

# آنالیز شکستگی‌ها و ژئومکانیک چاه با استفاده از نمودارهای تصویری

محمد رضا غفوری - دانشگاه صنعت نفت

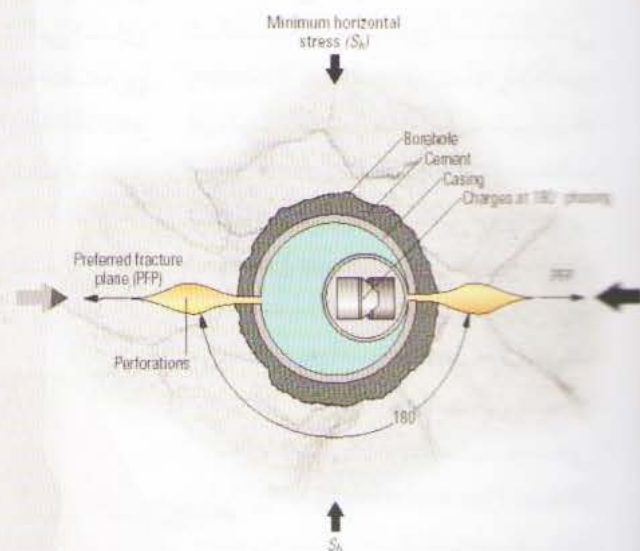
(Open or Close) و در نهایت تقسیم‌بندی زایشی آنها (Genetic Classification) می‌باشد. به این دلیل که در مخازن طبیعی شکست‌افزار (Naturally Fractured Reservoir) تولید هیدروکربن از ماتریکس (Matrix) به درون شکستگی‌ها و سپس به درون چاه صورت می‌گیرد، محاسبه مقدار تراوایی (Permeability)، شیب، امتداد، باز یا بسته بودن و روند (Trend) شکستگی‌ها در مکانیزم تولید و روش‌های ازدیاد برداشت (Enhanced Oil Recovery) از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

## کلیات Generality

یک پدیده زمین‌شناسی مسطح شیب‌دار (Geological dipping planar) را در نظر بگیرید که چاه را مطابق شکل قطع کرده باشد. حال اگر به فرم دوبعدی باز شده (Unwrapped 2D Format) آن بنگریم، این پدیده به شکل یک موج سینوسی مشاهده خواهد شد که دره (Trough) این موج سینوسی، جهت شیب (Dip Azimuth) این پدیده را نشان می‌دهد و دامنه (Amplitude) این موج بیانگر میزان شیب این پدیده است (در فرم دوبعدی چاه از آزیموت شمال بازمی‌شود). با توجه به مفاهیم عنوان شده، جهت شیب پدیده

## چکیده Abstract

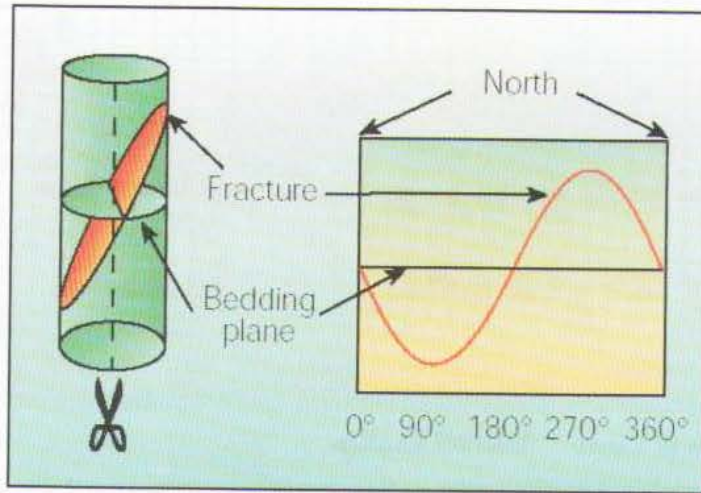
نمودارهای تصویری از (Image logs) نقطه‌نظر رسوب‌گذاری و رسوب‌شناسی، برای شناسایی عوارض زمین‌شناسی، تعیین شیب جهت شیب ساختارها، حصول اطلاعات سنگ‌شناسی (lithology) شکاف‌ها و رخساره‌های رسوبی و تعیین پارامترهای مخزن به کار می‌روند. کاربرد عمده نمودارهای تصویری، شناسایی و تعیین پارامترهای شکستگی‌ها از جمله شیب (dip) امتداد (Strike) میزان بازشدگی (Aperture) باز یا بسته بودن



آشنایی با ژئومکانیک چاه

۱۳۸۳

Vertical Well



شکل ۱- چگونگی نمایش یک شکستگی سطح شیب دار و یک صفحه لایه بندی به فرم واقعی (چاه) و به فرم دوبعدی باز شده روی نمودارهای تصویری

مورد نظر در شکل ۱ به سمت مشرق است. برای محاسبه شیب می توان از رابطه ساده زیر استفاده کرد:

$$\text{Dip} = \tan^{-1} \left( \frac{A}{d} \right)$$

که در این رابطه A دامنه موج سینوسی و d قطر چاه است. به طور کلی، پدیده های

افقی، عمودی و شیب دار در فرم دوبعدی باز شده به ترتیب به شکل افقی، عمودی و موج سینوسی مشاهده خواهند شد. در مورد پدیده های شیب دار، دامنه موج سینوسی با افزایش شیب پدیده، افزایش می یابد.

شکستگی Fracture

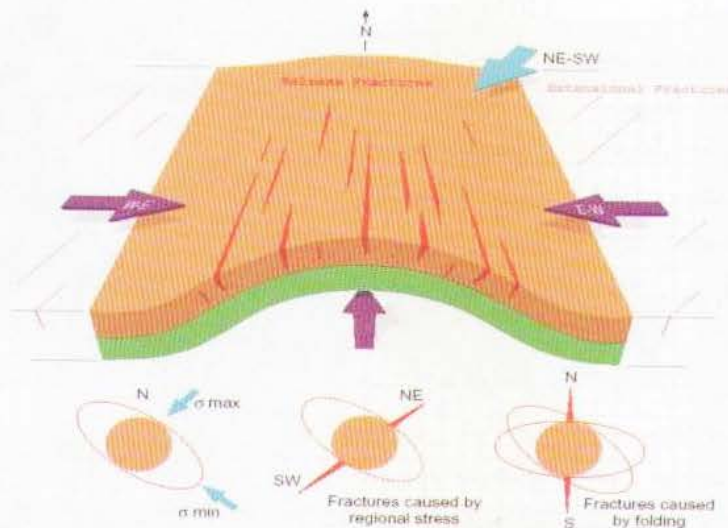
واژه شکستگی به هرگونه گسیختگی (Break) یا ناپوستگی فیزیکی (physical discontinuity) در سنگ

اطلاق می شود که از حد آستانه ای مقاومت سنگ (Rock Strength) گذشته باشد. شکستگی ها، درزها (joints) و گسل ها (Faults) را شامل می شوند که تفاوت این دو دسته در جابه جایی یا سکون صفحات است.

طبقه بندی زایشی شکستگی ها Genetic Classification of Fractures

شکستگی ها بر مبنای فرایند پیدایش به ۳ دسته عمده تقسیم می شوند: شکستگی های طبیعی (Natural Fractures) حاصل از عملیات حفاری (Drilling Induced Fractures) و شکستگی های توسعه یافته (Enhanced Fractures).

شکستگی های طبیعی معمولاً در اثر



شکل ۲- تنش های تکتونیکی محلی سبب بوجود آمدن شکستگی هایی به موزات تنش افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) در جهت NE-SW می شوند اگرچه در سنیخ (Crest) تاقدیس، روند شکستگی ها تحت تاثیر چین خوردگی (Folding) به موزات محور تاقدیس (N-S) قرار دارد. دسته اول به شکستگی های گسترشی و دسته دوم به شکستگی های رهایی معروف هستند.

تنش های تکتونیکی (Tectonic Stresses)

به وجود می آیند. این دسته از شکستگی ها در سازندهای کریناته به وفور یافت می شوند ولی در سازندهای ماسه سنگی زیاد معمول نمی باشند. روند کلی این دسته از شکستگی ها توسط جهت

تنش های تکتونیکی محلی تعیین می شود. (Regional Tectonic Stresses)

در یک تاقدیس مطابق شکل ۲، این شکستگی ها به سه دسته عمده شکستگی های گسترشی (Extentional Fractures) به موازات تنش افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) و به حالت (Maximum Horizontal Stress) نسبتاً عمودی، شکستگی های رهایی (Release Fractures) در راستای محور

تاقدیس و در نهایت چهار دسته شکستگی های برشی (Shear Fractures) تقسیم بندی می شوند. (شکل ۲)

شکستگی های حاصل از عملیات حفاری (Drilling induced Fractures)

معمولاً در اثر عوامل مرتبط با پارامترها و

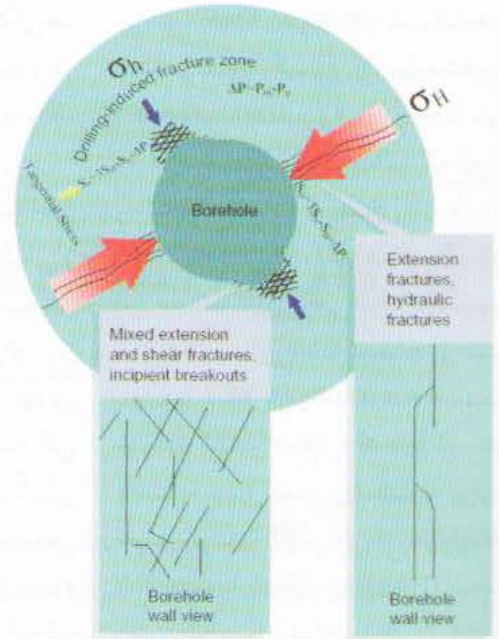
آشرف تولد  
۱۳۸۳

(شکل ۴c و ۴d)

شکستگی‌های برشی (Shear Fractures) دسته دیگری از شکستگی‌ها هستند که مرتبط با عملیات حفاری، مکانیزم ایجاد کاملاً متفاوتی دارند. این دسته از شکستگی‌ها در اثر استفاده از گل حفاری سبک (Light Mud) روی دیواره چاه در محل تلاقی با تنش افقی حداقل ( $\delta_H$ ) معمولاً به صورت دسته‌های متقاطع مشاهده می‌شوند. (شکل ۱۰، ۳ و ۱۱)

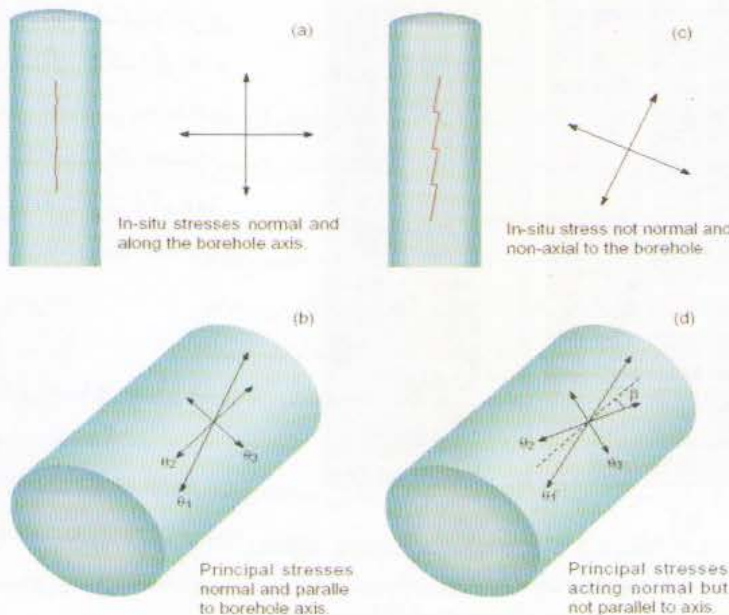
نیروی اعمال شده بر دیواره چاه در تشکیل این نوع شکستگی‌ها از نوع فشاری (Compressive) و جهت آن به موازات تنش افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) است. این دسته از شکستگی‌ها نیمه پایدار هستند و در اثر ناپایداری به مرور زمان، دیواره چاه در این نواحی شروع به ریزش می‌کند که سبب ایجاد دو ناحیه با قطر بیشتر (Enlarged Area) در چاه را فراهم می‌آورد. این پدیده توسط کالیپرهای صوتی (Acoustic Caliper) قابل شناسایی است. (شکل ۱۰) به این نواحی گسیختگی چاه (Borehole Breakout) اطلاق می‌شود که معمولاً در اثر به کار بردن گل حفاری سبک در عملیات حفاری ایجاد و روی دیواره

کششی (Tensile Fracture) هستند و معمولاً به صورت عمودی در راستای تنش افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) به وجود می‌آیند و از نظر مکانیزم تولید و فرم، مشابه شکستگی‌های هیدرولیکی (Hydraulic Fractures) در فرایند ایجاد شکاف‌های هیدرولیکی هستند. (شکل ۹) در صورتی که محور چاه به موازات یکی از انتهای اصلی (Principal Stresses) باشد، این شکستگی‌ها به صورت کاملاً عمودی رویت خواهند شد (شکل ۴a و ۴b). ولی در صورتی که محور چاه نسبت به تنش‌های اصلی حالت مورب (oblique) داشته باشد، این شکستگی‌ها حالت دندانه‌ای (Jagged) به خود می‌گیرند که به آنها شکستگی‌های پله‌ای (En-echelon Fractures) اطلاق می‌شود.



شکل ۳- نمای چاه از بالا و روبرو با ۳ دسته شکستگی، مقدار تنش‌های مماسی (جهت تنش‌های افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) و حداقل ( $\delta_h$ ) شکستگی‌های برشی در اثر گل حفاری سبک و به موازات تنش افقی حداقل در دو طرف دیواره چاه (NW\_SE) شکستگی‌های کششی در ناحیه گل حفاری سنگین روی دیواره چاه در محل تلاقی با تنش افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) (NE\_SW) و شکستگی‌های طبیعی توسعه یافته به موازات شکستگی‌های کششی با حاصل از عملیات حفاری روی دیواره چاه در تمامی نقاط تبصره می‌شوند. شناسایی شکستگی‌های توسعه یافته از شکستگی‌های ناشی از عملیات حفاری گری دشوار است.

ابزار آلات حفاری ایجاد می‌شوند. این شکستگی‌ها در اثر توزیع غیر یکسان و نامساوی تنش‌های مماسی (Tangential or circumferential stresses ( $\delta_p$ )) که بر روی دیواره چاه در محل تلاقی با تنش‌های افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) و تنش‌های افقی حداقل ( $\delta_h$ ) اعمال می‌شوند، موجود می‌آیند. (شکل ۳) از نقطه نظر کمی، مقدار این تنش‌های مماسی بر روی دیواره چاه در محل تلاقی با تنش افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) به کمترین مقدار خود می‌رسد. (شکل ۳) به طور خلاصه عوامل ایجاد شکستگی‌های حاصل از عملیات حفاری عبارتند از: وزن گل بالا، بار روی مته، برداشته شدن وزن لایه‌های بالایی از روی لایه زیرین هنگام حفاری و در نهایت خصوصیات سنگ و تنش‌های در جای محلی (Regional Insitu Stress).



شکل ۴- الگوی شکستگی‌های ناشی از عملیات حفاری وابسته به جهت تنش‌های اصلی نسبت به محور چاه است. این شکستگی‌ها می‌توانند به صورت کاملاً عمودی (a,b) و یا به صورت دندانه‌دار (c,d) باشند.

کشف رویداد  
۱۳۸۴

روغنی (Oil-Based Muds) شرکت های معتبر نمودارگیری از جمله شلمبرژه (Schlumberger) ابزارهای جدید خود را وارد عرصه بازار کرده اند که توانایی رانده شدن در گل های پایه روغنی (Oil-based Muds) را فراهم می سازد. از این دسته از ابزار می توان از تصویرگر گل های پایه روغنی (Oil-Based Mud Imager) محصول شرکت شلمبرژه نام برد که به مراتب دارای دقت عمودی کم تری نسبت به ابزارهای تصویرگر الکتریکی متداول نظیر FMI (Formation Micro Imager) است. چون شکستگی های باز در گل های پایه روغنی رسانایی ناچیزی دارند، این دسته از شکستگی ها در نمودارهای تصویری ابزار جدید، به رنگ روشن در می آیند و بیش از پیش بر مشکلات تفسیر می افزایند.

در صورت وجود شکستگی های بسته یا پر شده توسط کانی های رسوب یافته ثانویه (Closed or Mineralized Fractures)

جریان، هنگامی که ابزار پایین یا مقابل شکستگی قرار دارد فشرده شده و باعث به وجود آمدن یک مقاومت مجازی زیاد شده اما به محض آن که ابزار شکستگی را رد کند، خطوط جریان نسبت به حالت نرمال، حالت واگرایی به خود می گیرند که یک مقاومت مجازی ایجاد می کند. نتیجه این پدیده روی نمودارهای تصویری الکتریکی یک هاله متقارن (Halo-Effect) که به صورت تغییر رنگ ناگهانی از روشن (نارسانا) به تیره (رسانا) یا به عکس را رقم می زند. (شکل ۵ b)

اطراف دیواره چاه، این شکستگی ها دارای رسانایی بالایی هستند و در نمودارهای تصویری الکتریکی به رنگ تیره نمایان می شوند. (شکل ۵ a)

در این نمودارها، متمایز ساختن شکستگی های موازی با لایه های شیلی و استیلولیت ها چندان آسان نیست. در مورد استیلولیت ها (Stylolites) می توان از سطوح ناصاف و هندسی (Serrate) آنها در نمودارهای تصویری الکتریکی کمک گرفت ولی در مورد لایه های شیلی رسانای موازی با شکستگی ها، تشخیص بدون استفاده از نمونه های مغزه (Samples Core) کاری بس دشوار است. در آنالیز نمونه های مغزه پارامترهایی نظیر مورفولوژی (Morphology) سطوح شکستگی، وجود پدیده های حاصل از انحلال و سطوح صاف شکستگی استفاده می شود.

با توجه به آسیب دیدن مخزن در صورت استفاده از گل های پایه آبی برای جایگزین کردن گل های پایه آبی با گل های پایه

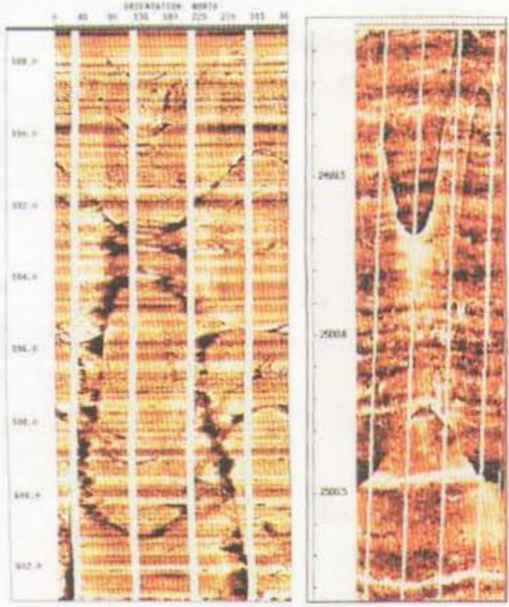
چاه در محل تلاقی باننش افقی حداقل ( $\delta_H$ ) مشاهده می شوند. شکستگی های توسعه یافته (Enhanced Fractures) به آن دسته از شکستگی های طبیعی گفته می شود که از حالت شکستگی های بسته (Closed Fractures) به شکستگی های باز (Open Fractures) تبدیل شده اند. این پدیده در اثر پارامترهای حفاری از قبیل استفاده از گل حفاری سنگین در عملیات حفاری به وجود می آیند. این دسته از شکستگی ها همانند شکستگی های حاصل از عملیات حفاری به صورت نسبتاً عمودی و به موازات تنش افقی حداکثر ( $\delta_H$ ) هستند. با این تفاوت ها به دلیل بازشدگی (Aperture) ناچیز، تاثیر زیادی در تراوایی (Permeability) و تولید از مخزن ندارند ولی شناسایی و متمایز ساختن آنها از شکستگی های حاصل از عملیات حفاری از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار است. (شکل ۱۳)

**ابزارهای تصویرگر الکتریکی Electrical Micro Imaging Tools**

به طور کلی این ابزار، مقدار رسانایی (Conductivity) سازند را اندازه گیری می کند، به دلیل نسبی بودن این مقادیر برای محاسبه بازشدگی شکستگی ها و برگرداندن مقادیر به مقادیر مطلق، از یک نمودار معادل الکتریکی (مقاوتی) کم عمق نظیر (shallow lateral-log) استفاده می شود.

**شکستگی های باز یا بسته؟ Open or Closed Fracture**

به دلیل رانده شدن این ابزار در گل های پایه روغنی (Water-based Muds) در صورت وجود شکستگی های باز در



شکل ۵- نمودارهای تصویری الکتریکی در یک بازه نشان دهنده دو دسته شکستگی باز، رسانا و دارای شیب های مختلف، شکستگی های کم شیب به سمت NNE و دسته دیگر با شیب بیشتر به سمت SSW دارند (۵ a) و نمودارهای تصویری الکتریکی در یک بازه دولومیتی که اثر هاله در آن به وضوح دیده می شود که نشان دهنده بسته بودن یا حضور سیمان ثانویه در بازشدگی شکستگی است (۵ b)

آشنایی با تولید گاز طبیعی در ایران ۱۳۸۳