

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه دامغان

دانشکده علوم زمین

عنوان درس:

زمین شناسی مهندسی پیشرفته ۲

Advanced Engineering Geology 2



دکتر داود فریدونی

اسفند ۱۳۹۷



## سرفصل درس

عنوان درس (فارسی)		تعداد واحد	جبراتی	نظری <input type="checkbox"/> عملی <input type="checkbox"/>	دروس پیشتاز
زمین‌شناسی مهندسی پیشرفته ۲		۱+۲			
عنوان درس (انگلیسی)		تعداد ساعت	الزامی	نظری <input checked="" type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/>	
Advanced Engineering Geology 2		۳۲+۳۲	اختیاری	نظری <input type="checkbox"/> عملی <input type="checkbox"/>	
اهداف کلی درس		آموزش تکمیلی عملی			
اهداف رفتاری		کارگاه <input type="checkbox"/>		دارد <input checked="" type="checkbox"/> ندارد <input type="checkbox"/>	
		سفر علمی <input checked="" type="checkbox"/>		آزمایشگاه <input type="checkbox"/> سمینار <input checked="" type="checkbox"/>	
<p>اهداف کلی درس</p> <p>معرفی کاربردهای زمین‌شناسی در طرح‌های اجرایی مانند سدها و سازه‌های هیدرولیکی، تونل‌ها و فضاهای زیر زمینی، راه‌ها و ابنیه فنی، سنگ‌های ساختمانی و روش‌های بهسازی زمین</p> <p>سرفصل یا رؤس مطالب:</p> <p>۱. زمین‌شناسی مهندسی طرح‌های بهره‌برداری از مصالح ساختمانی</p> <p>کلیات، خصوصیات سنگ‌های ساختمانی، انواع سنگ‌های ساختمانی و کاربری آن‌ها، روش‌های استخراج و بهره‌برداری از معادن سنگ، زمین‌شناسی معادن سنگ ساختمانی در ایران، منابع فرضه و کاربرد آن در طرح‌های اختلاط بتون و آسفالت، کاربرد سنگ‌ها در تهیه مصالح بنایی (سیمان، گچ، آهک)، کاربرد سنگ‌ها در تهیه مواد صنعتی (شیشه، سفال، چینی، رنگ ...)</p> <p>۲. زمین‌شناسی مهندسی طرح‌های سد سازی</p> <p>کلیات، رده‌بندی سدها، ترکیب ساختمانی سدها (رفتار و عملکرد اجزای سد)، ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه (نکته‌گاه‌ها، سرریزها، مخزن سد، حوضه آبریز)، عوامل زمین‌شناختی مؤثر در انتخاب نوع سد، عوامل زمین‌شناختی مؤثر در انتخاب روش آب‌بندی، عوامل زمین‌شناسی مهندسی مؤثر در تاج‌آمدی سدها، نقش زمین‌شناسی مهندسی در مدیریت بهره‌برداری</p> <p>۳. زمین‌شناسی مهندسی طرح‌های راه سازی</p> <p>کلیات، عوامل زمین‌شناختی مؤثر در انتخاب مسیر راه، عوامل زمین‌شناختی مؤثر در انتخاب موقعیت مناسب ابنیه فنی، عوامل زمین‌شناسی مؤثر در عملیات خاکریزی، انتخاب منابع فرضه مناسب</p>					



<p>۴. زمین شناسی مهندسی تونل</p> <p>کلیات، انواع تونل، عوامل زمین شناسی مؤثر در انتخاب مسیر تونل (ساختار های زمین شناختی ، آب زیرزمینی، جنس...)، زمین شناسی مهندسی حفر تونل در مناطق شهری، خطرات زمین شناسی مهندسی در حفر تونل، روش های پایدارسازی و ابزار بندی تونل ها.</p>			
<p>۵. زمین شناسی مهندسی طرح های زیست محیطی</p> <p>کلیات، ارتباطی زمین شناسی و محیط زیست، مکان بایی محل دفن زباله ها، زمین شناسی محیط های شهری، زمین شناسی پزشکی</p>			
<p>۶. زمین شناسی مهندسی طرح های بهسازی زمین</p> <p>کلیات، روش های بهسازی مکانیکی، روش های بهسازی هیدرولیکی، روش های بهسازی فیزیکی- شیمیایی، روش های بهسازی با سازه های مهندسی</p> <p>واحد عملی</p> <p>انجام بازدید از طرح های عمرانی ر حال اجرا و تهیه گزارش</p>			
روش ارزیابی:			
ارزشیابی مستمر	میان ترم	آزمون های نهایی	
		آزمون عملکردی	آزمون نوشتاری
فهرست منابع:			
<p>8. Bell F.G., 2004, Engineering Geology and Construction, Taylor and Francis, 797 pages</p> <p>9. Bell F.G., 1992, Engineering in rock masses, Butterworth-Heinemann, 580 pages</p> <p>10. Duncan C.W., 1999, Foundations on Rock, 2<sup>nd</sup> edition. E &amp; FN Spon, 401 pages.</p> <p>11. Ferrer, M. and Gonzalez de Vallejo, L. 2011, Geological Engineering, Taylor &amp; Francis, 678 pages.</p> <p>12. Keller EA., 2010, Environmental Geology, 9<sup>th</sup> edition, Prentice Hall, 650 pages.</p> <p>13. Price, D.G. 2009, Engineering Geology, Principle and Practice, edited by M. Freitas, Springer, 450 pages.</p> <p>14. Scott PW., and Bristow CM., 2002, Industrial Minerals and Extractive Industry Geology, GSL Publication, 376 pages.</p>			



## فهرست مطالب درس (تئوری)

فصل اول: زمین‌شناسی مهندسی بهره برداری از منابع قرصه و مصالح ساختمانی

فصل دوم: زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سدها و سازه‌های هیدرولیکی

فصل سوم: زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه راه و راه‌آهن

فصل چهارم: زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه تونل‌ها

فصل پنجم: زمین‌شناسی مهندسی طرح‌های زیست محیطی

فصل ششم: زمین‌شناسی مهندسی طرح‌های بهسازی زمین

## فهرست مطالب درس (عملی)

آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی

بازدید علمی

## برخی منابع مورد استفاده در درس

1. Holtz R.D., Kovacs W.D., Sheahan T.C., 2011, *An introduction to geotechnical engineering*, 2<sup>nd</sup> Edition, Pearson Pub., p. 853.
2. Hunt R.E., 2007, *Geologic Hazards: A Field Guide for Geotechnical Engineers*, Taylor & Francis Group, LLC, p.323.
3. Karstunen M., Leoni M., 2009, *Geotechnics of Soft Soils (Focus on Ground Improvement)*, Taylor & Francis Group, London, UK, p. 444.
4. Moseley M.P., Kirsch K., 2004, *Ground Improvement*, Taylor & Francis Group, Spon Press, p. 431.
5. Profillidis V. A., 2000, *Railway Engineering*, Ashgate Pub., p. 291.
6. Sarsby R., 2000, *Environmental geotechnics*, ThomasTelford Ltd., p. 584.
۷. فریدونی، داود، ۱۳۹۳، *زمین‌شناسی عمومی و مهندسی*، چاپ دوم، انتشارات دانشجو، ۴۵۰ صفحه.
۸. معماریان، حسین، ۱۳۷۷، *زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک*، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۳۵ صفحه.
۹. وفائیان، محمود، ۱۳۸۱، *سدهای خاکی*، مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۵۱۲ صفحه.



## فصل اول:

# زمین‌شناسی مهندسی بهره برداری از منابع قرضه و مصالح ساختمانی

### ۱-۱- مقدمه

مصالح ساختمانی<sup>۱</sup> به موادی اطلاق می‌شود که به شکل‌های مختلف و با اهداف متفاوت در ساخت انواع سازه‌ها، پروژه‌های عمرانی و تأسیسات ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ماده اولیه این مواد از پوسته زمین می‌باشد و به همین خاطر بین دانش مصالح ساختمانی و زمین‌شناسی رابطه تنگاتنگی وجود دارد و در مراحل اولیه و تهیه ماده اولیه مصالح ساختمانی باید از دانش زمین‌شناسی به منظور اکتشاف و استخراج ماده اولیه استفاده نمود.

بطور کلی مصالح ساختمانی ممکن است به یکی از سه شکل زیر مورد استفاده قرار گیرند:

- ۱- به صورت مصالح کاملاً طبیعی یا منابع قرضه<sup>۲</sup>: مثل قلوه سنگ، شن و ماسه طبیعی، خاک رس، آب و چوب
- ۲- به صورت مصالحی که پس از مقداری تغییرات و کار بر روی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند: مانند گچ، آهک، شیشه که با حرارت دادن ماده اولیه به مصالح ساختمانی قابل استفاده تبدیل می‌شوند و یا سنگ‌های ساختمانی برش خورده یا قطعه قطعه شده مثل سنگ لاشه، مالون، سنگ نما، قرنیز و غیره.
- ۳- مصالح ساختمانی مصنوعی: ماده اولیه این مصالح از پوسته زمین می‌باشد ولی تغییرات کلی در ساختار آنها صورت گرفته است. از این گروه از مصالح می‌توان به سیمان پرتلند، قیر، بتن سیمانی و آسفالتی و مواد پلیمری اشاره کرد.

### ۱-۲- سنگ‌های ساختمانی

سنگ یکی از مصالح ساختمانی می‌باشد که از دیرباز توجه انسان را به خود جلب کرده است و تا کنون آثار و سازه‌های بزرگی نظیر تخت جمشید، اهرام ثلاثه مصر، کاخ‌های امپراطوری روم و بسیاری از سازه‌های دیگر در نقاط مختلف دنیا توسط سنگ ساخته شده‌اند. بطور کلی یک سازه مهندس ممکن است از سنگ یا در سنگ ساخته شود. به عبارت دیگر سنگ می‌تواند به عنوان مصالح ساختمانی یا به عنوان محل اجرای پروژه عمرانی بکار برده شود.

---

1. Construction materials  
2. Naturally occurring substances or borrow materials

همچنین سنگ‌ها را می‌توان به صورت طبیعی یا با ایجاد تغییرات بر روی آن به عنوان مصالح ساختمانی به کار برد. به عنوان مثال، قلوه سنگ و شن ماسه طبیعی سنگی می‌باشند که بصورت دست نخورده و طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بسیاری از موارد با ایجاد تغییرات و کار بر روی سنگ‌ها آنها را به عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌کنند، مانند سنگ لاشه، مالون، سنگ برش خورده به منظور نماسازی، کفیوش، پوشش، دیوارها، سنگ قرنیز و شن و ماسه خرد شده. بنابراین مهمترین موارد استفاده از سنگ‌های ساختمانی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- اجزاء باربر سازه مانند پی و دیوارها
- ۲- کف پوش
- ۳- سازه‌های مجاور آب
- ۴- پوشش پیاده‌روها
- ۵- نما سازی
- ۶- پوشش پشت بام‌ها
- ۷- زیرسازی راه و راه آهن
- ۸- تولید سنگ‌دانه

### ۱-۲-۱- طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی

طبقه‌بندی سنگ‌های ساختمانی از دیدگاه‌های مختلف صورت می‌گیرد که مهمترین آنها به شرح زیر است:

**الف- از دیدگاه زمین‌شناسی (منشاء):** از دیدگاه منشاء سنگ‌ها را می‌توان به سه دسته آذرین، رسوبی و دگرگونی طبقه‌بندی نمود. از دیدگاه ترکیب شیمیایی در صنعت ساختمان سنگ‌ها را به سه دسته سیلیسی، سیلیکاته و آهکی طبقه‌بندی می‌کنند. از دیدگاه نوع کاربری، سنگ‌ها ممکن است تزئینی، باربر یا تلفیقی از هر دو باشند.

۱- انواع سنگ‌های آذرین که به عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شوند: مانند گرانیت، دیوریت، سینیت، گابرو و بازالت.

۲- انواع سنگ‌های رسوبی که به عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شوند: مانند سنگ آهک، تراورتن، دولومیت و ماسه سنگ.

۳- انواع سنگ‌های دگرگونی که به عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شوند: مانند مرمر، اسلیت یا سنگ لوح، کوارتزیت و هورنفلس.

**ب- طبقه‌بندی فیزیکی:** از این نظر سنگ‌های ساختمانی ممکن است به صورت توده‌ای، لایه‌ای و ورقه‌ای یا لامینه‌ای باشند.

**ج- طبقه‌بندی شیمیایی:** از نظر ترکیب شیمیایی سنگ‌های ساختمانی به سه گروه عمده زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- ۱- سنگ‌های سیلیسی: گرانیت، بازالت، گابرو، سینیت
- ۲- سنگ‌های رسی یا آرژلیتی: اسلیت، شیل، شیست
- ۳- سنگ‌های آهکی (کربناته): سنگ آهک، مرمر، دولومیت



د- طبقه‌بندی بر مبنای سختی: از نظر سختی، سنگ‌های ساختمانی به انواع خیلی سخت (مانند گرانیت، کواتزیت، هورنفلس، بازالت)، سخت (مانند گابرو)، با سختی متوسط (مانند سنگ آهک، دولومیت، مرمر) و سنگ‌های نرم (مانند اسلیت، سنگ گچ) طبقه‌بندی می‌شوند.

#### ه- طبقه‌بندی بر اساس ماهیت استفاده

از این نظر سنگ‌های ساختمانی به سه گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- سنگ‌های ابعادی

۲- سنگ لاشه

۳- قلوه سنگ

#### ۱-۲-۲- مشخصات فیزیکی سنگ‌های ساختمانی

مهمترین مشخصات فیزیکی قابل اندازه‌گیری برای سنگ‌های ساختمانی به شرح زیر است:

۱- وزن واحد حجم

۲- تخلخل

۳- جذب آب

۴- نفوذپذیری

#### ۱-۲-۳- مشخصات مکانیکی سنگ‌های ساختمانی

مهمترین مشخصات مکانیکی قابل اندازه‌گیری برای سنگ‌های ساختمانی به شرح زیر است:

۱- مقاومت فشاری

۲- مقاومت کششی

۳- مقاومت خمشی

۴- مقاومت سایشی

۵- مقاومت به ضربه

۶- قابلیت حفاری و آتشباری

#### ۱-۲-۴- مشخصات فیزیکومکانیکی سنگ‌های ساختمانی

مهمترین مشخصات فیزیکومکانیکی قابل اندازه‌گیری برای سنگ‌های ساختمانی به شرح زیر است:

۱- انبساط و انقباض حرارتی

۲- مقاومت در برابر آتش

۳- مقاومت در برابر یخبندان: آزمایش ساندنس یا ۵ سیکل یخ زدن و ذوب شدن

### ۱-۲-۵- مهمترین سنگ‌های ساختمانی مورد استفاده در ایران

مهمترین سنگ‌های ساختمانی مورد استفاده در ایران بر مبنای خانواده آنها به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- خانواده سنگ‌های آذرین: گرانیت، سینیت، دیوریت، گابرو، بازالت
- ۲- خانواده سنگ‌های رسوبی: سنگ‌های آهکی، تراورتن، ماسه سنگ
- ۳- خانواده سنگ‌های دگرگونی: مرمر (ماربل)، اسلیت، شیست، کوارتزیت، گنیس

### ۱-۳- سنگ‌دانه‌ها<sup>۱</sup>

سنگ‌دانه مجموعه‌ای از سنگ‌های کوچک می‌باشند که از نظر اندازه، اندازه قطر آنها بین ۷۵ میکرون (الک نمره ۲۰۰) تا حدود ۷۵ میلیمتر (الک ۳ اینچ) متغیر می‌باشد و در کارهای ساختمانی موارد استفاده از آنها به شرح زیر است:

- ۱- تهیه بتن سیمانی
- ۲- تهیه بتن قیری یا آسفالت
- ۳- زیرسازی راه سازی (جاده و راه آهن)
- ۴- در سد سازی (سدهای خاکریزه‌ای به صورت فیلتر و زهکش و گاهی پوسته سد)
- ۵- فرودگاه‌ها
- ۶- در گراول پک دیواره چاه‌ها و پشت دیوارهای حایل به عنوان مواد زه‌کش و پر کننده
- ۷- در موزائیک و جدول سازی

از لحاظ کمی بیشترین مصرف سنگ‌دانه‌ها در راه سازی است (حدود ۶۰٪). سنگ‌دانه پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی طبیعی به حساب می‌آیند بطوری که با در نظر گرفتن مصرف سالیانه ۵۰۰ کیلوگرم سیمان برای هر نفر و با فرض اینکه یک پنجم حجم بتن از سیمان تشکیل شده باشد و با در نظر گرفتن جمعیت هفتاد و پنج میلیونی می‌توان حجم منابع مصرفی سنگ‌دانه‌ها در ایران را برآورد نمود.

### ۱-۳-۱- انواع سنگ‌دانه‌ها به لحاظ منشاء و نحوه تولید

سنگ‌دانه‌ها را می‌توان به دو دسته کلی مصالح طبیعی و شکسته شده طبقه‌بندی نمود.

#### ۱-۳-۱-۱- سنگ‌دانه‌های طبیعی

این سنگ‌دانه‌ها بطور طبیعی از معدن برداشت شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند و تحت عنوان منابع قرضه شن و ماسه نیز نامیده می‌شوند. منابع قرضه طبیعی معمولاً گردشده‌تر بوده و حجم بتن مصرفی با آنها نسبت به سنگ‌دانه‌های شکسته که تیز گوشه‌تر می‌باشند، بیشتر است. برای مطالعه سنگ‌دانه‌ها طبیعی یا منابع قرضه شن و ماسه سه گروه از مشخصات آنها باید مد نظر قرار گیرد که عبارتند از:

## الف - مشخصات زمین‌شناسی

مهمترین مشخصات زمین‌شناسی سنگ‌دانه‌ها به شرح زیر است:

- ۱- نوع سنگ مادر
- ۲- فاصله قرصه‌ها از سنگ مادر
- ۳- عامل ایجاد کننده قرصه یا ذخیره
- ۴- عمق سطح آب زیرزمینی در محل قرصه
- ۵- میزان مصالح ریزدانه (سیلت و رس)
- ۶- گردشگری ذرات
- ۷- دانه‌بندی ذرات

از نظر زمین‌شناسی منابع قرصه شن و ماسه در محل‌های زیر تشکیل می‌شوند:

- ۱- منابع قرصه رودخانه‌ای: مطلوب‌ترین قرصه شن و ماسه از لحاظ کمیت و کیفیت است، نیاز به شستشو ندارد، فاقد روبراه است، کمترین مقدار ریزدانه‌ها را داراست.
- ۲- دشت‌های سیلابی: دارای کمیت زیاد ولی وجود روبراه زیاد است، از نظر دانه‌بندی، اکثراً درشت دانه هستند.
- ۳- ماسه‌های بادی: از مصالح مرغوب به حساب می‌آیند.
- ۴- ماسه‌های ساحلی: از نظر کیفیت خوب هستند ولی ذخیره زیادی را شامل نمی‌شوند.
- ۵- قرصه‌های یخچالی: از نظر کمیت و کیفیت چندان مرغوب نمی‌باشند و نیاز به شستشو و سرند کردن دارند.
- ۶- دره‌های مدفون یا حوضه‌های رودخانه‌ای قدیمی

## ب - مشخصات ژئوتکنیکی

مهمترین مشخصات ژئوتکنیکی سنگ‌دانه‌ها به شرح زیر است:

- ۱- ارزش شنی یا ماسه‌ای بالای ۷۵٪
- ۲- مدول ریزی یا ضریب نرمی: عبارت است از:

$$\text{درصد تجمعی روی الک مشخص} = \frac{\text{ضریب نرمی}}{100}$$

(۱-۱)

- ۳- تلفات در آزمایش سولفات سدیم یا ساندنس
- ۴- ضریب تخت شدگی یا تورق
- ۵- ضریب تطویل یا سوزنی بودن
- ۶- وزن مخصوص دانه‌ها ( $\gamma_s$ ) یا ( $G_s$ ): حداکثر ۲/۵۵ (درشت دانه و ریز دانه به صورت SSD) باشد.
- ۷- مقاومت مصالح بتنی تهیه شده: حداقل  $280 \text{ kg / Cm}^2$  یا  $28 \text{ MPa}$  باشد.
- ۸- جذب آب: حداکثر ۳٪ باشد.
- ۹- افت وزنی در آزمایش لوس آنجلس: کمتر از ۵۰٪ باشد.

### ج- مشخصات معدنی

مهمترین مشخصات معدنی سنگ‌دانه‌ها به شرح زیر است:

- ۱- ضخامت روباره کم باشد.
- ۲- ذخیره در حد قابل قبول باشد (معمولاً ذخیره معدنی کمتر از ذخیره زمین‌شناسی است).
- ۳- قابلیت استخراج داشته باشند.
- ۴- امکان استفاده از آتشیباری در شن و ماسه‌های کمی متراکم شده وجود داشته باشد.
- ۵- گسترش منابع قرضه در جهات قائم و جانبی یکنواخت باشد.
- ۶- منابع انرژی مثل آب، برق، گاز و جاده در محل معدن وجود داشته باشد.
- ۷- فاصله تا محل مصرف کم باشد.
- ۸- دانه‌بندی سنگ‌دانه مناسب باشد.
- ۹- محدودیت‌های زیست محیطی وجود نداشته باشد.

### ۱-۳-۱-۲- سنگ‌دانه‌های شکسته یا مصنوعی

این سنگ‌دانه‌ها از شکستن سنگ‌هایی نظیر سنگ آهک، دولومیت، ماسه سنگ، کنگلومرا و غیره بدست می‌آیند بطوری که ابتدا توسط سنگ‌شکن شکسته و سپس سرند شده و شستشو می‌یابند. این سنگ‌دانه‌ها نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی از جورشدگی بهتر ولی از گردش‌دگی کمتری برخوردارند و بنابراین حجم سیمان مصرفی توسط این سنگ‌دانه‌ها برای تهیه بتن کمتر است. در هنگام تهیه و استفاده از این مصالح باید به موارد زیر توجه نمود:

- ۱- سنگ مادر در دسترس و مقرون به صرفه باشد.
- ۲- سنگ مادر قابلیت خرد شدن داشته باشد و با هزینه کم شود.
- ۳- از سنگ‌های مسئله‌دار نظیر مارن، شیل، کلسیتون و غیره تهیه نشوند.
- ۴- از سنگ‌هایی که با سیمان واکنش شیمیایی می‌دهند تهیه نشوند (مثل سنگ گچ).
- ۵- از سنگ‌های دارای تورق تهیه نشوند.
- ۶- قابلیت انحلال در آب نداشته باشند.

### ۱-۳-۲- انواع سنگ‌دانه‌ها از نظر اندازه ذرات

سنگ‌دانه‌ها از نظر اندازه به دو دسته درشت‌دانه و ریزدانه طبقه‌بندی می‌شوند.

### ۱-۳-۱-۱- سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه یا شنی

این سنگ‌دانه‌ها در ابعاد ۲ تا ۶ میلی‌متر تحت عنوان شن نخودی و در ابعاد ۶ تا ۷۵ میلی‌متر تحت عنوان شن بادامی نامیده می‌شوند. در این سنگ‌دانه‌ها، هرچه ذرات گرد گوشه‌تر باشند حاوی تخلخل بیشتری هستند و هر چه ذرات بزرگتر باشند سطح ویژه کمتر و میزان سیمان مورد نیاز کمتر است.

### ۱-۳-۲-۲- سنگ‌دانه‌های ریزدانه یا ماسه

این سنگ‌دانه‌ها دارای ابعاد ۰/۷۵ تا ۲ میلیمتر می‌باشند. هدف از کاربرد این سنگ‌دانه پر کردن فضای بین سنگ‌دانه‌های درشت است که باعث افزایش کارایی و کاهش مصرف سیمان می‌شود.

### ۱-۳-۳- مشخصات سنگ‌دانه‌ها

مهمترین مشخصات قابل اندازه‌گیری در سنگ‌دانه‌ها به شرح زیر است:

- ۱- دانه‌بندی: دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه شامل دانه بندی یکنواخت، پیوسته و ناقص یا گسسته می‌باشد.
- ۲- شکل دانه‌ها: باید متساوی البعد ولی زاویه‌دار باشد.
- ۳- بافت سطحی: زبری سطح دانه هر چه بیشتر باشد میزان سیمان بیشتر نیاز است ولی به افزایش مقاومت بتن و آسفالت کمک می‌کند.
- ۴- رطوبت و جذب آب: بهترین درصد رطوبت شرایط مصالح اشباع با سطح خشک (SSD) می‌باشد.
- ۵- وزن واحد حجم ( $\gamma$ ): وزن واحد حجم تقریباً معادل  $\gamma_d = 1.5 - 1.7 \text{ gr/mm}^3$  می‌باشد و تابع عواملی نظیر جنس مصالح، تخلخل و درصد رطوبت مصالح می‌باشد.
- ۶- وزن مخصوص ( $G_s$ )
- ۷- مقاومت فشاری تک محوری ( $\sigma_c$ ): حداقل باید برابر  $\sigma_c = 40 \text{ MPa}$  باشد.
- ۸- مقاومت به سایش: این ویژگی برای سنگ‌دانه‌های درشت در بتن حداکثر ۴۰٪ و برای آسفالت ۴۰٪ باشد.
- ۹- مقاومت به یخبندان
- ۱۰- مقاومت در مقابل سولفات سدیم: افت وزنی حداکثر ۱۲٪ برای درشت دانه‌ها و حداکثر ۱۰٪ برای ریز دانه‌ها
- ۱۱- واکنش‌های قلیایی
- ۱۲- هم ارز ماسه (SE)<sup>۲</sup>: حداقل باید ۷۵٪ باشد.
- ۱۳- مواد مضر و ناخالصی‌ها: شامل موارد زیر می‌باشند:
  - موادی که موجب واکنش‌های شیمیایی با سیمان می‌شوند.
  - رس و کانی‌های رسی
  - مواد متورم شونده
  - وجود سنگ‌دانه‌های پولکی و سوزنی در آنها
  - سنگ‌دانه‌های نرم و سست
  - مواد آلی

### ۱-۴- چگونگی شناسایی منابع قرضه مختلف

به‌منظور شناسایی و بررسی مشخصات فنی منابع قرضه مورد نیاز در پروژه‌های مهندسی، بررسی ژئوتکنیکی از محل احداث پروژه و یا مناطق اطراف آن در صورتیکه فاصله حمل مصالح تا محل پروژه توجیه اقتصادی داشته باشد،

1. Saturated Surface Dry, SSD  
2. Sand Equivalent, SE

مورد نیاز است. مصالح مورد نیاز در پروژه‌های مهندسی مختلف شامل تخته‌سنگ، قلوه سنگ، شن، ماسه و خاک‌های مورد نیاز در خاکریزی می‌باشند که برای تهیه آنها یک گزارش از منابع قرضه مصالح مورد نیاز در پروژه که شامل مراحل شناسایی و بازدیدهای انجام گرفته، اکتشاف، نمونه برداری، آزمایشات آزمایشگاهی و طرح عملیات استخراج از محل قرضه باشد، باید تهیه نمود. این گزارش باید محل دقیق و قانونی قرضه و ذخیره احتمالی آنرا مشخص نموده و در نهایت به تأیید یک زمین‌شناس مهندس برسد.

#### ۱-۴-۱- کاوش‌های ژئوتکنیکی جهت اکتشاف منابع قرضه

زمانی استفاده از منابع قرضه مورد تأیید است که فاصله آن از محل پروژه خیلی دور نبوده و هزینه‌های حمل و نقل آن‌ها دارای توجیه اقتصادی باشد. هنگامی که هیچ منبع قرضه مورد تأییدی در دسترس نباشد، باید عملیات کاوش ژئوتکنیکی به منظور شناسایی و استخراج منابع قرضه مناسب انجام شود. این عملیات دارای مراحل زیر می‌باشد:

#### الف- ارزیابی سایت‌های منابع قرضه موجود

در این مرحله هرگونه اطلاعات موجود از منابع قرضه محدوده پروژه جمع‌آوری و بازنگری می‌شود. اطلاعاتی که نیاز به بازنگری دارند عبارتند از:

- ۱- زمین‌شناسی سایت یا محدوده پروژه با استفاده از نقشه‌ها و گزارشات موجود.
- ۲- عکس‌های هوایی
- ۳- تاریخچه سایت‌های استخراج مصالح در گذشته و نتایج آزمایشات کیفی آنها
- ۴- زهکشی سطحی و زیرسطحی محدوده مورد مطالعه
- ۵- بررسی نوسانات فصلی تراز آب زیر زمینی به کمک چاه‌های آبی موجود در زمین‌های همجوار که ممکن است رطوبت مصالح موجود در معدن قرضه را تحت تأثیر قرار دهند.
- ۶- بررسی نظرات و گفته‌های افراد محلی و مالکان زمین‌های همجوار
- ۷- ادعاها یا مطالبات پیمانکار شامل پرداخت‌های نهایی
- ۸- کاربری نگهداری و تعمیرات سایت

#### ب- اکتشافات زمین‌شناسی میدانی اولیه<sup>۱</sup>

این مرحله از کاوش‌های منطقه، شامل بازدید از محل منابع قرضه به منظور شناخت زمین‌شناسی منطقه و چگونگی استخراج سایت با در نظرگیری ملاحظات مربوط به کاربری اراضی همجوار می‌باشد. این بازدید ترکیبی از بازبینی تفصیلی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه یا سایت، اطلاعات زمین‌شناسی یا ژئوفیزیکی اراضی همجوار و همچنین بررسی عکس‌های هوایی است. حاصل کار این مرحله تهیه نقشه‌هایی از عوارض و بیرون زدگی‌های موجود و ارائه برنامه حفاری‌های اکتشافی و نمونه‌براری و توسعه معدن قرضه می‌باشد. در بازدیدهای اولیه به منظور تعیین نیاز منطقه به اکتشافات تفصیلی، برخی پارامترها را باید مد نظر قرار داد که مهمترین آنها به شرح زیر می‌باشند:

1. Primary geologic field exploration

- ۱- وضعیت زمین‌شناسی منطقه
  - ۲- وضعیت توپوگرافی منطقه
  - ۳- وجود چاه‌ها یا چال‌های آزمایشی
  - ۴- عکس‌های معرف منطقه
  - ۵- تهیه نقشه زمین‌شناسی عوارض موجود در منطقه
- به‌عنوان مثال، تعداد حداقل ۳ گمانه یا چال آزمایشی در فاز اولیه کاوش‌ها باید حفر گردد. بمنظور کاهش هزینه‌های اکتشافی، می‌توان نمونه‌های معرف مناسبی را از سطوح ترانشه‌ها بمنظور انجام آزمایشات فیزیکی، سایش‌لوس آنجلس و فرسایش‌پذیری تهیه نمود. در پایان این مرحله، یک گزارش بازدید زمین‌شناسی شامل زمین‌شناسی منطقه، اکتشاف میدانی مقدماتی و نتایج آزمایشات باید تهیه گردد.

### ج- اکتشافات زمین‌شناسی میدانی تفصیلی

در این مرحله از مطالعات، چال‌ها و گمانه‌های آزمایشی حفر شده، مورد بررسی قرار گرفته و پیمایش همراه با نمودارگیری انجام می‌شود. در این مرحله، زمین‌شناس مهندس باید نمونه‌های مناسبی را جهت انجام آزمایشات کیفی انتخاب نماید. بر اساس ملاحظات زمین‌شناسی، تعداد، مکان، عمق و نوع گمانه چاهک و یا چال‌های آزمایشی تعیین می‌گردند. به غیر از آزمایشات زمین‌شناسی، حفر شبکه چال یا گمانه‌ها با عمق مناسب یعنی تا جایی که کمیت‌های مورد نیاز را تأمین نماید، صورت می‌گیرد.

برای کاوش منابع قرضه خاکی، تجهیزات اکتشافی که مشاهده و نمونه برداری مستقیم از لایه‌های زیر سطحی را فراهم نمایند، ترجیح داده می‌شوند. این تجهیزات می‌توانند شامل بیل مکانیکی، بولدوزر و لودر باشند. عمق تراز آب زیرزمینی نیز در برداشت منطقه نیز باید ثبت گردد. در جائیکه نوسانات فصلی شدید آب زیرزمینی پیش‌بینی می‌شود، حفر چاه‌های مشاهده‌ای برای پایش تراز آب زیر زمینی الزامی است.

به منظور کاوش معادن سنگ، روش‌های نمونه‌گیری یا مغزه‌گیری پیوسته جهت تعیین شرایط زیرزمینی و نمونه‌گیری برای انجام آزمایش‌های مورد نیاز پیشنهاد می‌شود. بطور معمول لوله مغزه‌گیر سه جداره جهت بیشینه سازی کیفیت مغزه‌ها استفاده می‌شود. برای منابع سنگ لاشه، مانند سنگ‌های مورد نیاز در سنگ‌چینی<sup>۱</sup> تهیه نقشه درزه و شکاف‌ها شامل اندازه‌گیری دقیق فاصله‌بندی درزه و شکاف‌ها بمنظور ارزیابی ابعاد سنگ‌هایی که می‌توان از آتشیاری بدست آورد، مورد نیاز است. همچنین تعیین نوع و ضخامت مواد پرکننده درزه‌ها باید مورد توجه قرار گیرد. مغزه‌های بدست آمده باید توسط زمین‌شناس مهندس جهت ارزیابی و انجام آزمایشات کیفی بازبینی شوند. اگر نمونه‌گیری از یک سطح آزاد انجام شده باشد، ممکن است نیاز باشد تا با انجام مغزه‌گیری از عمق و یا تکنیک‌های ژئوفیزیکی از شرایط موجود در عمق و یا پشت سطح آزاد اطمینان حاصل نمود.

روش‌های ژئوفیزیکی که در اکتشافات معادن قرضه و مصالح ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل روش انکسار لرزه‌ای<sup>۲</sup>، مقاومت الکتریکی و رادار نفوذ کننده زمین<sup>۱</sup> می‌باشند. روش‌های چاه پیمایی نیز می‌تواند برای

۱. Rip-Rap

۲. Seismic refraction

شناسایی امتداد ناپیوستگی‌ها و شرایط آنها به همراه نرم افزار مخصوص تفسیر آنها مورد استفاده قرار گیرند. در روش مقاومت الکتریکی سنگ با کیفیت پایین با مقاومت پایین و سنگ با کیفیت خوب با مقاومت بالا مشخص می‌گردد. با این روش زاویه شیب گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها را نیز می‌توان تعیین نمود. نتایج بدست آمده از روش‌های ژئوفیزیکی اطلاعاتی را که در برنامه ریزی توسعه منابع مصالح بکار می‌روند، مهیا می‌سازند.

#### د- ملاحظات خاص

زمین‌شناس مهندس باید مقدار ظاهری مصالح موجود در معدن قرضه مورد نظر را برآورد نماید. همچنین زمین‌شناس مهندس باید ضرایب تورم و انقباض مصالح را تعیین کند تا حجم مطلوب را به حجم موجود در معدن قرضه تبدیل کند.

زمین‌شناس مهندس، با بررسی نحوه پیدایش و شکل‌گیری ذخیره معدن قرضه و در نظرگیری چال‌ها یا گمانه‌های آزمایشی، حجم مصالح قابل استفاده را برآورد می‌کند. مقدار ظاهری مصالح بدان معنی است که مقدار تخمین زده شده مصالح موجود در قرضه دارای یک ضریب اطمینان است. بیرون یابی عمق زیرین چال‌های آزمایشی در محاسبات حجم ظاهری مصالح منظور نمی‌گردد، مگر آنکه ملاحظات زمین‌شناسی بطور دقیق در نظر گرفته شوند. یک رابطه کلی برای محاسبه ذخیره ظاهری عبارت است از:

$$Q = L \times W \times D \times C_{bs} \times SF \quad (1-1)$$

در این رابطه، Q مقدار مصالح، L، W و D به ترتیب طول، عرض و عمق مصالح،  $C_{bs}$  تصحیح دامنه کم شیب و SF ضریب اطمینان می‌باشند.

#### ۱-۴-۲- گزارش منابع قرضه

زمین‌شناس مهندس باید گزارشی از منبع قرضه مورد نظر که دارای اطلاعاتی از اکتشاف مقدماتی و تفصیلی، نمونه‌گیری و آزمایشات آزمایشگاهی و طرح توسعه آینده منبع قرضه، ارائه کند. این گزارش باید زمین‌شناسی محدوده، اطلاعات اکتشاف میدانی و آزمایشات پایداری شیب‌ها و آب‌های زیرزمینی که از محدوده مورد نظر بدست آمده است را مورد بررسی و ارزیابی قرار دهد. مراحل نگارش این گزارش به شرح زیر می‌باشد:

##### ۱- مقدمه

در این قسمت توضیح مختصری از موقعیت جغرافیایی معدن قرضه و راه‌های دسترسی به آن ذکر می‌شود.

##### ۲- شرح منبع قرضه

این قسمت حاوی شرحی از نحوه مالکیت منطقه قرضه، حجم و ابعاد منبع قرضه و محدودیت‌های منطقه‌ای است.

##### ۳- توپوگرافی، پوشش گیاهی و آب و هوا



ژئومورفولوژی و توپوگرافی کلی منطقه به‌مراه زهکشی محدوده در این قسمت شرح داده می‌شود. پوشش گیاهی و آب و هوا نیز می‌تواند در این قسمت مورد بحث قرار گیرد.

#### ۴- برداشت ژئوتکنیکی میدانی

در این قسمت شماره و مکان گمانه‌های اکتشافی بر روی نقشه و متدولوژی حفاری شرح داده می‌شود. همچنین در این مرحله طول کلی مغزه‌های بدست آمده باید مشخص گردد و نمودار گمانه‌های حفاری به‌مراه عکس‌های رنگی از مغزه‌های بدست آمده و نمونه‌های اخذ شده از محل معدن، ضمیمه گردند.

#### ۵- آزمایشات آزمایشگاهی

نمونه‌های مناسب توسط زمین‌شناس مهندس انتخاب گردیده و آزمایشات کیفی اولیه مانند تعیین وزن واحد حجم، وزن مخصوص، درصد رطوبت، سایش لوس آنجلس و آزمایش فرسایش‌پذیری انجام می‌گیرد. از نتایج بدست آمده برای تعیین موقعیت مکانی و توزیع مصالح مرغوب و یا نامرغوب در معدن قرضه استفاده می‌شود. نتایج آزمایشات بر روی یک مقطع زمین‌شناسی و در یک جدول باید تهیه و نمایش داده شوند. با توجه به مشخصات فنی پروژه ممکن است آزمایش‌های دیگری نیز بر روی نمونه‌ها انجام گیرد.

#### ۶- زمین‌شناسی منطقه‌ای

در این قسمت به بررسی پدیده‌های زمین‌شناسی موجود در منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

#### ۷- زمین‌شناسی محل قرضه

بر اساس ساختار زمین‌شناسی منطقه‌ای، می‌توان زمین‌شناسی محل قرضه مورد نظر را شرح داد. زهکشی سطحی شامل چشمه‌ها یا زهکشی‌های طبیعی یا مصنوعی باید شناسایی و تشریح گردند. عمق آب زیر زمینی و هرگونه تغییرات فصلی باید ذکر گردد. این اطلاعات باید بصورت یک جدول ضمیمه گردد. پایداری شیب‌های طبیعی و مصنوعی موجود در محل قرضه باید مورد بحث و بررسی قرار گیرند.

وضعیت چینه‌شناسی منبع قرضه با توجه به وضعیت زمین‌شناسی آن و نمودارهای گمانه‌ها آزمایشی تهیه می‌شود. سرباره و مصالح باطله که از گمانه‌ها و آزمایش‌های کیفی بدست آمده‌اند و جایگاه تراز آب زیر زمینی باید در مقاطع زمین‌شناسی مشخص گردند. در این قسمت شرحی از سنگ با کیفیت خوب و با کیفیت ضعیف همراه با نمایش بر روی مقطع زمین‌شناسی باید ارائه شود و توضیح مختصری برای هر مقطع داده شود.

#### ۸- آب زیر زمینی

تراز آب زیر زمینی که در کاوش‌های زیرسطحی بدست آمده است باید ثبت گردد. هنگامیکه نوسانات فصلی محسوس در تراز آب زیر زمینی پیش بینی می‌گردد، پیژومترهایی برای پایش سطح آب زیر زمینی می‌بایست تعبیه گردد. همچنین میزان بارش‌های سالیانه نیز باید مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۹- کیفیت مصالح

کیفیت مصالح محل قرضه بر اساس نمونه‌های اخذ شده و آزمایشاتی که بر روی آنها انجام شده است مشخص گردد. آزمایشات کیفی بطور معمول عبارتند از سایش لوس آنجلس، وزن مخصوص و فرسایش ولی با توجه به نیاز پروژه و مصالحی که از قرضه استخراج می‌گردد، می‌توان آزمایشات دیگری نیز انجام داد.

#### ۱۰- کمیت یا مقدار مصالح

مقدار مصالح قابل استفاده در محل قرضه بر اساس چگونگی تشکیل مصالح و نتایج چال‌ها یا گمانه‌های آزمایشی تعیین می‌گردد. مقدار مصالح گزارش شده که با مقدار ظاهری بیان می‌شود، عبارتست از مقدار مصالح موجود با در نظرگیری یک ضریب اطمینان.

#### ۱۱- پایداری شیب‌ها

تحلیل‌های پایداری شیب‌های معدن قرضه در حین استخراج و جهت برنامه‌های احیای اراضی باید به دقت انجام گیرد.

#### ۱۲- ملاحظات استخراج

طرح استخراج نشان دهنده این است که معدن قرضه چگونه باید استخراج و توسعه یابد. طرح استخراج باید معرف توالی مراحل استخراج و مکان آن باشد به معنای اینکه کدامیک از نقاط معدن باید اول، دوم، سوم و ... استخراج گردد. شرح مشکلات که در جهت استخراج موجود می‌باشد، مانند مصالح با ابعاد بزرگ مانند بلوک‌های سنگی بزرگ یا سرباره بیش از حد باید ارائه گردد. حجم سرباره و مواد باطله‌ای که باید برداشت شود باید در نقشه طرح استخراج مشخص گردند. مکان راه‌های دسترسی، دروازه‌ها، فنس‌ها و تراز کف معدن باید در نقشه نشان داده شوند. زاویه شیب‌ها بر اساس آنالیزهای پایداری شیب باید طراحی گردند. در معادن سنگ، شیب‌ها باید بر اساس پارامترهای مکانیکی سنگ طراحی شوند. مکان راه‌های دسترسی و حمل مصالح، ذخیره مصالح، باطله، سرباره و تراز کف معدن قرضه باید در نقشه طرح احیا اراضی مشخص شود.

#### ۱۳- ضمایم

ضمیمه گزارش منابع قرضه می‌تواند حاوی موارد زیر باشد:

- ۱- شکل‌ها: شامل نقشه مکانی، نقشه پلان محل قرضه، توپوگرافی، گمانه‌ها و مقاطع زمین‌شناسی می‌باشند.
- ۲- جدول‌ها: شامل مشخصات گمانه‌ها با عمق و نتایج کیفی آزمایشات آزمایشگاهی و تراز آب زیرزمینی می‌باشند.

۳- نمودارهای گمانه‌های آزمایشی

۴- نتایج آزمایشات آزمایشگاهی

۵- محاسبات ذخیره معدن

۶- عکس‌های محل قرضه، مغزه‌های اخذ شده و نمونه‌های خاکی

## فصل دوم:

### زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سدها

#### ۲-۱- مقدمه

سد<sup>۱</sup> به مفهوم دیواری است که بر سر مسیر آب رودخانه احداث می‌شود تا از حرکت آب جلوگیری نماید. سدها برای مقاصد مختلفی ساخته می‌شوند، مثل ذخیره کردن آب برای مصارف شهری یا کشاورزی، تولید برق، مقابله با سیلاب، کشتیرانی، پرورش ماهی و انحراف مسیر آب رودخانه. در فارسی گاهی واژه بند را به جای واژه سد بکار می‌برند ولی باید در نظر داشت که بند به سدهای کوتاه گفته می‌شود.

سدها از دیرباز توسط انسان ساخته و در زمان‌های مختلف از آنها بهره‌برداری می‌شده است. احتمالاً قدیمی‌ترین سد دنیا، الکفره در ۱۶ کیلومتری جنوب شرقی هلوان در مصر است که در سال‌های ۲۹۵۰ تا ۲۷۵۰ قبل از میلاد (در حدود ۵۰۰۰ سال پیش) با طول ۱۱۵ و ارتفاع ۱۲ متر ساخته شده است. بعضی مورخین اولین سد ثبت شده در تاریخ را مربوط به ۴۰۰۰ سال پیش با طول ۴۷۵ و عرض ۱۵ متر می‌دانند. همچنین سدی به طول ۳/۲ کیلومتر و ارتفاع ۳۶ و عرض ۱۵۰ متر در یمن ساخته شده که آن را مربوط به ۱۷۰۰ سال قبل از میلاد می‌دانند که در قرن سوم میلادی بر اثر سیلاب تخریب شده است. در ایران، سد داریوش بر روی رودخانه کر بنا شده که عمر آن بیش از ۲۵۰۰ سال است و سد بهمن‌شیر دارای عمری بیش از ۲۰۰۰ سال است. بند میزان در شوشتر دارای عمر ۱۷۰۰ سال و بند/میر در روی رودخانه کر ۱۰۰۰ سال عمر دارند و در حال حاضر از آن بهره‌برداری می‌شود.

احتمالاً پر حجم‌ترین سد دنیا تا سال ۱۹۷۳ میلادی، یک سد خاکی است که در آریزونای آمریکا بنا شده که ارتفاع آن ۳۳ متر، طول آن ۱۰/۸۵ کیلومتر و حجم مصالح آن  $۱۰^8 \times ۲/۱$  متر مکعب است. از طولانی‌ترین سدهای دنیا می‌توان به سد کی‌یف با ارتفاع ۲۰ متر و طول ۵۴ کیلومتر در سال ۱۹۶۴ در کشور روسیه و سد دیگری با طول ۹۹ کیلومتر و ارتفاع متوسط در کشور چین که ساخت آن در قرن ۱۷ بوده است، اشاره کرد.

بزرگترین سد بتنی و یا در واقع بزرگترین سازه بتنی دنیا، گراندکولی روی رودخانه کلمبیا در واشینگتن است. طول تاج این سد ۱۳۹۱ متر، ارتفاع آن ۱۸۳ متر، حجم آن ۸/۰۵ میلیون متر مکعب و وزن آن ۲۱/۶ میلیون تن است. نیروگاه این سد توانایی تولید ۹۷۸۰ مگاوات انرژی را دارد. مرحله مطالعاتی این سد در سال ۱۹۳۳ آغاز شده و

ساخت آن در ماه مارس سال ۱۹۴۱ آغاز و در سال ۱۹۴۲ پایان یافته است. هزینه احداث این سد ۵۶ میلیون دلار گزارش شده است.

یکی از بلندترین سدهای بتنی دنیا سد گراندیکسن در کشور سوئیس است که ارتفاع آن ۲۸۴ متر و طول آن ۶۷۰ متر و در سپتامبر ۱۹۶۱ ساخته شده است. هزینه احداث این سد ۳۷۲ میلیون دلار و حجم آن ۵/۹ میلیون متر مکعب گزارش شده است. بلندترین سد خاکی دنیا سد نورک در روسیه می‌باشد که ارتفاع آن ۳۰۰ متر و طول آن تقریباً ۷۳۰ متر و حجم آن ۵۳/۸ میلیون متر مکعب است که بلندترین سد خاکی دنیا تا سال ۱۹۸۰ بود. شروع ساخت این سد در سال ۱۹۶۱ و اتمام آن در سال ۱۹۷۹ بوده است. البته سد دیگری از نوع خاکی با ارتفاع ۳۳۵ متر در کشور روسیه در دست اقدام و مطالعه بوده است که ممکن است تا کنون احداث شده باشد. با مقایسه ارقام مذکور نتیجه می‌شود که حجم سد خاکی نورک تقریباً ۱۰ برابر سد گراندیکسن است، در صورتی که ارتفاع آن فقط ۱۰ درصد بیشتر و طول آن فقط ۵ درصد بزرگتر از سد گراندیکسن است.

سد بختیاری با ارتفاع ۳۱۵ متر و طول تاج ۴۱۰ متر و حجم مخزن ۵/۳ میلیارد متر مکعب و حجم بتن ریزی ۲۵۵۰۰۰۰ متر مکعب بزرگترین سد دو قوسی جهان خواهد بود که برای کنترل سیلاب‌های مخرب و تامین برق ایجاد خواهد شد. ساختگاه این سد در ۱۲۰ کیلومتری شمال اندیمشک و ۱۱۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان درود قرار دارد.

## ۲-۲- مطالعات مورد نیاز برای احداث سدها

صرف‌نظر از نوع سد، انجام بررسی‌ها و مطالعات جهت ساخت سدها ضروری است. این مطالعات بستگی به شرایط ناحیه، وضعیت آبیگری، وسعت حوضه آبیگر و وسعت دریاچه‌ای که تشکیل می‌شود و وضعیت مصرف آب در پایین دست دارد. مباحث مورد مطالعه معمولاً شامل هواشناسی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی، هیدروژئولوژی، ژئوتکنیک و لرزه‌شناسی می‌باشد. مباحث دیگری جدا از موارد فوق که مورد توجه طراحان و کارفرمایان احداث سد در یک منطقه می‌باشد، غالباً مربوط به شرایط اقلیم شناسی، کشاورزی و نوع آن، مباحث اجتماعی منطقه و موضوع زیست محیطی ناحیه می‌شود. در ادامه به شرح مهمترین مطالعات مورد نیاز به منظور احداث سدها اشاره می‌شود:

### ۲-۲-۱- مطالعات زمین‌شناسی

در مباحث زمین‌شناسی باید وضعیت لایه‌های تشکیل دهنده منطقه، نوع سنگ‌ها، سن آنها، وضعیت چین خوردگی‌ها، گسل‌ها، رورانگی‌ها، امتداد و جهت درزه و شکاف‌ها، نوع رسوبات به لحاظ قدمت، طرز تشکیل و ارتباط لایه‌ها و رسوبات با یکدیگر و ارتباط بین لایه‌ای موجود در آن محل با لایه‌های محل‌های مجاور مشخص گردد.

### ۲-۲-۲- مطالعات ژئومورفولوژیکی

مطالعات ژئومورفولوژیکی برای احداث سدها از دیگر مطالعات می‌باشد. از نظر زمین‌ریخت‌شناسی وجود مناطق دارای پستی و بلندی برای احداث سدها ضروری است. در این مرحله از مطالعات، باید وضعیت ریخت‌شناسی و پستی و

بلندی‌های منطقه در امتداد دره رودخانه صورت گیرد تا بهترین محل برای احداث بدنه و مخزن سد انتخاب گردد. طبیعی است در محل احداث بدنه باید دره تنگ و در محل مخزن باید دره باز باشد.

### ۲-۲-۳- مطالعات هیدرولوژی و هیدروژئولوژی

بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی، آب‌هایی که به محل حوضه سد وارد می‌شوند و آب‌هایی که ممکن است بعد از احداث سد و پرشدن دریاچه از آن خارج می‌شوند (بیان آب حوضه آبریز)، ارتباط چشمه‌های ناحیه با حوضه سد، شرایط تغییرات زمانی آب چشمه‌ها، و حرکت آب‌ها در جهت‌های مختلف، تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی، نفوذپذیری لایه‌های مختلف، تخلخل و آب‌خوری لایه‌های مختلف، آبگذری از گسل‌ها و درزه‌ها، همه و همه از مواردی است که در بخش هیدروژئولوژی با استفاده از وضعیت زمین‌شناسی مشخص می‌گردد. تعیین وجود یا عدم وجود کارست، وضعیت درزه‌های آبگذران و منطقه‌های خردشده گسلی نیز از مسئولیت‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی است که باید یک زمین‌شناس مهندس از همگی آنها آگاهی کافی داشته باشد.

### ۲-۲-۴- مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی

در مبحث زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک باید وضعیت ژئومکانیکی لایه‌ها مثل مقاومت سنگ‌ها، تغییرات استحکام آنها، وضعیت پایداری شیب‌ها یا عدم آن در بخش‌های مختلف مخزن یا محور سد، پیش‌بینی امکان ناپایداری بعد از پر شدن دریاچه، شناخت و مشخص نمودن سنگ لغزش‌های قدیمی یا محتمل جدید، مشخص نمودن لایه‌های محتمل جابه‌جایی مثل مارن‌ها و واریزه‌ها پس از اشباع شدن، بررسی تأثیر گسله‌ها در ناحیه و پیش‌بینی حرکت آنها و محاسبه و شناخت خواص مکانیکی و دینامیکی لایه‌های زیر محل سد بررسی شوند. تشخیص محل‌های مستعد روانگرایی، واگرایی، و حساسیت خاک‌ها نیز باید در این بخش انجام گیرد. معمولاً تکمیل مطالعات ژئوتکنیک و گاهی شناخت دقیق چینه‌شناسی و لایه‌بندی و نیز در مواردی بررسی دقیق وضعیت هیدروژئولوژی نیاز به مطالعات ژئوفیزیکی مانند لرزه‌نگاری، ژئوالکتریک و گاهی ثقل‌سنجی دارد تا مجموعه کارهای زمین‌شناسی سطحی و ژئوفیزیکی و به کمک حفاری گمانه‌های اکتشافی بتواند وضعیت زمین‌شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی را برای آن ناحیه کاملاً معلوم نماید.

حفر گمانه‌های اکتشافی و مغزه‌گیری از آنها جهت شناخت لایه‌های تحت الارضی و تعیین خواص ژئومکانیکی آنها از کارهای بسیار معمول در مرحله مطالعات اولیه جهت احداث سد در یک ناحیه است. عمق گمانه‌ها معمولاً در محل محور سد تا حداقل ۱/۵ برابر ارتفاع محتمل سد برنامه‌ریزی می‌شود، مگر اینکه به لحاظ زمین‌شناسی سنگ‌های زیرین بسیار مشخص و یکنواخت باشند.

### ۲-۲-۵- مطالعات لرزه‌شناسی

در مبحث لرزه‌شناسی از یک سو باید وضعیت لرزه زمین ساخت آن ناحیه و تعیین گسل‌های فعال بزرگ ناحیه و کوچک محلی مشخص گردد و از سوی دیگر وضعیت آماری زلزله‌های اتفاق افتاده در گذشته و نیز محتمل در آینده تا شعاع مؤثر از محل احداث سد مورد بررسی قرار گیرد و مشخص گردد که ریسک لرزه‌خیزی آن محل و نیز ریسک

اثر زلزله‌های محتمل دیگر تا چه حد پیش بینی می‌گردد و در صورتی که احتمال تأثیر وقوع زلزله‌ها بر سد زیاد باشد چه مسائلی را در طراحی باید مد نظر قرار داد.

### ۲-۲-۶- مطالعات زیست محیطی

مطالعات زیست محیطی در خصوص احداث سدها نیز باید انجام شود و تأثیر سد سازی بر محیط زیست طبیعی و انسانی در حین ساخت و در زمان بهره‌برداری به درستی مشخص گردد. در بیشتر موارد انجام فرآیند ساخت و ساز همراه با فعالیت‌هایی نظیر آتشیاری و استفاده از ماشین‌آلات مختلف می‌باشد که با تولید گرد و غبار و سر و صدا باعث ایجاد اختلال در محیط زیست طبیعی و انسانی می‌شود. از سوی دیگر بعد از احداث سد و در زمان بهره‌برداری، سدها ممکن است با به هم زدن حالت طبیعی دبی آب رودخانه‌ها، به محیط زیست مناطق پایین دست خود آسیب برسانند. نمونه‌ای از اینگونه مخاطرات را دریاچه ارومیه تجربه کرده است.

در تمام مطالعات اولیه و نیز در طراحی احداث سد، نیاز به در دست داشتن نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس مناسب مانند ۱:۵۰۰۰، ۱:۲۰۰۰ و گاهی ۱:۱۰۰۰ می‌باشد. معمولاً نقشه‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی بر همین مقیاس‌ها پیاده می‌شوند. البته در طراحی و به منظور نشان دادن بخش‌های مختلف بر حسب مورد نقشه‌های با مقیاس بزرگتر مثل ۱:۵۰۰ و ۱:۱۰۰ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از محاسبات هیدرولوژی و با توجه به وضعیت و نقشه توپوگرافی و هیدرولوژی و انتخاب گزینه‌های محتمل برای احداث سد در آن محل‌ها می‌توان حجم آب ذخیره را تعیین نمود و از این طریق ارتفاع سد را مشخص کرد. در صورتی که حجم رواناب بسیار زیاد باشد، ارتفاع سد بر اساس ملاحظات دیگر مانند وضعیت توپوگرافی منطقه، امکانات اقتصادی و امکان فنی ایجاد سد و مسائل محتمل دیگر تعیین می‌شود.

### ۲-۳- فاکتورهای زمین‌شناسی مهندسی مؤثر در انتخاب ساختگاه سدها

انتخاب محل ساخت یک سد عمدتاً در جهت دستیابی به دو هدف اساسی یعنی تأمین پایداری بدنه سد و مخزن و آب‌بندی آنها می‌باشد. مهمترین عوامل زمین‌شناسی مؤثر در انتخاب محل مناسب برای احداث سدها بطور خلاصه عبارتند از:

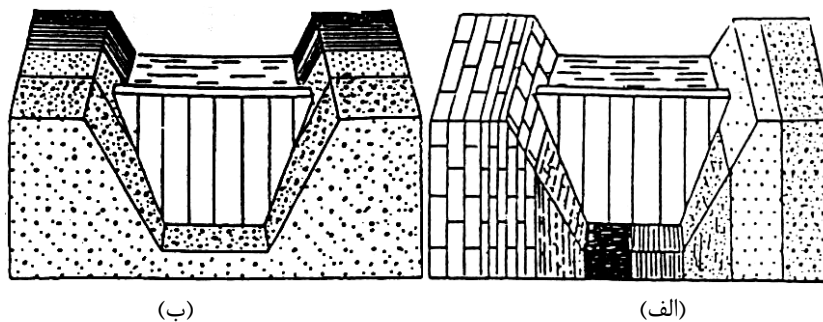
#### ۲-۳-۱- جنس مصالح زمین

جنس مصالح زمین در ساختگاه سدها تأثیر زیادی بر مقاومت و ظرفیت باربری پی و تکیه‌گاه‌های سدها دارد. همچنین آب‌بندی سد در محل پی و مخزن تا حدود زیادی به سنگ‌شناسی ساختگاه و تخلخل سنگ‌ها بستگی دارد. در این خصوص خاک‌ها در مقایسه با سنگ‌ها مقاومت بسیار کمتر و معمولاً نفوذپذیری بیشتری از خود نشان می‌دهند. اگر سنگ‌های ساختگاه سدها، فرآیندهای ثانویه نظیر چین‌خوردگی، گسل خوردگی و ایجاد و توسعه درزه و شکاف‌ها را تجربه نکرده باشند، سنگ‌های آذرین در مقایسه با انواع دگرگونی و رسوبی معمولاً از کیفیت بیشتری برخوردارند. توسعه درزه و شکاف در سنگ‌های مختلف، حضور لایه‌بندی و توسعه اشکال کارستیک در سنگ‌های رسوبی و ایجاد تورق و ناهمسانی در سنگ‌های دگرگونی همگی از عواملی هستند که مقاومت و ظرفیت باربری سنگ‌ها را کاهش داده و به نفوذپذیری آنها می‌افزایند.

## ۲-۳-۲- ساختارهای زمین‌شناسی

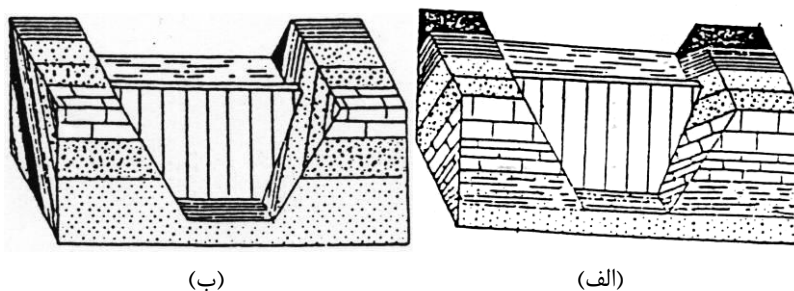
### ۱-۲-۳-۲- لایه‌بندی

یکی از ساختارهای زمین‌شناسی که برای احداث سد در یک محل باید مورد بررسی قرار گیرد، وضعیت امتداد و شیب لایه‌بندی سنگ‌ها می‌باشد. در خصوص امتداد لایه‌بندی بهترین حالت هنگامی است که امتداد لایه‌ها موازی محور سد باشد. در شکل (۱-۲) مقایسه دو حالت مختلف برای انتخاب محل سد نشان داده شده است. بطوری که در قسمت (الف) محور سد موازی با امتداد لایه‌بندی است و در قسمت (ب) محور سد عمود بر امتداد لایه‌بندی می‌باشد. در صورتی که محور سد موازی با امتداد لایه‌ها باشد، امکان دور ماندن از نقاط ضعف بیشتر است. در مقابل در صورتی که محور سد عمود بر امتداد لایه‌ها باشد نقاط ضعف حضور خود را در محل احداث سد نشان خواهند داد. همچنین در صورتی که محور سد موازی با امتداد لایه‌ها باشد امکان فرار آب کمتر است، چون لایه‌ها در جهت عمود بر مسیر حرکت آب قرار دارند و نفوذ پذیری در آن جهت کاهش می‌یابد. در مقابل در صورتیکه امتداد لایه‌ها عمود بر محور سد باشد سطوح لایه‌بندی در جهت حرکت جریان آب خواهد بود و نشت آب در آن جهت بیشتر خواهد بود. بنابراین بطور کلی می‌توان اظهار نمود که هر چه امتداد لایه‌ها زاویه کمتری با محور سد بسازد، انتخاب این محل برای احداث سد مناسب‌تر است. در این خصوص بدترین حالت زمانی است که امتداد لایه‌ها عمود بر محور سد باشد.



شکل ۱-۲- تأثیر امتداد لایه‌ها در انتخاب محل مناسب برای احداث سد

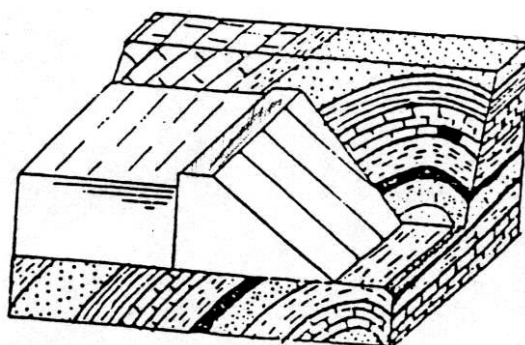
شیب لایه‌ها و جهت‌گیری آنها نیز مانند امتداد می‌تواند در انتخاب محل مناسب برای احداث یک سد مؤثر باشد. در این خصوص، بهتر است شیب لایه‌ها به سمت بالا دست انتخاب شود و یا به عبارت دیگر جهت شیب لایه‌ها در جهت عکس جریان آب باشد تا علاوه بر پایداری بدنه سد، از فرار آب نیز جلوگیری به عمل آید (شکل ۲-۲-الف). در این رابطه از آنجائی که تراوش معمولاً در جهت سطوح لایه‌بندی صورت می‌گیرد، بنابراین در صورتی که شیب سطوح لایه‌بندی به سمت پایین دست باشد، امکان فرار آب بیشتر است (شکل ۲-۲-ب). بر عکس اگر شیب لایه‌بندی به سمت بالا دست باشد، امکان فرار آب کمتر و محل احداث سد از شرایط بهتری برخوردار خواهد بود. پایداری پی و تکیه‌گاه‌های سد نیز در شرایطی که جهت شیب لایه‌ها به سمت بالا دست باشد بیشتر است زیرا بخش بیشتر بارهای وارده بر سطوح لایه‌بندی به سمت بالا دست وارد می‌شود و امکان لغزش نیز وجود نخواهد داشت.



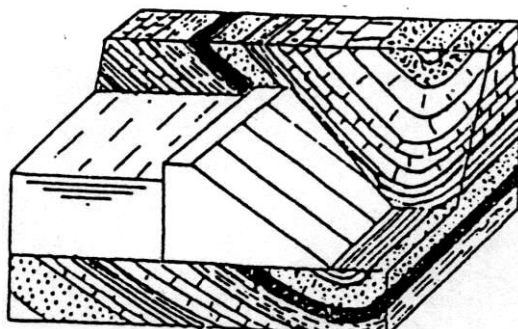
شکل ۲-۲- تأثیر جهت شیب لایه‌ها بر انتخاب محل مناسب برای احداث سد

### ۲-۲-۳-۲- ساختارهای چین‌خورده

نقش ساختارهای چین‌خورده در انتخاب محل مناسب جهت احداث سد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این رابطه بهتر است محل احداث سد جایی انتخاب شود که محور سد موازی با محور چین‌خوردگی بوده و ساختار چین‌خورده از نوع تاق‌شکل<sup>۱</sup> باشد. شکل (۲-۳) سدی را نشان می‌دهد که محور آن با محور تاق‌شکل موازی است. در شکل (۲-۴) محور سد موازی محور ناوشکل می‌باشد که در این صورت، جهت شیب لایه‌بندی به سمت پایین‌دست بوده و امکان فرار آب و لغزش سد وجود دارد.



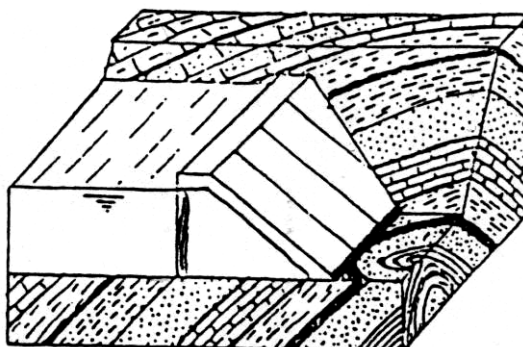
شکل ۲-۳- احداث سد بر روی یک تاق‌شکل - محور سد موازی محور چین



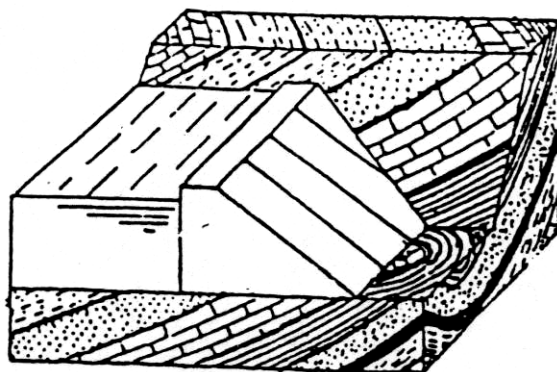
شکل ۲-۴- احداث سد بر روی یک ناوشکل، محور سد موازی محور چین است.



در صورتی که محور سد عمود بر محور طاق شکل یا ناوشکل باشد، لازم است که جهت شیب لایه‌ها در محل انتخابی لحاظ گردد. به عنوان مثال، شکل (۵-۲) محل قرارگیری یک سد را در دماغه یک تاق شکل نشان می‌دهد که جهت زاویه میل آن به سمت بالا دست است و در این حالت نیز جهت شیب لایه‌ها به سمت بالا دست خواهد بود. شکل (۶-۲) موقعیت قرارگیری یک سد در دماغه یک ناوشکل را نشان می‌دهد که جهت زاویه میل آن به سمت بالادست است و شیب لایه‌ها نیز به سمت بالادست می‌باشد. در این موارد، اگر سنگ‌های تشکیل دهنده این‌گونه ساختارها از مقاومت و آب‌بندی خوبی برخوردار باشند، می‌توانند محل مناسبی برای احداث سد باشند.



شکل ۵-۲- محور سد عمود بر محور چین خوردگی، زاویه میل چین به سمت بالادست، جهت شیب لایه‌ها نیز به سمت بالادست است.

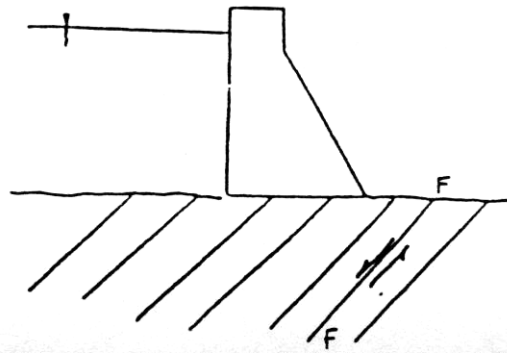


شکل ۶-۲- محور سد عمود بر محور چین خوردگی، زاویه میل چین به سمت بالادست، جهت شیب لایه‌ها نیز به سمت بالادست است.

### ۲-۳-۲-۳- گسل‌ها

در پی‌های سنگی نکته مهمی که به منظور احداث سد باید مورد توجه قرار گیرد وجود گسل‌های مدفون است. یک زمین‌شناس مهندس باید تا حد امکان از این گسل‌ها دوری گزیند، ولی اگر این امکان وجود نداشته باشد، شناخت شیب گسل‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مناسب‌ترین وضعیت گسل نسبت به سد حالتی است که گسل در پایین دست سد قرار گیرد و شیب آن به سمت بالادست سد بوده و شیب لایه‌بندی سنگ‌ها نیز به سمت بالادست باشد. در غیر این صورت گسل عاملی برای عدم پایداری و فرار آب و در مواردی گسیختگی کامل سد می‌باشد.

بنابراین لازم است قبل از احداث سد در مناطق دارای گسل با تزریق مواد غیر قابل نفوذ و نیز روش‌های تقویت پی، دیواره‌های گسل را در نقاط مختلف به هم متصل نمود. شکل (۷-۲) مناسب‌ترین وضعیت قرارگیری گسل نسبت به سد را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲- مناسب‌ترین وضعیت قرارگیری گسل نسبت به سد

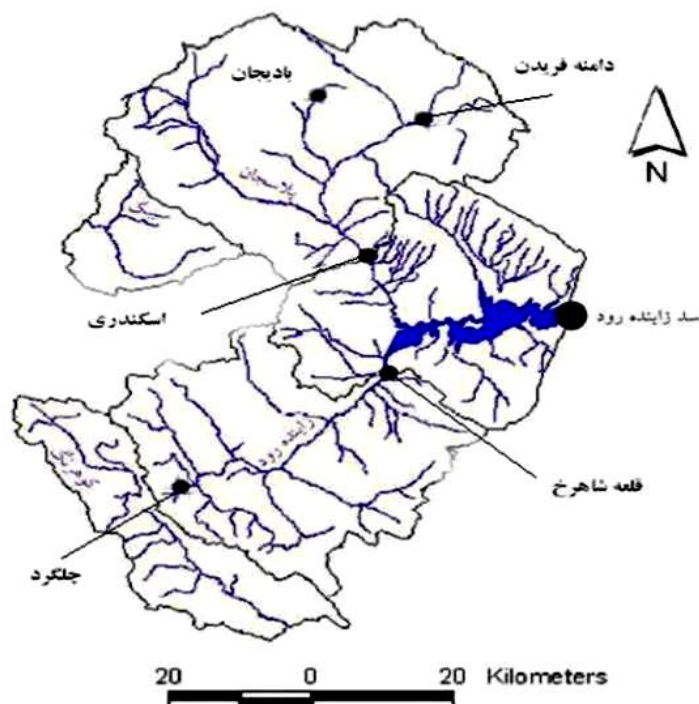
#### ۲-۳-۲-۴- درزه و شکاف‌ها

حضور درزه و شکاف‌های با منشاء مختلف در توده سنگ ساختگاه سد، باعث کاهش مقاومت و افزایش نشت آب از پی، تکیه‌گاه‌ها و مخزن سد می‌شود. برای اهدف سد سازی، بهترین حالت زمانی است که سنگ‌ها فاقد درزه و شکاف باشند. در صورت وجود درزه و شکاف در سنگ‌های ساختگاه سدها بهتر است که:

- ۱- امتداد درزه‌ها موازی محور سد و جهت شیب آنها به سمت بالادست باشد.
- ۲- درزه‌ها از بازشدگی زیادی برخوردار نباشند.
- ۳- درزه‌ها از فاصله‌داری زیادی برخوردار باشند.
- ۴- درزه‌ها دارای مواد پرکننده مقاومی باشند.
- ۵- درزه‌ها از تداوم زیادی برخوردار نباشند.
- ۶- سطح درزه‌ها فاقد هوازدگی یا از هوازدگی کمی برخوردار باشند.
- ۷- مقاومت فشاری و برشی سطح درزه‌ها زیاد باشند.

#### ۲-۳-۳- وضعیت حوضه آبریز

محل احداث سدها معمولاً در بخش انتهایی یک حوضه آبریز انتخاب می‌شود. بدین ترتیب حجم بیشتری از آب ذخیره و یا کنترل می‌شود. در جایی که رودخانه‌ها فصلی هستند، سدهای ساخته شده اغلب از نوع مخزنی، تنظیمی و یا حفاظتی‌اند و در جایی که رودخانه‌های دائمی قرار دارند، امکان ساخت سد در قسمت‌های مختلف مسیر رودخانه وجود دارد و سدها اغلب نیروگاهی یا مخزنی‌اند. شکل (۴-۸) محل مناسب برای احداث سد در حوضه آبریز را نشان می‌دهد. از نظر شکل پلان، حوضه‌های آبریز کشیده نسبت به حوضه‌های آبریز هم‌بعد دارای مزیت می‌باشند. زیرا حوضه‌های آبریز هم‌بعد توان تولید سیلاب بیشتری دارند.



شکل ۴-۸- محل مناسب برای احداث سد در حوضه آبریز

یکی از ویژگی‌های حوضه آبریز سدها این است که تولید رسوبات در آن کم باشد. اگر تولید رسوب در حوضه آبریز زیاد باشد، حجم مفید مخزن سد در مدت زمان کوتاه‌تری از رسوبات پر خواهد شد و عمر مفید سد کاهش خواهد یافت. مهمترین عوامل مؤثر بر تولید رسوبات در حوضه آبریز و ورود آنها به مخزن سد عبارتند از:

- ۱- مقاومت زمین در حوضه آبریز
- ۲- شدت هوازگی مصالح حوضه آبریز
- ۳- مساحت حوضه آبریز
- ۴- شیب حوضه آبریز
- ۵- وجود یا عدم وجود پوش گیاهی در حوضه آبریز و نوع آن
- ۶- نوع و مقدار بارش سالیانه

### ۲-۳-۴- وضعیت ژئومورفولوژی و توپوگرافی

از مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی می‌توان اطلاعات گران‌بهایی برای تعیین موقعیت و انتخاب یک محل مناسب برای سد ساخت به‌دست آورد. معمولاً بهترین حالت این است که یک دره تنگ در سمت بالادست خود منتهی به یک دره باز شود. همچنین از نظر ژئومورفولوژی مهندسی، دره تنگ نشان دهنده مقاومت سنگ‌ها در این بخش است که در مقابل جریان آب رودخانه مقاومت بیشتری را نشان داده‌اند، از این رو محل مناسبی برای احداث سد می‌باشد. دره باز نیز در صورت نداشتن مشکل آب‌بندی محل مناسبی به‌عنوان دریاچه سد خواهد بود.

در امتداد مسیر یک رودخانه، گزینه‌های مختلفی را از نظر شرایط توپوگرافی بررسی می‌کنند شکل (۲-۹) چگونگی انتخاب محل‌های گوناگون برای احداث سد در مسیر یک رودخانه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل،

محل‌هایی که در سمت بالادست قرار گرفته‌اند، دریاچه بزرگتری داشته و می‌توانند حجم بیشتری از آب را ذخیره کنند. در عین حال با حرکت به سمت پایین دست، ابعاد هندسی سد نیز کوچکتر است.



شکل ۲-۹- اثر توپوگرافی در انتخاب محل مناسب برای احداث سد

### ۲-۳-۵- نفوذپذیری زمین

نفوذپذیری زمین در اطراف سدها از نکات بسیار مهم در طراحی و شناسائی محل احداث سد است. زمین‌شناس مهندس باید بداند که در چه حالتی آب می‌تواند از اطراف سد فرار کند. در صورتی که اطراف سدها را سنگ‌های آذرین و دگرگونی تشکیل داده باشند باید با بررسی‌ها و آزمایش‌های صحرایی وجود درزه‌ها، گسل‌ها و لایه‌های هوازده را مشخص کرد، زیرا این مکان‌ها فضاهای خوبی برای فرار آب ایجاد می‌کنند.

زمانی که اطراف سدها را سنگ‌های رسوبی که دارای لایه بندی هستند تشکیل دهد، لازم است که وضعیت لایه بندی آنها نسبت به دره‌ای که سد در آن واقع می‌شود، مشخص شود. وقتی امتداد لایه بندی موازی با دره باشد و شیب لایه‌ها به سمت بالادست باشد، نفوذ آب به پایین دست کمتر از حالتی است که امتداد دره و لایه بندی بر هم عمود باشند.

### ۲-۳-۶- شرایط زیست‌محیطی

امروزه، به ویژه با ازدیاد جمعیت، افزایش تولید زباله و منابع آلوده کننده، توجه بیشتر به مسائل زیست‌محیطی در ارتباط با انتخاب محل مناسب برای احداث سد و دوری از هر گونه منابع آلوده کننده را می‌طلبد. اصولاً محل سدها، باید در بالادست منطقه‌ای که احتمال آلوده کردن آب رودخانه را دارد ساخته شود. حداقل فاصله سد در بالادست شهر باید ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته شود، تا علاوه بر جلوگیری از آلودگی آب رودخانه و دریاچه سد، شهر نیز از خطر احتمالی سیلاب ناشی از دریاچه سد در اثر حوادث غیر مترقبه مصون باشد.

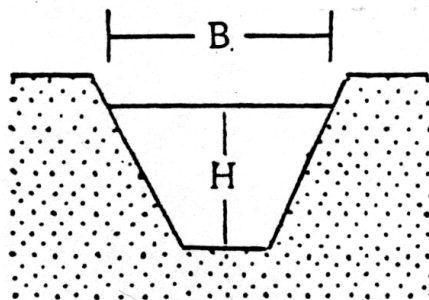
## ۲-۳-۷- آهک‌های کارستی

در انتخاب محل سد باید از مکان‌هایی که از سنگ آهک تشکیل شده است تا حد امکان دوری کرد زیرا در هر کجا که آب زیرزمینی در امتداد ناپیوستگی‌های موجود در این سنگ حرکت می‌کند، باعث انحلال سنگ و در نتیجه ایجاد حفرات و کانال‌های بزرگ می‌شود که به این مناطق، مناطق کارستی می‌گویند. در این مناطق ترک خوردن و ریزش سقف غارها و حفرات زیرزمینی باعث ایجاد فروچاله<sup>۱</sup> می‌گردد. بنابراین با توجه به کاهش مقاومت سنگ و فرار آب در مناطق کارستی باید وجود حفرات و سایر اشکال انحلالی را شناسایی نمود تا برای سد مشکلی بوجود نیاید. با توجه به مطالب مذکور مناسبترین حالت برای یک محل به‌عنوان پی سد زمینی است که از لایه‌های مقاوم تشکیل شده باشد و نشست آن در برابر وزن سد در حد مجاز باشد، نفوذناپذیر باشد و در صورت داشتن نفوذپذیری کم، باید آن را با تزریق سیمان یا مواد مناسب دیگر نفوذناپذیر کرد. همچنین در این محل باید لایه‌ها به سمت بالا دست سد شیب داشته باشند و منطقه تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی قرار نگرفته باشد.

## ۲-۴- عوامل مؤثر بر انتخاب نوع سد

### ۲-۴-۱- شکل دره

دره‌ها معمولاً در اثر عملکرد پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی شکل می‌گیرند. شکل یک دره می‌تواند در انتخاب نوع سد نقش عمده‌ای داشته باشد. در طرح‌های مهندسی سد، دره‌ها با در نظر گرفتن عرض (B) و عمق (H) خود معرفی می‌شوند. یکی از روش‌های ساده برای طبقه‌بندی دره‌ها با توجه به شکل (۲-۱۰) طبقه‌بندی آنها بر اساس نسبت B/H است. این روش توسط توماس (۱۹۹۴)<sup>۲</sup> پیشنهاد شده و جزئیات آن در جدول (۲-۱) ارائه شده است.



شکل ۲-۱۰- معرفی پارامترهای B و H

جدول ۲-۱- طبقه‌بندی انواع دره و نوع سد پیشنهادی (توماس ۱۹۹۴)

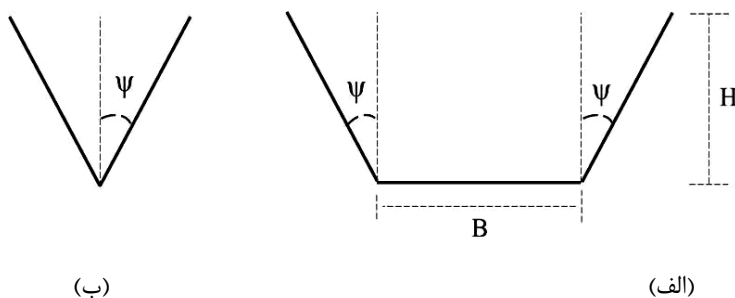
نوع سد پیشنهادی	نسبت B/H	نوع دره
بتنی قوسی	<3	عمیق
بتنی وزنی و بتنی پایه‌دار	3-6	تنگ
خاکی	>6	باز

همچنین طبقه‌بندی دیگری در این خصوص توسط ساکاویا (۱۹۹۵)<sup>۱</sup> ارائه شده است. بر اساس این طبقه‌بندی انواع دره به شرح زیر می‌باشد (شکل ۲-۱۱):

۱- دره U شکل: در این دره، مقدار عرض کف دره (B) بزرگتر از صفر است.

۲- دره V شکل: در این دره، مقدار عرض کف دره (B) مساوی صفر است.

نوع سد پیشنهادی برای انواع مختلف دره‌ها بر اساس این طبقه‌بندی در جدول (۲-۲) ارائه شده است.



شکل ۲-۱۱- انواع دره به پیشنهاد ساکاویا (۱۹۹۵)

جدول ۲-۲- طبقه‌بندی انواع دره و نوع سد پیشنهادی (ساکاویا ۱۹۹۵)

نوع سد پیشنهادی	زاویه شیب دره ( $\Psi$ )	نسبت B/H	نوع دره
بتنی قوسی	$\Psi < 35^\circ$	< 1	دره U شکل
بتنی وزنی و بتنی پایه‌دار	$\Psi > 35^\circ$		
بتنی وزنی و بتنی پایه‌دار	$\Psi < 35^\circ$	1 - 2	
سد خاکی	$\Psi > 35^\circ$		
سد خاکی	---	> 2	
بتنی دو قوسی	$\Psi < 35^\circ$	= 0	دره V شکل
بتنی تک قوسی	$\Psi > 35^\circ$		

#### ۲-۴-۲- مقاومت زمین

معمولاً با در نظر گرفتن خواص مهندسی سنگ‌ها و خاک‌ها، محل احداث سد باید مورد ارزیابی قرار گیرد. ظرفیت باربری مجاز زمین یکی از شاخص‌هایی است که با توجه به خواص مهندسی سنگ‌ها و خاک‌ها تعیین می‌شود و می‌توان بوسیله آن استقامت زمین را مورد سنجش قرار داد. با در نظر گرفتن باربری مجاز زمین، نوع سد مناسب مطابق جدول (۲-۳) پیشنهاد می‌شود. در این زمینه ظرفیت باربری نهایی از طریق روابط ارائه شده توسط محققین مختلف محاسبه می‌گردد.

جدول ۲-۳- ظرفیت باربری مجاز برای انواع سدها

ظرفیت باربری مجاز (MPa)	< ۱	۲-۱	۳-۲	۵-۳	> ۵
نوع سد پیشنهادی	خاکی	بتنی وزنی	بتنی پایه‌دار	بتنی قوسی ساده	بتنی قوسی مضاعف

با توجه به جدول بالا، سدهای خاکی با داشتن سطح قاعده وسیعتر سبب پراکنده شدن وزن بدنه سد در قسمت گسترده‌تری می‌شوند و مقدار بار کمتری در واحد سطح به زمین زیرین وارد می‌کنند. در مقابل سدهای بتنی قوسی مضاعف با داشتن سطح قاعده کوچکتر در مقایسه با انواع دیگر سدها، سبب انتقال بار سد به‌صورت متمرکز بر زمین زیرین خود می‌شوند. بنابراین خواص باربری زمین در انتخاب نوع سد با توجه به شکل ساختمان آن و نحوه انتقال نیرو حائز اهمیت است. شاخص‌های مهندسی مصالح پی از قبیل مقاومت تراکمی، مقاومت برشی، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون نیز در انتخاب نوع سد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

### ۲-۴-۳- منابع قرضه

فراوانی و در دسترس بودن منابع قرضه یکی از شاخص‌هایی است که می‌تواند در انتخاب نوع سد در یک منطقه مؤثر باشد. به‌ویژه برای سدهای خاکی که حجم زیادی از مصالح در ساختمان آنها بکار می‌رود. برای مثال سد کرخه با ارتفاع ۱۲۷ متر و طول تاج ۳۳۰۰ متر، ۳۳ میلیون متر مکعب مصالح مصرف کرده است. بنابراین برای سدهای خاکی مسئله نزدیکی به منابع قرضه و هزینه حمل و نقل نیز مهم است، به‌طوری‌که برای فواصل بیش از ۱۵ کیلومتر انتقال منابع قرضه مقرون به صرفه نیست.

### ۲-۴-۴- لرزه‌خیزی منطقه

میزان لرزه‌خیزی منطقه نیز از جمله عوامل مؤثر در انتخاب نوع سد در یک منطقه می‌باشد. در این خصوص سدهای بتنی به دلیل داشتن بدنه شکننده برای مناطق با لرزه‌خیزی زیاد پیشنهاد نمی‌شوند. از سوی دیگر سدهای خاکی دارای بدنه انعطاف‌پذیر هستند و در مناطق دارای لرزه‌خیزی زیاد، مشکلات کمتری نسبت به انواع بتنی دارند.

### ۲-۵- ایمنی و عوامل افزایشده عمر مفید سدها

ایمنی سدها همواره مد نظر طراحان، سازندگان و گروه‌های بهره‌بردار بوده و هست. شکست یک سد خسارات مالی سنگینی را به بار می‌آورد و به احتمال قوی تلفات جانی قابل ملاحظه‌ای را هم به همراه خواهد داشت. در سال‌های اخیر سعی شده است که با کاربرد مدل‌های ریاضی مبتنی بر آنالیز احتمالات، مخاطرات خرابی سدها حتی‌الامکان به صفر رسانده شود.

گسترش علوم و فنون شناخت زمین، پیشرفت در نحوه مطالعات صحرایی، و انجام آزمایش‌های ویژه، ساخت و استفاده از تجهیزات دقیق‌تر و ابزار آزمایش مناسب‌تر، گسترش تکنولوژی، کامپیوترها و برنامه‌های محاسباتی، شناخت دقیق‌تر و مناسب‌تر قوانین رفتاری خاک و سنگ، پیشرفت تکنولوژی ساخت و تهیه مصالح جدید برای ساختمان سدها، پی‌سازی‌ها و غیره از یک طرف، پاسخی به نیازهای فزاینده جوامع مختلف در زمینه تأمین آب و انرژی و بالاخره پیشرفت‌های اقتصادی کشورها است و از طرف دیگر سبب شده است که هر چه بیشتر پتانسیل‌های سد سازی مورد استفاده قرار گیرند و محل‌هایی که در دوره‌های گذشته برای سدسازی چندان مناسب تشخیص داده نمی‌شده است، امروزه برای این مقاصد و ایجاد مخزن و ذخیره آب به منظور مصارف گوناگون مورد استفاده قرار گیرند. هر چه ابعاد سد و حجم مخزن افزایش یافته و بهره‌برداری و استفاده از آب و حجم سرمایه‌گذاری اولیه مهمتر

می‌گردد، بر اهمیت تأمین ایمنی لازم و به حداقل رساندن مخاطرات افزوده می‌شود. بدین ترتیب سدهای بزرگ از نظر تأمین ایمنی و بهره‌برداری مطمئن در طول عمر مفید خود جایگاه خاصی یافته و در تصمیم‌گیری‌ها برای معیارهای فنی در مقیاس اجتماعی و اقتصادی نیازمند توجه ویژه می‌باشند. بطور کلی می‌توان ایمنی سد را در موارد زیر طبقه‌بندی نمود:

۱- ایمنی سدها در مقابل زمین لرزه و مخاطرات وابسته به حرکات پوسته زمین

۲- ایمنی سدها از دیدگاه سازه‌ای و شرایط پی

۳- ایمنی سدها از دیدگاه شرایط هیدرولوژی و سیلاب

۴- ایمنی سدها در رابطه با تجهیزات و سایر موارد

در کلیه موارد فوق نقش رفتار سنجی و تحت کنترل گرفتن کلیه حرکات سد، انجام بازدیدهای دقیق فنی به‌طور ادواری از کلیه تأسیسات و سازه‌ها، قرائت مستمر دستگاه‌های ابزار دقیق و تحلیل نتایج آنها از جمله لرزه‌نگاری، بازنگری آمار هیدرولوژی و فراوانی سیلاب‌ها و دوره بازگشت آنها، برای به تصویر کشیدن درجه ایمنی بسیار مهم و ضروری است. در حال حاضر، مطالعه و بررسی رفتار سد و همچنین اندرکنش سد و پی با تحلیل نتایج ابزار دقیق در دوره بهره‌برداری، فاز تکمیلی مطالعات سد سازی محسوب می‌گردد و برای ارزیابی درجه ایمنی همواره ضروری است. بطور کلی برای افزایش عمر مفید سدها توجه به موارد زیر ضروری است:

۱- رعایت استانداردها و آیین نامه‌ها

۲- در نظر گرفتن توان و ظرفیت سرریزها

۳- در نظر گرفتن وضعیت رسوب‌گذاری در محل دریاچه سد

۴- در نظر گرفتن پتانسیل لرزه‌خیزی محل

۵- توجه به آمار صد ساله بارندگی

در این خصوص عدم رعایت استانداردها و آیین نامه‌های تعیین شده به‌منظور احداث سدها می‌تواند موجب بروز خسارات جبران ناپذیری در بدنه سدها گردد.

موضوع سرریز و طغیان آب و عدم در نظر گرفتن ظرفیت تخلیه سرریزها در فصول سیلابی و به هنگام طغیان رودخانه‌ها یکی دیگر از فاکتورهایی است که می‌تواند در تخریب یا شستشوی بدنه سدها تأثیر بسزایی داشته باشد و بخصوص این موضوع در سدهای خاکی به دلیل پتانسیل شسته شدن تاج سد و دامنه پایین دست از سایر موارد بیشتر است.

عامل مهم دیگر توجه به حجم رسوبات و در نظر گرفتن عوامل یا فاکتورهایی است که باعث می‌شوند مواد آبرفتی و رسوبی ناشی از فرسایش ارتفاعات و زمین‌های حوضه آبریز سد در حجم قابل ملاحظه‌ای سالانه وارد دریاچه شده بنحوی که تکرار این عمل در طی سال‌های متمادی موجب افزایش ضخامت رسوبات در پشت دیواره سد گردیده و منجر به از کار افتادن تأسیسات و یا دریاچه‌های تخلیه رسوب و در نهایت عدم کارایی سد و کاهش ظرفیت آن می‌گردد. بدیهی است که در پاره‌ای از موارد هزینه لایروبی سدها به دلیل بالا بودن حجم رسوبات از احداث یک سد جدید بیشتر است. از مهمترین عوامل مؤثر در پر شده سریع دریاچه سد موارد زیر را می‌توان نام برد:

۱- بارش باران‌های سیل آسا و شدید

۲- عدم پوشش گیاهی مناسب در حوضه آبریز سد



۳- نوع خاک یا سنگ حوضه آبریز و عدم پایداری آنها در مقابل عمل فرسایش و شستشو

۴- تأثیر شیب رودخانه و شیب توپوگرافی محل

۵- وضعیت پوشش گیاهی حوضه آبریز

یکی دیگر از عواملی که در برخی از موارد موجبات تخریب و یا شکسته شدن سدها را فراهم می‌کند، زمین‌لرزه‌ها می‌باشند. بخصوص در مواردی که ساخت سد و محاسبات پایداری در سد بدون توجه به آمار تاریخی رویدادهای لرزه‌ای محل صورت گرفته باشد، بروز زلزله‌های شدید می‌تواند منجر به شکست یا تخریب کامل سد گردد. همچنین کنترل دریاچه، کنترل حجم آب ذخیره شده در پشت سد و بازدید و کنترل تأسیسات و تجهیزاتی که در محل سد نصب گردیده‌اند و همچنین استفاده از سیستم‌های اخطار دهنده حساس مانند کرنش‌سنج‌ها و سایر ابزار و وسائل مؤثر در جلوگیری بموقع از هر گونه حادثه‌ای که ممکن است منجر به تخریب سد و بروز حوادث ناگوار گردد، از جمله مواردی هستند که پیوسته باید مورد توجه باشند.

## ۲-۶- رفتار نگاری در سدها

سدها ساختمان‌های عظیم ساخته دست بشر می‌باشند که از یک طرف به علت پیچیدگی و تعداد پارامترهای فیزیکی، ژئومکانیکی، هیدرولوژیکی و سازه‌ای و از طرف دیگر به دلیل سرمایه‌گذاری سنگین و بروز خسارات فراوان ناشی از شکست احتمالی، باید ایمنی بالایی برای آنها قائل شد.

مطالعه پروژه‌های سد سازی در زمان طراحی پایان نمی‌یابد، بلکه از نظر ماهیت متغییر و شرایط غیر یکنواخت زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی و فیزیکی و بالاخره کنش‌های شیمیائی زمین زیر پی‌سدها، لازم است یافته‌های دوره ساخت از جمیع زوایای مهندسی و همچنین نتایج رفتارنگاری در حین اولین آبیگری مخزن با دقت خاص مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند که خود مرحله‌ای بسیار مهم از مطالعات محسوب می‌گردد. از دیدگاه کارشناسان برجسته بین‌المللی رفتارنگاری و رفتارسنجی کلیه تأسیسات و ساختمان سد در دوره بهره‌برداری و تحلیل نتایج آنها توسط مهندسين خبره و مسلط به مسایل سدسازی، فاز تکمیلی مطالعات یک پروژه سد سازی را تشکیل می‌دهد. بدین ترتیب با توجه به اهمیت زیاد ایمنی چنین سازه‌هایی، لازم است که رفتار سدها (بدنه و پی) در هر مقطع زمانی، ضمن سنجش کمی متغیرهای وارده شونده در تحولات و فرآیندهای رفتاری، تحلیل گردد و ناهنجاری‌های احتمالی فوراً مشخص شوند، تا در صورت نیاز اقدامات مهندسی پیش‌گیری کننده به عمل آید.

بررسی ایمنی سدها تحت دو روش مکمل یکدیگر یعنی یکی بازرسی‌های ادواری توسط مهندسين آگاه به مسایل رفتار سازه‌ای و پی‌سازی و دیگری تجزیه و تحلیل نتایج دستگاه‌های اندازه‌گیری و ابزار دقیق، امکان‌پذیر است. بنابراین استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری و ابزار دقیق، روشی برای سنجش واکنش‌های حاصل از بارگذاری و تحولات زمین و مصالح تحت نفوذ و گذر آب، می‌باشند.

## ۲-۶-۱- اهداف رفتارنگاری

با توجه به اهداف رفتارنگاری می‌توان اندازه‌گیری حرکات سدها را در زمان‌های مختلف و به‌صورت زیر انجام داد:

## ۲-۶-۱-۱- رفتارنگاری در حین ساخت سد و اولین آبیگری

هدف اولیه این اندازه‌گیری‌ها تحلیل ایمنی فوری سازه است. در این زمان می‌توان اطلاعات جالبی از عوامل پیچیده اندرکنش سازه و پی بدست آورد. به عبارت دیگر، این اندازه‌گیری‌ها مسائلی که در طراحی مورد ملاحظه قرار نگرفته است را آشکار می‌سازد. بعلاوه اندازه‌گیری‌هایی که در حین اولین آبگیری مخزن انجام می‌شود، می‌تواند نقطه شروعی برای ارزیابی اهمیت رفتارهای متفاوت سازه و پی آن ارائه نماید.

### ۲-۱-۶-۲- رفتارنگاری در زمان بهره‌برداری

از طریق این اندازه‌گیری‌ها می‌توان اطلاعات مفیدی درباره رفتار کل سازه و یا رفتار بعضی قسمت‌ها و یا نقاط حساس آن بدست آورد. منظور و هدف اصلی از رفتارنگاری در این مرحله، ارائه یک تصویر اطمینان بخش از تمامی تغییرات سازه است. بعضی از این تغییرات ممکن است مطلوب بوده و برخی دیگر موجب نگرانی بشوند.

### ۲-۱-۶-۳- رفتارنگاری برای مقاصد علمی - فنی

این اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در هر زمان برای حل مسائل معینی در ارتباط با معیارهای طراحی سازه انجام پذیرد. در این خصوص یکی از مقاصد عمده عبارت است از آزمایش اعتبار مفروضات طراحی که می‌تواند مدت کوتاهی (چند سال) بعد از بهره‌برداری یعنی زمانی که خزش اولیه و یا پدیده نشست متوقف گردیده و یا بسیار ناچیز شده است، انجام پذیرد.

### ۲-۶-۲- انتخاب ابزار دقیق

برای هر سازه انتخاب ابزار دقیق و نحوه ابزار گذاری بسیار مهم می‌باشد. نوع ابزارها، تعداد و نحوه توزیع آنها در داخل و خارج سازه و چگونگی نصب آنها باید مورد گواهی مهندسین متخصص قرار گرفته باشد. زیرا اصلاح بعد از نصب غالباً غیر ممکن بوده و در بسیاری از موارد کاری بیهوده می‌باشد. قابل ذکر است که در خیلی مواقع نتایج گمراه کننده (به غیر از اشتباهات طراحی) به نصب و جایگذاری ابزار دقیق مربوط می‌شود. انتخاب ابزار دقیق بستگی به هدف از رفتارنگاری و نوع سد دارد. تغییر شکل در سدهای بتنی معمولاً تحت اثر پدیده گرما می‌باشد. بنابراین این پدیده در هنگام اندازه‌گیری‌ها باید یا به وسیله دستگاه محاسباتی حذف شود و یا اثرات نامطلوب آن در نظر گرفته شود. به هر صورت چون ممکن است تغییر شکل‌های جزئی یا کلی در سدهای بتنی سریع باشد لذا قرائت‌ها باید آنچنان با سرعت انجام شود که حرکتی که در هر زمان اتفاق می‌افتد از دقت قابل انتظار نکاهد. در سدهای خاکی اندازه‌گیری‌ها در زمینه فشار آب منفذی در بدنه و پی سد، تغییر مکان‌های قائم یا نشست‌ها، تغییر شکل و نشست لایه‌های مختلف سد خاکی و تغییر مکان‌های افقی سطوح تاج و سایر نقاط مهم سد خاکی، انجام می‌پذیرد.

## فصل سوم:

### زمین‌شناسی مهندسی مسیر راه و راه‌آهن

#### ۳-۱- مقدمه

مسیرها محل اجرای پروژه‌های خطی می‌باشند. این پروژه‌ها دارای انواع مختلفی مانند راه‌ها و بزرگراه‌ها، خطوط راه‌آهن، خطوط انتقال نیرو، تونل‌ها و کانال‌های آبرسانی هستند. این پروژه‌ها دارای طول زیاد می‌باشند ولی در عرض کم اجرا می‌شوند. در اجرای اینگونه پروژه‌ها ابتدا نقشه‌های پایه و مقدماتی تهیه شده و سپس بر مبنای اینگونه نقشه‌ها اطلاعات پایه تهیه و پیاده‌سازی می‌شوند. مسیرها یا پروژه‌های خطی را می‌توان به چند گروه اصلی به شرح زیر طبقه‌بندی نمود:

۱- مسیرهای راه و راه‌آهن: در این مسیرها با توجه به توپوگرافی منطقه شیب مجاز مسیر تعیین شده و با در نظر گرفتن نقاط ابتدایی، انتهایی و نقاط اجباری، مسیر مورد نظر با شیب مشخص و زوایای گردش و قوس‌های مجاز طراحی و اجرا می‌شود. در این خصوص باید به آمار ترافیک و تردد، نیازهای منطقه، وضعیت زمین‌های کشاورزی، حجم عملیات حاکی، محدودیت‌های زمین‌شناسی و هزینه‌های پروژه توجه شود. همچنین با توجه به وضعیت ژئومورفولوژی منطقه لازم است در برخی از نقاط مسیر پل و تونل‌هایی احداث گردد.

۲- کانال‌های آبرسانی: در این پروژه‌ها با توجه به وضعیت ژئومورفولوژی منطقه لازم است شیب مناسب به منظور جریان آب به سمت مقصد مورد نظر ایجاد شود.

۳- مسیر لوله‌ها و خطوط انتقال نیرو: در اینگونه مسیرها محدودیت‌های موجود در طراحی و اجرا از قبیل شیب زمین، عمق و وضعیت زمین‌شناسی از مسیرهای دیگر کمتر است. ولی باید دقت داشت در مناطق سربالایی میزان افت فشار از مقدار خاصی نباید تجاوز کند. در این پروژه‌ها در قسمت‌های مختلف مسیر تابلوهایی به منظور مشخص کردن محل عبور مسیر نصب می‌گردند.

۴- تونل‌ها: اینگونه پروژه‌های خطی در عمق ایجاد می‌شوند و به لحاظ شرایط زمین‌شناسی از محدودیت‌ها بیشتری برخوردار می‌باشند. تونل با اهداف مختلف نظیر تونل‌های راه، تونل‌های معدنی، تونل‌های نظامی و تونل‌های صنعتی احداث می‌شوند.

در این نوشتار، به دلیل اهمیت بیشتر مسیرهای راه‌ها و بزرگراه‌ها و خطوط راه‌آهن به توضیح در خصوص ویژگی‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی این مسیرها پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- تاریخچه راه سازی در جهان و ایران

راه‌ها ابتدایی‌ترین وسیله ارتباط بین انسان‌ها می‌باشند و در هر کشور به عنوان شبکه ارتباطی بین نقاط مختلف تلقی می‌شوند. نیاز انسان به راه و جاده به دنبال اختراع چرخ در حدود ۵۰۰۰ سال پیش در عصر سومری‌ها احساس شده است. در بریتانیا جاده‌ای از جنس الوار چوبی کشف شده که متعلق به حدود ۲۵۰۰ سال پیش از میلاد مسیح (ع) بوده است و از آن برای اهداف نظامی استفاده می‌شده است (جاده برکشایر). در حدود ۱۱۰۰ سال پیش از میلاد، قبایل سریانی (سوریه امروزی) جاده‌هایی از میان کوه‌های شمالی بین‌النهرین احداث کردند. خیابان‌هایی با روکش‌های قیر و آجر در شهرهای نینوا و بابل یافت شده و مصریان نیز جاده‌هایی را برای حمل سنگ‌های مورد استفاده در ساخت اهرام ثلاثه ساختند. امپراتوری ایران در حدود ۵۰۰ سال پیش از میلاد، راه شاهی را احداث کرده است که طول آن در حدود ۲۵۰۰ کیلومتر بوده است. این راه از تخت جمشید شروع شده و پس از عبور از شوش، نواحی غربی ایران و ترکیه امروزی، به سارد پایتخت لیدی (نزدیک بندر ازمیر) منتهی می‌شده است. این راه در درجه اول با هدف نظامی و در درجات بعدی با مقاصد خبررسانی و تجاری احداث شده بود. همچنین جاده ابریشم در حدود ۲۶۰ سال قبل از میلاد، مسیری بوده که ابریشم از چین وارد ایران می‌شده و از آنجا به کشورهای اروپایی صادر می‌شده است. در تمدن اولیه هند در کنار دره ایندوس<sup>۱</sup>، جاده‌هایی با سطح آجری و دارای سیستم لوله تخلیه آب‌های سطحی ساخته شده بود که در سال ۱۹۹۲ میلادی توسط باستان‌شناسان کشف شده است. در کشورهای جنوبی قاره اروپا نیز جاده‌هایی با سطح پوشیده شده از الوار چوبی و کشف شده است که آثار آنها در کشورهای سوئیس و مجارستان بدست آمده است. در روم باستان نیز ساخت جاده‌های دارای راستای مستقیم بسیار موسوم بوده است، زیرا آنها هنوز نیم‌موخته بودند که محور چرخ جلو را به صورت محور چرخشی بسازند. این جاده‌ها معمولاً روی خاکریزها احداث می‌شدند تا سطح جاده از زمین‌های مجاور بالا باشد تا برای اهداف نظامی مناسب باشد، زیرا با احداث خاکریز حاشیه‌های جاده به صورت خندق در می‌آمد که تجاوز دشمنان را کاهش می‌داده است. رومی‌ها در ساخت جاده‌های خود از متراکم کردن چهار لایه استفاده می‌کردند که شباهت زیادی به ساختار جاده‌های امروزی داشتند.

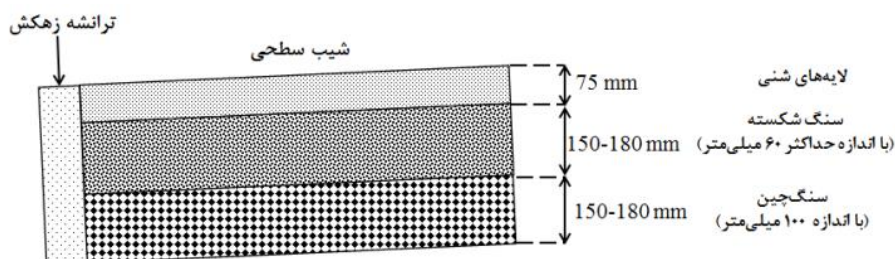
با گذشت زمان ساخت جاده‌ها از نظر ساختار و امتداد، در نقاط مختلف دنیا دچار تغییر شد. در طول قرن هیجدهم میلادی، راه‌سازان کار خود را در بریتانیا شروع کردند که از مهمترین آنها می‌توان افراد زیر را نام برد:

۱- رابرت فیلیپس (۱۷۳۶)<sup>۲</sup>: به عنوان طلایه‌دار واقعی در طراحی جاده است که در مقاله‌ای پیشنهادهایی در خصوص طراحی و ساخت جاده‌های شنی و رسی ارائه کرده است. در این مقاله اشاره شده است که اگر روی یک لایه اساس دارای زهکشی خوب، یک لایه شنی قرار گیرد در اثر تردد و سایل نقلیه به یک سطح تبدیل می‌شود.

۲- جان متکالف<sup>۳</sup>: متولد سال ۱۷۱۷ میلادی در سن ۶ سالگی به خاطر بیماری آبله بینایی خود را از دست داد و بعد از تجربه زندگی‌های متفاوت به جاده سازی روی آورد. او در جاده‌سازی تأکید زیادی بر زهکشی و فونداسیون خوب برای جاده داشت که امروزه به عنوان لایه زیر اساس در نظر گرفته می‌شود. همچنین طراحی و ساخت روسازی قوسی از کارهای دیگر متکالف بود که به خاطر زهکشی آب‌های سطح جاده انجام می‌شد.

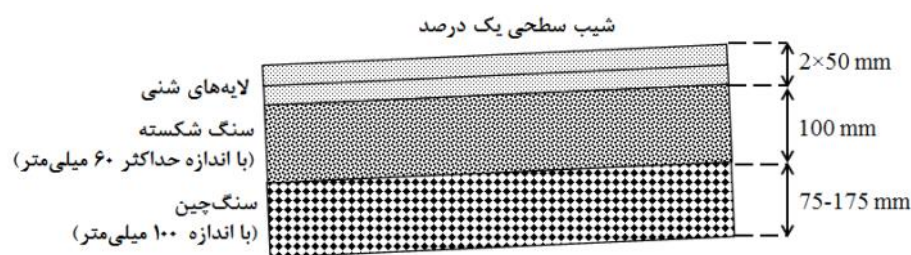
1. Indus  
2. Robert Philliphis  
3. John Metcalf

۳- پیتتر ترزگه<sup>۱</sup>: ترزگه (۱۷۶۴) ساختار سه لایه راه بر روی بستر شیب‌دار را پیشنهاد کرده است که لایه زیرین، لایه پی با ضخامت بین ۱۵۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر متشکل از لاشه سنگ می‌باشد. لایه میانی با ضخامت بین ۱۵۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر متشکل از قلوه سنگ و لایه سطحی با ضخامت ۷۵ میلی‌متر از جنس شن درشت می‌باشد. در حاشیه این ساختار نیز یک ترانشه زهکشی اجرا می‌شود (شکل ۳-۱).



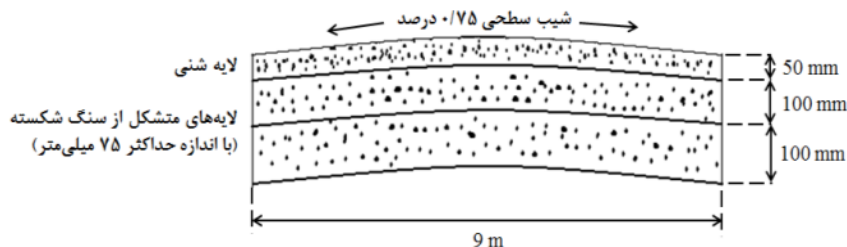
شکل ۳-۱- ساختار راه به پیشنهاد ترزگه (۱۷۶۴)

۴- توماس تلفورد<sup>۲</sup>: توماس تلفورد متولد سال ۱۷۵۷ میلادی و یکی از سنگتراشان ماهر بود که به مهندس راه و ساختمان روی آورد. شکل سازه ای جاده به پیشنهاد تلفورد متشکل از لایه محدد زیر اساس متشکل از سنگ‌های چین درشت دانه و لایه های فوقانی متشکل از سنگ‌های شکسته و شن می‌باشد (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲- ساختار راه به پیشنهاد ترزگه (۱۷۶۴)

۵- جان مک‌آدام<sup>۳</sup>: متولد ۱۷۵۶ اولین متخصص واقعی مهندسی راه می‌باشد که در طراحی و ساخت راه تأکید بر غلتک خوردن جاده و استفاده از سنگ‌های شکسته در رویه دارد (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳- ساختار راه به پیشنهاد مک‌آدام (۱۷۵۶)

1. Pitter Tresaguet
2. Thomas Telford
3. John Mc Adam

در ایران ساخت اولین خط آهن در سال ۱۲۶۵ شمسی (۱۸۸۶ میلادی) در زمان ناصرالدین شاه قاجار بین تهران و شهر ری به طول ۸۱۷ کیلومتر آغاز و در سال ۱۲۶۷ شمسی (۱۸۸۸ میلادی) به بهره برداری رسید. پس از اختراع موتورهای احتراقی و کاربرد آن‌ها در خودروها به تولید انواع اتومبیل افزایش یافت و به دنبال آن نیاز به توسعه و گسترش راه‌های اتومبیل به شدت احساس شد. به نحوی که در اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ نحوه احداث راه‌ها که قبل از آن منحصر به راه‌های اراه‌رو و کاسکه‌رو بودند متحول شده و ساخت راه‌های اتومبیل رو در بیشتر کشورها آغاز گردید. تکامل صنعت اتومبیل سازی منجر به گسترش و پیشرفت راه سازی در جهان گردید که تا به امروز ادامه دارد. به طوری که امروزه اتوبان‌ها و آزاد راه‌های تکامل یافته با حداقل سرعت مجاز در خط تندرو به ۱۲۰ کیلومتر در ساعت در سطح جهان مشاهده می‌شوند. در حال حاضر در ایران ۱۸۲۵۰۰ کیلومتر انواع راه‌ها اعم از آزادراه، بزرگراه، راه اصلی، راه فرعی و راه‌های روستایی وجود دارد که تراکم آنها معادل ۱۱ کیلومتر در ۱۰۰ کیلومتر مربع است. همچنین در حدود ۹۰۰۰ کیلومتر خطوط اصلی راه آهن با تراکم معادل ۰/۵۵ کیلومتر بر ۱۰۰ کیلومتر مربع وجود دارد. اگر مناطق کویری ایران برای محاسبه تراکم راه‌ها در نظر گرفته نشود، تراکم راه در ایران معادل ۱۴/۷ کیلومتر بر ۱۰۰ کیلومتر مربع و تراکم راه آهن معادل ۰/۷۳ کیلومتر در ۱۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد که در مقایسه با کشورهای پیشرفته جهان تراکم کمی است و نیاز به توسعه راه‌ها و بزرگراه‌ها و خطوط راه آهن در ایران احساس می‌شود. تراکم راه‌ها و بزرگراه‌ها و همچنین خطوط راه آهن یکی از معیارهای سنجش میزان پیشرفت و صنعتی بودن کشورها می‌باشد. بیشترین تراکم راه در جهان متعلق به انگلستان برابر ۱۳۲ کیلومتر در ۱۰۰ کیلومتر مربع و بیشترین تراکم راه آهن در جهان متعلق به کشور آلمان معادل ۲۸ کیلومتر بر ۱۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد. در جدول (۳-۱) طول تقریبی راه‌های مختلف ایران ارائه شده است.

جدول ۳-۱- طول تقریبی انواع راه‌ها در ایران

نوع راه	طول (کیلومتر)
آزاد راه یا اتوبان	۱۵۰۰
بزرگراه	۶۰۰۰
راه اصلی	۲۵۰۰۰
راه فرعی	۵۰۰۰۰
راه روستایی	۱۰۰۰۰۰
طول کل راه‌ها	۱۸۲۵۰۰

با توجه به مطالب مذکور، تاریخچه ساخت و تحولات راه‌سازی را می‌توان به سه مرحله مستقل و به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- عصر راه‌سازی اولیه: از هزاران سال قبل از میلاد تا اواخر قرن ۱۷ میلادی.
- ۲- عصر راه‌سازی نوین: قرون ۱۸ تا نیمه قرن ۱۹ میلادی.
- ۳- عصر راه‌سازی مدرن: اواسط قرن ۱۹ میلادی به بعد.

### ۳-۳-۳- طبقه‌بندی راه‌ها

راه‌ها از دیدگاه‌های مختلف مانند نوع مصالح مورد استفاده در ساخت آنها، وضعیت زمین آنها و توانایی آنها در جاری ساختن ترافیک و میزان و هدف استفاده از آنها طبقه‌بندی می‌شوند. بطور کلی می‌توان راه‌ها را به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

#### ۳-۳-۳-۱- راه‌های غیرشهری

این راه‌ها در بیرون از شهرها ساخته می‌شوند و وظیفه ارتباط بین شهر و نقاط جمعیتی و صنعتی را به عهده دارند. از نظر بزرگی و مقیاس این راه‌ها به ۶ گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- ۱- آزادراه یا اتوبان<sup>۱</sup>
- ۲- بزرگ راه کشوری<sup>۲</sup>
- ۳- بزرگ راه استانی یا ایالتی<sup>۳</sup>
- ۴- راه منطقه‌ای اصلی<sup>۴</sup>
- ۵- راه منطقه‌ای فرعی<sup>۵</sup>
- ۶- راه روستایی<sup>۶</sup>

#### ۳-۳-۳-۲- راه‌های شهری

این راه‌ها در نقاط شهر و در سطح شهرهای مختلف از کلان شهرها تا شهرهای با اندازه کوچکتر احداث می‌شوند و به پنج گروه زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

- ۱- آزاد راه شهری<sup>۷</sup>
- ۲- خیابان‌های شریانی یا اصلی<sup>۸</sup>
- ۳- خیابان‌های فرعی<sup>۹</sup>
- ۴- خیابان‌های اتصالی یا دسترسی<sup>۱۰</sup>
- ۵- خیابان‌های محلی<sup>۱۱</sup>

- 
1. Expressway
  2. National highway
  3. State highway
  4. Major district road
  5. Other district road
  6. Village road
  7. Expressway
  8. Arterial streets
  9. Sub-arterial streets
  10. Collector streets
  11. Local streets

### ۳-۴- ساختار راه‌ها و بزرگ‌راه‌ها

ساختار راه‌ها و بزرگ‌راه‌ها از دو بخش مجزای زیرسازی (پی یا بستر راه)<sup>۱</sup> و روسازی<sup>۲</sup> تشکیل شده است. زیرسازی راه که به خاک بستر و بستر راه نیز معروف است غالباً از مصالح خاکی تشکیل شده و به دو قسمت زمین طبیعی<sup>۳</sup> و لایه متراکم شده بستر<sup>۴</sup> تقسیم می‌شود. سطح فوقانی خاگریز متراکم شده بستر، موازی سطح نهایی روسازی ساخته می‌شود و وظیفه آن ایجاد سکویی مناسب جهت عبور ماشین آلات حمل مصالح به منظور ساخت لایه‌های مختلف روسازی راه است. روسازی راه، سازه یک یا چند لایه‌ای متشکل از مصالح شن درشت دانه است که بر روی بستر راه (زیرسازی) اجرا می‌شود و وظیفه آن تحمل و انتقال بار ترافیکی در شرایط مختلف آب و هوایی است. این سازه شرایط مناسبی را جهت عبور و مرور راحت، سریع و مطمئن و بدون ایجاد گرد و غبار ایجاد می‌کند. یک روسازی مدرن اصولاً از سه لایه زیرسازی، لایه‌های اساس و زیراساس و لایه‌های سطحی تشکیل شده است. ویژگی‌های مطلوب روسازی راه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- تحمل تنش‌های ناشی از ترافیک و انتقال آنها به لایه بستر راه با یک ضریب اطمینان مناسب را انجام دهد.
  - ۲- فراهم کننده سطحی سخت باشد تا تأثیر سایشی چرخ‌ها موجب تخریب آن نشود.
  - ۳- کاهش گرد و غبار ناشی از عبور وسایل نقلیه
  - ۴- دارای سطحی صاف باشد تا راحتی حرکت وسیله نقلیه را تضمین کند.
  - ۵- کاهش اصطکاک بین چرخ وسایل نقلیه و سطح آن به منظور کاهش مصرف سوخت.
  - ۶- زبری مناسب به منظور ایجاد اصطکاک در حین ترمز و جلوگیری از لغزش وسایل نقلیه داشته باشد.
  - ۷- کاهش سرو صدای ناشی از حرکت وسیله نقلیه تا حد ممکن.
  - ۸- سطح فوقانی روسازی باید به اندازه کافی نفوذ ناپذیر باشد تا از نفوذ آب ناشی از بارندگی به لایه‌های زیرین جلوگیری کند.
  - ۹- دارای عمر طولانی بوده و هزینه نگهداری سالیانه آن کم باشد.
- روسازی راه با توجه به نحوه انتقال و گسترش بار به لایه‌های زیرین و بستر، تغییر مکان رویه و عملکرد سازه‌ای به دو گروه روسازی انعطاف‌پذیر و روسازی صلب تقسیم می‌شود. در این سازه‌ها، تنش‌ها و تغییر شکل‌های قائم تابع نسبت سختی لایه‌های سطحی به لایه‌های زیرین بوده و نقش مؤثری در تحلیل و طراحی روسازی ایفا می‌کند. در روسازی انعطاف‌پذیر<sup>۵</sup> به علت مقاومت خمشی کم آن، بارهای وارده در سطح نسبتاً کوچکتر و با گستردگی کمتر به خاک بستر منتقل می‌شود. به علت مقاومت خمشی کم این نوع روسازی، مقدار تغییر شکل خمشی ایجاد شده در آن وابسته به تغییر شکل خمشی ایجاد شده در لایه‌های زیرین آن است. در این نوع روسازی، تغییر شکل تنش و تغییر مکان قائم در بستر به ترتیب به صورت یکنواخت و غیر یکنواخت خواهد بود. ضخامت این نوع روسازی به گونه‌ای طراحی می‌شود که تنش در بستر خاکی در محدوده تنش‌های قابل تحمل در آن بوده و تغییر شکل‌های بیش از حد در آن محدود باشد. این موضوع بر این دلالت دارد که در روسازی‌های انعطاف‌پذیر، بستر نقش مهمی در

---

1. Subgrade
2. Pavement
3. Natural ground
4. Formation layer
5. Flexible pavement



تحمل بارهای ترافیکی وارده بر روسازی را بر عهده دارد. بنابراین مقاومت و انعطاف‌پذیری روسازی انعطاف‌پذیر تا حدود زیادی وابسته به تغییر شکل‌های ایجاد شده در بستر و پایداری آن در مقابل این تغییر شکل‌ها است. این به آن معنی است که اگر روسازی بسیار قوی و مقاوم ساخته شود، ولی بر روی یک بستر ضعیف و نامقاوم قرار گیرد، به سادگی تخریب شده و منهدم می‌گردد.

روسازی انعطاف‌پذیر معمولاً از دو یا چند لایه از مصالح بتن آسفالتی گرم که بر روی لایه‌های اساس و زیر اساس قرار می‌گیرند، تشکیل شده است. به این نوع روسازی، روسازی آسفالتی قیری و یا به‌طور خلاصه روسازی آسفالتی گفته می‌شود. در این نوع روسازی به‌منظور ایجاد چسبندگی بین لایه‌های زیر اساس قیری (بیندر) و اساس از یک اندود قیری به نام اندود نفوذی یا پریمکت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. همچنین بین دو لایه آسفالتی زیر اساس قیری (بیندر) و اساس قیری (توپکا) یک اندود قیری به نام اندود سطحی یا تک‌کت<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در این نوع روسازی جنس مصالح بستر می‌تواند از مصالح غیر چسبنده و یا مصالح چسبنده تثبیت شده با قیر، آهک یا سیمان باشد. همچنین لایه آسفالتی ممکن است دارای حفرات غیر متصل با تخلخل ۴ تا ۸ و یا دارای حفرات متصل با تخلخل بیش از ۱۲ درصد باشد. آسفالت با تخلخل غیر متصل در مقابل آب غیر قابل نفوذ بوده و شرایط را برای نرسیدن آب به لایه‌های زیرین فراهم می‌کند. در صورتی که آسفالت نوع دوم نفوذپذیر بوده و اجرای زهکش برای آن ضروری است. مهمترین انواع روسازی‌های انعطاف‌پذیر در شکل (۳-۴) ارائه شده است که عبارتند از رویه آسفالتی معمولی، رویه آسفالتی ضخیم یا تمام آسفالتی و رویه آسفالتی با مصالح تثبیت شده.

لایه توپکا	لایه توپکا	لایه توپکا
لایه بیندر	لایه بیندر	لایه بیندر
لایه اساس یا مصالح دانه ای یا ضخامت با ۲۰ تا ۵۰ سانتیمتر	لایه اساس قیری یا ضخامت ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتر	لایه اساس با مصالح دانه ای
بستر روسازی	بستر روسازی	بستر روسازی

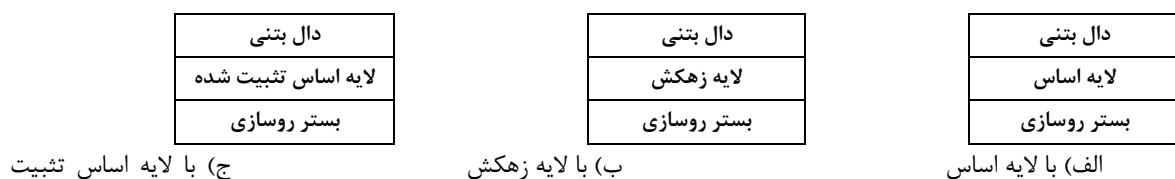
الف) معمولی (ب) تمام آسفالتی (ج) با مصالح تثبیت شده

شکل ۳-۴- انواع روسازی‌های انعطاف‌پذیر

در روسازی صلب<sup>۳</sup> یک دال بتنی به صورت غیرمسلح یا مسلح بر روی لایه بستر که از نظر مقاومت و تغییرشکل پذیری نسبت به دال بتنی تغییرشکل پذیرتر است قرار می‌گیرد و بار وارده از سوی ترافیک را با رفتاری خمشی به زمین منتقل می‌کند. بنابراین مقاومت کم لایه بستر با مقاومت زیاد دال بتنی جبران می‌شود. البته این بدان معنی نیست که مقاومت بستر باید کم باشد بلکه اجرای یک بستر با مقاومت زیاد تغییرشکل پذیری کم به ایمنی پروژه کمک زیادی می‌کند. در این نوع روسازی به دلیل صلیبیت قابل توجه دال بتنی بار وارده در سطح وسیع‌تری به خاک بستر منتقل می‌شود. در این نوع روسازی، توزیع تنش و تغییرمکان قائم در بستر به ترتیب به صورت غیریکنواخت و یکنواخت می‌باشد. دال بتنی ممکن است بطور مستقیم بر روی خاک بستر قرار گیرد و یا برای خاک‌های بستر ضعیف،

1. Prime coat  
2. Tack coat  
3. Rigid Pavement

لایه‌های اساس و زیراساس را در زیر دال بتنی اجرا کرد. مهمترین انواع روسازی صلب عبارتند از رویه بتنی با لایه اساس، رویه بتنی با لایه زهکش و رویه بتنی با اساس تثبیت شده که در شکل (۳-۵) ساختار آنها ارائه شده است.



(ج) با لایه اساس تثبیت

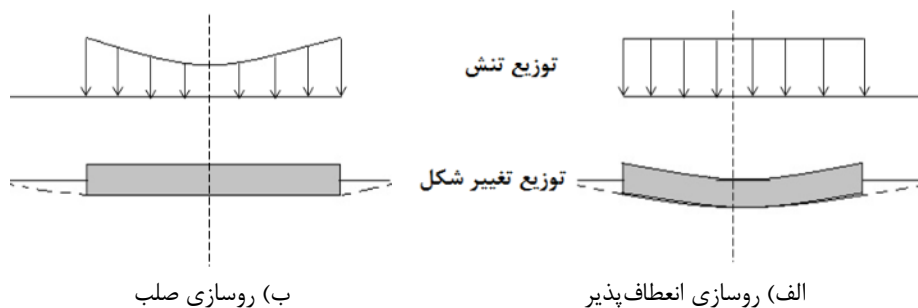
(ب) با لایه زهکش

(الف) با لایه اساس

شده

شکل ۳-۵- انواع روسازی‌های صلب

شکل (۳-۶) توزیع تنش و تغییرشکل قائم در روسازی‌های انعطاف‌پذیر و صلب را نشان می‌دهد.

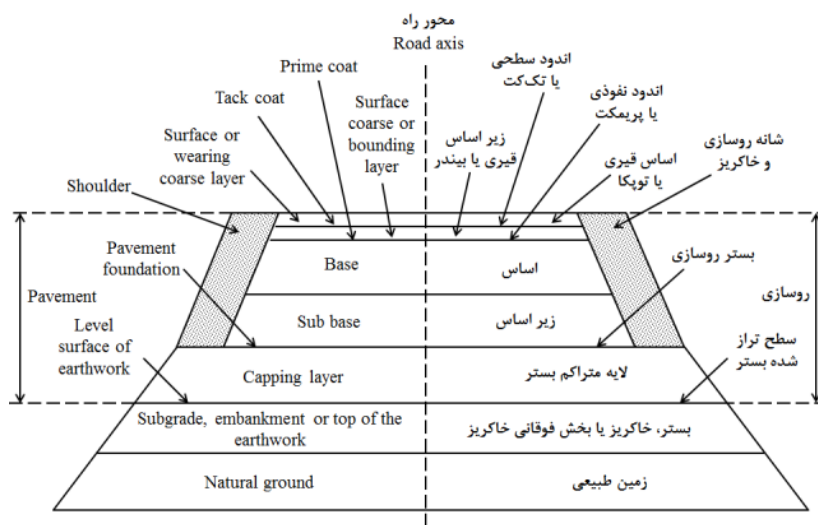


(ب) روسازی صلب

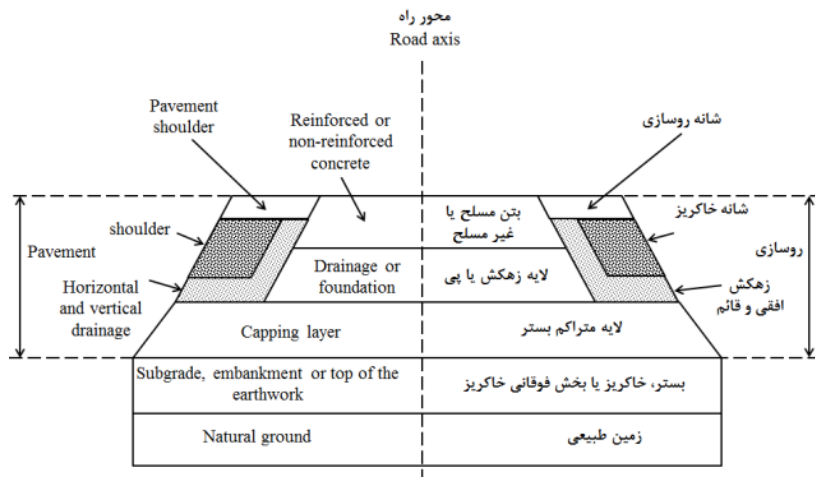
(الف) روسازی انعطاف‌پذیر

شکل ۱۴-۶- توزیع تنش و تغییرشکل قائم در روسازی‌های انعطاف‌پذیر و صلب

علاوه بر روسازی‌های انعطاف‌پذیر و صلب، انواع دیگری روسازی که از نظر سازه‌ای رفتار بینابینی را دارند، وجود دارد که مهمترین انواع آنها عبارتند از: روسازی نیمه صلب، روسازی مرکب، روسازی مختلط روسازی معکوس. شکل-های (۳-۷) و (۳-۸) جزئیات ساختار روسازی‌های انعطاف‌پذیر (آسفالتی) و صلب (بتنی) را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷- ساختار روسازی انعطاف‌پذیر (آسفالتی)



شکل ۳-۸- ساختار روسازی صلب (بتنی)

نوع مصالح مختلف در ساختار روسازی راه‌ها با یکدیگر متفاوت بوده و در هر لایه با توجه به هدفی که دارد مصالح مختلف استفاده و متراکم می‌شود. بطور کلی ویژگی‌های مختلف لایه‌های موجود در ساختار راه‌ها به شرح زیر است:

- ۱- لایه‌های متراکم شده خاک بستر: این لایه‌ها باید عاری از مواد آلی باشند و از جنس زمین طبیعی است که متراکم و آماده شده‌اند.
- ۲- لایه زیراساس: این لایه بر روی زیرسازی قرار می‌گیرد (خاک بستر) و در روی آن لایه اساس اجرا می‌شود. لایه زیراساس از مصالح نسبتاً مرغوب شامل سنگ شکسته و شن و ماسه و مخلوط آنها تشکیل شده است که متراکم شده‌اند. اجرای این لایه در راه سازی کمک زیادی به افزایش مقاومت روسازی می‌کند به خصوص زمانی که مصالح بستر راه مقاومت کمتری دارند. در راه‌های دارای ترافیک زیاد، اجرای این لایه الزامی است.
- ۳- لایه اساس: این لایه بین زیر اساس و رویه راه قرار می‌گیرد و از متراکم نمودن مصالح مرغوب شامل سنگ شکسته شده و شن و ماسه شکسته و مصالح تثبیت شده با سیمان و آهک و غیره ساخته می‌شود. در راه‌های دارای ترافیک زیاد با خاک بستر نامقاوم، از اساس قیری که همان بتن آسفالتی کم قیر است استفاده می‌شود.
- ۴- رویه راه: رویه راه ترکیبی از لایه‌های زیر اساس قیری (بیندر) و اساس قیری (توپکا) است که بین آنها از اندود قیر استفاده می‌شود. جنس این لایه‌ها از مصالح مرغوب و با مقاومت زیاد است. در راه‌های اصلی و دارای ترافیک زیاد جنس لایه‌های رویه از آسفالت می‌باشد در صورتی که در راه‌های فرعی و کم اهمیت ممکن است رویه شنی باشد.

ضخامت لایه‌های بیندر در حدود ۷ سانتیمتر و ضخامت لایه توپکا حدود ۵ سانتیمتر است. لایه بیندر در زیر لایه توپکا قرار گرفته است و قیر کمتری دارد و دانه بندی آن کمی درشت‌تر است. در صورتی که لایه توپکا که در تماس مستقیم با چرخ وسایل نقلیه است قیر بیشتری دارد و از مصالح ریزدانه‌تر تشکیل شده است. بین لایه‌های اساس و زیراساس قیری (بیندر) از اندود قیر استفاده می‌شود که به نام اندود نفوذی یا پریمکت نامیده می‌شود و وظیفه آن اتصال دو لایه مذکور است. همچنین بین لایه‌های بیندر و توپکا از اندود قیر به نام اندود سطحی یا تک‌کت استفاده می‌شود که وظیفه این اندود قیر نیز اتصال دو لایه فوق می‌باشد.

### ۳-۵- عوامل تعیین کننده مسیرراه‌ها

مسیر راه خطی است بر روی زمین که بین نقاط مبدأ و مقصد انتخاب می‌شود و در امتداد آن راه طراحی و اجرا می‌شود. در انتخاب مسیر راه و اجرای آن عوامل مختلفی دخالت دارند که قبل از طراحی و اجرای راه باید مورد مطالعه قرار گیرند تا بتوان بهترین، نزدیک‌ترین و ارزان‌ترین مسیر را انتخاب و راه را در امتداد آن اجرا کرد. مهمترین این عوامل به شرح زیر می‌باشند:

#### ۳-۵-۱- عوامل زمین‌شناسی

در انتخاب مسیر راه عوامل زمین‌شناسی مختلفی دخالت دارند که همگی آنها وابسته به زمین و ساختارهای موجود در مسیر می‌باشند. این عوامل عبارتند از:

- ۱- وضعیت ژئومورفولوژیکی: توپوگرافی و پستی و بلندی سطح زمین و همچنین عوارض طبیعی نظیر کوه‌ها دریاچه‌ها و رودخانه‌ها باعث می‌شوند تا مسیر راه از خط افقی خارج شده در نقاط مختلف خود دارای ارتفاع متفاوتی باشد. گذر از عوارض طبیعی و پستی و بلندی‌های سطح زمین مستلزم انجام عملیات خاکبرداری و خاکریزی، احداث پل و احداث تونل می‌باشد که هزینه‌های اجرای راه را به شدت افزایش می‌دهد. بنابراین به‌منظور کاهش هزینه‌ها، مسیر باید طوری طراحی شود که با حفظ ضوابط طرح هندسی، مقدار خاکبرداری و خاکریزی به حداقل کاهش یابد. بنابراین مسیر باید تا حد امکان از پستی و بلندی‌های طبیعی پیروی کند و با محیط خود هماهنگ باشد.
- ۲- جنس مصالح زمین: جنس مصالح زمین از دیدگاه‌های مختلف در راه‌سازی حائز اهمیت است. گذر راه از زمین‌های دارای مقاومت زیاد و فاقد مسئله هزینه‌های نگهداری راه در آینده را به مقدار زیادی کاهش داده و تضمین کننده پایداری دراز مدت آن خواهد بود. زمین‌های مسئله‌دار خاکی و سنگی علاوه بر صرف هزینه‌ها در طول زمان بهره‌برداری از راه، از کیفیت آن می‌کاهند. در این خصوص زمین‌های سنگی پی مناسبی برای اهداف راه‌سازی می‌باشند زیرا هم دارای مقاومت زیادی هستند و مسائل نشست و ظرفیت باربری برای پروژه ایجاد نمی‌شود. اما هزینه و مشکلات حفاری یا برش این زمین‌ها به‌منظور احداث جاده زیاد است. از سوی دیگر، مصالح مسئله‌دار خاکی یا سنگی نظیر خاک‌های متورم شونده، خاک‌های رمبنده، خاک‌های واگرا، خاک‌های آلی، سنگ‌های انحلال‌پذیر، خرد شده و سنگ‌های هوازده به‌هنگام استفاده به‌عنوان مسیر راه باید به دقت مطالعه شوند و در صورت نیاز با روش‌های بهسازی و تثبیت اصلاح گردند.

بنابراین جنس مصالح و مقاومت زمین چه از نظر قرارگیری خاکریز بستر راه و چه از نظر احداث پل و دیوارها عامل مؤثری در انتخاب مسیر راه می‌باشد و از آنجایی که احداث راه بر روی زمین‌های سست و باتلاقی بسیار پر هزینه می‌باشد، باید تا حد امکان از این مسیرها دوری کرد. روش‌های زیادی به‌منظور طبقه‌بندی زمین‌های مختلف بر اساس مقاومت آنها ارائه شده‌اند.

۳- ساختارهای زمین‌شناسی: ساختارهای زمین‌شناسی شامل گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها و درزه و شکاف‌های موجود در توده‌های سنگی در احداث راه‌ها و به‌خصوص به‌هنگام عبور راه‌ها از مناطق کوهستانی بسیار حائز اهمیت است. زیرا این ساختارها به‌طور مستقیم با وقوع لغزش‌ها، ریزش‌ها و رانش زمین در ترانشه‌ها و مناطق کوهستانی در ارتباط می‌باشد. گسل‌ها، شکستگی‌های موجود در توده‌های سنگی می‌باشند که هم به لحاظ لرزه‌خیزی و هم به لحاظ

حرکات وابسته به زمان می‌توانند سلامت راه‌ها و تجهیزات وابسته به آنها را به مخاطره اندازد. همچنین تلاقی راه‌ها در محل ترانشه‌ها یا مناطق کوهستانی با گسل از عوامل وقوع ریزش سنگ، لغزش و یا رانش زمین می‌باشد. یک گسل ممکن است به موازات محور راه باشد و یا با آن متقاطع باشد که در هر دو حالت حرکات وابسته به زمان گسل باعث ایجاد درزه و شکاف‌های طولی یا عرضی در روسازی راه می‌شوند که هزینه بهسازی این ترک‌ها زیاد است. چین‌خوردگی‌ها بیشتر در نواحی کوهستانی با راه‌ها تلاقی دارند و بسته به اینکه وضعیت تلاقی آنها با محور راه چگونه باشد می‌تواند در ترانشه‌ها و یا دامنه‌های طبیعی باعث وقوع گسیختگی‌های توده‌سنگ شود به‌خصوص زمانی که چین‌خوردگی در سنگ‌های رسوبی دارای لایه‌بندی رخ داده باشد. در این خصوص گسیختگی صفحه‌ای و واژگونی بیشتر زمانی رخ می‌دهد که محور راه موازی محور چین‌خوردگی (از نوع تاقدیس یا ناودیس) باشد در صورتی که گسیختگی گوه‌ای زمانی رخ می‌دهد که محور چین‌خوردگی با محور راه متقاطع باشد. حضور ناپیوستگی‌های مختلف در توده سنگ‌های موجود در ترانشه راه‌ها و دامنه‌های طبیعی کیفیت توده سنگ را به شدت کاهش می‌دهد و شرایط را برای وقوع انواع گسیختگی‌های توده سنگ مهیا می‌سازد در این حالت نوع گسیختگی احتمالی تابع آرایش فضایی ناپیوستگی‌ها نسبت به رویه شیب شیروانی یا ترانشه است. همچنین هر چه تراکم ناپیوستگی‌ها در توده سنگ بیشتر باشد، توده سنگ دارای کیفیت کمتری است و احتمال وقوع گسیختگی‌ها به خصوص گسیختگی دایره‌ای در سنگ‌های خرد شده وجود دارد. بنابراین شناخت مناطق دارای پتانسیل لغزش، ریزش و رانش زمین ناشی از حضور ساختارهای زمین‌شناسی در راه‌سازی حایز اهمیت است و تا حد امکان مسیر راه نباید از این مناطق عبور کند.

۴- شرایط هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی: بررسی آب‌های سطحی و زیرزمینی مرتبط با مسیر راه از جمله اقدامات مطالعاتی است که باید قبل از طراحی و اجرای راه صورت گیرد. در این خصوص موضوع آب‌های سطحی و یا آبراهه‌های قدیمی در تعیین مسیر راه نقش مهمی دارند. زیرا در محل تقاطع رودخانه‌های کنونی و آبراهه‌های قدیمی نیاز به احداث پل می‌باشد که این موضوع هزینه اجرای راه را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. گاهی اوقات در مناطق خشک ولی سیل خیز، سیلاب‌های فصلی ممکن است مصالح و آبرفت‌های زیادی را وارد حریم جاده کرده و به این صورت باعث بروز مشکل شوند. نقش آب‌های زیرزمینی نیز در زمان حفر تونل‌ها و یا خاک‌ریزهای موجود در مسیر راه مشخص می‌شود. زمانی که سطح ایستابی بالا است، آب زیرزمینی می‌تواند مصالح بستر راه را تحت تأثیر قرار دهد و موجب نشست آن شود. در تونل‌ها نیز هجوم آب زیرزمینی به داخل آنها، یکی از پارامترهای مؤثر در ناپایداری تونل محسوب می‌شود.

۵- دسترسی به منابع قرضه: راه‌ها و بزرگراه‌ها به دلیل اجرای زیرسازی و روسازی به حجم زیادی از مصالح و منابع قرضه طبیعی یا منابع شکسته شامل سنگ لاشه، قلوه سنگ، شن و ماسه طبیعی و حتی خاک رس نیاز دارند که اگر در محل موجود نباشند و برای تهیه آنها مجبور به حمل آنها از فواصل طولانی باشد، هزینه‌های ساخت را به شدت افزایش می‌دهند. بنابراین در اینگونه پروژه‌ها باید معدن منابع قرضه شناسایی شود تا به هنگام ساخت، پروژه با مشکل مصالح مواجه نشود.

۶- آب و هوای منطقه: احداث راه در مناطق دارای آب و هوای سرد با بارندگی‌های فصلی یا مداوم، شرایط خاص خود را می‌طلبد. در اینگونه مناطق، عمل تر و خشک شدن روسازی و زیرسازی و عمل یخبندان می‌توانند تا حدود

خیلی زیادی عمر مفید سازه را کاهش دهند. همچنین مناطق دارای بارندگی زیاد و حتی مناطق دارای مه‌گرفتگی، خسارات جانی ناشی از تصادف را افزایش می‌دهند. بنابراین تا حد امکان باید از این مناطق دوری گزید.

### ۳-۵-۲- عوامل زیست محیطی

حفظ محیط طبیعی و انسانی به هنگام طراحی و اجرای راه‌ها باید مد نظر قرار گیرد. مهمترین موارد مورد توجه در حفظ محیط طبیعی شامل عدم تخریب جنگل‌ها، رعایت حریم طبیعی رودخانه‌ها و آب‌های سطحی، حفاظت از منابع طبیعی، عدم آلودگی هوا در پارک‌ها و مکان‌های گردشگری و عدم آلودگی صوتی در مناطق مسکونی، بیمارستان‌ها، پارک‌ها، مکان‌های گردشگری و حتی زیستگاه حیات وحش می‌باشند. همچنین حفظ محیط انسانی نظیر برهم زدن وضع اجتماعی و زندگی مردم، عدم عبور مسیر از وسط آبادی‌ها یا روستاها، عدم عبور مسیر از مراکز فرهنگی، تاریخی، باستانی، مذهبی و قبرستان‌ها و عدم عبور مسیر از زمین‌های کشاورزی و باغات از جمله موارد مورد توجه می‌باشند.

### ۳-۵-۳- ضوابط طرح هندسی راه

هدف از طرح هندسی راه، احداث یک راه ایمن متناسب با حجم ترافیک، سرعت وسایل نقلیه و خصوصیات رانندگان است. مهمترین ضوابط طرح هندسی راه شامل حداکثر شیب طولی، حداکثر طول هر شیب، حداقل شعاع قوس‌ها، حداقل طول هر قوس، حداقل فواصل دید و مقاطع عرضی (عرض راه، عرض شانه و شیب عرضی) می‌باشند.

### ۳-۵-۴- زیبایی مسیر راه

احداث راه زیبا و دارای چشم‌اندازهای طبیعی یکی از مسایلی است که به هنگام استفاده از آن باعث ایجاد لذت در راننده و مسافران شده و از خستگی مسیر می‌کاهد. هماهنگ بودن قوس‌های افقی و قائم، پیروی مسیر از وضعیت طبیعی زمین و بافت شهری و نزدیکی مسیر به نقاط دیدنی مثل رودخانه‌ها، فضای سبز، آبشارها، جنگل‌ها و غیره به شرط حفظ محیط زیست از جمله عوامل ایجاد زیبایی مسیر راه می‌باشند.

### ۳-۵-۵- عوامل اقتصادی و سیاسی

در انتخاب مسیر راه باید هزینه‌های طراحی، اجرا و نگهداری و بهره‌برداری در نظر گرفته شوند. همچنین یک راه علاوه بر اتصال نقاط مبدأ و مقصد، باید دسترسی مراکز جمعیتی بین نقاط مبدأ و مقصد را نیز تأمین کند. این تصمیم که مسیر از کدام مراکز جمعیتی واقع در بین نقاط ابتدایی و انتهایی بگذرد، یک تصمیم اقتصادی-سیاسی است و به عوامل زیر بستگی دارد:

- ۱- اهمیت راه و اهمیت شبکه‌ای که راه عضوی از آن است
- ۲- اهمیت نقاط بین‌راهی از نظر جمعیت و توسعه اقتصادی و سیاسی
- ۳- وجود راه‌های ارتباطی دیگر برای نقاط بین‌راهی
- ۴- حجم ترافیک بین مبدأ و مقصد

۵- حجم ترافیک نقاط بین راهی

۶- هزینه اضافی که عبور از این نقاط ایجاب می‌کند

### ۳-۶- مطالعات تعیین مسیر راه‌ها

بطور کلی مراحل مطالعه تعیین مسیر راه‌ها را می‌توان به سه مرحله مقدماتی، اصولی و قطعی طبقه‌بندی کرد:

#### ۳-۶-۱- مطالعات مرحله مقدماتی (فاز صفر مطالعات)

مرحله مقدماتی همانگونه که از نامش پیداست، شروع مطالعات مسیر راه است و به فاز شناخت نیز معروف می‌باشد. حجم مطالعات این مرحله چندان زیاد نبوده و از تفصیل کمی برخوردار می‌باشد. مطالعات مرحله مقدماتی در سه مرحله به صورت زیر قابل انجام می‌باشد:

۱- کشف مسیرهای کلی محتمل: در طی این مرحله به کمک نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و عکس‌های ماهواره‌ای می‌توان چند مسیر کلی به عنوان نامزد برای انتخاب مسیر اصلی انتخاب و شناسایی نمود. عوامل مؤثر بر این انتخاب شامل عوارض طبیعی، تأمین دسترسی بین نقاط ابتدا و انتها و عوامل اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، نظامی و جمعیتی می‌باشند. در این مرحله از مطالعات اقدامات زیر باید صورت گیرد:

الف) جمع‌آوری اطلاعات اولیه: این اطلاعات در خصوص وضعیت اقتصادی، اجتماعی، کشاورزی، صنایع و معادن، مسایل جمعیتی، وضعیت راه‌های موجود، طرح‌های عمرانی اجرا شده و در دست اجرا، وضعیت زمین‌شناسی مسیر، بررسی اثرات زمین‌لرزه‌ها و ترافیک منطقه‌ای جمع‌آوری می‌شوند.

ب) تهیه نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای: نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ از سازمان نقشه برداری کشور یا سازمان جغرافیایی ارتش و عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای از طریق نرم افزارها یا سایت‌های اینترنتی مختلف قابل تهیه می‌باشند.

ج) تعیین نقاط اجباری: نقاط اجباری به نقاطی گفته می‌شود که راه باید از آنها عبور کند. نقاط اجباری به دو گروه کلی نقاط اجباری اقتصادی شامل مراکز جمعیتی، شهرها، معادن و کارخانجات و نقاط اجباری فنی شامل کمترین عرضی از رودخانه‌ها، عبور از گردنه‌های با ارتفاع کم، دوری از نقاط مرتفع قله‌ها، زمین‌های کشاورزی و زمین‌های سست و باتلاقی می‌باشند.

با تعیین نقاط اجباری، امتداد مسیر به چند نقطه بین نقاط اجباری تقسیم می‌گردد و مطالعات بعدی بررسی این قطعات صورت می‌گیرند.

۲- شناسایی و مطالعه مسیرهای کلی: هر یک از مسیرهای کشف شده در مرحله قبل، در این مرحله مورد شناسایی قرار می‌گیرند. منظور از شناسایی مجموعه اقداماتی است که طی آن علاوه بر استخراج اطلاعات تکمیلی از نقشه‌های توپوگرافی و عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای، با انجام بازدیدهای محلی اولیه، نتایج استخراج شده از منابع مطالعه شده تکمیل‌تر شده و در صورت نیاز اصلاح می‌گردند. در این مرحله اقدامات و اطلاعات مورد نیاز عبارتند از:

۱- بازدید محلی و نشانه گذاری مسیر در فواصل ۷۰۰ متر در دشت، ۵۰۰ متر در تپه ماهورها و ۳۰۰ متر در مناطق کوهستانی

- ۲- رسم پلان مسیر قابل اجرا و انعکاس نقاط ثابت (بالیزاژ) بررسی نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ یا ۱:۵۰۰۰۰
- ۳- تهیه پروفیل طولانی مسیر با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ برای طول و ۱:۲۰۰ برای ارتفاع
- ۴- تهیه نقشه تیپ مقطع با مقیاس ۱:۵۰
- ۵- برآورد تقریبی طول و تعداد ابنیه فنی مورد نیاز در طول مسیر شامل پل‌ها، آب‌روها، دیوارهای حایل، تونل‌ها و بهمن‌گیرها.
- ۶- مطالعات زمین‌شناسی سطحی، عمق آب‌های زیر زمینی، حوضه آبریز مسیل‌ها رودخانه‌ها
- ۷- بررسی وضعیت منابع قرضه در محل و امکان تأمین آنها
- ۸- بررسی و مطالعه ترافیک مسیر و احتمال رشد آن در آینده
- ۹- بررسی امکانات عملی از نظر تأمین نیروی انسانی، ماشین‌آلات و راه‌های دسترسی
- ۱۰- در نظر گرفتن نحوه عبور مسیر از مراکز جمعیتی، کشاورزی و اقتصادی
- ۱۱- برآورد مخارج ساخت در هر مسیر

۳- انتخاب مسیر کلی: انتخاب مسیر یک مسئله ارزیابی است. به این معنا که برای انتخاب بهترین مسیر باید مزایای و معایب گزینه‌های مختلف (واریانت‌ها و آلترناتیوها) را بررسی کرد. برای این منظور، ابتدا یک روش مقایسه انتخاب می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان ویژگی‌های مسیرها را بارم‌گذاری کرد و برای هر مسیر نمره‌ای بدست آورد. مسیری که بیشترین نمره را کسب کرده باشد، به‌عنوان مسیر بهینه معرفی می‌شود. بارم‌گذاری بر اساس دو دیدگاه اقتصادی و فنی و مهندسی صورت می‌گیرد. دیدگاه اقتصادی شامل توجیه اقتصادی پروژه می‌باشد. برای این توجیه از روش‌های اقتصادی مهندسی، میزان سرمایه اولیه ساخت هر واریانت و میزان هزینه سالیانه بهره‌برداری و نگهداری مسیر برای هر واریانت مشخص می‌شوند. برای بارم‌گذاری از دیدگاه فنی و مهندسی، شاخص‌های زیر باید مورد بررسی قرار گیرند:

- ۱- شاخص طول کلی هر مسیر: مسیری که طول کمتری دارد بیشترین نمره را می‌گیرد.
- ۲- شاخص شیب طولی هر مسیر: حداکثر شیب مجاز ۷ درصد می‌باشد شیب‌های هر مسیر از روی پروفیل طولی آن بدست می‌آیند و با شیب مجاز مقایسه می‌شوند شیب‌های کمتر و یا بیشتر از شیب مجاز نمره بیشتر و یا کمتری را کسب می‌کنند.
- ۳- شاخص یک دست بدون مسیر: تعداد قوس‌های هر مسیر و شعاع آنها از شاخص‌های تأثیر گذار در نمره مسیرها می‌باشد. هر چه تعداد قوس‌های مسیر کمتر و شعاع قوس‌ها بیشتر نمره بیشتری به مسیر تعلق می‌گیرد.
- ۴- شاخص هموار بودن مسیر: این شاخص نسبت طول امتدادی مستقیم در مسیر به طول کل مسیر می‌باشد که هر چه بیشتر باشد نمره بیشتری به آن مسیر تعلق می‌گیرد.
- ۵- شاخص دشواری عملیات خاکی: در این شاخص بلندی خاکریزها و یا ژرفای تراشه‌هایی که بیش از ۱۰ کمتر می‌باشند در طول تقریبی آنها ضرب شده و گزینه‌ای که عملیات خاکی بیشتری دارد، نمره منفی کسب می‌کند.
- ۶- شاخص طولی از مسیر که طراحی در آن قابل اجراست: هر چه این طول بیشتر باشد، نمره بیشتری تعلق می‌گیرد.



### ۳-۶-۲- مطالعات مرحله اصولی (فاز اول مطالعات)

این مرحله شامل برداشت مقدماتی مسیر و تعیین محور راه بر روی نقشه‌های توپوگرافی و تهیه نقشه‌های مقدماتی می‌باشد.

۱- برداشت مقدماتی مسیر: بدین صورت که بعد از انتخاب مسیر کلی، این مسیر به صورت مقدماتی برداشت می‌شود. در این مرحله با توجه به نوع راه و وضعیت آن، در نواری به عرض ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر اطراف مسیر کلی عملیات نقشه برداری صورت می‌گیرد و نقشه‌های توپوگرافی مسیر با مقیاس ۱:۲۰۰۰ تهیه می‌شود. در این نقشه‌ها وضعیت کلی زمین، محل عوارض، حدود تأسیسات، بناها، باغ‌ها، مزارع و سایر عوارض دیگر به طور دقیق مشخص می‌گردد. روش-های متداول برداشت مقدماتی مسیر شامل نقشه‌برداری زمینی یا تاکتومتری، نقشه‌برداری هوایی یا فتوگرامتری و استفاده از سیستم‌های سنجش از دور یا تعیین موقعیت ماهواره‌ای (GPS) می‌باشند.

۲- تعیین محور راه بر روی نقشه توپوگرافی و تهیه نقشه مقدماتی: در این مرحله از عملیات، نتایج حاصل از عملیات صحرائی در طی عملیاتی با عنوان مسیرگذاری در دفتر به صورت تعیین محور راه بر روی نقشه صورت می‌گیرد. برای این منظور، با رعایت ضوابط طرح هندسی، مسیرهای متعددی در محدوده برداشت شده (نوار ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر) امتحان می‌شوند و مسیر مناسب بر روی نقشه ترسیم می‌گردد. پس از مسیرگذاری و تعیین محور راه، نقشه‌های مقدماتی شامل پلان، پروفیل طولی و پروفیل عرضی تهیه می‌شوند.

### ۳-۶-۳- مطالعات مرحله قطعی (فاز دوم مطالعات)

این مرحله شامل پیاده کردن مسیر بر روی زمین و تهیه نقشه‌های قطعی و اجرایی می‌باشد. بنابراین در این مرحله مسیر بر روی زمین پیاده شده و مواردی که اجرای نهایی لازم است با جزئیات کامل جمع‌آوری و برداشت می‌شوند. در این مرحله، عملیات زیر باید صورت گیرد:

- ۱- پیکتاژ: به معنی پیاده کردن مسیر از روی نقشه بر روی زمین که به این عمل می‌خکوبی می‌گویند. این مرحله شامل پیاده کردن سومه‌ها (رأس‌ها)، قوس‌ها و قسمت‌های مستقیم می‌باشد.
- ۲- برداشت رتوم ارتفاعی محور طولی و متقاطع عرضی
- ۳- تهیه پروفیل طولی و عرضی
- ۴- محاسبه حجم عمیات خاکی (منحنی بروکنر)
- ۵- تعیین محل نقشه برداری و تهیه نقشه ابنیه فنی
- ۶- انجام مطالعات آزمایشگاهی مکانیک خاک، زمین‌شناسی مهندسی، مکانیک سنگ و بررسی منابع قرضه
- ۷- تدوین برنامه زمان‌بندی اجرای راه
- ۸- برآورد هزینه‌ها بر مبنای فهرست بهای راه و ابنیه فنی
- ۹- تدوین دفترچه پیمان و شرایط عمومی پیمان طبق آخرین مصوبات سازمان برنامه و بودجه
- ۱۰- دفترچه مشخصات فنی (نشریه ۱۰۱) و مشخصات خصوصی پیمان که در صورت نیاز توسط مشاور تهیه می‌شود.

۱۱- تهیه نقشه‌های مختلف شامل نقشه موقعین کلی راه، پلان راه با مقیاس ۱:۲۰۰۰، پروفیل طولی با مقیاس ۱:۲۰۰ و ۱:۲۰۰ در ارتفاع و پروفیل عرضی با مقیاس ۱:۲۰۰، نقش اجرایی مربوط به پل‌ها، تونل‌ها و مبلمان خیابانی و نقشه‌های اجرایی مربوط به تقاطع‌های هم‌سطح و غیر هم‌سطح شامل پلان، پروفیل طولی و نقشه جزئیات با مقیاس ۱:۵۰۰ یا ۱:۱۰۰

### ۳-۷- ساختار راه آهن

ساختار راه آهن از دو قسمت به نام بستر و روسازه تشکیل شده است. در بستر راه آهن لایه‌هایی نظیر لایه اساس<sup>۱</sup> و لایه شکل‌دهی<sup>۲</sup> و در قسمت روسازه یا روسازی لایه‌هایی نظیر زیربالاست<sup>۳</sup>، بالاست<sup>۴</sup>، قسمت‌های تراورس<sup>۵</sup>، پای-بندها<sup>۶</sup>، ریل<sup>۷</sup> و بالشتک‌ها<sup>۸</sup> دیده می‌شوند. وظیفه روسازه تحمل بار ناشی از عبور قطار و انتقال آن به بستر می‌باشد. بستر نیز پس از انتقال بار به آن، بار وارده را به زمین منتقل می‌کند.

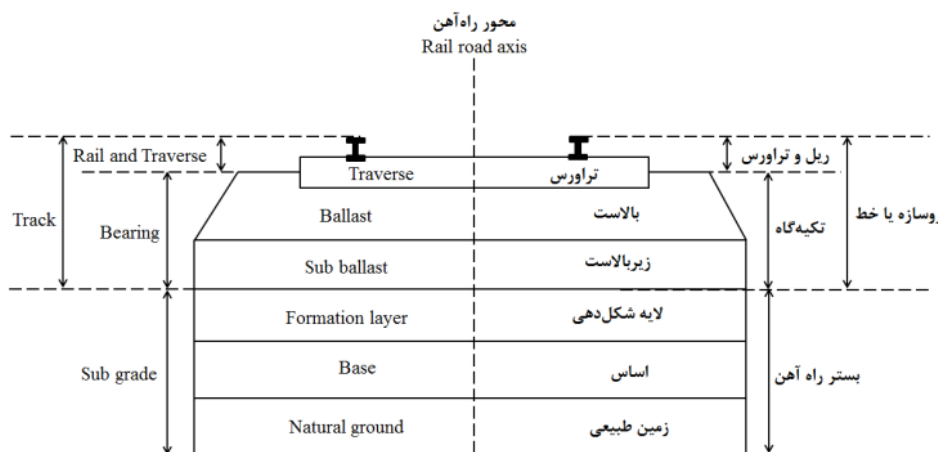
لایه اساس در زمانی که خط آهن در یک ترانشه باشد، همان خاک محل (زمین طبیعی) می‌باشد. در صورتی که در نواحی دیگر که خط بر روی خاکریز قرار می‌گیرد از خاک‌های منتقل شده به محل تشکیل شده است. لایه شکل‌دهی زمانی اجرا می‌شود که مصالح اساس دارای کیفیت مناسب نباشند. عمقی که از نظر تنش‌ها، اغتشاش ناشی از عبور قطارها در آن محسوس است در حدود ۲ متر زیر سطح فوقانی بستر قرار دارد که به آن بستر یا ساب‌گرید<sup>۹</sup> می‌گویند.

زیربالاست از شن و ماسه تشکیل شده است. این لایه از نفوذ و فرو رفتن سنگ‌های بالاست به قسمت‌های فوقانی بستر (لایه شکل‌دهی) جلوگیری می‌کند و در عین حال باعث توزیع بهتر بارهای خارجی و تسریع عمل زهکشی آب ناشی از بارندگی می‌شود.

بالاست از سنگ‌های شکسته دارای مقاومت زیاد ساخته شده و در موارد استثنایی ممکن است از شن نیز ساخته شود. وظیفه این لایه استهلاک ارتعاشات ناشی از عبور قطار، توزیع مناسب بار و زهکشی آب است.

تراورس‌ها و پای‌بندها وظیفه ثابت نگه داشتن فاصله ریل‌ها از یکدیگر و توزیع بار وارده را به عهده دارند. ریل‌ها نیز چرخ‌های قطار را نگه می‌دارند و آن را در مسیر هدایت می‌کنند. بالشتک‌ها نیز در بین ریل و تراورس قرار می‌گیرند و وظیفه آن‌ها کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار می‌باشد. ضخامت بالشتک‌ها بین ۴/۵ تا ۰/۹ میلیمتر است. شکل یر قسمت‌های مختلف موجود در ساختار راه آهن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل (۹-۳) دیده می‌شود، لایه‌های مختلف موجود در ساختار راه آهن با حرکت به سمت عمق دارای مساحت بیشتری می‌شوند که این موضوع به کاهش تنش وارده به زمین کمک فراوانی می‌کند به طوری که تنش‌های نقطه‌ای بین چرخ و ریل تا بستر راه آهن در حدود ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ برابر کاهش می‌یابند.

1. Base
2. Formation layer
3. Sub ballast
4. Ballast
5. Traverse or Sleeper
6. Fastening
7. Rail
8. Pad
9. Subgrade



شکل ۳-۹- قسمت‌های مختلف ساختار راه‌آهن

معمولاً خطوط راه‌آهن بر روی بالاست قرار دارد که در این حالت تکیه‌گاه دارای انعطاف‌پذیری می‌باشد و به آن تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر یا خط با بالاست<sup>۱</sup> می‌گویند. اما گاهی اوقات ممکن است خط بر روی دال بتنی قرار گیرد که در این صورت تکیه‌گاه غیر قابل انعطاف یا صلب می‌باشد و به آن خط با دال<sup>۲</sup> می‌گویند. خط با بالاست دارای مزایای بیشتری نسبت به خط با دال است زیرا سطح مقطع کوچکتری می‌سازد و به خصوص در تونل‌ها کار تعمیر و نگهداری را تسهیل می‌کند. همچنین دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است و نشست‌های غیر یکنواخت و ارتعاشات ناشی از حرکت قطارها را کاهش می‌دهد. در ریل‌های واقع بر تکیه‌گاه‌های انعطاف‌پذیر، سروصدا و تکان قطار کمتر است که این موضوع به راحتی مسافران کمک می‌کند.

از نظر ساختاری تفاوت بین خط با بالاست و خط با دال بتنی در این است که در خط با دال بتنی به‌جای لایه‌های زیربالاست و بالاست (تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر)، لایه‌های بالاست بتنی و دال بتنی (تکیه‌گاه سخت) به کار رفته می‌شود و بقیه قسمت‌ها تقریباً مشابه هم است.

### ۳-۸- ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی بستر راه‌آهن

کوشش‌های زیادی به منظور ایجاد خطوط راه‌آهن ایمن و راحت انجام شده است و اغلب این تلاش‌ها بر روی خطوط متمرکز بوده و اغلب این موضوع که بسیاری از مشکلات موجود در خط ناشی از بستر راه‌آهن می‌باشد نادیده گرفته شده است. در گذشته مطالعات مربوط به بستر از مطالعات مربوط به مهندسی راه‌آهن‌سازی می‌شده است که این موضوع با ویژگی‌های خاص راه‌آهن سازگار نمی‌باشد. بنابراین بستر راه‌آهن‌باید به صورت مجزا و برای شناخت بستر راه‌آهن انجام شود. بستر راه‌آهن باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- ۱- عبور قطارهای باری و مسافری در سرعت‌های طرح.
  - ۲- تحمل بارهای سنگین ناشی از عبور قطارهای باری را داشته باشد.
  - ۳- هزینه‌های تعمیر و نگهداری آینده خط را به حداقل کاهش دهد.
- ویژگی‌های مذکور با رعایت نکات زیر دست‌یافتنی می‌گردند:

1. Ballast track  
2. Slab track

- ۱- محدود کردن نشست زمین طبیعی و متراکم کردن و تحکیم خاکریزها
  - ۲- اتخاذ ترتیبی که تحت بارهای وارده از راه آهن و وزن خاکریزها مقاوم بماند.
  - ۳- اطمینان از عدم تخریب و تغییر شکل تدریجی سطح بستر در طول عمر مفید سازه.
- در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه راه آهن، باید به موارد زیر دقت کرد:
- ۱- مصالح مورد نیاز برای احداث خاکریزها در محل موجود بوده و یا از محل معدن قرصه تهیه شوند.
  - ۲- شناسایی زمین‌های ضعیف و بهسازی آن‌ها قبل از شروع خاکریزی.
  - ۳- شناسایی مناطقی که عمق سطح ایستابی باعث بروز مشکل در آن‌ها می‌شود.
  - ۴- معیارهای لازم برای اطمینان از پایداری شیب خاکریزها در درازمدت.
  - ۵- محل‌های ترانشه‌ها جهت زهکشی یا ضوابط حفاظتی مشخص شوند.
  - ۶- انتخاب دستگاه و ماشین‌آلات مناسب جهت خاکبرداری و خاکریزی.
- مهمترین ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی بستر راه آهن به شرح زیر می‌باشند:

### ۳-۸-۱- جنس مصالح زمین

علاوه بر موارد ارائه شده در خصوص راه‌ها، در مهندسی راه‌آهن، جنس مصالح زمین از جمله مهمترین عوامل زمین‌شناسی مسیر اینگونه پروژه‌ها محسوب می‌شود. شناخت جنس مصالح زمین قبل از فاز اجرای پروژه باید صورت گیرد و مصالح مسئله دار شناسایی شوند.

به منظور شناخت و مطالعه مصالح تشکیل دهنده زمین و به خصوص خاک‌ها و همچنین خاک‌های مورد نیاز به منظور ساخت خاکریزها از طبقه‌بندی‌های مختلفی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به طبقه‌بندی متحد (یونیفاید) و طبقه‌بندی آشتو اشاره کرد که در کشورهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۳-۸-۲- شرایط هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی

یکی از پارامترهای تعیین کننده در میزان کیفیت بستر راه آهن شرایط آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌باشد. در این خصوص باید با توجه به آب و هوای منطقه حداکثر تراز آب زیرزمینی که فراتر از آن، شرایط هیدروژئولوژیکی نامساعد خواهد شد، تعیین گردد. این مقدار در استانداردهای کشورهای مختلف، متفاوت است. به عنوان مثال در کشورهای انگلیس و فرانسه ۲ متر از زیر لایه بالاست، در کشورهای آلمان و سوئد ۱/۵ متر از بالای لایه بالاست، در کشورهای نروژ و اتریش ۸/۷ سانتیمتر از زیر لایه بالاست، و در کشورهای سوئیس و فنلاند ۲ متر از بالای لایه بالاست به عنوان عمق بحرانی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود. در شرایطی که عمق آب زیرزمینی از موارد مذکور بیشتر باشد، در این حالت شرایط خوب است. ولی اگر زهکشی آب به خوبی صورت نگیرد و یا زیر بالاست دارای شیب جانبی مناسب نباشد، نمی‌توان شرایط هیدروژئولوژیکی را خوب در نظر گرفت. همچنین نواحی دارای نوسان شدید سطح ایستابی باید با نصب فیلترهای ماسه‌ای و یا فیلترهای ژئوتکستایل بهسازی شوند.

از نظر شرایط هیدرولوژیکی نیز باید مسیر راه آهن در منطقه‌ای انتخاب شود که بستر و خاکریز از عوامل فرسایشی ناشی از آب‌های جاری و بارندگی‌های شدید در امان باشد.

## ۳-۸-۳- نشست پذیری بستر

براساس طبقه بندی اتحادیه بین‌المللی راه‌آهن (UIC)<sup>۱</sup> براساس رفتار مکانیکی و نشست‌پذیری بستر راه‌آهن، انواع بستر به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

- ۱- بستر خیلی خوب (R)
- ۲- بستر خوب (S<sub>3</sub>)
- ۳- بستر متوسط (S<sub>2</sub>)
- ۴- بستر بد (S<sub>1</sub>)
- ۵- بستر خیلی بد (S<sub>0</sub>)

مبنای تفکیک بستر به انواع مذکور پارامترهایی نظیر درصد ذرات ریزدانه، شاخص خمیری خاک (PI)<sup>۲</sup>، ضریب لوس‌آنجلس<sup>۳</sup>، ضریب دوال<sup>۴</sup> و شرایط هیدروژئولوژیکی می‌باشد. ویژگی‌های مختلف پنج گروه فوق در جدول (۲-۳) ارائه شده است.

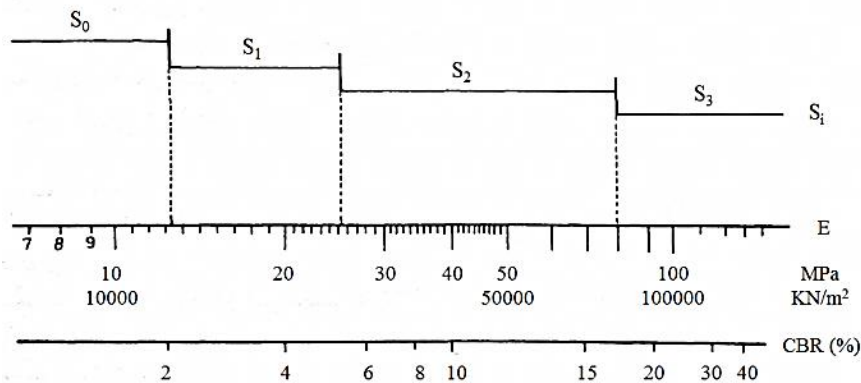
جدول ۲-۳- طبقه‌بندی و توصیف شرایط مختلف بستر راه‌آهن

کیفیت بستر	ویژگی‌های زمین‌شناسی	شرایط هیدروژئولوژیکی	توصیف رفتار بستر
R	سنگ با تغییرشکل پذیری کم	---	نشست‌پذیری کم تا خیلی کم و پایداری بستر زیاد
S <sub>3</sub>	سنگ با تغییرشکل پذیری متوسط $D > 9$ و $L < 30\%$ و $< 5\%$ ذرات ریزدانه خاک	---	نشست‌پذیری کم، پایداری بستر بسیار خوب
S <sub>3</sub>	سنگ با تغییرشکل پذیری زیاد $6 < D < 9$ و $30 < L < 33$	خوب	نشست‌پذیری کم، پایداری بستر بسیار خوب
S <sub>2</sub>	$< 5\%$ ماسه باریزدانه‌های یکنواخت، خاک‌های با ریزدانه بین ۵ تا ۱۵ درصد	بد	نشست‌پذیری متوسط با پایداری متوسط بستر
S <sub>2</sub>	شیست با $PI > 7$ ماسه سیلتی با $PI > 7$	خوب	نشست‌پذیری متوسط با پایداری متوسط بستر
S <sub>1</sub>	خاک‌های با ریزدانه بین ۱۵ تا ۴۰ درصد، سنگ شکسته با $D < 6$ و $L > 33$	بد	نشست‌پذیری زیاد، با تکیه‌گاه مطلوب
S <sub>1</sub>	سیلت با پلاستیسیته کم خاک‌های با ریزدانه بزرگتر از ۴۰ درصد	---	نشست‌پذیری زیاد، با تکیه‌گاه مطلوب
S <sub>0</sub>	خاک‌های آلی	---	نشست‌پذیری بیش از حد و پایداری ضعیف (سنگ‌های بالاست تا عمق زیادی در بستر نفوذ می‌کنند)

1. International Railways Union
2. Plastisity Index, PI
3. Los Angeles
4. Deval

## ۳-۸-۴- ویژگی‌های مکانیکی بستر

بستر راه‌آهن باید در مقابل بارهای وارد شده از سوی قطارها تا حد کافی مقاومت داشته باشد. البته استهلاک این بارها توسط لایه‌های بالادست و زیر بالادست تا حدود زیادی به مقاومت بستر کمک می‌کند. علاوه بر این، مصالح بستریه منظور تحمل این بارها باید ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی موردنیاز را داشته باشند. از مهمترین ویژگی‌های مکانیکی مصالح بستر راه‌آهن می‌توان به مدول الاستیسیته (E) و ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)<sup>۱</sup> اشاره نمود که مقدار آنها برای بسترهای مختلف بر مبنای طبقه‌بندی UIC مطابق شکل (۳-۱۰) می‌باشند.



شکل ۳-۱۰- مقادیر ویژگی‌های مکانیکی مصالح بستر راه‌آهن بر اساس بسترهای مختلف (پروفیلیدیس ۲۰۰۰)<sup>۲</sup>

اگر خاک مورد استفاده در بستر از نوع خاک‌های  $S_1$  و  $S_2$  باشد، توصیه می‌شود که یک لایه خاک دارای مصالح با کیفیت بهتر روی آن قرار داده شود. این لایه به نام لایه شکل‌دهی<sup>۳</sup> معروف است. این لایه باید دارای تراکم بیشتری نسبت به لایه اساس باشد و اغلب با ضریب ۱۰۰٪ در آزمایش تراکم پروکتور استاندارد اجرا می‌شود. در حالی که ضریب تراکم پروکتور استاندارد برای لایه اساس ۹۵ درصد می‌باشد. به منظور افزایش کارایی لایه شکل‌دهی باید دقت داشت که مصالح اساس باید دارای درصد آب کمی باشند، زیرا در غیر اینصورت ذرات خاک اساس در لایه شکل‌دهی نفوذ می‌کنند و شیب جانبی خاکریز تغییر می‌کند. همچنین لایه شکل‌دهی باید همگن باشد و فاقد ذرات ریزدانه به صورت تمرکز موضعی باشد. ضخامت لایه شکل‌دهی به عنوان تابعی از کیفیت مصالح بستر است و مقادیر ضخامت آن در جدول (۳-۳) ارائه شده است.

جدول ۳-۳- ضخامت لایه شکل‌دهی

کیفیت بستر	کیفیت لایه شکل‌دهی	ضخامت لایه شکل‌دهی (cm)
$S_1$	$S_2$	۳۰-۵۵
$S_1$	$S_3$	۲۰-۴۰
$S_2$	$S_3$	۲۰-۳۰

1. California Bearing Capacity, CBR  
 2. Profillidis, 2000  
 3. Formation Layer

### ۳-۸-۵- رفتار خستگی بستر

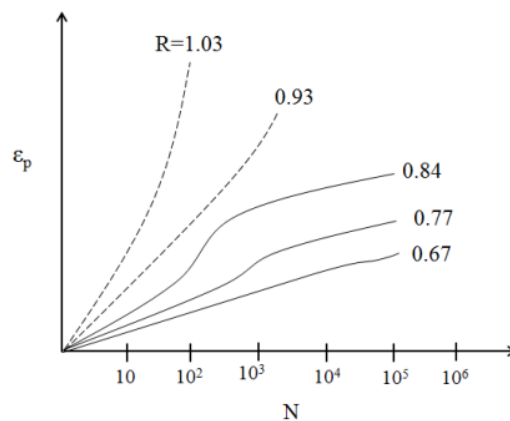
خستگی عبارت است از کاهش مقاومت مصالح در اثر تکرار بارگذاری آن‌ها. در مصالح خاکی و سنگی بستر راه-آهن، خستگی به صورت توسعه تغییر شکل‌های خمیری متناسب با تعدا مراتب بارگذاری (عبور قطار) تعریف می‌شود. نتایج تجربی آزمایش سه محوری تحت شرایط بارگذاری سیکلی نشان می‌دهد که شاخص خستگی به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{اولین بارگذاری}}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{آخرین بارگذاری منجر به شکست}}} \quad (۳-۱)$$

مقدار حدی شاخص مذکور ۰/۹ می‌باشد که اگر بیشتر از آن باشد به این معنی است که مصالح دچار خستگی می‌شوند یعنی تغییر شکل‌های خمیری با سرعت زیاد افزایش می‌یابند. سیر تکاملی تغییر شکل خمیری ( $\epsilon_p^N$ ) تابعی از تعداد دفعات بارگذاری است و به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\epsilon_p^N = a + b \log N + cN^\alpha + dN^\beta + \dots \quad (۲-۳)$$

در این رابطه،  $a, b, c, d, \alpha, \beta$  و ... ضرایب تجربی می‌باشند. بر اساس این رابطه زمانی که پارامترهای نمایی رابطه قابل نظر باشند، تغییر شکل خمیری به صورت لگاریتمی پیش می‌رود و بعد از تعدادی سیکل بارگذاری به حالت ثابت درمی‌آید. اما اگر پارامترهای نمایی قابل حذف نباشند، تغییر شکل خمیری به صورت فزاینده (تصادفی) افزایش می‌یابد. این رفتار در بسترهای گروه  $S_0$  و  $S_1$  تحت شرایط خاص مشاهده می‌شود. شکل (۳-۱۱) سیر تکاملی تغییر شکل خمیری در خاک‌های رسی را به ازای مقادیر مختلف  $R$  نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱- سیر تکاملی تغییر شکل خمیری به ازای تغییرات شاخص خستگی در خاک‌های رسی

### ۳-۸-۶- مقاومت به یخبندان

یکی از پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی بستر راه‌آهن، مقاومت آن در برابر یخبندان می‌باشد. در مهندسی راه-آهن به منظور بررسی مقاومت بستر در برابر یخبندان از شاخص یخبندان<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. این شاخص تابعی از

1. Frost Index

احتمال یخ زدن کامل بسترو تعداد دفعات احتمالی نفوذ یخبندان در یک دوره زمانی مشخص می‌باشد. شاخص یخبندان به صورت  $F_2, F_5, F_{10}, F_{100}$  معرفی گردد که  $F_2$  معرف یکبار یخبندان در یک دوره زمانی دوساله با احتمال  $50 = 100/2$  درصد می‌باشد ( $F_5$  معرف یکبار یخبندان در یک دوره زمانی ۵ ساله با احتمال  $20 = 100/5$  درصد می‌باشد و  $F_{10}$  یکبار در ۱۰ سال با احتمال  $10 = 100/10$  درصد و  $F_{100}$  یکبار در صد سال با احتمال  $1 = 100/100$  درصد).

به منظور مقابله با یخبندان در مهندسی راه‌آهن می‌توان پی یخبندان را اجرا کرد. پی یخبندان لایه‌ای از مصالح می‌باشد که در زیر لایه بالاست یا زیر بالاست و به منظور مافطت بستر در مقابل خیزش<sup>۱</sup> اجرا می‌شود. این لایه متشکل از مصالح مختلف شامل شن، خاکستر، پلاستوفوم و غیره می‌باشد که ضخامت آن با توجه به شاخص یخبندان تعیین می‌گردد.

### ۳-۸-۷- شیب زمین

وجود شیب زمین در مناطقی که به عنوان بستر راه‌آهن استفاده می‌شوند از نظر زمین‌شناسی مهندسی حائز اهمیت است. شیب زمین ممکن است به صورت شیروانی‌های حاشیه راه‌آهن به صورت طبیعی یا ترانشه و شیب زیر بستر (شیب پی) باشد. در خصوص شیب ترانشه‌ها باید مطالعات زمین‌شناسی مهندسی به منظور تعیین وضعیت پایداری، تعیین شیب بهینه حفاری و ارائه روش‌های تثبیت شیب‌ها صورت گیرد. همچنین به هنگام طراحی شیب ترانشه‌ها باید مسائل هزینه و زیبایی مدنظر قرار گیرد. همچنین اجرای دیواره حایل یا خاک مسلح به منظور مقاومت در برابر رانش زمین در شیروانی‌ها و ترانشه‌ها پیشنهاد می‌گردد. در خصوص شیب زمین زیر بستر نیز در صورتی که شیب زمین بیش از ۱:۱۰ باشد، حفظ پایداری خاکریز بستر با استفاده از روش‌های مختلف نظیر پلکانی کردن زیر خاکریز توصیه می‌شود.

### ۳-۹- بهسازی بستر راه‌آهن (زمین زیر راه‌آهن)

در مهندسی راه‌آهن روش‌های مختلفی به منظور افزایش پارامترهای مقاومتی و کیفیت مصالح بستر وجود دارند که از مهمترین این روش‌ها می‌توان به استفاده از خاک مسلح<sup>۲</sup> و استفاده از ژئوتکستایل (پارچه‌گونه)<sup>۳</sup> اشاره نمود:

### ۳-۹-۱- خاک مسلح

خاک مسلح در بسیاری از موارد می‌تواند به عنوان یک روش بهسازی در افزایش مقاومت بستر و جلوگیری از گسیختگی شیروانی‌های حاشیه راه‌آهن استفاده گردد. خاک مسلح مجموعه‌ای از خاک و مصالح مسلح کننده فلزی یا بتنی است که در بسترهای با کیفیت ضعیف ( $S_0$  و  $S_1$ ) قابل کاربرد است.

1. Heave  
2. Reinforced soil  
3. Geotextile



### ۳-۹-۲- ژئوتکستایل‌ها

بسترهای با کیفیت ضعیف ( $S_0$  و  $S_1$ ) در راه‌آهن را می‌توان با استفاده از ژئوتکستایل تقویت کرد. این مصالح از رشته‌های پلی‌پروپین یا پلی‌استر به ضخامت  $0/4$  تا  $3$  میلی‌متر و وزن  $70$  تا  $350$  گرم بر متر مربع می‌باشند که نفوذ پذیر بوده و در دونوع بافته شده و غیربافته شده تولید می‌شوند. ژئوتکستایل‌ها دارای خاصیت تغییرشکل پذیری بوده و در موارد زیر کاربرد دارند:

- ۱- به منظور تفکیک دولایه از مصالح دانه‌ای
  - ۲- به منظور تقویت یک لایه خاک با مقاومت کم
  - ۳- به عنوان فیلتر
  - ۴- به عنوان زهکش
- ژئوتکستایل‌ها معمولاً در زیر لایه زیربالاست قرار می‌گیرند و هرگز در زیر لایه بالاست استفاده نمی‌شوند. این مصالح اهداف چندگانه زیر را در مهندسی راه‌آهن دنبال می‌کنند:
- ۱- تسهیل قرارگیری سازه‌های نگهدارنده خط (تراورس، بالاست و زیر بالاست) بر روی بستر
  - ۲- افزایش مقاومت مکانیکی سازه‌های نگهدارنده خط
  - ۳- استفاده به عنوان فیلتر و زهکش
  - ۴- جلوگیری از نفوذ یخبندان به بستر راه‌آهن
  - ۵- کاهش هزینه‌های نگهداری خط در زمان بهره‌برداری

### ۳-۱۰- ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی بالاست و زیربالاست

بالاست لایه‌ای از مصالح دانه‌ای به صورت سنگ شکسته و در موارد استثنایی شن می‌باشد که تراورس‌ها در روی آن قرار می‌گیرند. این لایه فضای بین تراورس‌ها و همچنین فاصله‌ای بعد از دو انتهای تراورس‌ها را پر می‌کند. مهمترین وظایف لایه بالاست به شرح زیر است:

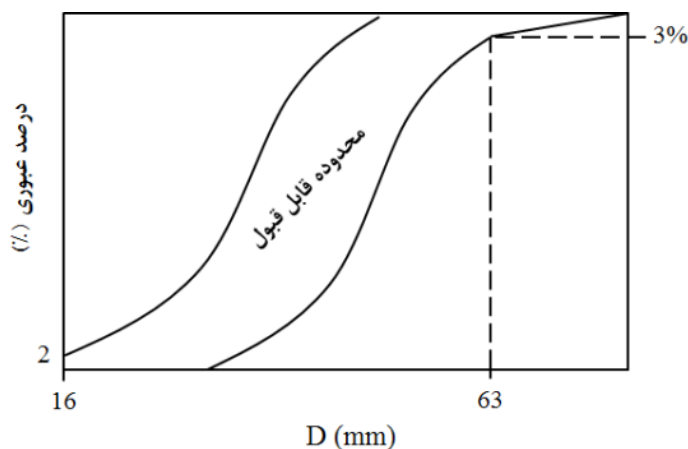
- ۱- توزیع تنش‌های اعمال شده از سوی تراورس به علت عبور قطارها
  - ۲- کاهش ارتعاشات ناشی از عبور قطار
  - ۳- مقاومت در برابر جابه‌جایی طولی و عرضی خط
  - ۴- زهکشی رواناب ناشی از بارندگی
  - ۵- کمک به تثبیت هندسه خط و تصحیح انحراف‌های آن
- بدیهی است در آن واحد نمی‌تواند همه وظایف فوق را برآورده کند. بنابراین اگر بتواند یک وضعیت متعادل از بین وظایف فوق را انجام دهد کافی است.
- لایه دیگری که در زیر لایه بالاست اجرا می‌شود، زیربالاست نامیده می‌شود که از جنس شن و به ضخامت حدود  $15$  سانتیمتر می‌باشد و مهمترین وظایف آن به شرح زیر است:

- ۱- محافظت از سطح فوقانی بستر در مقابل نفوذ سنگ‌های شکسته لایه بالاست
- ۲- توزیع بیشتر تنش‌های اعمال شده به آن
- ۳- زهکشی آب نفوذی از لایه بالاست

مهمترین ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی بالاست به شرح زیر می‌باشد:

### ۳-۱۰-۱- دانه‌بندی بالاست

از نظر دانه‌بندی بالاست باید از سنگ‌های شکسته شده سخت، دارای گوشه‌های تیز و زاویه‌دار با ابعاد تقریباً مساوی و عاری از مواد دانه‌ریز خاکی باشد. به عبارت دیگر بالاست ترکیبی از قطعات با اندازه مشخص می‌باشد که در استاندارد کشورهای مختلف قدری متفاوت است. به عنوان مثال بر اساس مقررات راه‌آهن فرانسه، اندازه اکثر قطعات بالاست بین ۶۳ تا ۱۶ میلی‌متر است. ذرات بزرگتر از ۶۳ میلی‌متر حداکثر ۳ درصد و ذرات کوچکتر از ۱۶ میلی‌متر حداکثر ۲ درصد می‌باشند. شکل (۳-۱۲) نمودار دانه‌بندی بالاست براساس مقررات راه‌آهن فرانسه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲- منحنی دانه‌بندی بالاست

بر اساس مقررات راه‌آهن انگلیس، اندازه قطعات بالاست باید بین ۱۴ تا ۵۰ میلی‌متر باشد (مطابق با جدول ۳-۴).

جدول ۳-۴- اندازه قطعات بالاست بر اساس مقررات راه‌آهن انگلیس

الک (D (mm)	درصد عبوری (%)
۵۰	۱۰۰
۲۸	< ۲۰
۱۴	۰

### ۳-۱۰-۲- تغییر شکل بالاست

اندازه‌گیری مقدار نشست‌ها و تنش‌های ایجاد شده در اثر عبور قطارها نشان می‌دهد که رفتار بالاست ارتجاعی (الاستیک) - خمیری (پلاستیک) می‌باشد. مهمترین معیار خمیری به منظور مطالعه رفتار بالاست، معیار خمیری دراکر- پراگر (۱۹۵۱)<sup>۱</sup> می‌باشد که به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$f(\alpha) = \alpha I_1 + J_2 + K \quad (۳-۳)$$

1. Drucker - Prager, 1951

در این رابطه  $I_1$  مقدار مجموع تنش‌های  $I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$  در ماتریس تنش،  $\alpha$  معادل مقدار  $\alpha = \frac{3c}{(9+12\tan^2\phi)^{1/2}}$  می‌کند و  $J_2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \frac{\tan\phi}{(9+12\tan^2\phi)^{1/2}}$  باشند که  $\sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$  تنش‌های اصلی،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $c$  چسبندگی آن‌ها است. اگر تکیه‌گاه خط دال بتنی باشد معیار خمیری به صورت یک معیار سهمی است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$f(\sigma) = J_2 + \frac{1}{3}(R_c - R_f)I_1 - \frac{1}{3}R_c \cdot R_f \quad (۴-۳)$$

در این رابطه،  $R_c$  و  $R_f$  به ترتیب مقاومت فشاری و مقاومت کششی مصالح بالاست می‌باشند.

### ۳-۱۰-۳- رفتار خستگی بالاست

تغییر شکل‌های ناشی از عبور قطارها در بالاست به صورت تغییر شکل خمیری و تغییر شکل ارتجاعی می‌باشند. در شروع بارگذاری، بالاست تحت تأثیر تغییر شکل خمیری قرار دارد. علت اصلی این پدیده تغییر آرایش ذرات بالاست برای رسیدن به حالت تعادل در حین اولین بارگذاری است. در طی بارگذاری‌های بعدی به تدریج از مقدار تغییر شکل خمیری کاسته می‌شود. به طوری که آزمایش‌های سه‌محوری نشان می‌دهند که در بارگذاری مرتبه  $N$ ام می‌توان تغییر شکل خمیری را به صورت تابعی از تغییر شکل مرتبه اول بارگذاری تعریف کرد، به طوری که:

$$\varepsilon_p^N = \varepsilon_p^1(1 + 0.2 \log N) \quad (۵-۳)$$

در این رابطه،  $\varepsilon_p^1, \varepsilon_p^N$  به ترتیب تغییر شکل خمیری بار  $N$ ام و بار اول و  $N$  تعداد دفعات بارگذاری است. آزمایش‌های تجربی توسط راه‌آهن انگلیس رابطه نیمه تجربی زیر را برای تعیین محاسبه  $\varepsilon_p^N$  ارائه کرده است:

$$\varepsilon_p^N = 0.82(100n - 38.2)(\sigma_1 - \sigma_3)^\alpha(1 + 0.2 \log N) \quad (۶-۳)$$

در این رابطه،  $n$  تخلخل بالاست و  $\alpha$  عدد ثابتی است که به میزان تنش‌های وارده بستگی دارد و مقدار آن بین ۱ تا ۲ در تغییر است. ولی ممکن است برای تنش‌های خیلی زیاد به ۳ نیز برسد.

در خصوص تغییر شکل‌های ارتجاعی نیز می‌توان بیان کرد که این تغییر شکل‌ها در طی ۱۰۰۰ بار اول بارگذاری تغییر می‌کنند. سپس تقریباً ثابت می‌شوند، به طوری که در بار ۱۰۰۰ام بارگذاری مقدار ضریب ارتجاعی به دو برابر مقدار آن در اولین بارگذاری می‌رسد.

### ۳-۱۰-۴- سختی بالاست

منظور از سختی مقاومتی بالاست در برابر سایش و خراش می‌باشد. این ویژگی باعث می‌شود تا بالاست در درازمدت خاصیت خود را از دست ندهد و دچار پاشیدگی نشود. برای تعیین سختی بالاست می‌توان از آزمایش دوال و لوس آنجلس استفاده کرد:

۱- آزمایش دوال<sup>۱</sup>: این آزمایش در سال ۱۸۹۶ ابداع شد. در این آزمایش پنج کیلوگرم نمونه در داخل استوانه دوار دستگاه آزمایش که دارای قطر داخلی ۲۰ سانتیمتر و طول داخلی ۳۴ سانتیمتر است ریخته شده است و برای مدت ۵ ساعت با سرعت ۲۰۰۰ دور در ساعت (مجموعاً ۱۰۰۰۰ دور) به گردش در می‌آید. محور استوانه دستگاه دارای زاویه ۳۰ درجه با خط افق می‌باشد. بعد از انجام آزمایش درصد سایش از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_D = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (7-3)$$

در این رابطه،  $A$  وزن خشک نمونه روی الک  $d$  (۵ کیلوگرم) قبل از آزمایش،  $B$  وزن خشک نمونه بعد از آزمایش و مانده روی الک  $d$  بعد از آزمایش و  $d$  قطر الک مورد نظر می‌باشد که در راه‌آهن فرانسه  $d$  معادل ۱/۶ میلیمتر و در راه‌آهن انگلیس معادل ۲/۳۶ میلیمتر می‌باشد. بعد از محاسبه درصد سایش مقدار ضریب دوال از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$Q = \frac{40}{W_D} \quad (8-3)$$

به پیشنهاد اتحادیه راه‌آهن فرانسه باید مقدار ضریب دوال برای سنگ‌های سخت بیش از ۱۴ و برای سنگ آهک بیش از ۱۲ باشد. آزمایش دوال در حضور آب نیز قابل انجام است که حاصل آن تعیین ضریب دوال مرطوب می‌باشد.

۲- آزمایش لوس آنجلس<sup>۲</sup>: آزمایش لوس آنجلس در سال ۱۹۲۶ ابداع گردید و اساس کار آن مشابه آزمایش دوال می‌باشد. استوانه فولادی آزمایش لوس آنجلس دارای قطر ۷۱/۱ سانتیمتر و طول ۵۰/۸ سانتیمتر می‌باشد و محور چرخش آن افقی است. در این آزمایش مقدار ۵ کیلوگرم نمونه خشک عبوری از الک مشخص به همراه ۱۲ گلوله فولادی دارای وزن ۴۲۰ گرم در داخل استوانه ریخته شده و برای مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه (مجموعاً ۵۰۰ دور) به گردش در می‌آید. سپس از طریق رابطه زیر ضریب سایش لوس آنجلس محاسبه می‌شود:

$$W_{LA} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (9-3)$$

در این رابطه،  $A$  وزن اولیه نمونه در حالت خشک و مانده روی الک  $d$ ،  $B$  وزن خشک نمونه‌ها بعد از آزمایش و مانده روی الک  $d$  می‌باشد. قطر الک  $d$  در آزمایش لوس آنجلس طبق مقررات راه‌آهن فرانسه ۱/۶ و طبق مقررات راه‌آهن انگلیس معادل ۲/۳۶ میلیمتر می‌باشد. مطابق با مقررات کشور فرانسه مقدار  $W_{LA}$  باید برای بالاست کمتر از ۲۵ درصد باشد.

آزمایش لوس آنجلس نسبت به آزمایش دوال دارای مزایای زیر است:

- ۱- انرژی آن از انرژی آزمایش دوال بیشتر است و نقاط ضعف نمونه‌ها را بهتر آشکار می‌کند.
- ۲- زمان انجام آزمایش کوتاه‌تر است.
- ۳- نقش فرد آزمایش‌کننده را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد.
- ۴- نتایج آزمایش و نتایج اجرایی توافق بهتری در پروژه‌های مختلف با یکدیگر دارند.
- ۵- برای مصالح مختلف شامل سنگ‌های سخت، سنگ شکسته و شن بطور یکسان مناسب است.

## ۳-۱۰-۵- ضخامت بالاست

در پروژه‌های راه‌آهن ضخامت لایه بالاست متفاوت است و بستگی به عواملی نظیر کیفیت خاک بستر، ویژگی‌های لایه شکل‌دهی، وضعیت بار ترافیکی، جنس و طول تراورس، حجم عملیات نگهداری و مقدار بار محوری دارد. تحلیل‌های انجام شده با روش اجزا محدود معادله تحلیلی زیر را برای تعیین ضخامت مناسب بالاست بدست آورده است:

$$b = N - a + g - c + d \quad (۱۰-۳)$$

در این رابطه،  $N$  ضخامت مینا بر حسب متر،  $a$  پارامتر مربوط به بار ترافیکی خط،  $g$  پارامتر مربوط به جنس و طول تراورس،  $c$  پارامتر مربوط به حجم عملیات نگهداری و  $d$  پارامتر مربوط به بارمحوری می‌باشند. مقادیر پارامترهای مذکور به کمک جدول (۳-۵) قابل محاسبه می‌باشند.

جدول ۳-۵- مقادیر پارامترهای تعیین ضخامت بالاست

پارامتر $N$ (ضخامت مینا) (m)	ویژگی‌های لایه شکل‌دهی		کیفیت خاک لایه بستر
	ضخامت (m)	کیفیت	
۰/۵۵	---	$S_1$	$S_1$
۰/۴۰	۰/۳۰ - ۰/۵۵	$S_2$	
۰/۳۵	۰/۲۰ - ۰/۴۰	$S_3$	
۰/۴۰	---	$S_2$	$S_2$
۰/۳۰	۰/۲۰ - ۰/۳۰	$S_3$	
۰/۳۰	---	$S_3$	$S_3$
۰/۲۵	---		R

نحوه محاسبه پارامترهای مختلف به شرح زیر می‌باشد:

محاسبه پارامتر بار ترافیکی خط (a): برای محاسبه این پارامتر ابتدا باید بار ترافیکی روزانه خط محاسبه شود. برای این منظور باید بار ترافیکی قطارهای مختلف به بار ترافیکی قطار مسافری تبدیل شود. در این صورت بار ترافیکی معادل از نظر تئوریک از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

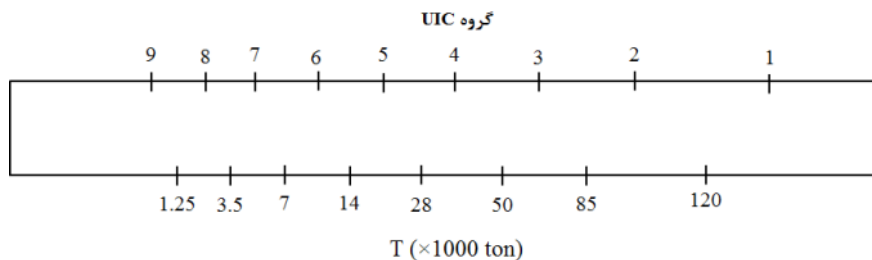
$$T_{th} = T_p + (K_{fr} \cdot T_{fr}) + (K_{tr} \cdot T_{tr}) \quad (۱۱-۳)$$

در این رابطه،  $T_p$  بار ترافیکی روزانه قطارهای مسافری،  $T_{fr}$  بار ترافیکی قطارهای باری،  $T_{tr}$  بار ترافیکی ماشین‌های کشنده،  $K_{fr}$  ضریبی معادل ۱/۱۵ و  $K_{tr}$  ضریبی معادل ۱/۴ می‌باشند. بنابراین بار ترافیکی خط با توجه به سرعت حرکت قطارها از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T = S \cdot T_{th} \quad (۱۲-۳)$$

در این رابطه، مقدار  $S$  برای خطوط بدون ترافیک مسافری معادل یک، برای خطوط با ترافیک مختلط و سرعت کمتر از ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۱/۱، برای خطوط با ترافیک مختلط و سرعت بین ۱۲۰ تا ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت معادل ۱/۲ و برای خطوط با ترافیک مختلط و سرعت بیش از ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت برابر ۱/۲۵ می‌باشد.

بر مبنای انواع خطوط ترافیکی روزانه، انواع مختلف راه‌آهن بر طبق استاندارد UIC وجود دارند که به صورت شکل (۱۳-۳) می‌باشند:



شکل ۳-۱۳- طبقه‌بندی راه‌آهن بر مبنای بار ترافیکی روزانه

با تعیین گروه UIC خط، می‌توان مقدار پارامتر  $a$  را به صورت زیر تعیین کرد:

- ۱- در گروه‌های UIC، ۱ و ۲: مقدار  $a$  معادل صفر می‌باشد (بیش از ۸۵ هزار تن بار ترافیکی روزانه).
- ۲- در گروه‌های UIC، ۳: مقدار  $a$  معادل ۰/۰۵ است (بار ترافیکی روزانه بین ۵۰ تا ۸۵ هزار تن).
- ۳- در گروه‌های UIC، ۴، ۵ و ۶: مقدار  $a$  معادل ۰/۱۰ می‌باشد (بار ترافیکی روزانه بین ۷ تا ۵۰ هزار تن).
- ۴- در گروه‌های UIC، ۷، ۸ و ۹: مقدار  $a$  معادل ۰/۱۵ می‌باشد (بار ترافیکی روزانه کمتر از ۷ هزار تن).

محاسبه پارامتر مربوط به جنس و طول تراورس (g): برای تراورس‌های چوبی به طول ۲/۶ متر، مقدار  $g$  معادل

$$g = \frac{2.5-L}{2}$$

صفر و برای تراورس‌های بتنی مقدار  $L$  طول تراورس بر حسب متر است.

محاسبه پارامتر مربوط به حجم عملیات نگهداری (C): عملیات نگهداری در خطوط مختلف متفاوت است. برای

تعیین حجم عملیات نگهداری خط ابتدا ضریب نگهداری به نام  $K$  تعیین می‌گردد. برای این منظور ابتدا طول کل خط به قطعاتی با جلسات کار نگهداری یکسان تقسیم می‌شود. منظور از جلسات کاری، تمام جلسات با نیروی انسانی یا تجهیزات مکانیکی بین دو نوسازی کامل یک خط می‌باشد. اگر  $I$  تعداد جلسات کاری یک قطعه در طول یک سال و  $I_m$  متوسط جلسات کاری سالیانه در فاصله زمانی بین دو نوسازی خط باشد، مقدار ضریب  $K$  نسبت  $\frac{I}{I_m}$  می‌باشد. بر اساس ضریب  $K$  می‌توان حجم عملیات نگهداری راه‌آهن را تعیین کرد. در این خصوص، برای عملیات نگهداری خط با حجم متوسط، مقدار  $C$  برابر صفر و برای عملیات نگهداری با حجم زیاد مقدار آن معادل ۰/۱۰ می‌باشد.

محاسبه پارامتر مربوط به بار محوری (d): طراحی خطوط راه‌آهن برای بارهای محوری حداکثر، متفاوت صورت

می‌گیرد. به طوری که بر این اساس می‌توان خطوط راه‌آهن را به انواع مختلف طبقه‌بندی کرد. بر مبنای بار حداکثر محوری اعمال شده به راه‌آهن مقدار پارامتر  $d$  متفاوت است که به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- حداکثر بار محوری ۲۰ تن می‌باشد، مقدار  $d$  معادل صفر در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- حداکثر بار محوری ۲۲/۵ تن می‌باشد، مقدار  $d$  معادل ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود.
- ۳- حداکثر بار محوری ۲۵ تن می‌باشد، مقدار  $d$  معادل ۰/۱۲ در نظر گرفته می‌شود.
- ۴- حداکثر بار محوری ۳۰ تن می‌باشد، مقدار  $d$  معادل ۰/۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

## فصل چهارم:

### زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه تونل‌ها

#### ۴-۱- مقدمه

(در درس مهندسی تونل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدیهی است درس مهندسی تونل برای آزمون دکتری باید مطالعه شود.)





## فصل پنجم:

### زمین‌شناسی مهندسی طرح‌های زیست محیطی

#### ۵-۱- مقدمه

محیط زیست، محیطی فیزیکی یا مجازی است که فرآیند زیستن را فراهم می‌کند. بسته به اینکه فرآیند زیستن در این محیط برای انسان یا سایر جانداران مهیا گردد، تقسیمات مختلفی برای محیط زیست ارائه شده است و به طور کلی می‌توان این محیط را به سه گروه زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- محیط طبیعی

۲- محیط انسان ساخت

۳- محیط اجتماعی

بدیهی است از دیدگاه‌های مختلف به محیط‌های فوق توجه یکسانی نمی‌شود. به عنوان مثال از دیدگاه مهندسی عمران منظور از محیط زیست بیشتر محیط انسان ساخت و محیط اجتماعی است. زمین‌شناسی مهندسی بیشتر به محیط طبیعی و محیط انسان ساخت توجه دارد، بین زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست دو نوع ارتباط وجود دارد که عبارتند از:

۱- انجام فرایندهای طبیعی زمین‌شناسی چه تأثیری بر محیط زیست دارد.

۲- ساخت پروژه‌های مهندسی چه تأثیری بر محیط زیست دارد.

در این درس هر دو مورد فوق مدنظر می‌باشد به همین دلیل در ادامه به شرح مهمترین موارد زیست محیطی مرتبط با زمین‌شناسی مهندسی پرداخته می‌شود.

#### ۵-۲- زمین لغزش‌ها و زمین لغزش‌های زیردریایی

درست است که زمین لغزش پدیده‌ای طبیعی است اما رخداد آن بر روی سازه‌های انسان ساخت تأثیر دارد و زیستن را دچار اختلال می‌کند.

### ۵-۲-۱- سدهای زمین‌لغزشی

طبق تعریف، زمین‌لغزش حرکت توده‌های سنگی یا خاکی در امتداد شیب زمین است که دارای مؤلفه‌های افقی و قائم می‌باشد. یک زمین‌لغزش دارای قسمت‌های مختلفی است شامل تاج، پرتگاه، بدنه اصلی، پهلوها، پاشنه، پنجه و سطح لغزش است. علت اصلی وقوع زمین‌لغزش نیروی جاذبه زمین است، اما عوامل دیگری که به وقوع زمین‌لغزش کمک می‌کنند زمین‌لرزه‌ها، بارش‌های سیل‌آسا، رودخانه‌ها، گیاهان و نیروی باد می‌باشند. زمین‌لغزش‌ها از دیدگاه‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شوند که به عنوان مثال می‌توان موارد زیر را نام برد:

- ۱- بر مبنای جنس مصالح درگیر در لغزش، زمین‌لغزشها را به انواع خاکی، سنگی، و خاکی-سنگی
- ۲- بر مبنای سرعت حرکت به انواع فوق‌العاده سریع تا فوق‌العاده کند
- ۳- بر مبنای میزان حرکت به انواع فعال و غیر فعال
- ۴- بر مبنای شکل سطح لغزش به انواع صفحه‌ای و دایره‌ای
- ۵- بر مبنای سن به انواع زمین‌لغزشهای جدید یا اخیر و قدیمی
- ۶- بر مبنای نسبت  $D/L$  (عمق به طول) به انواع سطحی (کمتر از  $1/5$ )، کم عمق ( $1/5$  تا  $5$ )، عمیق ( $5$  تا  $20$ ) و خیلی عمیق (بیشتر از  $20$ )

احتمالاً بعد از وقوع زمین‌لغزش‌ها در دره‌های کوهستانی سدهای زمین‌لغزشی ایجاد شود، این سدها حاصل پیر شدن عرض دره‌ها در اثر وقوع زمین‌لغزش‌ها می‌باشد که خود جزء پدیده‌های طبیعی و از مخاطرات زمین‌شناسی به حساب می‌آید. این سدها ممکن است در اثر ریزش‌ها و لغزش‌های خاکی و سنگی و خاک روانه یا گل روانه ایجاد شوند. عواملی نظیر ابعاد سد، ویژگی‌های هندسی آن، حجم مواد تشکیل دهنده سد، عمق دریاچه سد، وضعیت سنگ کف و ساخت سازه‌های مهندسی مانند سرریز و تونل انحراف آب در زمان شکستن و اندازه سیلاب ناشی از گسیختگی سد تأثیر دارند. مهمترین عوامل ایجاد سدهای زمین‌لغزشی عبارتند از:

- ۱- بارندگی و ذوب برف
  - ۲- زمین‌لغزش
  - ۳- آتشفشان‌ها
- به لحاظ مورفولوژی سدهای زمین‌لغزشی در دره‌های باریک و دارای عرض کم، بیشتر ایجاد می‌شوند. این مناطق از نظر تکتونیک و لرزه خیزی فعال بوده و با حجم کمتری از مصالح پرمی‌شوند.
- از نظر مقایسه سدهای زمین‌لغزشی نسبت به سدهای خاکی دارای تفاوت‌های زیر می‌باشند:
- (۱) بدنه سد ناهمگن و تکامل نیافته است.
  - (۲) فاقد سرریز است.
  - (۳) تخلخل مصالح بیشتر بوده و احتمال وقوع رگاب بیشتر است. رگاب شستشوی ذرات ریزدانه از بین ذرات درشت دانه می‌باشد.

۴) شیب بدنه سد زمین‌لغزشی بیشتر از سد خاکی است. (چون این سدها مهندسی ساز نبوده اما در سدهای خاکی شیب با ضریب اطمینان طراحی میشود. پتانسیل لغزش این سدها بیشتر از سدهای خاکی است که مستعد گسیختگی شیب هستند.)

۵) عرض تاج سدهای زمین‌لغزشی بیشتر از عرض تاج سدهای خاکی است. عمر سدهای زمین‌لغزشی از چند دقیقه تا چند هزارسال در تغییر می‌باشد. علت گسیختگی سریع این سدها عبارتند از:

۱- دبی آب ورودی به دریاچه سد

۲- ابعاد سد

۳- ویژگی‌های مکانیکی مواد تشکیل دهنده بدنه سد

سیلابهای ناشی از وقوع گسیختگی در سدهای زمین‌لغزشی ممکن است از وقوع گسیختگی در بالادست یا پایین دست سد ایجاد شوند. سیلاب بالادست زمانی اتفاق می‌افتد که دریاچه سد پر شده و آب اضافی از روی تاج سد سرریز و باعث تخریب آن شود. اطلاعات مورد نیاز جهت ارزیابی وسعت و میزان این سیلابها شامل موارد زیر است:

۱- سرعت آب ورودی

۲- شناخت توپوگرافی حوضه آبریز

۳- میزان تراوش آب از بدنه سد.

سیلابهای پایین دست ناشی از وقوع رگاب و گسیختگی سد از پایین دست می‌شوند و سیلاب پایین دست را بوجود می‌آورد. خسارت‌های مالی سیلابهای بالادست بیشتر است اما خسارت جانی آنها کمتر می‌باشد ولی سیلابهای پایین دست خسارات جانی بیشتری دارند.

اثرات ثانویه گسیختگی سدهای زمین‌لغزشی به شرح زیر می‌باشد:

۱- وقوع زمین‌لغزش در درون مخزن

۲- زمین‌لغزش‌های القائی

۳- شستن پنجه دامنه‌ها در پایین دست توسط جریان سیل و وقوع لغزش‌های دیگر

۴- تغییر در عرض و عمق کانال رودخانه در بالادست و پایین دست

۵- آسیب به حیات وحش و محیط انسانی.

از مهمترین سدهای زمین‌لغزشی ایران می‌توان به سد زمین‌لغزشی سیمره، سد زمین‌لغزشی دره لار، سد زمین‌لغزشی اوان در الموت قزوین، سد زمین‌لغزشی سیرویه در سمیرم جنوب اصفهان اشاره کرد.

## ۵-۲-۲- زمین‌لغزش‌های زیردریایی

حرکات رو به پایین و مایل توده‌هایی از مصالح و مواد از نواحی کم عمق دریا به نواحی عمیق است. از نظر ترکیب، سازوکار و مورفولوژی، زمین‌لغزش‌های زیردریایی بسیار شبیه به زمین‌لغزش سطحی می‌باشند اما از نظر ابعاد و اندازه از زمین‌لغزش‌های سطحی بزرگتر هستند به این دلیل که ضخامت مصالح و چسبندگی آنها کمتر است.

نمونه‌های از این زمین‌لغزش‌ها در سواحل نروژ، آفریقای جنوبی و در غرب مدیترانه اتفاق افتاده است. از نظر نوع زمین‌لغزش‌های زیردریایی ممکن است به صورت چرخشی، انتقالی، واژگونی، سقوط یا افتادن، جریانی و... باشد. در صورتی که در زمان وقوع این لغزش‌ها اندازه آنها بسیار بزرگ باشد و مصالح دچار آشفستگی شدید شوند به این حرکات *مگاتوربیدات* گفته می‌شود (مانند غرب مدیترانه). همچنین بهمن‌ها و زمین‌لغزش‌های زیردریایی ممکن است در اطراف دهانه آتشفشان‌های زیردریایی به وقوع بپیوندند.

### ۵-۳- فرونشست زمین و صدمات زیست محیطی آن

طبق تعریف انستیتو زمین‌شناسی مهندسی آمریکا فرونشست زمین شامل فرو ریزش یا نشت رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی افقی کمی نیز باشد. از نظر یونسکو این پدیده عبارت است از فروریزش یا نشت زمین که به دلایل مختلفی در مقیاس‌های بزرگی رخ می‌دهد. به طور معمول این اصطلاح به حرکات قائم و رو به پایین سطح زمین گفته می‌شود که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد. بر اساس یک تعریف کلی، فرونشست زمین شامل فرونشست یا نشت رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار افقی اندکی نیز باشد. این پدیده از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر در فرونشست محدود نمی‌باشد و در اثر فرآیندهای طبیعی زمین‌شناسی و یا فعالیت‌های انسانی به وقوع می‌پیوندد.

### ۵-۳-۱- خطرات زمین‌شناسی و زیست محیطی ناشی از فرونشست زمین

مهمترین خطرات زمین‌شناسی و زیست محیطی ناشی از فرونشست زمین را می‌توان به شرح زیر طبقه‌بندی کرد:

- ۱) تخریب سیستم آبیاری و خاک‌های حاصلخیز کشاورزی (دشت رفسنجان، قزوین، ورامین).
- ۲) آسیب به مناطق شهری
- ۳) تغییر در وضعیت توپوگرافی و وضعیت هیدرولوژی منطقه
- ۴) تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها و آبراه‌ها و سازه‌های انتقال آب
- ۵) پیشروی امواج در مناطق پست ساحلی (مانند سواحل هلند)
- ۶) کاهش برگشت ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه کاهش تخلخل مفید مصالح
- ۷) کاهش میزان نفوذ پذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی
- ۸) کاهش بازدهی و ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی

### ۵-۳-۲- عوامل مؤثر در فرونشست زمین

مهمترین عوامل مؤثر در فرونشست زمین را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- ۱) فرونشست زمین در اثر انحلال زیرسطحی سنگ‌های انحلال‌پذیر مانند سنگ‌های کربناته، سنگ‌های سولفات، سنگ‌های کلروره و سنگ‌های آواری دارای سیمان سولفات و کلروره
- ۲) فرونشست زمین در اثر استخراج بی رویه آب‌های زیرزمینی

- ۳) فرونشست در اثر تراکم خاک‌های ناپایدار مثل خاک‌های رمینده
- ۴) فرونشست زمین در اثر جریان‌های جانبی یا تقریباً افقی مثل جریان نمک
- ۵) فرونشست زمین در اثر معدن‌کاری و خروج مواد معدنی و نفتی (ایجاد فضای خالی در زمین)
- ۶) فرونشست زمین در اثر فرآیندهای تکتونیکی مثل آتشفشان‌ها که به اندازه حجم گدازه خروجی، فضای خالی ایجاد می‌شود.

#### ۵-۴- هوازدگی و هوازدگی تسریع شده و صدمات زیست محیطی ناشی از آنها

هوازدگی<sup>۱</sup> از دیدگاه‌های مختلف طبقه‌بندی می‌شود. به عنوان مثال، ممکن است هوازدگی فیزیکی یا شیمیایی باشد، در مقیاس کوتاه مدت یا بلند مدت و یا در مقیاس منطقه‌ای و محلی رخ دهد.

#### ۵-۴-۱- هوازدگی بلند مدت

در مقیاس زمانی بلند مدت فرآیند هوازدگی در زمان زمین‌شناسی رخ می‌دهد. نمونه‌ای از هوازدگی بلند مدت و در مقیاس ناحیه‌ای را میتوان در سازند آغاچاری مطالعه کرد که از دیدگاه زمین‌شناسی به دلایل زیر یک سازند مسئله دار در نظر گرفته می‌شود.

- ۱) این سازند تناوبی از ماسه سنگ، مارن، سیلتستون و بین لایه‌های ژیبسی است که پتانسیل هوازدگی آنها یکسان نمی‌باشد و تفاوت در دوام این لایه‌ها باعث ایجاد سقوط سنگ‌ها، واژگونی و لغزش سنگ می‌شود.
- ۲) انحلال پذیری به دلیل وجود لایه های ژیبسی و تحت تأثیر هوازدگی شیمیایی
- ۳) ریمبندگی به جهت تأثیر هوازدگی شیمیایی و انحلال بر مصالح ژیبسی و ایجاد حفرات زیرزمینی و در نهایت فروریختن سقف این حفرات
- ۴) هیدراته شدن که با توجه به وجود لایه‌های ژیبسی و تغییرات سطح ایستابی در منطقه، تغییرحجم مشاهده می‌شود.

نمونه دیگری از تأثیر هوازدگی بلند مدت را می‌توان در هورنفلس‌های دیگر هاله دگرگونی الوند در همدان مشاهده نمود که حتی باعث ریزش تونل دولایی که در درون آنها حفاری گردیده، شده است. همچنین این موضوع در ترانشه‌های حاشیه بزرگراه ساوه- همدان در منطقه دخان بسیار فراوان است.

#### ۵-۴-۲- هوازدگی کوتاه مدت

نوع دیگر هوازدگی، هوازگی کوتاه مدت است که در مقیاس زمانی عمرمفید سازه ها رخ می دهد. این نوع هوازدگی تلفیقی از هوازدگی فیزیکی و شیمیایی است که اهمیت هوازدگی شیمیایی بیشتر بوده و تحت عنوان هوازدگی تسریع شده<sup>۲</sup> معروف می‌باشد. در خصوص دلیل هوازدگی تسریع شده می‌توان گفت که آلودگی هوا و

1. Weathering  
2. Accelerated weathering

افزایش غلظت گازهای  $CO_2$ ،  $NO_2$ ،  $SO_2$  و سایر گازهایی که در ترکیب با آب باران تولید اسید کرده و باعث ایجاد بارش‌های اسیدی می‌گردند، بر روی سنگ‌های مختلف به ویژه سنگ‌های ساختمانی تأثیر می‌گذارد. این موضوع در شهرهای بزرگ و صنعتی بیشتر به چشم می‌خورد و تابعی از نوع و لیتولوژی سنگ، توپوگرافی، اسیدپتیه بارش، نفوذپذیری سنگ، قابلیت شستشوی شیمیایی<sup>۱</sup> و فعالیت‌های بیولوژیکی می‌باشد. اثر هوازدگی تسریع شده بر روی سنگ‌های مختلف بررسی شده است. در این خصوص سنگ‌های کربناته نظیر سنگ‌آهک، دولومیت، تراورتن، مرمر و همچنین سنگ‌های سیلیکاته نظیر گرانیت‌ها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد.

مطالعه هوازدگی کوتاه مدت گرانیت‌ها با تکیه بر دو روش زیر امکان‌پذیر است.

۱- نقش باران اسیدی با pH کمتر از ۵/۵

۲- رابطه متقابل آب و سنگ (دائمی یا متناوب و نوع آزمایش شبیه‌سازی شده مانند آزمایش دوام- وارفتگی و آزمایش باران اسیدی)

گرانیت‌ها تحت تأثیر باران‌های اسیدی دچار هوازدگی می‌شوند به‌طوری‌که کانی‌هایی نظیر فلدسپات‌ها و بیوتیت موجود در آنها ابتدا به اسمکتیت و مونت‌موریونیت و سپس در صورت وقوع شستشو این دو کانی به کائولینیت و هالوزیت تبدیل می‌شوند. تحت این فرآیند، پلاژیوکلازها زون‌بندی می‌شوند، به این صورت که مغزه‌های فلدسپاتی کلسیتی با هاله‌های سدیمی احاطه می‌شوند. علت این که سدیم در کنار و کلسیم در وسط است، به دلیل سری واکنشی باون می‌باشد.

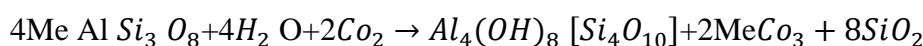
در طی فرآیند هوازدگی تسریع شده تخلیه عناصر بسیار رایج است به منظور تعیین میزان یا شدت هوازدگی تسریع شده در سنگ‌های سیلیکاتی میتوان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$WD = 1 - \frac{R_{sample}}{R_{parent}} \quad (1-5)$$

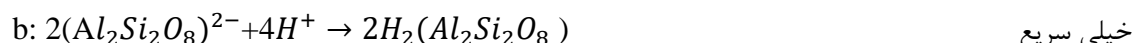
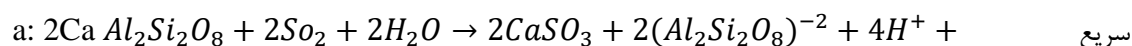
در این رابطه،  $R = \frac{CaO+Na_2O+K_2O}{Al_2O_3+H_2O}$  است.

مقدار  $WD$  برای سنگ تازه معادل صفر و برای سنگ هوازده برابر یک می‌باشد (برای تعیین مقدار  $R$  یک بار برای سنگ مورد نظر  $XRF$  به دست می‌آید و درصد اکسیدهای آن تعیین می‌شود و یک بار هم برای سنگ مادر آن این آزمایش تکرار می‌شود).

در اثر فرآیند شستشو کلسیم و سدیم سریعتر از سایر عناصر نظیر،  $Mg$ ،  $Si$ ،  $Al$ ،  $K$  شسته می‌شوند. علاوه بر تخلیه عناصر، کائولینیتی شدن گرانیت‌ها در مناطق شهری از اهمیت زیادی برخوردار است که مطابق با واکنش زیر صورت می‌گیرد:



در این واکنش،  $Me=Ca+Na$  می‌باشد. هوازدگی تسریع شده فلدسپات‌ها طی دو مرحله شامل انحلال و رسوبگذاری انجام می‌شود. انحلال فرآیندی است آهسته که با افزایش pH کاهش می‌یابد و با افزایش سطح در معرض تماس سنگ افزایش می‌یابد و جذب آب و تغییرات یونی در این فرایند مؤثرند. حضور گاز  $SO_2$  در هوای آلوده شهرهای بزرگ مسئول تجزیه فلدسپات‌ها است. این گاز در حضور آب ناشی از بارش تبدیل به اسید سولفوریک شده و در سه مرحله فلدسپات‌های کلسیم‌دار را به صورت زیر تجزیه (کائولینیتی) می‌کند:



هوازدگی تسریع شده در سنگ‌های کربناته نظیر سنگ‌آهک نیز دیده می‌شود که در این پدیده نقش انحلال سنگ از اهمیت زیادی برخوردار است.

### ۵-۴-۳- هوازدگی نمک

هوازدگی نمک نوع دیگری از هوازدگی و فرسایش است که در اثر حضور نمک (نمک سدیم، سولفات سدیم، کربنات سدیم، کلرید پتاسیم و...) در محیط می‌تواند بر روی سنگ‌های مختلف مؤثر واقع شود. مهمترین منابع تأمین نمک شامل هوازدگی شیمیایی سنگ‌های نمک‌دار، آب‌های زیرزمینی شور و فعالیت‌های آتشفشانی است. نمک تولید شده ممکن است در پلایا (دریاچه نمک حاج علی قلی کویر دامغان)، نواحی ساحلی (مثل سواحل دریاچه ارومیه و خلیج فارس) و نواحی بیابانی دیده شود. حضور نمک در داخل بافت سنگ باعث اعمال فشار نمک می‌شود که می‌تواند به داخل دیواره حفرات سنگ نیرو وارد کرده و باعث تخریب ساختار آن گردد. فشار نمک به یکی از سه روش زیر ایجاد می‌شود:

۱- در اثر رشد بلورهای نمک: در اثر این پدیده نمک در داخل آب موجود در سنگ حل شده و در صورت خشک شدن بلورهای نمک تشکیل می‌شود که این بلورها باعث ایجاد فشار می‌گردند. این فرآیند خاص سولفات سدیم، کربنات سدیم، نیترات سدیم و نیترات منیزیم است.

۲- تغییر حجم به دلیل هیدراته شدن: با جذب آب، مولکول‌های نمک افزایش حجم نشان می‌دهند. به عنوان مثال، کربنات سدیم و سولفات سدیم در اثر آبیگری در حدود ۳۰٪ افزایش حجم نشان می‌دهند.

۳- انبساط حرارتی: از آنجا که ضریب انبساط حجمی نمک بالا می‌باشد در اثر تغییرات درجه حرارت تغییر حجم-های زیادی از خود نشان می‌دهد. به عنوان مثال، نمک طعام در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سانتیگراد یک درصد انبساط می‌یابد.

به طور خلاصه می‌توان روش‌های زیر را به منظور جلوگیری از صدمات زیست محیطی هوازدگی نمک و هوازدگی تسریع شده به کار برد.

۱- استفاده از مصالح عاری از نمک در ساخت و سازها

- ۲- پایین انداختن سطح ایستابی در صورت بالا بودن
- ۳- کاهش آلودگی هوا با کنترل ترافیک
- ۴- عدم استفاده از سنگ‌های ساختمانی متخلخل و دارای پتانسیل هوازگی تسریع شده مثل تراورتن‌ها و بطور کلی سنگ‌های کربناته و سلیکاته فلدسپات‌دار
- ۵- انتقال ساخت و ساز به مناطق مطمئن که خطر هوازگی تسریع شده و هوازگی نمک کاهش یابد.

## ۵-۵- سد سازی و اثرات زیست محیطی آن

سد ها موانعی می‌باشند که بر سر راه آبها ایجاد می‌شوند و ممکن است به صورت سدهای سطحی و زیرزمینی طراحی و اجرا گردند. برای هر دو مورد باید مطالعات زیست محیطی ناشی از احداث سازه مد نظر قرار گیرد. صدمات زیست محیطی زیادی به دلیل سد سازی غیر اصولی سطحی در ایران و کشورهای همسایه رخ داده است که اهم آنها به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- ساخت سدهای زیاد و غیرمتعارف بر روی رودخانه‌های دجله و فرات که باعث تولید گرد و غبار در کشور عراق شده و به ایران وارد می‌شود.
  - ۲- ساخت سد روی رودخانه کرخه و خشک شدن حورالعظیم و تولید گرد و غبار و ذرات معلق
  - ۳- ساخت سد بر روی رودخانه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود در آذربایجان و کمک به خشک شدن دریاچه ارومیه و اثرات زیست محیطی ناشی از آن
  - ۴- ساخت سد گتوند و قرارگیری گنبد نمکی در داخل مخزن سد و به دنبال آن شور شدن آب مخزن و رودخانه و در نهایت تخریب زمین‌های کشاورزی پایین دست
- نوع دیگری از سدها، سدهای زیرزمینی هستند که در مناطق دارای بارش‌های فصلی و نامنظم احداث می‌شوند. این سدها جریان آب زیرزمینی را قطع کرده و شرایطی به شرح زیر ایجاد می‌کنند:

- ۱- ذخیره سازی آب در زیر سطح زمین
  - ۲- انحراف جریان آب زیرزمینی و ایجاد اختلال در سفره‌های آب زیرزمینی پایین دست (منظور این است که تغذیه سفره قطع شده و بیلان آن منفی می‌شود).
  - ۳- محدود کردن آب زیرزمینی و بالا آمدن سطح ایستابی
  - ۴- افزایش قابلیت پمپاژ آب در آبخوان (مصنوعی است).
- سدهای زیرزمینی به دو گروه سدهای زیرسطحی و سدهای ذخیره شنی تفکیک می‌شوند. در نوع اول، نیاز به آبخوان‌های دائمی است اما در نوع دوم آبخوان دائمی نیاز نمی‌باشند. سدهای زیر زمینی با سدهای سطحی در موارد زیر قابل مقایسه هستند:

- ۱- تبخیر: در سدهای سطحی بیشتر از انواع زیر سطحی می‌باشد.
- ۲- تجمع رسوبات: در سدهای سطحی بیشتر است (پر شدن دریاچه سد از رسوبات).
- ۳- خطر آلودگی: در سدهای سطحی بیشتر است و آب زیرزمینی را نیز آلوده می‌کند.



۴- مساحت اشغال شده: سدهای زیرزمینی بهتر هستند. در سدهای سطحی، زمین‌های زیادی زیر آب می‌روند و از کاربری می‌افتند.

۵- حجم آب ذخیره شده: در سدهای سطحی بیشتر است.

شرایط مورد نیاز برای احداث سدهای زیرزمینی شامل موارد زیر هستند:

۱- اقلیم

۲- شرایط توپوگرافی

۳- شرایط هیدرولوژیکی

۴- جنس مصالح زمین

در فاز مطالعات مورد نیاز برای احداث سدهای زیرزمینی باید مواردی از قبیل جهت جریان آب زیرزمینی، عمق سطح ایستابی و تغییرات آن، شیب سطح ایستابی، میزان آبگذری، عمق سنگ کف، شکل هندسی آبخوان، هدایت هیدرولیکی یا ضریب نفوذپذیری آبخوان، قابلیت انتقال، قابلیت ذخیره و فشار آب منفذی مشخص شود. اجرای سدهای زیرزمینی در فصول خشک انجام می‌شود، زیرا در این فصل سطح ایستابی پایین‌تر است و به راحتی می‌توان ترانسه بدنه سد را حفر و آن را توسط مواد غیر قابل نفوذ مانند بتن و مواد رسی پر و متراکم کرد.

## ۵-۶- معدن کاری و استخراج نفت و گاز و اثرات زیست محیطی آنها

مهمترین اثرات زیست محیطی ناشی از معدن کاری و استخراج نفت و گاز را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱- تخریب شکل ظاهری زمین

۲- پمپاژ و استفاده بی‌رویه از آب زیرزمینی در محل معدن کاری و پایین رفتن سطح ایستابی

۳- تخلیه مواد معدنی و نفت از داخل زمین و افزایش تخلخل و به دنبال آن فرونشست زمین

۴- استفاده از مواد شیمیایی مختلف برای برداشت و جداسازی ماده معدنی از باطله‌ها که ممکن است این مواد به داخل زمین نیز راه پیدا کنند و باعث آلودگی آب یا خاک شوند (به عنوان مثال، استفاده از سیانید CN که در معدن مس سرچشمه به کار می‌رود).

۵- احداث سدهای رسوب‌گیر و مشکلات زیست محیطی ناشی از گسیختگی این سدها و تراوش از درون آنها

## ۵-۷- محل‌های دفن زباله و اثرات زیست محیطی آنها

از مهمترین معیارهای زیست محیطی که به هنگام انتخاب محل‌های دفن زباله یا مدفن‌ها باید مد نظر قرار گیرند می‌توان به معیارهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، معیارهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی، معیارهای توپوگرافی و ژئومورفولوژیکی، معیارهای اقلیمی، معیارهای حکومتی و معیارهای اقتصادی اشاره کرد. در این خصوص، مهمترین معیارهای زیست محیطی که به هنگام انتخاب محل‌های دفن زباله باید مد نظر گرفته شوند تا مشکلات زیست محیطی آنها تا حد امکان کاهش یابد، به شرح زیر می‌باشند:

### ۵-۷-۱- ارزش اکولوژیکی گونه‌های مختلف گیاهی

استفاده مکانی مستقیم و غیر مستقیم لندفیل، گونه‌های گیاهی و پوشش گیاهی منطقه را تخریب خواهد نمود. در هنگام تصمیم‌گیری، ارزش اکولوژیکی گیاهان منطقه بایستی بطور دقیق برای مناطق مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گیرد. ارزش اکولوژیکی گیاهان به تنوع، طبیعت و خواص منحصر به فرد آنها بستگی دارد. مثالی از استفاده غیرمستقیم، بر هم خوردن سکوت در محیط اطراف در اثر فعالیت‌های وابسته به عملکرد بر روی لندفیل می‌باشد. مناطق کاملاً مناسب برای کشاورزی دارای تنوع گیاهی بسیار خوبی بوده و بنابراین نه تنها برای انباشت مواد زائد بلکه برای تمام فعالیت‌های صنعتی و شهری مناسب نیستند.

### ۵-۷-۲- آزار حاصل از بو و گرد و غبار

یک لندفیل جدید بدلیل انتشار بو و گرد و غبار آلوده حاصل از آن بایستی با یک فاصله مناسب از مناطق مسکونی قرار گیرد. بسته به جهت و سرعت باد محلی، فاصله مناسب می‌تواند از حساسیت به بو و گرد و غبار ممانعت بعمل آورد. مشکل بو و گرد و غبار را می‌توان با استفاده از یک پوشش مناسب خاک به حداقل رساند.

### ۵-۷-۳- رفت و آمد (ترافیک)

احداث لندفیل ترافیک بیشتری در منطقه بوجود می‌آورد. میزان این رفت و آمد به فاصله منطقه جمع‌آوری، نوع حمل و نقل و استفاده از ایستگاه‌های انتقال بستگی دارد. راه‌های دسترسی که از میان مناطق مسکونی عبور می‌کند نسبت به راه‌هایی که از یک سمت باز روستا عبور می‌کند مایه رنجش بیشتری برای افراد بومی می‌شود. بنابراین انتخاب مسیر رفت و آمد وسایل نقلیه از میان مناطق صنعتی، تجاری یا مناطق با تراکم جمعیتی پائینی از اثرات صدای وسایل مرتبط با فعالیت لندفیل می‌کاهد.

### ۵-۷-۴- خطرات احتمالی انفجار و آتش

به دلیل حضور گازهایی مانند گاز متان در لندفیل‌ها، احتمال انفجار و یا آتش‌سوزی وجود دارد. پوشش خاکی معمولاً در جهت پوشاندن آتش عمل می‌کنند و یک سدی را در جلوگیری از گسترش آتش تشکیل می‌دهد. نظارت مناسب بر کامیون‌های ورودی می‌تواند از طریق کاهش ریسک انباشته کردن بارهای حاوی مواد قابل اشتعال از خطرات مذکور بکاهد.

### ۵-۷-۵- حشرات و جانوران موذی

از دیگر موارد مشکل ساز می‌توان به جانوران موذی اشاره کرد که به قسمت‌های آلی مواد زاید در لندفیل، مواد زاید پراکنده، صدای حاصل از فعالیت‌های ساخت و ساز، فشرده سازی یا کامیون‌های در حال رفت و آمد واکنش نشان می‌دهند. پوشش روزانه راه حلی است برای مسائل و مشکلات بوجود آمده از حشرات موذی. پرکردن حفرات کوچک ایجاد شده در فرآیند پوشاندن و پوشش خاک در جلوگیری از گسترش حوضچه‌های آب راکد که در آن پشه‌ها تخم‌گذاری می‌کنند بسیار ضروری به نظر می‌رسد.

## فصل ششم:

### زمین‌شناسی مهندسی طرح‌های بهسازی زمین

#### ۶-۱- مقدمه

بر اساس مطالعاتی که درباره ساختگاه سازه انجام می‌گیرد می‌توان محدوده ساخت آن را از نظر ژئوتکنیکی ارزیابی کرد. اصولاً بسته به واکنش زمین نسبت به ساخت سازه، آنرا به دو گروه کلی با شرایط مناسب و نامناسب تقسیم‌بندی می‌کنند. اگر شرایط زمین مناسب باشد، ساخت سازه در آن مشکلی پیش نمی‌آورد، حال آنکه در مورد زمین‌های نامناسب ممکن است احداث سازه با خطراتی توأم باشد و یا موجب توقف یا تأخیر در ساخت و افزایش غیر عادی هزینه‌ها شود. در چنین شرایطی قبل از شروع حفاری، باید وضعیت زمین را بهبود بخشید و به اصطلاح آنرا بهسازی کرد. بسته به اینکه مواد تشکیل دهنده ساختگاه تونل خاکی یا سنگی باشد، از روش‌های مختلف برای بهسازی زمین ساختگاه استفاده می‌شود که در زیر به شرح آنها پرداخته می‌شود.

#### ۶-۲- بهسازی زمین‌های خاکی

زمین‌های خاکی، شرایط کاملاً متفاوت و متنوعی دارند. عملیات حفاری در این زمین‌ها ساده است و با روش‌های دستی و یا با استفاده از ماشین‌های حفاری انجام می‌گیرد ولی مشکل اصلی در مورد آنها، پایدار نگهداشتن قسمت حفاری شده است. بعضی از خاک‌ها حالت ریزشی، متحرک، جریان یابنده یا فشارنده دارند. در مورد اینگونه زمین‌ها، ابتدا باید وضعیت زمین را بهبود بخشید و آنگاه عملیات حفاری را آغاز کرد. بهسازی زمین‌های خاکی به یکی از روش‌های زیر انجام می‌گیرد:

#### ۶-۲-۱- تثبیت شیمیایی

تثبیت شیمیایی با افزودن مواد شیمیایی با عملکرد خاص به منظور کاهش فعالیت زمین‌های رسی، بخصوص رس‌های متورم شونده و واگرا صورت می‌گیرد.

### ۶-۲-۲- استفاده از فشار هوا

استفاده از هوای فشرده یکی از بهترین روش‌های تثبیت زمین‌های فشارنده است. افزایش فشار هوا در جبهه کار حفاری سبب می‌شود که از ورود آب و مصالح به داخل بخش حفاری شده جلوگیری به عمل آمده و مقاومت زمین افزایش یابد.

### ۶-۲-۳- خشکانیدن<sup>۱</sup>

با انجام زهکشی قبل از آغاز عملیات حفاری، می‌توان وضعیت زمین‌های ریزشی یا جاری‌شونده را بهسازی کرد. این عمل با حفر چاه‌های عمیق و پمپاژ نقطه‌ای انجام می‌شود.

### ۶-۲-۴- انجام تزریق<sup>۲</sup>

عملیات تزریق یکی از مناسب‌ترین روش‌های بهسازی زمین به ویژه در مناطق شهری و جاهایی است که نمی‌توان از روش هوای فشرده استفاده کرد. در این خصوص برای قسمت‌هایی از خاک که در زیر سطح ایستابی قرار دارد، تزریق مواد شیمیایی مؤثرتر از تزریق دوغاب است. استفاده از مواد شیمیایی منحصر به خاک‌های حاوی سیلت یا شن درشت‌دانه است. معمولاً ۴۰ تا ۷۰ درصد مواد تزریقی را سیلیس تشکیل می‌دهد. زمان ژله‌ای شدن خاک‌های تثبیت شده با این روش از چند ثانیه تا چند ساعت در تغییر است. با افزایش میزان سیلت در این خاک‌ها، کارایی محلول‌های شیمیایی به شدت کاهش می‌یابد.

### ۶-۲-۵- استفاده از انجماد

این روش برای کنترل ریزش زمین و کاهش ضرورت استفاده از هوای فشرده، به کار می‌رود و در مورد خاک‌های لایه‌ای، گاه مؤثرتر از روش‌های تزریق یا زهکشی است. برای انجام این روش، در اطراف ساختگاه گمانه‌هایی حفر کرده و از طریق آنها محلول‌های سرد کننده به داخل زمین تزریق می‌کنند تا محدوده اطراف تونل دچار یخبندان شود و از ورود آب به داخل تونل ممانعت گردد.

### ۶-۲-۶- استفاده از روش‌های مخصوص حفاری در تونل‌ها

روش‌های مخصوص حفر تونل نظیر سپرانی، سپر گل و غیره می‌تواند در زمین‌های مسئله دار و نامناسب به حفاری موفقیت آمیز کمک فراوانی کند.

---

1. Dewatering  
2. Grouting

## ۶-۳- بهسازی زمین‌های سنگی

به منظور پایدارسازی و حایل‌بندی حفاری‌های سطحی و فضا‌های زیرزمینی حفر شده در توده‌سنگ، استفاده از مجموعه‌های فولادی و پوشش‌های بتنی در چندین دهه اخیر معمول شده است. این تمهیدات را می‌توان در سه گروه کلی سنگ دوزها، توری سیمی و شاتکریت طبقه‌بندی نمود که استفاده از آنها ممکن است بصورت منفرد یا ترکیبی صورت می‌گیرد. در زیر بطور مختصر به شرح گروه‌های مذکور پرداخته می‌شود.

### ۶-۳-۱- سنگ دوزها

سنگ دوزها میله‌های فولادی می‌باشند که در داخل توده‌سنگ نصب شده و باعث بهم دوختن اجزاء توده‌سنگ می‌شوند. این تمهیدات به دو گروه سنگ دوزهای معمولی<sup>۱</sup> و سنگ دوزهای غیرکششی<sup>۲</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. بدیهی است که سنگ دوزهای معمولی یا کششی توسط وسایل مخصوص تحت کشش قرار می‌گیرند در حالی که سنگ دوزهای غیرکششی کشیده نمی‌شوند. سنگ دوزهای کششی و غیرکششی دارای انواع مختلف می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به سنگ دوزهای غیر کششی چوبی<sup>۳</sup>، سنگ دوزهای تزریق شونده و غیره اشاره نمود. در بکارگیری از سنگ‌دوزها انجام مراحل زیر باید به ترتیب صورت گیرد.

#### ۱- ترازسازی

یکی از متداولترین علل سوانح در حفاری‌های زیرزمینی عدم ترازسازی کافی بعد از هر سیکل آتشکاری است. ترازسازی عبارت است از خارج نمودن قطعات سنگی حاصل از حفاری و قطعات لق شده از نقاط مختلف سطح حفاری به روشهای مختلف که باعث پاکسازی محیط کار از خطرات و ایمن‌سازی آن برای ادامه کار که بعد از محو شدن دود حاصل از انفجار صورت می‌گیرد.

#### ۲- علامت گذاری و حفر محل نصب سنگ دوزها

با انجام یک برنامه مطالعاتی دقیق و توجه به سیستم‌های درزه و شکاف موجود در توده‌سنگ ابتدا محل نصب سنگ دوزها مشخص شده و سپس توسط مته مناسب حفر محل نصب سنگ دوز تا عمق مناسب صورت می‌گیرد. بدیهی است برای انجام این عمل باید همیشه به مسئله دسترسی اهمیت داد. در حفاریات زیرزمینی بزرگ استفاده از ماشین‌های دوبازویی متحرک و اتاقک‌های نصب سنگ دوز استفاده می‌شود. طول سنگ دوز یا به عبارت دیگر طول حفره محل نصب نیز مشابه محل سنگ دوز از اهمیت زیادی برخوردار است. نصب سنگ دوزهای طویل ممکن است مشکل زا و خطر آفرین باشد، بویژه وقتی که توسط دستگاه بالابر بلند و با اتاقک کوچک قرار است نصب شوند. چنانچه قرار است سنگ دوزهای بلند بکار روند، استفاده از سنگ دوزهای کوتاه که به یکدیگر کوپل شده و متصل می‌شوند به لحاظ نصب، بهتر و ایمن‌تر می‌باشند و از نظر طراحی و پایدارسازه نیز مؤثرتر هستند.

1. Rock bolts
2. Dowels
3. wooden dowels

### ۳- مهار و گیر دادن سنگ دوزها

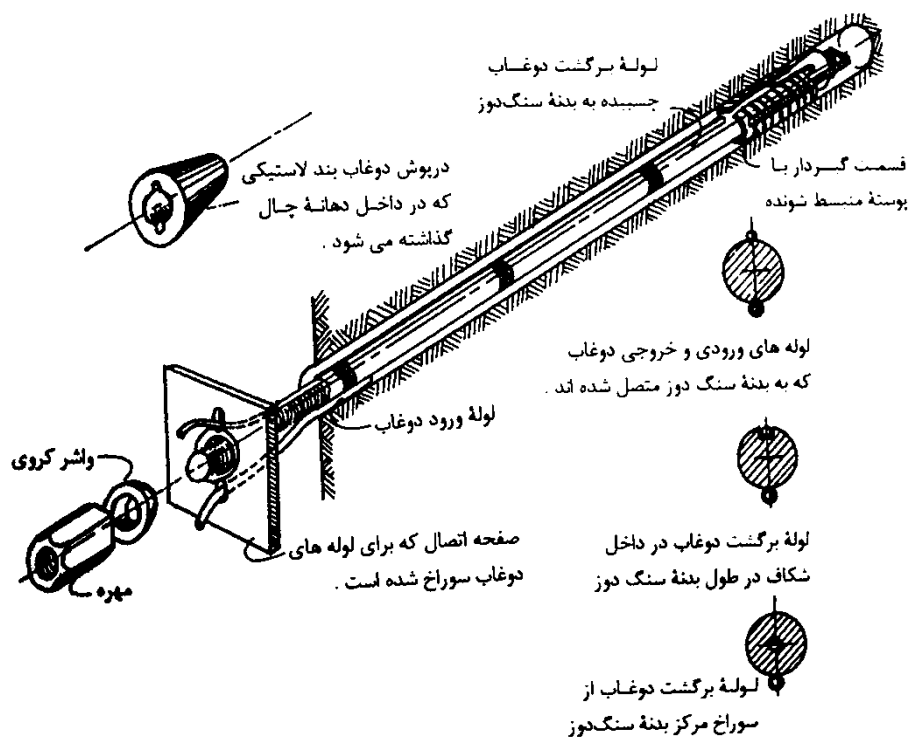
سنگ دوزهای غیر کششی معمولاً توسط تزریق دوغاب سیمان یا صمغ‌های مصنوعی به توده سنگ متصل می‌شوند. در سنگ دوزهای کششی وضعیت کمی متفاوت است زیرا وقتی قرار است سنگ دوزها کشیده شوند، باید ابزار گیرداری و مهار برای محکم نمودن و گیردار کردن انتهای میله سنگ دوز و چال مورد استفاده قرار گیرد. سه نوع از معمولترین این گیردار کننده یا مهارها عبارتند از گیردار کننده مکانیکی، تزریق دوغاب سیمان و گیردار کننده شیمیایی با استفاده از رزین یا صمغ‌های مصنوعی.

مهارهای مکانیکی بطور گسترده در کارهای معدنی و عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند و تعداد زیادی از انواع گوناگون پوسته‌های منبسط شونده طراحی و تولید می‌شوند که کلیه آنها به سبک و شیوه یکسانی عمل می‌کنند و انتخاب نوع گیردار کننده برای کارهای خاص معمولاً بیشتر بستگی به قیمت و قابلیت دسترسی به آن در بازار دارد تا به میزان کارایی و راندمان آن.

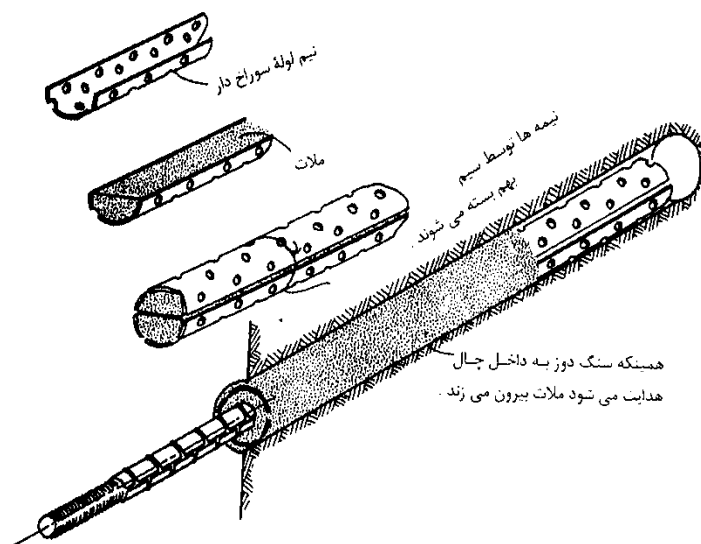
در سنگهای سخت و با کیفیت خوب، مهارهای مکانیکی کارایی خوبی دارند و سریع و راحت می‌توان آنها را نصب نمود. در سنگهای ضعیف‌تر و نرم‌تر تاثیرگیردار کننده مکانیکی به علت خردشدگی محلی و موضعی سنگ در طول غلاف سنگ دوز کاهش می‌یابد بطوری که در شیل‌های خیلی ضعیف، گل‌سنگ‌ها و ماسه سنگ‌های با سیمان ضعیف استفاده از گیردار کننده‌های مکانیکی به صلاح نبوده و توصیه نمی‌شود. شکل (۸-۱) نمونه‌ای از سنگ دوز تزریقی کششی با گیردار کننده مکانیکی را نشان می‌دهد.

گیردار کننده‌هایی که از تزریق دوغاب سیمان یا از ملات سیمان<sup>۱</sup> بدست می‌آیند از دو نوع دیگر یعنی مکانیکی و شیمیایی نامساعدتر هستند، لیکن احتمالاً ارزان‌ترین نوع گیردارکننده می‌باشند. رساندن دوغاب به انتهای چال مشکل‌ترین مسئله در استفاده از این نوع گیردارکننده است. بدین منظور از روش‌های مختلف استفاده می‌شود که یکی از مناسبترین و مؤثرترین این روش‌ها استفاده از قطعه‌ای غلاف مشبک<sup>۲</sup> می‌باشد. در این روش مطابق شکل (۸-۲) نیم لوله‌های سوراخدار با ملات پر شده و سپس توسط یک سیم به هم متصل می‌شوند و به داخل چال هدایت می‌شوند. سپس با هدایت سنگ دوز به داخل غلاف ملات از سوراخ غلاف خارج شده و فضای بین میله سنگ دوز و جدار چال را پر می‌کند. در این روش طرح اختلاط بتن مورد استفاده از اهمیت خاصی برخوردار است.

1. Mortar  
2. Perfobolt



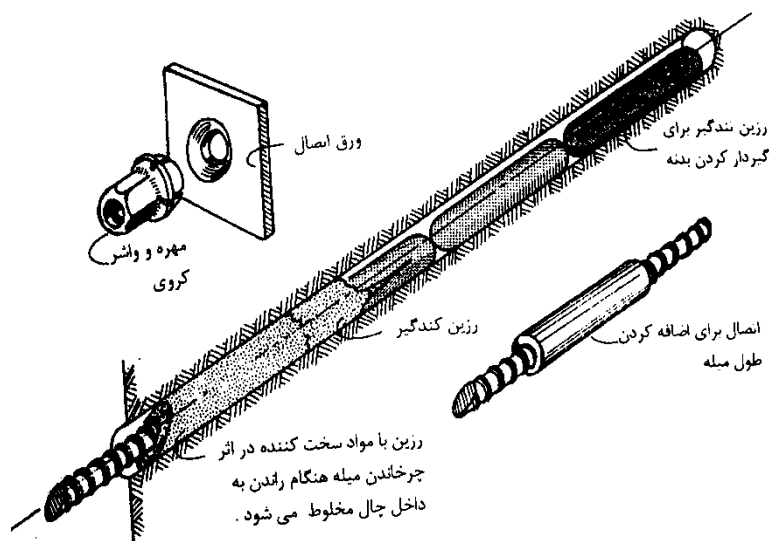
شکل ۸-۱- نمونه‌ای از سنگ دوز تزریقی کششی با گیردار کننده مکانیکی



شکل ۸-۲- غلاف مشبک

گاهی اوقات از کپسول‌های محتوی رزین مطابق شکل (۸-۳) بمنظور ایجاد گیرداری در مواقعی که مقاومت گیرداری زیاد و نصب سریع مد نظر است استفاده می‌شود. هزینه زیاد این کپسولها معمولاً به علت سرعت زیاد و راحتی نصب توجیه‌پذیر است.

این روش پیشرفته‌ترین سیستم سنگ دوزی مورد استفاده است و اکثراً مزایای سایر سیستم‌ها را داراست. در این روش رزین همراه با مواد کانی کاتالیزور در بسته‌های سوسیس شکل قرار دارد که کاتالیزور توسط ظرفی شیشه‌ای یا پلاستیکی در داخل چال رانده شده و به دنبال آن سنگ دوز را داخل چال هدایت می‌کنند. چرخاندن بدن سنگ دوز در طی راندن آن به داخل چال کپسول‌های رزین را پاره می‌کند و رزین با کاتالیزور مخلوط می‌شود و سفت می‌گردد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود میله سنگ دوز دارای پیچ‌های درشتی است که موجب قفل و بست خوب سنگ دوز با بدنه چال شده و سبب می‌شود که طول نصب براحتی تنظیم گردد.

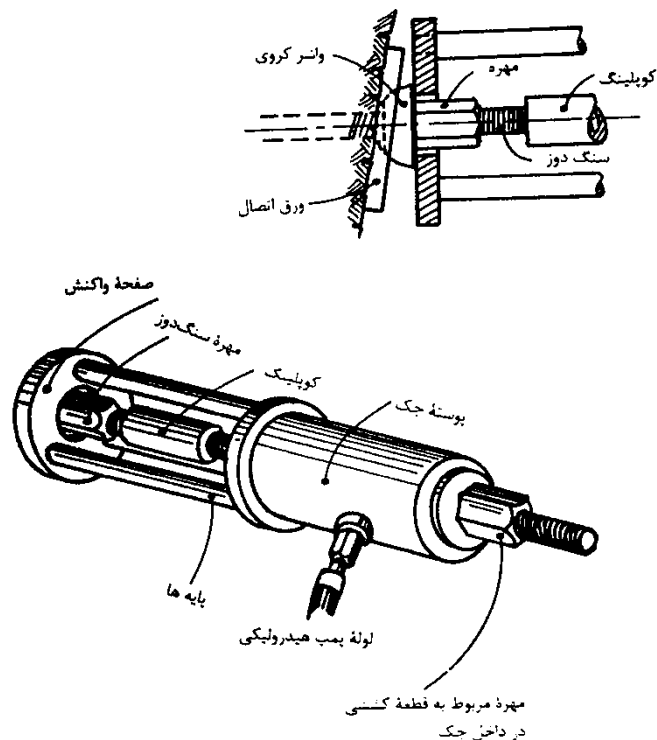


شکل ۸-۳- کپسول محتوی رزین

#### ۴- کشیدن سنگ دوز

سنگ دوزها را می‌توان با اعمال لنگرهای معین به مهره‌ها و یا با اعمال کشش مستقیم به میله سنگ دوز تا حد مورد لزوم کشید. در مواردی که کشیدن سنگ دوز تا حدود کمتر از ۱۰ تن مورد نیاز است، استفاده از آچار یا هوای فشرده که قابل تنظیم برای لنگر معین باشد، کافی است. در بارهای بیش از ۱۰ تن نامشخص بودن رابطه بین لنگر اعمال شده به مهره‌ها با کشش ایجاد شده در میله منجر به تغییرات زیادی در کشش سنگ دوز می‌گردد. بنابراین در اینگونه موارد کشیدن مستقیم مجموعه سنگ دوز بصورت هیدرولیکی عملی‌ترین روش محسوب می‌شود که توسط آن می‌توان به کشش واقعی در سنگ دوز با دقت معقول و قابل قبول دست یافت. در این روش از دستگاه مخصوصی که دارای پمپ هیدرولیکی است به منظور کشش سنگ دوز استفاده می‌شود، شکل (۸-۴).





شکل ۸-۴- دستگاه مجهز به پمپ هیدرولیکی به منظور کشش سنگ دوز

## ۵- تزریق

آخرین مرحله از نصب سنگ دوز تزریق دوغاب به فضای بین میله سنگ دوز و جدار چال است که با دو هدف انجام می‌شود:

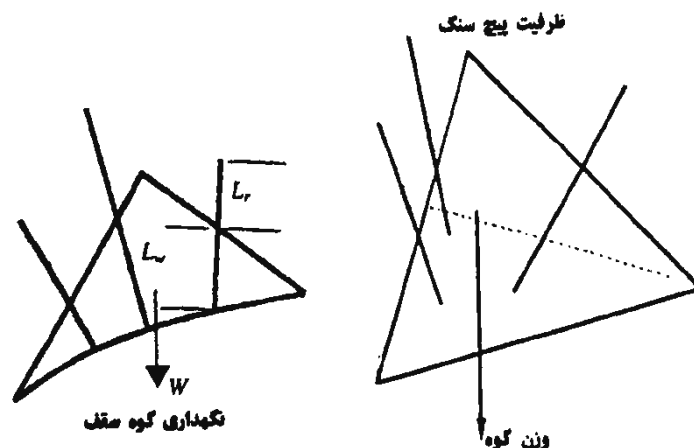
- تزریق موجب اتصال میله سنگ دوز به جدار چال شده که این امر سبب می‌شود تا سنگ دوز به صورت بخش لاینفک توده سنگ درآید. این امر موجب اصلاح و بهبود و همچنین قفل و بست اجزاء منفرد توده سنگ گردیده و منجر به تغییر و بهبود اساسی در توده سنگ می‌شود.

- تزریق سبب حفاظت سنگ دوز در مقابل خوردگی می‌شود.

بنابراین توصیه می‌گردد کلیه سنگ دوزهایی که با هدف دراز مدت بکار برده می‌شوند حتماً تزریق شوند. بطور کلی در مورد استفاده از سنگ دوزها توجه به نکات زیر ضروری است:

- وزنی که باید توسط سنگ دوزها تحمل شود باید معمولاً  $\frac{1}{3}$  تا  $\frac{1}{5}$  برابر وزن گوه‌ای باشد که سنگ دوز قرار است از ریزش آن جلوگیری کند، و بنابراین در این مورد ضریب اطمینان بین  $\frac{1}{3}$  تا  $\frac{1}{5}$  منظور می‌گردد.

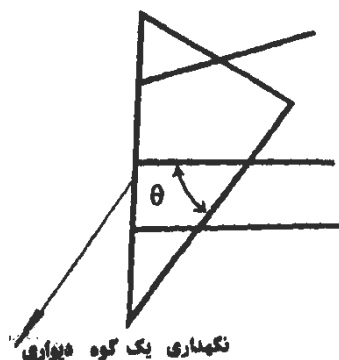
- در مواردی که محدوده گوه‌ها بخوبی قابل تشخیص است، موقعیت سنگ دوزها را باید حتی‌المقدور در حول و حوش مرکز ثقل گوه انتخاب نمود. این امر مانع از هرگونه حرکت چرخشی می‌شود که ممکن است ضریب اطمینان را کاهش دهد، (شکل ۸-۵).



شکل ۸-۵- پایدار سازی گوه‌های سقف تونل با استفاده از پیچ‌سنگ

- در مورد سنگ دوزهایی که بصورت مکانیکی محکم می‌شوند باید طول قسمت گیره سنگ دوز به حد کافی باشد تا بار ناشی از گیرش مکانیکی به نحو مناسبی توزیع گردد.

- در مورد گوه‌های کناری یا دیواره تونل‌ها، سنگ دوزها باید به گونه‌ای نصب شوند که مقاومت برشی سطوح لغزش افزایش یابد. بدین منظور باید سنگ دوزها سطوح لغزشی را قطع کنند، (شکل ۸-۶). در مواردی که امکان داشته باشد، سنگ دوزها به گونه‌ای نصب شوند که زاویه بین ۱۵ تا ۳۰ درجه باشد زیرا این امر سبب می‌شود که در سطح لغزش مقاومت برشی بیشتری القاء شود.



شکل ۸-۶- پایدار سازی گوه‌های دیواره تونل با استفاده از پیچ‌سنگ

### ۶-۳-۲- توری سیمی<sup>۱</sup>

توری سیمی شبکه فولادی می‌باشد که برای نگهداری قطعات کوچک سنگ یا بعنوان مسلح کننده شاتکریت مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از دو نوع توری سیمی در سازه‌های زیرزمینی معمول است، یکی توری بافته یا توری سرندی و دیگری توری جوش شده. در زیر به شرح مختصر این دو گروه پرداخته می‌شود.

1. Mesh

### ۱- توری بافته شده یا توری سرندی

این توری معمولاً برای حصارکشی بکار می‌رود و مرکب از سیم یا مفتول بافته است. مفتول را می‌توان برای جلوگیری از خردگی گالوانیزه کرد، و با توجه به طبیعت ساخت آن، حالت انعطاف پذیری داشته و محکم است. یک مورد از کاربرد آن در معدنکاری می‌باشد، بطوری که توری سرندی به سقف راهروهای زیرزمینی توسط سنگ دوز متصل شده می‌شود. قطعات کوچک سنگ که از سقف جدا می‌شوند توسط توری نگهداری، که بسته به فاصله نقاط تکیه گاهی می‌تواند بار قابل ملاحظه‌ای از سنگ‌های خرد شده را تحمل نماید.

توری سرندی برای مسلح کردن شاتکریت مناسب نیست، زیرا دانه‌های بتن از توری بافته شده براحتی عبور نمی‌کند. بنابراین استفاده از این نوع توری را در مسلح کردن بتن توصیه نمی‌شود. شکل (۷-۸) نمونه‌ای از توری بافته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۸- نمونه‌ای از توری بافته شده

### ۲- توری جوش شده

توری جوش شده عموماً برای مسلح کردن شاتکریت مورد استفاده قرار می‌گیرد و مرکب از شبکه‌ای مربعی از سیمهای فولادی است، که در نقاط تقاطع جوش شده‌اند. نمونه‌ای از این توری برای استفاده در کارهای زیرزمینی، شامل مفتول به قطر ۴/۲ میلیمتری است که به صورت شطرنجی به فواصل ۱۰۰ میلیمتر از یکدیگر قرار گرفته و

تحت عنوان توری  $۴/۲ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$  مشخص می‌شود و در اندازه‌های محدود و کوچک تهیه می‌شود، بطوریکه حمل و نصب آن توسط یک یا دو نفر راحت باشد. شکل (۸-۸) نمونه‌ای از توری جوش شده را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۸- نمونه‌ای از توری جوش شده

عموماً توری جوش شده توسط واشر و مهره اضافی که روی سنگ دوزها قرار می‌دهند به بدنه سنگ متصل می‌گردد. در فواصل بین سنگ دوزها نیز بر حسب لزوم توری توسط میله‌های کوتاه که به سطح سازه نصب می‌گردند، به بدنه سازه متصل می‌شود. این میله‌ها باید به تعدادی باشند که توری را هر چه بیشتر نزدیک به سطح سنگ متصل نماید. با آنکه مسئول بتن پاش ماهر می‌تواند توری را که تا فاصله ۲۰۰ میلیمتری (۸ اینچی) از سینه کار قرار گرفته بتن پاشی کند، فاصله زیاد موجب هدر رفتن بتن می‌گردد، زیرا باید آنقدر بتن پاشی ادامه یابد تا توری را کاملاً بپوشاند.

توری‌ها در مقابل پرتاب قطعه سنگ‌های ناشی از آتشکاری‌های مجاور به آسانی آسیب می‌بینند، از اینرو نصب آن را باید تا زمانی که آتشکاری تا فاصله کافی از کار دور نشده به تاخیر انداخت، یا اینکه با استفاده از پوشش‌های مقاوم در مقابل انفجار از آسیب رسیدن به توری جلوگیری نمود. قسمت‌هایی از توری که آسیب می‌بیند باید از شبکه جدا شده و با توری سالم جایگزین شود، تا بطور کافی قسمت‌های مجاور را بپوشاند و پیوستگی توری در بتن تامین شود. توری‌های جوش شده نسبت به توری‌های سرنندی از این امتیاز برخوردارند که در اثر آسیب دیدگی از هم باز نمی‌شوند.

تهیه توری‌های جوش شده گالوانیزه یا ضد زنگ مشکل بوده و لذا توری باید به اندازه کافی در داخل بتن قرار گیرد تا از خوردگی مصون بماند. همچنین باید دقت کافی مبذول گردد تا حباب‌های هوا در پشت مفتول‌ها یا در نقاط تقاطع سیم‌های شبکه تشکیل نشود. این کار با حرکت مداوم سر بتن پاش امکانپذیر است، زیرا به این ترتیب با تغییر زاویه برخورد بتن با توری کلیه حباب‌ها پر می‌شود.

### ۶-۳-۳- بتن پاشیدنی یا شاتکریت<sup>۱</sup>

ملات یا بتنی که با کمک فشار هوا در محل ریخته می‌شود را گانیت یا شاتکریت می‌نامند که به صورت فزاینده در حایل‌بندی سازه‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اساساً دو نوع شاتکریت وجود دارد، نوع اول شاتکریت با مخلوط خشک است که همانطور که از اسم آن بر می‌آید اجزای آن بصورت خشک با هم مخلوط شده و در هنگام پاشیدن روی سطح کار توسط نازل<sup>۲</sup> آب اضافه می‌شود. نوع دوم شاتکریت با مخلوط تر است که به صورت بتنی با اسلپ پایین تهیه می‌شود و سپس با نازل پمپ شده و پخش می‌گردد. در صورتیکه از شاتکریت تر استفاده می‌شود باید ماده تندگیر هنگام پاشیدن بتن در محل نازل اضافه شود. مراحل کار و فرآیندهای طی شده در تهیه هر کدام از دو نوع شاتکریت مذکور در جدول (۸-۱) با یکدیگر مقایسه شده است. انتخاب هر یک از دو روش فوق در هر پروژه بستگی به پاره‌ای ملاحظات و نکاتی خاص دارد که ارتباط مستقیمی با کیفیت محصول نهایی ندارد.

جدول ۸-۱- مقایسه شاتکریت خشک و تر

مخلوط خشک	مخلوط تر
- انطباق بیشتر با شرایط متغیر زمین دارد، بویژه وقتی که با آب مواجه می‌شود.	- هنگام پاشیدن ریخت و پاش کمتری دارد.
- وسایل و دستگاه‌های مورد نیاز در مخلوط خشک نوعاً ارزان‌تر بوده و مجموعه بیشتری از وسایل در اختیار است.	- گرد و غبار کمتر تولید می‌کند.
- ماشین‌های مخلوط خشک نوعاً کوچکتر هستند و به این ترتیب قابلیت کاربرد بیشتر در تونل‌هایی که با محدودیت فضا روبرو هستند دارند.	- کنترل نسبت آب به سیمان عملی است.
	- سهولت بیشتر در کنترل کیفی مصالح بعلت یکسانی تولید مصالح در بتن و شاتکریت.
	- نحوه اجرای شاتکریت تر احتیاج چندان به مهارت و حساسیت مامور بتن پاش ندارد، زیرا تنظیم آب بعهده وی نمی‌باشد.
	- مامور بتن پاش مستقیماً سرعت برخورد ذرات و دانه‌ها را کنترل می‌کند و بنابراین تراکم مخلوط با تنظیم جریان هوا در دهانه پخش عملی می‌شود.
	- دستگاه به آسانی تمیز می‌شود.
	- هزینه‌های نگهداری کمتر است.

### ۶-۳-۱-۱- طرح اختلاط شاتکریت

فرآیند طرح اختلاط فرآیندی طولانی و پیچیده است که شامل تهیه مقدمات کار، انتخاب مصالح، ابزار کار و تربیت گروه اجرا است. هر گونه تغییر در این فرآیند منجر به تغییر در محصول نهایی می‌گردد. پاشیدن مخلوط پس از مرحله آزمایش‌های قبل از ساخت و اجرا احتمالاً نتایج فوق‌العاده بهتری از پاشیدن همان مخلوط و قبل از انجام آزمایش خواهد داشت. هر چند باید مفروضات معینی در شروع کار برای طرح اختلاط بصورت آزمایشی انجام شود. روش کلی در طرح اختلاط برای هر دو نوع خشک و تر یکسان است، لیکن تفاوت‌های مهمی در جزئیات با هم دارند که بستگی به روش مورد استفاده دارد. هر یک از دو روش طرح اختلاط باید معیارهای زیر را تامین نماید:

1. Shotcrete  
2. Nozzle

- ۱- قابلیت پخش: باید استقرار مخلوط به محل پخش به گونه‌ای باشد که با حداقل ریخت و پاش همراه باشد.
- ۲- مقاومت اولیه و کوتاه مدت: باید به اندازه کافی مقاوم باشد تا نگهداری و حائل در مقابل زمین در طول کمتر از ۴ تا ۸ ساعت ایجاد نماید.
- ۳- مقاومت دراز مدت: با در نظر گرفتن مقدار ماده تندگیر لازم برای حصول قابلیت پخش و مقاومت اولیه، باید مقاومت ۲۸ روزه به دست آید.
- ۴- دوام: تامین مقاومت دراز مدت نسبت به محیط.
- ۵- اقتصاد: انتخاب مصالح ارزان و به حداقل رساندن ریخت و پاش.

### ۶-۳-۱-۲- انتخاب مصالح شاتکریت

در انتخاب مصالح مورد نیاز برای تهیه شاتکریت باید نکات زیر مد نظر قرار گیرند:

#### ۱- سیمان پرتلند

سیمان پرتلند تیپ I بطور گسترده در شاتکریت مورد استفاده قرار می‌گیرد، که این امر بعلت فراوانی آن بوده و عمده مشخصات مورد نیاز شاتکریت معمولی را تامین می‌کند.

سیمان پرتلند تیپ II (نسبتاً ضد سولفات) و تیپ V (شدیداً ضد سولفات) وقتی که سنگ، آب زیرزمینی یا آب اختلاط سولفاته باشد مورد نیاز است. سرعت گیرش و حصول مقاومت این دو نوع سیمان نسبتاً ملایم است.

سیمان تیپ III- بعلت ریزدانه بودن و ترکیبات موجود در آن، مقاومت فوری و اولیه زیاد ایجاد می‌کند. در حال حاضر سیمان تندگیر<sup>۱</sup> در بازار عرضه شده که محتوی فلئور و آلومینات کلسیم است. این ماده سبب می‌شود که سرعت گیرش و حصول مقاومت در چند ساعت اول زیاد شود بدون اینکه از ماده تندگیر استفاده شود. بعد از حدود یک روز، سرعت افزایش مقاومت بالا می‌رود و خواص فیزیکی شاتکریت مشابه شاتکریت ساخته شده از سیمان تیپ I است.

عموماً، در تهیه شاتکریت از سیمان تیپ I همراه با مواد تندگیر استفاده می‌شود، که این بعلت فراوانی این سیمان و انعطاف پذیری آن نسبت به تغییرات کوچک در طرح اختلاط است. باید توجه داشت که بین سیمان و ماده تندگیر سازگاری وجود داشته باشد، زیرا رفتار اولیه و نهایی شاتکریت توسط مصالح تشکیل دهنده مخلوط وقتی که با یکدیگر سازگار نباشند تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

#### ۲- مصالح سنگی

در استفاده از مصالح سنگی، شن و ماسه طبیعی به مصالح شکسته شده ترجیح داده می‌شود، زیرا این مصالح به علت گردی طبیعی خود خصوصیات پمپ پذیری بهتری دارد، از جهت دیگر، کیفیت مصالح سنگی مورد نیاز برای شاتکریت مشابه بتن معمولی با کیفیت مرغوب است. مصالح سنگی باید شسته، سخت، سفت، قوی و بادوام باشد و نباید بیش از ۲ درصد از مصالح سنگی از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ mm) عبور نماید. مصالح سنگی باید عاری از مواد

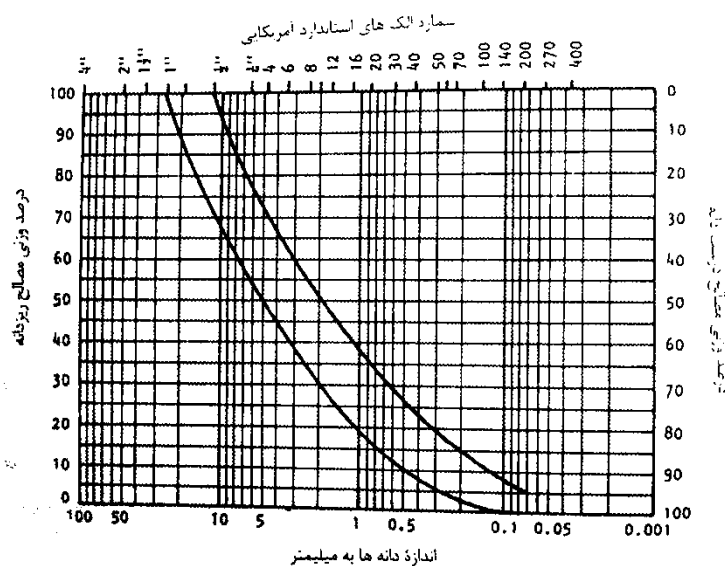
1. Regulated-set

سیلیتی و دانه‌های نرم یا پوشیده شده از مواد بوده و نیز میکا، و مواد مضر قلیایی و آلی نباید در آن یافت شود. در این خصوص باید از مصرف مصالح سنگی با واکنش‌های آلی باید اجتناب نمود.

اصولاً بزرگترین اندازه دانه‌ها نباید از یک سوم قطر لوله انتقال در باریکترین قسمت‌ها تجاوز نماید. دستگاه‌های شاتکریت که اندازه دانه‌ها تا قطر ۳۲ میلی‌متر را می‌پذیرد در بازار وجود دارند، لیکن روال معمولی این است که اندازه بزرگترین دانه‌های مورد استفاده ۱۹ میلی‌متر یا کمتر باشد.

در استفاده از شاتکریت باید دقت داشت که دانه‌بندی مصالح شاتکریت در طرح اختلاط، قابلیت پمپ شدن، جریان یافتن در داخل لوله‌های انتقال، اختلاط با آب در دهانه پخش، چسبیدن بتن به سطح مورد نظر، وزن مخصوص و اقتصادی بودن محصول نهائی از اهمیت خاصی برخوردار است.

چنانچه درصد مصالح درشت دانه افزایش داده شود، تراکم بهتر، وزن مخصوص بیشتر، نیاز به آب و سیمان کمتر، افت کمتر و مقاومت چسبندگی و خمشی بیشتری حاصل خواهد شد. در عین حال افزایش نسبت مصالح درشت دانه، پمپ کردن شاتکریت را مشکل‌تر نموده و ریخت و پاش را هنگام پخش افزایش می‌دهد. در شکل (۸-۹) حدود دانه-بندی پیشنهادی توسط رابرتز و آندریک (۱۹۷۵)<sup>۱</sup> برای نسبت ترکیب مصالح درشت‌دانه و ریزدانه مورد استفاده در شاتکریت، ارائه شده است.



شکل ۸-۹- حدود نسبت ترکیب مصالح درشت‌دانه و ریزدانه مورد استفاده در شاتکریت

### ۳- آب

آب مورد استفاده در شاتکریت باید معیارها و استانداردهای بتن معمولی را دارا باشد. آب باید تمیز و عاری از مواد غیر مجاز و مضر نفتی، چربی‌ها، نمک‌ها، مواد قلیایی و مواد آلی باشد. بطور کلی آبی که برای نوشیدن مناسب و عاری از بو و طعم خاصی باشد، برای مصرف در شاتکریت نیز مناسب است.

#### ۴- مواد تندگیر

وقتی دستیابی سریع به مقاومت اولیه شاتکریت برای ایجاد حایل فوری در مقابل سنگ مورد نیاز است، محصول- های تندگیر یا تندگیر کننده‌ها، به مخلوط اضافه می‌شوند. از مواد تندگیر به منظور بهبود شرایط پخش شاتکریت، جلوگیری از ریخت و پاش و مخصوصاً وقتی شاتکریت در قسمت‌های فوقانی و سقف اجرا می‌گردد نیز استفاده می‌شود.

کلرور کلسیم که مواد تندگیر معمولی در بتن است، گاهی در شاتکریت هم مصرف می‌گردد، لیکن در بیشتر مواقع به اندازه کافی در سازه‌های زیرزمینی سریع عمل نمی‌کند. اضافه کردن آن با نسبت ۵ درصد سرعت گیرش زیادی ایجاد می‌کند، لیکن این عمل به قیمت کاهش مقاومت نهائی و دوام بتن تمام می‌شود. بنابراین استفاده از کلرور کلسیم توصیه نمی‌شود.

تعداد زیادی مواد تندگیر مخصوص برای استفاده در شاتکریت به بازار عرضه شده است که این مواد به مراتب سریعتر از مواد معمول تندگیر مورد استفاده در بتن عمل می‌کنند. این مواد معمولاً شامل نمک‌ها محلول به عنوان عامل فعال بوده و به مهمترین آنها عبارتند از کربنات سدیم، آلومینات سدیم و هیدروکسید کلسیم. نسبت اختلاط این مواد و سایر مواد تندگیر از یک تولید کننده به تولید کننده دیگر متفاوت است، و برای ساختن مخلوط آزمایشی بعنوان شروع کار باید از مقررات و دستور العملی که سازنده ارائه می‌دهد استفاده کرد. مواد تندگیر هم به صورت مایع و هم به صورت پودر به بازار عرضه می‌شوند، به خاطر خطر اشتعال این مواد، باید در جابه‌جایی و مصرف نهائی آنها دقت کافی نمود.

برای بتن‌پاشی در قسمت‌ها بالادست یعنی سقف و بالادست دیوارها که ضخامت شاتکریت قابل ملاحظه است بطور معمول بیشتر از مواد تندگیر استفاده می‌شود. از سوی دیگر در هنگام بتن ریزی کف تونل‌ها و در قسمت‌هایی که ضخامت شاتکریت یا بتن کم است و بتن ریزی روی سنگ خشک و تمیز انجام می‌شود یا هنگامی که شاتکریت روی سطحی انجام می‌شود که بتن ریزی شده است، نیازی به استفاده از مواد تندگیر نمی‌باشد.

در پاره‌ای موارد که مقاومت دراز مدت شاتکریت در محیطی نامساعد و ناسازگار مطرح بوده و از اهمیت برخوردار است، مشخصات شاتکریت ممکن است ایجاب نماید که لایه‌های نهائی شاتکریت بدون استفاده از مواد تندگیر اجرا شود.

بطور کلی مخلوط شاتکریت معمولاً شامل نسبت‌های زیر از مصالح به صورت خشک می‌باشد:

- سیمان ۱۵-۲۰٪

- مصالح سنگی درشت‌دانه یا شن ۳۰-۴۰٪

- مصالح سنگی ریزدانه یا ماسه ۴۰-۵۰٪

نسبت آب به سیمان شاتکریت در روش خشک بین ۰/۳ تا ۰/۵ درصد است که با توجه به شرایط محلی، توسط مسئول پخش و اجرای شاتکریت تنظیم می‌گردد. در شاتکریت تر نسبت آب به سیمان بین ۰/۴ تا ۰/۶ درصد است.



## ۳-۱-۳-۶- مشخصات فنی شاتکریت

مهمترین مشخصات فنی و مهندسی مؤثر بر رفتار شاتکریت در مواردی که بعنوان حائل در سازه‌های زیرزمینی استفاده می‌شود عبارتند از مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته. در اینجا فقط مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته مورد بحث قرار می‌گیرند. وقتی از شاتکریت به عنوان عضو مؤثر حایل در زمینهای نرم و ضعیف استفاده می‌شود، دستیابی به مقاومت سریع فشاری در طول زمان ضروری است. مقدار مقاومت فشاری شاتکریت در جدول (۲-۸) ارائه شده است.

جدول ۲-۸- مقایسه مقاومت فشاری چند نوع شاتکریت

نوع	۳-۱ ساعت	۳-۸ ساعت	۱ روزه	۲۸ روزه
شاتکریت بدون مواد تندگیر	صفر	۰/۲ MPa ۳۰ lb/in <sup>2</sup>	۵/۲ MPa ۷۵۰ lb/in <sup>2</sup>	۴۱/۴ MPa lb/in <sup>2</sup> ۶۰۰۰
شاتکریت با ۱/۳ مواد تندگیر	۰/۶۹ MPa ۱۰۰ lb/in <sup>2</sup>	۵/۲ MPa ۷۵۰ lb/in <sup>2</sup>	۱۰/۳ MPa ۱۵۰۰ lb/in <sup>2</sup>	۳۴/۵ MPa lb/in <sup>2</sup> ۵۰۰۰
سیمان تندگیر مخصوص	۸/۲۷ MPa ۱۲۰۰ lb/in <sup>2</sup>	۱۰/۳ MPa lb/in <sup>2</sup> ۱۵۰۰	۱۳/۸ MPa ۲۰۰۰ lb/in <sup>2</sup>	۳۴/۵ MPa lb/in <sup>2</sup> ۵۰۰۰

اعداد جدول مذکور صرفاً جنبه راهنمای کلی دارند و نباید جایگزین مقادیر واقعی حاصل از آزمایش‌های کارگاهی گردند. همچنین مقادیر ارائه شده در این جدول نقش مطالعه و بررسی سیمان، ترکیب سیمان و مواد تندگیر جهت افزایش مقاومت شاتکریت را نشان دهد.

مدول الاستیسیته شاتکریت به میزان خیلی زیاد وابسته به مقاومت فشاری است، و همانگونه که انتظار می‌رود، با گذشت زمان روندی افزایشی هماهنگ با مقاومت فشاری دارد.

