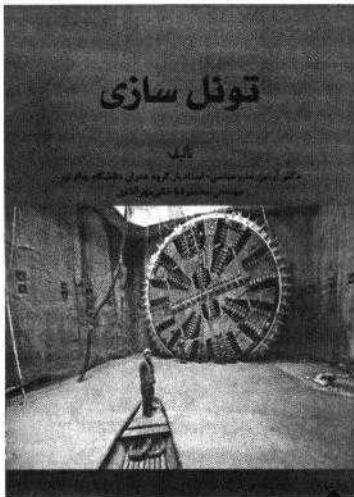


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تونل سازی

مؤلف:

دکتر آرمین میرعباسی

(استادیار گروه عمران)

مهندس محمدرضا خانی مهرآبادی



سرشناسه	:	منیر عباسی، آرمین، ۱۳۵۸
عنوان و نام پدیدآور	:	تونل سازی
مشخصات نشر	:	تهران: سیمای دانش: آذر، ۱۳۹۳
مشخصات ظاهری	:	۲۰۰ص
شابک	:	۹۷۸-۶۰۰-۱۳۰-۱۹۷-۴
وضعیت فهرست نویسی	:	فیبای مختصر
یادداشت	:	فهرست نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است
شکافه افزوده	:	خانی مهرآبادی، محمدرضا، ۱۳۵۶
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۷۸۲۸۵۱

تونل سازی

تألیف:	آرمین منیر عباسی- محمدرضا خانی مهرآبادی
ناشر:	انتشارات سیمای دانش
ناشر همکار:	انتشارات آذر
نوبت چاپ:	اول/ ۱۳۹۴
تیراژ:	۱۰۰۰ نسخه
حروفچینی:	موسسه مهراد
لیتوگرافی:	ندا
چاپخانه:	فرشیوه
مطبع:	یکتافر
شابک:	۹۷۸-۶۰۰-۱۳۰-۱۹۷-۴
قیمت:	۱۳۰۰۰ تومان

کلیه حقوق این اثر برای انتشارات سیمای دانش محفوظ است.

انتشارات سیمای دانش: خیابان انقلاب- ابتدای خیابان ۱۲ فروردین
 پلاک ۳۱۸- تلفن: ۶۶۴۶۴۷۷۹
 فروشگاه سیمای دانش: ۶۶۴۶۰۵۴۵
 انتشارات آذر: ۶۶۴۶۵۸۳۰
 کتابفروشی عصر دانش: ۶۶۴۹۳۷۰۱
 کتابفروشی پرهام: ۶۶۴۶۸۲۳۵

پیشگفتار مؤلفان

اگرچه ساخت تونل و فضا‌های زیرزمینی از دیرباز در اقصی نقاط دنیا و همچنین کشورمان رواج داشته است اما ساخت تونل همواره به عنوان یک موضوع چالش برانگیز ذهن متخصصین این امر را به خود مشغول داشته و همین موضوع باعث رشد این صنعت و تنوع روشهای اجرایی آن شده است. با وجود اجرای تونلهای فراوان در کشور با انواع روشهای سنتی و مکانیزه و در حد استانداردهای روز دنیا، روشهای تونل سازی تا کنون به صورت مکتوب و مستند در قالب یک کتاب در این کشور جمع آوری نشده بود. لذا با توجه به گسترش این گونه پروژه ها در صنایع مختلف نظیر راه، راه آهن، برق آبی، انتقال آب، کارهای زیر زمینی مانند مترو یا تونل‌های کابل برق و غیره مؤلفان تصمیم گرفتند با توجه به تجارب خود و جمع آوری اطلاعات از کتابها و مقالات داخلی و خارجی و همچنین مستند نمودن تجارب برخی از متخصصین داخلی این صنعت، اقدام به تهیه کتاب حاضر نمایند. کتاب حاضر مجموعه ای از روشهای موجود تونل سازی با تکیه بر روشهای مکانیزه تمام مقطع می باشد. اگرچه این کتاب با رویکرد کاربرد در صنعت تونل سازی تهیه شده اما با توجه به مطالب علمی استخراج شده از کتب و مقالات خارجی اطلاعات مفیدی نیز برای دانشجویان خصوصا دانشجویان رشته مهندسی عمران دارد. لذا کاربرد آموزشی و اجرایی دارد.

www.ketabpaki.com

۱۷	مقدمه
۱۹	فصل اول (تاریخچه تونل سازی)
۱۹	۱-۱- دلایل استفاده از تونل
۲۰	۱-۱-۱- استفاده از زمین و محل (جا و مکان)
۲۱	۲-۱-۱- ملاحظات جداسازی
۲۳	۳-۱-۱- حفاظت از محیط زیست
۲۴	۴-۱-۱- توپوگرافی
۲۴	۵-۱-۱- منافع اجتماعی
۲۵	۲-۱- مروری بر روند تاریخ تونل سازی و پوشش تونل
۲۸	۳-۱- فواید تونل سازی و انواع تونل ها
۲۸	۱-۳-۱- انواع فضاهای زیرزمینی
۳۱	۲-۳-۱- مرور آماری
۳۴	۳-۳-۱- انواع تونل ها بر اساس سطح مقطع
۳۷	فصل دوم (انواع روشهای تونل سازی)
۳۷	۱-۲- تونل سازی به روش چالزنی و آتشیاری
۴۲	۱-۲-۱- مراحل روش چالزنی و آتشیاری
۴۳	چالزنی
۴۷	- خرجگذاری
۴۷	- گل گذاری
۴۷	- انفجار
۴۹	۲-۱-۲- انواع روش های تونل سازی سنتی (چالزنی و آتشیاری)
۴۹	- روش آلمانی یا پیشروی مرکزی
۴۹	- روش تونل سازی اتریشی قدیمی
۵۰	- روش پیشروی از بالا
۵۲	- حفاری از دیواره ها (جوانب)

۵۴	 روش جدید تونل سازی اتریشی
۵۵	 ۲-۲- تونل سازی به روش مکانیزه
۵۶	 ۲-۲-۱- تاریخچه حفر تونل به وسیله ماشین TBM
۶۱	 ۲-۲-۲- انواع دستگاه های حفاری مکانیزه
۶۳	 ماشین های حفاری بخشی
۷۰	 ماشین های حفاری تمام مقطع
۹۷	 - سیرهای دایره ای چند سره

فصل سوم (نگهداری تونل ها)..... ۹۹

۱۰۰	 ۱-۳- نگهداری موقت
۱۰۰	 ۱-۳-۱- شاتریت (بتن پاشی)
۱۰۲	 ۱-۳-۲- تورهای سیمی فولادی (مش)
۱۰۲	 ۱-۳-۳- تقویت سنگ
۱۰۲	 ۱-۳-۴- چوب بست
۱۰۲	 ۱-۳-۵- قاب گذاری
۱۰۴	 ۱-۳-۶- پایدارسازی چتری
۱۰۵	 ۲-۳- نگهداری دائم
۱۰۵	 ۲-۳-۱- نگهداری دائم در حفاری سطحی
۱۰۶	 ۲-۳-۲- نگهداری دائم در حفاری مکانیزه

فصل چهارم (نگهداری دائم در حفاری مکانیزه - سگمنت)..... ۱۰۷

۱۰۷	 - مقدمه
۱۱۲	 ۱-۴- هندسه لاینینگ پیش ساخته (سگمنت)
۱۱۳	 ۱-۴-۱- انواع رینگ
۱۱۵	 ۱-۴-۱-۱- سگمنت مستطیلی
۱۱۶	 ۱-۴-۱-۲- سگمنت دوزنقه ای
۱۱۶	 ۱-۴-۱-۳- سگمنت شش وجهی یا لانه زنبوری
۱۱۷	 ۱-۴-۱-۴- سگمنت متوازی الاضلاعی
۱۲۰	 ۱-۴-۲- لاینینگ تک جداره یا با جداره دویل
۱۲۱	 ۱-۴-۳- سیستم دقیق بسته و سیستم باز انعطاف پذیر

۱۲۶	۴-۱-۴- تیرانس‌های هندسی
۱۲۷	۲-۴- متعلقات سگمنت
۱۲۸	۴-۲-۱- اتصال‌های بین سگمنت‌ها و رینگ‌ها
۱۳۱	۴-۲-۲- سیستم ضد آب
۱۳۶	۴-۲-۳- اجزای توزیع فشار تراست
۱۳۶	۴-۲-۴- هندسه گوشه‌های سگمنت
۱۳۷	۴-۲-۵- کدگذاری سگمنت‌ها
۱۳۹	۴-۳- پارامترهای طراحی سگمنت
۱۳۹	۴-۳-۱- ضخامت
۱۴۱	۴-۳-۲- طول و تعداد سگمنت‌ها در هر رینگ
۱۴۲	۴-۳-۳- طرح درزهای سگمنت‌ها
۱۴۲	۴-۳-۳-۱- درزهای طولی
۱۴۵	۴-۳-۳-۲- درزهای محیطی (شعاعی یا رینگی)
۱۴۶	۴-۴- معیارهای طراحی و بازبینی سازه‌ای سگمنت
۱۴۹	۴-۴-۱- نیروهای مرحله ساخت سگمنت
۱۵۰	۴-۴-۱-۱- خارج کردن از قالب‌ها
۱۵۲	۴-۴-۱-۲- دیوی اولیه
۱۵۴	۴-۴-۱-۳- دیوی نهایی
۱۵۶	۴-۴-۲- نیروهای وارده از طرف TBM
۱۵۷	۴-۴-۳- انتقال به داخل تونل و نصب
۱۶۰	۴-۵- فرایندهای ساخت سگمنت
۱۶۰	۴-۵-۱- مواد
۱۶۰	۴-۵-۲- کارخانه
۱۶۱	۴-۵-۳- قالب‌ها
۱۶۲	۴-۵-۴- چرخه‌های کاری
۱۶۷	۴-۶- انواع مخاطرات و آسیب‌های پوشش سگمنتال در حفاری مکانیزه
۱۶۹	۴-۶-۱- آسیب‌های مرحله طراحی و ساخت
۱۷۲	۴-۶-۱-۱- دلایل آسیب دیدگی‌های سگمنت در طول طراحی و ساخت
۱۷۳	۴-۶-۲- آسیب‌های مرحله حمل و نقل و نصب
۱۷۷	۴-۶-۳- آسیب‌های مرحله بهره‌برداری
۱۷۷	۴-۶-۳-۱- کاویتاسیون

- ۱۷۷..... ۴-۶-۲- سایش ناشی از آب
- ۱۸۰..... ۴-۶-۳- حملات شیمیایی
- ۱۸۲..... ۴-۶-۴- خوردگی آرماتورها
- ۱۸۳..... ۴-۶-۵- واکنشهای قلیایی سنگدانهها
- ۱۸۳..... ۴-۶-۳-۱- واکنشهای قلیایی - سیلیسی
- ۱۸۵..... ۴-۶-۳-۲- واکنشهای قلیایی - کربناتی

فصل پنجم (مزایا، معایب و معیارهای انتخاب نوع تکنیک تونل سازی)..... ۱۸۷

- ۱۸۸..... ۵-۱- مزایا و معایب حفاری سنتی
- ۱۸۹..... ۵-۲- مزایا و معایب حفاری مکانیزه
- ۱۸۹..... ۵-۲-۱- مزایا و معایب ماشینهای حفاری مکانیزه
- ۱۸۹..... - مزایا و معایب سرهم
- ۱۸۹..... - مزایا و معایب TBM نوع باز
- ۱۹۰..... - مزایا و معایب TBM نوع تک سپری
- ۱۹۱..... - مزایا و معایب TBM نوع دو سپری
- ۱۹۱..... ۵-۳- عوامل مؤثر در انتخاب روش اجرا
- ۱۹۹..... منابع

- شکل ۱-۱: ایستگاه Blaak (روتدام - هلند) ۲۰
- شکل ۱-۲: توسعه زیرزمینی کتابخانه سلطنتی (استکهلم - سوئد) ۲۰
- شکل ۱-۳: مترو توکیو توسعه ایستگاه Iidabashi (توکیو - ژاپن) ۲۱
- شکل ۱-۴: دهکده بابا نوئل (دایره قطب شمال - لاپلند فنلاند) ۲۱
- شکل ۱-۵: بدون آسیب ماندن مرکز خرید زیرزمینی و آسیب شدید به تالار واقع در سطح زمین در شهر کوبه در زلزله سال ۱۹۹۵ ژاپن ۲۲
- شکل ۱-۶: امکانات ذخیره‌سازی زیرزمینی نفت خام در ژاپن و مواد غذایی و ... در ایالات متحده آمریکا ۲۲
- شکل ۱-۷: سایت پروژه نوادا - ایالات متحده آمریکا ۲۳
- شکل ۱-۸: وضعیت بعد از حذف پارکینگ خودروها در میدانی در مarse فرانسه ۲۳
- شکل ۱-۹: تونلی در قلب سبزی در هلند ۲۴
- شکل ۱-۱۰: تونل Noord (روتدام - هلند و تونل گوتارد - سوئیس) ۲۵
- شکل ۱-۱۱: بخش اصلی بار توسط توده سنگ تحمل می‌شود ۲۸
- شکل ۲-۱: روند پیشرفت ماشین آلات حفاری تونل ۲۹
- شکل ۲-۲: مقطع حفاری و ابعاد یک ماشین جامبو مدل L2D [۳۵] ۴۱
- شکل ۲-۳: آرایش چال‌های حفاری در دو نمونه از جبهه کارهای متفاوت [۱۵] ۴۲
- شکل ۲-۴: نمایی از چرخه عملیات حفاری در روشی چالزنی و آتشباری [۲۹ و ۱۵] ۴۳
- شکل ۲-۵: اسامی مختلف چال‌های آتشباری در بخش‌های مختلف جبهه کار [۳۱] ۴۴
- شکل ۲-۶: پیش‌برد حفاری، وضعیت پیش‌بینی و واقعی چال حفاری [۳۰] ۴۵
- شکل ۲-۷: عمق یک راند آتشباری نسبت به اندازه تونل در آلمان (Ziegler, 1985) ۴۶
- شکل ۲-۸: نمایی از یک الگوی کامل از یک مقطع حفاری به همراه الگویی از یک چال خرجگذاری شده ۴۸
- شکل ۲-۹: مراحل حفر تونل به روش آلمانی ۴۹
- شکل ۲-۱۰: مراحل حفاری در روش اتریشی قدیمی ۵۰
- شکل ۲-۱۱: چندین نوع از حفاری مرحله‌ای جبهه کار ۵۰
- شکل ۲-۱۲: مقاطع طولی و عرضی حفاری از بالا، (۱) تاج (۲) پله ۵۱
- شکل ۲-۱۳: شماتیکی از مراحل حفاری از بالا ۵۱
- شکل ۲-۱۴: مفهوم نگهداری تاج، نگهداری از حفاری در روشی مشابه یک قوس پل سنگی است ۵۱
- شکل ۲-۱۵: چپ: پیشروی مرکزی - راست: حفاری از جوانب ۵۲
- شکل ۲-۱۶: نمایی از یک جبهه کار با روش حفاری از جوانب ۵۲
- شکل ۲-۱۷: روش‌های حفاری: (a) حفاری از جوانب، (b) روش پیشروی از بالا، (c) تمام مقطع ۵۳

- شکل ۲-۱۸: اقدامات مختلف نگهداری در این روش‌ها..... ۵۳
- شکل ۲-۱۹: نگهداری (پوشش خارجی) نه خیلی زود، نه خیلی دیر، نه بیش از حد سفت، نه بیش از حد انعطاف پذیر..... ۵۴
- شکل ۲-۲۰: نصب پیچ‌سنگ‌ها، مهارها و تورسیمی در پشت کاترهد..... ۵۵
- شکل ۲-۲۱: ماشین ساخته شده توسط H.J در سال ۱۸۴۶ [۱۳]..... ۵۶
- شکل ۲-۲۲: اولین TBM ساخته شده توسط C. Wilson در سال ۱۸۵۳ [۱۳]..... ۵۷
- شکل ۲-۲۳: نمایی از دستگاه بهبود یافته ویلسون در سال ۱۸۷۵ [۱۳]..... ۵۷
- شکل ۲-۲۴: نمایی از دستگاه ساخته شده توسط Beaumont انگلیسی در سال ۱۸۸۲ با قطر ۲/۱۳ متر [۱۳]..... ۵۸
- شکل ۲-۲۵: ماشین حفاری ساخته شده توسط اشمیت و کرانز در سال ۱۹۳۱ با قطر ۳ متر [۱۳]..... ۵۸
- شکل ۲-۲۶: ماشین‌های حفاری ساخته شده توسط رایبیز [۱۳]..... ۵۹
- شکل ۲-۲۷: انواع ماشین‌های حفاری تونل ساخته شده توسط ویرث [۱۳]..... ۶۰
- شکل ۲-۲۸: ماشین‌های حفر تونل‌سپردار [۱۳]..... ۶۰
- شکل ۲-۲۹: طبقه‌بندی ماشین‌های حفر تونل [۳۳]..... ۶۱
- شکل ۲-۳۰: انواع ماشین‌های حفر تونل مشخص شده در شکل ۲-۲۴ [۳۳]..... ۶۲
- شکل ۲-۳۱: نمایی دور و نزدیک از عملکرد یک چکش هیدرولیکی..... ۶۳
- شکل ۲-۳۲: دیاگرام حرکتی و اندازهای یک ماشین رودهدر [۲۵]..... ۶۵
- شکل ۲-۳۳: انواع سیستم بارگیری..... ۶۵
- شکل ۲-۳۴: نمونه‌ای از دو نوع رودهدر (الف) نوع Transverse (ب) نوع Axial..... ۶۶
- شکل ۲-۳۵: پارامترهای اصلی موثر در عملکرد حفاری ماشین رودهدر [۲۰]..... ۶۷
- شکل ۲-۳۶: چرخه کار یک ماشین حفاری رودهدر [۲۰]..... ۶۸
- شکل ۲-۳۷: نمودار عملکرد برش یک رودهدر ۱۳۲ کیلوواتی [۲۰]..... ۶۹
- شکل ۲-۳۸: نمودار رابطه بهره‌وری - باربرداری [۲۰]..... ۶۹
- شکل ۲-۳۹: نمودار رابطه مصرف سرسته و مقاومت فشاری و درصد کوآرتز [۲۰]..... ۷۰
- شکل ۲-۴۰: مقایسه مصرف سرسته در دو شرایط مختلف [۲۰]..... ۷۰
- شکل ۲-۴۱: نمایی کلی از روند کامل حفاری مکانیزه، با استفاده از TBM برای حفاری تونل در سنگ [۲۹]..... ۷۱
- شکل ۲-۴۲: نمایی کلی از روند کامل حفاری مکانیزه، با استفاده از سیر و فشار برای حفاری تونل در خاک [۲۹]..... ۷۱
- شکل ۲-۴۳: تونل‌زنی سپری تاریخی در زیر رودخانه Clair [۳۰]..... ۷۴
- شکل ۲-۴۴: تونل‌زنی سپری مدرن [۳۰]..... ۷۴
- شکل ۲-۴۵: تونل‌زنی با سیر دارای لبه‌های پیشرونده و مجهز به دستگاه حفر رودهدر [۳۰]..... ۷۵
- شکل ۲-۴۶: نمای شماتیک از دو نمونه ماشین سیر باز (ایزار مکانیزه در بالا و رودهدر در پایین)..... ۷۶

- شکل ۲- ۴۷: نمایی از ماشین‌هایی با سپر باز [۳۳]..... ۷۶
- شکل ۲- ۴۸: نمایی از مراحل انجام لوله‌رانی و ماشین‌آلات مربوطه [۲۶]..... ۷۸
- شکل ۲- ۴۹: قسمت‌های اصلی یک سپر TBM..... ۷۹
- شکل ۲- ۵۰: انواع پایداری جبهه کار در حفاری با سپر [۲۹]..... ۸۰
- شکل ۲- ۵۱: نمایی شماتیک از یک ماشین Slurry Shied [۲۱]..... ۸۱
- شکل ۲- ۵۲: نمایی از سپر نوع دوغابی و اجزاء اصلی آن [۳۳]..... ۸۱
- شکل ۲- ۵۳: نمودار کیلومترژ حفاری‌های انجام شده با بزرگترین قطرهای ماشین‌های تمام مقطع هرزکنشت [۲۷]..... ۸۲
- شکل ۲- ۵۴: محدوده کاربرد ماشین‌های Slurry و EPB [۱۲]..... ۸۳
- شکل ۲- ۵۵: محدوده دانه‌بندی خاک برای انتخاب نوع مناسب سپر (Slurry یا EPB) [۱۶]..... ۸۳
- شکل ۲- ۵۶: مفهوم تعادل فشار زمین [۱۳]..... ۸۴
- شکل ۲- ۵۷: نمایی از تقسیم بندی حالت‌های مختلف دستگاه‌های EPB [۲۷]..... ۸۵
- شکل ۲- ۵۸: معیارهای مکانیکی خاک، در حالت‌های مختلف دستگاه‌های EPB [۲۲]..... ۸۶
- شکل ۲- ۵۹: نمایی از دستگاه سپر EPB و اجزاء اصلی آن [۱۹] و [۲۶]..... ۸۷
- شکل ۲- ۶۰: نمایی از دستگاه سپر EPB با قطر ۱۵/۲ متر- بزرگراه مادرید اسپانیا [۲۶]..... ۸۷
- شکل ۲- ۶۱: نمایی از دستگاه‌های سپر مرکب..... ۸۸
- شکل ۲- ۶۲: نمایی از TBM‌های نوع Reamer [۱۴] [۳۳]..... ۹۰
- شکل ۲- ۶۳: نمایی از ماشین TBM نوع باز دو گیره [۱۶]..... ۹۱
- شکل ۲- ۶۴: چرخه کامل حفاری Open TBM از نوع یک کفشکه [۲۴]..... ۹۱
- شکل ۲- ۶۵: چرخه کامل حفاری Open TBM از نوع دو کفشکه [۲۴]..... ۹۲
- شکل ۲- ۶۶: نمایی شماتیک و واقعی از یک ماشین TBM نوع تک‌سپری [۲۶]..... ۹۴
- شکل ۲- ۶۷: نمایی از ماشین TBM نوع تلسکوپی (دوسپری)..... ۹۵
- شکل ۲- ۶۸: نمایی از تغییر حالت یک دستگاه EPB‌های سنگ سخت در طول یک پروژه [۱۶]..... ۹۶
- شکل ۲- ۶۹: نمایی از ماشین TBM نوع EPB سنگ سخت..... ۹۶
- شکل ۲- ۷۰: نمایی از ماشین‌های چند سره..... ۹۷
- شکل ۳- ۱: نمایی کلی از چگونگی انجام و بخش‌های مختلف تجهیزات انجام حفاری اکتشافی..... ۹۹
- شکل ۳- ۲: نازل مخلوط خشک..... ۱۰۰
- شکل ۳- ۳: اجرای شاتکریت با روش مخلوط تر..... ۱۰۱
- شکل ۳- ۴: بازوهای اجرای شاتکریت در TBM..... ۱۰۲
- شکل ۳- ۵: استفاده از چوبست در متروی مادرید..... ۱۰۳
- شکل ۳- ۶: پروفیل‌های فولادی کشویی، تیر حمل مشبک، روش نصب قاب‌های قوس‌دار..... ۱۰۳
- شکل ۳- ۷: نمایی از ماشین‌آلات مخصوص پایداری چتری..... ۱۰۴
- شکل ۳- ۸: نمایی شماتیک از پایداری چتری..... ۱۰۴

- شکل ۳- ۹: نمایی از دو نمونه قالب متحرک ۱۰۶
- شکل ۴- ۱: درزهای برآمده بکار رفته در سگمنت‌های چدنی در متروی لندن- ۱۸۶۹ ۱۰۷
- شکل ۴- ۲: یکی از اولین کاربردهای سگمنت لانه زنبوری برای پوشش پیوسته- متروی برلین ۱۹۶۵/۶۶ ۱۰۸
- [۴۵] ۱۰۸
- شکل ۴- ۳: وابستگی بین رفتارهای توده سنگ و پارامترهای TBM [۴۳] ۱۱۰
- شکل ۴- ۴: شماتیکی از چگونگی عملیات نصب سگمنت توسط TBM ۱۱۰
- شکل ۴- ۵: مراحل اساسی بعد از نصب سگمنت برای تثبیت، آب‌بندی و تحکیم لاینینگ ۱۱۱
- شکل ۴- ۶: شماتیکی از موقعیت سپر و سگمنت نصب شده [۴۲] ۱۱۲
- شکل ۴- ۷: واژه‌های یک رینگ ۱۱۳
- شکل ۴- ۸: شماتیکی از انواع سگمنت‌های اصلی ۱۱۴
- شکل ۴- ۹: نمایی از دیگر انواع سگمنت‌ها (نوع A استفاده شده در پروژه ECIS شهر لس‌آنجلس) [۴۴] ۱۱۴
- شکل ۴- ۱۰: نحوه قرارگیری سگمنت‌های مستطیلی در مقطع تونل [۴۱] ۱۱۵
- شکل ۴- ۱۱: نمای داخلی بارشده از سگمنت‌های مستطیلی ۱۱۵
- شکل ۴- ۱۲: نمای داخلی بارشده از سگمنت‌های دوزنقه‌ای ۱۱۶
- شکل ۴- ۱۳: سگمنت شش‌وجهی یا لانه زنبوری ۴ قطعه [۴۵] ۱۱۷
- شکل ۴- ۱۴: نمایی از سگمنت شش‌وجهی یا لانه زنبوری باز شده [۴۶] ۱۱۷
- شکل ۴- ۱۵: مقطع عرضی از سگمنت نوع مسطح (متوازی‌الاضلاع، لوزی) در Eurotunnel ۱۱۸
- بریتانیا [۴۵] ۱۱۸
- شکل ۴- ۱۶: نما از بالای پوشش بتنی متوازی‌الاضلاعی ۱۱۸
- شکل ۴- ۱۷: نمودار انواع سیستم‌های لاینینگ ۱۲۰
- شکل ۴- ۱۸: نمایی از سیستم پوشش بسته دقیق ۱۲۲
- شکل ۴- ۱۹: سیستم پوشش باز انعطاف پذیر ۱۲۳
- شکل ۴- ۲۰: هندسه انواع مختلف رینگ‌ها ۱۲۳
- شکل ۴- ۲۱: مفهوم رینگ یونیو رسال و امکان نصب آن در یک مسیر منحنی شکل ۱۲۴
- شکل ۴- ۲۲: امکان نصب یک رینگ یونیورسال در یک مسیر منحنی ۱۲۵
- شکل ۴- ۲۳: فرایند نصب و مونتاژ رینگ ۱۲۵
- شکل ۴- ۲۴: تالراس قالب‌های سگمنت ۱۲۷
- شکل ۴- ۲۵: نمای سه بعدی از یک سگمنت تکی کامل ۱۲۷
- شکل ۴- ۲۶: نمایی از نحوه قرارگیری اتصال بولتی خمیده و مستقیم [۳۰] ۱۲۸
- شکل ۴- ۲۷: نحوه قرارگیری یک بولت مستقیم ۱۳۰
- شکل ۴- ۲۸: مقطع یک محفظه استاندارد برای اتصال دهنده تکی از جنس پلاستیک (زبان‌های) ۱۳۰
- شکل ۴- ۲۹: هندسه میله راهنما ۱۳۱

- شکل ۴-۳۰: آب‌بندی سگمنت‌ها توسط گسکت ۱۳۱
- شکل ۴-۳۱: انواع مختلف گسکت‌ها از نظر شکل ۱۳۳
- شکل ۴-۳۲: توالی کار گسکت ۱۳۴
- شکل ۴-۳۳: تعریف هندسی از فاصله یا شکاف و خمیدگی یا انحراف ۱۳۴
- شکل ۴-۳۴: نمودارهای نمونه فاصله - نیرو و فشار کاری فاصله با مقدار متفاوت خمیدگی یا انحراف برای گسکت ۱۳۴
- شکل ۴-۳۵: نمونه‌ای از هندسه خاص از شیار گسکت ۱۳۵
- شکل ۴-۳۶: مراحل آب‌بندی با روش تزریق ۱۳۶
- شکل ۴-۳۷: یک سگمنت با پدهای توزیع فشار ۱۳۶
- شکل ۴-۳۸: جزئیاتی از پخ در گوشه سگمنت ۱۳۷
- شکل ۴-۳۹: نمایی از قطعات کلید و سگمنت کدگذاری شده خط ۷ متروی تهران ۱۳۸
- شکل ۴-۴۰: نمایی از نمادهای مرسوم در کدگذاری سگمنت‌ها ۱۳۸
- شکل ۴-۴۱: رابطه بین قطر داخلی و (الف) ضخامت پوشش، (ب) تعداد سگمنت ۱۴۰
- شکل ۴-۴۲: نمایی از یک درزه طولی تخت در محل اتصال دو سگمنت ۱۴۳
- شکل ۴-۴۳: انواع درزهای تخت ۱۴۳
- شکل ۴-۴۴: نمایی از درزهای طولی محدب/محدب و محدب/مقعر ۱۴۴
- شکل ۴-۴۵: دامنه کاربرد برای مفصل طولی صاف و محدب ۱۴۴
- شکل ۴-۴۶: انتقال نیروهای محوری به درزهای رینگ‌ها ۱۴۵
- شکل ۴-۴۷: نمودار موقعیت وقوع هر کدام از بارهای اعمالی در مراحل مختلف پیش ساخت ۱۴۹
- شکل ۴-۴۸: نمونه فرایند تولید سگمنت پیش ساخته ۱۵۰
- شکل ۴-۴۹: خارج کردن سگمنت از قالب به کمک نیروی خلاء ۱۵۱
- شکل ۴-۵۰: خارج کردن سگمنت از قالب توسط دستگاهی که از کناره‌ها آن را بلند می‌کند ۱۵۱
- شکل ۴-۵۱: طرح استاتیک محافظه‌کارانه برای استخراج از قالب ۱۵۱
- شکل ۴-۵۲: روش جابجایی سگمنت‌ها در دیوی اولیه ۱۵۳
- شکل ۴-۵۳: طرح استاتیک برای (a) دیوی اولیه و (b) دیوی نهایی ۱۵۳
- شکل ۴-۵۴: سگمنت‌های دیو شده از نماهای مختلف ۱۵۴
- شکل ۴-۵۵: دیوی قطعات بتنی با جداکننده‌ها برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی در طول حمل و نقل ۱۵۵
- شکل ۴-۵۶: نمایی از دیوی سگمنت‌ها در یک محل دیوی نهایی ۱۵۵
- شکل ۴-۵۷: نیروی وارد از چک‌ها بر روی سگمنت‌ها ۱۵۶
- شکل ۴-۵۸: نحوه بارگیری و حمل سگمنت به داخل تونل [۵۳] ۱۵۷
- شکل ۴-۵۹: حفره مخروطی برای نصب سگمنت با روش وکیوم ۱۵۷
- شکل ۴-۶۰: نحوه چیدمان قطعات سگمنت ۱۵۸
- شکل ۴-۶۱: رزوه مارپیچی موجود در مرکز سگمنت برای وارد شدن پیچ بزرگ در روش نصب مکانیکی ۱۵۸

- شکل ۴-۶۲: نمایی از کارخانه سگمنت خط ۷ متروی تهران..... ۱۶۱
- شکل ۴-۶۳: نمایی از قالب‌های مورد استفاده در تولید سگمنت خط ۷ متروی تهران..... ۱۶۱
- شکل ۴-۶۴: ساخت سبد فولادی به کمک شابلون (کارخانه سگمنت خط ۷ متروی تهران)..... ۱۶۲
- شکل ۴-۶۵: جابجایی و قرار دادن سبد فولادی در قالب (کارخانه سگمنت خط ۷ متروی تهران)..... ۱۶۳
- شکل ۴-۶۶: بیرون آوردن سگمنت از قالب و انجام دیوی اولیه..... ۱۶۴
- شکل ۴-۶۷: نمایی از نحوه بارگیری سگمنت‌ها (قطعات یک رینگ کامل) جهت حمل و نقل [۵۵]..... ۱۶۵
- شکل ۴-۶۸: نمودار فرایندها و توالی مراحل تولید سگمنت در کارخانه..... ۱۶۶
- شکل ۴-۶۹: چرخه کاری یک TBM..... ۱۶۷
- شکل ۴-۷۰: فراوانی انواع آسیب‌ها در سگمنت..... ۱۷۰
- شکل ۴-۷۱: آسیب‌های احتمالی با توجه به انحنای مسیر..... ۱۷۰
- شکل ۴-۷۲: موقعیت مکانی آسیب‌دیدگی‌ها در حین ساخت..... ۱۷۰
- شکل ۴-۷۳: زمان آسیب‌دیدگی‌های سگمنت در طول ساخت..... ۱۷۱
- شکل ۴-۷۴: دلایل آسیب‌دیدگی سگمنت‌ها در طول نصب..... ۱۷۴
- شکل ۴-۷۵: فراوانی آسیب‌های سگمنت در طول طراحی و نصب..... ۱۷۴
- شکل ۴-۷۶: ترک‌های برشی ناشی از افزایش تراست جک‌های سگمنت..... ۱۷۵
- شکل ۴-۷۷: لب‌پریدگی سگمنت در حین حمل، دیو و نصب..... ۱۷۵
- شکل ۴-۷۸: ترک‌های محوری (خمشی)..... ۱۷۵
- شکل ۴-۷۹: نمایی از فرسایش حفره‌ای در دیواره یک تونل انتقال آب..... ۱۷۶
- شکل ۴-۸۰: نمونه‌ای از صدمات ناشی از سایش آب..... ۱۷۷
- شکل ۴-۸۱: رابطه بین سرعت در کف تونل و اندازه ذراتی که بوسیله آب حمل می‌شود..... ۱۷۷
- شکل ۴-۸۲: رابطه بین نسبت آب به سیمان و افت در برابر سایش..... ۱۷۸
- شکل ۴-۸۳: شوره‌زدگی و خوردگی بتن و نمایان شدن آرماتور سگمنت در تونل زاگرس..... ۱۸۱
- شکل ۴-۸۴: نقشه ترک‌های ناشی از ASR..... ۱۸۳
- شکل ۴-۸۵: مغزه دارای ترک خوردگی در هر دو حالت عمودی و افقی (با توجه به ASR)..... ۱۸۴
- شکل ۴-۸۶: نقشه جغرافیایی ترک‌ها در سطح بتن ناشی از واکنش‌های قلیایی-کربناتی..... ۱۸۴
- شکل ۵-۱: مقایسه هزینه‌های TBM و چال‌زنی و آتشیاری..... ۱۸۵

جدول ۱-۱: عوامل مؤثر در پیشرفت‌های مهم تونل‌سازی طی قرن اخیر.....	۲۶
جدول ۱-۲: گروه‌بندی کلاس‌های اصلی فضاهاى زیرزمینی.....	۲۹
جدول ۱-۳: جدول طبقه‌بندی عملکرد.....	۲۹
جدول ۱-۴: طبقه‌بندی استفاده از فضای زیر زمینی بر اساس عمق.....	۳۰
جدول ۱-۵: چهار دسته از استفاده از فضای زیر زمینی، بر اساس رابطه بین سازه و سطح زمین.....	۳۰
جدول ۱-۶: قدیمی‌ترین تونل‌ها.....	۳۲
جدول ۱-۷: طولی‌ترین تونل‌ها.....	۳۲
جدول ۱-۸: طولی‌ترین تونل‌ها در اتریش.....	۳۲
جدول ۱-۹: سیستم‌های بزرگ مترو.....	۳۲
جدول ۱-۱۰: فعالیت‌های تونل‌سازی در اتریش.....	۳۲
جدول ۱-۱۱: فعالیت‌های تونل‌سازی در آلمان.....	۳۲
جدول ۱-۱۲: ارقام متناظر در سوئیس.....	۳۳
جدول ۱-۱۳: تونل‌های راه آهن سوئیس.....	۳۳
جدول ۱-۱۴: تونل‌های راه سوئیس.....	۳۳
جدول ۱-۱۵: تونل‌های حمل و نقل آلپ.....	۳۳
جدول ۱-۱۶: مشخصات برخی از طولی‌ترین تونل‌های انتقال آب ساخته شده در ایران.....	۳۴
جدول ۲-۱: تعداد چال‌ها در هر بار آتشیاری (Whittaker & Frith, 1990).....	۴۶
جدول ۲-۲: عوامل زمین‌شناسی مهم در کارآیی رودهدرها.....	۶۸
جدول ۲-۳: عوامل زمین‌شناسی مهم در کارآیی رودهدرها.....	۶۸
جدول ۲-۴: مشکلات اصلی در کار یک ماشین حفاری رودهدر.....	۶۸
جدول ۲-۵: مزایا و معایب استفاده از ماشین‌آلات تونل‌زنی تمام مقطع [۱۶].....	۷۱
جدول ۲-۶: طرح طبقه‌بندی کلی برای ماشین‌آلات تونل‌زنی [۲۴].....	۷۲
جدول ۲-۷: تقسیم‌بندی انواع ماشین‌های تمام مقطع توسط Professor Jian ZHAO [۱۶].....	۷۳
جدول ۲-۸: تقسیم‌بندی انواع ماشین‌های تمام مقطع بر اساس جنس زمین.....	۷۳
جدول ۲-۹: مزایا و معایب استفاده از سپر دوغابی.....	۸۱
جدول ۲-۱۰: مزایا و محدودیت‌های استفاده از ماشین EPB.....	۸۴
جدول ۲-۱۱: مزایا و محدودیت‌های استفاده از ماشین سپر مرکب [۱۶].....	۸۹

جدول ۲- ۱۲: مزایا و محدودیت‌های استفاده از ماشین نوع باز [۱۶]	۹۳
جدول ۲- ۱۳: مزایا و محدودیت‌های استفاده از ماشین نوع دوسپری [۱۶]	۹۴
جدول ۳- ۱: مزایای اجرای شاتکریت با هر کدام از روش‌های مخلوط خشک و مخلوط تر	۱۰۱
جدول ۳- ۲: ضخامت معمول انجام شاتکریت	۱۰۱
جدول ۴- ۱: موقعیت پوشش نوع سگمنتال در انواع حفاری [۴۲]	۱۰۹
جدول ۴- ۲: مشخصات کلی چیدمان سگمنت‌ها در هر رینگ	۱۱۸
جدول ۴- ۳: مزایا و معایب شکل‌های مختلف سگمنت	۱۱۹
جدول ۴- ۴: مقایسه میان سیستم لاینینگ دوپل و تکی	۱۲۱
جدول ۴- ۵: تفرانس ابعادی سگمنت‌ها	۱۴۶
جدول ۴- ۶: انواع بارهای وارده بر پوشش بتنی تونل	۱۴۸
جدول ۴- ۷: استانداردهای EN برای ماشین حفاری تونل	۱۶۷
جدول ۴- ۸: طبقه‌بندی آسیب‌های سگمنت در طول ساخت	۱۶۹
جدول ۴- ۹: طبقه‌بندی دلایل آسیب دیدگی سگمنت‌ها در طول طراحی	۱۷۲
جدول ۴- ۱۰: مخاطرات کلیدی و فعالیت‌های کلیدی مرتبط با نصب قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت)	۱۷۲
جدول ۴- ۱۱: طبقه‌بندی دلایل آسیب دیدگی سگمنت‌ها در طول نصب	۱۷۳
جدول ۴- ۱۲: اثر مواد شیمیایی بر بتن	۱۷۹
جدول ۴- ۱۳: عوامل موثر بر حمله شیمیایی در بتن	۱۸۰
جدول ۴- ۱۴: حداکثر مقدار مجاز یون کلرید	۱۸۲
جدول ۵- ۱: مزایا و معایب حفاری سنتی	۱۸۶
جدول ۵- ۲: مزایای حفاری مکانیزه	۱۸۷
جدول ۵- ۳: مزایا و معایب انواع TBM	۱۸۹
جدول ۵- ۴: طبقه‌بندی مواد مختلف زمین بر اساس مقاومت فشاری آنها	۱۹۲
جدول ۵- ۵: طبقه‌بندی انواع خاک برای حفاری تونل	۱۹۳
جدول ۵- ۶: نحوه کارکرد دستگاه حفاری مکانیزه در سنگ‌های مختلف	۱۹۴
جدول ۵- ۷: معیارهای انتخاب حفاری مکانیزه یا سنتی	۱۹۶

همواره طراحی و ساخت تونل در حمل و نقل، آبرسانی، تأسیسات، معدنکاری و موارد دفاعی راهکاری خلاقانه در برابر ناهمواریهای شدید زمین بوده است.

امروزه یکی از مهمترین راهبردهای پیشرفت کشورهای در حال توسعه روش های تأمین و مصرف انرژی، حفظ و نگهداری محیط زیست و منابع طبیعی می باشد لذا تونل سازی می تواند از مهمترین راه حل های دستیابی به این پیشرفت باشد.

در حال حاضر میانگین طول تونل های حفر شده در هر کشور، یکی از نمادهای توسعه و پیشرفت آن کشور محسوب می شود. به عبارتی دیگر تونل به عنوان یک زیرساخت مهم برای توسعه کشورها به شمار می رود که در همه زیرساخت ها جایگاه ویژه دارد از جمله:

- در توسعه راه های ارتباطی، حمل و نقل و باربری
- در استخراج و بهره برداری از منابع و ذخائر طبیعی و معدنی
- در انتقال خطوط نیرو و انرژی
- در انتقال آب از مناطق مستعد به سوی مناطق نیازمند
- در شهرها و کلان شهرها برای خطوط مترو و زیرگذرها
- در تأمین آب شرب و کشاورزی مورد نیاز بشر
- در تأمین انرژی های برقی
- در کنترل سیلاب ها و حفظ محیط زیست

علاوه بر این، بسیاری از کشورهای جهان به دلایل شرایط توپوگرافی و ناهمواری های موجود در گستره آنها و به منظور پیشرفت و توسعه محیط زیست مجبور به حفر فضاهای زیرزمینی می باشند. کشور ایران با درصد بالایی ارتفاعات و ناهمواری های خود (حدود ۶۰ درصد) یکی از کوهستانی ترین کشورهای جهان (در برخی منابع کوهستانی ترین کشور جهان) می باشد لذا در مسیر این توسعه، نیازمند حفر فضاهای مختلف زیرزمینی می باشد. ایرانیان از دیرباز از پیشگامان و مبتکران صنعت تونلسازی بوده اند اولین تونل های ساخته دست بشر، قنات های انتقال آب در ایران می باشد. سازه های آبی شوش در بامداد تاریخ و سدهای باستانی پارسیان در هزاره های اول پیش از میلاد، احداث ۵۰،۰۰۰ رشته قنات از هزاران سال پیش تا کنون با نمونه هایی دیرپای بجای مانده با طول حدود ۱۲۰ کیلومتر و عمق چاه حداکثر ۳۰۰ متر (قنات گناباد) [۱] و یا قنات دو طبقه "مون" با طول حدود ۲ کیلومتر و عمق های ۲۷ و ۳۰ متر (واقع در اردستان) [۲] نشانگر تلاش بی وقفه و هوش سرشار نخستین آبادگران تاریخ ایران زمین می باشد که در حال حاضر نیز آبدی ۳۴،۳۵۵ رشته قنات فعال ایران با مقدار سالیانه ۸/۲ میلیارد مترمکعب از مجموع آبدی کل قنات های دیگر کشورهای جهان بیشتر است [۳]. اولین تونل ثبت شده در مراجع غربی تونل مالیاس^۱ در فرانسه است که در قرن هفدهم میلادی جهت انتقال آب احداث گردید و اولین تونل راه در قرن نوزدهم بنام تونل سنت گوتارد^۲ در سوئیس اجرا شده است.

1 - Malpas

2 - SaintGothard

توسعه علم و فناوری و آشنایی بهتر و بیشتر با شرایط زمین و ساخت و گسترش تجهیزات ساخت و بهره‌برداری تونل‌ها، باعث شده است که رویکرد به این ساختار زیرزمینی در شهرها بیشتر شود، چرا که شهرهای بزرگ و پرجمعیت توانایی و گنجایش حمل و نقل پایدار را بر روی سطح نداشته و در نتیجه به سیستم‌های زیرزمینی از قبیل مترو روی آورده تا بتواند بدون دست‌خوردگی در سطح زمین، با احداث خطوط متعددی از شریان‌های شهری و مترو، شبکه وسیعی از حمل و نقل را ایجاد نماید علاوه بر این، از مهمترین مزایای استفاده از فضاهای زیرزمینی و تونل‌ها در محیط‌های شهری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- حفظ محیط زیست

- تأمین فضای مناسب

- تأمین ایمنی و امنیت بیشتر

- صرفه‌جویی در هزینه‌های تأمین انرژی

- صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری

- صرفه‌جویی در هزینه‌های جابجائی تأسیسات شهری و هزینه تملک و خرید زمین

ساخت تونل و حفاریات زیرزمینی به دلیل ناشناخته بودن زمین همواره یکی از پرهزینه‌ترین و مخاطره‌آمیزترین فعالیت‌های مهندسی بوده است. تنوع ویژگی‌های زمین و شرایط زمین‌شناسی، محدودیت‌های مهندسی پروژه و در نتیجه عدم قطعیت‌ها باعث می‌شود که هر پروژه تونل‌سازی از نظر طراحی و ساخت، منحصر به فرد باشد. تونل‌های کم عمق شهری در زمین‌های سست و تأثیر آن‌ها بر سازه‌های اطراف، حساسیت‌های ویژه‌ای از جنبه‌های ایمنی، زیست محیطی و اجتماعی دارند. در چنین شرایطی انتخاب صحیح شناسایی‌های ژئوتکنیکی، تحلیل و ارزیابی پایداری تونل و رفتار زمین اطراف آن، بکارگیری روش‌های مناسب مدیریت پروژه، استفاده از تکنولوژی‌های نوین و بهبود کیفیت اجرا و ساخت از اهداف اصلی دست‌اندرکاران این حرفه می‌باشد.

علی‌رغم قدمت بسیار زیادی که در شروع صنعت تونل‌سازی وجود دارد، تونل‌سازی پیشرفته یک صنعت نوپا محسوب می‌شود لذا در این کتاب سعی بر آن شده است تا مروری کوتاه و گذرا بر روش‌های قدیمی داشته و از ارائه تعاریف قدیمی و تکراری بهره‌برد و بیشتر به ارائه روش‌های نوین تونل‌سازی بپردازد.