۱۰- روش‌های اکتشاف (Methods of Exploration)

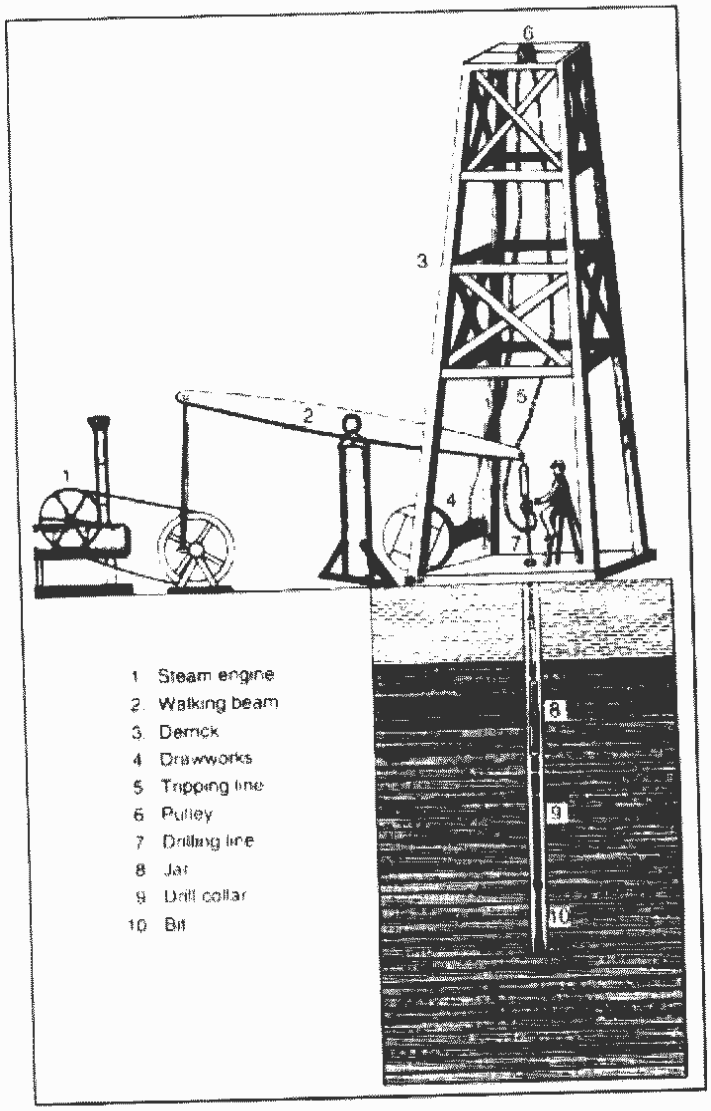
در این بخش از کتاب به طور مختصر اشاره‌ای می‌شود به روش‌هایی که به منظور اکتشاف مواد هیدروکربنی به کار برده می‌شوند.

۱۰-۱ حفاری (Drilling)

در سال ۱۸۵۹ برای نخستین بار نفت از یک چاه با عمق ۶۹/۵ فوتی در پنسیلوانیا فوران کرد. نام کلنل دریک (Colonel Drake) در تاریخ جستجوی نفت هم‌زمان با حفر این چاه ثبت شد. اگرچه این واقعه، صنعت حفاری نفت را آغاز کرد، اما با این وجود قبل از این تعداد زیادی از چاه‌ها به منظورهای تولید آب، نمک و قیر حفر می‌شده اند.

۱۰-۱-۱ حفاری ضربه‌ای (Cable Tool Drilling)

همه چاه‌های قدیمی، از جمله چاه دریک با استفاده از سیستم ضربه‌ای (cable tool) حفر می‌شدند (شکل ۱۰-۱). در این سیستم یک مته با لبه‌های شبیه قلم پیکرتراشی به انتهای یک میله سنگین (drill collar) متصل است که آن‌هم به نوبه خود ازیک شاهین (walking beam) آویزان است. مته به صورت سقوط آزاد به داخل چاه رها شده و بعد از برخورد به سنگ آن را به‌صورت قطعات خردشده در می‌آورد. شاهین درگذشته به وسیله نیروی انسان یا حیوان به کار انداخته می‌شد، که بعد در قرن ۱۹ به موتور بخار مجهز شد. اما با وجود داشتن موتور بخار، ته چاه بعد از پر شدن از قطعات و خرده‌های سنگی با یک وقفه درحفاری، به‌صورت متناوب تمیز می‌شده است. در طی حفاری، چاه به وسیله آب و گل حاصل از اختلاط آب و قطعات خرد شده سنگ‌ها پر می‌شد که به وسیله یک ابزار سیلندری شکل (گل کش) تخلیه می‌شده است. این وسیله یک انتهای شبیه به سوپاپ داشت که در حالت باز به داخل چاه رانده می‌شد و در حالت بسته توسط وسیله‌ای به نام منجنیق (drawworks) بالا کشیده می‌شد. عمیق‌ترین چاه حفرشده با این روش، چاهی بود که در سال ۱۹۱۸ تا عمق ۲۲۵۰ متری حفر شد. سیستم ضربه‌ای هنوز هم برای حفر چاه‌های آبی کم عمق به کار می‌رود.



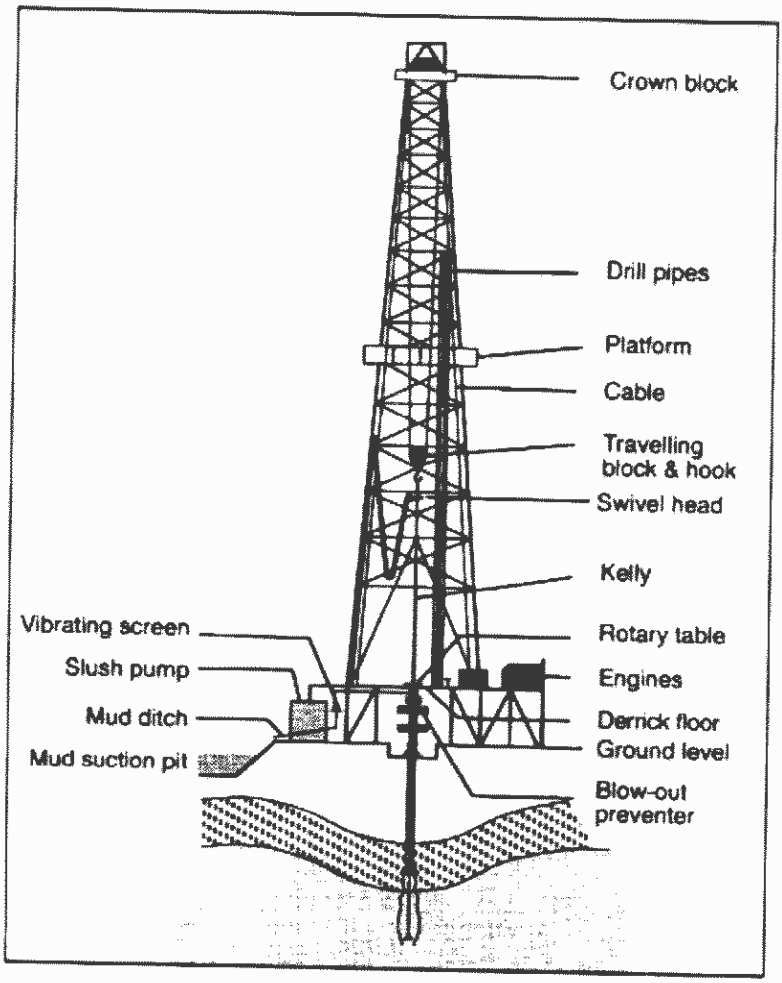
شکل ۱۰-۱ - تصویر شماتیک از یک دکل حفاری با سیستم ضربه‌ای

۱۰-۱-۲ حفاری دورانی (Rotary Drilling)

در آغاز قرن بیستم آنتونی لوکاس (Antony Lucas) هم‌زمان با کشف میدان نفتی Spindeltop درتگزاس روش حفاری دورانی را به تمام جهان نشان داد. او ترکیبی از مته چرخان و تزریق مداوم گل را به کار برد. از آن زمان تاکنون روش حفاری دورانی با پیشرفت تکنولوژی، به‌صورت بسیار پیشرفته مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۰-۲). در روش حفاری دورانی از مته‌های دندانه‌ای شکل نوع سه مخروطه (tricon) یا مته‌های یک تکه‌ای از جنس الماس یا PDC (polycrystalline diamond cutters) استفاده می‌شود. زمانی که مته در حال چرخش است نیرویی توسط وزنه‌ای به آن وارد می‌شود. مزیت این روش این است که یک سیال (گل حفاری) می‌تواند به طور مداوم از میان مته که در حال خرد کردن تشکیلات سنگی است پمپ شود و جریان بالارونده گل حفاری قطعات خرد شده را از داخل چاه به سطح چاه حمل می‌کند.

دکل حفاری (rig) دورانی، دستگاهی است که سه عمل زیر را انجام می‌دهد:

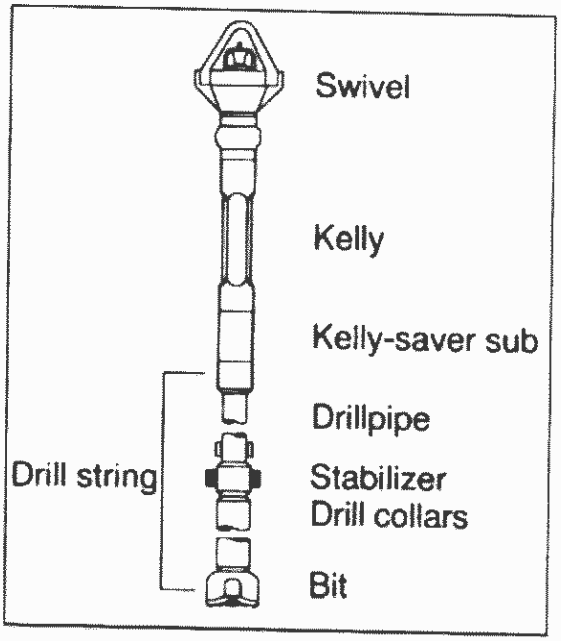
- بار گذاری وزنه بر روی مته



شکل ۱۰-۲ - دکل حفاری با سیستم دورانی و اجزای تشکیل دهنده آن

- چرخاندن مته
- گردش گل حفاری

انتهای رشته حفاری یقه مته (drill collars) نام دارد که به ته لوله حفاری (drill pipe) به‌صورت پیچ شده و به همین صورت هم به بخش بالائی مته متصل است. این مجموعه به وسیله صفحه دوار (rotary table) و لوله چند وجهی (kelly) می‌چرخد (شکل ۱۰-۳). لوله چند وجهی وسیلهٔ اتصال بین صفحهٔ دوار و محور حفاری است. مقطع عرضی لوله چند وجهی ممکن است چهار گوش، شش گوش یا حتی سه وجهی باشد.

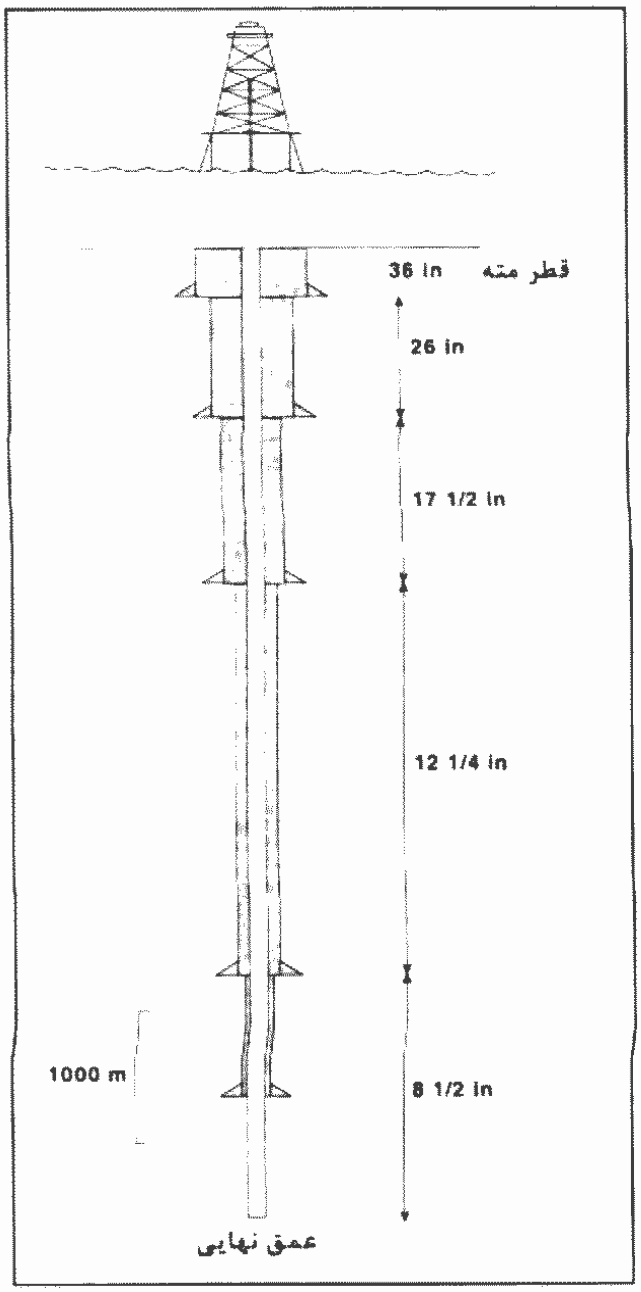


بخش‌های تشکیل دهنده رشته حفاری (drill string) در مرکز خود دارای یک مجرا هستند که سیال حفاری می‌تواند از طریق آن تا ته چاه گردش داشته باشد. یک سیستم بالا برنده موظف به نگهداری وزن رشته حفاری می‌باشد که آن را به داخل چاه فرستاده و بالا می‌کشد.

شکل ۱۰-۳ - تصویر شماتیک از بخش‌های مختلف رشته حفاری

زمانی که یک چاه حفر می‌شود به طور منظم به وسیله پوشش‌های مخصوصی پوشانده می‌شود. این عمل به وسیله لوله فولادی (steel pipe) یا جداره (casing) انجام می‌شود. جداره، تحت وزن خودش به داخل چاه رانده می‌شود و با عمیق‌تر شدن چاه قطر این لوله‌ها کوچک و

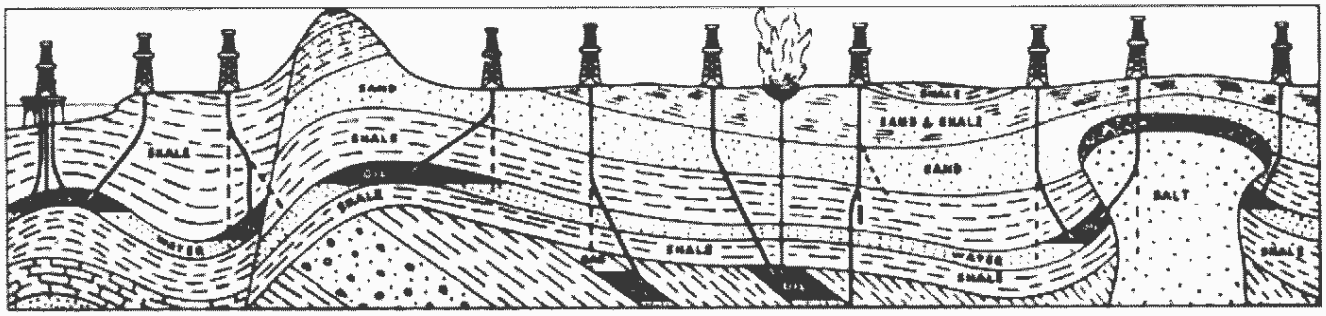
کوچک‌تر می‌شود (شکل ۱۰-۴). نخستین لوله جداره به آرامی‌به داخل چاه رانده شده و سپس سیمان به داخل آنالوس (فضای بین جداره و دیواره چاه) پمپ می‌گردد و لذا جداره به دیواره سیمان می‌شود. بعد از اینکه نخستین فاز حفاری تمام شد، حفاری مجدداً با یک مته با قطر کوچکتری نسبت به قطر داخلی جداره که به داخل چاه رانده شده و سیمانی شده است، آغاز می‌شود. چاه عمیق‌تر می‌شود و جداره‌های بیشتری در داخل چاه قرار می‌گیرند که باید قطری کوچکتر از مته داشته باشند.



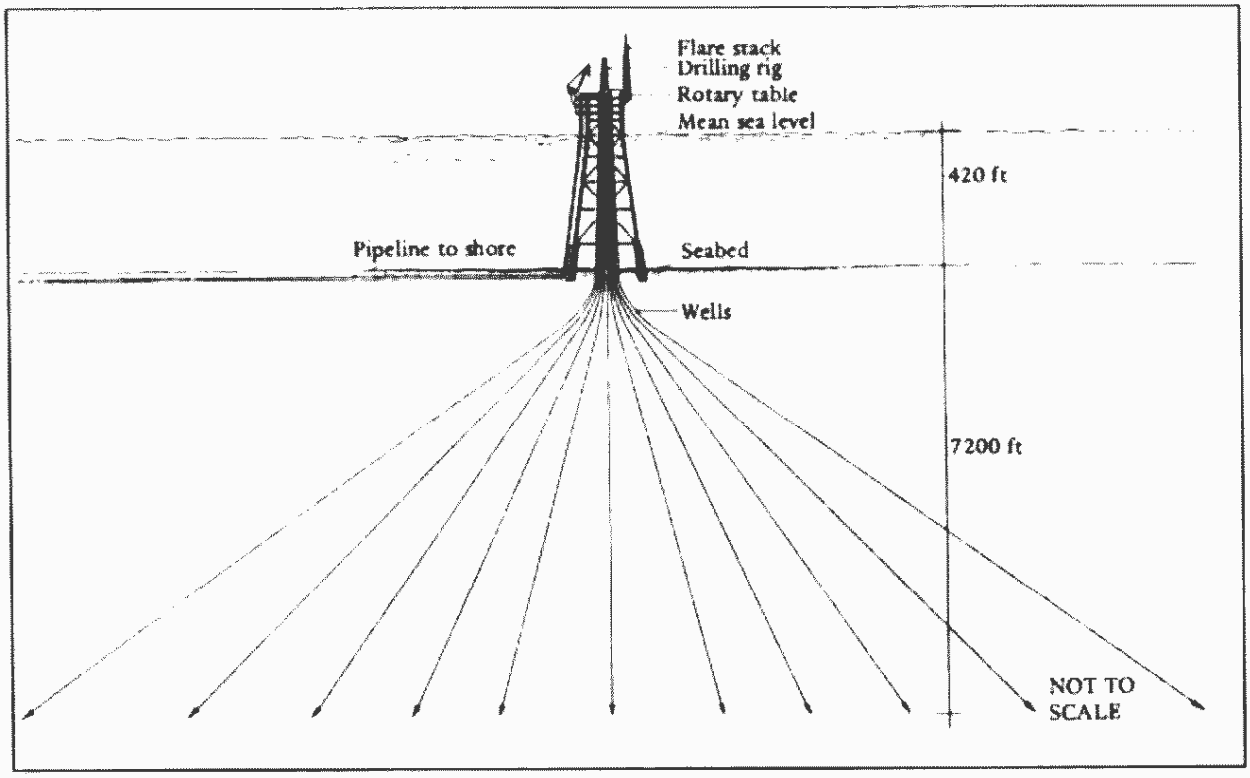
شکل ۱۰-۴ - تغییرات قطر چاه و مته حفاری با افزایش عمق

۱۰-۱-۳ حفاری جهت‌دار (Directional Drilling)

حالت‌هایی وجود دارد که حفاری چاه قائم امکان پذیر نیست. مثلاً وقتی که مخزن در زیر یک دریاچه یا رودخانه و یا مرکز شهر قرار گرفته است (شکل ۱۰-۵). در چنین شرایطی دکل حفاری در یک محل مناسب برپا شده و چاه برای رسیدن به مخزن منحرف می‌گردد. در حوضه‌های دور از ساحل (offshore) معمولاً حفر چاه‌های متعدد از یک سکوی حفاری عمومی، اقتصادی است (شکل ۱۰-۶).



شکل ۱۰-۵ - کاربردهای حفاری جهت‌دار



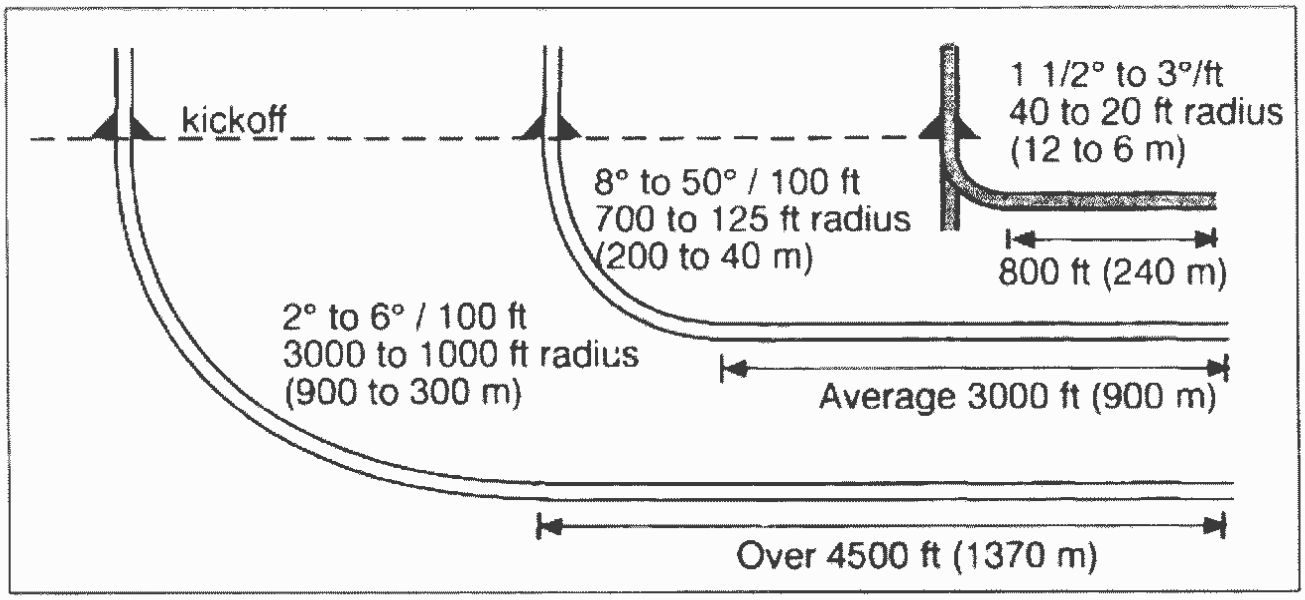
شکل ۱۰-۶ - در سکوهای حفاری دریایی از هر سکو چندین چاه در جهت‌های مختلف برای رسیدن به مخازن حفاری می‌شود

۱۰-۱-۴ حفاری افقی (Horizontal Drilling)

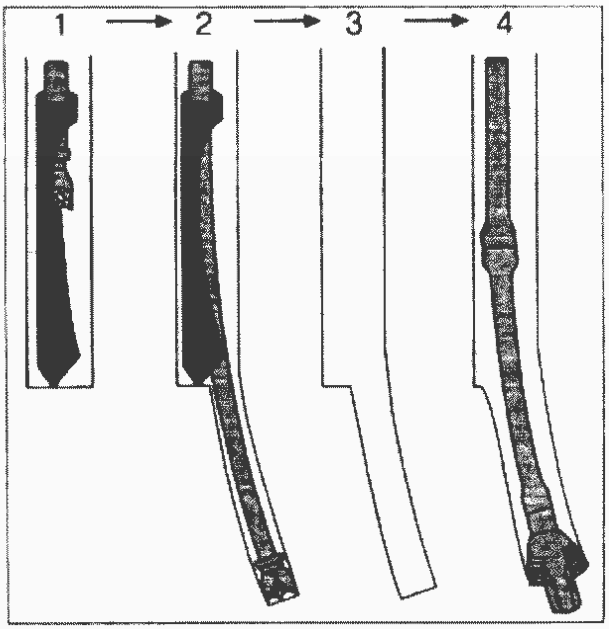
حفاری افقی در بسیاری از موارد می‌تواند سبب افزایش بهره‌وری از چاه‌های نفت گردد. به طور مثال این نوع حفاری قادر است تولید را در مخازن کارستی، مخازن با شکستگی‌های عمودی، مخازن با ستون هیدروکربنی نازک که مشکل مخروط شدگی (coning) به سمت پایین را دارد و در مخازن کم فشار، افزایش دهد. حفاری افقی برای مخازن به شدت شکسته شده و همینطور برای مخازن نازک لایه با تراوایی عمودی کم، نظیر رسوبات توربیدیتی و نیز برای مخازن همگن با کیفیت ضعیف، تأثیر بسزایی ندارد.

روش‌های متعددی برای حفاری افقی وجود دارد. در این روش‌ها قبل از رسیدن به مقصد، در نقطه‌ای خاص، به نام نقطه تغییر مسیر (kick off point)، حفاری را تغییر جهت می‌دهند. این تغییر مسیر، می‌تواند از ۲ تا ۶ درجه در هر صد فوت تا ۱,۵ تا ۳ درجه در هر فوت حفاری

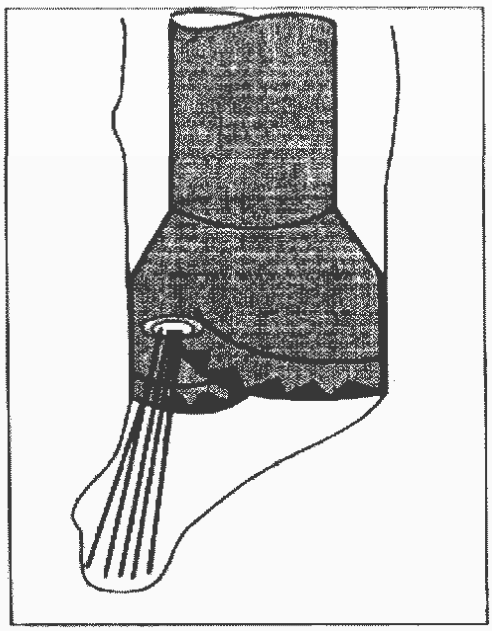
متغیر باشد تا اینکه چاه در مقصد افقی گردد (شکل ۱۰-۷). از روش‌هایی که سبب انحراف چاه می‌گردند استفاده از whipstock است که یک گوه فلزی است که سبب انحراف سرمته می‌گردد (شکل ۱۰-۸). روش دیگر استفاده از یک موتور هیدرولیک است که در بالای سرمته نصب می‌شود و قادر است سرمته را منحرف کند. روش دیگر که در رسوبات نرم کاربرد دارد استفاده از جت حفاری (jet drilling) است. در این روش در انتهای سرمته سه خروجی گل وجود دارد که یکی از آن‌ها بزرگتر است و گل می‌تواند با سرعت و انرژی بیشتری خارج شود و لذا هنگامی‌که رشته حفاری در حال چرخش نیست، خروجی بزرگتر قادر است جهت حفاری را به‌سمت خود منحرف کند (شکل ۱۰-۹).



شکل ۱۰-۷ - تغییر مسیر در حفاری افقی



شکل ۱۰-۸ مراحل تغییر مسیر با استفاده از whipstock



شکل ۱۰-۹ - تغییر مسیر با استفاده از فشار گل حفاری

۱۰-۱-۵ مته‌های حفاری (Drilling Bits)

از مته‌های حفاری می‌توان انواع زیر نام برد:

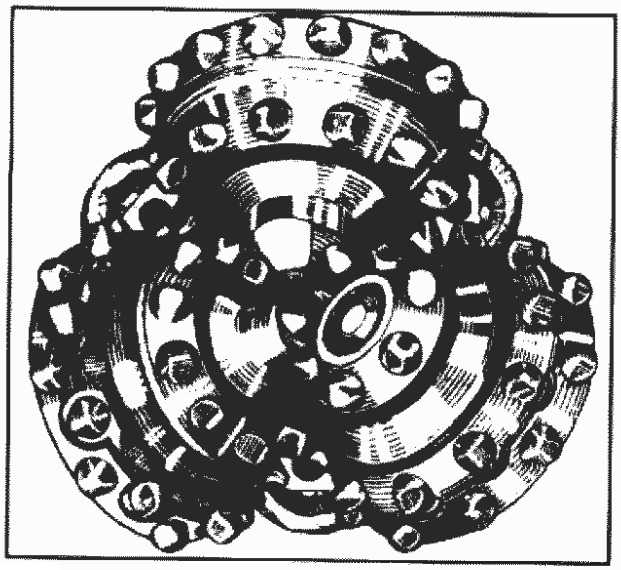
مته‌های مخروطی غلتکی (roller cone bits): این نوع مته از سه بخش اصلی تشکیل شده که شامل مخروط‌ها (cones)، یاتاقان‌ها (bearings) و بدنه مته (body) است. در مته‌های سه مخروطه، هر مخروط دارای ردیف‌هایی از دندانه می‌باشد که با ردیف‌های دندانه‌های مخروط مجاور هماهنگ شده اند. این دندانه‌ها که در مخروط جاسازی شده، می‌توانند از فولاد یا کربیدتنگستن ساخته شده باشد.

مته‌های الماسی (diamond bits): سه نوع مته الماسی وجود دارد که عبارتند از:

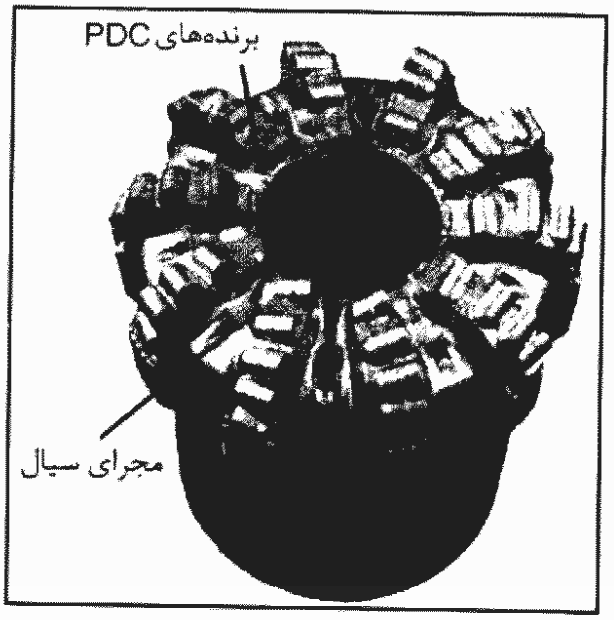
- مته‌های با الماس طبیعی (natural diamond)
- مته‌های با الماس‌های نوع PDC
- مته‌های با الماس‌های نوع TSP (thermally stable polycrystalline diamond cutters)

این سه نوع مته در ماهیت عناصر برنده که هر کدام سنگ را با یک روش متفاوت مکانیکی خرد می‌کنند، اختلاف دارند.

از نظر چگونگی حفر سنگ‌ها نیز می‌توان مته‌ها را به دو دسته تقسیم کرد: اول مته‌هایی که سنگ‌ها را خرد کرده و جلو می‌رود (شکل ۱۰-۱۰) و نتیجه حفاری به‌صورت خرده‌های سنگی کوچک (cuttings) به سطح می‌رسد. نوع دیگر مته استوانه‌ای تو خالی است که قادر است سنگ‌ها را به‌صورت مغزه (core) برش دهد (شکل ۱۰-۱۱).



شکل ۱۰-۱۰ - نمونه‌ای از مته‌های خردکننده



شکل ۱۰-۱۱ - نمونه‌ای از مته های مغزه گیر

۱۰-۱-۶ راندمان حفاری

سرعت یا به عبارتی راندمان حفاری توسط فاکتورهای متعددی کنترل می‌شود که عبارتند از: جنس و نوع سنگ، فشار مته در حین حفاری، تعداد دوران مته، نوع مته حفاری، قطر چاه و فشار هیدرولیکی در کف چاه حاصل از ستون گل حفاری.

اغلب سنگ‌های حاوی نفت از نوع رسوبی هستند. مقاومت این نوع سنگ‌ها در مقابل حفاری، به سختی دانه‌های تشکیل دهنده، اندازه دانه‌بندی، نوع سیمان و تخلخل سنگ بستگی دارد. جدول ۱۰-۱ راندمان حفاری را در سنگ‌های مختلف در شرایط یکسان نشان می‌دهد.

جدول ۱۰-۱ - راندمان حفاری (متر در ساعت) برای سنگ‌های مختلف

نوع سنگ	راندمان حفاری
آهک	۴,۹
انیدریت	۲,۵
ماسه‌سنگ	۰,۸۴
گرانیت	۰,۵۴
کوارتزآرنایت	۰,۳۴

در هنگام حفاری، وزن وارد بر مته سبب پیشرفت در نرخ نفوذ مته می‌شود. سرعت حفاری تقریباً نسبت مستقیمی با وزن وارد برمته دارد، البته اگر سیال حفاری بتواند از عهده تمیز نگه داشتن مته برآید. فشار حفاری به طور معمول یک تن به ازای هر اینچ قطر مته در تشکیلات نرم و سه تن در تشکیلات سخت است. به هر حال، نرخ نفوذ مته می‌تواند به یک حد ماکزیمم برسد اگر وزن وارد بر مته به حدی برسد که دندانه مته را به طور کامل در سنگ فرو ببرد.

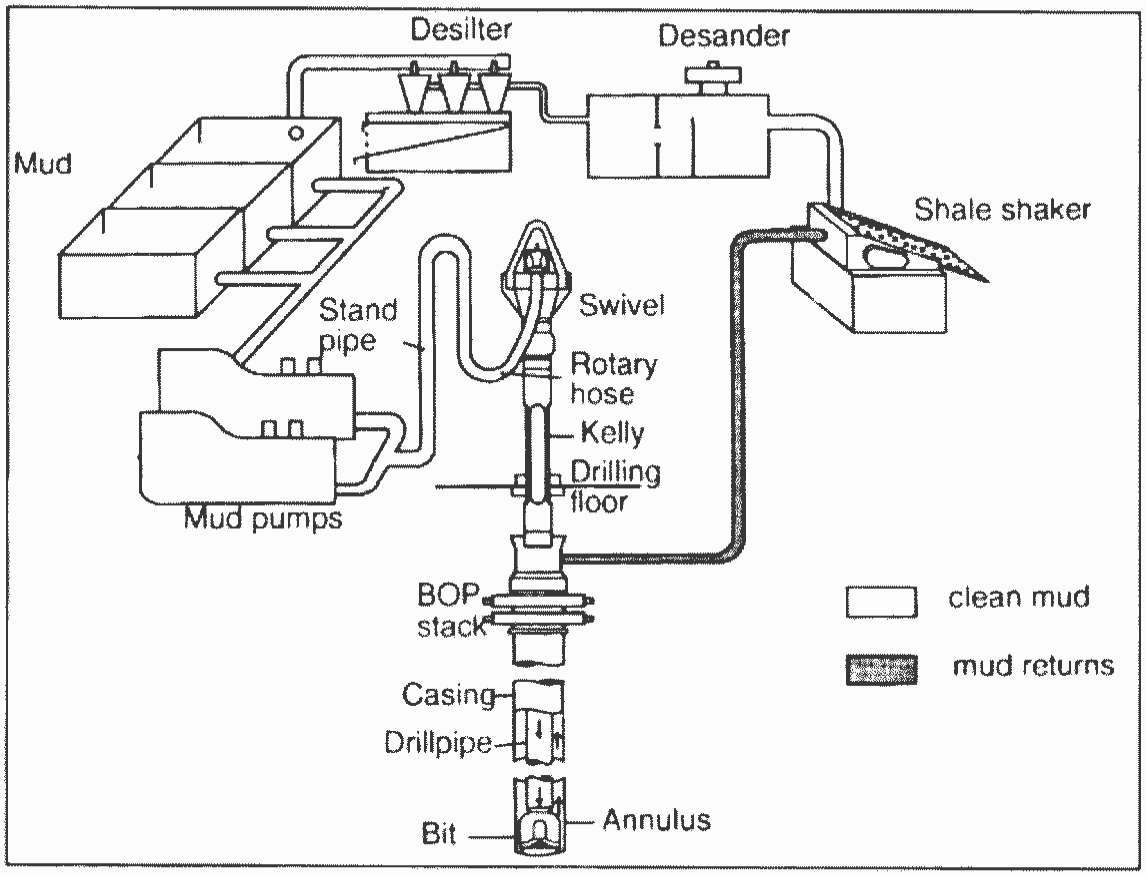
علاوه بر این، وزن وارد بر مته به نوع مته نیز بستگی دارد:

- یک مته با دندانه‌های طویل که مخصوص تشکیلات نرم است، به ناچار دارای یاتاقان‌های کوچکی است یعنی اینکه قادر به مقاومت کمتری دربرابر بارهای وارده است.
- در مقابل، یک مته با دندانه‌های کوچک که مخصوص تشکیلات سخت است، به طور قابل ملاحظه‌ای دارای یاتاقان‌های بزرگتری خواهد بود که می‌تواند در مقابل وزن‌های واردهٔ بالا مقاومت کند.

مطالعات نشان می‌دهد که نرخ نفوذ مته در تشکیلات نرم با نسبت مستقیمی‌در مقابل سرعت چرخش افزایش پیدا می‌کند. اما در تشکیلات سخت نرخ نفوذ، بیش از یک حد مناسب، افزایش نمی‌یابد.

۱۰-۱-۷ گل حفاری (Drilling Mud)

در حفاری چاه‌های نفت عموماً از گل حفاری استفاده می‌شود. گل حفاری از طریق لوله حفاری با فشار زیاد به داخل چاه پمپاژ می‌شود (شکل ۱۰-۱۲). گل از میان سر مته در ته چاه خارج شده و از بین لوله حفاری و لوله جداری دیواره‌های چاه، خرده سنگ‌های چاه را حمل کرده و به سطح بازمی‌گرداند. سپس گل حفاری صاف و دوباره مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰-۱۲ - سیستم چرخش گل حفاری

در طی حفاری، گل حفاری دارای کاربردهای زیادی است و اعمال مهمی را انجام می‌دهد. امروزه حفاری‌های بزرگ و گسترده به خاطر پیشرفت‌های تکنیکی در ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال‌های حفاری، با کیفیت بالایی انجام می‌شوند. به همین خاطر در این بخش راجع به وظایف و عملکردهای سیال‌های حفاری بحث خواهد شد:

۱ - انتقال قطعات خرده سنگی به سطح

باگردش سیال حفاری و بالا آمدن در آنالوس (annalus) یا فضای بین دیواره چاه و لولهٔ حفاری، باید قطعات خرده سنگی را از صحنهٔ کار (workink face) شستشو داده و به سطح چاه انتقال دهد.

۲ - تعلیق قطعات خرده سنگی در زمان توقف گردش سیال حفاری

در زمان اضافه کردن لولهٔ حفاری به رشته حفاری به منظور اضافه کردن طول آن و یا تعویض سر مته، گردش سیال حفاری باید متوقف شود. در طی این توقف، صعود قطعات خرده سنگی در آنالوس، به طرف بالا متوقف می‌شود. در این حالت قطعات خرده سنگی در گل حفاری به‌صورت معلق قرار گرفته و نمی‌توانند سقوط کنند. این مسأله به خاطر خاصیت دگرروانی (thixotropic) سیال حفاری است، به طوریکه در زمان توقف با استفاده از حالت ژله‌ای قطعات را معلق نگه می‌دارد.

۳ - *خنک کردن مته و کاهش اصطکاک محور حفاری*

متهٔ حفاری به دلیل درجه حرارت حاکم در عمق چاه و به خاطر اصطکاک مکانیکی داغ می‌شود. سیال حفاری در حال گردش، به‌صورت یک خنک کننده عمل می‌کند و چاله‌های گل (mud pit) در سطح، عمل مبادلهٔ گرما را انجام می‌دهند. به علاوه سیال حفاری ضریب اصطکاک بین محور حفاری و دیوارهٔ چاه را کاهش می‌دهد. این عمل گاهی اوقات با اضافه کردن مواد ضد اصطکاک همانند نفت و افزودنی‌های مخصوصی تقویت می‌شود.

۴ - *دادن استحکام به دیواره‌های چاه*

فاز سیال حفاری به داخل تشکیلات تراوا نفوذ می‌کند و حلقه‌ای از ذرات کلوئیدی را بر دیواره‌های چاه به وجود می‌آورد. این حلقه، سله گل (mud cake) نامیده می‌شود. به خاطر همین ایزوله کردن و اندود کردن تشکیلات نفوذپذیر در چاه است که به پایدار کردن تشکیلات کمک کرده و مدت بدون پوشش ماندن چاه را بیشتر امکان پذیر می‌سازد.

۵ - *جلوگیری از جریان یافتن سیال‌های موجود در تشکیلات به داخل چاه*

سیال حفاری، یک فشار هیدروستاتیک را اعمال می‌کند. اگر این فشار هیدروستاتیک نسبت به فشار سیال تشکیلات، بیشتر باقی بماند هیچ سیالی وارد چاه نخواهد شد.

۶ - *انتقال دهندهٔ نیرو به موتور داخل چاه*

در حالت‌های بخصوصی همچون حفاری‌های جهت‌دار یا حفاری با مته‌های الماسی، تنها به منظور چرخش مته، یک موتور یا توربین در ته چاه قرار داده می‌شود. موتور به وسیلهٔ سرعت جریان گلی که از درون محور حفاری به داخل چاه پمپ می‌شود به حرکت در می‌آید.

۷ - *ارائه دهندهٔ اطلاعات زمین‌شناسی*

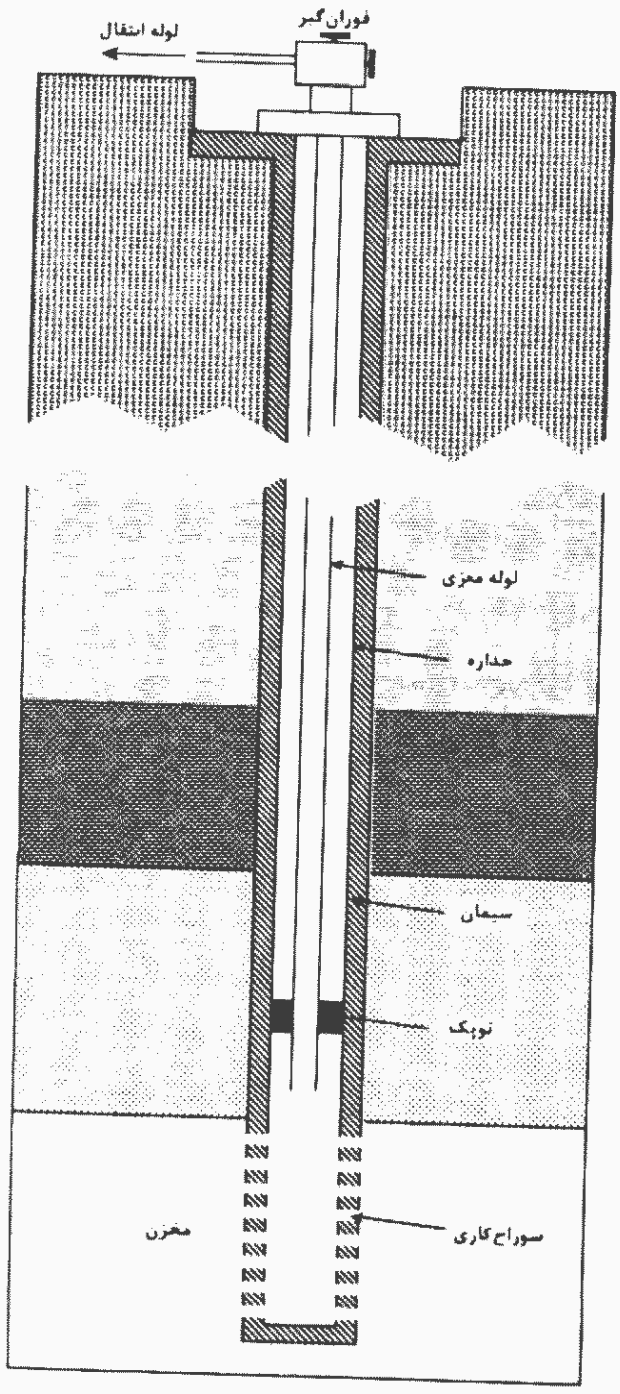
سیال‌های حفاری حاوی اطلاعات با ارزشی برای زمین‌شناسان می‌باشند. برای نمونه، آن‌ها حاوی قطعات خرده‌سنگی هستند که زمین‌شناسان آن‌ها را از خط بازگشت گل حفاری به دست آورده و آثار سیال و گازهای حاصل از تشکیلات حفاری شده را با مطالعه و مشاهده این

قطعات در سطح چاه به دست می‌آورند. تغییرات فیزیکوشیمیایی در سیال (درجه حرارت، pH، حجم کلریدها...) به زمین‌شناسان و پرسنل حفاری چگونگی پیشرفت حفاری را ارائه می‌دهد.

گل‌های حفاری دارای انواع و اقسام متفاوتی است که از مهم‌ترین آن‌ها گل حفاری پایه آبی (water-based mud) با اساس آب و گل حفاری پایه روغنی (oil-based mud) با اساس نفت و گل‌های پلیمری است.

۱۰-۱-۸ تکمیل چاه (Well Completion)

بعد از رسیدن به عمق نهایی و تکمیل جداره‌گذاری چاه و سیمانی کردن آن، یک سری تجهیزات پوشاننده و محافظ باید در بالای چاه نصب گردد. تجهیزات سرپوش چاه بخش فوران‌گیر (blowout preventers, BOP) را که دارای یک سیستم فشار بالا است همراهی می‌کنند. تکمیل کردن شامل نصب توپک یا مجرابند (packer)، لوله مغزی یا لوله استخراجی (tubing) و شیرهای ایمنی و همچنین سوراخ کاری (perforation) (شکل ۱۰-۱۳) مخزن تولید کننده است.



شکل ۱۰-۱۳ - تصویر شماتیک از یک چاه تکمیل شده

۱۰-۲ چاه نگاری (Logging)

انواع نمودارهای چاه که می‌توان در طی حفاری دورانی ثبت نمود شامل سه بخش اصلی زیر می‌باشند:

۱- نمودارهای کابلی (Wire-line logs)

۲- نمودارهای خرده سنگ‌های حفاری (Drill cutting logs)

۳- نمودارهای گل (Mud logs)

۱۰-۲-۱ نمودارهای کابلی (Wire-line Logs)

نمودارهای کابلی یا نمودارهای ژئوفیزیکی به وسیلهٔ انواع سیگنال‌های فیزیکی ثبت شده توسط یک سوند، تهیه می‌شوند. سوند به سرعت به ته چاه پایین فرستاده می‌شود. سپس به آرامی به طرف سطح، به بالاکشیده می‌شود و به طور پیوسته اندازه‌گیری‌ها، به وسیله کابل‌های رسانا به کامیون نمودارگیری فرستاده شده و ثبت می‌گردند.

سه نوع عمده از نمودارها وجود دارد:

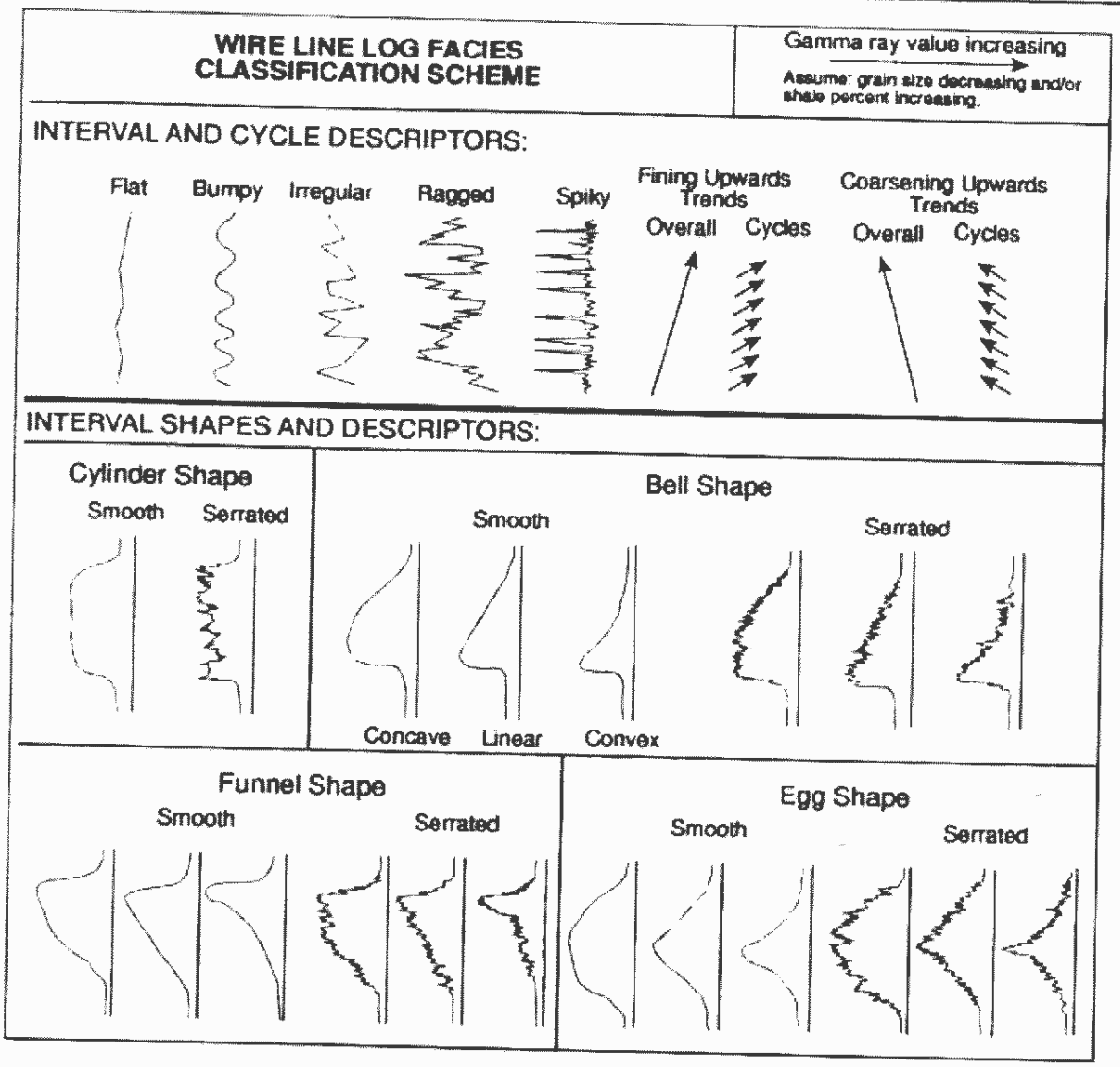
۱- الکتریکی (Electrical)

۲- رادیواکتیو (Nuclear)

۳- صوتی (Acoustic)

نمودارگیری الکتریکی شامل مقاومت الکتریکی سازند و پتانسیل خودزا (SP) می‌باشد. نمودارهای الکتریکی همراه با نمودارهای کابلی دیگر و نمونه‌های خرده سنگی، اطلاعات سودمندی از شناسایی و تطابق لیتولوژی‌ها و تعیین تخلخل، اشباع شدگی سیال و در برخی موارد تراوایی می‌دهند. نمودارهای رادیواکتیو مهم عبارتند از نمودار پرتو گاما که رادیواکتیویته طبیعی انواع سنگهای مختلف را ثبت می‌کند. نمودارهای نوترون که تخلخل پر شده با هیدروژن را اندازه می‌گیرند و نمودار چگالی سازند که ابزاری سودمند در تهیه نمودار تخلخل است. نمودارهای صوتی، زمان انتقال امواج صوتی را در درون سنگ‌ها ثبت می‌کنند. این نمودارها عمدتاً تغییرات ویژگی‌های کشسان (elastic) سنگ‌ها و سیالات درون آن‌ها را منعکس می‌کنند و به طور عملی در تخمین و ارزیابی تخلخل مفیداند.

این نمودارهای اطلاعات مهم دیگری در رابطه با محیط‌های رسوبی، به خصوص در مورد واحدهای تخریبی می‌دهد. امروزه می‌توان با استفاده از شکل‌شناسی نمودارها، که به اشتباه بعنوان رخساره‌های الکتریکی (electrofacies) معروف شده‌اند، به خوبی بخش‌های مختلف یک محیط دلتایی را شناسایی و تفکیک نمود. شکل ۱۰-۱۴ رخساره‌های الکتریکی مختلف را نشان می‌دهد. هر رخساره، محیط و شرایط رسوبگذاری خاصی را نشان می‌دهد. برای مثال، ماسه‌های سدی درشت‌شونده به سمت بالا (coaresening upward bar sands) و ماسه‌های کانالی ریزشونده به سمت بالا (fining upward channel sands) به خوبی از یکدیگر قابل تشخیص‌اند.

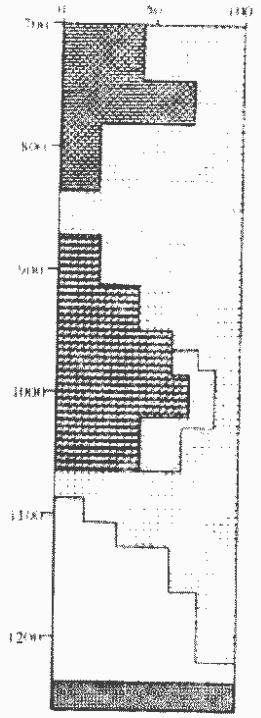


شکل ۱۰-۱۴ - مثالی از چندین رخساره الکتریکی حاصل از نمودارها

با توجه به اهمیت نمودارها، توضیح کامل‌تری در مورد آن‌ها در فصل بعدی کتاب آورده شده است.

۱۰-۲-۲ نمودارهای خرده سنگ‌های حفاری (Drill Cutting Logs)

خرده‌سنگ‌های حفاری (drill cuttings) به وسیلهٔ گل حفاری به سطح می‌رسند. نمونه‌ها به طور منظم جمع‌آوری و بسته‌بندی شده و برچسب زده می‌شوند و سپس با استفاده از میکروسکوپ آزمایش می‌شوند. درصد انواع مختلف سنگ به صورت سیستماتیک برای هر عمق ثبت شده و سپس نتایج روی یک نمودار به نام نمودار نمونه (sample log)، نمودار استراتیگرافی و یا نمودار نواری (strip log) رسم میگردد (شکل ۱۰-۱۵). این نمودار می‌تواند درتعیین واحدهای چینه‌شناسی و نبودهای سنگ‌شناسی به ما کمک کند. ولی آن‌ها باید با نمودارهای ژئوفیزیکی به منظور بررسی جزئیات دقیق‌تر رخساره‌ها، ضخامت‌ها و ارتباط بین انگشتی (inter-fingering) بین دو یا چند نوع سنگ مختلف هماهنگ شوند. در برخی مناطق،



برای مثال جایی که لیتولوژی همگن یا تکراری است، خرده سنگ‌ها ممکن است عمدتاً برای تولید نمودارهایی که اطلاعات زیست‌چینه‌ای (biostratigraphy) را ثبت می‌کنند استفاده شوند،که بازتابی ازتغییرات سیستماتیک محتوای میکروفسیلی نمونه‌ها است.

شکل ۱۰-۱۵ - مثالی از یک نمودار نواری که در آن لیتولوژی‌های حفاری شده مشخص شده‌اند

باید در نظر داشت که یک تأخیر زمانی (lag time) بین خرد کردن نمونه به وسیلهٔ مته و رسیدن آن به سطح وجود دارد، که ممکن است برای چاه‌های عمیق تا چندساعت طول بکشد. مقدار تأخیر زمانی بستگی به ظرفیت پمپاژ گل، سرعت پمپاژ، اندازهٔ چاه و عمق حفاری دارد. این تأخیر زمانی، می‌تواند محاسبه شود یا مستقیماً با اضافه کردن ردیاب‌هایی به جریان گل، که می‌توان به سادگی آن‌ها را هنگام برگشت آشکار کرد، اندازه‌گیری شود. نمونه‌ها همیشه باید با توجه به عمق واقعی مشخص شوند.

دیواره چاه‌هایی که بدون لوله جداری هستند ممکن است در جایی که سازندها سست یا دارای درز و شکاف هستند، فرو ریزند. در چنین وضعیتی این واریزه‌ها با خرده‌سنگ‌های حفاری مخلوط خواهند شد. اما اولین ظهور فسیل‌ها و لیتولوژی‌های شاخص قطعاً نتیجهٔ فروریزش چاه نیست و لذا می‌تواند به طور ویژه‌ای در بازسازی چینه‌شناسی چاه مهم باشد. با این وجود، معمولاً واریزه‌ها به دلیل اندازه بزرگ‌تر قابل تشخیص از خرده‌های واقعی حفاری است.

وقتی که لیتولوژی یا اطلاعات مخزنی خاصی مورد نیاز باشد مغزه‌گیری (coring) صورت می‌گیرد. با وجودی که هزینهٔ مغزه‌ها خیلی گرانتر است، قطعاً یک مغزه بر خرده‌سنگ ترجیح داده می‌شود. زیرا مغزه نمونه کامل از سنگ است که جزئیات بسیاری را به دست داده و می‌تواند مورد آزمایش‌های مختلف (core analysis) قرار گیرد. مشکل اساسی مغزه‌ها گران بودن کسب آن‌هاست.

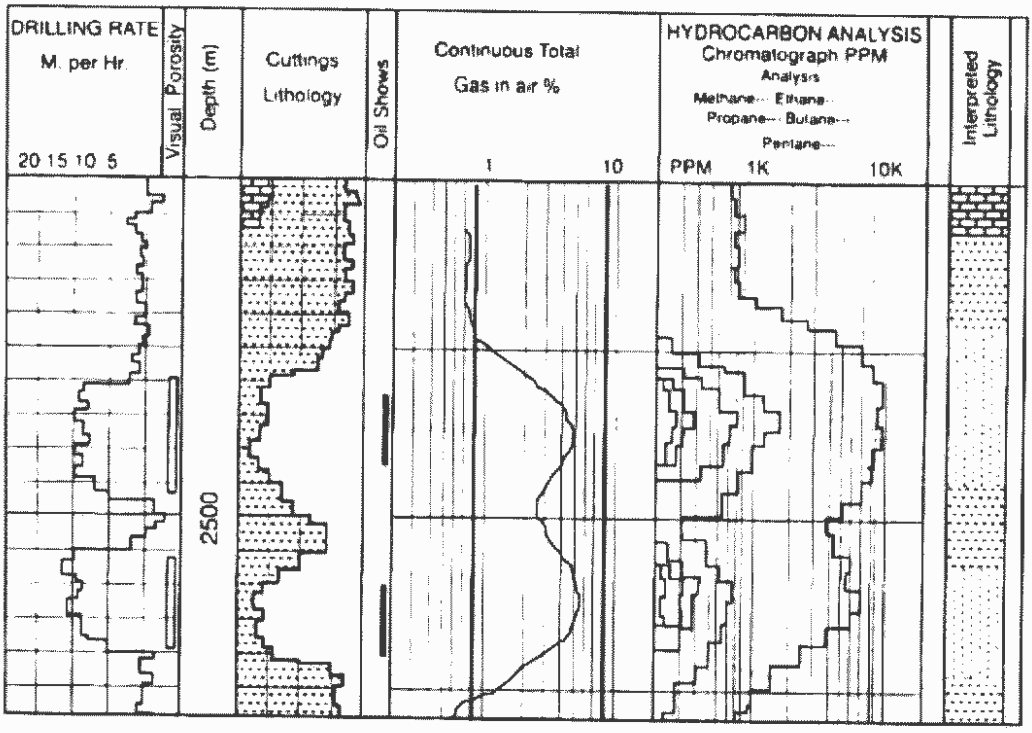
۱۰-۲-۳ گل‌نگاری (Mud Logging)

گل‌نگاری شامل بررسی مستمر گل حفاری است. اصولاً ثبت سرعت نفوذ مته حفاری و مهم‌تر از همه تشخیص وجود نفت و گاز در خرده سنگ‌ها و گل از وظایف گل‌نگار (mud logger) است.

چاهی که در حال حفاری است دارای ابزارهایی می‌باشد که قادر است اطلاعات متعددی در مورد گل حفاری ثبت نماید. این اطلاعات شامل:

- *ثبت تغییرات حجم گل حفاری*، اگر حجم گل حفاری در حوضچه‌های نگه دارنده گل افزایش یابد، بیانگر این است که سیالات از داخل سازندی وارد چاه می‌شوند. بدیهی است که چنین حالتی بیانگر وجود یک لایه پر فشار است که فشار آن بر فشار هیدروستاتیکی گل حفاری غلبه کرده و سیال موجود در سازند وارد چاه و گل حفاری شده است. در این حالت باید مراقب فوران (blow-out) چاه به دلیل سبک‌تر شدن گل حفاری بود.
- *سیستم نشان دهنده گاز*، وجود گاز طبیعی در گل حفاری می‌تواند براحتی در سر چاه ثبت گردد.
- *گاز کروماتوگراف*، این ابزار قادر است گازهای مختلف را که از گل حفاری خارج می‌شود از یکدیگر شناسایی کند.
- *ثبت فشار سر مته*
- *مشخص نمودن جهت و موقعیت سر مته*
- *معلوم نمودن دیگر ویژگی‌های گل نظیر گرانروی، مقاومت الکتریکی و غیره.*

شکل ۱۰-۱۶ یک نمونه حاصل از نمودارگیری گل را نشان می‌دهد که در آن سرعت حفاری، لیتولوژی خرده‌ها، ترکیب گازهای مشاهده شده در طی حفاری و غیره در آن آورده شده است. در این مثال دیده می‌شود در جایی‌که سرعت حفاری افزایش می‌یابد مصادف است با وجود تخلخل و وجود نفت و گاز.



شکل ۱۰-۱۶ - مثالی از یک نمودارگیری گل

۱۰-۳ روش‌های ژئوفیزیکی (Geophysical Methods)

به طور خلاصه به علم ژئوفیزیک مطالعه زمین با استفاده از روش‌های فیزیکی گویند. آغاز علم ژئوفیزیک به کشف گیلبرت درباره مغناطیس زمین و تئوری نیوتن درباره نیروی گرانی زمین برمی‌گردد. مطالعات ژئوفیزیکی بر خلاف مطالعات زمین‌شناسی بیشتر کمّی و غیرتوصیفی‌اند تا کیفی و توصیفی. هدف اصلی بررسی‌های ژئوفیزیکی، تعیین محل ساختارهای زمین‌شناسی و در صورت امکان اندازه‌گیری ابعاد و ویژگی‌های فیزیکی آن‌هاست. مثلاً در اکتشاف نفت، هدف به دست آوردن اطلاعات ساختاری است زیرا نفت با عوارض خاصی مثل طاقدیس،گسل و...در ارتباط است.

روش‌های ژئوفیزیکی به صورت گسترده‌ای در اکتشاف نفت استفاده می‌شوند. پیشرفت‌های این روش‌ها در اثرگسترش ابزارهای دقیق‌تر و پیچیده‌تر برای کسب اطلاعات و هم‌چنین ظهور کامپیوترهای بسیار سریع برای پردازش داده‌های حاصل شده است.

به طور کلی ژئوفیزیک به دو دسته ژئوفیزیک علمی و ژئوفیزیک عملی تقسیم می‌شود:

۱۰-۳-۱ ژئوفیزیک علمی

بررسی و شناسایی بعضی از خصوصیات فیزیکی زمین که خود به بخش‌های کوچکتری تقسیم می‌شود:

- **ژئودزی و گرانی سنجی**: مطالعه شکل و میدان گرانش زمین
- **لرزه‌شناسی**: مطالعه زمین لرزه‌ها و ارتعاشات حاصل از انفجار هسته‌ای و شیمیایی
- **ژئومغناطیس و ژئوالکتریک**: مطالعه مغناطیس زمین و پدیده‌های الکتریکی آن
- **ژئوترمومتری**: مطالعه ویژگی‌های حرارتی زمین
- **تکتونوفیزیک**: مطالعه جنبه‌های فیزیکی تکتونیک جهانی و منطقه‌ای
- **ژئوکاسموگونی**: مطالعه و بحث در بارهٔ منشأ زمین
- **ژئوکرونولوژی**: مطالعه و بحث دربارهٔ تاریخ زمین و زمان حوادث آن

همچنین علوم دیگر از قبیل هواشناسی و فضاشناسی در محدودهٔ علم ژئوفیزیک قرار می‌گیرند.

۱۰-۳-۲ ژئوفیزیک عملی (کاربردی یا اکتشافی)

استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی سنگ‌های زیرسطحی برای اکتشاف ذخایر پنهان شده در زیر زمین (از قبیل نفت، گاز، آب، کانی‌ها و...) و یا برای مقاصد مهندسی که به سه بخش تقسیم می‌شود.

– **دورسنجی**: مطالعه خصوصیات سنگ‌های سطح زمین با استفاده از ماهواره در مقیاس بسیار بزرگ که تشعشعات و امواج راداری، مایکروویو و مادون قرمز توسط دوربین‌های مخصوصی ثبت می‌گردند.

– **چاه‌پیمایی یا چاه‌نگاری**: مطالعه و بررسی درون زمین با استفاده از دستگاههای پایین‌رونده که بیشتر از سایر روش‌های ژئوفیزیکی مورد توجه زمین‌شناسان است.

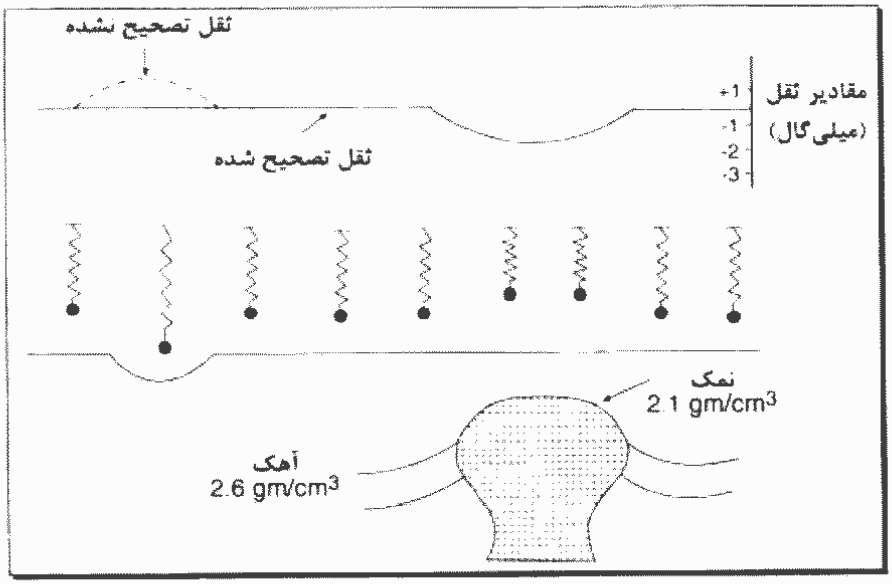
– **ژئوفیزیک سطحی (Surface Geophysic)**: مطالعه خصوصیات فیزیکی سنگ‌های سطحی و زیرسطحی توسط روش‌های مختلف ژئوفیزیکی از روی سطح زمین که به سه طریق هوایی، دریایی و زمینی انجام می‌شود. روش‌های مطالعه ژئوفیزیک سطحی بسیار گوناگون است به طوری که به زیربخش‌های مختلفی تقسیم می‌شود:

الف) روش حرارت سنجی: اندازه‌گیری درجه حرارت را در مقیاس‌های کوچک انجام می‌دهد که منجر به شناسایی ساختارهای کم عمق از قبیل: گسل، طاقدیس و گنبدنمکی و.... می‌شود. مهم‌ترین پارامتر اندازه‌گیری در این روش تغییرات درجه حرارت نسبت به عمق است.

ب) روش الکترو مغناطیسی: اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ثانویه زمین و ردیابی گسل‌ها، رگه‌های نازک، کابل و لوله‌های زیر زمینی و غیره.

ج) روش الکتریکی: اندازه‌گیری خواص الکتریکی سنگ‌ها و تعیین مکان کانی‌ها از روی خواص الکتریکی معین آن‌ها. این روش به دلیل عمق نفوذ کم (تا ۵۰۰ متر) در اکتشافات نفتی کاربرد کمی دارد.

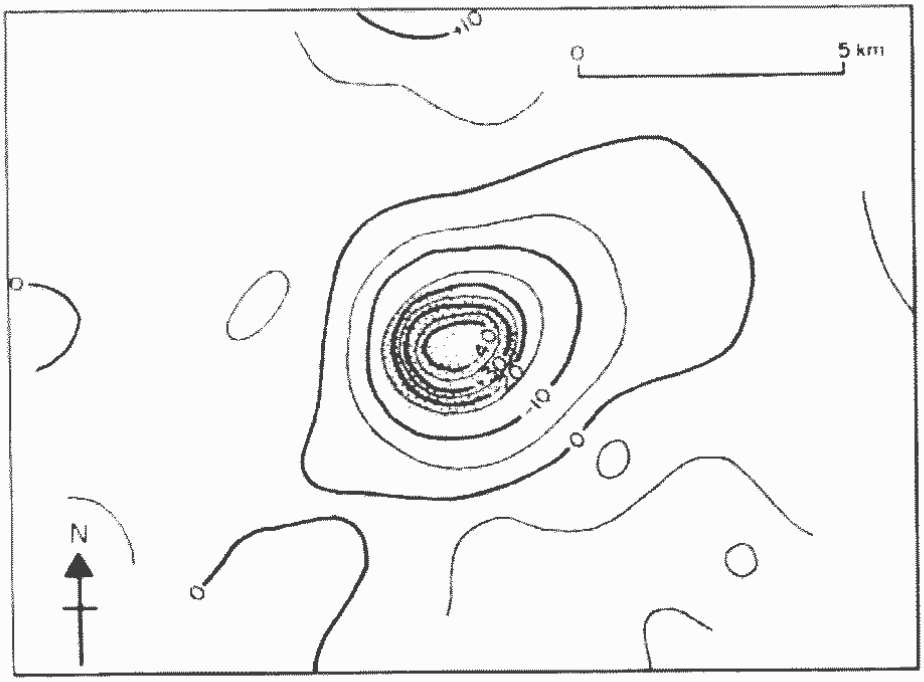
د) کاوش گرانی سنجی (Gravity Survey): این روش برای اندازه‌گیری تغییرات گرانی زمین و شناسایی انواع مختلف ساخت‌های زیر سطحی به کار برده می‌شود. ابزار اندازه‌گیری گرانی به‌صورت یک فنر بسیار دقیق است که با تغییر گرانی طول آن تغییر می‌کند (شکل ۱۰-۱۷). گرانی سنجی بیشتر برای اکتشافات مقدماتی به کار می‌رود، به طوری که با شناسایی سطح پی‌سنگ، که بسیار چگال‌تر از سنگ‌های رسوبی است، حوضه رسوبی را از نظر بزرگی و ضخامت رسوبات مشخص می‌کند. این روش در ابتدا برای تعیین محل گنبدهای نمکی مکزیک و آمریکا به کار رفت. در جاهایی که گنبد نمکی وجود دارد میدان گرانی زمین در بالای آن کمتر از سنگ‌های اطراف است، ولی برعکس در بالای قله طاقدیس‌های مدفون، میدان گرانی زمین بیشتر از سنگ‌های اطراف می‌باشد. بنابراین گرانی‌سنجی، روش بسیار مناسبی در کاوش منابع زیر زمینی (مخازن نفتی و کانسارها) است و تا حد زیادی در اکتشاف نفت و گاز (به خصوص اکتشاف مقدماتی منطقه فلات قاره) به کار می‌رود. این روش قدیمی‌ترین و اولین روش برای اکتشاف نفت بوده و با وجود مخارج زیاد باز هم از روش لرزه‌ای ارزان‌تر است.



شکل ۱۰-۱۷ - اساس کاوش گرانی سنجی

شتاب جاذبه در سطح زمین ثابت نیست و به وسیلهٔ چندین فاکتور از قبیل عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، توپوگرافی و نهایتاً زمین‌شناسی منطقه کنترل می‌شود. بنابراین برای به دست آوردن اطلاعات زمین‌شناسی، نظیر عمق پی سنگ، تأثیر طول و عرض جغرافیایی و توپوگرافی باید از مقادیر اولیه اندازه‌گیری شده داده‌های گرانی حذف شود.

واحد شتاب جاذبه گال می‌باشد. یک گال برابر با شتاب $1\ cm/s^2$ است. بعد از اینکه تصحیحات برای اندازه‌گیری‌های هر ایستگاه انجام شد، عموماً نتایج به صورت نقشه کانتوری نشان داده می‌شوند (شکل ۱۰-۱۸). با توجه به اینکه پی‌سنگ‌ها به دلیل چگالی بیشتر، شتاب ثقل بیشتری را ایجاد می‌کنند، با استفاده از نقشه کانتوری شتاب جاذبه، می‌توان موقعیت پی سنگ و لذا شکل و عمق حوضه را مشخص نمود.



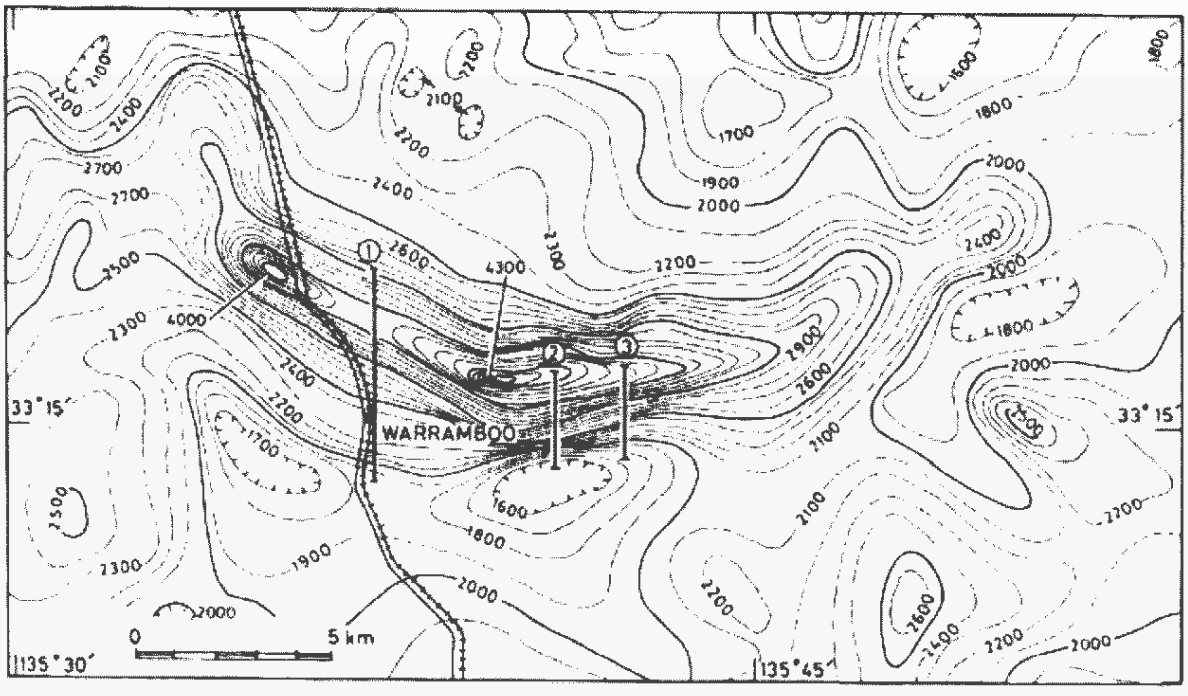
شکل ۱۰-۱۸ - نقشه کانتوری از آنومالی ثقلی بر روی یک گنبد نمکی در تگزاس امریکا

ه) کاوش مغناطیسی (Magnetic Survey)

اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین و شناسایی عمق پی‌سنگ و وسعت حوضه رسوبی، به خصوص در مناطق بدون کارهای اکتشافی قبلی از اهداف کاوش‌های مغناطیسی است. این روش بیشتر به عنوان ابزار اکتشاف و شناسایی مقدماتی ساختارهای زیرزمینی مربوط به نفت و گاز مطرح است به طوری که یک برنامهٔ اکتشاف ژئوفیزیکی حداقل در مرحلهٔ شناسایی بدون استفاده از روش مغناطیسی به سختی قابل اجرا می‌باشد.

در این روش یک مغناطیس‌سنج درسطح زمین، هم میدان مغناطیسی زمین و هم مغناطیس محلی ایجاد شده به وسیلهٔ سنگ‌های مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کند. میدان مغناطیسی زمین که به سبب طبیعت دو قطبی زمین به وجود آمده است با عرض جغرافیایی تغییر می‌کند و از حدود ۶۰۰۰۰ گاما در قطب تا حدود ۳۵۰۰۰ گاما در استوا متغیر است.

سنگ‌های مختلف شدت مغناطیسی متفاوتی دارند. حساسیت مغناطیسی سنگ‌های رسوبی خیلی کمتر از سنگ‌های آذرین است. اندازه‌گیری‌های میدان ژئومغناطیسی یک منطقه در هر نقطه شامل مجموع میدان مغناطیسی طبیعی و مغناطیسی سنگ‌های آنجاست. پس از کسب اطلاعات، آن‌ها باید پردازش شوند و تأثیر مغناطیسی طبیعی حذف گردد. مقادیر باقیمانده، بازتابی از حساسیت مغناطیسی سنگ‌های منطقه است. مقادیر به دست آمده معمولاً به شکل نقشه‌های کانتوری شدت میدان مغناطیسی، نمایش داده می‌شوند (شکل ۱۰-۱۹). این نوع نقشه‌ها ما را قادر به دیدن موقعیت پی‌سنگ می‌سازد و بنابراین مناطق عمیق و کم عمق حوضه‌های رسوبی را که دارای ضخامت‌های متفاوت رسوب است نشان می‌دهد. گسل‌ها نیز در نقشه‌های کانتوری شدت مغناطیسی، به وسیلهٔ تغییرات ناگهانی در کانتورها شناخته می‌شوند.



شکل ۱۰-۱۹ - نقشه کانتوری آنومالی مغناطیسی بخشی از جنوب استرالیا

به طور کلی کاوش مغناطیسی یک ابزار سریع، غیردقیق و نسبتاً ارزان در اکتشافات نفتی است که قادر به ساختن یک نمای منطقه‌ای از ساختمان حوضه است.

و) بررسی‌های لرزه نگاری (Seismic Survey): این روش از نظر مخارج و تعداد ژئوفیزیکدانان شاغل در آن در صدر تمام روش‌های دیگر ژئوفیزیکی قرار دارد. از جمله مهم‌ترین برتری‌های این روش، دقت بالا، عمق بررسی زیاد و توان تفکیک بالای آن است. معمولاً در مراحل اولیه اکتشاف در حوضه‌های ناشناخته، به خاطر کمبود اطلاعات از خصوصیات ساختاری، رسوب شناسی و دیاژنتیکی مخزن، حفاری ممکن است بی نتیجه بماند. داده‌های لرزه‌ای می‌تواند کمبودهای اطلاعاتی فوق را جبران کند.

روش لرزه‌ای بر حسب منبع تولید کننده امواج لرزه‌ای به دو بخش تقسیم می‌شود:

- **لرزه‌شناسی زمین لرزه** که دارای منبع انرژی طبیعی است.
- **لرزه‌شناسی اکتشافی** که دارای منبع انرژی مصنوعی است و هدف اصلی آن به تصویر کشیدن ساختار زمین‌شناسی بخش بالایی پوسته زمین می‌باشد.

روش لرزه‌ای بر حسب نحوه اندازه‌گیری زمان انتشار و دریافت امواج لرزه‌ای به دو بخش تقسیم می‌شود:

- **لرزه‌شناسی انکساری یا شکستی:** اندازه‌گیری زمان انتشار امواج لرزه‌ای انکساری از سطح ناپیوستگی دو محیط و شناسایی عمق و سرعت لایه‌ها در زیرزمین. در این روش برخلاف روش انعکاسی فاصله گیرنده تا منبع نسبت به عمق سطح ناپیوستگی بسیار زیاد است. این روش نسبت به روش بازتابی دارای دقت کمتری است ولی آسان‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود. این روش لرزه‌ای اولین روش کاوش لرزه‌ای برای اکتشاف نفت بوده، و در کاوش‌های مهندسی کاربرد فراوانی دارد. همچنین در شناسایی و تعیین عمق توده‌های نفوذی مثل گنبدنمکی بسیار مفید است زیرا سرعت امواج در نمک و رسوبات تبخیری بیشتر می‌شود. این روش اولین بار در سال ۱۹۳۴ در مسجدسلیمان انجام شد.

- **لرزه‌شناسی انعکاسی یا بازتابی:** اندازه‌گیری زمان انتشار امواج لرزه‌ای بازتابی از یک سطح بازتاب کننده برای شناسایی ساختار زمین در اعماق زیاد و به نقشه در آوردن ساختمان درونی زمین. در این روش تهیه اطلاعات از سایر روش‌ها با دقت بیشتر و بهتری صورت می‌گیرد اما سرعتی کندتر و هزینهٔ گران‌تری دارد. روش بازتابی پیشرفته‌ترین روش اکتشاف نفت است که در شناسایی ساختمان‌های زیرسطحی، تشخیص هیدروکربن‌ها (به خصوص گاز) و شناسایی سیستم‌های رسوبی منطقه به کار می‌رود. این روش، اولین بار در سال ۱۹۴۹ در دشت آبادان انجام شد که با توجه به اهمیت روزافزونش در اینجا به تفصیل بحث می‌شود.

۱۰-۳-۳ لرزه‌شناسی اکتشافی

مطالعات ژئوفیزیکی از روش‌های متداول اکتشاف مواد هیدروکربنی است. هدف اصلی این نوع مطالعات، یافتن ساختارهای زمین‌شناسی مناسب برای تجمع نفت و گاز در زیر زمین می‌باشد. در این بین روش لرزه‌نگاری به خصوص نوع انعکاسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری که پیشرفت روزافزون این شاخه از علم ژئوفیزیک مدیون اکتشاف مواد هیدروکربنی است. قبل از یک کار لرزه‌ای باید ابتدا ناحیه از نظر زمین‌شناسی سطحی بررسی گردد. در صورت مناسب بودن شرایط ابتدا روش مغناطیس سنجی و سپس روش ثقل‌سنجی در منطقه انجام می‌گیرد تا حدود تقریبی ساختارهای زیرزمین مشخص گشته و کار اصلی اکتشاف به نقاط خاصی محدود شود. در انتها در صورت موفقیت آمیز بودن روش‌های قبلی، از روش لرزه‌نگاری انعکاسی برای اکتشاف و شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی مناسب در تجمع هیدروکربن‌ها استفاده می‌شود.

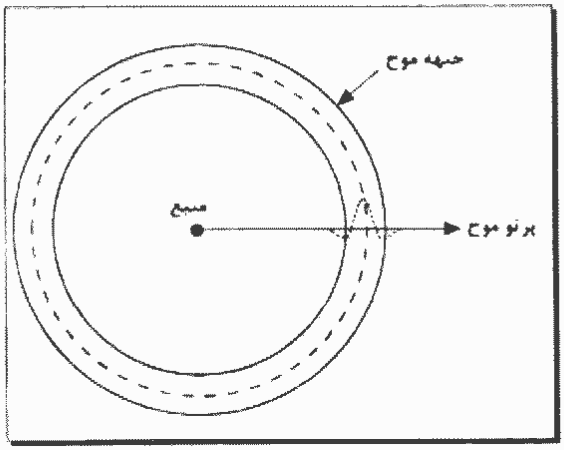
اصول پایه لرزه‌نگاری

۱۰-۳-۳-۱ انتشار امواج لرزه‌ای (Seismic Wave Propagation)

درک کامل یک ارتعاش لرزه‌ای طبیعی بسیار مشکل و شاید غیر ممکن باشد زیرا به‌صورت ترکیبی است. ولی می‌توان از یک مدل ساده شده برای درک ارتعاشات لرزه‌ای استفاده کرد. تکنیک‌های صحرایی و ابزار تفسیری بر پایه این مدل‌ها طرح‌ریزی شده است. وقتی به یک جسم کشسان به طور ناگهانی تنش وارد شده و یا آزاد می‌شود تغییر مکان‌های حاصل از آن به‌صورت موج لرزه‌ای منتشر می‌گردد. موج لرزه‌ای وسیله اساسی اندازه‌گیری در اکتشافات لرزه‌ای است. به امواج لرزه‌ای امواج الاستیک یا کشسانی نیز می‌گویند، زیرا باعث تغییر شکل الاستیک مواد می‌شوند.

۱۰-۳-۳-۲ جبهه‌ها و پرتوهای موج (Wave Fronts and Rays)

وقتی یک منبع انفجاری و یا ارتعاشی، انرژی لرزه‌ای را تولید می‌کند این انرژی به شکل کره‌ای که همیشه در حال انبساط است انتشار می‌یابد و بزرگترین لبه آن جبهه موج (wave front) نامیده می‌شود (شکل ۱۰-۲۰). انتشار امواج لرزه‌ای به‌صورت سه بعدی است. موج در راستای عمود برجبهه موج حرکت می‌کند. به خطی که راستای حرکت انرژی موج را مشخص می‌کند پرتو موج (wave ray) می‌گویند. اگر از منبع انرژی به نقاط هم ارز در روی جبهه‌های موج خطوطی عمود کنیم جهت انتشار موج که همان پرتو موج است به دست می‌آید. بنابراین در تمام نقاط پرتوها بر جبهه‌های موج عمود می‌باشند. البته درصورتی که محیط ایزوترپ یا همسانگرد باشد.



شکل ۱۰-۲۰ - موقعیت جبهه و پرتو موج نسبت به منبع تولید انرژی

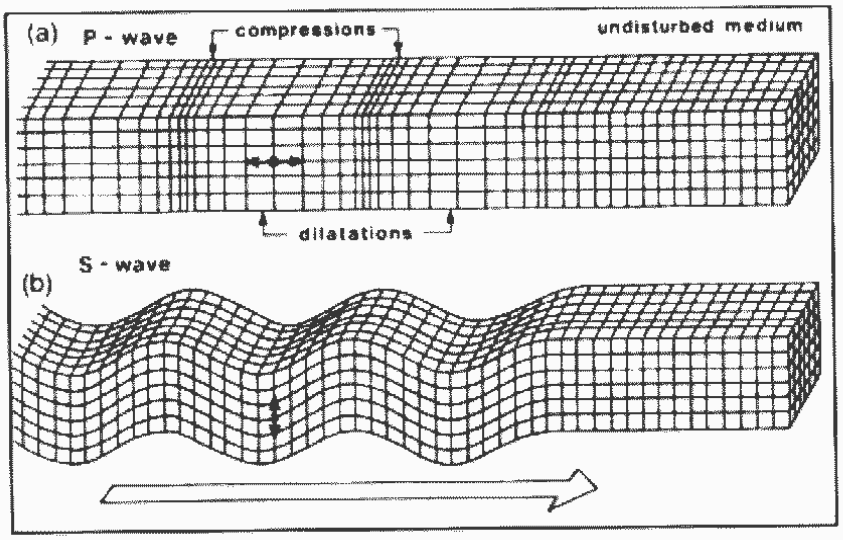
۱۰-۳-۳-۳ تئوری امواج

تئوری امواج، زمان سیر موج، شکل و اندازهٔ آن را شرح می‌دهد. بکارگیری این تئوری برای انرژی لرزه‌ای زمین بسیار پیچیده است اما در مدل‌های ساده شدهٔ قابل درک، کاربرد فراوانی دارد. مدل ساده نشانگر زمین هم‌جنس، نامحدود و جامدی الاستیک است که از مکعب‌های بسیار کوچکی ساخته شده است، به طوریکه نیروها و تغییر شکل‌ها برای هر مکعب مطالعه شده و انتقال موج از هر مکعب به مکعب دیگر به وسیله معادله موج کنترل می‌گردد. چون محیط کشسان تحت دو نوع کرنش (strain) قرار می‌گیرد تمام موج‌های مورد بررسی در لرزه‌شناسی از نوع برشی و یا تراکمی/ کششی می‌باشند. امواج لرزه‌ای به دو دسته کلی امواج سطحی(surface wave) و امواج پیکری یا حجمی(body waves) تقسیم می‌شوند. امواج سطحی در سطح دو محیط با خواص الاستیسته متفاوت منتشر می‌شوند و فقط از سطح آزاد یک محیط کشسان عبور می‌کنند. از امواج سطحی می‌توان امواج لاو (love waves) و امواج ریلی(rayleigh waves) را نام برد. امواج پیکری از پیکره جسم عبور کرده و در کل توده سنگ به‌صورت کروی منتشر می‌شوند. امواج پیکری به دو دسته امواج طولی یا اولیه و امواج عرضی یا ثانوی تقسیم می‌شوند. به دلیل اهمیت امواج پیکری در لرزه‌شناسی اکتشافی توضیح بیشتری در مورد آنها ارائه می‌شود.

امواج طولی یا اولیه (P): در این امواج، جهت ارتعاش ذره در امتداد انتشار موج است (شکل ۱۰-A۲۱). بدین صورت که حرکتی تراکمی/کششی شبیه به حرکت فنر دارند. این امواج از تمام مواد (جامد، مایع و گاز) عبور می‌کنند. در جامدات با افزایش چگالی سرعت امواج P زیاد می‌شود. امواج P دارای اسامی‌مختلفی‌اند: نظیر امواج طولی، چون جهت ارتعاش موج با انتشار آن یکی است، امواج اولیه، چون سرعت آن‌ها از امواج دیگر بیشتر است و اولین موج دریافتی می‌باشند و امواج فشاری، چون هنگام عبور از داخل جسم باعث تنش‌های فشاری و کششی شده و تغییر حجم بدون تغییر شکل در جسم ایجاد می‌کنند.

امواج عرضی یا ثانوی (S): در این امواج، جهت ارتعاش ذره عمود بر امتداد انتشار موج است و حرکتی شبیه به حرکت ریپل‌های سطح آب دارند (شکل ۱۰-B۲۱). این امواج از مواد سخت (جامد) عبور می‌کنند زیرا محیط‌های جامد دارای تنش برشی‌اند. امواج S دارای اسامی‌مختلفی‌اند: نظیر امواج عرضی، چون جهت ارتعاش موج عمود بر انتشار آن است، امواج ثانویه، چون سرعت سیر موج در جامدات تقریباً نصف سرعت امواج P است به طوری که دومین موج دریافتی می‌باشند و امواج برشی، چون هنگام عبور از داخل جسم باعث تنش برشی در آن می‌شوند و تغییر شکل بدون تغییر حجم در جسم ایجاد می‌کنند.

چون محیط‌های گازی و مایع تنش برشی را تحمل نمی‌کنند، بنابراین امواج برشی در داخل این محیط‌ها سیر نمی‌کنند.



شکل ۱۰-۲۱ - تغییر شکل الاستیک جسم و مسیر امواج پیکری، a) امواج طولی، b) امواج عرضی

۱۰-۳-۳-۴ سرعت امواج الاستیک

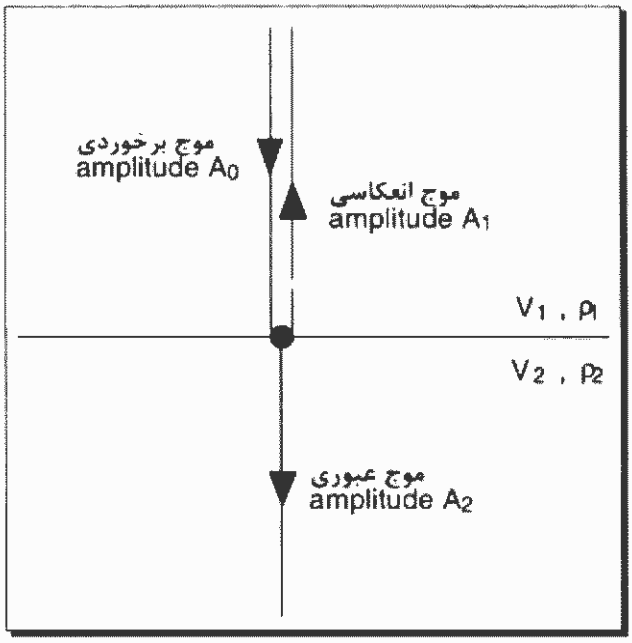
فاکتور اصلی تغییرات سرعت در سنگ‌ها تغییرات چگالی است که ارتباط تنگاتنگی با تخلخل دارد. البته چگالی متوسط سنگ‌ها تغییرات کمی دارد و بیشتر تحت تأثیر تخلخل تغییر می‌یابد تا کانی شناسی. فاکتورهای دیگر مؤثر بر روی سرعت سیر امواج، عبارتند از: کانی‌شناسی سنگ، سیمان، فشار، سیال منفذی، اندازه دانه‌ها، درجه حرارت و فرکانس موج.

در بیشتر سنگ‌هایی که مرحله دیاژنز را طی کرده‌اند نسبت سرعت امواج P به S بین ۱,۵ تا ۲ است.

تضعیف امواج لرزه‌ای و اتلاف انرژی در سنگ‌های غیرمتراکم و برای امواج با فرکانس‌های بالا بیشتر صورت می‌گیرد، به طوری که هر چه فرکانس امواج بالاتر باشد تحرک ذرات سنگ بیشتر و اصطکاک زیادتر می‌شود در نتیجه ضریب جذب افزایش می‌یابد و اتلاف انرژی بیشتر می‌گردد. همچنین هر چه سرعت سیر امواج بیشتر و سنگ متراکم‌تر باشد سرعت انتقال انرژی سریع‌تر بوده، ضریب جذب کاهش می‌یابد و اتلاف انرژی کمتر می‌گردد.

۱۰-۳-۳-۵ انعکاس (Reflection)

وقتی یک موج الاستیک به سطح جدایش دو محیط با چگالی و سرعت امواج صوتی متفاوت، برخورد می‌کند، قسمتی از آن تحت عنوان موج عبوری (transmitted ray) در همان جهت برخورد حرکت خود را ادامه می‌دهد و قسمتی نیز تحت عنوان موج انعکاسی (reflected ray) منعکس می‌شود (شکل ۱۰-۲۲). مقدار انرژی موج عبوری و موج انعکاسی برابر انرژی موج الاستیک برخوردی است. مقدار انرژی انعکاسی به اختلاف مقاومت صوتی (acoustic impedance, Z) دو محیط بستگی دارد. مقاومت صوتی به چگالی سنگ (ρ) و سرعت امواج (V) در آن وابسته است ($Z=\rho V$). مقاومت صوتی بیشتر به اختلاف سرعت دو محیط وابسته است تا تغییرات چگالی سنگ‌ها، زیرا تغییرات چگالی در سنگ‌ها ناچیز است. اگر اختلاف مقاومت صوتی دو محیط مجاور کم باشد، امواج برخوردی بیشتر به‌صورت امواج عبوری از میان آن‌ها عبور می‌کند. با افزایش اختلاف مقاومت صوتی و یا به عبارت دیگر افزایش اختلاف در ویژگی‌های سنگی که سبب ایجاد تباین صوتی در لایه فوقانی و زیرین می‌شوند، نظیر کانی شناسی، تخلخل و نوع سیال، امواج برخوردی بیشتر به‌صورت انعکاسی خواهند بود.



شکل ۱۰-۲۲ - امواج انعکاسی و عبوری در نتیجه برخورد یک موج الاستیک به سطح جدایش دو محیط با مقاومت صوتی متفاوت

ضریب انعکاس (Reflection Coefficient, R_C) که بیانگر میزان انعکاس امواج الاستیک از سطح جدایش دو محیط است، در مطالعات لرزه نگاری انعکاسی بسیار مهم است:

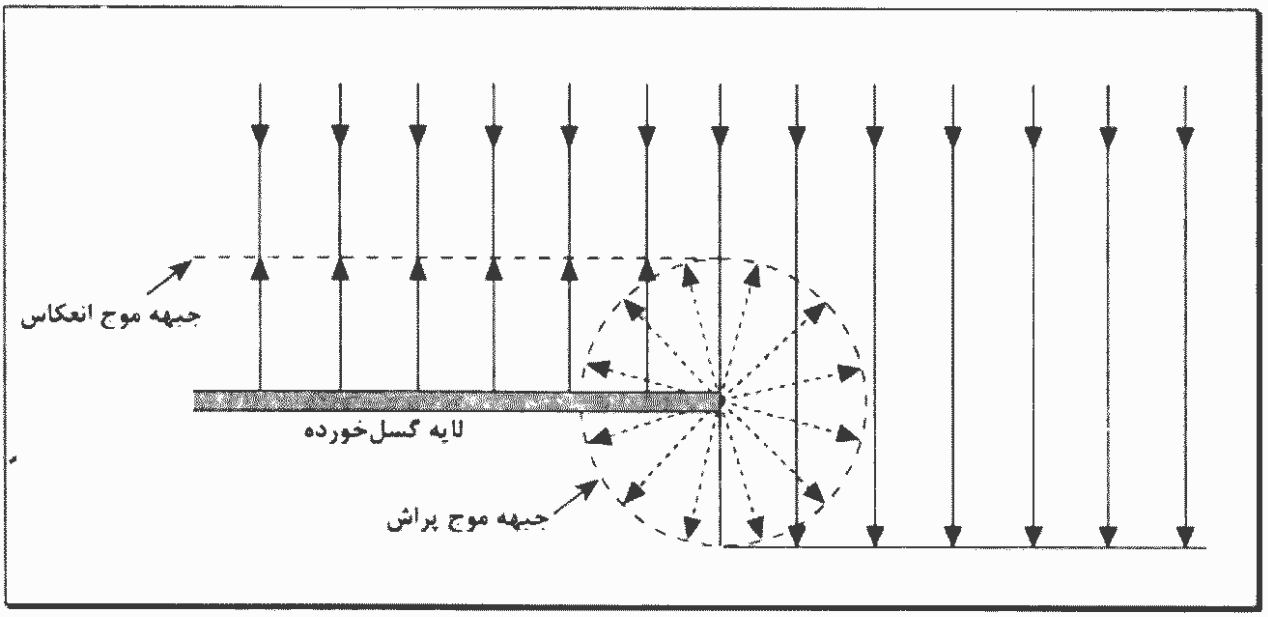
$$R_C = \frac{V_2\rho_2 - V_1\rho_1}{V_2\rho_2 + V_1\rho_1}$$

- اگر ضریب انعکاس برابر صفر باشد (Rc=0)، سرعت در دو محیط یکسان است ($V_1=V_2$) و $Z_1=Z_2$ بوده و هیچ انعکاسی رخ نمی‌دهد.

- اگر Rc = ±۱ باشد سرعت در دو محیط یکسان نیست ($V_1 \# V_2$) و $Z_1 \# Z_2$ بوده و تمام انرژی انعکاس یافته و هیچ موجی وارد محیط دوم نمی‌شود. اگر Rc = -۱ باشد سرعت لایه زیرین کمتر از لایه بالایی است ($V_1>V_2$) و $Z_1>Z_2$ بوده و ضریب انعکاس منفی شده (-Rc) و

موج انعکاسی تغییر فاز ۱۸۰ درجه‌ای می‌دهد، یعنی موج تابشی تراکمی به‌صورت موج کششی انعکاس می‌یابد. اگر Rc = +۱ باشد سرعت لایه زیرین بیشتر از لایه بالایی است ($V_1<V_2$) و $Z_1<Z_2$ بوده و ضریب انعکاس مثبت شده(Rc+) و موج انعکاسی تغییر فاز نمی‌دهد. این حالت اکثراً با افزایش عمق لایه‌ها در طبیعت رخ می‌دهد.

پدیده پراش (diffraction) در امواج الاستیک نقش مخرب در مطالعات لرزه‌ای دارد. امواج الاستیک با رسیدن به یک لبه یا تیغه مثل گسل، ناهمواری، سنگ آهک‌های حفره‌دار، توپوگرافی برآمده پی‌سنگ و تراس‌های آبرفتی رودخانه‌های مدفون، پراکنده می‌شوند و مثل یک منبع انرژی عمل کرده باعث انعکاس امواج در تمام جهات می‌شوند (شکل ۱۰-۲۳). دامنه موج پراشی نسبت به فاصله از منبع شدیداً کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰-۲۳ - پدیده پراش به علت گسل خوردگی لایه

امواج پراشی اغلب در اکتشافات لرزه‌ای روی لرزه‌نگاشت ثبت می‌شوند و امواج بازتابی را به طور قابل ملاحظه‌ای تار می‌کنند. پدیده پراش در تشخیص بازتاب کننده‌هایی که تخت و یا پیوسته نیستند (مثل گسل و گنبدنمکی) بسیار مهم است زیرا شکل خاصی را در مقاطع زمانی لرزه‌نگاری ایجاد می‌کنند.

۱۰-۳-۳-۶ کسب اطلاعات لرزه‌ای (Acquisition of Seismic Data)

کسب و ضبط اطلاعات لرزه‌ای را توسط دستگاه‌های مخصوص مستقر در صحرا در مسیرهایی که با توجه به اطلاعات موجود زمین‌شناسی برنامه‌ریزی شده است عملیات صحرایی یا کسب اطلاعات لرزه‌ای نامند. این عمل اولین مرحله در یک کار اکتشاف لرزه‌ای است. در این مرحله اطلاعات مورد نیاز به وسیله یک سری دستگاه‌های مخصوص مستقر در محل (خشکی و یا

دریا) ثبت و ضبط می‌گردد و محصول نهایی آن در محل به‌صورت نگاشت لرزه‌ای (seismic record) قابل مشاهده است. در یک بررسی لرزه‌ای با توجه به هدف اکتشاف باید چندین فاکتور مهم را در نظر گرفت از قبیل: اقتصادی بودن کار، زمان بررسی، نوع منبع تولید انرژی (منبع) و گیرنده‌ها و آرایش آن‌ها. البته عوامل دیگری نیز بر طبیعت بررسی تأثیر می‌گذارند که عبارتند از: ناهمواری‌های زمین، طبیعت نوفه (noise) منطقه یا طبیعت الکتریکی منطقه و بناهای ساخت بشر. پارامترهای مورد نیاز در یک بررسی لرزه‌ای عبارتند از:

- جدایش حداکثر (maximum offset): فاصله منبع انرژی تا دورترین گیرنده
- جدایش حداقل (minimum offset): فاصله منبع انرژی تا نزدیک‌ترین گیرنده
- فاصله گروه (group interval): فاصلهٔ بین آرایش‌های گیرنده‌ها (که در هر بررسی ثابت است)
- فاصله ضربه یا شوت (shot interval): فاصله بین دو ضربه یا شوت متوالی
- مقدار پوشش یا برداشت "لا" یا "تا" (fold coverage): تعداد زمان‌های بررسی شده یک نقطه در زیرزمین به وسیله منبع‌ها و گیرنده‌های مختلف یا تعداد برداشت‌های حاصل از یک نقطه عمقی مشترک (common depth point, CDP)
- فاصله نمونه (sample interval): فاصله زمانی بین شمارش نمونه‌های سیگنال که به ماکزیمم فرکانس بستگی دارد. این فاصله معمولاً بین ۱ تا ۴ میلی‌ثانیه متغیر است
- انتخاب نحوه آرایش منبع و گیرنده (choice array)
- تعداد کانال‌های ثبت کننده (number of recording channels)

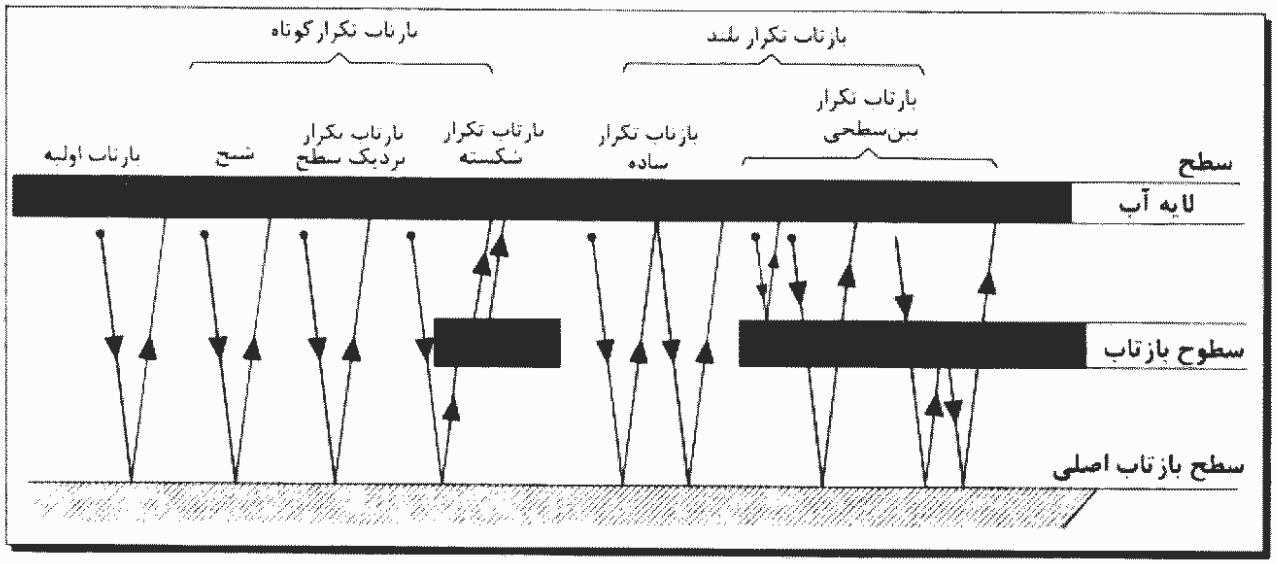
کسب اطلاعات لرزه‌ای در خشکی شامل مراحل زیر است:

۱) **شناسایی مقدماتی مسیر**: در این مرحله توسط عکس‌های هوایی، مشاهدات صحرایی و استفاده از منابع مختلف اطلاعاتی (از قبیل مقالات، گزارشات و....) محل و مسیر کار، شناسایی می‌شود. عوامل مختلفی که در این شناسایی مورد نظر است عبارتند از: پستی و بلندی منطقه، آب و هوای منطقه و تغییرات فصلی آن، تعیین طول مسیرخط و مختصات جغرافیایی دو سر آن و تعیین حد مجاز انحراف از مسیر به علت وجود رودخانه، زمین کشاورزی، تأسیسات شهری و مناطق مسکونی در طول مسیر.

۲) **نقشه برداری**: در این مرحله ضمن نقشه‌برداری مسیر، ایستگاه‌های محل منبع‌ها (نقطه انفجار) و گیرنده‌ها علامت‌گذاری شده و فواصل و ارتفاع آن‌ها روی نقشه مشخص شده و شماره‌گذاری می‌شوند.

۳) **حفاری و کارگذاری منبع مولد انرژی لرزه‌ای**: در این مرحله در صورت نیاز (مثلاً وجود لایه هوازده سطحی) باید چاله‌ای حفاری کرد. عمق حفاری به ضخامت لایه هوازده بستگی دارد که گاهی

این عمق به ۳۰۰ متر می‌رسد. معمولاً منبعی که برای انفجار در این چاله‌ها استفاده می‌شود دینامیت است. علت حفر چاله وجود لایه هوازده سطحی غیرمتراکم است که باعث کاهش سرعت صوت و در نتیجه انتقال نامناسب انرژی می‌شود. در منطقه هوازده، دو پدیده مهم رخ می‌دهد که باعث محو شدن شکل اصلی اولیه ساختمان‌های زیرزمینی می‌شود. این دو پدیده عبارتند از بازتاب تکرار یا انعکاسات چندگانه (multiple reflections) و شبح (ghost). بازتاب تکرار ایجاد سطوحی با ضریب انعکاس غیرعادی (زیاد یا کم) که باعث ایجاد پدیده تکرار شده و در روی مقاطع لرزه‌ای به‌صورت شبه‌لایه قابل مشاهده‌اند، مثل سطح قاعده منطقه هوازده که ضریب انعکاس بالایی دارد (شکل ۱۰-۲۴). شبح نوع خاصی از پدیده بازتاب تکرار است که در این حالت نقطه انفجار در زیر سطح لایه هوازده قرار گرفته است. با تولید انرژی یک سری از امواج به طرف بالاحرکت کرده و سپس با برخورد به سطح هوازده به طرف پایین انعکاس می‌یابند. به این امواج دوباره بازتاب شده از سطح لایه هوازده شبح می‌گویند که در مقاطع لرزه‌ای به‌صورت شبه لایه دیده می‌شوند.



شکل ۱۰-۲۴ - انواع انعکاسات چند گانه (بازتاب‌های تکرار) و پدیده شبح

در مناطقی که نیاز به حفاری نیست می‌توان از منبع‌های تولید انرژی غیردینامیتی استفاده کرد. حال که از منابع تولید انرژی صحبت شد لازم است که انواع منبع‌های لرزه‌ای خشکی را بررسی کنیم. به طور کلی منبع ایده‌آل باید ارتعاشی (pulse) با فرکانس و دامنهٔ بالا تولید کند و در عین حال بی‌خطر، ارزان و قابل تکرار (از نظر تعداد و زمان) باشد. منبع‌های لرزه‌ای خشکی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند که شامل منبع‌های لرزه‌ای ضربه‌ای یا انفجاری (impulsive) و منبع‌های لرزه‌ای غیر انفجاری یا پخش شونده (distributed) است. از مهم‌ترین و متداول‌ترین منبع‌های لرزه‌ای ضربه‌ای یا انفجاری می‌توان دینامیت‌ها را نام برد.

دینامیت، متراکم‌ترین منبع انرژی بوده که دارای بیشترین قدرت می‌باشد و به علت فراهم کردن سیگنال لرزه‌ای مناسب و راحتی حمل و نقل در زمرهٔ بهترین منابع تولید ارتعاشات لرزه‌ای می‌باشد.

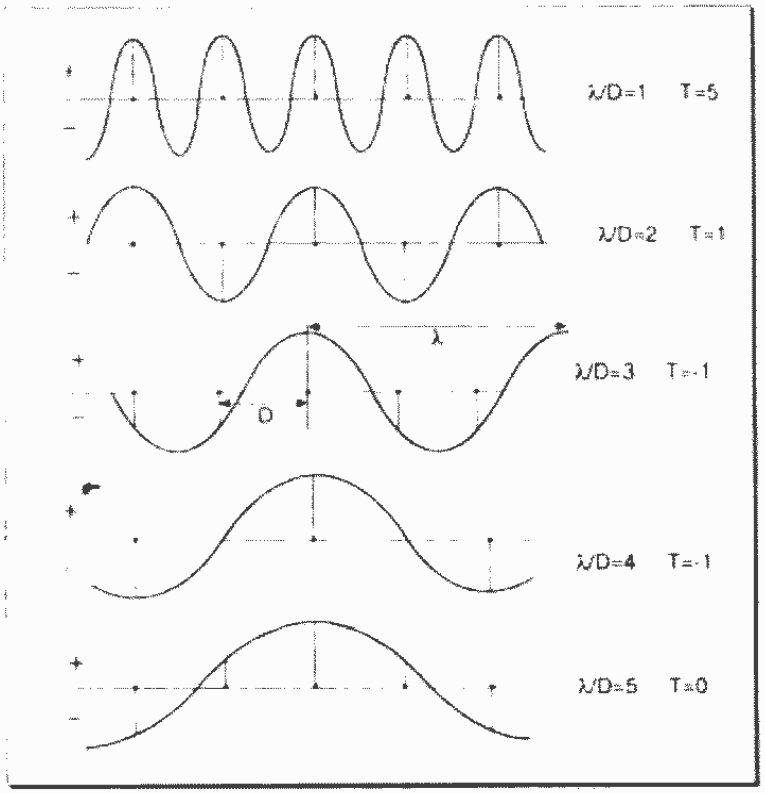
منبع‌های لرزه‌ای غیر انفجاری یا پخش شونده، امواجی با دامنه کوچک تولید می‌کنند و انرژی تولیدی آن‌ها ضعیف است اما با تکرار متوالی و نگاشت‌برداری در یک نقطهٔ ثابت می‌توان سیگنال‌های لرزه‌ای را با هم جمع کرد و اثری بزرگتر و قابل مقایسه با اثرات حاصل از روش انفجاری به دست آورد. از مثال‌های منبع‌های لرزه‌ای سطحی غیر انفجاری می‌توان ارتعاش کننده یا لرزنده (vibroseis)، دایناسیز (dinoseies) و وزنه انداز یا تامپر (weight-dropping or thumper) را نام برد. ارتعاش کننده یا لرزاننده، دستگاهی مکانیکی است که به طور مستقیم با سطح زمین در تماس است و با لرزش خود ارتعاشاتی با فرکانس مشخص تولید می‌کند که امواج حاصله برای شناسایی منعکس کننده‌های زیر زمین استفاده می‌شوند. این دستگاه امواج لرزه‌ای نوسانی تولید می‌کند که چندین ثانیه دوام دارد و در طول این مدت فرکانس آن به آرامی‌تغییر می‌کند، به طوری که بر خلاف منبع‌های دیگر که یک سیگنال لرزه‌ای آنی تولید می‌کنند، این وسیله یک پالس یا موجک (wavelet) با فرکانس متغیر (۶۰ -۶ هرتز) در مدت چند ثانیه (۷ ثانیه) ایجاد می‌کند. برای کاهش نوفه می‌توان از چندین لرزنده به طور هم‌زمان استفاده کرد. این دستگاه به علت ایجاد انرژی لرزه‌ای با چگالی کم در مناطق شهری کاربرد زیادی دارد. این ابزار در مجموع وزنی معادل ۸۰۰۰kg بر روی زمین وارد می‌کند که امواج تولید شده فرکانس بین ۱۲۰-۰/۱هرتز در یک پریود ۷ ثانیه دارد.

دایناسیز اساس کار این دستگاه برپایه انفجار گاز در یک سیلندر بسته، بنا نهاده شده که در زیر وسیله نقلیه حمل می‌گردد. با احتراق مخلوط گازی (اکسیژن و پروپان) داخل سیلندر به وسیله جرقه شمع گاز منفجر شده و فشار حاصل از انفجار باعث رانده شدن یک پیستون صفحه‌ای شکل با شدت به سطح زمین برخورد کرده و امواج لرزه‌ای ایجاد می‌کند.

وزنه انداز یا تامپر روش ارزان و سریعی است. در این روش به وسیله یک کامیون مخصوص جرثقیل‌دار، وزنه‌ای فلزی به وزن ۳ تن که در عقب کامیون مخصوصی آویزان است به اندازه ۳ متر از سطح زمین بلند می‌شود و به طور ناگهانی رها شده و به زمین برخورد می‌کند که نتیجه آن تولید امواج لرزه‌ای است. این عمل بلافاصله همراه با حرکت کامیون دوباره تکرار می‌شود. این دستگاه بیشتر در نواحی بیابانی و نیمه بیابانی کارآیی دارد و اخیراً نیز به علت ایجاد نوفه‌های حاصل از امواج سطحی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴) کارگذاری گیرنده یا آشکار ساز لرزه‌ای: هدف اصلی کار گذاشتن گیرنده‌ها در یک منطقه، بالابردن نسبت امواج بازتابی به امواج پارازیتی است تا در نتیجه کیفیت نگاشت لرزه‌ای بالا برود.

امواج سطحی و یا پدیده پراش تولید نوفه می‌کند که دامنه بزرگتری دارد و باعث تخریب امواج انعکاسی می‌شود. بنابراین بهترین و مؤثرترین راه برای از بین بردن نوفه حاصله (که بیشترحرکت افقی دارد)، توزیع چندین گیرنده در یک مسافت افقی است که با طول موج نوفه معادل باشد یعنی فاصله گروه با طول موج نوفه یکی باشد. در نتیجه با طراحی مناسب فاصله گروه می‌توان نسبت سیگنال به نوفه را بالا برد و کیفیت انعکاس را زیاد کرد (شکل ۱۰-۲۵).



شکل ۱۰-۲۵ - نحوه حذف امواج با طول موج‌های مختلف به وسیله طراحی مناسب فاصله گروه
فاصله گروه=D، دامنه نسبی امواج ثبت شده=T،
طول موج=λ
در T= 5 سیگنال‌های ثبت شده هم فازند و در نتیجه دامنه موج ثبت شده تقویت می‌شود

همان‌طور که می‌دانیم امواج سطحی بیشتر حرکت افقی دارند و امواج انعکاسی حرکت قائم. از طرفی گیرنده‌های مورد استفاده در خشکی به علت ساختمان درونی و نحوه قرارگیریشان اکثراً حرکات قائم را ثبت می‌کنند. بنابراین می‌توان با اتصال سری گیرنده‌ها و انتخاب گروه‌بندی مناسب برای گیرنده‌ها (طرح ژئوفونی مناسب) امواج سطحی را حذف کرد و امواج انعکاسی را که به طور هم‌زمان به گیرنده‌ها رسیده و ثبت می‌شوند با هم جمع کرد و تقویت نمود. در نتیجه نسبت سیگنال به نوفه (S/N) را بالا برد. البته تعداد گیرنده‌ها، نوع و آرایش آن‌ها بستگی به مشخصات نوفه منطقه مورد مطالعه دارد. بنابراین باید قبل از کارگذاری گیرنده‌ها عملیات تست نوفه را در منطقه انجام داد.

در اینجا لازم است قبل از تشریح تست نوفه ابتدا نوفه و انواع آن را بشناسیم و طریقه حذف آن را از روی نگاشت لرزه‌ای بررسی کنیم.

- نوفه (Noise) و انواع آن

به هر سیگنال دیگری که پس از امواج انعکاسی دریافت شود سیگنال جعلی، نوفه و یا امواج پارازیتی می‌گویند که دامنه بزرگتری داشته و در اکتشافات لرزه‌ای ایجاد مزاحمت می‌کنند و به طور کلی باعث پایین آمدن کیفیت مقاطع لرزه‌ای می‌شوند. امروزه برای کاهش حذف سیگنال‌های مفید انعکاسی روز به روز منبع‌های جدید تولید انرژی و روش‌های جدید صحرایی طراحی می‌شود. انواع مهم نوفه در کارهای لرزه‌ای انعکاسی انجام شده در خشکی، عبارتند از نوفه حاصل از امواج سطحی، نوفه حاصل از امواج پراشی و نوفه حاصل از انعکاسات چندگانه.

- *نوفه حاصل از امواج سطحی:* امواج سطحی نسبت به امواج انعکاسی دارای سرعت و فرکانس کمتر و دامنه بیشتری هستند. این امواج در تمام طول مقطع لرزه‌ای قابل مشاهده‌اند. در بین امواج سطحی بیشتر امواج ریلی و تا حدی هم امواج P و S انکساری در ایجاد این نوع نوفه نقش دارند. برای حذف نوفه حاصل از این امواج می‌توان از فیلترهای الکتریکی مخصوص و یا انتخاب فواصل گروهی مناسب نسبت به طول موج امواج سطحی استفاده کرد.

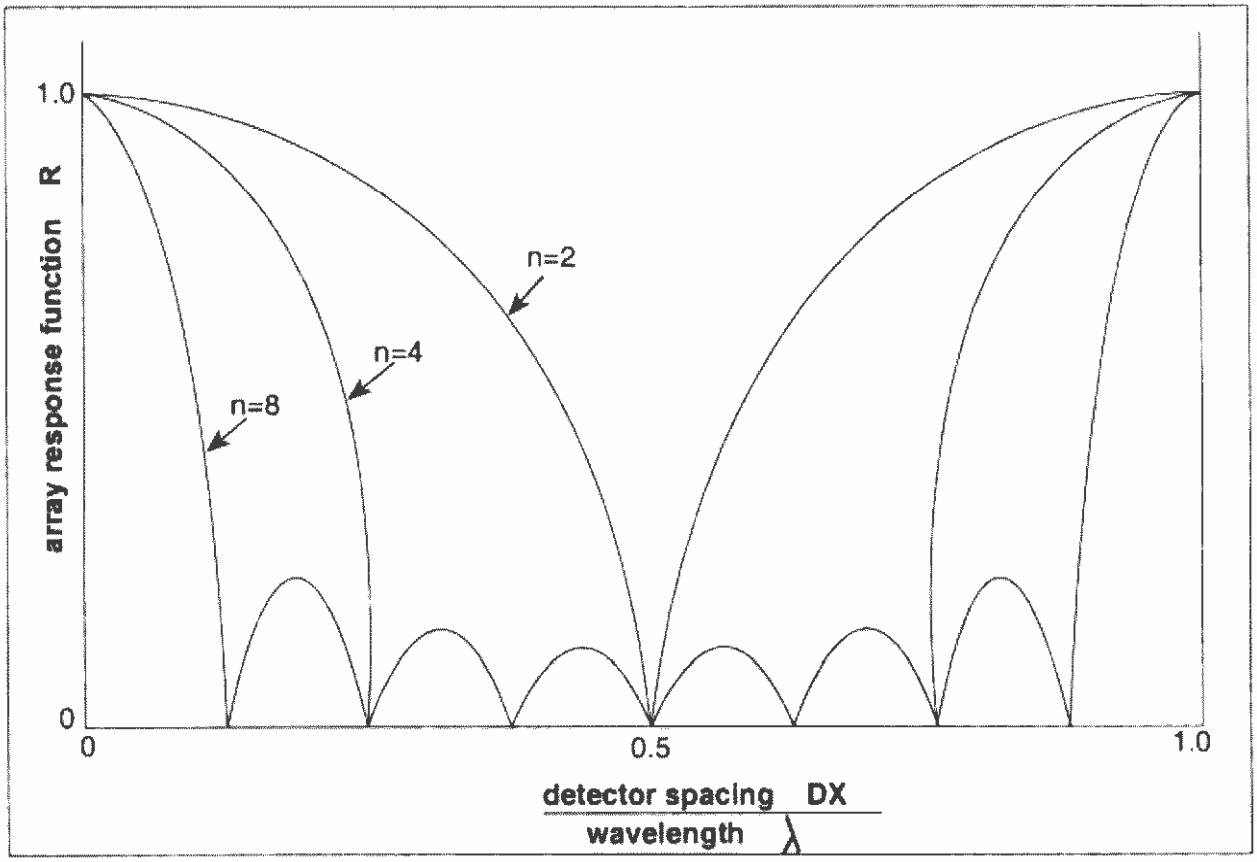
- *نوفه حاصل از امواج پراشی:* وقتی امواج به یک سطح بی‌نظمی مثل لنز ماسه‌ای، تراس آبرفتی، گسل، سنگ آهک حفره دار و.... برخورد می‌کنند به همه طرف پخش می‌شوند. شدت این امواج با فاصله گرفتن از سطح بی‌نظمی به شدت افت می‌کند تا حدی که در فواصل دورتر از بین می‌روند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در مواقعی که پدیده پراش رخ می‌دهد محل منبع تقریباً نزدیک و یا در روی سطح بی نظمی قرار دارد. این امواج در تمام طول مقطع لرزه‌ای قابل مشاهده نیستند. بنابراین به نوفه حاصل از آن‌ها نوفه تصادفی (random noise) می‌گویند. برای حذف نوفه حاصل از این امواج باید تعداد گیرنده‌ها و منبع‌ها را افزایش داد.

نوفه حاصل از انعکاسات چندگانه: نوفه حاصل از آن‌ها شبیه انعکاسات اولیه و اصلی است. بنابراین بسیار زیاد و پر دردسر بوده و تشخیص آن‌ها مشکل می‌باشد. برای حذف نوفه حاصله می‌توان از فیلترهای فرکانسی استفاده کرد زیرا به علت اختلاف جنس مواد و اختلاف مسیر هندسی امواج یک تغییر فرکانس بین انعکاسات اولیه و انعکاسات چندگانه به وجود می‌آید که درجدایش آن‌ها از یکدیگر به کار می‌رود. البته نوفه حاصل از انعکاسات چندگانه سطحی (surface multiple) را می‌توان به بهترین شکل توسط آرایش نقطه عمقی مشترک از بین برد.

- تست نوفه (Noise Test)

معمولاً در هر منطقه‌ای که عملیات لرزه‌نگاری در آن انجام می‌شود تست نوفه انجام می‌گیرد. زیرا نوفه منطقه و طرح‌های آن عمدتاً سطحی‌اند و از منطقه‌ای به منطقهٔ دیگر در حال تغییر هستند. برای این کار ابتدا گیرنده‌ها در منطقه چیده می‌شود و با ایجاد انفجار، امواج لرزه‌ای ثبت می‌گردد. سپس طول موج امواج سطحی و دیگر پدیده‌هایی که نوفه را ایجاد کرده‌اند به

دست می‌آید و در نهایت فرکانس نوفه منطقه محاسبه می‌گردد. اکنون با آرایه‌گذاری مختلف و رسم طیف سیگنال دریافت شده، بهترین آرایه برای حذف بیشتر نوفه و تقویت بیشتر سیگنال انتخاب می‌شود. در بعضی مناطق تست نوفه به تعداد زیاد انجام می‌گیرد و در نهایت نمودارهایی براساس دامنه موج ثبت شده، طول موج و فاصله گیرنده‌ها و تعداد گیرنده‌ها رسم می‌شود که برای استفاده در منطقه مورد مطالعه کاربرد دارد (شکل ۱۰-۲۶).



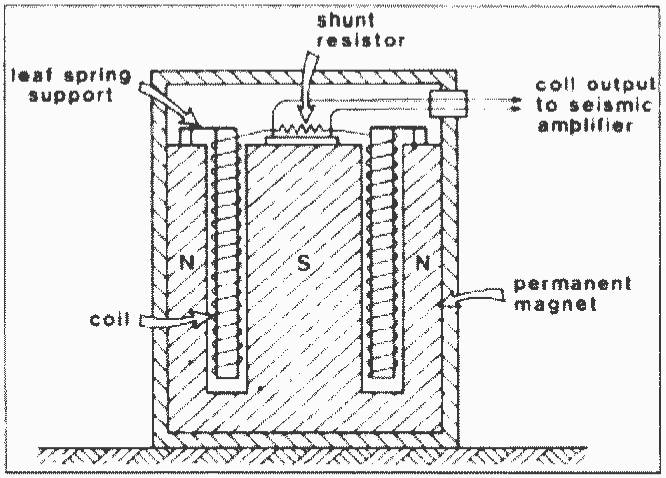
شکل ۱۰-۲۶ - مقدار دامنه موج ثبت شده (R) توسط گیرنده‌ها بر اساس نسبت فاصله گیرنده‌ها (DX) به طول موج (λ) و تعداد گیرنده‌های (n) مورد استفاده

اکنون گیرنده‌های لرزه‌ای خشکی را بررسی کرده و انواع آرایش (array) و گسترش منبع و گیرنده شرح داده می‌شود:

ژئوفون(Geophone): به دستگاه دریافت کننده امواج لرزه‌ای در خشکی ژئوفون یا لرزه‌سنج می‌گویند. این دستگاه در تماس مستقیم با سطح زمین بوده و انرژی لرزه‌ای را به جریان الکتریکی متناسب با آن تبدیل می‌کند. برای آنکه جریان الکتریکی حاصله نشانگر لرزش واقعی زمین باشد باید ژئوفون خوب به زمین متصل باشد. بر این اساس ژئوفون‌ها به دو شکل اساسی دیده می‌شوند:

- ژئوفون‌های سنگین با سطحی صاف که در مناطق با سنگ‌های سخت استفاده می‌شوند.
- ژئوفون‌های سبک با سطحی میخ‌گونه که در مناطق با خاک‌های نرم استفاده می‌شوند.

به طورکلی ژئوفون‌ها براساس نحوه کارشان به دو دسته تقسیم می‌شوند که شامل: ژئوفون‌های ظرفیتی که دارای خازن بوده و در حال حاضر دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و ژئوفون‌های الکترومغناطیسی می‌شوند (شکل ۱۰-۲۷). ژئوفون‌های الکترومغناطیسی ساده‌ترین نوع ژئوفون‌ها می‌باشند که دارای کاربرد فراوانی هستند و تقریباً بیشتر در خشکی استفاده می‌شوند. این ژئوفون‌ها اکثراً به‌صورت گروه‌های زوج (۱۲ تا ۹۶ کانالی) و به طور سری به هم وصل می‌شوند و از دو قسمت اصلی سیم پیچ و آهنربای دائمی تشکیل شده‌اند که براساس اینکه کدام قسمت متحرک باشد به دو نوع: ژئوفون با سیم پیچ متحرک و ژئوفون با آهنربای متحرک تقسیم می‌شوند.

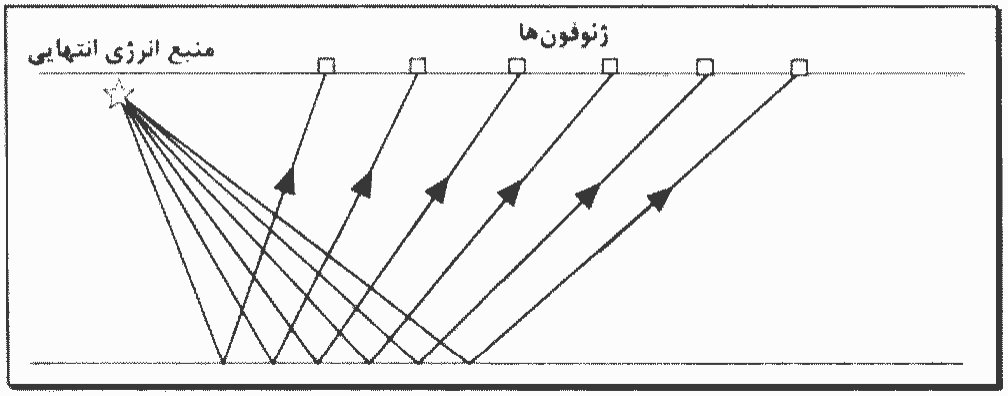


شکل ۱۰-۲۷ - برش شماتیک یک ژئوفون

نحوه کار ژئوفون بدین صورت است که با حرکات سطحی زمین یک حرکت نسبی بین سیم پیچ و آهنربا ایجاد می‌شود. این حرکت باعث قطع میدان مغناطیسی آهنربا توسط سیم پیچ شده و جریانی الکتریکی با ولتاژی متناسب با سرعت جنبش زمین در سیم پیچ تولید می‌شود و در نهایت سیگنال‌های الکتریکی نوسانی با فرکانس معین ایجاد می‌کند.

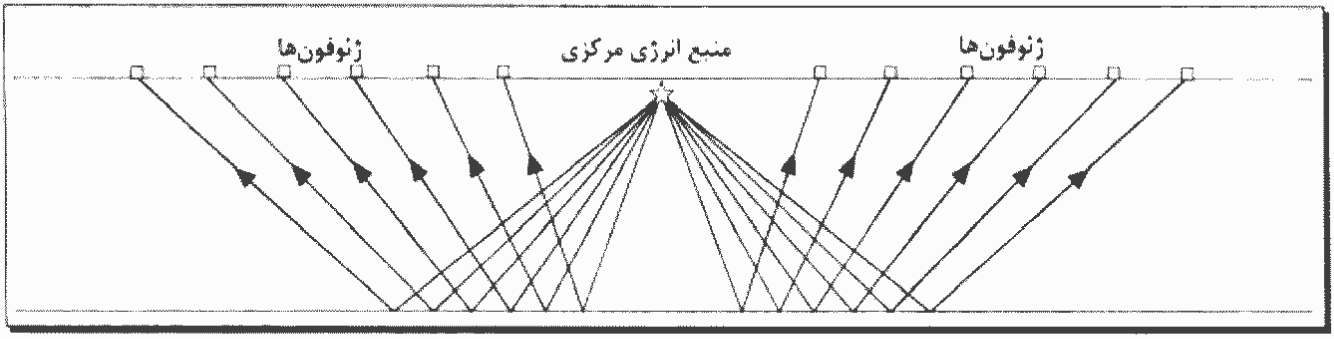
انواع آرایش ژئوفون و منبع: به موقعیت نسبی گروه ژئوفون‌ها نسبت به یکدیگر و نسبت به منبع انرژی، آرایش می‌گویند. پروفیل‌ها را بایستی تقریباً مستقیم و عمود بر امتداد کلی ساختار زمین‌شناسی تهیه کرد تا شیب واقعی لایه‌ها دقیق‌تر برداشت شود و در نتیجه عمق واقعی با دقت بیشتری محاسبه گردد.

۱- *آرایش ساده (Simple Array)* گروه ژئوفونی بر روی یک خط پروفیل و در یک طرف منبع قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-۲۸).



شکل ۱۰-۲۸ - آرایش ساده ژئوفون‌ها و منبع انرژی

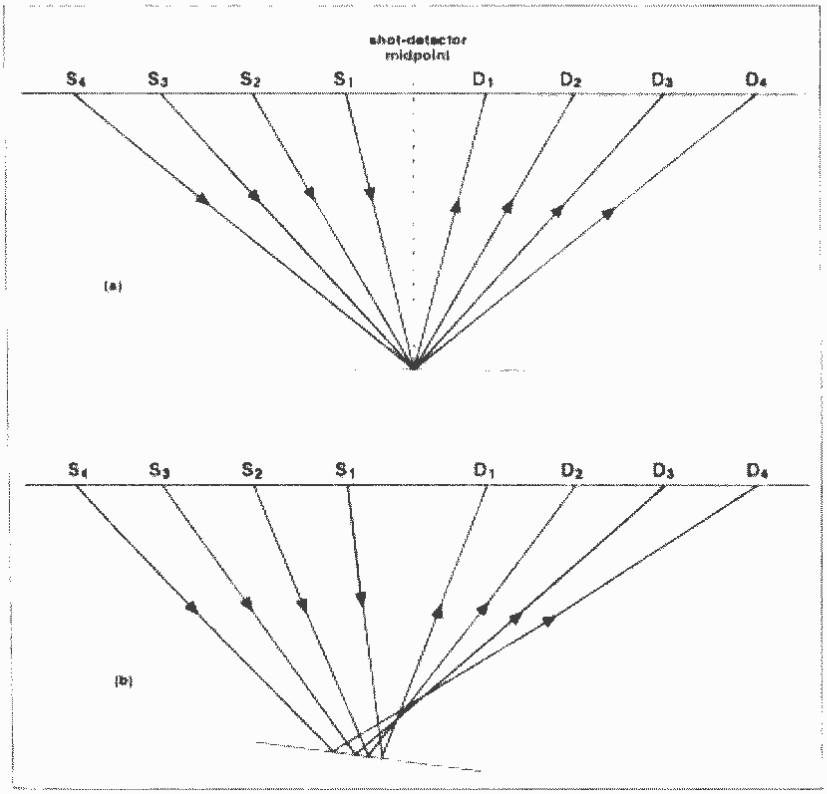
۲- *آرایش دونیمه‌ای (Split Array)* دوگروه ژئوفونی با تعداد یکسان در دو طرف منبع قرار می‌گیرند و به طور هم‌زمان سیگنال‌های لرزه‌ای را ثبت می‌کنند (شکل ۱۰-۲۹). این آرایش معمولی‌ترین نوع آرایش برای پوشش پیوسته منطقه است.



شکل ۱۰-۲۹ - آرایش دو نیمه‌ای ژئوفون‌ها و منبع انرژی

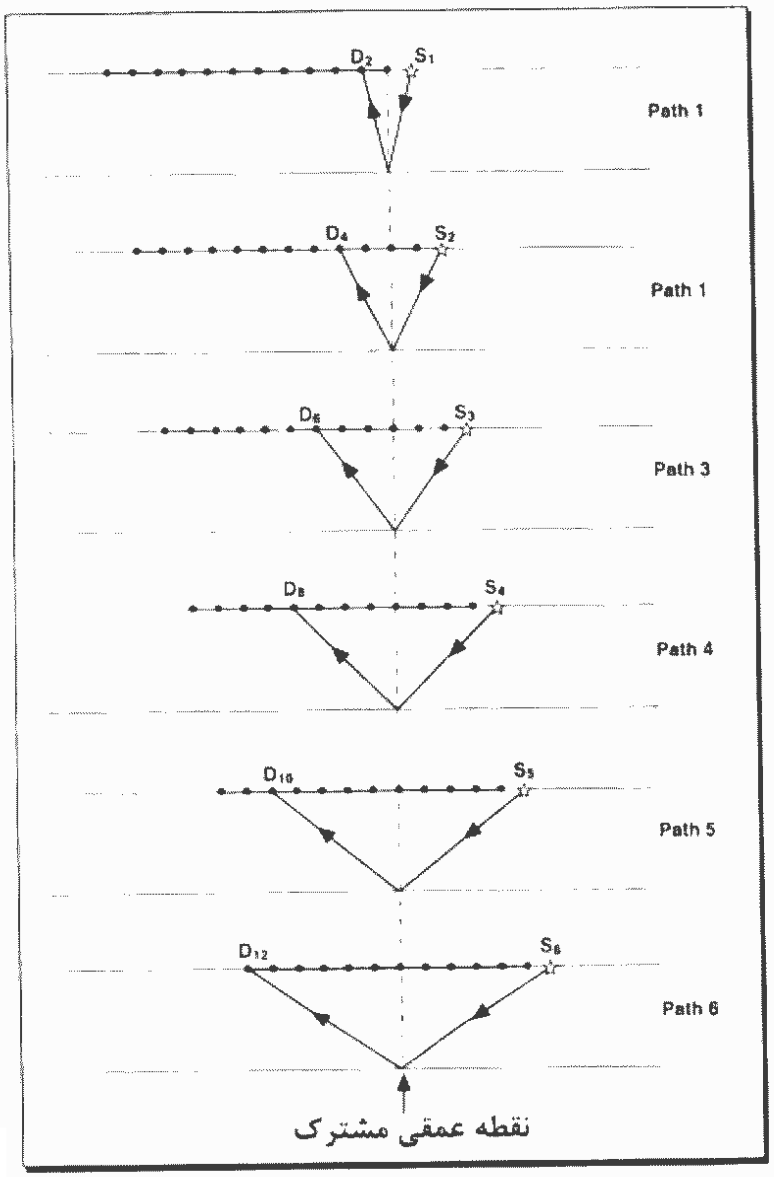
۳- *آرایش نقطه عمقی مشترک (Common Depth Point gather)* آرایشی استاندارد که یکی از مهمترین تحولات تکنیک‌های انعکاسی است. در این آرایش، تمام شعاع‌های امواج از نقطه‌ای مشترک در روی سطح انعکاس کننده در زیر زمین منعکس می‌گردند که به این نقطه مشترک در برداشت‌های متوالی CDP می‌گویند. در این نوع آرایش نسبت به آرایش‌های دیگر در یک فاصله معین به منبع‌های (نقاط انفجاری) بیشتری نیاز است، زیرا برداشت‌های بیشتری انجام می‌گیرد.

برای اینکه تمام سطح لایه انعکاس کننده در زیر زمین برداشت شود باید مقدار انتقال منبع در هر مرحله به اندازه نصف فاصله منبع تا آخرین ژئوفون باشد، زیرا مقدار سطح برداشت شده در زیر زمین نصف فاصلهٔ دو ژئوفون در سطح زمین است (شکل ۱۰-۳۰).



شکل ۱۰-۳۰ - آرایش نقطه عمقی مشترک (CDP) (a) و نقطه میانی مشترک (CMP) (b) ژئوفون‌ها و منبع‌های انرژی

در آرایش‌های ساده و دو نیمه‌ای برداشت‌ها از نوع یک‌تایی(single fold) است. بنابراین میزان پوشش ۱۰۰٪ می‌باشد، یعنی از هر نقطه فقط یک بار برداشت می‌شود به طوری که هر شعاع انعکاسی فقط از یک نقطه مجزا از سطح منعکس کننده بازتاب می‌شود. حال اگر از یک نقطه در زیر زمین بیش از یک بار عمل برداشت انجام گیرد به این نوع برداشت‌ها پوششی (multicoverage) می‌گویند و نقطه مشترک در این برداشت‌های متوالی را CDP می‌نامند. البته اگر سطح منعکس کننده شیب‌دار باشد به محدوده برداشت نقطه میانی مشترک (common mid point) می‌گویند. به تعداد اثرات به دست آمده از یک CDP چین یا " تا " یا " لا " (fold) می‌گویند به طوریکه اگر دوبار عمل برداشت از یک نقطه انجام گیرد، گفته می‌شود برداشت دوتایی (2-fold) است. یعنی ۲۰۰٪ پوشش داریم و به همین ترتیب اگر برداشت سه‌تایی (3-fold) باشد پوشش ۳۰۰٪ خواهد بود. تعداد پوشش‌ها می‌تواند بسیار متغیر باشد. شکل ۱۰-۳۱ یک برداشت ۶تایی را نشان می‌دهد.

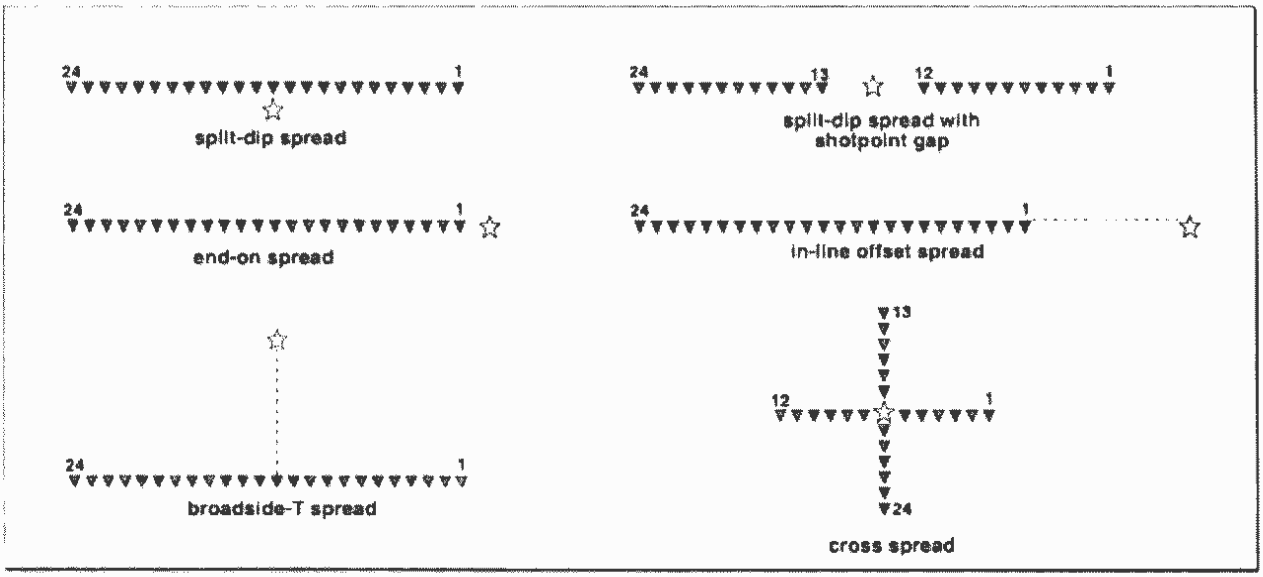


شکل ۱۰-۳۱ - نمایش یک برداشت ۶ تایی نقطه عمقی مشترک (6-fold CDP) با ۶۰۰ درصد پوشش

- **مزیت آرایش CDP**: در روش Single Fold هنگام ثبت امواج انعکاسی، نوفه نیز ثبت شده و باعث مزاحمت در روی مقاطع لرزه‌ای می‌شود. برای از بین بردن نوفه می‌توان از آرایش CDP استفاده کرد. در این آرایش اثرات (traces) یک نقطه با هم جمع شده و یک اثر تجمعی(stacked trace) را به وجود می‌آورند، به طوری که سیگنال‌های هر اثر به دلیل ثابت بودن نقطه انعکاس، هم‌شکل و هم فاز بوده و باعث تقویت انعکاس‌های ضعیف می‌شوند. ولی

سیگنال‌های نوفه هم شکل و هم فاز نیستند و باعث تضعیف یکدیگر شده و از بین می‌روند. در نتیجه مقطع لرزه‌ای از دقت و وضوح بیشتری برخوردار است.

انواع گسترش ژئوفون و منبع: نحوه گسترش گروه ژئوفون‌ها و منبع انرژی متغیر است. شکل ۱۰-۳۲ انواع گسترش ژئوفون‌ها و منبع را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۳۲ - انواع گسترش ژئوفون‌ها و منبع

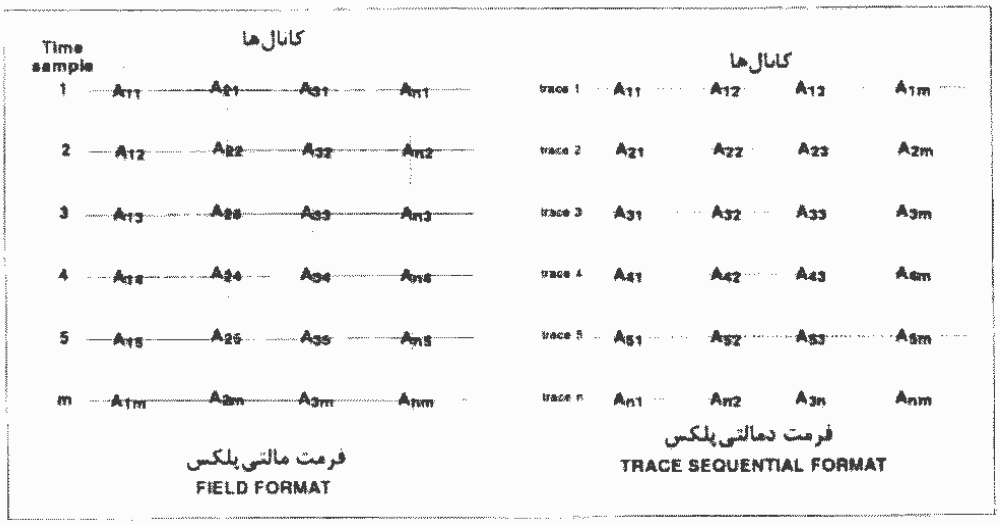
۵) ثبت امواج لرزه‌ای (Recording): به طورکلی امواج لرزه‌ای به دو صورت آنالوگ و رقومی ثبت می‌شوند. در ثبت آنالوگ، انرژی امواج دریافتی توسط دستگاهی به طور پیوسته روی کاغذ یا نوار ضبط می‌شود. در ثبت رقومی(digital)، انرژی امواج به‌صورت دامنهٔ موج ثبت می‌گردد، به‌طوریکه دامنهٔ موج دریافتی توسط ژئوفون در لحظات معینی از زمان اندازه‌گیری می‌شود و مقدار عددی آن برای محاسبات بعدی به کامپیوتر داده می‌شود. بنابراین اطلاعات دریافت شده پس از تقویت مناسب تبدیل به ارقام شده و با نظم خاصی که به آن مالتی‌پلکس (multiplex) می‌گویند روی نوار مغناطیسی ثبت می‌شود و در نهایت توسط کامپیوتر قابل بازخوانی است. فاصله این نمونه‌گیری بستگی به ماکزیمم فرکانس دارد، یعنی طوری باید نمونه‌گیری انجام شود که حداقل از هر نیم پریود مثبت یا منفی یک نمونه برداشت شود.

۱۰-۳-۳-۷ بازخوانی اطلاعات لرزه‌ای (Seismic Data Processing)

پس از اتمام کار عملیات و ثبت اطلاعات بر روی نوار مغناطیسی، نگاشت لرزه‌ای حاصله به مرکز بازخوانی یا داده‌آمایی (processing center) می‌رود تا در نهایت پس از تجزیه، تحلیل و تصحیحات کامپیوتری نگاشت لرزه‌ای (seismic record) به یک مقطع لرزه‌ای (seismic section) قابل تعبیر و تفسیر تبدیل شود. در حقیقت بازخوانی مرحلهٔ دوم کار

اکتشاف لرزه‌ای است و نتیجه آن در تفسیر زمین‌شناسی منطقه بسیار مهم است. در اینجا به توضیح بسیار مختصر برخی از مراحل بازخوانی اطلاعات لرزه‌ای پرداخته می‌شود:

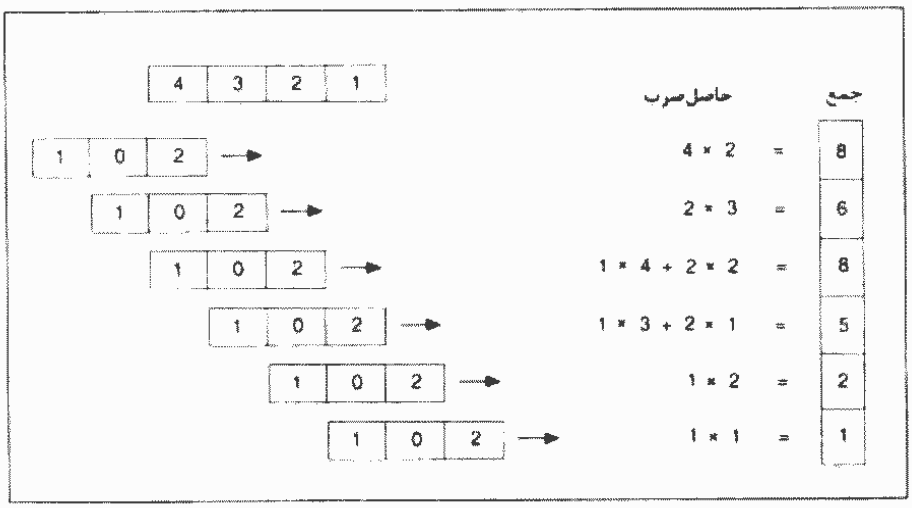
۱) **دمالتی‌پلکس (Demultiplex)**: همان‌طورکه گفته شد اطلاعات خام ثبت شده در صحرا بر روی نوار مغناطیس به شکل مالتی‌پلکس است. بنابراین در مرکز بازخوانی اطلاعات باید برعکس شده و به‌صورت دمالتی‌پلکس در آیند. یعنی نمونه‌گیری‌های زمانی در لحظات پیاپی از یک ایستگاه بر روی نواری به دنبال هم می‌آیند (شکل ۱۰-۳۳).



شکل ۱۰-۳۳ - فرایند دمالتی‌پلکس

۲) **بهبود برداشت (Gain Recovery)**: هنگام ثبت اطلاعات در منطقه برای بالا بردن کیفیت و قدرت ثبت از تقویت کننده‌ها و صافی‌های مناسب در مسیر بین گیرنده و دستگاه ثبت استفاده می‌شود. این وسایل فرکانس سیستم را کنترل کرده و برحسب نیاز فرکانس‌های مزاحم را حذف می‌کنند. بنابراین هنگام بازخوانی داده‌ها باید اثرات این تقویت کننده‌ها برطرف شود و تقویت کننده‌های مناسب دیگری مطابق با نیاز واقعی هر اثر تعبیه گردد.

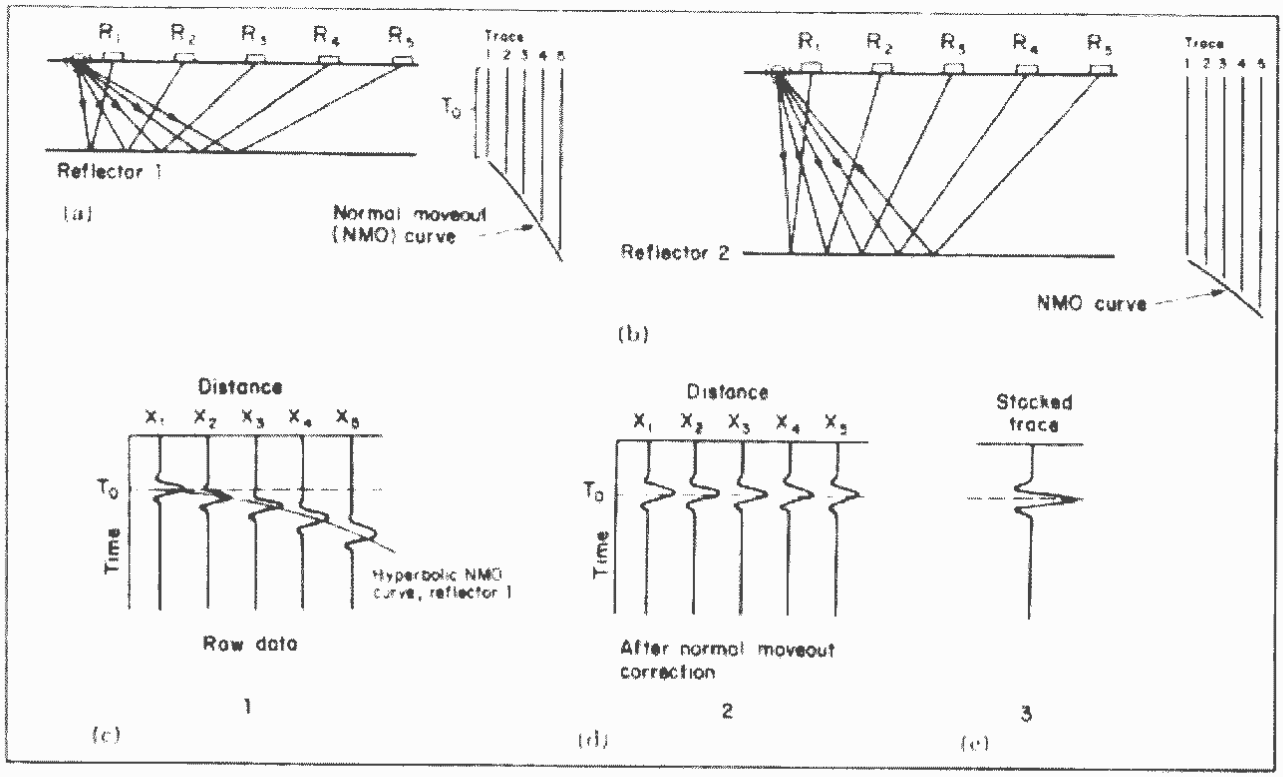
۳) **همامیخت (Convolution)**: همامیخت یک عملیات ریاضی است بین دو تابع تا تابع مطلوب‌تری به دست آید. به طوری که شکل موج به علت عبور از بین یک فیلتر خطی تغییر می‌کند (شکل ۱۰-۳۴).



شکل ۱۰-۳۴ - فرایند Convolution برای دو تابع عددی

۴) واهمامیخت (Deconvolution): فرآیندی است که قدرت تفکیک عمودی اطلاعات لرزه‌ای را به وسیله به هم فشردگی موجک (wavelet) پایه بهبود می‌بخشد. واهمامیخت، فیلترگذاری‌معکوس (inverse filtering) نیز نامیده می‌شود. به عبارت دیگر واهمامیخت یک فیلتر معکوس است که سیگنال‌های نامطلوب را تقلیل می‌دهد.

۵) برون راندنرمال NMO یا تصحیح دینامیک (Dynamic Correction or Normal Moveout): به تصحیح زمانی امواج رسیده به گیرنده‌ها نسبت به کوتاه‌ترین زمان دریافت امواج (یعنی زمان رسیدن موج به ایستگاه منبع) برون راندنرمال یا NMO می‌گویند. اگر از منبعی انرژی تولید شود، پس از مدتی امواج منعکس شده با زمان‌های متفاوت به گیرنده‌ها می‌رسند. این اختلاف زمان دریافت موج لرزه‌ای توسط گیرنده‌های مختلف باعث می‌شود که یک سطح انعکاس افقی به‌صورت یک منحنی هذلولی در آید (شکل ۱۰-۳۵). برای جلوگیری از این پدیده باید تصحیح NMO انجام گیرد. به طوری که برای هر ایستگاه مقدارNMO هر اثر لرزه‌ای را تعیین کرده و مقدار انتقال محاسبه می‌شود. در طبقات شیب‌دار هم این پدیده اتفاق می‌افتد و برای آن‌ها هم تصحیح NMO لازم است.



شکل ۱۰-۳۵ - فرایند برون راندنرمال (NMO) برای یک لایه افقی. a) یک سطح انعکاس کم عمق دارای منحنی NMO (منحنی زمان در مقابل فاصله از منشأ) شیب‌داری است که به دلیل تفاوت زیاد زمان عبور امواج در لایه‌های کم سرعت بین فرستنده و گیرنده است. b) سطوح انعکاس عمیق‌تر دارای منحنی NMO کم شیب‌تری است که به دلیل کاهش تفاوت در مسیر بین فرستنده و گیرنده‌های نزدیک و دور است. c) سرعت NMO را می‌توان با استفاده از منحنی هیپربولیک که در پلات مسافت در مقابل عمق حاصل می‌شود را محاسبه نمود. d) با تصحیح NMO تمامی انعکاس‌ها در یک زمان قرار می‌گیرند. e) جمع NMOهای تصحیح شده اثرها سبب انباشت و تقویت آن‌ها می‌شود

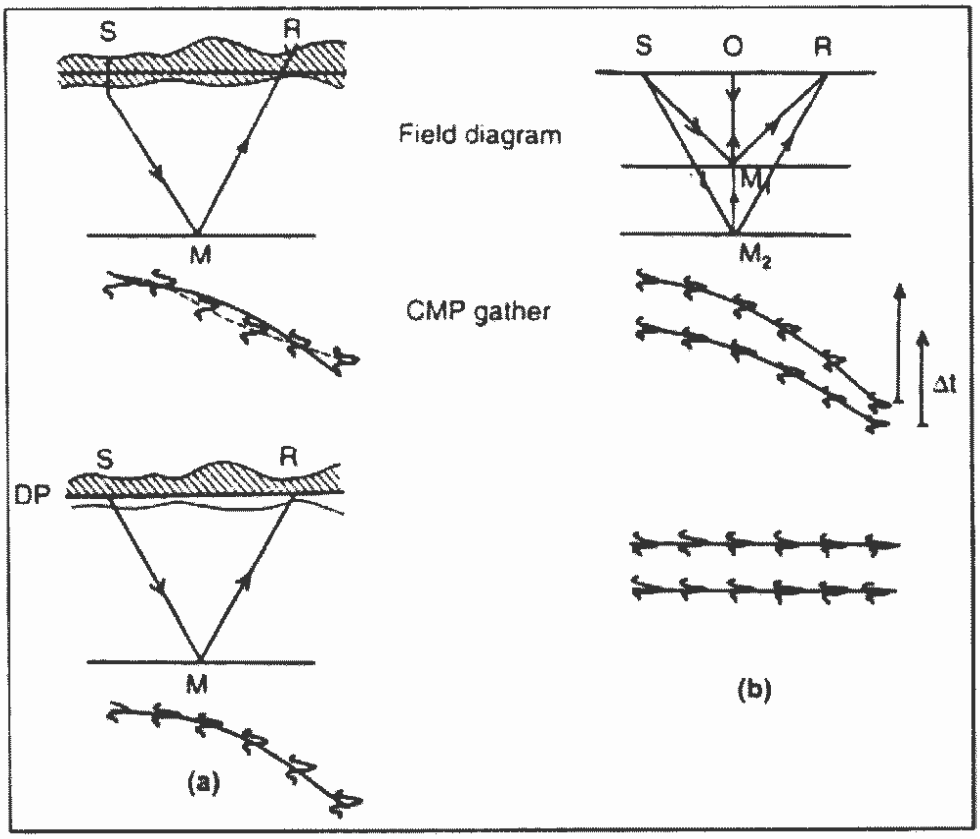
عوامل مؤثر برNMO عبارتند از:

- زمان انعکاس: باافزایش زمان مقدارNMO کاهش می‌یابد.
- فاصله (offset) گیرنده تامنبع: با افزایش فاصله مقدارNMO افزایش می‌یابد.
- سرعت متوسط: با افزایش سرعت متوسط NMO کاهش می‌یابد.
- عمق انعکاس: باافزایش عمق انعکاس NMO کاهش می‌یابد.

۶) حذف (Mute): فرآیندی که یک قسمت از اثر لرزه‌ای را بر می‌دارد. قسمت حذف شده، شامل نوفه تنها و یا نوفه همراه با قسمتی ازسیگنال می‌باشد. به طورکلی به حذف قسمتی از اطلاعات لرزه‌ای Mute می‌گویند.

۷) تصحیح پستی و بلندی (Static Correction): تصحیح پستی و بلندی نیز مانند تصحیح دینامیک یک تصحیح زمانی است، با این تفاوت که در اولی زمان ثابت است و در دومی متغیر. این نوع تصحیح بی نظمی‌های سطوح و لایه هوازده سطحی را براساس یک سطح مبنا (datum plane) تصحیح می‌کند (شکل ۱۰-۳۶). معمولاً سطح مبنا سطح آب‌های آزاد است.

در مناطقی که بین ایستگاه‌های گیرنده و منبع اختلاف ارتفاع وجود دارد باید این اختلاف نسبت به یک سطح مبنا محاسبه شود و سپس با در نظرگرفتن سرعت متوسط در هر منطقه، عمل تصحیح پستی و بلندی از نظر زمانی صورت گیرد. هرچه عمق بررسی زیادتر باشد عمل محاسبه ساده‌تر است زیرا می‌توان مسیر انعکاس امواج را تقریباً عمودی در نظر گرفت.



شکل ۱۰-۳۶ - مقایسه تصحیح استاتیک (a) با تصحیح دینامیک (b)

۸) برانباشت (Stacking): آمیختن و بهم پیوستن دو یا چند اثر لرزه‌ای را برانباشت می‌گویند (شکل ۱۰-۳۵e) که به چندین روش به وقوع می‌پیوندد. در طی عمل برانباشت دامنه‌های اثرات لرزه‌ای به‌صورت عددی در آمده و این اعداد با یکدیگر جمع می‌شوند.

یک نگاشت مرکب (composite record) از بهم پیوستن اثرات نگاشت‌های مختلف ساخته می‌شود. این نگاشت باعث بالارفتن نسبت سیگنال به نوفه شده و پدیده‌های زمین‌شناسی زیرسطحی را بهتر آشکار می‌سازد.

۹) انتقال یا مهاجرت (Migration): مهاجرت به معنی تبدیل و انتقال موقعیت ظاهری منعکس کننده به موقعیت حقیقی آن با استفاده از تغییر زمان انعکاسی ایستگاه‌های مجاور آن است. به‌طورکلی برای تبدیل نقشه زمانی به نقشه عمقی به علت وجود لایه‌های شیبدار در ساختارهای زیرزمین نمی‌توان به راحتی عمل نمود و باید عمل مهاجرت بر روی نقشه زمانی انجام گیرد. اگر منعکس کننده یک سطح افقی باشد تصویر نقطه انعکاس در روی زمین به راحتی قابل شناسایی است به طوری که در وسط فاصله منبع و گیرنده قرار می‌گیرد. ولی اگر منعکس کننده یک سطح شیبدار باشد تصویر موقعیت حقیقی نقطه انعکاس در روی زمین در وسط فاصله منبع و گیرنده نیست و به دست آوردن آن مستلزم دقت فراوانی است. در این حالت، انتقال موقعیت کاذب نقطهٔ انعکاس را به محل واقعی خود مهاجرت یا انتقال می‌گویند.

عمل مهاجرت اثرات سوء پدیده پراش را از بین می‌برد. با انجام این عمل لایه‌های شیب‌دار مقاطع لرزه‌ای شیبدارتر شده و از طرفی طولشان کمتر می‌شود. یعنی بعد از اینکه عمل مهاجرت بر روی یک مقطع لرزه‌ای انجام گرفت در مقطع زمین‌شناسی حاصله شیب لایه‌ها زیادتر و طول آن‌ها کمتر می‌گردد.

اگر در مقاطع لرزه‌ای عمل مهاجرت صورت نگیرد ساختارهای زیرزمینی از قبیل طاقدیس و ناودیس غیر طبیعی بنظر می‌رسند. به طوری که ناودیس‌ها، کم عرض‌تر و جمع‌تر و طاقدیس‌ها بازتر و پهن‌تر دیده می‌شوند. علت اصلی این مشاهدات تغییر زاویه شیب لایه‌های شیب‌دار است.

روش‌های مختلفی برای انجام عمل مهاجرت به کار می‌رود که دو روش محاسبه‌ای و به خصوص گرافیکی کاربرد بیشتری دارند.

۱۰-۳-۳-۸ *تعبیر و تفسیر داده‌های لرزه‌ای (Seismic Data Interpretation)*

تعبیر و تفسیر مقاطع لرزه‌نگاری از مراحل نهایی و پایانی کار اکتشاف لرزه‌ای می‌باشد. پس از آنکه نتیجه کارهای انجام شده برروی اطلاعات جمع آوری شده از صحرا در مرکز بازخوانی به‌صورت مقطع لرزه‌ای به روی کاغذ چاپ شد و یا آماده بر روی مانیتور کامپیوتر قرار گرفت،

عمل تفسیر و تعبیر مقطع لرزه‌ای آغاز شده و در نهایت نقشه‌های زمانی، عمقی و مقاطع زمین‌شناسی در امتدادهای موردنظر تهیه می‌شود. در این مرحله اطلاعاتی که از یک مقطع لرزه‌ای به دست می‌آید سه نوع است:

- اطلاعات ساختمانی
- اطلاعات چینه شناسی
- اطلاعات محتوای سیال سازند

برداشت‌های لرزه‌ای به همراه تصحیحاتی که بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد به صورت مقیاسی از مقاطع زمانی لرزه‌ای هستند. برای تهیه نقشه‌های ساختمانی زیر سطحی باید عمق‌ها را داشته باشیم. بنابراین با اندازه‌گیری سرعت در سنگ‌ها می‌توان مقطع زمان لرزه‌ای را به مقطع عمق تبدیل کرد. برای این منظور روش‌های متعددی وجود دارد که در زیر اشاره‌ای به آن‌ها می‌شود.

روش Check Shot: دقیق‌ترین روش برای تعیین سرعت میانگین است. دراین روش گیرنده‌ها را در اعماق مشخص سازندهای درون چاه نصب می‌کنند و سپس با ایجاد یک انفجار در سطح زمین و مجاور چاه سرعت را در سازندهای مختلف به دست می‌آورند. به طوری که با داشتن فاصله منبع تا سرچاه و عمق گیرنده و زمان دریافت موج توسط گیرنده می‌توان سرعت را به راحتی محاسبه کرد. در اغلب اوقات از نمودارهای چند چاه دور از هم میانگین گرفته و منحنی رسم شده را برای منطقه به کار می‌برند.

روش نمودار صوتی (Sonic Log): در این روش با استفاده از نمودارهای صوتی سرعت متوسط لایه‌ها محاسبه می‌شود.

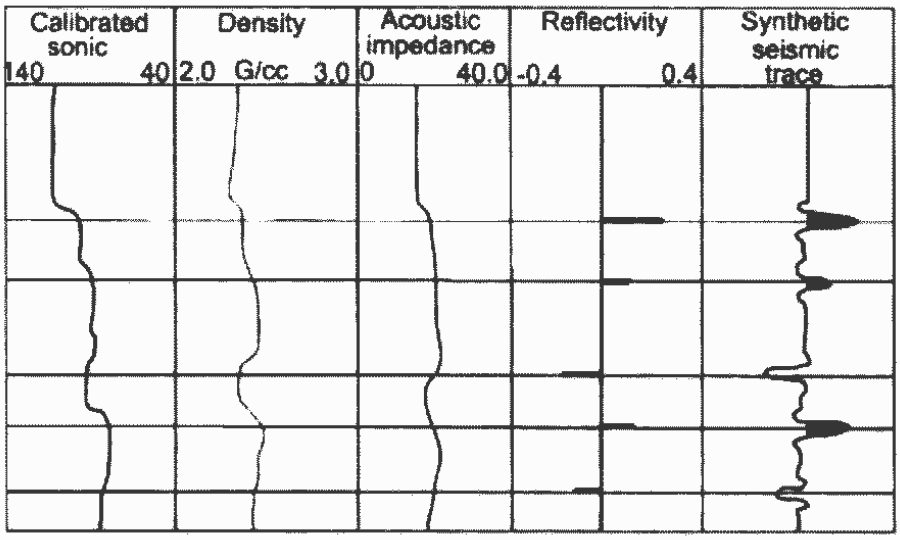
روش سایسموگرام مصنوعی (Synthetic Siesmogram): در این روش با استفاده از نمودارهای چاه می‌توان سایسموگرام مصنوعی ساخت که بسیار شبیه به اثرهای لرزه‌ای است. اهمیت این روش در این است که چون از نمودارهای چاه با عمق مشخص استفاده می‌شود، می‌توان با مقایسه آن با مقاطع لرزه‌ای، زمان را تبدیل به عمق نمود.

قبلاً بیان شد که اختلاف مقاومت صوتی بین دو محیط متفاوت، سبب بازتاب امواج الاستیک می‌شود. میزان بازتاب بستگی به شدت اختلاف مقاومت صوتی دو محیط و یا مقدار ضریب انعکاس دارد. مقاومت صوتی وابسته به سرعت امواج صوتی و چگالی است. این دو پارامتر به سهولت از طریق نمودارهای سونیک و چگالی چاه قابل کسب هستند. برای ساختن سایسموگرام مصنوعی مراحل زیر انجام می‌شود:

- برای محاسبه مقاومت صوتی، مقادیر سرعت امواج صوتی و چگالی در هم ضرب می‌شوند.

- با داشتن مقاومت صوتی، ضریب انعکاس محاسبه می‌شود.
- با داشتن ضرایب انعکاس موجک‌ها ساخته می‌شوند.

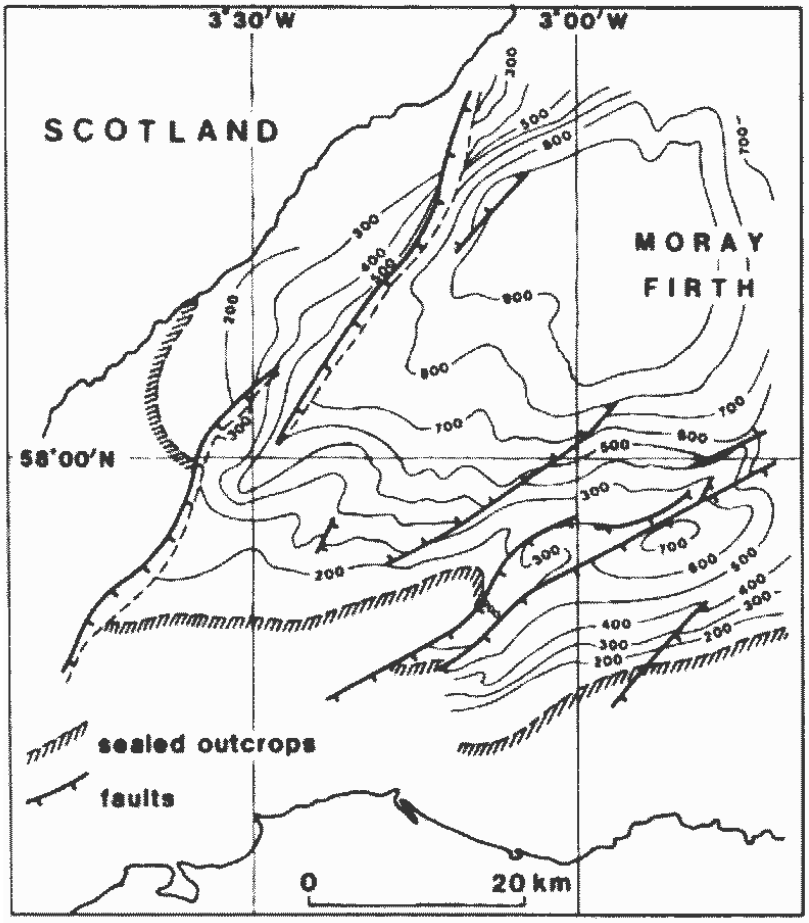
نرم افزارهای متعددی برای ساختن سایسموگرام مصنوعی وجود دارد. شکل ۱۰-۳۷ مراحل مختلف ساخت یک سایسموگرام مصنوعی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰-۳۷ - مراحل مختلف ساخت یک سایسموگرام مصنوعی با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی

۱۰-۳-۳-۸-۱ اطلاعات ساختمانی

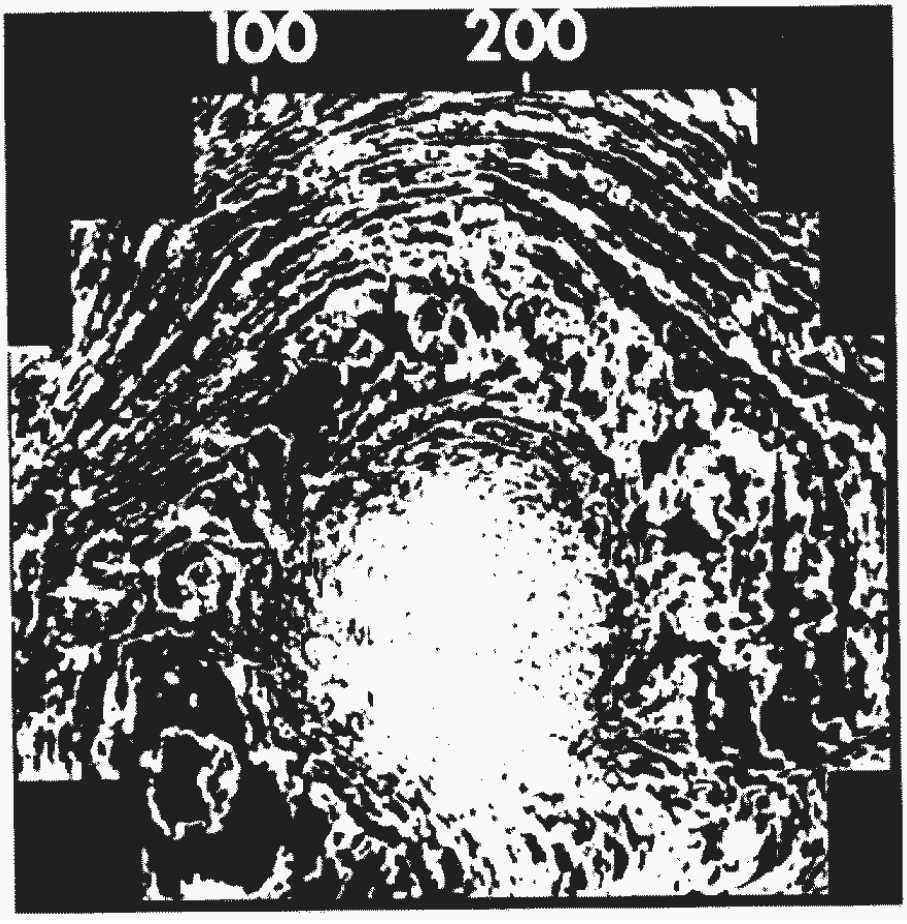
اطلاعات ساختمانی اصلی که از اطلاعات لرزه‌ای به دست می‌آید در جهت شناسایی ساختارهای زیرسطحی و به منظور جستجوی نفتگیرهای ساختمانی همانند طاقدیس‌ها است. عمده تعبیر و تفسیرهای ساختمانی بر روی مقاطع زمانی لرزه‌ای صورت می‌گیرد و نقشه ساختمانی- زمانی (time structure map) برای نشان دادن شکل هندسی برخی از انعکاس‌ها توسط کانتورهای همزمان ایجاد می‌شود (شکل ۱۰-۳۸). نقشه کانتوری ساختمانی نیز پس از تبدیل زمان انعکاس به عمق، قابل ترسیم است.



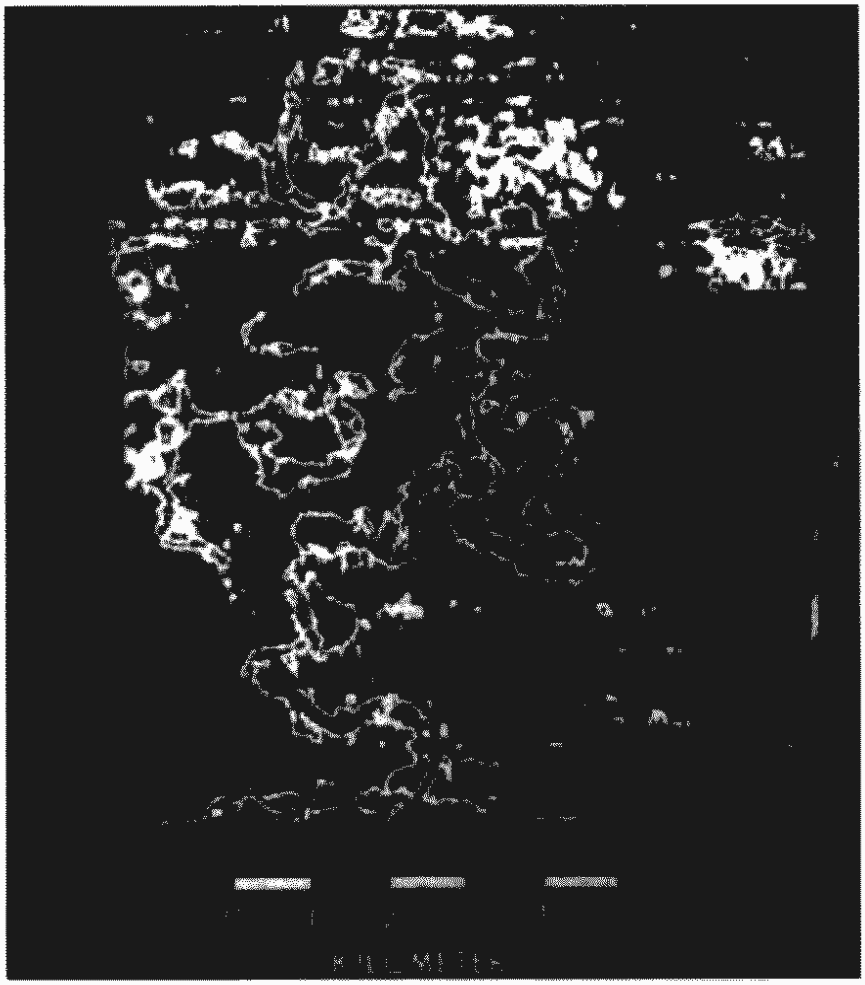
شکل ۱۰-۳۸ - مثالی از یک نقشه ساختمانی- زمانی. ارزش کانتورها، زمان رفت و برگشت امواج الاستیک بر حسب میلی‌ثانیه است

اطلاعات ساختمانی که از لرزه‌شناسی سه بعدی کسب می‌شود، دید بسیار دقیق‌تری را نسبت به ساختارهای زیرسطحی به دست می‌دهد. شکل ۱۰-۳۹ یک تصویر سه بعدی از نفوذ یک گنبد نمکی را در خلیج مکزیک نشان می‌دهد. از ویژگی‌های مهم لرزه‌شناسی سه بعدی، ایجاد برش‌های زمانی (time slice) از تصاویر سه بعدی است که با استفاده از آن‌ها ساختارها را به دقت می‌توان از بالا نظاره کرد (شکل ۱۰-۴۰). شکل ۱۰-۴۱ یک برش زمانی را نشان می‌دهد که به خوبی می‌توان آثار یک رودخانه مآندری را در آن مشاهده نمود.

شکل ۱۰-۳۹ - یک تصویر سه بعدی از نفوذ یک گنبد نمکی در خلیج مکزیک



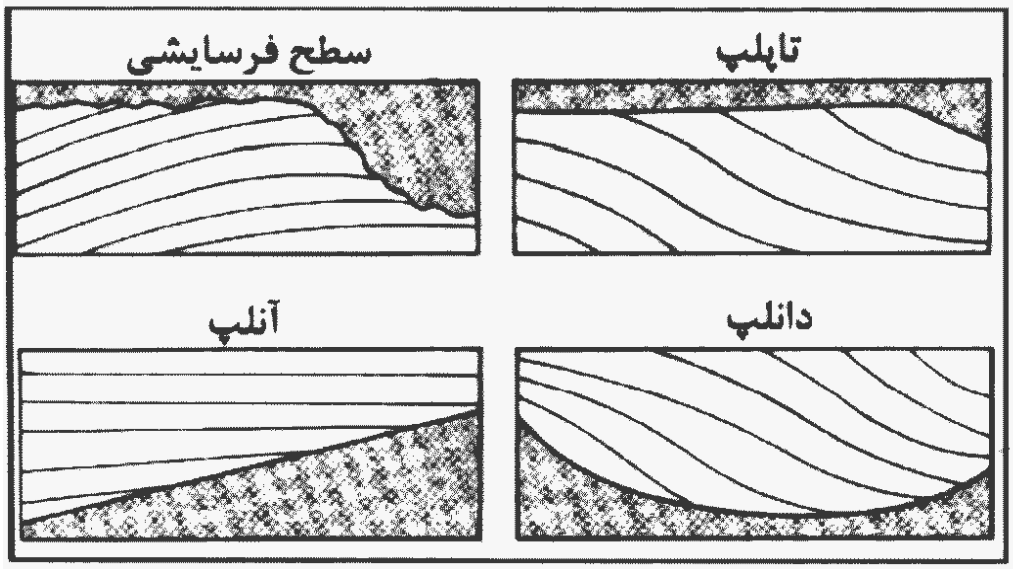
شکل ۱۰-۴۰ - یک برش زمانی از گنبد نمکی شکل ۱۰-۳۹



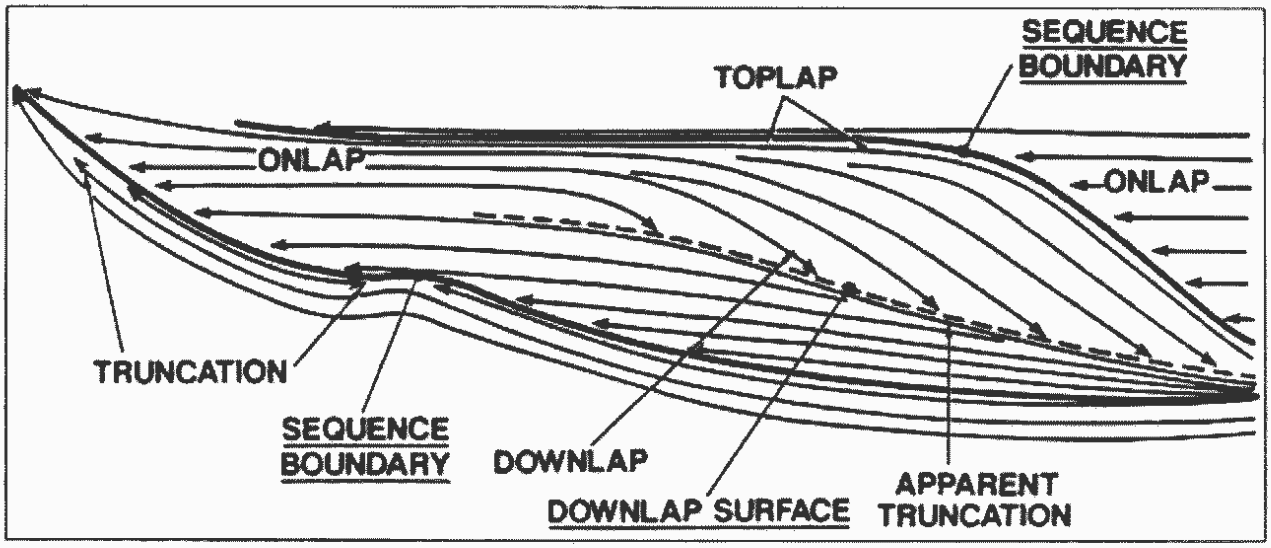
شکل ۱۰-۴۱ - یک برش زمانی از لرزه نگاری سه بعدی در خلیج تایلند که در آن آثار یک رودخانه مآندری قابل مشاهده است

۱۰-۳-۳-۸-۲ اطلاعات چینه شناسی

اطلاعات چینه شناسی حاصل از بررسی‌های لرزه‌ای در چارچوب چینه‌شناسی لرزه‌ای (seismic stratigraphy) بیان می‌شود. در چینه‌شناسی لرزه‌ای، مقاطع لرزه‌ای به سکانس‌های لرزه‌ای مشخصی تقسیم می‌شوند. این سکانس‌ها توسط الگوهای انعکاسی نظیر آنلپ (onlap)، دانلپ (downlap)، تاپلپ (toplap) و سطوح فرسایشی (erosion) مشخص می‌شوند (شکل ۱۰-۴۲ و ۱۰-۴۳).



شکل ۱۰-۴۲ - نمایش شماتیک انواع الگوهای انعکاسی



شکل ۱۰-۴۳ - نمایش شماتیک الگوهای انعکاسی در یک سکانس رسوبی

بعد از تفکیک یک مقطع لرزه‌ای به سکانس‌ها، هر سکانس را می‌توان بر اساس ساختار و الگوی داخلی انعکاس‌هایش تجزیه و تحلیل کرد. کاربرد ساختار و الگوی داخلی انعکاس‌ها را برای تعبیر و تفسیر رخساره‌های رسوبی، آنالیز رخساره‌های لرزه‌ای (seismic facies analysis) می‌نامند. رخساره‌های لرزه‌ای شامل انواع موازی، نیمه موازی، واگرا، سیگموئید، مایل و پشته‌ای است. هر کدام از آن‌ها بیانگر شرایط خاص رسوبگذاری است. برای مثال، نوع موازی بیانگر رسوبگذاری در آب‌های کم عمق فلات قاره بوده و نوع سیگموئید و مورب در بخش‌های عمیق‌تر در حواشی فلات قاره و شیب قاره شکل می‌گیرند. بدیهی است که تشخیص محیط رسوبی و پیش‌بینی رخساره‌های سنگی در مقاطع لرزه‌ای اهمیت بسزایی در کارهای اکتشافی دارد و ما را قادر به شناسایی مکان‌های پتانسیل برای سنگ منشأ، مخزن و پوش‌سنگ می‌نماید.

در این بخش از کتاب کاربرد اطلاعات لرزه‌ای در تحلیل رخساره‌های کربناته بیان می‌گردد.

تحلیل رخساره‌های لرزه‌ای کربنات‌ها (Carbonate Seismic Facies Analysis)

با توجه به اهمیت سنگ‌های کربناته در حوضه‌های هیدروکربنی ایران، در این بخش از کتاب به طور مختصر به چگونگی شناسایی رخساره‌های لرزه‌ای (seismic facies) سنگ‌های کربناته پرداخته می‌شود. شکل سنگ‌های کربنات‌ها در اطلاعات لرزه‌ای، راهنمای مفیدی در مورد محیط رسوبگذاری، لیتوفاسیس، دیاژنز و وجود سنگ منشأ و مخزن در منطقه مورد مطالعه است. رخساره‌های لرزه‌ای کربنات‌ها از روی تجزیه و تحلیل الگو (configuration)، دامنه (amplitude)، فرکانس (frequency) و پیوستگی (continuity) بازتاب‌های لرزه‌ای (seismic reflections) قابل تفسیر است. شکل هندسی الگوهای بازتابی (reflection configurations) در داده‌های لرزه‌ای بسیار متنوع و شامل موازی (parallel)،

پیشرونده (prograding)، تپه‌ای (mounded)، وارفته (draped)، آنلپ (onlap) یا آنلپ پرکننده (onlap fill) است. هر یک از این اشکال هندسی، دارای شرایط و مراحل نهشته شدن متفاوتی می‌باشند که نشان دهنده محیط‌های رسوبی مختلف هستند. دامنه، فرکانس و پیوستگی نیز می‌تواند بیان کننده رخساره‌های کربناته باشد.

اصطلاح رخساره (facies) در زمین‌شناسی در موارد مختلفی مثل رخساره زیستی (biofacies)، رخساره سنگی (lithofacies)، رخساره دگرگونی (metamorphic facies) و رخساره لرزه‌ای (seismic facies) به کار برده می‌شود. در شناسایی رخساره‌های لرزه‌ای لازم است که اطلاعاتی در مورد عوامل ذیل داشته باشیم:

- الگو یا شکل بازتاب‌ها
- دامنه (شدت نسبی پیک و تراف‌ها)
- فرکانس (تعداد بازتاب‌ها در واحد زمان سیر امواج)
- پیوستگی (تداوم جانبی بازتاب‌ها)

از میان این چهار پارامتر، بیشترین تنوع در الگو یا شکل بازتاب‌ها وجود دارد، اگر چه سه عامل دیگر نقش مهمی را در تفکیک محیط‌های کربناته ایفا می‌کنند.

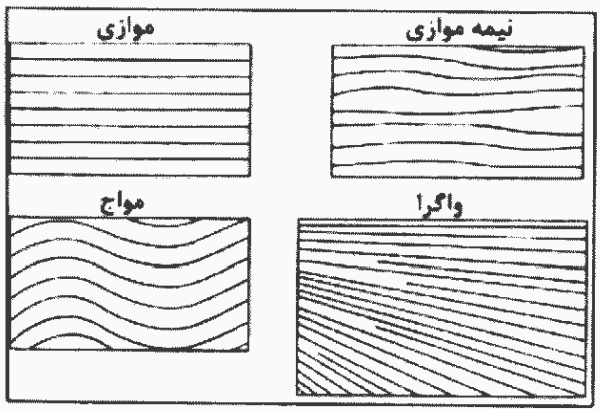
الگوهای بازتابی (Reflection Configurations)

چهار نو ع الگوی اصلی در داده‌های لرزه‌ای قابل شناسایی است:

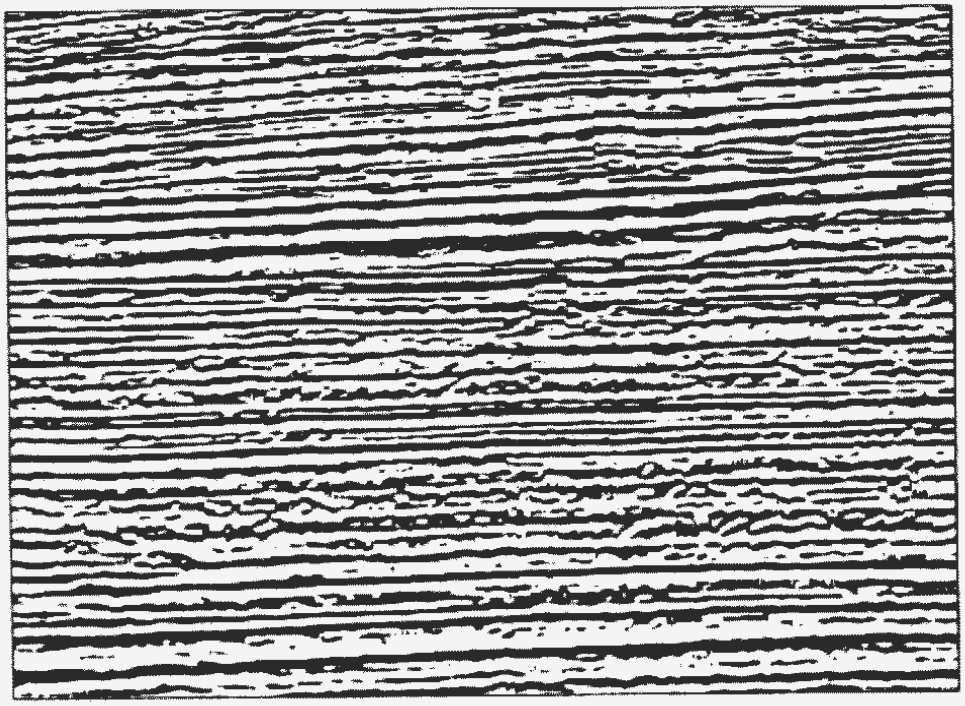
- *بازتاب‌های موازی یا نیمه موازی و واگرا (parallel or subparallel and divergent)*
- *بازتاب‌های پیشرونده (prograding)*
- *بازتاب‌های تپه‌ای (mounded) یا وارفته (draped)*
- *بازتاب‌های آنلپ (onlap)*

۱- بازتاب‌های موازی، نیمه‌موازی و واگرا (Parallel, Subparallel and Divergent Reflections)

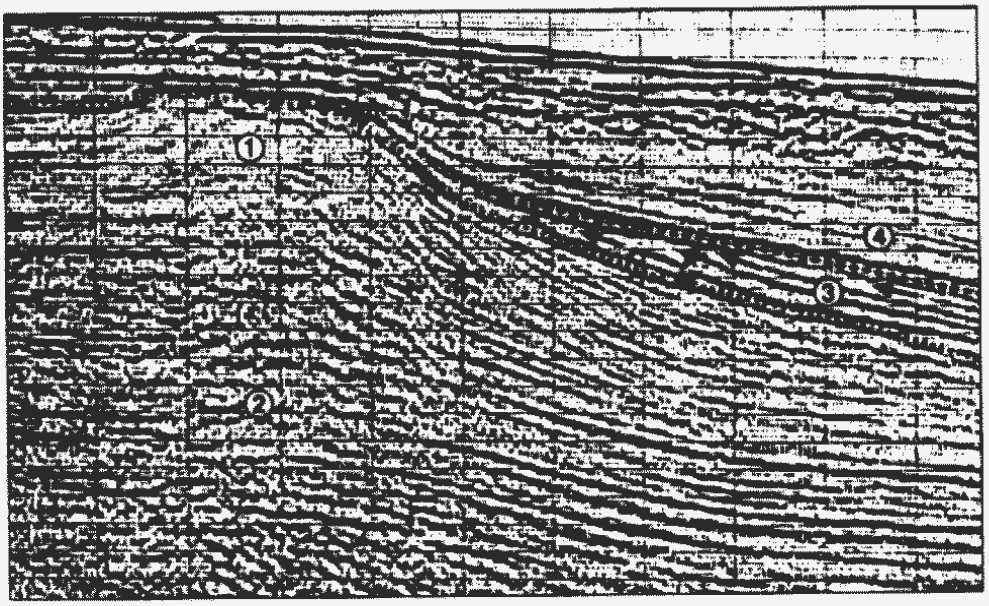
شکل ۱۰-۴۴ نمونه‌هایی از بازتاب‌های موازی، نیمه‌موازی و واگرا را نشان می‌دهد. کدام یک از محیط‌های رسوبگذاری منجر به ایجاد چنین بازتاب‌های لرزه‌ای شده است؟ بازتاب‌های موازی و نیمه‌موازی اشاره به وجود فضای رسوبگذاری به صورت عمودی به اندازه کافی دارد (شکل ۱۰-۴۵). در صورتی‌که بازتاب‌های واگرا نشان دهنده تغییرات جانبی در فضای رسوبگذاری می‌باشند، مانند یک نیمه گرابن (half-graben) پرشده یا ناحیه جلویی از یک ریف در حال رشد (شکل ۱۰-۴۶).



شکل ۱۰-۴۴ - بازتاب‌های موازی، نیمه موازی، مواج و واگرا



شکل ۱۰-۴۵ - مقطع لرزه‌ای از خلیج مکزیک که در آن بازتاب‌های موازی و نیمه‌موازی دیده می‌شود



شکل ۱۰-۴۶ - مقطع لرزه‌ای از یک ریف بزرگ (1). خرده های حاصل از ریف به سمت حوضه (3) گسترش یافته‌اند. قبل از رشد ریف حوضه به صورت یک رمپ بوده است (2). بازتاب‌های واگرا در جلوی ریف (4) قابل مشاهده است

بازتاب‌های حاصل به طور طبیعی چیزی را در مورد سرعت رسوبگذاری بیان نمی‌کند، مگر با اطلاعات چینه‌شناسی‌زیستی تلفیق شوند. در ضمن این الگوها مستقیماً نمی‌توانند شرایط انرژی تجمع رسوبات را نیز مشخص کنند.

الگوهای بازتابی واگرا (شکل ۱۰-۴۴)، معمولاً بیانگر تغییرشکل‌های هم‌زمان با رسوبگذاری (synsedimentary deformations) یا تفاوت در میزان رسوبات است. مانند حاشیه‌های کربناته که سریعاً رشد کرده در حالی‌که نواحی عمیق‌تر (با نرخ رسوبگذاری کمتر) قادر به همراهی نیستند.

از محیط‌های کربناته متداول، رمپ‌های کربناته و پلاتفرم‌ها (از محیط‌های کم عمق ساب‌تایدال تا اینترتایدال و سوپراتایدال) را می‌توان نام برد که دارای طبقات موازی می‌باشند و می‌توانند به خوبی رخساره لرزه‌ای موازی را ایجاد نمایند. محیط‌های دیگر کربناته که دارای بازتاب‌های موازی هستند شامل کف حوضه (basin floor) و شیب پایین (lower slope) است.

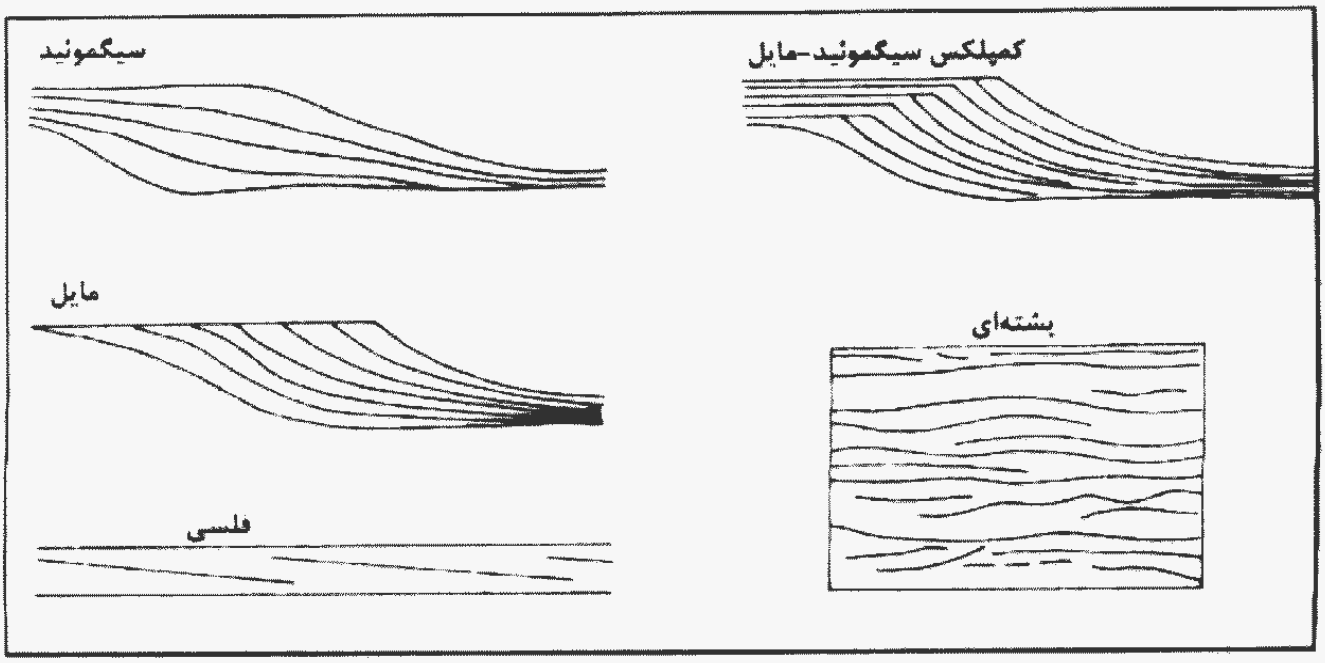
در حوضه‌های تبخیری، تناوب کربنات‌ها با لایه‌های تبخیری وجود دارد. رسوبات این نوع حوضه‌ها نیز رخساره لرزه‌ای موازی و یا نیمه‌موازی از خود نشان می‌دهند. عمده محیط‌های تبخیری در آب‌های کم عمق وجود دارند، مانند لایه‌های پرمین در شمال‌غرب اروپا. اما برخی از تبخیری‌ها در آب‌های عمیق نهشته شده‌اند، نظیرحوضه میشیگان که دارای تناوب کربنات‌ها با لایه‌های تبخیری است و میزان تبخیری‌ها به سمت مرکز حوضه افزایش می‌یابد.

۲ - بازتاب‌های پیشرونده (Progradational Reflections)

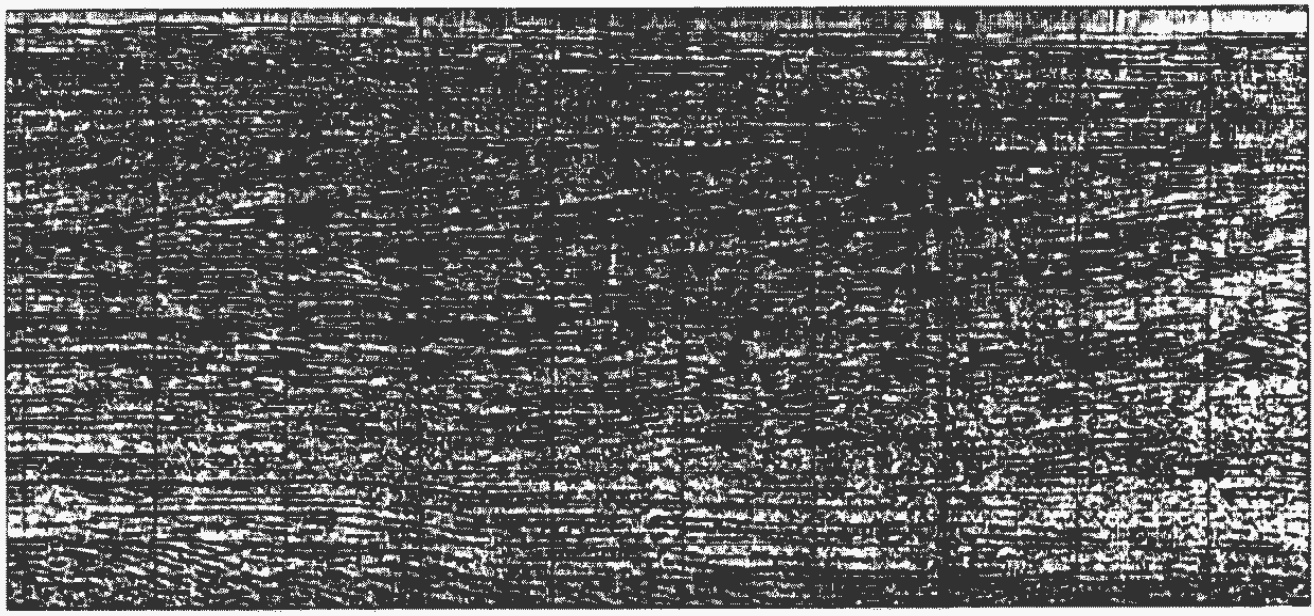
بازتاب‌های پیشرونده یکی از الگوهای بازتابی است که اغلب با یک مشاهده به طور سریع قابل شناسایی است. بازتاب‌های پیشرونده دارای انواع متنوعی است که شناسایی هریک برای پیشگویی‌های مخزن لازم است. بازتاب‌های پیشرونده شامل موارد زیر است:

- *سیگموئید (sigmoid)*
- *مایل (oblique)*
- *کمپلکس سیگموئید-مایل (complex sigmoid-oblique)*
- *فلسی (shingled)*
- *پشته‌ای (hummocky)*

شکل ۱۰-۴۷ انواع بازتاب‌های پیشرونده را نشان می‌دهد. یکی از متداول‌ترین الگوی بازتاب‌های پیشرونده به شکل سیگموئید (sigmoid) می‌باشد. این رخساره لرزه‌ای اشاره به وجود فضای رسوبگذاری به‌صورت جانبی و عمودی دارد. این رخساره لرزه‌ای از ویژگی‌های حواشی کربناته (carbonate margins) در حوضه‌هایی است که میزان فرونشست نسبتاً سریع می‌باشد، مانند باهاما (شکل ۱۰-۴۸).

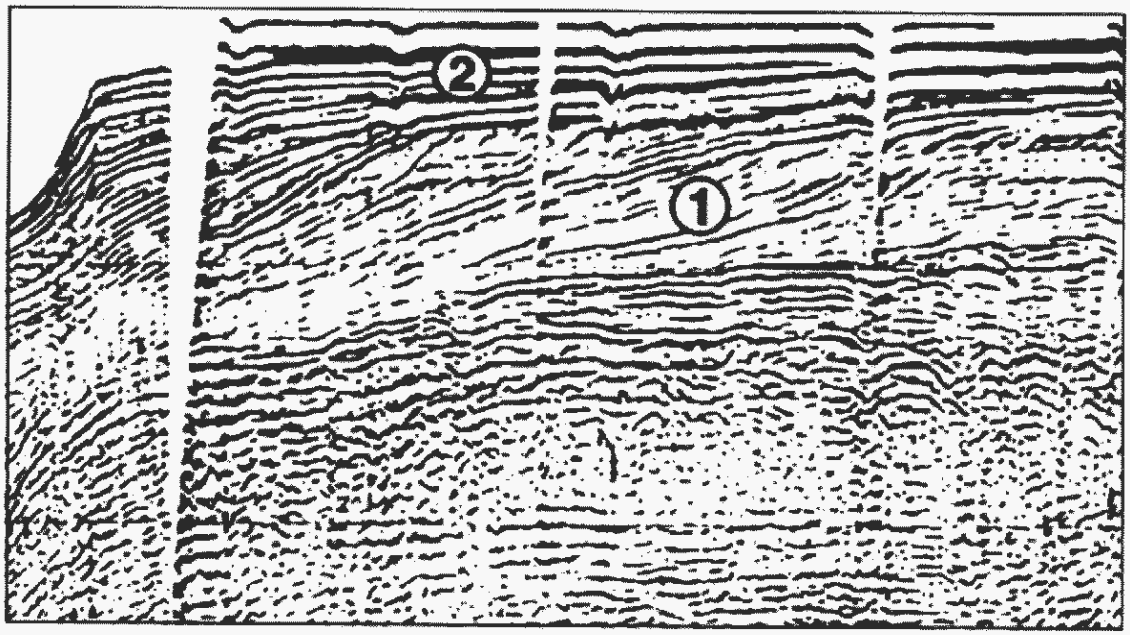


شکل ۱۰-۴۷ - انواع بازتاب‌های پیشرونده



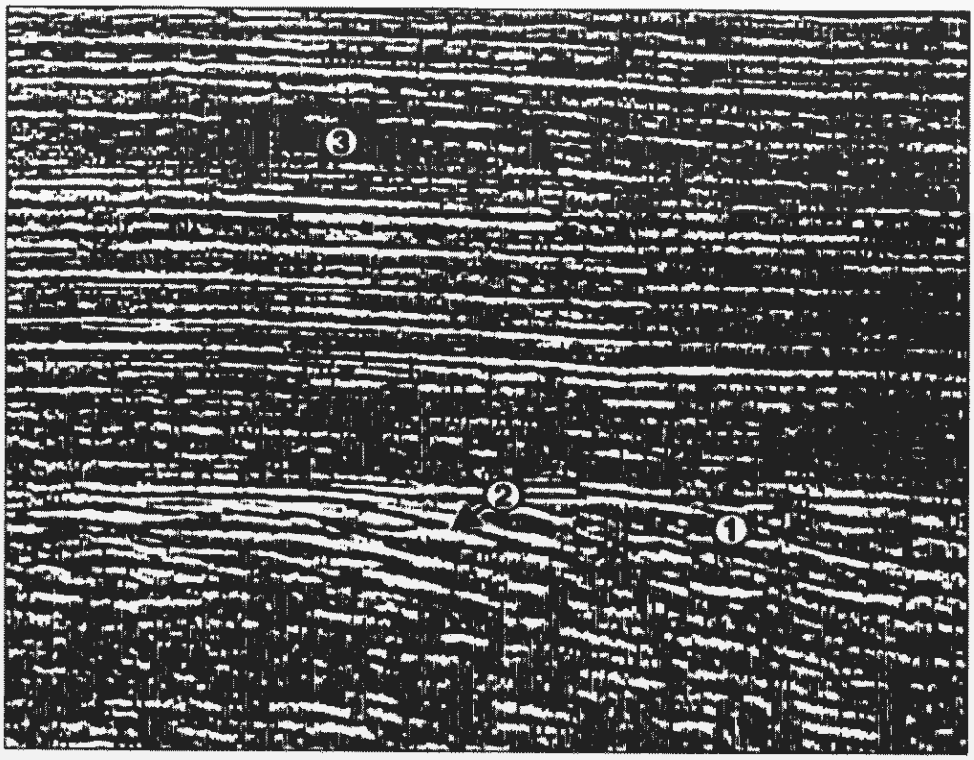
شکل ۱۰-۴۸ - مقطع لرزه‌ای رسوبات کربناته پیشرونده در باهاما

رخساره لرزه‌ای مایل (oblique)، برخلاف نو ع سیگموئید، بیانگر محدودیت در فضاهای رسوبگذاری قائم و وجود فضای رسوبگذاری جانبی به اندازه کافی است. این شرایط هنگامی مهیا می‌شود که میزان رسوبگذاری بیش از فرونشست حوضه باشد. شکل ۱۰-۴۹ مثالی در غرب فلوریدا را نشان می‌دهد. رخساره لرزه‌ای مایل همچنین در رسوبات کربناته ایجاد شده در محیط‌های پرانرژی در روی قله ریف‌ها می‌تواند ایجاد شود. به طور کلی بازتاب‌های مایل معمولاً در شرایط پرانرژی محیطی که ترکیب آن بیشتر گرینستون و رودستون می‌باشد، شکل می‌گیرد.



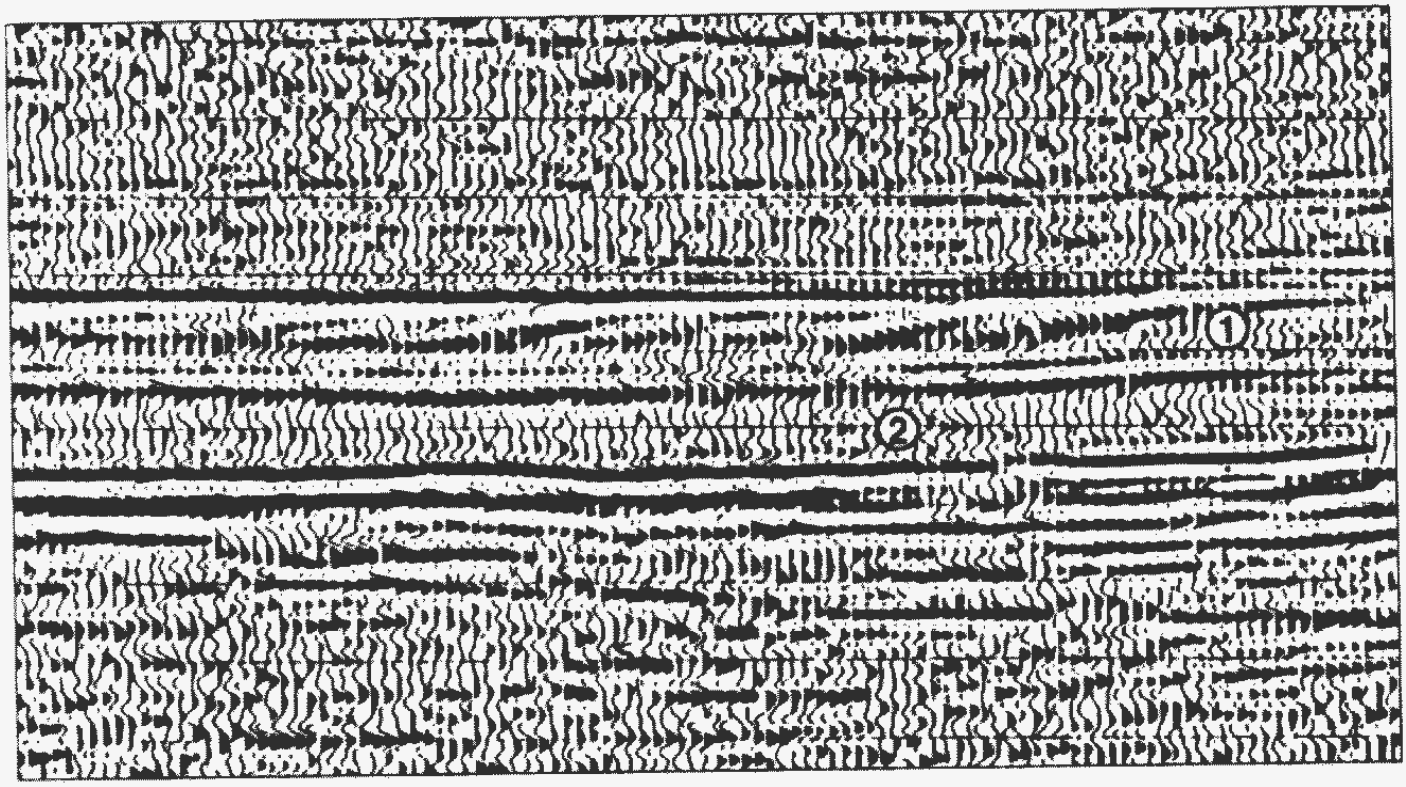
شکل ۱۰-۴۹ - مقطع لرزه‌ای که در آن رخساره لرزه‌ای مایل (1) حاصل از پیشروی رسوبات کربناته پلاتفرم دیده می‌شود. بازتاب‌های موازی (2) متعلق به رسوبات کربناته فلات است

سومین الگوی بازتابی از نو ع پیشرونده، ترکیبی از سیگموئید-مایل است. معمولاً این الگو به‌صورت تناوبی از سیگموئید و مایل ظاهر می‌شود. چندین عامل می‌تواند این الگو را ایجاد کند. یکی میزان متفاوت فرونشست در یک ناحیه فعال تکتونیکی و دیگری تغییرات آب و هوایی است که در ایجاد کربنات‌ها مؤثرند. مجموعه سیگموئید-مایل یک الگوی تقریباً نادر است. شکل ۱۰-۵۰ این مدل را در ناحیه‌ای در رسوبات ژوراسیک از سواحل شرقی امریکا نشان می‌دهد.



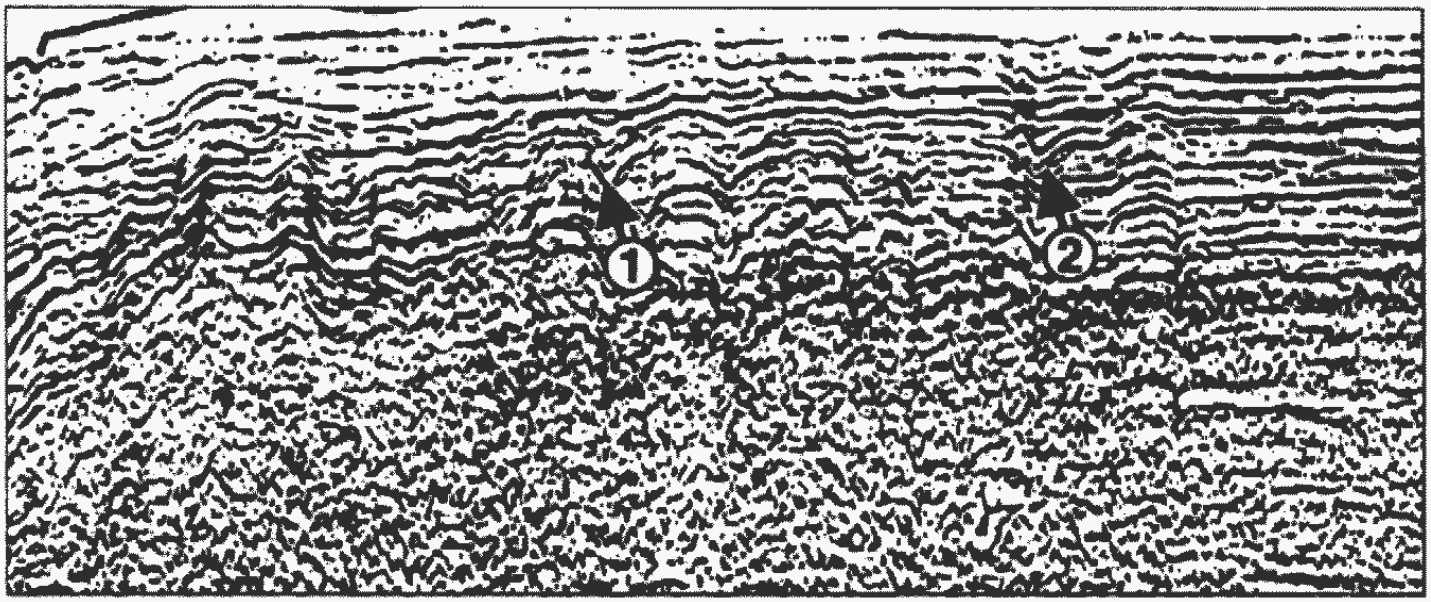
شکل ۱۰-۵۰ - مقطع لرزه‌ای که در آن رخساره لرزه‌ای سیگموئید-مایل (1) ناشی از پیشروی سکوی کربناته دیده می‌شود. بازتاب‌های موازی (3) در بالا متعلق به رسوبات آواری ساحلی است

چهارمین الگوی بازتابی از نوع پیشرونده، نوع فلسی (shingled) میباشد (شکل ۱۰-۵۱). این الگو از نظر شکل و ریخت شبیه الگوی مایل است، ولی توسط صرفاً یک بازتاب شناخته می‌شود، در صورتی‌که نوع مایل دارای بازتاب‌های مایل بیشتری است. این رخساره لرزه‌ای مربوط به محیط‌های محدود شده به‌صورت قائم و دارای انرژی زیاد در طول لبه پیشرونده خود است. این رخساره از خصوصیات رمپ‌های کربناته، محیطی که احتمال تشکیل گرینستون‌ها در آن زیاد است، می‌باشد.



شکل ۱۰-۵۱ - مقطع لرزه‌ای که در آن رخساره لرزه‌ای فلسی (1) ناشی از پیشروی رسوبات ساحلی کم عمق، دیده می‌شود. بازتاب‌های 2 متعلق به یک لایه نمکی است

پنجمین رخساره لرزه‌ای نوع پشته‌ای (hummocky) است که به‌صورت بازتاب‌های محدب و غیر پیوسته است. این رخساره حاصل جریان‌های جرمی(mass debris flow) و یا فروریزش (collapse) به دلیل کارستی شدن (karstification) است (شکل ۱۰-۵۲). سطح بالایی از این واحد بسیار ناهموار می‌باشد.

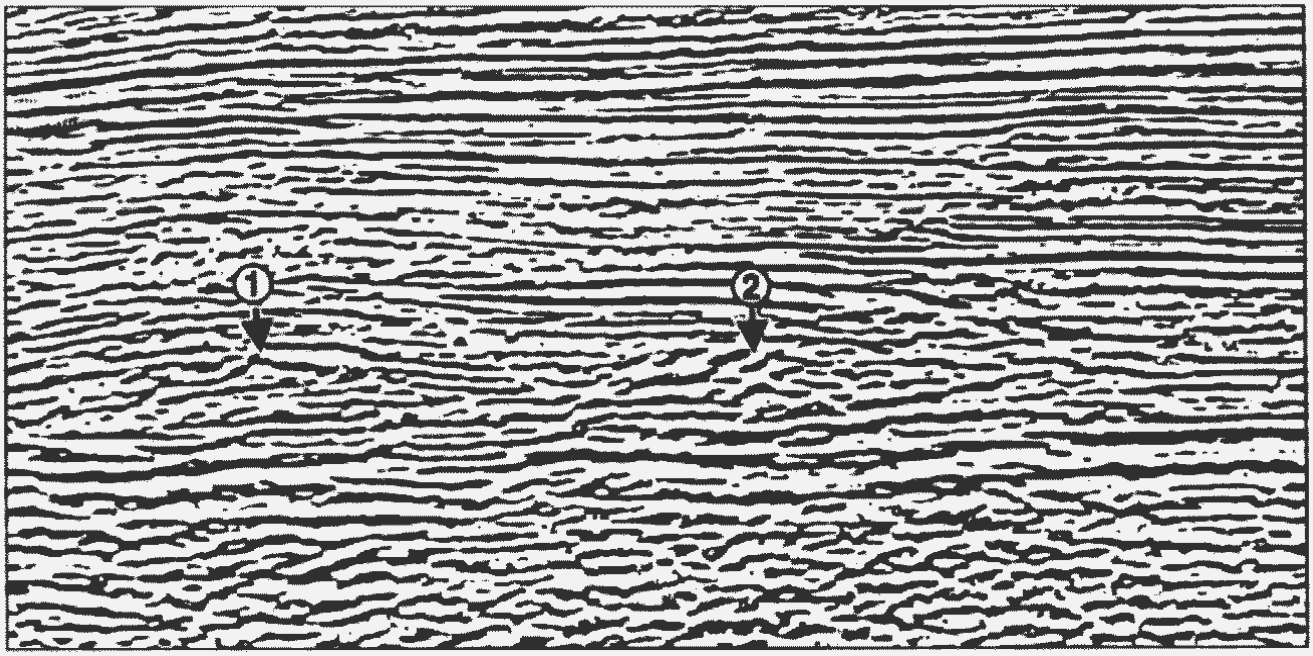


شکل ۱۰-۵۲ - رخساره لرزه‌ای نوع پشته‌ای (1&2) ناشی از انحلال

۳ - بازتاب‌های تپه‌ای و وارفته (Mounded and Draped Reflections)

بازتاب‌های تپه‌ای و وارفته بسهولت در مقاطع لرزه‌ای قابل شناسایی می‌باشند. معمولی‌ترین تصور این است که آن‌ها بیانگر ریف‌ها هستند. ولی باید توجه داشت که این برداشت کمی نیاز به تأمل دارد. مهم‌ترین ویژگی بازتاب‌های تپه‌ای و وارفته، محدب بودن آن‌هاست. در ابتدا می‌بایست تعیین کرد که آیا این شکل، یک پدیده زمین‌شناسی است یا یک سری از پدیده‌های مصنوعی ژئوفیزیکی که ممکن است در طی بازخوانی اطلاعات لرزه‌ای حاصل شده باشد. سپس باید ماهیت آن‌ها را از نظر فرسایشی، ساختمانی، ولکانیکی و نفوذی مشخص نمود. نهایتاً باید تعیین کرد که بازتاب‌ها از کربنات‌ها و یا از آواری‌ها شکل گرفته‌اند. بایستی توجه نمود که الگوهای بازتابی منحصراً یک سری از فرآیندهای رسوبگذاری هستند و نمی‌تواند لیتوفاسیس را مشخص کند. پیشگویی لیتوفاسیس توسط آنالیزهای ناحیه‌ای رخساره‌ها از روی نمودار و مغزه، آنالیز سرعت (velocity analysis) امکان‌پذیر می‌باشد.

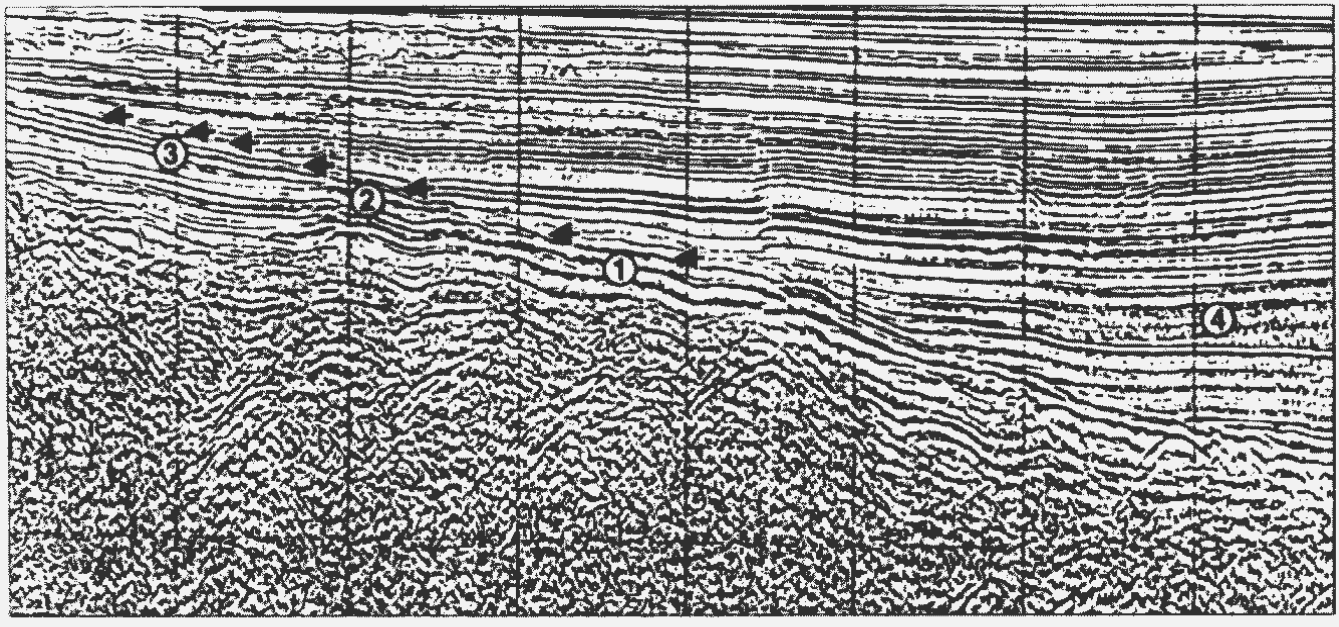
ریف (ساخت‌های کربناته که مقابل امواج مقاوم هستند) ساخت‌های محدبی هستند که از رشد درجای موجودات شکل گرفته‌اند. موجودات ریف‌ساز در طول زمان زمین‌شناسی تغییرات مهمی را داشته‌اند و از پرکامبرین شناخته شده‌اند. ریف‌ها اغلب در آب‌های کم‌عمق شکل گرفته‌اند. بیشترین و اصلی‌ترین ناحیه از ساخت‌های کربناته ریفی در حاشیه فلات قاره‌ها و در لبه رمپ‌های کربناته است (شکل ۱۰-۵۳).



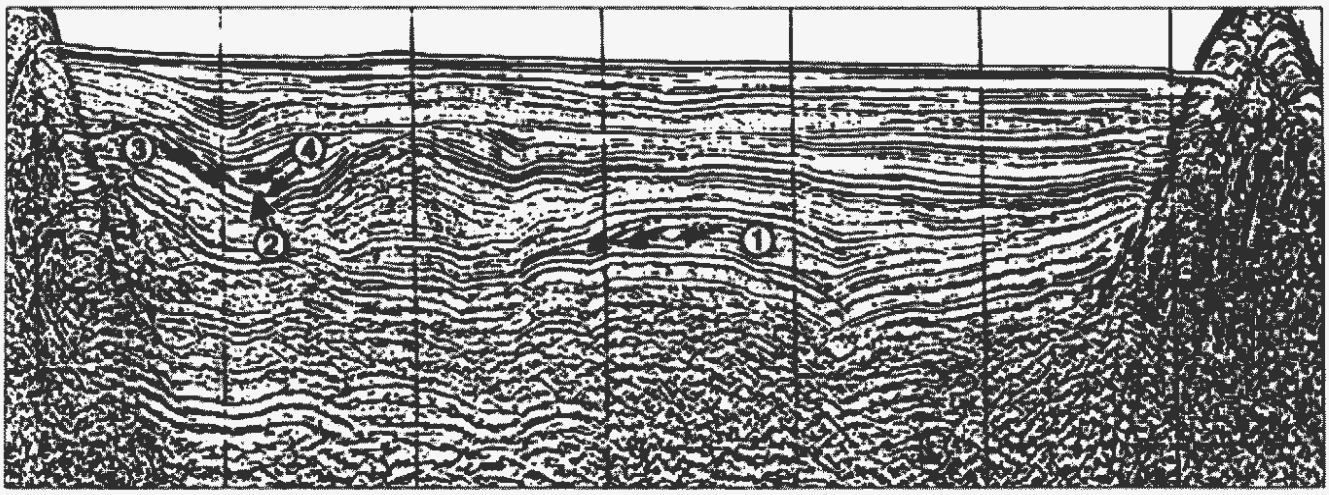
شکل ۱۰-۵۳ - مقطع لرزه‌ای از دو ریف (1&2) در خلیج مکزیک

۴ - بازتاب‌های لرزه‌ای نو ع آنلپ (Onlap) و آنلپ پرکننده (Onlap Fill)

الگوهای لرزه‌ای آنلپ و آنلپ پرکننده اشاره به وجود سطوح شیبداری دارد که بازتاب‌ها یا سطوح لایه‌بندی به آن‌ها ختم می‌شود. اصطلاح آنلپ، هنگامی استفاده می‌شود که انتهای بازتاب‌ها صرفاً به یک سطح شیبدار منتهی شود. اگر برخورد از دو طرف به دو سطح ختم شود از اصطلاح آنلپ پرکننده استفاده می‌شود. یک نبود زمانی بین لایه‌های بالا و سطح شیبدار وجود دارد. در شکل ۱۰-۵۴ الگوی آنلپ روی فلات در اثر پیشروی دریا دیده می‌شود. شکل ۱۰-۵۵ یک آنلپ پرکننده را نشان می‌دهد.



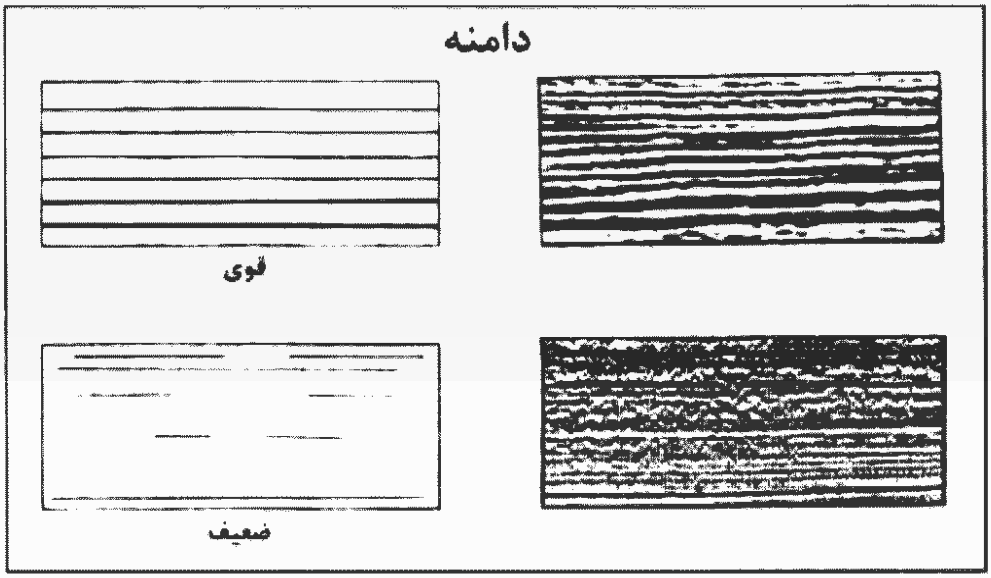
شکل ۱۰-۵۴ - مقطع لرزه‌ای که در آن الگوی آنلپ (1,2&3) دیده می‌شود



شکل ۱۰-۵۵ - مقطع لرزه‌ای که در آن رسوبات توربیدیتی یک آنلپ پرکننده را ایجاد کرده اند. ساختار پشته‌ای (1) در اثر جریان‌های توربیدیتی شکل گرفته است. جریان‌های توربیدیتی ایجاد دره زیردریایی (2) (submarine canyon) در داخل رسوبات کربناته قدیمی (3) کرده و مجدداً این دره توسط رسوبات پر شده است (4)

دامنه (Amplitude)

دامنه شدت نسبی پیک و تراف‌ها در نیمرخ‌های لرزه‌ای است (شکل ۱۰-۵۶). رسوبات کربناته با لایه‌بندی خوب، معمولاً دامنه قویی را نشان می‌دهند. این حالت درمحیط‌های کربناتی خالص یا محیط‌هایی که کربنات‌ها با لایه‌های تبخیری یا شیلی و مارنی همراهند دیده می‌شود. بر خلاف آن بخش‌های داخلی ریف‌ها اغلب خصوصیات لرزه‌ای با دامنه کم را نشان می‌دهند.



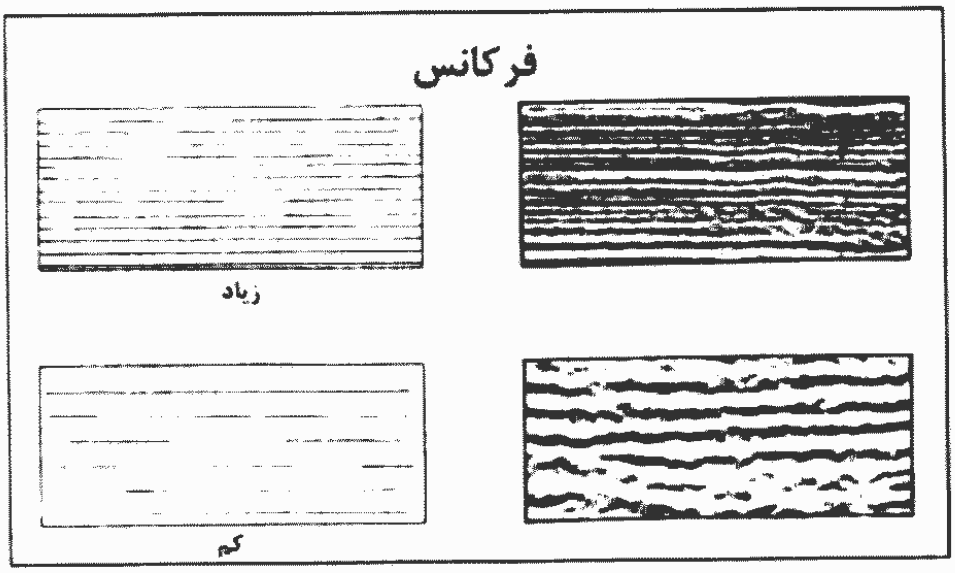
شکل ۱۰-۵۶ تغییرات دامنه در نیمرخ‌های لرزه‌ای

تغییر در دامنه بازتاب‌های لرزه‌ای به سمت ساحل در محیط‌های فلات (shelf) بیانگر تغییر در نوع رسوب است. به طور مثال در محیط‌های کربناته-آواری، جایی که کربنات‌ها در بخش‌های دور از ساحل و آواری‌ها در حواشی حوضه شکل می‌گیرند، تغییر در دامنه بازتاب‌های لرزه‌ای مشهود خواهد بود.

تغییر تدریجی آهک به دولومیت، که از اهمیت خاصی در ارزیابی مخازن برخوردار می‌باشد، با تغییر دامنه بازتاب‌های لرزه‌ای همراه است. دولومیت نسبت به آهک دارای دامنهٔ قوی‌تری است. ساخت‌های کارستی نیز دارای دامنه قویی هستند.

فرکانس (Frequency)

فرکانس در واقع تعداد بازتاب‌های لرزه‌ای در واحد زمان رفت و برگشت امواج لرزه‌ای است (شکل ۱۰-۵۷). فرکانس نسبت به عمق کاهش می‌یابد و به طور کلی، کربنات‌ها با فرکانس کم نسبت به رسوبات آواری مشخص می‌شوند که بیشتر بخاطر سرعت بالای امواج صوتی در آن‌ها است. در رخساره‌های عمیق، شاید بخاطر عمق تدفین، فرکانس کاهش می‌یابد. در تمامی‌حالات محیط‌های رسوبی، رخساره پیشرونده دارای فرکانس‌های متفاوت است. فرکانس‌های بالا در محیط‌های پلاتفرمی یافت می‌شود، لذا حدتفکیک (resolution) درونی بالایی داشته و ساخت‌های ظریف آن‌ها در مقاطع لرزه‌ای قابل شناسایی است.

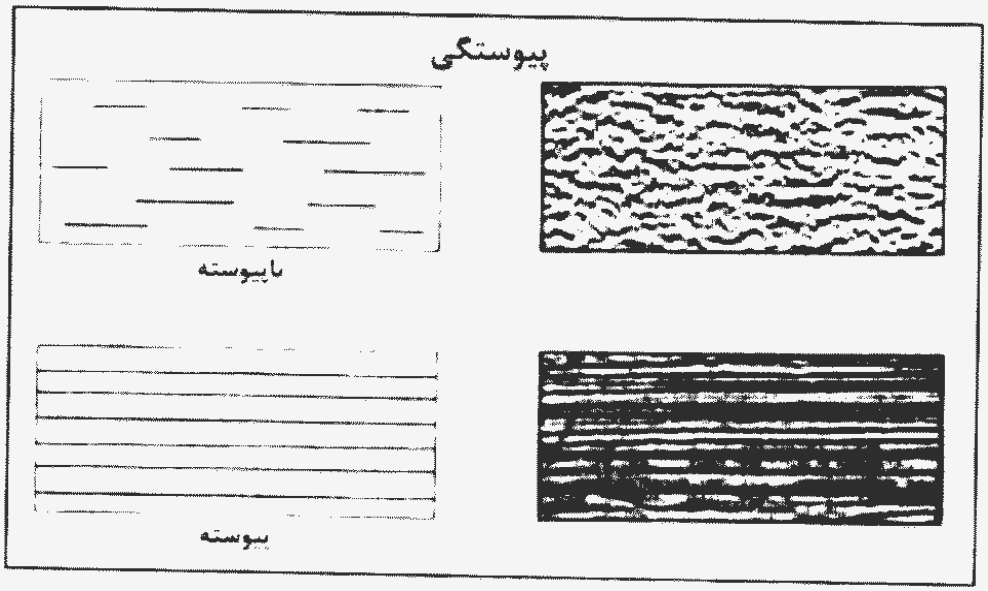


شکل ۱۰-۵۷ تغییرات فرکانس در نیمرخ‌های لرزه‌ای

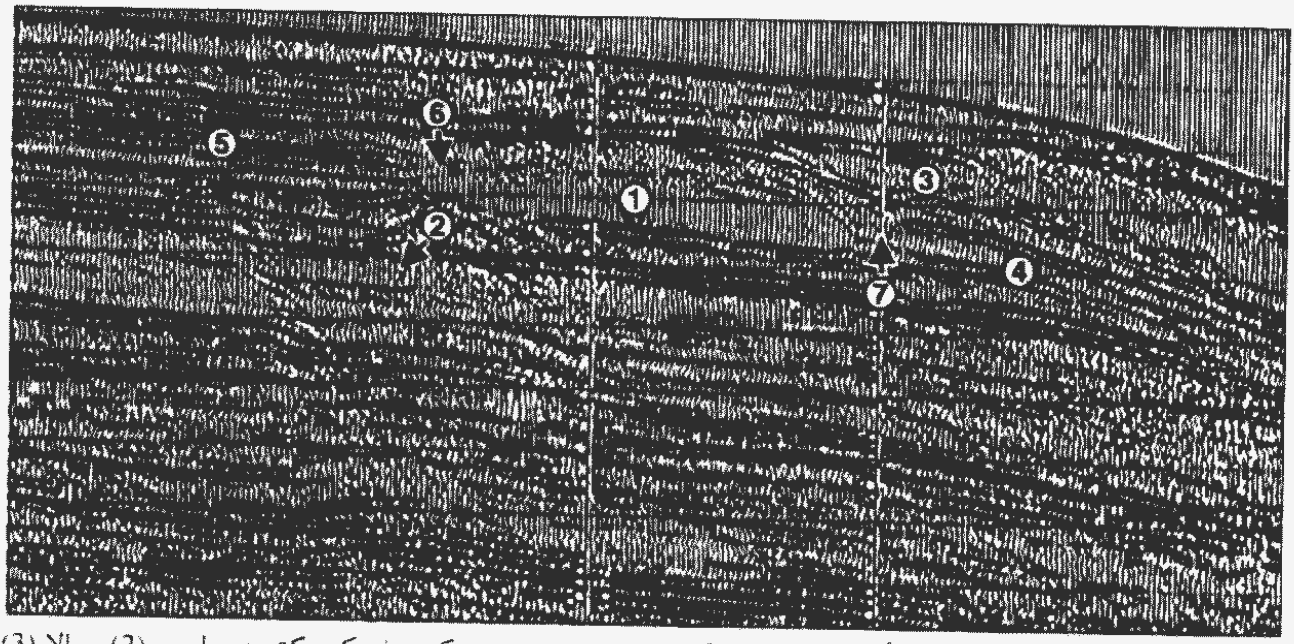
پیوستگی (Continiuty)

پیوستگی در نیمرخ‌های لرزه‌ای بیانگر تداوم جانبی بازتاب‌های لرزه‌ای است (شکل ۱۰-۵۸) هیچ محیطی قابل مقایسه با پلاتفرم‌های کربناته از نظر پیوستگی بازتاب‌های لرزه‌ای نیست. بازتاب آهک‌های Knowles از رمپ کربناته ژوراسیک-کرتاسه در شمال‌شرق خلیج مکزیک (شکل ۱۰-۵۳) و در برخی از لایه‌های پلاتفرم کربناته کرتاسه زیرین، به طول صدها کیلومتر پیوستگی دارد. تداوم و پیوستگی در آثار لرزه‌ای نیز می‌تواند در محیط‌های عمیق دیده شود. درمقابل، محیط‌های شیب فلات قاره معمولاً دارای بازتاب‌های کوتاه‌تر هستند که بخاطر وقایع رسوبگذاری مانند ریزش و لغزش (slumping , slides) رسوبات است.

ریف‌ها دارای ضعیف‌ترین پیوستگی در میان رسوبات کربناته هستند (شکل ۱۰-۵۹) که بخاطر ماهیت داخلی بسیاری از ریف‌هاست که فاقد لایه‌بندی داخلی‌اند.



شکل ۱۰-۵۸ تغییرات پیوستگی در نیمرخ‌های لرزه‌ای

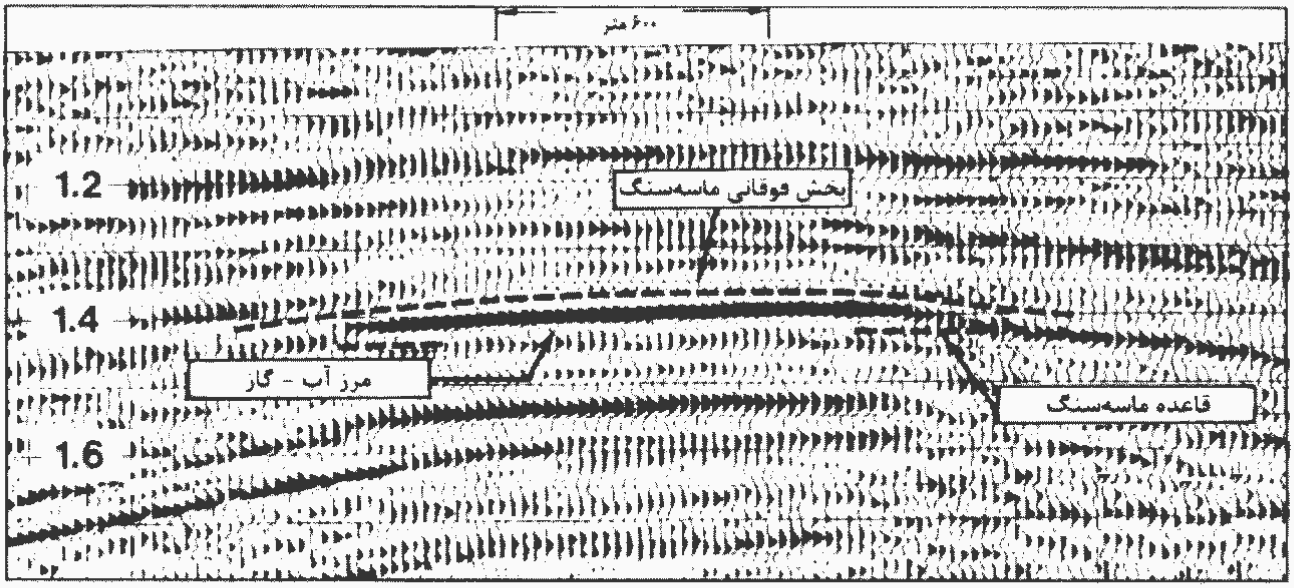


شکل ۱۰-۵۹ - مقطع لرزه‌ای که در آن یک ریف بزرگ (1) دیده می‌شود. یک ریف کوچکتر در پایین (2) و بالا (3) وجود دارد. رخساره‌های جلوی ریف (4) و عقب ریف (5) به خوبی قابل مشاهده‌اند. نقطه 6 تغییر رخساره از ریف به رخساره عقب ریف را نشان می‌دهد

در نهایت، محیط‌های رسوبی کربناته نظیر پلاتفرم کربناته (carbonate platform)، حاشیه پلاتفرم (platform margin)، شیب قاره (slope environment) و بخش‌های عمیق حوضه (basin) دارای ویژگی‌های لرزه‌ای مشخصی بوده که در شناسایی آن‌ها کمک می‌نماید و لذا می‌تواند راهنمای خوبی برای مکان‌های دارای پتانسیل هیدروکربنی باشد.

۱۰-۳-۳-۸-۳ اطلاعات محتوای سیال سازند

تجمع مواد هیدروکربنی را بعضی مواقع می‌توان بر روی مقاطع لرزه‌ای توسط انعکاس‌های قوی غیرمعمول به نام نقاط روشن (bright spot) تشخیص داد. این انعکاس‌های با دامنه قوی (شکل ۱۰-۶۰) به ضریب انعکاس‌های بسیار بالای زون گازدار در مخازن هیدروکربنی نسبت داده می‌شود. وجود گاز سبب تباین بسیار قوی در مقاومت صوتی لایه‌ها می‌شود. در صورت عدم وجود نقاط روشن، سطح سیالات مخازن ممکن است توسط نقاط صاف (flat spot) که نسبت شیب لایه‌ها افقی هستند، مشخص شود.



شکل ۱۰-۶۰ - نقطه روشن در یک مقطع لرزه ای

در پایان به طور خلاصه، فعالیت‌های اکتشافی نیاز به تلفیق علوم و تکنیک‌های متفاوت دارد. جدول ۱۰-۲ اهداف تکنیک‌های اکتشافی را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰-۲ - اهداف تکنیک‌های اکتشافی

هدف / تکنیک	حوضه	سنگ منشأ	مهاجرت	سنگ مخزن	نفتگیر	سیالات
لرزه‌ای	✓		✓	✓	✓	✓
ثقل‌سنجی	✓					
مغناطیس‌سنجی	✓					
حفاری		✓	✓	✓	✓	✓
نمودارگیری		✓	✓	✓	✓	✓
مطالعه صحرایی	✓	✓	✓	✓	✓	