

کاربری و طراحی فضاهای بزرگ زیرزمینی

رضا غفارزاده

شرکت مهندسی سپاسد، کارگاه سد و نیروگاه گتوند علیا

چکیده: فضاهای بزرگ زیرزمینی (مغارها) دارای کاربری‌های مختلفی هستند که بطور کلی می‌توان آنرا در پنج رده مختلف شامل نیروگاههای برق‌آبی، ذخیره سیالات، دفن فضولات هسته‌ای، سیستم‌های فاضلاب و کاربریهای متفرقه طبقه بندی کرد. اولین گام در طراحی یک فضای زیرزمینی انجام مطالعات اکتشافی است. سپس براساس اطلاعات جمع آوری شده در این مرحله، خصوصیات پروژه از جمله شکل مقطع، نوع و تعداد وسایل نگهداری و سیستم رفتارنگاری مغار تعیین می گردد. رایج ترین شکل مقطع برای مغارها، مقطعی با سقف قوسی و دیوارهای جانبی قائم است. اما در سنگ‌های بسیار ضعیف و یا وجود تنشهای برجای بالا، غالباً مقطع بیضی شکل (نعل اسبی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. وسایل نگهداری مغارها عمدتاً شامل بتن پاشیده، انواع پیچ سنگ‌ها و مهارها و در برخی موارد پوشش بتنی سقف است که با استفاده از تجربیات قبلی، قواعد تجربی، مطالعات تحلیلی، مدلسازی و مشاهده رفتار سازه طراحی می‌شود. امروزه براساس برخی مطالعات آماری انجام شده، حدود بار وارده بر وسایل نگهداری و طول مهار یا پیچ سنگ‌های لازم برای مغار را می‌توان بر حسب ابعاد مغار تعیین نمود. در طراحی پوشش بتنی سقف نیز باید به خاطر داشت که این پوشش در اعماق کم عمدتاً برای تحمل نیروی قائم و در اعماق زیاد برای تحمل نیروی افقی طراحی می‌شود. در شرایطی که لازمست چند فضای بزرگ زیرزمینی در کنار یکدیگر ایجاد شود، ابعاد دیواره حائل بین آنها را می‌توان با استفاده از مدل‌های تحلیلی تعیین کرد، اما در شرایط معمولی این فاصله برابر ارتفاع مغار بزرگتر پیشنهاد می‌شود.

۲ مقدمه

در حال حاضر در اکثر کشورهای جهان فضاهای بزرگ زیرزمینی زیادی وجود دارد که با کاربری‌های بسیار متنوعی درحال بهره‌برداری هستند. استفاده از این فضاها باتوجه به نیازهای جدید جامعه بشری (نظیر دفن زباله‌های هسته‌ای) روبه گسترش است. این مقاله که با هدف آشناسازی بیشتر اهل فن با اینگونه حفاریها ارائه می گردد در دویخش کلی تدوین یافته است. ابتدا مزایا و عده موارد کاربری فضاهای بزرگ زیرزمینی در پنج گروه مختلف تشریح شده و در رابطه با هریک از موارد اطلاعاتی از شاخص ترین پروژه‌های انجام شده در کشورهای جهان در آن زمینه ارائه شده است. دربخش دوم که به مسائل طراحی فضاهای بزرگ زیرزمینی از دیدگاه مکانیک سنگ اختصاص دارد، نتایج آخرین تحقیقات آماری انجام شده در رابطه با مسائل مورد بحث ارائه گردیده است.

۳ کاربری فضاهای بزرگ زیرزمینی

طی یک قرن اخیر و همزمان با پیشرفت دانش بشری در عرصه‌های گوناگون و بوجود آمدن نیازهای جدید، ایجاد و استفاده از فضاهای بزرگ زیرزمینی (مغارها) نیز روبه افزایش گذاشته است. پایین‌تر بودن هزینه‌های اولیه و عملیاتی نسبت به ایجاد تاسیسات در سطح زمین، فراغت از مسائل

توپوگرافی و عدم محدودیت در استفاده از فضا، ایمنی مناسب در مقابل حوادث طبیعی و حملات هوایی، امنیت در برابر سرقت و خرابکاری و بالاخره پایین بودن هزینه‌های سرمایش و گرمایش از جمله مزایایی است که باعث رویکرد به استفاده از فضاهای بزرگ زیرزمینی در عرصه‌های گوناگون شده است (جدول ۱).

جدول ۱ - مزایای استفاده از فضاهای زیرزمینی (Carmody & Sterling, 1993)

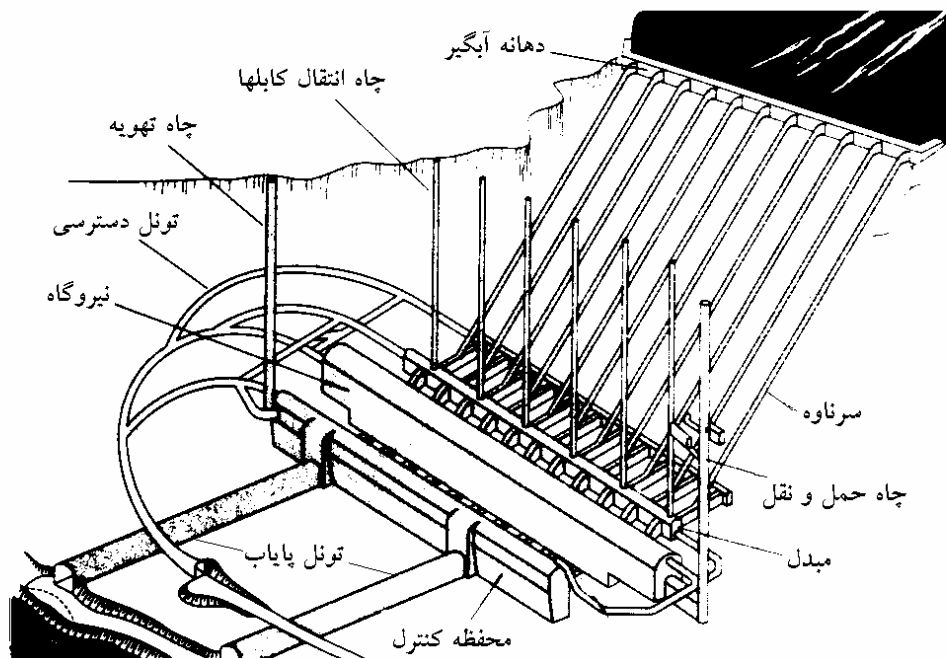
صرفه جویی هزینه تهیه زمین (بهخصوص در مناطق شهری) صرفه جویی هزینه طراحی برای شرایط خاص عدم تأثیر شرایط آب و هوایی بر عملیات ساخت فروش مصالح حاصل از حفاری (در صورتیکه نوع و کیفیت مصالح قابل استفاده باشد)	هزینه‌های اولیه (ایجاد فضای زیرزمینی)
پائین بودن میزان مصرف انرژی بدلیل شرایط تقریباً ثابت دما و رطوبت پایین بودن بیمه تأسیسات زیرزمینی	هزینه عملیاتی (حین بهره‌برداری)
آزاد بودن از قید و بند توپوگرافی سطح زمین و شرایط خاص آب و هوایی باز بودن دست طراح در هر سه جهت اصلی بدلیل عدم محدودیت	طراحی
نمای نازیبای تأسیسات در سطح نمایان نیست بدلیل عدم نمایان شدن نمای تأسیسات نیازی به طراحی نما نیست	معماری
عدم شناسایی تأسیسات موجود در داخل فضای زیرزمینی از سطح زمین و ایمنی در برابر حملات هوایی، موشکی و هسته‌ای (بهخصوص در کاربردهای نظامی) امنیت بالا در مقابل سرقت، خرابکاری و ... بدلیل محدود بودن راههای دسترسی ایمنی در برابر خطرات طبیعی نظیر طوفان، صاعقه، بارانهای اسیدی و ... ایمنی در مقابل سرایت آتش‌سوزی بدلیل محدود بودن راههای دسترسی و سهولت کنترل	ایمنی
ثابت بودن تقریبی دما و رطوبت عدم انتقال صوت از داخل فضا به محیط بیرون و برعکس و در نتیجه عدم محدودیت در ساخت تأسیسات گوناگون در مجاورت یکدیگر (مثلاً ایستگاه مترو در کنار بیمارستان) عدم آلودگی محیط اطراف با مواد سمی یا هسته‌ای که در داخل مغار نگهداری می‌شوند	انزوا از محیط بیرون

دامنه کاربری مغارها بسیار متنوع است. از مراکز شهری و خدماتی نظیر بیمارستان و ورزشگاه گرفته تا نیروگاههای برق‌آبی و مخازن ذخیره هیدروکربنهای نفتی از جمله مواردی است که تاکنون در فضاهای زیرزمینی احداث شده‌اند (جدول ۲). در مجموع می‌توان اصلی‌ترین کاربری مغارها را در پنج گروه شامل نیروگاههای برق‌آبی و تلمبه ذخیره‌ای، ذخیره سیالات، مخازن دفن فضولات هسته‌ای، سیستم‌های فاضلاب و آبهای هرز و کاربری‌های متفرقه دسته‌بندی نمود.

یک نیروگاه برق آبی زیرزمینی عمدتاً شامل یک مغار اصلی است که آب از طریق تونل یا چاه به توربین‌های واقع در آن انتقال یافته و سپس از طریق تونل پایاب به مسیر رودخانه باز می‌گردد. تونل دسترسی به مغار نیروگاه، مغار مبدل جهت نصب تاسیسات الکتریکی و در برخی موارد مخازن ضربه گیر، که برای جلوگیری از وارد شدن ضربه آب به دریچه توربین‌ها ایجاد می‌شود، از دیگر حفاریهای جانبی این نیروگاهها است (شکل ۱).

جدول ۲ - موارد کاربرد فضاهای بزرگ زیرزمینی

رده بندی	موارد بکار رفته تاکنون
شهری - خدماتی	بیمارستان، مراکز بایگانی اسناد، فروشگاه، مراکز مخابراتی، انبارکالا و موادغذایی، تعمیرگاه کشتی، ایستگاه مترو، پارکینگ وسائط نقلیه
فرهنگی - هنری	موزه، کتابخانه، فرهنگسرا، سالن نمایش (سینما و تئاتر)
ورزشی	مجموعه‌های ورزشی برای بازیهای سالنی (هاکی، والیبال و ...)، استخر شنا و سونا
نظامی	پناهگاه، آشیانه هواپیما، انبار تسلیحات و مواد منفجره، پارکینگ زیر دریایی، مراکز حساس نظامی نظیر سیستم‌های کامپیوتری، پایگاه دریایی
نیروگاه و ذخیره انرژی	نیروگاه برق آبی، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، ذخیره هوای فشرده، انرژی ابر رسانا و آب داغ
ذخیره سیالات	مواد سوختی (نفتی)، گازها (بصورت مایع شده یا تحت فشار)، آب آشامیدنی
دفن فضولات و فاضلاب	فضولات سمی، غیر سمی و هسته‌ای، سیستم‌های فاضلاب و عمل آوری آبهای زیرزمینی



شکل ۱ - نمایی از یک نیروگاه برق آبی زیرزمینی (Carmody & Sterling, 1993)

اولین نیروگاه برق آبی زیرزمینی جهان نیروگاه Snoqualmie Falls آمریکاست که طی سالهای ۹۹-۱۸۹۸ احداث شده است. مغار این نیروگاه دارای ابعاد $۹ \times ۱۲ \times ۶۱$ متر است که در عمق ۸۲ متری سنگهایی از جنس بازالت حفر شده است (Lang, 1988). رویکرد اصلی به ساخت نیروگاههای برق آبی زیرزمینی عمدتاً بعد از جنگ جهانی دوم اتفاق افتاده بطوریکه پس از این تاریخ بیش از هزار نیروگاه از این نوع تنها در قاره اروپا احداث شده است. اولین نیروگاه برق آبی زیرزمینی در کشور ما در سال ۱۳۴۲ در سد دز احداث شده است. ابعاد مغار این نیروگاه $۳۵ \times ۱۸ \times ۷۶$ متر است که در کنگلومرای سازند بختیاری حفر شده و تا این زمان نیز همچنان در حال بهره برداری است. طی ده سال اخیر نیز در سدهای مسجد سلیمان، کارون ۳ و شهید عباسپور (طرح توسعه) نیروگاههای برق آبی زیرزمینی احداث شده است.

نوع دیگری از این نیروگاهها، نیروگاه تلمبه ذخیره ای (Pumped Storage) است که برای پاسخگویی به نیازهای کوتاه مدت انرژی و متعادل کردن میزان تولید و مصرف برق در طول شبانه روز احداث می شود. این نیروگاهها شامل مخازن بالایی، پایینی و ایستگاههای تولید و پمپاژ در حفاصل بین دو مخزن هستند. در زمان بالا بودن تقاضای برق، آب از مخزن بالایی توسط تونل یا چاه تحت فشار به محل توربین ها (ایستگاه تولید) منتقل شده و سپس به مخزن پایینی می ریزد و برق تولیدی در این مدت زمان وارد شبکه سراسری مصرف خواهد شد. در زمان پایین بودن تقاضا، با استفاده از برق شبکه سراسری، آب ذخیره شده در مخزن پایینی به مخزن بالایی تلمبه خواهد شد تا برای تولید برق در زمان اوج مصرف، آب کافی در مخزن بالایی موجود باشد. بسته به شرایط توپوگرافی و عمق و کیفیت سنگ ساختمانی، آرایش تاسیسات این نیروگاهها تغییر کرده و مخازن آن می تواند سطحی یا زیرزمینی باشد، اما در هر حال ایستگاههای تولید و پمپاژ در داخل مغارهای زیرزمینی خواهد بود (Franklin & Dusseault, 1991). پروژه سیاه بیشه از جمله نیروگاههای تلمبه ذخیره ای است که قرار است در کشور ما احداث شود اما تاکنون به دلایل مختلف عملیات اجرایی آن نیمه کاره باقی مانده است.

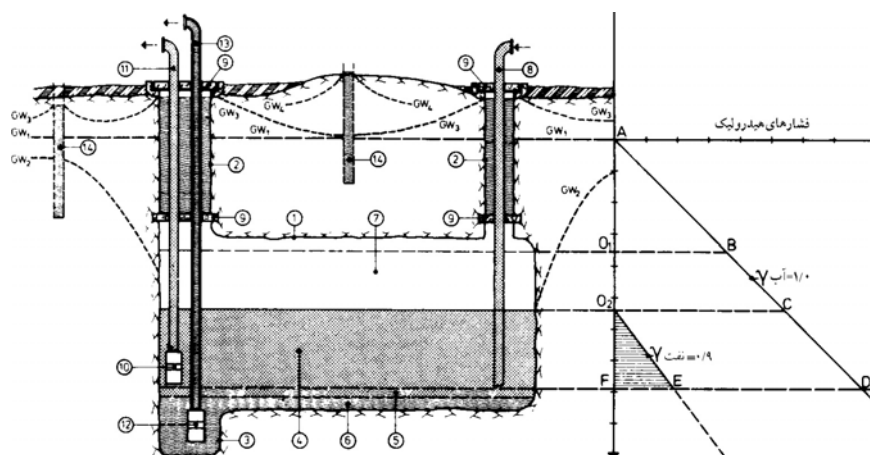
۳-۲-۱ ذخیره مواد نفتی

از جمله کاربری‌های گسترده مغارها، ذخیره مواد نفتی است. برای ایجاد چنین مغارهایی لازم است سطح آب زیرزمینی محل بالا بوده و سنگهای دربرگیرنده مغار ضمن نفوذپذیری کم، در برابر حرارت، فشار و خواص شیمیایی سیال ذخیره شده مقاوم باشند. تحمل این شرایط تنها بدلیل وضعیت خاصی است که ذخیره مواد نفتی ایجاد می‌کند. بطور مثال برای خارج کردن نفت خام سنگین از داخل انبارها به دمایی حدود 80°C نیاز است تا پمپاژ امکان پذیر باشد. نمونه ای از این نوع مغارها در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز مشخص است مغار در زیر سطح ایستابی ایجاد شده و وضعیت آب زیرزمینی در اطراف مغار از طریق چاههای کناری کنترل می شود. در داخل مغار نیز باتوجه به تفاوت وزن مخصوص، مواد نفتی بر روی بستری از آب قرار گرفته و مقادیر هر یک از این دو مایع توسط پمپ و لوله های ورودی و خروجی قابل کنترل است.

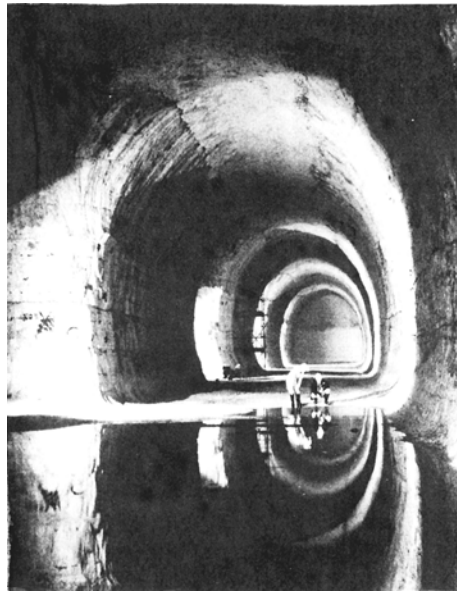
ذخیره مواد نفتی در مغارها در کشورهای حوزه اسکاندیناوی بسیار معمول است. بعنوان نمونه ای جالب از این نوع می توان به مجموعه Neste Oy Poorvo در کشور فنلاند اشاره کرد که از ۳۵ مغار به ظرفیت کلی ۵/۲ میلیون مترمکعب تشکیل شده است. این مغارها بتدریج طی سالهای ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۲ در ۲۲ واحد مجزا در سنگهایی از جنس گرانیت و گنیس حفر شده و مواد نفتی بدون به کارگیری پوشش داخلی خاص در مغارها ذخیره شده اند (Johansson, 1986).

۳-۲-۲ ذخیره گاز

برای ذخیره گاز طبیعی به شکل اقتصادی، می بایست آنرا فشرده ساخته و یا سردکرد. بدین صورت بسیاری از هیدروکربن های گازی را می توان به شکل مایع در حفاری های زیرزمینی انبار نمود. از آنجا که رسیدن به دماهای بسیار پائین در زیر زمین آسان تر از تاسیسات سطحی امکان پذیر است، لذا ذخیره سازی این مواد در مغارها کاملاً به صرفه بوده و تنها تمهیدات لازم، پوشاندن دیوارها بالایه ای از مواد نشت ناپذیر - نظیر اسفنج های پلاستیکی - است. شکل ۳ نمونه ای از مغارهای ذخیره پروپان که در کشور فرانسه مورد بهره برداری قرار گرفته است را نشان می دهد (Maurry, 1977).



شکل ۲ - ذخیره مواد نفتی در مغارها (Johansson, 1986)



شکل ۳ - مغار ذخیره پروپان در کشور فرانسه (Maurry, 1977)

روش دیگر ذخیره گازهای طبیعی، تحت فشار قرار دادن آنها در یک فضای محبوس زیرزمینی است. بعنوان مثال در منطقه انتاریوی جنوبی در کشور کانادا، در فصل تابستان مقادیر بسیار زیادی گاز را در عمق ۸۰۰ متری منطقه‌ای آهکی ذخیره کرده و سپس در زمستان به مصرف می‌رسانند (Franklin & Dusseault, 1991).

۳-۲-۳ ذخیره آب

از جمله کاربری دیگر مغارها ذخیره آب با مصارف شرب یا صنعتی است. آب آشامیدنی ذخیره شده در حفاریهای زیرزمینی، برخلاف مخازن سطحی که دائماً درخطر آلودگیهای جوی و غیره قرار دارند، به آسانی ذخیره شده و علاوه بر آن بدلیل شرایط خاص زیرزمین، دمای آن نیز تقریباً ثابت می‌ماند و از این رو نسبت به مخازن سطحی ارجحیت دارد. بعنوان مثال در کشور نروژ برای تامین آب آشامیدنی شهر Kristiansund دو مغار با حجم کلی ۱۶۰۰۰ متر مکعب در سنگهایی از نوع گنیس حفر شده که هزینه نگهداری آنها ۲۵-۲۰ درصد کمتر از انبارهای مشابه سطحی است.

ذخیره آب در مغارها با اهداف دیگری نیز صورت می‌گیرد. مثلاً در کشور سوئد دو مغار با ظرفیت ۱۲۰۰۰۰ متر مکعب جهت ذخیره آب گرم احداث شده است. بدین صورت که درطول تابستانهای طولانی منطقه اسکاندیناوی، آب این مغارها توسط گیرنده‌های تابش خورشیدی گرم شده و درطول زمستان از حرارت آن جهت گرم کردن منازل، ادارات و غیره استفاده می‌شود (Franklin & Dusseault, 1991).

۳ - ۳ مخازن دفن فضولات هسته ای

طی قرن اخیر با افزایش تعداد نیروگاههای هسته‌ای و کارخانجات اسلحه سازی، مسأله فضولات هسته‌ای به یک معضل تبدیل شده است. امروزه یکی از راه حل‌های این موضوع استفاده از معادن زیرزمینی عمیق و متروک یا ایجاد فضاهاى زیرزمینی است. اولین تاسیسات زیرزمینی مجهز برای دفن زباله‌ها و نگهداری سوخت مصرفی نیروگاههای هسته‌ای، پروژه CLAB است که توسط سوئدیه‌ها ایجاد شده و دانش فنی آن نیز به نام این کشور ثبت گردیده است. این تاسیسات شامل یک مغار اصلی به ابعاد ۲۷×۲۱×۱۱۷ متر است که در عمق ۳۰ متری سنگهای گرانیتی ایجاد شده و فضولات هسته‌ای را می‌توان

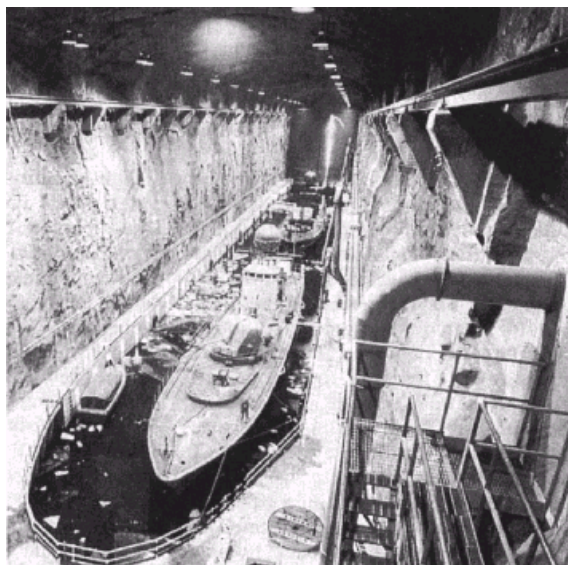
پیش از دفن دائم ۳۰ تا ۴۰ سال در آن نگهداری کرد. سنگهای دربرگیرنده این مغار با تزریق دوغاب سیمان آب بندی شده‌اند و سیستم نگهداری آن شامل پیچ‌سنگ و بتن پاشیده به ضخامت ۵-۱۰ cm است. فضولات هسته‌ای در داخل حوضچه‌های آب نگهداری شده و فضای بین این تاسیسات و دیوارهای مغار بطور دائم تهویه و زهکشی می‌شوند تا میزان رطوبت، دما و گرد و غبار آن تحت کنترل باشد. تاسیسات عظیم دیگری نیز در این کشور بنام S.F.R در عمق ۶۵ متری زیر بستر دریا در حال احداث است که شامل انباری به ظرفیت ۴۳۰۰۰۰ مترمکعب برای نگهداری فضولات هسته‌ای است (Carlsson & Christianson, 1988).

سیستم های فاضلاب و آبهای هرز ۴ - ۳

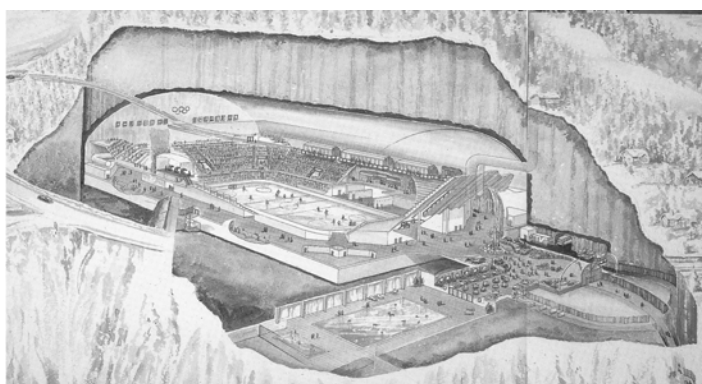
در مناطق شهری، تصفیه فاضلابها و آبهای هرز معمولاً در سطح زمین صورت می‌گیرد که مشکلاتی را از نظر اشغال فضای زیاد، منظر نامناسب و بوی نامطبوع بوجود می‌آورد. امروزه با ایجاد تاسیسات زیرزمینی سعی بر آن است تا کل عملیات جمع‌آوری و تصفیه فاضلابها و آبهای هرز در زیر زمین انجام گیرد. بعنوان یک مثال جالب می‌توان از پروژه TARP در شیکاگوی آمریکا نام برد که بزرگترین پروژه سیلاب و فاضلاب دنیاست. این تاسیسات در عمق ۱۰۰ متری سنگهایی از جنس دولومیت حفاری شده و شامل ۲۱۰ km تونل به قطر ۲/۷ تا ۱۱ متر، ۲۵۲ چاه قائم، مخازن زیرزمینی به حجم ۲/۵ میلیون مترمکعب و ایستگاههای پمپاژ زیرزمینی به ابعاد ۸۴×۱۹×۲۹ متر است (Cikanek & Goyal, 1986).

کاربری های متفرقه ۵ - ۳

بالا رفتن قیمت زمین و محدودیتهای زیست محیطی اعمال شده برای ساخت و ساز در مناطق شهری از یکسو و مزایای استفاده از مغارها که قبلاً بدان اشاره شد، باعث شده است تا بخصوص در نیم‌قرن اخیر، شماری از اماکن و تاسیسات با کاربریهای مختلف در فضاهای زیرزمینی احداث شوند. سالنهای ورزشی، فروشگاه، ایستگاههای مترو، سالن تعمیرات کشتی‌ها (شکل ۴) و غیره از جمله این کاربری‌هاست. از جمله نمونه‌های بسیار جالب از این نوع کاربری‌ها مجموعه ورزشی Gjovik در کشور نروژ است که بازیهای المپیک زمستانی سال ۱۹۹۴ در آن برگزار گردید (شکل ۵). این مجموعه دارای استخر شنا، سالن ارتباطی و سال اصلی به ابعاد ۹۱×۶۱×۲۴ متر با ظرفیت ۵۰۰۰ نفر تماشاگر است که برای برگزاری مسابقات هاکی روی یخ ایجاد شده است. جنس سنگ این محل گنیس و براساس طبقه بندی Q دارای کیفیت ضعیف تا خوب است. عملیات حفاری این مجموعه زیرزمینی در حدود دو سال طول کشیده و حفر و احداث آن مجموعاً ۲۰ میلیون دلار هزینه در برداشته است (Bhasin, Barton & Loset, 1993).



شکل ۴ - تاسیسات زیرزمینی نیروی دریایی سلطنتی سوئد در شهر Musko



شکل ۵ - مجموعه ورزشی Gjovik در کشور نروژ (Bhasin, Barton & Loset, 1993)

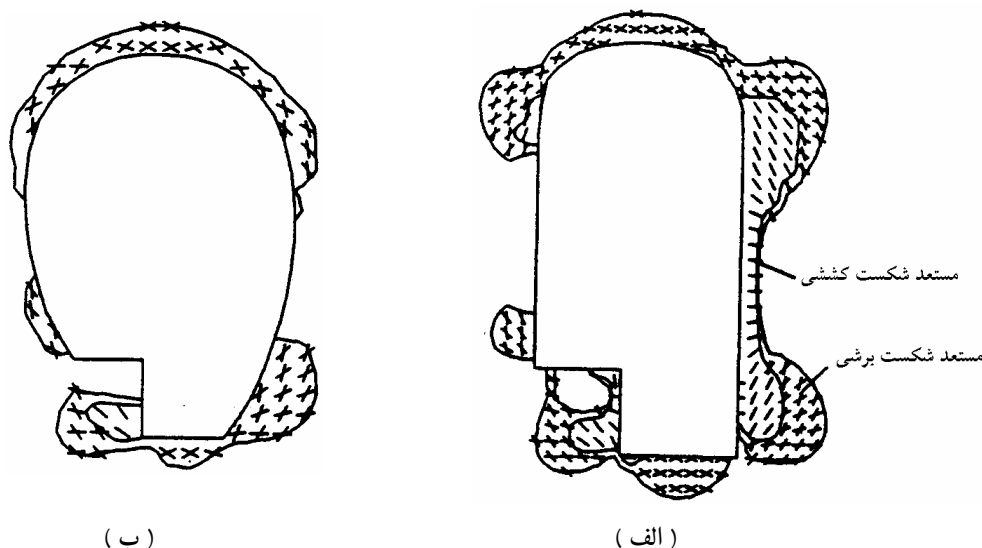
۴ طراحی فضاهای بزرگ زیرزمینی

طراحی یک پروژه زیرزمینی فرآیندی است که مراحل متنوعی را شامل شده و تخصص‌های گوناگونی در طراحی آن دخیل خواهند بود. بطور مثال در طراحی یک نیروگاه برق‌آبی زیرزمینی، کار مشترک توسط مهندسين برق، هیدرولیک و عمران انجام می شود تا تعداد و ابعاد فضاهای زیرزمینی مورد نیاز، باتوجه به کاربری آنها تعیین گردد. سپس مهندسين زمین شناسی و مکانیک سنگ تعیین مکان، شکل مقطع و سیستم نگهداری فضاهای زیرزمینی را برعهده خواهند گرفت. دراین بخش به جنبه هایی از طراحی یک فضای زیرزمینی از دیدگاه مکانیک سنگ اشاره خواهد شد.

۴ - ۲ انتخاب شکل مغار

بطور کلی شکل مقطع مغار می‌بایست بگونه‌ای انتخاب شود که هزینه حفاری و سیستم نگهداری مورد نیاز را به حداقل برساند. بعلاوه از نظر حجم، فضای درنظر گرفته شده را فراهم کرده و با تاسیسات

و امکاناتی که بعدها در آن نصب یا اجرا خواهد شد همخوانی داشته باشد. در توده سنگهای مقاوم، مقطع مرسوم برای مغارها اکثراً شبیه به شکل ۶- الف است. در این مقطع سقف قوسی تامین کننده پایداری سنگهای بالایی است و دیوارهای کناری نیز بسادگی بروش پله برداری حفاری و آتشیاری خواهند شد. در سنگهای سست و بخصوص وجود تنش برجای افقی زیاد، دیوارهای بلندکناری بداخل خم شده و شکست کششی اتفاق می افتد. در چنین شرایطی شکل مقطع مناسب بیضی یا تخم مرغی است. همانطور که در شکل ۶- ب مشاهده می شود در این حالت خطر شکست کششی در دیوارها حذف و بطور کلی ابعاد مناطق مستعد شکست کاهش می یابد. اما در این حالت مشکل انطباق تاسیسات داخلی با فضای حفاری شده وجود دارد. علاوه بر آن حفر دیوارهای منحنی شکل صعوبت بیشتری داشته و در مجموع هزینه و زمانی که صرف ساخت مغارهای تخم مرغی می شود بیش از حالت قبل است. لذا معمولاً در مناطقی که مسأله پایداری مشکلات حاد و غیر قابل جبرانی نداشته باشد حتی در سنگهای سست نیز با لحاظ کردن تمهیدات نگهداری مناسب شکل مقطع اول برگزیده می شود (Hoek & Moy, 1993).



شکل ۶ - شکل مقطع مرسوم برای مغارها (Hoek & Moy, 1993)

۳-۴ طراحی سیستم نگهداری

هدف از نصب سیستم نگهداری در یک فضای زیرزمینی، کمک به توده سنگ جهت حفظ خود به بهترین حالت ممکن است. تعیین نوع و مقادیر نگهداری نیز اصولاً با بررسی مقایسه‌ای روشهای ذیل انجام می گیرد:

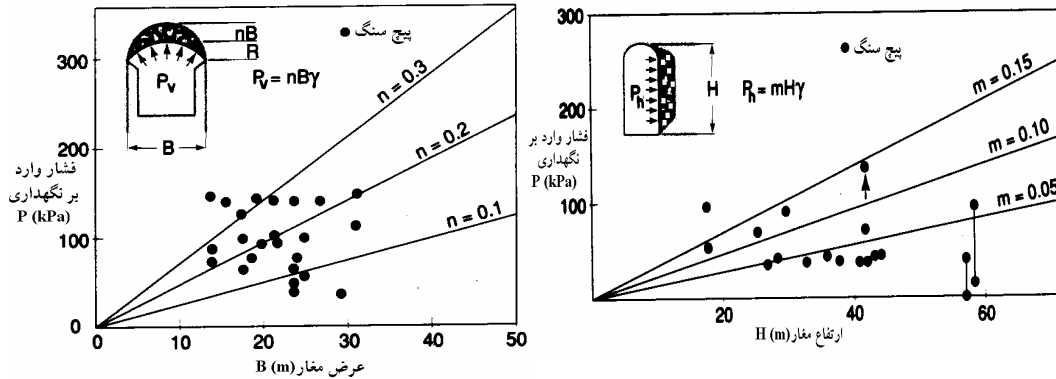
الف - تجربیات قبلی (بررسی وضعیت پروژه‌های مشابه) ب- قوائد تجربی (نظیر روشهای RMR و Q)

ج - مطالعات تحلیلی و مدلسازی (بخصوص روش F.E.M) د- مشاهده رفتار سازه (نتایج ایزار بندی)

از آنجا که روشهای فوق الذکر در اکثر کتابهای تونلسازی و مکانیک سنگ بطور مفصل تشریح شده‌اند لذا در این بخش تنها به نتیجه چند تحقیق جالب آماری در رابطه با نگهداری مغارها اشاره می شود.

۴-۳-۱ بار وارد بر سیستم نگهداری

طی یک تحقیق جامع، Cording و همکارانش میزان بار وارده بر سیستم نگهداری و مقادیر جابجایی رخ داده در تعدادی از مغارهای بزرگ احداث شده را مورد بررسی قرار داده‌اند که ماحصل این تحقیق، بیان فشار وارد بر وسایل نگهداری (عمدتاً شامل پیچ سنگ و مهارهای پیش تنیده) به شکل توابعی از عرض و ارتفاع مغار است (شکل ۷).



شکل ۷ - فشار وارد بر وسایل نگهداری در مغارها (Cording, Hendron & Deere, 1988)

این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش ابعاد مغار، فشار وارد بر سیستم نگهداری افزایش یافته و می‌بایست پیچ سنگهای طولی‌تری بکار رود. طول پیچ سنگهای مورد نیاز در سقف قوسی شکل بین ۰/۲ تا ۰/۴ عرض مغار و در دیوارهای مسطح کناری بین ۰/۱ تا ۰/۵ ارتفاع مغار در حال تغییر است. روابط زیر نیز بار وارد بر وسایل نگهداری را تعیین می‌کنند:

$$P_v = n \cdot B \cdot G$$

$$P_h = m \cdot H \cdot G$$

در این رابطه ها P_v و P_h فشار وارد بر سقف و دیوارها، G وزن حجمی سنگ و n و m ضرائب تجربی هستند که برحسب کیفیت سنگ بترتیب بین ۰/۱ تا ۰/۳ و ۰/۵ تا ۰/۱۵ در حال تغییرند. لازم به ذکر است که این تحقیق بر روی مغارهایی با کیفیت سنگ متوسط تا عالی و میزان تنش بر جای متوسط انجام شده و نتایج آن قابل استفاده در مناطق با سنگ سست و تنش بر جای زیاد نیست (Cording, Hendron & Deere, 1988).

۴-۳-۲ پیچ سنگها و کابلهای مهار شده

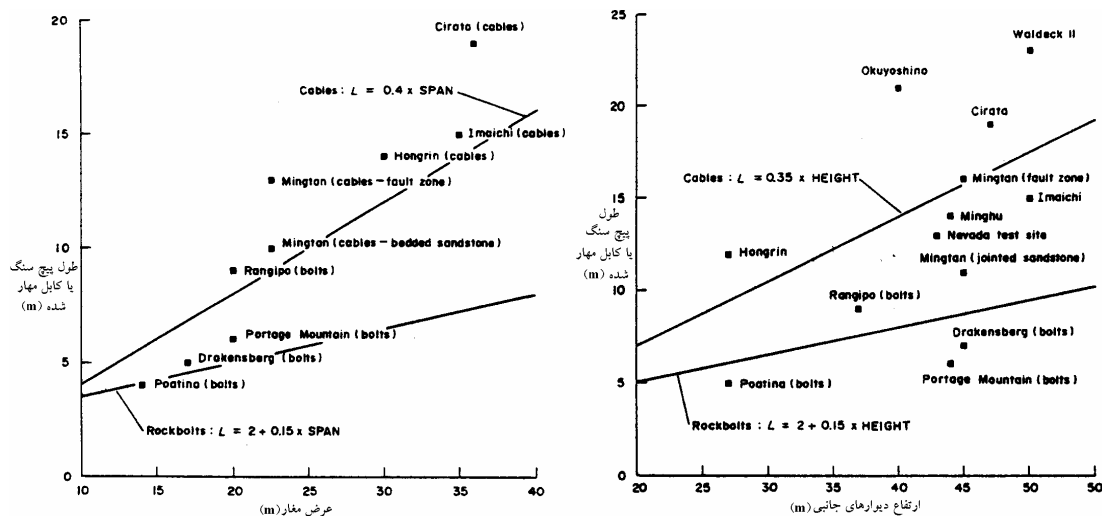
از جمله وسایل نگهداری بسیار معمول در مغارها پیچ سنگها هستند که عموماً ارزانه‌ترین و مؤثرترین شیوه نگهداری فضاهاى زیرزمینی محسوب می‌شوند. طراحی خصوصیات پیچ سنگهای مورد نیاز یک فضای زیرزمینی با استفاده از روش های معمول که در بخش ۲-۳ بدان اشاره شد انجام می‌شود، اما در زمینه تحقیقات آماری انجام شده در این زمینه می‌توان به مطالعات انجام شده توسط Barton اشاره کرد. در این تحقیق که با بررسی چندین مغار نیروگاه در مناطق سست به انجام رسیده است، طول کابلهای مهار شده و پیچ سنگها براساس عرض مغار و ارتفاع دیوارها و بصورت زیر تعیین می‌شوند (شکل ۸):

$$\text{سقف:} \quad \text{عرض مغار (متر)} \times ۰/۱۵ + ۲ = \text{طول پیچ سنگ}$$

$$\text{عرض مغار (متر)} \times ۰/۴ = \text{طول کابل مهار شده}$$

$$\text{دیوارها:} \quad \text{ارتفاع دیوار (متر)} \times ۰/۱۵ + ۲ = \text{طول پیچ سنگ}$$

$$\text{ارتفاع دیوار (متر)} \times ۰/۳۵ = \text{طول کابل مهار شده}$$



شکل ۸ - رابطه طول پیچ سنگ و کابل مهار شده با ابعاد مغار (Barton, 1989)

انتخاب فواصل در این حالت براساس ملاحظات زیر انجام می گیرد :

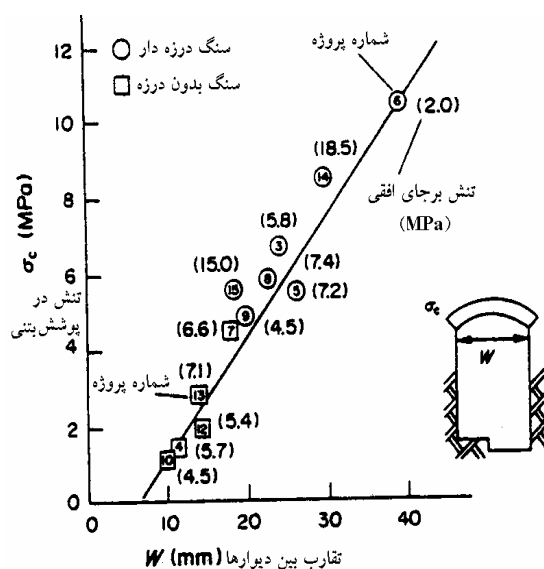
الف - برای اطمینان از اینکه پیچ سنگها یا کابلهای مهار شده با یکدیگر برهم کنش داشته و توده سنگ را به شکلی یکپارچه تقویت می کنند، فاصله داری می بایست کمتر از نصف طول آنها باشد.

ب - برای فشار نگهداری P و بار عملیاتی T ، یک الگوی مربعی با فاصله داری $S = (T/P)^{0.5}$ پیشنهاد می شود که در صورت نیاز به ظرفیت بیشتر (در سنگهای بسیار ضعیف) فاصله داری وسایل نگهداری کمتر شده و یا در مرکز شبکه طراحی شده اقدام به نصب پیچ سنگ یا کابل مهار شده خواهد شد. بطور کلی شبکه رایج برای پیچ سنگها $1/5 \times (3-1)$ متر و برای کابلهای مهار شده $2 \times (3-1)$ متر است که به شکلی گسترده مورد استفاده قرار می گیرد (Barton, 1989).

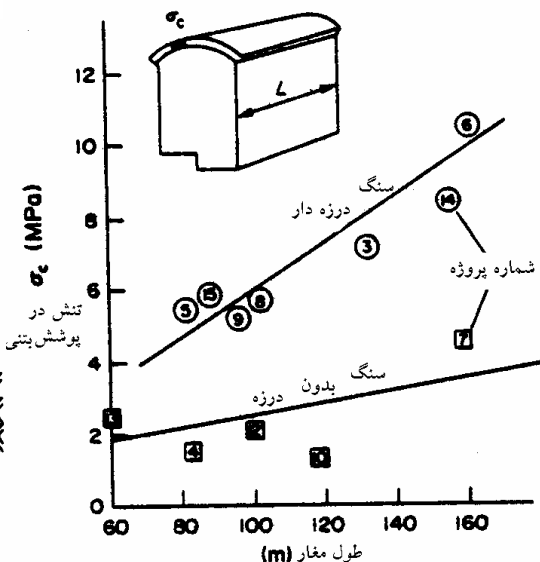
۳-۳-۴ پوشش بتنی سقف

یکی از روشهای نگهداری سقف مغارها که بخصوص در گذشته بیشتر مرسوم بوده است، استفاده از یک پوشش یکپارچه بتن مسلح در سقف است که در طرفین خود به سنگهای کناری تکیه کرده و بار سقف را به دیوارهای مجاور منتقل می کند. Hibino و Motojima چندین مغار نیروگاه در کشور ژاپن را مورد مطالعه قرار داده و با بررسی رفتارنگاری انجام شده در طی عملیات حفاری به نتایج جالب توجهی دست یافته اند که یکی از آنها میزان تنش در پوشش بتنی سقف است.

در شکل ۹- الف رابطه بین متوسط تنش در پوشش بتنی سقف (متوسط تمام اندازه گیریهای در محل) و تقارب بین دیوارهای جانبی مغار، بر اساس این تحقیق نشان داده شده است. مطابق این شکل حین حفر مغار و همزمان با پایین رفتن کف آن، دیوارهای جانبی به سمت داخل تمایل پیدا کرده و همین عامل موجب وارد آمدن فشار افقی به پوشش بتنی و ایجاد تنش در آن می گردد. شکل ۹- ب ارتباط بین این تنش با طول مغار را نشان داده و خود حاوی دو نکته است. اول آنکه میزان تنش همگام با افزایش طول مغار بیشتر می شود. دوم آنکه میزان تنش در پوشش بتنی سقف در سنگهای درزه دار ۲ تا ۳ برابر میزان آن در سنگهای بدون درزه است (Hibino & Motojima, 1993).



(الف)



(ب)

شکل ۹ - رابطه میزان تنش در پوشش بتنی سقف با طول و تقارب بین دیوارهای مغار

(Hibino & Motojima, 1993)

۴ - ۴ ابعاد دیواره حائل بین حفاریها

در بسیاری از پروژه‌های زیرزمینی به بیش از یک مغار نیاز است. بطور مثال در یک نیروگاه برق آبی در کنار مغار نیروگاه، یک مغار کوچکتر و موازی با مغار اول بنام مغار مبدل احداث می شود تا تجهیزات الکتریکی را در آن نصب کنند. در چنین شرایطی مهندسين برق تمایل بسیاری به نزدیکی هرچه بیشتر دو مغار به یکدیگر دارند تا طول میله های توزیع که مولدها را به مبدلها متصل می کنند کاهش یابد. در مورد سایر پروژهها نیز ممکن است برای کاستن از میزان حفاریهای بین مغارها این تمایل وجود داشته باشد. اما نزدیک کردن دو فضای بزرگ زیرزمینی، شرایط تنش نامطلوبی را درحد فاصل بین آن دو ایجاد خواهد کرد، لذا بررسی موضوع از نقطه نظر پایداری از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از عمومی ترین روشهایی که امروزه برای بررسی این موضوع مورد استفاده قرار می گیرد، مدلسازی کامپیوتری فضاهای زیرزمینی است. بدین ترتیب که با ایجاد مدلی مناسب از حفاریها و اعمال شرایط محیطی (در حد قابلیت برنامه کامپیوتری) به مدل ایجاد شده، می توان وضعیت تنشها و ضرایب ایمنی را در مناطق گوناگون اطراف مغارها پیش بینی نمود. بطور کلی براساس نتایج بررسی های انجام شده بر روی مغارهای احداث شده، پیشنهاد می شود که عرض دیواره حائل بین دو مغار در سنگهای سست حداقل یک برابر و در سنگهای بسیار سست حداقل ۱/۵ برابر ارتفاع مغار بزرگتر طراحی شود. در مناطقی با کیفیت خوب و سنگ مستحکم این فاصله می تواند کمتر از ارتفاع مغار بزرگتر نیز باشد (Hoek. & Moy, 1993).

در ایران تنوع حفاریهای زیرزمینی انجام شده از نظر کاربری بسیار محدود بوده و عمده حفاریهای زیرزمینی انجام شده را تونل‌های راه و راه آهن تشکیل می دهند. هرچند طی دهه اخیر چند نیروگاه برق آبی که دارای نیروگاههای زیرزمینی است احداث شده است، اما در مجموع تجربه طراحی و اجرای فضاهای بزرگ زیرزمینی در کشور ما وضعیت مطلوبی ندارد. با توجه به مزایای استفاده از فضاهای زیرزمینی نسبت به ابنیه و تاسیسات سطحی و نیز نوع نیازهای آتی بشر، قطعاً در آینده شاهد احداث مغارهای بیشتر در کشور خواهیم بود. از آنجا که بسته به کاربری هر مغار، نکات و ظرایف پیچیده ای در طراحی فضاهای بزرگ زیرزمینی وجود دارد، جای دارد تا تحقیقات بیشتری در این رابطه صورت گرفته و بخصوص در مجامع علمی کشور آخرین دستاوردهای بشری در این زمینه مورد توجه قرار گیرد. جمع آوری اطلاعات اولیه از مغارهای احداث شده در کشور و تحلیل آماری آنها از جمله اولین اقدامات لازم است که تاکنون به انجام نرسیده است.

نویسنده مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را نسبت به جناب آقای دکتر احمد جعفری به سبب راهنمایی در انجام این تحقیق تقدیم می دارد. همچنین از سرکار خانم مهندس صفورا همایونی که فرصت و امکانات لازم جهت تدوین و تهیه این مقاله را در اختیار قرار دادند سپاسگذار است.

- Carmody, J. & Sterling R. (1993) "Underground Space Design", Van Nostrand Reinhold, 328 pp.
- Lang, T. A. (1988) "Underground Rock Structure Challenge the Engineer", Proc. Symp. "Underground Rock Chambers", Phoenix, Ariz., American Society of Civil Engineers, pp.1-19
- Franklin J. A. & Dusseault M. B. (1991) "Rock Engineering Application", McGrawhill, 431 pp.
- Johansson, S. (1986) "Large Rock Cavern at Neste Oy's Porvoo Works", Proc. Int. Symp. "Large Rock Cavern", Helsinki, Vol.1, Pergamon Press, pp.121-128
- Maurry, V. (1977) "An Example of Uderground Storage in Soft Rock", Proc. Int. Symp. "Rock Store 77", Vol.2, Pergamon Press, pp.681-689
- Carlsson, A. & Christianson R. (1988) "Site Investigatons for Swedish Repository for Reactor Waste", Proc. Int. Symp. "Rock Mechanics and Power Plants", Madrid, Vol.1, A.A.Balkema, pp.561-569
- Cikanek, E. M. & Goyal, B. B. (1986) "Experiences from Large Cavern Excavation for Tarp", Proc. Int. Symp. "Large Rock Cavern", Helsinki, Vol.1, Pergamon Press, pp.35-46
- Bhasin, R., Barton, N. & Loset, F. (1993) "Engineering Geological Investigations and the Application of Rock Mass Classification Approach in the Construction of Norway's Underground Olympic Stadium", Int. Jour. Engineering Geology, no.35, pp.93-101
- Hoek, E. & Moy, D. (1993) "Design of Large Powerhouse Caverns in Weak Rock", Comprehensive Rock Engineering, Vol.5, ch.4, Pergamon Press, pp.85-109

- Cording, E. J., Hendron, A. J. & Deere, D. U. (1988) “ Rock Engineering for Underground Caverns ”, Proc. Symp. “Underground Rock Chambers”, Phoenix, Ariz., American Society of Civil Engineers, pp.567-600
- Barton, N. (1989) “ Cavern Design for Hong Kong Rock ”, Proc. “ Rock Cavern Seminar”, Hong Kong, Institution of Mining and Metallurgy, pp.179-202
- Hibino, S. & Motojima, M. (1993) “ Rock Mass Behaviour During Large Scale Cavern Excavation ”, Comprehensive Rock Engineering, Vol.4, ch.22, Pergamon Press, pp.631- 651