

روش های اکتشاف در زمین های کارستی

روشهای اکتشاف در زمینهای کارستی

پیش‌گفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه به مجامع فنی - تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران، تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و از این رو دفتر استانداردها و معیارهای فنی شرکت مدیریت منابع آب ایران در جهت نیل به این هدف، با مشخص نمودن رشته‌های اصلی مهندسی آب اقدام به تشکیل مجامع علمی - تخصصی با عنوان کمیته‌های تخصصی نموده که نظارت بر تهیه این استانداردها را به عهده دارند.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین می گردد :

- استفاده از تخصص و تجارب کارشناسان و صاحب‌نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مأخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاههای اجرایی، سازمان‌ها، نهادهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرح‌ها
- پرهیز از دوباره کاری‌ها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه‌کننده استاندارد

آگاهی از نظرات کارشناسان و صاحب‌نظرانی که فعالیت آنها به نوعی در ارتباط با تهیه استانداردهای مهندسی آب می باشد موجب امتنان خواهد بود.

ترکیب اعضای کمیته

نام اعضای کمیته تخصصی زمین‌شناسی مهندسی طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور که در تهیه این نشریه مشارکت داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر است:

خانم فیروزه امامی	لیسانس زمین‌شناسی
آقای رسول بنی‌هاشمی	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای فریدون بهرامی سامانی	فوق لیسانس زمین‌شناسی مهندسی
آقای عباس رادمان	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسن مدنی	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسین معماریان	دکترای زمین‌شناسی مهندسی
آقای محمد حسن نبوی	فوق لیسانس زمین‌شناسی مهندسی
آقای عبدالرزاق واثقی	لیسانس زمین‌شناسی و فوق لیسانس مدیریت

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۵	فصل اول - اطلاعات کلی درباره کارست
۷	۱-۱ تعریف کارست
۷	۲-۱ آب زیرزمینی در کارست
۸	۳-۱ ریخت‌شناسی کارستها
۸	۴-۱ عوامل لازم برای گسترش کارست
۸	۱-۴-۱ وضعیت زمین شناختی
۹	۲-۴-۱ آب و هوا
۹	۳-۴-۱ برجستگیها
۱۰	۴-۴-۱ هوازدگی سنگ آهک
۱۰	۵-۴-۱ هوازدگی شیمیایی
۱۱	۶-۴-۱ هوازدگی مکانیکی
۱۱	۷-۴-۱ هوازدگی بیولوژیکی
۱۱	۵-۱ سیمای کارستی
۱۲	۱-۵-۱ لایه یا کارن
۱۲	۲-۵-۱ فیتوکارست
۱۳	۶-۱ عوارض زمین ریخت‌شناسی کارستها و خصوصیات مربوط به آنها
۱۳	۱-۶-۱ شیارهای انحلالی
۱۳	۲-۶-۱ گودشدگیها و فرورفتگیهای محصور
۲۰	۳-۶-۱ دره کارستی
۲۰	۴-۶-۱ چشمه‌های کارستی
۲۱	۵-۶-۱ غارهای انحلالی
۲۱	۷-۱ فرار آب در نواحی زیرزمینی
۲۲	۸-۱ گسترش و پراکندگی نواحی کارستی
۲۵	فصل دوم- روشهای شناسایی و اکتشاف کارستها
۲۷	۱-۲ آشنایی
۲۷	۲-۲ شواهد زمین شناسی

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۲۸	۳-۲ روش لرزه‌ای
۲۸	۱-۳-۲ روش لرزه‌ای انکساری
۳۰	۲-۳-۲ روش لرزه‌ای انعکاسی
۳۷	۴-۲ روشهای الکتریکی
۳۷	۱-۴-۲ روش مقاومت ویژه الکتریکی
۴۱	۲-۴-۲ روش پتانسیل خودزا
۴۲	۵-۲ روش گرانی‌سنجی
۴۳	۱-۵-۲ روش گرادیان قائم گرانی زمین
۴۳	۲-۵-۲ کاربردهای عملی
۴۴	۳-۵-۲ تعبیر و تفسیر
۴۷	۶-۲ استفاده از روش سنجش از راه دور
۴۸	۱-۶-۲ فوتوگرافی هوایی
۴۹	۲-۶-۲ سیستمهای برداشت کننده چند طیفی
۴۹	۳-۶-۲ سیستمهای برداشت کننده خطی مادون قرمز حرارتی
۵۱	۴-۶-۲ رادیومتری کهموج
۵۲	۷-۲ روش رادار نفوذی در زمین (G.P.R)
۶۴	۸-۲ روش توموگرافی صوتی
۶۴	۱-۸-۲ آشنایی
۶۵	۲-۸-۲ مکان‌یابی حفره‌ها با استفاده از توموگرافی صوتی
۶۷	۳-۸-۲ شناسایی زونهای کارستی شده
۶۸	۴-۸-۲ شناسایی عوارض ریزشی ناشی از انحلال
۷۱	۵-۸-۲ نتایج بدست آمده
۷۱	۹-۲ سایر روشهای مورد استفاده در شناسایی کارستها
۷۱	۱-۹-۲ روش الکترومغناطیسی
۷۳	۲-۹-۲ روش تشدید صدا در اکتشاف کارستها
۷۴	۳-۹-۲ جریان سنجهای درون گمانه‌ای
۷۴	۴-۹-۲ تجزیه و تحلیل احتمال ایجاد سینک هولها با توجه به توالی زمانی تشکیل آنها

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۷۶	۵-۹-۲ آزمایش نفوذ استاندارد
۷۸	۶-۹-۲ پیزوکون الکتریکی
۷۹	۱۰-۲ اکتشاف مناطق و عوارض کارستی با استفاده از حفاری
۷۹	۱-۱۰-۲ شرایط موجود در زیر سطح زمین و چگالی اکتشاف
۷۹	۲-۱۰-۲ مقایسه حفاری با هوا در مقابل مغزه‌گیری در مناطق کارستی
۸۰	۳-۱۰-۲ اکتشاف حفاری با هوا در مناطق کارستی
۸۳	فصل سوم- تمهیداتی در مورد نمونه برداری و کاربرد روشهای مختلف در تعیین مشخصات سیستمهای کارستی
۸۵	۱-۳ آشنایی
۸۵	۲-۳ اثر وسعت و اندازه منطقه مورد بررسی در اندازه‌گیریها
۸۸	۳-۳ روشهای مختلف اکتشافی
۸۹	۴-۳ اندازه‌گیری از راه دور و روشهای ژئوفیزیکی
۹۰	۱-۴-۳ روشهای هوابرد
۹۱	۲-۴-۳ روشهای ژئوفیزیک سطحی
۹۲	۱-۲-۴-۳ روشهای ژئوفیزیکی برای استفاده در خشکی
۹۳	۲-۲-۴-۳ روشهای ژئوفیزیکی برای مناطق دریایی
۹۵	۳-۲-۴-۳ نحوه تعیین غارها با استفاده از روشهای سطحی
۹۷	۴-۲-۴-۳ نکات مهم استفاده از روشهای ژئوفیزیکی سطحی
۹۹	۳-۴-۳ روشهای چاه پیمایی
۱۰۲	فهرست منابع

مقدمه

امروز مسئله شناخت، تحقیق و دستیابی به راه حلها و شیوه‌های مناسب به منظور شناخت و در نتیجه پیشگیری از حفرات در کمین سازه‌های بزرگ مهندسی و در نتیجه کاهش زیانهای وارده از ناحیه مذکور، مورد توجه خاص محافل علمی تحقیقاتی، دستگاههای اجرایی و همچنین مراجع و مجامع جهانی است.

یکی از خطرانی که سازه‌های مهندسی بزرگ در ارتباط با آب (سدها) را تهدید می‌کند، شکستگیها و خلل و فرج موجود در دیواره دریاچه‌ها یا پی سدها است که در مناطق آهکی گسترش این شکستگیها و درزه‌ها زیادتر و وسیعتر است. زیرا سنگهای آهکی به دلیل خاصیت حل شدن در آب برای فعالیت محلولها مستعدند و فعالیت این محلولها باعث ایجاد درز و ترکها و حفره‌های متعدد و فراوان در سنگ آهک می‌شود. این فرآیند کارستی شدن نام دارد و عوارض ایجاد شده به این ترتیب، کارست نامیده می‌شود.

با توجه به نکات بالا، درز و شکافها و سایر حفره‌ها اگر در محل احداث یک سد واقع شوند، باعث فرار آب از سد شده و حتی ممکن است موجب تخریب سازه و تباه شدن سرمایه بشوند بدین ترتیب لزوم شناسایی مناطق با خصوصیات مذکور و تعیین وضعیت شکستگیها و حفره‌ها در مناطق آهکی روشن می‌شود.

از سوی دیگر غارها و حفرات کارستی ممکن است توسط آب یا رسوبات مختلف پر شوند که در این صورت اگر این مواد از لحاظ معدنی با ارزش باشند، کانسارهایی به وجود می‌آید. که از آن جمله می‌توان به ذخایر بوکسیت تشکیل شده در کارستها اشاره کرد.

از جمله موارد دیگر که مطالعه کارستها را با اهمیت می‌سازد، مطالعات آب‌شناسی و تعیین منابع آب است که این مطالعات به منظور تعیین آب شهرها و آب مورد نیاز برای منابع مختلف انجام می‌گیرد زیرا حفرات و شکستگیهای کارستی منابع مهمی برای ذخیره آب به شمار می‌آیند و معمولاً دارای ذخایر با کیفیت و کمیت بالا هستند.

سنگهای کربناتی و گچسنگها به طور کلی توانایی برای حل شدن در آبهای فرورو را دارند و این است که در آنها، حفره‌های انحلالی، آبروهای زیرزمینی، غارها و دیگر پدیده‌های کارستی به وجود می‌آید اما مهمترین نکته در مورد آنها افزون بر لیتولوژی، ساختار زمین‌شناسی آنهاست که کنترل کننده اصلی پیشرفت فرآیندهای کارستی است.

بررسیهایی که در این زمینه، در جاهای گوناگون و در کشورهای مختلف انجام شده چند نکته زیر را روشن کرده‌است.

الف- یک واحد کربناتی (بیشتر سنگ آهکی) در گستره برونزد و در فاصله‌های نزدیک نیز به طور یکسان دچار انحلال نشده است به عبارت دیگر در برونزد یک واحد سنگ آهکی (یا دولومیتی) بخشهایی که یا کارستی نشده‌اند و یا بسیار کمتر از دیگر قسمتها دچار انحلال شده‌اند، به خوبی قابل بازشناسی است.

ب- درون بخشهایی که کارستی شده‌اند، قسمت‌های کوچک و بزرگ وجود دارد که به راستی نشانه‌ای از انحلال در آنها دیده نمی‌شود. اینگونه قسمتها در سطح برونزد و درون توده وجود دارند و در حالت کلی محدوده‌هایی می‌باشند که از هر سوی، ناپیوستگیهای مهم تر، آنها را از دیگر قسمتها جدا کرده‌اند (Impervious Loops).

پ- برونزدهایی که در سطح زمین نشانه‌های انحلالی و پدیده‌های کارستی را نداشته‌اند و یا خیلی کم نمود بوده‌اند، در گمانه‌ها و تونل‌ها و دیگر فضاهای زیرزمینی، نشانه‌های آشکار پیشرفت کارست را آشکار کرده‌اند. به عبارت دیگر، سیمای برونزد چه بسا بازگوی واقعیت‌های درون توده سنگ نیست و نمی‌توان کارست را نادیده گرفت.

ت- وجود پدیده‌های گوناگون کارستی در برونزدها، نشانه‌ای است که درون توده سنگ نیز چنین نشانه‌های انحلالی وجود دارد اما نمی‌توان دریافت که تا چه ژرفایی گسترش دارند و این نکته اصلی در بررسی‌های اکتشاف کارست می‌باشد.

ث- مغزه‌های بدست آمده از گمانه‌ها در یک توده سنگ چنانچه نشانه‌های انحلالی را نداشته باشند، به هیچ روی نمی‌توان نبود آنها را عنوان کرد و چه بسا این گمانه‌ها در کارستی ترین قسمت یک توده سنگ حفر شده باشند.

به این ترتیب اهمیت شناسایی و کشف کارست در ناحیه سازه‌های مهندسی بسیار روشن است و بر پایه درجه اهمیت و اولویت‌های اقتصادی بهتر است به این موضوع پرداخته شود. پاسخ روشهایی که برای چنان هدفی به کار برده شده در بسیاری از کشورها به هر دو صورت مثبت یا منفی بوده است و تجربه‌اندوزی همچنان ادامه دارد.

آنچه که در این زمینه مشخص شده، این است که چنانچه با یک روش واقعیت‌های کارستی بودن یک واحد کربناتی اشکار شده، چه بسا در دیگر جاها، چنین روشی کارساز نیست (نبوده است). به عبارت دیگر، همه روشهای به کار برده شده، پاسخهای مثبت و منفی به بار آورده‌اند که نشان از پیچیدگی موضوع است.

بنابراین در جایی که شناخت گستره کارستی اهمیت زیادی دارد (برای مثال مخزن سد، تونلهای طویل درون سنگ آهک و ...) بهتر است، دو یا چند روش اکتشاف با هم در نظر گرفته شود و برنامه ریزی نیز به صورتی سامان داده شود که چنانچه پاسخ یک روش برای وجود کارست منفی بود، روش دیگر به کار برده شود و در صورت تفاوت نتیجه، علت آن شناخته شود.

روشهای ژئوفیزیکی برای اکتشاف کارست بی تردید باید با توجه به نتیجه‌گیریهای زمین‌شناسی ویژه (با نگرش به کارست) انجام شود و تفسیرهای بر پایه بررسیها، با همکاری نزدیک و تنگاتنگ زمین شناس و کارشناس ژئوفیزیک انجام شود.

ساده‌ترین و مهمترین روش‌شناسی کارست، روش زمین‌شناسی است که بر پایه آن روشهای دیگر را می‌توان برنامه‌ریزی نمود. روشن است که این روش در برونزدهایی که دارای نشانه‌های انحلال اند به کار برده می‌شود.

نخستین کار در این روش تهیه یک نقشه زمین‌شناسی کارست است که با بهره‌گیری از عکسهای هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ یا بزرگتر تهیه می‌شود و در آن موقعیت و نوع پدیده‌های کارستی در واحدهای لیتولوژی مشخص می‌شود.

بررسی زمین‌شناسی مهندسی این پدیده‌ها برای پاسخگویی به چند پرسش زیر استوار است:

الف - پدیده‌های مهم مانند نفس کش کوه^۱، حفر و چاله فروریز یا فروکش و درونریز^۲، غار، پولز، دره‌های کارستی ... به چه علت در موقعیت کنونی خود به وجود آمده‌اند؟

ب - این پدیده چگونه به چنین شکل یا شکلهایی درآمده‌اند؟

پ - تا چه ژرفایی از رویه زمین و یا ترازهای مورد نظر گسترش دارند؟

ت - موقعیت آبهای زیرزمینی و جریان آنها و ... در چه وضعیت و الگویی است؟

1- Doline

2- Cavein Sinkhole

رویارویی این پدیده‌ها (و به طور کلی واحد کارستی) و سازه مورد نظر چه خواهد بود؟

پاسخ به پرسشهای یاد شده که در حقیقت بحث درباره عامل، فرآیند و پدیده‌است، نیازمند انجام گمانه زنی و کاوشهای زیرزمینی است که بر پایه روشهای ژئوفیزیکی استوار می‌باشد. ردیابی و گمانه زنی مایل نیز اهمیت زیادی دارد. پس از به دست آمدن پاسخ پرسشهای یاد شده راههای جلوگیری از رویارویی نامناسب یا زیان آور و خطرناک مانند یورش آب زیرزمینی به درون فضاهای زیرزمینی، گریز آب از مخزن سد، فرسایش زیرزمینی پی سازه‌ها و ... مورد توجه قرار خواهد گرفت.

بسیاری از کارستهای دیرینه^۱ که در زیر نهشته‌های جوانتر جای دارند، ممکن است روی زمین و در پوشش رسوبی آنها نشانه‌هایی وجود داشته باشد که اهمیت کارست را بازگو کنند. سنگهای انحلال پذیری که در زمانهای گذشته، در سطح زمین دچار فرآیندهای کارستی شده‌اند، پس از نهشته رسوبهای آواری روی آنها (روی ناهمسازی = Unconformity) یک کارست پنهان به شمار می‌آیند که چنانچه در گستره‌ای بر سازه مهندسی باشند، شناسایی و اکتشاف آنها در خور توجه خواهد بود. اینگونه کارستها اگر زیر پوشش آبرفت‌های کواترنر و یا نهشته‌های آواری کهن تر قرار داشته باشند، امکان دارد نشانه‌های وجودی خود را مشخص کند که بیشتر به صورت چاله‌های فروریز و یا ناهمواریهای ویژه‌ای است.

چاله‌های فروریز و یا درون ریز در آبرفت‌ها وجود کارست دیرینه را به خوبی مشخص می‌کند اما گستردگی آن در زیر آبرفت‌ها مشخص نمی‌باشد و بهتر است روشهای ویژه‌ای برای اکتشاف آن به کار برد که در وهله نخست یافتن ضخامت آبرفت و در وهله دوم وضعیت ناهمواری سطح مرزی میان سنگ کف و آبرفت در مقیاس همخوان با اندازه‌های چاله‌های فروریز می‌باشد. یافتن وجود کارست دیرینه در زیر آوارهای کهن تر که بر پایه ناهمواریهای به وجود آمده در نهشته‌های پوششی آن است، بررسیها به سادگی آبرفت‌ها نیست و بررسیهای بیشتری ضرورت دارد. نمونه بسیار گویای اینگونه کارستهای پنهان در حوضه زغال سنگ مسکو دیده شده‌است. در آنجا، در نهشته‌های زغال‌دار کربونفر که روی سنگ آهکهای تورنیزین و گچ سنگها و دولومیت‌های دونین بالایی قرار دارند، چاله‌ها و برآمدگیهایی به وجود آمده که پس از گمانه‌زنیها مشخص شد سنگ کف آنها کارستی است.

در مورد کارستهای پنهان، دریافت زمین‌شناسی ویژگیهای زیر، اهمیت به سزایی دارد:

الف - موقعیت و وضعیت همبری میان توده سنگ کارستی و نهشته‌های پوششی آن

ب - آرایش خطی، توده‌ای و یا پراکنده پدیده‌های فروریزی و علت آن

پ - بررسی برونزد واحد کارستی پنهان در نزدیکترین محل به محدوده مورد بررسی.

تردیدی نیست که بررسیهای ریختاری - ساختاری، کاربرد روشهای ژئوفیزیکی و سرانجام گمانه‌های اکتشافی بسیار ضروری است.

در حالت کلی دانسته‌ای از کارست ناپیدا در یک ناحیه وجود ندارد و تنها در کند و کاوهای زیرزمینی و یا گمانه زنیها به پدیده‌های کارستی برخورد می‌شود اما در سطح زمین نشانه‌ای از چنین وضعیتی دیده نمی‌شود.

با این ترتیب، اکتشاف کارست ناپیدا، بیش از رسیدن به آن موردی ندارد و پس از نخستین برخورد با آن و دریافت اهمیت آن، می‌توان روشهای پیگیری آن را انتخاب کرد.

چنین کارستی در سنگهای کربناتی، سولفاتی و کوارتزیتی و دیگر سنگها دیده شده‌است و در زایش آنها گسله‌ها، دمای زیاد آب و عوامل دیگر نقش بازی کرده‌اند و نمونه‌هایی از آنها در نوشتارها وجود دارد که یکی از توجه برانگیزترین آنها، غار بزرگی در کوارتزیت‌های به سن پرکامبرین در سپربالتیک است. در آنجا، غاری به درازای ۱۵۰۰ متر، پهنای ۲۵ متر و گودی ۳۵۰ متر به وجود آمده است که به نظر می‌رسد یک شوراب داغ شکل گیری آن را زیر فرمان داشته‌است^۱ (Tsykin, ۱۹۸۹).

با توجه به اینکه قسمت وسیعی از مناطق سطحی زمین از سنگهای آهکی پوشیده شده‌اند، مطالعه عوارض کارستی موجود در آنها با اهداف مختلف از جمله مطالعات ساختگاه سدها، آبشناسی و معدنی باید انجام گیرند. کارستهای تشکیل شده در سنگهای آهکی به لحاظ نوع مواد پرکننده از نظر معدنی حائز اهمیت هستند همچنین کارستها ممکن است محل تجمع آب زیرزمینی بوده و در نتیجه محل تشکیل آبخوانهای عظیم و قابل توجهی باشند. مطالعه از دو دیدگاه فوق جنبه مثبت قضیه است. علاوه بر موارد یاد شده کارستها ممکن است به لحاظ وجود درز و شکافها و خطرات در داخل ساختمان خود در محل سازه‌های بزرگ مهندسی باعث بروز غیرقابل مهاری شوند که از این دیدگاه نیز با دقتاً مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند. روشهای مختلف شناسایی و اکتشاف کارستها در کشورهای دنیا مورد آزمایش و استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج متفاوتی با توجه به شرایط منطقه و روش مورد استفاده به دست آمده‌است. مطالب ارائه شده در این نشریه نگاهی گذرا و کلی به روشهای مختلف مورد استفاده و گزارش شده در این زمینه در کشورهای مختلف جهان دارد.

در فصل اول این نشریه ابتدا اطلاعاتی کلی درباره کارست آورده شده که از آن جمله می‌توان به وضعیت آب زیرزمینی در کارستها، ریخت‌شناسی کارستها، عوامل لازم برای گسترش کارست، سیماهای کارستی، عوارض زمین ریخت‌شناسی کارستها اشاره کرد.

در فصل دوم خصوصیات مربوط به آنها و فرار آب در نواحی زیرزمینی کارستها مورد بررسی قرار گرفته است و وضعیت گسترش و پراکندگی نواحی کارستی در ایران مورد بررسی قرار گرفته‌است.

در این فصل به روشهای مختلف شناسایی و اکتشاف کارستها اشاره شده است. این روشها غالباً روشهای ژئوفیزیکی هستند که با توجه به وضعیت منطقه و شرایط مطالعاتی می‌توان از آنها استفاده کرد. این روشها شامل روشهای لرزه‌سنجی، شواهد زمین‌شناسی موجود، روشهای الکتریکی، روش گرانی‌سنجی، روش سنجش از راه دور، بهره‌گیری از رادار نفوذی در زمین، روش توموگرافی صوتی، روش الکترومغناطیس و سایر روشهای مورد استفاده هستند. از جمله روشهای دیگر برای شناسایی کارستها انجام حفاریهای اکتشافی در مناطق کارستی است که معمولاً پس از یک مطالعات ژئوفیزیکی اولیه و در مراحل تفصیلی تر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در فصل سوم وضعیت نمونه‌گیری در مناطق کارستی و کاربرد روشهای مختلف در تعیین مشخصات سیستمهای کارستی به تفکیک روشهای هوابرد، روشهای ژئوفیزیکی سطحی مورد استفاده در خشکی و دریا و همچنین روشهای چاه پیمایی (چاه‌نگاری) بررسی شده است.

۱- آب شور و داغ ۱۰۰ درجه، کوارتز را خیلی بیشتر و آسانتر از کلسیت در خود حل می‌کند.

فصل اول

اطلاعات کلی درباره کارست

۱-۱ تعریف کارست

اصلاح کارست اولین بار توسط ژئومورفولوژیستهای اروپایی برای تشریح مجموعه مشخصی که در اثر انحلال سنگ آهک سیمای ویژه‌ای به خود گرفته‌است، به کار رفت. امروزه این اصطلاح برای سیمای مناطقی که دچار انحلال شده‌اند، اعم از آنکه انحلال در توده‌های آهکی یا غیر آهکی انجام گرفته باشد به کار می‌رود. انحلال سنگهای غیر آهکی به کندی صورت می‌گیرد، ولی در نواحی گرمسیری مرطوب، فرآیند مؤثری را نشان می‌دهد، بنابر اظهار نظر بوگلی^۱ کانیه‌های سیلیسی و برخی کانیه‌های موجود در ماسه سنگ و کوارتزیت، ابتدا دچار از هم پاشیدگی می‌شوند و بعداً تحت تأثیر شرایط جوی نواحی قاره‌ای، فرآیند انحلال در آنها انجام می‌گیرد. توپوگرافی کارست در نتیجه فعالیت انحلال در سطح یا نزدیک به سطح زمین و منحرف کردن آبهای روان به شبکه زیرزمینی از محل درز و ترکهای فرسایش یافته، سطوح لایه‌بندی، شکاف سنگها، گسلها به ویژه در آهکهای متراکم خالص و دولومیتها رخ می‌دهد. از این رو، نبودن آبهای روان و شبکه زهکشی زیرزمینی به طور قابل توجهی ویژگی سرزمینهای کارستی را تغییر می‌دهد. به عبارت دیگر دامنه کارستی شدن کاهش می‌یابد. سیمای نواحی کارستی و تنوع هندسی آنها را نمی‌توان به فرآیندهای تصادفی نسبت داد. زمینه و مجموعه سیمای کارستی عمدتاً در اثر کنش بین آب و هوا، رویش گیاهی و تنوع در ویژگی فیزیکی سنگهای آهکی ایجاد می‌شود. کارستی شدن یک اصطلاح عمومی است که برای توسعه سرزمینهای کارستی به کار می‌رود [۱].

۲-۱ آب زیرزمینی در کارست

مخازن بزرگ آبهای زیرزمینی در رسوبات آبرفتی و توده‌های سنگی، همچون ماسه سنگ و سنگ آهک یافته می‌شود. حرکت آبهای زیرزمینی در ژرفای کم و زیاد یکی از عوامل بنیادین توسعه و گسترش کارست است. از این رو به طور کلی آب زیرزمینی و به ویژه اثر انحلالی آن یکی از موارد قابل بحث در مطالعه کارست است. در مناطق کارستی، آبهای روان و آب باران در منطقه ثقیلی به صورت قائم از داخل آبراهه‌ها و منافذ حرکت می‌کند. محدوده آبهای ثقیلی معمولاً در بالای سازندهای دارای غار است، یعنی جایی که انحلال و فشار اتمسفری دی‌اکسیدکربن به حالت تعادل رسیده است. حرکت آب در نواحی آب ثقیلی افقی است و منجر به پهن‌تر شدن مسیر عبور آب و خوردگی مسیر می‌شود. در نتیجه دامنه کارستی شدن شتاب بیشتری به خود می‌گیرد. منطقه انتقالی بین آب ثقیلی و آب آزاد یکی از نواحی مؤثر و فعال از جهت انحلال کارستی به حساب می‌آید. در این ناحیه، شرایط آب آزاد فصلی و دوره‌ای موجب ایجاد غارهای بزرگ می‌شود. آب کارستی اکثراً به صورت مستقل، غیر پیوسته در یک یا چند تراز محصور شده و داخل درز و ترکها و بین سطوح لایه بندی سنگ آهک دیده می‌شود. رژیم جریان آب از نوع مغشوش، مشابه جریان کانالهای روباز و لوله‌های بسته‌است، آب زیرزمینی کارستی به صورت چشمه ظاهر می‌شود.

۳-۱ ریخت‌شناسی کارستها

بوگلی دو نوع خوردگی یعنی خوردگی در اثر سرد شدن و خوردگی حرارتی را مشخص کرده‌است. خوردگی در اثر سرد شدن در ژرفای ۱۰ تا ۱۵ متری نواحی آب‌زاد کارستی، بر اثر تغییرات فصل و دما رخ می‌دهد. هر زمان که در این نواحی دما کمتر از حد میانگین شود، میزان دی‌اکسیدکربن که برای عمل انحلال توده سنگ لازم است، افزایش می‌یابد، مقایسه این نوع خوردگی با خوردگی حرارتی نشان می‌دهد که خوردگی در اثر سرد شدن اهمیت کمتری دارد زیرا تأثیر آن تنها به چند متر بالاتر از منطقه آب غیر اشباع محدود می‌شود. خوردگی حرارتی در اثر کاهش دمای چشمه‌های آب گرم تحت فشار رخ می‌دهد. غارهای کارستی شهر بوداپست مجارستان در اثر خوردگی حرارتی تشکیل شده‌اند. تراز آب زیرزمینی نیز در یک محیط با تخلخل متوسط، لزوماً با سیستم کارست مرتبط است زیرا تراوایی سیستم کارست در توده آهک مربوط به میزان تخلخل و شیب لایه بندی، ناخالصی آهک، قابلیت انحلال و تراوش و برجستگیهای اطراف آبرگیر است. تراز آب زیرزمینی در منطقه کارستی بوسیله منطقه زیرزمینی با حداکثر زهکشی مشخص می‌شود. مفهوم آبدار بودن نیز لزوماً مرتبط با مسایل هیدرولوژیکی کارست نیست. گرچه، جریان دائم در آهکهای اشباع (تا حدی)، مربوط به شبکه کانالهای بهم پیوسته در توده آهک است که اکثر آنها از جمعیت هیدرولیکی مقاومت چندانی در برابر آب از خود نشان نمی‌دهند و دارای فشار هیدرواستاتیک کمی هستند. سرعت جریان آب، در کانالهای روباز و لوله‌های بسته با ریشه دوم ارتفاع نظیر فشار تغییر می‌کند. در نتیجه، سطح آب زیرزمینی کارست نسبتاً مسطح و دارای شیب هیدرولیک ۲ تا ۶ متر در کیلومتر است.

۴-۱ عوامل لازم برای گسترش کارست

گسترش شیارهای کارستی در شرایط ویژه‌ای با توجه به وضعیت زمین شناختی، آب و هوا و برجستگیها و وضعیت هوازدگی سنگ آهک از قبیل شیمیایی و مکانیکی و بیولوژیکی انجام می‌گیرد که به طور خلاصه به بحث راجع به هر کدام خواهیم پرداخت.

۱-۴-۱ وضعیت زمین شناختی

لیتولوژی یکی از عمده ترین عوامل در گسترش کارست است. در مناطقی که توده سنگ نسبتاً ضخیم لایه، قابل انحلال و نزدیک به سطح زمین می‌باشد، کارست گسترش می‌یابد. البته تمام سنگهای قابل انحلال در این حد کارستی نمی‌شوند و عوامل دیگری در این زمینه دخالت می‌کنند.

آهکهای گچی و آهکهای صخره‌ای، تخلخل اولیه (بین دانه‌ای) زیادی دارند و امکان جذب و زهکشی سریع روان آبها را در توده سنگ آهک فراهم می‌سازند، به علاوه این سنگها استحکام کمی دارند. از سوی دیگر دولومیت‌های صخره‌ای مقاومت بالا و تراوایی کم دارند. تراوایی ریشه در تخلخل، تراکم درز و ترکها و ویژگی لایه بندی دارد که این مشخصات از جمله عوامل بنیادین برای گسترش کارست به حساب می‌آیند اثر خوردگی آب در داخل شبکه درز و ترکها، موجب انحلال و حرکت آب در جهت قائم می‌شود، معابر افقی در امتداد لایه‌بندی لایه‌های افقی به وجود می‌آیند. آهکهایی که چنین ویژگیهایی دارند، برای فرسایش کارستی بسیار مناسب اند، در سنگهای آهکی، عوامل همچون نوع و ویژگی مواد غیر قابل انحلال، ناخالصیها، به ویژه

رس و سیلیس، میزان فراوانی و تراکم درز و شکافها، شیب و ضخامت طبقات به طور مؤثری در تشدید فرآیند انحلال و گسترش سیمای کارستی مؤثراند. مناطق کارستی عمدتاً دارای آهک با لایه بندی ضخیم همراه با درز و ترکهای به هم پیوسته اند. سطوح لایه بندی در توده های آهکی با لایه بندی متراکم، مانند گسل در گسترش کارست عمل می کنند (بوگلی). از این رو از ۱۴۵ کیلومتر معابر کارستی غار هولش^۱، ۱۲۵ کیلومتر آن در امتداد لایه بندی شکل گرفته است [۱].

۱-۴-۲ آب و هوا

آب و هوا عمده ترین اثر را در گسترش سیمای کارستی به عهده دارد. سوتینینگ^۲ [۲] مدعی است که فرآیند انحلال وابسته به شرایط آب و هوایی است. از این رو، زوال توده های سنگ و گسترش سیمای کارستی بر پایه آب و هوا تشخیص داده می شود. برای نمونه، سیمای کارستهای به جای مانده^۳ محدود به شرایط آب و هوای معتدل است در حالی که فرونشستگیهای قیفی و سایر فرمهای وابسته به آن، مخصوص نواحی با آب و هوای معتدل است بررسیهای تحلیلی آماری که توسط اسمیت^۴ و آتکینسون^۵ بر روی درجه سختی آب و درجه انحلال گرفته است نشان می دهد که اختلاف چندان فاحشی بین تراکم دی اکسید کربن و انحلال سنگهای کارستی وجود ندارد [۲].

در نواحی با بارندگی ناچیز و یا بدون بارندگی، سیمای کارستی گسترش نمی یابد و یا اینکه اصلاً دیده نمی شود. برای نمونه حرکت آب زیرزمینی در نواحی خشک، موجب انحلال سنگها و ایجاد غار می شود. معروف ترین غار از این نوع، غار کارلسباد^۶ می باشد که در جنوب نیومکزیکوی امریکا واقع است که به نظر می رسد برخی از غارهای این نواحی در اثر بارندگیهای شدید شکل گرفته اند. در نواحی قطبی که دما پائین و فاقد رویش گیاهی است، به دلیل فقدان دی اکسید کربن سیمای کارستی وجود ندارد. در این نقاط شرایط یخبندان و ذوب برف برای کوتاه مدت امکان نفوذ آب را به لایه های زیرین نمی دهد، در نتیجه انحلال اولیه در اثر وجود مقدار ناچیز دی اکسید کربن در اتمسفر رخ می دهد، بنابراین فعالیت عادی کارست با گسترش سریع دره ها با آبهاب روان و دوره کوتاه یخبندان همراه است (بوگلی) [۱]. از مطالب بالا به طور کلی می توان چنین نتیجه گرفت که نقش آب و هوا بر روی رشد گیاهان، فعالیت باکتریها، تکامل نیم رخ خاک و ویژگی حرکت آب زیرزمینی، کارایی عمل انحلال و سیمای فضایی کارست را مشخص می کند.

۱-۴-۳ برجستگیها

ارتفاع سنگهای قابل انحلال بالای آب غیر اشباع و سنگهای سخت نشده، کنترل نهایی را در مورد گسترش سیمای کارستی به عهده دارند. ژرفای گذرگاههای کارستی در جهت افقی و قائم با بقیه تراز آب غیر اشباع مشخص می شود، مگر آنکه محدود به

1 - Holloch
2 - Sweeting
3 - Residual
4 - Smith
5 - Atkinson
6 - Carlsbad

آبخیزهای مجدد شود. تراز آب غیر اشباع به عنوان یک پدیده ناحیه‌ای است که تراز آن یا با جریانهای دائمی پیرامون کنترل می‌شود و یا انحلال سنگهای زمینهای بلند بالا دست آن را کنترل می‌کند.

۱-۴-۴ هوازدگی سنگ آهک

انحلال ویژگی منحصر بفرد در سنگهای آهکی است که در اکثر سنگهای روی زمین دیده می‌شود. فرآیند انحلال به همان میزان که در سطح زمین مؤثر است، در ژرفای پائین تر نیز اثر داشته که منجر به فرسایش کارستی می‌شود. فرآیند انحلال تابع برخی عوامل از جمله آب و هوا است. از سوی دیگر، عوامل مکانیکی دارای اهمیت کمتر هستند و اکثراً نقشی در شکل‌گیری شیمیای کارستی به عهده ندارند.

۱-۴-۵ هوازدگی شیمیایی

سنگهای کربناته در اثر آب باران و برف دچار خوردگی متوسطی می‌شوند، اکسید شدن مواد آلی، موجب آزاد شدن دی‌اکسیدکربن می‌شود. دی‌اکسیدکربن آزاد شده بوسیله آب غیر اشباع در خاک و نواحی با پوشش گیاهی، به حرکت در می‌آید و در طول این حرکت، میزان دی‌اکسیدکربن آب افزایش می‌یابد و موجب بالا بردن توان انحلال سنگ آهک می‌شود. افزون بر آن، جریان آبهای زیرزمینی به‌هنگام عبور از توده سنگ آهک موجب افزایش بیشتر انحلال آنها نسبت به سنگهای آهکی روی زمین می‌شود. قدرت انحلال دی‌اکسیدکربن به میزان تمرکز آن بستگی دارد که توسط فشار جزئی و دمای حلال اندازه‌گیری می‌شود. فشار جزئی دی‌اکسیدکربن در زیر خاک نواحی دارای پوشش گیاهی، بیش از فشار اتمسفری بعید بنظر می‌رسد و همچنین بیش از خاکهای بدون پوشش گیاهی است خاکهای آهک‌دار برای انحلال توده سنگ، دی‌اکسیدکربن بیشتری آزاد می‌کنند. تحقیقات نیوسان نشان داد که سختی آبهای نفوذی که از درز و شکافها، در راستای قایم حرکت می‌کنند، در خاکهای آهکی در ناحیه من دیپ هیل در جنوب باختری انگلستان به طور استثنایی بالاست. از این رو، فرآیند خوردگی در زیر خاکهای مرطوب اسیدی، دامنه گسترده‌ای دارد. پاره‌ای مطالعات دلالت بر آن دارد که آزاد شدن بیولوژیکی دی‌اکسیدکربن ۳۰ تا ۱۰۰ بار بیش از شرایط اتمسفری است [۱]. انحلال پذیری دی‌اکسیدکربن به دما بستگی دارد؛ آبهای سرد نسبت به آبهای گرم مقدار بیشتری دی‌اکسیدکربن برای انحلال دارند. در جدول ۱-۱ انحلال پذیری کربنات کلسیم در دماهای مختلف نشان داده شده است [۱].

جدول ۱-۱- تأثیر دما در انحلال پذیری کربنات کلسیم [۱]

حرارت (C)	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
فاکتور (عامل)	۱/۲۸	۱/۰۰	۰/۰۷۸	۰/۶۴	۰/۴۳

وجود یون کلسیم Ca^{2+} در خاک، پدیده انحلال را شتاب تازه‌ای می‌بخشد. (برکلند) فرآیند انحلال و رسوب یک رابطه معکوس است. در رابطه زیر تعادل بین کربنات و بی کربنات برقرار است:



کاهش PH محلول موجب انحلال کلسیت و یونیزه شدن آن می‌شود. همانطور که در سمت راست رابطه بالا نشان داده شده است. کاهش PH ممکن است در اثر افزایش جزئی فشار دی‌اکسیدکربن روی دهد که منجر به افزایش سطح کربن دی‌اکسید محلول یا سختی آن می‌شود. طرف چپ رابطه معرف رسوب کلسیت در اثر افزایش PH در محلول و کاهش جزئی فشار دی‌اکسیدکربن یا انحلال در نتیجه محلولی است که کاملاً با دی‌اکسیدکربن اشباع شده است.

۱-۴-۶ هوازدگی مکانیکی

در تکامل عوارض کارستی، هوازدگی مکانیکی اهمیت کمتری دارد. رخنمونهای آهکی در نواحی نیمه خشک، در اثر بارندگیهای شدید دچار خوردگی شده و به اصطلاح سوراخ (آبله فام) می‌شوند. پاره‌ای از سیماهای کارستی به جا مانده در نواحی استوایی دال بر این مدعاست که فرسایش آنها در اثر آبهای روان رخ داده است.

۱-۴-۷ هوازدگی بیولوژیکی

فرآیند انحلال به طور اساسی در اثر آزاد سازی دی‌اکسیدکربن انجام می‌گیرد. زندگی همزیستی گل سنگ و خز روی سنگها موجب مرطوب شدن سطح سنگ می‌شود. رویش آلف و سایر موجودات زنده بر روی آهک در نواحی گرم استوایی، از موارد اثر انحلال بیوشیمیایی است که موجب کاهش مقاومت سنگ در جهت افقی و قائم شده و منجر به بروز ناهموازی و دنداندار شدن آن می‌شود. سیمای حاصله فیتوکارست^۱ نام دارد. نواحی پر آب با فراوانی هیدروفیتها^۲ و پوسیدگی و فساد مواد گیاهی موجب تداوم آزاد شدن دی‌اکسیدکربن در آب می‌شود. از این رو، فرسایش فرآینده شیمیایی در زیر نواحی باتلاقی روی می‌دهد.

۱-۵ سیمای کارستی

عملکرد پارامترهای متغیر و سختی آب موجود تأثیر متفاوت در فرآیند انحلال می‌شود که بنابر میزان خوردگی اندازه‌های متفاوت سیمای کارستی را به وجود می‌آورد. از این رو، رده بندی سیمای کارستی بر اساس اندازه آنها ممکن است مورد استفاده در مورفولوژی مرتبط با فرآیند کارستی شدن باشد (بوگلی، فورد^۳) [۱]. در جدول ۱-۲ رده بندی سیمای کارستی درج شده است.

1 - Phyto Kast

2 - Hydro Phytes

3 - Ford

جدول ۱-۲- رده بندی سیمای کارستی [۱]

مکان	مقیاس	سیمای اصلی	ارتباط
سطح زمین	کوچک، بزرگترین ابعاد (برای مثال درازا) معمولاً کوچکتر از ۱۰ متر	کارن، (لاپیه)، حفرات انحلالی، کانال و شیار	انواع متفاوت، مربوط یا غیر مربوط به سیستم آب موجود در اطراف آنها
	متوسط، بزرگترین ابعاد معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ متر	فرورفتگی بسته، حفره‌های قیفی شکل و انواع مرکب تخم مرغی کارستیهای برجا، کارستیهای مخروط و برج مانند	مربوط به وجود سیستم مؤثر آبهای زیرزمینی و تخلیه اساسی آنها
	بزرگ، بزرگترین ابعاد معمولاً برابر ۱۰۰۰ متر	پل ژه ^۱ ، تنگه و دره‌های خشک	
زیرزمین	در تمام اندازه‌ها	سیستم غار	بدون مصرف

۱-۵-۱ لاپیه^۲ یا کارن

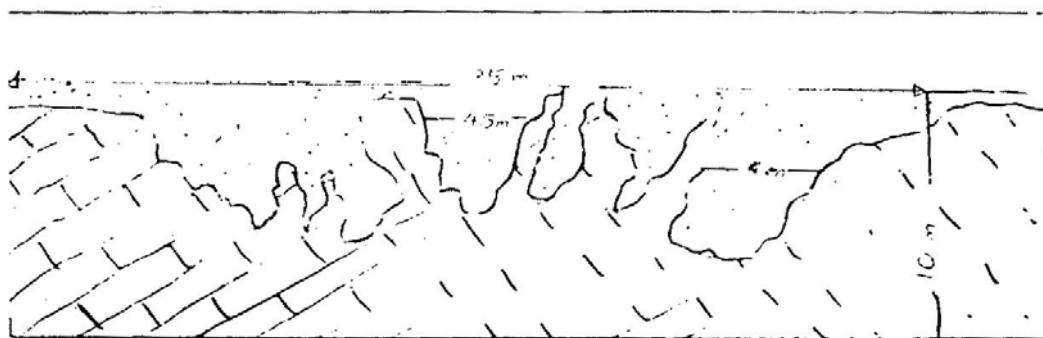
سنگهای آهکی خالص بدون پوشش گیاهی، گاه به وسیله شبکه‌ای به هم پیوسته از شکاف و درز و ترکها و موجبات شکستگی سنگ آهک شده و برجستگیهای لبه تیز و باریک جدا از یکدیگر را ایجاد می‌کند (شکل ۱-۱). این گونه زمینه‌های فرسایشی در آهک به نام لاپیه یا کارن معروف است. لاپیه در نواحی دارای رخنمونهای قابل ملاحظه که دارای درز و شکاف و پوشش گیاهی باشند در اثر آبهای روان منجر به تشکیل آبروها در ابعاد کوچک به عرض تا یک متر و ژرفای ۵۰ سانتی متر می‌شوند. این شیارها بین چند سانتی متر تا یک متر عمق دارند. در نواحی استوایی، خوردگی شدید آهک منجر به ایجاد شکافهای عمیق، بریدگیهای طولی یا کانالهای لاپیه می‌شود. در آهکهای سنگفرشی عمق کانالهای لاپیه به ۲۰ متر می‌رسد. این کانالها معبر سریع عبور آب برای انحلال به حساب می‌آیند ولی گاه مواد غیر قابل انحلال مسیر زهکش تحتانی را مسدود می‌کنند.

۱-۵-۲ فیتوکارست

فیتوکارست یکی از متداول ترین سیمای فرعی در نواحی مرطوب استوایی است. سیمای مزبور به طور عمده بر اثر فعالیتهای بیولوژیکی در زیر محللهایی که پوشیده با آلگ و خزه هستند، رخ می‌دهد. بر پایه پژوهش فولک^۳ و دیگران فیتوکارست بر اثر وجود مواد انحلالی اسیدی که از ریشه گیاهان بوجود می‌آید، ساخته می‌شود یا شکل می‌گیرد. عمل انحلال در مسیر نفوذ گیاهان موجب گسترش چاله‌های انحلالی شده و با به هم پیوستن آنها، چاله‌ها بزرگتر می‌شوند. [۱]

۱- فرورفتگی که از هر سو بسته باشد. فرورفتگی‌ای که پهن بوده و با دامنه پرسیب که کف آن تقریباً صاف و هموار است، به ام Polje، Polye نامیده می‌شود.

۲- قطعات سنگ آهک در سطح زمین به وسیله ترکهای ظریف از یکدیگر جدا شده اند. سطوح نواحی آهکی بدون پوشش که در پاره‌ای موارد به وسیله کانالهای باریک و متقاطع، با ژرفای حدود ۱۰ متر به نام Lapies یا Karren نامیده می‌شود.



شکل ۱-۱- لایه در آهک [۱]

۱-۶ عوارض زمین ریخت‌شناسی کارستها و خصوصیات مربوط به آنها

اشکال و ناهمواریهای کارستی که در اثر فرآیند انحلال سنگهای آهکی در مقابل آبهای اسیدی ایجاد می‌شوند، بسیار متنوع و گسترده بوده و هر یک اثرات و نشانه‌های جالبی را بر جای می‌گذارند. این مناطق با زمینهای فاقد پوشش گیاهی، شیبهای تند و خردشدهای سنگها نمایان می‌گردند که دارای لایه بندی کاملاً مشخص می‌باشند. در اینجا به بیان نحوه چگونگی پیدایش رخساره‌های کارستی و نشانه‌های برجای گذاشته پرداخته می‌شود.

۱-۶-۱ شیارهای انحلالی

این رخساره‌ها به همه شکل‌های انحلالی کوچک مقیاس در سطح سنگهای قابل حل گفته می‌شود که در اثر باران و در نتیجه فعالیت شیمیایی آب بر روی زمینهای آهکی بدون پوشش و عریان ایجاد می‌شوند. شیارهای انحلالی به ندرت در سنگهای دولومیتی گسترش می‌یابند. شیارهای انحلالی در سنگهای آهکی به صورت حفراتی مخروطی شکل و یا گودالهای با قاعده پهن هستند که در دامنه‌ها کانالهای مستقیم یا سینوسی شکل را به وجود می‌آورند. اندازه کانالها متفاوت است، به طوری که عمق آنها از چند میلی متر تا ۲ متر و گاهی ۵ متر و عرض بازشدگی آنها به حدود یک متر می‌رسد. این شیارها بهترین نحوه فرآیند کارستی را در سطح زمینهای آهکی نشان می‌دهد.

۱-۶-۲ گودشدهای و فرورفتگیهای محصور

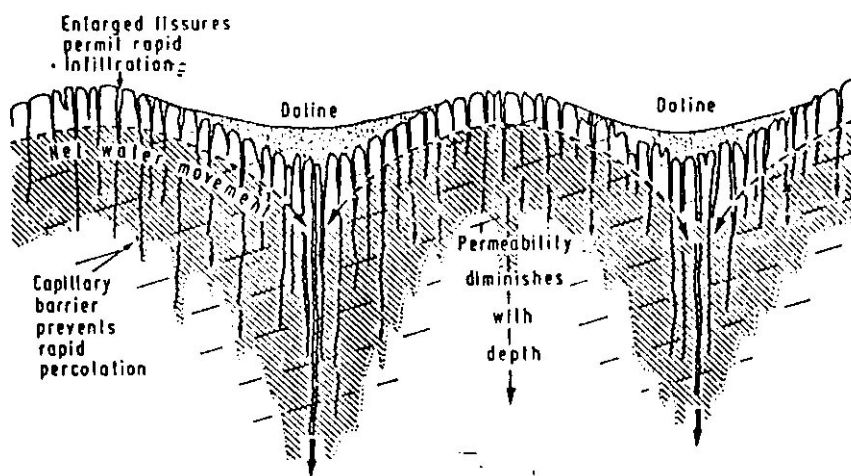
به طور کلی گودشدهای و فرورفتگیهای اشکال کارستی با مقیاس متوسط و شامل حفره‌های فروکش، چاههای کارستی و چاههای کنده‌هستند که در زیر به توضیح هر کدام خواهیم پرداخت:

الف- حفره‌های فروکش یا سینک هولها

این پدیده‌ها عموماً به فرونشست‌ها یا فروختگی‌های موضعی سطحی زمین اطلاق می‌شود. سینک هولها از نظر مورفولوژی معمولاً به صورت حفراتی با مقطع دایره یا بیضی و دیواره‌های نامنظم و ناهموارند که اغلب شیب تندی دارند. کف این گودالها اغلب با اجزای تخریب شده سنگهای آهکی پوشیده شده است. ابعاد سینک هولها بسته به عوامل تشکیل دهنده متفاوت است، به‌طوری که قطر آنها از چند متر تا ۲۰۰ متر و گاه بیشتر تغییر می‌کند. در روند تشکیل حفره‌های فروکش که در نهایت به ایجاد نوعی رخساره کارستی منتهی می‌شود، مکانیسمهای مختلفی دخیل اند. برای آگاهی از نحوه توسعه سینک هولها و بررسی اثرات آنها بر محیط، نیاز به شناخت مراحل هیدروژئولوژی در زونهایی است که اطراف روباره قرار دارند.

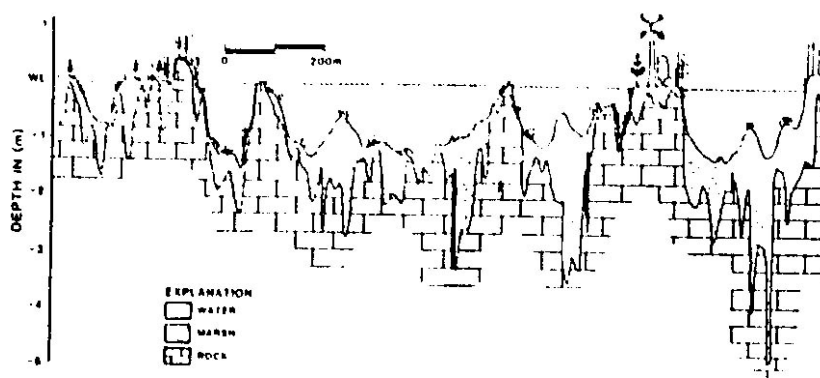
شکل ۱-۲ یک مدل از نحوه توسعه زون اپی کارستیک را در داخل کارست نشان می‌دهد. یک کارست شبیه به یک لایه از رسوبات ناپیوسته است. معمولاً در سطح سنگ آهک درزه‌ها به طور قائم توسعه پیدا می‌کنند. با افزایش عمق، درزه‌ها باریک شده و در صد نفوذ به طرف پایین نیز کاهش می‌یابد. درزه‌های اصلی که به طور پیوسته از داخل لایه سنگ آهک عبور می‌کنند، نقش منافذ انتقال محلول را بازی کرده و آب را به طرف پایین به داخل دهانه‌های کارستی داخل آهک هدایت می‌کنند. وقتی که حجم زیادی از آب لایه‌های رویی را اشباع کرد و سطح آب بالا آمد، به مناطق اطراف نفوذ می‌کند.

توپوگرافی در مناطق کارستی در سطح سنگهای آهکی نامنظم است و برعکس آنچه که در شکل ۱-۲ نشان داده شده، موجهای ملایمی ندارد. شکل ۱-۳ یک مقطع عرضی از سطح کارست را که به وسیله رسوبات دریایی جدید پوشیده شده است و در غرب کاستال در فلوریدا قرار دارد، نشان می‌دهد. این شکل پهنای دامنه نوسانات سطح زمین و نامنظمیهای موجود در سطح را که در اثر حل شدن در محلول به وجود آمده‌اند، همراه با درزه‌های منفرد که به وسیله میله عمق یاب مشخص شده‌اند، نشان می‌دهد. این مقطع در محیط زیر دریا شکل نمی‌گیرد، اما وقتی که سطح دریا در دوره‌های قبلی زمین‌شناسی پایین تر بوده به وجود آمده است.



شکل ۱-۲- زون اپی کارستیک در سنگهای کارستی شده [۳]

هنگامی که آب به طرف پایین حرکت می‌کند، شیارهای حاصل از انحلال آب باران در مناطق کارستی شروع به فرسایش کرده و رسوبات سخت نشده را به طرف پایین منتقل می‌کنند و درزهای موجود در سنگ بستر در بعضی مواقع ممکن است به اندازه یک غار باشند اما در اکثر مواقع این درزه‌ها به صورت یک شبکه از درزه‌های پهن هستند. درزه‌ها بعضی مواقع حالت اسفنج مانند دارند و دارای سوراخهای نامنظمی است که از داخل به هم متصل اند و عرضی برابر ده‌ها سانتی متر دارند. نکته مهمی که در ارزیابی خطرات سنینک هولها باید دانست این است که، این چالها ارتباطی با غارهای بزرگ شناخته شده‌ای که امکان سقوط سقف آنها می‌رود، ندارند. یک راه دانستن این موضوع وجود شیارهای نسبتاً کوچکی است که ممکن است به سطح زمین راه پیدا کنند. اگر رسوبات روباره به هم نچسبیده باشند، ممکن است که نشست زمین به آهستگی و به تدریج اتفاق بیافتد. در اثر شسته شدن پیوسته و مداوم رسوبات سطحی و حرکت آنها به طرف پایین درزه‌های سطحی بزرگ می‌شوند و رسوبات به آهستگی به داخل شبکه غارهای موجود نفوذ پیدا می‌کنند. بنابراین فرسایش مستمر و تدریجی سطح زمین باعث ایجاد یک سنینک هول می‌شود.



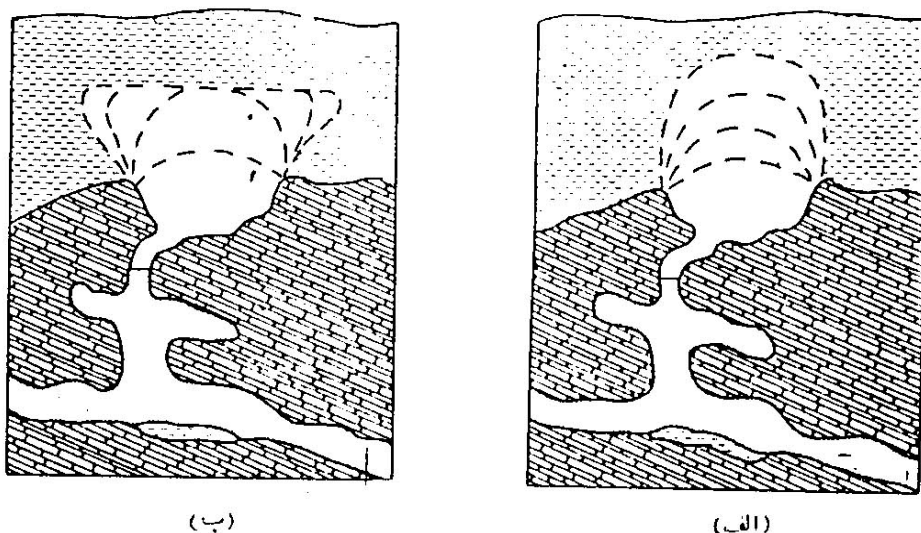
شکل ۱-۳- مقطع عرضی یک منطقه کارستی در غرب فلوریدای مرکزی [۳]

مواد پوششی در اکثر نشستهای ناشی از سنینک هولها در مناطق کارستی در فلاتها مشترک هستند و شامل مواد روباره‌ای هستند که تحت شرایط هوارس^۱ تبدیل به رس شده‌اند. به جای نشست که معمولاً به ندرت اتفاق می‌افتد. در چنین حالتی هم چنانکه رسوبات سطحی فرسایش می‌یابند و به طرف پایین حرکت می‌کنند، خاک موجود در غارها در بالای ستونهای کارستی توسعه می‌یابند. البته جزئیات این مراحل متغیر است و به موقعیت سنگ بستر، ترکیبات و چینه‌شناسی سنگهای سطحی، وجود آب و سطح ایستایی آن بستگی دارد. نیوتن نحوه وجود آمدن چنین حوادثی را در یک مدل ایده‌آل باروباره مشابه چینه‌های دارای روباره با لایه‌های پایدار، نشان داده‌است (شکلهای ۱-۴ الف و ۱-۴ ب). سوورس^۲ توقف سقوط رسوبات سست را

1- Vados

2- Swers

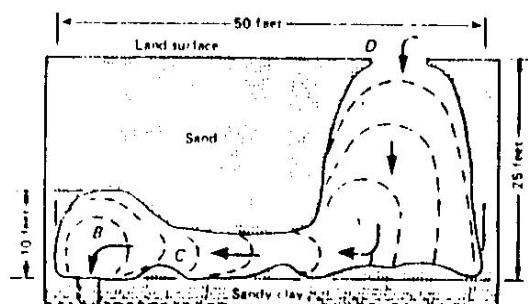
راولینگ^۱ نام گذاری کرد، اگر چه نیوتن از به کار بردن این واژه‌ها اجتناب می‌کند، چرا که تمایل بیشتر او به شرح فرسایش مکانیکی و عمل رگاب است. نیوتن شواهدی را کشف کرد که مواد و رسوبات چسبناک که تحت شرایط هوارس قرار دارند قبل از اینکه غار به سوی سطح زمین حرکت کند، سطوح جانبی فرسایش می‌یابند و سپس ستونهای کارستی به حالت عمودی اتفاق می‌افتند (شکل ۱-۴ ج) [۳ و ۱].



الف - نحوه رشد یک غار در روباره رسی همگن (خط ب - نحوه رشد یک غار روباره چینه بندی شده (خط

- چین ها)

- چین ها)



EXPLANATION
 --- BOUNDARY DESIGNATING CAVITY GROWTH
 → DIRECTION OF MOVEMENT OF WATER

(ج)

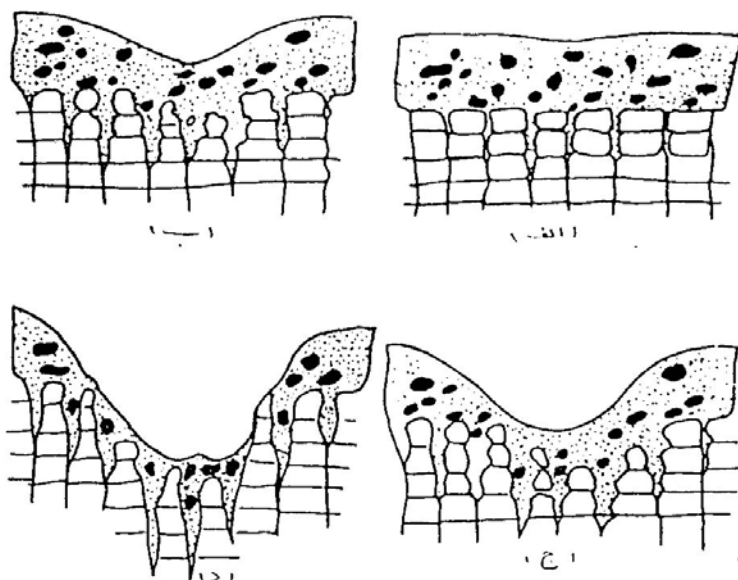
ج - نحوه رشد جانبی یک غار تحت شرایط محیط حفره دار (خط چین ها)

شکل ۱-۴ - مراحل رشد جانبی یک غارها در شرایط مختلف زمین شناسی [۳]

در مناطقی که سطح ایستایی در روباره واقع است. در اثر حرکت به طرف پایین رسوبات، فشار بر روی ذرات لایه آبدار کاهش می‌یابد و تولید یک استحکام خیلی پایین (۲-۰ ضربه Spt در ۳/۰ متر) را می‌کند، این بخش به وسیله مهندسین فلوریدا زون ریزشی نامیده شده‌است. تولید این بخش می‌تواند به علت فرسایش درزه‌ها در مناطق کارستی باشد. البته اثبات قطعی این امر مشکل است. هوای پر شده در داخل خاکهای موجود در غار به همراه استحکام کم و یا اشباع آب باعث می‌شود که زونهای ریزشی در حالت تعادل ناپایدار قرار گیرند و همچنین توقف فرسایش مواد سطحی به داخل غارهای کارستی باعث به وجود آمدن یک سینک هول می‌شود.

زمین‌شناسی لایه‌های کارست در مناطق کرانه‌ای مسطح با آنچه که در فلاتها وجود دارد فرق می‌کند. در جلگه‌های کرانه‌ای رسوبات روبازه به طور مشترک بر روی نهشته‌های دریایی که به مقدار زیادی ماسه دارند، قرار گرفته‌اند. اگر در این مناطق لایه‌های رسی وجود داشته باشند، لایه‌های آبدار از منحصر به لایه‌های ماسه‌ای نخواهد بود. از آنجا که لایه‌های رسی در مقابل حرکت آب مقاوم هستند، بالای درزه‌های کارستی یک اطاق ایجاد می‌کنند و فرسایش به آهستگی صورت خواهد گرفت، در حالی که اگر یک مجرا عبور مواد در دسترس باشد، ماسه‌های ناپیوسته و اشباع به سرعت فرسایش خواهند یافت. ترکیب روابط آب‌شناسی و چینه‌شناسی روباره‌ها در مناطق کرانه‌ای مناطقی مختلف ایجاد می‌کنند، که باعث به وجود آمدن سینک هولهای مختلفی می‌شود [۴].

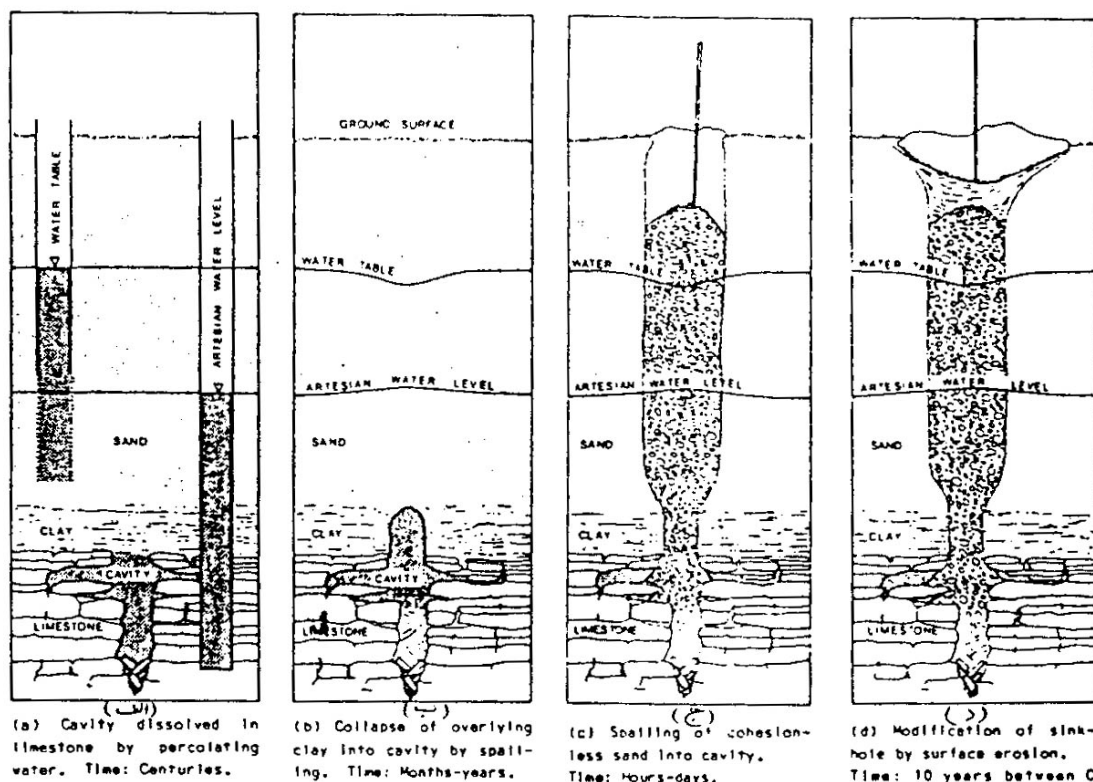
حفره‌های فروکش انحلالی یک نوع از این فرونشستها هستند که صرفاً بر اثر انحلال سنگ آهک بستر در اطراف بعضی نقاط مساعد نظیر محل تقاطع دو یا چند گسل ایجاد می‌شوند و غالباً دارای شکل مخروطی و قیف مانندند. مواد حل شده و بعضی مواد باقیمانده غیر قابل حل در پهنه‌های ضعیف که در اثر انحلال عریض شده‌اند به طرف پایین حرکت می‌کنند و این عمل خود باعث افزایش و ریزش مواد باقیمانده و تکه‌های سنگ اطراف دهانه آن می‌شود (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵- مراحل تشکیل یک حفره فروکش که در اثر انحلال طبقات آهکی تحتانی و حرکت

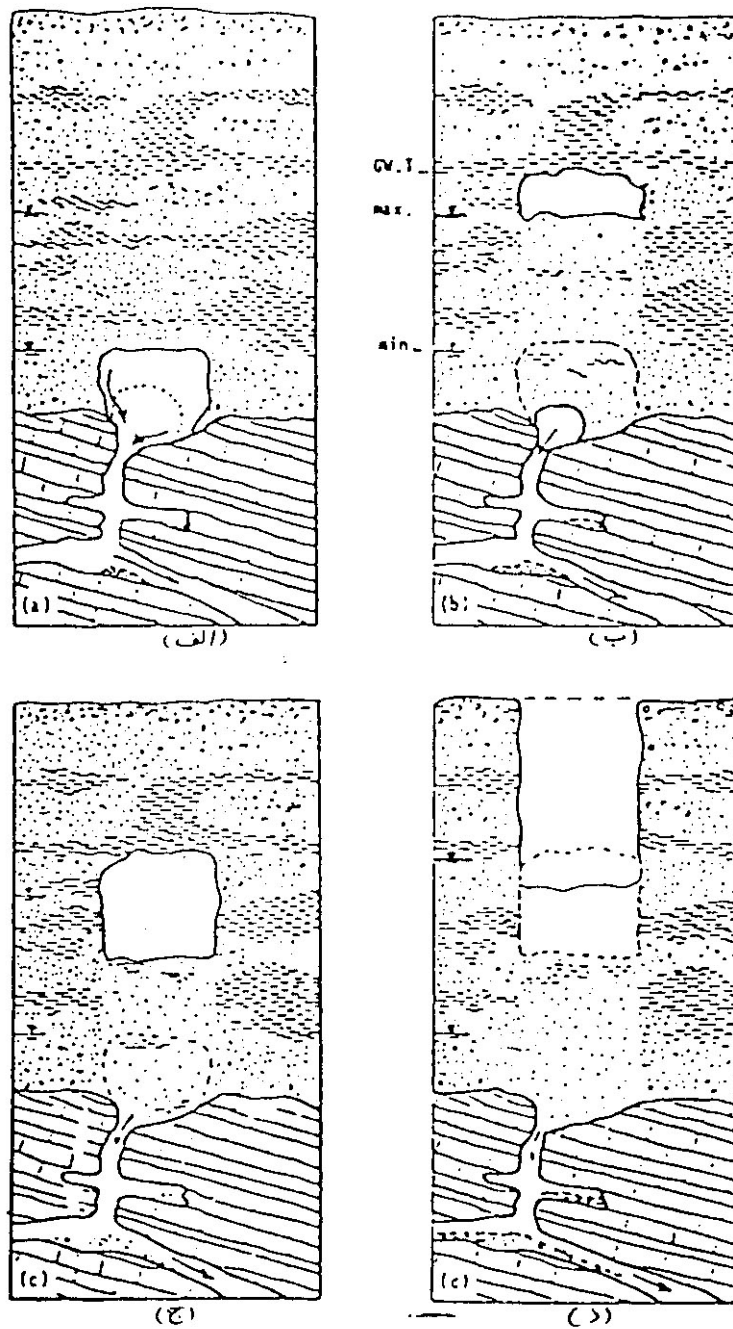
لایه‌های بالایی به طرف پایین ایجاد می‌گردد [۱].

از سوی دیگر، امکان دارد که در اثر فروریختگی غارها در سنگ بستر حفره‌های فروکش ایجاد شوند. چنین فرآیندی باعث تشکیل یک چاه با کناره‌های پرسیب با دیواره‌های سنگ بستر می‌شوند. در صورتی که سیستم غارهای زیرین پر از آب باشد، یک فروریختگی که مجراهای طبیعی آب را قطع کرده و از آب می‌شود حاصل امر خواهد بود (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶- مراحل شکل گیری یک سینک هول فروریزشی [۴].

اکثر حفره‌های فروکش از نوع فرونشینی هستند و به نام سینک هول یا حفره‌های ریزشی نامیده می‌شوند. در جایی که رسوبات سطحی یا خاکهای باقیمانده ضخیم بر روی سنگهای کارستی قرار گیرند در نتیجه حرکت آب، شکستگیهای کارستی، انحلال سنگ آهک زیرین، ریزش طبقات فوقانی تحکیم نشده به داخل منافذ و بازشدگیهای کارستی تشکیل و توسعه می‌یابند. این سینک هولها از نظر اندازه و شکل بسیار متفاوت هستند و به صورت استوانه‌ای، مخروطی و کاسه‌ای دیده می‌شوند. شکل ۱-۷ مراحل تشکیل یک سینک هول را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۱-۷- نحوه تشکیل هول ریزشی [۳]

ب - چاههای کارستی یا جاماها^۱

جاماها، چاههای کارستیک قائم یا نزدیک به قائم هستند که در ارتباط با سطح زمین اند.

این گونه عوارض کارستی معمولاً در مناطق با سیستمهای درز و شکاف قائم دیده می‌شوند که در اثر عملکرد آبهای فرورو و گسترش درزه‌های اولیه تشکیل شده‌اند. ایجاد چاههای کارستی مرتبط با فرآیندهای کارستی عمیق بوده و می‌توان آنها را در امتداد گسلها جستجو کرد.

ج - چاههای مکندۀ یا پونرها^۱

چاههای مکندۀ حفرات بزرگی هستند که از طریق آنها آب جاری رودخانه‌ها به درون زمین هدایت می‌شود. آبهایی که از طریق این حفرات به درون زمین راه می‌یابند مجدداً به صورت چشمه‌های کارستی در پایین دست ظاهر می‌شوند. پونرها حاصل زونهای انفصالی است که در اثر واکنشهای شیمیایی و هیدرولیکی در بافت سنگهای آهکی به وجود آمده‌اند. پونرها اغلب در اطراف پولزها و سواحل رودخانه قرار دارند و بر اساس نحوه ظهورشان در سطح یا بر اساس شکل ظاهری به ۴ گروه زیر تقسیم می‌شوند.

چاههای مکندۀ که به شکل چاههای بزرگ یا غار ظاهر می‌شوند.

چاههای مکندۀ که به صورت ترکهای توسعه یافته و حفرات کوچک دیده می‌شوند.

چاههای مکندۀ که به شکل یک سیستم درزه‌های باریک هستند.

چاههای مکندۀ آبرفتی

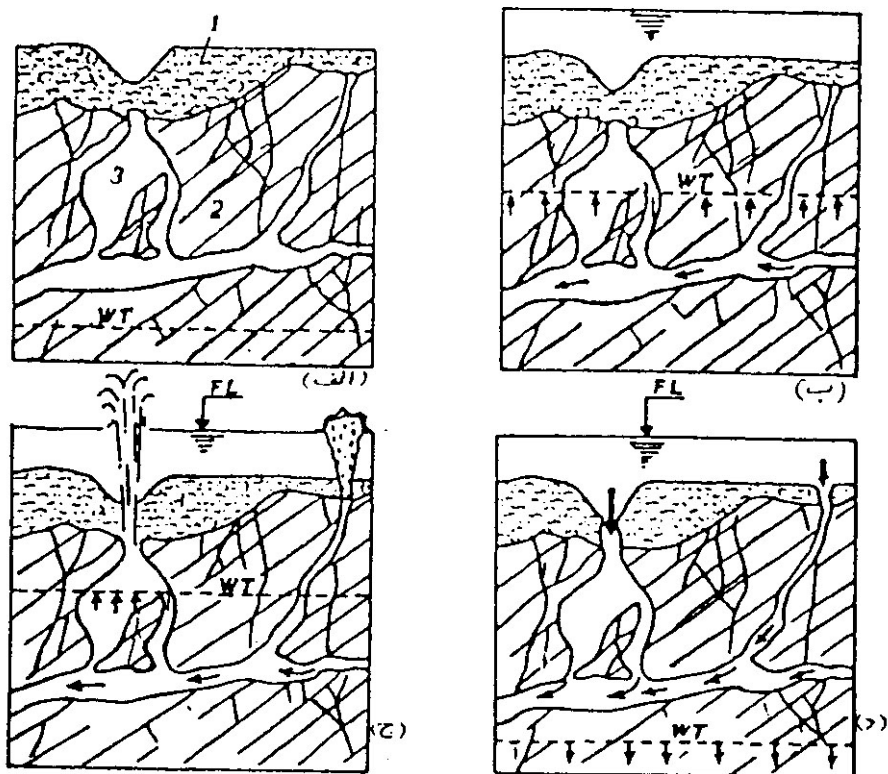
از میان گروههای فوق پونرهای آبرفتی از اشکال معمولی کارستها هستند که در سنگهای آهکی و در زیر رسوبات آبرفتی به وجود می‌آیند. میزان آبگذاری از پونرها وابسته به میزان مجاری متصل به هم است و حدود ۵۵ تا ۱۰۰ متر مکعب در ثانیه را می‌توان برای آنها ذکر کرد شکل ۱-۸- نحوه تشکیل پونرهای آبرفتی را نشان می‌دهد.

۱-۶-۳ دره کارستی

این دره‌ها در سازندهای آهکی به وفور یافت می‌شوند و معمولاً در محل گسلها و یا شکستگیهای اصلی سنگ در اثر انحلال و تخریب شیمیایی سنگها بر اثر ابهای اسیدی ایجاد می‌شوند، ترکیب سنگها و فعالیتهای تکنوتیکی نقش عمدهای در تشکیل این دره‌ها دارند.

۱-۶-۴ چشمه‌های کارستی

در نواحی کارستی نزولات جوی و جریانهای سطحی از طریق درزه و شکافها وارد توده سنگ آهکی شده و معمولاً به وسیله تعداد معدودی چشمه تخلیه می‌شوند، که میزان آبدهی آنها در مقایسه با چشمه‌های غیر کارستی نسبتاً زیاد است. این چشمه‌ها غالباً در اطراف مناطق فرسایش یافته از جمله پولزها و دره‌های کارستی قرار دارند.



- ۱- رسوبات آبرفتی
- ۲- سنگ آهک کربناته کارستی
- ۳- کانال کارستی، FT: سطح جریان سیلابی، WT: سطح ایستایی آب

شکل ۱-۸- مراحل تشکیل چاه مکنده [۳]

۱-۶-۵ غارهای انحلالی

یک سیستم غار انحلالی، مجرا یا مجموعه‌ای از مجاری انحلالی با قطر ۵ تا ۱۵ میلی متر یا بیشتر است، که بین نقاط ورودی (مثل چشمه‌ها) گسترش یافته‌اند. قطر اکثر غارها حدود ۵۰ سانتی متر یا بیشتر است.

۱-۷-۷ فرار آب در نواحی زیرزمینی

ذخیره‌سازی آب و حرکت آن در نواحی آبدار اپی کارستیک باید هماهنگ با اساس‌تر از نرمال آب زیرزمینی باشد. این شرایط ممکن است پایدار و دائمی نباشد، اما پس از هر بارندگی شدید، لایه‌های آبدار ممکن است سفره آب زیرزمینی معلق ایجاد کند. فردریک^۱ و اسمارت^۲ با به کارگیری ردیابهای رنگین، پی برده‌اند که لایه‌های آبدار اپی کارستیک در گستره وسیعی، از جهت

1 - Friedrich

2 - Smart

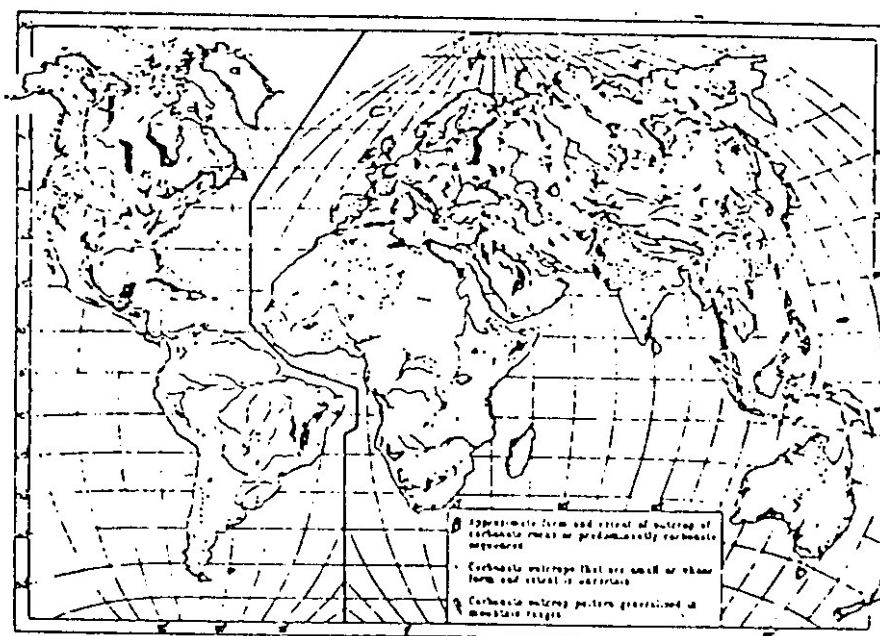
هیدرولوژئولوژی، از هر سو رفتاری مشابه آبهای زیرزمینی را نشان می‌دهند، در حالی که در سنگ آهکهای متبلور غیر کارستی تخلخل ممکن است کمتر از ۰/۱ درصد و هدایت هیدرولیکی بین 10^{-4} تا 10^{-7} متر در روز باشد (فریز^۱ و چرمی^۲) [۱].

در لایه‌های زیرزمینی دارای هوازدگی، تخلخل توده‌ای سنگ ممکن است بزرگتر از ۱۰ - ۵ درصد باشد و در نتیجه هدایت می‌تواند به 10^{-1} و حتی بیشتر نیز افزایش یابد. (گرچه پارامتر مذکور اندازه‌گیری نشده است).

بنابر طبیعت توده خاک، پارامتر اشباع شده هدایت هیدرولیکی ممکن است از 10^{-2} تا 10^{-5} متر در روز تغییر کند. درز و ترک‌هایی که با خاک پر شده‌اند موجب کاهش تراوایی در بخش فوقانی لایه‌های زیرزمینی می‌شوند، در حالی که درز و ترک‌های بسته در بخش تحتانی لایه‌های زیرزمینی موجب کاهش تراوایی می‌شوند. به طور کلی رفتار حرکت آب، از قانون دارسی تبعیت می‌کند، اما پاره‌ای موارد که جریان آب مغشوش است ممکن است خارج از قوانین دارسی عمل کند.

۸-۱ گسترش و پراکندگی نواحی کارستی

رخمونهای سنگهای کربناته در مجموع ۱۲ درصد قاره‌ها، شامل سرزمینهای مرتفع و دشتهای را فراگرفته‌اند. با توجه به وسعت زمینهای کربناته به نظر می‌رسد که اشکال و رخساره‌های مختلف کارستی در ۷ تا ۱۰ درصد این گونه مناطق وجود داشته باشد. مورفولوژی کارستی بیشتر در نیمکره شمالی در نواحی مرطوب تا نیمه مرطوب که میزان بارندگی بالاتر از ۲۵۰ تا ۳۰۰۰ میلیمتر است دیده می‌شود (شکل ۹-۱).

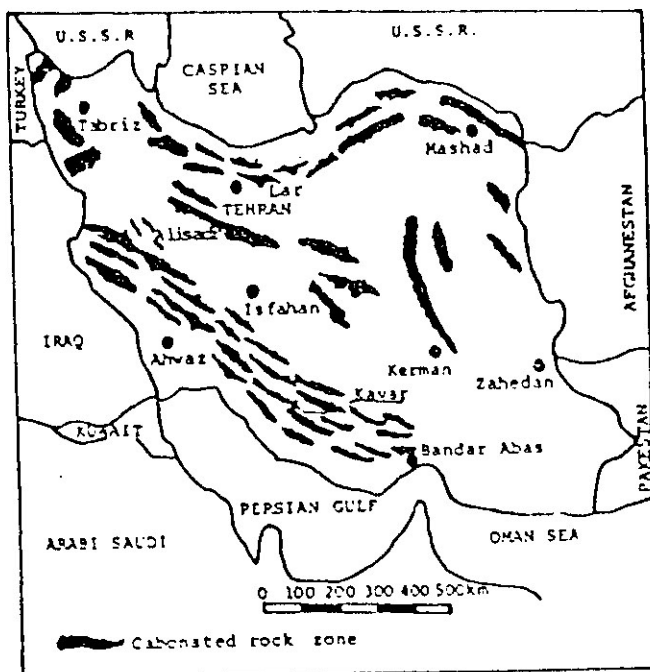


شکل ۹-۱- پراکندگی جغرافیایی سنگهای کربناته در دنیا [۵]

1- Freeze

2- Cherry

در ایران گسترش سنگهای کربناته حدود ۱۵۰ هزار کیلومتر مربع برآورده شده است که از پیش تحت تأثیر پدیده کارستی قرار گرفته اند (شکل ۱-۱۰). این سنگها عمدتاً متعلق به سازندهای باسن ژوراسیک تا الیگومیوسن هستند که در نواحی البرز و ارتفاعات زاگرس مشاهده می شوند. بررسی مناطق کارستی کشور از سالها پیش آغاز شده و در جدول ۱-۳ مطالعات جامع (نیمه تفصیلی) حوضه های کارستی کشور در طول برنامه پنج ساله دوم نشان داده شده است [۵].



شکل ۱-۱۰- گسترش سنگهای کربناته در ایران این سنگها غالباً به دورانهای ژوراسیک تا الیگومیوسن متعلق هستند. [۵]

جدول ۱-۳- برنامه مطالعات جامع (نیمه تفصیلی) حوزه‌های کارستی کشور در طول برنامه پنج ساله

دوم [۶]

رتبه	نام حوزه کارستی	وسعت کیلومتر مربع	سالهای مطالعات پیش بینی شده ۷۴-۷۵-۷۶-۷۷-۷۸	ملاحظات
۱	خلیج فارس	۹۰۰۰	۲	مطالعات شناسائی در سال ۱۳۵۲ انجام و نتیجه مثبت بدست آمده است
۲	بختگان	۲۷۰۰۰	۲/۵	مطالعات شناسائی در سال ۱۳۵۲ انجام و نتیجه مثبت بدست آمده است
۳	ارومیه	۵۰۰۰	۲	مطالعات شناسائی در سال ۱۳۷۲ انجام و نتیجه مثبت بدست آمده است
۴	الوند	۲۷۰۰	۲	مطالعات شناسائی در حال انجام است
۵	شاهرود دامغان و سمنان	۴۹۰۰	۲	مطالعات شناسائی در سال ۱۳۷۱ انجام و نتیجه مثبت بدست آمده است
۶	حاجی آباد	۷۳۹۲	۲/۵	مطالعات شناسائی در سال ۱۳۷۱ انجام و نتیجه مثبت بدست آمده است
۷	کشف رود مشهد	۲۲۰۰۰	۲/۵	مطالعات شناسائی در سال ۱۳۷۱ به پایان رسیده است

فصل دوم

روشهای شناسایی و اکتشاف کارستها

۱-۲ آشنایی

در این فصول مروری کلی بر روشهای مورد استفاده در اکتشاف کارستها و سینک هولها خواهیم داشت. اکثر این روشها قبلاً توسط افراد مختلف در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته و نتایج مثبتی نیز از آنها بدست آمده است. نکته لازم در مورد این روشها این است که روشهای ذکر شده در این بخش باید با آگاهی کامل از منطقه و وضعیت مورفولوژیکی و لیتولوژیکی آنها مورد استفاده قرار گیرند تا نتایج بدست آمده قابل تفسیر و تعبیر و در نهایت قابل نتیجه گیری باشند. ضمناً هدف اصلی همه روشهای تحقیقاتی باید تعیین و تهیه یک مقطع عرضی دو بعدی از منطقه مورد مطالعه باشد. بنابراین روشهایی که قادر به ارائه اطلاعات راجع به یک یا یک قسمت محدود از یک منطقه باشند، نمیتوانند برای کارها و طراحیهای مهندسی مورد استفاده قرار گیرند.

اقتصادی بودن، مؤثر بودن، بهترین تطابق با شرایط پروژه و هدف برنامه نکته‌هایی هستند که بوسیله آنها می‌توان بهترین روش را برای یک منطقه انتخاب کرد. به خاطر اینکه مناطق کارستی، زمینهای آهکی درزه دار و حفره داری هستند که در اثر عملکرد آبهای زیرزمینی بوجود آمده‌اند، بنابراین شناخت این حفرات و درزه‌ها به معنی شناخت مناطق کارستی است. همچنین سینک هولها نیز به دلیل خطرات بالقوه‌ای که برای پروژه‌ها و سازه‌های مهندسی دارند در این بررسی مورد نظر قرار گرفته‌اند. در این فصل روشهایی مورد استفاده که تا به حال در مناطق مختلف به صورت کلی مورد بررسی قرار گرفته اند بررسی خواند شد.

۲-۲ شواهد زمین شناسی

شواهد زمین‌شناسی و خصوصیات فیزیکی از علائم سطحی فرونشست سینک هولها است. برای تعیین اینکه نشست در یک منطقه ناشی از فعالیت سینک هولهاست یا نه باید شواهد فیزیکی از این فعالیت را به دست آورد. در زیر محل نشست باید یک فرورفتگی، شکاف یا چاه عمودی در سنگ بستر با قابلیت حل شدن در زیر وجود داشته باشد. لایه‌های خاک در پایین در داخل سینک هول فرو می‌ریزند. اگر در منطقه یک لایه رسی وجود داشته باشد که معمولاً در اکثر مناطق نیز وجود دارد، قسمت انتهایی سینک هول روی آن قرار می‌گیرد و یک ناپیوستگی به وجود می‌آورد. سینک هولها با اشکال قیفی، استوانه‌ای یا لنگی قابل تشخیص هستند که به وسیله رسوباتی که از توالی طبیعی چینه‌شناسی پیروی نمی‌کنند، پر شده‌اند. در حالی که در زمینهای پست مواد پر کننده سینک هولها شامل تورب و مواد رسی و سنگهای مختلف می‌باشند. در سینک هولهای فعال، رسوبات معمولاً خیلی سست و نرم هستند.

شواهد زمین‌شناسی باید این قدرت را داشته باشند که بتوانند مقایسه‌ای بین مناطق نشست کرده و محیط اطراف آن را که در آنها فرونشست مؤثر نبوده، ارائه کنند. شرایطی که در آنها فرسایش زیر سطحی و متوقف شدن توسعه سینک هول وجود داشته باشد، محدود به مناطق خاصی می‌شود. شرایط زمین در محلی که یک سینک هول وجود دارد، از اطراف آن که سینک هول در آنها اثر نگذاشته است، فرق می‌کند. برای مقایسه و تشخیص این دو منطقه باید هم داخل و هم خارج محدوده اثر سینک هول مورد بررسی قرار گیرد [۳].

۳-۲ روش لرزه‌ای

از روش لرزه‌ای در اکتشاف کارستها به دو صورت می‌توان استفاده کرد که عبارتند از روش لرزه‌ای انکساری و روش لرزه‌ای انعکاسی. در این بخش مروری بر کاربردهای این دو روش خواهیم داشت:

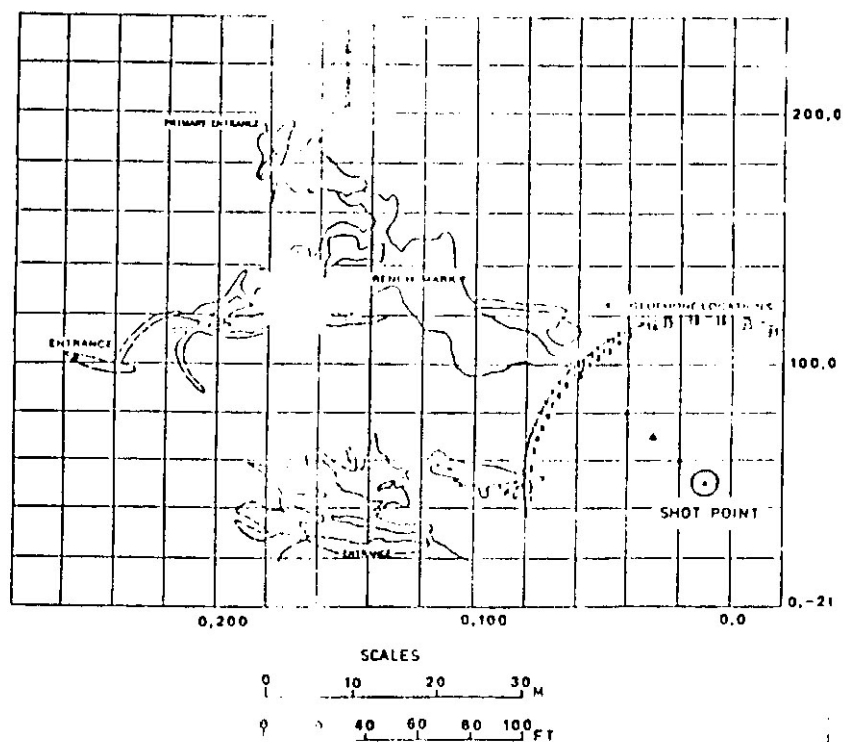
۳-۲-۱ روش لرزه‌ای انکساری

برای تشخیص غارها، روش لرزه‌ای انکساری با آرایش بادبزی از موقعیت بالایی برخوردار است. تکنیک لرزه‌ای انکساری بسیار ساده‌است و فقط به یک لرزه سنج و یک چکش سنگین باری تولید امواج نیاز دارد. معمولاً فاصله به یک لرزه سنج و یک چکش سنگین برای تولید امواج نیاز دارد. معمولاً فاصله بین منبع تولید موج تا لرزه سنج (ژئوفون) را چهار برابر عمق مورد کاهش در نظر می‌گیرند. تقویت کننده لرزه سنج باید طوری تنظیم شود تا بتواند بیشترین سیگنال را بدون در نظر گرفتن ضربه چکش دریافت کند.

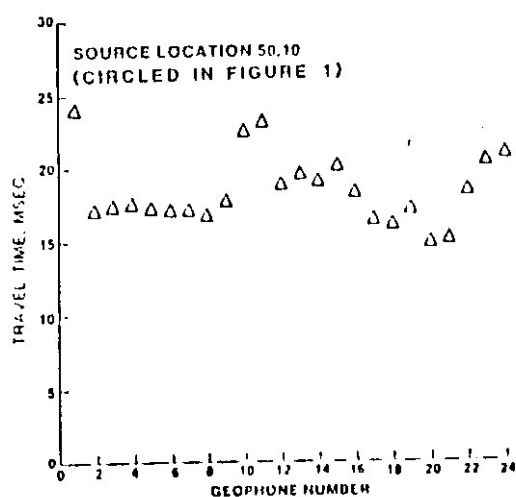
برداشت با پیش رفتن در طول یک خط و ثبت سیگنال لرزه‌ای حاصل از هر ضربه چکش، در حالی که فاصله بین منبع و ثبت کنند ثابت است. انجام می‌شود. با تکرار این مراحل در طول خطوط موازی هم می‌توان کل منطقه را پوشش داد. بنابراین همه امواج ثبت شده به طور یکسان و همگن کل منطقه را شامل خواهد شد و می‌توان تفسیر را بر پایه این اطلاعات انجام داد. وجود آنومالی به وسیله اختلاف مشخص بین یک محل با محیط اطراف در داده‌های ثبت شده نمایان می‌شود. اختلاف داده‌ها ممکن است شامل اختلاف در زمان ورود امواج، دامنه و فرکانس باشد. این نکته نباید فراموش شود که وجود آنومالیهای لرزه‌ای همیشه ارتباط به غارها ندارد. اما یک اپراتور با تجربه می‌تواند، علائم دریافتی را با شرایط زیر سطح زمین ارتباط دهد، به ویژه وقتی که تعدادی از آنومالیهای منطقه به کمک عملیات حفاری مورد بررسی و شناسایی قرار گرفته باشند. شکل امواج انکساری نیز می‌تواند یک ابزار شناسایی باشد، اما این روش از لحاظ عمق کاوش محدودیت دارد

روش لرزه‌ای انکساری بادبزی در اجرا به صورت روش یاد شده‌است، با این تفاوت که تعدادی لرزه سنج که به صورت قوسی قرار گرفته‌اند در پی جویی به کار می‌رود (شکل ۲-۱). اگر شرایط زیر سطحی یکنواخت باشد زمانهای دریافت امواج در لرزه سنجها یکسان خواهد بود و لازم به‌همگن کردن آنها نیست. بنابراین وجود یک آنومالی به راحتی با توجه به تغییر مشخص در زمان رسیدن امواج به یک چند لرزه سنج قابل تشخیص خواهد بود. در مورد یک غار یا حفره زمان رسیدن امواج به طور برجسته‌ای افزایش خواهند یافت. بعضی نتایج تیپیک حاصل از آرایش بادبزی در شکل ۲-۲ نشان داده شده‌است این نتایج متعلق به منطقه مدفورد^۱ واقع در حدود ۱۹ کیلومتری شمال او کالا در فلوریدا است.

به‌این نکته باید توجه شود که زمان حرکت امواج لرزه‌ای برای لرزه سنجهایی که در موقعیتهای ۱، ۱۰، ۱۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴ قرار دارند، به طور محسوسی افزایش یافته است. این در حالی است که لرزه‌سنجهای ۱، ۱۰، ۱۱ درست در بالای غارهای شناخته شده‌ای که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است، قرار دارند. در اکتشافات مرحله بعدی، گمانه‌ای که در موقعیت ۲۳ و ۲۴ حفر شد غارهای ناشناخته‌ای را که قبلاً به نقشه در نیامده بودند، کشف کرد [۴ و ۱۰].



شکل ۲-۱- نقشه غار مدفورد به همراه طرح آرایش بادبزی [۴]

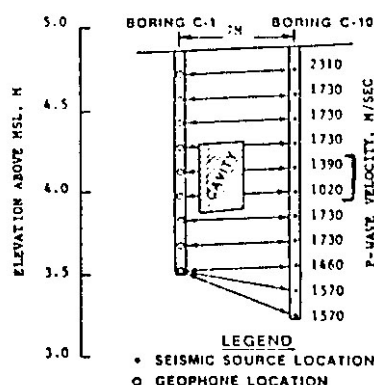


شکل ۲-۲- نتایج آزمایش با آرایش بادبزی در منطقه مدفورد [۴]

در طول تحقیقات دیگری که در شهر والت دیسنی در حدود ۱۶ کیلومتری جنوب غربی اورلاند و فلوریدا با استفاده از روشهای لرزه‌ای انعکاسی انجام گرفت، مشخص شد که این روش می‌تواند سینک هول را هنگامی که نسبتاً بزرگ باشد، تعیین

کند. با این روش عمق یک سینک هول را به دستی نمی‌توان تعیین کرد. علتش شاید آن باشد که امواج در اثر برخورد به لبه‌های یک سینک هول از مسیر خود منحرف می‌شوند، بدون اینکه زمان قابل محسوسی از دست برود. همان طور که ذکر شد با این روش نمی‌توان سینک هولهای کوچک را مشخص ساخت.

روشهای لرزه‌ای دیگری نیز از قبیل روش لرزه‌ای میان بر به طور وسیعی در تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که هدف آنها تعیین شدت امواج و سرعت انتشار امواج است، که تابعی از عمق در زیر سطح زمین اند. از این روشها برای مشخص کردن غارها استفاده شده‌است، زیرا غارها در خصوصیات انتشار امواج از جمله در سرعت، فرکانس و دامنه‌انها اثر می‌گذارند. از دیگر اثراتی که غارها بر روی امواج می‌گذارند، می‌توان از پدیده پراش و همچنین پدیده نظم امواج نام برد. از این اثرات برای تعیین و ترسیم سیمای غارها استفاده شده‌است. در حالتی که غارها خالی باشند، تاخیر زمان ورود امواج ممکن است، نشانه مهمی از وجود یک غار باشد، که در این روش منبع تولید لرزه باید پیوسته یا لحظه‌ای باشد. مثالی از نتایج استفاده از روش لرزه‌ای میان‌بر که از منبع تولید موج لحظه‌ای (ضربه‌ای) استفاده شده در شکل ۲-۳ نشان داده شده است که در آن تغییر در سرعت انتشار امواج در عرض غار آشکار شده است.



شکل ۲-۳- پروفیل لرزه‌ای میان‌بر [۴]

۲-۳-۲ روش لرزه‌ای انعکاسی

در اکثر تحقیقاتی که برای تعیین غارها از روش لرزه‌ای استفاده شده، سه پدیده‌ای که بر وجود غار دلالت می‌کنند عبارتند از: نوسانات آزاد یا تشدید امواج در دیواره‌های غار، تقلیل دامنه امواج و تاخیر در زمان ورود امواج، تشخیص یک وزن حفره دار سطحی که مواد اطراف آن دست نخورده هستند، با استفاده از روش لرزه‌ای انعکاسی به مقدار زیادی به فرکانس امواج بستگی دارد. ویداس^۱ ثابت کرد که حداقل ضخامت یک لایه برای اینکه قابل تشخیص باشد، باید یک چهارم طول موج فرستنده باشد.

1 - Widess

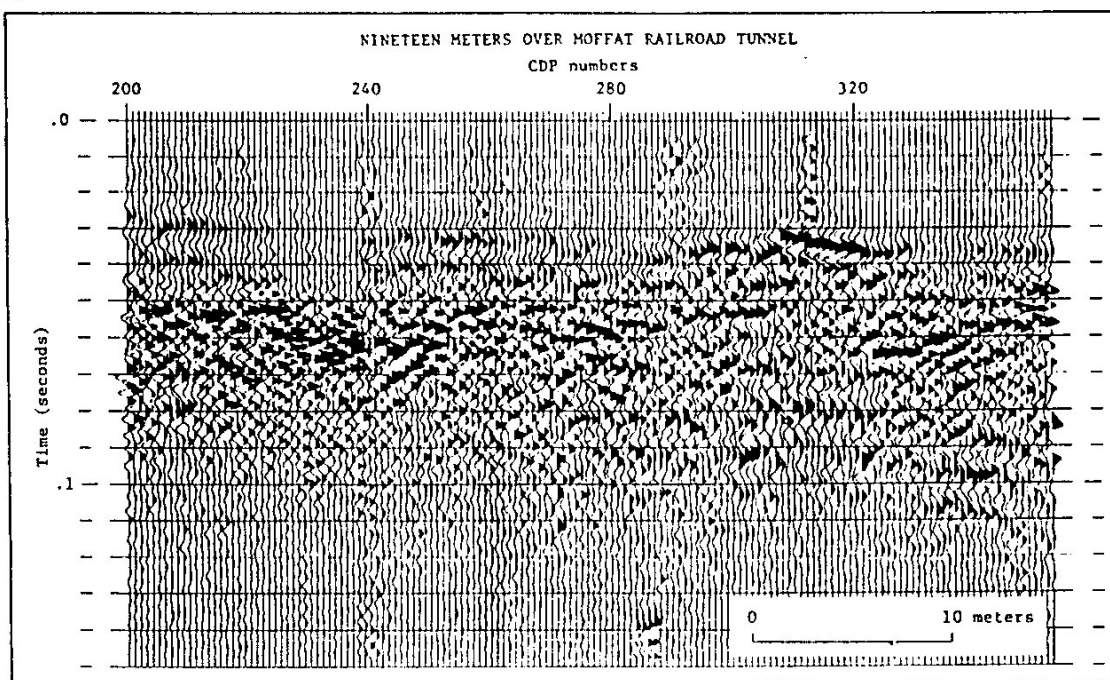
از آنجا که فرکانس با عکس طول موج متناسب است، بنابراین هر چه فرکانس امواج بیشتر باشد، امکان تشخیص لایه‌های نازک تر بیشتر می‌شود. قابلیت تعیین غارها با کوتاه شدن طول موج لرزه محدود می‌شود. [۷ و ۹]

افزایش فرکانس امواج و افزایش نسبت سیگنال به پارازیت، توانایی تعیین زونهای حفره دار موجود در زیرزمین را بالا می‌برد. افزایش نسبت سیگنال بوسیله مراقبت دقیق از صفحات لرزه سنج، حداقل کردن پارازیت‌های محیط و کنترل امواجی که از هوا به لرزه سنج می‌رسد، میسر خواهد بود. به منظور افزایش داده‌های ثبت شده می‌توان اقدامات زیر را انجام داد: افزایش فرکانس فیلترهای فرکانس پایین، انتخاب مناسب منبع لرزه، مراقبت دقیق در تصحیحات و افزایش سرعت پردازش داده‌های دیجیتال. مقدار اطلاعات فرکانس بالایی که بوسیله لرزه سنجها ثبت می‌شود، به شرایط زمین‌شناسی در نزدیک سطح زمین بستگی دارد. حال برای بررسی عملکرد روش لرزه‌ای انعکاسی به شرح چند مورد کاری انجام شده در کشورهای مختلف می‌پردازیم و ضمناً در هر مثال ضعف و قوت این روش را برای تعیین حفرات زیرزمینی بررسی می‌کنیم.

الف - تعیین یک غار در سنگ گرانیت

امکان تشخیص زونهای حفره دار در سنگهای سخت با استفاده از روش لرزه‌ای انعکاسی مشکل است. مقاومت در برابر امواج صوتی در بین مرز دو ناحیه مهم ترین فاکتور تعیین کننده در مقدار انرژی لرزه‌ای انعکاسی می‌باشد. یک غار پر شده از هوا در سنگ اکثر انرژی انعکاسی امواج را جذب می‌کند. بنابراین ثبت دقیق و آشکار قسمت بالایی یک غار، به خوبی پیش بینی تئوری نخواهد بود. ثبت یک غار در سنگ ناهمگن بستگی به طول موج منتشر شده دارد که معمولاً امکان تشخیص یک غار در سنگ ناهمگن با استفاده از روش انعکاسی استاندارد مشکل و غیر ممکن است.

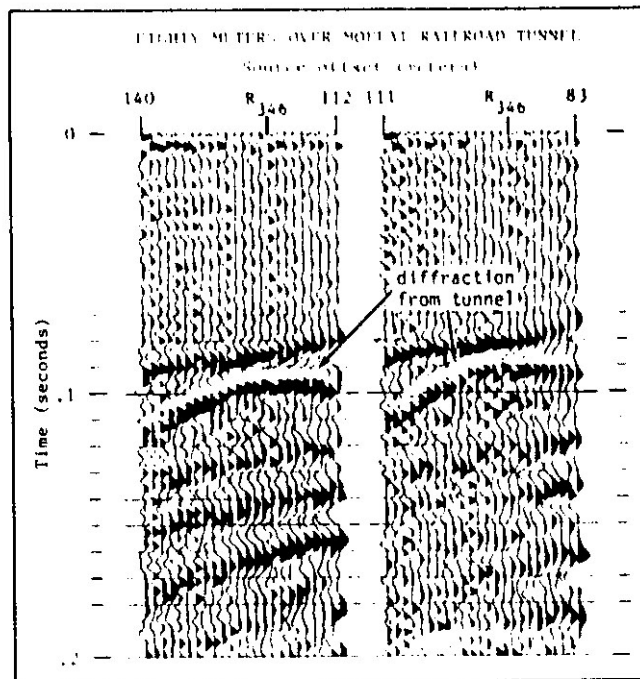
به منظور تعیین پارامترهای مؤثر در تعیین غارها در مناطقی که دارای سنگهای سخت (سنگ آهک ماسیو، دولومیت ماسیو، گرانیت و ...) هستند، یک سری آزمایشات بر روی تونلهای شناخته شده در داخل گرانیت انجام گرفت. محل انتخاب شده برای آزمایشات یک تونل راه آهن نزدیک پارک زمستانی کلرداو، قرار داشت. تونل راه آهن دارای قطر ۶ متر بوده و مطالعات لرزه‌ای انعکاسی سطحی، در عرض تونل در منطقه‌ای که تونل ۱۹ متر زیر سطح زمین قرار داشت، انجام داده شده. در شکل ۲-۴ نتایج این مطالعات آورده شده است. داده‌های موجود در شکل دارای آرایشهایی با فاصله منبع تا دریافت کننده از ۱۸/۳ متر تا ۲۰/۱ متر هستند. انعکاسهایی که در فاصله لرزه سنجها شماره ۲۹۵ تا ۳۲۵ قرار دارند، نماینده انعکاس مستقیم از قسمت بالای تونل است. شکل یک کاسه برگشته، نشان دهنده انحنای سقف تونل می‌باشد. فرکانس امواج انعکاسی در حدود ۱۸۰ هرتز است. زیرا مشابه این عارضه در فواصل زمانی ۷۰ تا ۱۳۰ میلی ثانیه به صورت عوارضی از فرکانس پایین تر مشابه فرکانس امواج انعکاسی در ۴۰ میلی ثانیه مشاهده می‌شود. فرکانس امواج که در پایین این عارضه قرار دارد، ۱۰۰ هرتز می‌باشد، این عارضه به اثر متقابل امواج لرزه‌ای با تونل نسبت داده می‌شود. عارضه فرکانس بالا در ۷۰ - ۵۰ میلی ثانیه مشاهده می‌شود و امواجی که از هوا می‌آیند، با امواج منبع ترکیب می‌شوند. [۹]



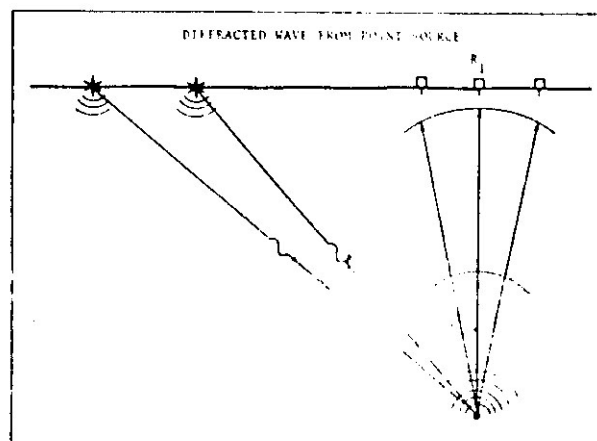
شکل ۲-۴- با توجه به شکل کانالهای ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱ دارای دافعه زیادی هستند و مرکز آنومالی در CDP 310 قرار دارد. عارضه دامنه بالا در ۴۵ میلی ثانیه به انعکاس امواج از بالای تونل نسبت داده می شود [۷]

برای ارزیابی نتایج و قابلیت تجزیه و تحلیل روش، آزمایشات بر روی تونلی در عمق ۸۰ متری انجام پذیرفت. شکل ۲-۵ دو میدان ثبت شده از مطالعات لرزه‌ای که در آنها لرزه سنجها در فاصله‌های مختلف و به صورت افقی قرار دارد، نشان می‌دهد. تعداد لرزه سنجها ۳۴۶ عدد بوده و زودترین زمان ورودی امواج به ژئوفون ۶۰ میلی ثانیه در هر دو میدان ثبت شده است. شکل ۲-۶ مسیر حرکت امواج را نشان می‌دهد که اثر برخورد با بالای تونل در آنها منعکس شده است. اولین لرزه‌سنجی که امواج انعکاسی را دریافت می‌کند، درست بالای تونل قرار دارد. در اثر دور شدن نقطه انفجار از تونل زمان ورودی امواج به تمام لرزه سنجها افزایش یافته ولی زودترین زمان ورودی همیشه متعلق به لرزه‌سنجی است که بالای تونل قرار دارد. در شکل ۲-۵ بیش از ۵۰ عارضه در میدانهای ثبت شده در فواصل مختلف در طول آزمایشات به دست آمده، که اینها نشان دهنده وجود زون ناپیوستگی مربوط به صدا سطح زمین است.

به موازات تونل مورد بحث، تونل آبی نیز قرار داشت. قطر این تونل ۲/۵ متر و فاصله افقی آن تا تونل مورد بحث ۲۵ متر است. آزمایشات اولیه که در مجاور تونل راه آهن مورد بحث انجام شد، تونل آب را مشخص نکرد. از آنجا که تونل راه آهن خالی بود، احتمالاً به علت کوچک بودن ضریب انعکاسی، انرژی امواج کمتر از آن بوده‌اند، که بتوانند آشکار شوند زیرا سرعت امواج p در آب، نصف سرعت امواج در گرانیت بوده و چگالی گرانیت ۲/۷ برابر چگالی آب است. بنابراین ضریب انعکاس برابر ۰/۷ خواهد شد، که به اندازه کافی بالاست تا بتواند انرژی بازگشتی خوبی برای امواج تولید کند.



شکل ۲-۵- میدان آزمایش شامل ۵ انفجار و ۵۰ کانال است. الگوی پراش در R346 متمرکز است [۹]



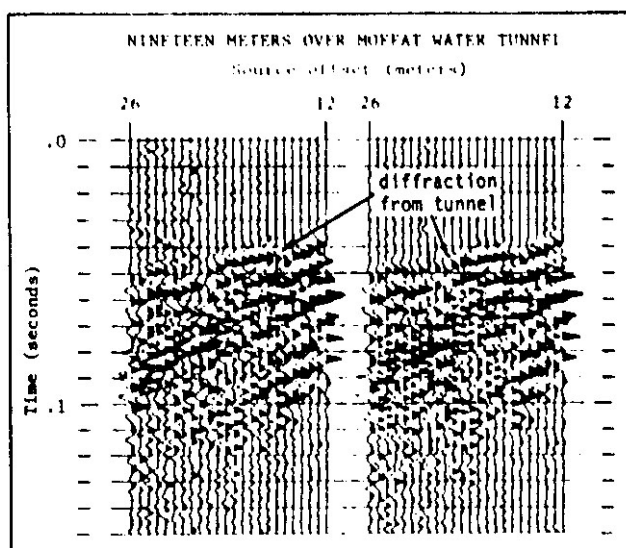
شکل ۲-۶- دیاگرام مسیر حرکت امواج از فرستنده تا دریافت کننده. [۹]

هدف بعدی کاربرد روش انعکاسی، تعیین تونل آب بوده است. همانطور که انتظار می‌رفت، فرکانس به کار برده شده در تعیین تونل راه آهن در منطقه مورد بررسی (که تونل در عمق ۱۹ متری قرار داشت)، به اندازه کافی زیاد نبود. بنابراین فرکانس فیلتر پایین گذر از ۳۴۰ به ۴۸۰ هرتز افزایش داده شد. همچنین انرژی منبع به اندازه کافی زیاد شد تا امواج منعکس شده قابل ثبت باشند. نتایج به دست آمده در بالای تونل آب (شکل ۲-۷) با نتایج حاصله در بالای تونل راه آهن در عمق ۸۰ متری خیلی شبیه به هم هستند. در الگوی زمان ورودی امواج انعکاسی مثل حالت قبل کوتاه ترین زمان مربوط به لرزه‌سنجی است که

مستقیماً بالای تونل آب قرار دارد و با دور شدن منبع تولید امواج از تونل، زمان رسیدن امواج به لرزه سنج نیز زیاد می‌شود. پس از تصحیح امواج منعکس شده از تونل راه آهن، موقعیت تونل آب در ۲۵ متری جنوب تونل راه آهن تشخیص داده شد [۹ و ۷].

ب - شناسایی و مکان یابی غار پر شده از آب

یک لایه زغال سنگ در شهر پیتسبورگ^۱ در شمال شرقی کانزاس قرار دارد. نقشه جزئیات کامل محل‌های استخراج شده از معدنکاری که در گذشته در این منطقه انجام شده موجود نبوده است. به منظور احداث ساختمانهای جدید، تشخیص دقیق محل حفرات احساس می‌شد. بنابراین یک شبکه حفاری در محل اجرا شد. اما جدیداً به خاطر تعیین قسمتهایی که از آب پر شده، مطالعات لرزه‌ای انعکاسی انجام گرفت. این تحقیقات بیشتر در مناطقی به اجرا درآمد که وجود زونهای حفره دار در لایه زغال سنگ به وسیله حفاری تعیین شده بود.



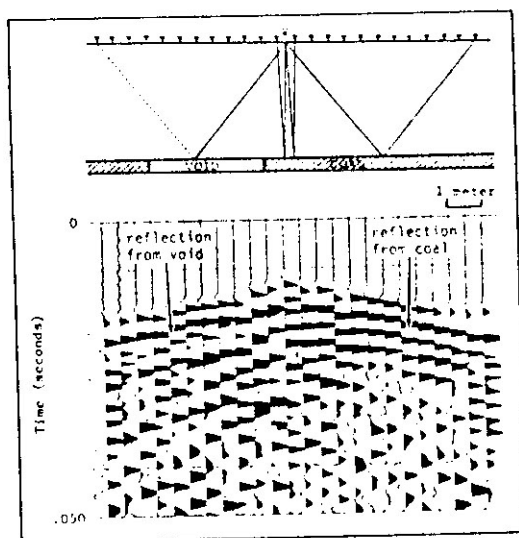
شکل ۲-۷- تصویری از زمان امواج منعکس شده از تونل آب که منبع تولید موج در یک گمانه قرار دارد [۹]

به منظور افزایش انرژی امواج انعکاسی از لایه زغال سنگ در عمق ۱۰ متری، کمترین فواصل گیرنده و فرستنده از هم ۱/۴ متر در نظر گرفته شد. از این فواصل نمونه‌گیری ۸ تا ۱۲ اثر زغال سنگ به دست آمد، که نشان می‌دهد این ستون زغال سنگ افقی و به شکل استوانه، است. سیستم ثبت کننده دارای ۲۴ کانال بوده و در هر کانال از $\frac{1}{4}$ میلی‌ثانیه تا ۱۲۵ میلی‌ثانیه

1 - Pittsburg

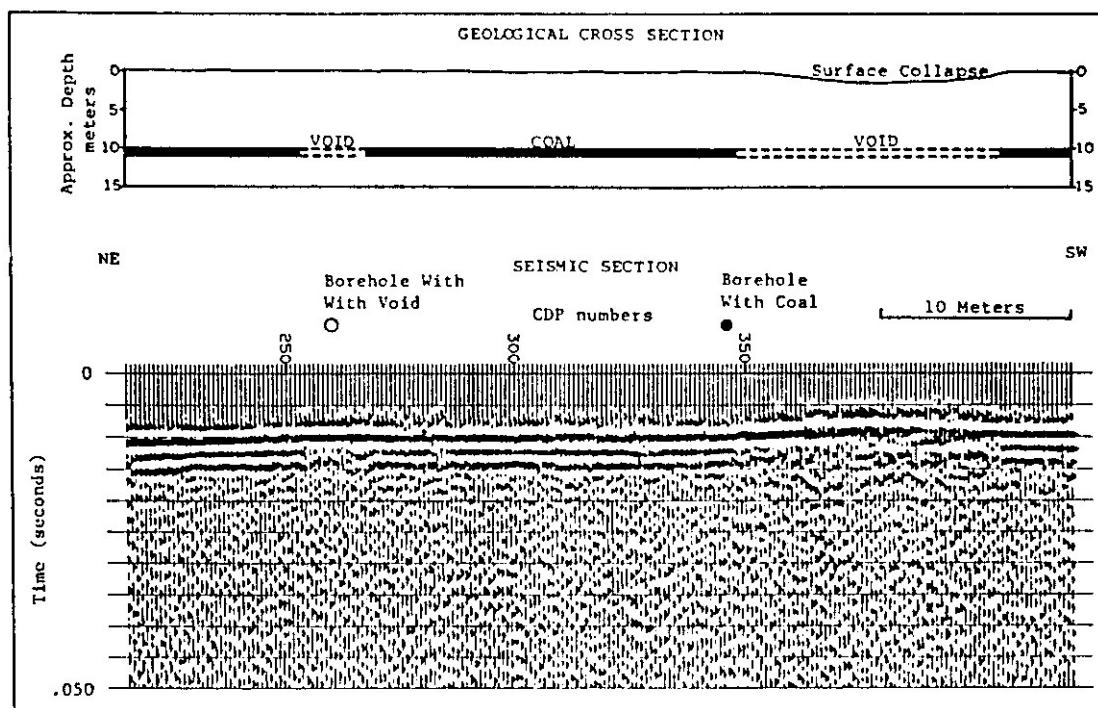
ثبت می‌شود. یک تبدیل کننده آنالوگ به دیجیتال دارای فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع ۳۴۰ هرتز در ناحیه گذر آن وجود دارد. گیرنده، ضد رطوبت و دارای فرکانس سیگنال ۱۰۰Hz می‌باشد. منبع تولید امواج یک تفنگ ۰.۶ - ۳۰ دارای صدا خفه‌کن است.

در منطقه، ۲۴ کانال از لرزه سنجها در یک ردیف قرار داده شد، که تعدادی از این لرزه سنجها در بالای لایه زغال سنگ دست نخورده و تعدادی دیگر در منطقه‌ای که در اثر معدن کاری و استخراج لایه زغال سنگ حفره دار شده بود، قرار داده شدند. در شکل ۸-۲ نحوه قرار گرفتن لرزه سنجها همراه با مقطع زمین‌شناسی و نزدیک ترین و دورترین آرایش ژئوفونها نشان داده شده‌است. در طرف راست تصویر، امواج دریافت شده از لایه زغال دست نخورده نشان داده شده‌است. در طرف چپ تصویر، یک زون حفره دار قرار دارد، که سیگنالهای دریافتی وجود آن را اثبات می‌کنند.



شکل ۸-۲- تصویر زمین‌شناسی به‌همراه مقطع لرزه‌ای انعکاسی. فاصله نزدیکترین دریافت کننده از منبع ۳/۲۵ متر و دورترین آن ۸/۷۵ متر است [۱۰]

شکل ۹-۲ مقطع لرزه‌ای انعکاسی به همراه مقطع زمین‌شناسی تفسیر شده را نشان می‌دهد. خط ۱ مربوط به انفجار در بین دو گمانه است، که در موقعیت ژئوفون CDP:۲۶۰ وجود یک غار در عمق ۹ متری را ثابت می‌کند و دیگری در موقعیت ژئوفون CDP:۳۴۶ نشان دهنده یک لایه زغال سنگ دست نخورده در عمق ۹ متری است. ریزش و نشست سطحی بین موقعیت ۴۰۵ و CDP:۳۰۵ که در عمق ۰/۷ متری اتفاق افتاده نشانه‌ای از وجود یک غار در زیر سطح زمین می‌باشد.



شکل ۹-۲- مقطع لرزه‌ای انعکاسی با مقطع زمین‌شناسی که نشان دهنده حفرات در لایه ذغال است.

چهار پیک بین ۱۰ تا ۳۰ میلی ثانیه در مقطع مشخص است [۱۰]

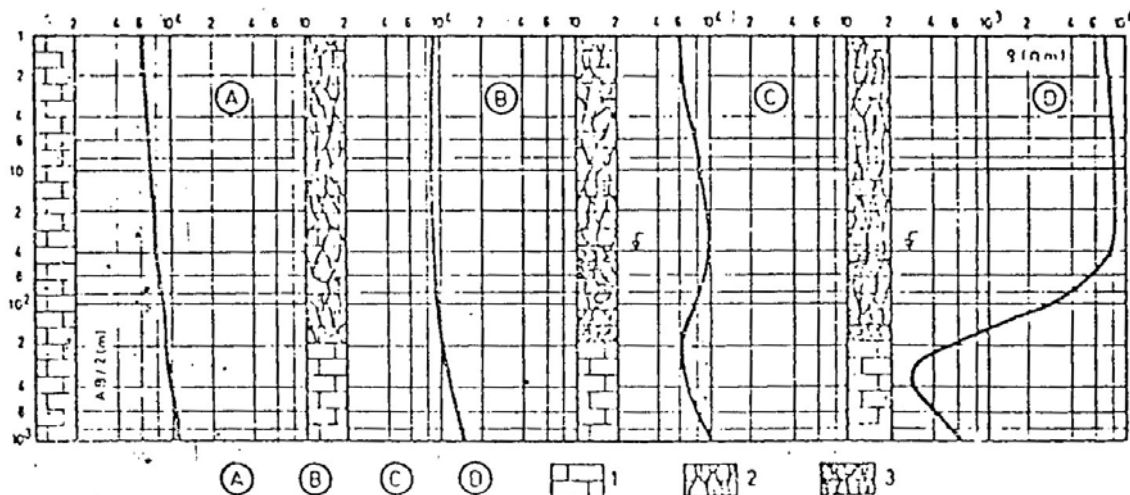
عوارض بدست آمده در ۲۵-۳۳ میلی ثانیه در سراسر مقطع مطابق با بخش بالایی لایه زغال و بالایی چال می‌باشد. قسمتهایی که پیوستگی خطوط از بین رفته و دامنه کاهش می‌یابد، نشان دهنده وجود غار می‌باشند. این زونهای حفره دار بوسیله داده‌های حفاری و نشست موجود در سطح ثابت شده است. کاهش دامنه این عوارض در بالایی غارهای پر شده از آب به برابر بودن ضریب انعکاس با مناطق مجاور نسبت داده شده است. از آنجا که سرعت صوت در آب موجود در غارها زیاده‌تر از سرعت صوت در لایه زغال است و همچنین سرعت صوت در لایه شیل بیشتر از هر دوی آنها است، بنابراین ضریب انعکاس برای مرز بین آب و شیل از ضریب انعکاس برای مرز بین زغال و شیل کوچک‌تر خواهد بود. پس دامنه انعکاس در بالایی غارهای پر شده از آب کاهش خواهد یافت.

روی هم رفته به علت وجود داده‌ها با کیفیت خوب در این روش امکان تعیین مرز حفرات میسر است. امواجی که از بالا و پایین لایه‌های زغال منعکس شده، نشان دهنده یک لایه زغال به ضخامت ۱ متر در عمق ۹ تا ۱۳ متری است. امواج انعکاس یافته از قسمت بالایی لایه زغال نشان دهنده کاهش دامنه انعکاس در قسمت بالایی غارهای پر شده از آب است. از تجربه و تحلیل جانبی مقطع، عرض غارها در حدود ۱/۵-۱ متر برآورد شد.

۴-۲-۱ روش مقاومت ویژه الکتریکی

در این روش، هدف تشخیص اختلاف مقاومت ویژه الکتریکی سنگهاست. قابلیت هدایت الکتریکی سنگها از قانون اهم تبعیت می کند. بطور کلی مقاومت الکتریکی سنگ به مقاومت الکتریکی آب جذب شده، مقدار آب موجود و شکل توزیع این آب در سنگ بستگی دارد، بطوری که اگر درجه شوری آب و یا مقدار آن در سنگ زیاد شود، مقاومت الکتریکی آن کم می شود. به همین علت در سنگ آهک متراکم مقاومت بیشتری داریم تا در سنگ آهک کارستی شده که اشباع از آب است. مقاومت الکتریکی سنگها پارامتر کاملاً متغیری است و دامنه تغییرات آن از یک تا چند اهم متر برای خاک رسی و مارن و از حدود ده تا چند صد اهم متر برای مخلوط شن و ماسه رسی و از حدود صد تا چندین هزار اهم متر برای سنگ آهک و سنگهای آذین تغییر می کند. لایه های خشک چندین هزار اهم متر مقاومت دارند [۱۱].

مقاومت الکتریکی، یکی از مهم ترین پارامترهای سنگ است. سنگهای کربناته که همان آهکها یا دولومیت های کارستی هستند، دارای ترکیبات همگن و مقاومت ویژه ثابتی هستند که اختلاف در مقاومت ویژه آنها می تواند ناشی از علل گفته شده در بالا باشد. با افزایش پدیده کارست، طبیعی است که در این مناطق، مقدار آب زیاد شده و در نتیجه مقاومت ویژه کم می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در سنگهای کربناته واقع در بالای منطقه آبدار، مقاومت بیشتر از نواحی عمیق تر است. تغییرات مقاومت ویژه را در یک ناحیه کارستی شده می توان به وضوح در شکل ۲-۱۰ دید.

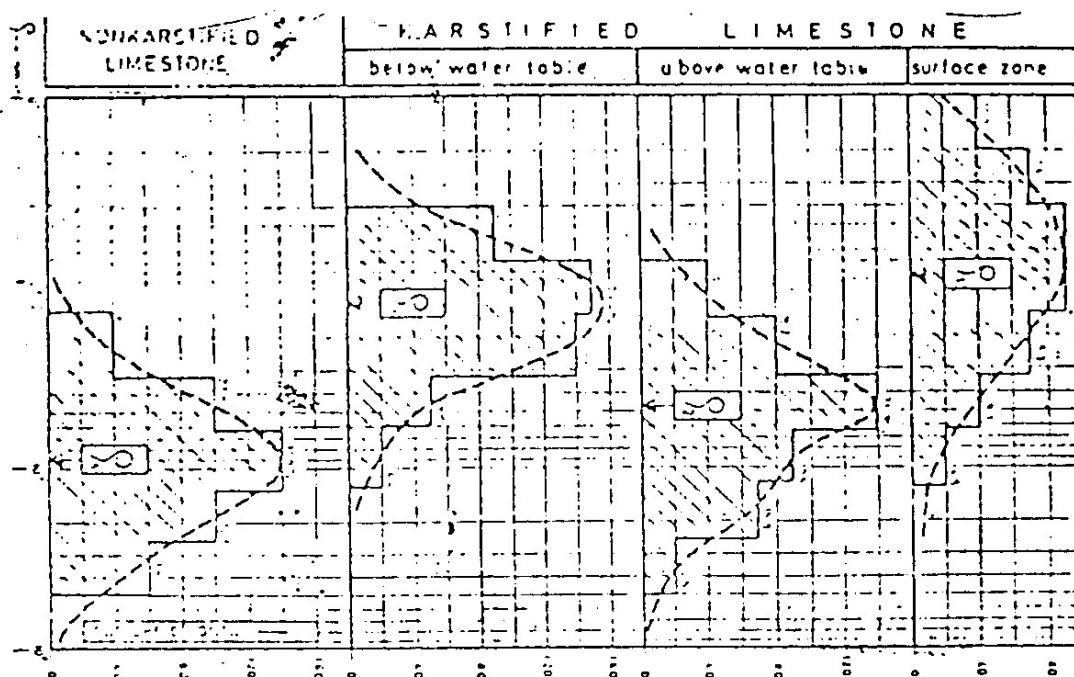


۱- آهک ۲- آهک کارستی شده ۳- آهک کارستی شده اشباع از آب

شکل ۲-۱۰- منحنی مقاومت ویژه بر روی یک منطقه آهکی [۱۲]

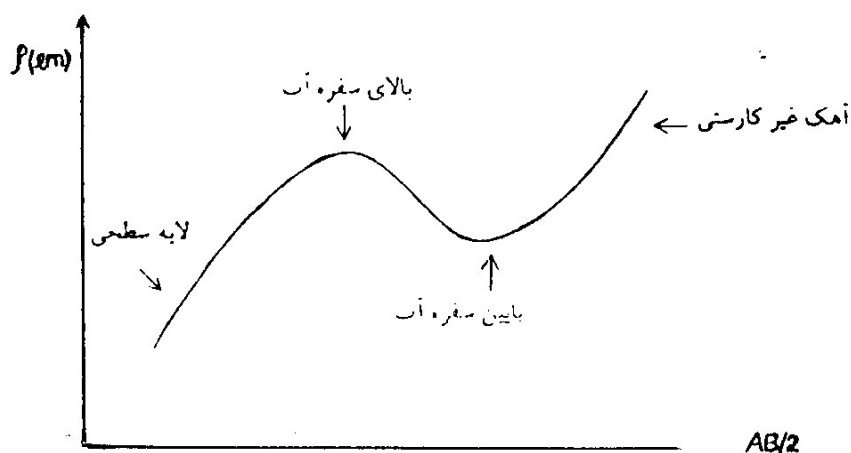
این شکل در واقع مقایسه‌ای است بین ناحیه‌ای که پدیده کارست در آن اتفاق افتاده و دارای درجات اشباع متفاوت از آب است. با ناحیه‌ای که هنوز کارستی نشده است. در این شکل چهار منطقه نشان داده شده که ناحیه A از شکل در واقع آهک متراکم بوده که پدیده کارست در آن روی نداده است و انتظار داریم که این ناحیه دارای مقاومت ویژه ثابتی باشد. با توجه به این ناحیه دیده می‌شود که تغییرات مقاومت ویژه با عمق تقریباً خطی می‌باشد. ناحیه B از شکل فوق معرف ناحیه‌ای است که در آن پدیده کارست روی داده ولی این پدیده با افزایش عمق کاهش داشته است. پس باید ناحیه‌ای که کارستی شده، دارای مقاومت کمتری از قسمت‌های عمیق تر ناحیه باشد.

شکل ۲-۱۰- نشان می‌دهد که هر چه به عمق می‌رویم، مقاومت ویژه زیاد می‌شود. در این شکل، نواحی C و D در واقع نواحی کارست شده‌ای هستند که از آب اشباع شده و درجه اشباع در ناحیه D بیشتر از ناحیه C است. از روی شکل می‌توان دید که در این قسمت افت ناگهانی مقاومت ویژه به علت وجود آب بوده و در قسمت D این افت شدیدتر است. در نهایت نتیجه این مطالعات را می‌تواند به صورت هیستوگرام نشان داد. برای رسم هیستوگرام، از مستطیل‌هایی که سطح آن متناسب با فراوانی باشد، استفاده می‌شود. به عنوان مثال داده‌های بدست آمده در منطقه‌ای از یوگسلاوی به صورت هیستوگرامی در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- هیستوگرام داده‌های مقاومت ویژه در یوگسلاوی [۱۲]

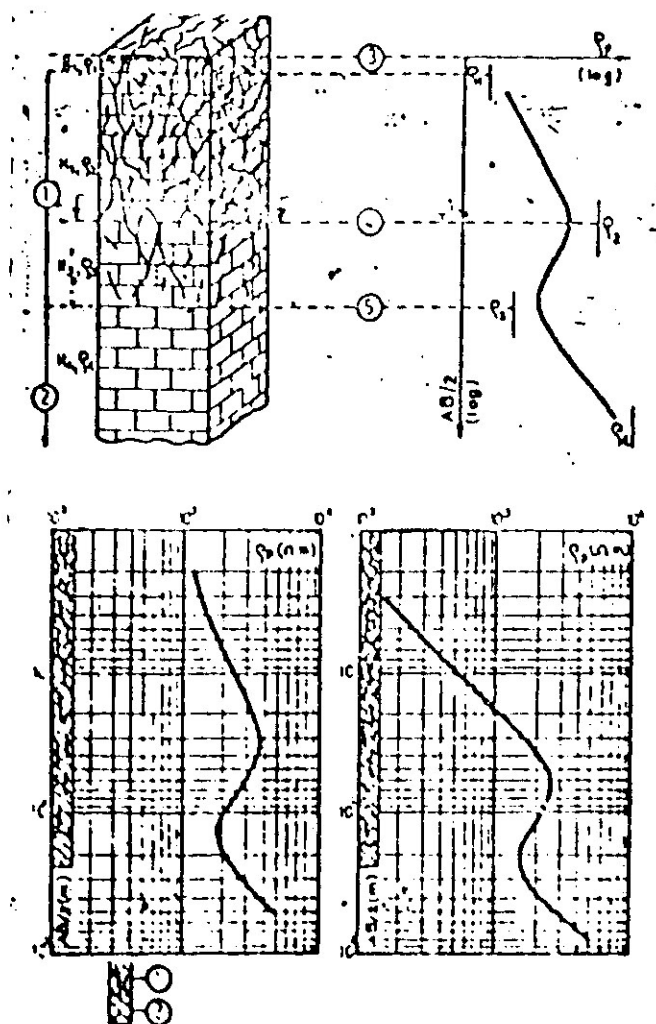
به طور کلی در این منطقه دو ناحیه آهکهای کارستی و غیر کارستی در نظر گرفته شده است. همان طوری که از شکل ۱۱-۲ پیدا است. مقاومت ویژه در آهکهای غیر کارستی بیشتر از آهکهای کارستی است. زیرا آهکهای کارستی عموماً حاوی آب هستند. در این مثال بخش آهکهای کارستی خود به سه ناحیه دیگر تقسیم شده است. در روی شکل این سه ناحیه را که شامل ناحیه سطحی، ناحیه بالای سفره آب زیرزمینی و ناحیه پایین سفره آب زیرزمینی هستند، می‌توان مشاهده کرد. همچنین از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که، ناحیه سطحی دارای کمترین مقاومت ویژه و ناحیه بالای سفره آب زیرزمینی دارای بیشترین مقاومت ویژه است. ناحیه پایین سفره آب زیرزمینی به علت آنکه حاوی آب می‌باشد دارای مقاومت کمتری از ناحیه بالای سفره آب می‌باشد. با توجه به گفته‌های بالا می‌توان تغییرات مقاومت ویژه را برای ناحیه کارستی به شکل ۱۲-۲ نشان داد.



شکل ۱۲-۲- منحنی تغییرات مقاومت ویژه در یک ناحیه کارستی [۱۲]

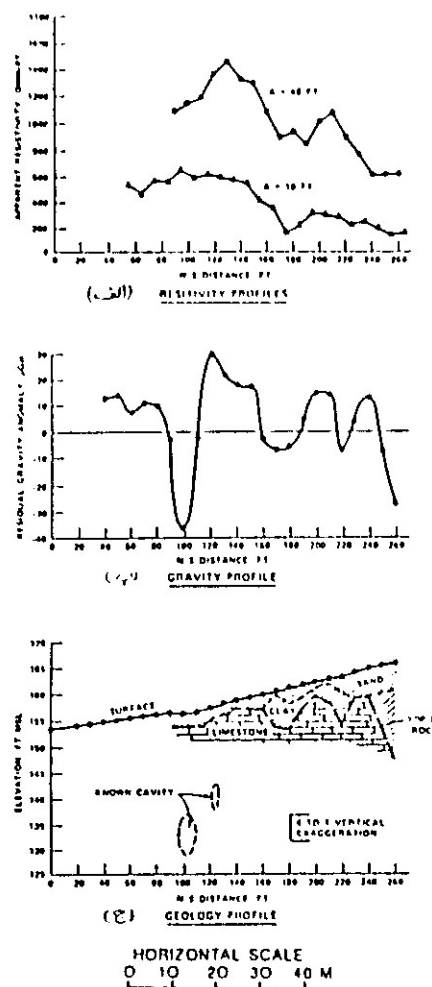
در تأیید این مطالب، به تفسیر یک نمونه عملی از منطقه‌ای در یوگسلاوی می‌پردازیم. در این مثال از آرایش شلومبرژه استفاده شده و نتایج حاصله در شکل ۱۳-۲ نشان داده شده است. ستون زمین‌شناسی و منحنی تغییرات مقاومت ویژه بر حسب عمق در شکل رسم شده، همانگونه که در شکل دیده می‌شود، منحنی بدست آمده همان منحنی تئوریک است. برای تأیید این مطلب دو چاه در منطقه مورد حفاری قرار گرفته و منحنیهای چاه‌پیمایی آنها در شکل ۱۳-۲ آورده شده است. این منحنیها نیز مطالب بالا را تأیید می‌کنند.

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که، که در یک ناحیه که پدیده کارست در آن رخ داده است، با چهار مطلقه مواجه خواهیم بود، اول ناحیه سطحی که دارای پایین‌ترین مقاومت ویژه است. دوم ناحیه فوقانی سفره‌اب زیرزمین که دارای مقاومت بیشتری از ناحیه سطحی است. سوم ناحیه زیر سفره آب زیرزمینی که دارای مقاومتی کمتر از ناحیه قبلی است که می‌توان علت این امر را جمع شدن آب در این بخش در اثر نیروی جاذبه زمین دانست و ناحیه چهارم آهکهای کارستی نشده متراکم می‌باشد، که دارای مقاومت بالایی هستند. کم بودن مقاومت ویژه ناحیه سطحی را می‌توان با ویژگیهایی نظیر دانه‌بندی، تخلخل و غیره مرتبط دانست [۱۳].



شکل ۲-۱۳- ستون زمین شناسی به همراه منحنی تئوری مقاومت ویژه [۱۲]

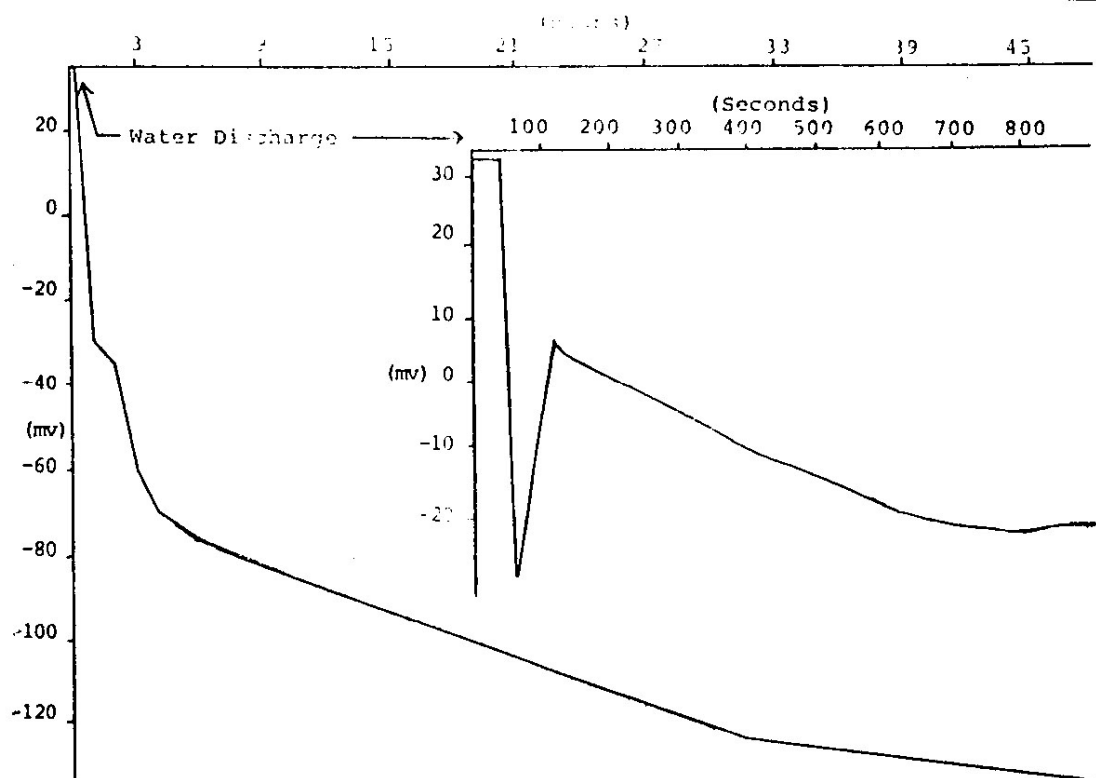
روش مقاومت ویژه الکتریکی هم در مراحل شناسایی و هم در مراحل تکمیلی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. از این روش در مناطق کارستی بیشتر با آرایش الکتریکی و نرو بریستو استفاده می‌شود که با یک فاصله الکترودی ثابت در طول پروفیل حرکت می‌کند. از این روش برای تحقیق در یک عوق طراحی شده و فاصله الکترودها عمق جستجو را مشخص می‌کنند این فاصله طوری انتخاب می‌شود، تا با شرایط کار و مقاصد مورد نظر مطابقت داشته باشد. شکل ۲-۱۴- الف یک نیم رخ مقاومت ویژه با آرایش الکترودی و نر را که در طول یکی از خطوط شبکه در منطقه مدفورد بدست آمده، نشان می‌دهد. این آرایش باد و فاصله الکترودی مختلف انجام شده است و شکل ۲-۱۴- ج شرایط واقعی در زیر سطح زمین را در طول همین خط شبکه نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بالاترین مقاومت ویژه ثبت شده، در بالای غار است که این نتیجه با توجه به اینکه غار مورد نظر بوسیله هوا پر شده است، نیز مطابقت دارد [۱۰].



شکل ۲-۱۴- مقایسه منحنی مقاومت ویژه با گرانی و مقطع زمین شناسی [۱۰]

۲-۴-۲ روش پتانسیل خودزا

بررسیهای پتانسیل خودزا یا همان SP در بالای مناطق غار داری که آب در آنها جریان دارد، آنومالیهای منفی از خود نشان می‌دهند، که این موضوع با استفاده از تئوری هلم هولتز^۱ ثابت شده است. تئوری هلم هولتز می‌گوید، که در نتیجه اصطکاک بین سطوح جامد و مایع، میدان با ولتاژ منفی تولید می‌شود از این پدیده طبیعی می‌توان برای تعیین غارها، الگوی جریان آبهای زیرزمینی و همچنین تعیین شدت جریان آبها استفاده کرد. شکل ۲-۱۵ نمونه‌ای از تأثیر جریان آب بر روی منحنی SP را در منطقه سنگ هول داری نشان می‌دهد [۱۵ و ۷].



شکل ۲-۱۵- نمودار SP در یک الکتروود ناشی از تغییر بار آب [۱۵]

۵-۲ روش گرانی سنجی

روش گرانی سنجی بر پایه اندازه گیری شتاب ثقل لایه های خاک یا سنگ، استوار است. از آنجا که سنگ آهک دارای چگالی بیشتر و در نتیجه شتاب ثقل زیادتری از لایه های خاک است، چگالی کمتر در یک منطقه دلالت بر عدم وجود سنگ آهک و در نتیجه عدم وجود منطقه کارستی در آن موقعیت است. در شکل ۲-۱۴ ب نیم زخ گرانی در طول همان مقطعی که مقاومت ویژه بدست آمده نشان می داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود، که یک آنومالی گرانی منفی در بالای غار شناخته شده ایجاد شده است [۴].

از روش گرانی سنجی به طور وسیعی در تعیین چگالی مواد زیر سطح و پیش بینی عواملی که باعث غیر یکنواخت شدن منحنی های گرانی می شود، استفاده شده است. به طور کلی به علت اینکه حفرات زیر سطحی خیلی کوچک هستند، معمولاً آنومالی گرانی قابل آشکار شدن ایجاد نمی کنند. اما گرادیان قائم گرانی میدان زمین که در سطح زمین اندازه گیری می شود قادر است که آنومالی های نسبتاً کوچک ناشی از تغییر چگالی مواد سطحی را تعیین و آشکار کند. در اینجا شرح داده می شود، که چطور از تفسیر تغییرات گرادیان قائم گرانی (VGG) می توان در تعیین حفرات زیر سطح زمین استفاده کرد. این مطالعات در یک محیط کنترل شده با پارامترهای شناخته شده در شمال فلوریدا توسط اسمیت انجام شده است [۱۶].

۲-۵-۱ روش گرادیان قائم گرانی زمین

مقدار شتاب جاذبه بین یک جسم و زمین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g = G.M_c / R \quad (۱-۲)$$

که در آن G ثابت جهانی جاذبه، M_c جرم زمین، R شعاع زمین و g شتاب جاذبه زمین است. گرادیان قائم گرانی به R بستگی دارد و برای عرضهای جغرافیایی میانی به طور مشابه با فاکتور تصحیح هوای آزاد متناسب است، که در این حالت گرادیان میدان گرانی در واحد طول در جهت قائم (عمود بر زمین) است. این شدت تغییرات در نزدیک سطح زمین ثابت است. البته اگر مواد نزدیک سطح بطور یکنواخت توزیع شده باشند، و بتوان منبعی را که باعث بوجود آمدن آنومالی شده با یک شکل هندسی ساده مثلاً کره شبیه سازی کرد به آسانی آنومالیهای گرانی ناشی از تغییرات چگالی نزدیک سطح را می‌توان مورد بررسی قرار داد. هامر^۱ مدل های زیادی از شکلهای هندسی به همراه معادلات بدست آمده برای گرادیان قائم گرانی را ارائه داده است. مدل‌های ارائه شده رابطه گرادیان قائم جاذبه را با عمق، گرانی، اندازه و خصوصیات شکل هندسی، نشان می‌دهد [۷]. با استفاده از یک میله ۳ متری و یک گرانی سنج خیلی حساس، اچکلوسیز^۲، کاربرد اندازه‌گیریهای گرادیان قائم گرانی را برای تعیین تونلهای زیرزمینی، غارها و معادن قدیمی نشان داد. بوتلر^۳ [۷]. دامنه عمقی که با استفاده از میکروگراویمتر می‌توان مورد بررسی قرار داد را مشخص نموده است. بر اساس نظر او بیشترین عمقی که به‌ازای آن تعیین غارهای زیرزمینی عملی باشد، ۱۵ متر است، که تا این عمق عدسیه‌های رسی و ستونهای آهکی که دارای آنومالیهای شاخصی هستند، را نیز می‌توان تعیین کرد.

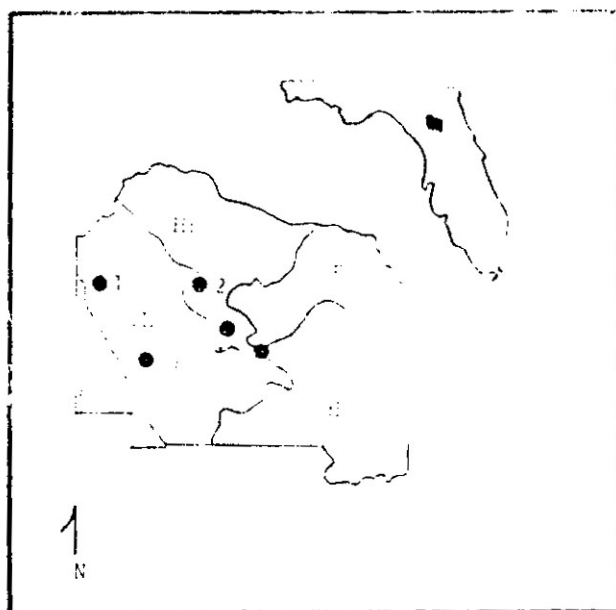
۲-۵-۲ کاربردهای عملی

موفقیت کاربرد اندازه‌گیریهای گرادیان قائم در گرو استفاده از گرانی سنج نسبتاً حساس است. حساسیت این وسایل در حدود یک میلی‌گال است. بیشترین مقادیر آنومالیهای گرادیان قائم گرانی که مستقیماً روی غارهای شناخته شده قرار داشتند، حدود ۳۰۰ میلی‌گال بر متر است. تحقیقات در این محل به منظور ارزیابی قابلیت کارایی یک گرانی‌سنج معمولی با حساسیت تقریبی ۲۰ میلی‌گال انجام شد. برای اندازه‌گیری از یک میله چوبی به ارتفاع یک متر که اندازه‌گیری در بالا و پایین آن در هر ایستگاه انجام می‌شد، استفاده شد.

محل آزمایش در بخش آلاچیو^۴ در فلوراید قرار داشت (شکل ۲-۱۶). این منطقه توسط یک توالی از لایه‌های ضخیم آهکی از سازند گروه او کالا متعلق به سن ائوسن که دارای سینک هولهای فعالی است، پوشیده شده و روی این سازند هاوترون^۵ قرار

1 - Hammer
2 - Ajklewicz
3 - Butler
4 - Alachua
5 - Hawthorn

دارد، که شامل ماسه رس و عدسیه‌های آهکی است. روی این سازند نیز ماسه سطحی قرار دارد. عمل کارستی شدن در این محل به خوبی اتفاق افتاده و باعث بوجود آمدن سیستم غارها شده است. سطح آب زیرزمینی در عمق ۵۰-۱۵ متری قرار دارد. برای مطالعات صحرایی، ۶ محل در ۵ سیستم غار شناخته شده و دارای نقشه‌های زیرزمینی انتخاب شدند (شکل ۲-۱۶). همه غارها در بالاترین بخش آهک او کالا قرار دارند. ایستگاههای اندازه‌گیری بر روی پروفیل‌هایی قرار دارند که عمود بر روند غارها هستند. فواصل ایستگاهها بستگی به وسعت ناحیه و نحوه رشد و نمو گیاهان دارد. اما فواصل واقعی آنها ۳-۱/۵ متر بوده و مقدار متوسط آنها ۲ متر است. همچنین طول پروفیل از ۱۵ تا ۳۰ متر متغیر است [۱۶].



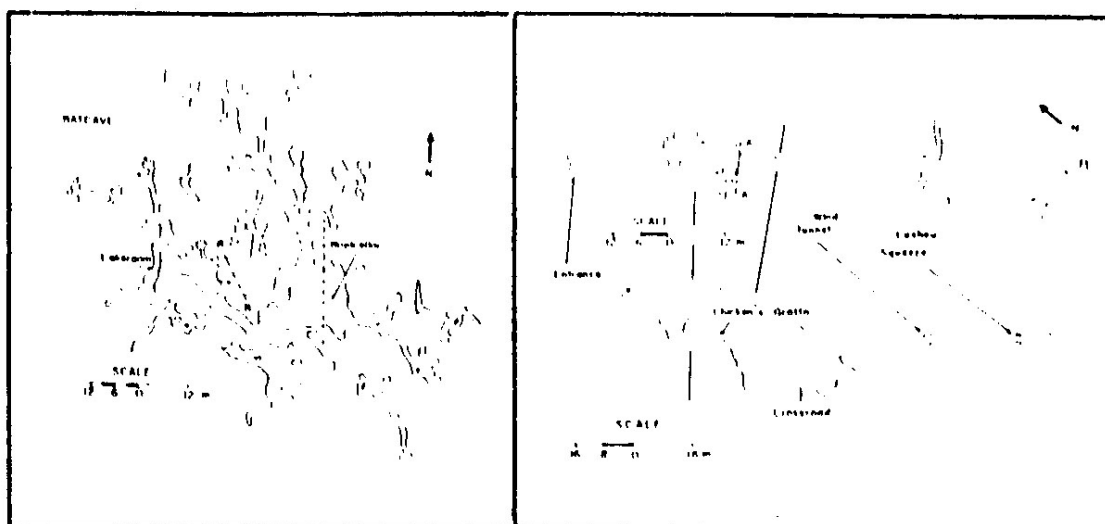
۱: غل Bat، ۲: غل Warren، ۳: Grant، ۴: غل Deadman، ۵: غل Black foot، ۶: غل

HF : سازند Hawlfhorn، AF : سازند Alachua، OL : آهک Ocala، Ps : ماسه پلینوسن

شکل ۲-۱۶- موقعیت محلهای اندازه‌گیری در بخش آلاچو در فلوریدا [۱۶]

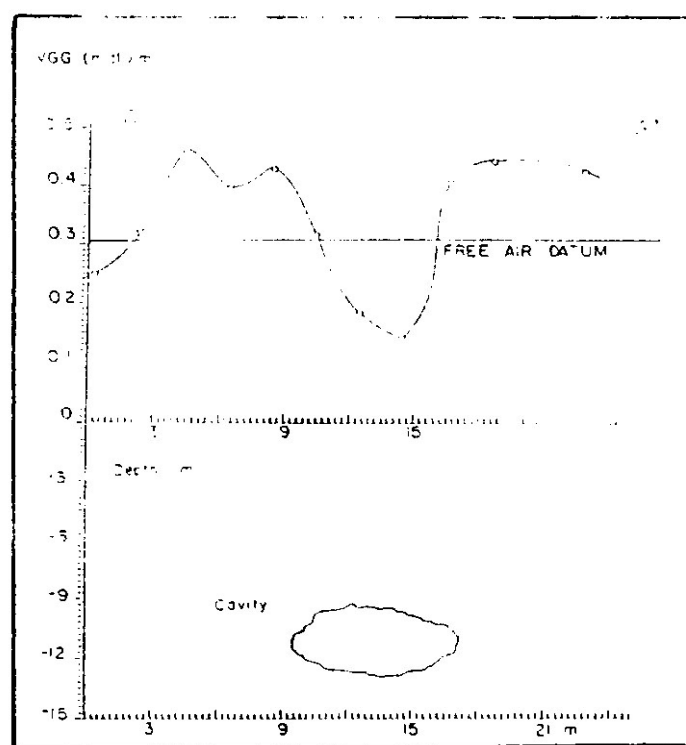
۲-۵-۳ تعبیر و تفسیر

مقادیر گرادیان قائم گرانی بر روی سیستم حفرات که تقریباً در عمق ۷-۱۲ متری قرار گرفته‌اند، آنومالی ضعیفی را نشان دادند. ارتفاع حداقل غارها ۳ متر بود. اما ابعاد جانبی آنها تغییرات شدیدی داشتند. بنابراین تطبیق دادن داده‌ها با وضعیت غارها مشکل است. شکلهای ۲-۱۷ و ۲-۱۸ غارهای وارن و بت را نشان می‌دهند. این تصاویر، پیچیده و مشکل بودن مطالعات را بر روی این غارها آشکار می‌سازند. شکلهای ۲-۱۹، ۲-۲۰ و ۲-۲۱ نشان دهنده نتایج اندازه‌گیری گرادیان قائم گرانی بر روی نیم رخهای A و B و C نشان داده شده در شکلهای ۲-۱۷ و ۲-۱۸ هستند.



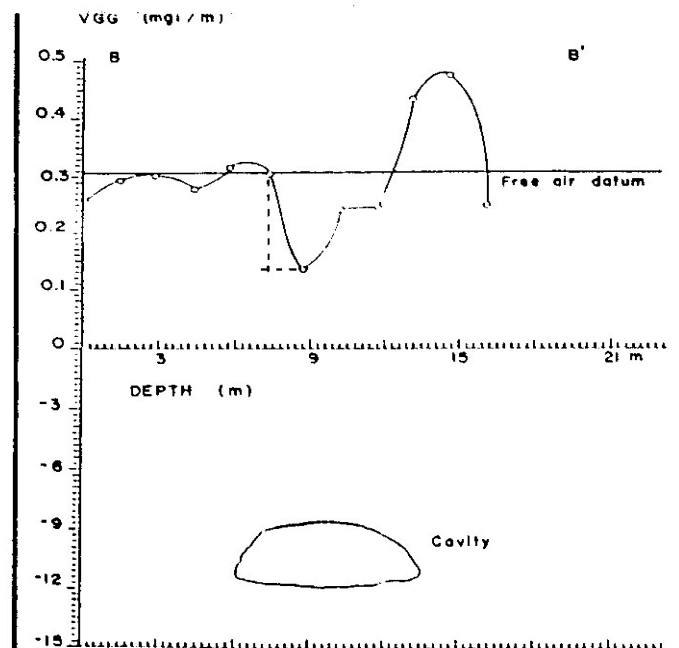
شکل ۲-۱۸- نقشه و موقعیت مقاطع
عرضی A و B و C بر روی غار بت^۲

شکل ۲-۱۷- نقشه و موقعیت عرضی A
بر روی غار وارن^۱

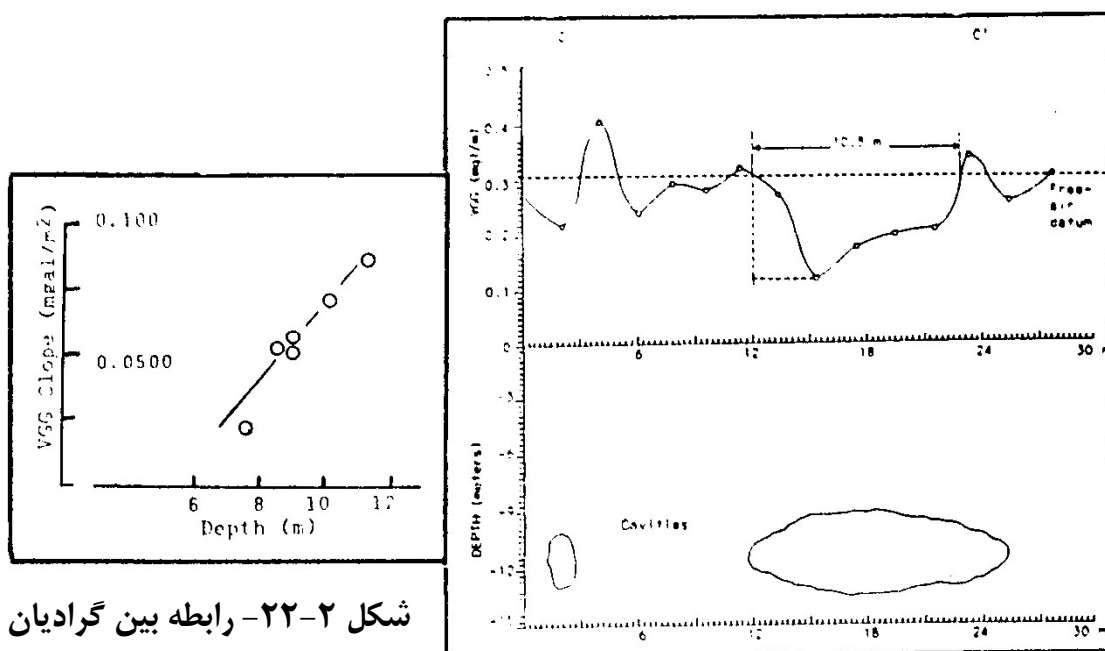


شکل ۲-۱۹- گرادیان قائم گرانی در مقطع A در غار روان

1 - Warren
2 - Bat



شکل ۲-۲۰- گرادیان قائم گرانی در مقطع B در غار بت



شکل ۲-۲۱- رابطه بین گرادیان
افقی گرانی با عمق قسمت بالای غار

شکل ۲-۲۱- گرادیان قائم گرانی در مقطع C در غار بت

هر یک از سیستم غارهای نشان داده شده، یک آنومالی گرادیان جاذبه قائم به اندازه کافی بزرگ برای شناسایی حفرات را ایجاد کرده‌اند، که وسعت افقی آنومالیها، پهنای حفرات زیر سطحی را نشان می‌دهد. هر یک از آنومالیها دارای مقادیر گرادیان

قائم گرانی بیش از مقدار تصحیح هوای آزاد هستند. در سه مورد (از ۶ تراس)، آنومالیهای گرادیان قائم گرانی با مقادیر مثبت در کنار آنومالیهای منفی با همان بزرگی مشاهده شده‌اند، است، که این امر نشان دهنده افزایش اثر گوشه است.

اگر چه غارهای زیر سطح زمین با حداقل ابعادی در حدود ۳ متر ارتفاع و ۶ متر پهنا، آنومالیهای قابل تشخیصی را ایجاد می‌کنند. همچنین از لحاظ عمق، امکان تشخیص حفراتی که عمیق تر از ۱۵ متر هستند نیز مشکل است. مگر اینکه این حفرات بزرگ باشند.

بنابراین شناسایی عملی سیستم غارهایی که شرایط مخاطره‌آمیز دارند، محدود به غارهایی است که حداقل ۳ متر قطر داشته و عمق کمتر از ۱۵ متر قرار گرفته‌اند. تا امکان تشخیص غارهای بزرگتر در اعماق بیشتر نیز هست.

لازم به ذکر است که غارهای سطحی تر تغییرات ناگهانی کمتری را در پروفیل‌های گرادیان قائم گرانی نشان می‌دهند، از این رو یک رابطه خطی برای گرادیان افقی گرانی بر حسب غارهای سطحی مشاهده شده می‌توان ارائه کرد (شکل ۲-۲۲). از این رابطه می‌توان عمق احتمالی وجود غارهای زیرزمینی را تعیین کرد. اما این رابطه نمی‌تواند در مورد غارهای با ابعاد نسبتاً بزرگ، یا در عمق بیشتر در مقایسه با چگالیهای کمتر مورد استفاده قرار گیرد [۱۶].

۲-۶ استفاده از روش سنجش از راه دور

فرونشست و فروریزش در سنگهای کربناتی قابل حل یک عارضه ژئوتکنیکی زیان آور در سراسر جهان به حساب می‌آید. چنین عوارضی مشکلات ژئوتکنیکی جدی را در زمینه کارهای مهندسی و احداث بناها به وجود آورده و همچنین خطراتی را برای امنیت عمومی ایجاد می‌کنند.

روشهای آشکار سازی بکار شده در طول بررسیهای اولیه و مقدماتی شامل روشهای مستقیم مانند حفاری و روشهای غیر مستقیم مانند ژئوفیزیک زمینی و سنجش از راه دور هوایی هستند.

هدف از ارائه این بخش تشریح نقش سنجش از راه دور در بررسیهای اولیه است. بررسیهای انجام شده به روش سنجش از راه دور چه آنهایی که قبلاً استفاده شده و چه آنهایی که در حال حاضر از آنها استفاده می‌شوند و مربوط به مکان یابی عوارض فروریزی هستند در این بخش بررسی می‌شوند. نکته مهم در این زمینه استفاده از روشهای سنجش از راه دور در شرایط محیطی ایتیم و شرایط زمین‌شناسی مناسب است.

استفاده از سنجش از راه دور هوایی برای آشکار سازی عوارض انحلالی نزدیک سطح زمین و یا عمیق تر موضوع مهمی در بیست سال اخیر بوده است. هدف از ارائه این بخش تاکید روی نقش "برداشت کننده‌های چند طیفی^۱ ماهواره‌ای و هوایی"، "برداشت کننده‌های خطی مادون قرمز حرارتی^۲ هوایی و "رادیومترهای کهموج^۳ هوایی و زمینی در زمینه اکتشاف عوارض کارستی است. با این حال اهمیت "فوتوگرافی هوایی^۴ نباید نادیده گرفته شود [۱۷].

1 - Multispectral

2 - Thermal infrared line Scanning Scanner systems (Mss)

3 - Micro eave radiometry

4 - aerial fotography.

۲-۶-۱ فوتوگرافی هوایی

فوتوگرافی هوایی قدیمی ترین و همچنین کاربردی ترین منبع برای کسب اطلاعات به روش سنجش از راه دور برای بررسیهای مربوط به مکان یابی عوارض انحلالی است. کاربرد آن به خاطر دیدهای اجمالی ارائه شده از منطقه، دید فضایی بالا و توانایی استفاده از استروئوسکوپ و مشاهده سه بعدی عکسها، نباید ناچیز شمرده شود. (شکل ۲-۲۳). بنابراین این روش یک منبع در دسترس برای کسب اطلاعات در مقابل هزینه نسبتاً کم است. که با استفاده از آن می توان دید کلی شواهد مستقیم و شواهد غیر مستقیم از وجود پتانسیل عارضه انحلالی ارائه کرد [۱۸].



شکل ۲-۲۳- عکس هوایی منطقه ساوس اوورهیث^۱ انگلستان، لوله های انحلالی (A) و دلینهای فرونشستی (B) در گچهای کرتاسه دیده می شود [۱۸]

شکستگیها و خطوارهها به عنوان عوارض خطی طبیعی (مانند توپوگرافی، خطوط رویش گیاهان، یا حالت خطی موجود در خاکها) به طور واضح در فوتوگرافی هوایی یا تصاویر ماهواره ای قابل مشاهده هستند. تشخیص بین دو بخش مجزا به صورت ساختارهای خطی فقط محدود به ساختارهایی است که حتی چندین مایل طول داشته باشند. اعتقاد بر این است که هر جا اثرات

1- South ovwr hith

یا رد شکستگیها یا خطواره‌ها با چگالی فراوان وجود داشته باشند و بویژه جائیکه دو یا چند مورد از آنها همدیگر را قطع کنند، خطر فرونشست بیشتر خواهد بود. مهم ترین مشکلات تجزیه و تحلیل شکستگیها، ابتدا مشکل شناسایی خطواره‌ها و ردهای مشخص که آیا مربوط به تجزیه و تخریب کرناتنها می‌باشند یا نه و دوم مشکل تفسیر اطلاعات بدست آمده، از این نظر که مناطق خطرناک از نظر فرونشست قادر به مکان یابی می‌باشند؟ تجزیه و تحلیل شکستگیها به تنهایی نمی‌تواند برای پیش بینی دقیق محل فرونشست به کار گرفته شود، ولی در بعضی مواقع نقش مکمل برای تعیین مناطقی که باید در طراحیها به آنها توجه کافی شود بازی می‌کند [۱۷].

۲-۶-۲ سیستمهای برداشت کننده چند طیفی

سیستمهای برداشت کننده چند طیفی (M_{ss}) هم به روش هوایی و هم ماهواره‌ای مورد ارزیابی محققان قبلی قرار گرفته‌اند. در مورد سیستمهای هوایی، نتایج متضادی گزارش شده است. برای مثال کوکر^۱، مارشال^۲ و تامسون^۳ استفاده از یک سیستم ۱۸ کاناله را بر روی منطقه‌ای نزدیک بارتو در فلوریدا آزمایش کردند [۱۷]. هدف از مطالعه، تعیین زونهای با حالت مرطوب و دارای پوشش گیاهی بود که گمان می‌رفت سینک هولهای در منطقه مذکور وجود داشته باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که زمینهای مستعد سینک هولها می‌توانند با استفاده از این مشخصه شناسایی شوند.

کاسپر^۴ و دگنر^۵ سیستمهای ماهواره‌ای را برای بررسی توزیع فضایی سینک هولها در فلوریدا بکار گرفتند [۱۷]. این مطالعه با بررسی محل سینک هولهای انجام شد که در ارتباط با ساختارهای خطی یا رد شکستگیها بوده و روی عکسهای هوایی و تصاویر ماهواره‌ای مشخص شده بودند، انجام شد. برای این کار که هم عکسهای هوایی ارتفاع بالا و هم سیستمهای برداشت کننده چند طیفی لندست با هم بکار گرفته شدند. بر اساس گزارش ارائه شده یک همبستگی قوی بین سینک هولها و فروریزشها با محلهای تقاطع ساختارهای خطی وجود داشت. براساس آنها نتیجه گرفتند زمانی که هیچ امکانی برای شناسایی محل سینک هولها منحصرأ با استفاده از اطلاعات بدست آمده از مطالعات ردیابی شکستگیها وجود نداشته باشد فقط می‌توان با این روش زونهای با پتانسیل زیاد برای تشکیل سینک هولها را شناسایی کرد.

۲-۶-۳ سیستمهای برداشت کننده خطی مادون قرمز حرارتی

نمونه واقعی تحقیق با این روش بیش از ۱۵ سال پیش برای آشکار سازی عوارض انحلالی انجام گردید. پارکر^۶ نیز جزو اولین محققانی بود که برداشت‌های خطی مادون قرمز حرارتی را برای کارهای مهندسی به کار برد. پارکر عقیده داشت که اگر چه مقالات متعددی برای تشریح توانایی این روش منتشر شده ولی با این حال سود اقتصادی حاصله از چنین سیستمی هنوز درک نشده است. بعد از مطالعات پارکر و در یک دوره زمانی ۵ تا ۶ ساله بسیاری دیگر از محققان آمریکایی شمالی پتانسیل این روش

1 - Coker
2 - Marshall
3 - Thomson
4 - Casper
5 - Degner
6 - Parker

را در مکان یابی عوارض انحلالی مورد تاکید قرار دادند. آنها و غالباً به نتایج متضادی در مفید بودن این روش رسیدند. چیزی که روشن بود، اینکه آنها هیچ اظهار نظری در مورد جزئیات، نوع دستگاههای بکار گرفته شده، شرایط محلی در طی به دست آوردن اطلاعات یا روش تجزیه و تحلیل آنها ارائه نکردند.

ریب^۱ و همکاران او مطالعاتی را روی یک سری معادن آهک زیرزمینی با استفاده از این روش انجام دادند نتایجی که از این بررسی مخصوصاً در مورد برداشتهای خطی مادون قرمز حرارتی بدست آمد در زیر آورده شده‌اند:

۱- در روی تصاویر هیچ نشانه‌ای از حضور معادن زیر سطحی به دست نیامد. شواهد بدست آمده فقط با استفاده از معیارهای ثانویه مانند اختلاف در مقدار رطوبت بودند.

۲- به کارگیری روشهای تشدید مانند کنتورینگ حرارتی و استفاده از نسبتهای حرارتی مختلف، نشانه‌ای مربوط به حضور معدن زیر سطحی ارائه نکردند.

با توجه به اوصاف بالا محققان نتیجه گرفتند که کارهای بیشتری لازم است تا زمانهای ایتیم خاصی به صورت روزانه یا فصلی برای جمع آوری اطلاعات تعیین شوند. علاوه بر این، همچنین باید به اندازه‌گیری دمای زمین در حین جمع آوری اطلاعات توجه کافی مبذول شود. نتایج دلگرم کننده چندی نیز توسط محققان دیگری گزارش شدند بودند. برای مثال کوکر و همکاران او مشکلی را در فلوریدا بررسی کردند. با ترکیب الگوهای دمایی برداشتهای خطی مادون قرمز حرارتی با الگوها و طرحهای رویش گیاهان (با بررسی رطوبت بدست آمده از MSS هوایی)، کوکر و همکاران او شواهدی حاکی از همبستگی قابل توجه مابین اطلاعات مذکور و منطقه با فعالیت سینک هولهای شناخته شده گزارش کردند او همچنین آنقدر با شهامت بود که اظهار کند: روشهای مذکور این پتانسیل را دارند که مکان پدیده‌های هیدرولوژیکی را تا عمق تقریباً ۳۰ متر زیر سطح زمین تعیین کنند.

دلوچ^۲ گزارش داد که همبستگیهای مثبت بارزی مابین آنومالیهای سرد (دمای پایین) مشاهده شده در تصاویر تهیه شده در شب هنگام و موقعیت شکافها و درزه‌های عویق در سنگ بستر یا حفرات بالای سطح آب زیرزمینی وجود دارد تفسیر این اطلاعات بدون استفاده از پردازش کامپیوتری و منحصرأ با استفاده از مشاهده تصاویر تهیه شده امکان‌پذیر بود. از ۱۶ حفاری انتخاب شده در ناحیه با استفاده از تفسیر تصاویر حرارتی، ۱۲ عدد از آنها، حاکی از عوارض انحلالی بودند خطرات قابل توجهی برای طراحی فونداسیون ایجاد کنند. همچنین نوبل^۳ از این روش برای مکان یابی سینک هولها در ویرجینیا استفاده کرد. با به کار بردن تصاویر مادون قرمز حرارتی هوایی تهیه شده از یک منطقه هم در روز و هم در شب، او توانست عوارض انحلالی را که در تصاویر تهیه شده در شب، رنگ خاکستری متوسط یا تن رنگ سرد داشتند، شناسایی کند. بررسیهای زمین‌شناسی وجود سینک هولها یا گودشدگیهای همراه این حفرات زیر سطحی در ۷ مورد از آنها تأیید کرد. نوبل نتیجه گرفت که تصاویر حرارتی به عنوان راهنمایی مکان یابی حفرات زیر سطحی مفید می‌باشند.

1 - Rib et al

2 - Deloach

3 - Nobel

آشکارسازی حفره‌های بزرگ در مناطق آهکی با استفاده از اطلاعات مادون قرمز حرارتی، توسط رینکر^۱ نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار او یک سنسور حرارتی را در منطقه‌ای در پوتوریکو که سیستم حفرات شناخته شده‌ای در آن وجود داشتند، پرواز داد. با بررسی دمای زمین و اندازه‌گیری آن هم در داخل حفرات و هم در سطح، رینکر نتیجه گرفت که زمان اپتیممی برای گرفتن تصاویر حرارتی مادون قرمز می‌توان تعیین کرد. او اظهار داشت که این زمان در اوایل صبح است زمانی که بخش درونی غار بیشتر از ۵ درجه سانتی گراد از هوای بیرون آن گرم تر است این دوره زمانی منطبق با کاهش در فشار اتمسفر می‌باشد. بنابر این فرض شد که سیستم حفرات باید بتواند هوای گرم را از راه هر سینک هول خشک و بدون آبی که سیستم حفرات را به سطح زمین مربوط می‌سازد، بیرون براند بررسی تصاویر تهیه شده از منطقه مورد مطالعه این وضعیت را تأیید کرد.

معادل کارهایی که در ایالات متحده انجام شده بود، یک سری از بررسیها نیز در آفریقا انجام شد. بیکر^۲ و همکاران او و واردیک^۳ مقایسه روشهای فوتوگرافی هوایی و برداشتهای خطی مادون قرمز حرارتی برای آشکار سازی سینک هولها مطالعه را انجام دادند. برای مطالعه، منطقه ترانسوال غربی انتخاب شد این منطقه دارای دولومیت‌های پوشیده شده توسط لایه نازکی از خاک با ضخامت کمتر از ۰/۵ متر بود. تصاویر حرارتی، ساختار زمین‌شناسی قرار گرفته در زیر سطح را آشکار کرد. دولومیتها با خاصیت حرارتی بالا یک تن سفید رنگ را در تصویر ظاهر کردند و درزه‌ها و گسلها بر عکس تقریباً یک تن تیره (سرد) روی تصاویر تهیه شده قبل از طلوع آفتاب نشان دادند که این امر در اثر رطوبت و نم خاکی بود که این درزه‌ها را پر کرده است. یک نقشه بعداً از این تصویر باری تشریح توزیع فضایی درزه‌ها و گسلها و همچنین جهت تعیین امتداد و شیب آنها تهیه شد. با تجزیه و تحلیل این نقشه چند محل مختلف برای بررسیهای زمینی جزئی تر مشخص شدند.

خلاصه اینکه مقالات نوشته شده در این مورد کارهای انجام شده متعددی را در تمام قسمتهای دنیا و با شرایط زمین‌شناسی مختلف ارائه کرده‌اند. با توجه به آنها می‌توان نتیجه گرفت که:

الف - تعیین زمان انجام پرواز خیلی مهم است

ب - در مواقع بعد بارانهای سنگین باید از عکس برداری پرهیز شود چون اختلاف خیلی کم در مقدار رطوبت در منطقه ممکن است در تعیین موقعیت انحلالی اشکال ایجاد نماید.

ج - در حال حاضر پیشنهاد مناسب ترین روش پردازش داده‌ها مشکل است و کار بیشتر روی این موضوع توسط نویسندگان این مقالات و فقط به صورت موردی انجام شده است.

۲-۶-۴ رادیومتری کهموج

در مقایسه با تعداد زیادی از مقالات که در مورد آشکار سازی محل فرونشستها با استفاده از تصاویر سنجش از راه دور مادون قرمز حرارتی منتشر شده‌اند، چند مقاله نیز در مورد استفاده از روش رادیومتری کهموج موجد است. سیستمهای میکروویو موجود، به دو صورت معلوم و مجهول استفاده می‌شود ولی بیشترین و زوثرترین فعالیتها روی کاربرد رادیومتری مجهول متمرکز

1 - Rinker

2 - Bakker

3 - Warwick

شده‌اند. برای مثال کندی^۱ استفاده از فرکانس سه‌گانه، پلاریزاسیون دوبل، رادیومتر زمینی برای پروفیل زنی روی زمین در ناحیه‌ای کارستی در کالیفرنیا را گزارش کرد. از لحاظ زمین شناسی، ناحیه شامل آهکهای کربنیفر بوده که با ضخامتی از ۱۵-۳ متر آبرفت پوشیده شده‌است. تجزیه و تحلیل نتایج، آنومالیهای قابل توجه رادیومتری مربوط به فضای خالی چندین ده متر زیر خاک‌رویی را آشکار کرد ولی ریچر^۲ در تفسیرهای خود درباره کارهای کندی اظهار کرد که آنومالیهای سرد^۳ مشاهده شده نمی‌توانند در رابطه با حضور حفرات زیر سطحی توجه شوند. دلیل او این بود که این آنومالیهای مشاهده شد بیشتر به این شبیه‌اند که توسط رطوبت خاک یا اثرات شیب در فضاهای خالی زیر سطحی ایجاد شده باشند [۱۷].

۷-۲ روش رادار نفوذی در زمین^۴ (G.P.R)

در روش رادار نفوذی در زمین (G.P.R) از فرکانسهای مختلف امواج الکترو و مغنتیکی (۸۰ مگاهرنز تا یک گیگا هرتز) استفاده می‌شود. که این امواج از یک آنتن رادار قرار گرفته در سطح زمین فرستاده می‌شود سیگنالهای راداری فرستاده شده از فصل مشترکهای مختلفی در داخل زمین منعکس می‌شوند که این انعکاس بستگی به خواص دی الکتریک و هدایت الکتریکی مواد داخل زمین دارد. امواج منعکس شده را دارای توسط گیرنده‌های راداری دریافت می‌شوند. این امواج منعکسه فصل مشترکها، وضعیت استراتیگرافی افقهای مختلف خاک، عوارض ایجاد شد دست بشر و یا هر فصل جدایش که تفاوتی در ثابتهای دی الکتریک دو طرف فصل مشترک وجود دارد را مشخص می‌کنند. خوشبختانه این ثابتهای دی الکتریک معمولاً به خواص فیزیکی و پارامترهای شیمیایی، وضعیت لایه‌بندی، سیمان شدگی سنگ، فضاهای خالی موجود و شکستگیها و فصل مشترکهای فلزی و غیر فلزی ساخت دست بشر بستگی دارند. آب زیرزمینی باعث افزایش هدایت الکتریکی می‌شود، و در نتیجه عمق نفوذ کاهش می‌یابد همچنین اگر تمرکز بالایی از مواد ریز دانه مانند رسها و سیلتها وجود داشته باشد، نیز عمق نفوذ کاهش می‌یابد عمق نفوذ سیگنالهای امواج GPR و همچنین ثابت دی الکتریک مواد با معادله زیر بهم مربوط هستند:

$$tp (ns) = d(m) \times V.E_r / 0.15 \quad (2-2)$$

یا

$$tp (nc) \cdot \frac{0.15}{V.E_r} = d(m) \quad (3-2)$$

که در رابطه فوق:

Tp (ns) : زمان رسیدن امواج به فصل مشترک و زمان برگشت آنها بر حسب نانوثانیه، Er ثابت دی الکتریک نسبی و

d(m) : فاصله تا فصل مشترک بر حسب متر (m) می‌باشند [۱۷].

1 - Kennedy

2 - Richer

3 - Coolanomalies

4 - Ground Penetrating Radar

ثابت دی الکتریک، نسبتی که پالسه‌های الکترومگنتیک از مواد درون زمین می‌تواند عبور کنند را تعیین می‌کند. ثابت دی الکتریک برای مواد مختلف متفاوت است مثلاً برای هوا یک و برای آب تقریباً ۸۸-۸۱ است. در نتیجه در محدوده فرکانسی که در حال حاضر در سیستم‌های GPR مورد استفاده قرار می‌گیرد، ثابت دی الکتریک شدیداً وابسته به حالت فیزیکی آب بوده و همچنین تا حد کمی نیز به چگالی، دما و بافت مواد زیر سطحی بستگی دارد.

با استفاده از رادار نفوذی در زمین می‌توان وسعت، عمق و ضخامت لایه‌های موجود در زیر سطح زمین را در صورتی که خاکها و لایه‌های سطحی دارای هدایت الکتریکی پایین (کمتر از ۲ میلی موهر بر متر) باشند، مورد بررسی قرار داد. با استفاده از این روش می‌توان نموداری گرافیکی از مقطع عرضی زمین بدست آورد، این نمودار مشابه‌ان است که از مطالعات لرزه‌ای بدست می‌آید. در مناطقی که دارای لایه‌های ماسه‌ای هستند، استفاده از این دستگاه نتایج مفیدی ارائه می‌کند. در مناطق رسی به علت جذب امواج توسط رس استفاده از این دستگاه مناسب نیست در شرایط آب و هوای سرد استفاده از این روش بر روی اکثر خاکها و حتی یخرفته‌ها نتایج امیدوار کننده‌ای را ارائه می‌کند [۱۹].

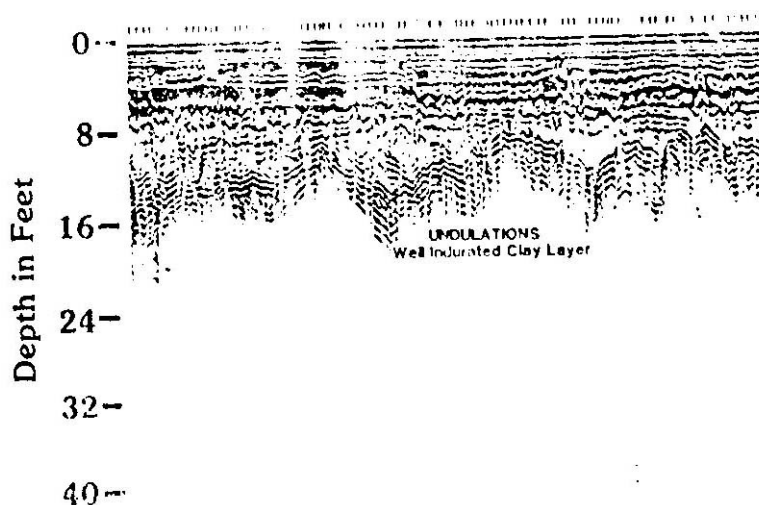
همان طوری که ذکر شد پروفیلها و مقاطع تهیه شده توسط رادار تغییرات مواد موجود در زیر سطح زمین با توجه به تغییر در ثابتهای دی الکتریک و هدایت الکتریکی آنها را نشان می‌دهند. همان طوری که قبلاً نیز ذکر شد، سیگنالهای را دارای شدیداً تحت تاثیر رطوبت و مقدار رس قرار کی گیرند. رسها با هدایت الکتریکی بالا و ثابت دی الکتریکی زیاد، سیگنالهای راداری را تضعیف می‌کنند، که این امر در مقاطع گرافیکی تهیه شده مشاهده می‌شوند.

تیرگی یک بخش در مقاطع مذکور معرف تغییر در شدت سیگنال در مرزهای منعکس کننده است. بخشهای خیلی سیاه دلالت بر وجود مرزهای خیلی شارپ و بخشهای خاکستری رنگ دلالت بر وجود مرزهای با اختلاف کم می‌کنند. اختلاف در مقدار رس بر عرض زون انتقال بین زونهای اشباع شده و اشباع نشده تأثیر خواهد گذارد که این امر با توجه به تغییرات در تیرگی سیگنالهای منعکسه و شدت مقدار آنها در مقاطع تهیه شده قابل مشاهده خواهد بود.

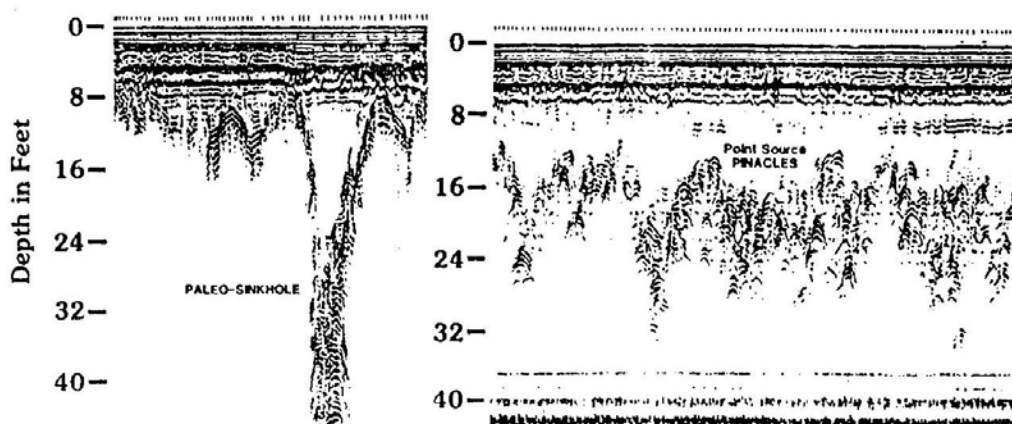
بیشترین و مهمترین عامل مؤثر بر رکوردهای گرافیکی در این روش، مقدار آب موجود در فضاهای خالی سازند است، هدایت الکتریکی یک سازند متخلخل با توجه به نحوه قرارگیری فضاهای خالی متفاوت است و این امر بیشتر با هدایت الکتریکی و مقدار آب محتوی ارتباط دارد. آب، ثابت دی الکتریک بالایی دارد و در نتیجه تیپ سیگنالهای ایجاد شده با توجه به متوسط مقدار اشباع شدگی، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش ثابت دی الکتریک اساساً در مقادیر رطوبت ۱۰٪ یا بیشتر آشکار می‌شود. مقدار ثابت دی الکتریک بالای آب، سرعت انتقال را بیشتر از هر متغیر دیگر کاهش می‌دهد و همچنین به طور مؤثر عمق نفوذ را در هنگام برداشت کم می‌کند.

هر انعکاس در روی مقاطع GPR شامل سه باند است، که به علت تغییرات سیگنال رادار از یک قطب به قطب دیگر به وجود می‌آید. قسمت بالای باند نشان دهنده موقعیت سطح تماس یا فصل مشترک موادی است که، هدایت مختلفی دارند. عمق نفوذ امواج رادار با عکس فرکانس متناسب است. برای تحقیقات در زمینهای کارستی معمولاً از فرکانس ۸۰ تا ۱۲۰ مگاهرتز استفاده می‌شود که در این حالت عمق نفوذ ۶ تا ۹ متر خواهد بود. اما در مناطق خشک که دارای ماسه کوارتزی می‌باشند، عمق نفوذ به بیش از ۳۰ متر هم می‌رسد.

با استفاده از نیم رخهای رادار می‌توان خصوصیات مواد موجود در زیرزمین را که دارای مکانیزمهای مختلف رسوبگذاری و یا فرسایش هستند، مورد بررسی قرارداد (شکل ۲-۲۴)، با استفاده از رادار در زمینه‌های کارستی می‌توان ستونهای سنگ آهک (شکل ۲-۲۵)، رسوبات پر شده در پالئوسینک هولها (شکل ۲-۲۶)، غارهای کارستی، چاههای عمودی و درزه‌هایی که در اثر انحلال سنگ آهک بوجود آمده‌اند را مشخص کرد. مثل اکثر روشهای ژئوفیزیکی دیگر، رادار نفوذی در زمین، نوع سنگ را مشخص نمی‌کند. بنابراین بهتر است که، این روش همراه با سایر روشها از جمله مطالعات زمین‌شناسی و نمونه‌گیری به وسیله محفظه دوکفه‌ای انجام شود. محل آنومالیهایی که به وسیله رادار بدست می‌آید را می‌توان به وسیله حفاری مورد تأیید قرار داد. بنابراین در مناطقی که ابتدائاً از امواج رادار استفاده می‌شود، باید حفاریها را در محلها ی مهم و مناسب انجام داد [۲۰ و ۲۲].

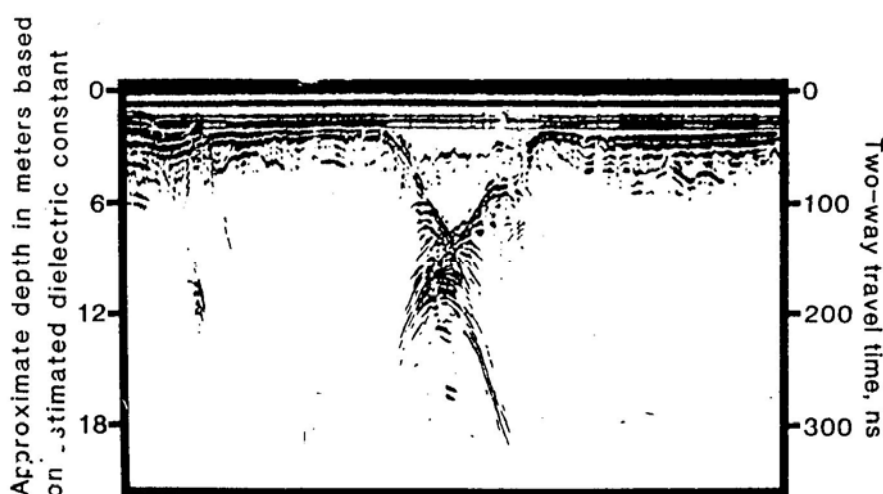


شکل ۲-۲۴- مقطع رادار نشان دهنده ناپیوستگی موجود در زیر سطح زمین



شکل ۲-۲۵- مقطع رادار نشان دهنده ستونهای آهکی
شکل ۲-۲۶- نیمرخ رادار نشان دهنده سینک هول قدیمی

شکل ۲-۲۷- مقطع رادار را که در آن یک سینک هول به خوبی نمایان است، نشان می‌دهد، این نیم رخ یک گودال کم عمق و پهن را نشان می‌دهد. اتفاق انعکاس دهنده ۱/۵ تا ۲/۱ متری در سطح تماس بین ماسه و رس قرار دارد، که این موضوع بعداً بوسیله حفاری او اگر ثابت شد در مرکز گودال سطح تماس بین ماسه و رس در عمق ۵ متری است. این حوضه که با ماسه پر شده است، ۷ شکل است، که این امر در پروفیل رادار نمایان است، قسمت هذلولی شکل در زیر سینک هول که بوسیله رس پر شده است، می‌تواند نشان دهنده یک غار پر شده از خاک یا در نتیجه انعکاس از فصل مشترک ماسه و رس باشد. البته وجود غار باید به وسیله حفاری مورد بررسی قرار گیرد. تأیید وجود غار با توجه به افتادن ناگهانی لوله‌های حفاری ثابت شد.



شکل ۲-۲۷- پروفیل رادار که نشست اولیه را نشان می‌دهد. این پروفیل بوسیله GSSI در سال ۱۹۸۵ تهیه شده است. مقیاس افقی مشخص نشده است (شمال غربی اورانج در فلوریدا) [۲۲]

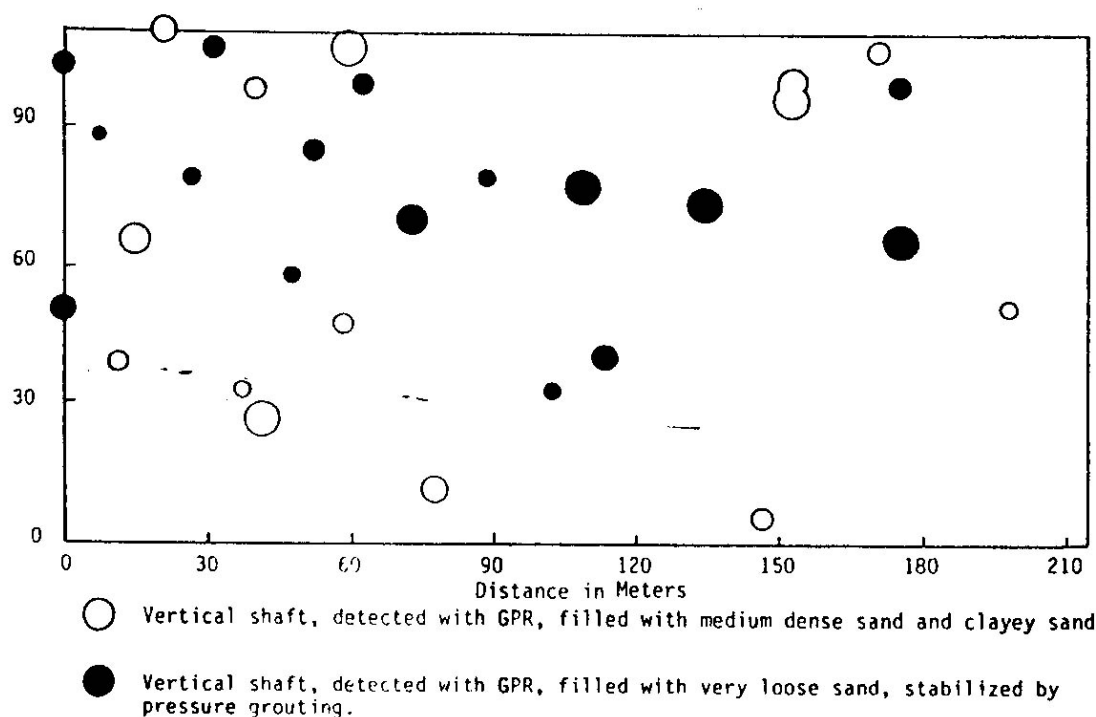
در مناطقی که سطح زمین به قدر کافی تمیز است، می‌توان با آنتن GPR در یک محیط محدود تحقیقات را انجام داد، و موقعیت سطح بالایی سنگ بستر و همچنین آنومالی‌هایی را که در ارتباط با توسعه سینک هولها هستند، مشخص کرد. استنگلند^۱ و کیو^۲ [۲۲] در سال ۱۹۸۷ یک نقشه از آنومالی‌های رادار را منتشر کردند، که در آن ارتباط بین پالتوسینگ هولها و درزه‌های موجود در خاک در بخش لیک فلوریدا بدست آمده بود.

در سال ۱۹۸۷ موسسه تحقیقات سینک هول فلوریدا از رادار نفوذی در زمین به منظور تشخیص مکان‌هایی که از لحاظ توسعه سینک هولها مستعد هستند، استفاده کرد این تحقیقات در خاک ریزهای بخش آلاچیو در فلوریدا انجام شد. محدوده

1 - Stangland

2 - Kuo

خاکریزهای جدید به عرض ۱۱۴ متر و طول ۲۲۰ متر بود. برای برداشت پروفیل‌های رادار یک ترانسفورماتور ۱۲۰ مگاهرتز ساخته شد. منطقه توسط ۷۳ خاک ریز از غرب به شرق و ۹ خاک ریز از شمال به جنوب پوشیده شده است. میانگین فاصله بین نیم رخها ۱۰۵ متر است نیم رخهای رادار منطقه‌ای به طول تقریباً ۱۷/۳ کیلومتر را پوشش می‌دهد. ستون چینه‌شناسی در محل گودالهای خاک ریز شامل ۳ تا ۹ متر ماسه سیلتی، ۰/۳ تا ۱/۲ متر رس و سنگ آهک است و در آن شکافهایی که در اثر انحلال بزرگ شده‌اند، دیده می‌شود. در منطقه سی آنومالی رادار که شرایط ناپایدار در آنها وجود دارند، مشخص شد. که در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده است. امواج منعکس شده نشان دهنده لایه‌های خاک نشست کرده هستند. امواجی که به عمق بیشتری نفوذ کرده‌اند، و سپس منعکس شده‌اند، نشان دهنده چاههای عمودی و باریک هستند که در اثر انحلال در سنگ آهک بوجود آمده و سپس توسط ماسه پر شده‌اند [۲۲].



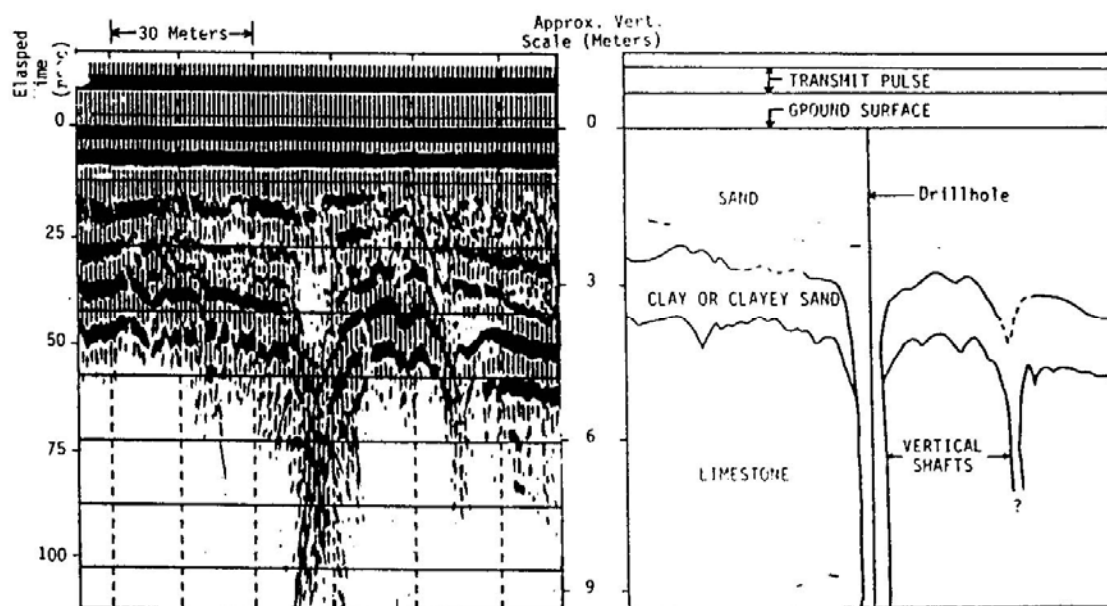
شکل ۲-۲۸- نقشه آنومالیهای مهم که بوسیله رادار زمینی در منطقه کارستی کاینسویلا در فلوریدا بدست آمده است [۲۱]

○ گمانه‌های قائم که با ماسه با تراکم متوسط و ماسه رسی پر شده است.

● گمانه‌های قائم که با ماسه خیلی سست پر شده و بوسیله دو غاب کاری پایدار شده است.

یکی از آنومالیاها بطور نمونه در شکل ۲-۲۹ نشان داده شده است. عمق چاهها از ۳ تا ۸ متر متغیر بوده و عمق متوسط آنها ۵/۲ متر است در هر آنومالی از روش آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) به منظور تعیین نوع رسوبات و تعیین استحکام مواد استفاده

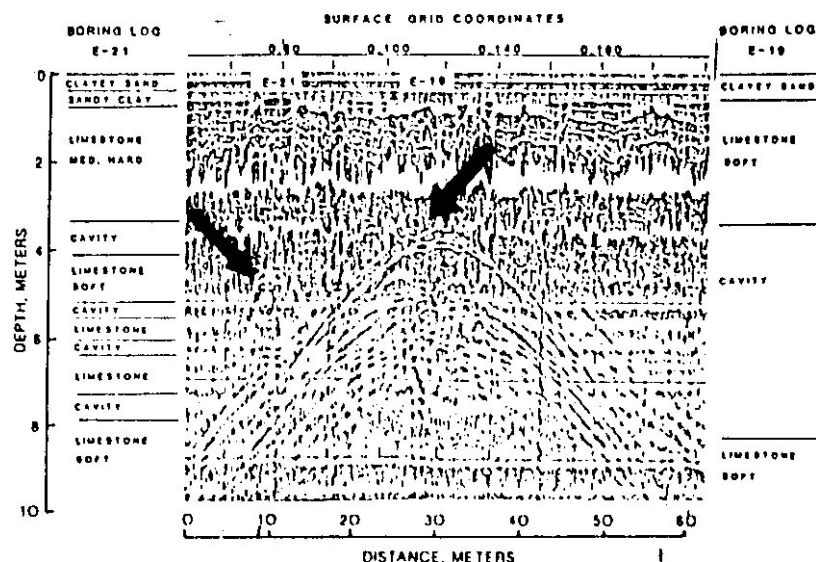
شد. در چهارده آنومالی رسوبات پر کننده شامل ماسه رسی و سیلت قهوه‌ای متمایل به قرمز با تراکم متوسط هستند. سن این رسوبات متعلق به دوران اخیر یا پلیستوسن است. در این مناطق که حدس زده می‌شد ناپایدار باشند، بوسیله تزریق دو غاب سیمان، پایدار سازی انجام شد تا از ریزش رسوبات سست و توسعه سینک هولها جلوگیری کرد. با استفاده از روش G.P.R و ارزیابی نتایج آن، روشهایی که می‌توانند در تحقیقات بعدی این مناطق مفید باشد، مشخص می‌شوند. و همچنین با این روش امکان ارزیابی حجم دوغاب کاری و تعیین قیمت لازم برای آن نیز میسر می‌شود.



شکل ۲-۲۹- گمانه قائم در سنگ آهک، نیم رخ رادار که نشان دهنده بخشی از خاکریز استخراج شده است.

آزمایش SPT در مرکز جال تا عمق ۱۲ متری در داخل ماسه‌های سست نفوذ پیدا کرده است (SPT:N= ۸ تا ۱۳) تفسیر زمین‌شناسی نیز در شکل آورده شده است [۲۱].

شکل ۲-۳۰ مثالی دیگر از داده‌های رادار نشان می‌دهد، که در این نیم رخ آنومالی موجود با علامت فلش نشان داده شده‌است. این آنومالیا احتمال وجود غارها را در منطقه مدفورد در امریکا نشان می‌دهند. که بعداً بوسیله حفاری تأیید شدند. یکی از این دو غار بوسیله هوا و دیگری بوسیله رس پر شده است.



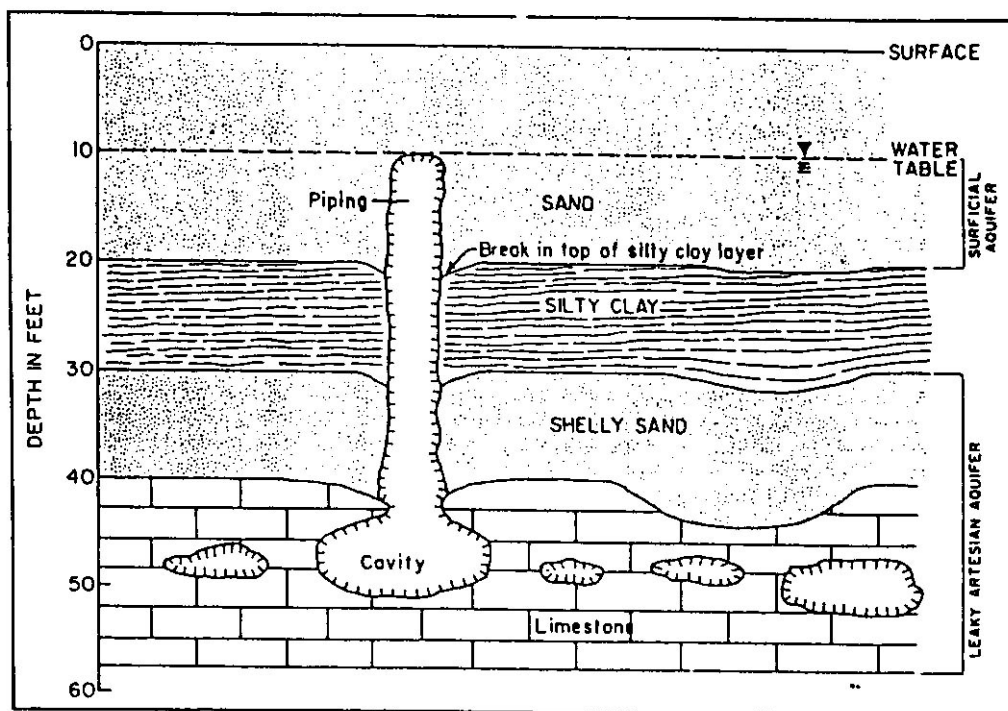
شکل ۲-۳۰- نمایش یک پروفیل رادار در منطقه مدفورد [۲۱]

در شکل ۲-۳۱ مقطع عرضی از زمین در ویرمندگان امریکا نشان داده شده که عمل رگاب باعث ایجاد غارهایی در سنگ آهک شده است. مطالعات اولیه که در منطقه توسط رادار نفوذی در زمین انجام شد. علائمی از وجود غار یا ناپیوستگی را تا عمق بالایی لایه رسی سیلتی نشان نداد. در شکل ۲-۳۲ این موضوع به وضوح قابل مشاهده است. و همچنین مرز مشترک ماسه بالایی و رس سیلتی نیز به خوبی در شکل نمایان است. در مطالعاتی که بعداً با استفاده از GPR انجام شده اغتشاش در مرز بین دو لایه مشاهده شد (شکل ۲-۳۳)، در مطالعات بعدی، نشست در بالای لایه رس سیلتی تأیید شد. که این امر نشانه نزدیک به سطح بودن فعالیت عمل رگاب در سنگ بستر آهکی است (شکل ۲-۳۴). سپس در منطقه بوسیله تزریق دو غاب سیمان لایه‌های بالایی مستحکم شده، و دوباره مطالعات رادار نفوذ زمینی انجام شد. در شکل ۲-۳۵ منطقه دو غاب کاری شده نمایان است، شکل ۲-۳۶ عمل رگاب باریک را که در همین مقطع اتفاق افتاده نشان می‌دهد.

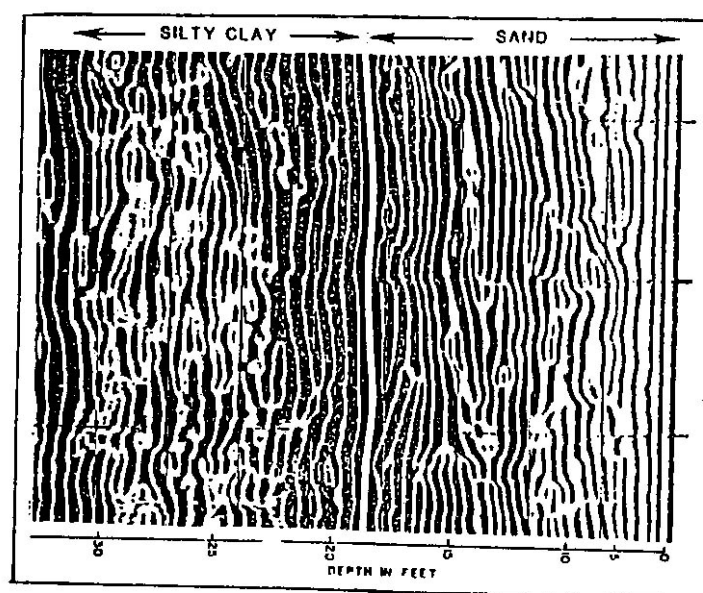
از سیستم رادار به روش میان بر نیز استفاده می‌شود. باشد. بدین صورت که در این روش فرستنده و گیرنده در گمانه‌های مختلف در یک افق قرار دارند، و حرکت آنها با هم به طرف بالا یا پایین خواهد بود. این روش معمولاً در مراحل نخستین کار انجام می‌شود، وقتی چهره غار مشخص شد، می‌توان کار را در ارتفاعات مختلف دنبال کرد.

وقتی فرستنده و گیرنده در دو سطح مختلف قرار بگیرند، با این روش می‌توان غارها را در دو بعد مورد بررسی قرار داد، که در نتیجه شکل و هندسه غار مشخص می‌شود.

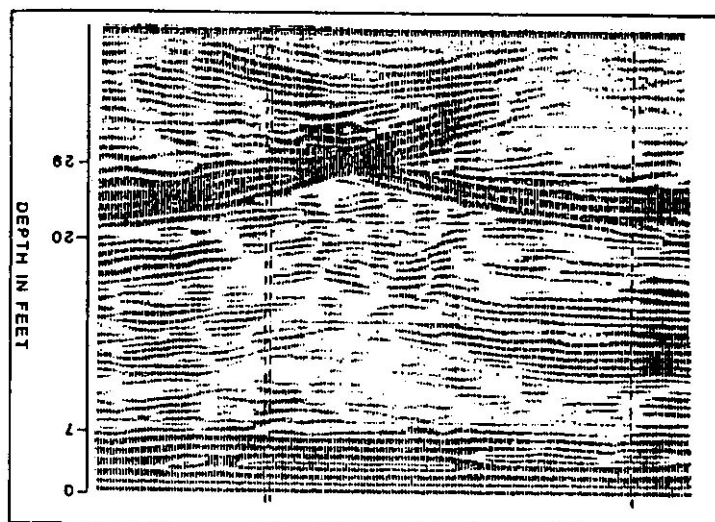
شکل ۲-۳۷ دو مورد ثبت شده را که توسط موسسه تحقیقات شمال غربی امریکا با استفاده از روش رادار میان بر انجام گرفته‌اند، نشان می‌دهد. شکل ۲-۳۷-الف مربوط به ارزیابی بین دو گمانه در سنگ آهک است و شکل ۲-۳۷-ب دو گمانه را که در یک غار توسعه یافته قرار دارند، نشان می‌دهد، در این شکل غار در عمق ۶/۵ تا ۱۲ متری مشاهده می‌شود.



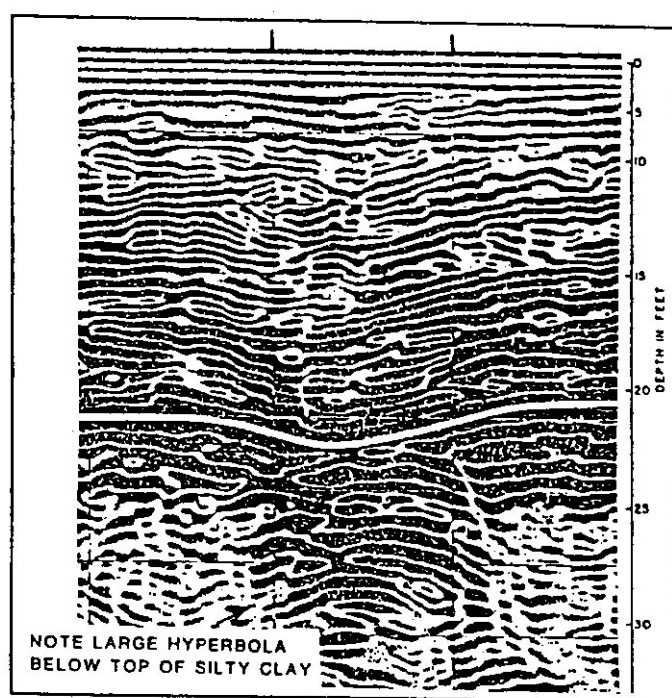
شکل ۲-۳۱- نمایش شماتیک مقطع زمین‌شناسی منطقه ویرمنگان در امریکا [۲۱]



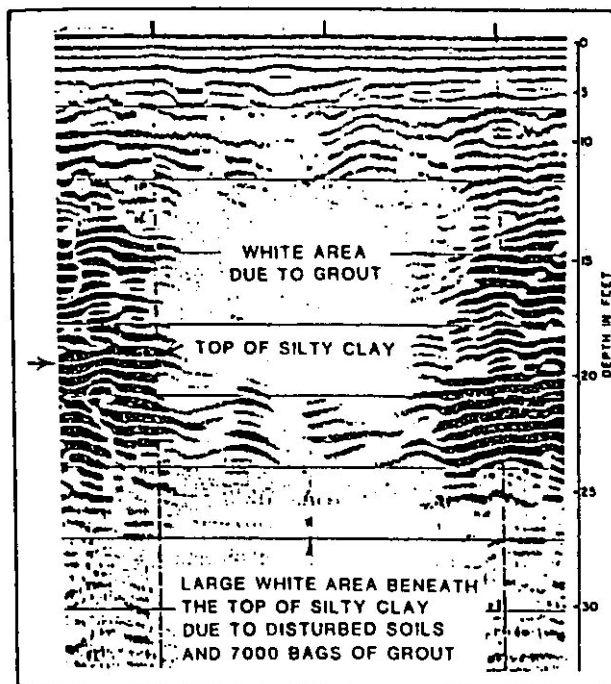
شکل ۲-۳۲- پروفیل رادار نشان دهنده ناپیوستگی زمین‌شناسی و عدم وجود علائم نشست در سطح زمین [۲۱]



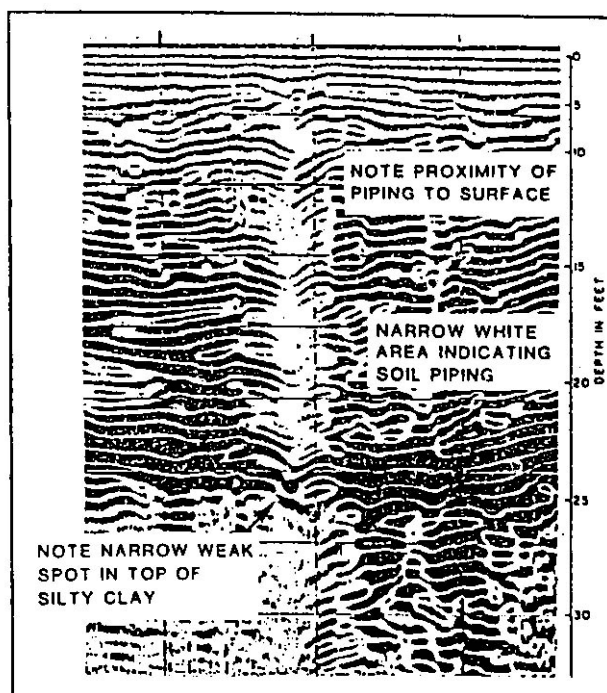
شکل ۲-۳۳- علائم نشان دهنده رگاب که از لایه آهک سرچشمه می گیرد [۲۱]



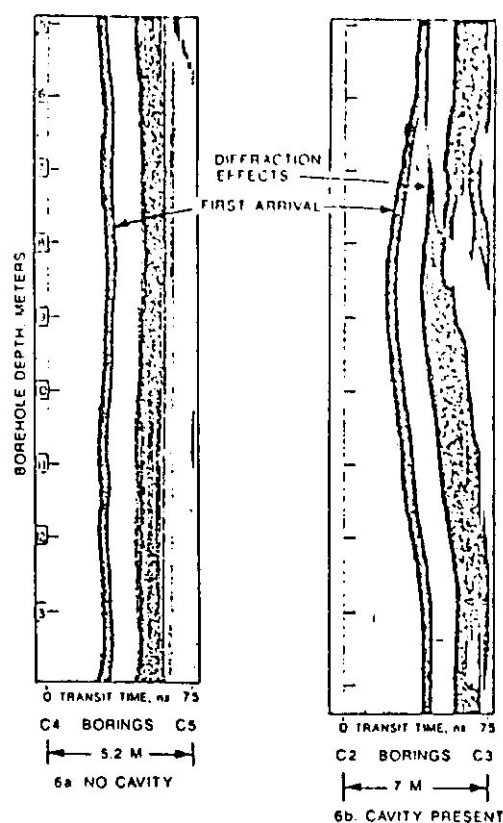
شکل ۲-۳۴- نیمرخ رادار که نشان دهنده نشست در سطح زمین می باشد [۲۱]



شکل ۲-۳۵- نیمرخ رادار که منطقه سفید نشان دهنده قسمت دو غاب کاری شده است [۲۱]

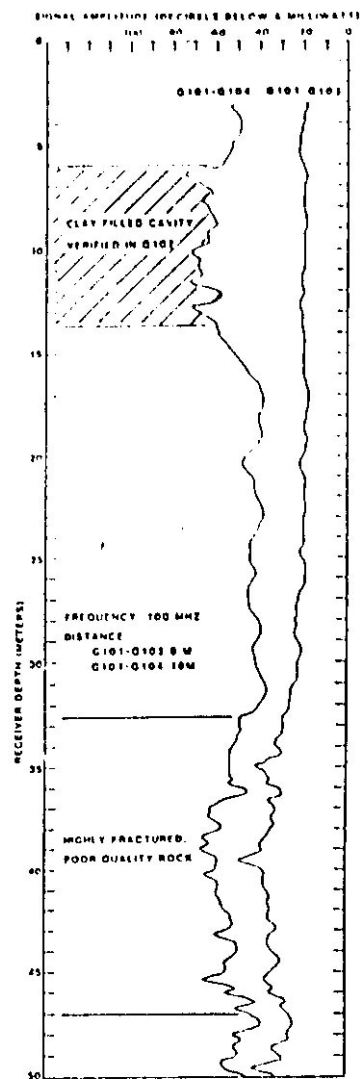


شکل ۲-۳۶- نیمرخ رادار نشان دهنده یک عمل رگاب باریک می باشد

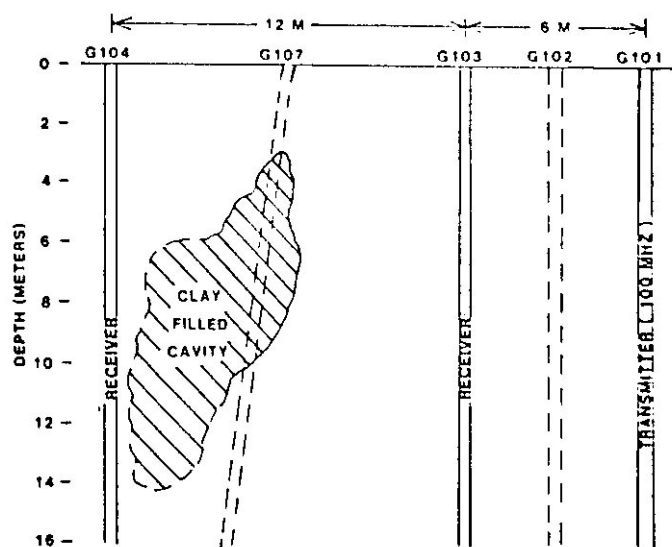


شکل ۲-۳۷- روش رادار میان بر که در منطقه مدفورد ثبت شده است

در شکل‌های ۲-۳۸ و ۲-۳۹ نمونه دیگری از استفاده از روش رادار میان بر را برای تعیین غارها که توسط رسوبات پر شده‌اند، در منطقه ال کاجون^۱ در هندوراس نشان می‌دهد. در این مثال رادار فرستنده در گمانه G۱۰۱ و گیرنده‌ها در گمانه‌های G۱۰۳ (فاصله ۶ متری از هم) و G۱۰۴ (در فاصله ۱۸ متری از هم) قرار دارند. در شکل ۲-۳۸ می‌توان دید که سیگنال‌های دریافت شده در گمانه‌های G۱۰۳ و G۱۰۴ مشابه‌همدیگر هستند (بجز در فاصله عمقی ۶ تا ۱۴ متری) کاهش دامنه سیگنال دریافتی که در شکل ۲-۳۸ بین گمانه‌های G۱۰۳G۱۰۱ در فاصله عمقی ۶ تا ۱۴ متری نشان داده شده است ناشی از یک غار پر شده از رس است. وضعیت تقریبی این غار از بررسی‌هایی که گیرنده و فرستنده در سطوح مختلف بوده‌اند و مابین گمانه G۱۰۱ و G۱۰۴ انجام شده در شکل ۲-۳۹ نشان داده شده است گمانه G۱۰۷ که بعداً در منطقه حفر شد وجود این غار را در عمق ۴ تا ۱۰ متری تأیید کرد. [۲۲].



شکل ۲-۳۸- نتایج روش رادار به همراه نیم رخ زمین‌شناسی در هندوراس



شکل ۲-۳۹- تعیین موقعیت غار با استفاده از روش رادار و تأیید آن با حفاری در هندوراس

۲-۱-۱ آشنایی

توموگرافی صوتی یکی از وسیع ترین زمینه‌های کاربردی روشهای ژئوفیزیکی است که برای بررسی عوارض تجزیه‌ای و انحلالی در مناطق کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مستلزم استفاده از روشهای آزمایش اطلاعات توسط کامپیوتر برای به دست آوردن یک تصویر کلی از اختلاف پارامترهای صوتی مانند سرعت امواج لرزه‌ای و تضعیف امواج در مقطع مورد مطالعه در زمین، است. اصول لازم اساساً همانهایی هستند که برای تولید اشعه ایکس در تصاویر پزشکی بکار می‌روند اما به دست آوردن اطلاعات بخاطر محدودیتهای فیزیکی که بر روی منابع ایجاد کننده اشعه و گیرنده‌های آن اعمال می‌شوند، مشکل‌تر است. معمولاً روش انجام کار به صورت بررسی مسیر اشعه بین دو چال (انفجار چال به چال) (شکل ۲-۴۰)، ما بین چال و سطح زمین (انفجار سرچاهی یا ته چاهی) و یا ترکیبی از هر دو است. این روش در مورد گمانه‌هایی به کار می‌رود که در مکانهای مشخص قرار گرفته‌اند و قائم بودن آنها، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این روش وضعیت کلی خصوصیات صوتی زمین را بهتر از روشهای دیگر ژئوفیزیکی مشخص می‌کند. هزینه‌های اضافی در این روش نسبت به سایر روشهای ژئوفیزیکی مشخص وجود دارند، اما این هزینه‌ها غالباً توسط تجزیه و تحلیل‌های مناسب ارائه شده توجیه می‌شوند.

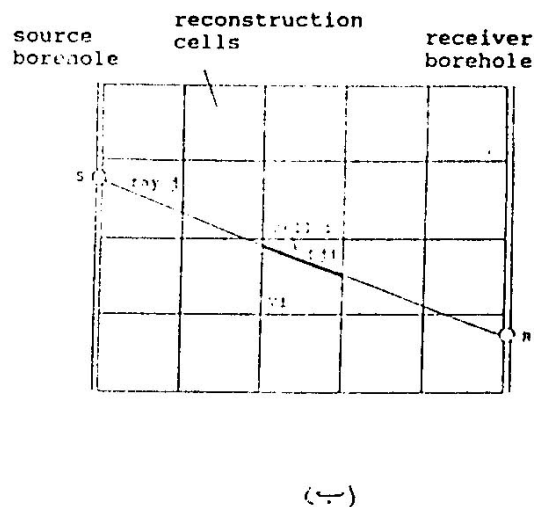
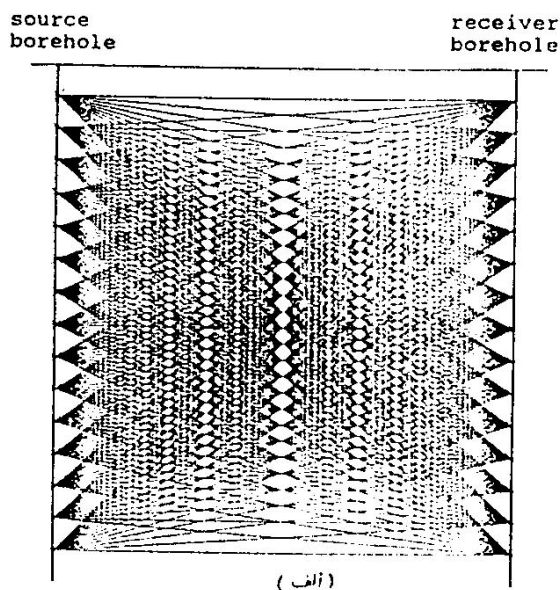
توجه کافی به هدف بررسی مانند سایر روشهای ژئوفیزیکی برای ایتیمایز کردن طرح مورد مطالعه لازم است. فضاهای خالی مجزا مانند غارهای بزرگ، حفره‌ها و لوله‌ها از لحاظ اندازه، عمق، نوع مواد پرکننده و همچنین شکل آنها، به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت هستند. این عوارض غالباً با تغییراتی در سنگ‌شناسی و یا ساختار زمین‌شناسی همراه هستند. یک مثال از این نوع توسط بای^۱ آورده شده است. او یک بررسی توموگرافی را در محل یک سد در نروژ انجام داد. که بعد از کنار هم چیدن ۷ مقطع مجاور، نواحی با سرعت کم مشخص شدند. که متمایز کننده که مربوط به نواحی شدیداً کارستی شده همراه زونهای شکسته و خرد شده در مارن بودند نتایج مشابهی در محل انبارهای بزرگ زیرزمینی در گچ بدست آمد، جایی که زونهای گسله قوسی (متحدالمرکز) توسط روشهای ارزان بررسیهای صوتی سطح به درون چاهی کشف شدند (مک داول)^۲ جنبه‌های اساسی این مورد کاوی که مربوط به کارستی شدن توده‌های گچی می‌باشند، خارج از حوصله این مقاله هستند.

دومین مورد کاوی از محلی واقع در چشیر^۳ انگلستان انتخاب شده، که فروانش زمین در اثر استخراج نمک و پمپاژ آب نمک حاصل شده‌است. هر دو روش بررسی بین چاهی و سطح به چاه با استفاده از توموگرافی موج P انجام شدند و از تضعیف امواج P برای مکان یابی جریانهای آب شور و زمینهای سست ایجاد شده در اثر فرونشست زمین استفاده شد [۲۳].

1 - By

2 - Mc Dowell

3 - Cheshire



شکل ۲-۴۰- الف مسیرهای فرضی پوشش داده شده توسط اشعه‌ها و امواج بین دو گمانه با در نظر گرفتن موقعیتهای همسان برابر منبع و گیرنده‌ها

۲-۸-۲ مکان‌یابی حفره‌ها با استفاده از توموگرافی صوتی

مثالهای چندی از توموگرافی صوتی که در مطالعات آشکار سازی حفره‌ها بکار برده شده‌اند، موجودند اما تعدادی از آنها مطالعاتی بودند که در محل‌های مشخص معدنی گالری‌ها و تونل‌ها انجام گرفته‌اند (نیو^۱ کوسما^۲، میراندا^۳) نتیجه کلی که از این آزمایشات اخذ می‌شود این است که فضاهای خالی فقط کاهش مختصری در سرعت امواج P ایجاد می‌کنند که تشخیص این امر روی توموگرامهای بدست آمده مشکل است. به جز در مورد معدن استریپا^۴ در سوئد که تونل با یک زون شکسته قطع شدگی داشت. فضاهای خالی مجزا اگر دارای پرشدگیهایی از آب یا خاک باشند در مقایسه با سنگ میزبان اثر کمتری را روی کاهش سرعت امواج p دارند.

به خاطر اینکه توموگرافی لرزه‌ای غالباً محدودیتهای عملی دارد، لازم است که مطالعه به صورت خیلی دقیق طراحی شود. فاکتورهایی که باید در مرحله طراحی مورد توجه قرار گیرند شامل دانستن مقدار تفاوت‌های سرعت، رفتار امواج لرزه‌ای، فاصله بین چالها و تجهیزات سرزمین هستند. برای مثال اگر هدف از انجام توموگرافی، ارائه وضعیت تجزیه‌ای فضایی مناسب برای سنگها باشد، طول موج امواج لرزه‌ای باید کمتر از متوسط فاصله جدایی بین فضاهای خالی باشد، جدول ۲-۱ اهمیت متناسب بودن فرکانس منبع را با نوع خاک و سنگ مورد نظر برای ارائه طول موج مناسب نشان می‌دهد. یک منبع با فرکانس بالا مانند یک

- 1 - New
- 2 - Cosma
- 3 - Miranda
- 4 - Stripa

جرقه زن می‌تواند در چالهای پر شده از آب برای پی جویی فضاهای خالی مجزا با قطر کوچک به کار برده شود اما متأسفانه، تضعیف امواج و دامنه‌انها با افزایش فرکانس منبع، افزایش می‌یابد و چندین انفجار تکراری ممکن است در همان محل به خاطر کسب یک سیگنال مناسب لازم باشد.

ب - نمودار شماتیک سلوله‌های موجود بین دو گمانه و مسیر اشعه آنها

حتی در جاهایی که تفاوت سرعت امواج زیاد باشند، مانند فضاهای خالی ($VP = 300 \text{ m/S}_e$)، یا در یک سنگ آهک ماسیو با درزهای خیلی بسته ($VP = 4000 \text{ m/S}_e$)، زمانهای عبور خیلی دقیق برای هر مسیر اشعه لازم هستند. یک حفره خشک با مقطع تقریباً دایره‌ای (گرد) و قطر ۵ متر در روی نقشه که مابین دو چال عمودی با فاصله ۲۵ متری از یکدیگر در یک چنان سنگ آهک قرار گرفته باشد، اختلاف زمان گذر ماکزیمم $0/12$ میلی ثانیه ایجاد می‌کند، زیرا لرزه سنج زمان عبور امواج P در داخل سنگ آهک در اطراف فضاهای خالی را ثبت می‌کند دقت پیکهای اولین موج P ثبت شده در رکوردهای لرزه‌ای باید مابین $0/05$ میلی ثانیه یا کمتر باشد که این امر در توانایی لرزه سنجهای خیلی مدرن است و غالباً کاهش اثر پارازیت زمینه برای به دست آوردن سطح از دقت، خیلی مشکل است.

در این مثال ویژه و دیگر مثالها جایی که تفاوت سرعت ما بین پرشدگی فضاهای خالی و سنگ میزبان بیشتر از ۲۰٪ باشد استفاده از مسیرهای منحنی شکل (شکسته) اشعه‌ها در توموگرافی بهتر از استفاده از مسیرهای اشعه‌های مستقیم است. توصیف روشهای لازم برای انجام توموگرافی در مورد مسیرهای منحنی شکل امواج توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ ارائه شده است.

توموگرامهای به دست آمده با این روش به صورت خیلی صحیح توزیع سرعت را در زیر سطح زمین نشان می‌دهند اما نمی‌توانند عوارض پنهان کوچک ناشی از انحلال سنگها را روشن کنند. بعید است که یک فضای خالی به طور واضح به صورت یک زون با سرعت کم شناسایی شود مگر اینکه فاصله بین گمانه‌ها کمتر از ۵ برابر متوسط ابعاد فضاهای خالی باشد. آزمایشات شنایدر یک کاهش آشکار در دامنه امواج P که از نزدیکی عوارض نسبتاً کوچک تونل مانند عبور کرده بودند را نشان داد. همچنین او خطاهای عملی در استفاده از داده‌های زیاد در تجزیه و تحلیل‌های توموگرافیکی را ارائه کرد.

جدول ۱-۲ - روابط بین طول موج منبع با توجه به فرکانس منبع باری خاکها و

سنگهای کارستی تیبیک [۲۳]

سرعت امواج طولی (m/se)	طول موج (m)	
	فرکانس منبع انفجاری ($f = 1500 \text{ Hz}$)	فرکانس منبع چکشی ($f = 100 \text{ Hz}$)
(ماسه خشک رسی) ۵۰۰	۰/۳۳	۵
(رس اشباع سفت) ۱۸۰۰	۱/۲	۱۸
(آهک خشک ضعیف) ۲۵۰۰	۱/۷	۲۵
(آهک اشباع محکم) ۵۰۰۰	۳/۳	۵۰

عوارض ناشی از انحلال در آهکها معمولاً همراه با شکستگیهای ایجاد شده در اثر تغییر شکل تکتونیکی هستند اگر شکستگیها در باندهایی بصورت مشخص مانند طول زونهای گسله یا لولای چینها باشند، هدف تعیین حفرات مجزا با حجمهای بزرگتر در داخل زونهای شکسته شده خواهد بود. توموگرافی صوتی وقتی که امتداد زون شکسته، پلان مقطع توموگرافیکی را قطع می کند، می تواند نتایج خوبی را ارائه کند، در این صورت بخش اعظم امواج P ثبت شده دارای مسیرهایی خواهند بود که عوارض مذکور را قطع می کنند. افزایش در زمانهای عبور معمولاً به طور مساوی برای گمانههایی که در فاصله زیاد نسبت به عرض زون خرد شده (درزه دار) مخصوصاً در سنگ آهک خشک قرار گرفته اند، قابل ملاحظه خواهد بود. اشکال عمده در این روش، انتخاب منبع انرژی برای انطباق بین طول موج ایجاد شده و قدرت سیگنالهاست.

نتایج بدست آمده از بررسی مشخصه های توده سنگ برای محل یک انبار زیرزمینی در گچهای سست (مک داول) می تواند برای تشریح مزایا و محدودیتهای توموگرافی امواج P برای این کاربرد ویژه بکار رود. با استفاده از چاه پیمایی در یک حفره زیر سطحی بزرگ، تعدادی زونهای درزه دار چندی همراه با گسل تشخیص داده شد. همچنین در مواردی فضاهای خالی و زونهای خرد شده که حاصل انحلال بودند، مشاهده شدند. در هر زون گسله دو گمانه حفر شد یکی به صورت قائم و تا ۱۵ متری حفره دیگری ۲۵ متر به سمت پایین از قسمت استخراج شده به صورت معکوس. نمونه های بدست آمده از مغزه ها بر این امر دلالت داشتند که گسلها مایل بوده و در پلانهای قائم به صورت منحنی وار بوده و در عمق محو می شوند. برای بررسیهای بیشتر ابتدائاً توموگرافی صوتی بین دو چال، در نظر گرفته شد. این طرح به خاطر هزینه لازم برای حفاری و لوله گذاری چالها و نیز مشکلات عملی پیش بینی شده در نحوه ارتباط دادن منابع انرژی و لرزه سنجها، به ویژه در چالهای حفاری شده قائم به سمت بالا انجام نشد یک انفجار برای ایجاد موج از سطوح آزاد حفره به لرزه سنجهای بسته شده در چالها، انجام شد. انرژی با استفاده از ضربات چکش به سطح سنگ در فواصل ۲ متری در هر طرف گمانه در طول خط مرکزی تونل راهنما ایجاد شد. دیاگرام تیپیک مسیر امواج برای یکی از چالهای سقف حفره در شکل ۲-۴۱-الف نشان داده شده است.

توموگرامها برای هر دسته از داده ها با استفاده از روش باز سازی تکراری همزمان (SIRT)^۱ و با اندازه سلولهای یک متر مربع با توجه به فاصله ژئوفونها در چالها تهیه شدند. سرعت متوسط برای هر سلول با استفاده از پردازش مسیر شکسته شده و به کار بردن یک وزن برای اعمال اثر اختلاف در پوشش اشعه بدست آمد. در توموگرامها از رنگهای متفاوت استفاده شده است و به صورت متوالی با سرعتهای امواج p ، 100 m/S_e به 100 m/S_e تا 3500 m/S_e با رنگهای مختلف سایه زده شده اند توموگرامهای کنتور شده با یا بدون رنگ آمیزی جاهایی رسم می شوند که اختلاف در سرعت به صورت ذکر شده وجود داشته باشد یک مثال از مدل اخیر نمایش، در شکل ۲-۴۱-ب نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود جائیکه زمانی مقادیر سرعت (VP) کمتر از 2100 m/S_e وجود دارد، به صورت رنگ روشن درآمده است.

توموگرامهای بدست آمده در این مثال و دیگر گمانه های حفر شده به طور روشن برتند شدن شیب گسل و پهن شدگی گسلها به طرف بالا در سقف حفره دلالت دارند، ضمناً به این نکته توجه شده است که با افزایش ارتفاع که همراه با کاهش در فشار در جا خواد بود، در سرعت امواج P یک کاهش کلی وجود خواهد داشت. فضاهای خالی و درزه های باز که در لایه راهنما مشاهده شده بودند، ناشی از گشاد شدن سطح گسل و افزایش کارستی شدن هستند [۲۴].



شکل ۲-۴۱- توموگرافی سطح در گمانه ۷۱ در سازند گچی الف- نمودار مسیر امواج
ب- توموگرام سرعت امواج P [۲۴]

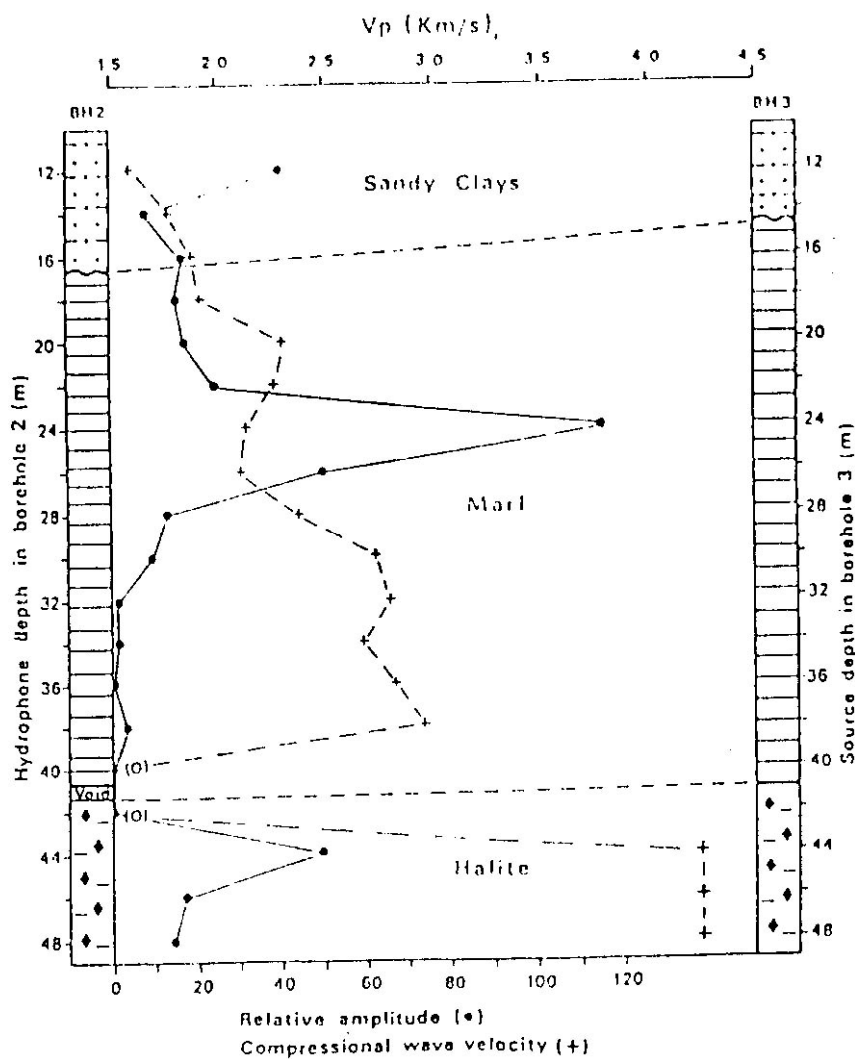
۲-۸-۴ شناسایی عوارض ریزشی ناشی از انحلال

در مناطق کارستی، انحلال و تجزیه سنگها غالباً به فرونشست و تولید زمین سست منتهی می‌شود که اهمیت زیست محیطی و مهندسی قابل ملاحظه‌ای می‌تواند داشته باشد. مقدار ناآرامی زمین با استفاده از ترکیب اطلاعات حاصل از حفاری، بررسیهای ژئوفیزیکی و روشهای دیگر مانند چاه پیمایی ژئوفیزیکی و استفاده از تلویزیون درون گمانه‌های می‌تواند ارزیابی شود. چنانچه هدف بررسی، تعیین فضاهای خالی مجزای بزرگ و نزدیک به سطح زمین باشد، توموگرافی صوتی یک روش مناسب است. هر دو روش بررسی بین گمانه‌ای و بین سطح زمین و گمانه در بررسی شرایط زمین در معدن لیون سلت، مارستون، چشیر انگلستان به کار برده شده است در این معدن، عمل استخراج نمک با استفاده از روشهای معدن کاری و پمپاژ آب شور، باعث شده تا که سازند با چگالی پایین از جنس برشهای فرو ریخته که روی مارن قرار گرفته‌اند، فرونشست قابل توجهی را از خود نشان دهد.

آماده سازی گمانه و روشهای بدست آوردن اطلاعات در این منطقه با یک منطقه گچی خشک، متفاوت است. پنج گمانه باز که قبلاً با قطر ۱۵۰ میلی متر حفر شده بودند با لوله‌های پلاستیکی به قطر داخلی ۱۰۰ میلی متر تا عمق ۴۰-۵۰ m لوله‌گذاری شدند.

فضای حلقوی اطراف هر لوله پلاستیکی سیمانی نشده بود زیرا انتظار می‌رفت که آب زیرزمینی و خاک دست نخورده اطراف گمانه آنرا پر کنند و تشدید صوتی زیادی را ایجاد نمایند. انفجار بین چاهی (چاه به چاه)، بین گمانه‌های نزدیک بهم (با فاصله ۲۴ m) با استفاده از یک منبع جرقه زن و رشته‌های هیدروفون قرار گرفته در مجاورت چالهای پر شده از آب انجام گرفت در بعضی موارد سیگنالهای خیلی کم، علیرغم استفاده از انفجارهای تکراری متعدد بدست می‌آیند بنابراین افزایش قدرت سیگنالها در مرحله به دست آوردن داده‌ها لازم است.

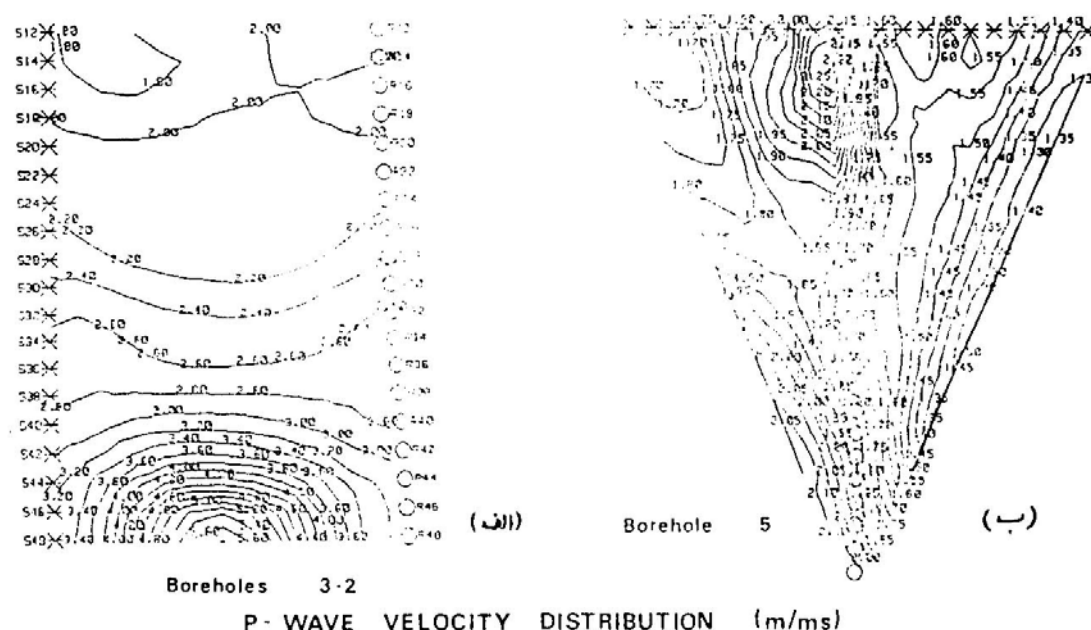
پروفیل رسم شده در شکل ۲-۴۲ نشان می‌دهد که نهشته‌های سطحی و کم عمق یک سرعت موج تراکمی با میانگین برابر ۱۷۱۵ متر بر ثانیه دارند. مقادیر سرعت برای مارن‌ها از ۱۹۲۰ m/sc تا ۳۰۰۰ m/sc متغیر است که به ترتیب نشان از مارن‌های هوازده سطحی و افق مارنی تقریباً دست نخورده است. سرعت‌های امواج تراکمی ثابت برای سنگ نمک در اعماق، بین ۴۲-۴۸ متر با میانگین سرعت ۴۴۵۰ m/se بدست آورده شدند. این مقادیر زیاد تا اندازه‌ای کمتر از مقدار مورد انتظار است اما می‌تواند با استفاده از احتمال وجود ناخالصیها بجای احتمال وجود فضاهای خالی در سنگ نمک مذکور توجیه شود. دامنه نوسان مقادیر سرعتی خیلی متغیر بوده و این امر در تشخیص وجود حفره‌ها و زونهای سست می‌تواند به عنوان یک مسئله مهم در نظر گرفته شود. سیگنال‌های با قدرت خیلی کم در نهشته‌های کم عمق و سطحی، نشان دهنده بخش‌هایی از مارن‌ها و قسمت‌های بالایی سازنده هالیتی هستند.



شکل ۲-۴۲- انفجار بین چاهی. از گمانه ۳ به گمانه ۲ در مارستون، چشیر انگلستان

شکل ۲-۴۳- الف توزیع سرعت را به صورت خطوط کانتوری نشان می‌دهد که با استفاده از روش SIRT و مسیرهای اشعه‌های شکسته شده رسم شده‌اند یک زون با سرعت پایین در داخل مارن‌ها و در اعماق مابین ۲۰-۱۲ متر دیده می‌شود که احتمالاً بر برشی شدن مارن‌های مربوط به فرونشست دلالت دارد. اما مقایسه توزیع سرعت در بخش پایین مقطع با استفاده از مدل‌های ایجاد شده از ترکیب داده‌ها بی نتیجه می‌باشد. (کلی تون) [۲۴].

برداشت سطح به گمانه ۵ خیلی سریع و کم خرج بود و نتایج خیلی جالبی را هم ارائه کرد. از یک منبع پتکی در سطح زمین و در فواصل ۲ متری در طول یک مسیر که از گمانه نیز می‌گذشت استفاده شد و هیدروفون‌ها در درون چال و در عمق، بین ۳۰-۴۰ متری قرار گرفتند. توزیع سرعت بدست آمده به طور واضح دلالت بر وجود زون‌های سست داشت (شکل ۲-۴۳-ب). مقادیر سرعت پایین (۱۳۰۰-۱۵۵۰ m/se) در انتهای شرقی برداشت با فرونشست زمینی و عارضه زیانبار ساختاری مشاهده شده در سطح هم خوانی داشت. تضعیف قدرت سیگنال مشخصاً به خاطر قطع کردن این زون دارای سرعت کم، توسط اشعه‌های موج بود [۲۴].



شکل ۲-۴۳- توموگرافی سرعت امواج P در چشیر انگلستان الف- انفجار بین گمانه‌های ۲ به گمانه ۳
ب- انفجار از سطح به گمانه، گمانه ۵

۲-۸-۵ نتایج بدست آمده

توموگرافی امواج P روش مفیدی است که اگر با دقت مورد استفاده قرار گیرد می‌تواند در بررسی عوارض کارستی نسبت به دیگر روشهای عادی و جاری، فوق العاده مفید واقع شود. هزینه به دست آوردن اطلاعات و داده‌ها و پردازش آنها در مقایسه با دیگر روشهای ژئوفیزیکی نسبتاً بالا است. اما موارد زیادی وجود دارند که باید به‌هزینه روش، نسبت به مزایا و آثار بدست آمده از آن توجه داشت مکان یابی و آشکار سازی مستقیم فضاهای خالی مجزا با این روش همیشه کاملاً موفقیت‌آمیز نیست مگر اینکه گمانه‌ها به صورت نزدیک بهم قرار گرفته باشند دو مثال ذکر شده در مقاله کاربردهای موفق توموگرافی امواج P هستند که مزایای استفاده از برداشت گمانه به سطح زمین را به خوبی انفجارهای بین گمانه‌ای تشریح می‌کنند. جایی که امکان داشته باشد برای ماکزیمم کردن پوشش اشعه‌ای هم از نظر کمیت و هم از نظر جهت به خاطر روشن کردن وضعیت انحلال، یک روش ترکیبی توصیه می‌شود. همچنین شواهد فراوانی از این مورد کاپیها موجودند که میدان نوسان امواج P اندازه گرفته شده در آنها برای تجزیه و تحلیل‌های توموگرافیکی بکار برده می‌شوند [۲۲].

۲-۹ سایر روشهای مورد استفاده در شناسایی کارستها

۲-۹-۱ روش الکترومغناطیسی

در مناطقی که می‌توان از رادار نفوذی زمین استفاده کرد، اطلاعات مفیدی از ترکیب و شکل لایه‌های سطحی می‌توان به دست آورد. اما در اکثر زمینهای کارستی، خاکهای رسی اجازه استفاده از این روش را نمی‌دهند. بنابراین استفاده از دیگر روشهای ژئوفیزیکی در تعیین سینک هولها می‌تواند مفید باشد. در اکثر روشهای ژئوفیزیکی عامل اندازه‌گیری شده مقدار متوسطی از خصوصیات فیزیکی موادی هستند، که در زیر ایستگاه اندازه‌گیری قرار دارد. بنابراین اندازه‌گیری را می‌توان به حجم بزرگی از مواد زیر ایستگاه اندازه‌گیری و نه به یک نقطه زیر سطح زمین، نسبت داد. اگر حجم اندازه‌گیری، شامل رسوبات سطحی سست باشند (که یک گودال را در سنگ آهک پر کرده باشد)، مقدار اندازه‌گیری در آن حجم با مقدار اندازه‌گیری برای مناطقی که مقدار نسبتاً زیادی از ستونهای آهکی این حجم را پر کرده باشند، متفاوت است. روشهای گرانی، مقاومت ویژه، روش مغناطیسی و الکترومغناطیسی همه دارای این خصوصیت ذکر شده هستند.

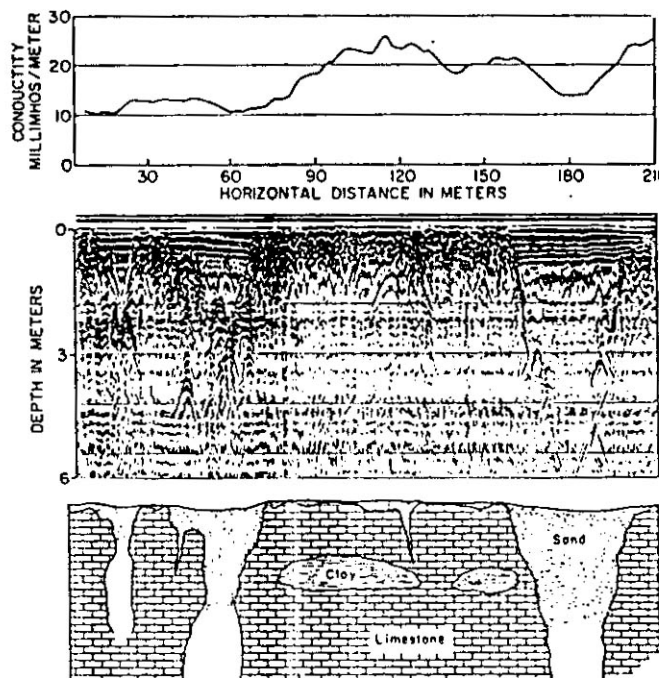
روش مغناطیسی کاربرد کمتری در زمینهای کارستی دارد. اما روشهای مقاومت ویژه، گرانی و الکترومغناطیسی می‌توانند در زمینهای کارستی مورد استفاده قرار گیرند. روش اندازه‌گیری الکترومغناطیسی از سایر روشها سریع تر است. بنابراین مؤثر ترین روش برای انجام مطالعات در ناحیه‌های بزرگ است.

روش الکترومغناطیس بدون تماس با زمین انجام می‌شود. در این روش هدایت الکتریکی لایه‌های سطحی را که شامل سنگ آهک نیز است، اندازه‌گیری می‌کنند. ابتدا یک میدان مغناطیسی اولیه که بوسیله جریان متناوب در یک سیم پیچ ایجاد شده را با یک آنتن حلقوی به زمین می‌فرستند. سپس یک آنتن مارپیچی دیگر میدان منتجه را اندازه می‌گیرد. این میدان منتجه مجموع میدان اولیه که بوسیله آنتن مارپیچی تولید شده و میدانی است که بوسیله تحریک مواد موجود در زیرزمین به وجود می‌آید. دستگاههای موجود میدان اولیه را به طور خودکار کم کرده و آنچه ثبت می‌شود، میدان تحریک شده با ثانویه

خواهد بود، که این میدان متناسب با هدایت الکتریکی سنگها است. وسایل اندازه گیری کالیبره شده اند تا مقدار قرائت شده بر حسب واحدهای هدایت الکتریکی باشد. هر چه فاصله بین آنتن گیرنده و فرستنده بیشتر باشد عمق نفوذ میدان نیز بیشتر خواهد بود.

از آنجا که هر اندازه گیری احتیاج به یک تا دو دقیقه وقت دارد و لوازم به زمین متصل نبوده و ارتفاع دستگاه از سطح زمین چندان مهم نیست، اپراتور می تواند به سرعت به ایستگاه بعدی حرکت کند. مقادیر هدایت الکتریکی به دست آمده به صورت نقشه رسم می شود، تا مناطقی که دارای هدایت الکتریکی پایین هستند، مشخص شود. به عنوان مثال سنگ آهک به همراه یک روباره نازک دارای مقاومت بالا (هدایت الکتریکی پایین) و یا روباره رسی با ضخامت زیاد دارای مقاومت پایین (هدایت الکتریکی بالا) است. ظاهراً ترکیب روباره در اندازه گیریها اثر می گذارد. ولی اگر ماسه خشک به طور مستقیم روی سنگ آهک خشک قرار بگیرد، تغییرات کمتری اتفاق خواهد افتاد. در مناطقی که ماسه رسی روی سنگ آهک قرار بگیرد، تغییرات متوسط خواهد بود (شکل ۲-۴۴). با انتخاب فاصله مناسب برای آنتن ماریپیچی تغییرات به دست آمده ماکزیمم خواهد بود.

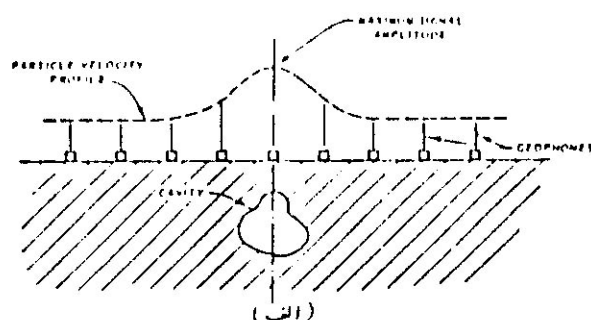
داده های مقاومت ویژه دارای جزئیات کامل تری از منطقه مورد مطالعه هستند. ولی وقت زیادی را صرف می کنند، بنابراین این اجرای این روش برای نواحی بزرگ چندان مناسب نیست پس باید ابتدا روش الکترو مغناطیس را به طور ناحیه ای انجام داد، و پس از تعیین مناطق مفید می توان از روش مقاومت ویژه در این مناطق استفاده کرد [۲۵].



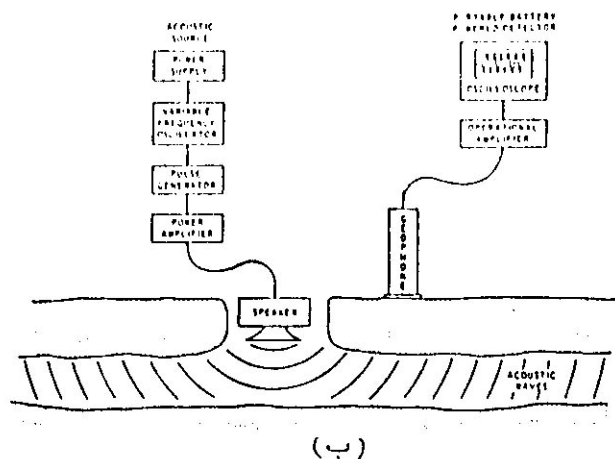
شکل ۲-۴۴- پروفیل های هدایت الکتریکی، رادار و زمین شناسی به ترتیب از بالا به پایین به هم خوانی بین هدایت الکتریکی و رادار وقتی پالئوکارست وجود دارد، توجه کنید [۲۲]

۲-۹-۲ روش تشدید صدا در اکتشاف کارستها

وقتی که وجود غارها به وسیله حفاری تأیید شد از روش تشدید صدا نیز می‌توان برای تعیین وسعت غارها در زمین به صورت نقشه استفاده کرد. برای اجرای این روش یک بلندگو یا منبع ایجاد صدا را داخل یک شکاف طبیعی یا یک گمانه قرار داده، سپس انواع فرکانس را تولید کرده تا ماکزیمم شرایط تشدید در غار بدست آید. سپس با این بلندگو یک خروجی به طور پیوسته ثبت می‌شود. تحقیقات در سطح زمین در یک الگوی شبکه‌ای انجام می‌شود (پالس ژئوفون با استفاده از باطری ایجاد می‌شود). با اندازه‌گیری پیک سرعت ذرات در هر نقطه از شبکه می‌توان یک نقشه کنتوری بر مبنای دامنه سیگنال برای منطقه سیگنال معمولاً بلافاصله بالای غار ظاهر می‌شود. شکل ۲-۴۵ اصول روش تشدید صدا را نشان داده است [۴].



8a. Hypothetical particle velocity profile across cavity



8b. Illustration of acoustic resonance technique using subsurface source

شکل ۲-۴۵-الف- پروفیل فرضی سرعت بر روی یک غار ب- شرح روش تشدید صدا با استفاده از منبع زیر سطحی [۲۷]

۲-۹-۳ جریان سنجهای درون گمانه‌ای

یکی از مسائل که در پایداری سینک هولها مدنظر است، بررسی پوشیدگی کامل شکافهای موجود در سنگ بستر است. تحت شرایط هیدروژئولوژی مناسب جریان سنجهای گمانه‌ای می‌تواند برای بررسی پایداری سینک هولها مورد استفاده قرار گیرد. اساس روش جریان سنج گمانه‌ای ایجاد یک منبع گرما در مرکز دیواره گمانه است که یک سری دماسنج نیز به طور حلقوی در اطراف منبع گرما قرار دارند. وسعت انتشار ایزومتریک دما با جهت و سرعت جریان آبهای زیرزمینی متناسب است. فلتون^۱ چهار پیژومتر اطراف یک سینک هول که اخیراً خراب شده بود، و در نزدیک دریاچه ماری در فلوریدا قرار داشت، کار گذاشت. جریان سنج گمانه‌ای در ابتدا حرکت آبهای زیرزمینی و سطحی را به طرف سینک هول نشان داد. پس از اینکه سینک هول پر شد، آبها به محیط اطراف جاری شدند. جریان سنجها همچنین نشان دادند که آبها تمام منافذ را پر کرده و این محل برای کارهای مهندسی مناسب است، چرا که فرسایش و حرکت آبها بطرف پایین متوقف شده بود [۲۸].

۲-۹-۴ تجزیه و تحلیل احتمال ایجاد سینک هولها با توجه به توالی زمانی تشکیل آنها

خطر پدید آمدن سینک هولها به طریق آماری نیز می‌تواند بررسی شود. بدین طریق که با بررسی یک منطقه وسیع، توالی زمانی توسعه یک سینک هول جدید در واحد زمان و در واحد سطح تعیین می‌شود. با بررسی داده‌های تاریخی درباره توسعه یک سینک هول جدید می‌توان، یک مدل ریسک پذیر در مورد احتمال توسعه یک سینک هول جدید ارائه داد. اطلاعات و داده‌های تاریخی در یک منطقه را می‌توان با بررسی مقاله‌ها، روزنامه‌ها دفاتر ثبت در شهرها و بخشها، گزارشات بیمه و با مصاحبه کردن با اهالی منطقه به دست آورد. البته داده‌ها باید محدود به یک دوره زمانی باشند که داده‌های کامل در دسترس قرار گیرد. با داشتن داده‌های کافی می‌توان کمترین خطر حاصل از توسعه یا ایجاد یک سینک هول را بدست آورد با اطلاع داشتن از توالی زمانی ایجاد سینک هولها می‌توان که تعداد سینک هولها که در یک منطقه با مساحت معین در واحد زمان شکل خواهد گرفت را مشخص کرد. یا برعکس زمان لازم برای ایجاد یک سینک هول در یک منطقه با مساحت معین را محاسبه کرد [۴].

برای مناطقی که داده‌های توالی ایجاد سینک هولها ارزیابی شده‌است، باید امکان مقایسه آن در تمام شرایط هیدروژئولوژی وجود داشته باشد. فرکانس سینک هول می‌تواند در یک نقشه نشان داده شود. برای این منظور تعداد سینک هولها در واحد سطح و زمان محاسبه و در واحد شبکه نوشته می‌شود، سپس نقشه منطقه بندی می‌شود. اندازه سلول و فضای شبکه باید بطور مناسبی انتخاب شود. ویلسون^۲ فرکانس گزارش شده از سینک هولها را در بخش کیتروس در فلوریدا (۲-۴۶) مورد ارزیابی قرار داد. او متوجه شد که در مناطق پست معمولاً بین ۱۳٪ تا ۷۷٪ کیلومتر مربع در سال و حد بالایی آن ۱۲٪ کیلومتر مربع در سال است. زمینهای مرتفع دارای فرکانس خیلی پایین‌تر هستند، و در مناطقی که دارای فرکانسهای بالایی هستند، گسل خورده نیز می‌باشند.

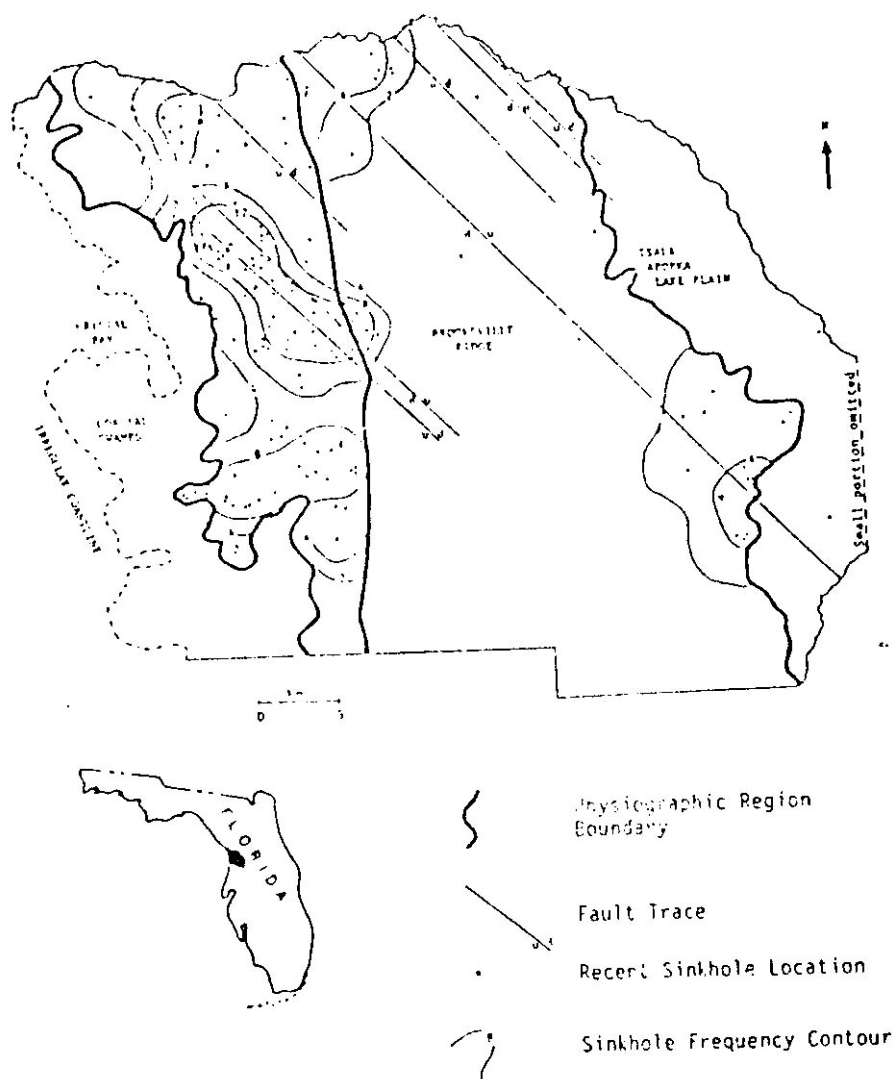
تشخیص حفرات سینک هول تابعی از فکانس و اندازه مورد انتظار برای ایجاد سینک هول جدید است. بنابراین علاوه بر فرکانس، ابعاد سینک هولها نیز باید به طور هم زمان یادداشت شود. توزیع اندازه سینک هولها با استفاده از رسم هیستوگرامهایی

1 - Felton

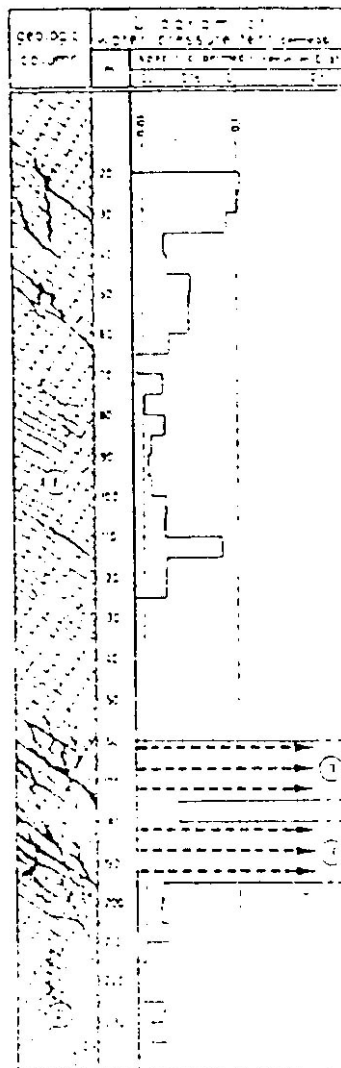
2 - Wilson

از ابعاد آنها می‌تواند تعیین شود. مهم‌ترین فاکتور اندازه‌گیری برای یک سینک هول ماکزیمم پهنای آن است، تا بدین وسیله بتوان طول پلی که باید ساخته شود تا از ریزش سازه‌های ساخته شده دست بشر جلوگیری کند، محاسبه شود.

از آنجا که مناطق کارستی دارای حفرات و درزه‌های متعدد هستند، بنابراین با اندازه‌گیری نفوذپذیری می‌توان به وجود کارستی شدن و درصد آن در یک منطقه پی برد. شکل ۲-۴۷ نمونه‌ای از اندازه‌گیری نفوذپذیری در گمانه حفر شده در مناطق کارستی را نشان می‌دهد هم چنان که مشاهده می‌شود، در مناطق کارستی درصد نفوذپذیری به طور ناگهانی افزایش چشمگیری می‌یابد [۲۹].



شکل ۲-۴۶- نقشه فرکانس سینک هولها در بخش کیتروس در فلوریدا منطقه جغرافیایی به همراه مناطق نفوذ بطور جداگانه در نقشه ذکر شده است. خطوط کنتوری نشان دهنده تعداد چالها در ۲۶ کیلومتر مربع در طول ۶ سال است [۲۹]



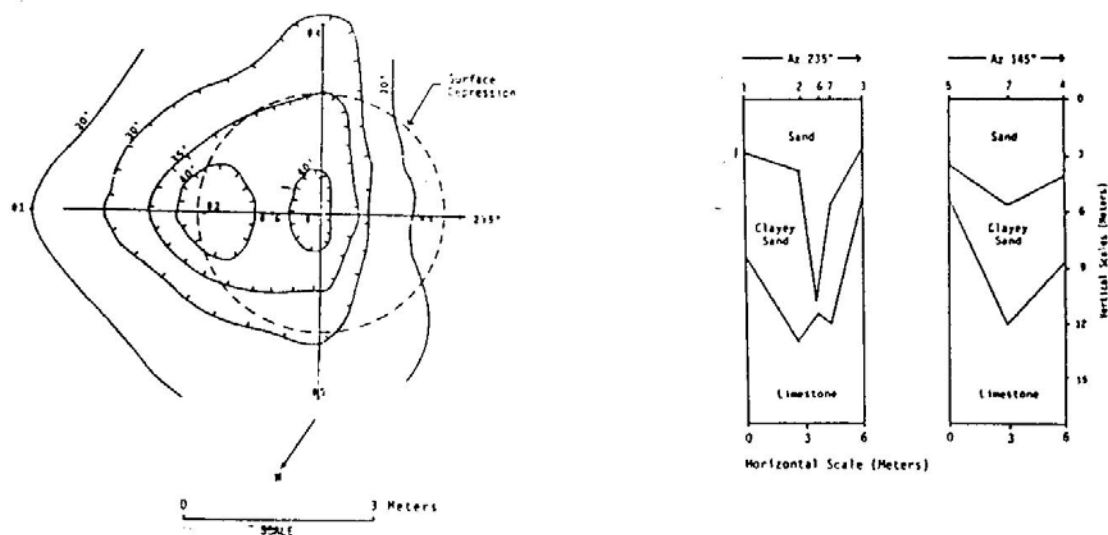
۲-۴۷- نتایج تحقیقات در یک گمانه، رابطه نفوذ پذیری و کارستی شدن آهک [۲۹]

۲-۹-۵ آزمایش نفوذ استاندارد^۱

با آزمایش نفوذ استاندارد می‌توان استحکام لایه‌های مختلف رسوبات را تعیین کرد. با این آزمایش می‌توان خصوصیات و ضخامت لایه‌های روباره را نیز بررسی کرد. اگر لایه‌ها نازک باشند، باید نمونه با محفظه دو کفه‌ای گرفته شود. در لایه‌های ضخیم نمونه‌گیری با فاصله ۱/۵ متر مناسب است. آزمایش نفوذ استاندارد معمولاً رسوبات خیلی نرم و سست را که مستقیماً روی سنگ بستر قرار دارد، مشخص می‌کند. با این آزمایشات می‌توان پایداری زمین را بررسی نمود و همچنین وجود سینک هولها و مناطق ریزشی را نیز مشخص کرد. بسته به اینکه رسوبات پوشش دهنده سطح زمین به هم چسبیده باشند یا نه و همچنین رسوبات، روی یک سینک هول ریزش کرده قرار داشته باشند، یا منطقه نشست کرده باشد، یک نتیجه به دست خواهد

1- Standard Penetrating tese (SPT)

آمد. آزمایش نفوذ استاندارد در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیکی توسط مهندسان اجرا می‌شود. از آنجا که آزمایش نفوذ استاندارد نمی‌تواند شاخصی از خصوصیات رسوبات در سینک هولها را ارائه بدهد، پیشنهاد می‌شود که از روش اندازه‌گیری خصوصیات بر جا یعنی روش پیزوگون الکتریکی استفاده شود.

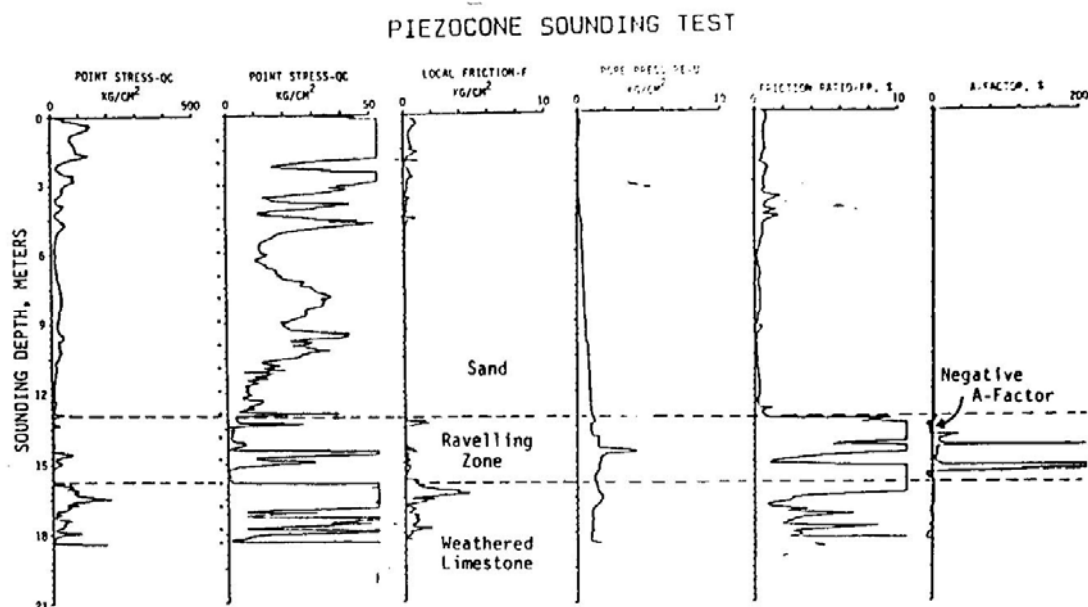


شکل ۲-۴۸- نتایج تحقیقات گمانه‌آزمایشی در یک سینک هول در تامپای فلوریدا. نقشه منحنیهای تراز در سمت چپ قسمت بالای لایه سنگ آهک و همچنین محل چال و خط مقطع عرضی را نیز نشان می‌دهد. مقاطع عرضی در سمت راست، لایه‌های خاک و گودال را در قسمت بالای سنگ آهک نشان می‌دهند [۳۰].

۲-۹-۶ پیزوکون الکتریکی

روش پیزوکون الکتریکی به تغییرات سنگ‌شناسی حساس است و از آزمایش نفوذ استاندارد مفیدتر و کم خرج تر است. برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاکها در مناطق دارای سینک هول می‌توان از این دستگاه استفاده کرد. کاهش مقدار داده‌های پیزوکون الکتریکی در نتیجه اندازه‌گیری ترکیب نیروهای مقاوم جدار لوله مخروط و نوک آن است که این امر در نفوذسنج استاندارد نیز مشترک است. نسبت اصطکاک (نسبت میله به مقاومت نوک) شاخصی برای بررسی بافت خاک می‌باشد. و از آن در بررسی چینه‌شناسی خاکها می‌توان استفاده کرد. همچنین یک سنسور متخلخل در نوک مخروط می‌تواند، فشار مایع در داخل منافذ را اندازه‌گیری کند.

شرایط ریزشی در یک منطقه با استفاده از پارامترهای پیزوکون الکتریکی که شامل نقطه تنش پایین، نسبت اصطکاک بالا و فاکتور A منفی هستند، تعیین می‌شود. فاکتور A اختلاف بین فشار منفذ محاسبه شده بر پایه عمق نفوذ در زیر سطح ایستایی و فشار حقیقی منفذی است. فاکتور A منفی در مناطق ریزشی به عنوان شاخصی از میزان آب زیرزمینی است که به داخل سینک هول نفوذ کرده است. پنج پارامتر (نقطه تنش، اصطکاک محلی، فشار منفذی، نسبت اصطکاک و فاکتور A) به صورت یک گراف از دستگاه پیزوکون الکتریکی بدست می‌آیند. شکل ۲-۴۹ نمونه‌ای از گراف حفاری پیزوکون الکتریکی را نشان می‌دهد، که در منطقه نشست ناشی از سینک هول اندازه‌گیری شده است. زون ریزشی در ماسه نرم در عمق ۱۳/۴ تا ۱۶/۵ متری قرار دارد. سنگ هوازده که در عمق ۱۶/۵ تا ۱۸/۵ متری قرار دارد، در زیر منطقه ریزشی واقع شده است [۳۱].



۲-۴۹- نمودار حفاری تهیه شده توسط پیزوکون الکتریکی در منطقه نشست کرده

در سینک هولی در فلوریدا [۳۱]

۲-۱۰ اکتشاف مناطق و عوارض کارستی با استفاده از حفاری

وقتی یک سازه مهندسی در منطقه‌ای طراحی و ساخته می‌شود، که احتمال دارد عوارض کارستی در آن مناطق وجود داشته باشد. نیاز به یک برنامه اکتشافی وسیعی داریم تا شرایط موجود در سطح زمین را مورد بررسی قرار دهیم. این امر با یک برنامه تحقیقاتی جامع ژئوتکنیکی میسر خواهد بود. اگر منطقه مورد نظر دارای درزه، شکاف و سنگهای هوا زده باشد، اکتشافات باید بیشتر زیر سطحی باشد. حفاری مغزه‌گیری و یا نمونه‌گیری از خرده‌های حفاری شیوه‌هایی هستند که اغلب در این مناطق به کار می‌روند تا شرایط و خصوصیات زیر سطح زمین را به درستی مشخص کنند. بنابراین در نهایت مواردی که از طریق سایر روشها، قابل اکتشاف و شکاف نمی‌باشند. به کمک حفاری مطالعه می‌شوند. زیرا قطعیت مطالعات معمولاً با انجام حفاری اکتشافی صورت می‌گیرد [۴].

۲-۱۰-۱ شرایط موجود در زیر سطح زمین و چگالی اکتشاف

شرایط موجود در زیر سطح زمین در محیطهای کارستی دارای دامنه تغییرات وسیع است. در مناطقی که سنگ بستر هوازده شده، در سطح به طور وضوح نمایان است، سینک هولها و سیستم درزها در سنگ بستر قابل تشخیص هستند. در اکثر مناطق شرایط موجود در فواصل کوتاهی ثابت است. این تغییرات زیر سطحی می‌تواند تأثیر مهمی در طراحی سازه‌های مهندسی و طول زمان اجرای آنها داشته باشد. و طراحی پایه‌های عمیق را با مشکل و پیچیدگی همراه سازد. برای جدا کردن غارها، گودالها و زونهای نرم خاکی یا سنگ که در ناحیه عمق تأثیر پایه‌ها قرار دارند باید از مطالعات ژئوتکنیکی استفاده کرد برای شناسایی تمام این فاکتورها باید تحقیقات ژئوتکنیکی بطور کامل انجام شود. و این تحقیقات نیز بر پایه اکتشافات زیر سطحی باشد. مقدار حجم اکتشاف در نظر گرفته شده از یک پروژه به پروژه دیگر فرق می‌کند. برای پروژه‌ها در مناطقی قرار دارند که انتظار می‌رود، سطح زیرزمین نامنظم باشد. و یا برای پروژه‌هایی که اثر متقابل بر روی شرایط زیر سطح زمین می‌گذارند و یا در یک حالت بحرانی قرار دارند، تعداد چالهای اکتشافی بیشتری مورد نیاز است [۴].

۲-۱۰-۲ مقایسه حفاری با هوا در مقابل مغزه‌گیری در مناطق کارستی

پس از اینکه وسعت عملیات اکتشافی مشخص شد. باید عملیات اکتشافی را طوری پیاده کرد مؤثر و اقتصادی باشد. فرض کنید می‌خواهیم حفاری را تا عمق ۳۰ متری انجام دهیم. چند عامل در انتخاب بهترین روش حفاری وجود دارد برای این منظور خاکهای گمانه‌های آزمایشی را با چاههایی که با فشار هوا حفاری ضربه‌ای) بدست می‌آیند، مقایسه می‌کنند. اکثر اطلاعات مفید، از آزمایش نمونه‌ها و مغزه‌های حفاری بدست می‌آیند. روشهای اکتشافی استاندارد شده هستند و نمونه‌هایی که از این روشها بدست می‌آیند اغلب به آزمایش گاه تجزیه و تحلیل ارسال می‌شوند و اطلاعات قابل اعتمادی مربوط به خصوصیات مواد موجود در زیرزمین نیز از این نمونه‌ها به دست می‌آیند. در اکتشاف به ندرت گمانه‌های آزمایشی بوسیله اکتشافات حفاری با هوا به طور کامل جایگزین می‌شود. هنگامی که شناسایی عمومی مواد زیر سطحی مورد نظر باشند، حفاری فقط با هوا فقط انجام می‌شود. همچنین در مناطقی که اکتشافات وسعت زیادی دارد. می‌توان از دستگاه حفاری با هوا استفاده کرد. که در زمان و وقت صرفه جویی خواهد شد. ولی با این حال حفاری با هوا معایبی نیز دارد که عبارتند از عدم

کارایی خوب در داخل لایه‌های با ضخامت زیاد، عدم امکان اخذ نمونه مغزه جهت آزمایش و عدم امکان چاه پیمایی و عدم کارایی خوب داخل سنگ بستری که شدیداً هوازده شده و دارای حفرات شماری که بوسیله رس پر شده‌اند. با وجود معایب بالا به خاطر اقتصادی بودن، سریع بودن، عدم احتیاج به آب جهت حفاری، قابلیت دسترسی آسان به لوازم حفاری و عدم احتیاج به لوله جداری در داخل سنگهای هوازده و حفره دار از روش حفاری با هوا در اکتشاف کارستها بیشتر استفاده می‌شود. به همین خاطر به ارائه توضیحی خلاصه در مورد این روش حفاری می‌پردازیم [۳۲].

۲-۱۰-۳ اکتشاف حفاری با هوا در مناطق کارستی

در هنگام حفاری با هوا، اجرای آن باید بوسیله اپراتور با تجربه و بازرس حفر یا تکنسین کنترل شود. هر اپراتور حفر با تجربه می‌تواند اکتشاف با این روش را انجام دهد. در هنگام کار، ارتباط بین کار و هدف بسیار مهم است. پیمانکاری که با وسایل حفاری با هوا کار می‌کند، هدفش تنها ایجاد یک گمانه است. و توجه کمتری به عمل حفاری و وجود حفرات و گودالها و آب زیرزمینی و غیره دارد. بنابراین به حفر باید توضیح داده شود که هدف، به غیر از به دست آوردن اطلاعات از مواد موجود در زیرزمین موارد دیگری را هم شامل می‌شود مثلاً اگر در ضمن حفاری به مناطق کم مقاومت و حفرات رسید، توقف کند تا شرایط موجود در زیر زمین بررسی شود. یک تکنسین با تجربه باید عملیات حفاری و جزئیات لاگ هر چاه را مورد بررسی قرار دهد. همچنین تکنسین باید نوع فولاد و لوله‌ها، قطر سرمته، اتصالات و همچنین تمام عملیات مربوط به حفاری از جمله استفاده از هر آبی جهت کنترل گرد و خاک، اندازه واحد کمپرسور و لوله‌های حفاری را تا قبل از شروع حفر چاه ثبت کند. در طول حفاری و پیشرفت آن تکنسین مشاهدات خود را از موادی که در ضمن حفاری به دست می‌آید، یادداشت می‌کند، و در بعضی موارد یک ارزیابی ذهنی از خصوصیات موادی که به سطح زمین برمی‌گردند، انجام می‌دهد. لاگ حفاری که بوسیله تکنسین پر می‌شود همچنین شامل سرعت پیشرفت حفاری و رفتار لوله (لرزش و انحرافات لوله‌های حفاری) نیز است.

چون پیشرفت حفاری سریع است، بازرس حفر باید توجه زیادی به همه اعمال داشته باشد و افتادگی ناگهانی لوله‌های حفاری و یا هر تغییر در خصوصیات موادی را که به سطح برمی‌گردند، یادداشت کند علاوه بر این تکنسین باید قادر باشد سریعاً علائم حفرات، لایه‌ها و تغییر رنگ و غیره را ترسیم کند بدون اینکه لحظه‌ای از عملیات حفاری غافل شود. همچنین لاگهای حفاری خالی باید همواره در دسترس تکنسین باشد. یک روش مفید برای اندازه‌گیری لوله‌های حفاری این است که یک دسته لوله بر اساس طول مرتب شده و نزدیک دکل حفاری نگه داری شود تا بتوان در حین اینکه لوله‌ها داخل چاه فرستاده می‌شوند، ارتفاع آنها را نیز اندازه‌گیری کرد.

در حفاری با هوا از یک چارت ثبت کننده می‌توان استفاده کرد. وسایلی وجود دارد که بر روی دستگاه حفاری با هوا سوار می‌شوند و شدت نفوذ را به طور مداوم ثبت می‌کنند. این وسایل اپراتور را قادر می‌سازد تا شدت حفاری را ثبت کند اما این داده‌های ثبت شده هنوز احتیاج به تفسیر دارند و یک اپراتور با تجربه باید چارت ثبت شده را با آنچه که به طور واقعی اتفاق افتاده، تصحیح کند. برای مثال وقتی که اپراتور حفر لوله‌ها را از ته چاه بالا می‌کشد تا سرمته را عوض کند یا یک لوله اضافه کند، این موارد باید در چارت لاگ ثبت شده اضافه شود. همچنین باید توضیح یادداشتهای به سرعت به طوری که به وضوح قابل رویت باشند، در چارت اضافه شوند. ثبت کننده چارت در عمق اگر که در حین حفاری در داخل سنگهای سالم باشد، خوب کار

می‌کند. اما لاگ گرفتن با چارت ثبت کننده در چاههای کم عمق که در داخل سنگهای شدیداً هوازده و دارای حفرات زیاد هستند، خیلی مشکل است. همچنین در چنین شرایطی حفار نیاز دارد که حفاری را در چندین مورد متوقف و دوباره شروع کند. در این صورت نگهداری لوازم حفاری خیلی مشکل خواهد بود.

پُر کردن لاگ چاههایی که بوسیله هوا حفاری شده‌اند، بوسیله یک تکنسین مجرب و با دقت کامل انجام می‌شود لاگهایی که از چاههای حفاری شده بوسیله هوا به دست می‌آیند می‌توانند با لاگهای چاههای مغزه‌گیری تصحیح شوند که این تصحیحات با توجه به محل ضعف، تغییرات سنگ‌شناسی و تغییرات در شدت حفاری انجام می‌شود [۳۳].

فصل سوم

تمهیداتی در مورد نمونه برداری و کاربرد روشهای
مختلف در تعیین مشخصات سیستمهای کارستی

۱-۳ آشنایی

دو دلیل که باعث رشد و پیشروی درز و شکافها در سنگهای کارستی می‌شوند عبارتند از:

- الف - جریان آبهای زیرزمینی، که در یکپارچگی ساختار اثر گذاشته و باعث به وجود آمدن مجاری انتقال مواد می‌شود.
 - ب - تداخل در یکپارچگی ساختار، که ممکن است در سنگها ایجاد زونهای ضعیف کرده و باعث شکسته شدن و ریزش آنها شود. در پروژه‌های آب‌شناسی و مهندسی بایستی شکستگیها و حفرات موجود در داخل خاکها و سنگها شناخته شود.
- پهنای شکستگیهای مورد نظر از چند سانتی متر تا چندین متر و همچنین فاصله بین آنها از یک متر تا دهها یا حتی صدها متر متغیر است. عمق آنها نیز در همین حدود تغییر می‌کند. این ساختارها در منطقه مورد نظر می‌تواند گسترده شده باشد. علاوه بر آن غارها می‌توانند بوسیله هوا، آب یا رسوبات پر شده باشند. تعیین منابع آب شهرها نیازمند جستجو و یافتن شکستگیهای بزرگ، غارها یا زونهای ترک دار و یا غاردار است. همچنین در محل پی ساختمانها و سدها احتیاج به شناخت شکستگیها و غارهای موجود در محل برای بهینه سازی زمین داریم.

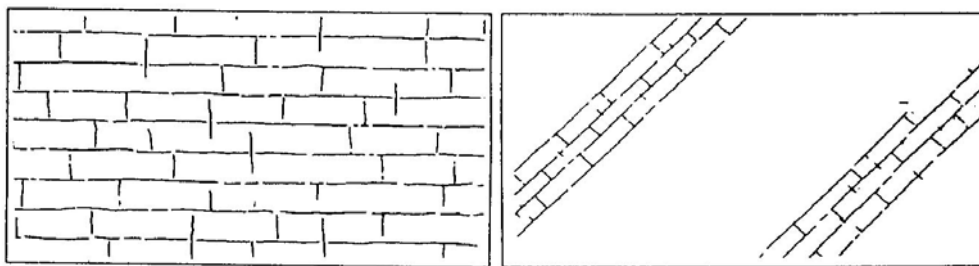
تعیین درست خصوصیات زمین‌شناسی و آب‌شناسی منطقه عامل مهمی در ارزیابی کار است. اگر ما درک درستی از زمین‌شناسی و آب‌شناسی محل داشته باشیم، پیش بینی جزئیات کار برای مهندسان آسان تر و راحت تر خواهد بود.

درباره نحوه رفتار با شکستگیها و غارها به منظور فائق آمدن بر آنها اطلاعاتی کم وجود دارد. اکثر مطالعات مهندسان زمین‌شناس و آب‌شناس در بررسی زونهای شکستگی و غارها خلاصه می‌شود. در مطالعات کارست، مراحل علمی برای مقابله با گستره وسیعی از مسائل و مشکلات که در این مناطق ممکن است پیش آید، مورد بحث قرار نگرفته است. بنابراین ممکن است، که هیچ روش برای تعیین، به نقشه در آوردن و ارزیابی شکستگیها و کارستها وجود نداشته باشد. تعداد کمی از مهندسان تجارب کاری موفق در این زمینه‌ها دارند. تعیین خصوصیات سنگ شکسته شده، غارها و محیطهای کارستی با یک درجه اطمینان بالا مشکل است ولی علم و ابزار کافی برای حل این مسائل در دسترس است در این بخش فلسفه عملی مقابله با این مسائل و لیست بعضی ابزارهایی که برای تعیین خصوصیات این مناطق در شرایط پیچیده زمین‌شناسی وجود دارند و به صورت نتیجه‌ای از بخشهای قبلی ارائه می‌شود.

۲-۳ اثر وسعت و اندازه منطقه مورد بررسی در اندازه‌گیریها

مدلهای چگونگی قرارگیری ترکها و مجاری کمبود آب که عموماً در سنگهای کارستی و درزه دار به وجود می‌آیند عبارتند از:

- الف - ترکها و یا مجاری که در فواصل نزدیک به هم بوده و یک مشکل هستند.
 - ب - ترکها و یا مجاری که دارای فواصل زیاد بوده و غیر یک شکل هستند.
 - ج - زون ترک دار محلی، که ترکها نزدیک به هم بوده و عموماً به هم مرتبط هستند و در زونهای نیز از هم جدا هستند.
- چنین سیستمی در یک زون غاردار محلی نیز می‌تواند، به وجود آید.
- این مدلها در شکلهای ۱-۳ و ۲-۳ و ۳-۳ نشان داده شده‌اند. این مدلها در موارد زیر بکار می‌روند.
- الف - در تعیین صفحات شکستگیها، ترکها و لایه بندی.
 - ب - در تعیین صفحات شکستگیها، ترکها و لایه‌های هوازده که در اثر حل شدن، ترکها بزرگ شده‌اند.
 - ج - غارهای بزرگ یا غارهای شبکه‌ای



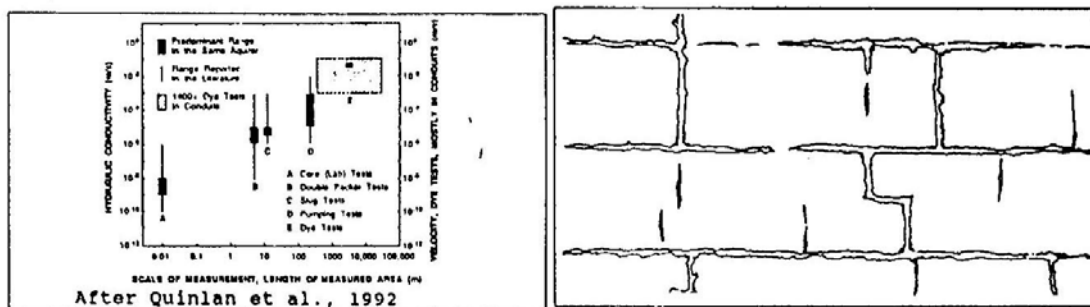
شکل ۳-۱- ترکهای یک شکل با فاصله شکل ۳-۲- ترکهای با فاصله زیاد که در اثر انحلال
نزدیک بزرگ شده‌اند

تعیین و تشریح غارها و ترکها با روشهای مرسوم نمونه برداری از جمله حفاری و نفوذسنج مخروطی مشکل است. بنسون^۱ خاطر نشان کرده است که شرایط فضایی نمونه نقش مهمی در تعیین خصوصیات آن دارد. نلسون^۲ پیشنهاد کرده است که برای تعیین هدایت هیدرولیکی سنگهای شکسته شده، فضای نمونه برداری حجمی ۱۰ برابر فاصله شکستگیها باید داشته باشد. کوئینلان^۳ اثر فضاهای مختلف اندازه‌گیریها بر روی هدایت هیدرولیکی را تعیین و خلاصه کرده است. محققین یک سیستم فضایی برای تعیین خصوصیات شکستگیها پیشنهاد کردند. در اندازه‌گیری از یک مکان (یعنی یک گمانه) اما در مقیاسهای مختلف (حجمهای مختلف)، هدایت هیدرولیکی متفاوتی بدست خواهد آمد (شکل ۳-۴). برای مثال با آزمایش لوژن مقدار هدایت هیدرولیکی را از شرایط نزدیک میدان به دست می‌آوریم. در حالی که از آزمایش پمپاژ در ته همان چاه هدایت هیدرولیکی از شرایط دور از میدان به دست می‌آید، که این کار با استفاده از یکپارچه کردن حجم زیادی از خاک یا سنگ در اندازه‌گیری به دست می‌آید. اگر مقادیر این دو اندازه‌گیری مشابه هم باشند، می‌توان فرض کرد که محیط دارای شکستگیهای یک شکل و همگن است. ولی اگر مقادیر این دو اندازه‌گیری مختلف باشند (یعنی آزمایشات لوژن نفوذ پذیری کوچکتر از آزمایش پمپاژ را بدهد) می‌توان فرض کرد که منطقه دارای شکستگیهای غیر یک شکل و غیر همگن است [۲۳].

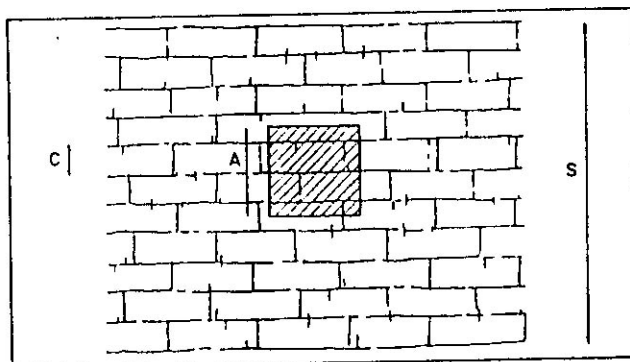
مثال ذکر شده تأثیر مقیاس اندازه‌گیری در هدایت هیدرولیکی در سنگهای ترک دار را نشان داد. بنابراین مقیاس اندازه‌گیریها در تعیین خصوصیات و شرایط موجود در زیرزمین یک عامل مهم و حساس است بحث زیر ما را به مفهوم مقیاس اندازه‌گیری و اثرات آن نزدیک تر می‌کند. توتش^۴ و ساوتر^۵ مفهوم مقیاس برای تبیین خصوصیات مناطق کارستی و ارائه یک مدل را برای جریان آب زیرزمینی شرح دادند. مفهوم مقیاس در شکل ۳-۵ در یک سیستم ناهمگن نشان داده شده است که در این شکل S، مشخصه ابعاد محل و C مشخصه فاصله شکستگیها یا اندازه غارها و A مشخصه مساحت یا حجم نمونه‌گیری است. در این مثال مقطع عرضی از شکستگیها یا سیستم کارست آب دار به طور ساده نشان داده شده است. سیستم ناهمگن

1 - Benson
2 - Nelson
3 - Quinlan
4- Teutsh
5- Souter

نشان داده شده دارای شکاف به اندازه C بوده که کوچکتر از فضای نمونه‌گیری A است. بنابراین حرکت پنجره نمونه‌گیر A یعنی انجام آزمایش پمپاژ در موقعیتهای مختلف باعث می‌شود که پارامترها بطور آهسته تغییر کنند و تغییرات ناگهانی در مقادیر به وجود نمی‌آید.

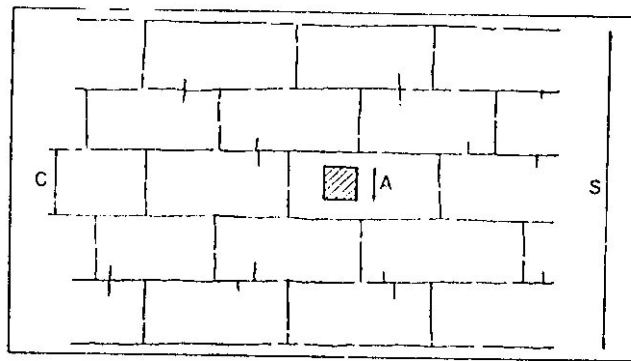


شکل ۳-۳- زون ترک دار شکل ۳-۴- تغییرات هدایت هیدرولیکی لایه کربنات آبدار که تابعی از مقیاس اندازه‌گیری است.



شکل ۳-۵- مثال شماتیک از درجه بندی مقیاس وقتی که $C < A$ باشد.

به علت بزرگ بودن پنجره نمونه‌گیر نمی‌توان انتظار داشت که ترکهای منحصر بفرد تعیین شود. اما با استفاده از پنجره نمونه‌گیر A می‌توان هدایت هیدرولیکی به صورت بلوکی را اندازه‌گیری کرد. اگر روش اندازه‌گیری مطابق شکل ۳-۶ باشد (اندازه پنجره نمونه‌گیر A کوچکتر از C باشد) در آزمایشات لوژن تغییرات پارامتر زیاد خواهد بود.



شکل ۳-۶- مثال شماتیک از درجه بندی مقیاس نمونه گیری وقتی که $C > A$ باشد.

تنستج^۱ و سامتر^۲ پیشنهاد کردند که، می توان مسائل و مشکلات جریان را بر پایه مقیاس (یعنی نسبت های A,S,C) طبقه بندی کرد. مفهوم مقیاس که در بالا شرح داده شد، می تواند به صورت یک مدل تصویری از فضای قابل تغییر، برای طراحی و تعیین خصوصیات مناطق کارستی یا شکسته شده استفاده شود. با در نظر گرفتن مقیاس، روش تحقیقات در تعیین و به نقشه در آوردن شکستگیها و غارها می تواند انتخابی شود. اگر در یک روش حجم اندازه گیری بزرگ باشد، مقادیر اندازه گیری یک محیط همگن را نشان خواهد داد، در صورتی که اگر حجم اندازه گیری کوچک باشد، مقادیر اندازه گیری یک محیط ناهمگن را نشان خواهد داد، بنابراین دامنه وسیعی از اندازه گیریها با مقیاسهای مختلف وجود دارد که، می تواند در تعیین و به نقشه در آوردن ترکها و غارها کمک کند، با استفاده از ترکیب روشهای مختلف درک درستی از کل ترکها و غارهای موجود در منطقه، می توان به دست آورد [۴۳].

۳-۳ روشهای مختلف اکتشافی

در جدول ۳-۱- فهرستی از روشهایی را که در حل مسائل مربوط به شکستگیها و غارها استفاده می شود، نشان داده شده است. این تقسیم بندی بر اساس وسعت فضای اندازه گیری است. روشهای موجود در لیست به ترتیب موارد استفاده از ناحیه های بزرگ به طرف نمونه های دستی مرتب شده اند. بعضی از روشها قابلیت اندازه گیری در مساحت های مختلف را دارند. با توجه به جدول به سادگی می توان دریافت که عکسهای هوایی در تعیین شرایط منطقه هم در مرحله ناحیه ای و هم محلی می تواند مؤثر باشد. بررسیهای مشاهده ای رخنمونها می تواند در محدوده وسیعی از ناحیه ای تا محلی مورد استفاده قرار گیرد. اندازه گیریهای هیدرولیکی در گمانه ها مشخصات هیدروژئولوژیکی منطقه را به ما می دهد. در حالی که آزمایشات تعیین نفوذپذیری که در گمانه ای انجام می شود، فقط اطلاعاتی از یک فاصله کوتاه در اطراف چاه را می دهد. لاگها و مغزه های حفاری اطلاعات نزدیک میدان از یک گمانه را ارائه می دهند که با برون یابی می توان اطلاعات را به یک منطقه بزرگ تر نسبت داد به طور کلی با توجه به جدول ۳-۱ می توان گفت که:

الف - روشهای ژئوفیزیکی سطحی می تواند در اندازه گیری ناحیه ای، محلی و نزدیک میدان بکار روند.

1 - Tentsch

2 - Sauter

- ب - از روشهای چاه پیمایی بین یک گروه از گمانه‌ها در اندازه‌گیریهای محلی و دور از میدان می‌تواند استفاده شود.
- ج - از اکثر روشهای چاه پیمایی در یک گمانه برای اندازه‌گیریهای نزدیک میدان استفاده می‌شود تعداد کمی از این روشها قابل اجرا در اندازه‌گیریهای دور از میدان هستند.

جدول ۳-۱- روشهای مورد استفاده در تعیین محل شکستگیها و حفرات بزرگ

با توجه به وسعت منطقه [۳۳]

ردیف	روشها	ناحیه‌ای	محلی	دور از میدان	نزدیک به میدان	نمونه
۱	اندازه‌گیریهای هوابرد و ماهواره‌ای	*	*	*		
۲	ژئومورفولوژی و زمین آمار	*	*	*		
۳	روشهای ژئوفیزیکی سطحی	*	*	*		
۴	ردیابهای رنگی	*	*	*		
۵	مشاهدات سطحی	*	*	*		
۶	مشاهدات زیر سطحی		*	*		
۷	اندازه‌گیریهای آبشناسی در یک گروه از چاهها		*	*		
۸	روشهای چاه پیمایی بین یک گروه از گمانه‌ها		*	*		
۹	اندازه‌گیریهای آبشناسی در یک چاه			*	*	
۱۰	روشهای چاه پیمایی در یک گمانه			*	*	
۱۱	حفاری و لاکهای زمین‌شناسی حاصل از آن				*	*
۱۲	اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مغزه‌ای				*	*

۳-۴ اندازه‌گیری از راه دور و روشهای ژئوفیزیکی

اندازه‌گیری از راه دور و روشهای ژئوفیزیکی شامل گستره وسیعی از روشهای هوابرد و روشهای سطحی (که در مناطق خشکی و پوشیده از آب کاربرد دارد) است. که مانند روشهای اندازه‌گیری گمانه‌ای در تحقیقات زمین‌شناسی زیر سطحی و تعیین شرایط هیدرولوژی کاربرد دارند. فضای نمونه برداری در این روشها از خیلی بزرگ (برای هوابرد) تا متوسط (برای روشهای سطحی) تا کوچک (برای روشهای چاه پیمایی) تغییر می‌کند. اگر این روشها می‌تواند در تعیین و به نقشه در آوردن خصوصیات ترکها و غارها بکار گرفته شود، اما یک روش به تنهایی نمی‌تواند در تهیه یک مقطع و تعیین خصوصیات مورد نظر زمین جواب گو باشد. درجه موفقیت در یک کار اکتشافی به طور مستقیم با انتخاب مناسب روشها، اجرای روشها، تلاش و مهارت در یکپارچه کردن نتایج با گستره وسیعی از داده‌های زمین‌شناسی و آب‌شناسی متناسب است.

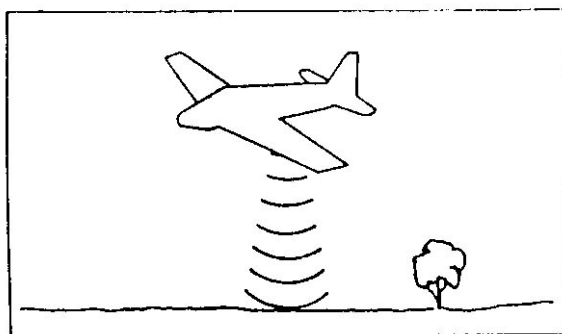
یکی از مهم ترین موارد استفاده از اندازه گیری از راه دور و روش ژئوفیزیکی مشخص کردن شرایط آنومالی است. اهداف این کار تحقیقاتی در متمرکز کردن برنامه ها از جمله اندازه گیری محلی، حفاری، چاه پیمایی، بررسیهای ژئوفیزیکی، نمونه گیری از زمینه و آنومالی خلاصه می شود. این برنامه باعث رسیدن به توصیف منطقی از خصوصیات محل و به حداقل رسیدن موارد مشکوک می شود.

۳-۴-۱ روشهای هوابرد

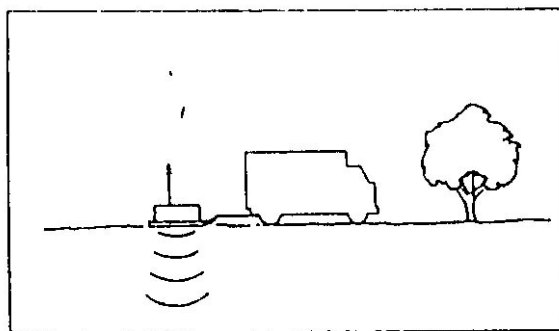
روشهای اندازه گیری از راه دور، هوابرد و قمر مصنوعی (شکل ۳-۷)، به علت پوشش زیاد در زمان کوتاه و هزینه کم می تواند در تحقیقات بطور شایسته ای مورد استفاده قرار گیرد قسمت ب جدول ۳-۲ شامل هوابردی است که در تعیین زونهای شکسته و غارها می تواند مورد استفاده قرار گیرد. روشهای هوابرد در مطالعات ناحیه ای و محلی قابل استفاده هستند. روشهای تصویری (شامل عکسهای سیاه و سفید، مادون قرمز کاذب، مادون قرمز حرارتی و SLAR) تصویری از محل مطالعه و اطراف آن ارائه می دهند.

تصاویر بدست آمده از این روشها به ما اجازه می دهند قسمتهایی از سطح زمین را به صورت سه بعدی مشاهده کنیم. تصاویر حاصل از روشهای هوابرد اولین ابزار برای تعیین شکستگیها و غارها هستند. اما این تصاویر اطلاعات دقیقی را از زیر سطح به ما نمی دهند. همچنین روشهای تصویری هوابرد در تعیین و مشخص کردن ساختارها، شکستگیها، گسلها، سینک هولها و خصوصیات ریزشی دیرینه مورد استفاده قرار می گیرند. برای مثال با این روشها می توان زون ترک داری (شکل ۳-۳) که در اثر افزایش تخلخل ثانویه و بالا آمدن سطح آب زیرزمینی به طور ناگهانی ایجاد شده است را مشخص کرد. عکسهای هوایی یکی از ابزارهایی است که به دلیل قابلیت دسترسی آسان به آن می توان در بدست آوردن اطلاعات اولیه از آنها استفاده کرد [۲۳].

روشهای هوابرد غیر تصویری شامل الکترومغناطیسی، مغناطیسی و رادیومتری در تعیین شرایط زیر سطح زمین مورد استفاده قرار می گیرند. اما از این روشها برای تعیین غارها و ترکها و به نقشه درآوردن آنها استفاده نمی شود. زیرا این روشها دارای خطوط برداشت با فاصله زیاد هستند که در تعیین ترکها و غارها نمی توان از این خطوط استفاده کرد و همچنین تجزیه و تحلیل این روشها برای شناخت ترکها و غارها ممکن نیست. اما روشهای مذکور می توانند اطلاعاتی از شرایط زمین شناسی و هیدرولوژی منطقه را ارائه کنند. ترکیب روشهای تحقیقاتی می تواند زمینه ساز تهیه نقشه کامل منطقه باشد که زونهای ترک دار نیز در آنها مشخص شده باشند.



شکل ۳-۷- روش اندازه گیری از راه دور و هوابرد



شکل ۳-۸- نحوه اجرای روشهای ژئوفیزیکی سطحی

روشهای هوابرد معمولاً برای مناطق بزرگ و یا مناطقی که دسترسی به آنها آسان نیست استفاده می‌شود. این روشها برای مطالعات ناحیه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. و پایه‌ای برای تحقیقات بعدی در منطقه به صورت محلی هستند همچنین این روشها ارائه دهنده ایده کلی برای درک و شناخت زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی محل هستند. شناخت الگوی ناحیه‌ای ترکها پایه‌ای برای شناخت جزئیات منطقه به صورت محلی است.

اندازه‌گیری از راه دور عکسهای هوایی می‌تواند در تعیین ترکها، شکستگیها و غارها به طور غیر مستقیم بکار رود، و سپس روشهای چاه پیمایی و ژئوفیزیکی سطحی در تعیین شکستگیها و غارها به طور مستقیم تحت شرایط معین و به طور غیرمستقیم تحت دیگر شرایط استفاده می‌شود (بنسون^(۱) [۳۳]).

۳-۴-۲ روشهای ژئوفیزیک سطحی

گستره وسیعی از روشهای ژئوفیزیکی سطحی و ابزارهای قابل دسترس برای کمک به شناخت و به نقشه درآوردن ترکها و غارها و تشخیص شرایط زیر سطح زمین (شکل ۳-۸) وجود دارد. کاربرد این روشها بوسیله محققین زیادی شرح داده شده است. روشهای ژئوفیزیکی سطحی در خشکی و دریا کاربرد دارند.

روشهای ژئوفیزیکی سطحی فضای کمتری را در واحد زمان نسبت به روشهای هوابرد پوشش می‌دهند. این روشها قدرت تجزیه و تحلیل و تعیین ترکهای کوچک را بهبود بخشیده و اطلاعاتی نیز از سطح منطقه ارائه می‌دهند. در این روشها سرعت پیمایش و اندازه‌گیریها گاهی به بیش از چندین مایل در ساعت می‌رسد. در وضعیتهای معین با استفاده از این روشها می‌توان کل منطقه را به طور اقتصادی پوشش داد. محدودیت و عیب اصلی همه روشهای ژئوفیزیکی سطحی کاهش قدرت تجزیه و تحلیلی با افزایش عمق است. مقیاس می‌تواند در طراحی مطالعات ژئوفیزیکی برای تعیین شکستگیها و غارها استفاده شود. در این روشها اگر مساحت نمونه بزرگ باشد (یعنی A بزرگتر از C باشد، شکل ۳-۵)، امکان تعیین دقیق فضای شکستگیهای چندگانه یا سیستم غارهای بزرگ میسر خواهد بود. و اگر مساحت نمونه کوچک باشد (یعنی A کوچکتر از C باشد، شکل ۳-۲)، امکان تعیین ترکها و غارهای مجزا میسر خواهد بود و این مورد در صورتی است که شکستگیها ترکها داخل زون اندازه‌گیری قرار داشته باشند.

جدول ۳-۲- روشهای هوابرد و ژئوفیزیکی سطحی مورد استفاده در تعیین شکستگیها و غارها [۲۳]

ردیف	روشها	ناحیه‌ای	محل	دور از میدان	نزدیک به میدان
الف	روشهای ژئوفیزیکی سطحی				
۱	رادار نفوذ زمینی	*	*	*	*
۲	الکترومغناطیس	*	*	*	*
۳	روش فرکانس خیلی پایین (VLF)	*	*	*	
۴	شنوایی غیر فعال		*	*	*
۵	مقاومت ویژه		*	*	
۶	پتانسیل خودزا		*	*	*
۷	لرزه‌ای انکساری		*	*	
۸	ارزه‌ای انعکاسی		*	*	
۹	میکروگرانی		*	*	
۱۰	مغناطیسی		*	*	
۱۱	گرماسنجی		*	*	*
۱۲	مادون قرمز حرارتی		*	*	*
۱۳	امواج صدا		*	*	
۱۴	تشعشعات گاما	*	*	*	
ب	روشهای هوابرد				
۱	عکسهای هوایی	*	*	*	
۲	رنگ مادون قرمز کاذب	*	*	*	
۳	مادون قرمز حرارتی	*	*	*	

۳-۴-۱ روشهای ژئوفیزیکی برای استفاده در خشکی

جدول ۳-۲ شامل تعدادی از روشهای ژئوفیزیکی سطحی است که در تعیین ترکها و غارها در خشکی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. روشهای ژئوفیزیکی سطحی معمولاً برای تحقیقات محلی در یک منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرند که در صورت لزوم این روشها می‌توانند ۱۰۰٪ منطقه را پوشش دهند. بعضی از روشها به علت اندازه‌گیریهای پیوسته قابلیت توانایی اندازه‌گیری سریع را در یک منطقه دارند. از آن جمله می‌توان از روشهای رادار، الکترومغناطیس، VLF و رادیومتری نام برد. البته این روشها را می‌توان به طور اقتصادی در مناطق بزرگتر (مقیاس ناحیه‌ای) اما با پوشش خیلی کمتر از ۱۰۰٪ به کار برد.

اکثر روشهای ژئوفیزیکی سطحی قابل کاربرد در تحقیقات در مقیاس محلی و دور از میدان هستند. اما تعداد کمی از آنها از جمله رادار، SP، مادون قرمز و روشهای گرمایی در اندازه‌گیریها در مقیاس نزدیک میدان نیز کاربرد دارند که این به دلیل قدرت تجزیه و تحلیل بالا و روش کار آنها است.

در روشهای ژئوفیزیکی سطحی اگر ترکها، شکستگیها و جدا از هم داخل فضای اندازه‌گیری کوچک A قرار بگیرند، آشکار کردن و تعیین آنها امکان پذیر خواهد بود. برای مثال رادار نفوذی در زمین که بالاترین قدرت تجزیه و تحلیل را در بین همه روشهای ژئوفیزیک سطحی دارد، قادر است که در تعیین ترکها و غارهای مجزا مارا یاری کند.

روشهای ژئوفیزیکی که دارای حجم نمونه‌گیری کم (چگالی زیاد ایستگاههای برداشت) هستند، امکان تعیین ترکها و شکستگیها که فاصله کمی از هم دارند را نیز میسر می‌کنند. برای مثال کارستهای پراکنده را می‌توان بوسیله روشهای ژئوفیزیکی الکتریکی (الکترومغناطیس و مقاومت ویژه) مورد بررسی قرار داد. حتی اگر در منطقه‌ای پدیده کارست انتشاری در داخل شکستگیها و ترکها اتفاق افتاده باشد، و مقیاس اندازه‌گیریهای ژئوفیزیکی الکتریکی به نسبت فاصله ترکها خیلی بزرگ باشد، علیرغم فاصله نسبتاً کم ترکها نسبت به حجم نمونه‌گیری باز هم می‌توان از روشهای الکتریکی برای تشخیص این مناطق استفاده کرد. در چنین حالتی جریان منتشر شده، داخل فضای ترکها و شکستگیها معادل تخلخل محیط در نظر گرفته خواهد شد. مادامی که از روشهای ژئوفیزیکی الکتریکی در تعیین زونهایی که جریان در داخل آنها منتشر شده استفاده می‌شود، امکان تعیین مجراهای بزرگ که در چنین محیطی نخواهد بود. در این حالت برای دستیابی به هدف، لازم است که از روشهای دیگری استفاده شود.

در روشهای ژئوفیزیکی سطحی دینامیکی آرایه‌های مختلفی قابل اجرا است. برای مثال در روش لرزه‌ای انعکاسی می‌توان از آرایش بادبزی (برای تعیین غارها)، اندازه‌گیری جهت یابی شکستگیها و یا روش پروفیل (برای تعیین شکستگیها و غارها)، اندازه‌گیری جهت یابی شکستگیها و یا روش پروفیل (برای تعیین شکستگیها و غارها) در مطالعات استفاده کرد همچنین در روش مقاومت ویژه می‌توان از روش سونداژ زنی یا پروفیلزنی و همچنین اندازه‌گیری آزمونوتی به منظور جهت یابی شکستگیها و ترکها استفاده کرد. در روش مقاومت ویژه از آرایه‌های مختلفی از جمله آرایش بریستو برای تعیین غارها یا آرایه باکس برای اندازه‌گیری آزمونوت شکستگیها و ترکها استفاده می‌شود.

۳-۴-۲ روشهای ژئوفیزیکی برای مناطق دریایی

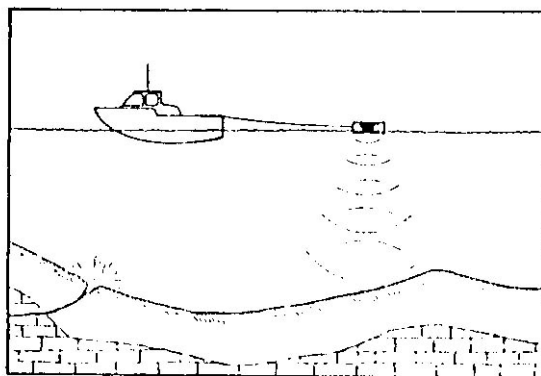
جدول ۳-۳ لیست تعدادی از روشهای ژئوفیزیکی را نشان می‌دهد که ممکن است، در مناطقی که بوسیله آب پوشیده شده استفاده شود. اکثراً این روشها می‌توانند در مناطقی که آب به داخل شکستگیها، ترکها و غارها نفوذ پیدا کرده از جمله در محل سدها و دریاچه‌های مصنوعی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین این روشها می‌توانند برای تعیین محل پی سازه‌ها، و همچنین بررسی آلودگیهای به وجود آمده در محیط زیست مورد استفاده واقع شوند. از روشهای هوابرد می‌توان برای اندازه‌گیری جریان آب و همچنین جریان آبهای که به داخل شکستگیها و غارها نفوذ پیدا می‌کنند، بوسیله ردیابهای رنگی و عکس برداری از آنها در مناطق پوشیده شده از آب (دریایی) استفاده کرد. بعضی از روشهای ژئوفیزیکی سطحی (مقاومت ویژه، پتانسیل خودزا، لرزه‌ای انعکاسی و انکساری) می‌تواند در محیط آب شیرین یا شور مورد استفاده قرار گیرند، اما بعضی از روشها مثل رادار و EM، در شرایط آب شور عمل نمی‌کنند، اما هر دو روش می‌توانند در محیطهای آب شیرین مورد استفاده قرار گیرند.

روش رادار در آب شیرین و در داخل دریاچه و رودخانه‌های پوشیده از یخ به طور مؤثری عمل می‌کند. با استفاده از روش عمق سنجی دریا و یا اقیانوس می‌توان یک نقشه از عمق آب و توپوگرافی کف دریاها و یا اقیانوس تهیه کرد. سپس با استفاده از دستگاه کشف شرایط زیرزمین بوسیله امواج صوتی می‌توان تصویری از ته دریا با قدرت تجزیه و تحلیل بالا را ارائه داد. دو روش مذکور می‌توانند، در تعیین زونهای نفوذپذیر که باعث نفوذ آب و رسوبات به داخل آنها و ایجاد اغتشاشات در محل می‌شود، مورد استفاده قرار گیرند. روش پروفیل لرزه‌ای انعکاسی یک مقطع عرضی از رسوبات و سنگها در عمق ۱۰ تا ۱۰۰ فوتی با قدرت تجزیه و تحلیل بالا را ایجاد می‌کند، که با استفاده از این پروفیلها می‌توان سطح روی سنگها و الگوی شکستگیها و حتی زونهای کارست دیرینه را مشخص کرد. ابزار و تجهیزات این روشها می‌توانند در قایق جای داده، شوند یا پشت قایق یدک کشیده شوند (شکل ۳-۹). اگر این تجهیزات پشت قایق و نزدیک ته آن یدک کشیده شوند، پروفیل پیوسته‌ای از شرایط ته دریا بدست می‌آید. همه این روشها مشترکاً در مقیاس محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۳-۳- روشهای ژئوفیزیکی مورد استفاده در تعیین زونهای شکسته و حفره دار در محیطهای پوشیده از آب و گستره کاربرد آنها [۲۳]

ردیف	روشها	ناحیه‌ای	محلی	دور از میدان	نزدیک به میدان	نمونه
الف	روشهای هوابرد					
۱	مادون قرمز حرارتی	*	*			
۲	ردیاب رنگی	*	*	*	*	
ب	روشهای مورد استفاده از سطح آب					
۱	رادار نفوذ زمینی		*	*		
۲	مقاومت ویژه		*	*		
۳	پتانسیل خودزا		*	*	*	
۴	لرزه‌ای انکساری		*	*		
۵	لرزه‌هایی انعکاسی	*	*	*		
۶	عمق سنجی		*	*		
۷	روشهای کم ژرفای با قدرت تفکیک بالا		*	*		
۸	تلویزیون			*	*	*
ج	روشهای اندازه‌گیری خصوصیات آب (آنومالیهایی که در اثر جریان آب بوجود می‌آیند)					
۱	دما		*	*	*	*
۲	هدایت الکتریکی		*	*	*	*
۳	شیمی آب		*	*	*	*
۴	ردیاب رنگی		*	*	*	*

تعداد کمی از روشهای اندازه‌گیری در آب در مقیاس نزدیک میدان کاربرد دارند که یکی از آنها روش تلویزیون است که دارای قدرت تجزیه و تحلیل بالایی است اما دامنه کاربرد آن به دلیل محدودیت قابلیت دید در آب کم است. بنابراین از روش مذکور فقط به عنوان نمونه می‌توان در مناطق کوچک استفاده کرد. اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات آنها از جمله حرارت، شدت جریان، هدایت الکتریکی و پارامترهای شیمیایی آب بوسیله نمونه‌گیری در نقاط مختلف می‌تواند برای تشخیص زونهای نفوذپذیر و محل نشت جریان آب به داخل شکستگیها مورد استفاده قرار گیرد. اما اندازه‌گیریهای مرکب می‌تواند برای نمونه‌گیری مناطق بزرگ به کار رود.



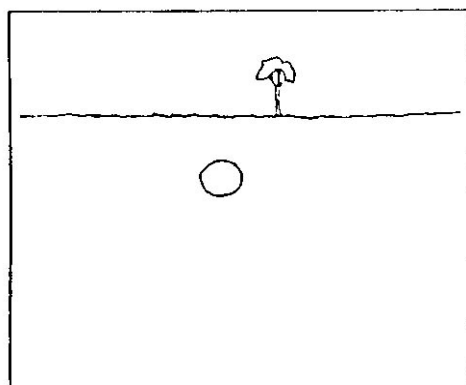
شکل ۳-۹- روشهای ژئوفیزیکی دریایی که‌گیرنده در سطح یا داخل آب شناور بوده و یک پروفیل پیوسته‌ای از بستر دریا ارائه می‌دهد [۳۳]

۳-۴-۲- نحوه تعیین غارها با استفاده از روشهای سطحی

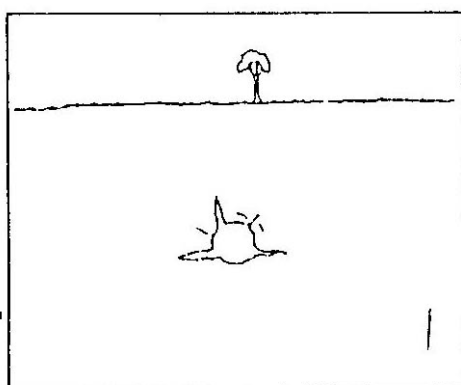
قابلیت روشهای ژئوفیزیکی سطحی در تعیین شکستگیها غارهای ساده و مجزا (شکل ۳-۱۰) که اغلب به ندرت در طبیعت اتفاق می‌افتد، چندان مناسب نیست. هر غار بزرگ شبیه آنچه در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است، حداقل دارای یک ورودی و یک خروجی مجرای آب می‌باشد. بنابراین شناخت طبیعت موجود در محل برای انتخاب کمترین تعداد روشها به منظور حل آن مسئله مهم است.

در مباحث ژئوفیزیکی به طور نظری گفته می‌شود که یک غار واقع در عمقی به اندازه چندین برابر قطر آن با استفاده از روشهایی مانند ثقل سنجی و روشهای مختلف مقاومت ویژه قابل شناسایی است (شکل ۳-۱۰). خصوصیات مانند تنش ایجاد شده در سنگ، نفوذپذیری ثانویه یا اثرات شیمیایی باعث به وجود آمدن یک هاله اثر اطراف غار می‌شود، که این هاله در آشکار کردن غار به وسیله روشهای ژئوفیزیکی کمک مؤثری می‌کند. وجود هاله، عمق تئوری قبلاً ذکر شده را از ۱/۵ تا ۲ برابر افزایش می‌دهد (شکل ۳-۱۱) وجود شکستگیها، ترکها، غارها و سطح لایه‌ها (شکل ۳-۱۲) در یک منطقه امکان اکتشاف و

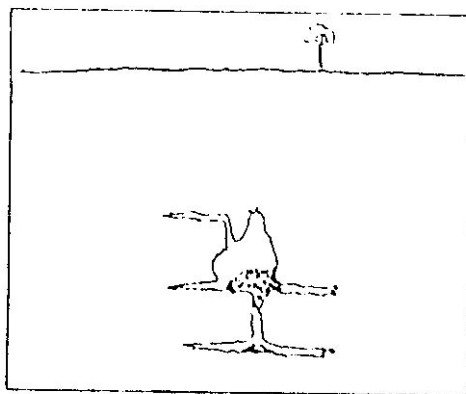
تشخیص آنها را در عمق بیشتر میسر می‌کند. به علت وجود این عوامل و بهبود تجهیزات، محدودیتهای تشخیص این ساختار کاهش یافته است. بنابراین امکان تشخیص غارهای کروی در عمقی بیش از ۶ تا ۸ برابر قطرشان و غارهای طولی بیش از ۱۰ برابر قطر آنها به وسیله روشهای ریز ثقل سنجی میسر شده است (باتلر) [۳۳]. علاوه بر آن وجود شاخصها و نشانه‌های این ساختارها در سطح زمین یا نزدیک سطح زمین امکان تعیین غارها و شکستگیها را در عمقی بیش از عمق قدرت تجسس عملی روشهای ژئوفیزیکی سطحی فراهم می‌سازد (شکل ۳-۱۳).



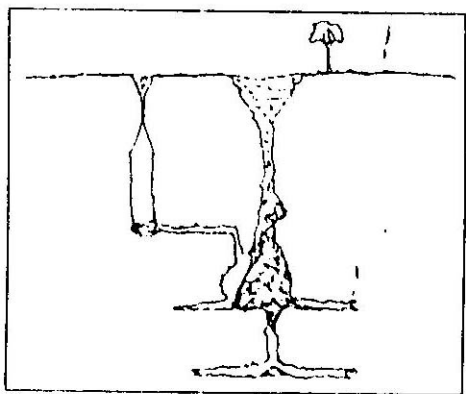
شکل ۳-۱۰- یک غار کروی که به طور تئوری امکان آشکار شدن آن در عمقی چند برابر قطر آن میسر است [۳۳]



شکل ۳-۱۱- وجود یک هاله در اطراف غار امکان تشخیص آن در عمق بیشتر می‌سازد [۳۳]



شکل ۳-۱۲- وجود یک سیستم غار امکان تشخیص آن را
در عمق زیاد میسر می سازد [۳۳]



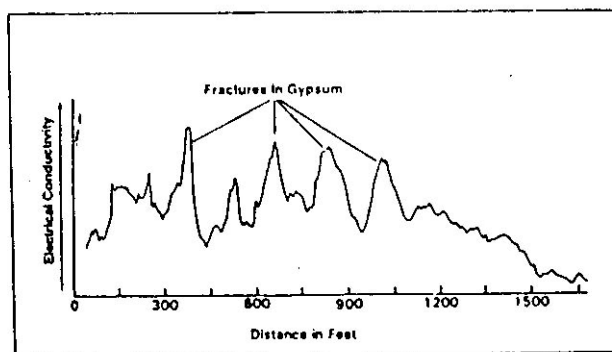
شکل ۳-۱۳- وجود علائمی از سیستم غار امکان تشخیص عمقی بیش از
عمق تئوری روشهای ژئوفیزیکی میسر می سازد [۳۳]

۳-۴-۲- نکات مهم استفاده از روشهای ژئوفیزیکی سطحی

الف - چگالی نمونه برداری

اولین عامل در تعیین دقیق خصوصیات یک محل تعداد نقاط نمونه برداری مورد استفاده است. با استفاده از روشهای اندازه گیری که دارای سرعت نسبتاً زیادی هستند، می توان چگالی نمونه برداری را افزایش داد. همچنین روشهای معینی وجود دارند، که سرعت نمونه برداری آنها در طول یک پروفیل به بیش از چندین مایل در ساعت می رسد. بنابراین با افزایش چگالی نمونه برداری می توان، احتمال کشف آنومالی (شکستگیها و غارها) را افزایش داد و در نتیجه اطلاعات دقیق تری از خصوصیات و شرایط زیر سطح زمین به دست آورد.

برای پیدا کردن شکستگیها، ترکها و غارها در محل یک سد در نیومکزیکو که باعث تضعیف زمین شده بود توسط سه سازمان مختلف که در این محل کار می‌کردند، مطالعاتی انجام شد که نتایج آنها با شکست مواجه شد. سپس مطالعاتی که با روش ژئوفیزیکی EM جهت تعیین رسانایی الکتریکی انجام شد، وجود شکستگیهای بزرگی را در لایه ژیبس (شکل ۳-۱۴) درست بعد از یک خاکریز نشان داد.



شکل ۳-۱۴- تأثیر ترکها بر مقدار رسانای الکتریکی در یک لایه ژیبس [۳۳]

ب - اختلاف لازم برای اندازه‌گیری یک پارامتر

بر عکس روشهای نمونه برداری و آنالیز مستقیم که شامل آنالیزهای آزمایشگاهی از نمونه‌های خاک یا آب هستند، روشهای ژئوفیزیکی که اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی بر جای سنگ و خاک را شامل می‌شوند، تأثیری در محیط مورد آزمایش نمی‌گذارند. موفقیت یک روش ژئوفیزیکی بستگی به اختلاف خصوصیات فیزیکی مورد نظر بین آنومالی (یک شکستگی یا غار) و سنگ زمینه دارد. اگر اختلاف موجود غیر قابل اندازه‌گیری باشد، تعیین هدف غیر ممکن است. حتی اگر مقیاس اندازه‌گیریها درست انتخاب شده باشد.

ج - نسبت سیگنال هدف به پارازیت

نه تنها باید بین خصوصیات هدف و زمینه اختلاف وجود داشته باشد. بلکه باید شرایط زمینه همگن و یا نسبتاً همگن باشد. تا نسبت سیگنال به پارازیت مناسب باشد تا بتوان نتایج مفیدی را به دست آورد. هدف مورد نظر (یک حفره یا شکستگی) باید دارای یک اندازه مناسب نسبت به عمقی که در آن قرار گرفته است باشد، تا امکان آشکار سازی آن میسر شود. هر چه نسبت اندازه هدف به عمق کوچک تر باشد، تعیین و آشکار سازی آن مشکل تر و حتی غیر ممکن است. سه عامل (اختلاف خواص هدف و زمینه، اندازه هدف و عمق هدف) پارامترهای مهم در مطالعات ژئوفیزیکی برای تشخیص شکستگیها و غارها هستند.

د- استفاده از علائم و نشانه‌های سطحی و نزدیک سطح

در اکثر حالات، شکستگیها و غارها در ورای قدرت تجزیه و تحلیل روشهای ژئوفیزیکی سطحی قرار دارند. اما خوشبختانه، غارها و شکستگیهایی که در عمق زیادی قرار دارند، اغلب نشانه‌ها و علائمی از وجودشان در نزدیکی سطح دیده می‌شود. وجود چنین نشانه‌هایی نزدیک سطح می‌تواند به کار گرفته شود، تا عمق نفوذ روشهای ژئوفیزیکی سطحی افزایش یابد. به طور مثال وجود علائم مشخصه در روی عکسهای هوایی شواهدی از وجود سیستمهای ترک و شکستگی دار در عمق زیاد را ارائه می‌کنند. این مشخصه‌ها بوسیله الگوی رشد و نمو گیاهان آشکار می‌شوند. در چنین حالتی غارها یا شکستگیها به طور مستقیم مشاهده نمی‌شوند اما وجودشان بوسیله الگوی رشد و نمو گیاهان مشخص می‌شود. ریزش خاکها به داخل غارها و ایجاد نشست در آن منطقه، از نشانه‌های سطحی و نزدیک سطح وجود غارها هستند. استفاده از نشانه‌ها و علائم سطحی و نزدیک سطح به دلیل اینکه وسیله‌ای است مؤثر و با سرعت زیاد و هزینه کم، می‌تواند در ارتباط دادن بین روشهای تصویری هوابرد و روشهای ژئوفیزیکی سطحی با نمونه برداری پیوسته، از جمله رادار، الکترومغناطیس و اندازه‌گیری اشعه‌گاما مؤثر باشد.

۳-۴-۳ روشهای چاه پیمایی

برعکس روشهای ژئوفیزیکی سطحی که با افزایش عمق قدرت تجزیه و تحلیل آنها کاهش می‌یابد، قدرت بررسی روشهای چاه پیمایی بستگی به عمق ندارد.

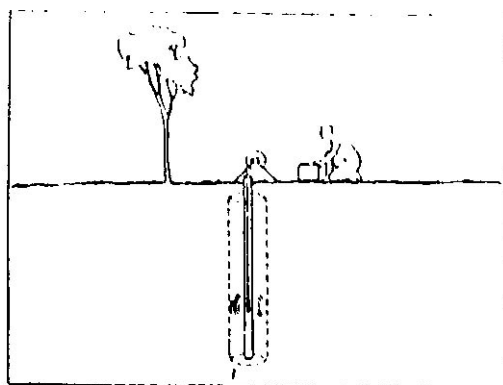
علاوه بر آن داده‌های اکثر روشهای چاه پیمایی دارای قدرت تفسیر بالایی در تمام طول چاه می‌باشند. اگر گمانه و چاه در منطقه مورد مطالعه وجود داشته باشند، هزینه چاه پیمایی نسبتاً پایین خواهد بود جدول ۳-۴- فهرست بعضی از روشهای چاه پیمایی که در تعیین شکستگیها، ترکها و غارها مورد استفاده قرار می‌گیرند. را نشان می‌دهد. اکثر روشهای چاه پیمایی و دیگر روشهای گمانه‌ای محدود به استفاده در مقیاس نزدیک میدان و یا نمونه‌گیری و اندازه‌گیری از دیواره چاه هستند (دایره‌ای به شعاع ۰/۵ تا ۳ فوت اطراف گمانه، شکل ۳-۱۵). اکثر روشهای چاه پیمایی احتیاج به یک گمانه پر از آب یا گل حفاری دارند. از بعضی روشها از جمله لاگهای قطرسنجی، تلویزیون و غیره به طور غیر مستقیم در تعیین شکستگیها و غارها استفاده می‌شود. در دیگر روشهای چاه پیمایی با اندازه‌گیری تغییرات تخلخل می‌توان شرایط آنومالی و وجود شکستگیها و غارها را مشخص کرد (یعنی افزایش تخلخل می‌تواند دلالت بر وجود یک سنگ با شکستگی و ترک زیاد باشد). بعضی از روشهای چاه پیمایی همچون پتانسیل خودزا، دما و هدایت الکتریکی به حرکات مایعات داخل شکستگیها، ترکها و غارها واکنش نشان می‌دهند، و به این ترتیب می‌توان پی به وجود آنها برد.

تعداد کمی از روشهای چاه پیمایی برای اندازه‌گیری در مقیاس دور از میدان به کار می‌روند. که در این حالت قدرت تشخیص در فاصله ۱۰ تا ۵۰ فوتی و در حالت محدود تا ۱۰۰ فوتی یا بیشتر است، که بستگی به اندازه غارها و اختلاف گرانی آنها با زمینه دارد. در یک سنگ با هدایت الکتریکی پایین، رادار می‌تواند در تشخیص شکستگیها که در فاصله ۵۰ تا ۱۰۰ فوتی یا بیشتر از یک گمانه قرار دارد، استفاده شود و در روش اندازه‌گیری بین دو گمانه این فاصله دو برابر می‌شود [۲۳].

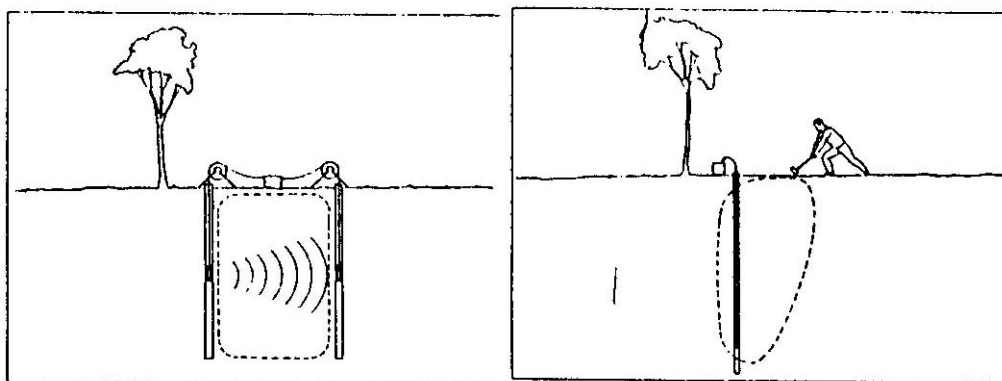
جدول ۳-۴- چاه پیمایی مورد استفاده در تعیین زونهای حفره دار و شکسته [۲۳]

ردیف	دور از میدان	نزدیک میدان	دیواره گمانه‌ای
الف	روشهای چاه پیمایی داخل گمانه		
۱	نوترون گاما		*
۲	چگالی سنجی		*
۳	تخلخل سنجی		*
۴	القاء		*
۵	مقاومت ویژه*		*
۶	مقاومت ویژه*		*
۷	پتانسیل خودزا*		*
۸	حرارت سنجی*		*
۹	جریان سنجی*		*
۱۰	هدایت الکتریکی*		*
۱۱	قطر سنجی		*
۱۲	تلوژیون		*
۱۳	رادار	*	*
۱۴	لرزه‌ای فرکانس پایین		*
۱۵	صوتی فرکانس بالا		*
۱۶	ردیاب صوتی داخل غارها*	*	
۱۷	گرانی سنجی		
ب	روشهای چاه پیمایی از بالا به ته گمانه		
۱	لرزه‌ای	*	
ج	روشهای چاه پیمایی از یک گمانه به گمانه دیگر		
۱	لرزه‌ای	*	
۲	رادار	*	
۳	الکترومغناطیس	*	
۴	مقاومت ویژه*	*	

* در این روش از گمانه‌های پر شده از آب یا گل حفاری استفاده می‌شود.



شکل ۳-۱۵- اندازه‌گیریهای چاه پیمایی فقط در یک فاصله کوتاه اطراف گمانه قابل تعمیم هستند [۳۳]



شکل ۳-۱۷- روش اندازه‌گیری بین دو گمانه [۳۳]

شکل ۳-۱۶- در اندازه‌گیری از سطح به داخل گمانه فاصله تشخیص زیاد می‌شود [۳۳]

- ۱- "صورتجلسه های کمیته زمین شناسی مهندسی". دفتر استانداردهای آب وزارت نیرو، ۱۳۷۷.
- 2- White, W. B., 1988. "Geomorphology and hydrology of karst terrain" Oxford university press, England.
- 3- Adams, S., Hart, P. A. H. and McDowell, P. W., 1992. "Ground conditions at lion salt work site, Marstone, Cheshire." Proc. 4th Int. conf. on ground movements and structures.
- 4- Sitar, N., 1988. "Geotechnical aspects of karst terrains." American society of civil engineers, New York.
- ۵- دفتر مشاورین سد لار، ۱۳۶۴ "فرار آب از مخزن سد لار"، مجله آب، شماره ۵.
- ۶- کمیته کارست و سازندهای سخت، ۱۳۷۴ "دستورالعمل برنامه های کمیته کارست در سال ۱۳۷۴"، وزارت نیرو.
- 7- Beck, B. F. and Wilson, W. L., 1987. "Karst hydrogeology" A. A. Balkema.
- 8- Sweeting, M. M., 1950. "Erosion cycles and limestone." Oxford university, England.
- 9- Don W. Steeples and Richard D. Miler, 1987. "Direct seismic reflection detection of shallow subsurface voids using high resolution techniques." Kansas geological survey and university of Kansas Lawrence, U. S. A.
- 10 - Peter Popenoe, F. A. Kohout and F. T. Manheim, 1984. US geol. surv., Woods Hole Massachusetts, "Seismic reflection studies of sinkholes and limestones in Florida shelf."
- ۱۱- کمیته کارست و سازندهای سخت کشور با همکاری کارشناسان ژئوفیزیک، مدیریت آبهای زیرزمینی، ۱۳۷۴. "دستورالعمل انتخاب روش بررسیهای ژئوفیزیکی سطحی در مطالعات منابع آب کارستی و سازندهای سخت" وزارت نیرو.
- 12 - Millanovic, A. C., 1988. "Karst hydrology" Elsevier, Amsterdam.
- 13- Douglas L. Smith and Anthony F. Randazzo, 1986. "Application of electrical resistivity methods to identify leakage zones in drained lacks." department of geology, university of Florida, Gainesvill, U. S. A.
- 14 - Eberhard Werner, 1984. "Sinkholes prediction - review of electrical resistivity methods." geo analysis, Horgantown, west Virginia, U. S. A.
- 15 - Erchul R. A., Slifer D. W., 1987. "The use of self potential method in detection of ground water flow patternes and flow rate in karst areas." department of civil engineering Virginia U. S. A.
- 16 - Doughlas L. Smith and Garey L. Smith, 1987. "Use of vertical gravity gradiant analysis to detect near-surface dissolution voids in karst

terrains .” department of geology ,university of Florida , Gainesville, U. S. A.

17 - Thomas J. M. Kennie and Clive N. Edmonds , 1987. “Location of potential ground subsidence and collapse features in soluble carbonate rocks by remote sensing techniques .”

18 - Johnson , Petterson editores. “ Geotechnical application of remote sensing and remote data transmission.” ASTM special technical publ. 1988.

19 - Benson, R. C. and L. Yuhr, 1987. “ Assesment and long term monitoring of subsidence using ground penetrating radar (G. P. R.) .”

20 - Beck, B. F. , Kuo, S. S. , Sweeny , M. and Wilson, W. L. , 1987 . “Use of ground penetrating radar techniques to aid in site selection for land application sites.”

21 - Anthony , E. Gilboy , 1987 . “ Ground penetrating radar: Its application in the identification of subsurface features - A case study in Florida.” Southwest Florida water management district , Brooksville , U. S. A.

22 - Leo, D. Handfelt and Williame, J. Attwooll , 1988 . “Exploration of karst conditions in central Florida . ” Society of dams engineers of U .S . A.

23 - Beck , B. L. , 1993 . “ Applied karst geology .” A. A. Balkema Rotterdam.

24 - Peter W. Mc Dowell . 1993 . “ The location and delineation of karst and solution collapse features by acoustic tomography .” department of geology , university of Portsmouth U. K.

25 - Beck, B. L. , 1984 . “ Sinkholes ” A. A. Balkema Roterdom .

26 - Albert E. Ogden , 1984 . “ Methods for describing and predicting the occurance of sinkholes .” Edwards aquifer research and data center /SWTSU , Sanmarcos , Texas U. S . A.

27 - Rene Rodrigues , 1995 . “ Mapping karst solution features by the integrated geophysical methods .” GECOH exploration , Lexington , U. S. A.

28 - Yevjevich, V. 1976 . “ Karst hydrology and water resource .” Water reasources publications.(WRP) , U. S. A.

29 - Dreybrodt , W. 1988 . “ Processos in karst systems .”Springer verlag Germany .

30 - P. Fisk , R. Holt, and G. Jones , 1987 . “ Strength of material in and in and around sinkholes by in situ geophysical testing . ” Weston geophysical corporatin, Westboro , Mass.,U. S. A.

31- Lawrence C. Weber , 1988 . “Exploration karst terrains with air track drilling .” Principle engr. geologist , the EDGE group vice president.

۳۲ - کمیته کارست و سازندهای سخت با همکاری بخش اکتشاف و حفاری، ۱۳۷۴. "دستورالعمل انتخاب روش و نظارت حفاری در منابع آب کارست و سازندهای سخت" وزارت نیرو، معاونت تحقیقات منابع آب.

33 - Richard , C. Benson , 1993 . " Spatial sampling consideration and their application to charactrizing fractured rock and karst systems . " Technos Inc. , Miami Fla. , U. S. A.

34 - Teutsth, G. and M. Sauter, 1992 . " Ground water modeling in karst terrances: scale effect , data acquisition and field validation . " Hydrology , Ecology , Monitoring and Management of ground water in karst terrances conference , Dublin .

35 - T. L ., Lund , and Korhonen ,R., 1988 . " karst cavity detection by means of seismic tomography to help assess a possible dam site in limestone terrain. "Proc. Symp. Rock Mech. and power plant , edit Roman, Madrid .