

اللَّهُمَّ صَلِّ عَلَى مُحَمَّدٍ



دانشکده : مهندسی عمران - محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته: عمران گرایش: خاک و پی

## عنوان پایان نامه:

مدل سازی عددی دوراهی تونل‌های شهری - مطالعه موردی تونل نیایش

در آبرفت درشت دانه تهران

نام دانشجو:

مژگان فلاح زاده شهرکتی

استاد راهنما(اصلی):

دکتر علی اکبر گلشنی

استاد مشاور:

دکتر سید شهاب الدین یثربی

خرداد 91

**تأییدیه هیات داوران**  
(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای:

را با عنوان:

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی تأیید می کند.

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیئت داوران
			۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
			۳- استاد مشاور
			۴- استاد ممتحن
			۵- استاد ممتحن
			۶- نماینده گروه

## آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب.....دانشجوی رشته..... ورودی سال.....  
تحصیلی.....»

مقطع ..... دانشکده ..... متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:.....

تاریخ:.....

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده 1: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده 2: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته

در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار

خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و

مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده 3: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده 4: در صورت عدم رعایت ماده 3، 50% بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده 5: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده 4 را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده 6: اینجانب دانشجوی رشته مقطع

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

## تقدیم

تقدیم بہ پدر و مادر بزرگوارم، آنان کہ وجودم برایشان ہے۔ بیخ بود و وجودشان برام ہے۔ مہر

توانشان برنت تابد توانای برہم و مویشان سپید کشت تارویم سپید ماند۔

آنان کہ فروغ نگاہشان، کرم کلانشان و روشنی روششان ہمراہ جادوان من است۔

آنان کہ راسق قلمم فریگی قاتشان تجلی یافت۔

ہم و وجودشان ہرگز نہوار ہوا۔

## تشکر و قدردانی

خداوند عزیز و بزرگ را شاکرم که بار دیگر به لطف بیکرانش توانستم گامی مثبت در ادامه راه زندگی بردارم، که بی تردید اگر لطفش نبود، سختی‌های راه، ادامه آن را بسی دشوار می‌نمود.

اکنون که انجام این تحقیق با موفقیت به اتمام رسید، بر خود لازم می‌دانم که از تمامی کسانی که بنده را در انجام این تحقیق یاری رساندند، صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم.

از جناب آقای دکتر علی اکبر گلشنی استاد راهنمای گرانقدرم که از هیچ کمکی در راستای انجام این تحقیق، دریغ نورزیدند و همواره بنده را مورد لطف و عنایت خود قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از جناب آقای دکتر سید شهاب‌الدین یثربی که به عنوان مشاور در این پایان نامه از حضور ایشان بهره برده‌ام کمال تشکر و قدردانی را دارم.

بر خود لازم می‌دانم که از اساتید محترم گروه خاک و پی دانشگاه تربیت مدرس آقایان دکتر علی کمک پناه، دکتر محمود یزدانی و دکتر محمد نوروز علیایی که در طول دوران تحصیل همواره از دانش و تجربیات گرانبهایشان استفاده نموده‌ام، قدردانی نمایم.

هم‌چنین از همکاری صمیمانه آقایان مهندس جواد هدایتی، مهندس سینا مجیدیان، مهندس علیرضا اردکانی، مهندس کامیل خاکپور، مهندس نعمتی، مهندس نجاتی و مسئولین محترم شرکت مهندسی مشاور پژوهش عمران راهوار که در طول انجام این پایان نامه همواره یار و همراه من بوده‌اند، تشکر می‌نمایم و برای ایشان توفیق و سربلندی را خواهانم.

## چکیده

با توسعه و گسترش شهرهای بزرگ و مسائل ترافیکی نیاز به وجود و احداث تونل‌ها در عمق‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. تونل سازی، باعث ایجاد تغییر در نحوه تمرکز تنش در اطراف فضای حفاری شده، می‌شود. به‌طور معمول تحلیل پایداری بازشوهای زیرزمینی با استفاده از فرض کرنش صفحه‌ای انجام می‌پذیرد. اما برخی از قسمت‌های تونل مانند سطح خاکبرداری، تقاطع و نواحی که هندسه آنها به‌طور ناگهانی تغییر می‌یابد، می‌بایست به‌صورت سه بعدی تحلیل شوند. یکی از انواع تقاطع، دوراهی‌ها می‌باشند. دوراهی به دو صورت طراحی می‌شود: تونل دسترسی به تونل اصلی منتهی می‌شود، تونل دسترسی از تونل اصلی انشعاب می‌گیرد.

در این پایان نامه، به بررسی امکان مدل سازی دوبعدی دوراهی تونل صدر- نیایش پرداخته شده است. برای مدل سازی دوبعدی ابتدا می‌بایست بحرانی‌ترین مقطع تعیین گردد. این بررسی‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای FLAC 2D و FLAC 3D و با بهره‌گیری از اطلاعات موجود از شرایط اولیه حاکم بر منطقه مورد مطالعه، از طریق مدل سازی سه بعدی و دوبعدی بر اساس دو مدل رفتاری موهر- کلمب و موهر- کلمب اصلاح شده سخت شونده/ نرم شونده در حالت استاتیکی انجام شده است.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل، عمق روباره، ضخامت بتن‌پاششی، ایجاد پدیده قوس‌زدگی و اندازه دهانه مقطع عرضی در تعیین مقطع بحرانی تأثیرگذار است. در این پروژه مقطع بحرانی از لحاظ میزان ماکزیمم نشست سطحی زمین، در فاصله قطر بزرگ‌ترین دهانه تونل از مقطع انشعاب دوراهی قرار دارد که دارای بیشترین عمق روباره و کمترین ضخامت بتن‌پاششی است. میزان ماکزیمم تورم در کف مقطعی از تونل که دارای بزرگ‌ترین قطر دهانه می‌باشد، رخ داده است. در مدل سازی دوبعدی جهت اعمال تأثیر بعد سوم (خاکبرداری و نصب سیستم نگهداری) از فاکتور ترخیص تنش استفاده شده است. فاکتور ترخیص تنش با استفاده از نتایج حاصل از مدل سازی سه بعدی تعیین شده است. نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی با در نظر گرفتن میزان مناسب فاکتور ترخیص تنش، با نتایج حاصل از رفتارسنجی و تحلیل سه بعدی هم‌خوانی قابل قبولی دارد.

**کلید واژه:** دوراهی، مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی، تونل صدر- نیایش، NATM، FLAC.



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
د.....	فهرست شکل‌ها.....
ح.....	فهرست جدول‌ها.....
1.....	فصل 1- مقدمه .....
1.....	1-1- پیشگفتار .....
3.....	2-1- هدف از انجام پروژه .....
3.....	3-1- مراحل انجام تحقیق .....
4.....	فصل 2- مقدمه ای بر حفر فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری .....
4.....	2-1- مقدمه .....
4.....	2-2- تونل‌سازی در محیط‌های شهری.....
5.....	3-2- حفر تونل در اعماق کم .....
5.....	4-2- روش‌های حفر فضاهای زیرزمینی .....
6.....	2-4-2-1- تعریف تونل بزرگ مقطع .....
6.....	2-4-2-2- شکل سطح مقطع .....
7.....	2-4-2-3- روش‌های حفاری تونل‌های بزرگ مقطع .....
7.....	2-4-2-3-1- روش حفاری مکانیزه تمام مقطع .....
8.....	2-4-2-3-2- روش نیمه بالایی با پله‌های کوتاه .....
9.....	2-4-2-3-3- روش دیافراگم میانی .....
10.....	2-4-2-4- روش گالری‌های کناری .....
11.....	2-4-2-5- حفر تونل با استفاده از تونل پایلوت .....
11.....	2-4-2-6- روش حفاری مرحله‌ای اتریشی .....
13.....	2-5- سیستم‌های نگهداری .....
14.....	2-5-1- بتن پاششی .....
16.....	2-5-2- قاب‌های فولادی .....
16.....	2-5-2-1- قاب‌های فولادی مشبک .....
17.....	2-5-2-2- پیش‌نگهداری یا تقویت .....
18.....	2-5-2-3- تزریق .....
19.....	2-5-2-4- روش چتری .....

26.....	6-2 - پدیده نشست .....
28.....	7-2 - کاربرد روشهای عددی برای پیش بینی نشست سطح زمین .....
29.....	1-7-2 - روش المان محدود .....
30.....	2-7-2 - روش المان مرزی .....
30.....	3-7-2 - روش تفاضل محدود .....
31.....	4-7-2 - روش المان مجزا .....
32.....	8-2 - تقاطع در تونل .....
37.....	<b>فصل 3 - مشخصات محل پروژه .....</b>
37.....	1-3 - مقدمه .....
37.....	2-3 - موقعیت جغرافیایی محدوده طرح .....
37.....	1-2-3 - معرفی پروژه تونل نیایش .....
37.....	2-2-3 - موقعیت دوراهی R04 .....
42.....	3-3 - مطالعات زمین شناسی .....
42.....	1-3-3 - زمین شناسی عمومی منطقه .....
43.....	2-3-3 - زمین شناسی مهندسی محدوده طرح .....
47.....	3-3-3 - زمین شناسی ساختمانی محدوده طرح .....
47.....	4-3 - وضعیت زیرسطحی محدوده طرح .....
49.....	1-4-3 - وضعیت آبهای زیرزمینی محدوده طرح .....
49.....	2-4-3 - پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های زیرسطحی .....
51.....	5-3 - روش حفاری .....
56.....	<b>فصل 4 - مدلسازی عددی .....</b>
56.....	1-4 - مقدمه .....
56.....	2-4 - معرفی نرم افزار .....
59.....	3-4 - مدل سازی سه بعدی .....
59.....	1-3-4 - انتخاب محدوده مناسب از محیط دربرگیرنده .....
63.....	2-3-4 - انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن .....
63.....	1-2-3-4 - مدل رفتاری موهر - کلمب .....
66.....	2-2-3-4 - مدل رفتاری پلاستیک با سخت شوندگی - نرم شوندگی کرنشی .....
67.....	3-3-4 - مدل سازی بتن پاششی .....
68.....	4-3-4 - اعمال شرایط مرزی و تنشهای اولیه .....

69	5-3-4 - حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری
70	4-4 - مدل سازی دوبعدی
74	فصل 5 - آنالیز نتایج
74	1-5 - مقدمه
74	2-5 - تعیین مدل رفتاری مناسب
75	1-2-5 - نتایج حاصل از مدل رفتاری موهر - کلمب
78	2-2-5 - مقایسه نتایج مدل سازی سه بعدی و نتایج رفتارسنجی
81	3-2-5 - اصلاح مدل رفتاری
82	4-2-5 - صحت سنجی مدل اصلاح شده SS
84	5-2-5 - مقایسه نتایج مدل رفتاری SS اصلاح شده و نتایج رفتارسنجی
85	6-2-5 - تحلیل پایداری مدل سه بعدی
88	7-2-5 - تحلیل پایداری سیستم نگهداری
92	3-5 - جمع بندی تعیین مقطع بحرانی
94	1-3-5 - مدل سازی دوبعدی (اعمال ترخیص تنش مناسب)
97	4-5 - جمع بندی
98	فصل 6 - نتیجه گیری و پیشنهادات
98	1-6 - نتیجه گیری
99	2-6 - پیشنهادات
100	فهرست مراجع
103	واژه نامه فارسی به انگلیسی
104	واژه نامه انگلیسی به فارسی

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
2.....	شکل 1-1- نواحی سه بعدی در تونل .....
2.....	شکل 2-1- انواع تقاطعها.....
6.....	شکل 1-2- نسبت ارتفاع به عرض تونلهای بزرگ مقطع در ژاپن .....
7.....	شکل 2-2- سطح مقطع استاندارد یک تونل آزادراهی دارای 3 باند.....
8.....	شکل 3-2- تصویری از دستگاههای حفر تمام مقطع جدید.....
8.....	شکل 4-2- روش حفاری نیمه بالایی با پله کوتاه.....
9.....	شکل 5-2- زونهای بحرانی در روش نیمه بالایی با پله کوتاه.....
10.....	شکل 6-2- روش دیافراگم میانی .....
10.....	شکل 7-2- مراحل ساخت تونل به روش گالریهای کناری .....
11.....	شکل 8-2- حفر تونل‌های آزادراه Tomei- Meishin با استفاده از تونل پایلوت.....
12.....	شکل 9-2- روش اتریشی در تونل کاراوانکن.....
13.....	شکل 10-2- روش حفاری مرحله‌ای تونل با توجه به ابعاد مقطع و شرایط ژئوتکنیکی.....
17.....	شکل 11-2- مقطع قاب مشبک.....
18.....	شکل 12-2- قسمت‌های مختلف پوشش بتنی .....
19.....	شکل 13-2- روش‌های رایج تزریق برای بهبود شرایط زمین .....
20.....	شکل 14-2- روش پیش نگهدارنده چتری .....
20.....	شکل 15-2- روش برش شیاری در سینه کار.....
21.....	شکل 16-2- انواع روشهای چتری .....
21.....	شکل 17-2- روش پیش نگهدارنده چتری .....
22.....	شکل 18-2- روش pipe roofing .....
22.....	شکل 19-2- الف) مشخصات لوله‌گذاری به روش pipe roofing، ب) مراحل مختلف در یک سیکل حائل گذاری چتری.....
25.....	شکل 20-2- پیش‌نگهدارنده طاق بتنی .....
28.....	شکل 21-2- هندسه نشست ناشی از احداث تونل بصورت سه بعدی.....
29.....	شکل 22-2- طبقه بندی روشهای عددی .....
32.....	شکل 23-2- مقایسه ابعاد تقاطع با ابعاد هر یک از بازشوها.....

- شکل 2-24- جهت درزه‌ها در محل تقاطع..... 33
- شکل 2-25- توزیع تنش در تقاطع..... 33
- شکل 2-26- فقدان سیستم نگهداری در محل تقاطع..... 33
- شکل 2-27- تأثیر شکل تقاطع بر محدوده ناحیه تأثیر..... 34
- شکل 2-28- تأثیر اندازه بازشوها در تقاطع بر محدوده ناحیه تأثیر..... 35
- شکل 2-29- تنش در دیواره تونل واقع در مقابل انشعاب..... 35
- شکل 3-1- عکس ماهواره ای منطقه طرح و مسیر تقریبی تونل نیایش..... 38
- شکل 3-2- پلان مسیر تونل نیایش، تهران..... 38
- شکل 3-3- پلان دوراهی R04..... 39
- شکل 3-4- عمق روباره در طول محور تونل..... 40
- شکل 3-5- مقطع عرضی دوقلو..... 40
- شکل 3-6- پلان مقاطع عرضی 4-1..... 41
- شکل 3-7- پلان مقاطع عرضی 8-5..... 42
- شکل 3-8- نقشه زمین شناسی تهران (Q-PL سازند A)..... 45
- شکل 3-9- نقشه زمین شناسی محدوده طرح..... 46
- شکل 3-10- نقشه گسل‌های منطقه طرح..... 48
- شکل 3-11- مراحل حفاری تونل..... 52
- شکل 3-12- مراحل حفاری تونل..... 53
- شکل 3-13- فواصل میان مراحل خاکبرداری برش A-A'..... 54
- شکل 3-14- فواصل میان مراحل خاکبرداری برش B-B'..... 55
- شکل 4-1- روند کلی شبیه سازی در FLAC..... 58
- شکل 4-2- توزیع تغییر مکان قائم در مدل با ابعاد 3 برابر قطر تونل..... 59
- شکل 4-3- توزیع تنش قائم در مدل با ابعاد 3 برابر قطر تونل..... 60
- شکل 4-4- شبکه بندی مقاطع مختلف تونل تعریف شده در شکل 3-3..... 62
- شکل 4-5- پوش گسیختگی مدل رفتاری موهر - کلمب..... 63
- شکل 4-6- الف) منحنی تنش - کرنش. ب) تغییرات چسبندگی ج) تغییرات زاویه اصطکاک با کرنش پلاستیک..... 67
- شکل 4-7- مقطع عرضی بتن پاششی..... 68
- شکل 4-8- توزیع تنش قائم در شرایط تعادل اولیه..... 69
- شکل 4-9- توزیع تغییر مکان قائم در شرایط تعادل اولیه..... 70

- شکل 4-10- نیروی نامتعادل کننده در شرایط تعادل اولیه..... 70
- شکل 4-11- مقاطع عرضی..... 71
- شکل 4-12- توزیع تنش قائم در شرایط تعادل اولیه (مقطع 1)..... 71
- شکل 4-13- توزیع تنش قائم در شرایط تعادل اولیه (مقطع 7)..... 72
- شکل 4-14- توزیع تغییرمکان قائم در شرایط تعادل اولیه (مقطع 1)..... 72
- شکل 4-15- توزیع تغییرمکان قائم در شرایط تعادل اولیه (مقطع 7)..... 72
- شکل 4-16- نیروی نامتعادل کننده در شرایط تعادل اولیه (مقطع 1)..... 73
- شکل 4-17- نیروی نامتعادل کننده در شرایط تعادل اولیه (مقطع 7)..... 73
- شکل 5-1- مقطع کلی سه بعدی..... 75
- شکل 5-2- نمای جانبی مقطع حفاری شده تونل..... 76
- شکل 5-3- نمای فوقانی مقطع حفاری شده تونل..... 76
- شکل 5-4- تغییرات مقطع تونل در طول پروژه..... 76
- شکل 5-5- چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نسبت داده شده به مدل..... 77
- شکل 5-6- تغییرات مدول الاستیسیته نسبت داده شده در عمق..... 77
- شکل 5-7- ایستگاههای رفتارسنجی..... 78
- شکل 5-8- نتایج رفتارسنجی..... 79
- شکل 5-9- نتایج مدلسازی با مدل رفتاری موهر - کلمب..... 79
- شکل 5-10- پوش گسیختگی موهر - کلمب..... 80
- شکل 5-11- آزمایش بارگذاری صفحه..... 80
- شکل 5-12- مقایسه مدل‌های رفتاری موهر - کلمب و SS در بارگذاری و باربرداری..... 81
- شکل 5-13- مقطع آزمایشی..... 82
- شکل 5-14- مقایسه مدل‌های رفتاری موهر - کلمب و SS اصلاح شده در باربرداری..... 82
- شکل 5-15- مقایسه مدل‌های رفتاری رفتار موهر - کلمب و SS اصلاح شده در بارگذاری..... 83
- شکل 5-16- نمودار نشست حاصل از تحلیل مدل اصلی با مدل رفتاری SS اصلاح شده..... 84
- شکل 5-17- رابطه بین کرنش بحرانی و مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ..... 86
- شکل 5-18- کرنش برشی بحرانی حاصل از تحلیل..... 88
- شکل 5-19- کرنش برشی بحرانی حاصل از تحلیل..... 88
- شکل 5-20- نیروی محوری و لنگر خمشی حاصل از تحلیل مقطع تونل..... 90
- شکل 5-21- وضعیت نیروهای وارد بر مقاطع 1 و 8..... 91
- شکل 5-22- وضعیت نیروهای وارد بر مقاطع 2، 6 و 7..... 91

- شکل 5-23- وضعیت نیروهای وارد بر مقاطع 3 و 4.....91
- شکل 5-24- وضعیت نیروهای وارد بر مقطع 5.....92
- شکل 5-25- پدیده قوس زدگی پس از حفاری دو گالری کناری.....93
- شکل 5-26- پدیده قوس زدگی پس از حفاری یک گالری کناری.....93
- شکل 5-27- کرنش حجمی در مقاطع 1و7.....94
- شکل 5-28- میزان ترخیص تنش در مقاطع 1و7.....95
- شکل 5-29- نشست حاصل از تحلیل دوبعدی در مقاطع 1 و 7.....96

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
36.....	جدول 1-2- برخی از مدل سازی های انجام شده توسط محققین.....
50.....	جدول 1-3- پارامترهای مقاومتی لایه های زیرسطحی.....
50.....	جدول 2-3- پارامترهای ژئوتکنیکی طراحی تونل.....
64.....	جدول 1-4: خلاصه‌ای از آنالیزهای المان محدود انجام گرفته توسط محققین مختلف.....
75.....	جدول 1-5: خصوصیات ژئوتکنیکی خاک.....
84.....	جدول 2-5: تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برحسب کرنش برشی پلاستیک.....
84.....	جدول 3-5: نتایج مدل آزمایشی با محدوده خطی اولیه مختلف.....
85.....	جدول 4-5: مقایسه نتایج مدل رفتاری SS اصلاح شده با نتایج رفتارسنجی.....
87.....	جدول 5-5: وضعیت پایداری تونل پس از نصب پوشش.....
88.....	جدول 6-5: نیروی محوری و لنگر خمشی ماکزیمم ایجاد شده در پوشش اولیه تونل.....
89.....	جدول 7-5: مشخصات بتن پاششی.....
95.....	جدول 8-5: میزان ترخیص تنش.....
96.....	جدول 9-5: مقایسه نیروی محوری و لنگر خمشی ماکزیمم ایجاد شده در پوشش اولیه تونل.....



## فصل 1- مقدمه

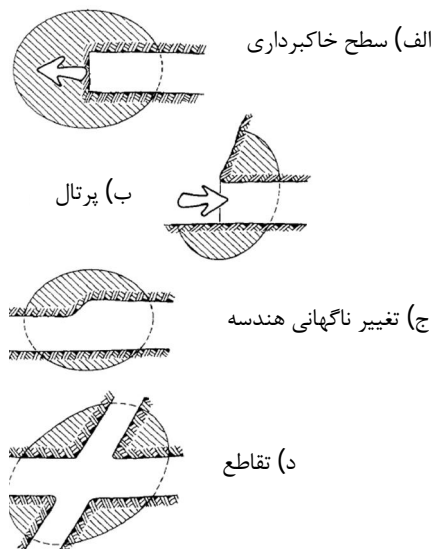
### 1-1- پیشگفتار

فضاهای زیرزمینی از گذشته‌های بسیار دور همواره توسط انسان‌ها برای مقاصد و اهداف مختلف احداث می‌شده‌اند. اکنون نیز این فضاها به منظور دسترسی به منابع طبیعی و معدنی، پناهگاه، انتقال آب، ایجاد راه‌آهن و تونل‌هایی با اهداف نظامی و... ایجاد می‌شوند. با گذشت زمان و به تبع آن نیاز به زیرساخت‌های بیشتر جهت توسعه و عمران جوامع بشری، ایجاد فضاهای زیرزمینی به عنوان بخش مهمی از زیرساخت‌های پیشرفت و تمدن مورد توجه قرار گرفته است.

امروزه تونل‌ها نقش مهمی در توسعه حمل و نقل شهری و بین‌شهری ایفا می‌کنند. اجرای تونل‌های مترو و راه در محیط‌های شهری برای کاهش بار ترافیکی امری ضروری است.

ساخت سازه‌های همانند تونل بیشتر به معنای حفاری آن و واکنش‌های زمین به این حفاری است. منظور از واکنش‌های زمین، تنش‌های القایی ایجاد شده در اثر حفاری می‌باشد. حفر تونل در اعماق کم و زمین‌های خاکی، بر روی سطح زمین نشست ایجاد می‌کند که موجب آسیب رساندن به سازه‌های موجود در سطح زمین می‌شود. بنابراین طراحی تونل به معنای تحلیل پایداری و تعیین میزان سیستم نگهداری مورد نیاز جهت حفاری ایمن و ایجاد نشست مجاز در سطح زمین می‌باشد.

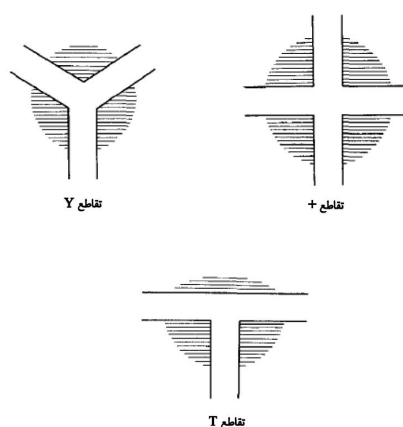
به منظور تحلیل پایداری تونل می‌بایست چگونگی تغییرات تنش‌ها و جابجایی‌ها را تعیین کرد. بدین منظور می‌توان روش‌هایی مانند روش‌های تجربی، تحلیل‌های عددی، ابزاربندی و... را بکار برد. تحلیل‌های عددی به سبب قابلیت‌هایی چون سرعت محاسبات، انعطاف‌پذیری نسبت به دستورات کاربر، تنوع نتایج، هزینه اندک و ... به سایر روش‌ها ترجیح داده می‌شوند. در اکثر موارد برای تحلیل تونل‌ها با استفاده از مدل سازی عددی از فرض کرنش صفحه‌ای مقاطع عرضی استفاده می‌شود. البته باید توجه داشت که در تونل‌ها نواحی وجود دارند که به طور معمول به صورت سه‌بعدی مدل می‌شوند. این نواحی عبارتند از: سطح خاکبرداری، پرتال‌ها، تقاطع و نواحی که تغییرات ناگهانی هندسی در آنها رخ می‌دهد (شکل 1-1).



شکل 1-1- نواحی سه بعدی در تونل [1]

تقاطع مکانی است که دو یا سه تونل در یک نقطه بهم می‌رسند. شکل 1-2 انواع تقاطع را نشان می‌دهد. برخی از علل ناپایداری در تقاطع عبارتند از: وجود ناپیوستگی ژئولوژیکی (مانند جهت درزه در سنگ)، بزرگتر بودن دهانه در تقاطع از قسمت‌های دیگر و در نتیجه کمتر بودن زمان ایستایی تونل، بیشتر بودن تنش‌های ایجاد شده در محل تقاطع نسبت به قسمت‌های دیگر و ... .

یکی از انواع تقاطع، دوراهی می‌باشد. دوراهی به دو صورت طراحی می‌شود: 1- تونل دسترسی به تونل اصلی منتهی می‌شود. 2- تونل دسترسی از تونل اصلی انشعاب می‌گیرد [2].



شکل 1-2- انواع تقاطع‌ها [1]

## 1-2- هدف از انجام پروژه

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، تقاطع نواحی در تونل می‌باشد که هندسه آنها به طور ناگهانی تغییر می‌کند. به همین منظور میزان بار وارده و تغییرشکل در مناطق نزدیک تقاطع نسبت مناطق دیگر افزایش می‌یابد. در نتیجه به سیستم نگهداری بیشتری نیاز است. تاکنون جهت طراحی، تحلیل پایداری و تعیین میزان اضافی سیستم نگهداری، از مدل سازی سه بعدی (با فرض کرنش سه بعدی) استفاده شده است، زیرا توزیع تنش در نواحی مانند تقاطع از فرض کرنش صفحه‌ای تبعیت نمی‌کند. مدل سازی عددی سه بعدی نتایج کامل‌تری نسبت به تحلیل دوبعدی در اختیار کاربر قرار می‌دهد اما در عین حال مدل سازی آن بسیار دشوار و انجام تحلیل سه بعدی بسیار زمان‌بر می‌باشد.

هدف از انجام این تحقیق بررسی امکان مدل سازی دوبعدی دوراهی می‌باشد. بدین منظور ابتدا دوراهی را به صورت سه بعدی مدل سازی کرده و سپس مقاطع بحرانی تعیین گردید. در انتها مقاطع بحرانی به صورت دوبعدی مدل سازی شده است.

## 1-3- مراحل انجام تحقیق

خلاصه مطالب و مباحثی که در فصل‌های بعد به آن پرداخته خواهد شد را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

فصل اول: شامل مقدمه و خلاصه‌ای از روند کار پایان نامه می‌باشد.

فصل دوم: ابتدا به معرفی تونل‌های بزرگ مقطع و کاربرد آنها پرداخته شده و سپس به روش‌های حفر فضاهای زیرزمینی و سیستم‌های نگهداری این گونه فضاها در زمین‌های نرم و کم‌عمق، اشاره شده است. در ادامه پدیده نشست ایجاد شده در اثر حفر تونل و کاربرد روش‌های عددی در محاسبه نشست شرح داده شده و در انتها روش‌های مختلف تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل سوم: در این فصل به معرفی پروژه تونل نیایش، موقعیت جغرافیایی محدوده طرح، موقعیت دوراهی R04 و پلان مقاطع پرداخته شده است. در ادامه مطالعه زمین شناسی محدوده طرح ارائه می‌گردد. در انتهای فصل داده‌های ژئوتکنیکی و روند حفاری دوراهی شرح داده شده است.

فصل چهارم: شامل مطالعه نرم‌افزار FLAC، مراحل مختلف مدل سازی دوبعدی و سه بعدی دوراهی می‌باشد.

فصل پنجم: در این فصل نتایج حاصل از مدل سازی و تحلیل‌های انجام شده ارائه می‌گردد.

فصل ششم: شامل نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای کارهای تحقیقاتی آتی می‌باشد.

## فصل 2- مقدمه ای بر حفر فضاهای زیرزمینی در محیط های شهری

### 2-1- مقدمه

امروزه تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، بخش مهمی از سازه‌های استراتژیک و زیربنایی را در کشورهای پیشرفته و در حال توسعه تشکیل می‌دهند. نقش این سازه‌ها در حمل و نقل جاده‌ای و ریلی، انتقال آب و سوخت، نیروگاه‌های آبی، مخازن و انبارهای نگهداری سوخت و مواد اولیه، معادن، انبارهای مهمات و تسلیحات و برخی موارد دیگر بسیار حیاتی و غیرقابل انکار است.

یکی از موضوعات مهم مطرح شده در زمینه تونل سازی، مبحث تقاطع است. تقاطع‌های زیرزمینی در بیشتر پروژه‌ها همانند تونل‌های راه، سیستم‌های مترو، نیروگاه‌ها، شبکه‌های آب و فاضلاب، تاسیسات نظامی و ... کاربرد دارند. اجرای بهینه و تامین ایمنی اینگونه فضاهای زیرزمینی در هنگام ساخت و پایداری درازمدت آنها به ویژه زمانی که دارای مقاطع بزرگ بوده و در زمین‌های نرم حفر شوند، از جمله عواملی است که باید توسط طراحان سازه‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این در فضاهای زیرزمینی کم عمق بررسی پدیده نشست سطح زمین و اندرکنش سازه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این فصل به بررسی کلیاتی در مورد تونل سازی در زمین‌های نرم و کم عمق و تأثیرات اندرکنشی آنها پرداخته شده است.

### 2-2- تونل سازی در محیط‌های شهری

امروزه بدلیل وجود برخی مسائل مانند تراکم ساختمان‌ها و مشکلات ترافیکی و ارتباطات حمل و نقلی و تأسیساتی در شهرها، به‌طور عمده تونل‌ها در اعماق کم و نزدیک سطح زمین طراحی و اجرا می‌گردند. تونل‌زنی در مناطق شهری تبعات خاص خود را دارد. زیرا عمق روباره کم و زمین اغلب بصورت آبرفتی و سیمانته نشده است. وجود ساختمان‌ها و پی‌های مجاور حساسیت زیادی بر نشست‌های حاصل از حفر تونل ایجاد می‌کنند و علاوه بر این امکان حفاری و یا تقویت را از طریق سطح زمین (به‌عنوان مثال روش کندن و پوشاندن<sup>1</sup>) محدود می‌کند. با وجود چنین شرایطی تونل‌ها بایستی با روش‌هایی ایجاد شوند که کمترین خسارت را برای سازه‌های سطحی داشته باشند، یعنی تغییرشکل زمین را تا حد امکان کاهش دهند. ملاحظات عمده‌ای که در طراحی تونل‌های سطحی که در خاک‌های نرم و دارای خصوصیات تغییرشکل‌پذیری بالا ساخته شده، بایستی در نظر گرفته شود عبارتند از [3]:

<sup>1</sup> Cut and Cover