۲- سیالات و شرایط زیرسطحی

برای اکتشاف نفت لازم است که دانش مطلوبی دربارهٔ شرایط زیرسطحی (subsurface) حوضه مورد مطالعه داشته باشیم. لازم به ذکر است که این شرایط از حوضه‌ای به حوضهٔ دیگر می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. شیمی سیالات خلل و فرج، دما و فشار در زیر سطح ممکن است اثرات اساسی و مهمی روی سیستم‌های نفتی داشته باشند. به طور مثال، شیمی آب منفذی، فرآیند انحلال و رسوب گذاری سیمان و یا به عبارتی دیاژنز را کنترل می‌کند و دیاژنز هم کیفیت سنگ مخزن را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.

۲-۱ سیالات زیر سطحی (Subsurface Fluids)

در زیر سطح زمین، مهمترین سیالاتی که مورد نظر زمین‌شناسان نفتی است، هیدروکربن‌ها و آب می‌باشند. هیدروکربن‌ها نقش اول و اساسی را در این بحث بازی می‌کنند که در مورد آن به تفصیل در بخش‌های بعدی کتاب صحبت خواهد شد.

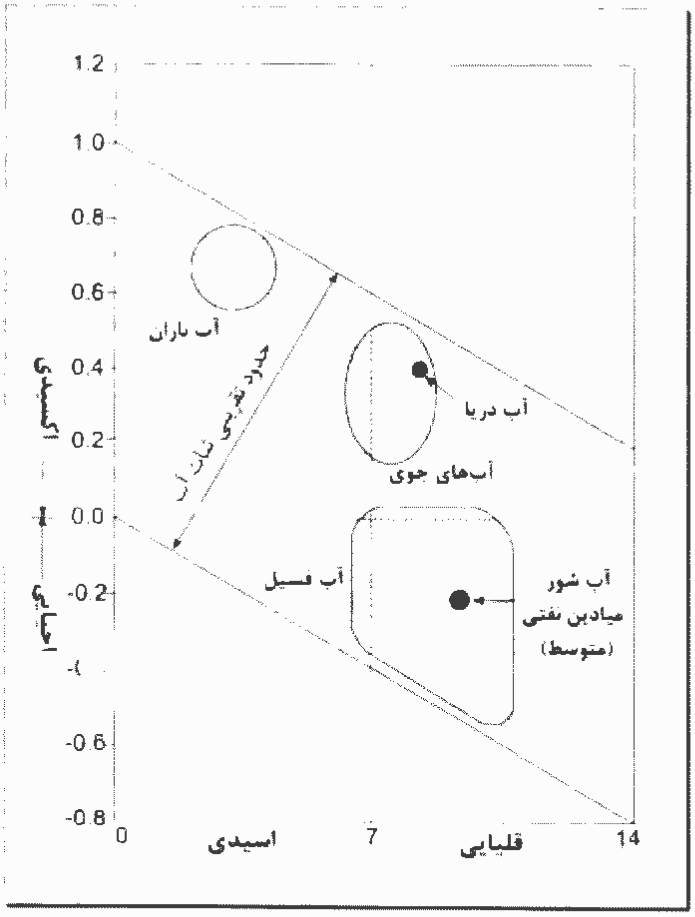
بر اساس چگونگی پیدایش و یا بر اساس نحوهٔ قرارگیری، برای آب منفذی (pore water) تقسیم بندی‌های مختلفی وجود دارد. از نظر پیدایش، چهار گروه آب زیر سطحی داریم که شامل آب‌های جوی (meteoric waters)، آب‌های فسیل(connate waters)، آب‌های جوان (juvenile waters) و مخلوطی از آب‌های مختلف (mixed waters) است. آب‌های جوی، در واقع آب‌های منفذی موجود در نزدیکی سطح زمین هستند که از نفوذ آب باران به وجود می‌آیند. آب‌های جوی، pH پایین داشته و از اکسیژن غنی‌اند و معمولاً فاقد شوری هستند. آب‌های فسیل به آب‌های میان روزنه‌ای اطلاق می‌شوند که برای مدت طولانی در چرخهٔ هیدرولیکی قرار نداشته‌اند. این آب‌ها احتمالاً همان آب‌های اولیهٔ محبوس شده در رسوبات در طی رسوبگذاری می‌باشند و بنابراین ممکن است شوری اولیهٔ آب را که در محیط رسوبگذاری دارا بوده است نشان دهند. آب‌های جوان از ماگما منشأ گرفته‌اند و آب مخلوط، که از اسم آن نیز پیداست، می‌تواند مخلوطی از گروههای دیگر آب‌های زیر سطحی باشد. Eh وpH آب‌های زیر سطحی مختلف در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

آب‌های زیرسطحی همچنین بر اساس نحوهٔ قرارگیری در داخل مخازن، به دو گروه آب آزاد (free water) و آب ثابت (fixed water) تقسیم می‌شوند. آب آزاد یا جاری (mobile water)، می‌تواند در داخل شبکهٔ منافذ سنگ مخزن وقتی‌که تحت تأثیر اختلاف

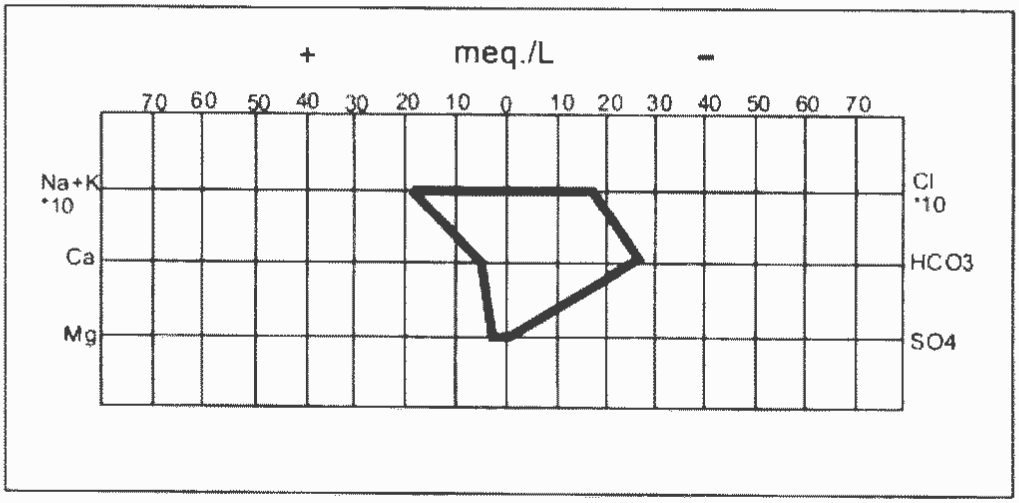
فشار قرار گیرد، حرکت نماید. آب ثابت یا کاهش نیافتنی (irreducible water) به آسانی نمی‌تواند در داخل سنگ مخزن حرکت کند. آب ثابت یا به سطح کانی‌ها چسبیده و یا در داخل شبکهٔ منافذ مویین به تله افتاده است.

درجهٔ شوری آب منفذی با مقیاس ppm یا میلی‌گرم در لیتر بیان می‌شود. به طور متوسط، شوری آب دریا در حدود ۳۵۰۰۰ppm است. میزان شوری سیالات منفذی می‌تواند بسیار متغیر باشد.

معمولترین آنیون‌ها و کاتیون‌های زیر سطحی عبارتند از: Cl^-، $SO4^{2-}$، CO_3^{2-}، Na^+، Mg^{2+} و K^+. ترکیب آب‌های شور معمولاً با دیاگرام سختی آب (stiff diagram) نشان داده می‌شود (شکل ۲-۲). شوری آب منفذی، هدایت الکتریکی سنگ‌ها را کنترل می‌کند که این پارامتر برای محاسبه میزان آب اشباع شدگی سنگ مخزن بکار می‌رود.



شکل ۲-۱ - تغییرات Eh و pH برای آب‌های زیر سطحی مختلف



شکل ۲-۲ - مثالی از یک دیاگرام سختی آب که ترکیب آب یکی از مخازن هیدروکربنی مهم جنوب استرالیا را نشان می‌دهد

غالباً در ماسه‌سنگ‌ها میزان شوری با عمق افزایش می‌یابد. نرخ افزایش شوری به طور متوسط حدود ۱۰۰ppm در هر کیلومتر است. این نسبت در مورد شیل‌ها بسیار پایین است.

افزایش میزان شوری سیالات منفذی در ماسه‌سنگ‌ها نسبت به عمق، مربوط به خاصیت غربالی شیل‌ها نسبت به نمک است. شیل‌ها از حرکت یون‌های نمک از داخل ماسه‌سنگ‌ها در هنگام تراکم جلوگیری می‌کنند.

۲-۲ دمای زیرسطحی (Subsurface Temperature)

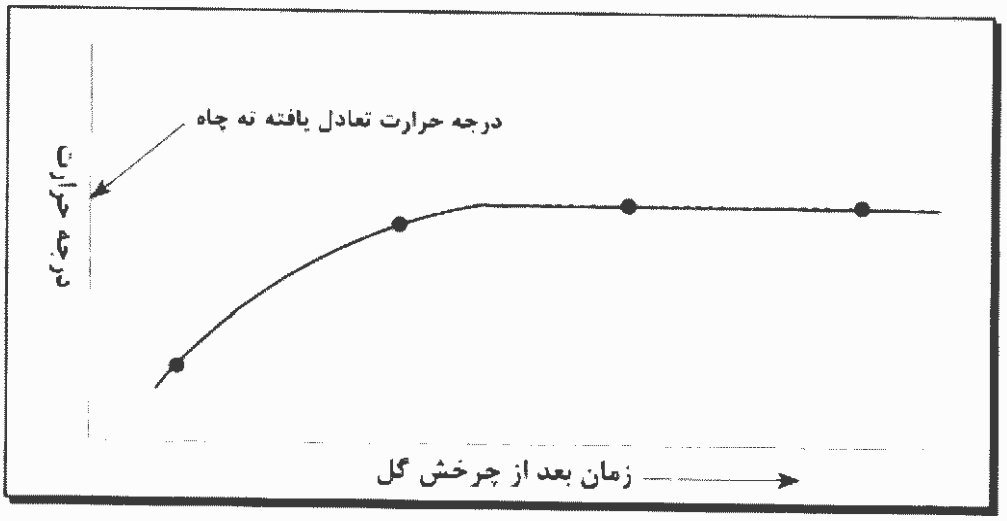
از سطح تا مرکز زمین دما به طور تدریجی افزایش می‌یابد. نسبت افزایش دما به عمق، شیب زمین‌گرمایی (geothermal gradient) نامیده می‌شود که ازحوضه‌ای به حوضه دیگر متفاوت است. دانستن شیب زمین‌گرمایی برای درک زمان زایش هیدروکربن از سنگ منشأ اهمیت دارد. برای تخمین شیب زمین‌گرمایی کنونی، دمای ته چاه (bottom hole temperature, BHT) چندین بار در طی حفاری در عمق‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. در هر اندازه‌گیری برای داشتن دمای حقیقی، چرخش گل حفاری باید متوقف شود تا سیستم به صورت متعادل در آید (شکل ۲-۳)، چرا که در اثر چرخش گل حفاری در داخل چاه، سیستم خنک می‌شود. بعد از بدست آوردن چندین درجه حرارت در عمق‌های مختلف می‌توان شیب زمین‌گرمایی ناحیه مربوطه را از روی شیب خط گراف درجه حرارت-عمق تعیین نمود و یا با استفاده از رابطه زیر شیب زمین‌گرمایی، بر حسب سانتیگراد به کیلومتر، محاسبه شود:

$$GeothermalGradient = \frac{T_{depth} - T_{surface}}{depth} \times 1000$$

T_{depth} = دمای ته چاه بر حسب درجه سانتیگراد

$T_{surface}$ = دمای سطح زمین بر حسب درجه سانتیگراد

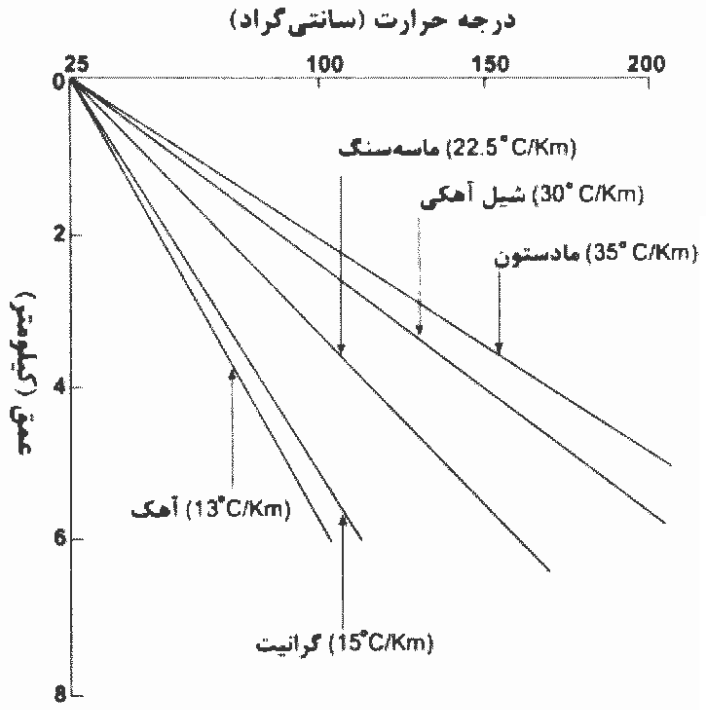
$depth$ = عمق ته چاه بر حسب متر



شکل ۲-۳ - دیاگرامی که چگونگی اندازه‌گیری دمای حقیقی یک چاه را نشان می‌دهد. دما با گذشت زمان قطع چرخه گل حفاری افزایش و در جایی ثابت می‌گردد

متوسط شیب زمین‌گرمایی حدود ۳۰°C/Km است ولی حدود تغییرات آن بسیار گسترده است. کمترین مقدار متعلق به سپرهای پایدار پرکامبرین مثل حوضهٔ اورال- ولگا با شیب زمین‌گرمایی حدود ۱۵° C/Km، دلتاهای ترشیری و حوضه‌های کششی-جدایشی (pullapart) می‌باشد. بیشتر حوضه‌های مزوزوئیک، خواه از نظر سبک ساختمانی، فشارشی (compressional) یا کششی (extensional) باشند، شیب زمین‌گرمایی متوسطی دارند. گنبدهای نمکی به دلیل اینکه تبخیری‌ها (evaporites) دارای قابلیت هدایت گرمایی (thermal conductivity) بالایی می‌باشند، شیب زمین‌گرمایی بالایی دارند. حوضه‌های موجود در مناطق ریفتی دارای شیب زمین‌گرمایی بالایی هستند. برای مثال گرابن سوئز، حوضه گیپس‌لند (Gippsland Basin) وگرابن راین (Rhein Graben)، شیب زمین‌گرمایی بین ۳۶ تا ۵۰ درجه سانتیگراد در کیلومتر را دارند. بالاترین شیب زمین‌گرمایی می‌تواند در حوضه‌های پشت‌کمانی (backarc basins) یافت شود. برای مثال حوضه مرکزی سوماترا دارای شیب زمین‌گرمایی حدود ۶۵ تا ۹۰ درجه سانتیگراد در کیلومتر است.

به طور معمول، دمای ته چاه (BHT) در ۳۰۰۰ متری در حدود ۱۰۰ تا ۱۲۵ درجه سانتیگراد است. در بسیاری از چاه‌های عمیق‌تر از ۶۰۰۰ متر، دمای ته چاه ۲۰۰ تا ۲۴۰ درجه سانتیگراد است. بیشترین رکورد دمای ته چاه شناخته شده، ۲۹۰ درجه سانتیگراد در عمق ۷۲۶۵ متری در یک چاه در جنوب غربی تگزاس است. شکل ۲-۴ گرادیانهای حرارتی برای انواع معمول سنگ‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴ – گرادیان‌های حرارتی برای انواع معمول سنگ‌ها

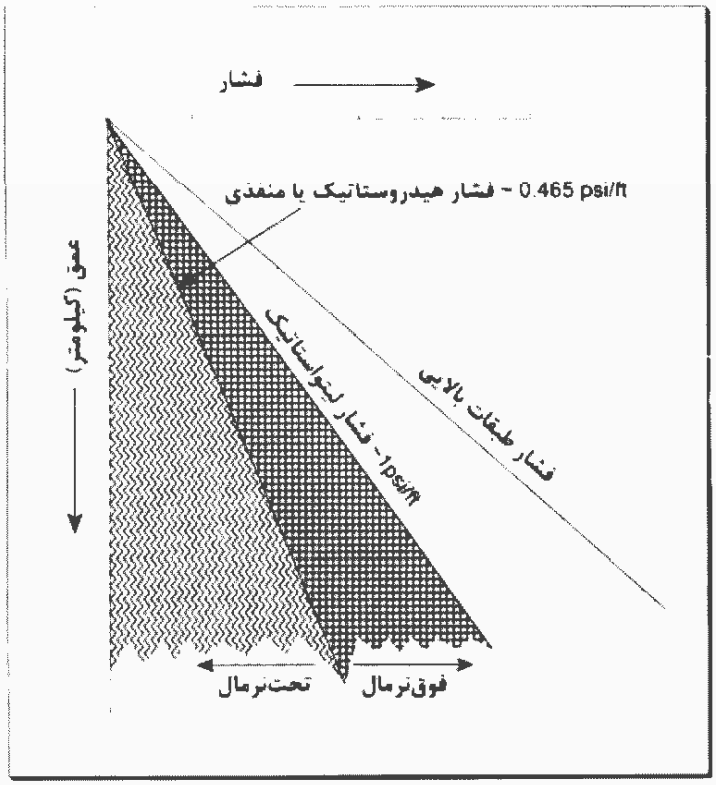
ایزوترم‌ها (isotherms) یا خطوط هم‌دما را می‌توان با استفاده از اطلاعات شیب زمین‌گرمایی چند چاه برای یک منطقه رسم نمود. این خطوط برای پی بردن به آنومالی‌های زمین‌گرمایی مفید هستند. برای مثال ایزوترم‌ها بر روی یک گنبد نمکی، که دارای رسانایی حرارتی بالایی است، به صورت برآمده درمی‌آیند. برعکس در یک دیاپیر گلی (mud diapir) که از رس‌های بسیار متخلخل با هدایت حرارتی پایینی تشکیل شده است، ایزوترم‌ها به صورت فروافتادگی ظاهر می‌شوند. جریان سیالات و گردش آب می‌تواند یک آنومالی در ایزوترم‌ها بوجود آورد.

۲-۳ فشار زیرسطحی (Subsurface Pressure)

بعد از تدفین، سنگ‌ها در زیر فشار طبقات بالایی (overburden pressure) قرار می‌گیرند. فشار طبقات بالایی شامل مجموع فشارهای لیتواستاتیک (lithostatic pressure) و هیدرواستاتیک (hydrostatic pressure) می‌باشد. فشار لیتواستاتیک، وزن لایه‌های سنگی است که روی یکدیگر قرار دارند و فشار را دانه به دانه به سمت پایین منتقل می‌کنند. فشار هیدرواستاتیک در اثر وزن ستون سیالات منفذی مرتبط به هم بوجود می‌آید.

فشار هیدرواستاتیک + فشار لیتواستاتیک = فشارطبقات بالایی

با افزایش عمق، فشار لیتواستاتیک و هیدرواستاتیک و در نتیجه فشارطبقات بالایی افزایش می‌یابد (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵ - دیاگرام فشار لیتواستاتیک، هیدرواستاتیک و فشارطبقات بالایی با افزایش عمق

فشار لیتواستاتیک حدود یک psi (pound per square inch) در فوت (1 psi/ft) برای سنگ‌هایی با چگالی $2/3 gr/cm^3$ است. گرادیان فشار در آب بسیار متغیر است و بستگی به میزان شوری آن دارد. گرادیان فشار برای آب خالص ۰/۴۳۳ psi/ft، برای آب استاندارد (آبی که حاوی ۱۰۰ ppt نمک باشد) ۰/۴۶۵ psi/ft و برای آب‌های بسیار شور ۰/۵۵ psi/ft می‌باشد. جدول ۲-۱ گرادیان فشار برای سیالات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۱ - گرادیان فشار برای سیالات مختلف و سنگ‌های با چگالی $2/65 gr/cm^3$

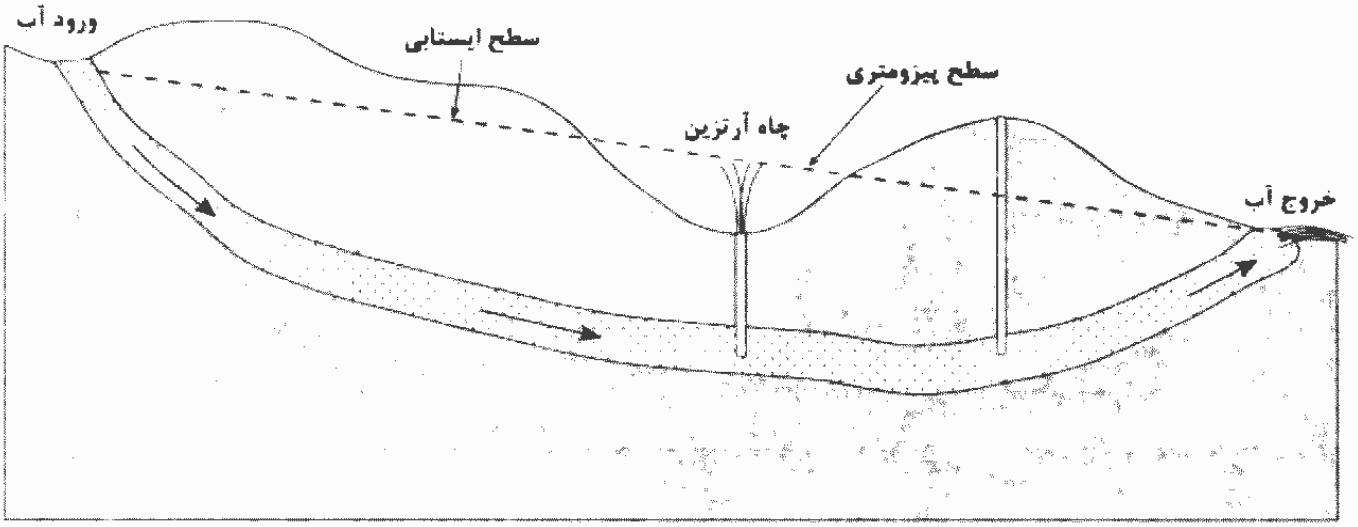
	گرادیان فشار
گاز طبیعی	۰/۰۱
نفت خام	۰/۳۵
آب دریا	۰/۴۶۶
آب شیرین	۰/۴۳۳
فشار لیتوستاتیک (چگالی ۲/۶۵)	۱/۱۵

فشار سازندی دریک مخزن می‌تواند تحت‌نرمال (subnormal)، نرمال (normal) و فوق‌نرمال (supernormal) باشد. اگرگرادیان فشار سیال برابر با گرادیان هیدرواستاتیک باشد، فشار سازند نرمال است. چنین شرایطی وقتی حاصل می‌شود که که سنگ کاملاً تراوا بوده و توسط سنگ‌های غیرتراوا ایزوله نشده باشد و لذا بتواند با محیط اطراف خود به تعادل هیدرواستاتیکی برسد. فشار سازند وقتی تحت‌نرمال خوانده می‌شود که فشار سیالات منفذی کمتر از فشار هیدرواستاتیک باشد. این وضعیت وقتی به وجود می‌آید که سنگ مخزن در بین سنگ‌های ناتراوا محدود شده باشد. فشار تحت‌نرمال می‌تواند به علت بهره‌برداری زیاد از مخزن و همچنین فرآیندهایی که باعث انبساط حجم منافذ و یا انقباض سیالات منفذی می‌شوند به وجود آید. انبساط حجم منافذ می‌تواند در اثر کاهش فشردگی سنگ در طی بالا آمدگی و فرسایش (uplift and erosion) و همچنین ایجاد شکستگی‌های کششی در سنگ حاصل شود. انقباض سیالات منفذی می‌تواند در اثر کاهش شیب زمین‌گرمایی در طول زمان زمین‌شناسی و کاهش دمای مخزن و در نتیجه انقباض سیال منفذی بوجود آید.

وقتی که فشار سیالات منفذی سازند بیش از فشار هیدرواستاتیک باشد فشار فوق‌نرمال نامیده می‌شود. فشارهای فوق‌نرمال می‌توانند در طی حفاری بسیار مخاطره آمیز باشند، لذا دانستن علل و نحوه توزیع زون‌های با فشارهای بالا در یک منطقه بسیار مهم است. علل زیادی برای ایجاد فشار فوق نرمال وجود دارد، مثل فرایندهای آرتزین (artesian)، ساختمانی

(structural)، تراکمی (compactional) و دیاژنزی (diagenetic). برای سه علت آخر سیستم باید بسته باشد.

فشار آرتزین وقتی وجود دارد که سطح پیزومتریک در یک منطقه بالای سطح زمین باشد (شکل ۲-۶). در چنین حالتی فشار هیدرواستاتیک مخزن بایستی از سطح پیزومتریک محاسبه شود، وگرنه مقدار آن، کم تخمین زده خواهد شد.



شکل ۲-۶ - یک چاه آرتزین که در آن سطح پیزومتریک در بالای سطح زمین است

تغییر شکل‌های ساختمانی مثل چین خوردگی می‌تواند شرایط فشار بالا را بوجود آورند. چین‌خوردگی‌های حاصل از نیروهای فشارشی، حجم منافذ را کاهش داده در نتیجه، اگر راه گریزی برای سیالات اضافی نباشد، فشار منفذی بالا می‌رود.

اگر سرعت رسوبگذاری و تدفین سریع باشد، رسوبات فرصت از دست دادن آب منفذی خود را نخواهند داشت. در چنین حالتی اگر رسوبات بین لایه‌های غیرتراوا ایزوله باشند، یک سری عدسی‌های فشار بالا ایجاد می‌شود که به لایه‌های پرفشار (overpressured beds) معروفند. مسلماً در این نوع لایه‌ها، آب منفذی اجازه تراکم طبیعی را به رسوبات نمی دهد و بعضاً از تماس دانه‌ها به یکدیگر و حتی سیمانی شدن آنها نیز جلوگیری می‌کند. در این نوع لایه‌ها فشار سیال منفذی تابعی از فشار هیدرواستاتیک و فشار لایه‌های فوقانی است.

هر فرآیند دیاژنزی که سبب آزاد شدن آب در سیستم بسته شود می‌تواند فشار فوق‌نرمال ایجاد کند. تبدیل ژیپس به انیدریت و تبدیل کانی‌های رسی به یکدیگر از فرآیند دیاژنزی مهم آبزا می‌باشند.

بلوغ کروژن می‌تواند یکی دیگر از علل ایجاد فشار بالا باشد. تبدیل کروژن به هیدروکربن، تغییر از فاز جامد به فاز مایع می‌باشد. این تغییر فاز، مصادف است با افزایش حجم و لذا افزایش فشار منفذی در یک سیستم بسته.

۲-۴ فشار سازندی (Formation Pressure)

فشار سازندی در زیر سطح زمین بایستی قبل از حفر یک چاه تخمین زده شود تا بتوان گل حفاری و جدارهٔ (casing) مناسب برای چاه بکار برد. در حالت نرمال فشار سازندی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{fm}=P_s+(TVD\times G_e)$$

P_{fm} = فشار سازندی

P_s = فشار در سطح زمین، ۱۴٫۷psi

TVD = عمق عمودی حقیقی بر حسب فوت

G_e = گرادیان فشار سیال نسبت به عمق بر حسب psi/ft

بدیهی است که پس از تخمین فشار سازندی، در طی حفاری از گل حفاری با چگالی مناسب به منظور جلوگیری از فوران چاه استفاده خواهد شد. فشار هیدرولیکی حاصل از گل حفاری در ته چاه بدین گونه محاسبه می‌شود:

$$P_{mud}=P_s+(TVD\times G_m)$$

P_{mud} = فشار هیدرولیکی گل حفاری در ته چاه

P_s = فشار در سطح زمین، ۱۴٫۷psi

TVD = عمق عمودی حقیقی (ft)

G_m = گرادیان فشار گل حفاری (psi/ft)

معمولاً چگالی گل حفاری بر حسب پوند در گالن (ppg) بیان می‌گردد. یک پوند در گالن گرادیان فشاری معادل ۰/۰۵۱۹psi در هر فوت دارد. به عنوان مثال اگر فشار مخزنی در عمق ۵۰۰۰ فوتی برابر ۴۱۰۰psi باشد، گل حفاری با چگالی بیش از ۱۵٫۹ باید به کار برده شود:

$$۴۱۰۰\div۵۰۰۰=۰/۸۲ \text{ psi/ft}$$

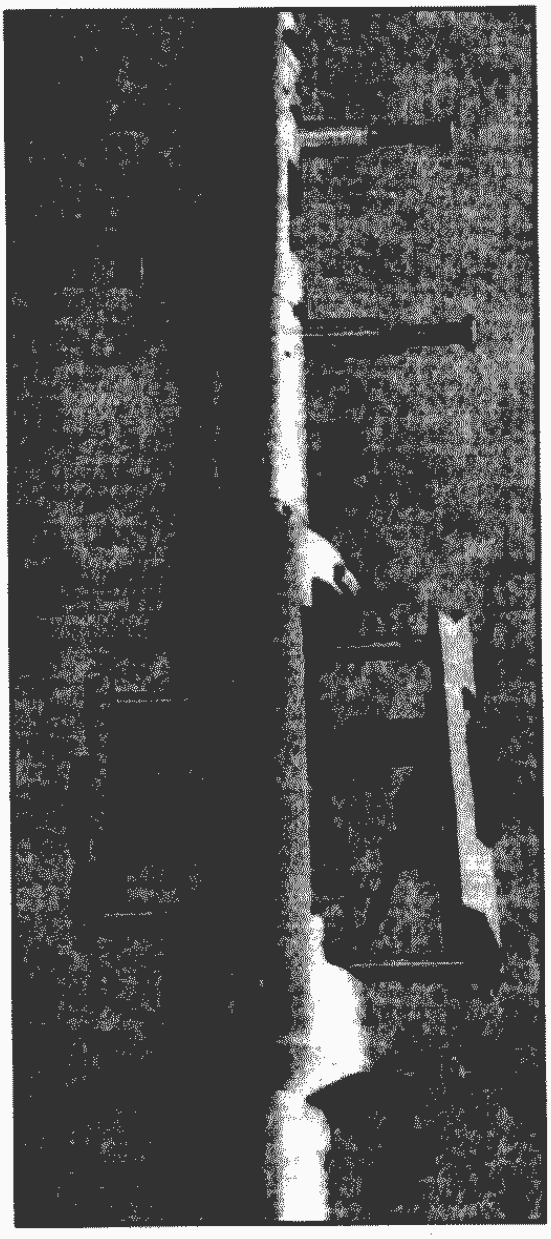
$$۰/۸۲\div۰/۰۵۱۹=۱۵٫۹ \text{ ppg}$$

معمولاً حفارها سعی می‌کنند گل حفاری با چگالی ۱ppg بیشتر، به عنوان ضریب اطمینان، بکار ببرند تا فشار گل حفاری کاملاً بر فشار سازندی غلبه کند و در چنین حالتی فیلتره گل حفاری (mud filtrate) وارد بخش‌های تراوا می‌گردد.

اگر فشار سازندی در هر عمقی، بیش از فشار هیدرولیکی گل حفاری باشد، سیال سازند به داخل چاه جریان خواهد یافت. اگر سیال سازندی دارای گاز باشد، گاز در طی بالا آمدن افزایش حجم پیدا نموده و چگالی گل کاهش می‌یابد. این پدیده، سبب کاهش فشار هیدرولیکی گل حفاری می‌شود. در این حالت، چاه در وضعیت خطرناک فوران قرار می‌گیرد. در چنین وضعیتی باید چگالی گل حفاری به سرعت افزایش یابد و گازهای حاصله سریعاً از گل تهویه شود.

۲-۵ اندازه گیری فشار در چاه (Pressure Testing)

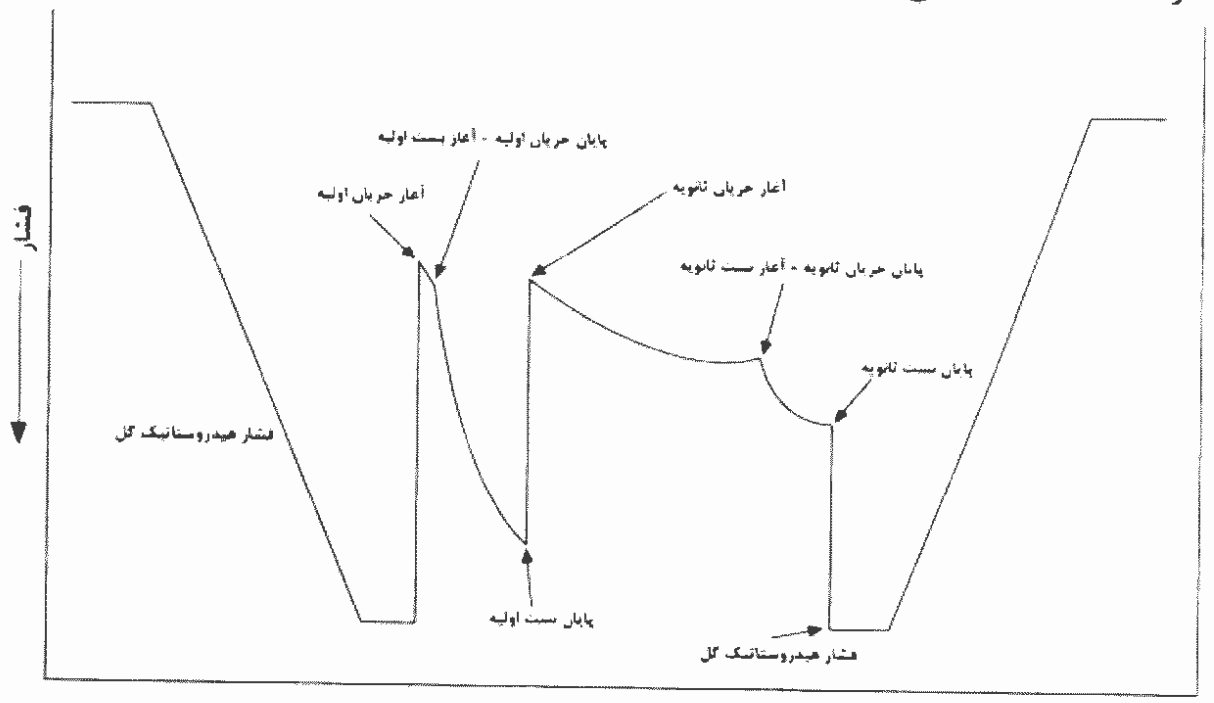
آزمایش ساق مته (drill stem test, DST) و آزمایش مجدد سازند (repeat formation test, RFT) از روش‌های متداول اندازه‌گیری فشار در چاه‌های نفت می‌باشند. درآزمایش ساق مته، لایه مورد آزمایش از بالا و پایین ایزوله شده به طوری که بتوان فشار جریان را در سازند به دقت اندازه گیری کرد.



شکل ۲-۷ - تصویر یک دستگاه RFT

دستگاه RFT دارای ساختمان ساده‌ای است که شامل سه مخزن کوچک و یک فشارسنج است که مجموعاً توسط یک کابل، همانند دیگر سوندهای چاه‌پیمایی، به داخل چاه رانده می‌شود. در هنگام پایین بردن، این ابزار فشار فزاینده هیدرولیکی گل حفاری را ثبت می‌کند. پس از رسیدن دستگاه به مقابل لایه مورد نظر، عایق کننده‌ها (packers) از بالا و پایین سبب ایزوله شدن هدف می‌گردد. سپس هر یک از سه مخزن دستگاه، به نوبت باز شده، علاوه بر اندازه گیری فشار، نمونه سیال مخزن را جمع‌آوری می‌نماید (شکل ۲-۷). شکل ۲-۸ نمونه‌ای از منحنی حاصله از RFT را نشان می‌دهد که در آن فشار هیدرولیک گل حفاری و فشارهای ثبت شده در هر سه مخزن با گذشت زمان ثبت شده است.

هدف اصلی RFT اندازه گیری فشار مخزن است، ولی در ضمن سیالهای سازند از جمله نفت، گاز و بخصوص آب سازندی را جهت محاسبه مقاومت الکتریکی آن (R_w) که پارامتر مهمی در محاسبه آب اشباع شدگی است به دست می‌دهد.



شکل ۲-۸ - نمونه‌ای از منحنی حاصل از آزمایش ساق مته

روش اساسی اندازه‌گیری فشار در داخل چاه، آزمایش‌های فشار فزاینده (pressure buildup tests) است. این آزمایش در چاه‌های تولید به منظور اندازه‌گیری فشار سازند و اندازه‌گیری تراوایی صورت می‌گیرد. در طی این آزمایش لایه مورد مطالعه را از بالا و پایین ایزوله نموده و برای مدت معینی فشار فزاینده در فضای دستگاه را اندازه‌گیری می‌کنند. چگونگی افزایش فشار بیانگر بسیاری از رفتارها و خصوصیت سنگ مخزن خواهد بود. منحنی‌های حاصله از این آزمایش به عنوان منحنی‌های هورنر (Horner plots) شناخته می‌شود (شکل ۲-۹) که از معادله زیر تبعیت می‌کنند:

$$P_{ws}=P_i-162.6q\mu B/kh\times[\log(t+\Delta t)/\Delta t]$$

P_{ws} = فشار چاه در هنگام بسته بودن دستگاه، بر حسب psi

P_i = فشار اولیه، بر حسب psi

q = نرخ تولید، بر حسب stb/day

μ = گرانروی سیال، بر حسب سانتی پواز

B = ضریب حجمی نفت

k = تراوایی ، بر حسب میلی دارسی

h = ضخامت زون تولید، بر حسب فوت

t = زمان تولید، بر حسب ساعت

Δt = زمان بسته بودن دستگاه، بر حسب ساعت

این معادله به صورت یک خط مستقیم $y=mx+b$ است که در آن:

$y = P_{ws}$

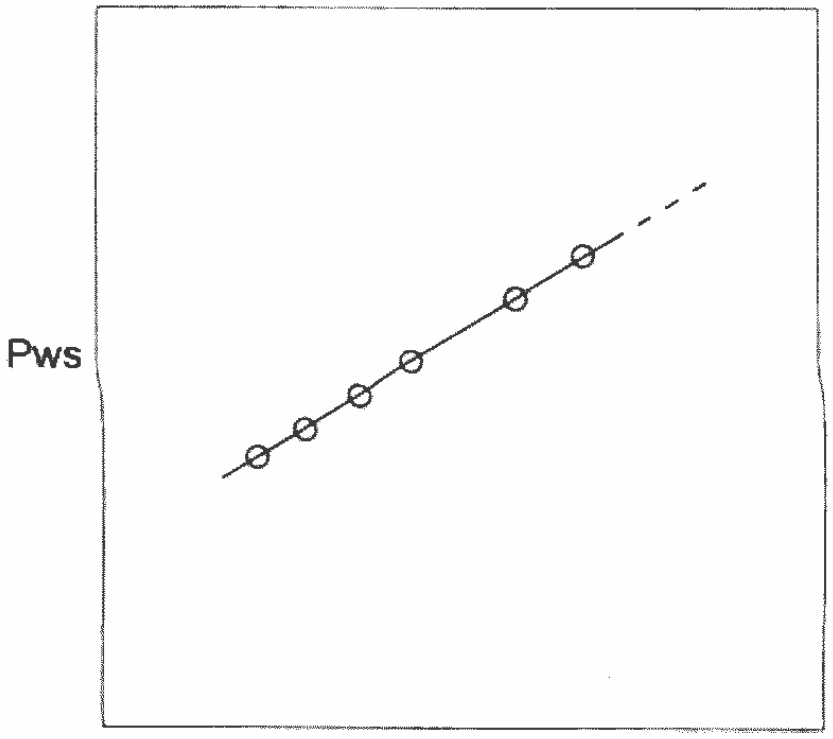
$m = 162.2q\mu B/kh$

$b = P_i$

$x = \log(t+\Delta t)/\Delta t$

استفاده این فرمول به خصوص در این است که از روی شیب حاصله (m) می‌توان تراوایی سازند را محاسبه نمود:

$$k = 162.6q\mu B/mh$$



شکل ۲-۹ - مثالی از یک منحنی هورنر برای یک مخزن نامحدود