امام علی بن ابیطالب صلوات الله و سلامه علیه:
فکر و اندیشه مخصوص کسانی است که دلی درون سینه داشته باشند.

مقدمه..... ۸

مراجع..... ۶

کاربرد ژئوفیزیک در ساخت تونل و فعالیت‌های پژوهشی محل..... ۸

۲-۱- اکتشاف ژئوفیزیکی..... ۹
۲-۲- نمونه‌هایی از کاربرد..... ۱۴
۲-۲-۱- پیش‌بینی مسیر تونل..... ۱۴
۲-۲-۲- اطلاعات زمین‌شناسی مورد نیاز قبل از ساخت تونل..... ۱۶
۲-۲-۳- بررسی مقاومت لایه‌های نازک..... ۱۷
۲-۳- پیش‌بینی امتداد تونل با منبع قرار گرفته در سطح..... ۱۸
۲-۳-۱- روش کار..... ۲۰
۲-۳-۲- مثال عددی..... ۲۱
۲-۴- موارد کاربردی برای ساخت..... ۲۵
۲-۴-۱- روش انعکاس ارتعاشی در تونل..... ۲۶
۲-۴-۲- روش انکسار ارتعاشی با منبع قرار گرفته در سطح تونل..... ۲۸
۲-۴-۳- نتیجهٔ ساخت..... ۳۰
مراجع..... ۳۲

تئوری بار سنگ ترزاقی..... ۳۴

۳-۱- مقدمه..... ۳۵
۳-۲- رده‌های سنگی..... ۳۵
۳-۳- فاکتور بار سنگ..... ۳۷

۳-۳-۱- محدودیت‌ها ۴۰
۳-۴- روش تعدیل‌یافتهٔ ترزاقی برای تونل‌ها و مغارها ۴۲
مراجع ۴۵

امتیاز توده‌سنگ (RMR)..... ۴۷

۴-۱- مقدمه ۴۸
۴-۲- مجموعه داده‌های میدانی ۴۹
۴-۲-۱- مقاومت تراکمی تک‌محوری ماده‌سنگ (qc) ۴۹
۴-۲-۲- شاخص کیفی سنگ (RQD) ۵۰
۴-۲-۳- فاصلهٔ ناپیوستگی‌ها ۵۰
۴-۲-۴- وضعیت ناپیوستگی‌ها ۵۱
۴-۲-۵- وضعیت آب زیرزمینی ۵۱
۴-۲-۶- جهت ناپیوستگی‌ها ۵۲
۴-۳- تخمین رده بندی توده سنگ ۵۴
۴-۴- کاربردهای RMR ۵۵
۴-۴-۱- میانگین زمان ایستایی سقف قوسی ۵۵
۴-۴-۲- چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی ۵۶
۴-۴-۳- مدول تغییر شکل ۵۷
۴-۴-۴- فشار باربری مجاز ۶۰
۴-۴-۵- مقاومت برشی توده‌های سنگی ۶۰
۴-۴-۶- تخمین فشار نگهدارنده ۶۰
۴-۵- ملاحظات ۶۲
مراجع ۶۳

سیستم رده‌بندی کیفیت توده‌سنگ..... ۶۷

۵-۱- سیستم Q ۶۸
۵-۱-۱- شاخص کیفی سنگ (RQD) ۶۹

۵-۱-۲- تعداد دسته درزه (J_n) ۷۰
۵-۱-۳- عدد زبری و عدد دگرسانی درزه‌ها (J_a,J_r) ۷۰
۵-۱-۴- ضریب کاهش آب درزه (Jw) ۷۲
۵-۱-۵- ضریب کاهش تنش (SRF) ۷۳
۵-۲- جهت‌یابی درزه‌ها و سیستم Q ۷۸
۵-۳- به روز رسانی سیستم Q ۷۸
۵-۴- جمع‌آوری اطلاعات صحرایی ۷۹
۵-۴-۱- پیشنهاداتی برای تازه کارها (افراد مبتدی) ۸۰
۵-۵- طبقه‌بندی توده‌سنگ ۸۲
۵-۶- تخمین فشار نگهدارنده ۸۳
۵-۶-۱- استفاده از روش بارتون و همکاران (۱۹۷۴) ۸۳
۵-۶-۲- ارتباط نظریات سینگ و همکاران در سال۱۹۹۲ ..... ۸۵
۵-۶-۳- ارزیابی نتایج بارتون و همکاران و سینگ و همکاران ۹۰
۵-۷- دهانه‌های بدون نگهدارنده ۹۰
۵-۸- مشخصات توده‌سنگ ۹۲
۵-۸-۱- مدول تغییر شکل توده‌سنگ ۹۳
۵-۸-۲- ناهمسانی توده‌سنگ ۹۵
5-8-3- تغییرات Q در مقابل سرعت موج p ۹۵
۵-۸-۴- بهبود سیستم Q با تزریق دوغاب ۹۷
۵-۹- ملاحظات (بارتون در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲) ۹۸
مراجع ۱۰۰

عدد توده‌سنگ..... ۱۰۳

۶-۱- مقدمه ۱۰۴
۶-۲- وابستگی بین Q و RMR ۱۰۵
۶-۲-۱- روش‌های جدید ۱۰۶
۶-۳- پیش‌بینی شرایط زمین ۱۱۰

۶-۴- پیش‌بینی فشار نگهدارنده ۱۱۰
۶-۵- تأثیر اندازهٔ تونل بر فشار نگهدارنده ۱۱۲
۶-۵-۱- مروری بر روش‌های موجود ۱۱۲
۶-۵-۲- مفهوم جدید تأثیر اندازهٔ تونل در فشار نگهدارنده ۱۱۴
۶-۶- روابط تخمین بسته‌شدگی تونل ۱۱۶
۶-۷- تأثیر عمق تونل در فشار نگهدارنده و بسته‌شدگی تونل ۱۱۷
۶-۸- روشی برای تعیین منحنی واکنش زمین (GRC) ۱۱۷
مراجع ۱۱۹

مقاومت ناپیوستگی‌ها ۱۲۳

۷-۱- مقدمه ۱۲۴
۷-۲- ضریب زبری دیوارهٔ درزه (JRC) ۱۲۵
۷-۲-۱- رابطهٔ بین J_r و توصیف زبری JRC ۱۲۷
۷-۳- مقاومت تراکمی دیواره درزه (JCS) ۱۲۹
۷-۴- ضریب انطباق دیواره (JMC) ۱۳۱
۷-۵- زاویه اصطکاک باقیمانده ۱۳۲
۷-۶- مقاومت برشی درزه‌ها ۱۳۳
۷-۷- مقاومت برش دینامیکی زبری درزه‌های سنگ ۱۳۵
۷-۸- تئوری مقاومت برشی در تنش‌های محبوس شده ۱۳۶
۷-۹- سختی برشی و نرمال درزه های سنگ ۱۳۷
مراجع ۱۳۸

افزایش مقاومت توده‌های سنگی در تونل‌ها ۱۴۰

۸-۱- علل افزایش مقاومت ۱۴۱
۸-۲- تأثیر تنش اصلی متوسط بر تنش مماسی گسیختگی در تونل‌ها ۱۴۱
۸-۳- مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ ۱۴۵
۸-۴- علت افزایش مقاومت در تونل‌ها و یک تئوری گسیختگی جدید ۱۴۸

۸-۴-۱- توده‌های سنگی سست ۱۵۲
۸-۴-۲- گسیختگی در مواد ناهمگن به لحاظ زمین‌شناسی ۱۵۳
۸-۴-۳- گسیختگی در توده‌های سنگی متورق ۱۵۴
۸-۵- کرنش بحرانی توده‌سنگی ۱۵۴
۸-۶- معیاری برای لهیدگی و بروز ترکش سنگ در توده‌های سنگی ۱۵۷
۸-۷- مقاومت کششی در امتداد درزه‌های ناپیوسته ۱۵۸
۸-۸- مقاومت دینامیکی توده‌سنگ ۱۶۰
۸-۹- پارامترهای مقاومت پس‌ماند ۱۶۱
مراجع ۱۶۱

روش جدید تونلسازی اتریشی ۱۶۷

۹-۱- روش‌های قدیمی تونل‌سازی ۱۶۸
۹-۲- توسعهٔ روش‌های ساخت و اجرای پوشش داخلی (آستر) ۱۶۹
۹-۳- روش‌های پیشرفته حفاری تونل ۱۷۰
۹-۴- نگهدارنده‌های موقت ۱۷۱
۹-۴-۱- روش شات‌کریت سنتی ۱۷۱
۹-۵- فلسفه روش جدید تونلسازی اتریشی (NATM) ۱۷۵
۹-۶- سنجش نهایی به وسیلهٔ اندازه‌گیری ۱۸۱
۹-۷- نکات آخر ۱۸۴
مراجع ۱۸۷

روش تونلسازی نروژی ۱۸۹

۱۰-۱- مقدمه ۱۹۰
۱۰-۲- دهانه‌های بدون نگهدارنده ۱۹۱
۱۰-۳- طراحی نگهدارنده‌ها ۱۹۴
۱۰-۴- طراحی شات‌کریت مسلح‌شده با الیاف فولاد ۱۹۶
۱۰-۴-۱- توضیحات تکمیلی بارتون و همکاران ۲۰۴

۱۰-۴-۲- توضیحات تکمیلی هوک و براون ۲۰۷
۱۰-۵- اقدامات مربوط به زه‌کشی ۲۱۰
۱۰-۶- تجربیات مربوط به شرایط سنگ‌های ضعیف ۲۱۰
۱۰-۷- نکات پایانی ۲۱۱
مراجع ۲۱۴

فصل ۱

مقدمه

«دانشگاه جایی است که شما می‌آموزید که چگونه یاد بگیرید»

سقراط ۴۷۰ تا ۳۹۹ سال قبل از میلاد مسیح (ع)

ساختن تونل لذت بخش است. ساختن تونل یک هنر است. احداث تونل در توده‌های سنگی ضعیف تجارت مخاطره آمیزی است. تونل‌ها مورد علاقهٔ کل افراد در سراسر جهان هستند و همچنین در طول جاده‌های تپه‌ای و خطوط ریلی باعث جذب توریست‌ها می‌شوند. متروهای زیرزمینی متداول‌تر از تونل‌ها هستند و عملکرد آن‌ها از حمل ونقل سطح جاده‌ای ایمن‌تر می‌باشد. تونل‌ها حتی در طول زمین لرزه‌هایی با شدت بالا ایمن‌اند. به علاوه فناوری ساخت تونل‌های زیرزمینی، اکوسیستم و شرایط زیست محیطی را ارتقا داده است.

کتاب‌های سنتی سزوچی[1] (۱۹۶۷)، بینیساوسکی[2] (۱۹۸۴)، بیکل[3] و همکاران (۱۹۹۷) و هوک[4] و همکاران (۱۹۹۵)، به طور کلی با موضوع ساخت تونل در سنگ‌های سخت سروکار دارند. بینیساوسکی تاریخچه‌ای از ساخت تونل ارائه کرده است که بسیار جالب است. تونل‌های شگفت انگیز زیردریایی (تونل‌های ریلی غوطه‌ور در سراسر جهان) توسط کالورول[5] (۱۹۹۰) تشریح شده است. منطقهٔ هیمالیا بهترین آزمایشگاه میدانی برای درک مکانیک سنگ و فناوری ساخت تونل در سنگ‌های ضعیف است. از این رو، تجربهٔ ساخت تونل در کوه‌های هیمالیای جوان و ضعیف از لحاظ ژئوتکنیکی برای مهندسان تونل در سراسر جهان پر ارزش است. رشته کوه هیمالیا آزمون‌های زیادی برای نظریه‌ها و فناوری‌های ساخت تونل فراهم می‌کند. از این رو، هیمالیا برای همهٔ ما ارزش است.

پروفسور کارلز فیرهاست[6] زمانی عنوان کرد که تنها یک استراتژی برای ساخت تونل می‌توان طراحی کرد. طراحی سیستم نگهدارندهٔ تونل در شرایط زمین‌شناسی پیچیده امکان‌پذیر نیست. شرایط زمین‌شناسی پیچیده و کوه‌های بلند مشکلات فوق العاده‌ای در ساخت تونل به همراه دارند. شگفتی‌های زمین‌شناسی در راستای تونل‌های بلند و عمیق (بیشتر از یک کیلومتر طول) درنواحی کوهستانی جوان و

1 Szechy
2 Bienisawski
3 Bickel
4 Hoek
5 Culverwell
6 Charles Fairhurst

دست‌خورده رایج است. شگفتی‌های زمین‌شناسی (نواحی برشی وگسل ها) حتی بعد از تکمیل تونل ممکن است، کشف شوند. از این رو، استراتژی طراحی شده برای تقویت موضعی تونل، نزدیک ضعف‌های زمین‌شناسی غیر منتظره، باید به حد کافی انعطاف پذیر باشد. برخلاف دیگر پروژه‌های عمرانی، برنامه‌ریزی‌ها باید قابل انعطاف باشد. اکتشاف، کوچکترین حلقه در پروژهٔ ساخت تونل‌های طولانی و عمیق است. مشکلات زیادی در ایجاد گمانه‌های حفاری در طول تونل عمیق و طولانی در منطقه وجود دارد زیرا دستگاه حفاری را به بالای کوه نمی‌توان برد و همیشه آب مورد نیاز حفاری قابل دسترس نیست. به طور کلی گمانه‌های اکتشافی برای درک مقطع عرضی زمین‌شناسی ایجاد می‌شوند. اما در لایه‌های چین خورده و گسل‌ها، خطاهای اکتشاف بر اساس عمق‌های مشاهده شده در حفاری‌ها زیاد است. مهندسان عمرانی برای شناخت بیشتر توده‌سنگ، نیاز به یک مقطع عرضی زمین‌شناسی قابل اطمینان دارند. از این رو بایستی چندین گمانه در مسیر ساخت تونل برای شناخت شرایط زمین‌شناسی حفاری شود. این گمانه‌های شناسایی نقش بسیار مهمی در هنگام ساخت تونل در سنگ‌های ضعیف، ایفا می‌کند.

دستگاه حفر تونل[1] (TBM) انتخابی مناسبی برای توده‌های سنگی همگن و غیر فشرده ($H<350Q^{1/3}$) و بدون نواحی برشی است. مهندسان نباید از TBM در محلی که تحقیقات زمین‌شناسی مهندسی به طور مفصل انجام نشده و توده‌سنگی بسیار ناهمگن است، استفاده کنند. پیمانکاران می‌توانند TBM را با توجه به شرایط همگن توده‌سنگ، طراحی کنند (باسین[2]،۲۰۰۴).

مکانیک سنگ نقش مهمی در برنامه‌ریزی و ساخت تونل ایفا می‌کند. باید توجه کرد که معمولاً لایه‌هایی که قابل اطمینان به نظر می‌رسند، ممکن است مشکلات شدیدی در راستای ساخت تونل بوجود آورند. مهندسی ساخت تونل در سال ۱۹۷۰ شکل گرفت ولی قبل از آن نیز ساخت تونل انجام می‌گردید. خطرات احداث تونل هم اکنون بهتر درک می‌شوند و مؤثرتر حل می‌گردند. مهندسان مکانیک سنگ و زمین‌شناسان برای ایمنی کارگران و رفع تهدیدهای ساخت تونل باید در پروژه‌های مهم حفر تونل استخدام شوند. معمولاً پشتیبانی خوب، هزینهٔ اجرا و تأخیر در تکمیل ساخت تونل‌ها را کاهش خواهد داد.

1 Tunnel Boring Machine
2 Bhasin

روش‌های متعارف ساخت تونل با حفاری و انفجار در روش تونل‌سازی جدید اتریشی (NATM) و روش نروژی ساخت تونل (NMT) بکار رفته است. ماشین آلات ساخت تونل در حفاری‌های سریع، بسیار مفید هستند. NATM (فصل نهم) استراتژی ساخت تونل را در طریق شرایط مختلف زمین ارائه می‌کند. NMT یک جدول طراحی را برای سیستم نگهدارنده ارائه می‌کند. شات‌کریت تقویت شده با الیاف فولادی (SFRD) عموماً در نگهداشتن سنگ‌های ضعیف و متوسط در زمین‌های فشرده استفاده می‌شود. به طور طبیعی SFRS با پیچ‌سنگ‌های پرشده با دوغاب انتخاب ایده‌آلی برای سنگ‌های ضعیف است. به مهندسان و دانشمندان زمین‌شناسی باید برای ساخت تونل ایمن در دوران پیشرفته تبریک گفت. ترس از ساخت تونل در اعماق زیاد (کمتر از ۱۰۰۰ متر) دیگر وجود ندارد. این کتاب سعی دارد تا یک استراتژی یکپارچه و پیشرفته را درمورد ساخت تونل در سنگ‌های ضعیف برای قرن بیستم ارائه کند.

شرایط مدیریتی بیش از شرایط جغرافیایی بر نرخ ساخت تونل تأثیر می‌گذارد. از این رو، پیشرفت در مدیریت ساخت بسیار مهم است. مدیران باید تلاش‌های بیشتری برای بستن قراردادهای موفق و مؤثر در به چالش کشیدن شغل‌هایی مثل ساخت تونل در سنگ‌های ضعیف و خردشده انجام دهند. روح همکاری و تعهد (یعنی اعتماد دو جانبه) باید به وسیلهٔ مدیران اجرایی ایجاد شود. مدیریت بحران مخصوصاً در ساخت تونل مهم است. پیمانکاران باید زندگی کارگران و TBM و ماشین‌آلات تونل را در حین کار تضمین کنند. همهٔ ارادهٔ مهندسان عمران در تکمیل سریع یک پروژه متمرکز می‌شود. در واقع، تمام آنچه که ما امروز در مورد مکانیک سنگ آموخته‌ایم، ناشی از تجربیات ساخت تونل در گذشته است. نظارت قابل اعتماد و مستمر توسط ابزار پیشرفته، کلید موفقیت در مقابله با خطرات غیر منتظره در ساخت تونل است. تجارب گستردهٔ موسسهٔ تحقیق مرکزی معدن در هند این را نشان می‌دهد.

نیمهٔ آخر قرن بیستم به عنوان طلوع عصر طلایی ساخت تونل در کل جهان نامیده شده است. در حدود پنجاه سال گذشته، بیشتر تونل‌های عمیق و طولانی در کوه‌های سنگی آلپ ساخته شده‌اند. تونل ۳۴ کیلومتری لوتسبرگ زیر کوه آلپ سویس که در سال ۲۰۰۷ به پایان رسید، هم اکنون طولانی‌ترین تونل برای حرکت قطارها روی زمین است. تونل دیگر، تونل گوتهارد با طول ۵۸ کیلومتر در موازات تونل لوتسبرگ طولانی‌ترین تونل جهان خواهد بود ولی در سال ۲۰۲۰ به پایان می‌رسد.

مهندسان تونل و زمین‌شناسان و مدیران باید برای چالش‌های آینده در ساخت تونل تعلیم ببینند. بینیساوسکی عنوان کرد که درس‌های ذیل را باید از تجارب ارزشمند گذشته آموخت.

۱. ساخت تونل در سنگ‌های سخت هم اکنون علمی آمیخته با هنر تجربی است.

۲. پیشرفت‌های عظیم در فناوری ساخت تونل به دلیل تلاش‌های تیمی بود، اما اغلب به رهبری یک نفر انجام می‌گرفت.

۳. ابتکار و خلاقیت مهندسان در گذشته ثابت شده است اما هنوز پتانسیل کامل مهندسان ساخت تونل کشف نشده است. نقش مهندس مکانیک سنگ در پروژهٔ ساخت تونل بسیار موثر است.

۴. دستگاه حفر تونل در تمام سنگ‌های همگن، خاک‌ها، تخته سنگ‌ها و مناطق گسل و غیره می‌تواند موفق باشد.

به لطف خدا، آیندهٔ ساخت تونل و فناوری استفاده از فضای زیرزمینی، روشن‌تر از گذشته به نظر می‌رسد. در کشور اتریش، تونل‌های زیرزمینی شهری در طول آزاد راه‌ها رایج است. تقاضا برای متروهای زیرزمینی چند طبقه‌ای با راه‌های دسترسی فراوان به سرعت درحال افزایش است. انتظار می‌رود که ساخت تونل حتی در سنگ ضعیف به سرعت در حال پیشرفت باشد. شبکهٔ تونل آب آشامیدنی یک ضرورت فوری در کشورهای پرجمعیت است. تونل‌های زیر دریا در تخیل برنامه‌ریزان در حال شکل گرفتن هستند. تونل بین لندن و نیویورک در اقیانوس اطلس درحال برنامه‌ریزی است. اجرای شهرهای زیرزمینی از لحاظ اقتصادی تا اواخر قرن بیستم اجرایی می‌شود. ایالات متحده آمریکا دستگاه حفاری ذوب سنگ را در سال ۱۹۷۲ ابداء کرد. بدین ترتیب که این دستگاه توده‌سنگ را در گاز می‌سوزاند و به پیش می‌رود. نروژ ساخت تونل‌های شناور روی دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها را تجربه می‌کند. مهندسان آینده و دانشمندان قصد دارند در استفاده از انرژی مؤثرترین باشند. سازه‌های زیرزمینی برخلاف ساختارهای سطحی از مردم در برابر انواع بلایای طبیعی حمایت می‌کنند.

مراجع

Bhasin, R. (2004). Personal communication with Prof. Bhawani Singh, IIT Roorkee, India.

Bickel, J. O., Kuesel, T. R. and King, E. H. (1997). *Tunnel Engineering Handbook.* 2nd edition, Asian edition, Chapman & Hall Inc., New York and CBS Publishers, New Delhi, 544.

Bieniawski, Z. T. (1984). *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling*. A. A. Balkema, 272.

Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A. A. Balkema, 215.

Szechy, K. (1967). *The Art of Tunnelling*. Akademiai Kiado, Budapest, 891.

فصل ۲

کاربرد ژئوفیزیک در ساخت تونل و فعالیت‌های پژوهشی محل

«زمین‌شناسی که عمدتاً از آن به عنوان علم تاریخی و توصیفی یاد می‌شد، در سال‌های اخیر جنبهٔ کاربردی به خود گرفته است. این علم تا حد زیادی، کاربردی و عملی شده است. زمین‌شناسی در صنعت معدن به عنوان ابزار کمکی در شناسایی معادن فلزات نقش اول را بازی می‌کند. هم اکنون زمین‌شناسی در فرآوری سوخت و جستجو برای میادین نفت، با در نظر گرفتن معیارهای زیست محیطی ایفای نقش می‌کند.»

چارلز برکی، مهندس پیشگام زمین‌شناسی ۱۹۳۹

تکنیک‌های پیشرفته در ساختار زیرزمینی نیاز به استفاده از دانش پیشرفته دارد که این نوعی از علم و تجربه است. به طور کلی درپایان این هزارهٔ میلادی و با افزایش روز افزون حفاری‌های زیرزمینی، موضوع مقرون به صرفه بودن و ایمنی حفاری‌ها اهمیت یافته است. تکنیک‌های پیشرفتهٔ ژئوفیزیک، مفهوم و کاربرد آن در ساختارهای زیرزمینی مخصوصاً در تونل‌ها در این فصل بحث و بررسی شده است.

پیشرفت اولیه در روش‌های ژئوفیزیک برای تعیین ساختار زمین‌شناسی زیر سطح زمین، ابتدا برای تحقیق روی مخازن بالقوه نفت و گاز طبیعی شکل گرفت. امروزه، تکنیک‌های ژئوفیزیک نه تنها برای شناسایی‌های زیرزمینی در اعماق صد متری بلکه برای شناسایی مخازن عمیق‌تر نفت و گاز طبیعی در اعماق چندین کیلومتری، استفاده می‌شوند. اخیراً این گرایش (استفاده از ژئوفیزیک) در بسیاری از کشورها با تصویب قوانین خاص حاکم بر استفاده عمومی فضای زیرزمینی ارتقا یافته است.

۲-۱- اکتشاف ژئوفیزیکی

اکتشاف ژئوفیزیکی برای شناسایی ساختارهای زیرسطحی و ویژگی‌های فیزیکی مربوط به سنگ‌ها به عنوان یک تکنیک غیر حفاری استفاده می‌شود. موقعیت و پراکندگی گسل‌ها و مناطق ترک‌خورده هم اکنون به طور معمول با تکنیک‌های ژئوفیزیک شناسایی می‌شوند. تکنیک‌های تحلیل نتایج خام داده‌های ژئوفیزیک در دو گروه تحلیل مستقیم و تحلیل معکوس دسته‌بندی می‌شوند.

شکل ۲-۱- تکنیک‌های مختلف برحسب کاربردشان در روند های تحلیل مستقیم و معکوس

جدول ۲-۱- تکنیک‌های اکتشاف ژئوفیزیکی و پدیده‌های ژئوفیزیکی

اکتشاف لرزه‌ای	بازتاب و شکست امواج لرزه‌ای
تعمیق الکتریکی	مقاومت ویژه و القاء شدهٔ پدیدهٔ قطبی‌شدگی
روش الکترومغناطیسی	پدیدهٔ القایی
ثقل‌سنجی	چگالی
مغناطیس‌سنجی	استعداد
رادیومتری‌سنجی	پدیدهٔ پراندگی اشعهٔ γ، رادن
اکتشاف ژئوترمال	پدیده ژئوترمالازگرادیان زمین گرمایی، شار گرما
چاه	ژئوفیزیک در اکتشاف با استفاده ازگمانه
ژئوتوموگرافی	اکتشاف ژئوفیزیک بین گمانه‌ها

تحلیل مستقیم در واقع تکنیک‌هایی را برای دریافت داده‌های ژئوفیزیکی با نسبت S/N (سیگنال به نوسان نویز) زیاد تعریف می‌کند. درحالی که تحلیل معکوس در مورد تکنیک‌های طراحی شده برای بازسازی ساختار سطح زیرین با دقت بالا ازطریق تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی است. نسبت S به N به وسیلهٔ معادلهٔ ۲-۱ تعریف می‌شود.

$$dB=(decibel)=20\log_{10} S/N \qquad (۱-۲)$$

که dB نسبت بیان شده به اعشار است.

تمایز لایه‌های نازک بر حسب ساختار زمین‌شناسی توسط داده‌های ژئوفیزیک انجام می‌شود. یکی از روش‌های اکتشاف ژئوفیزیک، تکنیک موج زمین لرزه است. در مورد بررسی بازتاب موج زمین لرزه، دقت داده‌های دریافتی در جهت عمودی به یک چهارم طول موج محدود می‌شود. برای مثال اگر سرعت زمین لرزه‌ای موج، ۲۰۰۰ متر بر ثانیه باشد و فرکانس موج بازتاب شده ۵۰ هرتز باشد، طبق معادلهٔ ($V=f. \lambda$)؛ یک چهارم طول موج ۱۰ متر خواهد بود. بنابراین تجزیه و بررسی لایه‌های با ضخامت کمتر از ۱۰ متر، امکان پذیر نیست. پیشرفت قابل توجهی در زمینهٔ استفاده از روش‌های ژئوفیزیک صورت گرفته است. با کمک نوآوری‌های اخیر در علم الکترونیک، پیشرفت‌های اساسی در تکنیک‌های ژئوفیزیک عبارتند از:

- کاربرد وسیع تحقیقات ژئوفیزیکی سه بعدی،
- معرفی بازتاب زمین‌لرزه‌ای موج S با استفاده از گیرنده‌های سه جزئی،
- پردازش داده‌ها و تفسیر آن با استفاده از تعامل رابطهٔ دستگاه- انسان،
- استفادهٔ جامع‌تر از تکنیک‌های مختلف اکتشاف،
- تفسیر ویژگی فیزیکی لایه‌ها،
- معرفی تحقیقات چهار بعدی، یعنی تحقیقات دوره‌ای برای نظارت،
- کاربرد بالای تکنیک‌های مجازی،
- معرفی ریاضیات جدید و مفاهیم فیزیکی.

عوامل درنظر گرفته شده در بکارگیری تکنیک‌های ژئوفیزیک در فناوری ساخت تونل و مهندسی ژئوتکنیک عبارتند از:

-شناخت ویژگی‌های فیزیکی لایه‌ها برای انتخاب تکنیک ژئوفیزیک بکار رفته،
-آگاهی از مقیاس فیزیکی لایه‌ها برای تعریف پارامترهای تحقیق،
-شناخت مناسب هر یک از تکنیک‌ها و محدودیت‌های آن‌ها،
-تفسیر یکپارچهٔ داده‌ها با استفاده از چندین تکنیک ژئوفیزیک برای افزایش دقت تفسیر،

-تشخیص محدودیت‌ها در دقت تفسیر.

در مناطقی که ویژگی‌های توده‌سنگ اختلاف زیادی دارند، روش‌های ژئوفیزیکی ممکن است قابل اطمینان نباشند. بعضی از تکنیک‌های ارزیابی در مهندسی ژئوتکنیک، جهت تعیین ویژگی فیزیکی سنگ‌ها بکار می‌روند. جدول (۲-۲) لیست تکنیک‌های ژئوفیزیک بکار رفته در مهندسی ژئوتکنیک را ارائه می‌کند.

جدول ۲-۲- تکنیک‌های اکتشاف ژئوفیزیک در حوزهٔ مهندسی سنگ و ژئوتکنیک

حوزهٔ فنی	موضوع	تکنیک‌های ژئوفیزیکی
الف. حوزهٔ شهری و عمرانی	پیش‌بینی امتداد مسیر تونل	پروفیل کردن افقی زمین لرزه با استفاده از روش الکترومغناطیس
	تحقیق برای تونل	
۱.حفاری تونل	تحقیق برای فضاهای سست‌شده از طریق حفاری تونل	تعمیق بازتاب لرزش پرتونگاری مقطعی زمین
۲. ساخت راه	شناخت منطقه گسله	روش الکترومغناطیس
۳.بهبود مقاومت لایه نازک	ارزیابی بهبود مقاومت لایهٔ نازک	بازتاب زمین‌لرزه‌ای؛ واقعه نگاری PS
ب. حوزهٔ توسعهٔ انرژی		
۱.تنظیم خط لوله گاز	تنظیم خط لوله‌های گاز بدون حفاری	رادار زمینی
پ.حوزهٔ محافظت در برابر		

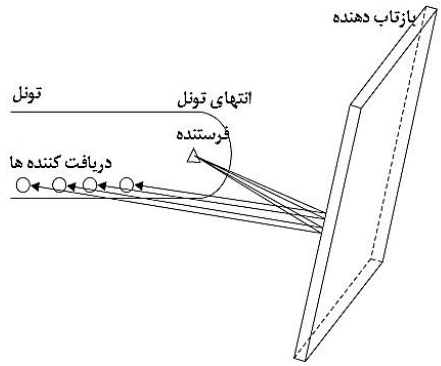
حوادث و حفظ محیط زیست		
۱.بررسی گسل فعال	تعیین موقعیت چاله و ترانشه	بازتاب زمین لرزه و تعمیق الکتریکی
۲. تحقیق زمین لغزه	پیش‌بینی زمین لغزه	الکترومغناطیس روش میکرولرزه‌ای بازتاب سه بعدی زمین لرزه تعمیق الکتریکی
۳.تشخیص حفره درساحل رودخانه	تشخیص حفره در ساحل رودخانه	
۴.تخلیه زیرزمینی اب های صنعتی	نشت اب در موقعیت مواد زائد	تعمیق الکتریکی
ت.حفظ زمین طبیعی		
۱.تحقیقات باستان شناسی	کشف خرابه های جدید و بازسازی وضعیت	امواج الکتریکی مادون قرمز–گرمایی
ث.حوزه نگهدرای		
۱.تشخیص بتن	تشخیص شکستگی و حفره	رادار نفوذ کننده زمین؛ مادون قرمز گرمایی ؛تعمیق با چکش
ج. زمینهٔ نظامی یا دفاعی		
۱.انفجار معدن زمینی	تفکیک محل مین زمینی	منابع انرژی

۲-۲- نمونه هایی از کاربرد

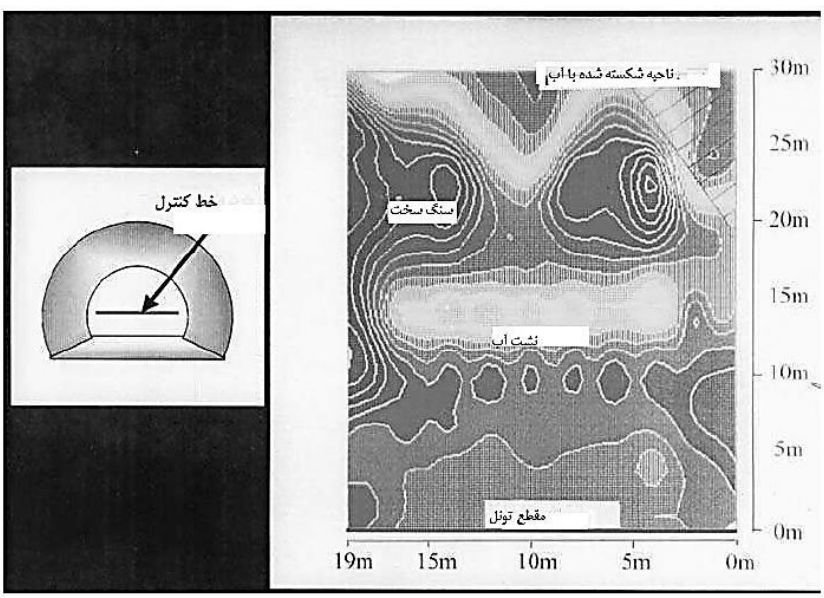
بخش ذیل چندین نمونه از کاربرد تکنیک‌های ژئوفیزیک در فناوری ساخت تونل را بیان می‌کند.

۲-۲-۱- پیش‌بینی مسیر تونل

برای بررسی شرایط زمین‌شناسی در امتداد مسیر تونل، تحقیقات ژئوفیزیکی با استفاده از موج‌های الکترومغناطیسی و ارتجاعی انجام می‌شود. نمودار شماتیک داده‌های میدانی دریافت شده در بررسی مسیر تونل با استفاده از موج‌های ارتجاعی، در شکل (۲-۲) نشان داده می‌شود. درون تونل چندین منبع انرژی برای ایجاد موج‌های ارتجاعی قابل استفاده است که شارژ ۱۰۰-۲۰۰ گرم دینامیت، تأخیر انفجار در سطح تونل و لرزش‌های ایجاد شده به واسطهٔ TBM (دستگاه حفاری تونل) از آن جمله هستند. موج‌های لرزه‌ای با گذر از مرزهای زمین‌شناسی دچار آشفتگی واختلال می‌شوند. این اختلالات زمین‌لرزه‌ای به وسیلهٔ ژئوفون‌های قرار گرفته در هر طرف دیوار تونل دریافت می‌شوند و در ثبت کننده‌های داده‌ها پردازش می‌شوند. موج‌های بازتاب ایجاد شدهٔ دارای قطبیت مثبت، تقریباً تغییرات را از سنگ سخت تا سنگ نرم از ۴۰ متر در سمت چپ وحدود ۶۰ متر تا۹۰ متر در سمت راست، در امتداد مسیر تونل نشان می‌دهند. شکل (۲-۳) نتیجهٔ تحلیل داده‌های الکترومغناطیسی با استفاده از فرستنده و گیرنده مستقر درون تونل را نشان می‌دهد. این نتایج با مقاومت لایه‌ها در گزارشات میدانی تطابق خوبی دارند.



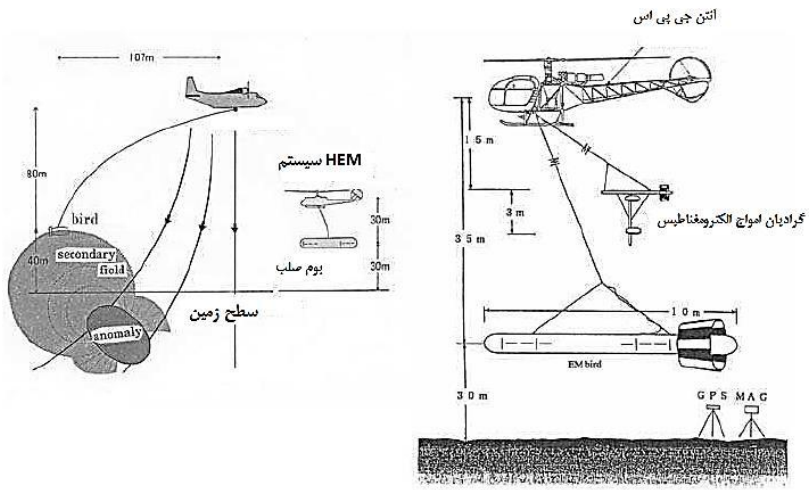
شکل ۲-۲ جمع‌آوری داده‌ها در مسیر تونل



شکل ۲-۳ تحلیل امواج الکترومغناطیس در بررسی امتداد تونل

۲-۲-۲- اطلاعات زمین‌شناسی مورد نیاز قبل از ساخت تونل

در این قسمت بایستی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، اطلاعات زمین‌شناسی را قبل از ساخت تونل بدست بیاوریم. معمولاً قبل از ساخت تونل از روش الکترومغناطیسی با استفاده از هلیکوپتر استفاده می‌شود. قاعدهٔ کلی روش الکترومغناطیس با استفاده از هلیکوپتر در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. فرستندهٔ امواج، در هلیکوپتر میدان اولیهٔ الکترومغناطیسی را ایجاد می‌کند و همچنین گیرنده، در هلیکوپتر میدان الکترومغناطیس ثانویهٔ برگشتی از زمین را ثبت می‌کند. میدان مغناطیسی زمین روی امواج برگشتی تأثیر می‌گذارند. بنابراین اثر میدان مغناطیس کل زمین بایستی به صورت همزمان با ثبت داده‌ها در هلیکوپتر در نظر گرفته شود زیرا که میدان مغناطیسی زمین دائماً در حال تغییر است.



شکل ۲-٤- نمای شماتیک تحقیق الکترومغناطیس با استفاده از هلیکوپتر

آشیدا[1] (۲۰۰۱) به منظور پیش‌بینی شرایط زمین‌شناسی در مسیر یک تونل، نتایج بررسی الکترومغناطیس هلیکوپتری انجام شده را ارائه کرد. این روش (الکترو مغناطیس هلیکوپتری) اجازه

1 Ashida

می‌دهد قبل از شروع ساخت تونل اطلاعات زمین‌شناسی برای امتداد مسیر تونل بررسی شوند. این رویداد پیشرفته برای تکمیل مطالعات زمین‌شناسی است.

ارتباط نزدیکی بین کیفیت توده‌سنگ (Q) و سرعت موج P طبق معادلهٔ (۵-۱۵) و شکل (۵-۵) وجود دارد. جزئیات این رابطه به طور مختصر در بخش ۳-۸-۵ ارائه گردیده است. کیفت توده‌سنگ بر اساس امواج برگشتی از بالای جبههٔ مسیر تونل تعیین می‌شود. در شکل (۲-۱۰) مبنای طراحی برای شرایط مختلف سنگ ارائه شده است.

بررسی ضریب مقاومت الکتریکی لایه‌ها در کشف مناطق گسل‌دار و پر از آب در توده‌های سنگی اهمیت زیادی دارد. این مهم با بررسی امواج الکترومغناطیس برگشتی انجام می‌گردد. مناطق وسیع پر از آب به طور حیرت‌آوری در سنگ‌های سختی مثل گرانیت، بازالت، کوارتز و غیره وجود دارند و می‌توانند تهدیدها و مخاطرات زیادی در ساخت تونل بوجود آورند.

۲-۲-۳- بررسی مقاومت لایه‌های نازک

اولین بار بهبود مقاومت لایه‌های نازک برای از بین بردن اثرات فرسایشی نامطلوب رودخانه عبوری از یک شهرستان انجام شد. لایه‌های نازک و ضعیف در ساحل و بستر رودخانه با تزریق دوغاب سیمان درون حفره‌های کوچک، در فواصل حدوداً ۲ متری تقویت شد. این کار به جهت اجتناب از نشست تأسیساتی مثل کابل‌های ارتباطی و لوله‌های فاضلاب در کف رودخانه انجام شد.

بهبود مقاومت لایه‌های نازک و ضعیف در کف رودخانه به شیوه‌های ذیل انجام می‌شود:

-بستن عرض بیش از نصف رودخانه برای انجام عملیات بر روی لایه‌های زیرین رودخانه،

-بهبود مقاومت لایه‌ها در فواصل حدوداً ۲ متر،

-نصب تأسیساتی مثل کابل‌های ارتباطی و لوله‌های فاضلاب روی لایهٔ تقویت شده (تثبیت شده)،

-عملیات مشابه بر روی نیمهٔ دیگر عرض رودخانه.

در ارزیابی بهبود مقاومت لایه‌های نازک، تعیین اینکه مقاومت فشاری و ضخامت لایهٔ تقویت شده الزامات را برآورده می‌سازد، حائز اهمیت است. به طور کلی امواج لرزه‌ای از محل تشکیل به صورت کروی منتشر می‌شوند. این امواج با سرعتی که بستگی به خواص الاستیکی توده‌سنگ دارد از داخل سنگ عبور می‌کنند. امواج لرزه‌ای در محل تغییر جنس لایه‌ها منعکس یا منکسر شده و پس از بازگشت به سطح زمین توسط ابزارهایی ثبت می‌شوند. این امواج که مشابه امواج زمین‌لرزه ولی به مراتب ضعیف‌تر از آن هستند، برچند نوع هستند.

امواج اولیه یا فشاری (P) که نوعی امواج داخلی هستند که در جهت انتشار موج ارتعاش می‌کنند. امواج برشی یا عرضی (S) که نوعی امواج داخلی هستند که در آنها امتداد ارتعاش ذرات عمود بر جهت انتشار موج است.

استفاده از موج‌های S نسبت به موج‌های P دارای اهمیت بیشتری است، چون سرعت پایین‌تر موج‌های S باعث افزایش کیفیت سیگنال برگشتی از توده‌سنگ می‌شود. رابطهٔ بین سرعت موج S و مقاومت فشاری تک محوری لایه، از طریق معادلهٔ (۲-۲) مشخص می‌گردد.

$$q_u = 6.0 * 10^{-7} V_s^{2.3821} \qquad (۲-۲)$$

معادلهٔ (۲-۲) این امکان را می‌دهد که مقاومت فشاری لایه را بعد از بهبود مقاومت تعیین کرد. همچنین باید عنوان کرد که استفاده از منابع انرژی موج S قبل از ساخت تونل برای پیش‌بینی مسیر زهکشی قابل استفاده خواهد بود. سرعت موج S تحت تأثیر درجهٔ اشباع توده‌سنگ نیست، درحالیکه سرعت موج P به دلیل عبور راحت‌تر از منابع آب زیرزمینی با افزایش درجهٔ اشباع بیشتر می‌شود.

۲-۳- پیش‌بینی امتداد تونل با منبع قرار گرفته در سطح

پیش‌بینی جبههٔ تونل به روش انکسار ارتعاشی با استفاده از منابعی درون تونل انجام می‌شود. در ابتدا با استفاده از فرستنده و گیرنده‌هایی در سطح زمین عملیات در فاز شناسایی انجام می‌شود. سپس دریافت داده‌ها و تحلیل آن‌ها با استفاده از فرستنده‌ها در تونل در مرحلهٔ ساخت تکرار می‌گردد. داده‌های دریافت

شده در مراحل شناسایی و ساخت تونل به صورت همزمان تحلیل می‌شوند. برای نشان دادن بازدهی این روش آزمایشات عددی و میدانی حاصل از روش انکسار ارتعاشی به کار می‌روند. داده‌ها بدون منابعی در داخل تونل نمی‌توانند مدل سرعت را به وضوح ترسیم کنند. هرچه تعداد فرستنده در تونل افزایش می‌یابد، کیفیت داده‌ها و تحلیل مدل‌های بازسازی شده نیز بالا می‌رود. مخصوصاً، در جبههٔ تونل سرعت موج در توده‌سنگ را می‌توان به طور دقیق برآورد کرد. روشی که برای تعیین محل واقعی تونل به کار رفته بود، همان روش انکسار درتونل می‌باشد. بررسی کیفیت سنگ در امتداد مسیر تونل با استفاده از روش‌های انکسار ارتعاشی را مطابق با سوابق حفاری تطابق داد.

یکی از روش‌های بکار رفته در هدف فوق، روش انعکاس ارتعاشی درون تونل است، مثلاً TSP.HSP (ساتل[1] و همکاران، ۱۹۹۲ و آشیدا و همکاران، ۱۹۹۹ و اینازاکی[2] و همکاران، ۱۹۹۹) که در آن منابع و گیرنده ها درون تونل قرار می‌گیرند. این روش در ساخت تونل فراوان بکار رفته است، اگرچه این تلاش‌ها عمدتاً در مرحلهٔ آزمایشی می‌باشند. با این وجود، هرچه تعداد کاربردهای عملی در این روش افزایش یابد، اختلاف بین پیش‌بینی‌ها و نتایج ساخت مشخص‌تر می‌شود و بسیاری از مشکلات در پیش‌بینی‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند. روش انکسار ارتعاشی سطحی یکی دیگر از روش‌ها است که در فاز شناسایی انجام می‌شود. این روش در ژاپن طی سال‌های متمادی در بررسی‌های تونل به عنوان روش استاندارد بکار رفته است. با این وجود، در سال‌های اخیر نیاز به بررسی دقیق‌تری در این روش می‌باشد. اگرچه این روش (انکسار ارتعاشی سطحی) عمدتاً دقت نتایج انکسار ارتعاشی را بالا برد، لیکن نمی‌توان عنوان کرد که این روش الزامات را کاملاً برآورده می‌سازد.

هر دو روش انعکاس درون تونل و انکسار ارتعاشی، کیفیت توده‌سنگ در راستای مسیر تونل را برآورد می‌کنند. مدل سرعت لرزه‌ای با استفاده از تولید مصنوعی امواج لرزه‌ای پیش‌بینی می‌شود. دو علت مهم برای اختلاف بین پیش‌بینی‌ها و نتایج واقعی وجود دارد. اول اینکه مدل‌های سرعت یا مدل‌های توزیع بازتاب اشعه که از روش انکسار ارتعاشی و روش انعکاس درون تونل بدست می‌آیند، ممکن است دقیق نباشند. دوم این است که تفسیر نتایج تحلیلی مناسب نباشند. اولین مورد، مشکل عمومی روش‌هاست.

1 Sattel
2 Inazaki