

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد تونل و فضاهای زیرزمینی

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

نگارنده: عابدین حجتی تواندشتی

استاد راهنما:

دکتر احمد رمضانزاده

بهمن ۹۶

ب

شماره: ۲۴۹۶۲۰۱
تاریخ: ۹۶/۱۱/۲۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

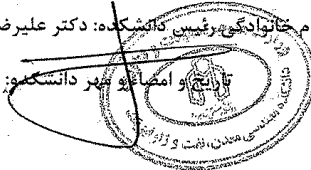
فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عابدین حجتی تواندشتی با شماره دانشجویی ۹۴۰۵۷۱۴ رشته مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهاى زیرزمینی تحت عنوان مدلسازی هیدرومکانیک نشست تونل در محیطهای شهری - مطالعه موردی تونل مترو خط ۷ تهران که در تاریخ ۹۶/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: خیلی خوب)			
<input type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/> نظری			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر احمد رمضانزاده	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	---	---	---
۳- استاد مشاور	---	---	---
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی نوروزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء: ۹۶/۱۱/۲۳



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم بہ

روح پاک پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونه در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم.

مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق کہ وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش برایم ہمہ مہر.

خواهرم، کہ وجودش شادی بخش و صفایش مایہ آرامش من است.

...

تشکر و قدردانی

■ با سپاس فراوان از راهنمایی‌ها و زحمات استاد محترم و گران قدر جناب آقای دکتر احمد رمضان‌زاده که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمایی‌های خود مرا در نگارش این اثر یاری نمودند.

■ با سپاس فراوان از جناب آقای مهندس مرتضی خسروی که وقت خود را بی‌شائبه در اختیار من گذاشته و با دقت نظر خاصی مشاوره لازم در این خصوص ارائه نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در پایان، دست همه عزیزانی که مرا در مسیر به سرانجام رساندن این تحقیق یاری نمودند، بخصوص دوستان عزیزم **مهندس مهدی باجولوند** و **مهندس نوید افراسیابی** را به گرمی می‌فشارم، امیدوارم که با کسب موفقیت‌های بعدی بتوانم زحماتشان را جبران کنم.

تعهدنامه

اینجانب **عابدین حجتی تواندشتی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **مدل سازی هیدرومکانیک نشست تونل در محیط‌های شهری - مطالعه موردی تونل مترو خط ۷ تهران** تحت راهنمایی دکتر احمد رمضانزاده متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

محدودیت فضاهای شهری، افزایش جمعیت و توسعه شهرها، نقش تونل به عنوان راه حلی مناسب جهت رفع نیازهای مختلف، بخصوص حمل و نقل و کاهش ترافیک سطح شهرها را برجسته تر می کند. از آنجا که اغلب محیطهای شهری دارای زمینهای سست و آبدار هستند، کنترل و تخمین نشست زمین یکی از مهمترین چالشهای حفر تونل در این مناطق است. نشست ناشی از تونل سازی همواره تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله جنس زمین، تانسور تنش منطقه، عمق حفاری، سطح آب زیرزمینی منطقه، روش حفاری و ... بوده که هر یک نقش عمده ای را در بروز نشست، در زمان حفاری و بهره برداری از تونل ایفا می کنند. با توجه به اهمیت کنترل و تخمین نشست زمین در تونل سازی مناطق شهری، در سالهای اخیر این موضوع بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل پیچیدگی های موجود در بررسی همه جانبه، اغلب این بررسی ها با ساده سازی های بسیاری همچون چشم پوشی از تغییرات سطح آب، عدم در نظر گرفتن پدیده های توأمان و ... همراه بوده است که تأثیر بسیار محسوسی بر نتایج حاصل از این بررسی ها داشته است. پیچیدگی مسأله زمانی است که کل یا بخشی از تونل، در زیر سطح ایستابی حفاری شود. در این شرایط نمی توان طراحی و تخمین های حاصل از این ساده سازی ها را دقیق دانست. در زمان حفر تونل، فضای ایجاد شده به عنوان یک کانال زهکشی عمل می کند. آب موجود در محیط به درون فضای حفر شده وارد می شود که این امر خود موجب تغییر در شرایط هیدرولیکی منطقه می شود. این تغییر در شرایط هیدرولیکی، بر ویژگی های مکانیکی محیط نیز اثر گذاشته و در نتیجه آن، امکان بروز جابجایی های جداره تونل بیشتر می شود. با توجه به اینکه راه حل های تحلیلی در دسترس از اندرکنش های هیدرومکانیکی، دارای محدودیت هایی از قبیل اعمال شرایط فیزیکی و مرزی می باشد. با پیشرفت فناوری اطلاعات و روش های عددی، روند حل مسائل هیدرومکانیک، به سمت حل عددی تغییر پیدا کرده است. در این پژوهش، با توجه به این که ۶۰ درصد از مسیر خط هفت متروی تهران زیر سطح ایستابی قرار دارد و مسیر حفاری تونل غالباً از مناطقی، با بافت فرسوده عبور می کند

کنترل و تخمین نشست ناشی از حفاری در کوتاه مدت و بلند مدت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو پس از انتخاب نرم‌افزار عددی متناسب با شرایط مسئله، مدل سه بعدی از تونل مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار FLAC3D ساخته می‌شود و پس از برقراری شرایط حاکم بر محیط، تغییرشکل‌های بدست آمده ناشی از عملیات حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج، میزان نشست ایجاد شده پس از عملیات حفاری، در حالت توأمان و غیرتوأمان به ترتیب ۱۹ و ۲۳ میلی‌متر می‌باشد. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده با داده‌های ابزار دقیق، مطابقت بالای روش توأمان نسبت به روش غیرتوأمان را نشان می‌دهد. همچنین تغییرشکل‌های اطراف فضای حفاری به شدت، به شرایط زهکشی و سطح آب زیرزمینی محیط وابسته است. بطوری که جابجایی‌ها و گسترش زون پلاستیک در اطراف فضای حفاری، در حالت زهکشی شده بیشتر از حالت زهکشی نشده می‌باشد. رفتار بلند مدت تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده نشان می‌دهد که تغییرشکل‌های ایجاد شده در حالت زهکشی نشده با گذشت زمان تغییری نمی‌کند. در صورتی که، در حالت زهکشی شده با گذشت زمان میزان جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: کوپل هیدرومکانیک، محیط متخلخل، محیط اشباع، نشست تونل، فشار منفذی، نرم‌افزار

FLAC3D

لیست مقالات مستخرج

حجتی تواندشتی ع، رمضانزاده ا و خسروی م.، (۱۳۹۶). مدل‌سازی توأمان هیدرومکانیک نشست تونل در محیط‌های شهری-مطالعه موردی تونل مترو خط ۷. سومین همایش منطقه‌ای و دوازدهمین همایش ملی تونل ایران، آذر ۱۳۹۶

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۲-۱- ضرورت و اهمیت پژوهش..... ۲
- ۳-۱- روش تحقیق..... ۳
- ۴-۱- سابقه موضوع..... ۳
- ۵-۱- اهداف پژوهش..... ۵
- ۶-۱- سازماندهی پایان نامه..... ۵

فصل دوم: مبانی و مفاهیم اندرکنش هیدرومکانیک

- ۱-۲- مقدمه..... ۸
- ۲-۲- انواع اندرکنش‌های هیدرومکانیکی حاکم بر محیط متخلخل..... ۸
- ۳-۲- محیط‌های انتقال دهنده سیال..... ۱۰
- ۱-۳-۲- محیط‌های پیوسته..... ۱۱
- ۲-۳-۲- محیط‌های ناپیوسته..... ۱۱
- ۴-۲- تقسیم‌بندی نیروها در محیط‌های اشباع..... ۱۲
- ۵-۲- روابط حاکم بر محیط متخلخل..... ۱۳

- ۱۵ ۱-۵-۲- فازهای موجود در محیط‌های اشباع
- ۱۵ ۲-۵-۲- بررسی تعادل برای خاک‌های اشباع
- ۱۶ ۳-۵-۲- تعادل مستقل فازها
- ۱۷ ۱-۳-۵-۲- تعادل فاز آب
- ۱۷ ۲-۳-۵-۲- تعادل اسکلت خاک
- ۱۸ ۶-۲- روابط هیدرومکانیکی حاکم بر محیط
- ۱۹ ۱-۶-۲- معادلات فاز سیال
- ۱۹ ۱-۱-۶-۲- معادله انتقال بخش سیال
- ۱۹ ۲-۱-۶-۲- معادله بقای جرم سیال
- ۲۰ ۲-۶-۲- رفتار اسکلت جامد
- ۲۰ ۱-۲-۶-۲- مفهوم تنش موثر
- ۲۵ ۲-۲-۶-۲- معادله تعادل
- ۲۵ ۷-۲- جمع بندی

فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته

- ۲۸ ۱-۳- مقدمه
- ۲۸ ۲-۳- مطالعات انجام شده
- ۲۸ ۱-۲-۳- مطالعات انجام شده به روش تفاضل محدود

۳۴	..... ۲-۲-۳- مطالعات انجام شده به روش المان محدود
۳۹	..... ۳-۲-۳- مطالعات انجام شده به روش المان مجزا
۴۰	..... ۳-۳- جمع بندی

فصل چهارم: زمین شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر احداث خط همفت متروی تهران

۴۴	..... ۱-۴- مقدمه
۴۴	..... ۲-۴- زمین شناسی مسیر احداث تونل
۴۵	..... ۱-۲-۴- تفکیک و توصیف واحدهای زمین شناسی مهندسی
۴۶	..... ۲-۲-۴- تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی
۴۷	..... ۳-۲-۴- وضعیت آبهای زیرزمینی در مسیر تونل
۴۸	..... ۳-۴- پارامترهای مربوط به ماشین حفاری و سیستم نگهداری
۴۹	..... ۴-۴- جمع بندی

فصل پنجم: مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار 3D FLAC

۵۲	..... ۱-۵- مقدمه
۵۲	..... ۲-۵- روش های عددی
۵۳	..... ۱-۲-۵- روش تفاضل محدود و نرم افزار 3D FLAC
۵۵	..... ۲-۲-۵- انواع روش های توأمان در روش های عددی

- ۵۶.....۳-۵- مدلسازی محدوده مورد مطالعه
- ۵۷.....۱-۳-۵- هندسه‌سازی
- ۵۸.....۲-۳-۵- انتخاب مدل رفتاری
- ۵۸.....۱-۲-۳-۵- مدل رفتاری محیط دربرگیرنده‌ی تونل
- ۵۹.....۲-۲-۳-۵- مدل رفتاری سپر ماشین حفار، سگمنت و تزریق
- ۶۰.....۳-۳-۵- مدلسازی جریان سیال
- ۶۱.....۱-۳-۳-۵- عدم پیکربندی شبکه برای جریان سیال
- ۶۱.....۲-۳-۳-۵- پیکربندی شبکه برای جریان سیال
- ۶۳.....۳-۳-۳-۵- خصوصیات لازم برای تحلیل جریان سیال
- ۶۳.....۱-۳-۳-۳-۵- ضریب نفوذپذیری
- ۶۳.....۲-۳-۳-۳-۵- دانسیته
- ۶۴.....۳-۳-۳-۳-۵- تخلخل
- ۶۴.....۴-۳-۳-۳-۵- مقاومت کششی سیال
- ۶۵.....۵-۳-۳-۳-۵- ضریب بایوت و مدول بایوت
- ۶۵.....۶-۳-۳-۳-۵- مدول حجمی سیال
- ۶۶.....۴-۳-۳-۵- پارامترهای هیدرولیکی محیط مورد مطالعه
- ۶۶.....۴-۳-۵- اعمال شرایط مرزی

- ۶۷..... ۱-۴-۳-۵- جابجایی‌های مرزی
- ۶۷..... ۲-۴-۳-۵- تنش‌های مرزی
- ۶۸..... ۵-۳-۵- تنش‌های اولیه
- ۶۹..... ۶-۳-۵- تعادل اولیه
- ۷۱..... ۷-۳-۵- حفاری مدل
- ۷۲..... ۱-۷-۳-۵- تعیین خصوصیات فصل مشترک سپر، پوشش نهایی و تزریق
- ۷۳..... ۲-۷-۳-۵- پیشروی حفاری و نصب سیستم نگهداری
- ۷۸..... ۴-۵- مقایسه نتایج در حالت توأمان و غیرتوأمان با داده‌های ابزار دقیق
- ۷۹..... ۱-۴-۵- نتایج بدست آمده در حالت توأمان هیدرومکانیک
- ۸۱..... ۲-۴-۵- نتایج بدست آمده در حالت غیرتوأمان هیدرومکانیک
- ۸۳..... ۵-۵- جمع‌بندی

فصل ششم: مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت

- ۸۶..... ۱-۶- مقدمه
- ۸۶..... ۲-۶- تحلیل عوامل موثر بر بروز نشست در تونلسازی
- ۸۶..... ۱-۲-۶- تحلیل تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده
- ۹۰..... ۲-۲-۶- تحلیل تغییرات تنش‌های برجا
- ۹۱..... ۳-۲-۶- بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی

۹۵ ۴-۲-۶- بررسی رفتار ۳۰ روزه تونل در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

۹۷ ۳-۶- جمع بندی

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۰۰ ۱-۷- نتیجه گیری

۱۰۲ ۲-۶- پیشنهادات

۱۰۳ منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): اندرکنش‌های هیدرومکانیکی موثر در محیط (Rutqvist & Stephansson., 2003)..... ۹
- شکل (۲-۲): فرآیندهای هیدرومکانیکی مستقیم، حاکم بر محیط متخلخل (Preisig., 2013)..... ۱۰
- شکل (۳-۲): تصویر شماتیک از شبکه‌ای از فضاها بین ذره‌های در یک محیط متخلخل (جولایی، ۱۳۸۹)..... ۱۱
- شکل (۴-۲): طبقه بندی نیروها در محیط‌های اشباع (Mitchell & Soga., 2005)..... ۱۳
- شکل (۵-۲): ماده متخلخل تحت تأثیر فشار هیدرواستاتیک الف) افزایش فشار داخلی، ب) عدم افزایش فشار داخلی (Zienkiewicz et al., 1999)..... ۲۳
- شکل (۱-۳): مقایسه روش‌های عددی و تحلیلی در کوتاه مدت و بلند مدت الف) تونل نفوذپذیر ب) تونل نفوذناپذیر (Graziani & Boldini., 2012)..... ۳۰
- شکل (۲-۳): نمودار تغییرات فشار هیدرولیکی در مقطع MII-2 (Li et al., 2016)..... ۳۲
- شکل (۳-۳): نمودار تغییرات فشار منفذی الف) رس ب) گرانیت (Prasetyo & Gutierrez, 2016) ... ۳۴
- شکل (۴-۳): تغییرات نشست نسبت به افت سطح آب زیرزمینی بعد از اتمام حفاری تونل (Yoo et al., 2008)..... ۳۷
- شکل (۱-۴): موقعیت متروی خط هفت تهران (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)..... ۴۵
- شکل (۲-۴): پروفیل زمین‌شناسی مربوط به کیلومتر ۲۱+۵۴۰ (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)..... ۴۶
- شکل (۱-۵): هندسه‌ی مدل..... ۵۷
- شکل (۲-۵): وضعیت قرارگیری لایه‌ها..... ۵۹
- شکل (۳-۵): سطح آب زیرزمینی در مدل..... ۶۲
- شکل (۴-۵): شرایط مرزی و تنشی..... ۶۸

- شکل (۵-۵): کانتور تنش‌های قائم بعد از تعادل اولیه ۶۹
- شکل (۶-۵): کانتور جابجایی‌های قائم بعد از تعادل اولیه ۷۰
- شکل (۷-۵): کانتور فشار منفذی بعد از تعادل اولیه ۷۰
- شکل (۸-۵): نمودار حداکثر نیروی نامتعادل بعد از تعادل اولیه ۷۱
- شکل (۹-۵): وضعیت زون‌های پلاستیک بعد از تعادل اولیه ۷۱
- شکل (۱۰-۵): روند پیشروی سپر و نصب سیستم نگهداری ۷۴
- شکل (۱۱-۵): کانتور جابجایی قائم در راستای سپر ماشین حفار ۷۵
- شکل (۱۲-۵): زون‌های پلاستیک در اطراف سپر ماشین حفار ۷۵
- شکل (۱۳-۵): نمودار جابجایی قائم در متر ۱ متر در تاج تونل ۷۶
- شکل (۱۴-۵): کانتور جابجایی‌های قائم پس از ۱۵ گام حفاری ۷۷
- شکل (۱۵-۵): گسترش زون پلاستیک پس از ۱۵ گام حفاری ۷۷
- شکل (۱۵-۵): کانتور تغییرات فشار منفذی پس از ۱۵ گام حفاری ۷۸
- شکل (۱۶-۵): نمودار جابجایی قائم در متر ۱ متر واقع در تاج تونل پس از ۱۵ گام حفاری ۷۸
- شکل (۱۷-۵): حداکثر نشست اندازه‌گیری شده از ابزار دقیق در کیلومتر ۲۱+۵۴۰ پس از حفاری ۷۹
- ۷۹
- شکل (۱۸-۵): جابجایی قائم در متر ۶/۸ متر در حالت توأمان ۸۰
- شکل (۱۹-۵): کانتور جابجایی قائم پس از حفاری در حالت توأمان ۸۰
- شکل (۲۰-۵): کانتور فشار منفذی پس از حفاری در حالت توأمان ۸۱
- شکل (۲۱-۵): جابجایی قائم در متر ۶/۸ متر در حالت غیر توأمان ۸۲
- شکل (۲۲-۵): کانتور جابجایی قائم پس از حفاری در حالت غیر توأمان ۸۲

- شکل (۵-۲۳): کانتور فشار منفذی پس از حفاری در حالت غیرتوأمان ۸۳
- شکل (۶-۱): کانتور جابجایی قائم پس از عملیات حفاری در حالت زهکشی شده ۸۷
- شکل (۶-۲): کانتور جابجایی قائم پس از عملیات حفاری در حالت زهکشی نشده ۸۸
- شکل (۶-۳): زون‌های پلاستیک ایجاد شده پس از عملیات حفاری در حالت الف- زهکشی شده ب) زهکشی نشده ۸۸
- شکل (۶-۴): نشست زمین پس از عملیات حفاری در متر اژ ۶/۸ متر ۸۹
- شکل (۶-۵): تغییرات فشار منفذی از سطح تا کف مدل ۹۰
- شکل (۶-۶): نشست زمین در متر اژ ۶/۸ متر به ازای ضرایب تنش مختلف ۹۱
- شکل (۶-۷): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی ۹/۵ متر از سطح مدل ۹۲
- شکل (۶-۸): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی ۱۷ متر از سطح مدل ۹۳
- شکل (۶-۹): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی ۲۵ متر از سطح مدل ۹۳
- شکل (۶-۱۰): گسترش زون‌های پلاستیک در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی الف): ۲۵ متر ب): ۳۳ متر ج): ۴۰/۵ متر ۹۴
- شکل (۶-۱۱): نشست ایجاد شده در سطح زمین در متر اژ ۶/۸ متر ۹۴
- شکل (۶-۱۲): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه در حالت زهکشی نشده ۹۵
- شکل (۶-۱۳): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه در حالت زهکشی شده

۹۶.....

شکل (۶-۱۴): گسترش زون‌های پلاستیک در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه الف: زهکشی نشده

ب: زهکشی شده..... ۹۶.....

شکل (۶-۱۵): نشست ایجاد شده پس از یک ماه در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده در متر ۶/۸

متر..... ۹۷.....

فهرست جدول‌ها

- جدول (۴-۱): مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل ۴۶
- جدول (۴-۲): مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل ۴۷
- جدول (۴-۳): مشخصات ماشین حفاری و سیستم نگهداری ۴۸
- جدول (۵-۱): پارامترهای مدل موهر-کلمب ۵۹
- جدول (۵-۲): پارامترهای مکانیکی سپر، پوشش نهایی و تزریق ۶۰
- جدول (۵-۳): پارامترهای هیدرولیکی محیط ۶۶
- جدول (۵-۴): خواص انواع فصل مشترک ۷۳

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

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 زیست محیطی و فنی بسیار ضروری است. در این میان، موضوع نشست ناشی از تونلسازی 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 تونلسازی مکانیزه در شرایط مختلف مکانیکی و هیدرولیکی منطقه ارائه شده است. در بین روش‌های مختلف، استفاده از روش‌های عددی به دلیل قدرت محاسبه بالا، ارائه پاسخ‌های نسبتاً سریع با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف مسئله کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. بررسی اندرکنش هیدرومکانیک فضای حفر شده بر جابه‌جایی‌های اطراف فضای حفاری در کوتاه مدت و بلند مدت از ویژگی‌های برجسته کاربرد روش‌های عددی در مدلسازی عملیات تونلسازی است.

۱-۲- ضرورت و اهمیت پژوهش

از آن‌جا که بروز نشست در مناطق شهری می‌تواند هزینه‌ها و خسارت‌های جبران ناپذیری چه از لحاظ مالی و چه از لحاظ جانی برجای بگذارد، تخمین دقیق از میزان نشست و راهکارهای مناسب در زمان حفر و بهره‌برداری تونل بسیار مهم است. ارزیابی دقیق و در نظر گرفتن عوامل مختلف، ضرورت استفاده از روشی که مناسب انجام این کار باشد را بیش از پیش برجسته می‌کند. براساس نتایج تحقیقات متعدد انجام شده - روابط تجربی، تحلیلی یا عددی ساده - بدلیل ساده‌سازی‌های فراوان و نیز تغییرات شرایط سطح ایستابی،

سبب بدست آمدن نتایجی دور از واقعیت می‌شوند که این خود باعث بروز مخاطراتی می‌گردد. مطالعات عددی که تاکنون در زمینه نشست تونل در مناطق شهری صورت گرفته است اغلب با تمرکز بر تحلیل مکانیکی یا صرفاً هیدرولیکی، به بررسی موضوع پرداخته اند. فلذا به نظر می‌رسد نتایج حاصله با حالتی که مدلسازی شرایط هیدرولیکی و مکانیک بطور توأمان در نظر گرفته شده باشد، تفاوت داشته و کاربرد روش توأمان هیدرومکانیک دارای دقتی به مراتب بالاتر نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. بنابراین برای ارزیابی دقیق نشست زمین در مناطق اشباع، کاربرد مدل‌سازی عددی توأمان هیدرومکانیک جهت تخمین نشست، ضرورت جدی خواهد داشت.

۱-۳- روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا سوابق موضوع و کارهای مطالعاتی که تا کنون انجام شده است مورد بررسی قرار می‌گیرند. در مرحله‌ی بعد اطلاعات ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژی منطقه و اطلاعات مربوط به داده‌های ابزار دقیق نشست‌سنجی در قطعه شمالی - جنوبی خط هفت تهران جمع‌آوری و دسته‌بندی می‌شود. سپس مقطع موردنظر برای مدلسازی انتخاب، و در مرحله‌ی بعد براساس شرایط حاکم بر محیط، نرم‌افزار مدلسازی مناسب انتخاب می‌شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی هیدرومکانیک نشست، نتایج بدست آمده با داده‌های حاصل از ابزار دقیق مقایسه می‌گردد. در انتها، با توجه به اهداف مسأله مدل ساخته شده مورد تحلیل حساسیت قرار می‌گیرد.

۱-۴- سابقه موضوع

با توجه به تأثیر بالای برهم‌کنش‌های هیدرومکانیکی بر تغییر شکل‌های اطراف فضای حفاری، داشتن شناختی مناسب از سابقه‌ی این برهم‌کنش‌ها، می‌تواند منجر به درک بهتر این پدیده‌ها شود. از این رو در این قسمت به طور خلاصه، به بررسی تاریخچه‌ی اندرکنش‌های هیدرومکانیکی پرداخته می‌شود.

برهم کنش‌های هیدرومکانیکی مستقیم در پوسته زمین از اواخر سال ۱۸۰۰ شناخته شدند (Wang., 2000). نخستین مشاهدات مرتبط با این موضوع مربوط به تغییرات سطح آب چاه‌ها نسبت به بارگذاری‌های مختلف، همچنین نشست‌های سطحی ایجاد شده ناشی از استخراج آب، نفت و گاز بوده است. مینزر^۱ 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 رابطه‌ی کلاسیک و بنیادی ترزاقی^۲ در سال ۱۹۲۳، بصورت زیر شد (Rutqvist & Stephansson, 2003):

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

که در رابطه فوق σ'_{zz} تنش موثر، σ_{zz} تنش عمودی کل و p فشار منفذی می‌باشد. معادله فوق بنیادی‌ترین رابطه بین فرآیند‌های مکانیکی و هیدرولیکی می‌باشد. این قانون تنش موثر ترزاقی در مسائلی چون آنالیز نشست، پایداری سد و شیب‌های سنگی، فناوری‌های استخراج برای شبیه‌سازی چاه‌های نفتی و ... به کار برده می‌شود.

تیس^۳ در سال ۱۹۳۵ رفتار چاه‌های پمپاژ شده را مورد مطالعه قرار داد. جاکوب^۴ در سال ۱۹۴۰ با توسعه مطالعات تیس، ضریب ذخیره شوندگی^۵ در محیط‌های متخلخل را ارائه نمود. سرانجام بایوت^۶ در سال ۱۹۴۱ مفهوم یک بعدی تحکیم ترزاقی را به یک تئوری کلی سه بعدی توسعه داد که این تئوری بر هم کنش‌های بین سیال منفذی و واکنش‌های الاستیک را بیان می‌کند که تئوری پوروالاستیسیته نامگذاری شد. تئوری پایه بایوت برای محیط‌های پوروالاستیک خطی، بعد از آن توسط افراد دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت تا اینکه برای سیستم‌های غیر خطی نیز توسعه پیدا کرد. به هر حال مدل‌های توسعه یافته توسط بایوت،

¹Meinzer

²Terzaghi

³Theis

⁴Jacob

⁵Biot

⁶Coefficient of storage

⁷poroelasticity

تیس و ترزاقی، پایه و اساس تحلیل هیدرومکانیکی توامان شدند که امروزه در کارهای مکانیک سنگی و هیدروژئولوژی مورد استفاده قرار می گیرند (Rutqvist & Stephansson., 2003).

۱-۵- اهداف پژوهش

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار عددی تفاضل محدود FLAC3D، با در نظر گرفتن اثر توامان هیدرومکانیک، نشست ناشی از حفاری تونل بررسی شده است. اهدافی که در این تحقیق دنبال می شوند عبارتند از:

- بررسی میزان نشست در زمان حفاری در دو حالت توامان و غیرتوامان و مقایسه‌ی نتایج با داده‌های ابزار دقیق
- بررسی تغییرات فشار منفذی در اطراف فضای حفاری
- تعیین تاثیر تنش‌های برجای منطقه بر پاسخ هیدرومکانیک تونل
- بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی بر نشست نهایی
- بررسی رفتار زهکشی شده و زهکشی نشده‌ی محیط دربرگیرنده تونل
- بررسی رفتار ۳۰ روزه محیط دربرگیرنده تونل

۱-۶- سازمان دهی پایان نامه

این تحقیق شامل هفت فصل می باشد. در فصل اول پس از ارائه کلیاتی در مورد موضوع و اهمیت بررسی آن، اهداف و روش تحقیق توضیح داده شده است. در فصل دوم این پایان نامه تاثیرات توامان بین فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی، مفاهیم پایه مرتبط با این فرآیندها، انواع محیط‌های انتقال دهنده سیال و روابط حاکم بر محیط‌های اشباع مورد بررسی قرار می گیرد. فصل سوم شامل ادبیات موضوع و همچنین مطالعاتی است که در ارتباط با موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم مشخصات زمین شناسی و

پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه، ارائه شده است. فصل پنجم شامل انتخاب نرم‌افزار و شبیه‌سازی عددی محدوده مورد مطالعه در دو حالت توأمان و غیرتوأمان می‌باشد. فصل ششم به تحلیل نتایج و آنالیز حساسیت مدل پرداخته شده است. و در فصل هفتم نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

فصل دوم

مبانی و معانیسم اندر کنش هیدرو مکانیک

۲-۱- مقدمه

رفتار محیط‌های سنگی و خاکی عمدتاً تابعی از اندرکنش اجزای مختلف تشکیل دهنده‌ی این محیط‌ها (فازهای جامد و مایع) است. مفهوم تنش موثر و تئوری پوروالاستیسیت^۱ از مفاهیمی است که توسط محققین مختلف براساس اندرکنش این فازها و به منظور 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، موثر است. از این رو در این فصل انواع اندرکنش‌های هیدرومکانیکی حاکم بر محیط، محیط‌های انتقال دهنده‌ی سیال و نیروهای حاکم بر محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها نیز به بررسی روابط حاکم بر محیط‌های متخلخل پرداخته می‌شود.

۲-۲- انواع اندرکنش‌های هیدرومکانیکی حاکم بر محیط متخلخل

اندرکنش هیدرومکانیک در محیط‌های اشباع و متخلخل سبب ایجاد جابجایی‌هایی می‌شود که این جابجایی‌ها ناشی از تغییرات فشار منفذی و تنش‌های منطقه می‌باشد که اثر هر یک از این تغییرات به شرح زیر می‌باشد (Prasetyo., 2017):

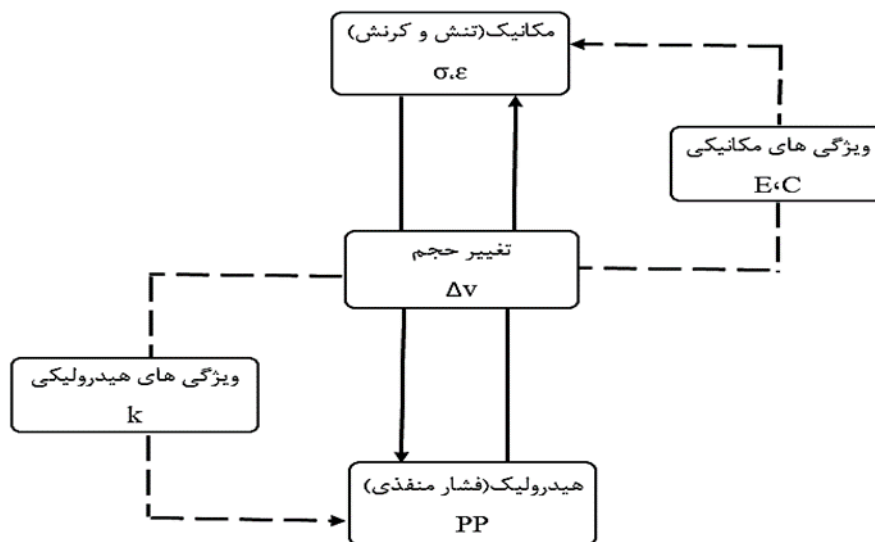
- خروج سیال سبب کاهش فشار منفذی، در نتیجه افزایش تنش موثر می‌شود. افزایش تنش موثر موجب نشست تحکیمی خاک، و انتقال این جابجایی‌ها به سطح زمین می‌شود.
- افزایش تنش موجب بسته شدن فضاها^۲ی خالی محیط، در نتیجه تغییر فشار منفذی می‌شود. به عبارت دیگر تغییر شکل موجب تغییر جریان سیال و بالعکس می‌شود.

^۱poroelasticity

از این رو، اندرکنش‌های هیدرومکانیکی می‌توانند به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم محیط مورد نظر را تحت تأثیر قرار دهند که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود (Wang., 2000). در شکل (۱-۲) اندرکنش‌های هیدرومکانیکی موثر در محیط ارائه شده است (Rutqvist & Stephansson., 2003):

الف) اندرکنش‌های هیدرومکانیکی مستقیم: زمانی رخ می‌دهد که تغییرات تنش ناشی از فضای حفر شده موجب تغییر فشار منفذی می‌شود (کوپل جامد به مایع^۱) و بالعکس، تغییر فشار منفذی سبب تغییر تنش و جابجایی‌های محیط می‌شود (کوپل مایع به جامد^۲). این نوع برهم کنش‌ها عمدتاً به تغییرات حجم منافذ وابسته هستند.

ب) اندرکنش‌های هیدرومکانیکی غیرمستقیم: در این حالت فرآیندهای هیدرولیکی و مکانیکی نیز ممکن است از طریق تغییر خواص هیدرولیکی یا مکانیکی محیط اطراف، بریکدیگر اثر بگذارند. به عبارت دیگر تغییر شکل‌های ایجاد شده موجب تغییر تخلخل و نفوذپذیری محیط می‌شود که در نتیجه‌ی آن شرایط مکانیکی و هیدرولیکی حاکم بر محیط تغییر می‌کند.



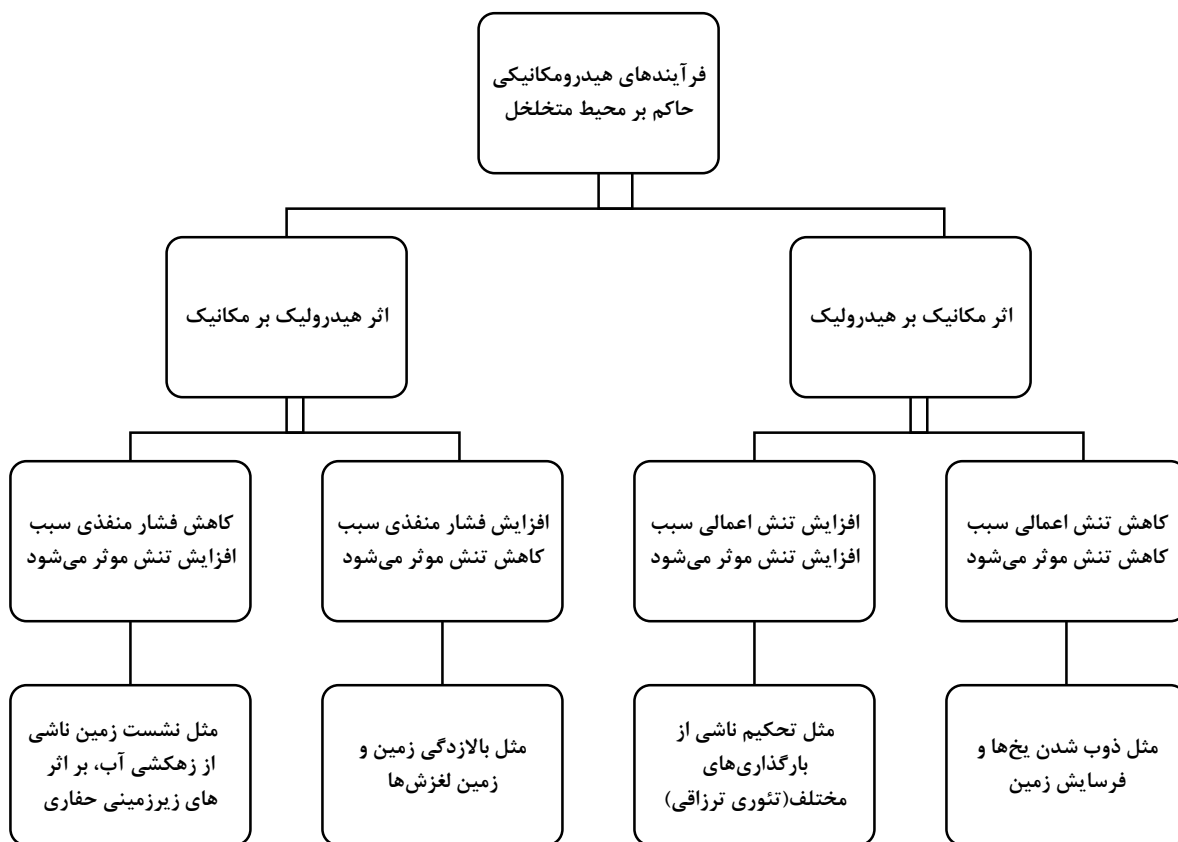
شکل (۱-۲): اندرکنش‌های هیدرومکانیکی موثر در محیط (Rutqvist & Stephansson., 2003)

^۱ solid-to-fluid coupling

^۲ fluid-to-solid coupling

خلاصه‌ای از فرآیندهای هیدرومکانیکی مستقیم، حاکم بر محیط متخلخل در شکل (۲-۲) ارائه شده

است (Preisig., 2013):



شکل (۲-۲): فرآیندهای هیدرومکانیکی مستقیم، حاکم بر محیط متخلخل (Preisig., 2013)

۲-۳- محیط‌های انتقال دهنده سیال

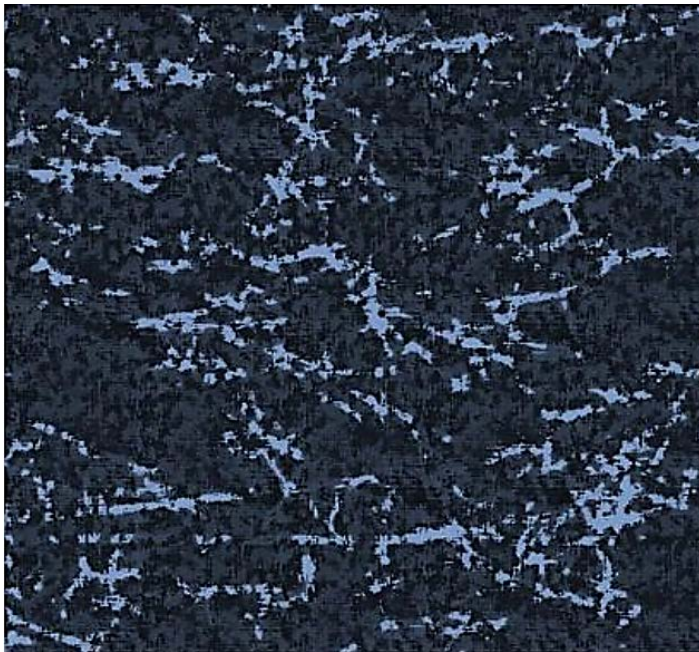
تاکنون طبقه‌بندی‌های مختلفی از دیدگاه‌های مختلف برای محیط‌های انتقال دهنده سیال در زمین و توده

سنگ‌ها ارائه شده است، اما شاید کاربردی‌ترین طبقه‌بندی، تقسیم این محیط‌ها به دو دسته‌ی پیوسته و

ناپیوسته باشد (Oda., 1982).

۲-۳-۱- محیط‌های پیوسته

محیط‌های پیوسته به محیط‌هایی اطلاق می‌شود که محیط تقریباً فاقد درزه و شکاف بوده و انتقال سیال به وسیله شبکه پیوسته‌ای از حفرات درون بافتی محیط انجام می‌شود. اغلب خاک‌ها و توده‌های متخلخل مثال‌های از این دسته محیط‌ها می‌باشد (Oda., 1982). شکل (۲-۲) تصویر شماتیکی از فضا‌های بین دانه‌ای در یک محیط متخلخل می‌باشد (جولایی، ۱۳۸۹).



شکل (۲-۳): تصویر شماتیک از شبکه‌ای از فضا‌های بین ذره‌ای در یک محیط متخلخل (جولایی، ۱۳۸۹)

در این گونه محیط‌ها، نفوذپذیری به شکل، ابعاد، نوع دانه‌بندی و نحوه‌ی قرارگیری ذرات بستگی دارد. هر چه فضا‌های خالی موجود، بیشتر به هم مرتبط باشند نفوذپذیری بیشتر می‌شود و عموماً هرچه دانه‌ها ریزتر باشند اندازه متوسط حفره‌ها کوچکتر است و در نتیجه میزان نفوذپذیری مقدار کمتری می‌شود.

۲-۳-۲- محیط‌های ناپیوسته

محیط‌های ناپیوسته خود به دو زیر گروه محیط‌های ناپیوسته با شبکه شکستگی‌های منظم و محیط‌های

ناپیوسته با شبکه شکستگی نامنظم تقسیم می‌شوند. محیط‌های دارای شکستگی منظم دارای شکستگی‌های موازی می‌باشند و شکستگی‌های آن‌ها عموماً طول‌های نامحدود دارند و بطور کلی می‌توان گفت شبکه ساده‌ای دارند. این محیط‌ها پایه اغلب روش‌های تحلیلی می‌باشند. در حالی که، محیط‌های دارای شبکه شکستگی نامنظم نسبت به حالت قبلی عمومیت بیشتری داشته و به واقعیت شبکه شکستگی‌های موجود در طبیعت نزدیک‌ترند. به عبارت دیگر در طبیعت بیشتر یافت می‌شوند. این محیط‌ها تنها دسته شکستگی‌های موازی با طول نامحدود را مبنا قرار نمی‌دهند بلکه شبکه شکستگی را مجموعه‌ای از تمام شکستگی‌ها چه با طول محدود و چه با طول نامحدود و با حالات موازی یا غیر موازی در نظر می‌گیرند (Oda, M. 1982). با توجه به اینکه در این پژوهش محیط مورد مطالعه خاکی و متخلخل می‌باشد، در ادامه به بررسی نیروها و روابط حاکم بر این محیط‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۴- تقسیم‌بندی نیروها در محیط‌های اشباع

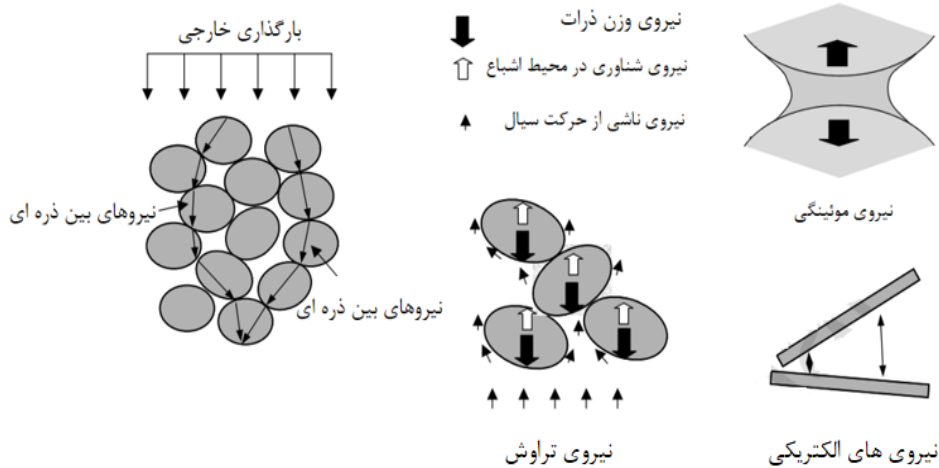
- در محیط‌های اشباع، نیروهای مختلفی در محیط و بین ذرات تشکیل دهنده وجود دارد. این نیروها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است (Mitchell & Soga., 2005).
- نیروهای اسکلتی^۱: این نیروها بر اثر بارگذاری‌های خارجی در محیط به وجود می‌آیند و از طریق ذرات انتقال می‌یابد.
 - نیروهای ذره‌ای^۲: این نیروها شامل نیروی وزن ذرات، نیروی شناوری و نیروی ناشی از حرکت سیال از میان شبکه منافذ می‌باشد.
 - نیروهای تماسی^۳: این نیروها شامل نیروهای الکتریکی و موئینگی می‌باشند. که در خاک‌های

^۱ skeletal forces

^۲ particle level forces

^۳ contact level forces

غیراشباع وجود دارند.



شکل (۲-۴): طبقه بندی نیروها در محیطهای اشباع (Mitchell & Soga., 2005)

۲-۵- روابط حاکم بر محیط متخلخل

محیط متخلخل یا مواد متخلخل به محیطهایی اطلاق می شود که حفرات در سراسر آن وجود دارند. این حفرات به وسیله ی سیال همانند سیال و یا گاز پر می شود 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 (Bear., 1972).

در محیطهای متخلخل، همواره محیط مابین دو وضعیت اشباع و نیمه اشباع قرار دارد. حل دقیق فازهای غیر اشباع به حل محیطهای چند فازی منجر می گردد. فازهای جامد، مایع و گاز از جمله فازهایی است که برای مدل سازی محیطهای متخلخل در نظر گرفته می شود. با این حال در مسایل ژئوتکنیکی حل دوفازی یا هیدرومکانیکی تقریب قابل قبولی از جواب واقعی مسأله بدست می دهد. در ساده ترین حالت می توان محیط مورد نظر را به صورت دو فاز 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 (Bear., 1972).

در تحقیق حاضر از ایده تنش موثر در تحلیل رفتار محیط اشباع استفاده می‌گردد. پس از شناسایی محیط و پدیده‌های فیزیکی موجود به شرح معادلات هیدرومکانیکی حاکم بر محیط پرداخته می‌شود. این گام براساس فرضیات و ساده‌سازی‌هایی است که براساس برداشت از پاسخ واقعی محیط در مطالعه پدیده‌های گوناگون و مقدار تخمینی مجاز برای حل مسایل مختلف انتخاب می‌شود. در بررسی پدیده‌های حاکم بر محیط، در مطالعه حاضر هر یک 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 بصورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در واقع از آنجا که شناخت جزئیات هندسه‌ی مرزهای بین فازی مختلف و معرفی پارامترهای معرف پدیده‌های مشاهده‌ای در این سطح نامتعارف است با یک ساده‌سازی، مدل ریاضی حاکم بر محیط متخلخل از سطح میکروسکوپی به ماکروسکوپی ارتقا داده می‌شود (Bear., 1972).

فرضیات اساسی به کار رفته در این معادلات را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد (Bear., 1972):

- کل محیط از برهم نهی دو محیط پیوسته یعنی خاک و سیال تشکیل می‌شود.
- اسکلت همگن و دارای رفتار خطی فرض شده است.
- شرایط استاتیکی و جریان آرام فرض شده است.
- ذرات جامد تراکم‌ناپذیر فرض شده‌اند.
- قانون حاکم بر حرکت آب مایع، قانون داریسی تعمیم یافته است.
- چگالی آب تابع فشار آب است.

- نفوذپذیری محیط ثابت فرض شده است.

- از پدیده خزش صرف نظر می‌شود.

در این بخش کلیاتی از مکانیک محیط‌های اشباع مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این در سیستم-های دو فازی، محیط از دو قسمت جامد و مایع تشکیل شده است، از این رو، برای شناخت بهتر خصوصیات محیط اشباع لازم است خصوصیات فازها بررسی شود.

۲-۵-۱- فازهای موجود در محیط‌های اشباع

خاک اشباع متشکل از دو فاز است که تعداد این فازها حالت تنش را تحت تأثیر قرار می‌دهد، از این رو باید به درستی تفکیک و شناسایی شوند. در ابتدا باید مفهوم مشخصی از فاز بسط داده شود. برای این که بخشی از یک ماده قابلیت آن را داشته باشد که به عنوان یک فاز مستقل تعریف شود باید شرایط زیر را داشته باشد (Bear., 1972):

- نسبت به سایر بخش‌های ماده دارای خواص متفاوتی باشد.

- مرز و فصل مشترک قابل تشخیصی نسبت به سایر بخش‌ها داشته باشد.

براساس این تعریف می‌توان دو فاز جامد و مایع را به سهولت در خاک‌های اشباع از هم متمایز کرد.

۲-۵-۲- بررسی تعادل برای خاک‌های اشباع

از آنجایی که رفتار محیط‌های اشباع به وسیله اسکلت جامد و سیال منفذی کنترل می‌شود در این قسمت به بررسی تعادل در محیط‌های اشباع پرداخته می‌شود (Fredlund., 2014).

نیروها را در یک تقسیم‌بندی کلی، می‌توان به دو گروه نیروهای خارجی و داخلی تقسیم نمود که در آن نیروهای خارجی از خارج محیط به آن اثر می‌کنند و نیروهای داخلی برای تأمین تعادل محیط در داخل آن

بوجود می‌آیند که نیروهای ثقلی و اندرکنش بین فازها از این نوع می‌باشند. تنش‌های قائم و برشی حاکم بر محیط در سه جهت X ، Y و Z عمل می‌کنند. معادله تعادل المان مربوطه با فرض آن که المان خاک هیچ شتابی تحمل نمی‌کند در جهت Y به صورت زیر نوشته می‌شود (Fredlund., 2014):

$$\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g \right) dx \cdot dy \cdot dz = 0 \quad (1-2)$$

به طور مشابه می‌توان معادلات را در راستای X و Z نوشت.

۲-۵-۳- تعادل مستقل فازها

در آنالیز تعادل فرض می‌شود که هر فاز به صورت مستقل، خطی و پیوسته در هر جهت رفتار می‌کند. بنابراین می‌توان برای هر یک از فازها یک معادله تعادل مستقل نوشت و آن‌گاه با توجه به خطی بودن میدان تنش، اصل جمع آثار قوا را برای فازها به کار برد. بدین صورت تعادل کل المان خاک از جمع معادلات تعادل برای هر یک از فازها حاصل می‌شود. (Fredlund., 2014).

مساحت و حجم مربوط به هر فاز را می‌توان به صورت نسبتی از ابعاد المان خاک در نظر گرفت. این کار با استفاده از تخلخل مربوط به هر فاز صورت می‌گیرد. تخلخل هر فاز به صورت نسبت حجم آن فاز به حجم کل تعریف می‌شود. برای یک خاک همگن، تخلخل برای هر فاز برابر سطح آن فاز به سطح کل مقطع است. مجموع تخلخل فازهای جامد (n_s) و سیال (n_w) برابر یک می‌باشد:

$$n_s + n_w = 1 \quad (2-2)$$

به طور مشابه جرم مخصوص کل خاک می‌تواند براساس جرم فازهای مختلف بیان می‌شود:

$$\rho = \frac{M_s + M_w}{V} = \frac{V_s \rho_s + V_w \rho_w}{V} = n_s \rho_s + n_w \rho_w \quad (3-2)$$

۲-۵-۳-۱- تعادل فاز آب

تعادل فاز آب در راستای Y به شکل زیر بیان می‌گردد (Fredlund., 2014):

$$\left(n_w \frac{\partial p_w}{\partial y} + n_w \rho_w g + F_{sy}^w \right) dx. dy. dz = 0 \quad (۴-۲)$$

که در آن فشار آب حفره‌ای و F_{sy} نیروی اندرکنشی بین فاز آب و ذرات خاک در راستای Y می‌باشد.

۲-۵-۳-۲- تعادل اسکلت خاک

همانطور که گفته شد تعادل کل یک المان خاک اشباع برابر مجموع معادلات تعادل فازهای مستقل می‌باشد. بنابراین تعادل اسکلت خاک در راستای Y را می‌توان از تفاضل رابطه تعادل کلی و جمع رابطه تعادل مربوط به فاز آب حاصل کرد (Fredlund., 2014):

$$\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} - n_w \frac{\partial p_w}{\partial y} - n_w \rho_w g - F_{sy}^w \right) dx. dy. dz = 0 \quad (۵-۲)$$

با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، معادلات هیدرومکانیکی حاکم بر محیط متخلخل اشباع در ادامه آورده شده است. این معادلات به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول با توجه به قانون اول ترمودینامیک بدست می‌آیند و شامل معادلات پایستگی بقا حاصل از پیوستگی برای فازهای جریانی و معادله تعادل برای فاز اسکلت جامد می‌باشد. دسته دوم از قانون دوم ترمودینامیک بدست می‌آید و معادلات جریان فاز مایع و قانون رفتاری اسکلت جامد را شامل می‌شود. در یک بیان خلاصه طبق قانون اول ترمودینامیک کار انجام شده روی محیط و انرژی حرارتی رسیده به آن در هر زمان متعادل می‌باشد. قانون دوم ترمودینامیک در واقع شرایط تعادل ترمودینامیکی محیط را برقرار می‌نماید که انتقال خود به خود سیستم

از یک وضعیت تعادل به وضعیت تعادل دیگر در نتیجه کاهش آنتروپی رخ می‌دهد.

۲-۶- روابط هیدرومکانیکی حاکم بر محیط

به طور کلی محیط خاک‌های اشباع به صورت یک محیط شامل فاز اسکلت (خاک) و سیال در نظر گرفته می‌شود. در مسائل محیط متخلخل در نظرگیری تعاملات بین فازی سبب پیچیدگی در روند محاسبات می‌گردد. در این قبیل مسائل تحت شرایطی خاص تأثیر یک فاز به فاز دیگر مشخص می‌باشد. از جمله این شرایط می‌توان به بارگذاری بلند مدت در محیط نفوذپذیر و حالت زهکشی نشده در بارگذاری آبی اشاره کرد. در محیط‌های نفوذپذیری که تحت بارگذاری آهسته و تقریباً استاتیکی قرار ندارد، با ایجاد حالت زهکشی شده، فشار آب حفره‌ای مستقل از تغییر شکل ماده قابل تعیین می‌باشد. این شرایط با فرض زمان بینهایت برای حل مسأله قابل دستیابی می‌باشد (Zienkiewicz et al., 1999).

حالت زهکشی نشده در بارگذاری‌های سریع و در محیط نفوذپذیر از دیگر مواردی است که می‌توان در آن از تعاملات بین فازی چشم‌پوشی کرد. در این شرایط با توجه به پیوستگی فاز جامد و سیال، فشاری که در سیال ایجاد می‌شود با یک رفتار واحد به فاز جامد منتقل می‌گردد (Zienkiewicz et al., 1999).

با توجه به موارد ذکر شده شرایط لازم برای چنین تحلیل‌هایی بسیار نادر است. در نتیجه، تحلیل محیط‌های متخلخل نیازمند استفاده از معادلات توأمان می‌باشد که اندرکنش جریان سیال منفذی محیط متخلخل و تغییر شکل اسکلت جامد را به صورت همزمان بریکدیگر لحاظ کند. نوشتن معادلات توأمان نیازمند شناخت دقیق، فازهای موجود در محیط می‌باشد. در این قسمت به بررسی فازهای جامد و سیال پرداخته می‌شود (Zienkiewicz et al., 1999).

۲-۶-۱- معادلات فاز سیال

منافذ موجود در محیط‌های متخلخل اشباع، بوسیله‌ی سیال پر شده است. در این پژوهش سیال منفذی آب در نظر گرفته می‌شود. که در ادامه معادلات حاکم بر این فاز ارائه شده است (Zienkiewicz et al., 1999).

۲-۶-۱-۱- معادله انتقال بخش سیال

برای حرکت آب در خاک از قانون داریسی تعمیم یافته استفاده می‌کنیم (Zienkiewicz et al., 1999):

$$U = \frac{q_w}{\rho_w} = -K \cdot \nabla(P_w + Z) \quad (۶-۲)$$

که در آن U سرعت سیال، q_w بردار جریان سیال، ρ_w دانسیته سیال، K نفوذپذیری، P_w فشار آب و Z پتانسیل گرانشی هستند.

۲-۶-۱-۲- معادله بقای جرم سیال

اصل بقای جرم برای محیط متخلخل اشباع به صورت زیر نوشته می‌شود (Zienkiewicz et al., 1999):

$$\frac{\partial(n\rho_w)}{\partial t} = -\text{div}(\rho_w \cdot U) \pm Q_w \quad (۷-۲)$$

در رابطه‌ی بالا n تخلخل، ρ_w جرم حجمی آب، U سرعت آب و Q_w نشان دهنده‌ی چشمه یا چاهک می‌باشد.

سمت چپ معادله بقای جرم مایع را می‌توان به صورت زیر بسط داد:

$$\frac{\partial(n\rho_w)}{\partial t} = n \frac{\partial\rho_w}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial n}{\partial t} \quad (۸-۲)$$

در این تحقیق از تغییرات دما صرف نظر می‌شود بنابراین چگالی آب فقط تابع فشار آب است و داریم:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\partial \rho_w}{\partial P_w} \cdot \frac{\partial P_w}{\partial t} = \beta_P \cdot P_w \quad (9-2)$$

با جایگذاری معادله (۹-۲) در سمت چپ معادله (۸-۲) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial(\theta \cdot \rho_w)}{\partial t} = \theta \cdot \beta_P \cdot P_w + \rho_w \cdot \theta = n \beta_P \cdot P_w + \rho_w \cdot n \quad (10-2)$$

در نهایت با استفاده از معادله (۱۰-۲) و (۶-۲) معادله (۷-۲) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$n \beta_P \cdot P_w + \rho_w \cdot n = \text{div}(-K \cdot \nabla P_w - K \cdot \nabla Z) \quad (11-2)$$

با توجه به تراکم‌ناپذیری ذرات جامد از رابطه (۱۲-۲) تغییرات تخلخل به تغییرات کرنش مرتبط می‌شود.

$$n = -\varepsilon_v = -\delta_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (12-2)$$

با استفاده از (۱۱-۲) و (۱۲-۲)، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n \beta_P \cdot P_w + \rho_w \cdot (-\delta_{ij} \varepsilon_{ij}) = \text{div}(-K \cdot \nabla P_w - K \cdot \nabla Z) \quad (13-2)$$

۲-۶-۲- رفتار اسکلت جامد

رفتار مکانیکی محیط‌های اشباع همواره به اندرکنش بین فازهای جامد و مایع وابسته است از این رو در

این قسمت به بررسی مفهوم تنش موثر و معادله تعادل در محیط اشباع پرداخته می‌شود (Zienkiewicz

et al., 1999)

۲-۶-۲-۱- مفهوم تنش موثر

براساس مطالعات انجام شده توسط لی و بوسینسک^۱ در پایان قرن ۱۹ معلوم شد که مفاهیم تنش ارائه

^۱ Lyell and Boussinesq

شده در خاک از دقت کافی برای توجیه و تفسیر رفتار خاک برخوردار نمی‌باشد. در آن زمان مفهوم تنش موثر که به عنوان پارامتر موثر در تعیین جابجایی، توزیع تنش و فشار در محیط متخلخل مطرح شد (Zienkiewicz et al., 1999).

یک المان از محیط متخلخل مفروض است. اگر این المان تحت بارگذاری خارجی قرار گیرد تنش‌ها در سطح محیط ایجاد می‌شود. با تقسیم کردن نیروی خارجی وارد بر سطح المان بر مساحت المان میزان تنش کل در محیط به دست می‌آید (Zienkiewicz et al., 1999):

$$\sigma = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{xz}]^T \quad (14-2)$$

تنش هیدرواستاتیکی ناشی از فشار آب موجود در حفرات از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$P \cdot \frac{V_v}{V} \cdot (-\delta_{ij}) = -\delta_{ij} \cdot n \cdot P \quad (15-2)$$

مطابق این رابطه P فشار حفره‌ای سیال است که این فشار در تخلخل n بر تنش‌های اصلی (اثر پارامتر δ_{ij}) موثر است. علامت منفی در این رابطه به دلیل تفاوت در قرارداد مثبت و منفی در حالت کشش و فشار برای فشار آب حفره‌ای با تنش اسکلت می‌باشد. در نهایت رابطه زیر برای تنش موثر وجود دارد:

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij} \cdot n \cdot p \quad (16-2)$$

اگر بردار m به صورت $m = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ تعریف شود، این بردار اثر فشار آب حفره‌ای بر تنش‌های اصلی را در نظر می‌گیرد، در نتیجه:

$$\sigma = \sigma' - m \cdot n \cdot p \quad (17-2)$$

در سال ۱۹۱۳، فیلانگر^۱ تعریف بالا را ارائه کرد. بر مبنای کارهای ترزاقی در سال ۱۹۳۵ و ترزاقی در سال ۱۹۳۶ رابطه‌ی زیر برای تنش موثر حاصل گردید:

$$\sigma = \sigma'_{ij} - \delta_{ij} \cdot n_w \cdot p \quad (18-2)$$

که n_w ضریب مساحت موثر فرض می‌گردد مقدار آن برابر واحد فرض می‌شود.

برای بررسی بهتر مفهوم تنش موثر، محیط متخلخل اشباع را در نظر گرفته شود، اگر این محیط تحت فشار همه جانبه Δp قرار بگیرد، فوراً این فشار توسط ذرات آب موجود در محیط جذب خواهد شد فلذا تغییرات تنش کل به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta\sigma = -m\Delta p \quad (19-2)$$

بدیهی است تحت شرایط بارگذاری بیان شده، کرنش حجمی کوچکی در محیط ایجاد می‌گردد. با توجه به اینکه، فشار همه جانبه به صورت یکسان به تمام ذرات وارد می‌شود. از این رو، در حالت کلی تمامی ذرات دارای یک کرنش حجمی یکسان به قرار زیر هستند:

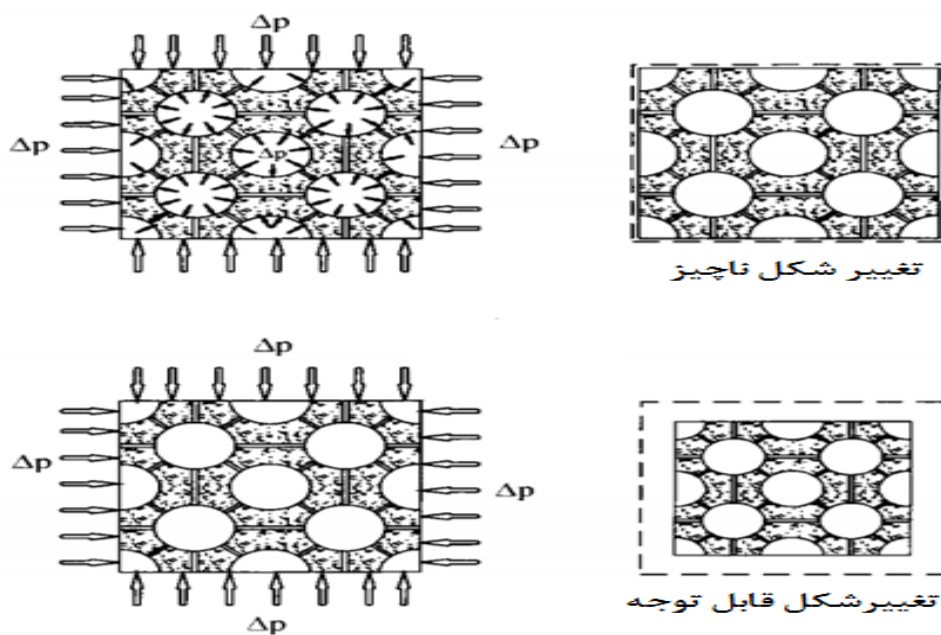
$$\Delta e = \Delta\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_{11} + \Delta\varepsilon_{22} + \Delta\varepsilon_{33} = -\frac{1}{K_s} \Delta p \quad (20-2)$$

در این رابطه K_s مدول بالک ذرات جامد بر اثر فشار همه جانبه می‌باشد که به اختصار مدول بالک متوسط ذرات جامد بیان می‌شود. با فرض همسانگرد بودن ماده مورد نظر خواهیم داشت:

$$\Delta\varepsilon = -\frac{1}{3K_s} m\Delta p \quad (21-2)$$

^۱ Fillunger

برای درک مناسب‌تر رابطه بالا به آزمایش فیلانگر در سال ۱۹۱۵ اشاره می‌شود. یک محیط متخلخل اسفنجی مطابق شکل (۴-۲) مفروض است. اگر این محیط تحت فشار همه جانبه Δp قرار داده شود، در حالت اول تمام فشار وارده به محیط توسط آب حفره‌ای تحمل می‌شود و به ذرات اسکلت فشاری وارد نمی‌شود. بنابراین اگر مقدار مدول K_s بزرگ باشد. تغییر شکل‌پذیری ناچیزی به ذرات اعمال می‌گردد (Zienkiewicz et al., 1999).



شکل (۴-۲): ماده متخلخل تحت تأثیر فشار هیدرواستاتیک الف) افزایش فشار داخلی، ب) عدم افزایش فشار داخلی (Zienkiewicz et al., 1999)

بنابراین آنچه بسط داده شده و مطابق اصل جمع آثار، اگر ماده متخلخلی تحت تغییر تنش $\Delta\sigma$ و به دنبال آن تغییرات فشار حفره‌ای Δp قرار گیرد، میزان تغییر کرنش به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Delta\varepsilon = D^{-1}(\Delta\sigma + m\Delta p) - \frac{1}{3K_s}m\Delta p + \Delta\varepsilon^\theta \quad (۲۲-۲)$$

در این رابطه D ماتریس خواص ماده و $\Delta\varepsilon^\theta$ تغییرات کرنش ناشی از تغییرات حرارتی محیط می‌باشد. از

معادله (۲۲-۲)، می‌توان پارامترهای موثر در محاسبه تغییر شکل را به صورت زیر به دست آورد:

$$\Delta\sigma + \alpha m^T \Delta p = D(\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^\theta) \quad (۲۳-۲)$$

مقدار سمت چپ در معادله (۲۳-۲) تنش موثر می‌باشد. با جایگذاری در معادله (۲۳-۲) رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$d\sigma' = d\sigma + \alpha m^T dp \quad (۲۴-۲)$$

در این رابطه σ' تنش موثر است و همچنین α از رابطه (۲۵-۲) حاصل می‌شود:

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_S} \quad (۲۵-۲)$$

K مدول بالک برای کل توده با فرض همسانگرد و الاستیک بودن آن است. با توجه به کوچک بودن تغییر شکل‌ها می‌توان معادلات را از فرم دیفرانسیلی به فرم زیر نوشت:

$$\sigma' = \sigma + \alpha m^T p \quad (۲۶-۲)$$

تعریف بالا با اندکی اصلاح همان تعریف ارائه شده توسط بایوت برای تنش موثر می‌باشد. با فرض ضریب α برابر ۱ برای خاک معادلات شکل ساده‌تری به خود می‌گیرد. این فرض در محیط‌های خاکی فرضی معقول می‌باشد، زیرا مدول بالک متوسط ذرات جامد بسیار بزرگتر از مدول بالک کل توده خاک می‌باشد این فرض برای سنگ و بتن برقرار نمی‌باشد در اینگونه محیط‌ها α برابر $\frac{2}{3}$ فرض می‌گردد به این ترتیب معادله زیر حاصل می‌گردد.

$$\sigma' = \sigma + m^T p \quad (27-2)$$

تنش موثر با رابطه زیر به کرنش مرتبط می‌شود:

$$\sigma' = D\varepsilon \quad (28-2)$$

در این رابطه D ماتریس خواص ماده می‌باشد و از رابطه (28-2) برای تنش مسطح محاسبه می‌گردد.

$$D = \frac{Eh}{1-\nu^2} \times \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (29-2)$$

همچنین در حالت کرنش مسطح مدول تغییر شکل از رابطه (30-2) محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \times \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \quad (30-2)$$

در این رابطه E مدول الاستیک و ν ضریب پواسون می‌باشد.

۲-۶-۲- معادله تعادل

معادله تعادل بر مبنای تنش کل برای محیط اشباع به صورت زیر نوشته می‌شود (Zienkiewicz et al.,

1999).

$$\sigma_{ij,j} + b_i = 0 \quad (31-2)$$

۲-۷- جمع بندی

در این فصل، ابتدا انواع اندرکنش‌های هیدرومکانیکی حاکم بر محیط مورد بررسی قرار گرفت. همچنین

شناخت نیروهای بین ذرات، انواع محیط‌های انتقال دهنده سیال و اثر تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی بر یکدیگر و تأثیر آن بر تغییر شکل‌های محیط و در نهایت روابط حاکم بر هر فاز بررسی شده است. در این میان تئوری تنش موثر بایوت و همچنین روابط مکانیکی و هیدرولیکی حاکم بر محیط در مدل‌سازی عددی این پژوهش استفاده شده است.

فصل سوم

مروری بر مطالعات گذشته

۳-۱- مقدمه

با آغاز برنامه‌های کامپیوتری در دهه ۱۹۷۰، فرآیندهای هیدرومکانیکی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفتند. اندرکنش هیدرومکانیک در تغییر شکل محیط‌های متخلخل در بسیاری از زمینه‌های مهندسی از جمله عمران، معدن، محیط زیست، نفت و ژئوتکنیک موثر است. حفاری تونل در زمین‌های اشباع سبب ایجاد دو نوع رفتار وابسته به زمان در محیط اطراف تونل می‌شود اول رفتار وابسته به زمان مربوط به تغییر شکل‌های ناشی از خزش - که به ویژگی‌های ذاتی محیط وابسته است - دیگری تغییر شکل‌های ناشی از تغییرات فشار آب منفذی محیط، که موجب از دست رفتن مقاومت مواد می‌شود. از آنجا که اغلب تونل‌های شهری در مناطق اشباع حفاری می‌شوند بررسی تغییرات فشار آب منفذی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. نشست و تحکیم از مهمترین نتایج اندرکنش هیدرومکانیک می‌باشد که این موضوع در تونل‌سازی مناطق اشباع و متخلخل شهری بسیار حائز اهمیت است. در ادامه به تشریح تعدادی از مهمترین مطالعات صورت گرفته در زمینه تغییر شکل‌های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری تونل پرداخته شده است.

۳-۲- مطالعات انجام شده

باتوجه به این‌که روش‌های عددی مختلفی برای تحلیل‌های توأمان هیدرومکانیک در محیط‌های اشباع وجود دارد، دو روش تفاضل محدود و المان محدود از پرکاربردترین روش‌های عددی محسوب می‌شوند. با این حال، مطالعاتی که با روش‌های عددی مختلف صورت گرفته در ادامه ارائه خواهد شد.

۳-۲-۱- مطالعات انجام شده به روش تفاضل محدود

استفاد از روش تفاضل محدود با توجه به ارائه‌ی پاسخ‌های نسبتاً سریع به مسائل توأمان در محیط‌های پیوسته در سال‌های اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است.

در مطالعه لی و همکاران^۱ (۲۰۰۸) با استفاده از نرم افزار FLAC3D با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک به بررسی تأثیر جریان تراوش آب بر تغییر شکل و نشست ایجاد شده در اطراف تونل چند قوسی پرداخته شد. مدل رفتاری استفاده شده برای محیط دربرگیرنده ی تونل در این پژوهش مدل موهر - کلمب می باشد. با توجه به نتایج، نشست بدست آمده در حالتی که اندرکنش هیدرومکانیک در نظر گرفته می شود؛ بزرگتر از زمانی است که اندرکنش هیدرومکانیک در نظر گرفته نمی شود بطوریکه میزان نشست بدست آمده در حالت توأمان ۶-۵/۷ میلی متر و نشست حاصل از داده های ابزار دقیق معادل ۶/۸-۵/۸ میلی متر می باشد. بنابراین برای داشتن یک تحلیل دقیق و نزدیک به واقعیت حل توأمان هیدرومکانیک اینگونه مسائل امری ضروری است (Li et al, 2008).

در مطالعه چوانچنگ و جیانجون^۲ (۲۰۰۹) با استفاده از نرم افزار FLAC3D، با در نظر گرفتن اثر توأمان هیدرومکانیک، پایداری تونل در خاک های لایه ای اشباع، میدان تراوش آب قبل و بعد از حفاری همچنین اثر سطح آب روی تراوش مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق ابعاد مدل ۱۲×۱۲×۱۲ متر و محیط دربرگیرنده ی تونل بصورت الاستیک در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج بدست آمده تغییرات فشار منفذی ایجاد شده در اطراف تونل نقش بسیار مهمی در پایداری تونل ایفا می کند بگونه ای که نمی توان از تأثیر آن چشم پوشی کرد (Chuan Cheng and Jianjun, 2009).

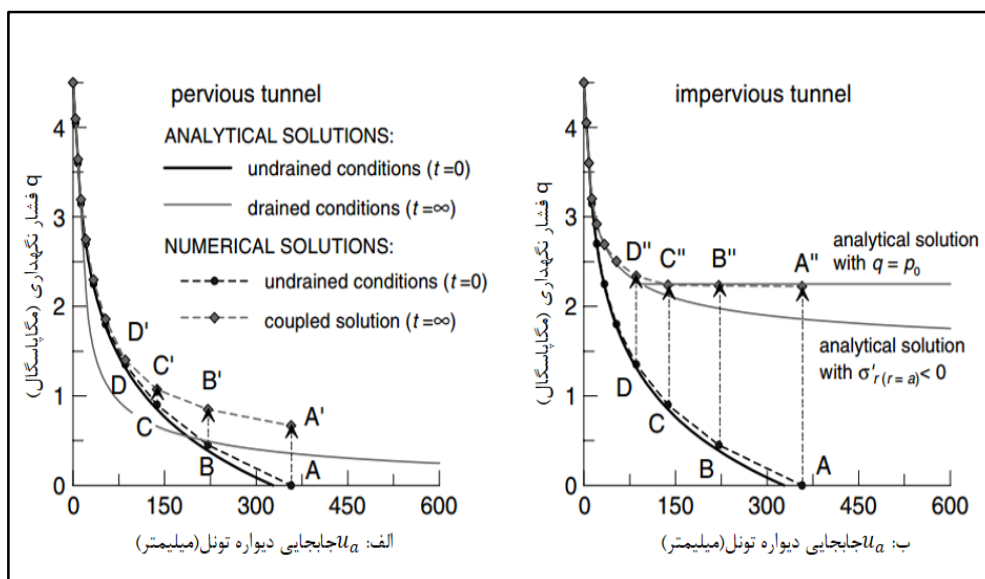
در مطالعه گرازیانی و بولدینی^۳ (۲۰۱۲) با استفاده از روش های عددی با در نظر گرفتن تأثیر توأمان هیدرومکانیک، و روش های تحلیلی غیر توأمان، پاسخ تونل در خاک های رسی اشباع مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده، مطابق شکل (۳-۳-الف) در حالتی که تونل نفوذ پذیر در نظر گرفته شود نتایج بدست آمده در کوتاه مدت مطابقت خوب این دو روش را نشان می دهد. در حالی که رفتار بلند مدت از این

¹ Li et al.

² Chuan Cheng and Jianjun

³ Graziani and Boldin

روند پیروی نمی‌کند. همچنین با توجه به شکل (۳-۳-ب) در حالی که پوشش نهایی نفوذناپذیر باشد فشار نگهدارنده در حالت عددی توأمان به مراتب بزرگتر از حالت تحلیلی غیرتوأمان می‌باشد (Graziani & Boldini, 2012).



شکل (۳-۱): مقایسه روش‌های عددی و تحلیلی در کوتاه مدت و بلند مدت (الف) تونل نفوذپذیر (ب) تونل نفوذناپذیر (Graziani & Boldini, 2012).

در مطالعه کائو و همکاران^۱ (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک به بررسی پایداری یک ایستگاه مترو پرداخته شد. براساس نتایج بدست آمده، حفاری تونل سبب حرکت آب به سمت تونل و کاهش فشار منفذی در اطراف تونل می‌گردد. نیروی تراوش ایجاد شده در حالتی که اندرکنش هیدرومکانیک در نظر گرفته شود سبب افزایش تنش و گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف تونل خواهد شد. با توجه به اهمیت نیروی تراوش، در طراحی سیستم‌های نگهداری باید تأثیر آن در نظر گرفته شود. همچنین برای جلوگیری از اثر مخرب هیدرومکانیک استفاده از روش‌های آب‌بند در

^۱ Cao et al.

اطراف تونل توصیه می‌گردد (Cao et al., 2009).

در مطالعه گانگ و بینگ^۱ (۲۰۱۴) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D اثر فشار آب منفذی بر محیط اطراف تونل در سنگ‌های نرم مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده حفاری تونل سبب از بین رفتن تعادل اولیه، در نتیجه گسترش زون پلاستیک در اطراف فضای حفاری می‌شود. همچنین جابجایی‌های حاصل از سه فشار منفذی ۰، ۲ و ۴ مگاپاسکال به ترتیب برابر ۹/۴۸۶، ۱۰/۸۷۶ و ۱۱/۰۷۴ سانتیمتر می‌باشد. از این رو فشار منفذی تأثیر چشم‌گیری بر تغییر شکل‌های اطراف تونل دارد. به همین دلیل در طراحی سیستم‌های نگهداری تأثیر فشار منفذی باید مورد توجه قرار گیرد (Gang and Bing, 2014).

در مطالعه‌ی یونگتاو^۲ (۲۰۱۴) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D و با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک، پایداری محیط دربرگیرنده تونل، تغییر شکل محیط و تغییرات فشار منفذی بعد از حفاری مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با توجه به شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژی حاکم بر مورد مطالعاتی، تونل بزرگراه وو جینگ هوانگ^۳ در چین، ابتدا بلوک اولیه به ابعاد ۸۰×۳×۶۰ متر ساخته و شرایط مرزی مکانیکی و هیدرولیکی مناسب اعمال شد. نتایج بدست آمده نشان داد که قسمت قوسی و دیواره‌های کناری تونل از موقعیت‌های کلیدی در زمان طراحی و ساخت محسوب می‌شوند. عملیات حفاری سبب کاهش فشار منفذی در اطراف تونل می‌شود و تراوش عمدتاً در قسمت‌های قوسی و دیواره‌های جانبی رخ می‌دهد. تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در اطراف فضای حفاری نشان دهنده‌ی پایداری ضعیف محیط دربرگیرنده تونل است که نیازمند نصب به‌موقع سیستم نگهداری پس از حفاری می‌باشد (Yongtao, 2014).

در مطالعه فن و همکاران^۴ (۲۰۱۵) با استفاده از روش عددی تفاضل محدود به بررسی تأثیر اندرکنش

¹ Gang and Bing

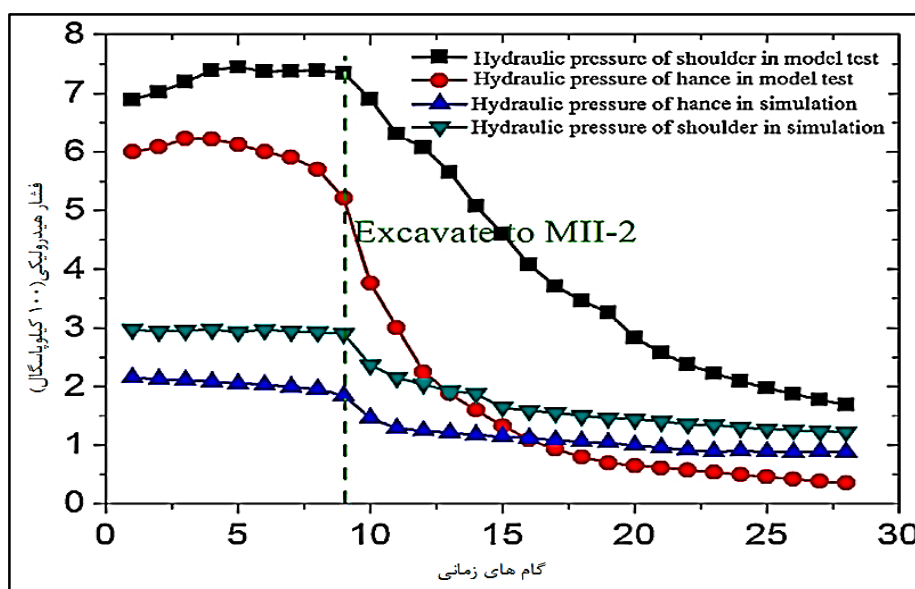
² Yongtao

³ Wu Jing Huang highway

⁴ Fan et al.

هیدرومکانیک بر پایداری جبهه کار تونل در تونلسازی سپری در خاک‌های لایه‌ای پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده تأثیر فشار آب منفذی بر تنش‌ها، جابجایی‌ها و پایداری جبهه کار تونل بسیار زیاد بود، بگونه‌ای که تغییرات فشار آب منفذی ایجاد شده سبب گسترش ناحیه‌ی پلاستیک در جلوی جبهه کار می‌گردد از این رو، نیازمند اعمال نگهداری به موقع می‌باشد. بنابراین با توجه به تأثیر بالای اندرکنش هیدرومکانیک بر پایداری تونل، نمی‌توان تأثیر آن را نادیده گرفت (Fan et al., 2015).

در مطالعه‌ی لی و همکاران^۱ (۲۰۱۶) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D و مدل آزمایشگاهی بزرگ مقیاس با در نظر گرفتن اثر غیرتوآمان هیدرومکانیک، تراوش در اطراف تونل زیردريا مورد بررسی قرار گرفت. علت استفاده از روش غیرتوآمان، کاهش زمان محاسبات و انجام ساده‌سازی در حل معادلات بوده است. نشست ایجاد شده در تاج تونل در دو حالت آزمایشگاهی و عددی مطابقت بالای این دو روش را نشان می‌دهد. همچنین با توجه به شکل (۳-۴) روند کاهش فشار هیدرولیکی در اطراف فضای حفاری در دو حالت عددی و آزمایشگاهی نزدیک بوده و نتایج در هر دو حالت دارای مطابقت قابل قبولی هستند (Li et al., 2016).

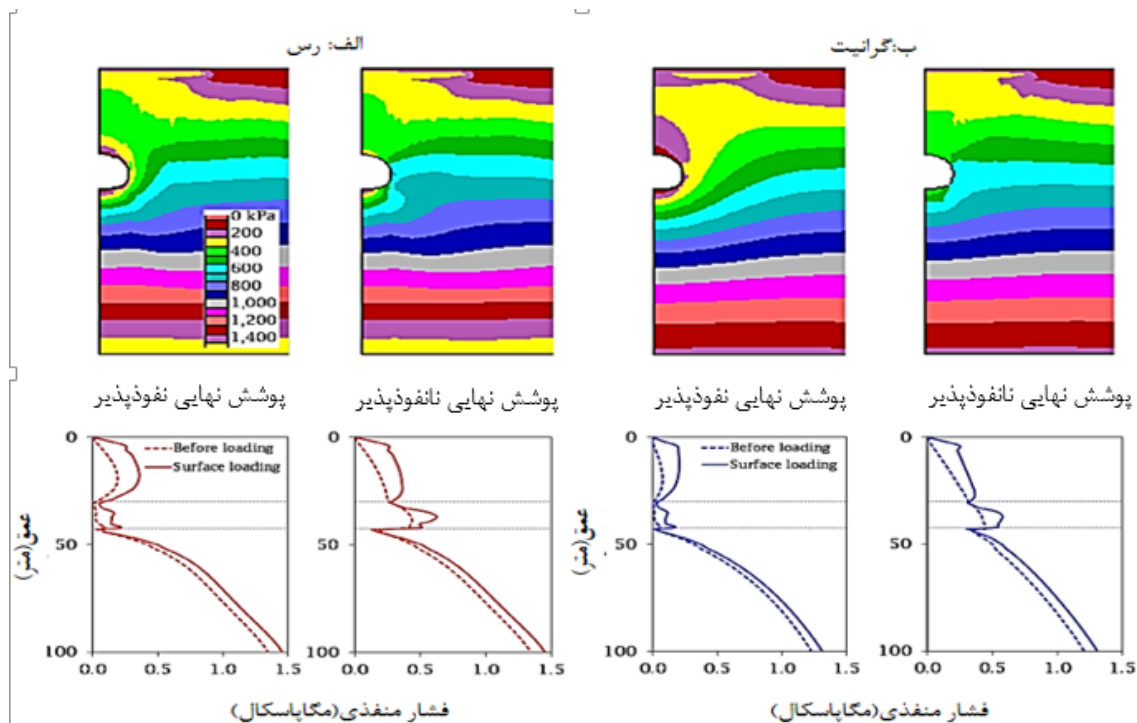


شکل (۳-۲): نمودار تغییرات فشار هیدرولیکی در مقطع MII-2 (Li et al., 2016)

¹ Li et al.

در مطالعه پراسیتیو و گوتیرز^۱ (۲۰۱۶) تأثیر بارسطحی بر پاسخ هیدرومکانیک تونل‌های نعل اسبی در زمین‌های اشباع مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار FLAC دو مدل برای بررسی پاسخ هیدرومکانیک تونل ساخته شد. یک مدل در زمین‌های خاکی با نفوذپذیری پایین (رس) و دیگری در زمین‌های سخت با نفوذپذیری بالا (گرانیت)، رفتار هر مدل با در نظر گرفتن دو نوع پوشش بتنی نفوذپذیر و نفوذناپذیر مورد بررسی قرار گرفت. بار سطحی در مدل اول ۱۰ سال بعد از ساخت تونل و در مدل دوم بعد از رسیدن به تعادل اعمال گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نفوذپذیری پوشش تأثیر بسیار زیادی بر روی نتایج مدلسازی دارد بطوریکه در پوشش نفوذپذیر تغییر شکل‌های ایجاد شده در اطراف تونل بسیار بزرگتر از پوشش نفوذناپذیر بوده و پاسخ هیدرومکانیک تونل در زمین‌های رسی به مراتب مخرب‌تر از زمین‌های سخت می‌باشد. علاوه بر این، پایداری بلند مدت در دو مدل ساخته شده مشابه بوده است از این رو، می‌توان از تأثیر زمان قبل از اعمال بار سطحی چشم‌پوشی کرد. همچنین با توجه به شکل (۳-۱) فشار منفذی ایجاد شده در هر دو مدل، در پوشش نفوذناپذیر بیشتر از پوشش نفوذپذیر می‌باشد از این رو، در پوشش نفوذناپذیر فشار منفذی تمایل دارد به حالت هیدرواستاتیک خطی برسد اما در پوشش نفوذپذیر فشار منفذی در اطراف تونل به صفر می‌رسد. توجه شود که پاسخ کوتاه مدت هیدرومکانیک، پاسخ نهایی محیط دربرگیرنده‌ی تونل نمی‌باشد. از این رو می‌بایست پاسخ بلندمدت یا همان رفتار تحکیمی باید مورد توجه مهندسين قرار گیرد (Prasetyo & Gutierrez, 2016).

¹ Prasetyo and Gutierrez



شکل (۳-۳): نمودار تغییرات فشار منفذی الف) رس ب) گرانیت (Prasetyo & Gutierrez, 2016)

در مطالعه ژو^۱ (۲۰۱۸) با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D پاسخ هیدرومکانیک محیط دربرگیرنده تونل ناشی از ماشین حفاری تمام مقطع مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل‌سازی، بلوک اولیه به ابعاد ۲۰۰×۴۵×۲۰۰ متر با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 14.0 مش‌بندی و اجزای اصلی ماشین حفار از قبیل کله حفار، سپر و مدل‌سازی شد. با توجه به نتایج بدست آمده در این مدل‌سازی دامنه‌ی تأثیر حفاری بر روی تغییر شکل اطراف تونل حدود یک برابر قطر تونل و دامنه‌ی تأثیر حفاری بر روی فشار منفذی اطراف تونل حدود ۲/۵ برابر قطر تونل در جهت محور تونل می‌باشد (Zhou et al., 2018).

۳-۲-۲- مطالعات انجام شده به روش المان محدود

در مطالعه چن و همکاران^۲ (۱۹۹۵) با استفاده از روش المان محدود به بررسی تأثیر حفاری تونل بر نشست تحکیمی پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده میزان نشست محاسبه شده از روش اجزا محدود،

¹ Zhou et al.

² Chen et al.

مطابقت قابل قبولی با داده‌های بدست آمده از ابزار دقیق دارد. همچنین فاصله‌ی بین سپر و قطر حفاری نقش بسزایی در میزان نشست ایفا می‌کند که باید مورد توجه قرار گیرد (Chen et al., 1995).

در مطالعه سوبودا و کریشا^۱ (۱۹۹۹) با استفاده از مدل‌سازی عددی المان محدود، تأثیر حفاری تونل بر تحکیم محیط اطراف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش فشار جبهه‌کار و فشار تزریق، فشار منفذی اضافی ایجاد شده در اطراف تونل افزایش یافته در نتیجه زمان استهلاک فشار منفذی و زمان تحکیم افزایش پیدا می‌کند (Swoboda & Abu-Krishna, 1999).

در مطالعه لیکوس^۲ (۲۰۰۰) با استفاده از روش اجزا محدود به بررسی تأثیر تحکیم خاک بر اندرکنش بین پوشش نهایی و خاک پرداخته شد. در این تحقیق جابجایی‌های ایجاد شده ناشی از حفاری تونل در دو حالت اشباع و خشک مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده، میزان جابجایی‌ها در حالت خشک بسیار سریعتر از حالتی اشباع رخ می‌دهد. همچنین میزان تنش‌های ایجاد شده در پوشش نهایی و زمین در حالت اشباع به مراتب بزرگتر از حالت خشک است. بررسی تأثیر تنش‌های اولیه نشان می‌دهد که هرچه ضریب تنش بزرگتر باشد، تنش‌های شعاعی در اطراف تونل نیز بزرگتر خواهند بود. همچنین مقایسه‌ی نفوذپذیری‌های مختلف نشان می‌دهد که با کاهش میزان نفوذپذیری، تنش ایجاد شده در پوشش نهایی به شدت افزایش می‌یابد (Liakos, 2000).

در مطالعه یو^۳ (۲۰۰۵) به بررسی برهم‌کنش بین تونلسازی و سطح آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS با در نظر گرفتن پدیده توأمان هیدرومکانیک پرداخته شد. در این تحقیق یک تونل نعل‌اسبی به قطر ۱۰ متر و در عمق ۲۵ متری از سطح زمین در شهر سئول مورد بررسی قرار گرفت.

¹ Swoboda and Krishna

² Liakos

³ Yoo

در این مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی در سطح مدل قرار دارد. همچنین مدل ساخته شده در دو حالت با پوشش نهایی نفوذپذیر و نفوذناپذیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الگوی فشار منفذی اطراف تونل پس از عملیات حفاری به شدت به میزان نفوذپذیری پوشش نهایی وابسته است و این امر یکی از مهمترین عوامل در بروز نشست بعد از حفاری محسوب می‌شود. همچنین تنش‌ها و جابجایی‌های اطراف فضای حفاری در حالتی که اندرکنش هیدرومکانیک در نظر گرفته نمی‌شود؛ نسبت به حالتی که این اندرکنش در نظر گرفته می‌شود، بسیار متفاوت با شرایط واقعی است (Yoo, 2005).

در مطالعه ان و همکاران^۱ (۲۰۰۶) با استفاده از روش المان محدود با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک به بررسی تأثیر ضخامت و میزان نفوذپذیری تزریق، بر جریان آب ورودی به تونل در مناطق اشباع پرداخت. با توجه به نتایج بدست آمده، با کاهش نفوذپذیری تزریق جریان ورودی به تونل کاهش می‌یابد. همچنین کاهش ضخامت تزریق سبب افزایش نیروی تراوش در جبهه کار تونل می‌شود که خود سبب افزایش جریان ورودی به تونل و در نتیجه افزایش تغییر شکل‌ها می‌شود (Ahn et al., 2006).

در مطالعه هوفل و همکاران^۲ (۲۰۰۸) با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D به بررسی تأثیر نفوذپذیری خاک بر رفتارهای وابسته به زمان، در طول عملیات تونلسازی در خاک‌های نرم اشباع پرداخته شد. بر اساس نتایج این تحقیق با افزایش نفوذپذیری میزان نشست سطح زمین و جابجایی‌های اطراف تونل افزایش می‌یابد. در نهایت میزان گسترش زون پلاستیک در اطراف تونل بیشتر خواهد شد (Höfle et al., 2008).

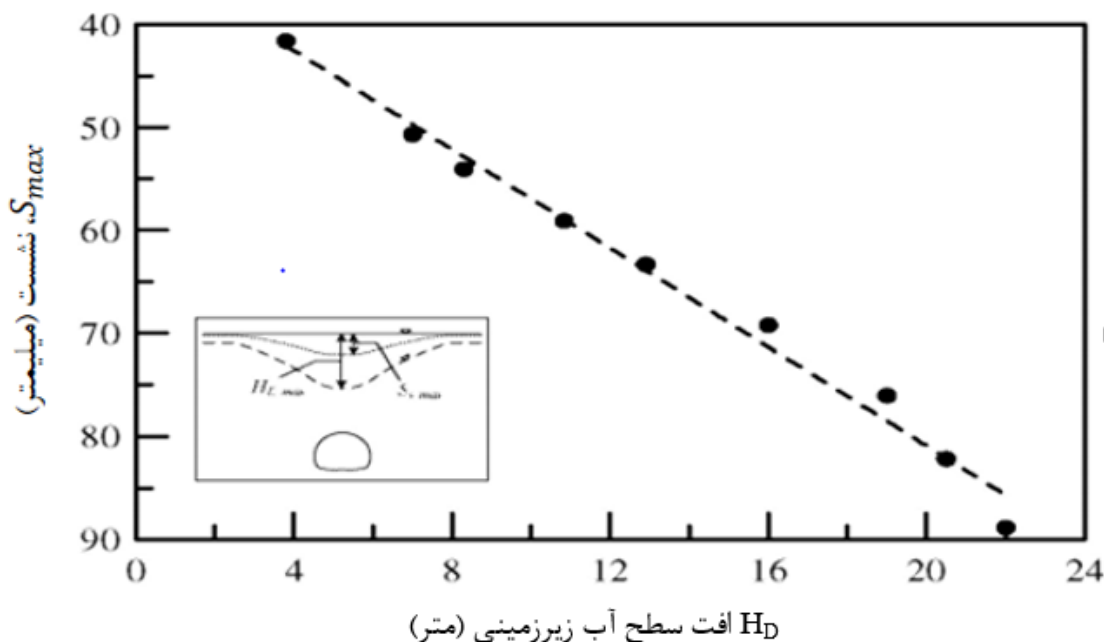
در مطالعه یو و همکاران^۳ (۲۰۰۸) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 2D، با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک، نشست ناشی از افت آب زیرزمینی در تونلسازی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج

¹ Ahn et al.

² Hofle et al.

³ Yoo et al.

بدست آمده، در شکل (۳-۲) با افزایش میزان افت سطح آب زیرزمینی، میزان نشست ایجاد شده افزایش می‌یابد و تا زمانی که سطح آب زیرزمینی به حالت پایدار برسد ادامه پیدا می‌کند. بطوری که ممکن است میزان این نشست از مقدار نشست بدست آمده در مراحل حفاری بیشتر باشد (Yoo et al., 2008).



شکل (۳-۴): تغییرات نشست نسبت به افت سطح آب زیرزمینی بعد از اتمام حفاری تونل (Yoo et al., 2008).

در مطالعه جی و همکاران^۱ (۲۰۱۱) با استفاده از نرم‌افزار COMSOL و در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک به بررسی تأثیر حفاری تونل بر نشست زمین پرداخت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حفاری موجب تمرکز تنش در طاق و دیواره‌های جانبی تونل می‌گردد. این تمرکز تنش سبب افزایش تغییرشکل‌های خاک در اطراف محیط حفاری می‌شود. به علت نشست و تغییرشکل‌های بزرگ زمین، اجرای پروژه تنها در صورت انجام عملیات تزریق امکان‌پذیر است. همچنین ورود آب به داخل تونل موجب مختل شدن ساخت و ساز تونل می‌شود. از این رو با توجه به شرایط حاکم بر محیط، در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک امری ضروری است (Ji et al., 2011).

^۱ Ji et al.

همچنین یو و همکاران^۱ (۲۰۱۲) با بررسی یک مطالعه‌ی موردی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS اثر افت آب زیرزمینی بر نشست زمین در تونلسازی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه‌ی داده‌های ابزار دقیق و خروجی‌های مدل‌سازی نشان می‌دهد که منحنی نشست بدست آمده از مدل‌سازی، مطابقت بالایی با داده‌های ابزار دقیق دارد و همچنین مشاهده شد نشست بدست آمده در حالتی که امکان زهکشی در مرز حفاری وجود داشته باشد، به مراتب بیشتر از حالت عدم زهکشی است. تحلیل توأمان انجام شده سبب بروز نشست بیشتری در مدل می‌شود که با توجه به شرایط حاکم بر محیط به واقعیت نزدیک‌تر است (Yoo et al., 2012).

در مطالعه وونگ سارج و همکاران^۲ (۲۰۱۳) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS اثر تونلسازی بر نشست تحکیمی، در محیط اطراف تونل مورد بررسی قرار گرفت. براساس این نتایج نشست ناشی از تحکیم به طور قابل ملاحظه‌ای به نفوذپذیری پوشش نهایی وابسته است. بطوریکه با افزایش نفوذپذیری پوشش نهایی و با گذشت زمان، نشست سطح زمین افزایش می‌یابد. این درحالیست که در پوشش نهایی کاملاً نفوذپذیر، نتایج مطابقت خوبی با داده‌های میدانی ندارند. در حالی که در پوشش نهایی نفوذناپذیر، استهلاک فشار منفذی منفی ایجاد شده ناشی از حفاری در بلند مدت موجب بالازدگی می‌گردد. بنابراین طراحی پوشش نهایی با نفوذپذیری مناسب می‌تواند رفتار محیط اطراف تونل را بخوبی کنترل کند (Wongsaroj et al., 2013).

در مطالعه فاتح و همکاران^۳ (۲۰۱۳) با استفاده از نرم‌افزار المان محدود و در نظر گرفتن تحکیم، به بررسی میزان گسترش زون پلاستیک در اطراف محیط حفاری در خاک‌های اشباع پرداخته شد. با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش قطر و کاهش عمق تونل، زون پلاستیک ایجاد شده در اطراف فضای حفاری گسترش می‌یابد. همچنین تغییرات فشار منفذی در تاج تونل - بعد از حفاری تا ۴۵ درصد مقدار اولیه کاهش

¹ Yoo et al.

² Wongsaroj et al.

³ Fattah et al.

پیدا می‌کند که این امر تا فاصله‌ی ۰/۵ برابری قطر تونل ادامه دارد (Fattah et al., 2013).

در مطالعه کتونی و همکاران^۱ در سال (۲۰۱۶) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نشست تحکیمی ایجاد شده ناشی از حفاری ماشین سپری در زمین‌های نرم مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق اهمیت فرآیند تحکیم در مراحل مختلف حفاری با در نظر گرفتن پوشش‌هایی با نفوذپذیری مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده میزان نشست در پوشش نفوذناپذیر، کمتر از پوشش نفوذپذیر است. جابجایی‌های ایجاد شده در بلند مدت برای هر دو پوشش، بزرگتر از جابجایی‌های کوتاه مدت می‌باشد. همچنین فشار منفذی ایجاد شده در اطراف فضای حفاری در پوشش نفوذپذیر یک روند کاهشی را دنبال می‌کند به همین دلیل میزان جابجایی‌های ایجاد شده در تونل با پوشش نفوذپذیر همواره بیشتر است (Cattoni et al., 2016).

۳-۲-۳- مطالعات انجام شده به روش المان مجزا

در مطالعه شفیع‌پور و سروش^۲ (۲۰۰۸) با استفاده از روش المان مجزای دوبعدی با در نظر گرفتن اثر متقابل ذره - سیال رفتار زهکشی نشده‌ی محیط‌های اشباع دانه‌ای، مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق فاز سیال بصورت یک محیط پیوسته و جریان سیال با استفاده از معادلات پیوستگی و قانون داری مدل‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی رفتار زهکشی نشده، سه نمونه‌ی متراکم، نیمه متراکم و سست انتخاب و پاسخ تنش- کرنش و فشار منفذی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از تنش- کرنش و تنش موثر در دو روش حجم ثابت^۳ و روش توأمان نزدیک و تنها یک اختلاف جزئی در فشار منفذی

¹ Cattoni et al.

² Shafipour and Soroush

³ constant volume method

مشاهده می‌شود که ناشی از فرضیات مسئله می‌باشد. در روش حجم ثابت، سیال منفذی بطور کامل تراکم-ناپذیر است درحالی‌که در روش توأمان برای مایع مدول بالک تعریف شده است. تأثیر مقدار مدول بالک بر فشار منفذی ایجاد شده در نمونه سست، محسوس تر می‌باشد (Shafipour & Soroush, 2008).

در مطالعه دونگ و یوان^۱ در سال ۲۰۰۹ با استفاده از نرم‌افزار PFC به بررسی اثر سیال منفذی بر تغییر شکل فاز جامد پرداخت. در این مدلسازی حرکت سیال بصورت ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود که از معادلات ناویر-استوکس پیروی می‌کند. برای مدلسازی ذرات خاک از روش المان مجزا استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، پارامترهای زمان و تخلخل از عوامل بسیار تأثیرگذار بر رفتار هیدرومکانیک محیط می‌باشند. همچنین تغییرشکل‌های ایجاد شده ناشی از تحلیل توأمان هیدرومکانیک مطابقت بالایی این روش را در مقایسه‌ی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد (Dong and Yuan, 2009).

در مطالعه چاریر و همکاران^۲ (۲۰۱۱) با استفاده از روش DEM، با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیک به بررسی نیروهای اعمال شده بر روی ذرات و تغییرات هندسه منافذ خاک در یک مدل دوفازی از مواد دانه‌ای اشباع پرداخت. همچنین انواع روش‌های مختلف حل هیدرومکانیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی نشان دهنده‌ی مطابقت بالای مدلسازی هیدرومکانیک انجام شده با نظریه کلاسیک ترزاقی است (Chareyre et al., 2011).

۳-۳- جمع‌بندی

مطالعات صورت گرفته در زمینه اندرکنش هیدرومکانیک نشست بیان‌کننده‌ی کاربردی بودن این روش در پیش‌بینی تغییرشکل‌های اطراف فضای حفاری در پروژه‌های تونلسازی است. با توجه به مطالعات انجام شده،

¹ Dong and Yuan

² Chareyre et al.

در اغلب مدلسازی‌ها با ساده‌سازی‌هایی از قبیل عدم در نظر گرفتن توالی حفاری، چشم‌پوشی از تغییرات سطح آب زیرزمینی، حل دوبعدی مسائل 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 غیرتوأمان صورت نگرفته است. از این رو در این پژوهش، به منظور داشتن یک تخمین دقیق و نزدیک به واقعیت با یک رویکرد همه جانبه به بررسی تأثیر حفاری بر محیط اطراف تونل در دو حالت توأمان و غیرتوأمان پرداخته شده است.

فصل چهارم

زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر احداث خط بهمت متروی تهران

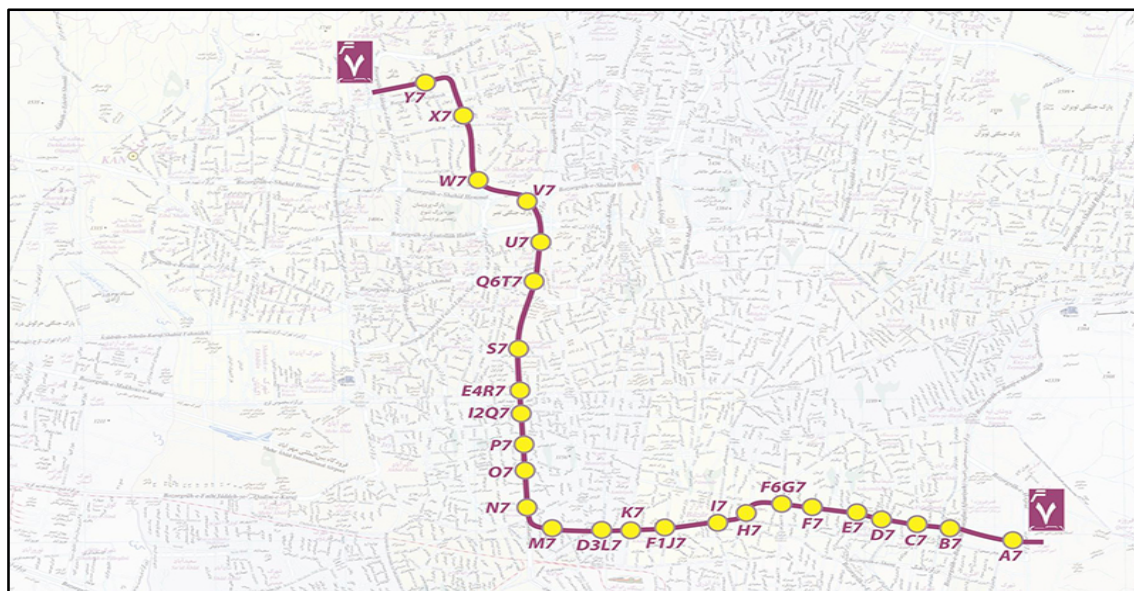
۴-۱- مقدمه

شهر تهران در شمال بخش مرکزی ایران و جنوب رشته کوه البرز قرار دارد. با توجه به موقعیت سیاسی و اقتصادی این شهر، توسعه سیستم حمل و نقل عمومی و بهبود وضعیت ترافیکی آن، اجتناب‌ناپذیر است. خط هفت متروی تهران از شهرک امیرالمومنین در شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج و امتداد یافتن در طول بزرگراه شهید محلاتی و اتصال به میدان قیام و گسترش آن در امتداد خیابان مولوی و هلال احمر و اتصال به بزرگراه نواب صفوی، مسیر آن در امتداد شمالی - جنوبی در طول بزرگراه نواب تغییر می‌یابد این خط شامل ۲۸ ایستگاه که تمامی آنها زیرزمینی می‌باشند. تونل خط هفت متروی تهران با طول ۲۲/۴ کیلومتر یکی از تونل‌های بزرگ مقطع و طولی 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.

۴-۲- زمین‌شناسی مسیر احداث تونل

همان طور که قبلاً اشاره شده خط هفت متروی تهران از دو قطعه شرقی - غربی و شمالی - جنوبی تشکیل شده است. شکل (۴-۱) موقعیت متروی خط هفت تهران را نشان می‌دهد. جهت تعیین و شناسایی واحدهای زمین‌شناسی منطقه در طول مسیر شمالی - جنوبی، از ۲۲ گمانه و ۸ چاهک مقدماتی برای تعیین نوع خاک، سطح آب زیرزمینی و انجام آزمایشات آزمایشگاهی لازم حفر استفاده شده است. خاک در طول مسیر مورد نظر از رسوبات آبرفتی دامنه‌ای متعلق به کواترنری تشکیل یافته که به سازند آبرفتی تهران مرسوم است. ضخامت این رسوبات در گستره طرح برابر ۶۰ متر گزارش شده است. اجزای تشکیل دهنده‌ی رسوبات آبرفتی در گستره طرح از ذرات بسیار ریز رس تا تخته سنگ‌های بزرگ را در بر می‌گیرد که از توزیع دانه‌بندی متغییری در عمق و گسترش سطحی برخوردار است. این سازند از لایه‌های متناوب خاک‌های ریز

و درشت دانه تشکیل یافته که می‌تواند بر طراحی و ساخت پروژه مورد نظر اثر گذار باشد. اجزای درشت تشکیل دهنده‌ی رسوبات آبرفتی محل (قلوه سنگ‌ها و تخته سنگ‌ها) که بیشتر از سنگ‌های آذرآواری تشکیل یافته‌اند، بسیار مقاوم، سخت و ساینده هستند (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰).



شکل (۱-۴): موقعیت متروی خط هفت تهران (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰).

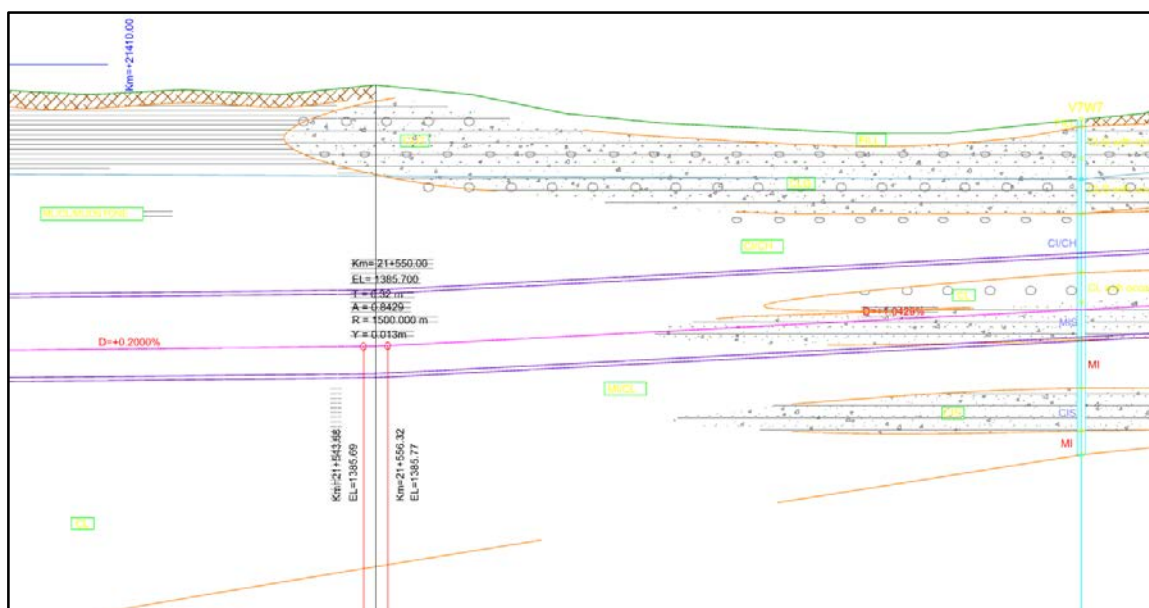
۴-۲-۱- تفکیک و توصیف واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

یکی از مهمترین فعالیت‌هایی که در مطالعات ژئوتکنیکی تونل‌های مکانیزه در خاک باید مورد توجه قرار گیرد تفکیک مناسب واحدهای خاکی می‌باشد. زیرا تفکیک این واحدها، مبنای مطالعات دیگر بوده و تاثیر قابل توجهی بر روی نتایج برآورد فشار سینه کار، مخاطرات محتمل و همچنین بر روی بهسازی یا عمل آوری خاک برای حفاری دارد. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل به پنج واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند که این واحدها در جدول (۱-۴) معرفی گردیده‌اند. بر اساس برش زمین‌شناسی مهندسی تونل واحدهای ET-2، ET-3 و ET-5 به ترتیب بیشترین گسترش را در مسیر

تونل دارند و دو واحد ET-1 و ET-4 بیشتر بصورت لنزها و عدسی‌های ماسه‌ای و شنی گسترش یافته است. با توجه با اطلاعات در دسترس از متروی خط هفت تهران، پروفیل زمین‌شناسی کیلومتراژ ۲۱+۵۴۰ تا ۲۱+۶۰۰ انتخاب شده است. در شکل (۲-۴) مقطع زمین‌شناسی مورد نظر نشان داده شده است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰).

جدول (۱-۴): مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)

ET-5	ET-4	ET-3	ET-2	ET-1	واحد زمین‌شناسی مهندسی
clayey SILT & silty CLAY with sand, very sandy CLAY (or SILT)	clayey silty SAND with gravel	very silty clayey SAND with gravel, very sandy CLAY (or SILT) with gravel	very gravely SAND with silt & clay	sandy GRAVEL & gravely SAND	توصیف خاک
>60 %	22-34 %	30-60 %	12-30 %	3-12 %	درصد رد شده از الک ۲۰۰
CL, ML & CL-ML (rarely CH)	SC, SM	SC, SM & CL	SC, SC-SM & GC	GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP	نوع خاک (USCS)



شکل (۲-۴): پروفیل زمین‌شناسی مربوط به کیلومتراژ ۲۱+۵۴۰ (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)

۴-۲-۲- تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی (لوگ گمانه‌ها و آزمایشهای صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی برآورد و تعیین شده است. به منظور تحلیل آماری پارامترهای بدست آمده از آزمون‌های صحرایی و یا آزمایشگاهی، محاسبات مربوط به برآورد مقدار هر پارامتر یک فاصله اطمینان برای مقدار هر پارامتر در نظر شده است. مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل در جدول (۴-۲) ارائه شده است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰).

جدول (۴-۲): مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)

unit weight Dry (g/cm ³)	u	E (kg/cm ²)			Φ (degree)			C (kg/cm ²)			Φ' (degree)			C' (kg/cm ²)			واحد زمین شناسی مهندسی
		مقدار پیشنهادی	فاصله اطمینان		مقدار پیشنهادی	فاصله اطمینان		مقدار پیشنهادی	فاصله اطمینان		مقدار پیشنهادی	فاصله اطمینان	مقدار پیشنهادی	فاصله اطمینان			
1.80	0.3	750	800	700	30	32	29	0.15	0.20	0.10	35	39	32	0.20	0.25	0.06	ET-1
1.90	0.3	800	850	750	30	32	28	0.20	0.3	0.10	34	38	32	0.25	0.35	0.15	ET-2
1.90	0.32	650	700	600	29	30	27	0.25	0.35	0.15	32	34	30	0.30	0.35	0.20	ET-3
1.90	0.3	700	750	650	30	32	28	0.30	0.40	0.20	35	40	30	0.35	0.40	0.30	ET-3*
1.75	0.3	600	650	550	26	29	25	0.30	0.40	0.20	30	35	26	0.35	0.40	0.30	ET-4
1.70	0.35	350	400	300	24	27	20	0.50	0.60	0.40	27	28	26	0.4	0.60	0.30	ET-5

۴-۲-۳- وضعیت آب‌های زیرزمینی در مسیر تونل

طبق اطلاعات بدست آمده از گمانه‌های اکتشافی، حدود ۶۰ درصد از طول تونل و ایستگاههای قطار شهری با آب‌های زیرزمینی برخورد داشته‌اند بنابراین وضعیت آب‌های زیرزمینی نقش تعیین کننده‌ای را در

طراحی و ساخت سازه‌های زیرزمینی مورد نظر ایفا خواهند کرد. دو نوع سفره آب زیرزمینی در گستره طرح وجود دارد که می‌تواند بر کارهای عمرانی طرح مورد نظر اثر گذار باشد. این سفره را که در رسوبات آبرفت دامنه‌ای تهران شکل گرفته‌اند. می‌توان سفره‌های اصلی و سطحی نام‌گذاری کرد. سفره اصلی در گستره طرح به طور عمده غیرمحصور و با ضخامت متغییر می‌باشد. این سفره در بخش شرقی - غربی مسیر، حداقل کیلومترهای ۲ تا ۱۲ در عمق ۱۵ تا ۵۵ متری با ضخامت ۵ تا ۴۰ متری، با تونل و ایستگاه‌ها برخورد خواهد داشت. سفره سطحی که در عمق‌های کم زمین، در بخش‌های شمالی گستره طرح شکل گرفته‌اند از کیلومتراژ ۱۹ تا ۲۵ در عمق ۱۰ تا ۴۵ متری با ضخامت ۵ تا ۳۵ متری، با تونل و ایستگاه‌ها برخورد خواهد کرد. منابع تشکیل سفره‌ها در گستره طرح عوامل مختلفی هستند این منابع عبارتند از: جریان زیرزمینی از بلندی‌های شمالی، نفوذ آب بارندگی‌ها، آبیاری فضاها سبز و نشت لوله‌های آب فاضلاب و مخازن فاضلاب (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰).

۳-۴ - پارامترهای مربوط به ماشین حفاری و سیستم نگهداری

مشخصات ماشین حفاری و سیستم نگهداری استفاده شده در قطعه شمالی - جنوبی خط هفت مترو تهران در جدول (۳-۴) ارائه شده است (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰).

جدول (۳-۴): مشخصات ماشین حفاری و سیستم نگهداری (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)

مشخصات ماشین حفاری و سیستم نگهداری استفاده شده در قطعه شمالی - جنوبی	
قطر حفاری	۹/۱۶۴ متر
قطر سپر	۹/۱۲۶ متر
طول دستگاه	۹۵ متر
طول گام پیشروی	۱/۵ متر
زمان حفاری هر گام	۲۵ دقیقه
ضخامت قطعات بتنی	۳۵ سانتی‌متر
طول قطعات بتنی	۱/۵ متر
ضخامت فضای تزریق در پشت قطعات بتنی	۱۵ سانتی‌متر

۴-۴ - جمع بندی

براساس مطالب ذکر شده، مسیر احداث قطعه شمالی - جنوبی خط هفت متروی تهران طبق طبقه بندی انجام شده از پنج نوع کلی خاک تشکیل شده است. به طوری که، بر اساس برش زمین شناسی مهندسی تونل، واحدهای ET-1، ET-2، ET-3 و ET-5 به ترتیب بیشترین گسترش را در مسیر تونل دارند و دو واحد ET-4 و ET-1 بیشتر بصورت لنزها و عدسی های ماسه ای و شنی گسترش یافته است. وضعیت آب زیرزمینی در این قطعه به گونه ای است که، ۶۰ درصد مسیر تونل زیر سطح ایستابی قرار گرفته است که نقش تعیین کننده ای در طراحی و ساخت سازه های زیرزمینی ایفا می کند. در انتها نیز پارامترهای ماشین و سیستم نگهداری بکار رفته شده در این خط ارائه شده است.

مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار **FLAC 3D**

۵-۱- مقدمه

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 توسعه یافته است. به طور کلی در حل عددی روش‌های توأمان، دو معادله اساسی حاکم بر محیط از قبیل معادلات سیال (مسئله جریان) و جامد (مسئله ژئومکانیک) حل می‌شود. بنابراین در این بخش ابتدا مقدمه‌ای بر روش‌های عددی و انواع روش‌های حل توأمان در راه حل‌های عددی بیان شده است. از این رو پس از انتخاب نرم‌افزار عددی متناسب با شرایط مسئله، مدل سه بعدی از تونل مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار FLAC3D ساخته می‌شود و پس از برقراری شرایط حاکم بر محیط، تغییرشکل‌های بدست آمده ناشی از عملیات حفاری در دو حالت توأمان و غیرتوأمان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲- روش‌های عددی

روش‌های عددی در حل مسائل مهندسی می‌توانند کاربردهای زیادی داشته باشند. در گذشته به علت نبود امکانات رایانه‌ای کافی و همچنین زمان بر بودن انجام محاسبات، بیشتر از روابط تجربی استفاده می‌شد. اساس روش‌های عددی تبدیل محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است. موقعیت، تعداد و ارتباط نقاط یاد شده توسط مش‌بندی مشخص می‌شود. امروزه با توجه به پیشرفت سریع علوم کامپیوتر، استفاده از روش‌های عددی برای حل مسائل ژئوتکنیکی گسترش چشم‌گیری یافته است. به دلیل قابلیت بالای روش‌های عددی، می‌توان تأثیر ناپیوستگی‌هایی مانند گسل، درزه، صفحات لایه‌بندی، ناهمگنی‌ها را مطالعه و بررسی کرد. با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای موجود و

تعریف دقیق هندسه، شرایط مرزی و خواص مقاومتی و تغییرشکل پذیری توده سنگ، می توان طراحی قابل قبولی انجام داد. همچنین می توان سازه های سطحی و یا زیرزمینی (تونل ها، مغارها، شیروانی ها و ...) با هر شکل و مقطع را مدلسازی کرده و تنش ها و جابجایی ها در تمام نقاط مورد نظر را بدست آورد. علاوه بر این به کمک روش های عددی می توان روند حفاری، نگهداری و اثر جریان آب در پایداری توده های سنگی و خاکی را بررسی کرد (Eberhardt et al., 2004).

واقعیتی که نباید فراموش کرد این است که نتایج بدست آمده از مدلسازی عددی به داده های ورودی و فرض های ساده سازی بستگی دارد. نباید انتظار داشت که از داده های ورودی اشتباه، نتایج صحیحی به دست آید. محققین و مهندسی در مدل سازی عددی و طراحی سازه های عمرانی و معدنی موفق بوده و هستند که خواص فیزیکی، مکانیکی و تغییرشکل پذیری توده سنگ را خوب می شناسند و دارای تجربه کافی در این زمینه می باشند (Eberhardt et al., 2004).

۵-۲-۱- روش تفاضل محدود و نرم افزار FLAC3D

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی ترین روش های عددی برای حل دستگاه های معادلات دیفرانسیلی است که هنوز هم از کاربرد گسترده ای در حل مسائل مهندسی برخوردار است. این روش نیز مانند روش المان محدود، فضای مسئله را بصورت پیوسته با المان هایی که در گره به هم متصل هستند، مدل می کند. برتری روش تفاضل محدود این است که به توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارند. محققان زیادی از جمله ویکینس^۱ در سال ۱۹۶۳ نشان داده اند که نتایج حاصل از روش تفاضل محدود و روش المان محدود برای مسائل خاص، یکسان است اما استفاده از روش تفاضل محدود انعطاف پذیرتر از روش المان محدود است. از مهمترین نرم افزارهایی که از روش تفاضل محدود برای حل مسائل ژئومکانیک استفاده می کنند

^۱ Wikins

می‌توان به FLAC 2D و FLAC3D اشاره کرد که این دو نرم‌افزار جزو مجموعه نرم‌افزاری شرکت آیتسکا^۱ می‌باشند (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC3D یک برنامه تفاضل محدود، که براساس تحلیل محاسباتی لاگرانژی استوار است که برای مدل‌سازی تغییرشکل‌های بزرگ نیز مناسب می‌باشد. با این نرم‌افزار می‌توان مدل رفتاری سازه‌های خاکی، سنگی و سایر مواد را که دارای جریان پلاستیک در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه‌سازی کرد. این مدل‌های رفتاری که از پیش تعیین شده می‌باشند، مدل‌های متنوعی را در بر می‌گیرند که شامل مدل تهی (فضای خالی) برای نمایش حفاری‌ها در شبکه، تا مدل تسلیم برشی و حجمی برای نمایش رفتار کرنش سختی و کرنش نرمی و نمایش گسیختگی غیرقابل برگشت و غیرخطی است. برای آنالیز تنش‌ها و تغییرمکان‌ها، مواد را به صورت شبکه‌هایی سه بعدی که از المان‌های چندوجهی تشکیل شده است، تعریف می‌کنند. به عنوان مثال محلی که قرار است سازه زیرزمینی در آن حفر شود، بوسیله‌ی شبکه‌ای از المان‌ها نمایش داده می‌شود. این شبکه توسط کاربر طراحی می‌شود که مشابه شکل سازه مورد نظر باشد. هر المان مطابق با یک قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی و در واکنش با نیروهای وارده یا شرایط مرزی رفتار می‌کند. المان‌ها براساس قانونی که از پیش تعیین می‌شوند، می‌توانند رفتارهای خطی یا غیرخطی از خود نشان دهند و به تسلیم برسند یا جریان یابند (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

این برنامه از قابلیت‌های بسیاری برای تحلیل مسائل برخوردار است که عمده‌ترین کاربرد آن در مسائل ژئوتکنیک می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسائل مربوط به سازه‌های زیرزمینی و سطحی مانند طراحی تونل‌ها، پی‌ها و شمع‌ها، شیروانی‌های معدنی و عمرانی و نیروگاهایی که در اعماق زمین قرار دارند

^۱ ITASCA

را مدل سازی کرد. علاوه بر این می توان اندرکنش سازه‌هایی مانند پوشش تونل، پیچ سنگ‌ها، قطعات تسلیم-پذیر و شمع‌های صفحه‌ای با سنگ یا خاک درونگیر را به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی کرد و اثرات آنها را بر روی پایداری سازه‌های زیرزمینی یا سطحی بررسی نمود (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

همچنین با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان پیوستگی کامل بین یک جامد تغییر شکل‌پذیر متخلخل و یک سیال لزج را در منافذ آن جریان دارد، مدل‌سازی کرد. این سیال می‌تواند از قانون ایزوتروپیک یا غیرایزوتروپیک داری پیروی کند. همچنین می‌توان هر دو جریان یکنواخت و غیریکنواخت سیال را مدل‌سازی کرد. با توجه به اینکه زمان محاسبات در تحلیل‌های توأمان مانند، برهم‌کنش‌های هیدرومکانیکی در محیط‌های متخلخل و اشباع بسیار بالا می‌باشد از این رو انتخاب روش عددی مناسب برای بررسی رفتار این محیط‌ها بسیار حائز اهمیت است. با توجه به سرعت و دقت بالای محاسبات و استفاده از حل صریح در تحلیل‌های توأمان، نرم‌افزار FLAC3D به منظور مدل‌سازی انتخاب می‌گردد (Itasca Consulting Group, Inc., 2013). در ادامه انواع روش‌های توأمان موجود در روش‌های عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲-۲- انواع روش‌های توأمان در روش‌های عددی

برای حل معادلات توأمان حاکم بر محیط‌های اشباع با استفاده از روش‌های عددی چهار روش توأمان کامل^۱، تکرار^۲، صریح^۳ و ضعیف^۴ وجود دارد که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است (Dean et al., 2006).

- روش توأمان کامل: در این روش هر دو معادله‌ی هیدرولیک و مکانیک به صورت همزمان در هر

^۱ Fully couple

^۲ Iteratively couple

^۳ Explicitly couple

^۴ Loosely couple

گام زمانی حل می‌شود و پاسخ نهایی از همگرایی ناشی از تکرار بدست می‌آید. این روش نیازمند توسعه‌ی کدهای عددی برای ادغام کردن معادلات جریان و ژئومکانیک می‌باشد که خود سبب افزایش هزینه‌ها می‌شود.

- روش توأمان تکرار: در این روش معادلات هیدرولیک و مکانیک بصورت ترتیبی یا مستقل از هم در هر گام زمانی حل می‌شود و جواب از همگرایی ناشی از تکرار بدست می‌آید. به عبارت دیگر در این روش ابتدا یکی از معادلات هیدرولیک یا مکانیک حل می‌شود و سپس معادله دیگر، با توجه به جواب حدواسط معادله قبلی حل می‌گردد.

- روش توأمان صریح: این روش یک نمونه‌ی خاص از روش توأمان تکرار است. با این تفاوت که تنها یک تکرار در هر گام زمانی کوچک انجام می‌شود. اجرای ساده‌ی این روش از مزیت‌های اصلی آن بشمار می‌رود به همین دلیل نسبت به سایر روش‌ها از محبوبیت بالاتری برخوردار است.

- روش توأمان ضعیف: در این روش پس از حل معادلات سیال، معادلات مکانیک در گام‌های زمانی مختلفی حل می‌شود. این روش از لحاظ هزینه مقرون به صرفه و از لحاظ دقت باید مورد بررسی قرار گیرد.

از میان چهار روش ذکر شده، روش توأمان صریح بسیار پرکاربرد و مورد توجه می‌باشد. این روش نه تنها از نظر اجرا ساده بلکه از نظر زمان محاسبات نیز مقرون به صرفه می‌باشد (Dean et al., 2006). در ادامه مدل‌سازی محدوده مورد مطالعه تشریح خواهد شد.

۵-۳- مدل‌سازی محدوده مورد مطالعه

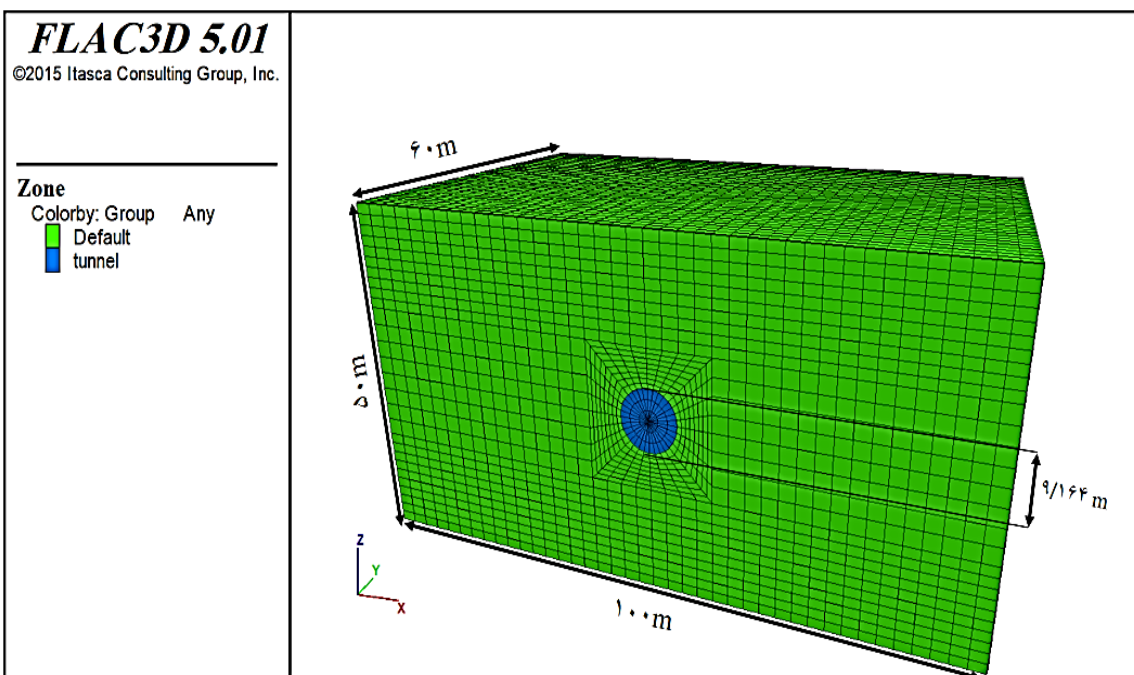
با هدف بررسی تأثیر توأمان هیدرومکانیک بر نشست تونل، یک مدل سه بعدی در نرم‌افزار FLAC3D

ساخته شده است. در ادامه روند مدلسازی، نحوه‌ی بررسی‌ها و در نهایت نتایج این بخش ارائه شده است.

۵-۳-۱- هندسه‌سازی

نخستین گام جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار FLAC3D ساخت هندسه مورد نظر 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 به دست آمده دارد.

ابعاد مدل ساخته شده در این نرم‌افزار با توجه به محدودیت سیستم‌های رایانه‌ای، به منظور افزایش سرعت محاسبات و به حداقل رساندن تأثیر مرزهای مدل بر خروجی‌های نرم‌افزار بر اساس قطر و طول تونل $100 \times 60 \times 50$ متر در نظر گرفته می‌شود. هندسه مورد نظر در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱): هندسه‌ی مدل

۵-۳-۲- انتخاب مدل رفتاری

انتخاب مدل رفتاری مناسب برای اجزای مختلف در مدلسازی بسیار مهم می‌باشد. صحت نتایج بررسی‌ها تا حد زیادی به این انتخاب وابسته است. در ادامه به تشریح نحوه‌ی انتخاب مدل رفتاری برای بخش‌های مختلف مدل پرداخته خواهد شد.

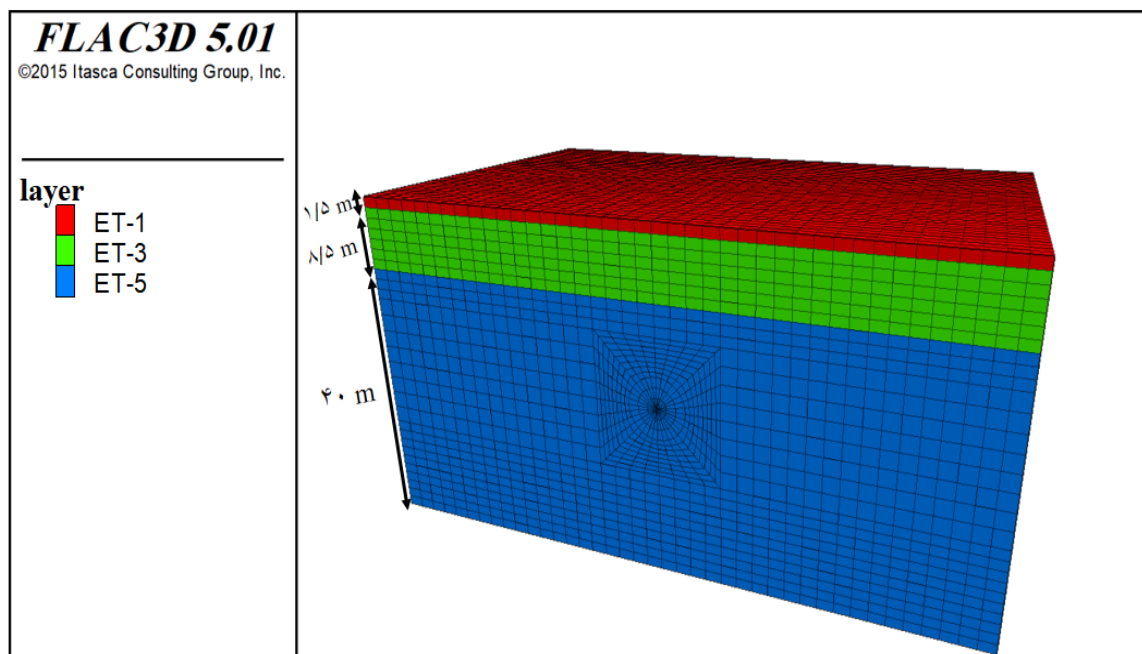
۵-۳-۲-۱- مدل رفتاری محیط دربرگیرنده‌ی تونل

پس از ساخت هندسه، باید یک مدل رفتاری مناسب به ماده‌ی آن اختصاص یابد. مدل‌های رفتاری متفاوتی در این نرم‌افزار پیش‌بینی شده است. نرم‌افزار FLAC3D دارای ۱۵ مدل رفتاری از پیش طراحی شده است که عبارتند از: مدل تهی، سه نوع مدل الاستیک (همسانگرد، ناهمسانگرد و ارتوتروپ) و هفت مدل پلاستیسیته (دراگر-پراگر، موهر-کلمب، کرنش سخت شونده و نرم‌شونده، درزه سراسری، کرنش نرم‌شونده و سخت شونده غیرخطی درزه سراسری، تسلیم دوگانه و مدل اصلاح شده Cam-clay) می‌باشد. هر مدل برای ارائه حالت خاصی از رفتار مصالح بکار می‌رود که با توجه به خصوصیات مصالح مدل مناسب انتخاب می‌شود. در پژوهش کنونی جهت بیان رفتار مواد تشکیل دهنده‌ی محیط از مدل موهر-کلمب استفاده شده است. این مدل برای موادی بکار می‌رود که تحت بارگذاری‌های برشی تسلیم می‌شوند و پرم‌کاربردترین مدل در مطالعات عمومی مهندسی است. این مدل می‌تواند در مواد دانه‌ای شن، سیمان، خاک، سنگ و بتن مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان در تحلیل پایداری حفاریات زیرزمینی و پایداری شیب از آن بهره برد. مدل موهر-کلمب مدل پلاستیکی است که از لحاظ محاسباتی کارآمدتر است. این مدل رفتاری نسبت به سایر مدل‌های پلاستیک، با توجه به زمان‌بر بودن تحلیل‌های توأمان نیاز به حافظه و زمان کمتری به منظور انجام محاسبات دارد. پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر-کلمب عبارتند از: جرم حجمی، مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقاومت کششی. چنانچه هر یک از این پارامترها تعریف نشود، نرم‌افزار بصورت پیش فرض مقدار صفر برای آن در نظر می‌گیرد Itasca Consulting

(Group, Inc., 2013). در این تحقیق پارامترهای جرم حجمی، مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک در مدل‌سازی استفاده شده است که ویژگی و موقعیت قرارگیری هر یک از لایه‌ها، با توجه به شرایط حاکم بر محدوده مورد مطالعه، واقع در کیلومتر ۲۱+۵۴۰ در جدول (۵-۱) و شکل (۵-۲) نشان داده شده است.

جدول (۵-۱): پارامترهای مدل موهر-کلمب (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)

گروه زمین-شناسی	چسبندگی (kpa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	مدول بالک (Mpa)	مدول برشی (Mpa)	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون	ضخامت لایه (M)
ET-5	۳۹/۳	۲۷	۳۸/۲۲	۱۲/۷۴	۱۷۰۰	۰/۳۵	۴۰
ET-3	۲۹/۵	۳۲	۵۹/۰۲	۲۴/۱۵	۱۹۰۰	۰/۳۲	۸/۵
ET-1	۱۹/۶	۳۵	۶۱/۲۵	۲۸/۲۷	۱۸۰۰	۰/۳	۱/۵



شکل (۵-۲): وضعیت قرارگیری لایه‌ها

۵-۳-۲- مدل رفتاری سپر ماشین حفار، سگمنت و تزریق

با توجه به هدف مسأله و مطالعات صورت گرفته مدل رفتاری سپر ماشین حفار، سگمنت و تزریق پشت آن بصورت الاستیک در نظر گرفته شده است (Hasanpour et al., 2014). خصوصیات مدل رفتاری الاستیک در جدول (۲-۵) ارائه شده است.

جدول (۲-۵): پارامترهای مکانیکی سپر، پوشش نهایی و تزریق (Chakeri et al., 2013)

توزینات مواد	واحد	سپر	پوشش نهایی	تزریق
مدول الاستیک	GPa	۲۰۰	۳۶	۱
نسبت پواسون	-	۰/۳	۰/۲	۰/۳
وزن مخصوص	KN/m ³	۷۶	۳۰	۲۴

۵-۳-۳- مدل سازی جریان سیال

همانطور که قبلاً گفته شد نرم افزار FLAC3D قادر به مدل سازی جریان سیال از میان یک محیط نفوذپذیر مانند خاک است. مدل سازی جریان ممکن است به تنهایی و مستقل از محاسبات مکانیکی انجام شود. همچنین برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سیال-محیط^۱، می توان این مدل سازی را هم زمان با مدل سازی مکانیکی انجام داد. نمونه ای از اندرکنش سیال-محیط، مسئله تحکیم^۲ است که در آن افت فشار منفذی، موجب رخ دادن جابجایی در خاک می شود. این نوع رفتار شامل دو اثر مکانیکی است. اولین اثر، تغییر در فشار منفذی است که موجب تغییر تنش موثر می شود. بنابراین رفتار محیط نیز متعاقباً تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. دومین اثر، تغییر حجم مکانیکی در اثر تغییر فشار منفذی است که ناشی از حضور سیال

^۱ Fluid-solid interaction

^۲ consolidation

در یک زون است. مدل‌سازی جریان سیال در این نرم‌افزار به دو صورت "عدم پیکربندی" و "پیکربندی" شبکه برای جریان سیال صورت می‌گیرد که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

۵-۳-۱- عدم پیکربندی شبکه برای جریان سیال

در صورتی که از دستور "CONFIG fluid" (پیکربندی شبکه برای جریان سیال) استفاده نشده باشد انجام تحلیل‌های مربوط به سیال ممکن نیست ولی می‌توان فشار منفذی گره‌ها را تعیین کرد. در این شیوه محاسباتی، فشار منفذی تغییر نمی‌کند اما در صورت استفاده از مدل‌های رفتاری پلاستیک، وضعیت تنش موثر ممکن است موجب گسیختگی شود. در این روش محاسباتی، حضور سیال نمی‌تواند بطور خودکار برای محاسبه‌ی نیروهای حجمی استفاده شود و دانسیته اشباع و خشک باید بصورت جداگانه برای زون‌های پایین و بالای سطح آب تعیین شوند (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

۵-۳-۲- پیکربندی شبکه برای جریان سیال

در صورت استفاده از دستور "CONFIG fluid"، تحلیل جریان سیال امکان‌پذیر بوده و به محض تغییر سطح ایستابی آب، فشار منفذی تغییر خواهد کرد. فشار منفذی در گره‌های هر زون محاسبه شده و با بکارگیری میانگین‌گیری، به زون‌ها تعلق می‌گیرد. توزیع تنش موثر و محاسبات زهکشی شده و نشده را می‌توان با استفاده از روش "CONFIG fluid" انجام داد. علاوه بر این، می‌توان تحلیل‌های ترکیبی کاملی را نیز انجام داد، به صورتی که تغییر فشار منفذی موجب تغییر شکل شده و کرنش حجمی باعث رهایی فشار منفذی می‌شود. در این روش محاسباتی، دانسیته خشک را برای زون‌های بالا و پایین سطح آب تعیین می‌شود و نوع مدل جریان، که در این تحقیق بصورت ایزوتروپ در نظر گرفته می‌شود به زون‌ها اختصاص می‌یابد. و در انتها، خصوصیات سیال تعیین می‌شود.

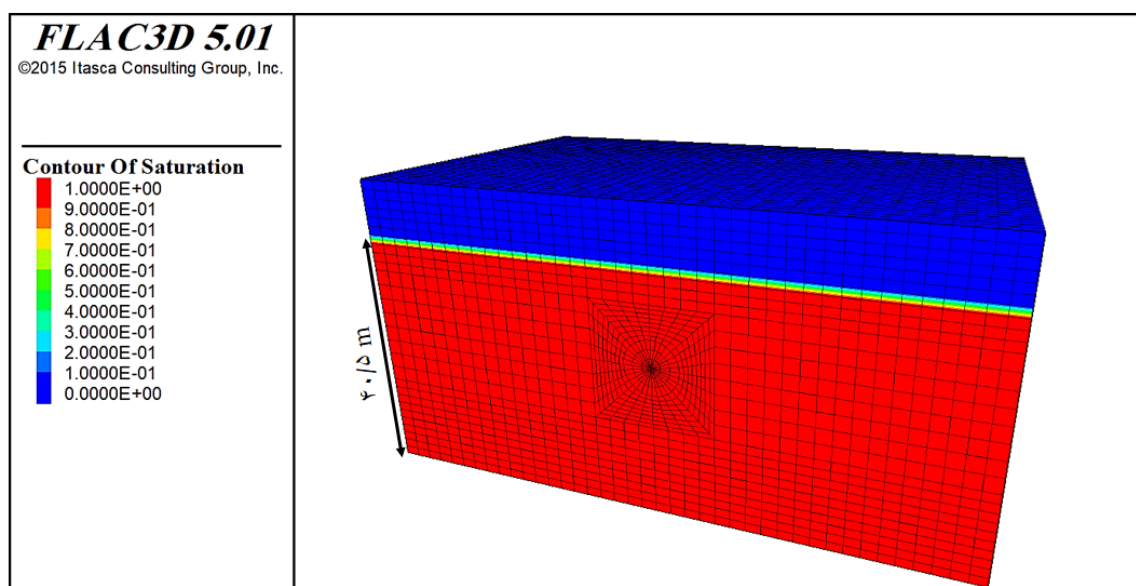
باید توجه داشت که در روش "CONFIG fluid" تراکم‌پذیری سیال به دو صورت زیر تعیین می‌شود:

- تعیین ضریب و مدول بایوت

- تعیین مدول حجمی و تخلخل

در روش اول، بخش جامد تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود (ضریب بایوت برای دانه‌های تراکم‌ناپذیر برابر ۱ می‌باشد). در روش دوم بخش جامد تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

با توجه به بررسی توأمان، در این تحقیق برای مدلسازی جریان سیال از روش "CONFIG fluid" استفاده شده است. سطح آب زیرزمینی در مقطع مطالعاتی واقع در کیلومتراژ ۲۱+۵۴۰ در فاصله‌ی ۹/۵ متری از سطح زمین قرار دارد. شکل (۳-۵) وضعیت قرارگیری سطح آب زیرزمینی در مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵): سطح آب زیرزمینی در مدل

۵-۳-۳-۳- خصویات لازم برای تحلیل جریان سیال

خصویاتی که مربوط به جریان سیال در نرم‌افزار FLAC3D است شامل ضریب نفوذپذیری، دانسیته سیال، ضریب بایوت، مدول بایوت، مدول حجمی سیال، تخلخل و مقاومت کششی سیال است که در ادامه، این خصویات توضیح داده شده اند (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

۵-۳-۳-۱- ضریب نفوذپذیری

ضریب نفوذپذیری ایزوتروپ K که در سیستم SI با واحد $m^2/(Pa/sec)$ مشخص می‌شود از خصویات یک زون است که با به کارگیری رابطه‌های تبدیلی ۵-۱ تا ۵-۳ استخراج شده و با استفاده از دستور PROPERTY و کلمه کلیدی perm تعیین می‌گردد (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

$$k \text{ (in SI units)} \equiv k \text{ (in cm}^2\text{)} \times 9.9 \times 10^{-2} \quad (۱-۵)$$

$$k \text{ (in SI units)} \equiv k_h \text{ (in cm/sec)} \times 1.02 \times 10^{-6} \quad (۲-۵)$$

$$k \text{ (in SI units)} \equiv \text{permeability in millidarcies} \times 9.8 \times 10^{-13} \quad (۳-۵)$$

در روابط تبدیلی فوق، k نفوذپذیری ذاتی^۱ و k_h قابلیت هدایت هیدرولیکی^۲ است. باید توجه داشت که

۱ داری برابر با 10^{-8} cm^2 است (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

۵-۳-۳-۲- دانسیته

در شرایط گوناگون دانسیته خشک برای ماتریکس جامد (ρ_d)، دانسیته اشباع برای ماتریس جامد (ρ_s)

و دانسیته سیال (ρ_f)، در نرم‌افزار FLAC3D استفاده می‌شوند. استفاده از دانسیته زمانی ضرورت می‌یابد

که بار گرانشی تعیین شده باشد.

^۱ Intrinsic permeability

^۲ Hydraulic conductivity

۵-۳-۳-۳-۳-۵- ضریب بایوت و مدول بایوت

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 که به طور پیش فرض توسط نرم‌افزار FLAC3D انتخاب می‌شود. برای آنکه شیوه محاسبات طوری باشد که دانه‌بندی، تراکم‌پذیر در نظر گرفته شود باید از دستور "SET fluid biot on" استفاده شود. دامنه تغییرات ضریب بایوت بین $\frac{3n}{3+n}$ تا ۱ است که در آن n تخلخل می‌باشد.

برای یک ماده‌ی متخلخل ایده‌آل، ضریب بایوت به مدول بالک توده خاک (k) و مدول بالک قسمت جامد (k_s) وابسته است و با استفاده از رابطه‌ی ۴-۶ بدست می‌آید:

$$\alpha = 1 - \frac{k}{k_s} \quad (۶-۵)$$

و مدول بایوت M ، با رابطه‌ی ۴-۷ محاسبه می‌گردد که در آن n تخلخل و k_f مدول حجمی سیال است.

$$M = \frac{k_f}{n + (\alpha - n)(1 - \alpha)k_f / K} \quad (۷-۵)$$

حال، در صورتی که قسمت جامد بصورت تراکم‌ناپذیر باشد ($\alpha=1$)، مدول بایوت به صورت زیر تعیین می‌شود

(Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

$$M = \frac{k_f}{n} \quad (۸-۵)$$

۵-۳-۳-۳-۳-۶- مدول حجمی سیال

وقتی شرایط تحلیل به گونه‌ای باشد که تراکم‌پذیری دانه‌ها قابل چشم‌پوشی باشد، کاربر می‌تواند مقدار

پیش‌فرض را برای ضریب بایوت انتخاب کند و مقداری برابر K_f/n را به مدول بایوت دهد (n تخلخل و k_f مدول حجمی سیال است)، در غیراینصورت باید از مدول حجمی سیال به عنوان ورودی استفاده کند. محاسبات سیال در FLAC3D به صورت پیش‌فرض برای محیط را تراکم‌ناپذیر می‌باشد (یعنی SET fluid biot off). مدول حجمی سیال یک متغیر گره‌ای است که با دستور INITIAL تعیین می‌شود. مدول حجمی آب خالص در دمای اتاق برابر 2×10^9 پاسکال است. (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

۵-۳-۳-۴- پارامترهای هیدرولیکی محیط مورد مطالعه

همانطور که در فصل دوم اشاره شد در محیط‌های خاکی مدول بالک متوسط ذرات جامد بسیار بزرگتر از مدول بالک کل توده خاک می‌باشد بنابراین می‌توان از تراکم‌پذیری ذرات جامد چشم پوشی کرد. بنابراین در تحقیق حاضر ضریب بایوت ۱ در نظر گرفته شده است و مدول بایوت با استفاده از رابطه‌ی (۵-۸) تعیین می‌گردد. همچنین سایر پارامترهای هیدرولیکی مربوط به واحدهای زمین‌شناسی مختلف استفاده شده در نرم‌افزار FLAC3D در جدول (۵-۳) ارائه شده است.

جدول (۵-۳): پارامترهای هیدرولیکی محیط (شرکت مهندسی سپاسد، ۱۳۹۰)

واحدهای زمین‌شناسی			پارامترهای هیدرولیکی (واحد)
ET-1	ET-3	ET-5	
۱	۱	۱	ضریب بایوت
$1/0.2e-8$	$1/0.2e-11$	$1/0.2e-12$	نفوذپذیری ($m^2/(pa/sec)$)

۵-۳-۴- اعمال شرایط مرزی

پس از ساخت هندسه و تعیین مدل رفتاری و خصوصیات ماده، باید شرایط مرزی در مدل اعمال شود.

در یک مدل عددی شرایط مرزی شامل مقادیر متغیرهای میدانی، مانند میدان جابجایی، تنش، فشار منفذی و ... است که در مرزهای یک شبکه‌بندی عددی باید تعریف شوند. در ادامه نحوه‌ی اعمال مرزهای جابجایی و تنشی در مدل بیان شده است.

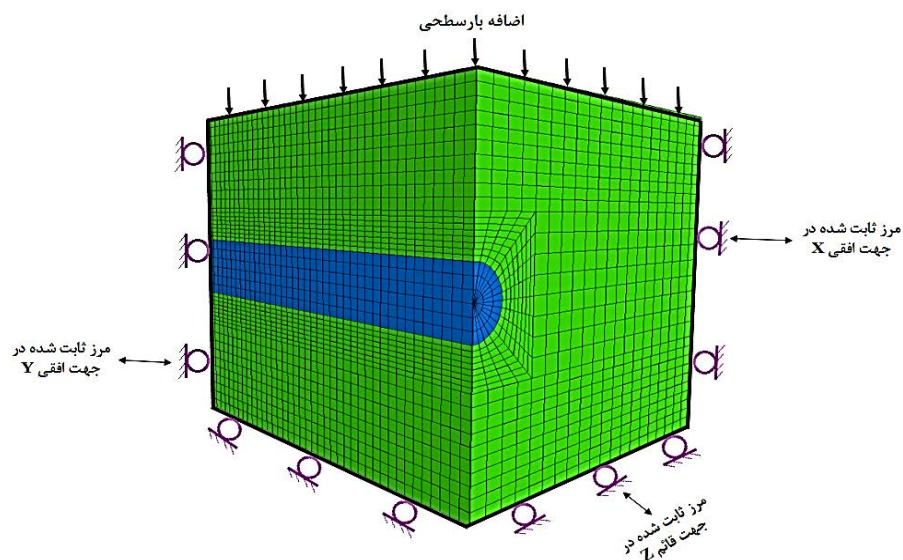
۵-۳-۴-۱- جابجایی‌های مرزی

برای از بین بردن ناپایداری‌ها و به تعادل رسیدن محیط ثابت کردن مرزهای جابجایی امری ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه ساخت هندسه بگونه‌ای است که ابعاد مدل در راستای x در بازه $[0, 100]$ ، در راستای y در بازه $[0, 60]$ و در راستای z در بازه $[0, 50]$ قرار دارد. از این رو جهت بستن مرزها، مدل در راستای x در صفحه YZ در بازه $[-0.1, 0.1]$ و $[0.99, 100.01]$ ، در راستای Y در صفحه XZ در بازه $[-0.1, 0.1]$ و $[59.9, 60.1]$ و همچنین کف مدل در صفحه XY در بازه $[-0.1, 0.1]$ ثابت شده است و سطح بالایی مدل همان سطح زمین است که بصورت آزاد در نظر گرفته می‌شود تا امکان بروز جابجایی و نشست به مدل داده شود.

۵-۳-۴-۲- تنش‌های مرزی

مرزهای شبکه FLAC3D در حالت اولیه آزاد از تنش می‌باشند. نیروها و تنش‌ها به وسیله دستور APPLY بر تمام یا بخشی از مرز مورد نظر اعمال می‌شود و تنش‌های کششی و فشاری برطبق قوانینی که در مقاومت مصالح حاکم بوده به ترتیب مثبت و منفی در نظر گرفته می‌شوند. در این نرم افزار کلمه `nstress` برای تنش عمودی و کلمه `sstress` و `dstress` تنش‌های برشی وارد بر صفحه هستند. تفاوت این دو در این است که `dstress` مولفه تنش در جهت شیب صفحه است ولی `sstress` مولفه تنش در جهت امتداد شیب است. در تحقیق حاضر بار ترافیک به اندازه 20 KN/m^2 با استفاده از دستور `APPLY nstress` در جهت عمود به سطح زمین وارد شده است. همچنین فشار سینه‌کار نیز با استفاده از دستور `APPLY nstress` در

جهت عمود بر سینه کار حفاری، وارد شده است. در شکل (۴-۵)، شرایط مرزی و تنش‌های حاکم بر مدل، نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): شرایط مرزی و تنش‌های

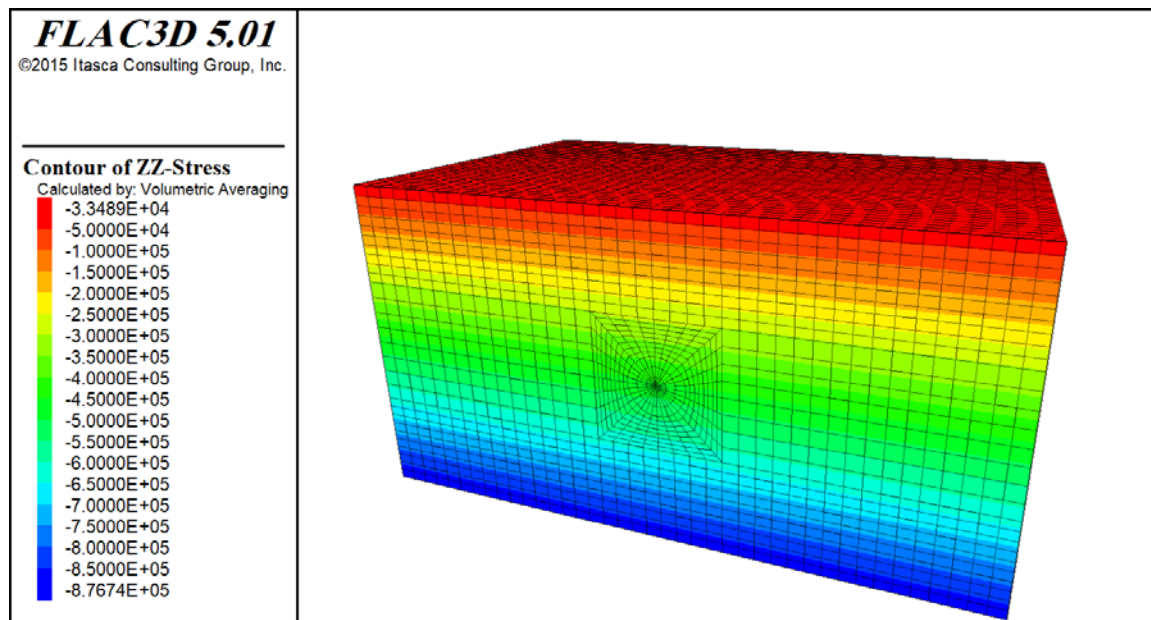
۵-۳-۵- تنش‌های اولیه

در همه پروژه‌های مهندسی زمین، قبل از حفر و ایجاد سازه، تنش‌های برجا در عمق زمین وجود دارند. با اعمال شرایط اولیه سعی می‌شود تنش‌های برجای موجود در زمین قبل از حفاری شبیه‌سازی گردد. حال در صورتی که این شرایط اعمال نشود در نتایج نهایی بدست آمده خطا ایجاد می‌کند. در شرایط ایده‌آل تنش‌های برجا با استفاده از اندازه‌گیری‌های صحرائی بدست می‌آیند. اما وقتی که امکان اندازه‌گیری‌های صحرائی وجود نداشته باشد می‌توان با استفاده از عمق سازه و پارامترهای ژئوتکنیکی زمین تنش‌های برجای محیط را تخمین زد. در این تحقیق تنش‌های قائم به صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم با توجه به جنس محیط برابر با ضریب فشار خاک $K_0 = 1 - \sin\phi$ در نظر گرفته شده است.

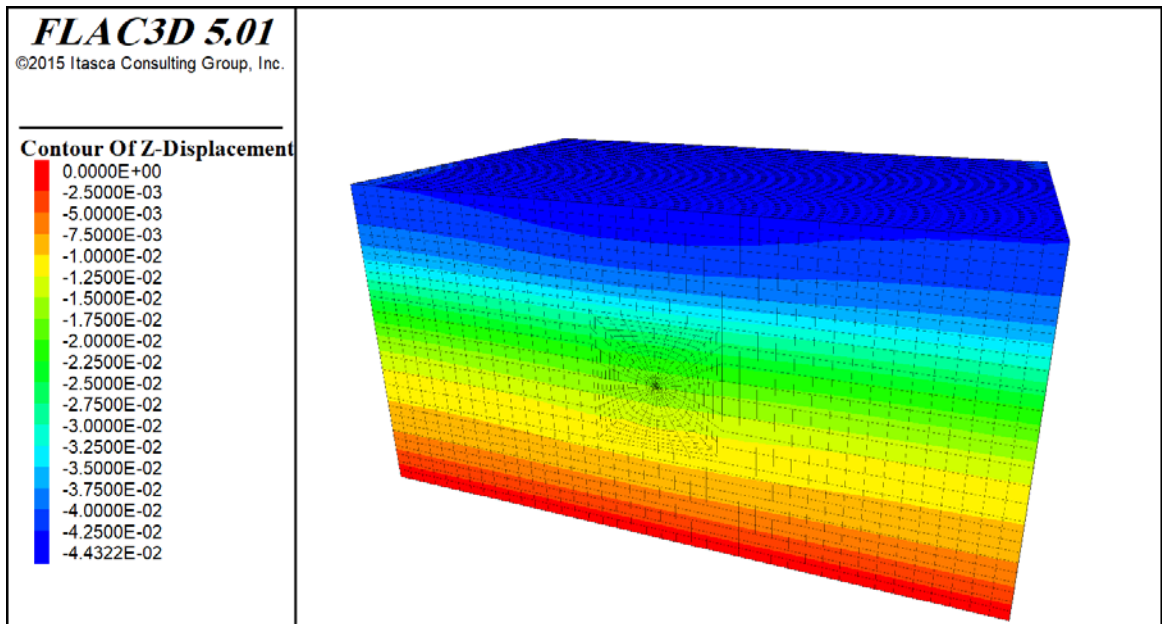
(Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

۵-۳-۶- تعادل اولیه

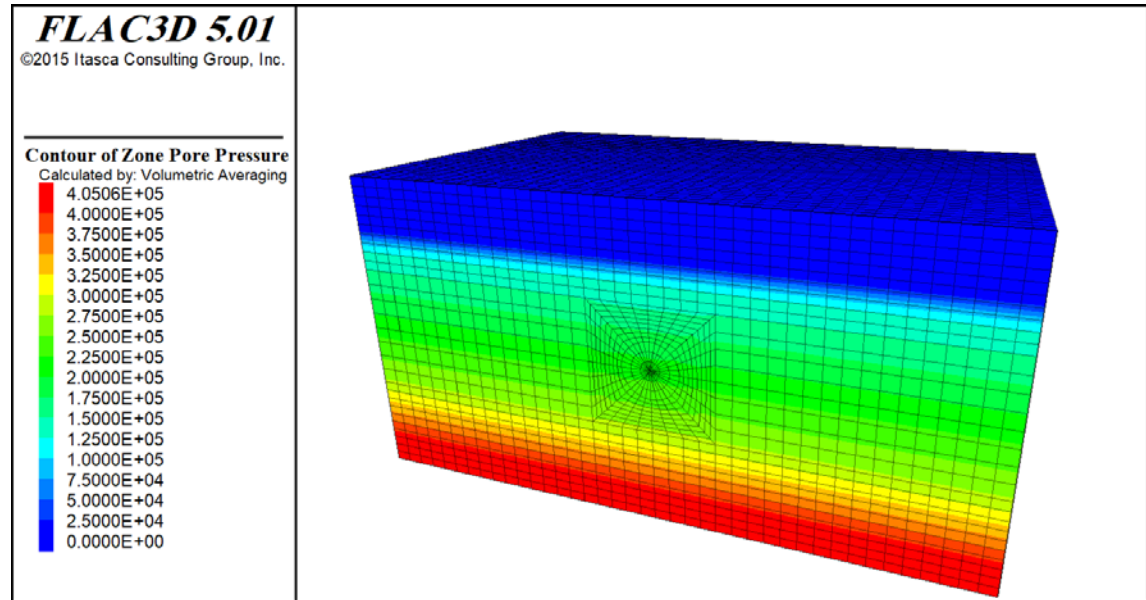
یکی از مراحل اصلی برای گرفتن نتایج دقیق در مدل سازی عددی به تعادل رسیدن تنش ها و جابجایی ها در مدل قبل از شروع حفاری می باشد. برای این منظور بعد از ایجاد هندسه، تعیین خصوصیات رفتاری و تنش های اولیه محیط، نرم افزار با طی تعداد مشخصی گام زمانی مدل ساخته شده را به تعادل می رساند. جهت بررسی صحت تعادل اولیه در نرم افزار FLAC3D کانتورهای جابجایی قائم، تنش های قائم و تاریخچه حداکثر نیروی نامتعادل مورد بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که عدم تشکیل زون های پلاستیک در تعادل اولیه، صحت تعادل اولیه را نشان می دهد. در شکل (۵-۵) تا (۹-۵) کانتورهای جابجایی قائم، تنش های قائم، فشار منفذی، نمودار حداکثر نیروی نامتعادل کننده و وضعیت پلاستیک زون های مدل، بعد از تعادل اولیه نشان داده شده است. از این رو، صحت تعادل اولیه در مدل ساخته شده حاصل می شود.



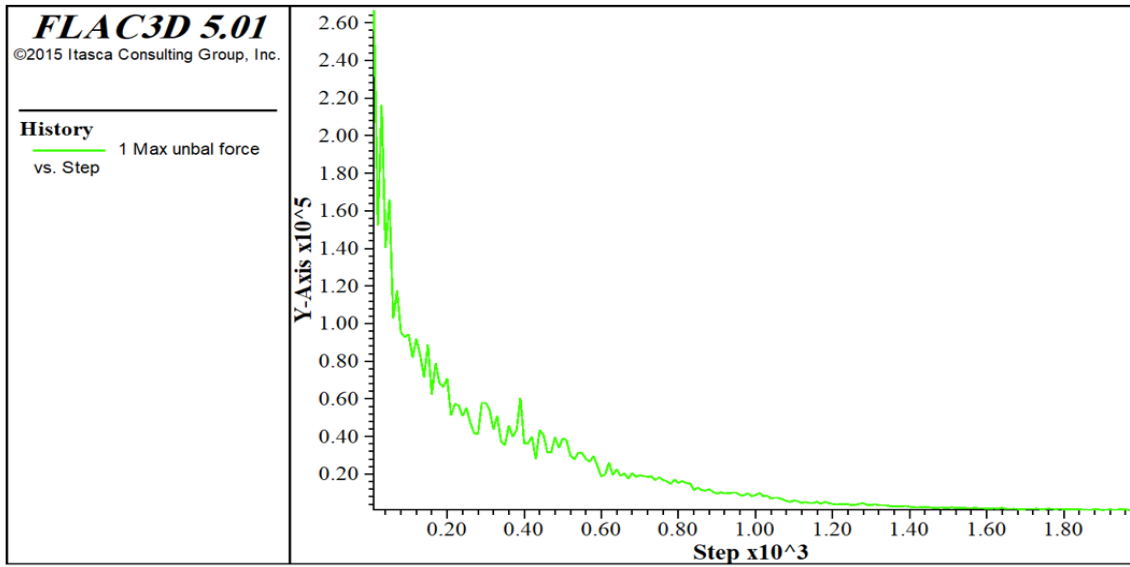
شکل (۵-۵): کانتور تنش های قائم بعد از تعادل اولیه



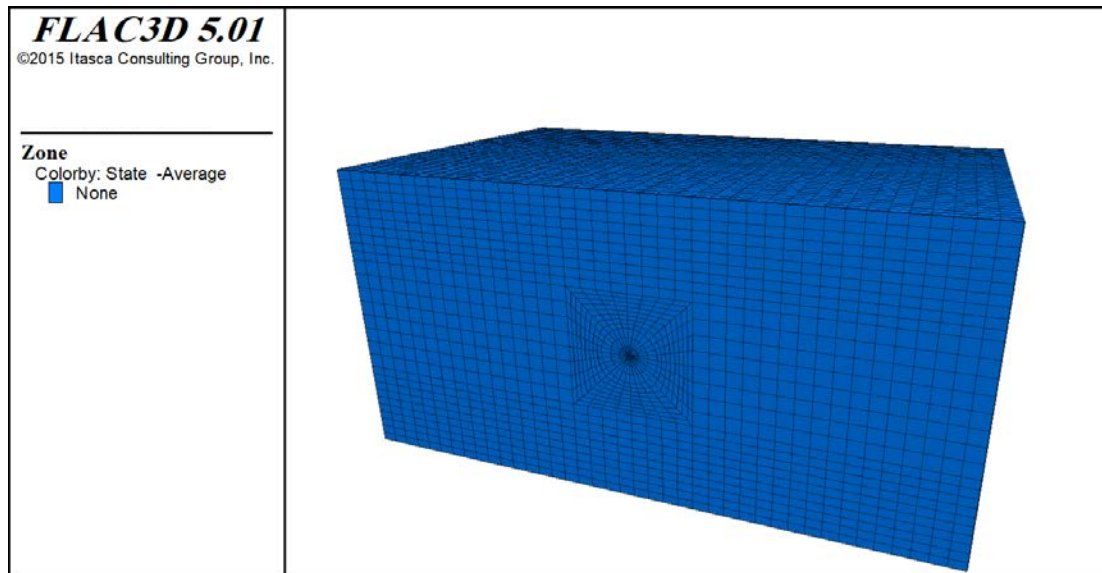
شکل (۵-۶): کانتور جابجایی‌های قائم بعد از تعادل اولیه



شکل (۵-۷): کانتور فشار منفذی بعد از تعادل اولیه



شکل (۸-۵): نمودار حداکثر نیروی نامتعادل بعد از تعادل اولیه



شکل (۹-۵): وضعیت زون‌های پلاستیک بعد از تعادل اولیه

۵-۳-۷- حفاری مدل

در نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی مرحله‌ی حفاری با حذف زون‌ها، در محدوده‌ی تعیین شده انجام می‌شود. در مدل‌سازی این پژوهش حفاری ۶۰ متر تونل طی ۴۰ گام با در نظر گرفتن فشار جبهه‌کار و

اندرکنش سپر ماشین حفار با محیط انجام شده است. در ادامه این بخش مراحل حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری ارائه شده است.

۵-۳-۷-۱- تعیین خصوصیات فصل مشترک^۱ سپر، پوشش نهایی و تزریق

برای برقراری اندرکنش مناسب بین مواد با سختی‌های مختلف استفاده از المان فصل مشترک امری ضروری است. در این مدلسازی 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 نرم‌افزار، به دلیل وجود موادی با سختی‌های متفاوت، سختی نرمال (K_s) و برشی (K_n) هر فصل مشترک ۱۰ برابر سخت‌تر از سختی ظاهری نرم‌ترین زون مجاور آن پیشنهاد شده است. این دو پارامتر از مهمترین پارامترهای تعیین کننده‌ی خواص فصل مشترک محسوب می‌شوند. بنابراین با استفاده از رابطه (۹-۵) سختی ظاهری تمام بخش‌های مدل محاسبه و خواص انواع فصل مشترک استفاده شده در مدلسازی در جدول (۴-۵) ارائه شده است.

$$K_s = K_n = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \quad (9-5)$$

که در این رابطه K مدول بالک زون نرم‌تر، G مدول برشی زون نرم‌تر و Δz_{min} کمترین بعد (متر) زون مجاور در راستای Z فصل مشترک در المان نرم‌تر است (Itasca Consulting Group, Inc., 2013).

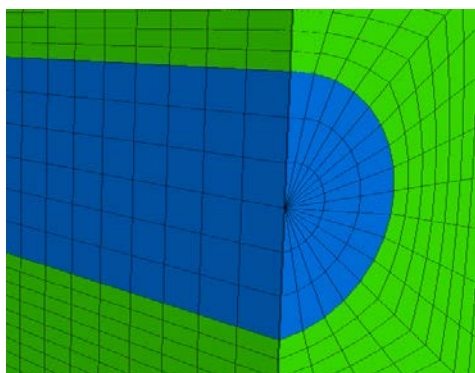
^۱ Interface

جدول (۴-۵) : خواص انواع فصل مشترک

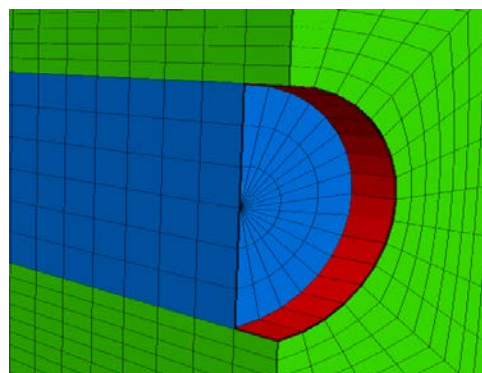
نوع فصل مشترک	سختی نرمال (مگاپاسکال)	سختی برشی (مگاپاسکال)
سپر با محیط	۸۱۵/۵	۸۱۵/۵
تزریق با محیط	۸۱۵/۵	۸۱۵/۵
پوشش نهایی با تزریق	۸۹۱۱/۱۱	۸۹۱۱/۱۱

۵-۳-۷-۲- پیشروی حفاری و نصب سیستم نگهداری

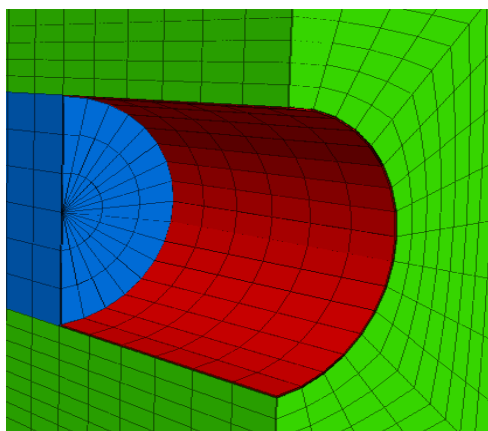
بعد از ایجاد تعادل اولیه نوبت به حفاری مدل می‌رسد. قبل از حفر تونل پارامترهای جابجایی و سرعت باید صفر شوند تا تنها تأثیر حفاری بر مدل بررسی گردد. ابتدا تونل با استفاده از دستور "null" با اعمال فشارسینه کار ۶۰ کیلوپاسکال با گام‌های حفاری ۱/۵ متری، و با اعمال شرایط سپر به اندازه‌ی ۹متر حفاری می‌شود. در هر گام پیشروی مدل با طی تعداد مشخصی گام زمانی، حل می‌شود. قطعات پوشش بتنی تونل، تزریق پشت قطعات بتنی و سپر ماشین حفر با استفاده از المان "cshell" مدل‌سازی شده است. در هر گام حفاری همزمان با مدل‌سازی سپر در قسمت حفر شده، با پیشروی عملیات حفاری، از ۱/۵ متر انتهایی سپر برداشته شده و المان سگمنت و تزریق به مدل اعمال می‌گردد و تا انتهای متراتژ حفاری این روند ادامه می‌یابد. در شکل (۵-۱۰) روند پیشروی سپر و نصب سیستم نگهداری در چهار مرحله نشان داده شده است.



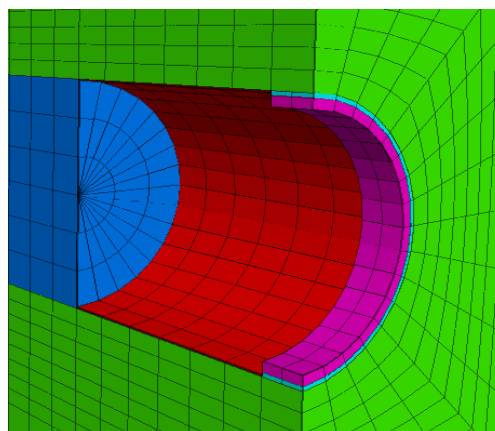
مرحله اول



مرحله دوم



مرحله سوم

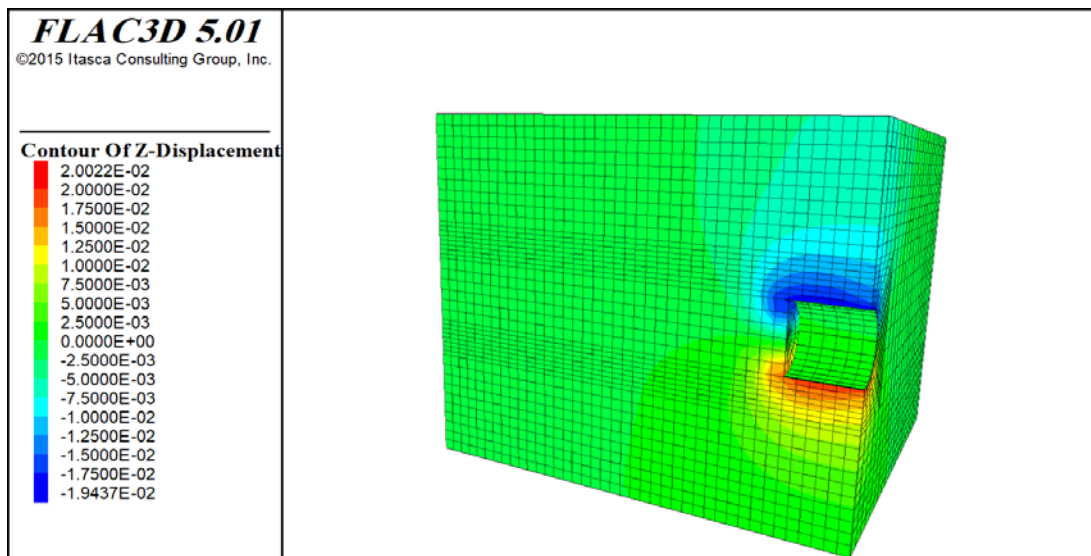


مرحله چهارم

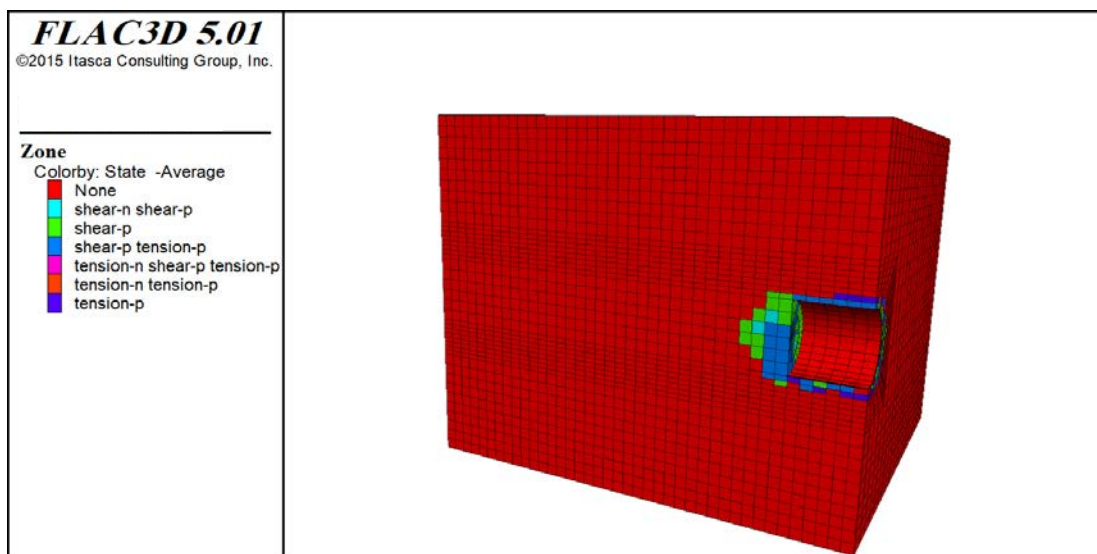
شکل (۵-۱۰): روند پیشروی سپر و نصب سیستم نگهداری

حفاری تونل به اندازه‌ی طول سپر ماشین حفار، سبب ایجاد جابجایی‌هایی در اطراف فضای حفاری می‌شود. با توجه به فاصله‌ی ۲ سانتی‌متری بین زمین و سپر، این جابجایی‌ها نباید بیشتر از این فاصله باشد. در شکل (۵-۱۱) و (۵-۱۲) کانتور جابجایی‌های قائم و زون‌های پلاستیک ایجاد شده بعد از حفاری به اندازه‌ی طول سپر نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده حداکثر جابجایی ایجاد شده در اطراف سپر پس از حفاری به اندازه‌ی طول سپر، مقدار ۲ سانتی‌متر می‌باشد که این جابجایی‌ها معادل فاصله‌ی بین سپر و دیواره تونل است. از این رو، این جابجایی‌ها سبب گسترش ناحیه‌ی پلاستیک به اندازه‌ی $1/4$ متر در اطراف فضای حفاری می‌شود. همچنین شکل (۵-۱۳) تاریخچه جابجایی قائم در متر^۱ در تاج

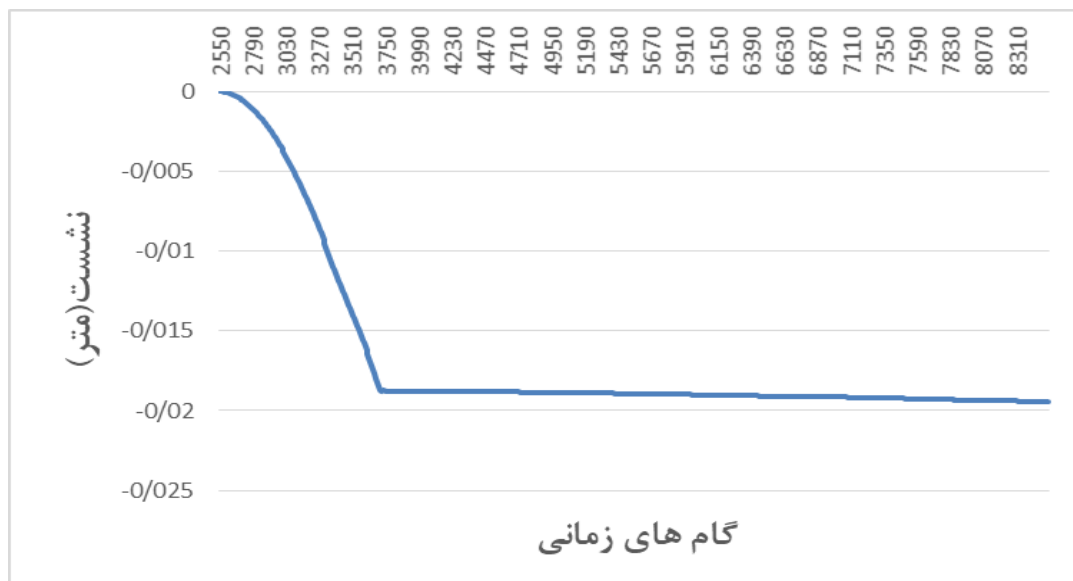
تونل را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار همگرایی جابجایی‌ها در ۲ سانتی‌متر، به علت وجود سپر ماشین حفار بخوبی قابل مشاهده است.



شکل (۵-۱۱): کانتور جابجایی قائم در راستای سپر ماشین حفار

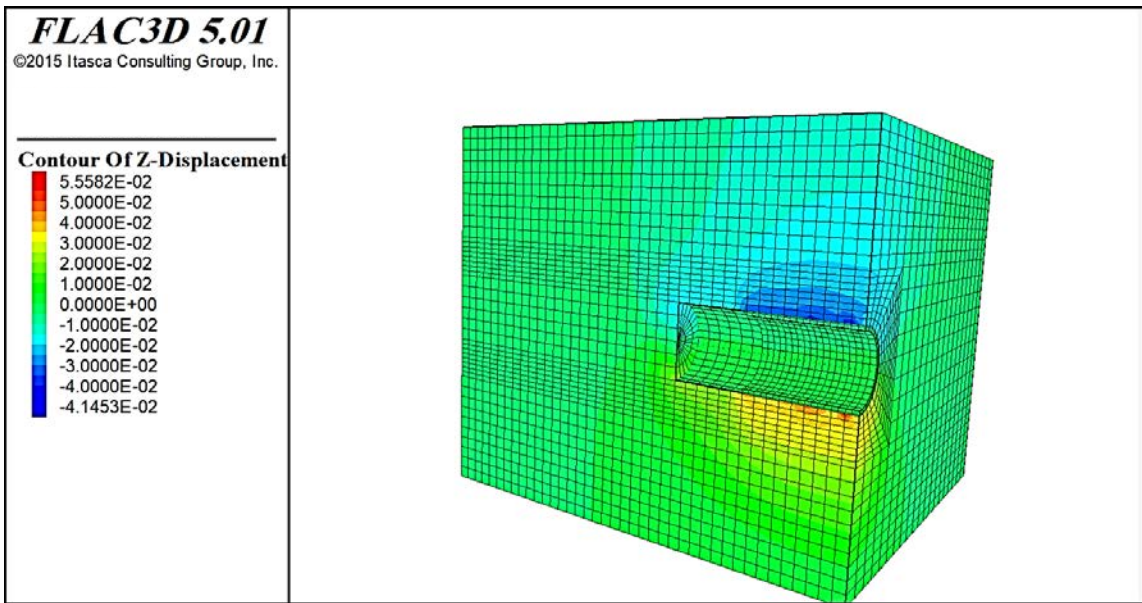


شکل (۵-۱۲): زون‌های پلاستیک در اطراف سپر ماشین حفار

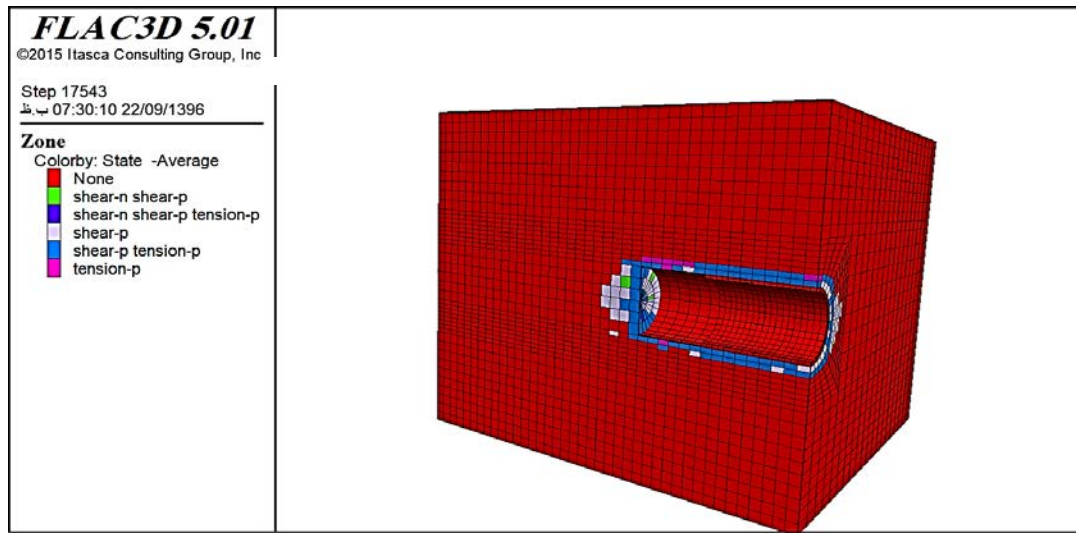


شکل (۵-۱۳): نمودار جابجایی قائم در متر از ۱ متر در تاج تونل

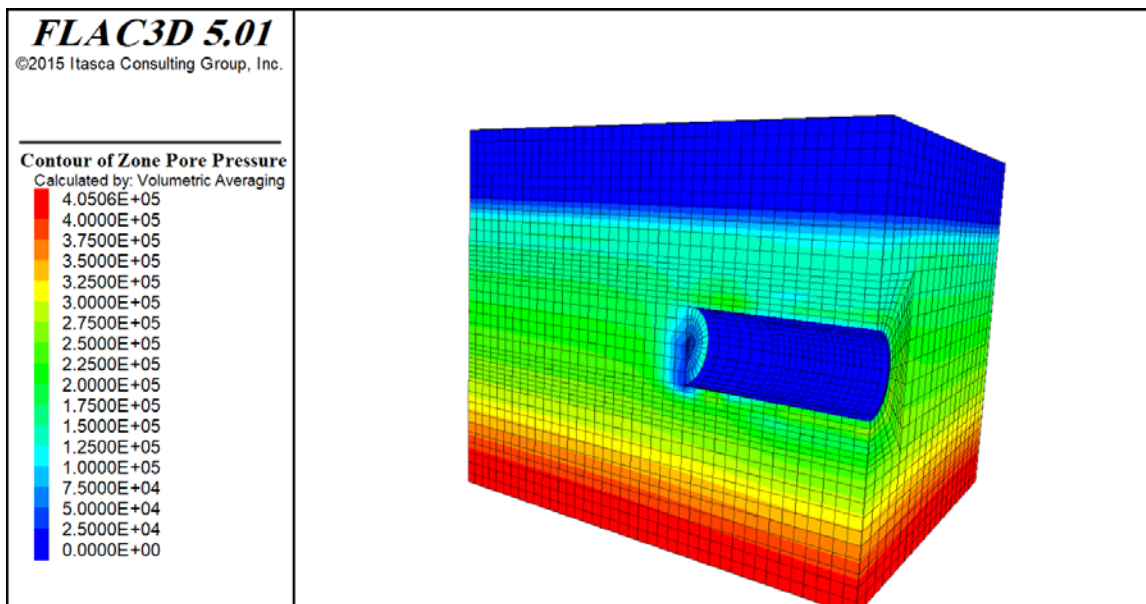
پس از پیشروی تونل به اندازه‌ی طول سپر، نوبت به عملیات تزریق و سگمنت گذاری در محیط می‌رسد. همانطور که قبلاً اشاره شد قطعات سگمنت و تزریق پشت سگمنت با استفاده از المان "cshell" مدلسازی شده است. در شکل‌های (۵-۱۴)، (۵-۱۵) و (۵-۱۶) به ترتیب کانتور جابجایی قائم، گسترش زون پلاستیک، کانتور فشار منفذی در اطراف فضای حفاری و نمودار جابجایی قائم در متر از ۱ متر واقع در تاج تونل پس از ۱۵ گام حفاری نشان داده شده است. بر این اساس، میزان جابجایی‌ها پس از نصب سیستم نگهداری در مقدار ۴ سانتی‌متر همگرا شده است. همچنین تغییرات فشار منفذی نشان می‌دهد که با پیشرفت عملیات حفاری میزان فشار منفذی در اطراف تونل کاهش یافته که همین امر سبب افزایش تنش موثر و جابجایی‌ها در اطراف فضای حفاری می‌شود.



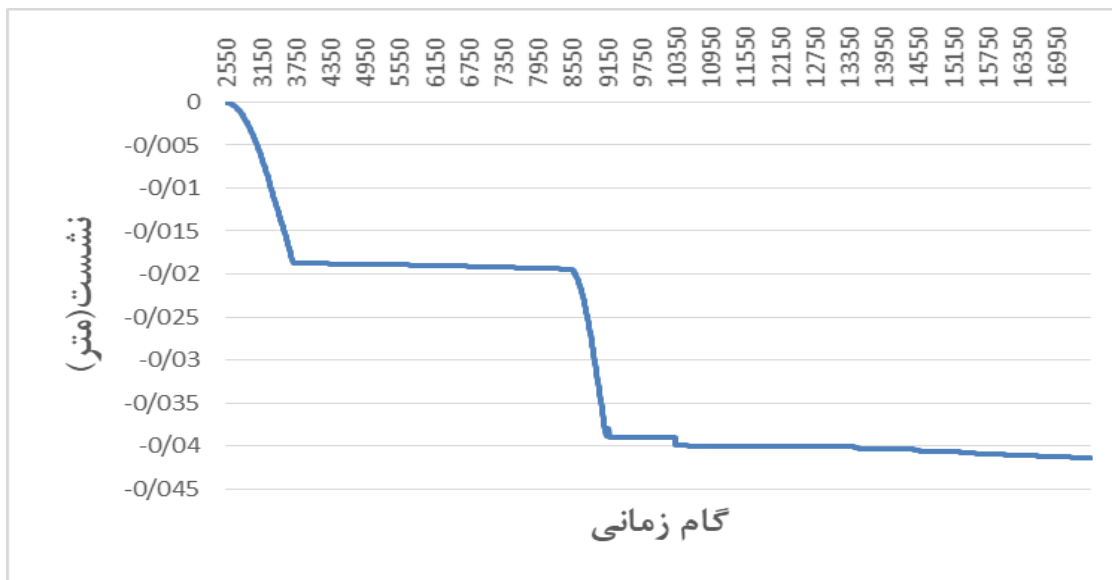
شکل (۵-۱۴): کانتور جابجایی‌های قائم پس از ۱۵ گام حفاری



شکل (۵-۱۵): گسترش زون پلاستیک پس از ۱۵ گام حفاری



شکل (۵-۱۵): کانطور تغییرات فشار منفذی پس از ۱۵ گام حفاری



شکل (۵-۱۶): نمودار جابجایی قائم در متر از ۱ متر واقع در تاج تونل پس از ۱۵ گام حفاری

۵-۴- مقایسه نتایج در حالت توأمان و غیرتوأمان با داده‌های ابزار دقیق

در این بخش از پژوهش به منظور اعتبارسنجی نتایج، مدل ساخته شده در دو حالت توأمان و غیرتوأمان

مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج بدست آمده با داده‌های ابزار دقیق مقایسه می‌شود. حداکثر نشست بدست آمده از ابزار دقیق (پین نشست سنج) واقع در محور تونل در کیلومتر ۲۱+۵۴۰ پس از اتمام عملیات حفاری مقطع مورد مطالعه، به اندازه‌ی ۲۰ mm می‌باشد که در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است.

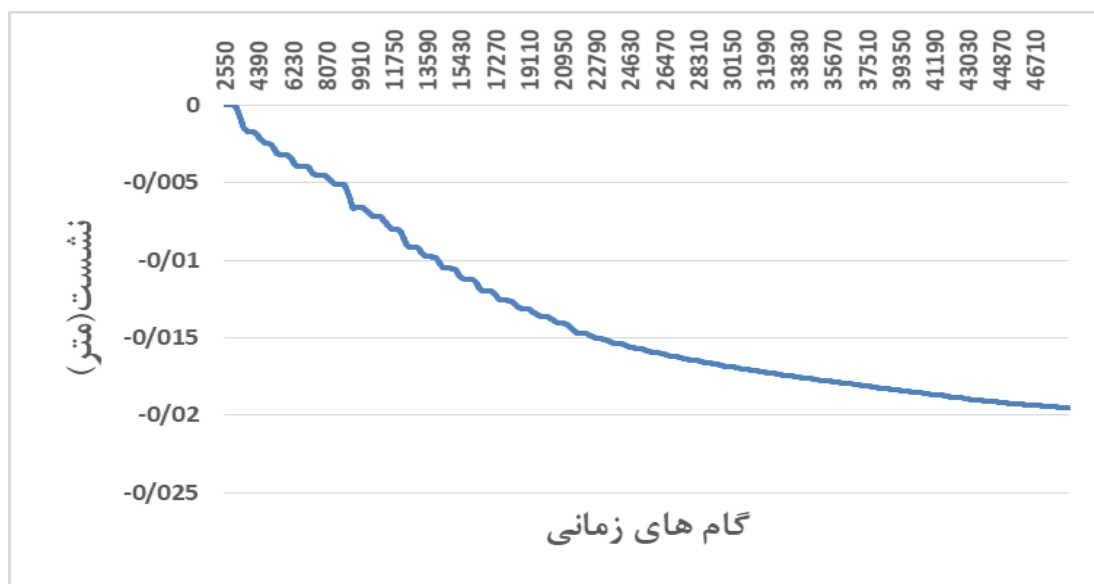


شکل (۵-۱۷): حداکثر نشست اندازه‌گیری شده از ابزار دقیق در کیلومتر ۲۱+۵۴۰ پس از حفاری

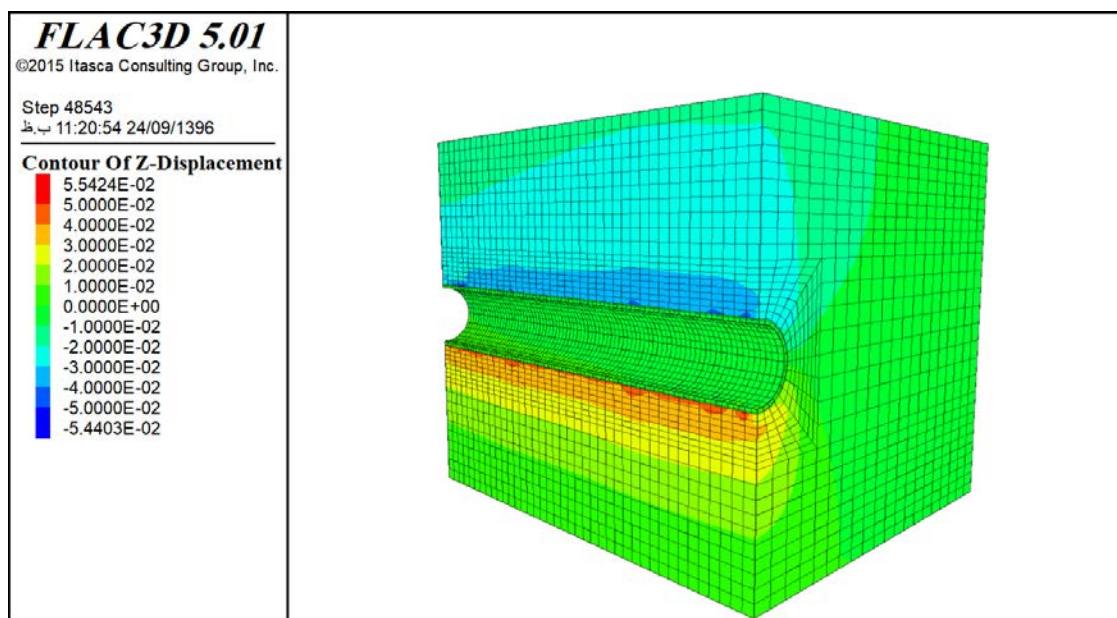
۵-۴-۱- نتایج بدست آمده در حالت توأمان هیدرومکانیک

در این روش بعد از هر گام حفاری، معادلات مکانیکی و هیدرولیکی حاکم به طور همزمان با استفاده از دستور "SET fluid on mech on" حل می‌شوند. این روند تا پایان عملیات حفاری ادامه می‌یابد. شکل (۵-۱۸) نمودار جابجایی قائم در متر ۶/۸ متر واقع در سطح مدل که مطابق با محل نصب ابزار دقیق مورد مطالعاتی است را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده، مطابقت بالای روش توأمان بخوبی قابل مشاهده است. همچنین کانتورهای جابجایی قائم و فشار منفذی پس از عملیات حفاری به ترتیب در شکل-های (۵-۱۹) و (۵-۲۰) ارائه شده است. با توجه به نتایج، حداکثر جابجایی ایجاد شده در اطراف فضای حفاری معادل ۵/۴۴ سانتی‌متر می‌باشد. تغییرات فشار منفذی در اطراف تونل به گونه‌ای است که عملیات

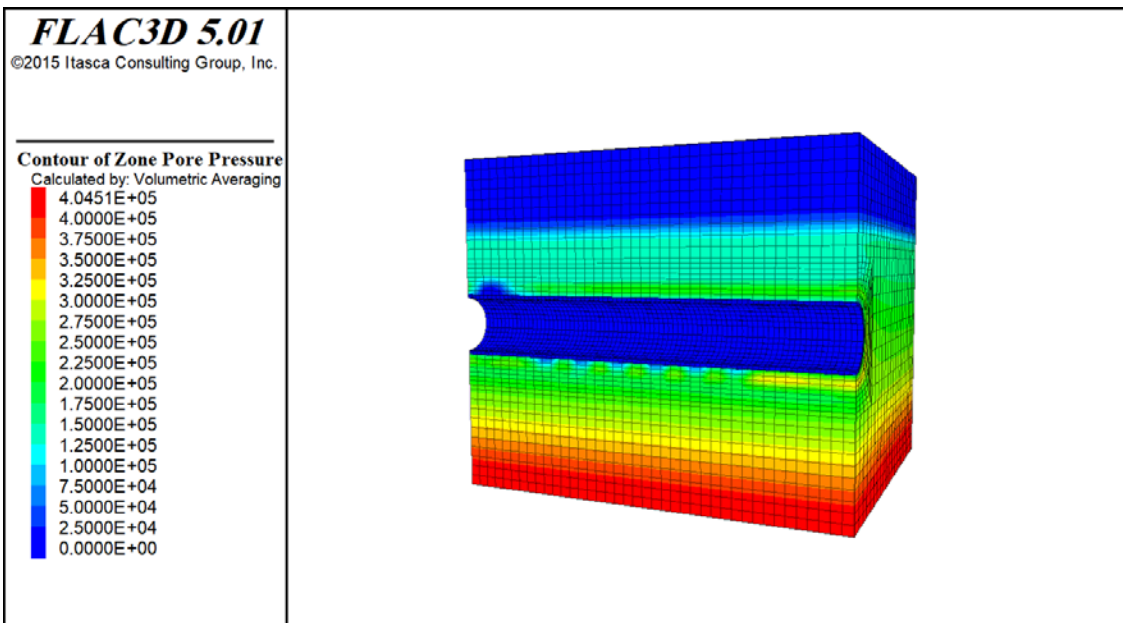
حفاری سبب کاهش فشار منفذی و افزایش تنش موثر در اطراف تونل و در نتیجه افزایش جابجایی‌ها می‌شود.



شکل (۵-۱۸): جابجایی قائم در متر از ۶/۸ متر در حالت توأمان



شکل (۵-۱۹): کانتور جابجایی قائم پس از حفاری در حالت توأمان

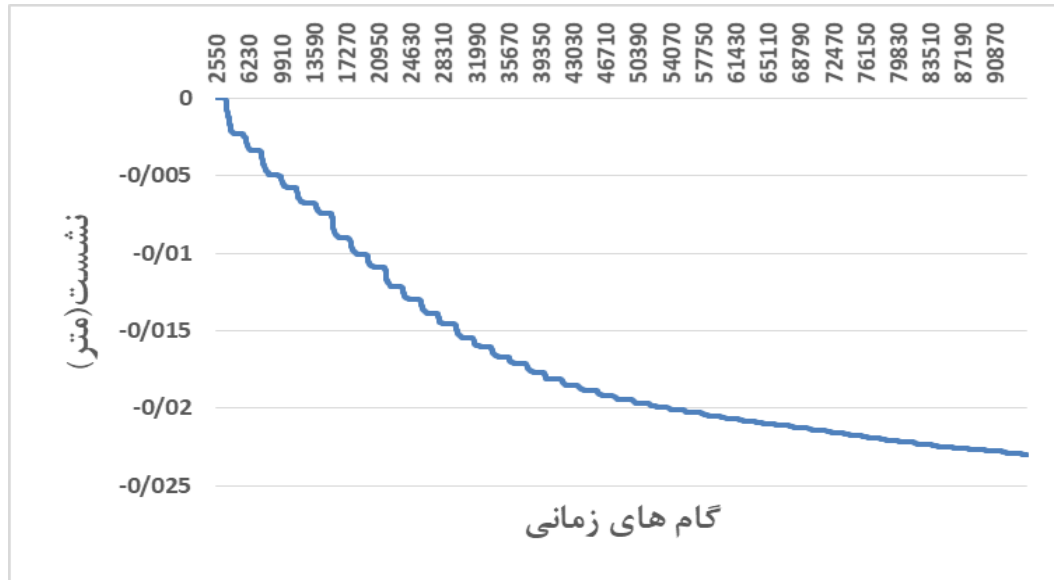


شکل (۵-۲۰): کانتور فشار منفذی پس از حفاری در حالت توأمان

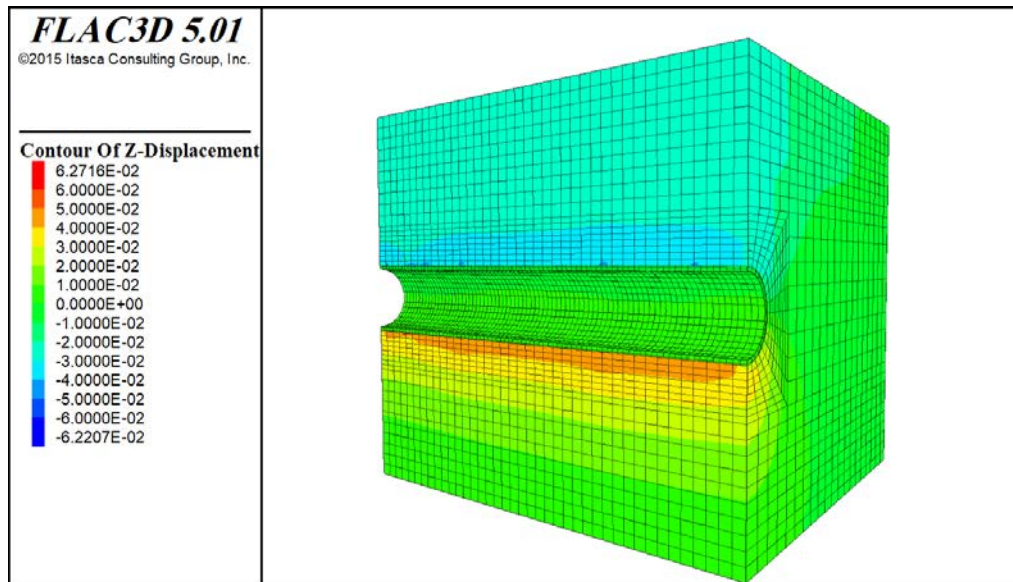
۵-۴-۲- نتایج بدست آمده در حالت غیر توأمان هیدرومکانیک

در این روش بعد از هر گام حفاری، معادلات هیدرولیکی و مکانیکی حاکم بر محیط به صورت غیر توأمان حل می‌شوند. روند حل به گونه‌ای 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 می‌شوند و این روند تا پایان عملیات حفاری ادامه می‌یابد. نمودار جابجایی قائم در متر از ۶/۸ متر واقع در سطح زمین، کانتورهای جابجایی و فشار منفذی پس از عملیات حفاری به ترتیب در شکل‌های (۵-۲۱)، (۵-۲۲) و (۵-۲۳) ارائه شده است. از آنجا که تنش‌های اعمالی به یک المان خاک توسط سیال و ذرات خاک کنترل می‌شوند در حالت غیر توأمان در هر گام زمانی نقش یکی از مولفه‌ها نادیده گرفته می‌شود که همین امر سبب افزایش جابجایی‌ها در حالت غیر توأمان می‌شود. همچنین میزان کاهش فشار منفذی در اطراف تونل در حالت غیر توأمان به مراتب بیشتر از حالت توأمان است که خود سبب ایجاد جابجایی‌های

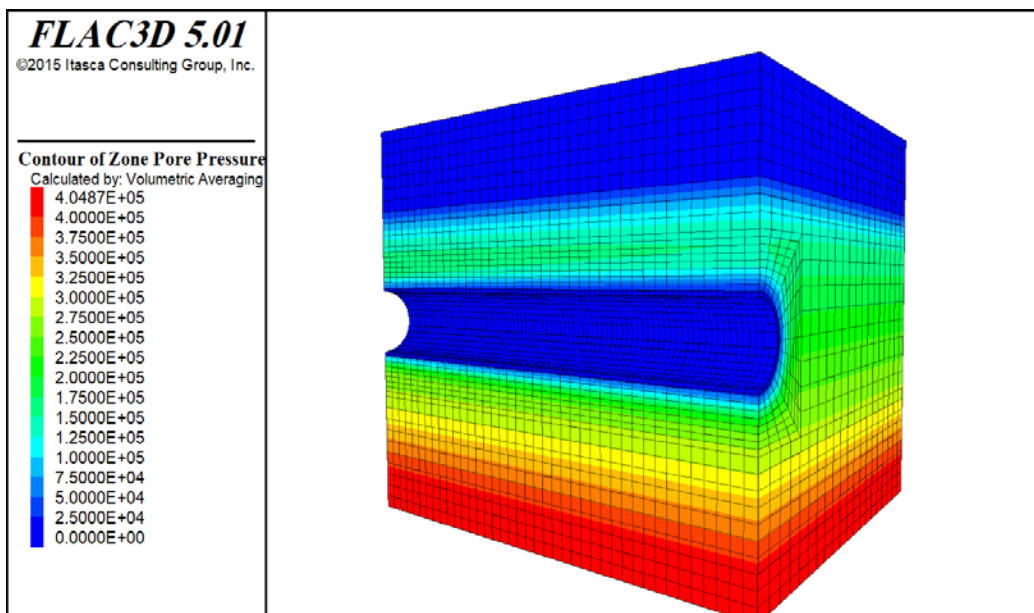
بیشتری در اطراف فضای حفاری می‌شود.



شکل (۵-۲۱): جابجایی قائم در متر از ۶/۸ متر در حالت غیرتوانمان



شکل (۵-۲۲): کانتور جابجایی قائم پس از حفاری در حالت غیرتوانمان



شکل (۵-۲۳): کانتور فشار منفذی پس از حفاری در حالت غیرتوآمان

۵-۵- جمع‌بندی

در این فصل پس از بیان مقدمه‌ای بر روش‌های عددی به معرفی نرم‌افزار مورد استفاده در این مطالعه و روش عددی مربوط به آن (تفاضل محدود) پرداخته شد. سپس مراحل مختلف مدل‌سازی شامل هندسه-سازی، تعیین مدل رفتاری برای لایه‌های خاک، مدل‌سازی جریان سیال و اعمال شرایط مرزی و اولیه مورد بررسی قرار گرفت. بعد از حفاری و نصب سیستم نگهداری نتایج بدست آمده در حالت توآمان و غیرتوآمان با داده‌های ابزار دقیق مقایسه شد. مقایسه نتایج حاصل از ابزار دقیق با حالت توآمان و غیرتوآمان نشان می‌دهد که، نشست و جابجایی‌های ایجاد شده در حالت توآمان مطابقت بالاتری با داده‌های ابزار دقیق دارد. از آنجا که تنش‌های اعمالی به یک المان خاک بوسیله‌ی سیال و ذرات خاک کنترل می‌شوند در حالت غیرتوآمان در هر گام زمانی یکی از مولفه‌ها نادیده گرفته می‌شود که همین امر سبب افزایش جابجایی‌ها در حالت غیرتوآمان می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، روش توآمان برای حل مسائل هیدرومکانیک نشست در محیط‌های اشباع مناسب‌تر است.

فصل هشتم

مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت

۶-۱- مقدمه

نشست ناشی از تونلسازی همواره تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله جنس زمین، تانسور تنش منطقه، عمق حفاری، سطح آب زیرزمینی منطقه، روش حفاری و ... قرار دارد. که هر یک نقش عمده‌ای را در بروز نشست، در زمان حفاری و بهره‌برداری از تونل ایفا می‌کنند. شناخت و کنترل اثر مخرب هر یک این عوامل می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌های وارده به ویژه در مناطق شهری داشته باشد. به این منظور، در این فصل از پژوهش با استفاده از روش توآمان هیدرومکانیک رفتار محیط دربرگیرنده‌ی تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده، تغییرات نسبت تنش‌های برجا، سطح آب زیرزمینی، همچنین پاسخ بلند مدت محیط دربرگیرنده بعنوان عوامل موثر بر بروز نشست در تونل‌سازی مناطق شهری بررسی می‌شود.

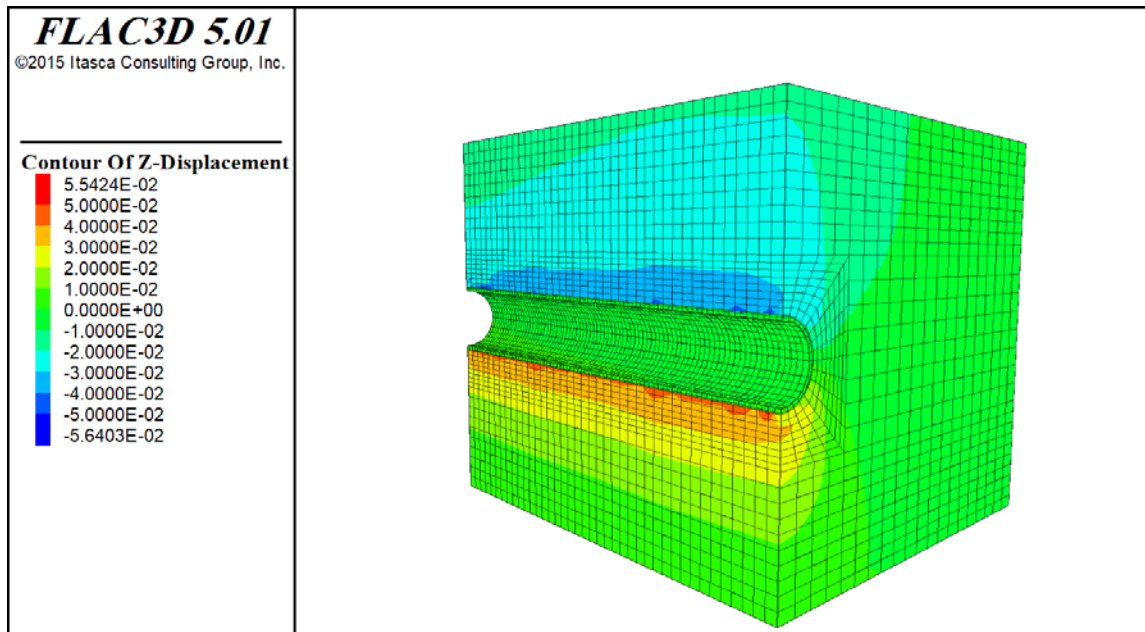
۶-۲- تحلیل عوامل موثر بر بروز نشست در تونل‌سازی

با توجه به اینکه اغلب تونل‌های شهری در مناطق اشباع حفاری می‌شوند ورود جریان آب به فضای حفر شده نقش مهمی در نشست و تغییر شکل‌های محیط اطراف تونل ایفا می‌کند. گزارشات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه از مترو خط هفت تهران نشان می‌دهد که، هجوم آب‌های زیرزمینی در مترژهای مختلف تونل، متفاوت است به گونه‌ای که با برخورد به عدسی آب‌های زیرزمینی و تغییر شاخص استحکام محیط، زهکشی آب صورت می‌گیرد. از این رو، در ادامه دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده‌ی تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

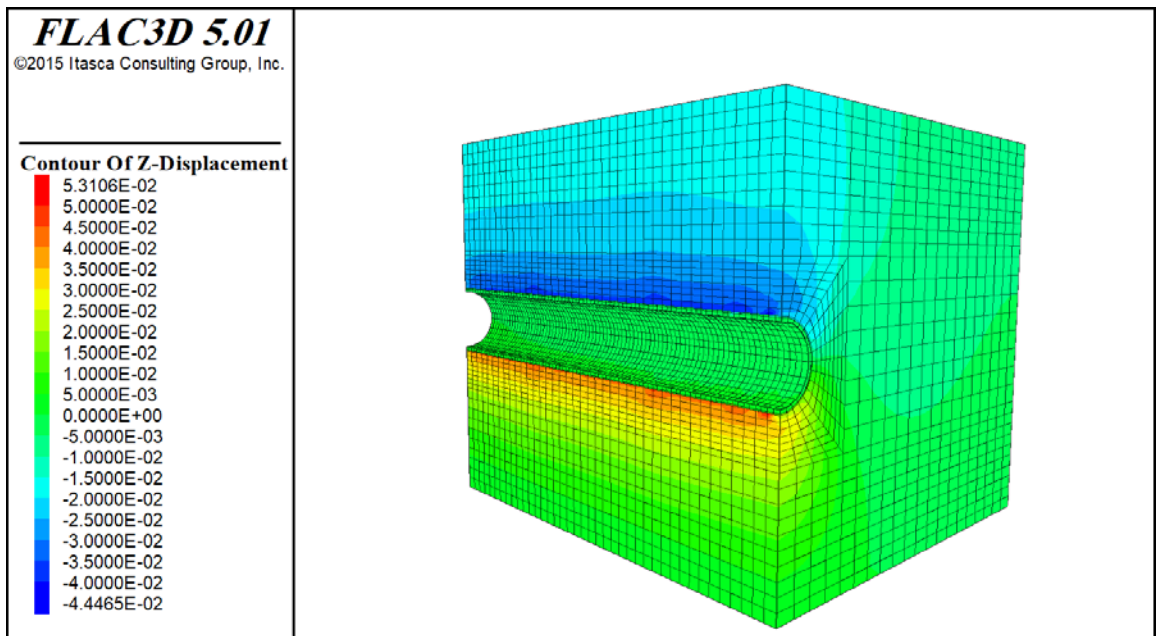
۶-۲-۱- تحلیل تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

در این بخش از پژوهش رفتار محیط دربرگیرنده‌ی تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده مورد بررسی قرار می‌گیرد. 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 بصورت

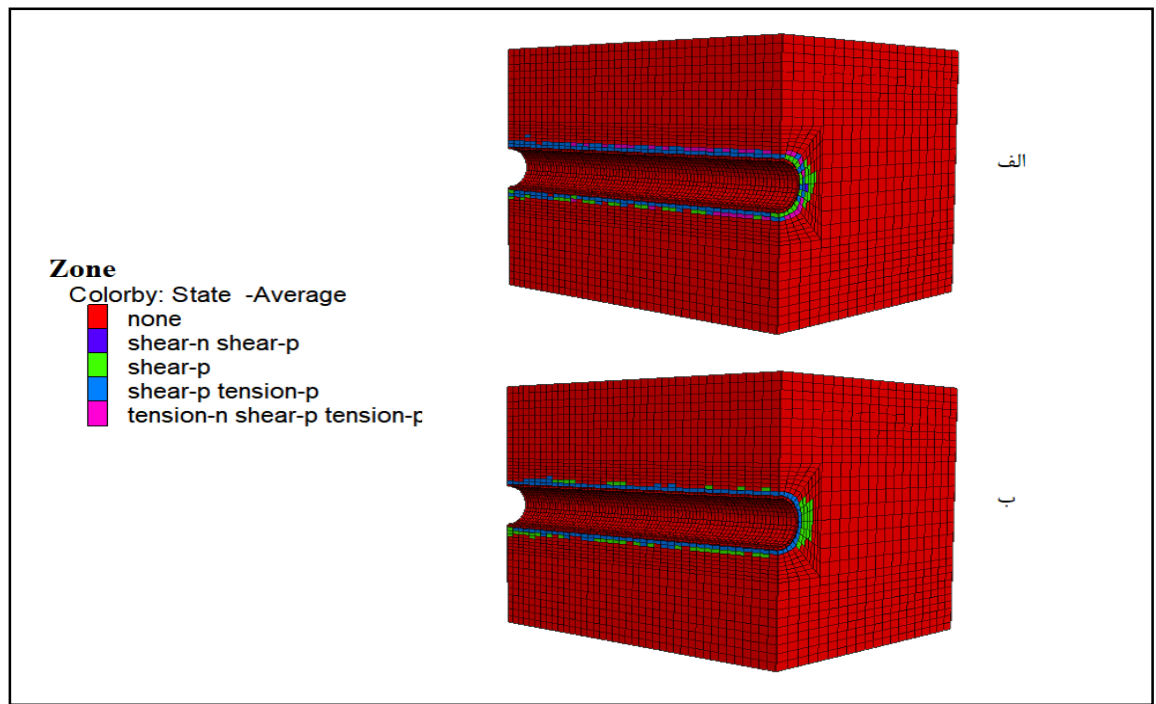
آزاد "Free pp" در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های (۱-۶)، (۲-۶)، (۳-۶) جابجایی‌ها و زون‌های پلاستیک ایجاد شده در اطراف فضای حفاری در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده، جابجایی‌ها و زون‌های پلاستیک ایجاد شده در حالت زهکشی شده به مراتب بیشتر از حالت زهکشی نشده است. این امر ناشی از، کاهش فشار منفذی در اطراف فضای حفاری در حالت زهکشی شده است. به عبارت دیگر ورود آب به داخل فضای حفاری سبب ایجاد فضای خالی بین ذرات خاک و فشرده شدن آن‌ها با گذشت زمان می‌شود. گسترش زون پلاستیک در اطراف تونل در حالت زهکشی شده به شعاع ۱/۳۵ متر است در حالی که این محدوده در حالت زهکشی نشده به شعاع ۰/۶۸ متر است. به همین دلیل نشست ایجاد شده در حالت زهکشی شده بیشتر است که به خوبی در شکل (۴-۶) قابل مشاهده می‌باشد.



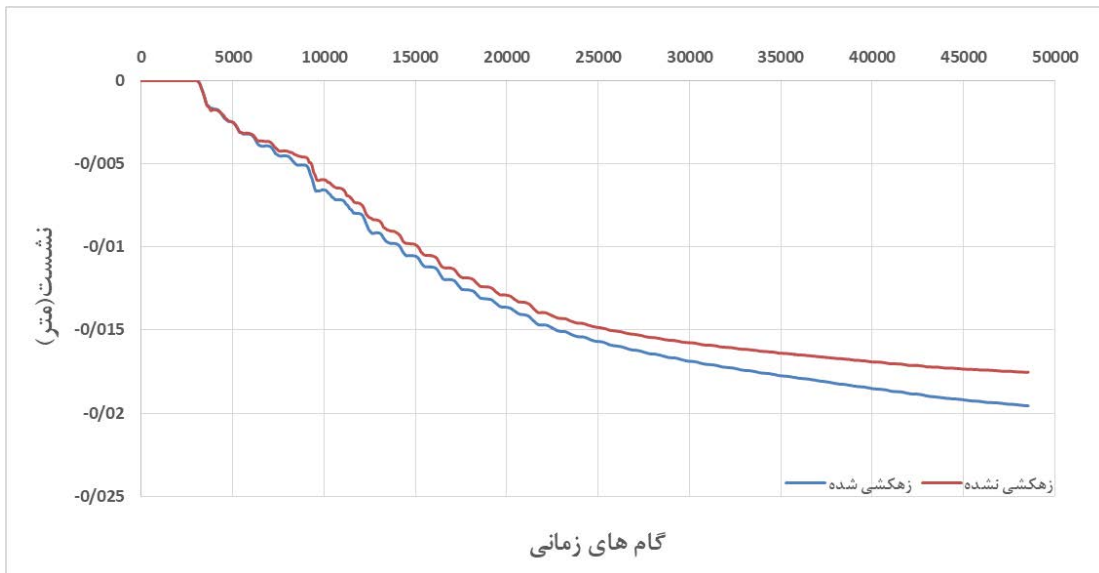
شکل (۱-۶): کانتور جابجایی قائم پس از عملیات حفاری در حالت زهکشی شده



شکل (۲-۶): کانتور جابجایی قائم پس از عملیات حفاری در حالت زهکشی نشده

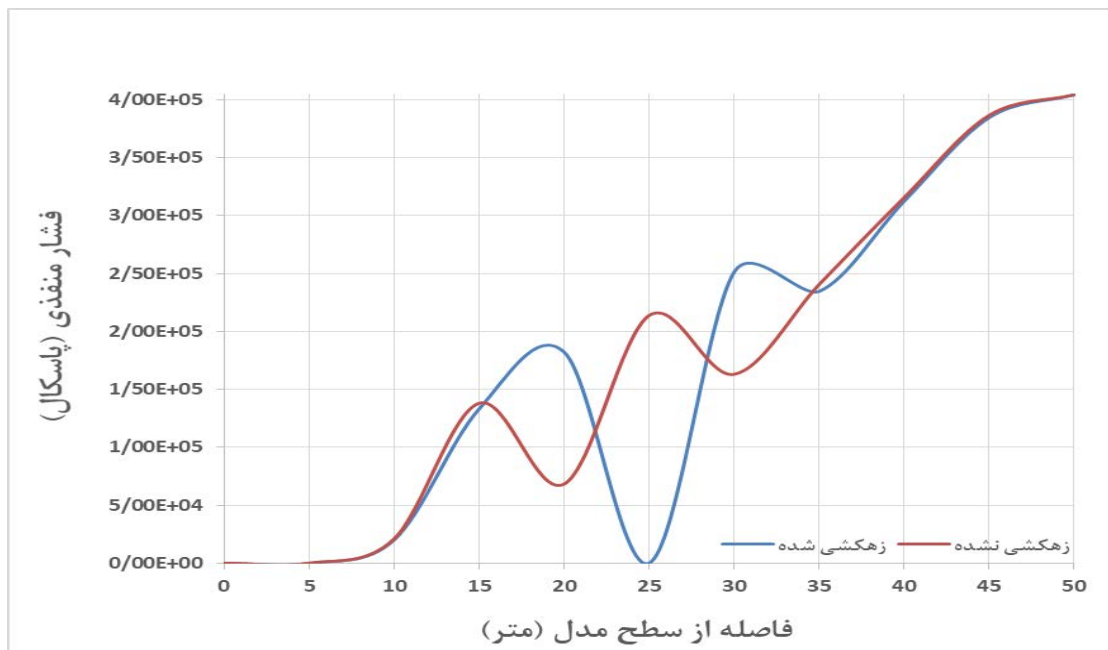


شکل (۳-۶): زون‌های پلاستیک ایجاد شده پس از عملیات حفاری در حالت الف- زهکشی شده ب) زهکشی نشده



شکل (۴-۶): نشست زمین پس از عملیات حفاری در متر از ۶/۸ متر

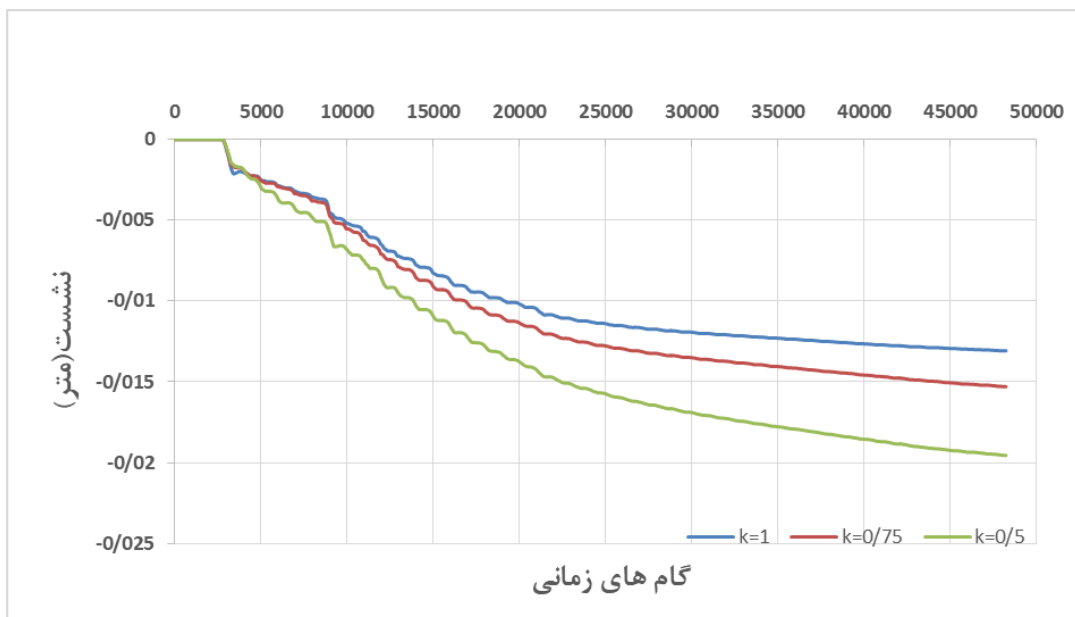
همچنین در شکل (۵-۶) تغییرات فشار منفذی از سطح تا کف مدل را برای دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده ارائه شده است. با توجه به این شکل، فشار منفذی در اطراف فضای حفاری برای حالت زهکشی شده به صفر رسیده است. این در حالی است که، تغییرات فشار منفذی در حالت زهکشی نشده تمایل به حفظ روند هیدرواستاتیکی خود را دارد. به همین دلیل، جابجایی‌های ایجاد شده در حالت زهکشی شده به مراتب بیشتر از حالت زهکشی نشده است.



شکل (۶-۵): تغییرات فشار منفذی از سطح تا کف مدل

۶-۲-۲- تحلیل تغییرات تنش‌های برجا

یکی دیگر از پارامترهای موثر بر جابجایی‌های اطراف فضای حفاری نسبت تنش‌های برجای منطقه است. با توجه به این که ضریب تنش‌های برجا برای محدوده مورد مطالعه $K=0.5$ می‌باشد 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 بدست آمده در شکل (۶-۶)، با نزدیک شدن میدان تنش به $K=1$ نشست و جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری کاهش پیدا می‌کند.

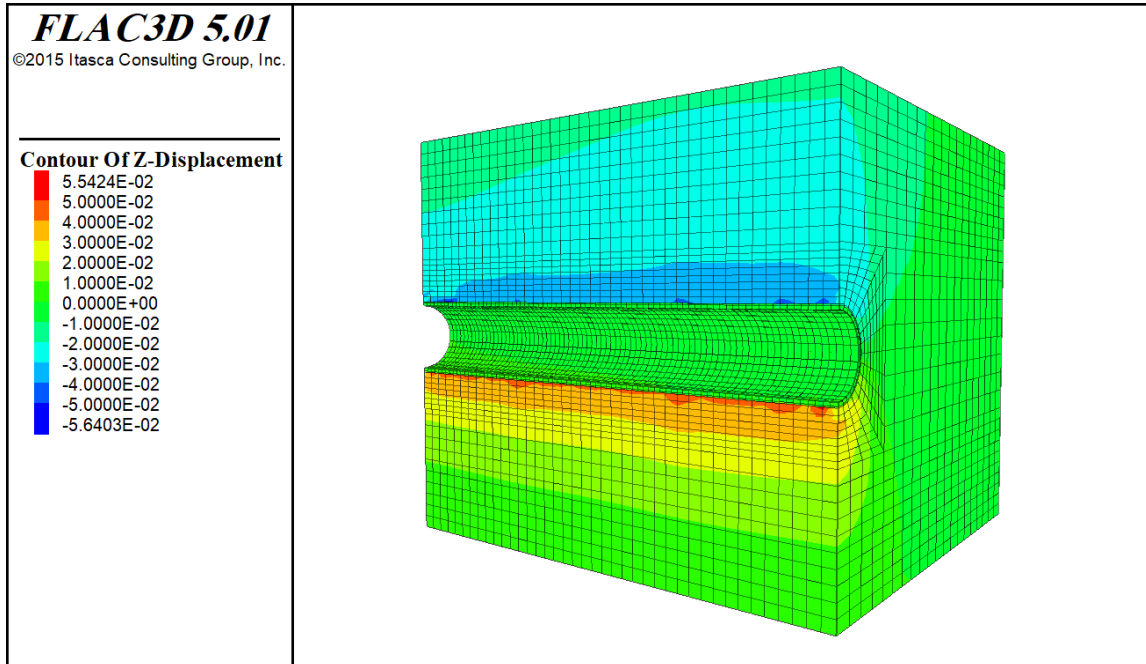


شکل (۶-۶): نشست زمین در متر از ۶/۸ متر به ازای ضرایب تنش مختلف

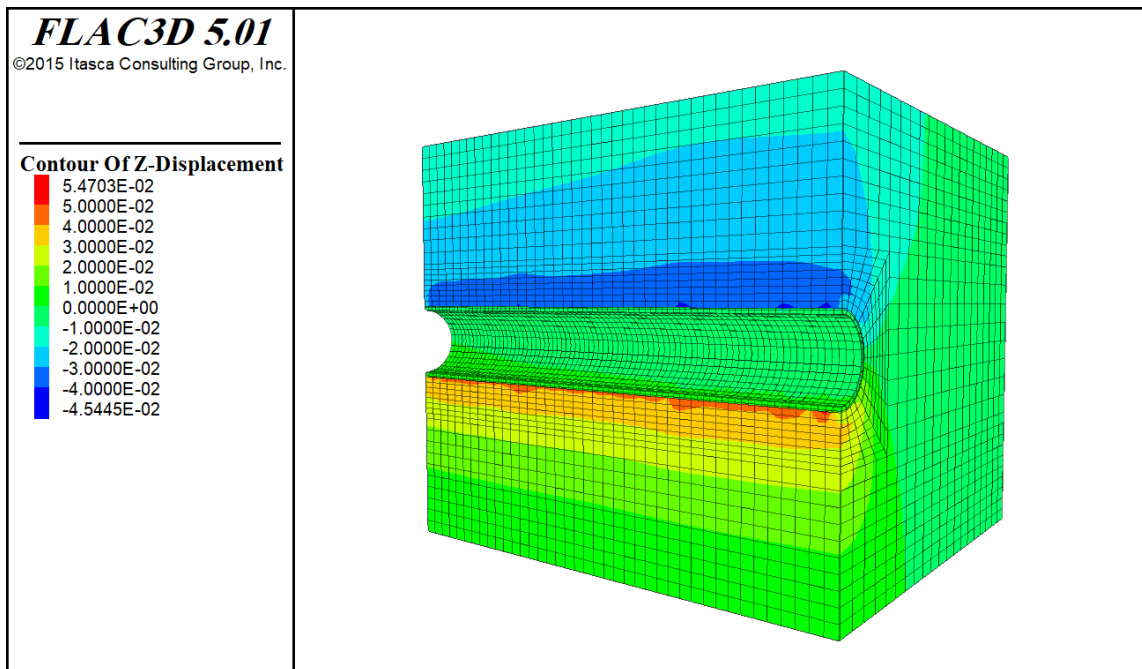
۶-۲-۳- بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی یکی از مهمترین پارامترهای موثر بر تغییرشکل‌های محیط اطراف تونل می‌باشد. با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه، ۹/۵ متر زیر سطح زمین قرار دارد به منظور درک بهتر، اثر آب‌های زیرزمینی دو تراز ۱۷ و ۲۵ متری از سطح زمین نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش سطح آب زیرزمینی جابجایی‌ها و گسترش زون پلاستیک در اطراف فضای حفاری نیز افزایش پیدا می‌کند. این نتایج در شکل‌های (۶-۷) تا (۶-۱۰) ارائه شده است. از این رو با افزایش جابجایی‌ها و زون‌های پلاستیک در اطراف فضای حفاری، مقدار نشست ایجاد شده در سطح زمین نیز افزایش می‌یابد که نتیجه آن در شکل (۶-۱۱) ارائه شده است. علت این امر این است که، افزایش آب زیرزمینی سبب افزایش فشار منفذی در مدل اولیه می‌شود. با انجام عملیات حفاری، مقدار کاهش فشار منفذی در مدلی با سطح آب زیرزمینی بالاتر، بیشتر خواهد بود که در نتیجه، جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری نیز افزایش می‌یابد. بنابراین سطح آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی در میزان نشست

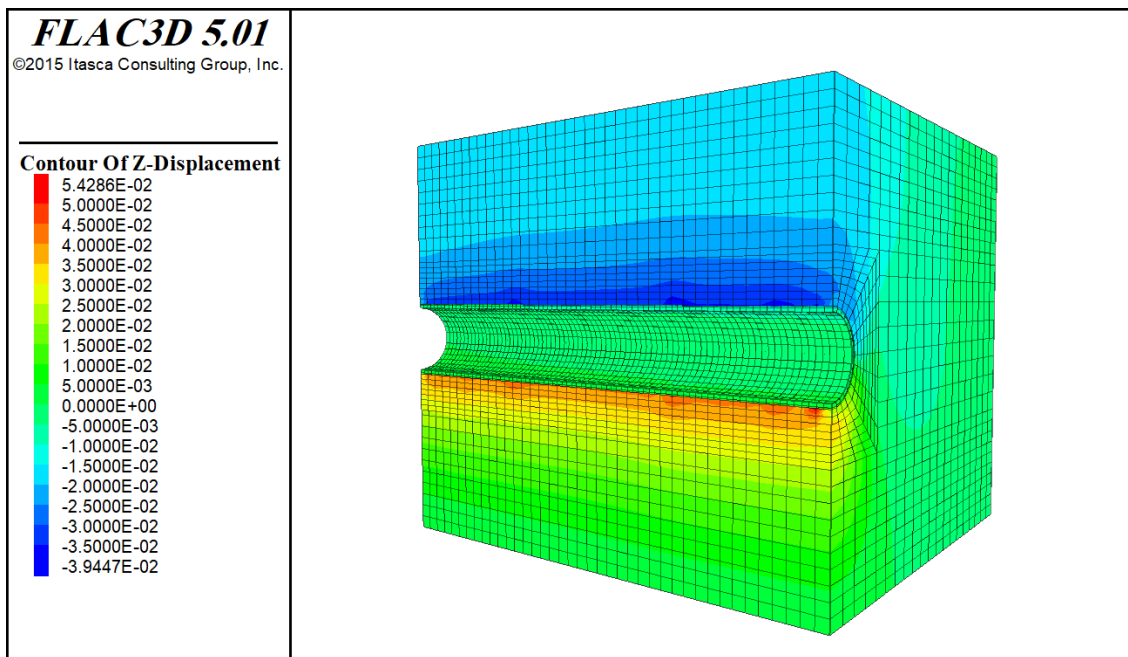
و جابجایی‌های اطراف تونل ایفا می‌کند که اثر آن غیرقابل چشم‌پوشی است.



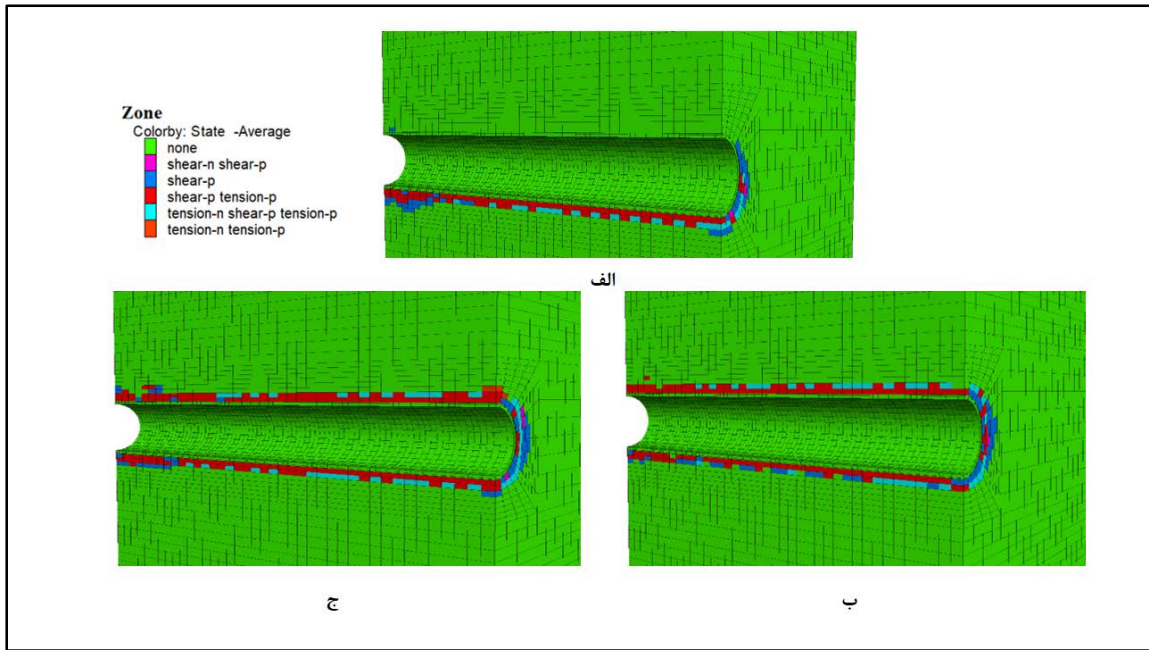
شکل (۶-۷): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی ۹/۵ متر از سطح مدل



شکل (۶-۸): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی ۱۷ متر از سطح مدل



شکل (۶-۹): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی ۲۵ متر از سطح مدل



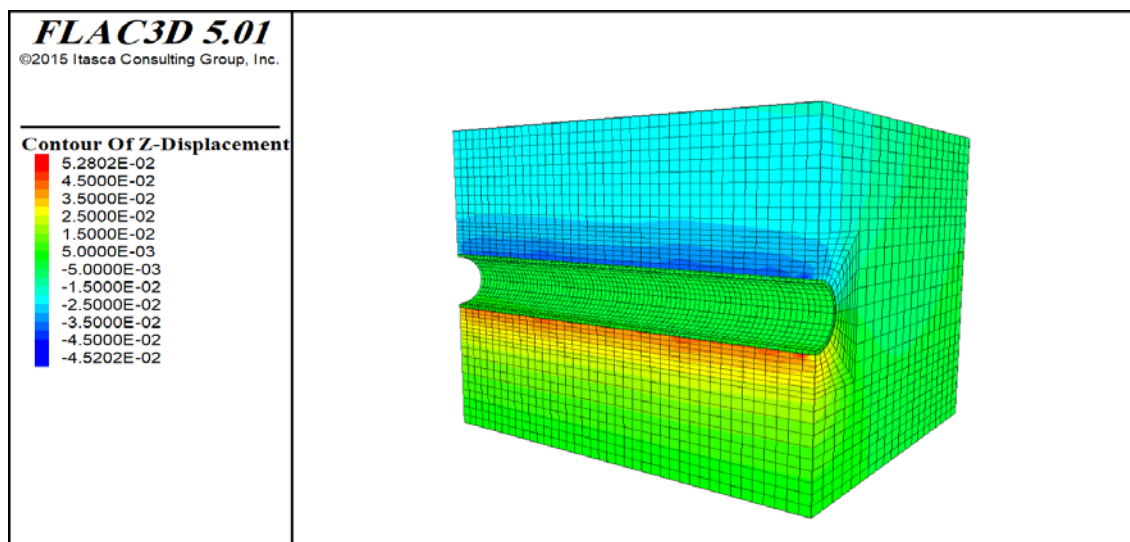
شکل (۶-۱۰): گسترش زون‌های پلاستیک در اطراف فضای حفاری به ازای سطح آب زیرزمینی الف: ۲۵ متر ب: ۳۳ متر ج: ۴۰/۵ متر



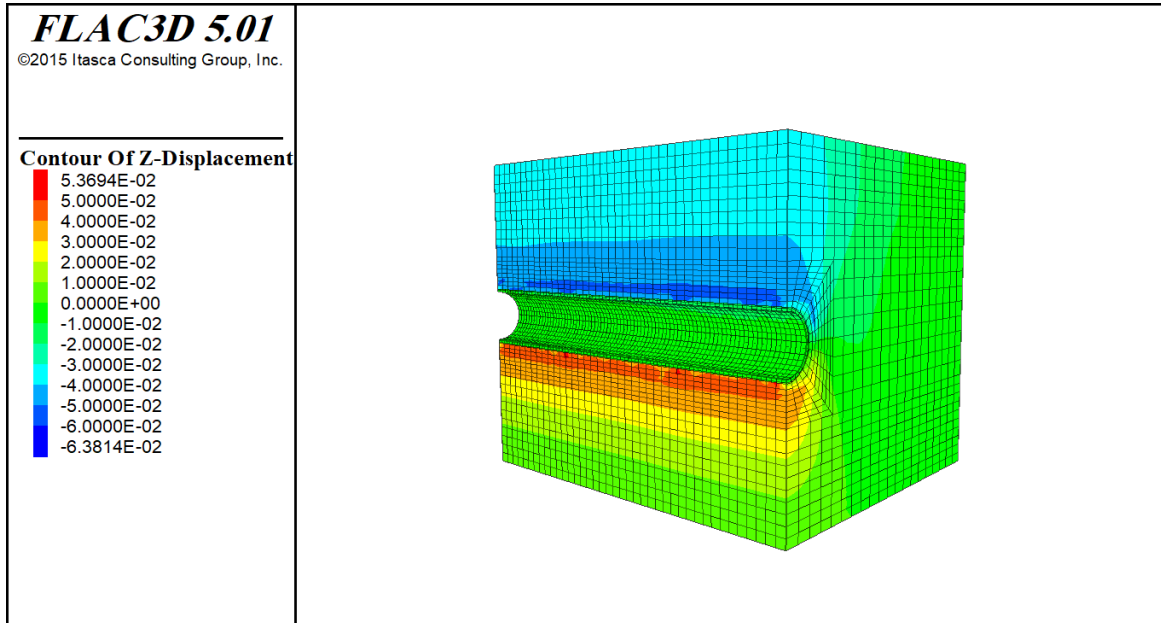
شکل (۶-۱۱): نشست ایجاد شده در سطح زمین در متر از ۶/۸ متر

۶-۲-۴- بررسی رفتار ۳۰ روزه تونل در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

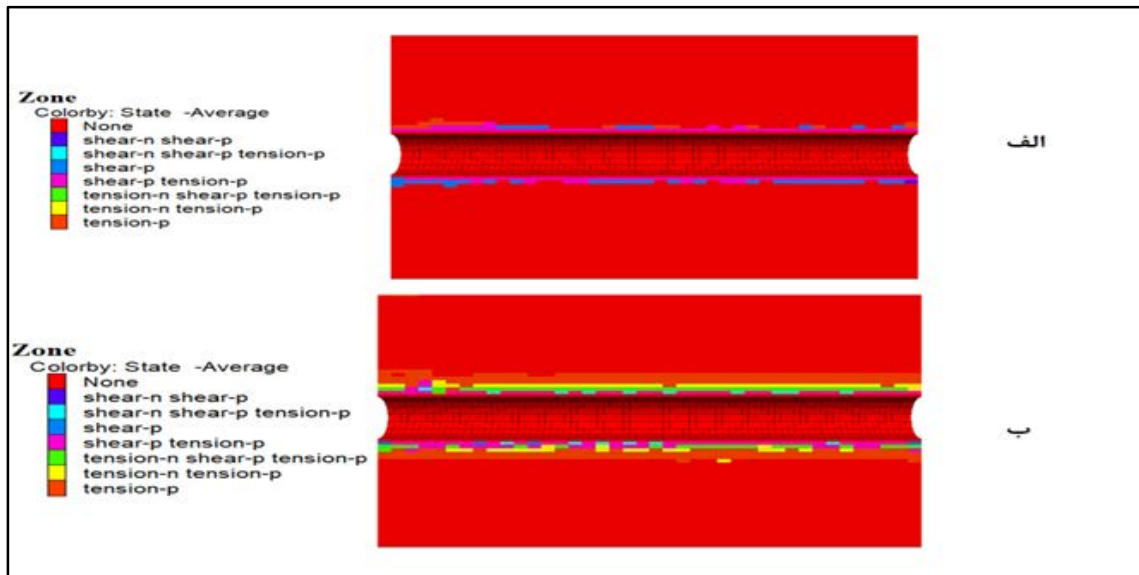
با توجه به اینکه تغییرات فشار منفذی در محیط‌های اشباع بصورت آنی صورت نمی‌گیرد. بررسی رفتار بلند مدت محیط‌های اشباع، یکی از مهمترین مواردی است که همواره باید، مورد توجه قرار گیرد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری در بلند مدت، بسیار بیشتر از جابجایی‌های ایجاد شده در زمان حفاری است. به همین دلیل در این قسمت از پژوهش، رفتار یک ماهه محیط دربرگیرنده‌ی تونل در دو حالت زهکشی نشده و زهکشی شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل-های (۶-۱۲) تا (۶-۱۵) جابجایی‌های قائم، گسترش زون پلاستیک و نشست ایجاد شده در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار بلند مدت تونل در حالت زهکشی نشده تفاوت چشم‌گیری با رفتار کوتاه مدت آن ندارد. این درحالیست که جابجایی‌های بلند مدت بدست آمده در حالت زهکشی شده به مراتب بیشتر از جابجایی‌های کوتاه مدت می‌باشد. همچنین می‌توان دریافت که گسترش زون پلاستیک در بلند مدت اطراف تونل در حالت زهکشی شده به شعاع ۴ متر می‌رسد در حالی که این محدوده در حالت زهکشی نشده به شعاع ۰/۷ متر است.



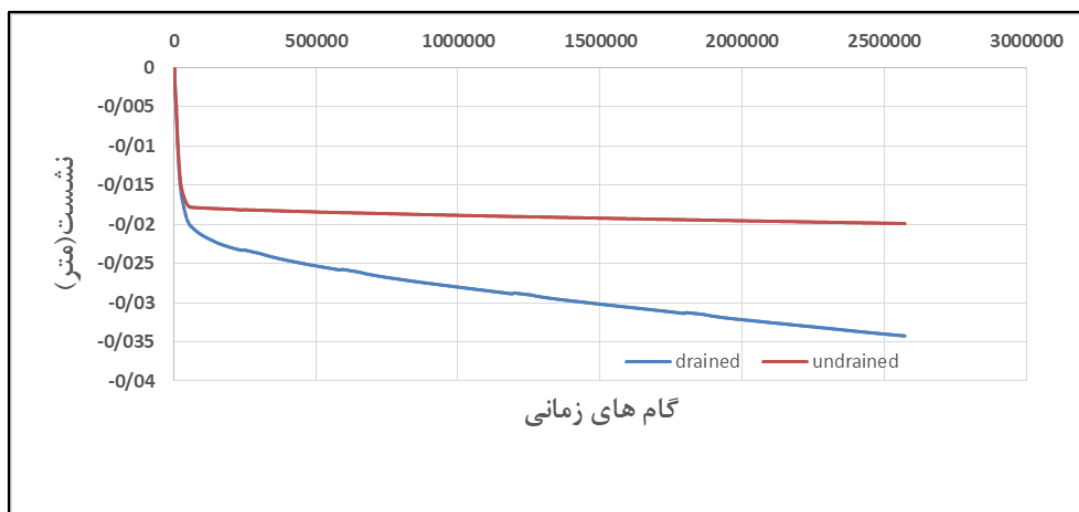
شکل(۶-۱۲): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه در حالت زهکشی نشده



شکل(۶-۱۳): کانتور جابجایی‌های قائم در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه در حالت زهکشی شده



شکل(۶-۱۴): گسترش زون‌های پلاستیک در اطراف فضای حفاری پس از یک ماه الف: زهکشی نشده ب: زهکشی شده



شکل (۶-۱۵): نشست ایجاد شده پس از یک ماه در حالت زهکشی شده و زهکشی نشده در متر از ۶/۸ متر

۳-۶- جمع بندی

در این فصل از پژوهش مطالعه پارامتری و تحلیل حساسیت عوامل مختلف از جمله پاسخ زهکشی شده و زهکشی نشدهی تونل، تغییرات تنش‌های برجا، سطح آب زیرزمینی و پاسخ بلند مدت محیط دربرگیرنده به عنوان عوامل موثر بر بروز نشست در تونل‌سازی مناطق شهری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده جلوگیری از ورود آب به فضای حفاری شده می‌تواند نقش مهمی در کاهش نشست و جابجایی‌های اطراف تونل داشته باشد به گونه‌ای که در حالت زهکشی نشده جابجایی‌ها اطراف تونل به حداقل مقدار خود می‌رسد. تنش‌های برجای محیط نیز نقش مهمی در تغییر شکل‌های اطراف تونل ایفا می‌کنند بگونه‌ای که در $k=1$ جابجایی‌ها به حداقل مقدار خود می‌رسند. بررسی‌های حاصل از تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که هر چه ارتفاع آب زیرزمینی از محور تونل کمتر باشد تغییر شکل‌های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری کمتر خواهد بود. در انتها نیز، پاسخ بلند مدت هیدرومکانیک تونل مورد بررسی قرار گرفت با توجه به نتایج بدست آمده، پاسخ کوتاه مدت هیدرومکانیک در حالت زهکشی شده، پاسخ نهایی محیط

دربرگیرنده‌ی تونل نمی‌باشد. بنابراین پاسخ بلندمدت یا همان رفتار تحکیمی محیط باید مورد توجه مهندسین و طراحان قرار گیرد زیرا بیشترین جابجایی‌های اطراف تونل مربوط به رفتار بلند مدت یا تحکیمی آن می‌باشد. در صورتی که، رفتار کوتاه مدت محیط در حالت زهکشی نشده با گذشت زمان تغییری نمی‌کند.

فصل ہفتم

نتیجہ گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری

با توجه به حفر اغلب تونل‌های شهری در محیط‌های اشباع، بررسی تأثیر آب‌های زیرزمینی بر تغییر شکل‌های اطراف تونل بصورت 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، مدلسازی هیدرومکانیک نشست ناشی از حفاری این تونل با استفاده از روش عددی تفاضل محدود انجام شده است. نرم‌افزار FLAC3D به دلیل قابلیت تحلیل توأمان در یک محیط متخلخل و سرعت بالای محاسبات، برای این مدلسازی انتخاب شده است. پس از برقراری شرایط اولیه و مرزی، برای اعتبار سنجی مدل اولیه، نتایج بدست آمده از مدلسازی با داده‌های ابزار دقیق در مقطع ۲۱+۵۴۰ در دو حالت توأمان و غیرتوأمان مقایسه شد. در انتها نیز، با توجه به هدف مسأله به بررسی پاسخ زهکشی شده و زهکشی نشده تونل در کوتاه مدت و بلند مدت، تغییرات سطح آب زیرزمینی و تغییرات تنش‌های برجا بر جابجایی‌های اطراف فضای حفاری پرداخته شده است. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر است؛

- (۱) با توجه به اینکه پایداری فضاهاى زیرزمینی به شناخت کامل محیط پیرامون آن بسیار وابسته است، مطالعه دقیق مسیر تونل از نظر شرایط هیدرولیکی و خصوصیات ژئوتکنیکی ضرورت دارد.
- (۲) نصب ابزار دقیق برای برداشت‌های کوتاه مدت و بلند مدت نشست تونل سازی و مقایسه نتایج روش‌های عددی با آن در پیش بینی پایداری بلند مدت تونل بسیار تأثیر گذار است.
- (۳) استفاده از روش‌های عددی به دلیل ارائه یک پاسخ تا حد امکان نزدیک به واقعیت و پیش بینی تغییر شکل‌های اطراف حفاری بسیار کارآمد است.

- (۴) پارامترهای شرایط تنش برجا، سطح آب‌های زیرزمینی و شرایط زهکشی محیط بر نتایج مدلسازی عددی بسیار تأثیر گذارند. بنابراین این پارامترها می‌بایست بسیار نزدیک به شرایط واقعی و به دور از

ساده سازی در مدل عددی اعمال شوند.

(۵) نشست و جابجایی‌های بدست آمده در حالت توأمان کمتر از حالت غیرتوأمان است. مقایسه نتایج با داده‌های ابزار دقیق نشان می‌دهد که مقدار نشست ایجاد شده در حالت توأمان مطابقت بالاتری با داده‌های ابزار دقیق دارد. با توجه به این که تنش‌های وارده بر یک محیط اشباع به وسیله‌ی سیال و خاک کنترل می‌شود در حل غیرتوأمان در هر گام زمانی نقش یکی از عوامل تشکیل دهنده محیط در نظر گرفته نمی‌شود همین امر سبب افزایش جابجایی‌ها در حالت غیرتوأمان نسبت به حالت توأمان می‌شود. بنابراین به منظور داشتن یک تحلیل دقیق و نزدیک به واقعیت استفاده از روش‌های توأمان امری ضروری است.

(۶) خروج آب ناشی از عملیات حفاری سبب کاهش فشار منفذی و افزایش تنش موثر در اطراف فضای حفاری می‌شود. به بیان دیگر زهکشی آب سبب ایجاد فضای خالی بین ذرات خاک و فشرده شدن آن‌ها با گذشت زمان می‌شود. از این رو نشست و جابجایی‌های ایجاد شده اطراف تونل افزایش می‌یابد. جهت کاهش جابجایی‌های ناشی از خروج سیال در اطراف فضای حفاری، بهتر است از ورود آب به داخل فضای حفاری جلوگیری شود.

(۷) با نزدیک شدن میدان تنش به حالت $K=1$ نشست و جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف فضای حفاری کاهش می‌یابد.

(۸) نتایج بدست آمده از تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که هر چه سطح آب زیرزمینی پایین‌تر باشد تغییر شکل‌های اطراف فضای حفاری کمتر خواهد شد. از آنجا که افزایش سطح آب زیرزمینی سبب افزایش فشار منفذی محیط می‌شود و عملیات حفاری منجر به کاهش فشار منفذی بیشتری در اطراف فضای حفاری می‌شود به همین دلیل با کاهش سطح آب زیرزمینی مقدار نشست ایجاد شده نیز کاهش می‌یابد.

۹) بررسی رفتار ۳۰ روزه تونل در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده نشان می‌دهد که رفتار محیط دربرگیرنده‌ی تونل در حالت زهکشی نشده با گذشت زمان تغییری نمی‌کند. همچنین نتایج بدست آمده در حالت زهکشی شده نشان می‌دهد که رفتار کوتاه مدت، پاسخ نهایی محیط دربرگیرنده‌ی تونل نمی‌باشد از این رو با گذشت زمان میزان جابجایی‌های ایجاد شده 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 بلند مدت یا همان رفتار تحکیمی آن می‌باشد.

۶-۲- پیشنهادات

- ۱) از آنجا که یکی از مهمترین پارمترهای تعیین کننده‌ی جابجایی‌ها در اطراف فضای حفاری قطر سپر می‌باشد، بررسی تأثیر قطرهای مختلف ماشین حفاری بر تغییر شکل‌های اطراف تونل پیشنهاد می‌شود.
- ۲) حل مدل در شرایط غیر اشباع (فاز مایع + جامد + گاز)
- ۳) نصب ابزار دقیق‌های مختلف در مسیر پروژه با هدف بررسی رفتار بلند مدت (۵ تا ۱۰ سال) فضاهای حفاری و تغییرات سطح آب زیرزمینی.

منابع

جولایی، الف، (۱۳۸۹)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "مدلسازی سه بعدی جریان سیال در سنگ‌های شکسته در مخازن نفتی ایران"، دانشگاه صنعتی اصفهان.

شرکت مهندسی سپاسد، (۱۳۹۰)، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل (قطعه

شمالی جنوبی)

فرهی، ع، سالاری راد، ح، فرهی، ا، (۱۳۹۵)، "تئوری پوروالاستیسیته و کاربرد آن در تحلیل تنش

مؤثر در محیط‌های متخلخل"، سومین کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و سازه، نروژ، موسسه تحقیقاتی، پژوهشی علوم و تکنولوژی نروژ.

متولی حقیقی، الف، (۱۳۹۴)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "مدلسازی هیدرومکانیکی ترک خوردگی

محیط متخلخل اشباع با استفاده از مدل ترک چسبنده و روش اجزای محدود بسط یافته"، دانشگاه تهران.

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.

Bear, J. (1972). **Dynamics of fluids in porous media**. American Elsevier Publishing Company.

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.

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.

Chakeri, H., Ozcelik, Y., & Unver, B. (2013). **Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB**. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 36, 14-23.

Chareyre, B., Catalano, E., & Barthélémy, E. (2011). **Numerical simulation of hydromechanical couplings by combined discrete element method and finite-volumes**. *Flows and mechanics in natural porous media from pore to field scale. Pore2Field, IFP Energies*, 16-18.

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.

Dean, R. H., Gai, X., Stone, C. M., & Minkoff, S. E. (2006). **A comparison of techniques for coupling porous flow and geomechanics**. *Spe Journal*, 11(01), 132-140.

Eberhardt, E., Stead, D., & Coggan, J. S. (2004). **Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1), 69-87.

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.

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.

Fredlund, D. G. (2014). **The emergence of unsaturated soil mechanics**. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(12), ix-x.

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.

Gutierrez, M. S., & Lewis, R. W. (2002). **Coupling of fluid flow and deformation in underground formations.** Journal of Engineering Mechanics, 128(7), 779-787.

Hasanpour, R., Rostami, J., & Ünver, B. (2014). **3D finite difference model for simulation of double shield TBM tunneling in squeezing grounds.** Tunnelling and Underground Space Technology, 40, 109-126.

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.

Itasca. (2012). **FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 5.01.** Itasca Consulting Group Inc.

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.

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.

Li, S. C., Liu, H. L., Li, L. P., Zhang, Q. Q., Wang, K., & Wang, K. (2016). **Large scale three-dimensional seepage analysis model test and numerical simulation research on undersea tunnel.** Applied Ocean Research, 59, 510-520.

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.

Liakos, A. L. (2000). **Effect of soil consolidation on soil-lining interaction in tunnels** (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology)

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). **Fundamentals of soil behavior.**

NI, X. D., & WANG, Y. (2009). **A Continuum3discrete Hydromechanical Analysis of Seepage Deformation**. In Proceedings of International Forum on Porous Flow and Applications (Vol. 2123218).

Oda, M. (1982). **Fabric tensor for discontinuous geological materials**. Soils and Foundations, 22(4), 96-108.

Prasetyo, S. H. (2017). **Hydro-mechanical analysis of tunneling in saturated ground using a novel and efficient sequential coupling technique** (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines)

Prasetyo, 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.

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).

Rutqvist, J., & Stephansson, O. (2003). **The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering**. Hydrogeology Journal, 11(1), 7-40.

Shafipour, R., & Soroush, A. (2008). **Fluid coupled-DEM modelling of undrained behavior of granular media**. Computers and Geotechnics, 35(5), 673-685.

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.

Wang, H. F. (2000). **Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology**. Princeton University Press.

Wongsaroj, J., Soga, K., & Mair, R. J. (2013). **Tunnelling-induced consolidation settlements in London Clay**. Géotechnique, 63(13), 1103.

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.

Yoo, C., Kim, S., & Lee, Y. (2008). **Characteristics of tunneling-induced ground settlement in groundwater drawdown environment.** IS-329.

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.

ZHANG, C., & LIU, J. (2009). **Effects of Fluid-solid Coupling on Tunnel in a Saturated Soil Layer.**

Zhang, Y. T. (2014). **Analysis of Seepage Field of Highway Tunnel Excavation by Finite Difference Method.** In Applied Mechanics and Materials (Vol. 638, pp. 798-803). Trans Tech Publications.

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.

Zienkiewicz, O. C., Chan, A. H. C., Pastor, M., Schrefler, B. A., & Shiomi, T. (1999). **Computational geomechanics** (pp. 105-110). Chichester: Wiley.

ABSTRACT

Limitation of urban spaces, growing of population and urban development have been led to extensive use of tunnels as appropriate solution to overcome the above problems. Because of the soft and saturated ground in urban area, the control and estimate settlement of ground in tunneling is one of the most important challenges. The settlement caused by tunneling has always been influenced by several factors such as the ground type, tensor of stress, depth of excavation, groundwater level of the area, the method of excavation, etc. Each of them plays a major role in tunneling. Due to the importance of controlling and estimating the ground settlement in the tunneling of urban areas, in recent years this issue has been very much considered. In most studies, because of existence the complexity in comprehensive reviews, there are many simplifications such as neglecting changing of water level and couples phenomena, etc. in these studies that have very significant impact on the results. The complexity of the conditions is happen when the whole or part of the tunnel is excavated below the ground water level. In this situation, the design and estimates made from these simplifications cannot be precise. At the time of the tunnel excavation, the excavated space acts as a drainage channel. Water contained in the environment enters the excavated space, which causes a change in the hydraulic conditions of the area. This change in hydraulic conditions affects the mechanical properties of the environment and, as a result, it can increase the displacement around the tunnel. Given that the analytical solutions available from the hydromechanical interactions have limitations such as the application of physical and boundary conditions .With the advancement of computer technology and numerical methods, the process of solving the problems of hydromechanics towards numerical solution has changed. In this study, considering that 60% of the path of the Tehran metro line 7 is below the ground water level and the tunnel excavation path often passes through areas with urban decay. Controlling and estimating the settlement caused by excavation in the short and long term is of particular importance. Therefore, after selecting numerical software in accordance with the problem conditions, the three dimensional model of the case study tunnel is made in the FLAC3D software environment and after the conditions governing the environment, the deformation resulting from the excavation operation has been investigated. Based on the results, the amount of settlement created after excavation

operations is 19 and 23 mm in couple and uncouple method. Comparison of the results with instrumentation data shows the high compliance of the couple method then the uncouple method. Also, the deformation around the excavation space is heavily dependent on the drainage and the groundwater level condition, so that the displacement and expansion of the plastic zone around the excavation space, in drained mode, is more than undrained. The long-term behavior of the tunnel in both drained and undrained mode shows that the deformation caused by drained does not change over time. See also, in the drained condition, the displacement increases around the excavation space with over time.

Keywords: Hydromechanic couple, Porous media, saturation media, Tunnel settlement, Pore pressure, Flac3D software



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

MSC Thesis in Tunnel and Underground Spaces Engineering

**Hydromechanical modeling of tunnel settlement in urban area-A case
study, Tehran subway tunnel-line7**

Abedin Hojjati Tavandashti

Supervisor:

Dr. Ahmad Rameanzadeh

January, 2018