نشریه علمی
پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران
جلد ۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۳، صص ۳۷ الی ۴۵
تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۴/۲۹
تاریخ تصویب نهایی: ۹۲/۷/۲۰
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

مطالعات آزمایشگاهی تأثیر میکروسیلیس بر دوغاب تزریق در روش طاق چتری (مطالعه موردی خط۴ مترو تهران)

اصغر لادریان[1]* و حامد مراد نژاد[2]

[1] **استادیار**، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

[2] **کارشناس ارشد**، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

a-laderian@araku.ac.ir

چکیده: از مهم‌ترین مسائل حفاری تونل‌های کم عمق در زمین‌های نرم نواحی شهری مساله‌ی نشست زمین و تأثیر آن بر سازه و تأسیسات شهری مجاور می‌باشد، اثرات وارده به گستره پروفیل نشست سطحی و میزان آن وابسته است. این شرایط در ایستگاه بیمه (*A4-2*) خط ۴ مترو تهران به وضوح قابل مشاهده است. یکی از روش‌های نگهدارنده تونل در چنین مناطقی استفاده از روش طاق چتری به عنوان یک روش پیش نگهدارنده می‌باشد. با توجه به شعاع کم تزریق در روش طاق چتری و حجم گروت تزریق شده و شیوه اجرای آن در تونل یک محیط همگن دوغاب و خاک در اطراف تونل متصور خواهد بود. به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی از خاک محل نمونه برداری شده و با مشخصه‌های خاک درجا اقدام به ساخت نمونه‌هایی گردید. با انجام آزمایش‌های مقاومت برشی و فشاری براساس استانداردهای*ASTM* پارامترهای مقاومت از جمله برش در نمونه‌های خاک محصور با دوغاب در درصدهای متفاوت میکروسیلیس تعیین گردید. نتایج به دست آمده به صورت جداول و اشکال ارائه می‌شود.

کلمات کلیدی: تزریق، روش طاق چتری، میکروسیلیس، خط۴ مترو تهران، پارامترهای مقاومت.

Experimental Results of the Effect of Silica Fume on Grout Injection in Umbrella Arch Method, Case Study: Tehran Metro Line 4

A. Laderian and H. Moradnezhad

Abstract: The most important problem in shallow tunnels excavated in soft ground of the urban areas is the surface settlement and its effect on the adjacent structures and facilities of the city, depending on the effects of the range of surface settlement profiles. This feature is clearly visible in Bimeh Station (A4-2) Line 4 of Tehran Metro. One method of supporting tunnel in this circumstance is using the umbrella arch method such as a pre-supporting. Due to the small radius and volume of grout injected into the umbrella arch method and manner of its implementation in field, a homogeneous area containing slurry and soil can be build up around the tunnel. To conduct laboratory studies, soil sampling and in-situ soil characteristics is used to achieve sample preparation. Shear and compressive strength tests were carried out according to the ASTM standards. The shear strength parameters of the soil samples (containing various percentages of silica in the slurry) were determined. The results are presented in tables and figures.

Keyword: Injection, Umbrella Arch Method, Silica Fume, Tehran Metro, Resistant Parameters.

۱ - مقدمه

با توجه به گسترده شدن مناطق شهری، موضوع سفرهای درون شهری و ترافیک یکی از مسائل حائز اهمیت است. سازه‌های زیرزمینی نقش مهمی در توسعه حمل و نقل شهری ایفا می‌کنند. کنترل نشست سطح زمین ناشی از تغییر شکل فضای ایجاد شده زیرزمینی در حفاری مناطق شهری و مسکونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پایداری این فضاها نقش مهمی در احداث این گونه تونل‌ها دارد. برای کاهش نشست ناشی از حفر تونل در مناطق شهری و تحمل سربار، خاک اطراف تونل را باید بهسازی کرد. انجام چنین عملیاتی هزینه اضافی برای اجرای تونل ممکن است با عبور نشست سطحی از حد مجاز، خسارت‌های بزرگ و حتی تخریب ساختمان اتفاق افتد. که در این صورت هزینه جبران چنین خسارت‌هایی بر روی سازه‌ها به دلیل تغییر شکل‌های حاصل آمده بیش از هزینه بهسازی خواهد بود. جهت اصلاح خاک در چنین شرایطی از روش‌های گوناگون مانند فریزکردن زمین، دیواره دیافراگمی، روش چتری، استفاده از وسایل مکانیکی، مسلح‌سازی به وسیله فایبرگلاس و تزریق در خاک استفاده می‌شود.

۲ - روش‌های پیش نگهدارنده

اصول روش فریز کردن زمین احداث پوسته یا گنبدی از زمین یخ زده در اطراف محل حفاری می‌باشد. در صورتی‌که ظرفیت سیستم کافی باشد، ممکن است کل مقطع تونل فریز شود [۱]. با یک اقدام به موقع می‌توان هنگامی که خاک با آب اشباع شده بکار برده و اجرا شود. هدف از این روش، حفر تونل در زمین یخ زده، با پایداری مناسب است. وقتی سیستم نگهداری نهایی در جای خود قرار بگیرد، عمل انجماد متوقف می‌شود[۲]. در صورتی که ظرفیت سیستم کافی باشد، سطح مقطع کل تونل نیز ممکن است منجمد شود. این تکنیک را می‌توان تقریباً در هر زمینی با نفوذپذیری پایین تر از 10^{-3} m/s استفاده کرد. انجماد می‌تواند از سطح یا جبهه کار انجام شود. در هر دو مورد، مشکل اصلی در کنترل انحراف حفاری در طول نصب و راه اندازی لوله‌های انجماد (که به طول ۵۰ متر محدود است) و گردش مقدار زیادی از آب‌های زیرزمینی نهفته است [۱].
اگر چه این روش اجازه می‌دهد تا ثبات زمین به طرز چشمگیری بهبود یابد، اما به دلیل اثرات مضر بالقوه آن در درون زمین که شامل جابجایی تولید شده، به وسیله نشت آب‌های زیرزمینی به سمت منبع سرد در طول انجماد و پس از آن نشست (و تغییر خواص زمین به دلیل ذوب) در پایان روند انجماد، مستلزم کنترل بسیار شدید می‌باشد [۱].

از میان روش‌های عنوان شده، استفاده از تزریق متداول‌تر است. تزریق فرایندی است که با فرستادن یک مایع سخت شونده (دوغاب) یا ملات به داخل زمین، باعث بهبود خواص سختی مقاومت و یا نفوذپذیری خاک می‌گردد [۳] .
روش‌های تزریق در خاک شامل روش‌های تزریق نفوذی، تزریق تراکمی، تزریق جت و تزریق شکست هیدرولیکی (fracture grouting) می‌باشد[۴]. بهترین روش و حالت تزریق با توجه به عواملی نظیر دانه بندی خاک، ترازهای مختلف آب زیرزمینی، عمق سازه از سطح زمین و دسترسی سطحی به تجهیزات تعیین می‌شود.
در تزریق نفوذی، دوغاب در داخل خاک به گونه‌ای که دانه‌بندی و ساختار خاک تغییر نکند، انتشار می‌یابد. اگر خاک همگن و همگرا باشد و در یک نقطه تزریق گردد، ناحیه تزریق کروی شکل خواهد بود [۳]. این روش احتمالاً قدیمی‌ترین تکنیک تزریق است که اولین برنامه کاربردی ثبت شده آن به اوایل ۱۸۰۰ برمی‌گردد [۴]. اندازه دانه‌های خاک و دانه بندی آن تزریق پذیری خاک و نوع مصالح مورد استفاده را مشخص می‌کند [۳].
تزریق پرفشار یا جت گروتینگ یکی از شیوه‌های پایدارسازی و بهسازی خاک به صورت درجا می‌باشد. پایه اصلی تزریق جت، جت برشی با سرعت بالا است [۵]. در این تزریق دوغاب از طریق یک نازل به همراه آب و هوا با فشار اولیه ۳۰۰ تا ۶۰۰ بار به خاک اطراف وارد می‌گردد و به طور کامل خاک را تغییر می‌دهد و ترکیبی از خاک و دوغاب را به وجود می‌آورد [۳]. زمانی که این روش در خاک‌های ریز دانه استفاده می‌شود، به خاطر عوارض جانبی بالقوه همراه با فشار غیر منتظره ساخت زمین حفر شده در جبهه کار (شکستگی ناگهانی و جابجایی بزرگ) باید توجه خاصی به آن شود. هنگامی که بهبود زمین مورد نیاز است، این روش ممکن است به جای تزریق در زمین‌های بسیار ریزدانه استفاده شود. سیستم تزریق جت به سه گروه تک جزئی، دو جزئی و سه جزئی تقسیم می‌شود [۱]. در روش سه‌گانه(تریپلکس)، یک برش اولیه توسط جت آب در خاک ایجاد شده و مخلوط سوسپانسیون سیمان متعاقباً با فشار به درون خاک برش خورده، تزریق می‌گردد [۳].

در روش تزریق شکست هیدرولیکی، دوغاب با فشار بالا (تا $40 kg/cm^2$) توسط پمپ درون درز و ترک‌ها نفوذ کرده و باعث کاهش تعداد شکاف‌ها و بهسازی خاک می‌شود. اصول این روش ایجاد درز و ترک در خاک با حفظ پایداری خاک است [۵]. این تزریق متداول فرانسوی با هدف تزریق دوغاب در زمین در فشار نسبتاً بالا است. از آنجا که در استفاده از این تزریق تغییر شکل بالقوه غیر قابل کنترل رخ می‌دهد، این دسته تزریق به طور گسترده در صنعت تونل سازی استفاده نمی‌شود [۴].

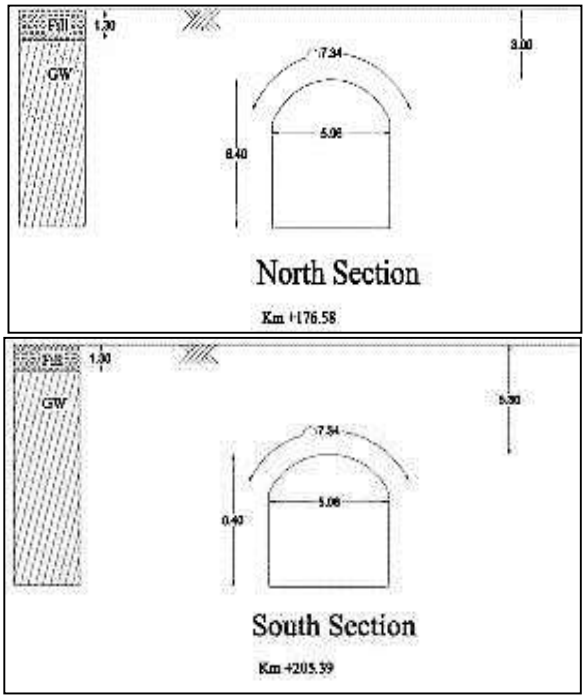
جهت کاهش نشست زمین ناشی از حفر تونل، می‌توان از تزریق شیمیایی استفاده کرد. این روش در صورتی‌که سطح آب زیرزمینی بالا باشد ،می‌تواند روش مؤثری بوده و نشست ناشی از زهکشی آب را نیز کاهش دهد [۶].

یکی از روش‌های مؤثر جهت کاهش میزان نشست در اثر حفاری‌های زیرزمینی، تزریق جبرانی یا متعادل است. اصول اولیه این روش تزریق دوغاب به ناحیه‌ای بین تونل و لایه های زیرین سازه می‌باشد تا نشست زمین و تنش‌های ایجاد شده در اثر حفاری را کاهش دهد [۷]. به عنوان یک نتیجه با این تزریق می‌توان برآمدگی زمین و سطح زمین را جابجا و نشست‌های قبلی و قدیمی را جبران نمود. در به کار بردن این روش، برای جبران نشست حاصل از حفر تونل به دلیل فشار اعمالی بالا و وارد آمدن بار زیاد به پوشش تونل باید احتیاط نمود [۳]. محدودیت عمده این روش در تحرک بالا و ویسکوزیته پایین دوغاب است که می‌تواند باعث مشکلاتی در کنترل محل دوغاب شود. استفاده از گروت با زمان گیرش بالا تا حدی می‌تواند به حل این مشکل کمک کند [۷].

ایستگاه بیمه در خط ۴ مترو تهران دارای خاک درشت دانه ریزشی است و تونل دسترسی به سالن فروش بلیت در ایستگاه مترو در زیر جاده مخصوص با سر بار متغیر بین ۳ تا ۵ متر واقع شده است. لذا برای پایداری این تونل در زمان احداث و جلوگیری از نشست، قبل از نصب سازه نگهبان اصلی، لزوم به کارگیری یکی از روش‌های اصلاح خاک به منظور افزایش پایداری سطح حفاری کاملا محسوس می‌باشد.

۳- مشخصات پروژه

این پژوهش به بررسی نیاز و عملکرد روش پایداری طاق چتری در تونل دسترسی به سالن فروش بلیت ایستگاه بیمه واقع در خط ۴ مترو تهران می‌پردازد. براساس انجام آزمایش دانه‌بندی در آزمایشگاه، خاک منطقه مورد بحث از دو نوع شن و خاک ریز می‌باشد. سطح آب زیرزمینی از سطح حفر تونل فاصله بسیار دارد؛ لذا شرایط منطقه غیر اشباع است. شکل ۱ نشان دهنده وضعیت تونل در ابتدا و انتهای مسیر می‌باشد.



شکل ۱: مقطع عرضی زمین در ابتدا و انتهای مسیر، مقطع تونل و لایه‌های ژئوتکنیکی

لایه خاکریز (Fill) در قسمت بالایی لایه زیر ساخت خط ۴ مشاهده می‌شود. ضخامت این لایه متغیر و بین ۰ تا ۳ متر است. ضخامت این لایه معمولاً در قسمت‌های قدیمی شهر و یا در قسمت‌های پست و کم ارتفاع افزایش می‌یابد که با این لایه پر شده و به سطح زمین رسیده‌اند. طبقه‌بندی این گونه از خاک (Fill) بر مبنای سیستم رده‌بندی معمول و عمومی خاک‌ها امکان‌پذیر نیست و بعضاً باعث اشتباه می‌شود. زیرا این لایه در بالای ریزدانه و درشت دانه قرار دارد، حاوی مواد ناخالص و غیرطبیعی از قبیل آجر بنایی، بتن، آسفالت و... است؛ لذا آن قسمت از این لایه که بدون مواد غیر طبیعی و ناخالص است، مناسب می‌باشد [۸]. خاک‌های شن‌دار در خط ۴ حدود ۹۰٪ و بیشتر لایه های زیرین را شامل می‌شوند؛ لذا ویژگی‌ها و خواص این گونه از خاک بسیار مهم است. نوع خاک شن‌دار موجود در این

منطقه از نوع GW می‌باشد. که مشخصات فیزیکی این خاک در جدول ۱ آمده است [۸].

۴- روش طاق چتری

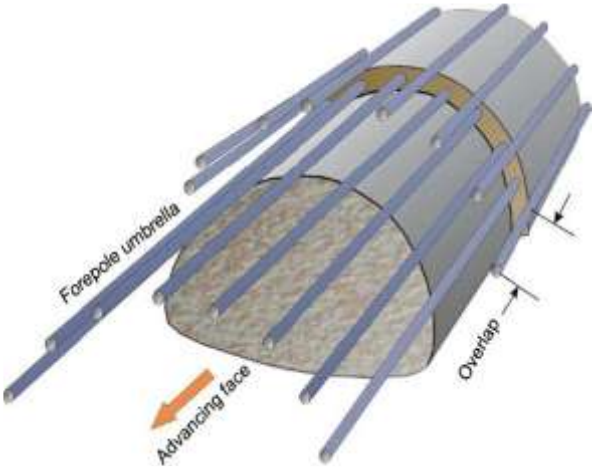
نشست زمین در نتیجه حفر تونل به صورت تدریجی تا هنگامی که نیمرخ حفاری جلو می‌رود، افزایش یافته و هنگامی که نیمرخ حفاری به نقطه معینی می‌رسد ۳۰ تا ۴۰ ٪ کل نشست زمین در آن نقطه اتفاق می‌افتد. این مطلب بدین معنی است که هر تصمیم و چاره‌جویی برای محدودسازی نشست زمین به تنهایی نمی‌تواند جلوی نشست خاک بالای نیمرخ تونل را بگیرد. بنابراین تسلیح سطح تونل قبل از عملیات حفاری در کاهش نشست خاک بالای نیمرخ حفاری در دو جهت طولی و عرضی توسط یک ناحیه کمانی شکل مسلح بسیار مؤثر می‌باشد [۹].

با توجه به پایین بودن سطح آب زیرزمینی و امکانات اجرایی، فریز کردن زمین مقدور نیست. سیستم‌های نگهداری چتر لوله به طور مؤثر به عنوان سیستم قبل از نگهداری در تونل برای افزایش ثبات در منطقه کار و کاهش تغییر شکل‌های ناشی از ساخت و ساز استفاده می‌شود. منطقه اصلی استفاده از آن احداث تونل در زمین ضعیف است [۱۰]. در روش طاق چتری هسته لوله فولادی در حفره‌های تزریق در فواصل مناسب نصب می‌شود و نقشی مانند پره چتر در محیط بیرونی مقطع عرضی تونل را اجرا می‌کند. سپس تزریق انجام می‌شود تا یک قوس مسلح به حالت چتر تشکیل شود [۱۱]. در شکل ۲ نمایی از استفاده طاق چتری در تونل نشان داده شده است. سیستم نگهداری چتر لوله شامل لوله‌ها، از جبهه واقعی به جلو نصب می‌شود. به طور معمول، لوله‌ها ۱۲/۰ تا ۱۵/۰ متر طول دارند و در حول مقطع تونل قرار می‌گیرند. قطر بیرونی لوله ها از ۷۰ میلی‌متر تا ۲۰۰ میلی‌متر است. این سیستم نگهداری در درجه اول جلوتر از پوشش اولیه نصب می‌شود و اثر خود را بر پایداری شرایط و تغییر شکل محیط اطراف می‌گذارد [۱۰]. شکل ۳ نشان دهنده لوله فورپولینگ و نصب آن می‌باشد. به‌کار بردن روش طاق چتری ناحیه نفوذ حفاری تونل را کم کرده و اثر تونل بر سطح و زیر سطح ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد. یک اثر مهم تونل‌ها این است که نشست زمین بعد از حرکت جبهه کار رخ می‌دهد. به منظور جلوگیری از جابجایی سینه کار به داخل تونل، می‌توان طول‌های مختلف فیس بولت را بسته به شرایط جرم جبهه کار و مساحت مقطع عرضی در فواصل مختلف همراه با طاق چتری به کار برد [۱۲].

در روش طاق چتری، لوله گذاری به شکل مخروط ناقص صورت می‌پذیرد. زاویه انحراف گمانه‌ها نسبت به افق از 5° تا 10° تغییر می‌کند. معمولاً این گمانه‌ها غیر موازی با محور تونل می‌باشد و طول آنها از ۵ تا ۱۰ متر و میزان همپوشانی آنها از ۱/۵ تا ۵ متر متفاوت می‌باشد. در این روش با توجه به وضعیت پایداری و نوع مصالح، فاصله گمانه‌ها می‌تواند در جاهای مختلف مقطع تونل کم یا زیاد گردد [۱۳].

جدول ۱: خواص فیزیکی خاک GW [۸].

مولفه	مقدار متوسط	انحراف معیار	ضریب تغییرات (٪)	حدود تغییرات
مقدار شن (G%)	۶۳/۱	۷/۲	۱۱	۷۵-۵۵
مقدار ماسه (S%)	۳۳/۸	۷/۳	۲۲	۴۳-۲۲
عبوری از الک ۲۰۰	۳/۱	۰/۹	۲۴	۵-۲
γ_d (gr/cm^3)	۲/۰۲	۰/۰۶	۳	۱/۲-۸۶/۰۸
درصد رطوبت	۶/۷	۱/۷	۳	۵/۹-۳/۹
d_{10}	۰/۵	۰/۱۷	۳۴	۰/۰-۳/۹
d_{30}	۳/۴	۱/۷	۵	۶-۵
d_{60}	۱۵/۵	۷/۱	۴۶	۳۳-۸
Cu	۳۲	۹/۳	۲۹	۵۴-۱۸
C_C	۱/۷	۰/۹	۵۳	۳-۱
حد خمیری	ندارد	-	-	-
نسبت تخلخل(e)	۰/۳۱۲	۰/۰۲	۶	۰/۰-۴۲۴/۲۷۴



شکل ۲: کاربرد تکنیک طاق چتری [۱۲]

شکل ۳: لوله فورپولینگ و روش نصب آن [۱۰]

۵- مدل‌سازی آزمایشگاهی

به منظور بررسی وضعیت محیط تزریق شده اطراف تونل، باید مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی انجام شود؛ لذا با تهیه نمونه خاک از محل پروژه، اقدام به ساخت نمونه‌های استوانه‌ای برای آزمایش تک محوره و نمونه‌های برشی شد. ساخت نمونه‌ها براساس اطلاعات موجود از فیلد و برپایه آئین نامه ASTM صورت پذیرفت.

با توجه به شعاع کم تزریق در روش طاق چتری و حجم گروت تزریق شده و شیوه اجرای آن در تونل، یک محیط همگن متصور خواهد بود. با در نظر گرفتن این فرض و داده‌های حاصل از فیلد به ساخت نمونه برای آزمایش‌های تک محوره و برشی اقدام شد. برای ساخت نمونه تک محوره فشاری در قالبی با قطر ۸/۷ cm و ارتفاع ۱۶ cm و در نظر گرفتن وزن مخصوص طبیعی خاک محل، حجم مورد نظر دوغاب برای اشغال فضای خالی و منافذ خاک حاصل شد.

برای آزمایش تک محوره فشاری:

$V = 950.66 cm^3$ $\quad \gamma_d = 2\, gr/cm^3$

$V_a = 98.74 cm^3$ $\quad e = 0.312$

برای آزمایش برش مستقیم:

$V = 200 cm^3$ $\quad \gamma_d = 2\, gr/cm^3$

$V_a = 20.8 cm^3$ $\quad e = 0.312$

حجم دوغاب در مقادیر بالا با V_a نشان داده شده است. دوغاب مورد استفاده در فیلد دوغاب سیمان با نسبت ۲:۱ می‌باشد. در این پژوهش، علاوه بر سیمان از میکروسیلیس با مقادیر مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد استفاده شد و درصد بهینه میکروسیلیس برای نسبت آب به سیمان ثابت ۲:۱ مورد بررسی قرار گرفت.

در این پژوهش از میکروسیلیس شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران استفاده شد که خواص فیزیکی این نوع میکروسیلیس در جدول شماره ۲ و خواص شیمیایی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج به دست آمده از آزمایشگاه برای آزمایش فشاری تک محوره در مدت زمان ۷ روز در نمودارهای ۴و۵ و نتایج به دست آمده از آزمایشگاه برای آزمایش فشاری تک محوره در مدت زمان ۲۸ روز در نمودارهای ۶ و۷ نمایش داده شده است.

جدول ۲: خواص فیزیکی میکروسیلیس [۱۴]

خواص	ویژگی
ساختار	بی شکل
شکل ذرات	کروی
دانه بندی	۰/۲ – ۰/۳ میکرون
چگالی فله ای	۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب

جدول ۳: خواص شیمیایی [۱۴]

مقدار (درصد)	ترکیب شیمیایی
۸۵ -۹۵	اکسید سیلیسیم SiO_2
۰/۴-۲/۰	اکسید آهن Fe_2O_3
۲/۰-۲/۳	اکسید کلسیم CaO_2
۰/۵-۱/۷	اکسید آلومینیم Al_2O_3
۰/۱-۰/۹	اکسید منیزیم MnO
۰/۶-۱/۵	کربن C

همان‌طور که در نمودارهای ۴، ۵، ۶ و ۷ مشهود است، روند افزایش مقاومت در درصدهای متفاوت میکروسیلیس متغیر است؛ اما در هر دو دوره زمانی در ۱۰ درصد میکروسیلیس مقاومت مناسبی برای این درصد آب به سیمان حاصل شده است. البته این احتمال وجود دارد که با تغییر درصد آب به سیمان این روند و درصد بهینه میکروسیلیس تغییر نماید؛ ولی با توجه به در نظر گرفتن شرایط اجرای کار در محل ۱۰ درصد میکروسیلیس بهینه درنظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از آزمایش برش مستقیم در مدت زمان ۲۸ روز در نمودارهای ۸ و ۹ نمایش داده شده است. همان طور که از نمودارهای ۸ و ۹ مشهود است، در هر دو دوره زمانی برای چسبندگی ۱۰ درصد میکروسیلیس بهترین اثر را از خود نشان داده؛ ولی در ۱۵ درصد بیشترین اصطکاک داخلی حاصل شده است. لذا برای درک بهتر از درصد بهینه نیاز به مقایسه در یک تنش قائم ثابت و محاسبه تنش برشی محسوس است.

چنان که در نمودارهای بالا مشخص است، بیشترین مقاومت برشی در ۱۵ درصد میکروسیلیس حاصل شده است؛ ولی با توجه به اختلاف کم مقاومت در درصدهای ۱۰ و ۱۵ و بهینه بودن ۱۰درصد میکروسیلیس برای مقاومت فشاری در نهایت ۱۰ درصد میکروسیلیس برای دوغاب درنظر گرفته شد.

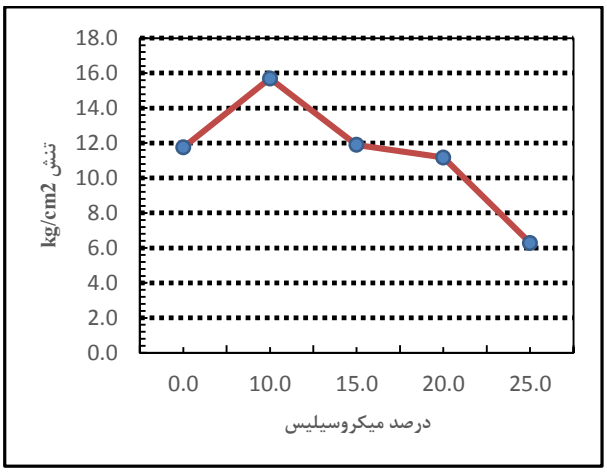
یارتینگام و همکاران در سال ۲۰۱۲ روابط تجربی برای ترکیب خاک با سیمان براساس پارامترهایی مانند درصد سیمان، زمان عمل‌آوری و وزن مخصوص برای محاسبه مقاومت تک محوره و مدول الاستیسیته ارائه کردند [۱۵]. در این پژوهش به منظور محاسبه مدول الاستیسیته از فرمول تجربی زیر که برپایه مقاومت فشاری تک محوره است استفاده شد.

$$E_s = -71.83 + 188.28U_{CS} \qquad (۱)$$

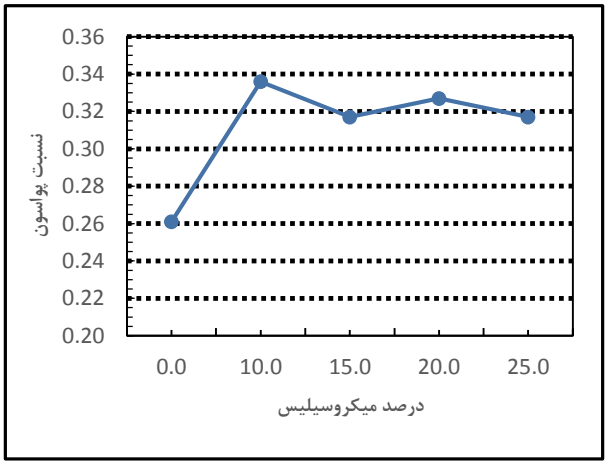
درنهایت تمام مقادیر به دست آمده برای ۱۰ درصد میکروسیلیس و حالت بدون میکروسیلیس با خاک طبیعی در جدول ۴ مقایسه شده است.

۶- مدل‌سازی عددی

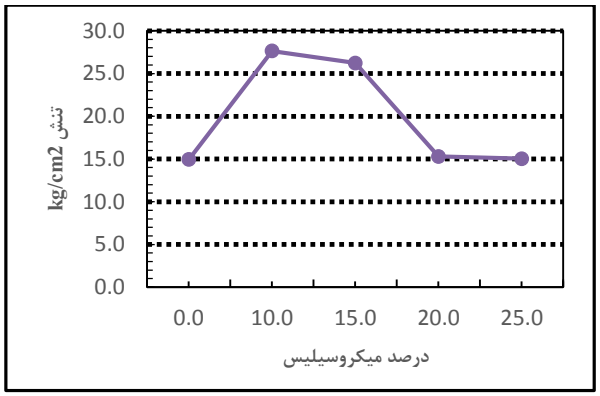
به منظور مدلسازی عددی از نرم افزار تفاضل محدود Flac 3D استفاده شد. پس از وارد کردن شرایط محیط مدل و داده‌های به دست آمده از آزمایشگاه در نرم افزار به بررسی و صحت سنجی مدل اقدام گردید و ابعاد مناسب برای مدل حاصل شد. سه شرایط مختلف حفاری بدون استفاده از روش طاق چتری، حفاری با دوغاب بدون میکروسیلیس و با دوغاب حاوی میکروسیلیس در نرم افزار مورد بررسی قرار گرفت که داده‌های حاصل از مدلسازی عددی در ادامه آورده شده است. مدلسازی براساس روش NATM است که شامل دو مرحله حفاری قسمت فوقانی و تحتانی می‌باشد.



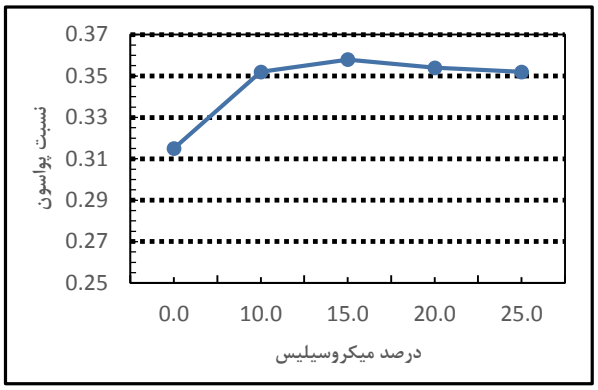
شکل ۴: تنش تک محوره برای دوره زمانی ۷ روز



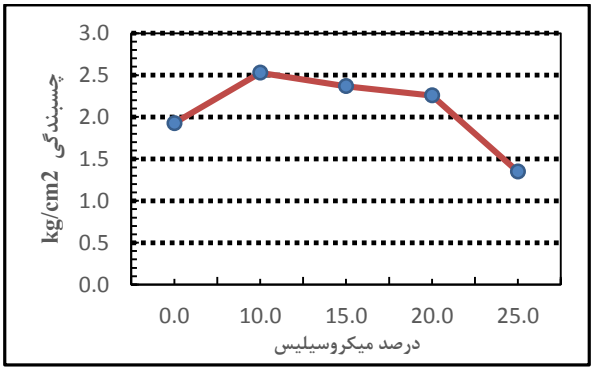
شکل ۵: نسبت پواسون برای دوره زمانی ۷ روز



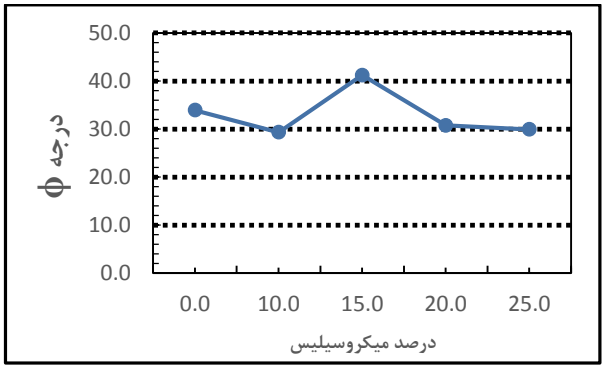
شکل ۶: تنش تک محوره برای دوره زمانی۲۸ روز



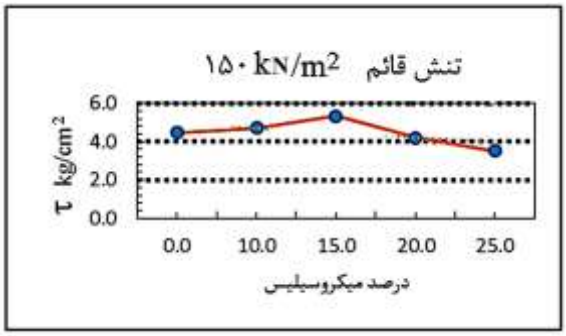
شکل ۷: نسبت پواسون برای دوره زمانی۲۸ روز



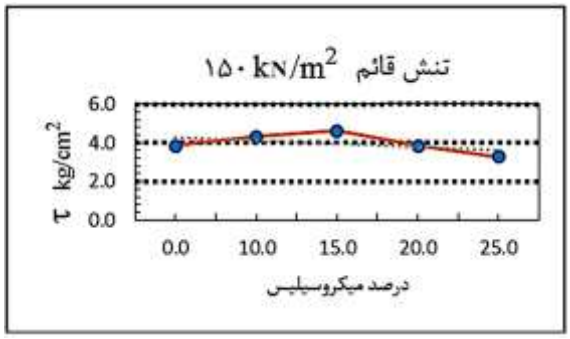
شکل ۸: چسبندگی برای دوره زمانی۲۸ روز



شکل ۹: اصطکاک داخلی برای دوره زمانی۲۸ روز



شکل ۱۰: تنش برشی در دوره زمانی ۲۸ روز



شکل ۱۱: تنش برشی در دوره زمانی ۷ روز

جدول ۴: مقایسه پارامترهای مکانیکی خاک

متغییر	واحد	خاک طبیعی GW	خاک با دوغاب بدون میکروسیلیس	خاک با دوغاب ۱۰ درصد میکروسیلیس
مقاومت فشاری تک محوره (U_{cs})	kg/cm^2	-	۱۴/۹۴	۲۷/۶۴
مدول الاستیسیته E_s	kg/cm^2	۱۵۰۰	۲۷۴۰/۹۴	۵۱۳۱/۹۳
چسبندگی (C)	kg/cm^2	۰	۲/۲۳	۲/۹۸
اصطکاک داخلی (φ)	درجه	۳۷	۳۳/۹۳	۲۹/۳۴
تنش برشی تحت تنش قائم ۱۵۰ kg/cm^2	kg/cm^2	۱/۱۵	۴/۴۷	۴/۷۲

جدول ۵: مقایسه نشست حاصل از حفاری قسمت فوقانی

نقطه	بدون تزریق (cm)	دوغاب با میکروسیلیس (cm)	دوغاب بدون میکروسیلیس (cm)
وسط	-۱۱/۵	-۰/۱۵	-۰/۲۳
X= 3	-۰/۵	-۰/۱۳	-۰/۱۲
X= -3	-۰/۵	-۰/۱۳	-۰/۱۲
X= 10	-۰/۰۱۵	-۰/۰۱۸	-۰/۰۱۴
X= -10	-۰/۰۱۵	-۰/۰۱۸	-۰/۰۱۴

جدول ۶ :مقایسه نشست حاصل از حفاری قسمت تحتانی

نقطه	بدون تزریق (cm)	دوغاب با میکروسیلیس (cm)	دوغاب بدون میکروسیلیس (cm)
وسط	ریزش	-۰/۳۲	-۰/۵
X= 3	-۵۸	-۰/۲۹	-۰/۳۳
X=-3	-۵۸	-۰/۲۹	-۰/۳۳
X=10	-۰/۰۵۱	-۰/۰۵۴	-۰/۰۵۱
X=-10	-۰/۰۵۱	-۰/۰۵۴	-۰/۰۵۱

۷- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- از نتایج به دست آمده از آزمایشگاه براساس مشخصات محل و درصد آب به سیمان ثابت میزان ۱۰ درصد میکروسیلیس برای این پروژه در نظر گرفته شد که پس از مدلسازی عددی اثر مثبت استفاده از این ماده مشخص گردید.

- استفاده از روش طاق چتری باتوجه به ریزش تونل درصورت حفر بدون پیش نگهداری بسیار حیاتی می‌باشد و با توجه به هزینه‌های مالی ناشی از ریزش و خطرات جانی آن توجیه اقتصادی استفاده از این روش کاملاً مشخص و بدیهی است.

- استفاده از روش طاق چتری، همانند انتظار، فرصت لازم برای نصب سیستم نگهداری نهایی را ایجاد می‌نماید، تا مراحل حفاری با امنیت کافی صورت پذیرد. بررسی سیستم پایداری مورد نیاز به مراحل بعدی حفاری برمی‌گردد، که خارج از موضوع مورد بحث این پژوهش می‌باشد.

- باتوجه به شرایط پروژه، که در محدوده حومه شهر قرارداشت، اثر بار ساختمان در مدل درنظر گرفته نشد اما در محدوده شهر به دلیل حساسیت بالا نسبت به نشست، تاثیر گذاری استفاده از میکروسیلیس با توجه به قیمت و دسترسی آسان این ماده بسیار قابل توجه می‌باشد.

- با توجه به در حال اجرا بودن پروژه احداث تونل در ایستگاه بیمه، با در نظر گرفتن شرایط موجود در منطقه و ریزش تونل در صورت حفر، پیشنهاد می‌گردد قبل از اقدام به حفر از سیستم پیش نگهدارنده طاق چتری استفاده گردد تا یک حفاری ایمن و با هزینه بهینه در این ایستگاه محقق گردد.

مراجع

[1] Leca, E. and New, B., *Settlements induced by tunneling in soft ground*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 22, pp. 119–149, **2007**.

[2] Pelizza, S. and Peila, D., *Soil and Rock Reinforcements in Tunnelling,* Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 8, No.3, pp: 357–372, **1993**.

[3] Kolymbas, D., *Tunelling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunnelling*, Springer, Berlin, pp. 159-170, **2005**.

[4] Pellegrino, G., *Soil Improvement Technologies for Tunnelling:Selected Case Histories*, Geotechnical Seminar State-of-the-Art Technology in Earth and Rock Tunnelling, New York, NY, **1999**.

[۵] معروف، م. ع. *کاهش نشست زمین ناشی از حفاری تونل در زمین‌های نرم با تزریق(مطالعه موردی ساختمان گردشگری* مشهد، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، **۱۳۹۲**.

[6] Aksoy, C. O., *Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent groundsettlement induced by groundwater drainage: A case study*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 45, pp. 376–383, **2007**.

[7] James, C. Ni. and Wen-Chieh, Ch., *Grout Efficiency of Lifting Structure in Soft Clay*, International Conference on Challenges and Recent Advance in Transportation Geotechnics, China, **2009**.

[۸] مهندسین مشاور گنو، *گزارش مولفه‌های ژئوتکنیکی زیر سطحی خط ۴*، **۱۳۸۲**.

[۹] مطهری، م. ر. و وفائیان، م.، *تحلیل اجزای محدود روش چتری در تونل سازی*، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران**۱۳۸۷**.

[10] Volkmann, G. M., and Schubert, W., *Tender document specifications for pipe umbrella installation methods Underground Facilities for Better Environment and Safety*, India, **2008**.

[11] Japan Foundation Engineering CO., *Aiming for symbiosis between people and environment to contribute towards building a plentiful society with foundation construction technology*, pp. 15-16, **2009**.

[12] Aksoy, C. O. and Onargan, T., *The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 25, pp. 553-559, **2010**.

[۱۳] تالی، ن. و قلندرزاده، ع.، *استفاده از روش تزریق طاق چتری در حفاری تونل‌های متروی تهران*، دومین همایش سد و تونل ایران، دانشگاه تهران، تهران، **۱۳۹۱**.

[۱۴] شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران، *آشنایی با میکروسیلیکا تولیدی شرکت صنایع فروآلیاژ ایران*، **۱۳۸۹**.

[15] Jaritngam, S. and Yandell, W. O., *Development of Strength Model of Lateritic Soil-Cement*, ENGINEERING JOURNAL, Vol 17, pp. 69-77, **2013**.