

نموده‌هایی از ویژگی‌های انحلالی سنگ‌ها و اثرات زیست‌محیطی آنها

نشریه شماره ۱۲۸ - ن

دی ماه ۱۳۸۲

به نام خدا
جمهوری اسلامی ایران
وزارت نیرو
شرکت مدیریت منابع آب ایران
معاونت پژوهش و مطالعات پایه
دفتر استانداردها و معیارهای فنی

نموده‌هایی از ویژگی‌های انحلالی سنگ‌ها و اثرات زیست‌محیطی آنها

دی ماه ۱۳۸۲

نشریه شماره ۱۲۸ - ن

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 رسته‌های 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 می‌گردد :

- 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، نهادها، واحدهای 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 می‌باشد موجب امتنان خواهد بود.

ترکیب اعضای کمیته

این نشریه را آقای مهندس عبدالرزاق واثقی تهیه کرده و در کمیته تخصصی زمین‌شناسی مهندسی طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور مورد بررسی و تصویب قرار گرفته است. اسامی اعضای کمیته به شرح زیر است:

خانم فیروزه امامی	طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور	فوق لیسانس زمین‌شناسی
آقای رسول بنی‌هاشمی	شرکت مهندسین مشاور مه‌باب قدس	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای فریدون بهرامی سامانی	شرکت مهندسین مشاور تماوان	فوق لیسانس زمین‌شناسی مهندسی
آقای عباس رادمان	شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسن عباسی	کارشناس آزاد	لیسانس زمین‌شناسی
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	فوق لیسانس مهندسی معدن
آقای حسین معماریان	دانشگاه تهران	دکترای زمین‌شناسی مهندسی
آقای محمدحسن نبوی	شرکت مهندسین مشاور آب‌نیرو	فوق لیسانس زمین‌شناسی مهندسی
آقای عبدالرزاق واثقی	کارشناس آزاد	فوق لیسانس مدیریت

مقدمه

حفره‌های انحلالی و به ویژه غارها که در سطح زمین پدیدار شده‌اند از دیر باز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند و امروزه درباره چگونگی تشکیل و گسترش آنها، بهره‌گیری از آبهای آنها و اثر ویژه در زیست محیط انسان نوشتارهایی بسیار منتشر شده است.

اکنون دانسته‌ایم برای آنکه یک دالان آبگذر زیرزمینی طبیعی برای آنکه آدمرو بشود، حدود ۱۰ تا ۱۰۰ هزار سال به درازا می‌کشد و به خوبی می‌توان دریافت که غارهای بزرگ که اینجا و آنجا و در همه جا دیده می‌شوند، چه مدت زمان‌درازی را پشت سر نهاده‌اند.

آبهای اسیدی حاوی H_2S یا اسیدهای دیگر در افزایش آهنگ انحلال بسیار اثربخشند و چنانچه در محیط باشند، مدت‌زمان یاد شده کاهش چشمگیری خواهد داشت.

نوشتار حاضر که در برگرفته ۶ فصل است، چشم‌اندازهای مختلف پژوهشی، مهندسی و زیست محیطی حفره‌های انحلالی و به ویژه غارها را تا اندازه‌ای روشن کرده است و برای دست‌اندرکاران صنعت آب کشور به ویژه آنها که دست‌اندرکار سازه‌های آبی مانند سد، تونل و فضاهای زیرزمینی هستند، در خور توجه می‌باشد.

فصل اول به این منظور در نوشتار گنجانیده شده است تا ویژگیهای کلی غارها به طور فشرده بیان شود و اینگونه ویژگیها و مفهوما در بیشتر کتابها و نوشتارهای پژوهشی وجود دارد و تنها برای آغاز مطالعات غار، در نوشتار موردنظر بوده است.

فصل دوم در حقیقت گردآوری مطالبی است که در آن خاستگاه و ریختار غارهای آهکی مورد بحث قرار گرفته است. برای مثال در این فصل اشاره شده است که گردیان گرمایی حدود $0/01$ درجه سلسیوس یا کمتر موجب پیچ و خم‌دار شدن دالانها و گذرگاههای آبهای زیرزمینی و تشکیل غارها می‌شوند و همچنین در این فصل ریختار آنها دسته‌بندی شده و دوباره درباره آهنگ انحلال بحث شده است.

فصل سوم درباره کارست مرکزی اتریش است که ریختار چاله‌ها و حفره‌های فروکش^۱ را توضیح می‌دهد و نشان می‌دهد که ساختار زمین‌شناسی در شکل‌گیری آنها اهمیت به‌سزایی داشته است. سنگ‌آهکهای سازند گریزر برگلند به سن دونین، سنگ‌آهکهای خالصی می‌باشند که توان کارستی شدن آنها بسیار چشمگیر است و چون راندهای اصلی در این ناحیه در زمان میوسن کارساز بوده است، بنابراین آغاز شکل‌گیری حفره‌های انحلالی نیز در آن زمان بوده و در زمانهای پلیوسن و پلیوستوسن ادامه یافته است.

فصل چهارم که درباره ناحیه‌های کارستی در کشور افریقای جنوبی است می‌رساند که بررسیهای زمین‌شناسی مهندسی با نگرشی به کارست، یک کار رسمی و قانونی شده است چون کارگاههای معدن طلا در آنجا با حفره‌ها و غارهای دولومیتی آبدار زیادی روبرو می‌شوند و خطر ساز می‌باشند.

چاله‌ها و حفره‌های انحلالی ریزشی در ناحیه روهانسبورگ که تا ۳۰ متر ژرفا دارند بسیارند و بیشتر آنها نیز به‌علت کارهای معدنکاری به وجود آمده‌اند.

فصل پنجم درباره کاربرد روش گرانی‌سنجی (گراویمتری) برای یافتن حفره‌های فروکش نزدیک سطح زمین در استان فلوریدای آمریکاست تا اینگونه حفره‌ها و چاله‌ها که در سطح زمین دیده نمی‌شوند، کشف شوند. در این روش گرادیان گرانش عمودی^۱ مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است.

در این استان، هرچند گاه کمی از این چاله‌ها فرو ریخته و زیانهایی به بار آورده است و در نتیجه برای یافتن آنها کوششهای بسیاری شده و روش گرانی‌سنجی کارساز بوده است.

فصل ششم درباره هیدروژئولوژی و حفظ زیست محیط کارستی در استان گولین چین است که یک منطقه معروف کارستی است. در آنجا پهنه‌هایی وجود دارد که کارست سطحی^۲ گسترش دارد و برای پروژه‌های مهندسی‌دشواریهای زیادی به بار آورده است. اهمیت این بررسیها در زمینه زهکشی ناحیه کارست سطحی است که گاهی موجب سیلابی شدن ناحیه شده و زیانها را افزایش داده است.

1 - Vertical Gravity Gradient = V.G.G

2 - Epikarst

۱- ویژگیهای مجموعه غارهای انحلالی در سنگ آهکها

غار یا سیستم غارهای انحلالی در سنگ آهکها با گذرگاههای آب به ضخامت حداقل ۵ تا ۱۵ میلیمتر مشخص است که این گذرگاهها به طور پیوسته‌ای در زیر تراز آب زیرزمینی از مدخل تا محل خروج رهگذر آب شکل می‌گیرند. هزاران غار با اندازه‌های مختلف تاکنون کشف شده‌اند که بزرگترین آنها دارای دالانهای قابل دسترسی در ژرفای ۱۰۰ تا بیش از ۱۰۰۰ کیلومتری در زیرزمین می‌باشند.

تقریباً بیش از ۸۰٪ این غارها بر اثر ریزشهای جوی و گردش آب بدون هیچگونه پدیده بازدارنده زمین‌شناسی به‌وجود آمده‌اند که عوامل ذکر شده منجر به پیدایش غارهای عادی شده است. بافت هندسی آنها در ارتباط با گرادیان هیدرولیکی آبگذرهای نخستین بوده است که به صورت ترکهای مویینه بهم می‌پیوستند. در مسیرهای طولانی غار، افت آب زیرزمینی^۱ و یا مورفولوژی مخلوطی از چرخه آبزایی^۲ را می‌توان انتظار داشت. در نتیجه بسیاری از غارها که در چند فاز (مرحله) مختلف شکل گرفته‌اند، دارای چند تراز هستند.

درز و ترکهای دو بعدی با تشکیل شبکه‌ای از کانالهای مشابه و متقاطع که سبب گسترش گذرگاههای ناهنجار متداول در غارها است، به وجود می‌آید و یا به صورت غارهای جداگانه، بر اثر بازتاب رخداد آرتزین و یا بر اثر تغذیه جداگانه و سریع سیلابها به وجود می‌آید. غارهایی که بر اثر آبهای گرم سرشار از CO₂ به وجود می‌آیند، به صورت شبکه شاخه‌ای و یا به صورت غارهای متشکل از شبکه کانالهای مشابه و متقاطع در دو و یا سه افق به وجود می‌آیند. پاره‌ای غارهای بزرگ در صورت وجود آبهای سرشار از H₂S و اکسیدکننده شکل می‌گیرند. در نواحی ساحلی بسیاری از غارهای لانه زنبوری در محلهایی که آبهای شور و شیرین با هم مخلوط می‌شوند به وجود می‌آید.

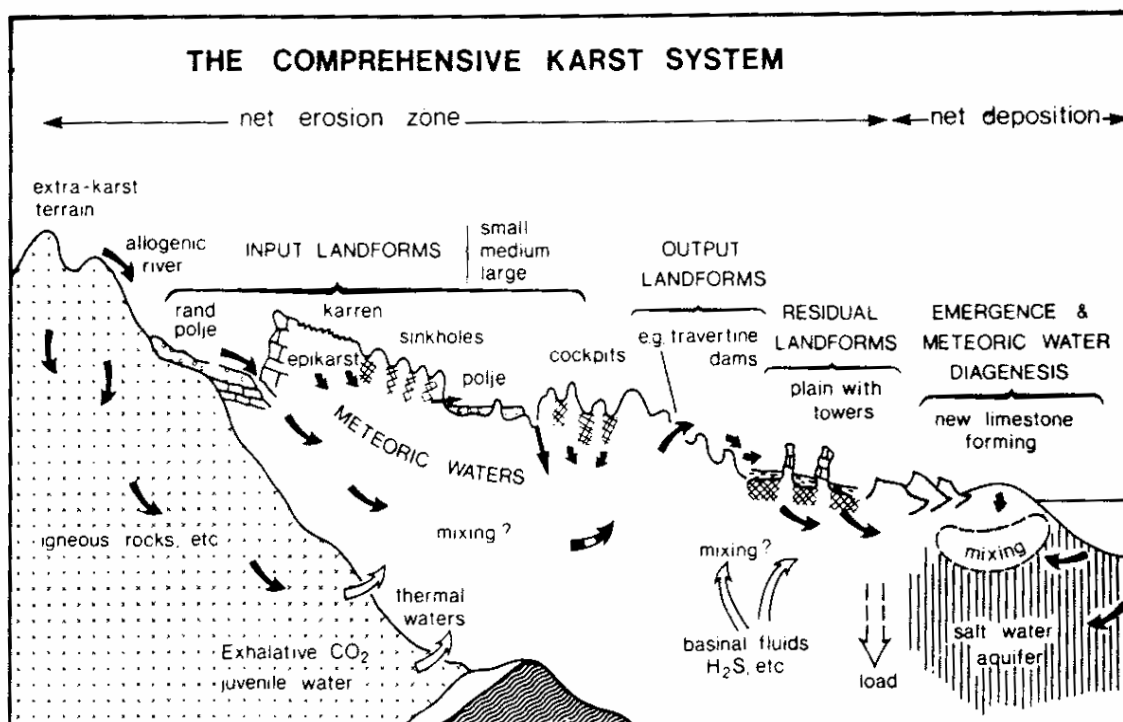
مقطع آبگذرهای آزاد به صورت بیضوی است ولی به دلیل انحلال‌پذیری مختلف، پیچیده و یا دارای پوشش در بستر است. مقاطع بالای سطح اشباع زمین (وادوس)^۳ به شکل دره‌ای عمیق و یا ذوزنقه‌ای است و در هر دو حالت انحلال صدف دو کفه‌ایها نمایانگر دیرینه بودن گذرگاه است. البته ممکن است گذرگاه شکل تازه‌ای گرفته و یا تخریب پله‌ای پیدا کرده باشد. مجموعه متنوعی از رسوبات تخریبی در داخل غار انباشت می‌شود. در این مورد رخساره‌های رودخانه‌ای غالب هستند. بیش از یکصد نوع کانی ثانویه در نهشته‌های غارها یافت می‌شود. کلسیت مهمترین محیط رسوبگذاری برای محیطهای دیرینه و بازسازی شده است.

هدف از مطالب این فصل بررسی و خلاصه نمودن سرشت و ریشه‌یابی غارهای انحلالی در سنگهای کربناته است که به وسیله پیشتازان و مکتشفین غارها شناسایی شده‌اند. برای نمونه، غارهایی هستند که دارای ورودی قابل دسترسی بوده‌اند، کاملاً روشن است اینگونه غارها، شامل کلیه انواع غارهای انحلالی در سنگهای کربناته نمی‌شود. ولی، با این حال، آنها دربردارنده تنوع، ریشه، مورفولوژی و اندازه هندسی هستند که در شکل ۱-۱ مورد بحث قرار خواهد گرفت. در نتیجه فرونشستگی و یا پنهان بودن (با پرشدن یا بدون پرشدن خرده سنگها و یا ته‌نشین شدن)، تمام انواع دسترسی به غارها ممکن است در سیمای غارهای دیرینه آشکار شود.

1 - Drowdown
2 - Phreatic
3 - Vadose

در سراسر جهان چندین هزار از غارهای انحلالی به وسیله غارشناسان شناسایی و نقشه‌برداری شده است. اکثریت مهم آنها کمتر از ۱۰۰۰ متر درازا و یکصد متر ژرفا دارند که شناسایی و نقشه‌برداری آنها به دلیل موانع متوقف شده است. گرچه، پیچیده‌ترین غارها با دربرداشتن گذرگاههای مختلف به طول ۱۰۰ کیلومتر شناسایی شده و حداقل ۲۴ مجموعه غار در نواحی کوهستانی تا ژرفای ۱۰۰۰ متر شناسایی شده‌اند. بیشترین اکتشافات غار در نواحی اروپایی (در بردارنده بخش اروپایی شوروی سابق) و در کوههای آپالاچی آمریکا صورت گرفته است. اکتشافات جدیدی در سالهای اخیر، موجب پیدا کردن غارهای زیادی در آسیای جنوب شرقی، گینه نو و جزایر پیرامون، در مکزیک و نواحی کاراییب شده است. بیشترین جستجو و پیدایش غارها در کشور چین نیز در نواحی جنوبی آن رویداده که موجب اکتشاف بزرگترین و مدون‌ترین پهنه‌های کارستی شده است (زانگ^۱ ۱۹۸۰ والتام^۲ ۱۹۸۶).

شکل ۱-۱ غارهای انحلالی را در پهنه گسترده کارستی نشان می‌دهد. این شکل از روی یک ریختار کارستی ترسیم شده است. توسعه و گسترش کارست در مناطق (زونهای) فرسایشی، در ارتباط با میزان رسوبگذاری است. بیشترین انحلال در بخش پایانی ورودی جریان رخ می‌دهد و ایجاد بستری با ابعاد متفاوت از چند میلیمتر تا چند کیلومتر از کارست سطحی می‌کند. ولی عمده وظیفه غار به جریان انداختن روانابها بر روی منطقه کارست سطحی و هدایت به چشمه‌های پایین دست است. بر پایه توسعه رویه گسترش یافته کارست می‌توان گستره چشمه‌ها را مشخص کرد، مگر آنکه ابعاد کارست کوچک باشد.



شکل ۱-۱ - غارهای انحلالی در پهنه گسترده کارستی

1 - Zhang
2 - Waltham

خوردگیهای چندگانه در این فرآیند از اهمیت برخوردارند که ممکن است در اثر آبهای جوی و یا آبهایی که ریشه خارجی دارند، رخ داده باشند.

گسترش غار در رسوبات آهکی معاصر (برای نمونه هولوسن) چندان توسط غارشناسان مورد پژوهش قرار نگرفته است. ورود به اینگونه غارها بسیار ناممکن است زیرا اکثراً با رسوبات ثانویه، آب و یا با هردو پر شده‌اند.

۱-۱ تشریح و رده‌بندی غارها

گرچه غارهایی که به ابعاد ۵۰ سانتیمتر یا بیشتر هستند امکان دارد به‌طور مستقیم مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند، ولی اکثر پژوهشگران بر این باورند هنگامی که ابعاد یک آبگذر انحلالی به میزان حداقل ۵ تا ۱۵ میلیمتر برسد با بیشتر شدن روند انحلال و گشادتر شدن آبرو، رفتار هیدرولیکی تغییری نمی‌نماید حتی ابعاد ۳۰ متر یا بیشتر در برخی غارها که از سوی فورد و اور، وایت^۱ مطالعه شده است این مورد را تأیید می‌کند. عوامل مؤثر در این محدوده جهت بهینه‌شدن انحلال حداقل قطر آبگذر برای گرادیانهای مختلف هیدرولیکی، زبری دیواره کانال و وجود جریان ورودی آشفته است. مجموعه غارهای انحلالی شامل یک آبگذر و یا آبگذرهای بهم پیوسته‌ای است که به‌طور چشمگیری بین ورودی و خروجی (حفره‌های آهکی و چشمه‌های کارستی) ادامه دارد. در این فصل مورد مزبور بررسی شده است. این مورد در این فصل برای کوتاهی سخن به نام «غار» آمده است. منافذ انحلالی بزرگتر از ۵ تا ۱۵ میلیمتر که در ورودی و خروجی آنها آب نیست به نام منافذ منفرد هستند. آبگذرهای انحلالی که قطر آنها کوچکتر از ۵ میلیمتر باشدو به یک ورودی یا خروجی، یا هر دو وصل شده باشند غار بدوی^۲ نامیده می‌شوند.

با در نظر گرفتن اندازه‌های هندسی شرح داده شده، متوجه می‌شویم به احتمال زیاد غارهایی که به اندازه کافی بزرگ باشند که به آنها بشود وارد شد در اقلیت قرار دارند. بیشترین بخش غارها دارای اندازه‌ای بزرگتر از ۵ میلیمتر و کمتر از ۵۰ سانتیمتر است. این ابعاد روی نقشه‌ها کوچک بوده در نتیجه امکان بررسی آنها میسر نیست و یا در تصویر عکسهای هوایی چنانچه زیر پوشش گیاهی قرار داشته باشند باز هم نمی‌توان به آنها دسترسی داشت.

1 - Ford and Ewars 1978, White 1984

2 - Protocave

جدول ۱-۱- رده‌بندی عمومی غارهای انحلالی کارستی

الف	عادی	گردش نامحدود در سنگهای کارستی	۱- غارهای عادی (حدود ۸۰٪ غارهای شناخته شده)
	آبهای جوی	گردش محدود در سنگهای کارستی یا گردش جزئی	۲- شبکه‌های دو بعدی غار (نوع آرتزین)
		گردش در سنگهای غیرکارستی	۳- غارهای تزریقی تهی
		توسعه یافته با گاز CO ₂	۴- مجموع نوع ۱ و ۲
ب	عمیق	متصاعدشده (معمولاً از آبهای گرم زیرزمینی)	۵- غارهای هیدروترمال (حدود ۱۰٪ زیرزمینی)
	توسعه یافته با آب	توسعه یافته با H ₂ S ، غیره (آب برکه، آبهای همزاد)	۶- غارهای تیپ کارلسباد
پ	آبهای مخلوط	بطور عمده مخلوط آبهای شیرین و دریایی	۷- غارهای مخلوط در سواحل
ت		مخلوط ب یا پ با الف، که گسترش می‌یابد	۸- غارهای نامتجانس

جدول ۱-۱ رده‌بندی عملی غارهای شناخته شده را نشان می‌دهد. میزان سنجش عبارتست از (الف) نوع آب حل‌کننده، (ب) آرایش هیدروژئولوژی، و (ج) بافت آبروها و انواع مختلف ترکیب آنها. بیشترین غارها در فرایند فرسایش به وسیله جریان آبهای جوی در زیر قسمت سطحی بدون هیچگونه محدودیت یا بدون وجود موانع زمین‌شناسی شکل گرفته‌اند، از جمله آنها غارهای معمولی است (فورد و اور ۱۹۷۸، پالمر ۱۹۸۴). اولین مطالعات در اینگونه غارها بوده است، سایر انواع به‌طور فشرده و گذرا مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱ شرایط اولیه برای زایش سیستم غار

در اکثریت غارها به روشنی آشکار است که نفوذ اولیه آبهای انحلالی در امتداد درز و ترکها (سطوح لایه‌بندی، صفحات، ترکها و گسلها) انجام گرفته است. نفوذ آب از منافذ توده سنگ چندان اهمیتی در این امر ندارد. در معادن عمیق ذغال سنگ، آبهای زیرزمینی از درز و ترکهای سنگ آهک فوران می‌کنند. اندازه این درز و ترکهای سنگ آهک حدود ۵/۰ میکرومتر، است در حالی که کارشناسان مجارستانی که روی اینگونه رفتارهای درز و ترک سنگ آهکها مطالعه کرده‌اند، معتقدند برای ایجاد و توسعه غار حداقل بازشدگی درز و ترکها باید برابر ۱۵ میکرومتر باشد، البته همراه با تأمین شرایط لازم زمین‌شناسی و زمان قابل قبول (باکر^۱ ۱۹۶۹). حداقل بازشدگی درز و ترکها را وایت^۲ (۱۹۷۷) ۲۵ میکرومتر پیش‌بینی کرده است. احتمالاً گسترش اکثریت غارها از درز و ترکهایی است که پهنای آنها بین ۱ تا ۲ میکرومتر است. بزرگترین درز و ترکهای اولیه موجب سریعترین گسترش غارهای بدوی می‌شوند؛ عامل اساسی برای تشخیص میزان نفوذ انحلال در صفحات بعد گفته خواهد شد.

1 - Bocker

2 - White

۳-۱ فرایند انحلال در آبهای جوی

در پهنه‌های کارستی ورود آبهای جوی با pH متفاوت است (که به‌طور عمده، pH آنها بین ۵/۵ تا ۹/۵ است). انحلال کلسیت یا دولومیت در دو مرحله بین جامد - مایع، جابجایی کاتیون و آنیون از جامد، در پی تجمع پروتون‌هایی که از مایع جدا شده‌اند، انجام می‌شود. در حالت ساده بین کلسیت و آب شیرین رابطه زیر برقرار است :



این واکنش با ۱۲ تا ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر CaCO_3 که مقدار ناچیزی است، در محلول به حال تعادل درمی‌آید. از این‌رو، مدت طولانی است که چنین تفکری در مورد انحلال اکثریت کربنات‌ها توسط آبهای معمولی جوی حاکم بوده که CO_2 بیش از انحلال CO_2 جو در این آبها است و انحلال در این واکنش به سرعت تولید اسید کربنیک و رهاشدن پروتون‌بستگی دارد:



انحلال‌پذیری گاز نسبت عکس با حرارت دارد و تقریباً از صفر تا ۲۰ درجه سانتیگراد دو برابر می‌شود. تمرکز انحلال در سیستم این تعادل بر پایه دو شرط شناخته می‌شود (الف) منشاء اتمسفر بر پایه اتمسفر استاندارد یا سرشار از CO_2 موجود در خاک باشد. درصد CO_2 موجود در اتمسفر استاندارد، در کنار دریا برابر ۰.۳۳/۰ است که با افزایش ارتفاع کمی کاهش می‌یابد. درصد CO_2 داخل توده خاک حدود ۲۱ قابل تصور است (تمام اکسیژن جانشین شده است) ولی درصد مرز بالایی ۷ است (ب) واکنش هر سه مرحله همزمان انجام می‌گیرد. هنگامی که باران بر سطح برهنه توده سنگ یا محل تراوش آبهای می‌بارد که خاک آنها دارای قطعات کربنات و در بین آنها پر از هوا است، CO_2 اضافی قادر است جانشین اسید کربنیک شده و فرایند انحلال را انجام دهد. این روش باز (یا همزمان) است. در یک سیستم بسته (یا پی در پی)، ابتدا آب زیرزمینی اشباع از CO_2 می‌شود، بعد این آب داخل توده سنگ آهکی شده و واکنش در نبودن گازهای بیشتری آغاز می‌شود. انحلال ایده‌آلی سنگ آهک در یک سیستم بسته تنها ۱۳ یا نصف آن انجام می‌گیرد. دخول آب جوی نرمال به غارها و آبهای حرارتی به غارها در شرایط بسته به صورت ایده‌آل صورت می‌گیرد، گرچه در پی، ممکن است سیستم تبدیل به باز شود (برای مثال ورود آبی که بالای تراز آب زیرزمینی^۱ وجود دارد).

تعادل توده سنگهای کربناته در آبهای جوی به‌طور جامع توسط شولر^۱ (۱۹۶۲)، گارل و کرایست^۲ (۱۹۶۵)، لانگ‌مور^۳ (۱۹۷۱)، استم و مورگان^۴ (۱۹۸۱) و باتلر^۵ (۱۹۸۲) مورد بررسی قرار گرفته است. برای انحلال توده سنگهای کربناته برنر^۶ (۱۹۷۸)، پلومر و دیگران^۷ (۱۹۷۹، ۱۹۷۸)، باگلی^۸ (۱۹۸۰)، دری یوردف^۹ (۱۹۸۱) و برای دولومیت، بوسینگر^{۱۰} (۱۹۸۲) و وایت^{۱۱} (۱۹۸۴)، درک^{۱۲} (۱۹۸۴، ۱۹۸۳، ۱۹۸۰) به‌طور سامانه‌ای (سیستماتیک) مدل‌های انحلالی را در پهنه جهانی در ارتباط با تراکم انحلال که در توده سنگهای بی‌کربناتهای کارستی رخداده است، بررسی کرده‌اند. اسمیت و اتکینسون^{۱۳} (۱۹۷۶) داده و نمونه‌های بیشتری را مورد تحلیل قرار داده‌اند که عمده نمونه آبها در حد تعادل قرار نداشته‌اند.

بررسیهای به دست آمده نشان از آن دارد که ظرفیت آبهای جوی برای حل کردن کلسیت از حداقل ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است، در حالی که در جریان رودخانه‌های دگرزا که در آنها جریان روباز داخل خاک فرو می‌رود و در سیستم بسته‌ای که جریان در تماس با سنگ آهک قرار دارد، انحلال حداکثر ۳۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر خواهد بود (جایی که جریان دارای درصد بالای CO₂ می‌باشد آن هم از توده خاکی که دارای مقدار زیاد قطعات سنگ آهک است). در آبهایی که دارای بیش از ۴۰۰ میلی‌گرم بر لیتر CaCO₃ باشند تداخل یونهای متداولی چون کلسیم (حاصل از سنگهای سولفات) با یونهای خارجی اثرات ژرفی در انحلال خواهد داشت.

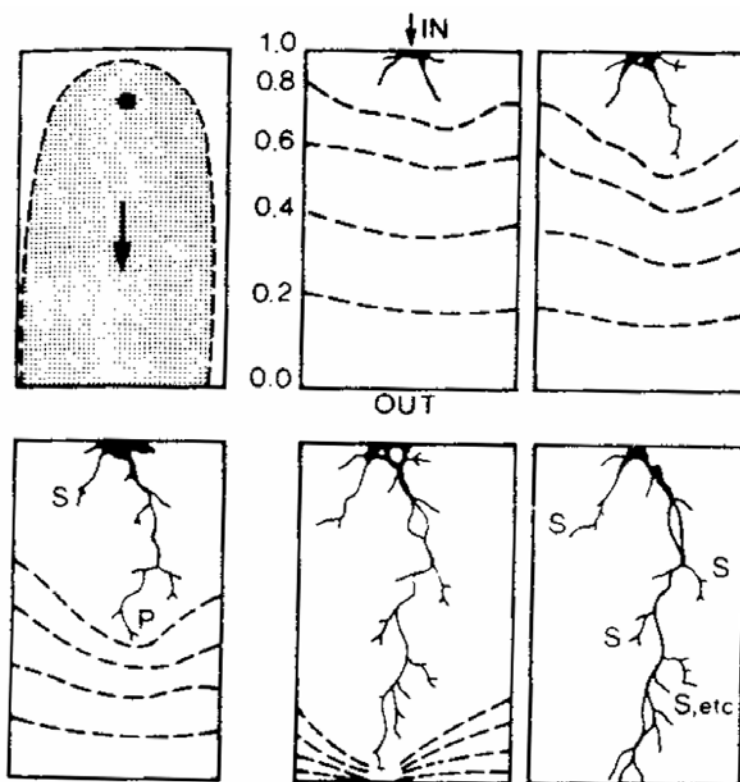
میزان خلوص انحلال به‌طور مقدماتی از مقدار روانابهای موجود تشخیص داده می‌شود. مقدار انحلال کمتر از $(1\text{m}^3/\text{km}^2/\psi\text{r})$ در نواحی خشک و $(100-150\text{m}^3/\text{km}^2/\psi\text{r})$ در نواحی حاره‌ای و بارانی است.

تاکنون بحثهای زیادی در مورد طول زمانی که لازم است تا آب جوی اشباع از کلسیت شود، صورت پذیرفته است (مراجعه به بوگلی ۱۹۸۰). در شرایط منطقی آزمایشگاه این شرایط ممکن است سه هفته طول بکشد. به‌عنوان مثال هرمان^{۱۴} (۱۹۸۲) و وایت (۱۹۸۴) قادر نبودند یک محلول دارای دولومیت را به مرز اشباع برسانند. با وجود به‌کارگیری وسایل افزایش واکنش سریع توسط آنها، دستیابی به چنین هدفی چندان میسر نبود.

بیشترین اثرات زایش یک غار توسط ویل^{۱۵} (۱۹۵۸) مورد بررسی قرار گرفته است. به این صورت که او میزان نفوذ مؤثر انحلال را پیش از آنکه درز و ترکها به مرز اشباع برسند و دیگر امکان انحلال و وسیع‌تر شدن درز و ترکها از بین برود، بررسی کرده است. در محل‌هایی که یک مجموعه غار انحلالی وجود دارد، میزان نفوذ انحلالی (تا ۹۰٪) به کیلومترها سر می‌زند. از این رو وسیع و بزرگ شدن غارها قابل فهم است.

-
- 1 - Schoeller
 - 2 - Garrels and Christ
 - 3 - Langmuir
 - 4 - Stumm and Morgan
 - 5 - Butler
 - 6 - Berner
 - 7 - Plummer et al
 - 8 - Bogli
 - 9 - Dreybrodt
 - 10 - Busenberg & Plummer
 - 11 - White
 - 12 - Drake
 - 13 - Smith & Atkinosn
 - 14 - Herman
 - 15 - Weyl

یکی از مسائل شناخت مرز و میزان نفوذ ورودی آبهای خورنده از درز و ترکهای باریک، در غارهای بدوی مطابق شکل شماره ۱-۲ است. بوگلی (۱۹۸۰، ۱۹۶۴) و دری برودت^۱ (۱۹۸۱) معتقدند که نفوذهای ساده و کوتاه موجب تحریک و توسعه مکانیسم خوردگی توده سنگ می‌شود. اور (۱۹۸۲) نویسنده این مطلب معتقد است که چنین اختلاطی، یعنی انحلال و مکانیسم خوردگی، غیرممکن است و نمی‌تواند دامنه نفوذ آن توسعه چندانی داشته باشد مگر آنکه توده سنگ دارای تخلخل مؤثر بالا باشد (برای مثال، روند سنگ‌شدگی ناقص، یا درز و ترکها به‌طور بی‌سابقه‌ای بزرگ است). ویل (۱۹۵۸)، وایت (۱۹۷۷، ۱۹۸۴) و پالمر (۱۹۸۴) مدل انحلال کنیتیک را به این صورت قبول کرده‌اند که توسعه انحلال در غارهای بدوی بدون اختلاط هیچگونه مکانیسمی با رشد بین 10^3 و $10^5 \text{ km}^3/\text{yr}$ صورت می‌گیرد. این نگرش مورد تأیید تجارب عملی از سوی فورد (۱۹۸۰)، میلرونی و کارو^۲ (۱۹۸۶) در بررسی شکل‌گیری پاره‌ای از غارهای نخستین پس از دوران یخبندان می‌باشد.



شکل ۱-۲- زمینه توسعه در غار بدوی از یک ورودی به سوی خروجی در راستای ترکهای نفوذپذیر شروع جریان به صورت عملی در شکل سمت چپ نشان داده شده است؛ نواحی هم پتانسیل به صورت خط چین؛ P = اصلی یا مسیرهای پیشرو؛ S = مسیرهای فرعی. برپایه بر پایه یک سخت‌افزار اور (۱۹۸۲)

1 - Dreybrodt
2 - Mylroie & Carew

۴-۱ توسعه غارهای معمولی

زمینه غارهایی که بر اثر گردش آبهای جوی بدون هیچگونه مانع غیرمتداول زمین‌شناسی در سنگهای کربناته به وجود می‌آیند ممکن است دارای ماهیت سه بعدی باشد. از این رو برای تشریح، آنها را به سه بخش تقسیم می‌کنیم:

(الف) زایش و گسترش اولین پدیده تشکیل غار، (ب) توسعه طولی (در جهت درازا و ژرفا و (ج) گسترش بعدی مراحل پیشین.

۵-۱ توسعه زمینه غار

۱-۵-۱ تشکیل غار از ورودی یک ترک ساده

این نوع ساده‌ترین زایش غار است که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. فاصله بین نقطه ورودی و خروجی از یک ترک ممکن است تا یک متر و حتی تا ۱۰ کیلومتر بالغ شود. تغییر فشار سر بار آب زیرزمینی به ضخامت لایه‌های منفرد تا چند صدمتر مربوط می‌شود. پیش از هرگونه بازسازی ناشی از انحلال، آرایش جریان صفحه‌ای، غیر ایزوتروپیک ولی یکسان است. به عنوان مثال، همانگونه که در شکل ۱-۲ نشان داده شده جریان از نوع داری است.

بر پایه تحقیقات صحرایی فورد (۱۹۶۸) و مدل‌های انحلال سخت‌افزار اور (۱۹۸۲) شبکه و گسترش انحلال در غارهای بدوی در ورودی جریان زاده شده و بر پایه تمایل برتر گردان هیدرولیکی رشد می‌کند. آبگذرایی که مسیر آنها از درز و ترکها شروع شده در پیوند با درز و ترکهای مویینه بوده و ممکن است اتفاقی و غیر قابل پیش‌بینی باشند. در شبیه‌سازیهای الکتریکی، راه‌آبهای غارهای بدوی از پیوند مجموعه‌ای از درز و ترکهای انحلالی به سوی پایاب شکل می‌گیرند. با وجود آنکه در این آبگذرها، مقاومت در برابر گذرگاه آب وجود دارد ولی جریان آب زیرزمینی در آنها آرام و کوچک است.

هنگامی که یکی از غارهای بدوی شروع به رشد انحلالی نسبت به سایرین می‌کند، موجب بهم‌خوردگی خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی و کاهش میزان انحلال در ورودی می‌شود. هنگامی که لوله‌های اصلی عهده‌دار خروجی می‌شوند، مقاومت بالای جریان از میان می‌رود. در این حالت رژیم جریان داری به دلیل پیوند ناهمگون آبراهه‌ها معتبر نیست. خطوط هم‌پتانسیل باقیمانده در ترکها جهت‌یابی جدیدی به خود می‌گیرند.

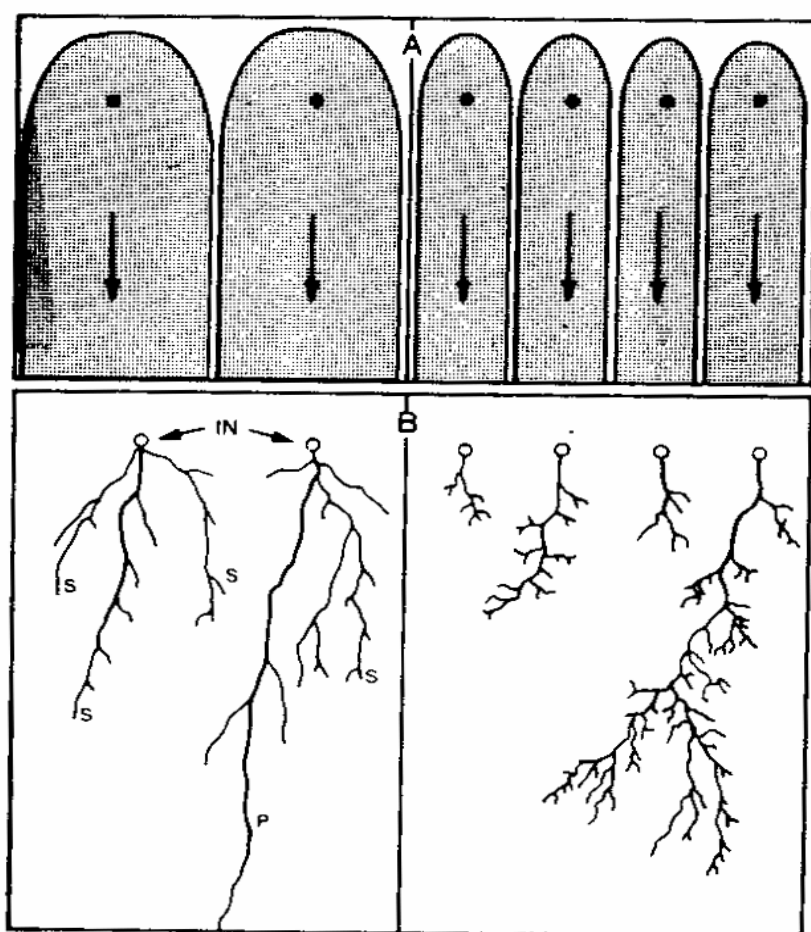
بزرگترین آبگذرها در یک درز و ترک، ابتدایی‌ترین، مستقیم‌ترین و کم‌شاخه‌ترین در آرایش انحلالی یک غار بدوی است. همان‌گونه که آبگذرهای نخستین بزرگ می‌شوند و بسیاری از شاخه‌های فرعی آنها متورم شده، اگر افت فشار نداشته باشیم انحلال در شاخه‌های فرعی به آرامی ادامه یافته و شبکه تازه‌ای را برای شکل‌گیری زمینه‌ای انحلالی به وجود می‌آورند.

بر پایه تجارب، لوله‌های اولیه انحلالی در پایین دست زمانی که به اولین خروجی راه می‌یابند به ضخامت یک میلی‌متر هستند. براساس تجارب به دست آمده جدید، زمان نفوذ و انحلال بین 10^3 و 10^5 $\psi r / km$ است. درازای انحلال در یک درز و ترک منفرد گاه بزرگتر از ۱۰ کیلومتر است ولی به‌طور معمول آشکار شدن گذرگاه همراه با چشمه و یامجاری از پیش بهم وصل شده در طول ۱۰۰۰ متر می‌باشد.

هزاران هزار از اینگونه غارهای ساده شناخته شده‌اند. اکثریت آنها در گلوگاههای عمیق خم‌دار (مئاندری) با شبکه‌ای از کانالهای مشابه و متقاطع موجب پیچیدگی در پایانه گذرگاه می‌شوند. این گونه انحلالها موجب پیدایش یکی از اولین غارهای کارستی می‌شود و اکثریت این نواحی کارستی، به‌طور متناوب در سرزمینهای پست در زمان یخبندان شکل می‌گیرند مانند کوبک^۱، (بوپر^۲ ۱۹۷۵) زیرا شرایط یخبندان و غیرمسکونی بودن آن موجب گسترش و پیچیدگی بیشتر آن شده است.

۱-۵-۲ تشکیل غار از چند ورودی در یک ردیف^۳

اساس موقعیت شرایط چندگانه در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

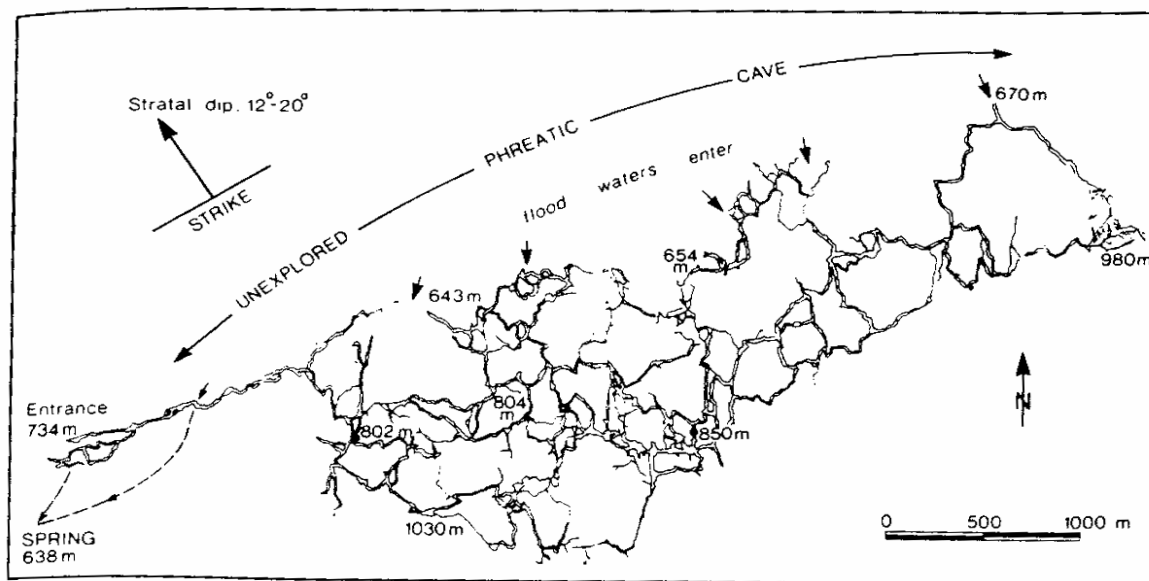


شکل ۱-۳- توسعه مضاعف چندمرحله‌ای زمینه غارهای بدوی از چند ورودی

1 - Quebec
2 - Beupre
3 - Multiple Inputs in a Rank

در توسعه اساسی، ورودیهای لوله‌ای به‌طور انتخابی از یک تا چند ورودی گسترش می‌یابند. هنگامی که این ورودیها به خروجی راه می‌یابند، آرایش جدید خطوط همگرا اطمینان از توسعه غارهای بدوی با بهم پیوستن آبگذرهای مختلف را می‌دهد. در مورد درز و ترکهایی که به‌طور نسبی وسیع هستند (مقاومت در آنها ناچیز است) اینگونه بهم‌پیوستگیهای افقی گرایش به خطوط مستقیم دارند. برای نمونه نزدیک به راستای درز و ترکها چنانچه مسیر آبگذرها با مقاومت زیاد روبرو باشد، در این صورت پیوند آنها بسیار نامنظم است.

نمونه بارز اینگونه پیوندهای نامنظم غار داس هولوخ^۱ سویس است. این دومین غار طولانی جهان در سنگهای کربناته است (بوگلی، ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰). شکل ۱-۴ بیشترین بخش گذرگاه مزبور را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴- شمای ساده شده مجموعه گذرگاههای غار داس هولوخ، موتالا، سویس.

ترازهای نشان داده شده به متر و بالاتر از سطح آب دریا است (حدود ۹۰ کیلومتر در مجموع نقشه‌برداری شده) که توسعه آنها در سطوح لایه‌بندی است و در عین حال به عنوان سطوح راندگی بین دو شیت پشت سرهم^۲ نیز می‌باشند. شیب لایه‌ها 12° - 25° درجه شمال غربی است. مجموعه ورودی تغذیه آبگذرها در حاشیه جنوبی است، برای نمونه، در سمت راستی لایه‌ها می‌باشد. بدنه غار مجموعه‌ای از آبگذرهای توسعه یافته است که تخلیه غار را با موقعیت در ترازهای پایین‌تر عهده‌دار هستند. شکل بسیار سینوسی و نامنظم به دلیل اتصال بدنه لوله‌ای آبگذرها در بخشهای جداگانه (غرب به شرق) است که گاه افت و خیزهای مرتفع و غار بدوی را شکل می‌دهد. طول پیوستگی لوله‌های مجاور به یکدیگر از ۵۰ تا ۲۵۰ متر است. بدنه‌های لوله‌ای آبگذر مدرن اغلب به شکل فراتیک^۳ و تا ضخامت ۸ متر است. اثر به جای مانده از آنها، امروزه به خوبی دیده می‌شود.

1 - Das Holloch
2 - Nappe Sheat
3 - Phreatic

جریانهای امروزه به سوی غرب در پایین تر از تراز آب زیرزمینی از طریق گذرگاههای فراتیک انجام می گیرد. بر پایه آمار هیدرولوژی بزرگترین جریانهای سیلابی، حدود ۱۸۰ متر بالاتر از اثر گذرگاههای عادی به ثبت رسیده است. گذرگاههایی که در راستای جهت لایه بندی شکل گرفته است، متداول ترین بوده که در غار داس هولوخ نیز بازتاب غالب داشته است.

۱-۵-۳ تشکیل غار/از چند ورودی در چند ردیف^۱

شکل شماتیک آن در شکل ۵-۱ نشان داده شده است که از نوع متداولترین در غارهای کارستی است. بنابر شکل ۵-۱ چنانچه ارتفاع فشار تقریباً ثابت باشد، ردیف ورودیهایی که نزدیکتر به مرز خروجی باشد تقریباً تمام گذرگاه را پر می کند. رقابت بین لوله های اصلی و فرعی در ردیف شکل ۵-۱-ب نشان داده شده است. هنگامی که لوله های اصلی نزدیکترین ردیف بهم وصل می شوند، گرادیان هیدرولیکی نسبت به ردیف دوم به شدت پرشیب بوده، به طوری که رشد غار بدوی شتاب بیشتری یافته، تا آنجا که به لوله های ردیف اول وصل می شود. این فرایند به سوی بالادست و افقی تکرار می شود و ساخت چنین آرایشی مشابه جریان شبکه ای هورتن^۲ است. در غارهای کارستی که چندین ورودی مختلف وجود دارد تشخیص اولین ورودیها که بهم متصل شده اند ناممکن است. اگر در یک ردیف رده بندی، ورودی در فاصله بسیار دوری نسبت به خروجی باشد و دارای ارتفاع فشار بیشتری نسبت به سایر ردیفها باشد ممکن است پیش از رسیدن به سایر ردیفها با جریانهای دیگری پیوسته شده و دگر شکلی در زمینه جریان به وجود آورد برای مثال غار برنکورک^۳ که از انواع متداول در بین غارها است. در طی سالها به دلیل بدی وضعیت زمین شناسی و هیدروژئولوژی تنها اندکی از نمونه ها از قوانین حاکم بر هورتن تبعیت می کنند. حتی قوانین تجربی جریان کانالها به طور آشکار قابل پیش بینی نیست. ولی با وجود این، اساس شکل گیری بافت جریان روشن است.

سیستم از داخل بهم پیوسته ماموت فلینت ریج روپل پروکتر^۴ در پلاتفرم آهکی می سی سی پی در کنتاکی (شکل ۱-۶) در حال حاضر به درازای بیش از ۵۰۰ کیلومتر بوده و در نوع خود یکی از طولانی ترین غارهای شناخته شده جهان است. خروجی غار در پایاب، بارها بنابر تغییراتی که مسیر رودخانه گرین^۵ به خود می گیرد، جابه جا شده است. از این رو شبکه آبگذر به دلیل تغییرات نخستین، تغییر یافته و دچار پیچیدگی شده است. در حالی که آبگذرهای اولیه در مسیرهای فرسایش یافته سطح زمین شکل گرفته اند. از این رو عملیات اکتشافی و تهیه نقشه ها در افقهای زیرین ناقص است. با وجود چنین پیچیدگی، می توان زمینه های ناقص آبگذرهای دور و نزدیک و بهم ملحق شدن آنها را در محل ظهور چشمه ها مشخص کرد. یکی از بهم پیوستگیهای اخیر افقی در ردیفهای دور (غار پروکترورب) هدایت زهکشی غار ماموت را عهده دار بوده اند. گزارش کامل به وسیله پالمر (۱۹۸۱) و کوئین لان و دیگران^۶ (۱۹۸۳) ارائه شده است.

1 - Multiple Inputs in Multiple Ranks

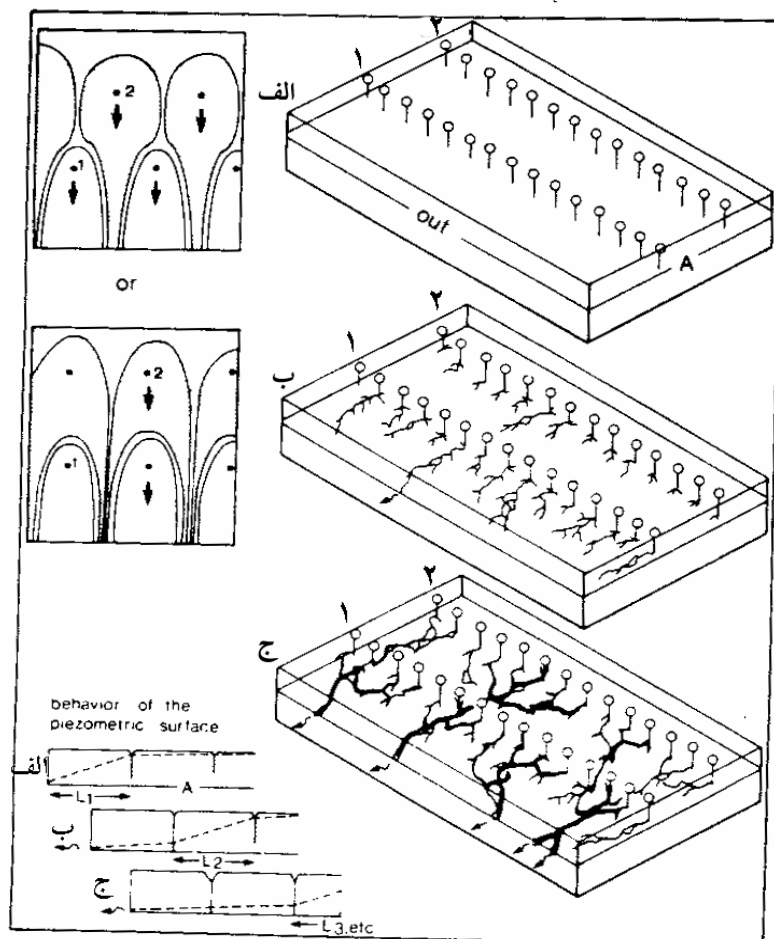
2 - Horton

3 - Branchwork

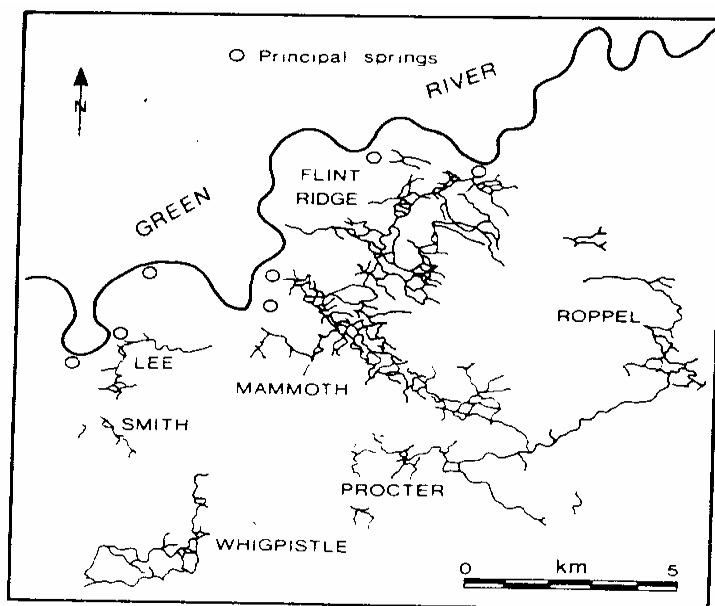
4 - The Mammoth – Flint Ridge – Roppel Procter

5 - Green River

6 - Quinlan and et al



شکل ۱-۵- تشکیل غار از چند ورودی در چند ردیف

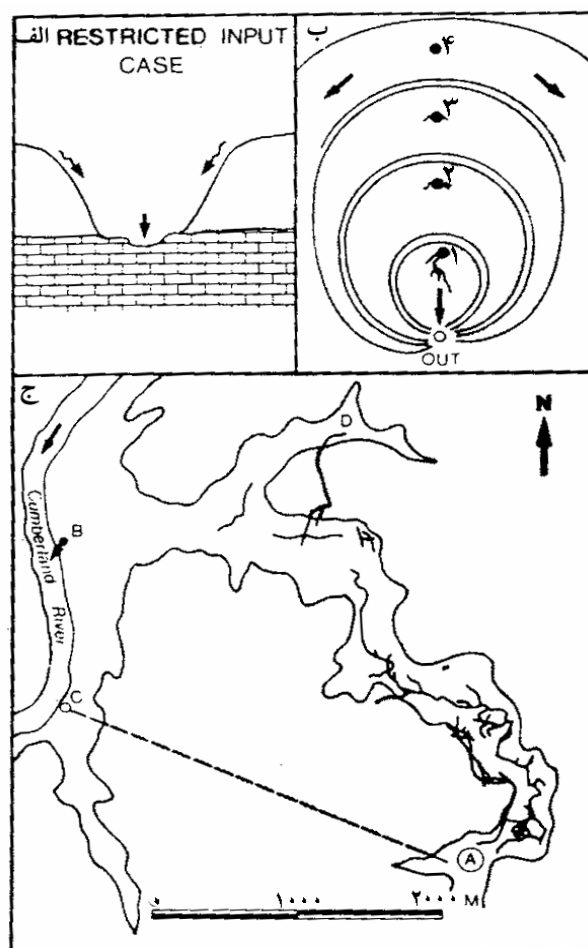


شکل ۱-۶- سیستم از داخل بهم پیوسته ماموت فلینت ریج روپل پروکتر در پلاتفرم آهکی می‌سی‌سی‌پی در ایالت کنتاکی آمریکا

۱-۵-۴ تشکیل غار از ورودیهای محدود شده در یک ردیف^۱

این حالت در شکل ۷-۱ با ورودی و خروجیهای مختلف کارستی و اشکال آنها نشان داده شده است. ورودی محدود، باریکه‌ای از رخنمون سنگهای کربناته (که بیشتر اوقات بستر دره‌ها است) را در بر می‌گیرد (شکل ۷-۱-الف). چشمه‌ها در یکی از نواحی دو طرف آشکار می‌شوند. شرایط هندسی جریان به اجبار ورودیهای دوردست را در برگرفته، از این‌رو غار در پیشانی جلویی شکل گرفته است (شکل ۷-۱-ب).

به اینگونه غارها به‌طور متناوب برخورد می‌شود. نمونه‌ای که در شکل ۷-۱ ارائه شده است بسیار پیچیده است، زیرا یک بار دیگر با کشف ناقص شبکه چند قسمتی روبرو هستیم. سنگربندی دیواره رودخانه کومبرلند^۲ (شکل ۷-۱-ج)، نشانگر فاز جدیدی از ورودی A به سوی بخش تختانی و چشمه B است که در اثر گسترش و توسعه بیشتر در راستای مستقیم به سوی غرب در زیر سنگ پوشش شیل به‌وجود آمده است. این گذرگاه جدید هنوز از جهت اندازه قابل ملاحظه نیست.



شکل ۷-۱- تشکیل غار از ورودیهای محدود شده در یک ردیف

1 - Inputs Restricted to a File
2 - Cumberland

۶-۱ جریان از شبکه کانالهای مشابه و متقاطع

در تمام چهار حالت قبلی سمت و سوی پیشرفت در غارهای بدوی و ارتباط آنها تحت تأثیر مستقیم گرادیان هیدرولیکی و دچار تغییرات است. در این شرایط استخوان‌بندی گذرگاههای اولیه غار تحت شرایط فراتیک توسعه می‌یابد. بعداً تماماً یا بخشی از بسیاری از غارها با بزرگتر شدن مقطعشان به صورت آبزاد درمی‌آیند. اگر آنها بعداً دچار سیلاب ناگهانی شوند، در محلهایی که گذرگاهها مسدود شده و ایجاد گرادیان هیدرولیکی پرشیب می‌کنند، کانالهای مشابه و متقاطع محلی با گذرگاههای کوچک ممکن است زاده شوند (پالمر ۱۹۷۵).

اینگونه سیلاب در کانالهای مشابه متقاطع یکی از علت‌های اساسی در مورد پیدایش غارهای انحلالی است. مثلاً نمونه آن در غارهای کم‌ژرفا مانند غار میدوست^۱ آمریکا متداول است و به ویژه در بالادست و در محلهایی که زهکشی دگرجا، موجب ایجاد سیلابهای بزرگ شده است، دیده می‌شود.

۷-۱ توسعه غارها در طول (در درازا و ژرفا)

برای سالها اعتقادات متفاوتی وجود داشته است درباره اینکه آیا غارهای آهکی به‌طور انتخابی در هریک از سه منطقه (زون): بالای سطح اشباع زمین^۲ مارتل^۳ (۱۹۲۱)، یا در مناطق (زونهای) آبزاد [دیویس^۴ (۱۹۸۰)، برتس^۵ (۱۹۴۲)]، یا در آبخوان منطقه اپی‌فراتیک^۶ که آنها را از هم جدا می‌کند، وجود دارند یا خیر^۷. [سوای‌نرتون^۸ (۱۹۳۲)، رودس و سیناکوری (۱۹۴۱)]. وارویک اعتقاد دارد سؤال مزبور منطقی نیست (فوردر ۱۹۷۱، فوردر و اور ۱۹۷۸). غارهای معمولی در هر سه منطقه گسترش می‌یابند و بیشترین و بزرگترین سیستم غار از ترکیب دو منطقه است.

۸-۱ انواع غارهای وادوس (بالای سطح اشباع زمین)

اکثریت سنگ آهک و دولومیت‌هایی که در کارست رخمون دارند در مجموعه فرسایشی قرار داشته و از جهت دیاژنرشد یافته به‌طوری‌که تخلخل مؤثر محدود به تخلخل ثانویه از نوع درز و ترک می‌شود. حجم خوردگی در اینگونه درزو ترکها و انحلال بر اثر گردش آبهای جوی ناچیز است به‌طوری‌که تراز مؤثر آب زیرزمینی در سطح توده‌های سنگ است. زایش یک منطقه وادوس در غارهای بدوی ابتدا در ارتباط با چشمه (همانگونه در بالا به آن اشاره شد) بوده و سپس وسیع شدن گذرگاه توسط زهکشی توده سنگی ادامه می‌یابد که بالاتر از تراز حداقل گرادیان هیدرولیکی چشمه است. گرادیان هیدرولیکی نهایی، پایدار و تراز آب زیرزمینی پایین خواهد بود (شکل ۸-۱).

1 - Midwest

2 - Vadose

3 - Martel

4 - Davis

5 - Bretz

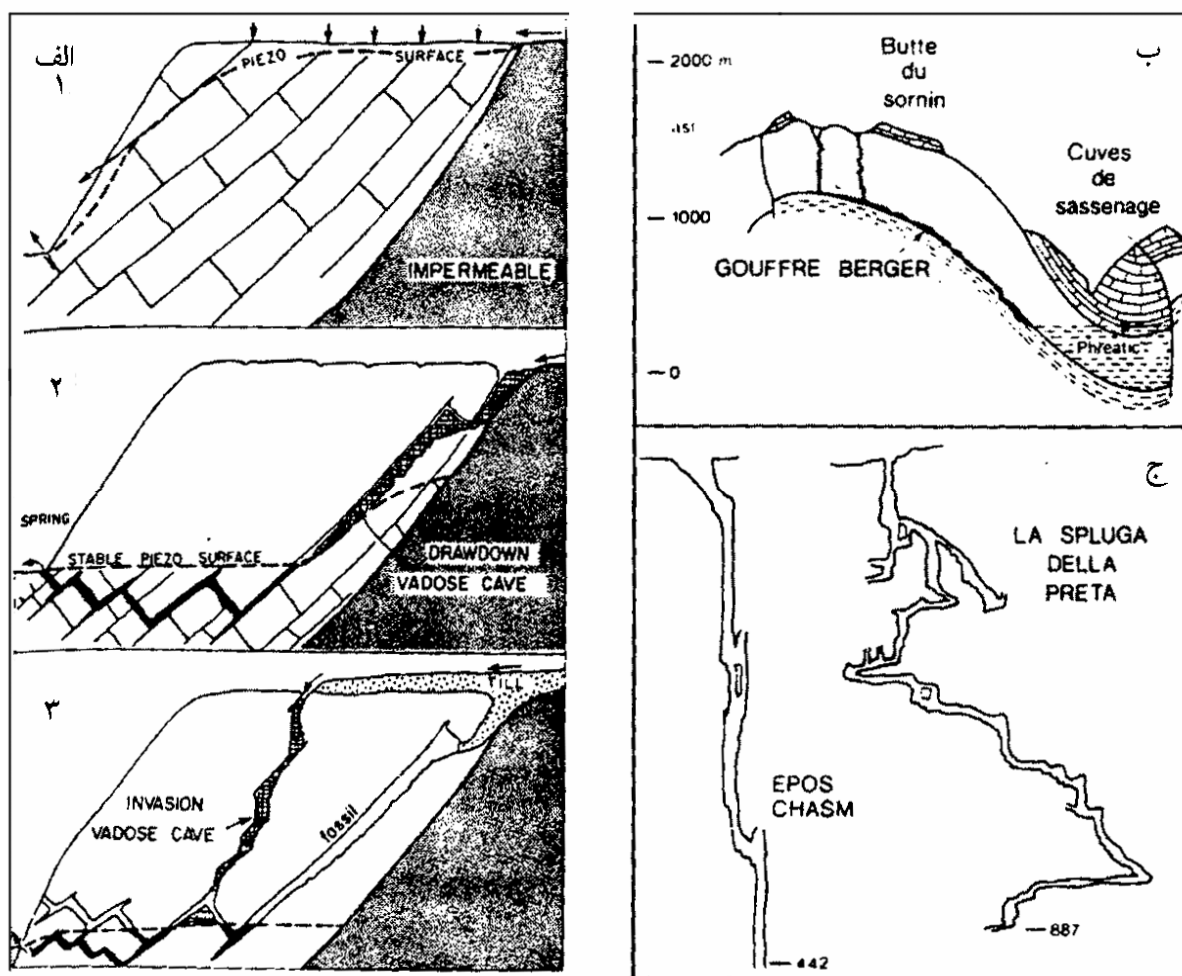
6 - Epiphreatic

7 - برای کسب اطلاعات بیشتر به وارویک (Warwick، ۱۹۵۳) مراجعه فرمایید.

8 - Swinnerton

دو نوع غار وادوس به وجود می‌آید. افت سطح آب زیرزمینی غارها در منطقه وادوس، توسعه یافته و بر اثر انحلال موجبات وسیع شدن گذرگاه آب می‌شود. در محل بهم پیوستن اولیه آنها به لوله‌های فرعی، ساختمان ابتدایی به صورت زایش گذرگاههایی است که از حالت فراتیک به حالت وادوس تبدیل می‌شود. گذرگاههای باریک رودخانه‌ای با سقف فراتیک مدور هستند.

دره‌های مهاجم در محلهایی که جریان نو از منطقه وادوس به وجود آمده است، شکل می‌گیرند. به طور عموم آنها پرشیبتر از افت آب زیرزمینی وادوس در غارها هستند. درز و ترکهای عمودی ایجاد تنوره‌ای می‌کند که به دره‌های پیرامون خود وصل می‌شوند. در محلهایی که تخلخل اولیه مؤثر است (مانند بسیاری از بالازدگیهای سنگهای مرجانی) یا در محلهایی که مقاومت در درز و ترکها بسیار کم است، بخشی از آنها بر اثر بالازدن و زایش کوههای جوان گسترش می‌یابند (بوگلی ۱۹۸۰). همانگونه که در شکل ۱-۸- الف نشان داده شده غارهای مهاجم وادوس به ویژه در نواحی یخچالی که مانع زهکشی در پهنه‌های کارستی می‌شوند، متداولند.

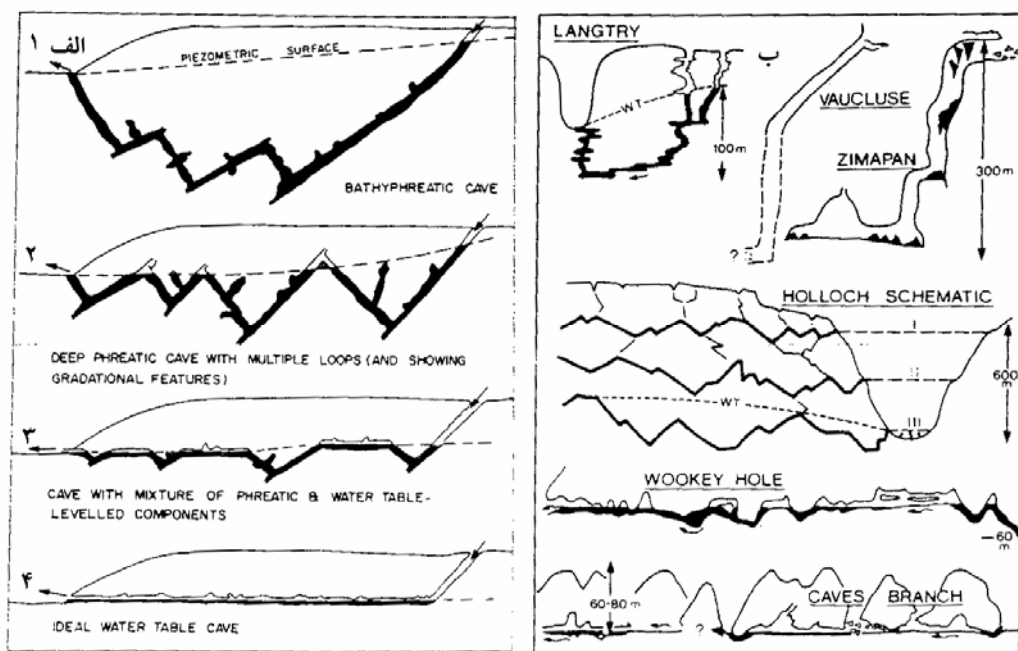


شکل ۱-۸- انواع غارهای وادوس

۹-۱ اختلاف بین تراز آب زیرزمینی غارها و جریان فراتیک

چگونگی برش طولی غارها در زیر تراز پایدار آب زیرزمینی با تناوب و یا مقاومت درز و ترک‌هایی که جریان آب زیرزمینی به آن وارد شده است، شناسایی می‌شود (فورد و اور ۱۹۷۸). به زبان ساده، اساس بر این روال است که تناوب بزرگتر درز و ترک‌ها، موجب کوتاهتر و کم ژرفاتر شدن آبگذرها، همان‌طور که در شکل ۱-۳ و ۱-۵ نشان داده شده است، می‌شود. چهار فرم مشخص هندسی بر اساس شکل ۱-۹-الف امکان‌پذیر است:

- چنانچه تناوب درز و ترک‌ها بسیار اندک باشد در این صورت غار ممکن است یک حلقه عمیق در زیر تراز آب زیرزمینی داشته باشد که به آن غار باتی فراتیک^۱ می‌گویند. مطالعه و کشف اینگونه غارها بسیار مشکل بوده، از این‌رو یافته‌ها درباره آنها ناتمام است (شکل ۱-۹-ب). غار وکلواسپرینگ^۲ (فرانسه) و لاهویادوزیمپان^۳ (مکزیک) به عنوان بخشی از حلقه دیرینه خروجی بوده که دارای برخاست عمودی بیش از ۳۰۰ متر از لوله‌های انحلالی با ضخامت ۲۰ تا ۳۰ متر هستند. در نواحی زیمپان غارهای بزرگتر دیگر به اضافه بزرگترین کارستی دنیا سیرادوال آبرا^۴، است که تمام این موارد از نوع درز و ترک‌های کم در سنگ آهک‌های توده‌ای، حفره‌دار مرجانی است (فیش^۵ ۱۹۷۷). هنوز آگاهی از ژرفای غارهای باتی فراتیک به دست نیامده است. حفاریهای اکتشافی در نواحی مختلف نهشته‌هایی به ضخامت ۳۰۰۰ متر را روی غارها شناسایی کرده است. بخشی از غارهای شناسایی شده در طی زمان حفاریهای مزبور از نوع باتی فراتیک هستند، ولی بیشتر آنها از زمره غارهای کم ژرفابوده که بنابر پویابودن فعالیت‌های تکتونیکی فرو نشسته‌اند.



شکل ۱-۹- چهار فرم مشخص هندسی غارهای تشکیل شده در قسمت زیرین جریانهای فراتیک

- 1 - Bathypneumatic Cave
- 2 - Vaucluse Spring
- 3 - La Hoya de Zimapan
- 4 - The Sierra de El Abra
- 5 - Fish

- غارهای چندتایی حلقه‌ای فراتیک در پهنه‌هایی گسترش می‌یابند که درز و ترکها دارای تناوبی اندک هستند. حلقه‌های بالاتر تراز ماندگار آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. غار داس‌هولوخ^۱ نمونه جالبی از اینگونه غارها است که در آن دامنه عمودی حلقه فراتیک نوسانی از ۸۰ تا ۱۸۰ متر دارد.
- غارهایی که ترکیبی از حلقه‌های کوتاه‌تر و کم‌تر فاطر دارند چنانچه کانال افقی (برای نمونه تراز آب زیرزمینی) معرف گذرگاه مقوله سومی از تناوب درز و ترکهای بیشتر با مقاومت کمتر است. بخشهای افقی در سمت و سوی درز و ترکهای عمده و یا گذرگاههایی که بین سطوح لایه‌بندی راه یافته‌اند، شکل می‌گیرند.
- در محلهایی که تناوب درز و ترکها بسیار زیاد است، گرادیان کم (اکثراً مستقیم) در راستای ورودیهای جریان در ماورای چشمه‌ها وجود دارد. زمانی که گذرگاهها بر اثر انحلال به اندازه کافی بزرگ می‌شوند، در چنین حالتی توان جذب تمام روانابها را دارا خواهند بود و تراز پی‌زومترها در آنها پایین‌تر خواهد بود. چنین شرایطی موجب پیدایش غارهای زیر تراز آب زیرزمینی می‌شود. نمونه‌های آنها که به شکل فشرد و یا در گذرگاه کانالهای شناور با سقف کوتاه هستند، بسیار متداول است. برای نمونه، از آهکهای درجا در پهنه‌های دشتهای آبرفتی چین، ویتنام، مالزی و کوبا می‌توان نام برد.
- نمونه دیگر از این نوع در سنگ آهکهای شکافدار، بخشهای گسترده دومیکابارادلا^۲ در مرز چکسلواکی و مجارستان می‌باشد که به صورت زایش گذرگاه رودخانه‌هایی دیده می‌شود که پهنه‌های فروافتاده باریک در سنگ آهکها (سرزمینهای آبله فام) به‌وجود آورده است. گرچه برای گذرگاه آبهای زیرزمینی بیش از ۱۰۰۰ متر، اینگونه غارها نادر است.

تقسیم چهارگانه^۳ توسط فورد و اور که در بالا ذکر شد به دنبال مشخص کردن کامل چهار ویژگی هندسی است که ممکن است در آبخوانهای فراتیک در یک فاصله زمان طولانی رخ دهد. در عمل، بسیاری از غارها، مجموعه‌ای از حالت دوم و سوم و یا سوم و چهارم را نشان می‌دهند. طولانی‌ترین غار، ماموت فلینت ریج روپل پروکتر^۴ است که نشانگر افت وادوس یا کاهش فشار بر اثر گریز آب زیرزمینی به اضافه هجوم زهکشی وادوس می‌باشد و در ترکیب حالت سوم و چهارم گذرگاه رخ می‌دهد. در بررسیهای سیستم زمانی مشخص شده است که فرآیندهای مرحله‌ای تمایل به مسطح کردن پروفیل غار را دارند (فورد و اور ۱۹۷۸).

با توجه به زایش سیستم غارها در ابعاد قابل توجه می‌توان پی در پی، به مطالعه اکتشافی آنها پرداخت، زیرا در مجموع، شش حالت تناوب درز و ترک و مقاومت در آنها شناخته شده است. در حالت صفر، تناوب درز و ترکها به‌اندازه‌ای ناچیز و یا مقاومت چنان زیاد است که هیچگونه غاری به‌وجود نمی‌آید که از جهت ریختارشناسی در زمان خاصی قابل مشاهده باشد. این شرایط به ویژه برای بسیاری از رخنمونهای سنگ مرمر حاکم است. حالت اول تاچهارم را قبلاً مشخص کردیم. در حالت پنجم زمینه درز و ترکها و تناوب آنها بسیار زیاد و یا به عبارت دیگر، تخلخل بسیار بالای اولیه غالب می‌شود به طوری که غارهای متراکم کوچک و یا غارهای بدوی به جای غارهای بزرگ (قابل ورود) شکل می‌گیرند. این شرایط برای بسیاری از لایه‌های گل

1 - Das Holloch

2 - Domica - Baradla

3 - Four State Model

4 - Mammoth - Flint Ridge - Roppel - Procter

سفید^۱ و سنگ آهکهای ائولیتیک^۲ زمان ژوراسیک انگلستان، صادق است و همچنین برای سنگ آهکهای با سختی کمتر در زمان هولوسن - پلیستوسن^۳ معتبر است.

برای ایجاد اشکال مختلف هندسی هیچگونه مقایسه ساده‌ای در درز و ترکها به دلیل تفاوت مقاومت درز و ترکها وجود ندارد. زمانی که تناوبها اندک باشد، بهم پیوستگیها کاهش یافته و درز و ترکهای با مقاومت کم ممکن است امکان گسترش غار در حالت سوم را بدهد، و حالت چهارم چنانچه مسیر کوتاه زیرزمینی و بریده شده با مئاندر (خم‌رود) باشد، بوجود می‌آید، باید در نظر داشت که تناوب اندازه‌گیریهای رخنمونها یا وجود معادن سنگ به‌طور عام، یک راهنمای ناچیز برای بررسی شرایط قسمت زیرین کارست سطحی است.

در لایه‌هایی که نسبتاً شیب آنها تند باشد (۲ تا ۵ یا بیشتر)، لایه‌های نفوذی، متمایل به دخول در قسمت عمیق آبخوان دارند زیرا گرادیان آنها تندتر از گرادیان هیدرولیکی اولیه بوده و موجب حبس شدن آب در آبخوانها و ایجاد شرایط آرتزین می‌شوند. از این‌رو، غارهای عمیق فراتیک بیشتر شکل می‌گیرند. در مقابل لایه‌هایی که افقی هستند، شرایط را برای به وجود آمدن تراز آب زیرزمینی بالای لایه‌های دولومیتی، یا شیل‌های ضخیم به وجود می‌آورند. از این‌رو مشاهده می‌شود فراتیکهای کم‌ژرفا بسیار متداول است. در لایه‌های به شدت چین خورده (برای مثال، سیستم غار در روی چند یا چندین لایه گسترش یافته باشد) تناوب درز و ترکهای مؤثر بسیار بالا بوده و شرایط مناسب برای غارهای تشکیل یافته در ژرفای کمتر امکان‌پذیر می‌شود.

برای نتیجه‌گیری از مطالب ذکر شده تأکید می‌شود که امکان دارد برای یک مجموعه غار، از دو نوع غار وادوس یا چهار نوع آبخوان فراتیک بین نقطه ورودی و چشمه یا چشمه‌ها، فقط یکی تشکیل شده باشد. بسیاری از غارهای کوتاه منحصر به فرد هستند، گرچه بیشتر غارهای بزرگ نشان از یک یا چند گذرگاه ورودی و یا هردو نوع زهکشی وادوس به یک یا چند آبخوان فراتیک دارند.

۱-۱۰ سیستم غارهای چندتایی

سیستم غارها دو نوع تغییرات متفاوت را تجربه کرده که ممکن است به توقف و یا اساساً تغییر سیر تکاملی آنها بیانجامد. حالت اول زمانی رخ می‌دهد که چشمه دچار بالا و پایین رفتن می‌شود. حالت دوم زمانی که، شرایط آب و هوایی یا تغییرات دیگری پیش می‌آید و غار با نهشته‌های آبرفتی و یا ته‌نشسته‌ها پر می‌شود. این سرگذشت اکثریت غارهای عمیق دیرینه است. برای غارشناسان امکان شناسایی آنها بسیار اندک و گاه ناممکن است. ویژگی رسوبات غارها در پایان این فصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

اکثریت سیستم غارهای طولانی که داخل سنگ آهکها شناخته شده‌اند تحت تأثیر بالا و پایین رفتن چشمه‌ها قرار داشته‌اند. ساده‌ترین آنها گذرگاه باریک وادوس در گذرگاه پیشین بستر است. اینگونه غارهای کوتاه و ساده با قسمتهای ورودی، بسیار متداول هستند. آنها فقط دلالت بر پایین رفتن چشمه‌ها داشته بدون آنکه هیچگونه جابجایی افقی در آنها صورت گرفته باشد.

1 - Chalks

2 - Oolitic

3 - Holocene - Pleistocene

جابه‌جایی محل چشمه‌ها در اکثر موارد با پایین رفتن آنها صورت می‌گیرد، زیرا به درز و ترک‌های جدیدی برخورد می‌شود که منجر به پیشروی در آن سو خواهند شد. نتیجه این پدیده آن است که، در یک سری پیشروی به سوی جلو از داخل سیستم، یک غار جدید از غار قدیمی زاده می‌شود، که ممکن است بخشی یا تمامی آن تحت تأثیر جریان سازنده‌ای باشد که اثر آن در بخش زیرین به یادگار می‌ماند. اکثریت غارشناسان گذرگاه بالایی را به نام تراز^۱ نامیده‌اند، گرچه بر اساس شکل‌های ۸-۱ و ۹-۱ آنها به‌ندرت و به سختی معنی و مفهوم کلمه تراز را می‌دهند.

زمینه‌های چندتایی و سه بعدی در غارها عمومیت داشته و شاید یکی از پیچیده‌ترین شکل ماندگار آنها در تمامی شرایط ریختارشناسی هستند. آنها بی‌تردید از مجموعه پیچیده شبکه فرسایشی تشکیل یافته‌اند. گذرگاه‌ها ممکن است بدون هیچگونه رابطه مستقیم هیدرولوژیکی حاکم بین آنها، یکدیگر را با تکرار قطع کنند. در بسیاری از سیستم‌ها آشکار است که تکرار درز و ترک‌های مؤثر در جهت افقی افزایش یافته که نشان از آبگذرهای نخستین و فرعی یا گسترش در راستای افقی در زیر بدنه آبگذرهای بهم پیوسته دارد. نتیجه آن است که در حالت آخر، طبقات پایینتر نسبت به تراز آب زیرزمینی غار را در برداشته که گاه ممکن است در پایه حلقه‌های قدیمی به‌وجود آیند و یا از زیر آنها توسط ورودیهای دیگری شکل گیرند. تنوره‌های وادوس گالریهای قدیمی را دونیمه کرده و در زیر آنها غوطه‌ور می‌شوند. جریانهای مهاجم وادوس فاز معاصر، ممکن است با گذرگاههای قدیمی فراتیک برخورد کنند و چند صدمتر دورتر از آنها سرگردان شوند و بار دیگر رهیافت جدیدی را پی نهند. تمام این پدیده‌ها بر اثر پایین رفتن به سوی چشمه‌ها و در جهت افقی جابه‌جایی یافتن است. غار ماموت فلینت ریج روپل پروکتر نمونه بارز از این پدیده است.

۱-۱۱ توسعه سایر انواع غارها

غارهای آبهای جوی در محل‌هایی گسترش می‌یابند که همراه گردش آب محدود شده باشند. تشریح غارهای مزبور در زیر بررسی می‌شود.

۱-۱۱-۱ شبکه‌ای از کانالهای مشابه و متقاطع دو بعدی

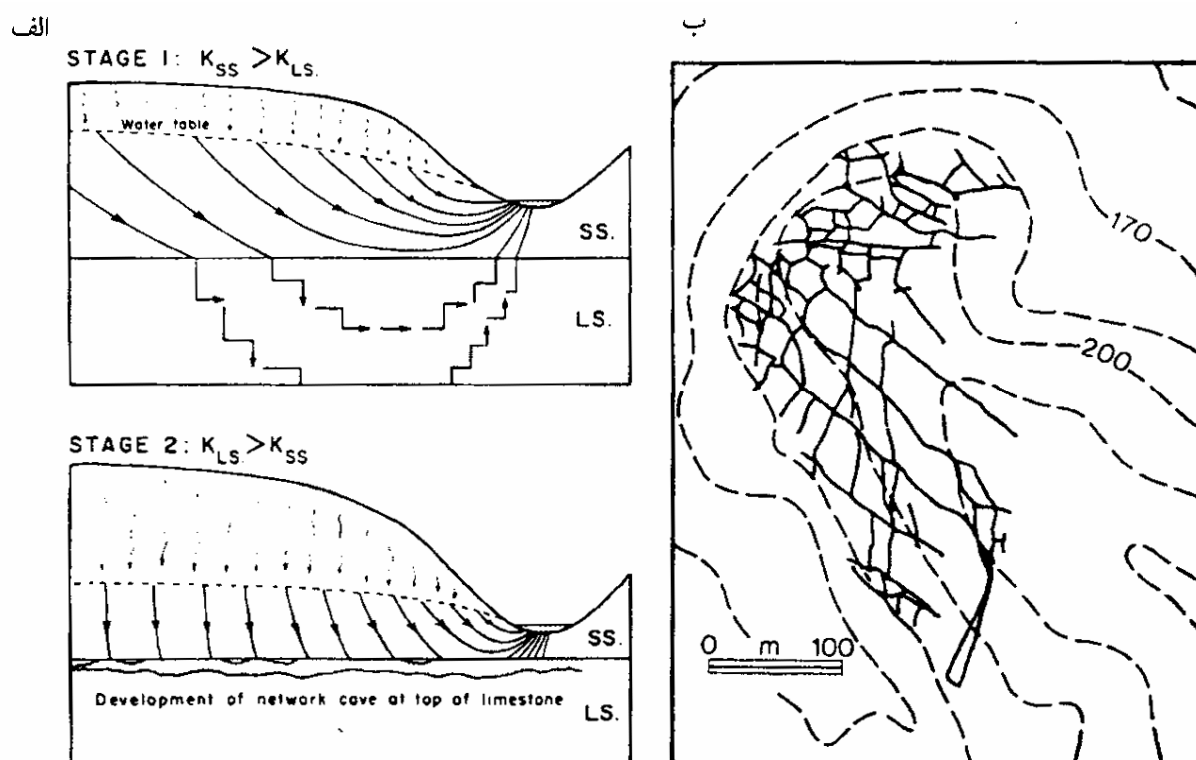
این نوع غارها که بسیار متعدّدند، به صورت جدا و یا به صورت ناهنجاری در بخشی از یک غار معمولی وجود دارند. آنها شبکه کانالهای مشابه و متقاطع را ایجاد کرده و همچنین ایجاد رشته گذرگاههای کوچک کرده که با بهم پیوستن در یک یا چند لایه ایجاد شرایط لایه‌های فشارزا می‌کند. گذرگاههای گرد و یا مقطعی که به تدریج باریک می‌شوند و آنهایی که با هم موازی هستند گرایش به ابعاد هندسی مشابه دارند. آنها بر اثر جریان آرام فراتیک، همچنین جریان دیرنگام تدریجی، نیز گهگاه به صورت کانالهای مشابه و متقاطع دیده شده‌اند.

کانالهای مشابه و متقاطع احتمالاً در اکثر لایه‌هایی که دارای تناوب و درز و ترک‌های قابل نفوذ و محدود با شرایط هیدرودینامیکی و شرایط مناسب زمین‌شناسی باشند، به‌وجود می‌آیند. شرایط فشرده محلی در جاهایی که چندین لایه به شدت در هم پیوسته و بین سنگ آهک‌های توده‌ای قرار می‌گیرند، معمولاً شرایط به وجود آمدن کانالهای مشابه و متقاطع را سبب

می‌شوند، نمونه بارز آن غار لوملوند^۱ در سوئد است. مجموع کانالهای منفرد و مشابه در مرحله‌ای که آب تحت فشار باشد به‌وجود می‌آید. یکی از بزرگترین اینگونه غارها در لایه‌های ژئیس به‌وجود آمده؛ درپودولیا روسیه است که این مورد مثال دیگری از این نوع غار با گذرگاههای به درازای ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد.

پالمر (۱۹۷۵) بررسی دقیقی از به‌وجود آمدن غارهای «میج^۲» در آمریکا کرده و دریافته است ۸۶٪ آنها مستقیماً در زیر لایه‌های تراوای ماسه سنگ شکل گرفته است.

پالمر مدل‌های آلترناتیو را در شکل ۱-۱۰-۱ الف پیشنهاد کرده است. در این مدل، یک قاره هم اندازه «میج» بر اثر جریان آب از داخل گذرگاههای قابل انحلال که از مسیرهای پیشین سنگهای همگن غیرقابل انحلال عبور کرده، به وجود می‌آید.



شکل ۱-۱۰-۱- مدل‌های آلترناتیو به‌وجود آمدن غار

گلینی^۳ (۱۹۵۴) غارهایی را که بر اثر نفوذ آبهای جوی در سنگهای کارستی به‌وجود می‌آیند تحت نام هیپوفراتیک^۴ نامیده است. یکی از بهترین نمونه‌های مطالعه شده از این نوع غار به وسیله برد^۵ (۱۹۶۴) در تاق‌دیس راگود^۶ بخش شرقی میسوری

-
- 1 - Lummelund
 - 2 - Mage
 - 3 - Glennie
 - 4 - Hypophreatic
 - 5 - Brod
 - 6 - Rockwood

مطالعه شده که چاله‌های کوچک و غارهای درز و شکاف‌دار در ۶۰ کیلومتر در راستای قله تاقدیس آرایش یافته است. غار با شیب تند، ۶۰ متر داخل سنگ آهکها پیش رفته و پایه غار به دولومیت می‌رسد. شبکه‌های همانند و متقاطع تشکیل دهنده غار به‌طور محلی در پایه دیده می‌شود. در این بخش در پایه غارهای مزبور ماسه سنگ دیده می‌شود و تخته سنگهای مدور ماسه سنگ در جانیز وجود دارد. ماسه سنگ سازند سنت‌پیت^۱ به ضخامت ۴۰ متر یکی از مهمترین لایه‌های آبدار در این ناحیه است. «برد» معتقد است که از این لایه آبدار، جریان به سوی بالا، داخل شکستگیهایی که بعداً در سنگ آهک به وجود آمده تا سطح سنگ پوشش تاقدیس راه یافته است.

۱-۱۱-۲ غارهای هیدروترمال همراه با آبهای سرشار از CO₂

این نوع غار حدود ۱۰٪ غارهای شناخته شده اکتشافی را شامل می‌شود. مطالعات اساسی در این مورد در بخش اروپای شرقی و اتحاد شوروی سابق، توسط جاکوس^۲ (۱۹۷۷)، مولر و سروری^۳ (۱۹۷۷) و دیبلجانسکی^۴ (۱۹۸۰) انجام گرفته است.

آبهای جریان یافته در آبگذرهای توده سنگ ممکن است از آبهای جوان^۵ که از عمق زمین بیرون آمده و در سیکل گردش آب در طبیعت مشارکت نداشته‌اند، آبهای محصور^۶ یا آبهای جوی و یا مخلوطی از آنها تشکیل یابد. مشخصات عمومی آنها گرم بودن و انتقال حرارت می‌باشد و همچنین همراه با گاز CO₂ می‌باشند و سرچشمه در ژرفای بس عمیق دارند. این آبها حین بالآمدن آب از اعماق زیاد، حرارت از دست داده و سرد شده و زمینه انحلال سنگ آهک را فراهم می‌سازند.

غارشناسان مجارستان سه ریختار مشخص غارهای هیدروترمال را تشخیص داده‌اند. نوع اول غاری است که بر اثر آب گرم به تنهایی به وجود آمده است که در شکل ۱-۱۱-الف نمونه بارز آن به نام غار ساتورکوپوزتا^۷ نشان داده شده است. احتمال می‌رود این غار از یک دالان زیرین (که در حفاریهای اکتشافی شناسایی شده است) با یک دالان ماگمایی پیوند داشته باشد. بدنه غار مانند درختی رشد یافته است. غار بردمیسوری که به طور اساسی داخل درز و ترکها تشکیل یافته است از این گونه است ولی فاقد شاخه‌های فرعی است که بر اثر آبهای گرم به وجود می‌آیند.

نوع دوم غارهای دو بعدی همراه شبکه‌های مشابه و متقاطع است. این غارها در بخشهایی شکل می‌گیرند که آب از شکاف و ترکهای سنگ آهک به پایین جریان یافته و در مسیر با لایه غیرقابل نفوذ برخورد کرده و یا آنکه تراز آب زیرزمینی با جریان آبهای داغ برخورد کرده و سبب شده است که فرایند انحلال همراه با فرسایشهای مکانیکی و خوردگی توسعه یابد.

1 - St. Peter Formation

2 - Jakus

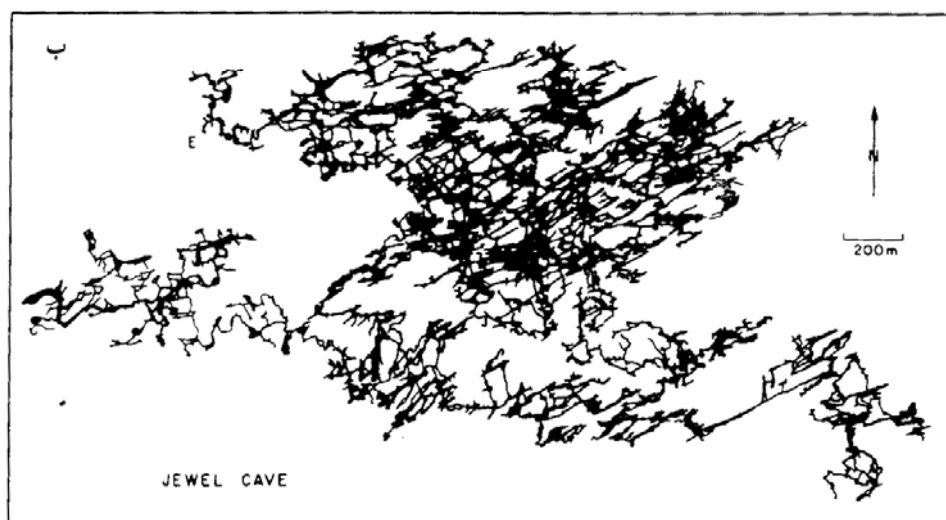
3 - Muller & Sarvary

4 - Dublijansky

5 - Juvenile Water

6 - Connate Water

7 - Satorkopuszta



شکل ۱-۱۱- غارهای هیدروترمال

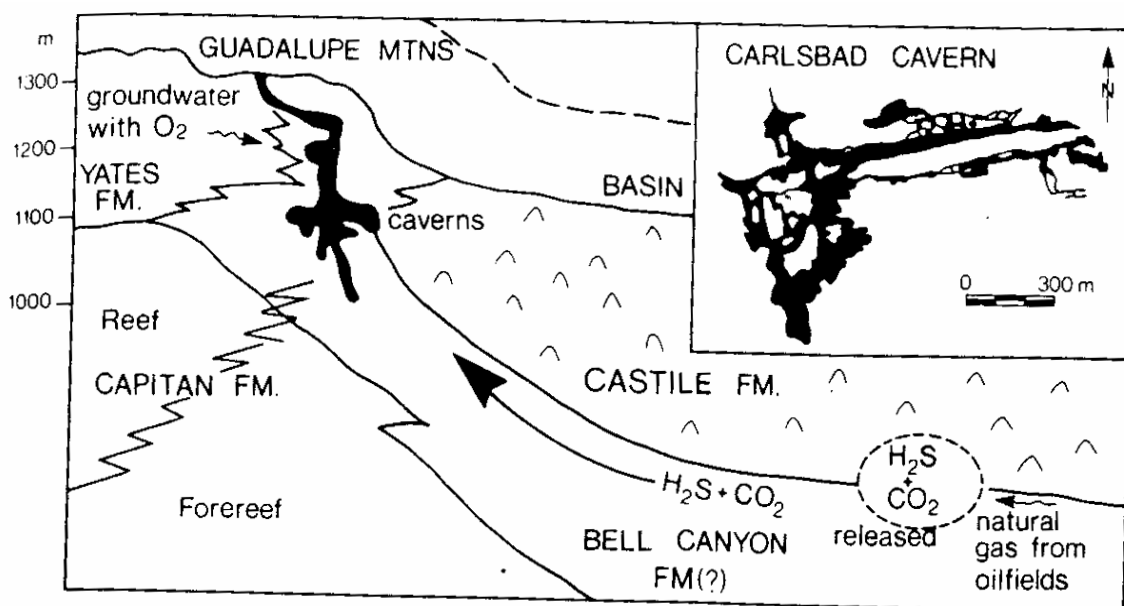
غارهای تیپ سوم از نوع سه بعدی همراه شبکه‌های مشابه و مستقیم (برای نمونه غارهای چند طبقه) در یک مرحله به وجود می‌آیند. چنین غارهایی از متداولترین غارهای آبهای حرارتی هستند. چشمه‌های آبگرم و آثار زیرین غارهای به یادگار مانده بوداهیل^۱، بوداپست یکی از قدیمی‌ترین غارهای مزبور بوده که مطالعات دیرینه‌ای را به خود اختصاص داده است. بزرگترین نوع این غار در شکل ۱-۱۱- ب نشان داده شده است که به نام جوئل^۲ نامیده شده است. این غار دارای ۱۱۸ کیلومتر راهرو در پهنه‌ای به وسعت ۲/۷ کیلومتر مربع است. غار ویند^۳ (دارای ۷۰ کیلومتر کریدور در پهنه‌ای به مساحت ۱/۸ کیلومتر مربع) نیز در بلاک هیل^۴ داکوتای جنوبی قرار دارد. این غارها، به ترتیب چهارم تا دهم از جهت درازای طول بوده و درازترین غارهای شناخته شده از این نوع هستند. تشکیل آنها در لایه‌های به ضخامت ۹۰ تا ۱۴۰ متر داخل سنگ آهک لایه همراه دولومیت آهکی، که دارای پوشش ماسه سنگ و شیل هستند، صورت گرفته است. در کنار این غار چشمه‌های جدید آبگرم از داخل ماسه سنگ فوران کرده و گذرگاهی دره فام داخل لایه‌های شیل به وجود آورده است.

-
- 1 - Buda Hill
 - 2 - Jewel
 - 3 - Wind
 - 4 - Black Hills

غار جویل (شکل ۱-۱۱-ب) اثری ماندنی را به جا گذاشته است. این غار هیچگونه پیوندی با ریختار جدید بیرونی نداشته و گذرگاه آن در برخورد با آبگذرهایی است که در مسیر قرار گرفته‌اند. ساختار شاخص آن به وجود آوردن گذرگاهی به بلندی ۲۰ متر با ضخامت ۶ تا ۱۵ سانتیمتر است که با کلسیت و سیلیس اندود شده است. غار ویندیز نمونه دیگری است که اندودی از جریانهای آبگرم آن را پوشانده است و پایین‌ترین گذرگاه قابل دسترسی در آن با آبی که از پایین تغذیه شده، پر شده است، با کالویج و دیگران^۱ با به کارگیری ردیابهای ایزوتوپ نشان داده‌اند منشأ رسوبات به جای مانده از آبهای گرم است که تا دیواره‌های غار جهش یافته‌اند. آنها مدلی را ارائه کرده‌اند مبنی بر اینکه آبهای گرم زیرزمینی که منشأ از پوسته اقیانوسی (گرانیت) داشته در غار بلاک‌هیل پوشش اندودواری را شکل داده و سپس به چشمه‌های قدیمی هدایت شده بر روی لایه‌های ماسه سنگی شکاف ایجاد کرده‌اند. نمونه بارز این پدیده در دره می‌سی‌سی‌پی و معادن جفرسون سیتی^۲ است. آنها غارهایی هستند که از آبهای دارای هیدروژن سولفور به وجود آمده‌اند.

۱-۱۱-۳ غارهای کارلسباد و سایر غارهای گودالوپ

در شکل ۱-۱۲ غاری در قسمت جنوبی کوههای گوادالوپ با پرتگاههای فرسایشی در لایه‌های مرجانی که حوزه تبخیری پکوس^۳ آن را به وجود آورده است، نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۲- غارهای کارلسباد

1 - Bakalowiczetal
2 - Jefferson City
3 - Pecos

غار یاد شده شبکه‌ای از اتاقهای بزرگ را در لایه‌های توده‌ای و سوراخدار مرجانی در برگرفته و گذرگاهی را برای صخره‌های بالایی میسر کرده است. بنابر عقیده برتس^۱ (۱۹۴۹) جریان پیچیده آبهای جوی با پشتیبانی سیلابهای بعدی موجب پیدایش غارهای کارلسباد شده است. مطالعات اخیر ثابت کرده است، این غارها هیچگونه پیوندی را با ریختار بیرونی و یا شرایط هیدرولوژیکی امروز نداشته و اثر آنها چندان چشمگیر نیست. برخی اتاقها و دیواره گذرگاه غار پوشیده از بلورهای ژئیس^۲ می‌باشد که روی لایه‌های رس را پوشانده‌اند.

کوبین و دیگران اعتقاد دارند نواحی ساحلی و تداخل فرایندها در این نواحی موجب زایش اتاقهای بزرگ شده که ژئیس در مرحله جریان برگشتی جانشین آهک مرجانی شده و آنگاه جریان آبهای جوی آن را حل کرده است. دیویس (۱۹۸۰) و هیل (۱۹۸۵) پیشنهاد کرده‌اند به جای آنکه گفته شده است H_2S از فساد و تباهی مواد زنده به‌وجودمی‌آید، در نظر گرفته شود که منشاء آنها از مهاجرت و جداسدن از گازهای زیرین که به سوی بالا حرکت می‌کنند، تأمین می‌شود. این گازها پس از برخورد با آب زیرزمینی ایجاد اسید سولفوریک که احتمالاً با آبهای جوی مخلوطاست، می‌کنند.

چاله‌های کور، اساس محلهایی است که اکسید شدن صورت گرفته و پیدایش اتاقهای بزرگ، ریشه در این محلهما دارد. هرچه اثر اکسیدشدن قویتر باشد، اتاقهای بزرگتر به‌وجود می‌آیند. در محلهایی که حالت اشباع رخ می‌دهد منجر به رسوب ژئیس می‌شود. ردیابیهای ایزوتوپی آشکار کرده‌اند که سرچشمه گوگرد از میدانهای گازی است تا منشاء دریایی.

دوبلیجانسکی^۳ (۱۹۸۰) نمونه‌ای از غارهای اطاقدار، که با عوامل هیدروترمال به‌وجود می‌آیند در شوروی سابق شناخته است که شباهت بسیار با گوادلوپ داشته، فقط گوادلوپ بزرگتر است. پژوهشهای انجام گرفته توسط فورد، دیویس و هیل نشان می‌دهد آبهای پایین‌رو موجب پیدایش این غارها می‌شوند ولی نباید فراموش کرد گاز CO_2 موجود در مخازن گاز زیرزمینی به همان اندازه که H_2S برای زایش غار نقش‌آفرین است نیز دارای اهمیت بسیاری می‌باشد.

۱-۱-۴ غارهایی که در سنگ آهکها با جانشین‌شدن ژئیس و فرایند انحلال به‌وجود می‌آیند

اگه میلر^۴ (۱۹۸۱) گزارش داده است غارهای فرعی بیگ هورن^۵ وایامینگ بسیار شاخص هستند. آنها در اثر جریان آب در سنگ آهک به صورت کوتاه، افقی و جریان وادوس به‌وجود می‌آید که به‌سوی جلو جریان یافته و پس از چند ده یا صدمتر به صورت چشمه‌های آبگرم از درز و شکافها بیرون می‌جهد. از این چشمه‌ها گاز H_2S متصاعد می‌شود. اثر این گاز موجب تغییر سنگ آهک به ژئیس می‌شود که از دیواره‌ها و سقف غارآویزان شده و سقوط می‌کند و بر رویه تازه سنگ آهک باقیمانده، تکرار تبدیل به ژئیس از سرگرفته می‌شود. ژئیسهای فروافتاده با جریان آب جابه‌جا شده و نهایتاً در آب حل می‌شوند.

1 - Brets
2 - Gypsum
3 - Dubligansky
4 - Egemeler
5 - Big Horn

۱-۱۱-۵ غارهای مرکب ساحل دریا

اینگونه غارها به طور عمده در سنگ آهکهای جوان و تازه با گرایش نهشته‌های کارستی به وجود می‌آیند (اواخر ترسیری و کوآترنری). مکانیسم تشکیل آنها در مخلوطی از آبهای شیرین و آب شور که فرایند خوردگی و انحلالی آنها توسط مؤلفان چندی چون پلومر (۱۹۷۵)، بونسیرگ و پلومر (۱۹۸۲)، بک و دیگران^۱ (۱۹۸۴) که در این مورد پژوهش و بررسی کرده‌اند، به این صورت شناخته شده است که تخلخل مؤثر از طریق حفره و منافذ، زمینه ساز غالب برای درز و ترکها و سطوح لایه‌بندی است. تشکیل اینگونه غارها، نسبت به سایر غارها بیشتر انجام می‌شود. تشکیل شبکه‌های متقاطع و مشابه در راستای لایه‌بندی قابل پیش‌بینی است.

بنابر اعتقاد بک و دیگران (۱۹۸۴)، چنین غارهایی به عنوان منطقه (زون) پنیرسوئیس^۲ نامیده می‌شوند و در سواحل یوکاتان دیده می‌شوند. غارهای متراکم لانه زنبوری مانند غارهایی که گرگو^۳ (۱۹۸۱) در ایندیانای غربی واولیر^۴ (۱۹۷۵) در جزایر تروبریانده^۵ و دریای سولمون^۶ شرح داده‌اند، دیده می‌شود. در نواحی ساحلی که توده‌های سنگ آهک با تخلخل خوب هستند، غارها تحت تأثیر مکانیسم پیچیده‌ای در تراز دریا به وجود آمده و غارهای بعدی در افقهای پایینتر و جانبی تشکیل می‌شوند. اکثریت غارهای مطالعه شده که نزدیک به اینگونه فرایندهای مرکب و پیچیده هستند، بر اثر نوسانات شدید سطح آب دریا در زمان دوران چهارم زمین‌شناسی به وجود آمده‌اند. با افت سطح آب دریا، انحلال بر اثر آب همزاد، وادوس و جوی با فروریزش سقف و دیواره‌هایی که استحکام خود را با فرایند انحلال از دست داده‌اند، رخ می‌دهد. آویزه‌های استالاگمیت وادوس به بزرگی ۴۴ متر در غار باها^۷ دیده می‌شوند که با روش تعیین سن اورانیوم تشخیص داده‌اند آنها مربوط به ۱۴۰ هزار سال قبل هستند (گاسکون و دیگران^۸). احتمالاً حقیقت آن است که غارهای مرکب که بافرایند پیچیده به وجود می‌آیند در پهنه‌های کارستی مدرن دیده نمی‌شوند، بلکه در سکوه‌های دیرینه سنگ آهکها به وجود می‌آیند مانند غار پین‌پونیت تکزاس باختری (رودس و دیگران^۹ ۱۹۸۴).

۱-۱۲ ساختار فرسایشی گذرگاههای غار

از آنجا که در درون غارها رشد ساختمانی و گسترش سطوح که قبلاً به تشریح آن پرداختیم امکان‌پذیر نیست، در چنین شرایطی برشهای مختلف می‌تواند سیمای مزبور را نشان دهد. آنها شامل سیمای غار دیرینه بوده که گاه در رخنمونها دیده می‌شوند و یا آنکه با دسترسی به مغزه‌های حفاری شده اکتشافی و تحلیل آنها می‌توان سیمای نهفته را آشکار کرد.

1 - Beck et al
2 - Swiss Cheese Zone
3 - Grego
4 - Ollier
5 - Trobriand
6 - Solomon
7 - Bahamas
8 - Gascoyne et al.
9 - Rhodes et al.

برشهای گرفته شده خلاصه‌ای از سرگذشت غار را نشان دهد. گزارش مشروح سیمای به‌وجود آمده از روند انحلالی فراتیک و وادوس در سال ۱۹۴۲ توسط برتس بررسی شده است. بوگلی (۱۹۸۰) و جنینگ (۱۹۸۵) این مسئله رابازنگری جدیدی کرده و تا حد امکان زوایای پنهان آن را آشکار کرده‌اند.

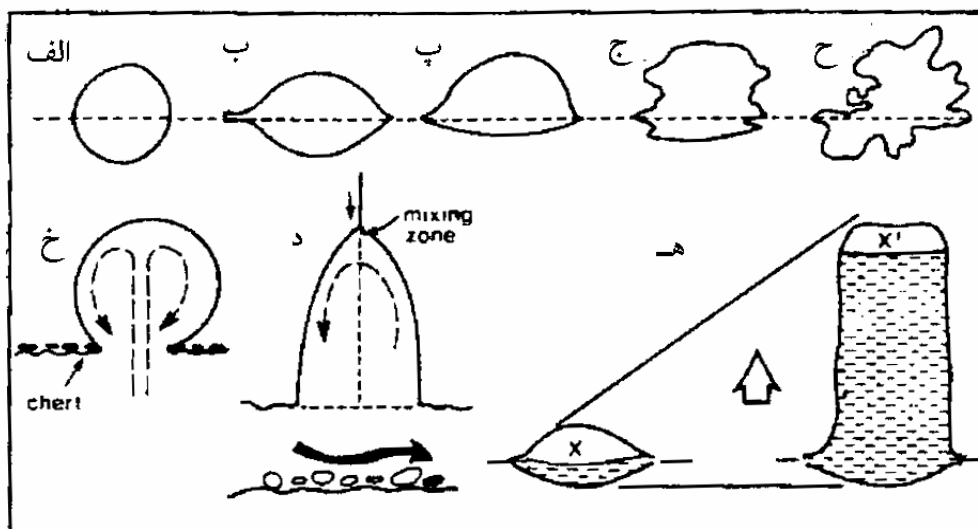
چهار نوع برش از غارها وجود دارد. نوع اول فراتیک که بر اثر انحلال، سیمای همگون را به‌وجود آورده ضمن آنکه بستر غار پوشیده از رسوبات کلاستیک است. نوع دوم وادوس، که فرسایش به بستر محدودی از دیواره‌های کانال‌دار منتهی می‌شود و یا آنکه منتهی به آدم‌روهای عمومی^۱ می‌شود. نوع سوم فروریختگیها، جایی که سنگهای فروافتاده پیشین به‌طور کامل دچار دگرگونی شده‌اند. نوع چهارم از ترکیب دو یا سه نوع از انواع پیشین.

۱-۱۲-۱ نوع فراتیک

در این نوع، مقطع گذرگاهها، مقطع ایده‌آل مدور (با حداقل اصطکاک) مانند مقاطع استاندارد لوله‌ها است. پیدایش نخستین غارها ممکن است همراه مقطع دایره کامل باشد که پس از آن در جهات افقی و عمودی درز و ترکها و یا در اثر برخورد و همراهی هر دو جهت آنها، این نوع غارها گسترش یافته‌اند. بر پایه نظرات فورد و دیگران^۲ (۱۹۸۳) غار کستل^۳ در کانادا نمونه بارزی از این نوع بوده که با محیط دایره‌ای شکل به اندازه ۴ متر و درازای ۵۰۰ متر شکل گرفته است. این غار در راستای لایه‌بندی داخل سنگ آهکهای متبلور، متراکم و سخت همراه جریان تندآب شکل گرفته است. گرچه بسیار محتمل است، مقطع در امتداد ترک به‌وجود آورنده غار، کشیدگی و شکلی نامنظم به خود گرفته باشد (شکل ۱-۱۳-ب). همچنین رویه آنها با نهشته‌های کلاستیکی و یا چرت پوشیده شده است و به‌سوی بالا گسترش دارد. به‌طور کلی جریان آرام است (همانگونه که در اکثر غارهایی که بر اثر جریان آب گرم و یا سایر جریانهای متقاطع فراتیک شکل گرفته‌اند) و فرایند انحلال به‌صورت انتخابی در هریک از انواع مسیرهایی که امکان گسترش خوردگی در آنها میسر و مهیا باشد پیش رفته که اغلب در سطح لایه‌بندی و بسیار نامنظم می‌باشد. در شکل ۱-۱۳-الف تا ه حالت د و ه پیشرفت نهایی اینگونه خوردگی و انحلالها را نشان می‌دهند که منجر به شکل‌گیری دیواره‌های غار به‌صورت لانه زنبوری می‌شود. نمونه آنها در بونیارد^۴، غارهای منطقه کارلسباد است که در لایه‌های سنگ آهکی حفره‌دار و مرجانی به‌وجود آمده است.

احتمالاً اکثر گنبدهای انحلالی تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرایندهای خوردگی و انحلالی که با هم رخ می‌دهد، به‌وجود آمده‌اند. آب داخل توده خاک که به سوی درز و شکافها هدایت می‌شود ایجاد معابری باریک کرده که در محل برخورد آنها گستردگی بیشتر می‌شود. پس از آن با روان شدن سیلابها، مسیر اصلی گشادتر می‌شود. همچنین جریان تند و با شتاب که همراه مواد شیمیایی خورنده است وقتی به محل تقاطع درز و شکافها رسیده سبب ایجاد گذرگاههای بزرگ و گشاد همانگونه که در شکل ۱-۱۳ و مشخص شده است، می‌شود. پاره‌ای مقاطع گرد و فنجانی شکل ممکن است بر اثر جریان آبهای گرم شکل گرفته باشند.

1 - Shaft
2 - Ford et al
3 - Castle
4 - Boneyard



شکل ۱-۱۳- پیدایش گنبدهای انحلالی

گنبدهای انحلالی : گنبدهای انحلالی یکی از جالب‌ترین انواع سیمای غارهای فراتیک هستند که موجب حیرت زمین‌شناسانی می‌شوند که آشنایی با غارشناسی ندارند. اینگونه غارها در سقف یا دیواره به‌وجود آمده و ممکن است تا ۴۰ متر پیشروی کنند. بسیاری از آنها پس از برخورد با نواحی متراکم بدون تخلخل متوقف می‌شوند. سیمای آنها ممکن است منفرد و یا چندتایی باشد (شکل ۱-۱۳).

۱-۱۲-۱ گذرگاههای پارائنسبز^۱، لوله‌های سقفی و آویخته

همانگونه که بررسی‌کنندگان فرانسوی [رنو و دیگران^۲ (۱۹۶۸)] گزارش کرده‌اند منظور از گذرگاه پارائنسبز عبارتست از هر نوع گذرگاه آبهای زیرزمینی و فراتیک که فرایند انحلال در تقاطع درز و شکافها در محلی که مواد کلاستیک و درجا انباشته شده‌اند، رخ داده است. محققین انگلیسی معتقدند که اینگونه خوردگی و انحلال پس از بالا آمدن تراز آب و ثابت شدن آن به‌وجود می‌آید. پاسینی^۳ (۱۹۷۳) اینگونه انحلال را به نام خوردگی^۴ نامیده است (قسمت «ح» از شکل ۱-۱۳).

گذرگاههای پارائنسبز در لوله‌های اصلی بزرگ شکل می‌گیرند. با بزرگ‌تر شدن و رسیدن جریان آب زیرزمینی به‌حد اکثر، شدت جریان ممکن است کاهش یابد و در محل‌هایی که غیرقابل انحلال هستند رسوبات به جای گذاشته‌شود. این فرایند موجب مسلح شدن بستر و بخش زیرین دیواره‌های گذرگاه می‌شود و در نتیجه فرایند انحلال به‌سوی بالا، روی دیواره‌های ضخیم و ستون مانند پیش می‌رود. دامنه عمودی چنین گذرگاههای پارائنسبز گاه متجاوز از ۵۰ متر خواهد بود. البته به‌طور چشمگیری سقف هموار غار به سوی شیب لایه‌ها پیش می‌رود و سرانجام در محل برخورد تراز آب زیرزمینی خاتمه می‌یابد.

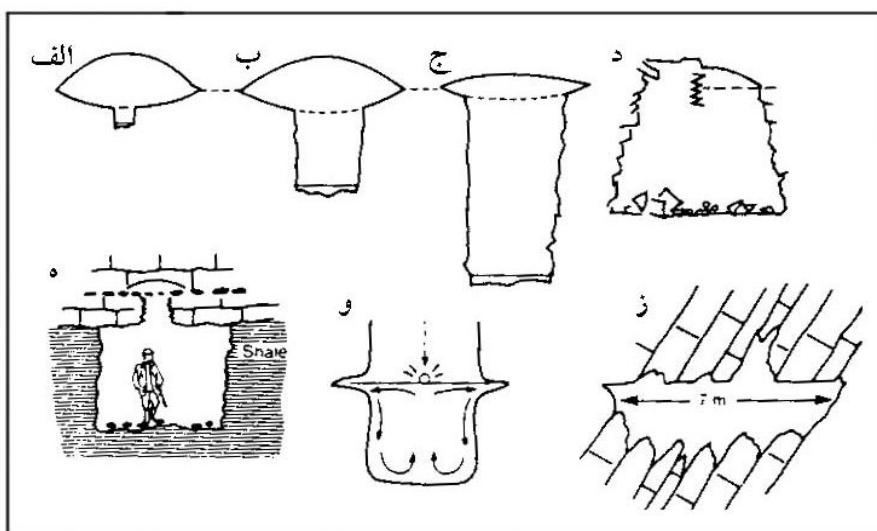
1 - Paragenesis
2 - Renault et al
3 - Pasini
4 - Antigravitative

سقفهایی که به صورت نیم لوله باشند، کوچک هستند و اکثراً خم دار (مئاندری) هستند. کانالهایی که تمایل به سوی سقف دارند و پاره‌ای از گذرگاههای بزرگ توسط مواد کلاستیک و تخریبی کاملاً پر می‌شوند. برای نمونه این گذرگاهها موجب گسترش گذرگاههایی می‌شوند که مسیر آنها پر شده و جریان با سختی از آنها می‌گذرد. گرچه به‌طور معمول نقاط تشکیل گذرگاهها به‌صورت افقی در دیواره‌ها شکل می‌گیرند.

گذرگاههای آزاد که دارای مسیرهای انحلالی و بهم پیوسته پیچیده‌ای به شکل کانال در سقف و دیواره‌های غار هستند، اکثراً در مناطقی شکل می‌گیرند که جریان آب آرام و پیوسته است نه در لایه‌های غیرتراوای رس‌دار زیرا این بخشها به‌عنوان انتقالی به حساب می‌آیند.

۱-۱۲-۲ گذرگاههای آب همزاد

گذرگاههای آب همزاد، شبکه‌ای از مسیرهای کانال فام پهن و باریک می‌باشند. در مرحله اولیه توسعه، گذرگاههای مزبور به شکل فراتیک در زیر کف غار شکل می‌گیرند (شکل ۱-۱۴-الف).



شکل ۱-۱۴- سامانه غارهای انحلالی در سنگهای کربناته

اینگونه گذرگاهها دلالت بر آن دارد که جریانهای محلی فراتیک گاه تکرار مسیرهای پیشین است که امروزه به صورت زهکشهای کارست سطحی هستند. شکل T مانند یا گذرگاههای کلیدی شکل (شکل ۱-۱۳-ب) دلالت بر آن دارد که این گذرگاهها اکثراً از حالت فراتیک به شرایط وادوس (همزاد) تغییر یافته‌اند (شکل ۱-۱۴-ج) و نشانگر افت در ریختار وادوس است. در آنها مسیر اصلی یا مسیر نخستین فراتیک بوده و مانند کانال شکل گرفته‌اند. گذرگاههای عمیق تا ژرفای ۱۰۰ متر نیز شناخته شده‌اند. آنها به صورت دره‌های عمیق دارای سقف هستند.

بسیاری از جریانهای وادوس دارای نیمرخهای برابرند و همراه با انباشت بار بستر هستند که تنها سیلابها آن را به حرکت درمی‌آورند. بار بستر میانی، محل انحلال دیواره‌های کانال می‌شود. فروریختگیهای زیاد همراه سنگهای بزرگ در داخل کانال دیده می‌شود که موجب به انحراف کشاندن جریان در جهات دیگری می‌شود. با فرسایش بخشهای زیرین، مقطع ذوزنقه‌ای و پایدار به وجود می‌آید (شکل ۱-۱۴-د). اینگونه مقاطع فراوان دیده می‌شوند.

تمامی اینگونه کانالهای وادوس ممکن است بر اثر عمل انحلالی به تنهایی شکل گیرند ولی فرایند فرسایش مکانیکی را نباید از نظر دور داشت. این پدیده و پیدایش آن همراه شواهدی بسیار حاکی است از عمیق‌تر شدن مسیر و یا لایه‌های غیرقابل نفوذ در زیر سنگ آهک آنها در محلی که انحلال نخستین در آن رخ داده است (شکل ۱-۱۴-و).

۱-۱۲-۲-۱ کانالهای خم‌دار (مئاندری)

سه نوع جریان خم‌دار (مئاندری) در گذرگاههای وادوس شکل می‌گیرد. گسترش معابر عمیق خم‌دار (مئاندری) در مرحله‌ای که آبشارها با پس‌نشینی مسیر به وجود می‌آیند، صورت می‌گیرد. گذرگاههای عمیق دارای این نوع جریان معمولاً در لایه‌های هموار افقی در جاهایی که مناطق (زونهای) عمیق وادوس همراه با جریانهای مهاجم وجود دارند، شکل می‌گیرند. برای نمونه، می‌توان کارست مرکزی کنتاکی را ذکر کرد.

خمهایی (مئاندرهایی) که رشد چندانی ندارند با خمهایی (مئاندرهایی) که به سوی پایین و افقی فرسایش می‌یابند، شکل می‌گیرند. شکل ظاهری آنها به شکل گردن غاز است که از معروف‌ترین آنها غار سن خواس ربور را می‌توان نام برد که هیچگونه پس‌نشستی در آبشار برای شکل‌گیری آن وجود ندارد. این غارها در لایه‌های سنگ آهکی که خوب لایه‌بندی شده‌اند به وجود می‌آیند. نمونه‌های بسیار زیادی از آنها که دارای چندین متر عمق و چندین کیلومتر درازا، ولی بسیار باریک است از اکثر نواحی می‌گذرد (اسمارت و براون^۱، ۱۹۸۱).

خمهای (مئاندرهای) آبرفتی در کانالهای ماسه‌ای، شنی و غیره در پهنه گسترده‌ای شکل می‌گیرند. دیک و وایت^۲ (۱۹۶۹) به نمونه غارهای میسوری که ریختار بستر آنها در آبرفتهای خم‌دار (مئاندری) شکل گرفته است اشاره می‌کنند. از ریزش آب تا ژرفای ۴۰۰ متری، آبگذرهای حفره‌ای با حفره‌های منفرد تشکیل شده است. آنها در دو ردیف حداقل و حداکثر هستند. اول آنهايي که بر اثر ریزش آبی پرتوان و پرانرژی به وجود آمده‌اند، دوم به شکل گنبدیهای کوچک که بر اثر ریزش مداوم و کم توان آبهای با مقدار کمتر به وجود می‌آیند. در حالت اول، ریزش آب، حفره‌ای به شکل دایره یا بیضی به وجود می‌آورد. حوضچه‌های آرایش یافته بر اثر ریزش آب، شکل نامنظمی در محل ریزش تشکیل می‌دهند که به سوی بالا دندانهای است و امکان فروریختن دندانهای بالایی به پایین فراوان است، از این رو بسیاری از حفره‌ها ناهنجار و نامنظم هستند.

1 - Smart and Brown

2 - Deike and White

یک گنبد کوچک ممکن است بر اثر جریان در یک سیستم کارست سطحی و یا تراز آب زیرزمینی که بالای لایه‌های شیل و غیره قرار دارد، به وجود آید. در چنین حالتی امکان زهکشی به منطقه (زون) مهاجم میسر است. در حالت ایده‌آل جریان به گونه‌ای کوچک است که مانع کشش سطحی در لبه بالایی می‌شود. جریان به صورت شعاعهایی از محل ورودی آب به پیرامون بوده و مجموعه‌ای از غارها را به سوی دیواره تشکیل می‌دهد. مقاطع آنها دایره‌ای است. گنبدهای کوچک در لایه‌های افقی و درز و شکافها محدود بوده و مقاومت آنها بالاست. یک نمونه از این نوع غارها، غار ماموت (ماریل ۱۹۶۰) است. بسیاری از حفره‌ها به شکل مرکب، همراه آبشارهایی است که گاه در راستای گسلها شکل گرفته‌اند.

۱-۱۲-۳ خوردگیهای طبیعی^۱

این جریانها در شرایط آبهای ماندگار به وجود می‌آیند، لذا کمترین گرادیان چگالی آب به سرعت مناطقی (زونهایی) را به وجود می‌آورد که دارای شتاب خوردگی است. در آبگیرهای راکد داخل سنگ آهکها، یونهای سنگین رسوب می‌کنند و موجب آزاد کردن هیدروژن (H^+) تازه در تراز آب روی دیواره می‌شوند (شکل ۱-۱۴-ز). یک شکاف^۲ متمایز ممکن است در این محل گسترش یافته و توسعه آن تا یک متر نیز ادامه یابد و بر پایه آن با دقت تمام، ممکن است تراز آب دیرینه را معین کرد. اینگونه معابر ممکن است در پایه غارهای کارست به جای مانده بزرگتر شود و در راستای دامنه آبرفت‌های ناشی از سیلاب گسترش یابد (شکل ۱-۱). این معابر با نوسانات فصلی تراز آب دریا تا چندین متر داخل توده‌های سنگ پیشروی می‌کنند که به نام شکافهای باتلاقی^۳ نامیده می‌شوند. از آنجا که به صورت بسیار تهاجمی عمل می‌کنند، صرفنظر از ساختمان زمین‌شناسی، ایجاد یک سقف هموار می‌نمایند. بنابر نظر کمپ و دیگران^۴ (۱۹۷۵) آنها را به نام لبه‌های فرسایش یافته^۵ می‌نامند. بزرگترین نوع آنها در شرایط فوق اسیدی و سولفیدی به وجود می‌آید. برای نمونه، در معدن نانی‌سیویک^۶ در جزایر بافین^۷، بزرگترین شکافها به پهنای ۴۰۰ متر و ژرفای یک متر وجود دارد که با لایه‌های پیریت اندود شده است.

۱-۱۲-۴ انحلال و برخاستن الگوهای مدور کنگره‌دار^۸

در اینگونه گذرگاههای انحلالی گنبدی شکل، انحلال به شکل مدور و یا قاشقی^۹ به طور منفرد و با پوشش داشتن روی یکدیگر توسعه می‌یابد. توده سنگهای آهکی یکنواخت متوسط تا ریزدانه، کانال و دیواره‌ها را پوشانده است، مانند غارهای فراتیک.

دیواره‌های پرشیب به سوی حوضه‌های آبگیر متمایل هستند. برای نمونه در این حالت گذرگاههای دیرینه جریان را می‌توان دید. اکثریت اشکال کنگره‌دار دارای درازای یکسان هستند. طول کنگره‌ها بین ۰/۵ تا ۲۰ سانتیمتر است و به طور اتفاقی تا

1 - Facets, Bevels

2 - Notch

3 - Swamp Notches

4 - Kempe et al.

5 - Corrosion Bevels

6 - Nanisivik

7 - Baffin

8 - Dissolution and Sublimation Scallop Patterns

9 - Scallop

۲ متر نیز می‌رسد. در شرایط مناسب ممکن است سیمای آنها به صورت مجموعه‌ای پایدار خودنمایی کند که در سطح قابل دسترسی هستند. کرل^۱ در سال ۱۹۶۶ یک دیدگاه جدیدی درباره سازند کنگره‌دار بر پایه جداسازی مرز سیال اشباع در رژیم جریان آشفته، بیان کرده است به این صورت که جداسازی منجر به هجوم خوردگی و انحلال و جداسازی بخش سخت به صورت مستقیم شده و این امر نیز به نوبه خود موجب بهم خوردن بنیاد یونی می‌شود. این ایده در روشهای آزمایشگاهی توسط گودچایلد و فورد^۲ (۱۹۷۱)، آلن^۳ (۱۹۷۲)، بلومبرگ و کرل^۴ (۱۹۷۴) و برای زمینه‌های به وجود آمدن غارها توسط گیل^۵ (۱۹۸۴) تحقیق و بررسی شده است. درازای کنگره‌ها با سرعت جریان نسبت معکوس دارد [لوریتزن و دیگران^۶ (۱۹۸۶)]. حداکثر ۲ تا ۵٪ کنگره‌هایی که در غارهای نروژ شکل گرفته است، در پیوند با تخلیه سالانه سیلابها است. در آثار انحلال غارها، کنگره‌ها نشانی از تخلیه‌های دیرین است.

۱-۱۳ سیمای فروریختگی غارها

فروریختگی (ویران شدن سنگ کف، دیواره‌ها، سقف و گاه تمامی غار) ممکن است در ارتباط با دلایل مختلفی باشد. مهمترین آنها عبارتند از (الف) از بین رفتن پوشش توسط آب در زمانی که زهکشی در غار فراتیک صورت گرفته است. (ب) خراب شدن پی دیوار یا بهتر شدن سقف بر اثر جریان فرسایش افقی وادوس و (ج) تهاجم انحلالی در شکستگیها و فروریزش انبوه که موجب بهم خوردگی لایه‌بندی شود. زمین‌لرزه نمود چندان ندارد. با وجود این به خوبی روشن شده است، اکثریت فروریختگیها منفرد بوده نه پیوسته. شرایط مناسب در محل برخورد رودخانه‌ها با موانعی که در مسیر، موجب انباشت کانالهای گذرگاهی شده است امکان فرسایش یافتن از زیر را به وجود آورده است، به ویژه اگر همسو با شکستگیهایی که به سقف غار می‌رسند، باشد. گسترش فروریختگی در غارها، در غارهای جدید و جوان یا غارهای کوچک رخ می‌دهد و یا آنکه به طور نادر در توده‌های سنگی با کامل شدن انبوه غارهای قدیمی که همراه لایه‌های متوسط تا نازک هستند، رخ می‌دهد (تمام سقف غار سقوط نموده تا به مرحله تعادل نیروهای کششی در قوسهای غار برسد). بزرگترین انحلال بدون خردشدگی در توده‌های ریفی که بدون لایه‌بندی هستند، دیده شده است. غار کارلسباد از نمونه‌های برجسته‌ای است که معمولاً به پهنای ۴۰ تا ۵۰ متر و بلندی تا ۸۰ متر، ولی با فروریختگیهای اندک در لایه‌های متوسط تا ضخیم، که به صورت افقی می‌باشند در غار ماموت کنتاکی، وجود دارد. قدیمیترین گذرگاه غار (که ۱۰ تا ۲۵ متر پهنای دارد) نمایانگر فروریختگی کامل است. گنبدهایی که تحت تأثیر عوامل برشمرده شده فروریختگی قرار داشته، خراب شده‌اند و آنها که به دور از نیروها و کنش و برکنشهای ویرانی بوده‌اند، دست نخورده پابرجا مانده‌اند. در تمام مواردی که شیب‌لایه‌ها کمی از حالت افقی خارج شده است، شیبها رو به بالا گرایش به ویرانی را در دیواره‌های غار به نمایش گذاشته‌اند. افزون بر خردشدگیهای آشکار و سقوط، لایه‌های الاستیک و متورم آرتزلی به طور معمول دیده می‌شود. شکستگیهای موضعی در رخنمون برشهای^۷ دیرینه فراوان گزارش شده است که منجر به پاره‌ای جابجایی‌ها شده است.

1 - Curl

2 - Good Child and Ford

3 - Allen

4 - Blumberg and Curl

5 - Gale

6 - Lauritzen et al.

7 - Breccia

آثار به جا مانده عبارتند از (الف) تخته سنگها که اتصال آنها با یک لایه صورت گرفته است (ب) قطعات چهارگوش به صورت کامل یا شکسته شده (ج) خردسنگها که از لایه‌های تشکیل یافته از اجزای دیگر به وجود آمده‌اند (د) بلوکهای منفرد بزرگتر از ۲۵۰۰۰ متر مکعب نیز دیده شده که از لایه‌های آهکی ریف^۱ به وجود آمده‌اند. این بلوکها در غار کارلسباد دیده شده است. قطعات تخت سنگ^۲ خرد شده معمولاً در لایه‌هایی که به صورت نازک تا ضخیم لایه و به صورت افقی هستند مانند غار ماموت دیده می‌شود. خردسنگها طیف گسترده‌ای داشته و در پیوند با بافت سنگ می‌باشند. نسبت سنگهایی که سقوط کرده و بر اثر جریان جابه‌جا شده‌اند، شامل طیف گسترده‌ای از صفر تا بسیار زیاد می‌باشد. جابه‌جایی کامل در محلهایی که جریان وادوس وجود داشته باشد، دیده می‌شود. اثر قسمت و یا تمام فروریختگیها در گذرگاهها قابل ردیابی است. گاه ممکن است خردسنگها مسیر را کاملاً مسدود کنند.

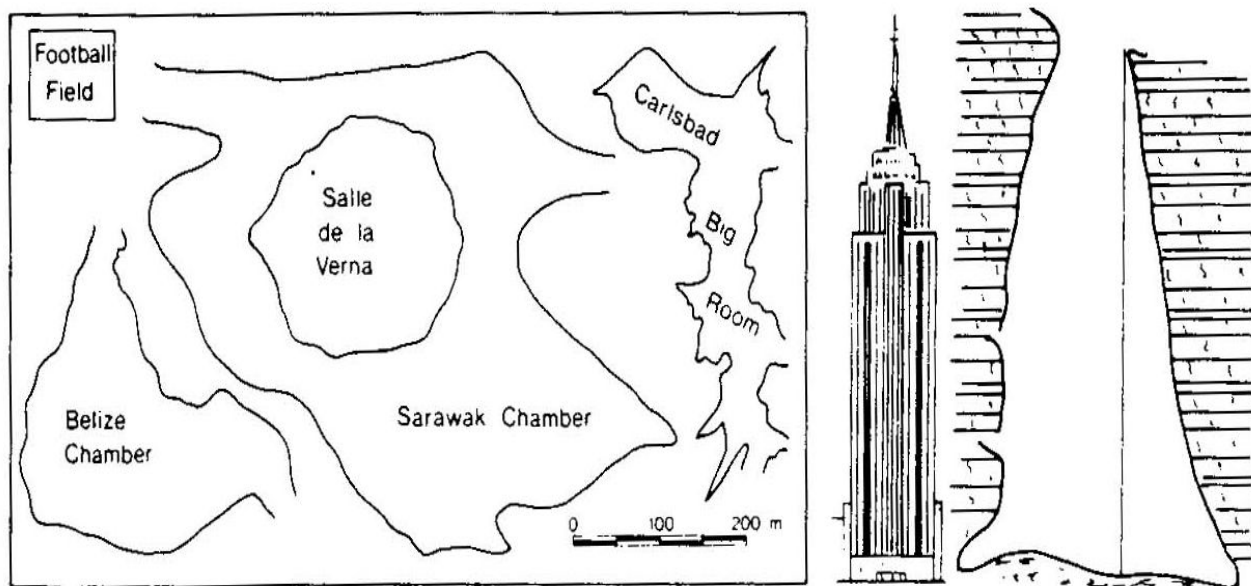
۱-۱۴ بزرگترین غار شناخته شده بر اثر منفذهای توده سنگ

منفذهای بزرگ در اصطلاح غارشناسی توسط آمریکاییها به نام اتاقها^۳ و توسط انگلیسیها سلول^۴ نامیده شده است. بزرگترین نمونه آن در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است که دارای بزرگترین تنوره است. سلول ساراواک^۵، در سال ۱۹۸۰ توسط والتام و بروک^۶ کشف شده که حدود ۲۰ میلیون متر مکعب حجم دارد. سلولهای بلیتس^۷ سال‌دولاورنا^۸ و اطاق بزرگ کارلسباد هریک بیش از یک میلیون متر مکعب حجم دارند. صدها اتاق در حجمهای یکصد تا ۵۰۰ هزار متر مکعب نیز وجود دارد. اکثریت عمده این اتاقها، متمرکز در گذرگاه رودخانه‌های وادوس هستند که از زیر دچار فرسایش و انحلال و جابه‌جایی قطعات فرو ریخته شده‌اند. علت به وجود آمدن اتاق بزرگ غار کارلسباد و پاره‌ای سلولها در شرایط هیدروترمال ممکن است بیشتر در اثر خاکبرداریها و اثرات خوردگی و فرسایش باشد تا مسائل فروریختگی.

۱-۱۵ پرشدگی در غارهای انحلالی

اکثریت عمده غارهای اکتشافی آهکی بر اثر فرایند انحلالی گردش آبهای جوی و زیرزمینی بدون هیچگونه مانع و محدودیت در مسیر گردش آب به وجود آمده‌اند. اساس شکل‌گیری و تبلور آنها امروزه به خوبی شناخته شده است. گرچه تشریح محل آنها و اندازه هندسی گذرگاهها در سنگ مهمان قابل پیش‌بینی نیست. زیرا میزان احتمالات^۹ در شکل‌گیری آنها زیاد است. شرایط چند فازي در شکل‌گیری غارهای بزرگ نیز زیاد است. سیستمهای بزرگتر کنونی متجاوز از یکصد کیلومتر و تا ژرفای ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر نیز کشف شده‌اند. همچنین اتاقکهای به حجم تا ۲۰ میلیون متر مکعب نیز شناخته شده‌اند.

1 - Back reef
 2 - Slab
 3 - Rooms
 4 - Chambers
 5 - Sarawak
 6 - Waltham & Brook
 7 - Belize
 8 - Salle de la Verna
 9 - Stochastic



شکل ۱-۱۵- بزرگترین غار شناخته شده بر اثر منفذهای توده سنگ

شبکه‌های مشابه متقاطع اولیه به عنوان بخشی از ناهنجاریهای غار شناسایی شده‌اند. آنها بر اثر سیلابهای محلی، توسعه آرتزینها و یا گسترش آبهای محبوس به وجود می‌آیند. بیش از ۱۰ درصد غارهای اکتشافی شناخته شده بر اثر آبهای گرم، سرشار از CO_2 به وجود آمده‌اند. آنها آرایش شاخه درختی و یا شبکه‌های مشابه دو یا سه بعدی متقاطع با هم دارند. پاره‌ای حفره‌های بزرگ سرچشمه میدانهای نفتی بوده و ممکن است همراه آبهای هیدروژن سولفور H_2S و یا اکسیدکننده باشند. بسیاری از غارها در نواحی‌ای که رسوبات نمک در کنار جریان آب شیرین ساحلی است به وجود می‌آیند، گرچه غارهای جدید بر اثر نوسانات آب دریا در زمان معاصر به وجود آمده‌اند.

مقطع غارها بر اثر فرایند جریان فراتیک یا وادوس یا مکانیکی و یا مخلوطی از همه آنها می‌باشد. مقاطع فراتیک بر اثر انحلالهای مختلف دو لایه مسلح (انبانها و پارائنز^۱) بسیار پیچیده هستند. مقاطع وادوس کنگره داراریب فام، دارای شکستگی و فروریختگی هستند. انحلال کنگره‌دار در توده‌های سنگ یکنواخت ریزدانه، صورت می‌گیرد. اینگونه انحلالها نمایشی مهم از فرایند هیدرولیک دیرینه است.

مجموعه‌های گسترده‌ای از نهشته‌های کلاستیک در غارها دیده شده‌اند که از بین آنها رسوبات رودخانه‌ای جایگاه ویژه‌ای دارند. شناخت رخساره و تحلیل هیدرولیکی باید با دقت انجام گیرد زیرا سطوح لغزشی که در آنها وجود دارد منجر به شکل‌گیری سد و فرایند الک شدن شده است که در سطح کانالهای باز دیده نمی‌شود. بیش از یکصدگانی ثانویه در غارها شناخته شده است. کلسیت بیشترین حجم کانی را در غارها به وجود آورده و از شرایط دیرینه دوباره بازسازی شده می‌باشد.

۱-۱۵-۱ رده‌بندی پرشدگی غارها

غارها ممکن است به عنوان تله‌ای برای نهشته‌ها به حساب آیند و محل انباشت تمام انواع رسوبات رودخانه‌ای، شیمیایی و ارگانیک هستند که در زمان زایش و پویایی غار در آن جمع شده‌اند. در این نوشتار، این نهشته‌های درون غاری فقط از دیدگاه مزبور بررسی شده و از مسائل پیچیده و ورود به مواردی که باستان‌شناسان و انسان‌شناسان در مطالعه غارها می‌نگرند، خودداری شده است. اکثراً ورودی غارها به صورت بکر و کارست دیرینه مدفون نیستند. همچنین در این رده‌بندی از ویژگی نهشته‌هایی که پیشروی دریا موجب پایان دادن فرایند کارستی‌شدن در آنها شده است، خودداری گردیده زیرا مراحل فرسایش و مدفون شدن سیمای کارستی توسط رسوبات بعدی، مانع اکتشاف آنها می‌شود. رسوبات جدول ۱-۲ را فقط به صورت ناپایدار با شبکه کارست فرسایش یافته می‌توان به حساب آورد ولی با این حال تنوع آنها چشمگیر است. گسترش آنها از صفر در بسیاری از غارها و یا به صورت پرشدن بخش زیاد و یا کامل غار است.

۱-۱۵-۱-۱ رخساره‌های اصلی کلاستیک و ارگانیک

نهشته‌های اصلی کلاستیک، فروریختگی زیاد و رویهم انباشت شده هستند که در مسیر رودخانه و جریان آبراهه‌ها حمل و به‌وجود آمده‌اند. اکثریت این نهشته‌ها از رودخانه‌های طبیعی و سیلابها سرچشمه می‌گیرند.

جابه‌جایی مصالح و رسوب کردن آنها ممکن است با انرژی زیادی انجام گیرد. در غارهای پرشیب آلپ که به‌طور روزانه آب برف دریافت می‌کنند، شتاب جریان مانند سیفون دستشویی است. نهایت جابه‌جایی ذرات و حداکثر اندازه هندسی آنها را می‌توان از مقطع جریان تشخیص داد. سنگهای بزرگ در حاشیه کناری بین کف و سقف غار فراوان دیده می‌شوند. در این غارها انبوه قلوه سنگ، ریگ و شن به صورت ناهمگون به شکل تنوره‌های بزرگ تا ارتفاع ۵۰ متر شناخته شده است.

در انواع رخساره‌هایی که دارای دانه‌بندی بی‌نظم تا بد هستند مخلوطی از تمام اندازه‌ها تا اندازه بولدرها (درشت‌سنگها) همراه با مقداری سیمان از ذرات کوچکتر وجود دارد که موجب استحکام آنها شده است. بخش بالایی اکثراً هموار و متشکل از ماسه و شن خوب دانه‌بندی شده است. این بخش مانند سطحی لغزنده است.

در اکثر غارها نهشته‌ها (به شکل خیزآب^۱، شن روان^۲ و غیره) گزارش شده است. گرچه موج بستر^۳ به ندرت شکل می‌گیرد. بدیهی است که لایه‌های لغزنده در اکثر موارد جانشین موج بستر می‌شوند.

لای و رسها از متداولترین و گسترش یافته‌ترین نهشته‌ها به حساب می‌آیند. اندازه دانه‌بندی آنها در جهت افقی از مرکز گذرگاه و از اعماق به بالا دانه ریز می‌شود. اینگونه رسوبات، دیواره‌ها، کف و سقف را می‌پوشانند. رشد همزمان آنها به صورت ورقه‌ای و موازی با سطوح نهشته‌های سطحی است. بنابر دیدگاه بول^۴ (۱۹۷۷) ضخامت لایه‌ها همسان بوده و گرایش به سوی بالا دارند. این نهشته‌ها در اثر سیلابها و یا جریانهای تند موقتی به‌وجود می‌آیند. بنابر نظر بوگلی^۵ (۱۹۶۱) برخی توده‌های رس بدون لایه‌بندی و از مواد معلق همسان در یک شرایط پایدار به‌وجود آمده‌اند.

1 - Ripple
2 - Dunes
3 - Antidune
4 - Bull
5 - Bogli

نسبت رس به سیلت معمولاً از ترکیب کانیهای رس و کوارتز ریزدانه است. گرچه، در نواحی یخچالی، اجزای کربناتها معمولاً از ۲۰ تا ۸۰٪ یا بیشتر، بر اثر دوباره به وجود آمدن از لایه‌های پیشین محل بوده است. گستره متنوعی از رخساره‌ها در غارهای فراتیک به وجود می‌آید که معمولاً اکثریت لایه‌ها از رس و سیلت هستند. نهشته‌های پاراژنتیک^۱ ممکن است شامل ماسه و حتی ریگ باشند که به طرف بالا تبدیل به ریزدانه می‌شوند. نهشته‌های ریزدانه در آبهای گرم و شبکه‌های مشابه متقاطع هستند. استاندارد مناسب در آبهای وادوس، تراز آب زیرزمینی و کانالهای کم ژرفای فراتیک شامل رسوبات خاکبرداری و خاکریزی شده در یک مکان است که در راستای افقی تبدیل به ریزدانه می‌شود. در هریک از این محلها ممکن است توده‌های لغزیده‌ای نیز در پایه وجود داشته باشد. مجموعه‌های رها شده مشابه هم هستند ولی رسوبات پیشرفته به‌طور مشخص به سوی بالا تبدیل به ریزدانه می‌شوند. ضمن آنکه روند رسوبگذاری در اثر انباشته شدن توده‌های رسوبی ناشی از سیلاب متوقف و رها می‌شود.

جدول ۱-۲- نهشته‌های داخل غار

(الف)

A

Allochthonous Clastic

1- Fluvial

۱- رودخانه‌ای

انواع مختلف - (اکثریت الوکتن)

2- Deglecta Cones Colluvium & Mudflows

۲- مخروط‌های انباشته شده واریزه‌ای (مدفوع و گل روانها متداول است).

3- Filtrates

۳- صافیها (مخروط ریزدانه‌های رسوب کرده در اثر تراوشها، در حجم کمتر)

4- Lacustrine

۴- رسوبات دریاچه‌ای (به ندرت سیلاب، رس و ماسه ریزدانه)

5- Marine

۵- رسوبات دریایی، (به ندرت رخساره‌های ساحلی در ورودی)

6- Eolian

۶- رسوبات بادی، (معمولاً چندان چشمگیر نیستند).

7- Glacial & Glaci - Fluvial Ingecta

۷- یخچالی و یخچالهای رودخانه‌ای (متداول در نواحی یخچالی)

8- Subglacial Lacustrine Organic

۸- دریاچه‌های یخچالی (اکثر گدازه صورت مواد مطبق آلی)

9- Fluvial of Eolian Transported

۹- رودخانه‌ای و یا جابه‌جایی با باد (بدنه درختها و گرده‌های گیاهی)

10- Cave - Using Exterior Fauna

۱۰- آرایش درونی غارها (استخوان، آشیانه پرندگان و توده شن بادآورده)

B.

(ب)

Autochthonous Clastic

11- Breakdown

۱۱- فروریختگیها

12- Fluvial

۱۲- رسوبات رودخانه که فروریختگیها را حمل کرده است.

13- Ineathering Rinds & Earths

۱۳- لایه هوازده از قشر پوسته زمین

14- Eolian

۱۴- رسوبات بادی (از تمامی نهشته‌های بالا، چه ته‌نشینی و چه تبخیری بیش از ۱۰۰ نوع کانی ثانویه در غارهابه‌وجود می‌آیند).

15- Calcite

۱۵- کلسیت (اکثریت به صورت اتوکتون^۱)

16- Other Carbonates, Hydrnted Carbontes

۱۶- سایر کربناتها، کربناتهای آبدار

17- Sulfates, Hydrated Sulfates, Halides

۱۷- سولفاتها، سولفاتهای آبدار، نمکها

18- Phosphates & Nitrates

۱۸- فسفاتها و نیتراتها

19- Silica & Silicate

۱۹- سیلیکات و سیلیکاتها

20- ORE - Associated Mineral

۲۰- سنگهای معدنی و کانیهای وابسته

21- ICE - Organics

۲۱- یخ (به صورت یخهای تزریق شده، آبهای یخ بسته، و لایه‌های یخ‌زده خاک)

22- Tracks & Remains of Cave - Adaptey (Hypogean) & Phreatophyte Facina

۲۲- اثرات به جای مانده در غار (زیرزمینی) و فسیل گیاهانی که ریشه آنها در آبخوان و یا بالاتر قرار دارد.

زمانی که بر اثر فروریختگی در مسیر جریان سدی به وجود می‌آید، تنوع رسوبات بسیار چشمگیر است. بیشترین نهشته‌ها به صورت موازی یا دلتایی در بالادست هستند، که از پایین به سوی بالا ریزدانه می‌شوند. در پایاب، لایه‌های روباره است که توسط نهشته‌های پیشین رسوبگذاری شده و حتی می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کامل شستشوی لایه‌های پیشین صورت گرفته است. اگر اکثر رسوبات سد جابه‌جا شود، یک آبگیر، بادافشان^۲ و نهشته‌های خاکبرداری و پر شده در همان محل به جای می‌ماند. تأکید می‌شود نهشته‌های به وجود آمده از جریانهای داخل غار بسیار پیچیده بوده و نیاز به تجزیه و تحلیل متنوعی دارد. در هر غاری در صورت انباشت مدفوع حیوانات به شکل هرم مانند که اجزای مختلف آن با هم جمع شده‌اند، فروغلتیدن مواد از دامنه‌های پرشیب به سوی هرم بسیار متداول است.

یخرفته‌های انبوه یا رسوبات حاصل از ذوب برف و خاشاک ایجاد یک رخساره تزریقی می‌کند و به این صورت می‌باشند که ورودی گذرگاه با خرسنگهای بزرگ مسدود شده و در آنها دنباله‌ای از ماسه و شن جلو آمده که این مواد سریعاً ریزدانه می‌شوند. مواد با منشأ گیاهی در سراسر غارها بسیار متداول دیده می‌شود. این مواد بیشتر در جاهایی دیده می‌شوند که مواد کلاستیک همراه بدنه درختان که پوسیده شده و سقوط کرده‌اند همراه با انبوهی از خاشاک، نهشته‌ها را شکل داده‌اند.

جانوران به ویژه جوندگان، ممکن است در آخرین بخشهای غار، لانه‌سازی کنند. آشیانه و زباله‌ها معمولاً حجم‌ناچیزی را تشکیل می‌دهند که به خوبی قابل تشخیص هستند، گرچه زباله‌ها ممکن است به چندین متر رسیده و جزءپوسته خشک زمین

1 - Autochtone

2 - Winnow

شوند. جایگاه عبور جوندگان از لایه‌های کلاستیک ممکن است آهنگ چینه‌بندی را بهم ریخته و از این راه موجب سقوط بالاترین لایه‌ها به بخشهای زیرین شود. گرچه این مشکل تنها در ورودی غارها مشهوداست. نهشته‌های ویژه دارای فسیل (سالاماندرهای کور^۱ که تمام عمر را در غار زندگی می‌کنند) ناچیز است.

۱-۱۵-۲ رسوبات و مواد تبخیری در غارها

بیش از یکصد نوع کانی ثانویه در نهشته‌های غار شناسایی شده است. پاره‌ای رسوبات آبدار تنها تحت حرارت و رژیم رطوبتی پایدار، در عمیق‌ترین گذرگاههای غارها شکل می‌گیرند. در این راستا هیل و فورتی^۲ (۱۹۸۶) مطالعات جالبی کرده‌اند.

– کلسیت

غارهای کلسیتی، به صورت تراورتن، رسوب چشمه‌های معدنی آبگرم یا سرد^۳ و یا سازند غار^۴ از عمده‌ترین رسوبات اتوکتون^۵ در شرایط دیرینه رسوبگذاری غارها هستند. این نهشته‌ها در ورودی غار، یا به صورت فصلی و یا در غارهای خشک به صورت کلسیت سخت متبلور دیده می‌شوند. آنها به صورت متبلور روی هسته اولیه کریستال رشد می‌کنند، به گونه‌ای که محور C بلور عمود بر جهت رشد کریستال است. اینگونه بلورهای کلسیت، تقریباً در همه‌غارها دیده می‌شود. بلورهای کلسیت سخت در اشکال گوناگون هستند.

(الف) عمده‌ترین بلورهای چکه‌سنگ^۶، استالاکتیت و استالاکمیت هستند که استالاکمیتها حتی تا درازای بیشتر از ۳۰ متر نیز دیده شده‌اند. (ب) جریان سنگ^۷ و یا ورقه‌هایی که ممکن است تا صدها متر گسترش داشته و به روی هم به صورت ۲ تا ۳ متر از رسوبات وادوس انباشته شوند. (ج) سنگ آهک^۸ که رویه گذرگاههای غار را اندودمی کند و ممکن است تا ضخامت یک متر برسد. این نهشته‌ها دیواره‌های آبگیر و یا نهشته‌های فراتیک هستند و اغلب در غارهای هیدروترمال دیده می‌شوند. کلسیت‌های سخت به صورت استالاکمیت و روان سنگها اطلاعات جالبی در مورد شرایط دیرینه سازند می‌دهند.

عمر آنها را می‌توان براساس کربن ۱۴، ESR^۹ و یا اورانیوم محاسبه کرد. تشخیص سن با اورانیوم توسط گسکون و شوارتز^{۱۰} (۱۹۸۲) به کار رفته است.

تاریخ تبلور درازمدت کلسیت سخت از روی اورانیوم تشخیص داده می‌شود. استالاکتیت‌های زرد فام احتمالاً تبلوری حدود ۱۰ میلیمتر در سال داشته، و استالاکتیت‌های نی فام تبلور بسیار سریعتری را داشته‌اند. استالاکمیتها به ندرت تبلوری بیش از ۰/۰۰۱ میلیمتر در سال داشته‌اند.

سایر رسوبات در بسیاری از غارها شناخته نشده‌اند و در محلهایی که دیده شده‌اند به سختی ضخامت اندکی از کلسیت خودنمایی می‌کند. بلورهای آراگونیت بسیار متداول و تجمع سوزنی شکل دارند و یا به صورت توده‌ای همراه لایه‌های کلسیت

-
- 1 - Salamader
 - 2 - Hill & Forti
 - 3 - Sinter
 - 4 - Speleo Therm
 - 5 - Autochthone
 - 6 - Dripstone
 - 7 - Flowstone
 - 8 - Euhedral
 - 9 - Electron Spin Resonance
 - 10 - Gascoyne & Schwartez

دیده می‌شوند. منیزیت‌های آبدار و سایر کربنات‌های آبدار به اضافه سولفات و سولفات‌های آبدار مانند تناردیت^۱ یا اپسومیت^۲ به صورت لایه‌های نازک روی سکانس رسوب‌های تبخیری را می‌پوشاند. این رخساره‌ها از نواحی سرد قطبی تا مناطق حاره استوایی گسترش داشته، از این‌رو به عنوان رخساره متمایز شناخته نشده‌اند. ژپس^۳، به صورت گل فام یا پوشش‌های اندودی ضخیم دیده شده است. آنها ممکن است پس از آنکه بیوکربنات‌ها از آب زیرزمینی (دارای شیل‌های پیریت‌دار اکسید شده) رسوب نموده‌اند، به وجود آیند. نمک‌ها و استالاکتیت‌های نمکی و پوسته‌های نمکی تنها در غارهای بیابانی مشاهده شده است.

غارهای فسفاتی و بسیار نیتراته، از ادرار حیوانات داخل غار که روی سنگ کف غار ریخته می‌شود به وجود می‌آید. بنابر نظر هیل^۴ (۱۹۸۱) برخی غارهای نیتریتی از عبور آب‌ها داخل خاک و انحلال نیترات به وجود می‌آیند. پوشش آلومینیوم و اکسید آهن در غارها از ذرات معلق بوکسیت و لیمونیت‌ها به وجود می‌آید. هماتیت‌ها در غارهای حرارتی و در برخی غارهای بسیار خشک دیده شده‌اند. اندود منگنز سیاه‌رنگ (به‌ویژه به صورت بیرنسیت^۵) روی شن‌ها و دیواره‌های کانال‌ها، حاکی از جریان آشفته وادوس است (مور^۶ ۱۹۸۱).

تنوعی گسترده از نهشته‌های یخی به صورت فصلی و یا دائمی در غارهای یخچالی شکل گرفته‌اند. یخ‌ها به ندرت بیش از چند صد متر از ورودی گسترش می‌یابند. گرچه در برخی غارهای یخچالی رومانی رشد و توسعه آنها از دوران یخچالی کوچک (که قبل از ۱۷۰۰ میلادی می‌باشد) بوده و امروزه در حال از بین رفتن هستند (راکوویستا^۷ ۱۹۷۲). لایه‌های ضخیم احتمالاً مربوط به هزاران سال پیش است که مارشال و بران^۸ (۱۹۷۴) در غارهای راک‌موتین کانادا بررسی کرده‌اند.

1 - Thenardite
2 - Epsomite
3 - Gypsum
4 - Hill
5 - Birnessite
6 - Moore
7 - Racovitza
8 - Marshall & Brown

۲- خاستگاه (منشأ) و ریختار غارهای آهکی

غارهای آهکی در امتداد بزرگترین مسیر آب زیرزمینی و تهاجم انحلالی به وجود می‌آید. با افزایش مسیر، جریان اصلی شتاب بیشتری به فرآیند خوردگی سنگ آهک می‌دهد، در حالی که سایر جریانهای فرعی از جهت خوردگی قابل ملاحظه نیستند. با افزایش جریان، حداکثر خوردگی دیواره‌ها رخ می‌دهد، به طور نمونه در سال $0/1 - 0/01$ سانتیمتر است که بر اثر نیروی جنبشی شیمیایی بوده ولی تقریباً با افزایش بیشتر جریان تغییری نمی‌کند. زمان فرارسیدن به نرخ حداکثر تقریباً مستقل از نیروی جنبشی بوده و به فاصله جریان و درجه حرارت بستگی ندارد. به‌عکس با عرض شکافهای اولیه، تخلیه، شیب جریان و PCO_2 در ارتباط است. اکثریت غارها نیاز به $10^4 - 10^5$ سال زمان برای رسیدن به اندازه قابل تردد هستند. شکل آنها بستگی به فرم و شبکه جریان آب زیرزمینی دارد. تشکیل حفره‌های فروکش قسمتی از غار است که به صورت اتصالات شاخه‌ای موجب پیوند پایاب با مسیرهای بالاتر قدیمی می‌شود. غارهای پرپیچ و خم در مناطقی به وجود می‌آید که (الف) گرادیان پرشیب و شرایط غیراشباع بالا موجب فراهم کردن مسیرهای متفاوتی با بزرگی مشابه شده است یا (ب) تخلیه یا تکرار شرایط غیراشباع به‌صورت مسیرهای یکسان شکل می‌گیرد. سیلابها ممکن است ایجاد شبکه زاویه‌دار در شکستگی سنگها کنند.

نواحی پرپیچ و خم بهم پیوسته، در امتداد سطوح جدایش با زاویه پایین، یا در نواحی که دارای تخلخل غالب بین دانه‌ای اسفنج فام هستند، رخ می‌دهند. پخش و انتشار دوباره، موجب به وجود آمدن شبکه اسفنجی می‌شود که در این راستا عمل آبهای دارای ترکیب شیمیایی متفاوت نیز به فرآیند مزبور کمک می‌کند. غار رامیفرم^۱، با شاخه‌های پی‌در پی خارجی به طور اساسی بر پایه افزایش حرارت آب حاوی سولفور هیدروژن^۲ به وجود آمده است. میزان انحلال توسط آبهای سرد با عواملی چون: گاز کربنیک، حرارت و گرادیان حرارتی (البته گرادیان حرارتی بیش از $0/01$ سانتیگراد بر متر افزایش می‌یابد. آبهای زیرزمینی دارای $0/01$ گرادیان حرارتی بدون وجود آبهای اسیدی یا مخلوط شدن جریان آبهای آرتزین ایجاد غارهای پرپیچ و خم می‌کنند. ساختمان زمین‌شناسی و چینه‌شناسی در آرایش جهات و گسترش غارها، تأثیر می‌گذارد ولی به تنهایی نسبت به پیچ در پیچ شدن غارها بی‌اثر است.

سیمای کارستی، در محلهایی که فرآیند انحلالی آب یکی از عوامل غالب ریختار زمین‌شناسی است، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد پوسته زمین را در بر می‌گیرد. تقریباً تمام سطوح اصلی خارجی سیمای کارستی ریشه در زهکشهای داخلی دارد، نشت و فروافتادگی بر اثر توسعه کارست در لایه‌های زیرین غار رخ می‌دهد. به طور اساسی تحلیل هیدرولوژی و ریختارشناسی، تحلیل هر نوع سیمای کارستی و تشخیص نواحی آبدار، مهاجرت آبهای آلوده کننده و پایداری توده خاک و سنگ کف با شناخت توسعه غارها در ارتباط است.

همچنین فرآیند انحلال سنگها دارای اهمیت است مانند تشخیص سنگهای کربناته، منشاء مخازن نفت و جانشین شدن سنگهای معدنی آبهای گرم.

1 - Ramiform

2 - H_2S

طی چند دهه گذشته اطلاعات صحرایی و آزمایشگاهی در مورد با غارهای آهکی به طور بی سابقه‌ای افزایش یافته است. تجزیه و تحلیل غارها برحسب شیمی آبهای زیرزمینی و هیدرولوژی^۱، ریختار و لیتولوژی^۲، نوع لایه‌های آبدار^۳، ساختمان زمین‌شناسی^۴، پتانسیل صحرایی^۵، سازه‌های هیدرولیکی و ساختمان زمین‌شناسی^۶ و انحلال وابسته به حرکت^۷ انجام شده است. غار هیک^۸ نزدیک کارلسباد، نیومکزیکو، یکی از نمونه غارهای هیپوژنیک است که بر اثر H_2S و اسید سولفوریک به وجود آمده است. نیمرخ غار نامنظم است که به میزان ناچیزی از توپوگرافی و لیتولوژی تبعیت می‌کند. دارای زمینه شاخه‌ای در افقهای مختلف است که هر یک خروجی جداگانه‌ای دارند.

(الف) مدخل لوله‌های نامنظم که از بستر فوس کانیون^۹ چندین دهها متر برخاسته است. (ب) ناحیه اکسیده شده H_2S در تراز آب زیرزمینی، با خروجی جدید در پرتگاه گوادالوپ، (ج) دوتالار میانی، با خروجی نامشخص و (د) افق دارای درز و ترکهایی که با رسوبات ثانویه کربنات پر شده‌اند، که عملاً به عنوان خروجی آبهای سرشار از H_2S در سراسر گسترش غار عمل می‌کند. اکنون آنچه بجای مانده‌است، غار است.

در شرایطی آب و هوایی مرطوب تشخیص غارهای غیرفعال هیپوژنیک بسیار مشکل است. آبهای مهاجم سطحی تمایل ورود به نواحی عمیق دارند و یا موجب بازسازی غار شده که تشخیص سیمای هیپوژنیک غار ممکن نیست. در شرایط آب و هوایی خشک جریان آب در غار به حداقل ممکن می‌رسد و غار دستخوش بازسازی نمی‌شود. در شرایط آب و هوایی مرطوب با جریان‌های عمیق غارهای مختلفی شکل می‌گیرند که هنوز نمی‌توان به منشاء اولیه آنها اشاره کرد. بهترین نمونه غارهای آپالاش هستند که نشانه‌ای از سیلاب و تغذیه آنها مشهود نیست. یکی از اهداف آینده پژوهشگران غار، تعیین اثر نسبی فرآیند آبهای کم عمق به فرآیند آبهای عمیق در این نواحی است.

این گزارش ویژگیهای منشاء غارها و رشد (بزرگ شدن) آنها را مورد بررسی قرار داده است. پوشش این مطالعات محدود به ریشه غارهای انحلالی در توده سنگهای کربناته، به ویژه سنگ آهک است. نهشته‌های غارها تنها زمانی که این رسوبات مربوط به آنها باشند مورد تحلیل قرار گرفته است. گرچه بیشتر بخشهای این گزارش تحلیلی است اما نتایج به دست آمده متکی بر مشاهدات صحرایی پیشین انجام گرفته روی ۵۰۰ غار به اشکال و آرایش‌های مختلف است (مراجعه به پالمر ۱۹۷۵، ۱۹۸۴، ۱۹۸۷). این یافته‌ها متکی به انتشارات مدارک چندین هزار غار دیگر نیز است.

۱-۲ ریختارشناسی غار

ریختار غارها با اثرات زنجیره‌ای کنترل می‌شود: (الف) محل غار، توسعه، روند و جهت که با پراکندگی سنگهای قابل انحلال و سرچشمه تغذیه کنترل می‌شود (ب) زمینه گذرگاه (برای مثال، شاخه‌های گذرگاه زیرین) در پیوند با تغذیه آب زیرزمینی است

1 - Thraikill 1968

2 - Powell, 1970

3 - White, 1977a

4 - Ford 1971

5 - Ewers, 1978, Ford & Ewers

6 - Palmer 1975

7 - Dreybredt 1981 a,b, 1984, 1981, 1977b, 1987, 1988, White, 1977

8 - Hick

9 - Fence Canyon

(ج) آرایش گذرگاههای منفرد با عوامل ساختمانی زمین‌شناسی، توسعه آبهای همزاد، توسعه جریانهای فراتیک و تاریخ ریختار ناحیه کنترل می‌شود. گذرگاه متداول یک غار در دو مرحله به وجود می‌آید: یک دوره درازمدت با انحلال نزدیک به اشباع، به دنبال آن انحلال تند و سریع در کمتر از حد اشباع.

غارهای شاخه‌ای بر اثر تغذیه لایه‌های فوقانی اطراف دارای سطوح کارستی که در محل برخورد با گذرگاههای آب زیرزمینی گاز از آنها متصاعد می‌شود، بوجود می‌آیند. غارهایی که شبکه کانالهای مرتبط بهم دارند، بر اثر بسیاری از بازشدگی‌های همزمان به وجود می‌آیند که نیاز به عوامل زیر دارند:

- شیب تند گرادیان هیدرولیکی و حد اشباع پایین، بسان غارهایی که در معرض سیلاب قرار می‌گیرند،
- تغذیه یکنواخت به درز و ترکهای موجود در سنگهای قابل انحلال از سنگهای موجود در همسایگی که دارای تخلخلی زیاد و بدون قابلیت انحلال هستند یا
- تولید آب مهاجم یکنواخت در هر یک از درز و ترکها.

با بالا آمدن آبهای گرم شرایط یک برای بسیاری از شبکه‌های بهم پیوسته روباز کارست سطحی فراهم می‌شود. هر یک از موارد، دربردارنده چند مرحله توسعه است: گذرگاههای اولیه تکامل نیافته، غارهای تکامل یافته از مراحل ابتدایی تا تکامل، غارهای چند مرحله‌ای شامل بخشی یا تمامی گذرگاههای غیرفعال گذشته که برخورد گذرگاه از جهت مورفولوژی در مراحل مختلف ناشناخته بوده است.

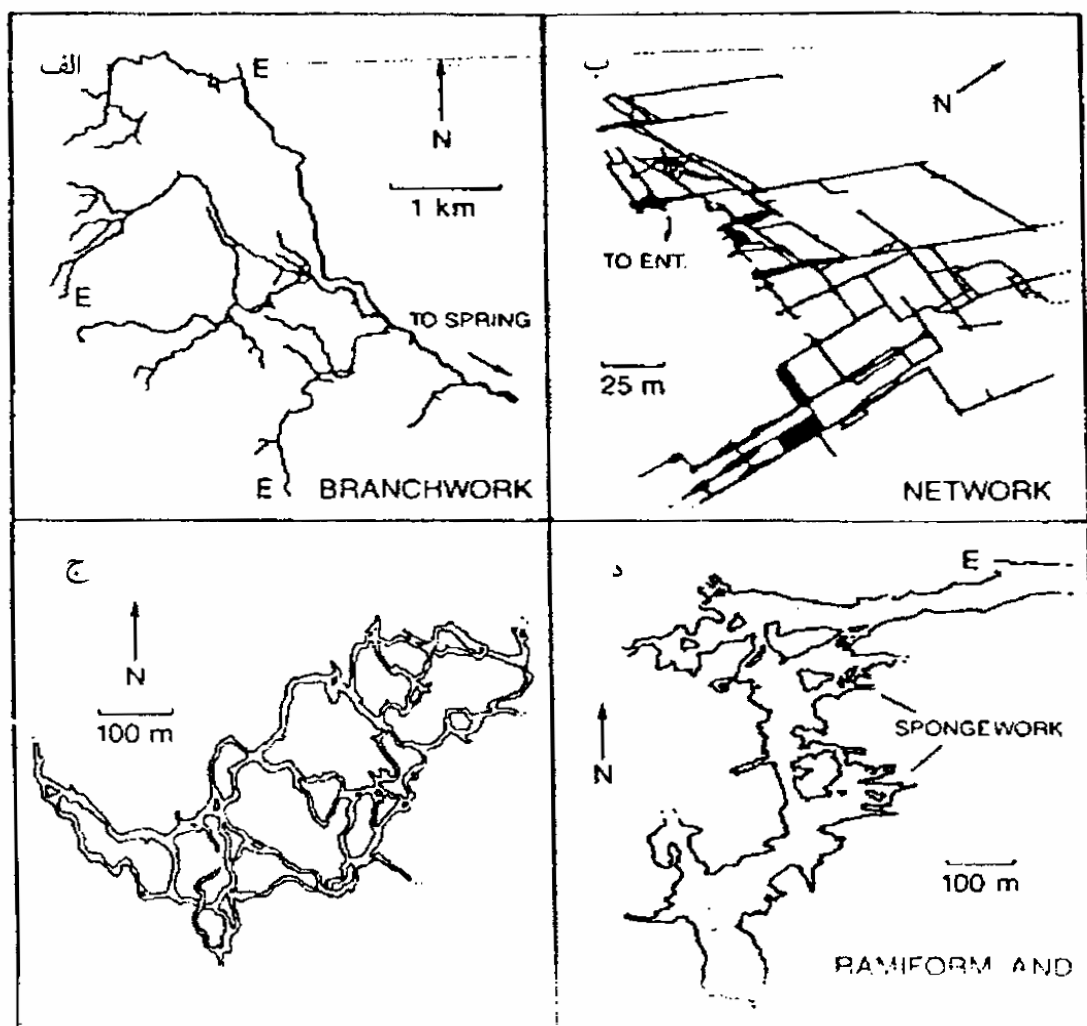
غارهای انحلالی از نظر بنیادی و مورفولوژی و فرآیند بوجود آمدن آنها نقش قابل توجهی در بسیاری از جهات زمین‌شناسی داشته است.

۲-۱-۱ بازشدگی‌های بیش از انحلال

غارهای انحلالی در مناطقی به وجود می‌آیند که جریان کافی آب زیرزمینی برای جابجایی مواد انحلالی سنگ کف و به حال غیراشباع نگاه داشتن آب در تماس با دیواره‌های غار را داشته باشد. این پدیده زمانی میسر است که بازشدگی‌های توده سنگ در پیوند با یکدیگر و در امر ارتباط با تغذیه و تخلیه ناحیه قرار گیرد. ۵۷ درصد درازای غارهای بررسی شده در امتداد جدایش لایه‌بندی بوده، ۴۲ درصد شستگی و تنها یک درصد بر اثر تخلخل بین دانه‌ای شکل گرفته است.

گذرگاهها متأثر از سطوح لایه‌بندی و جدایش سینوسی و مارپیچی (شکلهای ۲-۱-الف و ۲-۱-ج) است و فواصل نزدیک درزه‌ها در سطوح مناسب می‌تواند شرایط مشابه به وجود آورد^۱. درزه‌های انحلالی گشاد و بزرگ شده و گسله‌های با زاویه بزرگ تمایل به ایجاد گذرگاههای درزه‌فام با مقطع عدسی شکل و تقاطع‌های زاویه‌دار دارند. در محلهایی که درز و ترکها آشکار هستند، از روی آنها می‌توان گذرگاه‌های داخل غار را شناسایی کرد. (شکل ۲-۱-ب). گسلها معمولاً در محل گذرگاههای غار هستند و مسیر کلی و مرتبط به یکدیگر چند غار را نشان می‌دهد^۲ تخلخل بین دانه‌ای برای ایجاد غارها تنها در سنگ آهکهای ردیفی و سنگهای دانه‌فام^۳ کمتر سخت شده، مؤثر است.

1 - Powell, 1976
2 - Kastning 1977
3 - Grainstone



شکل ۲-۱- الگوهای مشترک غارهای انحلالی

۲-۱-۲ طرح غارها

ساده‌ترین شکل آرایش تمام غارها از بهم پیوستن گذرگاه‌هایی که زمینه و الگوی مشخصی را به وجود می‌آورند، شکل می‌گیرد (شکل ۲-۲). اساس و الگوی غارها را برپایه مطالعات صحرایی یا نقشه‌های پلان قابل بررسی است، مگر آنکه به دلیل کوچکی، امکان عبور از آنها ممکن نباشد. بخشهای متفاوت یک غار، الگو و زمینه‌های متفاوتی را دارا هستند و بیش از یک الگو را می‌توان در یک محل معرفی کرد. غارهای شاخه‌ای یا شبکه‌ای از گذرگاه‌های درز و ترکهای بهم پیوسته شاخه فام درست شده‌اند مانند غار بزیک‌ورک^۱ که از گذرگاه‌هایی که از بهم پیوستن شبکه‌های شاخه‌ای هستند، به وجود آمده است (اشکال ۱-۲- الف و ۲-۲). این گونه غارها متداولترین آنها در این پژوهش بوده و ۵۷٪ غارها را شامل می‌شوند که ۶۵٪ گذرگاه‌های بهم پیوسته را دربر می‌گیرند. در آغاز، اولین شاخه‌های هدایت آب آنها به صورت مجزا و مستقل عمل می‌کنند. آبهایی که در ترازهای بالاتر همسو شده‌اند و در یک مسیر هدایت می‌شوند، به سوی پایین‌دست، ایجاد گذرگاه‌های بزرگتر

1 - Branchwork

می‌کنند. به ندرت حلقه‌های بسته به وجود می‌آیند، مگر در محل‌هایی که آب مسیر اصلی را رها کرده و در یک مسیر جدید و بهم پیوسته و یا به گذرگاهی در دورتر و پایاب هدایت شده و ایجاد حلقه مسدود کرده باشد.

ویژگی‌های هیدرولوژیکی زیرزمینی سبب شده است غار برنک ورک، هم‌ارز کانالهای شاخه درختی رودخانه‌ای باشد. در مقابل، چهار مورد غارهای پریچ و خم، نمونه‌های حلقه‌های بسته با ریشه همزمان هستند.

شبکه‌های غار از بهم پیوستن درز و ترکها (در زمینه‌ای زاویه‌دار) با پهن‌تر شدن تمام شکستگی‌های عمده و انحلال‌پذیر شکل می‌گیرد (اشکال ۲-۱ ب و ۲-۳). در این مجموعه حلقه‌های بسته فراوان یافت می‌شود. و گذرگاههای مستقیم و باریک و بلند ایجاد شکلی بسان شبکه خیابان شهری کرده است. پاره‌ای شبکه‌های اولیه، متشکل از آرایش زاویه‌دار از درز و ترکهای یک سویه یا در انتها بسته شده همراه با برخی حلقه‌های بسته است. اینگونه درز و ترکها فاقد مسیرهای دوباره پرشدنی در غار برنک ورنک است.

غارهای بهم پیوسته آناستوماتیک^۱ متشکل است از لوله‌های خم‌داری که یکدیگر را در حاشیه قطع می‌کنند و دارای حلقه‌های بسته فراوان هستند (اشکال ۲-۱ ج و ۲-۴).

این فرم غار معمولاً از دو آرایش دو بعدی در امتداد یک شکستگی با زاویه کم، شکل می‌گیرد. به ندرت آرایش سه‌بعدی در بیش از یک ساختمان زمین‌شناسی به وجود می‌آید. کنترل قطعات ناشی از شکستگی ممکن است وجود داشته باشد ولی به صورت غالب نیست. غارهای بهم پیوسته پیچ در پیچ معمولاً روی برنک ورک قرار می‌گیرند و به ندرت شامل سراسر غار می‌شوند. تنها ۳٪ غارهای مطالعه شده از نوع بهم پیوسته هستند اما گذرگاه‌های بهم پیوسته بیش از ۱۵٪ طول نمونه‌ها دربر می‌گیرد.

غارهای اسفنج فام: متشکل از حفره‌های انحلالی در اندازه‌های مختلف بهم پیوسته است که به ندرت زمینه سه بعدی داشته و مانند منافذ اسفنج هستند (اشکال ۲-۱ د و ۲-۵).

غارهای اسفنجی ۵٪ نمونه‌های مطالعه نشده را شامل می‌شوند ولی در کمتر از یک درصد مسیر بهم پیوسته هستند. اکثر آنها از بهم پیوستن منافذ بین دانه‌ای و به میزان کمتر از درز و ترکها به وجود می‌آیند.

غارهای شاخه‌ای: سیمای اینگونه غارها مانند لکه‌های جوهر یا نمونه پرور شاخ^۲ است. اتافکها و راهروهای سه‌بعدی سرگردان با شاخه‌های انشعابی از محل تشکیل غار به سوی ورودی آن (شکل ۲-۱ د) وجود دارد. پیوند گذرگاهها با یکدیگر طبیعی بوده که موجب به وجود آمدن بهم پیوسته تدریجی غارهای اسفنجی و شبکه‌ای می‌شود. تغییرات ناگهانی گرادیان و مقاطع به صورت تیپ و نمونه است. به عکس غارهای شاخه فام گذرگاههای شاخه‌ای، از شبکه‌های انشعابی همگرا در سطح تغذیه نمی‌کنند. در عوض، بسیاری از آنها به عنوان خروجی دایمی آبهای زیرزمینی عمل می‌کنند. غارهای شاخه‌ای ۴٪ از نمونه‌های بررسی شده و ۸٪ مسیرهای بهم پیوسته را شامل می‌شود.

غارهای دارای یک گذرگاه: این غارها منحصراً شکل ابتدایی غارهایی که در بالا به آن اشاره شد، می‌باشند و گاه برخی از آنها دارای اندازه‌های بزرگ هستند. این غارها ۱۴٪ از نمونه‌های بررسی شده و یک درصد مسیرهای بهم پیوسته را شامل می‌شوند.

1 - Anastomatic

2 - Rorschach



شکل ۲-۲- یک گذرگاه ناشی از برخورد جریانهای لوله‌ای در یک غار نمونه شاخه‌ای
(غار بینگلی در ایندیانا)



شکل ۲-۳- غار شبکه‌ای با بهم پیوستن درز و ترکها (غار ویند، داکوتای جنوبی)



شکل ۲-۴- گذرگاه برخورد غار بهم پیوسته که در راستای شیب لایه‌بندی
به وجود آمده غار اونسکوتاو، نیویورک



شکل ۲-۵- نمونه غار شاخه‌ای اسفنجی کارلسباد در نیومکزیکو همراه اتاقکهای نامنظم

۲-۱-۳ انحلال کینتیک

درجه انحلال در سیستم $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CaCO}_3$ بر پایه تجربی میزان ارزش pH مشابه یا نزدیک به pH آب زیرزمینی به وسیله پلومروویگلی^۲ (۱۹۷۶)، پلومر و دیگران (۱۹۷۸)، سیوبرگ و ریچارد^۳ (۱۹۸۴)، بوهمن و دری‌پورت^۴ (۱۹۸۵) بررسی شده است. پژوهشهای مشابه در مورد انحلال سنگ دولومیت به وسیله بوسن برگ و پلومر^۵ (۱۹۸۲)، هرمن و وایت^۶ (۱۹۸۵) انجام شده است. برپایه این تجارب مشخص شده است که $\text{pH} > 4$ ، به طور کلی نمونه تمام آبهای زیرزمینی کارستی است. محدوده خوردگی در تقابل با آب سنگ کف است و در تقابل با انبوه آب روان در توده سنگ نیست. میزان خوردگی مربوط به غیراشباع بودن شیمیایی آب است و به میزان ناچیزی متاثر از سرعت یا رژیم جریان آشفته است. پلومر و دیگران (۱۹۷۸) میزان انحلال را در ارتباط با فعالیت انحلالی نمونه‌ها ذکر کرده‌اند. نمونه‌های فراگیرنده که دارای ویژگی هیدرودینامیکی هستند قابلیت انحلالی بیشتری را بروز می‌دهند (روزنفیلد براساس نظر کرل^۷).

در این گزارش، برای پرهیز از وابستگی به یک مدل و برای تسهیلات کاربرد ریختارشناسی، داده‌های تجربی در رابطه زیر وارد می‌شود:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{A'K}{V} (1 - C/C_s)^n \text{ mg/L-sec} \quad (1-2)$$

که در آن:

$A' =$ سطح توده سنگ دارای آب (سانتیمتر مربع)

$V =$ حجم آب (سانتیمتر مکعب)

$K =$ ضریب واکنش (mg-cm/L-sec)

$n =$ نوع واکنش

ارزش n و K به نسبت درجه اشباع (C/C_s)، درجه حرارت و PCO_2 متغیر خواهد بود.

میزان دلخواه یا ایده‌آل C را باید روی سطح سخت‌اندازه‌گیری کرد، اما انتقال توده، حتی در آبهای سرگردان، به اندازه کافی تند و سریع است تا میزان C حالت پایدار در سراسر مقطع داشته باشد.

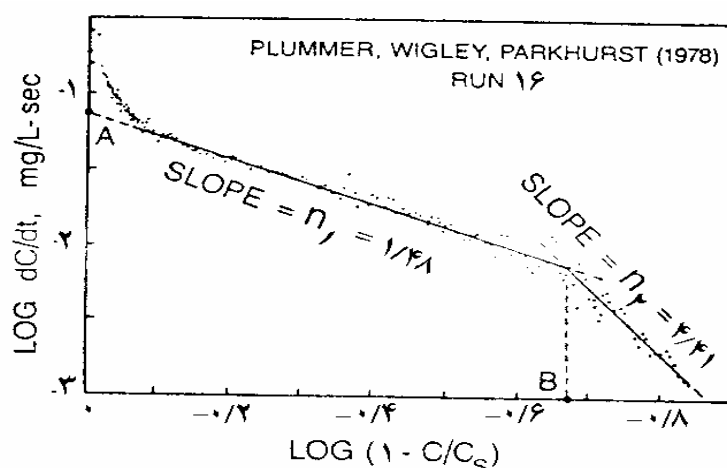
-
- 1 - Dissalution Kinetics
 - 2 - Plummer & Wigles
 - 3 - Sjober Rickard
 - 4 - Buhman & Dreybroat
 - 5 - Busenberg & Plummer
 - 6 - Herman & White
 - 7 - Rosenfeld 1986, Curl

جدول ۱-۲- ارزش n و k برای کلسیت خالص و ناخالص

P_{CO_2} (atm)	n_f	5 °C			15 °C			25 °C		
		k_f		$(C/C_s)_T$	k_f		$(C/C_s)_T$	k_f		$(C/C_s)_T$
		Pure	Impure		Pure	Impure		Pure	Impure	
1.0	1.5	0.11	0.07	0.8	0.14	0.09	0.85	0.18	0.12	0.9
0.3	1.6	0.044	0.03	0.65	0.055	0.035	0.7	0.065	0.04	0.8
0.03	1.7	0.014	0.009	0.6	0.018	0.015	0.7	0.028	0.02	0.8
0.003	2.2	0.01	0.006	0.6	0.015	0.01	0.7	0.02	0.015	0.8

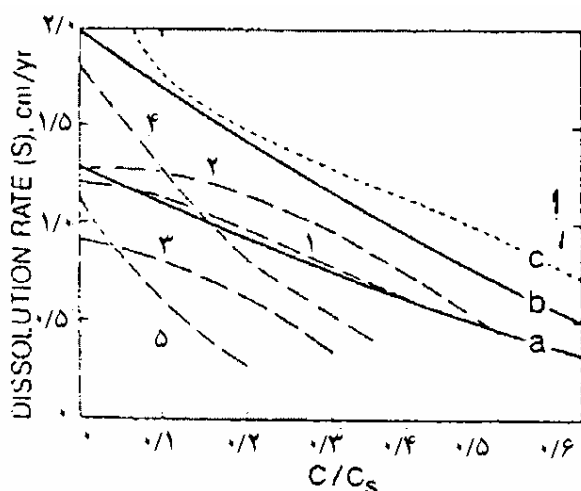
Note: all values $\pm$ 10%-20%, based on experimental data of Plummer and Wigley (1976) and Plummer and others (1978). See Figure 8 for method of calculation. $(C/C_s)_T$ = saturation ratio at the transition from low to high reaction order (n_1 to n_2); $n_2 = 4$; $k_2 = k_f [1 - (C/C_s)_T]^{(n_1 - n_2)}$; units of k = mg-cm/L-sec.

ارزش n و k در لیست جدول ۱-۲ از سوی نویسنده از سه جریان آهسته و اندازه‌گیری ارزش pH نسبت به زمان درحل کلسیت به صورت تجربی توسط پلومر و ویگلی (۱۹۷۶)، پلومر و دیگران (۱۹۷۸) به دست آمده‌است. براساس جدول ۱-۲، C_s برپایه مشخصات PCO_2 به صورت تجربی محاسبه و Ca^{++} برپایه تعادل وزن به دست آمده‌است. تعادل برای تمام نمونه‌های قابل انحلال به استثنای کلسیت فرض شده‌است. لگاریتم dc/dt بر روی لگاریتم $1 - C/C_s$ بر روی هم ترسیم شده و انحراف معیار k و n مورد تحلیل قرار گرفته است (شکل ۲-۶).

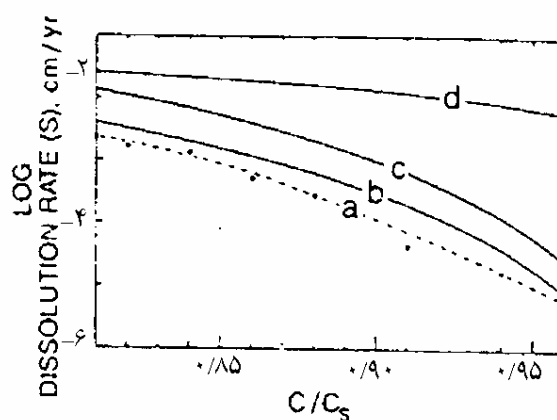


شکل ۲-۶- روش تعیین ضرایب n و k

این پیگیری مشابه روش پلومبر و ویگلی (۱۹۷۶) است به استثنای اینکه رابطه بدون بعد $(1-C/C_s)$ به جای $(C_s - C)$ به کار گرفته شده تا از تغییرات K و n پرهیز شود. یک روش اساسی تعیین میزان K و n در شکل ۲-۶ نشان داده شده که برابر $C/C_s < 0.1$ است که برای اندازه‌گیری انحلال سنگ آهک توسط راج و وایت^۱ (۱۹۷۷) و هوارد^۲ (۱۹۶۷) از جدول ۲-۱ مستثنی شده است. کارهای اولیه متمرکز بر اندازه‌گیری Ca^{++} به جای $pH.Ca^{++}$ بوده که در زمانی که C/C_s پایین باشد چندان معتبر نیست، زیرا آب گرفتن آرام مانع از برقراری تعادل لایه آبدار حین انحلال شدید می‌شود. مگر روشهای دیگری توصیه شده باشد، که مبتنی بر تقریب سنگ آهک طبیعی است (نگاه کنید به شکل‌های ۲-۷ و ۲-۸).



شکل ۲-۸- میانگین میزان انحلال سنگ آهک
و دولومیت، بر پایه ۱۷ مورد اندازه‌گیری
آزمایشگاهی



شکل ۲-۷- میزان انحلال شدید کلسیت،
اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی انحلال سنگ آهک

در هر نقطه گسترش یک آبگذر، میزان انحلال و پس نشینی دیواره آبگذر (S) بر پایه رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{31/56 K (1 - C/C_s)^n}{Pr} \text{ Cm / Yr} \quad (2-2)$$

رابطه مزبور برای هر نوع جریان آب در ارتباط با لایه‌های آهکی $PH < 4$ معتبر است. اگر رابطه درجه‌بندی داخلی شده و با رابطه $V/t=Q$ و $A'=2\pi rL$ برای لوله و $2bl$ برای درز و ترک ادغام شود، میزان اشباع پایاب در بخش طولی L (و تمام سایر موارد ثابت بماند) برابر است با

$$C/C_s = 1 - \left[\frac{PLK(n-1)}{QC_s} + (1 - CO/C_s)^{(1-n)} \right]^{(1-n)} \quad (3-2)$$

به شرط آن که $n \neq 1$ باشد.

پلومر و ویگلی (۱۹۷۶)، پلومر و دیگران (۱۹۷۸) مواد معلق در یک جریان آشفته را در روابط تجربی خود به کاربردند. ارزش n و K در جدول ۱-۲ از این تجارب به دست آمده است و اعتبار آنها در آبهای زیرزمینی کارست باید پیش از رابطه ۳-۲ برای به کارگیری در غارها نشان داده شود.

ارزش تخمین زده شده از رابطه ۲-۲ به خوبی با آنچه توسط راج و وایت (۱۹۷۷) در لوله‌های مصنوعی سنگ‌آهک و دولومیت اندازه‌گیری و مقایسه شده نشان داده شده است و در ۲۳ درجه سانتیگراد $N_r = 460$ است (شکل ۲-۸). یک سیستم روباز مشابه با جریان دوباره آب از داخل محفظه CO_2 دار به کار گرفته شده است. پژوهش آنها نشان می‌دهد انحلال سنگ آهک با وجود بلورهای دولومیت و درصد مواد غیرمحلول (به جز مواردی که تشکیل دسته کوچکی از لای می‌دهد) کاهش می‌یابد. ارزش انحلال نهشته‌های کربناته اقیانوس‌ها در بالاترین زمان انحلال C/C_s توسط مورس^۱ (۱۹۷۸) اندازه‌گیری شده است. یافته‌های او در شکل ۲-۸ به خوبی با رابطه ۲-۲ همسو است، مبنی بر اینکه مقاومت یونی کوچکترین تاثیری در میزان انحلال سنگ آهک ندارد.

اندازه‌گیرهای درجه انحلال در آزمایشگاه در رژیم صفحه‌ای داخل شکستگی‌های مصنوعی سنگ آهک در میزان پایین C/C_s توسط هوارد و هوارد (۱۹۶۷) اندازه‌گیری شده است. تجارب آنها بنابر تعادل ظاهری در تمرکز ۹۰٪ (چیزی که در جدول ۱-۲ نشان داده شده است)، دلالت می‌کند بر اینکه انحلال آرام نشان داده شده در شکل ۲-۶ می‌تواند در یک رژیم صفحه‌ای رخ دهد و این مطلب با اندازه‌گیری لایه نازک انحلالی کلسیت توسط بوهمن و دری‌بوردت (۱۹۸۵) اثبات شده است و این بررسیها با آنچه هوارد و هوارد به دست آورده‌اند همسو است. میزان انحلال حدود نصف رابطه ۲-۲ است، اما بر رابطه عملی شرح داده شده در این گزارش تاثیری ندارد.

تقریباً و اکثر اوقات اندازه‌گیرهای صحرایی یکی شده جهت مقایسه میزان بزرگ شدن در ارتباط با میانگین سالانه شیمی آب وجود ندارد. پس‌نشینی دیواره‌های سنگ آهکی در غارها با نصب صفحه عقرب‌دار اندازه‌گیری می‌شود (های، کوارد)^۲. مقایسه مستقیم با رابطه ۲-۲ بدون در دست داشتن گزارشات مداوم شیمیایی مشکل است، اما اندازه‌گیرهای ۰/۰۸ - ۰/۰۴ سانتیمتر خوردگی در سال با آنچه پیش‌بینی شده است، همسو هستند.

1 - Morse

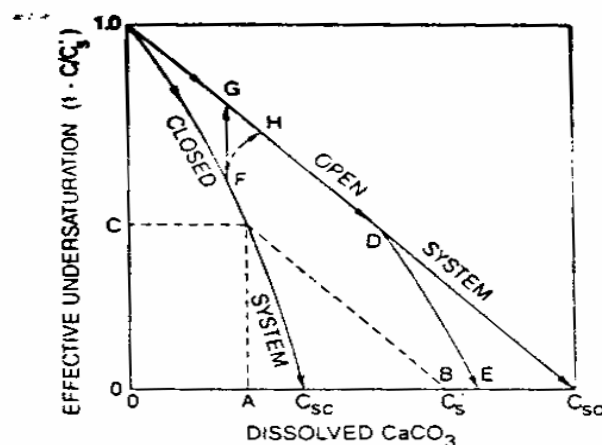
2 - High, (1970), Coward (1975)

۲-۲ تکامل یا فرگشت تدریجی گذرگاه یک غار یکسویه

پیش از آنکه الگوی پیچیده یک غار مورد شناسایی قرار گیرد لازم است مراحل فرگشت (تکامل) تدریجی گذرگاه مطالعه شود. بررسی مجموعه شکستگیها پیش از انحلال و باز شدن آنها تا اعماق زیرین ضروری است. گرادیان هیدرولیکی، تخلیه و میزان انحلال ابتدا قابل اهمیت نیستند، ولی آنها پس از آنکه جریانهای رودخانه‌ای داخل خندقیهای قابل انحلال می‌شوند افزایش می‌یابند. در این مرحله پیچیدگی تغذیه نادیده گرفته می‌شود و تنها مجموعه بهم پیوسته بازشدگیها که سرانجام گشاد شدن آنها منجر به گذرگاه یکسویه غار می‌شود، مهم است.

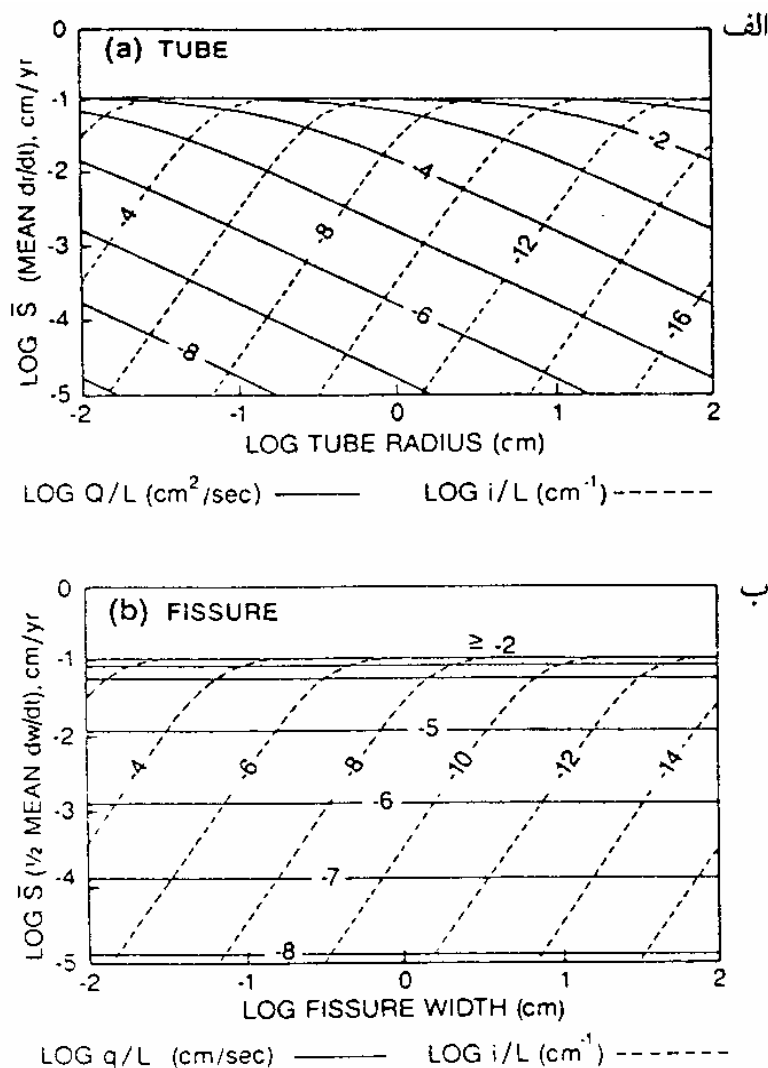
برای درک راحتتر، تصور بر آنست که در مراحل اولیه انحلال، گذرگاه آب لبریز از آب است. یک مجموعه از شکستگیهای عمیق پیش از آغاز فرآیند انحلال باید در نظر گرفته شود. در ابتدا، گرادیان هیدرولیکی، تخلیه و میزان انحلال، بی‌اهمیت هستند، اما با حفر و فرسایش به وسیله جریانهای رودخانه‌ای و آشکار شدن سنگهای قابل انحلال، فرآیند انحلالی افزایش می‌یابد. در این مرحله، پیچیدگی روند دوباره پر شدن مورد توجه نبوده و تنها مجموعه بازشدگیهای بهم پیوستگی‌های احتمالی که منجر به گذرگاه غارهای منفرد می‌شود مدنظر قرار دارد.

برای سهولت، تصور می‌شود سرتاسر گذرگاه آب در مرحله ابتدایی توسعه و انحلال، لبریز از آب است. رابطه میزان انحلال که در مراحل اولیه به دست آمده است برای هر دو سیستم شکستگیهای باز یا بسته با توجه به فاز گازی CO_2 معتبر است. درز و ترکهای کاملاً بسته در طبیعت کمیاب است، ولی گذرگاههای پر شده از آب در درز و ترکهای باز قابل پیش‌بینی است. در بخش انتهایی و بالایی اینگونه گذرگاهها، CO_2 آبدار یا مرحله گازی، بخش بالادست خود به‌حالت تعادل می‌رسد. میزان انحلال در ابتدای بخشهای بسته، هم ردیف بخشهای باز است، اما همانگونه که در پایاب‌میزان کرین افزایش می‌یابد، میزان انحلال CO_2 در آبگذرهای بسته کاهش می‌یابد، که موجب کاهش ظاهری C_s می‌شود. در سیستمهای بسته ارزش مؤثر $(C's)$ در مقایسه با (C_s) کاهش می‌یابد، (شکل ۲-۹). انحلال نسبت به یک سیستم باز آهسته‌تر رخ می‌دهد. در حالی که C_s ثابت باقی می‌ماند. کاهش $C's$ و افزایش C_s کاملاً از یک رابطه خطی تبعیت نمی‌کند ولی حدود ۱۰ درصد خطا را می‌توان تصور کرد. میزان C_s برای کلسیت در جدول ۲-۱ برای سیستم باز و بسته نشان داده شده است.



شکل ۲-۹- تکامل شیمیایی غارهایی که در شرایط باز و بسته همراه آب هستند.

نتایج • C_o و فشار اولیه $PCO_2 = 0/01$ اتمسفر در ۱۰ درجه حرارت در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰ - حد میانگین انحلال و پس نشینی دیواره در برابر تخلیه

منحنی i/L (گرادیان هیدرولیکی به طول، سانتیمتر cm^{-1}) تنها برای رژیم صفحه‌ای معتبر است. در یک آبگذر بسته، n و K تغییر می‌کنند همانطور که جریان با فاصله ناپدید می‌شود. میانگین درجه انحلال در شکل ۲-۱۰ بر پایه محاسبات روش تفاضل محدود^۱ انجام گرفته که در آن هر یک از شکستگیها پیش از اینکه تحت تأثیر عمل انحلال قرار گیرند به ۱۰۰ قسمت در طول افزایش یافته است و $C's$ به صورت خطی بین ۲۱۲ و ۵۵/۶ میلی گرم بر لیتر تنظیم شده است (ارزش درجه اشباع اولیه و نهایی در یک سیستم بسته در نظر گرفته شده است). میزان n و K برحسب درج از جدول شماره ۲-۱ متفاوت خواهد بود.

بزرگترین چگالی (دانسیته) محتمل سنگ کف (۲/۷ گرم بر سانتیمتر مکعب) در نظر گرفته شده است. شکل اساسی منحنی رسم شده در شکل ۲-۱۰ فارغ از پارامترهای n و k مورد محاسبه قرار گرفته، گرچه این ارقام به طور عمده برای مفاهیم ادراکی است، نمونه‌های زیر روابط مزبور را روشن می‌کند:

اگر $Q = 0.01 \text{ cm}^3 / \text{sec}$ در یک لوله‌ای به درازای ۱۰۰۰۰ سانتیمتر با شعاع ۰/۱ سانتیمتر باشد در آن صورت $Q/L = 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{sec}$ نسبت $i/L = 10^{-6/47}$ و $i = 0.0034$

اگر $C_0 = 0$ ، میانگین انحلال در لوله حدود $10^{-2/8} \approx 10^{-2/8}$ سانتیمتر در سال خواهد بود. شکل ۲-۱۰ گشاد شدن ناگهانی محل بی‌نهایت کوچک را نشان می‌دهد. گسترش غارهای افقی با رشد 10^{-6} سانتیمتر در سال توجیه‌پذیر نیست مگر در شرایط ویژه زمین‌شناسی رخ دهد.

بر پایه شکل ۲-۱۰ چند نکته در مورد غارها و عکس‌العمل CO_2 در آنها قابل بررسی است: میزان انحلال دیواره و پس‌نشینی آن با ازدیاد تغذیه به حداکثر می‌رسد و پس از آن افزایش تغذیه دیگر تاثیری نخواهد داشت (مگر آنکه همراه با تغییرات فشار PCO_2 یا درجه حرارت باشد).

در آبهای تیپ زیرزمینی، حداکثر میزان انحلال و خوردگی دیواره‌ها میانگین $0.1 - 0.01$ سانتیمتر در سال بوده اگر میزان Q/L یا $4/L$ بیش از 0.01 سانتیمتر بر ثانیه باشد.

- در تغذیه پایین، گذرگاه در مراحل اولیه، دچار تنوع زیادی از میانگین میزان جریان است.
- گود شدن گذرگاه می‌تواند موجب رشد انحلال شود در صورتی که بر میزان دبی افزوده شود.
- چنانچه چندین جریان موجب افزایش شیب گرادیان شوند، کوتاهی مسیر و تا حدودی شرایط یکسان شیمیایی صرفنظر از اندازه آنها در آغاز موجب افزایش خوردگی برابر می‌شوند.

ریشه غارهای آهکی در رشته‌های ظریف آویخته است. برای آنکه چنین رشته آهکی به اندازه‌های افقی قابل ملاحظه‌ای در زمان ممکن برسد، انحلال باید با شتاب انجام گیرد، و انحلال بسیار بالا در آغاز خوردگی باید رخ دهد تا خوردگی گسترش یابد. در درز و ترکهای باریک، انحلال فوری نزدیک به مرحله اشباع پس از چند سانتیمتر جریان اتفاق می‌افتد و گشاد شدن پایاب قابل ملاحظه نیست. تنها جریان‌های آرام و مداوم و یکسان موجب گسترش گذرگاه می‌شود. این تناقض با انحلال بسیار کم، زمانی که هنوز انحلال در مرحله اشباع نباشد، سازگار می‌شود (شکل ۲-۶). این مرحله انتقالی: اولین بار توسط برنر^۱ و مورس بررسی شده است که با افزایش عکس‌العمل (n) روبرو است. از آنجا که $1 - C/C_s$ کمتر از ۱ است، میزان S با افزایش n ، کاهش می‌یابد. پالمر (۱۹۸۴) اعلام کرده است که بدون این تغییرات، ایجاد غارها، در راستای انحلال کارستی، تنها در محلهایی است که گرادیان و پهنای نخستین مسیر انحلال به طور بی‌سابقه‌ای بزرگ باشد (برای نمونه در امتداد پرتگاه‌ها). در برابر، انحلال در مقابل ازدیاد n کاهش می‌یابد و به صورت یکنواخت در مسیری طولانی در محل درز و ترکها انجام می‌شود. در زمانی که به طور تصادفی گذرگاه آب در برابر میزان کم C/C_3 توان نفوذ کردن را می‌یابد، انحلال موجب بزرگتر شدن باز شدگی‌های و تبدیل آنها به غار می‌شود. اثر آن مانند نمونه حفاری چاههای اولیه (پیشرو) برای میخکوبی است. وایت نشان داده

^۱ - Berner

است تغییرات تیپ گرادیان آبهای زیرزمینی از مرحله آرام^۱ به تند^۲ است و به صورت انرژی سینتیک در گذرگاههایی که بزرگتر می شود می باشد. این امر همزمان با جریانهای انتقالی صفحه ای و شروع جابه جایی رسوبات است. این مرحله یکی از مهمترین آستانه های تکامل غار به حساب می آید.

بنا بر تغییرات بسیار گسترده ای که در میزان انحلال در مسیر گذرگاه در مراحل آغازین خوردگی نهفته است، تشخیص زمان لازم برای تکامل گذرگاه آب بر پایه نمودارها میسر نیست.

۳-۲ هم بستری غارها با لایه های آبدار آهکی

غارها تنها از پاره ای دهانه های باز شده انحلالی در توده سنگ میزبان به وجود می آیند، حتی غارهای لایبرنتی کوچک (حلزونی فام) که کم و بیش در محاصره توده سنگهای غیرانحلالی هستند نیز از این فرایند تبعیت می کنند. اکثر غارهای نخستین بر اثر جاری شدن مقدار کمی آب در آبگذرهای باریک و روباز که مسافت زیادی را طی کرده اند شکل گرفته اند. تنها مسیر آبگذرهایی که (توانسته اند از همسایگی خود تغذیه شوند) رشد تندتری داشته، تبدیل به غار واقعی شده اند. تمام جریانهای ضعیف با قدرت انحلال کم، کارایی غارسازی را نداشته اند. بهینه ترین مسیر برای ایجاد غار، آنهایی هستند که کوچکترین t_{max} را دارا هستند. در آنجایی که t_{max} متناسب با $(Lb/Q \cdot P_{CO_2})L/i$ کوتاهترین مسیر با بیشترین دبی و نسبت $PCO_2:CO_2$ چندان تغییرات عمده ای در جریانهای اطراف به وجود نمی آورد، میزان Q به تعداد بسیار زیاد تغییر می کند. پهنای ترکها یکی از مهمترین متغیرها در تشخیص چگونگی پخش جریان است. برای تشکیل یک غار، آبهای همزاد نقش بسیار بنیادین در مسیرهایی که پهنای ترکهای توده سنگ تنها کمی بزرگ است، بعهدده دارند. این پدیده در شکل ۲-۱ ج به صورت گذرگاههای حلقوی نمایش داده شده است.

رشد غارها در مناطقی دیده می شود که روانابها در محدوده کوچکی بهم پیوسته و جاری می شوند. مراحل کارستی شدن آغاز می شود و نماهای ثانویه غار پس از به وجود آمدن غار آغاز می شود. نواحی مستعد و ایده آل برای توسعه غارهای اولیه شامل جریانهای معلق، مسیرهای یخچالی و محل تماس بین سنگهای محلول و نامحلول است. اهمیت نقش آفرینی توپوگرافی مناسب در پیدایش غارهای نخستین در نمونه های ۴۴٪ (۶۷٪ در طول) با آب دره ها و یا مسیرهای فروافتاده، ۱۸٪ (در ۱۰٪ طول) در مرز بین سنگهای محلول و غیرمحلول دیده می شود. از مابقی ۷۰٪ طول متشکل از غارهای مخفی مانند غار کارلسباد^۳ (اشکال ۲-۱ د و ۲-۵) است که رشد آنها مستقل از جریانهای سطحی بوده و مابقی باقیمانده، پنجره ای به سوی نواحی کناری گشوده اند.

۴-۲ شاخه های غار در برابر سیمای غار

در تعداد زیادی از گذرگاهها، آبهای سرگردان با وجود بده بالا، تاثیر چندانی در بازشدگی های پیرامون خود ندارند. آبهای اطراف به سوی یک گذرگاه بزرگ متمایل می شوند و ایجاد شبکه ای می کنند. چنانچه گرادیان هیدرولیکی پرتیب و مسیر جریان کوتاه

1 - high - order
2 - low - order
3 - Carlsbad

باشد شدت انحلال افزایش یافته و به سرعت به حداکثر در بین بسیاری از مسیرهای مختلف می‌رسد. رشد در تمام جهات خواهد بود، ولی کوچکترین بازشدگی‌ها تقریباً هم شکل هستند و صرفنظر از اندازه آنها ایجاد غارهای زیرزمینی می‌کنند. اثر مشابه آنچه ذکر شد در آرایش درز و ترک‌هایی که تقریباً به طور یکسان تغذیه می‌شوند بازتاب می‌یابد (شکل ۲-۱۰-ب).

طبیعت آب زیرزمینی تغذیه‌کننده یکی از مهمترین عوامل تعیین غارهای زیرزمینی و یا غارهای شبکه‌ای است. گرچه مجموعه عوامل توپوگرافی، لیتولوژی، نوع خاک، شرایط آب و هوایی، آبهای زیرزمینی و تغذیه نیز از نکات حساس در به وجود آمدن سیمای غار است.

غارهای زیرزمینی (الف) یا با جاری شدن روانابها و ورود به سنگهای قابل انحلال در جریانهای زیرزمینی یا به وسیله سیل و ایجاد گردان‌ها تند هیدرولیکی که توان به وجود آوردن مسیرهای گشاد در جهات مختلف داشته (ب) یا با گسترش یافتن در روی یا زیر لایه‌های تروا و معمولاً توده سنگهای غیرقابل انحلال که موجب به وجود آمدن جریانهای یکنواخت در آهکهای شکسته شده است و (ج) یا آبهای مهاجم خورنده زیرزمینی در بازشدگیها، پس از بهم پیوستن آبهای دارای خصوصیت شیمیایی متفاوت یا سرد شدن آبهای گرم موجب به وجود آوردن غارهای پنهان می‌شوند. غارهای زیرزمینی بهم پیوسته تنها بر اثر منابع تغذیه کننده‌ای که به شدت دچار نوسان می‌شوند به وجود می‌آیند. غارهای شبکه‌ای و اسفنجی در طیف گسترده‌تری به وجود می‌آیند مانند سیلاب، آبهای از هر سو پخش شده و در شرایط گدازه‌ای آتشفشانی به وجود می‌آیند. غارهای شاخه‌ای تقریباً همه در شرایط گدازه‌ای به وجود آمده‌اند. در بخش زیر، منشاء به وجود آمدن هر یک از غارها بررسی می‌شود.

۵-۲ منشاء غارهای شاخه‌ای

تعداد غارهای شاخه‌ای بسیار زیاد و از جهت طول بیش از هر یک از سایر غارها می‌باشد. از این رو جای شگفتی نیست که آنها در شرایط کارستی به وجود می‌آیند. آبهای خورنده در زیر نواحی کارستی و فروافتادگیها متمرکز شده و در نقاط مختلف نفوذ می‌کنند. غارهای شاخه‌ای در فرایند بهم پیوستن مسیرهای هر دو نوع باز و پوشیدگیها، بویژه لوله‌ای، دره‌ها و تنوره‌ها به وجود می‌آیند. عوارض کوچک برهنه، بدون پوشش و دارای شکستگی زیاد، بعد فضایی به مساحت ۱۰۰۰ کیلومتر مربع را به وجود می‌آورند. یک عارضه به تنهایی ممکن است کیلومترها زهکش باشد. هریک از سرچشمه نقاط دارای توان به وجود آوردن یک غار شاخه‌ای را دارا هستند. گذرگاههای کوچک با پیوستن به گذرگاههای بزرگ ایجاد معبر بزرگ می‌کنند. محل ظهور آنها معمولاً به صورت چشمه‌های منفرد هستند، گرچه سرریز شدن آب چشمه‌ها ممکن است بر اثر بسته شدن چشمه‌های اصلی به وجود آید. محوطه‌های بزرگ در محل برخورد گذرگاهها یا محل‌هایی که مصالح فروریخته بر اثر فرآیند انحلال از میان رفته‌اند، شکل می‌گیرد.

غار بلواسپرینگ^۱، در آهکهای سالم^۲ سازند می‌سی‌سی‌پی، یک نمونه جالب غار شاخه‌ای است.

بیش از ۵۰ گذرگاه پنجه‌ای بهم می‌پیوندند تا یک گذرگاه منفرد بزرگ در ایست فورک^۳ وایت‌ریور^۴ برای زهکشی چشمه‌ای که در آن ناحیه قرار گرفته به وجود آورند. با عمیقتر شدن مسیر رودخانه، بسیاری از گذرگاهها متروک شده و جریان آنها به

1 - Blue Spring

2 - Salem

3 - East Fork

4 - White River

بخش عمیق رودخانه منتقل می‌شود. تنها در زمان سیلابی از گذرگاههای متروک شده جریان برقرار می‌شود. بخش غار زیرزمینی در این ناحیه از روی هم قرار گرفتن زمینه شاخه‌ای فعالیت جریانهای سیلابی شکل گرفته است.

۶-۲ تکامل فروافتادگی‌های کارستی و منطقه (زون) کارست سطحی

در گردش مقدار زیاد آب زیرزمینی برای تشکیل غارهای شاخه‌ای معمولاً موانعی به طور عمده در رودخانه‌های سطحی مانع یا کندی حرکت را به وجود می‌آورند. جریانهای کوچک شاخه‌ای در سطح، آب خود را از دست می‌دهند و اولین نشانهای فروافتادگی را به وجود می‌آورند، جایی که رودخانه‌ها سنگربندی کرده و به صورت خروجی آب زیرزمینی عمل می‌کنند. در مراحل اولیه توسعه غار، مراحل انحلال سنگ بستر در چند متر اولیه در قسمت‌های سطحی زمین صورت می‌گیرد و انحلال در ژرفا بسیار با آرامی مواجه است.

فروافتادگی کارستی، سازگار با تشکیل غار است. با بزرگتر شدن گذرگاه مسیر، مصالح و مواد فرسایش یافته از حفره فروکش در جریان زیرزمینی افزایش می‌یابد و مسیر گشادتر و بزرگتر می‌شود. با بزرگتر شدن حوضه آبگیر حفره فروکش، میزان بیشتری آب حوضه زهکش را تغذیه کرده و به طور خودکار آنرا تشدید می‌کند و کلیه بازشدگیهای مسیر را فرسایش می‌دهد. انحلال، نشست و فروریختگی همگی سهمی در منشاء ایجاد فروافتادگی به عهده دارند. در پاره‌ای از موارد، بستر جریان دارای حفره‌هایی است که از این طریق می‌تواند به جریان غارهای زیرزمینی منجر شود. ولی بیشتر با پوشش خاک روی سنگ مادر مواجه می‌شود.

تغذیه مجدد حفره فروکش بیش از آنچه از سطح زمین بنظر می‌رسد، پیچیده است. به طور کلی چند متر آهک بالایی دارایی دهها هزار مسیر انحلالی درز و ترک است که این بخش بنا بر دیدگاه ویلیام^۱ تشکیل کارستهای سطحی را می‌دهد. این نواحی اکثراً با توده خاک پر می‌شوند. این بازشدگیها در نتیجه انحلال جریانهای خورنده سطحی به وجود می‌آیند. بسیاری از مسیرهای قابل مقایسه، در سطح با آهنگی همسان گشاد و بزرگ می‌شوند که در بخش بالایی شکل ۲-۱۰ آشکار است. درز و شکافها به سرعت با افزایش ژرفا نازک و باریک می‌شوند و در فصل‌تر، آب در اجزای آنها، در امتداد افقی حرکت کرده و به مسیرهای باز خالی متصل به غارهای زیرزمینی راه می‌یابند. در این راستا، تغذیه پراکنده از کارست روی زمینی به نقطه اصلی مرکز تغذیه زیرزمینی راه می‌یابد.

۷-۲ توسعه گذرگاههای متمایل به مرکز

آبهای ثقلی متشکل از جریانهای جداگانه‌ای هستند که رفتار هیدرولیکی بهم پیوسته‌ای نسبت به یکدیگر ندارند. هریک از مسیرهای ثقلی، گذرگاه مستقلی را پیش گرفته و تمایلی به یکی شدن با جریانهای همسایه خود ندارند، آبهای بالای سطح اشباع زمین^۲، در دره‌های عمیق به طور موازی مسافت زیادی را بدون آنکه به هم ملحق شوند، طی می‌کنند. گرچه اینگونه آبها تحت شرایط بعضی از ساختمانهای زمین‌شناسی و درز و ترکهای متقاطع یا ناودیسها و یا حوضه‌های افقهای بالاتر سعی در بهم

1 - William (1985)

2 - Vadose

پیوستن می‌کنند. در گذرگاههایی که منحصرأ جریان آب بالای افقهای اشباع شده وجود دارد، بافت غار شاخه‌ای، در جریان‌های اولیه شکل می‌گیرد.

مسیرهای آب معلق ایجاد هد^۱ پایین کرده و موجب جذب مسیر آبهای معلق پیرامون خود می‌شود. تمایل به متحدالمرکز شدن مسیرها در نواحی حفره‌دار پیش از آغاز انحلال است که دارای کارایی هیدرولیکی متفاوت هستند و غار شاخه‌ای به سادگی جانشین می‌شود. توسعه سایر مسیرهای شاخه‌ای با دوباره تطبیق دادن مسیرهایی که در آنها فشار آب با گذشت زمان تغییر می‌یابد، انجام می‌شود.

۸-۲ بازنگری به پیدایش غارها بر اثر سیلاب

۱-۸-۲ ویژگیهای تغذیه با سیلاب

غارهایی که بر اثر فرورفتن جریانهای سیلابی در دوران بارندگیهای شدید و یا ذوب سایر برفها به وجود می‌آیند. تراوش شدید در حوضه‌های آبرگیر برهنه یا کارست‌های آلی و سیلابهای کرانه‌ای رودخانه می‌تواند غارهای مشابه آبهای فرورو را به وجود آورد. در زمان جریان یافتن شدید روانابها به فروافتادگیهای روباز، تراز آب در گذرگاههای اکثر غارها به سرعت بیشتری نسبت به نواحی دارای شکستگی و خلل و فرج‌دار بالا می‌آید. گرا دیان نرمال هیدرولیکی به سوی گذرگاه به طور موقت معکوس شده و آب به نواحی دارای گرا دیان هیدرولیکی پرشیب روان می‌شود. این فرآیند در نواحی دارای فروریختگی، مانع و یا نواحی دارای مصالح غیرقابل انحلال، فعالیت است^۲. افت فشار در چنین نواحی با میزان تغذیه متفاوت است.

سیلاب، توان ایجاد تغذیه بزرگی چندین برابر جریانهای کوچک دارد، از این رو آب در بالادست محلی که گرفتگی مسیر وجود داشته باشد به صورت آبرگیر شکل می‌گیرد. در پاره‌ای نواحی، حداکثر جریان به میزان چندین متر مکعب بر ثانیه داخل گذرگاههای روباز می‌رسد. سرریز شدن جریان سیلابی داخل غار موجب بازشدگیهای افقهای بالاتر شده و همچنین موجب کم ضخامت و باریکتر شدن حداکثر سیلاب در چشمه‌های کارستی می‌شود^۳.

برخاستن تراز آب زیرزمینی به هنگام جریان سیلاب می‌تواند به طور موقت شرایط آب معلق^۴ را نسبت به آبی که بالای سطح اشباع زمین جریان دارد^۵، به وجود آورد ولی متفاوت با آب معلق است، زیرا در این حالت گرا دیان هیدرولیکی بزرگتر و آب مهاجمتر است. رشد و توسعه غار در شکل ۲-۱۰ با شتاب در محل حداکثر دبی انجام می‌گیرد. ارزش i/L بزرگتر از $0/001^{-1} \text{cm}$ سانتیمتر متداول است، به ویژه در گذرگاههایی که فروریزش مانعی جدی در مسیر فعال جریان آب شده است. براساس شکل ۲-۱۰، به روشنی آشکار است که در این شرایط تمام شکستگیهای با پهنای بزرگتر از $0/01 - 0/005$ سانتیمتر در حداکثر دبی رخ می‌دهد بدون آنکه از مراحل انحلال آرام و کند اولیه گذشته باشد. اگر تمام بازشدگیهای توده سنگ با چنین آبی تغذیه شود آنها به طور مشخص دارای ارزشهای CO و C_s خواهند بود. بازشدگی‌ها و گشاد شدن آنها منجر به تشکیل غار

1 - Head

2 - Palmer, 1972, 1975

3 - Manjin, 1975

4 - Phratic

5 - Vadose water

زیرزمینی می‌شود که با گذرگاههای مختلف برخورد دارد. با آنکه جریان سیلابی در طول سال، تنها در مدت کوتاهی رخ می‌دهد، اما آنها موجب سایش و انحلال گسترده‌ای می‌شوند. به طوری که گذرگاههای جانبی می‌توانند در کمتر از ده‌هزار سال به وجود آیند.

یکی از ویژگیهای سیلاب، تزریق آن است آن هم با ایجاد مخازن در کنار گذرگاه سیلاب به ویژه در بخشهایی که مانع برای عبور سیلاب به وجود آمده‌است. بسیاری از غارها دربر دارنده هر دو شرایط هستند، که نوع اول طی چند ثانیه به وجود می‌آید. این نوع مشخصه اکثراً در غارهایی که به طور مؤثر زهکش می‌شوند یا در شرایطی که تغییرات تغذیه نسبت به زمان ناچیز است، وجود ندارد. حداقل ده درصد نمونه غارهای مطالعه شده، چه در تعداد و چه در طول نشان از بازسازی قابل توجه آنها بر اثر انحلال سیلاب است.

۲-۸-۲ سیمای تزریق با سیلاب

در شرایطی که جریان عادی است، بیشتری شکستگی‌ها و جداشدگیهای پیرامون غار یا با هوا پر شده و یا دارای آبی است که نزدیک است از نظر شیمیایی اشباع شود. زمانی که سیلاب در غار رخ دهد، آبهای مهاجم داخل بازشدگیها شده و با فروکش شدن سیلاب از شدت آنها کاسته می‌شود. سرایت آب، به سرعت موجب گشاد شدن و انحلال و درز و ترکهای یکسویه می‌شود. همانطور که در شکل ۲-۶ دیده می‌شود، این سیما در سقف و دیوارهای غار متداول است. در این نواحی پوشش رسوبات تخریبی به حداقل می‌رسد. در محلهایی که شکستگیها اساسی و سیلاب شدید است، شبکه غارهای زیرزمینی به وجود می‌آید. چنانچه غار از تغذیه کرانه‌ای آبهای سطحی به وجود آمده باشد، سراسر غار زیرزمینی خواهد بود. غارهای زیرزمینی بیشتری ممکن است روی غارهای شبکه‌ای پیشین، مانند غار اسکول^۱ در نیویورک، گسترش یافته باشند. در نهشته‌های دونین گروه هلدربرگ^۲ دارای چندین شبکه غار زیرزمینی است که در جهت افقی گسترش یافته‌اند. غاری با حدود ۴ کیلومتر درازا و دارای راهروهای منفرد به درازای ۵۰۰ متر در اثر سیلابهای دوره‌ای و آبگیرهای چینه‌ای و یخچالی به وجود آمده است.

در لایه‌های طبقه‌ای، سیلابها در بین لایه‌بندی بهم پیوسته نفوذ می‌کنند، همچنین در این لایه‌ها لوله‌های بهم پیوسته کوچک دارای زمینه بهم پیوسته، مشابه غار زیرزمینی وجود دارد. اکثر بررسی‌کنندگان بر این باورند چنین زمینه‌ای مقدمه تشکیل غار زیرزمینی است، مگر آنکه تغذیه آنها از سرچشمه آبهای مهاجم دیگری باشد که به طور موقت جریان معکوس یافته و آب تحت گرادیان هیدرولیکی پرشیب به بازشدگیهای اطراف سرایت می‌کند. این فرآیند زمانی به حالت شدیدترین عملکرد خود است که یک گذرگاه فعال دارای موانعی از قبیل انبوه فروریختگیهای محلی و لایه‌های غیرقابل انحلال و یا پرشدگی با رسوبات ریزدانه باشد.

افت فشار در صورت وجود چنین موانعی در ارتباط با منشأ تغذیه تغییر می‌یابد. سیلابها قادر به وجود آوردن تخلیه‌ای هستند که چندین برابر بزرگتر از جریانهای ضعیف است. به همین دلیل در بالادست، آب به سرعت در دو سوی موانع تشکیل آبرگیر می‌دهد. در سنگهای کنگلومرایی و یا آهکهای توده‌ای با تخلخل بین دانه‌ای بسیار بالا، سیلاب در دیواره غار ایجاد زمینه‌های

1 - Skull

2 - Helderberg

اسفنجی می‌کند. نمونه آن غار بیگ براش کریک، در یوتا، در آهکهای برشی سازند هامبوک می‌سی‌سی‌پی است. نمونه‌های بهم پیوسته اسفنجی در راستای افقی به ندرت دیده می‌شوند.

۲-۸-۳ سیلاب در آبگذرها

موانع کوچک در گذرگاههای فعال اکثراً توسط گذرگاههای اسفنجی غارهای زیرزمینی دور زده می‌شوند. اشکال آنها به شکل شبکه‌ای، بهم پیوسته یا به ندرت اسفنجی است که بستگی به نوع سنگ بستر دارد. فروریختگی‌های مشابه که موجب مسدود شدن چشمه‌های کارستی می‌شوند موجب ایجاد یک شبکه از درز و ترک یا لوله‌های جانبی در توده فروریخته شده که موجب سرریز شدن چشمه‌ها می‌شود. مسیرهای آبگذر جانبی متداول هستند، اما معمولاً آنها دارای سطح مقطع نامنظم بوده که در اثر تزریق سیلاب شکل گرفته‌اند.

جریان جانبی سیلاب در برخورد با موانع غار زیرزمینی مانند آب تزریق شده عمل کرده و گذرگاه را به سرعت گشاد می‌کند. چنین فرآیندی همانطور که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است، بسیار با سرعت انجام گرفته و به حداکثر بده خواهد رسید. بنظر می‌رسد که از میان جریانهای جانبی تنها یکی، دو جریان، توان کافی برای انتقال آب را دارا هستند. حتی گذرگاههای جانبی با گرادیان تند هیدرولیکی در زمان سیلاب نمی‌توانند مناسب باشند. افت فشار نقش حساسی در گذر سیلاب به عهده دارد، به طوری که تغییرات کوچک بده موجب پدید آمدن اختلافهای بزرگ در بده جریانهای پیرامون شده و سبب بهم پیوستن این جریانها می‌شود. درز و ترکها و حفره‌های به وجود آمده در اثر تزریق سیلاب موجب پیچیدگی زمینه گذرگاه سیلاب و نهایتاً بهم مربوط شدن آنها می‌شود. از این رو در چنین شرایطی شکل‌گیری غار زیرزمینی بیشتر از محل گذرگاههای منفرد و یا گذرگاههای موازی با هم است.

بررسی تاریخ به وجود آمدن غار اسپرینگ نشان می‌دهد که فروریختن در گذرگاه سیلاب موجب تشکیل یک دریاچه در غار زیرزمینی به طول ۲ کیلومتر شده است. غار زیرزمینی از بهم پیوستن درز و ترکهای عمودی به درازای ۲۰ متر به وجود آمده است. برخی از این شکافها پر شده از آب دائم هستند و برخی تنها در زمان سیلاب پر می‌شوند. زوایای تیز و نامشخص بسیاری از گذرگاههای بهم پیوسته که تمایل اکثر آنها در غار به سمت راست است، تقریباً عمومی بوده ولی لزوماً قابل رویت و تشخیص نیستند. بافت این زمینه درز و ترکهای بهم پیوسته ممکن است در زمان فروریختگی بر اثر برداشتن بار و در نتیجه تنش از روی آنها باشد. فروریختگیهای بیشتری ممکن است بر اثر شستشوی سیلاب و فرسایش رخ دهد.

نمونه غار زیرزمینی پس از سیلاب بهم پیوسته گذرگاهها در شکل‌های ۲-۴ و ۲-۷ و ۲-۸ نشان داده شده است که بستر از جنس چرت بهم پیوسته درز و ترک‌دار است. شبکه‌ای از موانع به شکل لوله‌های موازی که همزمان به‌وجود آمده‌اند، متداول است. بسیاری از غارهای بهم پیوسته زیرزمینی نمی‌توانند از بهم پیوستن معابر جانبی به وجود آیند ولی آنها گذرگاههای پر آب را به‌هنگام سیلاب تشکیل می‌دهند.

بستر برهنه کارستهای آلپ موجب تغذیه بلادرنگ آبهای زیرزمینی می‌شود. غارهای آلپ که سطح گسترده‌ای از زهکش را دارا هستند به شدت مستعد ایجاد سیلاب هستند و بافت سیما و زمینه آنها متمایل به پیچیدگی در زمان رخداد سیلاب است.

بزرگترین غار جهان در آلپ، از نوع بهم پیوسته است. نقشه بخشی از آن در شکل ۲-۱- ج نشان داده شده است (نگاه کنید به بوگلی ۱۹۷۰).

در فاصله کوتاهی هد گذرگاهها تا ۱۰۰ متر می‌رسد. همچنین با افت بستر، افقهای متعددی توسعه و گسترش می‌یابند که تبدیل به یک غار زیرزمینی می‌شوند.

۹-۲ ریشه غارهای زیرزمینی بر اثر تغذیه یکسان

غارها ممکن است بر اثر تغذیه یکسان از شبکه خلل و فرج بین دانه‌ای در توده سنگ یا از طریق لایه‌های تروا ولی غیرقابل انحلال بالایی و پایینی به وجود آیند. اینگونه غارها اغلب حالت شبکه‌ای و یا اسفنجی به خود می‌گیرند و پیوند در آنها همراه شکستگی و یا خلل و فرج بین دانه‌ای است (پالمر، ۱۹۷۵).

۱۰-۲ نشت یکسان در آهکهای متخلخل

نشت آب در آهکهای دارای تخلخل بین دانه‌ای به سرعت موجب اشباع توده آهک می‌شود. این قبیل آبها به ندرت ایجاد غار می‌کنند، زیرا قدرت انحلال و خوردندگی آنها پس از چند متر نفوذ از سطح، از بین می‌رود. غارهای به وجود آمده در عمق، بر اثر مخلوط شدن این گونه آبها با آبهای دارای خواص شیمیایی دیگری که توان خوردندگی دارند، است. معمولاً اختلاف آبها، در میزان CO_2 (بوگلی ۱۹۶۴)، میزان شوری (ویگلی و پلومر ۱۹۷۶) یا میزان H_2S است.

از جهت تئوری، در سواحل آبخیز مخلوط شدن آبهای شیرین با آب دریا، به نسبت مشخصی ایجاد آب خورنده می‌کند (پلومر ۱۹۷۵). این فرآیند توسط پلومر و دیگران در سال ۱۹۷۶ در برمودا و توسط بک^۱ و دیگران (۱۹۸۴) در یوکاتان اندازه‌گیری شده است. پالمر و دیگران (۱۹۷۷) مشخص کرده‌اند، خوردندگی در غارهای برمودا بر اثر اختلاف میزان CO_2 ، است که بیشتر از شوری آب افزایش یافته است.

انحلال مخلوط در ارتباط با میزان اختلاف تعادل اجزای گاز بین دو محلول است به ویژه آنکه، اگر میزان غلظت یکی از آنها خیلی پایین باشد. اگر بده جریان دو سرچشمه شناخته شده باشد، میزان افزایش سالانه در حجم خلل را می‌توان از رابطه ساده تعادل جرم بدون دخالت انرژی سینتیک به دست آورد، زیرا حداکثر توان خوردندگی به نظر می‌رسد در شرایط شروع اختلاط وجود دارد. ارزش تغذیه و C_s به آسانی به دست نمی‌آید و با تغییر فصل بارندگی یا جذر و مد عوض می‌شود. دو آب با سرچشمه جدا از هم، به ندرت می‌شود به یک نسبت با یکدیگر مخلوط شوند. معمولاً نسبت یکی کمتر بوده و میزان بده جریان کمتر به جریان بزرگتر، دامنه انحلال را کنترل می‌کند. در کانالهای روباز با سامانه (سیستم) جریان لامینار، اختلاط دو جریان، بر پایه انتشار عوامل شیمیایی است تا عوامل هیدرولیکی.

غارهای با ریشه مخلوط، ۱۰-۸ درصد نمونه‌ها را شامل می‌شوند، در حالی که کمتر از ۳ درصد مسیر را در برمی‌گیرند. نمونه تیپ به وسیله پالمر (۱۹۸۴) و مایلوری^۲ (۱۹۸۸) نشان داده شده است. اکثر آبها به شکل اسفنجی، شبکه‌ای و یا اتاقهای نامنظم

1 - Back
2 - Mylorie

از تراورتن به وجود آمده‌اند. انحلالهای منفرد به شدت در امتداد لایه‌بندی یا شکستگی ادامه یافته که مجموعه آنها تمایل به آرایش صفحه‌ای دارند و محدود به نواحی به شدت انحلالی با جریان مخلوط هستند، زیرا افقهای اسفنجی در آهکهای متخلخل فصلی ساحلی دلالت می‌کند بر تراز آب دریای پلیستوسن^۱ در محلی که آب شیرین با آب دریا مخلوط می‌شود. مایلوری پیدایش غارهای باهاما^۲ را برا اثر هر دو مورد مخلوط شدن آب همزاد و فراتیک و آب شیرین و آب شور می‌داند. در مورد اول غارها نیمه افقی بوده و در مورد دوم انحراف از ساحل دریا دارند. اکثریت غارهای باهاما نزدیک و تقریباً موازی ساحل، در محلی که آب زیرزمینی و مخلوط بیشترین مقدار را دارد، قرار دارند. سطوح کارستی به شدت متخلخل و چند مورد از کانالهای روباز از طریق انحلالهای جانبی، راه به مسیرهای زیرین غار می‌یابند. راه دسترسی به اکثریت غارها از طریق حفره‌های فروکش و یا به طور اتفاقی از محل برخورد پهنه‌های فرسایش یافته یا مسطح است.

۱۱-۲ تغذیه از میان سنگهای تراوای غیرقابل انحلال

از بین نمونه شبکه غارهای مورد مطالعه قرار گرفته، ۷۵٪ آنها دارای سنگ پوشش ماسه سنگی تراوا هستند. در محلهایی که این ماسه سنگ ضخیمتر و یا آنکه در جهات افقی دارای تراوایی کمتر شده است، اگر در زیر آن غاری وجود داشته باشد، به صورت شبکه‌ای خواهد بود (پالمر، ۱۹۷۵). در زمینهای بالادست، خوردگی در ماسه سنگها دیده می‌شود و موجب پخش و تغذیه توده سنگ آهک زیرین شده است. تمام سنگ آهکهای دارای شکستگی به طور یکسان تحت تاثیر خوردگی شیمیایی قرار گرفته و دارای رشد و میزان قابل توجه خوردگی هستند (شکل ۲-۱۰-ب). حدود ۵٪ غارها در این مطالعه (۷٪ طول غارها)، از این طریق به وجود آمده‌اند. بزرگ شدن شکستگیها ممکن است زمانی شروع شده است که محل تماس توده سنگ آهک و ماسه سنگ در زیر جریانهای رودخانه‌ای قرار داشته است. به طور اساسی تراوایی ماسه سنگها بزرگتر بوده و اکثراً آب زیرزمینی در آنها جریان دارد. میزان ناچیز آبی که وارد درز و ترکهای توده سنگ آهک تراوا می‌شود به تدریج موجب باز شدن آنها خواهد شد. در چنین صورتی جریان بیشتری از آب در توده سنگ آهک نسبت به ماسه سنگ جریان می‌یابد، زیرا مقاومت توده ماسه‌سنگ در برابر جریان آب بیشتر از سنگ آهک است. تغذیه درز و ترکها با یکدیگر متفاوت بوده و از روند لگاریتمی پیروی می‌کند که در ارتباط با بازشدگی آنها می‌باشد (پالمر، ۱۹۷۵). تمام درز و ترکها صرفنظر از بازشدگی آنها، به میزان قابل توجهی، آب دریافت می‌کنند و همه آنها به یک نسبت دچار خوردگی خواهند شد. این فرآیند تا تشکیل غار و پر شدن آن از هوا ادامه می‌یابد.

برای مثال، غار کراس رود^۳ در ویرجینیا، داخل گروه هلدربرگ دونین که با ماسه‌سنگ نازک اوریسکانی^۴ پوشیده شده است (شکل ۲-۱-ب)، دارای شبکه‌ای از خطوط مستقیم است که هنوز از این راه آبهای خورنده داخل می‌شوند و بازسازی عمودی دیواره‌های غار را به عهده دارند. اکثر اینگونه غارها، بازشدگی در سطح زمین داشته و به همین دلیل سیلابها موجب فراختر

1 - Pelistocen
2 - Bahamas
3 - Crossroads
4 - Oriskany

شدن آنها می‌شوند و به طور متناوب با هدایت حوضه آبریز به‌هنگام سیلاب، سیمای اولیه به وجود آمده و غار گشاد و گسترده می‌شود. فراخترین محل غار لازم نیست بی‌درنگ زیر ماسه سنگها باشد.

اکثر آبهای نفوذی از سنگهای پوششی غیرقابل انحلال و از توده خاک دارای دی‌اکسید کربن عبور می‌کنند. زمانی که لایه‌های آهکی زیر سنگ پوشش از خود بازتاب شیمیایی نشان می‌دهند، بسیار ابتدایی و ضعیف بوده، در نتیجه مقدار ناچیزی از آهک حمل می‌شود و در نتیجه تعادل PCO_2 کاهش می‌یابد (نگاه کنید به شکل ۲-۹). زمانی که این آب با سایر آبهای زیرزمینی مخلوط می‌شود، میزان تراکم CO_2 در آنها بسیار بالا خواهد بود، در نتیجه شروع خوردگی بسیار بالا است.

در بسیاری از غارهایی که دارای پوشش ماسه‌سنگی هستند، آب از درز و ترکهای سنگ پوشش به صورت کانال به سطوح سنگ آهک زیرین راه می‌یابد. در چنین شرایطی، توده خاک نقش تعیین کننده در جریان آب دارد. اگر نشت آب به درز و ترکهای اندک توده سنگ آهک راه یابد، انحلال مجموعه ستونهای مانند تنوره غول^۱ و دره‌های باریک عمیق، فراوان می‌شود.

۲-۱۲ شبکه‌های زیرزمینی با منشاء آرتزین

نسبت دادن شبکه‌های زیرزمینی به جریانهای عمیق و آرام لایه‌های آبدار آرتزین متصور است. پاره‌ای از بزرگترین شبکه‌های غار جهان، شامل غارهای ویندو ژوئل^۲ در بلک هیل^۳، در توده آهکهای شکل گرفته‌اند که فراشیب لایه‌ها به محل‌های محدوده شده، منتهی می‌شود. در غارهای آبدار آرتزین که به میزان کافی به پایین دست راه می‌یابند، چشمه‌های کارستی جاری می‌شوند.

به وجود آمدن غار در راستای افقی بدون مهیا بودن ویژگیهای زمین‌شناسی مربوط، میسر نخواهد بود. در نتیجه بنا بر جریان و انحلال ضعیف، تشکیل آرتزین آبدار به صورت حلقه محتمل است. غارهای زیرزمینی با ریشه آرتزین باید دلایل دیگری داشته باشند یا آنکه با پخش و تغذیه از داخل لایه‌های غیرقابل انحلال نیمه محدود و یا همزمان با تولید آبهای مهاجم در جریانهای مختلف مربوط است. مورد آخر در زیر بررسی می‌شود.

۲-۱۲-۱ غارهای زیرزمینی

کمتر از ده درصد نمونه غارهای بررسی شده در این گزارش دارای ریشه زیرزمینی هستند که شامل پاره‌ای از بزرگترین غارهای جهان است. مطالعات مغزه‌های حفاری شده دلالت بر این موضوع دارد که این غارها تخلخل‌های ناچیز برای به وجود آمدن معابر دارند. مهمترین اسیدهای زیرزمینی شامل اسید کربنیک و اسید سولفوریک (و سولفور هیدروژن آبدار) است. منافذ و معابر انحلالی غارها از هدایت آبهای اسیدی از لایه‌های غیرقابل انحلال به سنگ‌آهکها و یا بر اثر فرآیند اکسید شدن H_2S آب و یا تغییر و افت درجه حرارت (یک درجه)، به وجود می‌آیند. سه عامل آخری عمده‌ترین دلیل تشکیل غارهای زیرزمینی هیپوژنیک^۴ هستند.

1 - Shaft

2 - Wind & Jewel

3 - Black Hills

4 - Hypogenic

۲-۱-۱۲-۱ مخلوط شدن H_2S و آب

از سرگیری تهاجم خوردگی آبها بر اثر اختلاط آبهای دارای H_2S است. این فرآیند احتمالا در تکامل مخازن هیدروکربور مؤثرتر از غارها است. غارهای انحلالی پر شده از آبهای راکد سرشار از H_2S به معادن وارد می‌شوند (وارویک^۱، ۱۹۶۸)، برخی از آنها همراه سنگ معدنهای هیدروترمال، مانند معادن قلع - روی میدان پی‌چر^۲ دراوکلاهما-کانزاس (مک نایت و فیشر^۳ ۱۹۷۰) هستند. هنوز به درستی معلوم نیست که آیا اکثر این غارها بر اثر اسیدهایی که به وسیله فرآیند هیدروترمال تولید می‌شوند به وجود آمده‌اند و یا بر اثر کاهش سولفیت به وجود آمده‌اند.

۲-۱-۱۲-۲ اکسید شدن سولفیت

اسید سولفوریک بر اثر اکسید شدن مستقیم یا غیر مستقیم H_2S به وجود می‌آید. غارها بر اثر برخاستن لایه‌های آبدار و یا اثر گازهای H_2S داخل آب زیرزمینی در حوضه رسوبی به وجود می‌آیند (اگه‌میر، دیوید، هیل^۴). سولفیت‌های آبدار یا بر اثر آزاد شدن تدریجی و درازمدت گردش آبهای معدنی زیرزمینی و یا بر اثر رخداد حوادث ناگهانی به وجود می‌آیند. مورد آخر بر اثر مهاجرت حاشیه آبدار به کناره حوضه بر اثر تراکم رسوبات انجام می‌گیرد. برخاستن آبهای حرارتی بر اثر فعالیتهای سنگهای آتشفشانی یا آزاد شدن گاز از اعماق دریا یا بر اثر فشار زیاد در یک ناحیه و شکستگی هیدرولیکی یا فعالیت تکتونیکی می‌باشد.

در ارتباط با نحوه انحلال کلسیت به نظر می‌رسد در حرارت ۲۵ درجه سانتیگراد ابتدا آب با کلسیت در زیر تراز آب زیرزمینی در مجاور H_2S و CO_2 اشباع شده، آنگاه پس از آنکه تراز آب برخاسته به تراز آب زیرزمینی می‌رسد، در چنین حالتی تمام H_2S ها اکسید شده تبدیل به اسید سولفوریک می‌شود و تعادل جدیدی از کلسیت به وجود می‌آید، تراکم CO_2 آبدار، برابر $[CO_2]_i$ از ۰/۰۰۱M در (44mg/L) پیش‌بینی می‌شود. تبدیل H_2S به H_2SO_4 موجب به وجود آمدن انحلال ناگهانی می‌شود. اما اثر آن در صورتی که گاز CO_2 بر اثر رابطه $H_2SO_4 - CaCO_3$ به وجود آید کاهش می‌یابد. در گذرگاههای بزرگ آب زیرزمینی مانند کارلسباد کاورن^۵ (اشکال ۲-۱-۲ د و ۲-۵) درز و ترکهای باریک کف غار با رسوبات ثانویه بسته شده‌اند که این حالت معرف گذرگاه آبهای سرشار از H_2S است. یک گذرگاه منفرد از وارد شدن آب از یک سو و خروج فوری آن از سوی دیگر به وجود می‌آید که سرانجام ایجاد چشمه می‌کند (اگه‌میر^۶). پخش آب و جاری شدن آب در درز و ترکها ایجاد شبکه بهم پیوسته می‌کند. صرفنظر از ورودی، اگر آب‌زیر حد اشباع باشد، گذرگاههای متناوبی بر اثر جاری شدن آب به وجود خواهد آمد که بزرگی آنها قابل مقایسه با جریان سیلاب در غارها و شبکه‌های اسفنجی ایجاد شده در غار است.

1 - Warwick

2 - Picher

3 - McKinght and Ficher

4 - Egemeier, 1981, Davis, 1980, Hill, 1987

5 - Carlsbad Cavern

6 - Egemeier 1988

اگر تراکم انحلال سولفیت به اندازه کافی باشد در آن صورت روی دیواره سنگ آهکی ایجاد ژپس می‌کند (کوبین^۱). بلورهای ژپس روی دیواره‌های غار کین^۲ در امتداد تاقدیس شپ^۳ در وایامینگ^۴ به همین روش به وجود آمده است (اگه میر ۱۹۸۱). در این راستا بلوکهای ضخیم ژپس در غار کوههای گوادالوپ، نیومکزیکو به عنوان رسوبات اولیه در آبهای فوق اشباع با سولفیت کلسیم پس از انحلال اولیه به وجود آمده است (داوید ۱۹۸۰، هیل ۱۹۸۷). به روشنی معلوم است تالار برخی غارها بر اثر H_2S و گازهایی که از آبهای زیرین برخاسته‌اند و به داخل استخر غار رسیده‌اند، بزرگ شده است (استخرهایی که راه خروج نداشته‌اند). اکسید شدن اسید سولفوریک موجب انحلال سنگ آهک در داخل و بالای استخر غار شده و موجب متصاعد شدن CO_2 می‌شود. پس از آنکه اسید خنثی می‌شود، میزان نهایی C_s آب در پیوند با PCO_2 و برگشت به ارزش اولیه آن بوده و آب آمادگی رسوبگذاری سنگ آهک حل شده بر اثر عملکرد H_2S و اسید سولفوریک را دارد. تالار غار در کنار و بالای استخر گشاد می‌شود، اما کف غار و ترکهای رو به پایین با رسوبات آهکی مسدود می‌شوند.

اسید سولفوریک ممکن است از اکسید شدن پیریت به وجود آید، ولی فرآیند بسیار آرام بوده پیریت منافذ موجود محلی را پر می‌کند. برخی غارهای کوچک در این نوع فرآیند شکل گرفته‌اند (مورهاوس^۵).

۲-۱-۳ انحلال بر اثر برخاستن آبهای حرارتی

به دلیل رابطه معکوس بین انحلال کلسیت و درجه حرارت حتی در تراز پایدار CO_2 کاهش درجه حرارت و برخاستن آبهای حرارتی موجب افزایش انحلال می‌شود. برای آزمایش کردن تأثیر این فرآیند، نیاز به تجزیه تفاضل محدود^۶ بوده که در آن آب سرشار از CO_2 امکان بالا آمدن از درز و ترکهای به طول ۱۰۰ متر در سنگ آهک را داشته است و در این امتداد آب مذکور سرد شده است. آب مزبور که بالا می‌آید، به نظر می‌رسد کاملاً اشباع از کلسیت است. درز و ترکها به ۱۰۰ عدد مشابه در طول، تقسیم و میزان انحلال در هریک با $n=4$ و K تنظیم و محاسبه شده است و تراز تغییرات در جدول ۲-۱ دیده می‌شود. تغییرات C_s با درجه حرارت بر پایه روابط تعادل پایدار که به وسیله پلومر و بوسن بورگ^۷ (۱۹۸۲) معرفی شده، محاسبه شده است. با تغییرات میزان n و K در جدول شماره ۲-۱، شکل منحنی تغییرات ثابت بوده به طوری که روند ۵۰ درجه آب را می‌توان به تصویر کشید.

انحلال در جهت جریان آب افزایش می‌یابد، هم تراز بودن و ثابت ماندن تنها در تخلیه‌های کوچک میسر است. میزان کم C_s با درجه حرارت بالا همراه با مقدار K به هم خورده و سبب بزرگ شدن غار با افزایش درجه حرارت شده است. مضاعف شدن گرادیان حرارتی با $[CO_2]_i$ موجب افزایش رشد ده برابر، بدون تغییر در منحنی می‌شود. گرچه افزایش نرخ رشد بدون نسبت افزایش در q قابل توجه نیست. بیشترین افزایش مقدار q موجب می‌شود افزایش رشد منحنی گشادشدگی به حداکثر برسد و پس از آن افزایش a هیچگونه تأثیری ندارد. در نتیجه، بازشدگی درز و ترکها بر اثر سرد شدن آب به میزان حداکثر می‌رسد که

1 - Queen, 1981

2 - Kane

3 - Sheep

4 - Wyoming

5 - Morehouse

6 - Finite - difference

7 - Plumer & Busenburg

مستقل از تخلیه است. صرفنظر از اندازه و جریان آنها، اگر درز و ترکها همگی از یکنوع آب حرارتی تغذیه شوند، تمام آنها به یک نسبت مساوی بزرگ می‌شوند و ایجاد شبکه متقاطع زیرزمینی می‌کنند. این گونه شبکه‌های متقاطع در غار ویند در بلاک هیل با همین فرآیند شکل گرفته‌اند (باکلوویچ و دیگران^۱).

تنها در شرایط بسیار مناسب، سرد شدن آبهای حرارتی موجب انحلال شده و ایجاد غارهای افقی می‌کنند. حتی در چنین شرایطی زمان لازم برابر 10^5 تا 10^6 سال است. اکثریت غارهای حرارتی در اثر وجود اسیدهایی که در نتیجه آتشفشانی و حرارت به وجود می‌آیند یا مخلوط شدن آبهای مختلف جوی شکل گرفته‌اند. خاکهایی که CO_2 آنها از بین رفته است به ندرت بیش از ۰/۰۰۲۵ متر بوده و توان رشد ۱۰٪ غار را به عهده دارند.

تعادل PCO_2 آبهای برخاسته معمولاً بزرگتر از اتمسفر داخل غار و عبور آب از آن است. از دست دادن گاز CO_2 زمانی که افت فشار وجود داشته باشد رخ می‌دهد، در چنین شرایطی کلسیت رسوب می‌کند. این فرآیند با عمق محدود می‌شود و تا چندمتر زیر تراز آب زیرزمینی ادامه داشته و به سرعت رسوب کردن کلسیت و از بین رفتن آن وابسته بوده و با راه یافتن تا سنگ کف برای انحلال ادامه می‌یابد.

۲-۱۳ تشخیص غیرمتعادل بودن غارهای هیپوژنیک

اکثریت غارهای قابل دسترسی هیپوژنیک از گذشته به صورت غیرفعال بوده که ریشه آنها باید از راه غیرمستقیم بر پایه شواهد به دست آید. یکی از مهمترین شواهد پیدا کردن ارتباط است تقریباً تمام شاخه‌های غار هیپوژنیک بین اینکه آیا غار از لایه‌های بالایی تغذیه شده است و یا آنکه بلافاصله از سطوح زمین در همسایگی تغذیه شده است. اکثریت ورودیهای غار می‌باشند که به ندرت با سطح زمین بر اثر فرسایش، عملیاتی معدنی و سنگهای ساختمانی برخورد دارند. انواع شبکه‌های اسفنجی و گذرگاههای منفرد متداول است. زمینه‌های شاخه‌ای حقیقی وجود ندارد. غارهای بهم پیوسته (آناستوماتیک^۲) تنها با آبهای به شدت اسیدی به وجود می‌آیند. در نواحی اکسیده شدن H_2S ، نیمرخ غار بسیار نامنظم است، به جز در بخشهایی که آبهای مهاجم برخاسته به تراز آب زیرزمینی رسیده و جریان در جهت افقی برقرار می‌شود. تنوع مقاطع غار بسیار زیاد و سقف غار ممکن است گنبدی یا مدور باشد. انحلال صدف فام^۳ و رسوبات تخریبی درشت دانه بسیار نادر و معمولاً معرف آبهای مهاجم سطحی است.

در غارهای اپیژنیک جریان آب و هوا در ورودی غار و افقهای مختلف متداول است که آنها در غارهای هیپوژنیک نمی‌توان دید. گرادیان حرارتی در غارهای هیپوژنیک بالا بوده و برخاستن هوای گرم از گذرگاههای ژرف همراه با رطوبت بسیار متداول است. تراکم آب CO_2 در هوای غار را بسیار خورنده می‌سازد. سطوح در معرض اینگونه هوا، دارای تخلخل بسیار زیاد و لبه‌های هوازده ترد هستند. آب مجدداً بر اثر نیروی موئینه و جاذبه فرورفته و یک باردیگر مواد محلول خود را به صورت نهشته‌های غاری^۴ به جای می‌گذارد. این نهشته‌های تبخیری به صورت کلسیت‌های خوشه انگوری، سوزنهای آراگونیت و

1 - Bakalowicz & others 1987

2 - Anastomatic

3 - Scallop

4 - Speleothem

کربنات‌های آبدار هستند. رسوبات بستر غار پودری و از جنس پودر غیرقابل تفکیک کربنات‌ها و مصالح غیرقابل انحلال هستند. بلورهای کلسیت که بر اثر از دست دادن گاز CO_2 آب جاری در غار به وجود می‌آیند سنگ کف و دیواره‌های زیرین غار را می‌پوشانند. مانند غار جواهر^۱ و بخشی از غار کارلسباد. این رسوبات بسیار کند به وجود می‌آیند و نسبت ۱۸۰/۱۶۰ مانند نسبت سایر غارهای آهکی است (باکالویچ و دیگران).

زمینه غار هیپوژنیک، مانند سایر غارهای ایپی‌ژنیک، به وسیله تغذیه لایه‌های قابل انحلال کنترل می‌شود. گذرگاه‌های منفرد غار به صورت شاخه‌ای ساده از سرچشمه تغذیه در قسمت ورودی لایه‌های غیرقابل انحلال تا پایین دست مرکز تغذیه را دربر می‌گیرد. شبکه‌ها، سیمای اسفنجی و مجموعه‌های شاخه‌ای مرکب بر اثر جاری شدن در زیر لایه‌های غیرقابل انحلال به وجود می‌آیند. آنها موجب بازسازی و تهاجم به درز و ترک‌های بی‌شمار که بر اثر پدیده اکسید شدن به هم پیوسته‌اند، می‌شوند و با کاهش درجه حرارت آب‌های برخاسته در شکاف‌های بی‌شمار غار باعث می‌شوند برخی شبکه‌های هیپوژنیک مانند مشابه ایپی‌ژنیک آنها به نظر آیند. شبکه‌ها تحت این فرآیند همراه با آب‌های دارای سرچشمه‌های مختلف رشد می‌یابند، در حالی که این جریانها به صورت منفرد قادر به تشکیل شبکه نیستند.

غار هیک^۲ نزدیک کارلسباد، نیومکزیکو، یکی از نمونه غارهای هیپوژنیک است که بر اثر H_2S و اسید سولفوریک به وجود آمده است. نیمرخ غار نامنظم است که به میزان ناچیزی از توپوگرافی و لیتولوژی تبعیت می‌کند. دارای زمینه شاخه‌ای در افق‌های مختلف است که هر یک خروجی جداگانه‌ای دارند.

(۱) مدخل لوله‌های نامنظم که از بستر فنس کانیون^۳ چندین دهها متر برخاسته است. (۲) ناحیه اکسیده شده H_2S در تراز آب زیرزمینی، با خروجی جدید در پرتگاه گوادالوپ، (۳) دوتالار میانی، با خروجی نامشخص و (۴) افق دارای درز و ترک‌هایی که با رسوبات ثانویه کربنات پر شده‌اند، که عملاً به عنوان خروجی آب‌های سرشار از H_2S در سراسر گسترش غار عمل می‌کند. اکنون آنچه بجای مانده است، غار است.

در شرایطی آب و هوایی مرطوب تشخیص غارهای غیرفعال هیپوژنیک بسیار مشکل است. آب‌های مهاجم سطحی تمایل ورود به نواحی عمیق دارند و یا موجب بازسازی غار شده که تشخیص سیمای هیپوژنیک غار ممکن نیست. در شرایط آب و هوایی خشک جریان آب در غار به حداقل ممکن می‌رسد و غار دستخوش بازسازی نمی‌شود. در شرایط آب و هوایی مرطوب با جریان‌های عمیق غارهای مختلفی شکل می‌گیرند که هنوز نمی‌توان به منشاء اولیه آنها اشاره کرد. بهترین نمونه غارهای آپالاش هستند که نشانه‌ای از سیلاب و تغذیه آنها مشهود نیست. یکی از اهداف آینده پژوهشگران غار، تعیین اثر نسبی فرآیند آب‌های کم عمق به فرآیند آب‌های عمیق در این نواحی است.

1 - Jewel

2 - Hick

3 - Fence Canyon

۳- حفره‌های فروکش^۱ و ریخت‌شناسی کارست

آهک‌های خالص درزه و شکاف‌دار دونین در بخش مرکزی استی‌رین^۲ برای مطالعه توسعه و فرسایش کارستی مناسب‌اند. تناوب سنگ لوح دونین و سیلورین، دیاباز و توفیت که نشان دهنده تغییرات رسوبگذاری است، موجب پیچیدگی این مطالعات شده است. در این نواحی تکتونیک سطوح رورانه^۳ همراه با دوره‌های مختلف کوهزایی آپی از عوامل مؤثر بر توسعه پدیده کارستی بوده است.

آثار نواحی دشتگون اواخر ترشیری سنگ‌های آهکی و غیرآهکی را بریده است. از سوی دیگر، فازهای بالازدگی آپی اثرات متفاوتی در هویدا کردن لایه‌هایی که فرسایش یافته و نازک شده‌اند، داشته است. حفره‌های فروکش که بر اثر فرآیند انحلال به شکل حفره‌های فروکش انحلالی^۴ هستند بیشتر در نواحی آهکی که به صورت فلات مسطح‌اند و در محل برخورد سیستم درزه‌ها و شکافها گسترش یافته‌اند.

جریان ورودی منحصراً از بارندگیهای محلی و یا ذوب برف و یخ تامین شود. حفره‌های فروکش انحلالی در زمان فعالیتهای بالازدگی تکتونیکی به وجود می‌آیند. در حال حاضر اکثر فلاتهای آهکی مسطح زیرپوشش جنگلی هستند و هیچگونه تهدیدی برای ساخت منازل وجود ندارد.

در مرز سنگ آهک‌های توده‌ای و شیست‌ها، حفره‌های فروکش انحلالی همراه پانورها^۵ بر اثر جریان و زهکشی سنگ‌های غیرآهکی به وجود می‌آیند. حفره‌های فروکش انحلالی، شکل گرفته نوع دیگری از حفره‌های فروکش هستند که برخلاف حفره‌های فروکش نواحی هموار (دشت)، گسترش آنها اجباراً در ترازهای مختلف محلی است و فرسایش در پیرامون سنگ‌های توده‌ای صورت می‌گیرد. اختلاف آنها نشانه توپوگرافی است که بر تراز سیستم آب زیرزمینی کارستی و گسترش غارهای افقی، دره‌های کور و تخم مرغی شکل استوار است. این اختلاف که براساس فرسایش و خوردگی در اثر فشار آب به وجود می‌آید و فروریختگی‌ها رخ می‌دهد. در چنین مواردی تغذیه چشمه‌های کارستی منطقه منحصر به سنگ آهک‌های توده‌ای نیست بلکه با سنگ‌های غیرآهکی شیستی منطقه نیز پیوند دارد که دارای زهکش به سوی حفره‌های فروکش انحلالی هستند. در نواحی شیستی جریان سیل که به سرعت از راه غارهای خشک افقی نواحی کارستی را قطع می‌کند، موجب بروز خسارت به غارها، ساختمانها و جاده‌ها می‌شود.

حفره‌های فروکش و حفره‌های فروکش انحلالی مقوله کارستی هستند. تغییرات سنگ‌شناسی (لیتولوژی) از سنگ‌آهک به غیرآهکی نقش عمده‌ای در گسترش آنها دارد. به این دلیل، تاریخ زمین‌شناسی منطقه، ساختمان زمین‌شناسی، عوامل تکتونیکی مانند فرایند بیرون زدگی و تغییرات آب و هوایی روی این مقوله تأثیر شگرفی دارد. تراز محلی فرسایش یکی از عوامل مؤثر و مهم در گسترش کارست است. تغییر عوامل طبیعی یا مصنوعی در تراز مزبور به شدت بر آبدی چشمه‌های ناحیه و آلودگی آبهای کارستی اثر می‌گذارد.

1 - Sinkhole

2 - Styrian

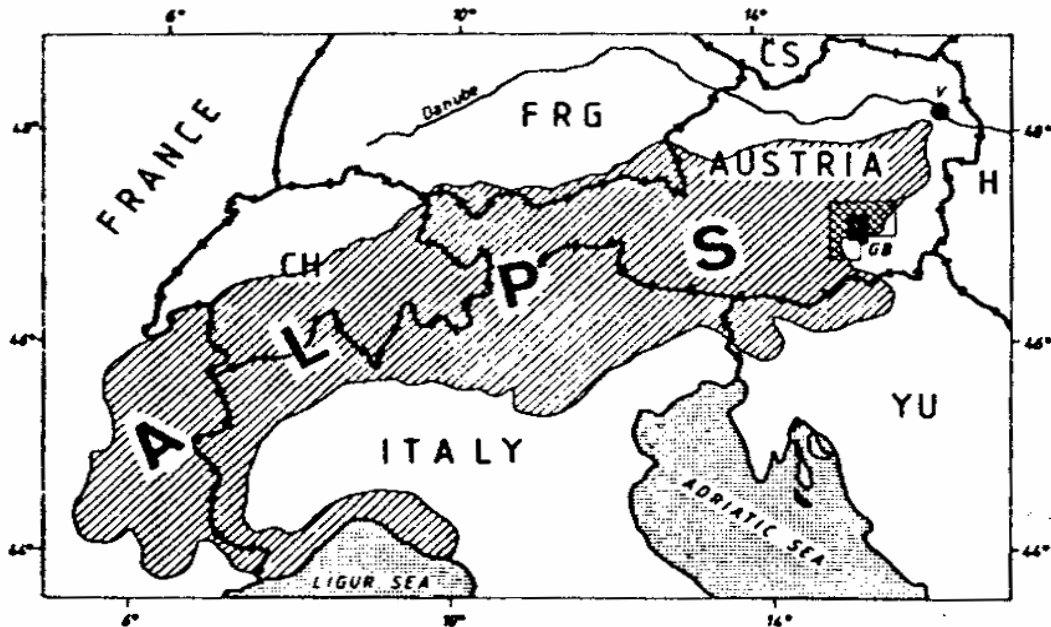
3 - Nappe tectonic

4 - Doline

5 - Ponors

۱-۳ عمل ساختمان زمین‌شناسی، واحدهای سنگ‌شناسی

بخش مرکزی کارست استی‌رین در سنگ آهک‌هایی به نام گریزر برگلند^۱ قرار دارد. نواحی گریزر برگلند از نواحی جنوب خاوری و حاشیه منطقه (زون) باختری آلپ مرکزی، شمال و شمال خاوری گراز^۲ مرکز استان استی‌رین، اتریش است (شکل ۱-۳).

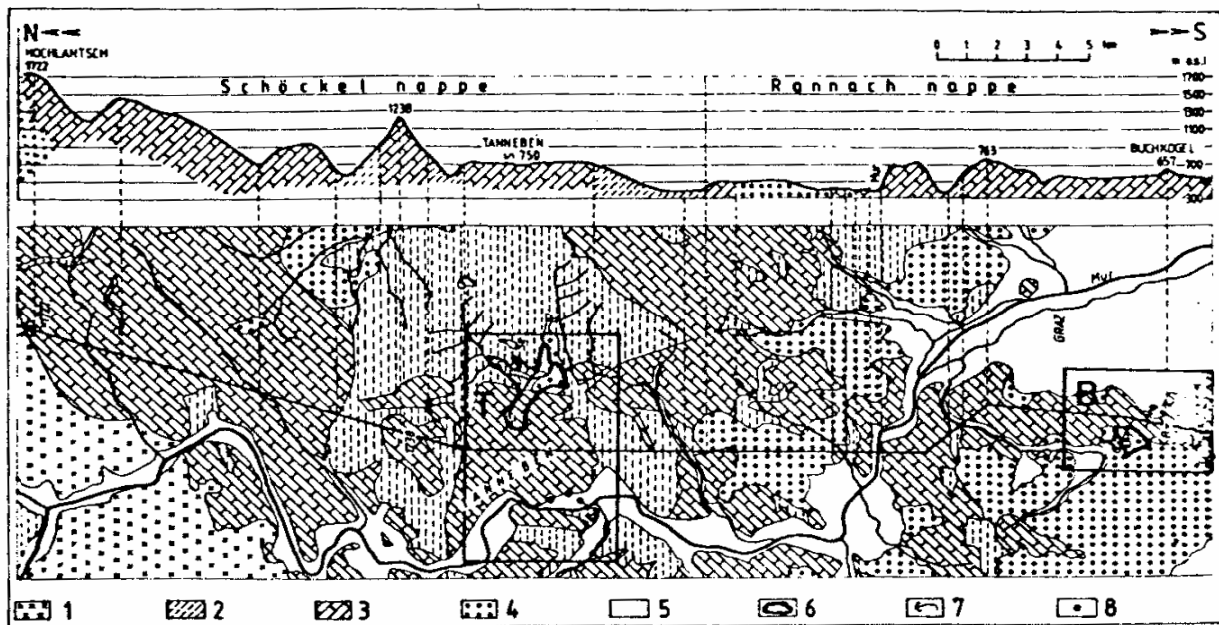


شکل ۱-۳ - مناطق هاشور زده باریک نواحی مطالعه شده گریزر برگلند است.

شهر وین با علامت V مشخص است.

چارچوب نهشته‌های گریزر برگلند توده‌های سنگ متبلور بالا زده از بخش خاوری آلپ است که به صورت دماغه‌ای به وسیله سری رسوبات پالئوزوئیک دربرگرفته شده است. از این رو به نام گراتس پالئوزوئیک^۳ نامیده می‌شوند و آنها همراه بخش ناچیزی از نهشته‌های مزوزوئیک هستند که در اینجا مورد توجه قرار نگرفته است. نهشته‌های «گریز پالئوزوئیک» متشکل از ردیف لایه‌های: دولومیت، ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک، شیست رسی، شیست سبز، شیل آهکی، کوارتزیت، و فیلیت^۴ به صورت مجموعه پیچیده‌ای است که در نتیجه راندگی تکتونیکی و گسلش به وجود آمده است.

1 - Grazer Bergland
2 - Graz
3 - Grazer Palaeozoicum
4 - Phyllite



شکل ۲-۳ - برش شمالی - جنوبی «گریز پالئوزوئیک» در راستای رودخانه مور

نواحی مورد بحث در اینجا، لایه‌های تشکیل یافته از سطح بالایی رورانگی هستند. رانگی شوکل^۱ در شمال که روی آن رانگی راناخ^۲ در جنوب است (شکل ۲-۳)، هر دو ناحیه دربردارنده سنگ آهک خالص کارستی شده است به این ترتیب که شوکل کالک دونین^۳ و باراندی کالک^۴ است ولی در هر دو ناحیه سنگ آهکهای با درجه خلوص کمتر ولی به شدت کارستی شده وجود دارد که در شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ از یکدیگر متمایز نشده‌اند.

۲-۳ ریختار پالئوکارست

فرضیه‌ها درباره ابعاد هندسی و سن رورانگی‌ها دارای دامنه گسترده‌ای هستند. چنین به نظر می‌رسد که سازندهای دارای آبخوان در این نواحی طی اوایل میوسن شکل گرفته‌اند. مراحل بالازدگی آلپ خاوری از یکسو و فرونشینی حوزه پانونین^۵ از سوی دیگر منجر به وجود آمدن حاشیه جنوب خاوری آلپ به شکل نهشته‌های میان انگشتی خشکی، دریاچه‌ای و نهشته‌های دریایی شده است.

گسترش نقشه جغرافیایی دیرینه دریایی پاراتتیس^۶ نشان می‌دهد که مرکز کارست فعلی استی‌رین در میوسن میانی هنوز زیر آثار سیلابهای دریایی قرار دارد (فلوجل و هریس^۷ ۱۹۶۸). بالا و پایین رفتن تراز آب دریا موجب فرسایش حاشیه شبه دشتهای

- 1 - Schöckel nappe
- 2 - Rannach nappe
- 3 - Devonian Schochelkalk
- 4 - Barrandei Kalke
- 5 - Pannonien
- 6 - Paratethys
- 7 - Flugel & Heritsch

موجود در آلپ، برجستگی مسلط به دره و خلیج شده است که بخشی در اثر فرآیند تکتونیکی ایجاد شبه دشتهای داخلی همراه نهشته‌های دریایی کرده‌است (سارمات)^۱. فرآیند کارستی شدن سنگ‌آهکها در زمان پایین رفتن تراز آب دریا رخ داده است. در زمان پلیوسن، رسوبات رودخانه‌ای آب شیرین (ماسه و شن) برجستگی‌های میوسن را پوشانده است. باقیمانده این پهنه‌های نسبتاً ضخیم از شن، در فرورفتگی‌های قیفی و پهنه‌های کوچک کارست دیرینه سر برآورده از نهشته‌های زمان پلیستوسن هستند. کارست‌های دیرینه و برجستگی‌های دیرینه ممکن است بر پدیده بیرون آمدن از زیر رسوبات تأثیر داشته باشند.

۳-۳ فرسایش حاصل از باران، فرسایش و کارستی شدن زمان پلیو - پلیستوسن

انباشت نهشته‌ها در مرز جنوب خاوری آلپ و حوزه استیرین (بخش باختری حوزه پانونین) در زمان پونتین^۲ متوقف شده است. در نتیجه بالا‌زدگی بخش خاوری آلپ، برجستگی‌ها و کارست‌های دیرینه سر از آب درآورده و بار دیگر دچار فرسایش جدید و پدیده کارستی شدن شده است.

توسعه فرسایش کارستی جدید به طور فزاینده‌ای با مقاومت و سختی متفاوت سنگهایی چون سنگ آهک، شیست و رسوبات بدون سیمان و سست روبرو بوده است. رودخانه مور به عنوان اساس فرسایش است.

۴-۳ توده تانبین^۳ و گسترش حوزه سیمیریاخ^۴

بر پایه گزارش وینکلر - هرمان^۵ (۱۹۵۷) فلات موجود توده تانبین در نتیجه فرسایش روان آبها از زمان پایانی پلیوسن شکل گرفته است (Astriany Piacenzian). در این زمان رودخانه مور در این نواحی در تراز ۷۰۰ متری جریان داشته است. رودخانه شکل خم‌رود (مئاندری) داشته و مصالح به وجود آمده از فرسایش حفره‌های فروکش برای پر کردن نواحی انحلالی کفایت داشته است.

رودخانه مور طی زمان پلیستوسن بستر خود را در راستای بستر دیرینه دچار فرسایش کرده است. طی زمان پلیستوسن میزان فرسایش رودخانه مور دچار تغییرات شدید بوده که ریشه در دگرگونیهای جوی داشته است. در زمان سردی و برودت هوا، جریانهای یخچالی در بخش بالایی رودخانه مور به صورت زبانه‌ای به درازای ۱۰۰ کیلومتر تا محلی که امروز به نام پگو^۶ نامیده می‌شود، ادامه یافته است. ذوب برف و یخ در تابستان موجب جریان پرشتاب رودخانه مور شده‌است. رودخانه گلوگاه دره را دچار فرسایش کرده و حجم زیادی از شن و ماسه را تا پایین دست گلوگاه حمل کرده است. در نواحی پگو، ژرفترین نواحی فرسایش یافته دره مور در زمان پلیستوسن تا ۳۰۰ متر رسیده است.

1 - Sarmat

2 - Pontian

3 - Massif Tanneben

4 - Tannebenmassif, Semirach

5 - Winkler - Hermaden

6 - Peggzu

حفره‌های فروکش بخش باختری و شمالی فلات، در تراز بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ متری و در تراس‌های پایینتر نواحی شمالی «یا دل گرابن»^۱ در تراز بین ۵۰۰ و ۶۰۰ متری قرار دارد. حفره‌های فروکش در پهنه فرسایش یافته دو سوی رودخانه که فعلاً زیرپوشش رسوبات ترشیری است، گسترش می‌یابد. پوشش باقیمانده و فرسایش نیافته، ضخامت حدود یک یا ۲ متر دارد.

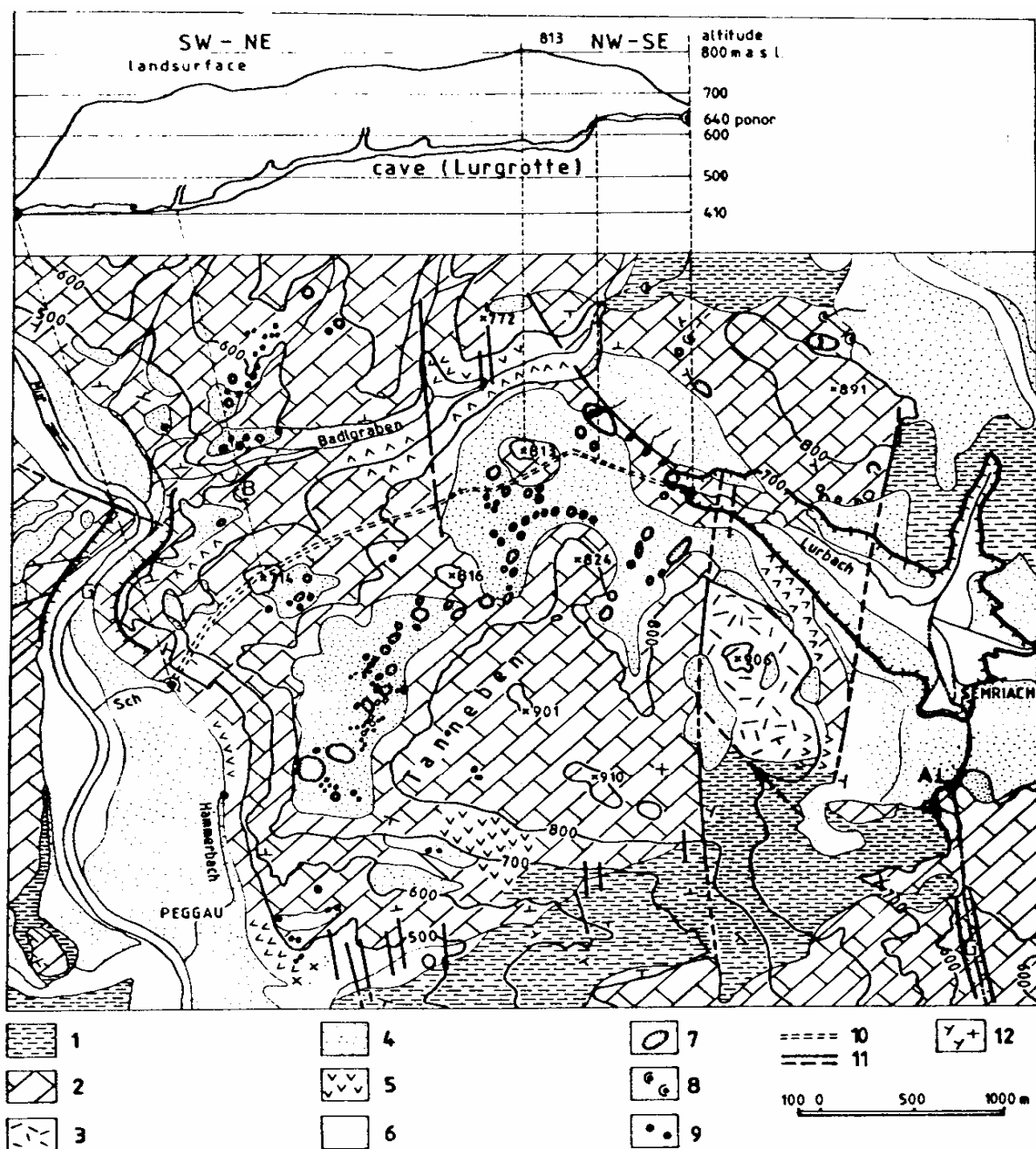
دو سری از حفره‌های فروکش وجود دارد: اول حفره‌های فروکش جوانتر با پیرامون و ژرفای کمتر، دوم حفره‌های فروکش قدیمتر با پیرامونی بزرگتر که گاه تا بیش از یکصد متر، در حالی که نهشته‌های ضخیم روی آنرا پوشانده است، می‌باشند. حفره‌های فروکش قدیمتر دارای بستر صاف بوده و شیب دیواره‌ها در آنها ملایم است. حفره‌های فروکش جوانتر که کوچک هستند، در کف گسترش می‌یابند. تمام این حفره‌های فروکش از گروه حفره‌های انحلالی بدون فروریختگی در سنگ آهک (فقط دارای نشست کوچک در نهشته‌های ترشیری) هستند و سیمای عمومی آنها جنگل و چمن می‌باشد. پاره‌ای منازل کوچک روستایی نزدیک به حفره‌های فروکش از مدتها پیش ساخته شده‌اند. این بناها تاکنون دچار فروریختگی و نشست نشده‌اند. نواحی خاوری توده تانبین (که به طور عمده از شیست‌های ترشیری است) دارای زهکشی سطحی به سوی جنوب تا شروع رسوبات پلیستوسن است (نگاه کنید به شکل شماره ۳-۳). زهکشی سطحی این نواحی هیچگونه پیوندی با ویژگی آب و هوایی یخچالی پلیستوسن و ذوب آنها ندارد.

طی زمان یخبندان پلیستوسن، یک دوره قبل از یخبندان حاکم بوده است. برای مثال تغییرات روزانه توده خاک یخ بسته و ذوب شدن آنها قابل ذکر است. تغییرات توده خاک موجب کاهش گرادیان سرایشی و کاهش سطح روان آبها می‌شده است که ممکن است به میزان آنچه امروزه وجود دارد، بوده باشد. فرسایش لورباخ^۲ ناچیز بوده است. فرسایش و گودشدگی بیش از اندازه دره مور در باختر توده تانبین، موجب شده است دره این ناحیه به عنوان خط تراز فرسایش باشد. مرحله این گسترش روی برش طولی غار لورگ روت^۳ نشان داده شده است. منطقه تغذیه این ناحیه تا توده‌های سنگ غیرآهکی گسترش یافته است. از آنجایی که این نواحی برای دفن مواد زاید کشاورزی به کار می‌رود، این مواد زاید موجب آلوده شدن آب زیرزمینی لورباخ که توده‌های کارستی منطقه را قطع می‌کند، شده است.

حفره‌های فروکش جوان در راستای تماس با سنگهای آهکی و غیرآهکی بیشتر به صورت بیضوی است تا حالت قیف فام حفره‌های فروکش انحلالی فلات و گاه دارای جریان‌های سطحی دوره‌ای است. در بخش خاوری توده تانبین در نهشته‌های ترشیری گاه ممکن است فروریختگی رخ دهد.

پس از آنکه آب لورباخ به غار وارد می‌شود، پس از طی چند متر داخل حفره‌های فروکش در لورگروت^۴ ناپدید می‌شود. در بخش پایانی (۷۰۰ متری به سوی خروجی) باختری غار نیام، جریانی است که جریان اشملزباخ^۵ نامیده می‌شود. این جریان از یک چشمه به داخل غار می‌باشد. آزمایش رنگی ردیابی نشان داده است که آب چشمه مزبور هیچگونه پیوندی با آب لورباخ تحت شرایط آب و هوایی متعادل ندارد. آب لورباخ به طور متداول به چشمه «هامرباخ»^۶ در بخش شمالی روستای پگو^۷ وارد می‌شود.

1 - Badlgraben
2 - Lurbach
3 - Lurgrotte
4 - Lurgrotte
5 - Schmelzbach
6 - Hammerbach
7 - Peggau



شکل ۳-۳ - توده تانبین و حوزه سیمریخ

میانگین دبی جریان آب زیرزمینی (MQ) حدود ۶۲ متر مکعب در ساعت است. تحت این شرایط معمولی اگر میانگین شدت جریان سالیانه چشمه «هامرباخ» که حدود ۲۱۲ لیتر بر ثانیه است با نشست آب «لورباخ» که حدود ۱۱۸ لیتر بر ثانیه است، مقایسه شود، اختلاف تراز بین حفره فروکش «لورباخ» و چشمه «هامرباخ» حدود ۲۳۰ متر می‌شود. رعد و برق همراه بارندگی‌های زیاد در حوزه سیمرباخ^۱ نقش فزاینده‌ای در شرایط محیط دارد. روانابهای جاری شده از شیستهای منطقه پیرامون حوزه سیمرباخ موجب می‌شود به سرعت سیلاب با فشار تند به سوی لورگروت جاری شود. این سیلابها موجب وارد شدن خسارت زیاد به تاسیسات غار و تهدید امنیت برای بازدیدکنندگان می‌شود. با وجود اهمیت سیستم دستگاههای هشدار دهنده، بازدیدکنندگان باید امکان پناه گرفتن در بخشهای بالاتر را داشته باشند زیرا آب خروجی به اندازه کافی پر توان است که موجب وارد شدن خسارت به ساختمان و تجهیزات اندازه‌گیری در غار شود.

۵-۳ نواحی باک هوگل^۲

دومین ناحیه کارستی نواحی مرکزی استی‌رین که برای مطالعه و بررسی حفره‌های فروکش انتخاب شده است در ۲۰ کیلومتری جنوب توده تانبین است. نوار باک هوگل درست در مرز حوزه گریز^۳ قرار دارد که یکی از زیر حوزه‌های حاشیه آلپ از حوزه بزرگ پانونین در جنوب خاوری آلپ است.

تناوب سنگ آهک مربوط به حوزه آبخیز راناج دونین و لایه‌های کارستی شده دولومیت است. لایه‌های بجای مانده ریگهای کوارتز در راستای حفره‌های فروکش فرسایش یافته و در زیر نهشته‌های ترشیری پنهان شده‌اند.

حاشیه مزبور در همان حال در نواحی تانبین سر از خاک برآورده است. حوزه گراتس بیشتر از حوزه‌های داخلی دشت در قسمت باختری فرسایش یافته و عمیق شده و به وسیله رسوبات ترشیری مربوط به بادنین و سارماتین^۴ پر شده است. در سطوح نواحی خاوری حاشیه نواحی‌ای که بیشتر فرسایش یافته‌اند به عنوان خط تراز فرسایش محلی به حساب می‌آید. به ویژه این پدیده، در نواحی توده تانبین و حوزه سیمرباخ رویداده است. اما حفره‌های فروکش در مجاور توده‌های سنگ‌آهک نهشته‌های ترشیری چندان گسترش نیافته‌اند. در ترشیری حوزه دشت داخلی وجود داشته که به طور مؤثر و مستقیمی تحت اثر سطح مربوط به دره مور بوده است. از این رو زهکش زیرزمینی از حاشیه باک‌هوگل، کوچک بوده و کمیت آب عبور کرده ناچیز است.

این مطلب حائز اهمیت خواهد بود زیرا گسترش فرورفتگی‌های قیفی تنها در دامنه باختری حاشیه و به روشی متمرکز در سه منطقه (زون) در تراز متفاوت است: ۶۵۰-۶۲۰، ۵۴۰-۵۰۰، ۴۸۰-۴۴۰ متر بالاتر از تراز آب دریا.

این منطقه (زون) یک دوره آرامش، بدون برهنه‌سازی یا فرسایش نهشته‌های ترشیری را نشان می‌دهد. حفره‌های فروکش بالاترین منطقه‌ها (زون‌ها) هنوز بقایای لایه‌های شن اواخر پلیوسن - اوایل پلیستوسن می‌باشند. پایین‌ترین منطقه‌ها (زون‌ها) دارای حفره‌های فروکش در مرز بین سنگ آهک و ماسه ترشیری و رس زمان سارماتین هستند.

1 - Semirah

2 - Buckhogel

3 - Graz

4 - Badenian & Sarmatian

۴- بررسی زمین‌شناسی مهندسی برای توسعه در پهنه‌های کارستی دولومیتی

فرآیند مطالعات از جمع‌آوری اطلاعات در دفتر آغاز می‌شود. این بررسی‌ها باید منجر به پیشنهاد مناطق مورد استفاده طرح باشد. پس از تکمیل بررسی و جمع‌آوری کلیه داده‌ها لازمست گزینه‌های دیگر نیز مورد توجه قرار گیرد. مهندسی زمین‌شناسی در این مرحله از مطالعات باید زمینها را برای مصارف مناسب مختلف منطقه‌بندی (زون‌بندی) و پیشنهاد کرده و اندازه‌گیریهای احتیاطی را به منظور پایداری توصیه کند. در مورد کارگاههای کارستی، تفسیر و تحلیل دقیق مورد نیاز بوده و تأکید بر شناخت ویژگیهای فیزیکی مواد و رفتار آنها در برابر آب لازمست مورد توجه قرار گیرد.

۱-۴ نواحی غیرآبدار

در نواحی دولومیتی خشک، زهکشی ضعیف سطحی و افزایش نفوذ آب نقش اساسی برای سازندهای تشکیل‌دهنده حفره‌های فروکش بازی می‌کند. در یک مورد مطالعات کارستی در نواحی جنوبی پرتوریا یک مقایسه آگاهی‌دهنده بین وجود حفره‌های فروکش و میزان بارندگی به دست آمد. طی مدت ۱۱ سال وجود حفره‌های فروکش در نواحی توسعه یافته و توسعه نیافته مورد بررسی قرار گرفت. هیچگونه گزارشی از حفره‌های فروکش طبیعی در نواحی توسعه نیافته گزارش نشده است. معادله برگشتی^۱

$$Y = 0.0079x + 23951$$

دارای ضریب همبستگی مقایسه‌ای $r = 0.8586$ است که به طور مؤثری ارتباط بین بارندگی و حفره‌های فروکش را نشان می‌دهد. پراکندگی مشاهدات (تعداد ۱۰۱) در راستای خطوط برگشتی موید آنست که بارندگی تنها فاکتور برای ایجاد حفره فروکش نیست. از تعداد ۱۰۰ مورد ضریب همبستگی^۲ که ۷۴ درصد در ارتباط با حفره‌های فروکش همسو با بارندگی هستند، تمام حفره‌های فروکش در اثر دخالت انسان به وجود آمده است. اساس مکانیسم بر پایه فرار آب از شبکه‌ها و یا نبودن زهکش است. نصب ضعیف شبکه‌ها در داخل خاکهای غیر چسبنده و یا خاکریزهای متراکم نشده که برای جمع‌آوری آب به کار می‌رود ممکن است مشکلاتی را در این رهگذر به وجود آورد. شبکه جمع‌آوری در نواحی توسعه یافته قدیمی‌تر از لوله‌های سیمانی آریست به طول ۲ متر هستند. خطوط شبکه فاضلاب از جنس سفالی لعاب‌دار با اتصالات آیینی شده^۳ است. اتصالات آیینی شده پس از دو سال حالت شکنندگی یافته و بر اثر فشار آب و بستر ممکن است دچار ترک خوردگی شود و نشت آب از اتصالات صورت پذیرد. نشست در نتیجه فرسایش داخلی از درز و ترکها در بستر سنگ کف دولومیتی آغاز می‌شود. این درز و ترکها، به طور متداول با خاکهای دارای چگالی کم اکسید آهن و منگنز و یا خاکهای آهن‌دار و چرت^۴ هوا زده پر شده‌اند. محل اتصالات لوله‌ها، به دلیل نشست خاک بستر و تنش‌های وارد بر آن دچار خرابی و فرار آب می‌شوند و ادامه آن ممکن است به شکستن لوله منجر شود. در بسیاری از مواقع حفره‌های فروکش بدون هیچگونه آثار قبلی بسیار سریع به وجود می‌آیند. اخیراً با به کارگیری اتصالات لاستیکی به میزان زیاد مانع فرار آب از اتصالات شده‌اند. سایر عواملی که منجر به تشکیل حفره فروکش

1 - The regression equation

2 - Freund & Williams, 1965

3 - Caulking

4 - Chert

می‌شوند عبارتند از : بهم خوردگی لایه‌های بالایی، ناتوانی زهکشها که منجر به هدایت و تراوش می‌شود. گمانه‌هایی که به طور کامل پس از حفاری پرو محافظت از ورود آب به آنها نشده یا نشت آب از استخرهای شنا. بدون شک توسعه و گسترش حومه شهرها و دستخوردگی لایه‌ها موجب بهم خوردن تعادل طبیعی لایه‌ها شده که این شرایط موجب تشدید به وجود آمدن حفره‌های فروکش می‌شود.

۴-۱-۱ روش بررسی

ساخت و ساز در سازندهای دولومیتی پر هزینه، وقت‌گیر و مخاطره‌آمیز است ولی در بسیاری از موارد برای توسعه و رشد اجتناب‌ناپذیر است. از نظر اقتصادی بررسی در دو مرحله انجام می‌گیرد (نمودار ۴-۱):

- مرحله شناسایی، متشکل از داده‌های دفتری همراه کنترل صحرایی است. در این مرحله حفاری اکتشافی و یا نمونه‌برداری صورت نمی‌گیرد.

- مرحله برنامه‌ریزی و طراحی، در این مرحله باید طراحان با یافته‌ها و داده‌ها قادر به طراحی شهر باشند. در این مرحله مجموعه‌ای از روشهای مختلف ژئوفیزیک، نقشه‌برداری، حفاری، ترائشه‌زنی و آزمایشهای آزمایشگاهی مجموعاً سیمای طرح را مشخص می‌کنند. گزارش این مرحله از مطالعات باید به گونه‌ای باشد که طراح برای طراحی و ارائه نقشه کلی از آن سود برد.

مراحل تحلیل از کارهای دفتری آغاز و پس از تکمیل بررسی‌ها به قضاوت مهندسی ختم می‌شود. قضاوت مهندسی‌نهایی باید دربر دارنده تصمیم‌گیری در مورد این باشد که آیا محل طرح از نظر پایداری و مناسب بودن پروژه قابل قبول هست یا خیر. نتایج به دست آمده از هر یک از مراحل بررسی باید منجر به این مطلب شود که آیا تصمیم به ادامه مطالعات برای مراحل بعدی می‌توان گرفت و آنرا ادامه داد یا نه.

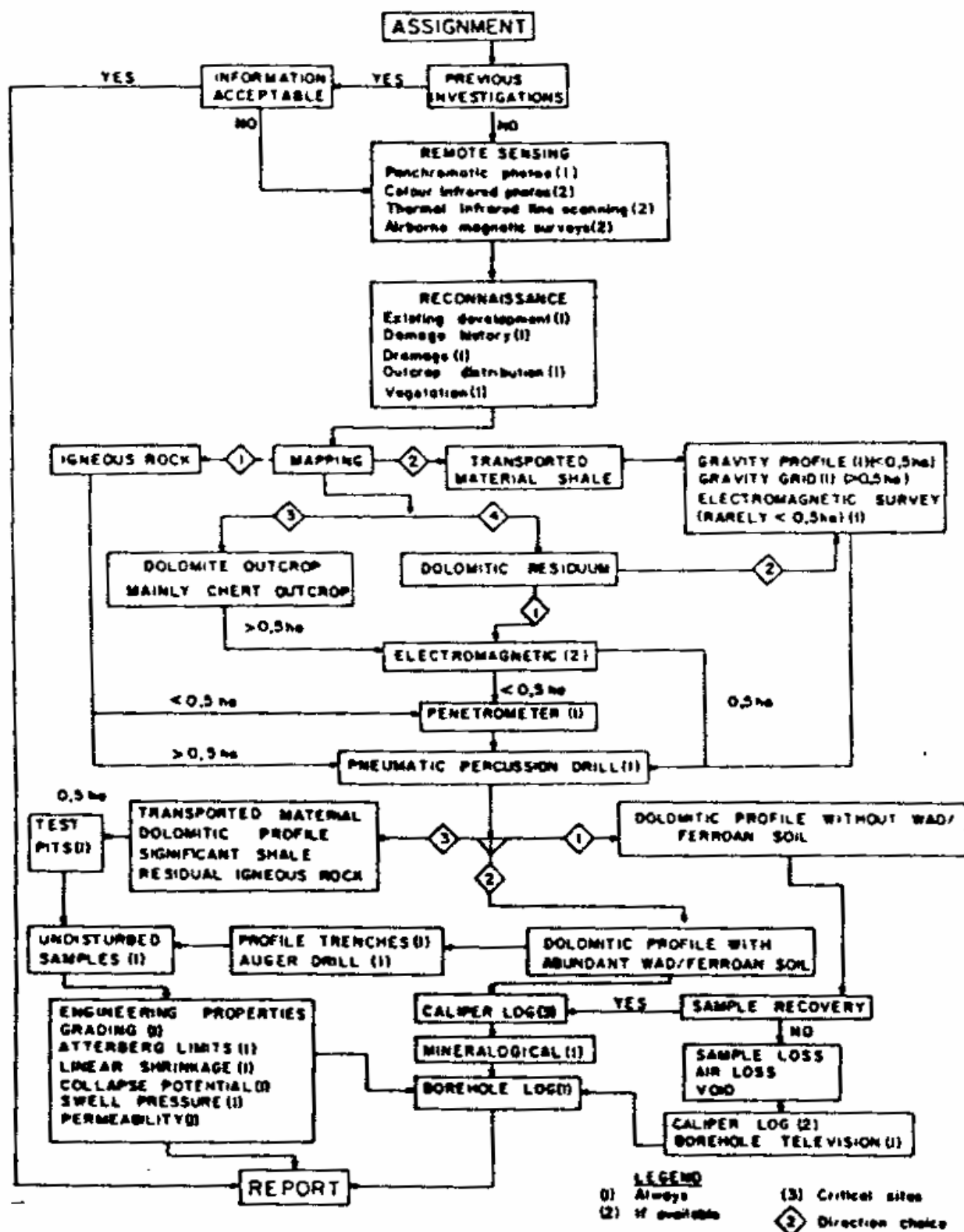
به کارگیری سنجش از راه دور می‌تواند امیدوار کننده باشد ولی باید با بررسی کامل صحرایی به منظور تکمیل یافته‌های سنجش از راه دور انجام گیرد.

در شرایط مساعد به کارگیری اشعه حرارتی مادون قرمز نتایج کمتری نسبت به رنگ مادون قرمز دربردارد. سایر روشهای متداول عبارت از تصویر پاناکروماتیک^۱ رنگی و سیاه سفید همراه با اشعه مادون قرمز است^۲. کاربرد موفقیت آمیز تصاویر حرارت مادون قرمز نیاز به بررسی دقیق سطح زمین در مورد پوشش گیاهی دارد. بهترین روش اقتصادی حفاری به منظور دستیابی به اطلاعات قابل قبول، حفاری ضربه‌ای همراه با هوا است. این روش حفاری به‌ویژه زمانی مناسب است که نمونه‌گیری در لایه‌های : چرت، دولومیت، شن، خاکهای دارای اکسید آهن و منگنز و خاکهای آهن دار با اشکال مواجه می‌شود (خاکهایی که دارای چگالی کمتر از ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب باشند). تصمیم‌گیری زمانی انجام می‌شود که میزان سرعت حفاری که بر روی عوامل زیادی اثر می‌گذارد، مورد توجه قرار گیرد. تداوم تشریح شده مذکور را نمی‌توان به نمونه‌های به دست آمده از حفاری ضربه‌ای با هوا نسبت داد. زیرا این یافته‌ها معرف ویژگی مقاومت برشی مواد مزبور است. تحلیل زمین‌شناسی بر پایه نمونه‌های به دست آمده از حفاریهای ضربه‌ای با هوا به دلیل داشتن چگالی پایین‌تر، مانع شناخت، مقاومت پایین موادی که نزدیک به سطح زمین هستند می‌شود. شستشوی مصالح و الک کردن آنها پایه بررسی و تحلیل منطقی از نمونه‌ها است.

1 - Panchromatic

2 - Roux, 1984

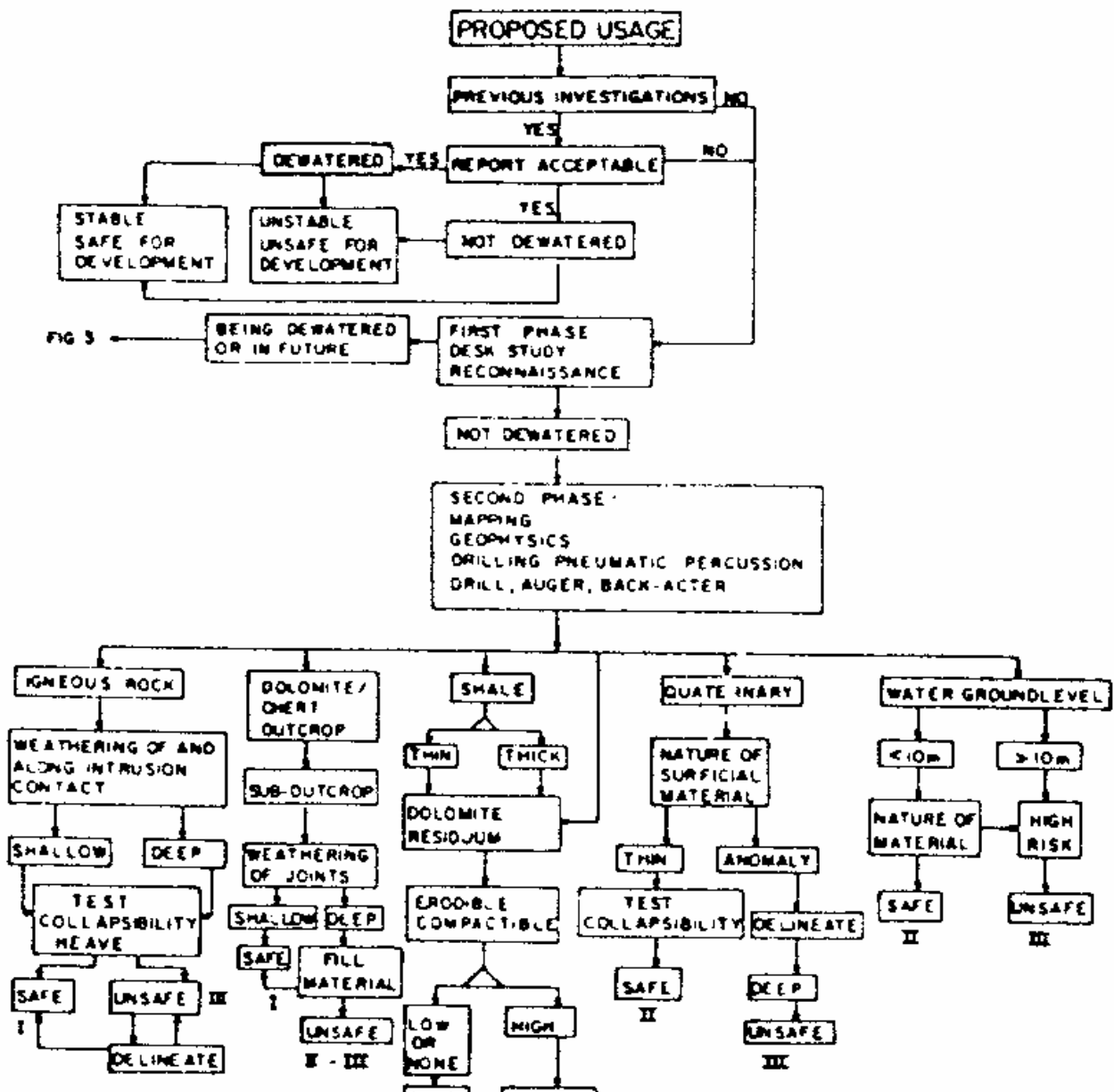
نمودار ۴-۱- بررسیهای ژئوتکنیکی برای گسترش نواحی شهری در سازندهای دولومیتی



۲-۴ تجزیه و تحلیل مصالح

باید تمام مسائل ویژه مهندسی همه مصالحی که در یک کارگاه دولومیتی وجود دارد و ممکن است روی طرح پیشنهادشده و توسعه آن اثر بگذارد، مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. یک نمونه از نمودار و روش تحلیل آن در مورد کارگاههای دولومیتی در نمودار ۲-۴ نشان داده شده است.

نمودار ۲-۴ - تحلیل در کارگاههای دولومیتی توسعه شهرها



۳-۴ سنگهای آتشفشانی درونی

ویژگیهای خاکهای بر جا روی سنگهای آتشفشانی درونی باید از نظر فروریختن و تورم مورد ارزیابی قرار گیرد. در امتداد دایکها آبشویی دولومیتها و حتی پیدایش حفرههای فروکش دیرین مورد انتظار است. در هر دو سوی دایک به منظور مقایسه، تراز آب زیرزمینی باید اندازه گیری شود. برای شناخت چگونگی ادامه یافتن سیلها، شیب، ضخامت، میزان هوازدهی و ویژگی مصالح درجا، هوازدهی دولومیت زیرین و زیرین آنها باید مورد ارزیابی قرار گیرد.

۴-۴ رخنمونهای دولومیتی و چرتی

روش بررسی از راه دور از برنامه های اساسی شناخت برای مراحل تهیه طرح ابتدایی است. وجود حفره های فروکش دیرینه، ژرفای آبشویی در امتداد درز و ترکها و گسل ها و نوع مواد پر کننده درز و ترکها بی نهایت در تحلیل آنها با اهمیت است. افقهای چینه شناسی از نظر هوازدهی و مصالح بجای مانده دارای نقش و اهمیت بسیار زیاد هستند. تشخیص پوشش گیاهی از تصاویر حرارتی و تصاویر هوایی به میزان قابل توجهی برای تشخیص زمینه درز و ترکها کمک می کند. محل برخورد درز و ترکها به عنوان محلهای دارای پتانسیل ایجاد حفره های نشتی باید مورد ارزیابی قرار گیرد. دسته بندی آنها مربوط به شرایط کارگاه می شود.

۵-۴ دولومیت های ته نشسته

این موارد شامل: چرت های تازه و هوازده، خاکهای دارای آهن و منگنز، خاکهای آهن دار، دولومیت انحلالی، شیل های هوازده و تمام مجموعه های تداخلی هستند. با تغییرات رخساره ای، فروریزش^۱ در اثر هوازدهی رخ می دهد. برشهای چرتی اکثراً سیلیسی هستند. این گونه لایه ها برای پی بهترین و ایده آل بوده و از نظر تقسیم بندی در ردیف I قرار می گیرد. تشخیص پایداری نیمرخ خاکی که متشکل است از مخلوط چرت، اکسید آهن، و منگنز یا خاکهای آهن دار ممکن نیست. چنانچه این مواد نزدیک به سطح زمین و داخل محفظه فشاری پی قرار گیرند در این صورت لازمست با دقت تمام نمونه دست نخورده و برش مناسب تهیه شود. آزمایشهای آزمایشگاهی مانند تحکیم و سه محوری دقت بررسیهای مورد نظر را افزایش می دهد. محل پیشنهادی برای اجرای طرح نهایتاً باید متناسب و ماندگار با ریسکهای مختلف باشد. رفتار خاکهای آهن و منگندار اشباع شده یا خاکهای آهن دار بسیار بحرانی و تحلیل آنها برای کارگاههای دولومیتی دارای اهمیت فراوان است.

۶-۴ برونهشته های شیل

بررسی کامل و دقیق برونهشته های جوان در طی بررسی طرح بسیار الزامی است. دولومیت های به جای مانده در زیر لایه های شیل باید مطالعه و بررسی شوند. به دلیل توسعه طرح و خشک شدن لایه های زیر پی لازمست دقت ویژه در مورد قابلیت فرسایشی مصالح و یا امکان تحکیم به عمل آید. بررسیهای ژئوتکنیکی گذشته منجر به تشخیص حفره های فروکش ویرتیه^۲ در باریکه رسوبات شیل و یا رسوبات پر شده شکافهای بیش از ۶۰ متر، شده است.

1 - Slumping

2 - Paleosinkhole

۷-۴ رسوبات کواترنری

رسوبات کواترنری در افریقای جنوبی روی دولومیتها متشکل از ماسه و تغییر متفاوتی از لای و رس است. مصالح به طور کلی از نظر ضخامت برای هر کارگاه دارای استاندارد مخصوص به خود است. تجارب به دست آمده طی ۲۵ سال گذشته ثابت می کند که اکثر ناهنجاریهای در ارتباط با ضخامت نهشته ها ریشه در مسائل کارستی دارد.

۸-۴ تراز آب زیرزمینی

در جنوب پروتريا، یک گروه از حفره های فروکش در نتیجه سیلابها به وجود آمده که در این نواحی تراز آب زیرزمینی ۱۵ متر زیر سطح زمین در نواحی که آب تخلیه نمی شود، به وجود آمده است. تغییرات تراز آب فصلی طی چندین دهه موجب تحریک سازندهای تشکیل دهنده حفره های فروکش نشده ولی در عین حال این نواحی در برابر اشباع بسیار حساس بوده اند. پس از تخلیه آب در هر کارگاه کارستی، پایداری آنها در نتیجه موفقیت آمیز بودن زهکشی و آب بندی کامل نواحی نشست دار انجام گرفته است.

از بررسی مجموع نتایج تحلیل کارگاه هایی که نیاز به آب زدایی ندارند به صورت خلاصه به دست آمده است.

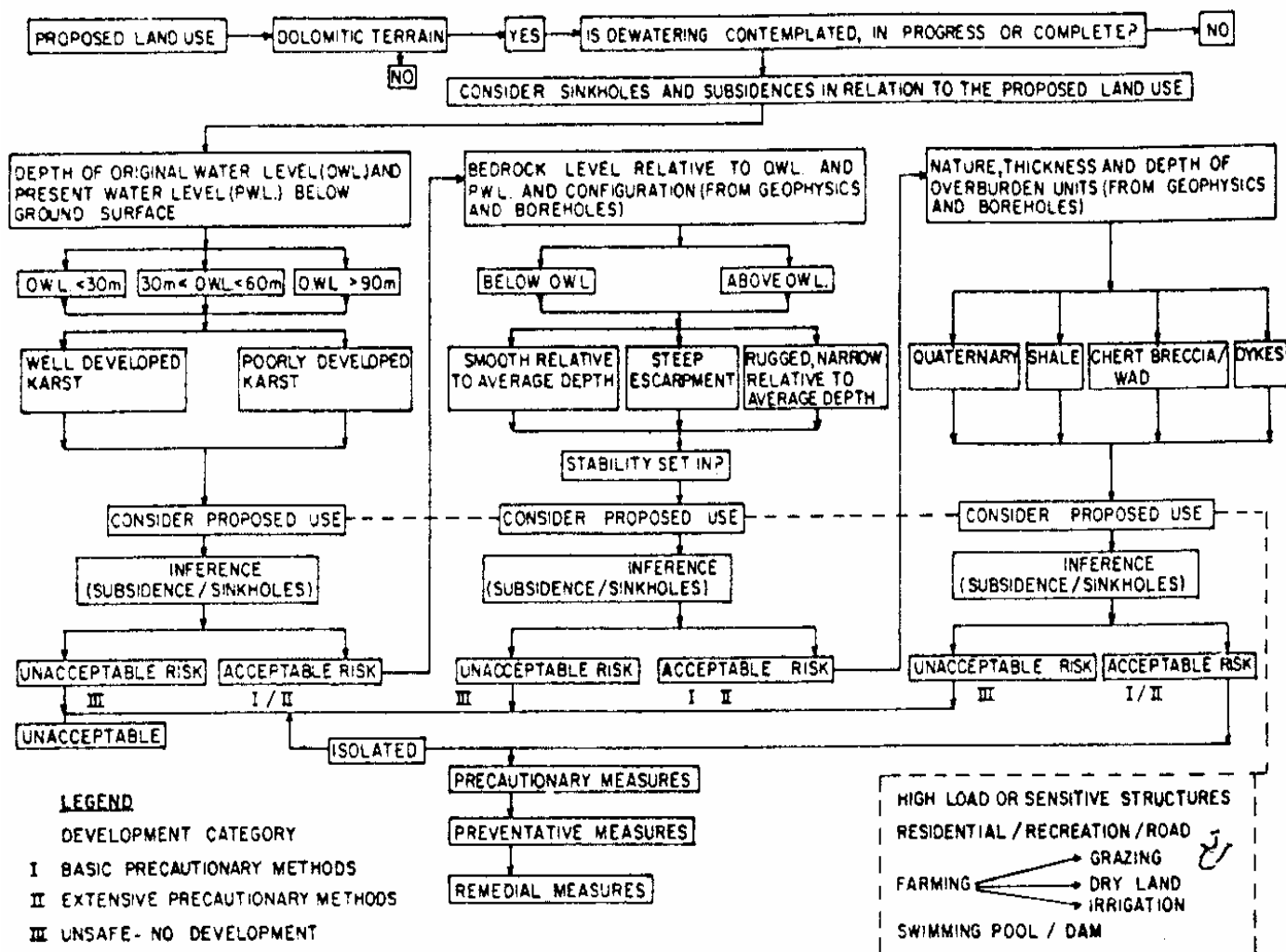
۹-۴ نواحی که انتظار آب زدایی در آنها بوده و یا در حال انجام است

هنگام تحلیل پایداری نواحی که درصدد آب زدایی آنها بوده ایم و یا این کار در آنها در دست انجام است لازمست زمینه های پیشنهادی برای این کار با دقت تمام ارائه شود. برپایه تجارب آب زدایی بخش ساحلی خاکریز جداساز^۱ تحلیل برپایه سیستم سه بخشی با توجه به تراز آب زیرزمینی است (۱۹۵۸)، (نگاه به نمودار ۴-۳). اطلاعات مورد نیاز از روی مطالعات ثقلی که روی شبکه منظم با فواصل با ۹۱ متری و روش حفاری ضربه ای بادی به دست می آید. کاهش داده های ثقلی به گونه ای است که تراز صفر روی نقشه های هم ضخامت معرف سنگ کف تراز آب زیرزمینی است. وضعیت سطح بیرونی سنگ کف بسیار حائز اهمیت است، گردان های پرشیب می تواند بهنگام آب زدایی، ایجاد ترکهای تنشی کند. اکثر حفره های فروکش در مناطقی به وجود می آیند که انحلال در امتداد یک شکاف در محلی است که سطح بیرونی سنگ کف دارای شیب تندی می باشد. مشخصات پارامترهای زمین شناسی مهندسی مصالح در جا و یا مصالح جابه جا شده ای که روی سنگ کف را پوشانده اند دارای اهمیت بسیار زیاد است.

یک مثال در این زمینه لایه های دولومیتی همراه میانه لایه چرت است که در اثر هوازدگی تبدیل به برش چرتی دارای مخلوطی از خاکهای حاوی آهن و منگنز شده است. این گونه مصالح بدون سیمان و تراکم، بسیار سست و دارای تراوایی بسیار بالا و آمادگی فرسایش شدید می باشند. هنگامی که این گونه مصالح دچار آب زدایی شوند، ناپایداری به دلیل تراکم ناگهانی و فرسایش داخلی در آنها رخ می دهد. حفاری در این گونه لایه ها با سرعت زیاد و بدون به دست آوردن نمونه است و به میزان زیادی هوای مورد استفاده حفاری از بین خواهد رفت.

1 - Bank compartment

نمودار ۳-۴- فرآیند تحلیل مربوط به آب‌زدایی در دست انجام نواحی شهرداری



اندازه‌گیریهای احتیاطی برای مقوله نواحی I در نمودار ۳-۴ عبارتند از : اندازه‌گیریهای احتیاطی برای گسترش مطمئن طرح در نواحی مجاور و کنترل تراوش منطقه. اندازه‌گیریهای مزبور نمی‌تواند دقیق و حساس برپایه قوانین و روشهای قابل دسترسی استوار باشد، از این رو اعمال و دخالت دادن ضریب اطمینان الزامی است. اندازه‌گیریهای مورد نیاز عبارتند از:

- نصب سیستم انتقال زهکشی (روش زهکشی فرانسوی قابل قبول نیست).
 - ساخت هیچگونه سدی در این نواحی قابل قبول نبوده و تمام منطقه باید به طور مؤثر زهکشی شود.
 - تمام شبکه‌های خدماتی و انتقال آب و کانال‌ها باید ناتراوا بوده و موجب فرار آب نشوند. نصب اتصالات زهکشی باید به گونه‌ای انجام گیرد که دارای حداقل حرکت بوده و در عین حال هیچگونه تراوش و فرار آب از این اتصالات میسر نباشد.
 - تمام خیابانها و پارکینگ‌ها باید با قیر، بیتومین یا بتن عایق کاری شده و درز و ترکها کاملاً آب بندی باشد.
 - پس از خاکبرداری پی، محل عبور کابلها، خطوط لوله و غیره لازمست با مصالح دارای رطوبت مناسب به ضخامت‌های ۱۵۰ میلیمتر متراکم شده، به گونه‌ای که کاملاً ناتراوا و مانند مصالح دست نخورده شوند.
- اندازه‌گیریهای احتیاطی مقوله II در نمودار ۳-۴ مربوط به نحوه ارزیابی کارگاه و با تاکید بر پیشنهاد نحوه به‌کارگیری آنها است. اندازه‌گیریهای باید شامل پی‌های ویژه، خطوط انتقال آب و مجاری آب بر در بستر غیرقابل نفوذ باشد.
- مقوله III در نمودار ۳-۴ برای گسترش و توسعه طرح مناسب نیست.

۵- کاربرد گرادیان گرانش عمودی برای تشخیص پهنه‌های کارستی انحلالی و حفره‌های انحلالی نزدیک به سطح زمین

گرادیان طبیعی عمودی گرانشی زمین به خوبی شناخته شده است و اثر آن روی ناهنجاریهای نزدیک به سطح زمین به آسانی قابل محاسبه و شناخت است. حفره‌های انحلالی از سطح تا ۳۰ متری زیر سطح زمین در پهنه‌های کارستی قابل مقایسه نبوده و با روشهای متداول برشهای گرانشی و ناهنجاریهای مشخص شده به وسیله کامپیوتر، نمی‌توان آنها را شناسایی کرد. گرچه گرادیان عمودی گرانشی^۱ (VGG)، به طور نسبی نسبت به توده نزدیک به سطح زمین دارای نارسایی‌هایی است، ولی از آنها برای تشخیص حفره‌های انحلالی زیرزمینی در پهنه‌های کارستی و دیگر نواحی زیست محیطی استفاده شده است.

مطالعات شناسایی حفره‌های کارستی با به کارگیری تجهیزات گرانی‌سنجی وردن^۲ در پنج کارگاه واقع در شمال فلوریدا انجام شده است. در این نواحی با استفاده از این تجهیزات به طور مشخص توده‌های سنگ آهک ضخیم کارستی شده ائوسن را که دارای پوشش نازکی از روبار جوان‌تر نهشته‌های رسوبی است از یکدیگر تمیز داده‌اند. در هریک از کارگاههای نامبرده ارزش VGG، در امتداد برشهایی که ۳۰-۱۵ متر در نواحی خوب از حفره‌هایی که در ژرفای ۱۲ تا ۲۵ متری قرار داشته، تهیه شده است. نتایج بررسی نشان داده است تا ژرفای ۱۵ متری سطح زمین حفره‌های عمودی که به ابعاد ۳ متر پر شده‌اند با این روش قابل تشخیص‌اند. حفره‌های بزرگتر در اعماق بیشتر نیز قابل تشخیص هستند. با مرتب کردن ژرفای شناخته شده روی شیب مقاطع VGG، می‌توان یک رابطه بین شیب و ژرفای حفره‌ها را تخمین زد.

در روشهای ژئوفیزیکی، روش فوق یک راه مناسب و مستقل تشخیص ناهنجاریهای زیرزمینی محسوب شده که به وسیله روشهای چاهنگاری الکتریکی شناخته می‌شود. از این رو، افزایش بررسیهای شناسایی که برای دستیابی به شناسایی و توسعه محل انجام می‌شود به میزان قابل ملاحظه‌ای از به کارگیری آزمایشهای صحرایی و حفاریهای اکتشافی پرهزینه برای اطلاع از ویژگیهای زیرزمینی جلوگیری می‌کند.

در پژوهشهای پیشین وجود حفره‌های نزدیک به سطح زمین در پهنه‌های کارستی با اندازه‌گیریهای VGG تشخیص داده شده است. این شیوه شامل اندازه‌گیری ساده‌ایست با استفاده از یک متر و یک سکوی بلند متحرک که کمتر از هزینه تراز وردن گرانی‌سنج است. این وسیله به کارگیری و ارزش VGG را برای ارزیابی نواحی مخاطره‌آمیز زمین‌شناسی و تحلیل کارگاه را برای اهداف برنامه‌ریزی مشخص می‌کند.

در این روش به هنگام اجرای گرانی‌سنجی چند سوند و تنها یک متر در راستای عمودی برای اندازه‌گیری گرادیان، زیرزمینی به کار می‌رود.

این روش را می‌توان به سادگی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و یا بازتابهای انکساری کم ژرفای ژئوفیزیکی به کار برد. طراحی شناسایی بیشتر، برای توسعه و کاهش میزان حفاریهای پرهزینه، نیاز به انجام آزمایشهای زیرزمینی دارد.

یکی از مهمترین پدیده پهنه‌های کارستی عبارتست از حفره‌های فروکش که در نتیجه فرسایش انحلالی به وجود می‌آید. در محل‌هایی که این چنین سیمای کارستی وجود داشته باشد ضمن آنکه مشکلات بسیار برای شرایط ژئوفیزیکی ببار

1 - Vertical gravity gradients

2 - Worden

می‌آید، وجود آنها تهدید آشکار برای جامعه نیز می‌باشد زیرا این حفره‌ها و دارای پتانسیل ایجاد خسارات ویرانگر بر اقتصاد جامعه هستند. مراحل کارستی شدن و توسعه حفره‌های فروکش و گسترش آنها به خوبی در بخش مرکزی شمال فلوریدا شناخته شده است (بک و سینکلر^۱ ۱۹۸۶).

با وجود زیاد بودن حفره‌های فروکش در فلوریدا، وجود آنها به طور جدی به عنوان تهدید عمده‌ای برای جان و مال مردم مورد توجه قرار نگرفته است. حفره‌های فروکش قبلی و آنهایی که جدیداً به وجود می‌آیند موجب وضعیت ناخوشایند زیست محیطی می‌شوند.

با آگاهی یافتن از فرآیند کارستی شدن و افزایش تعداد حفره‌ها و گسترش آنها، برنامه‌ریزان در تمام سطوح به این باور رسیده‌اند که در اینگونه پهنه‌ها نیاز به مشارکت دادن تصمیم‌های کارگاهی برای محافظت از سرمایه‌گذاریها هستند. چنانچه خواهیم از ویران شدن سازه‌های گرانیجیمت بر اثر حفره‌های فروکش تکرار شونده و یا ویران شدن موضعی سازه جلوگیری کنیم نیاز به مطالعه دقیق برای آنها است. بدون تردید حفاریهای اکتشافی اطلاعات قابل اعتماد از سازندهای تشکیل دهنده حفره‌های فروکش در اختیار قرار می‌دهند اما تعیین تعداد گمانه‌ها در بررسی‌های شناسایی مستلزم هزینه بسیار زیاد خواهد بود که مانع از به کارگیری این روش می‌شود.

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در ارتباط با ناهنجاریها و حفره‌های زیرزمینی در سرزمینهای کارستی فلوریدا و سایر پهنه‌های کارستی بسیار مؤثر و با ارزش بوده است (برای نمونه، اسمیت ۱۹۸۶، اسمیت و راندوز، ۱۹۸۶)^۲، گرچه این روش مطالعه تحلیلی است ولی قادر است حفره‌های نزدیک سطح زمین را که برای پایداری سطح زمین، مخاطره‌آمیز است در ابعاد سه بعدی مشخص کند. پاره‌ای نواحی برای روش اندازه‌گیری جریانهای الکتریکی مناسب نیستند زیرا جریان آب زیرزمینی ممکن است جریان الکتریکی را منحرف کند یا به دلیل پوشش گیاهی سطح، ممکن است منجر به بی‌نتیجه شدن مطالعات صحرایی شود.

تفسیر ناهنجاریهای گرانی به طور گسترده‌ای برای تشخیص اختلاف چگالی و پیش‌بینی پارامترهای غیریکسان می‌باشد. به طور کلی، حفره‌های انحلالی نزدیک به سطح زمین بیش از حد کوچک بوده که بتوانند ناهنجاریهای گرانی را مشخص کنند، اما گرادیان عمودی گرانشی زمین (VGG) به ویژه نسبت به چگالی حفره‌های کوچک می‌تواند به طور نسبی ناهنجاریهای زیرزمینی را مشخص کند. در گزارشی بر پایه تغییرات گرادیان عمودی می‌توان حفره‌های زیرزمینی را تشخیص داد. تحقیقات مزبور توسط اسمیت (۱۹۸۵) همراه با کنترل‌های زیست محیطی در شمال فلوریدا انجام گرفته است.

۱-۵ گرادیان ثقلی عمودی

ارتباط بین نیروی جاذبه اجزای ماده به خوبی شناخته شده است. در این مورد G به عنوان نیروی گرانی (ثقل) زمین و مقدار ثابت، m_e توده جرم زمین، و r شعاع کره زمین، شتاب گرانی (ثقل) مربوط به واحد ماده در سطح زمین بوده و از رابطه $g = Gm_e/r^3$ به دست می‌آید.

1 - Beck & Sinclair

2 - Smith, 1986, Smith & Randazzo, 1986

گرادبان میدان گرانشی (ثقل) عمودی، برپایه اختلاف شعاع کره زمین، و اعمال ضریب تصحیح هوا برابر 0.3086 میلی گرم بر متر (mgal/m) در بخش میانی مدار زمین به دست می آید. در این ارتباط، گرادبان عمودی گرانشی (ثقل) عبارتست از اندازه گیری تغییرات میدان گرانشی (ثقل) در واحد طول در جهت عمودی است.

در روی یا نزدیک به سطح زمین، اگر پراکندگی توده یکسان باشد، تغییرات گرادبان یکنواخت است. با مقایسه چگالی نزدیک به سطح زمین، ناهنجاریهای ثقلی را به آسانی می توان پیش بینی کرد به شرط آنکه نیرو در یک راستای هندسی استاندارد شده اعمال شود، برای مثال به صورت کره.

همر^۱ (۱۹۷۰) چندین نمونه سازه هندسی و روابط آنها را برای VGG معرفی کرده است. مدل ارائه شده او نمایش پیچیده ای از رابطه بین VGG با ژرفا، چگالی، و اندازه نیروی های مؤثر است.

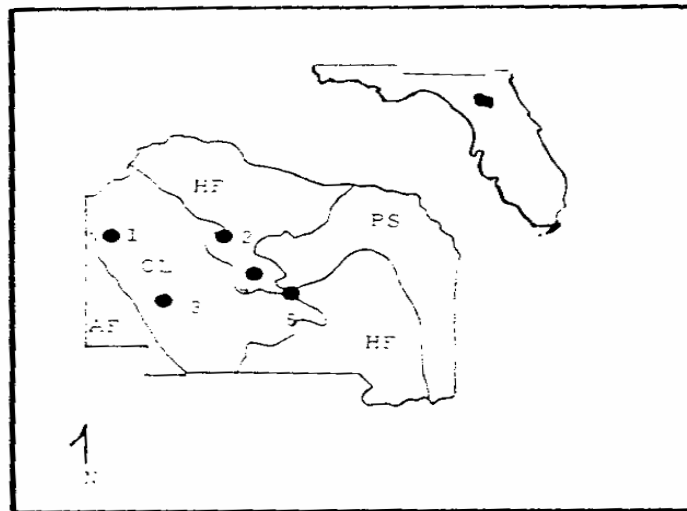
با به کارگیری یک برج سه متری و یک گرانی (ثقل) دقیق، (فاژکلوچ^۲ ۱۹۷۶) علمی بودن اندازه گیری VGG برای تشخیص تونل های زیرزمینی، غارها و معادن قدیمی ثابت شده است. (باتلر^۳ ۱۹۸۴، ۱۹۸۰) نشان داده است تغییرات به خصوص در غارها به وسیله اندازه گیری های میکرو گرانی (ثقلی) و روش گرادبان گرانشی (ثقلی) به دست می آید. براساس تحقیقات باتلر عمیق ترین غارها که به این روش (به صورت قابل قبول) شناخته شده است در ژرفای ۱۵ متری است. او همچنین توانسته است با این روش رسهای ابنانی^۴ و ستونهای سنگ آهکی ماریچ زیرزمینی که به طور نسبی تشخیص آنها در ناهنجاریها مشکل است را تشخیص دهد. پهنه های کارستی زیرزمینی در کنتاکی با اطلاعات به دست آمده از روش اندازه گیری میکروگرانی سنجی^۵ شناخته شده است (کرافورد^۶ ۱۹۸۷).

اکثر روشهای کاربردی موفق صحرایی شامل اندازه گیری VGG و حساسیت نسبی چگالی است. حساسیت برابر یک میکروگال^۷ به نظر طبیعی می رسد. گرچه، ناهنجاریهای هدایت شده به وسیله VGG بر روی غار و مغاره های شناخته شده عددی برابر ۳۰۰ میکروگال را نشان می دهد.

بر این اساس، این بررسی به منظور کمک به روش کاربردی مستر^۸ وردن با حساسیت ۲۰ میکروگال آغاز شد. یک برج چوبی، دو لایه با فاصله عمودی یک متری از یکدیگر برای این روش به کار گرفته شده است و دو اندازه گیری در هر یک از ایستگاهها به عمل آمده است.

کارگاه آزمایشی در استان الاکو فلوریدا انتخاب شده است (شکل ۵-۱). این نواحی با تناوبی از سازند آهکی گروه اوکالا^۹ که تحت فرآیند انحلال و سازندهای فعال تشکیل دهنده حفره های فروکش هستند، مشخص می شوند.

-
- 1 - Hammer
 - 2 - Fajklewicz
 - 3 - Butler
 - 4 - Pocket clay
 - 5 - Micro gravity
 - 6 - Crawford
 - 7 - Microgal
 - 8 - Master
 - 9 - Ocala Group



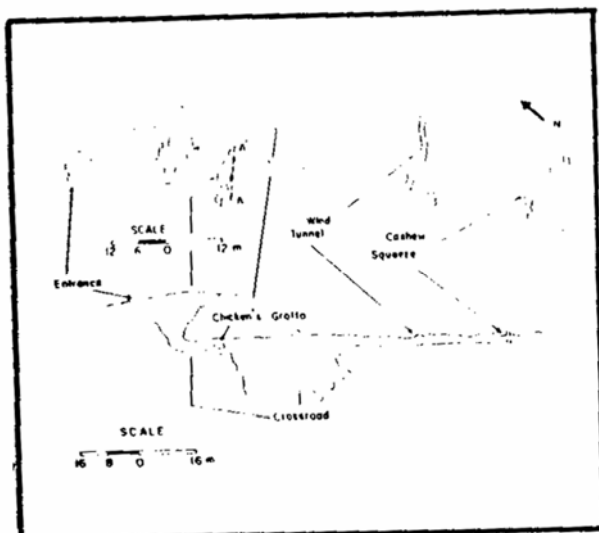
شکل ۵-۱- موقعیت ساختگاههای اندازه‌گیری شده

سنگ آهک مزبور، به وسیله توالی ماسه‌های میوسن که به سوی خاور بر ضخامت آنها افزوده می‌شود همراه رس، و عدسیه‌های سنگ آهک است که مجموعه مزبور به نام سازند هاوتورن^۱ نامیده شده است. سازند مزبور به وسیله ماسه‌های سطحی پوشیده شده است. منطقه مزبور، به خوبی کارستی شده و مجموعه حفره‌ها و مغاره‌ها دیده می‌شود. تراز آب زیرزمینی تقریباً نزدیک به سطح زمین است (۱۵-۵۰ متر).

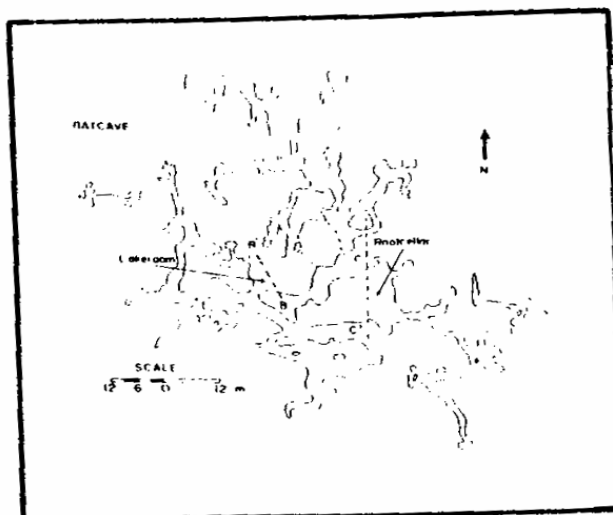
شش ساختگاه در پنج محل انتخاب شد. نقشه‌های زیرزمینی به خوبی نمایانگر مجموعه‌ای از حفره‌ها است که برای مطالعه انتخاب شده‌اند (شکل ۵-۱). تمام حفره‌ها متشکل است از بالاترین بخش سنگ آهکی اوکالا هستند. برشهای زمین‌شناسی با راستای تقریباً عمود بر روند عمومی در سطح زمین تهیه شده است و روی این برشها ساختگاه انتخاب شده است. فاصله ساختگاهها بستگی به عوارض سطح زمین، و رویش گیاهی دارد، ولی فاصله متداول ۱/۵ تا ۳ متر است. فاصله ۲ متری ساختگاه از یکدیگر عملاً مناسب بوده است. درازای برشهای اندازه‌گیری شده حدود ۱۵ تا ۳۰ متر است.

۵-۲ تجزیه و تحلیل

ارزش گرادیان عمودی به صورت بسیار پایین ناهنجار است (کمتر از ۰/۲ mgal/m) که با ژرفای ۷ تا ۱۲ متر روی مجموعه حفره‌ها و مغاره‌ها را پوشانده است. ابعاد غارها حداقل برابر ۳ متر ولی اندازه آنها در جهات افقی تغییر می‌کند. از این رو، مقایسه شکل داده‌های غار، با یکدیگر مشکل است (شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳).



شکل ۵-۳- منظر و برش غار وارن^۲
(نگاه به شکل ۵-۲- برای محل)



شکل ۵-۲- منظره غار بات^۱ دید از بالا

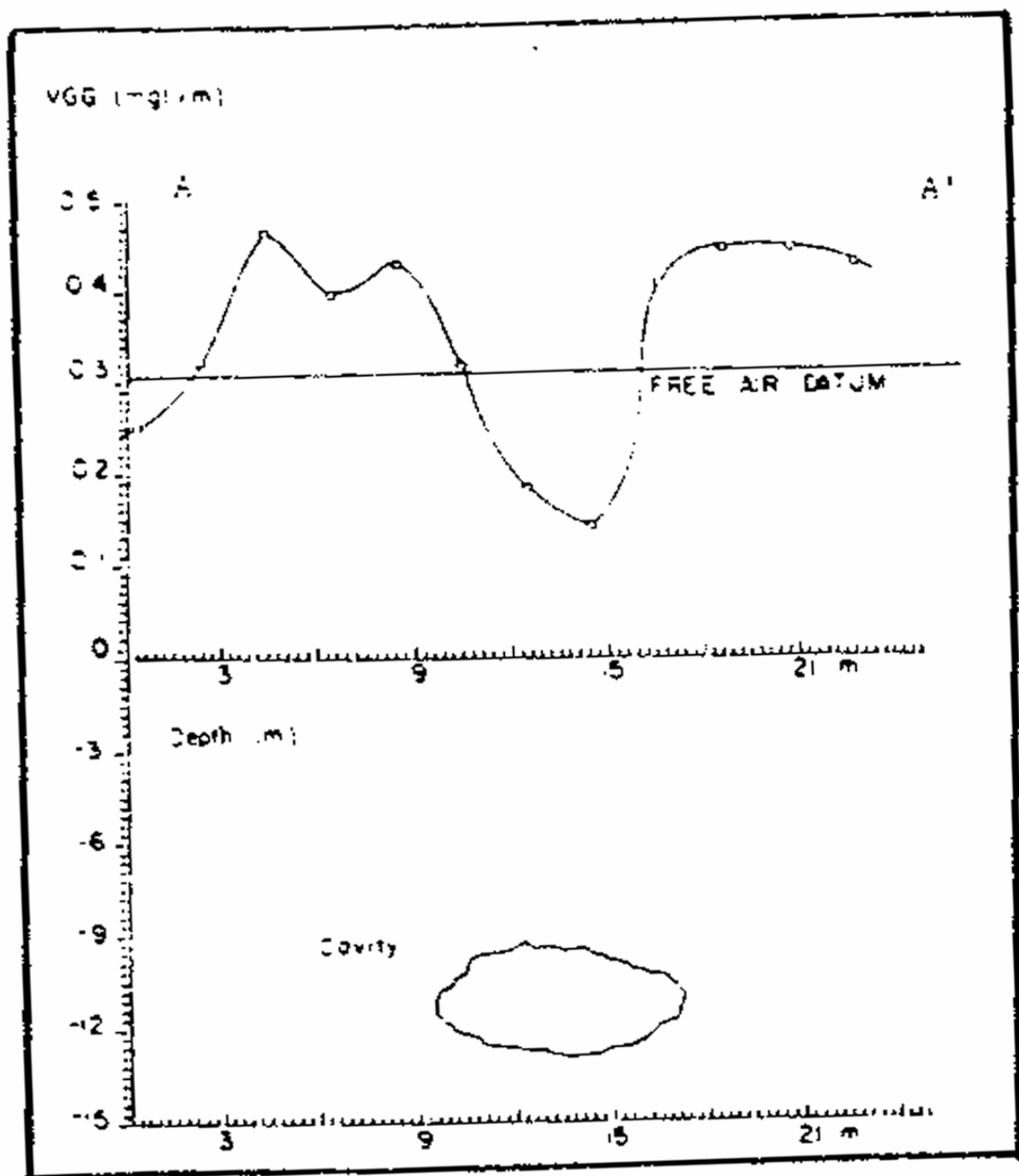
شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ به عنوان نمونه‌های به تصویر کشیده شده است که پیچیدگی سیستم غار را نشان می‌دهد. شکل‌های ۵-۴ تا ۵-۶ مقاطع VGG را در امتداد افقی A, B, C روی شکل‌های ۵-۲ و ۵-۳ نشان داده است.

هریک از مجموعه غارهای نشان داده شده (و سه غار دیگر نشان داده نشده‌اند) موجب ایجاد ناهنجاری VGG به‌میزان کافی برای تشخیص، همراه با مجموعه حفره و منفذ است. به طور کلی در راستای افقی معرف ناهنجاری منفذ زیرزمینی است. هر یک از حفره‌ها نماینده ناهنجاری در دامنه ارزش افزایش یافته VGG همراه خط مبنای هوای آزاد ($30.86 \text{ mgal/m} \cdot \text{atm}$) هستند. در سه مورد (از ۶ راستا)، دامنه مثبت ناهنجاری VGG مشابه دامنه منفی ناهنجاری بوده است. این شکل دربرگیرنده حاشیه‌ای است.

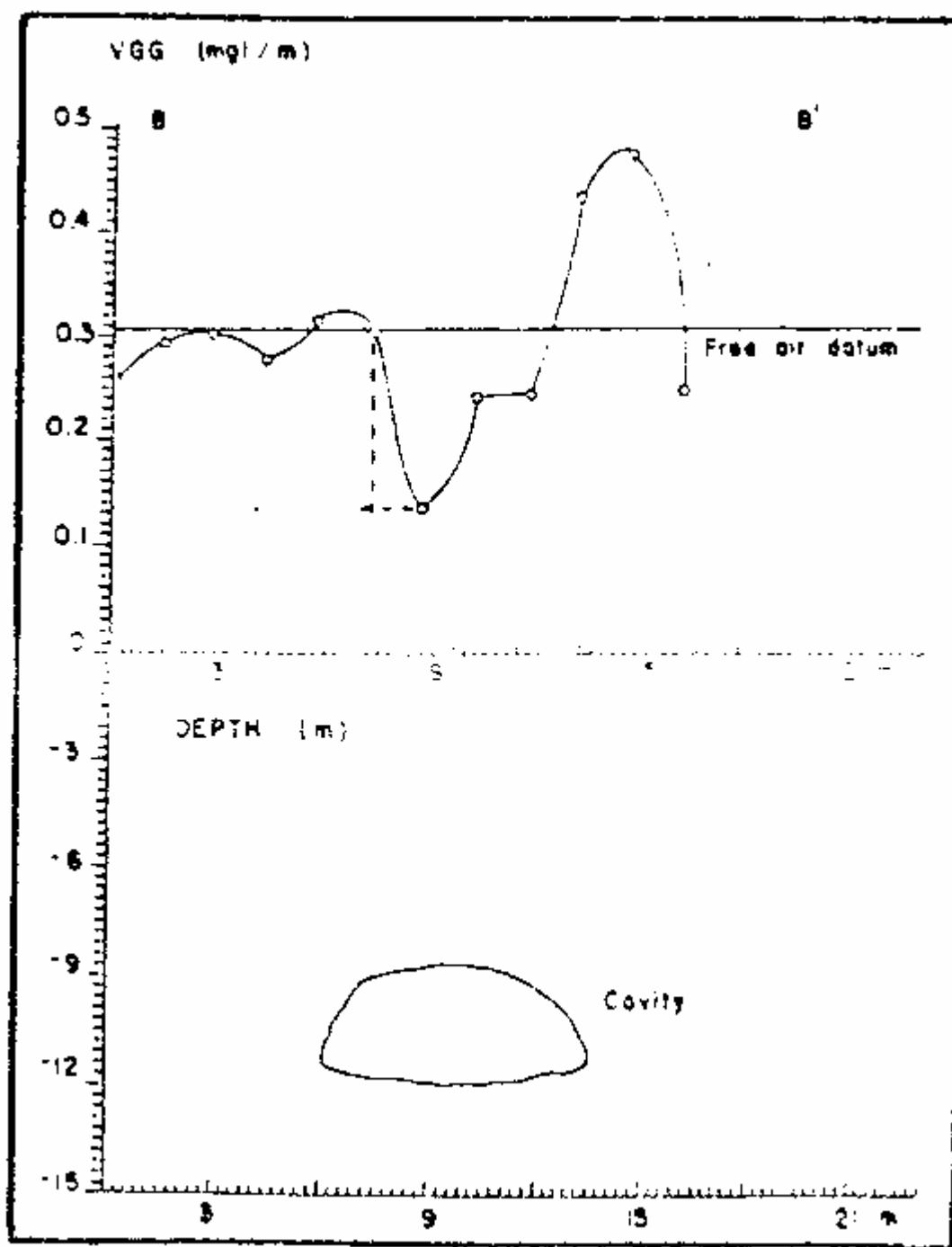
گرچه غارهای زیرزمینی با ابعاد ۳ متر بلندی و ۶ متر عرض توانسته‌اند ایجاد ناهنجاری قابل تشخیص کنند ولی بازتاب VGG برای حفره‌های کوچکتر (برای نمونه ۲ متر ارتفاع در یک متر عرض) در یک زمینه تغییرناپذیر مخفی بوده و قابل تشخیص با ثقل‌سنجی و تغییرات عمودی آن نبوده است و تشخیص حفره‌های عمیق‌تر از ۱۵ متر نیز مشکل است، مگر آنکه ابعاد هندسی آنها بزرگتر باشد. از این رو عملاً، پیش‌بینی مجموعه حفره‌های تهدیدکننده زیرزمینی محدود به آنهایی می‌شود که ابعاد آنها کوچکتر از ۳ متر و در ژرفای بیش از ۱۵ متر مخفی نباشند. حفره‌های بزرگتر در ژرفای بیشتر قابل تشخیص است.

روی برشهای VGG سیمای حفره‌هایی که در ژرفای کم قرار می‌گیرند، بازتاب شدید و ناگهانی را نشان نمی‌دهند. از این رو، با ارتباط خطی ساختمانی روی افق‌های VGG می‌توان گرادیان آنها که پیوند با سیمای زیرزمینی دارد مشخص کرد (شکل‌های ۵-۴ تا ۵-۷). گرچه، این ارتباط ممکن است برای تشخیص وجود غار زیرزمینی مفید باشد، اما این بدان معنی نیست که برای غارهای با ابعاد بزرگتر و یا تراکم کوچکتر نیز قابل اعمال است.

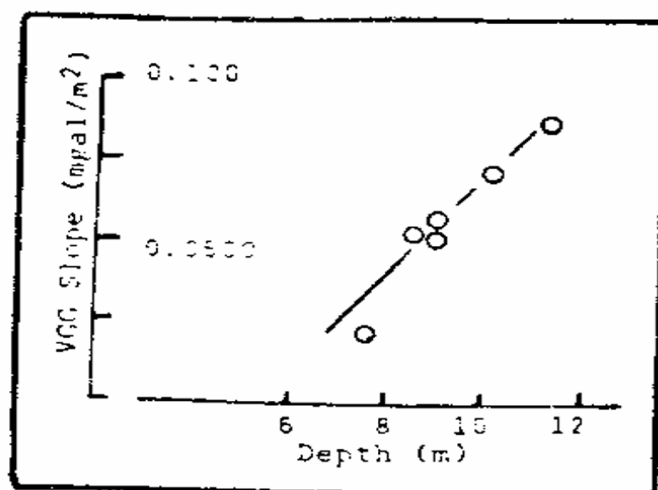
1 - Bat
2 - Waren



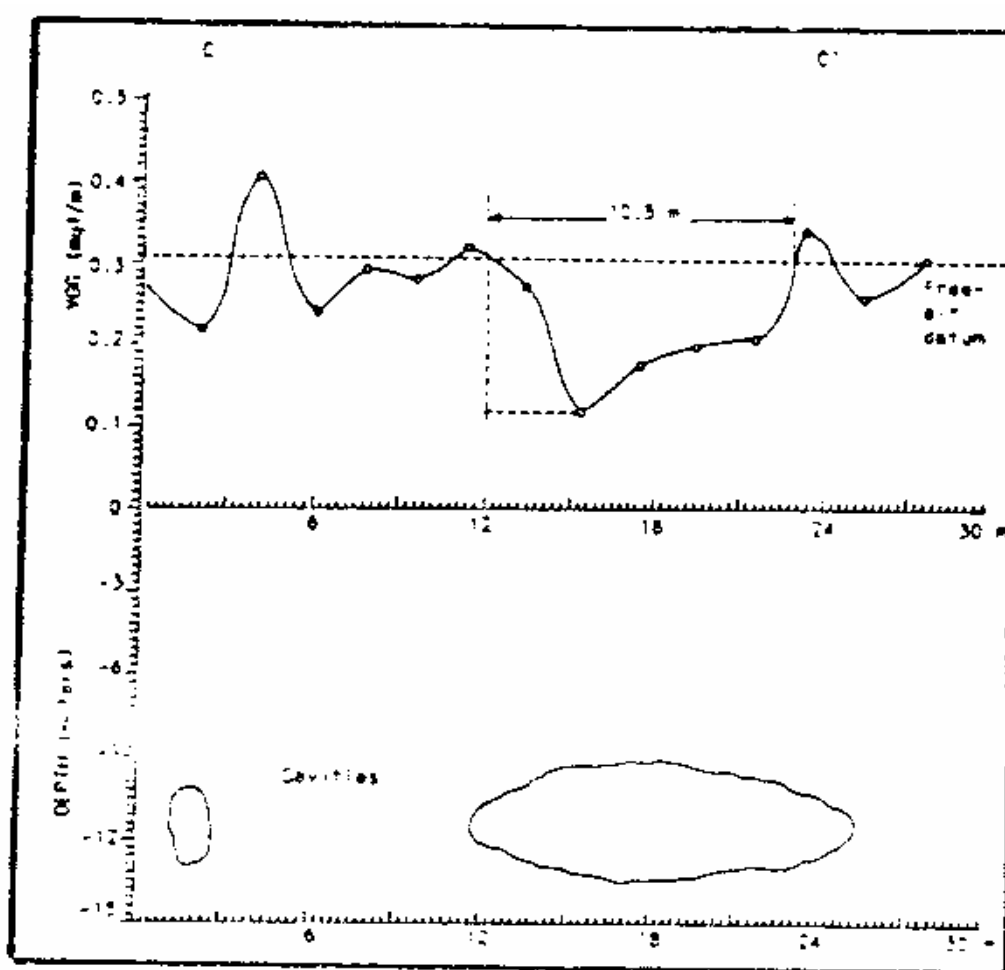
شکل ۴-۵- گرادیان گرانشی A در غار وارن (نگاه شود به شکل ۲-۵ برای مسیر). محل واقعی غار با توجه به مسیر در بخش زیرین شکل نشان داده شود.



شکل ۵-۵- گرادیان گرانشی در غار بات (لک روم). شکل ۵-۳ مسیر را نشان می دهد.



شکل ۵-۶- گرادیان گرانشی اندازه‌گیری شده C در غار بات (روت سلر) که در شکل ۵-۳ مسیر آن نشان داده شده است.



شکل ۵-۷- پیوند بین گرادیان VGG و بخش بالایی غار

۶- فرآیند مسائل و مشکلات اثرات زیست محیطی و مهندسی حفره‌های فروکش

فرسایش سرزمین‌های کارستی با فرایند رویداد در پهنه‌های کارستی سطحی کنترل می‌شود که با انحلال قشر بالایی توده سنگ آهک همراه است. امروزه به وجود آمدن حفره‌های فروکش و گسترش آنها معمولاً در اثر حرکت نهشته‌های پوششی در شیپارهای انحلالی تنورهایی است که زهکش اصلی نواحی کارستی سطحی برای هدایت به نواحی آبدار کارست حقیقی هستند. انحلال سنگ آهک در طول زندگی انسان نمود آشکاری ندارد. فرسایش نهشته‌های پوشش پایین دست به صورت رشته رشته‌ای است. در لایه‌های غیر متراکم و لایه لایه، فرسایش حتی ممکن است به شکل تونل‌های جانبی، انجام گیرد. تنها شیپارهای عمده و اصلی ممکن است موجب جابه‌جایی رسوبات شوند، در حالی که اکثر شیپارها در این مورد نقشی به عهده ندارند. در بخشهای کارستی پوشیده شده با نهشته‌ها، نواحی فرو افتاده سطحی و خطواره‌ها لزوماً نیاز به همسویی با نواحی فرو ریخته جدید ندارد. ناهنجاریها و ویژگی انحلال شدید نواحی کارستی سطحی مشکلات اساسی برای مهندسی به وجود آورده است. زهکشی پایین دست از داخل این نواحی ممکن است محدود و یا سیل آسا باشد. شناخت فرایند در نواحی اپی کارستیک مربوط به گسترش نواحی کارستی است.

این نوشتار خلاصه‌ای است از اثرات زیست محیطی و مهندسی حفره‌های فروکش و نمی‌تواند شامل همه جزییات و در بر دارنده تمام مسائل باشد. پیچیدگی‌های بی‌شمار آلودگی آبهای زیرزمینی کارستی، از جمله مواردی است که به آن اشاره نشده است. بر پایه تئوری این مقاله عمل فرسایش، در نواحی کارستی سطحی به طور محسوسی پیچیده‌تر از انحلال سنگ آهک ساده است و آنها عوامل کنترل کننده در برخورد با مسائل حفره‌های فروکش برای انسان است. عمل کارست سطحی به ویژه در کارست‌های پوششی مهم است، تا جایی که اثر نهشته‌های پوششی، عامل فاکتور غالب را در شکل دادن پهنه‌های کارستی به عهده دارند. تنها زمانی انسان می‌تواند بر پهنه‌های کارستی با اطمینان ساخت و ساز کند که اطلاعات کامل از فرایند فرسایش معاصر کارستی داشته باشد.

اصطلاح چاله‌های فرو افتاده یا حفره‌های فروکش، دلالت بر عملکرد و ریشه مکانیکی فرسایش و شکل آنها دارد و در بر گیرنده حوضه بسته‌ای است که هیچ گونه زهکشی سطحی و خروجی ندارد. عملکرد این ساختار عبارت از هدایت آبهای سطحی به سوی آب زیرزمینی و نواحی آبدار کارستی است. عبور آب، بر پایه انحلال کارستی توده سنگهای میزبان استوار است. در مراحل بعدی، فرایند غالب، فرسایش پراکنده یا مداوم لایه‌های پوششی غیرمتراکم زیرین است که در شکل گیری لایه‌های خارجی اثر می‌گذارند.

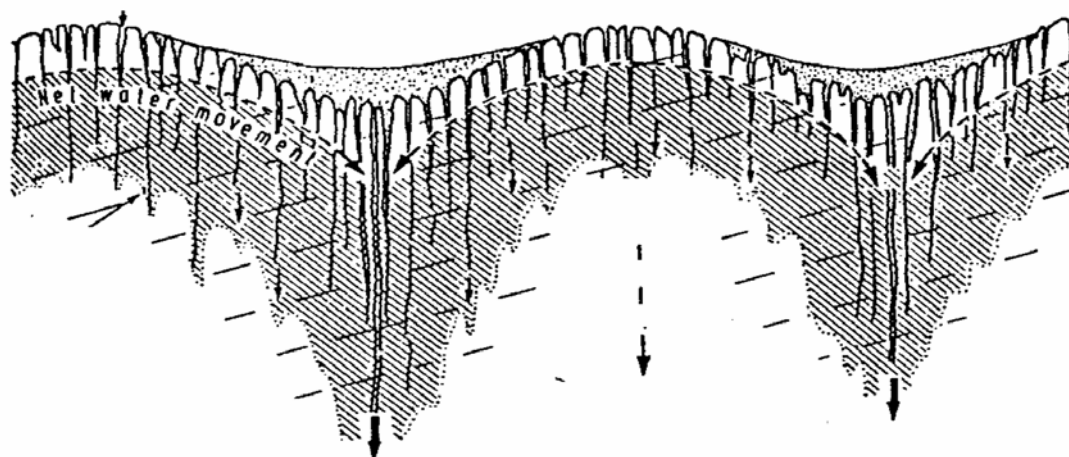
۱-۶ فرایند کارستهای سطحی

در حالی که فرو ریختن ناگهانی لایه‌های بیرونی یکی از مهمترین اثرات گسترش حفره‌های فروکش است، رخدادهای زیست محیطی دیگری نیز در ارتباط با چاله‌های فروکش وجود دارد (جدول ۶-۱) وقوع رخدادهای مشابه زیادی در سالهای اخیر، مسئله مزبور را به اثبات رسانده است. در این مورد، سعی می‌شود خلاصه‌ای از فرایند مربوط به آن بیان شود.

جدول ۶-۱- مسائل مهندسی و زیست‌محیطی مربوط به چاله‌های فروافتاده

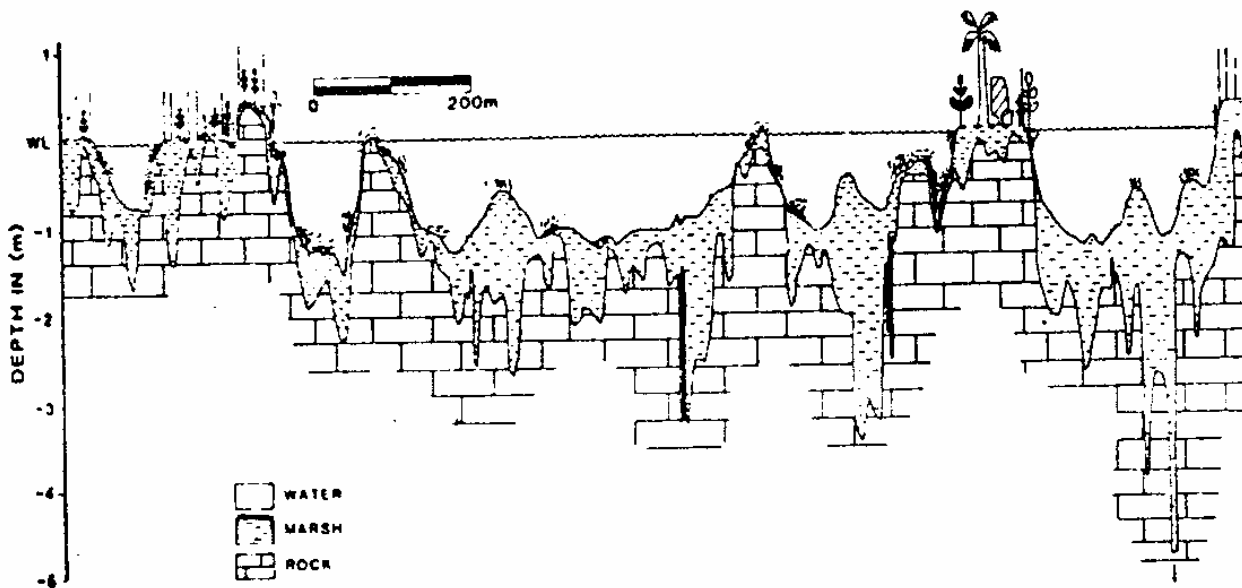
فروریزش ناگهانی سطح زمین، مواد پوششی فروریخته بر روی حفره‌های فروکش
فرونشت تدریجی نواحی پوششی بر روی حفره‌های فروکش
آلودگی آبهای زیرزمینی به دلیل زهکشی به سوی حفره‌های فروکش، «تنوره غول» ^۱ یا خروج ناگهانی آب در معدن ^۲
آلودگی آبهای زیرزمینی بر اثر فروریختن فاجعه‌آمیز آبگیر در نواحی پوششی حفره‌های فروکش
شرایط ناهنجار و غیرقابل پیش‌بینی پی که در اثر برخاستن فرسایش در نواحی کارست سطحی رخ می‌دهد.
سیلاب در حوضه کارستی بر اثر جریان با بده محدود

اکثریت حفره‌های فروکش که موجب گسیختگی سطوح روی زمین شده‌اند امروزه با فرو ریختن حفره‌های پوشیده شده، کمتر آشکارند و حفره‌های فرو رفته در نواحی مزبور دارای پوشش هستند. این گونه ریختارها بیشتر در نواحی کارست‌های پوشیده، گسترش می‌یابند (شکل ۶-۱ شمای کلی کارست سطحی را نشان می‌دهد). در کارست‌های پوشیده ناهنجاریها بسیار مشخص هستند (شکل ۶-۲). با گسترش شبکه زهکشهای کارستی در لایه‌های زیرین میزبان، تراوش آب موجب فرسایش نهشته‌های پوششی و هدایت آن به منافذ و حفره‌های زیرین می‌شود.



شکل ۶-۱- نواحی کارستی سطحی در کارست برهنه (ویلیامز، ۱۹۸۵)

1 - Ponor
2 - Swallet



شکل ۶-۲- سطح سنگ کف در پهنه کارستی دارای پوشش نازک، باختر فلوریدای مرکزی.

برش بر پایه حفاری و بررسی‌های زیرزمینی نزدیک به هم تهیه شده است: مقایسه با شکل ۱-۶. (از هوتون و دیگران،

۱۹۸۴)

بنا بر ویژگی ساختار زمین‌شناسی، فرسایش نهشته‌های روبار بر اثر ساز و کارهای (مکانیسم‌های) مختلفی روی می‌دهد. برنامه‌ریزی اصولی برای کارهای مهندسی و انجام تغییرات و جبران خسارات، زمانی میسر است که فرایند کارستی شدن را به روشنی بدانیم. شیارها (درز و ترکهای انحلالی بزرگ) اکثراً در امتداد درزو ترکهای متقاطع توده‌سنگ گسترش می‌یابد. اکثریت این درز و شکافها به‌سوی پایین باریک‌تر می‌شوند و تراوایی کم، ترک خوردن توده‌سنگ را در پی دارد و تبدیل به شکاف نمی‌شود. آب و توده‌های روبار، نمی‌توانند به‌صورت چشم‌گیری در این نواحی حرکت کنند. گرچه، در محلهایی که درز و ترکهای اصلی موجبات قطع لایه‌ها می‌شوند، این محلها گذرگاه مناسبی برای هدایت آب هستند که به سامانه (سیستم) آب زیرزمینی می‌پیوندند. از آنجا که لایه‌های بالایی سنگ‌آهک در امتداد درز و ترکها به‌شدت تحت تأثیر هوازدگی و انحلال قرار می‌گیرند، لذا شبکه سه بعدی از شکافهای بزرگ که با رسوبات پر شده‌اند یک لایه آبدار برای کمک به هدایت آب ایجاد می‌کند. این بخش دارای لایه آبدار جدا در ناحیه‌ای است که تراوایی کاهش یافته و شکاف سنگها^۱ دچار ترک خوردگی شده‌اند. پس از یک بارش و برقراری جویبار موقت، جریان آب در امتداد افقی و به‌ویژه در راستای زهکشهای اصلی که در امتداد درز و شکافهای بزرگ به‌وجود می‌آید، موجب هدایت عمده آب به سوی نواحی آبدار کارست سطحی می‌شود. این فرایند، بر روی جریانهای همگرا و سنگ‌آهکهای انحلالی متمرکز می‌شود. نتایج گسترده، فروافتادگی‌های کاسه‌ای شکل است که در اطراف مرکز زهکش گسترش می‌یابند. فرسایش سطوح خارجی و انحلال نواحی کارستی سطحی موجب می‌شود درز و ترکهای موجود

در توده سنگ دچار خوردگی و فرسایش شوند. در نتیجه ابعاد آنها بزرگتر و به این ترتیب هدایت مقدار بیشتر آب را در پی دارد. در عین حال بروز جریانهای آشفته ممکن است نهشته‌های ریزدانه را به نواحی پایین جابه‌جا نماید.

در کارست‌های برهنه و آشکار یا با پوشش اندک، گسترش چشمگیر فروافتادگی‌های کاسه‌ای شکل یا حفره‌های فروکش انحلالی دیده می‌شود و عمده‌ترین ریختار سطح زمین در این نواحی است. در نواحی کارستی با پوشش زیاد، فرایند فرسایش که در سطح زمین انجام می‌گیرد، ممکن است موجب پخش دوباره مصالح پوششی و بالا و پایین رفتن سطح سنگ‌آهک‌های زیرین شود. در نواحی ساحلی، در اثر بالا آمدن تراز آب دریا بر روی سنگ‌آهک‌های قدیمی کارستی، لایه‌ای افقی تشکیل می‌شود. در این نواحی بخش‌های کارستی سطحی همچنان گسترش می‌یابد و حرکت آب و رسوبات به نواحی پایین را کنترل می‌کند ولی لزوماً شکل سطح زمین را تغییر نمی‌دهد. تنوره‌هایی^۱ که به‌تازگی فعال بوده‌اند ممکن است رسوبات بیشتری را به صورت پراکنده یا پیوسته به سمت پایین حمل کنند. گرچه، تنوره‌هایی که قبلاً به‌وسیله رسوبات کاملاً بسته شده بود، ممکن است بر اثر جریان زیرزمینی ناگهانی شسته شوند و باز شوند و این پدیده در سطح زمین‌هایی که تاکنون هیچ اثری از فرونشست در آنها دیده نشده است، اثر می‌گذارد. این‌گونه تغییرات ممکن است به‌صورت طبیعی رخ دهد ولی معمولاً وقتی اتفاق می‌افتد که دخالت انسان در به‌هم ریختن شرایط طبیعی زمین موجب افزایش نشت آب و فرسایش لایه‌های زیرین شود. این‌گونه فرسایش ناگهانی لایه‌های زیرین که از پایین به سمت بالا انجام می‌گیرد موجب خالی شدن موضعی لایه‌های نزدیک به سطح زمین شده و منجر به فروریختن فاجعه بار پوشش حفره‌های فروکش می‌شود.

۲-۶ فروریزش پوشش‌ها

بسیاری از فرو ریختگی‌های ناگهانی که منجر به شکل‌گیری حفره‌های فروکش می‌شوند بر اثر ریزش سقف حفره‌های بزرگ و روبار غیر متراکم روی آنها رخ می‌دهد. این حفره‌ها یا مغاره‌ها بر اثر مهاجرت یا فرسایش و جریانهای رو به پایین رسوبات در نواحی باز سنگ کف به‌وجود می‌آیند. حفره‌های ایجاد شده در نهشته‌های غیرمتراکم مانند رس‌های درجا، دایره‌ای شکل با فرم گنبدی یا هلالی است. دیواره‌ها بیشتر قائم و رشد بازشدگی آنها به‌سوی سطح زمین است. فرم بازشدگی‌های مزبور ممکن است با فرم بازشدگی در لایه‌های زیرین سنگ کف هم‌سو و دارای تنوع در لایه‌های سخت مقاوم و به‌هم چسبیده باشد. شکل بازشدگی‌ها ممکن است حین رشد آنها به سوی بالا و برخورد با لایه‌های مقاوم‌تر تغییر کند. چنانچه سقف مسطح باشد، رشد آنها در راستای افقی و مخروطی‌های نوک تیزسنگی به‌سوی بازشدگی سنگ کف خواهد بود.

در برخی موارد ممکن است ریزش جانبی رخ دهد، مانند ریزش و فروریختن در نزدیکی سنترویل^۲ آلابامای آمریکا، این فروریختگی بر اثر دوباره برقرار شدن زهکش سطحی، بوده است که سبب افزایش جریان در منطقه شده است.

محاسبات نظری فرو ریختگی لایه‌های فوقانی که بر پایه توده‌های خاک قوسی شکل انجام می‌گیرد، با واقعیت‌های طبیعی متناسب و هم‌سو نیست.

1 - Shaft

2 - Cantervil

در بخش جنوب شرقی ساحلی آمریکا، آهکهای با تراوایی بالا مربوط به زمان ترشیری^۱، توسط نهشتههای جوان دریایی غیرمتراکم پوشیده شدهاند، این امر موجب پوشیده شدن حفرههای فروکش و پیچیدگی شناخت آنها شده است. در بسیاری از نواحی لایه‌های رس، بین سنگهای آهکی و ماسه‌های سطحی قرار می‌گیرد. این رس‌های چسبیده نه تنها آبخوان داخل سنگ‌آهک را تحت فشار قرار می‌دهند بلکه سبب تشکیل "Perch Water Table" در ماسه‌سنگهای فوقانی می‌شوند و در عین حال حفرات انحلالی در توده سنگ آهک زیرین ایجاد می‌کنند. با فرسایش تدریجی و حمل توده رسی به کانال‌های کارستی، بخش بالایی دست‌نخورده باقی می‌ماند و برای نگهداری پوشش لایه‌های ماسه‌ای به کار می‌رود. پس از آنکه سرانجام تاقدیس رسی فرسایش یافت، آب اشباع شده در ماسه‌ها با شتاب به‌سوی حفره‌های پایین جریان می‌یابد. اگر ضخامت لایه‌های پوششی کم باشد (۲-۳ متر در رس و کمتر از ۱۰ متر در ماسه)، حفره‌های فروکش به‌وجود آمده دارای شعاع کمتر از ۲۵ متر و عمق ۹ متر خواهند بود.

در وینتر فلورایدای آمریکا^۲، توده سنگ آهک دارای پوشش ۳۲ متر رس نیمه متراکم و ۱۸ متر ماسه غیر متراکم است. زمانی که در ماه می ۱۹۸۱، حفره‌های فروکش در وینتر پارک گسترش یافتند، یک مجرای عمودی به قطر ۲۲ متر داخل رس‌های محدوده کننده به‌وجود آمد و بلادرنگ آب لایه‌های ماسه‌ای اشباع شده روی رس ایجاد فرسایش و تنوره کرد و فرسایش تا رسیدن به مرحله تعادل شیب ادامه یافت. قطر نهایی در سطح زمین حدود ۱۰۰ متر و ژرفای قابل رویت حدود ۳۱ متر بود ولی شکی نیست که تنوره تا داخل سنگ آهک حفره‌دار کارستی ادامه می‌یافت. در این فروریختگی حدود ۱۴۷۰۰۰ متر مکعب نهشته‌ها همراه چندین درخت، یک منزل و سه اتومبیل پورشه ناپدید شده است. حفره فروکش مزبور موجب خسارت به دو خیابان شهر و چندین مرکز تجاری شده است. میزان خسارت نهایی افزون بر ۴ میلیون دلار برآورد شده است.

تراکم نواحی انحلالی در تنوره‌ها یا پهنه‌های کارستی، در سطح آهکهای مدفون ممکن است، بسیار زیاد باشد. اما همانطور که قبلاً مورد بحث قرار گرفت، نواحی انحلالی یاد شده نمی‌توانند به‌صورت مؤثری در زهکشی مناطق اثر کرده و ایجاد پوشش‌های آواری روی حفره‌های فروکش کنند. در مناطقی که توپوگرافی لایه‌ها افقی است، تراکم پهنه‌های کارستی بیشترین مقدار خواهد بود. نواحی ساحلی با پهنه‌های تخت که به‌وسیله نهشته‌های جوان و سنگ‌آهک دارای تراوایی زیاد پوشیده شده‌اند، شرایط مناسبی برای تراکم کارست را دارا هستند. انیستیتوی تحقیقاتی حفره‌های فروکش فلوریدا از ابزار رادار نفوذی برای تهیه نقشه تنوره‌هایی که در سنگ آهک ترشیری مدفون بوده و با رسوبات پر شده‌اند (همچنین دارای پوشش نازک خاک رس و نهشته‌های ضخیم ماسه ائولین‌دار در سطح می‌باشند) استفاده کرده است. در محدوده‌ای به بزرگی ۲/۴۶ هکتار، حدود ۳۰ عدد تنوره تشخیص داده شد. تقریباً نیمی از تنوره‌ها با رسوبات سخت میوسن و بقیه با ماسه‌های نرم غیرمتراکم معاصر پر شده‌اند. گرچه، تنها دو عدد از حفره‌های فروکش طی ۱۳ سال گذشته به وجود آمده‌اند. بررسی مشروح صحرایی ناحیه نشان می‌دهد دانسیته فروریختگی یک حفره فروکش که برابر ۲٪ باشد موجب به‌وجود آمدن فروریختگی دو هکتار در سال می‌شود (ویلسون و مک دونالد^۳ ۱۹۸۷).

1 - Tertiary

2 - Winter park

3 - Wilson and Mc Donald

صورت مصالح پوششی روی یک تنوره از ۶۰۹ تنوره در هر سال دچار فرو ریزش می‌شود. البته، چنانچه این آمار درست باشد، این به آن معنی است که دوره بازگشت فعالیت هر تنوره یک بار در هر ۶۰۹ سال خواهد بود. از آنجا که برخی تنوره‌ها با نهشته‌های میوسن پر شده‌اند، کاملاً روشن است که برخی از آنها به‌طور متناوب دچار فعالیت می‌شوند در حالی که بقیه به‌صورت بسته شده باقی می‌مانند.

۳-۶ انحلال حوضه‌ها

در پهنه‌های کارستی داخل قاره‌ای، جایی که توده سنگ‌آهک با خاکهای درجا، رسوبات یخچالی و یا سایر نهشته‌های غیرقابل انحلال پوشیده شده است یا در پهنه‌های کارستی سواحل که معمولاً توده‌های سنگ‌آهک تحت تأثیر شرایط آرتزین قرار دارد، در این نواحی برخی فرایندهای اپی کارستیک صورت می‌گیرد که اکثراً نامفهوم است. فرسایش واقعی از حجم حقیقی نهشته‌های پوششی نیاز به رژیم جریان آشفته در منافذی که از پیش وجود داشته‌اند، دارد. سنگ‌آهک‌های به وجود آمده در اثر انحلال طی میلیون‌ها سال انباشته شده‌اند و ارتباطی با ویرانی کوتاه‌مدت رسوبات پوششی ندارند. از این رو، تصور اینکه فرورفتگی‌های فروکش اکثراً در نواحی پرشده به وجود می‌آید «براین پایه که عمل انحلال در ابتدا به میزان بیشترین مقدار انجام می‌گیرد» تصور نادرستی است (روتلیج^۱، ۱۹۸۲). فرو ریختن حفره‌های فروکش در نواحی پر شده بالا است زیرا ناحیه تحت نفوذ آب، شرایط مناسب برای فرسایش فرورو و انتقال رسوبات به نواحی باز شده کارستیک زیرین را دارا است. هر عملی که نفوذ آب را افزایش دهد، ممکن است موجب فروریختن رسوبات سخت شده داخل حفره فروکش شود.

نمودار وجود حفره‌های فروکش روی نقشه‌های توپوگرافی و عکسهای هوایی لزوماً در پیوند با فروریختگی نیست. حقیقت آن است که فرسایش نهشته‌ها به‌سوی پایین تنوره‌ها در اثر زهکشی حوضه منجر به فروریختگی‌های پراکنده می‌شود ولی باید در نظر داشت فروریختگی‌ها منحصر به این نواحی نیست. تمام تنوره‌های قبلی، در حال حاضر در بخش تحتانی سطح حوضه قرار نمی‌گیرند. تشریح حوضه فروریخته را نمی‌توان با نقشه‌برداری گسترده در منطقه انجام داد، بلکه با جمع‌آوری مشروح یافته‌ها از فروریختگی‌های جدید می‌توان به آن دست یافت. در بسیاری از مجموعه فروافتادگی‌ها، فروافتادگی ممکن است به‌صورت طبیعی رخ ندهد، بلکه فقط با دخالت انسان رویداده است.

فروریزش تالاب فاضلاب آلتورا^۲ در مینه‌زوتای^۳ آمریکا، یکی از بهترین نمونه‌های مطالعه شده است. ناحیه دارای پوشش نازکی از رسوبات یخرفت^۴ روی لایه‌های نازک، ماسه سنگ شکننده و دولومیت‌های کارستی است. در سطح زمین فرسایش کارستی دیده نمی‌شود ولی ۲۳ حفره فروکش با پوشش فروریخته و ۴ غار در منطقه شناسایی شده‌اند. پس از آن که تالاب فاضلاب بر پایه طراحی‌های انجام شده ساخته و پر شد، طی یک هفته فاضلاب تالاب زهکشی شده و به ۹ حفره فروکش با پوشش ویران شده، هدایت شد.

1 - Rutledge

2 - Altura

3 - Minnesota

4 - Drift

تراوش محلی آب دریا در یک ناحیه، با افزایش قابل ملاحظه فشار آب (بار)، موجب باز تر شدن نواحی کارست پیشین در لایه‌های دولومیتی زیرین می‌شود.

از آنجا که بسیاری از تنوره‌های کارستی پیشین پر می‌شوند و هیچگونه نمودی در سطح زمین بر نهشته‌های روبار از خود به جای نمی‌گذارند، بررسی‌های عکسهای هوایی ممکن است منجر به شناخت نواحی فروریزش شود. ویلسون و دیگران^۱ ۱۹۸۷ زمانی متوجه این پدیده شدند که در نواحی اورلاندو^۲ عکسهای ماهواره‌ای و عکسهای هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ را بررسی می‌کردند. در اینجا هیچگونه همبستگی قابل ملاحظه‌ای بین نواحی با فروریختگی‌های فروکش زیاد در ناحیه دیده نمی‌شد. در لایه‌های کارستی زیرین که به طور عمده در راستای درز و ترکها شکل گرفته بود، هیچ یک از این درز و ترکها در زیر پوشش زیاد نهشته‌های روبار بر روی عکسهای هوایی دیده نمی‌شد. از این رو هیچگونه همبستگی بین فروریختگی‌ها و نشست‌ها با عکسها، وجود ندارد. بدون تردید، مطالعات میزان خطر فرورفتگی‌های فروکش، بر پایه عکسهای هوایی، در مناطقی که نواحی کارستی دارای پوشش زیاد روباره هستند با تردید روبرو خواهد بود (بروک و الیسون، ۱۹۸۱)^۳.

۴-۶ فرونشست‌های پوشیده

نه تنها فرآیند فرسایش رو به پایین و رسیدن آن به نواحی باز کارستی نه تنها موجب فروریختگی‌های فاجعه بار می‌شود، بلکه فرونشست‌های تدریجی نیز مشکل‌آفرین است. در فلوریدای ایالات متحده، اکثر نمونه‌های بررسی شده در سطحی وسیع، نمایانگر افزایش تدریجی فرونشست لایه‌های کم‌عمق‌اند که سبب تغییر شکل این لایه‌ها در رس ناپیوسته می‌باشد. این رس روی سنگ آهک را پوشانده است. در این نمونه‌ها به نظر می‌رسد که، رس به تدریج در نواحی باز کارستی فرو نشسته است. اینگونه «حفره‌های فروکش پوشیده»^۴ در نواحی ساحلی جایی که تراز آب زیرزمینی بالا و رس‌ها عموماً اشباع‌اند فراوان است، ولی امکان دارد که در داخل پهنه‌های کارستی نیز، چنانچه روباره رسی اشباع شده باشد، رخ دهد [نیوتن^۵ ۱۹۸۷]. این گونه فرونشست‌های پوشیده در فلوریدا، موجب بروز میلیونها دلار خسارت به خانه‌ها و سایر ساختمان‌ها شده است.

یکی از نمونه‌های جالب فرونشست‌های پوشیده به تازگی از لوگان گیف ویلج^۶ در شمال باختری تامپا^۷، فلوریدای آمریکا گزارش شده است. در تاریخ ۱۲ آوریل ۱۹۸۶، روزماری درایو^۸ از ساکنان یک مجموعه مسکونی بتنی بای دال بتنی، متوجه ترک در محل ملات سیمانی بین بلوکهای بتنی در دیوار شمال خاوری محوطه گاراژ می‌شود. ترک به‌سوی بالا در بخش جلویی ساختمان پیشروی کرده است. در اواخر ماه مه فاصله ترک بین بلوکها حدود یک دسیمتر رسیده است. یک چهارم ترک دایره‌ای در کف گاراژ به‌سوی اطاق نشیمن در مجاور گاراژ گسترش یافته است. ادعای خسارت بیمه درخواست می‌شود و از مهندس مشاور به منظور رسیدگی به شرایط زیرزمینی دعوت به عمل می‌آید. پس از حفاری در محل، اعلام شد پدیده ترک به

1 - Wilson

2 - Orlando

3 - Brook and Allisone

4 - Cover – subsidence

5 - Newton

6 - Logan Gate Village

7 - Tampa

8 - Rosemary drive

دلیل فرونشست حفره فروکش «فعال» رخ داده است. بدین منظور ۶ گمانه به وسیله مشاورهای مختلف به عمق ۹ تا ۱۳ متر داخل ماسه ریزدانه، با تراکم متوسط و ۲ تا ۵ متر رس سفت، حفاری شد.

مقاومت و سفتی خاک با آزمایش ضربه نفوذ استاندارد و نفوذپذیری الکتریکی به دست آمد. سنگ آهک تماماً معمولاً بین ۱۱ تا ۱۳ متری زیر سطح زمین قرار می‌گیرد. فرار آب در این آهکها یا کمی بالاتر از آهک یاد شده رخ می‌دهد، که دلالت بر وجود سنگ آهک حفره دار است. تراز آب زیرزمینی در لایه‌های ماسه‌ای سطحی معمولاً ۲ تا ۳ متری زیر سطح زمین است. خانه‌ای که در لوگان گیت قرار داشت، دچار شدیدترین خسارتهای شد. در این محل رس وجود ندارد و حدود ۶ متر رس ماسه‌ای ریزشی در گمانه دیده می‌شود. در یکی از گمانه‌هایی که در گوشه گاراژ شمال شرقی خانه حفاری شده سنگ آهک در عمق ۱۹ متری و در گمانه دیگر تنها با فاصله ۹ متری در عمق ۱۳ متری برخورد شده است. بررسی‌های انجام گرفته توسط FSRI نشان داد که منطقه دارای فرورفتگی‌های فروکش پوشیده شده می‌باشد.

فرورفتگی‌های فروکش به طور مداوم ایجاد حفره فروکش با دیواره‌های تند و فروافتادگی‌های دایره‌ای می‌کند که این حفره‌ها به راحتی از فرورفتگی‌های فروکش تشخیص داده می‌شود. از سوی دیگر، فرورفتگی‌های فروکش پوشیده ممکن است بسیار آرام گسترش یابد و فرونشست و برجستگی‌های ملایم ایجاد کند. هر دو نوع فرورفتگی‌ها ممکن است برای سازه‌ها خسارت ایجاد کند. فرورفتگی‌های فروکش پوشیده معمولاً بیشتر از فرورفتگی‌های ویران شده هستند ولی تشخیص آنها از سایر پدیده‌هایی که سطح زمین را به هم می‌زند، مشکل است.

۵-۶ ابعاد هندسی و پی مناطق کارستی سطحی

گرچه فرایند فرسایش در نواحی کارستی سطحی شکل‌گیری نهایی حفره‌های فروکش را در سطح زمین کنترل می‌کنند ولی برشهای نابهنجار روی تخته سنگهای سرگردان سنگ آهک و محل تماس با روبار نیز از جمله مواردی هستند که ایجاد مشکل می‌کنند. این در حالی است که شکل و سیمای خارجی توده سنگ آهک در دوران زندگی انسان به نظر بدون تغییر است. همانگونه که اشاره شد، سطح زمین در این نواحی به دلیل انحلال گسترده حفره‌های فروکش، حالت مواج به خود می‌گیرد و نابهنجاریهای محلی و سیمای کارستی در هر جا ایجاد می‌کند. سیمای کارستی اخیر اغلب باریک و عمیق و در حقیقت غیرقابل پیش‌بینی است. از این رو در حقیقت بررسی سطحی این گونه توده سنگ آهکها براساس اطلاعات گمانه‌های پراکنده (گمانه‌های اکتشافی یا پروفیل‌های غیریوسته ژئوفیزیکی) نمی‌تواند کمک چندانی به شناسایی فرسایش کارستی کند. گرچه از جهت مهندسی پی، در سنگ آهکها شناخت ژرفایی که از جهت باربری و پایداری مناسب باشد، اغلب مشکل است. مسئله زمانی پیچیده‌تر می‌شود که می‌بینیم درون ۳۰۶ متر از توده سنگ آهک به صورت گسترده و شدید در امتداد درز و ترکها و لایه‌بندی، انحلال یافته و موجب به وجود آوردن چند دسیمتر نواحی ضعیف در توده سنگ به ظاهر سخت از جهت حفاری کرده است. مهندس بررسی کننده باید این شرایط را پیش‌بینی کند. کسانی که اسناد مناقصه این گونه پروژه‌ها را تهیه می‌کنند باید به خاطر داشته باشند تخمین هزینه‌های اجرایی در سازه‌های کارستی با آنچه در توده سنگ آهک معمولی است با هم متفاوت و هزینه‌ها قابل پیش‌بینی نیست.

یک نمونه که معرف این شرایط باشد در بررسی پی فاصله بین دو کلمه کمی بیشتر شود هر شادی پنسیلوانیای آمریکا^۱ است (فوز و هوپ فرویل^۲، ۱۹۷۹). بررسیهای مقدماتی برای انجام پروژه ساختمان یک مرکز پزشکی بزرگ، با حفاری ۳۲ حلقه گمانه تا برخورد به سنگ کف آهکی به فاصله ۹۰ متر از یکدیگر انجام گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که سطح سنگ کف در یکی از گوشه های کارگاه دارای ناپهنجاری شدید بوده و در گوشه دیگر نیز حفره های فراوانی به ابعاد ۱/۲×۱ متر زیر سنگ کف است. نقشه طراحی ساختمان بازنگری شده و پی ها جدا جدا به پی صندوقی^۳ تغییر یافت. حفاریهای بیشتری به فاصله ۳۰ متری در مرکز طرح انجام گرفت. نیمی از گمانه ها به حفره های انحلالی سنگ آهک برخورد کردند. ژرفای حفره ها از ۰/۳ تا ۴۰ متر است.

نقشه ساختمان بار دیگر مورد بازنگری قرار گرفت و پیش بینی شد که پی صندوقی تا ژرفای ۲/۵ متری سنگ آهک سخت و مقاوم می تواند فاکتور ایمنی مورد نیاز را برآورده کند. درازای هر کدام از پی های صندوقی برابر ۴ متر پیش بینی شده است. سه چاه اکتشافی در کف پی صندوقی برای کنترل مقاومت زیر پی صندوقی، پیش بینی شده است. میانگین نصب پی صندوقی حدود ۵/۵ متر بوده و ۳۴ درصد پراکندگی دارد. زمین شناسان در این کارگاه به این نتیجه رسیده اند که شرایط کارستی به اندازه ای شدید است که تشخیص دقیق سنگ مقاوم حتی از فاصله ۳۰ متری گمانه در مرکز هم غیر ممکن است.

۶-۶ سیلاب

مسائل زیست محیطی سیلاب در پهنه های کارستی آمریکا تا این اواخر چندان مورد توجه قرار نگرفته بود. فرورفتگی های فروکشی، شبکه زهکش «شاخابه ای»^۴ ایجاد می کند، اعم از اینکه از طریق یک آبگذر و یا شبکه های آبرو باشد. در حالی که برخی از آنها در مرز جریانهای اولیه قرار می گیرند، برخی دیگر ممکن است در ترازهای بالاتر قرار گیرند زیرا این نواحی از شبکه زهکش سطحی تغذیه می شود. پیوند حقیقی بین حوضه های سطحی و نواحی آبدار ممکن است از طریق تنوره ای که توانایی انتقال جریانهای آشفته را دارد برقرار شود یا ممکن است از طریق رسوبات پوششی ضخیم انجام گیرد. در حالت نخستین میزان تراوش به ابعاد هندسی آبگذرهای زیرزمینی بستگی دارد و البته میزان فشار آب نیز عامل مؤثری به حساب می آید. در حالت دوم میزان تراوش به تراوایی نهشته های پوششی بستگی دارد که گاه ممکن است بسیار ناچیز باشد. جاری شدن سیلاب در حوضه های سطحی، چنانکه میزان تراوش از نهشته های پوششی ناچیز باشد، بسیار طبیعی است و مشکلی به وجود نمی آورد. بنابر سرشت طبیعی آن، می توان پیش بینی و جلوگیری از خسارتهای احتمالی را در دستور کار قرار داد. از این رو، در نهشته های پوششی کارست فلوریدای آمریکا، فرورفتگی های فروکشی روی نقشه های مخاطره آمیز نشان داده شده است.

در محل هایی که زهکشی حفره های فروکش از مجاری باز صورت می گیرد، تا زمانی که ظرفیت آبگذرها بیش از اندازه باشد، سایر زهکشها ناپدید خواهند شد. از این رو، رخداد سیلاب نادر و غیرقابل پیش بینی است. افزون بر آن، چنانچه آبگذرها بر اثر مواد فرسایشی بسته شوند، میزان تراوش به صورت غیرقابل تصور کاهش می یابد و سیلاب های ناگهانی جاری می شود. در

1 - Hershary

2 - Foose & Humphrevill

3 - Caisson

4 - Tributary

بولینگ‌گرین^۱ کنتاکی آمریکا، جایی که سیلاب حفره‌های فروکش مسئله‌ساز است، آئین‌نامه مدیریت آبهای سطحی محدود به گسترش سیلابهای مستعد حفره‌های فروکش است. گسترش حریم سیلاب در کف حفره‌های فروکش به خط ترازوی محدود می‌شود که ۳۰ سانتیمتر بالای تراز کنترل با داغ آب سیلاب است و این امر در نتیجه سه ساعت رواناب سطحی با احتمال یکصد سال رخداد (بارندگی به میزان ۱۰ سانتیمتر یا ۴ اینچ طی سه ساعت بارندگی) در نواحی بولینگ‌گرین است. خط تراز یکصدساله براساس تصور نبود زهکشی از بستر حفره‌های فروکش است و به این دلیل معمولاً بالاتر از تراز حقیقی سیلاب خواهد بود. در صورتی که دستگاه آشکارکننده بتواند درستی یا نادرستی کمیت خروجی را با اندازه‌گیری صحرایی مشخص کند، متوجه می‌شویم تراز سیلاب یکصد ساله پایین‌تر خواهد بود (گرافورد^۲، ۱۹۸۴).

لگیزتن در کنتاکی، آمریکا^۳، نیز دارای مسائل مشابه است. بسیاری از مسائل رواناب رگبار بر اثر توسعه نواحی حفره‌های فروکش است. برطرف کردن مسائل سیلابی مربوط به حفره‌های فروکش حداقل حدود ۱/۵ میلیون دلار هزینه در بردارد. نواحی سیندی بلر^۴ یک نمونه توسعه سیلاب حفره‌های فروکش است. در این نواحی آهک‌گیر^۵ مستعد انحلال است و ویژگی سیمای کارستی مانند حفره‌های فروکش، در جایی که آبهای سطحی در زمین فرو می‌روند و در مناطقی که آب پیدا می‌شود (چشمه‌ها)، متعارف است. در اینجا پاره‌ای احتیاطها صورت گرفته و طراحی تشدید فاضلاب‌ها بر پایه تخلیه آنها به حفره‌های فروکش است. بالا آمدن آب در یکی از منازل سیندی بلر در اثر سیلاب حفره‌های فروکش رخ داده است (دینگرو ریمن^۶).

1 - Bowling, Green
2 - Grawford
3 - Lexington
4 - Cindy Blair
5 - Grier
6 - Dinger and Rebman

- 1- Brink, A.B.A., 1979. Engineering geology of Southern Africa: Vol 1, Building1-Publications, Pretoria.
- 2- Freund, J.E., and Williams, F.J., 1965. Modern business statistics: Sir Isaac Pitman2-and sons, London.
- 3- Roux, P., 1984, Geotegniese ondersoeke vir dorpsontwikkeling in dolomietgebiede:3-Unpublished DSc thesis, University of Pretoria.
- 4- Roux, P., 1985, Die evaluasie van nie-ontwaterde dolomietgebiede : Seminar on the4-evaluation of dolomite areas, University of Pretoria.
- 5- Kleywegt, R.J., 1985. The evaluation of dewatered dolomitic areas: Seminar on the5-evaluation of dolomite areas: University of pretoria.
- 6- Kleywegt, R.J, and Enslin, J.F., 1973. the application of the gravity method to the6-problem of ground settlement and sinkhole formation in dolomite on the Far WestRand, South Africa: In: Proc. IAEG Symp. Sinkholes and Subsidence Engng, Problems related to soluble rocks, Hanover, T3-0, 1-15.
- 7- Ebner, F., 1983. Erlauterungen zur geologischen Basiskarte 1:50 000 derNaturraumpotentialkarte "Mittleres Murtal": Mitt. Abt. Geol. Palaont. BergbauLandesmus. Joanneum, 44, Graz.
- 8- Flugel, H.W., 1975, Die Geologie des Grazer Berglandes (2. Auflage): Mitt. Abt. Geol.Palaont. U. Berbau, Landesumus. Joanneum, SH 1, Graz.
- 9- Flugel, H., and Heritsch, H. 1968, Das Steirische Tertiarbecken (2. Auflage): SammlungGeologischer Fuhrer, 47, Gebrüder Borntrager, Berlin-Stuttgart.
- 10- Maurin, V., 1954. Das Paläozoikum im Raume zwischen Deutschfeistritz und Semriach.Mitt. naturw. Verein Steiermark, 84, Graz.
- 11- Winkler-Hermaden, A., 1957. Geologisches Kräfteispiel und landformung:Springer-Verlag, Wien.