

رفتار نگاری تونل گاوشان با استفاده از نتایج ابزار دقیق

مسعود پالاسی*^۱ و محمد حسین آرشی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۲ کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۰۵/۰۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۶/۰۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۶/۲۸)

چکیده

تونل انتقال آب گاوشان به طول ۲۰/۲۰ کیلومتر در ۳۸ کیلومتری جنوب شهرستان سنندج و در مجاورت جاده اصلی سنندج- کرمانشاه واقع شده است. مسیر تونل از لحاظ زمین‌شناسی از تنوع بالایی برخوردار است به طوری که در برگیرنده توده سنگ‌های با کیفیت مهندسی بالا تا توده سنگ‌های با کیفیت ضعیف می‌باشد. وضعیت حفاری تونل در هر یک از محدوده‌های زمین‌شناسی متفاوت بوده و از روش‌های حفاری مکانیزه تا روش‌های سنتی حفاری دستی را در بر می‌گیرد. از میان ابزار بکار رفته در تحلیل پایداری فضاهای زیر زمینی، همگرایی سنج‌ها به دلیل ویژگی‌های خاص کاربردی و هم چنین سهولت کاربرد و ارزانی، استفاده بیشتری دارند. در این تحقیق با استفاده از اطلاعات موجود و نتایج به دست آمده از مترهمگرایی سنجی و آنالیز ریاضی، نسبت تنش در محیط از آنالیز برگشتی محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: رفتارنگاری، ابزار دقیق، همگرایی، تونل گاوشان

مقدمه

سنجی با توجه به محدودیت‌های اجرایی کارهای زیرزمینی به گونه‌ای است که مقداری از همگرایی وابسته به سینه کار از دست می‌رود. در موقع تحلیل کرنش و آنالیز برگشتی باید به ترتیبی از میزان همگرایی کل آگاهی یابیم تا بتوانیم تحلیل درستی از پایداری یا ناپایداری مقطع حفاری شده ارائه دهیم. این کار توسط روش‌های عددی تا حدودی قابل انجام است. به هر حال بهترین و مطمئن ترین کار نصب ایستگاه در فاصله تا حد ممکن نزدیک به سینه کار و قرائت فواصل نقاط بلافاصله پس از حفاری است.

پس از اطمینان از میزان و دقت جا به جایی‌ها در نقاط مبناء به سراغ روش‌های آنالیز برگشتی می‌رویم. با استفاده از نرم افزارهای موجود این کار با دقت مناسبی صورت می‌پذیرد. در تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از آنالیز برگشتی از قضاوت مهندسی نباید غافل شد و تحلیل نتایج با توجه به جمیع جهات و در مقیاس زمین شناسی مناسب از محدوده طرح باید صورت پذیرد.

لزوم ارائه روش‌های دقیق آنالیز مقاطع حفاری شده در بررسی وضعیت نگهدارنده‌های موقت و طراحی نگهدارنده‌های دائم برای مقاطع زیرزمینی کاملاً مشهود است. با بهینه سازی نگهدارنده‌های موقت و به تعادل رساندن محیط پس از حفاری، دیگر نیازی به طراحی

بررسی پایداری سازه‌های زیرزمینی توسط ابزار دقیق یک روش مطمئن در تخمین پایداری آن می‌باشد. با توجه به هزینه اولیه کاربرد ابزار دقیق، همواره باید به دنبال روشی بود که با استفاده از کمترین ابزار بیشترین اطلاعات کسب گردد. یکی از ساده ترین و ارزان ترین ابزار دقیق مورد استفاده در کنترل سازه‌های زیرزمینی مترهای همگرایی سنجی هستند. نکته اساسی در کاربرد مترهای همگرایی سنجی انتخاب تعداد مناسب و نصب صحیح پین‌های همگرایی سنجی است تا بتوان از یک ایستگاه همگرایی سنجی بیشترین اطلاعات را کسب نمود.

یکی از محدودیت‌های کاربرد مترهای همگرایی سنجی آن است که نمی‌توان از این ابزار به جا به جایی مطلق پین‌ها پی‌برد و نیاز به یک ابزار کمکی مانند اکستنسومتر وجود دارد. اهمیت یافتن جا به جایی مطلق نقاط مبنا در تحلیل کرنش و مقایسه کرنش موجود با کرنش حدی توده سنگ می‌باشد. همچنین مکان نصب پین‌ها و فاصله ایستگاه همگرایی سنجی از سینه کار و زمان قرائت فواصل پین‌ها بلافاصله پس از حفاری سینه کار، اهمیت به سزایی دارد. چرا که تابع همگرایی سنجی یک تابع دو متغیره بوده که هم به گذشت زمان و هم به فاصله از سینه کار بستگی مستقیم دارد. معمولاً ترتیب نصب ایستگاه‌های همگرایی

پوشش‌های دائمی پر هزینه نخواهد بود و صرفاً با توجه به کاربری سازه اقدام به اعمال نگهدارنده دائمی صورت خواهد گرفت و این امر در صرف جویی هزینه طرح‌های عمرانی و معدنی بزرگ کاملاً قابل توجه و مفید خواهد بود.

روش حفاری

حفاری تونل انتقال و تونل‌های دسترسی آن به روش‌های مختلفی، با استفاده از دستگاه‌های TBM و رودهدر Roadheader و در برخی از جبهه‌های کاری به روش انفجاری انجام گرفته است.

تونل‌های دسترسی

چهار تونل دسترسی بنام‌های توانکش، هلتوشان، کچله و سربناو در طول مسیر اصلی تونل حفر شده‌اند.

تحلیل اطلاعات همگرایی سنجی

در این بخش به بررسی و تحلیل نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در تونل پرداخته می‌شود. بررسی‌های این بخش با دو هدف زیر انجام شده است.

۱- مقایسه میزان همگرایی در مقاطع مختلف در طول تونل و بررسی ارتباط میزان همگرایی با شرایط ژئو تکنیکی زمین.

۲- مقایسه میزان همگرایی اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی.

با توجه به اهداف فوق، اولین گام در بررسی نتایج اندازه‌گیری، اصلاح و یک دست کردن نتایج و حذف داده‌های ناهنجار می‌باشد به این منظور اصلاحاتی به شرح زیر در داده‌های همگرایی انجام شده است.

۱- حذف یا اصلاح داده‌های ناهنجار.

۲- تصحیح نتایج همگرایی بر اساس فاصله اولین قرائت.

همانگونه که در جدول شماره ۱ آورده شده به علت مشکلات اجرایی و تداخل عملیات حفاری، قرائت اول همگرایی با تاخیر و در فواصل بیشتری از سینه کار انجام شده است. جهت اصلاح تاثیر فاصله جبهه کار از مقطع اندازه‌گیری در هنگام اولین قرائت، منحنی همگرایی سنجی در هر مقطع برای فاصله از سینه کار برون‌یابی شده است. نکته‌ای که در همگرایی سنجی دارای اهمیت است ایجاد ایستگاه‌ها بلافاصله پس از حفاری سینه کار و تا حد ممکن نزدیک به سینه کار، می‌باشد. این کار باعث

موقعیت و هدف طرح ملی گاوشان

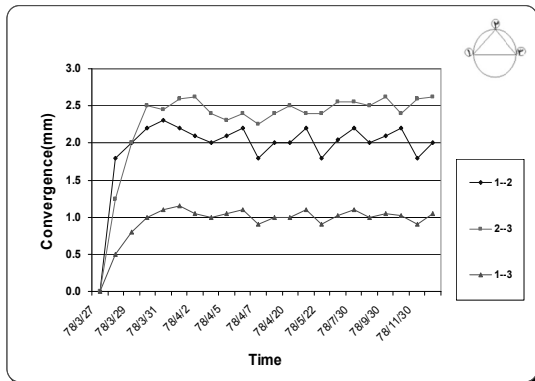
پروژه گاوشان یکی از ۳۵ طرح پیشنهادی طرح جامع سیروان بزرگ می‌باشد. هدف از اجرای طرح، انتقال آب از حوزه رودخانه سیروان به حوزه سر شاخه‌های رودخانه کرخه و تأمین آب ۳۱۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی دشت‌های میان دربند و بيله وار و همچنین تأمین آب شرب شهرستان کرمانشاه به میزان ۶۰ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. موقعیت جغرافیایی طرح در ۳۸ کیلومتری جنوب شهرستان سنندج و در مسیر جاده سنندج- کرمانشاه است. طرح شامل یک سد خاکی با هسته رسی به ارتفاع ۱۳۶ متر از سنگ بستر و تونل انتقال آب به طول ۲۰/۲۰ کیلومتر و یک نیروگاه ۱۲ مگاواتی می‌باشد [۱].

سنگ شناسی و زمین ساخت منطقه [۱]

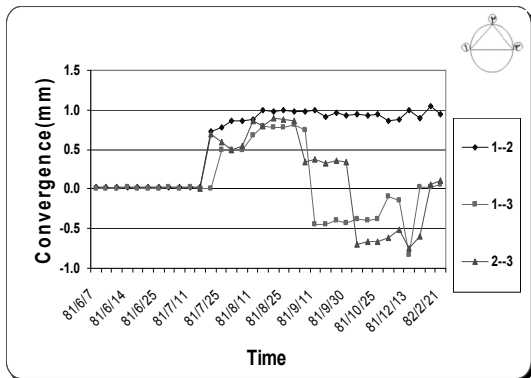
مسیر تونل انتقال آب گاوشان در یک دید کلی توسط گسل مروارید (در کیلومتر ۸+۳۸۹) به دو نیمه شمالی - جنوبی با مشخصات متفاوت تقسیم شده است. نیمه شمالی بطور عمده از سنگهای رسوبی کمی دگرگون شده، تشکیل یافته است که به رخساره فلیش تعلق دارند. نیمه جنوبی از سنگهای آذرینی نظیر دیاباز، گابرو، دیوریت، آندزیت، اولترابازیک‌ها (بطور عمده سرپانتینی) و اسپیلیت و بازالت‌ها تشکیل یافته که بدون حفظ هیچ گونه تناوب خاصی بیانگر بقایای پوسته اقیانوسی (زون افیولیت ملانژ) می‌باشند. بنابراین سنگهای ضعیف، سست و متورق در نیمه شمالی و سنگ‌های مقاوم و با کیفیت خوب (بجز در محدوده گسل‌ها و زون‌های خرد شده) در نیمه جنوبی مسیر تونل جا گرفته‌اند. تنوع لیتولوژیکی، نا پیوستگی و کنتاکت‌های متعدد لیتولوژی از مشخصات بارز مسیر تونل انتقال آب گاوشان می‌باشد.

مهمترین گسل‌های مسیر تونل از طرف دهانه ورودی به طرف دهانه خروجی تونل عبارتند از:

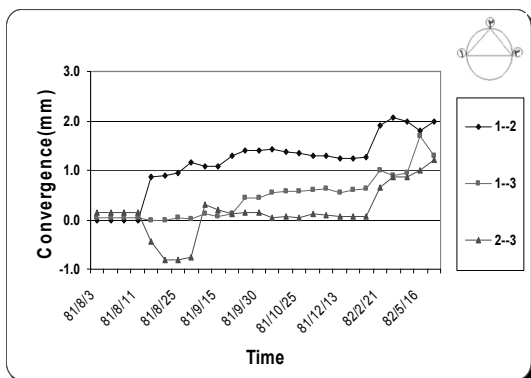
تونل دسترسی توانکش و دهانه خروجی تونل گاوشان می‌باشند.



شکل (۲): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CID2



شکل (۳): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CKU1



شکل (۴): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CSU1

می‌شود که هم جابجایی وابسته به زمان و هم جابجایی وابسته به فاصله از سینه کاربرد داشت شود زیرا تابع همگرایی یک تابع دو پارامتری بشکل زیر است [۲].

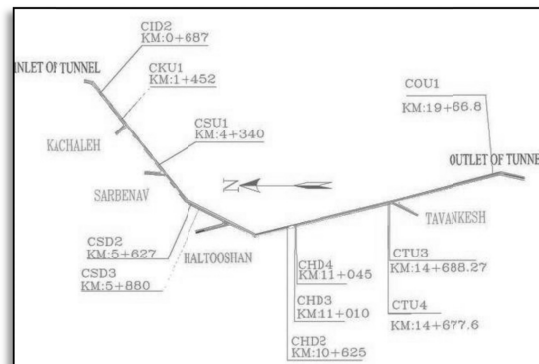
$$C_t = F(X) + G(T) \quad (1)$$

در این رابطه C_t تابع همگرایی کل و $f(x)$ تابع فاصله از سینه کار و $g(t)$ تابع وابسته به گذشت زمان از لحظه شروع برداشت (تابع خزشی) می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات ایستگاه‌های همگرایی سنجی تونل

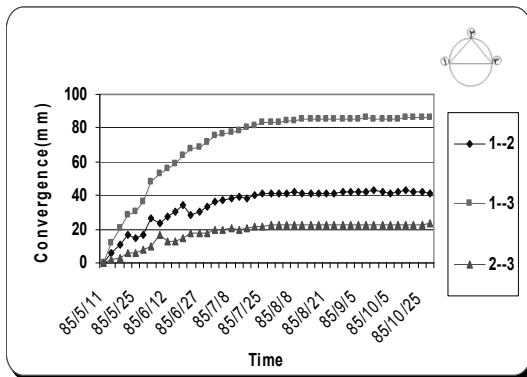
| کارگاه | ایستگاه | کیلومتر از | جنس سنگ | فاصله از سینه کار (m) |
|---------|---------|------------|----------|-----------------------|
| ورودی | CID2 | 0+687 | شیل | 16 |
| کچله | CKU1 | 1+452 | شیل | 68 |
| | CSU1 | 4+340 | شیل | 47 |
| سربناو | CSD2 | 5+627 | اسپیلیت | 21 |
| | CSD3 | 5+880 | بازالت | 29 |
| توانکش | CTU3 | 14+688 | سریانتین | 21 |
| | CTU4 | 14+677 | | 10 |
| هلتوشان | CHD2 | 10+625 | آمفییلیت | 10 |
| | CHD3 | 11+010 | گابرو | 3.5 |
| | CHD4 | 11+045 | گابرو | 5 |
| خروجی | COU1 | 19+066 | دیاباز | 21 |

پروفیل طولی ایستگاه‌های همگرایی سنجی تونل گاوشان در شکل شماره ۱ آورده شده است.

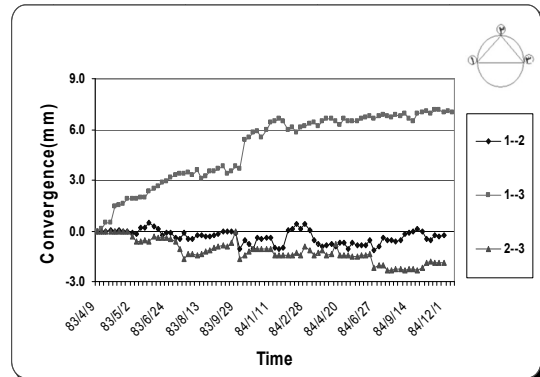


شکل (۱): پروفیل طولی ایستگاه‌های همگرایی سنجی تونل

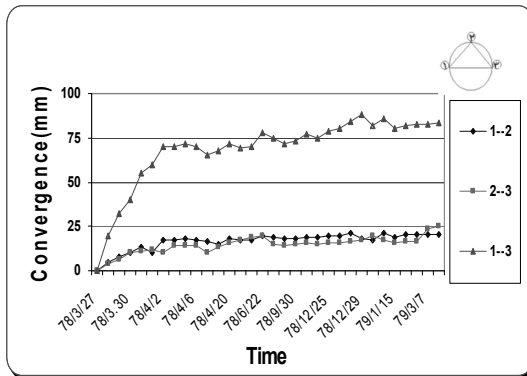
اشکال (۲) تا (۱۲) به ترتیب مربوط به منحنی‌های اطلاعات همگرایی ایستگاه‌های واقع در دهانه ورودی، بالادست تونل دسترسی کچله، محدوده تونل دسترسی



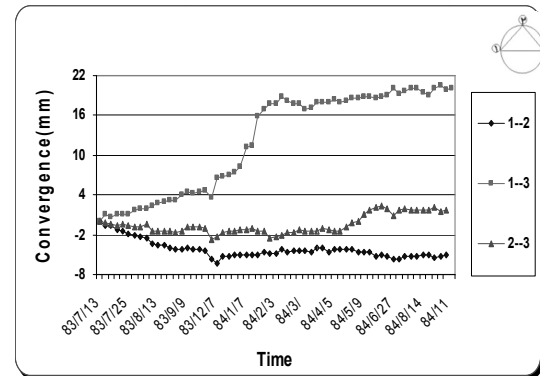
شکل (۹): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CHD4



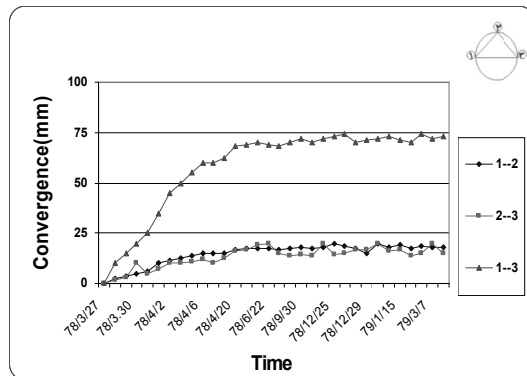
شکل (۵): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CSD2



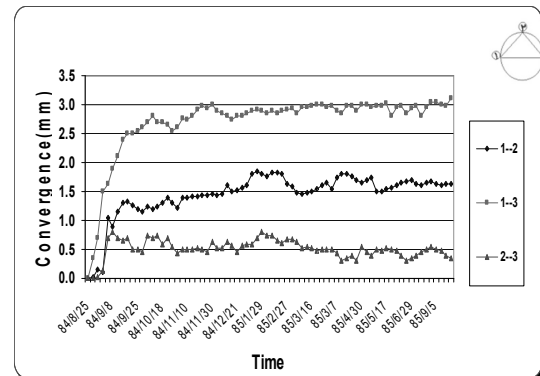
شکل (۱۰): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CTU3



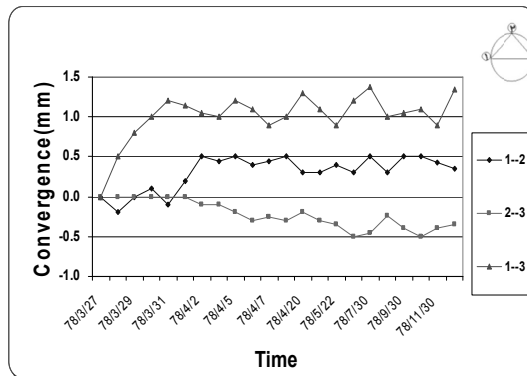
شکل (۶): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CSD3



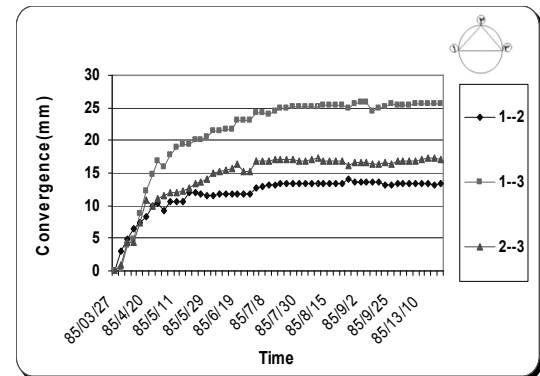
شکل (۱۱): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CTU4



شکل (۷): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CHD2



شکل (۱۲): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه COU1



شکل (۸): منحنی همگرایی سنجی تونل در ایستگاه CHD3

صحت نتیجه‌گیری فوق با استفاده از نتایج مدل عددی نیز تایید شده که در ادامه آمده است.

تخمین میزان همگرایی کل (T)

شروع اندازه‌گیری همگرایی بلافاصله پس از حفر سینه کار، اهمیت بالائی دارد. جهت استفاده از اطلاعات حاصل از همگرایی سنجی در تحلیل ریاضی، نیاز است که میزان همگرایی کل بنحوی مشخص شود. لازم به ذکر است در هیچ یک از ایستگاه‌های همگرایی سنجی موجود در تونل گاوشان تا این زمان، اصل مهم فوق رعایت نشده است. از رابطه زیر مقدار همگرایی کل (T) تخمین زده می‌شود: [۲]

$$T = \frac{R(0.3T)}{2} + R(0.3T) \quad (2)$$

برای محاسبه R یک مدل طولی به طول دو برابر فاصله ایستگاه در اولین قرائت از سینه کار و به ارتفاع تونل می‌سازیم. پس از تعادل مدل، نسبت میزان جابجائی نقطه در فاصله مورد نظر نسبت به نقطه رأس سینه کار که R نامیده می‌شود بدست می‌آید. عدد T بدست آمده با نتایج حاصل از برنامه Plaxis تحت نسبت تنش‌های مختلف، مقایسه شده و نسبت تنش واقعی در منطقه بدست می‌آید. همگرایی کل به روش فوق برای همه ایستگاه‌های موجود در طول تونل در جدول شماره ۲ محاسبه شده و جزییات آن به عنوان نمونه برای ایستگاه CID2 در ادامه آورده شده است.

یک شبکه المان محدود به ابعاد ۱۰۰×۷۰ متر مربع ساخته می‌شود. ابعاد بخش حفاری در این مدل عبارت است از، ۳۲ متر طول، ۶ متر ارتفاع که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مدل محاسباتی، مدل سنگ درزه دار (JR) می‌باشد. در این حالت شرایط مدل سازی همان‌طور که قبلاً شرح داده شد، برآورده می‌گردد. پس از به تعادل رساندن مدل میزان جابه‌جایی در گره رأس در سینه کار (گره شماره ۵۴۵) عبارت است از:

$$Y_d = 2.65mm$$

میزان جابه‌جایی در محل پین همگرایی سنجی در فاصله ۱۶ متری سینه کار (گره شماره ۷۰۰) برابر است با:

$$Y_d = 5.86mm$$

نکات ذیل در بررسی مقدماتی از اشکال فوق قابل استنباط می‌باشند.

۱- از این اشکال در مناطقی که همگرایی کل به میزان ثابتی رسیده باشد می‌توان پی به پایداری مناطق مذکور برد [۳]. این امر بیان‌گر آن است که سیستم به کار رفته جهت پایداری سازی کافی بوده است.

۲- همان‌طور که از شکل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود در دو ایستگاه CSU1 و CKU1 با توجه به فاصله خیلی زیاد در اولین قرائت از سینه کار مشاهده می‌شود که همگرایی و تغییر شکل خیلی کم بوده و این بدان معناست که تقریباً همه تغییر شکل و همگرایی در فاصله قبل از اولین قرائت حاصل شده، در نتیجه نمی‌توان از نتایج همگرایی در این دو ایستگاه در تحلیل پایداری تونل استفاده کرد.

۳- در اشکال ۵ و ۶ تغییرات ناگهانی در همگرایی ضلع ۳-۱ مشاهده می‌شود که علت آن با توجه به گزارشات ابزار دقیق، کفبرداری تونل بوده است که این افزایش ناگهانی در حین کفبرداری نشان‌گر بیشتر بودن تنش افقی نسبت به تنش قائم می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که این افزایش ادامه داشته تا این‌که با اتمام حفاری تقریباً نرخ همگرایی به صفر رسیده است.

۴- نکته دیگری که از منحنی‌های همگرایی سنجی نتیجه می‌شود میزان اهمیت تنش جانبی است که این موضوع توسط میزان همگرایی به‌دست آمده در ضلع ۳-۱ ایستگاه‌های همگرایی سنجیده نشان داده شده است. اگر به پلان موقعیت تونل شکل ۱ توجه شود امتداد محور تونل در بخش ورودی و محدوده تونل‌های دسترسی کچله و سربناو نسبت به بخش تونل خروجی حدود ۱۳۰ درجه دوران دارد که این امر می‌تواند نسبت تنش‌ها در طول تونل را عوض نماید. منحنی‌های همگرایی سنجی در ایستگاه‌های CHD2, CHD3, CHD4, CTU3, CTU4 و COU1 همگی بیان‌گر بیشتر بودن تنش افقی نسبت به تنش قائم هستند. تمامی این ایستگاه‌ها در یک امتداد و تقریباً در امتداد محور خروجی تونل قرار دارند.

به‌عنوان نتیجه‌گیری از این بحث می‌توان گفت که در محدوده پایین دست تونل دسترسی هلتوشان، بالادست تونل دسترسی توانکش، و دهانه خروجی $K > 1$ (نسبت تنش افقی به قائم) و در محدوده اطراف تونل‌های دسترسی کچله، سربناو و تونل ورودی $K < 1$ پیش‌بینی می‌شود.

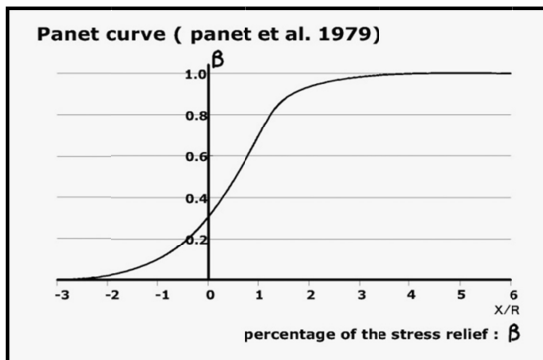
نکات ذیل از جدول (۲) قابل استنباط می‌باشد:

۱- مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از سینه کار در اولین قرائت، خطا در همگرایی کل افزایش می‌یابد.

۲- دقت شود آنالیز عددی بخش حفاری از دهانه توانکش بسیار مشکل است زیرا مدل ریاضی نمی‌تواند منطبق با واقعیت اجرا شده طراحی گردد، در نتیجه مقدار $R > 5$ بوده و نمی‌توان از رابطه ۲ در محاسبه همگرایی کل استفاده کرد. در نتیجه با توجه به فاصله ایستگاه همگرایی سنجی از سینه کار در اولین قرائت و میزان همگرایی کل برداشت شده، می‌توان فرض ۵۰٪ برداشت همگرایی نسبت به همگرایی کل را پذیرفت. این فرض با توجه به مدت زمان کوتاه اعمال نگهداری سنگین در این ایستگاه می‌تواند محافظه کارانه نیز باشد.

منحنی پانه

در این تحقیق مدلسازی عددی توسط نرم افزار دو بعدی (کرنش مسطح) انجام شده است در حالیکه مساله حفاری و پوشش تونل یک مساله سه بعدی است و بعد سوم یعنی بعد پیشروی کار نیز تاثیر اساسی در تحلیل دارا می‌باشد که در حالت دو بعدی (کرنش مسطح) بایستی اثر آن را منظور کرد [۲]. پانه (۱۹۷۹) راه حلی برای این مساله پیشنهاد کرده است. وی فاصله تا سینه کار را با استفاده از ضریبی به درصد ترخیص تنش ارتباط داده است و بنابراین طبق روابط وی در ازای یک فاصله مشخص تا سینه کار می‌توان درصد ترخیص تنش را تعیین نمود. در مدل سازی عددی مقطع تونل توسط نرم افزار Plaxis با توجه به منحنی پانه در شکل شماره ۱۷ اثر سه بعدی پیشروی سینه کار در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۴): منحنی پانه (۱۹۷۹)

$$R = \frac{5.86}{2.65} = 2.21$$

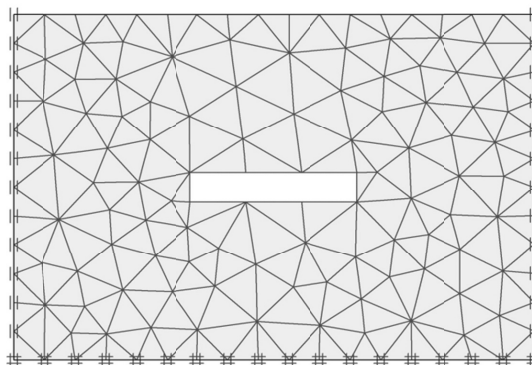
بنابراین نسبت R برابر با ۲.۲۱ خواهد بود. لازم به ذکر است که تنش اعمالی به مدل به صورت هیدرواستاتیک بوده است. اگر تنش به صورت غیرهیدرواستاتیک نیز به مدل اعمال شود، میزان R نزدیک به عدد ۲ محاسبه می‌گردد. لذا $R=2.21$ قابل قبول خواهد بود. بنابراین میزان جابه‌جایی کل در این مقطع مطابق رابطه ۲ عبارت است از:

$$T = \frac{1.05}{2} + 2.21(0/3T)$$

در نتیجه T برابر است با:

$$T = 1.56mm$$

با توجه به تقارن مقطع حفاری و میزان همگرایی برداشت شده در این مقطع، این مقدار بیان‌گر این موضوع است که حدوداً ۳۲٪ میزان همگرایی تا زمان برداشت اولین قرائت رخ داده است.



شکل (۱۳): مدل طولی دهانه ورودی تونل در محل ایستگاه CID2 جهت تخمین همگرایی کل

جدول (۲): تخمین همگرایی کل با احتساب تاخیر قرائت با فاصله از سینه کار

| خطا % | همگرایی کل (mm) | R | همگرایی قرائت شده (mm) | فاصله از سینه کار (m) | ایستگاه |
|-------|-----------------|------|------------------------|-----------------------|---------|
| 32 | 1.56 | 2.21 | 1.05 | 16 | CID2 |
| 40 | 42.01 | 2.52 | 20.5 | 29 | CSD3 |
| 50 | 166 | 1.92 | 83 | 21 | CHD2 |
| 50 | 144 | 1.81 | 72 | 10 | CHD3 |
| 15 | 3.65 | 1.84 | 3.10 | 10 | CHD4 |
| 9 | 28.33 | >5 | 25.9 | 3.5 | CTU3 |
| 12 | 98.45 | >5 | 86 | 5 | CTU4 |
| 48 | 2.41 | 2.47 | 1.25 | 21 | COU1 |

لازم به ذکر است برای هر ایستگاه، منحنی پانه با منحنی حاصل از نتایج همگرایی سنجی و منحنی بدست آمده از مدل عددی مقایسه و نتیجه گیری شده است.

مدل سازی عددی توسط نرم افزار Plaxis

جهت مدلسازی عددی از نرم افزار 8.2 Plaxis با مدل محاسباتی سنگ درزه دار (JR)، و المانهای مثلثی ۶ گرهی در حالت کرنش مسطح استفاده شده است [۵]. با توجه به اینکه محدوده تونل گاووشان درزون گسل سنندج-سیرجان واقع شده است و همچنین مباحث شرح داده شده در بالا و اطلاعات همگرایی سنجی موجود، تعیین میزان نسبت تنش افقی به تنش قائم (K) اهمیت دارد. لذا آنالیز برگشتی جهت تعیین میزان K از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در ادامه، مراحل مدل سازی دهانه ورودی تونل در ایستگاه CID2 آورده شده است. در این محدوده تونل داخل توده سنگ های شیل قرار دارد. نگه داری در این مقطع عبارت از ۲۰ سانتی متر شاتکریت و ۵ عدد راکبوت در شبکه ۱.۵ متر طولی و ۲ متر عرضی از فولاد با مقاومت کششی 3000 kg/cm^2 می باشد. روبراه در محل ایستگاه ۲۰۰ متر است. اطلاعات موجود توده سنگ محل حفاری جهت مدل سازی این بخش از تونل به شرح جدول ۴ می باشد.

جهت مدل سازی دهانه ورودی تونل گاووشان در محل ایستگاه CID2 توسط برنامه Plaxis، یک شبکه محاسباتی المان محدوده ایجاد می نمائیم. ابعاد شبکه در مقیاس واقعی $100\text{m} \times 70\text{m}$ منظور می گردد، بنابراین فواصل مناسب از اطراف تونل جهت طبیعی شدن شرایط تنش محیط در کناره های مدل در نظر گرفته شده است (شکل شماره ۱۶).

جدول (۴): پارامترهای مورد نیاز در مدل سازی ایستگاه CID2

| σ_c (MPa) | RMR | C_m (MPa) | ϕ_m (درجه) |
|--------------------------------|-------|----------------|-------------------------------|
| 42 | 41 | 0.1 | 28 |
| γ (t/m^3) | ν | E_m (GPa) | زوایای دسته درزه ها (درجه) |
| 2.72 | 0.2 | 4 | 204/86 088/69 |

به منظور بدست آوردن منحنی فوق برای تونل موجود، دو حالت بررسی می گردد.

۱- بدست آوردن منحنی فوق با استفاده از روابط ارائه شده توسط پانه

۲- بدست آوردن منحنی فوق با استفاده از مدل سازی

طبق روابط ارائه شده توسط پانه تغییر مکان شعاعی (Ur) با فاصله تا سینه کار (Y) به صورت زیر رابطه دارند [۴]:

$$Ur = C_0 + C_1 \{1 - \exp(-\frac{Y}{0.7R})\} \quad Y \geq R$$

$$Ur = C_0 - C_1 \{1 - \exp(-\frac{Y}{0.7R})\} \quad Y \leq R$$

$$C_0 = -\frac{\sigma_0 R}{2G} h_0$$

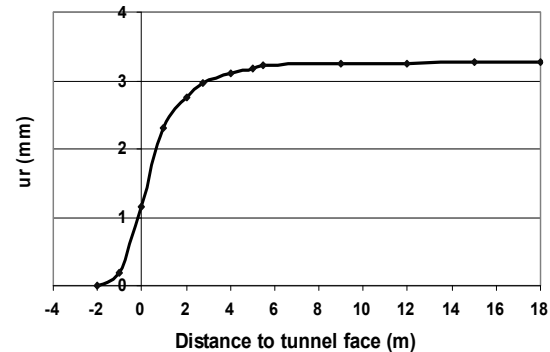
$$C_1 = -\frac{\sigma_0 R}{2G} (1 - h_0)$$

در رابطه فوق، R (شعاع مقطع حفاری)، σ_0 (تنش در جای هیدروستاتیک)، G (مدول برشی خاک)، Y (فاصله تا سینه کار) و h_0 برابر $1/3$ می باشد.

جدول (۳): پارامترهای مورد استفاده روابط پانه در ایستگاه

| CID2 | | | | | |
|--------|------|------------|-------|-------|-------|
| روباره | شعاع | σ_0 | E | C_1 | C_0 |
| m | m | (MPa) | (GPa) | | |
| 200 | 2.7 | 5.68 | 4 | 3.06 | 1.53 |

در شکل ۱۵ منحنی پانه برای دهانه ورودی تونل در ایستگاه CID2 با توجه به پارامترهای جدول ۳ رسم شده است.

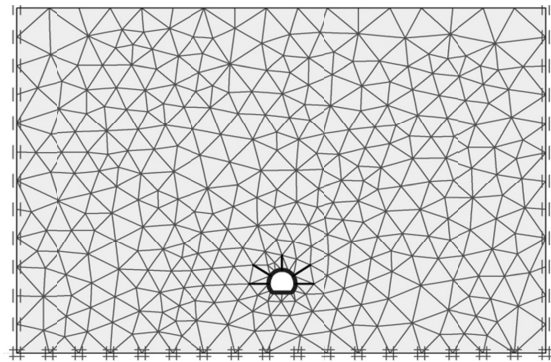


شکل (۱۵): منحنی پانه با توجه به روابط پانه (۱۹۷۹) - CID2

فشار جانبی محیط تخمین زده شده است. از این شکل با ۱.۴٪ خطا مقدار $K = 0.9$ قابل قبول می‌باشد.

جدول (۵): اطلاعات حاصل از آنالیز برگشتی K در CID2

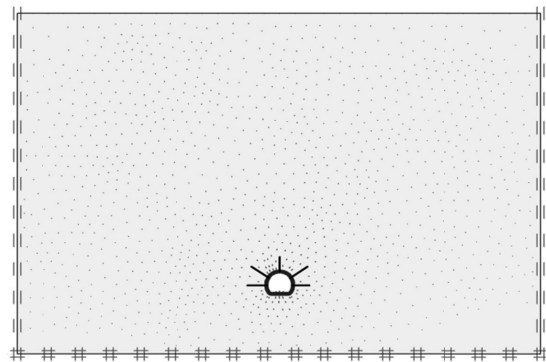
| K | بین شماره ۱ | | بین شماره ۳ | | جابجایی افقی |
|-----|-------------|------------|-------------|------------|--------------|
| | X_d (mm) | Y_d (mm) | X_d (mm) | Y_d (mm) | |
| 0.7 | 0.53 | -0.035 | -0.49 | -0.031 | 1.02 |
| 0.8 | 0.63 | -0.050 | -0.57 | -0.039 | 1.20 |
| 0.9 | 0.83 | -0.055 | -0.74 | -0.039 | 1.57 |
| 1.0 | 0.90 | -0.072 | -0.86 | -0.048 | 1.76 |
| 1.1 | 1.07 | -0.085 | -1.04 | -0.068 | 2.09 |
| 1.2 | 1.21 | -0.081 | -1.17 | -0.090 | 2.38 |



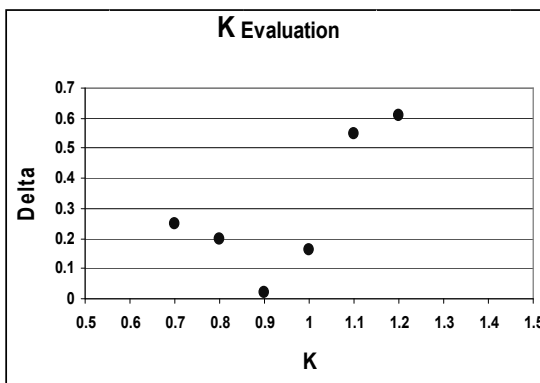
شکل (۱۶): مدل سازی دهانه ورودی تونل در ایستگاه CID2

دقت شود همانطور که قبلاً گفته شد اثر پیشروی سینه کار به صورت ضریب درصد ترخیص تنش با فاصله از سینه کار با توجه به منحنی پانه به نرم افزار داده شده است. پس از به تعادل رساندن مدل (تعادل اولیه)، تونل حفاری شده و شرایط K از ۰.۸ تا ۱.۸ به شرح گفته شده در قبل به مدل اعمال می‌شود و نتایج هر مرحله در فایل مجزا ذخیره می‌گردد. سپس نتایج حاصل از جابجایی با نتایج همگرایی سنجی مقایسه می‌شود و میزان K محیط تخمین زده می‌شود.

در شکل ۱۶ و ۱۷ مدل هندسی ایجاد شده توسط Plaxis و بردارهای جابه‌جایی در محدوده جداره تونل پس از آنالیز آمده است.



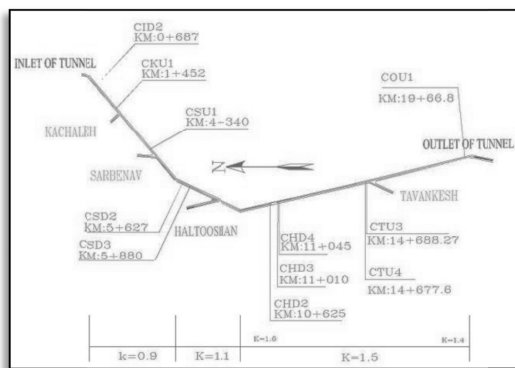
شکل (۱۷): وضعیت تغییر مکان نقاط در ایستگاه CID2



شکل (۱۸): ارزیابی K در مقابل خطای حاصل از اختلاف همگرایی قرائت شده و همگرایی نتیجه شده از مدل عددی

در ادامه منحنی همگرایی قرائت شده توسط ابزار دقیق در ایستگاه CID2 پس از اصلاح داده‌های ناهنجار و تاثیر فاصله اولین قرائت از سینه کار در اشکال ۱۹ و ۲۰، در مقایسه با منحنی‌های منتج از آنالیز برگشتی و روابط پانه آمده است. از مقایسه اشکال ذیل مشاهده می‌شود نتایج مدل عددی حاصل از آنالیز برگشتی در $K = 0.9$ با همگرایی کل قرائت شده از ابزار دقیق برابر می‌باشد. هم‌چنین از شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که همگرایی با فاصله از سینه کار به عدد ثابتی رسیده است که این امر نشان از پایداری توده اطراف تونل با پوشش موجود می‌باشد.

نتایج حاصل از آنالیز برگشتی در مدل سازی عددی با مقادیر مختلف K در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که در جدول مزبور ذکر شده، میزان جابه‌جایی در راستای محور y نقاط بسیار کوچک بوده و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. هم‌چنین در شکل ۱۸ ارزیابی مقدار K در مقابل میزان خطای حاصل از تفاضل همگرایی قرائت شده و همگرایی نتیجه شده از مدل عددی ترسیم، و میزان ضریب



شکل (۲۱): تغییرات ضریب فشار جانبی خاک در طول تونل

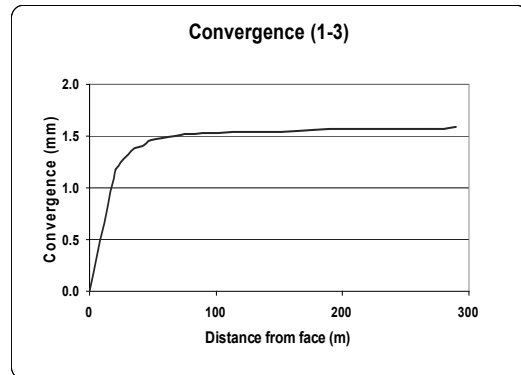
نتیجه‌گیری

با توجه به مجموعه عوامل بررسی شده به عنوان نتیجه‌گیری می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- حداقل ابزار دقیق مورد استفاده جهت کنترل مقاطع زیر زمینی متر همگرایی سنجی است. اما خاطر نشان می‌گردد که کاربرد این ابزار به گونه‌ای که بتوان بیشترین مطمئن‌ترین اطلاعات را از آن کسب نمود حائز اهمیت بسیار است. اولین قرائت با فاصله زمانی کوتاه پس از حفر سینه کار و در نزدیک‌ترین فاصله به آن اهمیت زیادی در تجزیه و تحلیل اطلاعات خواهد داشت. توام نمودن استفاده از مترهمگرایی سنجی و اکستنسومتر ایده آل بوده و نتایج حاصل از دقت خوبی برخوردارند.
- ۲- توجه به منحنی‌های همگرایی سنجی در مقایسه با نتایج آنالیز برگشتی ایستگاه‌های موجود در تونل گاوشان شامل نکات ذیل می‌باشد.

از این اشکال در مناطقی که همگرایی به میزان ثابتی رسیده باشد می‌توان پی به پایداری مناطق مذکور برد. این امر بیان‌گر آن است که نگهداری به کار رفته جهت پایداری کافی بوده است.

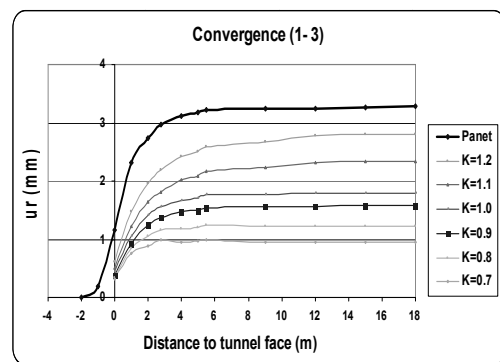
منحنی‌های همگرایی سنجی در ایستگاه‌های CSD2، CSD3، CHD2، CHD3، CHD4، CTU3 و CTU4 همگی بیان‌گر بیشتر بودن تنش افقی نسبت به تنش قائم هستند. تمامی این ایستگاه‌ها در یک امتداد و تقریباً در امتداد محور خروجی تونل قرار دارند. در نتیجه می‌توان گفت نسبت تنش افقی به قائم در بخش خروجی تونل و محدوده حفاری شده از تونل دسترسی سربناو، هلتوشان و توانکش بزرگ‌تر از یک بوده و در بخش ورودی تونل این نسبت کوچکتر از یک می‌باشد.



شکل (۱۹): منحنی قرائت همگرایی پس از اصلاح با احتساب همگرایی کل

تغییرات ضریب فشار جانبی K در طول تونل

مانند آنچه در مورد ایستگاه CID2 آورده شد در مورد سایر ایستگاه‌ها نیز انجام شد که با توجه به نتایج آنالیز برگشتی تغییرات ضریب فشار جانبی به شرح جدول ۶ می‌باشد.



شکل (۲۰): منحنی پانه در مقایسه با منحنی همگرایی ناشی از مدل عددی در ایستگاه CID2

جدول (۶): تغییرات ضریب فشار جانبی K در طول تونل

| K | کیلومتر از | ایستگاه | محدوده |
|-----|------------|---------|---------|
| 0.9 | 0+687 | CID2 | ورودی |
| 1.1 | 5+627 | CSD2 | سربناو |
| 1.1 | 5+880 | CSD3 | |
| 1.6 | 10+625 | CHD2 | هلتوشان |
| 1.6 | 11+010 | CHD3 | |
| 1.6 | 11+045 | CHD4 | |
| 1.5 | 14+688 | CTU3 | توانکش |
| 1.5 | 14+677 | CTU4 | |
| 1.4 | 19+066 | COU1 | خروجی |

نتایج جدول فوق برای قسمت‌های مختلف تونل در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

مراجع

1. Mahab Ghods Company (1997). *Geology Report of Gavoshan Tunnel*, Iran.
 2. Panet, M. (1979). "Time-dependent deformation in underground works". *Proc., 4th International Congress on Rock Mechanics*, Montreux, Switzerland, pp. 291-301.
 3. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden W.F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, Taylor & Francis, The Netherlands.
 4. Palassi, M. and Ghoreyshi, M. (2005). "Two dimensional modeling of multiple excavation of underground excavation using a finite difference method". *M.Sc. Thesis*, University of Tehran, Iran.
 5. Plaxis User's Manual (2007). *Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*.
-