

۷- سنگ مخزن (The Reservoir Rock)

یک مخزن هیدروکربنی سنگی است که هم دارای ظرفیت ذخیره سازی بوده (متخلخل باشد) و هم توانایی عبور سیال از میان خود را داشته باشد (تراوا باشد). نحوه رفتار هیدروکربن در داخل مخزن عمدتاً به وسیله بعضی خواص ذاتی سیالات درون مخزن و محیط متخلخل کنترل می شود. تحلیل خصوصیات زمین شناسی مخزن که جریان سیال و مکانیسم های بازیافت را کنترل می کند، باعث ایجاد مدل های کاربردی برای شبیه سازی مخزن (reservoir simulation) و توسعه میدان می شود.

در ارزیابی یک مخزن از کلیه تکنیک ها و روش ها استفاده می شود تا بتوان پارامترهای زمین شناسی و پتروفیزیکی کنترل کننده حرکت سیال را در آن مشخص نمود. درک متغیرهای پیچیده در خواص هیدرولیکی سنگ مخزن نظیر تخلخل (porosity)، تراوایی (permeability) و فشار موینه (capillary pressure)، ناهمگنی مخزن (reservoir heterogeneity)، شکل هندسی (geometry) و محتوای سیال آن نیازمند یک کوشش همه جانبه است. در این مطالعه از داده های منابع مختلف استفاده می شود. این منابع شامل مغزه ها (cores)، خرده ها (cuttings)، نمودارها (logs)، توموگرافی لرزه ای (seismic tomography) و آزمایش چاه (well testing) می باشد.

در این بخش از کتاب برای توصیف مخزن، یک روش سیستماتیک در تحلیل داده های به دست آمده از منابع مختلف معرفی می شود. نقش فرآیندهای زمین شناسی، رخساره های رسوبی و دیاژنز بر روی کیفیت سنگ مخزن نیز بحث خواهد شد.

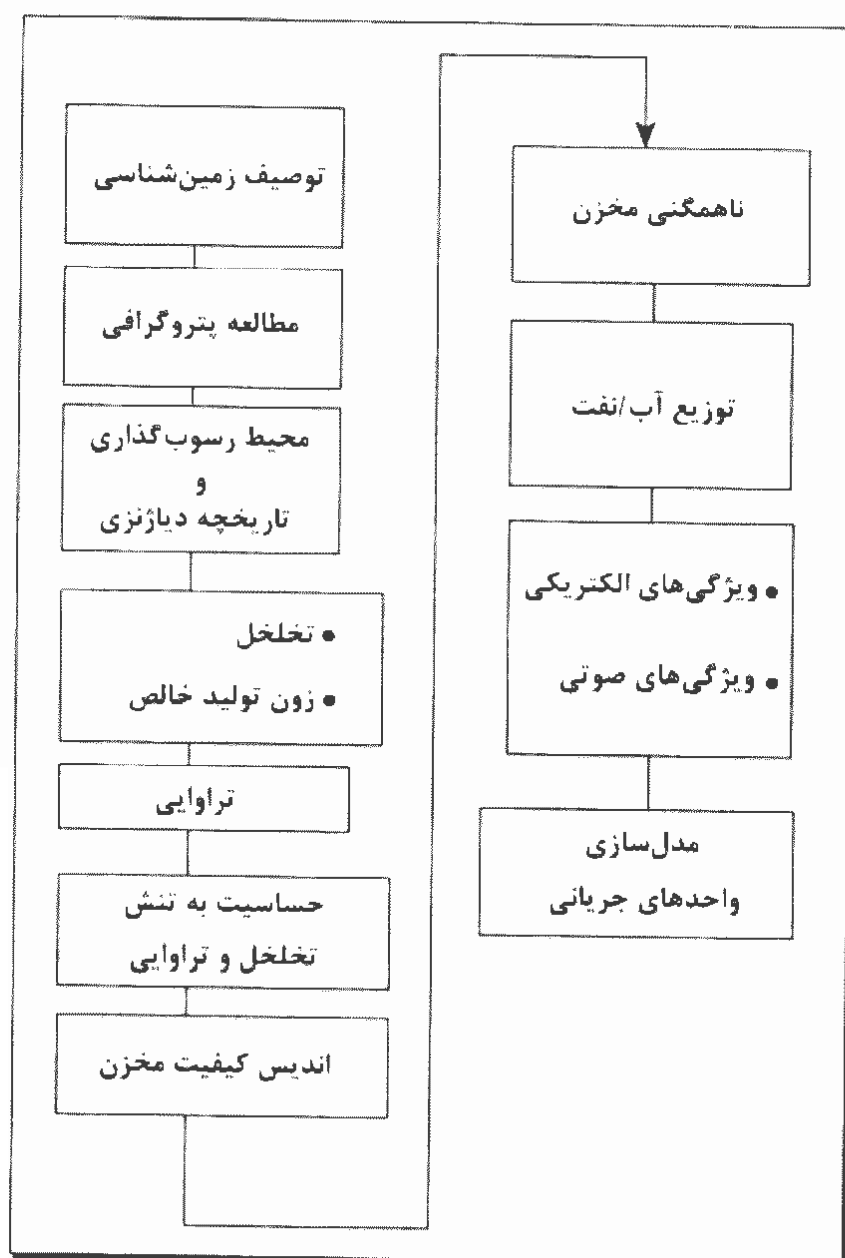
۷-۱ توصیف یک مخزن

اولین هدف از پروژه های توصیف مخزن، گردآوری اطلاعات از منابع مختلف جهت شناسایی واحدهای جریان (flow units)، زون های دارای ویژگی های مشابه از نظر جریان سیال، و تعیین پیوستگی قائم و جانبی چنین زون هایی می باشد. سپس میانگینی از ویژگی های سیال و سنگ به منظور شبیه سازی رقومی مخزن به این زون ها نسبت داده می شود تا نهایتاً بتوان رفتار مخزن را در طی تولید پیش بینی کرد. منابع متداولی که اطلاعات یک مخزن از آن به دست می آید شامل مغزه ها، نمودارها، آزمایش چاه، بررسی های لرزه ای و پیشینه تولید می باشد. توصیف یک مخزن برای کسب پارامترهای ذیل ضروری است:

- تعیین ظرفیت ذخیره
- تعیین هدایت هیدرولیکی
- تعیین پراکندگی نسبی تخلخل و تراوایی
- پیش بینی عملکرد یک مخزن
- برآورد مقدار تولید

۲-۷ روش‌های مطالعه مغزه‌ها

داده‌های مغزه نقشی اساسی را در تعیین مشخصات یک مخزن به عهده دارند. توصیف جزئیات مغزه اولین قدم برای تعیین مشخصات یک مخزن می‌باشد. شکل ۱-۷ قدم‌های متوالی مطالعه مغزه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۷ - مطالعات لازم بر روی مغزه‌ها

توصیف یک مغزه عموماً شامل تعیین لیتولوژی، ضخامت لایه‌ها، شناخت ساخت‌های رسوبی، مطالعه شکستگی‌ها و تفسیر محیط رسوبگذاری می‌باشد. اطلاعات تخلخل، تراوایی و چگالی دانه‌ها که از آنالیز مغزه (core analysis) به دست می‌آیند باید بر روی نمودار لیتولوژی نمایش داده شوند. به همین ترتیب محل‌های نمونه‌برداری برای کارهای دقیق پتروگرافی و پتروفیزیکی باید مشخص شود.

در صورت امکان، بعد از مغزه‌گیری باید کارهای زیر انجام شود:

- ❖ تعیین میزان اشعه گامای مغزه
- ❖ توصیف مغزه
- ❖ گرفتن عکس از مغزه (در نور معمولی و نور ماورای بنفش)
- ❖ آنالیز تصاویر (تحلیل کامپیوتری)
- ❖ پرتونگاری کامپیوتری اشعه X (CT Scanning)

۷-۲-۱ تعیین میزان پرتو گاما مغزه (Core Gamma Scan)

پرتو گامای طبیعی مغزه‌ها ممکن است در آزمایشگاه به وسیله ابزار مشابه آنچه در نمودارهای چاه‌پیمایی است، اندازه گرفته شود. این پرتوها ناشی از اورانیوم، پتاسیم، توریوم و یا هر سه می‌باشد. شیل‌ها به‌طور معمول دارای پرتو گامای بالایی هستند، کربنات‌ها کمتر و ماسه‌سنگ‌ها در بین این دو قرار دارند. امروزه این روش برای منظورهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین آن تطابق دقیق عمق بین مغزه و نمودار می‌باشد (depth matching). در این روش، در بایگانی مغزه‌ها (core library)، مغزه‌ها به‌طور اتوماتیک از زیر یک دستگاه ثبت اشعه گاما عبور داده می‌شوند. انطباق منحنی‌های پرتو گامای تولید شده با استفاده از این روش با نمودار پرتو گامای چاه یک تطابق دقیق بین عمق مغزه و نمودار ایجاد می‌کند.

۷-۲-۲ توصیف مغزه (Core Description)

در توصیف مغزه‌های یک چاه، پارامترهای زیر باید مد نظر قرار گیرد:

- تعیین دقیق لیتولوژی و رخساره رسوبی
- تشخیص سازند، سن و تطابق آن‌ها از چاهی به چاه دیگر
- ضخامت
- رنگ و بافت سنگ (شکل و اندازه دانه)
- وجود یا عدم وجود نفت (با استفاده از فلونورسانس)
- تعیین مقدار و نوع تخلخل‌های قابل مشاهده

◀ ارزیابی شکستگی‌ها

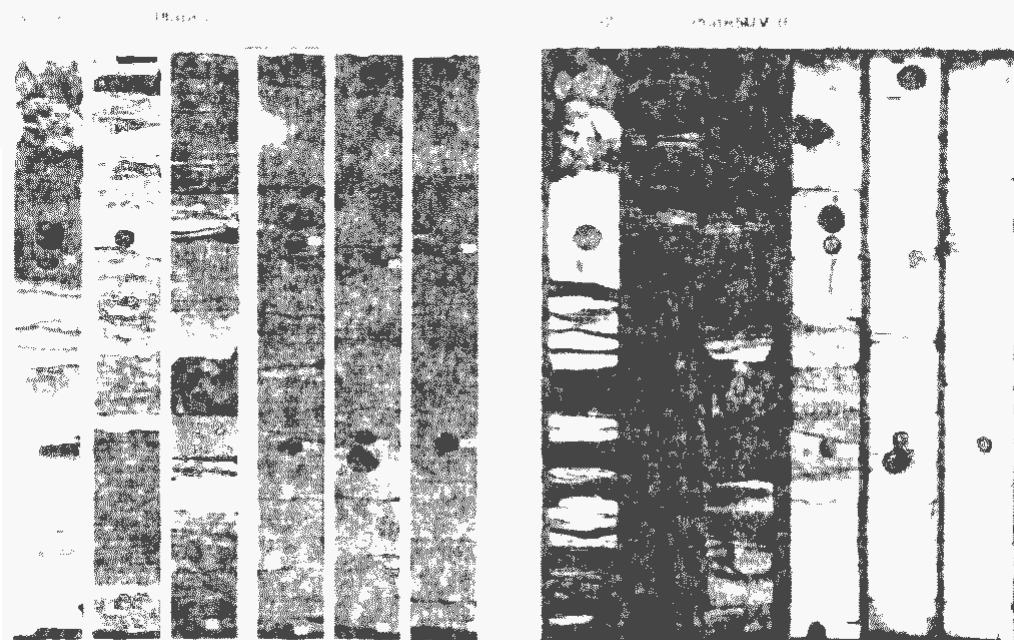
- عمق وقوع
- مقدار و جهت شیب
- طول
- پهنا
- فراوانی
- میزان سیمانی شدن و نهایتاً ارتباط آن‌ها با یکدیگر

◀ تشخیص ساخت‌های رسوبی و تفسیر محیط رسوبگذاری

◀ تطابق عمق مغزه با نمودارها

۳-۲-۷ گرفتن عکس از مغزه (Core Photography)

عکس‌ها یک تصویر دائمی از مغزه‌ها در هنگامی که تازه هستند در اختیار ما قرار می‌دهند. عکس‌ها ممکن است در نور ماورای بنفش و یا معمولی تهیه شوند. اغلب هیدروکربن‌ها در زیر نور ماورای بنفش خاصیت فلوئورسانس از خود نشان می‌دهند و به همین دلیل عکس‌های گرفته شده در نور ماورای بنفش، تشخیص وجود یا عدم وجود هیدروکربن را تسهیل می‌کند (شکل ۲-۷). نحوه نورپردازی عکس گرفتن و مراحل چاپ آن می‌بایستی به صورت استاندارد باشند، تا از بابت وجود رنگ‌های موجود در عکس‌ها مطمئن گشت. این عکس‌ها، یک ثبت دائم و همیشگی از نمای مغزه‌ها است که هم به سادگی در دسترس هستند و هم برای مطالعات مفید می‌باشند، بخصوص برای مطالعات مخزنی وقتی که نمونه‌های بیشتر و بزرگتر از مخزن در دسترس نیست. توصیف نوشته شده از سنگ‌شناسی مغزه‌ها با عکس‌های گرفته شده کامل شده و ممکن است اطلاعات تازه‌تری را نشان دهد. در این عکس‌ها نواحی حدواسط (transition zone) بخش آلوده نفتی (stained sections)، وجود شکستگی، استیلولیت، بخش شیلی و دیگر مشخصه‌های مفید سازند قابل بررسی است.

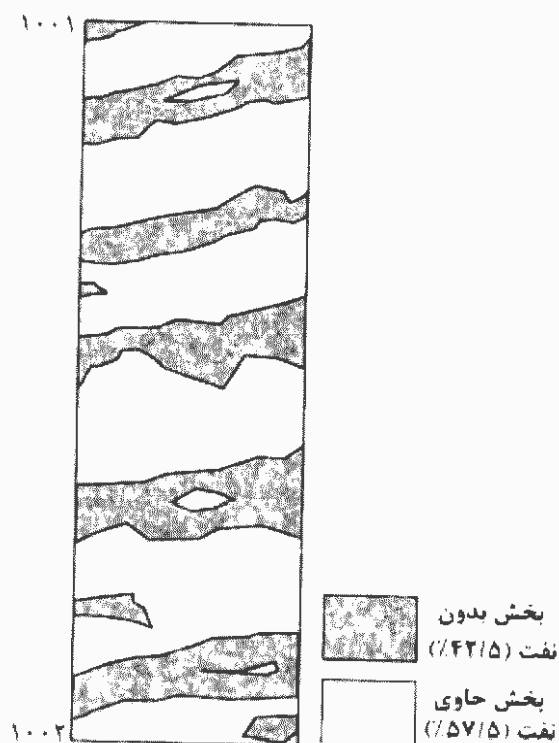


شکل ۲-۷ - عکس از مغزه، در نور معمولی (چپ) و نور ماورای بنفش (راست)

۷-۲-۴ تجزیه و تحلیل تصاویر مغزه‌ها (Core Image Analysis)

با ظهور کامپیوترهای با حافظه زیاد امکان تحلیل کامپیوتری تصاویر مغزه‌ها به طرق مختلف فراهم شده است. در این روش یک دوربین ویدیویی برای تهیه تصاویر رنگی از مغزه‌ها به یک کامپیوتر متصل می‌شود. در تصویر حاصله از نور ماورای بنفش زون‌های هیدروکربن‌دار از بقیه قسمت‌های مخزن مشخص می‌باشند (شکل ۷-۷).

۳. در این حالت با استفاده از نرم افزارهای تحلیل‌گر تصاویر (image analyzer) می‌توان نسبت حجمی زون‌های هیدروکربن‌دار به بخش‌های فاقد هیدروکربن را به دقت اندازه‌گیری نمود. امروزه تحلیل‌گر تصاویر به صورت مختلف یکی از ابزارهای مطالعاتی در زمین‌شناسی نفت محسوب می‌شود.



شکل ۷-۳ - دیاگرام شماتیک از تصویر آنالیز شده یک مغزه در نور ماورای بنفش. در این تصویر بخش‌های روشن حاوی هیدروکربن است. نرم افزارهای تحلیل‌گر تصاویر به سهولت قادرند درصد بخش‌های حاوی هیدروکربن را اندازه‌گیری کنند

۷-۲-۵ پرتونگاری کامپیوتری اشعه X (CT Scanning)

یک تصویر سه بعدی دقیق از مغزه می‌تواند توسط CT اسکن تهیه شود. مشخصات سه بعدی را می‌توان با بازسازی برش‌های تصویری مغزه به دست آورد. تهیه اینگونه برش‌های تصویری به وسیله تکنیک‌هایی که در ابتدا به منظور اهداف رادیولوژی پزشکی توسعه یافته‌اند، انجام می‌گیرد. CT اسکن‌های جدید اطلاعاتی در مورد توزیع شکستگی‌ها و سیمانی شدن آن‌ها در داخل مغزه، چگونگی اشباع سیال، و توزیع تخلخل مغزه را ارائه می‌دهد.

۷-۳ خواص کانی‌شناسی و بافتی سنگ‌های مخزن

تلفیق داده‌های جمع‌آوری شده از روش‌های مختلف در نهایت، نوع، مقدار و منشأ اجزای تشکیل‌دهنده سنگ و سیستم منافذ را در سنگ‌های مخزن مشخص می‌کند. تمام تکنیک‌ها می‌بایست با همدیگر و به صورت تلفیقی به منظور تعیین مشخصات یک مخزن به کار روند.

روش‌های بسیاری می‌تواند برای تعیین خصوصیات یک مخزن به کار رود که در این فصل به بعضی از آن‌ها فقط اشاره مختصری شده است.

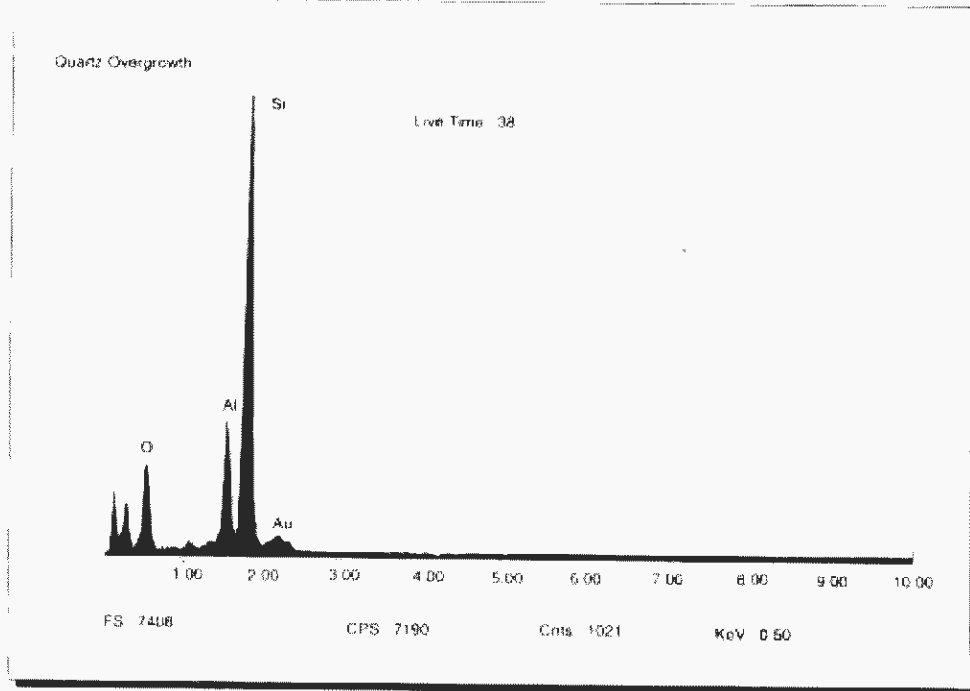
۷-۳-۱ پتروگرافی مقاطع نازک

مقاطع نازک با کیفیت بالا می‌تواند از خرده‌ها و مغزه‌های حفاری تهیه شود. در مطالعه مقاطع نازک مخازن، چون یکی از اهداف تشخیص مقدار و نوع تخلخل است، نمونه‌ها باید با تزریق اپوکسی آبی (blue-dye epoxy) تهیه شود تا بتوان به سهولت تخلخل آن را مشاهده نمود. تجزیه و تحلیل این مقاطع نازک، اطلاعات دقیقی درباره کانی‌شناسی اجزا، ماتریکس و سیمان به ما می‌دهد. این تجزیه و تحلیل همچنین اطلاعاتی درباره نوع، مقدار، شکل و توزیع تخلخل در اختیار قرار می‌دهد. این روش بهترین وسیله برای پی‌بردن به بافت و فابریک سنگ می‌باشد. این روش همچنین بهترین وسیله برای تعیین ارتباط بین دانه‌ها، ماتریکس، سیمان و تخلخل است.

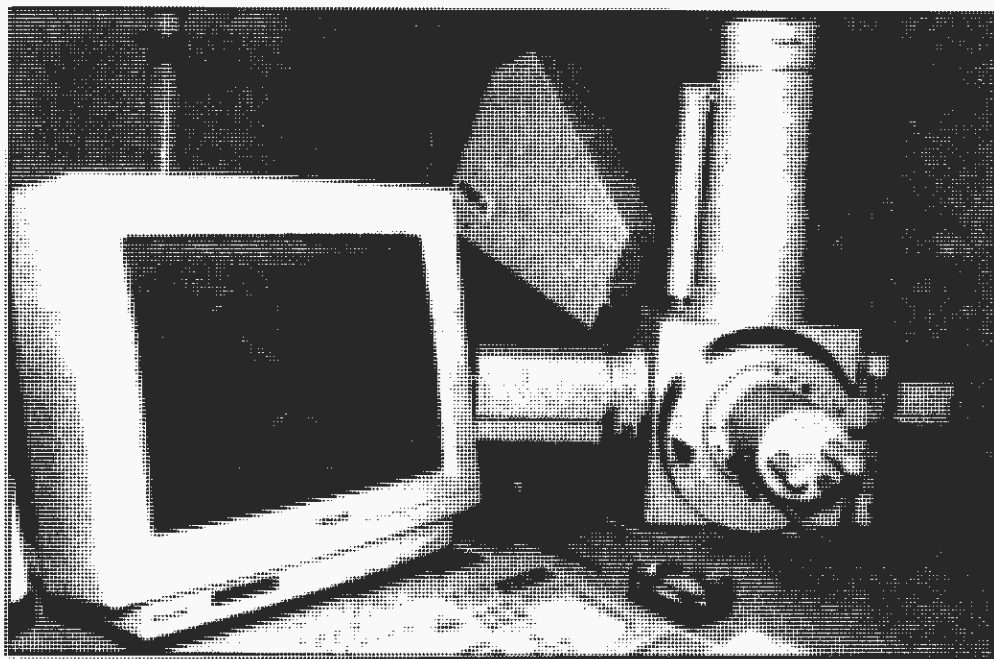
۷-۳-۲ مطالعه بامیکروسکوپ الکترونی (SEM) مجهز به گیرنده‌های EDS و BSE

مشاهده با میکروسکوپ الکترونی اطلاعات تصویری خوب و دقیقی از کانی‌شناسی اجزا تشکیل دهنده سنگ، سیمان و بافت سنگ به ما می‌دهد. این روش همچنین بهترین تکنیک موجود، در مطالعه سیستم منافذ مخازن است. این آنالیزها را می‌توان با سرعت زیاد، بلافاصله پس از تمیز کردن نمونه‌ها انجام داد و ظرف مدت چند ساعت تکمیل نمود. هم‌زمان با مطالعه SEM، می‌توان به کمک آنالیز EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) نمونه‌ها را تحت آنالیز عنصری قرار داد (شکل ۷-۴). داده‌های EDS اغلب در تصدیق شناسایی کانی‌ها به کار می‌روند.

پیشرفت قابل توجه دیگری که امروزه در تکنولوژی ابزاری صورت گرفته است، توسعه BSED یا Back Scattered Electron Detector است. با استفاده از این روش می‌توان به صورت تصویری توزیع عناصر را در ساختمان سیمان‌ها مشاهده نمود. در مجموع، این روش‌ها می‌تواند به طرق مختلف تاریخچه تحولاتی که در طی زمان بر سنگ مخزن گذشته است را بیان نماید. شکل ۷-۵ نمای کلی یک میکروسکوپ الکترونی را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۴ - گراف حاصل از آنالیز EDX برای یک سیمان کوارتزی

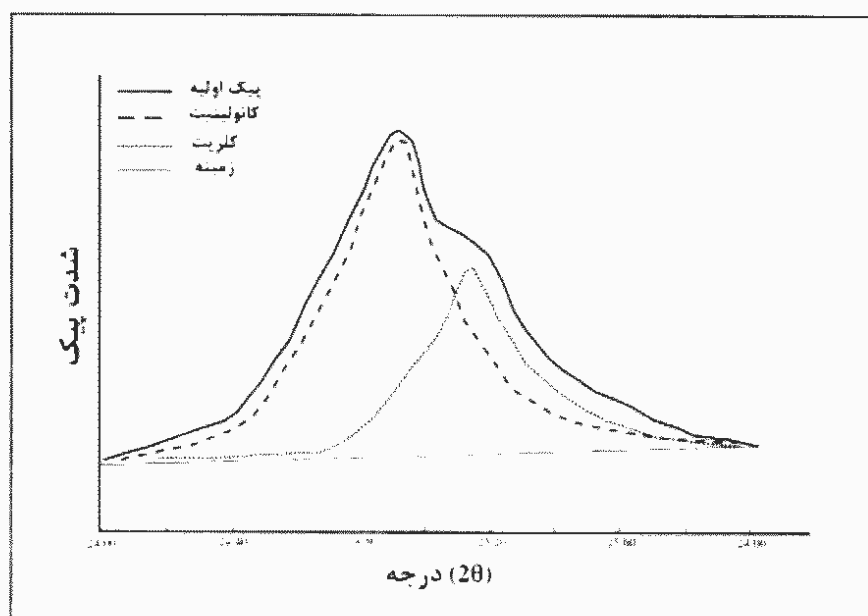


شکل ۷-۵ - نمای کلی یک میکروسکوپ الکترونی

۷-۳-۳ پراش اشعه ایکس (X-ray Diffraction)

با آنالیز XRD، کانی‌شناسی بخش رسی (clay fraction) (کوچکتر از دو میکرون) و کانی‌شناسی کل (bulk XRD) را می‌توان با دقت و سرعت بالایی تعیین نمود. شناسایی کانی‌ها با فایل استاندارد موسوم به JCPDS یا Joint Committee on Powder Diffraction Standard و با کمک نرم‌افزارهای خاص نظیر XplotTM و TracesTM با یک کامپیوتر شخصی انجام می‌شود. پیشرفت‌های اخیر در زمینه پردازش داده‌های XRD، دقت و صحت این تکنولوژی را به سطح بالایی ارتقا داده است. در تکنیک‌های جدید تجزیه و تحلیل داده‌ها،

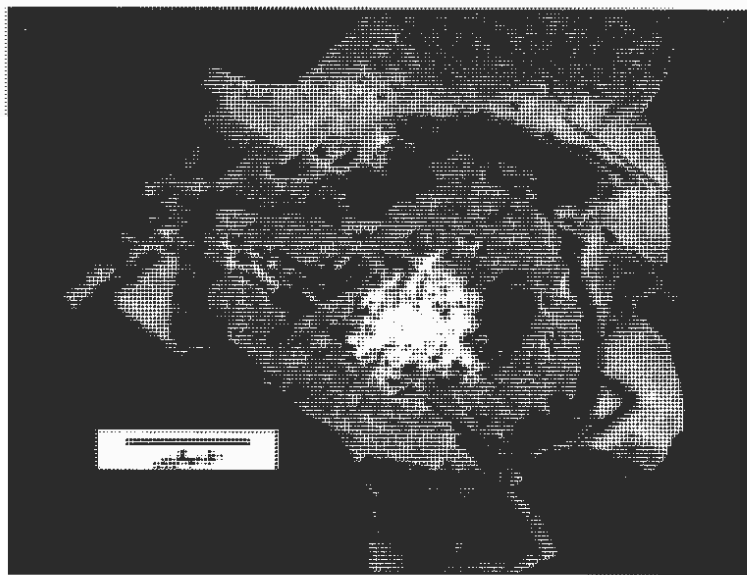
الگوریتم‌هایی مرسوم به الگوریتم‌های انطباق پروفیل لورنزین (Lorentzian profile-fitting algorithms) را در تفکیک پیک‌های پراش کانی‌های رسی مختلف که بر روی یکدیگر هم پوشانی دارند، به کار می‌گیرند (شکل ۶-۷). بهبود کیفی تکنولوژی XRD، درصد اطمینان و سرعت عمل این روش را در تعیین کانی‌شناسی کل نمونه‌ها بسیار بالا برده است. آنالیز XRD بهترین روش تعیین کانی‌شناسی رس‌هاست.



شکل ۶-۷ پیک XRD متعلق به نمونه‌ای که حاوی کلریت و کانولینیت است. با استفاده از الگوریتم‌های انطباق پروفیل لورنزین، پیک‌های این دو کانی از یکدیگر تفکیک شده‌اند

۷-۳-۴ الکترون مایکروپروب (Electron Microprobe)

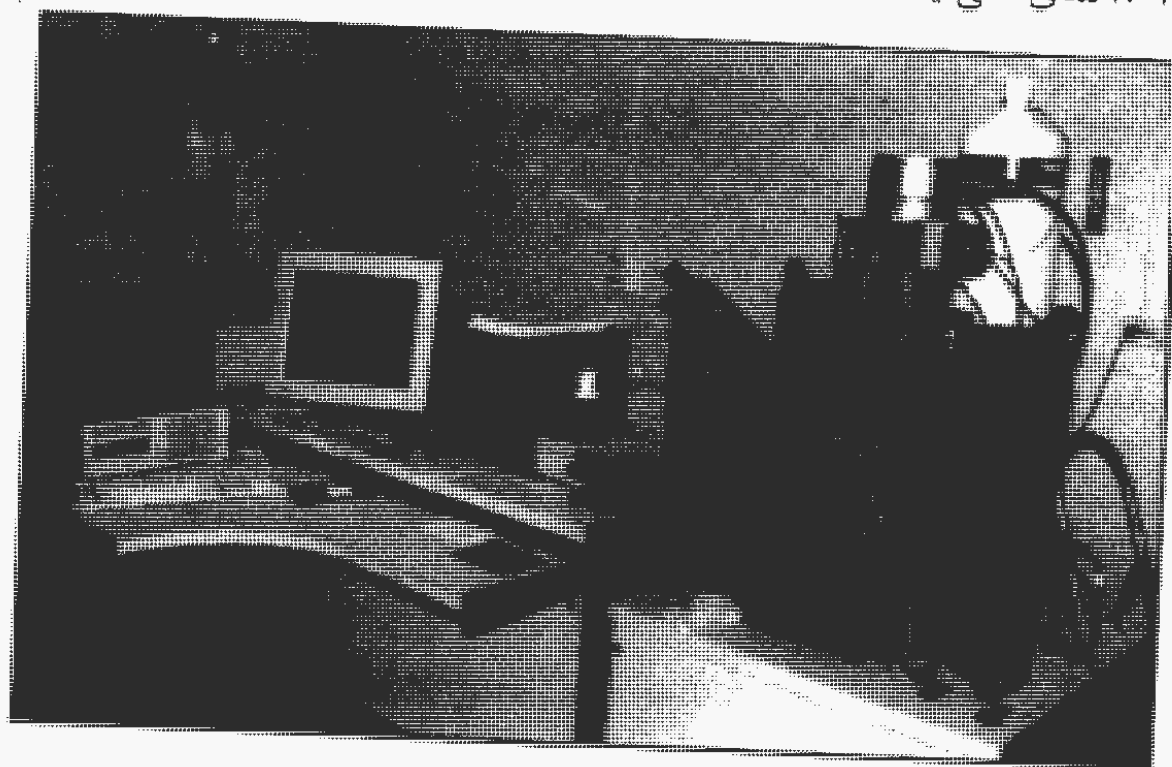
با استفاده از آنالیز مایکروپروب الکترونی و بررسی مقاطع نازک صیقل داده شده که با لایه‌ای



شکل ۷-۷ - تصویر BSE یک سیمان سیدریتی

نازک از کربن پوشیده شده‌اند، امکان تعیین ترکیب کمی عنصری اجزای سنگ با دقت فوق‌العاده زیاد فراهم می‌گردد. سیستم تصویری BSE یا (Back-Scattered Electron) که به مایکروپروب الکترونی متصل می‌شود می‌تواند زون‌بندی در سیمان‌ها را نشان دهد. شکل ۷-۷ تصویر BSE یک سیمان سیدریتی را نشان می‌دهد که تفاوت در رنگ خاکستری

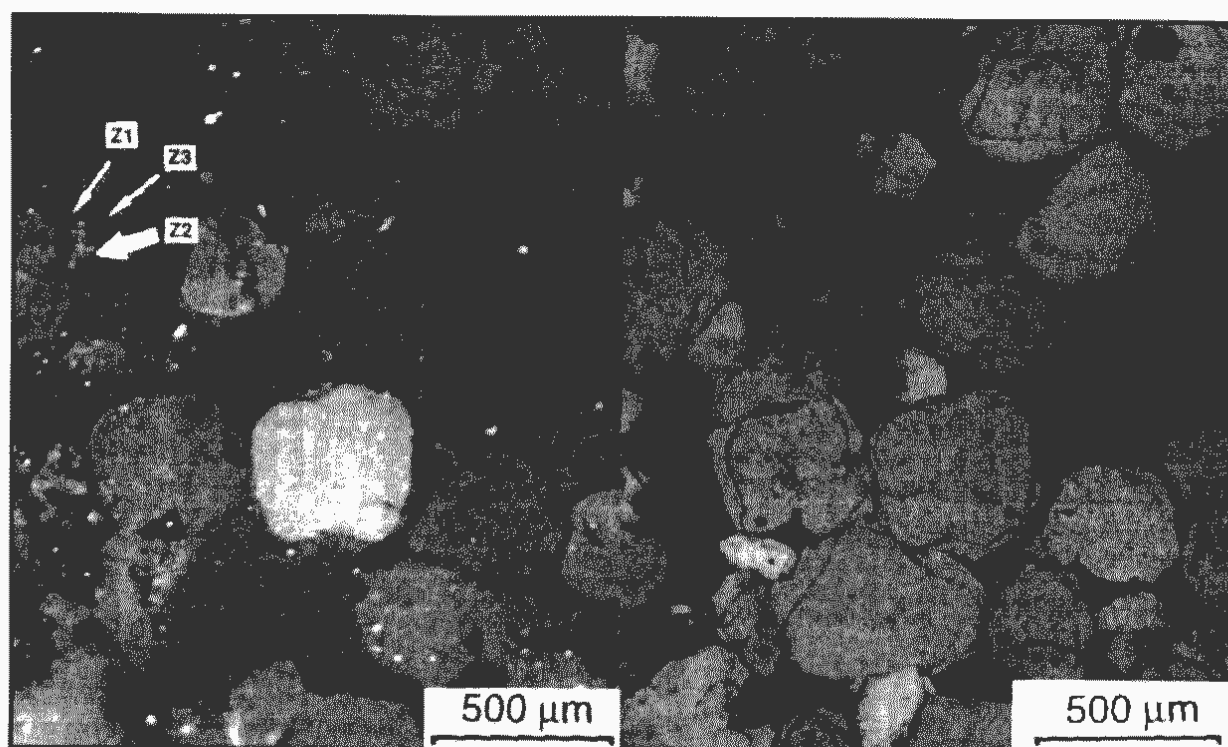
آن ناشی از تغییر مقدار Mg در آن است. زون مرکزی که دارای رنگ روشن است سیدریت تقریباً خالص است و بخش‌های تیره بیانگر جانشینی Mg به جای Fe در این سیمان است. شکل ۷-۸ نمای کلی یک دستگاه الکترون مایکروپروب را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۸ - نمای کلی یک دستگاه الکترون مایکروپروب

۷-۳-۵ مطالعه میکروسکوپی به روش کاتدولومینسانس (CL)

بیشتر گانی‌ها هنگامی که با انواع مختلف اشعه مثل اشعه الکترونی (کاتدولومینسانس یا CL)، اشعه ایکس (رادیولومینسانس)، نور مرئی یا فرابنفش (فوتولومینسانس یا PL) و غیره برانگیخته می‌شوند، از خود خاصیت لومینسانس نشان می‌دهند. شدت رنگ CL بستگی به میزان تمرکز فعال‌کننده‌ها (activators) و خاموش‌کننده‌ها (quenchers) در سیمان دارد. به عنوان مثال مهم‌ترین فعال‌کننده در کلسیت Mn^{2+} و مهم‌ترین خاموش‌کننده Fe است. روش میکروسکوپی کاتدولومینسانس به چینه‌شناسی سیمان (cement stratigraphy) کمک فراوانی می‌کند (شکل ۷-۹). به‌طور معمول ترکیب شیمیایی آب منفذی در حین مراحل مختلف سیمانی شدن به تدریج تغییر می‌کند. این تغییر در شیمی آب منفذی باعث نوسان ترکیب عنصری سیمان می‌شود. تغییر در سیمان به واسطه تغییر تمرکز فعال‌کننده‌ها و خاموش‌کننده‌ها با میکروسکوپ کاتودومینسانس قابل مشاهده و بررسی است.



شکل ۷-۹ - یک تصویر CL که در آن سه زون سیمان کوارتزی قابل مشاهده است. بر اساس میکروترمومتری اذخال‌های مایع، این سه زون در درجه حرارت‌های به ترتیب ۶۵، ۹۰ و ۱۲۵ درجه سانتیگراد شکل گرفته اند. بر اساس آنالیز الکترون مایکروپروب رنگ آبی زون میانی به دلیل وجود آلومینیوم می‌باشد که در اثر انحلال فلدسپارها حاصل آمده است

۷-۳-۶ میکروترمومتری اذخال‌های مایع (Fluid Inclusion Microthermometry)

به سیالی که هم‌زمان در طول رسوبگذاری کانی‌ها به دام می‌افتد، اذخال‌های مایع (fluid inclusions) اولیه گفته می‌شود (شکل ۷-۱۰). اذخال‌های مایع اولیه اطلاعات زیادی درباره طبیعت و ترکیب سیال و دمای زمان به دام افتادن آن به ما می‌دهند. آن‌ها همچنین شاهدهی مستقیم برای محیط دیاژنزی می‌باشند. اذخال‌های مایع اغلب کوچک بوده و برای مطالعه آن‌ها باید از بزرگ‌نمایی زیادی استفاده کرد. در مطالعه اذخال‌های مایع از صفحه رینولد (Reynolds stage) استفاده می‌شود. این صفحه گرم و سرد کننده به همراه میکروسکوپ مجهز به عدسی‌های چشمی و شیئی قوی، امکان میکروترمومتری اذخال‌های کوچک را فراهم می‌سازد. در این روش با حرارت دادن به نمونه (heating)، درجه حرارت همگن شدن فاز مایع و فاز جامد را می‌توان مشخص نمود. درجه حرارت همگن شدن (homogenization temperature) در واقع حداقل درجه حرارتی است که در آن سیمان میزبان اذخال مایع نهشته شده است. در ضمن با سرد کردن نمونه (cooling) و مشخص کردن درجه حرارت یخ زدن اذخال مایع، می‌توان میزان شوری آب موجود در اذخال را معین نمود. با شناخت دما و ترکیب سیال به وسیله مطالعه ترکیب اذخال‌های مایع، بهتر می‌توان مقادیر کمی ایزوتوپ‌های پایدار کانی‌های درجا را (اتوژنیک) را تعیین کرد. این روش ما را قادر



می‌سازد که در صورت وجود نفت در داخل ادخال‌ها و یا وجود نفت بین زون‌های سیمانی حاوی ادخال، به زمان مهاجرت هیدروکربن‌ها نیز پی ببریم.

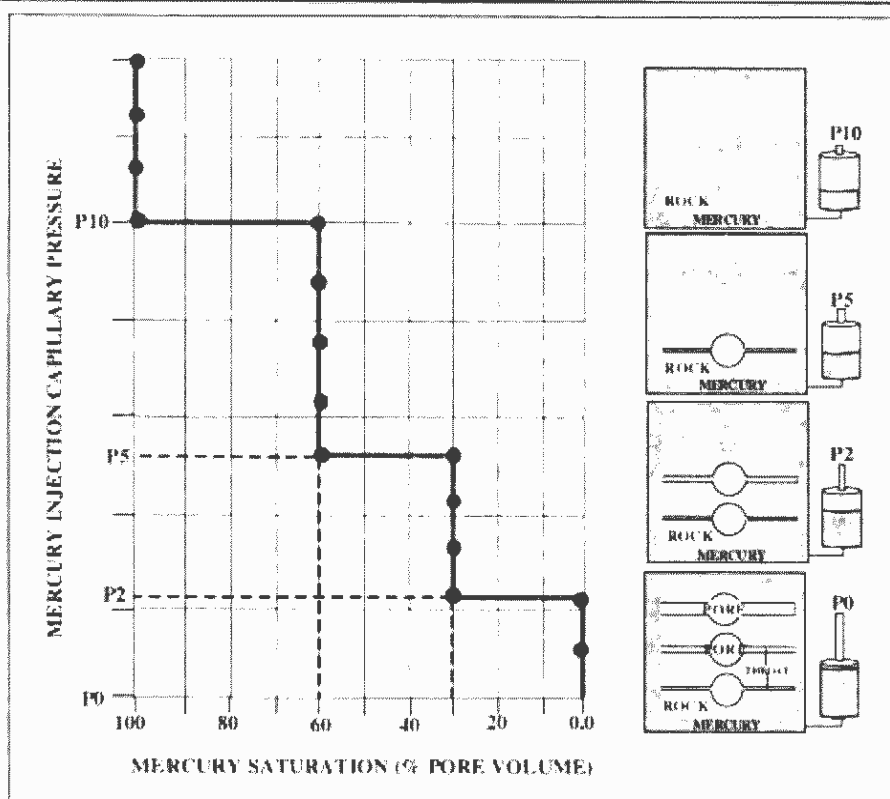
شکل ۷-۱۰ - تصویری از یک ادخال مایع

۷-۳-۷ ایزوتوپ‌های پایدار کربن و اکسیژن

آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و کربن به زمین‌شناسان در پی بردن به میانگین دما و شرایط محیطی هم‌زمان با ته نشینی سیمان، کمک شایان توجهی می‌کند. اساس این روش تعیین کمی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و کربن به صورت دو نسبت ایزوتوپی $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ و $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ است. اطلاعات ایزوتوپ‌های پایدار به همراه دمایی که در آن ادخال مایع به شکل همگن در می‌آید، اطلاعاتی را در مورد زمان مهاجرت هیدروکربن فراهم می‌کند.

۷-۳-۸ فشار مویینه تزریق جیوه (Mercury Injection Capillary Pressure)

فشارهای مویینه حاصل از تزریق جیوه برای تعیین برخی از خواص فیزیکی سنگ مخزن به کار می‌رود. منحنی تزریق جیوه، افزایش اشباع‌شدگی جیوه را، بر مبنای تابعی از فشار نشان می‌دهد (شکل ۷-۱۱). با این منحنی‌ها می‌توان توزیع اندازه‌های مختلف گلوگاه‌های تخلخل (pore throat) را اندازه‌گیری کرد. از آنجایی که جیوه یک فاز غیرمرطوب کننده است (non-wetting phase)، برای وارد شدن به منافذ داخلی سنگ باید تحت فشار قرار گیرد. منافذ با گلوگاه‌های بزرگتر، زودتر تحت افزایش فشار، از جیوه اشباع می‌شوند. منافذی که به گلوگاه‌های کوچک‌تر مرتبط‌اند، آخرین بخش‌های تخلخل مفیداند که ممکن است در فشارهای بسیار بالا تحت نفوذ و پر شدگی جیوه قرار گیرند. چون برخی ویژگی‌های مخزن مانند تخلخل و تراوایی به وسیله اندازه و نحوه آرایش منافذ و گلوگاه‌های تخلخل کنترل می‌شوند، روش تزریق جیوه وسیله‌ای مناسب برای ارزیابی سنگ مخزن است.



شکل ۷-۱۱ دیاگرام شماتیک از چگونگی رسم یک منحنی تزریق جیوه

۷-۳-۹ پردازش و آنالیز تصاویر جهت ارزیابی فضای منفذی

تکنیک آنالیز تصاویر پتروگرافی (Petrographic Image Analysis, PIA) برای تعیین روابط بین تخلخل و تراوایی و ارزیابی شکل هندسی منافذ (pore geometry) استفاده می‌شود. تکنیک فوق می‌تواند با استفاده از سیستم آنالیز تصاویر همراه با SEM انجام گیرد. در این حالت تصاویر BSE مقاطع نازک صیقلی داده شده باید به کمک یک دوربین ویدیویی از SEM به صورت یک تصویر خاکستری (grey-scale image) به نرم‌افزار Image AnalysisTM انتقال یابد. تصاویر خاکستری BSE در مرحله بعد به تصاویر دوتایی (binary) تبدیل می‌شوند. در تصاویر دوتایی دانه‌ها (به رنگ سفید) و تخلخل (به رنگ سیاه) کاملاً از یکدیگر قابل تفکیکند. با تبدیل تصاویر دوتایی به اطلاعات رقومی (دیجیتالی) می‌توان پارامترهای مختلف منافذ را مثل: مساحت، قطر و محیط منافذ محاسبه نمود.

۷-۴ پتروگرافی ترکیبی مخازن (Compositional Petrography)

۷-۴-۱ ترکیب دانه‌های اصلی (Framework Grain Composition)

اگرچه کانی‌شناسان تاکنون هزاران کانی را در سنگ‌های آذرین و دگرگونی شناسایی کرده‌اند، ولی تعداد کانی‌های سنگ‌های مخزن رسوبی بسیار کمتر است زیرا: - بیشتر کانی‌های توصیف شده در سنگ‌های آذرین و دگرگونی نادرند.

- در اثر عملکرد هوازدگی و فرسایش، کانی‌هایی که از نظر فیزیکی و شیمیایی ناپایدارند، به‌طور انتخابی قبل از آنکه در حوضه‌های رسوبی نهشته شوند، از ترکیب اصلی سنگ خارج می‌گردند.
- فرآیند دیاژنز به‌طور انتخابی کانی‌هایی را که از نظر شیمیایی ناپایدارند، دگرسان می‌نماید.

۷-۴-۱-۱ سنگ‌های تخریبی

در مخازن تخریبی (آواری)، فراوان‌ترین دانه‌های اصلی عبارتند از:

الف) کوارتز (SiO_2):

- مونو کریستالین و پلی کریستالین
- چرت (میکرو کریستالین)
- اپال - A (بی شکل)
- اپال - CT

ب) فلدسپار:

- غنی از پتاسیم ($KAlSi_3O_8$): ارتوکلاز و میکروکلین
- پلاژیوکلاز ($NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8$): سری انحلال جامد Ca-Na

ج) خرده‌های سنگی:

- خرده سنگ‌های آتشفشانی (VRF)
- خرده سنگ‌های دگرگونی (MRF)
- خرده سنگ‌های رسوبی (SRF)

د) اجزای فرعی:

- موسکویت $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
- بیوتیت $K(Mg,Fe)_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
- هورنبلند با فرمول‌های گوناگون
- آپاتیت $Ca_5(F,Cl,OH)(PO_4)_3$
- زیرکن $ZrSiO_4$
- تورمالین $(X,Y)_2Al_6(Bo)_3(Si_6O_{18})(OH)_4$
- مواد آلی بقایای گیاهی، زغال، استخوان و هیدروکربن باقی مانده

۷-۴-۲ سنگ‌های کربناته

الف) ترکیب کانی شناسی:

- آراگونیت $CaCO_3$

CaCO_3	کلسیت	▪
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	دولومیت	▪
FeCO_3	سیدریت	▪
$\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$	آنکرایت	▪
MgCO_3	مگنیزیت	▪

۲-۴-۷ انواع سیمان‌ها در مخازن

سیمان‌های متعددی در سنگ‌های رسوبی گزارش شده که لیست آن‌ها در ذیل آمده است. در این میان سیمان‌های کوارتزی، کلسیت و دولومیت از فراگیرترین سیمان‌ها می‌باشند.

(۱) سیلیس

SiO_2	کوارتر	▪
SiO_2	اپال	▪
SiO_2	اپال - CT	▪

(۲) کربنات‌ها

CaCO_3	کلسیت	▪
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	دولومیت	▪
FeCO_3	سیدریت	▪

(۳) کانی‌های رسی

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	کائولینیت	▪
$(\text{K}, \text{Na})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{20} \cdot (\text{OH})_4$	ایلیت	▪
$(\text{Mg}, \text{Fe})_6\text{AlSi}_3\text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_8$	کلریت	▪
$(\text{Na}, \text{K}, \text{Mg}, \text{Ca})_{x/22} \text{Al}_7\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	اسمکتیت	▪
رس‌های مخلوط لایه شامل:		

ایلیت - کلریت

ایلیت - اسمکتیت

کلریت - اسمکتیت

(۴) سولفات‌ها و سولفیدها

CaSO_4	انیدریت	▪
BaSO_4	باریت	▪
$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	ژپس	▪

سلسیت	SrSO_4	▪
پیریت	FeS_2	▪
(۵) فلدسپارها		
ارتوکلار	KAlSi_3O_8	▪
پلاژیوکلار	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	▪
(۶) اکسیدها		
هماتیت	Fe_2O_3	▪
(۷) زئولیت‌ها		
آنالسیم	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ و H_2O	▪
هولاندیت	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	▪
لومونتیت	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	▪

۷-۴-۳ کانی‌های رسی تخریبی و درجا در مخازن

در این بخش از کتاب به دلیل اهمیتی که کانی‌های رسی دارند و قادرند به شدت ویژگی‌های پتروفیزیکی سنگ مخزن را کنترل نمایند، به بحث مختصری در مورد آن‌ها پرداخته می‌شود. رس‌ها در داخل سنگ مخزن به دو روش تشکیل می‌شوند. طریقه اول، رس‌های تخریبی یا دگرجا (آلوژنیک)، که در طول رسوبگذاری با دیگر اجزای رسوبات نهشته می‌شوند، به استثنای کانی‌های رسی که به‌طور مکانیکی پس از رسوبگذاری با رسوبات مخلوط می‌شوند. طریقه دوم، کانی‌های رسی درجا یا درجا هستند. این کانی‌ها یا در شرایط مناسب، در اثر رسوب مستقیم از سیال منفذی به وجود می‌آیند (neomorphism) و یا حاصل واکنش بین دانه‌های اصلی و سیال منفذی هستند (regeneration). در شناسایی و تشخیص رس‌های اتوژنیک از آلوژنیک معیارهای زیادی استفاده می‌شود از جمله: ترکیب، ریخت‌شناسی، بافت و نحوه توزیع آن‌ها. درصد خلوص یک رس، فرم بلوری آن و ارتباطش با دانه‌های دیگر به شناسایی کانی‌های رسی درجا کمک می‌کند.

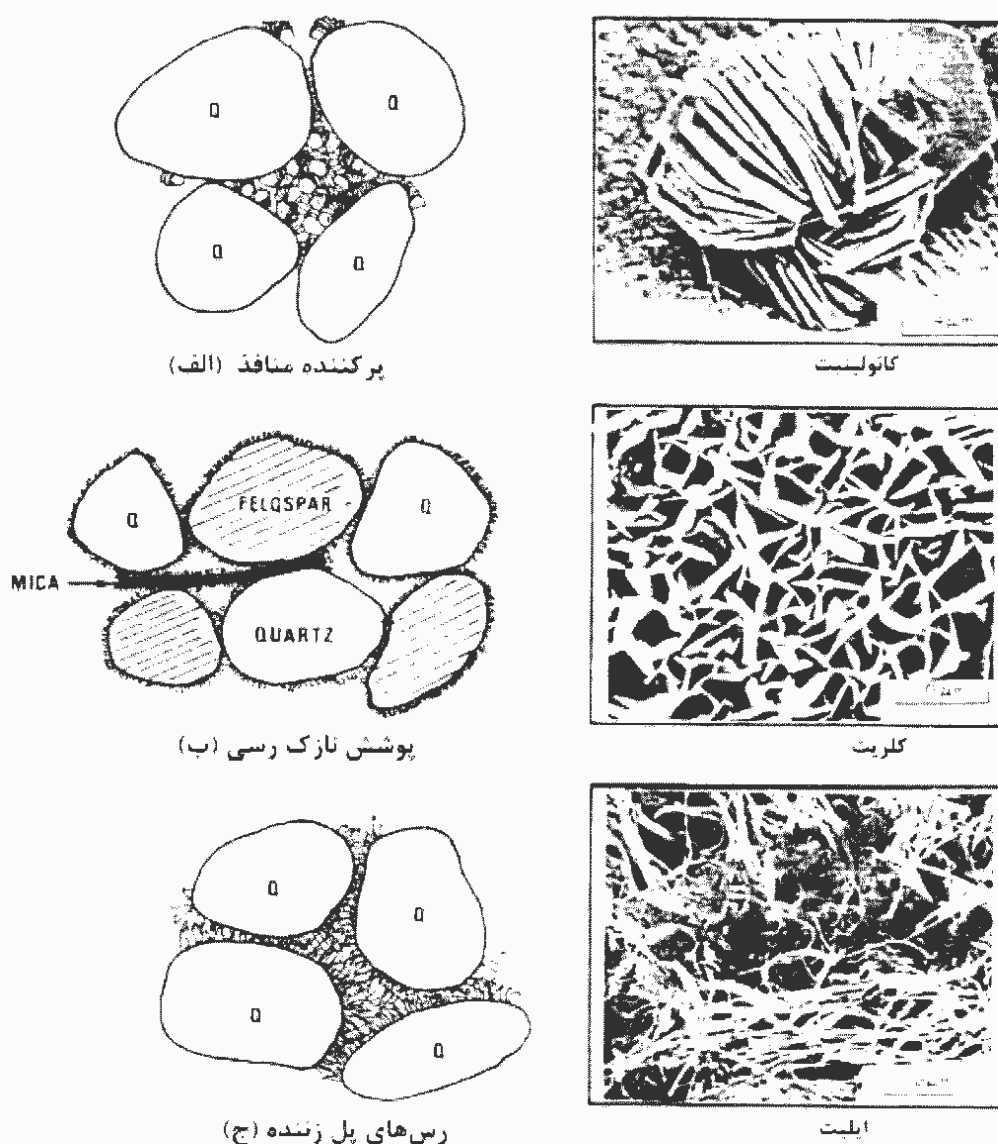
کانی‌های رسی درجا به اشکال مختلفی دیده می‌شوند (شکل ۷-۱۲):

الف) رس‌های پر کننده منافذ (pore filling) که منافذ اولیه یا ثانویه قابل دسترس را پر می‌کنند، نظیر کائولینیت (شکل ۷-۱۲ الف).

ب) رس‌هایی که به صورت آستری دیواره منافذ را می‌پوشانند (pore lining) یا به شکل پوشش نازک رسی روی سطح دانه‌ها رسوب می‌کنند که در این حالت ممکن است از تشکیل سیمان

هم محور (syntaxial rim cement) جلوگیری بعمل آورند. از این نوع رس‌ها می‌توان کلریت را نام برد (شکل ۷-۱۲ ب).

ج) رس‌هایی که در مجاری منافذ به صورت رشته‌های مو مانند پل می‌زنند (pore bridging)، نظیر ایلیت (شکل ۷-۱۲ ج).



شکل ۷-۱۲ چگونگی رشد سه نوع کانی رسی در خلل و فرج مخازن هیدروکربنی

کانی‌های رسی که دیواره حفرات را می‌پوشانند، فضاهای خالی را پر می‌کنند و یا به شکل پل‌هایی دیواره منافذ را به هم وصل می‌کنند (pore bridging) نقشی اساسی در تأثیرگذاری بر روی نمودارهای چاه‌پیمایی دارند. پنج کانی رسی که در سنگ مخزن‌ها فراوانترند عبارتند از: کائولینیت، ایلیت، اسمکتیت، کلریت و رس‌های مخلوط لایه. کائولینیت درجایزه به صورت صفحات شش وجهی کاذب و در هم فشرده شده است (شکل ۷-۱۲ الف) و انواع کرمی شکل و کتابی آن هم وجود دارد. صفحات کائولینیت بسیار بزرگند

(۲ تا ۲۰ میکرون) و اغلب اتصال سستی به دیواره حفرات دارند. کائولینیت درجازا عموماً تخلخل‌های درشت (macroporosity) سنگ مخزن را به ریز تخلخل (microporosity) موجود در داخل خودش تغییر می‌دهد.

در سنگ‌های مخزن، ایلیت درجازا دو مورفولوژی متفاوت مو مانند و کلمی شکل را از نظر نحوه پرکردن منافذ از خود نشان می‌دهد. حضور ایلیت موین که مانند پلی، منافذ را به هم وصل می‌کند (pore bridging) در کاهش تراوایی مخزن نقش مؤثری دارد، اگر چه نقش مهمی در کاهش تخلخل کل ندارد. رس‌های ایلیتی که ایجاد پل در منافذ می‌کنند درمقایسه با رس‌هایی که به صورت آستری و رس‌های پر کننده منافذ هستند نقش بیشتری در کاهش تراوایی یک سنگ مخزن دارند (شکل ۷-۱۲ج).

اسمکتیت درجازا از نظر چگونگی پوشش دادن روی دانه‌ها به دو شکل دیده می‌شود: شانه عسل (honeycomb) و چروکیده (crinkly). با تغییر میزان خشک شدن نمونه هردو نوع مورفولوژی اسمکتیت ممکن است تغییر کند. اسمکتیت به واسطه ظرفیت بالای تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی سنگ مخزن را بسیار بالا می‌برد. کلریت نیز به اشکال مختلفی مانند گل سرخی، شانه عسل و صفحه‌ای وجود دارد. کلریت درجازا معمولاً غنی از آهن است. مقدار آهن موجود در کلریت در انواع گل سرخی و صفحه‌ای بالاست اما در نوع شانه عسل کاهش می‌یابد. کانی‌های رسی مخلوط لایه (mixed layer) خواص فیزیکی و ریخت‌شناسی رس‌های سازنده‌شان را نشان می‌دهند. دو نوع معمول رس‌های مخلوط لایه عبارتند از: ایلت - اسمکتیت و کلریت - اسمکتیت. ریخت‌شناسی رس‌های مخلوط لایه بیشتر به فراوانی نسبی رس‌های سازنده آن‌ها بستگی دارد. به عنوان مثال یک ایلت - اسمکتیت غنی از اسمکتیت بسیار شبیه به اسمکتیت است.

۷-۵ خواص فیزیکی سنگ‌های مخزنی

در این بخش ویژگی‌های اصلی مخزن یعنی تخلخل و تراوایی توصیف و پارامترهای کنترل کننده آن‌ها بحث خواهد شد.

۷-۵-۱ تخلخل (Porosity)

تخلخل یکی از دو پارامتر ضروری برای یک سنگ مخزن هیدروکربنی است. تخلخل عبارتست از نسبت حجم فضا‌های خالی به حجم کل سنگ (شکل ۷-۱۳). در مخازن هیدروکربنی حجم فضا‌های خالی توسط سیالاتی نظیر گاز، نفت و آب اشغال شده است. تخلخل معمولاً با حرف

لاتین ϕ نشان داده شده و بر حسب درصد بیان می‌شود. تخلخل را می‌توان به کمک یکی از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\phi = (v_p/v_b) \times 100$$

$$\phi = [(v_b - v_g)/v_b] \times 100$$

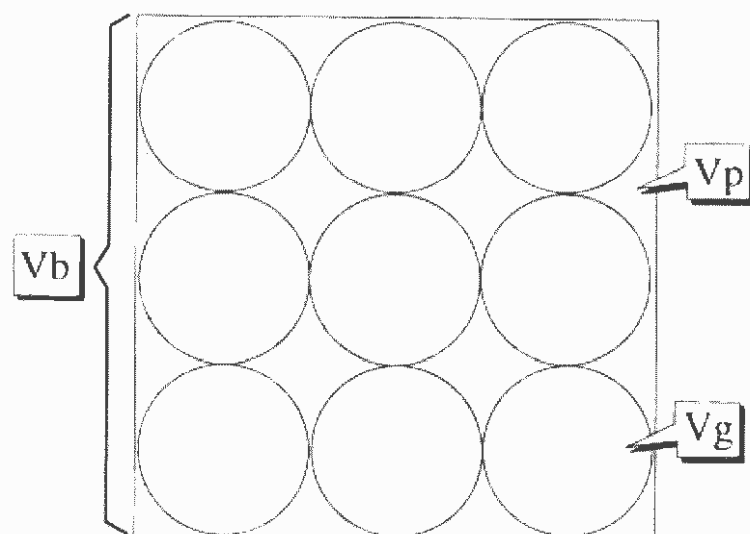
$$\phi = [v_p/(v_g + v_p)] \times 100$$

که در آن:

V_p = حجم منافذ

V_g = حجم دانه

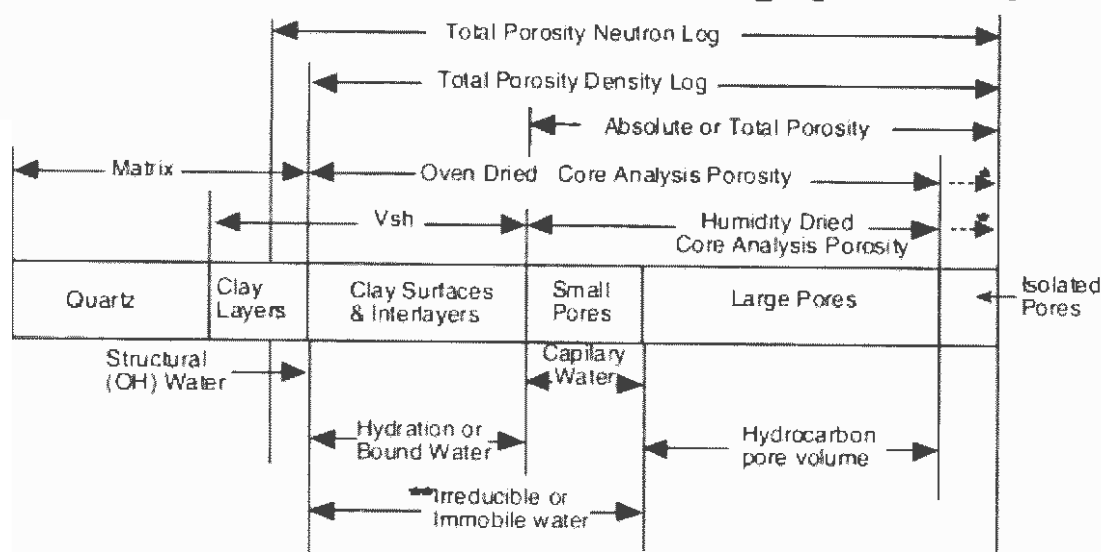
V_b = حجم کل



$$V_b = V_p + V_g$$

شکل ۷-۱۳ - دیاگرام شماتیک که در آن حجم منافذ (V_p)، حجم دانه (V_g) و حجم کل (V_b) یک نمونه متخلخل نشان داده شده است

بیشتر مخازن، تخلخلی در محدوده ۵ تا ۳۰ درصد دارند. تخلخل‌های کمتر از ۵ درصد به ندرت انباشته اقتصادی ایجاد می‌کنند و تخلخل بیشتر از ۳۵ خیلی نادر است. تخلخل را می‌توان در آزمایشگاه از روی مغزه‌ها و یا با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی خصوصاً نمودار چگالی، صوتی و نوترون محاسبه نمود. تخلخل را می‌توان از روی داده‌های لرزه‌ای نیز محاسبه نمود. شکل ۷-۱۴، تعاریف مختلف مربوط به انواع تخلخل و تفاوت اندازه‌گیری آن را با استفاده از تکنیک‌های مختلف نشان می‌دهد.



- If sample completely disaggregated during measurement
- Varies as a function height above the free water level.

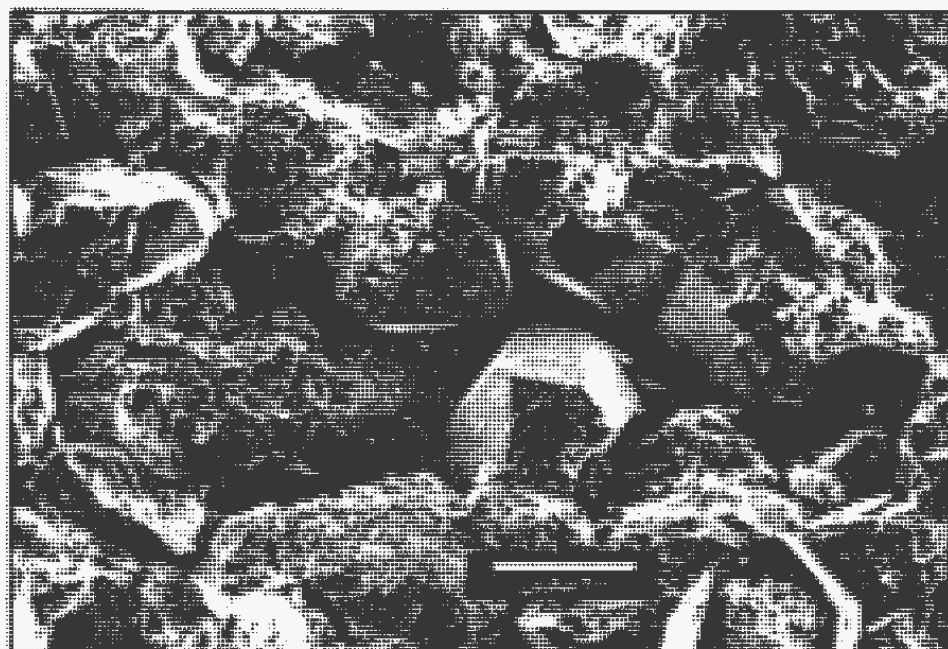
شکل ۷-۱۴ تغییر در تخلخل اندازه‌گیری شده با استفاده از روش‌های مختلف

۷-۱-۱-۵ انواع اصلی تخلخل

تخلخل را می‌توان براساس زمان تشکیل، مؤثر بودن برای تولید و اندازه به انواع مختلف تقسیم‌بندی کرد. از نظر زمان تشکیل تخلخل به انواع زیر تقسیم می‌شود:

- تخلخل اولیه (primary porosity)
 - تخلخل ثانویه (secondary porosity)
- از نظر کاربردی یا مؤثر بودن برای تولید، تخلخل به انواع زیر تقسیم می‌شود:
- تخلخل کل (total porosity)
 - تخلخل مفید (effective porosity)
- مرتبط (connected)
- به هم مرتبط (interconnected)
- تخلخل جدا افتاده (isolated porosity)
- از نظر اندازه، تخلخل به انواع زیر تقسیم می‌شود:
- درشت تخلخل (Macroporosity)
 - ریزتخلخل (Microporosity)

تخلخل براساس زمان تشکیل می‌تواند به دو نوع اصلی تقسیم شود. تخلخل اولیه هم‌زمان با رسوبگذاری و تخلخل ثانویه پس از رسوبگذاری تشکیل می‌شود. از تخلخل‌های اولیه می‌توان تخلخل بین‌دانه‌ای (intergranular porosity) یا بین‌ذره‌ای (interparticle) که ما بین دانه‌های رسوب وجود دارد و تخلخل درون‌دانه‌ای (intergranular porosity) یا درون‌ذره‌ای (intraparticle) که در داخل خود دانه‌ها قرار دارد را نام برد. تخلخل بین دانه‌ای، بیشتر در ماسه‌سنگ‌ها و تخلخل درون دانه‌ای، بیشتر در سنگ‌های آهکی اسکلتی وجود دارد. شکل ۷-۱۵ یک تصویر SEM از مخزن ماسه‌سنگی است که دارای تخلخل بین دانه‌ای اولیه است. همان‌طوری که در این تصویر دیده می‌شود، وجوه منتظم کوارتز ثانویه (overgrowth) دیواره منافذ را شکل می‌دهد. فضاهاى خالی بین دانه‌ها توسط گلوگاه‌های تخلخل (pore throats) به خوبی به هم متصل شده‌اند. در چنین حالتی مخزن معمولاً دارای تخلخل و تراوایی خوبی است. در مثال شکل ۷-۱۵ که متعلق به یکی از مخازن ماسه‌سنگی استرالیا است، تخلخل و تراوایی به ترتیب در حدود ۲۳٪ و ۲۴۰ میلی‌داری است.

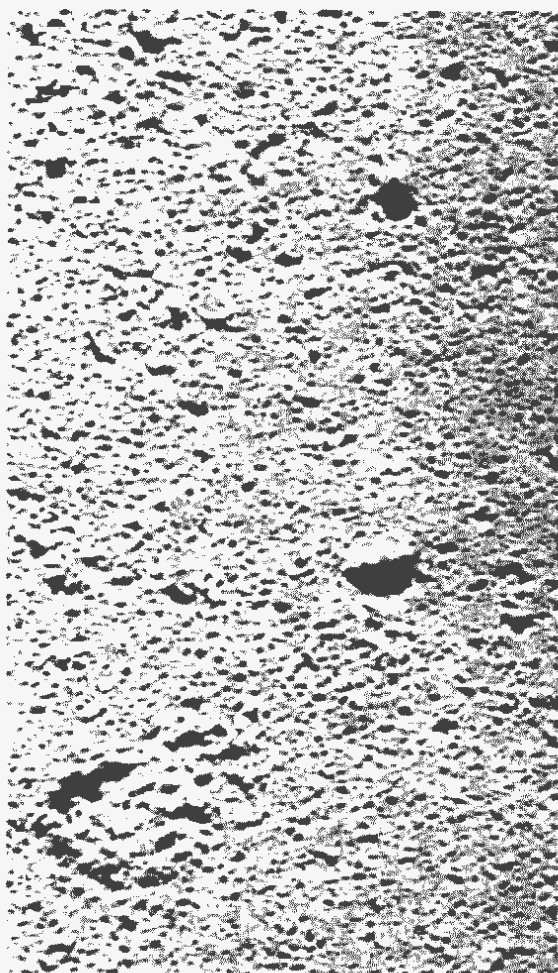


شکل ۷-۱۵ - تصویر SEM از مخزن ماسه‌سنگی با تخلخل اولیه بین دانه‌ای

تخلخل بین دانه‌ای اولیه معمولاً با ویژگی‌های زیر مشخص می‌شود:

- پس از رسوبگذاری و تراکم اولیه به شکل تخلخل یکپارچه و متصل (adhesive porosity) در سنگ دیده می‌شود.
- به شدت وابسته به جورشدگی، آرایش و شکل دانه‌ها است.
- با افزایش عمق و گذشت زمان از مقدار آن کاسته می‌شود.
- گاهی اوقات در اثر پوشیده شدن سطح دانه‌ها توسط رس‌های اولیه و یا مهاجرت اولیه هیدروکربن و در نتیجه تا حدی جلوگیری از سیمانی شدن، بدون تغییر باقی مانده و حفظ می‌شود.

تخلخل ثانویه، شامل تخلخلی است که بعد از رسوبگذاری در سنگ به وجود می‌آید. تخلخل ثانویه به چندین شکل وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها تخلخل بین بلوری (intercrystalline porosity) است. این نوع تخلخل در فضای بین بلورها بوده و در دولومیت‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. انحلال نیز می‌تواند چندین نوع تخلخل ثانویه را به وجود آورد. این پدیده به ویژه در سنگ‌های آهکی حائز اهمیت زیادی است، اما می‌تواند به‌طور مشابهی در ماسه‌سنگ‌ها نیز عمل کند. پدیده انحلال در سنگ‌ها به اشکال مختلف اتفاق می‌افتد. شکل ۷-۱۷ که از یک مغزه است، نشان می‌دهد که حفرات انحلالی ثانویه چگونه در اثر انحلال سنگ آهک توسعه یافته‌اند. برخی از حفرات، کوچک و مدور می‌باشند که در اثر انحلال و شسته شدن پلت‌ها به وجود آمده‌اند. این نوع تخلخل که به صورت انتخابی در فابریک سنگ شکل می‌گیرد



(fabric selective porosity) تخلخل قالبی نام دارد و چون از انحلال پلت‌ها حاصل شده تخلخل قالبی-پلت (pelmoldic) نامیده می‌شود. در این تصویر همچنین فضاهای خالی نامنظم و درشتی دیده می‌شود که فابریک اولیه سنگ را قطع می‌کنند. این فضاها، تخلخل حفره‌ای (vuggy porosity) نامیده می‌شوند. اگر سنگ آهک متحمل انحلال شدید گردد، فضاهای غارمانندی ممکن است در آن گسترش یابند. در تخلخل انحلالی ممکن است حفره‌های مجاور به هم مرتبط نباشند و بنابراین میزان تخلخل مفید از تخلخل کل بسیار کمتر باشد که در این صورت تراوایی سنگ بسیار کم خواهد بود.

شکل ۷-۱۷ - تصویری از یک مغزه که در آن حفرات انحلالی ثانویه از نوع پل‌مولدیک و حفره‌ای دیده می‌شود

به‌طور کلی شکل‌گیری تخلخل ثانویه را می‌توان محصول عوامل زیر دانست:

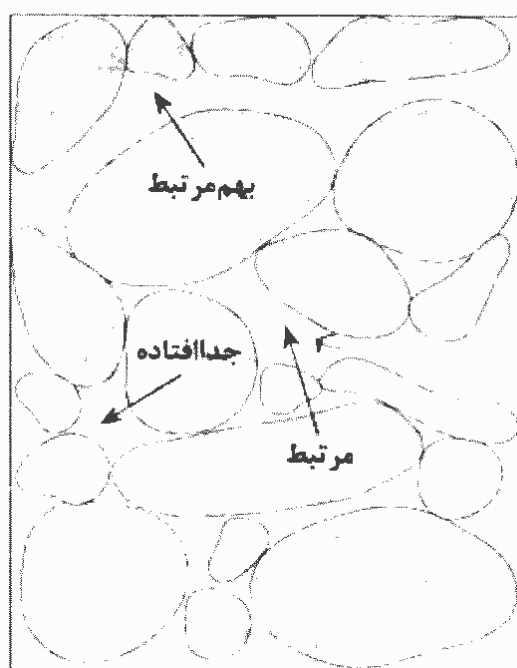
- انحلال دانه‌های اصلی (framework grain) که فاقد ثبات شیمیایی هستند
- انحلال سیمان‌های درجا یا بی‌ثبات
- کاهش حجم به واسطه تبدیل یک فاز به فاز چگال‌تر
- ایجاد شکستگی

تخلخل‌های ثانویه را می‌توان به کمک معیارهای زیر مورد شناسایی قرار داد:

- حفرات از حد معمول درشت‌ترند.
- حفرات کشیده و درازاند.
- در آن‌ها بقایای سیمان‌ها یا دانه‌های بی‌ثبات یافت می‌شود.

تخلخل مفید مقدار فضاهای خالی را گویند که قادرند به وسیله نفت یا گاز قابل بازیافت پر شوند. این نوع تخلخل در واقع مقدار فضاهایی خالی است که به اندازه کافی به هم مرتبط بوده

و نتیجه این ارتباط کافی حفرات به همدیگر، بازیافت نفت و یا گاز می‌باشد. در شکل ۷-۱۶، سه نوع تخلخل قابل مشاهده است. تخلخل مرتبط (connected)، به هم مرتبط (interconnected) و جدا افتاده (isolated). در تخلخل به هم مرتبط هر فضای خالی توسط چندین گلوگاه با فضاهای خالی اطراف مرتبط است. تخلخل مرتبط یا تخلخل ته بسته (dead end) فقط با یک گلوگاه به فضاهای اطراف مرتبط است. در تخلخل جدا افتاده، هیچ ارتباطی بین حفرات موجود نیست. دو نوع تخلخل مرتبط و به هم مرتبط مجموعاً تخلخل مفید (effective porosity) سنگ را تشکیل می‌دهند. در مورد تخلخل به هم مرتبط، نفت و گاز



می‌تواند توسط مکانیسم آبران طبیعی یا مصنوعی (که بعداً این مکانیسم‌ها توضیح داده خواهند شد) از مخزن به داخل چاه بیرون رانده شود. در تخلخل مرتبط این مکانیسم‌ها کمتر مؤثر است و خروج نفت و گاز از مخزن به داخل چاه از طریق انبساط سیالات ناشی از کاهش فشار مخزن صورت می‌گیرد. تخلخل جدا افتاده قادر به انتقال هیدروکربن نیست.

شکل ۷-۱۶ - دیاگرام شماتیک از سه نوع تخلخل مرتبط، به هم مرتبط و جدا افتاده

تخلخل‌ها را می‌توان بر اساس اندازه‌شان تقسیم‌بندی نمود. به کلیه خلل و فرجی که قطر آن‌ها کمتر از یک میکرون باشد ریزتخلخل اطلاق می‌گردد. ریزتخلخل‌ها بیشتر اوقات در فضای بین بلوری رس‌ها نظیر کائولینیت و کانی‌های دیگری که سطح مخصوص (specific area) بالایی دارند وجود دارند. میزان ریزتخلخل در توده‌های کائولینیتی با استفاده از تکنیک تحلیل‌گر تصاویر تا بیش از ۳۵ درصد اندازه‌گیری شده است.

ریزتخلخل‌ها به دلیل وجود نیروی موینگی بالا، معمولاً از آب کاهش نیافتنی (irreducible water) اشباع می‌باشند و لذا برای محاسبه آب اشباع‌شدگی در مخازن حاوی ریزتخلخل بایست روش‌های مناسب را برگزید.

درشت تخلخل‌ها ممکن است در اثر رشد کانی‌های رسی پرکننده منافذ (pore filling) و رس‌های پل‌ساز (pore bridging) به ریزتخلخل تبدیل شوند.

۷-۵-۱-۲ ارتباط بین تخلخل و عمق

تخلخل در همه رسوبات به صورت پیش‌بینی شده‌ای با افزایش عمق، کاهش می‌یابد. کاهش تخلخل با افزایش عمق با فرمول عمومی زیر نشان داده می‌شود:

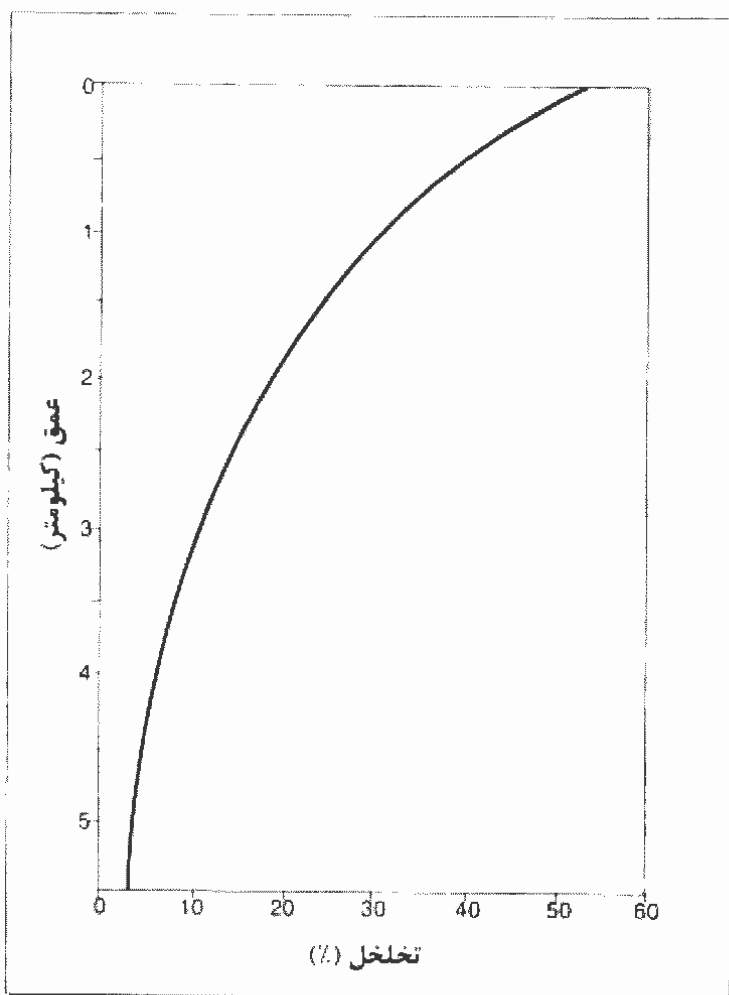
$$\phi = \phi_0 e^{-\text{depth}/B}$$

که B ثابت فشردگی و ϕ_0 تخلخل اولیه می‌باشد.

تخلخل سنگ‌های کربناته تحت تأثیر انواع گوناگونی از فرآیندهای دیاژنزی قرار دارد. با این وجود به نظر می‌رسد که کاهش ثابتی از تخلخل همراه با افزایش عمق در بعضی از حوضه‌های کربناته وجود دارد (شکل ۷-۱۸). مطالعه سنگ‌های کربناته محیط‌های گوناگون رسوبی جنوب فلوریدا نشان‌دهنده کاهش تخلخل همراه با افزایش عمق بوده که این موضوع به صورت یک معادله بیان شده است:

$$\text{تخلخل} = 41/73 e^{-Z/8197} (\text{ft}) \quad \text{یا} \quad \text{تخلخل} = 41/73 e^{-Z/2498} (\text{m})$$

که Z نشان‌دهنده عمق زیر سطح زمین (ft یا m) می‌باشد.



شکل ۷-۱۸- منحنی تخلخل در مقابل عمق در نمونه‌های زیرسطحی جنوب فلوریدا

۷-۵-۱-۳ اندازه‌گیری تخلخل در آزمایشگاه

برای یک نمونه متخلخل سه بخش قابل اندازه‌گیری وجود دارد که عبارتند از حجم منافذ (pore volume, PV)، حجم ذرات (grain volume, GV) و حجم کل (bulk volume, BV). برای تعیین تخلخل لازم است که دوتای این پارامترها محاسبه شود. این سه متغیر ممکن است به طرق مختلف اندازه‌گیری و در نهایت تخلخل حاصل شود. روش و رابطه انتخابی برای اندازه‌گیری به نوع سنگ آنالیز شده و زمان لازم برای به دست آوردن اطلاعات بستگی دارد. بیشتر تکنیک‌های آزمایشگاهی به تخلخل مفید حساسند، ولی تخلخل کل را می‌توان با خرد کردن نمونه و رساندن به اندازه ذرات (grain size) به دست آورد. در آنالیزهای مغزه، تخلخل کل مقداری است که پس از خارج کردن آب جذبی رس‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

۷-۵-۱-۳-۱ تکنیک قانون بویل

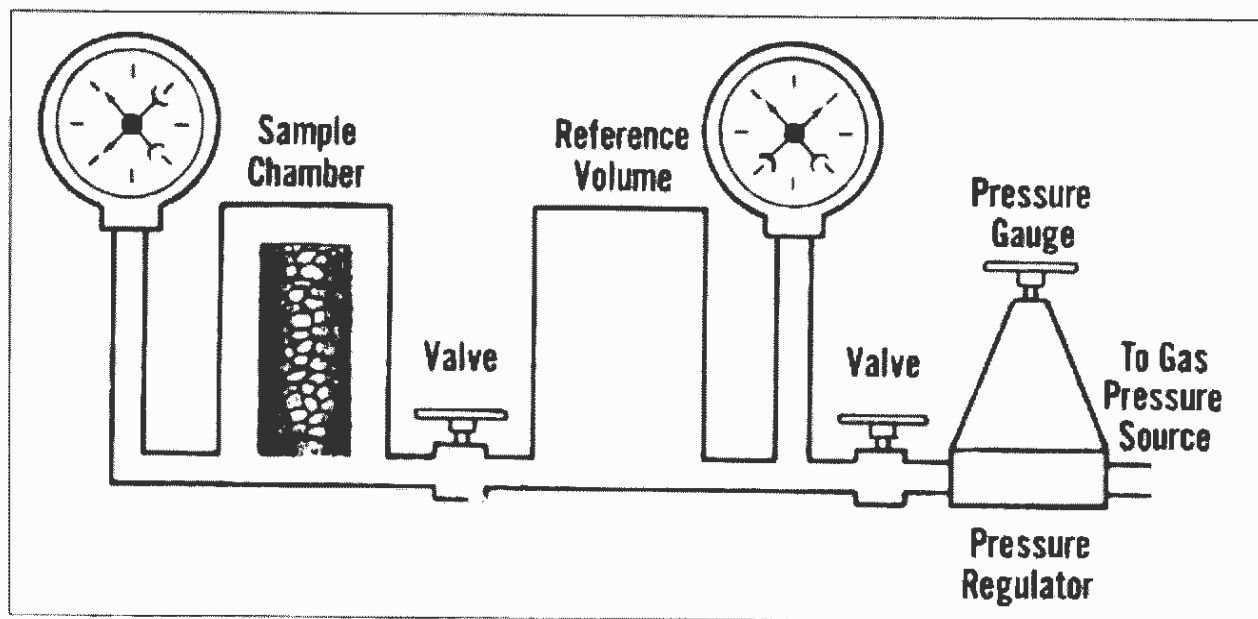
در روش قانون بویل برای اندازه‌گیری تخلخل، گاز متراکم نظیر هلیوم را به داخل منافذ وارد می‌کنند. هلیوم به دلیل کوچکی، به سرعت در منافذ ریز نفوذ می‌کند و به علت خنثی بودن، جذب دیواره و سطوح سنگ نمی‌شود. بسته به ابزارآلات و روش به کار گرفته شده می‌توان حجم منافذ یا حجم ذرات را تعیین کرد. این روش در صورتی که صحیح انجام شود دارای دقت بالا خواهد بود و روش نسبتاً سریعی است. نمونه‌ها لازم است که تمیز و خشک باشند، در غیر این صورت مقادیر تخلخل کم محاسبه می‌شود.

حجم کل: از اختلاف بین حجم کل و حجم ذرات، حجم منافذ به دست می‌آید. حجم کل با استفاده از قانون ارشمیدس، که معمولاً به دو روش انجام می‌گیرد، اندازه‌گیری می‌شود. در روش اول نمونه با مایعی اشباع می‌شود و سپس وزن می‌گردد. پس از آن نمونه در همان مایع فرو برده می‌شود و وزن غوطه‌ور شده آن اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت حجم کل برابر اختلاف دو وزن اندازه‌گیری شده تقسیم بر چگالی مایعی است که مغزه با آن اشباع شده و در آن غوطه‌ور شده است. در روش دوم نمونه با آب اشباع شده و در آب غوطه‌ور می‌شود و اختلاف دو وزن اشباع و غوطه‌وری برابر حجم کل است، چرا که چگالی آب برابر ۱ می‌باشد. معمولاً نیز از آب استفاده می‌شود چرا که خارج کردن آب از نمونه با حرارت به سهولت انجام می‌گیرد. حجم کل را همچنین می‌توان با اندازه‌گیری طول و قطر یک نمونه مغزه و استفاده از فرمول‌های مناسب ریاضی به دست آورد. ولی معمولاً اطلاعات به دست آمده از قطر سنجی برای به دست آوردن حجم منافذ از حجم ذرات دقیق نمی‌باشد.

حجم ذرات : اندازه‌گیری حجم ذرات با استفاده از قانون بویل بسیار راحت است. یک نمونه تمیز و خشک در یک محفظه که حجم معین دارد گذاشته می‌شود (شکل ۷-۱۹). این محفظه از محفظه فشار بالا (upstream) مجزا شده است و در عین حال محفظه فشار بالا هم دارای حجم معین است. فشار محفظه فشار بالا تا حدود ۱۰۰ psi رسانده می‌شود و سپس مسدود می‌شود. پس از آن، ارتباط دو محفظه باز می‌شود و گاز درون حجره نمونه توسعه می‌یابد، لذا فشار اولیه کاهش می‌یابد. باتوجه به مشخص بودن حجم دو محفظه، حجم ذرات را می‌توان با اندازه‌گیری فشار ثانویه و با استفاده از قانون بویل به دست آورد:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

حجم منافذ: حجم منافذ اغلب به صورت غیر مستقیم از اختلاف حجم کل و حجم ذرات به دست می‌آید. حجم منافذ را هم‌چنین می‌توان به صورت مستقیم و از معادلات قانون بویل به دست آورد.



شکل ۷-۱۹ - دستگاه اندازه‌گیری تخلخل با هلیوم

۷-۵-۱-۳-۲ روش مجموع سیالات (Summation of Fluids)

اندازه‌گیری تخلخل توسط روش مجموع سیالات بسیار مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این روش مقدار گاز، نفت و آب در فضای منافذ نمونه‌های تازه (fresh samples) محاسبه می‌شود. مجموع این منافذ در برگیرنده سیالات بیانگر تخلخل است. این روش تخلخل و اشباع شدگی را هم‌زمان در یک نمونه اندازه‌گیری می‌کند. برای تعیین تخلخل لازم است که دو قسمت از یک مغزه تهیه شود. یک قسمت که حدود ۱۰۰ گرم وزن دارد، تا حد اندازه ۰/۶ سانتیمتر خرد می‌شود و درون استوانه‌های فلزی ابزاری به نام ریتورت (retort) گذاشته می‌شود که در انتها دارای یک ظرف مدرج است (شکل ۷-۲۰). نمونه‌ها در درون استوانه‌های

فلزی گرم و آب و نفت آن‌ها بخار شده و برای اندازه‌گیری در ظروف شیشه‌ای مدرج جای می‌گیرند. قسمت دوم مغزه که حدود ۳۰ گرم وزن دارد به صورت استوانه‌ای از مغزه جدا



می‌شود. نمونه وزن شده سپس برای به دست آوردن حجم کل در جیوه (بر اساس جابجایی جیوه) قرار داده می‌شود. سپس برای به دست آوردن حجم گاز، نمونه در جیوه فرو برده شده و فشار جیوه تا حدود ۱۰۰۰ Psi بالا برده می‌شود. در این فشار، جیوه وارد نمونه شده و به گاز فشار می‌آورد و فضای اشغال شده را پر می‌کند. با محاسبات مناسب می‌توان حجم گاز را به صورت درصدی از حجم کل نمونه به دست آورد.

شکل ۷-۲۰ - تصویر یک ریتورت

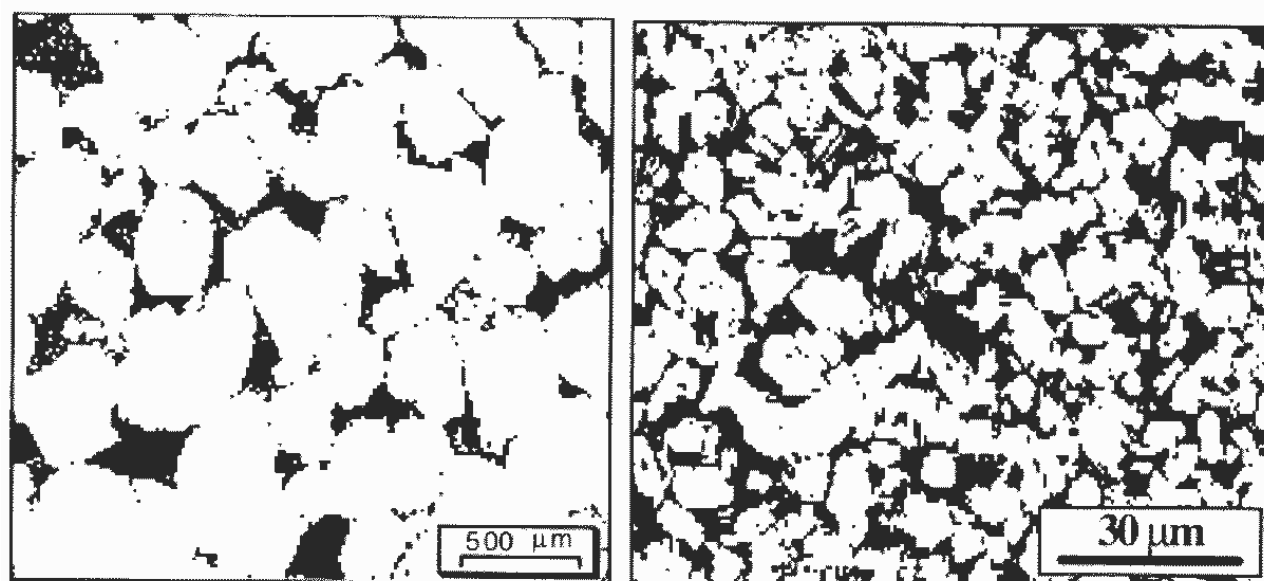
حجم نفت، گاز و آب هر کدام به صورت کسری از حجم کل گزارش می‌شوند و جمع این سه، تخلخل را می‌سازد. این روش، تکنیک مناسبی برای مغزه‌های هوا خورده یا مغزه‌هایی که نفت و آب آن‌ها بخار شده نمی‌باشد.

تمام تکنیک‌های اندازه‌گیری تخلخل که یاد شد دارای دقتی در حد $\pm 0.5\%$ واحد تخلخل می‌باشند.

۷-۵-۱-۳-۲ اندازه‌گیری تخلخل با تجزیه و تحلیل تصویر BSE

برای اندازه‌گیری تخلخل، تصاویر پتروگرافی باید رقومی گردند. تصاویر Back Scattered Electron از مقاطع صیقلی پوشیده شده با کربن از میکروسکوپ الکترونی به دست می‌آید. این تصاویر، به صورت تصاویر خاکستری می‌باشند که به‌طور مثال از 512×512 پیکسل (پیکسل‌ها اجزای تشکیل دهنده تصویرند که به عنوان مثال اندازه هر کدام، برای تصویری با حدتفکیک متوسط، $2/4 \times 2/4$ میکرون است) تشکیل شده است. رنگ پیکسل‌ها در تصاویر خاکستری می‌تواند از صفر تا ۲۵۶ بنا به شدت رنگ خاکستری تغییر کند. رنگ خاکستری زمینه سنگ معمولاً با رنگ حفره‌های خالی که با اپوکسی آبی رنگ آمیزی شده‌اند متفاوت است. بعد از تغییر دادن تصویر خاکستری به یک تصویر دوتایی (binary image) (تصویر سیاه و سفیدی که به‌طور مثال مقادیر ۰ تا ۱۲۷ خاکستری به عنوان صفر و ۱۲۸ تا ۲۵۶ به عنوان یک در نظر گرفته می‌شوند)

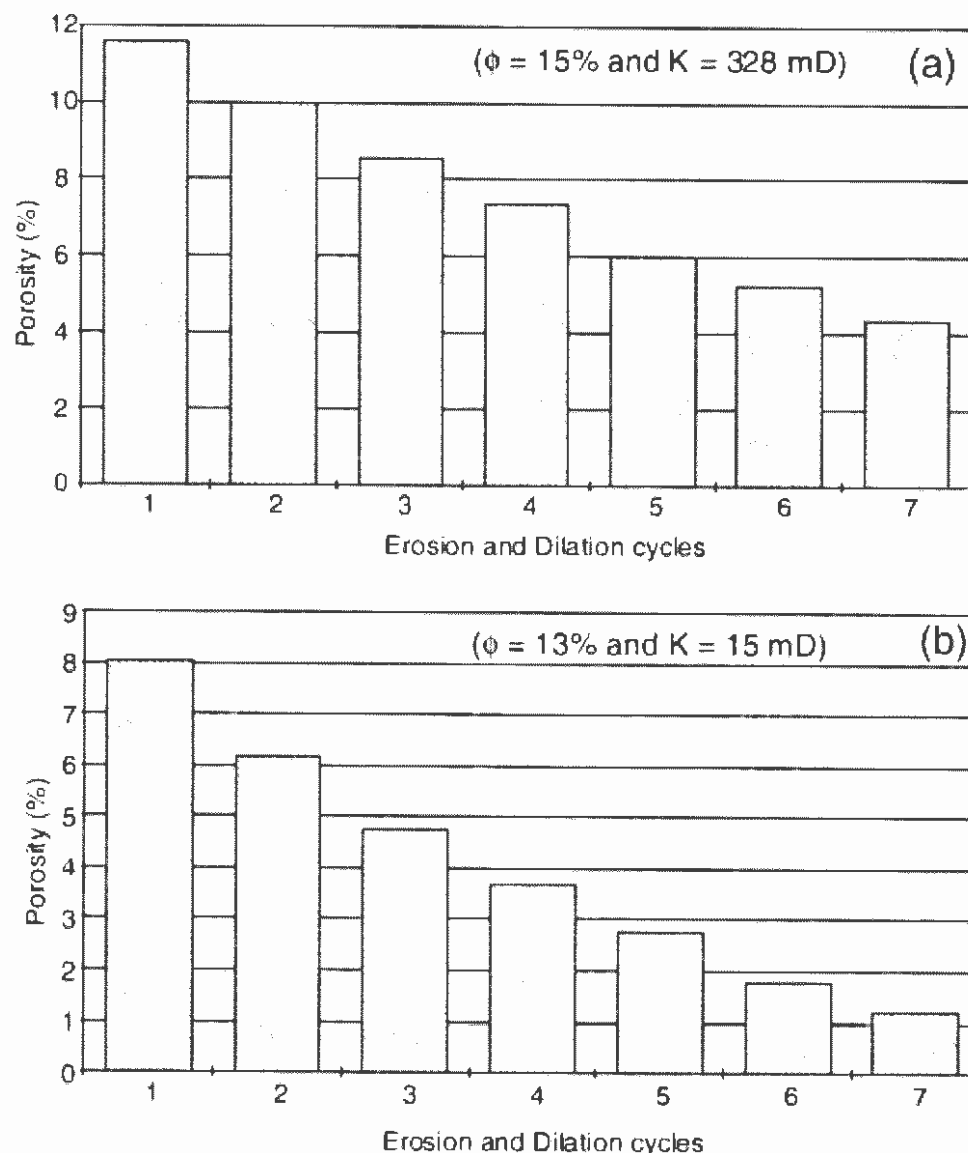
تخلخل می‌تواند به سهولت از زمینه سنگ تشخیص داده شود (شکل ۷-۲۱). در یک تصویر دوتایی هر پیکسل یکی از مقادیر یک یا صفر را دارد. پیکسل‌هایی که تخلخل را نشان می‌دهند خاکستری تیره هستند و بنابراین سیاه می‌شوند (۱) و زمینه سنگ که در تصویر BSE روشن‌تر هستند سفید می‌باشند و به صورت (۰) نشان داده می‌شوند (شکل ۷-۲۱). در این تصاویر می‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل گر تصاویر (image analyzer) تخلخل دوبعدی و شکل هندسی خلل و فرج (pore geometry) نظیر مساحت، اندازه قطر و محیط منافذ را محاسبه نمود.



شکل ۷-۲۱ - تصویر دوتایی از یک ماسه‌سنگ با تخلخل بین دانه‌ای (چپ) و ریز تخلخل موجود در داخل توده کانولینیت (راست)

قشرزایی (Dilation) و قشرزدایی (Erosion) تصویرهای دوتایی روشی است که اخیراً برای آنالیز تصاویر پتروگرافی استفاده می‌شود (شکل ۷-۲۲). قشرزدایی تکنیکی است که قشر خارجی مجموعه پیکسل‌ها را حذف می‌کند در صورتیکه قشرزایی یک لایه پیکسل به اطراف تصویر اضافه می‌کند. در طی قشرزدایی، حفرات کوچک و بی شکل کاملاً حذف و در طی قشرزایی بعدی بازسازی خواهند شد. در طی این فرآیند حفرات کوچک، حفرات ناصاف حذف می‌شوند و در نتیجه طیف تغییرات تخلخل (porosity spectrum) به دست آمده اطلاعاتی درباره توزیع اندازه حفرات نشان می‌دهد. سیکل‌های مداوم قشرزایی و قشرزدایی نشان می‌دهد که طیف تغییرات تخلخل برای نمونه‌های دارای تخلخل و تراوایی بالا کاملاً متفاوت با نمونه‌های با تخلخل و تراوایی کم است. شکل ۷-۲۲ نشان می‌دهد که کاهش سطح حفرات بعد از هر چرخه قشرزایی-قشرزدایی در نمونه‌های دارای تخلخل و تراوایی کمتر، بیشتر است. این امر در واقع نشان می‌دهد که نمونه‌های با تخلخل و تراوایی کمتر، منافذ و گلوگاه‌های منافذ

کوچکتری دارند و لذا به طور پیوسته بعد از هر سیکل قشرزدایی - قشرزایی، حفرات بیشتری را از دست می دهند.



شکل ۷-۲۲ - هیستوگرام طیف کمپلکس خلل و فرج (pore complex spectra) برای دو نمونه با تراوایی زیاد (a) و کم (b)

۷-۵-۲ تراوایی (Permeability)

برای یک سنگ مخزن صرف داشتن تخلخل پر از نفت یا گاز کافی نیست، بلکه خلل و فرج باید به هم متصل باشند تا به هیدروکربن‌ها اجازه حرکت به داخل و خارج مخزن را بدهند.

تراوایی توانایی محیط متخلخل برای انتقال سیال است. واحد اندازه‌گیری تراوایی داریسی (Darcy) است که به نام یک دانشمند فرانسوی می‌باشد که جریان آب در محیط‌های متخلخل را در سال ۱۸۵۶ مطالعه کرد. یک داریسی توانایی تراوایی یک سنگ است وقتی که بتواند در طی یک ثانیه اجازه عبور یک سانتیمتر مکعب از یک مایع با گرانشی یک سانتی‌پواز را از سطح مقطع یک سانتیمتر مربعی بدهد، وقتی که گرادیان فشار یک اتمسفر باشد. در واقع، تراوایی

یک داری برابر است با جریان یک بشکه در روز از نفتی با غلظت یک سانتی‌پواز از یک فوت از ضخامت مخزن در یک چاه وقتی که اختلاف فشار برابر یک PSI (pound per square inch) باشد. از آنجا که اکثر مخازن تراوایی کمتر از یک داری دارند، معمولاً از میلی‌داری که یک هزارم داری است، استفاده می‌شود. تراوایی سازندها از یک میلی‌داری تا بیش از ده هزار میلی‌داری (مخصوصاً در مخازن دارای شکستگی نظیر آسماری) تغییر می‌کند. عموماً تراوایی را با K نشان می‌دهند. تراوایی میانگین در مخازن معمولاً بین ۵-۵۰۰ میلی‌داری (mD) است، هرچند بعضی از مخازن استثنایی تراوایی بالای ۳۰۰۰ mD دارند.

معادله داری برای یک سیال که از یک محیط متخلخل عبور می‌کند به صورت زیر است:

$$Q = K \frac{A \times \Delta P}{\mu \times L}$$

Q: دبی جریان cm^3/Sec

ΔP : اختلاف فشار atm

A: سطح cm^2

: ویسکوزیته مایع centipoise

L: طول cm

K: تراوایی Darcy

قانون داری در صورت وجود شرایط زیر صحت داشته و قابل استفاده برای محاسبه تراوایی است:

□ جریان به صورت خطی و آرام باشد.

□ فقط یک فاز به صورت صد در صد منافذ را اشباع کرده باشد.

□ بین سنگ و سیال واکنشی وجود نداشته باشد.

در جایی که مخلوط آب، نفت و گاز وجود داشته باشد، حرکت آن‌ها در محیط متخلخل بسیار پیچیده است و باید نوع اصلاح شده معادله داری به کار رود.

۷-۵-۲-۱ انواع تراوایی

۷-۵-۲-۱-۱ تراوایی مطلق (Absolute permeability)

تراوایی مطلق، تراوایی است که فضاها صددرصد از یک سیال اشباع شده باشد. تراوایی مطلق یک سنگ، خاص همان سنگ است و به نوع سیال درونی آن بستگی ندارد.

تراوایی نسبی عبارت است از:

$$K_{rw} = K_w / K \quad \text{برای آب}$$

$$K_{ro} = K_o / K \quad \text{برای نفت}$$

$$K_{rg} = K_g / K \quad \text{برای گاز}$$

به طوری که:

K = تراوایی مطلق

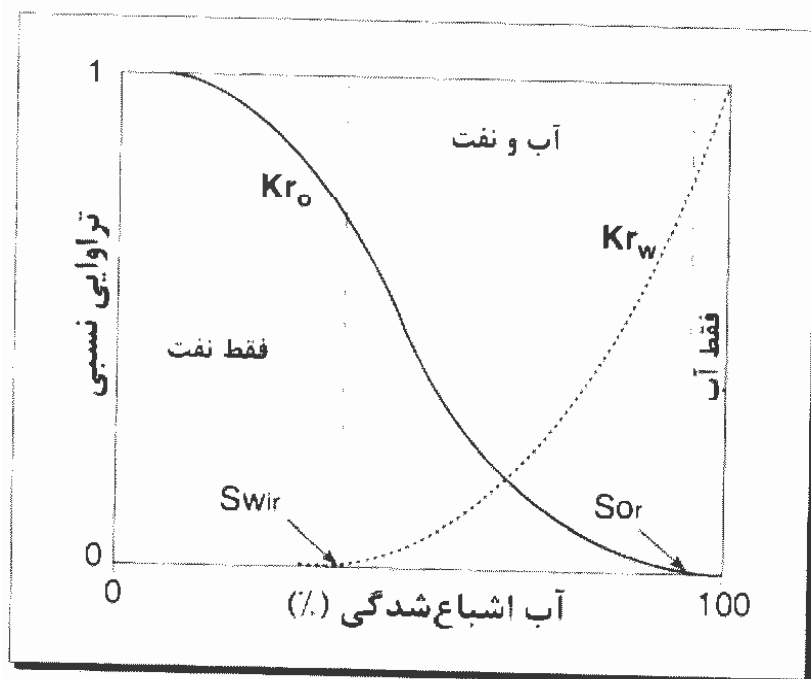
K_r = تراوایی نسبی

K_g = تراوایی مؤثر در ۱۰۰ درصد اشباع گاز

K_o = تراوایی مؤثر در ۱۰۰ درصد اشباع نفت

K_w = تراوایی مؤثر در ۱۰۰ درصد اشباع آب

در یک مخزن حاوی نفت و آب، تراوایی نسبی نفت (K_{ro}) می‌تواند بین صفر تا ۱ متغیر باشد که بستگی به مقدار اشباع آب دارد. هنگامی که اشباع آب افزایش می‌یابد، تراوایی نفت کاهش می‌یابد تا این که به صفر برسد (شکل ۷-۲۴). این نقطه مصادف با اشباع نفت باقیمانده (S_{or}) یا نفت غیرقابل تحرک در مخزن است. تراوایی نسبی برای آب، از طرف دیگر از صفر شروع می‌شود. نقطه شروع حرکت آب بستگی به مقدار اشباع آب کاهش نیافتنی (S_{wi}) دارد. از آن به بعد همچنان که اشباع آب افزایش می‌یابد تراوایی نسبی آب نیز افزایش می‌یابد. توجه داشته باشید که برای بیشتر آب اشباع شدگی‌های داده شده، تراوایی نسبی نفت برای یک سیستم نفتدوست (Oil-wet) در مقایسه با یک سیستم آبدوست (Water-Wet) کمتر است و بر عکس این موضوع، K_{rw} (تراوایی نسبی آب) در یک سیستم نفتدوست



در مقایسه با یک سیستم آبدوست بیشتر است. در یک سنگ مخزن نفتدوست، قطرات نفت مایلند به سطوح کانی‌های سنگ بچسبند و بالعکس در یک سنگ مخزن آبدوست، قطرات آب تمایل به چسبیدن به سطوح کانی‌های سنگ را دارند.

شکل ۷-۲۴ - منحنی تراوایی نسبی برای نفت و آب

افراد مختلفی، معادلات تجربی و مشاهده‌ای را برای ارتباط K_{ro} و K_{rw} به S_w و S_{wi} و S_{or} پیشنهاد داده‌اند. که یک مورد که عموماً مورد استفاده قرار می‌گیرد در ذیل آمده است:

$$K_{ro} = \{ (0.9 - S_w) / (0.9 - S_{wi}) \}^2$$

9

$$K_{rw} = \{ (S_w - S_{wi}) / (1 - S_{wi}) \}^3$$

۴-۱-۲-۵-۷ تراوایی پایه (Base Permeability)

تراوایی پایه (base permeability) تراوایی هیدروکربن در حضور آب کاهش نیافتنی (irreducible water) است. برای یک مخزن دارای آب و نفت، این بدان معنی است که تراوایی پایه همان تراوایی مؤثر برای نفت با حضور آب غیر قابل بازیافت است. برای یک مخزن گازی تراوایی پایه همان تراوایی گاز در حضور آب کاهش نیافتنی است.

۲-۲-۵-۷ فاکتورهای کنترل کننده تراوایی

تخلخل یک خصوصیت ساکن و استاتیک سنگ‌ها بوده در حالی که تراوایی یک خصوصیت دینامیک و متحرک می‌باشد. تراوایی به فاکتورهای متعددی بستگی دارد و مطالعات زیادی تاکنون به عمل آمده است تا بتوان ارتباط دقیق و کمی را بین این فاکتورها و تراوایی پیدا نمود. به‌طور مثال:

- ♦ رابطه بین رخساره‌های رسوبی و تراوایی: رخساره‌های رسوبی بافت و فابریک یک سنگ را کنترل می‌کنند، لذا تأثیر بسزایی بر روی تراوایی دارند.
- ♦ اثر ترکیب سنگ روی تراوایی و تخلخل: ترکیب یک سنگ، فشردگی شیمیایی و مکانیکی را در طی دیاژنز دفنی کنترل می‌کند که به شدت روی تخلخل و تراوایی تأثیر دارند.
- ♦ اثر عمق تدفین بر تراوایی: تراوایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای با عمق کم می‌شود. کاهش تراوایی با عمق به افزایش سیمان، کاهش تخلخل ثانویه و افزایش فشار لایه‌های فوقانی، و یا به عبارتی افزایش فشردگی، نسبت داده می‌شود که منجر به مسدود شدگی گلوگاه‌های تخلخل می‌شود.

۱-۲-۲-۵-۷ اثر پارامترهای بافتی روی تراوایی و تخلخل

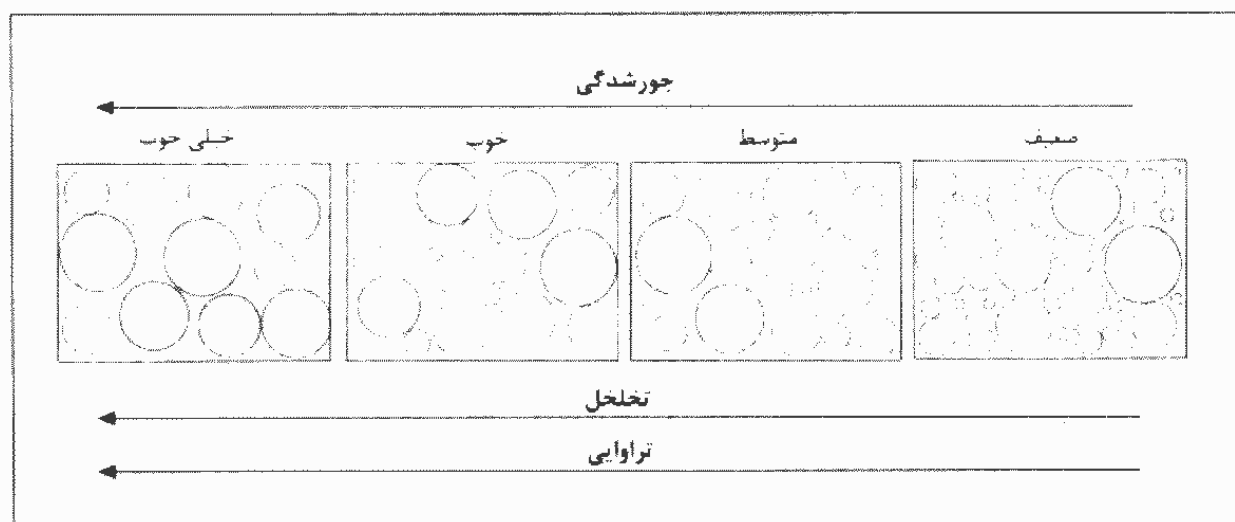
تخلخل و تراوایی سنگ‌ها ارتباط نزدیکی با بافت آن‌ها دارد. پارامترهای بافتی مختلف رسوبات شامل:

- شکل دانه‌ها (کروییت و گردش‌دگی)،
- اندازه دانه‌ها،
- جور شدگی و
- فابریک است.

شکل دانه‌ها به احتمال قوی نقش چندان مهمی را در کنترل تخلخل و تراوایی رسوبات بازی نمی‌کند. به عبارتی شکل دانه بطریقی تأثیر در فابریک سنگ خواهد داشت که تأثیر فابریک بر روی تخلخل و تراوایی بحث خواهد شد.

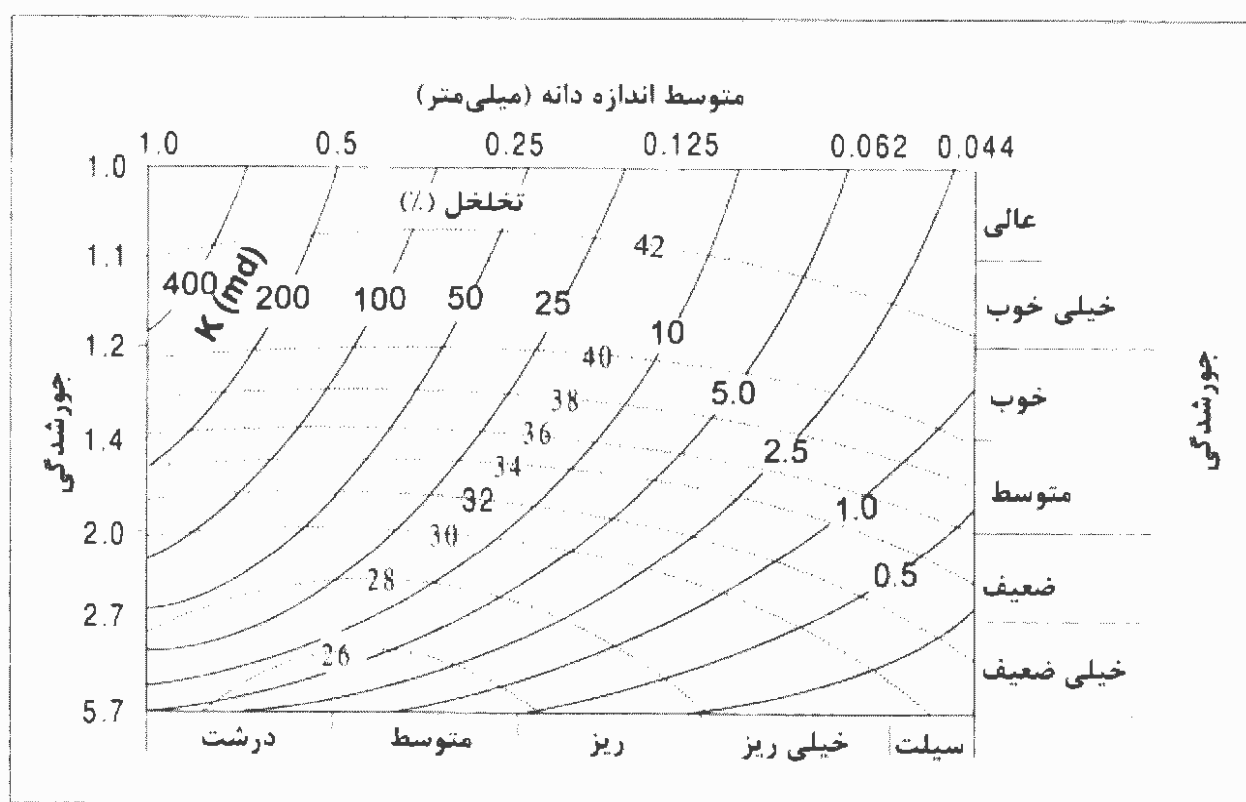
ارتباطی بین تخلخل و اندازه دانه‌ها در رسوبات در حد ماسه وجود ندارد و درصد تخلخل با تغییر اندازه دانه ثابت می‌ماند. به عبارت دیگر تخلخل مستقل از اندازه دانه‌هاست. ولی تراوایی کاملاً توسط اندازه دانه کنترل می‌شود، به‌طوری‌که هرچه اندازه ذرات کاهش یابد، تراوایی هم کم می‌شود. علت کاهش تراوایی با ریز شدن دانه‌ها در این است که هر چه ذرات ریزتر شوند، گلوگاه‌های تخلخل هم ریزتر شده و بنابراین سیالات به سختی از داخل سنگ عبور می‌کنند.

جورشدگی، هم تخلخل و هم تراوایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در رسوبات دارای جورشدگی ضعیف (poorly-sorted) ذرات ریز زیادی وجود دارند که فضای بین دانه‌های درشت اصلی را پر می‌کنند که این باعث کوچک شدن فضاهای خالی و گلوگاه‌های تخلخل شده و بنابراین تخلخل و تراوایی را کاهش می‌دهد (شکل ۷-۲۵). در مقابل در رسوبات خوب جورشده (well-sorted)، مواد دانه‌ریزی وجود ندارد تا فضای خالی بین آن‌ها را پر کند یا مسیر گلوگاه‌های تخلخل را ببندد. بنابراین یک رسوب خوب جورشده تخلخل و تراوایی نسبتاً بالایی خواهد داشت.



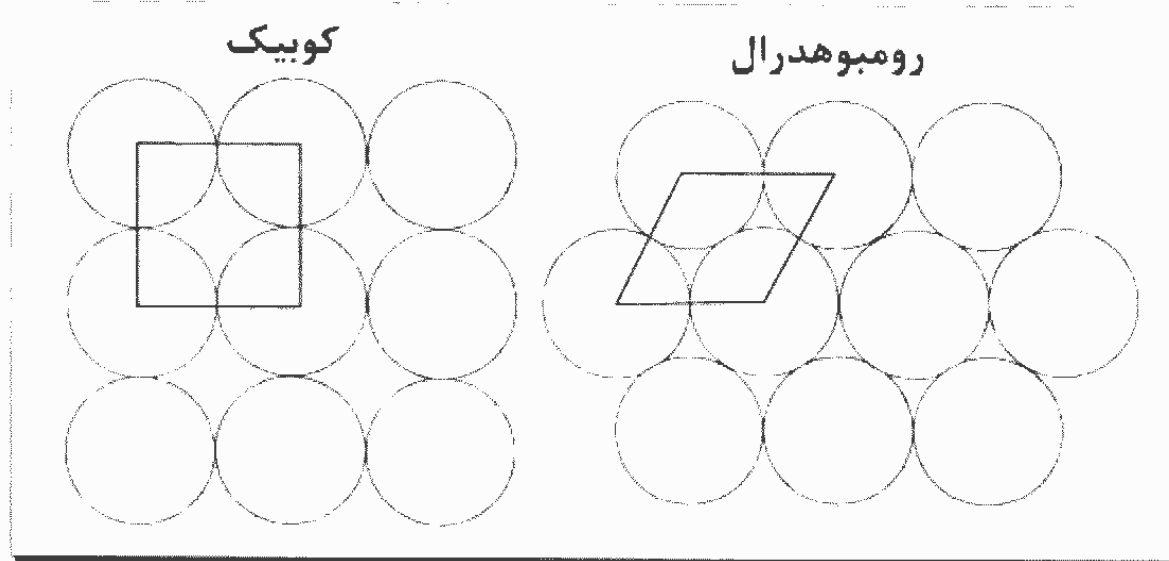
شکل ۷-۲۵ - تأثیر جورشدگی روی کیفیت سنگ مخزن

شکل ۷-۲۶ که از یک کار آزمایشگاهی برای رسوبات سست حاصل آمده است، تأثیر اندازه دانه‌ها و جورشدگی را بر روی تخلخل و تراوایی نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که در این شکل دیده می‌شود، هم تخلخل و هم تراوایی با افزایش جورشدگی افزایش می‌یابند. رسوبی که بهترین جورشدگی را داشته باشد و درشت‌دانه باشد بهترین تراوایی و تخلخل را دارد. این وابستگی بین اندازه دانه‌ها، جورشدگی و تخلخل و تراوایی عمدتاً در مخازن ماسه‌سنگی که سیمانی نشده و به تبع آن کاهش تخلخل را تحمل نکرده‌اند، دیده می‌شود. در ضمن این شکل بخوبی نشان می‌دهد که تغییر در اندازه دانه‌ها (در طیف اندازه ماسه) تأثیر آنچنانی بر روی مقدار تخلخل ندارد.



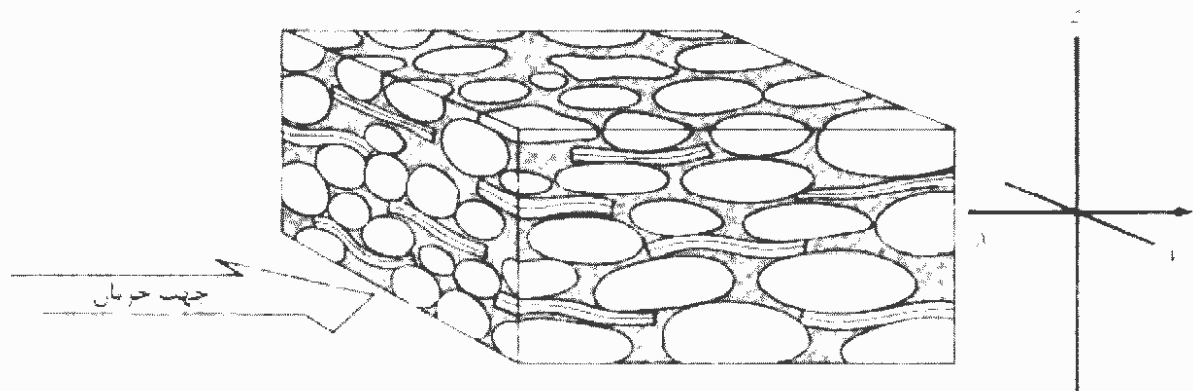
شکل ۷-۲۶ - تأثیر اندازه دانه‌ها و جورشدگی بر روی تخلخل و تراوایی برای رسوبات سست

پارامتر آخر فابریک رسوب است که به عنوان نحوه آرایش دانه‌های رسوب تعریف می‌شود. در اینجا دو جنبه از فابریک رسوب مورد بررسی قرار می‌گیرد که یکی چگونگی چیده شدن دانه‌ها (packing) و دیگری چگونگی جهت‌یابی (orientation) یا نظم آن‌ها در رسوب است. از نظر تئوری، شش راه وجود دارد که کره‌های هم اندازه در کنار هم قرار گیرند. چگونگی چیده شدن دانه‌ها از کوبیک (cubic) که بازترین آرایش است به سمت رومبوه‌درال (rhombohedral) که دانه‌ها فشرده‌ترین آرایش را دارند می‌تواند تغییر کند. آرایش کوبیک دارای ۴۸٪ تخلخل است و به سمت آرایش رومبوه‌درال تخلخل به ۲۶٪ کاهش می‌یابد (شکل ۷-۲۷).



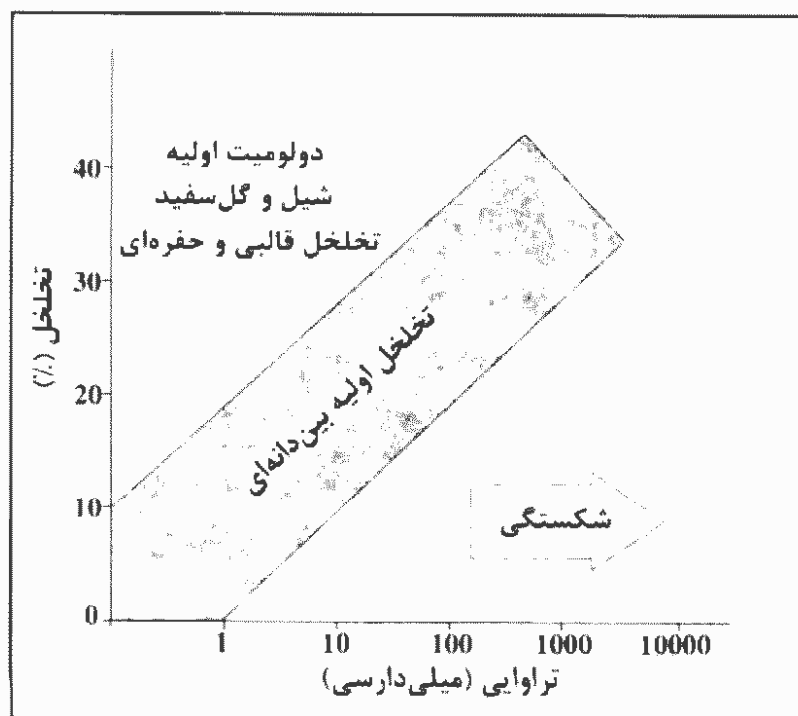
شکل ۷-۲۷ - چیده شدن کوئیک و رومبوهدرال دانه‌ها

چگونگی چیده شدن دانه‌ها یکی از کنترل‌کننده‌های مهم تخلخل و نهایتاً تراوایی در رسوبات است. به احتمال زیاد فشرده شدن بعد از رسوبگذاری باعث تغییرات شدید آرایش و از دست دادن تخلخل در زمان اولیه دفن می‌شود. مطالعات آزمایشگاهی مربوط به آرایش بر این فرض استوار شده است که دانه‌های رسوب کروی هستند. این موضوع به جز در اوولیت‌ها به ندرت در رسوبات دیگر صادق است. بیشتر کوارتزها کشیده شده‌اند. رسوباتی که شکل ورقه‌ای دارند مثل میکا یا رسها و کربناتهای اسکلتی هم شکل غیرکروی دارند. بنابراین برای رسوبات متشکل از دانه‌های غیرکروی، عنصر دوم فابریک یعنی جهت یافتگی به احتمال قوی مهم‌تر از آرایش است. وقتی تغییرات تخلخل و تراوایی را مورد توجه قرار می‌دهیم، جهت یابی ذرات اگر چه اثر کمی در تخلخل دارد، ولی اثر زیادی در تراوایی دارد. شکل ۷-۲۸ قطعه‌ای از یک ماسه‌سنگ دارای لایه‌بندی را نشان می‌دهد که شامل کوارتزهای کشیده شده در جهت جریان و صفحات میکا و دیگر ذراتی است که به صورت خطی به موازات لایه‌بندی قرار گرفته‌اند. تراوایی در امتداد محور X بیشترین مقدار و در جهت محور Z کمترین مقدار را خواهد داشت و تراوایی اندازه‌گیری شده در جهت Y مقداری بین دو مقدار قبلی را نشان خواهد داد. در آزمایشگاه تراوایی را معمولاً در جهت قائم و افقی نمونه اندازه‌گیری می‌کنند و عموماً تراوایی افقی (horizontal permeability) بیش از تراوایی عمودی (vertical permeability) است.



شکل ۷-۲۸ - قطعه‌ای از یک ماسه‌سنگ که به‌طور تیپیک دانه‌ها به موازات جریان جهت یابی شده‌اند

شکل ۷-۲۹ خلاصه‌ای از روابط تخلخل-تراوایی و نوع سنگ را نشان می‌دهد. تخلخل بین دانه‌ای اولیه در ماسه‌سنگ‌ها رایج‌تر است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تخلخل اولیه بین دانه‌ای، تراوایی به صورت خطی مستقیم افزایش می‌یابد. تخلخل ثانویه، هم حفره‌ای (vuggy) و هم قالبی (moldic)، معمولاً در سنگ آهک‌ها یافت می‌شوند. در این نوع سنگ‌ها اگر چه مقدار تخلخل ممکن است بالا باشد، ولی حفره‌ها و قالب‌ها معمولاً به صورت منفرد و جدا می‌باشند و لذا تراوایی نسبتاً کم است. اگر فضاهای خالی به هر دلیلی به هم متصل شوند، ممکن است تراوایی بالا رود. سنگ آهک‌های میکریتی، دولومیت اولیه و شیل‌ها ممکن است تخلخل قابل توجهی نشان دهند ولی به علت اندازه کوچک خلل و فرج و گلوگاه‌هایی که آن‌ها را به هم متصل می‌کند، تراوایی خیلی پایینی دارند. شکستگی، تراوایی هر نوع مخزنی را افزایش می‌دهد، اگر چه نقش زیادی در افزایش تخلخل ندارد.



شکل ۷-۲۹ - ارتباط تخلخل و تراوایی برای انواع سنگ‌ها و تخلخل‌ها

رابطه بین تراوایی و تخلخل به نوع سنگ بستگی دارد. عموماً در مورد سنگ‌های آواری نمودار تراوایی در مقابل تخلخل تقریباً خطی است، در صورتی که این رابطه برای سنگ‌های کربناته پیچیده و نامشخص است. افراد مختلف معادلات مفیدی را ارائه داده‌اند که تقریباً رابطه بین متخلخل و تراوایی را بیان می‌کند. این معادلات باید عوامل مختلف بافتی از قبیل اندازه، شکل و توزیع کانال‌های حفرات و منافذ سنگ را در نظر گرفته و محاسبه کند.

۷-۵-۲-۲ پارامترهای استفاده شده در تعیین تراوایی

تراوایی یکی از پارامترهای مهم پتروفیزیکی است که معمولاً از طریق اندازه‌گیری مستقیم کسب می‌شود. محققین زیادی سعی کرده‌اند تا به طرق مختلف ارتباط مشخص و قابل استفاده‌ای بین تراوایی و دیگر ویژگی‌های سنگ پیدا کرده و لذا بتوانند آن را به‌طور قابل قبولی تخمین بزنند. به‌طور عمده فاکتورهایی که تاکنون مود توجه قرار گرفته‌اند شامل موارد زیر است:

- سطح مخصوص دانه (surface area)
 - فاکتور سازند (formation factor)
 - فشار مویینه (capillary pressure)
 - زمان انتقال صوت (sonic transit time)
 - زمان استراحت تشدید مغناطیسی هسته‌ای (nuclear magnetic resonance relaxation time)
 - خصوصیات گلوگاه‌های تخلخل که از آنالیز تصویر مقاطع نازک به دست می‌آید.
- برخی روش‌های فوق قادرند تراوایی را در حد مورد قبولی تخمین بزنند.

۷-۵-۲-۳ اثر اندازه گلوگاه تخلخل روی تراوایی

با استفاده از فشارهای مویینه ناشی از تزریق جیوه (mercury injection capillary pressure) می‌توان ارتباط بین گلوگاه‌های تخلخل و تراوایی را مشخص کرد. رابطه بین فشار مویینه حاصل از تزریق جیوه و شعاع گلوگاه‌های تخلخل (pore throat radii) به صورت زیر است:

$$P_c = -2\sigma \cos\theta / r$$

که P_c فشار مویینه بر حسب psi، σ کشش سطحی جیوه بر حسب dyne/cm، θ زاویه ترشددگی و r شعاع گلوگاهی (بر حسب میکرون) است که جیوه وارد آن شده است. اگر مقدار $\sigma = 480$ dyne/cm و $\theta = 140^\circ$ برای سیستم جیوه- هوا در نظر گرفته شود، معادله فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$P_c = 107/r$$

روابط تجربی فراوانی میان تخلخل، تراوایی و اندازه گلوگاه‌ها وجود دارد که به عنوان مثال می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد:

$$\text{Log}r_{35}=0.732+0.588\text{Log}K-0.864\text{Log}\phi$$

9

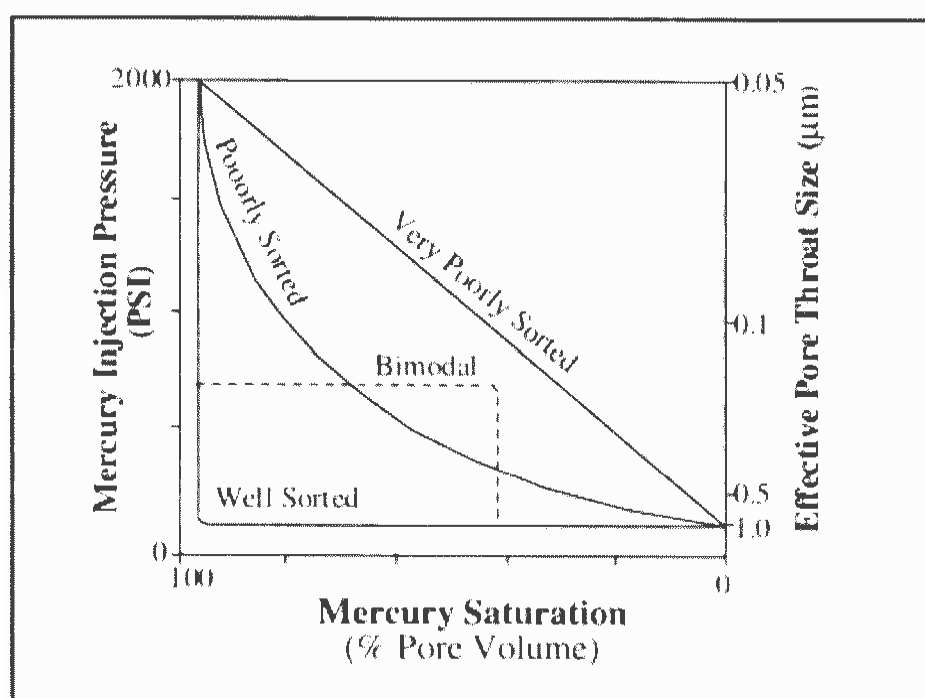
$$\text{Log}K=-1.221+1.415\text{Log}\phi+1.512\text{Log}r_{25}$$

در این فرمول‌ها K تراوایی هوای تصحیح نشده است بر حسب میلی‌داری و ϕ تخلخل بر حسب درصد است و r_{25} و r_{35} قطر گلوگاه‌هایی است که به ترتیب زمانی که نمونه ۲۵٪ و ۳۵٪ از جیوه اشباع شده باشد.

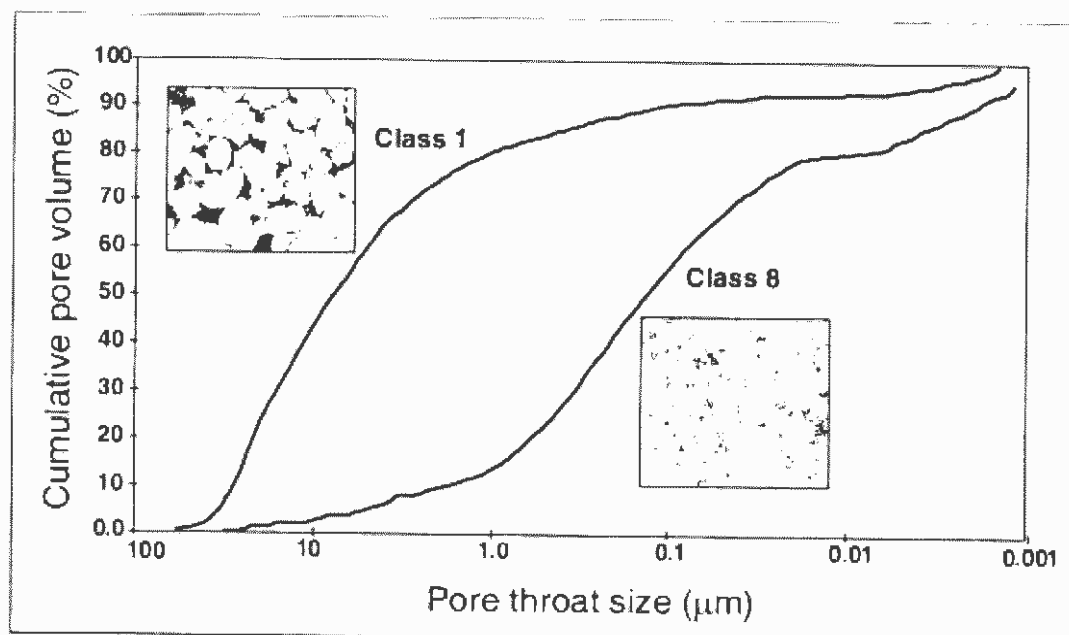
تراوایی محاسبه شده توسط معادلات فوق انطباق خیلی خوبی با تراوایی حاصل از مغزه‌ها دارند.

اندازه گلوگاه‌ها در یک نمونه می‌تواند تنوع زیادی داشته باشد. به عبارت دیگر اندازه گلوگاه‌ها در یک نمونه جورشدگی‌های مختلف نشان می‌دهد (شکل ۷-۳۰). با افزایش جورشدگی اندازه گلوگاه‌ها، کیفیت مخزن افزایش می‌یابد و بر عکس با کاهش جورشدگی اندازه گلوگاه‌ها، کیفیت مخزن کاهش می‌یابد. شکل ۷-۳۰ جورشدگی‌های مختلف را برای اندازه گلوگاه‌های سه نمونه متفاوت نشان می‌دهد. در شکل ۷-۳۱ به‌طور مثال توزیع گلوگاه‌های تخلخل برای دو گروه نمونه نشان داده شده است. نمونه کلاس ۱ دارای جورشدگی گلوگاه بهتر

و نیز اندازه بزرگتر می‌باشد، در صورتی که نمونه کلاس ۸ دارای جورشدگی گلوگاه ضعیف‌تر و نیز اندازه کوچکتر است. نمونه کلاس ۱ دارای تراوایی ۳۴۰ و نمونه کلاس ۸ دارای تراوایی ۰.۵ میلی‌داری است.



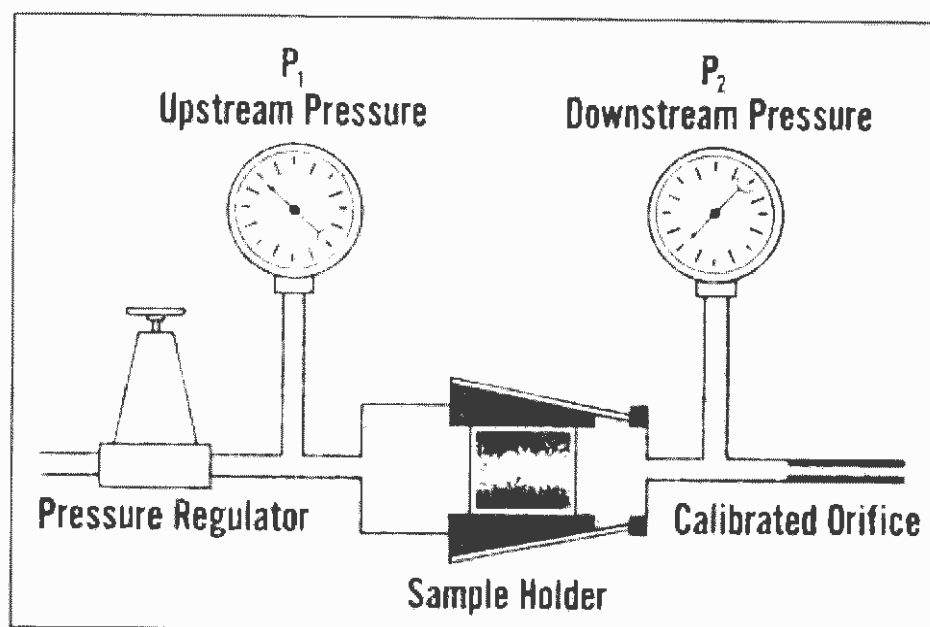
شکل ۷-۳۰ - تأثیر جورشدگی اندازه گلوگاه‌های خلل و فرج بر روی منحنی تزریق جیوه



شکل ۳۱-۷ - مقایسه‌ای بین منحنی اندازه گلوگاه‌های خلل و فرج برای دو نمونه متفاوت. نمونه متعلق به کلاس ۱ دارای گلوگاه‌های درشت (حدود ۱۰ میکرون) با جورشدگی خوب و نمونه متعلق به کلاس ۸ دارای گلوگاه‌های کوچک (حدود ۰.۱ میکرون) با جورشدگی ضعیف است. تراوایی در نمونه کلاس ۱ و کلاس ۸ به ترتیب ۲۴۰ و ۰.۵ میلی داری است.

۷-۵-۳ اندازه‌گیری تراوایی در آزمایشگاه (Measurement of permeability)

تراوایی مخزن می‌تواند در آزمایشگاه با استفاده از پلاگ (plug) اندازه‌گیری شود. در شکل ۷-۳۲ به‌طور شماتیک نحوه اندازه‌گیری تراوایی در یک نمونه سنگی نشان داده شده است.



شکل ۷-۳۲ - تصویری که به‌طور شماتیک اندازه‌گیری تراوایی را نشان می‌دهد

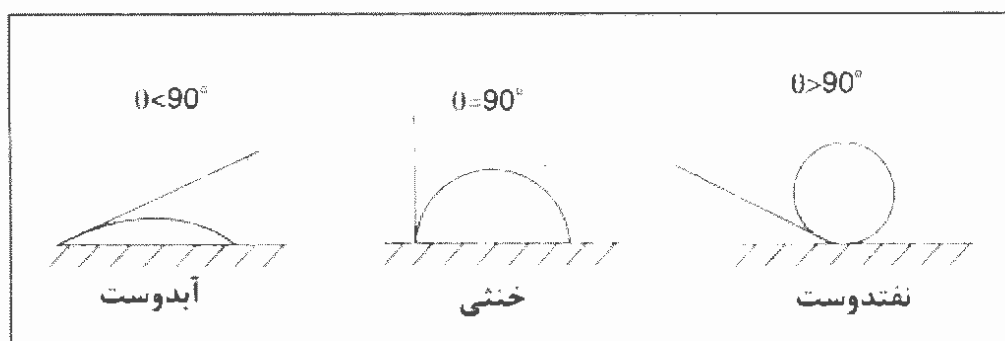
برای تعیین تراوایی از گاز خشک به عنوان یک سیال استاندارد استفاده می‌شود. زیرا این گاز کمترین واکنش را با سنگ‌ها دارد و به راحتی قابل استفاده است. در هنگام اندازه‌گیری تراوایی در آزمایشگاه، هوا (گاز خشک) به داخل نمونه‌ای با قطر و طول مشخص، خشک و تمیز

تزریق شده و جریان می‌یابد. سپس اختلاف فشار و سرعت جریان اندازه‌گیری شده و تراوایی توسط معادله دارسی محاسبه می‌گردد.

برای تعیین تراوایی افقی (K_h , horizontal permeability) نمونه‌ها به موازات سطوح لایه‌بندی گرفته می‌شوند. چنانچه تراوایی عمودی (K_v , vertical permeability) مدنظر باشد، پلاگ‌ها عمود بر سطوح لایه بندی گرفته می‌شوند. باید توجه داشت که مقدار تراوایی عمودی معمولاً کمتر تراوایی افقی می‌باشد. این به دلیل وجود سدهای تراوایی (permeability barriers)، نظیر سطوح غیرتراوای استیلولیتی و شیلی است که به موازات لایه بندی وجود دارند و نیز این که جهت یافتگی دانه‌ها در سطح بزرگتر به موازات لایه‌ها است.

۷-۵-۳ ترشدگی مخازن (Reservoir Wettability)

ترشدگی یک مخزن، تمایل یک سیال برای پخش شدن یا چسبیده شدن به سطوح حفرات است که این موضوع در حضور سیالات اختلاط نیافتنی صورت می‌گیرد. حفرات عموماً به وسیله نفت، گاز یا آب اشباع شده‌اند. شرایطی که تحت آن گاز می‌تواند قابلیت ترکندگی داشته باشد در ماوراء محدوده شرایط مخازن طبیعی قرار دارد. فقط نفت و آب قابلیت ترکندگی دارند. اگر هر سه فاز نفت و گاز و آب در یک مخزن حضور داشته باشند، فقط سیال ترکنده کوچکترین منافذ و سوراخ‌ها را اشغال می‌کند. ترشدگی به وسیله زاویه تماس (θ) بین سطوح میان حفرات و سطح تداخل بین سیالات مخلوط نشدنی اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۷-۳۳). اگر θ به صفر نزدیک شود قویاً ترشدگی به وسیله آب انجام می‌شود و سیستم آبدوست (water-wet) خواهد بود. اگر θ به 180° درجه نزدیک شود قویاً ترشدگی به وسیله نفت انجام می‌شود و سیستم نفتدوست (oil-wet) خواهد بود. در مطالعه‌ای که بر روی ۵۵ مخزن با ۲۷ نوع کربنات صورت گرفته مشخص شده که برعکس ماسه‌سنگ‌ها، ۸٪ کربنات‌ها آبدوست، ۸٪ آن‌ها حد واسط و ۸۴٪ از آن‌ها نفتدوست هستند.



شکل ۷-۳۳ - زاویه تماس (θ) برای نمونه‌های آبدوست، خنثی و نفتدوست

۶-۷ انواع مخازن هیدروکربنی

سنگ‌های مخزن بیشتر ماسه‌سنگی و کربناته هستند و به همین دلیل عمده بحث بر مطالعه این مخازن بوده و فقط به صورت گذرا مخزن‌هایی که کمتر معمول هستند، مثل مخازن موجود در سنگ‌های آذرین و دگرگونی، بررسی خواهد شد. در این کتاب مخازن هیدروکربنی به سه دسته اصلی ماسه‌سنگی، کربناته و غیرمعمول طبقه‌بندی می‌شود که به ترتیب به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۶-۷ مخازن ماسه‌سنگی (Sandstone Reservoirs)

یکی از مهم‌ترین نوع مخازن نفت و گاز دنیا، مخازن ماسه‌سنگی است. کیفیت خوب مخازن ماسه‌سنگی مدیون ماهیت آن‌هاست. ماسه‌سنگ‌ها نسبت به فرآیندهای دیاژنزی، در مقایسه با کربنات‌ها، کمتر حساسند بنابراین شانس باقی ماندن تخلخل اولیه در آن‌ها نسبتاً بالاست. کیفیت سنگ‌های مخزن ماسه‌سنگی به تخلخل و تراوایی آن‌ها بستگی دارد. این پارامترهای هیدرولیکی به بافت، ترکیب، وجود یا عدم وجود ماتریکس در زمینه و سیمان سنگ وابسته است. بدین ترتیب کیفیت مخزنی ماسه‌سنگ به منشأ، شرایط رسوبگذاری و محیط رسوبگذاری و نیز نهایتاً به محیط دیاژنزی آن‌ها بستگی دارد.

۱-۶-۷-۱ طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها

طبقه‌بندی‌های متفاوتی برای ماسه‌سنگ‌ها وجود دارد. بعضی از طبقه‌بندی‌ها بر پایه ترکیب کانی‌شناسی استوار شده‌اند و برخی دیگر به‌طور تجربی برای استفاده راحت در صحرا ابداع شده‌اند. امروزه تقسیم‌بندی‌ها به‌طور عمده بر پایه کانی‌شناسی و مشخصات بافتی صورت می‌گیرد. مهم‌ترین طبقه‌بندی‌هایی که امروزه بیشتر مورد استفاده اند، طبقه‌بندی فولک و پتی‌جان است.

شباهت طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها به ما این اجازه را می‌دهد که چهار نوع اصلی ماسه‌سنگ را معرفی نماییم:

- کوارتزآرنایت‌ها (quartz arenites)
- لیتیک‌آرنایت‌ها و ساب‌لیت‌آرنایت‌ها (litharenite and sublitharenites)
- آرکوزیک‌آرنایت‌ها (arkosic arenites)
- ماسه‌سنگ‌های گریوکی (greywacke sandstones)

۷-۶-۱-۲ عوامل کنترل کننده کیفیت مخازن ماسه سنگی

عوامل متعددی کیفیت یک مخزن ماسه سنگی را کنترل می کنند. در زیر به بررسی برخی از این عوامل که شامل فرایندهای دیاژنزی، ترکیب و بافت، عمق، گرادیان زمین گرمایی و نحوه دفن رسوبات است، پرداخته می شود.

۷-۶-۱-۲-۱ فرایندهای دیاژنزی (Diagenetic Processes)

به تمامی پدیده های فیزیکوشیمیایی که در رسوبات از زمان ته نشین شدن تا مرحله متامورفیسم رخ می دهد و باعث تغییر در آن ها می شود، دیاژنیز گفته می شود. فشردگی مکانیکی، فشردگی شیمیایی، سیمانی شدن، انحلال و جایگزینی و ایجاد شکستگی از فرایندهای دیاژنزی هستند که باعث تغییر تخلخل اولیه می شوند. فرایندهای دیاژنزی در مخازن ماسه سنگی هم می تواند سبب کاهش کیفیت سنگ مخزن و هم باعث افزایش آن گردد. به طور مثال، سیمانی شدن، کیفیت سنگ مخزن را کاهش داده و انحلال و شکستگی، با ایجاد منافذ، سبب افزایش تخلخل ثانویه و افزایش تراوایی در مخزن می شود.

تغییرات فیزیکی دیاژنیز شامل موارد زیر است:

* لغزش و چرخش دانه ها

* تغییر شکل دانه های شکل پذیر

* تغییر شکل دانه های شکننده

* شکستگی

فرایندهای شیمیایی دیاژنیز شامل موارد زیر است:

* سیمانی شدن

* انحلال

* انحلال فشاری

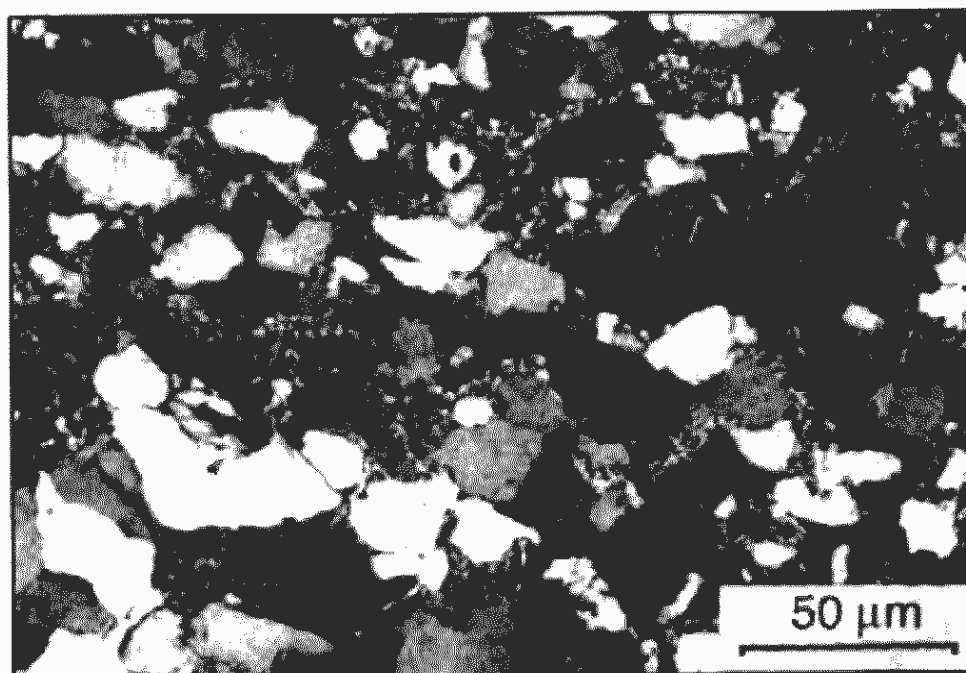
* گسترش کانی های درجا

فشردگی (Compaction)

فشردگی مکانیکی (Mechanical Compaction)

فشردگی مکانیکی عموماً در اثر فشار لیتواستاتیک اعمال شده و باعث کاهش حجم رسوبات می گردد. این امر، معمولاً با کاهش در حجم بین دانه های یا تخلخل همراه است. اما اگر دانه های شکل پذیر در رسوب وجود داشته باشد، احتمالاً کاهش حجم در دانه های تشکیل دهنده نیز

وجود خواهد داشت. اثرات حاصل از فشردگی مکانیکی شامل تغییر شکل پلاستیک قطعات سنگی، لغزش دانه‌ها، شکستگی دانه‌ها و نظم مجدد دانه‌ها می‌باشد (شکل ۷-۲۴).



شکل ۷-۲۴: فتومیکروگراف یک ماسه‌سنگ که به شدت فشرده شده و تمامی خلل و فرج آن مسدود شده است

روش‌های متعددی می‌تواند برای ارزیابی فشردگی به کار رود. ضریب فشردگی (compaction index) کاهش تخلخل اولیه را در اثر فشردگی محاسبه می‌کند. ضریب فشردگی به وسیله معادله زیر تعریف شود:

$$\text{ضریب فشردگی} = \left[\frac{IGV_0 - IGV}{IGV_0} \right] \times 100$$

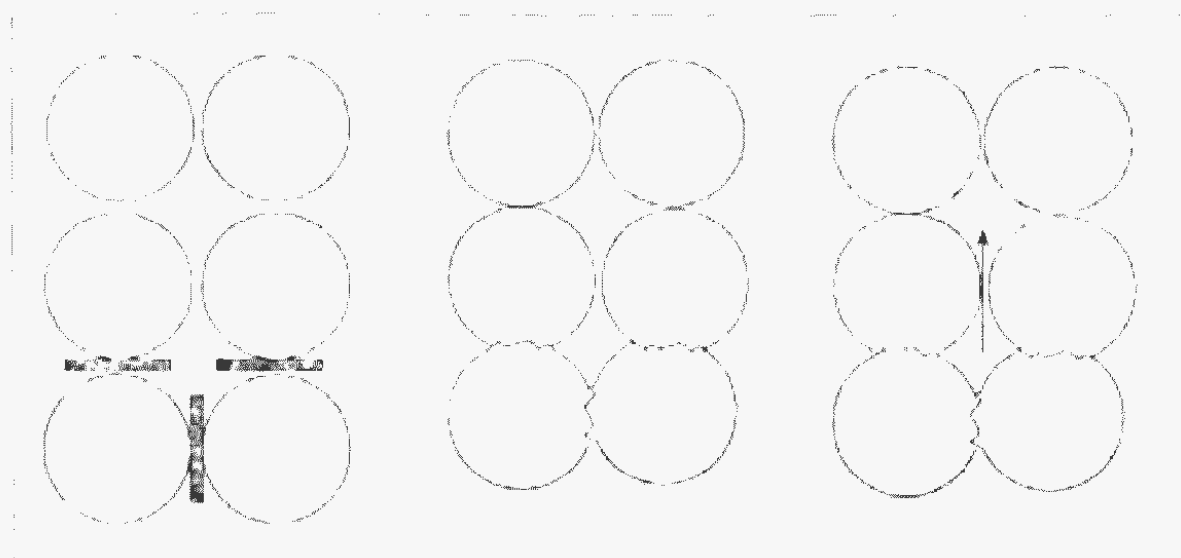
در این معادله IGV_0 عبارت است از فضای بین دانه‌ای اولیه که در زمان رسوبگذاری موجود بوده و IGV فضای بین دانه‌ای در حال حاضر است. IGV_0 را می‌توان با اطلاعات اندازه دانه و جورشدگی محاسبه نمود (با استفاده از شکل ۷-۲۶). IGV مجموع تخلخل بین دانه‌ای و سیمان سنگ است.

عمق دفن و فشار لیتواستاتیک متعاقب آن، زمان نسبی سیمانی شدن و ترکیب سنگ از جمله عوامل کنترل کننده مقدار فشردگی هستند.

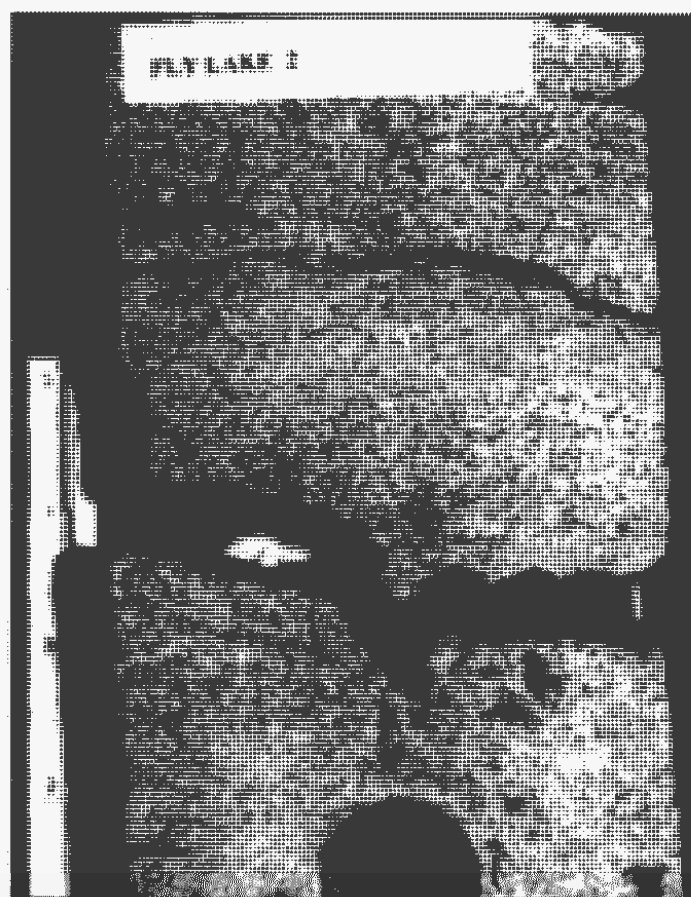
فشردگی شیمیایی (Chemical Compaction)

فشردگی شیمیایی کاهش حجم سنگ در اثر انحلال دانه‌های تشکیل دهنده در محل تماس دانه‌ها است (شکل ۷-۳۵). فشار طبقات بالایی و نیروهای تکتونیکی عوامل اصلی برای حل اجزای تشکیل دهنده سنگ می‌باشند. این فرآیند دیازنزای انحلال فشاری (pressure dissolution) نامیده می‌شود. فشردگی شیمیایی می‌تواند در مقطع نازک و نمونه

دستی به واسطه حضور استیلولیت، مرزهای محدب و مقعر دانه‌ها، تماس مضرس دانه‌ها تشخیص داده شود. وجود رس و مواد کربنی سبب تسهیل انحلال فشاری می‌شود (شکل ۷-۳۶). پدیده انحلال فشاری معمولاً سبب کاهش کیفیت مخزن می‌گردد مگر اینکه با درزه‌های کششی (tensional gashes) همراه باشد که سبب افزایش تخلخل می‌گردد.



شکل ۷-۳۵ - انحلال فشاری و ته‌نشت سیمان حاصل از آن

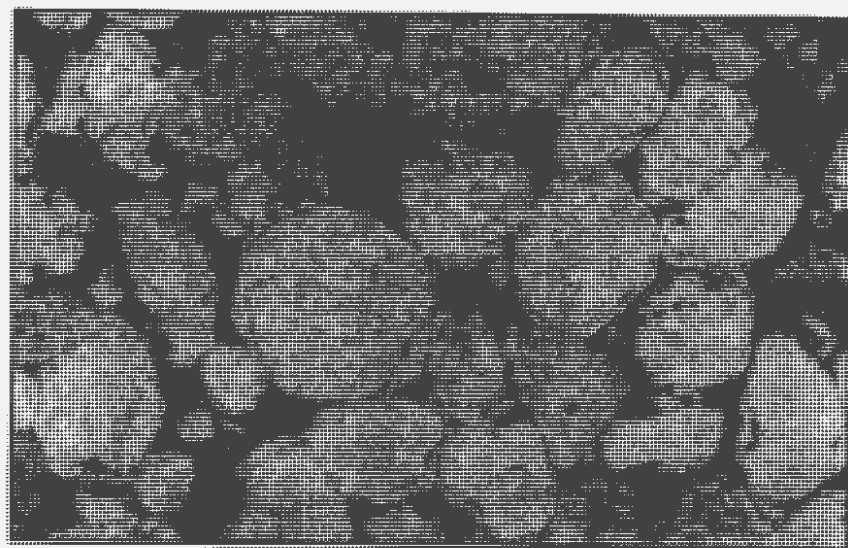


شکل ۷-۳۶ - فنو میکروگراف انحلال فشاری در یک ماسه‌سنگ

سیمانی شدن (Cementation)

در سنگ‌های رسوبی انواع زیادی از سیمان‌ها وجود دارد. این سیمان‌ها عمدتاً شامل کوارتز، رس و سیمان کربناته می‌باشد. سیمان کوارتزی در توالی سنگ‌های آواری سیلیسی معمولاً یک فاز اصلی دیاژتزی می‌باشد که بر روی کیفیت مخزن تأثیر می‌گذارد. این نوع سیمان در اکثر حوضه‌های رسوبی در دمایی بین ۶۰ تا ۱۴۵ درجه سانتیگراد شکل می‌گیرد. تاکنون منشاهای مختلفی برای سیمان کوارتزی پیشنهاد شده است. از مهم‌ترین منشاهای سیلیس برای سیمان کوارتزی می‌توان به دگرسانی یا حل شدن دانه‌های فلدسپات، حل شدن فازهای غیرپایدار سیلیس، تغییر و تبدیل در کانی‌های رسی، انحلال فشاری و جایگزینی کوارتز به وسیله سیمان کربناته اشاره کرد.

شکل ۷-۳۷ مقطع نازک از یک مخزن ماسه‌سنگی است که فضاهای خالی آن که عمدتاً از



نوع تخلخل بین دانه‌ای است به وسیله رزین آبی رنگ مشخص شده است. حاشیه زاویه‌دار بسیاری از دانه‌ها به دلیل وجود سیمان کوارتزی (overgrowth cement) است که روی دانه‌های کوارتز تخریبی رشد کرده است.

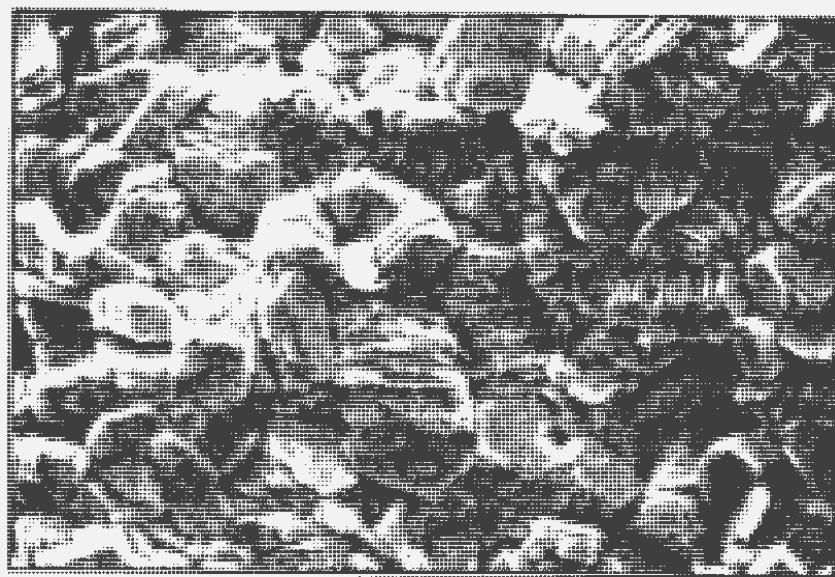
شکل ۷-۳۷ - فتومیکروگراف یک ماسه‌سنگ با تخلخل بین دانه‌ای و سیمان رشدی



شکل ۷-۳۸ نیز از نزدیک یک تخلخل بین دانه‌ای را نشان می‌دهد که بین سطوح شکل‌دار سیمان کوارتزی محدود شده است. بسیاری از مخازن ماسه‌سنگی مقداری از تخلخل خود را به وسیله این نوع سیمان از دست می‌دهند.

شکل ۷-۳۸ - فتومیکروگراف یک ماسه‌سنگ که نشان می‌دهد

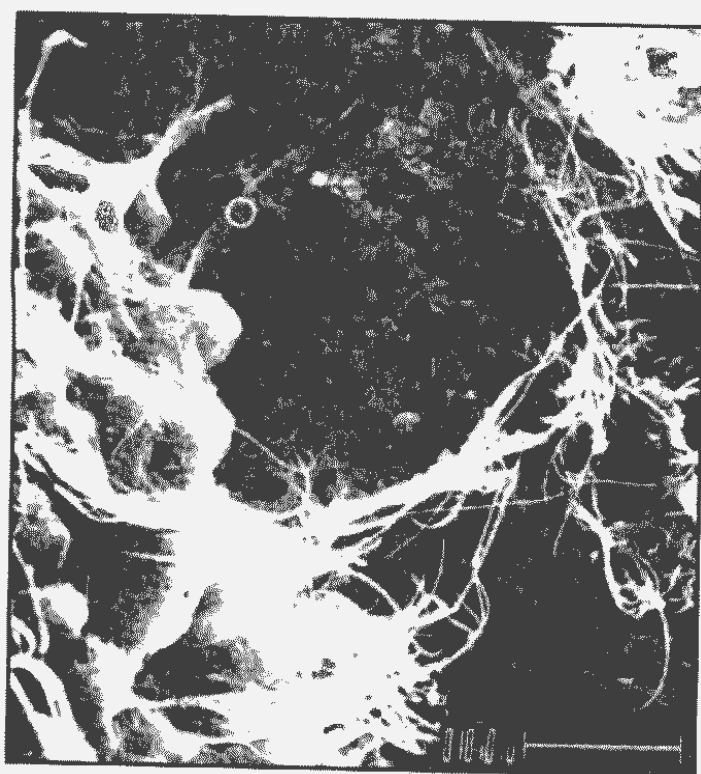
تخلخل بین دانه‌ای در بین سطوح کریستالی سیمان رشدی حفظ شده‌اند



شکل ۷-۳۹ - تصویر SEM از یک توده کانولیت

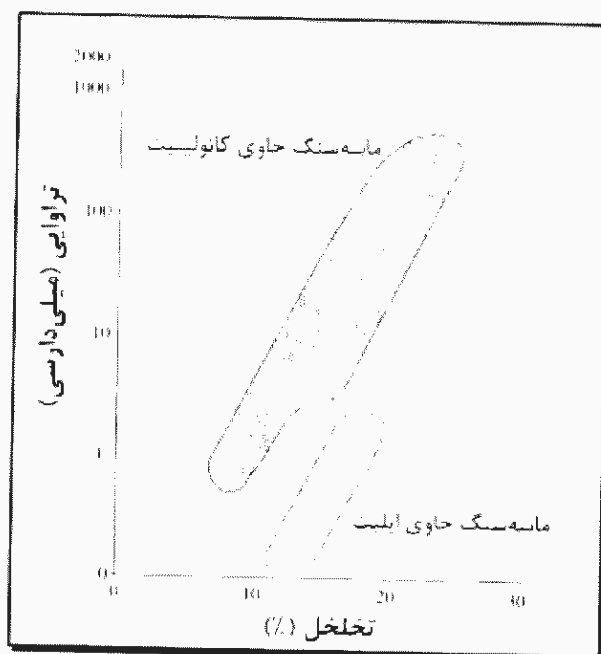
کانی‌های رسی انواع دیگری از سیمان‌ها می‌باشند که تأثیر زیادی بر کیفیت مخزن دارند. مهم‌ترین سیمان‌های رسی شامل کانولینیت، ایلیت، اسمکتیت و کلریت می‌باشند. بلورهای کانولن معمولاً به صورت صفحات کتابی (شکل ۷-۳۹) فضاهای خالی را اشغال می‌کنند ولی تأثیر زیادی

روی تراوایی سنگ ندارند. در صورتی که ایلیت در جازا معمولاً به صورت بلورهای نازک و بلند (موماند) دیده می‌شود (شکل ۷-۴۰) که معمولاً گلوگاه‌های خلل و فرج را می‌پوشاند و بنابراین مقدار کمی ایلیت ممکن است بر روی تراوایی اثر قابل توجهی بگذارد.



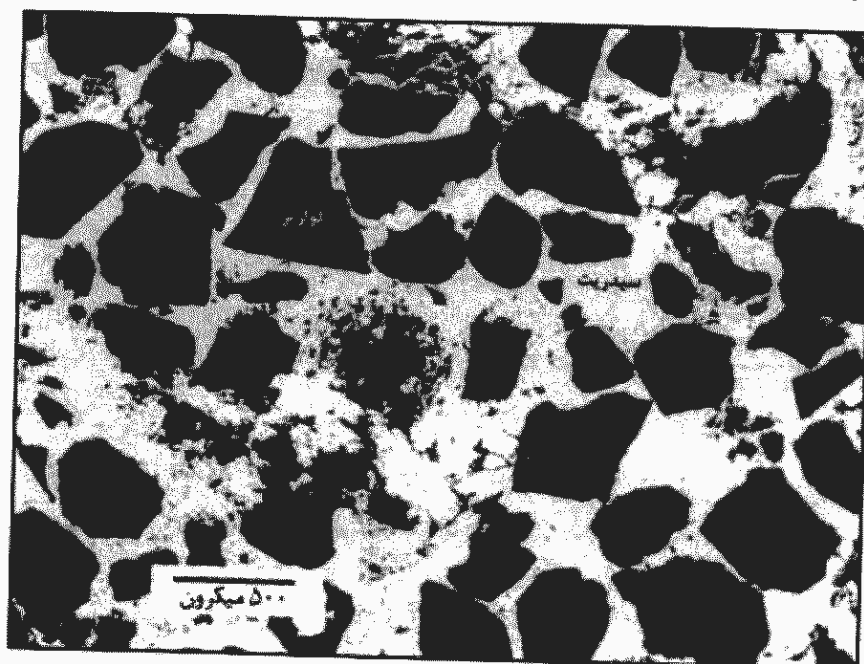
شکل ۷-۴۰ - تصویر SEM از ایلیت

شکل ۷-۴۱ نمودار تخلخل در برابر تراوایی را برای نمونه‌هایی با انواع مختلف سیمان‌های رسی (کانولینیت و ایلیت از میادین گازی دریای شمال) را نشان می‌دهد. در شکل دیده می‌شود که تخلخل بدون توجه به نوع کانی‌های رسی بین ۵ تا ۲۵ درصد در تغییر است، اما تراوایی برای ماسه‌سنگ‌های با سیمان کانولینیت، خیلی بیشتر از ماسه‌سنگ‌های با سیمان ایلیتی است.



شکل ۴۱-۷ - تأثیر کانولینیت و ایلیت بر روی تخلخل و تراوایی

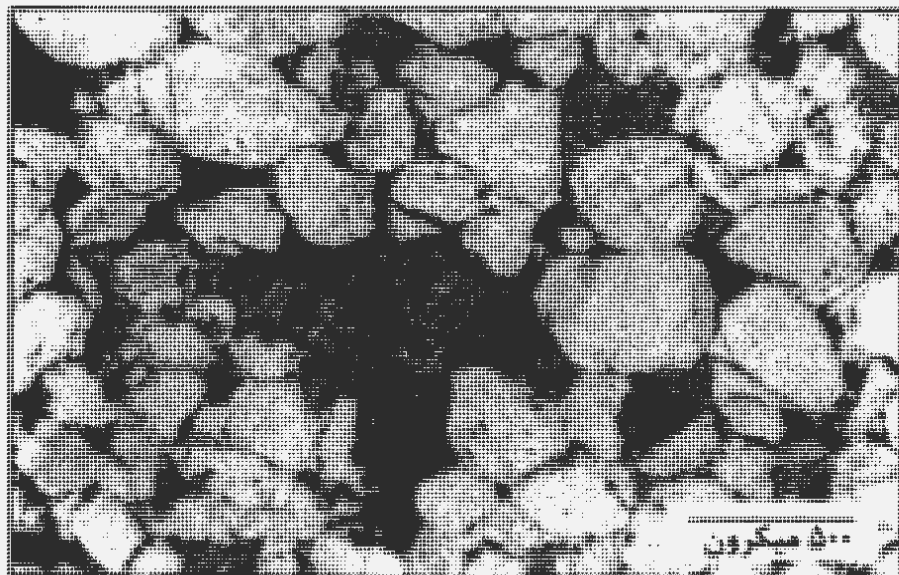
سیمان‌های کربناته عمدتاً شامل کلسیت، دولومیت و سیدریت می‌باشند. انواع مختلف سیمان کربناته تحت شرایط متفاوتی شکل می‌گیرند. برای مثال سیدریت، پایداری بسیار محدودی دارد و می‌تواند فقط در فشار بالای CO_2 و سولفور محلول کم و جایی که شرایط احیایی حکم‌فرماست به وجود آید. یک نسبت آهن به کلسیم بزرگتر از ۰/۰۵ نیز برای تشکیل آن به جای کلسیت در سازند لازم است. علی‌رغم محدودیت شرایط برای ته‌نشست سیمان سیدریتی، این سیمان می‌تواند در پهنه‌های وسیع و متنوعی از محیط‌های رسوبی مانند محیط‌های دریایی، لب شور و آب شیرین تشکیل شود. شکل ۴۲-۷ کاهش تخلخل یک نمونه ماسه‌سنگی را در اثر سیمان سیدریتی نشان می‌دهد.



شکل ۴۲-۷ - تصویر BSE ماسه‌سنگ دانه ریز که تمام خلل و فرج آن توسط سیمان سیدرینی پر شده است

انحلال (Dissolution)

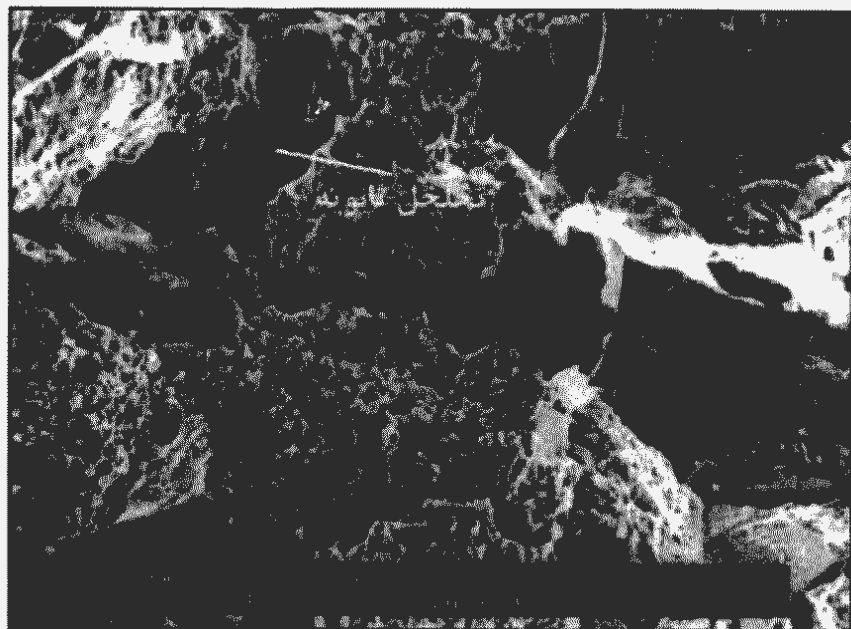
شکل ۷-۴۳ عکسی از مقطع نازک یک ماسه‌سنگ را نشان می‌دهد. دقت کنید که چندین فضای خالی خیلی بزرگ در آن وجود دارد. این فضاها، نسبت به اندازه دانه‌ها، آن قدر



شکل ۷-۴۳ - تحلیل ثانویه در یک ماسه‌سنگ

بزرگند که بعید به نظر می‌رسد که به صورت اولیه در هنگام رسوبگذاری شکل گرفته باشند. این‌ها فضاها، انحلالی ثانویه هستند که در اثر حل شدن یک دانه حاصل شده است.

تخلخل ثانویه معمولاً به وسیله شسته شدن سیمان‌ها و یا دانه‌های ناپایدار مثل فلدسپات ایجاد می‌شود (شکل ۷-۴۴). یک نکته مهم این است که بسیاری از تخلخل‌های ثانویه در زیر



شکل ۷-۴۴ - تصویر SEM از یک تخلخل ثانویه

ناپیوستگی‌ها وجود دارند که تأیید کننده تأثیر آب‌های متوریک در انحلال ماسه‌سنگ‌ها و به وجود آمدن تخلخل ثانویه است. پس از ایجاد تخلخل، ماسه‌سنگ‌ها در زیر رسوبات پیشرونده بالای ناپیوستگی‌ها ممکن است دفن شوند.

منشأ دیگر محلول‌های اسیدی در مخازن که سبب انحلال می‌شوند، می‌تواند از پختگی حرارتی کروژن باشد. در طی پختگی حرارتی کروژن، قبل از شکل‌گیری هیدروکربن، اسیدهای آلی از کروژن رها می‌شود که خود عامل مهمی در ایجاد تخلخل ثانویه است.

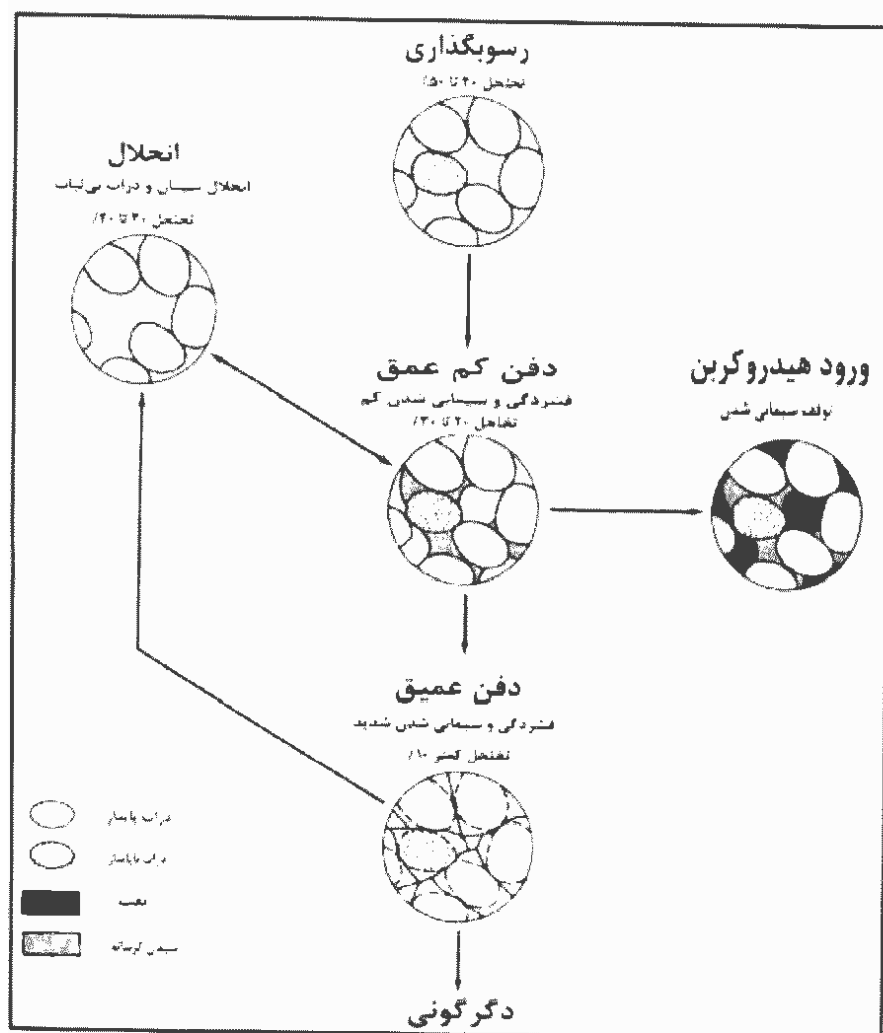
جدول ۷-۱ خلاصه‌ای از اثرات برخی فرآیندهای دیاژنزی مختلف را روی کیفیت مخزن نشان می‌دهد.

جدول ۷-۱ اثر برخی فرآیندهای دیاژنزی بر روی تخلخل

فرآیند دیاژنزی	نتیجه	اثر بر مخزن
سیمانی شدن	تشکیل سیمان‌هایی نظیر کوارتز و کلسیت	استحکام و کاهش تخلخل سنگ
رسوب رس	تشکیل رس‌هایی نظیر گائولینیت و ایلیت	کاهش ناچیز تخلخل
انحلال	شستشوی سیمان و دانه‌های ناپایدار	افزایش تخلخل
فشردگی	نظم مجدد دانه‌ها	کاهش تخلخل
ریزشکستگی	شکسته شدن دانه‌ها	افزایش ناچیز تخلخل

روندهای ممکن فرآیندهای دیاژنزی برای ماسه‌سنگ‌ها در شکل ۷-۴۵ نشان داده شده است. در ابتدا ماسه‌ها با تخلخلی در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد نهشته می‌شوند. در مرحله دفن کم عمق (shallow burial) در اثر فشردگی و سیمانی شدن جزئی تخلخل تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. دفن عمیق (deep burial) می‌تواند منجر به از بین رفتن تمام تخلخل به وسیله سیمانی شدن و فشردگی شود. در تمام مراحل دفن کم عمق و عمیق تخلخل ثانویه ممکن است به وسیله

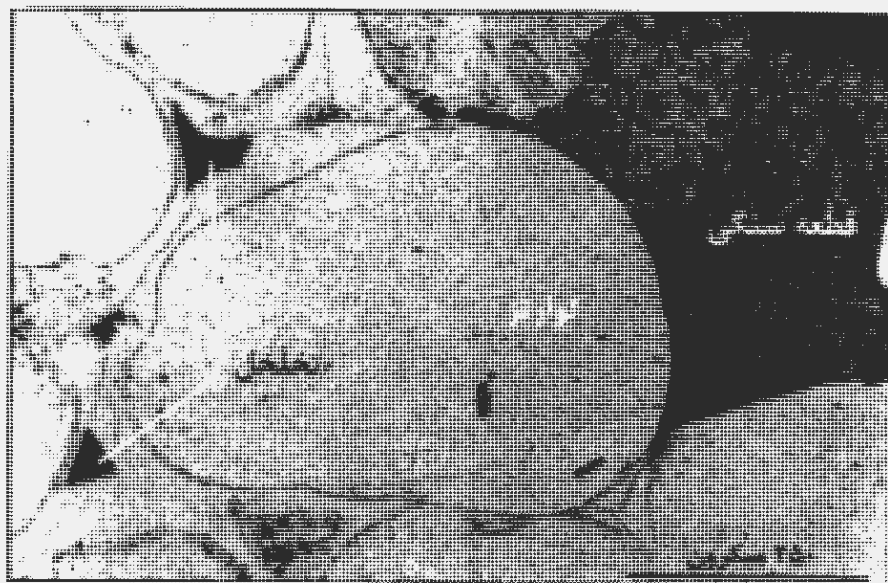
پدیده انحلال ایجاد شود. سنگ‌های مخزن خوب ممکن است در اعماق، جایی که بیشتر تخلخل اولیه به وسیله تراکم و سیمانی شدن از بین می‌روند، به دلیل انحلال و شکل‌گیری تخلخل ثانویه، یافت شوند. بهترین حالتی که ممکن است برای ماسه‌ها اتفاق بیافتد، ورود نفت و گاز به فضاهای خالی آن‌هاست. موقعی که این اتفاق افتاد، سیمانی شدن روی نمی‌دهد و تخلخل، فقط در اثر فشردگی کاهش می‌یابد.



شکل ۷-۴۵ - روندهای ممکن فرآیندهای دیاژنزی برای ماسه‌سنگ‌ها

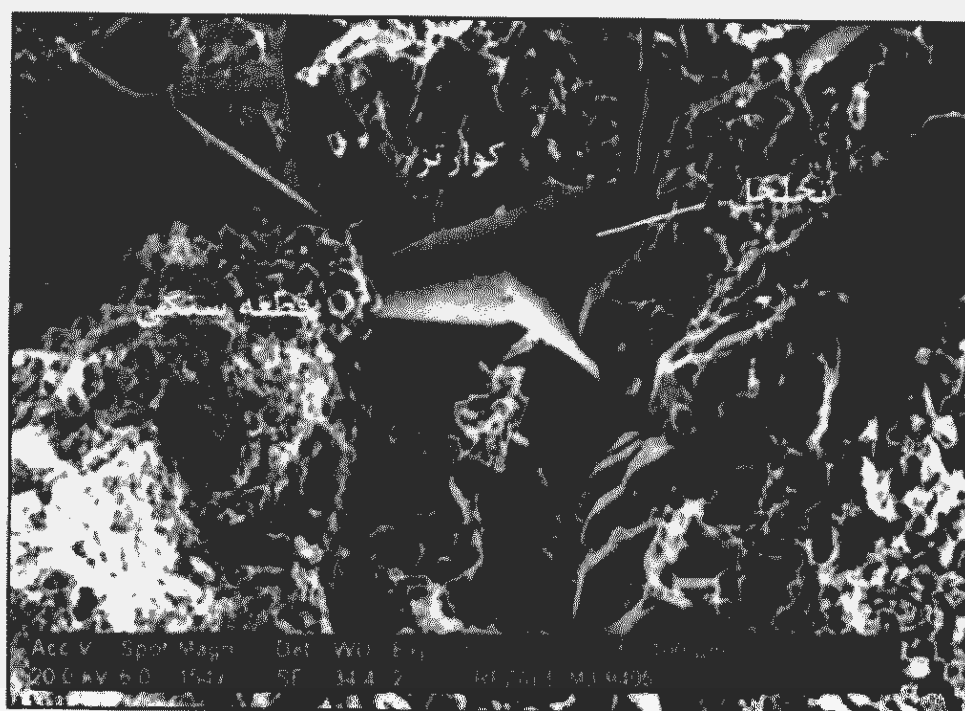
۶-۲-۱-۶-۲ ترکیب و بافت (Composition and Texture)

ترکیب آواری ماسه‌سنگ‌ها توسط منشأ رسوبات و فرآیندهای رسوبگذاری کنترل می‌شود. میزان فشردگی در ماسه‌سنگ‌های غنی از خرده سنگ‌های انعطاف پذیر، زیاد می‌باشد. همان‌طوری که نسبت خرده سنگ‌ها نسبت به کوارتز افزایش می‌یابد میزان تخلخل نیز کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که در رسوبات با خرده سنگ‌های کمتر کیفیت مخزن افزایش پیدا می‌کند. فشردگی مکانیکی یک رابطه مستقیم با ترکیب ماسه‌سنگ‌ها دارد. همان‌طوری که نسبت خرده سنگ‌ها افزایش می‌یابد میزان فشردگی نیز افزایش می‌یابد. شکل ۴۶-۷ و ۴۷-۷



نشان می‌دهند که چگونه تخلخل بین دانه‌های کوارتز سیمانی شده حفظ می‌شود و چگونه در جایی که خرده سنگ‌ها تغییر شکل پلاستیک دارند، تخلخل از بین می‌رود.

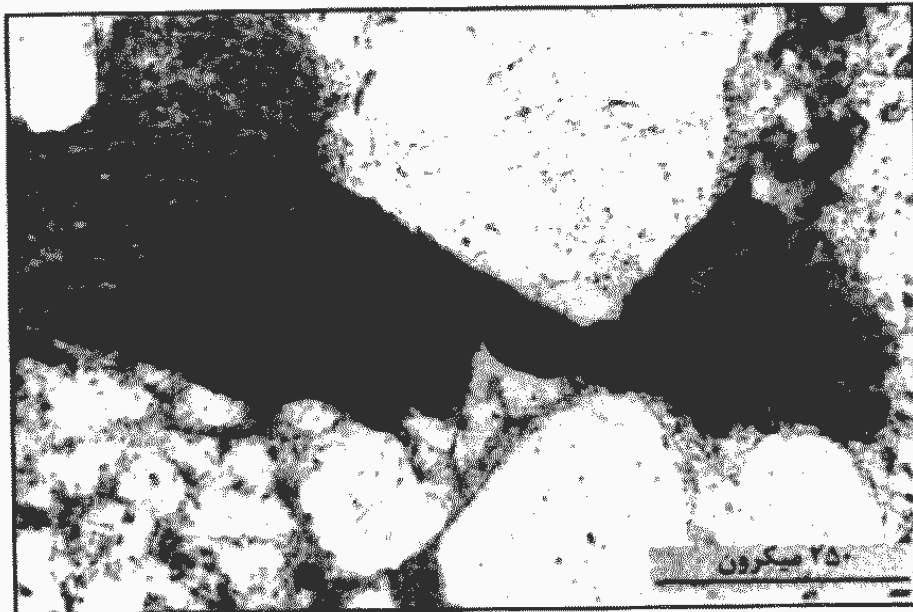
شکل ۴۶-۷ - مقایسه‌ای بین مرز کوارتز-کوارتز و مرز کوارتز-قطعه سنگ در مرز کوارتز-کوارتز. همان کوارتز گسیش یافته و تا حدی تخلخل اولیه حفظ شده است (سمت چپ تصویر)، در مرز کوارتز-قطعه سنگ به دلیل تغییر شکل پلاستیک قطعه سنگ تمامی حلال و فرج از بین رفته است (سمت راست تصویر)



شکل ۴۷-۷ - تصویر SEM در مورد موضوع بیان شده در شکل ۴۶-۷

سه فاکتور زیر در صورت وجود قطعات شکل‌پذیر سبب فشردگی بیشتر در ماسه‌سنگ‌ها و لذا کاهش تخلخل می‌گردد:

(A) سیمان کوارتزی نمی‌تواند در محل تماس بین دانه‌های کوارتز و خرده سنگ‌ها توسعه پیدا کند. در حالی که در محل تماس دانه‌های کوارتز، سیمان سبب استحکام سنگ می‌شود. لذا با افزایش خرده سنگ‌ها، مقدار سیمان کوارتزی کم می‌شود. بنابراین گسترش سیمان کوارتزی هم‌زمان با زیاد شدن دانه‌های کوارتز افزایش می‌یابد. گسترش سیمان کوارتزی اولیه می‌تواند فشار طبقات بالایی را در یک سطح وسیع پخش کرده و بنابراین مانع فشردگی بعدی می‌شود.

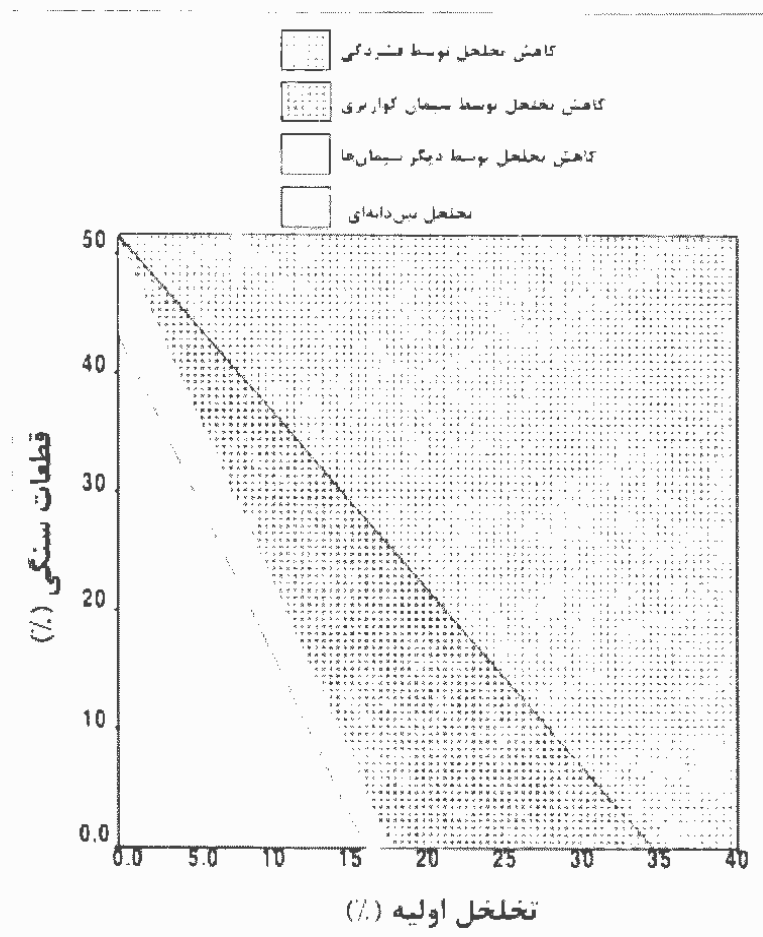


(B) خرده سنگ‌های شکل‌پذیر می‌توانند به سرعت تغییر شکل پیدا کرده و در فضا‌های خالی مجاور رانده شوند و تخلخل را کاهش دهند. در چنین حالتی همچنین مقدار زیادی از حجم رسوبات کاهش می‌یابد (شکل ۷-۴۸).

شکل ۷-۴۸ - کاهش تخلخل در اثر تغییر شکل پلاستیک یک قطعه سنگی سیلی

(C) خرده سنگ‌های شکل‌پذیر می‌توانند خرد شده و به صورت ماتریکس دروغین (pseudomatrix) درآیند. این عمل سبب کاهش تخلخل و همچنین تسریع انحلال فشاری شده که نهایتاً سبب کاهش کیفیت مخزن شود.

شکل ۷-۴۹ نشان می‌دهد که با شناسایی دقیق محیط رسوبی و کنترل‌کننده‌های دیارنتیکی، امکان پیش‌بینی کیفیت مخزن وجود دارد. این شکل که متعلق به یکی از مخازن هیدروکربنی در جنوب استرالیا است، نشان می‌دهد که از یک محیط رودخانه بریده‌بریده (braided river) به یک محیط رودخانه ماندری و بادی میزان قطعات سنگی کاهش یافته و مصادف آن مقدار تراکم مکانیکی کاهش و تخلخل اولیه باقیمانده افزایش یافته است.

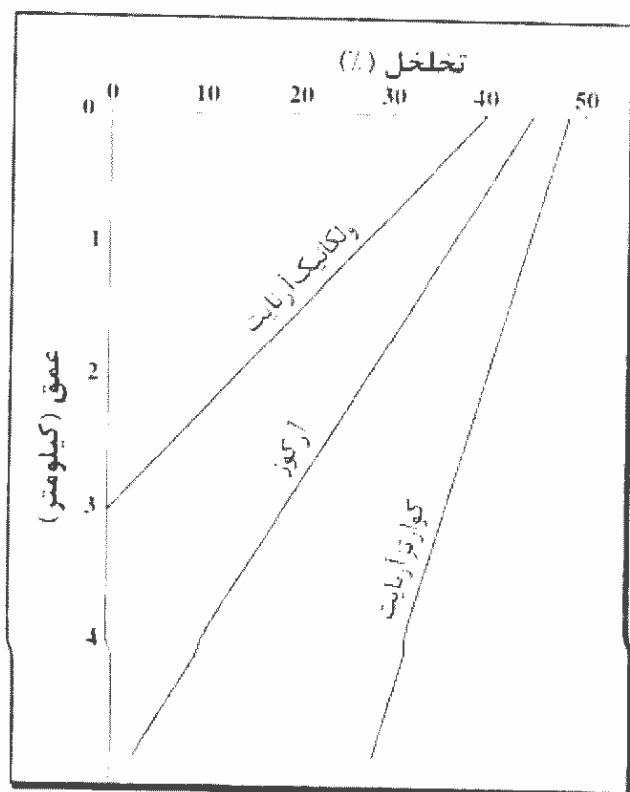


شکل ۷-۴۹ - دیاگرامی که اثر محتوای قطعات سنگی را بر روی تراکم و سیمان کوارتزی نشان می‌دهد. با افزایش مقدار قطعات سنگی، کاهش IGV توسط فنردگی افزایش می‌یابد، در حالی که مقدار سیمان کوارتزی کاهش می‌یابد.

در مورد تأثیر بافت بر روی کیفیت مخزن در صفحات قبل بحث شد.

۷-۶-۱-۲-۳ عمق (Depth)

بیشتر رسوبات ماسه‌ای عهد حاضر دارای تخلخل بین ۴۰ تا ۵۰ درصد در طی نهشته شدن می‌باشند. عموماً این تخلخل با افزایش عمق دفن کاهش می‌یابد. میزان کاهش تخلخل با افزایش عمق دفن برای ماسه‌سنگ‌های با ترکیب متفاوت، مختلف است (شکل ۷-۵۰). ماسه‌های ولکانیک ژاپن که از نظر شیمیایی ناپایدارند، تخلخل خود را با افزایش عمق، به سرعت از دست می‌دهند و در عمق ۲ تا ۳ کیلومتری تخلخل آن‌ها از ۱۰ درصد هم کمتر می‌شود. برای ماسه‌سنگ‌های غنی از فلدسپات دریای شمال، تخلخل تا عمق‌های بیشتری می‌تواند حفظ شود، در حالی که برای ماسه‌سنگ‌های کوارتزی دلتای نیجریه که از نظر مکانیکی و شیمیایی پایدارند، تخلخل می‌تواند تا عمق ۴ تا ۵ کیلومتری هم حفظ شود. بنابراین ترکیب شیمیایی ماسه‌ها یکی از فاکتورهای مهم کنترل کننده میزان کاهش تخلخل با افزایش عمق است.

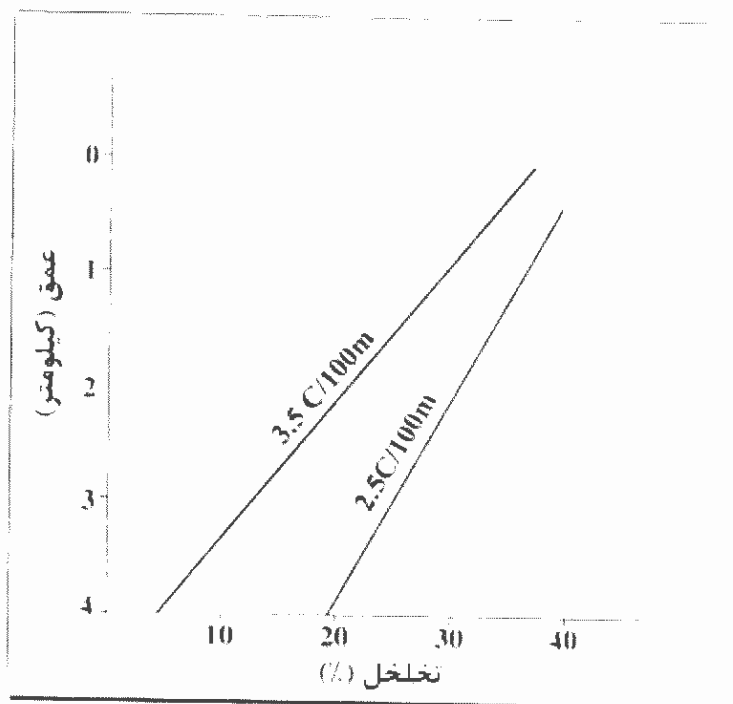


شکل ۵۰-۷ - کاهش تخلخل با افزایش عمق برای
ماسه‌سنگ‌های با ترکیب متفاوت

فلدسپارها به دلیل اینکه به آسانی به رس تبدیل می‌شوند، نمی‌توانند سنگ مخزن خوبی بسازند و نیز در ماسه‌سنگ‌های لیت‌آریاتی، قطعات سنگی به آسانی، تحت تأثیر فشردگی، به صورت پلاستیک تغییر شکل داده و تخلخل و به تبع آن تراوایی سنگ کاهش می‌یابد. با این وجود، این احتمال وجود دارد که تعداد زیادی از مخازن با جنس لیتیک و فلدسپاتیک وجود داشته باشند، به خصوص آن‌ها که جوان‌ترند و در عمق زیادی قرار نگرفته و زیاد حمل نشده‌اند.

۷-۶-۱-۲-۴ گرادیان زمین‌گرمایی (Geothermal Gradient)

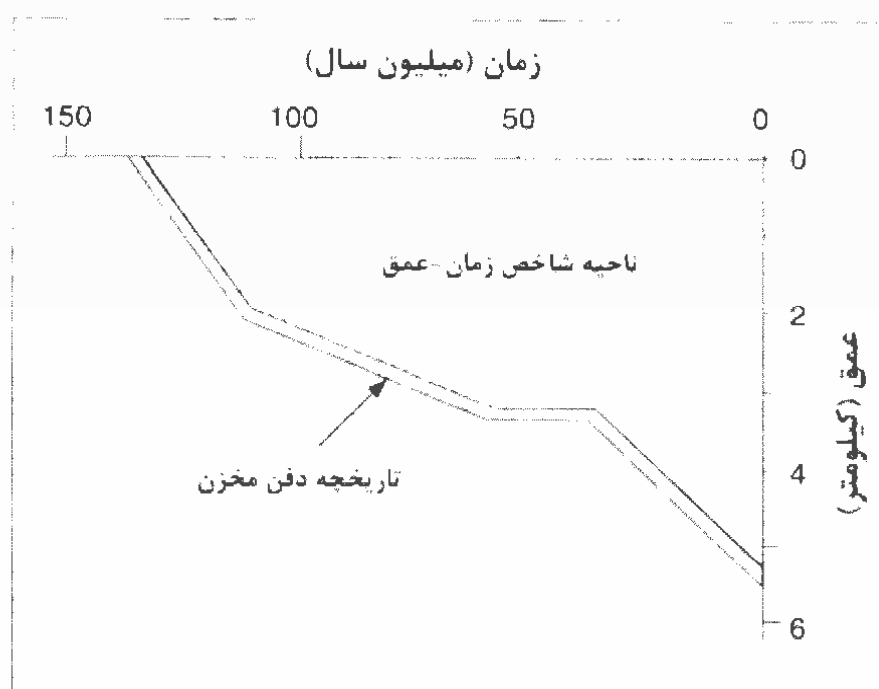
اثر گرادیان زمین‌گرمایی روی واکنش‌های شیمیایی نیز باعث تغییر در میزان از بین رفتن تخلخل نسبت به عمق می‌شود. معمولاً گرادیان زمین‌گرمایی بیشتر، کاهش بیشتر تخلخل با عمق را باعث می‌شود. شکل ۷-۵۱ رابطه تخلخل و عمق را برای ماسه‌سنگ‌های متعلق به دو منطقه با درجه زمین‌گرمایی متفاوت در حوضه شمال شرقی اقیانوس آرام را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که کاهش تخلخل با افزایش عمق در مناطق با گرادیان زمین‌گرمایی بالاتر، بیشتر است.



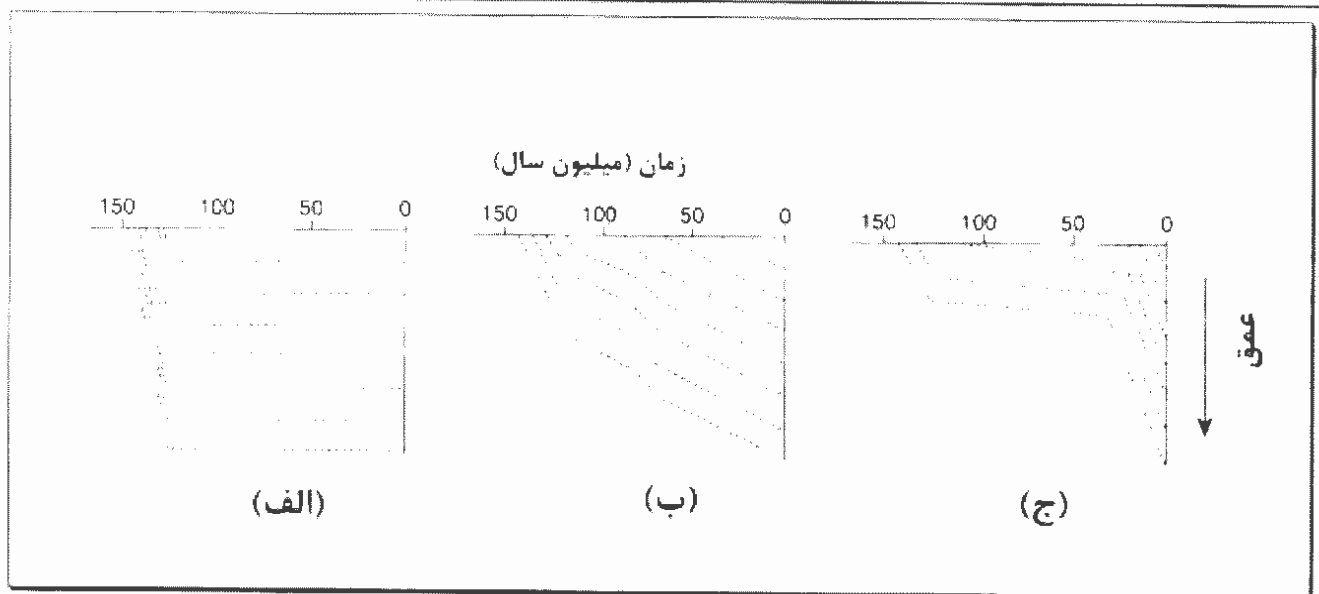
شکل ۵۱-۷ - رابطه تخلخل و عمق برای ماسه‌سنگ‌های متعلق
به دو منطقه با درجه زمین‌گرمایی متفاوت

۷-۶-۱-۲-۵ نحوه دفن رسوبات (Burial History)

نحوه دفن رسوبات در یک حوضه رسوبی و یا به عبارت دیگر مدت تدفین نیز در کاهش تخلخل در ماسه‌سنگ‌ها مؤثر است. بر اساس آزمایشات تجربی، مشخص شده است که زمان به تنهایی می‌تواند سبب کاهش تخلخل شود، حتی اگر عمق تدفین، حرارت و فشار ثابت بمانند. شاخص زمان-عمق (Time-Depth Index, TDI)، که ناحیه‌ای از دیاگرام تاریخچه تدفین است که به وسیله منحنی تدفین مخزن و محورهای دیاگرام محصور شده است (شکل ۷-۵۲)، برای اثر تاریخچه تدفین بر تکامل تخلخل ماسه‌سنگ‌ها به کار برده می‌شود. مطالعه بر روی اطلاعات مخزن ماسه‌سنگی به سن ژوراسیک پایانی تا ترشیری از هفت حوضه رسوبی در برزیل ارتباط متقابل بین تخلخل و TDI را به خوبی نشان می‌دهد. این مطالعه نشان می‌دهد که در طی تاریخچه دفن مخازنی که دیرتر به حداکثر عمق رسیده‌اند، یعنی دارای TDI کمتری هستند، نسبت به مخازنی که سریعاً دفن شده و دارای TDI زیادی هستند، تخلخل بیشتری را دارا می‌باشند. TDI که بر حسب کیلومتر در میلیون سال است و بیانگر چگونگی تدفین رسوب است، می‌تواند در پیشگویی تخلخل مخازن ماسه‌سنگی به کار برده شود. در مثال شکل ۷-۵۳ سه تاریخچه تدفین متفاوت نشان داده شده است که به راحتی می‌توان حدس زد که تخلخل در مخزن ج با توجه به اینکه با سرعت کمتری به عمق نهایی رسیده است، به ترتیب از ب و الف بیشتر است.



شکل ۷-۵۲ - دیاگرام تاریخچه تدفین یک مخزن فرضی را که در آن شاخص زمان-عمق، ناحیه‌ای که به وسیله منحنی تدفین مخزن و محورهای دیاگرام محصور شده است، را نشان می‌دهد



شکل ۷-۵۳ - دیاگرام‌های سه تاریخچه تدفین متفاوت که تخلخل در مخزن ج با توجه به اینکه با سرعت کمتری به عمق نهایی رسیده است، به ترتیب از ب و الف بیشتر است

۷-۶-۱-۳ انواع تخلخل در ماسه‌سنگ‌ها

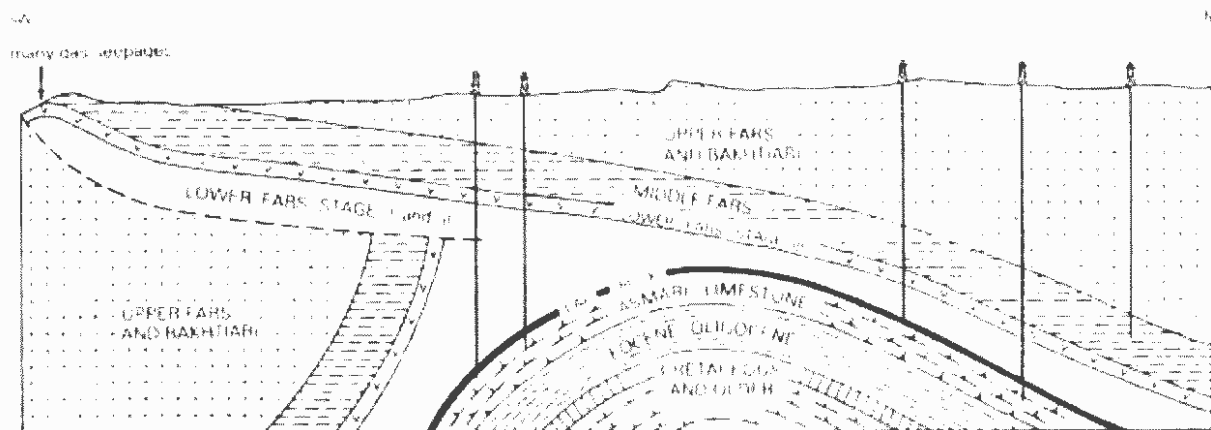
معمولاً در ماسه‌سنگ‌ها چهار نوع تخلخل اصلی وجود دارد که شامل تخلخل بین دانه‌ای (اولیه)، ریزتخلخل، تخلخل انحلالی و تخلخل شکستگی است. ریزتخلخل به صورت خلل و فرج کوچک (با قطر کوچکتر از ۱ میکرون) است که بیشتر همراه با کانی‌های رسی خصوصاً درج‌ازا است. تخلخل انحلالی وقتی حاصل می‌شود که دانه‌های اصلی یا سیمان‌ها به‌طور بخشی یا کامل حل شوند. تخلخل شکستگی بر اثر تنش بر سنگ‌ها ایجاد می‌شود.

تخلخل در ماسه‌ها و ماسه‌سنگ‌ها در درجه اول با جورشدگی آن‌ها بستگی دارد، به‌طوری‌که با افزایش جورشدگی، میزان تخلخل افزایش می‌یابد. نحوه آرایش دانه‌ها، سیمانی شدن، محتوای رس و شکل دانه‌ها نیز از دیگر عوامل کنترل‌کننده تخلخل هستند. عموماً تخلخل ماسه‌سنگ‌های تولیدکننده نفت بین ۱۰ تا ۴۰ درصد می‌باشد.

۷-۶-۲ مخازن کربناته (Carbonate Reservoirs)

بیش از ۶۵٪ هیدروکربن‌های خاورمیانه در مخازن کربناته هستند. مخازن کربناته حاوی بیش از ۴۰ درصد نفت تمامی میادین اصلی و ۵۰ درصد میادین خیلی بزرگ (giant oil field) است. سنگ‌های مخزن کربناته در میدان آغاچاری ایران (شکل ۷-۵۴) روزانه بیش از ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب نفت از حدود ۳۶ چاه تولید کرده‌اند. سنگ‌های کربناته با مجموعه خصوصیات ژنز، دیاژنز و پتروفیزیک خاص خود مشخص می‌شوند. منشأ سنگ‌های کربناته، بر خلاف سنگ‌های تخریبی، در درون حوضه و یا نزدیک آن است. بیشتر آن‌ها منشأ آلی داشته و محدوده وسیعی

از اندازه ذرات را شامل می‌شود. در سنگ‌های کربناته تخلخل اولیه به سرعت از طریق پدیده‌های دیافرنزی کاهش می‌یابد.



شکل ۷-۵۴ - نیمرخ زمین‌شناسی میدان آغاچاری

۷-۶-۲-۱ اجزای تشکیل دهنده کربنات‌ها

دانه‌های اصلی و ماتریکس، اجزا اصلی رسوبات کربناته هستند. ماتریکس رسوبات آهکی عمدتاً میکریت (micrite) است. میکریت به وسیله بافت دانه‌ای که شامل بلورهای کلسیت نیمه شکل دار تا بی شکل با اندازه بین ۱ تا ۴ میکرون است، مشخص می‌شود. طرق مختلفی برای تولید میکریت وجود دارد که شامل ته‌نشست شیمیایی، قطعات جلبکی میکروسکوپی، خرد شدن قسمت‌های سخت بی‌مهرگان، متلاشی شدن ناشی از فعالیت‌های جلبکی، پیوسته میکروارگانیسم‌ها و غیره است. وجود یا عدم وجود میکریت در رسوبات کربناته یک روش خوب برای تشخیص انرژی محیط رسوبی است.

اجزای کربنات (دانه‌های اصلی و آلوک‌ها) شامل موارد زیر است:

- دانه‌های اسکلتی (skeletal grains)

- اووئیدها (ooids)

- پلت‌ها (pellets)

- پلوئیدها (peloids)

- پیزولیت‌ها (pisolites)

- کورتوئیدها (cortoids)

- دانه‌های به هم پیوسته (aggregate grains)

- اینتراکلاست (intraclast)

- اونکوئیدها (oncoids) و

- اکستراکلاست (extraclast)

۷-۶-۲- طبقه‌بندی سنگ‌های آهکی

طبقه‌بندی سنگ‌های آهکی غالباً بر اساس تنوع بافتی آن‌هاست. تقسیم‌بندی‌های متعددی در مورد سنگ‌های آهکی وجود دارد که در اینجا اشاره‌ای به طبقه‌بندی فولک و دانه‌ام و آرچی می‌شود.

طبقه‌بندی فولک

طبقه‌بندی فولک برای سنگ‌های آهکی شباهت زیادی به طبقه‌بندی ماسه‌سنگ‌ها دارد. دانه‌های آلوکم، میکریٹ و کلسیت اسپاری قابل قیاس با دانه‌های ماسه، ماتریکس رسی و سیمان‌ها در ماسه‌سنگ‌ها است (شکل ۷-۵۵). در این طبقه‌بندی، بخش‌های مختلف سنگ به‌طور مثال به صورت زیر خلاصه شده‌اند: bio (فسیل)، oo (اووئید)، pel (پلوئید)، intra (اینتراکلاست)، mic (میکرایت) و spar (کلسیت اسپاری) و نامگذاری‌های ایجاد شده مانند بایوسپارایت، پل میکرایت و اووسپارایت می‌باشد. اسامی سنگ‌ها در طبقه‌بندی فولک بستگی به آلوکم‌های اصلی، سیمان و ماتریکس دارد و یک سری توصیفات مناسب ممکن است در ابتدای قسمت اصلی اسم بیاید.

Over / micrite matrix				Subequal spar & micrite	Over / spar cement		
0-1% Allochems	1-10% Allochems	10-50% Allochems	Over 50% Allochems		Sorting poor	Sorting good	Rounded & abraded
Micrite & dismicrite	Fossiliferous micrite	Sparse biomicrite	Packed biomicrite	Poorly washed biosparite	Unsorted biosparite	Sorted biosparite	Rounded biosparite
Micrite matrix				Sparry calcite cement			

شکل ۷-۵۵ - طبقه‌بندی فولک برای سنگ‌های آهکی

طبقه‌بندی دانه‌ام

تقسیم‌بندی دانه‌ام (شکل ۷-۵۶) در میان زمین‌شناسان نفت به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. این تقسیم‌بندی سه مشخصه دارد:

- توسط یک زمین‌شناس نفت و برای استفاده زمین‌شناسان نفت طراحی شده است.
- این تقسیم‌بندی غالباً احتیاج به مطالعات میکروسکوپی دقیق برای نام‌گذاری ندارد.
- بر جنبه‌های بافتی رسوبگذاری که تخلخل و تراوایی را کنترل می‌کند متکی است.
- واژه‌شناسی آن ساده و برای همه قابل استفاده است.

تقسیم‌بندی دانه‌ام با کمی تغییر توسط افراد دیگر شامل دسته‌های زیر است:

- باندستون (boundstone): سنگ‌های کربناتی برجا که در آن اجزای اولیه در حین رسوبگذاری به هم پیوسته‌اند. اگر یک چارچوب سخت توسط فسیل‌های توده‌ای در حال رشد ایجاد شود، سنگ فریم‌استون (framestone) نامیده می‌شود. استروماتوپوریدها، مرجان‌های بزرگ و رودیست‌ها اجزای اصلی این نوع سنگ‌های کربناتی هستند. فسیل‌های تیغه‌ای و صفحه‌ای حاصل از به هم پیوستن ارگانسیم‌ها (عمدتاً جلبک‌ها) که حاوی ماتریکس هستند، بایندستون (bindstone) را تشکیل می‌دهند. ارگانسیم‌های ساقه‌ای شکل، نظیر بریوزوا یا جلبک‌های کورالین تشکیل بافلستون (bafflestone) می‌دهند.

- گرینستون: اجزای اصلی در حین رسوبگذاری متصل نشده‌اند اما در بافت آن دانه‌ها به هم متصل هستند و فاقد گل است.

- پکستون: در بافت آن دانه‌ها به یکدیگر متصل هستند (دانه پشتیبان) و سنگ دارای گل آهکی است. اگر بیش از ۱۰ درصد دانه‌ها بزرگتر از ۲ میلی متر باشند، سنگ رودستون است. رودستون‌ها در نامگذاری‌های قدیمی‌تر کنگلومراهای آهکی نام داشتند.

- وکستون: دانه‌ها در گل شناور هستند (گل پشتیبان). اگر مقدار زیادی از دانه‌های شناور قطعات بزرگتر از ۲ میلی‌متر باشند نام سنگ فلوئستون می‌شود (نوع دیگری از کنگلومرای آهکی).

- مادستون: اساساً از گل آهکی تشکیل شده است.

Depositional texture recognizable					Depositional texture not recognizable
Original components not bound together during deposition			Original components were bound together		
Contains mud (clay and fine silt-size carbonate)		Lacks mud and is grain supported			
Mud-supported	Grain-supported				
Less than 10% grains	More than 10% grains				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Crystalline

شکل ۷-۵۶ - تقسیم بندی دانه‌ها بر سنگ‌های کربناته

طبقه‌بندی آرچی

طبقه‌بندی آرچی در مطالعه خرده‌ها (cuttings) و مغزه‌های حفاری (cores) استفاده می‌شود. آرچی نیز سنگ‌های کربناته را به سه گروه بر مبنای شکل آن‌ها در نمونه دستی و در زیر میکروسکوپ تقسیم‌بندی کرد (جدول ۷-۲). او سنگ‌های کربناته را به انواع I یا سنگ‌های آهکی کریستالین محکم فاقد تخلخل (compact crystalline)، II یا نوع گل‌سفید (chalky) و نوع III یا سنگ‌های آهکی دانه‌ای (granular) تقسیم نمود.

طبقه‌بندی آرچی تأکید بیشتری بر روی ویژگی‌های مربوط به جریان سیالات (تراوایی و تراوایی نسبی)، توزیع سیال (فشار موئینه) و جریان الکتریسته (مقاومت) دارد.

آرچی ۴ رده اندازه منفذ و حفره، با استفاده از میکروسکوپ با قدرت پایین و یا عدسی‌های دستی، تشخیص داد:

(A) تخلخل غیر قابل مشاهده

(B) اندازه تخلخل بین ۰/۱ تا ۰/۱۰ میلی‌متر (قابل مشاهده با لنز ۱۰×)

(C) اندازه تخلخل بین ۲ تا ۰/۱ میلی‌متر (قابل مشاهده با چشم)

(D) اندازه تخلخل بزرگتر از ۲ میلی‌متر، نظیر تخلخل حفره‌ای و شکستگی

در نهایت، یک نمونه کربناته، در تقسیم‌بندی آرچی، به صورت IIB (سنگ آهک گل‌سفیدی با تخلخل بین ۰/۱ تا ۰/۱۰ میلی‌متر) یا IIIC (سنگ آهک دانه‌ای با تخلخل قابل مشاهده با چشم) آورده می‌شود که بسیار تجربی و کیفی می‌باشد. طبقه‌بندی آرچی گاهی اوقات می‌تواند برای پیش‌بینی پتانسیل قابلیت تولید یک مخزن مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۷-۲ ویژگی‌های استفاده شده در طبقه‌بندی آرچی

ظاهر میکروسکوپی (۱۵X-۱۰)	ظاهر ماکروسکوپی دانه‌ای	بافت ماریکس
از کربنال‌های شدیداً در هم فرو رفته تشکیل شده است و هیچ فضای خالی بین بلورها قابل مشاهده نیست.	بلورین، سخت و متراکم و دارای لبه‌های تیز در روی سطح شکستگی	نوع I بلورین فشرده
بلورها کمتر در هم فرو رفته و با زاویه‌های مختلفی به یکدیگر پیوسته‌اند. بافت فوق‌العاده ریز دارند. اندازه دانه عموماً کمتر از ۰/۰۵ میلی‌متر است. بافت‌های درشت‌تر در نوع III طبقه‌بندی می‌شوند.	ظاهر کدر و حاکی دارد. فاقد ظاهر بلورین است که بعلب‌ب است. است که کربنال‌های کوچک به مقدار کمتری درهم فرو رفته و بنابراین نور در جهات مختلفی انعکاس پیدا می‌کند به طور کلی از دراب کوچک و با میکرو فیل‌ها تشکیل شده است.	نوع II گل سفیدی
بلورها در زاویه مختلفی در هم قفل شده‌اند و لذا تخلخل قابل توجهی در بین آن‌ها وجود دارد. بافت‌های اوولینی و دانه‌ای در این رده قرار می‌گیرند.	ظاهر ماسه‌ای با دانه شکری دارد. اندازه بلورها یا دراب به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند: خلی ریز = ۰/۰۵ mm ریز = ۰/۱ mm موسط = ۰/۲ mm درشت = ۰/۴ mm	نوع III دانه‌ای یا دانه شکری

۷-۶-۲-۳ دیاژنز کربنات‌ها و تخلخل

دیاژنز در سنگ‌های کربناته شامل چندین مرحله اصلی نظیر تراکم، سیمانی شدن، انحلال، میکریتی شدن، ننومورفیسیم و دولومیتی شدن است. فرآیندهای دیاژنزی عمدتاً توسط پارامترهای مختلفی نظیر کانی‌شناسی رسوب، شیمی سیالات درون منفذی، تاریخچه زمین‌شناسی رسوب نظیر تغییرات عمق دفن، بالا آمدگی و تغییرات سطح آب دریا و آب و هوا کنترل می‌شود. این فرآیندها که در محیط‌های نزدیک سطح دریا تا محیط دفنی عمیق صورت می‌گیرند، نقش مهمی در افزایش یا کاهش تخلخل دارند.

دیاژنز در محیط‌های دیاژنزی زیر صورت می‌گیرد (شکل ۷-۵۷):

◀ نزدیک سطح زمین در منطقه وادز (vadose zone)

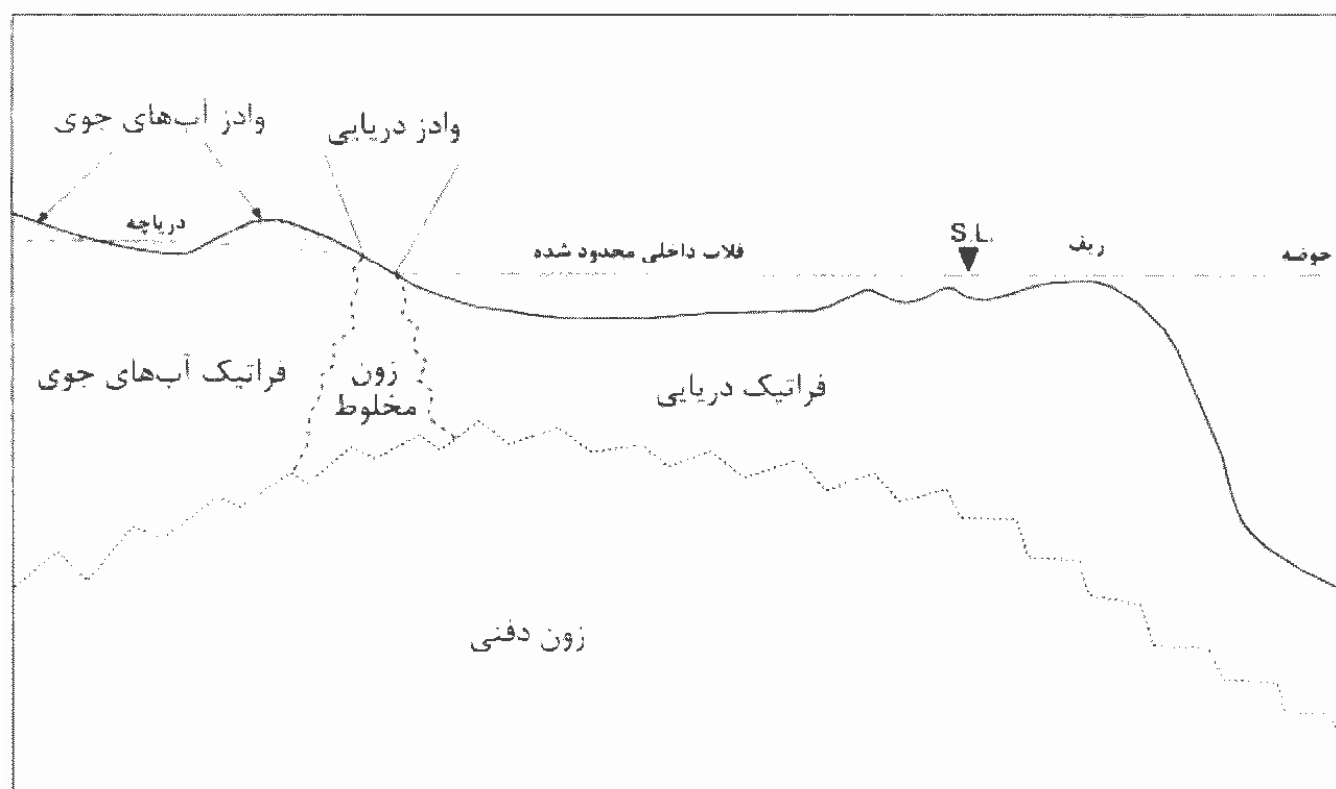
◀ فراتیک آب‌های جوی (meteoric phreatic)

◀ زون مخلوط (mixed water zone)

◀ فراتیک آب دریا (marine phreatic)

◀ زون دفنی (burial zone)

فرآیندهای دیاژنزی باعث تغییرات پتروگرافی نظیر سیمان‌شدگی و انحلال و متعاقب آن تغییرات پتروفیزیکی نظیر تخلخل و تراوایی در مخازن می‌شود.



شکل ۷-۵۷ - تصویر شماتیک از محیط‌های دیاژنتیکی متفاوت

۷-۶-۲-۳-۱ سیمانی شدن

در مخازن هیدروکربنی سیمانی شدن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای دیازنری است که سبب کاهش تخلخل و تراوایی می‌شود (شکل ۷-۵۸ و ۷-۵۹). سیمانی شدنی زمانی به وقوع می‌پیوندد که سیالات منفذی از فاز سیمان فوق اشباع (super-saturated) باشند. کلسیت



اسپاری، دولومیت و انیدریت در میان سیمان سنگ‌های کربناتی معمول هستند، اما فراوان‌ترین آن‌ها کلسیت اسپاری است که توسط خود سنگ آهک به وجود می‌آید.

شکل ۷-۵۸ - یک استراکود گریستون که در آن تخلخل بین دانه‌ای و میان دانه‌ای توسط کلسیت اسپاری پر شده است. برخی از استراکودها توسط فضاها پر شده‌اند.



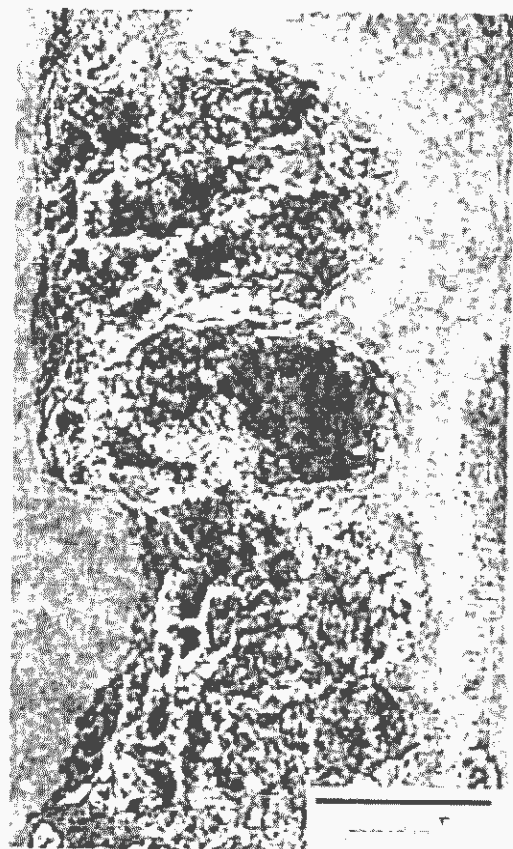
شکل ۷-۵۹ - یک

اووئید گریستون که در آن تخلخل بین دانه‌ای کاملاً توسط کلسیت اسپاری شعاعی پر شده است

۷-۶-۲-۳-۲ انحلال

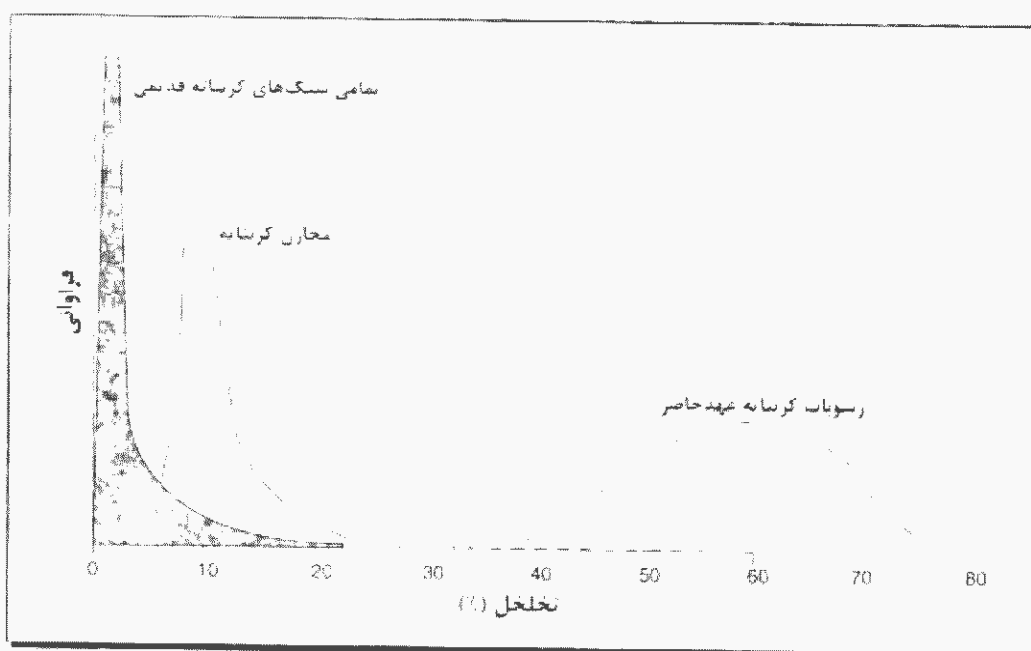
یکی از مهم‌ترین فرآیندهای دیازنری که باعث افزایش تخلخل (porosity enhancement) در بسیاری از مخازن کربناته شده، فرآیند انحلال است (شکل ۷-۶۰). انحلال موقعی صورت می‌گیرد که سیالات منفذی از کانی‌های پیرامون خود زیر اشباع باشند. فرآیند انحلال در

محیط‌های فراتیک آب شیرین و زون مخلوط و نیز در طی دیاژنز تدفینی رخ می‌دهد. سیالات با pH اسیدی نظیر آب‌های جوی و سیالات خارج شده از شیل‌ها در اثر تراکم، می‌تواند سبب شسته شدن بخش‌های ناپایدار سنگ شوند. اسیدهای آلی (organic acid) که طی بلوغ مواد



آلی در اثر کربوکسیل‌زدایی (decarboxylation) مواد آلی تولید می‌شوند، نیز می‌توانند باعث حل شدن سنگ‌ها و رسوبات شوند. انحلال در سنگ آهک، تخلخل ثانویه ایجاد می‌کند و می‌تواند عاملی برای مخزنی شدن یک سنگ متراکم باشد (شکل ۶۱-۷). مؤثرترین عملکرد برای انحلال، پسروری دریا است که سبب در معرض قرار دادن سنگ‌ها در مقابل آب‌های جوی است. پسروری بعدی، سنگ‌های دارای تخلخل انحلالی، شکسته شده و هوازده را زیر یک دگرشیمی یا وقفه رسوبگذاری دفن می‌کند. حتی بدون رخنمون اولیه، شانس توسعه تخلخل انحلالی در هر مرحله از دیاژنز، حتی بعد از دفن شدن نسبتاً عمیق، وجود دارد.

شکل ۶۰-۷ بدیده انحلال در یک سنگ کربناته



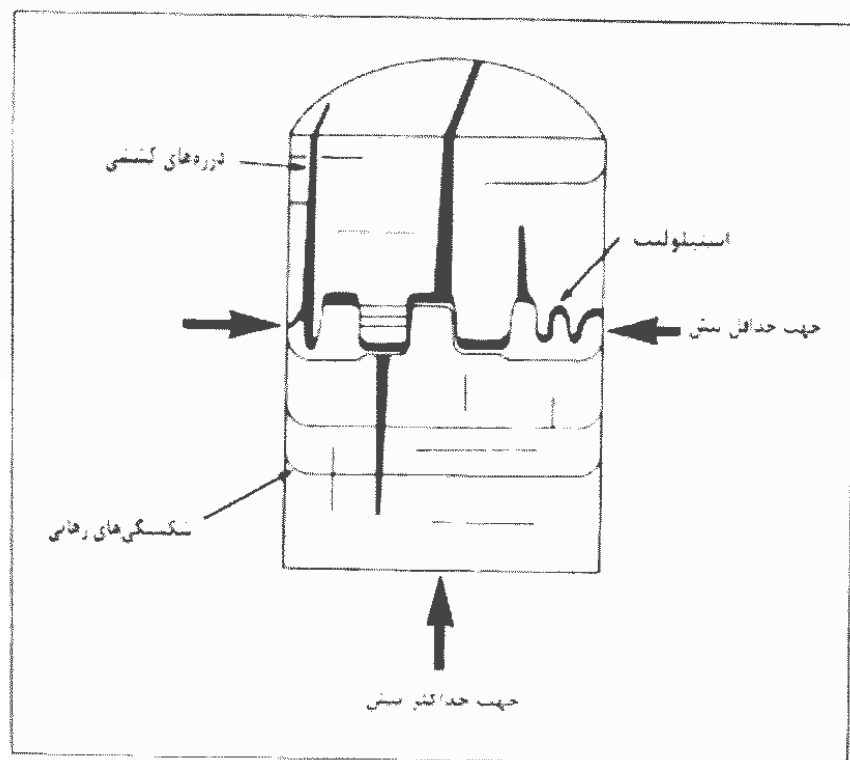
شکل ۶۱-۷ - در مقایسه با رسوبات کربناته عهدحاضر، تخلخل و تراوایی در سنگ‌های کربناته قدیمی در اثر فسرده‌گی و سیمانی شدن کاهش یافته و در اثر انحلال و دولومیتی شدن در مخارن هیدروکربنی مجدداً افزایش یافته است

۷-۶-۲-۳-۳ فشردگی مکانیکی

رسوبات کربناتی عهد حاضر تخلخل اولیه خیلی بالایی از ۳۶ تا ۷۵ درصد را دارا هستند (شکل ۷-۶۱). این تخلخلی است که رسوبات با اتمام مرحله نهشتگی به دست می‌آورند. تخلخل اولیه در سنگ آهک‌ها با تخلخل اولیه در ماسه‌سنگ‌ها متفاوت است. بهترین تخلخل اولیه سنگ آهک‌ها در گرینستون‌ها وجود دارد. پکستون‌ها، وکستون‌ها و مادستون‌ها به‌طور ذاتی از نظر بافتی فشرده هستند و به آسانی در حین تدفین فشرده‌تر می‌شوند. تقریباً همیشه تخلخل کربنات‌ها در حین تدفین کم می‌شود. کاهش تخلخل در کربنات‌ها در اثر فشرده شدن تنها اگر کربنات بدون سیمان‌شدگی باقی بماند، مهم است.

۷-۶-۲-۳-۴ فشردگی شیمیایی

فرآیندی که در کربنات‌ها خیلی مهم‌تر از آواری‌ها می‌باشد، انحلال فشاری (pressure dissolution) است که به صورت استیلولیت (stylolite) دیده می‌شود. استیلولیت‌ها به صورت سطوح غیر منظم می‌باشند که در اثر فشار وزن طبقات بالایی و یا نیروهای تکتونیکی شکل می‌گیرند. فشار سبب افزایش انحلال‌پذیری کانی‌ها می‌شود و فازهای حل شده در فضاهای خالی به صورت سیمان ته‌نشین می‌شوند و در عین حال مواد غیر قابل حل نظیر



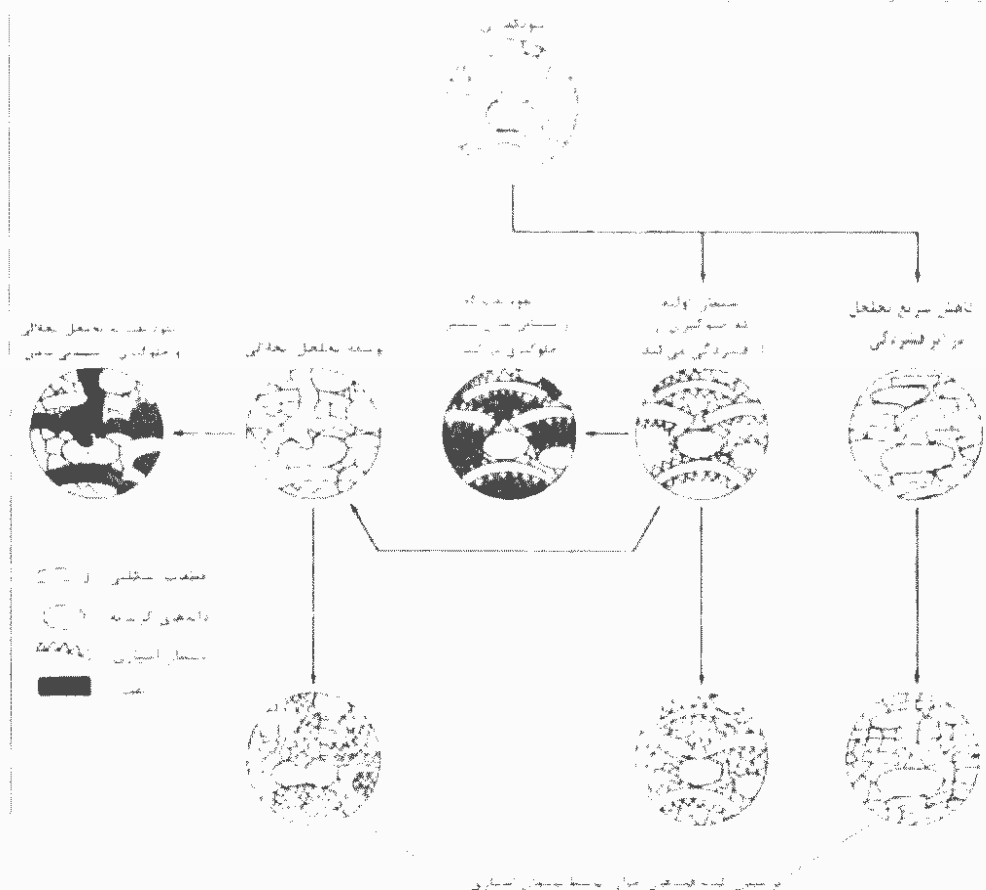
کانی‌های رسی و مواد آلی در سطح استیلولیت متمرکز می‌شوند. استیلولیت‌ها معمولاً به دلیل ایجاد سیمان در سنگ و ایجاد سدهای تراوایی (permeability barriers) سبب کاهش کیفیت سنگ مخزن می‌شوند. اگر استیلولیت‌ها همراه با درزه‌های کششی باشند (شکل ۷-۶۲)، می‌توانند سبب افزایش تخلخل سنگ مخزن شوند.

شکل ۷-۶۲ - تصویر شماتیک از درزه‌های کششی همراه با استیلولیت

۷-۶-۲-۴ روند فرآیندهای دیاریزی در آهک‌ها

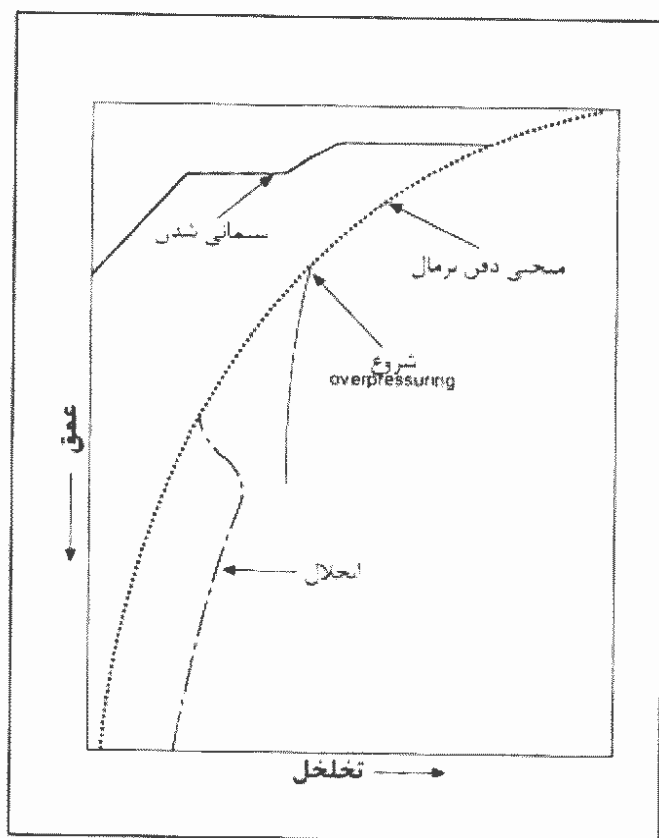
مشابه ماسه‌های آواری، ماسه‌های آهکی نیز تخلخل اولیه‌ای بین ۴۵ تا ۵۰ درصد دارند، اما در بیشتر سنگ‌های آهکی قدیمه، تخلخل تقریباً به‌طور کلی از بین رفته است. شکل ۶۳-۷ خطوط سیر فرآیندهای دیاریزی را برای یک آهک اسکلتی نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً اشاره شد، یک ماسه آهکی می‌تواند تخلخلی بین ۴۵ تا ۵۰ درصد داشته باشد، اگر دهن آن خیلی سریع و بدون دیاریز اولیه باشد، تخلخل ممکن است بوسیله تراکم و له شدن دانه‌ها خیلی کاهش یابد. تخلخل باقیمانده، ممکن است به وسیله بلورهای کلسیت اسپاری پر شود. در برخی از محیط‌ها، در طی دیاریز اولیه یک سیمان حاشیه‌ای از بلورهای کلسیت اسپاری شکل می‌گیرد که گاهی اوقات همراه با انحلال دانه‌های اصلی و ایجاد تخلخل قالبی زیستی (biomoldic) است. اگر هیدروکربن با گاز وارد مخزن شود از کاهش بیشتر تخلخل بوسیله سیمانی شدن جلوگیری خواهد کرد و سیمان حاشیه‌ای، مقاومت مؤثر سنگ را در مقابل تراکم بیشتر می‌کند. حتی اگر تمام تخلخل بوسیله سیمانی شدن و تراکم از بین رود، تخلخل انحلالی ثانویه می‌تواند تشکیل شود. این تخلخل، هم می‌تواند به صورت فابریک قالبی انتخابی و هم به صورت تخلخل حفره‌ای باشد که دانه‌های اصلی و فابریک سنگ را قطع می‌کند. این تخلخل ثانویه می‌تواند به وسیله هیدروکربن پر شود و مانع از سیمانی شدن آن شود. اگر نفت وارد

مخزن نشود، فضاهای ثانویه ممکن است بوسیله سیمان کلسیت اسپاری پر شود. پس می‌توان دید که مسیرهای دیاریزی کربنات‌ها خیلی پیچیده بوده و لذا پیش بینی کیفیت آن‌ها بسیار مشکل است.



شکل ۶۳-۷ خطوط سیر فرآیندهای دیاریزی برای یک سنگ آهک اسکلتی

شکل ۶۴-۷ به صورت فرضی، تغییرات تخلخل را در طی تدفین نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که از این شکل پیداست، سیمانی شدن سبب کاهش تخلخل و انحلال سبب افزایش آن می‌شود.



شکل ۶۴-۷ - تغییرات تخلخل ناشی از دیاژنز در طی تدفین

۷-۶-۲-۵ انواع تخلخل در کربنات‌ها

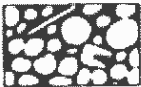
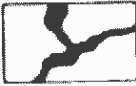
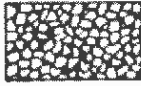
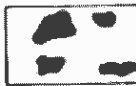
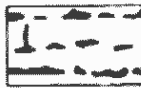
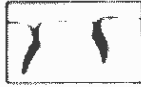
در مقایسه با تخریبی‌ها، تخلخل موجود در کربنات‌ها بسیار متنوع است. یکی از طبقه‌بندی‌های بسیار مورد استفاده برای انواع تخلخل در سنگ‌های کربناته، طبقه‌بندی چوکت و پری است. در این طبقه‌بندی ۱۵ نوع تخلخل در ۳ گروه قرار می‌گیرند (شکل ۶۵-۷):

گروه ۱ - تخلخل‌های وابسته به فابریک (fabric-selective) شامل: بین دانه‌ای، دورن دانه‌ای، بین بلوری، قالبی، فنسترال، چتری یا سایه‌بانی و رشدی

گروه ۲ - تخلخل‌هایی که به فابریک ارتباطی ندارند (not fabric-selective) شامل: شکستگی، حفره ای و کانالی، حفره‌های خیلی بزرگ (cavern)

گروه ۳ - تخلخل‌هایی که می‌توانند به فابریک وابسته باشند یا نباشند (fabric-selective or not) شامل: برشی (breccia)، گمانه‌ای (boring)، به هم ریختگی

(burrowing) و ترک‌های انقباضی (shrinkage)

BASIC POROSITY TYPES			
FABRIC SELECTIVE		NOT FABRIC SELECTIVE	
	INTERPARTICLE BP		FRACTURE FR
	INTRAPARTICLE IP		CHANNEL CH
	INTERCRYSTAL BC		VUG* VUG
	MOLDIC MO		CAVERN* CV
	FENESTRAL FE	* Cavern applies to man sized or larger pores of channel or vug shapes.	
	SHELTER SH		
	GROWTH FRAMEWORK GF		
FABRIC SELECTIVE OR NOT			
	BRECCIA BR		BORING BO
			BURROW BU
			SHRINKAGE SK

شکل ۷-۶۵ - طبقه‌بندی انواع تخلخل در سنگ‌های کربناته توسط چوکت و پری

زمان شکل‌گیری و منشأ انواع این تخلخل‌ها در جدول ۷-۳ خلاصه شده است.

جدول ۷-۳ - زمان شکل‌گیری و منشأ انواع تخلخل در سنگ‌های کربناته

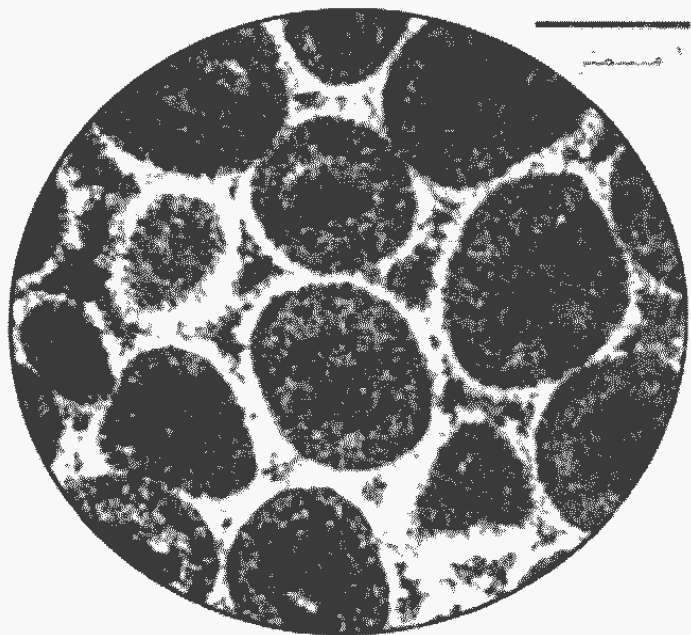
منشأ	نوع تخلخل	زمان شکل‌گیری
رسوبی	بین دانه ای دورن دانه ای	اولیه یا هم‌زمان با رسوبگذاری
دولومیتی شدن	بین بلوری	ثانویه یا بعد از رسوبگذاری
انحلال	قالبی و حفره ای	
نیروهای ساختمانی	شکستگی	

حال به توضیح مختصری در رابطه با تخلخل‌های فوق پرداخته می‌شود. تخلخل‌های ذکر شده را می‌توان بر طبق جدول ۷-۳ بر اساس زایش به دو دسته اولیه، که هم‌زمان با رسوبگذاری در محیط رسوبی شکل می‌گیرد (syndepositional) و ثانویه که بعد از رسوبگذاری ایجاد می‌شود (postdepositional) تقسیم کرد.

۷-۶-۲-۵-۱ انواع تخلخل اولیه

تخلخل بین دانه‌ای (Interparticle Porosity)

این تخلخل شامل تخلخل بین دانه‌ای (interparticle) است. دانه‌ها شامل کلیه آلوک‌های سنگ‌های آهکی است. تخلخل‌های بین اسکلتی، بین اووئیدی، بین پلوئیدی، بین قطعات سنگی و بین اینتراکلاستی در ذرات در حد ماسه و پیل است. شکل فضاهای خالی خیلی متغیر است و به اندازه قطعات، جورشدگی و آرایش دانه‌ها بستگی دارد و فقط وقتی هموزن است که ذرات دارای شکل و اندازه یکسان باشند، مثل اووئیدهای جور شده (شکل ۷-۶۶).



شکل ۷-۶۶ - فتومیکروگراف یک اووئید گریستون با تخلخل بین دانه‌ای

تخلخل درون دانه‌ای (Intraparticle Porosity)

خرده‌های اسکلتی و حجرات موجود در آن‌ها پس از دفن ممکن است حفظ شوند و تخلخل دورن دانه‌ای به وجود آورند. میزان این تخلخل به فراوانی قطعات فسیلی، اندازه و نوع موجود بستگی دارد (شکل ۷-۶۷).



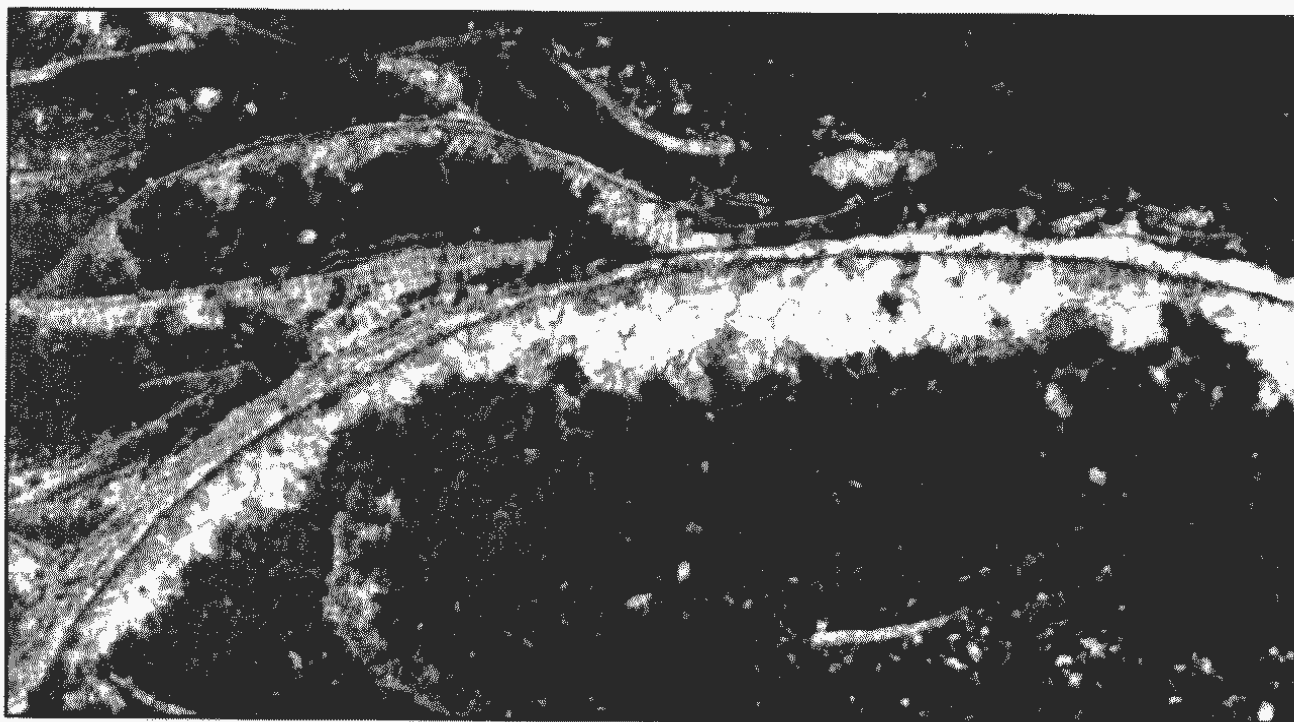
شکل ۷-۶۷ - فتومیکروگراف با

تخلخل درون دانه‌ای، میدان دید

۱،۵ میلی‌متر

تخلخل چتری (Shelter Porosity)

این نوع تخلخل در زیر ذرات بزرگ نظیر قطعات اسکلتی به وجود می‌آیند. این نوع تخلخل، بیشتر در کالک‌آرنایت که شامل پوسته‌های نرم‌تنان بزرگ و فرامینیفرهای بزرگ و مرجان است تشکیل می‌شوند (شکل ۶۸-۷).



شکل ۶۸ ۷ - فتومیکروگراف از یک قطعه اسکلتی که در زیر آن تخلخل چتری بر تنده با سیمان اسپاری مشاهده می‌شود

تخلخل فنسترال (Fenestral Porosity)

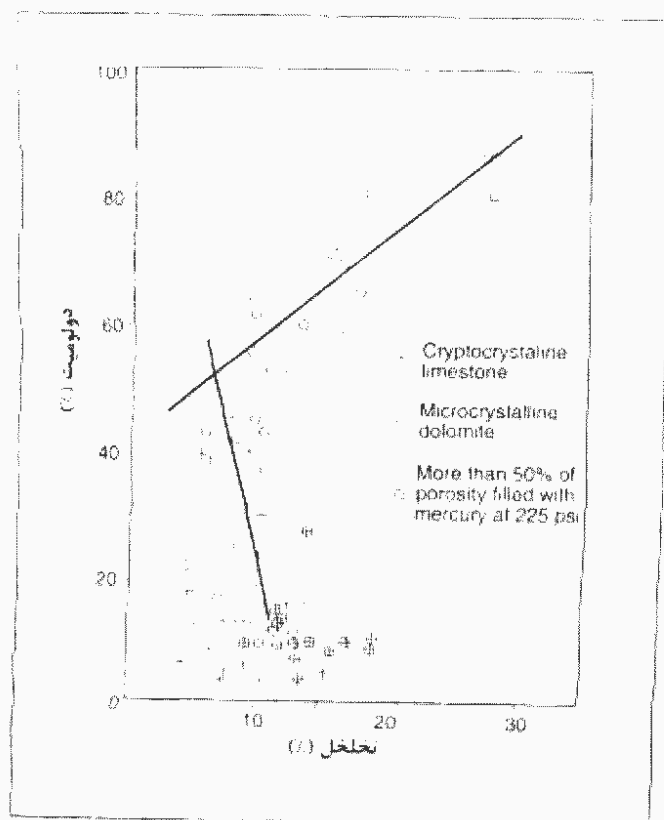
این نوع تخلخل عبارت است از حفره‌هایی که به شکل عدسی، کروی و یا بدون شکل به دنبال هم قرار گرفته‌اند. این حفره‌ها در اثر از دست دادن آب بین ذرات، تخمیر جلبک‌ها و یا هنگام خشک شدن رسوبات در مناطق اینترتایدال حاصل شده است.

۶-۲-۵-۲ انواع تخلخل ثانویه

تخلخل ثانویه در سنگ‌های کربناته به دلیل قابلیت انحلال بالای کانی‌های کربناته، بسیار فراوان و معمول است. در زیر انواع تخلخل ثانویه توضیح داده می‌شود.

تخلخل بین بلوری (Inter-crystalline Porosity)

این نوع تخلخل در بین بلورها ایجاد می‌شود و به خصوص در سنگ‌های دولومیتی خیلی مهم است. تخلخل ثانویه دولومیت‌ها در مخازن دولومیتی از اهمیت زیادی برخوردار است. اگر نسبت دولومیت کمتر از ۵۰ درصد بوده و بلورهای دولومیت در میان گل‌های آهکی متراکم محصور شده باشد، تخلخل غیراقتصادی خواهد بود. ولی اگر دولومیت بیشتر از ۵۰ باشد و رومب‌ها در

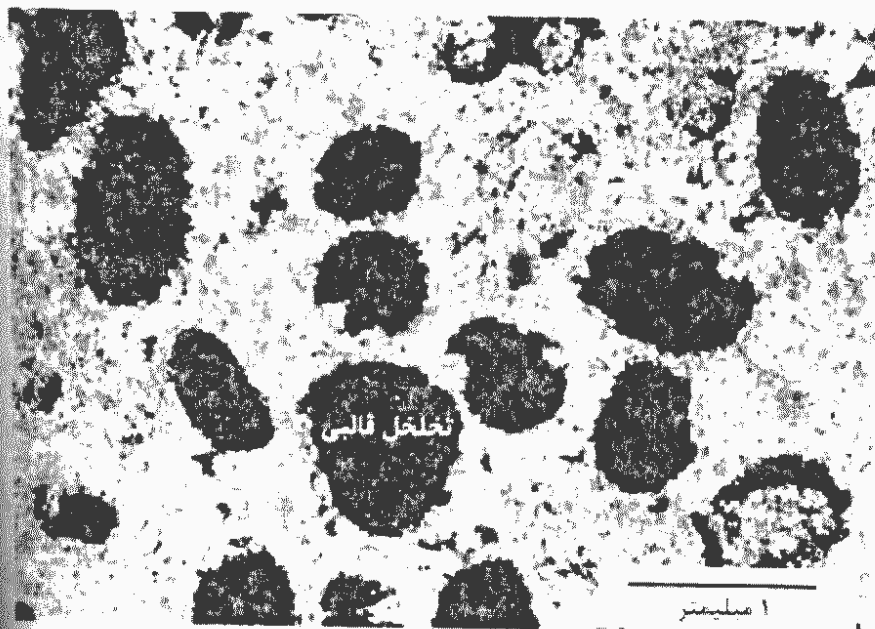


طی فرایند فشردگی به عنوان چهارچوب عمل کرده باشند تخلخل باقی خواهد ماند (شکل ۷-۶۹).

شکل ۷-۶۹ - ارتباط تخلخل با درصد دولومیت

تخلخل قالبی (Moldic Porosity)

تخلخل قالبی به وسیله شسته شدن انتخابی اجزای سنگ، مثل اووئید، پوسته دوکفه‌ای و کانی‌های تبخیری شکل می‌گیرد (شکل ۷-۷۰). تفاوت در ترکیب کانی‌شناسی کربنات‌ها و شرایط متغیر دیاژنزی در سرعت تشکیل این تخلخل مؤثر است به طوری که در شرایط دیاژنز جوی، کلیست پر منیزیم به کلیست کم منیزیم تبدیل می‌شود. این در حالی است که آراگونیت حل شده و تخلخل قالبی ایجاد می‌کند. قالب‌ها به وسیله شکل، سایز و اجزای دیواره یا سایر جنبه‌ها تشخیص داده می‌شوند. اندازه این حفرات به اندازه دانه حل شده و شدت انحلال

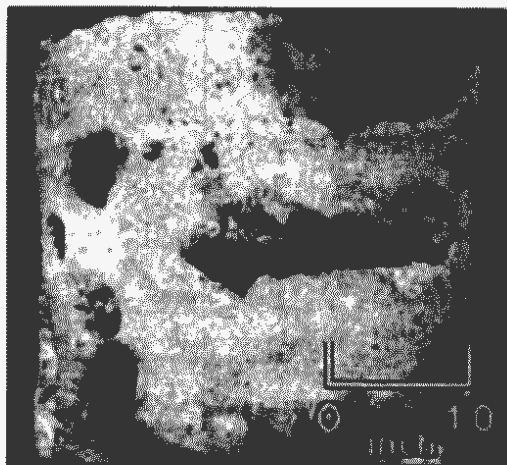


بستگی دارد. تخلخل‌های قالبی عمدتاً ایروله هستند مگر این که عوامل دیگری چون شکستگی یا تخلخل بین‌بلوری باعث ایجاد ارتباط آن‌ها شود که در این حالت تروایی و کیفیت مخزنی آن‌ها افزایش می‌یابد.

شکل ۷-۷۰ - تخلخل قالبی ناشی از انحلال اووئیدها

تخلخل حفره‌ای Vug، کانالی channel، غاری cave

تخلخل حفره‌ای در اثر انحلال و بزرگ شدن تخلخل‌های قالبی و بین دانه‌ای، بدون توجه به فابریک، در سنگ‌های کربناتی تشکیل می‌شود (شکل ۷-۷۱). این فضاهای خالی که با شکل‌ها و اندازه‌های غیرمنظم هستند می‌توانند با هم ارتباط داشته و یا نداشته باشد.



تخلخل غاری نوعی از تخلخل حفره‌ای است که با اندازه بزرگ مشخص می‌شود. تخلخل نوع کانالی با شکل هندسی خاص خود از نوع حفره‌ای مشخص می‌شوند. این نوع تخلخل عمدتاً در اثر انحلال مسیرهای باز شکسته شده حاصل می‌شود.

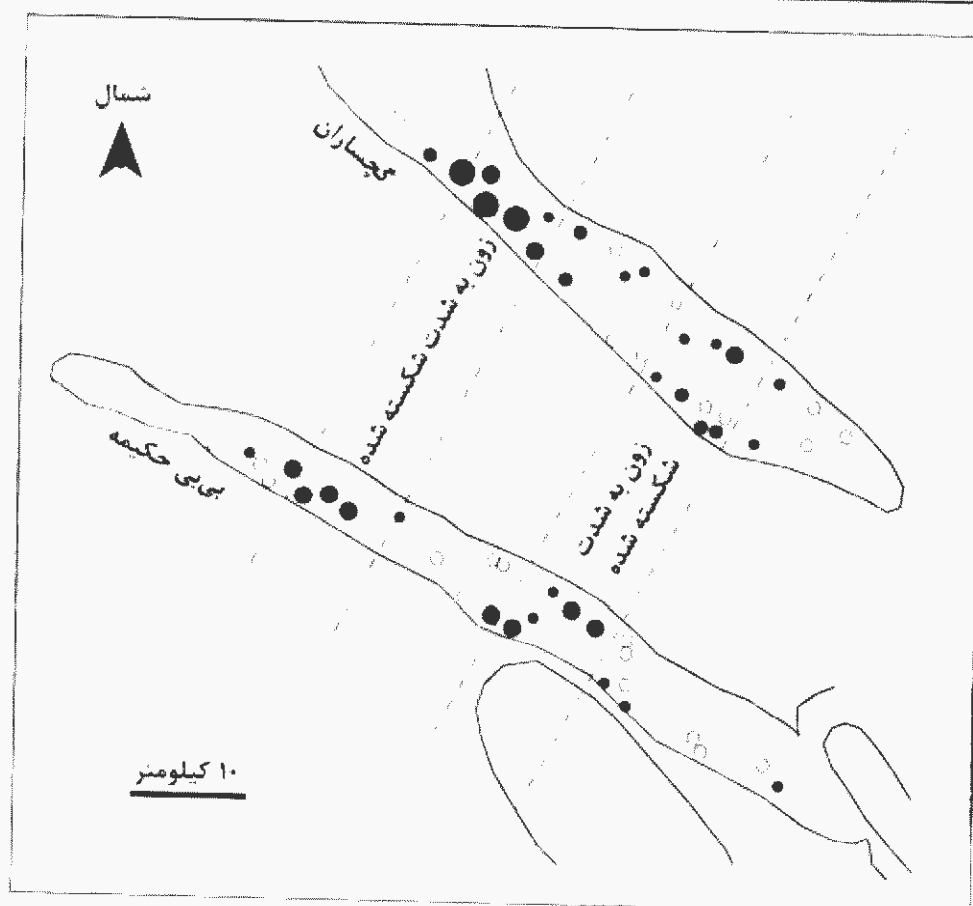
شکل ۷-۷۱ - تخلخل حفره‌ای تا غاری در یک سنگ آهکی

تخلخل شکستگی (Fracture Porosity)

آخرین نوع مهم از تخلخل، شکستگی است. مخازن شکسته بیشتر در سنگ‌های شکننده شکل می‌گیرند تا در سنگ‌هایی که در اثر فشار تغییر شکل پلاستیک دارند. بنابراین مخازن شکسته شده در ماسه‌سنگ‌های کوارتزی که به شدت سیمانی شده‌اند، سنگ آهک، دولستون و حتی پی سنگ‌ها مثل گرانیت و سنگ‌های دگرگونی وجود دارند. شکل ۷-۷۲ یک نمونه مغزه از مخزن شکسته را نشان می‌دهد. وقتی که این نوع تخلخل شکل می‌گیرد، اگر چه تخلخل سنگ واقعاً ممکن است خیلی بالا نرود، ولی مخزن تراوایی زیادی پیدا خواهد کرد. شکستگی‌ها از ویژگی‌های بیشتر میدان‌های بزرگ نفتی کربناته هستند. در میدان گچساران در ایران، یک چاه به تنهایی بیش از ۸۰۰۰۰ بشکه در روز تولید کرده است. این تولید زیاد از مخزن آهکی شکسته شده آسماری بوده است (۷-۷۳).



شکل ۷-۷۲ - یک نمونه مغزه حاوی شکستگی‌های باز و نیمه باز و شکستگی‌های گسترش یافته در اثر انحلال



شکل ۷-۷۳ - نقشه میادین گچساران و بی بی حکیمه. بیشترین تولید (دوایر توپر بزرگ) منطبق بر زون‌های شکسته شده است

مقدار و نوع تخلخل در سنگ‌های کربناته بسیار متنوع‌تر از ماسه‌سنگ‌ها است. در بعضی از انواع سازندهای ریفی، تخلخل بسیار بالا است و حتی ممکن است از ۵۰٪ هم تجاوز کند. سنگ آهک گل‌سفید دارای تخلخل اولیه بین دانه‌ای است که بین کوکولیت‌ها یا خرده‌های آنها قرار دارد (شکل ۷-۷۴). این تخلخل ممکن است در سطح تا ۷۰ درصد باشد، اما در عمق ۲۰۰۰



متری به ۱۵ درصد و در عمق ۳۰۰۰ متری به صفر درصد می‌رسد. تراوایی ماتریکس سنگ آهک گل‌سفید بسیار پایین است.

شکل ۷-۷۴ - تخلخل اولیه بین دانه‌ای و میان دانه‌ای در کوکولیت‌ها

در رسوبات کربناته جدید، دانه ریزترین رسوبات دارای بالاترین تخلخل و پایین‌ترین تراوایی می‌باشند (جدول ۴-۷).

جدول ۴-۷ - دامنه تغییرات تخلخل و تراوایی در رسوبات کربناته جدید

تراوایی (میلی داری)		تخلخل (%)		بافت رسی
محدوده	متوسط	محدوده	متوسط	
۱۵۸۰۰-۵۶۶۰۰	۳۰۸۰۰	۴۰-۵۳	۴۴۰۵	گرینستون
۳۱۱۵-۹۳۰۰	۱۸۴۰	۴۵-۶۷	۵۴۰۷	بکستون
۳۷۶-۶۵۷۰	۲۲۸	۶۴-۷۸	۶۸	وکسون
۰/۶۳-۱/۳۷	۰/۸۷	۶۷-۷۳	۷۰/۵	وکسون خیلی دانبر

جدول ۵-۷ به‌طور خلاصه ویژگی‌های تخلخل را در سنگ‌های کربناته و تخریبی مقایسه می‌کند.

جدول ۵-۷ - مقایسه ویژگی‌های تخلخل در کربنات‌ها در مقابل آواری‌ها

آواری‌ها	کربنات‌ها
تخلخل اولیه اغلب ۲۵-۴۰ درصد	تخلخل اولیه اغلب ۴۰-۷۰ درصد
تخلخل نهایی نصف یا قسمت اعظم تخلخل اولیه	تخلخل نهایی اغلب نزدیک به صفر است.
تخلخل اولیه کاملاً سی‌دانه‌ای است.	تخلخل اولیه عموماً بین دانه‌ای است و انواع دیگر (داخل دانه‌ای) نیز غیر معمول نیست.
تخلخل نهایی تقریباً همه بقایای تخلخل اولیه است.	تخلخل نهایی متغیر و بالایی دارد که بعثت تحمل تغییرات بعد از رسوبگذاری است.
به مقدار زیادی، اندازه تخلخل وابسته به اندازه ذرات رسوبی و جور شدگی است.	قطر تخلخل و با اندازه گلوگاه‌ها عموماً رابطه کوچکی و یا هیچ گونه رابطه‌ای را با اندازه ذرات رسوبی و یا جور شدگی نشان نمی‌دهند.
عموماً فضاها خالی هم‌شکل و یکسان در یک توده همگن می‌باشند.	یکسانی اندازه منافذ، شکل و توزیع دارای محدوده‌ای از کاملاً هم‌شکل تا فوق‌العاده ناهمگن است.
سکسگی عموماً اهمیت زیادی ندارد.	سکسگی اهمیت زیادی در تعیین خواص مخزن دارد.
پلاگ (۱ اینچ قطر) عموماً برای اندازه‌گیری تراوایی ماتریکس کافی است.	پلاگ و حتی کل مغزه‌ها ممکن است برای اندازه‌گیری تراوایی به حد کافی نباشد.
رابطه بین تخلخل و تراوایی نسبتاً ثابت بوده و به‌اندازه ذرات و جور شدگی بستگی دارد.	رابطه بین تخلخل و تراوایی وابسته به نوع تخلخل است.

۶-۲-۶-۷ برخی ویژگی‌های سنگ‌های کربناته

ساختمان سنگ‌های کربناته اساساً از نظر زایشی دو دسته می‌باشد که شامل ساختمان‌های اتوکتون (درج‌ازا)، مانند ریف‌ها و ساختمان‌های آلوکتون (نابرجا) با نشانه‌های حمل افقی است. ساختمان‌های ریفی اغلب می‌توانند به وسیله مقاطع لرزه‌ای مشخص گردند. ساختمان‌های کربناته آلوکتون بیشتر به ساختمان‌های ماسه‌سنگی شباهت دارند. توسعه اقتصادی مخازن کربناته بین چند صدمتر تا ده‌ها کیلومتر در ریف‌ها نوسان می‌کند.

ارزیابی آنیزوتروپی یک اصل ضروری برای اکتشاف و استخراج صحیح در مخازن کربناته است. آنیزوتروپی هم به صورت اولیه و هم به صورت ثانویه وجود دارد، به طوریکه آنیزوتروپی اولیه به وسیله شکل‌های رسوبگذاری که معرف محیط رسوبگذاری است و آنیزوتروپی‌های ثانویه به وسیله فرایندهای دیاژنزی ایجاد می‌گردد. آنیزوتروپی‌ها در مقیاس‌های ماکروسکپی و همچنین در ابعاد میکروسکپی می‌توانند مورد مطالعه و آزمایش قرار گیرند. آنیزوتروپی‌های ماکروسکپی می‌توانند به وسیله رسوبگذاری و یا ایجاد شکستگی‌های تکتونیکی ایجاد شوند. تعداد زیادی از مخازن هیدروکربنی کربناته آنیزوتروپ هستند که باید تراوایی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد. نیروهای تکتونیکی که باعث ایجاد آنیزوتروپی در سیستم‌های شکستگی می‌شوند، موجب آنیزوتروپی در تراوایی می‌گردند. ارزیابی صحیح محل این آنیزوتروپی برای بازیافت اولیه، به علاوه برای تزریق سیال به داخل چاه‌ها برای مراحل بعدی می‌تواند مفید باشد. چاه‌های تزریقی معمولاً در جهت شکستگی‌ها هستند. آنیزوتروپی‌های میکروسکپی در فابریک‌ها، در اثر پدیده‌های دیاژنزی نظیر انحلال و سیمانی شدن صورت می‌گیرد.

معمولاً سنگ‌های کربناته در جهات عمودی و جانبی، هتروژن‌تر از ماسه‌سنگ‌ها می‌باشند. این ناهمگنی به دلیل تراوایی کم ماتریکس در یک جهت و بازشدگی بزرگ نظیر حفره‌ها، شکاف‌ها، شکستگی‌ها و کانال‌های انحلالی در جهت دیگر می‌باشد. بنابراین گسترش تخلخل می‌تواند خیلی متغیر باشد، به طوریکه بعضی چاه‌ها در مخازن کربناته ممکن است هزاران مترمکعب در روز تولید نمایند، در حالی که در نزدیکی همان چاه‌ها، چاه‌های خشک نیز وجود دارد.

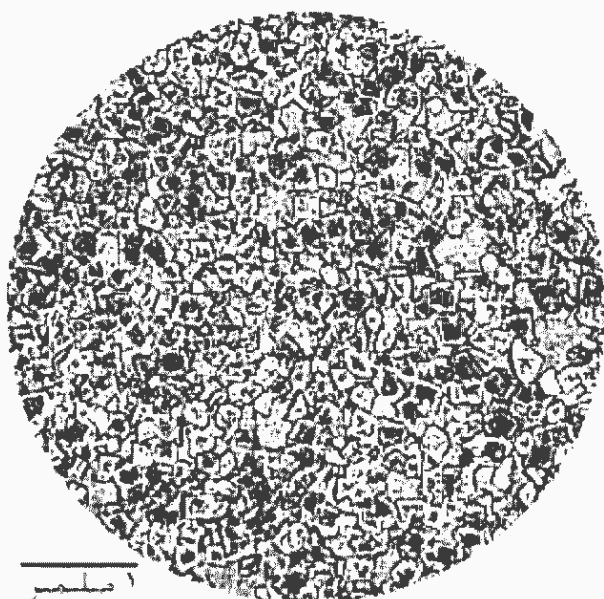
۷-۶-۳ مخازن دولومیتی (Dolomite Reservoirs)

دولومیت‌ها حدود ۳۰٪ مخازن کربناته جهان را شامل می‌شوند. ۹۰٪ از کربنات‌های پرکامبرین دولومیت هستند و در تعداد زیادی از کمپلکس‌های کربناته به سن قدیمی‌تر از پالئوزوئیک میانی دولومیت بیشتر از آهک است. بدین جهت بررسی فاکتورهای کنترل‌کننده دولومیتی شدن و ژئومتری آن از اهمیت زیادی برخوردار است.

در اثر فرآیند دولومیتی شدن نه تنها اندازه بلورها معمولاً افزایش می‌یابد و تخلخل افزوده می‌شود، بلکه ارتباط منافذ نیز بیشتر شده و نیز سطوح خلل و فرج و گلوگاه‌های آن‌ها نیز صافتر می‌شود که در نهایت سبب افزایش تراوایی خواهد شد. در اینجا لازم بذکر است که هر چند فرآیند دولومیتی شدن سبب افزایش کیفیت سنگ مخزن می‌گردد، ولی این در مورد همه دولومیت‌ها صدق نمی‌کند و به فابریک اولیه رسوب، ماهیت و حجم سیالات دولومیتی‌کننده و فرایندهای پس از دولومیتی شدن بستگی دارد. به طور مثال اگر فرآیند دولومیتی شدن به

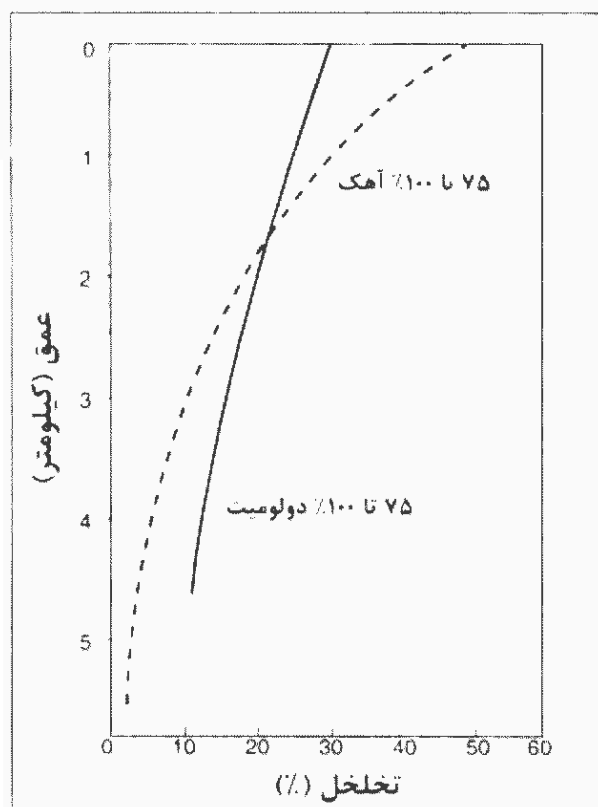
مقدار بیش از حد صورت گیرد (overdolomitization) این پدیده نه تنها سازنده نخواهد بود، بلکه مخرب هم هست و سبب کاهش تخلخل و تراوایی مخزن می‌گردد. با افزایش دولومیتی شدن از ۵ تا ۷۵٪، رشد دولومیت با کاهش تخلخل و اندازه منافذ همراه است و لذا تخلخل و تراوایی کاهش می‌یابد، ولی در ۷۵ تا ۸۰٪ دولومیتی شدن، بلورهای دولومیت تشکیل یک شبکه مستحکم بین بلوری را داده که در برابر تراکم و کاهش تخلخل مقاومت می‌کنند. از ۸۰٪ دولومیتی شدن و بیشتر، ادامه رشد بلورها باعث در هم فرو رفتن (interlocking) بلورها و

کاهش تخلخل می‌شود به طوری که در ۹۵٪ دولومیت، سنگ کاملاً ناتراوا می‌گردد. شدت دولومیتی شدن یک سنگ، بستگی به حجم سیالات دولومیتی کننده و مدت زمان اثر عامل دولومیتی کننده دارد. فابریک سنگ نیز در شدت دولومیتی شدن تأثیر زیادی دارد. شکل ۷-۷۵ یک سنگ مخزن دولومیتی را با تخلخل بین بلوری نشان می‌دهد.



شکل ۷-۷۵ - یک سنگ مخزن دولومیتی با تخلخل بین بلوری

در طی تدفین، دولومیت در مقام مقایسه با آهک، تخلخل خود را کمتر از دست می‌دهد



(شکل ۷-۷۶). این امر به دلیل آن است که دولومیت‌ها مقاومت بیشتری در مقابل تراکم مکانیکی و شیمیایی داشته و سیمانی شدن در آن‌ها کمتر صورت می‌گیرد. در عین حال دولومیت‌ها شکل‌پذیری کمتری نسبت به سنگ آهک دارند و گسترش شکستگی در آن‌ها با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد.

شکل ۷-۷۶ - کاهش تخلخل با افزایش عمق برای دولومیت و آهک. همان‌طوری که در شکل دیده می‌شود، اگرچه دولومیت‌ها در عمق کم ممکن است تخلخل کمتری داشته باشند، ولی با افزایش عمق مقدار تخلخل دولومیت‌ها نسبت به آهک پیشی می‌گیرد

دولومیت‌ها به دو نوع اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند. دولومیت‌های اولیه (primary dolomites) آن‌هایی هستند که هم‌زمان با رسوبگذاری شکل می‌گیرند و معمولاً با سنگ‌های آهکی و اغلب تبخیری‌ها همراه هستند. آن‌ها اکثراً در باتلاق‌های شور و محیط‌های سبخایی یافت می‌شوند و به‌طور معمول لایه‌لایه و نهان بلورین (cryptocrystalline) بوده و از نظر پتروفیزیکی شبیه گل‌سفیدها و شیل‌ها هستند. آن‌ها اغلب متخلخل هستند ولی به دلیل اندازه کوچک تخلخل و گلوگاه‌های آن، تراوایی بسیار کمی را دارا هستند.

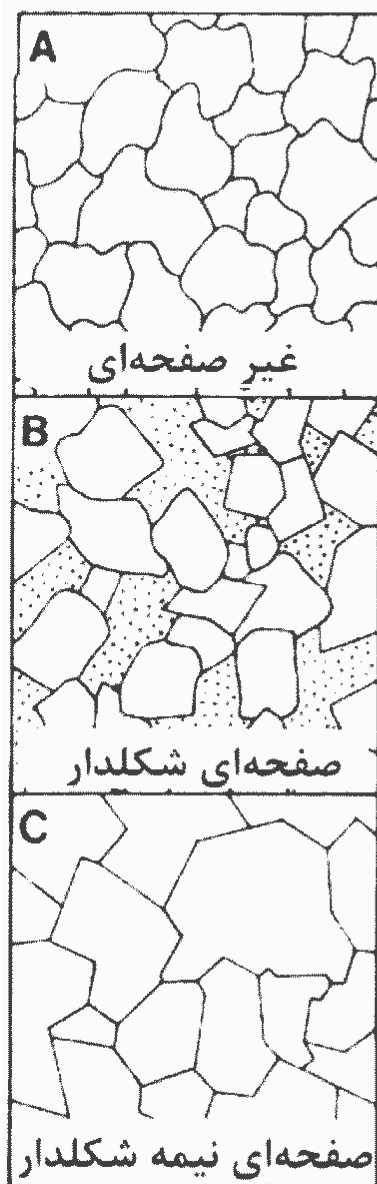
دولومیت‌های ثانویه (secondary dolomite) آن‌هایی هستند که در طی فرآیند دولومیتی شدن (dolomitization) جایگزین رسوبات کربنات کلسیم قدیمه می‌شوند. آن‌ها اغلب درشت بلور بوده و تخلخل بین بلوری دارند. در شکل ۷-۷۵، فضا‌های خالی بین بلوری دیده می‌شوند که بزرگ بوده و اغلب به هم مرتبط‌اند. به همین علت دولومیت‌های ثانویه نه فقط متخلخل بلکه تراوا هم هستند. بنابراین دولومیت‌های ثانویه بر خلاف دولومیت‌های اولیه می‌توانند مخازن هیدروکربنی خوبی باشند.

یک ویژگی بسیار مهم دولومیتی شدن، این است که دانه‌های با اندازه گل را بر دانه‌های با اندازه ماسه ترجیح می‌دهد. بنابراین غنی‌ترین میدان‌ها به ندرت در محل‌هایی که بیشترین تراوایی اولیه را دارند یافت می‌شوند. در محیط‌های اینترتایدال و ساب تایدال، واحدهای تراوا سنگ آهک‌های اوولیتی و اسکلتی را شامل می‌شود. اگر در این سنگ‌ها پدیده دولومیتی شدن رخ دهد، یون‌های کلسیم آزاد شده از سنگ آهک، انیدریت را (که تقریباً همیشه همراه با دولومیت است) به وجود می‌آورد که تراوایی آن‌ها را از بین برده و از یک سنگ متخلخل، یک سنگ متراکم می‌سازد. در صورتیکه دولومیتی شدن میکریته‌های با تراوایی خیلی پایین، موجب ایجاد تخلخل ماتریکس یا تخلخل بین کریستالی می‌شود. در بسیاری از مخازن دولومیتی ایران، سنگ‌های دولومیتی شده، عمدتاً میکریته بوده‌اند.

دولومیتی شدن یک سنگ مخزن کربناته را قادر می‌کند تا در برابر تراکم مقاومت کند. به‌طور عادی در قسمت‌های کم عمق، دولومیت‌ها کمتر از سنگ آهک‌ها تخلخل دارند اما آن‌ها تخلخل خود را در حین تدفین بهتر حفظ می‌کنند (شکل ۷-۷۶). در عمق ۴ یا ۵ کیلومتری، تخلخل دولومیت‌ها بسیار بیشتر از سنگ آهک‌ها است.

همه انواع ریف‌ها به‌طور ویژه قابلیت دولومیتی شدن دارند، زیرا محیط پشت ریف اولین جای نهشت تبخیری‌هاست. علت اینکه چرا بعضی از ریف‌ها بکلی دولومیتی می‌شوند در حالی که بقیه، ترکیب سنگ آهکی خود را حفظ می‌کنند، روشن نیست. ریف‌هایی که دولومیتی نشده‌اند ممکن است تراوایی و تخلخل هسته باندستونی خود را حفظ کنند.

شکل بلورهای موزائیکی در دولومیت‌ها از بی‌شکل تا لوزی‌های شکلدار تغییر می‌کند. بر اساس شکل حاشیه بلورهای دولومیت، آن‌ها به سه گروه غیرصفحه‌ای (non-planar)، صفحه‌ای شکلدار (planar-e) و صفحه‌ای نیمه‌شکلدار (planar-s) تقسیم می‌شوند (شکل ۷-۷۷):



گروه ۱- غیرصفحه‌ای (Non - Planar): این بلورها در اشباع‌شدگی بالا و در درجه حرارت بین ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد شکل می‌گیرند. این نوع دولومیت‌ها دارای تخلخل و تراوایی پایینی هستند، چون گلوگاه‌ها هیچ ارتباطی با هم ندارند. گروه ۲- صفحه‌ای شکلدار (Planar - E): بلورها شکل‌دار و به صورت بافت دانه شکری بوده و تخلخل بین آن‌ها زیاد است. چون گلوگاه‌ها ارتباط خوبی با هم دارند تراوایی با افزایش تخلخل زیاد می‌شود.

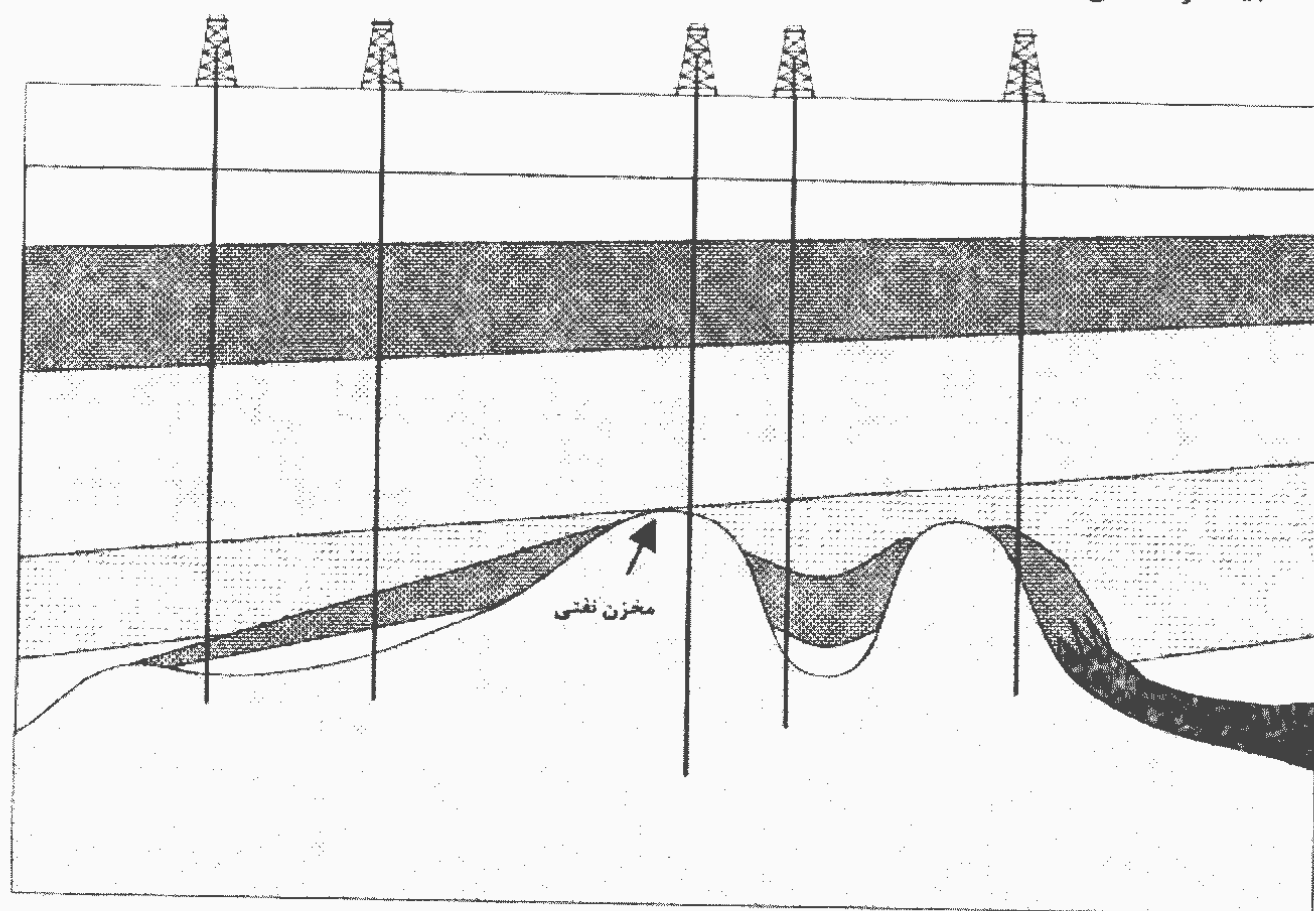
گروه ۳- صفحه‌ای نیمه شکلدار (Planar- S): بلورها نیمه شکل‌دار بوده و تخلخل بین بلورین آن‌ها کم است. چون گلوگاه‌ها دارای ارتباط خوبی با هم نیستند با افزایش تخلخل، تراوایی چندان تغییر نمی‌کند. گروه ۲ و ۳ معمولاً در درجه حرارت و اشباع‌شدگی پایین سیالات نسبت به کانی دولومیت تشکیل می‌شوند. معمولاً با افزایش اشباع‌شدگی، چون هسته‌زایی زیادتر می‌شود، اندازه بلورها کوچک‌تر می‌شود.

شکل ۷-۷۷ - سه بافت متداول در دولومیت‌ها
(تقسیم بندی توسط سیلی و گریگ)

۷-۶-۴ مخازن غیرمعمول (Atypical Reservoirs)

به‌طور معمول، در حدود ۹۰٪ نفت دنیا در مخازن ماسه‌سنگی و کربناته یافت می‌شوند. تعدادی از مخازن هم هستند که مخازن غیرمعمول نامیده می‌شوند. هر سنگی می‌تواند سنگ مخزن باشد، به شرطی که تخلخل و تراوایی داشته باشد. مخازن غیرمعمول شامل گرانیت، شیل و سایر سنگ‌های دگرگونی و آذرین است که به صورت معمول نمی‌توانند سنگ مخزن باشند. معمولاً تخلخلی که در این مخازن یافت می‌شود، در اثر شکستگی به وجود آمده است. این نوع تخلخل‌های ناشی از شکستگی اکثراً در زیر ناپیوستگی‌ها ایجاد می‌شوند و بعضی وقت‌ها تخلخل شکستگی در اثر انحلال کانی‌های ناپایدار توسعه پیدا می‌کند.

شکل ۷-۷۸، یک مقطع عرضی از میدان Augila در لیبی را نشان می‌دهد. این میدان شامل یک پی‌سنگ گرانیتی هوازده به همراه کربنات‌های ریفی و ماسه‌سنگ است. تولید نفت از کربنات‌ها و ماسه‌ها و به همان نسبت، از گرانیت است. یکی از چاه‌ها (در وسط تصویر) بدون اینکه مخازن ماسه‌ای یا ریفی را قطع کند از پوش‌سنگ عبور کرده و به گرانیت رسیده است. این چاه بیش از چهل هزار بشکه نفت در روز از گرانیت تولید کرده است. تخلخل در گرانیت ناشی از شکستگی و انحلال است. در این گرانیت دانه‌های فلدسپات ناپایدار کاملاً شسته و گرانیت بیشتر شامل دانه‌های کوارتز است. مخازنی مانند این مثال بسیار به ندرت پیدا می‌شوند.



شکل ۷-۷۸ - مقطع عرضی از میدان Augila در لیبی

۷-۷ تقسیم‌بندی مخازن بر اساس محتوای سیال

تقسیم‌بندی صحیح یک مخزن نیاز به دانش رفتار ترمودینامیکی فازهای حاضر در مخزن و دانستن نیروهای مؤثر بر مکانیسم تولید دارد. عموماً، مخازن بر اساس مکان نقطه‌ای که بیانگر فشار اولیه و دمای مخزن (T, P_i) بر روی نمودار درجه حرارت و فشار ($P-T$) سیال آن مخزن است، تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۷-۷۹). از این رو مخازن اصولاً می‌توانند به دو نوع تقسیم‌بندی شوند که عبارتند از:

۱- مخازن نفتی: اگر دمای مخزن کمتر از دمای بحرانی سیال مخزن باشد، مخزن به عنوان یک مخزن نفتی تقسیم بندی می شود. با توجه به فشار اولیه مخزن (P_i)، مخازن نفتی می توانند به دسته های کوچکتر زیر تقسیم شوند:

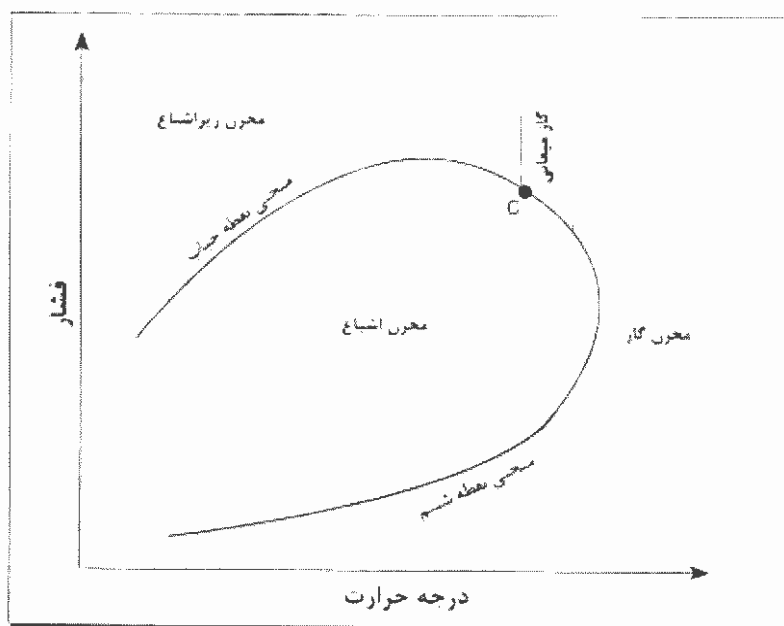
الف) مخزن نفتی زیر اشباع (*under-saturated*): اگر فشار اولیه مخزن (P_i)، بالاتر از فشار نقطه حباب (P_b) سیال مخزن باشد، مخزن به عنوان مخزن نفتی زیر اشباع طبقه بندی می شود. در این گونه مخازن، که از نظر گاز محلول اشباع نشده اند، پوش گاز (gas cap) وجود ندارد.

ب) مخزن نفتی اشباع (*saturated*): اگر فشار اولیه مخزن برابر فشار نقطه حباب سیال مخزن باشد، مخزن به عنوان مخزن نفتی اشباع در نظر گرفته می شود.

ج) مخزن با کلاهک گازی: اگر فشار اولیه مخزن، پایین تر از فشار نقطه حباب سیال مخزن باشد، مخزن به عنوان مخزن با کلاهک گازی یا مخزن دو فاز طبقه بندی می شود. در این مخازن گاز محلول از نفت جدا شده و پوش گاز را در بالای ستون نفت ایجاد کند. در اینجا لازم

به ذکر است که در طی تولید و کاهش فشار، یک مخزن نفتی زیر اشباع به مرور به یک مخزن نفتی اشباع و مخزن با کلاهک گازی تبدیل می گردد.

۲- مخازن گازی: اگر دمای مخزن بیشتر از دمای بحرانی سیال مخزن باشد، مخزن به عنوان یک مخزن گازی در نظر گرفته می شود.



شکل ۷-۷۹ - تفکیک مخازن هیدروکربنی بر روی نمودار درجه حرارت و فشار

۷-۸ محیط های رسوبی سنگ های مخزن

محیط های رسوبی که مخازن در آن نهشته می شوند پارامترهای مهم مخزنی نظیر مورفولوژی (morphology) روند (trend)، پیوستگی (continuity) و کیفیت یک مخزن را تحت کنترل دارند.

عوامل زیر می توانند در یک توالی قائم برای شناخت محیط های رسوبی استفاده شوند:

* بافت

* محتوای فسیلی

* ساختمان‌های رسوبی

* موقعیت چینه‌شناسی

مطالب بسیار متنوع و فراوانی در مورد محیط‌های رسوبی مناسب برای نهشته شدن سنگ‌های مخزن وجود دارد که بیان همه آن‌ها در حوصله این نوشتار نخواهد بود. در این بخش از کتاب به بیان خلاصه‌ای در مورد بعضی از محیط‌ها و اهمیت آن در زمین‌شناسی نفت پرداخته می‌شود.

۷-۸-۱ محیط‌های رسوبی تخریبی (Clastic Sedimentary Environments)

محیط‌های رسوبی تخریبی را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم کرد:

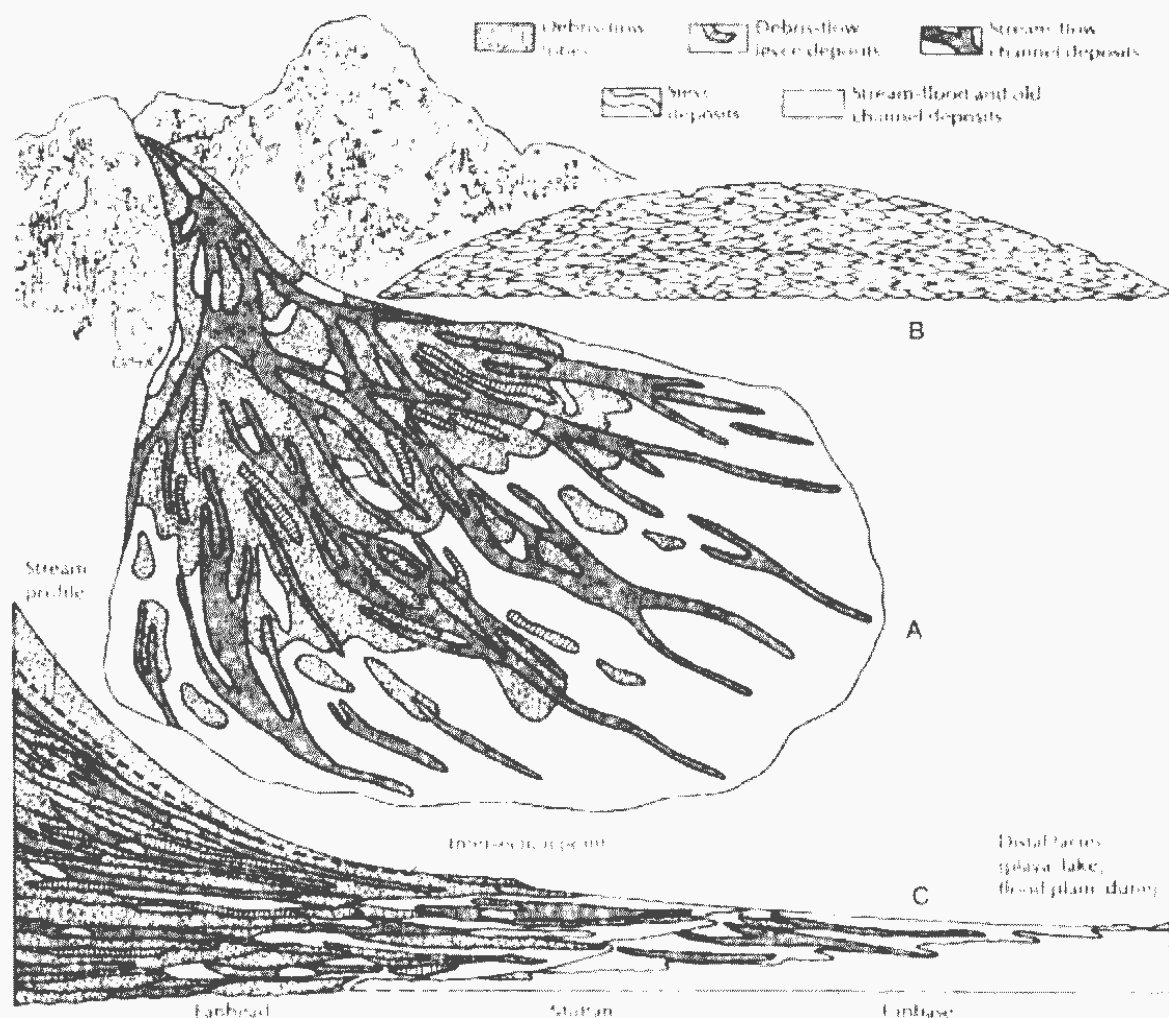
- قاره‌ای (continental)
- حدواسط (transitional)
- دریایی (marine)

۷-۸-۱-۱ محیط‌های قاره‌ای

محیط‌های قاره‌ای شامل زیرمحیط‌های زیر می‌گردد:

۷-۸-۱-۱-۱ مخروط افکنه (Alluvial Fan)

مخروط افکنه‌ها در پهنه‌های مجاور بلوک‌های گسل‌خورده و در بالای سطح آب دریا شکل می‌گیرند (شکل ۷-۸۰). مخروط افکنه‌ها به صورت توده‌های ماسه‌ای و گراولی هستند که از نظر توزیع تخلخل و تراوایی بسیار ناهمگن هستند. تاکنون مخازن قابل اهمیتی از رسوبات مخروط افکنه در دنیا گزارش نشده است. اگر احیاناً هیدروکربنی در رسوبات این محیط به دام بیافتد شانس تجزیه آن توسط آبشویی (water washing)، تجزیه آلی (biodegradation) و اکسید شدن آن زیاد است. البته شدت این فرآیندها بستگی به نرخ فرونشست و زمان مهاجرت هیدروکربن دارد. رسوبات مخروط افکنه‌ها غالباً فاقد رسوبات از نوع پوش سنگ هستند، مگر اینکه توسط رسوبات غیرتراوای پیشرونده پوشیده شوند.



شکل ۸-۷ مدل رسوبگذاری یک مخروط افکنه. (A سطح مخروط، (B برش عرضی مخروط، (C برش طولی مخروط

۷-۸-۱-۱ رسوبات بادی (Aeolian Deposits)

ماسه‌های تپه‌های شنی ممکن است جورشدگی و گردشدگی خوبی داشته باشند و از نظر تخلخل نیز برای ایجاد یک سنگ مخزن خوب مناسب باشند اما به علت فقدان سنگ منشأ مناسب و عدم شرایط مناسب برای حفظ و دفن شدن، کمتر به عنوان سنگ مخزن شناخته شده‌اند. ماسه‌های تپه‌های شنی دارای طبقه‌بندی مورب هستند (شکل ۷-۸۱) و ممکن است میان لایه‌هایی از تبخیری‌ها نیز در آن‌ها موجود باشد.

تپه‌های شنی که تشکیل مخازن را داده‌اند در دو بازه از زمان زمین‌شناسی تمرکز یافته‌اند. بازه جوانتر یک خشکی‌زایی وسیع در طی پرمین، تریاس و ژوراسیک پیشین بوده است در زمانی که ابرقاره پانگه‌آ وجود داشت، مثل ماسه‌سنگ Nugget در غرب آمریکا. بازه قدیمی‌تر بر پالئوزوئیک پیشین منطبق است، مثل مخازن ماسه‌سنگی حاسی مسعود در الجزایر و ماسه‌سنگ Wilcox و Simpson در آمریکا با سن اوردوئیسین.



شکل ۷-۸۱ - رسوبات بادی با ساخت طبقه‌بندی مورب در یوتای آمریکا

۷-۸-۱-۱-۳ مخازن ماسه‌سنگی یخچالی

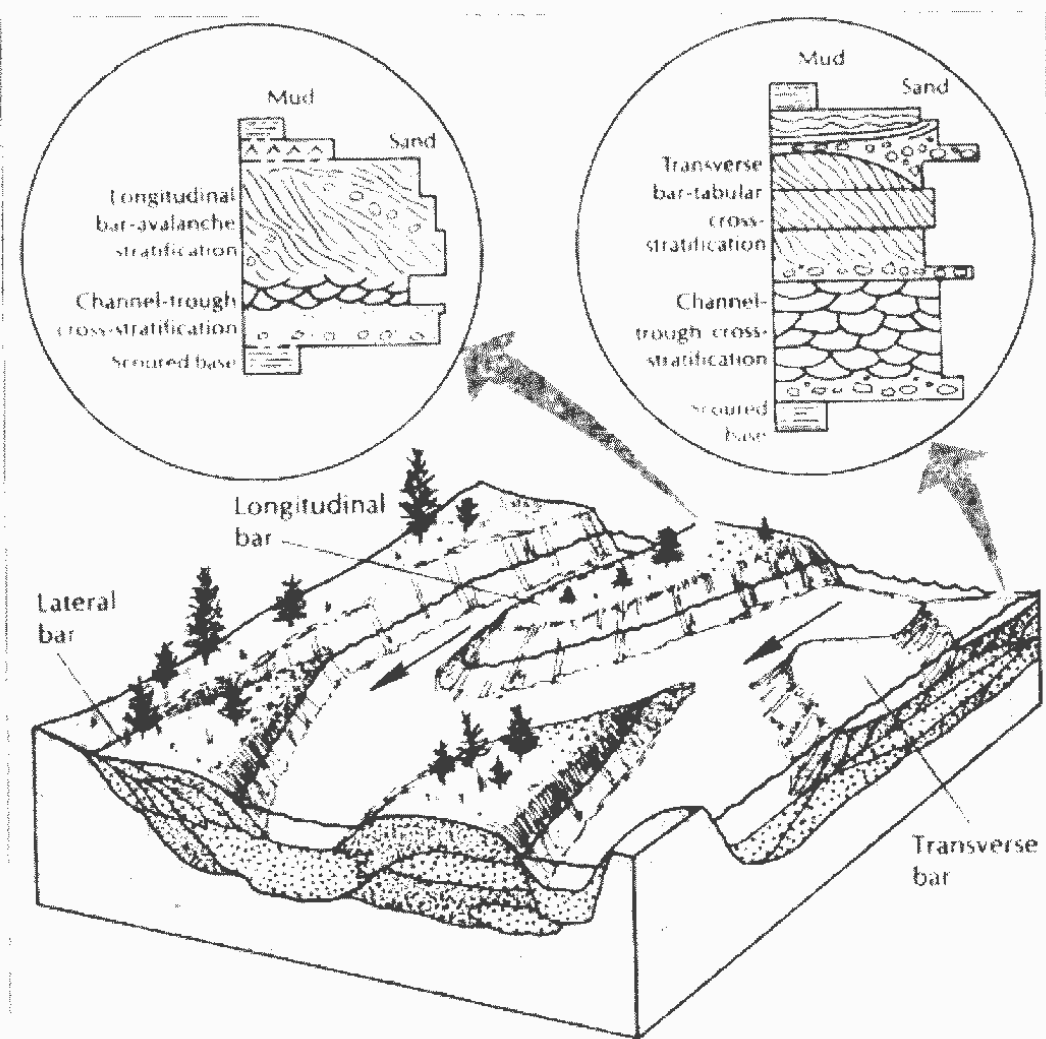
تعداد کمی از سنگ مخزن‌های آواری به منشأ یخچالی نسبت داده می‌شود. ماسه‌های این نوع مخازن تیلیت (دیامیکتایت) نامیده می‌شود. قطعات تیلیت به صورت اتفاقی پخش شده‌اند و ابعاد و ترکیب دانه‌های آن‌ها مختلف است و اشکال آن‌ها به صورت زاویه‌دار و یا صفحه‌ای است که حاصل از سایش یخچالی است. مخازن ماسه‌ای، لنزهایی از تیلیت همراه با واروهای آرژیلیتی دارند که از اطراف با رسوبات قاره‌ای، دریاچه‌ای یا دریایی ارتباط دارند. تقریباً تمام ماسه‌های یخچالی در قاره گندوانا واقع شده‌اند، مثل مخازن کربونیفر-پرمین که در بخش جنوبی عمان توسعه کمی دارند.

۷-۸-۱-۱-۴ محیط‌های رودخانه‌ای (Fluvial)

ماسه‌های رودخانه‌ای یا آبرفتی توسط رودخانه‌ها رسوب‌گذاری شده و در توالی‌های غیردریایی وجود دارند. در یک توالی عمودی از چین‌ها در رسوبات رودخانه‌ای کاهش در اندازه ذرات به سمت بالا (fining upward) دیده می‌شود. این توالی‌های به سمت بالا ریزشونده از ماسه‌های درشت، گراول و خرده‌سنگ تا ماسه‌های دارای طبقه‌بندی مورب و ماسه‌های لامینه‌ای و سیلت‌ها تشکیل شده که سیلت‌های لامینه‌ای ریزشی، رژیم جریان پایین را نشان می‌دهند. این توالی تفاوت بین رخساره رودخانه‌ای را از ماسه‌های ساحلی، که توالی‌های به سمت بالا درشت‌شونده (coarsening upward) دارند، آشکار می‌کند.

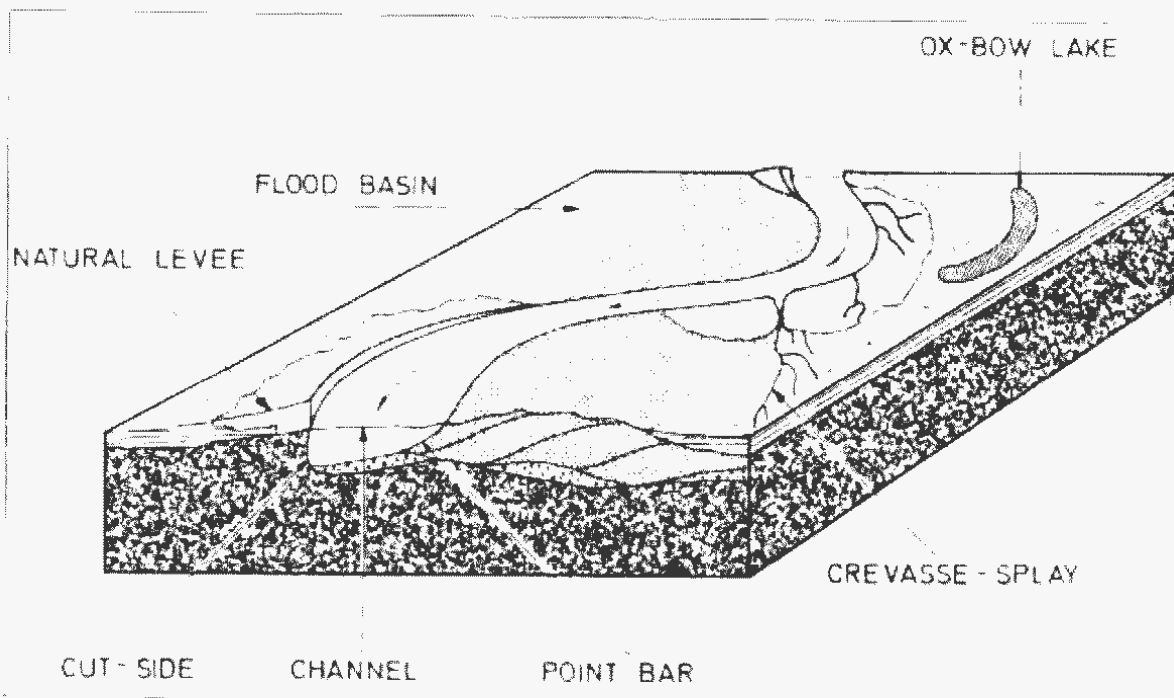
در اینجا به بررسی رسوبات رودخانه‌های بریده‌بریده (braided river) و ماندری (meander) پرداخته می‌شود:

رسوبات رودخانه‌های بریده‌بریده نقش بسزایی را به عنوان سنگ مخزن در سراسر دنیا بازی میکنند. از مثال‌های مهم می‌توان از سازند Sadlerochit در میدان Purdhoie که یکی از میادین نفتی عظیم امریکای شمالی است، نام برد. مثال دیگر سازند Tirrawarra در حوضه Cooper در استرالیا است. توالی‌های رسوبات رودخانه‌های بریده‌بریده، به صورت نهشته‌های ماسه‌ای و گراولی با شکل هندسی صفحه‌ای است که دارای شیب در جهت مخالف رشته کوه‌هاست. قسمت اعظم رسوبات رودخانه‌های بریده‌بریده در داخل جزایر میان کانالی (bars) شکل می‌گیرد (شکل ۷-۸۲). لازم به ذکر است که شکل این جزایر از قسمت‌های فوقانی رودخانه به سمت پایین دست تغییر می‌کند و به همراه این تغییر در مورفولوژی که از جزایر طولی (longitudinal bars) به جزایر مورب (transverse bars) و عرضی است، کیفیت بافتی و کانی‌شناسی بهبود یافته و لذا کیفیت سنگ مخزن افزایش می‌یابد. رسوبات سازند Sadlerochit شامل توالی رسوبات دلتایی و رودخانه‌های بریده‌بریده به سن پرموتریاس است. نفتگیر این مخزن از نوع ساختمانی و چینه‌ای است و سنگ مخزن ضخامتی در حدود ۲۰۰ متر ماسه‌سنگ است که دارای تخلخل در حدود ۲۰ تا ۲۴٪ و تراوایی ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ میلی‌داری است. رسوبات سازند Tirrawarra عمدتاً متشکل از ماسه‌سنگ‌های دانه متوسط با جورشدگی ضعیف تا خوب است. بلوغ بافتی و کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌ها از بخش‌های بالادستی رودخانه به سمت بخش‌های پایینی افزایش می‌یابد. با افزایش بلوغ بافتی و به خصوص بلوغ کانی‌شناسی، کیفیت سنگ مخزن حتی با دفن شدن به عمق ۳ کیلومتری زیاد کاهش نمی‌یابد. تخلخل در این سازند به‌طور متوسط ۱۷٪ و تراوایی ۳۴۰ میلی‌داری است.

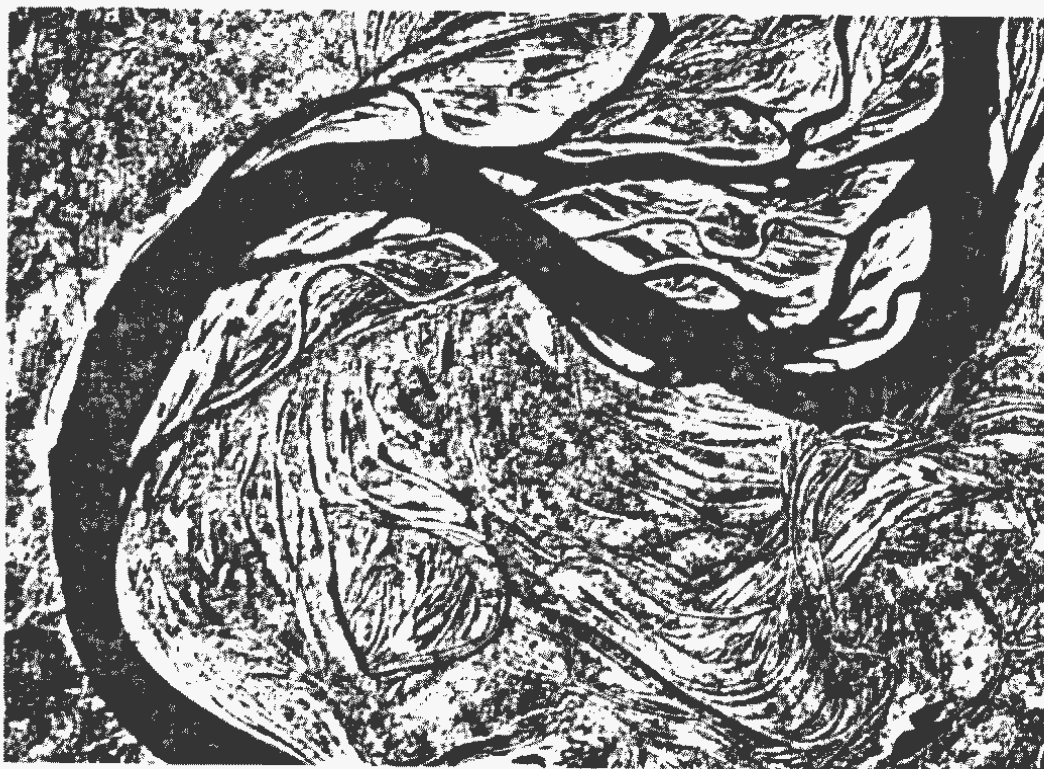


شکل ۷-۸۲ مدل رسوبی یک رودخانه بریده‌بریده و توالی رسوبات جزایر طولی و عرضی

در توالی رسوبات رودخانه‌های ماندری، ماسه‌سنگ‌های پوینت‌بار (pointbar) که در بخش داخل پیچ کانال شکل می‌گیرند (شکل ۷-۸۳)، دارای ارزش مخزنی هستند. این رسوبات به سمت بالا دانه‌ریز می‌شوند و در اثر جابجایی جانبی کانال رودخانه، گسترش جانبی (lateral accretion) و در اثر فرونشست منطقه، گسترش عمودی (vertical accretion) پیدا می‌کنند. شکل ۷-۸۴ گسترش جانبی وسیع یک رودخانه ماندری را نشان می‌دهد. رسوبات پوینت‌بار دارای جو رشدگی بافتی خوبی هستند و لذا تخلخل و تراوایی بالایی دارند. تغییر رخساره از رسوبات پوینت‌بار به رسوبات دانه ریز دشت سیلابی (flooding plain)، سبب ایزوله شدن رسوبات پوینت‌بار و تشکیل نفتگیرهای چینه‌ای می‌شود. در بعضی مواقع حلقه‌های ماندی از سیستم رودخانه جدا می‌شوند. اگر عمل جدا شدن حلقه رودخانه، سریع صورت گیرد، این حلقه که شبیه نعل اسب است توسط رسوبات دانه‌ریز دشت سیلابی و نیز مواد آلی پر می‌شود و یک پلاگ سه طرفه را برای رسوبات فراهم می‌کند. حال اگر طرف چهارم این نعل نیز ایزوله شود و یا اینکه رسوبات کمی شیب پیدا کنند، یک نفتگیر چینه‌ای شکل خواهد گرفت.

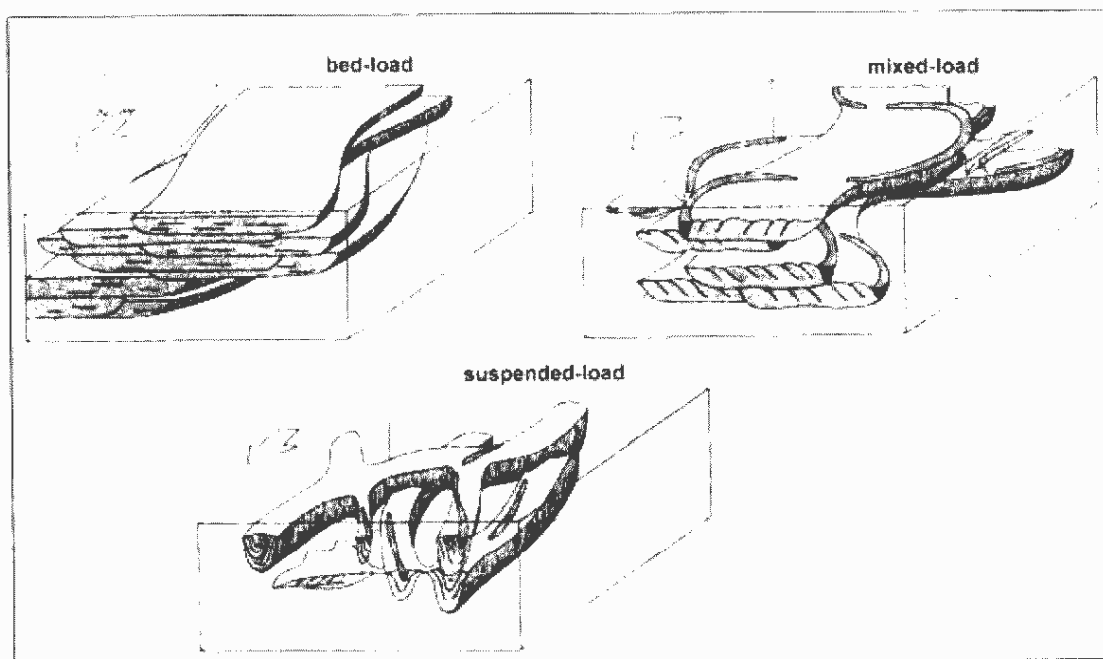


شکل ۸۳-۷ بلوک دیاگرام یک رودخانه ماندری با بخش‌های مختلف آن



شکل ۸۴-۷ عکس هوایی از یک رودخانه ماندری با بخش‌های مختلف آن

شکل ۸۵-۷ یک نمای کامل از چگونگی گسترش، ارتباط جانبی و ساختار داخلی توده‌های ماسه‌ای در سیستم‌های آبرفتی را نشان می‌دهد. در این شکل سعی شده است با حذف دیگر رسوبات محیط‌های آبرفتی، شکل هندسی مخازن احتمالی ماسه‌سنگی مشخص گردد. این چنین مدل‌سازی رخساره‌ای ابزار بسیار مهمی در پیش‌بینی چگونگی توزیع مخازن در مناطق اکتشافی است.



شکل ۷-۸۵ - شکل هندسی، ارتباط جانبی و ساختار داخلی توده‌های ماسه‌ای در سیستم‌های آبرفتی

۷-۸-۱-۱-۵ دریاچه‌ها (Lakes)

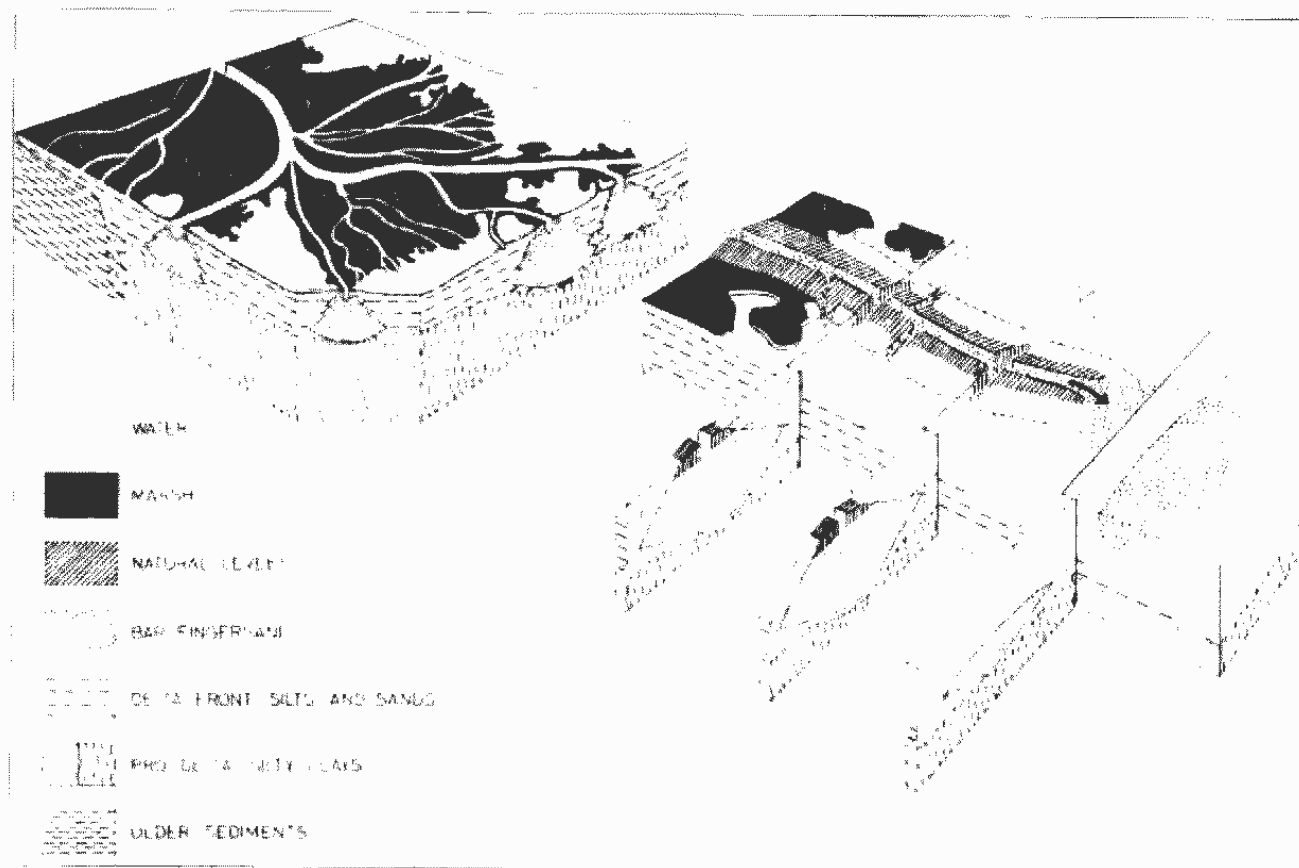
دریاچه‌ها از نظر تشکیل سنگ‌های مخزن از اهمیت کمی برخوردار هستند و فقط در صورتی که در حواشی آنها رسوبات دلتایی تشکیل شود شانس ایجاد سنگ مخزن در آنها حاصل می‌شود. در عین حال محیط‌های دریاچه‌ای، فضاهای مناسبی برای تجمع مواد آلی و لذا تشکیل سنگ‌های منشأ هیدروکربنی است.

۷-۸-۱-۲ محیط‌های حدواسط

۷-۸-۱-۲-۱ مخازن ماسه‌سنگی دلتایی

بسیاری از میدان‌های نفتی و گازی جهان در سنگ‌های رسوبی با منشأ دلتایی وجود دارند. رخساره‌های دلتایی، به دو دسته رخساره‌های دلتایی خارج از آب و رخساره‌های دلتایی زیرآب تقسیم می‌شود. رخساره‌های دلتایی خارج از آب شامل: رسوبات پرکننده رودخانه‌های قطع شده شاخه‌ای، خاکریزهای طبیعی، رسوبات خلیج‌های بین رودخانه‌های شاخه‌ای، رسوبات باتلاقی، کروس و جلگه‌های ساحلی یا دشت شنیر می‌باشند (شکل ۷-۸۶). رخساره‌های دلتایی زیرآب در منطقه زیر حد جزر و مد به طرف دریا تشکیل می‌شوند. رخساره‌های زیرآبی خود به دو بخش رسوبات قسمت جلویی دلتا و رسوبات قسمت انتهایی دلتا تقسیم می‌شود. مخازن عمده، بیشتر در قسمت جلویی دلتا در انتهای رودخانه‌های شاخه‌ای توزیع کننده (distributary channels) شکل می‌گیرند که به جزایر دهانه‌ای (mouth bar) معروفند. کانال‌های ماسه‌ای انشعابی در سطح دلتاهای سازنده به ندرت تشکیل مخزن می‌دهند زیرا

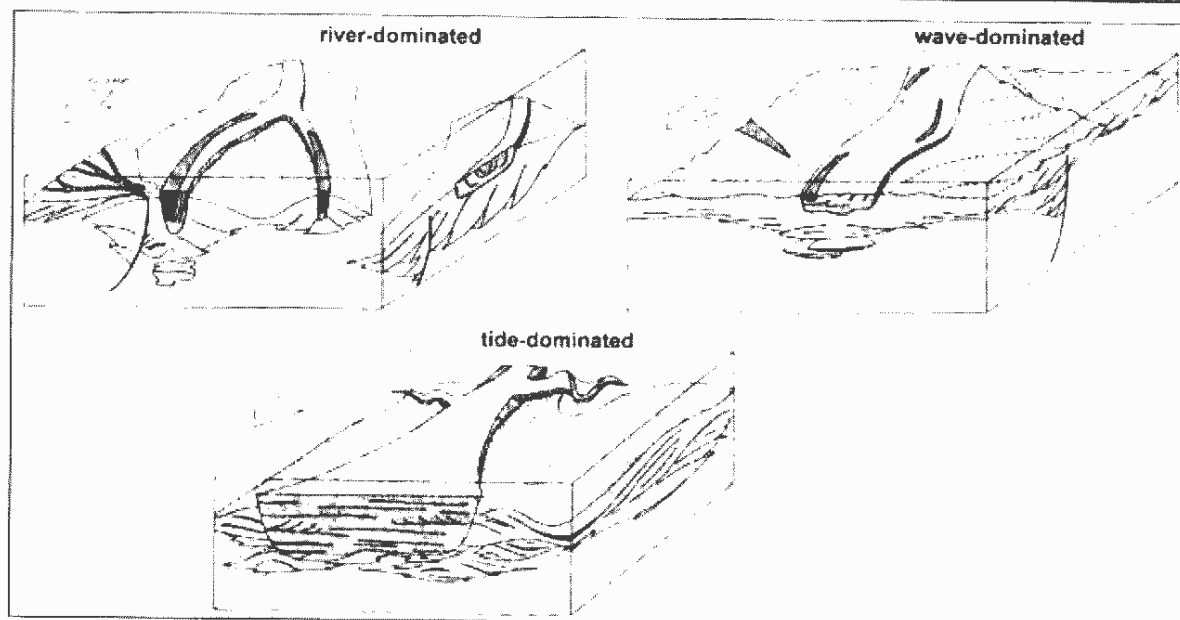
سیمان سیلیسی موجود در ماسه‌ها مانع از مهاجرت هیدروکربن به آن‌ها می‌شود. نفتگیرهای چین‌های در سیستم‌های دلتایی در نواحی که دو رخساره به‌طور زبانه‌ای به هم ارتباط دارند در ماسه‌های نواحی جلوی دلتا و گل‌های دریایی وجود دارند. نفتگیرهای ساختمانی نیز در دلتاها به دلیل عملکرد گسل‌های رشدی وجود دارند.



شکل ۷-۸۶ دیاگرام شماتیک از دلتای می‌سی‌سی‌پی و نحوه گسترش رسوبات دهانه‌ای کانال‌های توزیع

دلتاهای حاوی هیدروکربن در دونین و پنسلوانین و همچنین در کرتاسه - پالئوسن و از میوسن تا عهد حاضر گسترش یافته‌اند، مانند اغلب مخازن دونین و کربونیفر پایانی تا میانی در میدان‌های نفتی بزرگ حوضه اورال-ولگا. ماسه‌سنگ‌های دلتایی در کرتاسه پایینی معمولاً مخازن نفتی خوبی را ساخته‌اند مثل حوضه سیری غربی، حوضه کوه‌های راکی در آمریکای شمالی و مخازن متعدد ماسه‌سنگی و جوان باکو و چلکن در حوضه جنوبی خزر که از یک سری دلتاهای بادبزنی در طی پلیوسن شکل گرفته‌اند.

شکل ۷-۸۷ چگونگی گسترش، ارتباط جانبی و ساختار داخلی توده‌های ماسه‌ای در سیستم‌های دلتایی را نشان می‌دهد.

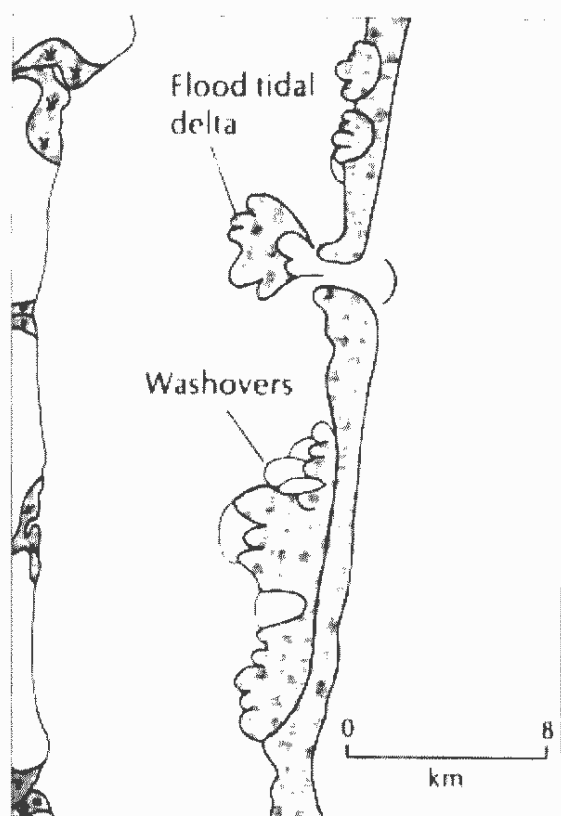


شکل ۷-۸۷ - شکل هندسی، ارتباط جانبی و ساختار داخلی توده‌های ماسه‌ای در سیستم‌های دلتایی

۷-۸-۱-۳ محیط‌های دریایی (Marine Environments)

۷-۸-۱-۳-۱ مخازن ماسه‌سنگی در محیط‌های دریایی ساحلی

ماسه‌سنگ‌های ساحلی نقش مهمی در تشکیل مخازن دارند. رسوبات ساحلی بهترین توسعه را در شیب‌های ملایم دور از خط ساحل در ناحیه پیشروی و پسروی دریا دارند. زون ساحلی مستعد جمع شدن ماسه‌ها است. این زون خیلی وسیع و ماسه‌های موجود در آن بسیار متنوعند. در قسمت‌های بیرونی زون ساحلی، ماسه‌های تپه‌های شنی، لاگون‌ها و باتلاق‌ها وجود دارند. قسمت

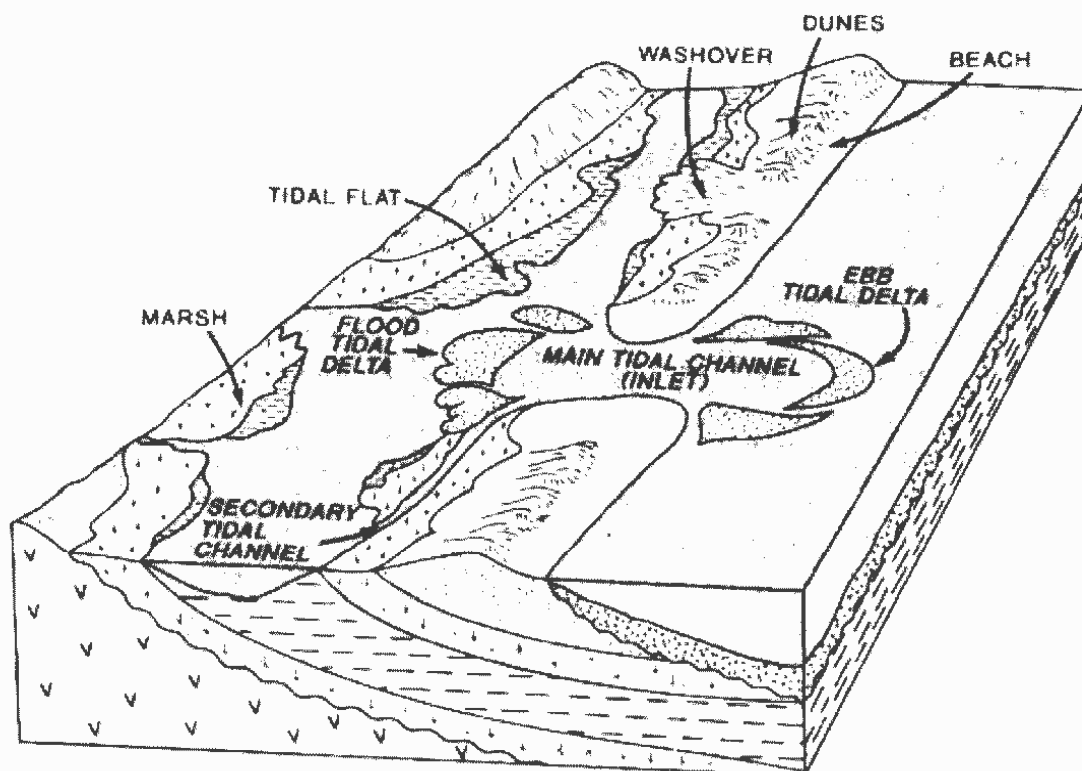


داخلی زون ساحلی کاملاً دریایی و نریٹیک است (شکل ۷-۸۸). ماسه‌های رسوبگذاری شده فوق، خصوصیات انرژی بالا را نشان می‌دهند و دارای جورشدگی خوبی هستند. در ماسه‌های رسوبگذاری شده زیر خط اثر امواج، لایه‌بندی‌ها ممکن است توسط زیست‌آشفستگی تخریب شود. ماسه‌های ساحلی ممکن است توسط رسوبات گلی دلتا دفن شوند. طوفان‌ها همچنین جریان‌های دانسیته‌ای ایجاد می‌کنند که ماسه‌ها را از خشکی به سمت دریا حمل می‌کنند و آن‌ها را زیر خط اثر امواج رسوب می‌دهند.

شکل ۷-۸۸ - نمای شماتیکی از محیط ساحلی با توده‌های ماسه‌ای

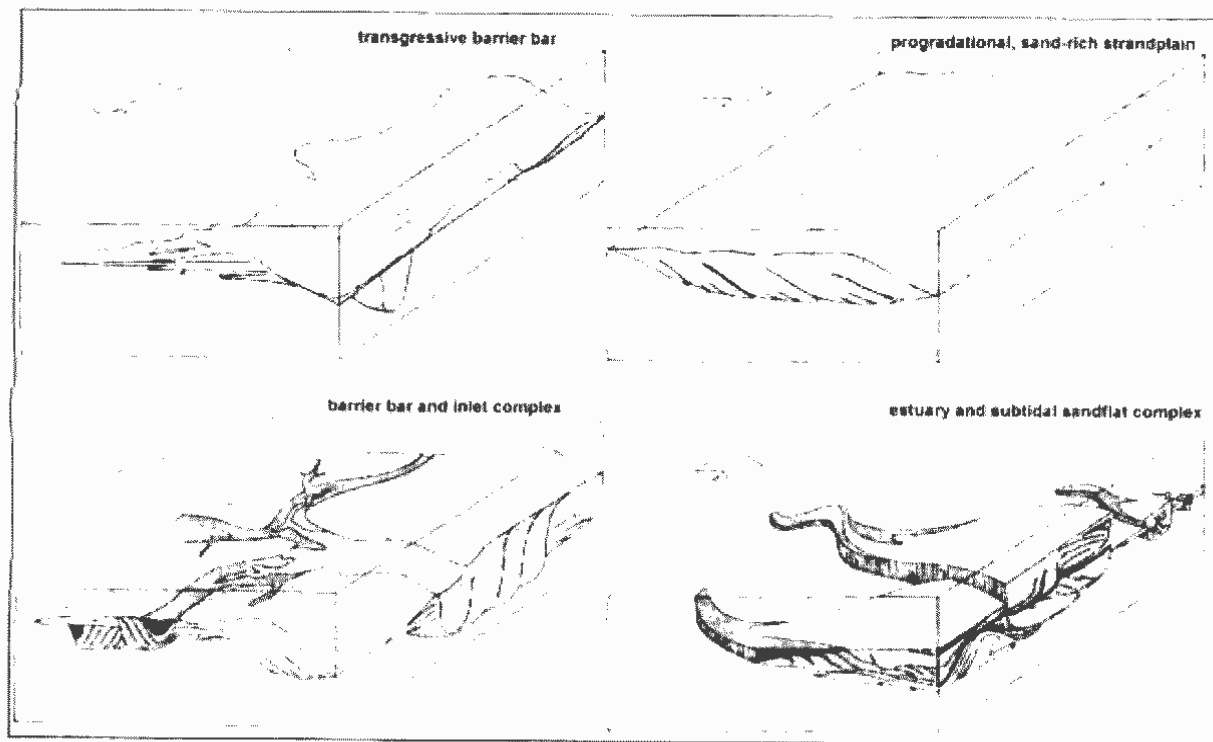
سواحل و سدهای ماسه‌ای به‌طور تیپیک غنی از کوارتز هستند و از نظر بافتی تمیز و جورشده بوده و دارای تخلخل و تراوایی بالایی هستند و لذا ظرفیت مخزنی بالایی دارند. میدان گازی Kinsale Head در جنوب ایرلند که شامل کانال‌ها، سواحل و سدهای ماسه‌ای به سن کرتاسه است مثال خوبی برای این نوع مخازن است.

رسوبات جزایر سدی (barrier-bar) شامل توده‌های ماسه‌ای به موازات ساحل است که بین رسوبات غنی از مواد آلی بخش لاگون پشت جزایر سدی و مادستون‌های دریایی احاطه شده است (شکل ۷-۸۹). وجود چنین شرایطی با توجه به اینکه رسوبات ماسه‌ای جزایر سدی عموماً از کیفیت تخلخل و تراوایی بسیار خوبی برخوردارند، موقعیت ایجاد مخازن هیدروکربنی خوبی را فراهم می‌سازد. رسوبات دانه‌ریز لاگون و مادستون‌های دریایی می‌توانند نقش پوش‌سنگ و سنگ منشأ را در اثر پیشروی یا پسروی رسوبات جزایر سدی بازی نمایند. مشهورترین تولیدکننده نفت از سدهای دور از ساحل، ماسه‌های بندکشی (shoestring sand) کانزاس و شمال شرق اوکلاهما هستند.



شکل ۷-۸۹ بلوک دیاگرام جزیره سدی پیشرونده با بخش‌های مختلف آن

شکل ۷-۹۰ چگونگی گسترش، ارتباط جانبی و ساختار داخلی توده‌های ماسه‌ای در محیط‌های ساحلی را نشان می‌دهد.

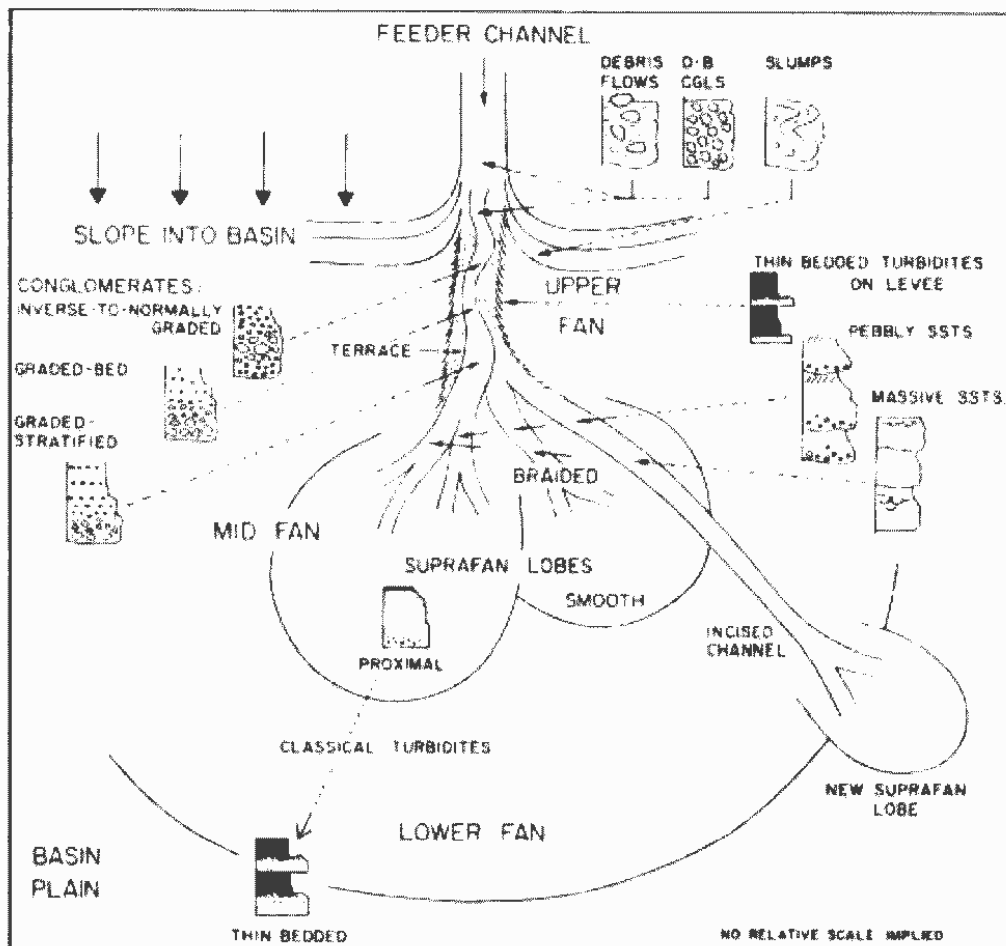


شکل ۷-۹۰ - شکل هندسی، ارتباط جانبی و ساختار داخلی توده‌های ماسه‌ای در محیط‌های ساحلی

۷-۸-۱-۳-۲ محیط دریایی عمیق (Deep Marine Environment)

مخروط‌های زیردریایی (submarine fan) از جمله محیط‌های مستعد تشکیل سنگ‌های مخزن در محیط دریایی عمیق دریایی می‌باشند. مخروط‌های زیردریایی توسط رسوبات تخریبی حاصل از جریان‌های آشفته (turbidity currents) تغذیه می‌شوند. این رسوبات از بخش‌های کم عمق از طریق دره‌های زیردریایی (submarine canyon) به بخش‌های عمیق حوضه ریخته می‌شود (شکل ۷-۹۱) و محیط‌های رسوبگذاری آن‌ها از شیب قاره تا منطقه آب‌سال امتداد می‌یابد. بخش بالادست (proximal) مخروط، عموماً از رسوبات در حد ماسه تشکیل شده است که دارای ساخت ناشی از تغییر شکل رسوبات نرم (soft sediment deformation) است که در طی فرآیند از دست دادن آب (dewatering) رسوبات ماسه‌ای غیر متراکم حاصل می‌شود. بخش پایین دستی (distal) شامل تناوبی از ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های نازک لایه است که به خوبی سری بوما (Bouma seires) را نشان می‌دهد. از ویژگی‌های رسوبات مخروط‌های زیردریایی، ضخامت و وسعت نسبتاً زیاد توالی شیلی و ماسه‌سنگی است.

اغلب مخازن ماسه‌سنگ‌های آب‌های عمیق در کربونیفر پسین و ژوراسیک پیشین و اوایل ترشیاری و اواخر الیگوسن شکل گرفته‌اند. مثل میدان‌های گازی و نفتی پالتوسن و اتوسن زیرین در حوضه دریای شمال و حوضه شرقی ونزوئلا و ترینیداد متعلق به ترشیاری.



شکل ۷-۹۱ مدل شماتیک از یک مخروط زبردریایی و رخساره‌های مرتبط به آن

۷-۸-۲ محیط‌های رسوبی کربناته (Carbonate Sedimentary Environments)

با استفاده از سه نوع مطالعه می‌توان محیط‌های رسوبی کربناته را از هم تشخیص داد:

۱ - مطالعه ماکروسکوپی و میکروسکوپی رسوب که شامل مطالعه ساخت‌های رسوبی، لیتولوژی و بافت می‌باشد. از فاکتورهای مهم در مطالعه محیط رسوبی انرژی محیط در هنگام رسوبگذاری است که در سنگ خود را به صورت اندازه ذرات، جورشدگی، گردشدگی و ساختمان‌های رسوبی نشان می‌دهد. نسبت بین ماتریکس و ذرات برای تخمین میزان انرژی مهم است. در بین تقسیم‌بندی‌های موجود، تقسیم بندی دانهام برای تخمین میزان انرژی مفید است.

۲ - شناسایی شاخص‌های بیولوژیکی محیط که شامل انواع فونا و فلورای موجود، تأثیر متقابل بین رسوب و ارگانیسم‌ها مثل زیست‌آشفته‌گی (bioturbation) است. ارگانیسم‌های فسیلی و آثار آن‌ها فاکتورهایی هستند که با فعالیت‌های بیولوژیکی ارتباط دارند ولی گاهی اوقات خودشان هم در تشکیل رسوب دخالت مستقیم دارند، مثل گل آهکی که از انباشته شدن ذرات اسکلتی به وجود می‌آید.

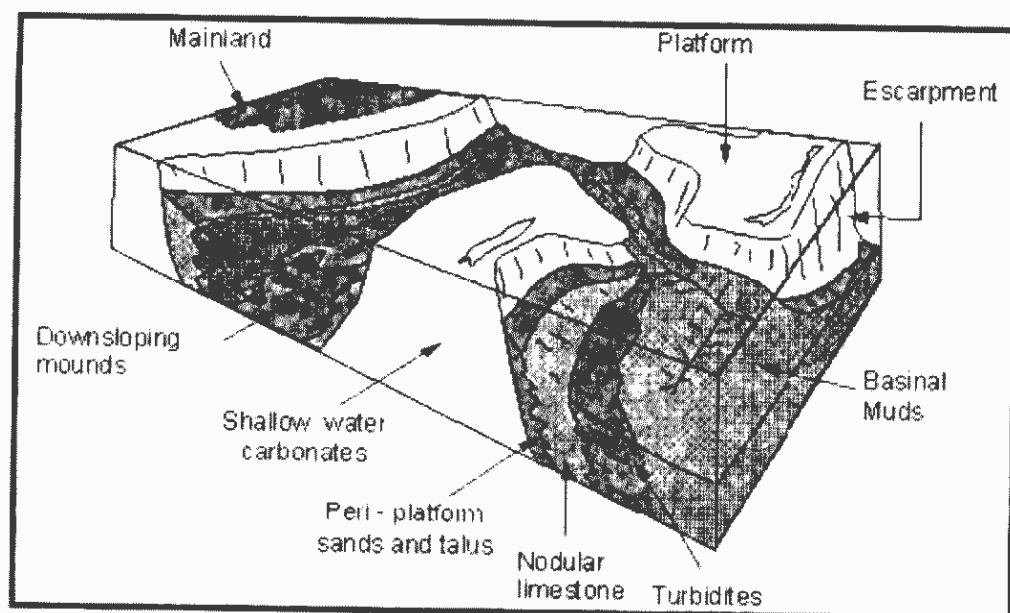
۳ - مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط‌های رسوبی مثل شوری، دینامیک و آب و هوا است. تأثیر آب و هوا روی ظهور و توزیع ارگانیس‌هاست و همچنین وجود یا عدم وجود تبخیری‌ها و دیگر نهشته‌ها است.

۷-۱-۲-۱ سیستم‌های رسوبی کربناته

توزیع رخساره‌های مطلوب و غیرمطلوب در رژیم‌های کربناتی، اول از همه به نیمرخ ژرفای قدیمی (paleobathymetric profile) منطقه رسوبگذاری بستگی دارد. کربنات‌های عصر حاضر، در سه رژیم به آسانی قابل تشخیص از هم نهشته شده اند، اگرچه موقعیت‌های حد واسطی که شامل خصوصیات هر سه می‌شود، وجود دارد.

۷-۱-۲-۸-۱ فلات‌های قاره‌ای کربناتی جدا شده (Differentiated Carbonate Shelves)

در حین پیشروی دریا، فلات‌های قاره‌ای کم شیب و پلاتفرم‌ها که ورودی ذرات آواری کم دارند، با رسوبات کربناتی آب‌های کم عمق، نظیر سنگ آهک‌های آواری بیوژنیک پلوئیدی و اوولیتی پوشیده می‌شوند (شکل ۷-۹۲). سنگ آهک‌های جلبکی و فرامینیفری و ریف‌های تپه‌ای شکل به‌طور گسترده‌ای توسعه می‌یابند. ریف‌های نسبتاً به هم پیوسته ممکن است در طول کناره فلات قاره نیز رشد کنند. در جلوی ریف که حداکثر انرژی وجود دارد گرینستون‌ها انباشته می‌شوند.



شکل ۷-۹۲ - فلات‌های قاره‌ای کربناتی جدا شده

از مثال‌های فلات قاره کربناتی نفت‌دار می‌توان حوضه میدلند در غرب تگزاس با سن پنسیلوانین پسین و پرمین را نام برد که از سنگ‌های مخزنی تشکیل شده است که همه انواع

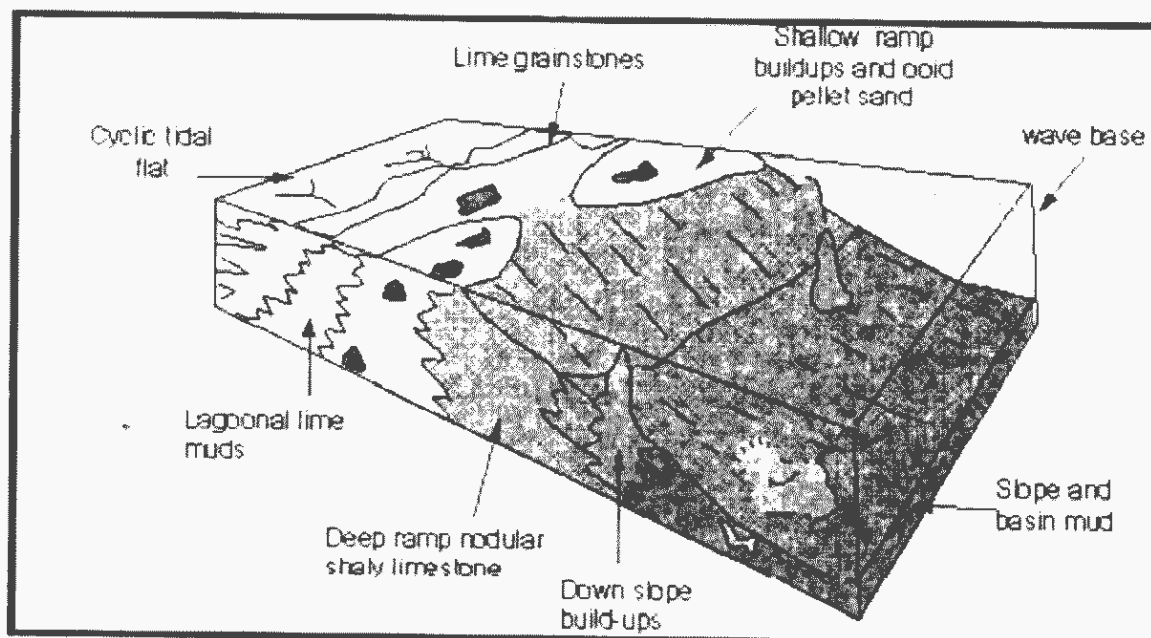
قابل تصور کربنات را دارد. این حوضه در طی پنسیلوانین یک حوضه کم رسوب بوده است و علاوه بر ریف‌های واقعی در حاشیه‌های حوضه دارای فلوئستون میکریتی، رودستون و وکستون با تخلخل عالی است. زون‌های متخلخل به صورت بین لایه‌ای، دارای شیل و ماسه‌های بیوکلاستی نازک هستند. رسوبات حوضه‌ای به‌طور عمده وکستون‌ها و پکستون رسی هستند که اشکال دگرشکلی رسوبات نرم را نشان می‌دهند. تقریباً تمام بخش‌های پرمین این کربنات‌ها دولومیتی شده است.

مخازن ریفی لیبی با سن پالئوسن و تقریباً هم‌زمان با مخزن کرکوک در عراق مثال‌های مخزنی بارورتری هستند. در لیبی، ریف‌های مرجانی، فریمستون‌ها را تشکیل داده‌اند. رسوبات غالب، پکستون‌های فرامینیفردار و جلبکی هستند و وکستون‌ها انواع زیادی از قطعات فسیلی را دارا می‌باشند و بیشتر دولومیتی شده‌اند.

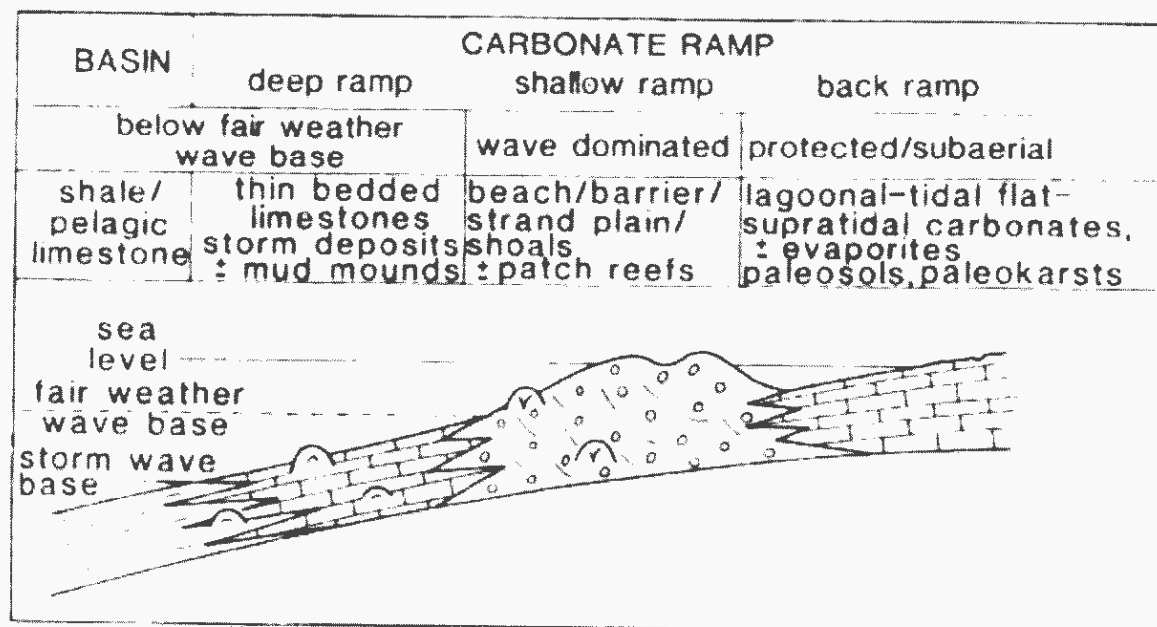
۷-۸-۲-۱-۲ رمپ‌های کربناته (Carbonate Ramps)

رمپ‌های کربناته به صورت کم‌شیب و بدون تغییر ناگهانی در شیب از خط ساحلی به حوضه می‌رسند (شکل ۷-۹۳). سکانس رمپ‌های کربناته بسیار نزدیک به سطح آب دریا ته‌نشست می‌یابند و شامل بخش‌های سوپراتایدال (supratidal)، اینترتایدال (intertidal) و ساب‌تایدال (subtidal) است. در رمپ‌های کربناته از کناره حوضه تا به سمت مرکز، رسوبات سبخایی (sabkha) شامل ژپس یا انیدریت، زون‌های جلبکی یا استروماتولیتی و سپس گرینستون‌ها (شامل اوولیت‌ها)، وکستون‌ها و پکستون‌ها (پلوئیدی و بیوکلاستی) و سرانجام مادستون‌های آهکی مشاهده می‌شوند (شکل ۷-۹۴). نتیجه نهایی یک سری سنگ‌های آهکی است که به صورت مکانیکی نهشته شده‌اند و به صورت دوره‌ای و منظم سنگ آهک‌های آرژیلی، مارن، شیل و شاید کمی ماسه‌سنگ بین لایه‌ای دارد. وجود ماسه‌سنگ نشان‌دهنده افزایش ورود تخریبی‌ها در طی دوره‌های پسروری است. همه واحدها گسترش جانبی وسیعی دارند و تطابق را بسیار آسان می‌سازند. رسوبات ته‌نشست یافته در نواحی سوپراتایدال و اینترتایدال دارای تخلخل اولیه بالایی می‌باشند. این تخلخل ناشی از ایجاد ترک‌های گلی، بافت فنسترال و زیست‌آشفستگی است. دیاژنز اولیه می‌تواند این فضاها را خالی را افزایش و یا آن‌ها را نابود کند. پیشروی نواحی سوپراتایدال به سمت دریا سبب دولومیتی شدن لایه‌های زیرین می‌شود. محیط ساب‌تایدال معمولاً متشکل از رخساره‌های متنوع است و از گرینستون تا مادستون متغیر است. این نوع رسوب معمولاً خیلی زود سیمانی شده و تخلخل آن‌ها از بین می‌رود. چون رسوبات کربناته رمپ‌ها نزدیک آب دریا شکل می‌گیرند، تاریخچه دیاژنتیکی آن‌ها غالباً متکی به تغییر سطح آب دریا است. افت سطح آب دریا سبب رخنمون یافتن رسوبات رمپ شده و لذا تحت تأثیر

آب‌های سطحی، پدیده انحلال در آن‌ها صورت می‌گیرد و کلسیت‌های حل شده مجدداً در زیر سطح ایستابی آب نهشته می‌شوند. پدیده انحلال در بالای سطح ایستابی آب سبب کارستی شدن (karstification) و افزایش کیفیت مخزن می‌شود.



شکل ۷-۹۳ - تصویری از یک رمپ کربناته



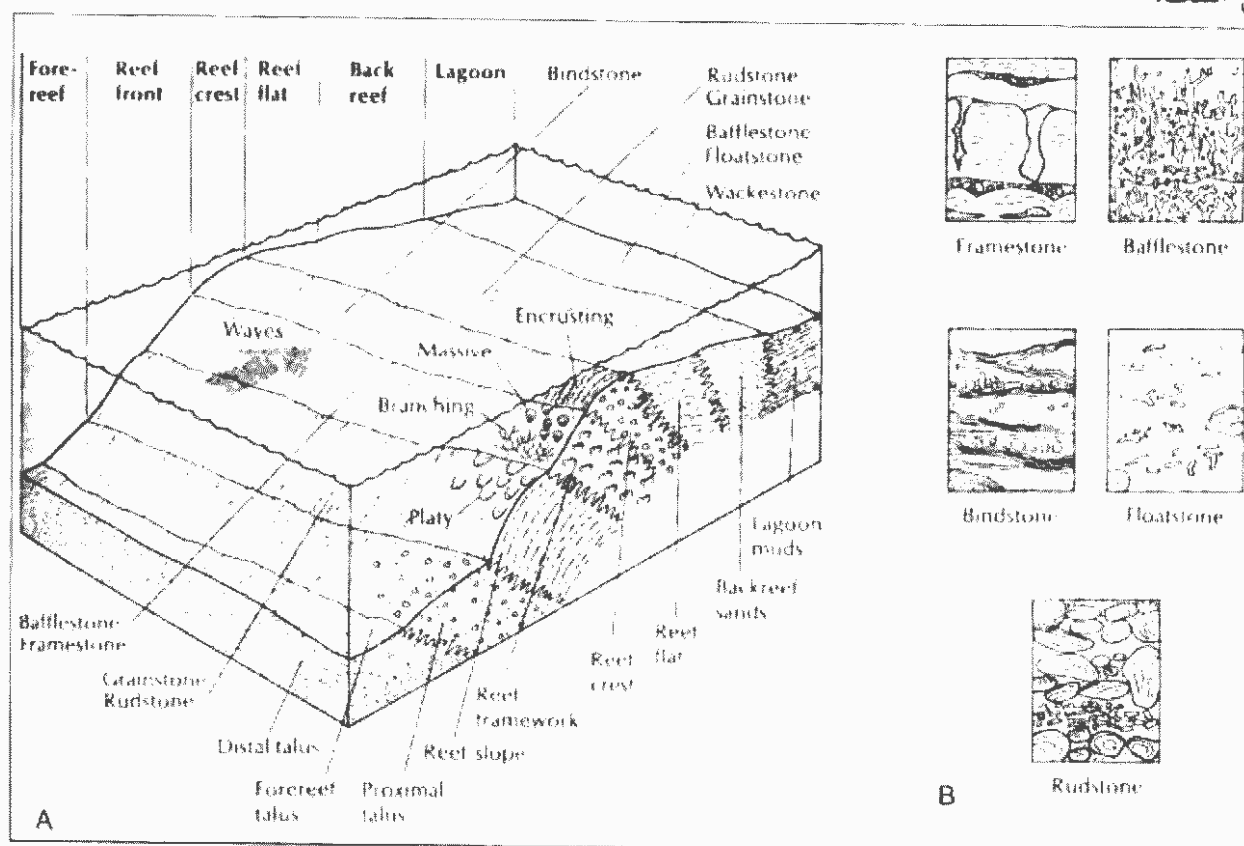
شکل ۷-۹۴ - مدل رسوبی رمپ کربناته

از مثال‌های مهم رمپ کربناتی نفت‌دار، می‌توان کربنات‌های کرتاسه پایینی و ژوراسیک بالایی در خلیج فارس را نام برد. در کامل‌ترین آن‌ها از سیستم سبخاهای ساحلی تا بخش‌های زیر سطح موج که در آن شرایط غیر اکسیدان حاکم می‌باشد، قابل مشاهده است. رخساره‌ها شامل نهشته‌های دوره ای سوپراتایدال، اینترتایدال و ساب تایدال است. نهشته‌های سوپراتایدال شامل کربنات (عمدتاً دولومیت)، انیدریت و ذرات تخریبی می‌باشند. رسوبات اینترتایدال، شامل

ماسه‌سنگ‌های دارای لامینه‌های متقاطع (cross lamination) و مادستون‌های جلبکی دولومیتی است و رسوبات ساب‌تایدال، شامل وکستون‌های پلتی است.

۷-۸-۲-۱-۳ ریف‌ها (Reefs)

ریف‌ها مجموعه زیستی هستند که معمولاً دارای ساختار تپه‌ای می‌باشند که غالباً مخازن هیدروکربنی خوبی را تشکیل می‌دهند (شکل ۷-۹۵). چون ریف‌ها گستردگی کافی را نداشته و به راحتی تغییر رخساره می‌دهند، معمولاً برای توسعه میادینی که مخازن اصلی آن ریف هستند، مطالعات لرزه‌ای دو بعدی و سه بعدی (2D and 3D seismic survey) از اهمیت زیادی برخوردار است. این نوع مطالعات ریسک عدم برخورد به مخازن را کاهش می‌دهد. ریف‌ها ممکن است هم در قسمت‌هایی از لبه فلات قاره و یا رمپ تشکیل شوند. در چرخه پسروی، به عنوان مثال در کمربند نفتی ایران، سنگ آهک ریفی روی قسمت جلویی خود (fore-reef) یا رسوبات حوضه‌ای قرار گرفته است که معمولاً یک نبود رسوبگذاری در قسمت بالایی خود دارد که بعضاً با پدیده انحلال همراه است. این آهک‌های ریفی توسط رسوبات پشت خود (back-reef) نظیر، تبخیری‌ها و مارن‌های لاگونی و سرانجام ماسه‌ها و رس‌های قاره‌ای پوشیده شده‌اند. در چرخه پیشروی که در اکثر ریف‌های نفت دار غرب کانادا دیده می‌شود این سری بر عکس است.



شکل ۷-۹۵ (A) بلوک دیاگرام یک ریف حاشیه پلاتنفرم و ماهیت رسوبات آن، (B) انواع مختلف آهک‌های ریفی همراه این

در محیط پر انرژی جلوی ریف، گرینستون‌های پلتی و مقداری وکستون و پکستون انکولیتی حاوی دانه‌های بیوکلاستی تشکیل می‌شود. وقتی گرینستون‌ها به وکستون‌ها و مادستون‌های پشت ریف تبدیل می‌شوند، نفتگیرهای متعددی از این تغییر رخساره به وجود می‌آید. به هر حال این گرینستون‌ها، در محیط پر انرژی خود توسط مادستون‌ها سریعاً دفن نمی‌شوند و بنابراین ممکن است تخلخل و تراوایی خود را در حین دیاژنز اولیه از دست بدهند. یکی از میادین هیدروکربنی مهم ریفی به نام Golden Lane مکزیک است که در سال ۱۹۰۷ به‌طور اتفاقی کشف گردید.

۷-۹ مخازن شکسته (Fractured Reservoirs)

تمامی سنگ‌های رسوبی به جز تبخیری‌ها در شرایط خاص قابلیت شکنندگی را دارند. مقاومت کششی سنگ‌ها بسیار کمتر از مقاومت تراکمی آن‌ها است. به همین دلیل، در سنگ‌ها تحت تأثیر نیروی کششی ایجاد درزه یا فرکچر (joint or fracture) می‌شود. درزه یا فرکچر، عبارت است از شکستگی‌هایی که غالباً در سنگ‌ها موجود است و مهم‌ترین مشخصه آن‌ها این است که حرکت نسبی به موازات صفحه شکستگی وجود ندارد. ابعاد شکستگی‌ها از چند سانتیمتر تا چند صد متر تغییر می‌کند. سطح شکستگی‌ها در اکثر حالات یک سطح صاف و مستوی است. از آنجا که شکستگی‌ها از نظر هندسی به صورت صفحه‌ای می‌باشند، لذا برای مشخص کردن آن باید شیب و امتداد آن مشخص گردد. سطح شکستگی ممکن است افقی، مایل و یا قائم باشد.

۷-۹-۱ تقسیم‌بندی شکستگی‌ها

شکستگی‌ها دارای تقسیم‌بندی‌های گوناگونی هستند و بر حسب خصوصیات خود به انواع زیر تقسیم می‌شوند:

۱) تقسیم بندی از نظر جهت جغرافیایی

این تقسیم بندی بر اساس امتداد شکستگی در جهات جغرافیایی صورت می‌گیرد. مثلاً شکستگی شمالی، که امتداد شکستگی به سمت شمال است.

۲) تقسیم بندی براساس موقعیت شکستگی‌ها نسبت به هم

- شکستگی‌های منظم و سیستماتیک: که شکستگی‌ها نسبت به هم موازی هستند و امتداد مشترک آن‌ها تقریباً در امتداد محور اصلی لایه‌ها یا امتداد گسل‌ها است.

- شکستگی‌های نامنظم: نسبت به هم چه از نظر امتداد چه شیب وضعیت مشخص ندارند و به صورت نامنظم پراکنده‌اند.

۳) تقسیم بندی از نظر وضعیت صفحه گسل نسبت به امتداد لایه بندی

- شکستگی امتدادی: نوعی شکستگی است که امتداد آن موازی یا تقریباً موازی امتداد لایه‌بندی است.

- شکستگی شیبی: امتداد شکستگی در جهت بزرگترین شیب لایه‌بندی است.

- شکستگی مایل: امتداد شکستگی نسبت به امتداد و شیب لایه غیر مشخص است.

- شکستگی طبقه‌ای: سطح شکستگی موازی سطح لایه‌بندی است.

معمولاً مجموعه شکستگی‌های موجود در یک ناحیه را یک دسته شکستگی گویند و مجموع چند دسته شکستگی را سیستم شکستگی گویند.

۴) تقسیم بندی براساس زایش شکستگی‌ها

- تکتونیکی: که بیشتر مدنظر است و بیشتر اتفاق می‌افتد و تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی و زمین‌ساختی در مجاورت چین‌خوردگی‌ها، گسل‌ها و گنبد‌ها شکل گرفته‌اند، که در صفحات بعد بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

- غیر تکتونیکی: شکستگی‌های غیر تکتونیکی ممکن است بر اثر اصابت اجرام خارجی به مقیاس بزرگ و در حد وسیع ایجاد شود، مثل برخورد سنگ‌های آسمانی به زمین. شکستگی‌های غیر تکتونیکی ممکن است بر اثر واکنش‌های لیتولوژیکی مثل از دست دادن آب به خصوص در سنگ‌های رسی به صورت محلی دیده شود. یا در اثر آبیگری و ازدیاد حجم سنگ، سنگ‌های اطراف شکسته شوند. لازم به ذکر است که این حالات به صورت محلی و در مقیاس کم و به صورت شکستگی‌های کوچک و میکروسکوپی دیده می‌شوند.

۷-۹-۲ روش مطالعه درزه‌ها

شکستگی‌های معمولاً به وسیله مطالعات آماری، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برای مطالعه درزه‌ها و شکستگی‌ها از تصاویر استریوگرافیک قطبی آن‌ها استفاده می‌شود که از روی پراکندگی آن‌ها، تفسیرها اعم از شیب، امتداد و جهت تنش در منطقه نتیجه‌گیری می‌شود. علاوه بر نمودارهای فوق از دیاگرام‌های گل سرخی (rose diagrams) نیز برای نمایش درزه‌ها استفاده می‌شود. این دیاگرام‌ها برای نمایش شیب و امتداد شکستگی‌ها قابل استفاده است. این روش در شناخت تکتونیک و تنش حاکم بر منطقه (field stress) و پیش‌گویی‌های کاربردی بسیار مفید می‌باشد.

استفاده از برخی نمودارهای چاه‌پیمایی، که در فصل‌های بعدی راجع به آن‌ها بحث خواهد شد، ما را قادر به بررسی شکستگی‌ها در داخل چاه‌های حفاری شده، می‌سازد.

۷-۹-۳ مکانیسم ایجاد شکستگی‌ها

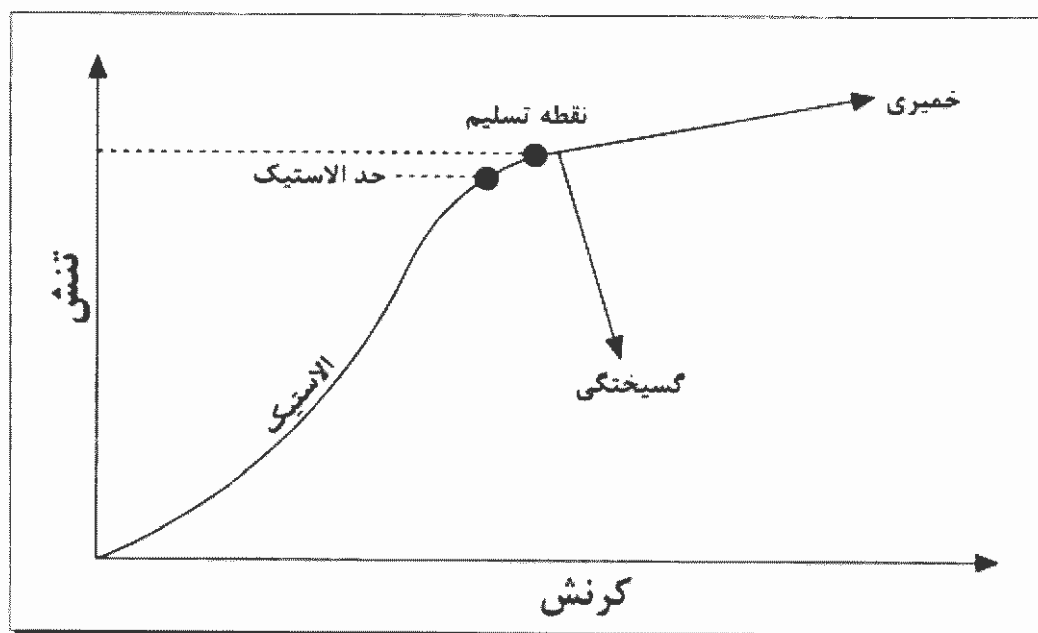
در اینجا بیشتر مکانیسم‌های تکتونیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شناخت مکانیسم ایجاد شکستگی‌ها، باید آن‌ها را در سنگ‌ها بررسی نمود.

سنگ‌ها در اثر تحمل تنش، مراحل رفتاری زیر را نشان می‌دهند (شکل ۷-۹۶):

۱- مرحله الاستیک که به صورت تقریباً خطی است و تغییر شکل ایجاد شده قابل برگشت است.

۲- مرحله خمیری که بالاتر از نقطه حد الاستیک است و تغییر شکل غیرقابل برگشت و یا تا حد کمی قابل برگشت است.

۳- مرحله گسیختگی، که تنش ایجاد شده فراتر از مقاومت سنگ است و سنگ در اثر آن شکسته می‌شود.



شکل ۷-۹۶ - دیاگرام تنش-کرنش برای سنگ‌های مخزن

سنگ‌ها با توجه به ترکیب خود در مقابل تنش، مراحل فوق را (شکل ۷-۹۶) به صورت متفاوت و با دامنه متفاوت طی می‌کنند. این تغییرات ارتباط مستقیم با خواص سنگ و فابریک آن و اندازه نیرو و مدت زمان تأثیر آن دارد.

۷-۹-۴ پارامترهای مؤثر و کنترل کننده در ایجاد شکستگی‌ها در سنگ تحت تنش

۱- فشارهای محصورکننده و همه جانبه (لیتواستاتیک)

فشارهای همه جانبه هر چه بیشتر باشد تغییر شکل پلاستیکی افزایش می‌یابد و سنگ دیرتر شکسته می‌شود.

۲- درجه حرارت

تغییر شکل پلاستیکی سنگ‌ها با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد و سنگ مقاوم‌تر و مقابل فشار دیرتر شکسته می‌شود.

۳- زمان

با افزایش مدت اثر تنش، دامنه تغییر شکل بیشتر می‌شود. ولی اگر مدت اثر تنش کم و سریع باشد، تغییر شکل کم و سنگ زودتر شکسته می‌شود.

۴- عمق

فشار لیتواستاتیک و درجه حرارت با افزایش عمق زیاد می‌شود. لذا تغییر شکل پلاستیک افزایش یافته و سنگ در مقابل شکستگی مقاومت بیشتری می‌کند.

۵- سیال‌های موجود در سنگ

سیال‌های موجود در سنگ در تعدیل تنش نقش دارند و باعث افزایش تغییر شکل پلاستیک سنگ می‌شوند. ولی اگر سنگ به مرحله شکست برسد سیال یک عامل تسریع کننده در این امر است.

۶- همگنی ترکیب سنگ

هرچه ترکیب سنگ همگن‌تر و از عناصر مقاوم‌تر تشکیل شده باشد شکل پذیرتر بوده و کمتر شکسته می‌شود و هر چه از عناصر شکننده و ناهمگن‌تر تشکیل شده باشد، ایجاد شکستگی در آن سریعتر است.

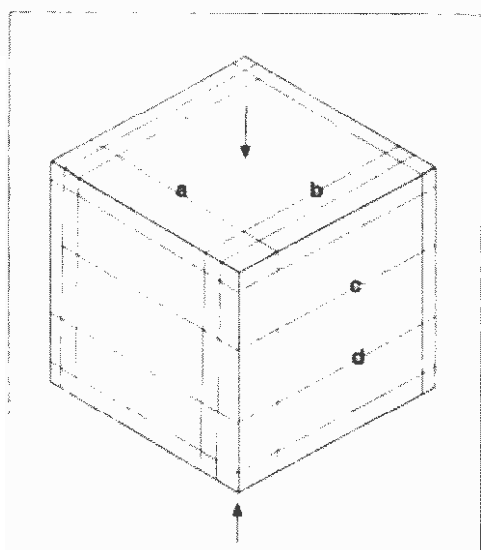
۷- فشارهای سیال منفذی

فشار سیال منفذی باعث کاهش مقاومت سنگ می‌شود، زیرا عکس تنش همه جانبه عمل می‌کنند و در شکسته شدن سنگ نقش مهمی را ایفا می‌کنند.

۷-۹-۵ تقسیم بندی شکستگی‌ها بر اساس نوع تنش اعمال شده

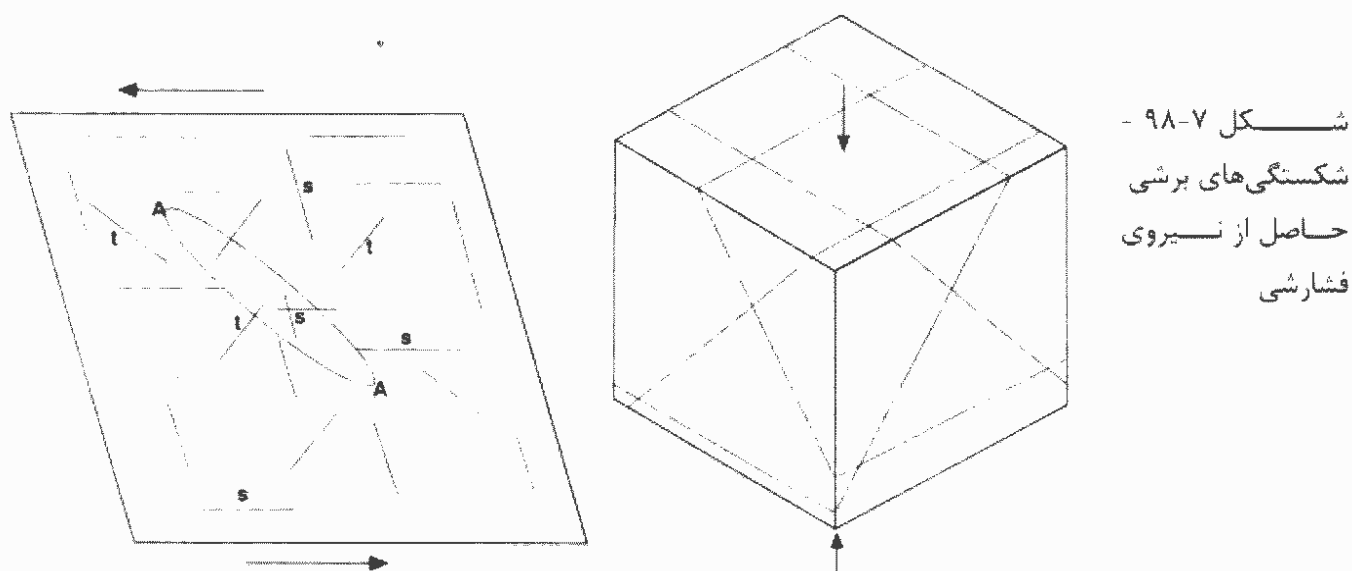
شکستگی را می‌توان بر اساس نوع تنش اعمال شده تقسیم نمود:

- ۱- شکستگی‌های حاصل از نیروی کششی: مقاومت سنگ‌ها در مقابل کشش نسبت به مقاومت آن‌ها در مقابل فشار بسیار کمتر است. این امر سبب می‌شود که ایجاد شکستگی در شرایط کششی بیشتر صورت گیرد. شکستگی کششی به صورت صفحه‌ای عمود در جهت بزرگترین کشیدگی است.
- ۲- شکستگی‌های حاصل از نیروی فشارشی: بر اساس کارهای آزمایشگاهی مشخص شده است که چندین نوع شکستگی در اثر نیروهای فشارشی حاصل می‌شود. این شکستگی‌ها شامل



شکستگی‌های کششی (extension fractures)، برشی (shear fracture) و شکستگی‌های رهایی (release fractures) است (شکل ۷-۹۷ و ۷-۹۸). شکستگی‌های کششی به موازات محور فشار و شکستگی‌های برشی به صورت مورب نسبت به محور فشار ایجاد می‌شوند. شکستگی‌های رهایی که در اثر کاهش یا برداشت نیروی تراکمی فوقانی می‌باشد، به صورت سطوح عمود بر محور بزرگترین تنش دیده می‌شود.

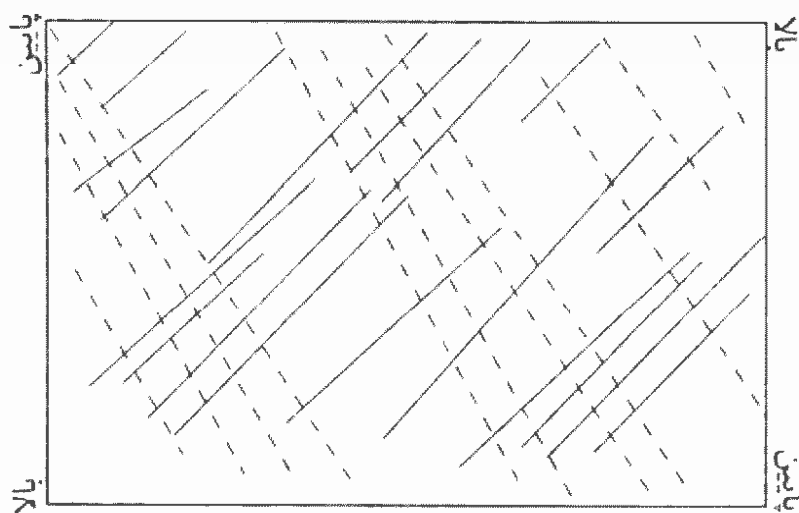
شکل ۷-۹۷ - شکستگی‌های کششی (a, b) و رهایی (c, d) حاصل از نیروی فشارشی



شکل ۷-۹۹ - شکستگی‌های ناشی از یک نیروی کوپل

۳- شکستگی‌های حاصل از نیروی کوپل: در بسیاری از مواقع محور اصلی فشار نسبت به سنگ‌ها به صورت مورب است. در چنین حالتی ترکیبی از شکستگی‌های کششی، تراکمی و مزدوج را نشان می‌دهند. در این نوع شکستگی‌ها، ابتدا شکستگی‌های کششی، که به موازات بزرگترین محور تراکم است، ایجاد شده سپس شکستگی‌های مزدوج و نهایتاً شکستگی‌های تراکمی، که عمود بر محور تنش است، شکل می‌گیرند (شکل ۷-۹۹). نیروی کوپل به صورت تنش برشی ساده با مؤلفه‌های برشی محض عمل می‌کند. یا بالعکس، اولین شکستگی‌ها عمود در جهت کشیدگی ایجاد شده، دومین شکستگی‌ها به موازات تنش‌های برشی (مزدوج) و نهایتاً آخرین شکستگی به موازات محور کشیدگی ایجاد می‌شود.

۴- شکستگی‌های حاصل از پیچش: که خود دو دسته شکستگی فشاری و کششی در دو جهت مخالف هم ایجاد می‌کند (شکل ۷-۱۰۰).



شکل ۷-۱۰۰ - شکستگی‌های ناشی از پیچش. شکستگی‌های صفحه بالایی با خطوط ممند و شکستگی‌های صفحه پایینی با خطوط منقطع نشان داده شده اند

۷-۹-۶ مطالعه مخازن شکسته

پس از مقدمه‌ای خلاصه شده برای آشنایی بهتر با شکستگی‌ها، آن‌ها را در مخازن هیدروکربنی بررسی می‌کنیم. قابل ذکر است که اکثر قریب به اتفاق این شکستگی‌ها به عوامل تکتونیکی و زمین ساختی نظیر چین خوردگی (folding) و گسل خوردگی (faulting) مربوط هستند.

۷-۹-۶-۱ نظریه عمومی برای شکستگی‌های موجود در مخازن

تقریباً تمامی سنگ‌های رسوبی، بجز تبخیری‌ها، ممکن است تحت تأثیر نیروی‌های زمین ساختی، چه نیروی فشارشی و یا نیروی کششی، شکسته شوند و یا در مقابل آن مقاومت کنند. مقاومت تراکمی مخازن رسوبی معمول حدود ۸ تا ۱۸۰ مگاپاسکال است و مقاومت تراکمی متوسط سنگ‌های کربناته در حدود ۱۰۰ مگاپاسکال و برای ماسه‌سنگ‌ها کمی کمتر و در حدود ۶۰ مگاپاسکال است که گاهی به خاطر وجود سیمان‌های مقاوم زیاده‌تر می‌شود.

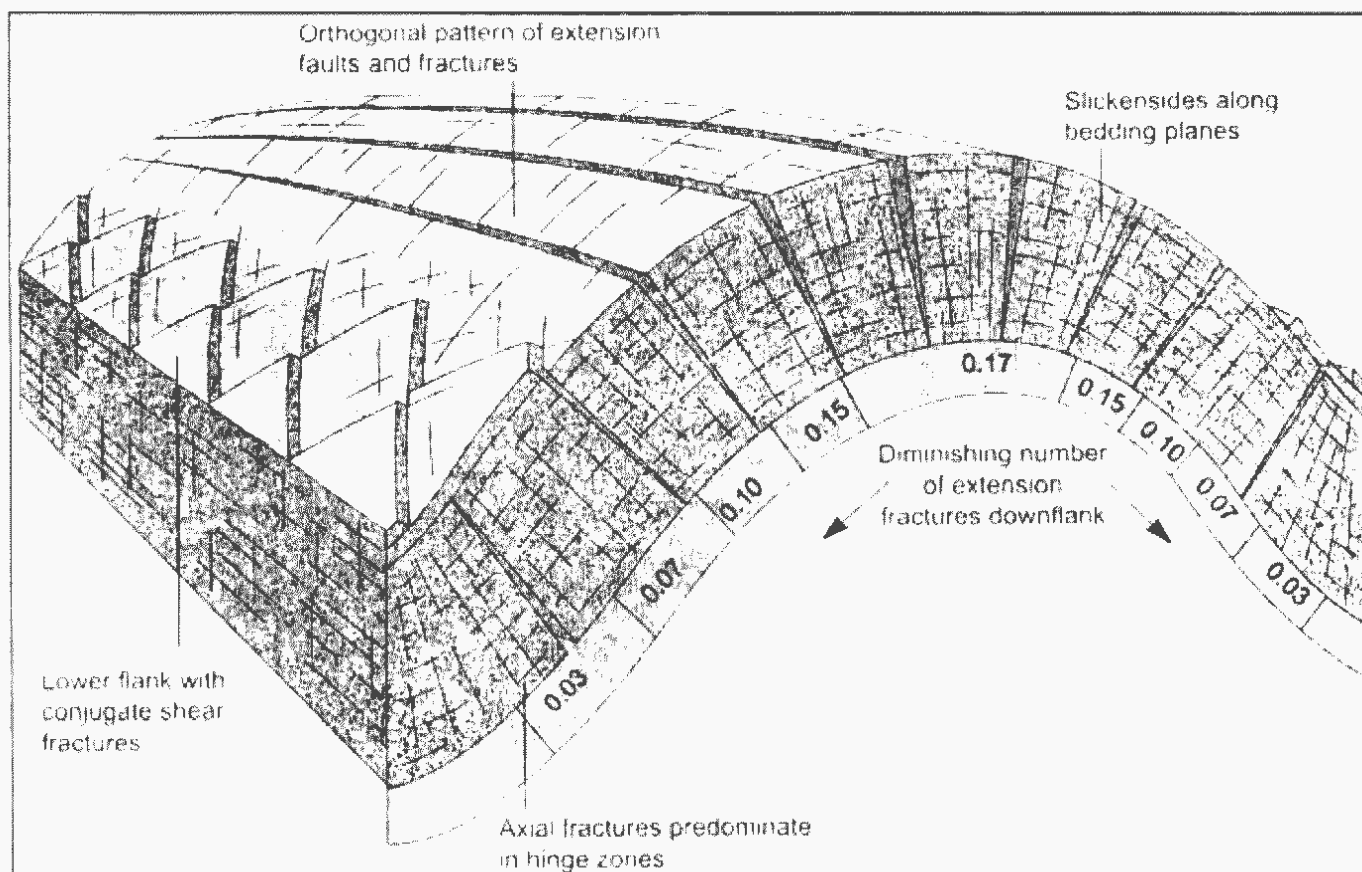
۷-۹-۶-۲ پارامترهای شکستگی‌ها و عوامل ایجاد آن در مخازن هیدروکربنی

به‌طور معمول عامل اصلی شکستگی‌ها در سنگ‌های رسوبی، عوامل خارجی هستند که به شرح برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود:

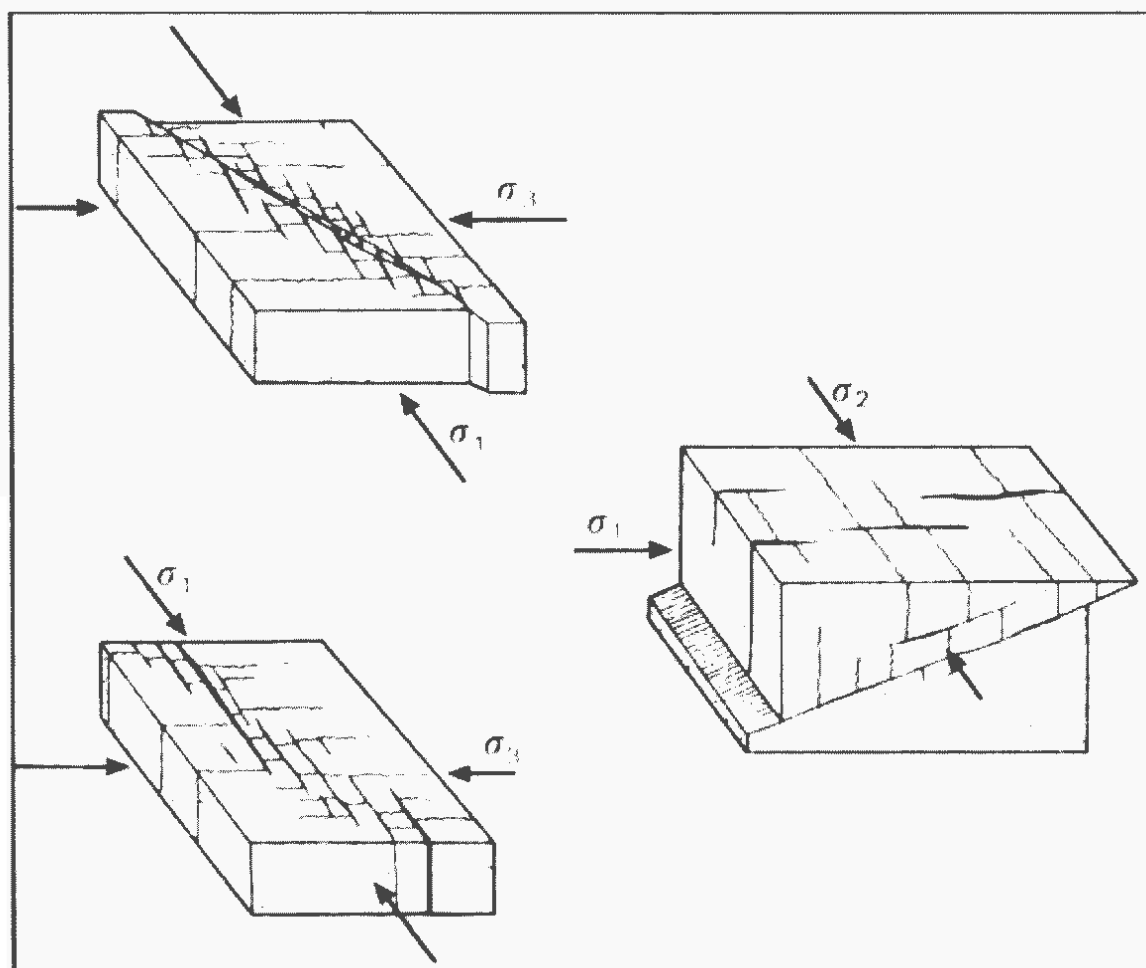
الف) چین خوردگی از نوع خمشی که نتیجه نیروهایی است که موازی لایه‌های سنگی است. در این سیستم، شکستگی‌ها در لایه‌های ضخیم و یا نسبتاً ضخیم، که استعداد کمتری برای جریان یافتن دارند، بهتر گسترش پیدا می‌کنند، مانند آهک آسماری که در ادامه توصیف شده است. بیشتر شکستگی‌های فعال و مفید در نواحی خط‌الراس چین‌ها که تنش کششی وجود دارد متمرکزند (شکل ۷-۱۰۱).

ب) چین خوردگی حاصل از خمش که نیروی ایجادکننده آن، عمود بر امتداد لایه‌ها است که عاملی برای بالا آمدگی قائم سنگ بستر و ایجاد بلوک‌های هورست است.

ج) گسل خوردگی: که خود یک نوع شکستگی است، ولی بیشتر گسل‌ها بزرگ مقیاس هستند. بیشتر شکستگی‌ها با کاهش فاصله از یک گسل به صورت تصاعدی افزایش پیدا می‌کنند. همچنین بیشتر شکستگی‌ها در مناطق گسل خورده و یا چین خورده دیده می‌شوند. یک مثال بسیار خوب در شیل‌های سیاه‌رنگ حاوی گاز در سیر آپالاش که بیشترین تمرکز شکستگی‌ها در روی سنگ بستر در مناطق گسل‌های تراستی و چین خورده است. امتداد معمول شکستگی‌ها جهت تنش‌های گسلی را مشخص می‌کنند (شکل ۷-۱۰۲).



شکل ۷-۱۰۱ نمای شماتیکی از شکستگی‌های همراه با یک چین‌خوردگی



شکل ۷-۱۰۲ - شکستگی‌های همراه با گسل‌های فشارشی

۷-۹-۶-۳ انواع مخازن شکسته

مخازن شکسته عموماً در سنگ‌های زیر ایجاد می‌شوند:

- دیاتومیت، چرت و شیل‌های سیلیسی

چرت معمولاً شکننده است و به واسطه دارا بودن بافت موزائیکی به هم فشرده که دانه‌ها در حدمیکرون و کوچکتز از میکرون است دارای تخلخل کم می‌باشد. تخلخل و فضاهای خالی در چرت در حد ساب میکرون و در بین دانه‌های کوارتز است. این فشردگی بافت چرت آن را در مقابل دگرشکلی مقاوم می‌کند ولی هنگام تغییر شکل، سریع شکسته می‌شود.

- آهک و دولومیت

آهک و دولومیت بیشترین مخازن شکسته را شامل می‌شوند. دولومیت، سنگی شکننده مثل چرت است و برخی اوقات دولومیت متراکم یک تغییر شکل خمیری جزئی نشان می‌دهد. به‌طور کلی مخازن دولومیتی، خاصیت شکنندگی کمتر از مخازن چرتی دارند.

- شیل‌ها

شیل‌ها به خصوص اگر دارای مقدار کافی سیلیس باشند رفتار شکننده تا نیمه شکننده دارند ولی شیل‌های رسی دارای رفتار خمیری هستند. شیل‌های غنی از مواد آلی و یا شیل‌های آهکی، حالت خمیری و شکل‌پذیری دارند.

- سنگ‌های بستر

سنگ‌های بستر به خصوص اگر در اعماق نسبتاً کم باشند به خوبی شکننده هستند.

۷-۹-۶-۴ چگونگی تشخیص شکستگی در مخازن

تشخیص مخازن شکسته در چاه‌های حفاری شده خیلی آسان نیست. شواهدی که وجود شکستگی را مشخص می‌کنند شامل:

□ شواهد شکستگی که مستقیماً در روی مغزه‌ها قابل مشاهده است. مغزه‌ها نمونه‌های کوچکی از یک مخزن می‌باشند و لذا، شاید قادر نباشند به‌طور کامل کلیه اطلاعات نسبتاً بزرگ مقیاس مثل شکستگی‌ها را نشان دهند. مغزه‌ها ممکن است تخلخل ماتریکس پایین را در کنار تخلخل شکستگی نشان دهند، ولی دشوار است که منشأ و جهت شکستگی را از روی مغزه‌ها بتوان معلوم کرد. یک زمین‌شناس می‌بایست مشخص کند که شکستگی‌ها مصنوعی و به خاطر مراحل حفاری و مغزه برداری نباشد. وجود سطوح لغزش همراه با درزه‌های کششی و یا استیلولیت‌ها و نیز سمنته شدن سطوح شکستگی، شواهدی از طبیعی بودن شکستگی‌ها هستند.

- مطالعه خرده‌های حفاری نیز ممکن است وجود شکستگی را مشخص کند. لکه‌های نفتی در روی بعضی سطوح خرده‌های حفاری و نیز خرده‌هایی با سیمان دروزی می‌تواند بیانگر وجود شکستگی باشد.
- از دست رفتن گل در حین حفاری.
- بازیافت ناقص مغزه‌ها. مغزه‌ها معمولاً در محل عبور شکستگی‌ها از هم جدا شده و لذا به‌طور کامل بازیافت نمی‌شوند.
- برخی نمودارهای چاه پیمایی نیز می‌توانند شکستگی را نشان دهند.

۷-۹-۶-۵ نقش شکستگی‌ها در تخلخل و تراوایی

مطالعات شکستگی نشان داده است که اگر یک شکستگی منفرد به پهنای یک میلی‌متر در سنگ مخزن باشد و توسط چاهی قطع شود، یک تراوایی خوب و مناسب را ایجاد می‌کند، که تولید نفتی در حدود ۱۰۰۰ متر مکعب در روز را باعث می‌شود. تخلخل حاصل از شکستگی بدون ارتباط با فابریک سنگ و از نوع ثانویه است.

ارتباط پهنای شکستگی با تراوایی به صورت زیر است:

$$K = 54 \times 10^6 \times W^2$$

تراوایی برحسب داریسی K پهنای شکستگی بر حسب اینچ W

بدین ترتیب حتی شکستگی‌های بسیار ریز، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تراوایی دارند. به عنوان مثال اگر شکستگی ۲ درصد به تخلخل سنگ بیافزاید، تراوایی آن را ممکن است به مقدار زیادی افزایش دهد. البته میزان افزایش تراوایی توسط شکستگی‌ها به عوامل مختلفی نظیر وجود ارتباط بین شکستگی‌ها، میزان بازشدگی آنها و فراوانی آنها بستگی دارد.

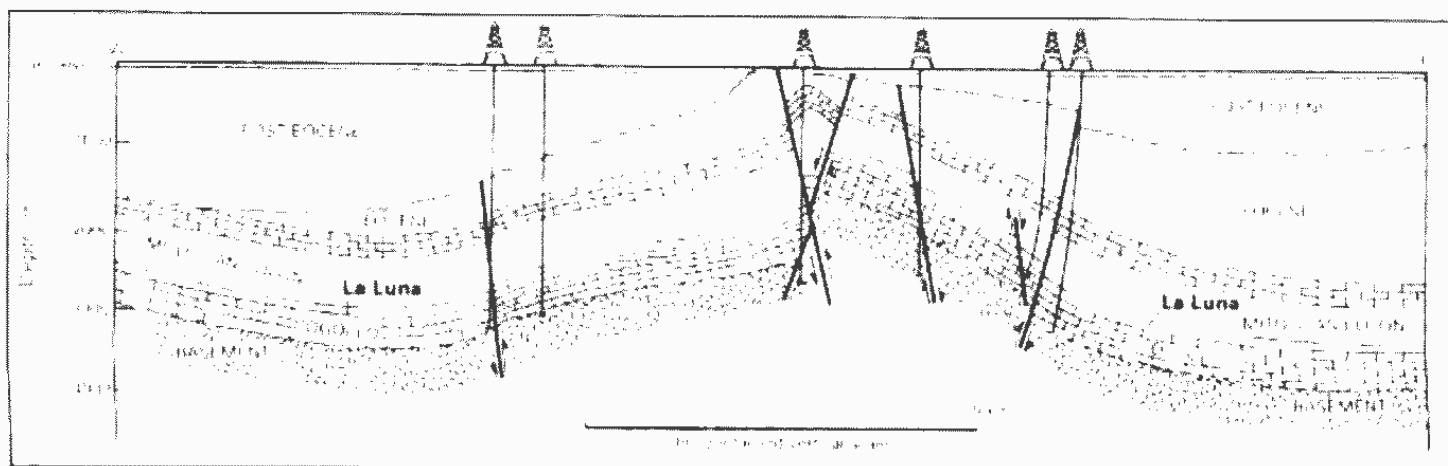
۷-۹-۶-۶ مثال‌هایی از مخازن شکسته

۷-۹-۶-۱-۶ مخازن کربناته شکسته شده

آهک‌های آسماری، معروفترین مخزن شکسته کربناته با سن الیگو-میوسن است که دارای ضخامتی در حدود ۳۰۰ متر از لایه‌های آهکی چین خورده است. متوسط تخلخل ماتریکس حدود ۸٪ و تراوایی ماتریکس آن کم است. در این سازند حرکت سریع و آسان سیالات از طریق شکستگی‌ها صورت می‌گیرد. شکستگی‌ها نقشی در ذخیره سازی نفت در مخزن ندارند ولی اگر چاهی به آن‌ها منتهی شود، میزان تولید را در آن چاه تحت کنترل دارند.

در جنوب شرقی مکزیک دگرشکلی‌های حاصل از فاز کوهزایی لارامید، گنبد‌هایی از نمک را زیر ساختمان‌های اولیه هورست و گرابن ایجاد کرده است. این بالآآمدگی منطقه در ردیف‌های آهکی و دولومیتی (ژوراسیک بالایی و کرتاسه) سبب ایجاد ریزشکستگی شده است. این دولومیت‌ها دارای تخلخل اولیه کمی هستند، ولی تراوایی آن‌ها بالاست. تخلخل کل کمتر از ۱۰٪ و تخلخل شکستگی فقط ۱٫۵٪ است، ولی تراوایی بالا و در حدود ۷ داری و یا حتی بیشتر است.

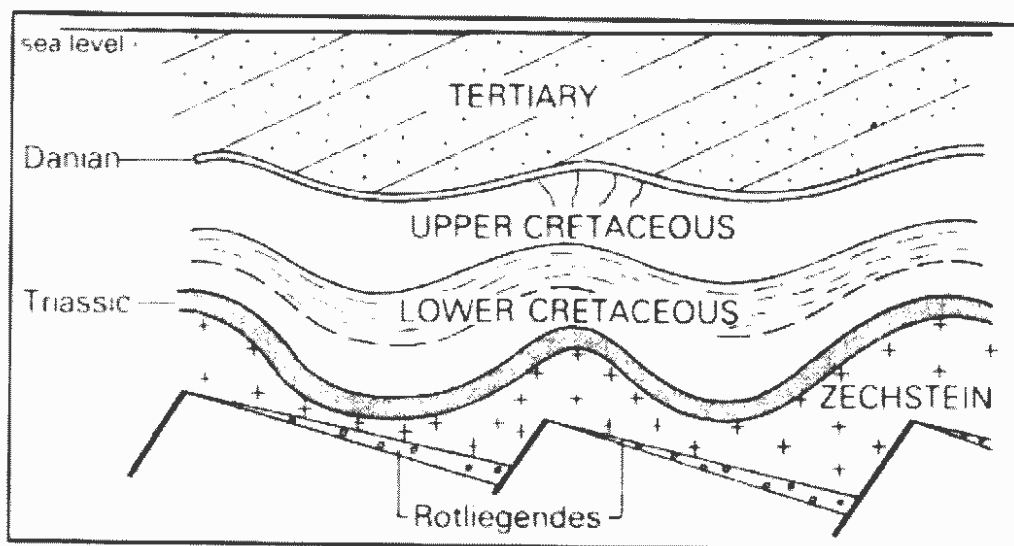
در غرب منطقه حوضه Maracaibo در ونزوئلا، تولید بالای نفت از آهک‌های ضخیم شکسته شده کرتاسه می‌باشد که زیر آن سنگ‌های دگرگونی بستر قرار دارد. گسل خوردگی‌های موجود در طاق‌دیس، از کرتاسه شروع و تا میوسن ادامه داشته‌اند (شکل ۷-۱۰۳). تخلخل و تراوایی به واسطه انحلال در طول شکستگی‌ها افزایش پیدا کرده است.



شکل ۷-۱۰۳ - مقطع زمین‌شناسی میدان لاپاز در حوضه Maracaibo، ونزوئلا

۷-۹-۶-۲ مخازن مارنی و گل سفید شکسته

گل سفید و مارن از مخازن غیر معمول می‌باشند. یکی از مثال‌های مخازن گل سفید در یکی از میادین دریای شمال است. در این میدان به دلیل بالآآمدگی نمک و ایجاد چین خوردگی، شکستگی‌هایی در رأس ساختمان‌ها ایجاد شده است (شکل ۷-۱۰۴).



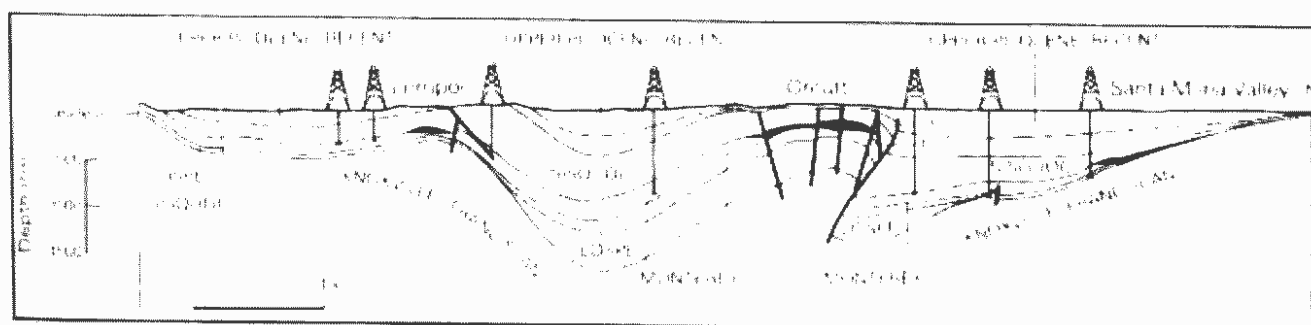
شکل ۷-۱۰۴ - مقطع زمین‌شناسی شماتیک از بخش Ekofisk دریای شمال. رسوبات گل‌سفید کرتاسه پسین در اثر بالا آمدگی نمک شکسته شده‌اند

در سازند قم، میدان سراج، مخزن اصلی تولید کننده هیدروکربن ممبر e این سازند است که عمدتاً متشکل از مارن است. وجود ریزشکستگی‌ها سبب ایجاد شرایط مخزنی در این ممبر شده است.

۷-۹-۶-۳ مخازن شیلی و چرتی شکسته

سازند مونتری (میوسن) در کالیفرنیا که متشکل از سنگ‌های سیلیسی دانه‌ریز است یک سنگ منشأ تولید کننده هیدروکربن محسوب می‌شود. این سازند به واسطه شکستگی‌ها، در چندین حوضه به عنوان سنگ مخزن نفت نیز عمل می‌کند.

در حوضه سانتاماریا (Santa Maria Basin)، نفت از تخلخل شکستگی در دیاتومیت‌ها و یا شیل‌های دیاتومیت‌دار (پلیوسن) و نیز سنگ بستر شکسته شده به دست می‌آید. در این میدان به‌طور کلی نفتگیرها و شکستگی‌های همراه، از چین‌خوردگی طبقات با ضخامت زیاد در طی پلیوستوسن حاصل شده‌اند. این ساختمان‌ها مستقیماً روی سنگ بستر شکسته شده قرار دارند که با همان مکانیسم شکسته شده است (شکل ۷-۱۰۵).



شکل ۷-۱۰۵ - مقطع زمین‌شناسی حوضه سانتاماریا

۷-۹-۶-۶-۴ مخازن ماسه‌سنگی و سیلتستونی شکسته شده

ماسه‌سنگ Oriskany در سپر آپالاچین مربوط به دونین یکی از اولین مخازن ماسه‌سنگی است که بسیار متراکم ولی شکسته شده است. شکستگی‌ها در اثر عملکرد گسل‌ها در طاقدیس‌ها و ساختمان‌های تراستی آن به وجود آمده است.

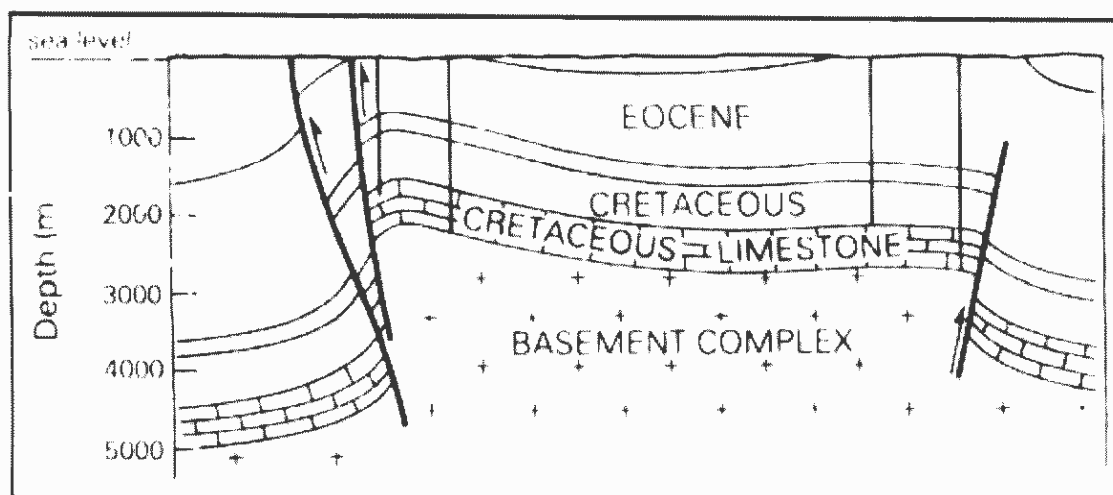
در ماسه‌سنگ‌ها و سیلتستون‌های سازند Spraberry در غرب تگزاس متعلق به پرمین پایینی، شکستگی‌های کشتی در رسوبات آواری آب‌های عمیق در روی یک چین بزرگ خمشی ایجاد شده‌اند. بیشترین تولید از سیلتستون کم ضخامت، متراکم، دانه ریز و شکسته شده است که جورشدگی ضعیف دارد و توسط دولومیت سیمانی شده است. شکستگی‌ها در حدود ۱٪ از حجم کل سازند را تشکیل می‌دهند و در واقع نقشی در ذخیره نفت ندارند و نقش آن‌ها به صورت مسیرهای حرکت سیال در یک شبکه مویرگی است.

۷-۹-۶-۶-۵ مخازن موجود در سنگ‌های آذرین شکسته شده و سنگ‌های بستر

سنگ‌های آذرین می‌توانند به صورت مخازن تجاری در نواحی محدودی دیده شوند. مخزن Tupungato در حوضه Mendoza آرژانتین از مهم‌ترین این مخازن است. در این حوضه نفت تولیدی از شکستگی‌ها و منافذ موجود در توف‌های ضخیم لایه تریاس بالایی است. مثال دیگر مربوط به توف‌های ائوسن کوبا است که نفت کمی را تولید می‌کند.

درلیبی چند میدان عظیم نفتی وجود دارد که نفت از سنگ‌های آذرین هوازده و شکسته شده پرکامبرین تولید می‌شود.

در حوضه Maracaibo در ونزوئلا در میدان‌های بزرگ Mara و Lapaz (شکل ۷-۱۰۶) تولید نفت هم از مخازن رسوبی شکسته شده کرتاسه و سنگ بستر متاآذرین زیر آن صورت می‌گیرد.



شکل ۷-۱۰۶ - مقطع زمین‌شناسی حوضه میدان نفتی Mara در ونزوئلا. تولید نفت از آهک‌های کرتاسه شکسته شده و پی‌سنگ متاآذرین صورت می‌گیرد.