

فصل اول

تاریخچه و معرفی زمین‌شناسی مهندسی

۱-۱ مقدمه

زمین‌شناسی، علمی است که به بررسی ترکیب عناصر تشکیل‌دهنده زمین، اجزای آن، تاریخچه شکل‌گیری زمین و کلیه فرآیندهای سطح زمین، بحث می‌کند. از سوی دیگر، مهندسی حرفه‌ای است که تمام اطلاعات علمی را می‌تواند در عمل با اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین شکل به کار گیرد. به عبارت دیگر، مهندس کسی است که می‌تواند کاری را که هر فرد عادی با صرف وقت و هزینه‌های گزاف انجام دهد، با وقت و هزینه کمتری ولی با اطمینان بیشتر به انجام برساند. از ترکیب این دو علم با یکدیگر، علم زمین‌شناسی مهندسی^۱ یا مهندسی زمین‌شناسی^۲ به وجود می‌آید. زمین‌شناسی مهندسی بین آزمایش‌های تجربی و روابط ریاضی ارتباط برقرار نموده و با تلفیق آنها بهترین نتیجه را به منظور کاهش هزینه‌ها و بالا بردن کیفیت کار ارائه می‌دهد.

زمین‌شناس مهندسی، زمین‌شناسی است که با علوم و فنون مهندسی آشنایی پیدا می‌کند. مهندس زمین‌شناسی، یک مهندسی است که علم زمین‌شناسی را می‌آموزد. مهندس می‌تواند

¹ Geological Engineering

² Engineering Geology

دارای تخصص عمران، آب، معدن و یا حتی کشاورزی باشد. اخیراً رشته‌هایی مثل کامپیوتر، GIS^۱، IT^۲، مکانیک و آمار به کمک گرایش‌های زمین‌شناسی درآمدند و رشته‌های نوینی مثل ژئوانفورماتیک^۳، ژئوماتیک^۴، ژئومکانیک^۵، علوم محیط‌زیست و زمین‌آمار را به وجود آوردند.

۱-۲ تاریخچه علم و مطالعات زمین‌شناسی مهندسی

زمین‌شناسی از قرن هجدهم وارد عرصه مهندسی شد. در ابتدا، زمین‌شناسی در بین مهندسان عمران و معدن رواج داشت. این مهندسان در گودبرداری‌های خاک و سنگ، برای اجرای ساختمان‌های بزرگ مهندسی با مشاهدات و اکتشافات خود به تشابه برخی از ویژگی‌های مواد زمین در نقاط مختلف برخوردند. این ایده‌ها و تئوری‌ها مبنای کارهای عملی در کارهای زیرسطحی شد و بدین ترتیب زمین‌شناسی به‌عنوان یک علم در این حوزه‌ها توسعه یافت.

بنیان‌گذاران علم زمین‌شناسی مهندسی، مهندسانی همچون چالرز برکی^۶ و لوئیس اونس^۷ (۱۷۵۶-۱۷۰۰) در آمریکا، ویلیام اسمیت^۸ (۱۸۳۹-۱۷۶۹) در انگلستان و پیرکودیر^۹ (۱۸۶۲-۱۷۷۷) در فرانسه (Price, 2009) و بسیاری دیگر از جمله دانشمندان ایران، همانند ابن‌سینا، کرجی و ابوریحان بیرونی هستند.

با گسترش فعالیت‌های عمرانی نیاز به علم زمین‌شناسی افزون شد و مهندسان در کار خود مسائل مهندسی را با دانش و درک شرایط زمین تکمیل کردند. در اواخر قرن هجدهم علم زمین‌شناسی در حرفه مهندسی توسعه یافت و زمین‌شناسی کم و بیش در برخی از کشورها

¹ *Geographic Information System*

² *Information Technology*

³ *Geoinformatics*

⁴ *Geomatic*

⁵ *Geomechanics*

⁶ *Charles Berkey*

⁷ *Lewis Evans*

⁸ *William Smith*

⁹ *Pierre Cordier*

جزو سرفصل آموزشی دانشجویان مهندسی قرار گرفت. اما دانش زمین‌شناسی در کرسی‌های مهندسی دچار چالش می‌شد، چون آنان با مبانی علم زمین‌شناسی آشنا نبودند. تا اینکه زمین‌شناسانی همانند جیمز دانا^۱ (۱۸۹۵-۱۸۱۳) در آمریکا، آلبرت حیم^۲ (۱۹۳۷-۱۸۴۹) در سوئیس و سرگیکی^۳ (۱۹۲۴-۱۸۳۵) در انگلستان کرسی‌های علم زمین‌شناسی را در دانشکده‌های فنی بر عهده گرفتند (Price, 2009).

اگرچه زمین‌شناسی عملی، گذشته طولانی دارد؛ ولی در انگلستان از سال ۱۸۱۵ مستندات علمی و نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه شد. در سال ۱۸۸۰ اولین کتاب زمین‌شناسی مهندسی توسط ویلیام پنینگ^۴ در انگلستان به چاپ رسید (Fookes et al., 2005).

نیاز به زمین‌شناسی در کاربردهای مهندسی در سال ۱۹۲۸ با شکست سد فراسیس^۵ در کالیفرنیا که باعث کشته شدن ۴۲۶ نفر شد؛ مورد توجه جدی قرار گرفت.

در سال ۱۹۵۷ اولین دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی مهندسی برای زمین‌شناسان و مهندسان تحت راهنمایی جان نیل^۶ در کالج شاهنشاهی لندن راه‌اندازی گردید. پس از آن این دوره در اروپا، آمریکا، کانادا توسعه یافت و در حال حاضر در دانشگاه‌های بسیاری از کشورها این رشته دایر است. در قرن نوزدهم و بیستم علم مکانیک خاک توسط مهندسانی چون چالرز کلمب^۷ و مکورن رانکین^۸ متولد شد و روش‌های محاسبه تنش خاک در کارهای مهندسی توسعه یافت. سرانجام کارل ترزاقی^۹ (۱۹۶۳-۱۸۸۳) پایه‌گذار علم مکانیک خاک مدرن شد و توانست مسائل عدیده مکانیک خاک را بررسی و راه حل‌های آن را بیابد و تحولی شگرف در این علم راه انداخت. ترزاقی اولین زمین‌شناس مهندسی است که توانست زمین‌شناسی را بصورت کاربردی به مهندسان بفهماند. در حال حاضر مبانی نظری ترزاقی است که در

¹ James Dana

² Albert Heim

³ Sir Geikie

⁴ William Penning

⁵ St. Francis

⁶ John Knill

⁷ Charles Coulomb

⁸ Macquorn Rankine

⁹ Karl Terzaghi

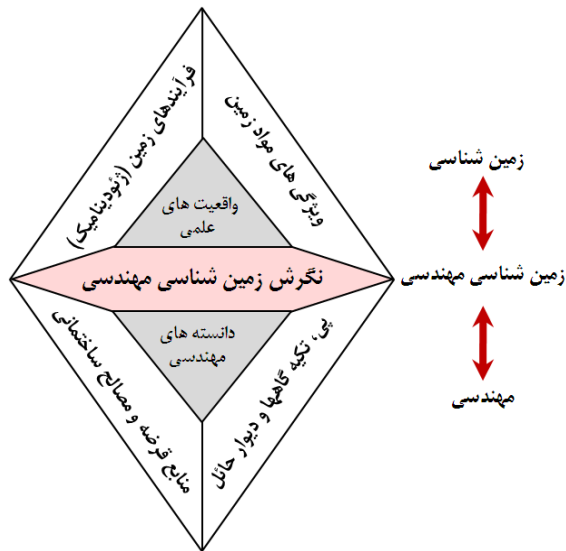
ژئوتکنیک کاربرد دارد. ترزاقی در سال ۱۹۲۵ اولین کتاب مکانیک خاک را به زبان آلمانی منتشر کرد و از آن پس به عنوان پدر علم مکانیک خاک شناخته شد (Kumar, 2004). در سال ۱۹۶۳ اولین انجمن زمین‌شناسی مهندسی (AEG)^۱ ثبت گردید و در سال ۱۹۶۷ انجمن بین‌المللی زمین‌شناسی مهندسی (IAEG)^۲ شکل گرفت (Price, 2009). در سال ۱۹۶۷ واحد زمین‌شناسی مهندسی در سازمان زمین‌شناسی انگلستان راه‌اندازی شد (Culshaw et al., 2014) و بعد از آن انجمن بین‌المللی زمین‌شناسی مهندسی هم‌ردیف با انجمن‌های بین‌المللی مکانیک خاک، مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک سنگ قرار گرفت. در ایران، رشته زمین‌شناسی مهندسی در سطوح کارشناسی ارشد و دکتری تدریس می‌شود. در سال ۱۳۶۱ این رشته در سطح کارشناسی ارشد و در سال ۱۳۷۲ در مقطع دکتری در دانشگاه تربیت مدرس تهران راه‌اندازی شده است. در حال حاضر در بسیاری از دانشگاه‌ها این رشته دایر است.

۳-۱ جایگاه زمین‌شناسی مهندسی

زمین‌شناسی مهندسی، یک گرایش بین‌رشته‌ای است. یک زمین‌شناس مهندس از یک سو به شناسایی، اندازه‌گیری و ارزیابی ویژگی‌های مواد زمین (سنگ، خاک و آب) و فرآیندهای تغییردهنده آنها می‌پردازد و از سوی دیگر زمین را برای یک پی و تکیه‌گاه و همچنین منابع قرصه و مصالح ساختمانی می‌کاود (شکل ۱-۱).

¹ Association of Engineering Geology

² International Association of Engineering Geology



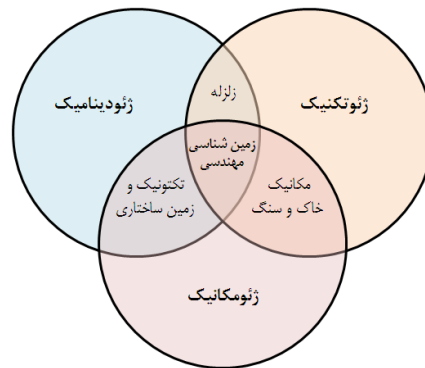
شکل ۱-۱: نگرش زمین‌شناسی مهندسی

حوزه فعالیت زمین‌شناسی مهندسی در عمل به سه بخش ژئومکانیک، ژئودینامیک^۱ و ژئوتکنیک^۲ تقسیم می‌شود (Bates & Jackson, 1980). ژئومکانیک شامل مطالعه رفتار مکانیکی سنگ‌ها و خاک‌ها و ارزیابی خصوصیات مهندسی آنها از طریق انجام آزمایش‌ها است و دارای دو گرایش مکانیک خاک و مکانیک سنگ است. ژئودینامیک به مطالعه و ارزیابی فرآیندهای فعال زمین می‌پردازد که باعث ایجاد تغییر در سطح زمین و ویژگی‌های مواد زمین می‌شود. فرآیندهای فعال زمین مثل زلزله، حرکات دامنه‌ای، پدیده‌های فرسایش و هوازدگی، سیلاب‌ها، روانگرایی، فرونشست‌ها و فروچاله‌ها پدیده‌های رایج در زمین‌شناسی‌اند که ممکن است در طول عمر مفید سازه مهندسی مورد نظر روی دهند. در حال حاضر ژئودینامیک بیشتر به مطالعه و بررسی حرکات پوسته زمین می‌پردازد. در حوزه عمل ژئوتکنیک، یک زمین‌شناس

¹ Geodynamic

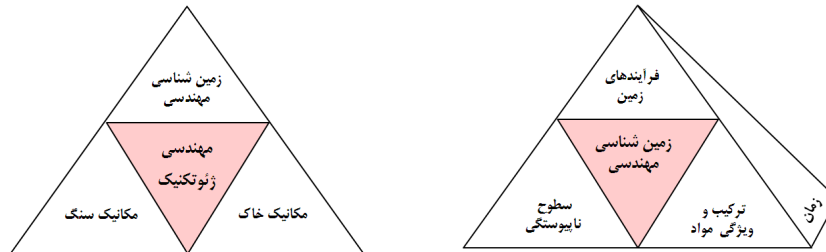
² Geotechnique

مهندس باید بتواند رفتار مهندسی مواد زمین را معرفی و راهکارهای مناسب را برای مقابله و یا بهسازی زمین ارائه کند (شکل ۱-۲).



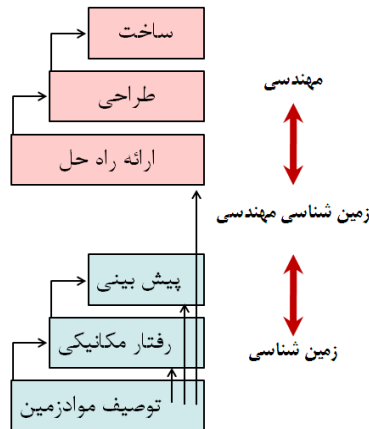
شکل ۱-۲: حوزه‌های فعالیت زمین‌شناسی مهندسی

امروزه در ادبیات مهندسی، زمین‌شناسی مهندسی در کنار مکانیک خاک و مکانیک سنگ از گرایش‌های مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود (شکل ۱-۳ الف). در مهندسی ژئوتکنیک فنون و ابزارهای شناسایی، کنترل و بهسازی زمین بکار گرفته می‌شود تا سازه‌های ایمن و با هزینه اقتصادی کمتر روی آنها بنا شده و یا مصالح مرغوب و با کیفیت مطلوب در پروژه‌های عمرانی استفاده گردد. به‌طور کلی مکانیک سنگ و خاک به بررسی ویژگی‌ها، رفتار و طبقه‌بندی مهندسی مواد زمین (سنگ و خاک) می‌پردازد و شرایط زمین را در حالت موجود بررسی می‌کند و به فرآیندهای تابع زمان و تغییر پارامترهای آن توجهی نمی‌شود، اما در زمین‌شناسی مهندسی علاوه بر شناسایی ویژگی‌ها و رفتار مواد زمین به فرآیندهای تغییردهنده سطح آن وابسته به زمان نیز توجه می‌شود (شکل ۱-۳ ب). ضمن اینکه مقیاس بررسی در زمین‌شناسی مهندسی و مکانیک سنگ و خاک متفاوت است. به طوری که در بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی سطح وسیعی از زمین پیرامون یک پروژه مدنظر قرار می‌گیرد ولی در مکانیک سنگ و خاک به ویژگی‌های نقطه‌ای مواد می‌پردازد که اغلب حاصل حفاری گمانه‌های اکتشافی است.



شکل ۱-۳: نقش زمین‌شناسی مهندسی (راست) و شاخه‌های اصلی رشته مهندسی ژئوتکنیک (چپ)

یک زمین‌شناس در اجرای مناسب پروژه‌های مهندسی مسئول بررسی و ارزیابی سه مرحله توصیف، بیان رفتار مکانیکی و پیش‌بینی مواد زمین است. مواد زمین را به شکل واقعی و آنچه که هست توصیف می‌نماید. رفتارهای مکانیکی آنها را در برابر اعمال و یا تغییر تنش‌های محیطی مورد ارزیابی قرار می‌دهد و سپس مخاطرات و رفتارهای مهندسی آن را پیش‌بینی خواهد نمود (شکل ۱-۴). ولی یک مهندس در مواجهه با هر کار عملی، به راه‌حل، طراحی و ساخت خواهد پرداخت. ارتباط منطقی و قابل فهم و کاربردی از اطلاعات یکی و نیازهای دیگری وظیفه زمین‌شناس مهندسی است (شکل ۱-۴).



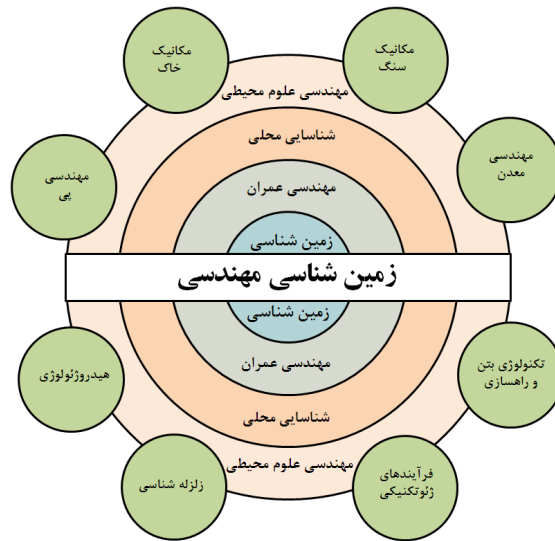
شکل ۱-۴: مدل مفهومی از نقش زمین‌شناسی مهندسی (دانش، ۱۳۷۲)

اگرچه نتیجه نهایی کار یک زمین‌شناس مهندسی و عمران، ارائه یک طرح ایمن و ارزان می‌باشد؛ ولی حوزه عمل هر یک از آنها جدا است، وجود هر دو تخصص در کنار هم در یک پروژه شرایط مطلوبی را بوجود می‌آورد (جدول ۱-۱).

جدول ۱-۱: مقایسه رشته زمین‌شناسی مهندسی و مهندسی عمران (دانش، ۱۳۷۲)

مهندسی عمران	زمین‌شناسی مهندسی	حوزه فعالیت
برنامه‌ریزی منطقه‌ای، طراحی	برنامه مطالعات، شناسایی و پیش‌بینی	برنامه‌ریزی پروژه‌ها
آزمون، تحلیل و ارزیابی و بهسازی	شناسایی، توصیف و طبقه‌بندی	ویژگی مواد زمین
بهسازی، مقابله، اقتصادی، طراحی	شناسایی، طبقه‌بندی، روش مقابله	مخاطرات زمین
تحلیل، طراحی، برآورد اقتصادی	روش، ابزار و پارامتر	شناسایی محلی
پلان، نقشه سازه‌ای، پیمایش، نصب و مدیریت ابزار دقیق	نقشه، پروفیل، ابزار دقیق	رفتارنگاری
طراحی و نظارت	ارائه طرح اولیه، کنترل و بازرسی	طراحی و کنترل

شاخه‌های مهم علوم که مطالعات زمین‌شناسی در آن نقش اساسی دارد، شامل چهار رشته زمین‌شناسی، عمران و معدن و ژئوتکنیک است و برحسب نیاز از نتایج مطالعات زمین‌شناسی بهره می‌برند (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵: جایگاه زمین‌شناسی مهندسی در علوم مهندسی (اقتباس از Price, 2009)

مهندسی ژئوتکنیک لیستی از رویه‌ها نیست؛ بلکه فهرستی از چالش‌ها است. مهندسان هرگز پروژه مشابهی را در خاک مشابهی احداث نمی‌کنند. در محیط خاک و سنگ نمی‌توان بر اساس نیاز پروژه تصمیم گرفت، بلکه باید پروژه‌ها تحلیل و طراحی شود (Kumar, 2004).

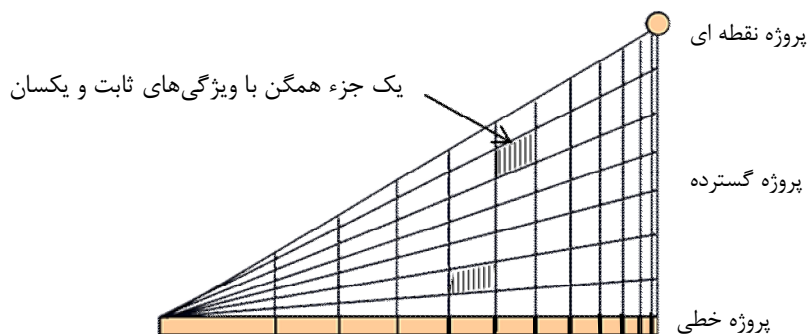
۴-۱ مطالعات زمین‌شناسی مهندسی

بطور کلی پروژه‌های مهندسی را از لحاظ گسترش زمینی به انواع زیر می‌توان تقسیم نمود.

- ۱- پروژه‌های خطی همانند راهسازی، تونل، گالری، خطوط انتقال نیرو
- ۲- پروژه‌های متمرکز همانند ساختمان سد، مخازن، ساختمان مسکونی، پل
- ۳- پروژه‌های گسترده همانند سدسازی، شهرسازی، بررسی‌های منطقه‌ای

در پروژه‌های خطی گستردگی مطالعات به طور معمول کم است (شکل ۱-۶). ولی تنوع واحدهای زمین‌شناسی زیاد است و ممکن است یک و یا چند سازند زمین‌شناسی را در برگیرد.

پروفیل‌های طولی آن متنوع است و باید تمام اجزای همگن آن جداگانه آزمون و تحلیل شود. و نیمرخ‌های عرضی آن تا حدودی ثابت است. در پروژه‌های نقطه‌ای گستردگی مطالعات کم بوده و محدود به یک یا چند لایه زمین‌شناسی است. اغلب از نتایج یک یا چند گمانه ژئوتکنیکی برای تحلیل استفاده می‌شود. اما در پروژه‌های گسترده سطح گسترش مطالعات زیاد و تنوع واحدهای زمین‌شناسی بالا است و ممکن است چندین سازند زمین‌شناسی و ایالت زمین‌ساختی و یا حوضه رسوبی را دربرگیرد. نیمرخ‌های طولی و عرضی و تغییرات عمقی در کل گستره مطالعاتی بسیار متنوع است و باید تمام اجزای همگن آن آزمون و تحلیل شود.



شکل ۱-۶: نمایش تنوع مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در پروژه‌های مختلف

بطور معمول مطالعات زمین‌شناسی مهندسی شامل سه مرحله مقدماتی، تکمیلی و ساخت می‌باشد (جدول ۱-۲). در مرحله مقدماتی امکان‌سنجی احداث پروژه انجام می‌شود و ممکن است مطالعات متوقف و یا ادامه پیدا کند (مراحل بعدی انجام شود). مطالعات زمین‌شناسی در این مرحله گسترده و کلی است و مبنای شرح مطالعات مراحل بعدی نیز می‌باشد. در مرحله تکمیلی با در اختیار گرفتن ابزارهای نمونه‌برداری و آزمایش تحلیل زمین کمی می‌شود. در این مرحله هزینه مطالعات ژئوتکنیکی بالا است. مرحله سوم نتایج و تحلیل‌های مراحل قبلی کنترل

می‌گردد و با نصب ابزار دقیق^۱ محیط زمین بصورت مستمر رصد می‌شود تا اثر فرآیندهای زمین بر سازه مهندسی اندازه‌گیری و تحلیل شود.

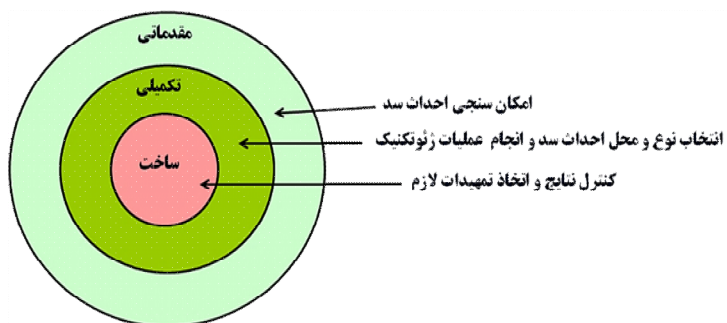
جدول ۱-۲: مراحل مطالعات زمین‌شناسی مهندسی

نام مرحله	فاز بررسی	عملیات	هدف	بررسی‌ها	خصوصیات	نتیجه
مقدماتی	اول	شناسایی	شناخت	- چینه‌شناسی - ساختارها - مخاطرات - مصالح	- گستره بررسی وسیع - کارمیدانی کم - بررسی جنبه توصیفی - بررسی سوابق مطالعات	- ارائه فرضیه
تکمیلی	دوم	آزمون	تحلیل	- نقشه‌برداری - حفاری - نمونه‌برداری - مدلسازی	- گستره بررسی محدود - کارمیدانی نسبتاً زیاد - تحلیل عددی - بررسی نتایج آزمایش‌ها	- اثبات فرضیه - پیشنهاد طرح - بودجه‌بندی
ساخت	سوم	نظارت	کنترل	- صحت‌سنجی - بهسازی - راهکار - تمهیدات	- آزمون و خطا - کنترل دائمی - حصول نتیجه	- ساخت پروژه

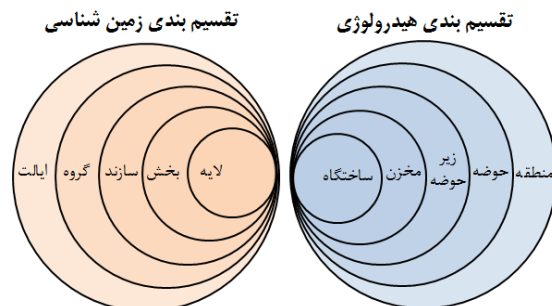
گسترده‌گی مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در مرحله مقدماتی زیاد ولی در مرحله ساخت کم می‌باشد. برای مثال در مطالعات سدسازی، محدوده مطالعات در مرحله مقدماتی ممکن است که حوضه آبریز و حوضه‌های مجاور آن باشد. در مرحله تکمیلی محدوده مطالعات به مخزن سد، تکیه‌گاه‌ها و ساختگاه سد مربوط می‌شود در مرحله ساخت، مطالعات در ساختگاه سد و تکیه‌گاه متمرکز می‌شود (شکل ۱-۷). براساس آن واحدهای چینه‌ای و هیدرولوژی خاصی مد نظر قرار می‌گیرد (شکل ۱-۸). برای مثال؛ اگر هدف مطالعات ساختگاه سد باشد؛ گسترش

¹ Instruments

سطح مطالعاتی از منظر زمین‌شناسی در اندازه بررسی و مطالعه یک لایه یا بخشی از سازند می‌باشد.



شکل ۱-۷: گسترش بررسی در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و هدف از مراحل مطالعات



شکل ۱-۸: گسترش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در سدسازی

به‌طور کلی بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی در پروژه‌ها به شرح زیر است:

- ۱- اندازه‌گیری و ارزیابی خواص مهندسی مواد زمین (خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، خاک و آب)
- ۲- شناسایی و پهنه‌بندی مخاطرات زمین (زلزله، زمین‌لغزش، فرونشست، سیل، رمبندگی، واگرایی، روانگرایی و...)
- ۳- بهسازی زمین (پیشنهاد بهترین روش بهسازی برحسب شرایط زمین و ویژگی مواد با لحاظ نمودن هزینه آن)

- ۴- مصالح ساخت (ارائه برنامه اکتشاف و عملیات ژئوتکنیکی، شناسایی و اکتشاف مصالح مورد نیاز پروژه‌ها، ارزیابی ژئوتکنیکی مصالح و بررسی مرغوبیت آنها)
- ۵- برنامه‌ریزی منطقه‌ای (در احداث شهرهای جدید، توسعه روستایی، شهرک‌ها، جابجایی روستاها و احداث شهرک‌ها و نیروگاه‌ها مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در مراحل مقدماتی و تکمیلی انجام می‌شود).
- ۶- مسائل زیست‌محیطی پروژه‌های مهندسی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی^۱ آنها
- ۷- آب زیرزمینی (اثر استخراج آب و مسائل ژئوتکنیک، شناسایی آبخوان‌ها در محل احداث سازه‌های مهندسی و بررسی اثر متقابل آنها)
- ۸- زمین‌شناسی مهندسی و ابنیه‌های مهندسی (سدسازی و سازه‌های آبی، فضاها و زیرزمینی و تونل، راه و جاده‌سازی، سیستم‌های آبیاری و زهکشی، مهندسی رودخانه، خطوط انتقال نیرو، پی‌سازی، پل)

لازم به ذکر است که در مطالعات ساختگاهی طرح‌های مختلف، طبق شرح وظایفی که برای یک زمین‌شناس مهندس تعیین می‌شود. مطالعات خود را به پیش می‌برد. یک زمین‌شناس مهندس از ابتدای مراحل طراحی تا دوران ساخت، درگیر طرح یا پروژه است و زمین را به همان شکل که هست توصیف می‌کند.

¹ Environmental Impact Assessment (EIA)