

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک

ارزیابی تأثیر حفاری زیر زمینی بر نشست سطحی زمین و مقایسه‌ی آن با نتایج ابزار دقیق

مطالعه‌ی موردی: خط ۲ قطار شهری مشهد

نگارنده: سید رضا مدنی

استاد راهنما:

دکتر رضا نادری

شهریور ۱۳۹۶

تقدیم به خانواده عزیزم:

مهربان فرشتگانی که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت
خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون
حضور سبز آنهاست...

تشکر و قدردانی

امروز که به همت پروردگار بی همتا
و به مدد دعای پدر و مادر عزیزتر از جانم
و لطف و راهنمایی استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر نادری
برگی دیگر از دفتر بزرگ علم و دانش را ورق زدم
خاضعانه دست بوس تمام کسانی ام
که باعث دلگرمی من بودند.

تعهدنامه

این جانب سید رضا مدنی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران-ژئو تکنیک دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی نشست سطحی تحت اثر حفاری زیر زمینی و مقایسه آن با نتایج ابزار دقیق مطالعه موردی خط ۲ قطار شهری مشهد باراهنمائی دکتر رضا نادری متعهد می‌شوم:

- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب انجام و از صحت و اصالت برخوردار است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت مدرک یا امتیاز به هیچ فرد یا مکانی ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که به نحوی در دستاوردهای اصلی پایان‌نامه مؤثر بوده‌اند، در مقالات حاصل از این اثر رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در صورتی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده گردیده، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاقی- انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

امروزه با توجه به گسترش روز افزون محیط‌های شهری، افزایش تراکم سازه‌های سطحی و کمبود فضای لازم برای حمل و نقل درون شهری، نیاز به اجرای سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو در محیط‌های شهری بیش از گذشته احساس می‌شود. یکی از عوامل حائز اهمیت در اجرای ایستگاه‌های عمیق مترو در محیط‌های شهری انتخاب روش مناسب حفاری است؛ که تأثیر به‌سزایی در پایداری فضای اطراف تونل در حین حفاری، نشست‌های سطحی ناشی از حفاری و هم‌چنین پایداری درازمدت محیط حفاری شده (ایستگاه مترو) دارد. اطمینان از عدم ریزش تونل در حین و بعد از اجرا و هم‌چنین عدم ایجاد تغییر شکل‌های نامناسب در سازه‌های سطحی، از جمله اهداف اصلی طراحان تونل‌ها به حساب می‌آیند. از این رو شناخت و بررسی رفتارهای متقابل تونل، خاک و سازه‌ی سطحی اهمیت زیادی داشته و باید مورد بررسی قرار گیرد. لذا، در پژوهش حاضر به مطالعه‌ی این رفتارها و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر مانیتورینگ^۱ نشست در ایستگاه خط ۲ قطار شهری واقع در میدان شهدای مشهد پرداخته‌ایم. هدف این پژوهش بررسی اثر حفاری زیرزمینی بر رفتار سطحی خاک است که در آغاز، تحقیق‌های انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران در این زمینه بررسی شده است. اکثر این مطالعات با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی و نرم‌افزارهای اجزا محدود صورت گرفته است. در موارد معدودی نیز، صحت سنجی مدل عددی به روش مقایسه‌ی نتایج مدل با نتایج ابزارنگاری تونل حفاری شده‌ی واقعی انجام شده است. از آنجا که مطالعات گذشته به بررسی نشست تحت تأثیر حفاری مکانیزه پرداخته و مقایسه‌ی با نتایج ابزار دقیق صورت نگرفته است؛ لذا در این پژوهش، نشست سطحی تحت تأثیر حفاری زیرزمینی و مقایسه‌ی آن با دو مدل دو بعدی و سه بعدی از حفاری انجام شده در ایستگاه خط ۲ قطار شهری واقع در میدان شهدای مشهد بررسی شده است. هم‌چنین این نکته را یادآور می‌شویم که با توجه به نکات مثبت و منفی شیوه‌های متفاوت و امکانات موجود، روش شبیه‌سازی عددی به کمک دو نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS 2D ver. 8.6 و PLAXIS 3D برای انجام این پژوهش انتخاب شده است. با کمک مدل عددی ساخته شده، تغییرات سطوح متفاوت مربوط به تونل و خاک اطراف آن، مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: ایستگاه مترو، روش پیش‌نگهدارنده طاق‌بتنی (روسی)، نشست سطحی، PLAXIS 2D، PLAXIS 3D، ابزار دقیق

^۱ Monitoring

فهرست مطالب

۱	فصل اول مقدمه
۲	۱-۱ کلیات
۳	۲-۱ ضرورت و هدف انجام پژوهش
۳	۳-۱ معرفی پژوهش و شیوهی تحقیق
۴	۴-۱ ساختار پایاننامه
۷	فصل دوم روشهای حفاری تونل و ایستگاههای زیرزمینی
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ طبقه بندی کلی ایستگاه
۹	۳-۲ روشهای حفاری تونل
۹	۱-۲-۲ حفر تونل به روش نوین اتریشی
۱۱	۲-۲-۲ حفر تونل به روش پیشنگهدارندهی طاق بتنی
۱۳	۳-۲-۲ حفر تونل به وسیلهی ماشینهای بازویی
۱۴	۴-۲-۲ حفر تونل به کمک ماشینهای تمام مقطع
۱۵	۵-۲-۲ حفر تونل به کمک کند و پوش
۱۵	۶-۲-۲ حفر تونل به روش حفاری مرحلهای با ستونهای میانی
۱۶	۳-۲ جمع بندی
۱۷	فصل سوم بررسی تأثیر حفاری زیرزمینی بر نشست سطحی
۱۸	۱-۳ مقدمه
۱۸	۲-۳ نشست سطح زمین در اثر حفر تونل
۱۸	۳-۳ برآورد نشست
۱۹	۱-۳-۳ آزمایشهای بزرگ مقیاس
۲۰	۲-۳-۳ آزمایشهای کوچک مقیاس
۲۰	۴-۳ شبیه سازیهای عددی

۲۱	۵-۳ تحقیقات انجام شده
۲۷	۶-۳ بررسی عددی تأثیر عرض پی در تحلیل برهم کنش تونل - پی سطحی
۳۱	۷-۳ مطالعه تأثیر حفاری تونلهای شهری بر سازههای سطحی
۳۳	۸-۳ تحلیل و بررسی تأثیر حفاری تونلهای شهری بر سازههای اطراف
۳۵	۸-۳ بررسی اندرکنش خاک - سازه در اثر حفر تونل و باربرداری
۳۷	فصل چهارم روش اجزاء محدود
۳۸	۱-۴ مقدمه
۳۹	۲-۴ انواع مدل رفتاری
۳۹	۱-۲-۴ مدل الاستیک خطی
۴۰	۲-۲-۴ مدل رفتاری موهر-کولمب
۴۲	۳-۲-۴ مدل رفتاری خاک سخت شونده
۴۶	۲-۴ المان صفحه
۴۸	۲-۴ المان سطح مشترک
۴۹	۵-۴ شرایط مرزی
۴۹	۱-۵-۴ شرایط تکیهگاهی
۵۱	۶-۴ مشبندی
۵۱	۱-۶-۴ انتخاب نوع المانها و گرھها
۵۵	۷-۴ جمعبندی
۵۷	فصل پنجم مدلسازی و تحلیل عددی ایستگاه زیر زمینی
۵۸	۱-۵ مقدمه
۵۸	۲-۵ مشخصات پروژه
۵۸	۱-۲-۵ مشخصات محل پروژه
۶۰	۲-۲-۵ زمینشناسی شهر مشهد
۶۱	۱-۲-۲-۵ لایههای ریزدانه

۶۱	۵-۲-۲-۲ لایه‌های درشتدانه
۶۱	۵-۲-۲-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک
۶۳	۵-۳ مشخصات سازه نگهبان
۶۶	۵-۴ مشخصات بارهای سطحی
۶۷	۵-۵ مدل سازی پروژه
۶۷	۵-۵-۱ مدل عددی دوبعدی
۶۸	۵-۵-۲ فازبندی مدل عددی دوبعدی پروژه
۷۰	۵-۵-۳ مدل عددی سه بعدی پروژه
۷۲	۵-۶ فازبندی مدل عددی سه بعدی پروژه
۷۴	۵-۷ اندازه‌گیری نشست
۷۵	۵-۸ جمع بندی
۷۷	فصل ششم مقایسه ی نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج ابزار دقیق
۷۸	۶-۱ مقدمه
۷۸	۶-۲ بررسی اثر حفاری بر نشست سطحی
۷۸	۶-۲-۱ مقطع عرضی
۸۱	۶-۲-۲ مقطع طولی
۸۳	۶-۳ بررسی اثر حفاری بر نشست در تاج تونل
۸۳	۶-۳-۱ مقطع عرضی
۸۵	۶-۳-۲ مقطع طولی
۸۶	۶-۳ بررسی اثر حفاری بر نشست در ردیف شمع سازه‌نگهبان
۸۹	فصل هفتم نتیجه گیری و ارائه ی پیشنهاده‌ها
۹۰	۷-۱ نتایج
۹۱	۷-۲ پیشنهاده‌ها
۹۲	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ پیشنهادارنده طاق بتنی ۱۲
- شکل ۲-۲ روش اجرای پیش‌نگهدارنده طاق بتنی (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹) ۱۳
- شکل ۳-۲ روش حفاری مرحله‌ای با ستونهای میان ۱۶
- شکل ۱-۳ تصویر شماتیک سیستم پی - خاک - حفره ۲۴
- شکل ۲-۳ منحنی فشار - جابه‌جایی پی سطحی در دو حالت عمود و موازی با حفره‌ی دایره‌ای پیوسته ۲۶
- شکل ۳-۳ عمق بحرانی حفره‌ی پیوسته در زیر پی سطحی (Badie A, 1983) ۲۷
- شکل ۴-۳ تصویری شماتیک از نمونه‌ی آزمایشگاهی ۲۹
- شکل ۵-۳ ابعاد مدل عددی ۳۰
- شکل ۶-۳ نمودار نشست سطحی در مقابل فشار وارد بر پی ۳۱
- شکل ۷-۳ منحنی گودی نشست در اثر حفر تونل ۳۲
- شکل ۸-۳ هندسه، مشبندی و شرایط تکیه‌گاهی مدل عددی تونل امداد و سازه‌های اطراف ۳۴
- شکل ۹-۳ مراحل اجرای تونل امداد به روش NATM ۳۵
- شکل ۱۰-۴ دایره‌ی تنش مور به همراه پوش کولمب [Brinkgreve, R. B (2004)] ۴۰
- شکل ۲-۴ سطح تسلیم مدل رفتاری خاک سخت شونده [گوهری م (۱۳۸۶)] ۴۲
- شکل ۳-۴ نسبت تنش - کرنش هذلولی در بارگذاری اولیه در آزمایش سه محوری استاندارد زهکشی شده ۴۴
- شکل ۴-۳ نحوه‌ی محاسبه E_{oed}^{ref} در آزمایش تک محوری [Brinkgreve, R. B . (2004)] ۴۵
- شکل ۵-۴ موقعیت گره‌ها در المان ۶ و ۱۵ گرهی [Brinkgreve, R.B. (2004)] ۵۲
- شکل ۶-۴ موقعیت گره‌ها در المان ۱۰ گرهی [Brinkgreve, R. B (2010)] ۵۲
- شکل ۱-۴ تصویری شماتیک از محل ایستگاه میدان شهدای قطار شهری مشهد [مهندسین مشاور ساحل ۵۹
- شکل ۲-۵ تصویری شماتیک از تونل موجود در ایستگاه میدان شهدا قطار شهری مشهد ۶۰
- شکل ۶-۵ پلان و محل شمعه‌های سازه نگهبان [مهندسین مشاور سانو، (۱۳۹۱)] ۶۳

- شکل ۵-۷ برش سازه نگهبان ایستگاه [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)] ۶۴
- شکل ۵-۶ هندسه، شرایط تکیهگاهی و اجزاء مدل دو بعدی پروژه ۶۸
- شکل ۵-۷ مشبندی مدل دو بعدی پروژه ۶۸
- شکل ۵-۸ نتایج و فازبندی دو بعدی مدل ایستگاه ۶۹
- شکل ۵-۹ نمایش نشست سطحی در مدل دو بعدی ۶۹
- شکل ۵-۱۰ مدل سه بعدی ایستگاه به همراه بارگذاری اینترفیس ۷۱
- شکل ۵-۱۲ مشبندی سه بعدی مدل ایستگاه ۷۱
- شکل ۵-۱۳ تقسیم خاک تونل جهت خاکبرداری در مدل سه بعدی ایستگاه ۷۲
- شکل ۵-۹ نتایج و فازبندی مدل سه بعدی ایستگاه ۷۳
- شکل ۵-۱۰- نمایش نشست سطحی در مدل سه بعدی ۷۳
- شکل ۶-۱- مقایسه جابهجایی قائم در مدل دو بعدی و سه بعدی و مقایسه با نتایج مانیتورینگ ۷۹
- شکل ۶-۳ تصویر سه بعدی از نشست طولی تونل در حین عملیات ساخت با بزرگنمایی ۴۰۰برابری ... ۸۳
- شکل ۶-۴- مقایسه نشست تاج تونل در مدل دو بعدی و سه بعدی و مقایسه با نتایج مانیتورینگ .. ۸۴
- شکل ۶-۵ مقایسه مدل سه بعدی و نتایج مانیتورینگ تاج تونل در مقطع طولی حین حفاری ۸۵
- شکل ۶-۶ مقایسه مدل سه بعدی و نتایج مانیتورینگ ردیف شمع سازه نگهبان در مقطع طولی پس از انجام حفاری ۸۷

فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱ مشخصات خاک ماسه‌ای با سه تراکم متفاوت ۳۳
- جدول ۴-۱ تعداد المانها در هر مش [گوهری م(۱۳۸۶)] ۵۴
- جدول ۴-۲ مقادیر r_e با توجه به انواع مش [Brinkgreve, R. B (2010)] ۵۴
- جدول ۵-۱ مشخصات لایه‌های خاک پروژه ۶۲
- جدول ۵-۲ مشخصات شمع سازه نگهدارنده به کار رفته در مدل سازی [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)] ۶۵
- جدول ۵-۳ مشخصات مقطع طاق بتنی سازه نگهدارنده به کار رفته در مدل سازی [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)] ۶۶
- جدول ۵-۴ مشخصات شاتکریت سازه نگهدارنده به کار رفته در مدل سازی [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)] ۶۶
- جدول ۵-۵ مشخصات بارهای وارد بر ایستگاه میدان شهدا [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)] ۶۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱ کلیات

حفر تونل در زمین‌های خاکی می‌تواند منجر به ایجاد جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در اطراف تونل شود. این جابه‌جایی‌ها می‌توانند به سطح زمین رسیده و موجب آسیب رساندن به سازه‌های موجود در سطح زمین شوند؛ بنابراین تخمین میزان نشست زمین در اثر حفاری، به خصوص در محیط‌های شهری از اهمیت بسیاری برخوردار است. هدف از این مطالعه، در واقع یک نوع پیش‌بینی از وضعیت نشست‌های سطحی حاصل از حفر تونل‌های مترو واقع در مناطق شهری است. با توجه به تأثیر حفر این فضای زیرزمینی بر محیط اطراف، سست بودن زمین و سطح مقطع بزرگ این محیط‌ها که باعث ایجاد تغییراتی در محیط اطراف و نشست در سطح زمین شده است که برای سازه‌های سطحی و زیر سطحی مخاطراتی به دنبال خواهد داشت؛ لذا احداث فضاهای زیرزمینی بزرگ هم‌چون ایستگاه‌های مترو ضروری به نظر می‌رسد. هم‌چنین بایستی علاوه بر پایداری این فضاها، تغییر مکان‌های اطراف نیز تا حد امکان پیش‌بینی و کنترل شوند. اصولاً هنگام حفاری در مناطق شهری سعی بر این است که حفاری به گونه‌ای صورت پذیرد که نشست در سطح حداقل بوده و کمترین آسیب به ساختمان‌های سطحی و زیر سطحی وارد شود؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده است نشست سطحی تحت تأثیر حفاری زیرزمینی و مقایسه‌ی آن با دو مدل دو بعدی و سه بعدی از حفاری انجام‌شده در ایستگاه خط ۲ قطار شهری واقع در میدان شهدای مشهد بررسی شود. هم‌چنین با توجه به نکات مثبت و منفی شیوه‌های متفاوت و امکانات موجود، روش شبیه‌سازی عددی به کمک دو نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS 2D ver. 8.6 و PLAXIS 3D برای انجام این پژوهش انتخاب گردید و تغییرات سطوح متفاوت مربوط به تونل و خاک اطراف آن با کمک مدل عددی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت.

در این فصل ضرورت انجام این تحقیق با ذکر جزئیات آن و همچنین شیوهی انجام پژوهش، فرض-ها و محدودیت‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت در ارتباط با ساختار پایان‌نامه و بخش‌های متفاوت آن توضیحاتی ارائه می‌گردد.

۱-۲ ضرورت و هدف انجام پژوهش

تنها در زمانی می‌توان گفت که استفاده از وسایل حمل و نقل زیرزمینی مانند مترو، راه حل مناسبی برای حل مشکل ترافیک و آلودگی هوای شهرهای بزرگ است که از جنبه‌ی ایمنی نیز بتوان به آن اطمینان کرد. مهم‌ترین بخش در مورد ایمنی این قبیل وسایل، مسأله‌ی ایمنی تونل‌ها است. اطمینان از عدم ریزش تونل در حین و بعد از اجرا و همچنین عدم ایجاد تغییر شکل‌های نامناسب در سازه‌های سطحی، از جمله‌ی اهداف اصلی طراحان تونل‌ها به حساب می‌آیند. بنابراین عملکرد سازه‌ی ایستگاه خط ۲ قطار شهری میدان شهدای مشهد با توجه به نکات ذکر شده در مورد اهمیت آن، می‌تواند هدفی مناسب برای پژوهش در زمینه‌ی کنترل نشست سطحی باشد. در این پژوهش سطوح مختلف خاک تحت تأثیر حفر ایستگاه با توجه به نتایج ابزار دقیق، مدل‌سازی و مقایسه می‌شود.

۱-۳ معرفی پژوهش و شیوه‌ی تحقیق

این پژوهش، بررسی نشست در مطالعه‌ی موردی بر روی ایستگاه (G2) خط ۲ قطار شهری میدان شهدای مشهد می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، ابتدا تحقیق‌های انجام گرفته توسط سایر پژوهشگران در این زمینه بررسی گردید. اکثر این مطالعات با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی و با استفاده از نرم‌افزارهای اجزا محدود انجام شده‌اند. در موارد معدودی نیز، صحت سنجی مدل عددی به

روش مقایسه‌ی نتایج مدل با نتایج ابزارنگاری تونل حفاری شده‌ی واقعی انجام گرفته است. با توجه به نکات مثبت و منفی شیوه‌های متفاوت و امکانات موجود، روش شبیه‌سازی عددی به کمک دو نرم‌افزار اجزا محدود PLAXIS 2D ver. 8.6 و PLAXIS 3D انجام و مدل‌های دو بعدی و سه بعدی به دست آمده است.

با کمک مدل عددی ساخته شده، تغییرات سطوح متفاوتی مربوط به تونل و خاک اطراف آن مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه دارای ۷ فصل است. در ادامه خلاصه‌ای از فصل‌های بعدی ارائه می‌گردد. فصل دوم این پایان‌نامه به روش‌های حفاری تونل و ایستگاه‌های زیرزمینی اختصاص یافته است که شرحی بر انواع شیوه‌های حفاری و آزمایش‌های صورت گرفته بر آن‌ها را شامل می‌شود. فصل سوم به بررسی اثر حفاری تونل بر نشست سطح زمین در تحقیقات گذشته و پژوهش‌های متفاوت انجام شده با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی برای بررسی رفتار خاک در اثر حفر تونل و مروری کوتاه بر نتایج حاصل از آن‌ها اختصاص دارد. در فصل چهارم به بررسی روش اجزاء محدود، تئوری‌ها و امکانات آن پرداخته شده است.

در فصل پنجم این اثر مدل‌سازی، تحلیل عددی تونل و ایستگاه زیرزمینی میدان شهدا مشهود بررسی شده است. در این فصل چگونگی مدل‌سازی خاک، تونل و برخی مشخصه‌های بررسی مانند مدل رفتاری خاک و پارامترهای تونل مشخص می‌گردند که در ادامه مراحل شبیه‌سازی نیز بررسی می‌شود.

ششمین فصل از این پایان نامه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی می‌پردازد. نتایج حاصل از بررسی تأثیر حفر تونل بر روی مقادیر نشست‌های نسبی و کلی ارائه می‌شود.

فصل هفتم شامل نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادهایی در این زمینه برای پژوهش‌های آتی می‌باشد که با توجه به نتایج به دست آمده در فصل شش راه‌کارهایی برای نزدیک‌تر شدن مدل‌سازی اثرات منفی حفر تونل بر سازه‌های سطحی با مقادیر واقعی مشخص می‌گردد و در پایان پیشنهادهایی برای ادامه‌ی پژوهش در زمینه‌ی این موضوع ارائه می‌شوند.

فصل دوم

روش‌های حفاری تونل و ایستگاه‌های

زیرزمینی

۲-۱ مقدمه

تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی برای مقاصد متنوعی ایجاد می‌شود که تونل‌های حمل و نقل از آن جمله‌اند. طراحی هر تونل مستلزم دسترسی به داده‌های مناسب و به کارگیری تمهیدات ویژه است. در هر مورد طراح باید با آگاهی دقیق از شرایط زمین و امکانات موجود، اقدام به انتخاب روش حفاری مناسب نماید. در این فصل قصد داریم تعدادی از روش‌های حفاری مرسوم را معرفی و مرور کنیم.

۲-۲ طبقه‌بندی کلی ایستگاه

امروزه از نظر طبقه‌بندی کلی، موقعیت ایستگاه‌ها به دو دسته زیرزمینی و روزمینی تقسیم می‌شوند. اصولاً عمق ایستگاه بر اساس تراز ریل تونل تعیین می‌شود. در شرایطی که پروفیل طراحی شده در مسیر مترو در روی زمین قرار گیرد، ایستگاه به صورت روزمینی و در شرایطی که پروفیل طراحی شده مسیر مترو در تراز زیر سطح زمین قرار گیرد، ایستگاه به صورت زیرزمینی طراحی می‌شود. به طور کلی سه نوع ایستگاه زیرزمینی در شبکه مترو پیش‌بینی می‌شود که تقسیم‌بندی آن‌ها به شرح زیر است (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹):

الف- ایستگاه کم عمق^۱: عمق ریل تا سطح زمین کمتر از ۱۳ متر می‌باشد.

ب- ایستگاه نیمه عمیق^۲: عمق ریل تا سطح زمین بین ۱۳ تا ۲۰ متر می‌باشد.

پ- ایستگاه عمیق^۳: عمق ریل تا سطح زمین بیشتر از ۲۰ متر می‌باشد.

یکی از مواردی که در پایدارسازی فضاهای حفاری شده زیرزمینی مؤثر است، تقسیم‌بندی سطح مقطع حفاری است تا که تونل به صورت تمام مقطع حفاری شود. به طور کلی در این روش سطح مقطع کلی به

^۱ Shallow Station

^۲ Station Medium Depth

^۳ Deep Station

بخش‌ها و جبهه‌های کوچکتر تقسیم شده و عملیات اجرا در جبهه‌های مختلف، با گام‌ها و فواصل معین نسبت به هم پیش می‌رود تا فضای حفاری کمترین آسیب را ببیند (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

۳-۲ روش‌های حفاری تونل

الگوهای مختلفی جهت تعیین ترتیب حفاری در این روش‌ها توسط کارشناسان مختلف ارائه شده که این الگوها بسته به شرایط زمین‌شناسی، ابعاد مقطع حفاری، وضعیت آب‌های زیرزمینی، ارتفاع روباره، مدت انجام پروژه و مهم‌تر از همه نوع سنگ و یا خاک در انتخاب روش حفاری مؤثر است. انواع روش حفار تونل عبارتند از (پاکباز م. س. و حیدری‌زاده ی، ۱۳۸۷):

- حفار تونل به روش نوین اتریشی (NATM)
- حفار تونل به روش پیش‌نگه‌دارنده طاق بتنی
- حفار تونل به کمک ماشین‌های بازویی (Road Header)
- حفار تونل به کمک ماشین‌های تمام مقطع (TBM)
- حفار تونل به کمک کند و پوش (Cut & Cover)
- حفار تونل به روش حفاری مرحله‌ای با ستون‌های میانی

۳-۲-۱ حفار تونل به روش نوین اتریشی

روش تونل‌سازی اتریشی (NATM)، در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۵۷ تا ۱۹۶۵ در اتریش ابداع گردید. اساس این روش استفاده‌ی بهینه از تنش‌های ژئوتکنیکی خاک یا سنگ‌های پیرامونی برای پایداری تونل است. در واقع اساس این روش بر اتصال پوسته‌ی محافظ به بخشی از خاک است که دیگر تغییر شکل ندارد. به عبارت دیگر استفاده از مقاومت خود خاک برای پایداری تونل. ناتم روشی است مبتنی بر تابع نگاری رفتار توده‌های سنگ تحت بار و مونیتورینگ عملیات ساختمان زیرزمینی سنگ. این متد بر

مقاومت ذاتی توده‌ی سنگ پیرامون به عنوان یک جز اصلی نگهداری شده در تونل تکیه می‌کند. تکیه‌گاه اولیه طوری هدایت می‌شود که سنگ را قادر سازد تا بر خودش تکیه کند (مدنی، ح.، ۱۳۹۰). هرگونه تغییر شکل ناشی از حفاری در این روش باید اندازه گرفته شود. ناتم به نصب تجهیزات اندازه‌گیری در سطح بالایی نیاز دارد. این تجهیزات در آستر، زمین و گمانه‌ها جاسازی می‌شود. تونل‌زنی به روش جدید اتریشی در خاک‌های سست تا سنگ‌های سخت و مقاوم و در اعماق کم (در جهت به حداقل رساندن نشست سطح) تا اعماق زیاد و بیش از ۱۰۰۰ متر تحت میدان‌های تنش ناشی از عملیات معدن‌کاری انجام گرفته است. در حال حاضر برای ساخت تونل‌های مترو از این روش به شکل زیر استفاده می‌شود:

۱- حفاری مقطع فوقانی تونل

۲- حفاظت موقت مقطع فوقانی با نصب فریم و شاتکریت

۳- حفاری مقاطع تحتانی تونل

۴- حفاظت موقت مقاطع تحتانی، با نصب فریم و شاتکریت

۵- اجرای رادیه کف (بتن ریزی فونداسیون)

۶- اجرای دیواره و تاج تونل (نصب قالب و بتن ریزی سازه‌ی اصلی دیواره و تاج)

ناتم روند و دستور کاری نیست که بتوان با دنبال کردن آن به نتیجه‌ی مورد نظر رسید؛ بلکه عبارت است از مجموعه‌ای از ایده‌ها که به ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه توجه ویژه‌ای دارد. این روش در نتیجه تجربیات متعدد در کار تونل‌زنی به دست آمده است و برای به دست آوردن هر یک از این ایده‌ها و نیز جمع‌بندی آن‌ها به عنوان یک روش، سال‌های زیادی وقت صرف شده است (مدنی، ح.، ۱۳۹۰).

۲-۲-۲ حفر تونل به روش پیش‌نگه‌دارنده‌ی طاق بتنی

روش پیش‌نگه‌دارنده طاق بتنی از روش‌های حفاری ایستگاه‌ها است که در سال ۱۹۷۴ در تونل والدک در آلمان غربی با مقطعی به عرض ۳۳/۵ متر اجرا شد که بزرگ‌ترین تونل ساخته شده در خاک در آن زمان بود. هم‌چنین این روش در ایران برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ در ساخت ایستگاه ملت از خطوط متروی تهران معرفی شده که پس از موفقیت آن، امروزه به عنوان یکی از روش‌های اصلی اجرای ایستگاه‌های مترو مطرح می‌شود. مراحل اصلی در این روش عبارتند از (حجازی راد . گنجیان، ۱۳۹۴):

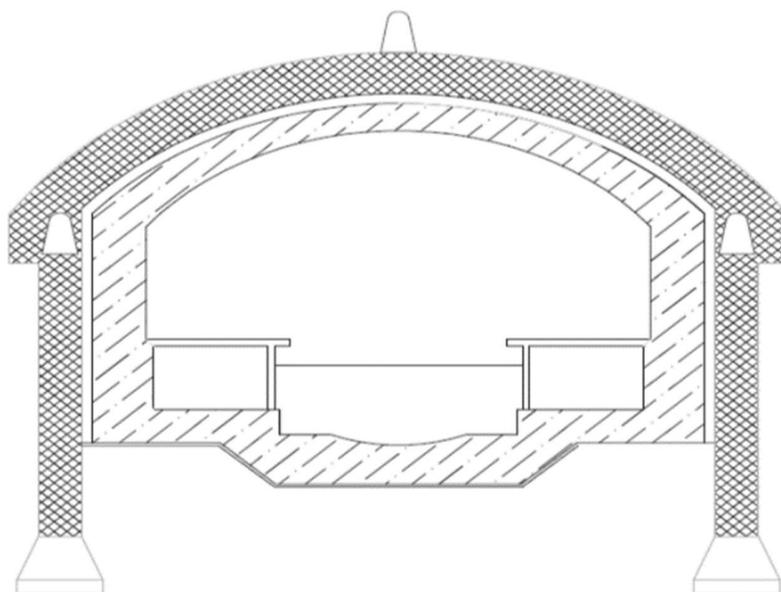
الف- در ابتدا تونل اولیه با مقطع کوچک در طول فضای زیرزمینی اجرا می‌شود.

ب- از تونل میانی اجرا شده، گالری‌های دسترسی کوچکی به فواصل معین به صورت عرضی به دو طرف، در فضای زیرزمینی اصلی حفاری می‌شود.

پ- از انتهای گالری‌های دسترسی عرضی ایجاد شده، دو گالری جانبی به موازات تونل میانی اولیه و با طولی برابر با فضای زیرزمینی اصلی حفاری می‌شود.

ت- از درون گالری‌های جانبی، ردیفی از شمع‌ها به فواصل معین اجرا می‌شود.

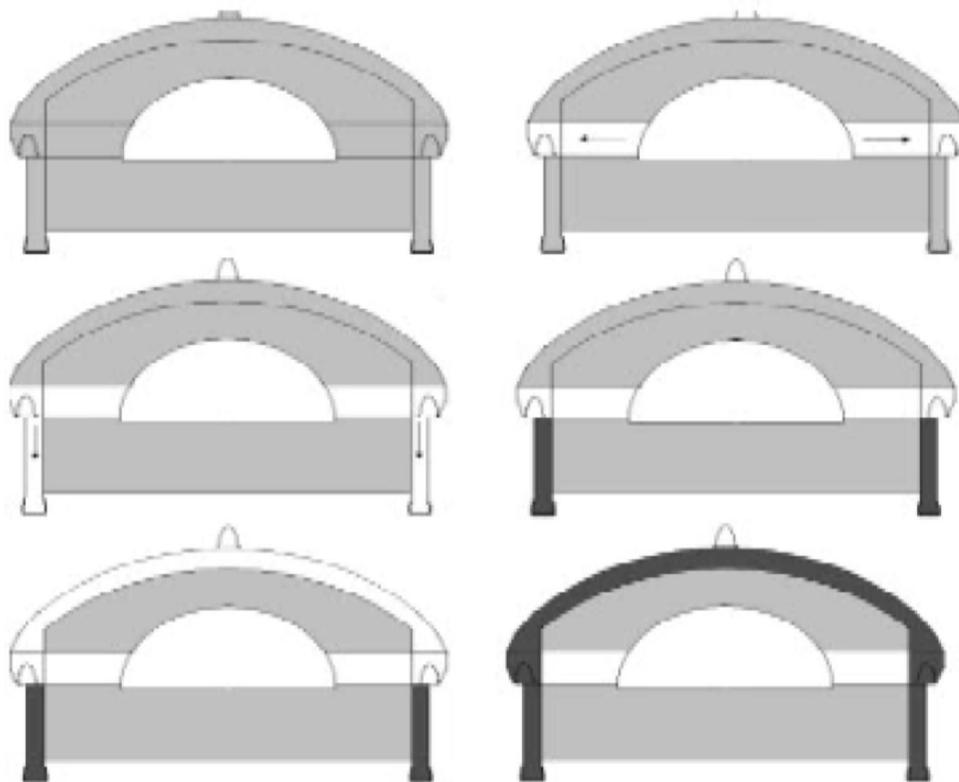
ث- هم‌چنین از بالای شمع‌ها در دو طرف، یک گالری با مقطع نعل اسبی حفاری می‌شود که این گالری برای ایجاد طاق نگه‌دارنده است که دو شمع مقابل هم در دو طرف محدوده‌ی اصلی حفاری را به هم متصل می‌کند.



شکل ۱-۲ پیش‌نگه‌دارنده طاق بتنی

همان طور که در شکل ۱-۲، نشان داده شده است، در این روش المان‌های بتنی مسلح زیرزمینی شامل شمع‌ها و طاق‌های قوسی (ریب)، در اطراف فضای زیرزمینی مورد نظر، پیش از حفاری به منظور نگه‌داری زمین در حین حفاری اجرا می‌شود (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹).

از آن جا که در این روش از شمع‌ها و ریب‌های بتنی جهت ساخت سازه‌ی نگهبان استفاده می‌شود، به آن روش ریب بتنی یا شمع و ریب نیز گویند. در شکل ۲-۲ نحوه‌ی اجرای این روش به طور شماتیک نشان داده شده است. بدین ترتیب ردیفی از طاق‌های بتنی به موازات هم در زیرزمین ایجاد می‌شوند که به عنوان سازه‌ی نگهبان عمل می‌کنند. پس از اجرای شمع‌ها و طاق‌های بتنی، حفاری فضای مورد نظر در پناه این سازه‌ی نگهبان با ایمنی بالا صورت می‌گیرد.



شکل ۲-۲ روش اجرای پیش نگه‌دارنده طاق بتنی (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۸۹)

۳-۲-۲ حفر تونل به وسیله ماشین‌های بازویی

در ماشین‌های بازویی، یک یا چند بازوی حفار وجود دارد که سطح مقطع آن به مراتب کمتر از سطح مقطع تونل است و با جابه‌جا کردن آن در نقاط مختلف مقطع، تونل را حفاری می‌کنند. حفر سنگ به وسیله ماشین بازویی طی یکی از دو مکانیسم پودر کردن و تراشه کردن انجام می‌گیرد. در شیوه‌ی حفاری به روش پودر کردن، محور دوران سرمته در امتداد محور بازوی دستگاه است. سر مته نیز حالت مخروطی دارد و به تدریج با نفوذ سرمته به داخل سنگ، تعداد بیشتری از ناخن‌ها در حفر درگیر

می‌شوند و بدین ترتیب، سنگ تا عمق مورد نظر حفر می‌شود و با تغییر موقعیت سر مته، این عمل در نقاط مختلف مقطع تونل انجام می‌شود. این شیوه حفر سبب می‌شود که دستگاه برای حفر سنگ‌های محکم و نیز حفاری در شرایط دشوار زمین شناختی مناسب باشد. حفاری به روش تراشه کردن عمدتاً در ماشین‌های حفار پیوسته و برای حفر سنگ‌های نرم و ضعیف به کار می‌رود و یکی از موارد کاربرد آن، حفر لایه‌های زغال و سنگ‌های رسوبی اطراف آن است (صالح زاده، ۱۳۹۲)

۲-۲-۴ حفر تونل به کمک ماشین‌های تمام مقطع

در این روش حفاری به وسیله دستگاه‌های حفاری تونل (Tunnel Boring Machine) یا تی‌بی‌ام انجام می‌شود. این دستگاه با استفاده از یک سطح مقطع مدور، قادر است در قشرهای خاکی و سنگی زمین حفاری کند. این دستگاه در ضمن حرکت دورانی، به وسیله جک‌ها با فشار زیاد به جلو رانده می‌شود. نتیجه‌ی این دو حرکت، کندن خاک از سینه‌ی تونل است. خاک و مواد حفاری شده از سینه‌ی تونل، از طریق دریچه‌های کنترلی که در کنار سر مته‌های حفاری تعبیه شده‌اند، به نوار نقاله هدایت می‌شوند و بعد به واگن‌های حمل خاک ریخته می‌شوند (حجازی راد، ۱۳۹۴). این نوع از ماشین‌آلات توانایی ایجاد حفره در هر نوع زمینی، از سنگ سخت گرفته تا ماسه را دارد. تی‌بی‌ام‌ها مزایایی هم‌چون کاهش تعرض به زمین‌های مجاور و ایجاد دیوارهای نرم در تونل را دارند. این دستگاه‌ها یکی از مهم‌ترین ماشین‌آلات حفر تونل می‌باشند که قادرند تونل را به صورت تمام مقطع حفر کنند. EPB نوع خاصی از دستگاه‌های TBM است. در این دستگاه‌ها، جهت حفاظت از جبهه‌ی کار، از مخلوط خاک حفاری شده، آب، فوم و در صورت نیاز مواد افزودنی دیگر استفاده می‌شود. حفاظت از جبهه‌ی کار به دلیل متعادل کردن فشار لایه‌های فوقانی خاک و هم‌چنین فشار آب زیرزمینی الزامی است. اگر در خاک‌های سست فشار متعادل

کننده به جبهه‌ی حفاری وارد نشود، فروریزش زمین بالای تونل و وقوع نشست‌های بزرگ، اجتناب ناپذیر است (حجازی راد، ۱۳۹۴).

۲-۲-۵ حفر تونل به کمک کند و پوش

این روش در مواردی امکان‌پذیر است که در محل مورد نظر، سازه‌های سطحی وجود نداشته باشد و یا تخریب آن‌ها امکان‌پذیر باشد. بسته به وضعیت زمین و شرایط موجود در محل، از روش‌های اجرایی مختلفی برای این کار استفاده می‌شود که تعدادی از آن‌ها عبارتند از (بادآشینی، ۱۳۹۴):

روش گودبرداری با دیواره‌ی شیروانی که در این روش دیواره‌های ترانشه به صورت شیروانی؛ یعنی با دیواره‌های کم شیب احداث می‌شود و نیازی به سیستم نگه‌داری ندارد. روش میخ‌کوبی دیواره که در آن دیواره‌ی پر شیب ترانشه را به وسیله میله‌های فولادی به طول چندین متر میخ‌کوبی می‌کنند.

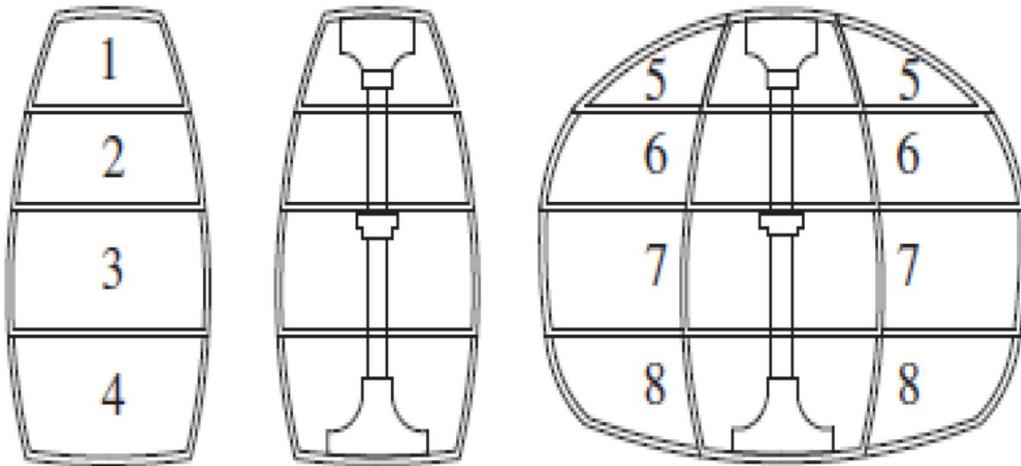
روش استفاده از پایه‌های فولادی

روش دیوارسازی بتنی که در این روش، قبل از عملیات گودبرداری، دیوار قائمی به ضخامت ۵۰ تا ۸۰ سانتی‌متر در دو طرف دیواره‌ی ترانشه مورد نظر احداث می‌شود که نقش دیواره‌ی حائل و پرده‌ی آب-بندی را بر عهده دارد (بادآشینی، ۱۳۹۴).

۲-۲-۶ حفر تونل به روش حفاری مرحله‌ای با ستون‌های میانی

یکی از روش‌های مؤثر در کاهش نشست سطح زمین، روش حفاری مرحله‌ای با ستون‌های میانی است. در این روش همان‌طور که در شکل ۲-۳، نشان داده شده است، ابتدا فضای مورد نظر برای اجرای ستون‌های میانی به صورت مرحله‌ای حفاری می‌شود و پس از اجرای ستون‌ها، حفاری فضای مورد نظر در پناه

این سازه‌ی نگهبان با ایمنی بالا صورت می‌گیرد (عطایی، ۱۳۸۴). از این روش برای حفاری تونل در شرایطی که فضای مورد نظر هنگام حفر برای قرارگیری ستون‌ها پایدار بوده و شرایط محیطی تونل خشک باشد، استفاده می‌شود.



شکل ۲-۳ روش حفاری مرحله‌ای با ستون‌های میان

۲-۳ جمع‌بندی

روش‌های مختلفی در جهت کاهش نشست‌های سطحی در اثر حفر تونل ارائه شده است که انتخاب هر کدام از این روش‌ها نقش به‌سزایی در عملکرد تونل در جهت کنترل جابه‌جایی‌های قائم را به ما ارائه می‌کند. با پیشرفت تکنولوژی، این روش‌ها در جهت هر چه مکانیزه‌تر شدن عمل می‌کند که می‌تواند برای پیش‌بینی هر چه صحیح‌تر نشست‌ها و قابل کنترل شدن آن‌ها بسیار مفید باشد.

فصل سوم

بررسی تأثیر حفاری زیرزمینی بر

نشست سطحی

۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به تعریف نشست و بررسی روش‌های برآورد آن و انواع آزمایش‌ها می‌پردازیم و پس از آن مروری بر مطالعات انجام شده در این زمینه خواهیم داشت.

۳-۲ نشست سطح زمین در اثر حفر تونل

با توجه به تعارف ارائه شده، نشست عبارت است از فرو رفتن سطح زمین در اثر وجود فضای خالی در زیر زمین که به طور معمول این اصطلاح به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با حرکت اندک افقی همراه باشد گفته می‌شود. ایجاد فضای خالی بر اثر عوامل مختلف طبیعی و یا عملیات انسانی صورت می‌گیرد و ارتباط بین نشست سطح زمین و تونل وابسته به فاکتورهایی چون شناخت زمین، ژئوتکنیک خاک، شناسایی آب، هندسه و عمق تونل، روش حفاری، کیفیت و مهارت‌های فنی می‌باشد [Baziar,(2014)].

۳-۳ برآورد نشست

یکی از آثار مهم و البته غیر قابل اجتناب حفاری تونل‌ها، جابه‌جایی و حرکات زمین است. حفاری تونل، باعث آزادسازی تنش‌های منطقه می‌شود که فقط با استفاده از سیستم نگه‌داری مناسب می‌توان از آن استفاده نمود. از آن جایی که نمی‌توان با یک سیستم نگهداری خیلی صلب به طور کامل از جابه‌جایی‌ها جلوگیری کرد؛ لذا در هر صورت میزان مشخصی جابه‌جایی خواهیم داشت. در نتیجه زنجیره‌ای از جابه‌جایی‌ها از تونل تا سطح زمین به وجود می‌آید. این نشست‌ها با کمتر شدن عمق تونل، اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد. از دلایل نشست زمین به سه دلیل عمده می‌توان اشاره کرد (عطایی، ۱۳۸۴).

۱- نشست کوتاه مدت زمین ناشی از حفر تونل: این نشست تابعی از پایداری سینه‌ی کار تونل، نرخ پیش‌روی، زمان مورد نیاز جهت نصب سیستم نگهداری و زمان لازم برای پر کردن فضای خالی انتهای ماشین تونل‌زنی (در حفاری مکانیزه) است. نشست کوتاه مدت، در یک فاصله‌ی معینی از جلو سینه‌ی کار شروع شده و با نصب نگهداری مناسب، متوقف می‌شود.

۲- نشست ناشی از تغییر شکل سیستم نگهداری: این نوع نشست مربوط به تونل‌ها با قطر زیاد و حفر شده در نواحی کم عمق است.

۳- نشست بلند مدت زمین: این نوع نشست در اثر دو عامل به وجود می‌آید. تحکیم اولیه که به طور معمول در خاک‌های چسبنده و متراکم در اثر کاهش فشار آب منفذی رخ می‌دهد و تحکیم ثانویه که نوعی خزش در خاک است (عطایی، ۱۳۸۴).

جهت برآورد نشست روش‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند. به طور کلی این روش‌ها به سه دسته‌ی روش‌های تجربی، روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های عددی تقسیم می‌شوند:

۳-۳-۱ آزمایش‌های بزرگ مقیاس

در رابطه با موضوع حفر تونل، عموماً از برداشت‌ها و اندازه‌گیری‌های انجام شده در محل پروژه‌های مختلف حفاری، به عنوان آزمایش‌های بزرگ مقیاس یا مشاهدات تجربی نام برده می‌شود. با انجام این اندازه‌گیری‌ها مجموعه‌ای از اطلاعات فراهم می‌شود که با استفاده از آن‌ها روابط تجربی حاکم بر شرایط آزمایش به دست می‌آیند و یا تنها برای کنترل مقادیر مجاز جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌ها به کار می‌روند. این اطلاعات با استفاده از ابزارنگاری‌های دقیق و گسترده به دست می‌آیند.

استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس و اندازه‌گیری‌های در محل، با توجه به نیاز به امکانات و هزینه‌ی بالا، در تعداد کمی از پروژه‌های حفاری تونل انجام می‌شود که عموماً نیز توسط سازمان‌های بزرگ دولتی و خصوصی اجرا شده و نتایج حاصل از آن‌ها به راحتی در اختیار پژوهشگران قرار نمی‌گیرد.

۳-۳-۲ آزمایش‌های کوچک مقیاس

در آزمایش‌های کوچک مقیاس از مدل‌های ساده‌سازی شده استفاده می‌شود. با استفاده از این آزمایش‌ها می‌توان داده‌هایی برای به دست آوردن روابط تحلیلی فراهم ساخت. آزمایش‌های زیادی برای بررسی اندرکنش تونل، خاک و یا پی‌های سطحی به این شیوه انجام شده و مدل‌های متفاوتی در مراکز مختلف تحقیقاتی ساخته شده است. ساخت این قبیل مدل‌های آزمایشگاهی گاهی بسیار زمان‌بر بوده و نیاز به دقت زیادی دارند تا بتوان نتایج حاصل از این آزمایشات را منطبق بر واقعیت دانست.

۳-۴ شبیه‌سازی‌های عددی

شبیه‌سازی‌های عددی بر روابط ریاضی استواراند و قوانین فیزیکی حاکم بر رفتار تونل و خاک اطراف آن را توصیف می‌کنند. این روش‌ها در شبیه‌سازی مدل‌های رفتاری گوناگون خاک و ویژگی‌های هر مدل توانمند هستند. در آن‌ها رفتار هر جزء، مسئله و ویژگی‌های مواد سازنده‌اش در نظر گرفته می‌شوند. شبیه‌سازی عددی در دهه‌های گذشته مورد استفاده بوده است، اما در سال‌های اخیر با گسترش رایانه‌ها و در دسترس قرار گرفتن برنامه‌های شبیه‌سازی، کاربرد بیشتری پیدا کرده است. استفاده از رایانه در شبیه‌سازی عددی، انجام محاسبه‌های پیچیده و طولانی را ممکن و دقت آن‌ها را بالا برده است.

مزیت اصلی شبیه‌سازی‌های عددی پایین بودن هزینه انجام پژوهش‌ها با استفاده از این روش است. هم‌چنین انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس و کوچک مقیاس در برخی زمینه‌ها (مانند تونل‌سازی) به سادگی و در نبود حمایت سازمان‌های بزرگ قابل انجام نیست. مجموعه این عوامل استفاده از شبیه‌

سازی‌های عددی در بررسی پدیده‌ای مانند اندرکنش تونل - خاک را به بهترین گزینه تبدیل می‌کند. بر این اساس در پژوهش حاضر از مدل‌سازی‌های عددی برای بررسی اثر حفر تونل بر رفتار پی نواری سطحی استفاده کرده‌ایم. در ادامه‌ی این فصل به مرور تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌پردازیم.

۳-۵ تحقیقات انجام شده

تحقیقات انجام شده در حدود سال‌های ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۴، در دانشگاه ایالت پنسیلوانیا را می‌توان به عنوان اولین پژوهش‌ها در زمینه‌ی تأثیر حفر تونل بر رفتار نشست سطحی معرفی کرد. دو پژوهش مهم در این دانشگاه، اولی در سال ۱۹۸۳ (Badie A, 1983) و بعدی در سال ۱۹۸۴ (Wang, 1984) توسط وانگ و بدیع انجام شده است. در مقاله‌ی حاصل از پژوهش اول (۱۹۸۳)، خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در گذشته توسط سایر محققین آورده شده است. این تحقیق مروری بر کارهای اتکینسون^۱ و همکارانش (۱۹۷۳ تا ۱۹۷۷) داشته که در آن‌ها پایداری تونل سطحی دایره‌ای در خاک غیرچسبنده مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین دیویس^۲ و همکارانش (۱۹۸۰) به بررسی پایداری تونل‌های سطحی در خاک چسبنده پرداخته‌اند. تحقیقات مذکور تأثیر تغییر شکل خاک بر پایداری تونل را بررسی نکرده‌اند. با استفاده از روش اجزا محدود می‌توان این اثر را در تحلیل اعمال کرد. این روش به وسیله قابوسی^۳ و همکارانش برای آنالیز نشست بالای تونل‌های قرار گرفته در خاک نرم (۱۹۷۹) و هم‌چنین برای شبیه‌سازی اجرای یک تونل فاضلاب بر روی یک تونل متروی از قبل احداث شده (۱۹۸۳)، مورد استفاده قرار

^۱ Wang & Badie

^۲ Atkinson

^۳ Davis

^۴ Ghaboussi

گرفته است. به عنوان یک مرجع تحقیق در این زمینه، به پژوهش باس^۱ (۱۹۷۸) در پایداری پی نواری قرار گرفته روی حفره‌ی زیرزمینی پیوسته و هم‌مرکز با آن، با روش اجزا محدود اشاره شده است. در تحقیق مذکور از مقایسه‌ی نتایج برنامه کامپیوتری اجزا محدود و مدل آزمایشگاهی، برای صحت سنجی برنامه‌ی کامپیوتری استفاده شده است. بر اساس نتایج باس، وانگ و باس^۲ (۱۹۸۰) رفتار نشست سطحی روی یک تونل را آنالیز کردند. آن‌ها روابط بین ظرفیت باربری، اندازه و موقعیت حفره را گسترش دادند. در این‌جا لازم است یادآوری کنیم که علاوه بر تحقیقات مذکور، که همگی با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری و روش اجزا محدود بوده؛ تحقیقاتی نیز توسط سایر محققین از جمله پک^۳ (۱۹۶۹)، کلود و اسمیت^۴ (۱۹۸۱) و یانگ^۵ و همکارانش (۱۹۹۵) با استفاده از روش‌های تحلیلی و مشاهدات تجربی انجام و منجر به ارائه‌ی روابطی تجربی، به منظور پیش‌بینی تغییر شکل زمین در اثر حفر تونل شده است.

(Chen. and Kuo, 2011) به عنوان بخشی از ادامه‌ی مطالعه و تحقیق در این موضوع، در پژوهش‌های انجام شده توسط وانگ و بدیع، اثر تونل زیرزمینی بر رفتار سطحی بر روی زمین متراکم مورد بررسی قرار گرفته است (Badie A, 1983). این بررسی در شرایط مختلف از جمله شکل پی (پی نواری و مستطیلی^۶)، شکل تونل (دایره‌ای پیوسته و مکعبی^۷)، جهت‌گیری تونل در مقایسه با محور پی نواری (موازی و عمود) و محل قرارگیری تونل انجام گرفت. در هر دو پژوهش، خاک در نظر گرفته شده یک نوع کائولین است که به نام EPK^۸ شناخته می‌شود. این خاک براساس طبقه‌بندی‌های یونیفاید و

^۱ Baus

^۲ Wang & Baus

^۳ Peck

^۴ Cloud & Schmidt

^۵ Yang

^۶ Square & strip footings

^۷ continuous circular & cubic voids

^۸ Edgar Plastic Kaolin

آشتو^۱ به ترتیب از نوع MH و A-7-5 است. هم‌چنین رفتار خاک به صورت ارتجاعی - خمیری کامل^۲ و منطبق بر معیار گسیختگی دراگر- پراگر^۳ در نظر گرفته شده است. این پژوهش‌ها شامل یک تحلیل تئوری و یک مدل آزمایشگاهی بوده‌اند. تحلیل تئوری با استفاده از یک برنامه‌ی کامپیوتری سه بعدی اجزا محدود انجام گرفته است. از نمونه آزمایشگاهی برای صحت سنجی و اعتبار بخشی به برنامه‌ی کامپیوتری استفاده شده است. به منظور اعمال رفتار غیر خطی^۴ خاک، در آنالیز کامپیوتری، ابتدا یک افزایش بار ۲۰ درصدی از بار کل بر روی سطح وارد شده است. در گام‌های بعدی افزایش بار به مقدار ۱۰٪ بار کل کاهش یافته و زمانی که خاک به شرایط گسیختگی رسیده، این کاهش به ۲٪ بار کل رسیده است. علاوه بر این در هر افزایش بار، پروسه‌های تکرار در محاسبات انجام می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، پی سطحی تحلیل شده بر روی یک حفره^۵ قرار گرفته و تحت یک بار استاتیکی که در مرکز آن وارد می‌شود، قرار دارد. T و d, w, e, D, D_f, B به ترتیب عرض پی، عمق پی، عمق حفره، خروج از مرکزیت حفره نسبت به محور پی، قطر حفره (یا عرض حفره‌ی مکعبی)، عمق سنگ بستر از زیر حفره و عمق سنگ بستر از زیر پی هستند.

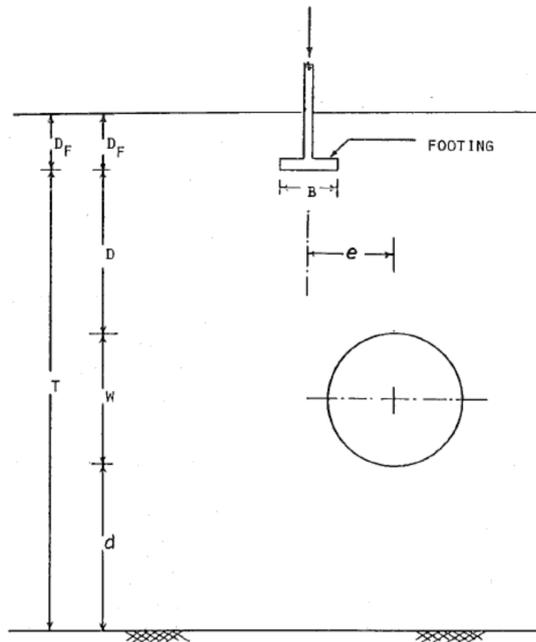
^۱ Unified & AASHTO

^۲ elastic perfectly plastic

^۳ Drucker and Prager

^۴ nonlinear

^۵ void



شکل ۳-۱ تصویر شماتیک سیستم پی - خاک - حفره

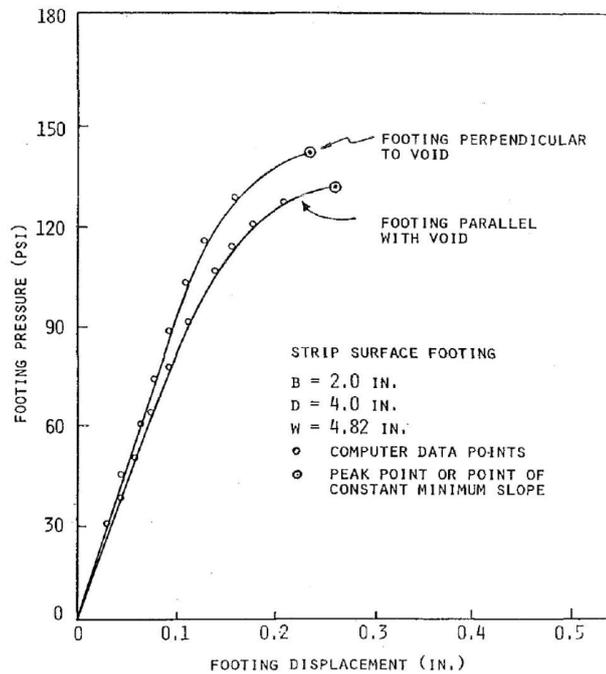
موارد بررسی شده در این پژوهش شامل: (۱) پی نواری موازی با حفره دایره‌ای پیوسته و در دو حالت هم محور و خارج از محور حفره (۲) پی نواری عمود بر محور حفره دایره‌ای پیوسته (۳) پی مربعی هم مرکز با حفره مکعبی (۴) پی نواری و مربعی بدون حفره است.

نتایج حاصل از آنالیزها، روابط بین فشار روی پی و جابه‌جایی قائم را به دست می‌دهند. ظرفیت باربری خاک برای هر کدام از شرایط آنالیز شده، از نقطه‌ای که در آن شیب منحنی‌های فشار- جابه‌جایی کمترین مقدار را دارد به دست آمده است. مقادیر ظرفیت باربری در پی‌های همراه با حفره، به صورت درصدی از شرایط بدون حفره بیان شده است. هم‌چنین اندازه و موقعیت حفره و ضخامت لایه‌ی خاک در ترکیب با عرض پی به صورت ضرایب بدون بعد در آمده‌اند. نتایج بررسی نشان داد که برای یک پی مربعی

یا نواری قرار گرفته بالای یک حفره دایره‌ای پیوسته که محور طولی آن موازی محور پی است، ظرفیت باربری، با تغییر موقعیت حفره تغییر می‌کند.

هم‌چنین برای یک نسبت ثابت خروج از مرکزیت به عرض پی (e/B)، ظرفیت باربری با کاهش نسبت عمق حفره به عرض پی (D/B) کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشاهده می‌شود ظرفیت باربری با افزایش عمق فونداسیون، افزایش می‌یابد. برای یک نسبت D/B ثابت، ظرفیت باربری همراه با کاهش e/B ، کم می‌شود و در $e/B=0$ به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد.

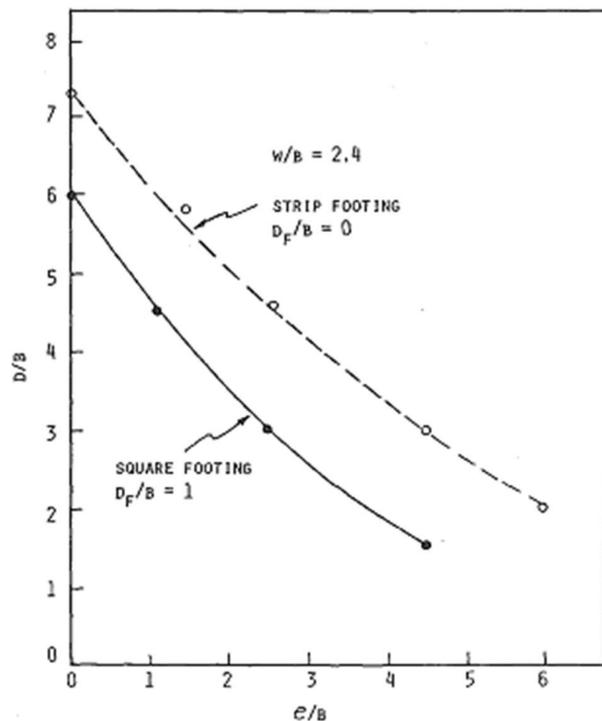
تأثیر جهت حفره پیوسته نسبت به محور پی نواری واقع در سطح، در دو حالت موازی و عمود بر هم مورد بررسی قرار گرفته است. در حالتی که حفره، عمود بر محور پی است، مشاهده شده منحنی فشار-جاب‌جایی دارای شیب تندتر بوده و ظرفیت باربری در این حالت بیشتر است. شکل ۲-۳ منحنی فشار-جاب‌جایی را برای پی نواری سطحی در دو حالت عمود و موازی با محور حفره‌ی دایره‌ای پیوسته نشان می‌دهد (Badie A, 1983).



شکل ۳-۲ منحنی فشار - جابه جایی پی سطحی در دو حالت عمود و موازی با حفره‌ای دایره‌ای پیوسته (Badie A, 1983)

نتایج حاصل از این پژوهش، نشان می‌دهد که یک عمق بحرانی^۱ وجود دارد و تنها زمانی که تونل زیرزمینی بالاتر از این عمق قرار گیرد، بر رفتار سطح تأثیر خواهد گذاشت. عمق بحرانی به عوامل زیادی از جمله شکل پی، شکل حفره، جهت‌گیری حفره، اندازه‌ی حفره و نوع خاک بستگی دارد. شکل ۳-۳ نمودار این عمق بحرانی را برای پی‌های سطحی نشان می‌دهد.

^۱ critical depth



شکل ۳-۳ عمق بحرانی حفره‌ی پی‌oste در زیر پی سطحی (Badie A, 1983)

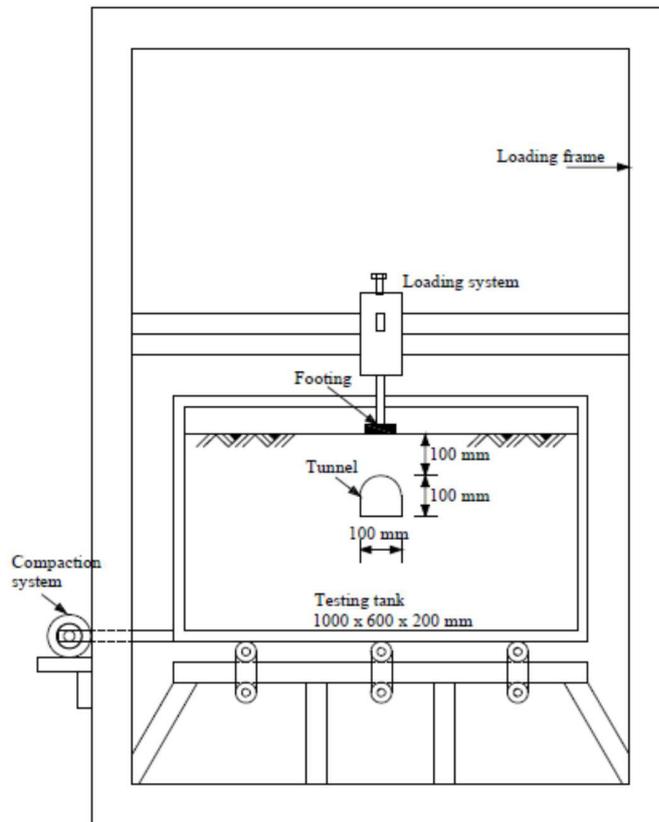
۳-۶ بررسی عددی تأثیر عرض پی در تحلیل برهم کنش تونل- پی سطحی

نبیل نقی^۱ در پژوهشی در سال ۲۰۰۹ برهم کنش تونل- پی سطحی و تأثیر آن از تغییرات عرض پی را مورد بررسی قرار داده است (Nagy N. M, 2009). در این پژوهش، سیستم پی- خاک- تونل به کمک نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور صحت سنجی پروسه عددی و مدل‌سازی مصالح، یک مقایسه بین مدل و نمونه‌ی نسبتاً کوچک آزمایشگاهی انجام شده است.

^۱ Nabil M. Nagy

تئوری نشست خاک، بر روی خاک هموزن ماسه‌ای و رسی ارائه شده و سپس به منظور وارد کردن تأثیر پارامترهای دیگر از جمله شکل پی و شرایط بارگذاری، گسترش داده شده است. با توجه به این موضوع، قابل ذکر است که این تئوری را نمی‌توان در شرایطی که خاک دارای حفره یا تونل است به کار برد.

نمونه‌ی آزمایشگاهی استفاده شده در این پژوهش، شامل یک تانک به ابعاد داخلی 1050 mm (طول)، 200 mm (عرض) و 600 mm (عمق) است. شکل ۳-۴ تصویری از این تانک و سیستم بارگذاری مورد استفاده را نشان می‌دهد. بار استاتیکی به وسیله‌ی یک دستگاه بارگذاری با تقویت ۱:۱۰، اعمال و تغییر شکل و کرنش در تاج و دیواره‌های تونل اندازه‌گیری و در وسط پوشش تونل انجام می‌شوند. همچنین سه گیج کرنش سنج درست در همان نقاط، اما بیرون از تونل، برای اندازه‌گیری کرنش نصب شده‌اند. گیج‌ها قبل از جاگذاری تونل داخل تانک، روی آن نصب شده و قرائت اولیه آن‌ها ثبت می‌شود. در هر افزایش بار، تغییر شکل و کرنش قرائت می‌شوند. بارگذاری به صورت گام به گام است و تا زمانی که خاک یا تونل دچار گسیختگی شوند ادامه می‌یابد.



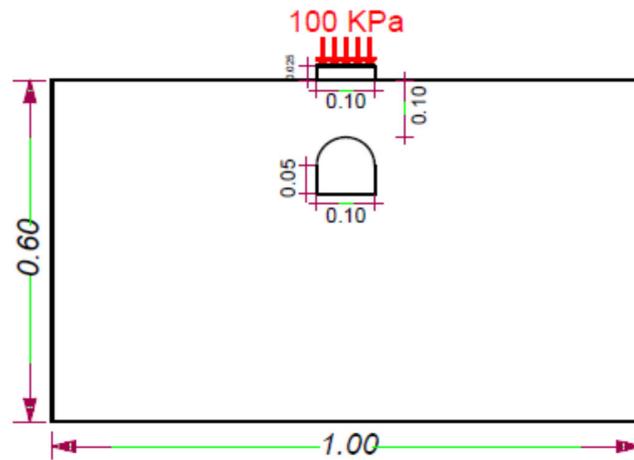
شکل ۳-۴ تصویری شماتیک از نمونه‌ی آزمایشگاهی

در این پژوهش هم‌چنین از یک مدل عددی نعل اسبی^۱ که درست مانند نمونه‌ی آزمایشگاهی در خاک ماسه‌ای قرار گرفته، برای مدل‌سازی تونل استفاده شده است. در این برنامه خاک به صورت غیر کشسان^۲ مور-کلمب و پوشش تونل و پی به صورت الاستیک خطی^۳ مدل شده است. ابعاد مدل مطابق شکل ۳-۵ است.

^۱ Horseshoe-shaped

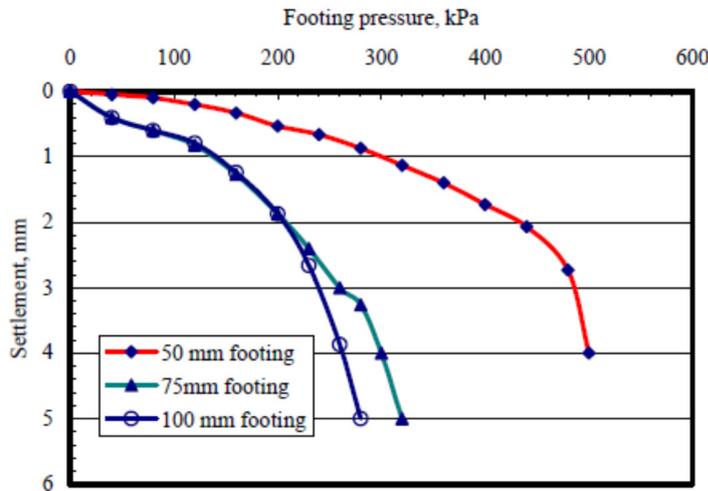
^۲ inelastic

^۳ Linear elastic



شکل ۳-۵- ابعاد مدل عددی

در این مدل یک بار خارجی افزایشی بر روی پی اعمال می‌شود. فشار از صفر تا 50.0 kPa و با گام‌های 10.0 کیلو پاسکالی افزایش می‌یابد. پوشش تونل به صورت استیل گالوانیزه و با ضخامت 0.35 mm (t) مدل شده است. ارتفاع داخلی و عرض تونل هر دو 100 mm در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش عرض تونل ثابت در نظر گرفته شده و سه مدل عددی برای عرض‌های 50 ، 75 و 100 mm پی ساخته شده است. به دلیل تقارن و هم مرکز بودن پی و تونل، اندازه‌گیری‌ها در تاج و یکی از دیوارهای تونل انجام شده است. شکل ۳-۶ نشست را به صورت تابعی از فشار اعمال شده بر پی و در سه عرض متفاوت نشان می‌دهد. بر اساس شکل در یک عرض و عمق ثابت برای تونل، هر افزایشی در عرض پی، باعث افزایش نشست پی خواهد شد (Nagy N. M, 2009).



شکل ۳-۶ نمودار نشست سطحی در مقابل فشار وارد بر پی

۳-۷ مطالعه‌ی تأثیر حفاری تونل‌های شهری بر سازه‌های سطحی

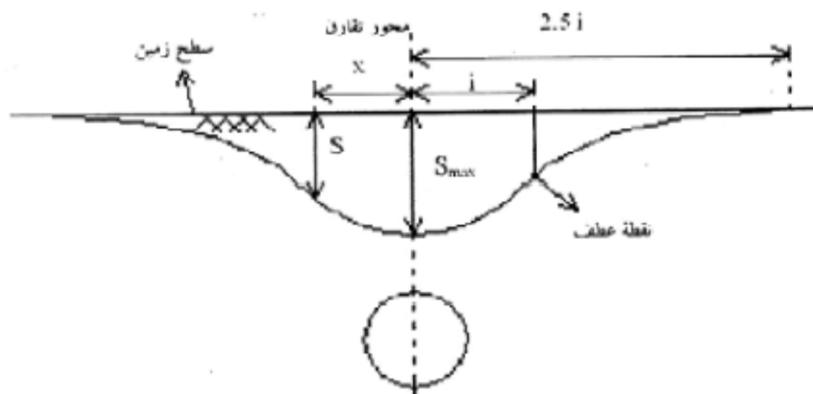
محمد صالح صالحی و سعید ابریشمی در پژوهشی (۱۳۹۰)، مسأله‌ی اندرکنش تونل - خاک - سازه‌های سطحی را در شرایط استاتیکی به صورت عددی، با روش اجزا محدود و با استفاده از نرم افزار Plaxis مدل سازی کرده‌اند (صالحی م. ص. و ابریشمی س، ۱۳۹۰). آن‌ها تأثیر عواملی نظیر تراکم خاک، عمق، قطر و ضخامت پوشش تونل و میزان سربار سطحی بر مسئله را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در نهایت و بر اساس تحلیل نتایج به دست آمده و پردازش این نتایج، ثوابت رابطه‌ی پیشنهادی پک^۱ را که یکی از مهم-ترین و پرکاربردترین رابطه‌ها در این زمینه می‌باشد، به دست آورده‌اند.

بسیاری از محققین از این تابع‌نمایی ارائه شده توسط پک (۱۹۶۹)، (رابطه ۳-۱) که یک رابطه‌ی تجربی است، برای تعیین منحنی گودی نشست ناشی از حفاری تونل (شکل ۳-۷) استفاده می‌نمایند.

^۱ Peck

$$S_x = S_{\max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1-3)$$

در این رابطه، S_x نشست در فاصله‌ی x از محور تقارن مسئله، S_{\max} حداکثر نشست در محور تونل و i فاصله نقطه‌ی عطف گودی نشست تا خط مرکزی تونل است. تحقیقات متفاوتی جهت تعیین پارامترهای این رابطه صورت گرفته است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Matlab و برازش منحنی، مقدار ثوابت این رابطه برای شرایط مختلف محاسبه گردیده است.



شکل ۳-۷ منحنی گودی نشست در اثر حفر تونل

شرایط کرنش مسطح در این تحلیل فرض شده که امکان مدل‌سازی و تحلیل دوبعدی را فراهم می‌سازد. از المان‌های ۱۵ گرهی برای مش‌بندی استفاده شده است. با توجه به قرارگیری دو نوع مصالح متفاوت در کنار یکدیگر، المان‌های سطح مشترک با مشخصات مقاومتی ۰.۶۶ مشخصات خاک، در مرز بتن پوشش تونل و خاک استفاده شده است.

جنس مصالح خاکی، دانه‌ای و رفتار آن‌ها الاستو پلاستیک مور-کلمب فرض شده است. جهت بررسی تأثیر مشخصات خاک بر مسئله، سه تراکم مختلف سست، متوسط و متراکم با مشخصات ذکر شده در

جدول ۱-۳ برای خاک انتخاب شده است. هم‌چنین چسبندگی خاک‌های دانه‌ای با توصیه راهنمای نرم-افزار Plaxis 2D برابر ۰.۲kPa در نظر گرفته شده است.

جدول ۱-۳ مشخصات خاک ماسه‌ای با سه تراکم متفاوت

تراکم خاک			واحد	مشخصات خاک	
مقاوم	متوسط	سست		شناسه	نام
۱۸	۱۶/۵	۱۵	kN/m ³		وزن مخصوص مرطوب
۲۰	۱۸/۵	۱۷	kN/m ³		وزن مخصوص اشباع
۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۳۰	-		ضریب پواسون
۵۰۰۰۰	۳۴۰۰۰	۱۸۰۰۰	kPa	E	مدول الاستیسیته
۰/۲	۰/۲	۰/۲	kPa	C	چسبندگی
۳۶	۳۲	۲۸	درجه		زاویه اصطکاک داخلی
۶	۰	۰	درجه		زاویه اتساع
۰/۵	۱/۰	۱/۳	%	V ₁	نسبت انقباض حجمی

یکی از موارد اصلی مورد بررسی در این پژوهش "نشست سطح زمین" است که نتایج به دست آمده حاصل تحلیل تغییر پارامترهایی از جمله تراکم خاک، قطر تونل، عمق قرارگیری تونل و غیره می‌باشد.

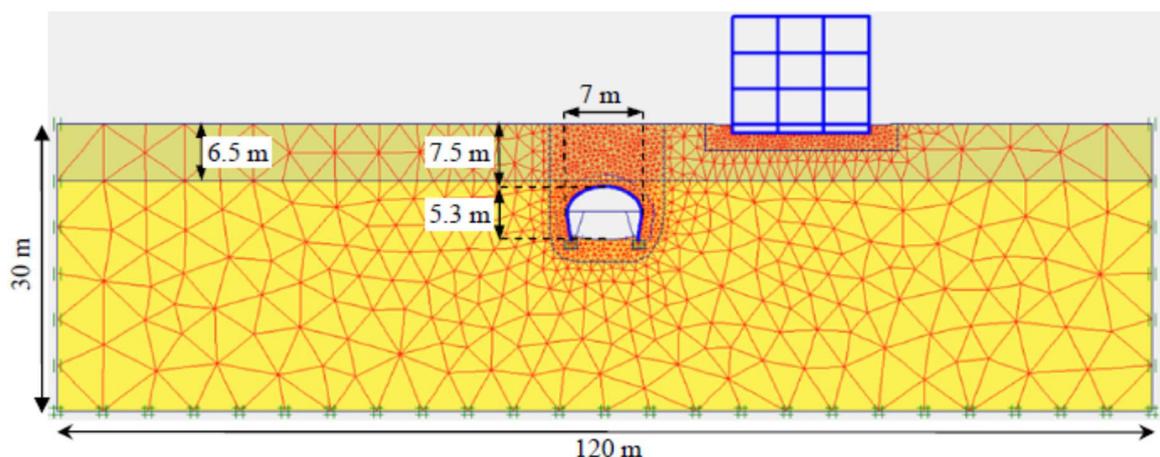
۳-۸ تحلیل و بررسی تأثیر حفاری تونل‌های شهری^۱ بر سازه‌های اطراف

تونل امداد مشهد در حد فاصل بیمارستان امام رضا (ع) و بیمارستان قائم (عج) طراحی و اجرا گردیده است. این تونل در عمق ۷.۵ متری از سطح و در زمین نرم اجرا شده است. حفر تونل در خاک نرم و در مناطق شهری با مشکلات تأمین پایداری تونل و ساختمان‌های مجاور در زمان حفاری و بهره‌برداری روبه‌رو است؛ لذا علی‌غفاری سرجامی و سعید ابریشمی (۱۳۹۱) در پژوهشی به بررسی اثرات حفاری تونل

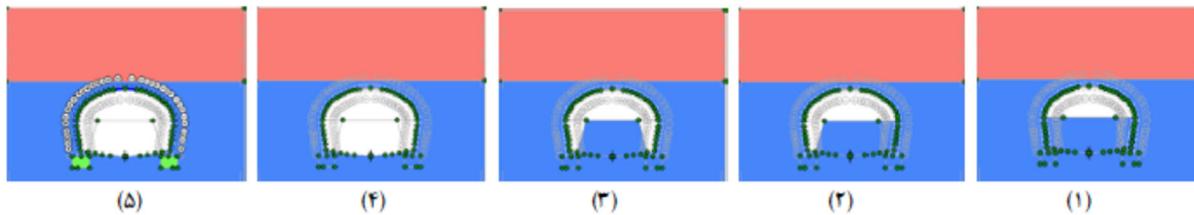
^۱ New Austrian Tunneling Method

امداد به روش NATM و اندرکنش بین سازه‌های سطحی و تونل به کمک مدل‌سازی عددی پرداخته‌اند (غفاری سرجامی ع. و ابریشمی س، ۱۳۹۱). بدین منظور تأثیر تقدّم و تأخّر در احداث تونل و سازه‌های سطحی و فاصله‌ی سازه‌ها از تونل بر نشست حداکثر زمین و نیروهای پوشش آن مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور بخشی از تونل امداد مشهد به روش NATM حفر گردیده و سازه‌های اطراف آن شبیه سازی شده است. ابتدا مدل عددی با فرض عدم وجود سازه‌های اطراف تحلیل و با طرح اصلی تونل مقایسه شده است که نتایج حاصله، مؤید صحت و دقت مدل می‌باشد. سپس تأثیر ساختمان‌های اطراف بر تونل با تغییر فاصله‌ی سازه از آن در دو حالت وجود ساختمان‌ها قبل از حفر تونل و احداث ساختمان‌ها بعد از حفر آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

نرم‌افزار اجزا محدود Plaxis 2D برای ساخت مدل عددی انتخاب شده است. تونل امداد مشهد با مقطع نعل اسبی به عرض دهانه ۷ متر و ارتفاع ۵.۳ متر در عمق ۷.۵ متر از سطح زمین شبیه سازی شده است (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸ هندسه، مش‌بندی و شرایط تکیه‌گاهی مدل عددی تونل امداد و سازه‌های اطراف



شکل ۳-۹ مراحل اجرای تونل امداد به روش NATM

در این پژوهش و با توجه به مطالعات انجام شده قبلی، تحلیل‌ها با دو مقدار $\sum Mstage$ برابر ۰.۵ و ۰.۷ جهت ساخت مرحله‌ای انجام شده است. از مدل ساخته شده، جهت مطالعه‌ی اندرکنش ساختمان‌های مجاور و تونل امداد در دو حالت زیر استفاده شده است:

الف) وجود ساختمان‌ها پیش از حفر تونل (شرایط A)

ب) احداث ساختمان‌ها پس از حفر تونل (شرایط B)

تغییرات نشست در برابر فاصله‌ی سازه از تونل و تغییرات نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی پوشش آن مورد بررسی قرار گرفته است (غفاری سرجامی ع. و ابریشمی س، ۱۳۹۱).

۳-۸ بررسی اندرکنش خاک - سازه در اثر حفر تونل و باربرداری

رولف کاتزنباخ^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در مقاله‌ای (Katzenbach R, 2013) نتایج حاصل از مشاهدات و اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده در دو پروژه‌ی بزرگ در آلمان و اسپانیا را ارائه کردند. اولین مورد، تونل قطار سریع‌السیری بود که از مرکز شهر بارسلونا می‌گذشت. این تونل با قطر ۱۱.۵۵m از نزدیکی دو ساختمان بزرگ و مهم که جز میراث جهانی یونسکو هستند، می‌گذرد. پروژه‌ی دوم مربوط به تخریب یک ساختمان ۱۴ طبقه در فرانکفورت آلمان است. در زیر این ساختمان یکی از ایستگاه‌های

^۱ Rolf Katzenbach

سیستم متروی شهر و تونل‌های منتهی به آن قرار دارد. این مقاله به بررسی اندازه‌گیری‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی^۱ انجام شده بر روی تأثیر پارامترهای هندسی مثل عمق قرارگیری تونل و پارامترهای اجرایی مثل سرعت پیشروی حفاری پرداخته است. در طی این پژوهش اطلاعات جدیدی در مورد وابستگی ظرفیت باربری و تغییر شکل خاک به زمان به‌دست آمده؛ به ویژه اگر یک فاصله زمانی زیاد بین تخریب (باربرداری) و ساخت مجدد سازه‌ای دیگر (بارگذاری مجدد) وجود داشته باشد.

۱-۳-۱۱ جمع‌بندی

تحقیقات انجام شده پیشین در رابطه با موضوع تأثیر حفر تونل بر نشست سطحی، عموماً به بررسی حفاری‌های با مقطع دایره‌ای و استفاده از ابزار تمام مکانیزه و بر روی خاک‌هایی با مدل‌های رفتاری متفاوت پرداخته‌اند و اکثراً فاقد کنترل آن با مقادیر واقعی می‌باشند. به عنوان بخشی از مجموعه تحقیقات انجام شده در این زمینه، در ادامه و تکمیل تحقیقات پیشین، در این پژوهش در دو مدل دو و سه بعدی به بررسی تأثیر حفاری زیر زمینی با مدل‌های رفتاری متفاوت با نتایج ابزار دقیق در مطالعه‌ی موردی ایستگاه خط ۲ میدان شهدای مشهد پرداخته شده است.

^۱ Geotechnical & geodetic

فصل چهارم

روش اجزاء محدود

پیدایش روش اجزاء محدود^۱ به حل مسائل پیچیده‌ی الاستیسیته و تحلیل سازه‌ها در مهندسی عمران و هوا فضا برمی‌گردد. این روش حاصل کار الکساندر هرینیکوف^۲ (۱۹۴۱) و ریچارد کورانت^۳ (۱۹۴۲) می‌باشد. با این‌که روش کار این دو دانشمند کاملاً متفاوت بود، اما یک ویژگی مشترک داشت و آن تقسیم یک دامنه‌ی پیوسته (ماده) به یک سری زیردامنه (قطعات کوچکتر ماده) به نام المان (جزء) بود.

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود که به اختصار (FEM) نامیده می‌شود؛ روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی. اساس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند، است. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم این است که معادله‌ی ساده‌ای که از نظر عددی پایدار است - به این معنا که خطا در داده‌های اولیه و در حین حل آن قدر نباشد که به نتایج نامفهوم منتهی شود- به دست آید. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد و روش اجزا محدود یکی از بهترین آن‌ها است. این روش در حل معادلات دیفرانسیل جزئی روی دامنه‌های پیچیده (مانند وسائل نقلیه و لوله‌های انتقال نفت)، دامنه‌ی متغیر یا وقتی که نیاز به دقت بالا نباشد و یا اگر نتایج هم‌بستگی و یک‌نواختی کافی را نداشته باشند بسیار مفید می‌باشد. به عنوان مثال در شبیه‌سازی یک تصادف در قسمت جلوی ماشین، نیازی به دقت بالای نتایج در عقب ماشین نیست (Clough & Sweeney, 1989).

^۱ Finite Element Method (FEM)

^۲ A. Hrennikoff

^۳ R. Courant

برخی از فواید این روش به شرح زیر می‌باشد:

- قدرت روش اجزای محدود در انواع اندازه و مدل کردن سازه‌ها با هندسه‌ی دلخواه
 - قدرت روش در برخورد با بارگذاری دلخواه از جمله بارگذاری حرارتی
 - سازه‌ی اجزاء محدود شبیه به سازه‌ی واقعی است و پدیده‌ی مجزا و غیر قابل تصور نیست.
- روش‌های تقریبی مانند روش تفاضل محدود، تمام این ویژگی‌ها را ندارد و یا دارای ویژگی‌های محدودتری هستند.

به طور کلی مسائل مکانیک خاک را می‌توان از دو جنبه بررسی کرد:

- حل تحلیلی که عبارت از حل مسئله با نگاهی ویژه به حالت گسیختگی در توده‌ی خاک می‌باشد و شامل روش‌هایی چون تعادل و تحلیل حدی و روش خطوط مشخصه است.
- حل عددی که عبارت از حل معادلات حاکم بر مسئله به صورت تحلیلی و یا ریاضی به طور عمومی و یا با تکنیک‌ها و روش‌های عددی و به کمک نرم‌افزارهای کامپیوتری می‌باشد.

۴-۲ انواع مدل رفتاری

۴-۲-۱ مدل الاستیک خطی

ساده‌ترین رابطه بین تنش و کرنش، رابطه‌ی خطی معروف به قانون هوک می‌باشد. قانون هوک برای مواد با رفتار الاستیک خطی هم‌سان به کار می‌رود و اطلاع از پارامترهای مدول الاستیسیته، E و نسبت پواسون^۱، ν لازم می‌باشد.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (4-4)$$

^۱Poisson ratio

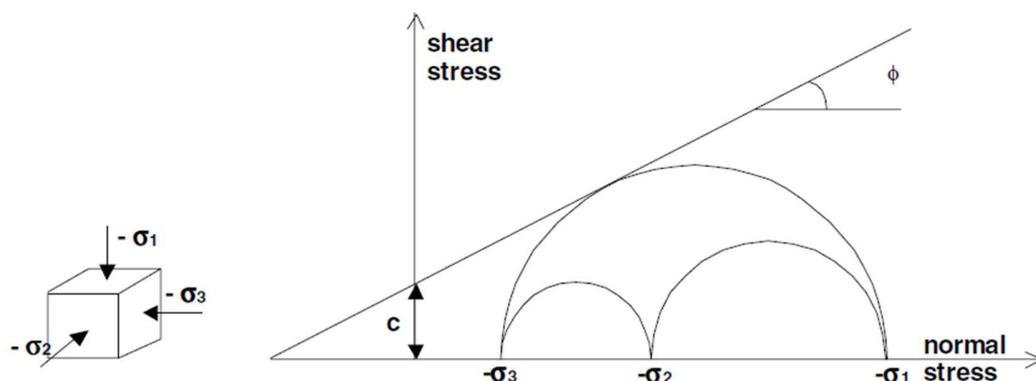
که σ تنش و ε کرنش می‌باشد. مدل الاستیک خطی برای مدل‌سازی رفتار سازه‌های حجیم و سخت واقع در خاک نظیر تیرها، ورق‌ها، مهار گره‌به‌گره، ژئوگرید، شمع مدفون و ... استفاده شده است [Brinkgreve, R. B. (2004)].

۴-۲-۲ مدل رفتاری موهر-کولمب^۱

مدل رفتاری موهر-کولمب یکی از مدل‌های رفتاری رایج در مدل‌سازی پروژه‌های ژئوتکنیکی می‌باشد. این مدل برای اولین بار به منظور نشان دادن رفتار سنگ و خاک ارائه گردید. این مدل رفتار مصالح را در محدوده‌ی قبل از گسیختگی الاستیک خطی فرض می‌کند، اما بعد از ایجاد، گسیختگی رفتار را پلاستیک کامل در نظر می‌گیرد. همچنین این مدل در قالبی ساده، رابطه‌ی خطی بین تنش برشی لحظه‌ی گسیختگی و تنش عمود بر سطح بر روی یک صفحه، به صورت زیر ارائه می‌کند:

$$\tau_f = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (۵-۴)$$

که در این رابطه τ_f تنش برشی، σ_n تنش قائم، C چسبندگی و φ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک می‌باشد.



شکل ۴-۱ دایره‌ی تنش مور به همراه پوش کولمب [Brinkgreve, R. B (2004)]

^۱ Mohr-coulomb model

در این مدل برای هر لایه یک سختی میانگین ثابت در نظر گرفته می‌شود و به همین دلیل محاسبات نسبتاً سریع انجام می‌گیرد و می‌توان یک تخمین نسبتاً دقیق از تغییر شکل‌ها قبل از گسیختگی پیدا کرد که پیشنهاد شده است که این مدل برای یک تحلیل اولیه از مسئله استفاده شود.

در این مدل، شرایط کاملاً پلاستیک به کمک سه تابع بر حسب تنش‌های اصلی می‌تواند تعریف شود]

گوهری م (۱۳۸۶):

$$f_1 = \frac{1}{2} |\sigma'_2 - \sigma'_3| - \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (۴-۶)$$

$$f_2 = \frac{1}{2} |\sigma'_3 - \sigma'_1| - \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (۴-۷)$$

$$f_3 = \frac{1}{2} |\sigma'_1 - \sigma'_2| - \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0 \quad (۴-۸)$$

پارامترهای اساسی مورد نیاز برای تعریف مدل موهر-کولمب شامل:

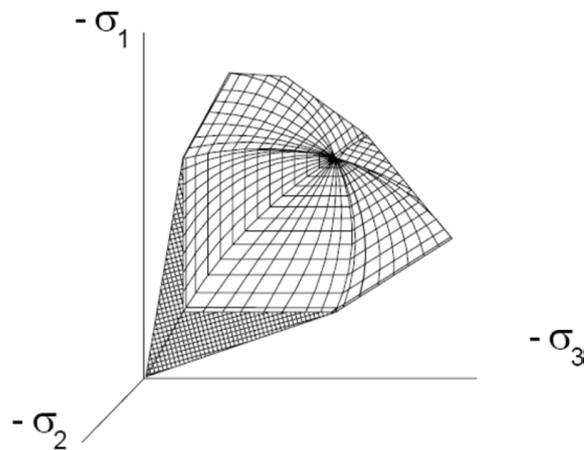
- ۱- سطح گسیختگی
 - زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک φ
 - چسبندگی خاک C
 - زاویه‌ی اتساع: خاک‌های رسی تمایل دارند که از خود اتساع نداشته باشند، یعنی $\psi = 0$
- است ولی در خاک‌های ماسه‌ای بستگی به زاویه‌ی اصطکاک و چگالی ماسه دارد. برای ماسه میزان اتساع برابر $30 - \varphi$ می‌باشد؛ در حالی که $30 < \varphi$ باشد، ψ صفر در نظر گرفته می‌شود.

۲- سختی خاک

- E مدول یانگ
- ν نسبت پواسون خاک

۴-۲-۳ مدل رفتاری خاک سخت شونده^۱

یک نوع مدل هیپربولیک الاستوپلاستیک است که بر مبنای اصطکاک پلاستیسیته سخت شونده فرمول‌بندی شده است. این مدل می‌تواند جهت شبیه‌سازی رفتار ماسه، شن و رس‌های پیش تحکیم یافته به کار رود. این مدل رفتار مصالح را در محدوده‌ی قبل از گسیختگی به صورت الاستیک غیرخطی (مدل هذلولی) در نظر می‌گیرد و در محدوده‌ی بعد از گسیختگی رفتار پلاستیک سخت شونده لحاظ می‌شود.



شکل ۴-۲ سطح تسلیم مدل رفتاری خاک سخت شونده [گوهری م (۱۳۸۶)]

مشخصات اصلی این مدل به صورت زیر خلاصه می‌شود [Schweiger, H(2002)]:

- سختی وابسته به تنش بر طبق قانون توان^۲ (وابستگی توانی سختی به تنش)
- رابطه هذلولی بین کرنش و تنش انحرافی برای مسیر تنش در آزمایش سه محوری
- تفکیک بارگذاری اولیه نسبت به باربرداری - بارگذاری مجدد

^۱ Hardening soil model

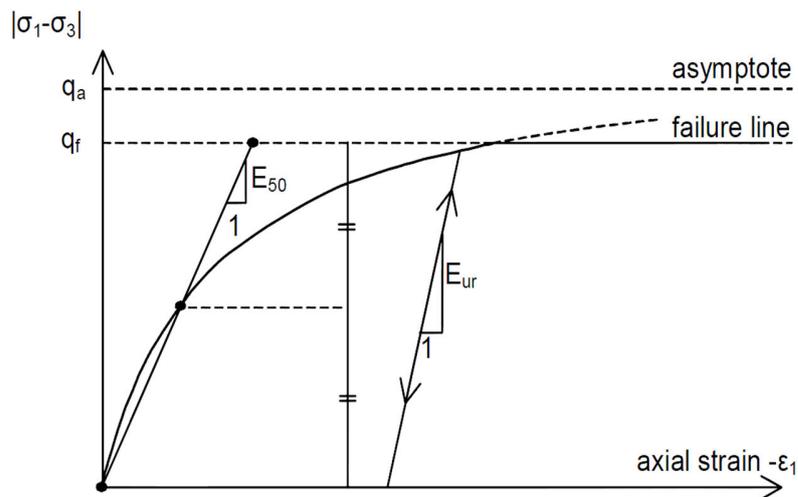
^۲ Power law

۴- گسیختگی بر طبق معیار موهر-کولمب

- پارامترهای اساسی در مدل خاک سخت شونده شامل:
 - پارامترهای گسیختگی شامل:
 - φ زاویه اصطکاک داخلی خاک
 - C چسبندگی خاک
 - ψ زاویه اتساع
 - پارامترهای سختی شبه هذلولی شامل:
 - E_{50}^{ref} سختی قطع کننده خط گسیختگی در آزمایش سه محوری استاندارد
 - E_{oed}^{ref} سختی مماسی برای بارگذاری اولیه ادنومتر
 - m پارامتر بیان کننده میزان وابستگی تنش سختی خاک
- پارامترهای پیشرفته‌ی مدل شامل:
- E_{ur}^{ref} سختی خاک در حالت باربرداری- بارگذاری مجدد
 - v_{ur} نسبت پواسون در حالت باربرداری- بارگذاری مجدد که در پیش فرض برنامه ۰/۲ می- باشد.
 - P^{ref} تنش مرجع برای در نظر گرفتن مقدار سختی
 - k_0^{nc} مقدار ضریب k_0 در حالت عادی تحکیم یافته که در پیش فرض برنامه $k_0^{nc} = 1 - \sin \varphi$ می باشد.
 - R_f نسبت گسیختگی می باشد که در پیش فرض برنامه ۰/۹ است.
 - $\sigma^{tension}$ تنش کششی مقاوم

• مقدار افزایش چسبندگی در عمق خاک $C_{increment}$

مدل خاک سخت شونده در مقایسه با مدل رفتاری موهر-کولمب وابستگی تنش به مدول سختی را در نظر می‌گیرد؛ یعنی این که سختی‌ها با افزایش فشار محصور کننده افزایش می‌یابد. به علاوه ارتباط بین تنش- کرنش را می‌توان به صورت شبه هذلولی مطابق شکل (۳-۴) نشان داد.



شکل ۳-۴ نسبت تنش - کرنش هذلولی در بارگذاری اولیه در آزمایش سه محوری استاندارد زه‌کشی شده]

[Brinkgreve, R. B. [(2004)

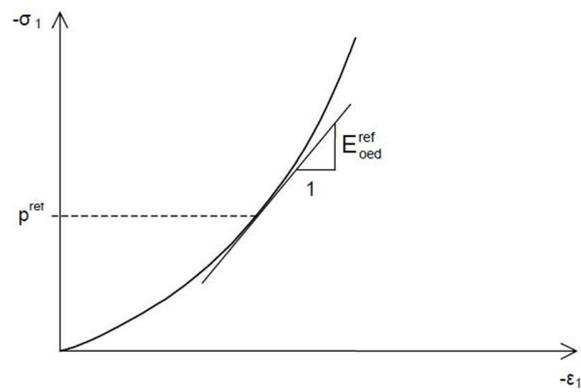
در مدل خاک سخت شونده مانند مدل رفتاری موهر-کولمب هنگامی که تنش به سطح گسیختگی می‌رسد، کرنش‌های پلاستیک کامل در آن روی می‌دهد؛ اما برخلاف مدل موهر-کولمب سطح تسلیم در این مدل در فضای تنش‌های اصلی ثابت نمی‌ماند. نکته‌ی قابل ذکر آن است که استفاده از مدل رفتاری خاک سخت شونده نسبت به مدل رفتاری موهر-کولمب نتایج دقیق‌تری دارد؛ علت آن هم، در نظر گرفتن سختی‌های متفاوت با توجه به فشار سربار در مدل رفتاری خاک سخت شونده است؛ ولی مدل رفتاری موهر-کولمب سختی را یکسان در نظر می‌گیرد. روابط (۳-۹ تا ۱۱) نحوه‌ی محاسبه ضرایب مدول سختی

مرتبط با تنش مرجع را نشان می‌دهند. همچنین شکل (۳-۴) مقدار E_{oed}^{ref} و نحوه‌ی ارتباط آن با p^{ref} را نشان می‌دهد.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{C \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{C \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (۹-۴)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{C \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{C \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (۱۰-۴)$$

$$E_{50} = E_{oed} \left[\frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \right] \quad (۱۱-۴)$$



شکل ۳-۴ نحوه‌ی محاسبه E_{oed}^{ref} در آزمایش تک محوری [Brinkgreve, R. B. (2004)]

برای تعیین پارامترهای سختی در این مدل، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$E_{50}^{ref} = \frac{1}{3} E_{ur}^{ref} = E_{oed}^{ref} \quad (۱۲-۴)$$

همچنین طبق تحقیقات به عمل آمده، پارامترهای مورد نیاز این مدل به طور معمول در آزمایشگاه‌ها حتی آزمایشگاه‌های تخصصی مکانیک خاک اندازه‌گیری و محاسبه نمی‌گردند و علاوه بر آن زمان

طولانی‌تری را در مرحله‌ی محاسبات می‌طلبد که این امر به خصوص در مدل‌سازی سه بعدی مشهودتر و ملموس‌تر می‌باشد [Brinkgreve, R. B. (2004)].

۴-۲ المان صفحه

صفحات، اجزاء سازه‌ای هستند که برای مدل‌سازی خمش دیوارهای حائل، پوشش‌های تونل و سازه‌های لاغر دیگر در این مدل اجزاء محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا از این المان‌ها برای مدل‌سازی سازه‌ی نگهبان و سازه‌ی اصلی در مدل‌سازی دو و سه بعدی استفاده گردیده است. در یک مدل هندسی دو بعدی، صفحات با خطوط آبی رنگ و در یک مدل سه بعدی این المان با رنگ دلخواه ظاهر می‌شود. در مدل‌سازی دو بعدی، صفحات از عناصری با سه درجه آزادی در هر گره، دو درجه آزادی جابه‌جایی U_1 و U_2 و یک درجه آزادی دورانی در صفحه $X-Y$ (Φ_z) تشکیل می‌شوند. وقتی که از المان‌های ۶ گرهی استفاده می‌شود، هر المان صفحه با ۳ گره معرفی می‌گردد؛ در حالی که برای المان‌های خاک ۱۵ گرهی، المان‌های صفحه ۵ گرهی استفاده می‌شود. لنگرهای خمشی و نیروهای محوری و برشی از تنش‌های به دست آمده در نقاط محاسبه‌ی تنش به دست می‌آیند. عناصر صفحه‌ی ۳ گرهی شامل دو جفت نقطه‌ی محاسبه‌ی تنش هستند؛ در حالی که عناصر صفحه‌ی ۵ گرهی شامل چهار جفت نقطه‌ی محاسبه‌ی تنش می‌باشند که هر جفت نقطه در فاصله $0.5d_{eq}\sqrt{3}$ از بالا و پایین خط مرکزی قرار داده می‌شوند. در مدل‌سازی سه بعدی نیز صفحات از اجزاء مثلثی ۶ گرهی با ۶ درجه آزادی در هر گره می‌باشند که ۳ درجه آزادی جابه‌جایی U_x ، U_y و U_z و سه درجه آزادی دورانی Φ_x ، Φ_y و Φ_z تشکیل می‌شوند. ماتریس سختی این المان براساس انتگرال‌گیری عددی با استفاده از سه نقطه انتگرال گاوس^۱ (نقاط

^۱ Gaussian integration points

تنش) به دست می‌آید که هر جفت در فاصله‌ی $0.167 d \sqrt{3}$ از بالا و پائین خط مرکزی قرار داده می‌شوند. در هنگام اتصال این المان به المان صفحه یا تیر دیگر اتصال صلب می‌باشد.

این مدل‌سازی، صفحات را بر اساس تئوری تیر میندلین^۱ انجام می‌دهد. بر اساس این تئوری، صفحات هم تغییرشکل ناشی از برش و هم تغییرشکل ناشی از خمش دارند. به علاوه، اجزاء می‌توانند هنگامی که نیروی محوری به کار می‌رود، تغییرطول دهند؛ لذا اگر لنگر خمشی و نیروی محوری حداکثر از یک مقدار تعریف شده‌ای بیشتر شوند، اجزاء حالت پلاستیک به خود می‌گیرند. رفتار الاستیک با استفاده از صلبیت خمشی EI و سختی محوری EA در واحد عرض در جهت خارج از صفحه تعریف می‌شود. با استفاده از این دو پارامتر، ضخامت معادل صفحه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (۱۳-۴)$$

در مدل‌سازی سه‌بعدی نیز ضخامت معادل از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{I}{A}} \quad (۱۴-۴)$$

سختی برشی^۲ واحد طول عمود بر صفحه‌ی تیر نیز از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$S_s = \frac{5EA}{12(1+\nu)} = \frac{5E(d_{eq} \times 1m)}{12(1+\nu)} \quad (۱۵-۴)$$

صفحات می‌توانند برای تحلیل دامنهی وسیعی از سازه‌ها استفاده شوند [Brinkgreve, R. (2010)]

.B

^۱ Mindlin

^۲ Shear stiffness

۴-۲ المان سطح مشترک^۱

المان‌های سطح مشترک، اساساً به وسیله‌ی مدل رفتاری موهر-کولمب شبیه‌سازی می‌شوند؛ یعنی در صورت استفاده از یک مدل بسیار پیشرفته برای مجموعه مصالح لایه‌دار، المان سطح مشترک تنها داده‌های مربوط به c ، φ ، ψ و E و ν را برای مدل موهر-کولمب برمی‌دارد. این المان‌ها برای در نظر گرفتن اندرکنش بین اجزای سازه‌ای و خاک مجاور می‌باشد. سطوح مشترک به وسیله‌ی علائم مثبت و منفی نشان داده می‌شوند. این علامت‌ها صرفاً برای شناسایی به کار برده می‌شوند و معنی خاص فیزیکی نداشته و تأثیر خاصی بر روی نتایج نیز ندارند [گوهری م (۱۳۸۶)].

یکی از کاربردهای خاص سطوح مشترک در حفاری در هنگام بررسی اثر متقابل دیواره (سازه نگهبان) و خاک می‌باشد تا حتماً بین یک سطح صاف و یک سطح کاملاً زبر تفاوت در نظر گرفته شود. در سطح مشترک برای باقی ماندن الاستیک، تنش برشی τ به صورت زیر می‌باشد:

$$|\tau| < \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (۴-۱۶)$$

و برای رفتار پلاستیک، τ به صورت زیر می‌باشد:

$$|\tau| = \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (۴-۱۷)$$

در روابط فوق φ_i و c_i زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی سطح مشترک هستند. مشخصات مقاومت سطح مشترک با مشخصات مقاومت لایه‌های خاکی رابطه دارد. هر مجموعه داده‌ها شامل فاکتور کاهش مقاومت هم‌بسته می‌باشد. مشخصات سطح مشترک از مشخصات خاک در داده‌های وابسته به آن و با استفاده از فاکتور کاهش مقاومت براساس قوانین زیر محاسبه می‌شود [Brinkgreve, R.B. (2004)]:

^۱ Interface element

(۱۸-۴)

$$\tan \varphi_i = R_{inter} * \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil}$$

(۱۹-۴)

$$\psi_i = 0^\circ \text{ if } R_{inter} < 1$$

(۲۰-۴)

$$C_i = R_{inter} * C_{soil}$$

۴-۵ شرایط مرزی

برای حل معادله‌ی دیفرانسیل تعادل، باید شرایط مرزی تعریف گردد. در پژوهش حاضر، شرایط مرزی عبارت از مقادیر مشخص جابه‌جایی و نیرو می‌باشد که به ترتیب شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری نامیده می‌شود.

۴-۵-۱ شرایط تکیه‌گاهی

در مدل‌سازی دوبعدی شرایط تکیه‌گاهی ممکن است به صورت گیرداری افقی ($U_x = 0$)، گیرداری قائم ($U_y = 0$) یا گیرداری کامل ($U_x = U_y = 0$) باشد. در مسئله‌ی حاضر از شرایط گیرداری استاندارد^۱ تعریف شده در نرم‌افزار استفاده شده است که شرایط مرزی مطابق قوانین زیر ایجاد می‌گردد:

۱- برای مرزهای قائم که مختصات X برابر کمترین یا بیشترین مختصات X در مدل می‌باشد (مرزهای جانبی)، گیرداری افقی ($U_x = 0$) اعمال می‌گردد.

^۱ Standard fixites

۲- برای مرزهای افقی که مختصات Y برابر کمترین مختصات Y در مدل باشد (مرز کف)، گیرداری کامل)

$$U_x = U_y = 0 \text{ (اعمال می‌گردد.)}$$

۳- وقتی که دست کم یکی از جهات تغییر مکان نقاط مرزی ثابت باشد، صفحاتی که در مرز هندسه‌ی

مدل گسترده شده‌اند، چرخش ثابت خواهند داشت (φ_z) [گوهری م (۱۳۸۶)].

در مدل‌سازی سه‌بعدی شرایط تکیه‌گاهی برای المان خاک به صورت زیر می‌باشد [(2010)

:Brinkgreve, R. B .

۱- برای مرزهای جانبی مدل که عمود بر محور X می‌باشند، گیرداری به صورت افقی است ($U_x = 0$)

۲- برای مرزهای جانبی مدل که عمود بر محور Y می‌باشند، گیرداری به صورت قائم است ($U_y = 0$)

۳- برای مرزهای جانبی مدل که بر هیچ‌یک از محورهای X و Y عمود نیستند، گیرداری در جهات X و

$$Y \text{ اعمال می‌شود (} U_x = U_y = 0 \text{)}$$

۴- مرزهای قسمت تحتانی مدل در تمامی جهات گیردار می‌شوند ($U_x = U_y = U_z = 0$)

۵- سطح زمین در تمامی جهات آزاد می‌باشد.

ضمن این‌که شرایط تکیه‌گاهی برای اعضاء سازه‌ای نیز به صورت زیر می‌باشد:

۱- برای مرزهای جانبی مدل که عمود بر محور X می‌باشند؛ $\varphi_y = \varphi_z = 0$

۲- برای مرزهای جانبی مدل که عمود بر محور Y می‌باشند؛ $\varphi_x = \varphi_z = 0$

۳- برای لبه‌های جانبی مدل و قسمت تحتانی مدل؛ $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = 0$

۳- در سطح زمین؛ $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z = \text{Free}$

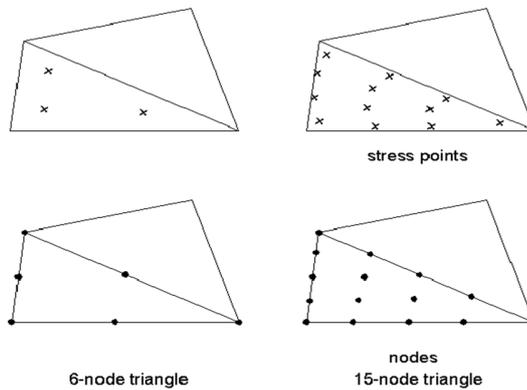
۴-۶-۶ مش بندی

۴-۶-۱ انتخاب نوع المان ها و گره ها

در حل مسائل به روش عددی، شبیه سازی باید به نحو مطلوبی انجام پذیرد و اجزاء مدل مطابق با شرایط مسئله تعیین گردند. بعضی از اجزاء مدل مانند تعداد و ابعاد المان ها در وقت محاسبات تأثیر گذارند. چنانچه تعداد المان ها بسیار زیاد باشند، دقت جواب ها بالا می رود. برای تحلیل مدل، وقت زیادی صرف می شود که این امر به خصوص در مدل سازی سه بعدی مشهودتر است، ولی برعکس چنانچه تعداد المان ها کم فرض شوند، دقت جواب ها پایین می آید و نتایج حاصل از مدل سازی عددی دقت مطلوبی نخواهند داشت. بنابراین اگر چه افزایش تعداد المان ها بر دقت جواب ها می افزاید، ولی نمی توان نتیجه گیری کرد که شبکه بندی بهینه شامل بیشترین تعداد المان است. به عبارت دیگر افزایش تعداد المان ها و به تعبیری کوچکتر کردن اندازه آن ها تا جایی لازم است که هدف مدل سازی با دقت قابل قبولی برآورده شود، لذا در این پژوهش مدل به نحو مطلوبی کالیبره گردیده است.

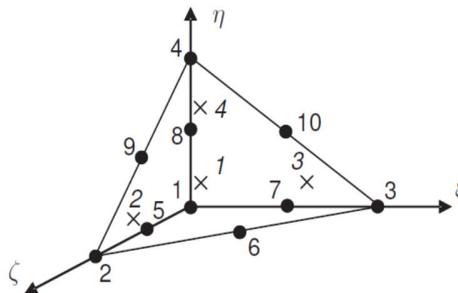
بعد از ساخت مدل عددی و تخصیص پارامترها و خصوصیات اجزاء خاک و سازه، نوبت مش بندی و تقسیم کل فضا به منظور انجام محاسبات اجزاء محدود می باشد که این امر به وسیله ی دستور مش خودکار انجام می شود. در هنگام تولید مش، توده ها به المان های مثلثی تقسیم می شوند که در مدل اجزاء محدود دو بعدی با یکی از المان ۶ یا ۱۵ گرهی انجام می شود. المان های ۱۵ گرهی از دقت بیشتری در محاسبات تنش ها، بار و گسیختگی (خصوصاً در شرایط هندسه متقارن) برخوردارند. ضمن این که مش های مرکب از المان های ۱۵ گرهی ریزتر و انعطاف پذیرتر از مش المان های ۶ گرهی هستند، اما محاسبات و تحلیل آن ها کمی وقت گیر است. برای مدل سازی دوبعدی دقیق تر در این پژوهش از المان های ۱۵

گرهی با ۱۲ نقطه تنش استفاده گردیده است. در شکل (۴-۵) موقعیت گره‌ها و نقاط تنش در عناصر ۶ و ۱۵ گرهی نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ موقعیت گره‌ها در المان ۶ و ۱۵ گرهی [Brinkgreve, R.B. (2004)]

همان‌طور که در شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود در مدل‌سازی سه بعدی و در هنگام تولید مش، توده‌ها به المان‌های هرمی (۴ وجهی) ۱۰ گرهی تقسیم می‌شوند.



شکل ۴-۶ موقعیت گره‌ها در المان ۱۰ گرهی [Brinkgreve, R. B (2010)]

علاوه بر المان‌های خاک در مدل‌سازی سه بعدی از المان‌های متفاوت دیگری نیز برای اعضای سازه‌ای استفاده می‌شود؛ به عنوان مثال برای تیرها، از المان‌های خطی ۳ گرهی استفاده می‌شود که با

لبه‌ی ۳ گره‌ی المان‌های خاک سازگار می‌شود. هم‌چنین به طور مشابه برای شبیه‌سازی رفتار ژئوگریدها و ورق‌ها از المان‌های ۶ گره‌ی استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی اندرکنش رفتار اعضای خاک و سازه‌ای از المان‌های ۱۲ گره‌ی استفاده شده است [Brinkgreve, R. B (2010)]. المان‌های مجاور از طریق این گره‌ها به هم متصل می‌شوند. در حین محاسبات به روش اجزاء محدود، تغییرمکان (U_x و U_y) در گره‌ها محاسبه می‌شوند. هم‌چنین گره‌ها برای تولید منحنی‌های تغییرمکان - بار انتخاب می‌شوند. برخلاف تغییرمکان، تنش و کرنش‌ها بیشتر در نقاط منفرد (یا نقاط تنش) محاسبه می‌شوند و نقاط تنش برای تولید مسیره‌های تنش-کرنش نیز انتخاب می‌شوند [گوهری م (۱۳۸۶)].

نرم‌افزار به منظور مش‌بندی مدل از یک تولیدکننده‌ی مش خودکار استفاده می‌کند و مش‌بندی را در ۵ حالت کلی خیلی درشت، درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز انجام می‌دهد. تفاوت اصلی این ۵ حالت و معیار اصلی، طول متوسط المان (L_e) می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$L_e = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{n_c}}$$

که در این رابطه مقادیر x_{\max} و x_{\min} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار طول مدل در جهت x ، مقادیر y_{\max} و y_{\min} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار عرض مدل در جهت y و مقدار n_c تعداد المان‌ها مربوط به هر یک از پنج حالت فوق که براساس جدول (۴-۱) تعریف می‌شود، می‌باشد [گوهری م (۱۳۸۶)].

جدول ۴-۱ تعداد المان‌ها در هر مش [گوهری م (۱۳۸۶)]

در حدود ۵۰ المان	$n_c = 25$	خیلی درشت
در حدود ۱۰۰ المان	$n_c = 50$	درشت
در حدود ۲۵۰ المان	$n_c = 100$	متوسط
در حدود ۵۰۰ المان	$n_c = 200$	ریز
در حدود ۱۰۰۰ المان	$n_c = 400$	خیلی ریز

علاوه بر پنج حالت فوق نرم‌افزار ضریب تصحیحی را به منظور ریز یا درشت نمودن المان‌ها در نقاط مختلف مدل در نظر می‌گیرد.

در مدل سه بعدی اجزاء محدود نیز طول متوسط المان (l_e) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$l_e = \frac{r}{20} \sqrt{(x_{\max} - x_{\min})^2 + (y_{\max} - y_{\min})^2 + (z_{\max} - z_{\min})^2} \quad (22-4)$$

که در این رابطه z_{\max} و z_{\min} به ترتیب حداکثر و حداقل ارتفاع مدل در جهت Z می‌باشد و r_e فاکتور وابسته به ابعاد المان است که از جدول (۴-۲) به دست می‌آید.

جدول ۴-۲ مقادیر r_e با توجه به انواع مش [Brinkgreve, R. B (2010)]

حالت مش	مقدار r_e
خیلی درشت	۲
درشت	۱/۵
متوسط	۱
ریز	۰/۷
خیلی ریز	۰/۵

۴-۷ جمع بندی

روش اجزا محدود یا روش المان محدود، روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادله‌های انتگرالی. اساس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده-سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند، است.

برای روش‌های مبتنی بر حالت گسیختگی سه نقص اساسی ارائه می‌شود که مهم‌ترین و اساسی‌ترین آن‌ها عدم محاسبه مقدار جابه‌جائی می‌باشد. از دیگر معایب روش‌های گسیختگی می‌توان به عدم ارائه‌ی-اطلاعاتی در مورد نقطه‌ی شروع گسیختگی و نحوه‌ی گسترش آن اشاره کرد؛ در حالی که در صورت تعیین نقاط با جابه‌جائی زیاد و یا نقاط شروع گسیختگی می‌توان با تعبیه‌ی ابزار دقیق در آن نقاط از گسیختگی آن‌ها آگاه شد. باید برای رفع این نقیصه مهم از برخی فرض‌های ساده کننده و شرایط مرزی استفاده کرد.

فصل پنجم

مدل سازی و تحلیل عددی ایستگاه

زیر زمینی

۵-۱-مقدمه

انجام مطالعه‌ی پارامتریک نیازمند مدل عددی می‌باشد که ساخت مدل عددی نیازمند دقت زیاد در نوع المان‌ها و نحوه‌ی مدل‌سازی می‌باشد. برای ساخت مدل عددی اولاً نیاز به اطلاعات از حفاری به روش طاق بتنی بوده که تا حد زیادی باید شبیه واقعیت باشد. ثانیاً باید صحت و دقت مدل عددی ساخته شده را نیز مورد بررسی و تحلیل قرار داد؛ لذا باید از موارد مطالعاتی استفاده شود که اطلاعات ژئوتکنیکی، آزمایشگاهی و ابزار سنج‌های مورد استفاده در آن‌ها دقیق باشند. در این پژوهش پس از بررسی‌های فراوان در بعد فنی ایستگاه‌های اجرا شده در سطح شهر مشهد از مطالعه‌ی موردی ایستگاه متروی خط ۲ مشهد استفاده گردیده است.

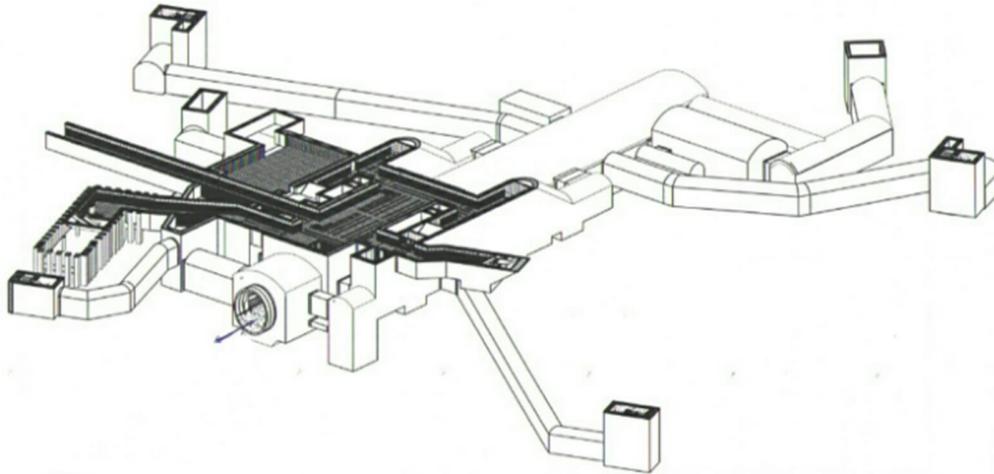
۵-۲-مشخصات پروژه

۵-۲-۱-مشخصات محل پروژه

پروژه‌ی خط ۲ قطار شهری مشهد به طول ۱۴/۴ کیلومتر در راستای جنوب غربی- شمال شرقی و دارای ۱۳ ایستگاه است.

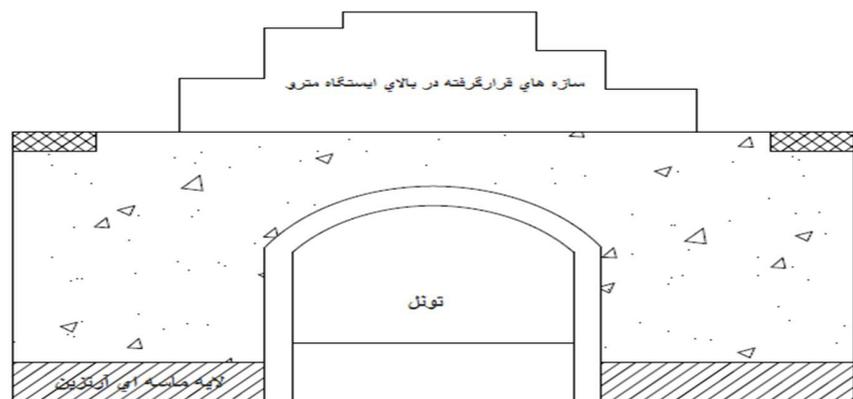
این مسیر از انتهای طبرسی شمالی پایین دست روستای کشف شروع می‌شود و به بسیاری از کانون‌های جمعیتی آن منطقه سرویس دهی مستقیم دارد. این مسیر در ادامه پس از قطع کمربندی صدمتری (بزرگراه بسیج) از منطقه‌ی طلاب عبور و با فاصله‌ی اندکی از چهار راه مقدم طبرسی گذر کرده و سپس به میدان راه آهن و میدان شهدا و در ادامه‌ی این خط با عبور از میدان سعدی و میدان دکتر شریعتی، تقاطعی با خط یک خواهد داشت. در نهایت خط مذکور با عبور از زیر پارک کوهسنگی و میدان فضل بن شاذان در ابتدای بولوار شهید فکوری خاتمه می‌یابد.

این پژوهش، مطالعه‌ای موردی بر روی ایستگاه (G2) خط ۲ قطار شهری میدان شهدای مشهد می‌باشد که در این زمینه، اثر حفاری بر نشست سطح زمین مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴، تصویری شماتیک از پروژه‌ی حاضر را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه خواهد شد، یک لایه ماسه‌ی آبدار آرتزین در اطراف تونل و میزان سربار زیاد حاصل از بار میدان و ساختمان‌های اطراف مورد توجه می‌باشد؛ لذا بررسی نشست سطحی با توجه به موقعیت ایستگاه، امری مهم در این ساخت‌گاه می‌باشد [مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۹)].



شکل ۱-۴ تصویری شماتیک از محل ایستگاه میدان شهدای قطار شهری مشهد [مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۹)]

[۱۳۸۹]



شکل ۲-۵ تصویری شماتیک از تونل موجود در ایستگاه میدان شهدا قطار شهری مشهد

۲-۲-۵-۲ زمین شناسی شهر مشهد

شهرستان مشهد، مرکز استان خراسان رضوی می باشد و محدوده‌ی نقشه‌ی زمین شناسی مشهد در مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ در شمال شرقی ایران زمین در شکل شماره ۳-۴ نشان داده شده است. دشت مشهد در حد فاصل کوه‌های بینالود و هزار مسجد، با امتداد شمال غرب - جنوب شرق واقع می باشد [مهندسین مشاور سانو، (۱۳۹۱)]. در گستره‌ی نقشه‌ی مشهد، مرتفع‌ترین نقطه ۱۷۳۰ متر و کم ارتفاع‌ترین نقطه ۸۰۹ متر از سطح دریا فاصله دارد. رودخانه‌های حوزه‌ی آبریز مشهد؛ علاوه بر کشف رود، شامل رودخانه های طرق، عارفی و اردکان می باشند.

به طور کلی خاک زیرسطحی در محل گمانه‌های حفاری شده از یک لایه خاک دستی به ضخامت ۰/۵ تا ۴/۵ متر و پس از آن از بخش‌های ریزدانه (لای و رس با ماسه) و درشت‌دانه (ماسه لای دار یا رس دار)، با ضخامت‌های متغیر تشکیل شده که به صورت متناوب در اعماق مختلف گمانه‌ها، مشاهده شده‌اند و می توان آن‌ها را به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود [مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸)]:

۵-۲-۱- لایه‌های ریزدانه

لایه‌های خاک ریزدانه در محل گمانه‌های حفاری شده از نوع لای، لای با ماسه، رس لای‌دار با ماسه، رس کم مایه، رس کم مایه‌ی شنی و رس کم مایه با ماسه، به رنگ قهوه‌ای (عمدتاً) و خاکستری، همراه با مقداری دانه‌های پولکی و متورق شکل ماسه‌ای و رگه‌های نازک ماسه‌بادی و در برخی اعماق با کمی دانه‌های سخت شده، به ضخامت ۱ تا بیش از ۱۵ متر می‌باشند. این لایه‌ها در بالای تراز سطح آب زیرسطحی (رقوم بالای تراز ۹۵۹/۵) به صورت غیراشباع و در پایین‌تر از سطح آب زیرسطحی به صورت اشباع می‌باشند و از لحاظ استحکام به صورت نرم تا بسیار سفت در اعماق مختلف گمانه‌ها مشاهده شده- اند [مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸)].

۵-۲-۲- لایه‌های درشت‌دانه

لایه‌های درشت‌دانه در محل گمانه‌های حفاری شده از ماسه‌ی لای‌دار، ماسه لای‌دار با شن و ماسه رس و لای‌دار با شن، به رنگ قهوه‌ای (عمدتاً) و خاکستری تیره و به ضخامت متغیر ۰/۵ تا ۷ متر در اعماق مختلف گمانه‌های حفاری شده تشکیل یافته‌اند. لازم به ذکر است که دانه‌های ماسه‌ای در اعماق مختلف گمانه‌ها به شکل رگه‌های نازک ماسه‌بادی، دانه‌های پولکی شکل (متورق) و دانه‌های گردگوشه مشاهده شده‌اند [مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸)].

۵-۲-۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک

با توجه به بند قبل و دامنه‌ی تغییرات نسبتاً زیاد لایه‌های خاک در اعماق مختلف، لایه‌های زیرسطحی خاک در محل گمانه‌های حفاری شده را به‌طور متوسط به ۶ لایه تقسیم کرده‌اند که در جدول ۵-۱ آورده

شده است و به طور خلاصه، پارامترهای طراحی نیز در جدول جمع‌آوری شده است [مهندسی مشاور سانو، (۱۳۹۱)].

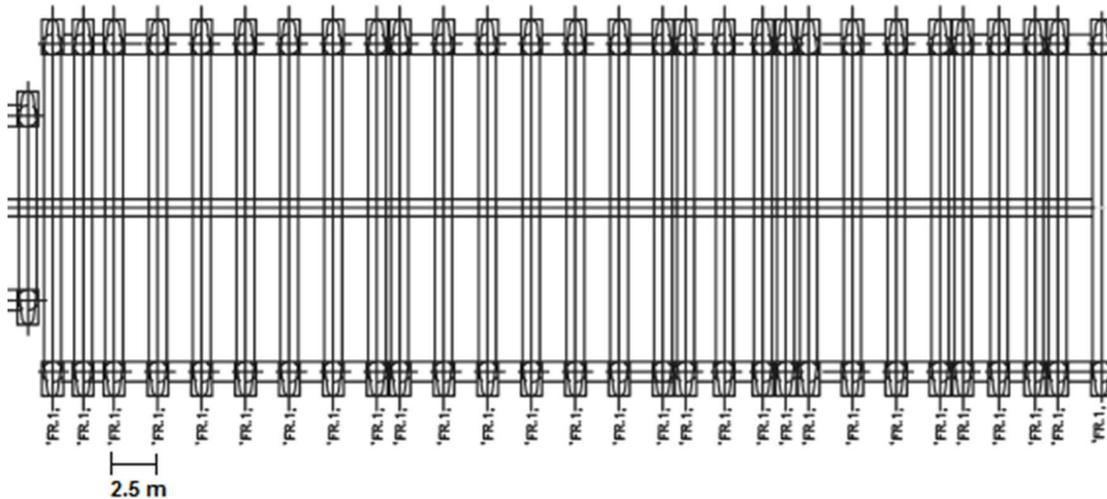
لازم به ذکر است که لایه‌های مدل شده در نرم‌افزار با بررسی‌های انجام گرفته از گمانه‌ها و با توجه به ویژگی و خصوصیات هر لایه، در انتها به ۶ لایه تقسیم و مدل گردید.

جدول ۵-۱ مشخصات لایه‌های خاک پروژه

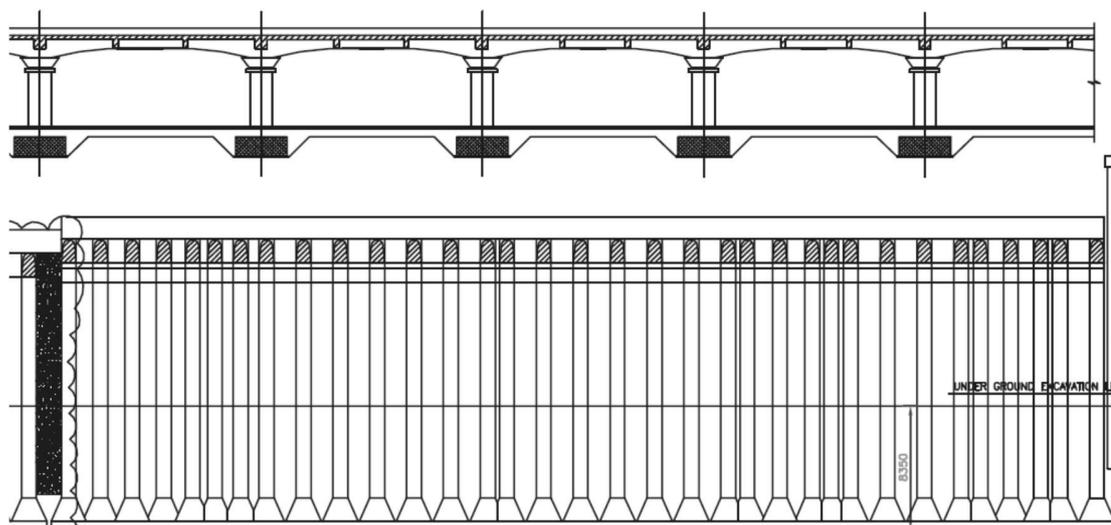
خاک دستی	مقدار						شرح مقادیر
	لایه VI	لایه V	لایه IV	لایه III	لایه II	لایه I	
C=0.0 $\phi=27$	$\left\{ \begin{array}{l} C=1.8 \\ \phi=0.0 \\ \text{تا} \\ C=0.5 \\ \phi=23 \end{array} \right.$	C=0.2 $\phi=30$	$\left\{ \begin{array}{l} C=1.1 \\ \phi=0.0 \\ \text{تا} \\ C=0.3 \\ \phi=18 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C=0.85 \\ \phi=0.0 \\ \text{تا} \\ C=0.3 \\ \phi=15 \end{array} \right.$	C=0.2 $\phi=25$	$\left\{ \begin{array}{l} C=0.65 \\ \phi=0.0 \\ \text{تا} \\ C=0.3 \\ \phi=10 \end{array} \right.$	چسبندگی-C (kg/cm^2) و زاویه اصطکاک داخلی ϕ (درجه)
1.75	2.0	2.0	2.0	1.95	2.0	1.90	وزن مخصوص طبیعی γ (t/m^3)
—	550	550	275	200	350	140	مدول الاستیسیته اولیه E (kg/cm^2)
—	0.4	0.35	0.45	0.45	0.35	0.45	ضریب پواسون μ
—	—	3E	—	—	3E	—	مدول الاستیسیته برگشتی محاسباتی (باربرداری) E_{ur} (kg/cm^2)
—	22	12	22	18	10	18	درصد رطوبت ω (%)
—	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	وزن مخصوص جامد G_s
—	0.128	—	0.128	0.105	—	0.105	شاخص تراکم پذیری عادی (محاسباتی) C'_c
—	0.013	—	0.013	0.013	—	0.013	شاخص تراکم پذیری پیش تحکیمی (محاسباتی) C'_s
0.55	0.43	0.40	0.52	0.58	0.48	0.64	ضریب فشار جانبی سکون خاک (K_0)
—	0.65	—	0.75	0.8	—	0.8	ضریب اسکمپتون و بیروم (برای پیش تحکیمی)
—	1.5	—	0.5	0.5	—	0.5	اضافه فشار پیش تحکیمی $\Delta p = p_c - p_0$ (kg/cm^2)
$C'_c = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad \& \quad C'_s = \frac{C_s}{1 + e_0} \quad \& \quad \text{بر حسب } \text{kg/cm}^2$							

۳-۵ مشخصات سازه نگهبان

در این پروژه جهت پایداری دیواره‌ی تونل از سیستم طاق پیش نگه‌دارنده استفاده شده است که پلان و محل شمعه‌های سازه نگهبان آن، مطابق شکل (۵-۵) از شمعه‌های بتنی درجاریز به قطر ۱/۲ متر و با فاصله‌ی ۲/۵ متر و با ارتفاع ۱۳ متر و قسمت فقهانی به صورت طاقی و با مقطع بیضی شکل (به ابعاد ۱×۱/۵ متر) اجرا شده است [مهندسین مشاور سانو، (۱۳۹۱)].

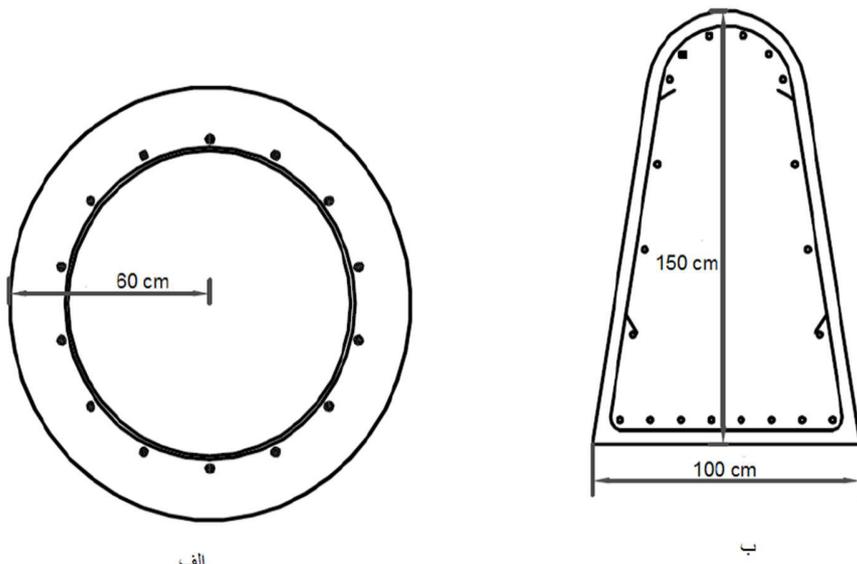


شکل ۵-۶ پلان و محل شمعه‌های سازه نگهبان [مهندسین مشاور سانو، (۱۳۹۱)]



شکل ۷-۵ برش سازه نگهبان ایستگاه [مهندسین مشاور سانو، (۱۳۹۱)]

شکل (۷-۵) مقاطع سازه نگهبان را نشان می‌دهد. در تحلیل سازه‌ی اصلی ایستگاه‌های زیر زمینی با سربار قابل توجه خاک، المان‌های کف و سقف با عملکرد تیری، $I=0.5I_g$ و المان‌های دیوار با $I=1.0I_g$ مدل می‌شوند. هم‌چنین فواصل ۲/۵ متری شمع‌ها از یکدیگر با توجه به استفاده از کرنش سطحی در مدل دوبعدی با تقسیم محاسبات بر فواصل آن‌ها در نظر گرفته شد. شاتکریت نیز برای فواصل خالی بین شمع‌ها به ضخامت ۰/۲ متر محاسبه شده است. با توجه به گزارشات محاسبات سازه و نقشه‌های اجرایی مطالعه‌ی موردی جداول ۱-۵ و ۲-۵ جهت انجام معادل‌سازی، در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت [مهندسین مشاور سانو، (۱۳۹۱)].



الف

ب

شکل ۵-۷ الف: مقطع شمع ب: مقطع طاق پیش‌نگه‌دارنده

جدول ۲-۵ مشخصات شمع سازه نگهبان به کار رفته در مدل سازی [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)]

پارامتر	نشانه	واحد	مقدار
صلبیت محوری	EA	KN/m	$۱/۳۱ \times ۱۰^۷$
صلبیت خمشی	EI	KNm ² /m	$۱/۰۱۸ \times ۱۰^۵$
وزن	W	KN/m/m	۱/۱۹
ضریب پواسون	ν	-	۰/۲

جدول ۳-۵ مشخصات مقطع طاق بتنی سازه نگهبان به کار رفته در مدل سازی [مهندسين مشاور سانو،

(۱۳۹۱)]

پارامتر	نشانه	واحد	مقدار
صلبیت محوری	EA	KN/m	$7/2 \times 10^6$
صلبیت خمشی	EI	KNm ² /m	$1/344 \times 10^6$
وزن	W	KN/m/m	۱/۱۹
ضریب پواسون	ν	-	۰/۲

جدول ۴-۵ مشخصات شاتکریت سازه نگهبان به کار رفته در مدل سازی [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)]

پارامتر	نشانه	واحد	مقدار
صلبیت محوری	EA	KN/m	$1/4 \times 10^5$
صلبیت خمشی	EI	KNm ² /m	$6/3 \times 10^5$

۴-۵ مشخصات بارهای سطحی

برای دقت بیشتر مدل سازی و تطابق با واقعیت موجود بارهای وارد بر پروژه، مطابق با گزارش محاسبات

سازه، بارهای وارد بر سازه به دست آمد و عبارت‌اند از [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)]:

جدول ۵-۵ مشخصات بارهای وارد بر ایستگاه میدان شهدا [مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)]

پارامتر	واحد	مقدار
بار گسترده وارد بر میدان شهدا	KN/m ²	۳۵

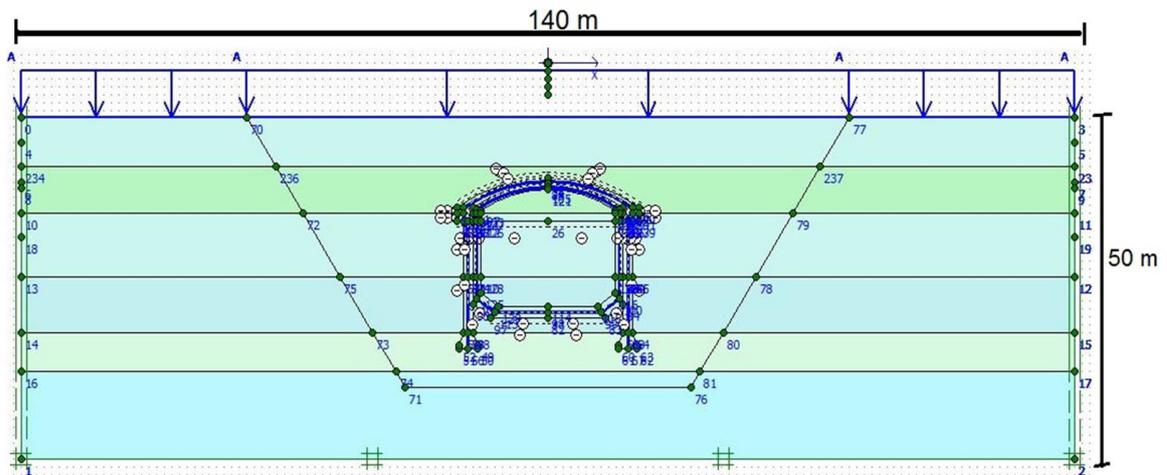
۵-۵ مدل سازی پروژه

۵-۵-۱ مدل عددی دوبعدی

خاک یک محیط نیمه بی نهایت است، اما نقص عمده‌ی روش‌های تفاضل محدود یا اجزاء محدود این است که نمی‌توان یک محیط نیمه بی نهایت خاک را مستقیماً مدل نمود. لذا برای حل مشکل فوق به جای در نظر گرفتن یک محیط بی نهایت برای خاک، قسمتی از آن مدل می‌شود که در نرم‌افزار PLAXIS 2D از مدل کرنش سطحی^۱ برای سازه‌های با یک یا چند درجه آزادی مقطع میانی و وابسته به حالت تنش و بارگذاری با طول مشخص عمود بر مقطع استفاده می‌شود که تغییر مکان‌های عمود بر مقطع، صفر در نظر گرفته می‌شود. در شبیه‌سازی عددی، ابعاد مدل باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا تأثیر مرزها بر روی رفتار مدل به حداقل برسد. به خصوص که تأثیر ابعاد مدل‌سازی بر روی تغییر شکل سازه نگهبان و نشست سطحی زمین در حفاری مهم و اساسی می‌باشد.

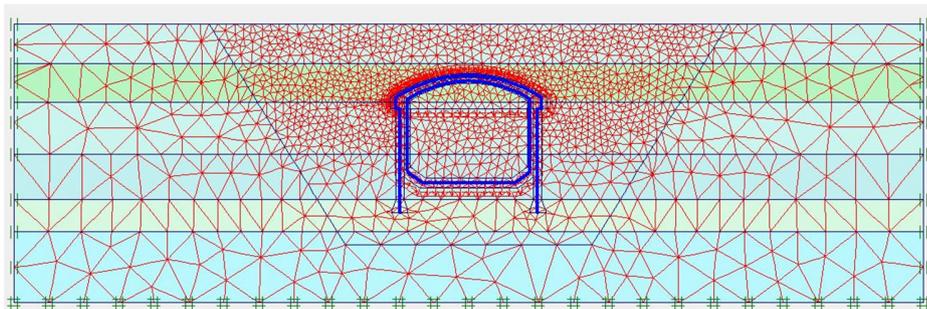
محدوده‌ی طول که اثر نشست ناشی از حفاری بر روی سطح زمین روی این محدوده تأثیرگذار است، باید حدود ۴ تا ۵ برابر قطر حفاری باشد [جهانیان ه، (۱۳۹۱)]. که در پژوهش حاضر، مدل‌سازی دو و سه بعدی طول این محدوده با توجه به ۱۷/۵ متر قطر تونل، به ترتیب ۱۴۰ و ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد محدوده‌ی مدل هندسی نیز دقیقاً مطابق نقشه‌های اجرایی مدل‌سازی گردیده است. هندسه‌ی مدل عددی دو بعدی در شکل (۵-۶) نشان داده شده است.

^۱ Plain strain



شکل ۵-۶ هندسه، شرایط تکیه‌گاهی و اجزاء مدل دو بعدی پروژه

در پژوهش حاضر مش در ۶ مرحله و به صورت توده‌ای ریز گردید. مرحله‌ی اول مش به صورت بزرگ، مرحله‌ی دوم لایه‌های خاک به صورت جداگانه و درشت و مرحله‌ی سوم و چهارم اطراف تونل به صورت متوسط و مرحله‌ی پنجم و ششم دو بار قسمت تاج تونل ریز گردیده است. تعداد المان‌ها در مدل دوبعدی ساخته شده، ۲۱۳۰ بوده است.



شکل ۵-۷ مش‌بندی مدل دوبعدی پروژه

۵-۵-۲ فازبندی مدل عددی دوبعدی پروژه

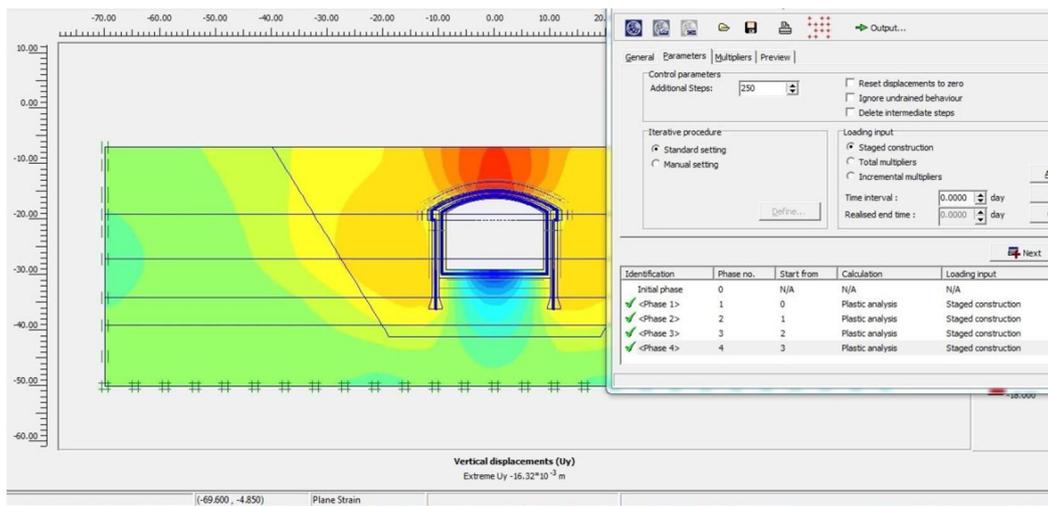
نحوه‌ی فازبندی مدل حفاری ایستگاه به روش نگاه‌دارنده طاق‌بتنی به صورت زیر آورده شده است:

۱- فعال کردن سربار حاصل از ساختمان‌های اطراف و عرصه‌ی پروژه

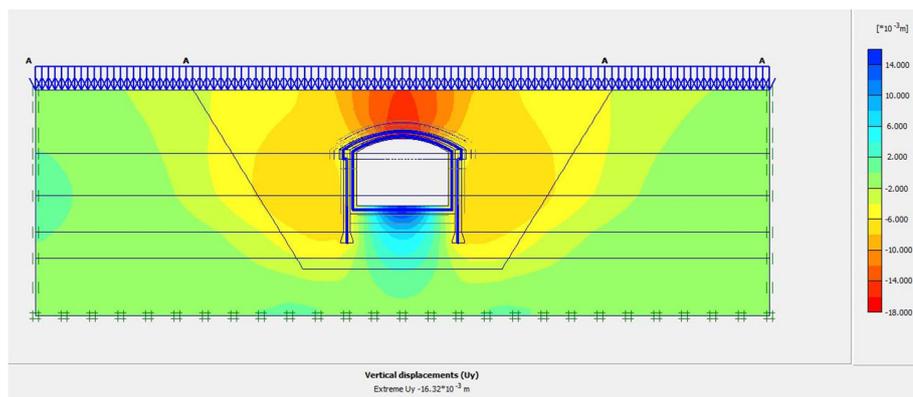
۲- صفر کردن نشست‌ها قبل از عملیات حفاری

۳- فعال کردن سازه نگهبان و انجام عملیات حفاری

۴- فعال سازی سازه‌ی اصلی ایستگاه



شکل ۵-۸ نتایج و فازبندی دو بعدی مدل ایستگاه



شکل ۵-۹ نمایش نشست سطحی در مدل دو بعدی

۵-۵-۳ مدل عددی سه بعدی پروژه

علاوه بر مدل سازی دو بعدی، مدل سازی سه بعدی غیرخطی اجزاء محدود حفاری ایستگاه نیز برای برآورده کردن عوامل زیر انجام گردید:

۱- به منظور تعیین ویژگی های کمی مدل سازی سه بعدی است که در مدل سازی های رایج دو بعدی در نظر گرفته نمی شود.

۲- به منظور بررسی دقیق تر رفتار حفاری، PLAXIS 3D نسخه ی ویژه، قادر به تحلیل سه بعدی جامع تونل می باشد. برای مدل سازی سه بعدی حفاری تونل این پروژه از المان های زیر استفاده می شود:

۱- المان های ۱۰ گرهی برای مدل سازی خاک، سازه نگهبان

۲- المان صفحه برای مدل کردن سازه نگهبان و سازه ی اصلی

۴- المان سطح مشترک برای در نظر گرفتن اثر اندرکنش بین اعضای خاک و سازه ای [PLAXIS

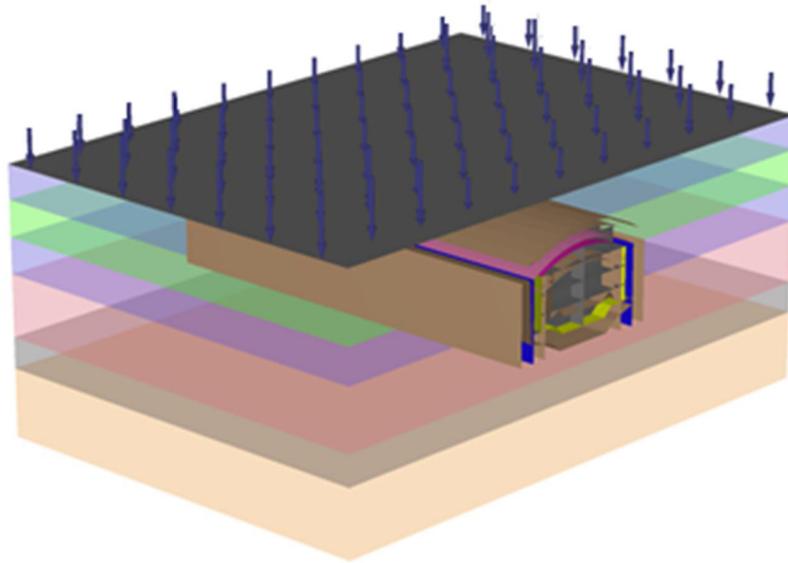
[Material Model Manual, 3D, (2010)

مش در ۶ مرحله و به صورت توده ای ریز گردید:

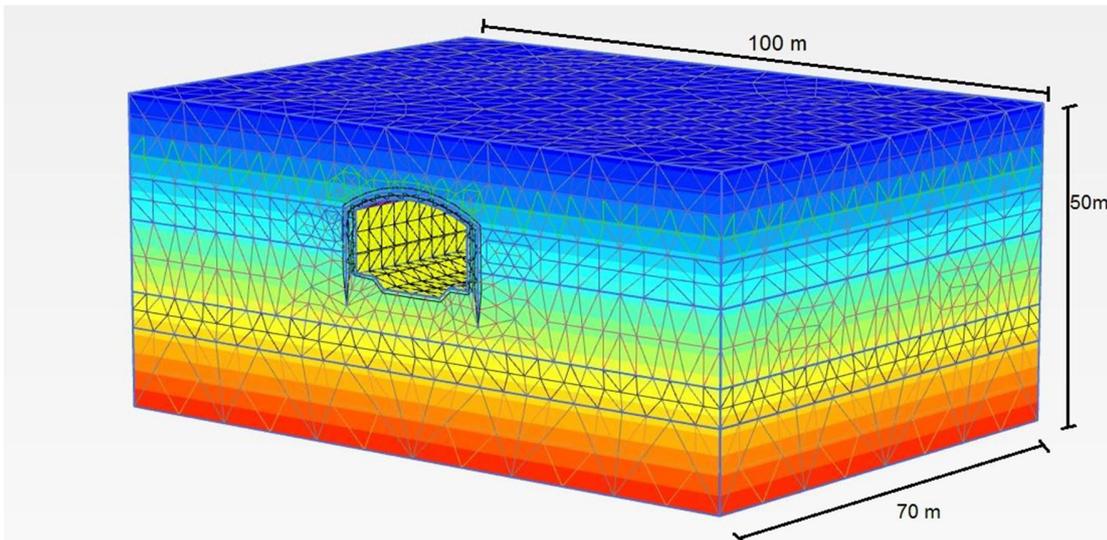
مرحله ی اول مش به صورت بزرگ، مرحله ی دوم لایه های خاک به صورت جداگانه و درشت، مرحله ی

سوم و چهارم اطراف تونل به صورت متوسط و مرحله پنجم و ششم دو بار قسمت تاج تونل ریز گردیده

است. تعداد المان ها در مدل سه بعدی ساخته شده، ۱۲۳۵۰ بوده است.



شکل ۵-۱۰ مدل سه بعدی ایستگاه به همراه بارگذاری اینترفیس

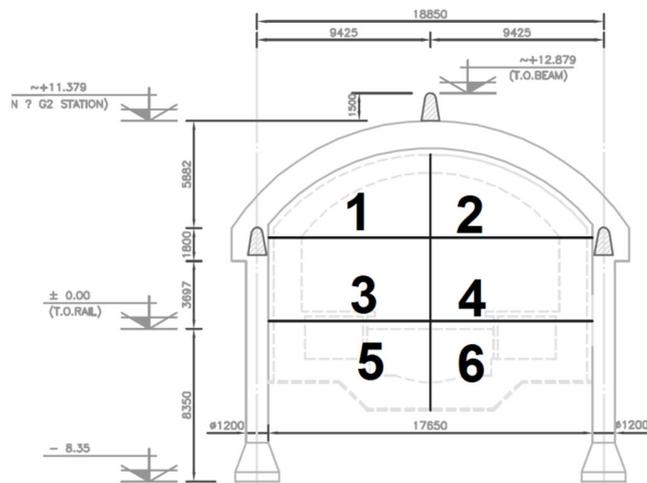


شکل ۵-۱۲ مش بندی سه بعدی مدل ایستگاه

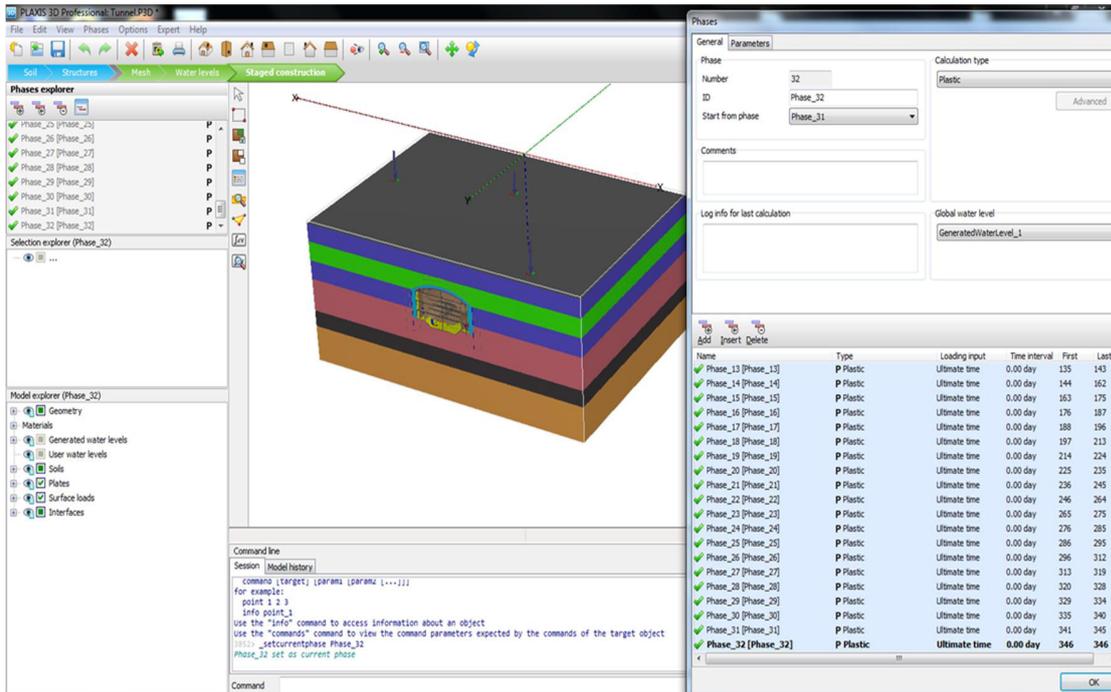
۵-۶ فازبندی مدل عددی سه بعدی پروژه

نحوه فازبندی مدل حفاری ایستگاه به روش نگه‌دارنده طاق‌بتنی به صورت زیر آورده شده است:

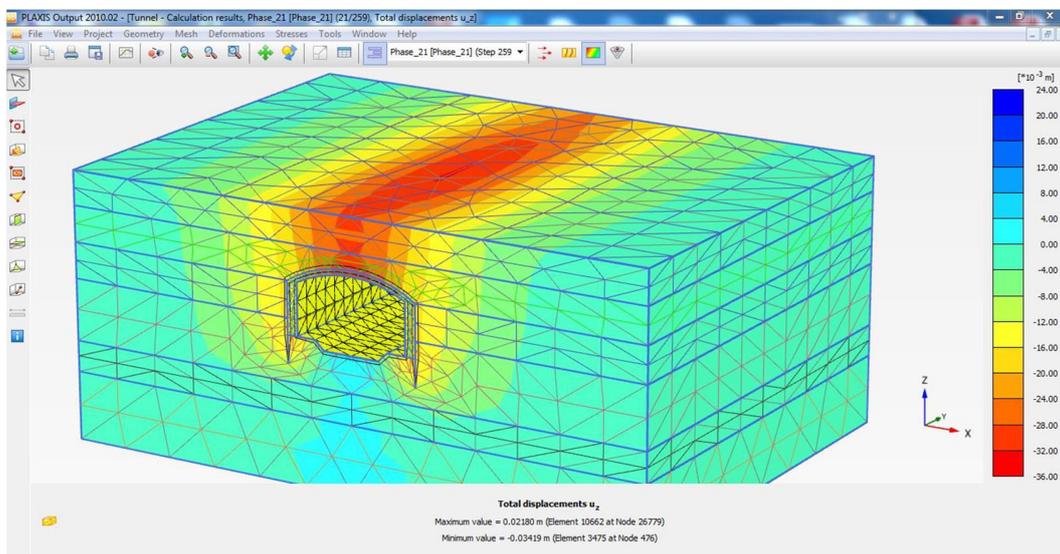
- ۱- فعال کردن سربار حاصل از عرصه‌ی پروژه
- ۲- صفر کردن نشست‌ها قبل از عملیات حفاری
- ۳- فعال کردن سازه نگهبان و انجام عملیات حفاری قسمت ۱، ۲ تا ۲/۵ متر ابتدایی
- ۴- انجام عملیات حفاری قسمت ۳، ۴ تا ۲/۵ متر ابتدایی و ۱، ۲ تا ۵ متری
- ۵- انجام عملیات حفاری قسمت ۵، ۶ تا ۲/۵ متر ابتدایی و قسمت ۳، ۴ تا ۵ متری و ۱، ۲ تا ۷/۵ متری
- ۶- انجام عملیات حفاری قسمت ۵، ۶ تا ۲/۵ متر ابتدایی و قسمت ۳، ۴ تا ۵ متری و ۱، ۲ تا ۷/۵ متری
- ۷- انجام عملیات حفاری قسمت ۵، ۶ تا ۵ متر ابتدایی و قسمت ۳، ۴ تا ۷/۵ متری و ۱، ۲ تا ۱۰ متری
- ۸- ادامه‌ی کار با همین روند تا فاز ۳۲



شکل ۵-۱۳ تقسیم خاک تونل جهت خاک‌برداری در مدل سه بعدی ایستگاه



شکل ۵-۹ نتایج و فازبندی مدل سه بعدی ایستگاه



شکل ۵-۱۰- نمایش نشست سطحی در مدل سه بعدی

۵-۷ اندازه‌گیری نشست

کنترل نشست سطحی زمین در پروژه‌های زیرزمینی، مانیتورینگ زمین به منظور ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های صورت گرفته، برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیمات پیش‌گیرانه جهت جلوگیری و کاهش خطرات جانبی و مالی، کنترل هم‌زمان با حفاری، تغییر شکل‌های سطح زمین خصوصاً در معیارهای شهری را از اهمیت شایانی برخوردار کرده است. عملیات اندازه‌گیری نشست در مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد، براساس اطلاعات ارائه شده توسط مشاور خارجی پروژه‌ی آر^۱ و تجربیات تیم‌های مشابه در خط ۷ متروی تهران، شیراز و تبریز در حال اجرا می‌باشد [شرکت قطارشهری مشهد و حومه (۱۳۹۰)].

عملیات اندازه‌گیری نشست شامل عملیات مربوط به کاشت، نصب، ثبت، قرائت نشانه‌ها توسط دوربین نقشه‌برداری، انجام پردازش اولیه و ارائه اطلاعات تشکیل شده می‌باشد که توضیحات مربوط به هر یک از آن‌ها در ادامه آمده است:

الف: عملیات مربوط به کاشت و نصب نشانه‌ها

در این قسمت جهت کنترل نشست سطح زمین و سازه‌های مجاور از سه نوع پین اندازه‌گیری نشست استفاده شده است.

۱- پین اندازه‌گیری نشست سطحی

۲- پین اندازه‌گیری نشست ساختمان‌ها

۳- مینی‌پرسیم کنترل جابه‌جایی ساختمان‌های خاص

پین‌ها در فاصله‌ی ۵ متری از هم و در راستای محور و هم‌چنین در فواصل ۵ متری در سمت چپ و راست محور نصب می‌شوند.

¹ Arthe

نکته قابل توجه این است که در هنگام نصب ممکن است به علت وجود تأسیسات زیرزمینی گاهی فواصل عرضی یا طولی پین‌ها تا حدود چند متر تغییر کند که در این حالت پین‌ها به سمت سازه‌ی مهم‌تر متمایل می‌شوند [شرکت قطارشهری مشهد و حومه (۱۳۹۰)]

۵-۸ جمع بندی

در این فصل چگونگی انجام پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سعی شد با ارائه‌ی توضیحات، همراه با جزئیات لازم، تمام زوایا و نکات مهم در رابطه با چگونگی انجام پژوهش و دلیل انتخاب مقادیر، مدل‌ها، پارامترها و غیره برای خواننده روشن شود. در ابتدا توضیحاتی در مورد مطالعه‌ی موردی ایستگاه خط ۲ میدان شهدای مشهد ارائه و سپس چگونگی ساخت مدل عددی و انتخاب گزینه‌های مختلف در این مسیر شرح داده شد و همچنین روش عددی مورد استفاده و مدل‌های ساخته شده با نرم‌افزار معرفی گردید و ابعاد مدل‌های عددی و شرایط مرزی آن‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

عملیات اندازه‌گیری نشست سطحی زمین جهت جلوگیری کاهش خطرات جانی و مالی، امری ضروری است. با توجه به روش اتخاذ شده در نصب پین‌های کنترلی، درگیری مناسب بین پین و خاک از اهمیت بالایی برخوردار است و باید به گونه‌ای نصب گردد که عبور وسایل نقلیه روی آن اثر نداشته باشد.

فصل ششم

مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج ابزار دقیق

۶-۱ مقدمه

در فصل‌های گذشته مطالعات انجام شده در زمینه‌ی اندرکنش تونل و خاک بررسی و روش تحقیق در این پژوهش انتخاب شد. سپس مراحل ساخت مدل‌های عددی و هم‌چنین مطالعه‌ی موردی معرفی و مشخص شد. در این پژوهش اثر حفاری‌های زیرزمینی بر نشست سطحی در ایستگاه خط ۲ متروی میدان شهدای مشهد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ابتدای این فصل نتایج حاصل از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی با نتایج مانیتورینگ در سطح زمین ارائه و در قسمت بعدی، مدل‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده با هدف مطالعه‌ی اثر حفاری بر تاج تونل، انجام می‌شود. در ادامه چگونگی عملکرد شمع‌های سازه نگهبان در اثر حفاری و سربار میدان شهدا مشهد شرح داده می‌شود. تمام بررسی‌های مذکور، برای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده و موهر-کلمب انجام شده است.

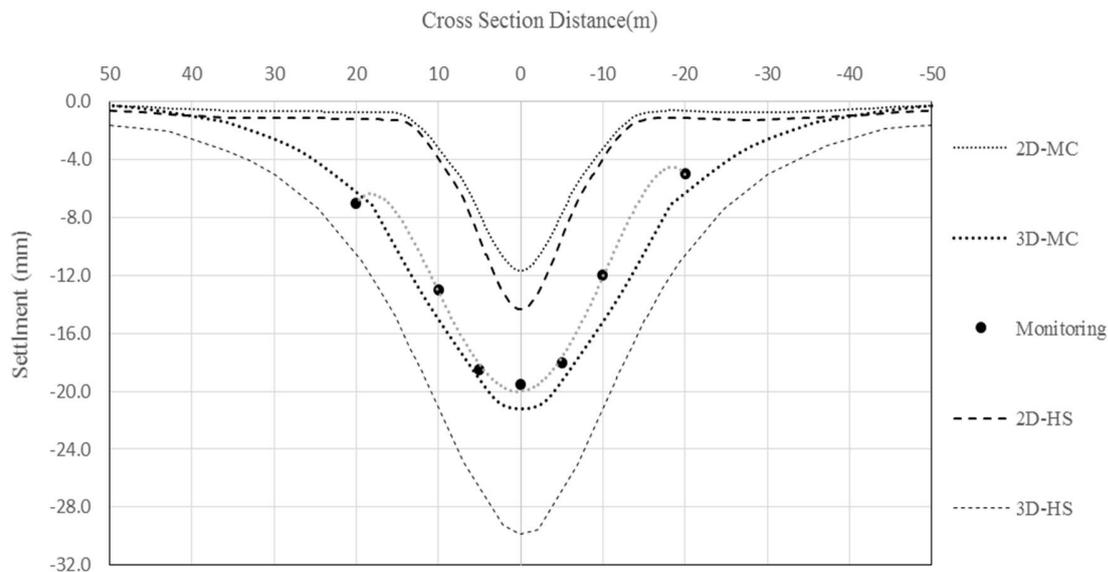
۶-۲ بررسی اثر حفاری بر نشست سطحی

در این قسمت نتایج حاصل از مدل‌های دو بعدی و سه بعدی با نتایج مانیتورینگ در سطح زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شبیه‌سازی‌ها با هدف بررسی اثر حفاری بر مقدار جابه‌جایی قائم حداکثر در دومدل دو بعدی و سه بعدی و مقایسه با نتایج ابزار دقیق در مقطع عرضی تونل، پس از حفر تونل و هم-چنین مقایسه‌ی مدل‌سازی سه بعدی با مانیتورینگ سطح در مقطع طولی تونل انجام شده است.

۶-۲-۱ مقطع عرضی

آکس تونل جهت تعیین مقدار حداکثر نشست سطحی در مدل دوبعدی و برای مدل سه بعدی با فاصله‌ی ۳۵ متری از ابتدای حفاری (مرکز تونل)، به منظور مقایسه با مانیتورینگ و تعیین نشست

حداکثر، انتخاب شده است. مقادیر این پنج نمودار جابه‌جایی قائم محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است که این نتایج در شکل ۶-۱ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از شکل دریافت می‌شود، جابه‌جایی قائم حداکثر سطح زمین در مدل سه بعدی، بیش‌ترین و جابه‌جایی قائم دوبعدی، کمترین را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱- مقایسه‌ی جابه‌جایی قائم در مدل دو بعدی و سه بعدی و مقایسه با نتایج مانیتورینگ

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تحلیل دو بعدی خاک سخت‌شونده، جابه‌جایی قائم نشست حداکثر را پس از حفاری، ۱۴/۳۵ میلی‌متر نشان می‌دهد که این مقدار در تحلیل سه بعدی خاک سخت‌شونده، ۲۹/۸ میلی‌متر و در نتایج ابزار دقیق، ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. مقایسه‌ی نمودار در مقطع عرضی نشان می‌دهد تحلیل دو بعدی و سه بعدی روند یکسانی را در فواصل مختلف نسبت به محور تونل دارند و مقادیر مانیتورینگ نیز این روند را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل نمودارها، مدل سه بعدی خاک سخت‌شونده نسبت به مقادیر ابزار دقیق بیشتر است و حداکثر مقدار آن، ۵۶/۸ درصد مطابق نمودار برازش شده از نقاط ابزار دقیق بیشتر می‌باشد. اما مقادیر به دست آمده از مدل دو بعدی ۲۵ درصد

کمتر از مقادیر ابزار دقیق می‌باشد. این امر می‌تواند نشان دهنده‌ی تأثیر تجمیع تنش‌ها در امتداد طولی تونل به واسطه‌ی سه بعدی مدل کردن آن در نشست سطحی باشد. همچنین وجود سربار در مدل سه-بعدی و گسترده مدل شدن آن به همراه افزایش تغییر شکل‌های سازه‌ای در نقاط وسط تونل مدل شده از این عوامل است.

در تحلیل دو بعدی خاک موهر-کولمب نشست حداکثر را پس از حفاری ۱۱/۷۵ میلی‌متر نشان می‌دهد که این مقدار در تحلیل سه بعدی خاک موهر-کولمب ۲۱/۸ میلی‌متر می‌باشد. مقایسه‌ی نمودار در مقطع عرضی نشان می‌دهد، نمودار مدل سه بعدی خاک موهر-کولمب با اختلاف کمی نسبت به مقادیر ابزار دقیق بیشتر است. حداکثر این مقادیر، ۱۴/۷ درصد مطابق نمودار برآزش شده از نقاط ابزار دقیق بیشتر می‌باشد. اما مقادیر به دست آمده از مدل دو بعدی، ۳۸/۱ درصد کمتر از مقادیر ابزار دقیق می‌باشد.

مقایسه‌ی نتایج مدل موهر-کولمب و مدل خاک سخت‌شونده نشان می‌دهد، در مدل دو بعدی ۲۰/۳ درصد و در مدل سه‌بعدی ۳۵ درصد نتایج مدل موهر-کولمب کمتر از مقادیر مدل خاک سخت‌شونده می‌باشد.

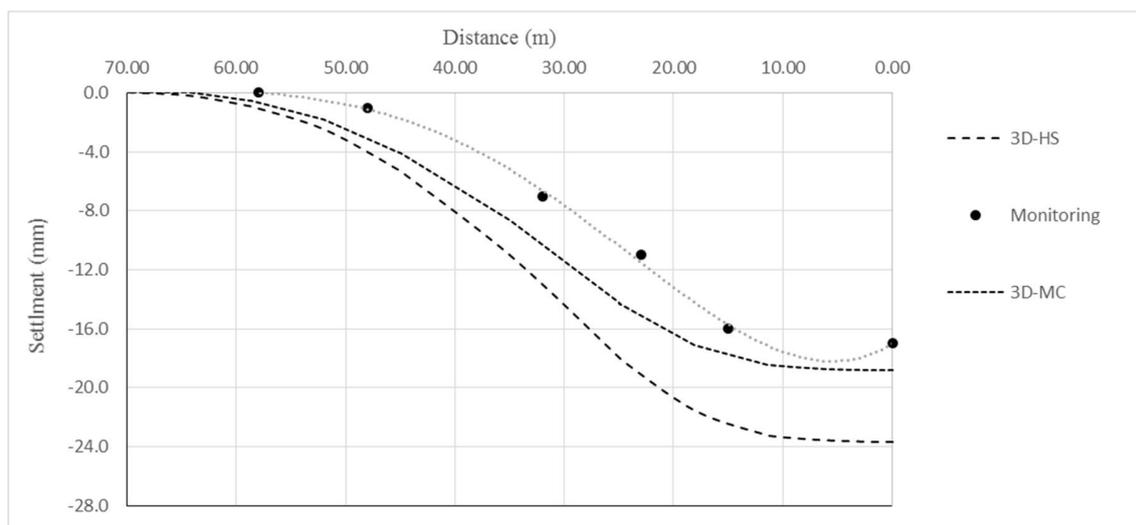
میزان تأثیر جابه‌جایی قائم در فواصل عرضی نسبت به محور حفاری تونل یکی از نتایج ارزشمند در بررسی نشست سطحی تحت تأثیر حفاری زیرزمینی می‌باشد؛ لذا در ادامه به بررسی و مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از تحلیل دو بعدی، سه بعدی و مانیتورینگ پرداخته می‌شود.

همان‌طور که در نمودار ۲-۶ و شکل ۳-۶ نشان داده شده است، مدل دو بعدی عرض، تأثیری در حدود ۱۴/۷ متر را از محور تونل نشان می‌دهد که این مقدار در مدل‌سازی سه بعدی به میزان ۴۲ متر افزایش یافته است. با توجه به نبود داده‌های مربوط به مانیتورینگ در فواصل عرضی بیشتر از ۲۰ متر، مقایسه‌ی عرض تأثیر نشست با مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی میسر نگردید. اما با توجه به روند نمودار برآزش شده از

داده‌های ابزار دقیق می‌توان پیش‌بینی کرد که نتایج حاصل از تحلیل سه‌بعدی تطابق بهتری با واقعیت داشته باشد.

۲-۲-۶-۲-۲-۶ مقطع طولی

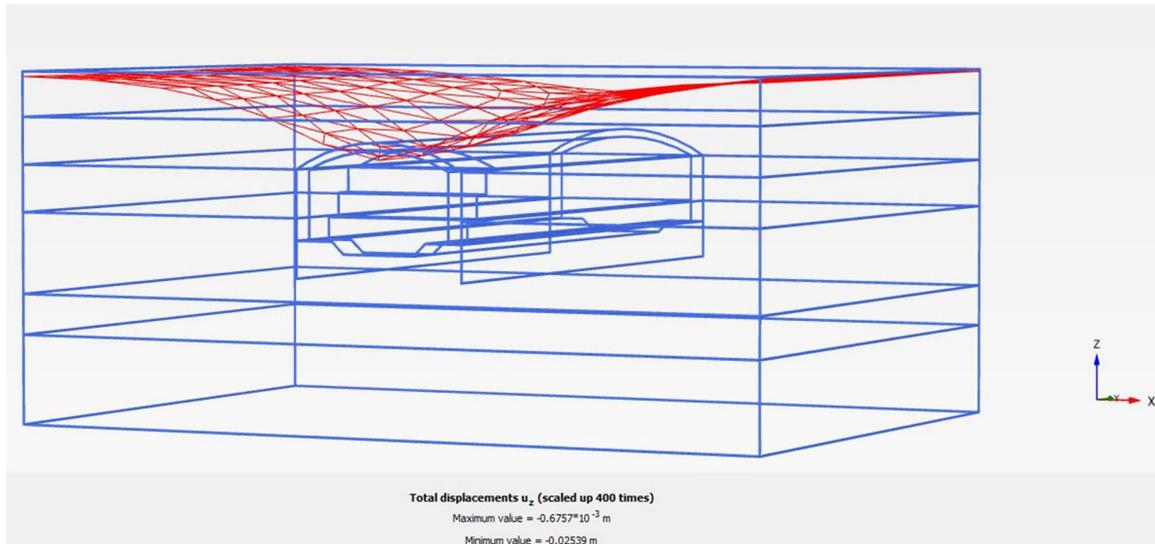
در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی تونل در مقطع طولی با نتایج ابزار دقیق بررسی و نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. با توجه به این که مقایسه در حین انجام عملیات حفاری صورت گرفته است؛ بنابراین جهت انجام کار از فاز ۹ که حفاری ۱۷/۵ متر در طول تونل پیش‌روی داشته است، استفاده نموده‌ایم. تا حدود ۱۶ متری از ابتدای تونل، نشست در سطح زمین، بیش‌ترین مقدار موجود را می‌توان مشاهده کرد که با توجه به دست نخورده بودن زمین مقطع پس از آن مقادیر نشست با نرخ زیادی کمتر می‌شود تا در نهایت به صفر میل می‌کند.



شکل ۲-۶-۲-۲-۶-۲-۲-۶ مقایسه‌ی مدل سه بعدی و نتایج مانیتورینگ مقطع طولی تونل در زمان حفاری

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تحلیل سه بعدی مدل خاک سخت‌شونده ۲۳/۷ میلی‌متر را به عنوان بیش‌ترین جابه‌جایی قائم در زمان حفاری نشان می‌دهد که این مقدار در نتایج ابزار دقیق ۱۷ میلی‌متر، و در مدل موهر-کولمب نیز برابر با ۱۸/۸ میلی‌متر می‌باشد. نمودار در مقطع طولی نشان می‌دهد، تحلیل سه بعدی بیش‌ترین میزان نشست سطح و جابه‌جایی‌های محیطی ایستگاه در ابتدای حفاری اتفاق می‌افتد و با پیشرفت در طول جبهه‌ی کار حفاری از نرخ افزایش آن کاسته می‌شود و مقادیر مانیتورینگ نیز این روند را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل نمودارها مدل سه بعدی موهر-کولمب با اختلاف کمی نسبت به حداکثر مقدار ابزار دقیق و به میزان ۱۰ درصد بیشتر است. با توجه به استفاده از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده، مقادیر حاصل از جابه‌جایی قائم در مدل خاک سخت‌شونده ۳۹ درصد بیشتر از نتایج ابزار دقیق به دست آمده که می‌تواند نشان دهنده‌ی پاسخ، با ضریب اطمینان بیشتر در این مدل رفتاری باشد. با توجه به این‌که این نمودار مربوط به حالتی است که حفاری تا ۱۷/۵ متر پیشرفت داشته، می‌توان تأثیر آن را در بررسی نشست در نقاط با فواصل مختلف از محل خاک‌برداری را مورد مطالعه قرار داد. با توجه به نمودار مشخص می‌گردد که نشست در تحلیل سه بعدی خاک سخت‌شونده تا فاصله‌ی ۴۷ متری و تحلیل سه بعدی خاک موهر-کولمب تا فاصله‌ی ۴۵ متری از محل پیشرفت خاک‌برداری تأثیرگذار بوده و این در حالی است که این مقدار در نتایج ابزار دقیق مقدار ۴۱ متر می‌باشد. با مقایسه‌ی این دو مقدار می‌توان نتیجه گرفت مدل‌سازی سه بعدی به همراه فازبندی، دقت بالایی در پیش‌بینی طول تأثیر نشست‌های حین ساخت و اجرای پروژه دارد. با توجه به این‌که در مدل‌سازی لایه‌های خاک در تمام طول مدل دارای پارامتر ثابت است، نرخ تغییرات، روند مشخصی را دنبال می‌کند که این روند در نتایج ابزار دقیق کمی متفاوت بوده که می‌تواند به دلیل ناهمگنی خاک در مقاطع طولی تونل باشد که این خود اهمیت مطالعات اولیه و شناسایی لایه‌های خاک را در پروژه‌های ژئوتکنیک نشان

میدهد. شکل ۳-۶ محدوده‌ی تأثیر نشست در راستای طولی تونل در مدل سه بعدی را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ تصویر سه بعدی از نشست طولی تونل در حین عملیات ساخت با بزرگ‌نمایی ۴۰۰ برابری

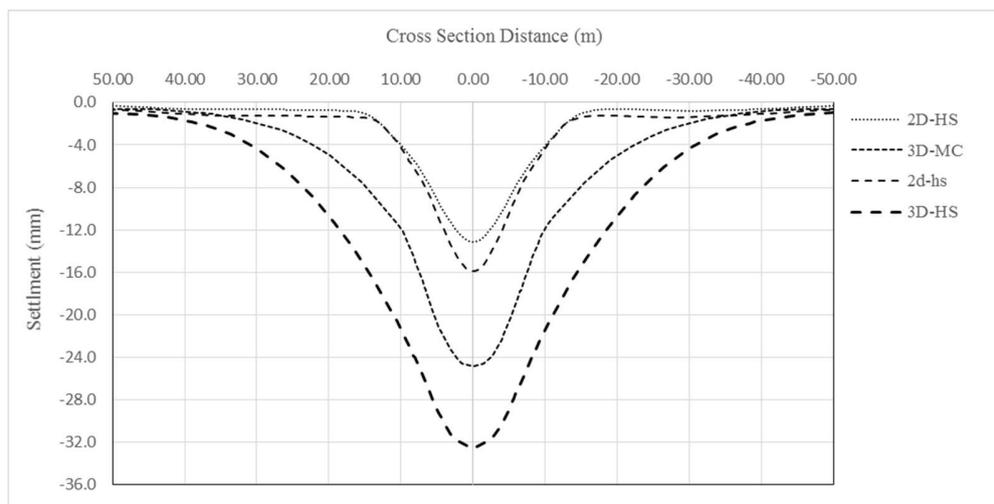
۳-۶ بررسی اثر حفاری بر نشست در تاج تونل

در این قسمت مدل‌های دو بعدی و سه بعدی در سطح منتهی به تاج تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شبیه‌سازی‌ها با هدف بررسی اثر حفاری بر مقدار جابه‌جایی قائم حداکثر تاج تونل در دو مدل دو بعدی و سه بعدی و مقایسه‌ی مدل‌های رفتاری متفاوت در مقطع عرضی تاج تونل، پس از حفر تونل و هم‌چنین مقایسه‌ی مدل‌های سه بعدی در تاج تونل و در مقطع طولی تونل انجام گرفته‌اند.

۳-۶-۱ مقطع عرضی

آکس تونل جهت تعیین مقدار حداکثر نشست تاج تونل در مدل دوبعدی و سه بعدی با فاصله‌ی ۳۵ متری از ابتدای حفاری (مرکز تونل) انجام شده است. مقادیر جابه‌جایی‌های قائم محاسبه و در مدل

رفتاری خاک سخت شونده و موهر-کولمب، با یکدیگر مقایسه و نتایج آن در شکل ۶-۴ نشان داده شده-
اند. همان طور که از شکل دریافت می‌شود، جابه‌جایی قائم حداکثر در سطح منتهی به تاج تونل در مدل
سه بعدی، بیش‌ترین و جابه‌جایی قائم دوبعدی، کم‌ترین را نشان می‌دهد.



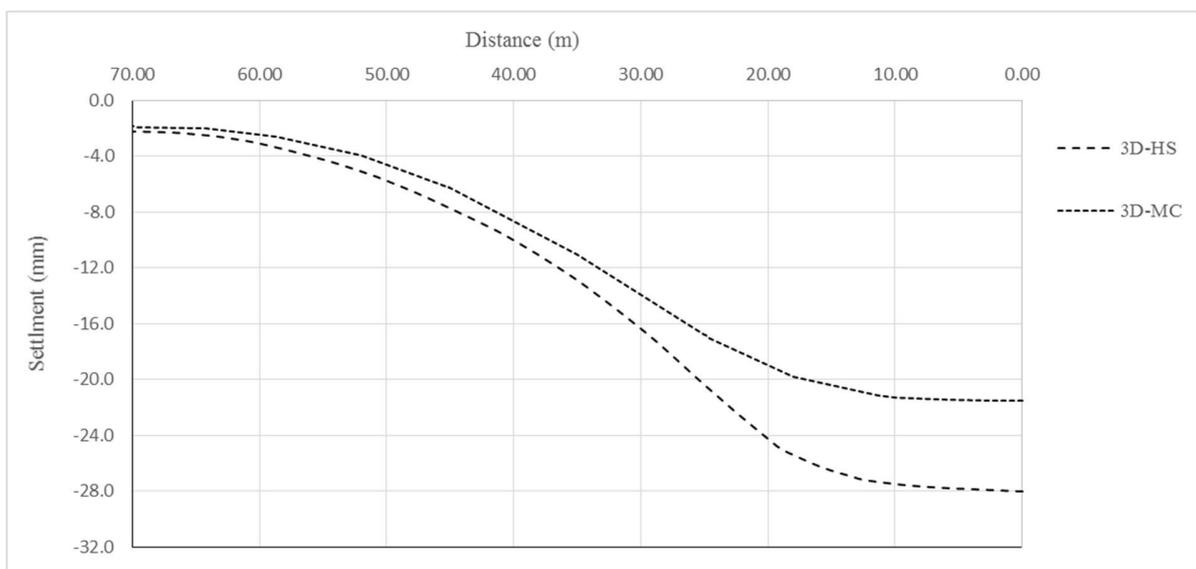
شکل ۶-۴- مقایسه‌ی نشست تاج تونل در مدل دو بعدی و سه بعدی و مقایسه با نتایج مانیتورینگ

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تحلیل دو بعدی خاک سخت‌شونده، نشست حداکثر را پس از حفاری
۱۶ میلی‌متر نشان می‌دهد که این مقدار در تحلیل سه بعدی ۳۲ میلی‌متر و برای مدل موهر-کولمب به
ترتیب ۱۳/۱ و ۲۴/۹ میلی‌متر می‌باشد. مقایسه‌ی نمودار در مقطع عرضی نشان می‌دهد، تحلیل دو بعدی
و سه بعدی روند یکسانی را در فواصل مختلف نسبت به محور تونل دارند. با توجه به نتایج به‌دست آمده
از تحلیل نمودارها مدل سه بعدی خاک سخت‌شونده با نسبت ۲۷ درصد مطابق نمودار از نتایج موهر-
کولمب بیشتر می‌باشد و مقادیر به‌دست آمده از مدل دو بعدی خاک سخت‌شونده ۲۲ درصد بیشتر از
نتایج موهر-کولمب است. بیشتر بودن مقادیر مدل سه‌بعدی از دو بعدی می‌تواند حاصل تجمیع تنش‌ها و
سربار حاصل از خاک و سازه‌های سطحی در امتداد طولی تونل به واسطه‌ی سه بعدی مدل کردن آن در

نشست روی تاج تونل باشد؛ همچنین افزایش تغییر شکل‌های سازه‌ای در نقاط وسط تونل مدل شده می‌تواند تأثیرگذار باشد.

۶-۳-۲ مقطع طولی

نتایج شبیه‌سازی مدل خاک سخت‌شونده و موهر-کولمب در شکل ۶-۵ نشان داده شده است. با توجه به این‌که مقایسه در حین انجام عملیات حفاری صورت گرفته و حفاری کامل نگردیده است؛ بنابراین جهت انجام کار از فاز ۹ که حفاری ۱۷/۵ متر در طول تونل پیش‌روی داشته است، استفاده نموده‌ایم. تا حدود ۱۸ متری از ابتدای تونل، جابه‌جایی قائم در تاج تونل، بیش‌ترین مقدار موجود را می‌توان مشاهده کرد که با توجه به دست‌نخورده بودن زمین در مقطع پس از آن، مقادیر جابه‌جایی قائم نشست با شیب زیاد، کمتر شده و به صفر میل می‌کند.



شکل ۶-۵ مقایسه‌ی مدل سه بعدی و نتایج مانیتورینگ تاج تونل در مقطع طولی حین حفاری

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تحلیل سه بعدی خاک سخت‌شونده ۲۸ میلی‌متر را به‌عنوان بیش‌ترین

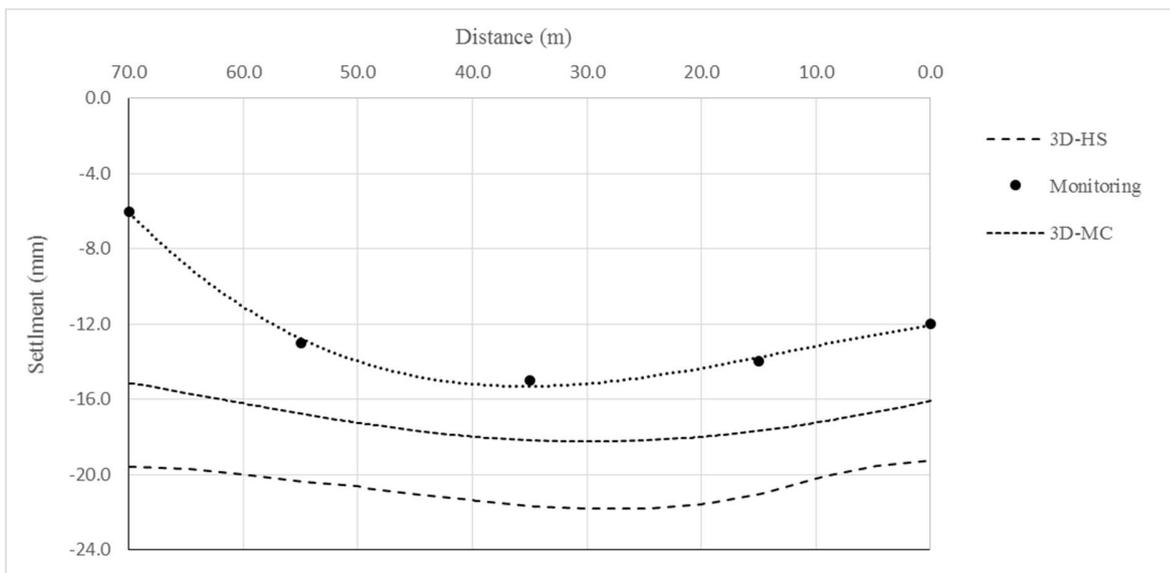
جابه‌جایی قائم در زمان حفاری نشان می‌دهد که این مقدار در نتایج موهر-کولمب ۲۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. نمودار در مقطع طولی و تحلیل سه بعدی نشان می‌دهد بیش‌ترین میزان نشست تاج تونل در ابتدای حفاری اتفاق می‌افتد و با پیشرفت در طول جبهه‌ی کار حفاری از نرخ افزایش آن کاسته می‌شود. با توجه به نتایج به-دست آمده از تحلیل نمودارها، مدل سه بعدی خاک سخت‌شونده نسبت به مقادیر موهر-کولمب با نسبت ۲۹ درصد بیشتر می‌باشد. این پاسخ می‌تواند نشان دهنده‌ی نشست با ضریب اطمینان بیشتر در مدل سه‌بعدی خاک سخت‌شونده باشد. با توجه به این نمودار که مربوط به به پیشرفت حفاری تا ۱۷/۵ متری می‌باشد، مشخص می‌گردد که جابه‌جایی قائم در تحلیل سه بعدی خاک سخت‌شونده تا فاصله‌ی ۵۵ متری از محل پیشرفت خاک‌برداری تأثیرگذار بوده و این در حالی است که این مقدار در نتایج موهر-کولمب تقریباً برابر با ۵۹/۵ متر است. شکل ۶-۵ محدوده‌ی تأثیر نشست در راستای طولی تونل در مدل سه بعدی را نشان می‌دهد.

۳-۶ بررسی اثر حفاری بر نشست در ردیف شمع سازه‌نگهبان

در این قسمت مدل سه بعدی و نتایج مانیتورینگ در مقطع طولی ردیف شمع‌های سازه‌نگهبان تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل‌سازی با هدف بررسی اثر حفاری بر مقدار جابه‌جایی قائم حداکثر ردیف شمع در مدل سه بعدی مدل رفتاری خاک سخت‌شونده و موهر-کولمب و مقایسه با نتایج ابزار دقیق در مقطع طولی شمع‌های تونل، پس از حفر تونل انجام گرفته‌اند.

نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. با توجه به این که مقایسه در پایان انجام عملیات حفاری صورت گرفته است، جابه‌جایی‌های قائم از ابتدا تا انتهای تونل در مدل سه‌بعدی و نتایج مانیتورینگ، تقریباً مقداری ثابت است. اختلاف جابه‌جایی قائم در کم‌ترین و بیش‌ترین حالت در مدل سه‌بعدی خاک سخت‌شونده ۲/۳ میلی‌متر، مانیتورینگ ۹ میلی‌متر و در مدل موهر-کولمب نیز ۳ میلی‌-

متر می‌باشد. از مقایسه‌ی نمودار جابه‌جایی قائم مدل سه‌بعدی خاک سخت‌شونده و نمودار برآزش نتایج ابزار دقیق می‌توان مشاهده نمود، نمودار مدل سه‌بعدی خاک سخت‌شونده ۴۵ درصد مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد که این مقادیر در مدل موهر-کلمب ۲۱/۱۳ درصد بیشتر است و با توجه به جابه‌جایی‌های قائم اتفاق افتاده در سطح و تاج تونل امری محتمل به نظر می‌رسد.



شکل ۶-۶ مقایسه‌ی مدل سه بعدی و نتایج مانیتورینگ ردیف شمع سازه‌نگهبان در مقطع طولی پس از انجام

حفاری

ملاحظه می‌شود نشست‌ها در نتایج ابزار دقیق ناهماهنگ می‌باشند که می‌تواند ناشی از ناهمگنی خاک اطراف شمع‌ها باشد، اما بیش‌ترین جابه‌جایی قائم در نتایج ابزار دقیق مربوط به ۲۸ متری از ابتدای حفاری و به میزان ۱۵ میلی‌متر می‌باشد. نشست در مدل سه بعدی نیز تقریباً روند مشابهی دارد و نشست در بیش‌ترین حالت ۱۹/۵ میلی‌متر و در کم‌ترین مقدار خود ۱۷/۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها

۷-۱ نتایج

- جواب مدل ساخته شده سه بعدی اجزاء محدود، سازگاری مناسب در مطالعه‌ی موردی ایستگاه خط ۲ قطارشهری میدان شهدای مشهد را با مدل اندازه‌گیری شده در سطح زمین داشته و باید توجه داشت داده‌های ورودی به مدل دارای مشخصات مناسب با مقادیر واقعی تونل را داشته باشد.
- جواب مدل ساخته شده‌ی سه بعدی اجزاء محدود، سازگاری مناسب در مطالعه‌ی موردی ایستگاه خط ۲ قطارشهری میدان شهدای مشهد با نتایج اندازه‌گیری شده در روی شمع‌ها داشته است.
- در مدل سه‌بعدی، توانایی ایجاد فازهای متفاوت، مشابه عملیات اجرایی انجام شده بر میزان نشست سطح زمین بسیار تأثیرگذار است.
- پروفیل‌های طولی و عرضی مربوط به جابه‌جایی سطح زمین در اثر حفاری، با توجه به مدل سه‌بعدی تونل، به واقعیت نزدیک‌تر است. باید توجه داشت که این مقادیر در مدل رفتاری خاک سخت‌شونده، ۲۶/۲ درصد بیش‌تر از مقادیر در مدل رفتاری موهر-کولمب می‌باشد؛ لذا مدل رفتاری خاک سخت‌شونده می‌تواند ضریب اطمینان بیشتری را برای استفاده در پروژه‌های مشابه در نظر بگیرد.
- میزان فاصله‌ی عرضی تأثیرگذاری تونل بر نشست سطح زمین از محور اصلی در مطالعه‌ی موردی حاضر در مدل دوبعدی خاک سخت‌شونده برای نشست ۲ میلی‌متر برابر با ۱۴/۹ متر و برای مدل دو-بعدی موهر-کولمب برابر با ۱۳/۸ متر می‌باشد.

• میزان فاصله‌ی عرضی تأثیرگذاری تونل بر نشست سطح زمین از محور اصلی در مطالعه موردی حاضر در مدل سه‌بعدی خاک سخت شونده برای نشست ۲ میلی‌متر برابر با ۴۴/۲ متر و برای مدل سه‌بعدی موهر-کولمب برابر با ۳۵ متر می‌باشد.

• میزان فاصله‌ی طولی تأثیرگذاری تونل بر نشست سطح زمین در محور اصلی، در مطالعه‌ی موردی حاضر در مدل سه‌بعدی خاک سخت شونده برای نشست ۲ میلی‌متر برابر با ۳۰ متر و برای مدل سه-بعدی موهر-کولمب برابر با ۲۷/۵ متر می‌باشد.

۲-۷ پیشنهادها

- بررسی نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل خط ۳ در تقاطع با خط ۲ در محدوده‌ی ایستگاه میدان شهدای مشهد با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D
- بررسی نشست سطح زمین تحت تأثیر حفاری در سایر ایستگاه‌ها با نرم‌افزار FLAC3D
- بررسی دینامیکی تحت تأثیر زلزله در ایستگاه خط ۲ قطار شهری میدان شهدای مشهد

منابع

- مهندسين مشاور ساحل، (۱۳۸۹)، بررسی روش اجرای خط ۲ مشهد.
- مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)، مطالعات ژئوتکنیک ایستگاه G2.
- شرکت قطارشهری مشهد و حومه، (۱۳۹۰)، "دستورالعمل نقشه برداری کنترل نشست سطحی و سازه-های مسیر".
- مهندسين مشاور سانو، (۱۳۹۱)، "گزارش محاسبات سازهی ایستگاه G2.
- مهندسين مشاور ساحل، (۱۳۸۸)، مطالعات ژئوتکنیک ایستگاه G2.
- صالحی. م. ص. و ابریشمی. س، (۱۳۹۰)، "مطالعهی تأثیر حفاری تونل‌های شهری بر سازه‌های سطحی" ششمین کنگرهی ملی مهندسی عمران، سمنان.
- جهانیان. ه، (۱۳۹۱)، "بررسی تأثیر حفاری تونل‌های کم عمق شهری بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی ساختمان‌ها" همایش ملی عمران و توسعهی پایدار، مشهد.
- غفاری سرجامی. ع. و ابریشمی. س، (۱۳۹۱)، "تحلیل و بررسی تأثیر حفاری تونل‌های شهری به روش NATM بر سازه‌های اطراف- مطالعهی موردی تونل امداد مشهد" نهمین کنگرهی بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان.
- عطایی. م، (۱۳۸۴)، "معدن کاری زیرزمینی(مباحث ویژه)"، جلد دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
- مدنی. ح، (۱۳۹۰)، "تونل‌سازی"، جلد اول، حفاری و اجرا، انتشارات دانشگاه امیرکبیر.
- پاکباز. م. س. و حیدری‌زاده. ی، (۱۳۸۷) "بررسی نشست خاک در اثر حفر تونل شهری اهواز" چهارمین کنگرهی ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

- طلایی. آ. و امین پور. ح، (۱۳۹۰)، "بررسی مدل‌های رفتاری ارتجاعی - خمیری در آنالیز عددی تونل‌ها" همایش ملی سازه، راه، معماری، چالوس.
- صالح زاده. م، (۱۳۹۲)، "عملکرد TBM در تونل‌های سنگی"، انتشارات قرارگاه خاتم الانبیا.
- حجازی راد. گنجیان، (۱۳۹۴)، "بررسی روش‌های مناسب حفاری چند مرحله‌ای ایستگاه‌های زیرزمینی عمیق خط هفت مترو تهران، مطالعه‌ی موردی ایستگاه X7" نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاها، زیرزمینی.
- بادآشپانی. م. گلشنی. ع. ا، (۱۳۹۴)، "تحلیل دینامیکی سازه‌های ساخته شده به روش کند و پوش"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت.
- گوهری. م، "آموزش مقدماتی Plaxis"، تهران، ۱۳۸۶

Sadaghiani, M.H., Dadizadeh, S., (2010). Study on the Effect of a New Construction Method for a Large Span Metro Underground Station in Tabriz-Iran, Tunneling and Underground Space Technology, 63-69.

Fang, Q., Zhang, D., Wong, L. (2012). Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground, Tunneling and Underground Space Technology. 29, 10-30.

Badie A. and Wang M. C. (1983) "Stability of spread footing above void in clay" Journal of Geotechnical engineering, 110.

Wang M. C. and Badie A. (1984) "Effect of underground void on foundation stability" Journal of Geotechnical engineering, 111.

Chen S. Ho C. and Kuo Y. (2011) "Three-Dimensional Numerical Analysis of Ground Surface Settlement Induced by the Excavation of Shield Tunnels".

Nagy N. M. (2009) "Numerical Investigations of Footing Width Influence on the Surface Footing-Tunnel Interaction" 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology.

Katzenbach R. and Leppela S. (2013) "Soil-Structure-Interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time" 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Technique.

Yoo, C., (2009). Performance of Multi-Faced Tunnelling – A 3D Numerical Investigation, Tunneling and Underground Space Technology, 562-57

Azam G. and Hsieh C. W. (1991) "Performance of Strip Footing on Stratified Soil Deposit with Void" Journal of Geotechnical engineering.

PLAXIS Reference Manual, 2D-Version 8, (2002), A.A. Balkema Publishers, Lisse, Abingdon, Exton(pa), Tokyo.

PLAXIS Material Model Manual, 2D-Version 8, (2002), A.A. Balkema Publishers, Lisse Abingdon, Exton(pa), Tokyo.

PLAXIS Material Model Manual, 3D, (2010), Lisse Abingdon, Exton(pa), Tokyo

Baziar M,H, Rabeti Moghadam.(2014)" Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration" Tunnelling and Underground Space Technology

Atkinson,H.,and Potts, (1977),"settlement above Shallow Tunnels in Soft .Plaxis8.2 Ground",journal of Geotechnical Engineering.,ACDE,103

Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., and Swolfs, W. M., “PLAXIS 3D Manuals (General & Tutorial & Material Models)”, A. A. Balkema, 2010.

Clough, G. W., Smith, E. M., and Sweeney, B. P., “Movement control of excavation support systems by iterative design”, Current Principle and Practices, Foundation Engineering Congress, Vol. 2, ASCE, pp. 869-884, 1989.

پیوست

نمونه‌ای از شیت برداشت نقشه برداری

کارفرما: شهرداری مشهد - قطار شهری مشهد		نام پروژه: خط ۲ قطار شهری مشهد						
مشاور: مهندسین مشاور پژوهش		پیمانکار موسسه مهندسی رهاب						
عنوان فرم گزارش نشست ستجی سطحی ایستگاه شهدا		تاریخ اندازه گیری:						
صباح		ساعت قرائت:						
شماره سریال:		68.3						
مترژ حفاری از ابتدا:		موقعیت ایستگاه G۲ واقع روی عرصه						
مستول قرائت:		page 1-1						
م-آخوند زاده		ارتفاع کنونی بین						
شماره ردیف	فاصله از آکس (AX)	فاصله از ابتدای حفاری (line)	ارتفاع اولیه بین (m)	ارتفاع کنونی بین (m)	جلیجایی کلی (m)	ارتفاع بین در روز قبل (m)	جلیجایی نسبت به روز قبل (m)	موقعیت نقطه
1R	5.200	32.100	984.374	984.370	0.004	984.370	0.000	روی عرصه
1C	2.000	28.800	984.344	984.335	0.009	984.335	0.000	روی عرصه
1L	6	28.8	984.344	984.336	0.008	984.336	0.000	روی عرصه
2R	19.6	40.5	984.397	984.387	0.010	984.387	0.000	روی عرصه
2C	4.5	39.5	984.405	984.392	0.013	984.392	0.000	روی عرصه
2L	20.3	38.5	984.407	984.398	0.009	984.398	0.000	روی عرصه
3R	6.8	36.8	984.339	984.321	0.180	984.321	0.000	روی عرصه
3C	2	35.82	984.424	984.405	0.019	984.405	0.000	روی عرصه
3L	4.1	36.2	984.45	984.432	0.017	984.432	0.000	روی عرصه
3R2	14.5	50	984.322	984.317	0.005	984.317	0.001	روی عرصه
4R	7.3	53.8	984.325	984.317	0.008	984.317	0.000	روی عرصه
4C	1.6	53.8	984.334	984.322	0.012	984.322	0.000	روی عرصه
4L	4.2	53.8	984.454	984.444	0.010	984.444	0.000	روی عرصه
4R2	13.3	53.8	984.308	984.303	0.005	984.303	0.000	روی عرصه
5R	11	63	984.314	984.308	0.006	984.308	0.000	روی عرصه
5C	4.2	63	984.338	984.332	0.006	984.332	0.000	روی عرصه
5L	3.5	63	984.348	984.34	0.008	984.34	0.001	روی عرصه
6R	8	71.9	984.307	984.305	0.002	984.305	0.000	روی عرصه
6C	2	71.9	984.333	984.331	0.002	984.331	0.000	روی عرصه
7R	7.8	79.7	984.314	984.314	0.000	984.314	0.000	روی عرصه
7C	1	79.7	984.352	984.351	0.001	984.351	0.000	روی عرصه

شماره ردیف		فاصله از آکس (AX)	فاصله از ابتدای حفاری (line)	ارتفاع اولیه بین (m)	ارتفاع کنونی بین (m)	جلبجایی کلی (m)	ارتفاع بین در روز قبل (m)	جلبجایی نسبت به روز قبل (m)	موقعیت نقطه
11BSP	11	1.1	975.111	975.111	0.012	975.111	0.000	روی ستون ها	
4BSP	10.1	15.2	975.33	975.314	0.014	975.314	0.000	روی ستون ها	
5BSP	15	24.3	974.786	974.764	0.004	974.764	0.000	روی ستون ها	
8BSP	21.5	28.8	975.056	975.056	0.000	975.056	0.000	روی ستون ها	
9BSP	24.4	28.8	974.943	974.943	0.000	974.943	0.000	روی ستون ها	
2BSP	10.800	36.200	975.330	975.315	0.015	975.306	0.000	روی ستون ها	
13BSP	51.2	40.75	974.808	974.808	0.000	974.808	0.000	روی ستون ها	
3BSP	11.500	55.400	975.276	975.258	0.013	975.253	0.000	روی ستون ها	
6BSP	15.5	45.5	974.969	974.962	0.007	974.962	0.000	روی ستون ها	
7BSP	31	51	975.125	975.124	0.001	975.124	0.000	روی ستون ها	
1BSP	9.800	70.200	975.178	975.174	0.006	975.174	0.000	روی ستون ها	

Abstract

Nowadays, due to the increasing expansion of urban areas, increasing the density of surface structures and lack of space for intra-urban transportation, the necessity of the implementing underground structures such as underground tunnels and metro stations in urban areas is essential. One of the most important factors in implementing of deep metro station in urban areas is the appropriate method of excavating, which has a significant effect on the stability of surrounding spaces of the tunnel during excavation, surface settlements caused by excavation, as well as the long-term stability of the excavated space (metro station). One of the main goals of tunnel designers is to ensure that the tunnel does not fall during and after the implementation as well as the lack of inappropriate deformations in surface structures. So, recognizing and investigating the interaction of tunnels, soil and surface structures are very important and should be considered. Therefore, in the present study, we studied these interactions and compared them with monitoring values of the settlement at the Shohada Square metro station, line 2 city train, in Mashhad. This study aimed to investigate the effects of underground excavation on behavior of soil. To achieve this goal, researches in this field were reviewed at first. Most of these studies are done using the numerical simulation as well as the finite element method software packages. In a few cases, the verification of the numerical model is done by comparing the results of the model with the instrumentation results of the actual excavated tunnel. Since previous studies have often been investigated settlement caused by mechanized excavation or no comparing with the results of instrumentation, in the present study the surface settlement caused by underground excavation and its comparison with two and three-dimensional models after the excavation of the Shohada Square metro station, line 2 city train, in Mashhad were investigated. Also, according to the positive and negative aspects of different methods as well as available facilities, a numerical simulation using two finite element method software packages, PLAXIS 2D ver. 8.6 and PLAXIS 3D, was used in this study. Using the numerical model, changes in the different surfaces related to tunnel and soil around the tunnel were investigated.

(Russian), surface **Keywords:** *metro station, pre- supporting concrete arc method settlement, PLAXIS 2D, PLAXIS 3D, instrumentation*



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**Study of the effect of underground excavation on ground settlement with
comparison with actual data**

Case Study: Mashhad Subway Line 2

Reza Madani

Supervisor:

Dr.Reza Naderi

September, 2017