

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مهندسی فضاهاى زیرزمینی

در راستای توسعه پایدار شهری

فهرست

خلاصه.....	۷
فصل اول: مقدمه.....	۱۹
تعریف زیرساخت زیرزمینی.....	۲۱
پایداری.....	۲۲
خطر و خطرپذیری (ریسک).....	۲۴
تاریخچه‌های کوتاه از استقرار در زیرزمین.....	۲۴
مزایا و چالش‌های بالقوه مرتبط با توسعه فضای زیرزمینی.....	۲۹
عوامل انسانی تاثیرگذار بر توسعه فضای زیر زمین.....	۳۳
گزارش.....	۳۴
منابع.....	۳۵
فصل دوم: تکامل و عوامل تاثیرگذار بر توسعه زیرزمینی.....	۳۹
توسعه فضای زیرزمینی در قرن گذشته.....	۴۰
مهندسی زیرسطحی برای پایداری.....	۴۱
محورک‌های سیاسی، اقتصادی و رفتاری انسانی اثرگذار بر تصمیم‌گیری.....	۴۴
وابستگی‌های متقابل بین سامانه‌ها.....	۴۹
عواقب برنامه‌ریزی ناقص.....	۵۳
برنامه‌ریزی و نحوه اداره به منظور پایداری.....	۵۶
مدیریت بلندمدت فضاهاى زیرسطحی.....	۵۹
منابع.....	۶۰
فصل سوم: کمک‌های مهندسی فضای زیرزمینی به توسعه شهری پایدار و تاب‌آور.....	۶۷
دیدگاه کلی: فضای شهری به عنوان سامانه‌ای در میان سامانه‌ها.....	۶۷
خطرات، امنیت و تاب‌آوری مناطق شهری.....	۸۵
منابع.....	۹۵
فصل چهارم: سلامت و امنیت در فضای زیرزمینی.....	۱۰۳
مهندسی عامل انسانی.....	۱۰۴

۱۰۵.....	مدیریت ایمنی به واسطه مقررات.....
۱۰۷.....	خطرات مربوط به سلامتی انسان.....
۱۰۹.....	ایمنی از خشونت.....
۱۱۲.....	آیین‌نامه‌های بین‌المللی ایمنی تونل‌های زیرزمینی.....
۱۱۳.....	چالش‌های پاسخ اضطراری.....
۱۱۶.....	افزایش آسایش و حداکثرسازی ایمنی.....
۱۱۸.....	منابع.....
۱۲۳.....	فصل پنجم: پایداری چرخه حیات، هزینه‌ها و مزایای توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی.....
۱۲۳.....	ارزیابی پایداری چرخه حیات.....
۱۲۶.....	هزینه و فایده اقتصادی چرخه حیات.....
۱۳۱.....	هزینه و فایده اقتصادی چرخه حیات فاز نوسازی و جایگزینی.....
۱۳۱.....	هزینه و فایده زیست‌محیطی چرخه حیات.....
۱۳۳.....	هزینه و فایده اجتماعی چرخه حیات.....
۱۳۵.....	نیازهای پژوهشی برای هزینه‌ها و مزایای چرخه حیات.....
۱۳۷.....	منابع.....
۱۴۱.....	فصل ششم: مهندسی و فن‌آوری‌های نوآورانه در زیرزمین به منظور توسعه پایدار.....
۱۴۱.....	سیر تکامل تکنولوژی.....
۱۴۵.....	فن‌آوری‌هایی برای مشخص‌سازی موقعیت (محل) فضای زیرزمینی.....
۱۵۱.....	فن‌آوری‌ها برای طراحی.....
۱۵۵.....	فن‌آوری‌هایی برای ساخت‌وساز در زیرزمین.....
۱۶۰.....	فن‌آوری‌های حفاری بدون ترانشه (trenchless).....
۱۷۱.....	فن‌آوری‌هایی که پایداری و تاب‌آوری را ارتقاء می‌دهند.....
۱۸۱.....	فصل هفتم: ظرفیت سازمانی، آموزشی، پژوهشی و نیروی کار.....
۱۸۹.....	بهبود عملکرد.....
۱۹۰.....	فن‌آوری‌های پیشرفته برای پایداری.....
۱۹۲.....	رویکردهای چرخه حیات.....
۱۹۴.....	ایمنی و آسایش کاربر.....
۱۹۵.....	مطالب پایانی.....
۱۹۷.....	منابع.....

خلاصه

طی هزاران سال، فضای زیرزمینی، پناهگاه، ملجأ و پایه‌ای برای سازه‌های روسطحی و همچنین مکانی برای بیان معنوی و هنری بوده است. اخیراً، زیرساخت‌های مهم به دلیل نزدیکی و مجاورت با نقاط خدمات‌رسان، در زیرزمین واقع می‌شوند تا مواردی همچون حفظ فضای روسطحی در برابر خطرات، ایزولاسیون و حفاظت در برابر تهدیدات امنیتی و اقلیمی، کاهش هزینه‌های ساخت و انرژی، بهبود جریان ترافیک و مزایای زیبایی‌شناختی را فراهم سازد. فضای زیرزمینی قادر است آزادی سه بعدی را که در مناطق به شدت توسعه یافته امکان‌پذیر نیست، فراهم آورد. سامانه‌های زیرساختی می‌توانند در زیر شهرها، زیر رودخانه‌ها و حتی در میان کوه‌ها احداث شوند. با توجه به راحتی و آسایشی که این سامانه‌ها فراهم می‌کنند، زندگی بسیاری از مردم به آن‌ها وابسته شده است. همچنین ممکن است قرار دادن زیرساخت‌های جدید در زیرزمین، باعث تشویق و حمایت از تغییر مسیر توسعه شهری به الگوهای پایدار شود. لذا زیرساخت‌های زیرزمینی تاب‌آور که به خوبی عمل می‌کنند و به درستی نگهداری می‌شوند، بخش لاینفک پایداری محسوب می‌گردند.

بنا به درخواست بنیاد ملی علوم^۱، شورای تحقیقات ملی^۲ مطالعه‌ای جهت جمع‌بندی دانش فعلی از مهندسی زیرزمینی انجام و جهت‌های مورد نیاز برای مسیر جدید تحقیقات را تعیین نمود تا توسعه پایدار را از طریق مهندسی زیرزمینی پشتیبانی کرده و محرک‌هایی که توسعه زیرزمینی را ارتقا داده و یا مهار می‌کنند بررسی شود. NRC، هیئتی متشکل از محققان و متخصصان با تخصص در مهندسی ژئوتکنیک، طراحی و ساخت فضاها و سازه‌های زیرزمینی، تکنولوژی‌های بدون تراشه، ارزیابی ریسک، فناوری‌های تجسمی برای کاربردهای ژئوتکنیک، توسعه پایدار زیرساخت‌ها، ارزیابی چرخه حیات، سیاست و برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها، پیشگیری از آتش‌سوزی، ایمنی و تهویه در زیرزمین می‌باشد. مطالعات این کمیته به منظور آگاه‌سازی مخاطبان بخش خصوصی و دولتی دخیل در پژوهش، برنامه‌ریزی و طراحی شهری و تأسیسات، ساخت‌وساز زیرزمینی و ایمنی و امنیت است.

این مطالعات بر میزان مشارکت و سهم فضای مهندسی‌ساز زیرزمینی در توسعه پایدار تمرکز دارد و نیازهای موجود در تحقیق و محیط‌های آموزشی، قانون‌گذاری و اجتماعی که این سهم را به حداکثر می‌رساند را خاطر نشان می‌کند. این گزارش مجموعه‌ای از مشاهدات جامع، نتایج، اقدامات بالقوه و موضوعات پژوهشی مرتبط با طراحی و مدیریت سامانه‌های زیرساختی یکپارچه و میان رشته‌ای؛ آموزش مهندسی زیرزمینی، تربیت نیرو، پژوهش و اجرا؛ رویکردهای مدیریت و توسعه فن‌آورانه؛ ارزیابی چرخه حیات زیرساخت؛ مقبولیت فضای زیرزمینی نزد مردم و ایمنی؛ و فضای زیرزمینی به عنوان یک منبع را فراهم می‌آورد. این نتایج به تمامی ابعاد هزینه‌ای به طور کلی و نه به طور خاص می‌پردازد.

^۱ NFS

^۲ NRC

شرح وظایف کمیته تدوین

کمیته‌ای موقت از دانشگاه‌های ملی مطالعه‌ای را به منظور بررسی مزایای بالقوه توسعه فضای زیرزمینی در محیط‌های شهری، تعیین تحقیقات لازم برای بهره بردن از این فرصت‌ها، و ارتقاء درک عموم و جامعه فنی از نقش مهندسی فضای زیرزمین در پایداری محیط‌های ساخته شده شهری انجام خواهد داد که به طور مشخص کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر انرژی و مصالح ساختمانی، و اثرات منفی بر محیط‌های طبیعی، محیط‌های ساخته شده، و محیط‌های اجتماعی را در بر خواهد داشت. این کتاب به طور خاص عبارت خواهد بود از:

- جمع‌بندی دانش مهندسی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک درباره توسعه زیرزمینی در محیط‌های شهری و اینکه چگونه استفاده از فضای زیرزمینی پایداری را افزایش می‌دهد که شامل دانش زمین‌شناسی محل، ساخت و فناوری‌های نظارتی ژئوتکنیکی، الزامات انرژی، استفاده از مصالح تولید شده از حفاری، هزینه‌ها و مزایای چرخه حیات توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی می‌باشد.
- شناسایی تحقیقات لازم به منظور سرمایه‌گذاری در فرصت‌هایی که منجر به افزایش توسعه شهری پایدار از طریق مهندسی زیرزمینی در حوزه‌های ذیل می‌شود:
- توصیف‌سازی زیرزمین، پیش‌بینی محیط زمین‌شناسی، و پاسخ زمینی که برای طراحی و ساخت موفق پروژه‌های زیرزمینی و تأسیسات حیاتی به منظور افزایش پایداری و تاب‌آوری، مهم و حیاتی است؛
- روش‌شناسی ساخت و نظارت و روش‌های ارتقاء یافته حفاری، از جمله حفاری تونل که منجر به توسعه زیرزمینی پایدار و تاب‌آور می‌گردد؛
- سازه‌ها و مجراهای هوشمند زیرزمینی که وضعیت خود را اطلاع می‌دهند؛
- ملاحظات سلامت و ایمنی، از قبیل تهویه مقرون به صرفه، روشنایی، و نگرانی‌های مربوط به کنترل آتش یا تشعشعات رادیواکتیو؛
- مسائل مربوط به هزینه و مزایا چرخه حیات، از جمله: کاهش نیاز به انرژی برای گرمایش و سرمایش، کاهش به‌کارگیری مصالح ساختمانی، استفاده از لوازم حفاری، افزایش طول عمر سازه‌های زیرزمینی و کاهش هزینه‌های نگهداری مرتبط با دمای پایدار و ایزولاسیون از اثرات آب و هوای سطح زمین؛
- مزایای بالقوه پایداری حاصل از افزایش استفاده از فضای زیرزمینی برای سامانه‌های حمل و نقل انسان، از جمله سواره‌روها و حمل و نقل عمومی و باربری؛
- پتانسیل یکپارچه‌سازی سامانه‌های انرژی، آب، و فاضلاب برای مناطق شهری خاص به منظور بهبود پایداری؛ و
- اینکه چگونه توسعه زیرزمینی می‌تواند نگرانی‌های مربوط به تأثیرات تغییرات آب و هوایی بر محیط شهری را برطرف سازد.

این کمیته دستورالعمل‌هایی را ارائه می‌دهد که مسیر جدیدی را در تحقیقات مهندسی فضای زیرزمینی بیان می‌نمایند، که این تحقیقات بر مهندسی سامانه‌های زمینی و مدیریت تأمین منابع انسانی آینده، برای توسعه پایدار زیرزمینی تمرکز دارند و همچنین مزایا و مضرات ایجاد یک مرکز تحقیقاتی جدید در این حوزه را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و دیگر گزینه‌های بالقوه جهت افزایش ظرفیت منابع انسانی برای توسعه پایدار زیرزمینی (شامل وضع موجود) را بررسی خواهد نمود. این کمیته همچنین از دیدگاه علوم اجتماعی، محرک‌های اقتصادی، و رفتاری انسانی که توسعه فضای زیرزمینی را در حالت پایدار افزایش یا مهار می‌کنند مورد بررسی قرار می‌دهد، لیکن خط مشی یا توصیه‌های مالی را ارائه نخواهد داد.

فضای زیرزمینی برای پایداری

در این متن پایداری، به صورت توانایی برآوردن نیازهای اجتماعی حاضر، تعریف می‌شود بی‌آنکه قابلیت نسل‌های آینده در اقدام مشابه (برآوردن نیازهای اجتماعی) را به مخاطره اندازد. حفظ یا بهبود کیفیت زندگی و حفاظت بلندمدت تعادل محیطی در زمره این نیازهای اجتماعی می‌باشند. محیط طبیعی ناسالم به طور منفی بر منابع غذایی، و آب و هوا تأثیر می‌گذارد و کیفیت زندگی و سلامتی را تا سطوح غیر قابل قبولی تنزل می‌دهد. تاب‌آوری، بعدی مهم از پایداری است که به صورت توانایی

پاسخ به تغییرات محیطی (به‌ویژه حوادث منفی طبیعی یا ناشی از بشر) با حداقل تأثیر بر عملکرد تعریف می‌گردد. نقشه‌های اصلی برخی شهرها (مانند سنگاپور) شامل استفاده‌ای گسترده از فضای زیرزمینی می‌باشد. زیرساخت زیرزمینی که به خوبی برنامه‌ریزی شده باشد می‌تواند بر کاربری زمین و تصمیمات توسعه‌ای به طور مناسبی اثرگذار باشد و استفاده از خودرو و اثرات مرتبط به آن را کاهش دهد. مراکز شهری باتراکم بالا ممکن است به خدمات متمرکز وابسته باشند اما می‌توانند به منظور افزایش پایداری، بر روی متمرکزسازی سرمایه‌گذاری کنند. در صورتی که عناصر زیرساختی به طور بهینه طراحی، مکان‌یابی و اجرا شوند، آنگاه زیرساخت‌های حمل و نقل زیرزمینی (مانند راه‌ها و بزرگراه‌های شهری، متروهای حمل و نقل عمومی، خطوط راه‌آهن با سرعت بالا و معابر عمومی و پیاده‌روها) می‌توانند چالش‌های چندگانه مربوط به رشد در نواحی شهری (مانند ازدحام، پراکندگی و رشد نامنظم شهری) را بر طرف سازند. زیرساخت‌های زیرزمینی که به خوبی برنامه‌ریزی و اجرا شده باشند، در بسیاری از موارد می‌توانند کیفیت زندگی و پایداری را بیشتر از آنچه که زیرساخت‌های سطحی با هدف مشابه می‌توانند، بهبود بخشند.

زیرساخت زیرزمینی به عنوان بخشی از یک سامانه

مشاهده: هماهنگی راهبردی ناچیزی در توسعه زیرساخت زیرزمینی در ایالات متحده وجود دارد.

نتیجه‌گیری ۱. پشتیبانی رسمی و هماهنگ و مدیریت زیرساخت‌های زیرزمینی، به عنوان بخشی از یک سامانه یکپارچه، چند بعدی، روزمینی و زیرزمینی در سامانه‌های شهریامری حیاتی برای پایداری شهری است.

اقدامات بالقوه:

- a. تشخیص مسئولیت‌های مرتبط با پشتیبانی رسمی برای زیرساخت‌های زیرزمینی به عنوان بخشی از سامانه شهری کل، از طریق برنامه‌ریزی و عملکرد هماهنگ، توسعه فن‌آورانه و قانون‌گذاری محلی و منطقه‌ای.
- b. توسعه و ترغیب به کارگیری سامانه‌ای به منظور جمع‌آوری، بایگانی و دسترسی به داده‌های مناسب برای استفاده توسط صاحبان تسهیلات و اپراتورهای تسهیلات و تأسیسات به منظور کمک به تصمیم‌گیری.

تحقیق:

- a. بررسی مناسب‌ترین رویکردهای فنی و اداری در دولت به منظور تسهیل مدیریت هماهنگ فضای زیرزمینی به عنوان بخشی از یک سامانه شهری کل.
 - b. پایش اینکه چگونه کشورها و شهرهای جهان اطلاعات سه بعدی سازه‌های مدفون و زمین‌شناسی را جمع‌آوری، مدیریت، قابل دسترس و استفاده می‌نمایند.
- توسعه، اجرا و نگهداری زیرساخت‌ها نیازمند مدیریت سامانه‌های فیزیکی، اجتماعی و محیطی پیچیده‌ای است که بر عملکرد مناسب اثرگذار می‌باشند. توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی در ایالات متحده از فقدان سازمان یا آژانسی مسئول در سازمان فدرال که برای هماهنگی اقدامات توسعه‌ای در همه بخش‌ها تخصیص می‌یابد دچار خدشه می‌گردد. مکانیزم سرمایه‌گذاری برای پروژه‌ها و پژوهش‌ها تمایل به تمرکز بر حل مشکلات خاص با توجه اندک به اثرات بلندمدت بر سامانه شهری کل می‌باشد.

هماهنگی می‌تواند منجر به مدیریت بهتر سرمایه‌گذاری در تحقیقات، تصمیم‌گیری بهینه، کاهش ریسک برای پروژه‌های توسعه‌ای و اعمال نفوذ بهتر در نهادهای دولتی و محلی گردد. اگرچه برنامه‌ریزی و منطقه‌بندی توسط ادارات محلی موجب

رشد شهری رو به بالا و رو به بیرون انجام می‌شود، اما کنترل ناچیزی از فضای زیرزمینی و حتی کنترل کمتری برای هماهنگ‌سازی توسعه روزمینی و توسعه زیرزمینی وجود دارد. شناسایی، حفاظت و منطقه‌بندی مؤثر منابع زیرسطحی نخست برای استفاده بهینه امکان‌پذیر و مطلوب می‌باشد چنانکه به طور مثال در هلستینکی، فنلاند، مونترال، کانادا و سنگاپور انجام می‌گیرد. برخی تغییر سیاست‌ها از طریق مثلاً فرآیندهای مجوزی با صرف زمان کمتر به هزینه‌های پایین‌تر می‌انجامد، مشابه آنچه در ژاپن جریان دارد.

مشاهده: نیروهای بازار در ایالات متحده از رشد ظرفیت نیروی کار و توسعه شهری و زیرساختی حمایت می‌کنند، اما غالباً به صورت موقت که با پایداری شهری همساز نخواهد بود.

نتیجه‌گیری ۲. توسعه فضای زیرزمینی به عنوان بخشی از شهرسازی پایدار نیازمند ارتباط گسترده و هماهنگ با ذی‌نفعان می‌باشد تا شرایط خاص محل، انعطاف‌پذیری بیشتر و نیازهای اجتماعی بلندمدت را در طراحی سامانه زیرساخت و مدیریت بهینه چرخه حیات به صورت بهتری وارد نماید.

اقدامات بالقوه:

a. ایجاد یک شبکه یا سازمان میان رشته‌ای از سازمان‌ها و موسسات به جهت هدایت الگوهای پایدار در توسعه زیرساخت زیرزمینی و ترغیب به تحقیق و ارتباط میان رشته‌ای یافته‌ها در میان تمام رشته‌ها و ذی‌نفعان. ذی‌نفعان متشکل از طراحان، برنامه‌ریزان بلند مدت، معماران، متخصصان ایمنی و مجموعه‌ای از متخصصان مهندسی، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، محیط زیست، و پیمانکاران صنعت، دولت و دانشگاه می‌باشند.

b. مکانیزم توسعه برای تحقیق و برنامه‌ریزی سه بعدی جامع و یکپارچه که شامل مدیریت اطلاعات و فن‌آوری‌های ارتباطی است به این منظور که تحقیق، طراحی، ساخت، عملیات و مدیریت پیچیده زیرساخت‌های زیرزمینی را تسهیل بخشد.

تحقیق:

a. بررسی مدل‌هایی برای طراحی پایداری در سامانه‌های مهندسی شده سامانه‌های شهری که وابستگی، آسیب‌پذیری، پیچیدگی و سازگاری را تشخیص می‌دهند. هماهنگ ساختن تحقیق حاضر در ایالات متحده و کشورهای دیگر با سامانه‌های سازگار پیچیده و مهندسی عوامل انسانی (مانند ترکیب علوم رفتاری، عملکرد و ظرفیت انسانی، پرسنل و آموزش، و زیست‌شناسی انسانی و فیزیولوژی در سامانه‌های مهندسی شده).

b. توسعه مدل‌های مفهومی، تعاملات پیچیده در میان سامانه‌های چندگانه (مثلاً مکانیکی، انسانی و محیطی) برای افزایش فهم، کاهش ریسک و مدیریت مؤثر زیرساخت‌ها در میان فن‌آوری‌های در حال تغییر، شرایط اجتماعی و انتظارات.

c. مطالعه رفتار دست‌اندرکاران عملیات، نگهداری و کاربری زیرساخت زیرزمینی در خلال سناریوهای عملیاتی عادی و بدترین حالت به منظور بهینه‌سازی واسطه‌های انسانی - فنی در حالت سازگار با معیارهای بلند مدت.

توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی تلاشی چند رشته‌ای است. یک سامانه شهری پایدار زمانی امکان‌پذیر می‌باشد که تصمیمات به واسطه ارتباط‌های میان عناصر اجتماعی، فنی و عناصر حاکم بر جامعه (چنانکه امروزه تا حدی اتفاق می‌افتد) آگاهانه صورت گیرند. به هر حال پروژه‌های زیرساخت زیرزمینی اغلب به صورت پروژه به پروژه با بررسی ناچیز نگهداری بلندمدت یا نیازهای اجتماعی پذیرفته می‌شوند. این رویکرد با پایداری ناسازگار می‌باشد. تصمیمات تصمیم‌گیرندگان اغلب با دخالت منافع سیاسی، اجتماعی و اقتصادی و نگرانی‌های امنیتی همراه است این که با چه سرعتی، کجا و با چه روش‌هایی

توسعه زیرزمینی اتفاق می‌افتد. برای حداکثرسازی پایداری، تلاش‌های چند رشته‌ای در طول کل چرخه حیات زیرساخت مورد نیاز می‌باشد.

تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر زمانی میسر می‌گردد که مهندسين به عوامل اقتصادی و اجتماعی پیچیده و تعاملی توجه می‌نمایند که به پایداری کمک می‌کند و همچنین زمانی که برنامه‌ریزان شهری انتظارات واقع بینانه‌ای در مورد محیط زیرزمینی دارند. برخی وابستگی‌ها مشخص می‌باشند اما دیگر وابستگی‌ها - برخی که نسبت به امنیت ملی دارای اهمیت فراوانی می‌باشند - ممکن است بدون ارتباط و برنامه‌ریزی مناسب در میان کارشناسان و ذی‌نفعان ناشناخته باقی بمانند. داشتن ظرفیت انعطاف‌پذیری برای پرداختن به مسائل، فن‌آوری‌ها و انتظارات اجتماعی در حال ظهور در طول عمر عملیاتی زیرساخت زیرزمینی و فراتر از آن الزامی است. خطرات جدید مرتبط با سامانه‌های زیرساختی آسیب‌پذیر و در حال فرسودگی، تغییرات آب و هوایی و نگرانی‌های امنیتی، برای مثال، ممکن است بر ارائه خدمات، کیفیت زیست‌محیطی یا ایمنی شخصی تأثیرگذار باشد. حوادث غیر مترقبه و افراطی (مثلاً عملیات تروریستی یا بلایای طبیعی) دیگر خطرات و ریسک‌ها را فراهم می‌آورند. پایداری، به برنامه‌ریزان و مهندسانی وابسته است که ظرفیت‌ها را ایجاد و با هم تلفیق می‌کنند تا رفتار انسانی را پیش‌بینی کرده و مطابقت دهند و به طور مداوم محیط‌های شهری را توسعه دهند. وارد ساختن رفتار انسانی در فضای زیرزمینی منجر به خلق محیط‌هایی می‌گردد که امکان درک شهودی بیشتری از ایمنی فضای زیرزمینی در موقعیت‌های مختلف فراهم می‌سازند.

ایجاد یک چهارچوب نهادی برای برنامه‌ریزی حرفه‌ای، معماری، مهندسی، مدیریت عمومی و سیاست اجتماعی و اقتصادی متعهد به توسعه پایدار دشوار خواهد بود اما می‌تواند ظرفیت‌های آموزشی و پژوهشی ایالات متحده را برای پرداختن به کاربری فضای زیرزمین شهری باز مطالبه نماید. سازمان‌های دولتی و محلی، صنایع مهندسی و ساخت‌وساز و اساتید دانشگاهی و محققان برای افزایش سرمایه انسانی می‌بایست با یکدیگر تعامل داشته باشند.

مشاهده: مدل‌های پیچیده مالکیت برای زیرساخت زیرزمینی مسئولیت بازرسی‌های معمول، نگهداری، تعمیرات، دستورالعمل‌ها، بودجه و بدهی‌ها را دچار مشکل می‌سازد.

نتیجه‌گیری ۳. درک مالکیت و کنترل مدل‌های فضای زیرزمینی و توسعه دستورالعمل‌ها برای سرمایه‌گذاری و انجام بررسی‌های دوره‌ای لازم، نگهداری و تعمیر عناصر زیرساختی مجزا یک ضرورت است.

تحقیق:

a. تحلیل رویکردهای چند رشته‌ای و جامع به منظور بررسی بافت پیچیده مالکیت، کنترل و مسئولیت‌های مرتبط با نگهداری و ایمنی زیرساخت زیرزمینی.

b. بازرسی رویکردهای چند رشته‌ای برای کمک به مدیریت سامانه‌های مدرن‌تر.

زیرساخت‌های زیرزمینی در ایالات متحده معمولاً تحت تملک و کنترل افراد، شرکاء، شرکت‌های متعدد و دولت محلی، ایالتی و فدرال می‌باشند. مسئولیت بازرسی‌های معمول، نگهداری و تعمیرات نامشخص است و ابهام در دستورالعمل‌های کاربردی، بودجه و شرایط می‌تواند پدیدار گردد. سازمان‌های مجزا به طور مستقل با حمل‌ونقل عمومی، مسکن‌سازی و توسعه شهری، امنیت کشور و مسائل مربوط به انرژی سروکار دارند اهداف پایداری بدون کنترل و مدیریت هماهنگ به تأخیر خواهد افتاد.

وضعیت پژوهش، توسعه فن آوری و آموزش ایالات متحده

مشاهده: زمانی که سرمایه‌گذاری صنعتی و فدرال در تحقیق و توسعه مهندسی فضای زیرزمینی وجود داشت، ایالات متحده در بسیاری از زمینه‌های علم و فن آوری فضای زیرزمینی در جهان پیشگام بود.

نتیجه‌گیری ۴. حفظ رقابت‌پذیری جهانی در آموزش، توسعه فن آوری و عملکرد مهندسی فضای زیرزمینی پایداری شهری، تاب‌آوری و استاندارد زندگی را در ایالات متحده پشتیبانی می‌نماید.

اقدام بالقوه:

تخصیص منابع برای آموزش میان رشته‌ای گسترده‌تر و توسعه فن آوری در طراحی و ساخت‌وساز زیرزمینی.

تحقیق:

بسط و توسعه تحقیقات آمریکا، سبب ارتقاء مواردی مانند: فن آوری مواد، فن آوری ساخت روبات، سامانه‌های هدایت لیزری، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سامانه‌های تجسمی و تحلیل کامپیوتری می‌گردد که قابلیت مدل‌سازی، طراحی، نقشه‌کشی و کاهش ریسک مرتبط با سامانه‌های زیرزمینی پیچیده را بهبود می‌بخشد (رجوع به فصل ۶ برای جزئیات بیشتر).

تخصص ژئوتکنیک همواره برای ارائه تسهیلات زیرزمینی با هزینه و ریسک کمتر و عملکرد بهتر چرخه حیات ضروری است. آموزش، پژوهش و عملکرد ژئوتکنولوژی نیاز به تلفیق بهتر تمام رشته‌های مرتبط با مکان‌یابی، طراحی، ساخت، عملیات و مدیریت ریسک و تسهیلات زیرزمینی دارد. پیچیدگی و غیر قابل پیش‌بینی بودن در ساخت، نشان می‌دهد که چالش‌های بسیاری باقی مانده است. پیشرفت‌های فن آورانانه، توانایی ما را در فهم، مدل‌سازی، ساخت و کاهش ریسک مرتبط با زیرساخت زیرزمینی بهتر می‌سازد. با این همه، اعتماد زیاد بر تخصص و پیشرفت‌های فن آورانانه وارداتی، برای ایجاد و نگهداری تسهیلات زیرزمینی آن‌گونه که تبدیل به یک روند در ایالات متحده گردیده است به نفع این کشور نمی‌باشد. دانش و فن آوری بسیار نوین، و آرشيو خاص پروژه، ممکن است کشور مذکور را، نسبت به خسارت بلندمدت احتمالی عملیات، نگهداری و امنیت زیرساخت زیرزمینی، در اتمام ساخت‌وساز دچار مشکل نماید.

مشاهده: عدم تداوم سرمایه‌گذاری، که امکان سرمایه‌گذاری هدفمند در تجهیزات و گروه آموزشی را میسر می‌سازد؛ منجر به کاهش قابل توجه در تعداد برنامه‌های دانشگاهی تخصیص یافته برای پژوهش و آموزش مهندسی یکپارچه فضای زیرزمینی می‌گردد.

نتیجه‌گیری ۵. کمبود قابل توجهی در فرصت‌های آموزشی، تحصیلی و پژوهشی برای مهندسانی که خواستار فراگیری و به کارگیری مهندسی فضای زیرزمینی در ایالات متحده می‌باشند وجود دارد.

اقدامات بالقوه:

a. توسعه مراکز پژوهشی چند رشته‌ای، چند نهادی و متقابل بخشی ملی، که بر حوزه‌های گوناگون مهندسی فضای زیرزمینی و زیرساخت شهری پایدار تأکید دارند تا نسل جدید پیشگامان مهندسی فضای زیرزمینی را عرضه نمایند.

b. تلفیق مطالعات تکمیلی مهندسی فضای زیرزمینی با برنامه‌های پژوهشی و یا با انبوه قابل توجهی از فعالیت‌های هماهنگ آموزشی برای تثبیت پژوهش در برنامه‌های موجود. ایجاد فرصت‌هایی برای تخصیص یافتن در ابعاد خاص مهندسی فضای زیرزمینی، اما به همراه یک رویکرد چند رشته‌ای.

c. توسعه کنسرسیوم دانشگاهی، برای گردآوری تخصص دانشگاهی؛ تقویت روابط آموزشی دانشگاه - صنعت.
 d. آموزش برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر تسهیلات با رویکرد چند رشته‌ای از طریق قالب‌های آموزش سنتی، آموزش از راه دور یا به شیوه‌ترکیبی. کارآموزی‌ها (مانند کارآموزی پژوهشی و آموزش تکمیلی یکپارچه NSF) می‌توانند به تأمین مالی برنامه‌ها کمک نمایند.
 e. عرضه رشته‌های چندگانه، موضوعات، چالش‌ها و فرصت‌های مرتبط با مهندسی و کاربری فضای زیرزمینی پایدار به دانشجویان دوره کارشناسی.
 f. افزایش فرصت‌های ادامه تحصیل برای متخصصان.

g. افزایش شرایط لازم و مناسب برای بازرسان، تکنیسین‌ها، و اپراتورهای تسهیلات پیچیده زیرزمینی.
 امروزه دانش، تخصص و آموزش مهندسی فضای زیرزمینی در ایالات متحده عمدتاً از طریق مشاوره و تجربه کاری بدست می‌آید و نه از طریق آموزش عالی. چنین آموزشی تجربه عملی را فراهم می‌کند و برای نیروی کار سودمند است، اما رقابت‌پذیری و مسائل مربوط به تعهد و مسئولیت می‌تواند اشتراک‌گذاری اطلاعات در صنعت را به طور کلی محدود سازد و مهندسان جوان را از بهره‌جویی گسترده‌ای از فن‌آوری‌ها و روش‌شناسی‌ها محروم نماید. از آنجائی که انگیزه‌های تجاری اندکی در صنعت برای پذیرش چالش‌های مرتبط با پایداری سامانه شهری یا زیرساخت بلندمدت وجود دارد، لذا ممکن است مهندسان جوان از راه‌حل‌های بالقوه این مسائل آگاه نگردند. در مقابل، دانشجویان آمریکایی که در موسسات پژوهشی چند رشته‌ای ایالات متحده تحصیل نموده‌اند از پیشرفت‌ها و انتشار فن‌آوری و دانش گسترده‌ای که انجام می‌پذیرد احتمالاً بهره بیشتری می‌برند و تبدیل به نیروی کار آماده‌تر داخلی می‌گردند.

طراحی بهینه و استفاده سنجیده‌تر از منابع در نتیجه شناخت دقیق زمین‌شناسی زیربنایی و زمین‌شناسی اطراف و سوابق توسعه انسانی (مثلاً زیرساخت‌های موجود و مصالح ساختمانی قدیمی) و قابلیت حداقل‌سازی شرایط پیش‌بینی نشده زمین حاصل می‌گردد. برنامه‌های آموزش سنتی مقطع کارشناسی، رویکرد منسجمی را برای اجرا نمی‌آموزند و برنامه‌های تحصیلات تکمیلی، اندکی برنامه‌های میان رشته‌ای در مهندسی فضای زیرزمینی، صدور مجوز در حوزه‌های خاص (مثلاً تونل‌سازی)، و یا تخصص در برنامه‌های تحصیلات تکمیلی عمومی‌تر را ارائه می‌دهند که امکان بهینه‌سازی را میسر می‌سازد. دانش فن‌آوری تونل‌زنی (مانند حفاری)، خاک برداری، پشتیبانی زمین، بهبود زمین و نظارت بر سامانه‌های طبیعی و سامانه‌های ساخته بشر و دیگر عملکردها ضروری است. اما برنامه‌های آموزشی مناسب همچنین در برگیرنده مهندسی مکانیک، برق، عمران، سازه، ژئوتکنیک و زمین‌شناسی؛ برنامه‌ریزی؛ معماری؛ سیاست عمومی؛ ایمنی از آتش؛ و فن‌آوری اطلاعات در برنامه تحصیلی خود خواهند بود.

تنها چند هیئت علمی دانشگاهی در ایالات متحده در مورد طراحی تونل و اجرای ساخت تحقیق می‌نمایند. عدم تمرکز مداوم دولت بر مسائل زیرساختی و پراکندگی تحقیقات توسعه فضای زیرزمینی با پشتوانه مالی دولت آمریکا در چندین رشته با محوریت مهندسی فضای زیرزمینی (مانند مهندسی سازه، ژئوتکنیک و معدن) منتهی به انتظارات کم در ادامه تأمین مالی برنامه می‌شود. فرصت‌ها در حوزه‌های تخصصی از قبیل تونل‌سازی در نتیجه کاهش اجباری واحدهای درسی برای دانشجویان دوره کارشناسی و جدیداً به دلیل عدم علاقه دانشجویان آمریکا به ادامه تحصیل در مقاطع پیشرفته از بین می‌روند.

بهبود عملکرد

مشاهده: پیچیدگی سامانه‌های زیرساخت شهری و عدم قطعیت مرتبط با طراحی و عملکرد سامانه با تقاضای بیشتر و متنوع‌تر، هم در زیرساخت‌های زیرزمینی و هم زیر ساخت‌های رو زمینی افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری ۶. مهندسان و برنامه‌ریزان شهری می‌توانند کارایی امکانات کل چرخه حیات و پایداری شهری کل را با رویکردهای خطر آگاه، مستند و معتبر نسبت به برنامه‌ریزی و طراحی پروژه بیشتر و بهتر افزایش دهند که این امر نیازهای پروژه‌های چرخه حیات را به لحاظ ارائه خدمات، هزینه‌های اولیه، تاب‌آوری در برابر حوادث وخیم و شدید، و نگهداری و عملکرد مؤثر متعادل می‌سازد.

تحقیق:

- a. ارتقاء فن‌آوری‌های موجود و توسعه فن‌آوری‌های جدید برای مدل‌سازی، عدم قطعیت در جریان تمامی فازهای چرخه حیات زیرساخت. این موارد عبارتند از فن‌آوری‌های تهاجمی و غیر تهاجمی برای مشخص‌سازی محل زمین‌شناسی (از جمله مواد و زیرساخت‌های موجود و قدیمی)؛ روش‌های طراحی تحلیلی و محاسباتی؛ فن‌آوری‌های خاک‌برداری، فن‌آوری‌های پشتیبانی زمین و فن‌آوری‌های نظارتی؛ و فن‌آوری‌هایی برای مدیریت دارایی که از جمله مربوط به مدیریت داده‌ها و امنیت می‌باشند (رجوع به فصل‌های ۶ و ۷ برای جزئیات بیشتر).
 - b. گسترش استراتژی‌ها به منظور بررسی خطرات بالقوه، مشکلات قریب الوقوع و رشد آبشاری مشکلات به ویژه با توجه به سرمایه‌گذاری کنونی در نوسازی سامانه زیرساخت.
 - c. مهندسان و برنامه‌ریزان می‌توانند از حوادث غیرمترقبه برای درک رفتار و وابستگی‌های متقابل سامانه‌های پیچیده و برای تأیید مدل‌های محاسباتی عملکرد سامانه استفاده نمایند.
- ارزیابی کامل مزایا و هزینه‌های چرخه حیات، مالکان و برنامه‌ریزان را متقاعد می‌سازد که سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر در زیرساخت‌های زیرزمینی در بلندمدت می‌تواند به صرفه باشد. اگر تصمیمات با ارزیابی کامل مزایا، نواقص و تعاملات عناصر زیرساختی و با در نظر گرفتن تمامی خطرات و خطرپذیری‌های بالقوه آگاهانه صورت گیرد، امنیت و تاب‌آوری مناطق شهری افزایش می‌یابد. عملکرد بلندمدت زیرساخت‌ها می‌تواند با دسترسی به مدل‌ها و داده‌های مناسب برای تجزیه و تحلیل بهبود یابد. به هر صورت، اعتبار سنجی و تأیید مدل‌های توسعه یافته برای کارایی و عملکرد سامانه‌های مجزا در هنگام مدل‌سازی سامانه‌های پیچیده‌تر اغلب نامعلوم و سوال برانگیز می‌باشد و عدم قطعیت بالا می‌رود. با این حال مدل‌های سیستم‌های یکپارچه سامانه‌هایی چون، زیرساخت‌های شهری باید پیشرفته و معتبر باشند.

تعهد بلند مدت

مشاهده: زیرساخت‌های زیرزمینی فرسوده ممکن است نسبت به فرسودگی و مسائل مربوط به تغییرات فن‌آوری‌ها، تغییرات آب و هوایی و نیازهای اجتماعی حساس و آسیب‌پذیر باشند...

نتیجه‌گیری ۷: توسعه فضای زیرزمینی نیازمند یک تعهد درازمدت نسبت به پیشرفت‌های فن‌آورانه در محیطی است که با برنامه‌ریزی، نوآوری و اجرای بهتر همساز می‌باشد.

اقدامات بالقوه:

- a. طراحی زیرساختی که امکان سهولت دسترسی به بازرسی‌ها، نگهداری، تعمیرات، به روز رسانی‌ها، و پیکربندی‌های مجدد را در پاسخ به نیازها یا فن‌آوری‌هایی که امکان اتمام چنین عملی را با هزینه‌های پایین‌تر می‌دهند فراهم آورد.
- b. بررسی نیازها، قابلیت‌های استفاده و دسترسی منابع در هنگام تصمیم‌گیری‌های اداری و فنی در خصوص توسعه که این

منابع شامل منابع انرژی (مانند نفت، گاز و دیگر منابع انرژی است)، مواد معدنی صنعتی، مواد معدنی با ارزش یا بسیار استراتژیک (مانند طلا، اورانیوم، عناصر خاکی کمیاب) و مصالح ساختمانی (مانند سنگ ریزه، ماسه، سنگ ساختمانی) می‌باشد.

c. به کارگیری مدل‌های مناسب که سناریوهای بالقوه متعددی را به نمایش می‌گذارند و برنامه‌ریزی بهتر سامانه زیرساختی را بر اساس شرایط محلی میسر می‌سازند.

تحقیق:

a. ذی‌نفعان سامانه و دانشگاه مشترکاً می‌توانند مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد درازمدت را برای سامانه‌های پیچیده ارتقا دهند و به مرور نتایج را برای درک پاسخ‌های دینامیکی و رفتارهای در حال ظهور سامانه تأیید نمایند.

b. بررسی اینکه چگونه فن‌آوری‌ها و نوآوری‌های حاصل از دیگر صنایع (مانند ابزارهای اکتشاف، فن‌آوری‌های تحلیلی در جا، سامانه‌های اندازه‌گیری در حین حفاری، اسکن لیزری، تلفیق داده‌های چند سنسوری (دیتا فیوژن)) و کاربردهای غیر نظامی تحقیقات نظامی می‌توانند در مهندسی فضای زیرزمینی بکار روند.

c. انجام تحقیقات بلندمدت در خصوص اثرات زیرساخت زیرزمینی بر محیط‌های طبیعی و ساخته بشر به منظور افزایش ظرفیت تصمیم‌گیری برای منافع بلندمدت جامعه به بهترین شکل.

d. مطالعه اثرات بلندمدت بر پایداری ذخیره‌سازی یا دفع زیرزمینی زباله‌های شهری (از جمله مربوط به شهرداری، فاضلاب، یا تولیدات مربوط به انرژی) به طور همه جانبه و بر یک مبنای ریسک - هزینه - مزیت مشترک.

برنامه‌ریزی چرخه حیات، به سلامت بلندمدت زیرساخت‌ها کمک می‌نماید. عمر (سن)، فرسودگی و تغییرات در فن‌آوری‌ها و کاربری آنها به این معنی است که سامانه‌های زیرساخت زیرزمینی همواره نیازمند توجه و بررسی می‌باشند. اگر بهترین دانش، فن‌آوری و نظرات موجود استنتاج و با نیازهای اجتماعی همراه شوند و استفاده از آنها کم هزینه‌تر گردد، انتخاب پایدارترین رویکردها برای کاربری فضای زیرزمینی به احتمال زیاد خواهد داشت. برای مثال، وارد نمودن صنایع همگانی در تونل‌های تأسیساتی مشترک (به نام اوتیلیدورها یا کوریدورهای تأسیساتی) می‌تواند صنایع همگانی را از سطح جدا ساخته و در یک مکان همواره در دسترس قرار دهد. گره‌های زیرساخت‌های تأسیساتی در بسیاری مناطق شهری می‌تواند کاهش یابد و یا از آنها جلوگیری گردد (چنین زیرساختی معمولاً بعد از عمر عملیاتی خود طولانی مدت در محل می‌ماند) و سطح زمین بیشتری برای استفاده‌های دیگر باقی می‌ماند. این امر به ویژه در مناطقی با معیار عمومی محدود سودمند است و زمانی که بررسی‌های هزینه‌ای شامل ارزش فضای زیرزمینی باشد، می‌تواند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد.

ساخت‌وساز استراتژیک و نگهداری بلندمدت زیرساخت‌های زیرزمینی در مقایسه با زیرساخت‌های سطحی به اثرات محیطی نامطلوب کمتری می‌انجامد. پیشرفت‌های فناورانه به حداقل‌سازی سر و صدا و ارتعاشات، حفظ کیفیت هوا و امکان بازیافت و استفاده مجدد مواد ساختمانی زائد، از جمله خاک و سنگ کمک می‌نماید. ما نیاز به پیشرفت‌های فن‌آورانه‌ای داریم که امکان پیش‌بینی بهتر اثرات بر کیفیت آب، جریان آب‌های زیرزمینی، ژئوشیمی خاک، و درجه حرارت زیرزمین و جریان گرما که بر محیط‌های طبیعی و ساخته بشر اثر می‌گذارند را فراهم می‌نمایند.

ارزیابی چرخه حیات

مشاهده: اندک اطلاعاتی در مورد اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی و پایداری چرخه حیات و توسعه شهری وجود دارد که می‌تواند بر فن‌آوری و تصمیمات اجرایی مرتبط با عملکرد بلندمدت زیرساخت (دهه تا قرن)، تعمیر و نگهداری و هزینه‌های کاهش یافته مؤثر باشد.

نتیجه گیری ۸. مطالعات علمی و جامع گذشته نگران هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم و اثرات انواع گوناگون پروژه‌های زیرزمینی برای ارزیابی سودمندی و تأثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی ضرورت دارد، به طوری که برنامه‌ریزی آتی بتواند پایداری را به حداکثر برساند.

تحقیق:

a. انجام تحقیقات همه جانبه و علمی تا با عطف به گذشته عملکرد چرخه حیات انواع گوناگون زیرساخت‌ها مشخص شده و ابعاد برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و عملیات پروژه که بیشترین کمک را به هزینه‌ها و اجرای پروژه می‌نمایند تعیین گردند. برای مثال، بررسی تأثیرات مالی (هم مستقیم و هم غیرمستقیم)، زیست‌محیطی (مثلاً کیفیت هوا و آب) و اجتماعی طی یک دوره طولانی (مثلاً دهه) که به دنبال یک پروژه می‌آیند به طور مثال ترازبندی شاهراه مرکزی بوستون.

b. توسعه معیارهای مشترک برای ارزیابی توسعه پایدار به طور کلی تر و برای ارزیابی اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی خاص.

c. توسعه روش‌های کمی برای مقایسه ارزش فضای زیرزمینی با دیگر منابع شهری هم طراز (مثلاً مرتبط با ارزش ملک سطح در بازار) و با در نظر گرفتن تأثیرات بر کاربری آتی فضای زیرزمینی (مثلاً زیرساخت‌ها ممکن است به قرارگیری در شرایط فزاینده سخت زمین نیاز داشته باشند).

d. گردآوری داده‌ها در خصوص ابعاد پایداری مواد و روش‌های گوناگون ساخت (مثلاً قابلیت استفاده مصالح و مواد و انرژی نهفته در تولید مواد).

افق‌های برنامه‌ریزی تصمیم‌گیرندگان اغلب بسیار کوتاه‌تر از عمر مفید زیرساخت‌های زیرزمینی است. توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی ظاهراً نیازمند سرمایه‌گذاری‌های اولیه برای هزینه‌های کمرشکن جهت ساخت‌وساز در مقایسه با زیرساخت‌های سطحی با کاربرد مشابه می‌باشد. زمانی که مزایای بلندمدت دارای ارزش نمی‌باشند، داده‌های اندکی برای تأیید حمایت مالی وجود دارد. ارزیابی چرخه حیات می‌تواند داده‌ها را از طریق بررسی هزینه‌ها، تأثیرات و مزایا فراهم سازد. از جمع‌آوری مواد اولیه، تا ساخت و عملیات. ورودی‌های اضافی از قبیل انرژی (مثلاً برای روشنایی و تهویه) نیز در زمره عوامل به حساب می‌آیند. به طور مشابه، درک اینکه چگونه برخی از توسعه‌های زیرزمینی دیگر کاربردهای فضای زیرزمینی را غیرممکن یا پرهزینه‌تر می‌سازند ممکن است بر تصمیمات مؤثر بر انتخاب‌های آینده تأثیرگذار باشد. هزینه‌ها و چالش‌های استفاده مجدد از فضای زیرزمینی مسائل دراز مدتی را بر جا می‌گذارد.

مقبولیت، ایمنی و راحتی کاربر

مشاهده: زیرساخت‌های زیرزمینی می‌توانند زندگی میلیون‌ها نفر را بدون هیچ گونه خطری بهبود بخشند، اما مقررات ایمنی اندکی در سطح فدرال وجود دارد که ایمنی عملیاتی را در زمانی که پیچیدگی سامانه زیرزمینی افزایش می‌یابد هدایت می‌کنند.

نتیجه گیری ۹. در صورتی که محیط‌های زیرزمینی با بررسی بیشتر امکانات، راحتی دسترسی، مسیریابی‌ها، ایمنی، و زیبایی‌شناختی طرح‌ریزی شوند، پذیرش و استفاده بیشتر از زیرساخت‌ها و تسهیلات زیرزمینی توسط کاربران مناسب‌تر و محتمل‌تر خواهد بود.

اقدامات بالقوه:

- a. توسعه و اتخاذ سازوکارها و کدهای ایمنی مبتنی بر عملکرد که نه تنها برای مصارف زیرزمینی امروزه (مثلاً استفاده ترکیبی، چند سطحی) و خطرات اختصاص می‌یابند، بلکه گستردگی و تغییر کاربری را هم در نظر می‌گیرند. الزامات فنی شورای کد بین‌الملل، استانداردهای عملی انجمن ملی ایمنی در برابر آتش، و دیگر استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه می‌توانند گسترش یابند و برای تسهیلات زیرزمینی قابل اجرا باشند.
- b. یکی‌سازی مفاهیم مهندسی سامانه‌های پیچیده و عامل انسانی به منظور هدایت شناسایی تهدید و تصمیم‌گیری‌های فنی و عملیاتی برای کارکردهای عادی و برای کارکردهای زمان تنش (مثلاً در پاسخ به حوادث غیر مترقبه).
- c. وارد ساختن علوم رفتاری، آموزش، زیست‌شناسی و فیزیولوژی، عملکرد و ظرفیت انسانی در کدها و طراحی ایمنی.

تحقیق:

- a. بررسی چگونگی عملکرد و بهترین عملکردهای مربوط به سامانه‌های امنیتی (مثلاً تشخیص خطر، هشدار، تهویه هوا، اطفاء حریق، خروج اضطراری، و یکپارچه‌سازی سامانه). توسعه حداقل الزامات مناسب سامانه ایمنی به منظور وارد ساختن در دستورالعمل‌ها و استانداردها در سطح ملی.
- b. مقایسه کدها و دستورالعمل‌های بین‌المللی ایمنی فضای زیرزمینی با مواردی که در ایالات متحده قابل اجرا می‌باشند به منظور تعیین نارسایی‌ها و هدایت شیوه‌های آتی، که تلاش‌های موجود در این زمینه را تأیید می‌نماید (برای مثال، توسط اداره کل بزرگراه فدرال).
- کاربری فضای زیرزمینی می‌تواند به اندازه فضای سطحی با کاربری مشابه ایمن، جذاب، مهیج، کارا، سودمند و سالم باشد. معهداً، غلبه بر دیدگاه‌های منفی درباره فضای زیرزمینی به اندازه چالش‌های پیچیده فنی و ایمنی دشوار می‌باشد. پذیرش و کاربری فضای زیرزمینی با راحتی و سهولت کاربرد افزایش می‌یابد (مثلاً با تشکیل ارتباط بهتر میان سامانه‌های زیرزمینی، که زمان سفر مسافر و جابجایی‌های عمودی طولانی مانند پله‌ها، پله‌های برقی یا آسانسورها را محدود می‌کنند). درک بصری بیشتر نسبت به ایمنی در زیرزمین توسط کاربران نیز میزان پذیرش را افزایش خواهد داد.
- ایمنی در فضای زیرزمینی به واسطه اجتناب، انتقال یا کاهش خطرپذیری مرتبط با وقوع پدیده‌های طبیعی (مانند گازها، تشعشعات، درجه حرارت شدید، آب و فقدان اکسیژن) و فعالیت‌های انسانی (مانند آتش، دود، مواد خطرناک، انفجارات بین‌المللی یا تصادفی، گسیختگی‌های سازه‌ای یا خرابی‌های ساده انسانی) بدست می‌آید. ایمنی با افزایش پیچیدگی زیرساخت چالش برانگیزتر می‌گردد. مهندسی عوامل انسانی به منظور افزایش توانایی افراد برای عملیات و استفاده از فضای زیرزمینی به صورت ایمن ضروری است.

کدهای ایمنی اغلب در پاسخ به حوادث یا شکایات وضع می‌شوند و به قدر کافی منفع نیستند که بتوانند فن‌آوری‌های در حال تحول را ملحوظ دارند. ایمنی به صورت عملیاتی از طریق راه حل‌های فنی حاصل می‌گردد اما به طراحی و عملیاتی فراتر از انطباق با کدهای نامناسب وابسته است. اندک مقررات ایمنی در سطح فدرال برای زیرساخت‌های زیرزمینی غالباً در ساخت بکار می‌روند تا در کاربردهای عملیاتی تسهیلات، کدهای ایمنی در برابر آتش در سطح ایالتی به طور کامل به سازه‌های زیرزمینی نمی‌پردازند و احتمالاً نا کافی خواهند بود وقتی انواع گوناگون کاربری‌ها در یک فضای زیرزمینی ترکیب می‌شوند (مثلاً حمل و نقل عمومی و تجاری).

هزینه‌های کاهش خطرپذیری عملیاتی و ساخت‌وساز سرمایه‌ای برای فضای زیرزمینی می‌تواند بسیار زیاد باشد و از آغاز به کار یک پروژه زیرزمینی جلوگیری نماید یا منجر به حفظ و نگهداری نادرست گردد. مهندسی عوامل انسانی می‌تواند به حداقل سازی هزینه‌های مرتبط با حذف یا انتقال ریسک، کمک کند. برای مثال، توسط روش‌های شناسایی برای کاهش

ریسک از طریق آئین نامه‌های ایمنی و آموزش هنگامی که راه‌حل‌های فن‌آورانه عملی و میسر نیستند. نوآوری در طراحی و ساخت با استفاده از کدهایی غیر از کدهای تجویزی و بالقوه غیر مؤثر به سمت مکانیزم‌های مبتنی بر عملکرد پرورنده می‌شود.

فضای زیرزمینی به عنوان یک منبع

مشاهده: فضای زیرزمینی، یک منبع ارزشمند اما قطعاً غیر قابل تجدید می‌باشد.

نتیجه‌گیری ۱۰. فضای زیرزمینی تنها در صورتی می‌تواند پایداری شهری را بالا ببرد که فضای زیرزمینی به طور کامل شناخته شود و کاربری و استفاده مجدد از فضای زیرزمین و حفاظت از محیط‌های طبیعی و ساخته شده در برنامه‌ریزی بلندمدت سامانه زیرساخت شهری کل گنجانده شود.

اقدامات بالقوه:

- a. شروع برنامه‌ریزی تمام فضای زیرزمینی به عنوان بخشی از یک سامانه شهری در حال توسعه تا به دقت مهندسی شود و یا برای استفاده بهینه بلندمدت و پایداری منطقه‌ای محافظت گردد.
 - b. ایجاد روش‌های نظارت آب‌های زیرزمینی عمیق، خاک، و زیرساخت به طور مستدل به جهت پیگیری سلامت محیط شهری زیرزمینی مطابق با شرایط زمین‌شناسی و کاربری عمومی. استفاده از اطلاعات منتج شده از گستره‌ای از فضاها و موقعیت‌ها برای آگاهی دادن و تأثیر گذاشتن بر برنامه‌ریزی شهری در دیگر زمینه‌ها.
- فضای زیرزمینی جایگزین جهانی برای سطح روی زمین نیست اما کاربردهای فراوان فضای زیرزمینی به پایداری شهری کمک می‌نماید. بسیار مهم است که سیاست‌ها و ساختارهای اداری، راهنمایی درست و جامعی را ارائه دهند، تا عموم مردم چشم‌انداز جامعه در درازمدت را درک نمایند و انتظارات جامعه با توجه به خدمات زیرزمینی درک و برآورده شود. تعهد سازمانی مناسبی برای افزایش تحقیقات میان رشته‌ای و متقابل بخشی، تحصیل و ظرفیت آموزشی لازم است تا اطمینان دهد که جامعه انواع زیرساخت زیرزمینی که توسعه شهری پایدار را به جهت اقتصادی، امنیتی و مطابق با اولویت‌های ملی حمایت می‌کند را توسعه می‌دهد.

فصل اول

مقدمه

در سال ۲۰۰۰، آکادمی ملی مهندسی، فهرستی از ۲۰ دستاورد مهندسی در قرن بیستم را منتشر نمود، اعم از برق‌رسانی، خودروسازی، تأمین و توزیع آب، کامپیوتر، تلفن، تهویه مطبوع و خنک‌سازی، بزرگراه‌ها، اینترنت، مکانیزه شدن (ماشینی شدن) پتروشیمی، لیزر و فیبر نوری، فن‌آوری‌های هسته‌ای و مواد با عملکرد بالا (NAE, ۲۰۰۰). بسیاری از این دستاوردها به عنوان مهره‌های اصلی زندگی شهری معاصر مطرح شده‌اند (Papay, ۲۰۰۲) و بسیاری از خدمات ضروری وابسته به آنها با استفاده از فضای زیرزمین شهری در طول مراحل تولید، ذخیره و توزیع ارائه می‌گردند. نگهداری و ارتقاء این خدمات و همچنین کیفیت زندگی در نواحی شهری وابسته به جریان ثابت سرمایه‌گذاری و نوآوری فن‌آورانه می‌باشد.

فعالیت‌های انسانی و رشد جمعیت به هر حال کشور و زمین را دچار تغییر شکل می‌سازد. چالش‌های بلندمدت جامعه عبارت است از: دانستن اینکه چگونه انسان‌ها می‌توانند بدون فرسایش مداوم زمین پیشرفت حاصل نمایند و چگونه سازگاری‌های مناسب و پایدار را ایجاد کنند. ارتقاء یا حتی حفظ استانداردهای فعلی زندگی در آینده فشار بیشتری را بر سامانه‌های زمینی قرار می‌دهد به ویژه در فضاهای شهری که افزایش جمعیت در آنها انتظار می‌رود. تقریباً ۸۰ درصد مردم ساکن در ایالات متحده در نواحی شهری زندگی می‌کنند (اداره آمار آمریکا، ۲۰۱۱). تقریباً ۵۳ درصد جمعیت آمریکایی در ۵۰ مایلی ساحل (مارکهام، ۲۰۰۸) زندگی می‌کنند در حالی که پیش‌بینی می‌شود تغییرات جهانی آب و هوا اثرات ساحلی مهمی به همراه داشته باشد که شامل افزایش سطح آب دریا، تغییر در الگوهای هوایی (مثلاً IPCC, ۲۰۰۷) و تخریب منابع آب آشامیدنی است (IPCC, ۲۰۰۸). ضمناً برخی از افراد نیازهای متمرکز کوتاه مدت در طراحی و اتخاذ استراتژی‌های مبتنی بر جامعه را به منظور کاهش آسیب‌پذیری اثرات بالقوه مخرب تغییرات آب و هوایی در سرتاسر کشور توصیه می‌کنند (NRC, ۲۰۱۰).

استفاده هماهنگ درست و متمرکز فضای زیرزمینی عنصر کلیدی در راهکار پایداری است. مهندسان فضای زیرزمینی نقش اساسی در برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت، عملیات، نگهداری و اداره فضای زیرزمینی، و همچنین در تأثیرگذاری بر تصمیمات اجتماعی، اقتصادی و حتی سیاسی مرتبط با فضای زیرزمینی و توسعه شهری دارند. افزایش علاقمندی در ساخت و توسعه فضای زیرزمینی در سرتاسر جهان مشهود می‌باشد (استرلینگ و گودارد، ۲۰۰۰). مهندسی فضای زیرزمینی، ابزاری است برای کاهش مصرف انرژی، افزایش حفظ فضای سبز، انجام فرآیند و ذخیره پایدار آب و ضایعات (زباله‌ها)، بنا نمودن زیرساخت‌های حیاتی به صورت مؤثر و ایمن، جلوگیری و معکوس‌سازی فرسایش محیط شهری و افزایش کیفیت زندگی. بسیاری از نواحی شهری پیش از این از مزایای استفاده از فضای زیرزمینی سود جسته‌اند. شاهراه مرکزی I-۹۳ و توسعه I-۹۰ در بوستون (در مجموع شناخته شده به عنوان «بیگ دیگ»)، برای مثال، اگرچه پرهزینه، بحث برانگیز و همراه با مشکلاتی بوده است، زمان اوج سفر در مرکز شهر بوستون را بهبود بخشیده است که تقریباً ۱۶۸ میلیون دلار در هزینه‌های سالیانه سفر

درون شهری و زمان صرف جویی می‌نماید (محدوده شاهراهی ماساچوست، ۲۰۰۶) و یک منظره پیشرفته شهری را ارائه می‌دهد. تجربه سوئد در تسهیلات بهبود فاضلاب زیرزمینی از دهه ۱۹۴۰ (ایسگارد، ۱۹۷۵) تا کنون و شبکه گسترده زیرساخت زیرزمینی نوری شامل تولید برق، تسهیلات بهبود فاضلاب و تأمین آب، کنترل ترافیک هوایی، تسهیلات آرشویی، مالی، دفاع شهری و امنیت ملی، (لینگر و همکاران، ۲۰۰۲) نشان می‌دهد که تأسیسات زیرزمینی می‌تواند هم مقرون به صرفه و هم قابل اطمینان باشد. مونترال در سال ۱۹۶۲ ساخت شهر داخلی خود را آغاز کرد؛ یک شبکه بهم پیوسته از گذرگاه‌های پیاده‌رو، مراکز خرده فروشی، مناطق مسکونی و حمل‌ونقل عمومی که حدود نیمی از آن در زیرزمین قرار دارد. از سال ۲۰۰۶ این سازه در حدود ۲۰ مایل در طول گسترده شد و مساحتی بالغ بر ۴٫۵ مایل مربع را در هسته مرکزی شهر مونترال پوشش داد. این پروژه منجر به دسترسی بهتر به مرکز شهر و کاهش مسافت‌های پیاده‌روی گردیده است و فضای عمومی بیشتری را در سطح زمین ارائه می‌دهد (ال-گنیدی و همکاران، ۲۰۱۱).

شهرسازی به عنوان علت اصلی بسیاری از مشکلات اجتماعی امروزی توسط برخی در نظر گرفته می‌شود اما مطابق با نظر شرکت‌کنندگان در کارگاه اخیر شورای تحقیقات ملی^۳ در خصوص پایداری شهری (شافر و والمر، ۲۰۱۰)، شهرسازی به عنوان روش و ابزاری برای آمادگی پایدار نسبت به جمعیت پیش‌بینی شده در قرن بیست و یکم نیز بیان می‌گردد. هر چند که ممکن است شهرسازی علت ریشه‌ای نباشد، لیکن ممکن است که مشکلات خاص با آن ترکیب شوند. شرکت‌کنندگان در این کارگاه انواع عواملی که اثرات شهرسازی (مصرف زیاد منابع در نواحی متمرکز، تضعیف محیط زیست، مشکلات سلامت عمومی و نابرابری‌های اقتصادی و اجتماعی) را تشدید می‌نمایند و شکست جامعه را در تشخیص نواحی شهری به صورت سامانه منعکس می‌کنند را مشخص نمودند.

تغییر تصویر یک شهر از مجموعه‌ای مترکم از مردم، سازه‌ها و امکانات زیرساختی مستقل به یک سامانه دینامیکی از عناصر وابسته، کار ساده‌ای نیست؛ لیکن برای توان تاب‌آوری و قابلیت انطباق با چالش‌های آینده ضروری است. یک رویکرد سه بعدی یکپارچه برای طراحی و مدیریت زیربنایی که کاربرد فضا و نیازهای انسانی و اجتماعی را با گذشت زمان بررسی کرده و به آنها اهمیت و ارزش می‌دهد، برای تمامی بخش‌های اجتماع با حفظ سلامت عمومی، کاهش خطرپذیری، حداکثرسازی قابلیت اطمینان و عملکرد بلندمدت سامانه‌های زیرساخت شهری و حداقل‌سازی هزینه‌های بلندمدت سودمند می‌باشد.

فضای زیرزمینی یک منبع ارزشمند می‌باشد. برنامه‌ریزی شهری (شهرسازی) فضا را چه در سطح زمین و چه در زیر سطح زمین بر یک پایه هماهنگ در هر مقیاس و اندازه‌ای که باشد به ندرت به صورت نظام‌مند در نظر می‌گیرد، و به ندرت برنامه‌ریزی چرخه حیات، زیرساخت و یا پایداری بلندمدت زیرساخت را در زمان تصمیم‌گیری دوره آینده لحاظ می‌نماید. تحت حمایت مالی بنیاد ملی علوم، NRC هیئتی از کارشناسان را تشکیل داد تا توسعه زیرزمینی پایدار را بررسی کرده، پژوهش مورد نیاز برای استفاده درست از مزایا را شناسایی نماید و درک عمومی و جامعه فنی از نقش مهندسی فضای زیرزمین در پایداری محیط ساخته شده شهری را ارتقاء دهد. این کمیته متشکل از محققان و متخصصانی در مهندسی ژئوتکنیک، ساخت‌وساز زیرزمینی، تکنولوژی حفاری، مدیریت ریسک و فناوری‌های تجسم‌سازی برای برنامه‌های کاربردی ژئوتکنیک بود. افزون بر این، کمیته دارای تخصص در زمینه توسعه پایدار زیرساخت‌ها، سیاست و برنامه‌ریزی زیرساخت‌ها و حفاظت در برابر آتش، ایمنی و تهویه در فضای زیرزمینی بوده است. بیانیه کار این کمیته در کادر ۱-۱ ارائه گردیده است. بیوگرافی اعضای کمیته در پیوست A گنجانده شده است و دستور جلسه نشست‌های علنی کمیته در پیوست B قرار دارد.

^۳ NRC

تعریف زیرساخت زیرزمینی

به طور کلی، زیرساخت‌های شهری به تمام سازه‌های فیزیکی و سازمانی اطلاق می‌گردد که به سامانه شهری اجازه فعالیت می‌دهند. بسیاری از انواع زیرساخت‌ها، محیط فیزیکی سامانه شهری (مثلاً جاده‌ها، تاسیسات، ساختمان‌ها) و چهارچوب‌های اقتصادی و اجتماعی حاکمی که یک جامعه را تعریف می‌کنند را شکل می‌دهند. زیرساخت‌های زیرزمینی به هر زیرساخت فیزیکی که در زیر سطح زمین قرار می‌گیرد و در برگیرنده تسهیلات زیرزمینی (مانند آب، برق، گاز، ارتباطات، مدیریت پسماند)، حمل و نقل (مانند جاده‌ها و بزرگراه‌ها، مترو، حمل بار و مسافر) و تسهیلات پشتیبانی آنها، زیرسازی‌های ساختمانی و هر سازه‌ای که در زیرزمین برای همساز شدن با اهداف مسکونی، صنعتی، تولیدی، تفریحی و دیگر مقاصد ساخته می‌شود اشاره دارد. معرفی بیشتر زیرساخت‌ها در فصل ۳ بیان می‌گردد. با توجه به ویژگی گسترده مسئولیت کمیته و انواع فراوان زیرساخت‌های زیرزمینی، در این گزارش زیرساخت‌های زیرزمینی به ویژه در ارتباط با سامانه‌های زیرساخت اغلب به صورت یک گروه واحد در بسیاری از مباحث معرفی می‌گردند. به هر صورت باید توجه داشت که مزایا و چالش‌های انواع خاص زیرساخت زیرزمینی در مورد کل صدق نمی‌کند. زیرساخت زیرزمینی متعلق به انواع بسیار متفاوت ماهیت‌هایی است که به ذی‌نفعان بسیار متعددی خدمت‌رسانی می‌کند که هر کدام دارای نیازها، منافع، ساختارهای اداری و منابع متفاوت بالقوه و گاهی متضاد می‌باشند.

کادر ۱-۱

کمیته موقت آکادمی‌های ملی مطالعه‌ای انجام داد تا مزایای بالقوه توسعه زیرزمینی در محیط شهری را بررسی کرده و پژوهش مورد نیاز برای بهره‌بردن از این فرصت‌ها را مشخص نماید و درک جامعه فنی و عمومی از نقش مهندسی فضای زیرزمینی در پایداری محیط ساخته شده شهری، به ویژه حداقل‌سازی مصرف منابع انرژی تجدیدناپذیر، ساخت مواد و تأثیر منفی بر محیط‌های طبیعی، محیط‌های ساخته بشر و محیط‌های اجتماعی را افزایش دهد. به طور اخص این مطالعه موارد زیر را در بر دارد:

- جمع‌بندی دانش کنونی مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی در خصوص توسعه زیرزمینی در محیط شهری و اینکه چگونه بهره‌برداری از زیرزمین می‌تواند پایداری را افزایش دهد، که شامل دانش مشخص‌سازی محل زمین‌شناسی، فن‌آوری‌های ساخت و کنترل ژئوتکنیکی، الزامات انرژی، استفاده از وسایل حفاری، و هزینه‌ها و مزایای چرخه حیات توسعه زیرساخت زیرزمینی می‌باشد؛
 - تعیین تحقیقات مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری در خصوص فرصت‌هایی برای تقویت توسعه شهری پایدار از طریق مهندسی فضای زیرزمینی، در حوزه‌های ذیل:
 - مشخص‌سازی فضای زیرزمینی، پیش‌بینی محیط زمین‌شناسی و پاسخ زمین برای طراحی و ساخت موفق پروژه‌های زیرزمینی و تسهیلات مهم برای حداکثرسازی پایداری و تاب‌آوری؛
 - متدشناسی ساخت و نظارت و روش‌های حفاری پیشرفته شامل تونل زنی، که منجر به توسعه زیرزمینی پایدار و تاب‌آور می‌گردد؛
 - سازه‌ها و کانال‌های زیرزمینی هوشمند که وضعیت خود را گزارش می‌دهند؛
 - بررسی سلامت و ایمنی از قبیل روشنایی، تهویه مقرون‌به‌صرفه، و مسائل مربوط به قرارگیری در معرض گاز رادون یا کنترل آتش؛
 - مزایا و هزینه‌های چرخه حیات شامل کاهش نیاز به انرژی برای گرمایش و سرمایش، کاهش استفاده از مصالح ساختمانی، استفاده از وسایل حفاری، افزایش طول عمر سازه‌های زیرزمینی و کاهش حفاظت مرتبط با دماهای ثابت و ایزولاسیون از شرایط آب‌و-هوایی سطح؛
 - مزایای پایداری بالقوه افزایش استفاده از فضای زیرزمینی برای سامانه‌های حمل‌ونقل انسان، شامل جاده‌ها و حمل‌ونقل عمومی و باربری؛
 - پتانسیل یکپارچه‌سازی سامانه‌های انرژی، آب و فاضلاب برای مناطق شهری خاص برای بهبود پایداری؛ و
 - اینکه چگونه توسعه زیرزمینی به مسائل مربوط به اثرات تغییرات آب و هوایی بر محیط شهری می‌پردازد.
- این کمیته دستورالعمل‌هایی را برای مسیر جدید تحقیقات مهندسی فضای زیرزمینی که بر مهندسی و مدیریت سامانه‌های زمینی تأکید دارد توصیه خواهد کرد تا منابع انسانی آینده را برای توسعه پایدار زیرزمینی تضمین نماید و مزایا و مضرات تأسیس یک مرکز تحقیقاتی جدید در این ناحیه را تجزیه و تحلیل خواهد نمود و دیگر گزینه‌های بالقوه به جهت افزایش ظرفیت منابع انسانی برای توسعه پایدار زیرزمینی (شامل وضع موجود) را بررسی خواهد کرد. کمیته مذکور همچنین محرک‌های رفتاری انسانی و اقتصادی و سیاسی که توسعه زیر سطح زمین را در یک حالت پایدار ارتقاء می‌دهند یا مانع می‌گردند را از نقطه‌نظر علوم اجتماعی مورد توجه قرار خواهد داد، اما در مسائل مالی یا سیاست‌گذاری دخیل نخواهد بود.

پایداری

اصلاح تعریف پایداری آنچنان که در توسعه زیرزمینی بکار می‌رود، اولین وظیفه کمیته تحقیق بود. در ابتدای امر کمیته با مشکل تعریف واژه‌هایی چون «پایداری» و حتی «شهری» مواجه گردید (برای مثال شافر و والمر، ۲۰۱۰). مفهوم «توسعه پایدار» توسط کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه در سال ۱۹۸۷ به صورت «رفع نیازهای حاضر بدون به خطر انداختن

توان نسل‌های آینده در برآوردن نیازهای خاص خود» بیان شد (UN, ۱۹۸۷). واژه‌هایی چون «تاب‌آوری» اغلب به پایداری مربوط می‌شوند (برای مثال NRC, ۲۰۱۱). کمیته تحقیق حاضر حفظ کیفیت زندگی را به عنوان بخشی از پایداری بررسی می‌کند و ادعان می‌نماید که ادغام پایداری در روش مدیریت اجتماعی می‌بایست در مقیاس‌های زیادی اتفاق بیفتد - از مقیاس پروژه‌های ملی و جهانی تا مقیاس پروژه‌های شخصی. تعریف پایداری به عنوان بخشی از سامانه‌های شهری قابل اجرا، در سطح محلی سخت‌تر می‌گردد چرا که این واژه با معیارهای محلی در هم می‌آمیزد. تعریف کمیته از توسعه پایدار زیرزمینی شهری در کادر ۱،۲ ارائه می‌گردد.

کمیته مذکور، تاب‌آوری را به عنوان ویژگی کلیدی و مهم پایداری بیان می‌نماید و آن را به عنوان توانایی پاسخ به تغییرات در محیط - به ویژه به عنوان نتیجه بلایای طبیعی یا فجایع انسان‌ساز - با حداقل تأثیر بر عملکرد، تعریف می‌کند و این با تعریف تاب‌آوری که در ادبیات علوم اجتماعی ظهور می‌کند تقریباً سازگار می‌باشد (به طور مثال نوریس و همکاران، ۲۰۰۸). توانایی در استمرار خدمات اجتماعی مورد انتظار نمادی از تاب‌آوری است. در یک محیط اجتماعی، خصوصاً در زمینه سامانه‌های مهندسی شده، تاب‌آوری اغلب به افزونگی و ذخایر مرتبط می‌گردد. معهذاً، این کمیته ادعان می‌دارد که تاب‌آوری چیزی بیشتر از طراحی سامانه‌های پشتیبان و ذخایر فیزیکی است. در واقع ذهنیتی را در بر می‌گیرد که در آن جامعه به عنوان سامانه‌ای در نظر گرفته می‌شود که فضای زیرزمینی در آن نقش حیاتی دارد اما اغلب نادیده گرفته می‌شود.

در جوامع شهری، فضای زیرزمینی بخشی از یک سامانه پیچیده است که اموال سطحی و رو زمینی (مانند پل‌ها، آسمان خراش‌ها) را در بر می‌گیرد. بدون بررسی درست فضای سه بعدی و کاربرد فضا در طول زمان، تضادها و ناسازگاری‌های ناشی از استفاده رقابتی فضای زیرزمینی، یا مسائل مربوط به آلودگی منابع زیرزمینی (مانند فضا، آب‌های زیرزمینی و مواد) به وجود می‌آیند. منابع زیرزمین شهری می‌باید برای پایدارترین راه حل‌ها به صورت کلی‌نگرانه بررسی گردند (برای نمونه، پارپاکس و همکاران، ۲۰۰۶). پروژه‌های شخصی غالباً مستقل از دیگر برنامه‌ریزی‌ها بنا می‌گردند و در چارچوب استفاده از فضای موجود قرار می‌گیرند اما نه به عنوان بخشی از برنامه‌ریزی بلندمدت که امکان استفاده یکپارچه از منابع فضای سطحی و زیرزمینی را میسر می‌سازد. فضای زیرزمینی غالباً به صورت منسجم یا مشخص ارزش‌گذاری نمی‌شود. در نتیجه، بسیاری از طرح‌های پروژه‌ای به منظور حفظ فرصت برای انعطاف‌پذیری آینده و استفاده‌های جایگزین و یا دسترسی انتخاب نمی‌گردند. اطلاعات اندکی در مورد هزینه‌های مستقیم، غیر مستقیم و اجتماعی، استفاده از فضای زیرزمینی وجود دارد و معیارهای اندکی از مزایای چرخه عمر سرمایه‌گذاری در فضای زیرزمینی در دست می‌باشد.

کادر ۱-۲

تعریف توسعه پایدار فضای زیرزمینی شهری

با توجه به این گزارش، توسعه پایدار فضای زیرزمینی شهری شیوه‌ای است برای توسعه زیرسطحی که نیازهای کنونی بشر را بر آورده می‌سازد، در حالی که از منابع و محیط‌های طبیعی و ساخته شده برای برآوردن نیازهای نسل‌های آینده محافظت می‌نماید. توسعه پایدار فضای زیرزمینی شهری نیازمند یک دیدگاه سامانه‌ای برای استفاده و مدیریت منابع رو زمینی و زیرزمینی است. ویژگی‌های پایداری چنانکه در این گزارش بکار رفته است، بررسی تأثیرگذاری هزینه؛ طول عمر؛ کارآمدی؛ و قابلیت اطمینان را در بر می‌گیرد، حال آنکه اثرات منفی بالقوه را به حداقل می‌رساند.

پایداری درازمدت گهگاه یک بررسی و تأمل در مراحل اولیه توسعه نواحی پرجمعیت می‌باشد. الگوی شهرنشینی مشاهده شده در ساکنان جلگه رودخانه کشورهای در حال توسعه مثالی از این نکته است که چگونه اسکان بشر بر اساس احتیاجات کوتاه مدت و فردی افزایش می‌یابد. مثلاً، یک آبادی فرضی کوچک در جلگه رودخانه ممکن است مقدار زیادی فضا هم برای

زندگی و هم برای کشاورزی نزدیک رودخانه که معمولاً منبع اصلی آب محسوب می‌گردد خواهد داشت. همانگونه که روستاها رشد می‌کنند، زمین جلگه‌ای حاصلخیز به طرز چشمگیری آماده و ساخته می‌شود و دامنه‌های مجاور که معمولاً دارای خاک نامرغوب‌تر بوده و نیاز به کار کشاورزی بیشتری دارند برای کشاورزی تراس‌بندی می‌گردند. مزایای نزدیک بودن به رودخانه از بین می‌رود و شرایط کشاورزی سخت‌تر به وجود می‌آید. در صورتی که پایداری بلندمدت از ابتدا بررسی گردد، الگوهای کاملاً متفاوت رشد ممکن است مطرح شوند.

تحلیل پایداری نشان می‌دهد که آیا بهتر است که دامنه تپه‌ها برای خانه‌سازی تراس‌بندی گردد، که این کار حفاظت بیشتری را در مقابل سیل در مناطق مسکونی به وجود می‌آورد و جلگه رودخانه را برای کشاورزی اختصاص می‌دهد. ماهیت چنین تحلیلی بررسی می‌کند که کدام مشکلات موجود زمین آسان‌تر حل می‌گردد - آیا بهتر است که زمین‌های کشاورزی تولیدی جدیدی را ایجاد کنیم و یا شیوه‌های تأمین آب و حمل و نقل را برای رسیدگی به پیشرفت‌های دامنه توسعه دهیم؟ در سناریوهای واقعی، چنین تصمیماتی به چهارچوب‌های منطقه‌ای و ملی بسط می‌یابد اما این مثال نشان می‌دهد که نظام‌های اسکان بشر لزوماً به بهترین منفعت خود در درازمدت نمی‌اندیشند.

خطر و خطرپذیری (ریسک)

واژه‌های خطر و خطرپذیری در طول این گزارش به چشم می‌خورد. تعاریف بسیاری از این واژه‌ها وجود دارد و حتی در ادبیات تک رشته‌ای این واژه‌ها نامنسجم و به جای یکدیگر استفاده می‌گردند. کادر ۱،۳ تعاریفی را برای این واژه‌ها ارائه می‌نماید، همانگونه که در طول این گزارش مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تاریخچه‌ای کوتاه از استقرار در زیرزمین

برای داشتن دیدگاهی از کاربرد حال و آینده فضای زیرزمینی، بهتر است که کاربری فضاهای زیرزمینی را طی اعصار گذشته جمع‌بندی کنیم. میراث غنی از پیشینه فسیل و ابزارهای باستانی، هنر و ویرانی‌های سازه‌ای، حاکی از آن است که انسان‌ها همواره از زمان تکامل یافتن به شکل انسان‌های هوشمند مدرن، ارتباط پیچیده و نزدیکی با زیرسطح زمین داشته‌اند. انسان‌ها خواستار پناهگاه‌های زیرزمینی قابل استفاده بوده‌اند، اما به نظر می‌رسد که فضای زیرزمینی موجب پدید آمدن درکی از ماوراءالطبیعه و تمایل به بیان زیبایی شناسانه گردیده است (رجوع به کادر ۱،۴). بقایای انسانی، پوسته‌ها، استخوان‌های حیوانی و مصنوعات سنگی کشف شده در غار دهانه رودخانه کلاسیس در آفریقای جنوبی شواهد محکمی ارائه می‌دهد از اینکه انسان‌های مدرن بیش از ۱۲۰۰۰۰ سال پیش در آنجا زندگی می‌کردند، هنگامی که آب و هوا به گرمی امروز و یا گرمتر از حال بوده است (رایتمایر و دیکون، ۱۹۹۱).

کادر ۱-۳

تعاریف مرتبط با خطر و خطرپذیری (ریسک)

کمیته مذکور خطر را به صورت پتانسیل ایجاد آسیب تعریف می‌نماید؛ که تهدیداتی برای انسان، زیرساخت‌ها، محیط زیست، و یا سامانه‌های اجتماعی محسوب می‌شوند.

پایداری، وابسته به بررسی تمامی منابع خطرپذیری و همه پیامدهای بالقوه می‌باشد، که برخی همراه با اثراتی می‌باشند که به سختی اندازه‌گیری می‌شوند. این موارد شامل اثرات اجتماعی، زیست‌محیطی، و دیگر تأثیرات بلندمدت کمتر ملموس می‌باشد که روش مهندسی سنتی به بررسی آنها نمی‌پردازد. این کمیته، برنامه حفاظت از زیرساخت‌های ملی را که تعریف خطرپذیری و ریسک را گسترش می‌دهند می‌پذیرد که عبارتند از

مقدار مورد انتظار آسیب (مثلاً مرگ، صدمات، ضرر اقتصادی، از دست دادن اعتماد ملی، و یا قابلیت دولت) به واسطه حمله تروریستی، بلایای طبیعی، و یا دیگر حوادث، همراه با احتمال وقوع چنین حادثه‌ای و احتمال ایجاد این آسیب (DHS, ۲۰۰۶). کمیته مذکور آسیب‌پذیری را به صورت اندازه‌ای که افراد، زیرساخت‌ها، موسسات، و سامانه‌ها می‌توانند مورد آسیب یا تخریب در وقوع یک حادثه خطرناک قرار گیرند تعریف می‌نماید.

کادر ۱-۴

نمود هنری و جنبه معنوی زیرزمین

زیرزمین، تأثیر عمیق و پایداری بر پندار جمعی ما دارد. ارتباطات واقعی و ادبی گسترده فضای زیرزمینی با مرگ و زندگی پس از مرگ، شیاطین پنهان و هیولاهای آیین‌های مقدس، حماسه‌های قهرمانانه، شورش‌های سیاسی مخفی، جرایم سازمان یافته، موسیقی و تئاتر آنارشیستی، نوار فیلم، غارشناسان ماجراجو، و جستجوهای داخلی برای یافتن فلزات گرانبها و مواد معدنی، قدرت و تصویر متناقض آن را نشان می‌دهد. فضای زیرزمینی هیچگاه عرصه بی‌طرفی برحسب ادراک و احساسات بشر نبوده است.

صرفه‌نظر از نجات و بقا در زیرزمین، انسانها در طول ده‌ها هزار سال به جهت بیان روحی و هنری، سرگرمی و مراسم مذهبی به ویژه در بزرگداشت مردگان به فضای زیرزمین علاقمند گشته‌اند. حکاک‌ها و نقاشی‌های خاطره‌انگیز از حیوانات و صحنه‌های شکار در غار شووه-پون-د-ارک (Chauvet-Pont- D'Arc) در جنوب فرانسه (رجوع به تصویر) بیش از ۳۰۰۰۰ سال پیش تاریخ‌گذاری گردیده است. بقایای معابد زیرزمینی باستانی، دخمه‌ها و مکان‌های آیینی در سرتاسر جهان دیده می‌شوند از قبیل چاوین هانتر در پرو، osireon (چاه استرابو) در مصر و سرداب مالت. به طور مشابه، اسطوره بسیاری از فرهنگ‌ها شامل خدایان و الهه‌ها بوده که به طور مشخص به عالم اموات اختصاص داشته است. نسخه رومی، پلوتو، وظیفه مضاعفی را به عنوان خدای ثروت به عهده داشت، زیرا فلزات گرانبهای پنهان در زیرزمین را نیز اداره می‌نمود.



در ابتدایی‌ترین سطح، فضای زیرزمینی پناهگاه‌های سنگی و غارها را به عنوان پناهی در برابر آب و هوای سخت و نفس‌گیر و دشمنان کینه‌جو، منابع معدنی و آب و مکان‌هایی محصور برای ذخیره غذا ارائه کرد. برخی فرهنگ‌ها برای هزاران سال فضای زیرزمینی را به عنوان بخش جدایی‌ناپذیر زندگی روزمره و منزل اصلی خود پذیرفته بودند. جوامع بومی در چین، ترکیه، اسپانیا و تونس بیش از ۴۰۰۰ سال در فضاهای ساخته دست بشر در زیرزمین زندگی می‌کردند؛ دهها میلیون چینی امروزی نیز در خانه‌هایی به نام یائو دونگ (رجوع به شکل ۱،۱) که درون دیوارهای عمودی بادرفت حکاکی شده‌اند (خاک سیلتی) زندگی می‌کنند؛ گفته می‌شود که تاریخ بسیاری از آنها به ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد بر می‌گردد (گولانی، ۱۹۹۶؛ میجنفلدت، ۲۰۰۳).

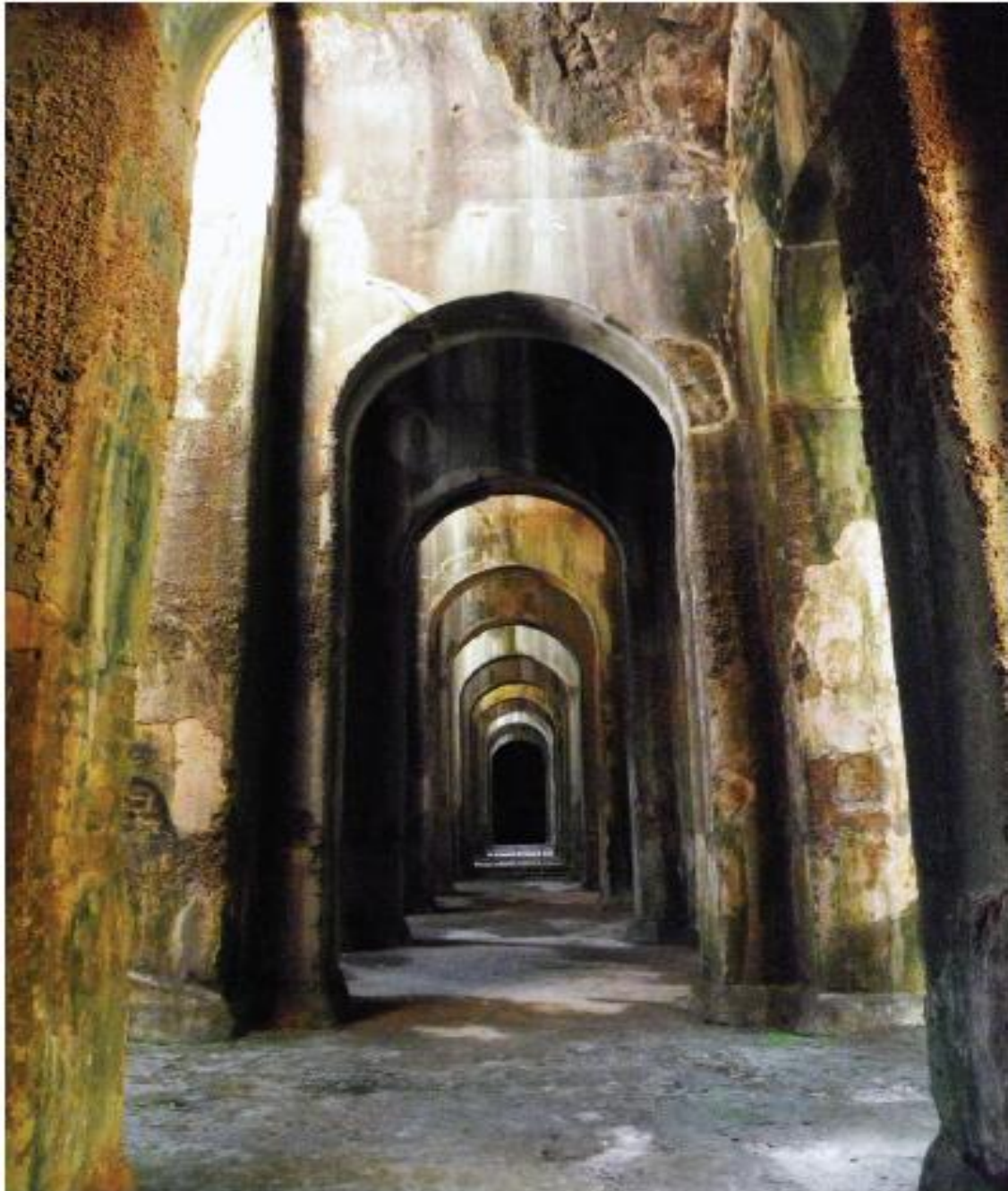


شکل ۱-۱ نمونه‌ای از یک یائو دونگ چند طبقه، نوعی از غار خانه‌های کنده شده در دیوارهای عمودی یا تقریباً عمودی بادرفت (خاک سیلتی). در استان شآنشی در شمال غربی چین. تقریباً ۹۰ درصد ساکنان روستایی منطقه در یائو دونگ زندگی می‌کنند.

مهندسان جهان باستان، به طرز ماهرانه‌ای با فن‌آوری ابتدایی از فضای زیرزمین بهره جستند تا رشد شهرهای در حال ظهور و تجارت را افزایش دهند. اولین فن‌آوری، تأمین آب در اورشلیم، یک سامانه آب زیرزمینی بود که در طول دوره میانی برنز (۱۵۰۰ - ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد) برای اهداف هم‌خانگی و هم‌کشاورزی ساخته شد (بارگوت و السعید، ۲۰۰۹). تونل ۱۰۳۶ متری یوپالینوس، اولین تونل عمیق معروف در تاریخ، بخشی از سامانه تأمین آب جزیره ساموس در یونان بود و به نام مهندس طراح و سازنده آن در ۵۳۰ سال قبل از میلاد نام‌گذاری گردید؛ که تقریباً حدود ۱۰۰۰ سال تا قرن پنجم بعد از میلاد کارایی داشت (کاتسویانیس و همکاران، ۲۰۰۸). منبع خارق‌العاده آب روم، *pisina mirabilis* (شکل ۱،۲)، با ظرفیت حجمی ۱۲۰۰۰ متر مربع آب، از یک تپه تופا (یک سنگ آتشفشانی متخلخل نرم) در منطقه کامپانیا در جنوب ایتالیا در دوره سلطنت سزار امپراتور آگوستین بین دوره ۱۲ و ۳۳ قبل از میلاد حکاکی شد تا آب شیرین را برای یک پایگاه مهم نیروی دریایی روم و همچنین چندین شهر و بندر فراهم سازد (د فئو، ۲۰۰۸).

بیشتر جمعیت جهان به فضای زیرزمینی به عنوان یک ضرورت روزانه، راحتی و یا انتخاب زیبایی شناختی اعتماد دارند. درصد اندکی در فضای زیرزمینی به صورت تمام وقت زندگی و یا کار می‌کنند؛ سهم بسیار بزرگ‌تری گهگاه از فضای زیرزمینی به عنوان مکانی برای کنسرت‌ها یا سینما، مغازه، عبادت، پارک خودرو، فروشگاه یا خلاصی یافتن از شرایط آب و

هوای بد سطحی استفاده می‌کنند. شیوه معمول ارتباط مستقیم انسان با فضای زیرزمینی به صورت سفر درون آن به واسطه تونل‌های ماشین‌رو یا قطاررو، متروهای حمل و نقل، یا گذرگاه‌های عابر پیاده می‌باشد. بسیاری از تسهیلات زیرزمینی معاصر، نمادهای فرهنگی مشهور جهان می‌باشند مانند مترو مسکو (شکل ۱،۳)، چرخ و فلک لوور در پاریس (شکل ۱،۴)، معبد شیشه‌ای در کیوتو، ژاپن، سالن فیلامونیک در کلن، آلمان، و کلیسای کاتدرال برزیلیا، برزیل.



شکل ۱-۲ پیسینا میرابلیس در جنوب ایتالیا مخزنی با ظرفیت ۱۲۰۰۰ متر مربع بود که توسط رومی‌های باستان بین دوره ۱۲ و ۳۳ قبل از میلاد حکاکی شد.

قسمت عمده‌ای از تاریخچه ساخت زیرزمینی، هم دوره با تاریخچه تونل‌سازی است. برای روایت‌های کلی تاریخچه مهندسی فضای زیرزمینی، خواننده می‌تواند به آثار سندستروم (۱۹۶۳)، زیچی (۱۹۷۰)، هاردینگ (۱۹۸۱) و وود (۲۰۰۰) مراجعه نماید.



شکل ۱-۳ سکوی مترو زیرزمینی مسکو.



شکل ۱-۴ هرم وارونه در چرخ و فلک لوور، مرکز خرید زیرزمینی در پاریس، فرانسه، مجاور موزه هنرهای زیبای لوور. این مرکز زیرزمینی امکان خرید، تئاتر زنده، فضای کنفرانس، پارکینگ و دسترسی زیرزمینی به موزه معروف را فراهم می‌نماید. هرم وارونه از شیشه ساخته شده و نور را به داخل این مرکز زیرزمینی هدایت می‌نماید.

جدول ۱-۱ مثال‌هایی از مزایا و نقایص بالقوه فضای زیرزمینی

مسائل اساسی	زیرشاخه	مزایای بالقوه	نقایص بالقوه
	مکان	ندارای نفع کاربردی استفاده محدود از فضای سطحی رائه خدمات آب و برق و حمل و نقل	زمین‌شناسی نامطلوب در انتخاب مکان زمین‌شناسی نامعلوم
	بی‌ولاسیون (جداسازی)	آب و هوایی: گرمایی، هوای خراب، آتش‌سوزی، زلزله حفاظت: سرو صدا، ارتعاش، انفجار، باران رادیو اکتیو، حادثه صنعتی منیت: دسترسی محدود، سطوح محافظت شده مهار: مواد و فرایندهای خطرزا	آب و هوایی: گرمایی، سیلاب، ارتباطات مسائل انسانی: نگرانی‌های روانی، ایمنی از آتش، امنیت شخصی
مسائل فیزیکی و سازمانی	حفظ و نگهداری	زیبایی شناختی: تأثیر بصری، طراحی داخلی محیطی: چشم‌انداز طبیعی، اکولوژی تخریب مواد سطح پایین	زیبایی شناختی: تأثیر بصری، خدمات ساختمانی، طراحی استاندارد مورد نیاز محیطی: تخریب محل، زه‌کشی، آلودگی
	جانمایی	طرح‌ریزی سه بعدی آزادی توپوگرافی	پشتیبانی زمین محدودیت دهانه محدودیت دسترسی سازگاری حذف فاضلاب
	سازمانی		حصول آسایش و راحتی مجوزها کد ساختمانی تردید در سرمایه‌گذاری
	هزینه اولیه	صرفه جویی در هزینه زمین صرفه جویی در ساخت: بدون پشتیبانی سازه‌ای، آب و هوای مستقل، مقیاس ساخت و ساز فروش مواد خاکبرداری شده یا مواد معدنی صرفه‌جویی در مختصات طراحی تخصصی	شرایط کاری محدود پشتیبانی زمین دسترسی محدود خاک‌برداری زمین، حمل و نقل و انتقال ضایعات نامشخص بودن هزینه: تاخیرهای زمین شناختی، ساخت و سازی، سازمانی
	هزینه چرخه حیات	نعمیر و نگهداری بیمه مصرف انرژی	دسترسی به تجهیزات/مصارح دسترسی شخصی تهویه و روشنایی نگهداری و تعمیر
مسائل اجتماعی		بهره‌وری کاربری زمین بهره‌وری حمل و نقل و جریان حفظ انرژی محیطی/زیبایی شناختی آلودگی در برابر بلایا منیت ملی ختلال و وقفه کمتر در ساخت و ساز	تخریب زیست‌محیطی برگشت‌ناپذیری انرژی نهفته بالا

منبع: اقتباس از کامودی و استرلینگ، ۱۹۹۳.

مزایا و چالش‌های بالقوه مرتبط با توسعه فضای زیرزمینی

توسعه فضای زیرزمینی مزایای بالقوه‌ای را ارائه می‌کند، اما چالش‌های بسیاری در طراحی، عملیات و نگهداری زیرساخت‌های

زیرزمینی وجود دارد که باید حل گردند به طوری که به پایداری شهری کمک نماید. جدول ۱,۱ برخی از مزایا و نقایص بالقوه توسعه فضای زیرزمینی را فهرست می کند. الگوهای توسعه شهری کنونی نسبت به تغییر، سرسخت می باشد. فضای زیرزمینی غالباً برای برآوردن نیاز یک پروژه و یا استفاده شخصی، مهندسی می شود. گاهی در طراحی، حفظ و نگهداری بلند مدت، تعاملات بسیار کمتر با سازه های موجود یا آینده، در نظر گرفته نمی شود. مثلاً، شیوه های جانمایی چندمنظوره گذشته و حال همساز با اهداف پایداری نیستند (رجوع به کادر ۱,۵) و اثرات درازمدت بر محیط زیست، اقتصاد، اجتماع، منابع طبیعی یا حکومت را در نظر نمی گیرند. همان گونه که توسط استرلینگ و همکارانش (۲۰۱۲) بیان شد، تسهیلات زیرزمینی می توانند بر روشهایی که در آنها تصرف و استفاده انسانی زمین بر محیط سطحی و همچنین ساختارهای اقتصادی و اجتماعی یک منطقه شهری اثر می گذارد، به شیوه هایی که با استفاده از ساختارهای سطحی موجود پیش از این امکانپذیر نبود تأثیر گذارند. در صورت برنامه ریزی و نگهداری درست، زیرساخت های زیرزمینی می توانند با حفاظت از منابع سطحی طبیعی (مثلاً زمین، آب، تنوع زیستی)، کاهش آلودگی هوای وابسته به حمل و نقل، ایجاد فرصتهایی برای مصرف کمتر انرژی و تولید کمتر زباله و ایجاد سازه هایی با تاب آوری بیشتر نسبت به حوادث فاجعه بار به پایداری کمک نمایند. نمونه های سرتاسر جهان نشان می دهند که چگونه تسهیلات زیرزمینی می توانند اثرات محیطی کمتری داشته باشند. برای نمونه، تونل گرین هارت که در فضای زیرزمینی چهار شهر بزرگ هلند قرار دارد، ارتباط سریع از آمستردام تا مراکز اقتصادی مهم در اروپا را بدون آسیب رساندن به فضای سبز بزرگ گرین هارت فراهم می کند (Sabel Communicatie, ۲۰۰۷; ITA-AITES, ۲۰۱۱).

تصمیم گیری برای انتقال بخش های اجتماعی به فضای زیرزمین، یک مرحله اساسی در توسعه اسکان انسان می باشد. زیرساخت هایی که نمی توانند به طور مناسب و یا مطلوب در سطح یا روی سطح قرار گیرند، اغلب در زیرزمین بنا می شوند؛ مثلاً، تصمیم گیری برای ساخت در فضای زیرزمینی زمانی انجام می پذیرد که یک سامانه حمل و نقل جدید برای یک شهر تاریخی با محیط سطحی، بسیار فرهنگی و بی نظیر در نظر گرفته می شود، یا در جایی که جانمایی خیابانی یا سطوح ترافیک اجازه ترازبندی های بلند یا سطحی جدید را نمی دهد. به هر حال، یک مکان مورد دلخواه ممکن است چالش هایی را مطرح نماید - سازه ها شاید قبلاً در زیرزمین وجود داشته اند یا اینکه شرایط زمین شناسی ممکن است ایده آل نباشد. نیازهای شهری اغلب اوقات، زمین شناسی مطلوب را از میان می برد. اگر چه حجم بزرگی در زیر سطح زمین وجود دارد، اما شاید تنها از ۳۰ متر اول در زیر شهرها برای پشتیبانی اکثر عملکردهای شهری استفاده می گردد. و از ۳۰ متر اول، اکثریت قریب به اتفاق خدمات همگانی و حمل و نقل زیر سطحی در زیر راه های عبور عمومی قرار می گیرند (مثلاً خیابان ها و پیاده روها). ضمناً، در هنگام آشفستگی و اختلال، فضای زیرزمینی نمی تواند به شرایط قبلی خود بازگردد. این امر به ویژه برای فضاهایی مانند تونل های قدیمی یا حفره های ایجاد شده در خاک یا سنگ صادق است؛ وجود آنها به طرز چشمگیری بر گزینه های آینده و هزینه زیرساخت های زیرزمینی در مجاورت آنها تأثیر می گذارد.

کادر ۱-۵

پایداری طراحی تأسیسات زیرزمینی

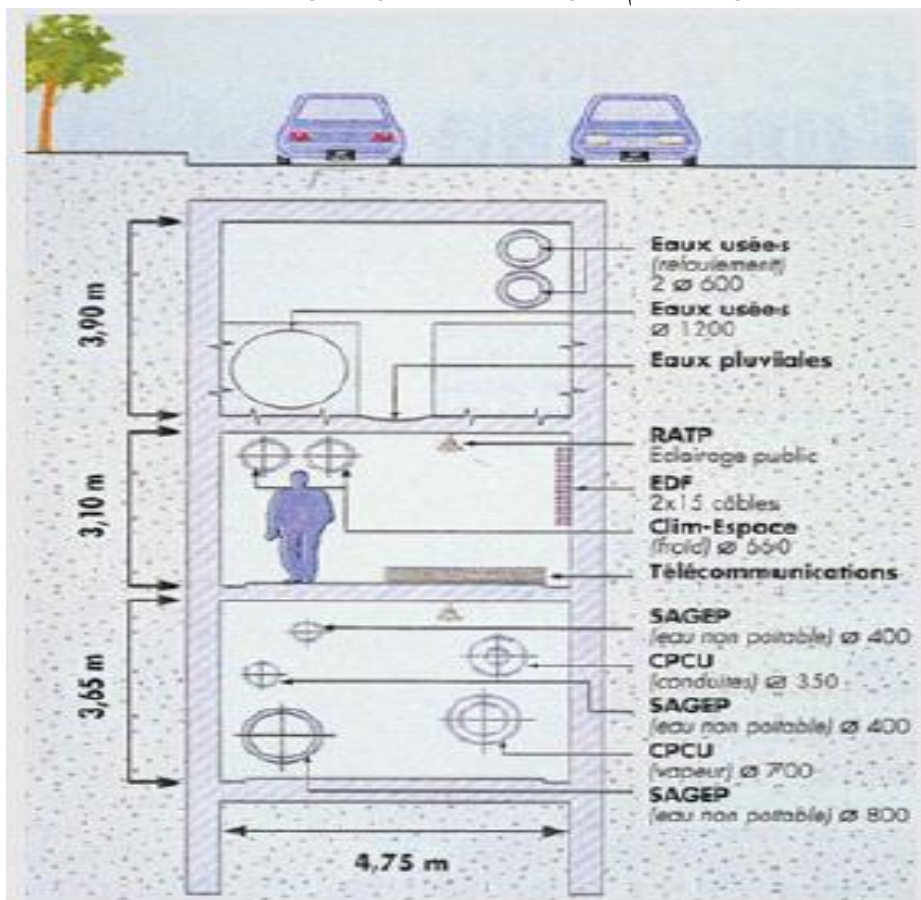
پایداری بلندمدت طراحی زیرساخت‌ها مثلاً برای خدمات ضروری شهری به ندرت در گذشته مورد توجه قرار گرفته است و تنها گاهی امروزه بررسی می‌گردد. شکل ۱ یک شاهکار طراحی مهندسی در سال ۱۹۱۷ را به خوبی نشان می‌دهد. یک «اسپاگتی» از لوله‌های زیرزمینی و مجراهای آب برای مجموعه‌ای از خدمات ارائه شد؛ با این همه، تعمیر یا جایگزینی هر عنصر این زیرساخت احتمالاً منجر به اختلال در ترافیک محلی و خدمات زیرساختی می‌گردید و احتمالاً خرابی در دیگر عناصر این زیرساخت را به همراه داشت. راهروهای تأسیسات با نام اوتیلیدورها، از سوی دیگر، کانال‌های محصور هستند که توسط برخی مناطق شهری استفاده می‌شوند که برای حمل خطوط تأسیساتی متعددی مانند برق، آب و فاضلاب، و ارتباطات طراحی می‌شوند (رجوع به شکل ۲). تعمیر خطوط تأسیساتی مجزا با حداقل مداخله در سازه‌های سطحی یا دیگر زیرساخت‌ها انجام می‌گیرد. طراحی می‌تواند سطوح مختلف راهروهای تأسیساتی را در خود جای دهد (رجوع به شکل ۳). مباحث بیشتر در مورد راهروهای تأسیساتی، مزایای آنها و موانع استفاده از آنها در فصل ۳ ارائه می‌گردد.



شکل ۱-۵ قرارگیری زیرساخت‌های تأسیسات زیرزمینی در خیابان وال (در حدود ۱۹۱۷).



شکل ۱-۶ نمونه‌ای از یک راهرو تأسیساتی در آمستردام که می‌تواند خطوط تأسیساتی مختلفی مانند برق، آب و فاضلاب، و ارتباطات را حمل نماید.



شکل ۱-۷ نموداری که طراحی راهرو تأسیساتی در پاریس را نشان می‌دهد. سطوح مختلف راهرو تأسیساتی می‌توانند در نظر گرفته شوند.

محدودیت‌های سازه‌ای و ژئوتکنیکی، می‌توانند انواع تأسیسات واقع در فضای زیرزمینی در یک مکان خاص را محدود نمایند و یا هزینه‌های ساخت یا عملیاتی را نسبت به هزینه تأسیسات در سطح افزایش دهند. کنترل آب و رطوبت در محیط زیرزمین چالش برانگیز است - زیرساخت‌های زیرزمینی نیاز به محافظت در برابر جریان و یا نشت مایعات ناخواسته دارند و منابع آب زیرزمینی آسیب‌پذیر باید از آلودگی و تخلیه حفاظت گردند. زیرساخت‌های زیرزمینی موجود یا بقایای ساختمان‌های قدیمی، طراحی و ساخت زیرزمینی را محدود می‌نمایند. به هر حال، قرارگیری زیرساخت‌ها در فضای زیرزمین یک بعد توسعه‌ای اضافه را به همراه دارد: سامانه‌های حمل و نقل پیچیده می‌توانند در زیر شهرها قرار گیرند و تونل‌ها در زیر رشته کوه‌ها و رودخانه‌ها ایجاد شوند.

عوامل انسانی تأثیرگذار بر توسعه فضای زیر زمین

مجموعه دیگری از فرصت‌ها و چالش‌ها، مواردی هستند که به اشخاصی که از فضای زیرزمین استفاده می‌کنند یا در آن کار می‌کنند مربوط می‌گردد. این موارد عبارتند از محدودیت‌های سازمانی و اداری مرتبط با برنامه‌ریزی و صدور مجوز، امنیت زیرساخت‌های زیرزمینی، ایمنی، و پذیرش روانی سازه‌های زیرزمینی و کاربری آنها. این گزارش به بررسی تمامی این مسائل با جزئیات زیاد نمی‌پردازد، اما در فصل ۴ مباحث بیشتری در خصوص این مسائل مطرح می‌گردد. در واقع نداشتن یک پایه تجربی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به زیرساخت‌های زیرزمینی، این مسائل را چالش برانگیزتر می‌سازد. صدور مجوز برای فضای زیرزمینی، برای مثال، نسبت به تسهیلات سطحی از روال کمتری برخوردار می‌باشد و بنابراین دارای زحمت بیشتری است. کدهای ایمنی برای تسهیلات زیرزمینی مورد استفاده، از جمله کدهای مربوط به آتش‌سوزی، خروجی، و سامانه‌های تهویه، وجود ندارند یا ناکافی هستند (رجوع به فصل ۴ برای بحث در خصوص کدهای موجود برای انواع تسهیلات خاص). زیرساخت‌های زیرزمینی به دلیل کنترل دسترسی و ایزولاسیونی (جداسازی) که فضای زیرزمینی عرضه می‌نماید، می‌توانند امنیت بیشتری را نسبت به زیرساخت‌های سطحی فراهم سازند. به همین ترتیب، فضای زیرزمینی می‌تواند برای جداسازی یا ایزوله نمودن مواد خطرناک مانند فاضلاب خام یا خطوط برق ولتاژ بالا از مردم و زیرساخت‌های روی سطح مورد استفاده قرار گیرد. از سویی دیگر، این جداسازی به این معنی است که حفاظت در برابر خطرات فیزیکی مانند سیلاب، آتش‌سوزی داخلی، انفجارها چالش برانگیزتر می‌باشد، به ویژه زمانی که زیرساخت‌های زیرزمینی مختلف با دیگر زیرساخت‌های زیرزمینی و سطحی یکپارچه‌تر می‌گردند.

دسترسی به تسهیلات یا منابع زیرزمینی ممکن است برای اشخاص دارای معلولیت جسمانی بدون انتقال مکانیکی دشوار و یا غیر ممکن باشد. ایمنی برای مردم با نیازهای خاص یک چالش بزرگ است، برای مثال، در صورت وقوع قطعی برق. دیگر اعضای جامعه به سادگی ممکن است نسبت به مفهوم زیرزمین حس بدی بیابند، و یا عدم وجود روشنایی طبیعی در زیرزمین برایشان ناخوشایند و یا به لحاظ فضا گیج‌کننده باشد. و برای برخی، موانع فیزیولوژیکی یا روانی برای کار، زندگی، مسیریابی و رفت و آمد، و یا بازی در زیرزمین وجود دارد از جمله مرض ترس (فوبیا) از فضای تنگ و محصور یا ترس از دورافتادگی. بسیاری از افراد با این مشکلات می‌توانند استفاده و ارزش فضای زیرزمینی را با کمپین‌های آموزش عمومی مناسب بیاموزند. این مسائل ناخوشایند به طور مؤثری می‌توانند با برنامه‌ریزی ماهرانه، طراحی‌های نوآورانه، جانمایی، نمای سطح، و روشنایی مورد توجه قرار گیرند.

داستان‌های عبرت‌آموز از اجتماعات زیرزمین که توسط یک محرک برای بهره‌وری یا پاسخ به یک فاجعه به وجود می‌آیند، در تعدادی از آثار ادبی یافت می‌شوند (برای مثال؛ فارستر، ۱۹۰۹). چنین دل‌نگرانی‌هایی نیاز به بررسی دارند، هم برحسب آنچه که باید در محیط‌های زندگی و محیط کار باشد و هم در جزئیات طراحی تأسیسات. توازن میان میل به زندگی در فضای باز و راحتی و یا حفاظتی که توسط تأسیسات زیرزمینی ارائه می‌گردد یک نقطه ثابت

نیست. اگرچه درصد کمی از افراد قادر به تحمل تأسیسات زیرزمینی به لحاظ روان شناختی نیستند، اما سایرین اکتشاف غار را به عنوان یک سرگرمی انتخاب می‌کنند. بیشتر آنها در جامعه شاید مورد ارزیابی آگاهانه یا ناآگاهانه مزایا و نقایص مربوط به شرایط خاص قرار می‌گیرند، برای مثال، سفر سریع و راحت در مترو زیرزمینی در مقابل سفر کند در یک ماشین یا اتوبوس در خیابان، یا پناهگاه در حین حمله در زمان جنگ. طراحی مناسب در پاسخ به درک آنچه که محیط زیرزمینی را جالب، جذاب، ایمن، مقرون به صرفه و بخشی از توسعه پایدار در محدودیت‌های فیزیکی موجود می‌سازد می‌تواند نقطه توازن را با توجه به درک از کاربرد فضای زیر زمین انتقال دهد.

گزارش

زندگی روزمره شهری بدون اینکه مردم از عملکرد زیرساخت‌های زیرزمینی آگاه باشند، ادامه می‌یابد و شاید موفقیت زیرساخت‌ها بعضاً با اندازه‌گیری میزان برآوردن نیازها بررسی می‌گردد. مهندسان، طراحی و ساخت را با حداقل‌سازی ریسک انجام می‌دهند. هر چند حذف ریسک به طور کامل امکان‌پذیر نمی‌باشد. عدم موفقیت زیرساخت‌ها در نتیجه فرسودگی، خطا یا حوادث غیر مترقبه اتفاق می‌افتد. چنین شکست‌هایی نیاز به گزارش‌هایی از این دست را مطرح می‌کنند؛ که انواع گوناگون عدم موفقیت زیرساخت‌ها را بیان می‌نمایند تا چالش‌های پیش رو را نشان دهند. موفقیت زیرساخت‌های زیرزمینی نیز برای بیان رویکردهای مهندسی فضای زیرزمینی برجسته می‌شوند که به توسعه شهری پایدار کمک می‌نماید.

کشورهایی مانند فنلاند، سوئد، نروژ، هلند، ژاپن، چین و سنگاپور اقداماتی را در سطح ملی انجام داده‌اند که استفاده از فضای زیرزمینی را به عنوان یک مسئله سیاسی افزایش می‌دهد. کشورهایی مانند فرانسه، بریتانیا، ایالات متحده و آلمان سطح قابل توجهی از فعالیت زیرزمینی را دارا می‌باشند اما استفاده از فضای زیرزمینی از عدم توجه در سطح ملی رنج می‌برد (استرلینگ و همکاران، ۲۰۱۲). در این گزارش، کمیته مذکور استدلال می‌نماید که یک رویکرد چندسطحی، چند رشته‌ای در برنامه‌ریزی شهری که مهندسی فضای زیرزمینی را به عنوان بخشی از رویکرد کل مداخله می‌دهد، چارچوب مناسب‌تری را برای توسعه پایدار شهری ارائه می‌دهد.

بیانیه کار چنان که در کادر ۱-۱ وجود دارد، طولانی و گسترده است اما پس از مطالعه‌ای قابل توجه در خصوص مسئولیت مورد نظر و مباحث متعدد بعدی با حامی مالی کمیته، کمیته مذکور به این نتیجه رسید که وظیفه اصلی آن انطباق با عنوان داده شده به کمیته می‌باشد: کمیته مهندسی فضای زیرزمینی برای توسعه پایدار. این کمیته در مورد وظیفه خود تعمق نمود و این گزارش را با توجه به هم بخشی‌های فضای مهندسی شده زیرزمینی برای توسعه پایدار و همچنین آنچه که در محیط‌های اجتماعی، آموزشی، نظارتی، و تحقیقاتی برای انجام این همکاری‌ها نیاز است، آماده ساخت.

این گزارش در هفت فصل تهیه شده است. فصل ۲ در مورد سیر تکاملی کاربری فضای زیرزمین شهری و محرک‌هایی که بر توسعه مناسب تأثیر گذارند، می‌باشد. در فصل ۳، این کمیته در خصوص نقش مهندسی فضای زیرزمینی در پایداری و برخی چالش‌های توسعه پایدار فضای زیرزمینی بحث می‌کند. فصل ۴ روابط سیستم فنی انسانی و خطرات وابسته به استفاده انسان از محیط زیر زمین را بررسی می‌نماید. ارزیابی هزینه‌ها و مزایای زیرساخت زیرزمینی و پایداری چرخه حیات در فصل ۵ پرداخته می‌شود. فصل ۶ فن‌آوری‌هایی که مهندسی فضای زیر زمین را ممکن می‌سازند را بررسی می‌کند و انواع نوآوری‌هایی که هم بخشی مهندسی فضای زیر زمین را نسبت به توسعه پایدار افزایش می‌دهد، را بیان می‌نماید. و در آخر، کمیته نتیجه‌گیری کلی خود را در زمینه چارچوبی برای بهبود ظرفیت‌های سازمانی، آموزشی، تحقیقاتی و نیروی کار مهندسی فضای زیر زمین به منظور پایداری در فصل ۷ ارائه می‌نماید.

- ١) Barghouth, J.M., and R.M.Y. Al-Sa'ed. ٢٠٠٩. Sustainability of ancient water supply facilities in Jerusalem. Sustainability ١(٤):١١٠٦-١١١٩.
- ٢) Carmody, J., and R.L. Sterling. ١٩٩٣. Underground Space Design: A Guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces. New York: Van Nostrand Reinhold.
- ٣) De Feo, G. ٢٠٠٨. The Piscina Mirabilis in Miseno, Southern Italy. Pp. ١١-١٤ in Specialist Group on Water and Wastewater Technologies in Ancient Civilizations Newsletter, May ٢٠٠٨. International Water Association [online]. Available: [http://www.miraproject.eu/MELIA/copy_of_about-melia/TWA Ancient Civilisations Newsletter.pdf](http://www.miraproject.eu/MELIA/copy_of_about-melia/TWA%20Ancient%20Civilisations%20Newsletter.pdf) (accessed March ٣١, ٢٠١١).
- ٤) DHS (U.S. Department of Homeland Security). ٢٠٠٦. National Infrastructure Protection Plan: Building a Safer, More Secure, and More Resilient America. U.S. Department of Homeland Security [online]. Available: www.dhs.gov/xlibrary/assets/NIPP_Overview.pdf (accessed March ٣٠, ٢٠١١).
- ٥) El-Geneidy, A., L. Kastelberger, and H. Abdelhamid. ٢٠١١. Montreal's roots: Exploring the growth of Montreal's indoor city. Journal of Transport and Land Use. ٤(٢):٣٣-٤٦.
- ٦) Forster, E.M. ١٩٠٩. The Machine Stops [online]. Available: <http://archive.ncsa.illinois.edu/prajlich/forster.html> (accessed April ٣٠, ٢٠١٢).
- ٧) Golany, G.S. ١٩٩٦. International uses of geo-space: Indigenous and contemporary examples. Pp. ٣١١-٣٣٧ in Geo-Space Urban Design. New York: John Wiley & Sons.
- ٨) Harding, H. ١٩٨١. Tunneling History and My Own Involvement. Toronto, Canada: Golder Associates.
- ٩) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). ٢٠٠٧. Climate Change ٢٠٠٧: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change [online]. Available: www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm (accessed October ١٤, ٢٠١٠).
- ١٠) IPCC. ٢٠٠٨. Climate Change and Water: IPCC Technical Paper VI. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change [online]. Available: <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-water-en.pdf> (accessed March ٣٠, ٢٠١١).
- ١١) Isgård, E. ١٩٧٥. Underground Wastewater Treatment Plants. Journal of the Water Pollution Control Federation. ٤٧(٤):٦٨٤-٦٨٧.
- ١٢) ITA-AITES (Association Internationale des Tunnels-International Tunnelling and Underground Space Association). ٢٠١١. Protection of Wildlife [online]. Available: <http://www.ita-aites.org/index.php?id=١٢٠> (accessed April ٣٠, ٢٠١٢).
- ١٣) Kammen, D.M., and A. Jacobson. ٢٠٠٦. Science and Engineering Research That Values the Planet. Pp. ٥٩-٧٠ in Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the ٢٠٠٥ Symposium. Washington, DC: The National Academies Press.
- ١٤) Koutsoyiannis, D., N. Zarkadoulas, A.N. Angelakis, and G. Tchobanoglous. ٢٠٠٨. Urban water management in ancient Greece: Legacies and lessons. Journal of Water Resource Planning and Management ١٣٤(١):٤٥-٥٤.
- ١٥) Linger, D.A., G.H. Baker, and R.G. Little. ٢٠٠٢. Applications of underground structures for the physical protection of critical infrastructure. Pp. ٣٣٣-٣٤٢ in North American Tunneling ٢٠٠٢, L. Ozdemir, ed. Lisse, The Netherlands: Swets & Zeitlinger.
- ١٦) Liu, J. ٢٠٠٩. Yaodong - Cave Dwellings on Loess Plateau. ChinaBlog.cc. [online]. Available: <http://chinablog.cc/٢٠٠٩/٠٢/yaodong-cave-dwellings-on-loess-plateau/> (accessed March ٣١, ٢٠١١).

- ۱۷) Markham, V.D. ۲۰۰۸. U.S. Population, Energy & Climate Change. Center for Environment & Population [online]. Available: http://www.cepnet.org./documents/US-Population-Energy-Climate_Change۲۰۰۹.pdf (accessed October ۱۴, ۲۰۱۰).
- ۱۸) Massachusetts Turnpike Authority. ۲۰۰۶. Economic Impact of the Massachusetts Turnpike Authority & Related Projects, Volume I: The Turnpike Authority as a Transportation Provider. Massachusetts Department of Transportation [online]. Available: <http://www.massdot.state.ma.us/portals/۰/docs/infoCenter/additionalDocs/MTA-Economic-V۱.pdf> (accessed April ۲۷, ۲۰۱۲).
- ۱۹) Meijenfeldt, E.V. ۲۰۰۳. Below Ground Level: Creating New Spaces for Contemporary Architecture, M. Geluk, ed. Basel, Boston: Birkhauser.
- ۲۰) NAE (National Academy of Engineering). ۲۰۰۰. Greatest Engineering Achievements of the ۲۰th Century [online]. Available: <http://www.nationalacademies.org/greatachievements/List.PDF> (accessed July ۹, ۲۰۱۲).
- ۲۱) Norris, F.H., S.P. Stevens, B. Pfefferbaum, K.F. Wyche, and R.L. Pfefferbaum. ۲۰۰۸. Community resilience as a metaphor: Theory set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology* ۴۱(۱-۲):۱۲۷-۱۵۰.
- ۲۲) NRC (National Research Council). ۲۰۱۰. Adapting to the Impacts of Climate Change. Washington DC: The National Academies Press. NRC. ۲۰۱۱. Building Community Disaster Resilience through Private-Public Collaboration. Washington DC: The National Academies Press.
- ۲۳) Papay, L.T. ۲۰۰۲. Urban design: The grand challenge. Pp. ۹۱-۹۴ in *Engineering and Environmental Challenges: Technical Symposium on Earth Systems Engineering*. Washington, DC: National Academy Press.
- ۲۴) Parriaux, A., L. Tacher, V. Kaufmann, and P. Blunier. ۲۰۰۶. Underground resources and sustainable development in urban areas. Paper number ۷۰۰ in *Engineering Geology for Tomorrow City: International Association for Engineering and Geology ۲۰۰۶: The ۱۰th International Congress*, September ۶-۱۰, ۲۰۰۶, Nottingham, U.K. [online]. Available: <http://www.iaeg.info/iaeg۲۰۰۶/start.htm> (accessed March ۳۰, ۲۰۱۱).
- ۲۵) Rightmire, G.P., and H.J. Deacon. ۱۹۹۱. Comparative studies of Late Pleistocene human remains from Klasies River Mouth, South Africa. *Journal Human Evolution* ۲۰(۲):۱۳۱-۱۵۶.
- ۲۶) Sabel Communicatie. ۲۰۰۷. Guide to Good Practice: Underground Space. Rotterdam, The Netherlands: Europoint Media [online]. Available: <http://www.scribd.com/doc/۹۶۶۳۸۹۵/Connected-Cities-guide-to-good-practice-underground-space> (accessed April ۳۰, ۲۰۱۲).
- ۲۷) Sandström, G. ۱۹۶۳. Tunnels. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- ۲۸) Shaffer, D., and D. Vollmer. ۲۰۱۰. Pathways to Urban Sustainability: Research and Development in Urban Systems. Washington, DC: The National Academies Press.
- ۲۹) Sterling, R.L., and J.P. Godard. ۲۰۰۰. Geoenvironmental considerations in the optimum use of underground space. Pp. ۷۰۸-۷۲۰ in *GeoEng۲۰۰۰: An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, Vol.۱: Invited Papers. International Tunnelling and Underground Space Association [online]. Available: <http://www.itaaites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ItaPositionPapers/Geoenvironmental/geo۲۰۲.pdf> (accessed April ۶, ۲۰۱۱).
- ۳۰) Sterling, R., H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J.P. Godard, I. Vähäaho, C.D.F. Rogers, X. Shi, and T. Hanamura. ۲۰۱۲. Sustainability issues for underground spaces in urban areas. *Proceedings of ICE -*

Urban Design and Planning. Available at www.icevirtuallibrary.com/content/article/١٠,١٦٨٠/udap.١٠,٠٠٠٢٠.

٣١) Széchy, K. ١٩٧٠. The Art of Tunnelling. Budapest: Akademia Kiado. UN (United Nations). ١٩٨٧. Report of the World Commission on Environment and Development.

٣٢) General Assembly. A/RES/٤٢/١٨٧. United Nations [online]. Available: <http://www.un.org/documents/ga/res/٤٢/ares٤٢-١٨٧.htm> (accessed April ٦, ٢٠١١).

٣٣) U.S. Census Bureau. ٢٠١١. The ٢٠١٢ Statistical Abstract: The National Data Book [online]. Available: <http://www.census.gov/compendia/statab/cats/population.html> (accessed August ٤, ٢٠١١).

٣٤) Wood, A.M. ٢٠٠٠. Tunneling: Management by Design. London: E & FN Spon.

فصل دوم

تکامل و عوامل تأثیرگذار بر توسعه زیرزمینی

توسعه فضاهای زیرزمینی به موازات توسعه روستاها و شهرک‌ها به شهرها صورت گرفته است. آب، انرژی، فاضلاب و زباله‌هایی که زمانی داخل و خارج از شهر بر روی سطوح خیابان حمل می‌شدند اکنون از طریق مجراهای زیرزمینی انتقال می‌یابند. ساکنان شهری غالباً از ارتباطات میان تأسیسات خدمات ضروری آب و برق و سازه‌ها در ساختمان‌هایی که در آن زندگی و کار می‌کنند و زیرساخت‌ها و خدمات پشتیبانی زیرزمینی بی‌اطلاع‌اند و به تبع آن، درک عمومی از نقش حیاتی منابع زیرزمینی در عملکرد مناسب و استانداردهای بالای زندگی در مناطق شهری آمریکا وجود ندارد.

فضای زیرزمینی همواره پشتیبانی زیرسازی فیزیکی را برای ساختمان‌ها و دیگر سازه‌های سطحی فراهم می‌نماید. زیرسازی‌های ساختمانی اولیه مجموعه ساده‌ای از سنگ بود که با دست درون گودال‌های کم عمق قرار می‌گرفت. امروزه، زیرسازی ساختمان‌های بزرگ و آسمان خراش‌ها شامل ستون‌های عمیق، کانال‌هایی برای گرمایش و سرمایش زمین گرمایی و سطوح مختلف فضای زیرزمین که به طور مثال سالن‌های خرید، پارکینگ‌های زیرزمینی، تأسیسات برق و آب و ذخیره‌سازی با کیفیت بالا را ارائه می‌دهند می‌باشد. زیرسازی‌ها با طراحی مناسب خاک، سنگ، آب‌های زیرزمینی و دیگر شرایط خاص مکانی را در نظر می‌گیرند و به مقاومت ساختمان‌ها در مقابل اثرات لرزه‌ای قوی و بادهای شدید کمک می‌نمایند. تجربه سخت بدست آمده، مهارت‌های استادانه و دانش حاصل از بسیاری از علوم و رشته‌های مهندسی به توسعه پروسه‌ها و روش‌های مورد استفاده امروزی در مکان‌یابی، طراحی و ساخت سازه‌های بزرگ کمک می‌نماید.

اگرچه شهرها، رو به بالا و به طرف خارج رشد می‌کنند، رشدشان وابسته به زیرسازی‌های ساختمانی زیرزمینی و زیرساخت‌های تأسیساتی است. در بسیاری از شهرداری‌ها، طرح‌ریزی و منطقه بندی فضاهای سطحی و هوایی توسط دولت‌های محلی انجام می‌گیرد. متأسفانه، محیط زیرزمین به طور همانند طرح‌ریزی و منطقه بندی نمی‌گردد و یک میزان مشخص برای فضای زیرزمین به طور کلی مشخص نمی‌گردد (استرلینگ و همکاران، ۲۰۱۲). برنامه‌ریزی رسمی و کنترل فضای زیرزمین توسط شهرداری‌ها مسئولیتی است که در صورت تحقق توسعه پایدار شهری، در ایالات متحده مشخص و مؤثر است. در برخی کشورها مانند چین، طرح‌ریزی فضای زیرزمین تمرکز ویژه‌ای برای پاسخ به رشد شهری است و چنین برنامه‌هایی تقریباً توسط همه شهرهای بزرگ چین در چند سال گذشته گسترش یافته است (گوا و همکاران، در مطبوعات). این فصل، تکامل فضای زیرزمین را دنبال می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه توسعه پیشرو و تدریجی محیط زیرزمین به طرز چشمگیری محدودیت‌های بیشتری را در مقایسه با محدودیت‌های توسعه زیرساختی و تسهیلات سطحی برای توسعه آینده مطرح می‌سازد.

توسعه فضای زیرزمینی در قرن گذشته

سامانه‌های فاضلاب در زیرزمین قرار می‌گیرند تا با استفاده از گرانش، فاضلاب را به دور از ساختمان‌ها تخلیه کنند. سامانه‌های توزیع آب اغلب در زیرزمین قرار می‌گیرند تا از آنها در برابر یخ زدگی و دیگر تخریب‌ها محافظت کنند. سامانه‌های تأمین برق و مخابرات با توجه به رسم و روال محلی در زیرزمین قرار می‌گیرند، با در نظر گرفتن ارزش قرار داده شده برای نگهداری یک زیرساخت امن و مرتجع، به دلایلی که به زیبایی‌شناسی سطح یا حداقل سازی اثرات نصب بر ارزش ملک مربوط می‌شود. نگرانی در مورد برنامه‌ریزی ناهماهنگ فضای زیرزمین، موضوع جدیدی نیست. در سال ۱۹۱۴، جورج وبستر که مهندس ارشد و نقشه بردار فیلادلفیا بود اظهار تاسف کرد از اینکه تعداد اندکی از شهرهای بزرگ فضای زیر خیابان‌ها را طرح‌ریزی می‌کنند، و یا تسهیلات و خدمات قرار گرفته در آن را در نقشه نشان می‌دهند (وبستر، ۱۹۱۴). او اهمیت درک آنچه که فضای زیرزمینی برای همساز شدن نیاز دارد را خاطر نشان کرد و ضرورت طرح‌ریزی برای موارد ذیل را بیان نمود.

- لوله‌های آب، آب گرم، بخار، فاضلاب، خنک کننده و گاز؛ کانال‌های برق؛ لوله‌های پنوماتیک؛ و تا کنون خدمات نامشخص آینده؛
- دالان‌هایی برای لوله‌ها و مجراها؛
- سرداب‌هایی در زیر پیاده روها در معابر عمومی به عنوان بخشی از ساخت‌وساز جدید؛
- راه‌های زیرزمینی برای سامانه‌های حمل و نقل و مسافران؛
- تونل‌هایی در زیر خدمات زیرزمینی برای در نظر گرفتن حرکت مردم در بین بنگاه‌های کسب‌وکار بدون نیاز به عبور از خیابان یا خطر کردن در آب و هوا؛ و

• خدمات جابجایی بار زیرزمینی برای اتصال پایانه‌های حمل و نقل به مؤسسات صنعتی و بوستر کسب‌وکار تجاری.

از این موضوع که فضای زیرزمین باید برای تسهیل نصب و راه‌اندازی آینده و حداقل سازی هزینه‌ها و تاخیرهای ناشی از راه‌اندازی‌های آینده طرح‌ریزی شود حمایت کرد. او از یک نهاد رسمی معتبر برای سروسامان دادن به کاربری زیرزمین جانب داری کرد و پیش‌بینی نمود که بدون چنین نظارت‌هایی تأسیسات زیرزمینی بزرگ و جدید، هنگامی که مهندسان مجبور به کار در زیرساخت‌های موجود می‌باشند، با هزینه‌ها و چالش‌های بیشتری روبه‌رو خواهد شد.

چنان‌که ما در قرن بیست و یکم پیش می‌رویم، زیرزمین برای تمامی اهداف ذکر شده در بالا بکار می‌رود و بسیاری از مشکلات پیش‌بینی شده در قرن گذشته از قوه به فعل تبدیل می‌شوند. جدول ۲،۱ طول تخمینی خدمات همگانی اصلی زیرزمینی در ایالات متحده را ارائه می‌کند که تقریباً به ۱۰،۸ میلیون مایل (۱۷،۴ میلیون کیلومتر) می‌رسد. زیرساخت‌های زیرزمینی برای ملحوظ داشتن جمعیت در حال رشد و خدمات زیرساختی جدید (و تأمین‌کنندگان مختلف) توسعه می‌یابند اما همچنان در زیر همان معابر عمومی نصب می‌شوند. همچنان‌که ترافیک با رشد جمعیت شلوغ‌تر می‌شود، عملیات تأسیسات زیرزمینی که باید از طریق سطح قابل دسترسی باشد به افزایش مشکلات و هزینه‌های ترافیکی می‌انجامد. گزارش شده است که تقریباً ۴ میلیون حفره در خیابان‌ها و معابر بریتانیا به سبب خدمات عمومی کنده می‌شود که هزینه‌ای حدود ۲،۲۵ بیلیون دلار به ازای هر سال و هزینه‌های غیرمستقیم منتجه حدود ۴،۵ بیلیون دلار به ازای هر سال در بر خواهد داشت (فاریموند، ۲۰۰۴). هزینه‌های مشابه در ایالات متحده چندین برابر بیشتر بوده است.

سامانه‌های فاضلاب نیز گسترده شده‌اند و فضای زیرزمینی اکنون سامانه‌های بزرگ انتقال فاضلاب (مانند، سامانه‌های فاضلاب سطحی و بهداشتی، سامانه‌های فاضلاب ترکیبی) و سامانه‌های جداساز لوله‌های سرریز فاضلاب ترکیبی^۴ و تونل ذخیره‌سازی با دهانه‌های قطری بزرگ را در خود جای می‌دهد. بیشتر بخش‌های سامانه‌های فاضلاب و زهکشی برای جاری شدن توسط گرانش، از طریق لوله‌ها و تونل‌ها طراحی می‌شوند و بنابراین به ترازبندی‌های عمودی کنترل شده وابسته‌اند. این

^۴ CSO

سامانه‌ها عموماً در زیر مجموعه‌ای از زیرساخت‌های تأسیساتی کم عمق موجود قرار دارند و ممکن است که استفاده از آن فضای زیرزمینی را برای خدمات آینده شامل متروهای حمل و نقل سریع و ریل‌های با سرعت بالا^۵ را مسدود کنند. حفظ فرصت‌های دسترسی برای چنین خدماتی، دلالت بر برنامه‌ریزی و امکان‌پذیری با هدف حفاظت از راهروهای زیرزمینی برای زیرساخت‌های شهری با ارزش بالا دارد. آینده‌نگری برای پایداری حیاتی است زیرا چنین زیرساخت‌های پیچیده‌ای غالباً تا خیلی بعدتر در سیر تحول یک شهر نیاز نمی‌شوند.

مهندسی زیرسطحی برای پایداری

تونل‌سازی که مؤلفه‌ای از پروژه‌های ساخت زیرزمین می‌باشد ویژگی‌های مشترک بسیاری با دیگر انواع ساخت‌وساز که در جوامع شهری انجام می‌پذیرند دارد. با این همه ممکن است چالش‌های خاصی در فضای زیرزمین تقویت شوند (وود، ۲۰۰۰). برای مثال:

- وابستگی بیشتری نسبت به زمین و درک خصوصیات زمین بر حسب ریسک (رجوع به کادر ۱،۳) در خود پروژه ساخت، دیگر زیرساخت‌ها، ایمنی و سلامت کارگر، منافع زیست‌محیطی و اقتصادی وجود دارد؛
- وابستگی متقابل بیشتری میان برنامه‌ریزی و طراحی پروژه وجود دارد که از نیاز به تثبیت زمین و از میان برداشتن آب‌های زیرزمینی یا آلودگی‌ها منتج می‌شود.
- متدهای ساخت‌وساز بالقوه کمتری با توجه به محدودیت‌های زمین‌شناسی و انسانی موجود می‌باشند.
- تدارکات می‌تواند چالش برانگیزتر باشد به دلیل دسترسی محدود و پرداختن به ایمنی کارگر (کارگران ممکن است در فاصله‌های بسیار دورتر از نقاط دسترسی باشند)؛ و
- تخصص و مدت زمان لازم از آغاز به کار پروژه و اتمام ممکن است زیاد باشد و آنچه که در ارتباط با خرید سهام عام یک پروژه و مسائل مورد پذیرش و انطباق دولتی است را در برگیرد.

جدول ۲-۱ طول تخمینی برای تأسیسات خدماتی زیرزمینی آمریکا

انتقال (مایل)	توزیع/جمع‌آوری (مایل)	سامانه خدماتی (مایل)	کل (مایل)
گاز جمع‌آوری..... ۴۱۰۰۰ (Doe, ۲۰۰۶) بین ایالتی..... ۲۵۰۰۰ بین ایالتی..... ۷۵۰۰۰	۱۲۱۲۶۸۸ (PHMSA, ۲۰۰۵)	PHMSA, ۲۰۰۵) ^{a)} ۷۸۳۹۲	۲۳۵۹۰۸۰
مایعات خطرناک..... ۱۶۰۸۶۸ (PHMSA, ۲۰۰۳)			۱۶۰۸۶۸
نفت جمع‌آوری..... ۳۵۰۰۰ (خط لوله ۱۰۱، ۲۰۰۱) خام..... ۶۵۹۴۲ (BTS, ۲۰۰۴) تولید..... ۷۶.۲۵۸			۱۷۷۲۰۰
آب..... ۶۶۰۰۰ (Brongers, ۲۰۰۲)	۹۹۵۶۴۴ (EPA, ۲۰۰۷)	(EPA, ۲۰۰۷) ^{b)} ۸۵۴۳۶۴	۲۵۱۰۰۰۸
فاضلاب			۱۲۲۴۰۰۰

		(PEA, ۲۰۰۶) ۲۴۰۰۰ ۵۰۰۰۰	عمومی خصوصی
۱۱۶۷۶۴۳	۴۰۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰	برق ۱۶۷۶۴۳ (NERC, ۲۰۰۶)
۳۱۹۴۹۲۱		(FCC, ۲۰۰۶) ۳۸۲۴۷۲ ۲۱۷۲۶۶ ۲۱۷۸۳۲۰ ۲۱۷۳۲۲ ۱۹۹۵۴۱	مخابرات کابل زیرزمینی فلزی فیبر کابل زیرخاکی فلزی فیبر سامانه مجرای سیم خندق
۱۰۷۹۳۷۱۹			جمع کل

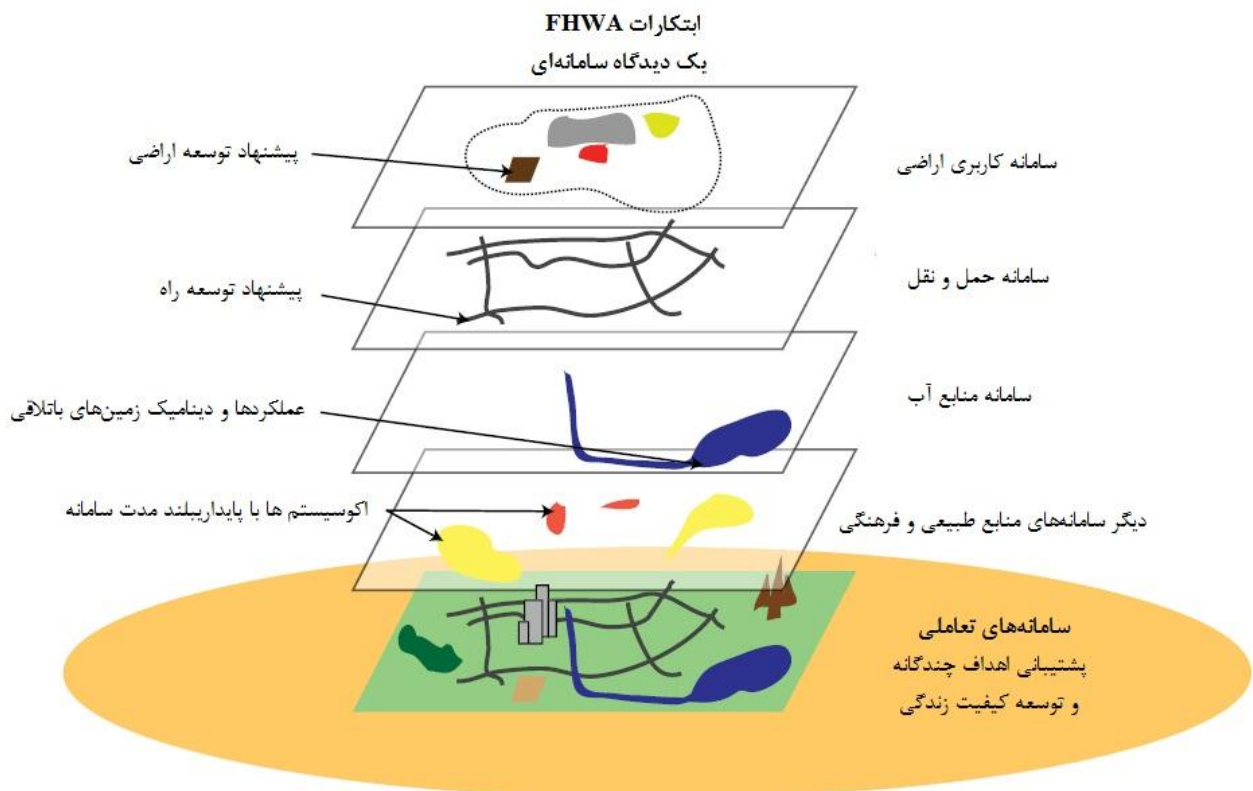
a تعداد کل خدمات گازرسانی در ایالات متحده بر اساس (PHMSA ۲۰۰۵)، ۶۳۵۲۳ می‌باشد. سپس این تعداد تبدیل به مایل با در نظر گرفتن متوسط طول یک خط خدمات برابر با ۶۵ فوت، می‌گردد.

b تعداد کل خدمات آب رسانی در ایالات متحده بر اساس (EPA ۲۰۰۷)، حدود ۶۹۵۴۵۳۰۷ می‌باشد. این تعداد سپس تبدیل به مایل با در نظر گرفتن متوسط طول یک خط خدمات برابر با ۶۵ فوت، می‌گردد.

c یازده سرویس خدمات‌رسانی آمریکا در مجموع ۲۹۶۰۹۳ مایل را اعلام کرده‌اند (استرلینگ و همکاران، ۲۰۰۹). به هر صورت، انتظار می‌رود طول خط زیرزمینی توزیع برق خیلی کمتر از آنچه برای گاز یا آب است باشد در حالی که به طور کامل در زیرزمین قرار دارد. رقمی برابر با ۶۰۰۰۰۰ مایل به عنوان مجموع کل در آمریکا فرض می‌شود.

d این رقم یک برآورد تقریبی بر اساس خدمات برق رسانی زیرزمینی است که کمتر از نصف طول خدمات آبرسانی زیرزمینی می‌باشد. منبع: اقتباس از استرلینگ و همکاران، ۲۰۰۹.

یک پروژه زیرزمینی نیاز به یک دیدگاه سامانه‌ای دارد چنان‌که در شکل ۲،۱ بیان می‌شود، که بر روابط متقابل میان سامانه‌های مرتبط از جمله آنهایی که به کاربری زمین مربوطند، حمل و نقل چند وجهی، سامانه‌های زیست‌محیطی، فرهنگی و اجتماعی - اقتصادی تأکید دارد. این نوع رویکرد بر ترکیب بی‌نظیری از مهارت‌ها، دانش، مدیریت و هدایت مورد نیاز به جهت طرح‌ریزی، ساخت، عملیات، و نگهداری زیرساخت‌های موفق برای محیط پایدار شهری تأکید دارد. شکل ۲،۱ یک شروع مناسب از این نوع ضرورت فکری را نشان می‌دهد اما پایداری سامانه‌های مهندسی شده در سامانه‌های شهری نیازمند طراحی برای پیچیدگی و سازگاری بسیار بیشتری است، چنان‌که برای سامانه انطباقی پیچیده مهندسی سامانه‌ها انجام شده است. مهندسی CASoS وابستگی‌ها و آسیب‌پذیری‌های سامانه‌ها را بررسی می‌کند تا ریسک را کاهش دهد و ایمنی و سلامت را به حداکثر برساند (گلاس و همکاران، ۲۰۱۱)، چنانکه در کادر ۲،۱ شرح داده شده است.



شکل ۲-۱ یک دیدگاه سامانه‌ای نسبت به زیرساز سامانه‌های متعامل (که در زیر/پایه این تصویر نشان داده شده) که شامل کاربری زمین، حمل و نقل چند وجهی، سامانه‌های طبیعی، فرهنگی و اجتماعی - اقتصادی می‌باشد، کیفیت زندگی و مزایای مختلفی را برای بلندمدت ارائه می‌نماید. منبع: FHWA, ۲۰۰۸.

کادر ۲-۱

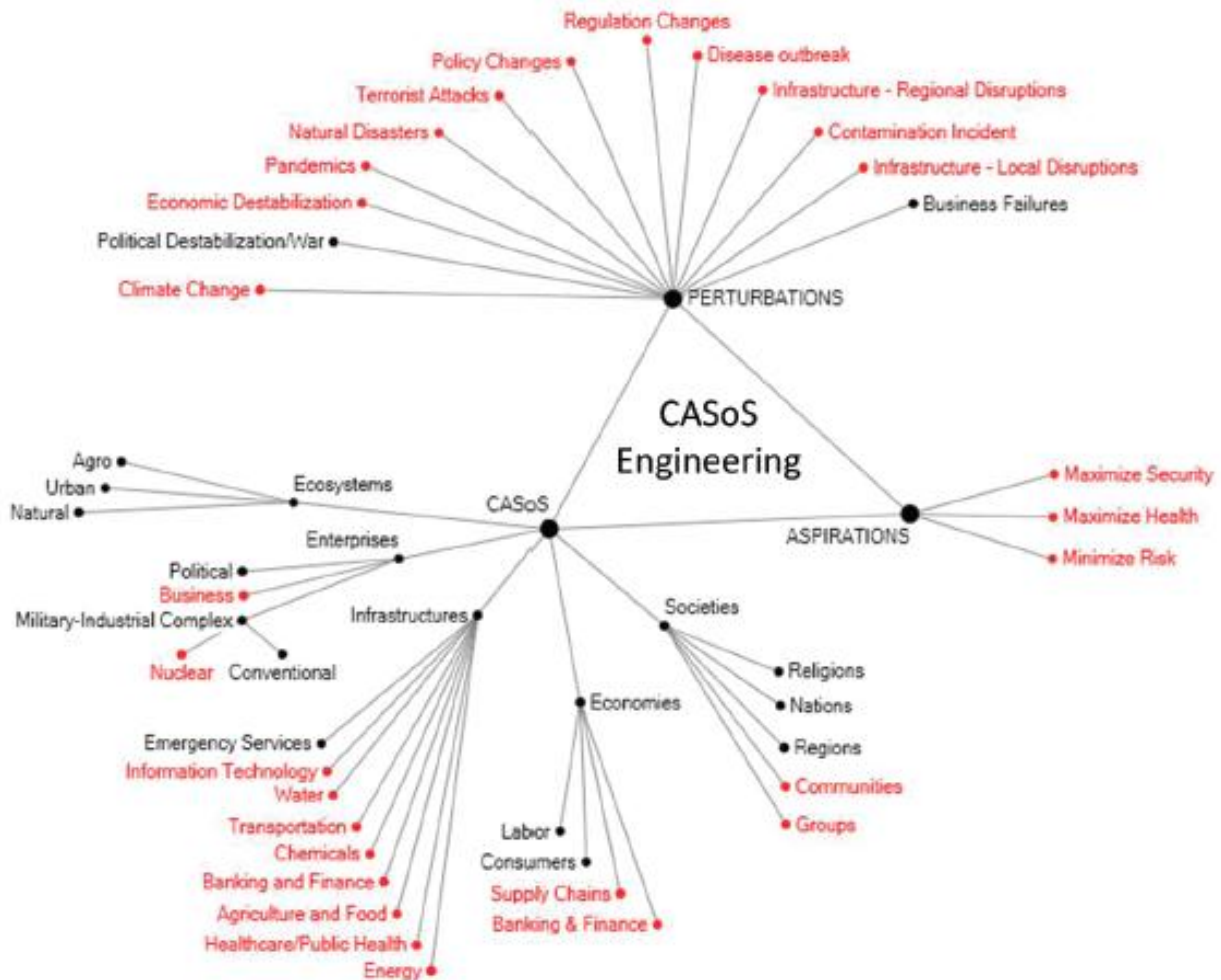
سامانه‌های انطباقی پیچیده مهندسی سامانه‌ها

ابتکار عمل آزمایشگاه ملی سانديا توسعه یک چارچوب مهندسی برای حل مسائل پیچیده بزرگ بوده است که سامانه‌های فیزیکی، اجتماعی و فنی را که سامانه‌های انطباقی پیچیده سامانه‌ها (CASoS) نامیده می‌شود را ترکیب می‌کند. CASoS در کل شامل زیرساخت‌های فیزیکی، دولت، مردم و اکوسامانه‌ها می‌باشد. این سامانه‌ها ماهیت‌های پیچیده، واقعی یا انتزاعی متشکل از سامانه‌ها هستند و به دلیل تعاملات درون سامانه یا محیط به مرور زمان تغییر می‌کنند (گلاس و همکاران، ۲۰۰۸). مهندسان CASoS، مجموعه‌ای از فرآیندهای تعاملی مشخص را برای حل مشکلات، بهره‌برداری از فرصت‌ها، دستیابی به اهداف یا پاسخگویی به سوالات با در نظر گرفتن گزینه‌ها، هزینه‌های در نظر گرفته شده و ناخواسته و مزایا، بی‌ثباتی‌ها، و اینکه چگونه سامانه برای بازدهی نتایج بهتر اصلاح شود را بکار می‌برند. ایجاد تغییرات در CASoS می‌تواند با استفاده از مدل‌های مفهومی، اندازه‌گیری‌های سامانه‌ای، طراحی مشاهده‌ای و تجربی، شناسایی الگوها، بررسی سیاست‌ها، فرآیندهای مهندسی، تعاریف مشکل زمان واقعی (به ویژه در زمان بحران) و ارتباط و ایجاد ظرفیت فکری مورد نیاز برای انجام مهندسی CASoS که بر برنامه‌های کاربردی متمرکز است انجام گیرد (گلاس و همکاران، ۲۰۰۸). چهارچوب CASoS، طراحی یک مدل محاسباتی بر حسب شرایط، اجرای مدل در یک محیط واقعی و بررسی اقدامات در هر مرحله برای اصلاح، انطباق و «عملکرد مناسب» در هر مرحله از عملیات را در بر می‌گیرد. این شکل دیاگرام ساده شده‌ای از عناصر است که در مهندسی CASoS بررسی می‌گردد.

با توجه به چنین سامانه‌هایی از رویکردهای سامانه‌ای، تیمی که طراحی، ساخت و مدیریت زیرساخت‌های زیرزمینی را انجام می‌دهد باید میان رشته‌ای باشد و تخصصی خاص، برای پاسخگویی به چالش‌های خاص نیاز خواهد بود (رجوع به پیوست C). به هر حال، لازم است که اعضای تیم به این درک برسند که چگونه هر مؤلفه پروژه بخشی از یک سامانه در میان سامانه‌هاست.

محورهای سیاسی، اقتصادی و رفتاری انسانی اثرگذار بر تصمیم‌گیری

خطوط نیرو، خیلی پیش‌تر در نیویورک در اواخر دهه ۱۸۰۰ مدفون می‌شدند (Schewe, ۲۰۰۷) اما خطوط برق هوایی هنوز در شهرهای سراسر ایالات متحده معمول و مرسوم می‌باشد. چه عواملی پذیرش زیرزمینی زیرساخت‌ها را سبب می‌شود؟ در قرن گذشته، پذیرش نصب صنایع همگانی زیرزمینی بر اساس ترکیبی از موضوعات زیست‌محیطی، هزینه‌ای و عملکردی بوده است. عملکرد بلندمدت تسهیلات زیرزمینی هنوز باید اندازه‌گیری یا تعیین گردد، که منبع بی‌ثباتی و خطر پذیری‌های ناشناخته برای تصمیم‌گیرندگان را آشکار سازد. برآوردهای هزینه‌ای سودآوری سه‌گانه^۱ - آنالیزهایی از هزینه‌ها و مزایای اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی - برای تسهیلات زیرزمینی می‌تواند توجیهات متقاعدکننده‌ای را برای نصب و راه‌اندازی زیرزمینی ارائه دهد اما تأثیرات مستقیم و غیر مستقیم برای طراحی درست مهندسی چرخه حیات باید بررسی گردد.



دیگرام، ساده شده توسعه یافته در آزمایشگاه‌های ملی ساندا از فضای کاربردی مهندسی CASoS که به صورت یک شبکه ساده است را نشان می‌دهد. این دیگرام نشان می‌دهد که چگونه مهندسی CASoS روابط CASoS، اهداف مهندسی (که آرمان‌ها نامیده می‌شوند) و عناصری که بر سامانه تأثیرگذارند (آشفتگی‌ها) را بررسی می‌کند. موارد با رنگ مشکی، برنامه‌های کاربردی موجود برای یک CASoS خاص را نشان می‌دهند و موارد با رنگ قرمز، برنامه‌های کاربردی در توسعه بیان را می‌کنند. منبع: گلاس و همکاران، ۲۰۱۱.

هزینه‌های بالاتر نصب صنایع همگانی زیرزمینی ممکن است از جذابیت زیرزمین برای بخش خصوصی بکاهد. ذی‌نفعان دولتی غالباً پذیرش متنوعی نسبت به نصب و راه‌اندازی زیرزمین دارند که گاهی بستگی به روابط آنها با تأمین‌کنندگان صنایع همگانی دارد. چشم‌انداز بلندمدت تصمیم‌گیرندگان جامعه نقشی در پذیرش خدمات زیرزمین ایفا می‌کند. تصمیم به مدفون

^۱ TBL

کردن صنایع همگانی بهترین کار بر اساس هزینه‌های واقعی و تجربه است تا اینکه آیا ذی‌نفعان تسهیلات زیرزمین را «دوست دارند». پیشرفت‌های فناورانه در فرآیندهای نصب زیرزمینی و مانیتورینگ سامانه، و در توسعه کوریدورهای صنایع همگانی زیرزمینی مقرون به صرفه (که صنایع همگانی گوناگونی چون آب، فاضلاب، برق و مخابرات را در خود جای می‌دهند) مزایا و انگیزه برای قرار دادن صنایع همگانی در زیرزمین را ایجاد می‌کند.

تصمیم‌گیری‌های مربوط به جایابی سامانه‌های بزرگ حمل و نقل اغلب در میان مردم با مقایسه منافع، صورت می‌گیرد. دیدگاه‌های سیاسی، اولویت‌های سبک زندگی جامعه، و منافع تجاری در طراحی و قراردادهای ساخت‌وساز بر تصمیم‌گیری در بسیاری از جوامع ایالات متحده تأثیر گذارند. وقفه و بی‌نظمی‌های مربوط به ساخت و عملیات و تأثیر پروژه‌ها بر مالیات می‌تواند مانع از پذیرش عمومی برای نصب تأسیسات زیرزمینی گردد. همچنین ممکن است مردم دچار نگرانی و ترس درباره امنیت شوند که سامانه‌های حمل و نقل عمومی امکان دسترسی شمار زیادی از افراد ناشناس به یک محله را فراهم می‌کنند.

مقامات ایالتی ممکن است که در مورد «موفقیت» یک پروژه نگرانی‌هایی داشته باشند - اینکه هزینه اصلی فراتر از حد رود و مسائل مربوط به ساخت محدود گردند و اینکه مردم اذعان دارند که زیرساخت به پایان رسیده، یک سرمایه‌گذاری عاقلانه بوده است. برای برخی سیاستمداران مهم است که اتمام کار موفقیت‌آمیز پیش از دوره بعدی انتخابات صورت گیرد تا اعتباری برای موفقیت مقامات مسئول کسب شود. تجربیات منفی و مثبت دیگر شهرها بر اینکه چگونه هزینه‌ها و ریسک‌های گزینه‌های طراحی، پذیرفته می‌شوند تأثیر گذارند. متأسفانه، ارزیابی‌های تکمیلی جامع اندکی از سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی بزرگ با داده‌های مناسب، برای تحلیل‌های سه گانه هزینه سودآوری^۷ وجود دارد. بدون چنین اطلاعاتی ممکن است تمرکز بسیار زیادی بر هزینه اولیه و تمرکز بسیار اندک بر عملکرد بلندمدت و مزایای شهری قرار گیرد.

تصمیم‌گیری برای قرار دادن سامانه‌های فنی مانند تسهیلات وابسته به انرژی، جاده‌ها و خطوط راه‌آهن، مراکز خرید، تأسیسات آبرسانی و تصفیه فاضلاب در زیرزمین؛ غالباً در وهله اول، بر اساس اطلاعات فنی مرتبط با ملاحظات عملیاتی و زیست‌محیطی و ملاحظات مربوط به ایمنی، بهداشتی، پیشگیری از فاجعه، کاربری زمین و هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد. تجربه اسکاندیناوی به طور نمونه با کارخانه‌های تصفیه فاضلاب زیرزمینی و تسهیلات برق آبی منجر به این شد که زیرساخت‌های زیرزمینی برای مردم، شرکت‌های خدمات رسانی همگانی و ذی‌نفعان دولتی یک اولویت بسیار خوب باشد که توسط محیط‌های آب و هوایی، توپوگرافی و زمین‌شناسی ایجاد می‌شود (پارکر، ۲۰۰۴). تلاش‌های آمریکا برای توسعه تسهیلات زیرزمینی در مقایسه، ناچیز و مختصر می‌باشد؛ اتخاذ رویکردهای جدید، اغلب توسط کنترل‌های اداری، دستورالعمل‌های طراحی، کدهای روش کار و شیوه‌های کار موجود سرکوب می‌شود (NRC, ۲۰۱۱).

تحلیل سامانه اتیک شبکه‌های تصمیم‌گیرندگان و اینکه چگونه جریان اطلاعات از طریق شبکه‌ها تصمیم‌گیری را تسهیل یا مانع آن می‌شود، ابزاری قدرتمند و روشنگرانه‌ای می‌تواند باشد اگر به درستی استفاده گردد (مثلاً باتس، ۲۰۰۹). نظر به اینکه شمار ذی‌نفعان خاطر نشان می‌کند که وب شبکه‌ها در صورت تحلیل سامانه شهری پیچیده می‌باشد، حتی شبکه‌های پیچیده هم در شکل‌گیری و فعالیتشان تصادفی و بی‌نقشه نیستند و برای تأثیر گذاشتن بر تصمیم‌گیری، بررسی می‌شوند. آلبرت و باراباسی (۲۰۰۲) مکانیزم‌های آماری و دینامیک شبکه‌ها را تشریح می‌کنند که در یک زمان تصادفی به نظر رسیدند، و واتس (۲۰۰۴) یافته‌ها در باره شبکه‌ها، سازمان‌های شبکه‌ای و دینامیک جمعی در درون شبکه‌ها را جمع‌بندی می‌کند که می‌توانند، در میان سایر مسائل، به اشاعه اطلاعات پروبال یا مانع از آن گردند. ادبیات و تحلیل‌های محاسباتی گسترده‌ای از سامانه‌های اجتماعی - فنی پیچیده مشابه وجود دارد که در این مبحث بکار می‌روند. برای مثال کارلی و سایرین (۲۰۰۹) فناوری‌های تحلیل کمی، را برای تعیین اینکه چگونه یادگیری در شبکه‌هایی که منجر به تغییر می‌شوند صورت می‌گیرد بکار گرفتند و

^۷ TBL

کاتالدو و همکاران (۲۰۰۸) مدل سازی را بررسی کردند که چگونه سایر انواع تصمیمات مهندسی نرم افزار تصمیمات مهندسی نرم افزار را محدود می نماید و نیاز به اقدامات هماهنگ را پدید می آورد.

به دلیل این مبحث، شبکه ها به دو دسته ساده می شوند:

(۱) شبکه های فنی درگیر در طراحی، ساخت، عملیات و تعمیر و نگهداری فضای زیرزمینی و (۲) شبکه های نظام مند سازمان های دولتی، نهادهای بخش خصوصی و گروه های اجتماعی که هزینه ساخت را پرداخت می نمایند، وقفه و اختلال در کار را متحمل می شوند و از تسهیلات زیرزمینی تکمیل شده بهره می جویند. تصمیم گیری ایده ال با تعامل و ارتباط مستمر میان این دو شبکه در جریان تمامی فازهای چرخه حیات زیرساخت صورت می گیرد. شناسایی نوع مناسب اطلاعات برای به اشتراک گذاری با کارگزاران مناسب در شبکه های مناسب به منظور تسهیل تغییراتی که پایداری را افزایش می دهند دشوار می باشد و روش شناسی منحصر به فردی وجود ندارد که در تمام سامانه های شهری و یا احتمالاً در یک سامانه شهری واحد با توجه به طبیعت منحصر به فرد و دینامیکی شبکه ها به مرور زمان کار کند.

حمایت پایدار از سرمایه گذاری در زیرساخت ها نیاز به این شناخت دارد که چگونه مطبوعات و مردم به پروژه و اقدامات مرتبط پی می برند و چگونه اطلاعات به آنها انتقال می یابد. همچنین تعهد رهبری سیاسی برای مدت زمان ساخت پروژه، عملیات و نگهداری لازم و ضروری است. رضایت مندی عمومی از سرمایه گذاری در زیرساخت ها نیازمند ارتباطات شفاف، از جمله بازنمایی دقیق از ارزش و خطرات سرمایه گذاری است مانند آنچه که به هزینه های پروژه و برنامه ریزی مربوط می گردد. موانعی که حمایت عمومی را برای تصمیمات سرمایه گذاری تداوم می بخشند، منجر به تعهد بیش از حد در طراحی، تحلیل و ساخت برای دستیابی به پروژه های در جریان می شود.^۸ امکان توسعه و استفاده از ابزارها برای بالا بردن آگاهی جمعی، در ارتباط با مزایا و هزینه های مرتبط با زیرساخت های زیرزمینی وجود دارد. برای مثال، پایگاه داده های ژئوتکنیکی برای جوامع مختلفی در سرتاسر جهان توسعه یافته اند که می توانند روابط بین زیرساخت های ساخته شده و محیط زمین شناختی را به لحاظ بصری نشان دهند (ریوز، ۲۰۱۰؛ تامپسون، ۲۰۱۰). این موارد می توانند برای اهداف آموزشی و برنامه ریزی بکار روند. همانگونه که در فصل ۵ بیشتر بررسی می گردد، ارزیابی مقایسه ای پایداری، برای گزینه های کاربری فضای زیرزمینی و سطحی نیاز به این دارد که داده های کافی و مناسب و نمونه های موردی، مستند شوند. به طوری که کل چرخه حیات و اثرات سه گانه هزینه سودآوری گزینه های رقابتی را بتوان ارزیابی نمود.

مقبولیت تأسیسات زیرزمینی صنعتی، اقتصادی و سازمانی در نظر کاربران

تسهیلات سازمانی، تجاری و صنعتی زیرزمینی به نحو متفاوت تری توسط کسانی که مدت زمان طولانی در این تسهیلات کار یا کارگذارند نگرینده می شود تا کسانی که این امکانات را برای استفاده کوتاه مدت تری بر می گزینند. کارگران خواستار فضایی، به راحتی و امنیت تسهیلات رو زمینی، می باشند. عدم دسترسی به نور طبیعی، تهویه و مبنای سنجش مکانی، (مثلاً یک چشم انداز) بیشتر اوقات یک نقص ذکر می شود (کارمودی استرلینگ، ۱۹۹۳). از این رو، پذیرش گارگر به اینکه تا چه حد تأسیسات در زیرزمین یا بدون پنجره و نوع محیط مورد انتظار کارشان، در یک مرکز معمولی بستگی دارد. از طرف دیگر، پذیرش کاربر پیرامون مفاهیم، سهولت دسترسی و ایمنی به علاوه راحتی سیر می کند. هم کارگران و هم کاربران به شدت تحت تأثیر کیفیت طراحی، نگهداری، عملیات و امنیت قرار می گیرند. پذیرش سهامدار خصوصی و عمومی به شدت متأثر از موقعیت مکانی و طراحی است - مثلاً، آیا قرار گرفتن کل یا بخشی از یک سازه در زیرزمین ویژگی های آن را در آن مکان

۸. برای مثال، پروژه چند بیلیون دلاری «استات گارت ۲۱» در آلمان مخالفت های زیادی را توسط کسانی که معتقد بودند بسیار جاه طلبانه و گران است در پی داشته است.

افزایش می‌دهد؟ اگر چنین است، پس هزینه‌ها و نگرانی‌های کاربر در برابر مزایای ساخت آن مرکز در آن مکان سنگین می‌شود. برای مثال، هتل‌ها در منطقه واشنگتن دی سی اغلب چندین طبقه در زیرزمین برای پارکینگ، میتینگ و سالن رقص قرار می‌دهند. محدودیت‌های معماری ارتفاع در منطقه D.C. دلالت بر این دارد که فضای «پنجره‌دار» در بالای زمین بسیار گران‌بها و کمیاب است. توسعه فضای زیرزمینی نتیجه کدهای مربوط به فضا و محیط می‌باشد تا از محیط زیست روی زمین محافظت کند. محیط زیست، مردم را به سوی آن منطقه جلب می‌کند و فضای زیرزمینی امن و با طراحی مناسب استفاده از آن را به دنبال دارد. (کادر ۲،۲).

نیروهای محرک

ارزیابی اینکه چه نیروهای محرکی در پیشبرد یا توقف توسعه و استفاده از تسهیلات زیرزمینی مهمترین می‌باشند کار دشواری است. بزرگ‌ترین مناطق شهری در ایالات متحده و در سرتاسر دنیا، رشد تسهیلات زیرزمینی در همان حال که توسعه شهری افزایش می‌یابد را نشان می‌دهند. در این خصوص، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که هیچ سیاست یا محرک خاصی در فضا و محیط نیاز نیست تا سبب توسعه زیرزمین گردد این امر به عنوان نتیجه طبیعی کاربری زمین، فشارهای زیست‌محیطی و نیاز به بهبود خدمات همگانی و حمل و نقل برای یک شهر در حال رشد، اتفاق می‌افتد. نقطه ضعف این رویکرد، اقتصاد آزاد توسعه بی‌برنامه زیرزمین، پروژه به پروژه، می‌باشد، حتی زمانی که در این اصل که استفاده‌های گسترده از فضای زیرزمینی بعدها پیش خواهد آمد به خوبی قابل درک باشد. این بخش، برخی محرک‌هایی که محیط‌های زیرزمینی منظم و گسترده را ارتقا می‌دهند و یا مانع آن می‌گردند را بررسی می‌نماید.

برنامه‌ریزان شهری ممکن است که شهر را تنها از دو بعد در نظر بگیرند (با استفاده از کنترل ارتفاع یا نسبت‌های سطح زیربنا که برای کنترل ارتفاع ساختمان استفاده می‌شود) و اهمیت فضای زیرزمینی را در مناطق اصلی شهری نادیده می‌گیرند. بدون سازمان‌های دولتی یا مأموریت شهری با مسئولیت فراگیر برای آماده‌سازی زیرساخت‌های شهری، سازمان‌های مجزا به طور مستقل به مسائل مرتبط با حمل و نقل، مسکن و شهرسازی، امنیت کشور و انرژی می‌پردازند. اگر چه احکام فردی این سازمان‌ها با اهمیت است، عدم وجود یک رویکرد مشترک برای ارائه صنایع همگانی زیرزمینی و برنامه‌ریزی شهری این قضیه احساس می‌گردد. مکانیزم تأمین مالی برای پروژه‌ها یا تحقیقات تمایل به تمرکز بر مشکلات یا راه‌های خاص، بدون در نظر گرفتن اینکه آن راه حل چگونه بر این سامانه در میان سامانه‌ها در کوتاه مدت و بلندمدت تأثیر می‌گذارد دارد. رکود اقتصادی محلی یا ملی که سرمایه‌گذاری در تسهیلات عمومی را کمتر ضروری و مقرون به صرفه می‌سازد مشکل را تشدید می‌کند، آن-چنان که هزینه‌های بالای ابتدایی توسعه پروژه‌های زیرزمینی و بازه‌های زمانی طولانی را تا قبل از تکمیل پروژه انجام می‌دهند. برداشتهای منفی در مورد فضاهای داخلی تسهیلات زیرزمینی، طرح‌بندی‌های گیج‌کننده و فقدان مرجعی برای علامت‌های سطحی که مانع از مسیریابی آسان می‌گردد و نگرانی‌ها در خصوص امنیت شخصی با این باور که طراحی و عملیات ضعیفی درباره تسهیلات زیرزمینی انجام گردیده است، حمایت عمومی از زیرساخت‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهد.

کادر ۲-۲

گالری آرتورام ساکلو و موزه ملی هنرهای آفریقا، مؤسسه اسمیتسونیان، واشنگتن، دی سی.

گالری آرتورام ساکلو (موزه هنرهای آسیا) و موزه ملی هنرهای آفریقا در زیرزمین مؤسسه اسمیتسونیان واشنگتن دی سی در محوطه مجاور به «قلعه» اسمیتسونیان در مرکز خرید ملی قرار دارند. عملکرد آن به خوبی با یک سازه زیرزمینی سازگار و متناسب است - ظاهر ساختمان شمایل اسمیتسونیان حفظ شده است، هیچ فضای بازی در مرکز خرید ملی پوشش داده نمی‌شود و کارکنان موزه پیش از این عادت به کار در ساختمان‌های بدون پنجره روزمینی را داشته‌اند. کیفیت بالای طراحی و فضاهای جالب گالری، محیط جذابی را برای عموم ارائه می‌نماید. این تصویر، استفاده از طراحی فضا، هنر و روشنایی طبیعی برای خلق یک محیط دراماتیک و دلپذیر را نشان می‌دهد.



مجسمه‌ای که توسط خو بینگ ساخته شد و از هر چهار طبقه گالری آرتورام ساکلو در فضایی با طراحی زیبا که استفاده هوشمندانه از نورگیرهای سقفی و نور مصنوعی را ممکن می‌سازد قابل مشاهده می‌باشد. این مجسمه چنانکه دیده می‌شود از بالای چهار طبقه به پایین می‌نگرد. توجه داشته باشید که آبما در پایین مجسمه نور طبیعی را از نورگیر سقفی چهار طبقه بالاتر انعکاس می‌دهد.

با این همه، نمونه‌های بسیاری از پروژه‌های زیرساختی زیرزمینی موفق وجود دارد که منتج به جوامع پایدارتر می‌گردد. توسعه برخی از این موارد، توسط ساختارهای حکومتی و سامانه‌های در جا در این مکانها بسیار متفاوت از آنچه که در ایالات متحده هست تسهیل می‌گردد. سیاست‌های قوی برای ارائه زیرساخت‌های جدید که همراه با کنترل‌های اداری قوی برای اجرای پروژه مثلاً در چین می‌باشد لزوماً قابل اجرا در ایالات متحده نیست. سیاست‌هایی که نیاز به برنامه‌ریزی بلندمدت مؤثر برای کاربری فضای

زیرزمینی دارند و آن را تسهیل می‌بخشند، چنان‌که در مکان‌هایی چون سنگاپور یا هلسینکی، فنلاند، یافت می‌شود، به این مکان‌ها کمک می‌کنند تا نزدیکتر به اهداف پایداری حرکت کنند. سیاست‌هایی که حفظ فضای زیرزمین را تقویت می‌کنند در حالی که امکان گسترش امکانات در زیرزمین را فراهم می‌آورند، یک دلیل برای انتقال زیرساخت‌های بیشتر به زیرزمین ارائه می‌دهند که در آن دیگر دلایل و محرکها وجود ندارند. این سیاست‌ها عبارتند از محدودیت‌های ارتفاع ساختمان همراه با ممانعت فضای زیرزمین از محدوده زیربنا، و یا ممنوعیت خدمات همگانی هوایی. سیاست‌هایی که امکان مسیر آسان عناصر زیرساختی را در عمق زیرزمین‌های خصوصی افزایش می‌دهند، مانند اقدامات ویژه ژاپن برای استفاده عمومی از زیرزمین عمیق (Act no. ۸۷ of ۲۰۰۳, see Konda, ۲۰۰۳) که به سازمان‌های دولتی حقوق مقدماتی را برای توسعه فضای زیرزمین عمیق می‌دهند، به جلوگیری از برخی موانع قانونی برای توسعه گسترده‌تر، چند منظوره‌تر و سریع‌تر کمک می‌نمایند.

مهندسی و ساخت‌وساز زیرزمین پرهزینه، و هزینه‌های ساخت عموماً بیشتر از هزینه‌های زیرساخت سطحی می‌باشد. به هر حال، ارزیابی کامل هزینه‌ها و مزایای چرخه حیات (رجوع به فصل ۵) صاحبان و برنامه‌ریزان را متقاعد می‌سازد که سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر، سرمایه‌گذاری بهتری است. تغییرات در سیاست همانگونه که قبلاً بیان شد می‌تواند منجر به برخی هزینه‌های پایین‌تر گردد مثلاً با ساده کردن برخی فرآیندهای وقت‌گیر مرتبط با مجوز و حقوق راه، دیگر محرک‌های اقتصادی در طبعت عملی‌تر و مناسب‌تر می‌باشند. نواحی شهری و توسعه اقتصادی، امکانات و خدمات جدیدی را می‌طلبند، اما ممکن است سطح زمین با توجه به افزایش تراکم توسعه شهری فراهم نباشد. با این همه، دیگر محرک‌ها ممکن است رفتاری انسانی داشته باشند مثلاً: اصرار عموم برای یک محیط سطحی بهتر و سرویس‌های خصوصی و عمومی پیشرفته‌تر و بهتر، آگاهی بیشتر از رویکردهای کیفیت زندگی مطرح در شهرهای گوناگون و یا تقاضا یا پاسخ به کیفیت طراحی بهتر در تسهیلات زیرزمینی و یکپارچگی بهتر با سطح که دیدگاه‌های منفی در مورد فضای زیرزمینی را از میان می‌برد.

شرایط و محرک‌های متعدد، پذیرش و توسعه زیرزمین را سرعت و یا متوقف می‌سازند. در خصوص مسائل مربوط به دیدگاه‌های مشاهده شده منفی و راحتی در زیرزمین در فصل ۴ بیشتر بحث می‌شود، برای ارزیابی بهتر هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در فصل ۵ تبادل نظر می‌گردد و فن‌آوری‌های پیشرفته‌ای که امکان درک بهتر از خطر پذیری‌های عملیاتی و ساخت که هزینه‌ها را افزایش می‌دهند فراهم می‌کنند در فصل ۶ بررسی می‌گردند. یک رویکرد جدید برای برنامه‌ریزی و مدیریت زیرساخت که تلاش‌های مهندسی زیرزمین را برای توسعه پایدار ارج می‌نهد با نتیجه‌گیری‌های کمیته مذکور در فصل ۷ پیشنهاد می‌شود.

بهتر است که فضای زیرزمینی به عنوان یک جایگزین جهانی برای سطح در نظر گرفته نشود - که نیست - بلکه تا حدودی بررسی‌های مناسب و مقتضی از زیرزمین با توجه به آینده درازمدت و پایداری یک منطقه شهری انجام گردد. مهم است که گزینه‌های توسعه زیرزمینی آینده توسط کاربری‌های پیشین بدون برنامه یا نامناسب از بین نروند، که سیاست‌ها و ساختارهای اداری راهنمایی درست را ارائه دهند، و عموم مردم به طور کامل به توسعه چشم‌انداز بلندمدت جامعه، استانداردهای جامعه و انتظارات جامعه خود بپردازند با توجه به اینکه تسهیلات زیرزمینی چگونه به آن جامعه خدمت می‌نماید.

وابستگی‌های متقابل بین سامانه‌ها

همانگونه که کاربری فضای زیرزمینی پیچیده‌تر می‌گردد، بدیهی است که توجه مناسب به اثر متقابل میان سطح و زیرزمین در جریان تمامی فازهای چرخه حیات زیرساخت، امری ضروری است. نمونه‌هایی از اثرات بسیار منفی مدیریت ضعیف زیرساخت‌های سطحی یا زیرزمینی در سرتاسر این گزارش ارائه می‌گردد، لیکن به منظور بیان این نکته نمی‌باشد که چنین مسئله‌ای در روال مهندسی یک قاعده است. برای نمونه، کادر ۲،۳، اثرات گسیختگی سازه باربر در فضای زیرزمینی را در خلال ساخت بیان می‌نماید که تسهیلات سطحی را به خطر می‌اندازد. در حین ساخت، غالباً زیرساخت‌ها به گسیختگی سازه‌های

حساس ترند زیرا تا اتمام ساخت، خاک به طور کامل تثبیت نمی‌گردد. ثبات زیرساخت‌های سطحی به ثبات زیر سطح، بستگی دارد. وابستگی‌های متعدد دیگر، کمتر به چشم می‌خورند. بسیاری از این وابستگی‌ها ممکن است به طور جدی برای امنیت ملی مهم و با اهمیت محسوب گردند.

کمیسیون ریاست جمهوری در حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی؛ سامانه‌های زیرساختی را برای کشور ما اساسی و حیاتی دانست (PPCCIP, ۱۹۹۷) و با نگاه آینده‌نگرانه به زیرساخت‌های حیاتی، آنها را به عنوان موضوع اقدامات برنامه‌ریزی شده برای حفاظت دارایی‌ها از آسیب و یا تخریب تعیین می‌کند. پایداری ملت ما و روش زندگی بسته، به خدمات مستمر و بدون وقفه این سامانه‌های زیرساختی می‌باشد. بیش از یک دهه بعد و پس از حملات ۱۱ سپتامبر، ۲۰۰۱ (۱۱/۹)، فهرست زیرساخت‌های حیاتی که توسط PCCIP تعریف شده بودند هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد (NRC, ۲۰۰۲) اما با فوریت بیشتر و احتساب مسائل، خطرات و سطوح حفاظتی بیشتر. به دلیل حوادث ۱۱ سپتامبر و روزهای طولانی قطعی اساسی برق منطقه‌ای (به طور نمونه، رجوع کنید به Minkel, ۲۰۰۸)، وابستگی متقابل سامانه‌های زیرساختی به صورت یک نگرانی ملی برجسته گردیده است.

کادر ۲-۳

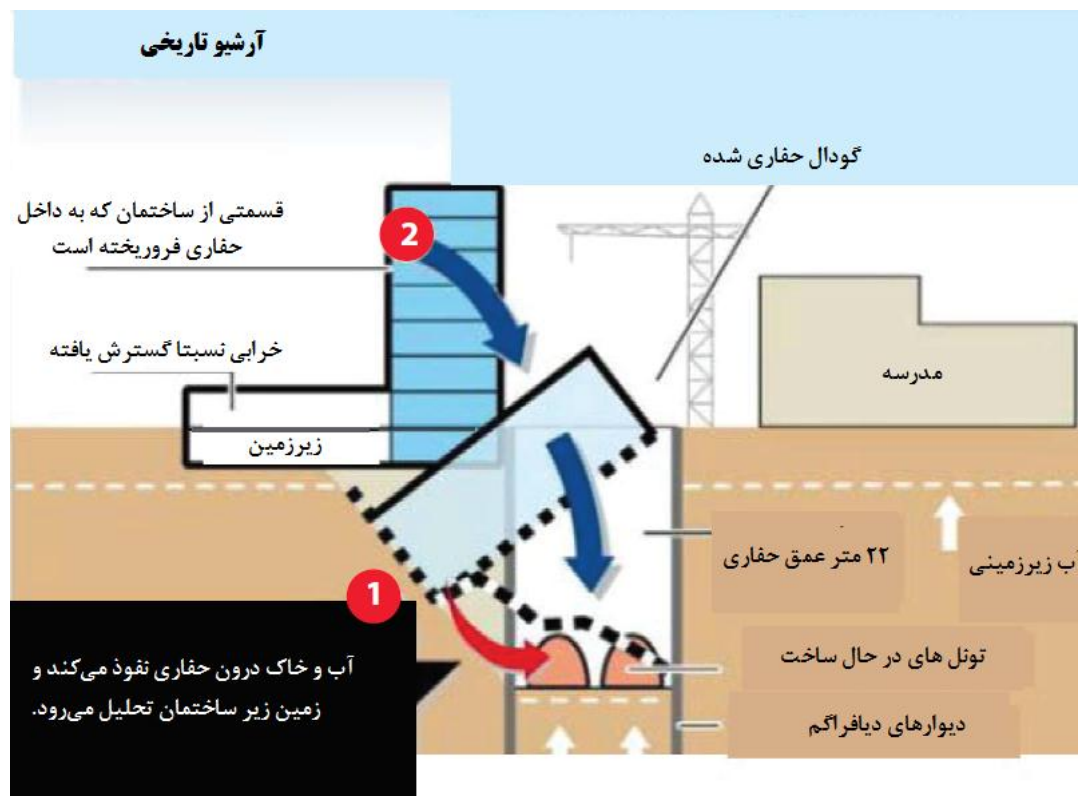
خرابی یک خط مترو در کلن، آلمان، ۲۰۰۹

ساخت خط متروی ۳٫۸ کیلومتری شمال-جنوب کلن آلمان (با تونل‌هایی برای هفت ایستگاه زیرزمینی) در سال ۲۰۰۴ آغاز گردید و در تابستان ۲۰۰۸ به پایان رسید. ساخت ایستگاه‌ها، دو شافت اضطراری و یک خروجی زیرزمینی (با عمق ۲۸ متر) شامل استفاده از روش‌های حفاری روباز و معدن کاری با انجماد زمین می‌باشد. در سوم مارچ ۲۰۰۹، ساختمان آرشو تاریخی هفت طبقه کلن (پنج طبقه روی زمین و دو طبقه زیرزمین) واقع در کنار حفره روباز راه خروجی زیرزمینی به همراه ساختمان‌های اطراف از جمله خانه‌های واقع در دو طرف آن فرو ریخت (رجوع به شکل ۱). به دلیل هجوم آب‌های زیرزمینی و مواد زمینی، این ریزش منتج به تلفات جانی و آسیب‌های گسترده در سوابق تاریخی حجیم و ارزشمند شهر کلن، مناطق اطراف و آلمان گردید (هاک، ۲۰۰۹؛ رجوع به شکل ۲). آوار و خاک در ساختمان انباشت گردید و سقف فولادی موقت و سامانه آب زدایی تخریب شد، بتن ترک برداشت و خاک اطراف سست و جابجا گردید. گمانه زنی‌هایی وجود دارد که این ریزش به دلیل تفکیک محلی ناشی از حذف خاک توسط سامانه آبیگری و یا گسیختگی سازه دیوار دیافراگم بوده است (ماندرفلد، ۲۰۱۰).



ریزش ساختمان‌های متعدد که از ریزش حفاری ناشی شده است.

دو نفر در خانه‌های فرو ریخته جان دادند، چهل و پنج نفر دیگر (۳۰ نفر در ساختمان آرشیو و ۱۵ نفر از ساکنان) نجات یافتند (هاک، ۲۰۰۹). خشم عمومی و تهدیدی که مردم خشمگین برای رهاسازی کل پروژه داشتند، گمانه زنی‌های بسیار در مورد آنچه که رخ داد و «جای خالی جزئیات رسمی» پس از حادثه گزارش شد (والیس، ۲۰۰۹). پاسخ‌های سیاسی اولیه این بود که نقشه ساخت در کلن (یا در هر شهر مملو از ساختمان) نباید مورد تائید قرار می‌گرفته است (هاک، ۲۰۰۹). بر طبق گزارش مهندسی سپتامبر ۲۰۱۰، دلیل آن هنوز در دفتر دادستان عمومی مورد تحقیق و تفحص می‌باشد. کارشناسان مستقل که توسط دادگاه معرفی شدند، در حال بررسی حادثه می‌باشند (مندرفلد، ۲۰۱۰). بازتاب حادثه کلن به آمستردام هم رسید جایی که در آن یک خط مترو در حال طرح‌ریزی برای منطقه‌ای با همان ویژگی‌های زمین‌شناسی بود. دو مرتبه در سال ۲۰۰۸، خرابی ناشی از نشت در دیوار بتنی حفره ساخت برای یک ایستگاه جدید مترو در گودال ملات آمستردام وجود داشت و در نتیجه، خانه‌های نساجی قرن هفدهم در همسایگی آن دچار آب گرفتگی و نامناسب برای زندگی شد (ون اوترن، ۲۰۰۹).



دیاگرام علت فرضی حادثه

شاید تا اندازه‌ای به دلیل توجه به حملات یازده سپتامبر، شبکه‌های زیرساخت حیاتی در حال حاضر به صورت سامانه‌های وابسته قلمداد گردند (NRC, ۲۰۰۲). آنها شامل سامانه‌هایی هستند که آب قابل شرب، جمع‌آوری و دفع فاضلاب و رواناب، برق، توزیع سوخت، مخابرات و اتصال به تلویزیون دیجیتال و اینترنت و ارتباطات (مانند در مدار قرار دادن وسایل ماهواره‌ای) و همچنین سامانه‌های حمل و نقل نظیر جاده‌ها، بزرگراه‌ها، تونل‌ها، تسهیلات ترانزیتی و ریلی و فرودگاه‌ها و بنادر (پیرنوم، ۲۰۰۱) را ارائه می‌دهند. دیگر سامانه‌های زیرساختی نیز خدمات اضطراری، فضای کار و زندگی، کلیسا و محل اجتماع، بیمارستان و مدرسه، پارک و مکان‌های تفریحی، فضاهای باز و دیگر

امکانات را فراهم می‌سازند (NRC, ۲۰۰۲).

به عنوان سامانه، آنها تا حدودی با پیچیدگی این واقعیت روبرو هستند که به افراد، شرکا و شرکت‌های متعدد، و دولت‌های محلی، ایالتی و ملی تعلق و نظارت می‌گردند. این مدل پیچیده مالکیت، منجر به سردرگمی در مورد مثلاً تعهد بودجه و انجام بازرسی‌های ضروری دوره‌ای، نگهداری و تعمیر عناصر یا سامانه‌های مجزای زیرساختی می‌شود. هیچ درک روشن و یا یکپارچه‌ای از اینکه چه کسی چه کاری را تحت چه الگو و بودجه‌ای و تحت چه شرایطی انجام دهد وجود ندارد.

خرابی آبشاری سامانه‌ها

وابستگی متقابل در میان سامانه‌های زیرساختی غالباً به طور کامل قابل درک نیست (لیتل، ۲۰۰۵). شکست و گسیختگی در یک عنصر از یک سامانه می‌تواند منجر به ایجاد اختلال در یک یا بسیاری از سامانه‌های دیگر شود و نقص در سامانه‌های زیرزمینی می‌تواند در نتیجه گسیختگی سامانه‌های روی سطح به وجود آید. اختلالات ممکن است به شهرها، ایالات و کشورهای دیگر کشانده شوند. برای مثال، خرابی آبشاری زیرساخت‌های زیرزمینی وابسته به هم در نتیجه حملات یازده سپتامبر به زیرساخت‌های سطحی در نیویورک رسید. جریان‌های اصلی آب به سمت تونل‌های ریلی یک ایستگاه پر رفت و آمد و یک وسیله‌ای که تمام کابل‌ها را برای آنچه که از آن به عنوان بزرگ‌ترین گره مخابراتی جهان یاد شده است در خود جای می‌دهد سرازیر شد. معاملات در بورس اوراق بهادار نیویورک به مدت ۶ روز در نتیجه قطع زیرساخت‌های ارتباطی متوقف شد. بنابراین ثبات مالی بین‌المللی به قطع شدن اصلی آب در یک مکان وابسته بود (او رورک، ۲۰۰۷).

قطع سامانه‌های ارتباطی می‌تواند به قطع شدن‌های آبشاری نیروگاه‌ها، سامانه‌ها و تجهیزات الکتریکی بیانجامد. سامانه‌های الکتریکی اغلب اوقات از یک ایستگاه عملیات مرکزی از راه دور، توسط خطوط تلفن بی‌سیم یا استیجاری، اینترنت و یا توسط سامانه‌های کنترل نظارتی و گردآوری داده‌ها (SCADA) کنترل می‌شوند. سامانه‌های SCADA معمولاً از نرم افزارهای معماری باز بدون حفاظت امنیتی استفاده می‌کنند که آنها را نسبت به هکرها آسیب‌پذیر می‌سازد. دسترسی به یک سامانه SCADA می‌تواند شرایطی که منجر به ایجاد مشکلاتی در عملکرد سامانه از جمله اضافه باری یک شبکه انتقال می‌گردد را فراهم کند (NRC, ۲۰۰۲). سامانه‌های اسکادا (SCADA) همچنین می‌توانند دچار نقص شوند هنگامی که نیروی برق نوسان دارد و یا ناپایاست، همانگونه که به واسطه انفجار خط لوله گاز طبیعی در سال ۲۰۱۰ در سان برونو کالیفرنیا ثابت گردید (NTSBt ۲۰۱۱a).

نمونه دیگر قطعی‌های آبشاری زیرساخت‌های وابسته به هم در اگوست ۲۰۰۳ رخ داد. هنگامی که یک خط انتقال برق پربار خدمات اوهایو دچار نقص شد، که باعث تعطیلی بخشی از شبکه انتقال و سپس قطعی شبکه انتقال الکتریکی و در نتیجه قطع کامل برق هشت ایالت در شمال شرق ایالات متحده و جنوب شرق کانادا گردید. پنجاه میلیون نفر به مدت دو روز از برق محروم بودند (مینکل، ۲۰۰۸). کلیولند، اوهایو، برق لازم برای پمپاژ آب همگانی برای ۱٫۵ میلیون شهروند را در اختیار نداشت (لیتل، ۲۰۰۵)، و شرایط مشابه در جاهای دیگر نیز گزارش می‌شد. فقدان نیروی برق، کنترل ترافیک و روشنایی خیابان‌ها را مختل کرد، و حرکت در مسیرها و بزرگراه‌ها را به ویژه در شب خطر ساز نمود. اثرات قطع شدگی دور از دسترس بود. سردسازی مواد غذایی غیرممکن بود و نیاز به انجام اقدامات اضطراری مثلاً برای نگهداری ذخیره شیر کودکان بود (PSEPC, ۲۰۰۶). ایستگاه‌های خدماتی قادر به پمپاژ سوخت نبودند و مردم خودروهای خود را هر کجا که بنزین تمام می‌کردند رها می‌ساختند. اثرات آبشاری سریع در دیگر سرویس‌های حیاتی مشاهده می‌شد (مینکل، ۲۰۰۸).

قطع شدن‌های آبشاری زیرساخت‌های وابسته به هم، زمانی به وجود می‌آید که زیرساخت‌های زیرزمینی موجود به واسطه نصب و راه‌اندازی و یا تعمیر دیگر خدمات مختل می‌شوند. قوانین «تماس قبل از حفاری»^۹ برای کاهش این احتمال در

^۹ CBYD

بسیاری مناطق در محل قرار داده شده است. توجه بیشتری باید به سمت منابع مدفون در زیرزمین معطوف گردد که در بسیاری موارد درست در زیر سطح زمین قرار دارند. این به نفع صاحبان املاک و مدیران است که محل، شرایط و چگونگی تعمیر عناصر زیرساختی که در مستغلات آنها خدمت رسانی می‌کنند بشناسند. دولت‌های محلی تحت قوانین ایمنی و بهداشت عمومی با این فرض که بازرسی و نگهداری زیرساخت‌های تأسیساتی انجام می‌پذیرد و قابل استناد و دستیابی می‌باشد نقش مهمی ایفا می‌کنند. دولت‌های ایالتی نیز وظایف مشابه‌ای در قبال شبکه‌های برق، خطوط انتقال و سامانه‌های تأمین آب شرب دارند. روش‌های نقشه‌برداری تأسیسات زیرزمینی با نیروی کار کمتر، انجام و گزارش بازرسی‌های ضروری تأسیسات و آشنایی با پیامدهای ارتباطات داخلی آنها بر کاربران محلی می‌تواند منجر به رویکرد سامانه‌ای بهتری برای برنامه‌ریزی، ساخت، عملیات و نگهداری در درازمدت به منظور افزایش عمر زیرساخت‌های حیاتی و جلوگیری از قطعی‌های آبشاری سیستمی گردد. این کمیته تحقیق علمی، در این مناطق را پیشنهاد می‌کند که در فصل ۷ بیان می‌گردد.

عواقب برنامه‌ریزی ناقص

کمیته تحقیق با این فرض که توسعه پایدار وابسته به توان برنامه‌ریزان در بررسی نیازهای آینده است آغاز به کار کرد. عمر مفید زیرساخت‌های حیاتی بستگی به خدمتی که طی فرآیندهای طراحی و تعیین مصالح، منصوب و معین می‌گردد دارد. انتظار می‌رود که خدمات تأسیسات عمومی زیرخاکی به مدت ۵۰ سال، سازه‌ها و تونل‌های ترانزیت و فاضلاب نیز به مدت ۱۰۰ سال به فعالیت خود ادامه دهند. پیش‌بینی اینکه چگونه به بهترین وجه به عملکرد و حفظ بلندمدت زیرساخت‌ها کمک نماییم در حالی که رشد یا تغییر جمعیت، تغییر نیازهای زیرساختی و تکنولوژی‌های نوین را ملحوظ می‌داریم غالباً دشوار است؛ و به ویژه اینکه نیازهای اجتماعی زیرساخت‌ها در طول ۵۰ تا ۱۰۰ سال چه می‌باشد. روش‌های عملی برای تعیین باقی مانده عمر مفید تأسیسات و خدمات عمومی لازم و ضروری است.

بخش‌های آینده به مسائلی که از برنامه‌ریزی ضعیف یا ناقص نشئت می‌گیرند و اینکه چگونه این مسائل به مشکلات مربوط به زیرساخت‌های فرسوده و زیرسازی‌های ساختمانی ارتباط دارند می‌پردازد.

فرسودگی نه چندان دلپذیر همراه با افزایش تقاضا

تقریباً حدود ۷۶ میلیون نفر در ایالات متحده در آغاز قرن بیستم و حدود ۳۱۰ میلیون نفر در حال حاضر (اداره آمار آمریکا، ۲۰۱۲) وجود داشتند. اداره آمار ایالات متحده تخمین می‌زند جمعیت آمریکا به حدود ۴۳۹ میلیون نفر تا سال ۲۰۵۰ خواهد رسید (اداره آمار آمریکا، ۲۰۰۸) که ۴۲ درصد رشد را در ۴۰ سال آینده نشان می‌دهد. مردم ارائه کیفیت خاصی از زندگی را به واسطه زیرساخت‌های فیزیکی انتظار دارند و چنین رشدی، فشارهای مالی و فیزیکی را به منظور توسعه تمام سامانه‌های زیرساختی ایجاد خواهد نمود در حالی که به صورت همزمان روش‌های افزایش عمر مفید و اطمینان‌پذیری سامانه‌های موجود را مشخص می‌کنند. همانگونه که فن‌آوری‌ها تکامل می‌یابند و تکنولوژی‌های جدید به وجود می‌آیند و ارائه شان قابل پیش‌بینی می‌گردد، نیازهای متفاوت و حتی بیشتر به زیرساخت‌ها محتمل می‌باشد. وابستگی‌های متقابل زیرساخت‌ها احتمالاً حتی پیچیده‌تر هم می‌گردد و همچنانکه سامانه‌های زیرساختی فرسوده می‌گردند، آن سامانه در میان سامانه‌ها احتمالاً دارای اطمینان‌پذیری کمتری می‌شود و این سناریوی مناسبی برای پایداری نیست.

کادر ۲-۴

خرابی لوله اصلی آب

خرابی لوله ۶۶ اینچی بتنی پیش تنیده اصلی آب در سال ۲۰۰۸ منجر به گیر افتادن نه نفر در خوردروهایشان گردید در حالیکه حدود ۱۵۰۰۰۰ گالن آب در هر دقیقه به سمت یک خیابان اصلی نزدیک پوتوماک، مریلند، سرازیر می‌شد (مورس و شیور، ۲۰۰۸). این لوله که ۱۵ متر در زیر سطح زمین قرار داشت در سال ۱۹۶۴ مورد استفاده قرار گرفت. تحقیقات قانونی نشان داد که خوردگی لوله و تضعیف آن به دلیل نصب لوله به طور مستقیم بر روی سنگ بود (WSSC, ۲۰۰۹). آخرین بازرسی داخلی لوله مذکور در سال ۱۹۹۸ انجام شد اما بازرسی‌های داخلی به طور معمول خوردگی‌های شیمیایی خارجی را آشکار نمی‌کنند. یک حفره ۳۰ در ۵۰ فوتی توسط نیروی گسیختگی ایجاد شد، چندین درخت تنومند و یک تیر برق به زمین افتادند و بخشی از جاده تخریب شد. مدارس و راه‌های ناحیه موقتاً بسته شدند. در نتیجه این حادثه، سازمان مسئول بلافاصله یک برنامه نظارتی سریع و فعال برای بخش اعظم سامانه لوله کشی آب با قطر بزرگ پیاده کرد.

کادر ۲-۵

نقص در خط لوله سن برونو، کالیفرنیا، و کارمایکل، می‌سی‌سی‌پی

نقص اخیر خط لوله در سن برونو، کالیفرنیا، و کارمایکل، می‌سی‌سی‌پی، خطرپذیری غیر معمول اما قابل ملاحظه‌ای را نسبت به زیرساخت‌های سطحی به ویژه در مناطق پر جمعیت نشان داد. انفجار و آتش‌سوزی خط لوله گاز طبیعی سن برونو، کالیفرنیا، در سال ۲۰۱۰ خطرات بالقوه مرتبط با خط لوله زیرخاکی گاز را آشکار ساخت. خط لوله مذکور در سال ۱۹۵۶ در زیرزمین نصب شد که متعاقباً در یک محله مسکونی پر رونق بهره‌برداری شد. این خط لوله به یک سیستم SCADA اختصاصی برای کنترل جریان و فشار گاز تکیه دارد. هشت نفر به طرز خطرناکی آسیب دیدند و بیشتر از ۵۰ خانه در نتیجه انفجار لوله‌های فولادی گاز با قطر ۳۰ اینچ تخریب و یا از بین رفتند. گزارش اولیه کمیته ملی ایمنی حمل و نقل^{۱۰} حاکی از این بود که ترکیب ایجاد شده، نقص در عملکرد خط انتقال برق که سامانه SCADA را تغذیه می‌کند به دنبال دارد و باعث افزایش فشار بر خط مذکور می‌گردد (NTSB, ۲۰۱۱a). تمامی این عوامل بر یافتن روش‌های بهتر برای توسعه، عملکرد و نگهداری سامانه‌های زیرساختی ما تأکید دارند. در سال ۲۰۰۷، ترکیب خط لوله انتقال پروپان مایع در نواحی روستایی می‌سی‌سی‌پی بیش از ۱۰۰۰۰ بشکه (حدود ۴۳۰۰۰۰ گالن) پروپان را پخش نمود. پروپان پخش شده ابر گازی را تشکیل داد و مشتعل شد که یک توده آتشین را به وجود آورد و منتج به دو کشته، هفت مجروح و ویرانی چهار خانه گردید (NTSB, ۲۰۰۹). هفتاد جریب از مراتع و زمین‌های جنگلی در آتش سوختند و شرکت انتقال لوله ادعا کرد که خسارتی بالغ بر ۳ میلیون دلار متحمل گردیده است. NTSB مشخص کرد که در میان مسائل ایمنی گوناگون دست‌اندر کار در حادثه، ناکافی بودن مقررات و نظارت اعمال شده توسط شرکت انتقال خط لوله و اداره ایمنی مواد خطرناک در آموزش اپراتورهای لوله کشی و برنامه‌های توسعه‌ای پاسخ اضطراری وجود دارد (NTSB, ۲۰۰۹). چنین حوادثی تقریباً غیر معمول می‌باشند. NTSB ۱۷ حادثه خط لوله قابل توجه که در ۱۰ سال گذشته در ایالات متحده مورد بررسی قرار گرفته‌اند را فهرست کرد (NTSB, ۲۰۱۱b).

^{۱۰} NTSB

گزارش شده است که بخش قابل توجهی از زیرساخت‌های زیرزمینی در ایالات متحده از عمر مفید پیش‌بینی شده خود فراتر رفته است (USNCTT, ۱۹۸۹; ASCE, ۲۰۰۹). سازمان‌های مسئول در جستجوی راه‌های مؤثر برای افزایش بودجه در حال کاهش و هزینه‌های سرمایه‌ای می‌باشند تا به مسائل مرتبط با فرسودگی زیرساخت‌ها بپردازند اما اختلاف زیادی میان منابع مالی اختصاص یافته و هزینه‌های مورد نیاز برای نوسازی زیرساخت‌ها وجود دارد. در سال ۲۰۰۲، سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) یک اختلاف سالیانه ۸ بلیون دلاری طی یک دوره ۲۰ ساله (۲۰۱۹ - ۲۰۰۰) تنها برای زیرساخت‌های فرسوده آب ملی پیش‌بینی کرد (EPA, ۲۰۰۲). انجمن مهندسان عمران آمریکا^{۱۱} تخمین زد که نشستی لوله‌های آب منجر به اتلاف ۷ بلیون گالن از آب آشامیدنی در هر روز در سرتاسر کشور می‌گردد (ASCE, ۲۰۰۹). به علاوه اینکه، ASCE اذعان داشت که لوله‌های فرسوده فاضلاب، سالانه بلیون‌ها گالن از گنداب را درون آبراه‌های کشور وارد می‌سازد. سلامت و ایمنی شخصی و اقتصادی به واسطه ناتوانی در کاهش ضعف سامانه‌های زیرساختی که مستقیماً و به لحاظ جانی شهروندان را به مخاطره می‌اندازد در معرض خطرپذیری بیشتری قرار می‌گیرد (رجوع به کادرهای ۲،۴ و ۲،۵ برای مثال).

زیرسازی‌های ساختمانی و کاربری آینده فضای زیرزمینی

زیرسازی‌های ساختمانی، استفاده اساسی و عمده از فضای زیرزمین شهری را مشخص و پشتیبانی ساختمانی لازم را فراهم می‌تواند به ارزش و فضای مستغلات بیفزایند. به هر صورت، زیرسازی‌های ساختمانی به ندرت با این اندیشه که چگونه فضای زیر یا اطراف زیربنا در آینده استفاده خواهد شد طراحی می‌شوند. فونداسیون‌های شمع عمیق برخی سازه‌ها، برای مثال، ملحوظ ساختن زیرساخت‌هایی نظیر تونل‌های جاده‌ای و ترانزیتی که دارای محدودیت‌های تراز افقی و عمودی هستند را دچار مشکل می‌نماید. برخی طراحی‌های زیربنایی معابر عمومی را محدود می‌سازند. نصب لنگرهای افقی زمین یا «میخ‌ها» پشتیبانی‌های جانبی را برای دیوارها و فونداسیون‌های عمیق در برابر فشار زمین و آب‌های زیرزمینی اطراف مهیا می‌نمایند اما نیازمند قرار دادن پشت بندها در سوراخ‌های دو طرف گودال خاکبرداری است که می‌توانند ۳۰ تا ۳۵ فوت در خاک یا سنگ‌های مجاور امتداد یابند. با وجود اینکه پشت‌بندها عموماً پس از ساخت، هیچ عملکرد سازه‌ای انجام نمی‌دهند، غالباً در محل باقی می‌مانند و در کاربردهای دیگر فضاهای زیرزمینی در جایی که هستند کمک می‌نمایند.

طراحی فونداسیون و ساخت می‌تواند شامل شیوه‌های پایدار مانند استفاده از لنگرهای قابل حمل در صورت امکان باشد. یک رویکرد بلندمدت برای طراحی فونداسیون شامل طراحی زیرسازی‌هاست به طوری که راحت‌تر مورد استفاده مجدد یا تغییر کاربری قرار گیرند. اگر زیرساخت‌های سطحی بیشتر از عمر مفید خود باقی بمانند، روش‌های جاری برای نوسازی، غالباً شامل تخریب سازه‌های زیربنایی و سطح، زمانی که ساخت‌وساز جدید اتفاق می‌افتد می‌باشد. یک رویکرد ژرف برای طراحی زیربنا، نیازمند بررسی پایداری شهری به صورت کلی نگرانه می‌باشد. این رویکرد، تأثیر جمعی تصمیمات طراحی و ساخت مجزا را برای استفاده آینده از فضای زیرزمینی شهری در نظر می‌گیرد. ممکن است طراحی‌ها به برنامه‌ریزی بلندمدت برای مناطق شهری به صورت یکپارچه توجه نشان دهند، برای مثال، اجتناب از طرح‌های خاص در منطقه‌ای که برای حمل و نقل آینده در زیرزمین اختصاص یافته است. این رویکرد زمانی که فضای زیرزمینی شهری با برنامه‌های رشد شهری به عنوان بخشی از مجموعه در حال کار و تکامل سامانه‌ها در هم می‌آمیزد موفق‌تر خواهد بود. گه‌گاهی برنامه‌ریزی مطلوب برای حفظ فضای زیرزمینی برای استفاده‌های آتی ضروری است.

^{۱۱} ASCE

مدیریت سازمانی فضای زیرزمینی

همان گونه که بیان شد، تصمیمات مرتبط با عناصر زیربنایی زیرزمین به ندرت با استفاده از رویکرد مدیریت سامانه که در آن زیرساخت‌های ترکیبی رو زمینی و زیرزمینی شامل یک سامانه یکپارچه می‌باشند گرفته می‌شوند. نظارت و مدیریت سازمانی فضای زیرزمینی شهری که تصمیم‌گیری در ایالات متحده را هدایت می‌کند، در بهترین حالت جزئی و در بدترین حالت معدوم است. سیاست‌های عمومی که کاربردهای زیرزمینی شهری را کنترل و اداره می‌کند، با اندک استثنائاتی، به خوبی شکل نمی‌گیرند. تمرکز اصلی برنامه‌ریزی شهری بر ارائه خدمات تحت محدودیت‌های سطح در دسترس و مسائل مربوط به هوا و توسعه منابع می‌باشد. یک چالش بزرگ برای حکومت این است که تملک صنایع همگانی، خدمات و ساختارهای زیرزمینی به مجموعه‌ای از بخش‌های خصوصی و دولتی واگذار گردیده است. این موضوع و همچنین فقدان چهارچوبی برای ارزیابی فضای زیرزمینی توسط شهرداری‌ها از جمله مسائلی است که برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر زیرزمین شهری را بی‌نتیجه می‌سازد. شهرداری‌ها معمولاً اجازه عملیات‌های زیرسطحی در حوزه خود را از طریق فرآیندهای صدور مجوز می‌دهند، اما توانایی کمی در کنترل آن دارند. مثلاً اجازه برای سد معبر کردن خیابان به هر منظور و هدفی نیاز به مجوز دارد اما این مجوز معمولاً شامل شرایط مخصوص نصب و راه‌اندازی تأسیسات یا خدمات نمی‌باشد. به علاوه، نیاز به ارائه گزارشات چون ساخت (as-built) تأسیسات نمی‌باشد.

نقشه‌برداری جامع از محل تأسیسات و خدمات زیرخاکی به ندرت قابل انجام است و گزارشات چون ساخت تسهیلات زیرزمینی موجود و در دسترس عموم نیست و یا نادرست می‌باشند. بنابراین طرح‌ریزی تأسیسات جدید بدون اخلال در خدمات زیرخاکی موجود، دشوار است. بر طبق CGA، در ایالات متحده هر ۶۰ ثانیه یک صنعت همگانی آسیب و یا تخریب می‌گردد (لاندس، ۲۰۰۸). فن‌آوری‌های موجود برای شناسایی و نقشه‌برداری زیرساخت‌ها به منظور حداقل‌سازی آسیب و تخریب سامانه‌هایشان در خلال اقدامات ساخت، غالباً به اندازه کافی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

شماره ملی ۸۱۱ - خط «تماس پیش از حفاری»^{۱۲} - در سال ۲۰۰۷ راه‌اندازی شد تا با ۶۲ مرکز تماس وابسته به طرف‌هایی که خدمات را در نواحی تحت پوشش خود مدفون ساخته‌اند، ارتباط برقرار کنند. این اولین قدم در توسعه مدیریت سازمانی فضای زیرزمین شهری است. نتیجه مثبت CBYD اشتراک‌گذاری اطلاعات مربوط به صنایع همگانی و خدمات توسط اشخاص و گروه‌های علاقمند است. وقتی سیاست عمومی به استفاده و بهینه‌سازی فضای زیرزمین شهری به نفع مردم، اقتصاد و توسعه پایدار اختصاص می‌یابد، اختلاف نظراتی می‌تواند از بین رود.

برنامه‌ریزی و نحوه اداره به منظور پایداری

برخی شهرهای سراسر دنیا در برنامه‌ریزی و اداره فضای زیرزمینی پیشرفت بیشتری حاصل نموده‌اند. هلستینکی فنلاند که نمونه بارزی از این شهرهاست، منابع سنگ اصلی نزدیک به سطح خود را شناسایی و حفاظت کرده است و تونل‌های عمیق تأسیساتی رایج را توسعه داده است که تداخل، با زیرساخت‌های زیرزمینی مردم محور و کم عمق مانند آنچه که برای حمل و نقل، اتصالات پیاده‌رو و پارکینگ استفاده می‌گردد را محدود می‌سازد. این استراتژی به دور از روش‌های معمول تر قرارگیری صنایع همگانی مستقیم زیرزمین می‌باشد. مونترال، کانادا، چهارچوبی را ایجاد کرده که توسط آن یک شبکه خصوصی عظیم از اتصالات عابر پیاده زیرزمینی در منطقه مرکز شهر، یک شهر با آب و هوای شمالی را به یک شهر گسترده داخلی تبدیل کرده که در سخت‌ترین آب و هوای زمستانی راحت و در دسترس می‌باشد. یحتمل، بلند پروازانه‌ترین برنامه‌ریزی برای زیرزمین، در زمان نگارش، توسط شهر دولتی سنگاپور در حال انجام بوده است. کمبود شدید زمین و منابع طبیعی این کشور جزیره‌ای،

^{۱۲} CBYD

استفاده از فضای زیرزمینی را مؤلفه‌های مهم در برنامه‌ریزی کلی قرار داده است (هولم و ژائو، ۱۹۹۹). استفاده از فضای زیرزمینی مؤثر در سنگاپور فضای سطحی را برای دیگر کاربردها مانند تفریح و سرگرمی حفظ می‌کند. پلت فرم، فن‌آوری ساخت‌وساز اروپا، مفهوم شهر چند بعدی که در آن مردم به صورت عمودی روی زمین و زیرزمین و همچنین به صورت افقی حرکت می‌کنند را بیان می‌کند (ECTP, ۲۰۰۵). کادر ۲,۶ تشخیص اتحادیه اروپا از اهمیت فضای زیرزمین شهری و چشم‌انداز آن برای تأثیر بر قابلیت زندگی شهری متناسب با برنامه‌ریزی منابع فضای یکپارچه را نشان می‌دهد.

جمعیت در حال رشد شهری، منجر به افزایش اراضی کم اهمیت و حاشیه‌ای (مثلاً زمین با خاک نرم و ضعیف) و تسهیلات تجاری و صنعتی بلا استفاده و شرایط زیست‌محیطی بد مرتبط (مثلاً آلودگی، زباله‌های خطرناک و زمین آلوده) می‌گردد. توسعه زیرزمینی همچنین به زمین‌های حاشیه‌ای نیز دست‌اندازی می‌کند و شرکت‌های ساختمانی و پیمانکاران باید به مسائلی نظیر انتقال یا اصلاح زباله‌های خطرناک بپردازند. این امر بررسی جدی و گسترده ذی‌نفعان، برنامه‌ریزان شهری، شرکت‌های ساختمانی و مردم را در خصوص مسائل ژئوتکنیکی و ژئوزیست‌محیطی مرتبط با کل ساخت‌وساز شهری، و به طور مشخص در خصوص توسعه فضای زیرزمینی و درباره ارزیابی صریح و روشن از فضای زیرزمینی به صورت یک منبع می‌طلبد.

برنامه‌ریزی مؤثر و تصمیمات سرمایه‌ای زیرساخت‌ها نیاز به این دارد که مدیران و برنامه‌ریزان مربوطه ضرورت و مسئولیت برنامه‌ریزی بلندمدت یکپارچه را به عهده می‌گیرند و آرشو اطلاعات باید انجام گیرد تا از دسترس بودن منابع اطلاعاتی به شکلی سودمند اطمینان حاصل گردد. این به این معنی است که هم سوابق و گزارشات زمین‌شناسی معتبر و هم سوابق و گزارشات سه بعدی از منابع مختلف سازه‌های موجود در زیرزمین باید ایجاد شود، و در یک منبع مکانی مشترک ثبت و نگهداری گردند. برنامه‌ریزی برای فضای زیرزمینی یک ضرورت است به ویژه در زمین‌شناسی‌های پیچیده، با تغییرات مهم توپوگرافی و زمانی که سطوح مختلف تسهیلات زیرزمینی بررسی می‌گردند (ریوز، ۲۰۱۰). قابلیت آرشو، پژوهش، مدیریت و نمایش پایگاه داده‌های سه بعدی پیچیده با درجات مناسب پیچیدگی برای برنامه‌ریزی و کارهای طراحی مفصل و دقیق به توانایی در برنامه‌ریزی مؤثر برای استفاده از فضای زیرزمینی شهری بسیار زیاد کمک می‌نماید. برخی ابعاد پایگاه داده‌ها و نرم‌افزارها برای انجام این وظیفه نیاز می‌باشد، اما پیچیدگی‌های بسیاری به لحاظ امکان دسترسی به داده‌های تأسیساتی مفصل و مشروح و امکان مدیریت عدم قطعیت و کیفیت متغیر داده‌های موجود باقی می‌ماند (ریوز، ۲۰۱۰). این مبحث با جزئیات بیشتر در فصل ۶ دنبال می‌گردد.

برای بررسی روشن و مشخص هزینه - سود در تصمیم‌گیری‌های زیرساختی، ایجاد یک روش‌شناسی برای تعیین کمیت ارزش فرصت‌های فضای زیرزمین به عنوان یک منبع در محیط‌های شهری پر اهمیت می‌باشد. این امر امکان مقایسه ارزش فضای زیرزمینی هم‌تراز با دیگر منابع شهری که مثلاً مرتبط با افزایش ارزش بازار مستغلات روی سطح می‌باشد را فراهم می‌نماید. همچنین ارزش کاربری‌های آینده شامل این واقعیت است که نوع کاربری گذشته (برای مثال، زیرساخت‌های گذشته) می‌تواند سامانه‌های زیرساختی جدید را وادار سازد تا به طور فزاینده‌ای در شرایط زمینی دشوار که مشکلاتی را برای مهندسان و پیمانکاران به وجود می‌آورد و دشواری‌های افزون‌تر مرتبط با برنامه‌ریزی و کنترل هزینه را ایجاد می‌کند قرار گیرند. برنامه‌ریزی و نظارت مؤثر می‌تواند به صورت کارآمد کاربری منابع زیرزمینی را بهینه سازد و بیشترین نتیجه را از منابع زیرزمینی در بلندمدت ارائه دهد. رویکردهای نظارتی عبارتست از: منطقه بندی فضای عمودی و افقی زیرزمین، اختصاص دادن کوریدورها برای سامانه‌های حمل و نقل بزرگ و هماهنگ‌سازی مقتضیات کاربری فضای خدمات همگانی در معابر عمومی.

کادر ۶-۲

دستور کار تحقیقات استراتژیک برای بخش ساخت و ساز در اروپا

پلتفرم فن آوری ساخت اروپا^a (ECTP) برنامه تحقیقاتی استراتژیک را برای بخش ساخت و ساز زیرزمینی به مدت ۲۵ سال گسترش داد که نوآوری‌های ایجاد شده توسط چشم‌اندازهای اجتماعی بلندمدت و بازار را توجیه می‌کند (ECTP, ۲۰۰۵). بر اساس ECTP، مدل‌های آینده برای برنامه‌ریزی شهری باید روشهای جدیدی را در برگیرد تا فضای زیرزمین و مفاهیم ساخت را در نظر بگیرند به گونه‌ای که استفاده از فضای زیرزمین به سمت پایین تا آنجایی که فکر و تکنولوژی اجازه دهد بتواند گسترش یابد. زیرساخت‌های زیرزمینی، زمانی مطلوب تراند که به فضای سطحی پیشرفته و به سامانه‌های حمل و نقل با ظرفیت بالا که گزینه‌های مناسبی برای جابجایی می‌باشند متصل شوند. شکل ارائه شده یک طرح کلی است از آنچه این پلتفرم به شهر چند بعدی نسبت می‌دهد.

ECTP حاکی از این است که تمام جوانب ساخت (مانند نظام زنجیره تامین، تدارکات پیمانی، صنایع خدماتی، معماری فضای زیرزمینی، وسایط نقلیه تخصصی، تکنولوژی‌های حفاری، کسب و کار اجتماعی و صنعت ایمنی و امنیت) باید بررسی و اصلاح گردد تا نتیجه کار در محیط زیرزمین بالا رود و نظارت و حفاظت در مقابل خطرات فراهم گردد. برنامه تحقیقاتی ECTP عبارتست از یک چشم‌انداز و اولویت‌های پژوهشی کوتاه مدت و بلندمدت اختصاص یافته برای برآوردن نیاز مشتریان (مثلاً از طریق استفاده مؤثر از فضای زیرزمینی و ارتقاء فهم و توان ما در کنترل خود زمین) که شهرها را پایدار می‌سازد (با کاهش مصرف منابع، اثرات زیست‌محیطی و انسانی، افزایش ایمنی و امنیت و ارتقاء کیفیت) و تحولی را در خود بخش ساخت و ساز ایجاد می‌نماید (از طریق افزایش رقابت پذیری، یک فرایند ساخت دانش بنیان جدید که توسط مشتریان هدایت می‌شود، فن‌آوری‌های اطلاعات و ارتباطات و اتوماسیون، پیشرفته‌ترین مصالح ساختمانی و محیط کاری جذاب) (ECTP, ۲۰۰۵).

^a رجوع به <http://www.ectp.org/> (۶ اکتبر ۲۰۱۱).



یک شهر چند بعدی جدید که توسط مرکز فعالیت ساخت و ساز زیرزمینی پلتفرم فناوری ساخت در اروپا پیش‌بینی شده است.

مدیریت بلندمدت فضاهای زیرسطحی

توفیق‌های افسانه‌ای بسیاری در زیرساخت‌های زیرزمینی (مانند سامانه‌های مترو نیویورک سیتی و بوستون) و موفقیت‌های جدیدتر در توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی - مترو واشنگتن دی سی، سازمان حمل و نقل سریع کلان شهر آتلانتا و سازمان حمل و نقل شیکاگو - وجود دارد. ثبت دستاوردها به ایجاد سامانه‌های تأسیساتی زیرزمینی بسط می‌یابد. با این وصف، میراث بیش از یک قرن از زیرساخت‌های متروک و یا بدون طرح و نقشه نیز مشکلات بزرگی به وجود می‌آورد (استرلینگ و همکاران، ۲۰۰۹). موقعیت تأسیسات ضروری متروکه، زیرسازی‌ها، مخازن و آوار تخریب یا ساخت‌وساز ثبت نمی‌گردند و یا گزارشات آنها کنار گذاشته می‌شوند. موقعیت تأسیسات فعال نامعلوم است و یا به درستی ثبت نمی‌گردد. این وضعیت منحصر به ایالات متحده نیست و برخی نقاط دنیا حتی سابقه طولانی‌تری در زیرساخت‌های متروکه زیرزمینی دارند. یک گام منطقی در روش‌های برنامه‌ریزی پایدار، توسعه پایگاه داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی به همراه اطلاعاتی در خصوص محل مصنوعات و زیرساخت‌های زیرزمینی است. یک برنامه پژوهشی ۱۰ ساله در بریتانیا در حال انجام است که یک نمونه ابزار راداری نفوذ به زمین چند سنسوری که محل تأسیسات و خدمات زیرزمینی را مشخص و نقشه‌برداری می‌کند را توسعه می‌دهد. سپس نقشه‌های سه بعدی در سازمان زمین‌شناسی بریتانیا ساخته می‌شود. مستندسازی مطمئن‌تر تمام کارها در زیرزمین در یک سامانه دیتا باس قابل جستجو که شامل ابزارهایی برای تجسم‌سازی است - و مستندسازی دیگر خدمات ثبت نشده درگیر در طول ساخت‌وساز زیرزمینی - به شدت توان برنامه‌ریزان را در حداکثرسازی کاربری فضای زیرزمینی افزایش می‌دهد، در حالی - که هزینه ساختمان و نگهداری زیرساخت‌های زیرزمینی را به حداقل می‌رساند.

از سال ۱۹۷۲ تا ۱۹۹۴، کمیته ملی فن‌آوری تونل‌سازی آمریکا در شورای تحقیقات ملی به عنوان سازمان ملی برای ایجاد پیشرفت‌هایی در فناوری تونل‌سازی و کاربری فضای زیرزمینی انجام وظیفه نمود (رجوع به پیوست C). این کمیته مسئولیت‌های نظارتی را بر عهده نداشت، اما بر تکنولوژی، روال کار و تعلیم و آموزش تأثیرگذار بود. اعضای آن عبارت بودند از نمایندگان دولت، صنعت و دانشگاه. هدف آن افزایش هماهنگی اقدامات، شامل ارزیابی، تحقیق، توسعه، آموزش، پرورش و انتشار اطلاعات می‌باشد. همچنین این کمیته به عنوان تابع آمریکایی انجمن بین‌المللی تونل‌سازی انجام وظیفه می‌کند. تاکنون هیچ‌گونه نهاد مشابهی نبوده است و در سال ۲۰۱۲ نهادهای رسمی، وظیفه نظارت و تأیید کاربری فضای زیرزمینی را به منظور مدیریت آن در پایدارترین حالت به عهده نگرفتند. فقدان برنامه‌ریزی برای کاربری سامانه‌های پایدار زیرزمین منجر به هزینه‌های اضافی قابل توجه و مشکلات برنامه زمان‌بندی می‌گردد، همانگونه که خدمات جدید در فضاهای زیرزمینی شهری بسیار شلوغ، نصب می‌شوند. ایالات متحده نصب سامانه‌های ریلی با سرعت بالا^{۱۳} را که برخی در فضای زیرزمینی می‌باشند را پیش‌بینی می‌کند همانگونه که در دیگر بخش‌های جهان ساخته می‌شود. سامانه‌های جابجایی باربری غیر همسطح (مثلاً مسیرهای راه آهن و جاده‌های کامیون رو) نیز می‌توانند به عنوان بخشی از توسعه شهری پایدار در زیرزمین قرار گیرند. هزینه این موارد و یا هر زیرساخت زیرزمینی آتی در محیط‌های شهری به دلیل ناتوانی در برنامه‌ریزی مؤثر در خصوص زیرساخت‌های موجود افزایش خواهد یافت. فرصت‌های پژوهشی برای توسعه یک چهارچوب و رویکرد مدیریتی به منظور برنامه‌ریزی، مستندسازی شرایط موجود، فراهم‌سازی احتیاجات کاربری زمین و صدور مجوزها برای کاربری‌های مورد تأیید فضای زیرزمینی شهری در فصل ۷ تشریح خواهد شد.

منابع

- ۱) Albert, R., and A.-L. Barabási. ۲۰۰۲. Statistical mechanics of complex networks. Review of Modern Physics. ۷۴(۱):۴۷-۹۷ [online]. Available: http://www.barabasilab.com/pubs/CCNR-ALB_Publications/۲۰۰۲۰۱-۳_RevModernPhys-StatisticalMech/۲۰۰۲۰۱-۳_RevModernPhys-StatisticalMech.pdf (accessed November ۸, ۲۰۱۲).
- ۲) ASCE (American Society of Civil Engineers). ۲۰۰۹. ۲۰۰۹ Report Card for America's Infrastructure. American Society of Civil Engineers [online]. Available: http://www.infrastructurereportcard.org/sites/default/files/RC۲۰۰۹_full_report.pdf (accessed May ۱, ۲۰۱۲).
- ۳) BBC. ۲۰۱۰. Internet access is 'a fundamental right'. BBC News: March ۸, ۲۰۱۰ [online]. Available: <http://news.bbc.co.uk/۲/hi/۸۵۴۸۱۹۰.stm> (accessed March ۱, ۲۰۱۱).
- ۴) Broch, E. ۲۰۰۶. Use of Rock Cavern in Urban Areas in Norway [online]. Available: <http://www.itaaites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/Organisation/Members/Member-Nations/Egypt/PapersSharm۲۰۰۶/kn۰۰.pdf> (accessed May ۲, ۲۰۱۲).
- ۵) Brongers, M.P.H. ۲۰۰۲. Appendix K: Drinking Water and Sewer Systems. Cost of Corrosion, March ۲۰۰۲ [online]. Available: <http://www.corrosioncost.com/pdf/water.pdf> (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).
- ۶) BTS (Bureau of Transportation Statistics). ۲۰۰۴. The Transportation Network: ۲۰۰۴ [online]. Available: http://www.bts.gov/publications/pocket_guide_to_transportation/۲۰۰۶/html/table_۰۱.html (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).
- ۷) Butts, C.T. ۲۰۰۹. Revisiting the foundations of network analysis. Science ۳۲۵:۴۱۴-۴۱۶.
- ۸) Carley, K.M., M.K. Martin, B.R. Hirshman. ۲۰۰۹. The etiology of social change. Topics in Cognitive Science ۱(۴):۶۲۱-۶۵۰. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.17۵۶-۸۷۶۵.۲۰۰۹.۰۱۰۳۷.x/pdf> (accessed November ۶, ۲۰۱۲).
- ۹) Carmody, J., and R.L. Sterling. ۱۹۹۳. Underground Space Design: A Guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces. New York: Van Nostrand Reinhold.
- ۱۰) Cataldo, M., J. D. Herbsleb, and K.M. Carley. ۲۰۰۸. Socio-Technical Congruence: A Framework for Assessing the Impact of Technical and Work Dependencies on Software Development Productivity. International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement Proceedings of the Second ACM-IEEE [online]. Available: <http://herbsleb.org/web-pubs/pdfs/cataldo-socio-۲۰۰۸.pdf> (accessed November ۶, ۲۰۱۲).
- ۱۱) DOE (U.S. Department of Energy). ۲۰۰۶. Transmission, Distribution & Storage. Oct. ۲۰۰۶ [online]. Available: <http://www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/delivery/index.html> (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).
- ۱۲) ECTP (European Construction Technology Platform). ۲۰۰۵. Strategic Research Agenda for the European Underground Construction Sector, Draft, October ۲۰۰۵. European Construction Technology Platform [online]. Available: http://www.ectp.org/documentation/FA-Underground-Constructions_SRA-VISION۲۰۲۰-۲۳Nov۰۵.pdf (accessed May ۲, ۲۰۱۲).
- ۱۳) EPA (U.S. Environmental Protection Agency). ۲۰۰۲. The Clean Water and Drinking Water Infrastructure Gap Analysis. EPA-۸۱۶-R-۰۲-۰۲۰. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency [online]. Available: <http://www.epa.gov/ogwdw/gapreport.pdf> (accessed November ۱۱, ۲۰۱۰).
- ۱۴) EPA. ۲۰۰۶. Emerging Technologies for Conveyance: New Installations and Rehabilitation Methods. EPA ۸۳۲-R-۰۶-۰۰۴. July ۲۰۰۶ (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).

- ١٥) EPA . ٢٠٠٧. P. ١٣ in Distribution System Inventory, Integrity and Water Quality, Jan. ٢٠٠٧ (as cited in Sterling et al., ٢٠٠٩).
- ١٦) Farrimond, M. ٢٠٠٤. The ESWRAC Initiative. Proceedings, ISTT No-Dig ٢٠٠٤ Conference. November ١٥-١٧, ٢٠٠٤, Hamburg, Germany [online]. Available: <http://www.eswrac.org/download/1/Farrimond.pdf> (accessed May ١, ٢٠١٢).
- ١٧) FCC (U.S. Federal Communications Commission). ٢٠٠٦. Table I.A: Outside Plant Statistics—Cable and Wire Facilities. FCC Report ٤٣-٠٨: ARMIS Operating Data Report (as cited in Sterling et al., ٢٠٠٩).
- ١٨) FHWA (Federal Highway Administration). ٢٠٠٨. To Move Forward with FHWA Initiatives. The Environmental Quarterly ٤(٣) [online]. Available: <http://www.fhwa.dot.gov/resourcecenter/teams/environment/vol4iss3.cfm> (accessed May ١, ٢٠١٢).
- ١٩) Glass, R.J., T.J. Brown, A.L. Ames, J.M. Linebarger, W.E. Beyeler, S.L. Maffitt, N.S. Brodsky, P.D. Finley, S.H. Conrad, T.F. Corbet, Jr., R.J. Detry, P.S. Downes, M.A. Ehlen, P.G. Kaplan, A. Kelic, M. Mitchell, R.A. Mitchell, T.W. Moore, A.V. Outkin, T.-T. Quach, G.E. Reedy, E.D. Russell, Sh. J. Starks, D.J. Sunderland, V.N. Vargas, S. J. Verzi, A.A. Zagonel, E.D. Vugrin. ٢٠١١. Phoenix: Complex Adaptive System of Systems (CASoS) Engineering Version ١,٠. Sandia Report SAND ٢٠١١-٣٤٤٦ [online]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories. Available: http://www.sandia.gov/CasosEngineering/docs/Phoenix_1,0_12_1_2011_/203446.pdf (accessed November ٧, ٢٠١٢).
- ٢٠) Glass, R.J., A.L. Ames, W.A. Stubblefield, S.H. Conrad, S.L. Maffitt, L.A. Malczynski, D.G. Wilson, J.J. Carlson, G.A. Backus, M.A. Ehlen, K.B., Vanderveen, D. Engi. ٢٠٠٨. A Roadmap for the Complex Adaptive Systems of Systems (CASoS) Engineering Initiative. SAND Report ٢٠٠٨-٤٦٥١ [online]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories. Available: http://www.sandia.gov/CasosEngineering/docs/CASOSEngineeringRoadmap_09,22,08.pdf (accessed October ٢٦, ٢٠١٢).
- ٢١) Guo, D., P.P. Nelson, J. Xie, Z. Chen. In press. Vertical Planning of Urban Underground Space Use in China. ١٣th World Conference of the Associated Research Centers for Urban Underground Space, Singapore, November ٧-٩, ٢٠١٢.
- ٢٢) Haack, A. ٢٠٠٩. Construction of the North-South-Metro Line in Cologne and the Accident on March ٣rd, ٢٠٠٩. STUVA (Research Association for Underground Transportation Facilities), Cologne, Germany [online]. Available: [http://management.kochitech.ac.jp/ssms_papers/sms10_194_Alfred/20Haak100126\(re-submit\).pdf](http://management.kochitech.ac.jp/ssms_papers/sms10_194_Alfred/20Haak100126(re-submit).pdf) (accessed April ٢٩, ٢٠١١).
- ٢٣) Hølestøl, K., and A. Palmström. ١٩٩٦. Extensive use of the underground in Oslo is giving a better city. Pp. ١٠٣-١١٤ in Proceedings of International Conference on Tunnels for the Third Millennium, Prievidza, Slovakia [online]. Available: http://www.rockmass.net/ap/06_Holestol&Palmstrom_on_Use_of_Oslo_underground.pdf (accessed May ٢, ٢٠١٢).
- ٢٤) Hulme, T.W., and J. Zhao. ١٩٩٩. Underground space development in Singapore: The past, present and future. Tunnelling and Underground Space Technology. ١٤(٤):٤٠٧.
- ٢٥) Konda, T. ٢٠٠٣. Reclaiming the underground space of large cities in Japan. In (Re)Claiming the Underground Space. J. Saveaur. Swets & Zeitlinger B. V.: Lisse, The Netherlands.
- ٢٦) Landes, S. ٢٠٠٨. Underground damage occurs once every ٦٠ seconds: Statistics you can't afford to ignore. Underground Construction (Jan):٣٤-٣٦ [online]. Available:

- http://www.rhinomarkers.com/DP_Info/Article_PDFs/DIRT_Underground_Construction_۰۱_۲۰۰۸.pdf (accessed May ۱, ۲۰۱۲).
- ۲۷) Little, R.G. ۲۰۰۵. Tending the infrastructure commons: Ensuring the sustainability of our vital systems. *Structure and Infrastructure Engineering*. ۱(۴):۲۶۳-۲۷۰.
- ۲۸) Manderfeld, J. ۲۰۱۰. Cologne's Tunnel Tube Disaster, ۰۳,۰۳,۲۰۰۹. Presentation at Annual IMIA Conference, September ۱۴, ۲۰۱۰, Berlin [online]. Available: http://www.imia.com/downloads/guest_presentations/GP۱۹_۲۰۱۰.pdf (accessed April ۲۹, ۲۰۱۱).
- ۲۹) Minkel, J.R. ۲۰۰۸. The ۲۰۰۳ Northeast Blackout - Five years later. *Scientific American*, August ۱۳, ۲۰۰۸ [online]. Available: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=۲۰۰۳-blackout-five-years-later> (accessed April ۸, ۲۰۱۱).
- ۳۰) Morse, D., and K. Shaver. ۲۰۰۸. Water main break forces dramatic rescue of nine. *The Washington Post*, December ۲۴, ۲۰۰۸ [online]. Available: <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/۲۰۰۸/۱۲/۲۳/AR۲۰۰۸۱۲۲۳۰۲۸۵۳.html> (accessed April ۷, ۲۰۱۱).
- ۳۱) NERC (North American Electric Reliability Council). ۲۰۰۶. Long-Term Reliability Assessment: The Reliability of the Bulk of Power Systems in North America. Oct. ۲۰۰۶ [online]. Available: <http://www.nerc.com/files/LTRA۲۰۰۶.pdf> (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).
- ۳۲) Nordmark, A. ۲۰۰۲. Overview on survey of water installations underground: Underground water conveyance and storage facilities. *Tunnelling and Underground Space Technology*. ۱۷:۱۶۳-۱۷۸.
- ۳۳) NRC (National Research Council). ۲۰۰۲. Making the Nation Safer: The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. Washington, DC: The National Academies Press.
- ۳۴) NRC. ۲۰۱۱. An Assessment of the Science Proposed for the Deep Underground Science and Engineering Laboratory (DUSEL). Washington, DC: National Academies Press.
- ۳۵) NTSB (National Transportation Safety Board). ۲۰۰۹. Rupture of Hazardous Liquid Pipeline with Release and Ignition of Propane, Carmichael, Mississippi, November ۱, ۲۰۰۷ [online]. Available: http://www.nts.gov/news/events/۲۰۰۹/Carmichael_ms/index.html (accessed May ۲, ۲۰۱۲).
- ۳۶) NTSB. ۲۰۱۱a. Pacific Gas and Electric Company: Natural Gas Transmission Pipeline Rupture and Fire, San Bruno, California, September ۹, ۲۰۱۰. Pipeline Accident Report No. NTSB/PAR-۱۱/۰۱. National Transportation Safety Board [online]. Available: <http://www.nts.gov/doclib/reports/۲۰۱۱/PAR۱۱۰۱.pdf> (accessed May ۱, ۲۰۱۲).
- ۳۷) NTSB. ۲۰۱۱b. Pipeline Accident Reports [online]. Available: http://www.nts.gov/investigations/reports_pipeline.html (accessed May ۸, ۲۰۱۲).
- ۳۸) O'Rourke, T.D. ۲۰۰۷. Critical infrastructure, interdependencies, and resilience. *The Bridge* ۳۷(۱):۲۲-۲۹ [online]. Available: <http://www.nae.edu/File.aspx?id=۷۴۰۵> (accessed February ۱۵, ۲۰۱۱).
- ۳۹) Parker, H.W. ۲۰۰۴. Underground Space: Good for Sustainable Development, and Vice Versa. International Tunnelling Association (ITA) Open Session World Tunnel Congress, May ۲۰۰۴, Singapore [online]. Available: <http://www.itaaites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ITAEvents/OpenSessions/HParker.pdf> (accessed April ۳۰, ۲۰۱۲).
- ۴۰) PCCIP (President's Commission on Critical Infrastructure Protection). ۱۹۹۷. Critical Foundations: Protecting America's Infrastructures [online]. Available: <http://www.fas.org/sgp/library/pccip.pdf> (accessed November ۲۳, ۲۰۱۰).
- ۴۱) Peerenboom, J. ۲۰۰۱. Infrastructure Interdependencies: Overview of Concepts and Terminology. National Science Foundation Workshop, June ۲۰۰۱ [online]. Available: <http://we>

- partner.org/onionbelt/wp-content/uploads/۲۰۱۱/۰۶/peerenboom_pdf.pdf [accessed May ۷, ۲۰۱۲].
- ۴۲) PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration). ۲۰۰۳. Frequently Asked Questions: General Pipeline FAQs [online]. Available: http://www.phmsa.dot.gov/media/pipeline_qa.html (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).
- ۴۳) PHMSA. ۲۰۰۵. Gas Distribution Systems Annual Report Data File Fields, Distribution Annual Report Form RSPA F ۷۱۰۰, ۱-۱, Dec. ۲۰۰۵ (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).
- ۴۴) Pipeline ۱۰۱. ۲۰۰۱. Overview: How Many Pipelines Are There? [online]. Available: <http://www.pipeline۱۰۱.com/Overview/energy-pl.html> (as cited in Sterling et al., ۲۰۰۹).
- ۴۵) PSEPC (Public Safety and Emergency Preparedness Canada). ۲۰۰۶. Incident Analysis: Ontario—U.S. Power Outage—Impacts on Critical Infrastructure. IA ۰۶-۰۰۲. August ۲۰۰۶ [online]. Available: http://www.publicsafety.gc.ca/prg/em/_fl/ont-us-power-e.pdf [accessed May ۳, ۲۰۱۲].
- ۴۶) Reeves, H. ۲۰۱۰. Attributed 3D Geologic Models in the UK and Their Application to Planning and the Sustainable Development of Underground Space. Presentation at the First Meeting on Underground Engineering for Sustainable Underground Development, June ۱, ۲۰۱۰, Washington, DC. Rundgren, L., and J. Martna. ۱۹۸۹. Underground hydropower projects in Sweden. *Tunnelling and Underground Space Technology*. ۴(۲): ۱۳۱-۱۳۷.
- ۴۷) Schewe, P.F. ۲۰۰۷. *The Grid: A Journey through the Heart of Our Electrified World*. Washington, DC: Joseph Henry Press.
- ۴۸) Sterling, R.L., J. Anspach, E. Allouche, and J. Simicevic. ۲۰۰۹. Encouraging Innovation in Locating and Characterizing Underground Utilities. Report S۲-R۰۱-RW. Transportation Research Board [online]. Available: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp۲/shrp۲_S۲-R۰۱-RW.pdf (accessed July ۱۰, ۲۰۱۲).
- ۴۹) Sterling, R., H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J.P. Godard, I. Vähäaho, C.D.F. Rogers, X. Shi, and T. Hanamura. ۲۰۱۲. Sustainability issues for underground spaces in urban areas. *Proceedings of ICE - Urban Design and Planning* [online]. Available: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/۱۰,۱۶۸۰/udap.۱۰,۰۰۰۲۰> (accessed July ۱۰, ۲۰۱۲).
- ۵۰) Thompson, E. ۲۰۱۰. Geohazards Database Consortium [online]. Available: <http://gdc.cee.tufts.edu/> (accessed November ۱۳, ۲۰۱۲).
- ۵۱) U.S. Census Bureau. ۲۰۰۸. National Population Projection. U.S. Census Bureau [online]. Available: <http://www.census.gov/population/www/projections/۲۰۰۸projections.html#>. (accessed November ۱۱, ۲۰۱۰).
- ۵۲) U.S. Census Bureau. ۲۰۱۲. ۱۹۰۰ Fast Facts. U.S. Census Bureau [online]. Available: http://www.census.gov/history/www/through_the_decades/fast_facts/۱۹۰۰_fast_facts.html (accessed May ۴, ۲۰۱۲).
- ۵۳) USNCTT (U.S. National Committee on Tunneling Technology). ۱۹۸۹. Micro- and small-diameter tunneling: The U.S. perspective. *Tunnelling and Underground Space Technology*. ۴(۲): ۱۹۳-۱۹۹.
- ۵۴) van Outeren, E. ۲۰۰۹. Subway Headaches: Amsterdam Metro Line Sinks Deeper into Trouble. *Spiegel*, April ۷, ۲۰۰۹ [online]. Available: <http://www.spiegel.de/international/europe/۰,۱۵۱۸,۶۱۷۸۹۴,۰۰.html> (accessed April ۲۹, ۲۰۱۱).
- ۵۵) Wallis, S. ۲۰۰۹. Köln—Speculation and Anger in Aftermath. *Tunnel Talk*, March ۲۰۰۹ [online]. Available: <http://www.tunneltalk.com/Cologne-collapse-Mar۰۹-Deadly-collapse-in-Cologne.php> (accessed April ۲۹, ۲۰۱۱).
- ۵۶) Ward, J. ۲۰۱۰. Stuttgart ۲۱: A Four Billion Euro Makeover. *Spiegel* [online]. Available: <http://www.spiegel.de/international/germany/۰,۱۵۱۸,۷۱۰۳۸۸,۰۰.html> [accessed April ۳۰, ۲۰۱۲].

- ۵۷) Watts, D.J. ۲۰۰۴. The “new” science of networks. *Annual Review of Sociology*. ۳۰:۲۴۳-۲۷۰ [online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/۲۹۷۳۷۶۹۳?seq=۱> (accessed November ۷, ۲۰۱۲).
- ۵۸) Webster, G.S. ۱۹۱۴. Subterranean street planning. Pp. ۲۰۰-۲۰۷ in *Annals of the American Academy of Political and Social Science: Housing and Town Planning*. E.R. Johnson, C.L. King, R.C. McCrea, J.C. Ballagh, T. Conway Jr., G.G Huebner, S.S. Huebner, C. Kelsey, J.P. Lichtenberger, L.S. Rowe, and T.W. Van Metre, eds. Philadelphia: American Academy of Political and Social Sciences.
- ۵۹) Wood, A.M. ۲۰۰۰. Tunneling: Management by Design. London: E & FN Spon WSSC (Washington Suburban Sanitary Commission). ۲۰۰۹. Forensic Analysis Links River Road Water Main Rupture to Improper Installation ۴۴ Years Ago. WSSC Media Release: May ۲۰, ۲۰۰۹ [online]. Available: <http://www.wsscwater.com/home/jsp/misc/genericNews.faces?pgurl=/Communication/NewsRelease/۲۰۰۹/۲۰۰۹-۰۵-۲۰.html> (accessed November ۱۱, ۲۰۱۰).

فصل سوم

کمک‌های مهندسی فضای زیرزمینی به توسعه شهری پایدار و تاب‌آور

دو فصل اول این گزارش در مورد ویژگی‌های کلی فضای زیرزمین می‌باشد. این فصل که چگونه کاربری فضای زیرزمینی، اساس پایداری درازمدت مناطق شهری را بررسی می‌کند، چه پژوهش‌های بیشتری برای اصلاح روش‌های مهندسی فضای زیرزمینی ضرورت دارد و چه پیشرفت‌هایی در مهندسی فضای زیرزمینی، پایداری شهری را بهتر حمایت و پشتیبانی می‌کند. این گزارش، مباحث مربوط به رویکردهای خاص توسعه شهری پایدار را بسط و گسترش نمی‌دهد؛ بلکه بررسی می‌کند که چگونه فضای زیرزمینی می‌تواند از این رویکردها که برای پایداری پیشنهاد و یا ارائه می‌گردند حمایت و یا به آنها کمک نماید و چگونه کاربری فضای زیرزمینی می‌تواند مستقیماً بر مسائل مشخص مربوط به پایداری تأثیرگذار باشد. برخی جنبه‌های کلیدی مربوط به پایداری جوامع شهری به اختصار بررسی خواهند گردید.

این فصل محیط شهری را به صورت سامانه‌ای در میان سامانه‌ها در نظر می‌گیرد و گسترده‌ترین روابط میان کاربری فضای زیرزمینی و عناصر ضروری برای پایداری شهری را مورد بحث قرار می‌دهد. کیفیت فیزیکی زیرساخت‌های مرتبط با حمل و نقل، پناهگاه، غذا، آب و منابع ضروری مهم که به پایداری کمک می‌کنند و یا آنها را نسبت به خطرات آسیب‌پذیر می‌سازند توصیف می‌گردد. سپس بر روابط مستقیم‌تر به لحاظ حفظ جوامع پایدار قابل زندگی و بالا بردن کاهش خطرپذیری به واسطه استفاده از تسهیلات زیرزمینی با طراحی و نقشه مناسب تمرکز می‌کند. فصل‌های ۴، ۵ و ۶ پیشرفت‌های مربوط به ایمنی جانی، فناوری‌های تحلیلی برای ارزیابی هزینه چرخه حیات تسهیلات زیرزمینی و آنالیز «سه گانه سود و زیان» اجمالی‌تر (عملکرد مالی، اقتصادی و اجتماعی) و پیشرفت‌های فناورانه خاص مرتبط با افزایش پایداری را به ترتیب بررسی می‌نمایند.

دیدگاه کلی: فضای شهری به عنوان سامانه‌ای در میان سامانه‌ها

پایداری به چیزی بیشتر از آب تمیز، غذا و اقلام ضروری وابسته است. همان‌گونه که نواحی شهری رشد می‌کنند، رشد استراتژیک سامانه‌های زیرساختی نیز برای امکان ارائه با کیفیت و پایدار خدمات آب و فاضلاب، غذا، انرژی، کالاهای صنعتی و تجاری و اطلاعات، لازم و ضروریست. خدمات یا تولیدات محلی باید منتقل و یا صادر گردند، دیگر کالاها باید وارد گردند و ضایعات باید دفع شوند. بدین ترتیب سامانه‌های زیرساخت فیزیکی برای سامانه شهری سامانه‌ها حیاتی می‌باشند و پایه هم اقتصاد پایدار و هم کیفیت زندگی را تشکیل می‌دهند.

رشد جمعیت شهری، گسترش اراضی شهری و تسهیلات و زیرساخت‌های مرتبط با آنها چگونه تأمین مواد و خدمات ضروری و پیدایش جوامع شهری مقاوم، پایدار و مطلوب اجتماع را افزایش می‌دهد و یا مانع آنها می‌گردد؟ نقش فضای زیرزمینی در این میان چیست؟ همان‌گونه که در فصل‌های ۱ و ۲ بیان گردید، فضای زیرزمینی، بهترین گزینه، به عنوان منبعی

است که با استفاده از یک سامانه در میان سیستم‌ها طراحی و اداره می‌شود تا به دستیابی پایدارترین راه‌حل‌ها فائق گردد. در مناطق پیشرفته، زیرساخت‌های زیرزمینی ممکن است یکی از اندک راه‌های مورد پذیرش را برای تقویت یا پشتیبانی تغییر مسیر پیشرفت‌های شهری به الگوهای پایدارتر عرضه کنند زیرا زیرساخت‌های پشتیبان جدید می‌توانند نسبتاً آرام و بی‌سروصدا اضافه گردند. یک زیرساخت زیرزمینی تاب‌آور و به خوبی حفظ شده و با عملکرد کافی و مناسب برای پایداری آینده شهرها ضروریست. معهدا، برای بهبود و اصلاح جنبه‌های پایداری تسهیلات زیرزمینی آنها اعمال بیشتری می‌تواند انجام گیرد.

پایداری شهری، محتمل‌تر خواهد بود اگر در میان برنامه‌ریزان و مدیران شهری این انتظار باشد که فضای شهری شامل منابع فضای هم‌روزمینی و هم‌زیرزمینی است و اینکه هر دو به عملکرد سالم یک شهر کمک می‌کنند. این فصل برخی منابع شهری و نقش بالقوه آنها در شناخت جامع سامانه‌های شهری را مطرح می‌نماید؛ بخش بعدی به طور مشخص کاربری‌های خاص فضای زیرزمینی شهری را برجسته می‌سازد که بسیار به پایداری شهری کمک می‌نماید.

راهروهای تأسیسات

برنامه‌ریزی پایداری، نیاز به آینده‌نگری در رابطه با مسائل مربوط به عملکرد و حفظ و نگهداری برای کل چرخه حیات، زیرساخت‌ها دارد. سهولت دستیابی به حفظ و نگهداری، تعمیرات و بهسازی، روشی است برای نیل به این هدف که با هزینه‌های پایین‌تر امکان پذیر ساخته است. تجربه ساخت مترو و دیگر عملیات‌های بزرگ زیرزمینی سبب علاقه برخی ارائه دهندگان خدمات همگانی زیرزمینی به تلفیق خدمات همگانی در تونل‌های تأسیساتی مشترک - که اغلب «اوتیلیدور» (راهروهای تأسیساتی) (یا «گالری» (دالان) در اروپا؛ رجوع به کادر ۱،۴، شکل ۲ نمونه‌ای از یک اوتیلیدور است) گفته می‌شوند، گردیده است. راهروهای تأسیساتی امکان تعمیر و نگهداری مداوم خدمات همگانی بدون نیاز به کندن خیابان‌ها را فراهم می‌سازند و به منظور حداقل‌سازی جابجایی‌های زیرسطحی و دیگر تأثیراتی که باعث تخریب تسهیلات زیرزمینی و سطحی می‌گردند طراحی می‌شوند و کاربری ثمربخش‌تری به نسبت تأسیسات زیرخاکی مجزا دارند. مطالعات محققان اسپانیا (ریرا و پاسکال، ۱۹۹۲) سود اقتصادی متمایز و محسوسی را در قرارگیری خدمات در یک تونل مشترک نشان داد زمانی که ارزش فضای زیرزمینی در محاسبات ساخت جاده کمربندی بارسلونا منظور گردید. در واقع، تونل‌های تأسیساتی مشترک به کرات در اروپا که در آن معابر باریک و تصمیم‌گیری‌های متمرکز قوی، کاربری آنها را میسر کرده‌اند ساخته می‌شوند.

توسعه راهروهای تأسیساتی به صورت گسترده، دشوار بوده است. موانع عبارتند از: واگذاری سرمایه در زیرساخت‌های خدماتی موجود، نگرانی‌ها در خصوص مسئولیت‌های عملیاتی و خطرپذیری در یک محیط تأسیساتی مشترک (مثلاً خطوط آب یا گاز در یک تونل مشترک با خطوط برق) و نگرانی‌های اداری در خصوص دسترسی به خطوط تأسیسات توسط سایرین. به علاوه، هزینه‌های اتصال اولیه ممکن است بالاتر از هزینه حفاری و قرار دادن تأسیسات باشد. مشکلات عملیاتی مانند نگرانی‌های امنیتی و خطرپذیری برای خدمات ضروری، در صورتی که در راهروهای تأسیساتی نصب شوند، با سامانه‌های امنیتی و سنسوری پیشرفته از بین می‌روند. قابلیت اجرا، ارزش و مزایای راهروهای تأسیساتی به نحو کارآمدی مرتبط می‌گردند به: (۱) توسعه سناریوهای قابل اجرا برای تسهیلات چند منظوره ایمن؛ (۲) توسعه سناریوهای قابل اجرا برای حمل و نقل مؤثر حاصل از پیکربندی‌های موجود؛ (۳) تحلیل‌های هزینه - سود چرخه حیات که راهروهای تأسیساتی مرکب و مجزا را مقایسه می‌کنند؛ و (۴) پروژه‌های نمونه و نمایشی. در ایالات متحده، راهروهای تأسیساتی معمولاً به صورت بخشی از پیشرفت‌های اصلی قدیمی و جدید و یا بهسازی‌های حمل و نقل زیرزمینی ساخته شده‌اند (مثلاً دنیای دیزنی در اورلاندو، فلوریدا، با «شهر» خدمات زیرزمینی وسیع آن و شبکه تونل باربری شیکاگو). اگر ایالات متحده در صدد ارتقاء پایداری خدمات همگانی شهری خود و حفظ فضای زیرزمینی برای فرصت‌های پایداری مقرون به صرفه‌تر برای خدمات آینده می‌باشد، لذا این

مقوله نیاز به توجه و عنایت مجدد دارد.

تسهیلات حمل و نقل زیرزمینی

پایداری بلندمدت مناطق شهری، به شدت تحت تأثیر آمادگی سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی است. شهرهایی چون سنگاپور از نقشه‌های اصلی طراحی شده پیرامون سامانه‌های حمل و نقل بهره برده‌اند (هولم و ژائو، ۱۹۹۹). سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی با نقشه و طرح مناسب تمایل به کاهش پراکندگی مراکز شهری، حفظ مناظر طبیعی و حفاظت از تنوع زیستی دارند و به شدت بر کاربری زمین و تصمیمات توسعه‌ای تأثیر می‌گذارند (بابیلو، ۲۰۰۹؛ استرلینگ و همکاران، ۲۰۱۲). این سامانه‌ها حمل و نقل ایمن و کارآمد را ارائه می‌دهند و نیاز و استفاده از خودرو را کاهش می‌دهند که منجر به کاهش ازدحام و زمان سفر می‌گردد که به نوبه خود مصرف سوخت فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد (بسنر، ۲۰۰۲).

دارایی‌های مربوط به حمل و نقل زیرزمینی می‌تواند چالش‌های گوناگون مربوط به رشد و توسعه را در نواحی شهری مرتفع نماید؛ اما چالش‌های زیادی نیز باقی می‌مانند که باید مورد توجه قرار گیرند (رجوع به کادر ۳-۱). امروزه، بسیاری از شهرها دارای سامانه‌های مترو حمل و نقل شهری، شاهراه‌ها و بزرگراه‌های سریع‌السیر زیرزمینی و کوریدورهای جابجایی اختصاصی بار غیر هم سطح برای قطار یا کامیون می‌باشند. خدمات ریلی با سرعت بالا^۱ که شامل مؤلفه‌های هم‌رو زمینی و هم‌زیرزمینی است در اروپا و آسیا متداول است. هر سامانه‌ای مشخصات منحصر به فردی برای متناسب‌سازی با هدف و موقعیت مکانی خود داراست. همه این موارد احتمال کیفیت زندگی و مزایای پایداری بلندمدت را برای مراکز شهری تحت سرویس افزایش می‌دهد (جهانو و همکاران، ۲۰۱۱).

کادر ۳-۱

چالش‌ها و فرصت‌های خاص برای سامانه‌های حمل و نقل

سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی به شدت از پیشرفت‌های فنی بهره می‌جویند آن‌چنان‌که در سرتاسر این گزارش مشاهده می‌گردد. در طراحی و ساخت، برای مثال، تکنولوژی‌های جدید ساخت و ساز زیرزمینی و آسترکشی نیاز است که مصرف مصالح را کاهش می‌دهند و عملکرد بلندمدت تسهیلات را بهبود می‌دهند. معهدنا، سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی در کلان شهرها معمولاً عناصر زیرساخت کلیدی که برای جابجایی شهری محوری و اساسی می‌باشند را ارائه می‌کنند که اقتصاد را حفظ می‌کنند و کیفیت زندگی را فراهم می‌نمایند و از این رو اهمیت خاصی در کاربری فضای زیرزمینی دارند. از آنجایی که سرمایه‌های بزرگ عمومی هستند و تابع محدودیت‌های بودجه‌ای و سیاسی بسیاری می‌باشند لذا سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی ممکن است برای حداکثر مشارکت در پایداری کلی شهری طراحی، راه‌اندازی و حفظ و نگهداری نشوند. ساخت پروژه‌های بزرگ حمل و نقل زیرزمینی غالباً نیاز به انتقال قابل توجه تأسیسات زیرزمینی درجا در امتداد معابر عمومی دارند. به هر صورت، حفاری اصلی و ضروریات جابجایی پروژه، فرصت‌های کلیدی را برای نوسازی و بهینه‌سازی تأمین خدمات در یک ناحیه ارائه می‌دهد تا حفظ و نگهداری آسان‌تر این سامانه‌ها را در آینده فراهم کند. در حالی که این امر دلالت بر بار اضافی بر پروژه حمل و نقل دارد، می‌تواند یک منفعت کلی برای جامعه شهری که از تحلیل یک سامانه در میان سامانه‌ها به جای تحلیل پروژه به پروژه استفاده می‌کند داشته باشد. علاوه بر این، در یک نمونه متن برنامه‌ریزی، پایداری بلندمدت یک سامانه حمل و نقل زیرزمینی افزایش می‌یابد وقتی طراحی‌های سامانه تا حد ممکن برای در نظر گرفتن کاربری‌های آینده، پتانسیل خطوط انتقال بیشتر و اتصالات چند وجهی منعطف می‌گردد. این امر مجدداً هزینه‌های اولیه را افزایش می‌دهد اما پایداری بلندمدت بهتری را ارائه می‌نماید.

حمل و نقل زیرزمینی، همان گونه که در بخش بعدی بحث خواهد شد، می تواند به افزایش تاب آوری جامعه در برابر خطرات طبیعی و یا انسان ساز از جمله زلزله و جنگ در مقایسه با هم تیان سطحی خود خدمت نماید. کادر ۳،۲ نمونه ای از عملکرد زیرساخت های زیرزمینی را ارائه می دهد که از بندر سانفرانسیسکو بعد از زلزله لوما پریتا در سال ۱۹۸۹ می گذرد. انواع گوناگون عناصر و سامانه های حمل و نقل زیرزمینی و نقش آنها در توسعه شهری پایدار تشریح می گردند.

جاده ها و بزرگراه های شهری زیرزمینی

راه های شریانی سطحی شهری پربار و شلوغ می توانند، به ترازهای هوایی یا زیرزمینی به منظور دستیابی به معابر انحصاری و تقاطع چند سطحی (مثلاً مسیرهای حمل و نقل در ارتفاعات متعدد) انتقال یابند. این امر سطح ترافیک شلوغ، سر و صدا، آلودگی صوتی و ازدحام را تقلیل می بخشد. سطوح مختلف حمل و نقل که به واسطه تونل ها به دست می آیند امکان جایگزینی جاده های شریانی ناکارآمد را با جاده های سطحی کارآمد مهیا می کنند که کیفیت زندگی ساکنان محله و جابجایی حمل و نقل شهر را بهبود می بخشد. موانع فیزیکی و مشکلات بصری که یک جاده شریانی مرتفع ایجاد می کند، از بین خواهند رفت. محلات مجاور که زمانی توسط جاده از هم جدا می شدند قادر خواهند بود به صورت یک جامعه دوباره به هم بپیوندند (رجوع به، برای مثال، انیشتن، ۲۰۰۴). انتقال ترافیک به تونل نیز به محیطی روشن تر و آرام تر، فرصت های جدید در کاربری زمین و افزایش ارزش املاک محله می انجامد - تمامی شاخص های محلات پایدارتر و با قابلیت سکونت بیشتر - (پارکر، ۲۰۰۴).

راه ها و بزرگراه های شهری زیرزمینی، معمولاً عمق زیر یک شهر را از پورتال ها در هر انتها می پیمایند که شبکه های جاده ای خدماتی موجود را به هم وصل می کند. با قرارگیری در اعماق، تونل ها، از پی ریزی های ساختمانی و دیگر خدمات در محل جلوگیری می کنند و فضای نزدیکتر به سطح را برای تأسیسات آبی باقی می گذارند. در بیشتر موارد تونل های ساخته شده در عمق، کمترین هزینه را در میان راه حل های زیرزمینی جایگزین دارا می باشند اگر تحلیل هزینه چرخه حیات تمهید گردد (پارکر و ریلی، ۲۰۰۹) و شرایط زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. موانع بر سرتراфик جریان آزاد، می تواند نادیده گرفته شوند، زمان سفر کوتاه شود و انتشار کربن برای همان اندازه مسافت طی شده در مسیر سطح کاهش یابد. به علاوه، انحراف ترافیک از خیابان ها، محیط های غابر پسندتری را در شهر ایجاد می کند. معهدا، تصمیمات مبتنی بر ساخت راه های زیرزمینی، بدون در نظر گرفتن منافع، به طور منظم مورد سؤال و تردید می باشند (برای مثال، در سیاتل، واشنگتن؛ رجوع به کادر ۳،۳). تصمیم به ادامه کار غالباً نیاز به رأی و نظر مردم و اجماع نمایندگان شهر، بخش، ایالت و فدرال دارد تا به توافق دست یابند. این فرآیند اغلب زمان بر است و منجر به افزایش هزینه های پروژه ای می گردد.

متروهای حمل و نقل عمومی

حمل و نقل عمومی بخش مهم و حیاتی بسیاری از مناطق شهری است و بخش جدایی ناپذیر محیط شهری پایدار می باشد. حمل و نقل سریع، جابجایی مؤثر مردم از هر طبقه اقتصادی و گروه قومی به سمت خانه، مدرسه، کار، و با عکس، خدمات بهداشتی، عبادتگاه ها، فرودگاه ها، فعالیت های تفریحی و دیگر امکانات موجود در زندگی شهری را تسهیل می نماید. حمل و نقل عمومی، جابجایی مورد نیاز برای اشخاص فاقد خودروی شخصی را مهیا می کند و محلات و اجتماعات را به هم متصل و متحد می کند تا راحت تر به وظیفه خود پردازند و از خدمات اجتماعی بهره مند شوند. همانگونه که جمعیت بین ۱ تا ۳ میلیون رشد می کند، مناطق نیز می توانند مزایای استفاده از حمل و نقل ریلی برقی را مشاهده نمایند (قطار برقی) (APTA, ۲۰۰۹) که امکان جابجایی سریعتر به شمار بیشتری از مردم را می دهد.

کادر ۳-۲

عملکرد زیرساخت‌های حمل و نقل به دنبال زلزله لوما پرتا

سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی می‌توانند در خلال و یا بلافاصله بعد از عملیات بازسازی حوادث خطرناک طبیعی مانند زلزله، گردباد، رعد و برق و شرایط مه غلیظ و یا گرد و غبار مؤثر و عملیاتی باقی بمانند. بر طبق یک بررسی از مطالعات گوناگون که خرابی‌های ناشی از زلزله را مستندسازی می‌کند، تونل‌های زیرزمینی با قطر بزرگ در تاریخ کمتر از سازه‌های سطحی دچار آسیب و خرابی می‌گردند (Hashash et al, ۲۰۰۱). سامانه حمل و نقل سریع منطقه خلیج (BART) سانفرانسیسکو به واسطه تونل‌های حفاری شده و تاوه‌ای مؤثر واقع می‌شود و به مقصدهای متعدد شامل سانفرانسیسکو و اوکلند، کالیفرنیا، از طریق یک تونل زیر آبی ۵٫۵ کیلومتری که از خلیج عبور می‌کند در بین دو شهر خدمت رسانی می‌نماید. این سامانه، ترمیم‌پذیری فاجعه را برای این منطقه شهری به دنبال زلزله لوما پرتا در سال ۱۹۸۹ با فراهم‌آوری امکان عملکرد مستمر اقتصاد این جوامع افزایش و توسعه داد.

زلزله لوما پرتا به بزرگی ۶٫۹ بود که آسیب‌های فیزیکی جدی به زیرساخت‌های محلی (USGS, ۲۰۰۹) از جمله خرابی اتصالات، تکیه‌گاه‌ها و قطعات سازه‌ای پل بندر سانفرانسیسکو-اوکلند وارد ساخت که باعث مسدود شدن آن به مدت بیش از یک ماه گردید. یک بخش از مسیر ۵ لاینه ۱۵ متری از طبقه بالایی مسیر شرقی راه به روی طبقه پایینی مسیر غربی افتاد (رجوع به تصویر) که منجر به کشته شدن یک تن گردید (گروه مهندسی زلزله دیمز و مور، ۲۰۰۴) BART^۱. از بندر سانفرانسیسکو در فضای زیرزمینی تقریباً درست در زیر تراز پل خلیج عبور می‌کند. این سامانه به طور موقت به واسطه زلزله تعطیل گردید اما هیچ مسافری دچار آسیب و صدمه نشد و خدمات در عرض یک نیمه روز بعد از بازرسی خرابی و احیای نیروی برق مجدداً به کار خود ادامه داد. پشتیبانی BART به سرعت از متوسط ۲۱۸۰۰ مسافر در هر روز به بیش از ۳۰۸۰۰۰ افزایش یافت و خدمات بدون وقفه، هفت روز هفته ادامه یافت تا اینکه پل بندر بیش از یک ماه بعد بازگشایی شد (گروه مهندسی زلزله دیمز و مور، ۲۰۰۴). اقتصاد منطقه خلیج اگرچه توسط زلزله آسیب دید، اما سریع‌تر از آنچه که اگر BART به صورت زیرزمینی نمی‌بود به وضع عادی برگشت زیرا شمار بسیار قابل ملاحظه‌ای از افراد توانستند به محل کار خود بروند (USGS, ۱۹۹۸).



تصویر بخش فروریخته پل بندر سانفرانسیسکو-اوکلند که در پی زلزله لوما پرتا در سال ۱۹۸۹ رخ داد. پل به مدت بیش از یک ماه مسدود شد در حالیکه تونل مترو BART که تقریباً درست در زیر پل قرار داشت در روز زلزله به کار خود ادامه داد.

^۱ به طور مشابه، مسیر بالایی از طول ۲ کیلومتری بزرگراه پل خیابان Cypress در منطقه بندری سانفرانسیسکو بر روی مسیر پایینی افتاد که ۴۲ کشته و صدها زخمی به همراه داشت.

چنین سامانه‌هایی می‌توانند در خیابانهای دارای ترافیک معمولی، در معابر با دسترسی محدود و معابر اختصاصی و غیر همسطح فعالیت کنند (برای مثال، سامانه زیرزمینی یا مرتفع برای سامانه حمل و نقل مونی در سان فرانسیسکو، کالیفرنیا و سامانه حمل و نقل مکس در پورتلند، اورگان). سامانه‌های حمل و نقل حجم بالا و سنگین - به اصطلاح سامانه‌های «خط آهن سنگین» زمانی که جمعیت به بیش از ۳ میلیون افزایش می‌یابد ضرورت پیدا می‌کند (APTA, ۲۰۰۹). این سامانه‌ها، غالباً در راه‌های زمینی از جمله در سامانه BART که در سال ۱۹۶۲ در منطقه خلیج سانفرانسیسکو ساخته شد و سامانه حمل و نقل نیویورک سیتی که آغاز ساخت آن در سال ۱۹۰۰ بوده است غیر همسطح می‌باشند (بابریک، ۱۹۸۱).

حمل و نقل سریع متر، و همان جابجایی امن، سازگار با محیط، سریع، کم هزینه و راحت برای تمامی افرادی که از آن استفاده می‌کنند را مهیا می‌کند. قبلاً بیان شد که حمل و نقل مترو به دلیل راحتی نسبی آن، صرفه جویی در وقت و پول، و یا قابلیت پیش‌بینی زمان حرکت تعداد مسافران در خیابان‌های سطحی را کاهش می‌دهد. مسافرانی که روزانه به جای استفاده از خودروی شخصی از حمل و نقل سریع بهره می‌جویند از اثر کربنی خود به طرز چشمگیری می‌کاهند (APTA, ۲۰۰۸) و به مزایای سلامتی شخصی به واسطه کاهش استرس ناشی از ترافیک، تصادف و ازدحام و شلوغی دست می‌یابند. به لحاظ منطقه-ای، ایستگاه‌های سامانه حمل و نقل منطقه‌ای، گرایش به توسعه مراکز شهری - جوامع شهری کوچک دارند، زیرا دسترسی به مناطق شهری از جاذبه‌های مهم برای کسانی است که به منطقه نقل مکان می‌کنند. مکان و خدماتی که دارای توسعه مترکم‌تر و فشرده‌تری در مجاورت ایستگاه‌های حمل و نقل می‌باشند در مقایسه با توسعه پراکندگی مراکز شهری می‌تواند بر هزینه کلی برای مالیات‌دهندگان از نظر ارائه خدمات ضروری مانند مدارس، پلیس، ایمنی از آتش و خدمات اورژانس پزشکی، بیمارستان‌ها، آب، فاضلاب، برق، گاز طبیعی و دیگر منابع تأمین، که همگی ویژگی‌های لازم برای توسعه یک محیط شهری پایدار می‌باشند تأثیر گذار باشند.

توانایی ارتقاء و جایگزینی مؤلفه‌های سامانه مترو مانند کانال‌ها، کابل‌های برق و فیبر نوری، خطوط آب، خطوط فاضلاب، مؤلفه‌های سامانه تهویه، روشنایی، علائم، پله برقی و آسانسور، و سامانه‌های اطلاعاتی، از آن سامانه‌ای معقول و منطقی می‌سازد تا انتظار از خدمات سودمند تونل‌های زیرزمینی برای بیش از ۱۰۰ سال وجود داشته باشد. تونل‌های حمل و نقل در دهه ۱۸۶۰ در لندن ساخته شدند که هنوز هم خدمت‌رسانی می‌کنند. عمر طولانی مؤلفه‌های زیرزمینی رو به سوی کاهش هزینه‌های چرخه حیات و همچنین کاهش تقاضا برای هم منابع تجدیدپذیر و هم منابع تجدیدناپذیر دارد (پارکر، ۲۰۰۴). تمامی این خصوصیات به پایداری کمک می‌نماید و متروهای ریلی سریع جدید را از نقطه نظر تحلیل چرخه حیات موجه می‌سازد.

خط آهن حمل و نقل زیرزمینی و غیر همسطح

ترکیب ترافیک سطحی عادی و ترافیک بار، به ویژه حرکت واحدهای کانتینری باربری معمول، می‌تواند منجر به ترافیک سنگین به خصوص در شهرهای بندری گردد. رانندگان ممکن است با صفوف طولانی ترافیک که منتظرند تا قطارهای باربری تقاطع راه‌آهن و جاده را ترک کنند مواجه شوند و یا کامیون‌هایی که در صفوف طولانی منتظر ترک تقاطع‌های چراغدار می‌باشند. آلودگی قابل توجه هوای ناشی از قطار و آگروز کامیون و نیز ناشی از ترافیک منتظر برای عبور می‌تواند کیفیت هوا را کاهش دهد (هریکو، ۲۰۰۶) و این پتانسیل که به صورت منفی بر کیفیت زندگی و اقتصاد محله‌های اطراف تأثیر گذارد را دارد (برای مثال، پالانیپان و همکاران، ۲۰۰۶).

کادر ۳-۳

جایگزینی پل روگذر (راهبر) آلاسکا، سیاتل، واشنگتن

تجربه اخیر سیاتل، واشنگتن، تمهید جایگزینی پل دره گذر آلاسکا که در جریان زلزله تخریب شد (AWV) نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری برای تغییر مسیر به زیرزمین چقدر دشوار خواهد بود. AWV کنونی یک اتوبان شهری دو طبقه می‌باشد (رجوع به تصاویر ۱ و ۲) که در طول اسکله سیاتل ادامه می‌یابد. این اتوبان در طراحی و ساخت شبیه به پل دره گذر خیابان سایپرس در منطقه خلیجی سانفرانسیسکو در دهه ۱۹۵۰ و آزاد راه امبارکادرو می‌باشد که هر دو در پی زلزله لوما پریتا در سال ۱۹۸۹ تخریب گشتند (AWV, ۲۰۰۹, USGS) در اثر زلزله نیکوآلی ۲۰۰۱ متحمل خسارات غیر قابل تعمیر گردید (۲۰۰۲, PNSN) و اکنون می‌بایست جایگزین شود (۲۰۰۴, WSDOT). راه‌حل‌های جایگزین متشکل از یک پل روگذر (دره گذر) جدید در دو سطح و عریض‌تر بر روی همان تراز، جایگزینی پل توسط یک خیابان عریض سطحی که سطح قابل توجهی از ترافیک عبوری را حمل می‌کند، انتقال بزرگراه بر روی یک پل یا تونل بر روی بندر البوت و یا در زیر آن، و در نظر گرفتن گزینه «هیچکدام» برای محدود ساختن رشد ترافیک و ایجاد تقاضا برای حمل و نقل عمومی بهتر به واسطه ازدحام جاده‌ای مختل‌کننده‌تر و پیوسته می‌باشد. گزینه‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند و به طور عمومی بحث و بررسی گردیدند. معیارهای رأی‌گیری برای تعیین راه حل ارجح به شدت در سطح محله، شهر و ایالت به بحث گذاشته شد.

در نهایت، تصمیم بر این شد که یک تندراه کمربندی زیرزمینی شهری بسازند، پل روگذر تخریب شده را از میان برداشته و یک اسکله خوش منظره قابل دسترس را بازسازی کنند (رجوع به شکل ۲). تونل کمربندی

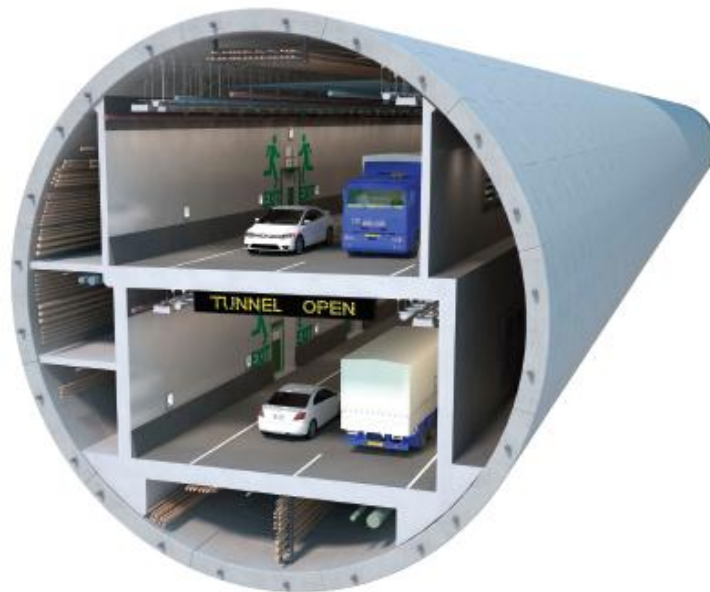
سواره‌رو ۴ لاینه و ۳٫۲ کیلومتری (رجوع به شکل ۳) با عمق کافی در زیر شهر ساخته خواهد شد تا از تونل ریلی قدیمی قرن، به نام سانتا فه شمالی در برلینگتون در کاربری روزانه، کانال‌های بزرگ جداکننده فاضلاب و زیرسازی‌های ساختمان‌های موجود دوری نماید. سیاتل مناظر بندر البوت، پوگت سوند (Puget Sound) و کوه‌ها را زمانی که پل دره مذکور از میان برداشته شود باز خواهد یافت. از اختلال عمده الگوهای ترافیکی مرکز شهر سیاتل اجتناب خواهد شد (۲۰۱۱, FHWA). یک بلوار خوش منظره بر روی اسکله طرح‌ریزی می‌شود، شبیه آنچه در سانفرانسیسکو بعد از فروریزی آزاد راه امبارکادرو ساخته شد. اثرات منفی پل روگذر قدیمی بر شهر به طور کامل شناخته نشد تا اینکه بحث و گفتگو برای جایگزینی آن صورت گرفت (برای مثال، گاربر، ۲۰۰۹؛ لیندبلوم و هفتر، ۲۰۰۹). طرفداران این طرح استدلال کردند که مرکز شهر سیاتل از فضاهای باز آباد و مناطق سبز بهره خواهد جست.



پل روگذر آلاسکا در سیاتل واشنگتن، یک تند راه دو طبقه در امتداد اسکله شهر می‌باشد.



(چپ) نمای هوایی از سیاتل، واشنگتن، اسکله و پل روگذر آلاسکا و (راست) ایده اولیه از خیابان پیشنهادی جدید آلاسکا در همان ناحیه. این ایده جدید، دسترسی پیاده به اسکله را افزایش می دهد و دسترسی عمومی به شرکت های تجاری مجاور را بیشتر می کند.



ایده پیشنهادی اولیه از تونل حفر شده خیابان ۹۹ ایالتی.

کادر ۳-۴

غیرهم‌سطح‌سازی باربری در لس آنجلس بزرگ

در منطقه لس آنجلس بزرگ، بنادر لس آنجلس و لانچ بیج به جایی رسیده‌اند که، اگر با هم محسوب شوند، می‌توانند بزرگ‌ترین ترمینال کانتینری کشور باشند (AAPA, ۲۰۱۱). آنها دروازه اصلی برای کالاهای کانتینری در آسیا و خارج آن می‌باشند. شیوه اصلی حمل و نقل کانتینرها دور از بنادر به سایر نقاط کشور، راه آهن می‌باشد. سه راه آهن اصلی - اقیانوس آرام جنوبی، اتحادیه اقیانوس آرام و سانت فه شمالی برلینگتون (BNSE) - مسیرهایی به داخل بنادر از تقاطع مسیر ملی خود داشتند. به لحاظ زمانی، مسیرهای راه آهن برترافیک عبوری حق تقدم دارند و حرکت بسیار زیاد باربری در سطح، ترافیک سطح بزرگی از ناحیه لس آنجلس جنوبی را به چندین بار توقف در روز می‌رساند چنانکه قطارهای باربری به طول ۲۰۰ خودرو به آرامی بر روی سه شبکه ریلی مجزا حرکت می‌کردند تا به شبکه‌های مسیر ملی خود در شرق منطقه شهری پیوندند.

نگرانی‌های مربوط به شلوغی و ازدحام و آلودگی هوا منجر به توسعه پروژه کوریدور آلامدا شد (ACTA, ۲۰۱۲a)، طرحی برای ساخت یک اتوبان ریلی باربری به طول ۳۲ کیلومتر (۲۰ مایل) شامل یک خندق باز مهار شده فوقانی به طول ۱۶ کیلومتر (۱۰ مایل)، ۱۵ متر عرض و ۱۰ متر عمق به همراه فضایی بر روی کف آن برای مسیر و یک خیابان خدماتی به نام «ترانشه نیمه کوریدور». سازمان حمل و نقل کوریدور آلامدا^۱ پیشنهاد شد، سازماندهی گردید، و طبق قوانین تأیید شد ACTA (ACTA, ۲۰۱۲b) حق جذب سرمایه، کمک‌های مالی دولت، مالکیت و دریافت مستغلات، قرارداد برای ساخت و عملیات، و هر آنچه که برای اجرای این طرح ضروریست را دارا می‌باشد. در سال ۱۹۹۴، با خرید مسیر کوریدور باغ ملی و حق عبور راه آهن اقیانوس آرام جنوبی، پروژه کوریدور به صورت جدی آغاز شد.

عمق ۱۰ متری (۳۳ فوتی) ترانشه نیمه کوریدور به سادگی امکان استقرار خط آهن BNSF و راه آهن اتحادیه اقیانوس آرام را، از طریق حقوق و اختیارات خط آهن، در حرکت ۲۰۰ ماشین ریلی باربری یک شکل با دو کانتینر بر روی هر کدام در یک زمان، در هر دو مسیر، با سرعت ۴۰ مایل در ساعت از بنادر به سمت اتصال سامانه ریلی ملی مربوطه فراهم می‌کند (ACTA, ۲۰۱۲a). اولین عملیات در سال ۲۰۰۲ آغاز شد و بیش از ۲۰۰ تقاطع همسطح که پیش از این ماشین‌ها و کامیون‌ها برای عبور قطار منتظر می‌ماندند با پلهایی که از ترانشه عبور می‌کردند جایگزین گشتند که جریان ترافیک را احیا کرده و نواحی محلی را در ارتباط نگه می‌دارد. ثمرات این کار عبارت بودند از افزایش پایداری منطقه و پیشرفت‌های عملیاتی برای بنادر و خطوط راه آهن می‌باشد که برخی از مزیت رقابتی خود را به واسطه کاهش زمان تحویل بار مسترد می‌نمایند. اوج جابجایی و حرکت در اکتبر ۲۰۰۶ با حرکت ۶۰ قطار به ازای هر روز به دست آمد. استفاده از کیفیت هوا در نتیجه مسیرهای ریلی مستقیم‌تر با سرعت بیشتر، کاهش گازهای خروجی از خودروها در تقاطع‌های هم سطح و افزایش میزان حمل بار از طریق خط آهن به جای استفاده از کامیون می‌باشد (راهکارهای وستون، ۲۰۰۵). ACTA در حال طراحی است و خیلی زود به ساخت پروژه شرقی کوریدور آلامدا می‌پردازد، با طراحی مهاربندی بیشتر ترانشه و با یک پروژه ساخت ۵۰۰ میلیون دلاری برای غیر همسطح‌سازی قطارهای باربری طولانی از تقاطع‌های جاده و راه آهن در طول یک بخش از شهر سان گابریل.

^۱ ACTA



یک قطار کانتینری در خط باربری کریدور آلامدا در کالیفرنیا. قطارها در یک خندق مهارشده رو باز که تهویه موتورها و غیر همسطح‌سازی رفت و آمد کانتینری را فراهم می‌سازد حرکت می‌کنند.

غیر همسطح‌سازی حرکت باربری، از خیابان‌های سطحی بخشی از راه حل می‌باشد. خندق‌های مهاربندی شده روباز که تهویه طبیعی را برای گازهای خروجی دیزلی انجام می‌دهند راه حل ارجح در جاهایی مانند کالیفرنیا جنوبی برای قطارهای باری که با محرکهای برقی - دیزلی حرکت می‌کنند می‌باشد. (رجوع به کادر ۳،۴). در کالیفرنیا جنوبی سرمایه‌گذاری قابل توجه در زیرساخت‌های غیر همسطح‌سازی در نتیجه تشریک مساعی میان بنادر، شماری از شهرهای تحت تأثیر، دولت‌های فدرال، ایالت و شهرستان و خطوط راه آهن می‌باشد.

برخی مشکلات ترافیکی را می‌توان به واسطه خیابان‌های اختصاصی و چراغدار و یا پل‌های روگذر غیر همسطح برای جابجایی‌های باربری به وسیله کامیون در زمان‌هایی غیر از زمان رفت و آمد روزانه کاهش داد. از تونل‌ها نیز می‌توان برای مسیرهای ویژه یا حق تقدم برای باربری کامیون‌ها استفاده نمود. برای مثال، در میامی، فلوریدا، یک تونل ماشین رو در زیر خلیج پست‌ها (Biscayne) در حال ساخت برای ایجاد ارتباطی مستقیم از بندر میامی به بزرگراه‌های محلی و کاهش ترافیک در مناطق مرکزی شهر می‌باشد (ورودی تونل میامی، ۲۰۱۰). در منطقه شهری نیویورک بزرگ، طرح آزمایشی بار دیگر در یک تونل مخصوص باربری آغاز شده است که در زیر بخشی از نیو جرسی شرقی، رودخانه هادسون، جزیره منهتن، بخشی از بروکلین، نیو یورک، عبور می‌کند، که احتمالاً برای حرکت قطارهای باربری و کامیون‌ها مابین حوالی شاهراه نیو جرسی و بزرگراه جزیره‌ای لانگ تعیبه شده است. (FHWA/PANYNJ, ۲۰۱۰) این طرح بلندپروازانه رشد و افزایش تشخیص این نکته است که سطح کافی برای برآوردن احتیاجات و خدمات مورد نیاز به جهت رقابت در بازار جهانی وجود ندارد. تونل‌های

غیر همسطح بخشی از پاسخ می‌باشند و مزایای پایداری در زمره مواردی هستند که توسط برنامه‌ریزان برای توجیه چنین امکانی تحلیل می‌شوند.

علاقه و پیگیری نسبت به خطوط لوله‌ای زیرزمینی برای حمل بسته‌ها و یا باربری وجود دارد، مثلاً استفاده از شبکه‌های گسترده از لوله‌های بادی یا هوایی در پاریس، فرانسه، وین، اتریش، برلین، آلمان، و پراگ (جمهوری چک کنونی)، از نیمه دوم اواخر دهه ۱۸۰۰ (یوفینگ و آدمیرال، ۲۰۱۲). چنین سامانه‌هایی متضمن حمل بار و محموله در یک کپسول می‌باشند که توسط مایع (خطوط لوله کپسولی هیدرولیکی) و یا گاز (خطوط لوله کپسولی بادی) به واسطه شبکه‌ای از لوله پیش‌رانده می‌شوند (لیو، ۲۰۰۰). خطوط لوله کپسولی بادی در اتحاد جماهیر شوروی سابق بکار می‌رفتند و یک سامانه تجاری درجایی برای انتقال مصالح ساختمانی، سنگ آهک و کالاهای مشابه در ژاپن می‌باشد (لیو، ۲۰۰۰). سامانه‌های دیگری در نقاط دیگر جهان تحت بررسی و مطالعه می‌باشند، خصوصاً در نواحی بندری (یوفینگ و آدمیرال، ۲۰۱۲). طرح‌های خاصی برای سامانه‌های باربری لوله‌ای آمریکا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (مثلاً گاف، ۲۰۰۱؛ روپ و همکاران، ۲۰۰۳؛ لیو، ۲۰۰۴) ولیکن به واسطه رقابت هزینه‌ای با دیگر روش‌های باربری و مسائل زیست‌محیطی گوناگون تحقق نیافته‌اند.

راه‌آهن با سرعت بالا

مزایای پایداری گسترده‌تر، زمانی به وقوع می‌پیوندد که سامانه‌های حمل و نقل ریلی منطقه‌ای با خطوط هوایی بر اساس زمان سفر و هزینه‌ها رقابت می‌نمایند. برای مثال، راه‌آهن با سرعت بالا^۱ می‌تواند شمار زیادی از مسافران را در مسافت‌های طولانی با اثر کربنی بسیار ناچیز به مقصد برساند (بارون و همکاران، ۲۰۱۱؛ لدبوری و ویچ، ۲۰۱۲). سامانه‌های HSR در ژاپن، فرانسه، آلمان، ایتالیا، چین، و تایلند استفاده می‌گردند و با آمودش روزانه میان خانه و محل کار با جابجایی‌های نقطه به نقطه در مسافت‌های طولانی بر اساس یک جدول زمانی مطمئن همساز و هم‌سو می‌باشند. در ایالات متحده، رأی دهندگان کالیفرنیا اوراق قرضه‌ای را در سال ۲۰۰۸ تصویب کردند که ساخت HSR را از لس‌آنجلس به سانفرانسیسکو میسر ساخت (رجوع به کادر ۳، ۵).

HSR معمولاً بیشتر از ۱،۰ تا ۱،۵ درصد درجه عمودی در نظر گرفته نمی‌شود تا اینکه بتواند سرعت ماکسیمم و پیچ‌های افقی و عمودی با شعاع بسیار طولانی را حفظ کند و سرعت‌های بسیار زیاد از سطح زمین را تا ۲۲۰ مایل در ساعت ملحوظ نمایند. درجات بالاتر و شعاع‌های به نوبه خود کوچکتر می‌توانند با تکنولوژی‌های مورد استفاده معمول همساز شوند، مثلاً درجات ۳،۵ تا ۴،۰ درصد در برخی خطوط HSR در اروپا، اما ممکن است به سرعت‌ها لطمه وارد گردد. این سرعت‌ها نیاز به معابر اختصاصی دارند و باید از دسترس سایر وسایط نقلیه، مردم و یا حیوانات محافظت شوند و برای دستیابی به HSR مورد نظر، از پل‌های روگذر، خندق‌های سرباز و تونل‌ها استفاده می‌گردد. وقتی HSR به شهر مقصد نزدیک می‌شود، به آرامی و آهستگی در زیرزمین حرکت می‌کند تا به مرکز شهر در زیر زیرساخت‌های موجود راه یابد. یک فضای زیرزمینی بزرگ یا بیشتر در زیر مرکز شهر قرار دارد تا ایستگاه، امکانات پشتیبانی و پرسنل مورد نیاز برای ارائه خدمات را در خود جای دهند. سامانه‌های انتقال عمودی مسافران و بار را به سطح خیابان می‌رسانند. با این وجود، HSR بسیار گران و اغلب شامل یارانه دولتی می‌باشد.

^۱ HSR

کادر ۳-۵

راه آهن تندرو در ایالات متحده: مثال کالیفرنیا

خط آهن با سرعت بالا (تندرو) در دو دهه آینده به واقعیتی در ایالات متحده تبدیل خواهد شد. HSR در بین مناطق شهری که ۸۰۰-۱۶۰ کیلومتر جدا از هم، دارای جمعیت کافی (۵۰۰۰۰ و بیشتر) و بهره‌وری اقتصادی و بازار سیروسفر مشخص می‌باشند از نظر اقتصادی قابل قبول است (هاگلر و تودوروویچ، ۲۰۰۹). حمایت دولت و فدرال، بودجه و تأمین مالی نیاز به همراهی و علاقه‌مندی اهالی محل به خدمات HSR دارد. برنامه‌ریزی، گزارش اثرات زیست‌محیطی و اقدامات کاهش، حصول حق عبور، و طراحی و تعهد ساخت دارای اهمیت می‌باشد و بررسی‌های مهندسی، ژئوتکنیکی، تاریخی و باستان‌شناسی و گزارشات برای پیشرفت به موقع پروژه قابل توجه می‌باشند. اعمال تحلیلی و تحقیقاتی بسیاری نسبت به زلزله و علوم زمینی می‌بایست برای حمایت از راه‌حل‌های طراحی انجام گیرد، به ویژه با توجه به نیاز به زنده ماندن و نجات یافتن در خدمات در پی یک رویداد لرزه‌ای قابل توجه. در سال ۲۰۰۸ رأی دهندگان کالیفرنیا اوراق قرضه ۱۰ میلیارد دلاری صادر کردند تا ساخت یک سامانه HSR را مابین لس‌آنجلس و سانفرانسیسکو، کالیفرنیا، میسر سازند، که در نهایت در جنوب به سان دیاگو و در شمال به ساکرامنتو گسترده شود. این طرح در مراحل اولیه طراحی مفهومی قرار دارد که از طریق طراحی‌های جایگزین بخش به بخش انجام می‌شود و گزارشات اثرات زیست‌محیطی رسمی تکمیل می‌گردد.

طول کل مسیر ۲۷۷۵ کیلومتر تخمین زده می‌شود، با مسیری که بیشتر دوطرفه می‌باشد. مابین ۱۶۰ و ۲۰۰ کیلومتر از مسیر خط آهن تونل در نظر گرفته شده است. دستیابی به ایستگاه‌های سانفرانسیسکو و لس‌آنجلس از طریق تونل‌های عمیق میسر می‌شود که مسافران را به ترمینال ترنسی (Trancbay) در سانفرانسیسکو و ایستگاه یونیون در لس‌آنجلس انتقال می‌دهند. طراحی‌های تونل برای سرعت‌های ۳۵۰ کیلومتر در ساعت (۲۱۷ مایل در هر ساعت) برای قطارها انجام می‌گیرد. برای فراهم‌سازی راه عبوری مورد نیاز در دیگر مناطق مسکونی، استفاده قابل توجه از سامانه سازه‌های جعبه‌ای بتن مسلح با مهاربندی روباز و تاوهای برای دو مسیر در جریان عملیات و یک جاده خدماتی در نظر گرفته می‌شوند. سطح مقطع نیز مشابه آنچه که در پروژه کریدور آلامدا استفاده گردید می‌باشد.

مسکن‌سازی

سرپناه در مناطق شهری در ایالات متحده از شهرک‌های کم‌تراکم با خانه‌های تکی تا آپارتمان باتراکم بالا و املاک با مالکیت مشترک گسترده می‌شود. شهرک‌های کم‌تراکم فرصت‌های پایداری متکی به خود را به لحاظ جمع‌آوری انرژی یک مکان، تولید غذا، و مدیریت محلی و بازیافت برخی زباله‌های تولید شده توسط ساکنان عرضه می‌کنند. معهدا، هزینه‌های انرژی برای حمل و نقل در مناطق شهری کم‌تراکم خیلی بیشتر از آن چیزی است که در مناطق شهری پرتراکم می‌باشد (نیومن و کنوورسی، ۱۹۹۹) و این به دلیل مسافت‌های طولانی سفر و گزینه‌های حمل و نقل عمومی محدود می‌باشد. ارائه خدمات متمرکز شهرک‌های کم‌تراکم نیاز به افزایش طول خدمات همگانی دارد در مقایسه با همان میزان جمعیتی که در مناطق پرتراکم خدمت‌رسانی می‌شوند. مسکن‌سازی باتراکم بالا وابستگی ساکنان را به خدمات متمرکز بالا می‌برد اما حق انتخاب را برای سبک زندگی شهری بدون خودرو افزایش می‌دهد، زیرا حمل و نقل عمومی اقتصادی‌تر می‌باشد و مراکز خرید عمومی می‌توانند در فاصله پیاده‌روی اندکی برای بسیاری از ساکنان دایر شوند. روند توسعه شهری در ایالات متحده، یک افزایش مستمر و پیوسته‌ای را در پراکندگی و بی‌نظمی شهری، بلکه گرایش به سمت افزایش تراکم جمعیت در مراکز شهر را نشان می‌دهد (برای نمونه، گرین، ۲۰۰۶)، که بعضاً به دلیل میل به تجربه زندگی شهری بدون آلوده‌های طولانی روزانه و پر هزینه توسط خودرو می‌باشد.



شکل ۴-۳ خانه زمین - پناه تا حدی زیرزمینی است که مقاومت بیشتر و بهره‌وری انرژی بیشتری را ارائه می‌دهد.

بیشتر مردم زندگی در زیرزمین را بر نمی‌گزینند. کاربری فضای زیرزمینی شهری مرتبط با مسکن به شکل صنایع همگانی و خدمات حمل و نقل برای ساکنان، انبار و منبع ذخیره‌سازی و یا فضای زندگی باز و گسترده (مثلاً سرداب‌ها) می‌باشد. در شهرک‌های مسکونی روستایی و برون شهری کم‌تراکم، به دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی، عایق‌سازی و انرژی آنها برخی ساختمان‌های زمین - پوشش یا زمین - پلکانی ساخته شده‌اند (رجوع به شکل ۳،۱) و لیکن هزینه‌های اولیه، مسائل مربوط به کنترل رطوبت، پذیرش و مسائل مربوط به فروش مجدد، ساخت‌وساز گسترده آنها را محدود می‌سازد.

تسهیلات تجاری، صنعتی و سازمانی شهری

مناطق شهری پایدار می‌بایست زیرساخت‌های تجاری، صنعتی و سازمانی تأمین کنند تا یک اقتصاد پویا را فراهم و مدیریت کرده، شغل ایجاد کنند و به ارائه پشتیبانی از جمله خدمات آموزشی و اجتماعی بپردازند. رابطه میان تراکم شهری و قیمت زمین رو به سوی ایجاد بازاری برای ساختمان‌های تجاری و سازمانی بزرگ و چند طبقه در مرکز یا مراکز پرتراکم مناطق شهری و سازه‌های کم مرتبه‌تر در مناطق اطراف شهر و برون شهری دارند. همانگونه که در بخش دیگری از این گزارش مطرح شد، تحت شرایط خاصی پسندیده است که انواع گوناگون امکانات تجاری، صنعتی و سازمانی را در زیرزمین قرار دهیم. با این همه، این تنها کاربری فضای زیرزمینی نیست اگرچه در مراکز شهری مهم و قابل توجه است. اندازه و تراکم افزایش یافته ساختمان‌ها در مرکز شهر نیاز به افزایش ظرفیت صنایع همگانی و خدمات حمل و نقل شهری دارد، هم در مرکز و هم در مناطق دور از مرکز که به لحاظ اجتماعی و اقتصادی مرتبط هستند. افزایش اتکا به چنین سامانه‌هایی به این معنی است که این سامانه‌ها باید مستحکم و قابل اطمینان باشند. فضای زیرزمینی می‌تواند حفاظت از این سامانه‌ها را بر عهده گرفته، آنها را

در دسترس جمعیتی که نیاز به خدمت‌رسانی دارند قرار دهد و ارائه خدمات تأسیسات حیاتی و پاسخ اضطراری را میسر سازد، که املاک رو زمینی را برای سایر کاربری‌ها حفظ می‌نماید.

تولید و توزیع مواد غذایی پایدار

زمین‌های کشاورزی عمده در قالب شهرک‌های برون شهری کم‌تراکم در ایالات متحده پوشش داده می‌شوند (کارور و یاهنر، ۱۹۹۷). یک میل و رغبت تاریخی در میان مردم برای تمرکز در نواحی دارای پتانسیل مطلوب در کشاورزی، تجارت و یا حمل و نقل که اغلب در امتداد رودها و یا سواحل قرار داشتند وجود داشته است. بدین جهت، همانگونه که شهرها گسترده می‌شوند، غالباً از مرکز جمعیت پراکنده می‌شوند و جایگزین زمین‌های کشاورزی خوب می‌گردند. بسیاری از زیرساخت‌های موجود و شیوه‌های مالیات‌بندی در واقع با حمایت از ساخت زیرساخت‌های منطقه‌ای جدید مورد نیاز برای خدمات‌رسانی به مناطق برون شهری در حال رشد به پراکندگی شهری میدان می‌دهند (بروکنر، ۱۹۹۹). نیروهای بازار که زمینه تبدیل زمین‌های کشاورزی به زمین‌های توسعه یافته و آماده شده را فراهم می‌سازند مسائل برجسته و مهمی را در درازمدت بیان می‌کنند که اثرات بالقوه‌ای بر هزینه، دسترسی و تأمین مواد غذایی دارند. اگر بنا بر این باشد که پایداری منطقه‌ای حاصل شود، رهاسازی زمین‌های کشاورزی مرغوب نزدیک به بازار و توسعه زمین‌های کشاورزی نامرغوب بسیار دور باید به واسطه بهبود بهره‌وری متعادل گردد.

قرارگیری تسهیلات در زیرزمین تقاضا برای زمین سطحی را کاهش می‌دهد که بر حفظ زمین‌های کشاورزی می‌تواند تأثیرگذار باشد. برنامه‌ریزی شهری جامع و دقیق و قرار دادن تسهیلات در زیرزمین به رشد مستقیم شهری در پایدارترین حالت کمک می‌کند. برنامه‌ریزی جامع نه تنها چگونگی حفظ زمین‌های تولیدی کشاورزی را بررسی می‌کند، بلکه چگونگی دسترسی آسان مردم شهر به مواد غذایی را از طریق زیرساخت‌های حمل و نقل، امکانات ذخیره‌سازی با دمای کنترل شده، ابزار توزیع و فروش، و انرژی مورد نیاز برای عملکرد هر بخش از زنجیره تحویل/ذخیره‌سازی در نظر می‌گیرد. به شرط اینکه تمامی این ضروریات زیرساختی به عنوان بخشی از سامانه شهری کل در میان سامانه‌ها بررسی گردد، حداکثر مزایای پایداری به دست خواهد آمد. چنین تسهیلاتی لزوماً نباید در زیرزمین قرار گیرند، اما امکانات زیرزمینی، برخی از مزایای ذاتی حرارتی را به لحاظ ذخیره‌سازی و انبارداری مواد غذایی یقیناً ارائه می‌نماید. برای مثال، انبارها و فروشگاه‌های خرده فروشی مواد غذایی معمولاً مکان‌های بدون پنجره‌ای هستند که نیاز اندکی به اشغال سطح دارند به ویژه زمانی که فضای سطحی اندک و کمیاب می‌باشد.

حفظ و توزیع منابع آب

آب مایه حیات است و عدم تأمین آب بهداشتی بر بقاء و حیات تأثیرگذار خواهد بود و خیلی سریع‌تر از عدم تأمین مواد غذایی می‌تواند منجر به شیوع بیماری گردد. مناطق شهری معمولاً آب مورد نیاز خود را از آب‌های سطحی (رودها، دریاچه‌ها و مخازن آب) و یا منابع آب‌های زیرزمینی استخراج می‌کنند. منابع آبی عمدتاً توسط چرخه آب کنترل می‌شوند، اما به واسطه شیوه‌های ضعیف مرتبط با توسعه و عمران، زمین ممکن است دچار آسیب و خسارت گردند. همچنانکه مناطق شهری رشد می‌کنند و منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی بهداشتی و مطمئن برای برآوردن تقاضا دیگر کافی نیستند، مصرف درست آب، استفاده مجدد از آب «خاکستری» (پساب ناشی از فعالیت‌های خانگی مانند حمام کردن و شستشوی لباس) و آب «سیاه» (فاضلاب)، و ایجاد تجهیزات آبی جدید قابل توجه و اهمیت می‌باشند. شهرها، به خصوص آنها که در مناطق خشک واقع‌اند، ناچار به جستجوی منابع آبی عمیق‌تر می‌باشند همانگونه که جمعیت‌های شهری و تقاضا برای آب افزایش می‌یابد.

زیرساخت‌های قدیمی تأمین آب و یا با شرایط نگهداری بد، منابع آب شهری را در معرض تهدید نشت یا ترکیب‌گی قرار می‌دهند. همچنین رقابتی میان نواحی شهری و مناطق کشاورزی که در آن آبیاری در مقیاس گسترده انجام می‌گیرد وجود دارد (FAO, ۲۰۱۱). با نگاهی کلی نگرانه، صادرات محصولات کشاورزی از یک منطقه به معنای از دست دادن منابع آبی است - درست همان موقعی که به عنوان یک مزیت برای اقتصاد منطقه شناخته می‌شود.

پایداری بلندمدت بیانگر آن است که یک منطقه شهری، فرصت‌های تأمین آب خود را متعادل ساخته است. وقتی آب‌های زیرزمینی منبع مهم آب محسوب می‌شوند، ذخیره پایدار آب کاهش نخواهد یافت (مثلاً با استخراج بیش از حد)، آلوده نخواهد شد و یا به راه‌های زیان بخش منحرف نخواهد گشت (رجوع به کادر ۳،۶). فعالیت‌های ساخت‌وساز ممکن است منجر به تولید رواناب با رسوبات و آلاینده‌ها، از قبیل پاتوژن‌ها و فلزات گردد، که اثرات منفی بر کیفیت و یا کمیت آب خواهد داشت (EPA, ۲۰۰۵). شیوه‌های کشاورزی همچنین ممکن است اثرات بلندمدت بر کیفیت آب و محیط زیست منطقه داشته باشند. برای مثال، افزایش شوری آب‌های سطحی و زیرزمینی که به واسطه تبخیر و انحلال نتیجه می‌شود (هیئت کنترل منابع آب CA, ۲۰۱۰) و تغییرات وابسته در زیستگاه گیاهان و جانوران می‌تواند نتیجه مستقیم شیوه‌های مصرف آب باشد.

نظارت خوب و مناسب منابع آب‌های زیرزمینی می‌تواند استفاده از زیرزمین برای توسعه شهری را در بر گیرد، چرا که منظره طبیعی بیشتری برای تغذیه آب‌های زیرزمینی حفظ خواهد شد. تسهیلات توزیع آب می‌تواند در زیرزمین قرار گیرد که امکان توسعه زمین را به روش‌هایی که کیفیت زندگی در شهرهای متراکم را بالا می‌برد میسر می‌سازد. با این همه، تحلیل و رویکردهای دقیق ساخت و عملیات برای اجتناب از انحرافات و تغییرات زیان‌بخش در سطوح آب‌های زیرزمینی، الگوهای جریان و آلودگی ضروریست. آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌تواند تبدیل به یک مسئله اساسی گردد؛ آلودگی حاصل از مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی گازوئیل در ایستگاه‌های خدماتی مثال شناخته شده‌ای است (میهان، ۱۹۹۳)، چنان‌که در پاکسازی‌های بودجه‌ای بالا از سایت‌های بزرگ، آلودگی صنعتی وجود دارد.

کادر ۳-۶

جریان آب‌های زیرزمینی در زیر مترو دویسبورگ (آلمان)

ایستگاه‌های تراموای زیرزمینی در دویسبورگ، آلمان، برای افزایش ترافیک در آینده طراحی شدند با دو سطح سکو و تغییر سکوی عبور در هر مسیر. در سال ۲۰۰۰، امتداد ۳،۶ کیلومتری تونل اسچادباهن از شمال در زیر رودخانه روهر تا میدرخ راه‌اندازی شد (شبکه ریلی شهری، ۲۰۰۷). هنگامی که خط دویسبورگ ساخته شد، دیوارهای حایل (دیافراگمی) تا یک لایه نشت‌ناپذیر رسی پایین آورده شدند و همواره از جریان رو به شمال آب در زیر شهر جلوگیری می‌کنند، که باعث تجمع سطح آب در قسمت بالادست (جنوبی) می‌گردد و سطح آب را در سمت پایین دست (شمالی) رها می‌کند. این تغییر بالقوه در شرایط آب‌های زیرزمینی غیر قابل قبول بود. شهرداری دویسبورگ و پیمانکار اصلی، سامانه‌ای را طراحی کردند که مانع دخول آب در حین ساخت و سپس نفوذپذیری بعد از ساخت شود. دوغاب (خاک رس) بتونیت غلیظ، این قسمت‌های خندق (کانال‌تراشه) را پر و حمایت می‌کند تا اینکه پتل‌های بتنی و یا بتن درجا ریخته، جایگزین آن شوند. یک فاصله و بادخور حدود ۱،۳ متری در بین پتل‌های درجا ریخته شده ۵،۴ متری دیوار دیافراگمی نشت‌ناپذیر ایجاد شد. این فاصله‌ها پیش از حفاری برای پشتیبانی مورد نیاز زمین منجمد می‌شوند که یک مانع نفوذناپذیر را تشکیل می‌دهد. لوله‌های انجماد، زمانی که ساخت به پایان می‌رسد و دوغاب ذوب می‌شود برداشته می‌شوند، که به آب‌های زیرزمینی اجازه عبور در زیر تونل را می‌داد (هوکس و همکاران، ۱۹۸۰).

در این شرایط، مسائل در پس ساخت، بررسی شدند و راه حلی برای یک مشکل بالقوه جدی به کار گرفته شد. معه‌ذا، این مثال مشکلات بالقوه در مقیاس بزرگ را نشان می‌دهد که در جریان ساخت‌وساز زیرسطحی بدون حساسیت مناسب نسبت به اثرات طراحی زیرزمینی، ساخت و عملیات بر یک سامانه شهری کامل می‌تواند رخ دهند.

منابع مواد زمینی مهم

استفاده پایدار از یک منبع تجدیدناپذیر، متناقض به نظر می‌رسد، اما در شرایط عملی، استفاده پایدار می‌تواند به عنوان میزان استفاده از یک منبع در یک مدت زمان قابل فهم، در نظر گرفته شود. منابع مواد مهم که از مواد زمینی استخراج می‌شوند، برای این مبحث، در دسته منابع انرژی سیال و گازی (اصولاً نفت و گاز)، منابع انرژی به شکل جامد (مانند زغال سنگ، شیل نفتی، ماسه نفتی (تار)، چوب و زغال سنگ نارس)، مواد معدنی صنعتی (مانند سنگ آهن و بوکسیت)، مواد معدنی استراتژیک حیاتی و یا با ارزش بالا (مانند طلا، اورانیوم، عناصر خاکی کمیاب) و مواد با کاربری ساختمانی (مانند سنگ ریزه، شن، سنگ ساختمان، سیمان پورتلند و آجر با کیفیت خاک رس) قرار می‌گیرند. در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل منابع انرژی و معدنی، ذخایر موجود، نگرانی‌های استراتژیک و اثرات زیست‌محیطی فراتر از محدوده این سند می‌باشد. با این همه، مسائلی که در روابط متقابل مابین توسعه شهری، استخراج مواد معدنی و انرژی، و استفاده از فضای زیرزمینی شهری مطرح می‌گردند برای مباحثه در این گزارش توجیه می‌شوند و شرح مختصر و کلی برخی مسائل ارائه می‌شود.

ارزیابی‌ها برای اینکه نفت، گاز و دیگر منابع انرژی جهانی با توجه به نرخ کنونی مصرف تا چه مدت طول می‌کشند متفاوت است. نرخ مصرف و میزان دستیابی محقق و مسلم به مخازن تا اندازه‌های بستگی به قیمت واحد منابع دارد. نفت و گاز مواد اولیه مهم، برای پلاستیک و صنایع شیمیایی می‌باشند که قیمت و تعاملات سیاسی را پیچیده می‌سازد. هنگامی که جایگزین‌ها قابل دستیابی باشند، انگیزه‌های قوی‌تری برای روی آوردن به جایگزینی منابع وجود دارد. انرژی باد، انرژی خورشیدی (مثلاً نیروی حرارتی، گرمایش خورشیدی منفعل و انرژی الکتریکی فتووالتائیک)، زیست توده (مانند منبع به سرعت پر شده برای سوخت‌های هیدرو کربنی و سوزاندن مستقیم برای تولید برق)، زمین گرمایی (کاربردهای نیروی سنگ داغ و سامانه‌های تبادل حرارت همراه زمین)، و سامانه‌های جذب انرژی موج، در زمره گزینه‌های متداول‌تر مورد بحث می‌باشند. بررسی این گزینه‌ها در بلندمدت در توسعه شهری ضروریست، که شامل ایجاد شیوه‌ای در دسترس، برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد انرژی است. نظر به اینکه منابع انرژی و تکنولوژی‌ها تغییر می‌نمایند.

مواد معدنی صنعتی، گستره‌ای از انواع سنگ معدن و روش‌های حفاری را در برمی‌گیرند. بسیاری از بازارها نسبت به قیمت حساسند و بسیاری از سنگ‌های معدن صنعتی در خارج از ایالات متحده استخراج می‌گردند. جهانی شدن اینچنین‌ای منجر به بسته شدن بسیاری از معادن آمریکا و نتیجتاً انتخاب‌های کمتر برای آموزش مهندسان معدن در ایالات متحده گردیده است (رجوع به فصل ۷ برای مباحث بیشتر در این باره). صرف منابع بیشتر برای استخراج مواد معدنی دارای اهمیت استراتژیکی بالا، شاید قابل توجیه باشد اما منابع داخلی غالباً به نفع منابع خارجی ارزان‌تر نادیده گرفته می‌شوند (NRC, ۲۰۰۸a). مصالح ساخت اغلب محدود به استخراج محلی، انتقال و استفاده به دلیل حجم بالا و پتانسیل قیمت پایین آنها می‌گردند. اگرچه آنها برای ساخت ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری دارای اهمیت می‌باشند. دسترسی نامناسب وضعیت شهری به طرز چشمگیری می‌تواند هزینه‌های ساخت را افزایش داده و مانع توسعه گردد.

منابع طبیعی مهم، در نتیجه توسعه شهری رفته رفته دست نیافتنی می‌شوند، که اساساً در زیر گسترش نواحی شهری قرنطینه می‌شوند. تکنولوژی‌های نوین برای استخراج موفق و ایمن در نواحی توسعه یافته ضروری می‌باشند. برای مثال، منابع سنگدانه محلی، غالباً از شنچال‌های روباز و یا معادن سنگ رو باز آن اطراف به دست می‌آیند. وقتی یک منطقه شهری به این منابع دست‌اندازی می‌کند، حفاری باز سبب مزاحمت‌هایی از قبیل سروصدا، گردوخاک، ارتعاشات، رقابت برای ظرفیت حمل و نقل جاده‌ای و دیگر اختلالات می‌گردد. افزایش ارزش زمین همچنین به فروش زمین برای توسعه کمک می‌نماید.

یک گزینه برای دست کشیدن از منابع معدن سنگ، تغییر به سمت بازیابی منابع از طریق استخراج منابع زیرزمینی می‌باشد. تحت ترکیب صحیح کیفیت سنگ و شرایط اقتصادی مناسب، یک منبع سنگدانه می‌تواند حفظ شود و فضای زیرزمینی تازه ایجاد شده در غارهای استخراجی بزرگ می‌تواند یک درجه حرارت طبیعی ثابت و میزان بالای تفکیک از

کاربری‌های شهری و یا تفریحی بر روی سطح زمین ارائه دهد. منطقه شهری کانزاس، بهترین مثال از آنچه که می‌تواند توسعه یابد می‌باشد. تقریباً دوسوم فضای صنعتی در منطقه شهری کانزاس در غارهای سنگ آهک بزرگ واقع شده است (نادیس، ۲۰۱۰) (رجوع به کادر ۳،۷). دیگر فضاهای استخراجی در سراسر جهان به عنوان امکاناتی برای ذخیره هر چیزی از کاغذ و آرشيو الکترونیکی؛ انرژی، دورریختنی‌ها، و تولیدات کشاورزی؛ غذاهای منجمد؛ و هوای فشرده استفاده شده‌اند. آنها همچنین به عنوان موزه و تسهیلات توریستی، تسهیلات ورزشی، تسهیلات آموزشی، بیمارستان، آزمایشگاه و برای انواع خرده‌فروشی‌ها، دفتر و محل کار و اهداف تولیدی به کار رفته‌اند (پیلا و پلیزا، ۱۹۹۵). البته، این استخراج معدن می‌بایست به دقت انجام شود تا پایداری بلندمدت فضای سطحی و زیرزمینی را تضمین نماید. نمونه‌های فراوانی در سراسر جهان وجود دارد از شهرهایی که از طریق معدن قدیمی رشد کرده‌اند به طوری که با ذهنیت پایداری بلندمدت تحت حفاری قرار نگرفته‌اند. چنین معادنی ممکن است خطرات ریزش و نشست زمین را برای توسعه سطح به همراه داشته باشند و به علاوه از طریق شسته شدن مواد شیمیایی مضر حاصل از معدن کاری مسیری را برای تخریب آب‌های زیرزمینی منطقه ایجاد می‌کنند.

کادر ۳-۷

مراکز تجارت زیرزمینی: تبدیل حفاری‌های معدنی به منابع تجاری جدید

سازندگان مناطق ایالات متحده مانند بخش لارنس، پنسیلوانیا، و کانزاس سیتی، میسوری، حفاری‌های زیرزمینی خود را تبدیل به فضایی برای انبار، دفتر کار، تولید و آموزش نموده‌اند (رجوع به تصویر). استخراج سنگ آهک در شهر کانزاس در اواخر دهه ۱۸۰۰ آغاز گردید. تا نیمه دهه ۱۹۰۰، صاحبان معادن با ملاحظات استراتژیکی حفاری کردند تا از فضای حفاری شده به جا مانده، بهره‌برداری نمایند (بوزبی، ۲۰۱۱). «ساب‌تروپولیس» حدود ۷،۶۲ میلیون متر مربع از فضای اجاره‌ای را احاطه می‌کند. از سال ۲۰۱۰، ۵۵ کسب‌وکار در صنایع همگانی زیرزمینی قرار گرفتند که شامل یک شبکه ۳،۲ کیلومتری از خطوط ریلی و ۹،۷ کیلومتر جاده آسفالت می‌باشد (نادیس، ۲۰۱۰). دمای زیرزمینی ثابت به ۵۰ تا ۷۰ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های کلی انرژی می‌انجامد (هانست میدوست، ۲۰۰۹). هزینه‌های گرمایشی در زمستان تحمیل نمی‌گردد و نیاز به انرژی بسیار اندکی برای سرمایش و کنترل رطوبت در تابستان می‌باشد. کاربری فضا متنوع است چنان‌که این شرکت یک دیتا سنتر ۶۱۰۰۰ متر مربعی با نیروی مازاد بر سازمان و سامانه‌های سرمایشی و حفاظت در برابر بلاهای طبیعی را توسعه داد.

در سال ۱۹۹۱، صنایع همگانی دچار آتش‌سوزی بزرگ و غیرقابل کنترل گردید به طوری که علیرغم تلاش‌های آتش‌نشانان برای کنترل آن در یک انبارش هفته‌ها به طول انجامید. سرکوب مستقیم آتش‌سوزی زیرزمینی توسط آتش‌نشانان بسیار پرخطر بود و هیچ‌گونه سامانه اطفاء حریق ثابت از قبیل آب‌پاش در آن زمان در محل وجود نداشت. ترکیبات تمیزکننده‌ها، آفت‌کش‌ها، محصولات کاغذی و روغن‌های پخت‌وپز به میزان آتش افزودند به طوری که درجه حرارت به 1100°C (2000°F) رسید (بوزبی، ۲۰۰۱). مشکلات مشابه‌ای در دیگر صنایع همگانی زیرزمینی واقع در لوئیزویل، کنتاکی، به وجود آمد. در نتیجه چنین آتش‌سوزی‌هایی، انجمن ملی ایمنی از آتش، کمیته‌ای فنی در خصوص فضاهای زیرزمینی تشکیل داد و استانداردهای جدیدی در مورد ایمنی از آتش شکل گرفت که مربوط به فاصله و مسافت، تعداد خروجی‌ها، تهویه، ارتباطات در زیرزمین و مسیریابی در فضای زیرزمینی بود (لیک، ۱۹۹۸). از آن به بعد کانزاس سیتی زبان ایمنی جدیدی را در کدهای خود برای فضاهای زیرزمینی اتخاذ کرده است که حداقل الزامات ایمنی را محرز می‌نماید.^۴ ساب‌تروپولیس (SubTropolis) و دیگر صنایع همگانی زیرزمینی در حال حاضر دارای سامانه‌های اطفاء حریق و شیوه‌های ایمنی می‌باشند.



فضای انباری زیرزمینی در غارهای سنگ آهک استخراجی حدود ۱۰۰ فوت در زیر کانزاس. راه‌ها و صنایع همگانی ظرفیت عبور تریلی ۱۸ چرخ را دارند.

حفظ محیط زیست طبیعی و شهری، محلی

ورای داشتن مواد غذایی، آب، سرپناه، اقتصاد پویا، و یک موجودی از منابع کلیدی، یک محیط زیست شهری پایدار نیاز دارد که فرایندهای طبیعی به قدر کفایت حفظ شوند تا از تعادل زیست‌محیطی در درازمدت حفاظت شود. محیط شهری پایدار و سالم، اساساً به محیط زیست طبیعی پایدار و سالم وابسته است. محیط زیست طبیعی رو به زوال به طور مستقیم و زیان‌باری بر منابع غذا و آب تأثیر می‌گذارد و در نهایت کیفیت زندگی و سلامت و بهداشت را تا سطوح غیرقابل قبول تنزل می‌دهد. پارامترهای محیطی مهم برای کیفیت پایدار زندگی شهری عبارتند از: استانداردهای به دقت بررسی شده کیفیت هوا و آب، کنترل نویز و سروصدا، و استانداردهای ایمنی و بهداشتی چنانچه فقیرترین مناطق باید از لحاظ سامانه‌های شهری تأمین گردند تا در کل به پایداری برسند. سطوح پایه‌ای حفظ محیط زیست، به معنی ایجاد محیط زیست شهری است که توسط تمام شهروندان ارج نهاده می‌شود و اینکه انواع فرصت‌های اجتماعی، فرهنگی و تفریحی را با دسترسی آسان به محیط زیست طبیعی عرضه می‌کند. همان‌گونه که قبلاً بیان گردید، تسهیلات زیرزمینی می‌توانند اثرات خاص بسیاری بر حفظ محیط زیست سطحی در محل یک مرکز خدماتی و یا در امتداد شبکه حمل و نقل داشته باشند. در شرایط کلی، قرارگیری تسهیلات در فضای زیرزمینی امکان حفظ فضای طبیعی بیشتر برای بهره‌مندی جامعه را فراهم می‌کند.

ساخت‌وساز زیرزمینی، در مقایسه با ساخت‌وساز سطحی یا مرتفع، می‌تواند صدای مزاحم و ارتعاشات را کاهش دهد و کنترل کیفیت بهتر هوا و استفاده مجدد سودمند از مصالح ساختمانی بی‌مصرف مانند خاک و سنگ کنده شده از محل را عرضه نماید. از سویی دیگر، به منظور کمک به سامانه محیط زیست طبیعی پایدار شهری، زیرساخت‌های واقع در زیرزمین باید با در نظر گرفتن مسائل مرتبط با کیفیت آب، جریان آب‌های زیرزمینی، تغییرات بالقوه ژئوشیمی خاک و یا تغییرات در دمای زیرزمین یا جریان گرما که ممکن است بر محیط زیست طبیعی و مصنوعی اثر بگذارد ساخته شوند.

برای محدودسازی آلودگی آینده، شیوه‌های مونیتورینگ آب‌های زیرزمینی جاری، خاک، و زیرساخت‌ها برای مناطق شهری به منظور شناسایی و پرداخت مؤثرتر مشکلات بالقوه می‌باید افزایش یابد (رجوع به فصل ۶ برای مباحث مفصل‌تر). شیوه‌های پایدار تأیید می‌کنند که مشکلات زیست‌محیطی باید به طور جامع و بر مبنای متعارف ریسک - هزینه - بازده بررسی شوند.

خطرات، امنیت و تاب‌آوری مناطق شهری

فرم و عملکرد نواحی شهری غالباً پاسخگوی خطرپذیری‌های شناخته شده می‌باشد. در طول تاریخ، تهدید حملات منجر به ایجاد شهرهای دور تا دور دیوار کشیده شده و منابع آب و غذا ایمن می‌گردد که برای ماه‌ها کفایت می‌کرد. آتش‌سوزی‌های گسترده، از قبیل آتش‌سوزی بزرگ لندن در ۱۶۶۶، به تغییراتی هم در شیوه‌های ساخت و هم در طراحی خیابان در شهرهای مهم انجامید (اسکوفیلد، ۲۰۱۱)؛ و توجه به تأمین و بهسازی آب در عصر جدید، زمانی که ارتباط میان پاکیزگی و بیماری شکل بست صورت گرفت. شرایط و یا پدیده‌های طبیعی زیرزمین مانند وجود یا فقدان گاز، تشعشع (رادون)، دمای بیش از اندازه بالا یا پایین و آب خطرانی را برای زیرساخت‌های زیرزمینی و مردم حاضر در آنها و یا مرتبط با آنها به همراه دارد. برای مثال، گازهایی مانند متان، سولفور و دی‌اکسیدکربن به طور طبیعی در زیرزمین وجود دارند و می‌توانند سلامتی انسان را در تراکم و یا موقعیت خاص تهدید نمایند. عدم وجود اکسیژن طبیعی نیز یک تهدید محسوب می‌شود. بنابراین، زندگی زیرزمینی انسان نیاز به تهویه مداوم از سطح در یک سامانه عرضه ایمن دارد. آب نیز خطری برای زیرساخت‌های زیرزمینی و ساکنان آنها محسوب می‌شود و بی‌درنگ می‌تواند سازه‌های زیرزمینی و سامانه‌های ایمنی را غرق و تخریب نماید (رجوع به کادر ۳،۸). چنین خطراتی می‌توانند در سطوح قابل قبولی به حداقل برسند و مدیریت شوند، اما تنها در صورتی که شناسایی، دریافت و پاسخ داده شوند. استراتژی مدیریت ریسک موفق، آن است که قرص و محکم در طراحی و فرایندهای عملیاتی ادغام شود. سامانه‌های مونیتورینگ قوی لازم است تا عملکرد کلی را تضمین کند و ظرفیت‌های انسانی و فنی نیاز است تا بتوان طراحی و اجرا نمود و در زمان رویارویی به عملکرد زیر استانداردها، پاسخ داد.

در سال‌های اخیر، انواع گوناگون و یا جدید خطرات در محیط شهری تشخیص داده شده‌اند و نیاز به رسیدگی بیشتر دارند. برخی مربوط به مسائل موجود شهری از قبیل کیفیت هوا، ایمنی شخصی و امنیت؛ بقیه به سامانه‌های زیرساخت شهری آسیب‌پذیر و رو به خرابی مرتبط می‌گردند. نوع دیگری از خطر، به حوادث غیر مترقبه و افراطی مرتبط می‌شوند مانند آنچه که در جنگ، اقدامات تروریستی و بلایای طبیعی اتفاق می‌افتد. منابع اطلاعاتی موجود برای فهم کامل پاسخ سامانه‌های پیچیده به حوادث غیر مترقبه و افراطی و یا مدل‌سازی و پیش‌بینی رفتار قابل اعتماد، بسیار اندک می‌باشند. حوادث غیر مترقبه و سخت می‌توانند فرصت‌هایی را برای نمایش‌های گسترده فراهم کنند، پاسخ‌های مشاهده گردیده، و طراحی و پیش‌بینی عملکرد از طریق شبیه‌سازی محاسباتی می‌تواند بهبود یابد. این امر مستلزم پیش‌سازماندهی و آماده‌سازی (شامل شناسایی بودجه) و همچنین شناسایی تیم‌های متقابل بخشی است که به منظور بررسی عواقب پس از حادثه به سرعت می‌تواند آماده و تجهیز شوند. تیم‌ها به منظور بررسی عواقب زلزله‌های بزرگ در سراسر جهان بسیج می‌شوند، اما تمرکز مطرح در اینجا بر درک و اعتبار سنجی مدل‌ها وابستگی متقابل قرار دارد.

نیازهای امنیتی نیز به طور قابل ملاحظه‌ای حتی از ۱۰ سال پیش تغییر یافته‌اند و برنامه‌ریزان و مهندسان می‌بایست خطرات و خطرپذیری‌هایی که قبلاً مورد بررسی قرار نگرفته‌اند کاهش دهند در حالی که انتظارات اجتماعی در خصوص بهروری و کیفیت زندگی را حفظ می‌کنند. بعلاوه، امکانات، مواد و مصالح و کاربری فضای چرخه حیات زیرساخت‌های مورد انتظار، تغییر کرده است. کدها و مقررات اندکی برای استعمال و کاربرد به طور مشخص در تسهیلات زیرزمینی شکل گرفته‌اند و حتی تعداد کمتری از نیازهای امنیتی در حال تغییر را ملحوظ می‌دارند. خرد و اندیشه در انتخاب کدها، مقررات و معیارهای جدید برای اندازه‌گیری موفقیت باید لحاظ شود. پایداری، بستگی به توان برنامه‌ریزان و مهندسان برای پیش‌بینی و انعطاف‌پذیری نسبت به مسائل، فن‌آوری‌ها و انتظارات اجتماعی در حال ظهور در طول و پس از چرخه حیات، زیر ساخت‌هایی دارد که آنها طراحی، ساخته و اجرا می‌کنند. آنان باید محیط زیست شهری دائماً در حال تحول را در نظر بگیرند.

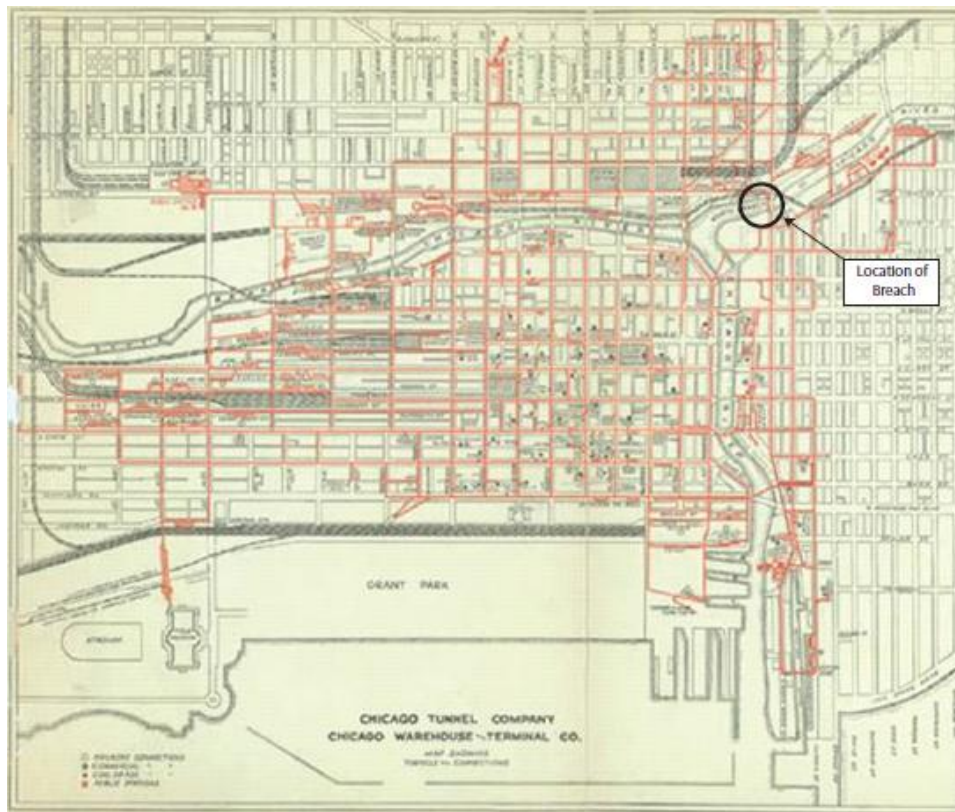
کادر ۸-۳

سیل بزرگ شیکاگو در سال ۱۹۹۲

«سیل بزرگ شیکاگو در سال ۱۹۹۲» در صبحگاه ۱۳ آوریل ۱۹۹۲ در نتیجه قرار دادن یک ستون پشتیبان در پایین رودخانه شیکاگو در جریان عملیات ساخت، اتفاق افتاد. سقف یک تونل قدیمی واقع در زیر رودخانه تخریب شد و جاری شدن سیلی گسترده جان انسان‌ها را به خطر انداخت و به زیرساخت‌های منطقه تجاری شیکاگو به شدت آسیب رساند (آرنولد، ۱۹۹۲). این تونل بخشی از سامانه‌ای است که از عمق ۶ تا ۱۵ متر در زیر رودخانه امتداد دارد (اینوی و ژاکوبازی، ۱۹۹۲)؛ ۹۶۶ میلیون لیتر (۲۵۰ میلیون گالن) آب در فضا‌های زیرزمینی مرکز شهر سرازیر شد. پس از تلاش‌های موفقیت‌آمیز توسط گارگران و پیمانکاران شهر برای بستن حفره، شهردار دیلی از رئیس جمهور بوش خواست تا حلقه شیکاگو را یک منطقه فاجعه زده ملی اعلام کند. در ۱۵ آوریل، سازمان مدیریت اضطراری فدرال، واکنش فدرال نسبت به فاجعه را بر عهده گرفت و گروه‌های مهندسی کار خود را به همراه پیمانکاران آغاز کردند تا عملیات مسدودسازی را انجام دهند. این کار ۳۷ روز بعد به اتمام رسید (اینوی و ژاکوبازی، ۱۹۹۲).

سامانه تونل باربری دست ساز ۱۰۰ کیلومتری که در اوایل دهه ۱۹۰۰ با هدف حمل سیم‌ها و کابل‌های تلفن و تلگراف ساخته شد برای جابجایی کالا و انتقال زباله خاک حاصل از بیش از ۸۰ ساختمان بکار گرفته شد. این تونل‌ها در حال حاضر ذخیره کردن کابل‌های برق و فیبر نوری استفاده می‌شوند (ورن، ۲۰۰۷). این رودخانه شبکه تونل را زیر آب برد که «مرکز شهر شیکاگو را قطع کرد و به زیرزمین ساختمان‌ها رسید» (ورن، ۲۰۰۷، ص. ۳۵). محققان خرابی تونل را در یک مدل ژئوتکنیکی عیناً بازسازی کردند و افزایش باردراماتیک، نقض و شکاف، و سیلاب را توضیح دادند. پایه جنوب شرقی یک پل پیش از این توسط دو دسته شمع دلفین (دسته‌های تنگاتنگ شمع) حفاظت می‌شد. در حین بازسازی، شمع‌ها برداشته شده و شکاف با حرکت دادن ۱ متری شمع‌های جدید به سمت جنوب و نزدیک‌تر به تونل ایجاد شد. این شکاف پیش از آغاز سیلاب آشکار گردید و تعمیرات تونل طرح‌ریزی شد. سیلاب به واسطه نشست کندتر آب از طریق خاک نسبتاً نفوذناپذیر به تأخیر افتاد، اما در نهایت زمانی که شمع‌ها برداشته شدند، خاک از جای خود حرکت کرد. مجرای بین پایین رودخانه و تونل شکل گرفت (ورن، ۲۰۰۷).

گزارشات در خصوص هزینه‌های اقتصادی و انسانی این سیلاب گسترده متفاوت است. کل هزینه قرارداد برای «آب زدایی» و تعمیرات سازه‌ای حدود ۵٫۵ میلیون دلار گزارش شد (اینوی و ژاکوبازی، ۱۹۹۲). سیلاب حلقه، یک مرکز مالی و خرده فروشی و مقر دولت شیکاگو را با هزینه تخمینی بین ۱ میلیارد دلار (ورن، ۲۰۰۷) تا ۱٫۹۵ میلیارد دلار (cbs۲chicago.com, ۲۰۰۷) به تعطیلی کشاند. گزارش شد که بورس کالای شیکاگو ۲۵ میلیون دلار را در معاملات از دست داد. هزاران نفر تحت تأثیر قرار گرفتند زیرا مردم می‌باید تخلیه می‌شدند، مترو تعطیل گردید، ساختمان‌ها و مشاغل بدون برق ماندند (برخی برای چندین روز) و سیلاب همه چیز را ویران کرد از کالا و منابع غذایی رستوران تا مدارک و اسناد دولت. طبقات پایینی ساختمان مؤسسه هنر نیز تخریب شدند. مقامات هشت شهر از جمله کمیساریای اقدام دپارتمان حمل و نقل، چه مستعفی چه بازنشسته، می‌باید پاسخگو می‌بودند چرا که آنها از پیش می‌دانستند که یک مشکل بالقوه جدی در محل شکاف شکل گرفته بود (cbs۲chicago.com, ۲۰۰۷).



نقشه شبکه تونل باربری شیکاگو در سال ۱۹۲۸ (اهدایی دپارتمان حمل و نقل شیکاگو) را نشان می‌دهد و محل شکاف ۱۹۹۲ که بیشتر مرکز شهر شیکاگو را زیر سیل برد.

شناسایی خطرات متوجه زیرساخت‌ها

برای بالا بردن امنیت و افزایش تاب‌آوری مناطق شهری، مزایا، نواقص و تعاملات عناصر زیرساختی می‌بایست با استفاده از یک رویکرد خطر آگاه، به درستی ارزیابی گردد. تمامی خطرات می‌باید مشخص و شناسایی شوند، اطلاعات مناسب و درست گردآوری و مدل‌ها و روش‌شناسی‌ها ایجاد شوند تا امکان تحلیلی جامع و فراگیر را برای درک خطرپذیری مهیا سازند. هر قدر تقاضا برای ساخت زیرساخت‌ها بیشتر باشد و هر قدر زیرساخت‌های بیشتری در زیر زمین قرار گیرد، پیچیدگی بیشتر می‌شود. امکان مدل‌سازی سامانه‌های مجزا و عملکردشان وجود دارد، ولیکن یقین و اطمینان کمی وجود دارد که مدل‌ها مطابق با واقعیت باشند. عدم قطعیت در رفتار سامانه‌های وابسته، نسبتاً بالاست و مدل‌های یکپارچه و معتبر سامانه‌های هنوز توسعه نیافته است. سامانه‌های ما توان و استحکام خود را از دست می‌دهند همچنان‌که سامانه‌های موجود بیشتر و نزدیکتر به ظرفیت کامل کار می‌کنند. کندکاری‌ها و یا توقف‌های مکرر زیرساخت‌ها (مثلاً راه‌بندان‌ها، خاموشی‌های کامل برق و یا نیمه خاموشی‌ها) نتیجه این امر می‌باشد. با اینکه میزان حساسیت و کنترل افزایش یافته است (مثلاً از طریق سامانه‌های کنترل نظارت و گردآوری اطلاعات [SCADA])، این سامانه‌ها نسبت به حملات عمدی، نقص‌های غیر منتظره و از دست دادن خدمات آسیب‌پذیرتر می‌باشند (هیلدیک-اسمیت، ۲۰۰۵). مدیران بخش زیرساخت به واسطه گسترش آبخاری مشکلات در سراسر بخش‌ها دچار سردرگمی می‌شوند. با این افزایش، ارزیابی و تخمین از آسیب‌پذیری‌های سامانه کنترل و SCADA، استراتژی‌های مقدماتی باید توسعه یابند، تا اینکه حوادث و خطرات مورد بررسی قرار گیرند. مشکلات تشدید می‌شوند، چرا که جامعه در نوسازی سامانه‌های زیرساخت موجود دارای سرمایه مکفی نمی‌باشد، که منتهی به خرابی، ظرفیت ناکافی و عدم سازگاری با تقاضاها و چالش‌های جدید می‌گردد که همگی منجر به افزایش آسیب‌پذیری می‌شود. مطالعات سامانه‌های اندکی وجود داشته است چه در مورد خطرات یکپارچه‌ای که توسط سامانه‌های زیرساخت زیرزمینی و چه در مورد همراهی با

خطر پذیری‌هایی که به واسطه افزایش استفاده از فضای زیرزمینی برای قرار دادن سامانه‌های حیاتی شکل می‌گیرند. برای اینکه مناطق شهری به پایداری برسند، در طراحی سامانه زیرساخت باید کاربری و خدمات بلندمدت موفق، و همچنین پاسخ‌های مهم دوره‌ای و کوتاه مدت به رویدادهای بالقوه شدید طبیعی و یا ناشی از مداخله انسان در نظر گرفته شود. زمانی که حوادث غیر مترقبه رخ می‌دهند، مهندسان و برنامه‌ریزان می‌بایست برای بررسی آنها به صورت بستر آزمایش تحصیل کرده، و آموزش ببینند تا رفتار سامانه‌های پیچیده، وابستگی‌های مابین سامانه‌های سامانه‌ها و اعتبار مدل‌های محاسباتی عملکرد سامانه را دریابند.

خطرات لرزه‌ای

پایداری زیرساخت‌های زیرزمینی، و اجتماع گسترده‌تر تا حدودی وابسته به قابلیت انعطاف‌پذیری و ترمیم‌پذیری نسبت به خطرپذیری مرتبط با مخاطرات طبیعی مانند زلزله و سیل می‌باشد. برای مثال، سازه‌های زیرزمینی واقع در مناطق زلزله خیز در معرض تکان‌های زمینی قرار دارند و در صورتی که به درستی طراحی نگردند دچار گسیختگی و شکست می‌شوند (مثال، ایستگاه مترو دقای، ژاپن؛ ناکامورا و همکاران، ۱۹۹۷). به طور کلی، سازه‌های زیرزمینی در زمان رویدادهای لرزه‌ای به واسطه دامنه‌های پایین‌تر ارتعاش، که توسط تسهیلات زیرزمینی تجربه می‌شوند و استحکام طراحی سازه و ساخت به خوبی عمل می‌کنند (هشاش و همکاران، ۲۰۰۱). معهدا، برخی ویژگی‌ها نظیر عمق و خصوصیات سنگ و یا خاک می‌تواند سازه‌های زیرزمینی را بیشتر و یا کمتر در معرض آسیب قرار دهد. هشاش و همکاران (۲۰۰۱) ملاحظه کردند که تونل‌های عمیق نسبت به تکان و لرزه در مقایسه با تونل‌های کم‌عمق از آسیب‌پذیری کمتری برخوردارند و اینکه تسهیلات ساخته شده در صخره مقاوم نسبت به آنهایی که در خاک ساخته می‌شوند دچار آسیب کمتری می‌گردند. به هر حال، زلزله‌های بزرگ هنوز می‌توانند خرابی‌های قابل توجه‌ای را در سازه‌های زیرزمینی به ویژه نزدیک مراکز زلزله به بار آورند. تلاش‌های قابل ملاحظه‌ای در راستای توسعه فن‌آوری‌های طراحی صورت پذیرفته است که عملکرد لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی را ارزیابی می‌کنند (هشاش و همکاران، ۲۰۰۱؛ هوو و همکاران، ۲۰۰۵؛ رجوع به کادر ۳،۱). به هر صورت، در محیط‌های شهری رو به رشد، درک کامل‌تر تعاملات میان زیرساخت‌های رو زمینی و زیرزمینی و اثرات لرزه‌ای بر پیکربندی تسهیلات زیرزمینی پیچیده نیاز است.

خطرات سیل

جاری شدن سیل به سبب باران‌های بیش از اندازه، طوفان‌های شدید و سونامی، دغدغه‌ای برای نواحی ساحلی و بسیاری از مناطق کم ارتفاع می‌باشد. برای مثال، طوفان‌های نیویورک در خلال مدهای بالا می‌توانند باعث جاری شدن سیل در بخشی از سامانه مترو گردند که حفاظت از نقاط دسترسی سطح، در برابر افزایش سطح آب را ایجاب می‌کند. یک طوفان تنها، با توجه به شرایط مناسب، می‌تواند منجر به یک موج طوفانی پایدار، چندین فوت بالاتر از سطوح معمولی جزر و مد بالا گردد و سبب سیلابی جدی و نفوذ آب شور به درون ساخت و سازه‌های زیرزمین می‌شود، نظیر آنچه که در طوفان سندی در ۳۰ اکتبر ۲۰۱۲ تجربه شد. (رجوع به کادر ۳،۹). حوادثی این چنین، مهر تأییدی بر ضرورت شناخت ریسک کلیه مخاطرات است. بازیابی از این رویداد همچنین می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه عمل کند که توسعه زیرساخت‌های آینده و برنامه‌ریزی و تلاش برای بازیابی و بهبود را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مهندسان فضای زیرزمینی و برنامه‌ریزان شهری فرصتی بی‌نظیر برای فهرست کردن یافته‌های خود دارند مادامی که اعمال بازیابی را بر عهده می‌گیرند و فرصت بازسازی و بهسازی سامانه‌های زیرساخت را دارند به این منظور که پایدارتر و تاب آورتر گردند.

جاری شدن سیل، در نتیجه حوادث و یا شرایط دیگری می‌تواند اتفاق بیفتد. زمین‌لرزه‌های منطقه فرورانش با ابعاد بزرگ،

همانطور که در مورد بخشی از غرب ایالات متحده صادق است، ممکن است سبب بالا آمدن سطح دریا گردد که زیرساخت‌ها را تهدید می‌نماید. سونامی نیز می‌تواند تأثیرات مخربی بر ساختمان‌ها و زیرساخت‌های نواحی ساحلی داشته باشد همانگونه که در زلزله و سونامی اقیانوس هند در سال ۲۰۰۴ و زلزله و سونامی ۲۰۱۱ در ژاپن بروز کرد. جالب این که، سازه‌های زیرزمینی در برابر فشار آب و اثرات باقی مانده ناشی از حرکت سیلاب بهتر محافظت می‌شوند به شرط اینکه مدخل‌ها پیش از حادثه محافظت و محکم‌کاری شوند. مناطقی که به لحاظ تاریخی در معرض سیلاب نبوده‌اند ممکن نیست برای کاهش اثرات سیل توسعه یافته باشند و حتی برخی نواحی مستعد جاری شدن سیل دارای زیرساخت‌های زیرزمینی در معرض ریسک می‌باشند (رجوع به کادر ۳،۱۰ برای توضیح تأثیرات آبشاری که جاری شدن سیل می‌تواند بر زیرساخت‌های شهری داشته باشد). اثرات جاری شدن سیل بر زیرساخت‌های زیرزمینی نیاز به تحقیق و مطالعه افزون‌تر دارد.

خطرات مرتبط با تغییرات آب و هوایی و افزایش سطح دریا

تغییرات گسترده زیست‌محیطی نظیر رگبارهای شدید و مکرر، تغییر سطح دریا و سیلاب ناشی از تغییر آب و هوا بر بسیاری از نواحی شهری تأثیر خواهد گذاشت (۲۰۱۲، ۲۰۱۱a، ۲۰۱۰b، ۲۰۰۸b، NRC). پایداری، به قابلیت پاسخگویی و سازگاری با چنین تغییراتی بستگی دارد. اگرچه بحث در مورد علم تغییرات آب و هوایی مورد توجه این گزارش نمی‌باشد، لیکن عنایت بر روش‌هایی که توسعه و کاربری فضای زیرزمینی، اثرات تغییرات آب و هوایی را کاهش می‌دهند مناسب و شایسته می‌باشد. مهندسی فضای زیرزمینی، بر محرک‌های تغییر آب و هوا (مثلاً کاربری زمین، انتشار گازهای گلخانه‌ای) تأثیر خواهد داشت و قابلیت جوامع شهری را در انطباق با شرایط، در حال تغییر آب و هوا افزایش می‌دهد.

کادر ۳-۹

عبرت‌های اولیه از طوفان سندی

طوفان سندی، بزرگ‌ترین طوفان ثبت شده اقیانوس اطلس، شرق ایالات متحده از کارولینا تا ماساچوست را در ۳۰ اکتبر سال ۲۰۱۲ تحت تأثیر قرار داد (به عنوان مثال، ۲۰۱۲، USGS). یوسف هشاش، یکی از اعضای کمیته تحقیق، راهبری بنیاد علمی ملی حمایت از تیم شناسایی حوادث غیر مترقبه ژئوتکنیکی (GEER) را بر عهده گرفت تا رفتار زیرساخت‌های زیرزمینی و ساحلی در حین و پس از طوفان سندی در منهتن، کویتز، جزیره استاتن و ساحل راکاوی در نیویورک و در نیوجرسی را بررسی نمایند. گزارش تیم GEER به صورت آن لاین عرضه می‌گردد (رجوع به <http://www.geerassociation.org>), اما دکتر هشاش مشاهدات اولیه در خصوص برخی از این اثرات در منهتن را با کمیته در میان نهاد.

یک موج ۱۳ فوتی قسمت پایین تر منهتن را زیر آب برد و زیرساخت‌های سطحی را از بین برد و یا دچار آسیب جدی و سنگین نمود و از ورودی‌های مترو و سایر زیرساخت‌های زیرزمینی که برای مقابله با سطوح بالای آب طراحی نشده بودند گذشت. همه هشت تونل متروی زیر رودخانه زیر آب رفتند اگرچه تمام زیرساخت‌های زیرزمینی غرق شدند، اما بسیاری از ساختمان‌ها با موفقیت آب را تخلیه و ظرف چند روز خشک شدند که دسترسی را برای تیم geer میسر ساخت. یکپارچگی سازه‌ای این ساختمان‌ها بی‌عیب و نقص به نظر می‌رسید اما سامانه‌های کمکی و پشتیبانی زندگی (مثلاً برق و تهویه) برای یک مدت طولانی در معرض آب بسیار خورنده و رسانای دریا قرار داشتند. برای اطمینان از ایمنی، سامانه‌های الکتریکی نمی‌توانستند تست و یا استفاده شوند تا اینکه توسط پرسنل واجد شرایط مورد بازرسی قرار گرفتند. ساختمان‌های بسیاری «برچسب زرد» دریافت کردند که دلالت بر این داشت که صاحبان زیرساخت‌ها هنوز در انتظار بازرسی‌های الکتریکی می‌باشند؛ از این رو، در زمان شناسایی، میزان واقعی خرابی شناخته نشد. طوفان سندی، جان بیش از ۱۰۰ نفر را در ایالات متحده گرفت. اگرچه بسیاری مربوط به غرق شدگی می‌شد، ولیکن هیچ یک از قربانیان غرق شدگی گزارش نشدند که در زیرساخت‌های زیرزمینی عمومی یافت شده‌اند (NY Times, ۲۰۱۱) (بدین لحاظ،

زیرساخت‌های زیرزمینی برای جلوگیری از تلفات بیشتر به خوبی مدیریت شدند با اینکه کار اندکی برای اجتناب از آسیب سازه‌ای انجام پذیرفت. صاحبان و اپراتورهای زیرساخت‌های زیرزمینی عمومی خطرات و ریسک‌های قریب الوقوع مرتبط با این طوفان را ارزیابی کردند و اقدام مناسب را برای تخلیه کارکنان از زیرزمین صورت دادند. بیشتر منهن در حال بازیابی است همانگونه که خدمات در حال بازسازی می‌باشند. خدمات مترو از ۳ دسامبر ۲۰۱۲ به مناطق پایین منهن برگرده شد (NY MTA, ۲۰۱۲a)، اما، تا ۱۰ دسامبر ۲۰۱۲، خدمات تونل از منهن تا بروکلین بازسازی نشده بود. شدیدترین آب گرفتگی در تونل مترو (مونتاگ) توسط آب دریا نزدیک به یک مایل بود که «از کف تا سقف» تونل را پر کرده بود (NY MTA, ۲۰۱۲b). چندین روز طول کشید تا اینکه گل‌ولای و آوار از تونل‌ها بیرون برده شد به محض اینکه آب داخل آنها پمپاژ گردید. تیم‌های بازرسی خرابی را در دستگاه‌های تقویت کننده سیگنال، سوزن‌های ریل، موتورهای توقف و سیم‌کشی یافتند. آوارها و تکه پاره‌های باقی مانده در تونل جریان پیدا کردند، برخی دارای نیروی کافی برای خم کردن فلز بودند، بر اساس MTA.

این اولین آب گرفتگی ساحلی شدید از یک قسمت به شدت شهری، ایالات متحده است که به طور گسترده‌ای وابسته به زیرساخت‌های زیرزمینی است. این کمیته در باره اینکه آیا این حادثه در پاسخ به تغییرات جهانی در الگوهای آب و هوایی است هیچ ایده و تصمیمی ندارد؛ با این همه، اذعان می‌دارد که طوفان‌های مکرر و یا شدیدی به عنوان نتیجه تغییرات آب و هوایی مورد انتظار پیش‌بینی شده‌اند (برای مثال، NRC, ۲۰۱۰; IPCC, ۲۰۰۷). طغیان آب دریا که در جریان این طوفان تجربه شد نیز یادآور افزایش مورد انتظار سطح دریا در بسیاری از قسمت‌های دنیا می‌باشد (مثلاً NRC, ۲۰۱۲). مشاهدات و درس‌های آموخته شده از طوفان سندی می‌تواند برای آگاهی در تصمیمات آینده پایداری شهری گردآوری شود چنانکه مسائل در حال ظهور شناسایی و پرداخت می‌گردند.

از آنجایی که مناطق بسیار بزرگ شهری در امتداد سواحل واقع می‌شوند و زیرساخت‌های آنها در حال حاضر درجا می‌باشند، لذا اینکه چگونه تاب‌آوری نواحی شهری را برای تضمین پایداری افزایش دهیم نیاز به فکر و اندیشه بیشتری دارد - یک چشم‌انداز دشوار با توجه به عمر و زوال بسیاری از این زیرساخت‌ها. تاب‌آوری و پایداری سامانه‌های شهری و زیرساخت‌ها در پرتو تمام خطرات و ریسک‌ها الزاماً فاکتورهایی می‌باشند که در طول پروسه تصمیم‌گیری مورد توجه قرار می‌گیرند. برنامه‌ریزان شهری باید دریابند که احتمال کاهش و یا تخفیف ریسک‌های وابسته به طوفان‌های با شدت بالا و افزایش سطح دریا وجود دارد، اما از بین بردن تمامی این خطرپذیری‌ها ناممکن است. مهندسان می‌بایست تاب‌آوری و افزایش توان برای بازیابی فاجعه (مثلاً طراحی مؤلفه‌های الکتریکی که می‌توانند قرارگیری طولانی‌مدت در معرض آب دریا را تحمل کنند) را در تصمیم‌گیری‌های فنی خود وارد سازند. تمامی این موارد باید تشریح مساعی کنند تا دریابند زیرساخت‌ها ظرفیت چه خطراتی را به صورت ایمن دارند.

تغییرات آب و هوایی اشاره به تغییر قابل ملاحظه به لحاظ آماری در حالت میانگین آب و هوا و یا تغییرپذیری آن طی یک دوره طولانی، معمولاً دهه و یا طولانی‌تر، که می‌توان آن را به دلایل طبیعی و یا فعالیت‌های انسانی نسبت داد (IPCC, ۲۰۰۷) دارد. شورای تحقیقات ملی پیامدهای تغییرات آب و هوایی بر زیرساخت و عملکرد سامانه‌های حمل و نقل آمریکا را اعلام نمود و پنج تغییر اقلیمی بااهمیت ویژه از جمله افزایش در تعداد و تعدد روزهای بسیار گرم و امواج گرما، افزایش در دمای قطبی، بالا آمدن سطح دریا، افزایش بارش‌های شدید، و افزایش در شدت طوفان را مشخص کرد (NRC, ۲۰۰۸b). خطرات کلی تغییر آب و هوا برای زیرساخت‌ها به خوبی مستندسازی شده است (NRC, ۲۰۰۹; CCAP, ۲۰۰۷; IPCC, ۲۰۱۰, ۲۰۰۸b)؛ با این همه، پرداختن به پیامدهای تغییر آب و هوا از طریق استفاده بهتر از فضای زیرزمین برای آینده پایدارتر به طور گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته است. به علاوه، تأثیرات تغییر آب و هوا به لحاظ منطقه‌ای متفاوت است به سبب تنوع در عوامل طبیعی و انسانی، بنابراین هیچ گونه راه حلی برای مسائل در حال ظهور به طور کلی قابل اجرا نمی‌باشد. این مسائل شامل نیاز به طراحی مجدد سامانه‌های تخلیه فاضلاب ساحلی، حفاظت بهتر در برابر آب گرفتگی سامانه‌های ریلی و جاده‌ای زیرزمینی، و حفاظت بهتر برای تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی تأسیسات زیرزمینی می‌باشند. ایجاد سازگاری‌های لازم برای طراحی سامانه‌های جدید و به شیوه‌ای برنامه‌ریزی شده برای سامانه‌های موجود به منظور عملکرد مؤثر و مستمر این

سامانه‌ها دارای اهمیت می‌باشد. ریسک‌های شناخته شده و ابزارهای تخفیف، کاهش و یا انتقال ریسک‌باید مورد بررسی قرار گیرند. گزینه‌هایی نظیر، نقل مکان و یا مهاجرت مراکز شهری به دور از مناطق تأثیرپذیر از تغییرات زیست‌محیطی می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند اما در این گزارش مورد توجه قرار نمی‌گیرند. تجدیدنظر در خصوص محل خدمات حیاتی - مانند ژنراتورهای اضطراری و سوخت - در فضاهای زیرزمینی و یا مناطق سیل خیز عاقلانه می‌باشد. دیگر پیامدهای تغییر آب و هوا ممکن است ناشناخته باشد و نیاز به تحقیق و پژوهش دارد. برای مثال آیا تأثیرات بالا آمدن سطح دریا بر زیرساخت‌های زیرزمینی می‌تواند افزایش وقوع بیماری‌های منتقله توسط آب و یا عدم توانایی تأمین آب در فشار کافی برای آتش نشانی در طول یک فاجعه را در برگیرد؟

کادر ۱۰-۳

جاری شدن سیل در نیواورلین به دنبال طوفان کاترینا

اثرات طوفان کاترینا در نیواورلین درس‌های تازه‌ای در مورد تاب‌آوری در اختیار ما قرار داد و در جای دیگر مفصلاً مطرح خواهد گردید (مثلاً کولتن و همکاران، ۲۰۰۸). جاری شدن سیل به واسطه شکست سامانه خاکریز، موجب بروز شکست‌های زنجیره‌ای و خسارات گسترده به سامانه‌های فیزیکی و اجتماعی شد؛ به طوری که تا سال‌ها بعد آن شهر به وضع عادی باز نگشت. از آنجایی که ایستگاه پمپاژ مورد استفاده برای تخلیه آب، طوفان خود نیز از آب گرفتگی در امان نبود، پیش از آنکه عملیات آغاز گردد، می‌باید تعطیل، آب زدایی و خشک می‌شد. خانه‌ها و خطوط زیرساخت زیرزمینی در طول سیل گرفتگی شناور ماندند (NIST, ۲۰۰۶)، که در بسیاری از موارد موجب قطع خدمات صنایع همگانی زیرزمینی (به ویژه گاز و آب) در نقاط ورود به ساختمان‌ها گردید. این امر منجر به نشستی‌های بسیار زیادی در سامانه‌های تأمین آب و گاز گردید به طوری که میزان فشار عرضه از دست رفت و سامانه‌های لوله کشی با آب غیر بهداشتی و شور پر گردید (NIST, ۲۰۰۶). عدم تأمین آب بر قابلیت‌های آتش نشانی تأثیر نهاد و تا حد زیادی از سرعت بازگشت به شرایط عادی زندگی کاست. آب گرفتگی سامانه توزیع گاز کم فشار باعث خوردگی شیرآلات و کتورها شد و نیاز به جایگزینی گسترده پیدا کرد. خطوط تأسیساتی مدفون در عمق کم به وسیله ریشه درختان صدمه دیدند زمانی که درختان بالغ در جریان طوفان از جا کنده شدند. تجهیزات پاکسازی سنگین غالباً به شیرهای پنهان شده توسط تکه پاره‌های باقیمانده آسیب می‌رسانند و تأسیسات مدفون در عمق کم غالباً به وسیله این تجهیزات زیر گرفته می‌شوند که سبب آسیب و یا خرابی این تأسیسات خدماتی می‌گردد. فقدان ثبت مناسب و یا در دسترس خطوط تأسیسات، شیرها و دریچه‌های بسته و دیگر مکان‌های عنصر زیرساخت مانعی بر سر پاسخ خدمات اضطراری و تأسیسات همگانی محسوب می‌شوند. به علاوه، نقاط عطف طبیعی بسیاری در محل خدمات توسط خرابی طوفان و سیلاب از بین می‌روند. بازیابی و بهبود به واسطه از بین رفتن خدمات شهری مانند برق، آب شیرین و تأسیسات بهداشتی به کندی انجام پذیرفت - مردم به سهولت نتوانستند به محلات خود باز گردند حتی زمانی که سیلاب فروکش کرده بود. بدون وجود ساکنان برای سروسامان دادن به آنجا، مسائل اداری و حقوقی عدیده‌ای در مورد وجوه مشترک مسئولیت‌های شخصی و وظایف سرویس پاسخ اضطراری به وجود آمد (دفتر اجرایی ریاست جمهوری آمریکا، ۲۰۰۶).

برخی مشکلات از قرارگیری زیرساخت‌ها در زیرزمین پدیدار می‌گردند، اما فضای زیرزمینی راه‌حل‌هایی ارائه می‌دهد. سؤالات مربوط به ساخت‌وساز زیرزمینی برای مثال عبارتند از (a): آیا ساخت‌وساز در زیرزمین می‌تواند، مثلاً از طریق کاهش مصرف سوخت فسیلی و خروجی کربن ابزاری برای کاهش مشارکت انسان در تغییرات آب و هوایی باشد؟ و (b) آیا ساخت‌وساز در زیرزمین از آسیب و یا خطر تغییرات زیست‌محیطی ناشی از تغییرات آب و هوایی می‌کاهد؟ سؤال اول مجموعه‌ای از ارزشیابی‌های پیچیده ملی و یا بین‌المللی را در بر می‌گیرد که شامل محاسبه بازدهی انرژی خالص چرخه حیات و اثر کربنی زیرساخت‌های زیرزمینی در مقایسه با هم‌تایان روی سطح می‌باشد (این موضوع در فصل ۵ به تفصیل بحث خواهد شد).

پرسش دوم در مورد کاهش آسیب و ریسک مربوط می‌شود به کاربری فضای زیرزمینی به عنوان ابزاری فیزیکی برای محافظت در برابر برخی از پیامدهای تغییرات اقلیمی، از قبیل طوفان‌های سهمگین، سیلاب‌ها و بالا آمدن سطح دریا (بابیلو، ۲۰۰۹). اگرچه تسهیلات زیرزمینی حفاظت نشده ممکن است در طول سیل غرق شوند، اما آنها حفاظت افزونی در برابر خسارت‌های سازه‌ای که در اثر افزایش آب و تکه پاره‌های باقی مانده ایجاد می‌شوند دارا می‌باشند. تغییرات در نیروهای سازه‌ای بر تسهیلات زیرزمینی در طول طوفان‌ها و یا سیلاب‌ها قابل پیش‌بینی است و در جریان طراحی می‌توان آن را لحاظ نمود. احتمال پیشگیری از جاری شدن سیل به واسطه افزایش و یا حفاظت ورودی‌ها به منظور حذف امکان نفوذ آب وجود دارد. بالا آمدن سطح دریا که وابسته به تغییرات اقلیمی است ریسک‌های قابل توجه‌ای را متوجه زیرساخت‌های زیرزمینی می‌سازد. تخمین زده می‌شود که تا سال ۲۰۳۰ سطح جهانی دریا ۸-۲۳ cm نسبت به سطح آن در سال ۲۰۰۰ افزایش یابد و تا سال ۲۱۰۰ (۵۰-۱۴۰ cm (NRC, ۲۰۱۲). برخی سامانه‌های در دست ساخت به صورت پیش‌بینانه از سطح آینده دریا طراحی می‌گردند. به هر صورت، مشکل حفاظت از شهرهای کم ارتفاع در برابر بالا آمدن سطح دریا اضطراب‌آور است، نمونه‌هایی که در هلند و نیو اورلئان، لوئیزیانا می‌توان یافت. نقاط کم ارتفاع زمین در هلند و نیو اورلئان به ترتیب ۶٫۸ m و ۱٫۵-۳ m زیر میانگین سطح دریاست (بورکت و همکاران، ۲۰۰۳). تسهیلات و امکانات زیرزمینی در میان دیگر موارد نیاز به طراحی خاص و ویژه دارد (مثلاً ورودی‌ها) تا آنها را نسبت به شرایط بالا آمدن سطح دریا مناسب سازند.

یکی دیگر از کاربری‌های بالقوه مهندسی شده فضای زیرزمینی، در نیاز به ارزیابی بیشتر، جداسازی زباله‌های مربوط به انرژی در مشخصه‌های زمین‌شناسی می‌باشد. تزریق دی‌اکسیدکربن به مشخصه‌های زمین‌شناسی به منظور تجزیه کربن (netl, ۲۰۱۰) و جداسازی زباله‌های رادیو اکتیو سطح بالا (مک کوبی، ۲۰۰۳) از جمله روش‌های تحت مطالعه برای قابلیت اطمینان، خطرات بالقوه برای مردم و محیط زیست در کوتاه مدت و بلند مدت، و تداخل با دیگر کاربردهای بالقوه فضای زیرزمینی می‌باشد. جداسازی دی‌اکسیدکربن به منظور کاهش میزان دی‌اکسیدکربن - یک گاز گلخانه‌ای - که در اتمسفر آزاد می‌گردد انجام می‌پذیرد. جداسازی فضای زیرزمینی از زباله‌های هسته‌ای سطح بالا که محصول شکاف هسته‌ای به منظور تولید برق می‌باشند به طور غیر مستقیم انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد چرا که تولید انرژی به این شیوه مستقیماً سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای نمی‌گردد. به شرط اینکه مسائل سیاسی و فنی پیرامون جداسازی فضای زیرزمینی از زباله حل و فصل گردند، و یا اگر نیروگاه‌های هسته‌ای مستقل (هر کدام با ذخیره‌سازی زیرزمینی بلندمدت مختص به خود) قادر به حداقل سازی فاکتورهای سیاسی، حمل و نقل و خطرپذیری مرتبط با هم نیروگاه‌های هسته‌ای و هم ذخیره‌سازی زباله باشند (مک کوبی، ۲۰۰۳)، ارزیابی مجدد برنامه‌ریزی، نظر به اینکه به تغییرات آب و هوایی وابسته است موجه دانسته می‌شود. چنین مسائلی هنوز باید مورد توجه قرار گیرند اما خارج از موضوع این گزارش می‌باشند.

شهرها را تا چه ارتفاعی از بالا آمدن سطح دریا می‌توان با دیوار و خاکریز محافظت نمود؟ برای شهرهای در معرض تهدید که از سطوح همکف موجود دست می‌کشند، اساساً آیا بالا آوردن «سطح زمین» تا یک طبقه منطقی است چنان‌که به دلایل مختلفی در بخش‌هایی از سیاتل، واشنگتن انجام پذیرفته است (ریچارد، ۲۰۰۸)؟ اگر چنین شود در این صورت سطوح هم کف موجود می‌توانند به سطوح جدیدی از شبه فضای زیرزمینی تبدیل گردند، همان‌گونه که در *La Rive* و *la Defense* در پاریس، فرانسه (دوفات، ۲۰۰۶) و شهر علمی تسوکوبا در ژاپن (دیرینگ، ۱۹۹۵) انجام گردیده است تا اینکه زیرساخت‌های خدماتی ارتقاء یافته همراه با یک محیط عابر پسندتر را شکل دهند. با توجه به چنین سناریوهایی، فن‌آوری‌های مهندسی فضای زیرزمینی مشخص می‌کنند که آیا شبکه‌های موجود کابل و لوله کشی زیرزمینی می‌توانند بارگذاری در عمق بیشتر و یا فشار سیل را متحمل شوند و اینکه فضاهای زیرزمینی موجود در ساختمان‌ها چگونه می‌توانند در برابر چنین افزایش باری، و نیز پتانسیل برای خوردگی بیشتر راه در میان دیگر ویژگی‌ها مسلح گردند.

تأثیرات بالقوه تغییرات آب و هوایی در شهرها و جوامع داخلی نیز می‌تواند قابل ملاحظه باشد. برای مثال، حوادث خطرناک

طبیعی ناشی از تغییرات آب و هوایی که بارندگی‌های بسیار شدید را ایجاد می‌کنند نیاز به طراحی‌های سامانه‌ای که حجم زیادی از آب را ذخیره و منتقل می‌کنند دارند به منظور کاهش و یا جلوگیری از خسارت‌های سیل و زیان‌های اقتصادی. تغییر در بارندگی سالیانه یحتمل بر سفره آب‌های زیرزمینی منطقه‌ای تأثیر خواهد داشت به طوری که تغییر در منابع آب‌های زیرزمینی در دسترس را به همراه دارد. احتمال تأثیرات بر سازه‌های سطحی و زیرزمینی موجود که به واسطه سطوح در حال تغییر آب‌های زیرزمینی و تغییرات حاصل در خواص خاک، سنگ و مواد مورد استفاده در ساخت‌وساز زیرزمینی ایجاد می‌شوند نیز وجود دارد. دیدگاه بلندمدت و منطقه‌ای مدیریت آب احتمالاً عنصری کلیدی در ایجاد تاب‌آوری برای مناطق محلی از اثرات تغییر آب و هوا می‌باشد، مادامی که درک کامل تری از تغییرات رفتاری خاک، سنگ و مصالح ساختمانی که ناشی از شرایط در حال تغییر آب‌های زیرزمینی است وجود دارد. بیمه و بیمه انکابی، به عنوان مؤلفه‌ای از مدیریت ریسک رویدادهای تغییر آب و هوایی برای سامانه‌های زیرزمینی، احتمالاً ضروری خواهد بود چرا که، اگرچه برخی حوادث به احتمال ضعیف به وقوع می‌پیوندند، پیامدهای ناشی از وقوع آن‌ها می‌تواند تأثیرات اقتصادی مکانی (جغرافیایی) و زمانی گسترده‌ای به دنبال داشته باشد. عملکرد کوتاه مدت و بلندمدت و الزامات نگهداری زیرساخت‌ها می‌باید شناخته شود تا تاب‌آوری و پایداری ارتقاء یابد.

افزایش تاب‌آوری

چنانکه در فصل ۱ بیان گردید، تاب‌آوری قابلیت پاسخ و سازش با تغییرات موجود در محیط را عرضه می‌نماید. در این مبحث، تاب‌آوری شامل توانایی جامعه شهری در کاهش شدت و توزیع مکانی خسارت ناشی از حوادث غیر مترقبه و یا تغییرات زیست‌محیطی بلندمدت (مثلاً رکود اقتصادی، تغییرات آب و هوایی) می‌باشد. قابلیت پاسخ و ارائه سریع عملکرد خدماتی به دنبال حوادث غیر مترقبه و کاهش اثرات اقتصادی ناشی از این حوادث نمایشی از تاب‌آوری می‌باشند. تاب‌آوری ساختمان به انواع خطراتی که پیش از این ذکر شد مربوط می‌گردد و از بین بردن و یا حداقل‌سازی آسیب‌پذیری‌ها در سامانه‌های ضروری که سامانه‌ها را در ریسک قرار می‌دهند را ایجاد می‌کند. این امر مستلزم یک سامانه از رویکرد سامانه‌ها و توجه به وابستگی‌های متقابل سامانه‌ها می‌باشد تا از گسیختگی‌های آبشاری سامانه‌های مجزا جلوگیری نماید.

فجاییی مانند طوفان کاترینا (رجوع به کادر ۳، ۱۰) می‌تواند برخی حسانات را به همراه داشته باشد به شرط آنکه جامعه از این تجربیات بیاموزد. برای مثال، زیرساخت‌های زیرزمینی چگونه طراحی شوند تا اثرات شناوری را کاهش دهند همان‌گونه که در جریان سیل نیو اورلئان اتفاق افتاد؟ چگونه می‌توان از اثرات خوردگی زیرساخت‌های فیزیکی جلوگیری نمود؟ فصل ۲ ابعاد خرابی‌های آبشاری ناشی از فروریزی برج‌های مرکز تجارت جهانی^۱ که به دنبال حملات تروریستی ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ اتفاق افتاد را بیان می‌کند. این حملات غم‌انگیز بودند اما درس‌هایی به همراه داشت که برنامه‌ریزان و پاسخگویان آینده می‌توانند برای به‌کارگیری در طراحی و عملیات زیرساخت‌های زیرزمینی بیاموزند:

- شرکت کان ادیسون در نیویورک (تامین کنندگان برق، گاز طبیعی و نیروی بخار) از تریلی حامل ژنراتورهای پرتابل استفاده کرد تا برق منطقه‌ای و خطوط موقت تغذیه مسیر - به نام شانت - را در زیرزمین تأمین کند به منظور برقراری تحرک و فعالیت برای شبکه‌های خراب و بی‌مصرف و بازگرداندن نیروی برق (او رور که و همکاران، ۲۰۰۳؛ مندونکا و والاس، ۲۰۰۵).
- افزونگی در خطوط سامانه مترو به این معنی که دسترسی به بسیاری از مناطق در کمتر از چند روز تعمیر و ترمیم گردید (او رور که و همکاران، ۲۰۰۳).
- سامانه‌های پلکان اصلی در برج‌های مرکز تجارت جهانی به مسیرهای تخلیه از بالای برج‌ها منتهی می‌شدند که ناپیوسته

^۱ WTC

- بودند و یا قطع شدند (مسیرهای فرار زیرساخت‌های زیرزمینی نیز ممکن است با چنین مشکلی رو به رو گردند).
- خطرات گرد و غبار در هوا و کیفیت آب بلافاصله شناخته نشد و در نهایت به عنوان خطرات بهداشتی برای اولین پاسخ دهندگان ثابت شد.
- عدم دسترسی آسان به اطلاعات مهندسی مرتبط با برج‌های مرکز تجارت جهانی و زیرسازی‌ها مانع از قابلیت دسترسی به امکان بالقوه ریزش ساختمان و پایداری سامانه دیوار پی گردید.

اهمیت استحکام سامانه‌های مجزا نسبت به تاب‌آوری کل به واسطه مثال‌های بالا نمایان می‌گردد. شاید مهم‌تر اینکه، وابستگی‌های میان کل سامانه، سامانه‌ها - سامانه‌های اجتماعی، اقتصادی، اطلاعاتی و فیزیکی در معرض خطر قرار دارند. انعطاف‌پذیری طراحی شهری بستگی به یک رویکرد مخاطرات چندگانه نسبت به آمادگی برای فاجعه و طراحی سامانه یکپارچه دارد. رویکرد مخاطرات چندگانه برنامه‌ریزی برای سناریوهای ریسک محتمل‌تر را ضروری می‌سازد و دارای انعطاف‌پذیری کافی برای همساز شدن با حوادث غیرمنتظره می‌باشد (مثال، ۲۰۱۱b NRC). برنامه‌ریزی سامانه‌های یکپارچه و هماهنگ نیاز به برنامه‌ریزی برای افزونگی‌های حیاتی در سامانه‌هایی دارد که برای مثال امکان پاسخ درست و بازیابی را میسر می‌سازند، زمانی که بخشی از یک سامانه دچار خرابی می‌شود. سرمایه‌های زیرساختی سطحی و زیر سطحی می‌باید به صورت سامانه‌هایی یکپارچه با در نظر گرفتن حفظ چرخه حیات، خطرپذیری، قابلیت اطمینان و پاسخ در زمان واقعی طراحی و عملیاتی شوند. برنامه‌ریزان شهری و مهندسان نیاز به رویکردهای خطر آگاه مورد اعتماد و معتبر دارند تا طرح‌ها و برنامه‌هایی که نیازهای پروژه را از نظر ارائه خدمات، هزینه‌های ابتدایی، تاب‌آوری در برابر حوادث غیر مترقبه، و حفاظت و عملیات مؤثر متعادل می‌سازند را برنامه‌ریزی کنند به طوری که عملکرد کل حیات رضایت بخش باشد. به واسطه انتخاب این نوع رویکرد برای محیط و زیرساخت‌های زیرزمینی (پر و یا خالی)، پیامدهای حوادث غیر مترقبه بسیار محدود می‌گردند، در نتیجه، جامعه به طور گسترده فضای زیرزمینی را به عنوان یک منبع بسیار امن و قابل اعتماد و بخشی از یک جامعه پایدار خواهد دانست.

منابع

- AAPA (American Association of Port Authorities). ۲۰۱۱. North America-Container Port Traffic: ۱۹۹۰-۲۰۱۰. Port Industry Statistics [online]. Available: <http://aapa.files.cms-plus.com/PDFs/CONTAINER%20TRAFFIC%20NORTH%20AMERICA%20۱۹۹۰%20-%20۲۰۱۰%20for%20the%20web.pdf> (accessed September ۲۰, ۲۰۱۱).
- ACTA (Alameda Corridor Transportation Authority). ۲۰۱۲a. Alameda Corridor Factsheet [online]. Available: http://www.acta.org/projects/projects_completed_alameda_factsheet.asp (accessed April ۸, ۲۰۱۲).
- ACTA. ۲۰۱۲b. About ACTA, History [online]. Available: <http://www.acta.org/about/history.asp> (accessed April ۸, ۲۰۱۲).
- APTA (American Public Transportation Association). ۲۰۰۸. Public Transportation Reduces Greenhouse Gases and Conserves Energy: The Benefits of Public Transportation. http://www.apta.com/resources/reportsandpublications/Documents/greenhouse_brochure.pdf (accessed June ۲۵, ۲۰۱۲).
- APTA. ۲۰۰۹. Changing the Way America Moves: Creating a More Robust Economy, a Smaller Carbon Footprint, and Energy Independence [online]. Available: http://www.apta.com/resources/reportsandpublications/Documents/america_moves_۰۹.pdf (accessed April ۸, ۲۰۱۱).
- APWA (American Public Works Association). ۱۹۷۱. Feasibility of Utility Tunnels in Urban Areas Special Report No. ۳۹. February. Chicago, IL: APWA.
- Arnold, R.L. ۱۹۹۲. Special Report: Underground flood hits Chicago's Loop, shutting down businesses for weeks. Disaster Recovery Journal [online]. Available: <http://www.drj.com/special/chicago.html> (accessed April ۴, ۲۰۱۱).
- Baron, T., G. Martinetti, and D. Pepion. ۲۰۱۱. Carbon Footprint of High Speed Rail Lines. Paris: International Union of Railways [online]. Available: http://uic.org/IMG/pdf/hsr_sustainability_carbon_footprint_final.pdf (accessed May ۱۸, ۲۰۱۲).
- Besner, J. ۲۰۰۲. The Sustainable Usage of the Underground Space in Metropolitan Area. ACCUS ۲۰۰۲ International Conference, November ۱۴-۱۶, ۲۰۰۲, Torino, Italy [online]. Available: http://www.ovi.umontreal.ca/documents/ovi_jbesner۲.pdf (accessed April ۷, ۲۰۱۱).
- Bobrick, B. ۱۹۸۱. Labyrinths of Iron: A History of the World's Subways. New York: Newsweek Books.
- Bobylev, N. ۲۰۰۹. Urban Underground Infrastructure and Climate Change: Opportunities and Treats. ۵th Urban Research Symposium [online]. Available: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/۳۳۶۳۸۷-۱۲۵۶۵۶۶۸۰۰۹۲۰/۶۵۰۵۲۶۹-۱۲۶۸۲۶۰۵۶۷۶۲۴/Bobylev.pdf> (accessed May ۲۴, ۲۰۱۲).
- Brueckner, J. ۱۹۹۹. Property Taxation and Urban Sprawl. University of Illinois at Urbana, Champaign, IL [online]. Available: <http://igpa.uiillinois.edu/system/files/WP۸۰-taxsprwl.pdf> (accessed September ۲۲, ۲۰۱۱).
- Burkett, W.R., D.B. Zilkoski, and D.A. Hart. ۲۰۰۳. Sea-Level Rise and Subsidence: Implications for Flooding in New Orleans, Louisiana [online]. Available: http://www.nwrc.usgs.gov/hurricane/katrina_rita/Sea-Level-Rise.pdf (accessed May ۳۰, ۲۰۱۲).
- Buzbee, J. ۲۰۱۱. Business goes underground. Progressive Engineer, May/June ۲۰۱۱. [online]. Available: <http://www.progressiveengineer.com/features/businessUnderground.htm> (accessed June ۱۳,

۲۰۱۱).

CA Water Resources Control Board. ۲۰۱۰. Salinity. Groundwater Information Sheet, March ۲۰۱۰ [online]. Available: http://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/gama/docs/coc_salinity.pdf (accessed June ۲۰, ۲۰۱۲).

Carver, A.D., and J.E. Yahner. ۱۹۹۷. Defining Prime Agricultural Land and Methods of Protection. Agronomy Guide AY-۲۸۳. Purdue University Cooperative Extension Service [online]. Available: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/AY/AY-۲۸۳.html> (accessed June ۴, ۲۰۱۲).
 cbs۲chicago.com. ۲۰۰۷. ۱۹۹۲ Loop Flood Brings Chaos, Billions in Losses, April ۱۴, ۲۰۰۷ [online]. Available: http://web.archive.org/web/۲۰۰۷۰۹۲۷۲۳۱۲۲۲/http://cbs۲chicago.com/vault/local_story_۱۰۴۱۴۰۹۴۰.html (accessed April ۴, ۲۰۱۱).

CCAP (Center for Clean Air Policy). ۲۰۰۹. Ask the Climate Question: Adapting to Climate Change Impacts in Urban Regions, A. Lowe, J. Foster, and S. Winkelman, eds. Center for Clean Air Policy Urban Leaders Adaptation Initiative, Washington, DC [online]. Available: http://www.ccap.org/docs/resources/۷۷۴/Urban_Climate_Adaptation-FINAL_CCAP%۲۰۶-۹-۰۹.pdf (accessed May ۱۸, ۲۰۱۲).

Colten, C.E., R.W. Kates, and S.B. Laska. ۲۰۰۸. Community Resilience: Lessons from New Orleans and Hurricane Katrina. Community & Regional Resilience Initiative (CARRI) Report ۳ [online]. Available: <http://biotech.law.lsu.edu/climate/docs/a۲۰۰۸,۰۳.pdf> (accessed July ۹, ۲۰۱۲).

Dames and Moore's Earthquake Engineering Group. ۲۰۰۴. The Loma Prieta Earthquake: Impact on Lifeline Systems. Disaster Recovery World [online]. Available: http://www.drj.com/drworld/content/w۱_۱۱۳.htm (accessed May ۱۴, ۲۰۱۲).

Dearing, J.W. ۱۹۹۰. Growing a Japanese Science City: Communication in Scientific Research. London: Routledge.

Duffaut, P. ۲۰۰۶. Underground City-Planning: A French Born Concept for Sustainable City of Tomorrow. International Symposium on Utilization of Underground Space in Urban Area, November ۶-۷, ۲۰۰۶, Sharm El-Sheikh, Egypt [online]. Available: http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/UWW_۱۰/use_۰۷_underground_planning/underground_city_planning.pdf (accessed June ۸, ۲۰۱۲).

Einstein, D. ۲۰۰۴. A City Reunited. Bechtel Company Magazine [online]. Available: http://www.bechtel.com/a_city_reunited_۰۱.html [accessed May ۱۶, ۲۰۱۲].

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). ۲۰۰۰. National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas. EPA ۸۴۱-B-۰۰-۰۰۴. U.S. Environmental Protection Agency, November [online]. Available <http://water.epa.gov/polwaste/nps/urban/index.cfm> (accessed July ۹, ۲۰۱۲).

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). ۲۰۱۱. Innovations in Water Management Needed to Sustain Cities. FAO Media Center, March ۳, ۲۰۱۱ [online]. Available: <http://www.fao.org/news/story/en/item/۰۳۴۷۹/icode/> (accessed June ۲۰, ۲۰۱۲).

FHWA (U.S. Federal Highway Administration). ۲۰۱۱. SR ۹۹: Alaskan Way Viaduct Replacement Project: Record of Decision. FHWA-WA-EIS-۰۴-۰۱-F. August. Available: <http://www.wsdot.wa.gov/Projects/Viaduct/library-environmental.htm>.

FHWA/PANYNJ (The Port Authority of NY and NJ). ۲۰۱۰. Cross Harbor Freight Program: Draft Scoping Document: Tier ۱ Environmental Impact Statement [online]. Available: <http://www>.

- panynj.gov/about/pdf/DRAFT-Scoping-Document-Appendices.pdf (accessed May ۱۷, ۲۰۱۲).
- Garber, A. ۲۰۰۹. Alaskan Way Viaduct Legislation Is Headed for the Governor. *Seattle Times*, April ۲۵, ۲۰۰۹ [online]. Available: http://seattletimes.nwsources.com/html/politics/۲۰۰۹۱۱۹۵۳۴_viaduct۲۰m۰.html (accessed April ۱۲, ۲۰۱۱).
- Goff, Z. A. ۲۰۰۱. Feasibility of Tube Transportation to Relieve Highway Congestion. Ph.D. dissertation. The Texas A & M University.
- Greene, R.P. ۲۰۰۶. Strong downtowns and high amenity zones as defining features of the ۲۱st century metropolis: The case of Chicago. Pp. ۵۰-۷۴ in *Chicago's Geographies: Metropolis for the ۲۱st Century*, R.P. Greene, M.J. Boumann, and D. Grammenos, eds. Washington, DC: Association of American Geographers [online]. Available: <http://immigrationseminar.uchicago.edu/events/GreeneChicagoGeog.pdf>.
- Hagler, Y., and P. Todorovich. ۲۰۰۹. Where High Speed Rail Works Best. *America* ۲۰۰۹, September ۲۰۰۹ [online]. Available: http://www.americamagazine.org/pdf/۲۰۰۹_Report_Where_HSR_Works_Best.pdf (accessed September ۲۰, ۲۰۱۱).
- Hashash, Y.M.A., J.J. Hook, B. Schmidt, and J.I.C. Yao. ۲۰۰۱. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. ۱۶:۲۴۷-۲۹۳.
- Hildick-Smith, A. ۲۰۰۵. Security for Critical Infrastructure SCADA Systems. Bethesda, MD: SANS Institute [online]. Available: http://www.sans.org/reading_room/whitepapers/warfare/securitycritical-infrastructure-scada-systems_۱۶۴۴ (accessed July ۹, ۲۰۱۲).
- Hooks, J.M., R.D. Goughnour, W.G. Horn, A.S. Peters, E.S. Smith, G.J. Tamaro, and C.E. Thunman. ۱۹۸۰. A Report of the Design and Construction of Diaphragm Walls in Western Europe, ۱۹۷۹. Report No. DOT-FH-۱۱-۸۸۹۳. Washington, DC: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation [online]. Available: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=۱۶۶۳۲۵> (author's summary description of the report; accessed April ۱۱, ۲۰۱۱).
- Hricko, A.M. ۲۰۰۶. Ships, trucks, and trains: Effects of goods movement on environmental health. *Environmental Health Perspectives*. ۱۱۴(۴):A۲۰۴-A۲۰۵.
- Hull, L. ۲۰۱۰. Now water chaos hits England as taps run dry for ۳۰۰۰ after burst pipe. *Daily Mail*, December ۳۱, ۲۰۱۰ [online]. Available: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-۱۳۴۳۲۰/WATER-CRISIS-Now-chaos-hits-England-taps-runs-dry-۳۰۰۰-burst-pipe.html> (accessed March ۹, ۲۰۱۱).
- Hulme, T.W., and J. Zhao. ۱۹۹۹. Underground space development in Singapore: The past, present and future. *Tunnelling and Underground Space Technology*. ۱۴(۴):۴۰۷.
- Huo, H., A. Bobet, G. Fernandez, and J. Ramirez. ۲۰۰۵. Load transfer mechanisms between underground structure and surrounding ground: Evaluation of the failure of the Daikai station. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* ۱۳۱(۱۲):۱۵۲۲-۱۵۳۳.
- Hunt Midwest. ۲۰۰۹. SubTropolis Benefits [online]. Available: <http://www.huntmidwest.com/subtropolis/benefits.html> (accessed May ۲۱, ۲۰۱۲).
- Inouye, R.R., and J.D. Jacobazzi. ۱۹۹۲. The Great Chicago Flood of ۱۹۹۲. *Civil Engineering—ASCE* ۶۲(۱۱):۵۲-۵۵.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). ۲۰۰۷. *Climate Change ۲۰۰۷: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change [online]. Available: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm (accessed June ۲۰, ۲۰۱۰).

- Jehanno, A., D. Palmer, and C. James. ۲۰۱۱. High Speed Rail and Sustainability. International Union of Railways [online]. Available: http://uic.org/IMG/pdf/hsr_sustainability_main_study_fi nal.pdf (accessed May ۱۱, ۲۰۱۲).
- Lake, J.D. ۱۹۹۸. NFPA ۵۲۰: A new standard for subterranean spaces. NFPA Journal (Nov/Dec ۱۹۹۸) [online]. Available: http://fi ndarticles.com/p/articles/mi_qa۳۷۳۷/is_۱۹۹۸۱۱/ai_n۸۸۱۶۹۹۵/ (accessed June ۱۳, ۲۰۱۱).
- Ledbury, M., and A. Veitch. ۲۰۱۲. The Benefi t of Expanding Europe’s High-Speed Rail Network. Public Service Europe, March ۴, ۲۰۱۲ [online]. Available: <http://www.publicserviceeurope.com/article/۱۵۸۹/the-benefi ts-of-expanding-europes-high-speed-rail-network> (accessed May ۱۷, ۲۰۱۲).
- Lindblom, M., and E. Heffter. ۲۰۰۹. Alaskan Way Viaduct Tunnel Claims: Who’s Right? Seattle Times, October ۱۷, ۲۰۰۹ [online]. Available: http://seattletimes.nwsourc.com/html/politics/۲۰۱۰۰۸۱۵۶۳_tunnelclaims۱۷m.html. (accessed April ۱۲, ۲۰۱۱).
- Liu, H. ۲۰۰۰. Pneumatic Capsule Pipeline—Basi۹۹۹c Concept, Practical Considerations, and Current Research. Proceedings of the Mid-Continent Transportation Symposium ۲۰۰۰, Iowa State University, Ames, Iowa. May ۵-۱۶, ۲۰۰۰ [online]. Available <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/midcon/liu.pdf> (accessed October ۳۱, ۲۰۱۲).
- Liu, H. ۲۰۰۴. Feasibility of Underground Pneumatic Freight Transport in New York City. Prepared for the New York State Energy Research and Development Authority. Columbia, MO: Freight Pipeline Company. ۹۹ pp [online]. Available: <http://www.uta.edu/ce/cuire/UPFT/۲۰NY.pdf> (accessed October ۳۱, ۲۰۱۲).
- McCombie, C. ۲۰۰۳. International perspectives on the reprocessing, storage, and disposal of spent nuclear fuel. *The Bridge* ۳۳(۳):۵-۱۰.
- Meehan, R.L. ۱۹۹۳. A natural history of underground fuel tank leakage. *Environmental Claims Journal* ۵(۳):۳۳۹-۳۴۰.
- Mendonça, D., and W.A. Wallace. ۲۰۰۵. Adaptive Capacity: Electric Power Restoration in New York City Following the ۱۱ September ۲۰۰۱ Attacks [online]. Available: http://www.resilienceengineering.org/REpapers/Mendonca_Wallace.pdf (accessed June ۴, ۲۰۱۲).
- Nadis, S. ۲۰۱۰. SubTropolis, USA. *Atlantic Magazine*, May ۲۰۱۰ [online]. Available: <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/۲۰۱۰/۵/subtropolis-usa/۸۰۳۳/> (accessed May ۲۱, ۲۰۱۲).
- Nakamura, S., J. Esaki, I. Suetomi, N. Yoshida, and M. Iwafuji. ۱۹۹۷. Investigation, analysis and restoration of the collapsed Daikai Subway Station during the ۱۹۹۵ Hyogoken Nanbu Earthquake. Pp. ۳۶۷-۳۷۶ in *Geotechnical Engineering in Recovery from Urban Earthquake: Proceedings of the Third Kansai International Geotechnical Forum on Comparative Geotechnical Engineering (KIG-Forum ۹۷)*, January ۱۹۹۷, Kobe. Kansai Branch of Japanese Geotechnical Society.
- NETL (National Energy Technologies Laboratory). ۲۰۱۰. DOE/NETL Carbon Dioxide Capture and Storage RD&D Roadmap. U.S. Department of Energy, National Energy Technologies Laboratory. December ۲۰۱۰ [online]. Available: http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/CCSRoadmap.pdf (accessed July ۹, ۲۰۱۲).
- Newman, P., and J.R. Kenworthy. ۱۹۹۹. *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Washington DC: Island Press.
- NIST (National Institute of Standards and Technology). ۲۰۰۶. *Performance of Physical Structures in Hurricane Katrina and Hurricane Rita: A Reconnaissance Report*. NIST Technical Note ۱۴۷۶. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology [online]. Available: <http://>

- www.bfrl.nist.gov/investigations/pubs/NIST_TN_۱۴۷۶.pdf (accessed July ۹, ۲۰۱۲).
- NRC (National Research Council). ۲۰۰۸a. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۰۸b. Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation: Special Report ۲۹۰. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۰. Adapting to the Impacts of Climate Change. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۱a. America's Climate Choices. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۱b. Building Community Resilience through Private-Public Collaboration. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۲. Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon, and Washington: Past, Present, and Future. Washington, DC: The National Academies Press.
- NY MTA (New York Metropolitan Transit Authority). ۲۰۱۲a. R Resumes Service to Lower Manhattan [online]. Available: <http://www.mta.info/nyct/service/RestoringRServiceMontagueStTube.htm> (accessed December ۱۲, ۲۰۱۲).
- NY MTA. ۲۰۱۲b. Restoring South Ferry Station [online]. Available: <http://www.mta.info/nyct/service/RestoringSouthFerryStation.htm> (accessed December ۱۲, ۲۰۱۲).
- NY Times. ۲۰۱۲. Mapping Hurricane Sandy's Deadly Toll [online]. Available <http://www.nytimes.com/interactive/۲۰۱۲/۱۱/۱۷/nyregion/hurricane-sandy-map.html> (accessed December ۱۲, ۲۰۱۲).
- O'Rourke, T.D., A.J. Lembo, and L.K. Nozick. ۲۰۰۳. Lessons learned from the World Trade Center disaster about critical utility systems. Pp. ۲۶۹-۲۹۰ in Beyond September ۱۱th: An Account of Post-Disaster Research, J.L. Monday, ed. Boulder, CO: Natural Hazards Research and Applications Information Center [online]. Available: http://www.colorado.edu/UCB/Research/IBS/hazards/publications/sp/sp۳۹/sept۱۱book_ch۱۰_ourourke.pdf (accessed June ۴, ۲۰۱۲).
- Palaniappan, M., S. Prakash, and D. Bailey, ۲۰۰۶. Paying with Our Health: The Real Cost of Freight Transport in California. A Ditching Dirty Diesel Collaborative Report, by the Pacific Institute. Hayward, CA: Alonzo Printing Co., Inc. [online]. Available: http://www.pacinst.org/reports/freight_transport/PayingWithOurHealth_Web.pdf (accessed June ۲۰, ۲۰۱۲).
- Parker, H.W. ۲۰۰۴. Underground Space: Good for Sustainable Development, and Vice Versa. International Tunnelling Association (ITA) Open Session World Tunnel Congress, May ۲۰۰۴, Singapore [online]. Available: <http://www.ita-aite.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ITAEvents/OpenSessions/HParker.pdf> (accessed April ۳۰, ۲۰۱۲).
- Parker, H.W., and J. Reilly. ۲۰۰۹. Life Cycle Cost Considerations Using Risk Management Techniques. Harvey Parker & Associates, Inc., Bellevue, WA, and John Reilly Associates International, Framingham, MA [online]. Available: <http://www.ctta.org/FileUpload/ita/۲۰۰۹/papers/O-۰۱/O-۰۱-۰۸.pdf> (accessed April ۱۱, ۲۰۱۱).
- Peila, D., and S. Pelizza. ۱۹۹۵. Civil reuse of underground mine Openings: A summary of international experience. Tunnelling and Underground Space Technology ۱۰(۲):۱۷۹-۱۹۱.
- PNSN (Pacific Northwest Seismic Network). ۲۰۰۲. Nisqually Earthquake, February ۲۸, ۲۰۰۱, Basic Information [online]. Available: http://old.pnsn.org/SEIS/EQ_Special/WEBDIR_۰۱۰۲۲۸۱۸۵۴۳p/welcome.html (accessed May ۱۸, ۲۰۱۲).
- Port of Miami Tunnel. ۲۰۱۰. Project Overview [online]. Available: <http://www.portofmiamitunnel.com>

- com/project-overview/project-overview-۱/ (accessed April ۸, ۲۰۱۱).
- Richard, C. ۲۰۰۸. The History of the Seattle Underground. Helium.com, November ۱۳, ۲۰۰۸ [online]. Available: <http://www.helium.com/items/۱۲۳۶۴۵۰-the-history-of-the-seattle-underground> (accessed July ۹, ۲۰۱۲).
- Riera, P., and J. Pasqual. ۱۹۹۲. The importance of urban underground land value in project evaluation: A case study of Barcelona's utility tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology* ۷(۳): ۲۴۳-۲۵۰.
- Roop, S.S., C.E. Roco, L.E. Olson, C.A. Morgan, J.E. Warner, D.-H. Kang. ۲۰۰۳. Year ۴ Report on the Technical and Economic Feasibility of a Freight Pipeline System in Texas. Report No. FHWA/TX-۰۴/۹-۱۵۱۹-۴. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System.
- Schofield, J. ۲۰۱۱. London after the Great Fire. BBC History [online]. Available: http://www.bbc.co.uk/history/british/civil_war_revolution/after_fire_۰۱.shtml (accessed May ۲۱, ۲۰۱۲).
- Sterling, R., H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J.P. Godard, I. Vähäaho, C.D.F. Rogers, X. Shi, and T. Hanamura. ۲۰۱۲. Sustainability issues for underground spaces in urban areas. *Proceedings of ICE - Urban Design and Planning* [online]. Available: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/۱۰,۱۶۸۰/udap.۱۰,۰۰۰۲۰>.
- Uffink, T., and H. Admiraal. ۲۰۱۲. Underground Transport of Cargo: A Sustainable Alternative. *Proceedings of the ۱۳th World Conference of Associated Research Centers for the Urban Underground Space*, Marina Bay Sands, Singapore. November ۷-۹, ۲۰۱۲. CD ROM (accessed October ۳۱, ۲۰۱۲).
- UrbanRail.Net. ۲۰۰۷. Subway Maps: Duisburg [online]. Available: <http://www.amadeus.net/home/subwaymaps/en/info/duisburg.htm> (accessed April ۲۲, ۲۰۱۲).
- U.S. Executive Office of the President. ۲۰۰۶. The Federal Response to Hurricane Katrina: Lessons Learned. Washington, DC: Government Printing Office.
- USGS (United States Geological Survey). ۱۹۹۸. The Loma Prieta, California, Earthquake of October ۱۷, ۱۹۸۹—Recovery, Mitigation, and Reconstruction, J.M. Nigg, ed. U.S Geological Survey Professional Paper No. ۱۵۵۳-D [online]. Available: <http://pubs.usgs.gov/pp/pp۱۵۵۳/pp۱۵۵۳d/pp۱۵۵۳d.pdf> (accessed May ۱۴, ۲۰۱۲).
- USGS. ۲۰۰۹. Historic Earthquakes: Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California [online]. Available: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/states/events/۱۹۸۹_۱۰_۱۸.php (accessed November ۲۳, ۲۰۱۰).
- USGS. ۲۰۱۲. Coastal Change Hazards: Hurricanes and Extreme Storms [online]. Available: <http://coastal.er.usgs.gov/hurricanes/sandy/> (accessed December ۱۲, ۲۰۱۲).
- Weston Solutions. ۲۰۰۵. Alameda Corridor Air Quality Benefits Final Report: June ۱۰, ۲۰۰۵ [online]. Available: http://www.acta.org/pdf/Alameda%۲۰Corridor_AQ_Benefits_۰۶۱۰۰۵.pdf (accessed July ۱۸, ۲۰۱۲).
- Wren, J. ۲۰۰۷. The Great Chicago Flood: Analysis of Chicago's ۲nd great disaster. *Structure Magazine* (August):۳۵-۴۰ [online]. Available: <http://www.structuremag.org/Archives/۲۰۰۷-۸/SFChicago-Flood-Wren-Aug-۰۷.pdf> (accessed April ۴, ۲۰۱۱).
- WSDOT (Washington State Department of Transportation). ۲۰۰۴. SR ۹۹: Alaska Way Viaduct & Seawall Replacement Project: Draft Environmental Impact Statement. March ۲۰۰۴ [online]. Available: <http://www.wsdot.wa.gov/Projects/Viaduct/library-environmental.htm#deis> [accessed

May ۱۴, ۲۰۱۲].

فصل چهارم

سلامت و امنیت در فضای زیرزمینی

«توجه به نقش رفتار انسان در ایمنی تونل امری مهم می‌باشد. نتیجه نهایی برخی حوادث بیشتر وابسته به واکنش سریع و درست افراد می‌باشد تا به سطح ایمنی فنی در تونل.» (OECD, p. ۱۵)

ما هر نوع زیرساخت زیرزمینی را طراحی کرده، می‌سازیم و عملیاتی می‌کنیم، اما انجام این کار می‌بایست با در نظر گرفتن توانایی‌ها و رفتارهای اپراتورها و کارکنان زیرساخت‌های زیرزمینی برای حداقل‌سازی خطرپذیری‌ها و افزایش بهره‌وری اتفاق افتد (رجوع به کادر ۲،۱). جورج بوگلیارلو نیاز به تعادل عناصر انسانی و مکانیکی زندگی شهری برای ایجاد محیط‌های مدرن، پایدار به لحاظ زیست‌محیطی و رضایت بخش به لحاظ روحی و روانی را تشریح کرد (بوگلیارلو، ۲۰۰۱). ایمنی نیز یک بخش ضروری از این چشم‌انداز می‌باشد. سامانه‌های زیرساخت زیرزمینی پیچیده‌اند و عناصری شبیه به آنچه بوگلیارلو به عنوان سامانه‌های بیوسوما (ترکیبی از زیست‌شناسی، ماشین‌آلات و جامعه) توصیف کرد را دارا می‌باشند - سامانه‌هایی که حاوی اجزاء بیولوژیکی (افرادی که سامانه را خلق، مدیریت و از آن استفاده می‌کنند)، اجزاء اجتماعی (جنبه‌های سازمانی)، و ماشین‌آلات (ساخته‌های مهندسی) می‌باشند. بوگلیارلو اذعان داشت نقاط تماس و اندرکنش این اجزاء در سامانه‌های حمل و نقل نقاط آسیب‌پذیری می‌باشند که در نهایت بر تاب‌آوری سامانه تأثیر می‌گذارند (بوگلیارلو، ۲۰۰۹). این کمیته معتقد است که همین مسئله را می‌توان بیان کرد وقتی انسان‌ها به سمت فضای زیرزمینی جایی که زیرساخت‌ها برای پشتیبانی این حرکت، حیاتی خواهند بود روانه می‌شوند.

با توجه به این ایده بعلاوه، می‌توان گفت که پایداری شهری به همان اندازه که به اقدامات، نظرات و رفتارهای انسانی وابسته است، به همان اندازه نیز به استحکام و تاب‌آوری زیرساخت‌های فیزیکی بستگی دارد (مثال، میلس، ۲۰۰۱)، اما آگاهی افراد، آنهایی که زیرساخت‌های زیرزمینی را طراحی می‌کنند، به کار می‌اندازند، استفاده و یا بهره‌وری می‌نمایند، از نقشی که هر عنصر سامانه و سازه در عملکرد مناسب سامانه شهری ایفا می‌کند برای پرداختن به استحکام، تاب‌آوری و پایداری سامانه شهری با ارزش‌تر است.

خطرات و ریسک‌های واقعی برای انسان‌ها در فضای زیرزمینی وجود دارد و مهندسان در پرداختن به بسیاری از آنها تا حد زیادی موفق بوده‌اند. فصل‌های ابتدایی این گزارش به اینکه چگونه تأسیسات و سامانه‌های شهری بسیار منسجم و نظام یافته و در نتیجه وابسته به یکدیگر می‌باشند می‌پردازند. این فصل به روابط سامانه فنی - انسانی، پاسخ انسان به خطرات پیش رو در فضای زیرزمینی و خطرات و ریسک‌هایی که به استفاده انسان از فضای زیرزمینی مرتبط است عنایت دارد. این فصل افراد را در فضای زیرزمینی مورد تأیید قرار می‌دهد و مهندسی لازم برای سلامت نگه داشتن آنها را بررسی می‌نماید در حالی که

پایداری را نیز عرضه می‌کند. حضور و یا عدم حضور پدیده‌هایی که به طور طبیعی رخ می‌دهند در فضای زیرزمینی ممکن است انسان‌ها را در معرض ریسک قرار دهند. گازها، تشعشع، درجه حرارت، آب و فقدان اکسیژن در زمره خطرات ذاتی و طبیعی برای انسان در استقرار زیرزمینی می‌باشند. دیگر خطرات برای انسان‌ها و یا زیرساخت‌ها ممکن است در نتیجه فعالیت‌های انسانی که خطرات طبیعی را ایجاد، افزایش و یا تشدید می‌نمایند به وجود آیند. این خطرات شامل ریسک‌هایی که مرتبط با آتش و دود، مواد خطرناک، انفجارهای عمدی و یا تصادفی، خرابی‌های سازه‌ای، کوتاهی‌های انسانی، و حوادث غیرمترقبه می‌باشند.

شناخت کامل این خطرات و خطرپذیری‌ها با اهمیت است چرا که بخش بسیار کلیدی موفقیت بلندمدت (مثلاً پایداری) در زیرزمین توانایی در سامان بخشیدن به ساخت‌وساز و اقدامات زیرزمین برای تضمین حداقل ایمنی است. اگر چه استانداردهای گوناگونی وجود دارد که اصولاً بر ایمنی در برابر آتش در حمل و نقل زیرزمینی و ساختمان‌ها و تسهیلات صنعتی نظارت می‌کنند، اما نیاز به یک رویکرد جامع‌تر برای ایمنی در برابر تمامی خطرات برای انواع گوناگون تسهیلات زیرزمینی می‌باشد. تذکرات این بخش این نیاز را بررسی می‌نماید.

مهندسی عامل انسانی

برای ایجاد یک سامانه شهری پایدار و کارآمد که به نحو مؤثری آرمانهای اجتماعی، فنی و نظارتی خود را به هم متصل می‌کند، روابط میان فن‌آوری‌ها، افرادی که این فن‌آوری‌ها را ایجاد، راه‌اندازی و استفاده می‌کنند، و ساختارهای اجتماعی که آنها را کنترل می‌کنند می‌بایست شناخته شود. در عرصه تولید، این حوزه تحقیقاتی مربوط به اسامی مختلفی شامل عوامل انسانی، مهندسی انسانی، روانشناسی مهندسی و مهندسی محیط کار می‌شود (کار پژوهی). لیچ و همکاران (۱۹۸۹) تعاریف متعددی را برای شرایط و زمینه‌های مطالعه مرتبط و یا مترادف با تحقیق «عوامل انسانی» آنالیز نمودند و دریافتند که بسیاری از تعاریف حاکی از یک رویکرد چند رشته‌ای شامل مفاهیم مرتبط با علوم رفتاری؛ ظرفیت عملکرد انسانی؛ نیروی انسانی، پرسنل و آموزش؛ و زیست‌شناسی، فیزیولوژی و پزشکی می‌باشد.^۱ اطلاعات حاصل از مطالعه عوامل انسانی می‌تواند در «طراحی ابزار، ماشین‌آلات، سامانه‌ها، وظایف، مشاغل، و محیط‌ها برای کاربری انسانی امن، راحت و کارآمد» مورد استفاده قرار گیرد (چاپانیس، ۱۹۹۱، ص. ۱) به طوری که بتوانیم «روابط میان تکنولوژی و انسان را بهینه‌سازیم» (کانتوویتز و سورکین، ۱۹۸۳؛ لیچ و همکاران، ۱۹۸۹، ص. ۲۷). کاربرد سامانه‌های انطباقی پیچیده مهندسی سامانه‌ها همان‌گونه که در فصل ۲ بیان گردید ضرورتاً روابط مابین انسان‌ها و زیرساخت‌های زیرزمینی را در نظر می‌گیرد.

نظامیان مدت‌هاست که اهمیت یکپارچه‌سازی عناصر سامانه انسانی و تکنولوژی را برای انجام عملیات‌هایی تا حد امکان مؤثر، کارآمد، امن و پایدار دریافته‌اند و این مفاهیم را به واسطه دستورالعمل‌ها و رهنمون‌ها اشاعه داده‌اند. برای مثال، دستورالعمل وزارت دفاع^۲ از سال ۱۹۸۸ بررسی نیروی انسانی، پرسنل، آموزش و ایمنی را در روند کسب سامانه دفاعی به منظور بهبود «تمامی ابعاد وجه مشترک انسان و ماشین» لازم می‌داند (DOD, ۱۹۸۸: p. ۱) در سال ۲۰۰۷، شورای تحقیقات ملی گزارشی را بنا به درخواست آزمایشگاه تحقیقاتی ارتش، آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی و DOD منتشر نمود که به رویکردهایی برای ایجاد «روش‌های طراحی سامانه انسانی، یکپارچه، چند رشته‌ای و قابل تعمیم» می‌پردازد (NRC, ۲۰۰۷, p. ۲) این

گزارش اصولی که برای پیشرفت و تحول سامانه انسانی، حیاتی است شامل آنچه که در ارتباط با توافق و اجماع ذی‌نفعان

۱. زیست‌شناسی، فیزیولوژی و ماشین در تعاریف مرتبط با مهندسی محیط کار متداول تر بودند. (Licht et al, ۱۹۸۹)

^۲ DOD

۳. این دستورالعمل از آن به بعد توسط دیگر دستورالعمل‌ها جایگزین گردیده است که همچنان بر عوامل انسانی تاکید دارند.

بر نتایج مورد نظر، ارزیابی منظم برنامه‌های مبتنی بر درس‌های آموخته شده و مدیریت ریسک می‌باشد را خاطر نشان می‌نماید.

بسیاری از کاربردهای مهندسی عوامل انسانی در ارتباط با تعامل انسان با یک آیتم تولیدی و یا فن‌آوری تنها می‌باشد. سامانه‌های زیرزمینی به عنوان بخشی از محیط‌های شهری کل پیچیده‌تر می‌باشند و نیاز به درک، طراحی، تنظیم و اداره روابط انسان - تکنولوژی افزون می‌گردد. تأثیر شکست و خرابی مؤلفه‌های زیرساختی کلیدی - از جمله انسان - و یا سامانه‌ها بر عملکرد پایدار محیط شهری می‌تواند نابود کننده باشد (رجوع به مبحث خرابی‌های آبشاری در فصل ۲). رفتار انسانی در رویارویی با حوادث نامساعد و شدید، همیشه قابل پیش‌بینی نیست و قطع نظر از اینکه زیرساخت‌های زیرزمینی و سامانه‌های ایمنی چقدر نسبت به خطرات ترمیم پذیرند، خرابی زیرساخت و سامانه پیامدهای منفی قابل ملاحظه‌ای در پی خواهد داشت. تمامی اشکال مهندسی زیرزمین نه تنها باید به بررسی این موضوع بپردازند که چه دستورالعمل‌های آموزشی و ایمنی برای عملکرد بدون مشکل زیرساخت‌ها در بهترین شرایط لازم است، بلکه می‌بایست در جریان سناریوهای عملیات هم معمولی و هم بدترین موارد رفتار ساکنان و کارکنان زیرزمین را پیش‌بینی نماید. طراحی باید کل نگرانه باشد و محیطی یکپارچه ایجاد نماید که امکان درکی تقریباً شهودی از چگونگی ایمن ماندن در بالا رفتن شرایط نامساعد را میسر می‌سازد. پایداری فضای شهری بستگی به بهینه‌سازی روابط فنی - انسانی به روش‌هایی دارد که دست کم حداقل ایمنی را مهیا می‌کند در حالی که با چشم‌اندازهای اجتماعی بلندمدت سازگار می‌ماند.

صنعت نیز به ایمنی در زیرساخت‌های زیرزمینی عنایت دارد. انجمن بین‌المللی تونل‌سازی^۱، برای مثال، کمیته‌ای را برای ایمنی عملیات تسهیلات زیرزمینی (COSUF)^۲ تشکیل داد تا به دل نگرانی‌های ایمنی و امنیت در سازه‌های زیرزمینی بپردازد. COSUF دستورالعمل‌های ارزیابی ریسک را گسترش داده (مولاگ و تریجسنار - بوهره، ۲۰۰۶) و با یک گروه کاری ITA در مورد سلامت و ایمنی^۳، بر افزایش روش‌های ایمنی در حین ساخت تمرکز نموده است. پلت فرم تکنولوژی ساخت اروپا^۴ اذعان داشت که ایمنی و امنیت می‌بایست در همه عناصر زیرساخت‌ها طرح‌ریزی شود، از جمله وجوه مشترک میان هر عنصر، با در نظر گرفتن چرخه حیات کامل زیرساخت (ECTP, ۲۰۰۵).

مدیریت ایمنی به واسطه مقررات

قابل پیش‌بینی است که ایمنی در زیرساخت‌های زیرزمینی همانند ایمنی در زیرساخت‌های سطحی است و در غیر این صورت، انتظار این است که یکی از این‌ها به طور کامل آگاه از خطرات بالقوه باشد. به هر حال، اگرچه مهندسان در کاهش بسیاری از انواع خطرپذیری مرتبط با کاربری فضای زیرزمینی موفق بوده‌اند، ریسک در زیرساخت‌های زیرزمینی به اندازه خطرپذیری مرتبط با زیرساخت‌های سطحی از بازرسی دقیق نظارتی برخوردار نبوده است و سطوح خطرپذیری‌های مشخص به خوبی شناخته نخواهد شد. کدهای موجود تمایل دارند در طبیعت تجویزی باشند - که شیوه‌ها و یا مواد خاصی را تجویز می‌کنند - اما فضای زیرزمینی چالش‌های ایمنی مختلفی را مطرح می‌سازد که کدهای در نظر گرفته شده برای فضای سطحی به منظور پرداختن به آنها طرح‌ریزی نشده‌اند. برای مثال، بسیاری از مردم می‌دانند که ترک بدون دردسر یک ساختمان در حال آتش‌سوزی برای رسیدن به ایمنی کافی است. خروج از یک ساختمان بلند در شرایط اضطراری، برای مثال، معمولاً پایین آمدن از چندین ردیف پله را ایجاب می‌کند به جای استفاده از آسانسورها و یا پله‌های برقی. معهذاً، ترک یک‌سازه زیرزمینی

^۱ ITA

^۲ رجوع به <http://cosuf.ita - aites.org/> (دسترسی در ۱۵ جون ۲۰۱۱).

^۳ برای مثال، سلامت و ایمنی در گروه کاری ورکس از انجمن بین‌المللی تونل‌سازی نشریات متعددی را در ارتباط با شیوه‌های کار ایمن منتشر کرده است (رجوع به ۲۰۱۱، ITA - AITES).

^۴ ECTP

گرفتار در آتش تنها ساکنان را به یک فضای زیرزمینی دیگر که آن نیز آلوده به دود است سوق می‌دهد و ساکنان ممکن است که مجبور به بالارفتن از چندین ردیف پله برای خروج گردند - یک کار فیزیکی چالش برانگیز برای برخی. خطرات همراه با آسانسورها و پله‌های برقی تا حدودی توسط انجمن کد ایمنی

مهندسی مکانیک آمریکا برای آسانسورها و پله‌های برقی (ASME, ۲۰۱۰a) مورد توجه قرار گرفته است که طراحی، ساخت، نصب، راه‌اندازی، نگهداری، تعمیر، بازرسی و آزمایش آسانسورها و پله‌های برقی را پوشش می‌دهد. دستورالعمل‌ها نیز اطلاعاتی در مورد اینکه چگونه بخش شروط عدالت مربوط به قانون آمریکائیان معلول به واسطه عملکرد آسانسورها و یا پله‌های برقی برآورده خواهد شد ارائه می‌دهند (ASME, ۲۰۱۰b).

گاهی نیاز است که ایمنی به صورت عملیاتی ایجاد شود به جای استفاده از راه‌حل‌های فنی (مثلاً بدون مواد خطرناک مگر اینکه آب پاش مناسب و یا دیگر سامانه‌ها در محل باشند). کدهای ایمنی غالب اوقات در پاسخ به درس‌های آموخته شده از حوادث و یا شکایات نوشته می‌شوند نه در پاسخ به تحقیقات. استراتژی مدیریت ریسک پاسخگو، شناسایی و شناخت خطرات و خطرپذیری‌ها و به کارگیری استراتژی‌های مناسب برای کاهش خطرات را در بر می‌گیرد. اگر خطرپذیری‌های زیرزمینی تشخیص داده شوند، می‌توان از آنها اجتناب نمود، منتقل کرد و یا تا سطوح قابل تحمل کاهش داد. در برخی موارد هزینه کاهش خطرات بسیار زیاد و یا سرسام‌آور خواهد بود چه از نظر هزینه‌های سرمایه‌ای برای ساخت چه در هزینه‌های عملیاتی. این می‌تواند به این معنا باشد که یک پروژه هرگز آغاز نخواهد گردید، یا اینکه سامانه‌های مینیمم نصب شده در محل به واسطه هزینه‌ها به صورت مناسب نگهداری و حفاظت نمی‌شوند. فرض کنید که اجتناب از ریسک و یا انتقال آن امکان‌پذیر نیست، کاهش ریسک از طریق مقررات ایمنی مناسب و آموزش شاید بهترین رویکرد باشد. استانداردهای ایمنی برای زیرساخت‌های سطحی در فدرال، ایالت و سطوح محلی گسترش یافته‌اند و در طول نسل‌ها اصلاح گشته‌اند تا مجموعه گسترده‌ای از اقدامات را تحت پوشش قرار دهند. چنین استانداردهایی نقش کلیدی در جلوگیری و یا کاهش خطرات و خطرپذیری‌ها ایفا می‌کنند.

مقررات ایمنی فعلی در سطح فدرال برای زیرساخت‌های زیرزمینی محدود می‌باشند، در کاربری هر روزه بسیاری از انواع تسهیلات کاربرد ندارند، و عمدتاً برای کنترل ایمنی ساخت از طریق اداره کل مخاطرات ایمنی شغلی^۱ در نظر گرفته می‌شوند. این مقررات شامل مقررات OSHA مرتبط با ساخت‌وساز زیرزمینی می‌باشند ۲۹ (CFR ۱۹۲۶.۸۰۰)^۲ که در ساخت تونل‌های زیرزمینی، اقامتگاه‌های زیرزمینی، معابر زیرزمینی و حفاری‌های رو باز که در ارتباط با ساخت زیرزمینی هستند بکار می‌روند به منظور کاهش خطرات مربوط به «کاهش تهویه و نور طبیعی، دسترسی و خروج دشوار و محدود، قرار گرفتن در معرض آلودگی هوا، آتش‌سوزی، جاری شدن سیل، و انفجار» (OSHA, ۲۰۰۳). این مقررات تونلی را به عنوان یک حفاری زیر سطحی تعریف می‌کنند، «که محور بلندتر آن زاویه بیشتر از ۲۰ درجه نسبت به افق تشکیل نمی‌دهد». اگرچه این مقررات برای بسیاری از انواع زیرساخت زیرزمینی قابل اجرا می‌باشند، اما تنها برای حفاظت از کارگران ساختمانی در طول ساخت‌وساز زیرزمینی اختصاص می‌یابند و به مسائل ایمنی ساخت زیرساخت‌ها نمی‌پردازند.

هر یک از ایالات‌های آمریکا کدهای ایمنی جانی و آتش‌سوزی را برای اطمینان از ایمنی در سازه‌ها پذیرفته است، اما این کدها به طور کامل به سازه‌های زیرزمینی عنایت و توجه ندارند. بسیاری از ایالات (۴۵) کدهای ساختمانی، آتش‌سوزی، لوله کشی و مکانیکی شورای بین‌المللی کد (ICC)^۳ را پذیرفته‌اند. کدهای ICC به سه استاندارد انجمن ملی حفاظت از آتش

^۱ OSHA

^۲ http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadispl.show_document?p_id=۱۰۷۹۰&p_table=STANDARDS (دسترسی در ۴ آوریل ۲۰۱۱).

^۳ <http://www.iccsafe.org/Pages/default.aspx> دسترسی در ۹ جون ۲۰۱۱.

(NFPA) اشاره دارند – (NFPA, ۲۰۱۰b, NFPA ۵۲۰ (NFPA, ۲۰۱۰a), NFPA ۱۳۰ (NFPA, ۲۰۱۱), و NFPA ۵۰۲ (NFPA) – که به ایمنی جانی و ایمنی از آتش در زیرزمین می‌پردازند و اینکه دستورالعمل‌های ایمنی را برای تونل‌های ریلی مسافری و جاده‌ای و استفاده از فضای ایجاد شده به واسطه حفاری زیرزمینی ارائه می‌دهند. دو استاندارد از این استانداردها در طول دهه‌ها برای تسهیلات حمل و نقل زیرزمینی مناسب و قابل اجرا بوده‌اند. با این همه، استانداردهای قابل اجرای NFPA نمی‌توانند به قدر کفایت برای تمام کاربری‌های فضای زیرزمین ایمنی جانی و ایمنی از آتش را در فضای زیرزمینی بپردازند و زمانی که انواع متفاوت کاربری در یک فضای زیرزمینی ترکیب می‌گردند احتمال بی‌نتیجه خواهند ماند. به علاوه، این استانداردها اختیارات قانونی را محدود می‌سازد مگر اینکه توسط ایالات و یا حوزه‌های قضایی محلی به تصویب برسند.

ناکافی بودن استانداردهای ایمنی در نتیجه گسترش آنها بدون در نظر گرفتن رشد تمام انواع و مقیاس‌های بزرگ کاربری فضای زیرزمینی می‌باشد. نوع‌آوری در طراحی و ساخت فضای زیرزمینی به واسطه کدهای تجویزی (و بالقوه غیر مؤثر) حتمی و ملزم می‌باشد زمانی که مکانیسم‌های مبتنی بر عملکرد که اطمینان می‌دهند طراحی‌ها همان‌طور که انتظار می‌رود کار می‌کنند به واقع مورد نیازند.^۱ همچنین، همان‌گونه که در سرتاسر این گزارش تأکید می‌شود، زیرساخت‌های زیرزمینی تنها عنصر سامانه شهری کل می‌باشند که به طور فزاینده‌ای به هم پیوسته و به هم وابسته هستند. تصمیمات در خصوص ایمنی یک عنصر زیرساختی می‌باید بر اساس تأثیرات آن تصمیم بر سامانه کل باشد. درخواست برای کاربری فضای زیرزمینی در حال رشد می‌باشد و بدون بررسی دقیق، دستورالعمل‌های مبتنی بر تحقیق و در سطح ملی و یا استانداردهای ایمنی مؤثر که برای فضای زیرزمینی به عنوان بخشی از سامانه شهری یکپارچه بزرگ‌تر در نظر گرفته می‌شوند، حوزه‌های قضایی محلی تشکیل استانداردهای ایمنی خاص خود را به عهده می‌گیرند که اگر منابع و ظرفیت‌های مناسب در دسترس نباشند این عمل با آگاهی کامل انجام نمی‌گیرد.

خطرات مربوط به سلامتی انسان

بخش‌های آتی در مورد خطرات مربوط به سلامتی انسان که در ارتباط با اشغال فضای زیرزمینی می‌باشند بحث می‌نمایند، که بر عدم وجود تهویه مناسب، دود حاصل از آتش‌سوزی و مواد خطرناک تمرکز دارد. برخی خطرات و خطرپذیری‌ها به صورت عملیاتی متوقف می‌گردند، با بقیه نیز مستقیماً در طراحی زیرساخت‌ها، از طریق راه‌حل‌های مهندسی مقابله می‌شود. سایر موارد نیز به کمک سیستم‌هایی کنترل خواهند شد. تحلیل دقیق سناریوهای اضطراری زیرزمینی برای تمامی خطرات و خطرپذیری‌ها – از جمله آنهایی که در نتیجه تغییرات در تکنولوژی‌ها و یا کاربری به وجود می‌آیند – این اطمینان را ایجاد می‌کند که شدت رویدادهای اضطراری هیچگاه از حدود قابل کنترل تجاوز نکند و یا اینکه خسارات قابل پیشگیری را رقم بزنند. برای مثال، می‌توان گرایش کنونی به سمت خودروهای الکتریکی بیشتر برای کاهش ریسک آتش‌سوزی در تونل‌ها را مشاهده کرد، اما باتری‌ها در وسایل نقلیه الکتریکی مجموعه‌ای از خطرپذیری‌های خاص خود را به همراه دارند. ناوگان آینده وسایل نقلیه که با هیدروژن و یا گاز طبیعی کار می‌کنند هنوز مسائل مختلفی را مطرح می‌سازند.

افزونگی در سامانه‌های ایمنی جانی و ایمنی از آتش کلیدی برای کنترل حوادث می‌باشد. برای مثال، از آنجایی که مدیریت دود در زیرزمین امری حیاتی است، اطمینان از اینکه سناریوهای تهویه کمینه برای کنترل دود حاصل از آتش عملیاتی می‌باشند لازم و ضروریست اگر هر بخشی از تهویه اضطراری دچار نقص شود. بدون چنین سطحی از افزونگی در سامانه‌های ایمنی جانی ضروری، یک نقص ساده مکانیکی ساکنان و کارکنان زیرزمین، محتویات و سازه‌های فیزیکی زیرزمین را به خطر می‌اندازد.

۱. آسیا دارای کدهای مبتنی بر عملکرد بیشتری است چرا که پیمانکاری در آنجا بر پایه طراحی-ساخت است به جای طراحی-مناقشه-ساخت، که در ایالات متحده متعارف‌تر می‌باشد.

تهویه، دود و کنترل آتش

مهندسی تهویه فضای زیرزمینی، عرضه هوای تنفسی برای افراد در زیرزمین و از بین بردن گازهای خطرناک (مانند دی‌اکسیدکربن اضافی، گازهای خروجی، دود) از فضای اشغال شده را با خود به همراه دارد. حرکت بی‌دردسرها از سطح به زیرزمین ممکن است مناسب نباشد، چرا که هوا می‌باید حاوی اکسیژن کافی برای گنجایش مردم باشد تا این نیازشان برآورده گردد و از آلودگی به دور باشند. گازهای خطرناک به واسطه تمیز کردن هوای فضای زیرزمینی و یا به وسیله هدایت بدون خطر هوای آلوده به سطح از میان می‌روند. استانداردهای NFPA و ICC به بسیاری از این مسائل می‌پردازند، اما نه به طور مشخص برای فضاهای زیرزمینی ایجاد شده برای استفاده انسان. خطرات به طور نامناسبی تعدیل می‌گردند.

یکی از بزرگ‌ترین خطرات برای سلامت و ایمنی انسان در زیرزمین دود حاصل از آتش می‌باشد (ITA, ۱۹۹۸). مدیریت دود در تقریباً تمام انواع سازه‌های سطحی در چارچوب دانش فنی فعلی و ظرفیت سامانه ایمنی جانی کاری درست است. با این وجود، مدیریت دود در یک سازه پیچیده _ سازه‌ای که می‌تواند.

چندین سطح زیرزمین را در بلوک‌های شهری مختلف در برگیرد، توسط هزاران انسان در هر زمان می‌تواند پر شود و کاربری‌های بسیار (مثلاً خرده فروشی، فضای اداری، مراقبت‌های پزشکی، مسکونی) و در نتیجه خطرات و خطرپذیری‌های بالقوه بسیاری دارد - ممکن است بسیاری از طرح‌های پیچیده سامانه تهویه را به چالش کشاند. به منظور تهویه هوا، این مناطق زیرزمینی چند کاربری می‌توانند به مراتب پیچیده‌تر و مشکل‌تر از، مثلاً، برخی تونل‌های جاده‌ای که به صورت لوله‌های ساده‌ای از هوا، اگرچه طولانی، با مقاطع نسبتاً کوچک ساخته می‌شوند باشند.

تمایزات استراتژیک مهمی در مدیریت دود در ساختمان‌های بلند مرتبه در مقایسه با سازه‌های زیرزمینی بزرگ وجود دارد. برای مثال، در یک ساختمان بلند مرتبه ۴۰ طبقه که یک بلوک شهری کامل را اشغال می‌نماید (که معادل با ۴۰ بلوک شهری از فضای همکف در یک تراز افقی است) معمولاً برای کنترل تهویه، آب پاش‌های آتش، آژیرها و سامانه‌های خروج فوری تا چهار طبقه طراحی می‌گردند که ساکنان را در معرض ریسک قرار می‌دهد. مدیریت ریسک نوعاً محدود به تنظیم فشار هوای بدنه آسانسور و فضای پلکان می‌گردد که نیاز به فن‌های نسبتاً کوچک دارند. ساکنان دیگر طبقات به وسیله طبقات میانی این سازه برای مدت کوتاهی حفاظت می‌شوند تا اینکه بدون هیچ خطری ساختمان را تخلیه کنند.

یک ساختمان زیرزمینی با اندازه قابل مقایسه (معادل ۴۰ بلوک شهری از فضای همکف) به صورت بالقوه می‌تواند فضای جانبی گسترده‌تری را در سطوح کمتر اشغال کند، که تماس جانبی با آتش و دود که در سرتاسر فضای افقی پخش می‌گردد را افزایش می‌دهد. مدیریت دود در چنین مساحت بزرگی - با ابزارهای کنترلی اندک اگر در دسترس باشند (مانند پنجره‌هایی رو به بیرون) - نیازمند طراحی نسبتاً پیچیده‌تر و سامانه‌های تهویه پرتوان‌تر، و سامانه‌های تشخیص آتش‌سوزی، سامانه‌های هشدار و سامانه‌های خروجی با طراحی دقیق‌تر برای حفاظت از ساکنان می‌باشد. اطلاعات تخصصی هشدار اضطراری باید به منظور مطلع ساختن افراد از نیاز به تخلیه طراحی شود. سامانه‌های ساختمان بلند مرتبه مجبور به پرداختن به تنها یک طبقه در یک زمان می‌باشد. سامانه‌های زیرزمینی ضرورتاً ظرفیت ۲۰ طبقه یا بیشتر را به طور همزمان دارند.

پیشگیری از آتش و مهار رشد آتش از طریق استراتژی‌های مدیریتی از جمله ساخت‌وساز غیرقابل احتراق، کنترل مواد خطرناک، امنیت بیشتر، و محدودیت‌های دقیق کاربری (مانند پیشگیری از خطرات قریب الوقوع از قبیل کار در کارخانه در مجاورت بیمارستان) میسر می‌باشد. سازه‌های زیرزمینی دارای برخی مزایا بر حسب ایمنی جانی و ایمنی از آتش در مقایسه با سازه‌های سطحی می‌باشند. سازه‌های زیرزمینی با فضاهای محصور کوچکتر، استفاده از سامانه‌های گازی یا مه آب را برای کنترل آتش و دود امکانپذیر می‌سازند، که بدین‌سان تقاضا برای آب و زهکشی که مشکلات دیگری را در زیرزمین ایجاد می‌کند کاهش می‌یابد. اطمینان از اینکه ساکنان خطر آتش را در فضای زیرزمینی تشخیص می‌دهند تضمین می‌نماید که تمامی ساکنان ریسک کمتری در ارتباط با آتش می‌پذیرند.

مواد خطرزا

مواد خطرزا مورد استفاده در تولید، پردازش و ناوگان دریایی و یا ایجاد شده توسط آنها خطرات خاصی را در زیرزمین به دلایلی مشابه آنچه که برای دود و آتش مطرح است به وجود می‌آورند: جداسازی‌های فیزیکی و سامانه‌های تهویه که ایمنی کافی و مناسب را در سطح زمین عرضه می‌کنند ممکن است در زیر سطح مناسب نباشند. بر روی سطح، برای مثال، کارگاهی که از دستگاه‌های برش استفاده می‌کند اجازه کار در ساختمانی مجاور یک سازه مسکونی را می‌یابد به شرط آنکه یک فضای نسوز مانند یک شکاف هوایی آزاد مابین دیوارهای دو ساختمان وجود داشته باشد. شکاف هوایی کافی مناسب اطمینان می‌دهد که آتش‌سوزی در گارگاه به آسانی در ساختمان‌های مجاور گسترش نمی‌یابد، و تبادل آسان هوا به بیرون را میسر می‌سازد به گونه‌ای که گازهای مورد استفاده در فرآیند برش اکسیژن را جایگزین نمی‌کنند و جوی فاقد اکسیژن را به وجود می‌آورند. از سویی دیگر، اقدامات عملیاتی و مهندسی به منظور حفظ ایمنی در سازه‌های زیرزمینی ضروری است. دیوارهای آتش بند، تهویه، و شیوه‌های مناسب برای برش‌های بی‌خطر در فضای زیرزمینی الزامی است. به طور مشابه، نشست مایعات خطرآفرین و در فضای زیرزمینی خطرات طولانی مدتی را برای سلامتی ایجاد می‌سازد در صورتی که از طریق تهویه و سامانه‌های زه‌کشی زیرزمینی کوچ کنند و یا در خاک‌های مجاور و سنگ‌های متخلخل نفوذ نمایند که دیگر محیط‌ها و یا منابع آب را آلوده می‌سازد.

ایمنی از خشونت

زیرساخت‌های زیرزمینی غالباً به منظور جذاب ساختن و آسانتر نمودن دسترسی و کاربری تسهیلات زیرزمینی برای عموم طراحی می‌گردند. حتی صنایع همگانی زیرزمینی، اگر چه برای دسترسی عموم مردم طراحی نشده است، باید برای ملحوظ داشتن دسترسی کارگران و تجهیزات طراحی شوند. طراحی زیرساخت‌ها غالباً شامل عناصر امنیتی برای جلوگیری از جرم و خرابکاری و یا حفاظت در برابر آتش و شرایط اضطراری مشابه می‌باشد. متأسفانه، عناصر طراحی، دسترسی آسان به زیرزمین را برای شهروندان عادی میسر می‌سازد همچنین دسترسی را برای آنان که اهداف خطر آفرین و یا خرابکارانه دارند فراهم می‌نماید. خنثی نمودن تمامی اعمال خشونت بار بر ضد مردم و یا زیرساخت‌ها غیر ممکن می‌باشد (جنکینز و گریستن، ۲۰۰۱). با این حال، تمایل مسافران به متروهای زیرزمینی در شهرهای بزرگ آمریکا در ۱۰ سال گذشته افزایش یافته است (مثلاً WMATA و سامانه‌های کمبریج، ثبت شده، ۲۰۰۹؛ دیناپولی و بلاواس، ۲۰۱۰)، که دلالت بر این دارد که نیاز و آسایش برای دست کم چند درصد از مردم مهم‌تر از نگرانی‌های لحظه‌ای در خصوص ایمنی شخصی است. به دنبال حوادث تروریستی مطالعات اندکی برای مستندسازی الگوهای کاربری فضای زیرزمینی انجام گردیده است، اما مطالعات بر روی مسافران حمل و نقل عمومی در دوران پس از بمب‌گذاری‌های ۲۰۰۵ لندن، بمب‌گذاری‌های ۲۰۰۴ مادرید، و حملات گاز سارین ۱۹۹۵ در ژاپن نشان داد که رفتار، تحت تأثیر باورهای فرهنگی، ویژگی حملات، فاکتورهای مرتبط با خود سامانه حمل و نقل، و برداشت‌های اجتماعی از خطر می‌باشد (وفون وینترفلت و پراگر، ۲۰۱۰). برای مثال، مسافران زیرزمینی و اتوبوس‌های لندن (مورد هدف در حمله) کاهش یافتند و پس از حادثه به آرامی به حالت اولیه برگشتند، اما مسافران در ژاپن به نظر تغییری نیافتند (پراگر و همکاران، ۲۰۱۰b).

امنیت و بهبودپذیری نسبت به خشونت در جامعه شهری به واسطه انواع برنامه‌ریزی‌ها، طراحی‌ها، و عملکردهای عملیاتی می‌تواند بهتر گردد که تکرار و یا شدت حوادث خطر آفرین را کاهش می‌دهد. در این فصل ابتدا در خصوص ایمنی افراد در برابر خشونت بحث می‌گردد و سپس خشونت بر ضد شمار بیشتری از مردم و خود زیرساخت‌ها مطرح می‌گردد.

ایمنی از جرم و جنایت

احساس امنیت شخصی - آزادی عمل در یک شهر با انتظارات پایین از حملات خشونت‌آمیز بر ضد مردمش - برای عملکرد بدون مشکل جامعه با اهمیت است. طراحی فیزیکی و تعداد افراد حاضر در یک فضای اشغال شده به ایمنی افراد و احساس امنیت شخصی کمک می‌نمایند. انواع مشخص سازه‌های زیرزمینی، برای مثال زیرگذرهای عابر پیاده، با توجه به ایمنی دارای شهرت و اعتبار اندکی می‌باشند، شاید به دلیل روشنایی ضعیف و یا استقرار محدود، البته در مقایسه با سامانه‌های مترو که در آنها به منظور مدیریت سازمان‌های مسافربری امنیت در سطح بالاتری قرار دارد (برای مثال، از طریق استفاده از قطارهای کوتاه‌تر و پلت فرم در شب به منظور افزایش تعداد مسافران در مناطق درگیر). کاربری‌های مختلف زیرزمینی انواع گوناگونی از مشکلات را مطرح می‌کند. برای مثال، امنیت خرده‌فروشی واقع در سالن حمل و نقل عمومی چگونه است زمانی که قسمت خرده‌فروشی در شب تعطیل می‌شود و این در حالی است که حمل و نقل عمومی هنوز مورد استفاده است؟ دسترسی عمومی به حمل و نقل وقتی بخش خرید زیرزمینی برای آن روز تعطیل می‌باشد چگونه است؟ پس راه‌حل‌های مهندسی به شکل نظارت پیشرفته به میدان می‌آیند (رجوع به فصل ۶).

حملات بر ضد زیرساخت‌ها و جمعیت‌های شهری

فضای زیرزمینی همواره به عنوان عامل دفاعی بازدارنده یا امنیتی پیشنهاد شده و می‌شود. برای مثال، فضای زیرزمینی به منظور حفاظت از امنیت رهبری یک کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد (مک کامای، ۱۹۹۸؛ باری، ۲۰۰۰). با ظهور سلاح‌های کشتار جمعی، میزان زیادی اعمال مهندسی در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ بر تسهیلات نظامی و دفاعی زیرزمینی در ایالات متحده انجام گرفت که به پیشرفت فن‌آوری‌های مرتبط با محیط زیست، امنیت، و حفاظت در برابر آتش در تسهیلات زیرزمینی خدمت نمود. مثال‌ها شامل مرکز جانشینی فرماندهی کوه شایان در عمق کوهی گرانیته و پناهگاه زیرزمینی در گرینبریر در غرب ویرجینیا برای تداوم دولت در زمان حمله می‌باشند. به علاوه، گرایش بی‌وقفه‌ای در سراسر جهان به قرار دادن نیروگاه‌های هسته‌ای و زباله‌های آنها در زیرزمین به منظور افزایش جداسازی مواد رادیواکتیو و همچنین افزایش امنیت این تسهیلات وجود دارد (مثال، میرز و الکینز، ۲۰۰۹). امکان ذخیره‌سازی بلندمدت و ایمنی همچنان یک حوزه تحقیقاتی فعال می‌باشد. در تأیید امنیت عرضه شده در فضای زیرزمینی، خزانه جهانی بذر سوالبارد در نوروی در یک کوه ساخته شد تا در صورت فاجعه جهانی و یا منطقه‌ای مربوط به جنگ یا آب و هوا از تنوع محصول جهانی حفاظت نماید (فولر، ۲۰۰۸).

حملات تروریستی ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱ (۱۱/۹) در ایالات متحده، با این وصف، اساساً روشی را که برای ایمنی و امنیت در این کشور بکار می‌رفت تغییر داد، از جمله طراحی و فعالیت سازه‌های زیرزمینی. پیش از ۹/۱۱، فعالیت‌های خرابکارانه و مجرمانه نگرانی‌های اصلی برای امنیت فضای زیرزمینی بود. تهدیدات تروریستی بر علیه انسان و زیرساخت‌ها به صورت ناهنجاری در نظر گرفته شدند. زیرساخت‌های زیرزمینی، به خصوص سامانه‌های حمل و نقل عمومی، اکنون به عنوان هدفی آسیب‌پذیر برای آن افرادی است که خواهان آسیب رساندن بسیار به زیرساخت‌ها و یا وارد نمودن صدمه به شمار زیادی از مردم می‌باشند. اثرات انفجارها، آتش‌سوزی‌ها، گازها، و دیگر سموم موجود در هوا و خطرات بهداشتی در سازه‌های محصور زیرزمینی می‌تواند شدیدتر و زیان‌آورتر باشد. اعمال تروریستی در مکان‌های زیرزمینی مختلف با پیامدهای جدی روی داده است، از جمله حمله سال ۱۹۹۵ با گاز اعصاب، سارین، در توکیو ژاپن (Tu, ۱۹۹۹)، بمب‌گذاری‌های سال ۲۰۰۵ در لندن انگلیس (۲۰۰۶، HC)، و بمب‌گذاری‌های سال ۲۰۱۰ در مسکو روسیه (رگزا و زوجوسکی، ۲۰۱۰). تمامی این رویدادها با به‌کارگیری وسایلی که با دست به داخل زیرساخت‌های زیرزمینی برده شدند به وقوع پیوستند.

حدود ۸۷ درصد حملات تروریستی در سراسر دنیا در سال ۲۰۰۳ از طریق بمب‌گذاری‌ها رخ دادند (وزارت امور خارجه آمریکا، ۲۰۰۴)، که به صورت مواد منفجره دست‌ساز حمل شده در خودرو، یاترفندهای بکار گرفته شده به صورت تله‌های

انفجاری، دستگاه‌های انفجاری کنترل از راه دور، و یا نقشه‌های اجرا شده توسط بمب‌گذارهای انسانی انجام می‌گیرد. همچنین تهدیدات قابل تصور ناشی از مواد انفجاری مورد اصابت در زمین به وسیله موشک‌ها وجود دارد. معهدا، تأسیسات زیرزمینی به منظور تأمین «مؤثرترین حفاظت فیزیکی موجود» شناخته می‌شوند و می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که عناصر زیرساختی حیاتی در مقابل حملات فیزیکی محافظت گردند و در برابر حملات الکترونیکی مقاوم شوند (لینگر و همکاران، ۲۰۰۲). قرارگیری تسهیلات در زیرزمین آنها را نسبت به آسیب خارجی سخت‌تر می‌نماید (مثلاً آسیب حاصل از سطح زمین) و نقاط ورود را محدود می‌سازد. لینگر و سایرین (۲۰۰۲) هزینه این حفاظت را به صورت «رقابتی» با سازه‌های روززمینی که با سطوح مشابهی مقاوم شده‌اند تعریف کردند. متاسفانه، طبقه بندی فن‌آوری‌های نظامی منتهی به فقدان استانداردها و یا شیوه‌هایی در زیرساخت‌های غیر نظامی گردیده است (Gui and Chein, ۲۰۰۶).

با توجه به تشخیص نیاز به توجه در مورد مسائلی مانند مخاطرات، سازمان‌های مختلف تحقیقات مربوط به بسیاری از جنبه‌های امنیت و ایمنی زیرزمین را آغاز نموده‌اند. نیروی مسئول امنیت حمل و نقل انجمن مقامات حمل و نقل و بزرگراه ایالتی آمریکا^۱ مسئولیت آماده‌سازی کتاب راهنما برای کمک به متخصصان حمل و نقل را بر عهده گرفتند نظر به اینکه آنها بزرگراه‌های مهم را شناسایی می‌کنند و برای کاهش آسیب‌پذیری آنها اقدام می‌نمایند (SAIC, ۲۰۰۲). هیئت تحقیقات حمل و نقل شورای ملی تحقیقات گزارش‌های بسیاری را در ارتباط با ایمنی و امنیت حمل و نقل منتشر کرده است، از جمله تعداد بسیار زیادی که به حمل و نقل زیرزمینی مربوط می‌شوند.^۲ این گزارشات دستورالعمل‌ها و توصیه‌هایی را در مورد موضوعاتی نظیر افزایش‌های مستمر زیرساخت‌های زیرزمینی عرضه می‌کنند که امنیت و همچنین عمر مفید سازه‌های زیرزمینی را بهبود خواهند داد و از سامانه‌ها حفاظت خواهند نمود (TRB, ۲۰۰۶). به همان ترتیب، اداره فدرال بزرگراه و AASHTO مشترکاً هیئتی را تشکیل دادند تا «استراتژی‌ها و روش‌های بازداری، بر هم زدن و کاهش حملات بالقوه» را گسترش دهند، که توصیه می‌کند که هماهنگی دینفعان و بین سازمانی به گونه‌ای اتفاق بیافتد که روش‌ها و راه‌حل‌های ارزیابی امنیت با نیازهای تمام مسائل درگیر همساز و مطابق باشد و اینکه مسئولیت‌های قانونی در سطح فدرال و ایالت واضح و روشن باشد (BRPBTS, ۲۰۰۳). از نقطه نظر فنی، این هیئت توصیه نمود که پل‌ها و تونل‌های مهم مشخص و اولویت‌بندی شوند و منابع مالی برای تأمین امنیت آن سازه‌ها اختصاص یابند. این هیئت همچنین توصیه کرد که امنیت، باید عنصری مهندسی شده در طراحی باشد و اینکه تحقیق و توسعه مناسب باید در استانداردهای فنی سازه‌ها با توجه به تهدیدات امنیتی لحاظ گردد.

امنیت، همانند ایمنی، با تفکر سامانه‌های مشترک میان تمامی ذی‌نفعان در طول چرخه حیات زیرساخت‌ها افزایش می‌یابد. تعامل میان برنامه‌ریزان شهری و مهندسان فضای زیرزمینی در خلال توسعه و عملیات بر این نکته تمرکز دارد که چگونه زیرساخت‌های زیرزمینی می‌توانند حفاظت از تسهیلات حیاتی و ساکنان آنها را بهبود بخشند یا مانع آن گردند. مسائل و نیازهای مرتبط با امنیت دائماً در حال تغییر است همانطور که تکنولوژی‌ها تغییر می‌کنند، خطرات شناخته شده با موفقیت مورد بررسی قرار می‌گیرند، و یا خطرات جدید ظهور می‌کنند. پایداری نیازمند به‌کارگیری تکنولوژی‌های نوین و جامع می‌باشد، و، همانگونه که غالباً در حوزه امنیت بیان می‌گردد، فن‌آوری‌ها باید در برگیرنده مفاهیم پیش‌گیری، بازداری، شناسایی و تأخیر (مثال، روشن و همکاران، ۲۰۰۵)، و همچنین مفاهیم مرتبط با واکنش، بازیابی، و ارزیابی درس‌های آموخته شده از حوادث و یا «خطاهای قریب به یقین» که مطمئناً روی می‌دهند باشند.

اگر تهدیدات امنیتی به نحو شایسته‌ای ارزیابی و بررسی نگردند، تلفات گسترده جانی و آسیب‌های سازه‌ای، اقتصادی، و حتی سیاسی سنگین به وقوع می‌پیوندد. تأمین و تضمین ایمنی مردم و دارایی‌های فیزیکی و حداقل‌سازی اختلال در

^۱ AASHTO

^۲ رجوع به <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/dva/CRP-SecurityResearch.pdf> (دسترسی در ۱۵ جون ۲۰۱۱) برای گزارش وضعیت برنامه‌های تحقیقات مشارکتی مرتبط با امنیت، مدیریت اضطراری و حفاظت از زیرساخت‌ها.

زیرساخت‌های فیزیکی، اجتماعی، و اقتصادی سامانه شهری کل باید مورد بررسی قرار گیرند. به هر حال، هر یک از عناصر سامانه زیرزمینی منحصر به فرد است و نیاز به اقدامات خاص برای کاهش گستره‌ای از تهدیدات پیش‌بینی شده دارد. مقاومت غیر عامل، در واقع، آخرین خط دفاع در تأمین مرکزی امن و ایمن می‌باشد و فناوری‌های مقاومت سازه‌ای غیرعامل که برای کاهش آسیب‌پذیری اعمال می‌گردند لزوماً پایداری را افزایش نمی‌دهند.

معرفی مهندسی عوامل انسانی، به منظور پیشگیری از وحشت و رفتار، سرگردان و هدایت تشخیص تهدید، تصمیم‌گیری، و کنش تحت تنش مطرح می‌گردند. مواد جدید و رفتارشان برای این کاربرد باید بررسی گردد (مثلاً برای پیشگیری از آسیب ناشی از قطعات و بقایای پرواز و گسترش سموم موجود در هوا ناشی از تغییرات شیمیایی به واسطه گرما و آتش‌سوزی). به علاوه، مدیریت ریسک باید جنبه‌های تخلیه، نجات، و بازیابی را در برگیرد تا اثرات را به حداقل رساند و در فعالیت‌های پس از حادثه باری‌رسان باشد.

آیین‌نامه‌های بین‌المللی ایمنی تونل‌های زیرزمینی

آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های بین‌المللی ایمنی که در زیرساخت‌های زیرزمینی مناسب می‌باشند در ایالات متحده قابل اجرا نیستند، اما مقایسه آنها با آیین‌نامه‌های ایالات متحده می‌تواند کمبودها و عیوب روش‌های مرسوم در ایالات متحده را مشخص نماید و برای هدایت شیوه‌های آینده مفید واقع شود. اداره فدرال بزرگراه آمریکا^۱ در صدد بر آمد تا پی‌برد چه سامانه‌های زیرزمینی، تجهیزات و شیوه‌هایی به صورت بین‌المللی برای ارتقاء ایمنی، عملیات و پاسخ زیرزمینی بکار گرفته می‌شوند (ارنست و همکاران، ۲۰۰۶) و در نهایت پیشنهاداتی را برای اجرای استراتژی‌ها در نه منطقه‌ای که در آنها استانداردها و مقررات آمریکا می‌توانست بهبود یابد ارائه نمود (رجوع به کادر ۴،۱).

جامع‌ترین اطلاعات بین‌المللی ایمنی در ارتباط با زیرساخت‌های زیرزمینی مربوط به ساخت و فعالیت تونل‌های جاده‌ای است و کمیته اقتصادی سازمان ملل متحد در اروپا^۲ دریافت که تصادفات ترافیکی کمتری در تونل‌های طویل نسبت به جاده‌های باز با همان مقدار طول وجود دارد، که ناشی از وجود عناصر حفاظتی و روشنایی یک دست می‌باشد (UNECEt ۲۰۰۱). به هر صورت، تصادفاتی که در تونل‌ها رخ می‌دهند یحتمل تأثیر بیشتری به لحاظ آسیب رساندن به مردم و زیرساخت‌ها دارا می‌باشند. UNECE اظهار می‌دارد که بهبود رفتار رانندگان، خودروهای آنها، کارایی اپراتور تونل، و خود زیرساخت‌ها روش‌هایی برای کاهش تعداد تصادفات داخل تونل می‌باشد. یافته‌های UNECE در بخشنامه‌ای از اتحادیه اروپا در مورد حداقل استانداردهای ایمنی برای تونل‌ها در شبکه جاده‌ترانزیتی اروپا اعلام گردید (شورا و پارلمان اروپا، ۲۰۰۴).^۳ انجمن جهانی راه (PIARC)^۴ دیگر انجمن بین‌المللی است که مجموعه‌ای از مسائل جاده‌ای و ترانزیتی را از نقطه نظر پایداری بررسی می‌نماید. کمیته فنی دائمی آن وظیفه بررسی مدیریت و بهبود ایمنی تونل‌ها، تأثیرگذاری رفتار کاربر در تونل‌ها، و ارزیابی، سامان دهی و انتقال دانش در خصوص فعالیت‌ها و ایمنی تونل را بر عهده دارد. PIARC اسناد ایمنی مختلفی شامل اسنادی که در ارتباط با کنترل آتش و دود در تونل‌های جاده‌ای، عوامل انسانی و ایمنی کاربر تونل جاده‌ای است را تهیه کرده

^۱ FHWA

^۲ UNECE

^۳ تمامی تونل‌های طولانی‌تر از ۵۰۰ متر که به شبکه جاده‌ای متصل‌اند باید حداقل الزامات ایمنی مرتبط با سازماندهی، نقش‌ها و مسئولیت‌های نهادهای مختلف اداری در قبال ایمنی تونل، و مرتبط با استانداردهای فنی برای زیرساخت‌ها، عملیات، مقررات ترافیکی و اطلاعات کاربر در زیرزمین را برآورده نمایند. در حدود ۵۰۰ تونل در اروپا در حال بهره‌برداری، در حال ساخت، و یا در مرحله طراحی تحت تأثیر قرار دارند. الزامات برگشت‌پذیر برای ایمنی نیز در این بخشنامه به تفصیل آمده است.

^۴ کمیته فنی PIARC. عملیات تونل جاده‌ای ۳،۳. قابل دسترس در:

است.

چالش‌های پاسخ اضطراری

پاسخ به شرایط اضطراری زیرزمین از همه نوع، چالش‌های متمایزی را برای پاسخ‌گویان اضطراری که معمولاً طرح‌های استراتژیک و تاکتیکی و قطار را برای سناریوهای پاسخ گسترش می‌دهند مطرح می‌سازد. زمان پاسخ به شرایط اضطراری زیرزمینی افزایش می‌یابد، دسترسی و مسیریابی ممکن است دشوار باشد، و محیط پیچیده تصمیم‌گیری شهودی را چالش برانگیزتر می‌سازد. پاسخ‌گویان اضطراری نیاز به آموزش و شیوه‌های خاص استفاده از سامانه‌های پیچیده آتش‌نشانی و ایمنی جانی دارند که برای مثال، دود، سرکوب آتش، دسترسی، خروج و اطلاع‌رسانی آتش را در زیرزمین مدیریت می‌کنند.

زمان پاسخ‌گویی

خدمات آتش‌نشانی و پزشکی برای پاسخ‌گویی به تماس‌ها اجباری و تا حد امکان سریع و ایمن است. NFPA ۱۷۱۰ حداقل زمان پاسخ ۴ دقیقه‌ای را توسط آتش‌نشانان نسبت به «درب جلوی» سازه برای ۹۰ درصد کل تصادفات تثبیت کرد (NFPA, ۲۰۱۰c). معهداً، «درب جلویی» یک سازه زیرزمینی ممکن است پورتال دسترسی سطح خیابان خودش باشد، که احتمالاً چندین بلوک از محل اضطرار فاصله دارد. این فاصله، زمانی که آتش‌نشانان می‌توانند به موقعیت اضطراری پاسخ واقعی دهند را افزایش می‌دهد. اگر زمان‌های پاسخ‌گویی طولانی و غیر قابل قبول باشند، در طراحی پاسخ‌گویان و تجهیزات باید در زیرزمین و یا نقاط دسترسی نزدیک‌تر قرار گیرند. برای مجتمع‌های زیرزمینی بزرگ‌تر، منابع اضطراری زیرزمینی شامل تجهیزات اضطراری (ماشین‌های آتش‌نشانی، کامیون‌های نردبان، و خودروهای پزشکی) و اجرای قانون می‌باشد. دسترسی به آتش‌سوزی زیرزمینی و یا مخاطرات دیگر نیاز به فرود دشوار از میان دود دارد مگر اینکه مسیرها و یا روش‌های دسترسی جایگزین، طراحی ساخته و کنترل گردند. اقدامات آتش‌نشانی سخت و دشوار می‌باشد چرا که فرایندهای معمولی برای ارزیابی بصری یک موقعیت بر روی سطح زمین، که نوعاً از طریق بازرسی دست کم سه طرف ساختمان حادثه دیده می‌باشد، در زیرزمین عملی نمی‌باشد. تهیه وضعیت اضطراری با روش‌های عمودی یا افقی به واسطه فقدان پنجره‌های خارجی و یا دسترسی به بیرون از طریق «بام» که دود از آن می‌تواند به خارج راه یابد، محدود می‌گردد.

مسیریابی

توانایی پاسخ‌گویان حالت اضطراری به منظور تطبیق خود با موقعیت جدید مهم می‌باشد. مراحل اضافی برای تضمین استفاده از یک روش جامع لازم و ضروری است، که جهت‌یابی‌های مشخص، دقیق و سریع را در اختیار قرار می‌دهد. در حال حاضر دپارتمان‌های پاسخ اضطراری، بسیاری از تکنولوژی‌های ماهواره را برای پیدا کردن واحدهای پاسخ‌دهی استفاده می‌کنند و از مخابره کامپیوتری^۱ برای تعیین واحدهایی با کوتاه‌ترین زمان پاسخ‌گویی ممکن بهره می‌برند. به هر حال، این فن‌آوری‌ها به ارتباط خط دید با ماهواره‌ها بستگی دارند و در زیرزمین کارآمد نیستند. با این وجود گزینه‌هایی باید برای کاربری زیرزمینی قابل بهره‌برداری شوند، و پاسخ‌گویان حالت اضطراری باید بر تکنولوژی‌های قدیمی اعتماد نمایند (مثلاً نقشه‌های نسخه چاپی) تا خودشان را با موقعیت جدید در محیط زیرزمینی تطبیق دهند. نظر به اینکه نقشه‌ها گزینه مناسبی می‌باشند، به کارگیری بیش از یک تکنولوژی (مثل ماهواره و نقشه‌های نسخه چاپی) ممکن است برای واحدهای پاسخ‌دهنده ایجاد سردرگمی نماید. برخی فن‌آوری‌ها برای ارتباطات اضطراری و مسیریابی که ممکن است در زیرساخت‌های زیرزمینی کاربرد داشته باشند از طریق پشتیبانی عرضه شده توسط مؤسسه ملی برای اداره ایمنی و بهداشت حرفه‌ای تحقیقات بهداشتی و ایمنی معدن در حال تحقیق و آزمایش می‌باشند. برای مثال، این سازمان، تحقیقات جهت‌یابی اینرسی را به منظور خود

^۱ CAD

ردیابی و ارتباطات بی‌سیم برای استفاده معدن چیان و پرسنل امداد و نجات پشتیبانی می‌کند.^۱ پیشرفت این تکنولوژی‌ها ممکن است به بهبود نهایی ایمنی زیرساخت‌های زیرزمینی بی‌انجامد.

کادر ۱، ۴

پیشنهادات و استراتژی‌های اجرایی برای بهبود ایمنی تونل آمریکا از برنامه بین‌المللی اسکن فن‌آوری

اداره فدرال بزرگراه آمریکا و انجمن مقامات بزرگراه و حمل و نقل ایالتی آمریکا و برنامه مشارکتی تحقیقات ملی بزرگراه، مطالعه‌ای را برای بررسی روش‌های مرتبط با ایمنی تونل، فعالیت‌ها و پاسخ اضطراری در چندین کشور اروپایی انجام دادند. موارد ذیل پیشنهادات و برخی از استراتژی‌های اجرایی گزیده شده از گزارش نهایی را بیان می‌کنند (ارنست و همکاران، ۲۰۰۶).

۱. گسترش علائم جهانی، یکپارچه، و مؤثرتر به لحاظ بصری، دیداری، و لمسی برای مسیرهای فرار.

پیشنهادات شامل یکپارچگی علائم است به طوری که برای تمامی مردم قابل درک باشد و سردرگمی در جهت‌یابی و خروج در مواقع اضطراری را به حداقل رساند. صداها و پیام‌های ساده کلامی و پیام‌های لمسی، علائم بصری را در شرایط کم نور مؤثرتر می‌سازند. دستورالعمل‌های انجمن ملی حفاظت در برابر آتش^۲ قابل اجرا در طراحی‌های حفاظت از آتش و ایمنی جانی باید بررسی شود، و تکنولوژی‌های فعلی و نتایج حاصل از مطالعات پاسخ انسانی باید در طراحی مدخل‌های فرار، مسیرهای فرار و معابر متقاطع گنجانده شود (رجوع به شکل ۱).

۲. گسترش دستورالعمل‌های AASHTO (انجمن مقامات بزرگراه و حمل و نقل ایالتی آمریکا) برای تونل‌های موجود و جدید.

یک مرجع AASHTO واحد برای مهندسان و اپراتورها به منظور پیش‌برد معیارهای آمریکا که متناسب با AASHTO, FHWA, NFPA، انجمن حمل و نقل عمومی آمریکا، و استانداردها و دستورالعمل‌های هیئت تحقیقات حمل و نقل شورای ملی تحقیقات برای تونل‌ها باشد.

۳. انجام تحقیقات و گسترش دستورالعمل‌ها در خصوص مدیریت حالت اضطراری تونل‌ها که در برگیرنده عوامل انسانی است. آموختن از تجربه اروپا در طراحی عامل انسانی برای برنامه‌ریزی، طراحی و پاسخ اضطراری مؤثرتر. کار از طریق AASHTO برای سرمایه‌گذاری و ایجاد هدایت مدیریت وضع اضطراری تونل. همکاری با دانشگاه برای مطالعه پاسخ انسانی در حوادث داخل تونل.



مثالی از علامت مسیر فرار تونل بلان مون (مایین فرانسه و ایتالیا)، نمونه‌ای از علائم یکسان مورد استفاده در بسیاری از کشورهای اروپایی.

۱. فهرستی از پروژه‌های فعلی و گذشته که در این حوزه تحقیقاتی انجام گردیده در آدرس زیر قابل رویت می‌باشد.
<http://www.cdc.gov/niosh/mining/researchprogram/communicationstracking.html> (accessed October ۲۵, ۲۰۱۲)

^۲ NFPA

۴. گسترش آموزش برای پاسخگویی رانندگان به حوادث داخل تونل.
۵. ارزیابی اثربخشی سامانه‌های اتوماتیک تشخیص تصادف و تصویر هوشمند برای تونل‌ها.
سامانه‌های کامپیوتری مجهز به سامانه‌های نظارت تصویری را می‌توان برای شناسایی، ردیابی، و ثبت تصادفات بکار بست تا متصدیان سیگنال اقدام مناسب را انجام دهند، که زمان واکنش و پاسخ را کاهش می‌دهد. از آنجایی که استفاده گسترده عمومی از صفحه نمایش مدار بسته در ایالات متحده به راحتی مورد پذیرش نمی‌باشد، لذا توسعه مزایا و فرصت‌های این تکنولوژی امری ضروری است.
۶. توسعه معیارهای طراحی تأسیسات تونل برای ارتقاء عملکرد و پاسخ مطلوب راننده به حوادث.
طراحی نوآورانه تونل با هندسه بهبود یافته یا به لحاظ زیبایی خوشایندتر، ایمنی و عملکرد راننده و عملیات ترافیک را بیشتر و بهتر می‌نماید.
۷. بررسی سامانه‌های یک دکمه‌ای برای آغاز به کار سامانه‌های حسگر خودکار و پاسخ اضطراری به منظور تعیین پاسخ.
از برخی خطاهای انسانی و نیاز به تصمیم‌گیری در مواقع اضطراری تنها با فشار یک دکمه توسط اپراتورها برای آغاز اقدامات واکنشی مهم می‌توان جلوگیری کرد. سامانه‌های خودکار (مثلاً، به‌کارگیری سنسورهای تاریکی) به تعیین پاسخ‌های مناسب به موقعیت‌های خاص کمک می‌کنند. فن‌ها و تهویه‌ها از طریق سامانه‌های مدار بسته تحلیلی و گردآورنده داده‌ها که بر شرایط جوی، سرعت هوای داخل تونل و غلظت دود نظارت دارند به بهترین حالت کنترل می‌شوند.
۸. استفاده از رویکرد مدیریت ریسک به منظور بررسی ایمنی تونل و حفاظت.
نظارت هوشمند و تحلیل داده‌ها اطلاعاتی را بدست می‌دهد که تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر ریسک را با توجه به برنامه‌ریزی بازرسی‌ها (و تکرار بازرسی) میسر می‌سازد.
۹. اجرای نورپردازی با دیودهای ساطع کننده نور برای حفظ فاصله امن از خودروها و تمیز دادن کناره‌ها در داخل تونل‌ها.
نورهای آبی ال‌ای دی در فواصل مشخص به رانندگان امکان می‌دهد تا به راحتی فاصله از دیواره‌های تونل و خودروهای جلویی را تشخیص داده و فاصله رانندگی ایمن را حفظ نمایند.



برخی تونل‌های اروپا از دیودهای (لامپ دوقطبی) ساطع کننده نور در فواصل مساوی استفاده می‌کنند تا به رانندگان در تشخیص کناره‌های راه و تعیین فواصل امن از جلو کمک نمایند.

واکنش نسبت به حوادث تروریستی در زیرساخت‌های زیرزمینی برای پاسخگویان حالت اضطراری، همراه با سامانه‌های ایمنی مهم (مانند خروجی‌ها) می‌تواند فوق‌العاده چالش برانگیز باشد، همچنین ممکن است که از اهداف حملات باشند. زیرساخت‌های رو سطحی و زیرزمینی کم‌سکنه (کمتر از ۵۰۰ نفر) عموماً نیاز به تنها دو خروجی بر مبنای کدهای ساختمانی بین‌المللی دارند (IBC, ۲۰۰۷) و لذا دسترسی و خروج اضطراری را محدود می‌سازد. نقاط چوک ممکن است در هنگام حرکت پاسخگویان حالت اضطراری به پایین و حرکت ساکنان به بالا در همان مسیر ایجاد شوند.^۱ حمله تروریستی، هماهنگ و شامل طرح‌هایی برای صعب‌العبور ساختن خروجی‌ها می‌باشد، که مشکلی فراتر از آنچه که برای ساختمان‌های سطحی با پنجره‌ها و دسترسی مستقیم به هوای تازه مطرح است ایجاد می‌کند. اطلاعات بیشتر در خصوص تروریست برای پاسخگویان حالت اضطراری در منابع متعدد دولتی قابل دستیابی می‌باشد (برای مثال رجوع به FEMA, ۲۰۰۴).

ارتباط

رادیوهای سطحی غالباً از دستگاه‌های تقویت کننده رادیویی استفاده می‌نمایند تا مناطق زیادی را از طریق هوای آزاد پوشش دهند، تکنولوژی‌ای که در زیرزمین کاربرد ندارد. به هر حال، پاسخ دهندگان حالت اضطراری، موشکافانه بر ارتباط رادیویی اعتماد می‌کنند. هنگامی که پاسخ‌دهندگان قادر به استفاده از تکنولوژی ارتباطات رادیویی رو زمینی نیستند، روی دیگر فن‌آوری‌ها از جمله تقویت کننده‌های رادیویی و کابل‌های کواکسیال تغذیه کننده سوراخ‌دار که به صورت آنتن‌های پهن عمل می‌کنند حساب باز می‌نمایند. این متدها در زیرزمین کار می‌کنند، اما باید به قدر کافی هماهنگ و مستحکم باشند تا پوشش معقولی را در سراسر فضای زیرزمینی از طریق مثلاً افزونگی سامانه ارائه دهند. قابلیت همکاری در میان پاسخگویان متعدد، به طور بالقوه از بسیاری از سازمان‌ها، و قابلیت ایجاد ارتباط با فرکانس‌های متعدد نیز برای تأمین ایمنی با اهمیت می‌باشد. تکنولوژی ایجاد ارتباط میان دپارتمان‌های پاسخگوی حالت اضطراری با سامانه‌های افزونه، در حال حاضر وجود دارد، اما این سامانه‌ها در فضای زیرزمینی عمل نمی‌کنند. همانگونه که در بخش قبلی بیان گردید، صنعت معدن در حال تحقیق در خصوص ارتباط زیرزمینی توسعه یافته (مانند استفاده زیرزمینی از تکنولوژی‌های بی‌سیم) میان آنهایی که در زیرزمین مستقر می‌باشند، و میان آنهایی بر روی سطح و آنهایی که در زیرزمین قرار دارند می‌باشند. تحقیقات مستمر در این حوزه‌ها نیاز است تا ارتباطات قابل اعتمادی را در زیرساخت‌های زیرزمینی ارائه دهد.

افزایش آسایش و حداکثرسازی ایمنی

شواهد حاکی از آن است که بسیاری از مردم به ویژه آن‌هایی که با بودن در زیرزمین به طور منظم نا‌آنوس هستند، با ایده در زیرزمین بودن دچار آشفتگی می‌گردند. این کمیته، داده‌های لازم برای کمی‌سازی حدود این نگرش منفی را در دست ندارد. نگرش‌های منفی ناشی از نگرانی‌ها نسبت به ایمنی، تجربیات ناخوشایند شخصی، یا این باور که فضای زیرزمینی سرد و مرطوب و خطرناک است، به جای داشتن آگاهی درست و مناسب درباره مزایا، ریسک‌ها و ایمنی نسبی تسهیلات زیرزمینی می‌باشد. قاعدتاً، عامه مردم برای از میان برداشتن سامانه‌ها و خدمات زیرزمینی موجود اقدامی انجام نمی‌دهند، اما به نظر شور و شوقی برای کاربردهای زیرزمینی جدید، به ویژه با توجه به هزینه‌های اولیه‌شان ندارند.^{۱۳} یافتن راه‌هایی برای وضوح بخشیدن و تعادل برداشت‌های منفی، به عنوان مانعی بزرگ پیچیده‌ترین چالش‌های ایمنی و فنی را می‌تواند به وجود آورد و نیاز به یک تمرکز تحقیقاتی کامل در خصوص آن می‌باشد. محیط زیرزمینی شهری می‌تواند مهندسی و مدیریت گردد - با توجه به طراحی مناسب - تا امن، جذاب، تحریک کننده، پربار، و سالم باشد (کارمودی و استرلینگ، ۱۹۹۳؛ میچنفلد و گلوک،

۱. نقطه مقابل این امر در مرکز تجارت جهانی در ۱۱ سپتامبر اتفاق افتاد

۲۰۰۳). با در نظر گرفتن توجه مناسب به نورپردازی، تهویه، علائم بصری برای جهت‌یابی، حفاظت در برابر آتش و دیگر ملاحظات ایمنی، خروجی اضطراری، و ملاحظات زیبایی‌شناسی، فضای زیرزمین می‌تواند به اندازه فضای رو زمینی که برای همان کاربری طراحی شده است فریبنده باشد. ایجاد فضای زیرزمینی که کاربری امن، اقتصادی، و پایدار بلندمدت را امکان‌پذیر می‌نماید و از آن حمایت می‌کند قسمت اصلی فضایی است که بخشی از توسعه پایدار و ترمیم‌پذیر در محیط شهری می‌باشد.

برای مثال، رجوع به پارسونز، ۲۰۱۱.

منابع

- ۱) ASME (American Society of Mechanical Engineers). ۲۰۱۰a. Safety Code for Elevators and Escalators. A۱۷,۱/CSA B۴۴-۲۰۱۰. New York: ASME.
- ۲) ASME. ۲۰۱۰b. Guide for Inspection of Elevators, Escalators and Moving Walks. A۱۷,۲-۲۰۱۰. New York: ASME.
- ۳) Barrie, A. ۲۰۰۰. War underground: The tunnellers of the Great War. Staplehurst, Kent, United Kingdom: Spellmount Limited.
- ۴) BRPBTS (The Blue Ribbon Panel on Bridge and Tunnel Security). ۲۰۰۳. Recommendations for Bridge and Tunnel Security. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) and Federal Highway Administration (FHWA) [online]. Available: <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/security/brp.pdf> (accessed June ۱۴, ۲۰۱۱).
- ۵) Bugliarello, G. ۲۰۰۱. Rethinking urbanization. *The Bridge* ۳۱(۱):۵-۱۲.
- ۶) Bugliarello, G. ۲۰۰۹. A note on the interfacial vulnerabilities of transportation systems. Pp. ۹۵-۱۰۳ in *Countering Terrorism Biological Agents, Transportation Networks, and Energy Systems: Summary of a U.S.-Russian Network*, G.E. Schweitzer, rapporteur. Washington, DC: The National Academies Press.
- ۷) Carmody, J., and R. Sterling. ۱۹۹۳. *Underground Space Design: A Guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- ۸) Chapanis, A. ۱۹۹۱. To communicate the human factors message, you have to know what the message is and how to communicate it. *Human Factors Society Bulletin*. ۳۴(۱۱):۱-۴.
- ۹) DiNapoli, T.P., and K.B. Bleiwas. ۲۰۱۰. Financial Outlook for the Metropolitan Transportation Authority. Report ۵-۲۰۱۱. New York: Office of the NY State Comptroller [online]. Available: <http://www.osc.state.ny.us/reports/mta/mta-rpt-۵۲۰۱۱.pdf> (accessed April ۲۷, ۲۰۱۱).
- ۱۰) DOD (U.S. Department of Defense). ۱۹۸۸. Manpower, Personnel, Training, and Safety (MPTS) in the Defense Acquisition Process. DOD Directive Number ۵۰۰۰,۵۳ (cancelled February ۲۳, ۱۹۹۱, by DOD ۵۰۰۰,۱ and DOD ۵۰۰۰,۲).
- ۱۱) ECTP (European Construction Technology Platform). ۲۰۰۵. Strategic Research Agenda for the European Underground Construction Sector, Draft, October ۲۰۰۵. European Construction Technology Platform [online]. Available: http://www.ectp.org/documentation/FA-UndergroundConstructions_SRA-VISION۲۰۳۰-۲۳Nov۰۵.pdf (accessed May ۲, ۲۰۱۲).
- ۱۲) Ernst, S., M. Patel, H. Capers, D. Dwyer, C. Hawkins, G.S. Jakovich, W. Lupton, T. Margro, M.L. Ralls, J. Rohena, and M. Swanson. ۲۰۰۶. *Underground Transportation Systems in Europe: Safety, Operations, and Emergency Response*. FHWA-PL-۰۶-۰۱۶. Federal Highway Administration [online]. Available: <http://international.fhwa.dot.gov/uts/uts.pdf> (accessed June ۱۶, ۲۰۱۱).
- ۱۳) European Parliament and Council. ۲۰۰۴. Directive ۲۰۰۴/۵۴/EC of the European Parliament and of the Council of ۲۹ April ۲۰۰۴ on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network. OJEU L۱۶۷:۳۹-۹۱ [online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:۲۰۰۴:۱۶۷:۰۰۳۹:۰۰۹۱:EN:PDF> (accessed May ۲۹, ۲۰۱۲).
- ۱۴) FEMA (Federal Emergency Management Agency). ۲۰۰۴. *Fire and Emergency Services Preparedness Guide for the Homeland Security Advisory System*, 1st Ed. Emmitsburg, MD: FEMA [online]. Available: <http://www.nh.gov/safety/divisions/fstems/ems/preparedness/documents/hsasguide.pdf> (accessed May ۲۹, ۲۰۱۲).
- ۱۵) Fowler, C. ۲۰۰۸. *The Svalbard Global Seed Vault: Securing the Future of Agriculture*. The Global Crop Diversity Trust [online]. Available: <http://www.croptrust.org/documents/Svalbard/۲۰opening/New/۲۰EMBARGOED-Global/۲۰Crop/۲۰Diversity/۲۰Trust/۲۰Svalbard/۲۰Paper.pdf> (accessed December ۴, ۲۰۱۲).
- ۱۶) Gui, M.W., and M.C. Chien. ۲۰۰۶. Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport—a parametric study. *Geotechnical and Geological Engineering*. ۲۴(۲):۲۲۷-۲۴۸. HC (UK House of Commons). ۲۰۰۶. *Report of the Official Account of the Bombings in London on ۷th July ۲۰۰۵*. London: The Stationery Office

- [online]. Available: http://news.bbc.co.uk/2/shared/bsp/hi/pdfs/11_05_06_narrative.pdf (accessed April ۲۷, ۲۰۱۱).
- ۱۷) IBC (International Building Code). ۲۰۰۷. Section ۱۰۱۹.۱ Number of Exits and Continuity [online]. Available: http://publicecodes.citation.com/icod/ibc/2007/ibc_ibc_2007/10_sec019.htm (accessed June ۲۷, ۲۰۱۲). ITA (Association Internationale des Tunnels). ۱۹۹۸. Fire and life safety for underground facilities: Present status of fire and life safety principles related to underground facilities. ITA Working Group ۴. Tunnelling and Underground Space Technology. ۱۳(۳):۲۱۷-۲۶۹ [online]. Available: http://www.itaaites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/WorkingGroupsPublication/WG4/Tust_Vol_13_3_217-269.pdf.
- ۱۸) ITA (Association Internationale des Tunnels). ۱۹۹۸. Fire and life safety for underground facilities: Present status of fire and life safety principles related to underground facilities. ITA Working Group ۴. Tunnelling and Underground Space Technology. ۱۳(۳):۲۱۷-۲۶۹ [online]. Available: http://www.itaaites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/WorkingGroupsPublication/WG4/Tust_Vol_13_3_217-269.pdf.
- ۱۹) ITA-AITES (Association Internationale des Tunnels-International Tunneling and Underground Space Association). ۲۰۱۱. Working Group ۵: Health and Safety in Works [online]. Available: http://www.itaaites.org/index.php?id=۷۵&L=۰&tx_ttnews%5Btt_news%5D=۲۷&cHash=۴۵۸۸dfc۰bfa۵ba۸۹۱c۵۸۳bacbae۵cfda (accessed June ۱۴, ۲۰۱۱).
- ۲۰) Jenkins, B.M., and L.N. Gersten. ۲۰۰۱. Protecting Public Surface Transportation against Terrorism and Serious Crime: Continuing Research on Best Security Practices. Mineta Transportation Institute Report ۰۱-۰۷. Mineta Transportation Institute, San Jose State University [online]. Available: http://www.fta.dot.gov/documents/terrorism_final.pdf (accessed May ۲۹, ۲۰۱۲).
- ۲۱) Kantowitz, B.H., and R.D. Sorkin. ۱۹۸۳. Human Factors: Understanding People-System Relationships. New York: John Wiley & Sons.
- ۲۲) Licht, D.M., D.J. Polzella, and K. Boff. ۱۹۸۹. Human Factors, Ergonomics, and Human Factors Engineering: An Analysis of Definitions. CSERIAC-۸۹-۰۱. Crew System Ergonomics Information Analysis Center, and H.G. Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory, Wright Patterson AFB, Dayton, OH [online]. Available: <http://www.hfes.org/Web/EducationalResources/HFDefinitions.pdf> (accessed June ۱۹, ۲۰۱۱).
- ۲۳) Linger, D.A., G.H. Baker, and R.C. Little. ۲۰۰۲. Applications of underground structures for the physical protection of critical infrastructure. Pp. ۳۳۳-۳۴۲ in North American Tunneling, L. Ozdemir, ed. Lisse, The Netherlands: Swets and Zeitlinger [online]. Available: works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=۱۰۰۲&context=george_h_baker&seid=۱#search=Underground+Infrastructure+Security (accessed April ۲۶, ۲۰۱۱).
- ۲۴) McCamley, N.J. ۱۹۹۸. Secret Underground Cities: An Account of Some of Britain's Subterranean Defence, Factory and Storage Sites in the Second World War. South Yorkshire, United Kingdom: Pen & Sword Books, Ltd.
- ۲۵) Meijerfeldt, E.V., and M. Geluk. ۲۰۰۳. Below Ground Level: Creating New Spaces for Contemporary Architecture. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser. Miles, S.B. ۲۰۱۱. The role of critical infrastructure in community resilience to disasters. Pp. ۱۹۸۵-۱۹۹۵ in Proceedings of the ۲۰۱۱ Structure Congress, April ۱۴-۱۶, ۲۰۱۱, Las Vegas, NV, D. Ames, T.L. Droessler, and M. Holt, eds. Reston, VA: ASCE. DOI: ۱۰.۱۰۶۱/۱۱۷۱(۴۰۱)۱۷۳.
- ۲۶) Molag, M., and I.J.M. Trijssenaar-Buhre. ۲۰۰۶. Risk Assessment Guidelines for Tunnels. Safe and Reliable Tunnels, Second International Symposium, Lausanne, Switzerland [online]. Available: <http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/Committees/COSUF/Molag.pdf>.
- ۲۷) Myers, C.W., and N.Z. Elkins. ۲۰۰۹. Underground Collocation of Nuclear Power Reactors and Repository to Facilitate the Post-Renaissance Expansion of Nuclear Power. Waste Management Conference, March ۱-۵, ۲۰۰۹. Phoenix, Arizona [online]. Available: <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-۰۸-۰۷۴۵۲> (accessed December ۴, ۲۰۱۲).
- ۲۸) NFPA (National Fire Protection Association). ۲۰۱۰a. NFPA ۱۳۰: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems [online]. Available: <http://www.nfpa.org/aboutthecodes/About->

- TheCodes.asp?DocNum=۱۳۰&cookie/°Ftest=۱ (accessed June ۹, ۲۰۱۱).
- ۲۹) NFPA. ۲۰۱۰b. NFPA ۵۲۰: Standard on Subterranean Spaces [online]. Available: <http://www.nfpa.org/aboutthecodes/AboutTheCodes.asp?DocNum=۵۲۰> (accessed June ۹, ۲۰۱۱).
- ۳۰) NFPA. ۲۰۱۰c. NFPA ۱۷۱۰: Standard for the Organization and Deployment of Fire Suppression Operations, Emergency Medical Operations, and Special Operations to the Public by Career Fire Departments [online]. Available: <http://www.nfpa.org/aboutthecodes/AboutTheCodes.asp?DocNum=۱۷۱۰> (accessed June ۸, ۲۰۱۲).
- ۳۱) NFPA. ۲۰۱۱. NFPA ۵۰۲: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways [online]. Available: <http://www.nfpa.org/aboutthecodes/AboutTheCodes.asp?DocNum=۵۰۲> (accessed June ۹, ۲۰۱۱).
- ۳۲) NRC (National Research Council). ۲۰۰۷. Human-System Integration in the System Development Process: A New Look. Washington, DC: National Academies Press. OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). ۲۰۰۶. OECD Studies in Risk Management: Norway Tunnel Safety. Paris, France: OECD [online]. Available <http://www.oecd.org/dataoecd/۳۶/۱۵/۳۶۱۰۰۷۷۶.pdf> (accessed June ۱۹, ۲۰۱۱).
- ۳۳) OSHA (Occupational Safety and Health Administration). ۲۰۰۳. Underground Construction (Tunneling). OSHA ۳۱۱۵-۰۶R ۲۰۰۳. Washington, DC: OSHA [online]. Available: <http://www.osha.gov/Publications/OSHA۳۱۱۵.pdf> (accessed June ۸, ۲۰۱۲).
- ۳۴) Parsons, J. ۲۰۱۱. Virginia Pol Criticized Dulles Station Design, Labor Agreements. ENR, April ۱۹, ۲۰۱۱ [online]. Available: <http://enr.construction.com/infrastructure/transportation/۲۰۱۱/۰۴۱۹-DullesStationCriticized.asp> (accessed April ۲۰, ۲۰۱۱).
- ۳۵) Prager, F., G. B. Asay, B. Lee, and D. von Winterfeldt. ۲۰۱۰a. Exploring reductions in London Underground passenger journeys following the July ۲۰۰۵ bombings. In Estimating Behavioral Changes for Transportation Modes After Terrorist Attacks in London, Madrid, and Tokyo, Final Report, D. Von Winterfeldt and F. Prager, eds. METRANS Project ۰۸-۱۰. National Center for Risk and Economic Analysis of Terrorism Events [online]. Available <http://www.metrans.org/research/final/۰۸-۱۰/۲۰Final/۲۰Report.pdf> (accessed October ۲۳, ۲۰۱۲).
- ۳۶) Prager, F., B. Fasolo, Z. Ni. ۲۰۱۰b. Analysis of passengers' reactions to the sari gas attacks in Tokyo. In Estimating Behavioral Changes for Transportation Modes After Terrorist Attacks in London, Madrid, and Tokyo, Final Report, D. Von Winterfeldt and F. Prager, eds. METRANS Project ۰۸-۱۰. National Center for Risk and Economic Analysis of Terrorism Events [online]. Available <http://www.metrans.org/research/final/۰۸-۱۰/۲۰Final/۲۰Report.pdf> (accessed October ۲۳, ۲۰۱۲).
- ۳۷) Rogoza, J., and P. Zochowski. ۲۰۱۰. Attacks in the Moscow Metro. East Week ۱۳(۲۰۶) [online]. Available: <http://www.osw.waw.pl/en/publikacje/eastweek/۲۰۱۰-۰۳-۳۱/attacks-moscow-metro> (accessed April ۲۷, ۲۰۱۱).
- ۳۸) Rowshan, S., W.C. Saunty, T.M. Wood, B. Churchill, and S.R. Levine. ۲۰۰۵. A Guide to Physical Security Risk Management for Transportation Management Centers. Washington, DC: Federal Highway Administration [online]. Available <http://trb.metapress.com/content/۳۷pv۸۳۱۵۶۲۸j۵۷۲۴/fulltext.pdf> (accessed June ۸, ۲۰۱۲).
- ۳۹) SAIC (Science Applications International Corporation). ۲۰۰۲. A Guide to Highway Vulnerability Assessment for Critical Asset Identification and Protection: Contractor's Final Report. Prepared for the American Association of State Highway and Transportation Officials' Security Task Force, by Science Applications International Corporation, Vienna, VA [online]. Available: http://security.transportation.org/sites/security/docs/guide-VA_FinalReport.pdf (accessed June ۱۴, ۲۰۱۱).
- ۴۰) TRB (Transportation Research Board). ۲۰۰۶. Transportation Security, Volume ۱۲: Making Transportation Tunnels Safe and Secure. Transit Cooperative Research Program Report ۸۶/National Cooperative Highway Research Program Report ۵۲۵. Washington, DC: TRB.
- ۴۱) Tu, A.T. ۱۹۹۹. Overview of sarin terrorist attacks in Japan. Pp. ۳۰۴-۳۱۷ in Natural and Selected Synthetic Toxins, A.T. Tu and W. Gaffield, eds. ACS Symposium Series ۷۴۵ [online]. Available: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/bk-۲۰۰۰-۰۷۴۵.ch۰۲۰> (accessed April ۲۷, ۲۰۱۱).
- ۴۲) Von Winterfeldt, D., and F. Prager. ۲۰۱۰. Estimating behavioral changes for transportation modes after terrorist attacks in London, Madrid, and Tokyo, Final Report. METRANS Project ۰۸-۱۰. National Center for Risk and Economic Analysis of Terrorism Events [online]. Available <http://www.metrans.org/research/final/۰۸->

- ۱۰٪۲۰Final٪۲۰Report.pdf (accessed October ۲۳, ۲۰۱۲).
- ۴۳) UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). ۲۰۰۱. Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels Final Report. TRANS/AC.۷/۹ [online]. Available: <http://live.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/۲۰۰۲/ac۷/TRANS-AC۷-۰۹e.pdf> (accessed June ۲۲, ۲۰۱۱).
- ۴۴) U.S. Department of State. ۲۰۰۴. Patterns of Global Terrorism, ۲۰۰۳ [online]. Available: <http://www.state.gov/documents/organization/۳۱۹۱۲.pdf> (accessed June ۱۴, ۲۰۱۱).
- ۴۵) WMATA (Washington Metropolitan Area Transit Authority) and Cambridge Systematics, Inc. ۲۰۰۹. Transit Ridership Trends and Markets, March ۲۰۰۹ [online]. Available: <http://www.wmata.com/pdfs/planning/FINAL٪۲۰Transit٪۲۰Ridership٪۲۰and٪۲۰Market٪۲۰Trends٪۲۰Report.pdf> (accessed April ۲۷, ۲۰۱۱).

فصل پنجم

پایداری چرخه حیات، هزینه‌ها، و مزایای توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی

توسعه فضای زیرزمینی فرصتهایی را برای استفاده مؤثرتر از فضای شهری موجود، ایجاد می‌کند، اما سرمایه‌گذاری با هزینه‌های گزاف را برای ساخت‌وساز اولیه در مقایسه با استفاده مشابه از زیرساخت‌های ساخته شده بر روی زمین می‌طلبد. این بخش اطلاعات موجود در خصوص پایداری چرخه حیات، هزینه‌ها، و مزایای توسعه زیرزمینی را جمع‌بندی می‌کند. نوشته‌های در خصوص اثرات زیرساخت‌های زیرزمینی بر پایداری چرخه حیات توسعه شهری نسبتاً ناچیز است. بیشتر آنها در مورد مزایا و هزینه‌های پولی چرخه حیات می‌باشد، در حالی که اندکی به اثرات اجتماعی یا زیست‌محیطی بلندمدت می‌پردازند. حتی تحقیقاتی که مرتبط با هزینه و مزایای اقتصادی می‌باشند، هدف آنها در درجه اول، ارزیابی گزینه‌های جایگزین برای پروژه‌های پیشنهاد شده، مانند پل راه بر آلاسکا در سیاتل، می‌باشد (تیلور، ۲۰۰۸). مطالعات گذشته نگرانه کمتری، برای دسترسی به هزینه‌ها و مزایای واقعی توسعه زیرزمینی انجام پذیرفته است.

این فصل ارزیابی هزینه چرخه حیات را برای اعمال زیرزمین ارائه نمی‌دهد، بلکه عواملی را مشخص می‌کند که در ارزیابی چرخه حیات از نظر هزینه‌ها و مزایای اقتصادی در طول عمر زیرساخت (ساخت، عملیات، و نوسازی) و هزینه‌ها و مزایای زیست‌محیطی و اجتماعی باید بررسی گردند. تحقیقی که ارزیابی بهتر و جامع‌تر از چرخه حیات را ارائه می‌دهد تعیین می‌گردد.

ارزیابی پایداری چرخه حیات

در ارزیابی پایداری چرخه حیات، تحلیل «سه‌گانه سودآوری»^۱ غالباً مورد پذیرش است که اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی توسعه را بررسی می‌نماید. ال‌کینگتون مفاهیم اصلی این رویکرد را در سال ۱۹۹۴ معرفی نمود و آنها را تشریح کرد و عبارت "TBL" را در سال ۱۹۹۷ معرفی کرد (ال‌کینگتون، ۱۹۹۴، ۱۹۹۷). این رویکرد چهارچوبی را برای ارزیابی چند منظوره سرمایه‌گذاری‌های پیچیده ارائه می‌دهد. «حسابداری هزینه کامل» هدفی مشابه شامل طیف گسترده‌ای از تأثیرات در تصمیم‌گیری است، اما حسابداری هزینه کامل معمولاً بر برآوردهای در حال توسعه پولی از اثرات پرزحمت تأکید دارد. مثالی جدید از این رویکرد، تخمین هزینه‌های خارجی مرتبط با تولید انرژی بود (NRC, ۲۰۱۰). معهدا، اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی به سختی به لحاظ پولی و مالی تعدیل می‌گردند و غالباً به دلیل عدم توجه، فراتر از وضعیت فعلی اطلاعات در

^۱ TBL

خصوص توسعه زیرزمینی می‌باشند. از این رو، این فصل به دو بخش تقسیم می‌گردد که اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی چرخه حیات توسعه زیرزمینی را بررسی می‌کند. این بازبینی هزینه‌ها و مزایای چرخه حیات، همساز با وظیفه کمیته مذکور، مبنی بر بررسی چگونگی افزایش پایداری با استفاده از فضای زیرزمینی می‌باشد.

برنامه‌ریزی و ارزیابی چرخه حیات

توسعه فضای زیرزمینی غالباً متضمن یک چرخه حیات نسبتاً بلند می‌باشد، حتی زمانی که با دیگر سرمایه‌های زیرساختی مقایسه می‌گردد. برای مثال، مترو circle line در لندن ابتدائاً بیشتر از ۱۵۰ سال پیش در اواسط قرن نوزدهم ساخته شد (بایریک، ۱۹۸۱). اگرچه این خط در طول زمان امتداد یافته و نوسازی و مرمت گردید، با این وجود سرمایه‌گذاری اولیه در ساخت زیرزمینی بازگشته و سفر و مزایای دیگری را ارائه می‌دهد.^۱ همچنین، خطوط لوله زیرزمینی نیز می‌تواند تا بیش از ۱۰۰ سال دوام بیاورند، علی‌الخصوص اگر در بازرسی محل، حفاظت کاتدیک،^۲ و تعمیرات اساسی انجام گردد (مثال، MWRA, ۲۰۰۶). با این همه، افق‌های برنامه‌ریزی دولتی و خصوصی معمولاً به عمر معمول زیرساخت‌ها، نسبتاً کوتاه می‌باشد. برای مثال برنامه‌های دوربرد حمل و نقل شهری و در سطح ایالت غالباً مزایا و هزینه‌های سرمایه‌گذاری را تنها برای یک افق بیست ساله در نظر می‌گیرند (DOT, ۲۰۰۷). این افق برنامه‌ریزی کوتاه به این معنی است که هر گونه امتیاز و منفعتی که بعد از ۲۰ سال اتفاق بیفتد در این تصمیم‌گیری سرمایه‌ای پرداخته نمی‌شود.

توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی در برگرفته یک سرمایه اولیه برای ایجاد فضایی قابل استفاده است، به طوری که مزایایی را طی یک دوره طولانی عرضه می‌نماید. زمان عمر طولانی زیرساخت‌های زیرزمینی در تحلیل‌هایی که توسط افراد با افق برنامه‌ریزی کوتاه مدت انجام می‌گیرد نادیده گرفته می‌شود، درست همانطور که هزینه‌های بازسازی تسهیلات سطحی، برای مالکان و کاربران در تحلیل‌های هزینه‌ای نادیده گرفته می‌شود، اگر چه ممکن است این هزینه‌ها بسیار بزرگ باشند. همچنین، نرخ بالای نزول بانکی برای محاسبه ارزش کنونی منافع و سود آتی، اگر زمان عرضه آن در آینده طولانی شود منافع مذکور را کم ارزش‌تر خواهد ساخت. برای مثال، نرخ نزول آزمون واقعی سال مالی فدرال در سال ۲۰۱۱ برای افق برنامه‌ریزی ۳۰ ساله در ۲٫۷ درصد محرز شد (OMB, ۲۰۱۰). با این نرخ تنزیل، ۱ دلار از سود و منافع واقعی که در ۳۰ سال حاصل می‌گردد بعدها در ۲۰۱۱ دارای ارزش $1,027^{30}/1 = 0,45\$$ و یا کمتر از نیم خواهد بود. یک دلار از سود بدست آمده در ۱۰۰ سال در آینده یا سوای افق برنامه‌ریزی نادیده گرفته خواهد شد و یا ارزشی برابر با تنها ۰٫۰۷ دلار در سال ۲۰۱۱ خواهد داشت.

عمر طولانی آن نیز ممکن است بر برنامه‌ریزی برای جایگزین‌های آینده تأثیرگذار باشد. توسعه خاص فضای زیرزمینی می‌تواند مانع از دیگر کاربری‌ها گردد و یا پیاده‌سازی و اجرای آنها را پر هزینه‌تر سازد. برای مثال، تونل‌های حمل و نقل زیرزمینی مانند پروژه شاهراه مرکزی بوستون نیاز به بازسازی و جابجایی تسهیلات زیرزمینی موجود در معابر تونل دارد. پی‌ریزی‌های ساختمانی ممکن است استفاده مجدد از مکان‌های فضای زیرزمینی آنها را به شدت پرهزینه و گران سازند، که پارکینگ‌های زیرزمینی جدید، تونل‌ها و یا دیگر کاربری‌ها را در آن مکان غیر ممکن می‌سازد. در حقیقت، ساخت‌وساز فضای زیرزمینی هزینه را افزایش و انعطاف‌پذیری گزینه‌ها برای کاربری‌های جایگزین آتی را کاهش می‌دهد. از آنجایی که بسیاری از تسهیلات زیرزمینی حتی پس از پایان عمر مفید خود در زمین باقی می‌مانند، هزینه‌های اضافی و یا دشواری استفاده مجدد از فضا، تقریباً برای مدت نامحدودی ادامه می‌یابد. برنامه‌ریزی جامع اذعان می‌دارد که، فضای زیرزمین منبعی است که باید در بهترین حالت ممکن استفاده گردد، به جای کاربری‌های اولیه که مانع از استفاده‌های بعدی می‌شود. نتایج مشابهی با توجه به

۱. مثلاً برای تامین پناهگاه. تونل‌های مترو لندن به عنوان پناهگاهی برای در امان ماندن از بمباران در جنگ جهانی دوم مورد استفاده قرار گرفت.

۲. حفاظت در برابر خوردگی

محدود ساختن زباله‌های فضایی در مدارهای اطراف زمین به دست آمده است که ممکن است استفاده از آن مدارها را برای اهداف دیگر غیرممکن سازند (مثال، ۱۹۹۹، UN).

علاوه بر ارزیابی چرخه حیات، خود زیرساخت‌های زیرزمینی پایداری، حاکی از این است که اثرات زیرساخت‌ها نیز برای کل چرخه حیات یک پروژه، بررسی می‌گردد. ارزیابی چرخه حیات « جنبه‌های زیست‌محیطی و اثرات بالقوه را در طول عمر یک محصول (مثال، از گهواره تا گوه‌ر) از حصول مواد اولیه تا استفاده از محصول و انهدام آن بررسی می‌نماید» (ISO, ۱۹۹۷). شکل ۵،۱ چرخه حیات زنجیره تأمین کلی را نشان می‌دهد. برای زیرساخت‌های زیرزمینی، زنجیره تأمین، شامل مواد و فرآیندهای مختلفی است که در جریان ساخت وجود دارند و همچنین ورودی‌هایی از قبیل انرژی برای روشنایی و تهویه در حین عملکرد تسهیلات. هزینه‌های تعطیلی و انهدام مشمول فاز انهدام در شکل ۵،۱ می‌باشد. انتظار می‌رود فاز دفن زباله در برگیرنده هزینه‌های فراهم‌سازی دفن مهندسی شده زباله برای انهدام و یا هر گونه هزینه مرتبط با سازه‌های قدیمی در زیرزمین باشد.

معیارهای مورد استفاده در ارزیابی توسعه پایدار به طور کلی، و همچنین ارزیابی اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی خاص، حتی بدون در نظر گرفتن شرایط ویژه توسعه زیرزمینی هنوز موضوع مباحث گسترده می‌باشند (جون و امکدزی، ۲۰۰۵). اثرات اقتصادی معمولاً در واحدهای پولی باز نمود می‌گردند، اما انواع گوناگون اثرات برای تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی بررسی می‌شود. برای مثال، ریچنדרز (۱۹۹۶) پیشنهاد می‌کند که اثرات زیست‌محیطی گسترده در آماده‌سازی ارزیابی چرخه حیات بررسی گردد که عبارتند از:

- تأثیر بر منابع (مثلاً، استفاده از منابع تجدیدپذیر و منابع تجدیدناپذیر، آلودگی منابع)؛
- تأثیر مستقیم بر طبیعت و فضای باز، از جمله از طریق تغییر نامطلوب در فضای باز؛
- آلودگی هوا و مشارکت آن در تغییرات آب و هوایی، دود مه، رسوب اسید، عطرها، و بدتر شدن لایه اوزون؛
- آلودگی خاک، از قبیل ضایعات خاک افزوده شده به خاک، از طریق اتروفیکاسیون، سموم افزوده شده، و کمک به آلودگی آب‌های زیرزمینی؛
- اثرات آب‌های سطحی، از جمله تخلیه بیولوژیکی یا شیمیایی با نیاز به اکسیژن، تخلیه‌های سمی، گرم شدن آب‌های سطحی، و همکاری در اتروفیکاسیون؛
- سر و صدا؛
- تشعشعات و یا میدان‌های الکترومغناطیسی؛ و
- تشعشعات یونیزان.

در بسیاری از مطالعات ارزیابی زیست‌محیطی چرخه حیات، برآورد اثرات زیست‌محیطی تنها به چند دسته مهم از اثرات محدود می‌گردند، از قبیل انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های معمولی.

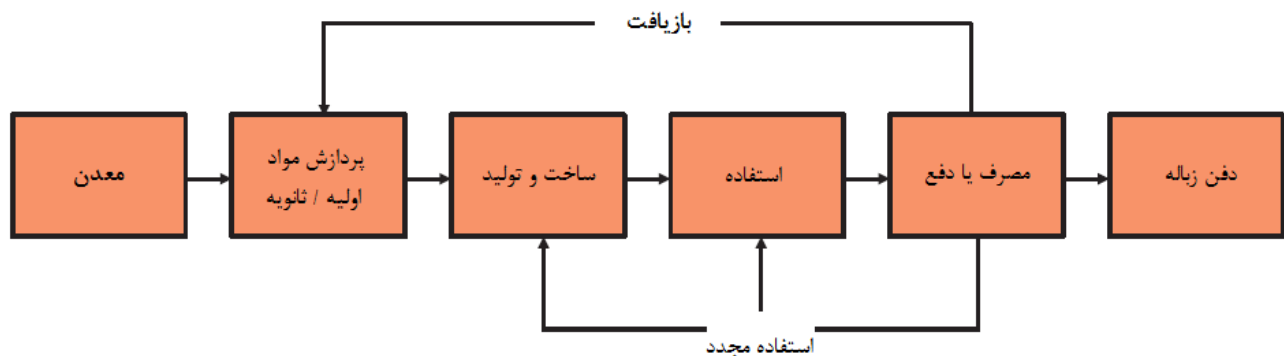
ارزیابی وابستگی‌های متقابل سامانه‌ی در طول چرخه حیات زیرساخت‌های زیرزمینی نیز با اهمیت و بخش چالش برانگیز ارزیابی ریسک می‌باشد. انواع گوناگونی از ابزارهای تحلیلی برای کمک به ارزیابی ریسک سامانه‌های زیرساختی مجزا و تعاملات آنها، وجود دارد. این ابزار عبارتند از شبکه‌های بی‌زی، شبیه‌سازی مونت کارلو، و درخت‌های تصمیم‌گیری (رینالدی و همکاران، ۲۰۰۱؛ هایمس، ۲۰۰۴؛ وبر و همکاران، ۲۰۱۲). به کارگیری چنین ابزاری تصمیم‌گیری را به واسطه کاهش برخی سطوح بالای عدم قطعیت که مرتبط با انواع مختلف خطرپذیری می‌باشد تحت تأثیر قرار می‌دهد، به ویژه هنگامی که با فعل و انفعالات سامانه‌های پیچیده سروکار دارند.

در این فصل، کمیته مذکور، دانش موجود درباره اثرات توسعه زیرزمینی را گردآوری می‌نماید، که حاکی از خلأهای شناختی متعددی است، به خصوص به دلیل اینکه تحقیقات گذشته به طور کلی دیدگاه محدودتری در خصوص مزایا و

هزینه‌ها، به نسبت آنچه که برای چشم‌انداز پایداری چرخه حیات نیاز می‌باشد داشته‌اند. همچنین نوسان و عدم قطعیت در اجرای توسعه زیرزمینی وجود دارد، به ویژه با توجه به حوادث غیر مترقبه‌ای از قبیل زلزله‌ها و سیلاب‌ها. به علاوه، مزیت‌ها و معایب کلی تسهیلات زیرزمینی که در فصل ۳ بیان گردید ارزیابی‌های خاصی را برای هر گونه کاربری و شرایط محل ایجاب می‌کنند.

هزینه و فایده اقتصادی چرخه حیات

افزایش جمعیت، میزان مصرف، تراکم، جهانی شدن، و دیگر روندها، افزایش پیچیدگی را برای جامعه انسانی مطرح می‌سازند (بوئل و همکاران، ۲۰۱۰). پیاده‌سازی پیشرفت‌های فناورانه می‌تواند هم پیامدهای منفی و هم پیامدهای مثبت را در پی داشته باشد. مهم این است که فرآیندهای ارائه دهنده زیرساخت‌های زیرزمینی پایدار، به دقت طراحی گردند تا اثرات منفی را در حین حصول حداکثر مزایا محدود نمایند. اثرات غیر مستقیم پیشرفت‌های تکنولوژی نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. فضای زیرزمینی پیشرفته، فرصتی را برای استفاده از فضای سطحی، برای دیگر اهداف، از جمله فضای سبز برای پارک‌ها و یا دیگر توسعه‌های رو سطحی در داخل و یا نزدیک مراکز شهری فراهم می‌نماید، اما تعیین میزان چنین فرصت‌هایی دشوار می‌باشد. طراحی سامانه‌های زیرساختی با تأثیر کم که اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های حمل و نقل را کاهش می‌دهد هم اکنون در توسعه شهری گنجانده می‌شود (TRB, ۲۰۰۹). روند شهرهای متراکم، مفهوم توسعه زیرزمینی را که شامل دامنه گسترده‌ای از تسهیلات زیرزمینی است را پشتیبانی کرده که به حفظ یک محیط کارآمد اما با قابلیت بالا برای زندگی کمک می‌کند. در این خصوص، منافع ذاتی اقتصادی از بهره‌برداری زیرزمین به عنوان بخشی از تهیه مسکن، حمل و نقل، و تسهیلات تجاری، صنعتی و صنایع همگانی منتج می‌گردند.



شکل ۱-۵ چرخه کلی از گهواره تا گور فرآورده.

توسعه متمرکز و شهر متراکم

بحث دیرینی بر سر مزایا و هزینه‌های توسعه متمرکز به شکل شهرهای متراکم، نسبت به توسعه پراکنده و پراکندگی مراکز شهری وجود داشته است (مثال، اوینگ، ۱۹۹۷؛ گوردون و ریچاردسون، ۱۹۹۷). شهرهای متراکم باتراکم‌های بالا از مردم به ازای هر واحد سطح زمین، آمیزه‌ای از کاربری‌های زمین در مناطق مجاور، یک یا چند مرکز اشتغال باتراکم بالا، و مجاورت یاترکیب فضایی دقیق از کاربری‌های زمین متمایز می‌گردند (NRC, ۲۰۱۰). منتقدان شهرهای متراکم، اثرات مضر توسعه متمرکزتر، شامل تراکم افزایش یافته ترافیک، مسکن با صرفه اقتصادی کمتر، و هزینه‌های بالاتر مصرف کننده را مورد توجه قرار می‌دهند (گوردون و ریچاردسون، ۱۹۹۷؛ او تول، ۲۰۰۹).

مطالعات اخیر NRC نشان می‌دهد که شهرهای متراکم برای کاهش مسافت سفر با خودرو و هم مصرف مستقیم و غیر

مستقیم انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مناسب می‌باشند (NRC, ۲۰۱۰). تجربه اروپا مشابه این امر می‌باشد (شوانن و همکاران، ۲۰۰۴). شمین و سایرین (۲۰۱۰) نتیجه گرفتند که مصرف کل انرژی برای ساکنان مناطق شهری حدوداً ۱۷ درصد پایین‌تر از ساکنان مناطق روستایی و یا نواحی کم‌تراکم می‌باشد حتی زمانی که تمامی کالاهای خریداری شده و خدمات در نظر گرفته می‌شوند. تا حدی، این مزایای قابل انتظار از شهرهای متراکم، از انتخاب خود ساکنانی که خواهان رانندگی کمتر می‌باشند حاصل می‌گردد، لیکن حتی زمانی که عوامل نگرشی در نظر گرفته می‌شوند، مسافت‌های کمتری توسط خودروها در شهرهای متراکم پیموده می‌شود (هندی و همکاران، ۲۰۰۵). توسعه متراکم نیز هزینه‌های زیرساختی و فشار توسعه بر فضاهای سبز را کاهش می‌دهد (اوپنگ، ۱۹۹۷).



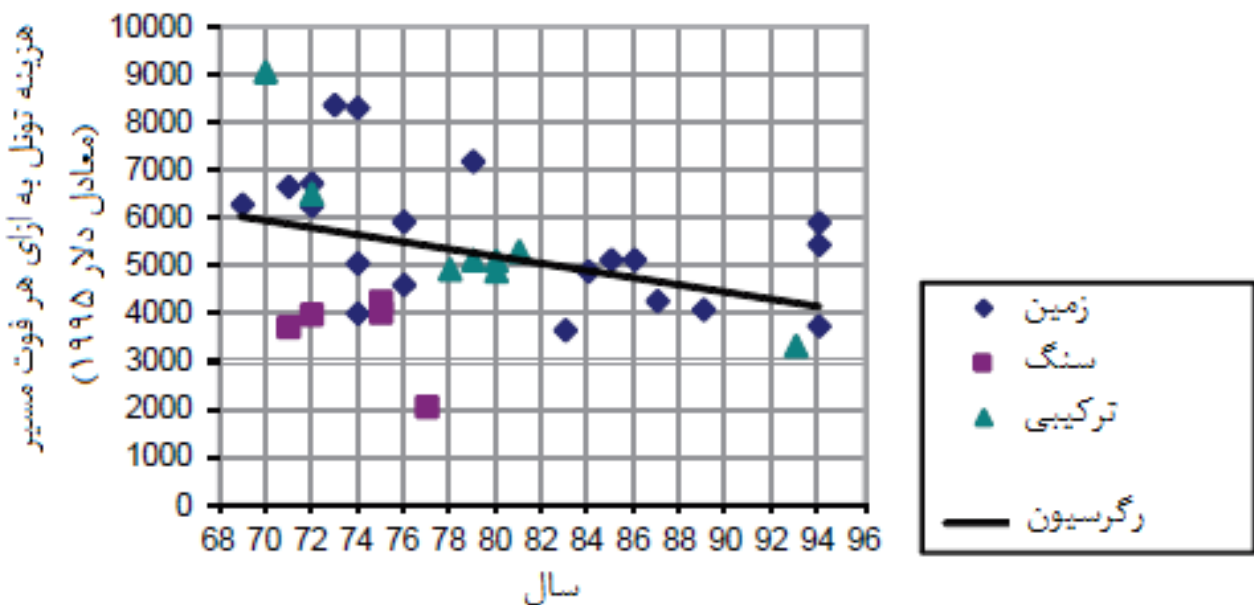
شکل ۵-۲ شاهراه مرکزی بوستون به صورت یک سازه هوایی و یک سواره رو زیرزمینی

با این وجود، تراکم شهری بالاتر به نظر می‌رسد که به طور مستقیم با سطوح بالاتری از توسعه فضای زیرزمینی متناظر باشد (استرلینگ و همکاران، ۲۰۱۲). بسیاری از برنامه‌ریزان باور دارند که توسعه و کاربری فضای زیرزمینی منافع خالص توسعه متراکم را افزایش می‌دهد. استفاده از فضای زیرزمینی می‌تواند تراکم ترافیک و هزینه‌های مصرف‌کننده در نظر گرفته شده توسط منتقدان شهرهای متراکم را کاهش دهد، در حالی که به طور همزمان کاهش سفر و انرژی مشخص شده توسط طرفداران شهر متراکم را در پی دارد. شکل ۵،۲ شاهراه مرکزی بوستون را نشان می‌دهد که در ابتدا به صورت یک سازه هوایی در طول مرکز شهر بوستون ساخته شد اما در پروژه بیگ دیگ به زیرزمین انتقال یافت، که منتهی به یک کوریدور از فضای باز شد (NAE / NRC, ۲۰۰۳). سود و منفعت خالص و تأثیرات غیر مستقیم بر توسعه بلندمدت قابل توجه است حتی با اینکه دستیابی به آنها بر پایه پروژه به پروژه دشوار می‌باشد.

مزایای اقتصادی فاز ساخت و هزینه‌ها

«محیط زیست فعلی ما شامل ساختمان‌ها، اعمال مهندسی، و زیرساخت‌هایی چون راه‌ها، کارخانه‌های تصفیه آب و

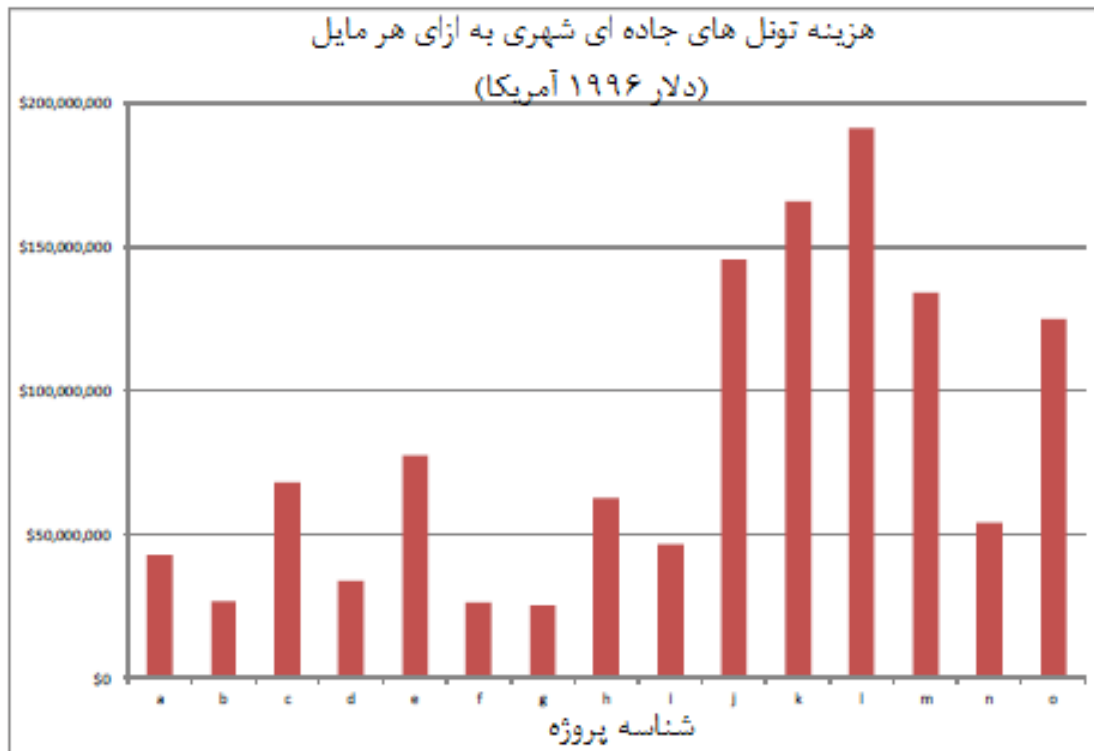
فاضلاب، سامانه‌های مدیریت آب‌های حاصل از طوفان، تأسیسات تولید برق، خطوط راه آهن، پل‌ها، و حتی سامانه‌های طبیعی مانند رودها و بنادر می‌باشد» (بویل و همکاران، ۲۰۱۰). توسعه فضای زیرزمینی فرصتی را برای قرارگیری بسیاری از این تسهیلات در فضای قابل دسترس تر - املاک و مستغلات - در زیر شهرک‌های سطحی موجود به وجود می‌آورد. استرلینگ (۲۰۰۵) اهمیت برنامه‌ریزی فضای شهری زیرزمینی را توضیح می‌دهد. هزینه‌های اولیه برای ساخت در زیرزمین عبارتند از مواردی که به خصوصیات سایت زمین‌شناسی و مدیریت شرایط ژئولوژیکی، یافتن و منتقل کردن صنایع همگانی، اختلالات بالقوه برای زیرساخت‌های موجود به دلیل قطعی‌های ناگهانی تأسیسات، الزامات مورد نیاز برای خاک‌ریزی مهندسی شده، و کنترل ترافیک در طول یک‌تراز افقی مرتبط می‌باشند. تلاشی ملی برای بکارگیری بهترین شیوه‌ها در عملیات‌های زیرزمینی به نفع امنیت عمومی در جریان است (CGA, ۲۰۰۸). با این وجود، در نواحی شهری، سازه‌های موجود، طراحی کاربردی تسهیلات زیرزمینی را ملزم می‌کنند. تسهیلات زیرزمینی می‌بایست با محدودیت‌های طراحی تأسیسات و در دسترس بودن زمین و یا راحتی دسترسی برای ساخت همگام و همسو باشند. زمان مرتبط با الزامات آماده به خدمت، وابسته به قوانین زیست‌محیطی و ایمنی نیز می‌باید در هزینه‌های ساخت لحاظ گردد.



شکل ۳-۵ هزینه برای معدن کاری و خط کشی تونل‌های با قطر تقریبی ۲۰ فوت برای مترو واشنگتن در طول دوره ۱۹۹۴-۱۹۶۹.

شکل ۳-۵، بر اساس اطلاعات حاصل از ساخت مترو واشنگتن از ۱۹۶۹ تا ۱۹۹۴، یک روند خطی کاهشی را برای هزینه‌های اولیه ساخت تونل، و به همان اندازه مهم، کاهش رنج هزینه‌ها در طول این دوره ۲۵ ساله را نشان می‌دهد. اگر چه هزینه‌های پروژه‌های بسیار زیاد و وابسته به شرایط خاص، برای مثال دشواری نصب و راه‌اندازی بخش‌های خاص، می‌باشد، این نمودار بیانگر این موضوع است که دانش انباشته و مدیریت ریسک، سرمایه‌گذاری‌ها در تحقیقات، و پذیرش فن‌آوری‌های بهتر و روش‌های پیمانکاری در طول این دوره منجر به کاهش هزینه در ساخت تونل واقعی گردیده است. آیا این کاهش‌های هزینه‌ای در هزینه کلی پروژه‌های ساخت زیرزمینی جدیدتر در نظر گرفته می‌شود؟ پاسخ احتمالاً «نه» می‌باشد، چرا که تقاضا برای استانداردهای ایمنی بالاتر و کاهش خطرپذیری ساخت و تأثیر زیست‌محیطی برای پروژه‌های جدیدتر افزایش یافته است. افزون بر این، این تغییرات در هزینه‌های فنی ممکن است توسط طیف گسترده‌ای در هزینه‌های کل پروژه که در پروژه‌های سراسر جهان دیده می‌شود پنهان ماند. برای نمونه، شکل ۳-۴ اطلاعات جمع‌آوری شده در خلال مطالعه‌ای در

خصوص هزینه‌ها و مزایای تسهیلات حمل و نقل زیرزمینی را نشان می‌دهد که توسط گروه کاری ۱۳ (ITAWG ۱۳, ۲۰۰۴) انجمن بین‌المللی تونل‌سازی و فضای زیرزمینی (ITA) انجام پذیرفته است. داده‌های هزینه‌ای درباره تونل‌های جاده‌ای از ۳۰ شهر در ۱۹ کشور از پاسخ پرسشنامه‌ها گردآوری و بر حسب دلار ۱۹۹۶ آمریکا برای هزینه به ازای هر مایل لاین از راه به یک مبنای متداول تبدیل گردید.



شکل ۵- بی‌ثباتی در هزینه‌های تونل‌های جاده‌ای شهری بر اساس اطلاعات حاصل از استرالیا، فرانسه، ژاپن، سوئد، و ایالات متحده. هر حرف بر روی محور X پروژه متفاوتی را نشان می‌دهد که داده‌های هزینه‌ای بر آن اساس تهیه گردیده‌اند

اگر چه این هزینه‌ها به دلیل آنچه که در هزینه‌های هر پروژه به حساب آورده می‌شود متفاوت می‌باشند، لیکن نوسانات و تغییرات مشاهده شده در میان کشورها، در ساخت هر کیلومتر لاین از مسیر راه را بیان می‌کند که بررسی دلایل هزینه‌های پایین‌تر در برخی کشورها در مقایسه با دیگر ممالک خالی از لطف نمی‌باشد. با وجودی که زمین‌شناسی محلی، در این میان نقشی را ایفا می‌کند، اما انتظار نمی‌رود که تنها دلیل قابل توجه برای نوسانات مشاهده شده باشد. تفاوت‌ها در استانداردهای طراحی، فرایندهای بازرگری اداری، مشارکت عمومی، و ساده‌سازی فرایندهای طراحی و ساخت به طور فزاینده‌ای دارای اهمیت می‌باشند. شناخت دلایل هزینه‌های متغیر مهم است به طوری که نتایج پروژه‌های انجام شده در دیگر کشورها می‌تواند با توجه به استانداردهایی غیر از هزینه بالا مورد قضاوت قرار گیرند و به گونه‌ای که عوامل دخیل در هزینه‌های بالا می‌توانند مشخص شده و بهبود یابند.

برآوردهای مختلف از طول خطوط لوله آب، فاضلاب، آب حاصل از طوفان در ایالات متحده در این اثر یافت می‌شود. جدول ۲،۱ در مجموع حدود ۳،۷ میلیون خط لوله شامل انتقال، توزیع، و اتصالات خدمات خصوصی را فهرست می‌کند. برآورد می‌شود سالانه بیش از ۴۸۰۰۰۰ کیلومتر تأسیسات زیرزمینی در سرتاسر جهان نصب و راه‌اندازی می‌گردد، که عبارتند از آب، فاضلاب، گاز، برق، تلویزیون‌های کابلی، و تلفن (نجفی، ۲۰۰۵). بخش قابل ملاحظه‌ای از این زیرساخت‌ها در زیر سطوح هموار محیط‌های شهری مدفون است. به تبع آن، نصب و راه‌اندازی و نوسازی مؤثرتر و کارآمدتر این شبکه تأسیساتی وسیع منافع اقتصادی چشمگیری به واسطه هزینه‌های مستقیم کمتر و بی‌نظمی‌های ناچیز این محیط سطحی را به همراه دارد.

بسته شدن لاین، با توجه به ساخت روی سطح و مسیرهای انحرافی متعاقب آن سبب معطلی‌های ترافیکی می‌گردد و بر هزینه سوخت تأثیرگذار خواهد بود (CNRC, ۲۰۰۵). تأثیرات به واسطه انتخاب تجهیزات ساختمانی مناسب به حداقل خواهد رسید. صرفه جویی‌های بیشتر برای تجهیزات سرمایه‌ای اولیه، مثلاً با روش‌های حفاری حاصل می‌گردد، به ویژه در ساخت و سازهای افقی به دلیل کاهش استفاده از تجهیزات ساخت (وودروف و آریاراتنام، ۲۰۰۸). در مقابل، حفاری رو باز نیاز به استفاده از تعداد زیادی از تجهیزات از جمله دستگاه‌های حفاری، بولدوزرها، تخم‌اق‌های سطح، و وسایل نقلیه حمل و نقل دارد. در حال حاضر آنچه که در عملیات‌های زیرزمینی پیاده می‌گردد مکانیسم‌های پیمانکاری جایگزین می‌باشند که ابزارهای نوآورانه‌ای را برای تقسیم ریسک‌های پروژه به منظور کاهش اثرات آنها بر مقادیر پیشنهادی ارائه می‌دهند. این ابزارها حاوی رویکردهایی از قبیل طراحی - ساخت، طراحی - تصدیق - عملیات - انتقال، و مدیر ساخت در ریسک می‌باشند. به علاوه، مشخصات مبتنی بر عملکرد بکار گرفته می‌شود تا خلاقیت پیمانکار را ارتقاء دهند و هزینه‌های ساخت را کاهش دهند. کمبود مشخصات مبتنی بر عملکرد به هر حال اثرات منفی بر ماحصل نهایی خواهد داشت.

مقایسه مختصری از هزینه‌های ساخت در زیرزمین در مقابل ساخت رو زمینی وجود دارد (پارکر، ۲۰۰۷). تحلیل‌های هزینه چرخه حیات، هزینه‌های مستقیم، اجتماعی، و زیست‌محیطی و همچنین هزینه‌هایی برای آیتم‌های اختصاصی مانند سامانه‌های گرمایشی، هواکش، و سامانه‌های تهویه هوا را در طول چرخه حیات در نظر می‌گیرند. از آنجایی که این موارد برای عملکرد زیرساخت‌ها مهم و حیاتی می‌باشند و باید به دقت انتخاب و در جریان ساخت اولیه نصب گردند، این هزینه‌ها و دیگر هزینه‌های عملیاتی معمولاً با هزینه‌های سرمایه‌ای مستقیم در انتخاب بهترین گزینه ساخت تلفیق می‌شوند.

خطرات و خطر پذیری‌های مربوط به ایمنی در تمامی پروژه‌های ساختمانی امری ذاتی می‌باشند و نیاز به ارزیابی در طول فاز طراحی دارند. رویکرد ارزیابی اثر ایمنی مبتنی بر ریسک، برای ساخت یک خط مترو در سئول، کره اتخاذ گردید (سئو و چوی، ۲۰۰۸). ساخت‌وساز رو باز نیز به منظور اهداف مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف آن شناسایی و کاهش پیش از ساخت، خطر پذیری‌های مرتبط با آیتم‌های طراحی که حوادث ساختمانی را به وجود می‌آورند بود. این موضوع دارای اهمیت است چرا که ساخت‌وساز در زیرزمین «خارج از دید»، انجام می‌گیرد که در نتیجه نیاز به درجه بالایی از مهارت و تجربه گسترده طراح (غالباً به صورت قراردادی موظف به عرضه بازرسی‌های کنترل کیفیت تمام وقت می‌باشد) و سازنده دارد. طراحی و ساخت زیرساخت‌های زیرزمینی سناریوهای بی‌نظیری را ارائه می‌دهد که در آنها طراحی، بازرسی، و عملیات ساخت به سادگی جداسازی نمی‌شوند (کاگان و همکاران، ۱۹۸۶).

هزینه و فایده چرخه حیات فاز عملیاتی

همانگونه که پیش‌تر بیان شد، تعیین میزان منافع هزینه‌ای حاصل از عملکرد هر سامانه زیرساختی، سخت و دشوار است. مزایا شامل بهبود کیفیت زندگی، کاهش تعداد سفر و زمان سفر، و افزایش در بهره‌وری می‌باشد. با این همه، مزایای ذاتی مرتبط با عملیات زیرساخت‌های زیرزمینی وجود دارد. جانسون (۲۰۰۶) دریافت که تبدیل خطوط برق هوایی بدمنظر به خطوط زیرزمینی موجب افزایش ارزش ملک و افزایش زیبایی‌شناسی در مناطق و محلات می‌گردد. دیگر مزایای اقتصادی اجتماعی چرخه حیات، شامل کاهش قطعی‌ها، خسارات انتقال، و گازهای گلخانه‌ای؛ کاهش هزینه‌های حفظ و نگهداری شبکه؛ برق گرفتگی‌های کمتر؛ و تصادفات موتورهای کمتر با پل‌ها می‌باشد (مشاوره IFC، ۲۰۰۳). هزینه متوسط قرار دادن خطوط برق موجود در زیرزمین ۱ میلیون دلار به ازای هر مایل تخمین زده می‌شود، که تقریباً ۵ تا ۶ برابر (پارسونز برینکرهوف، ۲۰۱۲) و یا ۱۰ برابر (جانسون، ۲۰۰۶) هزینه یک خط هوایی جدید می‌باشد. با این وجود، هزینه‌های نگهداری و عملیاتی خطوط برق زیرزمینی در حدود یک دهم هزینه‌های مشابه در خطوط روی زمین گزارش می‌شود به دلیل کاهش خسارات انتقال در طول چرخه حیات (مشاور IFC، ۲۰۰۳). علاوه بر این، کابل‌های زیرزمینی همچنین قادر به افزایش ظرفیت

انتقال برق می‌باشند (ال خالیدی و کلام، ۲۰۰۶).

فصل ۴، مسائل امنیتی مربوط به زیرساخت‌های زیرزمینی را بیان می‌کند و نشان می‌دهد که مزایای امنیتی بالفطره‌ای در قرارگیری زیرساخت‌ها در زیرزمین وجود دارد. سامانه‌های زیرزمینی، دارای ریسک خرابی کمتری، حاصل از فاجعه در زمین لرزه‌ها، طوفان‌ها، گردبادها، طوفان‌های گرمسیری، حوادث برفی سنگین، بادهای موسمی، و بلایای طبیعی هستند، اما این سامانه‌ها ممکن است نسبت به جاری شدن سیل آسیب‌پذیر باشند. این ریسک‌های کمتر می‌توانند به کاهش حق بیمه در طول چرخه حیات آن دارایی تبدیل گردند (مثلاً، د سونتحم، ۱۹۹۷).

هزینه و فایده اقتصادی چرخه حیات، فاز نوسازی و جایگزینی

نوسازی زیرساخت‌ها (برای مثال حفظ دارایی) در وضعیت بهره‌برداری غالباً از هزینه‌های جایگزینی کمتر می‌باشد. به تبع آن، زمانی که زیرساخت‌های موجود هنوز به لحاظ سازه‌ای قابل قبول می‌باشند، روش‌های نوسازی از جمله آسترکشی و یا ملات‌ریزی دور خطوط لوله و تعمیرات خارجی ساختمان‌ها ترجیح داده می‌شوند اما نیاز به نوسازی «همانند یک سازه جدید» دارند. جایگزینی ممکن است به دلیل کهنگی، طراحی تغییرناپذیر، و یا ترمیم‌ناپذیری زیرساخت‌های موجود ضروری به نظر برسد. زیرساخت‌های سطحی با سهولتی نسبی نسبت به زیرساخت‌های زیرزمینی جایگزین می‌گردند؛ با این وجود، تعداد دفعات تعمیرات و بازسازی‌ها احتمالاً برای زیرساخت‌های زیرزمینی به دلیل مصنویت و حفاظتی که فضای زیرزمینی ارائه می‌دهد کمتر می‌باشد. از سویی دیگر، در صورتی که زیرساخت‌های زیرزمینی کهنه و منسوخ گردند، - برای مثال، سامانه تونل حمل و نقل تا حد زیادی متروکه در زیر مرکز شهر شیکاگو (رجوع به کادر ۳،۷) - تغییر کاربری آن فضا برای کاربردهای دیگر دشوار به نظر می‌رسد.

برنامه‌ریزی دقیق برای استفاده درست از فضای زیرزمینی در آینده می‌تواند اندازه و درجه‌ای که در آن زیرساخت‌ها دچار فرسودگی و کهنگی می‌گردند را به حداقل برساند. اوتیلیدورها (کریدورهای تأسیساتی در زیرزمین تشریح شده در فصل ۳)، به عنوان نمونه، انعطاف‌پذیری را برای جایگزینی و یا افزودن صنایع تأسیساتی فراهم می‌نمایند زمانی که فرسودگی، زوال، و یا مسائل مربوط به ظرفیت و گنجایش بر آنها تحمیل می‌گردد. کوریورهای تأسیساتی (اوتیلیدورها) بهبود تأسیسات را ساده‌تر و کارآمدتر می‌سازند و ارتقاء دقت و صحت را در قرار دادن تأسیسات همگانی زیر خاکی موجود فراهم می‌کنند، که برای نگهداری و جایگزینی خط با صرفه می‌باشد. کانتو- پرلو و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که اوتیلیدورها معضل بالقوه تداخل متقابل میان صنایع همگانی و شبکه‌های حمل و نقل را به حداقل می‌رسانند. افزون بر این، قرار دادن تأسیسات همگانی در اوتیلیدورها (کوریورهای تأسیساتی) منجر به مینیمم‌سازی خرابی‌های فیزیکی در خیابان‌های سطحی زمین در برابر برش‌های مستمر در پیاده رو در هنگام نصب، بازرسی، نگهداری، تعمیر، و یا جایگزینی خطوط می‌گردد.

هزینه و فایده زیست‌محیطی چرخه حیات

از سال ۱۹۷۰، قانون ملی حفاظت از محیط زیست^۱ «سازمان‌های فدرال را ملزم به وارد نمودن ارزش‌های زیست‌محیطی در فرایندهای تصمیم‌گیری خود با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی اقدامات پیشنهادی خود و جایگزین‌های مناسب و معقول برای آن اقدامات نموده است» (EPA, ۲۰۱۰). در نتیجه، گزارش‌ها و تحلیل‌های مربوط به اثرات زیست‌محیطی برای گستره وسیعی از توسعه‌های زیرزمینی کامل گردیده است. معهدا، این بیانی‌های مربوط به اثرات در آینده طبیعت مؤثر می‌باشند تا در تصمیمات مربوط به برنامه‌ریزی، آگاهی‌رسان باشند، به جای ارزیابی‌های گذشته نگرانه اثرات واقعی زیست‌محیطی حاصل از

^۱ NEPA

پروژه‌هایی که به مرحله اجرا در آمده‌اند. برای مثال، در حالی که بسیاری از تحلیل‌های اولیه در برگیرنده تأثیرات انتشار گازهای گلخانه‌ای نمی‌باشند، بیانیه‌های جدید اثرات زیست‌محیطی به یافته‌هایی چون یافته ۲۰۰۹ توسط مدیر سازمان EPA عنایت دارند که نشان می‌دهد انتشار گازهای گلخانه‌ای (دی اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن، هیدروفلوروکربن، پرفلوروکربن، و هگزا فلورید گوگرد) سلامت عمومی و رفاه نسل‌های فعلی و آینده را در نتیجه اثرات تغییر آب و هوایی تهدید می‌نماید (EPA, ۲۰۰۹). در نهایت، بیانیه‌های اثرات زیست‌محیطی معمولاً زنجیره تأمین و یا اثرات زیست‌محیطی مستقیم را در تحلیل‌ها در بر نمی‌گیرند و از اینرو ارزیابی کاملی از چرخه حیات ارائه نمی‌دهند. برای تخمین اثر کربنی و یا انتشار گازهای گلخانه‌ای، این نشرهای غیر مستقیم انتشار ردیف ۳ (Tier ۳) نامیده می‌شوند و غالباً برای تهیه کالاها و خدمات، مهم و دارای اهمیت می‌باشند (ماتیوز و همکاران، ۲۰۰۸). به خصوص، تولید سیمان که در ساخت‌وساز زیرزمین بکار می‌رود عموماً منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد.

روش‌های ساخت‌وساز نقشی اساسی در انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند. سیه‌بودین و آریاراتنام (۲۰۰۹) انتشار حاصل از حفاری بدون ترانشه (trenchless) در هوا را با تعویض رو باز لوله‌ها در پروژه مشابه مقایسه نمودند و دریافتند که حفاری بدون ترانشه (trenchless) آلودگی را در حدود ۸۰ درصد کاهش می‌دهد. مطالعات اندکی در خصوص اثرات زیرساخت‌های زیرزمینی بر چرخه حیات خود آنها انجام گرفته است و یا اینکه ارزیابی‌های چرخه حیات زیرساخت‌های فوقانی و زیرساخت‌های زیرزمینی که همان خدمات را ارائه می‌دهند را مقایسه نموده‌اند (رجوع به کادر ۵، ۱).

کادر ۵-۱

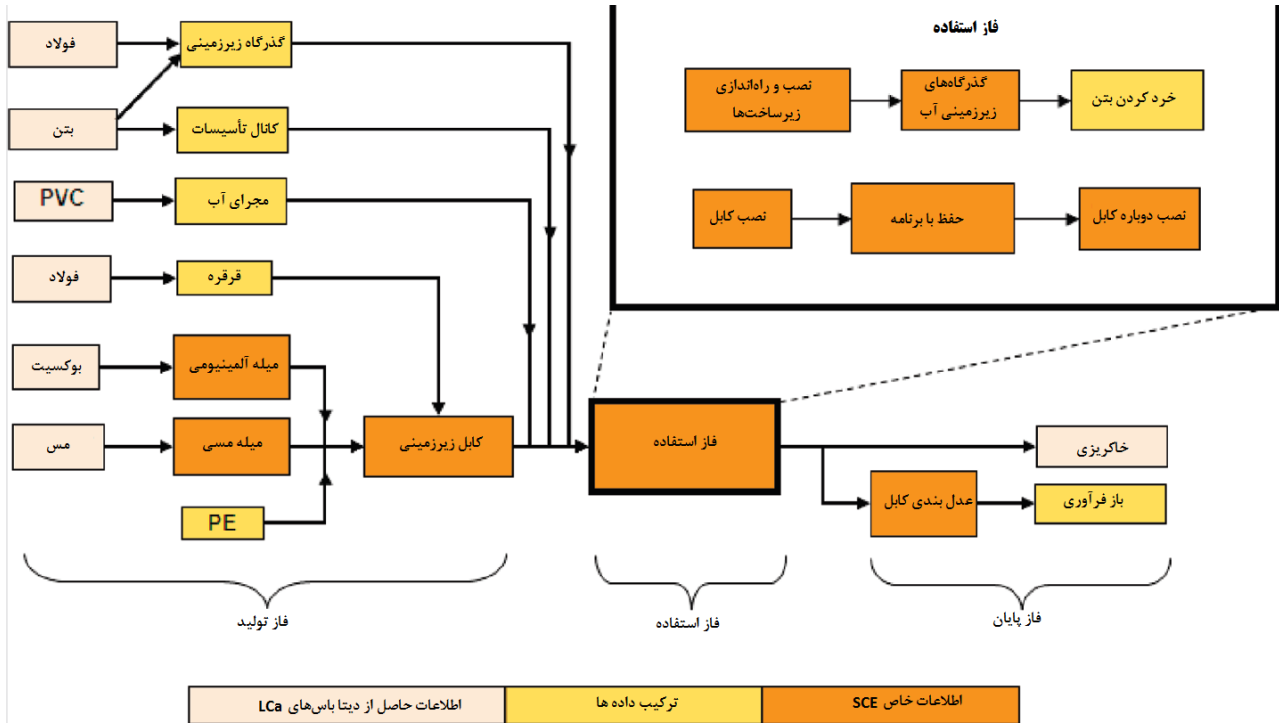
مقایسه چرخه حیات زیست‌محیطی توزیع برق هوایی و زیرزمینی

بمبئی و همکاران (۲۰۱۰) توزیع برق هوایی و زیرزمینی را با هم مقایسه کردند که از طرح‌های (شرکت) ادیسون کالیفرنای جنوبی برای کابل‌های ولتاژ متوسط با استفاده از ارزیابی چرخه حیات مبتنی بر فرآیند در هر دستورالعمل از سازمان بین‌المللی استانداردسازی بهره می‌برد^۱. شکل مربوطه مراحل پروسه‌ای مختلف درگیر در چرخه حیات برای مونتاژ توزیع برق زیرزمینی را نشان می‌دهد. ارزیابی آنها حاکی از آن است که مونتاژهای توزیع هوایی همان‌گونه که توسط شرکت ادیسون کالیفرنای جنوبی طراحی شد انتشار کلی کمتری دارد. این مقادیر به شدت توسط ورودی‌های مواد اضافی مورد نیاز برای تولید کابل مونتاژ خط توزیع زیرزمینی تحت تأثیر قرار دارد. عوامل ثانوی شامل عمر تخمینی کوتاه‌تر برای کابل‌های زیرزمینی است به واسطه اثرات گرمایش زیرزمینی و فرصت تجزیه کربنی از دست رفته به واسطه تولید الوار و چوب چرا که کربن در رشد درختان جذب می‌شود. این تحقیق همچنین تأثیرات شاخص سازگار با محیط زیست متداول در اروپا را ارزیابی نمود (رجوع به Guinee, ۲۰۰۲، برای استانداردها)، از جمله پتانسیل تقلیل غیرزنده، پتانسیل اسید شدن، پتانسیل اتروفیکاسیون، سمیت آبی آب شیرین، پتانسیل سمیت انسانی، پتانسیل ایجاد ازن فتوشیمیایی، و پتانسیل سمیت زمینی. به دلایلی مشابه آنچه برای انتشار گازهای زیرزمینی مطرح می‌باشد، طرح هوایی اثرات زیست‌محیطی کمتری در این طبقه‌بندی‌ها دارا بود.

این تحقیق برخی از طبقه‌بندی‌ها را حذف کرد که نیاز به پژوهش‌های آینده دارند. کابل زیرزمینی دارای مقاومت کمتری است، بنابراین تلفات برق انتقالی در زیرزمین کمتر خواهد بود. این پژوهش اثرات استفاده از زمین و مصرف انرژی خالص سامانه شهری و یا اثرات زیست‌محیطی حاصل از کاربری چه هوایی چه زیرزمینی را مورد بررسی قرار نمی‌دهد. مزیت مواد ساخت‌وساز برای کابل‌های برق ممکن است برای سازه‌های روزمینی (هوایی) که برای دیگر اهداف مانند حمل و وسایل نقلیه مورد استفاده قرار می‌گیرند وجود نداشته باشد. مضافاً بر این، قرار دادن خطوط هوایی (رو زمینی) انتقال برق غالباً می‌تواند به دلایل زیبایی‌شناختی

^۱ ایزو ۱۴۰۴۴ برای ارزیابی چرخه حیات شامل حوزه، فاز تحلیل موجودی، فاز ارزیابی اثرات، فاز تفسیر الزامات را تعیین و دستورالعمل‌ها را ارائه می‌نماید (ISO, ۲۰۰۶).

سخت و دشوار باشد. این تحقیق مشکلات دریافت نتایج جامع اما دقیق، حاصل از تحلیل‌های سه گانه سود و زیان را نشان می‌دهد. چنین تحلیل‌هایی تنها می‌تواند در برگیرنده مسائلی باشد که اطلاعاتشان در دسترس است و قادر به بررسی مسائل اجتماعی، زیست‌محیطی، تاب‌آوری به طور گسترده‌تر نمی‌باشند.



نمودار جریان روند برای مونتاژ توزیع برق زیرزمینی. رنگ‌ها بیانگر منبع اطلاعات به صورت دیتا باس‌های ارزیابی تجاری چرخه حیات (صورتی)، شرکت ادیسون کالیفرنای جنوبی (نارنجی)، یا آمیزه‌ای از این دو منبع (زرد) می‌باشند.

هزینه و فایده اجتماعی چرخه حیات

این بخش پاره‌ای از مزایا و هزینه‌های اجتماعی مرتبط با استفاده از فضای زیرزمین را جمع‌بندی می‌کند و مطرح می‌کند که چه اطلاعات اضافی و یا تغییراتی در روش‌های ارزیابی مفید خواهد بود تا موجب سرمایه‌گذاری‌های درست و تصمیم‌گیری‌های عملیاتی گردد.

همان‌گونه که در بخش‌های ابتدایی بیان گردید، در چهارچوبی برای ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی چرخه حیات گزینه‌های پروژه‌ای، نسبتاً به خوبی شناخته شده است—از جمله اینکه چگونه به صورت مفهومی و ادراکی ترکیبی از مقایسات کمی و انتزاعی را مدیریت نماییم. یکی از چالش‌های تحلیل هزینه چرخه حیات این است که برخی از برجسته‌ترین مزیت‌های سازه‌های زیرزمینی، کیفی بوده و در طولانی مدت حاصل می‌شوند (شامل مزایایی برای کیفیت زندگی و یا تاب‌آوری شهری)، در حالی که معایب آمادگی دارند که با سهولت بیشتری قابل شناسایی و قابل سنجش باشند (مثلاً، هزینه‌های راه‌اندازی). دیگر چالش موجود در این باره این است که انتظار می‌رود افراد اندکی استفاده از تسهیلات زیرزمینی را به جای تسهیلات روی سطح زمین برای دوره‌های طولانی ترجیح دهند. در بسیاری از موارد، مزایای آنچه که تسهیلات زیرزمینی به واسطه یک محیط سطحی پیشرفته، جابجایی و تحرک، و یا خدمات میسر می‌سازند حاصل می‌گردند به جای اینکه ماحصل، ویژگی‌های عالی و برتر خود تسهیلات، باشند.

کاربری فضای زیرزمین، اگر به خوبی طرح‌ریزی گردد، گزینه‌های بی‌نظیری را برای حمل و نقل شهری و ارائه خدمات

همگانی به همراه طیفی از سایر تسهیلات مطلوب میسر می‌سازد، که همگی دارای اثرات اندکی بر محیط سطحی، ماترک، و به طور بالقوه، بوم‌شناسی می‌باشند. به عبارت دیگر، ساخت‌وساز زیرزمینی با برنامه‌ریزی مناسب یک محیط شهری متراکم، دارای عملکرد خوب، قابل سکونت و پایدار را تأمین می‌نماید. حفاظت و تاب‌آوری یک سازه زیرزمینی ممکن است برای مالک پروژه مفید باشد، اما اگر این امر بر توانایی جامعه در انجام عملکرد مفید و مؤثر، برای مثال بعد از وقوع یک فاجعه، تأثیرگذار باشد، بنابراین تأثیرات اجتماعی بسیار وسیع‌تری وجود خواهد داشت. به همین ترتیب، جوامع بیش از پیش در برابر ساخت‌وساز پروژه‌های زیرساختی جدید که منتهی به بی‌نظمی و اختلال می‌گردد مقاومت می‌کنند. مالک پروژه ممکن است هزینه‌هایی را بابت این اختلال پرداخت نماید - از جمله زیان کسب‌وکار، - اما در برابر هزینه‌های تأخیر ترافیک و کاهش قابلیت سکونت در مجاورت آن به واسطه سروصدای ناشی از ساخت‌وساز، ارتعاشات، گرد و خاک، و کاهش کیفیت هوا مسئولیتی ندارد. در مقایسه با گزینه‌های پروژه‌ای، گرفتن تمامی هزینه‌های مقتضی چالشی را برمی‌انگیزد و سر فصلی را برای تحقیقات آتی باز می‌نماید.

مقالات متعدد مسائلی را مطرح می‌کنند که با توجه به پروژه‌های تأسیساتی بررسی می‌شوند (مثلاً، گیلکریست و آلوچه (Allouche)، ۲۰۰۵) و نمونه‌های موردی از کاربرد هزینه‌های اجتماعی و غیرمستقیم را در تصمیم‌گیری‌های پروژه‌ای ارائه می‌دهند (مثلاً لی و همکاران، ۲۰۰۹). به هر حال، معمولاً تنها تعداد اندکی از هزینه‌های کلیدی اجتماعی یا غیرمستقیم به دلیل فقدان اطلاعات مربوط به اثرات و یا فقدان هزینه‌های مورد پذیرش برای تأثیرات ناشی از اختلالات در نظر گرفته می‌شوند. مقالاتی که تحلیل‌هایی را از انواع هزینه‌ها تعریف می‌کنند (مثلاً پوکر و همکاران، ۲۰۰۶) نوعاً اعلام می‌دارند که هزینه‌های تأخیر ترافیکی مهمترین هزینه اجتماعی در مناطق شهری است و می‌تواند با هزینه خود ساخت‌وساز برای برخی از کارهای تأسیساتی خیابانی برابری و یا حتی فراتر رود. در مناطق برون شهری و یا روستایی، تأخیر ترافیکی معمولاً دارای شدت کمتری مگر در مسیرهای شریانی اصلی می‌باشد.

مخالفت‌های محلی نسبت به پروژه، عموماً بر اساس هزینه‌های اجتماعی و غیرمستقیم که در نتیجه ساخت و عملیات پروژه قابل پیش‌بینی است می‌باشد. غالباً، این هزینه‌ها می‌توانند به واسطه روش‌های ساخت‌وساز با اختلال و بی‌نظمی کمتر (مثلاً فن‌آوری‌های حفاری بدون ترانشه (trenchless) برای ساخت و تعمیر تأسیسات، و تونل‌های حفاری مت‌های به جای تونل‌های حفاری روباز برای پروژه‌های ریلی و جاده‌ای) و محدودیت‌ها و یا تغییرات در شیوه‌های کار (مثلاً محدودیت ساعات کار، سر و صدا، و لرزش‌ها) کاهش یابند. همانگونه که روش‌های کاری محدود برای همراهی با مخالفان محل اتخاذ می‌گردند، هزینه‌های اجتماعی پرداخت نشده جزئی از هزینه‌های سنگین ساخت محسوب می‌گردند و به طور بالقوه ریسک ساخت را بالا می‌برند. روش‌های ساخت‌وساز با کمترین اختلال و بی‌نظمی به احتمال زیاد گزیده می‌شوند، که نیاز به محاسبه هزینه‌های اجتماعی را رفع می‌نمایند.

مسئله دیگری که شایان ذکر است این که تأثیرات ساخت و عملیات پروژه‌های زیرساختی بزرگ هدفی مؤثر را بر حسب سازش‌های مورد پذیرش برای محدود ساختن تأثیرات بر محله ارائه می‌دهد. بررسی‌ها در خصوص تبدیل یک پروژه حمل و نقل سطحی و یا هوایی (مرتفع) به یک‌تراز زیرزمینی، و یا تبدیل از ساخت تونل حفاری روباز به حفاری مت‌های، معمولاً تأثیرات کیفیت هوا و نویز را در پورتال تونل مورد بررسی قرار می‌دهند. در شرایط عمومی، جابجایی در زیرزمین به حرکت بسیاری از افراد در آن منطقه شهری تداوم می‌بخشد و اثرات زیست‌محیطی را در بیشتر منطقه که از طریق آن در جریان است کاهش می‌دهد. با این وجود، ارتعاشات ساخت‌وساز (مثلاً حاصل از انفجار) و انتشار سروصدا و کیفیت هوا متمرکزتر می‌شوند - که این امر مشکلات ذکر شده را برای آنانی که در مجاورت مستقیم و نزدیک می‌باشند آزار دهنده‌تر، اما با کنترل بیشتر می‌سازد. مشکل اینجاست که استانداردهای به طور فزاینده بالا، که پروژه‌های زیرزمینی به واسطه آنها اعتبار می‌یابند، هزینه‌های آنها را نسبت به گزینه‌های سطحی و یا مرتفع (هوایی) افزایش می‌دهند. تصمیم‌گیری‌های مهم با توجه به طرح‌های بزرگ زیربنایی

برای نواحی شهری وابسته به چنین نگرانی‌هایی است. توانایی در سنجش و مقایسه کافی گزینه‌های زیربنایی کاملاً متفاوت، (شامل گزینه «هیچ کدام») که به طور بالقوه سیمای شهر را به صورت بهتر یا بدتر تغییر می‌دهد چالشی دلهره آور را بر جای می‌گذارد. در بسیاری از موارد، در نهایت یک تصمیم سیاسی قوی در مواجهه با گزینه‌های بسیار متفاوت و تحلیل‌های متناقض از هزینه - سود گرفته می‌شود.

ملحوظ داشتن مسائل مربوط به فاکتورهای اجتماعی و انسانی و بهبود طرح‌های زیرزمینی تنها برای ظاهرسازی و نمایش در پروژه‌های اساساً فنی نمی‌باشد. چگونه این مسائل در طراحی پروژه نظام می‌یابند و چگونه ساخت‌وساز می‌تواند اثرات ژرفی بر هزینه آن، که مورد پذیرش عموم مردم باشد، و تأثیراتی بر چرخه حیات آن داشته باشد. نمی‌توان به بهترین جواب در این زمینه رسید، اما شناخت و درک نتایج مختلف با اهمیت می‌باشد. متروی استکهلم (سوئد) طرح‌های ایستگاهی را که توسط هنرمندان طراحی گردیده‌اند متمایز ساخته است تا فضاهای مجزا و متفاوتی را در هر ایستگاه ایجاد نماید (وینکویست و ملگرن، ۱۹۸۸). ایستگاه‌های متروی واشنگتن، دی سی، ظاهری همانند دارند که تا این همانندی سهولت در استفاده را به وجود آورد. حفره‌های بزرگ ایستگاهی غالباً برای ایجاد یک فضای عمومی قابل توجه و گیرا در زیرزمین بکار می‌روند، البته با هزینه‌ای که با توجه به ساخت اولیه و احتمالاً در عملیات هم در نظر گرفته می‌شود (همانگونه که توسط او رور که ارائه گردید، ۱۹۸۳). منظور ساختن تنوع، در رویکردهای طراحی بر اساس شناخت و درک بهتر از چگونگی ایجاد فضاهای زیرزمینی جذاب و دلپذیر بدون افزایش در هزینه و یا الزامات فضا چالشی را بر جای می‌گذارد، همان‌طور که کمی‌سازی مزایا و هزینه‌های اجتماعی در طول چرخه حیات زیرساخت‌ها، بر جای می‌نهد.

نیازهای پژوهشی برای هزینه‌ها و مزایای چرخه حیات

همان‌طور که پیشتر بیان گردید، فاکتورهای بسیاری در تحلیل هزینه‌های چرخه حیات گنجانده می‌شود. بررسی این عوامل، درک ما از مکان استفاده از فضای زیرزمینی را تغییر می‌دهد - از آنچه که بر هزینه و ریسکی است، به آنچه که معقول و مقرون به صرفه‌ترین در بلند مدت است. درک بهتر از اینکه چه جنبه‌هایی از برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت، و عملیات پروژه بیشترین همراهی را با هزینه‌های پروژه و مزایا و عملکرد بلندمدت دارند تا حد زیادی مورد نیاز است. اهداف تحلیل هزینه چرخه حیات، کاهش هزینه‌ها تا حد امکان از طریق پیشرفت‌های تکنولوژی و طراحی و تغییرات اداری، و همچنین بیان بهتر مزایای بلندمدت برای مناطق شهری می‌باشد - برحسب شرایط مالی در صورت امکان - البته، حداقل از طریق نمونه‌های مستند شده مناسب از اثرات مثبت و منفی پروژه‌های زیرزمینی.

با توجه به مشخصات برجسته بسیاری از پروژه‌های جاده‌ای و ریلی، جای تعجب است که یافتن اسناد جامع امری دشوار است. مطالعات برنامه‌ریزی‌ها در دسترس می‌باشد، اما آنها فاقد ارزیابی‌های گذشته‌نگرانه از هزینه‌ها و مزایای واقعی است. مدارک نامعتبر و بی‌اساس و یا ناقص از اثرات زیست‌محیطی و مالی جایگزینی سازه‌های حمل و نقل رو زمینی باترازهای زیرزمینی در مناطق سرتاسر جهان وجود دارد. برای مثال، جهان بستون که در سال ۲۰۰۴ منتشر شد (پالمر، ۲۰۰۴).

با توجه به بررسی عمیق مالیات شهر بوستون با ارزیابی پرونده‌های جهان، در طی ۱۵ سال که پروژه تونل شاهراه مرکزی آغاز گردید، ارزش املاک تجاری در امتداد این مسیر طولانی که *the Rose Kennedy Greenway* خواهد شد به ۲,۳ بیلیون دلار افزایش یافت، یعنی تا ۷۹ درصد افزایش. این تقریباً دو برابر افزایش ۴۱ درصدی سطح شهر در ارزش املاک تجاری مورد ارزیابی در همان دوره زمانی می‌باشد.

زمانی که کل تراز شاهراه مرکزی تنظیم و جمع‌بندی شد، این افزایش در ارزش زمین به اندازه همان هزینه‌ای بود که در چنین پروژه متفاوت و پرجرجی صرف گردید. آنچه که فقدان آن در این نمونه و دیگر نمونه‌ها احساس می‌گردد مطالعه‌ای دقیق و قابل دفاع از تغییرات مالی و محیطی در طی یک دهه در طول تکمیل پروژه می‌باشد. مطالعات گذشته‌نگرانه و

تطبیقی از هزینه‌ها و تأثیرات انواع گوناگون پروژه‌های ساخت‌وساز در زیرزمین الزامی است. برای مفید واقع شدن این مطالعات، آنها را باید به صورت جامع و علمی انجام دهیم و باید اثرات اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی را در این تحقیقات بررسی و ارزیابی نماییم.

- Al-Khalidi, H., and A. Kalam. ٢٠٠٦. The Impact of Underground Cables on Power Transmission and Distribution Networks. First International Power and Energy Conference. PECon ٢٠٠٦. November ٢٨-٢٩, ٢٠٠٦, Putrajaya, Malaysia. ٥٧٥-٥٧٩ [online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=٤١٥٤٥٦١> (accessed December ١٩, ٢٠١٢).
- Bobrick, B. ١٩٨١. Labyrinths of Iron: A History of the World's Subways. New York: Newsweek Books.
- Boyle, C., G. Mudd, J.R. Mihelcic, P. Anastas, T. Collins, P. Culligan, M. Edwards, J. Gabe, P. Gallagher, S. Handy, J.-J. Kao, S. Krumdieck, L.D. Lyles, I. Mason, R. McDowall, A. Pearce, C. Riedy, J. Russell, J.L. Schnoor, M. Trotz, R. Venables, J.B. Zimmerman, V. Fuchs, S. Miller, S. Page, and K. Reeder-Emery. ٢٠١٠. Delivering sustainable infrastructure that supports the urban built environment. *Environmental Science and Technology* ٤٤(١٣):٤٨٣٦-٤٨٤٠.
- Bumby, S., E. Druzhinina, R. Feraldi, D. Werthmann, R. Geyer, and J. Sahl. ٢٠١٠. Life cycle assessment of overhead and underground primary power distribution. *Environmental Science and Technology* ٤٤(١٤):٥٥٨٧-٥٥٩٣.
- Canto-Perello, J., J. Curiel-Esparza, and V. Calvo. ٢٠٠٩. Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma. *Tunnelling and Underground Space Technology* ٢٤(٢):١٨٥-١٨٩.
- CGA (Common Ground Alliance). ٢٠٠٨. Best Practices Guide ٥,٠. Alexandria, VA: CGA.
- CNRC (National Research Council Canada). ٢٠٠٥. Municipal Infrastructure Investment Planning Report: Social Cost Considerations for Municipal Infrastructure Management. Report B-٥١٢,٨. Ottawa, Ontario: CNRC.
- De Savenhem, E.M. ١٩٧٧. Insuring risks underground - some general considerations. *Underground Space* ٢(١):١٩-٢٦.
- DOT (U.S. Department of Transportation). ٢٠٠٧. Statewide Transportation Planning; Metropolitan Transportation Planning; Final Rule, February ١٤. Fed. Reg. ٧٢(٣٠):٧٢٢٤-٧٢٨٦.
- Elkington, J. ١٩٩٤. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. *California Management Review* ٣٦(٢):٩٠-١٠١.
- Elkington, J. ١٩٩٧. *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of ٢١st Century Business*. Oxford: Capstone
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). ٢٠٠٩. Endangerment and Cause or Contribute Findings for Greenhouse Gases Under Section ٢٠٢(a) of the Clean Air Act; Final Rule. Federal Register ٤٠ CFR Chapter ١. December ١٥ [online]. Available: http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/endangerment/Federal_Register-EPA-HQ-OAR-٢٠٠٩-٠١٧١-Dec.١٥-٠٩.pdf (accessed July ٢٢, ٢٠١٢).
- EPA. ٢٠١٠. National Environmental Protection Act [online]. Available: <http://www.epa.gov/compliance/nepa/> (accessed August ٣, ٢٠١٠).
- Ewing, R. ١٩٩٧. Is Los Angeles-style sprawl desirable? *Journal of the American Planning Association* ٦٣(١):١٠٧-١٢٦.
- Gilchrist, A., and E.N. Allouche. ٢٠٠٥. Quantification of social costs associated with construction projects: State-of-the-art review. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology* ٢٠(١):٨٩-١٠٤.
- Gordon, P., and H.W. Richardson. ١٩٩٧. Are compact cities a desirable planning goal? *Journal of the American Planning Association* ٦٣(١):٩٥-١٠٥.
- Guinée, J.B. ed. ٢٠٠٢. *Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- Haimes, Y.Y. ٢٠٠٤. *Risk Modeling, Assessment, and Management*. Vol. ٣٠. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Handy, S., X. Cao, and P.L. Mokhtarian. ٢٠٠٥. Correlation or causality between the built environment and travel behavior? Evidence from Northern California. *Transportation Research Part D-Transport and Environment* ١٠(٦):٤٢٧-٤٤٤.
- Hendrickson, C.T., L.B. Lave, and H.S. Matthews. ٢٠٠٦. *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach*. Washington, DC: Resources for the Future Press.
- IFC Consulting. ٢٠٠٣. Overview of the Potential for Undergrounding the Electrical Networks in Europe. Report Prepared for DG/TREN (Director-General for Transport and Energy) European Community, by IFC Consulting, London, UK [online]. Available: http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/studies/doc/electricity/٢٠٠٣_٠٢_underground_cables_icf.pdf (accessed June ١٢, ٢٠١٢).
- ISO (International Organization for Standardization). ١٩٩٧. ISO ١٤٠٤٠. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO. ٢٠٠٦. ISO ١٤٠٤٤. Geneva, Switzerland: ISO.

- ITA WG^{۱۳} (International Tunneling and Underground Space Association Working Group Number ۱۳). ۲۰۰۴. Underground or aboveground? Making the choice for urban mass transit systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*. ۱۹:۳-۲۸.
- Jeon, C.M., and A. Amekudzi. ۲۰۰۵. Addressing sustainability in transportation systems: Definitions, indicators, and metrics. *Journal of Infrastructure Systems*. ۱۱(۱):۳۱-۵۰.
- Johnson, B.W. ۲۰۰۶. Out of Sight, Out of Mind? A Study on the Costs and Benefits of Undergrounding Overhead Power Lines. Report Prepared for Edison Electrical Institute, Washington, DC [online]. Available: <http://www.woodpoles.org/documents/UndergroundReport.pdf> (accessed June ۱۲, ۲۰۱۲).
- Kagan, H.A., D.J. Leary, and G.E.K. Pratter. ۱۹۸۶. Design engineers' responsibilities during construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. ۱۱۲(۳):۳۹۴-۴۰۲.
- Li, X.Q., B. Chavez, D. Ocenosak, and R. Williams ۲۰۰۹. Building a Large-diameter Deep Sewer Pipeline under Urban Constraints. Paper E-۲-۰۴. Proceedings of the International No-Dig Show Conference, March ۲۹-April ۳, ۲۰۰۹, Toronto, Canada. Liverpool, NY: North American Society for Trenchless Technology.
- Matthews, H.S., C.T. Hendrickson, and C.L. Weber. ۲۰۰۸. The importance of carbon footprint estimation boundaries. *Environmental Science & Technology*. ۴۲(۱۶):۵۸۳۹-۵۸۴۲.
- MADOT (Massachusetts Department of Transportation). ۲۰۱۲. The Big Dig. Massachusetts Department of Transportation-Highway Division [online]. Available: <http://www.massdot.state.ma.us/highway/TheBigDig.aspx> (accessed June ۱۵, ۲۰۱۲).
- MWRA (Massachusetts Water Resources Authority). ۲۰۰۶. Metropolitan Boston's Water System History [online]. Available: <http://www.mwra.state.ma.us/water/html/hist1.htm> (accessed January ۳, ۲۰۱۱).
- Najafi, M. ۲۰۰۵. *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design Construction and Renewal*. New York: McGraw-Hill.
- NAE/NRC (National Academy of Engineering and National Research Council). ۲۰۰۳. *Completing the "Big Dig": Managing the Final Stages of Boston's Central Artery/Tunnel Project*. Washington, DC: National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۰. *Hidden Cost of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use*. Washington, DC: National Academies Press.
- O'Rourke, T.D. ۱۹۸۳. Problems of size and complexity in urban underground projects. *Underground Space* ۷(۳):۱۸۲-۱۸۶.
- O'Toole, R. ۲۰۰۹. *The Myth of the Compact City: Why Compact Development Is Not the Way to Reduce Carbon Dioxide Emissions*. Policy Analysis No. ۶۵۳. Washington, DC: CATO Institute [online]. Available: <http://www.cato.org/publications/policy-analysis/myth-compact-city-whycompact-development-is-not-way-reduce-carbon-dioxide-emissions> (accessed June ۱۳, ۲۰۱۲).
- OMB (The White House Office of Management and Budget). ۲۰۱۰. Guidelines and Discount Rates for Benefit-Cost Analysis of Federal Programs. Circular A-۹۴ [online]. Available: <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/omb/assets/a94/a94.pdf> (accessed August ۲, ۲۰۱۰).
- Palmer, T.C. ۲۰۰۴. For property owners, parks mean profits. *The Boston Globe*, June ۱۴, ۲۰۰۴ [online]. Available: http://www.boston.com/news/local/massachusetts/articles/۲۰۰۴/۰۶/۱۴/for_property_owners_parks_mean_profits/ (accessed June ۱۳, ۲۰۱۲).
- Parker, H.W. ۲۰۰۷. Risk Analyses and Life Cycle Costs of Underground Facilities. Presentation at the ISRM-ITA Specialized Session, ۱۱th Congress of the International Society for Rock Mechanics, July ۹-۱۳, ۲۰۰۷, Lisbon, Portugal.
- Parsons Brinkerhoff. ۲۰۱۲. *Electricity Transmission Costing Study: An Independent Report Endorsed by the Institution of Engineering & Technology* (issued ۳۱ January ۲۰۱۲; with errata April ۲۰۱۲).
- Pucker, J., E.N. Allouche, and R.L. Sterling. ۲۰۰۶. Social Costs Associated with Trenchless Projects: Case Histories in North America and Europe. Paper C-۴-۰۴. Proceedings of the ۲۰۰۶ NASTT No-Dig Conference, March ۲۶-۳۱, Nashville, TN. Arlington, VA: North American Society for Trenchless Technology (NASTT).
- Reijnders, L. ۱۹۹۶. *Environmentally Improved Production Processes and Products: An Introduction*. Berlin: Kluwer Academic Press.

- Rinaldi, S. M., J. P. Peerenboom, and T. K. Kelly. ۲۰۰۱. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems* ۲۱(۶):۱۱-۲۰.
- Schwanen, T., M. Dijst, and F.M. Dieleman. ۲۰۰۴. Policies for urban form and their impact on travel: The Netherlands experience. *Urban Studies*. ۴۱(۳):۵۷۹-۶۰۳.
- Seo, J.W., and H.H. Choi. ۲۰۰۸. Risk-based safety impact assessment methodology for underground construction projects in Korea. *Journal of Construction Engineering Management*. ۱۳۴(۱):۷۲-۸۱.
- Shammin, M.R., R.A. Herendeen, M.J. Hanson, and E.J.H. Wilson. ۲۰۱۰. A multivariate analysis of the energy intensity of sprawl versus compact living in the U.S. for ۲۰۰۳. *Ecological Economics*. ۶۹(۱۲):۲۳۶۳-۲۳۷۳.
- Sihabuddin, S., and S.T. Ariaratnam. ۲۰۰۹. Methodology for estimating emissions in underground utility construction operations. *Journal of Engineering, Design, and Technology*. ۷(۱):۲۷-۶۴.
- Sterling, R.L. ۲۰۰۰. Urban underground space use planning: A growing dilemma. In *Underground Space and Rock Mechanics: Proceedings of the ۱۰th ACUUS International Conference-Underground Space: Economy and Environment*, January ۲۴-۲۸, ۲۰۰۰, Moscow.
- Sterling, R., H. Admiraal, N. Bobylev, H. Parker, J.P. Godard, I. Vähäaho, C.D.F. Rogers, X. Shi, and T. Hanamura. ۲۰۱۲. Sustainability issues for underground spaces in urban areas. *Proceedings of ICE - Urban Design and Planning* [online]. Available: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/۱۰,۱۶۸۰/udap.۱۰,۰۰۰۲۰>.
- Taylor, A.W. ۲۰۰۸. Alaska Way Viaduct: Evaluation of Seismic Retrofit Options. Final Report of the Alaskan Way Viaduct Independent Project Management Team. Seattle, WA: KPFF Consulting Engineers [online]. Available: <http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/C۴C۹۶۶C۱-۲۷۲۳-۴۱۸۷-AD۴D-۰F۳FA۱۸۷۰C۱۹/۰/KPFFretrofit۰۸۰۹۲۰.pdf> (accessed June ۱۰, ۲۰۱۲).
- TRB (Transportation Research Board). ۲۰۰۹. *Driving and the Built Environment: The Effects of Compact Development on Motorized Travel, Energy Use, and CO₂ Emissions – Special Report ۲۹۸*. Washington, DC: National Academies Press.
- UN (United Nations). ۱۹۹۹. Technical Report on Space Debris. Text of the Report adopted by the Scientific and Technical Subcommittee of the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. New York: UN [online]. Available: http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/UN_Report_on_Space_Debris۹۹.pdf (accessed June ۱۰, ۲۰۱۲).
- Weber, P., G. Medina-Oliva, C. Simon, and B. Iung. ۲۰۱۲. Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis, and maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* ۲۰(۴):۶۷۱-۶۸۲.
- Winqvist, T., and K.E. Mellgren. ۱۹۸۸. *Going Underground*. Stockholm: Royal Swedish Academy of Engineering Sciences. ۱۹۱ pp.
- Woodroffe, N.J.A., and S.T. Ariaratnam. ۲۰۰۸. Cost and Risk Evaluation for Horizontal Directional Drilling versus Open Cut in an Urban Environment. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. ۱۳(۲):۸۰-۹۲.

مهندسی و فن آوری‌های نوآورانه در زیرزمین به منظور توسعه پایدار

ژئوتکنولوژی و علوم وابسته و حوزه‌های مهندسی، استفاده از فضای زیرزمین را به منظور تأمین شهرهای قابل سکونت، تاب آور، و پایدار امکان پذیر می‌سازد. برنامه‌های کاربردی ژئوتکنیک، طراحی و ساخت تسهیلات زیرزمینی را تأمین نموده است و برای ارائه تسهیلات زیرزمینی با خطرپذیری و هزینه‌های اولیه کمتر و عملکرد بهتر چرخه حیات مهم و حیاتی می‌باشند. به منظور کمک به آینده بهبود پذیرتر و پایدارتر، ژئوتکنولوژی باید بسیاری از رشته‌های مرتبط با بررسی سایت (مکان یابی)، طراحی، ساخت، عملیات، و مدیریت ریسک تسهیلات زیرزمینی را به صورت نزدیکتر و تنگاتنگ تلفیق نماید. شناخت و درک بهتر از پایداری کاربری زیرزمینی - برای مثال، حداقل سازی فرسودگی و خراب شدن، افزایش تاب‌آوری، تصمیم‌گیری‌های جامع با توجه به محیط‌های حرارتی و هیدروژئولوژیکی زیرزمینی - نیز لازم و ضروری خواهد بود. بهبود در فن‌آوری‌های زیرزمینی گام‌های بلندی را در توسعه شهری در دهه‌های اخیر، میسر ساخته است، لیکن پیچیدگی و غیر قابل پیش‌بینی بودن که هنوز هم امری ذاتی در ساخت‌وساز زیرزمینی است به این معنی است که چالش‌های بسیاری در این باره به قوت خود باقیست.

این فصل مروری کوتاه بر وضعیت هنر در فن‌آوری‌هایی که ساخت‌وساز زیرزمینی و عملیات تأسیساتی دارد را ممکن می‌سازند. فن‌آوری‌هایی مورد تأکید هستند که فرصت‌هایی را برای بهبود قابل توجه در انجام عملکرد مقرون به صرفه چرخه حیات برای تسهیلات زیرزمینی ارائه می‌دهند، به افزایش و بهبود استفاده از فضای زیرزمین کمک می‌نمایند، و در راه حل‌های پایدار و بهبودپذیر شهری شرکت می‌نمایند.

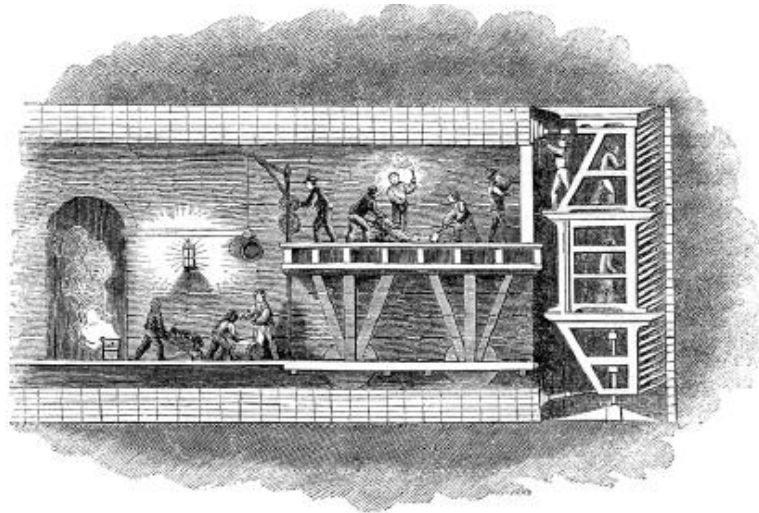
سیر تکامل تکنولوژی

نوآوری در فن‌آوری شیوه مهندسی را ارتقاء می‌دهد و تقاضا برای فضای زیرزمینی را افزایش می‌دهد. پیشرفت‌های فن‌آورانه و مهندسی، همواره برای توسعه کارآمد و اقتصادی زیرزمین حیاتی و مهم بوده‌اند. بسیاری از پیشرفت‌های فن‌آورانه به واسطه چالش‌های عملی که در حین ساخت‌وساز یک پروژه به وجود می‌آیند موجه گردیده‌اند (مثلاً، توسعه پوشش محافظ تونل که توسط برونل انجام پذیرفت)، و صنعت تونل‌سازی به بسیاری از این مسائل کمک نموده و یا سودمند بوده است. ماشین حفاری مدرن کاملاً خودکار در تونل‌زنی، نمونه‌ای از صنعت که منجر به توسعه می‌شوند چنانچه فن‌آوری‌های ضد آب و بهبود زمین، معرفی و عمومی گردیده‌اند. در همکاری نزدیک با دانشگاه، صنعت، بسیاری از ابزارهای تجزیه و تحلیل و طراحی را گسترش و توسعه داده است (مثلاً روش‌های تحلیلی المان محدود).

از زمان فراغنه، تونل‌ها به واسطه روش‌های ساخت‌وساز حفاری رو باز، ایجاد می‌شده‌اند (ال سلام، ۲۰۰۲). اختراع سپر (حفاظ) تونل به منظور کاهش خطرپذیری ریزش از زمین بدون پوشش، حفاظت می‌کند، سر مارک ایسامبارد برونل و پسرش

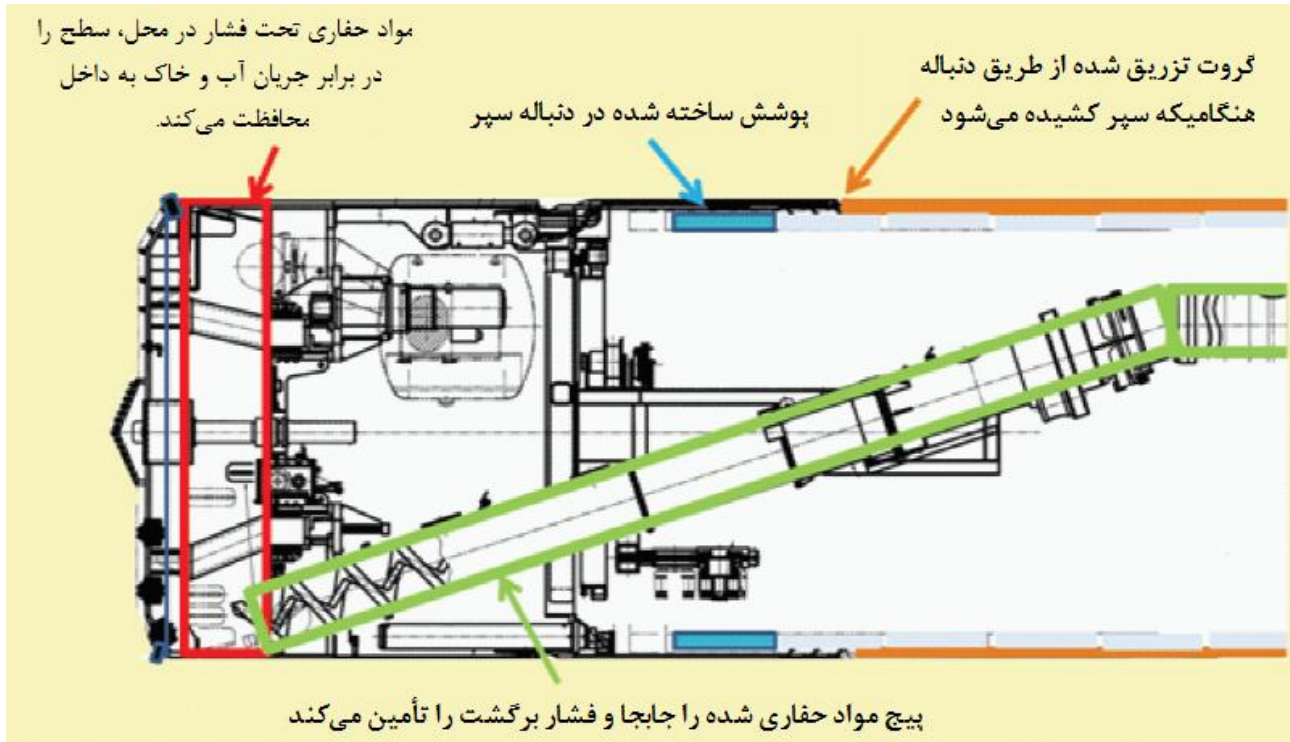
ایسامبارد کینگدام بروئل موفق به حفاری تونل در زیر رودخانه توماس (لندن) بین سال‌های ۱۸۲۵ و ۱۸۴۳ گردیدند (میور وود و همکاران، ۱۹۹۴؛ اسکمپتون و کریمس، ۱۹۹۴) (رجوع به شکل ۶,۱ یک نقاشی به جا مانده از سپر بروئل). اتمام پروژه‌های قبلی شامل حفاری تونل در خاک نرم و اشباع شده تقریباً دشوار و یا غیرممکن بود. تونل ارتباط مهم و فوق العاده‌ای در شاخه‌های شمالی و جنوبی رودخانه توماس ایجاد نمود که هنوز بعد از حدود ۱۷۰ سال قابل استفاده می‌باشد. کاربرد این فن‌آوری جدید منادی عصر تونل‌سازی دارای پوشش بود.

لوکوموتیوهای برقی، (الکتریکی) طلایه دار عصر سامانه‌های متروی مدرن در آغاز قرن بیستم بودند. برقی کردن این وسایل، نگرانی‌ها را در خصوص دوده‌های دیزل و یا زغال سنگ کاهش داد و سفرهای زیرزمینی با مسافت طولانی توسط قطار را میسر ساخت. نوآوری‌ها در سامانه‌های تهویه با مقیاس بزرگ، توسعه سواره‌روهای زیرزمینی را امکان پذیر می‌سازند. سامانه‌های کنترل آب و هوا، روشنایی پیشرفته، و علامت‌های مؤثرتر، فضای زیرزمین را برای عملیات خرده‌فروشی و حمل و نقل عمومی مساعدتر، راحت‌تر، و دلپذیرتر می‌نمایند. پیشرفت‌ها در تکنولوژی مواد، علوم کامپیوتری، تکنولوژی ساخت روبات، و هدایت لیزری حفاری زیرزمینی پیشرفته را با استفاده از سپر دوغاب مدرن و ماشین آلات حفاری متعادل کننده فشار زمین^۱ (شکل ۶,۲) و ماشین آلات حفاری تونل در سنگ (شکل ۶,۳) میسر می‌سازند. تکنولوژی‌های این چنینی ساخت تونل‌های فراتر از ۵۰ کیلومتر در طول و با قطر نزدیک به بیست متر و تونل‌سازی در شرایط زمین‌شناسی چالش برانگیز، (مثلاً در زمین روان و نرم و یا سنگ‌های بسیار ترک خورده تحت فشار بالای آب و زمین) را امکان‌پذیر و شدنی می‌نمایند. فن‌آوری‌های اصلاح زمین - مثلاً تزریق عامل‌های سیمانی به منظور استحکام‌سازی و کاهش نفوذپذیری خاک و سنگ، یا انجماد موقت مواد آب‌دار (شکل ۶,۴) - شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی که در حین ساخت‌وساز زیرزمینی روی خواهند داد را منبسط نمودند. حفاری جهت‌دار افقی، نصب و راه‌اندازی بسیاری از صنایع همگانی را دچار تغییرات اساسی کرد و نیاز به مسدود شدن خیابان‌ها در ترافیک و اختلال زندگی در موقعیت‌های شهری را تا حد زیادی کاهش داد.



شکل ۶-۱ سپر تونل بروئل. مارک ایسامبارد بروئل این فن‌آوری سپر تونل را به منظور ساخت اولین تونل زیر آبی در زیر رودخانه توماس ایجاد کرد (۱۸۲۱-۱۸۲۵). دیوارهای آجری در سطوح ظاهری تونل ساخته شدند و در همان جا نگه داشته شدند در حالی که سپرهای متناوب ۶ اینچ به جلو تحت فشار قرار گرفتند. تونل کامل شده دارای ۲۸ فوت عرض بود و مسیر جاده‌ای را ملحوظ داشت.

۱. سپر گل روان و ماشین آلات حفاری متعادل کننده فشار زمین خاک اشباع به منظور مقاومت در برابر آب تحت فشار طراحی می‌شوند.



شکل ۶۲ مقطع عرضی ماشین حفاری متعادل کننده فشار زمین. این فن‌آوری تونل‌زنی برای خاک نرم همگن ایدئال می‌باشد. یک نوار نقاله پیچی برای انتقال ضایعات از سطح بکار گرفته می‌شود و به کنترل فشار با پیشرفت هماهنگ این ماشین کمک می‌نماید. محل حفاری پر می‌شود تا سطح را عرضه نماید و به ماشین امکان واکنش نسبت به فشارهای زمین و آب‌های زیرزمینی را می‌دهد.

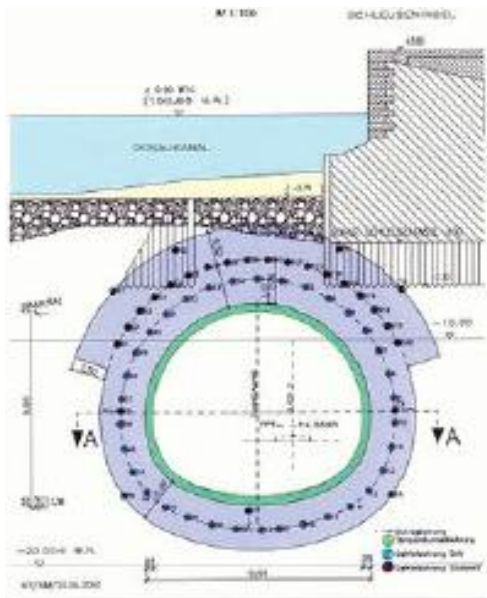


شکل ۶۳ سرفرز (برش دهنده) یک ماشین حفاری تونل در سنگ مورد استفاده در حفاری تونل Chattanooga. کاترهای دیسک، شیارها را تقریباً ۴ اینچ جدا از هم در این نمونه برش می‌زنند.

بسیاری از فن‌آوری‌های شرح داده شده در بالا منجر به تغییراتی در روش مهندسی گردیدند و در برخی موارد، منتهی به الگوهای جدید در برنامه‌ریزی شهری شدند. به همین ترتیب، پیشرفت‌های مهندسی و تکنولوژی امروزی برای محیط شهری پایدار، خوش نما، کارآمد از نظر انرژی، کارا، و با ساخته شده با صرفه اقتصادی حیاتی و با اهمیت خواهند بود. این فصل در خصوص موضوعات زیر گروه‌بندی می‌گردد:

- فن‌آوری‌هایی برای توصیف محل پروژه و موقعیت فضای زیرزمینی، از جمله موقعیت زمین‌شناسی، خواص سنگ و خاک، و زیرساخت‌های زیرزمینی موجود؛
- فن‌آوری‌هایی برای طراحی و تحلیل فن‌آوری‌های زیرزمین؛
- فن‌آوری‌هایی برای ساخت فضای زیرزمین؛
- فن‌آوری‌هایی برای مدیریت دارایی مؤثر؛ و
- فن‌آوری‌هایی که پایداری و تاب‌آوری را ارتقاء می‌دهند.

این موضوعات لزوماً زنجیره‌ای و یا مستقل نمی‌باشند. مشاهدات صورت گرفته در جریان اجرای هر یک از آنها، بر تصمیم‌گیری در طول هر فاز از پیشرفت و یا عملیات تأثیرگذار خواهد بود. طراحی زیرساخت‌ها، نیازهای فراتر به توصیف محل را برآورده می‌سازد و شرایط غیرمنتظره که در حین ساخت به وقوع می‌پیوندند ممکن است نیاز به بازنگری‌هایی در طراحی داشته باشند. مونی‌تورینگ و مشخص‌سازی به صورت ایده‌آل باید در سرتاسر چرخه حیات زیرساخت‌ها اتفاق افتد. مشاهدات می‌توانند منجر به نوعی تصمیم‌گیری آگاهانه به نام روش مشاهده‌ای گردند (مثلاً، پک، ۱۹۶۹؛ مؤسسه مهندسان عمران (بریتانیای کبیر)، ۱۹۹۶) که قادر است اقتصاد و ایمنی را بهبود بخشد. بسیاری از مهندسان ژئوتکنیک از چهارچوبی برای این روش که توسط پک ابداع گردید و توسط نیکولسون و سایرین (۱۹۹۹) در نشریه‌ای تشریح شد سخن به میان می‌آورند.



شکل ۱-۶ انجماد مصنوعی زمین در حفاری‌هایی که در زیر رودخانه داتوب توسعه می‌یابند بکار می‌رود. انجماد آب‌های زیرزمینی در اطراف یک حفاری باری که ظرفیت خاک‌ها را حمل می‌کند را بهبود می‌دهد و پشتیبانی موقت را در حین ساخت فراهم می‌سازد. (شکل سمت چپ) دیاگرام برش مقطعی است به همراه محل لوله‌های انجماد.

مباحث درباره هر موضوع، گویای فن‌آوری‌های مورد استفاده می‌باشد و یا اینکه پتانسیل قابل ملاحظه‌ای را برای آینده داراست. بنا بر طبیعت خود، فن‌آوری‌های مخرب به سختی قابل پیش‌بینی می‌باشند، ولی اساساً روشی که فضای زیرزمینی توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرد را تغییر می‌دهند. بسیاری از فن‌آوری‌های مشروح در این فصل بستگی به استفاده از روش مشاهده‌ای در تصمیم‌گیری‌های مؤثر دارد. فن‌آوری‌هایی برای تجزیه و تحلیل پیشنهاد می‌گردند که اجرای بهتر روش مشاهده‌ای را میسر می‌سازند.

فن‌آوری‌هایی برای مشخص‌سازی موقعیت (محل) فضای زیرزمینی

مهندسی فضای زیرزمین شهری اطلاعات دقیق و مفصلی از زمین‌شناسی اصولی و تاریخچه زمین‌شناسی و توسعه و پیشرفت انسان درباره محل و موقعیت، هم‌ترازی، و مناطق مجاور که احتمالاً بر توسعه پیشنهادی تأثیر خواهد داشت یا از آن تأثیر می‌پذیرد را می‌طلبد. مشخص‌سازی بهتر فضای زیرزمینی، تصمیم‌گیری بهتری ارائه می‌دهد. حداقل‌سازی شرایط غیر منتظره زمین، طراحی بهینه و استفاده صحیح از منابع در حین ساخت را میسر می‌سازد. شناخت و درک دقیق اینکه چگونه یک موقعیت و محل به سامانه‌های شهری و طبیعی گسترده‌تر وابسته است، امکان درک کامل‌تر از چالش‌های مهندسی موجود را فراهم می‌سازد و تعیین محل و هم‌ترازی‌های زیرساخت زیرزمینی، طراحی، انتخاب روش‌ها و ابزارهای ساخت، و عملکرد بلندمدت تأسیسات و سازه‌های مجاور را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اقدامات مشخص‌سازی خصوصیات سایت (محل و موقعیت) غالباً از طریق مطالعه داده‌های موجود و اطلاعات انتشار یافته آغاز می‌گردد. در حال حاضر، اطلاعات مرتبط باید از منابع بسیاری جمع‌آوری شود و ممکن است اطلاعات کافی - یا دقیق - در خصوص موقعیت زمین شناختی و یا سازه‌های زیرزمینی موجود ارائه ندهد. پیشرفت‌های در حال تکوین در قابلیت‌های محاسباتی (مثلاً سامانه‌های عظیم پایگاه داده‌ها، داده کاوی) و زمین مرجع کردن داده‌ها (مثلاً سامانه‌های موقعیت یابی جهانی درجه - پیمایشی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی) استفاده‌های زیادی در آینده خواهند داشت.

مشخص‌سازی زمین‌شناسی، خصوصیات مواد زمین شناختی، آلودگی، و خطرات طبیعی

یک دیدگاه زمین شناختی در مشخص‌سازی محل و موقعیت به منظور شناخت، کمی‌سازی، و مدیریت بی‌ثباتی‌ها در خصوصیات و رفتار خاک و سنگ و تغییرپذیری آنها (مثلاً ترکیب بندی، رفتار تنش - کرنش، نفوذپذیری، ساینده‌گی، رسانایی حرارتی) و شرایط آب‌های زیرزمینی، در نهایت به حداقل رساندن هزینه‌ها و یا طراحی بیش از حد محافظه کارانه ضروری و لازم می‌باشد (NRC, ۲۰۰۶; FHWA, ۲۰۰۹). کار میدانی و آزمایشگاهی اولیه، طراحی مقدماتی پروژه و برنامه‌ریزی ساخت را تأمین می‌نماید، اما مشخص‌سازی، بیشتر بی‌ثباتی‌ها را محدود می‌سازد و جزئیات در مورد ویژگی‌های مهم زمین شناختی (مثلاً مرزهای واحدهای زمین شناختی، مناطق گسل) را ارائه می‌دهد، طراحی، اعمال خاص زیرزمین (مثلاً شافت‌ها، فضاها) را در اختیار می‌گذارد، و اطلاعات مرتبط با دیگر نیازمندی‌های مخصوص (مثلاً اجتناب از آلودگی زیست‌محیطی و یا ارزیابی تنش در جا) را تأمین می‌کند. محیط زیرزمینی طبیعی ناهمگن، ناهمسانگرد، و بسیار متغیر در اندازه‌های فضایی کوتاه می‌باشد. حجم زیادی از مواد زمین‌شناختی غالباً باید در جزئیات زیاد و مهم توصیف شوند تا تغییرات چینه‌شناسی و ناپیوستگی‌هایی که برای پیش‌بینی واکنش زمین نسبت به ساخت‌وساز مهم می‌باشند را شناسایی کند. طیف گسترده‌ای از فن‌آوری‌ها و ابزارهای تهاجمی و غیر تهاجمی به منظور انجام تخفیفات میدانی درجا در دسترس می‌باشند (برای مثال رجوع کنید به، FHWA, ۲۰۰۹)، لیکن ابزارهای ارزیابی موجود قادر نیستند پوشش فضایی کامل، پهنه‌بندی دقیق، و خصوصیات مواد درجا را فراهم کنند.

در مقیاس پروژه‌های، مواد خطرناک درگیر در ساخت زیرزمینی، می‌توانند هزینه‌های بزرگ و غیر منتظره‌ای را به یک پروژه بیافزایند و تحویل پروژه را دچار وقفه نمایند. مشخص‌سازی مواد خطرناک انسانی و طبیعی (مثلاً آلودگی‌های شیمیایی و تشعشعات) و اثرات آنها بر محیط‌های طبیعی و ساخته شده برای اقدامات ساخت‌وساز و عملیاتی خاص، حیاتی است. شناخت هر گونه ماده خطرناک که ممکن است در نتیجه ساخت و عملیات، منتشر و یا منتقل گردد برای پایداری و تاب‌آوری بلندمدت با اهمیت می‌باشد. به طور مشابه، شناسایی رویکردهای دقیق طراحی به منظور حفاظت زیرساخت‌های زیرزمینی از خطرات طبیعی از جمله زلزله‌ها و یا سیلاب‌ها برای تسهیلات، تاب‌آور و دارای عملکرد مناسب، بحرانی است. از آنجایی که این موضوعات ارتباط گسترده‌ای با پایداری و تاب‌آوری دارند، توصیف خصوصیات آنها بعداً در این فصل بحث خواهد شد.

دلواپسی‌های زیست‌محیطی که به ذخیره‌سازی و دفع زیرزمینی کشانده می‌شود نیز باید مورد بررسی قرار گیرند. برای مثال، جامعه با خطرپذیری‌های مرتبط، با تکنولوژی در حال ظهور جداسازی و تجزیه دی‌اکسیدکربن دست و پنجه نرم می‌کند. همچنان که جداسازی‌های با مقیاس بزرگ‌تر طرح‌ریزی می‌شوند، نیاز به بررسی اثرات بالقوه آنها بر توانایی توسعه فضای زیرزمینی حتی بیشتر می‌گردد، زیرا، برای مثال، دی‌اکسیدکربن می‌تواند به فضای زیرزمین نفوذ کند. بنابراین، راه حل یک مشکل می‌تواند ناخواسته موجب مشکلی دیگر گردد. گزارش اخیر NRC خطرپذیری مرتبط با زلزله خیزی القاء شده در نتیجه جذب و ذخیره‌سازی کربن را بررسی می‌نماید و توصیه‌های تحقیقاتی خاصی را موجب می‌شوند که این توصیه‌ها، برای مثال، به عواملی غیر از فشار منفذی که بر لرزه‌خیزی، و پیشرفت مدل‌های مکانیکی مایع و فیزیک-شیمیایی برای تزریق دی‌اکسیدکربن به مخازن ذخیره‌سازی بالقوه زیرزمینی تأثیر می‌گذارند مرتبط می‌باشند (NRC, ۲۰۱۲).

انتخاب ابزارهای مشخص‌سازی، بستگی به تعدادی از عوامل از جمله: عمق کشش و شرایط زمین (مثلاً خاک در مقابل سنگ؛ اشباع در مقابل نیمه اشباع) دارد. هم فن‌آوری‌های سنتی درجا (مثلاً اندازه‌گیری‌های مستقیم) و هم فن‌آوری‌های غیرتهاجمی (مثلاً ژئوفیزیکی) می‌توانند در مشخص‌سازی ویژگی‌های طبیعی و دست‌ساز مورد استفاده قرار گیرند. برخی از بخش‌های ساخت‌وساز راهنمایی‌هایی در خصوص انتخاب فن‌آوری مشخص‌سازی سایت (محل و موقعیت) از طریق فهرست‌های گسترده‌ای از ابزارآلات و فناوری‌ها ارائه می‌دهند (مثلاً FHWA, ۲۰۰۹).

فن‌آوری‌های تهاجمی

ابزارهای تست درجا، اندازه‌گیری فیزیکی مستقیم خصوصیات مواد را انجام می‌دهند. در خاک، برای مثال، آزمون‌های فرورفت (نفوذ) استاندارد و آزمایش‌های نفوذ سنج مخروطی (مثلاً ابزارهای الکتریکی، ابزارهای پیزو متر مخروطی، ابزارهای لرزه‌ای) به منظور نمونه‌برداری کردن و یا آزمایش نمودن لایه‌های خاک به طور مستقیم با حفاری و مته‌زنی و یا با فرو کردن ابزارهای نمونه‌برداری به داخل زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌برداری و آزمایش سنگ می‌تواند بر اساس و یا هدایت هسته حذف شده گمانه باشد. حفاری‌ها (گمانه‌زنی‌ها) به منظور مشخص‌سازی، خصوصیات هم‌چون مقاومت خاک، صلبیت، سرعت دینامیکی موج برشی، و خصوصیات و کیفیت آب‌های زیرزمینی، و زمین‌شناسی در محل گمانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک گمانه‌زنی مجزا ممکن است تنها مسافتی کوتاه در زیرزمین با توجه به تغییر بالقوه زمین‌شناسی ایجاد کند و یا ایجاد نکند. گمانه‌های افقی و شیب‌دار جهت‌دار و ابزارهای کاوش-محور نیز می‌توانند به منظور بررسی ویژگی‌های خاص و یا توزیع مواد بکار گرفته شوند. گمانه‌زنی‌های افقی اکتشاف زیر سطح زمین را در امتداد طول تراز یک تونل و یا دیگر زیرساخت‌ها میسر می‌سازند. استفاده از ابزارهای اکتشاف محور، در حالی که در صنعت اکتشاف انرژی متداول می‌باشند، برای توسعه سازه زیرزمینی شهری کمتر رایج می‌باشد. این امر ممکن است به واسطه هزینه باشد، اما شاید هم به واسطه نا‌آشنایی با فناوری مرسوم در میان متخصصان بررسی سایت (مکان و موقعیت) باشد. می‌توان استدلال کرد که انگیزه‌ها برای بهره‌وری و کارایی برای مهندسان کمتر مشهود است تا برای پیمانکاران و صاحبانی که متوجه صرفه‌جویی‌های حاصل از بهره‌وری می‌گردند.

توسعه های اخیر در فن آوری های حفاری و گمانه زنی، شامل قابلیت های مته زنی برودتی برای گمانه زنی در مواد سخت و اندازه گیری می باشد در حالی که سامانه های حفاری و مته زنی (MWD) که اطلاعات اولیه در خصوص مواد را فراهم می سازند برای هدایت گمانه زنی ها و طرح ریزی های برنامه آزمون، مؤثر و مفید واقع می شوند.

فن آوری های غیر تهاجمی

ابزارهای غیرتهاجمی مشخص سازی سایت در برگیرنده سنجش از راه دور (مانند ماهواره و ردیابی و مرتب سازی نور زمینی (LIDAR)، فوتوگرامتری دیجیتال، فن آوری های رادیومتری، و روش های تداخلی) و فناوری های ژئوفیزیک (مثلاً روش های انعکاس و انکسار لرزه ای، تجزیه و تحلیل طیفی امواج سطح (SASW)، توموگرافی حفره متقابل، ژئوالکتریک، الکترومغناطیسی، و روش های بالقوه میدانی {جاذبه زمین، مغناطیسی}) می باشد که داده هایی که از آن شرایط زیر سطحی نتیجه می شوند را ارائه می دهند. فناوری های غیر تهاجمی به بهترین وجه در ترکیب با فناوری های تهاجمی مورد استفاده قرار می گیرند تا درک کامل تری از شرایط زیرزمینی ارائه دهند. مزایای فن آوری های غیرتهاجمی، سرعتی است که با آن می توانند استفاده شوند و اینکه حجم بیشتری از زیرزمین می تواند مشخص سازی گردد. مضرات آن این گونه است که داده ها عموماً باید از فرم اولیه خود تنزل یابند - مدل سازی معکوس غالباً نیاز به ارزیابی پهنه بندی زمین و خصوصیات مواد دارد. چنین مدل هایی غیر منحصر به فرد می باشند (مثلاً یک مجموعه داده واحد می تواند مدل های نامحدود را به همراه داشته باشد)، و از این رو دانش و مهارت های خاص برای تقلیل و تفسیر داده ها لازم و ضروری است. هزینه برخی از این روش ها می تواند بالا هم باشد، اما همانطور که این روش ها رایج تر می شوند و فناوری ها رو به پیشرفت و توسعه می گذارند (مانند اسکن لیزری)، هزینه گردآوری و تجزیه و تحلیل داده ها کاهش خواهد یافت.

فرصت قابل توجهی به منظور جمع آوری داده هایی که مرتبط با خصوصیات زمین و محل سازه های موجود می باشند با استفاده از فن آوری های غیر تهاجمی وجود دارد، لیکن محدودیت های فیزیکی به لحاظ مقیاس اشیاء برای مشخص سازی و تفاوت های خصوصیات مواد وجود دارد که می توانند نسبت به عمق تحقیقات ممکن، مشخص گردند. برای مثال، یک محدودیت اجرایی برای کشف و شناسایی لوله با استفاده از رادار نافذ زمین مبتنی بر سطح (GPR) وجود دارد، که به صورت نسبت حدود ۱۲:۱ برای عمق تشخیص به قطر لوله قابل تشخیص بیان می شود، حتی تحت شرایط مطلوب خاک (استرلینگ و همکاران، ۲۰۰۹). این به این معنی است که یک لوله با قطر ۱ فوت تنها در صورتی تشخیص داده می شود که در داخل ۱۲ پا از زمین قرار گیرد و لوله ۱ اینچی می تواند تنها تا عمق ۱ پا شناسایی گردد. تحقیق در مورد تلفیقی از داده های چند سنسوری که فن آوری های غیر تهاجمی را به منظور در نظر گرفتن طیف گسترده تری از شرایط زیرزمینی و به منظور ارتقاء توانایی آنها در تفکیک خصوصیات زمین و حضور و محل اشیاء زیر خاک (زیرزمین) امکانپذیر می نمایند هم در ایالات متحده و هم در خارج در حال انجام است. به طور مشابه، تحقیقات توسط ارتش به منظور کشف مین های زمینی و تونل های عمیق مخفی مزایای قابل ملاحظه و چشمگیری در برنامه های گسترده تر مهندسی عمران می تواند داشته باشد.

مشخص سازی زیرساخت های موجود و مصالح ساختمانی قدیمی

ناکامی در پیدا کردن محل زیرساخت های موجود پیش از تعمیر زیر ساخت های موجود و یا نصب زیرساخت های جدید منشاء بالقوه ای از حوادث می باشد. مصالح ساختمانی قدیمی، از جمله شمع های متروک در نقشه نیامده، زیرسازی ها، و یا پشت بندهایی که تکیه گاهی برای ساخت و ساز قبلی بوده اند، به کرات در حین ساخت و ساز زیرزمینی برخورد می شوند. شناسایی و مشخص سازی خصوصیات این مصنوعات بخش لاینفکی از مشخص سازی است. سوابق تاریخی یافت شده در وزارتخانه های برنامه ریزی می توانند به منظور شناسایی محل برخی از مصالح قدیمی، مورد استفاده قرار گیرند، اما این سوابق غالباً ناقص، نادرست، و مفقود می باشند، در نتیجه اتکای بیشتر بر فن آوری های اکتشاف، به خصوص غیر تهاجمی، را به منظور

مشخص‌سازی ایجاب می‌کنند.

زیرساخت‌های زیرزمینی بدون طرح و نقشه و یا با نقشه‌برداری نادرست، مخاطرات و خطرات بالقوه‌ای را برای کارگران ساختمانی در زیرزمین، محل ساخت دیگر زیرساخت‌ها، و سایر افرادی که در آن حومه و نزدیکی می‌باشند مطرح می‌سازند. مواجهه با زیرساخت‌های نامنتظر برنامه‌ریزی و یا تعمیرات ساختمانی اصلاحی را ایجاب می‌نماید. زیرساخت‌های موجود و یا قدیمی ممکن است احتراز گردند، اما هراز گاهی باید توسط تکیه‌گاهی که به منظور جلوگیری از جا به جایی و یا آسیب به زیرساخت‌های موجود و یا زیرساخت‌های طرح‌ریزی شده حفاظت شوند. این کمیت‌ه خاطر نشان می‌نماید که تمامی حفاری‌های رو باز، گمانه‌زنی‌ها، و یا تونل‌ها، فرصتی برای ارزیابی و مستندسازی خصوصیات و سازه‌های زمینی است که برای کاربردهای کنونی و آتی انجام می‌گیرند. صدها هزار حفاری روباز به منظور کار تأسیساتی که هر روز در ایالات متحده انجام می‌گیرند، برای مثال، فرصت‌های مکرری را برای گردآوری و آرشیو داده‌های این چنینی را به وجود می‌آورند. با این وجود، صحت و دقت فناوری‌های غیر تهاجمی به منظور شناسایی زیرساخت‌های زیر سطحی نیاز به بهبود و ارتقاء دارد. علاوه بر این، فناوری‌های تحقیقاتی می‌باید در ابزارهای فیزیکی نوین و ساختارهای اداری به منظور جذب این نوع از اطلاعات گنجانده شوند. مکانیسم‌هایی که آرشیو و بایگانی دینامیکی (مثلاً به روزرسانی و اصلاح مستمر) این داده‌ها را میسر می‌سازند برای پایداری زیرساخت‌های شهری مهم و قطعی است.

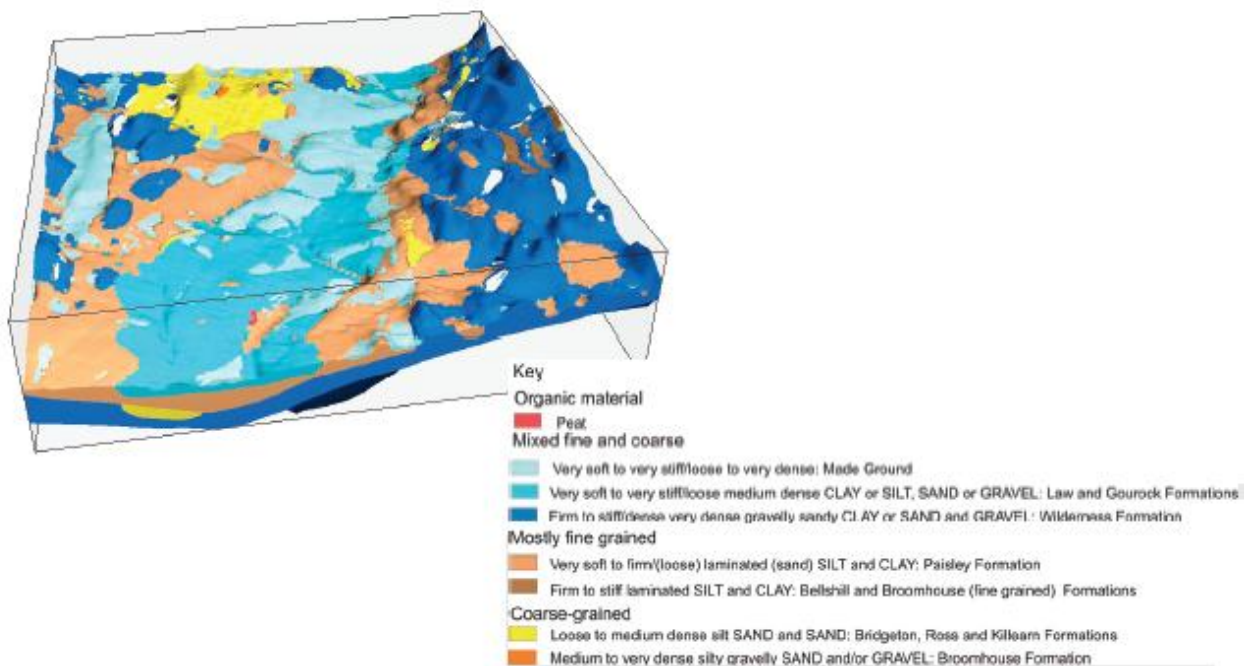
تفسیر و یکپارچه‌سازی داده‌های توصیف کننده سایت (محل و موقعیت)

اطلاعات و داده‌های مشخص‌سازی سایت باید پردازش و ارزیابی شوند تا بتوان مدل‌های تفسیری زمین شناختی را توسعه داد و پارامترهای مهندسی را به منظور استفاده در طراحی تسهیلات زیرزمینی ایجاد نمود (رجوع به نمونه‌هایی در کادر ۱، ۶). بسیاری از فناوری‌های میدانی مورد استفاده برای طبقه‌بندی خصوصیات اولیه در طول دهه‌ها به کار گرفته شده‌اند و دستخوش تفاوت‌های فاحش و بزرگی در تفسیر و معنی می‌باشند. معمولاً، طبقه‌بندی میدانی نمی‌تواند جایگزینی برای صحت سنجی آزمایشگاهی باشد. ابزارهای بسیاری به تفسیر، برای مثال، طبقه‌بندی سنگ شامل رویکردهای مبتنی بر تجربه از قبیل سامانه Q (برای طبقه‌بندی کیفیت سنگ) (بارتون و همکاران، ۱۹۷۴)، سامانه سنج جرم سنگ (بینیاوسکی، ۱۹۷۶، ۱۹۸۹)، و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (هوک، ۱۹۹۴) کمک می‌نمایند (رجوع به شکل ۶، ۵ برای طبقه‌بندی نمونه). طرح‌های طبقه بندی برای شاخص‌هایی چون مقاومت و صلبیت نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند تا داده‌های لازم برای روش‌های تحلیلی عددی پیشرفته، فراهم نمایند.

کادر ۱۶

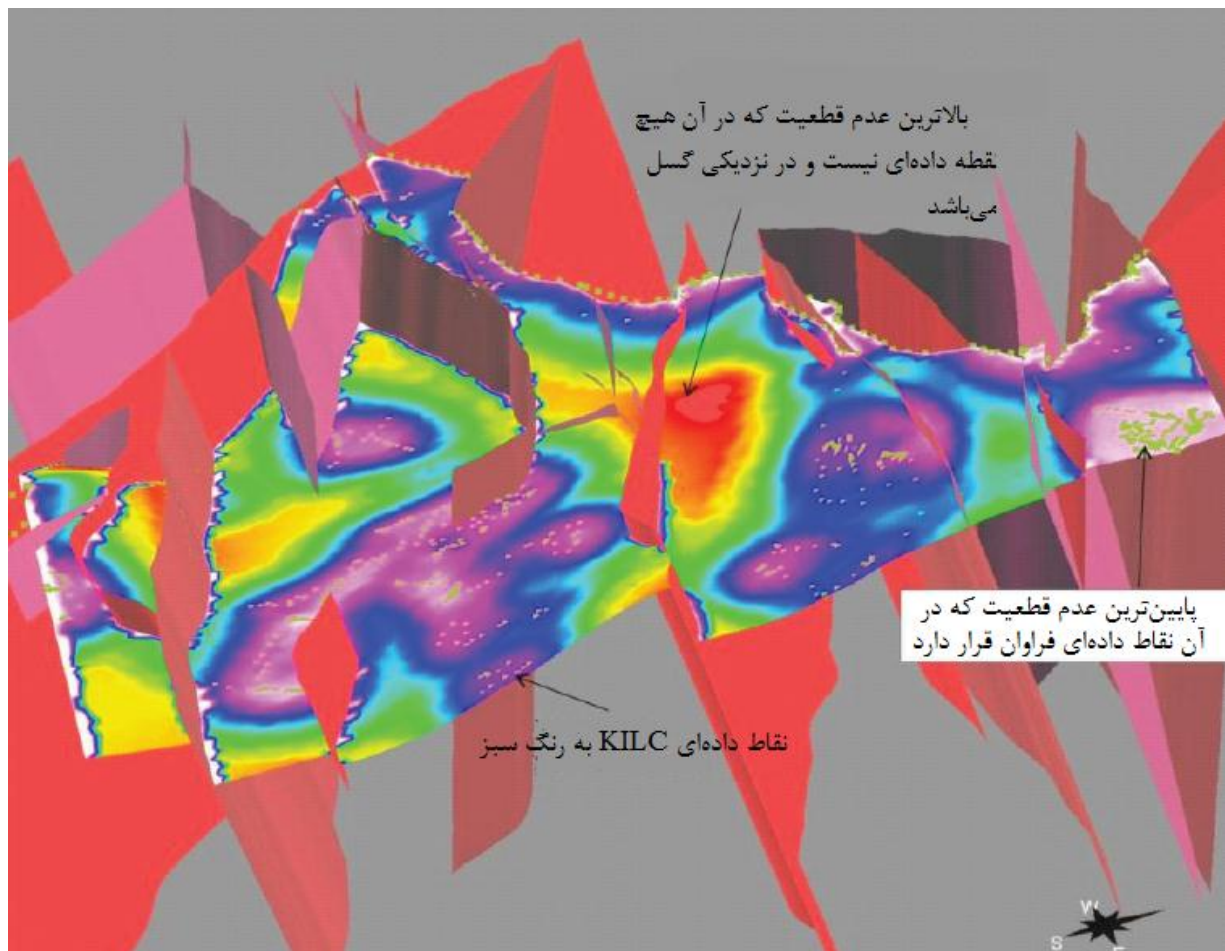
مدل سازی سه بعدی زمین شناسی

مدل سازی سه بعدی شرایط زمین که داده های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی را ادغام می نماید به طور گسترده در ایالات متحده برای اقدامات توسعه ای از جمله اکتشاف و استخراج منابع و توسعه زیرساخت ها انجام می گیرد. فناوری های مدل سازی مشابه می توانند به منظور طرح ریزی زیرساخت های شهری، مدل سازی ریسک، و مدیریت منابع بکار برده شوند همانگونه که توسط سازمان زمین شناسی بریتانیا انجام می پذیرد (رجوع به شکل ۱). چنین مدل هایی می توانند «دیدگاه های» متعددی را ارائه دهند (مثلاً جهت یابی ها)، می توانند «تشریحی» باشند (مثلاً لایه ها می توانند به صورت بصری از هم جدا شوند تا ویژگی ها یا واحدهای خاص را مجزا سازند)، و در غیر این صورت به منظور شناسایی خصوصیات فیزیکی پیش بینی شده در عمق، موقعیت های ساختارهای انسانی، آسیب پذیری های سفره آب زیرزمینی، و سایر ویژگی ها می توانند مورد بهره برداری قرار گیرند.



نمونه ای از مدل سازی مهندسی سه بعدی زمین شناسی که توسط سازمان زمین شناسی بریتانیا به منظور تجسم سازی تغییر پذیری در مواد زمین شناسی و خصوصیات فیزیکی آنها مورد استفاده قرار گرفت.

چنین نگرش جامعی به داده ها، می تواند تصمیم گیری را بهتر و تقویت نماید و به تعیین میزان بی ثباتی ها و ناپایداری ها کمک کند که به لحاظ تاریخی منشاء مشکلات پیمانکاری و شکایات می باشد. نقشه های اطمینان بر اساس انبوهی داده ها و پیچیدگی زمین شناسی می توانند ایجاد شوند که مناطقی با ناپایداری کم و یا بالا را در مدل ها نشان می دهند (رجوع به شکل ۲). با توجه به تغییر پذیری شرایط زمین شناسی و محدودیت های فضایی ابزارهای مشخص سازی زیرزمین، اطلاعات در خصوص زیرزمین غالباً محدود است و حاوی بی ثباتی ها و عدم قطعیت قابل توجهی می باشد.

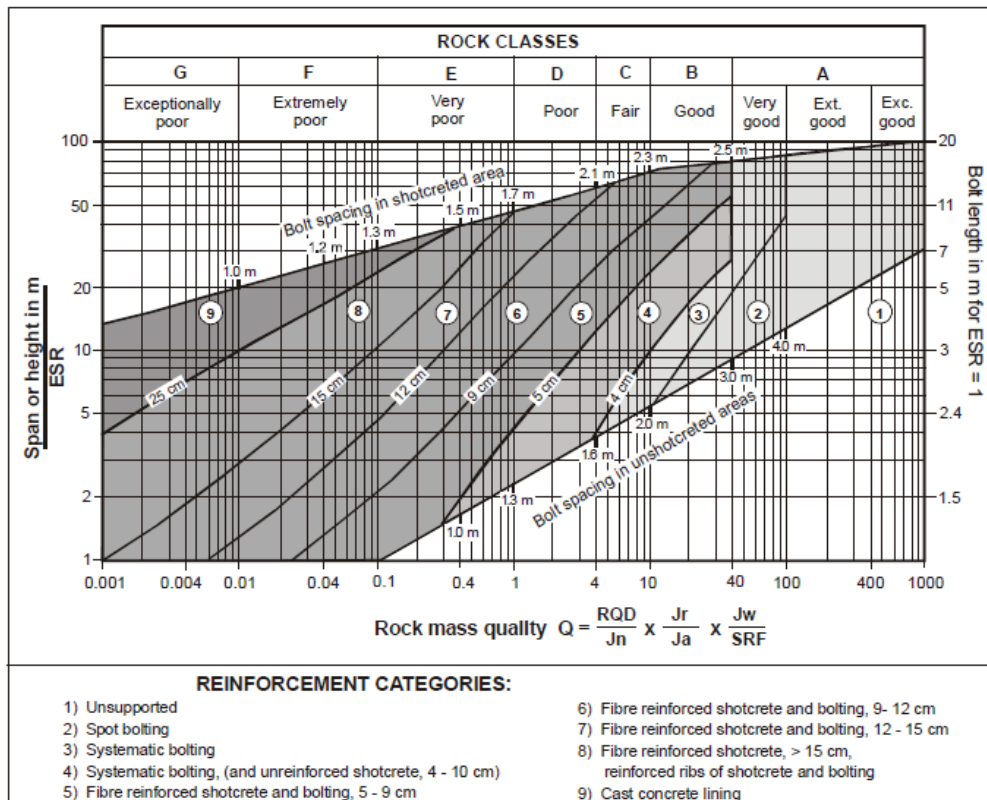


یک نقشه اطمینان سنگ بستر که برای منطقه‌ای در گلاسگو، اسکاتلند تهیه شده است. نقاط سبز رنگ نقاط داده‌ای واقعی را نشان می‌دهند؛ سطوح تقریباً عمودی گسله‌ها را نمایش می‌دهند. خطوط فاصل میزان عدم قطعیت را بر اساس تراکم داده و پیچیدگی زمین‌شناسی سطح مدل شده را ارائه می‌دهند (رنگ قرمز در برگیرنده عدم قطعیت بالاست). چنین نقشه‌هایی بیش ارزشمندی را با توجه به اینکه در کجاها داده‌های بیشتری ممکن است نیاز باشد عرضه می‌نمایند.

از یک چشم‌انداز کلی و اجمالی، با این همه، استفاده ناقصی از کل طبقه‌بندی و تست مواد ایجاد می‌شود که این تست‌ها بر روی هزاران پروژه مجزا که هر ساله در اندازه‌های متوسط تا بزرگ رخ می‌دهند انجام می‌گردد. گردآوری و یکپارچه‌سازی چنین داده‌هایی دشواری‌هایی را بر جای می‌گذارد چرا که، برای متمر ثمر بودن، این داده‌ها باید به دقت مستندسازی شوند و نسبت به مکان و موقعیت، عمق، خصوصیات دیگر، و شجره نامه (مثلاً منابع داده‌ای، چه تست‌هایی انجام گردیده، و آیا تجهیزات تست و آزمایش به درستی درجه بندی گردیده‌اند) دارای شماره ارجاع باشند. همچنین، و شاید بیشتر گفته شود، بازدارنده‌های قابل توجهی برای صاحبان پروژه و مشاوران آنها در انتشار اطلاعات به دلیل نگرانی‌های مرتبط با مسئولیت و فقدان اطلاعات ملکی وجود دارد. با این اوصاف، قانون و مقرراتی وجود دارد، برای مثال، که عملیات‌های گمانه‌زنی مناسبی را برای تحویل صورت عملیات‌های گمانه‌زنی به سازمان‌های زمین‌شناسی دولتی می‌طلبد. مراحل جذب بیشتر داده‌های ژئوتکنیکی تولید شده به صورت مفید و مؤثر، راه‌های با اهمیتی را برای کمک به فراهم‌سازی پایداری زیرزمین شهری و مناطقی که به آنها خدمات‌رسانی می‌کند ارائه می‌دهد.

برای حرکت به سوی روش‌های مهندسی که با این اهداف پایداری سازگار می‌باشند، داده‌های مرتبط با توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی می‌باید در فرمت‌ها و با ابزارهایی آرشو شوند که آنها را قابل اصلاح، بازیافتنی و دست یافتنی می‌سازد برای چرخه حیات زیرساخت‌ها - و پس از آن (به منظور در نظر گرفتن دست ساخته‌های زیرساختی در جای خود

به طور مناسب بعد از تعطیل شدن و یا انهدام). این مسائل در بخش بعدی که به چالش های بحرانی و مهم آرشینو داده های مربوط به زیرساخت ها می پردازد مطرح خواهد شد.



کیفیت توده سنگ:

طبقه بندی های تسلیح (تقویت)

- ۱) پشتیبانی نشده
- ۲) پیچ کردن نقطه ای
- ۳) پیچ کردن سامانه اتیک
- ۴) پیچ کردن سامانه اتیک، (و شاتکریت غیر مسلح، ۱۰-۴)
- ۵) پیچ کردن و شاتکریت مسلح فیبری، ۹-۵
- ۶) پیچ کردن و شاتکریت مسلح فیبری، ۱۲-۹
- ۷) پیچ کردن و شاتکریت مسلح فیبری، ۱۵-۱۲
- ۸) شاتکریت مسلح فیبری، < ۱۵ cm، تیرچه های مسلح شاتکریت و پیچ کردن
- ۹) آسترکشی بتن ریزی

شکل ۶۵ طبقه بندی های پشتیبانی که از شاخص کیفیت تونل زنی تخمین زده می شود (بعد از گرمستا و بارتون، ۱۹۹۳) منبع: پالمستروم و بروچ، ۲۰۰۶.

فن آوری ها برای طراحی

پایداری به عنوان بخش جدایی ناپذیر طراحی یک مفهوم نسبتاً جدید می باشد. مسائل سیاسی- اجتماعی و اقتصادی، که در فصل های ابتدایی بیان گردید، بر طراحی زیرساخت ها و احتمالاً بر هزینه پایداری تأثیرگذار است. طراحی و تجزیه و تحلیل زیرساخت های زیرزمینی، اغلب بر افتتاح فوری و پشتیبانی از فضای زیرزمینی تمرکز دارد؛ مسائل بلندمدت وابسته به حفظ و نگهداری و استفاده پایدار غالباً نادیده گرفته می شود، همانگونه که مشارکت و هم بخشی های چرخه حیات زیرساخت ها، نسبت به جامعه وجود دارد. محدودیت های پروژه های از قبیل راه های عبوری و دستیابی می توانند بر انتخاب تراز پروژه اثرگذار باشند، و

محدودیت‌های فیزیکی از قبیل مواردی که به سامانه‌های گرانس انتقال آب مرتبط می‌شوند (مثلاً شیب، تعداد ایستگاه‌های انتقال، طول انتقال دهنده‌ها)، ماکسیمم درجه (برای ساخت و عملیات)، و مکان‌های شافت نیز ممکن است بر گزینه‌های طراحی تأثیر بگذارند. فن‌آوری‌ها یا سیاست‌های نوین که اثرات منفی و مضر این موانع فیزیکی را کاهش می‌دهند می‌توانند هزینه توسعه فضای زیرزمین را تقلیل دهند.^۲ همانگونه که در فصل ۴ بیان گردید، کدها و استانداردها طراحی و عملیات را هدایت می‌نمایند، به ویژه جایی که امنیت عمومی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. اگرچه کدهای ساختمانی می‌توانند از سلامت و ایمنی آن زیرساخت‌های در حال ساخت، در حال عملیات و در حال استفاده محافظت نمایند، کدهای ساختمانی در طبیعت ثابت و ایستا می‌باشند و، از این رو، می‌توانند از اهداف پایداری کاسته و فضای اندکی برای انعطاف‌پذیری و یا تکامل تکنولوژی‌ها بر جای گذارند.^۲ نمونه‌ای از آن یک قانون ژاپنی است که به حق عمومی نسبت به فضایی بیشتر از ۴۰ متر عمق مربوط می‌شود که وسیله‌ای، برای بهبود و ارتقاء برنامه‌ریزی و پایداری منابع زیرزمینی است. این قوانین انتخابات عقلانی را برای ترازهای پروژه‌های و حفظ فضای زیرزمینی برای کاربری‌های آتی امکان‌پذیر می‌سازند (کوندا، ۲۰۰۳).

موانع ایجاد شده به واسطه محدودیت ابزارهای طراحی، یا به وسیله محدودیت‌های افرادی که از این ابزارها استفاده می‌کنند، نیز توانایی در طراحی بهینه زیرساخت‌های زیرزمینی و در کاهش هزینه‌های چرخه حیات را محدود می‌سازند. طراحی زیرساخت‌های زیرزمینی می‌تواند از تحلیل‌های تکراری طراحی‌ها - به ویژه طراحی‌های ابتکاری - در محیط مجازی بهره جوید. اجرای طراحی در شرایط دشوار زمین می‌تواند با استفاده از مدل‌های عددی پیش‌بینی گردد، و نتایج تحلیل‌ها می‌تواند بر تغییرات طراحی زیرساخت‌ها که با محدودیت‌ها و پارامترهای مورد نظر مواجه می‌شوند مؤثر واقع شود. این پروسه هر چند بار که لازم است می‌تواند تکرار گردد تا اینکه پاسخ‌های مدل مورد نظر و طراحی بهینه حاصل گردد. بسته‌های نرم افزاری تجاری برای این نوع تجزیه و تحلیل در دسترس می‌باشند، لیکن استفاده از آنها در صورتی موفقیت‌آمیز خواهد بود که محدودیت‌های آنها تشخیص داده شود. سازگاری و یکپارچه‌سازی بیشتری در طراحی ژئوتکنیکی در استفاده از مدل‌سازی عددی، اعتبار سنجی طراحی پروژه، و ادغام مدل‌سازی با دیگر مؤلفه‌های تحلیلی (مقیاس‌گذاری) مورد نیاز است تا بتوان به طراحی پایدارتری دست یافت. این امر پیشرفت‌های نرم افزاری، به ویژه با توجه به تعاملات رابط کاربر گرافیکی، چک کردن خطا، و آموزش کاربران را می‌طلبد. چالش دیگر فقدان ورودی مناسب مدل رفتاری زمین می‌باشد. داده‌های آزمون میدانی و آزمایشگاهی غالباً برای ورودی در تحلیل‌های پیشرفته و یا صحت سنجی مدل مناسب و درخور نمی‌باشند. رابطه‌های قوی‌تر و مستقیم‌تر میان داده‌های تحقیقات میدانی و توسعه مدل مورد نیاز می‌باشد (مثال هاشاش و همکاران، ۲۰۰۹).

ترکیب مناسب تکنولوژی، آموزش و مهارت‌ها به منظور یک طراحی خوب مهندسی واجب و حیاتی است. این طراحی از تسهیلات زیرزمینی پایدار، پروسه‌ای پیچیده و تکراری است که لزوماً یک تلاش گروهی و تیمی می‌باشد، چنانکه در فصل ۳ بیان گردید. ارتباطات مستمر میان مهندسان، صاحبان و اشخاص ثالث ذینفع برای ایجاد و توسعه طرح‌های بهینه ضروری است که نیازمندی‌های خاص صاحبان و اهداف پایداری اجتماعی را برآورده می‌سازد. درون نهاده (ورودی) حاصل از طیف وسیع‌تری از سهامداران، به ایجاد زیرساخت‌ها کمک می‌نماید که در آن سامانه، سامانه‌ها ادغام می‌گردد که شامل توسعه شهری می‌باشد. طراحان باید با اینکه چگونه فضا با زیرساخت‌های موجود متناسب باشد، اثرات بلندمدت آن بر محیط شهری کل، و تاب‌آوری آن در طول زمان دست و پنجه نرم کنند.

بخش‌های بعدی، ورودی‌های اصلی معمول برای طراحی پروژه‌های زیرزمینی را شرح می‌دهند.

یکپارچه‌سازی طراحی و تجزیه و تحلیل

طراحی مهندسی مناسب شامل تحلیل عملکرد سامانه به عنوان بخشی از توسعه طراحی است. ابزارهای بسیاری برای جزئیات طراحی سازه‌های زیرزمینی موجود می‌باشد - برای مثال، ضخامت تکیه گاه‌ها و یا اندازه و محل درست شفت‌های

تهویه. روش‌های طراحی تجربی و تحلیلی، ایده‌ها و رویه‌های مبتنی بر تجربه، کدهای ساختمانی، و بسته‌های نرم‌افزاری تحلیلی و محاسباتی همگی در طراحی بهینه سازه‌های زیرزمینی مشارکت دارند. با این وجود، اثر بخشی آنها به طور مستقیم به کیفیت ورودی داده‌ها و پایه دانش و تجربه کسانی که از این ابزارها استفاده می‌کنند مرتبط می‌باشد.

تجربه

فقدان تحصیل و آموزش که مهندسی مناسب سامانه‌های زیرزمینی را میسر می‌سازد از جمله نگرانی‌های رو به رشد در ایالات متحده می‌باشد و در نهایت بر تاب‌آوری زیرساخت‌های زیرزمینی و پایداری توسعه شهری تأثیر خواهد داشت. کمتر از پنج مؤسسه آموزش عالی آمریکا فرصت‌های دانشجویی را در ساخت‌وساز زیرزمینی فراهم می‌سازند و استعداد‌های مهندسی از خارج از کشور وارد می‌شوند. به طور مشابه، برای صنعت ساخت‌وساز زیرزمینی توسعه و گسترش مکانیزم‌ها بسیار مهم است که انتقال مناسب تجربه را از پرسنل ارشد به مهندسان جوان امکان‌پذیر می‌سازد.

ابزارهای طراحی تجربی

روش‌های طراحی تجربی بر رویکردهای شبه کمی برای مشخص‌سازی مواد که تا حد زیادی مبتنی بر قضاوت‌های تجربه محور می‌باشد تکیه دارند. آنها لزوماً بر پایه مکانیزم‌های اصلی و بنیانی رفتار زمین و سازه نمی‌باشند. برای مثال، سامانه‌های طبقه بندی خاک و سنگ بر اساس مقایسه رفتارهای مشاهده شده مواد حاصل از موقعیت زیرساخت‌ها با مشاهدات مشابه در نقطه و جای دیگر است. رفتارها بر اساس این مقایسات پیش‌بینی می‌گردند، اما دلایل اساسی برای این رفتارها ممکن است به خوبی درک نگردد. با این حال، طبقه بندی‌های خاک و سنگ مبتنی بر مشخص‌سازی تجربی غالباً بر الزامات پشتیبانی و مشخصات طراحی مؤثر خواهد بود. در برخی موارد، مشخص‌سازی تجربی ممکن است بر اساس تعدادی از مشاهدات قبل باشد و نتیجه‌گیری‌های منتج شده جدی و قاطعانه است. در دیگر موارد، داده‌های اندکی برای میسر ساختن مقایسات وجود دارد، و مشخص‌سازی‌های تجربی بیشتر شبیه به «بهترین حدسیات» می‌باشند. نتیجه‌گیری‌های تجربی محور می‌توانند به صورت برآوردهای مرتبه اول در نظر گرفته شوند، و ممکن است مشاهدات بیشتری برای تأیید و یا اصلاح آن برآوردها نیاز باشد. به عبارت دیگر، آنها می‌توانند برای درون‌یابی و نه برای برون‌یابی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده نادرست از ابزارهای تجربی می‌تواند منتهی به خطرات ایمنی، عملکرد ضعیف، و یا هزینه‌های غیر ضروری گردد. آموزش متخصصان در خصوص محدودیت‌های روش‌های تجربی راهی برای بهبود استفاده از آنهاست. بهبود و اصلاح پایگاه داده‌های مشاهدات و روش‌ها برای توسعه آنها راه دیگری است.

روش‌های تحلیلی و محاسباتی

روش‌های تحلیلی - در درجه اول راه حل‌های ریاضیاتی فرم بسته که نیاز به استفاده از کامپیوتر ندارند - برای محاسبه تنش‌ها، کرنش‌ها، حرکات زمین، جریان آب‌های زیرزمینی، و دیگر خصوصیات به منظور درک و شناخت بهتر رفتار سازه زیرزمینی در هم‌آهنگی با محیط زیرزمین بسیار مهم می‌باشند. این روش‌ها داده‌ها را برای پاسخگویی سازه‌های زیرزمینی برای شرایط مرزی آرمانی خاص و رفتارهای مواد فراهم می‌سازند. روش‌های تحلیلی ابزارهای کلیدی و مهم برای دانش و قضاوت ساختمان با توجه به رفتار ژئوتکنیکی، برای انجام مطالعات طراحی مقدماتی (یا طراحی کامل با نظر به پیکربندی‌های مناسب)، و برای مقایسه خروجی‌های مدل محاسباتی پیچیده با قابلیت اطمینان سنج می‌باشند. با این همه، آنها نمی‌توانند پیچیدگی کامل بسیاری از سازه‌های زیرزمینی و شرایط زمین‌شناسی را بگیرند.

روش‌های محاسباتی از جمله روش‌های المان محدود، تفاضل محدود، و المان گسسته به منظور تخمین رفتارهای خاک،

سنگ، و یا سازه های مهندسی شده زمانی که میزان کافی و بسنده ای از اطلاعات دقیق موجود باشد بکار گرفته می شوند - برای مثال، برای اصلاح طراحی بر اساس پاسخها- اما زمانی که تجربه قبلی محدودی که تحت شرایط خاص انجام پذیرفته وجود دارد می توانند مفید واقع شوند. رفتارها ممکن است با استفاده از برنامه های نرم افزاری کامپیوتری پیش بینی گردند. روش های محاسباتی ممکن است به منظور تخمین، برای مثال، تعاملات سازه- زمین و دگرذیسی ها و تغییر شکل ها، تغییرات در محیط زیست زمین (مثلاً تغییرات گرمایی و جریان آب های زیرزمینی و آلودگی)، و انتشار آتش و دود در فضاهای زیرزمینی مورد مصرف مورد استفاده قرار گیرند. تمامی روش های محاسباتی، چه مبتنی بر جزءسازی (دیفرانسیل در برابر انتگرال) چه بر اساس فرض های پیوستگی (مثلاً محیط پیوسته، بلوک های سنگی گسسته، یا مقداری نا متجانس) آگاهی از اطلاعات مکانی و خصوصیات مواد (مثلاً مواد یکپارچه، نا پیوستگی ها، و خصوصیات سیال) را می طلبند.

از بسیاری جهات، توسعه سریع روش های محاسباتی در طی چند دهه گذشته فراتر از توان کنونی در گردآوری داده هایی به قدر کافی دقیق برای مسکون ساختن این مدل ها و یا معتبر ساختن خروجی مدل های پیچیده (مثلاً رفتارها) پیش رفته است پیش از آنکه اطلاعات مدل در طراحی ادغام گردد. قابلیت یک طراح در مقایسه نتایج رویکردهای تحلیلی و شبیه سازی متفاوت و در دست یافتن به داده های تاریخی مورد مربوطه می تواند به طرز چشمگیری افزایش یابد. برای بهره جویی کامل تر از پیشرفت ها در روش های محاسباتی، مدل های اطلاعات زمین می توانند به صورت دینامیکی به داده های حاصل از تجهیزات حفاری، سامانه های پشتیبانی، و شبیه سازی های به روز مرتبط گردند تا حلقه های بازخوردی مفیدی را فراهم سازند. این اطلاعات می توانند در خلال ساخت و ساز مورد استفاده قرار گیرند تا مدل های پیش گویانه مورد استفاده در طراحی را معتبر سازند، مشخص سازی زمین را بهبود بخشند، و پاسخ های مورد انتظار زمین و سازه را به روز سازند. به صورتی مشابه، جمع آوری داده ها از محیط زمین و خود زیرساخت های زیرزمینی در طول چرخه حیات این زیرساخت ها درک و شناخت از مفاهیم پایداری سازه (اثرات بر محیط اطراف و اثرات حاصل از آن) را افزایش می دهد. ایالات متحده به عنوان پیشرو در توسعه نرم افزارهای شبیه سازی عددی برای مهندسی ژئوتکنیک در طول چندین دهه بوده است، اما این مقام اول با پیشرفت رویکردهای شبیه سازی در دیگر کشورها تهدید می گردد. بسته های نرم افزاری متعدد در حال حاضر مورد استفاده در روش ژئوتکنیک در خارج از ایالات متحده توسعه و گسترش یافته اند. کادر ۶،۲ برخی از نیازهای مرتبط با توسعه مدل های تحلیلی و محاسباتی را بیان می نماید.

کادر ۶۲

توسعه مدل های تحلیلی و محاسباتی

داده های بیشتر و بهتر کافی نمی باشد. مدل های بهتری برای بررسی رفتار سامانه های زیرساختی انطباقی پیچیده و وابسته نیاز می باشد که عبارتند از

مدل های تحلیلی و محاسباتی که عملکرد سامانه را پیش بینی و نشان می دهند، آسیب پذیری ها را مشخص می کنند، و پلت فرمی را برای بررسی فرصت هایی برای افزایش امنیت، استحکام، تاب آوری، ظرفیت و کارایی، و مقرون به صرفه بودن ارائه می دهند؛ المان های اتصال و محاسبات عددی (الگوریتم ها) که شبیه سازی و بررسی تعاملات متقابل بخشی و وابستگی های متقابل را امکان پذیر می سازند؛ و ابزارهایی برای تجسم سازی و انتقال خروجی این شبیه سازی های پیشرفته.

فناوری های تحلیلی پیشرفته می باید تحت شرایط عملیاتی قابل اجرا و عملی باشند، و همچنین نیاز به جذب شرایط عملیاتی رو به تکوین و رفتارهایی که ناشی از تعاملات سامانه پیچیده و تنش های داخلی یا خارجی غیرمعمول (مثلاً زمین لرزه ها، طوفان های اساسی، تغییرات سطح دریا، اقدامات تروریستی) می باشند دارد.

مدل‌های معتبر می‌توانند پلت فرمی ارائه دهند به منظور درک اینکه چگونه در بهترین حالت تسهیلات زیرساختی رو زمینی و زیرزمینی را برای ارائه خدمات پایدار و قابل اطمینان یکپارچه و به کار اندازند؛

پتانسیل فناوری‌ها و ابزارهای جدید را برای افزایش و اصلاح عملکرد سامانه‌های موجود و برای دستیابی بینش تغییر توازن میان ویژگی‌های سامانه‌ی متمرکز و غیرمتمرکز جذب نمایند؛ شبکه‌های سنجش را برای جذب رفتار سامانه‌ی پیچیده به صورت مؤثر و اقتصادی و بهبود عملیات و امنیت سامانه طراحی و مستقر سازند؛

بسترهای آزمون‌های تحقیقاتی طولانی مدت را برای استقرار سنسورها در محیط‌های واقعی توسعه دهند؛ امنیت داده‌های قابل اطمینان را برای داده‌های منتقل شده و ذخیره شده میسر سازند و معماری سامانه تاب‌آور را توسعه دهند که می‌تواند داده‌های دستکاری شده را شناسایی کند؛ و مفاهیم جدید در طراحی، عملیات، و حفظ سامانه را بررسی نمایند که آسیب‌پذیری را کاهش می‌دهد و انعطاف‌پذیری و ترمیم‌پذیری را ارائه می‌دهد.

فن آوری‌هایی برای ساخت‌وساز در زیرزمین

پیشرفت‌های فن‌آورانه مرتبط با حفاری، تغییرات زمین، بهسازی، پشتیبانی، گمانه‌زنی تونل، و استفاده از مواد حفاری برای توسعه فضای زیرزمین به صورت هرچه کارآمدتر، مقرون به صرفه‌تر، و تحت شرایط بسیار دشوار زمین دارای اهمیت است. توسعه فن‌آوری‌های زیرزمین و پیشرفت‌های مهندسی با توجه به الزامات ساخت‌وساز در زیرزمین در سرتاسر جهان (پاریاکس و همکاران، ۲۰۰۶)، و با توجه به نیاز رقابتی ماندن در یک بازار بین‌المللی برای قراردادهای ساخت‌وساز زیرزمینی تحریک و ترغیب می‌گردد. اهمیت توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی که به توسعه پایدار کمک می‌نماید در حال حاضر مورد تأیید می‌باشد (مثال ۲۰۰۵، ECTP).

پایداری محیط شهری تا اندازه‌ای وابسته به حداقل‌سازی اختلالات و بی‌نظمی‌ها نسبت به تولید اقتصادی مناطق پرجمعیت در خلال ساخت (و بعدها در حفظ و نگهداری) زیرساخت‌های زیرزمینی می‌باشد. پروژه‌های زیرزمینی غالباً در طی چند سال به اتمام می‌رسند و در طول این زمان تجهیزات به محل حفاری منتقل و یا از آن خارج می‌شوند و حجم بزرگی از سنگ و خاک حفاری شده (نخاله) باید انتقال داده شود. خیابان‌ها ممکن است برای دوره‌های زمانی طولانی مسدود گردند، و حرکت کامیون‌ها بر خیابان‌های سطح زمین می‌تواند مختل کننده و آلوده کننده باشد. از آنجایی که هر پروژه و محیطی منحصر به فرد است، هیچ راهکار مهندسی اختلالات و بی‌نظمی‌ها، استفاده از منابع تجدیدناپذیر، و هزینه‌ها برای تمامی پروژه‌های زیرزمینی را به حداقل نمی‌رساند. با این همه، در صورت وجود تمایل به تحمیل هزینه‌های راه‌اندازی اضافی، تکنولوژی‌ها در دسترس می‌باشند. پیشرفت‌های موجود در تکنولوژی‌ها از جمله ماشین‌آلات گمانه‌زنی جدید (TBMها) و فن‌آوری‌های حفاری بدون ترانشه می‌تواند اختلالات و بی‌نظمی‌ها را به حداقل برسانند، برای مثال با انجام حفاری در شرایط دشوار زمینی بدون گودبرداری‌های رو باز. بخش‌های آینده نمونه‌هایی از فن‌آوری‌های مورد استفاده در ساخت‌وساز در فضای زیرزمین ارائه می‌دهند، که عبارتند از تونل‌زنی و حفاری رو باز؛ تونل‌زنی و پشتیبانی زمین در سنگ و خاک، بهبود زمین، و کنترل و نظارت.

تونل‌زنی و حفاری روباز

حفاری رو باز فناوری‌ی رایج و اثبات شده برای ساخت تونل‌های کم عمق (مثلاً با عمق کمتر از ۱۵۰ پا {۵۰ متر})،

ساختمان‌های زمین پناه، و زیرزمین‌ها و زیرسازی‌های ساختمانی می‌باشد. در حفاری تأسیسات نیز عموماً از گودبرداری‌های روباز استفاده می‌گردد. حتی در تونل‌های گمانه‌ای و یا بخش‌های تونل مستغرق از تونل‌زنی رو باز برای دسترسی، سازه‌های پشتیبان، و راه‌اندازی ماشین آلات گمانه‌زنی استفاده خواهد شد. فن‌آوری‌های رو باز ممکن است برای مناطقی با محدودیت‌هایی در استفاده از سطح زمین به لحاظ اقتصادی مطلوب باشند، اما در مناطق پر جمعیت واقعاً مختل کننده می‌باشند.

حفاری رو باز می‌تواند با تغییرات در عرض تونل و شکل یکنواخت آن همساز شود و غالباً برای ساخت محفظه‌ها و ایستگاه‌ها انتخاب می‌گردند. انتخاب از میان فناوری‌های ساخت موجود از قبیل درجا ساختن، از پایین به بالا، یا از بالا به پایین، وابسته به شرایط زمین، فضای موجود و در دسترس، و الزامات محیطی می‌باشد (برای مثال، بریکل و همکاران، ۱۹۹۶). در معابر عمومی و در هنگام استفاده از روش‌های از بالا به پایین، حفاری ممکن است در مراحل اولیه ساخت پنهان و پوشانده شود تا ادامه جریان ترافیک را میسر سازد و یا اینکه ساخت طبقات بالاتر یک ساختمان را امکان پذیر سازد در حالی که حفاری فضای زیرزمینی ادامه دارد. روش حفاری رو باز نیز در تونل‌های تحت‌البحری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

پروژه‌های بزرگ حفاری روباز در مناطق شهری فرصت‌هایی را برای ارتقاء و نوسازی سایر تسهیلات در مجاورت آنها ایجاد می‌کند. برای مثال، اوتیلیدرها (راهروهای تأسیساتی) ممکن است در پروژه‌های حمل و نقل گنجانده شوند، و شبکه‌های زیرزمینی عابر پیاده در توسعه مجدد مرکز شهر (همانگونه که هم در مونترال و هم در تورنتو به انجام رسید) ممکن است ساخته شوند. تأثیرات نسبی مستقیم و غیر مستقیم ساخت‌وساز رو باز در معابر عمومی در مقایسه با رویکردهای ساخت‌وساز کمتر نفوذی از قبیل تونل‌های گمانه زده و فن‌آوری‌های حفاری بدون ترانشه (trenchless) همیشه به اندازه کافی درک و شناخته نمی‌گردند تا در تصمیم‌گیری‌ها اثرگذار باشد.



شکل ۶۶ حفاری مهار بندی شده برای قسمت تونل رو باز شاهراه مرکزی بوستون.

تونل‌زنی و فن آوری‌های پشتیبانی زمین در سنگ

حفاری سنگ برای تمامی انواع کاربری‌های زیرزمینی از جمله تونل‌های در کوه، استخراج معدن، و غارهای زیرزمینی که در آنها سنگ در سطح و یا نزدیک آن قرار دارد الزامی است. در اعصار گذشته، حفاری سنگ، کاری آهسته و طاقت فرسا بود، که بر ابزارهای دستی و یا حتی شوک‌های حرارتی^۱ برای خرد کردن سنگ تکیه داشت. معرفی فن آوری‌های انفجاری در قرن‌های شانزده و هفده میلادی سرعت حفاری سنگ را به کلی متحول ساخت و طیف پروژه‌هایی که به صورت مقرون به صرفه‌ای ممکن بود انجام شوند را افزایش داد. در نیم قرن گذشته، TBM‌های سنگ سخت کاربردهای گسترده‌ای پیدا نموده‌اند که تونل‌هایی با طول متوسط تا طولانی را ایجاد می‌نمایند. حفاری سنگ همچنین از پیدایش مکانیک سنگ به صورت شاخه‌ای مجزا از مهندسی ژئوتکنیک در دهه ۱۹۵۰ بهره‌مند گردید. مطالعه تجزیه (تکه تکه شدن) سنگ، شتاخت رفتار مقاومت پس پیک سنگ‌ها، و مشخص‌سازی تأثیر گسستگی‌های سنگ بر رفتار توده سنگ از زمره نتایج و خروجی‌های دارای اهمیت تحقیقات در زمینه مکانیک سنگ می‌باشد.

فن آوری‌های انفجاری و حفاری (مته‌کاری)

در حفاری انفجاری و با مته، مواد منفجره و چاشنی‌های زمان‌دار در سوراخ‌های حفر شده قرار می‌گیرند، انفجار انجام می‌گردد، سوراخ و شکاف ایجاد شده تهویه می‌گردد، ضایعات از سطح حفاری دور و منتقل می‌شود، و این فرآیند دوباره آغاز می‌گردد تا اینکه سوراخ و دهانه مطلوب و مورد دلخواه حاصل شود (مثال، سلرز و همکاران، ۲۰۱۰). انفجار معمولاً راه حل ارجمند از منظر هزینه برای تونل‌های سنگی کوتاه و برای حفاری زیرسازی‌ها و غارهای سنگی است. انفجار، به هر حال، می‌تواند به ویژه برای مناطق شهری چالش برانگیز باشد با توجه به ارتعاشات با دامنه بالاتر (و متعاقب آن، لرزش‌های زمین)، مواد ضایعات با اندازه‌های بزرگ‌تر، و نیاز بیشتر برای پشتیبانی اولیه تونل در مقایسه با، مثلاً، آنچه که از به کارگیری TBM نتیجه می‌گردد. سرعت‌های حفاری نسبتاً کند می‌باشد، این پروسه پر سر و صدا است، زیاده‌برداری (حفاری مواد بیش از حد) امکان پذیر می‌باشد.

جایگزین‌هایی برای فن آوری‌های مرسوم انفجاری و مته‌زنی مقدور و ممکن می‌باشد. برای مثال، انتشار ترک خورگی‌های حاصل از گمانه‌ها در سنگ با استفاده از گسترش کنترل شده گاز امکان حفاری مستمر و مداوم بدون آزادسازی انرژی اضافی را فراهم می‌سازد که موجب ارتعاش و پرتاب سنگ می‌گردد. کاربرد تجاری چنین فن آوری‌هایی تا کنون محدود به کاربردهای تخصصی بوده است که در آنها انفجارهای مرسوم امکان پذیر و معقول نمی‌باشد. طراحی انفجار (مثلاً، الگوها و تسلسل‌های انفجاری) با مدل‌های محاسباتی پیشرفته حفاری (با مته)، انفجار، ارتعاشات، و جابجاسازی‌ها اثر بخش‌تر و کارآمدتر خواهد بود. طراحی‌هایی که سر و صدا و ارتعاش را به حداقل می‌رسانند، برای مثال، امکان انفجار در هر ساعتی از روز را میسر می‌سازند، که بهره‌وری را افزایش می‌دهد، اختلالات و بی‌نظمی‌ها را در مناطق محلی به حداقل می‌رساند، و آسیب به زیرساخت‌های اطراف را کاهش می‌دهد. همانطور که شهرها پر توسعه‌تر می‌شوند و از فضای زیرزمینی بیشتری استفاده می‌کنند، رویکردهای انفجاری که نقش‌شان در کاهش آسیب و مزاحمت به اثبات رسیده است مطلوب خواهند بود.

۱. از آتش برای گرم کردن سنگ استفاده می‌شود، که پس از آن به سرعت با آب سرد می‌گردد. این تغییر سریع حرارت موجب ترک خوردن و شکستن سنگ می‌شود. سنگ شکسته بدین سان حفاری می‌گردد.

فن آوری ماشین آلات گمانه‌زنی (حفاری) تونل برای حفاری سنگ

تغییرات اولیه TBMها برای سنگ نرم در اواخر دهه ۱۸۰۰ انجام پذیرفت (برای مثال، ماشین آلات حفاری بیومانت (Beaumont) انگلیس برای یکی از اقدامات اولیه به منظور ایجاد تونل چنل (Channel) ما بین انگلیس و فرانسه مورد استفاده قرار گرفت؛ میدل و همکاران، ۲۰۰۸). پیشرفت‌های اولیه در طراحی TBM توسط کمپانی روبینس سیاتل، واشنگتن، انجام شد، که به عنوان سردمدار طراحی و تولید TBM برای سده‌های زیادی در سراسر جهان به قوت خود باقی ماندند. در طی دهه گذشته، با این وجود، تولید و ساخت TBM به طور روز افزونی تحت سلطه شرکت‌های غیر آمریکایی قرار داشته است.

تونل‌زنی با ماشین آلات در سنگ‌های سخت‌تر به دلیل نا کارآمدی و سایش سریع کاترهای (برش دهنده هایت) سنگ از نوع پرتابی مورد استفاده در آن زمان چالشی را به وجود آورد. با ظهور طراحی ماشین آلات تمام مقطع و کاترهای دیسکی برای سنگ‌ها و اثبات ارزش روش TBM (برای مثال، طرح تونل و مخزن آب شیگاگو)، TBM سنگ‌های سخت با استفاده از کاترهای دیسکی رفته رفته جایگزین فن‌آوری‌های متهم‌زنی و انفجاری برای تونل‌های طولانی گردید.

میزان پیشرفت با استفاده از TBMها در سنگ نرم می‌تواند فراتر از ۱۰۰ پا در هر روز باشد. با این همه، حفاری تونل یک فرایند تولیدی صنعتی و سامانه‌اتیک می‌باشد که می‌تواند تنها با سرعت کندترین عنصر در این سامانه پیش رود. از این رو، پیشرفت‌های فن‌آورانه‌ای که سرعت خرد شدن سنگ را افزایش می‌دادند به طور کامل نمی‌توانست مورد استفاده قرار گیرد تا زمانی که سامانه‌های انتقال نخاله که مواد حفاری شده را جابجا می‌کنند به منظور حفظ سرعت طراحی می‌شدند. میزان پیشرفت برای حفاری سنگ همچنان می‌توانست با روش‌های مؤثرتر و کارآمدتر از پشتیبانی تقویت نصب افزایش یابد. اقدامات کنترل زمین برای جلوگیری از خسارات محصور شدگی و به دلیل آن بی‌ثباتی سطح، شکاف‌های باریک و تند، انسداد و گیر کردن سرفرز (cutterhead)، و فرو ریختگی تونل در زمین کندالی و بسیار ترک خورده باید افزایش و بهبود می‌یافت. روش‌های بهبود یافته برای پیش‌بینی و کاهش شکستگی‌های ذاتی و خود به خودی، شدید و گه‌گاهی خطرناک سنگ‌ها (ترکیدگی‌های سنگ) در سنگ‌های مقاوم با تنش بالا می‌توانست از میزان ریسک و خطر بکاهد و منتهی به شیوه‌های ساخت‌وساز با تکرار بیشتر، دستاوردهای کاری سازگارتر، و کنترل بهتر زمان و هزینه‌های ساخت گردد. این امر هم طراز با نیاز به ارتقاء اساسی در درک و شناخت ما از مکانیک سنگ و رفتار سنگ، از جمله مکانیک شکست سه بعدی سنگ می‌باشد.

با اندازه‌گیری بهتر تعاملات سنگ و ابزارهای حفاری، استفاده از سامانه‌هایی که به پیشرفت و عملکرد خاص خود حساس می‌باشند می‌تواند افزایش یابد، خودکاری (اتوماسیون) بیشتر در ساخت زیرزمینی (مثال، رباتیک) برای کاهش خطرپذیری و خطر برای کارگران ایجاد می‌گردد، و توانایی در بررسی و کاوش پیشاپیش سطح مورد نظر حفاری به منظور شناسایی و تعیین تغییرات در خصوصیات مواد می‌تواند بیشتر گردد. TBMهای مدرن، ماشین‌آلاتی با تکنولوژی بالا که از سنسورها و سامانه‌های هدایت لیزری برای دستیابی به اطلاعات در زمان واقعی برای عملکرد سامانه استفاده می‌نمایند، توسط کامپیوتر کنترل می‌گردند. داده‌های بدست آمده در حین حفاری می‌توانند در حلقه‌های بازخوردی استفاده شوند تا به صورت مطلوب و مناسبی مثلاً سرعت‌های چرخش و فشار عکس‌عملی را تنظیم کنند.

تونل‌زنی و فن‌آوری‌های پشتیبانی زمین در خاک

سنگ سخت شده در زمان تونل‌زنی ممکن است نسبت به شکستن و تکه تکه شدن مقاوم و سخت باشد، اما تونل‌زنی در خاک (مواد تحکیم نشده) چالش‌هایی را ایجاد می‌نماید که مربوط به پشتیبانی زمین، جابجایی نخاله و مواد حفاری شده، و

اثرات ناشی از حفاری بر زمین اطراف (مثلاً نشست زمین، پایین آمدن سطح آب‌های زیرزمینی) می‌شوند. بهبود کنترل تغییر شکل به دلیل تونل‌زنی در خاک راه حلی برای محدودسازی آسیب‌های مطرح برای زیرساخت‌های موجود و افزایش ظرفیت توسعه فضای زیرزمین به صورت پایدار در بسیاری از مناطق شهری می‌باشد.

پوشش و آسترکشی تونل نیز عرصه‌ای است که کارایی و بازدهی آن به ارتقاء پایداری کمک می‌نماید. مثلاً هزینه‌ها در زمانی که پشتیبانی اولیه و دائمی (برای مثال، پشتیبانی ساخت و پوشش نهایی) تلفیق می‌گردند، و یا زمانی که ضخامت آسترهاها به واسطه استفاده از مواد جدید با مقاومت بالاتر کاهش می‌یابد تقلیل می‌یابد. دیگر پیشرفت‌های سودمند شامل افزایش فناوری‌ها در بالا بردن برش اضافی در خلال معدن کاری، بهبود کنترل جهت‌دهنده در حین معدن کاری به منظور کاهش هزینه‌های فوق‌العاده برای خطاهای ترازبندی، و گسترش سازه‌ای کارآمدتر و به سرعت برای پوشش‌های از پیش ساخته می‌باشد.

ماشین‌آلات گمانه‌زنی تونل در خاک

پیشرفت‌های فناوریانه اخیر برای تونل‌زنی در خاک در برگیرنده TBM متعادل کننده فشار زمین (رجوع به شکل ۶،۲) و TBM سپر گل روان (آبکی) (رجوع به شکل ۶،۳) می‌باشد. این روش‌ها به طور هم زمان حفاری و سطح تونل را با ایجاد یک محفظه مجزا (تیغه جداساز) که سطح را از بقیه تونل جدا می‌سازد پشتیبانی می‌کنند. این فن‌آوری‌های پیشرفته خطرات تونل‌زنی در خاک‌های اشباع شده از جمله مسائلی که به خاک‌های رونده در سطح، نشست قابل توجه در زمین سست، و فشار بیش از حد آب مربوط می‌گردند بسیار زیاد کاهش می‌دهند. در گذشته، تونل‌زنی با ماشین‌آلات برای تونل‌های عمیق تحت فشارهای بالای آب بدون استفاده از هوای فشرده در تونل میسر نبود - پروسه‌ای پر هزینه با مشکلات ایمنی و ریسکی قابل توجه. به طور نسبی، فن‌آوری‌های گل روان و فشار زمین به شدت نشست و آسیب‌های مربوطه را به حداقل می‌رسانند، سرعت حفاری را افزایش داده، و هزینه را کاهش می‌دهند. در نتیجه، تونل‌های بیش از پیش بزرگ‌تر برای ساخت در شرایط خاک ضعیف ایمن و اقتصادی شده‌اند و این نوع تونل‌زنی را میسر می‌سازند تا به راه‌حل‌های پایدارتر برای حمل و نقل و سایر نیازهای زیرساختی کمک نمایند.

روش‌های حفاری متوالی

روش‌های حفاری متوالی (SEM) شامل برنامه‌های کاربردی متعددی از قبیل روش جدید تونل‌زنی اتریشی و روش پوشش بتن پودر شونده می‌باشند که بر تلفیق سنگ یا خاک حفاری شده در سازه پشتیبانی تونل‌ها تکیه دارد (FHWA, ۲۰۰۹). طراحی SEM شامل تنش کاهنده حساب شده با آماده‌سازی زمین اطراف تونل تا حداکثر حد ممکن به سبب تغییر شکل کنترل شده می‌باشد. این روش‌ها مستلزم تعهد هم به فلسفه طراحی و هم به روش ساخت که بسیار زیاد وابسته به روش مشاهده‌ای است می‌باشد. پشتیبانی اصلی اولیه تونل با در نظر گرفتن ویژگی‌های بار - تغییر شکل که مناسب با شرایط موجود زمین است طراحی می‌شود؛ سرعت نصب و راه‌اندازی مورد نیاز بر اساس مقدار و سرعتی که در آن تغییر شکل‌های زمین گسترش می‌یابد می‌باشد. پوشش مقدماتی پشتیبانی اولیه را در جریان ساخت میسر می‌سازد، که از فروریزی سقف جلوگیری می‌نماید. ابزاربندی به منظور مونتورینگ و نظارت بر تغییر شکل‌ها در سامانه پشتیبانی اولیه و به منظور آگاهی از تغییرات مورد نیاز در طراحی پشتیبانی و توالی حفاری نصب می‌شود. تونل به طور متوالی حفاری و پشتیبانی می‌گردد، و توالی‌های حفاری می‌تواند متنوع باشد. پشتیبانی دائمی معمولاً (اما نه همیشه) یک پوشش بتنی درجا ریخته می‌باشد. SEM می‌تواند در حفاری‌های هم کم عمق و هم عمیق بکار بسته شود، اما در هر دو مورد اثرات تغییر شکل بر سازه‌های اطراف و سطح نیاز

به بررسی دارد.

پشتیبانی زمین در SEM می‌تواند در زمان واقعی انتخاب و یا بهینه شود تا با شرایط زمین که در طول ساخت آشکار گشته‌اند مطابقت یابند. این ویژگی برای پشتیبانی شرایطی با کمترین مطلوبیت که در ترازبندی ایجاد می‌شود مطلوب است و در تضاد با سامانه پشتیبانی از پیش تعیین شده که تغییر در شرایط همراه ترازبندی را در نظر نمی‌گیرند می‌باشد. میزان و هزینه مواد مورد نیاز برای پشتیبانی زمین بدین سان می‌تواند کاهش یابد. با این همه، این رویکرد محدودیت‌های خاص خود را داراست: تغییر مداوم طرح پشتیبانی ممکن است بهره‌وری خدمه ساخت را کاهش دهد و ساخت پروژه را به تعویق اندازد. مضافاً بر این‌که، فرآیندهای تصمیم‌گیری مورد استفاده در SEM بستگی به اطلاعاتی دارد که به راحتی در دسترس نیستند (برای مثال، آنچنان که به شرایط زمین، واکنش زمین، و حرکت مربوط می‌شوند). تحقیقات و پژوهش‌هایی در این عرصه‌ها نیاز می‌باشد تا بتوان کاربرد SEM و مشارکت آن در توسعه پایدار فضای زیرزمین را افزایش داد.

فن آوری‌های حفاری بدون ترانشه (trenchless)

سیاری از فن‌آوری‌های جدید ساخت و تعمیر تأسیسات زیرزمینی در ۴۰ سال گذشته به وجود آمده‌اند به طوری که نصب، جایگزینی، و یا تعمیر تأسیسات یا مجراهای زیرزمینی را بدون حفر کردن یک ترانشه (خندق) از سطح میسر می‌سازند. اگرچه «حفاری بدون ترانشه» در تونل‌های مته‌ای (حفر با مته) بزرگ‌تر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، این عبارت معمولاً به فن‌آوری‌هایی در مقیاس تأسیسات شهری اشاره دارد تا تأسیسات تونل جاده‌ای، مترو و یا خط آهن. فن‌آوری‌های حفاری بدون ترانشه راه‌حل‌های نوینی را برای کاهش اختلالات و بی‌نظمی‌های سطح در برنامه‌ریزی بلندمدت و کوتاه مدت، طراحی، و راه‌اندازی سامانه‌های زیرزمینی معرفی می‌نماید. این امر به خصوص مطابق با واقع است وقتی این فناوری‌ها به صورت عمومی تر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تعاریف فن‌آوری‌های بدون ترانشه در کتاب‌ها و گزارشات (مثال، کرامر و همکاران، ۱۹۹۲؛ تامپسون، ۱۹۹۳؛ استرین، ۲۰۰۲، ۲۰۰۵؛ نجفی و گوخاله، ۲۰۰۵)، مجموعه مقالات کنفرانس‌های متعدد (مثال، ۲۰۱۰، ISTT)، ژورنال‌ها (مثال، بروچ و همکاران، ۱۹۸۶)، و مجلات موجود می‌باشد.^{۲۱} شکل ۶،۷ فن‌آوری‌های بزرگ حفاری بدون ترانشه و کاربردهای آنها را نشان می‌دهد. از آنجایی که بسیاری از پیشرفت‌های فن‌آورانه بر روی تجهیزات بهتر و یا فرآیندهای جدید متمرکز می‌شوند، درک و آشنایی کامل این فرایندها به لحاظ طراحی و کاربرد به دلیل تصویب این مقوله به تأخیر افتاده است. اطلاعات بیشتر در مورد این تکنولوژی‌ها مستقیماً از پیمانکاران نصب و راه‌اندازی، تولید کنندگان، تأمین کنندگان، و یا به واسطه انجمن‌های صنفی به دست می‌آید. این فقدان بالقوه ارتباط میان طراحان مهندسی و پیمانکاران ساخت مشکل ساز می‌باشد. علاوه بر این، قابلیت نسبتاً جدید در نصب و راه‌اندازی تأسیسات با هزینه کم در زیر صنایع همگانی کم عمق موجود بدون اختلالات و وقفه‌های اساسی برای تأسیسات و یاترافیک منتهی به ایجاد توانایی - و حتی انگیزه - برای افزایش طرح بندی ماکارانی موجود از تأسیسات همگانی می‌شود چنانکه در شکل ۱،۶ به تصویر کشیده شده است. به هر حال، این امر ممکن است با جایابی آینده زیرساخت‌های حمل و نقل و یا آب و فاضلاب تداخل پیدا کند. به عبارت دیگر، فن‌آوری‌های ساخت‌وساز این چینی ضرورت توجه به برنامه‌ریزی بلندمدت و توانایی انتخاب پایدارترین و بهترین استفاده از فضای زیرزمینی شهری را شدت می‌بخشند.

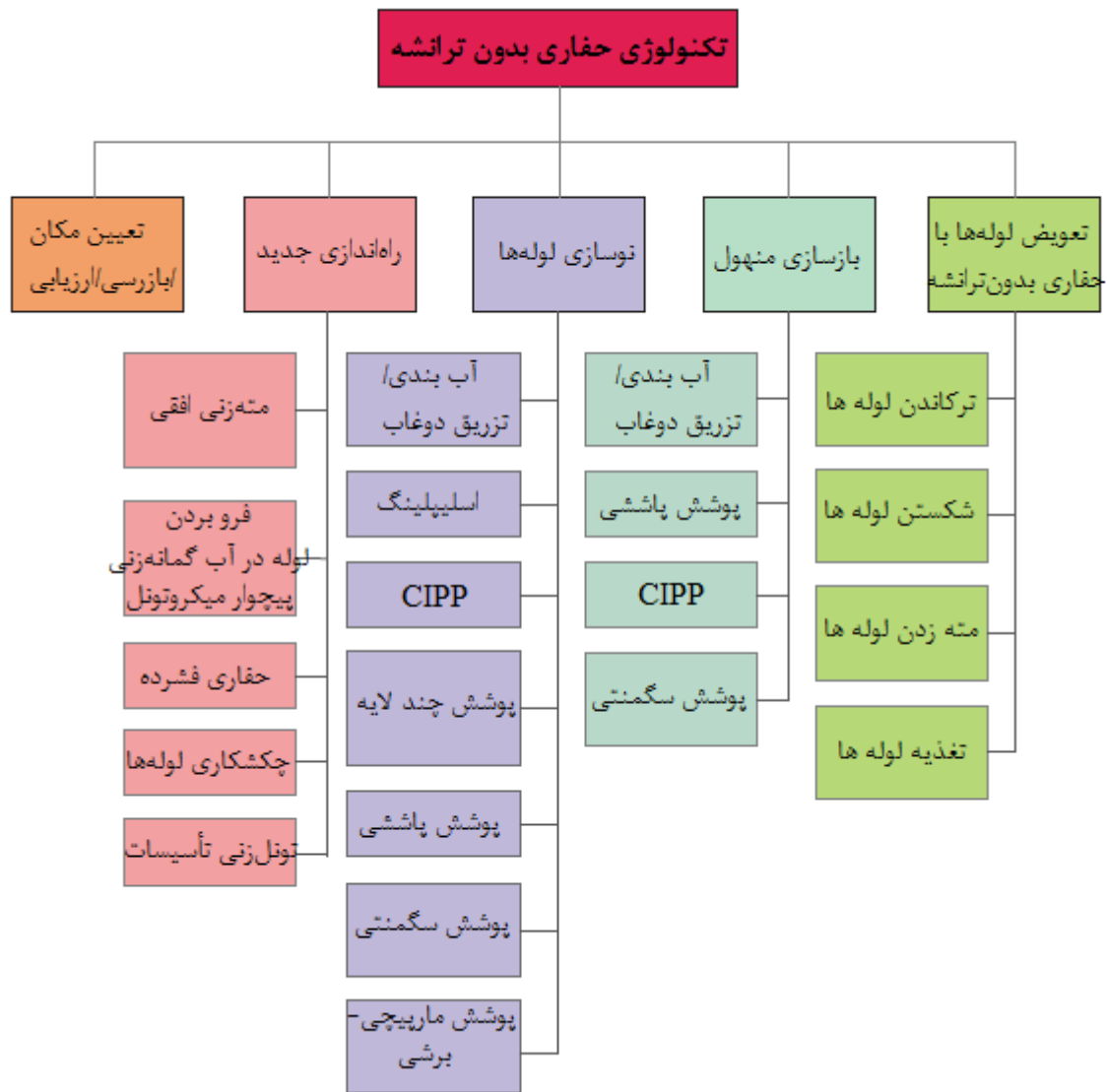
۱. مجله تکنولوژی بدون ترانشه که توسط رسانه بنجامین منتشر می‌شود، شبه جزیره، اوهایو.
۲. مجله ساخت و ساز در زیر زمین که توسط انتشارات اویدوم منتشر شد، هوستون، تگزاس.



شکل ۶-۷ ماشین آلات سپر گل روان (دوغاب) برای پروژه دسترسی سمت شرقی، کوئینز، نیو یورک. (تصویر سمت چپ) مونتاژ دو ماشین گمانه‌زنی تونل‌سازی (TBM) و چرخ دانه عقبی آنها در گودال راه‌اندازی. (تصویر سمت راست) تصویر نزدیک از سرفرز TBM.

فن آوری‌های اصلاح و بهسازی زمین

تغییر موقتی و یا دائمی خصوصیات خاک و یا آب‌های زیرزمینی در طول ساخت‌وساز زیرزمینی به منظور راحت نمودن طراحی، ساخت و یا راه‌اندازی تسهیلات غالباً ضروری و یا ثمر بخش می‌باشد. برای مثال، انجمادسازی می‌تواند به صورت موقتی خاک ضعیف و اشباع شده را تبدیل به خاک و مواد تقریباً نفوذناپذیر نماید؛ آب‌زدایی می‌تواند مشکلات ساخت را هم به لحاظ جریان آب و هم به لحاظ پایداری خاک آسان نماید؛ و تزریق دوغاب می‌تواند به منظور سفت کردن و یا تغییر دادن نفوذپذیری خاک استفاده گردد. فناوری‌های اصلاح زمین و آماده‌سازی مواد جدید مورد استفاده برای کاربردهای زمین محیطی و ژئو مکانیکی (مثلاً بیو تکنولوژی‌ها و نانو تکنولوژی‌ها؛ NRC, ۲۰۰۶) از حوزه‌های فعال در تحقیقات و برنامه‌های کاربردی میدانی می‌باشند. پیشبرد استفاده از روش‌های تثبیت شده (مثلاً تزریق دوغاب جریان سریع و متعادل نمودن نیروهای مختلف)، و همچنین گسترش رویکردها و مواد جدید، پتانسیل کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد را ارائه می‌دهد. با این همه، با توجه به فن آوری‌های حفاری بدون ترانشه، کاربرد تکنولوژی‌های جدید بهسازی زمین ممکن است از فهم نظری این روش‌ها پیش افتد، به این معنی که استفاده از این فناوری‌ها در طراحی بهینه و مطلوب نخواهد بود. تحقیق و توسعه بیشتر برای اصلاح روش‌های موجود، افزایش فهم کاربرد آنها، و فراهم آوری مهندسی بهتر، برای مثال، با بیوتکنولوژی‌های درجا، نانوتکنولوژی‌ها، و دیگر فناوری‌های اصلاح و بهسازی زمین نیاز است که می‌تواند استفاده از منابع را کاهش دهد و نسبت به بسیاری از روش‌های سنتی ساخت با محیط زیست مهربان‌تر باشد.

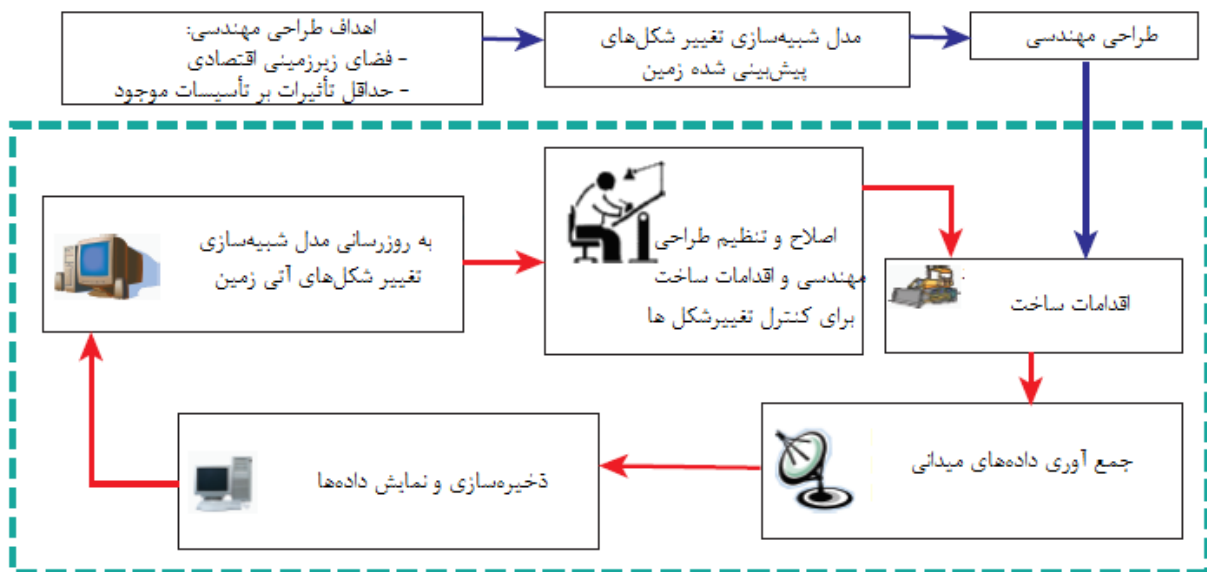


شکل ۶۸ فناوری‌های مهمی که تحت «فن‌آوری‌های بدون ترانشه» گروه بندی شده‌اند. CIPP نگهداری لوله در محل را در نظر می‌گیرد.

نظارت بر جریان ساخت

برنامه‌های ژئوتکنیکی و نظارت بر ساخت، مبنای درک پاسخ زمین به حفاری و تأثیرات ساخت بر سازه‌های موجود و محیط زیست طبیعی را ارائه می‌دهند. نظارت بر ساخت ممکن است شدیدتر و کامل‌تر از نظارت بر کار زیرساخت‌ها باشد، اما معمولاً مدت زمان کوتاه‌تری است (اغلب کمتر از پنج سال). ابزارهای نظارت و مونی‌تورینگ ممکن است در طول ساخت‌وساز در معرض شرایط سخت قرار گیرند و باید دارای استحکام بیشتری باشند. نظارت بر رفتار تسهیلات زیرزمینی و محیط اطراف در طول ساخت به تأمین ایمنی، ارزیابی عملکرد، معتبرسازی طراحی، و آگاهی از تغییرات ضروری طراحی کمک می‌نماید. شکل ۶۸، برای مثال، سطح جزئیات ممکن با استفاده از اسکن لیزری برای نظارت بر پیشرفت حفاری را نشان می‌دهد. تغییرات در تصویر در طول زمان اطلاعاتی را در خصوص پیشرفت کار ارائه می‌دهد بلکه می‌تواند اطلاعاتی را درباره اثرات حفاری بر، مثلاً، زیرساخت‌های همان حوالی عرضه نماید. نظارت بر حجم و فشار آب و کیفیت هوا و آب به حفظ منابع آب‌های زیرزمینی و کیفیت هوای بالا و پایین سطح زمین کمک می‌نماید. پیمانکاران عموماً بر فرایندها و عملیات ساخت نظارت دارند و آنها را تحلیل می‌نمایند (مثلاً، استفاده از نوبت کاری، خرابی تجهیزات، تعمیر یا جایگزینی، کارگذاری پشتیبان زمین، حجم نخاله و ...)

مواد حفاری، و جذب دوغاب) تا فرصت‌های بهبود کارایی‌ها را شناسایی کنند.^{۷۱} پیمانکاران همچنین به صورت مستمر بر گازهای زیرزمین (مثلاً متان، مونوکسید کربن، سولفید هیدروژن) در حفاری‌ها نظارت دارند.



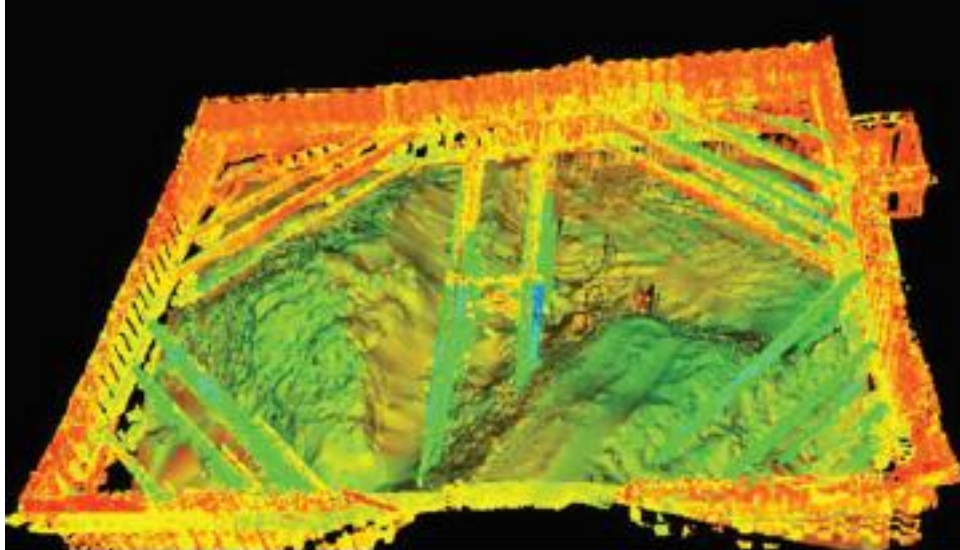
شکل ۶-۹ داده‌های نظارتی به صورت مداوم به سمت طراحی ارتقاء یافته و ساخت باز خورد می‌شوند.

استفاده از سنسورها برای اندازه‌گیری جانشین‌سازی‌های ژئوفیزیکی و سازه‌ای ساختارها، پروژه‌ها، و یا عملیات‌های مجزا در عمل به خوبی تثبیت شده است (برای مثال، رجوع کنید به دونیکلیف، ۱۹۹۳)، و مهندسان همواره قابلیت خود را در استفاده از این فناوری‌ها به روش‌هایی هر چه خلاقانه‌تر ارتقاء می‌دهند. با این وجود، فرض اصلی این گزارش نیاز به یک سامانه از رویکردهای سامانه‌ای است، که دلالت بر نیاز به ایجاد سامانه‌های یکپارچه دارد که بتوانند شرایط سامانه شهری را مونیتور کنند. اطلاعات در خصوص تمامی عناصر یک سامانه می‌تواند در طول تمامی فازهای چرخه حیات آنها به دست آید، که امکان مشاهده اثرات حاصل از تغییرات ملاحظه شده در یک عنصر سامانه‌ی بر دیگر عناصر سامانه‌ی را میسر می‌سازد. جمع‌آوری داده‌ها از سامانه‌های زیرزمینی به صورت یک کار منفرد و مجزا پر هزینه می‌باشد، و بنا بر این بهترین حالت این است که داده‌های مفید و مؤثر در هر زمان که عملیات زیرزمین این فرصت را به دست می‌دهد جمع‌آوری گردند. دهه گذشته تحولی را در توسعه و گسترش سنسورها، تکنولوژی‌های حسگر، و زیرساخت‌های فن‌آوری اطلاعات به منظور مجاز ساختن سامانه‌های نظارتی یکپارچه که امکان بازخوردهای به موقع را برای طراحان فراهم می‌سازند به خود دیده است. شکل ۶،۹ نشان می‌دهد که یک حلقه بازخوردی این چنینی ممکن است چگونه باشد.

فرصت‌ها برای پیشبرد نظارت و مونیتورینگ در ساخت در برگیرنده ابزارهایی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های نظارتی زمان واقعی و دقیق و مفصل در جریان عملیات تجهیزات ساخت می‌باشد. مثلاً، داده‌های عملیاتی سرفرز (برای مثال، گشتاور، توان، فشار موتور، نفوذ به ازای هر چرخش، نیروهای کاتر دیسکی، سرعت چرخش، درجه حرارت یاتاقان، و محل دیسک) آگاهی از فرایندهای حفاری، در شرایط زمین‌شناسی خاص را افزایش می‌دهند. به شیوه‌ای مشابه، اندازه‌گیری مداوم حجم، وزن، و میزان پیشرفت جابجایی نخاله و خاک اضافی از جمله شاخص‌های با اهمیت در کنترل جابجایی و نشست زمین می‌باشند (رجوع به کادر ۶،۳ برای مثال). مزایای انجام این کار برای یک مدتی بازشناخته شد، لیکن قابلیت به‌کارگیری - توسط ابزارهای عملی - این داده‌های گردآوری شده همچنان در حال ظهور است (برای نمونه، به کادر ۶،۴ مراجعه کنید). دیگر فرصت‌ها و موقعیت‌ها از پیشرفت‌ها در تصویربرداری سطح زمین و پردازش تصویر نتیجه می‌گردد. جابجایی‌های سطح زمین حاصل از سطح کل حفاری در طول زمان، برای مثال، می‌تواند با استفاده از سامانه‌های تصویربرداری جایگزین، مبتنی بر لیزر،

۱. این اطلاعات غالباً ویژگی پیمانکار را بررسی می‌کنند و لزوماً با مالک در میان گذاشته نمی‌شود.

و یا عکاسی ثبت گردد (رجوع به شکل ۶،۷). برخی ویژگی‌های زمین شناختی می‌توانند به صورت خودکار از اسکن‌ها تعیین گردند. این داده‌های بصری با داده‌های روش عددی مرسوم به منظور توسعه مشخصات و نقشه‌های چون ساخت (as-built) برای اهداف آرشیو یکپارچه می‌شوند.



شکل ۶-۱۰ نمونه‌ای از اسکن لیزری برای نظارت بر پیشرفت حفاری. عکس از Y. Hashash.

به عنوان یک روند کلی، پیشرفت‌ها در نظارت بر ساخت از اندازه‌گیری‌های فیزیکی در تعداد محدودی از نقاط دور گردیده و به سمت شبکه‌های حسگر با اتصال بی‌سیم و توزیع گسترده، و به سمت تکنیک‌های اسکن فضایی در حال پیشروی می‌باشند. این داده‌ها امکان بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت و افزایش ایمنی در کار را به پیمانکاران می‌دهند (رجوع به شکل ۶،۱۰). یکپارچه‌سازی داده‌ها از پروژه‌های متعدد می‌تواند طراحی پیشرفته، پیش‌بینی عملکرد، و شناخت خصوصیات مواد زمین‌شناسی و ساختمان‌های غشایی را تسهیل نماید. نظارت برای افزایش ایمنی نیز دارای اهمیت بیشتری می‌گردد همانطور که تسهیلات زیرساختی کم عمق تر و با قطر بزرگ‌تر (مثلاً تونل‌ها و ایستگاه‌ها) به طور فزاینده‌ای برای موقعیت‌های شهری در نظر گرفته می‌شوند.

فن آوری‌هایی برای مدیریت دارایی مؤثر

قابلیت به راه انداختن و حفظ زیرساخت‌های زیرزمینی در درازمدت برای پایداری آن و برای پایداری سامانه بزرگ‌تری که به آن تعلق دارد الزامی است. تمامی سامانه‌های ساخته شده باید مسائل مربوط به تعمیر و نگهداری را ملحوظ دارند به ویژه آنهایی که برای دهه‌ها یا قرن‌ها کار کرده‌اند. حفظ و نگهداری زیرساخت‌های زیرزمینی، از بعضی جهات، قابل قیاس است با حفظ و نگهداری یک ناوگان فرسوده از صنعت هواپیما از طریق استفاده از روش‌های غیر مخرب ارزیابی و تعمیر. سامانه‌های زیرساختی پایدار می‌باید برای تأمین انعطاف‌پذیری و به منظور همساز بودن با فناوری‌های به سرعت در حال تغییر، استانداردهای جدید ایمنی و سلامت، و ضروریات و نیازهای فرهنگی در حال تغییر طراحی شوند - به عبارت دیگر، پایداری وابسته به قابلیت در نظر گرفتن تحولات اجتماعی و فناورانه می‌باشد. برای مثال، خطوط لوله زیرزمینی می‌توانند دوباره مورد استفاده قرار گیرند در صورتی که اندازه، شرایط، و ترازبندی آنها برای نیازهای جدید مناسب باشد. سامانه‌های تولید گاز کم فشار می‌توانند تبدیل به سامانه‌های گاز طبیعی پر فشار گردند، برای مثال، توسط لغزاندن لوله‌های جدید درون لوله‌های قدیمی. سامانه‌های لوله کشی زیرزمینی موجود از انواع گوناگون می‌توانند با ارائه اتصالات فیبر نوری به منازل و مشاغل همساز شوند (و بوده‌اند).

کادر ۶۳

نظارت بر ساخت در سامانه خط آهن ریل متقاطع، بریتانیا

سامانه‌ی از ۲۱ کیلومتر تونل ریلی دو کاناله در زیر لندن (بریتانیا) در حال ساخت است تا سامانه‌های ریلی شبکه موجود را گسترش دهند.^a مونیتورینگ گسترده داده‌های زمان واقعی و مدیریت داده‌های متمرکز از بخش‌های مهم و حیاتی کنترل ریسک و فرایندهای، برای مثال، نظارت بر پیشرفت ساخت و کنترل حرکت زمین، نشست سطح زمین، و فقدان گنجایش و حجم محسوب می‌شوند (رینولدز، ۲۰۱۰، a, b). برای مثال، برای کنترل استخراج و متناسب‌سازی میزان ساخت پوشش، یک سامانه اندازه‌گیری وزن نخاله استخراجی بر روی حمل‌کننده ثابت نخاله (نوار نقاله) که در امتداد TBM حرکت می‌کند را معین می‌کند، و اسکن ویدئویی و لیزری نخاله بر روی نوار نقاله به صورت یک روش وزن‌کشی مکمل (اما کمتر قابل اعتماد) کنترل می‌گردد (رینولدز، ۲۰۱۰، b). سامانه مدیریت اطلاعات ساخت زیرزمینی (UCIMS) تمامی داده‌های حاصل از ابزارهای ساخت و ژئوتکنیکی و نظارت بر یک منبع متمرکز را یکجا جمع می‌کند. قراردادهای بازرسی گودال حفاری در جریان استخراج را می‌طلبند که از آن میزان حفاری (متنه زنی) و حجم و فشار جریان آب می‌تواند ارزیابی شود و مشکلات زمین‌شناسی پیش‌بینی گردد. در برخی موارد، بازرسی ژئوفیزیکی پیش از حفاری انجام می‌گیرد تا شرایط مشکل‌ساز را پیش‌بینی نماید.

^a رجوع به <http://www.crossrail.co.uk/tunnelling/>.

در کوتاه مدت، راه‌اندازی و حفظ و نگهداری زیرساخت‌های زیرزمینی یک سرمایه‌گذاری سالیانه قابل توجه‌ای را طلب می‌کند. بازرسی بسیاری از فرم‌های زیرساخت‌های زیرزمینی دشوار و یا هزینه‌بر می‌باشد. بسیاری از لوله‌کشی‌های زیرزمینی، برای مثال، به شخص اجازه ثبت بازرسی‌های مستقیم را نمی‌دهند، و پیدا کردن لوله‌های (مثلاً برای گاز، نفت، یا آب) تحت فشار خراب موجب اختلالات اساسی و خسارات درآمدمی‌گردد. زیرساخت‌های ریلی زیرزمینی (به ویژه سامانه‌های مترو با کاربری بالا) چالش‌های خاصی را موجب می‌شوند که مربوط به انجام بازرسی‌ها و نوسازی‌ها می‌شود. در مقایسه با دیگر شکل‌های زیرساخت‌های زیرزمینی، تونل‌های جاده‌ای احتمالاً به خوبی حفظ و نگهداری می‌شود چرا که فضاهای داخلی به آسانی دیده می‌شوند - مشکلات احتمالاً با سرعت بیشتری شناسایی می‌گردند. بسیاری از زیرساخت‌های زیرزمینی، با این وجود، می‌توانند در طول دهه‌ها تحت حفاظت و نگهداری قرار گیرند. بسیاری از مسائل مربوط به فرسودگی، تعمیر و نگهداری، و مسائل عملیاتی در تسهیلات زیرزمینی به دلیل، مثلاً، نفوذ آب‌های زیرزمینی در تسهیلات و یا خوردگی ناشی از آب‌های زیرزمینی در سازه‌های تسهیلاتی اتفاق می‌افتد. مواد جدید برای آب‌بندی سازه‌های زیرزمینی و یا خود چسبی نشستی‌ها یاترک‌ها به دور نگه داشتن آب‌های زیرزمینی از سازه‌ها کمک می‌نماید، و طراحی نوآورانه می‌تواند زه‌آب را وارد مفاهیم زیبایی‌شناسی و یا انرژی به نفع تسهیلات نماید. همچنین شایان ذکر است که تنها مسئله بهبود مدیریت دارایی جمع‌آوری داده‌های بیشتر نیست، بلکه جمع‌آوری داده‌های ارزشمند و مقرون به صرفه می‌باشد که در این صورت به صورت مؤثر تجزیه و تحلیل می‌شوند تا اطلاعات مفید برای هدایت تصمیمات در خصوص تعمیر و نگهداری، بازسازی، و جایگزینی جمع‌آوری شوند.

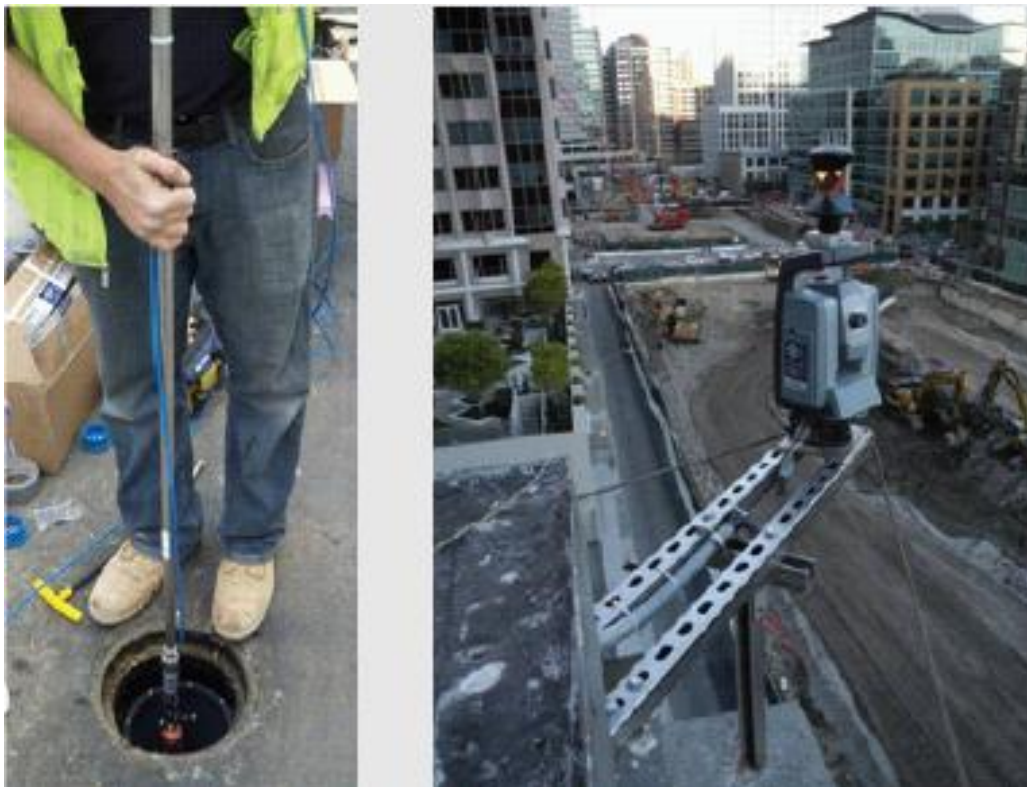
کادر ۴

ابزارهای دقیق شبکه‌ای برای مرکز حمل و نقل ترانسبی، سانفرانسیسکو، کالیفرنیا

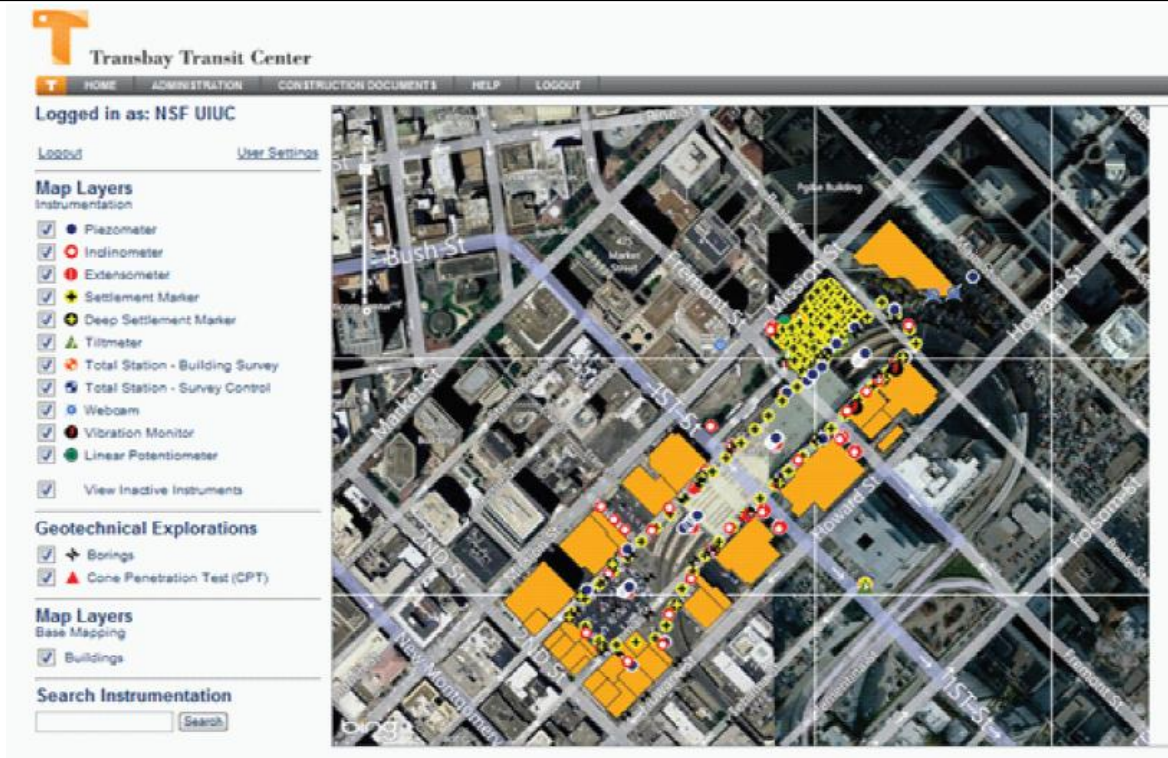
مرکز حمل و نقل ترانسبی (TTC) <http://transbaycenter.org>، پروژه‌ای ۲ میلیارد دلاری است که یک مرکز حمل و نقل منطقه‌ای مدرن را جایگزین ترمینال کنونی ترانسبی در مرکز شهر سانفرانسیسکو می‌نماید که ۱۱ سامانه حمل و نقل منطقه‌ای و شهری را به هم متصل می‌سازد و ایستگاه نهایی قطار پر سرعت از لس‌آنجلس خواهد بود. ساخت TTC نیاز به حفاری رو باز به عمق ۶۰ فوت، عرض ۱۸۵ فوت، و طول ۱۵۰۰ فوت در خاک نسبتاً نرم در مجاورت چندین ساختمان بلند مرتبه و کوتاه مرتبه از جمله یکی از بلندترین ساختمان‌ها در سان فرانسیسکو دارد.

این حفاری با چنین مقیاسی در سواحل غربی ایالات متحده بی‌سابقه است و برنامه نظارتی گسترده‌ای را در بر می‌گیرد تا به کاهش بی‌نظمی‌ها در تسهیلات مجاور کمک نماید. این پروژه مدرن‌ترین سنسورهای درجا که در عمق خاک‌های زیرین، و همچنین ساختمان‌ها و تسهیلات اطراف، و دیگر زیرساخت‌ها قرار می‌گیرند را به خدمت می‌گیرد (رجوع به شکل ۱). این حسگرها واکنش خاک و زیرساخت‌ها به اقدامات ساخت را اندازه‌گیری می‌کنند. دوربین‌ها به منظور گرفتن تصاویر پیوسته از ساخت‌وساز مورد استفاده قرار می‌گیرند. میکروفون‌ها بدون معطلی دوربین‌ها را به سمت منبع ناگهانی صدا متوجه می‌سازند. اطلاعات برای سنسورها و تجهیزات تصویربرداری به صورت بی‌سیم در ذخیره‌سازی ابری (پردازش ابری) جریان می‌یابد و از هر نقطه در جهان از طریق خط اتصال مبتنی بر وب و دارای کلمه عبور که تحلیل‌کننده جهانی نامیده می‌شود

قابل دستیابی است (رجوع به شکل‌های ۲ و ۳). تحلیل‌کننده جهانی تمامی مسائل و جریان‌های داده‌ای که به صورت خودکار هشدارها را از طریق ایمیل و ارسال پیام موبایل دریافت می‌کند را هم‌گذاری می‌کند. این اطلاعات به وسیله فضای مجازی تویتر کامل می‌شوند که به موجب آن پرسنل پیمانکار و مهندسين تیم طراحی توضیحات مختصر اقدامات ساخت را ارسال می‌کنند - که بدین سان ثبت مراحل ساخت را به انجام می‌رسانند که بعدها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.



(سمت چپ) قرار دادن یک شیب سنج درجا با شبکه‌های بی‌سیم. (سمت راست) دوربین توتال استیشن اتوماتیک به همراه دوربین و کانون/گره بی‌سیم اختصاصی برای اندازه‌گیری مستمر حرکات اهداف قرار گرفته بر زیرساخت‌ها در اطراف سایت (عکس‌های گرفته شده با ژئو ابزارها).



اطلاعات حسگر مبتنی بر ابر (پردازش ابری) تحلیل کننده جهانی و رابط مستندات برای TTC. طراحی و اجرا توسط Arup North America Ltd. سازمان مرجع حمل و نقل ترانسبی، سان فرانسیسکو، کالیفرنیا.



شبکه بی سیم پروژه TTC برای انتقال تصویر مراحل ساخت و داده‌های مؤثر. دوربین‌های توتال استیشن خودکار که با رنگ سبز نشان داده شده‌اند به صورت گره‌های بی سیم برای شبکه بی سیم پروژه اختصاصی استفاده می‌شوند. طراحی و اجرا توسط Arup North America Ltd برای سازمان مرجع حمل و نقل ترانسبی، سان فرانسیسکو، کالیفرنیا.

نگهداری نامناسب به تازگی توجه عمومی را به خود جلب نموده است البته به لطف گزارش‌های متعدد در خصوص وضعیت زیرساخت‌های آمریکا (مثال، ۲۰۰۹، ASCE). افزایش توجه و رسیدگی به مشکلات ایجاد شده به واسطه فرسودگی زیرساخت‌ها منجر به سرمایه‌گذاری در فن‌آوری‌های پیشرفته برای بازرسی و نوسازی شده است. بسیاری از بازرسی‌ها در حال حاضر می‌تواند به صورت کنترل از راه دور با استفاده از ربات‌های داخل لوله رو، «پیگ‌زنی‌ها» بازرسی خطوط لوله، و یا حتی دستگاه‌های شناور آزاد که برای «شنیدن» و یافتن نشتی‌ها یا حفره‌های گازی در طول لوله عبور می‌کنند انجام گردد و این کار اطلاعات درباره نرخ جریان و خصوصیات لوله‌ها از جمله محل شیرها و اتصالات لوله را ارائه می‌دهد. تشخیص نقص و خرابی از راه دور از طریق کابل‌های الکتریکی و فیبر نوری می‌تواند موقعیت و ماهیت این عیوب را مشخص نماید. مفهوم نظارت حتی با افزایش علاقه‌مندی به «سازه‌های هوشمند» فراتر می‌رود (مثال، واده‌اوان، ۲۰۰۷)، که در آنها حسگرهای بی‌سیم برای مونیتر نمودن سلامت سازه و عملکرد بلندمدت وجود مختلف یک سازه قرار داده می‌شوند. با این همه، چالش‌های استفاده از سنسورها در طول دهه‌ها همچنان سخت و دشوار است. محیط سخت و خشن زیرزمین می‌تواند موجب فرسودگی سریع آنها در یک دوره زمانی نسبتاً کوتاه شود (مثال، هولت و همکاران، ۲۰۰۹؛ استاجانو و همکاران، ۲۰۱۰). اتصال رادیویی محدود و برق در زیرزمین نیز می‌تواند مشکلی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم باشد (مثال، بنت و همکاران، ۲۰۱۰)، و پیشرفت‌های فناورانه سریع در زمینه حسگرهای بی‌سیم می‌تواند در کمتر از یک دهه سنسورهای موجود را تقریباً منسوخ سازد. پیشرفت‌های قابل توجه‌ای در این حوزه نیاز می‌باشد تا تصور کاملی از سازه‌های زیرزمینی هوشمند حاصل شود.

پرداختن به کمبود بسیار زیاد در تعمیر و نگهداری برای پایداری سامانه‌های شهری دارای اهمیت است و رویکردی چندگانه را می‌طلبد. مشوق‌های قابل توجه‌ای برای سرمایه‌گذاری در بازرسی، نوسازی، و جایگزینی زیرساخت‌ها، و همچنین برای توسعه فن‌آوری‌هایی که ابزارهای مقرون به صرفه ارائه می‌دهند نیاز می‌باشد تا اختلالات و بی‌نظمی‌ها در تجارت و زندگی شهری را به حداقل برسانند. تسهیلات زیرزمینی جدید می‌باید با بررسی بیشتری نسبت به تحلیل‌های هزینه‌ای چرخه حیات (رجوع به فصل ۵) طراحی و ساخته شوند به طوری که طرق بازرسی، تعمیر، پایداری، تاب‌آوری، و ملاحظات پایان عمر مفید را در نظر می‌گیرند.

تکنولوژی‌های نوین که هزینه‌های عملیات و نگهداری تسهیلات زیرزمینی را کاهش می‌دهند، آنها را ایمن‌تر می‌سازند، و عمر مفید آنها را افزایش می‌دهند تأثیر بزرگی بر هزینه‌های آتی و قابلیت اطمینان عملیاتی از تسهیلات زیرزمینی دارا می‌باشند. نیازهای پژوهشی بنیادی برای درک بهتر خوردگی و دیگر مکانیزم‌های فرسودگی هم برای مواد مورد استفاده و هم برای مواد جدید و برای توسعه روش‌های آزمون ارتقاء یافته غیر مخرب احساس می‌گردد. نیازهای تحقیقاتی مورد استفاده در برگیرنده ارتقاء مستمر فن‌آوری‌های خاص بازرسی، ارزیابی، نوسازی، و جایگزینی می‌باشد - از جمله روش‌هایی برای به روزرسانی تسهیلات زیرزمینی مورد استفاده برای برآوردن انتظارات کنونی از سلامت، ایمنی، و آسایش. گزینه‌های طراحی و برنامه‌ریزی بهتر به منظور استفاده مجدد از زیرساخت‌های شهری موجود و ایجاد گزینه‌های چند منظوره برای آینده (مثلاً مفاهیم جدید در طراحی برای تسهیلاتی که نوسازی و یا مقاوم‌سازی برای افزایش عمر یا تغییر کاربری را آسان‌تر بپذیرند) نیز امکان پایداری را افزایش می‌دهند.

۱. یک چنین دستگاهی با تکنولوژی‌های ناب Ltd تولید می‌گردد. این دستگاه بنا بر گزارش‌ها می‌تواند در خطوط لوله فعال تا بالای ۱۲ مایل مستقر شود و نشتی‌ها و سوراخ‌ها را با هدایت پالس‌های صوتی که به گیرنده‌های متصل به لوله‌ها در مکان‌های مشخص انتقال می‌یابند شناسایی کند. محل این نشتی‌ها و مک‌های گازی با آنالیز زمان ورود پالس‌ها به گیرنده‌ها مشخص می‌شود (تکنولوژی‌های ناب، ۲۰۱۲).

فن‌آوری اطلاعات

این بخش در خصوص مسائل گسترده‌تری از یکپارچه‌سازی عملیات‌های سامانه زیرزمینی به همراه بافت اجتماعی و زیرساختی کل یک منطقه به بحث می‌پردازد. زمانی که این یکپارچه‌سازی به درستی انجام پذیرد، می‌تواند استفاده از تسهیلات را بهینه سازد، که اطمینان می‌دهد نیازهای عملیاتی و نگهداری برآورده می‌شوند، و ارائه انتظارات اجتماعی را افزایش می‌دهند. برای مثال، یکپارچه‌سازی سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی و سطحی می‌تواند جریان آهسته وسایل نقلیه، کاربران و ساکنان، و باربری را برای کل منطقه تضمین کند. به صورتی مشابه، سامانه‌های تونلی انتقال مؤثر فاضلاب هم زمان با چرخه‌های روزانه مصرف آب در یک شهر عمل می‌کنند. آگاهی موقعیتی برای توسعه، عملیات، تعمیر و نگهداری، مدیریت یکپارچه سامانه‌های شهری دارای اهمیت و ارزش می‌باشد. جامعه به طور فزاینده‌ای متکی بر سامانه‌های حسگر شبکه‌ای، از راه دور، خودکار، و الکترونیکی می‌باشد تا بتواند بر فعل و انفعالات نظارت نماید و در آگاهی‌رسانی سامانه‌های تصمیم‌گیری با محوریت انسانی مؤثر باشد؛ با این وجود، این سامانه‌های جمع‌آوری داده‌ها محفوظ از خطا و شکست نیستند.

سامانه‌های حسگر متنوعی به منظور اندازه‌گیری بسیاری از عوامل عملکرد فضا و محیط زیرزمینی ایجاد شده‌اند، که همگی در تلاش برای آگاهی و تأثیرگذاری بر تصمیم‌گیری‌ها در خصوص عملیات‌های زیرزمینی و ایمنی می‌باشند - برای مثال در سامانه‌های ریلی زیرزمینی (بنت و همکاران، ۲۰۱۰) و سامانه‌های توزیع آب (شینوزوکا و همکاران، ۲۰۱۰). عواملی مانند کیفیت هوا و آب، سطح سر و صدا، بارترافیک، درجه حرارت، انسجام سازه‌های سامانه‌های پشتیبانی، پیچ و مهره‌های شل در پوشش‌ها، خوردگی بتن مسلح، نشست آب، جریان ترافیک، علائم کنترل، و تغییرات ناشی از حوادث بسیار شدید (مثلاً زمین لرزه، انفجار، آتش‌سوزی) از زمره مسائلی می‌باشند که باید کنترل گردند. قابلیت کنترل و نظارت بر چنین عواملی برای پایداری و تاب‌آوری زیرساخت‌ها حیاتی است، اما تلاش‌های نظارتی جاری نمی‌توانند به صورت گسترده و کافی به منظور ارائه تصویری مناسب از عملکرد یک سامانه زیرساختی کامل به کار گرفته شوند.

از آنجایی که سامانه‌های انتقال داده‌های عملیاتی «دائمی و ماندگار» می‌باشند، دلایل و محرک‌هایی برای سرمایه‌گذاری در سامانه‌های مقاوم وجود دارد. اگرچه زیرساخت‌های تکنولوژی اطلاعات پشتیبانی و سنسور به منظور مقرر ساختن حفظ و نگهداری نسبتاً محدود به بهترین حالت از قابلیت کنونی طراحی خواهند شد، همچنین می‌باید قابل اطمینان و دقیق، دارای کالیبراسیون خودکار، دارای اندازه کوچک، با قیمت‌گذاری مناسب، ساده و آسان در راه‌اندازی و کنترل، و ارتقاء یافته در فواصل زمانی منظم باشند. انتظار می‌رود که سامانه‌های حسگر بی‌وقفه برای سال‌ها اطلاعات را تهیه کنند و در برابر گرد و خاک، آلاینده‌ها، رطوبت، و جریان‌های الکتریکی اتفاق و ناخواسته مقاومت کنند، و در رضایت‌بخش‌ترین حالت، بدون معطلی خرابی و نقص را گزارش دهند. سامانه‌های پایدار ایجاب می‌کنند که نقص یک سنسور خاص کل سامانه را دچار مشکل نسازد. نیروی برق لازم برای راه‌اندازی سنسورها باید از طریق دستگاه‌های برق قابل تعویض تأمین گردد یا زمانی که اندازه‌گیری انجام می‌گیرد از راه دور انجام گردد (مثلاً یک سنسور غیر فعال و کنش پذیر)، و یا توسط «مهار» انرژی از محیط سنسور (مثلاً ارتعاشات محلی، جریان سیال) به دست آید. افزون بر این، سنسورها می‌باید در برابر خرابکاری یا آسیب‌های تصادفی مقاوم گردند. طول عمر بسیاری از سامانه‌های حسگر، با این وصف، مشخص نمی‌باشد.

بازیابی داده‌ها که امکان دریافت زمان واقعی یا نزدیک به واقعی و تفسیر داده‌ها را میسر می‌سازد برای تصمیم‌گیری‌های عملیاتی با اهمیت می‌باشد. بسیاری از چالش‌های همانند که در انتقال اطلاعات مربوط به ساخت مطرح می‌گردد نیز برای انتقال داده‌ها و اطلاعات عملیاتی وجود دارد. سامانه‌های سیم‌بندی شده انتقال داده‌ها که نیاز به خطوط اختصاصی دارند قابل اطمینان می‌باشند اما می‌تواند هزینه بر باشد (به‌ویژه در تونل‌های طویل)، و برای هر مکانی مناسب نمی‌باشند. تعداد سنسورهای مورد استفاده محدود می‌باشد به اینکه چند سنسور می‌توانند سیمی باشند. استفاده از انتقال بی‌سیم داده‌ها به تازگی افزایش یافته است، که به واسطه پیشرفت‌ها در دسترسی پروتکل اینترنت بی‌سیم، شبکه‌های محلی بی‌سیم (LANها)،

و گسترش خدمات تلفن همراه حاصل گردیده است. انتقال بی سیم داده‌ها از هزینه سیم کشی جلوگیری می‌کند، اما انتقال داده‌ها به طور چشمگیری در زیرزمین تنزل می‌یابد و فضا را محدود می‌سازد، به ویژه در تونل‌های طویل. انتقال بی سیم داده‌ها نسبت به نقض‌های امنیتی آسیب‌پذیر می‌باشد که می‌تواند عملکرد سامانه را به خطر اندازد (استاجانو و همکاران، ۲۰۱۰). اطلاعات مبتنی بر مکان و موقعیت (مثلاً داده‌های سامانه موقعیت یابی جهانی [GPS]) می‌تواند موقعیت عناصر سامانه که به تعمیر نیاز دارند را نشان دهد، اطلاعات زمان واقعی در خصوص شرایط در زیرزمین را تقویت کنند، و نقشه موقعیت دستگاه‌های تعمیر و نگهداری و حسگر خودکار را رسم نماید، لیکن علائم سلولی و GPS در زیرزمین به سختی دریافت می‌شوند.

علاوه بر اپراتورهای زیرساخت، برخی کاربران زیرساخت‌های زیرزمینی (مثلاً مسافران راه آهن) به شدت وابسته به مکان و موقعیت خدمات (خدمات مبتنی بر مکان) می‌باشند و به دسترسی‌های سهل و آسان عادت نموده‌اند. توسعه بیشتر فن‌آوری‌های مبتنی بر مکان که انتقال بی‌وقفه و یکپارچه از روی زمین به زیرزمین را میسر می‌سازند افرادی را که خواستار استفاده از چنین عملکردی می‌باشند راترغیب و تشویق می‌نماید. مضافاً بر اینکه، اطلاعات زمان واقعی سفر (برای مثال، اطلاعات ورود و خروج) بر روی صفحه نمایش‌های مسطح در مغازه‌های کوچک در داخل و یا نزدیک سامانه‌های حمل و نقل کوچک، و یا از طریق ارسال پیام و اعلام‌های ایمیل به دستگاه‌های موبایل، می‌تواند به کاهش ازدحام و شلوغی در ایستگاه‌های حمل و نقل و اطراف آنها کمک نماید (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

فرصت‌های بسیار زیاد دیگری برای توسعه سنسورها و سامانه‌های یکپارچه جدید برای تقویت عملکرد سامانه‌های حمل و نقل زیرزمینی به قوت خود باقی است. برای مثال، فن‌آوری‌هایی که از تصاویر دوربین‌های امنیتی برای ارزیابی سازه‌های بهره می‌جویند سودمند و ثمر بخش می‌باشند. قطارهای انتخابی و یا وسایل نقلیه حفظ و نگهداری می‌توانند با دوربین‌های سرعت بالا و یا اسکنرهای لیزری برای مستندسازی دوره‌ای شرایط تونل‌ها تجهیز گردند و می‌توانند با استفاده از الگوریتم‌های استدلال تصویر برای ارزیابی تغییرات در سازه‌ها مقایسه شوند.

مدیریت دارایی و داده‌های ارتباط و قابلیت‌های تحلیلی

جریان‌های پیوسته داده‌های عددی و بصری می‌توانند بر عملیات‌های روزانه، تعمیر و نگهداری، و پیش‌بینی عملکرد بلندمدت زیرساخت‌ها و برنامه‌های عملیات‌ها مؤثر باشند. با این وصف، تفسیر جریان‌های بزرگ داده‌های تصویری بصری و عددی در زمان واقعی و یا نزدیک آن می‌تواند بر اپراتورهای انسانی غلبه کند. اطلاعات مهم که نیاز به ساز و کار دارند ممکن است از دست بروند. روش‌ها و سامانه‌های خودکار به منظور تفسیر این داده‌ها و گزارش مشکلات به یک اپراتور عملیات مطلوب و حفظ و نگهداری سامانه‌های زیرزمینی را افزایش می‌دهند. تکنولوژی‌های مدیریت داده‌های تقویت شده می‌توانند به درک عملکرد زیرساخت‌های زیرزمینی به عنوان بخشی از سامانه شهری بزرگ‌تر کمک نمایند و امکان پیش‌بینی وابستگی‌های متقابل و تداخلی که بر عملکرد و کیفیت خدمات تأثیر می‌گذارند را به برنامه‌ریزان می‌دهند. تکنولوژی‌های مدیریت داده‌ها از قبیل فرآیندهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) (مثال، اسمیت و تاردیف، ۲۰۰۹) ارزیابی تأثیر ساخت‌وساز جدید بر تأسیسات سامانه‌های موجود در جزئیات بزرگ را ممکن می‌سازند، تأثیر سامانه‌های موجود بر ساخت‌پذیری یک پروژه جدید را ارزیابی می‌کنند، و سامانه‌های حسگر مناسب برای سامانه‌های جدید و بازسازی شده را به صورت بخشی از یک سامانه شهری یکپارچه در میان سامانه‌ها طراحی می‌نمایند. با این همه، اگرچه این روش‌ها بسیار مهم می‌باشند، اما تکنولوژی‌های بکار گرفته شده ممکن است منسوخ گردند، و محدودیت‌های بودجه‌ای به‌روزرسانی‌های داده‌های ضروری و دسترسی را چالش برانگیز می‌سازند. برخی اطلاعات می‌باید محفوظ بمانند. همکاری بخش خصوصی - عمومی ممکن است برای ارتباط، تحلیل، مدیریت، و دسترسی به اطلاعات سامانه گسترده لازم و ضروری باشد.

مستندسازی سامانه‌های تیک و استاندارد سوابق موردی مرتبط با زیرساخت‌های زیرزمینی می‌تواند به گسترش درک بنیادی از فرآیندهای حفاری و پشتیبانی کمک نماید. در واقع، سوابق موردی روشی ارزشمند برای فراگیری در خصوص فضای زیرزمینی می‌باشد چرا که آنها وضعیت کار را نشان می‌دهند، و اطلاعاتی را که فرضیات و مدل‌ها را معتبر می‌سازند و یا رد می‌کنند ارائه می‌دهند. آرشیو داده‌ها و سوابق مرتبط با مشخص‌سازی سایت برای توسعه، طراحی، عملیات و نگهداری، بازسازی، استفاده مجدد، و از رده خارج کردن زیرساخت‌ها امکان ارتقاء برنامه‌ریزی و مدیریت آتی را فراهم می‌آورد به گونه‌ای که پس از گردآوری داده‌ها پایداری را به صورت طولانی مدت ارتقاء می‌دهد.

امنیت اطلاعات

حفاظت، نگهداری، و حفظ یکپارچگی داده‌ها در برابر مسامحه، خرابکاری، زمان، و یا کهنه شوندگی مسائل جدی و مهمی هستند که مدیریت پایدار را تهدید می‌نمایند. به دست آوردن اطلاعات زیر سطح زمین به اندازه کافی دشوار می‌باشد؛ فهرست کردن و نگهداری درست آن در طول دوره‌های طولانی (مثلاً ۵۰ تا ۱۰۰ سال و طولانی‌تر) چالشی قابل توجه می‌باشد. داده‌هایی که به صورت الکترونیکی آرشیو شده‌اند می‌توانند تنها در عرض یک دهه یا دو دهه منسوخ گردند که در آن هنگام فن‌آوری‌ها تغییر می‌کنند و رسانه‌ها و وسایلی که در آنها ذخیره می‌شوند دیگر در دسترس نیستند. از سویی دیگر، نسخه‌های چاپی کاغذی داده‌ها به مدت تقریباً یک قرن برای برخی از پروژه‌های تونلی به جا مانده‌اند، لیکن تنها در صورتی که به درستی مراقبت شوند.

امنیت داده‌ها در جریان انتقال یا ذخیره‌سازی در سامانه‌های کامپیوتری مرکزی یک نگرانی بسیار جدی محسوب می‌گردد. این داده‌ها می‌توانند توسط اشخاص غیر مجاز به قیمت آسیب به عملیات ایمن و یا بدون مشکل تسهیلات زیرزمینی قابل دستیابی، دستکاری، و یا مخدوش گردند. از آنجایی که داده‌های سنسور در آگاهی‌رسانی تصمیماتی که مثلاً بر ایمنی زندگی (برای مثال، عملیات ترافیکی، تهویه هوا) تأثیرگذارند نقش دارند، رفاه ساکنان و استفاده کنندگان زیرساخت‌های زیرزمینی وابسته به عملکرد ایمن و درست این سامانه می‌باشد. این نگرانی زمانی که سنسورها در حلقه‌های بازخوردی خودکار (از جمله سامانه‌های مدیریت و یا کنترل نظارتی ترافیک و سامانه‌های گردآوری داده‌ها [SCADA]) مورد استفاده قرار می‌گیرند شدیدتر و جدی‌تر می‌شود. خرابکاری داده‌ها بی‌درنگ می‌تواند بر عملکردهای تأسیسات زیرزمینی تأثیرگذار باشد. پیگیری دلیل این مشکلات ممکن است سخت و دشوار باشد.

همانگونه که استفاده از تصمیم‌گیری‌های خودکار و سنجش شبکه‌ای فراگیرتر می‌شود، نیاز به توسعه شبکه‌های داده‌ای امن و مکانیزم‌های صحت‌گذاری و تأیید احساس می‌شود تا از دستکاری‌ها و خرابکاری‌های مغرضانه و تصادفی داده‌ها جلوگیری گردد. مقاوم‌ترین شبکه‌ها هنوز به طور بالقوه نسبت به حملات مفرضانه آسیب‌پذیر می‌باشند و شورای تحقیقات ملی (NRC) گزارش‌های متعددی را در خصوص مسائل مرتبط با امنیت فن‌آوری اطلاعات منتشر ساخته است (مثال، NRC, ۲۰۱۰a, b). در سال ۲۰۰۷، NRC راهکاری را برای تحقیقات امنیت سایبری و دسته‌بندی‌های ارتقاء یافته تحقیقات گسترش داد که شامل محدود ساختن تأثیرات مسائل امنیتی (مثلاً طراحی سامانه‌های امن، ارزیابی امنیت)، دادن مسئولیت (مثلاً اختیار، صحت‌گذاری از راه دور)، ارتقاء استقرار طرح‌های امنیتی (مثلاً «امنیت قابل استفاده»)، بازداري (مثلاً سیاست‌ها و اقدامات قانونی)، و رویکردهای نظری، و آماده به کار برای امنیت (NRC, ۲۰۰۷) می‌باشد. تاب‌آوری می‌باید در سامانه‌های حسگر پرداخته شود، که دربرگیرنده تصمیم‌گیری‌ها با محوریت انسانی است برای مؤلفه‌های مهم برای کاهش داده‌های منسوخ شده.

فن‌آوری‌هایی که پایداری و تاب‌آوری را ارتقاء می‌دهند

این بخش به برخی از مسائل مهم و کلیدی مرتبط با اثرات پایداری و تاب‌آوری تسهیلات زیرزمینی، و به طور مشخص به اینکه چگونه پیشرفت‌های فن‌آورانه می‌توانند بهسازی‌ها را در این زمینه‌ها ارتقاء دهند می‌پردازد. بسیاری از این مسائل پیش‌تر

به شکل‌هایی در طراحی و عملیات تسهیلات زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرند، اما زمانی که در پرتو تاب‌آوری و پایداری کلی جامعه بررسی می‌گردند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شوند. مسائل دیگر، از قبیل درک و کنترل نظام‌های بسیار مرتبط سامانه‌ها، زمینه‌های جدید مطالعه با اهمیت بسیار زیاد در آینده را ارائه می‌دهند. ارتباطات و وابستگی‌های متقابل میان سامانه‌های زیرساختی مجزا و عملکرد کلی و رفاه جامعه اجتماعی و سامانه‌ها می‌باید مورد بررسی قرار گیرند.

مصالح و مواد

توسعه امکان پایداری، بررسی استفاده اقتصادی از مصالح و مواد را ایجاب می‌کند. مواد مورد استفاده، در دسترس بودن منابع آنها، فرآیندهای مورد نیاز برای ایجاد محصولات آماده برای ساخت و ساز، دسترسی بلندمدت به مواد و مصالح، پیامدهای مصرف انرژی (و اثرات کربنی)، و اثرات زیست‌محیطی بلندمدت باید بررسی گردند. برای مثال، حتی مواد مورد استفاده رایج از قبیل شن و سنگریزه به دلیل عدم دسترسی منطقه‌ای و یا تصمیمات برنامه‌ریزی و توسعه شهری ممکن است کمیاب باشند که منابع شن و سنگریزه را غیر قابل دسترس می‌سازند. بر حسب مصرف انرژی (رجوع به بخش بعدی)، بتن، یک عنصر مهم در بسیاری از شکل‌های ساخت‌وساز زیرزمینی، نیاز به سطح بالایی از ورودی انرژی برای ساخت آن دارد (که انرژی نهفته نامیده می‌شود). ثابت شده است که برخی مصالح ساختمانی رایج مورد استفاده برای محیط زیست و سلامت عمومی مضر می‌باشد (مثلاً انواع گوناگون ترکیبات آلی فرار مورد استفاده در لوله‌ها که می‌توانند سامانه آب‌های زیرزمینی را آلوده سازند، و آزیست مورد استفاده در لوله کشی سیمانی).

مواد حفاری شده از برخی پروژه‌های تونل‌زنی می‌توانند منبعی برای پروژه‌های ساخت‌وساز آن اطراف باشد. ممکن است لازم باشد که میلیون‌ها یارد مواد از محل حفاری منتقل و جابجا شود. برخی از این مواد می‌توانند منبع شن، سنگریزه، و سنگ باشند. با این همه، برخی از این مواد ممکن است به عنوان مواد خطرناک دسته‌بندی گردند و بنابراین نیاز به بررسی و نظارت خاص دارند. با این وجود، حجم زیادی از مواد برای دیگر مصارف ساختمانی مناسب می‌باشند، و یا ممکن است بخشی از چاره‌سازی برای دیگر مسائل پایداری باشد. کادر ۶،۵ مورد استفاده مجدد مواد حفاری شده از پروژه شاهراه/ تونل مرکزی بوستون را تشریح می‌کند که به اصلاح یک مرکز مواد زائد جامد کمک می‌کند و آن را به پارکی که توسط خدمات پارک‌های ملی اداره می‌شود تبدیل می‌نماید. انهدام و یا استفاده مجدد مواد حفاری شده مسئله مهمی است که توجه بیشتری را ایجاب می‌کند.

استفاده پایدارتر از مواد به معنی انتخاب گزینه‌های طراحی و ساخت زیرزمینی است که مقادیر کوچکتری از مواد را استفاده می‌کنند یا موادی با عملکرد بهتر، و یا به معنی وارد نمودن زباله‌های بیشتر یا مواد تولیدی حاصل از دیگر مصارف در طراحی است (مثلاً ژئوپلیمرهایی که عمدتاً از خاکسترهای زائد به وجود می‌آیند). هزینه‌ها و مزایای چرخه حیات، با این صف، باید در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ گردد. برای مثال، یکپارچه‌سازی سامانه‌های اولیه و دائمی پشتیبانی زمین ممکن است استفاده مصالح ساختمانی کمتر را در نظر بگیرند، اما ممکن است بر کارایی عملیات ساخت تأثیرگذارند. حداکثرسازی قابلیت زمین به عنوان بخشی از سامانه پشتیبانی، یا استفاده مجدد از مواد حفاری شده حاصل از یک پروژه و یا نزدیک آن، به افزایش بهره‌وری در استفاده یا استفاده مجدد مواد کمک می‌نماید. فن‌آوری‌های پوشش و ساخت زیرزمینی جدید نیاز می‌باشند که مصرف مصالح را کاهش می‌دهند و عملکرد بلندمدت تسهیلات را بهبود می‌بخشند. تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر نیاز به ایجاد اطلاعات بهتر و مناسب‌تر درباره جنبه‌های پایداری مصالح ساختمانی (مثلاً دسترسی، انرژی نهفته) برای طراحان دارند.

کادر ۶۵

استفاده مجدد از مواد حفاری شده از پروژه شاهراه/ تونل مرکزی بوستن

جزیره اسپکتکل در بندر بوستون (ماساچوست) محل مرکز ضایعات جامد شهری مورد استفاده تا سال ۱۹۵۹ می‌باشد. از سال ۱۹۵۹ تا ۱۹۹۳، این محل دفن زباله به صورت یک منبع فروشوی بدون پوشش به طرف بندر بوستون باقی مانده بود. مواد حفاری غیر آلوده حاصل از پروژه شاهراه تونل مرکزی بوستون (بیگ دیگ) به منظور تثبیت دامنه‌ها و پر نمودن و پوشش دار کردن این محل دفن زباله مورد استفاده قرار گرفتند تا آن را به یک مرکز تفریحی تبدیل نمایند. از سال ۱۹۹۲ مواد حفاری شده در بیشتر از ۴۴۰۰ بار کرجی به این جزیره منتقل شدند (بارنت و چین، ۱۹۹۸) و برای پوشش دار کردن محل دفن زباله یک لایه ۲ فوتی از خاک رس استفاده گردید (MassDOT, ۲۰۱۲). این پوشش یک لایه غیر قابل نفوذ ایجاد کرد که برای محافظت بارش از مخلوط شدن با زباله‌های در زیر مانده و فروشوی به داخل بندر کافی بود. خاکریزی‌های حفاری شده با لجن‌های حاصل از چندین تأسیسات کمپوست زباله در نیو انگلند مخلوط گردید تا خاک سطحی را به وجود آورد که متعاقباً محل پوشیده از گیاه شد تا به پوشش آن کمک نماید (NEBRA, ۲۰۱۲). در سال ۲۰۰۶، یک پارک ۱۱۴ هکتاری بعد از ۱۵ سال فعالیت‌های پاکسازی بازگشایی شد. این پارک توسط خدمات پارک‌های ملی اداره می‌گردد و یک مرکز اطلاع‌رسانی بازدیدکنندگان، چندین مایل مسیر پیاده روی، و یک ساحل شنا را در خود جای داده است (NPS, ۲۰۱۲).

انرژی و کربن

هزینه، قابلیت دسترسی، امنیت عرضه، و تأثیرات آب و هوایی مصرف انرژی توجه جهانی را در سال‌های اخیر به خود معطوف ساخته است، و دانشمندان و مهندسان برای توسعه حساب گره‌های انرژی نهفته شده در انواع سامانه‌های فناورانه و زیرساختی به کار گماشته شده‌اند (برای مثال، چستر و هورواست، ۲۰۱۰؛ هاموند و همکاران، ۲۰۱۱؛ سوگا، ۲۰۱۱). بدون چنین محاسبه کننده‌هایی، درک هزینه‌های درست انرژی در زیرساخت‌های زیرزمینی دشوار می‌باشد. زیرزمین گزینه‌های متعددی را برای ارتقاء بهره‌وری انرژی و بهبود تغییر آب و هوا ارائه می‌دهد که در سرتاسر این گزارش بیان می‌شوند، اما چالش‌های برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت، تعمیر و نگهداری، و دیگر چالش‌های پایداری برای درک بهتر یا ادغام در روش‌های افزایش ذخیره‌سازی انرژی زیرساخت‌های زیرزمینی به قوت خود باقی است. روش‌های کارآمدتر یا جایگزین برای حفاری یا تولید بتن - هر دو فرآیندهای مصرف انرژی - ممکن است منجر به بهره‌وری بیشتر انرژی در طی ساخت گردد.

استفاده از فضای زیرزمین نیاز به مقادیر قابل توجهی از انرژی برای تهویه، کنترل حرارت، روشنایی، تشخیص آتش، و دیگر سامانه‌ها در طول عمر تسهیلات زیرزمینی را مطرح می‌سازد. برخی از پیشرفت‌ها بهره‌وری بیشتری را میسر می‌سازند، اما هزینه‌های بالاتر نصب مانع از پذیرش آنها می‌گردد. توسعه تکنولوژی‌ها و پیکربندی‌های فضا که بهره‌وری این سامانه‌ها را افزایش می‌دهد برای اپراتورهای تسهیلات و جامعه عموماً مفید خواهد بود. وسایل روشنایی که لامپ‌هایی با مصرف انرژی کمتر را می‌پذیرند طراحی شده‌اند و برای برخی تونل‌های جدید و مقاوم‌سازی‌ها تعیین گردیده‌اند. سامانه‌های تهویه برای حداقل سازی خطر دود ناشی از آتش‌سوزی‌های بزرگ طراحی شده‌اند و بنابراین نیاز به انرژی بسیار بالاتری دارند که برای عملیات روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. حداقل ملزومات برای کنترل‌های دوره‌ای سامانه تهویه منجر به دست‌اندازهای منظم در مصرف انرژی می‌شود. با این همه، استانداردها بازبینی و تغییر می‌یابند تا مشخص کنند که آیا روش‌های تست کنترل با دشواری کمتر یا تکرار کمتر می‌توانند عملکرد ایمن را تضمین نمایند و بدین سان مصرف انرژی در طول عمر سامانه را کاهش می‌دهند. فن‌آوری‌ها و فرآیندهای جدیدی که بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهند، و توسعه پیکربندی‌های فضای کوچکتر و جدیدی که استفاده از منابع انرژی را کاهش می‌دهند، برای اپراتورهای تسهیلات و جامعه عموماً مفید خواهند بود. تسهیلات زیرزمینی می‌توانند به منظور حفظ انرژی ساخته و استفاده شوند و سامانه‌هایی ایجاد کنند که به تبادل حرارتی

زمین با مواد زمین‌شناسی زیرسطحی در زیرزمین شهری دست یابند. مطالعات قابل توجهی در خصوص مسائل مربوط به انتقال گرمای زیرزمین در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ آغاز گردید (برای مثال، گری، ۱۹۸۲؛ بلومکوئیست، ۱۹۹۹). سامانه‌های تبادل حرارتی با زمین از آن وقت در اروپا متداول و افزایش یافته‌اند (سانر و همکاران، ۲۰۰۳). به هر حال، این سامانه‌ها به طور گسترده و همه جانبه در جوامع شهری استفاده نشده‌اند، و بهره‌وری بلندمدت آنها در هنگام استفاده در نزدیکی یکدیگر ارزیابی نشده است. بررسی اثرات حرارتی و تأثیرات بلندمدت هم بر آب و هوای زیرزمین و هم بر کاربری فضای زیرزمین توجیه‌پذیر می‌باشد.

استفاده از منابع زمین گرمایی با درجه حرارت پایین‌تر می‌تواند به کاهش انتشار ویژه گازهای گلخانه‌ای به واسطه استفاده از پمپ‌های حرارتی منبع زمین یا سامانه‌های تبادل حرارتی مشابه برای ساختارهای گرمایشی و سرمایشی و آب قابل شرب و غیر قابل شرب برای استفاده‌های مسکونی کمک نماید. چنین سامانه‌هایی حرارت را از زمین به یک سازه در زمستان، و برعکس در تابستان مبادله می‌کنند، و در برخی موارد، به طور مستقیم می‌توانند در زیرسازی زیرساخت‌ها ادغام شوند. اگرچه صرفه جویی‌های انرژی می‌تواند دارای اهمیت باشد (DOE, ۲۰۱۲)، پیامدهای زیست‌محیطی وجود دارد که باید آشکار گردند، از جمله انتخاب مبردها (خنک‌کننده‌ها) (برای مثال، فورزن، ۲۰۰۵)، و اثرات بلندمدت تغییرات بالقوه درجه حرارت زمین بر سفره‌های آب و جریان آب‌های زیرزمینی، شیمی، زیگان، و بر خود زیرساخت‌های زیرزمینی. دیگر کاربری‌های زیرزمینی ممکن است در برخی مناطق به دلیل حضور «انبوه» گمانه‌های زمین گرمایی محدود گردد.

مسائل مرتبط با تولید انرژی و منابع و ذخیره‌سازی زباله‌های مرتبط با انرژی در این گزارش بررسی نگردیده است، لیکن آنها در زمینه مهندسی فضای زیرزمینی و توسعه پایدار مطرح و مناسب می‌باشند. استخراج انرژی و منابع معمول از زیر سطح زمین می‌تواند مثلاً با افزایش میزان حفاری و استخراج مؤثرتر و بهره‌ورتر گردد. تولید نفت و گاز از چاه‌های عمیق، معادن زغال سنگ، معادن اورانیوم، و اخیراً تولید گاز از تشکل‌های شیل عمیق همگی بخشی از تعامل پیچیده فضای زیرزمینی با آینده انرژی ما می‌باشند. همچنین در استفاده از ترسیب کربن و دیگر فن‌آوری‌های دفع زباله در عمق نسبتاً کم علاقمندی وجود دارد. این فن‌آوری‌ها غالباً مباحث سیاست عمومی جدی و مهمی را در خصوص اثرات واقعی و یا احتمالی زیست‌محیطی و مزیت‌های نسبی دنباله روی سیاست‌های مختلف برای حفظ انرژی و یا تولید انرژی بیان می‌نمایند. داده‌ها و تحلیل‌های مهم در حوزه عمومی غالباً نادیده گرفته می‌شوند که به درستی منافع و مسئولیت‌ها را به گزینه‌های مختلف که می‌توانند به صورت مناسب بر گزینه‌های آتی مهم در خصوص انرژی و آب و هوا مؤثر باشند اختصاص می‌دهند.

منابع غیر سنتی انرژی می‌توانند بهتر و مناسب‌تر باشند و به صورت مؤثرتری با پیشرفت‌های حاصل در تکنولوژی‌های مهندسی فضای زیرزمینی بهره‌برداری شوند. مناطق فعال به لحاظ زمین گرمایی می‌توانند، برای مثال، با حفاری (مته زنی) در سنگ‌های داغ و با استفاده از دماهای طبیعی بالا بهره‌برداری شوند تا نیروی بخار و برق را تولید کنند (دافیلد و ساس، ۲۰۰۳). منابع زمین گرمایی متداول شناخته شده پتانسیل تولید تقریباً ۹۰۰۰ MWe را دارند، و یک پتانسیل توان متوسط حدود ۳۰۰۰۰ MWe از منابع کشف نشده تخمین زده می‌شود (USGS, ۲۰۰۸). یک برآورد حدود ۵۱۸۰۰۰ MWe می‌تواند به صورت بالقوه از روش‌های زمین گرمایی غیر متعارف از جمله سامانه‌های زمین گرمایی مهندسی (EGS) تولید گردد (USGS, ۲۰۰۸). مسائلی از قبیل خوردگی حاصل از آب‌های زیرزمینی بسیار خورنده در حوزه‌های زمین گرمایی می‌باید مورد توجه قرار گیرند. به همین ترتیب، مسائل مربوط به حفظ و نگهداری و عملکرد بلندمدت برای سامانه‌های EGS به خوبی قابل درک نیستند، به ویژه با توجه به فشار بالا و میزان جریان بالا که از چاه‌های EGS انتظار می‌رود. پمپ‌های شناور قابل اعتماد با درجه حرارت بالا که برای توسعه EGS مناسب می‌باشند به عنوان یک گپ در تکنولوژی مشخص شده است (DOE, ۲۰۰۸). یکی دیگر از موانع اصلی برای استفاده از منابع زمین گرمایی نزدیکی منابع به جایی است که برق نیاز می‌باشد.

منابع

- ASCE (American Society of Civil Engineers). ۲۰۰۹. Report Card for America's Infrastructure. Reston, VA: American Society of Civil Engineers [online]. Available: <http://www.infrastructurereportcard.org/report-cards> (accessed July ۳, ۲۰۱۲).
- Barnett, C.J., and K. Chin. ۱۹۹۸. Soil contamination assessment and characterization in urban tunneling. Pp. ۷۹-۸۶ in North American Tunneling ۱۹۹۸, L. Ozdemir, ed. Rotterdam, Netherlands: Balkema.
- Barton, N.R., R. Lien, and J. Lunde. ۱۹۷۴. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics and Rock Engineering. ۶(۴):۱۸۹-۲۳۶.
- Bennett, P.J., K. Soga, I. Wassell, P. Fidler, K. Abe, Y. Kobayashi, and M. Vanicek. ۲۰۱۰. Wireless sensor networks for underground railway applications: Case studies in Prague and London. Smart Structures and Systems. ۶(۵-۶):۶۱۹-۶۳۹.
- Bickel, J.O., T.R. Kuesel, and E.H. King. ۱۹۹۶. Tunnel Engineering Handbook, ۲nd Ed. New York: Chapman & Hall.
- Bieniawski, Z.T. ۱۹۷۶. Rock mass classification in rock engineering. Pp. ۹۶-۱۰۶ in Exploration for Rock Engineering, Proceedings of the Symposium, November ۱۹۷۶, Johannesburg, Z.T. Bieniawski, ed. Cape Town: Balkema.
- Bieniawski, Z.T. ۱۹۸۹. Engineering Rock Mass Classifications. New York: Wiley. Bloomquist, R.G. ۱۹۹۹. Geothermal Heat Pumps Four Decades of Experience. GHC Bulletin (December): ۱۳-۱۸ [online]. Available: <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull۲۰-۴/art۳.pdf> (accessed June ۴, ۲۰۱۲).
- Broch, E., R. Sterling, J. Zhao, and C. Rogers, eds. ۱۹۸۶. Tunnelling and Underground Space Technology. Oxford, UK: Elsevier Science.
- Chester, M., and A. Horvath. ۲۰۱۰. Life-cycle assessment of high speed rail: The case of California. Environmental Research Letters. ۵(۱):۰۱۴۰۰۳.
- DOE (U.S. Department of Energy). ۲۰۰۸. An Evaluation of Enhanced Geothermal Systems Technology. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy [online]. Available: http://www.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/evaluation_egs_tech_۲۰۰۸.pdf (accessed July ۶, ۲۰۱۲).
- DOE. ۲۰۱۲. Geothermal Heat Pumps [online]. Available: <http://www.eere.energy.gov/geothermal/heatpumps.html> (accessed July ۶, ۲۰۱۲).
- Duffield, W.A., and J.H. Sass. ۲۰۰۳. Geothermal Energy—Clean Power from the Earth's Heat. USGS Circular ۱۲۴۹ [online]. Available: <http://pubs.usgs.gov/circ/۲۰۰۴/c1۲۴۹/> (accessed July ۱۰, ۲۰۱۲).
- Dunncliff, J. ۱۹۹۳. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, ۲nd Ed. New York: John Wiley & Son.
- ECTP (European Construction Technology Platform). ۲۰۰۵. Strategic Research Agenda for the European Underground Construction Sector, Draft, October ۲۰۰۵. European Construction Technology Platform [online]. Available: http://www.ectp.org/documentation/FA-Underground-Constructions_SRA-VISION۲۰۳۰-۲۲Nov۰۵.pdf (accessed May ۲, ۲۰۱۲).
- El Salam, M.E.A. ۲۰۰۲. Construction of underground works and tunnels in ancient Egypt. Tunnelling and Underground Space Technology. ۱۷(۳):۲۹۵-۳۰۴.
- FHWA (Federal Highway Administration). ۲۰۰۹. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements. Publication No. FHWA-NHI-۱۰-۰۳۴. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration [online]. Available: http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi۰۹۰۱۰/tunnel_manual.pdf (accessed July ۱۰, ۲۰۱۲).
- Forsén, M. ۲۰۰۵. Heat Pumps: Technology and Environmental Impact July ۲۰۰۵: Part ۱. Swedish Heat Pump Association [online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/ecolabel/about ecolabel/reports/hp_tech_env_impact_aug۲۰۰۵.pdf (accessed July ۶, ۲۰۱۲).
- Geery, D. ۱۹۸۲. Solar Greenhouses: Underground. Blue Ridge Summit, PA: Tab Books.

- Grimstad, E., and N. Barton. ۱۹۹۳. Updating the Q-System for NMT. Pp. ۴۶-۶۶ in Proceedings of International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes. Oslo: Norwegian Concrete Association (as cited in Palmstrom and Broch, ۲۰۰۶).
- Hammond, G., C. Jones, F. Lowrie, and P. Tse. ۲۰۱۱. Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy. A BSRIA (Building Services Research and Information Association) Guide BG ۱۰/۲۰۱۱. Bracknell: BSRIA.
- Hashash, Y.M.A., and R.J. Finno. ۲۰۰۸. Development of new integrated tools for predicting, monitoring and controlling ground movement due to excavations. *ASCE Practice Periodical on Structural Design and Construction* ۱۳(۱):۴-۱۰.
- Hashash, Y.M.A., Q. Fu, J. Ghaboussi, P.V. Lade, and C. Saucier. ۲۰۰۹. Inverse analysis-based interpretation of sand behavior from triaxial compression tests subjected to full end restraint. *Canadian Geotechnical Journal*. ۴۶(۷):۷۶۸-۷۹۱.
- Hoek, E. ۱۹۹۴. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal* ۲(۲):۴-۱۶.
- Hoult, N., P.J. Bennet, I. Stoianov, P. Fidler, C. Maksimovic, C. Middleton, N. Graham, and K. Soga. ۲۰۰۹. Wireless sensor networks: Creating 'Smart Infrastructure.' Proceedings of the Institute for Civil Engineering - Civil Engineering. ۱۶۲(۳):۱۳۶-۱۴۳.
- IMWS (Institute for Mechanics of Materials and Structures). ۲۰۰۹. Artificial Ground Freezing as Temporary Support in Underground Excavation. Institute for Mechanics of Materials and Structures, Vienna, Austria [online]. Available: <http://www.imws.tuwien.ac.at/en/research/researchprojects/alte-projekte/artificial-ground-freezing.html> (accessed July ۲۳, ۲۰۱۲).
- Institution of Civil Engineers (Great Britain). ۱۹۹۶. The observational method in geotechnical engineering. London New York, NY, Thomas Telford: American Society of Civil Engineers [U.S. distributor].
- ISTT (International Society for Trenchless Technology). ۲۰۱۰. ۲۸th International No-Dig Conference and Exhibition ۲۰۱۰, November ۸-۱۰, ۲۰۱۰, Singapore. Alexandria, VA: ISTT.
- Konda, T. ۲۰۰۳. Reclaiming the underground space of large cities in Japan. Pp. ۱۳-۲۳ in (Re)Claiming the Underground Space, J. Saveur, ed. Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema.
- Kramer, S.R., W.J. McDonald, and J.C. Thompson. ۱۹۹۲. An Introduction to Trenchless Technology. New York: Van Nostrand Reinhold. ۲۲۳ pp.
- Maidl, B., L. Schmid, V. Ritz, and M. Herrenknecht. ۲۰۰۸. Hardrock Tunnel Boring Machines. Berlin: Ernst and Sohn.
- MassDOT (Massachusetts Department of Transportation). ۲۰۱۲. The Big Dig: Facts and Figures [online]. Available: <http://www.massdot.state.ma.us/highway/TheBigDig/FactsFigures.aspx> (accessed July ۰, ۲۰۱۲).
- Muir Wood, A.M., A.M.M. Wood, and M.I. Brunel. ۱۹۹۴. The Thames Tunnel ۱۸۲۵-۱۸۴۲: Where shield tunneling began. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering*. ۱۰۲(۳):۱۳۰-۱۳۹.
- Najafi, M., and S.B. Gokhale. ۲۰۰۰. Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design Construction and Renewal. New York: McGraw Hill.
- NEBRA (New England Biosolids and Residuals Association). ۲۰۱۲. Putting Biosolids to Use: Spectacle Island, Boston Harbor [online]. Available: <http://www.biosolids.com/Headlines/pdf/NEBRACaseStudySpectacleIsl.pdf> (accessed July ۰, ۲۰۱۲).
- Nicholson, D., C.M. Tse, and C. Penny. ۱۹۹۹. The Observational Method in Ground Engineering— Principles and Applications. Report ۱۸۰, CIRIA, London.
- NPS (National Park Service). ۲۰۱۲. Island Facts: Spectacle Island. Boston Harbor Islands National Recreation Area [online]. Available: <http://www.nps.gov/boha/historyculture/facts-spec.htm> (accessed July ۰, ۲۰۱۲).
- NRC (National Research Council). ۲۰۰۶. Geological and Geotechnical Engineering in the New Millennium. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۰۷. Toward a Safer and More Secure Cyberspace. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۰a. Toward Better Usability, Security, and Privacy of Information Technology: A Report of a Workshop. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۰b. Wireless Technology Prospects and Policy Options. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC. ۲۰۱۲. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. Washington, DC: The National Academies Press.

- Palmstrom, A., and E. Broch. ۲۰۰۶. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology*. ۲۱(۶):۵۷۵-۵۹۳.
- Parriaux, A., L. Tacher, V. Kaufmann, and P. Blunier. ۲۰۰۶. Underground Resources and Sustainable Development in Urban Areas. Paper No. ۷۰۰. IAEG ۲۰۰۶ Engineering Geology for Tomorrow's Cities: ۱۰th International Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, September, ۶-۱۰, ۲۰۰۶, Nottingham [online]. Available: http://www.iaeg.info/iaeg۲۰۰۶/PAPERS/IAEG_۷۰۰.PDF (accessed July ۱۰, ۲۰۱۲).
- Peck, R.B. ۱۹۶۹. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique* ۱۹(۱):۱۷۱-۱۸۷.
- Pure Technologies. ۲۰۱۲. SmartBall® for Water and Wastewater Pipelines [online]. Available: http://www.puretechltd.com/products/smartball/smartball_leak_detection.shtml (accessed July ۳, ۲۰۱۲).
- Reeves, H. ۲۰۱۰. Attributed 3D Geologic Models in the UK and Their Application to Planning and the Sustainable Development of Underground Space. Presentation at the First Meeting on Underground Engineering for Sustainable Underground Development, June ۱, ۲۰۱۰, Washington, DC.
- Reynolds, P. ۲۰۱۰a. Monitoring Contract for Crossrail. TunnelTalk: Direct by Design, June ۲۰۱۰ [online]. Available: <http://tunneltalk.com/Crossrail-Jun۱۰-Monitoring-contract-award.php> (accessed July ۲, ۲۰۱۲).
- Reynolds, P. ۲۰۱۰b. Settlement Control Measures. Crossrail Geotechnical Series ۳: TunnelTalk: Direct by Design, August, ۲۰۱۰ [online]. Available: <http://tunneltalk.com/Crossrail-Aug۱۰-Settlement-control-measures.php> (accessed July ۲, ۲۰۱۲).
- Sanner, B., C. Karytsas, D. Mendrinou, and L. Rybach. ۲۰۰۳. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics* ۳۲(۴-۶):۵۷۹-۵۸۸.
- Schmidt, B.S., and Y.M.A. Hashash. ۱۹۹۸. Seismic rehabilitation of two immersed tube tunnels. Pp. ۵۸۱-۵۸۶ in *Tunnels and Metropolises: Proceedings of the World Tunnel Congress '۹۸*, April ۲۵-۳۰, ۱۹۹۸, Sao Paulo, Brazil, A. Negro, and A.A. Ferreira, eds. Rotterdam: Balkema.
- Sellers, E.J., M. Kotze, L. Dipenaar, and M. Ruest. ۲۰۱۰. Large scale concrete cube blasts for HSBM model. Pp. ۳۸۹-۳۹۸ in *Rock Fragmentation by Blasting*, J.A. Sanchidrian, ed. London: Taylor and Francis [online]. Available: <http://www.aelminingservices.com/pdfs/whitepapers/AELwhite-paper-on-Rock-Fragmentation-by-Blasting.pdf> (accessed July ۱۰, ۲۰۱۲).
- Shinozuka, M., D. Karmakar, P.H. Chou, S. Kim, H.R. Kim, and L. Fei. ۲۰۱۰. Non-invasive acceleration-based methodology for damage detection and assessment of water distribution system. *Smart Structures and Systems*. ۶(۵-۶):۵۴۵-۵۵۹.
- Skempton, A.W., and M.M. Chrimes. ۱۹۹۴. Thames Tunnel: Geology, site investigation and geotechnical problems. *Geotechnique* ۴۴(۲):۱۹۱-۲۱۶.
- Smith, D.K., and M. Tardif. ۲۰۰۹. *Building Information Modeling: A Strategic Guide for Architects, Engineers, and Real Estate Asset Managers*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Soga, K. ۲۰۱۱. Embodied energy and gas emissions of geotechnical infrastructure. Pp. ۵۹-۷۴ in *Geotechnics and Earthquake Geotechnics Towards Global Sustainability Vol. ۱۵*, S. Iai, ed. Dordrecht: Springer.
- Stajano, F., N. Hoult, I. Wassell, P. Bennett, C. Middleton, and K. Soga. ۲۰۱۰. Smart bridges, smart tunnels: Transforming wireless sensor networks from research prototypes into robust engineering infrastructure. *Ad Hoc Networks* ۸(۸):۸۷۲-۸۸۸.
- Stein, D. ۲۰۰۲. *Technical Information System: Rehabilitation and Maintenance of Drains and Sewers*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Stein, D. ۲۰۰۵. *Trenchless Technology for Installation of Cables and Pipelines*. Bochum: Stein & Partners.
- Sterling, R.L., J. Anspach, E. Allouche, and J. Simicevic. ۲۰۰۹. Encouraging Innovation in Locating and Characterization Underground Utilities. Report S۲-R۰۱-RW. Transportation Research Board [online]. Available: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp۲/shrp۲_S۲-R۰۱-RW.pdf (accessed July ۱۰, ۲۰۱۲).
- Thompson, J. ۱۹۹۳. *Pipejacking and Microtunnelling*. London: Chapman & Hall. ۲۲۷ pp.

- USGS (U.S. Geological Survey). ۲۰۰۸. Assessment of Moderate- and High-Temperature Geothermal Resources of the United States. Fact Sheet ۲۰۰۸-۳۰۸۲ [online]. Available: <http://pubs.usgs.gov/fs/۲۰۰۸/۳۰۸۲/pdf/fs۲۰۰۸-۳۰۸۲.pdf> (accessed July ۶, ۲۰۱۲).
- Wadhawan, V.K. ۲۰۰۷. Smart Structures: Blurring the Distinction between the Living and the Nonliving. Monographs of the Physics and Chemistry of Materials No. ۶۵. New York: Oxford University Press.
- Zhang, L., J.Q. Li, K. Zhou, S. Datta Gupta, M. Li, W. Zhang, M.A. Miller, and J.A. Misener. ۲۰۱۱. Design and Implementation of Traveler Information Tool with Integrated Real-Time Transit Information and Multimodal Trip Planning. Paper #۱۱-۲۳۸۳. Transportation Research Board Annual Meeting ۲۰۱۱ [online]. Available: <http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=۱۰۹۲۴۴۵> (accessed August ۱, ۲۰۱۱).

فصل هشتم

ظرفیت سازمانی، آموزشی، پژوهشی، و نیروی کار

پرداختن به پایداری سطح خاصی از تعهد و ظرفیت اجتماعی را برای انجام کار لازم می‌طلبد. در این فصل مسائل مرتبط با ظرفیت جامعه برای به‌کارگیری مهندسی زیرزمین به عنوان بخشی از ابزارهای افزایش پایداری شهری را بررسی می‌نماییم. وظیفه این کمیته در برگیرنده بررسی مزایای توسعه زیرزمین، تعیین تحقیق برای سرمایه‌گذاری بر فرصت‌های مهندسی زیرزمین، نظارت بر هدایت مسیر تحقیقات برای افزایش ظرفیت انسانی مورد نیاز، و بررسی محرک‌ها برای توسعه زیرزمین که پایداری را تقویت می‌کنند می‌باشد. در تعمق این وظیفه، کمیته دریافت که مدل‌های موجود برای آموزش، پژوهش، و روال معمول در حوزه‌های مربوط به مهندسی زیرزمین برای میدان دادن به اقدامات تک منظوره و مستقل محتمل‌تر است از تلاش‌های میان رشته‌ای که پایداری را ارتقاء می‌دهند. نیروهای بازار در ایالات متحده غالباً از رشد ظرفیت نیروی کار مورد نیاز و توسعه شهری و زیرساختی حمایت می‌کنند، اما پیشرفت‌ها اغلب اوقات با نیاز به حل چالش‌های مهندسی خاص در محیط‌های خاص بدون توجه لازم به منافع و تأثیرات اجتماعی گسترده‌تر ایجاد و هدایت می‌گردند. سامانه‌های سازمانی موجود به منظور توسعه انواع ظرفیت‌های مورد نیاز برای توسعه پایدار طراحی نمی‌شوند. یک چارچوب جدید مورد نیاز است که ظرفیت اجتماعی و انواع تحقیقات، آموزش، پرورش، و شیوه‌های مورد نیاز برای برنامه‌ریزی پایدار شهری و توسعه زیرساخت‌ها را تقویت نماید.

ظرفیت اجتماعی از ظرفیت نیروی کار مهم‌تر است و شامل موارد ذیل می‌باشد:

- حضور و آمادگی شایسته و کافی مهندسان، برنامه‌ریزان، معماران، تکنیسین‌های آموزش دیده و با تجربه، و دیگر افراد متخصص برای تدریس، تحقیق، طرح ریزی، طراحی، ساخت، راه‌اندازی، و حفاظت تسهیلات زیرزمینی مفید و تاب‌آور؛
 - تعهد مناسب و کافی دولت، دانشگاه، و صنعت برای توسعه ظرفیت پژوهشی مورد نیاز برای نگه داشتن ایالات متحده در صف اول پیشرفت‌های علمی و فناورانه که مرتبط با ساخت‌وساز شهری زیرزمینی و استفاده از آن فضا می‌باشند (از جمله سامانه‌های مکانیکی و الکتریکی که بخشی از زیرساخت‌های زیرزمینی می‌باشند)؛
 - شهروندان و تصمیم‌گیرندگان بسیار آگاه که از پیامدهای بلندمدت استفاده از فضای زیرزمین بر کیفیت زندگی در مناطق شهری آگاه می‌باشند؛ و
 - برنامه‌ریزی سازمانی مناسب و کافی، ساختارهای سیاسی، آموزشی و پژوهشی که طرح‌های بینا-رشته‌ای و متقابل بخشی را برای بهینه ساختن پایداری و تاب‌آوری از طریق استفاده از تسهیلات زیرزمینی فراهم می‌نمایند.
- فصل‌های قبلی در مورد همکاری‌های بالقوه و تحقق یافته مهندسی و زیرساخت‌های زیرزمینی سخن می‌گویند، و حوزه‌های پژوهشی موارد اقدامی بسیاری به طور کلی مشخص می‌گردند. این کمیته برای اولویت‌بندی این موارد به کار

گماشته نشده است چرا که برای انجام این کار نیاز به ارزیابی پیچیدگی بیشتر نسبت به آنچه که این کمیته با توجه به مقیاس و میزان وظیفه خود می‌توانست بدست آورد می‌باشد. در عوض، کمیته مذکور موضوعات مشترک و متداول مرتبط با تغییرات در رویکردها برای برنامه‌ریزی شهری و آموزش، پژوهش، و شیوه مهندسی زیرزمین که برای ارتقاء پایداری شهری ضروری است را مشخص می‌نماید. در این فصل، کمیته مذکور مجموعه‌ای از مشاهدات، نتیجه‌گیری‌ها، موارد اقدامی، و پژوهش لازم جهت فراهم ساختن سازنده‌ترین و مؤثرترین استفاده از مهندسی زیرزمین را برای توسعه شهری پایدار ارائه می‌نماید. نتیجه‌گیری‌ها تا حد زیادی بر چارچوب‌های سازمانی متمرکز می‌شود که از ظرفیت اجتماعی حمایت می‌کنند، بدون اینکه احتمال دستیابی به اهداف پایداری کمتر گردد.

برنامه‌ریزی رسمی هماهنگ

مشاهده: هماهنگی استراتژیک اندکی در توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی در ایالات متحده وجود دارد.

نتیجه‌گیری ۱: مدیریت و پشتیبانی اداری رسمی هماهنگ زیرساخت‌های زیرزمینی به عنوان بخشی از سامانه یکپارچه، چند بعدی، رو زمینی و زیرزمینی سامانه‌های شهری برای پایداری شهری مهم و حیاتی است.

اقدامات بالقوه:

- a. تعیین مسئولیت‌های مرتبط با پشتیبانی رسمی برای زیرساخت‌های زیرزمینی به عنوان بخشی از سامانه شهری کل به واسطه برنامه‌ریزی و عملیات هماهنگ، توسعه فناوریانه پرورش یافته، و قانون‌گذاری محلی و منطقه‌ای.
- b. توسعه و ترغیب به استفاده از یک سامانه برای جمع‌آوری، آرشیو، و دستیابی داده‌های سازگار که توسط تمامی صاحبان و اپراتورهای تسهیلات جهت کمک به تصمیم‌گیری‌ها قابل استفاده باشد.

تحقیق:

- a. بررسی مناسب‌ترین رویکردهای فنی و اداری در دولت فدرال به منظور تسهیل مدیریت هماهنگ زیرزمین به عنوان بخشی از یک سامانه شهری کل. تشخیص و هماهنگی با تحقیقات در حال انجام در این زمینه، برای مثال، که توسط هیئت تحقیقات حمل و نقل شورای تحقیقات ملی (NRC) که به پروژه‌های جاده‌ای منتسب می‌باشد انجام پذیرفت.
- b. انجام اسکن فن‌آوری از اینکه چگونه کشورها و شهرهای سرتاسر جهان اطلاعات زمین‌شناختی و سازه‌های زیرزمینی را جمع‌آوری، مدیریت، قابل دستیابی، و استفاده می‌نمایند.

زیرساخت‌های شهری به صورت کلی، و زیرساخت‌های زیرزمینی به صورت ویژه‌تر متعلق به سازمان‌های خصوصی و دولتی بسیاری می‌باشند و توسط آنها ساخته، اداره، و نگهداری می‌شوند تا بتوانند حتی به تعداد بیشتری از سهامداران و ذی‌نفعان خدمت کنند. این گروه‌های مختلف هر کدام ممکن است ماموریت‌های خاص خود را داشته باشند، که به دلیل اهداف متفاوت می‌باشد، و ابزارهای مالی مختلفی را دارا هستند، که همگی آنها متفاوت و متباعد می‌باشند. پیمانکاران استخدام شده برای ساخت و یا راه‌اندازی زیرساخت‌های زیرزمینی ممکن است تعهد بلند مدتی برای زیرساخت‌ها یا منطقه نداشته باشند. ممکن است فرصت اندکی برای صاحبان و اپراتورها به جهت شناخت وابستگی‌های متقابل میان سامانه‌های زیرساختی مربوطه آنها وجود داشته باشند.

بررسی وابستگی‌های متقابل مکانی و عملکردی زیرساخت‌های رو زمینی و زیرزمینی در طول تمامی فازهای چرخه حیات زیرساخت‌ها برای پایداری شهری دارای اهمیت می‌باشد. با این همه، کنوانسیون‌های فرهنگی و سیاسی در ایالات متحده تمایل به تعیین، طرح‌ریزی سامانه‌اتیک، و سازمان دهی تنها املاک و مستغلات و حقوق هوا بر روی سطح یا بالای آن دارند،

که عملاً املاک ارزشمند و قابل تجدید زیر پاهایمان را نادیده می‌گیرند (به غیر از استخراج منابع). افزون بر این، از دهه ۱۹۸۰، ایالات متحده از یک هسته فدرالی چند سازمانی هماهنگ برای حفظ تحقیقات و تکنولوژی آمریکا در صف اول توسعه زیرزمین بی‌بهره بوده است. توسعه زیرساخت‌ها، به طور کلی، و توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی، به طور خاص، در ایالات متحده از سازماندهی شدن توسط بخش‌ها و بدون هیچ گونه سازمان مامور و مسئول و یا سازمان دیگری در تشکیلات فدرال که برای هماهنگی در میان بخش‌ها اختصاص یافته باشد رنج می‌برد. این هماهنگی می‌تواند منتهی به مدیریت بهتر سرمایه‌گذاری‌های پژوهشی و کاهش ریسک در سرمایه‌گذاری‌های فدرال گردد (به ویژه سرمایه‌گذاری پروژه‌های بزرگ زیرساختی)، و همچنین می‌تواند با سرمایه‌گذاری توسط ایالات و شهرداری‌ها هماهنگ شود. برنامه‌ریزی یکپارچه، جامع و سه بعدی ضروری و لازم می‌باشد.

تمامی سطوح دولت در بسیاری از مناطق کشور با مشکلات اقتصادی دست و پنجه نرم می‌کنند که یک هنجار و اصل اقتصادی برای سال‌های آینده خواهد بود. سامانه کمک مالی بین دولتی که بسیاری از سامانه‌های زیرزمینی را ممکن ساخته است ممکن است قادر به سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های زیرزمینی چنانکه در گذشته انجام داده است نباشد. گسترش یک چارچوب سازمانی که الگوهای رشد پایدار را از طریق سرمایه‌گذاری‌های استراتژیک هدفمند تسریع می‌بخشد تحت شرایط اقتصادی این چنینی حتی با اهمیت‌تر می‌گردد. مدیریت اطلاعات، فن‌آوری‌های اطلاعات، و ارتباطات در تسهیل تحقیقات پیچیده اما مؤثر و طراحی، ساخت، راه‌اندازی، و مدیریت زیرساخت‌های زیرزمینی مهم و کلیدی خواهند بود.

مشاهده: نیروهای بازار در ایالات متحده از رشد ظرفیت نیروی کار و توسعه شهری و زیرساختی حمایت می‌کنند، اما غالباً در یک حالت موردی و موقت که ممکن است با پایداری شهری سازگار نباشد.

نتیجه گیری ۲. توسعه فضای زیرزمین به عنوان بخشی از شهرسازی پایدار به منظور وارد ساختن بهتر شرایط خاص محل، انعطاف‌پذیری بیشتر، و نیازهای بلندمدت جامعه در طراحی سامانه زیرساختی و مدیریت بهینه چرخه حیات نیاز به ارتباط هماهنگ و گسترده با سهامداران و ذی‌نفعان دارد.

اقدامات بالقوه:

- a. ایجاد یک شبکه یا سازمان میان رشته‌ای به رهبری فدرال از سازمان‌ها و موسسات برای هدایت الگوهای پایدار در توسعه زیرساخت‌های زیرزمینی و حمایت از تحقیقات میان رشته‌ای و ارتباط یافته‌ها میان همه رشته‌ها و ذی‌نفعان. ذی‌نفعان، برای مثال، شامل طراحان، برنامه‌ریزان بلند مدت، معماران، متخصصان اِی‌مِنی، و مجموعه‌ای از متخصصان مهندسی، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، محیط زیست، و قرارداد از صنعت، دولت، و دانشگاه می‌باشند.
- b. توسعه مکانیزم‌هایی برای پژوهش و برنامه‌ریزی سه بعدی یکپارچه و جامع که حاوی مدیریت اطلاعات و فن‌آوری ارتباطات می‌باشد به منظور تسهیل تحقیقات، طراحی، راه‌اندازی، و مدیریت پیچیده زیرساخت‌های زیرزمینی.

تحقیق:

a. بررسی مدل‌ها برای تخصیص پایداری در سامانه‌های مهندسی شده سامانه‌های شهری که وابستگی‌های متقابل، آسیب‌پذیری‌ها، پیچیدگی، و سازگاری را تشخیص می‌دهند. هماهنگ ساختن تحقیقات در حال انجام در ایالات متحده و جاهای دیگر در خصوص سامانه‌های انطباقی پیچیده و مهندسی عوامل انسانی (برای مثال، وارد ساختن علوم رفتاری، عملکرد و ظرفیت انسانی، پرسنل و آموزش، و زیست‌شناسی و فیزیولوژی انسان در سامانه‌های مهندسی شده).

b. توسعه مدل‌های مفهومی تعاملات پیچیده در میان سامانه‌های مختلف (برای مثال، مکانیکی، انسانی، زیست‌محیطی) برای ارتقاء شناخت، کاهش ریسک، و مدیریت مؤثر زیرساخت‌ها در میان فن‌آوری‌های در حال تغییر، شرایط اجتماعی، و انتظارات.

c. تحقیق و بررسی رفتار دست‌اندرکاران راه‌اندازی، حفظ و نگهداری، و استفاده از زیرساخت‌های زیرزمینی در خلال سناریوهای عملیات عادی و بدترین حالت برای بهینه‌سازی رابط‌های انسانی - فنی در حالت سازگار با ارزش‌های بلند مدت. یک چارچوب سازمانی که توسعه پایدار را تسریع می‌بخشد و ظرفیت آموزشی و پژوهشی آمریکا را با در نظر گرفتن فضای زیرزمینی شهری پایدار به اندازه کافی تقویت می‌نماید مورد نیاز می‌باشد. سرمایه‌های فنی انسانی مورد نیاز در این چارچوب می‌تواند برای آوردن سازمان‌های فدرالی، ایالتی، و محلی، مهندسی و صنایع ساختمانی، و تحصیلات‌گرفته‌های دانشگاهی و محققان به زیر یک چتر توسعه یابد. توسعه فضای زیرزمین از این رو می‌تواند به واسطه برنامه‌های آموزشی و پژوهشی یکپارچه به صورت جامع مورد توجه قرار گیرد که از آموزش و تعلیم مقاطع کارشناسی، فارغ‌التحصیلی، مهندسی پیوسته فراتر می‌رود. این امر تغییرات مهمی را در ساختار اصلی برنامه‌های مدارک تخصصی مختلف در ایالات متحده شامل می‌شود از جمله برنامه‌ریزی، معماری مهندسی، مدیریت عمومی، و سیاست اجتماعی و اقتصادی - که یک مسئولیت دشوار می‌باشد. این کشور نیاز دارد به برنامه‌ریزی که فضای زیرزمین را می‌شناسند و اقتصاددان‌هایی که بهتر می‌دانند زیرساخت‌های زیرزمینی چگونه از ارائه خدمات تأسیسات حمایت می‌کنند و یک محیط شهری اقتصادی مقاوم. برنامه هیئت تحقیقات حمل و نقل NRC و برنامه ملی کاهش خطرات زلزله باید مورد مطالعه قرار گیرد تا مشخص شود که چه عناصری از آن مدل‌های سازمانی باید در یک چارچوب نهادی همانطور که در اینجا مطرح گردید گنجانده شوند. بسیار مهم است که مهندسان با عوامل اجتماعی و اقتصادی که به پایداری کمک می‌نمایند آشنا باشند، اما به همان اندازه مهم است که دیگر ذی‌نفعان درگیر در برنامه‌ریزی شهری و توسعه زیرزمین انتظارات واقع‌بینانه‌ای از مهندسی داشته باشند.

اطلاعات به اشتراک گذاشته شده در روابط میان سامانه‌های مجزا و عملکرد کلی سامانه حیاتی است، و یک هستی‌شناسی که در میان بخش‌ها و فرهنگ‌های سازمانی پذیرفته شده است برای هماهنگی و همکاری مورد نیاز می‌باشد (رجوع به کادر ۷.۱). داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده در شناخت هزینه‌های مستقیم، غیر مستقیم، و اجتماعی تصمیمات مرتبط با عناصر زیرساختی مجزا در طول چرخه حیات سامانه می‌تواند پایه و اساس برای تصمیم‌گیری‌های بهتر باشد که این تصمیم‌گیری‌ها مربوط می‌شوند به، برای مثال، عملکرد در مقابل سرمایه‌گذاری‌های مورد نیاز برای تعمیر، نوسازی، یا جایگزینی.

مشاهده: مدل‌های مالکیت پیچیده برای زیرساخت‌های زیرزمینی مسئولیت بازرسی‌های معمول، حفظ و نگهداری، تعمیرات، دستورالعمل‌ها، بودجه، تعهد و مسئولیت را مغشوش می‌سازد.

نتیجه‌گیری ۳. نیاز به آشنایی با مدل‌های کنترل و مالکیت فضای زیرزمین و گسترش دستورالعمل‌هایی برای منابع مالی و انجام بازرسی‌های ضروری دوره‌ای، حفظ و نگهداری، و تعمیر عناصر زیرساختی مجزا احساس می‌شود.

تحقیق:

a. تحلیل رویکردهای چند رشته‌ای و جامع برای بررسی شبکه پیچیده حق مالکیت، کنترل، و مسئولیت‌های مرتبط با نگهداری و ایمنی زیرساخت‌های زیرزمینی.

b. بررسی و کنترل رویکردهای چند رشته‌ای برای کمک به انتقال به مدیریت سامانه‌های مدرن‌تر.

شناخت حق مالکیت، تعهد، و مسئولیت برای فضای زیرزمین اهمیت بیشتری می‌یابد اگر مدیریت زیرساخت‌ها برای تأمین پایداری بهتر در میان پیچیدگی کامل سامانه‌های زیرزمینی به هم پیوسته باشد. ایمنی مرتبط با خرابی و نقص تأسیسات زیرزمینی همچنین نیاز به عنایت و توجه دارد. با افزایش بررسی و ارزیابی سامانه‌های کنترل نظارتی و گردآوری داده‌ها (SCADA) و آسیب‌پذیری‌های آنها، استراتژی‌های پیش‌بینی باید گسترش یابند تا حوادث و تهدیدات مستقیم نسبت به

جامعه شهری، و یا تهدیداتی که در نتیجه شکست (خرابی)های آبخاری به وجود می‌آیند را بررسی نمایند. سرمایه‌گذاری‌های گذشته در ساخت و نوسازی زیرساخت‌ها آسیب‌پذیری‌های فعلی و آتی را به دلیل بازرسی‌های نامناسب، خرابی‌های ترمیم نشده، ظرفیت سامانه‌ی ناکافی، و عدم سازگاری با تقاضاها و چالش‌های جدید افزایش می‌دهد.

پیشتازی فناوریانه

مشاهده: ایالات متحده در بسیاری از حوزه‌های علم و فن‌آوری مربوط به زیرزمین در زمانی که سرمایه‌گذاری صنعتی و فدرال در توسعه و تحقیقات مهندسی زیرزمین وجود داشت پیشتاز جهان بوده است.

نتیجه‌گیری ۴. حفظ رقابت جهانی در آموزش مهندسی زیرزمین، توسعه تکنولوژی، و عملکرد پایداری شهری، تاب‌آوری، و استاندارد زندگی در ایالات متحده را تأمین و پشتیبانی می‌کند.

اقدام بالقوه: تخصیص منابع برای آموزش میان رشته‌ای و توسعه تکنولوژی در طراحی و ساخت زیرزمین.

تحقیق: گسترش تحقیقات آمریکا که، برای مثال، تکنولوژی مواد، تکنولوژی ساخت ربات، سامانه‌های هدایت لیزری، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، و تحلیل‌های پیشرفته کامپیوتری و سامانه‌های تصویری را ارتقاء و تغییر اساسی می‌دهند که این موارد قابلیت مدل‌سازی، طراحی، برنامه‌ریزی را بهبود می‌بخشند، و ریسک مرتبط با سامانه‌های زیرزمینی پیچیده را کاهش می‌دهند (رجوع به فصل ۶ برای جزئیات بیشتر).

می‌توان ادعا کرد که دستیابی و حفظ موقعیت پیشتازی فناوریانه در مهندسی زیرزمین برای ایالات متحده به منظور به دست آوردن تمامی مزایا از تسهیلات مؤثر فضای زیرزمینی شهری الزامی نیست. ایالات متحده مطمئناً از مزایای فن‌آوری‌های توسعه یافته در دیگر جاها بهره‌مند می‌گردد، لیکن آن را در جهت منافع خود نمی‌داند که به شدت و اندازه‌ای که در حال حاضر انجام می‌گردد به تجربه و تکنولوژی‌های وارداتی تکیه و اعتماد کند. بسیاری از تسهیلات حیاتی زیرزمین به طور مشخص برای تأمین امنیت و تاب‌آوری افزون در رویارویی با حوادث بالقوه شدید یا ریسک‌ها طراحی می‌گردند. به علاوه، هر چند خارج از محدوده این گزارش است، مهندسی زیرزمین یک عامل مهم در کمک به دفاع ملی و ظرفیت انرژی است. کاهش ظرفیت فناوریانه آمریکا در مهندسی زیرزمین می‌تواند به صورت منفی در رشد اقتصادی و رقابت جهانی شرکت‌های آمریکایی دست داشته باشد.

ایالات متحده پیشگام و پیشروی جهانی در بسیاری از حوزه‌های علم و فن‌آوری برای ساخت در زیرزمین (رجوع به کادر ۷،۲) در گذشته بوده است. همکاری با محققان در موسسات آکادمیک در ۴۰ سال گذشته به جریان پیوسته داده‌ها، افزایش شناخت، و یک نیروی فارغ التحصیل با کیفیت بالا کمک می‌نماید که امکان پیشتازی به صنعت آمریکا را می‌دهد. با این همه، این پیشگامی رو به اتمام است، و جایگزین‌های اندکی آماده شده‌اند. اکثر نوآوری‌های ساخت در زیرزمین (مثلاً دیوارهای حائل (دوغاب)، لنگرهای پشت بند، ریز شمع‌ها، اختلاط عمیق خاک، تزریق سریع دوغاب، ماشین آلات تونل‌زنی تعادل فشار زمین و ماده آبکی (دوغاب)، سامانه‌های پوشش مجدد لوله‌های در جا، و بسیاری دیگر) در حال حاضر در خارج از ایالات منحنه حاصل می‌گردد.

کادر ۱-۲

مدیریت و اشتراک‌گذاری داده‌ها

وابستگی‌های متقابل مشخص ضعیف ممکن است خطرات در حال ظهور را بازنمود کنند، به ویژه در ارتباط با حوادث غیرمترقبه. برای مثال، حفظ عملکرد، حفاظت در برابر حملات، هزینه‌های بلند مدت، یا کوتاه مدت، کیفیت خدمات، یا تساوی حقوق در دستیابی و عرضه نیاز به بررسی به لحاظ فضا (منطقه آسیب دیده، ارتباط جغرافیایی با اثرات ثانویه و غیره) و زمان (تکامل زمانی اثرات و بازیابی) دارند برای اینکه طراحی یا عملیات را به حد مطلوب برسانند. ابزارهای مختلف مدل‌سازی ضرورتاً به مجموعه مختلفی از سهامداران خدمت‌رسانی خواهند کرد، اما اطلاعات گسترش یافته توسط آنها در صورتی سودمندترین خواهد بود که شکل و قالب آنها سازگار باشد و ثبت‌های زمانی و مکانی مشترکی داشته باشند. داده‌ها و مدل‌های سامانه غالباً نیاز به امنیت بالایی دارند و ابزارها باید برای اشتراک‌گذاری اطلاعات مربوط و لازم برای مطالعه وابستگی متقابل با یک جامعه کاربری هدف گسترش یابند. بی‌ثباتی‌ها و عدم قطعیت در خصوص ریشه داده‌ها اغلب اوقات در بسیاری از پایگاه‌های داده زیرساختی وجود دارد، و پروتکل‌هایی که می‌توانند اطلاعات در خصوص کیفیت، دقت، عدم قطعیت، و قابلیت اطمینان را تأمین کنند دارای اهمیت می‌باشند. به همین ترتیب، مدیریت و گزینش روند داده‌های زمان واقعی گسترده حاصل از آرایه‌های سنجش عملکرد و سامانه‌های هوشمند با اهمیت‌تر خواهند شد، همانگونه که ابزارها برای داده کاوی، پروتکل‌ها برای تولید ابرداده‌ها، و ابزارها برای پشتیبانی تفسیر سریع داده‌ها از جمله تصویرسازی خواهند بود.

کادر ۲-۲

روزگاری به عنوان پیشاز جهانی

ایالات متحده پیش‌تاز در فن‌آوری‌های زیرزمین در گذشته بوده است. برای مثال، اولین نیروگاه برق آبی کاملاً زیرزمینی در آبشار اسنو‌کوالمی، واشنگتن، در سال ۱۸۹۸ ساخته شد (PSE, ۲۰۰۹). پیشرفت‌های اصلی در ماشین آلات گمانه‌زنی تونل با سنگ‌های سخت در دهه ۱۹۶۰ به سبب تصمیم برنامه‌ریزان شیکاگو و منطقه احیای آب شهری شیکاگو بزرگ رخ داد تا تونل‌های عمیق جداساز فاضلاب را در سنگ دولومیتی مقاوم بسازند به منظور دفع فاضلاب و سرریز آب طوفان در دریاچه میشیگان (مثال، هاپگود، ۲۰۰۴). این پروژه‌ها محققان دانشگاهی را به خدمت گرفتند و منجر به رشد دانش گردید. در دهه ۱۹۷۰، تلاش‌های فشرده‌ای برای بهبود تکنولوژی ساخت در زیرزمین وجود داشت همانگونه که سازمان‌ها نیاز رو به رشد به استفاده از فضای زیرزمین در مناطق شهری را تشخیص می‌دادند، به ویژه در رابطه با مترو (با کمک مالی اداره کل حمل و نقل عمومی شهری [UMTA]) و پروژه‌های ترکیبی آب و فاضلاب (به دستور سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا [EPA]). این پروژه‌ها منجر به رهبری و پیشسازی آمریکا در فن‌آوری‌های پشتیبانی زمین (مثلاً بیختن سنگ و آسترکشی تونل) و طراحی ماشین آلات گمانه‌زنی، اختراع، و تولید و ساخت آنها گردید. با حمایت سازمان‌های فدرال از جمله تحقیقات بنیاد ملی علوم که به برنامه نیازهای ملی (RANN) اعمال شده است، UMTA، وزارت دفاع، EPA، و وزارت انرژی، ایالات متحده پیشرفت‌های قابل توجهی در فن‌آوری‌های ساخت در زیرزمین در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ ایجاد نمود. افزون بر این، نوآوری‌ها در صنایع همگانی و ساخت خط لوله از طریق مفاهیم جدید در حفاری‌های بدون ترانشه و سازگاری فن‌آوری‌های مته‌زنی مستقیم چاه نفت با تأسیسات کابلی و خطوط لوله امکانات جدید اساسی را برای تأسیسات همگانی و خطوط لوله در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ به وجود آوردند.

امروزه در ایالات متحده، همکاری صنعت و موسسات تحقیقاتی در برخی موارد برای توسعه فن‌آوری ادامه دارد، و موسسات تحقیقاتی غالباً حمایت صنعت را برای دانشجویان و تحقیقات دریافت می‌کنند. بیشتر دانش، تخصص، آموزش نیروی مهندسی، ساخت، و تولید تجهیزات که برای توسعه زیرزمین ضروری است از طریق نظارت، حل مشکلات خاص پروژه

و محل کار، استفاده گسترده از شرکت‌های ساختمانی خارج از کشور در خصوص پروژه‌ها، و همکاری با مهندسان بین‌المللی با انتصاب‌های موقت اتفاق می‌افتد. برای رقابتی ماندن، شرکت‌هایی چون پارسونز برینکرهاف برای جبران تعداد کم کالج‌ها و دانشگاه‌هایی که دانش عملی مهندسی زیرزمین را ارائه می‌دهند برنامه‌های توسعه حرفه‌ای دارند. گروه‌های صنعتی از قبیل جامعه آمریکای شمالی برای فن‌آوری حفاری بدون ترانشه (رجوع به <http://nastt.org/training>) نیز دوره‌هایی برای متخصصان در مورد موضوعات مورد هدف برگزار می‌کنند. با این وجود، این آموزش - حتی توسط کسانی که تجربه صنعتی گسترده و زیادی در این کمیته دارند - به صورت یک تعلیم گسترده دیده نمی‌شود، و همکاری‌های اندکی از سمت موسسات آموزش عالی برای این تلاش‌ها وجود دارد.

مزایا و البته محدودیت‌های مهمی در خصوص آموزش مبتنی بر صنعت وجود دارد. رقابت‌های اقتصادی در صنعت به این معنی است که دانش به دست آمده از یک شرکت خاص گرایش به ماندن در همان شرکت را دارد و حتی ممکن است از ایالات متحده خارج گردد اگر آن شرکت با تکمیل پروژه به خارج از کشور برگردد. موانع تجاری ممکن است مانع صنعت از پذیرش چالش‌های مرتبط با رویکردی یکپارچه و جامع نسبت به توسعه شهری، و همچنین چالش‌های مرتبط با پایداری زیرساخت‌ها و عملکرد بلندمدت گردند. در مقابل، پیشرفت‌های ایجاد شده در موسسات تحقیقاتی چند رشته‌ای دارای بهره اجتماعی بیشتری هستند در حالی که به نیروی کار تحصیلکرده داخلی بیشتری نیز منتهی می‌گردند (رجوع به کادر ۳، ۷). این امر حتی زمانی که کشور برای پرداختن به چالش‌های پیش‌بینی شده شهری، جمعیتی، و اقلیمی آماده می‌گردد دارای اهمیت بیشتری است.

کادر ۳-۷

تحقیقات چند رشته‌ای که به رقابت داخلی کمک می‌نمایند

از سال ۱۹۷۷ تا ۱۹۹۵، در زمانی که ایالات متحده به عنوان پیش‌تاز و رهبر جهانی تکنولوژی‌ها و نوآوری مهندسی زیرزمین محسوب می‌شد، سازمان تحقیقات با شاید گسترده‌ترین مأموریت مربوط به ساخت زیرزمینی مرکز فضای زیرزمینی با بودجه دولتی در دانشگاه مینه‌سوتا مواجه بود. این مرکز یک تیم چند رشته‌ای تشکیل داد تا به صورت گسترده مسائل تأثیرگذار بر کاربری فضای زیرزمین، از جمله سیاست عمومی، برنامه‌ریزی، طراحی معمارانه، مهندسی ژئوتکنیک، و انتقال حرارت زیرزمینی را بررسی نماید، و الگویی برای سایر مراکز سراسر جهان گردید که کاربری فضای زیرزمین را در کشورهای مربوطه هدایت می‌نمایند. این مراکز شامل مراکز در دانشگاه دلفت هلند، دانشگاه تانگیجی، دانشگاه چونگ کینگ و مؤسسه مهندسی نانجینگ و دیگر دانشگاه‌ها در چین، و مرکز فضای زیرزمین شهری در ژاپن می‌باشد. در حالی که دانشگاه مرکز مینه‌سوتا در فعالیت‌های پژوهشی و حفظ تعهد گسترده خود موفق بود، فقدان یک منبع مالی با پایه ثابت برای انجام این مأموریت، آن را برای یک دانشگاه آسیب‌پذیر و تبدیل به بحران اقتصادی بودجه دولت نمود که منجر به خاتمه آن در سال ۱۹۹۵ شد.

یک چارچوب آموزشی

مشاهده: عدم تداوم کمک‌های مالی که امکان سرمایه‌گذاری‌های ارزشمند را در تجهیزات و دانشگاه فراهم می‌نماید منجر به کاهش قابل توجهی در تعداد برنامه‌های دانشگاهی آمریکا که برای تحقیقات و آموزش یکپارچه مهندسی زیرزمین تخصیص یافته گردیده است.

نتیجه‌گیری ۵. کمبود جدی در آموزش، پرورش، و فرصت‌های تحقیقاتی برای مهندسانی که خواستار فراگیری و اعمال مهندسی زیرزمین در ایالات متحده می‌باشند وجود دارد.

اقدامات بالقوه:

- a. توسعه مراکز تحقیقاتی چند رشته‌ای، چند نهادی، متقابل بخشی که بر حوزه‌های مختلفی در مهندسی زیرزمین و زیرساخت‌های شهری پایدار برای ایجاد نسل جدید پیشگامان در مهندسی زیرزمین تمرکز دارند.
- b. یکپارچه‌سازی تحصیلات تکمیلی مهندسی زیرزمین با برنامه‌های تحقیقاتی یا انبوه زیادی از فعالیت‌های هماهنگ دانشگاهی برای اتصال تحقیقات به برنامه‌های موجود. ایجاد فرصت‌هایی برای تخصیص یافتن در جنبه‌های خاص مهندسی زیرزمین، اما با رویکردی چند رشته‌ای.
- c. توسعه کنسرسیوم دانشگاه برای جمع آوری تخصص دانشگاهی؛ تقویت روابط آموزشی صنعت و دانشگاه.
- d. تعلیم برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر امکانات با رویکردی چند رشته‌ای از طریق قالب‌های آموزشی سنتی، از راه دور، یا به سبک ترکیبی. کارآموزی‌ها (مثلاً کارآموزی‌های تحقیقات و آموزش تکمیلی یکپارچه NSF) می‌تواند به برنامه‌های مالی کمک نماید.
- e. قرار دادن دانشجویان کارشناسی در معرض رشته‌ها، مسائل، چالش‌ها، و فرصت‌های متعدد مرتبط با کاربری و مهندسی فضای پایدار زیرزمینی.
- f. توسعه فرصت‌های آموزش پیوسته برای متخصصان و افراد کارکننده.
- g. گسترش صلاحیت مناسب برای بازرسان، تکنیسین‌ها، و اپراتورهای تسهیلات زیرزمینی پیچیده.
- مهندسی خوب و مناسب وابسته به مهارت‌های تحلیلی قوی، خلاقیت، قوه ابتکار، تخصص، و پیشنازی (NAE, ۲۰۰۴) و همچنین دانش انباشته بر اساس موفقیت‌های قدیم و جدید در اعمال زیرزمینی می‌باشد. برنامه‌های مقطع کارشناسی که به انواع دانش‌های مطرح در این گزارش کمک می‌نماید شامل اما نه محدود به مهندسی مکانیک، برق، عمران، سازه، ژئوتکنیک و زمین‌شناسی، برنامه‌ریزی، معماری، سیاست عمومی، ایمنی از آتش، و فن‌آوری اطلاعات می‌باشد. با این وصف، برنامه‌های سنتی و قدیمی در این حوزه‌ها دانشجویانی برای بکارگیری رویکردی یکپارچه آماده نمی‌سازند. برخی از برنامه‌های میان رشته‌ای در مهندسی فضای زیرزمینی در سطح کارشناسی با سیاست ۴۶۵ جامعه مهندسان عمران آمریکا برای پشتیبانی مدرک کارشناسی ارشد (MS) (یا معادل) به صورت پیش نیاز برای عملکرد حرفه‌ای مطابقت می‌کنند (ASCE, ۲۰۰۷). چند نمونه از برنامه‌ها شامل MS (کارشناسی ارشد) در سامانه‌های زیرساختی پایدار و تاب آور در دانشگاه ایلینوی در اوربانا-شامپاین، و تمرکز زیرساختی برنامه مهندسی عمران برای MS در مهندسی در دانشگاه صنعتی لوئیزیانا می‌باشد (بریرلی و هوکس، ۲۰۱۰). آموزش تحصیلات در برخی موسسات شامل تمرکزهای مشخص خاص (مثلاً صدور گواهینامه در تونل‌زنی در دانشگاه تگزاس آستین) یا تخصص‌سازی یک برنامه تحصیلات تکمیلی کلی‌تر می‌باشد. تحصیلات و کارآموزی‌های مشترک برای تمامی شکل‌های آموزشی در مهندسی فضای زیرزمینی به طور ویژه دارای اهمیت می‌باشد، که نسبت به مهندسی طراحی سازه‌ای ساختمان از تدوین کمتری برخوردار است.
- تعلیم و آموزش در برخی از برنامه‌های مهندسی فضای زیرزمینی از جمله، برای مثال، گروه مهندسی فضای زیرزمینی و تونل‌سازی در دانشگاه ایلینوی (دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۹۵)، مرکز فضای زیرزمین در دانشگاه مینه‌سوتا (۱۹۷۷-۱۹۹۵)، و مرکز فن‌آوری حفاری بدون ترانشه در دانشگاه صنعتی لوئیزیانا تلفیق گردیده است. این گروه‌های تحقیقاتی به طرز چشمگیری بر شیوه کلی و کاربردهای خاص تأثیر گذاشتند، لیکن اندازه برنامه‌ها در مقایسه با مقیاس توجیه شده توسط سطح سرمایه‌گذاری‌های ملی در کاربری فضای زیرزمین و زیرساخت‌ها از اهمیت افتادند.
- امروزه، انتظار اندکی از تداوم و انسجام بودجه وجود دارد که سرمایه‌گذاری‌های ارزشمندی در تجهیزات و مراکز دانشگاهی سبب می‌شود که برای پشتیبانی برنامه‌های تحقیقاتی پایدار و یکپارچه و نوع تحصیلات تکمیلی یکپارچه پیشنهادی در اینجا مورد نیاز می‌باشد. این امر به عدم تمرکز مستمر دولت بر مسائل زیرساخت‌ها به طور کلی، و زیرساخت‌های زیرزمینی به

صورت خاص مربوط می‌گردد. تعداد نسبتاً کمی از اساتید هیئت علمی دانشگاه در ایالات متحده درگیر تحقیقات در مورد تونل‌زنی می‌باشند، و بسیاری از آنان بر عملکرد تونل در شرایط لرزه‌ای و دیگر شرایط وخیم تمرکز دارند به جای تمرکز بر بهبود طراحی تونل و اجرای ساخت. شمار برنامه‌های دانشگاهی آمریکا که به مهندسی معدن تخصص یافته‌اند پایداری را نیز از دهه ۱۹۶۰ کاهش داده است؛ کمتر از ۲۰ مورد تا به امروزه وجود دارد.

تنزل تحقیقات در زمینه ساخت زیرزمینی و تونل‌زنی در دانشگاه‌های ایالات متحده منعکس کننده قطع فعالیت‌های حمایتی دولت آمریکا در تحقیقات توسعه زیرزمین می‌باشد. یک نیروی کار مهندسی زیرزمین که پایداری را تأمین می‌کند نمی‌تواند به واسطه برنامه‌های آموزشی ترکیبی ساده از مجموعه مهارت‌های مشابه ایجاد شود. این امر در مورد رشته‌های مختلفی که در هسته اصلی مهندسی زیرزمین از جمله مهندسی ژئوتکنیک و معدن قرار دارند صادق است. مهندسی ژئوتکنیک، برای مثال، غالباً به عنوان یک زیر شاخه در مهندسی عمران تلقی می‌شود، و از این رو برای منابعی با رشته‌های مهندسی سازه، حمل و نقل، محیط زیست و سایر رشته‌ها رقابت می‌کند. تعداد هیئت علمی مهندسی ژئوتکنیک ممکن است در یک دانشگاه تنها ۱ یا ۲ نفر و به ندرت بیشتر از ۵ یا ۶ نفر در دانشکده‌های مهندسی عمران حتی بزرگ با ۳۰-۴۰ استاد باشد.

تحصیل و آموزش مهندسی معدن در گذشته به دلیل کاهش فعالیت‌های معدن کاری به نفع توسعه معدن در خارج دچار ضرر و زیان شده است. فقدان برنامه‌ها، هیئت علمی، و دانشجویان مهندسی معدن، با توجه به دانش هسته‌ای همانند آنها به عنوان همکاران مهندسی عمران، مسائل مربوط به ظرفیت انسانی برای مهندسی زیرزمین را تشدید می‌سازد. حوزه‌های تخصصی علمی از جمله تونل‌سازی با کاهش اجباری واحدهای درسی برای مقاطع کارشناسی توسط دولت، عدم علاقه دانشجویان آمریکا به پیگیری مقاطع و مدارک پیشرفته، و طبیعت محدود یا پراکنده فرصت‌های مالی برای پژوهش در این زمینه‌ها تحت فشار بوده‌اند.

بهبود عملکرد

مشاهده: پیچیدگی سامانه‌های زیرساختی شهری و بی‌ثباتی‌های مرتبط با طراحی سامانه و افزایش عملکرد با تقاضاهای بیشتر و متنوع‌تر هم برای زیرساخت‌های روزمینی و هم برای زیرساخت‌های زیرزمینی.

نتیجه‌گیری ۶: مهندسان و برنامه‌ریزان شهری بهتر می‌توانند کارایی کل چرخه حیات تسهیلات و پایداری شهری کل را با رویکردهای خطر آگاه مستند و معتبر برای طرح‌ریزی و طراحی پروژه بهبود بخشند که این امر نیازهای پروژه‌های چرخه حیات را به لحاظ ارائه خدمات، هزینه‌های اولیه، تاب‌آوری در برابر حوادث وخیم و شدید، حفظ و عملکرد مؤثر متعادل می‌سازد.

تحقیق:

a. پیشبرد فن‌آوری‌های موجود و جدید توسعه‌های برای مدل‌سازی عدم قطعیت در طول تمامی فازهای چرخه حیات زیرساخت‌ها. این فن‌آوری‌ها در برگیرنده تکنولوژی‌های ته‌جمی و غیر ته‌جمی برای مشخص‌سازی زمین‌شناسی محل (شامل زیرساخت‌ها و مواد جدید و قدیم)؛ روش‌های طراحی تحلیلی و محاسباتی؛ تکنولوژی‌های حفاری، پشتیبانی زمین، و مونیتورینگ؛ و تکنولوژی‌هایی برای مدیریت دارایی از جمله مدیریت داده‌ها و امنیت می‌باشند (رجوع به فصل‌های ۶ و ۷ برای جزئیات بیشتر).

b. گسترش استراتژی‌ها برای بررسی خطرات بالقوه، مشکلات قریب‌الوقوع، و سیر آبخاری مشکلات، به ویژه با توجه به سرمایه‌گذاری فعلی در نوسازی سامانه‌های زیرساختی.

c. مهندسان و برنامه‌ریزان می‌توانند از حوادث غیرمترقبه برای درک رفتار و وابستگی‌های متقابل سامانه‌های پیچیده و برای

اعتبار سنجی مدل‌های محاسباتی عملکرد سامانه استفاده نمایند.

پایداری و تاب‌آوری تنها در شرایط کلی برای یک یا دو دهه بررسی شده‌اند، و سوالات بیشتری نسبت به پاسخ‌ها در خصوص اینکه چه استراتژی‌هایی برای پایداری و تاب‌آوری مؤثرتر است وجود دارد. با وجود دانش و معلومات فعلی محدود ما، ضروری است که طبق بهترین معلوماتی که در زمان بهبود سریع شناخت‌مان از تعاملات پیچیده سامانه‌ی و در زمان توسعه معیارهای ارزیابی پیشرفته داریم اقدام نماییم. در این خصوص، چارچوب آموزشی مطرح شده در بالا می‌تواند نسل جدیدی از متخصصان را پدید آورد که قادر به یکپارچه‌سازی رشته‌های فنی با درک روشنی از پایداری، تاب‌آوری و یکپارچه‌سازی رویکردهای خطر آگاه برای طراحی، ساخت، و مدیریت می‌باشند.

تسهیلات و شبکه‌های زیرزمینی بزرگ و پیچیده سرمایه‌گذاری‌های مالی بزرگی را می‌طلبند، و عملکردها و خدمات مهمی برای زندگی شهری عرضه می‌نمایند، و نباید سلامت و ایمنی را تنزل دهند. برای بسیاری از شهرها، با این وصف، پروژه‌های زیرزمینی بزرگ یک مسئولیت معمولی نمی‌باشد و از این رو چالش‌های بزرگی را برای سیاست‌گذاران و متخصصان بخش‌های برنامه‌ریزی، معماری، مهندسی، مالی، بیمه، مقررات ساختمانی، و سلامت و ایمنی که درگیر چنین پروژه‌هایی هستند ایجاد می‌کنند. اطلاعات موثق درباره جایگزین‌ها، هزینه‌ها، مزایا، و خطرات که توسط کسانی که دست‌اندر کار این رشته‌ها می‌باشند می‌تواند استفاده گردد مورد نیاز می‌باشد به همان اندازه که دانش و تجربه اضافی به دست می‌آید باعث توسعه آن اطلاعات نیز می‌گردد. تحقیقات، تحصیل، و آموزش بین رشته‌ای که موجب گسترش روش‌های عملی برای تعیین، مثلاً، باقی مانده عمر مفید تأسیسات و خدمات می‌گردد مورد نیاز می‌باشد. بررسی موضوعاتی نظیر اینکه چگونه بهترین استفاده مجدد و یا پیکربندی مجدد را از فضای زیرزمین داشته باشیم حین اینکه فن‌آوری‌ها تغییر می‌کنند نیز بخشی از عملکرد و برنامه‌ریزی کلی چرخه حیات می‌باشد.

فن‌آوری‌های پیشرفته برای پایداری

مشاهده: زیرساخت‌های زیرزمینی کهنه و قدیمی مستعد تخریب و نابودی می‌باشند و نسبت به موضوعاتی چون تغییر فن‌آوری‌ها، تغییرات آب و هوایی، و نیازهای اجتماعی حساس و آسیب پذیر هستند.

نتیجه‌گیری ۷. توسعه فضای زیرزمین نیاز به تعهد بلندمدت به پیشرفت‌های فناورانه در یک محیط دارد که برای بهبود برنامه‌ریزی، نوآوری، و پیاده‌سازی مساعد می‌باشد.

اقدامات بالقوه:

- a. طراحی زیرساخت‌هایی که سهولت دسترسی برای بازرسی، کنترل، تعمیرات، به‌روزرسانی‌ها، و پیکربندی مجدد را در پاسخ به نیازها یا فن‌آوری‌های جدید فراهم می‌آورند که امکان اتمام چنین اعمالی را با هزینه‌های کمتر حاصل می‌سازد.
- b. بررسی نیازها، قابلیت استفاده، و دسترسی به منابع حین تصمیم‌گیری‌های فنی و اداری در خصوص توسعه. این موارد شامل منابع انرژی (مثلاً نفت، گاز، و دیگر منابع انرژی)، کانی‌های صنعتی، کانی‌های استراتژیک مهم و یا بسیار ارزشمند (مثلاً طلا، اورانیوم، عناصر خاکی کمیاب)، و کانی‌های ساختمانی (مثلاً سنگ ریزه، شن و ماسه، سنگ ساختمانی) می‌باشند.
- c. به‌کارگیری مدل‌هایی که سناریوهای بالقوه مختلفی را بیان می‌کنند و طرح‌ریزی سامانه زیرساختی بهتری را بر اساس شرایط محلی ارائه می‌دهند.

تحقیق:

- a. دانشگاه و ذی‌نفعان سامانه می‌توانند به صورت مشارکتی مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد بلندمدت را برای سامانه‌های پیچیده توسعه دهند و نتایج را در طول زمان برای درک پاسخ‌های دینامیکی و رفتارهای نو ظهور سامانه اعتبار سنجی نمایند.
- b. بررسی اینکه فن‌آوری‌ها و ابداعات حاصل از دیگر صنایع (مثلاً ابزارهای اکتشاف، فناوری‌های تحلیلی درجا، سامانه‌های اندازه‌گیری حین حفاری، اسکن لیزری، تلفیق داده‌های چند سنسوری) و کاربرد غیر نظامی تحقیقات نظامی چگونه می‌توانند در مهندسی زیرزمین بکار گرفته شوند.
- c. انجام تحقیقات بلندمدت در خصوص تأثیرات زیرساخت‌های زیرزمینی بر محیط‌های طبیعی و ساخته شده به منظور افزایش قابلیت تصمیم‌گیری برای بهترین منافع بلندمدت جامعه.
- d. تحقیقات همه‌جانبه و مبتنی بر یک مبنای مشترک از ریسک-هزینه-مزیت از تأثیرات بلندمدت بر پایداری ذخیره‌سازی یا دفع زیرزمینی زباله‌ها (مثلاً تولیدات شهری، فاضلاب، مربوط به انرژی)

فن‌آوری‌های پیشرفته می‌توانند قابلیت انتخاب پایدارترین رویکرد را برای کاربری فضای زیرزمین با ارزان‌تر یا بهتر ساختن چنین کاربری‌ای افزایش دهند. برای مثال، توسعه تکنولوژی‌های بهتر در نقشه‌کشی، طراحی، و ساخت می‌تواند هزینه‌های ساخت را کاهش دهد، تخریب و فرسودگی را به حداقل رساند، تاب‌آوری را افزایش دهد، و به مسائل زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی، حرارتی، و اجتماعی که وجود دارند و یا ممکن است در گذر زمان افزایش یابند بپردازد. فن‌آوری‌های گذشته بهبود یافته‌اند، اما، به طور فزاینده‌ای، بسیاری از حوزه‌های عمومی که در آنها پیشرفت‌ها غالباً هر زمان که نیاز باشد استناد می‌گردند تغییر نیافته‌اند. برای مثال، در سال ۱۹۸۹، شورای تحقیقات ملی روش‌هایی که در آن ژئوتکنولوژی بر اقتصاد، محیط زیست، و امنیت ملی آمریکا تأثیر می‌گذارد را مشخص کرد (NRC, ۱۹۸۹). موضوعات تحقیقاتی متعددی که نیاز به بررسی مخصوص دارند مشخص شدند که می‌توانند در توسعه زیرساخت‌ها و نوسازی مشارکت نمایند. این موارد عبارتند از:

- تأثیرات ساخت‌وساز بر سازه‌های اطراف؛
 - فن‌آوری‌های ساخت بدون ترانسه برای نصب و راه‌اندازی و نوسازی شبکه‌های خطوط لوله تأسیسات (رجوع به کادر ۷،۴)؛
 - توسعه و به‌کارگیری مواد جدید از قبیل لوله‌های پلاستیکی، پلیمرها، و مواد ژئوسنتتیک به منظور پرداختن به نیازهای سامانه زیرساخت؛
 - حفظ و نگهداری و نوسازی سامانه‌های زیرساختی فرسوده، شامل سامانه‌های حسگر از راه دور به منظور استقرار و ارزیابی کیفیت سامانه‌های زیرساخت؛ و
 - یک رویکرد بین‌رشته‌ای به منظور مرتفع ساختن نیازهای متنوع سامانه‌های زیرساختی پیچیده.
- پژوهش در بسیاری از این حوزه‌ها ظرفیت آمریکا را برای توسعه سامانه‌های زیرزمینی افزایش داده است، لیکن تحقیقات در همین حوزه‌ها در حال حاضر هنوز نیاز می‌باشند، به ویژه با توجه به منافع ملی در پایداری و تاب‌آوری. فصل ۶ بحث مفصلی را در مورد نوآوری‌های مورد نیاز تکنولوژی که مرتبط با مشخص‌سازی، و طراحی، ساخت، عملیات، نظارت، و نگهداری است ارائه می‌دهد که می‌تواند به توسعه پایدار کمک نماید.
- برخی چالش‌ها و فرصت‌های توسعه تکنولوژی خاص برای تحقیقاتی که به رویکردی جامع‌تر برای طراحی و عملیات سامانه شهری یکپارچه کمک می‌نماید در فصل‌های پیشین و در کادرهای ۷،۴ و ۷،۵ تأکید شده است.

رویکردهای چرخه حیات

مشاهده: داده‌های اندکی با توجه به تأثیرات زیست‌محیطی و اجتماعی و پایداری چرخه حیات توسعه شهری وجود دارد که می‌تواند بر تکنولوژی و تصمیمات اداری مربوط به عملیات بلندمدت (دهه‌ها تا قرن‌ها)، حفظ و نگهداری، و کاهش هزینه‌ها مؤثر باشند.

نتیجه‌گیری ۸. مطالعات گذشته نگرانه علمی و همه‌جانبه تأثیرات و هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم انواع مختلف پروژه‌های زیرزمینی به منظور ارزیابی سودمندی و تأثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی مورد نیاز می‌باشد به طوری که برنامه‌ریزی آینده بتواند پایداری را به حداکثر برساند.

کادر ۴-۷

چالش‌های خاص برای سامانه‌های لوله‌ای و کابلی

- سامانه‌های لوله کشی در ایالات متحده ۵۰ تا ۱۰۰ سال ارائه خدمات می‌نمایند، عمر خدمات کابل‌ها ۱۰ تا ۱۵ سال می‌باشد (EPA, ۲۰۰۸). سامانه‌های بسیاری در ایالات متحده از عمر خدماتی مورد انتظار خود تجاوز می‌کنند و در صورتی که تعمیر و یا نوسازی نشوند در سال‌های آینده دچار آسیب و فرسودگی می‌شوند.
- گسترش مصالح کابلی و لوله‌ای جدید که در طول چرخه‌های عمر طولانی عملکرد بهتری دارند، و همچنین شبکه‌های زیرساختی زیرزمینی هوشمند و جدید که عملکرد و شرایط خاص خود را مونیتور می‌کنند مورد نیاز می‌باشند. سامانه‌های هوشمند می‌توانند قبل از خرابی‌ها و نقص‌های پر هزینه پیش‌بینی بهتری از تعمیرات مورد نیاز را ارائه دهند. در نتیجه برنامه‌ریزی‌های هوشمندتری برای حفظ و نگهداری زیرساخت‌ها و تصمیمات یکپارچه خواهیم داشت. برای مثال، تعمیرات لازم در هر ناحیه می‌تواند هماهنگ باشد، که هزینه‌های تعمیراتی تلفیقی و بسته شدن معابر عمومی را به حداقل می‌رساند.
- اطلاعات سه بعدی موقعیت و عملکرد دارای اهمیت می‌باشد، به ویژه با توجه به حق بیمه قرار داده شده بر روی فن‌آوری‌های جدید برای نوسازی خطوط لوله و افزایش ظرفیت لوله‌های موجود درجا به جای ایجاد ترازبندی‌های جدید.
- راهروهای تأسیساتی که سامانه‌های تأسیساتی را در پیکربندی‌های فشرده و قابل نگهداری ترکیب می‌نمایند از طریق گسترش سناریوهای عملی برای تسهیلات چند منظوره امن، تحلیل‌های هزینه-سود چرخه حیات، و استراتژی‌های گذار مؤثر که با پروژه‌های نمونه ترکیب می‌شوند به صورت مؤثری توجیه می‌گردند.
- استانداردهای آینده طراحی باید در برگرفته بررسی نقش عناصر سامانه‌ی مجزا در سامانه شهری بزرگ‌تر در طول چرخه حیاتشان باشند. استانداردها همچنین می‌باید، برای مثال، اثرات تغییرات آب و هوایی را در یک منطقه در نظر بگیرند (مثلاً سامانه‌های زهکشی نیاز به ظرفیت بیشتری برای در نظر گرفتن افزایش شدت، مدت زمان، و تکرار طوفان‌ها دارند).
- طرح‌ریزی و طراحی نیازمند تطبیق رویکردهای چند سازه‌ای با مدیریت مبتنی بر خطرپذیری در طول چرخه حیات سامانه‌ها خواهند بود و نیاز به بررسی استحکام، تاب‌آوری و پایداری بلندمدت در زمان طراحی و عملیات خواهند داشت. برای مثال، تأثیرات بر منابع آب‌های زیرزمینی و کفایت سازه‌ای، غوطه‌وری، مقاومت در برابر نفوذ آب، و خوردگی نیاز به توجه بیشتر در مناطق آسیب دیده با تغییر سطوح آب‌های زیرزمینی خواهد داشت (به ویژه اگر همراه با نفوذ آب شور باشد).

تحقیق:

a. انجام بررسی‌های جامع و علمی برای تعیین عملکرد چرخه حیات انواع گوناگون زیرساخت‌های زیرزمینی به صورت گذشته نگرانه به منظور تشخیص ابعاد طرح‌ریزی، طراحی، ساخت و عملیات پروژه که به بسیاری از هزینه‌های پروژه‌ای و اجرای آن کمک می‌نمایند. برای مثال، پیگیری تأثیرات مالی (هم مستقیم و هم غیرمستقیم)، زیست‌محیطی (مثلاً کیفیت هوا و آب) و اجتماعی در یک دوره طولانی (مثلاً دهه‌ها) به دنبال پروژه‌ای چون هم‌ترازی شاهراه مرکزی بوستون.

- b. گسترش معیارهای متداول برای ارزیابی توسعه پایدار به صورت عمومی تر و برای ارزیابی تأثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی خاص.
- c. توسعه روش‌های کمی برای مقایسه ارزش زیرزمین با دیگر منابع شهری هم طراز (مثلاً مرتبط با ارزش ملک سطح در بازار) و با در نظر گرفتن تأثیرات بر کاربری آبی زیرزمین (مثلاً زیرساخت‌ها ممکن است نیاز به قرارگیری در شرایط فزاینده سخت زمین داشته باشند).
- d. گردآوری داده‌ها در خصوص ابعاد پایداری مواد و روش‌های گوناگون ساخت (مثلاً قابلیت استفاده مصالح و مواد و انرژی نهفته در تولید مواد).

کادر ۷-۵

نقشه‌برداری و تکنولوژی‌های گردآوری و ارزیابی داده‌ها

فضای زیرزمینی شهری می‌تواند با ابزارهایی که نیاز به کارگر کمتری دارند بهتر مدیریت شوند تا موقعیت‌های دقیق تمامی تأسیسات زیرزمینی نقشه‌برداری شود. بازرسی‌های ضروری خدمات تأسیسات انجام گیرد، و پایگاه‌های داده‌ای گسترده حاصل مدیریت شوند. مستندات موثق تمام چیزهای زیرزمین در سامانه پایگاه داده‌های در دسترس و قابل جستجو قابلیت برنامه‌ریزان را برای حداکثرسازی کاربری فضای زیرزمین افزایش می‌دهد در حالی که هزینه‌های ساخت و نگهداری را به حداقل می‌رساند. این فن‌آوری‌ها همچنین می‌توانند منجر به رویکردهای سامانه‌ی بلندمدت بهتری برای برنامه‌ریزی، ساخت، عملیات، و نگهداری شوند. این ابزارها همچنین می‌توانند برای ارتباط دینامیکی مدل‌های اطلاعات زمین با هم با بازخورد حاصل از تجهیزات نظارتی یا ساخت توسعه یابند تا امکان مشخص‌سازی زمان واقعی، پیش‌بینی پاسخ، و تصمیم‌گیری مرتبط با فرآیندهای طول چرخه حیات زیرساخت‌ها را میسر سازند. با این همه، جمع‌آوری و انتقال داده‌های زیرزمین که وابسته به استحکام سامانه سیمی و ظرفیت‌های انتقال سامانه بی‌سیم و تجهیزات انرژی می‌باشند هنوز چالش‌هایی را ایجاد می‌نماید. سنسورها و سامانه‌های شبکه‌ای نیاز می‌باشند که می‌توانند در زیرزمین در شبکه‌های توزیع گسترده و خود سازمانده قرار گیرند، که امکان عملیات بلندمدت (شامل پیکربندی و ثبت مکان و زینه‌بندی) را میسر می‌سازند، و اینکه می‌توانند از راه دور راه‌اندازی شوند. توسعه‌های هماهنگ فن‌آوری می‌توانند در حوزه‌هایی چون سامانه‌ها و سنجش کم توان، مهار و جمع‌آوری توان، یا توسعه سامانه‌های انتقال بی‌سیم در زیرزمین مورد بررسی قرار گیرند.

تحلیل چرخه حیات ابزاری استراتژیک می‌باشد که می‌تواند در تصمیمات وابسته به عملیات، نگهداری، هزینه‌ها، و اثرات زیست‌محیطی که بر پایداری تأثیرگذارند مؤثر واقع شود. درک اینکه آیا، برای مثال، توسعه فضای زیرزمین شهری مانعی بر سر راه نظارت مناسب منابع آبی زیرزمینی در یک ناحیه خواهد بود نیاز به کمی‌سازی میزان تبخیر و تعرق، تغذیه آب‌های زیرزمینی، الگوهای جریان، و آلودگی، در میان دیگر عوامل، دارد که به دلیل فناوری‌های ساخت متفاوت یا حفظ مناظر طبیعی ممکن می‌گردد. تحلیل‌های گذشته نگرانه بر تحلیل‌های آینده نگرانه و استراتژیک هزینه چرخه حیات مؤثر می‌باشند که، در حالت ایده آل، بخشی از فرایندهای برنامه‌ریزی محلی و منطقه‌ای می‌گردد. تصمیم‌گیرندگانی که از هزینه‌های واقعی گزینه‌های زیرساختی در طول زمان سر در می‌آورند احتمالاً برای تصمیم‌گیری‌هایی که پایداری را تأمین می‌کند آماده‌تر می‌باشند. تصمیمات طراحی که بر پایداری تأثیر می‌گذارند در بر گیرنده، برای مثال، مواردی است که سامانه‌های پشتیبانی اولیه (در جریان ساخت) و دائمی زمین را یکپارچه می‌سازند که نیاز به مصالح ساختمانی کمتری دارند، از موادی با عملکرد بهتر استفاده می‌کنند، و یا مواد زائد یا محصول بازیافتی حاصل از دیگر کاربردها را شامل می‌شوند (مثلاً بتن ساخته شده از خاکستر گرد زغال سنگ مبتنی بر ژئوپلیمرها).

محاسبه تمامی هزینه‌ها، از قبیل کیفیت کاهش یافته هوا یا مواردی که مرتبط با بی‌نظمی‌ها و ضرر و زیان کسبه در طول

مدت بسته شدن خیابان‌ها، در مقایسه‌ای از گزینه‌های پروژه‌های چالش و سرفصلی را برای تحقیقات آینده بر جای می‌گذارد. اگرچه هزینه‌ها ممکن است به طور قابل توجهی در میان پروژه‌های مشابه متفاوت باشند، اما اختلافات مشاهده شده در هزینه یک کیلومتر از مسیر سواره رو در کشورهای مختلف، برای مثال، حکایت از این دارد که بررسی دلایل مفصل و دقیق برای هزینه‌های پایین‌تر در برخی کشورها در مقایسه با سایر کشورها ارزنده و مفید خواهد بود. درک چنین روابطی به توسعه یک چارچوب مدیریتی واقعی کمک می‌نماید که به طور عینی هزینه‌های کل در طول چرخه حیات زیرساخت‌ها را دسته بندی می‌کند. یک چارچوب مدیریتی زیرساخت کلی می‌تواند مؤثر باشد که عبارتند از برنامه‌ریزی، مستندسازی شرایط موجود، ایجاد الزامات کاربری زمین (هم روی زمین و هم زیرزمین)، و صدور مجوزها برای کاربری زیرزمینی مورد تأیید (همان گونه که توسط سیاست آگاهانه هدایت می‌شود).

ایمنی و آسایش کاربر

زیرساخت‌های زیرزمینی می‌توانند بدون هیچ خطری زندگی میلیون‌ها نفر را بهتر سازند، اما مقررات ایمنی اندکی در سطح فدرال وجود دارد که ایمنی عملیاتی را در زمانی که پیچیدگی سامانه زیرزمینی در حال افزایش است جهت دهی می‌کنند. نتیجه گیری ۹. در صورتی که محیط‌های زیرزمینی با بررسی بیشتر امکانات، راحتی دسترسی، مسیریابی‌ها، ایمنی، و زیبایی شناختی طرح‌ریزی شود، پذیرش و استفاده بیشتر از زیرساخت‌ها و تسهیلات زیرزمینی توسط کاربران مناسب‌تر و محتمل‌تر خواهد بود.

اقدامات بالقوه:

- a. توسعه و اتخاذ مکانیزم‌ها و کدهای ایمنی مبتنی بر عملکرد که نه تنها برای مصارف زیرزمینی امروزه (مثلاً استفاده‌ترکیبی و مختلف، چند سطحی) و خطرات اختصاص می‌یابند، بلکه گستردگی و تغییر کاربری را هم در نظر می‌گیرند. الزامات فنی شورای کد بین‌المللی، استانداردهای عملی انجمن ملی ایمنی در برابر آتش، و دیگر استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه می‌توانند گسترش یابند و برای تسهیلات زیرزمینی قابل اجرا باشند.
- b. یکی‌سازی مفاهیم مهندسی سامانه‌های پیچیده و عامل انسانی به منظور هدایت شناسایی تهدید و تصمیم‌گیری‌های فنی و عملیاتی برای کارکردهای عادی و برای کارکردهای زمان تنش (مثلاً در پاسخ به حوادث غیرمترقبه).
- c. وارد ساختن علوم رفتاری، آموزش، زیست‌شناسی و فیزیولوژی، عملکرد و ظرفیت انسانی در کدها و طراحی ایمنی.

تحقیق:

- a. بررسی وضعیت روال معمول و بهترین شیوه‌های مربوط به سامانه‌های ایمنی (مثلاً تشخیص خطر، هشدار، تهویه هوا، اطفاء حریق، خروج اضطراری، و یکپارچه‌سازی سامانه). توسعه حداقل الزامات مناسب سامانه ایمنی به منظور وارد ساختن در دستورالعمل‌ها و استانداردها در سطح ملی.
- b. مقایسه کدها و دستورالعمل‌های بین‌المللی ایمنی زیرزمین با مواردی که در ایالات متحده قابل اجرا می‌باشند به منظور تعیین نارسایی‌ها و هدایت شیوه‌های آینده، که تلاش‌های موجود در این زمینه را تأیید می‌کند (برای مثال، توسط اداره کل بزرگراه فدرال).

پذیرش و استفاده عمومی از فضای زیرزمین افزایش خواهد یافت اگر استفاده از زیرساخت‌های زیرزمینی مناسب‌تر و راحت‌تر باشد. یک چالش در طراحی، برنامه‌ریزی دوربرد می‌باشد که ارتباطات قوی را در سامانه‌های زیرزمینی و با سامانه‌های سطحی وارد می‌سازد. این یعنی ایجاد سامانه‌های زیرزمینی پیوسته مناسب و قابل استفاده که زمان سفر عابر پیاده و

حرکت‌های عمودی طولانی توسط پله‌ها، پله برقی‌ها، آسانسورها را محدود می‌سازد. با این همه، کدهای ساختمانی موجود به اندازه کافی برای همساز بودن با انواع طراحی که راحتی را افزایش می‌دهند منعطف و قابل تغییر نمی‌باشند. کدهای ساختمانی به منظور حفظ سلامت و ایمنی افرادی که دست‌اندر کار ساخت، عملیات، یا استفاده از زیرساخت‌ها می‌باشند وجود دارند، اما طبیعت به آرامی در حال تحول آنها فضای اندکی برای بهره‌جویی از فن‌آوری‌های در حال تحول را بر جای می‌گذارد. به علاوه، کدها، مقررات، و استانداردهای ایمنی موجود که با در نظر گرفتن خطرات مشخص سطح زمین طراحی شده‌اند، غالباً برای توسعه پایدار در مقیاس بزرگ زیرزمین نامناسب می‌باشند. کاربری عمومی در مقیاس بزرگ گسترش مقررات ایمنی جدید و به روز را ایجاب خواهد نمود که به صورت خاص به خطرات زیرزمین و فعالیت‌های (مصارف) جاری در آن می‌پردازند.

امکان تغییر در طراحی بر اساس درک بهتر چگونگی ایجاد فضای زیرزمینی ایمن بلکه جالب و لذت بخش بدون مقتضیات فضا و هزینه‌های افزایشی زیاد چالشی را بر جای می‌گذارد. وارد ساختن مهندسی عوامل انسانی بیشتر در طراحی سامانه شهری و زیرزمینی ایمنی، بهره‌وری، و زیبایی‌شناسی زیرزمین را افزایش می‌دهد. تحقیقات درباره مواد جدید و رفتار آنها، همراه با ارزیابی ریسک و فعالیت‌های مدیریتی که برای اقدامات لازم برای ارزیابی از مواقع اضطراری، نجات، و بازیابی را در بر می‌گیرد برای محیط زیرزمین در طول کارکردهای عادی، و همچنین طی حوادث استرس‌زا و بعد از آنها سودمند خواهد بود. شناسایی و مقابله با برداشتهای منفی می‌تواند به اندازه چالش‌های فنی و ایمنی با اهمیت باشد و تمرکز پژوهشی خاص خود را می‌طلبد.

مطالب پایانی

مشاهده: فضای زیرزمین منبعی ارزشمند اما به طور قطع تجدیدناپذیر می‌باشد.

نتیجه‌گیری ۱۰. فضای زیرزمین می‌تواند پایداری شهری را افزایش دهد تنها در صورتی که زیرزمین به طور کامل شناخته شود و در صورتی که استفاده از زیرزمین و استفاده مجدد آن و حفظ محیط‌های طبیعی و ساختگی در برنامه‌ریزی بلندمدت سامانه زیرساخت شهری کل گنجانده شوند.

اقدامات بالقوه:

- a. انجام برنامه‌ریزی تمام فضای زیرزمینی به صورت بخشی از سامانه شهری در حال تحول به منظور مهندسی با حفظ دقیق برای کاربری بلندمدت بهینه و پایداری منطقه‌ای.
- b. ایجاد شیوه‌های نظارتی متمرکز بر آب‌های زیرزمینی، خاک، و زیرساخت‌ها به منظور پیگیری سلامت محیط شهری زیرزمین مطابق با شرایط زمین‌شناسی کلی و کاربری. به کارگیری داده‌های حاصل از طیفی از محیط‌ها و موقعیت‌ها برای آگاهی دادن به برنامه‌ریزی شهری در دیگر حوزه‌ها.

بررسی عکس شهر و تجسم مدل سه بعدی سازه‌ها، آسمان‌خراش‌ها، ساختمان‌های بلند مرتبه سطح آن کار آسانی است. این گزارش بسیاری از برنامه‌ریزان شهری، مهندسان، محققان، پیمانکاران، اپراتورهای زیرساخت‌ها را به چالش می‌کشد تا زیر سطح زمین را در این مدل سه بعدی منظور سازند، و به طور منسجم زیرساخت‌ها را مابین سطح زمین و زیرزمین با هم ارتباط دهند. درست همان طوری که صرفاً مساحت سطحی بسیار زیادی در یک شهر فرضی وجود دارد، حجم زیرزمینی قابل استفاده‌ای نیز در زیر سطح زمین قرار دارد. به هر حال، برخلاف زیرساخت‌های سطح زمین، زیرساخت‌های زیرزمینی در پایان عمر مفید خود نمی‌توانند به آسانی از میان برداشته شوند یا نوسازی شوند. به محض اینکه مواد زمین‌شناسی زیر سطح زمین

از بین می‌روند و عناصر زیرساختی یا نخاله‌ها در محل‌شان گذاشته می‌شوند، سطح زیرزمین نمی‌تواند به وضعیت اولیه خود باز گردد و احتمالاً برای اهداف دیگر نمی‌تواند استفاده شود. به همین دلیل، پایداری شهری وابسته به درک و شناخت کامل زیرزمین و چگونگی طرح‌ریزی برای استفاده، استفاده مجدد، و حفاظت منابع زیرزمینی - چه منابع مواد یا انرژی طبیعی، و چه خود فضای زیرزمین به بهترین حالت می‌باشد.

انسان‌ها فضا و منابع زیرزمینی را طی هزاران سال به منظور پیشرفت و حفظ بقاء، چشم‌اندازهای اقتصادی، فرهنگ اساطیری، و رشد معنوی مورد استفاده قرار داده‌اند. این تلاش‌ها در برگیرنده خطرات بالایی است که با این باور که مزیت‌های زیرزمین بیشتر از خطرات آن می‌باشد جبران می‌گردد - مدت‌ها قبل شناخت دقیقی از محیط زیرزمین یا ابزارهای پیچیده وجود داشت که با آنها به بررسی و کشف آن می‌پرداختند. با این همه موفقیت‌ها و شکست‌های اولیه در زیرزمین به ساخت پایگاه اطلاعاتی قابل توجهی کمک کرد که امروزه در سراسر جهان وجود دارد. چالش امروز، ایجاد یک میراث قابل مقایسه برای تداوم بخشیدن منابع طبیعی ملی، بهره‌وری اقتصادی، و همبستگی اجتماعی برای بلندمدت می‌باشد. این یعنی توسعه اطلاعات مان به روش‌هایی که ابزارهای فنی، برداشت‌های جمعی، سیاست‌های عمومی، مقررات، و روندهای ما را در یک خط قرار می‌دهد به طوری که بتوانیم خطرات را به سطوح قابل اغماض کاهش دهیم، خدمات و فضاهای مورد نیاز را که به صورت قابل اطمینانی عمل می‌کنند و روحیه مان را تقویت می‌کنند ایجاد کنیم، و در نهایت یک سامانه پشتیبانی یکپارچه و متوازن برای مناطق شهری پایدار و قابل سکونت تهیه نماییم.

- ASCE (American Society of Civil Engineers). ۲۰۰۷. Policy Statement ۴۶۵ - Academic Prerequisites for Licensure and Professional Practice [online]. Available: <http://www.asce.org/Content.aspx?id=۲۶۱۹۴> (accessed January ۵, ۲۰۱۱).
- Brierley, G., and A. Hawks. ۲۰۱۰. Tunnel education in the United States. *Mining Engineering*. ۶۲(۶):۱۵۰.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). ۲۰۰۸. Wire and Cable Insulation and Jacketing: Life-Cycle Assessments for Selected Applications. EPA ۷۴۴-R-۰۸-۰۰۱. U.S. Environmental Protection Agency, June [online]. Available: <http://www.epa.gov/dfepubs/wire-cable/lfs-lca-chap1.pdf> (accessed October ۲, ۲۰۱۲).
- Hapgood, F. ۲۰۰۴. The Underground Cutting Edge: The innovators who made digging tunnels hightech. *Invention and Technology* ۲۰(۲) [online]. Available: <http://www.mindfully.org/Technology/۲۰۰۴/Underground-Boring-Machines\sep۰۴.htm> (accessed October ۲, ۲۰۱۲).
- NAE (National Academy of Engineering). ۲۰۰۴. *The Engineer of ۲۰۲۰: Visions of Engineering in the New Century*. Washington, DC: The National Academies Press.
- NRC (National Research Council). ۱۹۸۹. *Geotechnology: Its Impact on Economic Growth, the Environment, and National Security*. Washington, DC: National Academy Press.
- PSE (Puget Sound Energy). ۲۰۱۲. Snoqualmie Falls Hydroelectric Project [online]. Available: <http://pse.com/inyourcommunity/king/Pages/Snoqualmie-Falls.aspx> (accesses July ۳۱, ۲۰۱۲).