چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علوم زمین
The 42nd National Geosciences Congress
www.geoconf.ir

ابزاربندی و رفتارنگاری تونل حکیم در دوران ساخت

حسنعلی سراج[۱]، زهرا نجفی[۲]، یاور جباری[۳]

[۱] کارشناسی مهندسی معدن، مدیر عامل شرکت نوآوران سراج ابزار، serajabzar@gmail.com

[۲] کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، شرکت نوآوران سراج ابزار، z.najafi87@gmail.com

[۳] کارشناسی ارشد زمین شناسی ساختمانی، خدمات ژئوتکنیک دنیز، Yavarjabbari92@gmail.com

چکیده

با توجه به افزایش جمعیت شهرها، تعداد خودروها و وسایل حمل و نقل عمومی، مسئله ترافیک وسایل نقلیه، یکی از چالش های فرا روی کارشناسان برنامه ریزی و مدیریت شهرها می‌باشد. اهمیت این مسئله در کلان شهرهایی مثل تهران که علاوه بر تراکم جمعیت بالا، طبق آمار و ارقام موجود، تعداد ۳ میلیون نفر مسافر روزانه دارند بیشتر نمود پیدا می کند. ظرفیت حمل و نقل جاده‌ای (خیابانی) به دلیل محدودیت در استفاده از فضاهای روی سطح زمین، محدود شده است. لذا در چند سال گذشته تلاش ها در جهت انتقال بخشی از ترافیک این شهر به فضاهای زیرزمینی معطوف شده است. یکی از مهم‌ترین مسائل تونل‌سازی در فضاهای شهری، اثرات نامطلوب آن بر روی سازه‌های سطحی و بخصوص در زمین‌های نرم و مناطق متراکم می‌باشد. ابزاربندی و رفتارنگاری ژئوتکنیکی بعنوان یک ابزار مهم در شناخت رفتار سازه و کنترل آن در حین اجرا و بهره‌برداری می‌باشد که با توجه به شرایط پروژه، روش اجرای نصب ابزاردقیق بسیار مهم می‌باشد. بزرگراه حکیم یکی از بزرگراههای اصلی کلان شهر تهران به طول ۹ کیلومتر است که از محل اتصال بزرگراه رسالت و بزرگراه کردستان بعد از تونل رسالت آغاز می‌شود و در بزرگراه لشگری به پایان می‌رسد. تونل دوقلو حکیم با سطح مقطع حفاری ۱۸۶ مترمربع و طول کلی ۳۲۵۶ متر به روش NATM / SEM در منطقه جنگلی چیتگر احداث شد که بصورت مرحله‌ای حفاری و نگهداری شد. برای ابزاربندی و رفتارنگاری این تونل از نشست‌سنج سطحی، اکستنسومتر و تارگت‌های ژئودزی استفاده شده است. در این مطالعه رفتار و نشست سطحی و زیر سطحی محیط اطراف تونل بررسی شدند که نتایج بدست آمده از ابزاربندی تونل حکیم علاوه بر اینکه نشان می‌دهد مراحل حفاری و نگهداری بخوبی انجام شده است، رفتار و اثر هر مرحله از حفاری را به درستی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

تونل حکیم، ابزاربندی، رفتارنگاری، نشست سطحی، نشست زیر سطحی.

۱. مقدمه

در چند سال گذشته تلاش ها در جهت انتقال بخشی از ترافیک کلان شهرها به فضاهای زیرزمینی معطوف شده است که نمونه آن احداث و توسعه خطوط مترو می باشد که امروز حجم زیادی از انتقال افراد بوسیله مترو انجام می شود. این تونل های شهری معمولاً با فاصله نزدیک بهم و با ابعاد بزرگ و بصورت مرحله ای[۱]ساخته می شود و به اینگونه تونل ها، تونل های دوقلو گفته می شود [۱]. علاوه بر امتیازات این سبک از تونلسازی، این روش تاثیرات نامطلوبی بر روی سازه های سطحی و بخصوص در زمین های نرم و مناطق متراکم دارد. بعضی از این مشکلات نامطلوب، سبب افزایش بیش از حد نشست سطح زمین[۲]می شود [۲]. بنابراین در نظرگرفتن نکات زیر در امر طراحی و احداث تونل بسیار مهم می باشد:

۱- پایداری: روش حفاری و ساخت تونل باید بر اساس شرایط زمین باشد. حفظ پایداری تونل در حین احداث آن، یکی از نکات کلیدی می باشد.

۲- نشست زمین: تاثیر حفر تونل بر روی نشست زمین و سازه های واقع بر روی سطح زمین بایستی ارزیابی شود.

۳- موثر بودن نصب سیستم نگهداری: سیستم نگهداری (موقت یا دائم) بایستی ظرفیت لازم در برابر بارهای اعمالی را دارا باشد. بنابراین ارزیابی از بارهای موجود قبل از طراحی تونل امری ضروری می باشد.

با درنظر گرفتن این ملاحظات، بسته به شرایط زمین، حفاری تونل در مناطق شهری با روش های متفاوتی نظیر ماشین حفار(TBM)، روش تونلسازی اترشی جدید(NATM) و روش کند و آکند(Cut & Cover) انجام می شود. یکی از روش های متداول در طراحی و اجرا در مناطق شهری روش NATM می باشد. این روش اولین بار در اتریش در سال های ۱۹۵۷-۱۹۶۵ بکار گرفته شده است و سپس در سالزبورگ در حدود سال ۱۹۶۵ مطرح شد. مبنای تئوری این روش وابسته به ارتباط بین تنش های تونل و تغییر شکل ها می باشد. این روش در زمین های نرم و در مناطق کم عمق مناسب می باشد. در این روش، رفتارنگاری و ابزاربندی پروژه یکی از نکات اساسی می باشد که بایستی در حین اجرای تونل از نتایج آن در جهت بهبود طراحی استفاده نمود. در حفاری تونل های شهری، رفتارنگاری ژئوتکنیکی[۳]بعنوان یک ابزار مهم برای اثبات عملکرد روش احداث و کالیبره کردن آن، در طول اجرا می باشد. همچنین برای پیمایش رفتار تونل در فاز بهره برداری، بمنظور کنترل کردن آن در طول زمان نیز بکار گرفته می شود. در واقع با رفتار نگاری می توان از صحت جابجایی های پیش بینی شده مطلع گردید و در صورت نیاز تراکم، محل نصب و زمان نصب سیستم نگهداری را اصلاح کرد (شکل ۱) [۳] .

حفاری تونل‌ها یا فضاهای زیرزمینی سبب جابجایی توده سنگ یا خاک اطراف تونل به سمت داخل تونل می‌شود. میزان و عمق جابجایی‌ها بسته به نوع سنگ دربرگیرنده تونل و قطر تونل متفاوت می‌باشد. اندازه‌گیری و کنترل این جابجایی‌ها کمک می‌کند تا از میزان آن‌ها با اطلاع بوده و درصورت نیاز با آنها مقابله شود که با توجه به شرایط اینگونه پروژه‌ها، نصب ابزاردقیق کمک بسیار زیادی خواهد نمود. در این مقاله ابزاربندی و رفتارنگاری تونل حکیم در دوران ساخت ارائه می‌شود.

۲. معرفی پروژه تونل حکیم

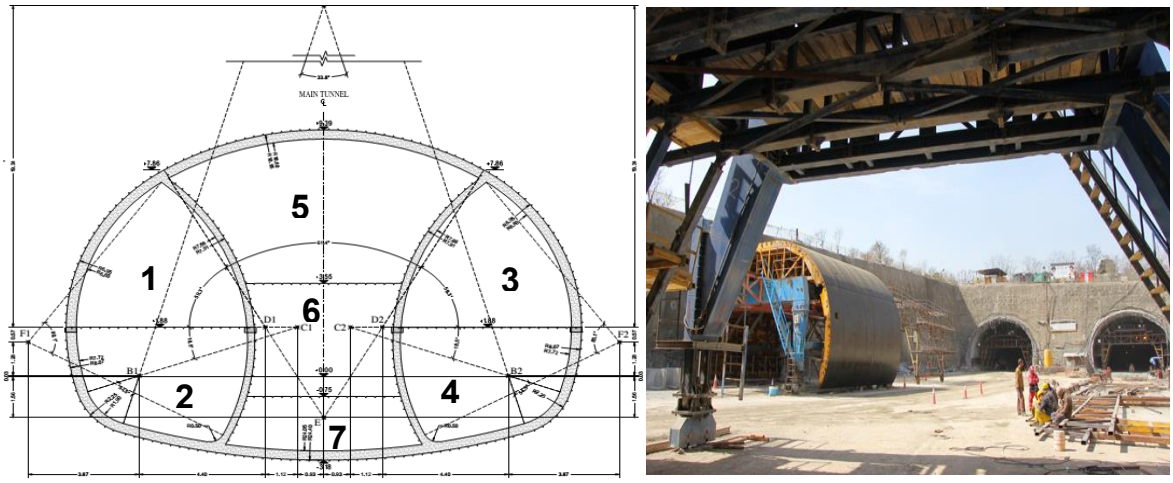
بزرگراه شهید حکیم به دلیل نیاز شهر تهران، باید به سمت غرب امتداد پیدا کند این در حالی است که بر اساس مطالعات کارشناسان ، نمی توان بزرگراه شهید حکیم را از مسیر دیگری عبور داد و یا با بزرگراه شهید همت یکی کرد یا حتی به سمت جنوب امتداد داد. از سوی دیگر تلاقی اتوبان شهید حکیم با بوستان جنگلی چیتگر گزینه اجرای همسطح را منتفی می کند چرا که ساخت اتوبان در این مسیر به معنی تخریب محیط زیست و طبیعت بکر چیتگر است. از جهتی، اگر ساخت پل در دستور کار قرار می گرفت با دو مشکل مواجه می شد چرا که ساخت پل نیازمند نصب پایه است که این پایه ها و کارگاههای عمرانی آن باید در بوستان جنگلی نصب و راه اندازی شود که همین امر باعث تخریب جنگل می شود. همچنین وقتی پل در این مسیر ساخته شود سروصدای زیادی به همراه دارد که آرامش را از شهروندانی که برای گذران اوقات فراغت به بوستان جنگلی می آیند می گیرد. در واقع، افزایش آلودگی صوت، هوا و آلودگی بصری از عمده مسائلی است که گزینه اجرای پل در امتداد بزرگراه شهید حکیم را رد می کند. بنابراین با توجه به مشکلاتی که ساخت پل یا اجرای همسطح ایجاد می کرد ساخت تونل بهترین گزینه برای انتخاب در نظر گرفته شد (شکل ۱).

---

[۱] Sequential Excavation Method
[۲] Surface Settlement
[۳] Geotechnical Monitoring

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تونل شهید حکیم.

با توجه به خصوصیات خاک و تست های انجام گرفته و همچنین سطح مقطع بزرگ، حفاری و اجرای تونل به صورت مرحله ای و در ۷ مرحله انجام گرفته است. این ۷ مرحله شامل حفاری بخش های جانبی، بخش بالائی و بخش پایینی می باشد. هر کدام از بخش های جانبی در دو مرحله پیشانی و کف حفاری شده است. بخش کف نیز در دو مرحله حفاری می شود. سیستم نگهداری شامل ۳۵ سانتی متر شاتکریت بهمراه دو لایه مش و لتیس ۳ نقطه ای می باشد (شکل ۲).



شکل ۲. هندسه مقطع تونل شهید حکیم.

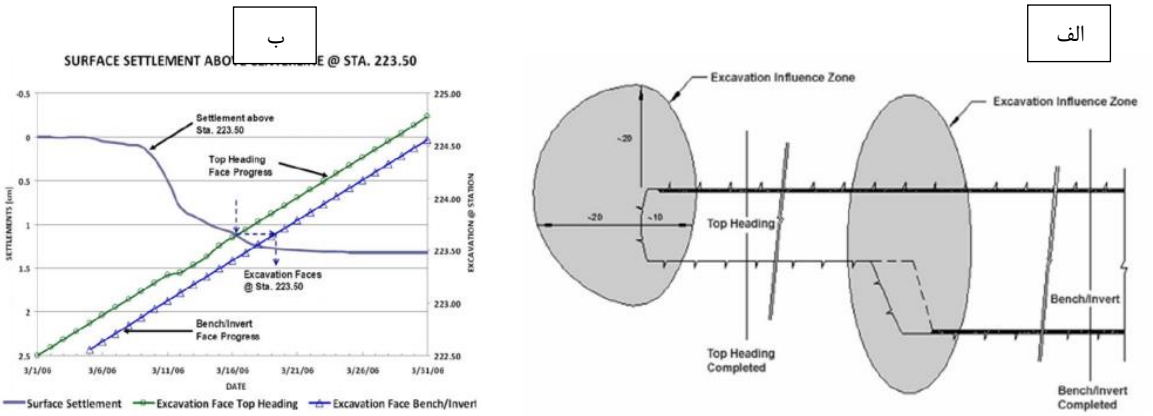
۱،۲. عوامل موثر در نشست زمین

عوامل موثر در نشست زمین عبارتند از: ۱- ناپایداری جبهه کار تونل ۲- تاثیر خصوصیات و شرایط نصب سیستم نگهداری موقت ۳- شرایط مربوط به حفاری مرحله ای ۴- تاثیر نصب سیستم نگهداری نهائی و پاسخ زمین نسبت به آن [۴].

۲،۲. زون تاثیر

با توجه به این نکته که تونلها در مناطق شهری با توجه به کاربردشان با ابعاد بزرگ و بصورت مرحله ای حفر می‌شوند، تمام داده های حاصل از رفتارنگاری ژئوتکنیکی بایستی بطور کامل و سیستماتیک جمع آوری و ثبت شوند. این داده‌ها بانضمام مشاهدات بصری مربوط به وضعیت شاتکریت اولیه، بایستی بکار گرفته شوند تا بعنوان مثال اثر distrees ناشی از گسترش ترک در شاتکریت مشاهده شود. بمنظور نشان دادن یک ارتباط مستقیم

بین رفتار تونل و رفتار زمین در قبال حفاری تونل، توصیه می‌شود که نرخ مقادیر اندازه گیری شده بصورت تابعی از پیشرفت هر کدام از مراحل حفاری تونل ترسیم شود. این مسئله، شامل یک منحنی که ارتباط بین مقادیر اندازه گیری شده (جابجایی، تنش و..) و پیشرفت تونل را نسبت زمان نشان می دهد، می‌باشد. بعنوان مثال شکل (۳) زون تاثیر شکل گرفته در اطراف تونل و نشست سطح زمین در بالای محور تونل را نشان می‌دهد. زون تاثیر در حفاری مرحله ای بطور عمده‌ای وابسته به شرایط زمین، ابعاد حفاری و طول گام حفاری می‌باشد. همانگونه که در شکل زیر مشاهده می‌شود، مقدار نشست بر اثر پیشروی بخش سقف (top heading) و سپس بخش کف (benching) و نزدیک شدن به نقطه اندازه گیری افزایش می‌یابد و سپس با دور شدن هر دو بخش از نقطه اندازه گیری شده، بطور تدریجی کاهش می‌یابد. این جایجایی اندک بعد از دور شدن کافی از نقطه اندازه گیری، بیانگر به تعادل رسیدن زمین و سیستم نگهداری نصب شده می‌باشد [۵].



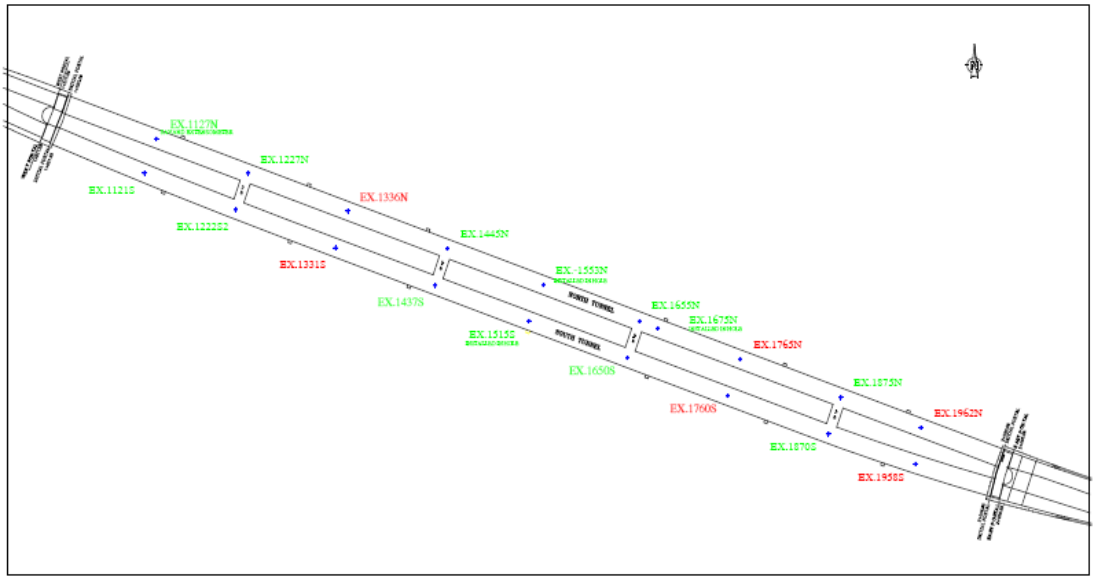
شکل ۳. الف- زون تاثیر ناشی از حفاری مرحله‌ای؛ ب- پایش نشست سطح زمین از طریق نقطه قرارگرفته بر روی محور تونل [۵].

۳. ابزارهای نصب شده جهت پایش نشست سطحی و زیر سطحی

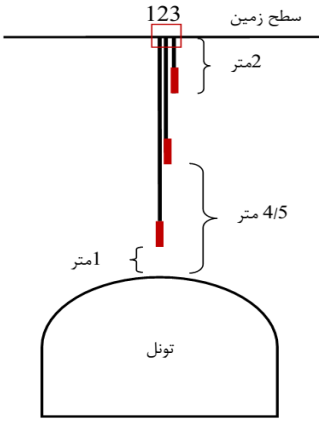
در تونل حکیم به‌دلیل روباره کم تونل (ماکزیمم حدود ۱۲ متر) نشست سطحی زمین نیز به کمک یک سری پین‌های نشست سنجی کنترل می‌شود و همگرایی دیواره و سقف تونل نیز به کمک اندازه‌گیری موقعیت تارگت‌های ژئودتیک نصب شده در دیواره و سقف تونل اندازه‌گیری می‌شود.
جابجایی قائم زیر سطحی لایه‌های بالای تونل نیز توسط ۱۸ عدد اکستنسومتر سه نقطه‌ای اندازه‌گیری شد.

۱،۳. اکستنسومترهای تونل حکیم

به‌منظور اندازه‌گیری جابجایی قائم زیر سطحی لایه‌های بالای تونل، تعداد ۱۸ عدد اکستنسومتر سه نقطه‌ای با آرایش زیر جانمایی شد که تامین، نصب و قرائت آن‌ها به این شرکت واگذار شد. شکل (۴) موقعیت اکستنسومترهای نصب شده در تونل حکیم را نشان می‌دهد. نامگذاری اکستنسومترها هم با توجه به موقعیت آنها انجام گرفته است. بعنوان مثال EX.1121S، بیانگر اکستنسومتر نصب شده در کیلومتراژ ۱۱۲۱ بر روی محور تونل جنوبی (S) می‌باشد. آرایش راد اکستنسومترها مطابق شکل (۵) به گونه‌ای چیدمان شده است که راد شماره یک یا بلندترین راد یک متر بالاتر از سقف تونل و راد شماره دو یا راد وسطی به میزان ۴/۵ متر بالاتر از سقف تونل و راد سوم یا راد کوتاهتر در عمق ۲ متری نسبت به سطح زمین نصب شدند.



شکل ۴. موقعیت اکستنسومترهای نصب شده در تونل حکیم [٦]



شکل ۵. آرایش رادها در هر اکستنسومتر [۶].

در پی درخواست شفاهی از پروژه تونل حکیم، این شرکت پس از بازدید از محل و بررسی‌های فنی، اکستنسومتر درون چاهی را مناسب دید و نمونه آن را مطابق شکل (۶) در کیلومتر ۱۶۷۵ تونل شمالی نصب نمود.

شکل ۶. نمونه اکستنسومتر درون چاهی

به‌دلیل خطای محتمل ناشی از قطر بالای چاه (حدود ۷۰ سانتیمتر)، مشاور محترم نصب اکستنسومتر درون گمانه را در اولویت اول قرار داد. بنابراین بدلیل عدم کارایی اکستنسومترهای درون گمانه‌ای معمول که در آن تمام گمانه با دوغاب پر می گردید، این شرکت متناسب با شرایط پروژه اکستنسومترهای درون گمانه‌ای با تزریق موضعی را پیشنهاد داد که مورد موافقت قرار گرفت و بلافاصله نمونه آن تهیه و در کیلومتر ۱۱۲۱ تونل جنوبی نصب گردید (شکل ۷).

شکل ۷. نمونه اکستنسومترهای درون گمانه‌ای

برای تزریق موضعی، پکرهایی با اندازه و شکل متناسب با گمانه‌ها و از جنس ژئوتکستایل نمدی تهیه و برای تقویت مقاومت کششی آن از پوشش کیسه‌های مشبک استفاده شد. هر یک از انکرها درون یک عدد پکر قرار گرفته و به کمک بست های فشار قوی و تفلون‌هایی که به همین منظور ساخته شده بود آب‌بندی می‌شدند (شکل ۸).

شکل ۸. پکر کیسه‌ای برای تزریق موضعی

۱،۱،۳. روش نصب اکستنسومتر

اکستنسومترها انواع مختلفی دارند که با توجه به نیازهای موجود در این پروژه از اکستنسومتر سه شاخه‌ای استفاده شده است. با توجه به باز بودن محیط نصب، اکستنسومترها در بیرون گمانه مونتاژ (شکل ۹) و به داخل گمانه ارسال می‌شدند و سپس انکرها به ترتیب از پایین به بالا تزریق شدند. پس از تزریق انکرها کلگی یا هد اکستنسومتر به کمک ملات در دهانه اکستنسومتر نصب و پیچ‌های نگهدارنده از آن جدا می‌شد.

شکل ۹. اکستنسومتر مونتاژ شده

۲،۱،۳. روش و برنامه قرائت

قرائت‌ها مطابق با برنامه قرائت پیشنهادی زیر (جدول ۱.) انجام و در فرم‌های مخصوص قرائت ثبت می‌شوند.

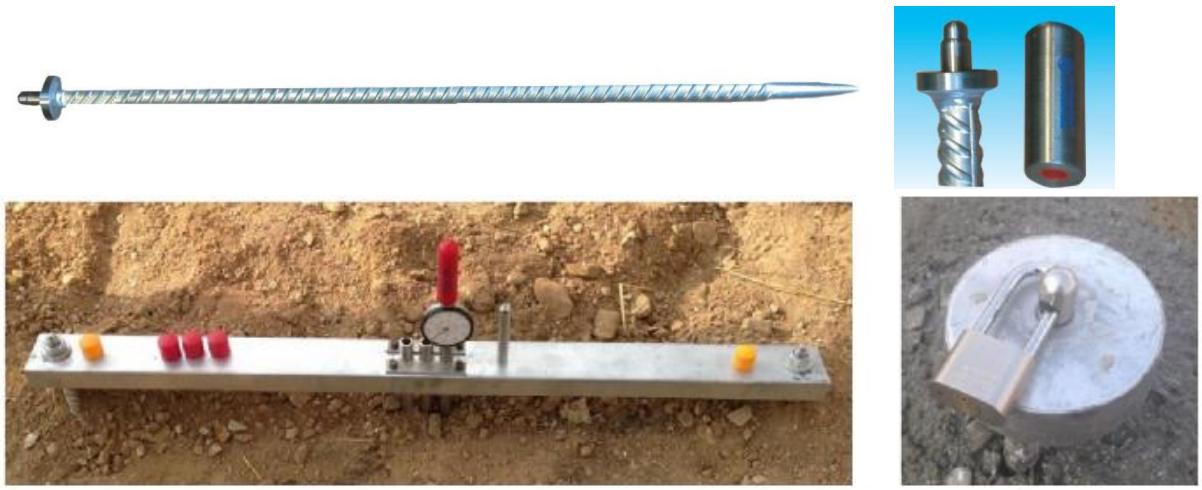
جدول ۱. برنامه قرائت پیشنهادی

فاصله از سینه کار (L)	برنامه قرائت	
	در شرایط عادی	در شرایط غیر عادی
L>-3D	هر دو هفته یکبار	—
-۳□□□□-۱D	هفته‌ای دو بار	یک روز در میان
+۲□□□ و □□□۱-	روزانه	روزانه و حتی روزی دو بار
+۳□□□□+۲□	هفته‌ای دو بار	روزانه
L>+3D	هر دو هفته یکبار	در صورتیکه تغییرات بیشتر از ۰/۰۱ میلی‌متر در روز باشد بصورت روزانه تا هفتگی

۲،۳. پین نشست سنجی

پین‌های نشست سنجی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که سطح تماس آنها با میر نقشه برداری دائماً به صورت نقطه‌ای باشد. این پین‌ها به کمک قطعه کمکی و ضربات چکش وارد زمین می‌شوند و سطح کره‌ای استیل آن در بالا و در سطح زمین به گونه‌ای قرار می‌گیرد که در زمان برداشت، میر نقشه برداری روی آن قرار داده می‌شود، پس از اتمام کار برای جلوگیری از آسیب دیدگی سطح کره‌ای پین، درپوش آن بسته می‌شود.

در هر مقطع رفتارنگاری ۱۴ عدد از این پین‌ها به ترتیب از، شمال به جنوب بر روی دو تونل.و اطراف آنها نصب شده است فواصل بین مقاطع نشست سنجی ۲۰ متر تعیین شده بود. در این پروژه پین نشست‌سنجی بر روی کلگی اکستنسومترها تعبیه شد تا نشست هر یک از نقاط اکستنسومترها را بتوان دقیق‌تر محاسبه نمود (شکل ۱۰).

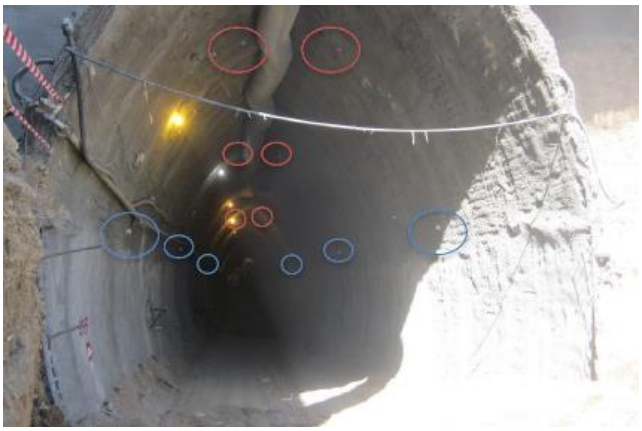


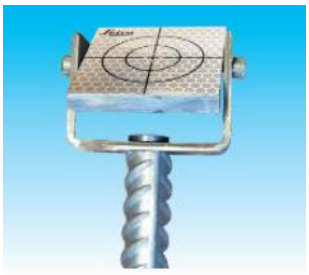
شکل ۱۰. پین نشست سنجی تعبیه شده بر روی کلگی

۳،۳. تارگت ژئودتیک

تارگت‌های استفاده شده در تونل حکیم نیز ساخت این شرکت بوده (شکل ۱۱) که به کمک میلگرد همراه آن در قمستهای تعیین شده از سقف یا دیواره تونل به کمک سوراخ کاری و دوغاب نصب می‌شد. پس از نصب، صفحه آلومینیومی تارگت در جهتی که می‌بایست قرائت گردد قرار گرفته و با پیچهای تعبیه شده ثابت می‌گردید. تارگتهای ساخت این شرکت به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در صورت آسیب دیدن قسمت فوقانی آن، امکان تعویض یا جایگزین کردن بدون تغییر موقعیت وجود دارد.

در هر مقطع رفتارنگاری ۹ عدد تارگت ژئودتیک بکار رفته است.





شکل ۱۱. تارگت‌های ژئودتیک استفاده شده در تونل حکیم

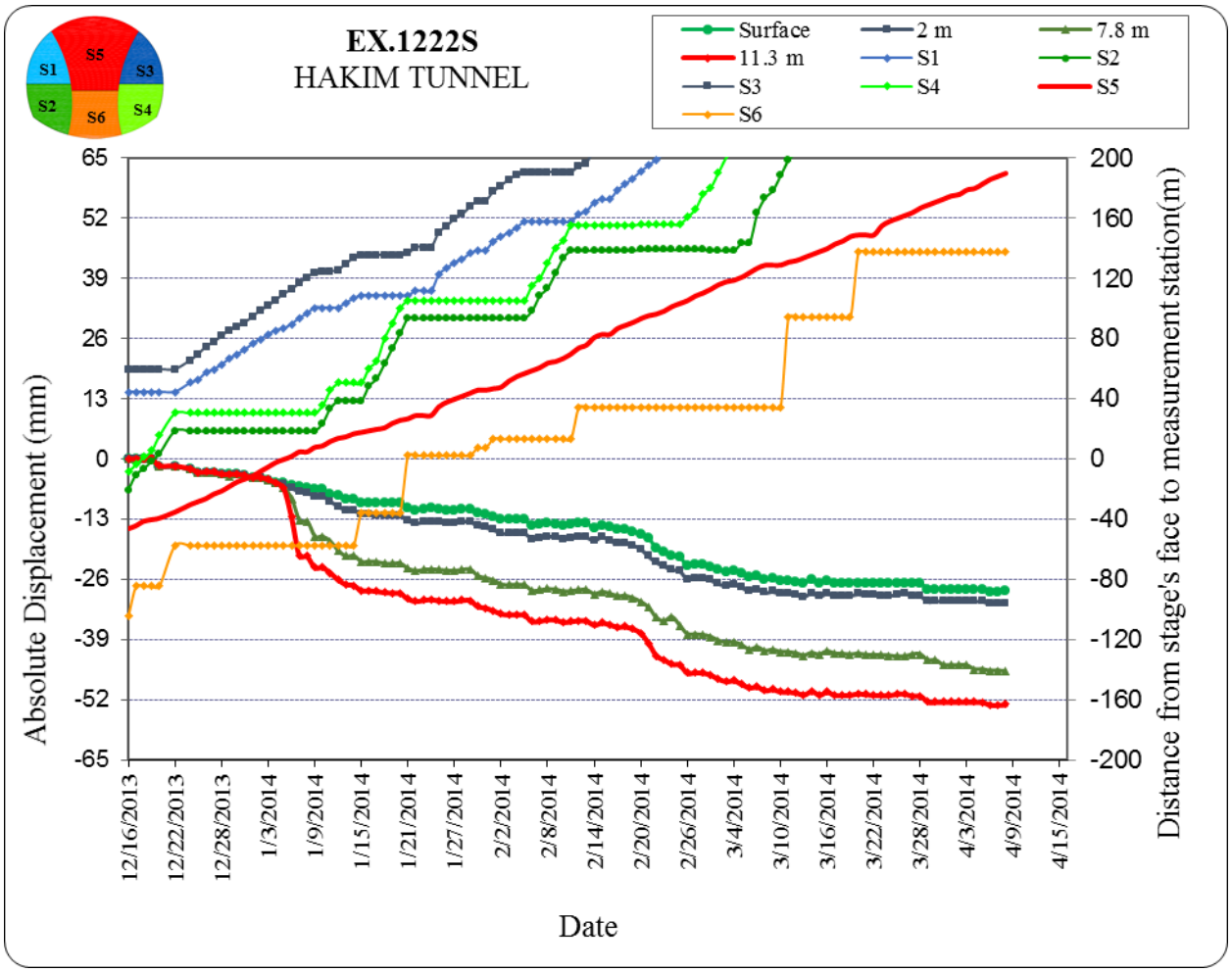
بعداز سوراخ کردن مکان مورد نظر، سوراخ با گروت پر می‌شود سپس تارگت ژئودتیک با فشار داخل گروت قرار می‌گیرد.

۴. نتایج بدست آمده

۱,۴ نتایج بدست آمده از اکستنسومترها و و پین نشست سنجی

نتایج بدست آمده از اکستنسومتر EX.1222S در حال قرائت به عنوان مثال، در شکل (۱۲) ارائه شده است که این نتایج مربوط به جابجایی‌های قائم زیر سطحی اندازه گیری شده از طریق ۳ راد جایگذاری شده در گمانه و نشست سطحی همراه با پیشرفت هر کدام از مراحل حفاری نسبت به زمان می باشد.

این اکستنسومتر چند روز قبل از اینکه رسیدن سینه کار به محل نصب، نصب شده بود که در نمودار شکل (۱۲) ارائه شده به وضوح اثر حفاری هریک از بخش های حفاری نشان داده شده است. همانگونه که نمودار نشان می‌دهد حفاری هر یک از بخش‌های کناری تونل سبب نشست مختصری می‌شود ولی همانگونه که ملاحظه می‌شود بیشرین نشست پس از حفاری قسمت تاج میانی تونل اتفاق افتاد که قابل انتظار هم بود و بعد از آن حفاری کف تونل در قسمت میانی و حذف لتیس های میاتی بیشترین اثر را در نشست توده سنگ روباره تونل داشت.



شکل ۱۲. نشست سطحی و جابجایی‌های قائم در EX.1553N

تمامی بخشهای حفاری مرحله‌ای (Stages of sequential excavation) بصورت اختصاری (S1,S2,S3,S4,S5,S6)، با رنگ مخصوص بخود و مقدار پیشرفتشان با زمان در نمودار زیر آمده است.

۵. نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای مهم در ابزاربندی و رفتارنگاری ژئوتکنیکی، استفاده از روش اجرای مناسب برای نصب ابزاردقیق می‌باشد که با توجه به شرایط هر پروژه متفاوت خواهد بود. این شرکت با توجه به شناخت این گونه پروژه‌ها و ابداع روش نصب مناسب برای اکستنسومترهای تونل حکیم توانسته نتایج بسیار ارزشمندی را از ابزاردقیق نصب شده اخذ و ارائه نماید. همانگونه که ملاحظه گردید با استفاده از روش اجرای نصب مناسب بکار رفته در این پروژه برای اکستنسومترهای درون گمانه‌ای، بخوبی رفتار و اثر هر مرحله از حفاری مذکور پایش گردید. نتایج بدست آمده از اکستنسومترها و پین نشست سنجی نشان می‌دهد که با پیشرفت هر مرحله از حفاری، نرخ و میزان جابجایی و بیشترین مقدار نشست سطحی و عمقی چه مقدار بوده است و همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مراحل حفاری و نگهداری در حین اجرای پروژه بخوبی انجام شده است.

منابع

[1] S. Divall, R.J. Goodey and R.N. Taylor, *"Ground movements generated by sequential twin-tunnelling in over-consolidated clay"*.

[2] Saeid Hesami, Saeid Ahmadi, Abbasali Taghavi Ghalesari, Ali Hasanzadeh, *"Ground Surface Settlement Prediction in Urban Areas due to Tunnel Excavation by the NATM"*, EJGE, Vol. 18,2013.

[3] Pietro Lunardi, *"DESIGN AND CONSTRUCTION OF TUNNELS(Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS))"*2006.

[4] AITES-ITA, Working group 2: Leca ,E. & New, B., *"SETTLEMENT INDUCED BY TUNNELLING IN SOFT GROUND"*, Tunnelling and Underground Space Technology(TUST) 2007,22,Nr.2, 119-149.

[5] Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil elements, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-NHI-09-010-March 2009.

[۶] گزارش ابزاردقیق تونل حکیم، شرکت نوآوران سراج ابزار.