

# مدل سازی فشار منغذی مخزن هیدروکربنی در جنوب غرب ایران با استفاده از داده‌های چاه پیمایی

پژوهش نفت

سال بیست و سوم

شماره ۷۴

صفحه، ۸۶-۷۲ ۱۳۹۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۵/۱۶

حسین پورصیامی

پژوهشگاه صنعت نفت، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشکده

مطالعات مخازن و توسعه میادین

poursiamih@ripi.ir

آزمون t-استیودنت نشان داد که نمودارهای تخمینی دقت و صحت قابل قبولی دارند. پس از تخمین نمودار زمان عبور صوت، ابتدا فشار منغذی و گرادیان آن با استفاده از مدل ایتون محاسبه شد و سپس در یکی از چاه‌ها نمودار فشار منغذی به دست آمده با داده‌های فشار منغذی اندازه‌گیری شده، مقایسه شدند. این مقایسه نشان داد که نمودار فشار منغذی به دست آمده برای این مخزن برآورد قابل قبولی از فشار منغذی واقعی است. براین اساس مدل فشار منغذی مخزن با استفاده از روش زمین‌آمار برای کل میدان تهیه شد. بدیهی است عدم قطعیت مدل در مناطقی که تعداد چاه کمتری دارد، بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: فشار منغذی، نمودارهای پتروفیزیکی، مدل ایتون، شبکه عصبی مصنوعی

## مقدمه

در صنعت نفت داده‌های فشار برای برنامه‌ریزی حفاری و توسعه میادین در مناطقی که به لحاظ فشارهای غیرعادی زمین دارای ریسک زیادی هستند، اهمیت فراوانی دارد.

## چکیده

یکی از مهم‌ترین عملیات اجرایی برای توصیف و شبیه‌سازی مخازن هیدروکربنی، عملیات نمودارگیری است. در اغلب چاه‌های نفتی/گازی برای تعیین خواص مخزنی مانند تخلخل، نفوذپذیری و لیتولوژی، از نمودارهای زمان عبور صوت، چگالی و پرتو گاما که به داخل چاه‌ها رانده می‌شوند. همچنین از این نمودارها می‌توان برای محاسبه و ساخت مدل فشار منغذی استفاده کرد که موضوع اصلی این مقاله می‌باشد. به دلیل هزینه نسبتاً زیاد و اطلاعات موضعی ابزارهای اندازه‌گیری مستقیم فشار منغذی، استفاده از روش‌های کم هزینه‌تر که طیف گسترده و پیوسته‌ای از داده‌های فشار منغذی را دارند، مقرون به صرفه است. در این مقاله ابتدا روش‌های محاسبه فشار منغذی با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی و سپس نمونه‌ای واقعی از تخمین و مدل‌سازی فشار منغذی در یک مخزن هیدروکربنی واقع در جنوب غرب ایران ارائه می‌شود. به دلیل سن زیاد چاه‌های حفاری شده، برخی از چاه‌ها فاقد نمودار زمان عبور صوت بودند، لذا این نمودارها با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی تخمین زده شدند.

به دلیل چگالی و ارتفاع عمودی ستون سیال به وجود می آید. در مطالعات نفتی، فشار هیدرواستاتیک با رابطه ۲ تعیین می شود [۳]:

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

P مقدار فشار هیدرواستاتیک در عمق تحقیق بر حسب (psi)، چگالی آب بر حسب (lb/gal) و D عمق عمودی بر حسب فوت (ft) است. در سیستم SI فشار هیدرواستاتیک با رابطه (۳) تعیین می شود [۳].

$$P = 0.0098 \times W \times D \quad (3)$$

در این رابطه P مقدار فشار هیدرواستاتیک در عمق تحقیق بر حسب (kPa)، W چگالی آب بر حسب (kg/m<sup>3</sup>) و D عمق عمودی بر حسب m است [۳].

در زیر سطح آب زیرزمینی یا سطح آب دریا، منافذ سنگها خالی نبوده و حاوی سیالات مختلف هستند. در بعضی موارد این منافذ با نفت، گاز یا میعانات پر می شوند، ولی رایج ترین سیال منفذی، آب است. فشار منفذی که آن را فشار سازندی نیز می نامند، در شرایط طبیعی، فشار استاتیک است که به وسیله سیالات منفذی در یک سنگ اعمال می شود و تنها مؤلفه های به وجود آورنده آن چگالی سیال و ارتفاع ستون سیال است. در ضمن دانه های سنگی در داخل این سیستم هیچ اثری بر روی فشار اعمال شده توسط سیالات منفذی ندارند [۳].

به طور کلی آب همواره ارتفاع خودش را پیدا می کند و فشاری را بدون در نظر گرفتن شکل هندسه ظرف اعمال می نماید به همین علت می توان از ارتباطات داخلی و پیچیده تشکیل دهنده تخلخل مؤثر یک سنگ صرف نظر کرد. از طرفی به دلیل حرکت آرام و کند آب عبوری از میان فضاهای خالی یک سازند، می توان از توان افزایشی فشار ناشی از لزجت آب صرف نظر و سیستم را پایدار فرض کرد [۳].

برای جلوگیری از خروج سیالات منفذی از چاه صرف نظر از آن که در کجا حفر شده باشد، فشار هیدرواستاتیک گل حفاری باید در تعادل با فشار هیدرواستاتیک سیال منفذی باشد. طبق تعریف، گرادیان فشار به تغییرات فشار در عمق گفته می شود و واحد آن در صنعت نفت پوند نیرو بر اینچ مربع بر فوت (lb/in<sup>2</sup>/ft = psi/ft) است.

این اطلاعات برای زمین شناسان با هدف ارزیابی صحیح روند شکستگی ها، گسل ها و دینامیک مهاجرت هیدروکربن و برای مهندسان به لحاظ برنامه ریزی چاه، طراحی لوله گذاری و گل حفاری بسیار مفید هستند. اثر این برنامه ریزی ها نیز به نوبه خود در کاهش هزینه های حفاری، افزایش ایمنی چاه و حفظ محیط زیست حائز اهمیت می باشد. بنابراین اطلاع از فشار منفذی برای طراحی، کنترل و ایمنی چاه ها، کاهش و حذف مشکلات عملیات حفاری و کاهش ریسک فنی و اقتصادی برنامه توسعه میداین ضروری است [۱]. تاکنون روش ها و مدل های زیادی برای تخمین فشار منفذی ارائه شده که صرف نظر از دقت آنها، میزان اهمیت دستیابی به فشار منفذی را نشان می دهد. در مقاله حاضر هدف عبارت است از تعیین فشار منفذی و گرادیان آن در یک مخزن نفتی با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی در یکی از میداین جنوب غربی ایران که آن رابه ختصار میدان الف می نامیم.

### فشار منفذی

در هر نقطه از عمق زمین و در جهات مختلف، فشاری وجود دارد که ناشی از وزن طبقات فوقانی بوده و تابعی از عوامل مختلف مانند نوع و چگالی سنگ های تشکیل دهنده زمین، میزان تخلخل، نوع و چگالی سیال پرکننده منافذ سنگها، اثرات دیاژنتیک، عوامل تکتونیکی و غیره است. این فشار شامل فشار لیتواستاتیک و فشار هیدرواستاتیک است. فشار لیتواستاتیک حاصل وزن ستون سنگی طبقات فوقانی و فشار هیدرواستاتیک نتیجه وزن ستون سیال پرکننده فضا خالی سنگها است. این فشارها تابعی از وزن مخصوص سنگها و سیالات درون منافذ سنگها بوده و متناسب با عمق افزایش می یابند. مجموع این دو فشار برابر با فشار روباره است که با رابطه ۱ بیان می شود [۲]:

$$S = 27.031 \times \rho_b \times D \quad (1)$$

S مقدار فشار روباره در عمق تحقیق بر حسب پوند بر اینچ مربع (psi)،  $\rho_b$  چگالی بالک بر حسب پوند بر فوت مکعب (lb/ft<sup>3</sup>) و D عمق عمودی بر حسب فوت (ft) است [۲]. فشار هیدرواستاتیک فشاری است که توسط ستونی از آب در هر نقطه از آن اعمال می شود. این فشار

سازند را اندازه‌گیری می‌کند. در این ابزار چون فاصله بین فرستنده‌ها و گیرنده‌ها ثابت است، زمان به عنوان تنها متغیر و به شکل زمان عبور صوت بر حسب میکروثانیه بر فوت اندازه‌گیری می‌شود.

سرعت موج فشاری تقریباً دو برابر دیگر امواج است. زمان مورد نیاز برای سیر موج فشاری در یک مسافت واحد بر حسب ثانیه برابر است با [۳ و ۵-۷]:

$$T_c = \sqrt{\frac{\rho(1+\mu)}{3M_b(1-\mu)}} \quad (4)$$

$T_c =$  زمان

$\rho =$  چگالی مواد

$M_b =$  مدول بالک کشسانی (فشاری)

$\mu =$  ضریب پواسون

بنابراین زمان عبور صوت بستگی به چگالی و ضریب کشسانی مواد دارد. مواد مختلف، چگالی و ضرایب کشسانی متفاوتی دارند. لذا برای تعیین خواص ویژه آنها اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مورد نیاز است. با معلوم بودن این خواص، زمان عبور صوت برای یک سنگ خاص تابعی از اندازه تخلخل آن است. این تخلخل از رابطه ۵ قابل محاسبه است [۸]:

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m} \quad (5)$$

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، رایج‌ترین سیال منفذی، آب است و گرادیان آن تابع چگالی آب موجود در منافذ بوده و از منطقه‌ای به منطقه دیگر تغییر می‌کند. چگالی آب منفذی می‌تواند از کمی شور (۸/۵۱ lb/gal) تا اشباع از نمک (۹/۹ lb/gal) تغییر کند. چون درجه شوری با عمق و نوع سازند تغییر می‌کند، مقدار متوسطی را نمی‌توان برای تمام اعماق ارائه داد [۴].

قبل از حفر یک چاه، مقدار گرادیان فشار منفذی طبیعی باید تعیین شود. این گرادیان را می‌توان از روی اندازه‌گیری‌های چگالی واقعی، اندازه‌گیری‌های مستقیم فشار، تعبیر و تفسیر نمودار SP و مقاومت‌ویژه و یا با فرض اینکه چگالی آب منفذی در مناطق دریایی، همان چگالی آب دریا و در خشکی معادل آب شیرین است، تعیین نمود. جدول ۱ گرادیان فشار هیدرواستاتیک برای انواع آب با درجه شوری مختلف و جدول ۲ گرادیان فشار منفذی طبیعی برای برخی از نواحی جغرافیایی را نشان می‌دهد [۳ و ۴].

### کاربرد نمودارهای درون‌چاهی در تعیین فشار

#### نمودار زمان عبور صوت

ابزار نمودارگیری صوتی، زمان عبور صوت ( $\Delta t$ ) از میان

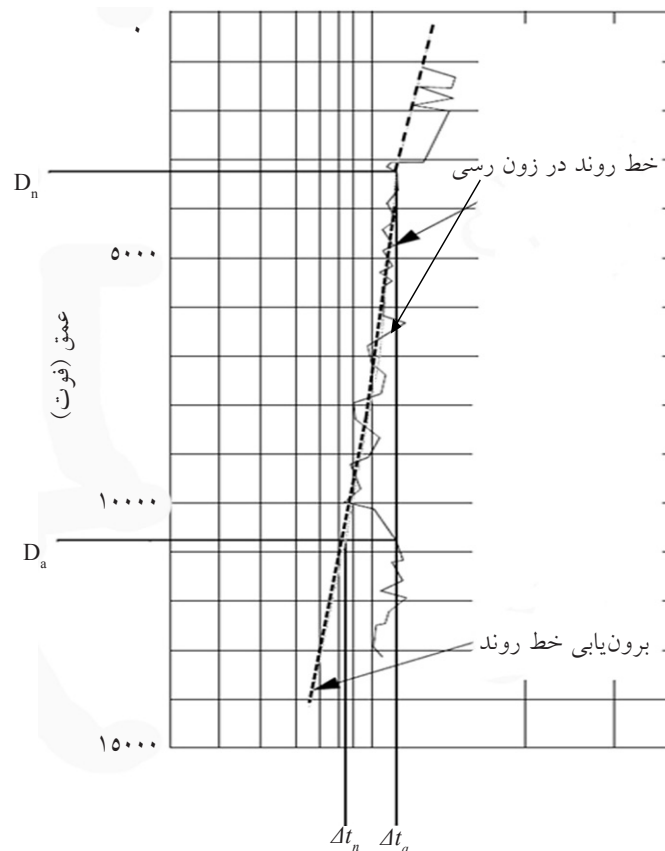
جدول ۱- تغییر فشار هیدرواستاتیک با درجه شوری آب سازند [۳]

وزن گل معادل (lb/gal)	گرادیان فشار طبیعی (psi/ft)	NaCl (ppm)	درجه شوری کلراید (mg/lit)	نوع آب سازندی
۸/۳۴	۰/۴۳۳	۰	۰	آب شیرین
۸/۵۵	۰/۴۴۴	۱۰۰۶۲	۶۰۹۸	آب شور
۸/۶۳	۰/۴۴۸	۵۴۴۵۰	۳۳۰۰۰	آب دریا
۸/۹۲	۰/۴۶۴	۱۹۷۲۲۸	۶۴۹۸۷	آب نمک
۹/۴۳	۰/۴۹۰	۲۰۳۹۴۶	۱۲۳۶۰۴	گرادیان نمونه در مناطق دریایی
۹/۹۹	۰/۵۱۹	۳۱۶۱۴۰	۱۹۱۶۰۰	آب دریای اشباع شده

جدول ۲- گرادیان فشار منفذی طبیعی در برخی از مناطق جغرافیایی [۳]

گرادیان فشار منفذی		ناحیه
(kPa/m)	(psi/ft)	
۹/۷۷	۰/۴۳۹	کالیفرنیا
۱۰/۳۵	۰/۴۶۵	خلیج مکزیک
۹/۸۴	۰/۴۴۲	مالزی
۱۰/۰۶	۰/۴۵۲	دریای شمال
۹/۸۴	۰/۴۴۲	غرب آفریقا

تئوری ارزیابی کمی فشار درونی زمین با استفاده از ابزار صوتی، مستقل از مقدار تخلخل است. از این رو نمودار صوتی می تواند شاخص خوبی از فشار درونی زمین باشد. یعنی افزایش زمان عبور در صوت در برابر زون رسی تابعی از تغییر تخلخل یا افزایش گرادیان منفذی است. چون رس ها با افزایش عمق تحکیم می یابند، زمان عبور صوت نیز با عمق کاهش می یابد [۳، ۹ و ۱۰]. در نتیجه در این حالت نمودار زمان عبور صوت رس، روند خطی و طبیعی را با عمق نشان می دهد. در به کارگیری روش عمق معادل<sup>۱</sup> می توان با استفاده از نمودار زمان عبور صوت، فشار منفذی را محاسبه کرد (شکل ۱). در این روش پس از تعیین خط روند طبیعی در یک زون رسی نزدیک به عمق تحقیق، این روند تا عمق تحقیق برون یابی می شود. پس از این مرحله، فشار روباره را با استفاده از نمودار چگالی در عمق محاسبه شده و یا با استفاده از داده های معلوم منطقه ای، می توان تعیین کرد و سپس فشار منفذی با استفاده از رابطه ۶ به دست می آید [۳ و ۱۱].



شکل ۱- روش عمق معادل در تعیین فشار منفذی با نمودار صوتی [۳]

$$\phi = \text{تخلخل}$$

$$\Delta t = \text{زمان عبور صوت از سازند مورد تحقیق}$$

$$\Delta t_r = \text{زمان عبور صوت از سیال منفذی}$$

$$\Delta t_m = \text{زمان عبور صوت از بخش جامد سنگ}$$

زمان عبور صوت در رس ها دامنه وسیعی دارد، به طوری که از خیلی زیاد (حدود  $167 \mu\text{s}/\text{ft}$ ) برای رس های تحکیم نیافته سطحی مثل مونت موریلونیت تا مقدار کم (حدود  $\mu\text{s}/\text{ft}$ ) برای انواع رس های تحکیم یافته تغییر می کند. افزایش زمان عبور صوت در یک زون پرفشار رسی، سبب افزایش گرادیان فشار منفذی خواهد شد. در صورت وجود زون انتقالی، منحنی نمودار صوتی به سمت چپ (مقادیر بیشتر) حرکت می کند. از طرفی رس های هیدراته و عوارض داخلی چاه بر روی مقادیر نمودار صوتی تأثیرگذار هستند. ابزارهای امروزی از بخش های جبرانی برای حذف این اثرات استفاده می کنند اما مشکل به طور کامل برطرف نمی شود. یکی از راه های کنترل مقادیر نمودار صوتی انطباق آن با مقادیر حاصل از تحلیل سرعت لرزه ای است.

درصد هیدروکربن موجود دارد. ابزارهای مقاومت ویژه که در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند، انواع لاترال و نرمال، میکرولاگ‌ها، انواع مقاومت ویژه متمرکز و القایی هستند. هر یک از این وسایل کاربرد خاصی در تحلیل‌های پتروفیزیکی دارند. برای ارزیابی فشارهای منفذی، بهترین نمودارها، انواع القایی و میکرولاگ‌ها هستند. نمودارهای القایی برای تعیین قابلیت هدایت الکتریکی سازند دست نخورده ( $C_i$ ) مناسب هستند. مقادیر به دست آمده از این نمودار تابعی از تخلخل، توزیع آن و درجه شوری آب است. با افزایش عمق، مقاومت ویژه سازندی شیل‌ها و گل‌سنگ‌هایی که تراکم طبیعی دارند به دلیل کاهش مقدار سیال منفذی، افزایش می‌یابد. نمودار مقاومت ویژه شیل با عمق در مقیاس نیمه‌لگاریتمی، افزایش خطی را نشان می‌دهد که این روند می‌تواند برای اعماق بیشتر، برون‌یابی شود. انحراف از این روند می‌تواند ناشی از تغییر لیتولوژی یا تغییر در فشار منفذی باشد. البته تغییرات لیتولوژی را می‌توان با نمودار پرتو گاما نیز تشخیص داد [۱۳].

در اینجا همانند نمودارهای صوتی می‌توان از نمودارهای مقاومتی برای محاسبه فشارمنفذی استفاده کرد. برای این کار ابتدا خط روند طبیعی در زون رسی نزدیک به عمق تحقیق، تعیین و این روند تا عمق تحقیق، برون‌یابی می‌شود. سپس در عمق تحقیق مقاومت ویژه از روی نمودار مقاومت ویژه ( $R_0$ ) و خط روند ( $R_n$ ) قرائت می‌شود. در ادامه با استفاده از نمودار چگالی، فشار روباره در هر عمق محاسبه و فشار منفذی طبیعی با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مستقیم یا اطلاعات منطقه‌ای تعیین می‌شود. در صورت عدم دسترسی به داده‌های فشار منفذی طبیعی، می‌توان از گرادیان فشار منفذی طبیعی که معمولاً برای برخی از مناطق معلوم است، استفاده کرد (جدول ۲). لازم به توضیح است که همین روش را می‌توان برای نمودارهای قابلیت هدایت ویژه نیز انجام داد. اکنون می‌توان با استفاده از رابطه ۸ یا ۹ فشار منفذی را در هر عمق محاسبه نمود [۳]:

$$P = S - \left[ (S - P_r) \left( \frac{R_0}{R_n} \right)^{12} \right] \quad (8)$$

$$P = S - \left[ (S - P_r) \left( \frac{R_0}{R_n} \right)^{12} \right] \quad (9)$$

$$P = (OBG_a \times D_a) - D_n (OBG_n - NFBG) \quad (6)$$

$P$  = فشار منفذی بر حسب (psi)

$OBG_a$  = گرادیان فشار روباره در عمق تحقیق  $D_a$  بر حسب (psi/ft)

$OBG_n$  = گرادیان فشار روباره در عمق  $D_n$  (واقع در زون رسی) بر حسب (psi/ft)

$D_n$  = عمق تحقیق بر حسب (ft)

$D_n$  = عمق واقع در زون رسی بر حسب (ft)

$N.FBG$  = گرادیان طبیعی معادل سازند بر حسب (psi/ft)

راه حل دیگر استفاده از روش ایتون (Eaton, B.A., 1976) است. در این روش از نسبت زمان عبور صوت استفاده می‌شود. همانند روش قبل، ابتدا خط روند طبیعی در یک زون رسی نزدیک به عمق تحقیق تعیین و این روند تا عمق تحقیق برون‌یابی می‌شود. سپس عمق تحقیق زمان عبور صوت از روی نمودار صوتی ( $\Delta t_0$ ) و خط روند ( $\Delta t_n$ ) قرائت می‌شوند. در این مرحله با استفاده از نمودار چگالی، فشار روباره در هر عمق محاسبه و فشار منفذی طبیعی با استفاده از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مستقیم یا اطلاعات منطقه‌ای تعیین می‌شود. در صورت عدم دسترسی به داده‌های فشار منفذی طبیعی، می‌توان از گرادیان فشار منفذی طبیعی که معمولاً برای برخی از مناطق معلوم است، استفاده کرد (جدول ۲). اکنون می‌توان با استفاده از رابطه ۷ فشار منفذی را در هر عمق محاسبه نمود [۳ و ۱۲].

$$P = S - \left[ (S - P_r) \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_0} \right)^{3.0} \right] \quad (7)$$

$P$  = فشار منفذی بر حسب (psi)

$S$  = فشار روباره بر حسب (psi)

$P_n$  = فشار منفذی طبیعی بر حسب (psi)

$\Delta t_0$  = زمان عبور صوت مشاهده شده بر حسب ( $\mu s/ft$ )

$\Delta t_n$  = زمان عبور صوت بر روی خط روند طبیعی بر حسب ( $\mu s/ft$ )

### نمودار مقاومت ویژه

قابلیت هدایت الکتریکی کانی‌های معمول تشکیل‌دهنده سنگ‌ها، خیلی پایین است. بنابراین هر تغییری در مقاومت ویژه سنگ بستگی به مقدار آب موجود در منافذ سنگی، درجه شوری و توزیع فضاهای خالی آن و نیز

چون این نوترون‌ها در حال مهاجرت از منبع هستند و به دلیل برخورد با همه عناصر سازند دچار افت انرژی شده و به سطوح انرژی پایین می‌رسند. با استفاده از گیرنده‌های تعبیه شده بر روی ابزار نمودارگیری، میزان انرژی پرتوهای برگشتی اندازه‌گیری می‌شود. بیشترین افت انرژی زمانی اتفاق می‌افتد که نوترون‌ها با نوترون‌های اتم هیدروژن که دارای جرم مشابهی هستند، برخورد می‌کنند. بنابراین شدت کاهش انرژی و افت سرعت آنها بستگی زیادی به مقدار و تعداد اتم‌های هیدروژن سازند دارد. در سازندهای تمیز اشباع از آب یا نفت، نمودار نوترون، تخلخل پر شده از سیال را نشان می‌دهد. به دلیل تمرکز پایین اتم‌های هیدروژن در گاز، نمودار نوترون تخلخل خیلی پایینی را نشان خواهد داد. چون در رس‌ها نمودار نوترون، کل آب را اندازه می‌گیرد، در نتیجه تخلخل‌های نوترونی اندازه‌گیری شده در رس‌ها خیلی زیاد هستند. از نمودار چگالی می‌توان به‌طور مستقیم در محاسبات فشار روباره استفاده کرد. در کنار نمودار چگالی معمولاً منحنی تصحیح چگالی وجود دارد. مقدار تصحیح در مناطق شکستگی و ریزش دیواره چاه زیاد است، در نتیجه اعتبار مقادیر چگالی در این مناطق پایین می‌آید. در مناطقی که فشار در شرایط طبیعی است، نمودار چگالی با افزایش عمق باید روند افزایش تدریجی را نشان دهد. اما در برخورد با زون انتقالی که ناحیه‌ای بین زون با فشار طبیعی و زون با فشار غیرطبیعی است، منحنی چگالی کاهش پیدا خواهد کرد. عمق تحقیق ابزار چگالی در سازند حدود ۸ اینچ است [۳، ۱۷ و ۱۸].

### نمودارهای چگالی MWD<sup>۱</sup>

توسعه تکنولوژی MWD در سال ۱۹۸۰ یکی از حوادث مهم و اساسی در بهینه‌سازی حفاری و ارزیابی سازندها بوده است. توسعه مستمر خدمات MWD باعث افزایش ایمنی و کارایی حفاری، بهبود تعبیر و تفسیر لیتولوژی و هیدروکربن‌ها و ارزیابی فشار سازند شده است. اطلاعات MWD حاوی اطلاعات جمع‌آوری شده از داخل چاه، ذخیره و یا ارسال هم‌زمان آن به سطح زمین برای

$P =$  فشار منفذی بر حسب (psi)

$S =$  فشار روباره بر حسب (psi)

$P_{\text{ن}}$  = فشار منفذی طبیعی بر حسب (psi)

$R_o =$  مقاومت ویژه مشاهده شده بر حسب اهم‌متر

$R_{\text{ن}}$  = مقاومت ویژه بر روی خط روند طبیعی بر حسب اهم‌متر

$C_o =$  قابلیت هدایت الکتریکی مشاهده شده بر حسب موهو برمتر

$C_{\text{ن}}$  = قابلیت هدایت الکتریکی بر روی خط روند طبیعی بر حسب موهو برمتر

میکرولاگ‌ها نیز دو ناحیه را اندازه می‌گیرند. میکرولاترال به وسیله کیک گل متاثر می‌شود و میکرونرمال مقاومت ویژه زون شسته شده را اندازه می‌گیرد. چون مقاومت ویژه فیلتر گل معلوم است، بنابراین مقاومت ویژه زون شسته شده تنها تابعی از تخلخل و هندسه آن است. کاربرد این ابزار به سازندهایی که ضخامت فیلتر کیک کمتر از ۰/۵ اینچ و تخلخلی بیش از ۵٪ دارند. محدود می‌شود. افزایش تخلخل در رس‌های تحت فشار به شرط عدم تغییر مقاومت ویژه آب منفذی، با کاهش مقاومت ویژه مشخص می‌شود. قید اخیر در مناطق اکتشافی قابل پیش‌بینی و تخمین نیست و نمودار مقاومت ویژه باید در این شرایط هم به صورت شاخص کیفی و هم به عنوان شاخص کمی با احتیاط استفاده شود. با وجود این در مناطق شناخته شده ابزار مقاومت ویژه نشان داده که شاخص قابل اعتمادی است و به عنوان شاخص کمی نیز می‌تواند کارایی داشته باشد [۳ و ۱۴-۱۶].

### نمودارهای چگالی و نوترون

ابزار نمودار چگالی، چگالی سازند را با بمباران سازند به وسیله پرتوهای گامای حاصل از یک منبع سزیم ۱۴۷ و سپس آشکارسازی انرژی و مقدار انتشار پرتوهای برگشتی گاما از سازند، اندازه می‌گیرد. اگر فرض کنیم که ضریب جذب جرمی برای تمام سنگ‌ها و سیالات در سطح انرژی معینی ثابت باشد، مقدار و انرژی نسبی پرتوهای برگشتی گاما، مقدار چگالی مواد را نشان می‌دهد. ابزار نمودار نوترون، سازند را با نوترون‌های با انرژی بالا بمباران می‌کند. نوترون‌ها هم دچار افت انرژی می‌شوند.

1. Measurement While Drilling

با استفاده از مدل‌های تخمین گر، نمودارهای لازم تهیه شود. لازم به توضیح است که بیشترین نمودار درون چاهی موجود در داده‌های این میدان مربوط به نمودارهای زمان عبور صوت است و نمودارهای مقاومت ویژه یا موجود نبوده و یا تنها در عمق‌های محدودی در دسترس هستند. بنابراین برای مطالعه حاضر از نمودار زمان عبور صوت استفاده شد.

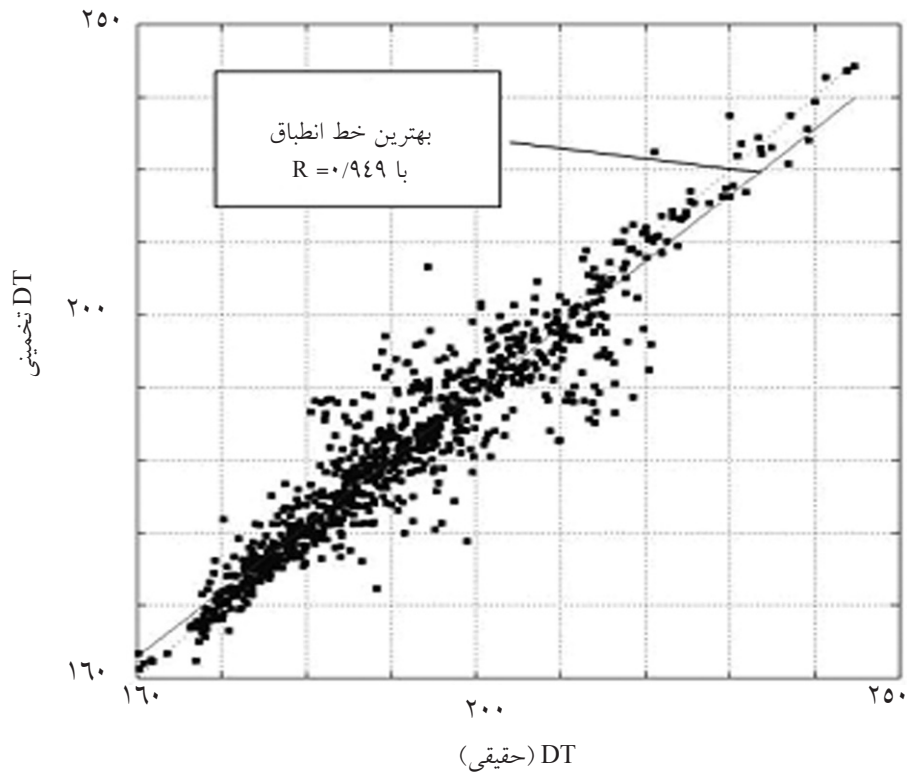
از کل تعداد چاه‌های موجود در میدان الف، تعداد ۱۵ حلقه چاه واقع در بخش مرکزی آن، نمودار زمان عبور صوت را دارند. اما در بخش‌های کناری میدان این نمودار وجود ندارد و برای محاسبه گرادیان فشار منفذی در کل میدان باید این نمودار را برای چاه‌های واقع در بخش‌های کناری تخمین زد. به همین منظور با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با الگوریتم پس انتشار خطا، تخمین نمودار زمان عبور صوت برای ۶ حلقه چاه (۱ تا ۶) انجام شد. لازم به توضیح است که از دو چاه ۷ و ۸ که نمودارهای کامل و جدیدی دارند، در فرآیند آموزش شبکه عصبی مصنوعی استفاده گردید. با توجه به تقسیم‌بندی مخزن هیدروکربوری این میدان به ۶ زون مختلف، باید تخمین نمودار زمان عبور صوت برای هر زون به‌طور جداگانه انجام شود. پس از طراحی و آموزش شبکه‌های عصبی و تخمین نمودارهای زمان عبور صوت در هر زون، باید قدرت تعمیم شبکه‌ها و همگرایی بین مقادیر واقعی و برآوردشده در هر زون بررسی و تحلیل شود. شکل ۲ میزان ارتباط داده‌های واقعی و برآوردشده زون ۱ در مرحله اعتبارسنجی شبکه را نشان می‌دهد. داده‌های ورودی به شبکه، نمودارهای ILD، NPLS و GR هستند و مقدار R (جذر ضریب همبستگی) بین دو دسته داده در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

جدول ۳ مقدار R را برای هر زون نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار R در زون ۴ کمی پایین‌تر از دیگر زونهاست و دلیل آن وجود مناطق ریزشی در یکی از چاه‌های معلوم (چاه ۷) به‌ویژه زون چهار آن است. بنابراین قبل از طراحی مدل برای این زون، اندازه‌گیری‌های نادرست از مجموعه داده‌ها حذف شدند.

تعبیر و تفسیر است. داده‌های MWD همانند داده‌های چاه‌پیمایی برای آشکارسازی و ارزیابی فشارهای سازند مورد استفاده قرار می‌گیرد. اطلاعات MWD دارای این مزیت است که اطلاعات دسته‌بندی شده حین عملیات حفاری به سطح زمین ارسال می‌شود. در نتیجه اطلاعات مناسبی برای تلفیق و تطابق با اطلاعات نمودار گل به شمار می‌رود. این اطلاعات برخلاف اطلاعات چاه‌پیمایی، در زمان حفاری به‌دست آمده و نقاط لوله‌گذاری را نیز شامل می‌شود. روش‌های ارزیابی فشار منفذی با لاگ‌های متداول مقاومت‌ویژه برای داده‌های مقاومتی MWD نیز به‌کار می‌روند. باید توجه داشت که تمام روش‌های بیان شده نیاز به محاسبه صحیح فشار روباره دارند و استفاده از نمودار پرتو گاما برای تشخیص و تعیین زون‌های شیلی است. براین اساس ابتدا مقاطع شیلی با ضخامت‌های بین ۲۰ تا ۴۰ فوتی انتخاب و سپس عمق عمودی واقعی آنها یادداشت می‌شود. مقدار مقاومت‌ویژه برای همان عمق واقعی ثبت و برای اثرات چاهی تصحیح و یادداشت می‌شود. در صورت امکان مقاومت‌ویژه شیل باید به‌طور متناوب و حداقل برای هر ۱۰۰ فوت یک‌بار نمونه‌گیری و بر روی کاغذ نیمه لگاریتمی با اشل ۱ اینچ به ۱۰۰۰ فوت عمق عمودی رسم شود. زمانی که نمودار مقاومت‌ویژه شیل تهیه شود، خط روند مقاومت‌ویژه شیل با تراکم طبیعی ساخته می‌شود. این روند در اغلب موارد بهترین خط منطبق بر مقادیر مقاومت‌ویژه شیل در مقطعی از چاه که تحت فشار طبیعی قرار دارد، می‌باشد. هر مقاومتی از شیل که بر روی خط روند قرار بگیرد، نشان دهنده فشار منفذی طبیعی است [۳ و ۱۹].

### مطالعه موردی

برای تعیین گرادیان فشار منفذی در یک میدان هیدروکربوری نیاز به نمودارهای درون‌چاهی و اطلاعات حفاری است. میدان مورد تحقیق برای این پژوهش یک میدان نفتی واقع در جنوب غربی ایران است که آن را به اختصار، میدان الف می‌نامیم. با توجه به سن زیاد و عدم وجود اطلاعات لازم در بخشی از میدان، تلاش شد تا پس از سرند داده‌های موجود و تهیه بانک اطلاعاتی آن،



شکل ۲- میزان ارتباط بین داده‌های واقعی و برآوردشده زون ۱ در مرحله تست

جدول ۳- ضرایب R برای مقادیر واقعی و برآورد شده در هر زون

زون	۱	۲	۳	۴	۵	۶
R	۰/۹۴۹	۰/۹۶۲	۰/۹۴۶	۰/۸۷۰	۰/۹۵۷	۰/۹۵۰

حلقه چاه با استفاده از این مدل‌ها برآورد شد. در مرحله بعد باید دقت و صحت نمودارهای زمان عبور صوت برآوردشده در ۶ حلقه چاه مذکور با روش‌های آماری تعیین شود. برای این منظور برای هر زون در سطح معنی‌دار بودن ۵٪ آزمون دو طرفه  $t$ -استیودنت، مقایسه‌ای بین میانگین زمان عبور صوت برآوردشده و میانگین زمان عبور صوت واقعی (چاه ۷ و ۸) انجام شد. با استفاده از آزمون  $t$ -استیودنت می‌توان دو جامعه آماری را با یکدیگر مقایسه کرد [۲۰]. این آزمون نسبت به انحراف از توزیع نرمال چندان حساس نیست و توزیع‌های با چولگی کم را نیز می‌توان با آن مورد بررسی قرار داد. آزمون مذکور بر اساس مقدار سه پارامتر در دو جامعه انجام می‌شود که شامل تعداد نمونه، میانگین و پراش آنها است [۲۰].

در نتیجه عدم اعتماد به نمودارهای واقع در این زون سبب افزایش نسبی تعداد لایه‌های پنهان ثانویه در مدل شبکه عصبی برای این زون شده است. جدول ۴ خلاصه‌ای از پارامترهای طراحی ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی و نیز نحوه آموزش و ارزیابی شبکه‌های طراحی شده که با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به دست آمده را نشان می‌دهد. همگرایی مناسب نمودارهای زمان عبور صوت واقعی و برآوردشده با شبکه‌های عصبی بهینه شده نشان می‌دهد که مدل‌های مورد تحقیق قادرند روند تغییرات مقادیر نمودار زمان عبور صوت را در سایر نقاط میدان به خوبی برآورد کنند. به عبارت دیگر شبکه به تعمیم یافتگی مطلوب رسیده است. پس از کسب اطمینان از مدل‌های به دست آمده در هر زون، نمودار زمان عبور صوت برای ۶



جدول ۴- طراحی ساختار شبکه‌های عصبی برای تخمین نمودار زمان عبور صوت

اعتبارسنجی	آموزش		ساختار شبکه عصبی مصنوعی					نمودار		زون	
	میانگین مربع خطا	R	میانگین مربع خطا	R	تعداد حلقه‌های تکرار	تعداد نودها در لایه پنهان دوم	تعداد نودها در لایه اول پنهان	تعداد لایه‌ها	روش		خروجی
۰/۱۴	۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۹۷	۲۳	۲۸	۳۶	۴	پس انتشار خطا	DT	GR, NEUT, ILD, SN, NPLS	۱
۰/۱۳	۰/۹۶	۰/۰۴	۰/۹۹	۳۵	۱۸	۳۶	۴	پس انتشار خطا	DT	GR, NRMN, NRMR	۲
۰/۱۲	۰/۹۵	۰/۰۷	۰/۹۵	۲۴	۳۶	۲۲	۴	پس انتشار خطا	DT	GR, NRMN, NRMR	۳
۰/۲۷	۰/۸۷	۰/۱۷	۰/۸۹	۳۷	۴۸	۲۴	۴	پس انتشار خطا	DT	GR, NRMN, NRMR	۴
۰/۱۵	۰/۹۶	۰/۰۵	۰/۹۸	۲۶	۲۲	۲۴	۴	پس انتشار خطا	DT	GR, NRMN, NRMR	۵
۰/۱۰	۰/۹۵	۰/۰۶	۰/۹۶	۱۸	۲۴	۲۲	۴	پس انتشار خطا	DT	GR, NRMN, NRMR	۶

از  $t$  متناظر در جدول استاندارد باشد، فرض صفر بودن رد و در حالتی که کوچک‌تر یا مساوی آن باشد، فرض صفر قبول می‌شود. مطابق با جدول استاندارد  $t$ -استیودنت، مقدار  $t$  برای آزمون دوطرفه در سطح اعتماد ۹۵٪ برابر با ۱/۹۶ است و قبول شدن فرض صفر به این معنی است که اختلاف معنی‌داری بین میانگین دو جامعه آماری وجود ندارد و می‌توان مقادیر برآورد شده را برای انجام مراحل بعدی پذیرفت [۲۰]. جدول ۵ مقادیر  $t$  محاسبه شده برای تمام زون‌های مختلف مخزن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر  $t$  محاسبه شده در تمام زون‌های مخزن کوچک‌تر یا مساوی مقدار  $t$  متناظر در جدول  $t$ -استیودنت (۱/۹۶) است. کمترین و بیشترین مقدار مشاهده شده ۰/۱۱ و ۱/۹۶ به ترتیب مربوط به زون‌های ۳ و ۴ در چاه شماره ۴ است که در بدترین حالت، برابر با مقدار استاندارد آزمون است.

به عبارت دیگر فرض صفر قبول می‌شود. به این معنا که شواهدی آماری مبنی بر وجود اختلاف معنی‌دار بین میانگین دو جامعه معلوم (چاه‌های ۷ و ۸) و برآورد شده (چاه‌های ۱ تا ۶) در سطح اعتماد ۹۵٪ وجود ندارد و داده‌های برآورد شده از دقت و صحت مناسبی برای استفاده در محاسبه گرادیان فشار منفذی برخوردارند.

برای مقایسه میانگین جامعه نمونه (زمان عبور صوت برآورد شده) با میانگین جامعه کل (زمان عبور صوت واقعی مربوط به دو چاه معلوم ۷ و ۸) در هر زون، لازم است با استفاده از آزمون  $t$ -استیودنت تعلق این دو جامعه نسبت به هم بررسی شود. بنابراین باید برای آزمون دوطرفه، فرض‌های صفر و یک به صورت زیر تعریف شوند:

$$H_0: \mu = \bar{X}$$

$$H_1: \mu \neq \bar{X}$$

در فرض صفر ( $H_0$ ) میانگین جامعه کل ( $\mu$ ) و میانگین جامعه نمونه ( $\bar{X}$ ) برابرند و در فرض یک ( $H_1$ ) میانگین جامعه کل و میانگین جامعه نمونه برابر نیستند. برای انجام این آزمون ابتدا باید متغیر  $t$  با درجه آزادی  $(n-1)$  مطابق رابطه ۱۰ برای هر زون محاسبه و با مقدار  $t$  متناظر در جدول استاندارد مقایسه شود [۲۰]:

$$t = \frac{|\bar{X} - \mu|}{S/\sqrt{n}} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $S$  انحراف معیار و  $n$  تعداد نمونه در جامعه نمونه است. در این آزمون ابتدا مقدار بحرانی احتمال توزیع  $t$  با درجه آزادی  $(n-1)$  و سطح معنی‌دار بودن ۵٪ (سطح اعتماد ۹۵٪) از جدول  $t$ -استیودنت استخراج می‌شود. لازم به توضیح است که اگر  $t$  محاسبه شده از رابطه ۱۰ بزرگ‌تر

جدول ۵- مقدار  $t$  در آزمون  $t$ -استیودنت برای نمودارهای زمان عبور صوت برآوردشده در هر زون

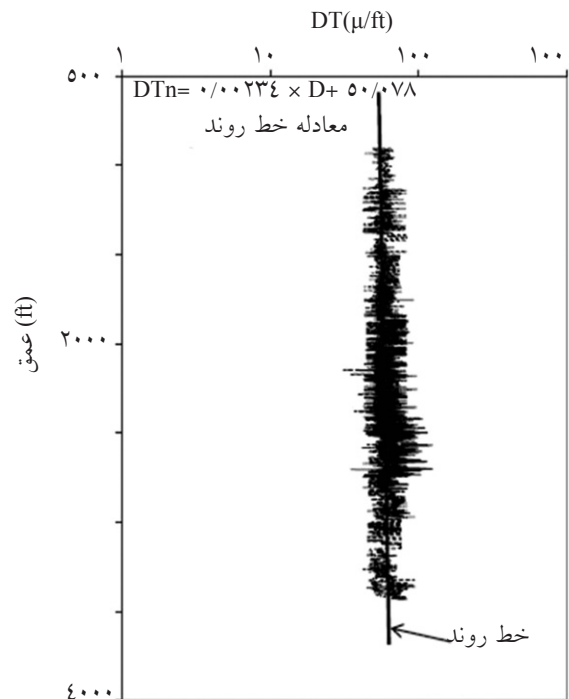
آزمون $t$ استیودنت						چاه
زون ۶	زون ۵	زون ۴	زون ۳	زون ۲	زون ۱	
۱/۷۲	۱/۹۱	۱/۹۵	۱/۹۳	۱/۹۰	۱/۸۸	۱
—	—	—	—	۱/۲۸	۱/۷۰	۲
۱/۹۲	۱/۹۲	۱/۹۵	۱/۸۵	۱/۹۱	۰/۵۸	۳
۱/۲۶	۰/۷۲	۱/۹۶	۰/۱۱	۱/۹۲	۱/۹۳	۴
—	—	—	—	۱/۴۵	۱/۹۴	۵
۰/۹۷	۱/۷۹	۱/۹۴	۱/۹۱	۱/۸۹	۱/۹۴	۶

نموداری است که معمولاً همراه با نمودار پرتوگاما از سطح زمین تا انتهای چاه رانده می‌شود. بنابراین در میدان الف، ابتدا چاه‌هایی که نمودار زمان عبور صوت از سطح زمین تا عمق مخزن را داشتند، انتخاب و سپس با استفاده از نمودار پرتوگاما، لایه‌های شیلی (آهکی - آرژیلیتی) آنها مشخص شده و نمودار زمان عبور صوت بر حسب عمق ترسیم شد (شکل ۳). مطابق شکل ۳، در یکی از چاه‌ها روندی وجود دارد که می‌توان آن را با تقریب مناسبی، خطی در نظر گرفت. رابطه ۱۱ معادله این روند را نشان می‌دهد:

$$DT_n = 0.00234 \times D + 50.078 \quad (11)$$

اکنون پس از اطمینان به داده‌های برآوردشده زمان عبور صوت، می‌توان برای ۲۱ حلقه چاه شامل ۱۵ حلقه چاه در بخش میانی و ۶ حلقه چاه در بخش کناری میدان، گرادیان فشار منفذی را محاسبه کرد.

برای محاسبه گرادیان فشار منفذی ابتدا باید تغییرات عوامل مختلف وابسته به تخریل مانند زمان عبور صوت، چگالی و... در لایه‌های شیلی یا آهک‌های آرژیلیتی در عمق تحقیق بررسی و سپس خط روند طبیعی تعیین شود. در عملیات نمودارگیری از چاه‌ها، نمودار زمان عبور صوت رایج‌ترین



شکل ۳- تعیین روند خطی طبیعی در میدان الف

شکل ۴ نمونه‌ای از تغییرات فشار منفذی با عمق برای چاه شماره ۲ نشان داده شده است. برای بررسی دقت و صحت نمودار فشار منفذی برآورد شده، مقایسه‌ای بین این نمودار و داده‌های فشار نقطه‌ای حاصل از اندازه‌گیری مستقیم در بخشی از چاه شماره ۲، انجام شد (شکل ۵). در این چاه عمق نقاط اندازه‌گیری مستقیم فشار منفذی بین ۲۲۹۷ تا ۲۴۵۸ فوت می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقدار انطباق و ضریب همبستگی (۰/۹۶) بین نمودار تخمینی فشار منفذی با نقاط اندازه‌گیری شده متناظر در حد قابل قبولی است و می‌توان از این نمودارها برای محاسبه گرادیان فشار منفذی و ارائه مدل فشار منفذی استفاده کرد. پس از تخمین فشار منفذی در ۲۱ حلقه چاه، مقدار میانگین آن برای هر زون محاسبه شد (جدول ۶). از ۲۱ حلقه چاه موجود در این میدان تعداد ۱۲ حلقه چاه تا زون دو، ۶ حلقه چاه تا زون شش، ۲ حلقه چاه تنها در زون‌های سه و چهار و ۱ حلقه چاه در زون یک نمودارگیری شده‌اند. بنابراین به دلیل عدم وجود برخی از نمودارهای پتروفیزیکی در بعضی از زون‌ها، امکان تخمین نمودار زمان عبور صوت در این مناطق وجود ندارد. در نتیجه تخمین فشار منفذی انجام نشد.

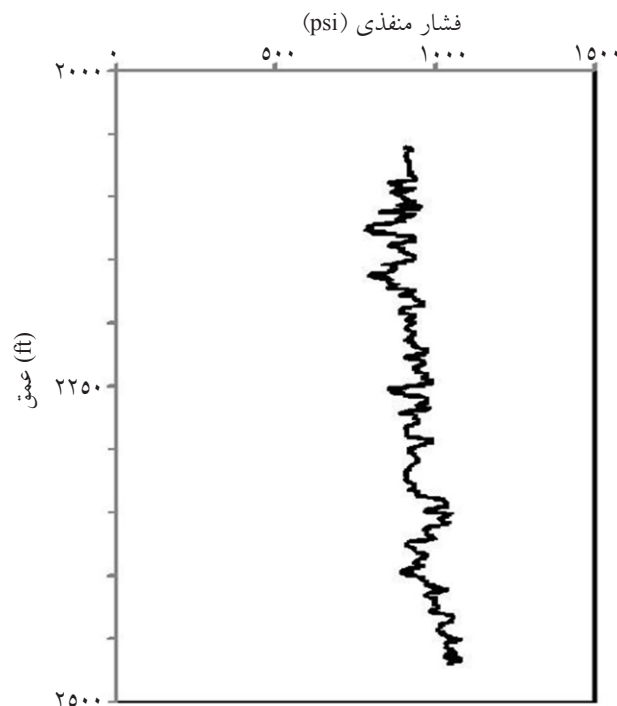
$DT_n$  مقدار زمان عبور صوت طبیعی برحسب  $(\mu s/ft)$  و  $D$  عمق برحسب (ft) است. برای محاسبه فشار منفذی باید با استفاده از رابطه ۱۱ و مدل ایتون (رابطه ۱۲) استفاده می‌شود:

$$P = S - \left[ (S - P_n) \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)^{3.0} \right] \quad (12)$$

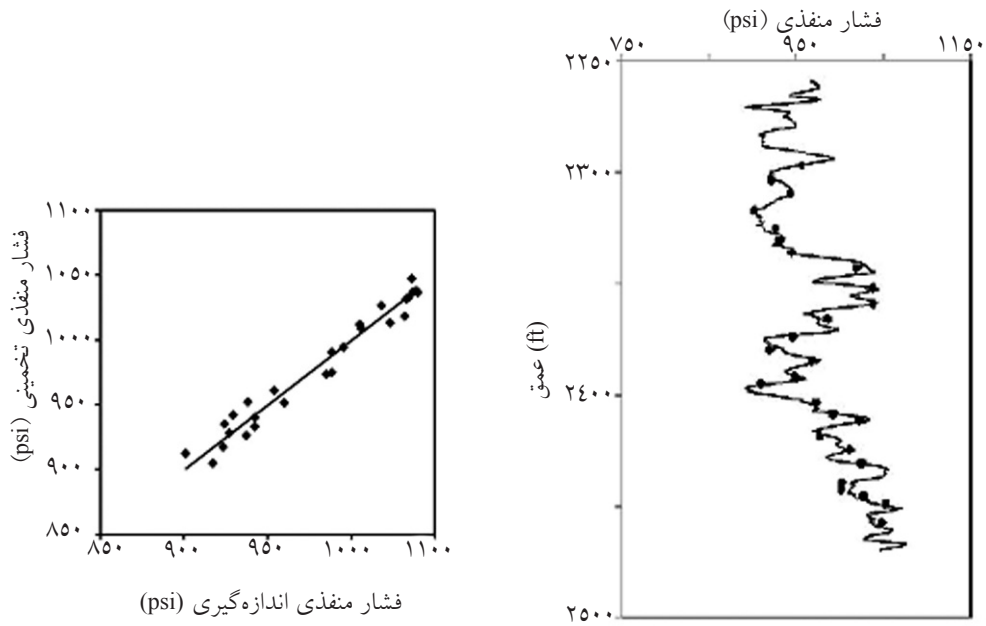
در رابطه ۱۲،  $S$  مقدار فشار روباره در عمق تحقیق،  $P_n$  فشار هیدرواستاتیک طبیعی و  $P$  مقدار فشار منفذی واقعی در هر عمق است. با توجه به مقدار شوری آب مخزن، گرادیان فشار هیدرواستاتیک طبیعی  $(psi/ft)$   $0/465$  به دست آمد. و برای محاسبه فشار هیدرواستاتیک در هر عمق کافی است مقدار گرادیان را در عمق مربوطه ضرب نمود. نسبت  $\left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)$  مقدار زمان عبور صوت در شرایط طبیعی به مقدار واقعی آن در هر عمق است. برای محاسبه فشار روباره نیز از نمودار چگالی ( $\rho_b$ ) و رابطه ۱۳ در هر عمق استفاده شد.

$$S = 0.433 \times \rho_b \times \text{عمق} \quad (13)$$

پس از محاسبه فشار روباره، ابتدا در هر عمق زمان عبور صوت طبیعی با رابطه ۱۱ تعیین گردیده و سپس نسبت  $\left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)$  با استفاده از نمودارهای زمان عبور صوت برای هر چاه به دست آمد. در پایان نیز با استفاده از رابطه ۱۲ فشار منفذی برای هر چاه و در هر عمق محاسبه شد. در



شکل ۴- نمودار فشار منفذی محاسبه شده برای چاه شماره ۲



شکل ۵- وضعیت انطباق نمودار تخمینی فشار منفذی با نمونه‌های اندازه‌گیری شده در چاه شماره ۲

جدول ۶- مقدار متوسط گرادیان فشار منفذی در هر زون

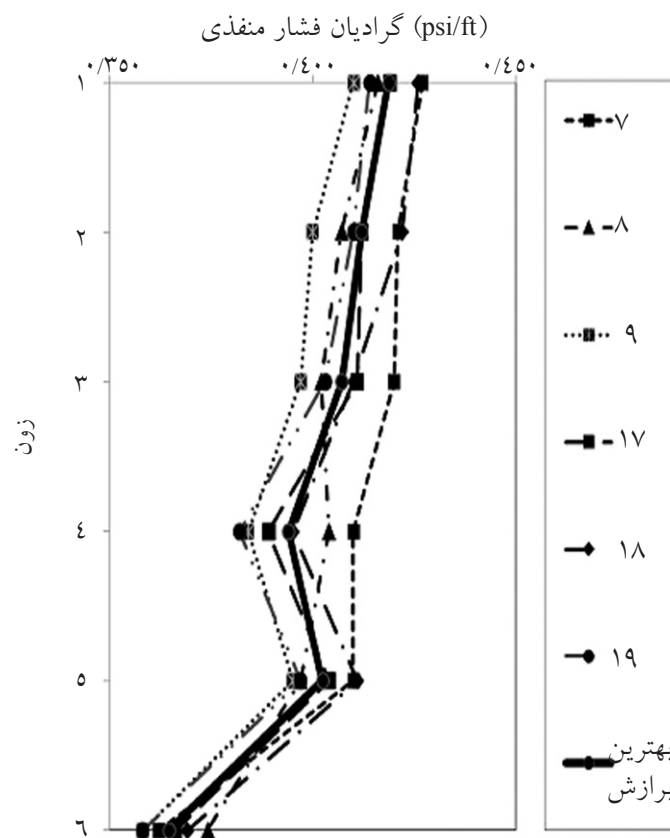
گرادیان فشار منفذی (psi/ft) در زون						شماره چاه
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
-	-	-	-	-	۰/۳۸۸	۱
-	-	-	-	۰/۴۱۲	۰/۴۱۴	۲
-	-	-	-	۰/۳۸۷	۰/۴۰۰	۳
-	-	-	-	۰/۳۸۳	۰/۳۸۱	۴
-	-	-	-	۰/۴۰۵	۰/۳۸۸	۵
-	-	-	-	۰/۴۰۸	۰/۴۱۴	۶
۰/۳۶۲	۰/۴۱۰	۰/۴۱۰	۰/۴۲۰	۰/۴۲۱	۰/۴۲۷	۷
۰/۳۷۴	۰/۳۹۷	۰/۴۰۴	۰/۴۰۲	۰/۴۰۷	۰/۴۱۶	۸
۰/۳۵۸	۰/۳۹۵	۰/۳۸۴	۰/۳۹۷	۰/۳۷۴	۰/۴۱۰	۹
-	-	-	-	۰/۳۷۴	۰/۳۷۷	۱۰
-	-	-	-	۰/۳۸۴	۰/۴۱۲	۱۱
-	-	-	-	۰/۴۰۴	۰/۳۹۳	۱۲
-	-	-	-	۰/۳۹۰	۰/۴۲۴	۱۳
-	-	-	-	۰/۴۱۱	۰/۳۹۱	۱۴
-	-	-	-	۰/۳۹۳	۰/۴۱۴	۱۵
-	-	-	-	۰/۳۸۷	۳۸۰	۱۶
۰/۳۶۶	۰/۴۰۴	۰/۳۸۹	۰/۴۱۱	۰/۴۱۲	۰/۴۱۹	۱۷
۰/۳۶۹	۰/۴۱۱	۰/۳۹۵	۰/۴۱۰	۰/۴۲۲	۰/۴۲۶	۱۸
۰/۳۵۸	۰/۳۹۷	۰/۳۸۲	۰/۴۰۳	۰/۴۱۰	۰/۴۱۴	۱۹
-	-	۰/۳۷۵	۰/۳۶۹	-	-	۲۰
-	-	۰/۳۹۲	۰/۳۶۷	-	-	۲۱

گرافیکی فشار منفذی در عمق به ویژه در فواصل بین چاهها از مقادیر فشار منفذی برآورد شده در چاهها و روش زمین‌آمار<sup>۱</sup> استفاده شد. برای این منظور ابتدا دو مقطع طولی و عرضی از میان موقعیت چاهها عبور داده شد و سپس با روش زمین‌آمار فشار منفذی در فواصل بین چاهها مدل شد. شکل ۷ تغییرات فشار منفذی در میدان الف را در دو مقطع طولی و عرضی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در مناطق نزدیک به مرکز هر دو مقطع به دلیل حضور و تمرکز زیاد موقعیت چاهها، منحنی‌های فشار منفذی تمرکز بیشتری دارند لذا در این مناطق عدم قطعیت نسبتاً پایین است. با افزایش فاصله از مرکز هر دو مقطع و در هر دو سمت، به دلیل فاصله زیاد بین موقعیت چاهها، تخمین فشار منفذی عدم قطعیت بیشتری دارد.

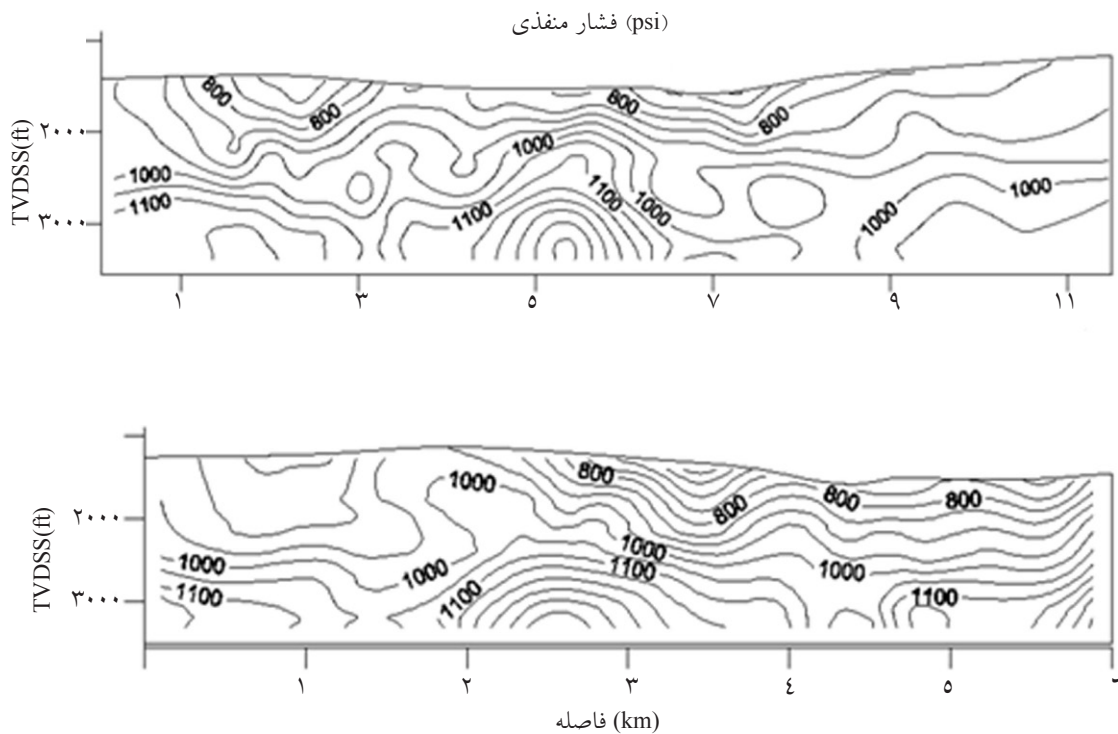
در شکل ۶ روند تغییرات گرادیان فشار منفذی و میانگین کل آن برای چاه‌های ۷، ۸، ۹، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ که مخزن را به طور کامل قطع کرده‌اند، نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، روند تغییرات میانگین کل گرادیان فشار منفذی از زون یک (۰/۴۰۵ psi/ft) تا زون ۴ (۰/۳۹۱ psi/ft) کاهش، به سمت زون پنج مقداری افزایش (۰/۴۰۲ psi/ft) و مجدداً در زون شش (۰/۳۶۵ psi/ft) کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات می‌تواند ناشی از تغییر چگالی و نوع سیال منفذی باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعات، به طور متوسط گرادیان فشار منفذی در میدان الف برابر با ۰/۳۹۹ psi/ft است و رابطه ۱۴ مدل فشار منفذی در میدان الف را نشان می‌دهد:

$$P = 0.399 \times D \quad (14)$$

P فشار منفذی در میدان الف بر حسب (psi/ft) و D عمق بر حسب (ft) است. همچنین برای نشان دادن تغییرات



شکل ۶- تغییرات گرادیان فشار منفذی بر حسب زون



شکل ۷- تغییرات فشار منفذی در میدان الف در دو مقطع طولی و عرضی

### نتیجه گیری

مطالعه (الف) نشان داد که نمودارهای زمان عبور صوت از دقت و صحت قابل قبولی برخوردار هستند.  
 ۴- در چاه شماره ۲، نمودار فشار منفذی محاسبه شده تقریباً قابل قبولی از داده‌های فشار منفذی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.  
 ۵- تغییرات فشار منفذی در زون‌های مختلف میدان مورد مطالعه احتمالاً به دلیل تغییر نوع سیال و چگالی آن است.  
 ۶- گرادینان فشار منفذی در میدان مورد مطالعه برابر با  $0.399 \text{ psi/ft}$  و مدل فشار منفذی در این میدان به صورت رابطه  $P = 0.399 \times D$  می‌باشد.  
 ۷- عدم قطعیت مدل فشار منفذی به دلیل تمرکز چاه‌ها در بخش مرکزی میدان، کمتر از بخش‌های دیگر است.

۱- نمودارهای پتروفیزیکی ابزار نسبتاً مناسبی برای مدل‌سازی فشار منفذی هستند.  
 ۲- با استفاده از نمودارهای MWD و مدل ایتون می‌توان فشار منفذی را هنگام حفاری برآورد کرد. بنابراین می‌توان ضمن تشخیص مناطقی که فشار منفذی غیرعادی دارند، ریسک خطر حفاری و هزینه‌های مربوطه در این مناطق را کاهش داد.  
 ۳- نمودار زمان عبور صوت که یکی از مهم‌ترین نمودارهای درون چاهی برای برآورد فشار منفذی است را می‌توان با استفاده از دیگر نمودارها و روش شبکه عصبی مصنوعی با تقریب قابل قبول تخمین زد. نتایج آزمون t-استیودنت بر روی داده‌های تخمینی زمان عبور صوت در میدان مورد

مراجع

- [1]. Bingham M. G., "A new approach to interpreting rock drillability", 1965, The Petroleum Publishing Co.
- [2]. Deer W. A., et al, An Introduction to Rock Forming Minerals, Longmans Press, 1967
3. Hughes B. INTEQ, *Formation Pressure Evaluation*, Reference Guide, 1996
- [4]. Bellotti P., and Giacca D., *Pressure evaluation improves drilling programs*, O&GJ, 1978, Sept., 11.
- [5]. Bowers G. L., "Pore Pressure Estimation From Velocity Data: Accounting for Overpressure Mechanisms Besides Undercompaction", SPE 27488, 1994, February.
- [6]. U. S. Bureau of Reclamation, *Physical Properties of Some Typical Foundation Rocks*, Concrete Laboratory Rpt. SP-39, 1953.
- [7]. Rehm B., and McClendon R., "Measurement of Formation Pressure from Drilling Data", SPE 3601, 1971, SPE Reprint Series No. 6a, 1973 revision.
- [8]. Bruce, Clemon, H., "Smectite Dehydration-Its Relation to Structural Development and Hydrocarbon Accumulation in Northern Gulf of Mexico Basin", AAPG, vol. 68/6, pp. 673-683, 1984.
- [9]. Eaton B. A., *How to Use Drilling Petrophysical Data in Prospect Evaluation*, World Oil, Sept & Oct, 1995.
- [10]. Hottman C. E., and Johnson R. K., *Estimation of Formation Pressures from Log-Derived Shale Properties*, J. P. T., Jun., 1965.
- [11]. Matthews W. R., and Kelly J., *How to Predict Formation Pressure and Fracture Gradient*, O&GJ, Feb. 20, 1967.
- [12]. Weurker R. G., "Annotated Tables of Strength and Elastic Properties of Rocks", SPE Reprint Series, 1963, n.6.
- [13]. Fertl W. H., *Abnormal Formation Pressures*, Elsevier Press, 1973.
- [14]. Costley R. D., "Hazards and Costs Cut by Planned Drilling Programs", World Oil, Oct., 1967.
- [15]. Eaton B. A., *Graphical Method Predicts Geopressures Worldwide*, World Oil, July 1976.
- [16]. Jordan J. R., and Shirley O. J., *Application of Drilling Performance Data to Overpressure Detection*, J.P.T., Nov., 1966.
- [17]. Rehm B., Deep Water Drilling Poses Special Pressure Control Problems, O & G J, May 3, 1976.
- [18]. Mudford Brett S. and Best Melvyn E., "Venture Gas Field, Offshore Nova Scotia: Case Study of Overpressuring in Region of Low Sedimentation Rate", AAPG, , vol. 73/11, pp. 1383-1396, 1989.
- [19]. Zoeller W. A., *Pore Pressure Detection from the MWD Gamma Ray*, SPE, 12166, 1983, Society of Petroleum Engineers of AIME.

۲۰- حسنی پاک ع، شرف الدین م، تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.