

## استفاده از نمودارهای درون چاهی در تخمین فشارهای درونی زمین

علی اکبر رحیمی بهار

حسین حسین پورصیامی

[rahimibaharaa@ripi.ir](mailto:rahimibaharaa@ripi.ir)

### چکیده

تعیین فشارهای درونی زمین از مهمترین پارامترهای لازم در طراحی چاههای عمیق و مدرن است. اندازه گیری مستقیم فشار صرفنظر از هزینه آن، مشکلات عملیاتی و فنی زیادی دارد و به همین دلیل در چاههای خیلی محدودی انجام می شود. از اینرو تلاشهای زیادی شده تا فشارهای درونی زمین به طور غیرمستقیم و با استفاده از دیگر اطلاعاتی که فراوانترند پیش بینی یا تخمین زده شود. چون در اکثر قریب به اتفاق چاهها در یک میدان نفتی (یا گازی)، نمودارهای ژئوفیزیکی درون چاهی برداشت می شود، یکی از راهکارهای ارایه شده، استفاده از این نمودارها در تخمین فشار سازندهای درونی زمین است. اصول کلی کار در این روش بدست آوردن یک خط میل طبیعی از نمودارهای وابسته به تخلخل بر حسب عمق است. سپس با استفاده از این خط میل و روابط تجربی ارایه شده، مقدار حدودی فشار در مناطق پر/کم فشار برآورد می گردد. در این مقاله علاوه بر معرفی این روش نتایج حاصل از مطالعه موردی در تخمین فشار سازندی، با استفاده از نمودارهای درون چاهی در یکی از میادین نفتی کشور آورده شده است.

واژه های کلیدی: فشار سازند، خط میل طبیعی، نمودارهای درون چاهی، منطقه پرفشار

### Geopressure Evaluation via Geophysical Well Logs

Ali Akbar Rahimi Bahar-Hossein Hosseinpour Siami

#### ABSTRACT

Estimation formation pressure is one of the most important parameters in designing advance deep wells. Directly formation pressure measuring is expensive and possible only after penetrating it. Therefore it has been tried greatly for measuring formation pressure indirectly. Estimation formation pressure from well logs in an oil field has been delivered as a good method. Determination of normal trend line is base of this method. After constructing normal trend line in an interested field we can predict and estimate formation pressure in overpressure zone with using an empirical correlation. This paper discusses in detail about it.

**Keywords:** Formation pressure, normal trend line, geophysical logs, overpressure zone

## ۱. مقدمه

فشار سازند (منفذی) از فشارهای درونی زمین و مربوط به سیالات موجود در منافذ سنگها است. این سیال که معمولاً آب شور دریا است همراه با ته نشینی رسوبات و در بین منافذ آنها دفن می شود. در حالت طبیعی فشار منفذی برابر با فشار ناشی از وزن سیال یا همان فشار هیدروستاتیک است که فقط به عمق و وزن مخصوص سیال بستگی دارد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$P = \rho_f gH \quad (1)$$

با جایگزینی ضرایب ثابت و تبدیلی، فشار هیدروستاتیک را می توان به صورت زیر نوشت: [۱]

$$P = 0.0519 .W .D \quad (2)$$

که در آن:

P برابر است با فشار هیدروستاتیک بر حسب (psi)

W برابر است با چگالی آب بر حسب (lb/gal)

D برابر است با عمق بر حسب (ft)

وقتی که فشار سیال معادل فشار هیدروستاتیکی است، سازند دارای فشار طبیعی (عادی) است؛ در این حالت شیب فشار سازند<sup>۱</sup> (P/H) ثابت است که معمولاً برحسب (psi/ft) بیان می شود. مقدار این شیب بسته به میزان شوری آب در سازندهای درونی زمین از ۰,۴۳۳ تا ۰,۵۱۹ (psi/ft) تغییر می کند [۱]. لذا شناخت محیط رسوبی ناحیه مورد مطالعه در برآورد شیب فشار هیدروستاتیکی منطقه بسیار مهم است. به عنوان نمونه شیب فشار هیدروستاتیک در مناطق مختلف آمریکا بین ۰,۴۳۳ تا ۰,۴۶۵ (psi/ft) گزارش شده است [۲].

بنابر دلایل مختلفی از جمله؛ تراکم غیر یکنواخت رسوبات بویژه هنگام رسوبگذاری سریع موادی با نفوذپذیری کم (مثل رسها)، تغییرات حجمی سیال یا خمیره سنگ در اثر تغییر دما، پدیده دیاژنتیک و یا عوامل شیمیایی، اختلاف چگالی و چند فازی بودن سیالات درون زمین (آب، نفت و گاز)، عوامل تکتونیکی، فشار اسمزی و غیره ممکن است فشار منفذی کمتر یا بیشتر از فشار هیدروستاتیک گردد [۳].

مشاهدات تجربی نشان داده است که در شرایط طبیعی با افزایش عمق، رسوبات متراکم تر شده و از مقدار تخلخل آنها کاسته می گردد؛ به طوریکه اگر مقدار تخلخل بر حسب عمق رسم شود یک روند کاهشی را نشان می دهد. اگر این نمودار بر روی یک کاغذ نیمه لگاریتمی ترسیم شود معمولاً یک خط راست شیبدار بدست می آید که در اصطلاح به آن خط میل طبیعی<sup>۲</sup> می گویند [۱].

در شرایطی که رسوبگذاری سریع اتفاق افتاده و رسوبات به ویژه آنهايي که نفوذپذیری بسیار کمی دارند (مثل شیل ها) فرصت کافی برای تراکم نداشته باشند؛ روند تغییر تخلخل از روند طبیعی ذکر شده در بالا انحراف دارد. این موضوع که به فرضیه تراکم نامتعادل<sup>۳</sup> معروف است [۳] پایه و اساس روش های پیش بینی و شناسایی مناطق پر (یا کم) فشار و تخمین غیر مستقیم فشار منفذی در این مناطق است. بر اساس مشاهدات تجربی و کارهای انجام شده، ملاحظه شده که تغییر پارامترهای حفاری مثل وزن گل، سرعت و نرخ نفوذ مت، تغییر سرعت امواج صوتی (لرزه ای) و نمودارهای درون چاهی وابسته به تخلخل مثل زمان عبور صوت، چگالی و مقاومت الکتریکی نیز رفتار مشابه ای را نشان می دهند. لذا تلاشهای زیادی صورت گرفته و روابط تجربی مختلفی ارایه شده تا از اختلاف این متغیرها در دو وضعیت شرایط عادی و غیر عادی بتوان مناطق پر فشار را شناسایی و مقدار فشار منفذی را در آنجا تخمین زد.

<sup>1</sup> Formation pressure gradient

<sup>2</sup> Normal trend line

<sup>3</sup> Unequilibrium Compaction

## ۲. شناسایی مناطق پرفشار

به طور طبیعی با افزایش عمق، میزان فشار روباره (وزن رسوبات فوقانی) نیز افزایش می یابد که برای جبران آن از میزان تخلخل سنگها کم شده و سطح تماس دانه ها در سنگ بیشتر می شود اما چون مایعات عموماً تراکم ناپذیرند، با کاهش منافذ سنگ (در اثر ازدیاد فشار) مایعات از منافذ سنگ خارج شده و در جهت کاهش فشار حرکت می کنند. اگر مسیر حرکت سیال توسط یک لایه غیر قابل نفوذ مسدود گردد فشار سیال به طور غیر طبیعی افزایش یافته و یک منطقه پرفشار در آن ناحیه بوجود می آید [۴].

در محیط متخلخل اشباع از آب و تراکم پذیر، نسبت بین فشارهای درونی به شکل زیر است [۲]:

$$S = \sigma_z + P \quad (۳)$$

که در آن:

$S$  برابر است با فشار روباره (وزن رسوبات فوقانی)

$\sigma_z$  برابر است با تنش قائم موثر (فشار وارد بر خمیره سنگ)

$P$  برابر است با فشار آب (سیال) داخل سنگ

فشار قائم ناشی از وزن رسوبات در عمق  $D$  را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$S = \rho g D \quad (۴)$$

یا با توجه به تغییرات چگالی با عمق می توان از رابطه دقیق تر ذیل استفاده کرد:

$$S = \int_0^D \rho_b g dh \quad (۵)$$

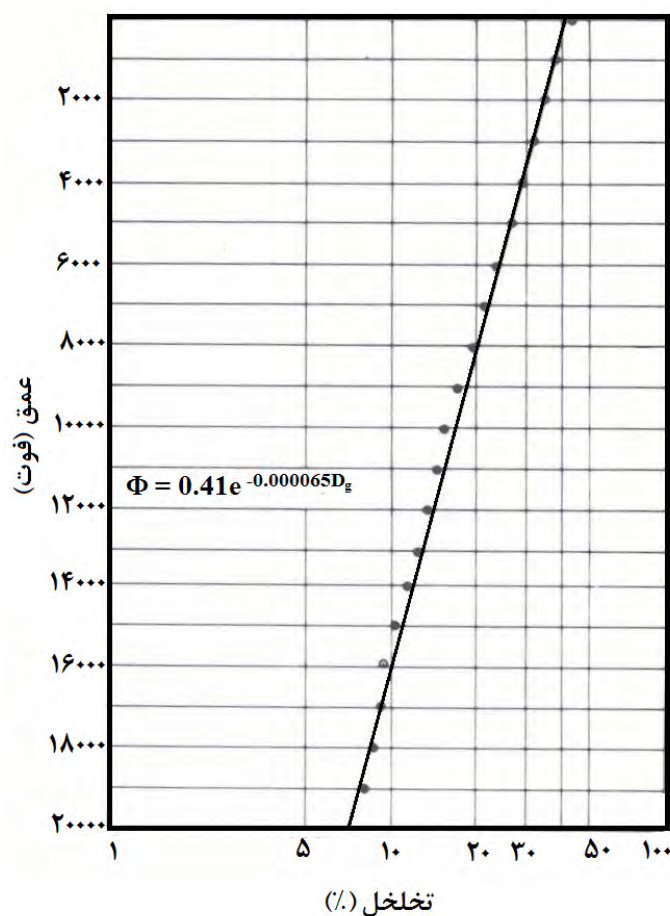
که  $g$  مقدار شتاب جاذب زمین،  $\rho$  چگالی متوسط،  $\rho_b$  چگالی کلی سنگها و  $D$  عمق مورد نظر است.

در شرایط طبیعی با افزایش عمق از مقدار تخلخل کاسته می گردد. این تغییر را می توان با رابطه زیر نشان داد:

$$\phi = \phi_0 e^{-kD} \quad (۶)$$

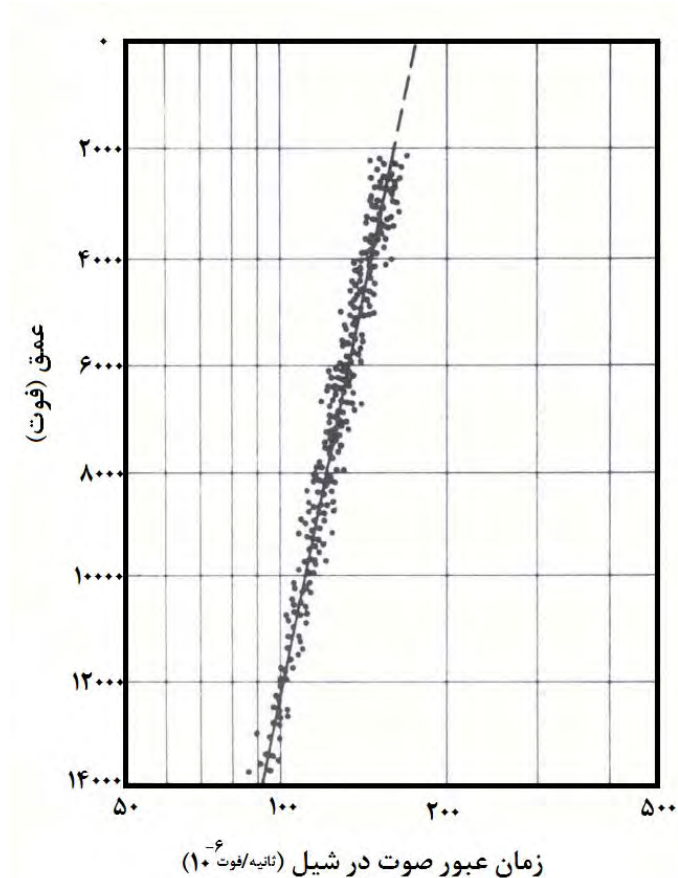
که در آن؛  $\phi_0$  مقدار تخلخل در سطح (زمین) و  $k$  یک ضریب ثابت است که بستگی به منطقه مورد مطالعه دارد [۵]. به

عنوان نمونه در شکل ۱، تغییرات تخلخل بر حسب عمق در نواحی خلیج کاست در آمریکا را می توان ملاحظه نمود.



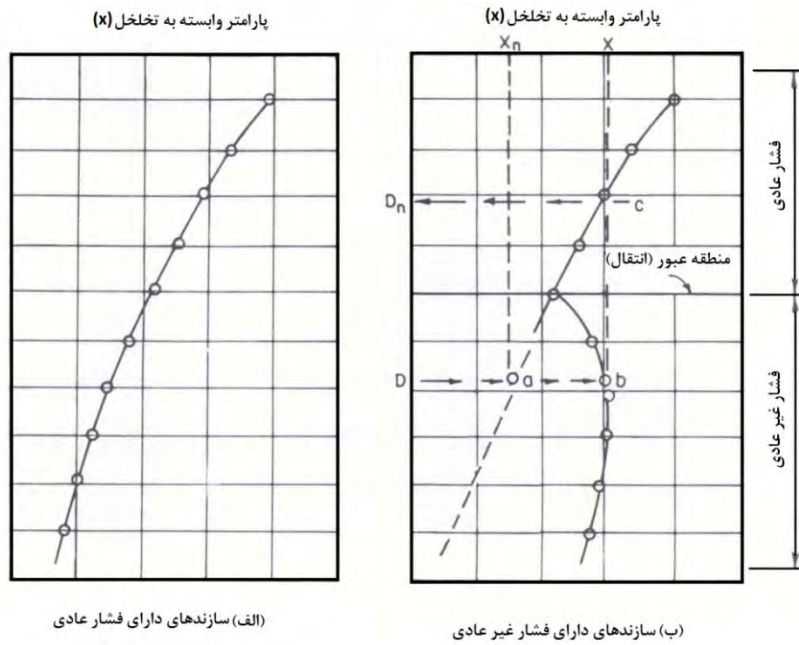
شکل ۱- تغییرات مقدار تخلخل سازند بر حسب عمق در سواحل خلیج کاست آمریکا [۲]

این رابطه خط میل طبیعی تخلخل را نشان می دهد. در مناطق دارای فشار طبیعی (فشار هیدروستاتیکی) یک روند طبیعی کاهش تخلخل با عمق را می توان ملاحظه کرد. اما در مناطق دارای فشار غیر عادی، نقاط، خارج از این روند قرار می گیرند که بسته به وضع قرارگیری آنها نسبت به خط میل طبیعی، نشان دهنده مناطق پرفشار یا کم فشار هستند. چنین روندی در نمودارهای وابسته به تخلخل نیز قابل مشاهده است؛ به این معنی که تغییرات این نمودارها بر حسب عمق روندی را از خود نشان می دهند که معمولاً (در یک مقیاس نیمه لگاریتمی) خطی است. به عنوان نمونه می توان به تغییرات زمان عبور صوت در شیل ها بر حسب عمق در منطقه لویزیانای آمریکا اشاره کرد (شکل ۲).

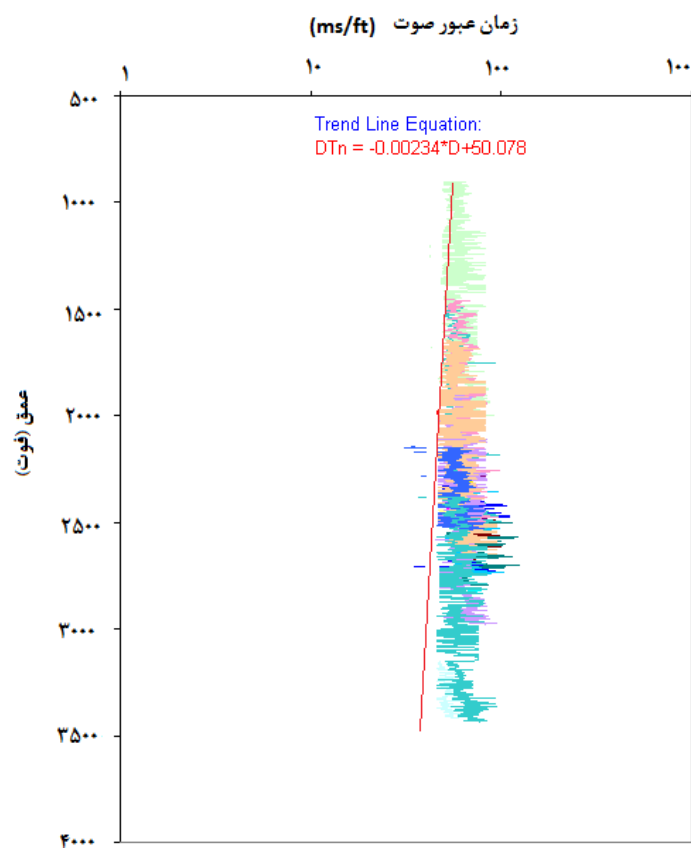


شکل ۲- مقادیر زمان عبور صوت در شیل ها بر حسب عمق در شرایط فشار طبیعی سازند در منطقه لویزیانای آمریکا [۲]

بنابراین با بررسی تغییرات این نمودارها بر حسب عمق و شناسایی روند طبیعی، می توان مناطق دارای فشار غیر طبیعی را شناسایی نمود. در این مناطق تخلخل بیشتر از حد مورد انتظار است و در نتیجه نمودارهای وابسته به تخلخل از روند طبیعی، انحراف نشان می دهند. این موضوع در شکل ۳ به صورت شماتیک نشان داده شده است. روند تغییرات نمودار صوتی در لایه های آهکی آرژیلی در منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. چنانکه دیده می شود یک روند طبیعی کاهشی متناسب با عمق در قسمت بالا دیده می شود. ولی در بخش پایینی انحرافی از این روند مشاهده می شود. این بخش منطبق بر زون پر فشار (مخزن هیدروکربنی) در این ناحیه است.



شکل ۳- رابطه پارامتر وابسته به تخلخل بر حسب عمق در دو حالت فشار طبیعی و غیر طبیعی [۲]



شکل ۴ تعیین روند خطی طبیعی در میدان مورد مطالعه

### ۳. استفاده از نمودارهای درون چاهی در تخمین فشار منفذی

روشهایی تجربی برای تخمین فشار سازندی با استفاده از پارامترهای وابسته به تخلخل که در نمودارگیری از چاه ثبت می شود، ابداع شده است. از جمله پارامترهای وابسته به تخلخل می توان به مدت زمان عبور صوت از سازند (DT)، هدایت یا مقاومت الکتریکی (Rt یا Ct) و چگالی ( $\rho_b$ ) اشاره کرد. البته چون زمان عبور صوت کمتر از بقیه پارامترها تحت تاثیر شرایط محیطی قرار می گیرد لذا نتایج متکی به آن از دقت بیشتری برخوردار است و به همین دلیل در تخمین فشار منفذی کاربرد بیشتری دارد. چون تراکم پذیری در شیلها نمود و ظهور بازترتی نسبت به دیگر رخساره های رسوبی دارد در روابط ارائه شده، از مقادیر پارامتر وابسته به تخلخل در لایه های شیلی برای تخمین فشار منفذی استفاده می شود. البته از این روابط برای سازندهایی که تا حدی از قابلیت تراکم پذیری برخوردارند (مثل آهک های شیلی یا آرژیلی) نیز می توان استفاده کرد [۱].

برای تشخیص لایه های شیلی از معیارهای زیر می توان استفاده کرد.

حداقل مقدار در نمودار SP

حداکثر مقدار در نمودار GR

حداکثر مقدار هدایت (حداقل مقاومت) در نمودارهای الکتریکی

حداکثر مقدار در نمودار صوتی DT

معمولاً یافتن تعداد داده کافی (تعدد لایه های شیلی) در یک چاه برای شناسایی روند طبیعی پارامتر وابسته به تخلخل در یک منطقه، مشکل است. لذا سعی می شود تا با استفاده از اطلاعات تمام چاههای موجود در منطقه و یا مناطق همجوار مشابه، این روند بدست آید.

در مطالعه ی موردی که بر روی یکی از میادین کشور انجام دادیم، مقادیر نمودار صوتی در لایه های آرژیلی مشابه (بدلیل نبود سازندهای شیلی کافی در منطقه) از سطح زمین تا انتهای چاهها بر حسب عمق ترسیم و بهترین خط ممکن بر آن برآش شد. به این ترتیب خط میل طبیعی نمودار زمان عبور صوت برای سازندهای آرژیلی ترسیم و معادله آن بدست آمد. شکل (۴) نتیجه کار را نشان می دهد. برای تخمین فشار منفذی از روش تجربی ارائه شده توسط دکتر بن ایتون<sup>۱</sup> استفاده شد. در این روش، از نمودار الکتریکی به عنوان شاخص و یک ضریب تجربی ثابت استفاده شده است. این روش برای نمودارهای دیگر از جمله زمان عبور صوت نیز بسط داده شده است [۶]. رابطه توسعه یافته برای زمان عبور صوت عبارت است از [۱]:

$$P = S - (S - P_n) \left[ \frac{Dt_n}{Dt_o} \right]^3 \quad (7)$$

که در آن S فشار روباره،  $P_n$  فشار هیدروستاتیک در منطقه،  $Dt_n$  و  $Dt_o$  بترتیب مقدار واقعی و طبیعی زمان عبور صوت در یک عمق مشخص است.

برای محاسبه فشار روباره از نمودار چگالی استفاده شد. بدلیل نبود نمودار چگالی در اعماق نزدیک به سطح ما از نمودار صوتی برای تخمین چگالی بر اساس رابطه زیر استفاده کردیم:

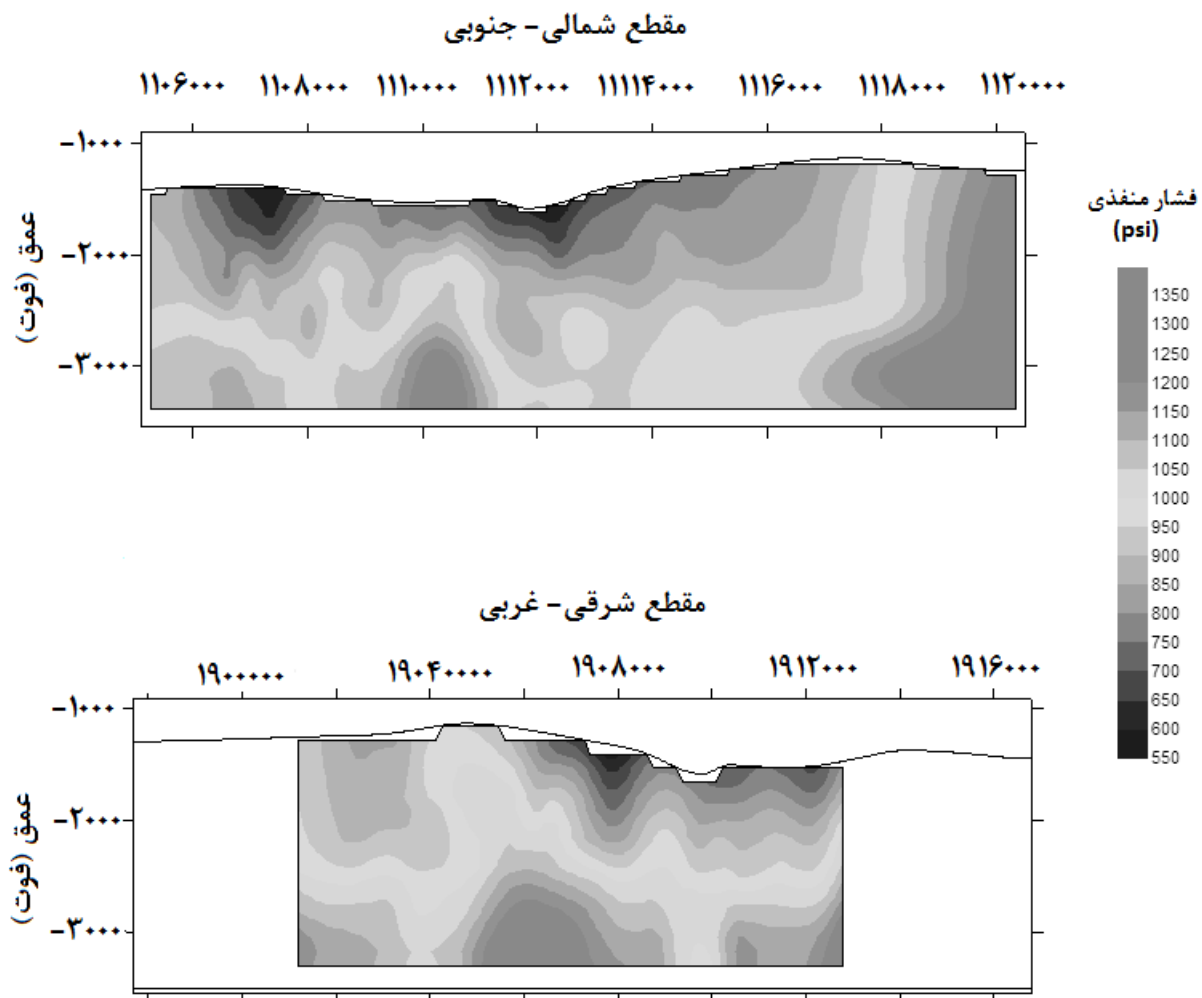
$$\rho_b = 2.75 - \left[ 2.11 \times \left( \frac{Dt - Dt_{ma}}{Dt + Dt_{fl}} \right) \right] \quad (8)$$

که در آن  $\rho_b$  چگالی، Dt زمان عبور صوت،  $Dt_{ma}$  و  $Dt_{fl}$  زمان عبور صوت از خمیره سنگ و سیال است. برای محاسبه فشار هیدروستاتیک در ناحیه نیز بر اساس شوری متوسط آب در سازندهای مختلف منطقه مورد مطالعه، مقدار ۰٫۴۷ (psi/ft) را به عنوان شیب متوسط فشار هیدروستاتیک در نظر گرفتیم.

بر اساس رابطه بدست آمده از روند طبیعی نمودار صوتی (شکل ۴) و رابطه ایتون مقدار فشار منفذی در هر نقطه از منطقه پرفشار (مخرن نفتی) محاسبه شد. با توجه به وجود نمودار صوتی در اکثر چاهها، فشار تخمینی در نقاط عمقی مختلف

<sup>۱</sup> Ben Eaton

مخزن در تمامی چاهها محاسبه و یک الگوی فشاری از مخزن ساخته شد. شکل ۵ مقاطع طولی و عرضی این الگوی فشاری را در منطقه مخزنی میدان مورد مطالعه به تصویر کشیده است.



شکل ۵ تغییرات فشار منفذی در مخزن در دو مقطع شمالی-جنوبی و شرقی-غربی [۱]

#### ۴. جمع بندی و نتیجه گیری

علاوه بر اندازه گیری مستقیم فشار سازندهای درونی زمین که بدلیل هزینه های مالی و عملیاتی کمتر صورت می گیرد روشهایی توسعه داده شده که با استفاده از سایر اطلاعات نیز بتوان به تخمینی مناسب از میزان فشار سازندهای درونی زمین دست یافت. یکی از این روشها استفاده از نمودارهای درون چاهی برداشت شده در اکثر چاههای میدانی هیدروکربوری است. مبنای این روش نظریه تراکم نامتعادل رسوبات، بویژه رسوبات شیلی است. با بررسی تغییرات تخلخل این رسوبات بر حسب عمق می توان شناختی از وضعیت فشاری سازندها (طبیعی یا غیر طبیعی بودن) بدست آورد. روند تغییر تخلخل در حالت عادی کاهشی است لذا می توان یک خط را (در مقیاس نیمه لگاریتمی) بر آن برازش کرد. اما در منطقه ای که فشار غیر عادی است تغییرات تخلخل از روند طبیعی منحرف می شود. نقطه تغییر روند مرز ناحیه پراکم فشار را نشان می دهد. ثابت شده که تغییر پارامتر وابسته به تخلخل در هر نقطه از ناحیه فشاری غیر عادی نسبت به روند طبیعی با میزان فشار در آن نقطه رابطه دارد. یکی از روابط تجربی ارایه شده در این مورد، رابطه ایتون است.



در این مقاله به عنوان یک مطالعه موردی، ما از نمودارهای درون چاهی زمان عبور صوت برای بررسی و تخمین فشار در سازند های دورنی زمین (به ویژه سازند مخزنی) در یکی از میادین نفتی کشور استفاده کردیم. ابتدا با ترسیم مقادیر زمان عبور صوت در لایه های آرژیلی (آهکی شیلی)، بر حسب عمق در یک مقیاس نیمه لگاریتمی خط میل طبیعی تغییرات را بدست آورده و سپس با استفاده از رابطه ایتون مقدار فشار در اعماق مختلف محاسبه شده است. این کار در همه چاههای موجود در منطقه که دارای نمودار زمان عبور صوت بودند انجام گرفت و در نهایت با کمک روش زمین آمار کنتورهای فشار دورنی زمین در ناحیه مورد مطالعه ترسیم و یک الگوی فشاری تهیه گردید.

## منابع

- [۱]- حسین حسین پور صیامی و علی اکبر رحیمی بهار، مبانی ارزیابی فشار سازند، انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت، زمستان ۱۳۸۹
- [2]- Adam T.Bourgoyne, Keith K.Millheim, Martin E.Chenevert, Young, F.SApplied Drilling Engineering, U.S.A Society of petroleum engineers 1991 Chapter 6, P246-258
- [3]- Mark J.O and Richard E.Swarbin, Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basin, AAPG bulletin 81, No.6, June 1997, P1023-1041
- [4]- Johns Bradley Abnormal formation pressure, AAPG bulletin 59, No.6 June 1975,P953-973
- [5]- W.R.Matthews and John Kelly How to predict formation pressure and fracture pressure gradient, the oil and gas journal Feb 1967, P92-106
- [6]- R.A.Lane & K.A.Macpherson A review of geopressure evaluation from well logs\_ Louisiana Gulf Coast,Journal of petroleum technology Sep 1976, P963-971