق برای جدا کردن خاک های مستعد روانگرایی از خاک های بدون قابلیت روانگرایی، از عنوان "آستانه ی روانگرایی" استفاده شده است. دو عامل کلیدی متمرکز شده در این معیار درصد ذرات رس (ذرات کوچکتر از ۵ میکرون) و دامنه ی خمیری خاک است.

در تحقیق دیگر (Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... & Faris, A. 2003) اساس داده های جمع آوری شده از مشاهدات صحرایی در زلزله ۱۹۹۹ کواتلی (Kocaeli) چی چی (Chi - Chi) دستور العمل دیگری برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی پیشنهاد دادند بر اساس این تحقیق، در صورتی که درصد رطوبت خاکی بیش از $0.8(LL)$ باشد، این خاک تحت بارهای سیکلی مستعد روانگرایی است.

(Pakbaz, M. C., & Yareevand, A. 2005) در یک آنالیز عددی پاسخ لرزه ای تونل را وابسته به مشخصات هندسی تونل، روش حفاری، خواص خاک (سفتی، سطح تراز آب و غیره) و خواص بار وارده (دامنه، فرکانس، شتاب اوج و مدت تحریک) دانستند.

تحقیق ارائه شده توسط پاکباز . م.، حیدری زاده، (۲۰۰۸) به بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل شهری اهواز پرداخته است. در این تحقیق با استفاده از روش عددی اجزاء محدود و نرم افزار پلکسیس و در نظر گرفتن رفتار غیر خطی موهر- کولمب خاک، به بررسی وضعیت نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل شهری اهواز پرداخته و سپس تأثیر پارامترهای مختلف از جمله قطر، عمق و ضخامت پوشش تونل در نشست سطح زمین در

روانگرایی و فشار منفذی شن و ماسه اشباع شل، متوسط و مترکم مورد بررسی قرار دادند و مشخص گردید در مناطق مستعد روانگرایی با افزایش دامنه و فرکانس بار، فشار آب حفره ای (در شن و ماسه اشباع) و تغییر شکل (تجمعی) افزایش می یابد و شروع روانگرایی در نزدیکی انتهای بار وارده بوده و سپس گسترش می یابد و با افزایش عمق استقرار، مقدار سربار بیشتر شده و مقاومت روانگرایی افزایش می یابد.

(Madabhushi, S. S. C., & Madabhushi, S. P. G. 2015) با استفاده از تست سانتریفوژ و تحلیل المان محدود، پاسخ لرزه‌ای تونل با مقطع مستطیل تحت بار سینوسی و بار واقعی زلزله کوبه (۱۹۹۵) را بررسی کردند. مقدار بالآمدگی تونل، فشار آب حفره ای و تاثیر نفوذپذیری مقایسه گردید. در این مطالعه مشاهده شد بالآمدگی تونل تحت بار سینوسی بیشتر و مقدار آن با افزایش نفوذپذیری به دلیل استهلاک سریع فشار آب حفره ای کاهش می یابد. همچنین مشاهده گردید در هنگام اعمال بار سینوسی، با شروع روانگرایی در خاک بالای تونل، فشار آب حفره‌ای زیر تونل تولید می‌شود. این پدیده در هنگام اعمال بار واقعی مشاهده نشد. همچنین کرنش محوری با کاهش نفوذپذیری، کاهش خواهد یافت و در هر دو حالت شتاب تونل و شتاب سطح زمین به طور قابل توجهی با شروع روانگرایی کاهش می‌یابد. در تحقیق دیگر (Xiongyao, X., Yubing, Y., Mei, J. 2016) با استفاده از آزمون لرزه ای تاثیر روانگرایی بر یک تونل مترو را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق تغییر شکل، کرنش و جابجایی حاصل از روانگرایی تحت بار سیکلی را بررسی کردند و ماکزیمم کرنش در بالای مدل مشاهده گردید. همچنین مقدار تغییرات فوق با توجه به میزان روانگرایی تغییر کردند. (Zhuang, H., Chen, G., Hu, Z., & Qi, C. 2016) در یک تحقیق تاثیر فاصله تونل های دوقلو با مشخصات هندسی مختلف را

بر نشست سطحی زمین مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه دیگر (Fang, Q., Tai, Q., Zhang, D., & Wong, L. N. Y. 2016) به ارزیابی نشست سطحی در اثر ساخت تونل ها با قطر بزرگ پرداختند. در این تحقیقات کمتر اثر روانگرایی بر نیروهای داخلی پوشش تونل با تغییر پارامترهای از قبیل مدول ارتجاعی، زاویه اصطکاک و چسبندگی مورد مطالعه انجام گرفته است لذا در این مقاله با توجه به اهمیت موضوع با نرم افزار-Flac 2D به بررسی اثر تغییر پارامترهای خاک، بار وارده و مشخصات هندسی تونل بر نشست و نیروهای وارد بر تونل در خاک روانگرا تحت بار هارمونیک پرداخته شده است.

۲- نحوه مدل سازی و معرفی مدل مینا

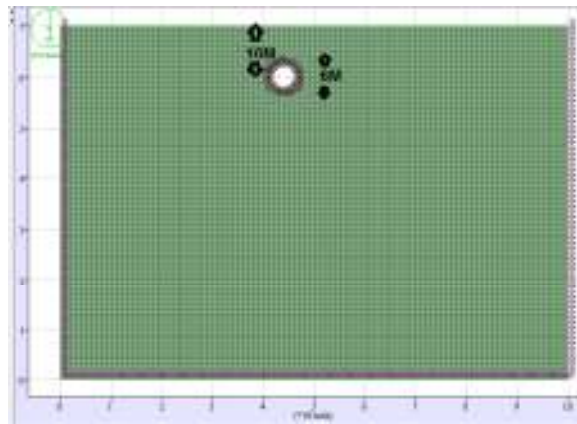
هدف از این مطالعه بررسی اثر روانگرایی خاک بر نیروهای داخلی تونل و نشست سطحی زمین در حالت تک و دوقلو می‌باشد. برای مدل سازی ابتدا تونل در محیط مدل شده و تعادل استاتیکی برقرار می‌شود. در مرحله‌ی بعد محیط تحت یک بار سیکلی در شرایط دینامیکی قرار میگیرد تا اثر روانگرایی خاک بر مقادیر نیروها و تغییر شکل‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور یک نوع خاک از نوع ماسه سست اشباع مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از روانگرایی خاک تغییرات فشار آب حفره‌ای و تنش موثر در تعدادی از نقاط کنترل می‌شود. برای مدل سازی روانگرایی و افزایش فشار آب حفره‌ای براساس مطالعات (Azadi, M., & Hosseini, S. M. M 2010) از مدل فین که مدل مناسبی برای ارزیابی روانگرایی است، استفاده می‌شود. بعد از تعادل استاتیکی محیط، تونل با مشخصات جدول ۲ مطابق اشکال ۱ تا ۲ مدل می‌گردد. میرایی از نوع محلی (Local Damping)

و به مقدار (۵ درصد) در نظر گرفته شده است. قطر حفاری ۶ متر و ضخامت پوشش تونل ۳۰ سانتی متر است. برای بررسی تغییرات نیروهای داخلی تونل از المان تیر (Beam) که دو گره‌ی هستند استفاده شده است. هر گره دارای سه درجه آزادی می‌باشد. با توجه به اینکه مدل در محیط خاکی مدل گردیده است، از المانهای واسطه بین

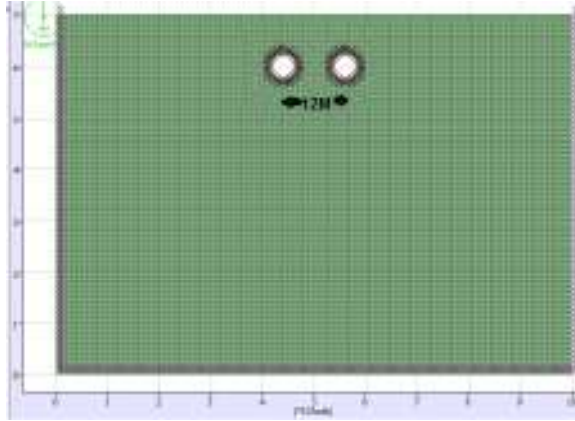
خاک و پوشش تونل استفاده شده است (شکل ۳). المانهای واسطه در مدل مبنا دارای سختی برشی و قائم 48 (MPa) می‌باشند. در شرایط دینامیکی به علت بازگشت موج در زمان برخورد به مرزها، شرایط مرزی خاصی برای جذب اثرات موج مورد نیاز می‌باشد. برای این منظور از شرایط مرزی آزاد (FF) استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح مدل مرجع

مقدار	واحد	پارامتر
۰	kPa	چسبندگی
۲۵	درجه	زاویه اصطکاک
۴۰	m/sec	نفوذپذیری
۱۳/۸	MPa	مدول بالک
۳۰	MPa	مدول برشی
۰/۷۶	--	مدل $\text{finn } (c_1)$
۰/۵۲	--	مدل $\text{finn } (c_2)$
۰/۲	--	مدل $\text{finn } (c_3)$
۰/۵	--	مدل $\text{finn } (c_4)$



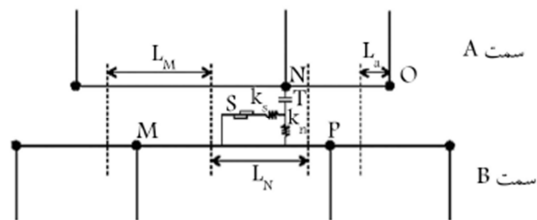
شکل ۱. نمایش تونل تک در مدل مبنا



شکل ۲. نمایش تونل دوبل در مدل مبنا

جدول ۲. مشخصات تونل مدل مرجع

مقدار	واحد	پارامتر
۲۴	(kN/m^3)	وزن مخصوص
$۲/۲۳۶ \times ۱۰^۷$	(kN/m^2)	مدول ارتجاعی
۰/۳۰	(m)	ضخامت پوشش تونل
۵/۴	(m)	قطر داخلی تونل (m)
۶	(m)	قطر حفاری



شکل ۳. نمایش المانهای واسطه

T = مقاومت کششی

K_n = سختی عمودی

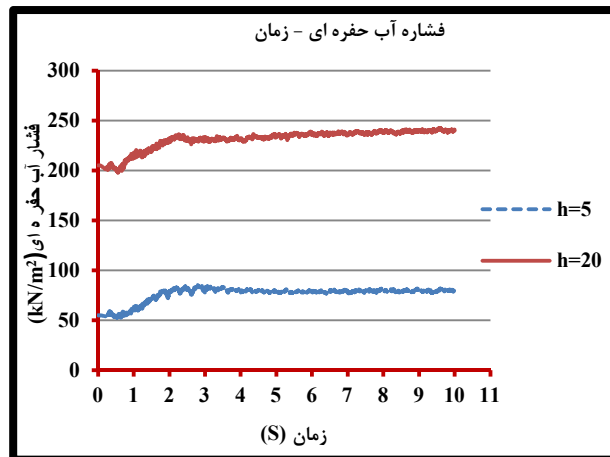
K_d = سختی برشی

بعد از تعادل استاتیکی بار سیکلی به صورت شتاب نگاشت با ۱۰ سیکل رفت و برگشت به صورت رابطه‌ی ۱ اعمال می‌شود.

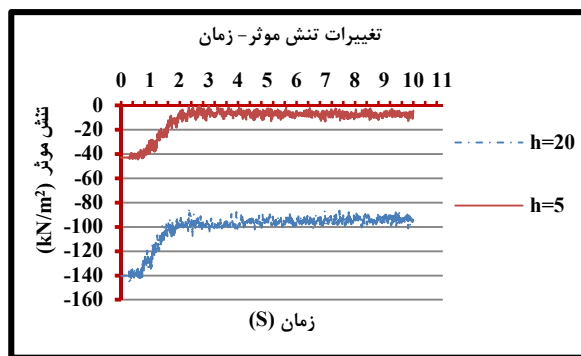
$$\ddot{u}_g = A_g \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

در این رابطه A_g دامنه شتاب، f فرکانس بار وارده و t زمان اعمال بار دینامیکی است. مطابق مطالعات آزادی (۲۰۱۰)، دامنه بارگذاری ۰/۳ گرم و فرکانس سه هرتز در نظر گرفته شده است. مدت زمان اعمال بار دینامیکی نیز ۱۰ ثانیه می‌باشد. این زمان به نحوی در نظر گرفته شده است که روند تحلیل‌ها به یک حالت پایدار برسد و اثرات

بارگذاری دینامیکی بصورت کامل ملاحظه گردد. براساس مطالعات انجام شده، پس از اعمال بار سیکلی فشار آب حفره ای افزایش و تنش موثر کاهش یافته است. در اشکال ۴ و ۵ تغییرات فشار آب حفره‌ای و تنش موثر در اعماق مختلف از سطح زمین مشاهده می‌شود با افزایش زمان بارگذاری فشار آب حفره‌ای افزایش و تنش موثر کاهش یافته است. در عمق ۵ متری و ۲۰ متری از سطح زمین فشار آب حفره‌ای به ترتیب از ۰/۵kPa با ۸۰٪ افزایش به ۰/۹kPa و ۲/۰kPa با ۲۰٪ افزایش به ۲/۴kPa رسیده است که این امر حاکی از روانگرایی خاک در حالت زهکشی نشده می‌باشد.



شکل ۴. نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای در اعماق مختلف از سطح زمین تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۵. نمودار تغییرات تنش موثر افقی در اعماق مختلف از سطح زمین تحت بارگذاری سیکلی

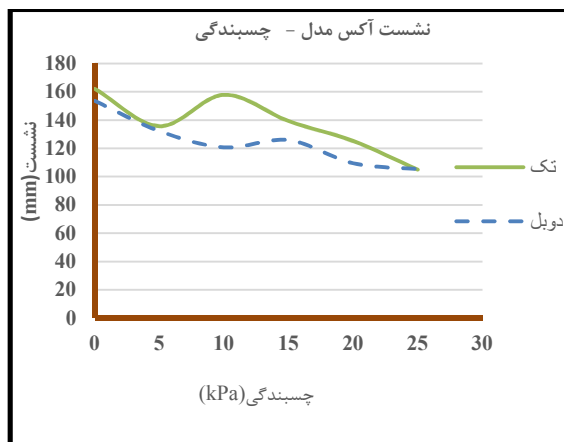
۳- بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر نشست

سطحی و نیروهای داخلی پوشش تونل

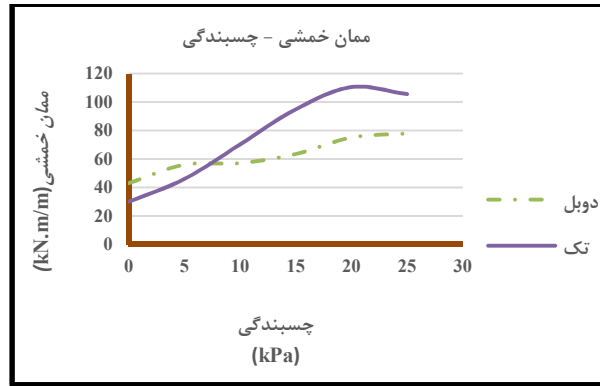
از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر نشست سطحی و نیروهای داخلی پوشش تونل می‌توان به پارامترهای زاویه اصطکاک، چسبندگی، مدل الاستیسیته و پارامترهای هندسی تونل مانند قطر و عمق استقرار و پارامترهای بار لرزه‌ای مانند فرکانس و دامنه اشاره نمود. در ادامه، تحلیل‌های انجام شده و نتایج حاصل شده تشریح می‌گردد.

۳-۱- بررسی تغییرات چسبندگی خاک

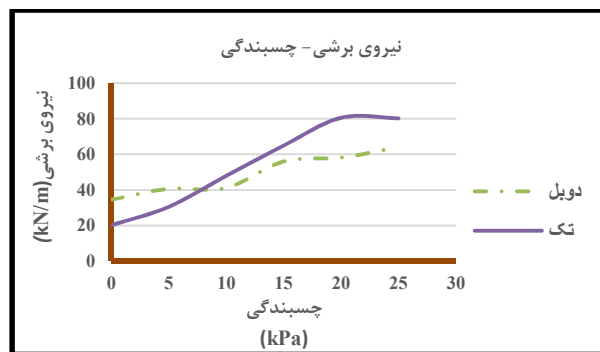
مقدار چسبندگی از صفر تا ۲۵ کیلوپاسکال تغییر یافته و در هر بار تغییر، میزان نشست سطحی زمین و نیروهای داخلی وارد بر پوشش تونل محاسبه شده است. بوسیله اشکال ۶ تا ۹ نمودار این تغییرات برای تونل تک و دو قلو نمایش داده شده است.



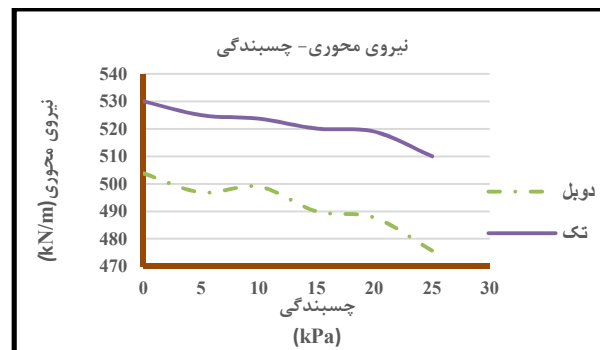
شکل ۶. نمودار تغییرات نشست سطحی - چسبندگی تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۷ نمودار تغییرات ممان خمشی - چسبندگی تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۸ نمودار تغییرات نیروی برشی - چسبندگی تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۹ نمودار تغییرات نیروی محوری - چسبندگی تحت بارگذاری سیکلی

افزایش داشته است. نیروی محوری برای حالت تک ۲٪ و برای حالت دوقلو ۴٪ کاهش داشته است. همچنین نشست سطحی نیز به ترتیب به میزان ۳۵٪ و ۳۱٪ نسبت به مدل مبنا کاهش داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد افزایش

بر اساس این نتایج ممان خمشی در حالت تک ۲۶۶٪ و برای حالت دوقلو ۸۱٪ افزایش یافته است و در ادامه تحلیل روند ثابتی پیدا کرده است. همچنین نیروی برشی در دو حالت تک و دوقلو به ترتیب ۳۰۰٪ و ۱۰۰٪

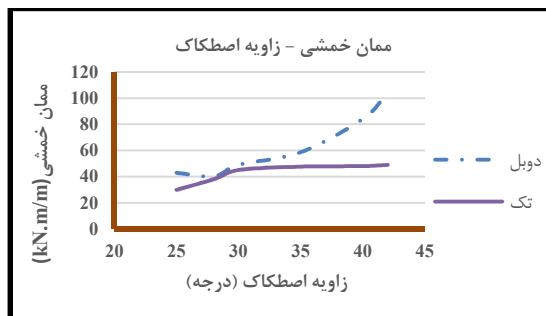
چسبندگی، باعث افزایش خاصیت سیمانتاسیون خاک و افزایش مقاومت برشی، پایداری خاک و کاهش پتانسیل روانگرایی گردیده است.

این روند برای زاویه اصطکاک تقریباً "بیشتر از ۴۰ درجه کاهش می‌یابد. همچنین نیروی محوری به ترتیب ۹٪ و ۸٪ کاهش یافته است.

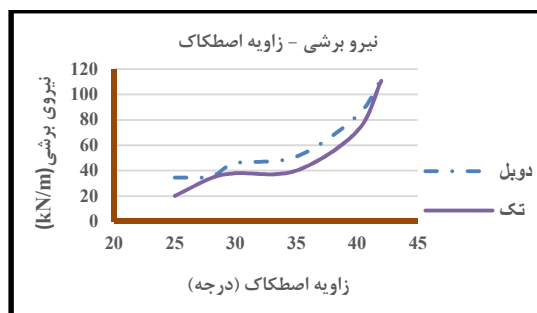
علت تغییرات فوق این است که با افزایش زاویه اصطکاک ضریبی جانبی کاهش یافته است و چون تنش افقی ضریبی از تنش قائم است با کاهش این ضریب تنش افقی خاک کاهش یافته است. با کاهش تنش افقی و ثابت بودن تنش قائم، نشست و نیروهای داخلی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج، افزایش زاویه اصطکاک بیشترین تاثیر را روی نیروی برشی و کمترین تاثیر را روی نیروی محوری داشته است.

۳-۲- بررسی اثر تغییرات زاویه اصطکاک

با افزایش زاویه اصطکاک از ۲۵ تا ۴۲ درجه، نتایج تحلیل برای تغییرات نشست سطحی و نیروهای داخلی بوسیله اشکال ۱۰ تا ۱۳ نمایش داده شده است. با افزایش زاویه اصطکاک به میزان ۶۸٪، ممان خمشی، در حالت تک و دوقلو به ترتیب ۳۹٪ و ۱۴۱٪، نیروی برشی به ترتیب ۴۵٪ و ۲۲۴٪ و نشست سطحی به ترتیب ۲۵٪ و ۲۴٪ افزایش یافته اند. در نمودار نشست مشاهده می‌شود



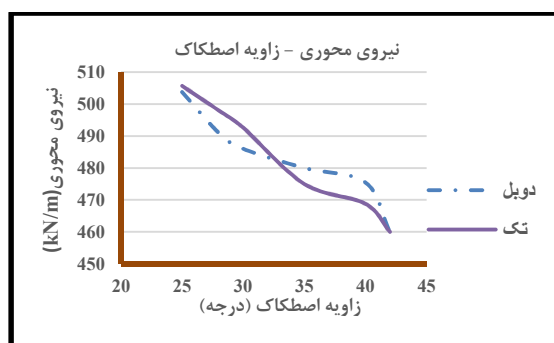
شکل ۱۰. نمودار تغییرات ممان خمشی با زاویه اصطکاک تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۱۱. نمودار تغییرات نیروی برشی با زاویه اصطکاک تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۱۲. نمودار تغییرات نشست سطحی با زاویه اصطکاک تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۱۳. نمودار تغییرات نیروی محوری با زاویه اصطکاک تحت بارگذاری سیکلی

در جدول ۳ و اشکال ۱۴ تا ۱۶ مشاهده می شود. با افزایش مدل ارتجاعی انعطاف پذیری خاک کمتر شده است و براساس این نتایج ممان خمشی برای حالت تک و دوقلو به ترتیب، ۱۰۶٪ و ۲۵٪ نیروی برشی به ترتیب ۱۷۵٪ و ۵۵٪ افزایش و نشست سطحی ۷٪ و ۱۶٪ کاهش نسبت به مدل مینا داشته‌اند. با توجه به نتایج جدول ۳ تغییرات نیروی محوری با افزایش مدل ارتجاعی ناچیز بوده و روند مشخصی ندارد.

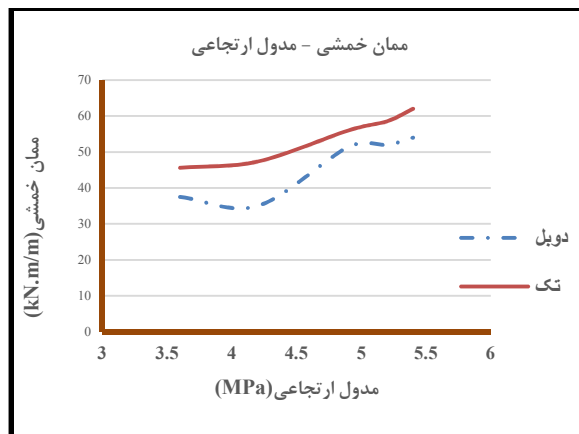
۳-۳- بررسی اثر تغییرات مدول ارتجاعی

از پارامترهایی که انعطاف‌پذیری خاک را نشان می‌دهند، می‌توان به مدول ارتجاعی و ضریب پواسون خاک اشاره نمود. در نرم‌افزار FLAC رابطه این ضرایب با مدول برشی و مدول بالک خاک بصورت زیر تعریف می‌شوند:

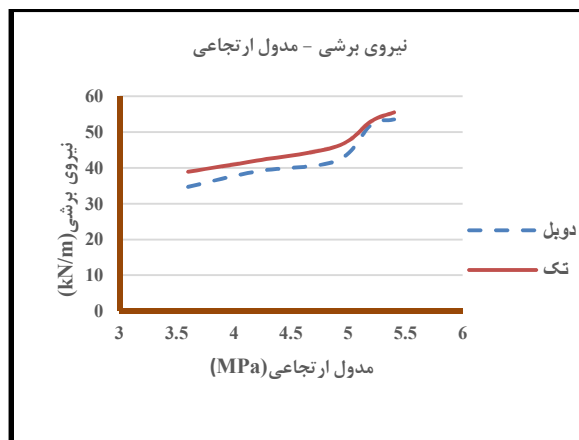
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۲)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۳)$$

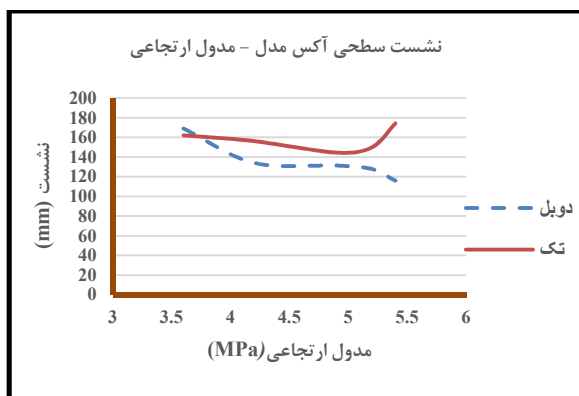
با افزایش مدول الاستیسیته از ۳/۶ تا ۵/۴ مگاپاسکال یعنی ۵۰٪ افزایش، تغییرات نیروی‌های داخلی و نشست سطحی



شکل ۱۴. نمودار تغییرات ممان خمشی با مدول ارتجاعی تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۱۵. نمودار تغییرات نیروی برشی با مدول ارتجاعی تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۱۶. نمودار تغییرات نشست سطحی با مدول ارتجاعی تحت بارگذاری سیکلی

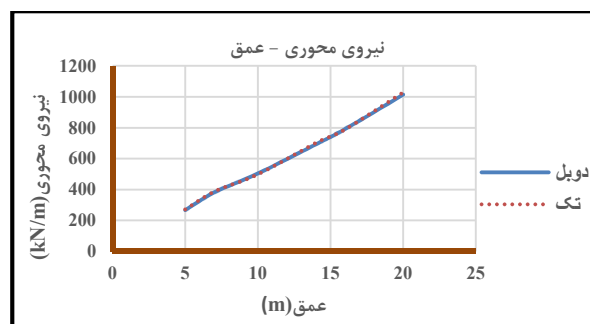
۴-۳- بررسی اثر تغییرات عمق استقرار

عمق استقرار تونل از ۵ تا ۲۰ متر تغییر یافته است. اشکال ۱۷ تا ۱۸ اثر تغییرات عمق استقرار بر میزان نشست سطحی و نیروهای داخلی را نمایش می‌دهند. مشاهده می‌شود نیروهای داخلی و نشست سطحی برای تونل تک و دوقلو به ترتیب ممان خمشی ۳۸٪ و ۵۸٪، نیروی برشی ۱۸۳٪ و ۲۱۱٪، نیروی محوری ۶۰٪ و ۵۸٪ افزایش و نشست سطحی به ترتیب ۵٪ و ۹٪ کاهش یافته اند. علت این تغییرات آن است که با افزایش عمق استقرار، مقدار سربار روی تاج تونل افزایش یافته که

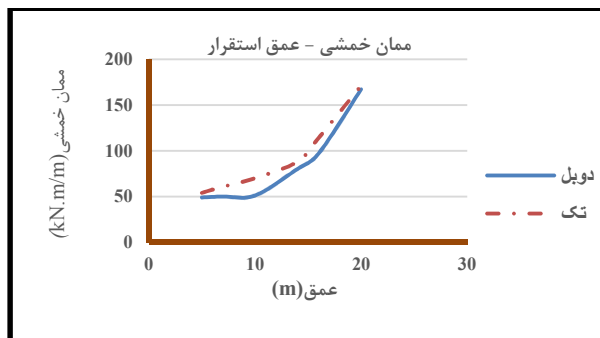
باعث افزایش نیروهای داخلی شده است همچنین با فاصله گرفتن از سطح زمین، مقدار نشست نیز کاهش می‌یابد. با توجه به جداول ۴ و ۵ روند تغییرات نشست سطحی با افزایش عمق استقرار از ۵ تا ۱۴ متر افزایش و برای عمق‌های بیشتر از ۱۴ متر کاهش می‌یابد. همچنین این روند برای نیروی برشی نیز حاکم است. لذا می‌توان نتیجه گرفت عمق ۱۴ متر عمق بحرانی این تحلیل می‌باشد.

جدول ۳. تغییرات نیروی محوری با مدول ارتجاعی تحت بار گذاری سیکلی

نسبت نیروی محوری به مدل مینا		نیروی محوری (kN/m)		مدول ارتجاعی (kPa)
دوقلو (%)	تک (%)	دوقلو	تک	
--	--	۵۰۴	۴۹۸	۳/۶
-۳/۱	-۱/۴	۴۸۸	۴۹۱	۴/۲
-۲/۳	۴/۲	۴۹۲	۵۱۹	۴/۹
۰/۴	۱/۸	۵۰۲	۵۰۷	۵/۲
-۲/۷	۱	۴۹۰	۵۰۳	۵/۴



شکل ۱۷. نمودار تغییرات نیروی محوری با عمق استقرار تونل تحت بار گذاری سیکلی



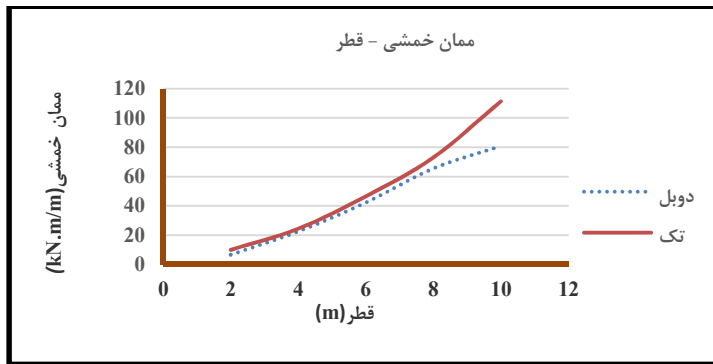
شکل ۱۸. نمودار تغییرات ممان خمشی با عمق استقرار تونل تحت بارگذاری سیکلی

جدول ۴. تغییرات نشست سطحی با عمق استقرار تونل تحت بارگذاری سیکلی

نسبت نیروی محوری به مدل مبنا		نیروی برشی (kN/m)		عمق (m)
دوقلو (%)	تک (%)	دوقلو	تک	
۱۹	-۳۲	۱۴۶/۸۲	۱۱۲	۵
۱۶	۵	۱۴۳	۱۷۳/۴	۷
--	--	۱۲۳	۱۶۴/۸	۱۰
۳۴	۱۴	۱۶۴/۸۴	۱۸۸/۷۴	۱۴
۱۹	۹	۱۴۷	۱۷۹/۶۲	۱۶
۹	۵	۱۳۴	۱۷۳	۲۰

جدول ۵. تغییرات نیروی برشی با عمق استقرار تونل تحت بارگذاری سیکلی

نسبت نیروی برشی به مدل مبنا		نیروی برشی (kN/m)		عمق (m)
دوقلو (%)	تک (%)	دوقلو	تک	
۹۳	۴۸	۷۴	۵۱	۵
۴۵	۷۱	۵۵/۶	۵۹	۷
--	--	۳۸/۳	۳۴/۴	۱۰
۱۵۸	۱۱۲	۹۸/۹	۷۳/۱۱	۱۴
۱۰۱	۱۴۴	۷۷/۳	۸۴	۱۶
۲۲۳	۲۶۰	۱۲۴	۱۲۴	۲۰

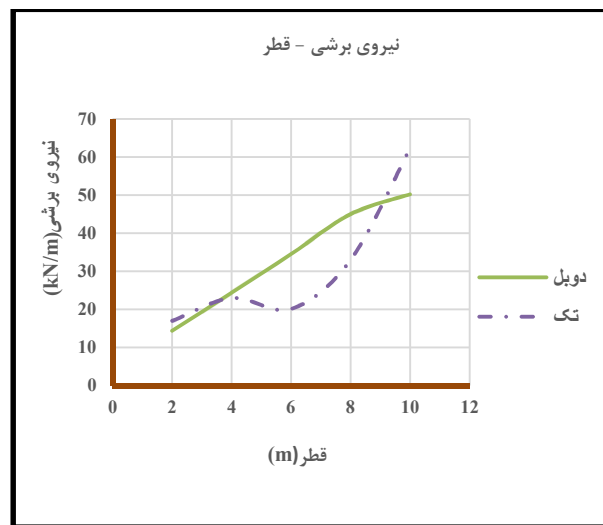


شکل ۱۹. نمودار تغییرات ممان خمشی با قطرهای مختلف حفاری تونل تحت بارگذاری سیکلی

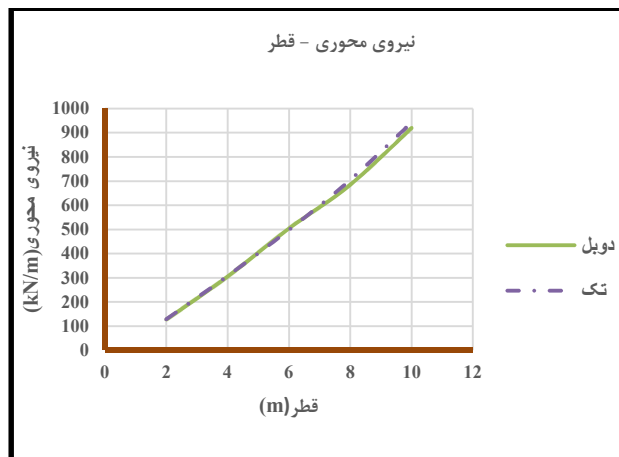
دوبل به ترتیب ۹۸۰٪ و ۷۰۰٪ ممان خمشی، ۲۶۴٪ و ۲۵۷٪ نیروی برشی، ۹۹٪ و ۸۳٪ نیروی محوری افزایش و نشست سطحی ۴۰٪ و ۴۲٪ کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر حفاری اثر توزیع تنش بر محیط اطراف تونل افزایش پیدا کرده است.

۳-۵- بررسی اثر تغییرات قطر حفاری

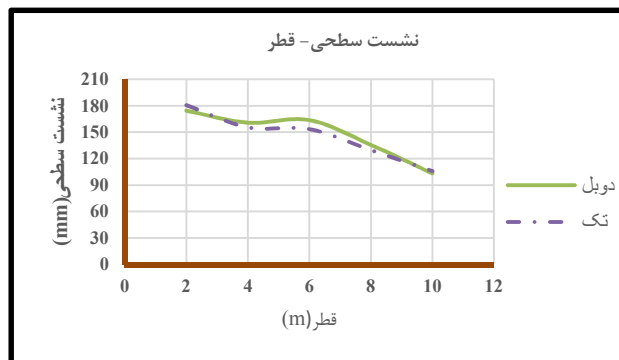
در اشکال ۱۹ تا ۲۲ تغییرات نشست سطحی و نیروهای داخلی برای قطرهای مختلف حفاری از ۲ تا ۱۰ متر نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقدار نیروهای داخلی و نشست سطحی برای حالت تک و



شکل ۲۰. نمودار تغییرات نیروی برشی با قطرهای مختلف حفاری تونل تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۲۱. نمودار تغییرات نیروی محوری با قطرهای مختلف حفاری تونل تحت بارگذاری سیکلی

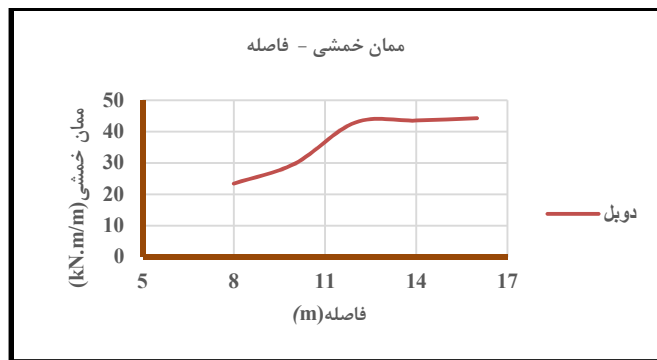


شکل ۲۲. نمودار تغییرات نشست سطحی با قطرهای مختلف حفاری تونل تحت بارگذاری سیکلی

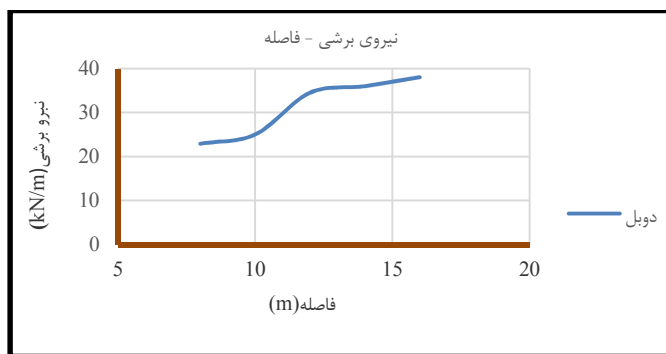
۳-۶- بررسی اثر تغییرات فاصله تونل‌ها از یکدیگر

۷۰٪ افزایش یافته‌اند. همانطور که از اشکال پیدا است روند نیروی‌های داخلی تا فاصله ۱۲ متر افزایش چشمگیری داشته و بعد از آن تغییر چندانی نداشته است. این روند بیانگر آن است که در فاصله‌های بیشتر تونل‌ها، روند تغییرات ثابت شده است.

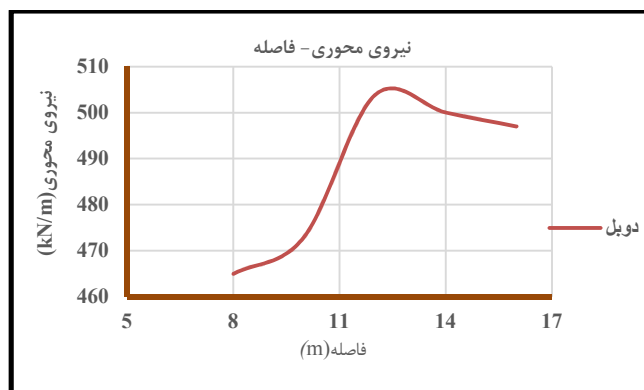
فاصله مراکز تونل از ۸ تا ۱۶ متر افزایش یافته است. در اثر تغییرات فاصله، نیروهای داخلی و نشست سطحی زمین تغییر یافته‌اند. این تغییرات محاسبه و در اشکال ۲۳ تا ۲۶ ارائه شده‌اند. بر این اساس ممان خمشی ۹۱٪، نیروی برشی ۴۶٪، نیروی محوری ۳٪ و نشست سطحی



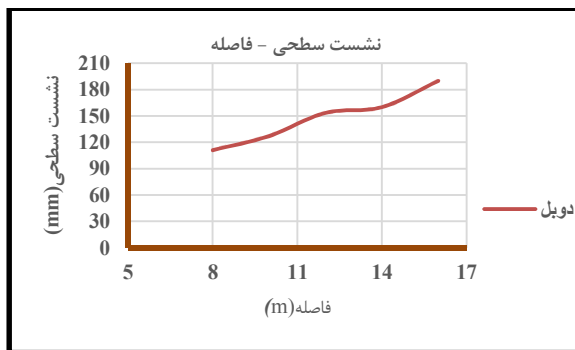
شکل ۲۳. نمودار تغییرات ممان خمشی با فاصله تونل‌ها تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۲۴. نمودار تغییرات نیروی برشی با فاصله تونل‌ها تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۲۵. نمودار تغییرات نیروی محوری با فاصله تونل‌ها تحت بارگذاری سیکلی

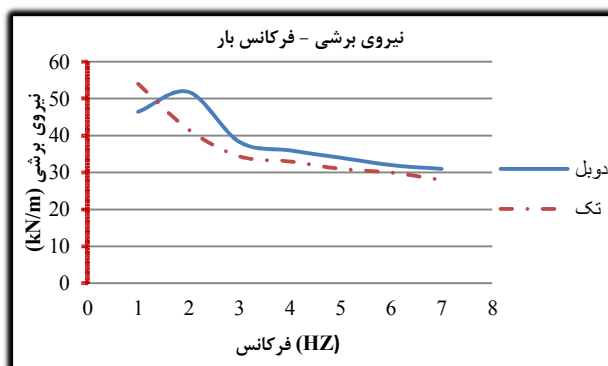


شکل ۲۶. نمودار تغییرات نشست سطحی با فاصله تونل‌ها تحت بارگذاری سیکلی

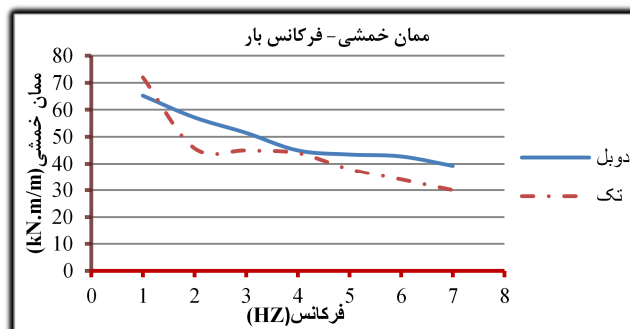
می شود. براساس نتایج بدست آمده، مقدار نیروی برشی برای حالت تک و دوقلو به ترتیب ۴۴٪ و ۴۰٪ و ممان خمشی، به ترتیب ۲۷٪ و ۳۲٪ کاهش یافته است. علت این تغییرات کاهش فشار آب حفره ای با افزایش فرکانس می باشد. با افزایش فرکانس بار، زمان بیشتری برای وارد شدن سیکل بعدی فراهم خواهد شد که در این فرصت بار وارده به آب موجود در خاک کاهش می یابد.

۳-۷- بررسی اثر تغییرات فرکانس بار

یکی از پارامترهایی که در تغییرات نیروها و تغییرشکل‌های محیط اثرات زیادی دارد، فرکانس بار سیکلی است. بررسی‌های انجام شده نشان می دهد که با افزایش فرکانس بار، میزان نیروها و تغییرشکل‌های وارد بر پوشش تونل کاهش می یابد. این تغییرات در جدول ۶ و ۷ و اشکال ۲۷ تا ۲۸ برای فرکانس ۱ تا ۷ هرگز مشاهده



شکل ۲۷. نمودار تغییرات نیروی برشی با فرکانس بارگذاری سیکلی



شکل ۲۸. نمودار تغییرات ممان خمشی با فرکانس بارگذاری سیکلی

است. همچنین نشست سطحی برای حالت تک و دوقلو به ترتیب با افزایش فرکانس بار ۰.۴٪ و ۱.۴٪ نسبت به مدل مینا کاهش داشته است.

همچنین با توجه به جداول ۶ و ۷ نیروی محوری و نشست سطحی روند مشخصی ندارند و در حالت کلی با افزایش فرکانس بار در حالت تک نیروی محوری ۲/۳٪ و در حالت دوقلو ۹٪ نسبت به مدل مینا کاهش داشته

جدول ۶. تغییرات نیروی محوری با فرکانس بارگذاری سیکلی

نسبت نیروی محوری به مدل مینا		نیروی محوری (kN/m)		
تک (%)	دوقلو (%)	تک	دوقلو	
۹	۷	۵۴۵	۵۴۶	۱
۳	-۳	۵۱۱	۴۹۶	۲
--	--	۴۹۸	۵۱۲	۳
۷	-۴	۵۳۴	۴۹۲	۴
۸	۲	۵۴۰	۵۲۳	۵
۶	-۱	۵۲۶	۵۰۶	۶
۷	-۳	۵۳۲	۴۹۵	۷

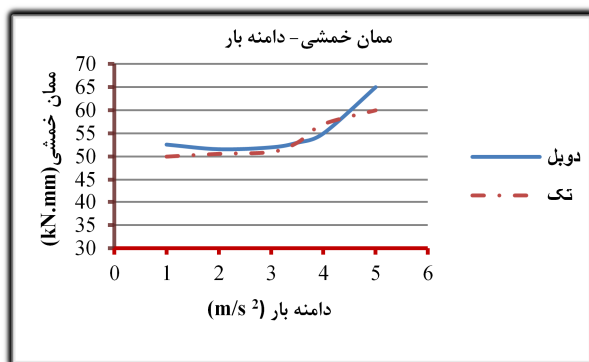
جدول ۷. تغییرات نشست سطحی با فرکانس بارگذاری سیکلی

نسبت نشست سطحی به مدل مینا		نشست سطحی (mm)		فرکانس بار (HZ)
دوقلو (%)	تک (%)	دوقلو	تک	
-۲۲	-۲۳	۱۳۱	۱۲۴	۱
-۳۱	۲/۴	۱۱۶	۱۶۶	۲
--	--	۱۶۹	۱۶۲	۳
-۲۸	-۲/۴	۱۲۲	۱۵۸	۴
-۴۵	-۳۶	۹۲	۹۸	۵
-۴۸	-۴۲	۸۸	۹۳	۶
-۳۴	-۲۷	۱۱۲	۱۱۸	۷

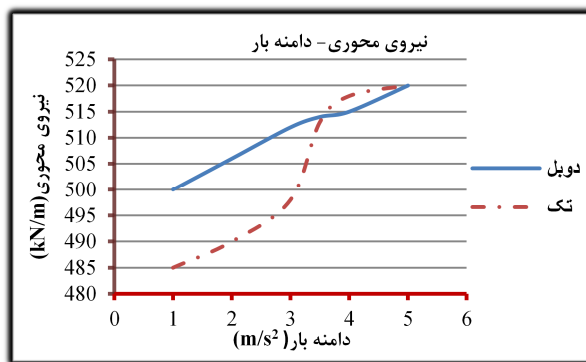
۸-۳- بررسی اثر تغییرات دامنه بار

است. همچنین نشست سطحی برای تونل تک و دوقلو از ۰/۱ گرم تا ۰/۳ گرم افزایشی به میزان ۷۶٪ افزایش داشته است. همانطور که در این نمودار مشخص است با افزایش دامنه بار از ۳/ گرم تا ۵/ گرم تغییرات تا ۱۲٪ برای دو حالت تک و دوقلو نسبت به مدل مینا کاهش داشته است. همچنین تغییرات نیروی برشی نسبت به مدل مینا روند مشخصی نداشت. علت این تغییرات این است که با افزایش دامنه بار فشار آب حفره‌ای افزایش یافته است.

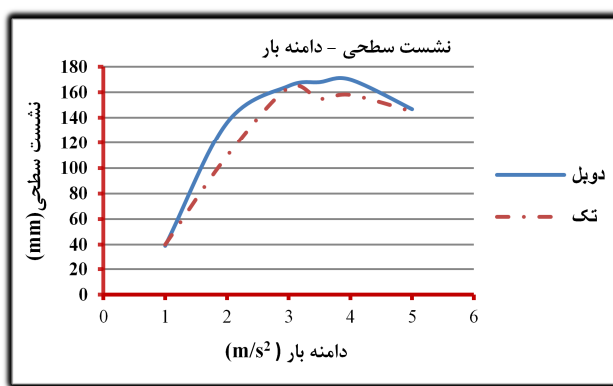
یکی از پارامترهایی که در تغییرات نیروها و تغییرشکل‌های محیط اثرات زیادی دارد، دامنه بارسیکلی است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش دامنه بار، میزان نیروها و تغییرشکل‌های وارد بر پوشش تونل افزایش می‌یابد. این تغییرات در اشکال ۲۹ تا ۳۱ برای دامنه بار ۰/۱ گرم تا ۰/۵ گرم مشاهده می‌شود. تغییرات ممان خمشی برای تونل تک و دوقلو نسبت به مدل مینا به ترتیب ۲۰٪ و ۳۰٪ افزایش یافته است. این تغییرات برای نیروی محوری به ترتیب ۷٪ و ۴٪ بوده



شکل ۲۹. تغییرات ممان خمشی با دامنه بار گذاری سیکلی



شکل ۳۰. تغییرات نیروی محوری با دامنه بار گذاری سیکلی

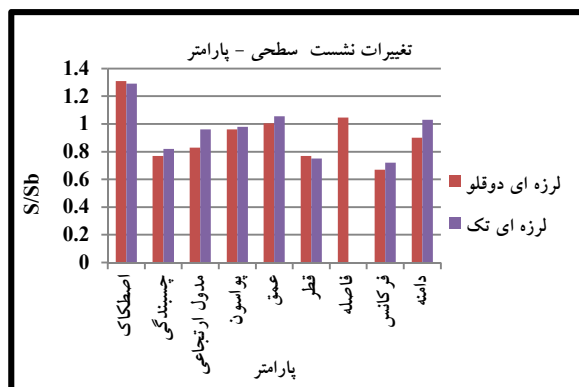


شکل ۳۱. تغییرات نشست سطحی با دامنه بار گذاری (سیکلی)

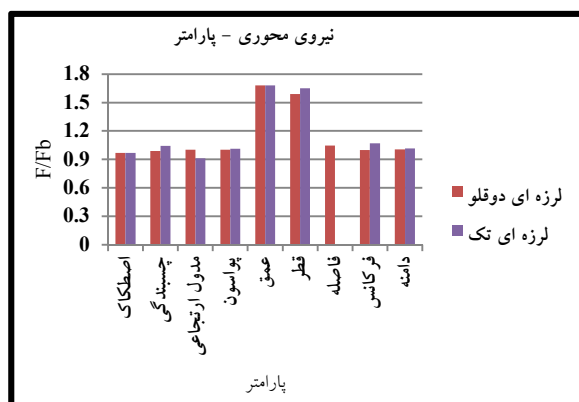
۴- تفسیر نتایج

عمق می باشد. برای تونل تک و تونل دوقلو ۶۸٪ نسبت به مدل مبنا افزایش دارد. همچنین در شکل (۳۴) پارامتر موثر در حداکثر نیروی برشی پارامتر عمق می باشد. بر اساس نتایج، با افزایش عمق برای تونل تک ۴۴۸٪ و تونل دوقلو ۱۵۰٪ نسبت به مدل مبنا افزایش را نشان می دهد. با توجه به شکل (۳۵) از پارامترهای موثر بر حداکثر ممان خمشی، پارامتر عمق می باشد. با افزایش عمق برای تونل تک ۳۳۵٪ و برای تونل ۱۸۲٪ افزایش نسبت به مدل مبنا را نشان می دهد.

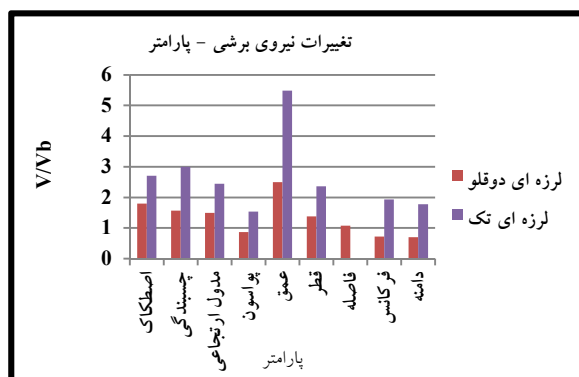
با توجه به بررسی های انجام شده در این تحقیق پارامترهای موثر در حداکثر مقدار نیروی های داخلی و نشست سطحی نسبت به نتایج مدول مبنا که در جدول (۸) آمده است و به کمک اشکال (۳۲) تا (۳۵) نیز مقایسه گردیده اند. با توجه نمودار نشست سطحی در شکل (۳۲)، پارامتر زاویه اصطکاک پارامتر موثر در حداکثر نشست سطحی می باشد که برای حالت تک ۲۹٪ و حالت دوقلو ۳۱٪ نسبت به مدل مبنا افزایش داشته است. در شکل (۳۳) پارامتر موثر در حداکثر نیروی محوری پارامتر



شکل ۳۲. تغییرات نشست سطحی با پارامترهای مختلف مدل تحت بارگذاری سیکلی



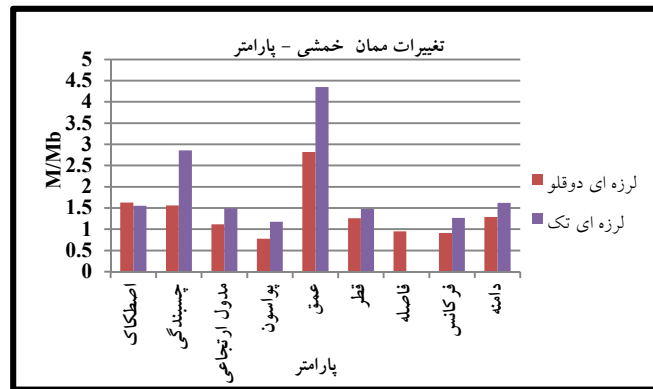
شکل ۳۳. تغییرات نیروی محوری با پارامترهای مختلف مدل تحت بارگذاری سیکلی



شکل ۳۴. تغییرات نیروی برشی با پارامترهای مختلف مدل تحت بارگذاری سیکلی

وارد بر پوشش تونل گردیده است. همچنین با افزایش زاویه اصطکاک فشار جانبی کاهش و چون فشار جانبی ضریبی از فشار قائم است و فشار قائم خاک افزایش یافته است. مقدار نشست سطحی و نیروها افزایش پیدا کرده است.

با توجه به نتایج بدست آمده پارامترهای مشخصات هندسی تونل (عمق و قطر) و زاویه اصطکاک از مشخصه‌های خاک، عوامل موثر در حداکثر میزان نیروهای داخلی می باشند. با افزایش عمق میزان سر بار تاج تونل افزایش یافته و با افزایش قطر توزیع نیروها بر محیط اطراف تونل افزایش پیدا کرده و موجب افزایش نیروهای



شکل ۳۵. تغییرات ممان خمشی با پارامترهای مختلف مدل تحت بارگذاری سیکلی

جدول ۸. نتایج بدست آمده برای مدل مبنا جهت مقایسه برای اثر تغییرات پارامترها

خروجی				ورودی										نوع تونل		
ممان خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)	نشست (mm)	دامنه	فرکانس (Hz)	فاصله (m)	قطر (mm)	عمق (m)	تختل	تشدیدی (m/s)	وزن مخصوص (kPa)	پواسون	مدول ارتجاعی (MPa)		زاویه اصطکاک (°)	چسبندگی (kPa)
D	D	D	D													
۳۰	۲۰	۴۹۸	۱۶۲	۰/۳g	۳	۱۲	۶	۱۰	۳/۰	۱۰ ^{-۴}	۱۵	۳/۰	۳۶	۲۵	۰	تونل تک
۲۶	۳۴	۵۰۴	۱۵۴	۰/۳g	۳	۱۲	۶	۱۰	۳/۰	۱۰ ^{-۴}	۱۵	۳/۰	۳۶	۲۵	۰	تونل دوقلو

۵- نتیجه گیری

۷- با افزایش فاصله از ۸ تا ۱۶ متر نیروهای داخلی و نشست سطحی زمین تغییر یافته است. بر این اساس ممان خمشی ۹۱٪، نیروی برشی ۴۶٪، نیروی محوری ۳٪ و نشست سطحی ۷۰٪ افزایش یافته‌اند. روند نیروهای داخلی تا فاصله ۱۲ متر افزایش چشمگیری داشته و بعد از آن روند تغییرات تغییر چندانی نداشته است. این روند بیانگر آن است. در فاصله‌های بیشتر روند تغییرات ثابت شده است.

۸- با افزایش فرکانس مقدار نیروهای داخلی و نشست سطحی برای حالت تک و دوقلو به ترتیب ۴۴٪ و ۴۰٪، ممان خمشی، ۲۷٪ و ۳۲٪، نیروی برشی کاهش یافته است. همچنین نشست سطحی ۱۴٪ کاهش یافته است. علت این تغییرات کاهش فشار آب حفره‌ای با افزایش فرکانس می‌باشد. با افزایش فرکانس بار، زمان بیشتری برای وارد شدن سیکل بعدی فراهم خواهد شد که در این فرصت بار وارده به بر آب موجود در خاک کاهش می‌یابد.

۹- با افزایش دامنه بار، فشار آب حفره‌ای افزایش یافته است و باعث افزایش نیروهای داخلی و نشست سطحی گردیده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که با افزایش دامنه بار، میزان نیروها و تغییرشکل‌های وارد بر پوشش تونل افزایش می‌یابد. برای دامنه بار ۰/۱ گرم تا ۰/۵ گرم تغییرات ممان خمشی ۳۰٪ افزایش یافته است. این تغییرات برای نیروی محوری به ترتیب ۷٪ و ۴٪ بوده است. همچنین نشست سطحی ۷۶٪ افزایش داشته است. برای افزایش دامنه بار از ۳/۰ گرم تا ۵/۰ گرم تغییرات تا ۱۲٪ برای دو حالت تک و دوقلو نسبت به مدل مبنا کاهش داشته است. علت این تغییرات این است که با افزایش دامنه بار، شتاب بار وارده بر مدل افزایش یافته و باعث افزایش فشار آب حفره‌ای گردیده است.

در این مطالعه اثر روانگرایی خاک اطراف تونل بر نیروهای داخلی پوشش تونل و نشست سطحی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج ذیل حاصل گردیده است.

۱- در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، با اعمال بار دینامیکی در شرایط زهکشی نشده، فشار آب حفره‌ای حدود ۲۰٪ افزایش یافته و با کاهش تنش موثر بین ذرات، مقاومت برشی از بین رفته و خاک بصورت روان در می‌آید.

۲- با افزایش چسبندگی خاک، پایداری خاک افزایش و پتانسیل روانگرایی کاهش یافته است. براساس این نتایج نیروی محوری با افزایش میزان چسبندگی ۶٪ افزایش داشته است و نشست سطحی نیز به ترتیب به میزان ۳۵٪ و ۳۱٪ کاهش داشته‌اند.

۳- با افزایش زاویه اصطکاک، میزان نیروهای داخلی افزایش یافته است و نشست سطحی نیز حدود ۲۵٪ افزایش پیدا کرده است. علت این امر کاهش نیروی افقی خاک با افزایش زاویه اصطکاک است و در نتیجه تنش افقی کم می‌شود.

۴- با افزایش مدول ارتجاعی سختی خاک افزایش پیدا کرده و باعث افزایش ممان خمشی ۲۵٪، نیروی برشی ۵۵٪، افزایش و نشست سطحی ۱۶٪ کاهش نسبت به مدل مبنا داشته‌اند و بر نیروی محوری تاثیر زیادی نداشته است.

۵- با افزایش عمق استقرار مقدار سربار روی تاج تونل افزایش یافته و به علت فاصله یافتن از سطح زمین، مقدار نشست نیز کاهش یافته است. ممان خمشی ۵۸٪، نیروی برشی ۱۸۳٪ و نیروی محوری ۶۰٪ افزایش و نشست سطحی ۹٪ کاهش یافته است.

۶- با افزایش قطر حفاری، مقدار نیروهای داخلی افزایش و نشست سطحی ۴۰٪ کاهش یافته است. این تغییرات باعث افزایش قطر حفاری، توزیع تنش بر محیط تونل افزایش پیدا کرده است.

۶-مراجع

- Chian, S. C., & Madabhushi, S. P. G. (2012), "Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 41, pp.181-190.
- Unutmaz, B. (2014), "3D liquefaction assessment of soils surrounding circular tunnels. *Tunneling and Underground Space Technology*, 40, 85-94.
- Fattah, M. Y., Al-Neami, M. A., & Jajjawi, N. H. (2014). Prediction of liquefaction potential and pore water pressure beneath machine foundations. *Central European Journal of Engineering*, 4(3), pp.226-249.
- Madabhushi, S. S. C., & Madabhushi, S. P. G. (2015), Finite element analysis of floatation of rectangular tunnels following earthquake induced liquefaction. *Indian Geotechnical Journal*, 45(3), pp.233-242.
- Xiongyao, X., Yubing, Y., Mei J. (2016), "Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in shanghi, China. *Tunneling and UndergroundSpaceTechnology*, 51: pp. 120-132.
- Zhuang, H., Chen, G., Hu, Z., & Qi, C. (2016), Influence of soil liquefaction on the seismic response of a subway station in model tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(3) pp.1169-1182.
- Fang, Q., Tai, Q., Zhang, D., & Wong, L. N. Y. (2016). Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements. *Tunneling and underground space technology*, 51.
- Jennings, P. C. (Ed.). (1980), "Earthquake engineering and hazards reduction in China: a trip report of the American Earthquake Engineering and Hazards Reduction Delegation submitted to the Committee on Scholarly Communication with the People's Republic of China", Vol. 8. National Academies.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... & Faris, A. (2003), "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework". In *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*.
- Pakbaz, M. C., & Yareevand, A. (2005), "2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading". *Tunneling and Underground Space Technology*, 20(5), pp.411-417.
- Azadi, M., & Hosseini, S. M. M. (2010), "Analyses of the effect of seismic behavior of shallow tunnels in liquefiable grounds". *Tunnelling and underground space technology*, 25(5), pp.543-552.
- Rezania, M., Faramarzi, A., & Javadi, A. A. (2011), "An evolutionary based approach for assessment of earthquake-induced soil liquefaction and lateral displacement". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(1), pp.142-153.

-