

(مقاله پژوهشی)

مدل‌سازی هیدرومکانیک نشست تونل در محیط‌های شهری مطالعه موردی تونل مترو خط ۷ تهران

عابدین حجتی تواندشتی^۱، احمد رمضان‌زاده^{۱*}

۱- دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
(دریافت: تیر ۱۳۹۷، پذیرش: شهریور ۱۳۹۹)

چکیده

افزایش جمعیت و توسعه شهرها، نقش تونل به‌عنوان راه‌حلی مناسب جهت رفع نیازهای مختلف، بخصوص حمل‌ونقل و کاهش ترافیک سطح شهرها را برجسته‌تر می‌کند. کنترل و تخمین نشست یکی از مهم‌ترین چالش‌های حفر تونل در این مناطق است. به دلیل پیچیدگی‌های موجود در بررسی همه‌جانبه کنترل و تخمین نشست، اغلب این بررسی‌ها با ساده‌سازی‌های بسیاری همچون چشم‌پوشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی، عدم در نظر گرفتن پدیده‌های توأمان و ... همراه بوده است که تأثیر بسیار محسوسی بر نتایج حاصل از این بررسی‌ها داشته است. در زمان حفر تونل، فضای ایجادشده به‌عنوان یک کانال زهکشی عمل می‌کند. آب موجود در محیط به درون فضای حفرشده وارد می‌شود که این امر خود موجب تغییر در شرایط هیدرولیکی منطقه می‌شود. این تغییر در شرایط هیدرولیکی، بر ویژگی‌های مکانیکی محیط نیز اثر گذاشته و در نتیجه آن، امکان بروز جابجایی‌های جداره تونل بیشتر می‌شود. در این پژوهش، با توجه به این که ۶۰ درصد از مسیر خط هفت متروی تهران زیر سطح ایستایی و مسیر حفاری تونل غالباً از مناطقی با بافت فرسوده عبور می‌کند کنترل نشست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D تغییر شکل‌های به‌دست‌آمده در دو حالت توأمان (معادلات مکانیکی و هیدرولیکی به‌صورت هم‌زمان حل می‌شوند) و غیر توأمان (معادلات مکانیکی و هیدرولیکی به‌صورت ترتیبی و جداگانه حل می‌شوند) مدل‌سازی و با داده‌های ابزار دقیق مقایسه می‌شود. با توجه به نتایج، مدل‌سازی در حالت توأمان مطابقت بالاتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین تغییر شکل‌های اطراف فضای حفاری به‌شدت، به شرایط زهکشی، سطح آب زیرزمینی، وضعیت تنش‌های برجا منطقه و زمان وابسته است.

کلمات کلیدی

اندرکنش هیدرومکانیک، محیط متخلخل، محیط اشباع، نشست تونل، فشار منفذی، روش‌های عددی، FLAC3D

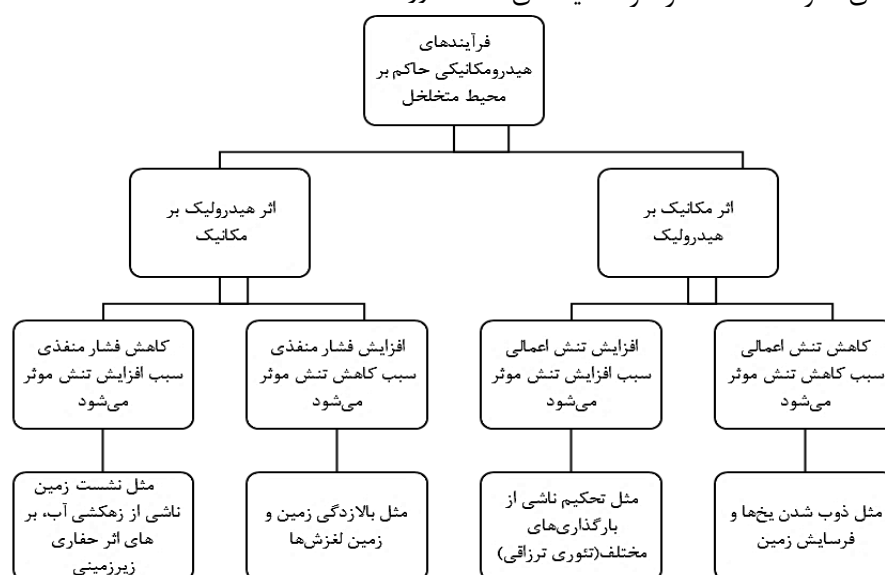
* عهده‌دار مکاتبات: Aramezanzadeh@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

سنگی و خاکی عمدتاً تابعی از اندرکنش اجزای مختلف تشکیل‌دهنده‌ی این محیط‌ها (فازهای جامد و مایع) است. مفهوم تنش مؤثر و تئوری پوروالاستیسته^۱ از مفاهیمی است که توسط محققین مختلف بر اساس اندرکنش این فازها و به‌منظور تحلیل‌های محیط‌های متخلخل ارائه شده است. تئوری مواد پوروالاستیک مدلی است که به شرح رفتار سیال درون محیط‌های متخلخل می‌پردازد. اساس این تئوری این است که فشار سیال درون محیط متخلخل بر روی تنش کلی، مؤثر است.

اندرکنش هیدرومکانیک در محیط‌های اشباع و متخلخل سبب ایجاد جابجایی‌هایی می‌شود که این جابجایی‌ها ناشی از تغییرات فشار منفذی و تنش‌های منطقه است به‌طوری‌که در تونل سازی، عملیات حفاری سبب خروج سیال و کاهش فشار منفذی، در نتیجه افزایش تنش مؤثر و گسترش جابجایی‌ها می‌گردد. از طرف دیگر افزایش تنش موجب بسته شدن فضاها یا خالی محیط، در نتیجه تغییر فشار منفذی می‌شود. به عبارت دیگر تغییر شکل موجب تغییر جریان سیال و بالعکس می‌شود که به آن اندرکنش هیدرومکانیک مستقیم گفته می‌شود. همچنین فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی از طریق تغییر خواص هیدرولیکی یا مکانیکی محیط اطراف، بر یکدیگر اثر می‌گذارند که به آن اندرکنش‌های هیدرومکانیکی غیرمستقیم گفته می‌شود. در ادامه، خلاصه‌ای از فرایندهای هیدرومکانیکی مستقیم، حاکم بر محیط متخلخل در شکل ۱ آورده شده است [۱].

حفر تونل در مناطق شهری اغلب با چالش‌های متعددی مواجه می‌شود. در مناطق شهری با توجه به وجود آب زیرزمینی، عبور از مناطق مسکونی و بناهای تاریخی، لزوم رعایت ملاحظات مختلف زیست‌محیطی و فنی بسیار ضروری است. در این میان، موضوع نشست ناشی از تونل سازی در مناطق شهری با در نظر گرفتن سطح آب زیرزمینی و جنس زمین بسیار بحرانی است. موضوع نشست در متروی خط هفت تهران قطعه شمالی - جنوبی به عنوان یکی از عمیق‌ترین خطوط مترو کشور و با عبور از بافت متراکم و فرسوده شهری بسیار حائز اهمیت است. همچنین حضور سطح بالایی از آب زیرزمینی شرایط طراحی و عملیاتی این پروژه را تحت تأثیر قرار داد. طی چند دهه گذشته، مطالعات و روش‌های مختلف تحلیلی، تجربی و عددی برای تخمین میزان نشست ناشی از عملیات تونل سازی مکانیزه در شرایط مختلف مکانیکی و هیدرولیکی منطقه ارائه شده است. بر اساس نتایج تحقیقات متعدد انجام‌شده روابط تجربی، تحلیلی یا عددی ساده به دلیل ساده‌سازی‌های فراوان و نیز تغییرات شرایط سطح ایستایی، سبب به دست آمدن نتایجی دور از واقعیت می‌شوند که این خود باعث بروز مخاطراتی می‌گردد؛ بنابراین برای ارزیابی دقیق نشست زمین در مناطق اشباع، کاربرد مدل‌سازی عددی توأمان هیدرومکانیک جهت تخمین نشست، ضرورت جدی خواهد داشت. رفتار محیط‌های



شکل ۱- فرآیندهای هیدرومکانیکی مستقیم، حاکم بر محیط متخلخل

ایجاد شده در اطراف تونل چند قوسی پرداخته شد. با توجه به نتایج، نشست به دست آمده در حالتی که اندرکنش هیدرومکانیک در نظر گرفته می شود؛ بزرگ تر از زمانی است نیروی تراوش، نادیده گرفته می شود [۴].

در مطالعات پراستيو و گوتيرز (۲۰۱۶)، گرازیانی و بولدینی (۲۰۱۲)، کتونی و همکاران (۲۰۱۶)، وونگ سارج و همکاران (۲۰۱۳)، ان و همکاران (۲۰۰۶) و یو (۲۰۰۵) به بررسی تأثیر نفوذپذیری لاینینگ و تزریق بر تغییر شکل های اطراف فضای حفاری پرداخته شد با توجه به نتایج به دست آمده با افزایش نفوذپذیری تغییر شکل های اطراف فضای حفاری با گذشت زمان افزایش پیدا می کنند [۵-۱۰].

در مطالعه یو و همکاران در سال (۲۰۱۲) و (۲۰۰۸) با استفاده از نرم افزار ABAQUS اثر افت سطح آب زیرزمینی بر نشست و جابجایی های اطراف فضای حفاری مورد بررسی قرار گرفت با توجه به نتایج، جابجایی های اطراف فضای حفاری تا به تعادل رسیدن سطح آب زیرزمینی ادامه خواهد داشت [۱۱، ۱۲].

در مطالعه ژوو و همکاران در سال (۲۰۱۸) با استفاده از نرم افزار FLAC3D دامنه ی تأثیر حفاری بر تغییر شکل و تغییر فشار منفذی مورد بررسی قرار گرفت [۱۳].

در مطالعات فاتح و همکاران (۲۰۱۳)، لیکوس (۲۰۰۰)، سوبودا و کریشا (۱۹۹۹) و چن و همکاران (۱۹۹۵) با استفاده از روش المان محدود به بررسی تأثیر حفاری بر نشست تحکیمی محیط پرداخته شد با توجه به نتایج به دست آمده قطر و عمق تونل، قطر سپر، وضعیت آب های زیرزمینی منطقه، فشار جبهه کار و تزریق نقش بسزایی در بروز نشست و جابجایی های اطراف فضای حفاری ایفا می کنند [۱۴-۱۷].

همچنین در مطالعات کائو و همکاران (۲۰۱۱)، فن و همکاران (۲۰۱۵)، جی و همکاران (۲۰۱۵)، لی و لیانگ (۲۰۱۴) و چوانچنگ و جیانجون (۲۰۱۲) نشان داده شد که تأثیر اندرکنش هیدرومکانیک به گونه ای است که نمی توان آن را نادیده گرفت و در طراحی سیستم نگهداری باید مورد توجه قرار گیرد [۱۸-۲۲]. در مطالعه هوفل و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از نرم افزار Plaxis 3D به بررسی تأثیر نفوذپذیری خاک بر رفتارهای وابسته به زمان، در طول عملیات تونل سازی در خاک های نرم اشباع پرداخته شد.

برهم کنش های هیدرومکانیکی مستقیم در پوسته زمین از اواخر سال ۱۸۰۰ شناخته شدند [۱]. نخستین مشاهدات مرتبط با این موضوع مربوط به تغییرات سطح آب چاه ها نسبت به بارگذاری های مختلف، همچنین نشست های سطحی ایجاد شده ناشی از استخراج آب، نفت و گاز بوده است. مینزر در سال ۱۹۲۸ یک تغییر شکل بزرگ در ماسه سنگ داکوتا واقع در کانادا مشاهده کرد که بر اثر تغییر حجم منفذی رخ داده بود. مشاهداتی دیگر از این قبیل منجر به رابطه ی کلاسیک و بنیادی ترزاقی در سال ۱۹۲۳، به صورت رابطه (۱) شد [۲]:

$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz} - p \quad (1)$$

که در این رابطه σ'_{zz} تنش مؤثر، σ_{zz} تنش عمودی کل و p فشار منفذی است. معادله فوق بنیادی ترین رابطه بین فرآیندهای مکانیکی و هیدرولیکی است. این قانون تنش مؤثر ترزاقی در مسائلی چون آنالیز نشست، پایداری سد و شیب های سنگی، فناوری های استخراج برای شبیه سازی چاه های نفتی و ... به کار برده می شود.

تیس در سال ۱۹۳۵ رفتار چاه های پمپاژ شده را مورد مطالعه قرار داد. جاکوب در سال ۱۹۴۰ با توسعه مطالعات تیس، ضریب ذخیره شوندگی^۲ در محیط های متخلخل را ارائه نمود.

سرانجام بایوت در سال ۱۹۴۱ مفهوم یک بعدی تحکیم ترزاقی را به یک تئوری کلی سه بعدی توسعه داد که این تئوری برهم کنش های بین سیال منفذی و واکنش های الاستیک را بیان می کند که تئوری پوروالاستیسیته نام گذاری شد. تئوری پایه بایوت برای محیط های پوروالاستیک خطی، بعد از آن توسط افراد دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت تا اینکه برای سیستم های غیر خطی نیز توسعه پیدا کرد. به هر حال مدل های توسعه یافته توسط بایوت، تیس و ترزاقی، پایه و اساس تحلیل هیدرومکانیکی توأمان شدند که امروزه در کارهای مکانیک سنگی و هیدروژئولوژی مورد استفاده قرار می گیرند. با آغاز برنامه های کامپیوتری در دهه ۱۹۷۰، فرآیندهای هیدرومکانیکی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفتند [۳]. از این رو، نمونه ای از مطالعات انجام شده در این زمینه در ادامه آورده شده است.

در مطالعه لی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از نرم افزار FLAC3D با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک به بررسی تأثیر جریان تراوش آب بر تغییر شکل و نشست

۲۸ ایستگاه که تمامی آن‌ها زیرزمینی می‌باشند. تونل خط هفت متروی تهران با طول ۲۲/۴ کیلومتر یکی از تونل‌های بزرگ مقطع و طویل کشور محسوب می‌شود.

با توجه به سطح مقطع بزرگ تونل، عبور از زیر مناطق مسکونی، نوع زمین و در نهایت دارا بودن ضریب ایمنی بالا و سرعت مناسب، عملیات حفاری این تونل با استفاده از دستگاه سپر تعادلی زمین EPB TBM انجام شده است. قطر حفاری و سپر ماشین حفار استفاده شده در این خط به ترتیب ۹/۱۶۴ و ۹/۱۲۶ متر و طول سپر ۹ متر است. همچنین ضخامت قطعات بتنی و تزریق پشت آن به ترتیب ۳۵ و ۱۵ سانتیمتر است. طبق اطلاعات به دست آمده از گمانه‌های اکتشافی، حدود ۶۰ درصد از طول تونل و ایستگاه‌های قطار شهری با آب‌های زیرزمینی برخورد داشته‌اند بنابراین وضعیت آب‌های زیرزمینی نقش تعیین‌کننده‌ای را در طراحی و ساخت سازه‌های زیرزمینی مورد نظر ایفا خواهد کرد که باید مورد توجه قرار گیرد [۲۴].

با توجه با اطلاعات در دسترس از متروی خط هفت تهران، پروفیل زمین‌شناسی کیلومتر ۲۱+۵۴۰ تا ۲۱+۶۰۰ انتخاب شده است. تراز آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در ۹/۵ متری سطح زمین قرار دارد. اجزای تشکیل‌دهنده رسوبات آبرفتی در گستره طرح از ذرات بسیار ریز رس تا تخته‌سنگ‌های بزرگ را در برمی‌گیرد که از توزیع دانه‌بندی متغیری در عمق و گسترش سطحی برخوردار است [۲۴].

شکل ۲ و جدول ۱ به ترتیب پروفیل زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی کیلومتر ۲۱+۵۴۰ تا ۲۱+۶۰۰ متروی خط هفت تهران را نشان می‌دهد.

۳- طرح ابزاربندی در محدود مورد مطالعه

برای بررسی جابجایی‌های ایجاد شده در سطح زمین در محدوده مورد مطالعه از خط‌کش‌های ترازیابی استفاده شده است. بدین صورت که با ایجاد نقاط مشخصه بر روی سطح زمین و قرائت مستمر آن‌ها پیش از رسیدن و پس از عبور تونل از این نقاط، مقدار جابجایی عمودی آن‌ها و در نتیجه میزان نشست یا بالادگی سطح زمین در اثر حفر تونل مشخص می‌شود.

شکل ۳ جانمایی ابزار و حداکثر نشست به دست آمده در مقطع مورد مطالعه نشان داده شده است [۲۵].

بر اساس نتایج این تحقیق با افزایش نفوذپذیری میزان نشست سطح و جابجایی‌های اطراف تونل افزایش می‌یابد. در نهایت میزان گسترش زون پلاستیک در اطراف تونل بیشتر خواهد شد [۲۳].

بررسی مطالعات انجام شده، نشان می‌دهد در اغلب مدل‌سازی‌ها با ساده‌سازی‌هایی از قبیل عدم در نظر گرفتن توالی حفاری، چشم‌پوشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی، حل دوبعدی مسائل، زمان و ... به بررسی موضوع پرداخته شده است. این ساده‌سازی‌ها باعث ایجاد نتایجی دور از واقعیت می‌شود. لازم به ذکر است که در هیچ یک از مطالعات ذکر شده مقایسه‌ای بین نتایج توأمان و غیر توأمان صورت نگرفته است. از این رو در این پژوهش، به منظور داشتن یک تخمین دقیق و نزدیک به واقعیت با یک رویکرد همه‌جانبه به بررسی تأثیر حفاری بر محیط اطراف تونل در دو حالت توأمان و غیر توأمان پرداخته شده است.

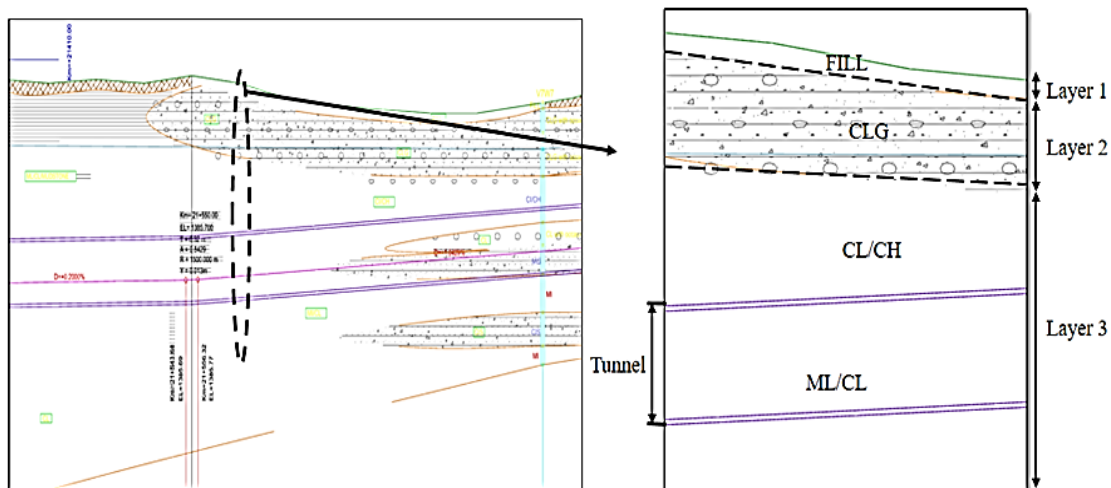
در این پژوهش پس از بررسی سوابق موضوع، اطلاعات ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه و اطلاعات مربوط به داده‌های ابزار دقیق نشست‌سنجی جمع‌آوری و طبقه‌بندی می‌شود. سپس مقطع مورد نظر برای مدل‌سازی انتخاب و در مرحله بعد بر اساس شرایط حاکم بر محیط، مدل‌سازی انجام می‌شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی هیدرومکانیک نشست، نتایج به دست آمده با داده‌های حاصل از ابزار دقیق مقایسه می‌گردد. همچنین نشست در زمان حفاری در دو حالت توأمان و غیر توأمان، تغییرات فشار منفذی در اطراف فضای حفاری، تأثیر تنش‌های برجای منطقه بر پاسخ هیدرومکانیک تونل، تغییرات سطح آب زیرزمینی بر نشست نهایی، رفتار زهکشی شده و زهکشی نشده‌ی محیط دربرگیرنده تونل و رفتار ۳۰ روزه محیط مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر

احداث خط هفت متروی تهران

شهر تهران در شمال بخش مرکزی ایران و جنوب رشته‌کوه البرز قرار دارد. با توجه به موقعیت سیاسی و اقتصادی این شهر، توسعه سیستم حمل‌ونقل عمومی و بهبود وضعیت ترافیکی آن، امری اجتناب‌ناپذیر است.

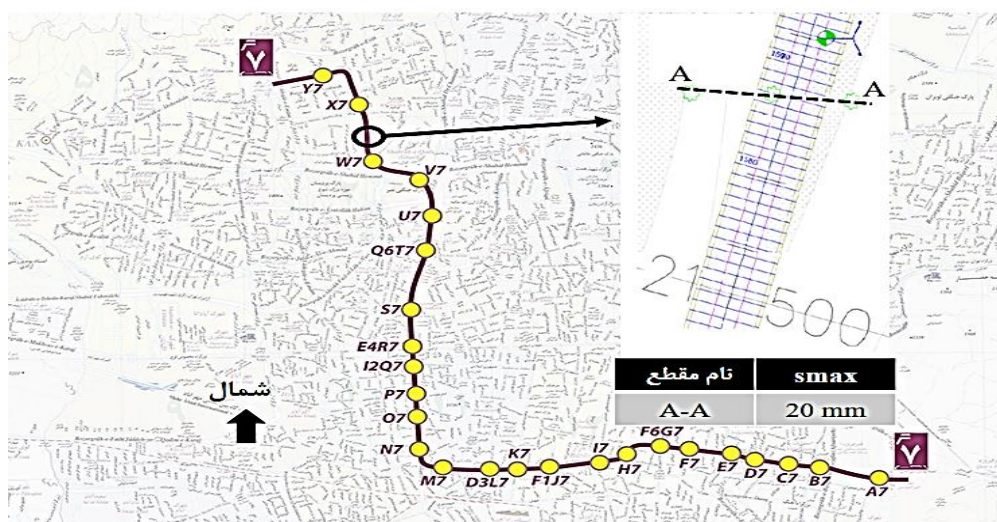
خط هفت متروی تهران از شهرک امیرالمؤمنین در شرق تهران شروع شده و مسیر آن در امتداد شمالی - جنوبی در طول بزرگراه نواب تغییر می‌یابد این خط شامل



شکل ۲- پروفیل زمین شناسی مربوط به کیلومتر ۲۱+۵۴۰ [۲۴]

جدول ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی کیلومتر ۲۱+۵۴۰ تا ۲۱+۶۰۰ متروی خط هفت تهران [۲۴]

ویژگی ها	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	نماد	واحد
چگالی	۱۸۰۰	۱۹۰۰	۱۷۰۰	ρ	kg/m ³
نسبت پواسون	۰٫۳	۰٫۳۲	۰٫۳۵	ν	—
مدول بالک	۶۱٫۲۵	۵۹٫۰۲	۳۸٫۲۲	K	Mpa
مدول برشی	۲۸٫۲۷	۲۴٫۱۵	۱۲٫۷۴	G	Mpa
چسبندگی	۰٫۰۱۹۶	۰٫۰۲۹۵	۰٫۰۳۹۳	c	Mpa
زاویه اصطکاک داخلی	۳۵	۳۲	۲۷	ϕ	°
نفوذپذیری	۱٫۰۲e-۸	۱٫۰۲e-۱۱	۱٫۰۲e-۱۲	K	m ² /(Pa/sec)
ضخامت لایه	۱٫۵	۸٫۵	۴۰	t	M
طبقه بندی مهندسی خاک	FILL (ET-1)	CLG (ET-3)	CL/CH·ML/CL (ET-5)	—	—



شکل ۳- جانمایی ابزار و حداکثر نشست ایجاد شده در کیلومتر ۲۱+۵۴۰ [۲۵]

تحلیل‌های توأمان در این نرم‌افزار، از آن به‌منظور مدل‌سازی استفاده شده است.

۴-۱ - مدل‌سازی محدوده مورد مطالعه

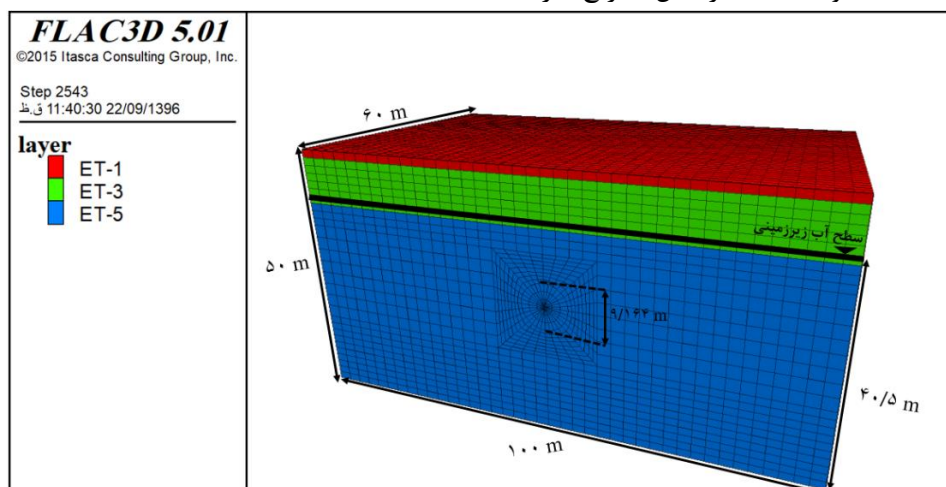
مدل‌سازی محدوده مورد مطالعه در دو فاز مکانیکی و هیدرولیکی صورت گرفته است که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱-۱ - مدل‌سازی فاز مکانیکی محدوده مورد مطالعه

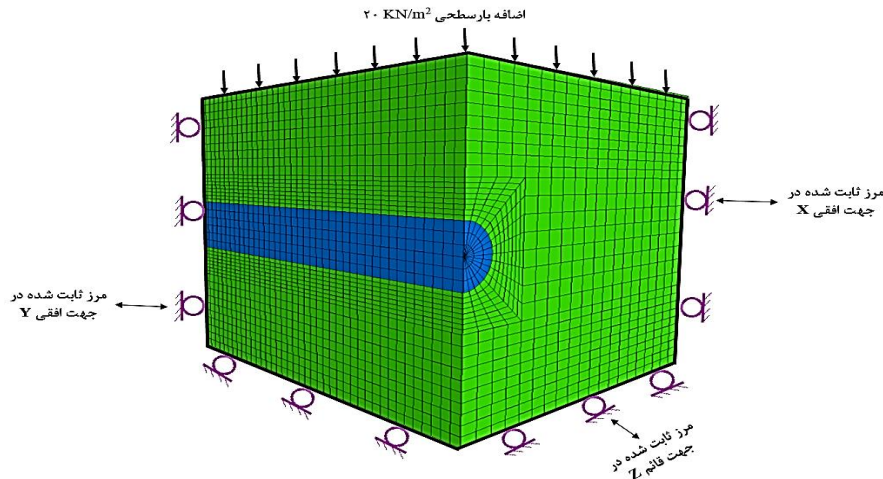
جهت مدل‌سازی محیط دربرگیرنده‌ی تونل، خاک به‌صورت همگن و ایزوتروپ با رفتار الاستوپلاستیک کامل و لایه‌بندی افقی در نظر می‌شود. مدل رفتاری موهر-کلمب برای محیط دربرگیرنده‌ی تونل و برای سپر ماشین حفار، لاینینگ و تزریق پشت لاینینگ از مدل رفتاری الاستیک استفاده شده است. هندسه‌سازی در این نرم‌افزار توسط یک سری المان که زون نامیده می‌شود انجام می‌گیرد. بهینه بودن ابعاد زون‌ها تأثیر بسزایی در زمان حل و دقت جواب‌های به‌دست‌آمده دارد. به‌منظور افزایش سرعت محاسبات و حداقل رساندن تأثیر مرزهای مدل بر خروجی‌های نرم‌افزار، ابعاد مدل $100 \times 60 \times 50$ متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای از بین بردن ناپایداری‌ها و به تعادل رسیدن محیط، مرزهای جابجایی در اطراف مدل ثابت و بار ترافیک به‌اندازه 20 KN/m^2 به سطح مدل اعمال شده است. هندسه مدل، سطح آب زیرزمینی و شرایط مرزی و تنش‌ی استفاده‌شده در مدل‌سازی، در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

۴ - مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D

روش‌های حل تحلیلی اندرکنش‌های هیدرومکانیکی دارای محدودیت‌هایی از قبیل اعمال شرایط فیزیکی و مرزی می‌باشند. در حال حاضر با پیشرفت فناوری اطلاعات و روش‌های عددی، تمایل به استفاده از روش‌های عددی در حل مسائل هیدرومکانیک افزایش پیدا کرده است. در سال‌های اخیر تکنیک‌های توأمان عددی مختلفی برای مدل‌سازی اندرکنش هیدرومکانیک در مهندسی زمین توسعه‌یافته است. به‌طور کلی در حل عددی روش‌های توأمان، دو معادله اساسی حاکم بر محیط از قبیل معادلات سیال (مسئله جریان) و جامد (مسئله ژئومکانیک) حل می‌شود. روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی است که از کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی برخوردار است. برتری روش تفاضل محدود نسبت به سایر روش‌ها این است که به توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارند. از مهم‌ترین نرم‌افزارهایی که از روش تفاضل محدود برای حل مسائل ژئومکانیک استفاده می‌کنند می‌توان به FLAC2D و FLAC3D اشاره کرد که این دو نرم‌افزار جزو مجموعه نرم‌افزاری شرکت آیتسکا^۲ می‌باشند [۲۶]. نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC3D یک برنامه تفاضل محدود که از قابلیت‌های بسیاری برای تحلیل مسائل برخوردار است که عمده‌ترین کاربرد آن در مسائل ژئوتکنیک می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان پیوستگی کامل بین یک جامد تغییر شکل‌پذیر متخلخل و یک سیال لزج که در منافذ آن جریان دارد را مدل‌سازی کرد؛ و با توجه به سرعت و دقت بالای محاسبات و استفاده از حل صریح در



شکل ۴ - هندسه مدل

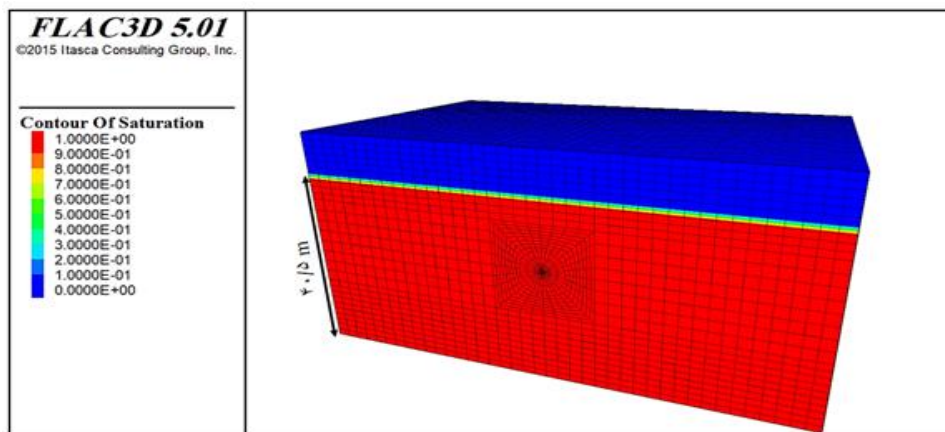


شکل ۵- شرایط مرزی و تنش

۲-۱-۴ - مدل سازی فاز هیدرولیکی محدوده مورد مطالعه

مدل سازی فاز هیدرولیکی محدوده مورد مطالعه با استفاده از دستور "CONFIG fluid"، صورت گرفته است. به طوری که به محض تغییر سطح ایستابی آب، فشار منفذی تغییر خواهد کرد. فشار منفذی در گره های هر زون محاسبه شده و با به کارگیری میانگین گیری، به زون ها تعلق می گیرد [۲۶]. تغییر فشار منفذی موجب تغییر شکل شده و کرنش حجمی باعث رهایی فشار منفذی می شود. سطح

آب زیرزمینی در مقطع مطالعاتی واقع در کیلومتر ۲۱+۵۴۰ در فاصله ۹/۵ متری از سطح زمین قرار دارد. شکل ۶ وضعیت قرارگیری سطح آب زیرزمینی در مدل ساخته شده را نشان می دهد. درجه اشباع برای زون های زیر سطح ایستابی ۱ و برای زون های واقع شده در بالای سطح ایستابی صفر در نظر گرفته می شود. مدول حجمی آب 2×10^9 پاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- شرایط مرزی و تنش

۴-۲ - تئوری و روابط حاکم بر مدل سازی هیدرومکانیک محیط متخلخل

در نرم افزار FLAC 3D محیط متخلخل یا مواد متخلخل به محیط هایی اطلاق می شود که حفرات در سراسر آن وجود دارند. این حفرات به وسیله سیال همانند سیال و یا گاز پر می شوند و معمولاً فرض بر آن است که

این ذرات جامد صلب و یا دچار تغییر شکل های کوچک می شوند. فضای خالی بین ذرات جامد (خاک) به فازهای مایع و گاز اجازه عبور از محیط را می دهد [۲۷].

در محیط های متخلخل، همواره محیط مابین دو وضعیت اشباع و نیمه اشباع قرار دارد. حل دقیق فازهای غیراشباع به حل محیط های چند فازی منجر می گردد.

ضریب بایوت (α) یکی از خصوصیات زون است که معرف حجم سیال وارد شده (یا خارج شده) به یک المان نسبت به تغییر حجم المان در اثر تغییر فشار منفذی است. برای مواد تراکم‌ناپذیر ضریب بایوت برابر ۱ است. برای یک ماده‌ی متخلخل ایده‌آل، ضریب بایوت به مدول بالک توده خاک (k) و مدول بالک قسمت جامد (k_s) وابسته است و به صورت مقابل به دست می‌آید.

• معادله مشخصه:

سیال منفذی، به تغییر فشار منفذی، اشباع‌شدگی و کرنش حجمی وابسته است.

که در آن، ζ تغییرات حجم سیال، M مدول بایوت، s اشباع‌شدگی و n تخلخل را نشان می‌دهد. همچنین مدول بایوت از رابطه‌ی (۴) به دست می‌آید:

$$M = \frac{k_f}{n + (\alpha - n)(1 - \alpha)k_f / K} \quad (4)$$

به طور مثال، برای محیط اشباع $s = 1$ ، معادله ساختاری به صورت رابطه (۵) نشان داده می‌شود:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (5)$$

• معادله انتقال سیال (قانون دارسی):

انتقال سیال با رابطه‌ی دارسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

$$V = -\frac{k}{\rho_f g} \nabla p \quad (6)$$

• معادله پیوستگی:

تعداد جرم سیال به صورت رابطه (۷) بیان شود که در آن، q_v منبع سیال حجمی است.

$$-\nabla \cdot V + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (7)$$

• معادله سازگاری:

رابطه‌ی بین نرخ کرنش و گرادیان سرعت به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (8)$$

۳-۴ - پیشروی حفاری و نصب سیستم نگهداری

تونل با استفاده از دستور "null" با اعمال فشار سینه‌کار ۶۰ کیلو پاسکال در جهت عمود بر سینه‌کار حفاری می‌شود. گام‌های حفاری ۱/۵ متر و طول سپر ۹ متر در نظر گرفته شده است. در هر گام پیشروی مدل با طی

فازهای جامد، مایع و گاز از جمله فازهایی است که برای مدل‌سازی محیط‌های متخلخل در نظر گرفته می‌شود. باین‌حال در مسائل ژئوتکنیکی حل دوفازی یا هیدرومکانیکی تقریب قابل قبولی از جواب واقعی مسئله به دست می‌دهد. در ساده‌ترین حالت می‌توان محیط مورد نظر را به صورت دوفازی در نظر گرفت در این حالت فضای بین ذرات جامد کاملاً با مایع پر شده است که اصطلاحاً به آن محیط اشباع گفته می‌شود. از این رو، حل محیط‌های چند فازی منجر به ایجاد تحلیل‌های دقیق‌تری می‌شود. در تحقیق حاضر از ایده تنش مؤثر در تحلیل رفتار محیط اشباع استفاده شده است. پس از شناسایی محیط و پدیده‌های فیزیکی موجود به شرح معادلات هیدرومکانیکی حاکم بر محیط پرداخته می‌شود. این گام بر اساس فرضیات و ساده‌سازی‌هایی همراه است که بر اساس برداشت از پاسخ واقعی محیط در مطالعه پدیده‌های به دست می‌آید. در بررسی پدیده‌های حاکم بر محیط، در مطالعه حاضر هریک از فازها به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود و ساختار مولکولی آن مورد توجه قرار نمی‌گیرد که این در واقع گذار از مقیاس میکروسکوپی در رسیدن به مقیاس ماکروسکوپی است که در طی آن رفتار هر فاز در محدوده المان نمونه به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در واقع از آنجاکه شناخت جزئیات هندسه‌ی مرزهای بین فازی مختلف و معرفی پارامترهای معرف پدیده‌های مشاهداتی در این سطح نامتعارف است با یک ساده‌سازی، مدل ریاضی حاکم بر محیط متخلخل از سطح میکروسکوپی به ماکروسکوپی ارتقا داده می‌شود.

در نرم‌افزار FLAC، محیط به صورت ایزوتروپیک، متخلخل، اشباع و با تغییر شکل آرام و نامحسوس در نظر گرفته شده است. روابط حاکم بر تغییر شکل محیط اشباع در نرم‌افزار FLAC بر پایه‌ی تئوری بایوت است. بر اساس فرضیه الاستیک خطی، رابطه‌های (۲) تا (۸) در نظر گرفته شده است [۲۶].

• معادله تعادل:

معادله تعادل بر مبنای تنش کل برای محیط اشباع به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود:

$$\nabla \cdot \sigma^t + F = 0 \quad (2)$$

• اصل تنش مؤثر ترزاقی:

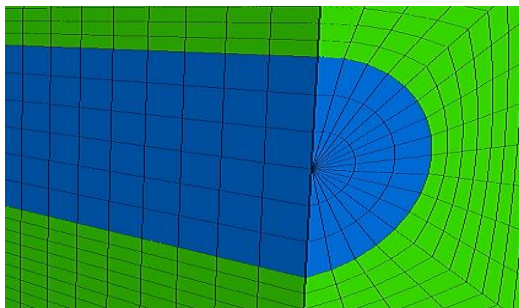
$$\sigma^t = \sigma^e + \alpha pI \quad (3)$$

می گردد و تا انتهای مترائز حفاری این روند ادامه می یابد. ویژگی های مکانیکی سپر ماشین حفار، سگمنت و تزریق پشت آن در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۷ روند پیشروی سپر و نصب سیستم نگهداری در چهار مرحله نشان داده شده است.

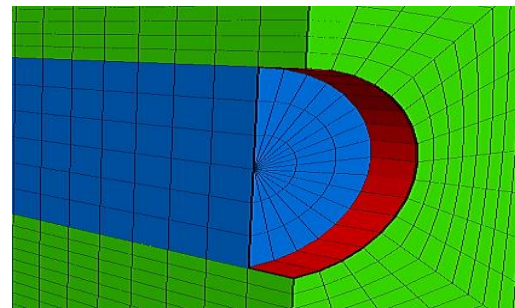
تعداد مشخصی گام زمانی، حل می شود. قطعات پوشش بتنی تونل، تزریق پشت قطعات بتنی و سپر ماشین حفار با استفاده از المان "cshell" مدل سازی شده است. در هر گام حفاری همزمان با مدل سازی سپر در قسمت حفرشده، با پیشروی عملیات حفاری، از ۱/۵ متر انتهایی سپر برداشته شده و المان سگمنت و تزریق به مدل اعمال

جدول ۲- مکانیکی سپر ماشین حفار، سگمنت و تزریق [۲۴]

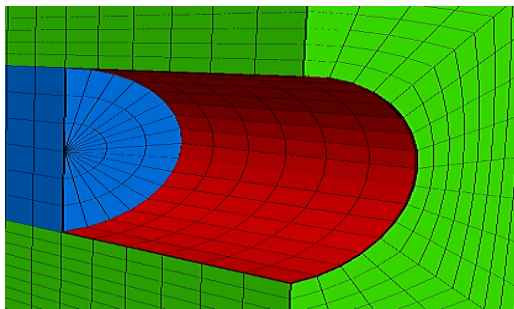
ویژگی ها	سپر	سگمنت	تزریق	واحد
مدول الاستیک	۲۰۰	۳۶	۱	GPa
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۲	۰/۳	-
وزن مخصوص	۷۶	۳۰	۲۴	KN/m3



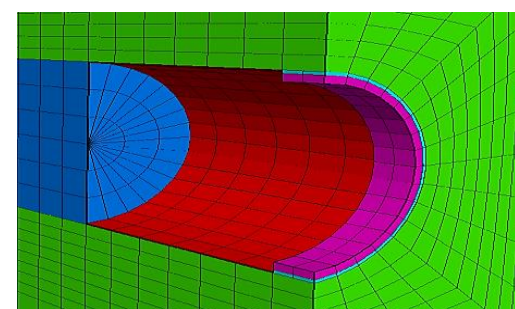
مرحله اول



مرحله دوم



مرحله سوم

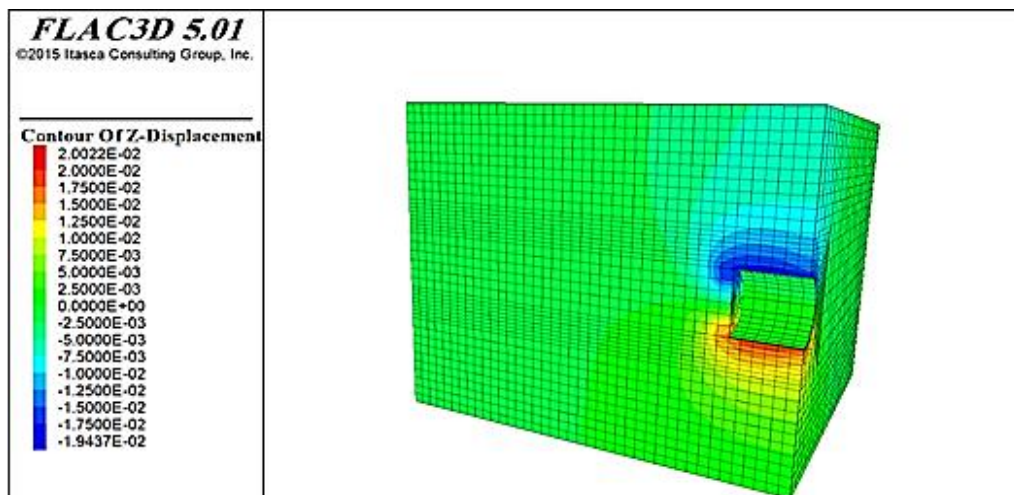


مرحله چهارم

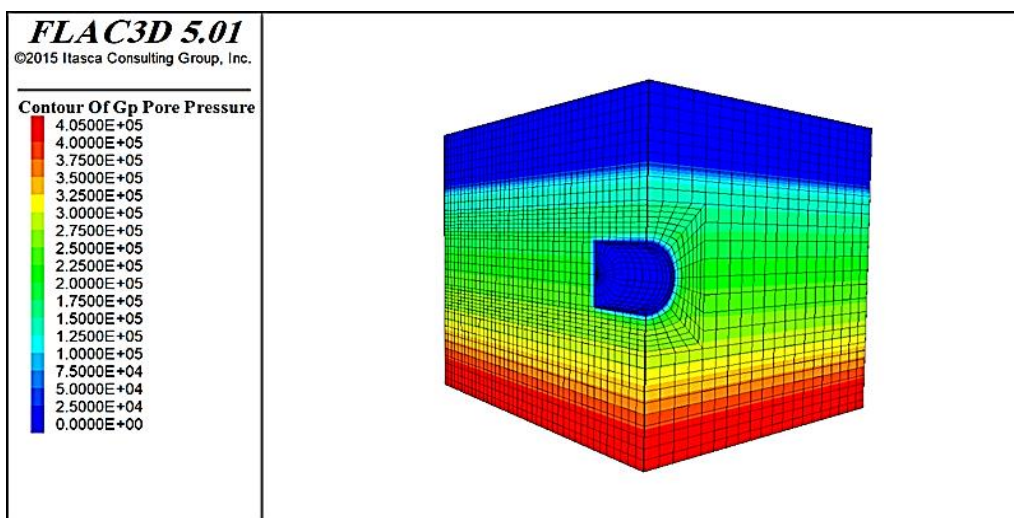
شکل ۷- روند پیشروی سپر و نصب سیستم نگهداری

طول سپر نشان داده شده است. همچنین شکل ۱۱ تاریخچه جابجایی قائم در مترائز یک متر در تاج تونل را نشان می دهد. با توجه به این نمودار همگرایی جابجایی ها در ۲ سانتی متر، به علت وجود سپر ماشین حفار به خوبی قابل مشاهده است.

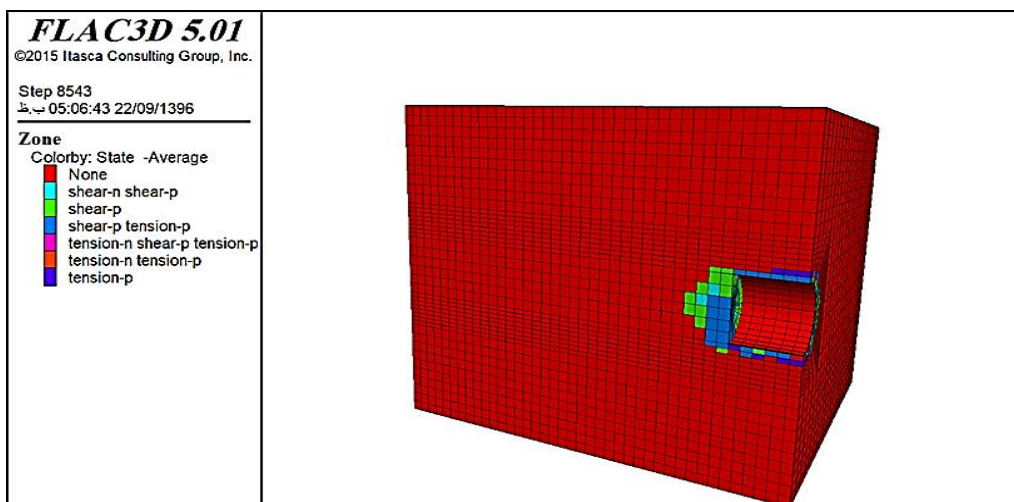
حفاری تونل به اندازه ی طول سپر ماشین حفار، سبب ایجاد جابجایی هایی در اطراف فضای حفاری می شود. با توجه به فاصله ی حدود ۲ سانتی متری بین زمین و سپر، این جابجایی ها نباید بیشتر از این فاصله باشد. در شکل های ۸ تا ۱۰ به ترتیب کانتور جابجایی های قائم، تغییرات فشار منفذی و گسترش زون پلاستیک بعد از حفاری به اندازه ی



شکل ۸- کانتور جابجایی قائم در راستای سپر ماشین حفار



شکل ۹- کانتور تغییرات فشار منفذی در راستای سپر ماشین حفار



شکل ۱۰- زون‌های پلاستیک در اطراف سپر ماشین حفار



شکل ۱۱- نمودار جابجایی قائم در متر از یک متر در تاج تونل

دستور "SET fluid on mech on" حل می شوند. در صورتی که در روش غیر توأمان بعد از هر گام حفاری، معادلات هیدرولیکی و مکانیکی حاکم بر محیط به صورت غیر توأمان حل می شوند.

روند حل به گونه ای است که ابتدا معادلات هیدرولیکی با استفاده از دستور "SET fluid on mech off" و سپس معادلات مکانیکی با استفاده از دستور SET fluid off mech "on" در هر گام حفاری حل می شوند و این روند تا پایان عملیات حفاری ادامه می یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده حداکثر جابجایی های سقف در حالت توأمان و غیر توأمان در جدول ۳ نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق با حالت توأمان و غیر توأمان نشان می دهد که نشست و جابجایی های ایجاد شده در حالت توأمان مطابقت بالاتری با داده های ابزار دقیق دارد.

از آنجاکه تنش های اعمالی به یک المان خاک به وسیله سیال و ذرات خاک کنترل می شوند در حالت غیر توأمان در هر گام زمانی یکی از مؤلفه ها نادیده گرفته می شود که همین امر سبب افزایش جابجایی ها در حالت غیر توأمان می شود.

۶- تحلیل عوامل مؤثر بر بروز نشست در تونل سازی

زهکشی محیط، سطح آب زیرزمینی، وضعیت تنش های منطقه و فاکتور زمان از عوامل تأثیرگذار بر پاسخ هیدرومکانیک تونل است.

در ادامه به بررسی نقش هر یک از این عوامل در بروز نشست ناشی از عملیات تونل سازی پرداخته می شود.

۱-۳-۴- تعیین خصوصیات فصل مشترک ۹ سپر، پوشش نهایی و تزریق

برای برقراری اندرکنش مناسب بین مواد با سختی های مختلف در نرم افزار FLAC3D از المان فصل مشترک استفاده می شود. در این مدل سازی سه نوع فصل مشترک شامل فصل مشترک بین سپر ماشین حفار با زمین، فصل مشترک بین تزریق با زمین و فصل مشترک پوشش نهایی با تزریق در نظر گرفته شده است. بر اساس دستورالعمل نرم افزار، به دلیل وجود موادی با سختی های متفاوت، سختی نرمال (K_s) و برشی (K_n) هر فصل مشترک ۱۰ برابر سخت تر از سختی ظاهری نرم ترین زون مجاور آن پیشنهاد شده است. سختی ظاهری بخش های مختلف مدل بر اساس رابطه (۹) محاسبه شده است؛ که در آن رابطه K مدول بالک زون نرم تر، G مدول برشی زون نرم تر و ΔZ_{min} کمترین بعد (متر) زون مجاور در راستای Z فصل مشترک در المان نرم تر است [۲۶].

$$K_s = K_n = (K + 4/3 G) / [\Delta Z]_{mi} \quad (9)$$

در شکل های ۸ و ۱۱ جابجایی های اطراف فضای حفاری نشان داده شده است ثابت شدن جابجایی ها، ناشی از اندرکنش بین سپر ماشین حفار با محیط اطراف است. در شکل ۱۲ محل قرارگیری المان فصل مشترک در مراحل مختلف حفاری نشان داده شده است.

۵- مقایسه نتایج در حالت توأمان و غیر توأمان با داده های ابزار دقیق

در روش توأمان بعد از هر گام حفاری، معادلات مکانیکی و هیدرولیکی حاکم بر محیط به طور هم زمان با استفاده از

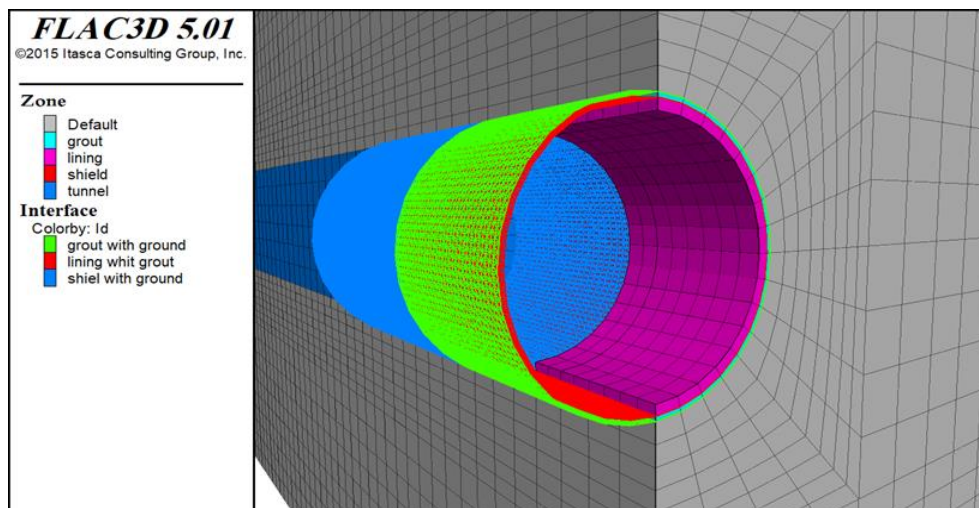
۱-۶ - رفتار تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

جدول ۴ به ترتیب تغییرات فشار منفذی، گسترش شعاع زون پلاستیک و میزان نشست در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده نشان داده شده است.

۲-۶ - بررسی تغییرات تنش‌های برجا

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر جابجایی‌های اطراف فضای حفاری نسبت تنش‌های برجا در منطقه است. با توجه به این‌که ضریب تنش‌های برجا برای محدوده مورد مطالعه $K=0.5$ است برای درک بهتر تأثیر تنش‌های برجا بر پاسخ هیدرومکانیک تونل دو ضریب تنش 0.75 و 1 نیز مورد تحلیل قرار گرفته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۱۵، با نزدیک شدن میدان تنش به $K=1$ نشست و جابجایی‌های ایجادشده در اطراف فضای حفاری کاهش پیدا می‌کند.

به این منظور جهت بررسی رفتار محیط دربرگیرنده تونل در حالت زهکشی شده، فشار منفذی در جداره تونل صفر " $Fix\ pp=0$ " و در حالت زهکشی نشده فشار منفذی در جداره تونل به‌صورت آزاد " $Free\ pp$ " در نظر گرفته می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، جابجایی‌ها و زون‌های پلاستیک ایجادشده در حالت زهکشی شده به‌مراتب بیشتر از حالت زهکشی نشده است. این امر ناشی از کاهش فشار منفذی در اطراف فضای حفاری در حالت زهکشی شده است. به‌عبارت‌دیگر ورود آب به داخل فضای حفاری سبب ایجاد فضای خالی بین ذرات خاک و فشرده شدن آن‌ها باگذشت زمان می‌شود. در شکل ۱۳، ۱۴ و



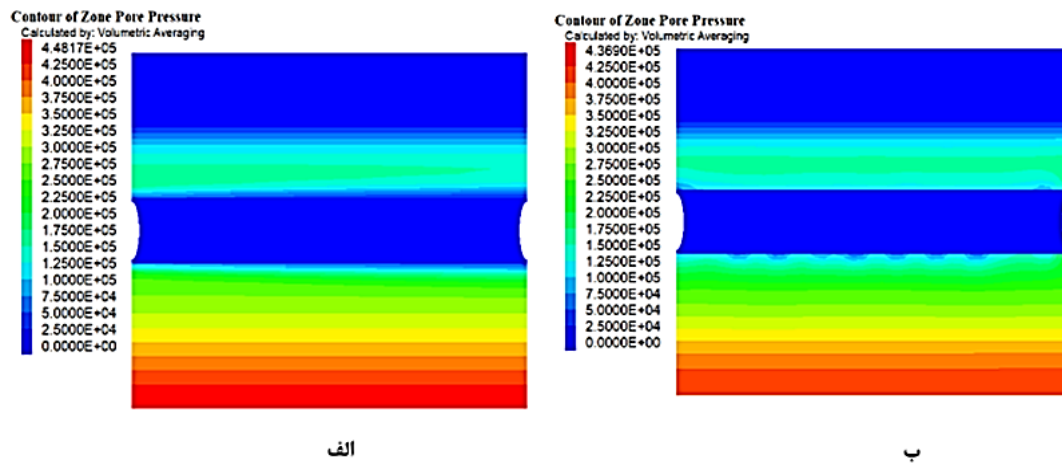
شکل ۱۲ - المان فصل مشترک سپر، تزریق و لاینینگ

جدول ۳ - حداکثر جابجایی‌های سقف در حالت توأمان و غیر توأمان برحسب میلی‌متر

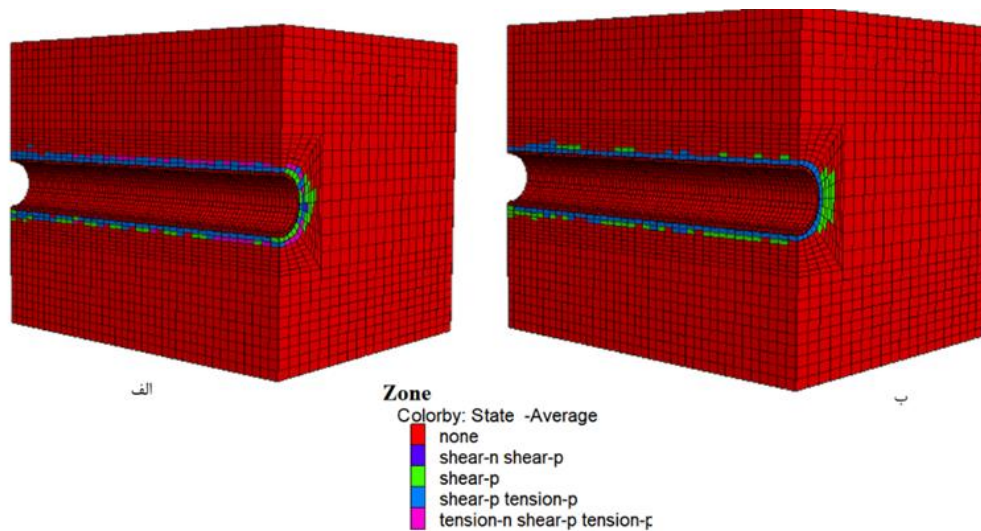
حداکثر نشست مقطع A - A	حالت غیر توأمان	حالت توأمان	ابزار دقیق
	۲۳ mm	۱۹ mm	۲۰ mm

جدول ۴ - نشست و شعاع زون پلاستیک در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

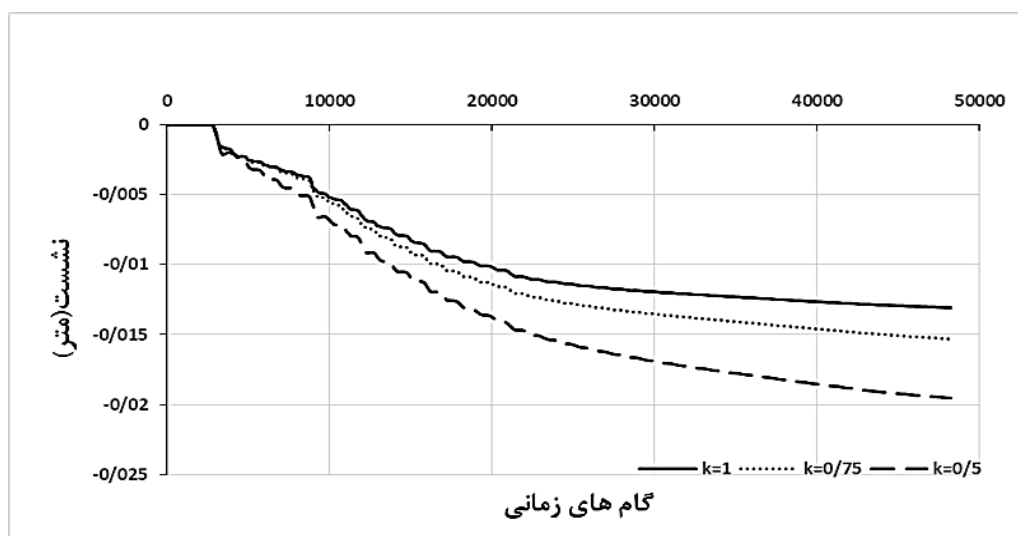
شعاع زون پلاستیک (m)	حداکثر نشست (mm)	زهکشی شده (" $Fix\ pp=0$ ")
۱.۳۵	۱۹	
۰.۶۸	۱۷	زهکشی نشده (" $Free\ pp$ ")



شکل ۱۳- تغییرات فشار منفذی پس از عملیات حفاری در حالت الف- زهکشی شده ب) زهکشی نشده



شکل ۱۴- زون های پلاستیک ایجاد شده پس از عملیات حفاری در حالت الف- زهکشی شده ب) زهکشی نشده



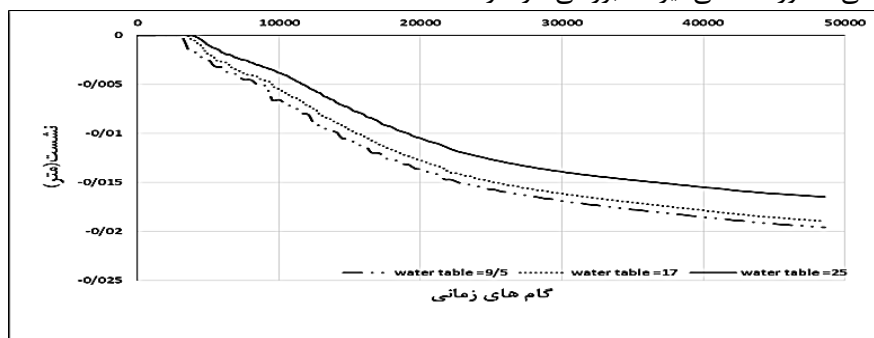
شکل ۱۵- نشست زمین در متر از ۶/۸ متر به ازای ضرایب تنش مختلف

۳-۶ - بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی

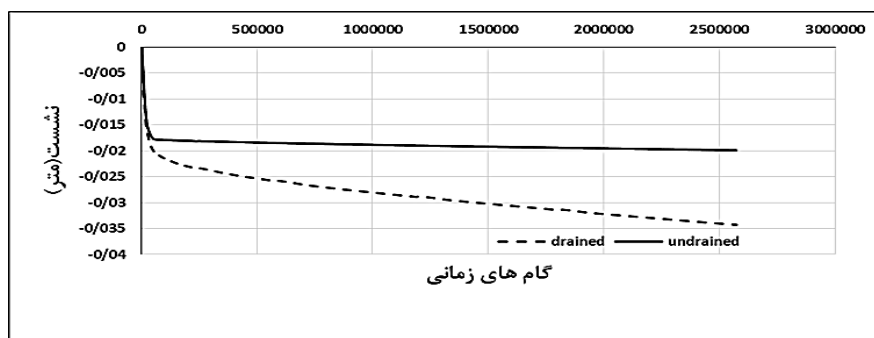
سطح آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر تغییر شکل‌های محیط اطراف تونل است. با توجه به اینکه تراز آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه، ۹/۵ متری زیر سطح زمین قرار دارد به‌منظور درک بهتر، اثر آب‌های زیرزمینی دو تراز ۱۷ و ۲۵ متری از سطح زمین نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش سطح آب زیرزمینی جابجایی‌ها و گسترش زون پلاستیک در اطراف فضای حفاری نیز افزایش پیدا می‌کند. با افزایش سطح آب زیرزمینی فشار منفذی در مدل اولیه افزایش می‌یابد. با انجام عملیات حفاری، مقدار کاهش فشار منفذی در مدلی با سطح آب زیرزمینی بالاتر، بیشتر خواهد بود که در نتیجه، جابجایی‌های ایجادشده در اطراف فضای حفاری نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۱۶ نشست ایجادشده به ازای ترازهای مختلف آب زیرزمینی نشان داده شده است.

۴-۶ - بررسی رفتار ۳۰ روزه تونل در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

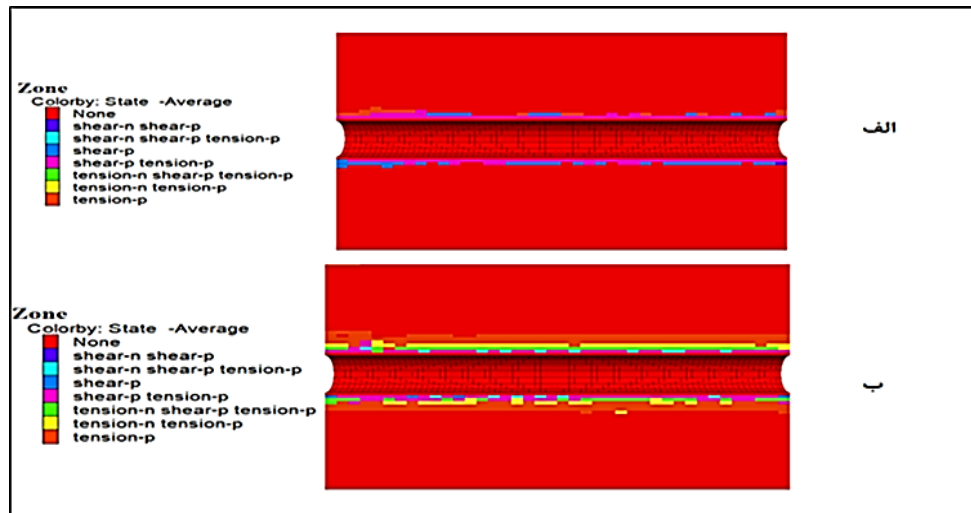
با توجه به اینکه تغییرات فشار منفذی در محیط‌های اشباع به‌صورت آبی صورت نمی‌گیرد. بررسی رفتار



شکل ۱۶- نشست زمین در متراژ ۶/۸ متر به ازای ضرایب تنش مختلف



شکل ۱۷- نشست ایجادشده پس از یک ماه در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده در متراژ ۶/۸ متر



شکل ۱۸- گسترش زون های پلاستیک در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه الف: زهکشی نشده ب: زهکشی شده

۷- نتیجه گیری

با توجه به حفر اغلب تونل های شهری در محیط های اشباع، بررسی تأثیر آب های زیرزمینی بر تغییر شکل های اطراف تونل به صورت توأمان از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، با در نظر گرفتن اهمیت کنترل و تخمین نشست کوتاه مدت و بلند مدت در متروی خط هفت تهران، به دلیل شرایط اشباع محیط و عبور از مناطقی با تراکم جمعیت بالا، مدل سازی هیدرومکانیک نشست ناشی از حفاری این تونل با استفاده از روش عددی تفاضل محدود انجام شده است. پس از برقراری شرایط اولیه و مرزی، برای اعتبار سنجی مدل اولیه، نتایج به دست آمده از مدل سازی با داده های ابزار دقیق در مقطع ۲۱+۵۴۰ در دو حالت توأمان و غیر توأمان مقایسه شد. مهم ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- پارامترهای شرایط تنش برجا، سطح آب های زیرزمینی و شرایط زهکشی محیط بر نتایج مدل سازی عددی بسیار تأثیر گذارند؛ بنابراین این پارامترها می بایست بسیار نزدیک به شرایط واقعی و به دوراز ساده سازی در مدل عددی اعمال شوند.

- مقایسه نتایج با داده های ابزار دقیق نشان می دهد که مقدار نشست ایجاد شده در حالت توأمان مطابقت بالاتری با داده های ابزار دقیق دارد. با توجه به این که تنش های وارده بر یک محیط اشباع به وسیله سیال و خاک کنترل می شود در حل غیر توأمان در هر گام زمانی نقش یکی از عوامل تشکیل دهنده محیط در نظر گرفته نمی شود همین

امر سبب افزایش جابجایی ها در حالت غیر توأمان نسبت به حالت توأمان می شود؛ بنابراین به منظور داشتن یک تحلیل دقیق و نزدیک به واقعیت استفاده از روش های توأمان امری ضروری است.

- خروج آب ناشی از عملیات حفاری سبب کاهش فشار منفذی و افزایش تنش مؤثر در اطراف فضای حفاری می شود. به بیان دیگر زهکشی آب سبب ایجاد فضای خالی بین ذرات خاک و فشرده شدن آن ها با گذشت زمان می شود. از این رو نشست و جابجایی های ایجاد شده اطراف تونل افزایش می یابد.

- با نزدیک شدن میدان تنش به حالت $K=1$ نشست و جابجایی های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری کاهش می یابد.

- نتایج به دست آمده از تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان می دهد که هر چه سطح آب زیرزمینی پایین تر باشد تغییر شکل های اطراف فضای حفاری کمتر خواهد شد. از آنجا که افزایش سطح آب زیرزمینی سبب افزایش فشار منفذی محیط می شود و عملیات حفاری منجر به کاهش فشار منفذی بیشتری در اطراف فضای حفاری می شود به همین دلیل با کاهش سطح آب زیرزمینی مقدار نشست ایجاد شده نیز کاهش می یابد.

- بررسی رفتار ۳۰ روزه تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده نشان می دهد که رفتار محیط دربرگیرنده ی تونل در حالت زهکشی نشده با گذشت زمان تغییر

- [12] Yoo, C., Kim, S., & Lee, Y. (2008). Characteristics of tunneling-induced ground settlement in groundwater drawdown environment. IS-329.
- [13] Zhou, H., Gao, Y., Zhang, C., Yang, F., Hu, M., Liu, H., & Jiang, Y. (2018). A 3D model of coupled hydro-mechanical simulation of double shield TBM excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 1-14.
- [14] Fattah, M. Y., Shlash, K. T., & Salim, N. M. (2013). Propagation of Plastic Zone around a Tunnel in Cohesive Soil. The second scientific engineering conference-university of mosul college of engineering.
- [15] Liakos, A. L. (2000). Effect of soil consolidation on soil-lining interaction in tunnels (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [16] Swoboda, G., & Abu-Krishna, A. (1999). Three-dimensional numerical modelling for TBM tunnelling in consolidated clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(3), 327-333.
- [17] Chen, J. J. R., Ho, T. Y., Chen, F. S., & Chao, C. S. (1995). Consolidation settlements caused by a shield tunnel for the Taipei Mass Rapid Transit System. IAHS PUBLICATION, 135-140.
- [18] Cao, R. L., He, S. H., Wang, F., & Qi, F. L. (2013). Stability Analysis of Large Underground Station Based on Coupled Fluid-Solid Theorem. In *Advanced Materials Research* (Vol. 748, pp. 1104-1108). Trans Tech Publications.
- [19] Fan, Y., Ren, Z., Liu, K., Qiao, J., & Chen, X. (2015). Seepage-Stress Coupled Analysis on Shield Tunnel Face Stability in Layered Soil. In *3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation*, Shenzhen, China, April.
- [20] Ji, Y. J., Liu, J. J., & Cheng, L. S. (2011). Numerical simulation of tunnel excavation considering fluid solid coupling. *Rock and Soil Mechanics*, 32(4), 1229-1233.
- [21] Li, G., & Liang, B. (2014). The effect of pore water pressure on response of roadway in soft rock. *Physical and Numerical Simulation of Geotechnical Engineering*, (15), 68.
- [22] Zhang, C., & Liu, J. (2012). Effects of Fluid-solid Coupling on Tunnel in a Saturated Soil Layer. *Physical and Numerical Simulation of Geotechnical Engineering*, (7), 37.
- [23] Höfle, R., Fillibeck, J., & Vogt, N. (2008). Time dependent deformations during tunnelling and stability of tunnel faces in fine-grained soils under groundwater. *Acta Geotechnica*, 3(4), 309-316.
- [24] Zaminfanavar Consulting Engineer (ZAFA), 2007, Geotechnical investigations Final Report (In Persian).
- [25] Engineers, S. C. (2014). Engineering Report of the Eastern-Western Part of Tehran Subway Line 7. Tehran, Iran: Sepasad Engineering Company (In Persian).
- [26] Itasca. (2013). FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 5.01. Itasca Consulting Group Inc.
- [27] Bear, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier Publishing Company.

نمی‌یابد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده در حالت زهکشی شده نشان می‌دهد که رفتار کوتاه‌مدت، پاسخ نهایی محیط دربرگیرنده‌ی تونل نیست از این رو باگذشت زمان میزان جابجایی‌های ایجادشده در اطراف فضای حفاری افزایش پیدا می‌کند؛ بنابراین پاسخ بلندمدت یا همان رفتار تحکیمی باید مورد توجه مهندسين و طراحان قرار گیرد زیرا بیشترین جابجایی‌های اطراف تونل مربوط به رفتار بلندمدت یا همان رفتار تحکیمی آن است.

مراجع

- [1] Wang, H. F. (2000). Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology. Princeton University Press.
- [2] Preisig, G. (2013). Regional simulation of coupled hydromechanical processes in fractured and granular porous aquifer using effective stress-dependent parameters (Doctoral dissertation, Université de Neuchâtel).
- [3] Rutqvist, J., & Stephansson, O. (2003). The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. *Hydrogeology Journal*, 11(1), 7-40.
- [4] Li, X. B., Zhang, W., Li, D. Y., & Wang, Q. S. (2008). Influence of underground water seepage flow on surrounding rock deformation of multi-arch tunnel. *Journal of Central South University of Technology*, 15(1), 69-74.
- [5] Prassetyo, S. H., & Gutierrez, M. (2016). Effect of surface loading on the hydro-mechanical response of a tunnel in saturated ground. *Underground Space*, 1(1), 1-19.
- [6] Graziani, A., & Boldini, D. (2011). Influence of hydro-mechanical coupling on tunnel response in clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3), 415-418.
- [7] Cattoni, E., Miriano, C., Boco, L., & Tamagnini, C. (2016). Time-dependent ground movements induced by shield tunneling in soft clay: a parametric study. *Acta Geotechnica*, 11(6), 1385-1399.
- [8] Wongsaroj, J., Soga, K., & Mair, R. J. (2013). Tunnelling-induced consolidation settlements in London Clay. *Géotechnique*, 63(13), 1103.
- [9] Ahn, S. Y., Ahn, K. C., & Kang, S. G. (2006). A study on the grouting design method in tunnel under ground water. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3), 400.
- [10] Yoo, C. (2005). Interaction between tunneling and groundwater—numerical investigation using three dimensional stress-pore pressure coupled analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 131(2), 240-250.
- [11] Yoo, C., Lee, Y., Kim, S. H., & Kim, H. T. (2012). Tunnelling-induced ground settlements in a groundwater drawdown environment—A case history. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 29, 69-77.

¹ Poroelasticity

² Coefficient of storage

³ ITASCA