

پیش‌بینی فشار منفذی در مخازن کربناته با استفاده از سرعت لرزه‌ای برآورد شده از آنالیز چند نشانگری

ایرج مداحی^۱، علی مرادزاده^{۲*}، علی نجاتی کلاته^۳

۱. دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، maddahie@ripi.ir

۲. استاد دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران و استاد همکار دانشگاه صنعتی شاهرود، a_moradzadeh@ut.ac.ir

۳. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، nejati.ali@gmail.com

(دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۸ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۵)

چکیده

امروزه از روش‌های متفاوتی برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده می‌شود که هر یک نقاط قوت و ضعف ویژه‌ای دارند. در این تحقیق فشار منفذی و مکانیزم‌های مربوط در یکی از مخازن هیدروکربنی کربناته جنوب غرب ایران با استفاده از روش سرعت لرزه‌ای مورد بررسی و تخمین قرار گرفته است. برای این منظور سرعت بازه لرزه‌ای با استفاده از روش آنالیز چند نشانگری لرزه‌ای به دست آورده شد. مکعب فشار روباره هم از مکعب چگالی تخمین زده شد. برای تحلیل مکانیزم‌های موثر در فشار منفذی، با ترسیم نمودار متقاطع سرعت-چگالی بالک در چاه‌های میدان، نشان داده شد که مکانیزم اصلی موثر در فشار مخزنی، تراکم نامتوازن بوده است. بنابراین رابطه اولیه تبدیل سرعت به فشار از برازش بین داده‌های فشار موثر و سرعت لرزه‌ای به دست آورده شد. پس از کالیبراسیون در محل چاه‌ها، ضرایب رابطه نهایی شده و داده‌های سرعت به تنش موثر برگردانده شد. سپس مکعب تنش موثر با استفاده از رابطه ترازافی به مکعب فشار منفذی تبدیل شد. بررسی مقاطع عرضی تهیه شده از مکعب فشار منفذی، بیانگر تفکیک واضح لایه‌های مخزنی از بخش‌های بالا و پایین خود است. همچنین تجزیه تحلیل آماری نتایج تحقیق اعم از خطای میانگین مربعات کم و ضریب همبستگی بالا بین داده‌های پیش‌بینی شده و واقعی، نشان می‌دهد که روش سرعت لرزه‌ای حاصل از آنالیز چند نشانگری قادر است فشار منفذی را قبل از حفاری در سازندهای کربناته به صورت قابل قبولی پیش‌بینی کند. بنابراین انجام این مطالعات می‌تواند در تعیین وزن گل حفاری، ارزیابی پتانسیل خطر و اقتصاد حفاری اهمیت قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

کلمات کلیدی

فشار موثر، فشار منفذی، مکانیزم بارگذاری، مخازن نفتی کربناته، سرعت لرزه‌ای.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

فشار منفذی فشاری است که از سیال درون منافذ سنگ ناشی شده و پیش‌بینی آن قبل از حفاری یکی از عوامل مهم در طراحی چاه، ارزیابی پتانسیل خطر، آسیب‌های زیست‌محیطی و ریسک اقتصادی است و اهمیت زیادی در اکتشاف منابع نفت و گاز دارد. به طور کلی دو دسته روش برای برآورد فشار منفذی وجود دارد. این روش‌ها، یا بر پایه روابط آماری حاصل از اندازه‌گیری‌های مستقیم‌اند و یا بر اساس روش‌های غیرمستقیمی است که با اندازه‌گیری تغییرات مقادیر خواص فیزیکی سازند نسبت به حالت نرمال به دست می‌آیند [۱] از جمله روش‌های غیرمستقیم، استفاده از داده‌های لرزه‌ای است. در این روش‌ها، فشار منفذی قبل از حفاری با برآزش بین یک نشانگر لرزه‌ای و فشار موثر و بر اساس روابط تجربی شناخته شده قابل محاسبه و تخمین است. در بیشتر مواقع، یک انحراف مهم در تخلخل از روند تراکم نرمال، موید فشارهای غیرعادی است و شناسایی آن را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی ممکن می‌سازد. همچنین انبساط سیال و تبدیل هیدروکربن‌های سنگین به هیدروکربن‌های گازی و سبک، یکی دیگر از عوامل مهم فشارهای غیرعادی است و می‌تواند با استفاده از تغییرات در سرعت صوت و چگالی تشخیص داده شود [۲، ۳].

اولین مطالعات پیش‌بینی فشار منفذی احتمالاً به سال ۱۹۶۵ برمی‌گردد که به وسیله هاتمن و جانسون^۱ در ضمن استخراج خواص شیل‌ها انجام گرفت، روش آن‌ها بر پایه انحراف از روند خط نرمال در سرعت اندازه‌گیری شده صوت در نگارهای چاه استوار بود [۱]. از جمله بنیان‌گذاران روش‌های لرزه‌ای پیش‌بینی فشار منفذی می‌توان به وینکلر و نور^۲ [۴] و نیز به دوتا^۳ [۵] اشاره کرد. این روش به ویژه در خلیج مکزیک با استقبال گسترده‌ای روبه‌رو شد، به نحوی که در سال ۲۰۰۵ مطالعه جامعی بر روی ۷۰۰ بلوک نفتی این منطقه که شامل ۲۰۰۰ چاه بودند توسط کلی^۴ و همکاران انجام شد [۶]. سلیمانی و ریاحی در سال ۲۰۱۱ سرعت برانبارش لرزه‌ای را برای پیش‌بینی فشار منفذی در مخزن ماسه‌سنگی میدان منصوری به کار بردند [۷]. نوری و همکاران [۸] سرعت حاصل از وارون‌سازی را در میدان سفید زاخور مورد استفاده قرار داده و نشان دادند که بخش غربی میدان، فشار منفذی بالایی دارد. اوگو^۵ در سال ۲۰۱۵ با استفاده

از سرعت لرزه‌ای فشار منفذی و فشار شکستگی را دلتای نیجر مورد مطالعه قرار داد. وی یک رژیم فشار بالا از رده خفیف تا متوسط را با به کارگیری رابطه باربرداری باورز شناسایی کرد [۴]. هاسکین و اوکانور^۶ در سال ۲۰۱۶ تاثیر خواص سنگ روی داده‌های سرعت را به منظور پیش‌بینی فشار منفذی درجا با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد، در صورتی که از سرعت‌های پردازشی عمل واسنجی با نگار سرعت چاهی به درستی انجام نگرفته باشد، فشار پیش‌بینی شده از مقدار واقعی آن کمتر خواهد بود [۹]. ال-ویر^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۷ سرعت لرزه‌ای را برای پیش‌بینی فشار منفذی در میدان نفتی بنی سوف^۸ مصر به کار گرفتند [۱۰] و با شناسایی دو لایه با فشارهای بالا نتایج مطالعه را در برنامه حفاری میدان یاد شده مورد استفاده قرار دادند. هریس^۹ و همکاران سرعت لرزه‌ای را به روش شبکه عصبی احتمالی به دست آوردند و برای تخمین فشار منفذی در سازند آواری قومای سوماترای جنوبی مورد استفاده قرار دادند و موفق به شناسایی منطقه فشار بالا در آن ناحیه شدند [۱۱]. محمدی و همکاران [۱۲] در سال ۱۳۹۶ با واسنجی کردن سرعت برانبارش لرزه‌ای به وسیله نگارهای موج تراکمی و با به کارگیری رابطه باورز در میدان کویال موفق به شناسایی فشار غیرعادی برای سازندهای گچساران و پابده شدند، ولی موفق به شناسایی بخش مخزنی سازند کربناته آسماری و مخزن کربناته بنگستان نشدند. تینگ لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ با انجام وارون‌سازی هم‌زمان دامنه مقابل دورافت و دامنه مقابل آزمون، سرعت موج تراکمی را استخراج کردند و در پیش‌بینی فشار منفذی به کار گرفتند. آن‌ها از مدل ایتون استفاده کردند و نشان دادند که فرآیند تعیین روند تراکم نرمال اهمیت زیادی در نتایج مطالعات آن‌ها داشته است [۱۳]. آدیم و همکاران [۱۴] در سال ۱۳۹۷ روش باورز را برای پیش‌بینی فشار منفذی از سرعت لرزه‌ای در یکی از میادین کربناته ایران به کار گرفتند. این گروه مدل سرعت لرزه‌ای را با استفاده از نگارهای موج تراکمی و به روش کوکریجینگ و با کمک گرفتن از مکعب مقاومت صوتی به دست آوردند و نتایج پیش‌بینی را با فشار منفذی به دست آمده از نگارهای چاهی به روش ایتون مقایسه کردند که نتایج به دست آمده از نگارهای چاهی بهتر بوده است. این گروه مقطع عرضی که ارایه دادند، فقط ستون چینه‌شناسی سازند مخزنی را شامل می‌شد و نشان ندادند که آیا روش به کار گرفته شده توانسته است، بخش‌های مخزنی را از لایه‌های بالا و پایین خود

1- Hatman and Johnson

2- Winkler and Nur

3- Dutta

4- Kelly

5- Ugwu

6- Hoskin and O'Connor

7- El-Werr

8- Beni Suef

9- Haris

بیشترین تحقیقات مربوط به روابط سرعت- فشار که به طور وسیعی استفاده شده است، روش‌های ایتون [۱۹] و باورز [۲۰] بوده است که بر پایه اصول تنش موثر بیان شده‌اند (رابطه-۲):

$$V_p = f(P_e) = f(P_o - nP_p) \Rightarrow P_p = (P_o - g(V_p)) / n \quad (2)$$

که در آن g وارون تابع f است. این رابطه بیان می‌کند که اگر سرعت صوت در سنگ معلوم باشد، می‌توان تنش موثر را تخمین زد.

۱-۲- روش ایتون

ایتون در سال ۱۹۷۵ یک معادله تجربی برای کمی‌سازی فشار منفذی با استفاده از نگارهای چاهی زمان عبور موج تراکمی پیشنهاد کرد. وی تراکم نامتوازن را به عنوان مکانیزم اصلی تولید مناطق پرفشار در نظر گرفت و انحراف در روند طبیعی فشردگی شیل را به کمک نگار صوتی (سونیک) و اسنجی کرد که بیشتر بر پایه روش ارایه شده اولیه توسط هاتمن و جانسون است [۱۱]. رابطه ایتون برای پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از زمان عبور موج لرزه‌ای به صورت رابطه ۳ است:

$$P_{pg} = P_g - (P_{og} - P_{ng}) \left(\frac{\Delta_m}{\Delta_t} \right)^x \quad (3)$$

که در آن:

P_{pg} گرادیان فشار منفذی

P_{og} گرادیان فشار روباره

P_{ng} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک

Δ_t زمان سیر اندازه‌گیری شده صوت در شیل با نگار موج

تراکمی چاه

Δ_m زمان سیر اندازه‌گیری شده صوت در شیل در فشار نرمال

(به دست آمده از ناحیه روند نرمال در نمودار چاه)

x ثابت توان

همان‌طور که در رابطه ۳ دیده می‌شود برای استفاده از روش ایتون به زمان سیر نرمال (Δ_m) یا روند سرعت در حالت تراکم نرمال نیاز است. روش ایتون یکی از روش‌های متداول در پیش‌بینی فشار منفذی درجا است و در برخی از حوضه‌های نفتی و توسط افراد زیادی به کار گرفته شده است [۲۱، ۲۲].

ثابت توان x در معادله ایتون به صورت اولیه عدد ۳ در نظر گرفته می‌شود که در عمل نیاز به اصلاح (به ویژه در مخازن کربناته) دارد [۲۳]. با توجه به اینکه توان x به طور زیادی به

تفکیک کند یا خیر. حال با در نظر گرفتن سابقه فوق و با توجه به اینکه همه روش‌های پیش‌بینی ابتدا در مخازن ماسه‌سنگی و در خارج از ایران توسعه پیدا کرده‌اند و در مطالعات انجام شده برای مخازن کربناته نیز کم و کاست‌هایی مشاهده شده است، برای انجام بررسی‌های بیشتر در پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری تحقیق حاضر انجام شد که با بهره‌گیری از روش‌های جدید برآورد سرعت لرزه‌ای به پیش‌بینی و مدلسازی دقیق‌تر فشار منفذی در مخازن کربناته و غیرکربناته در یکی از میداین جنوب غرب کشور پرداخته شد. در این مطالعه سعی شده است که توانایی روش سرعت لرزه‌ای حاصل از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای در پیش‌بینی‌های فشار منفذی به دقت مورد بررسی قرار گیرد.

۲- معرفی روش‌های تحقیق

پایه و اساس این نوع مطالعات اصول تنش موثر است که برای اولین بار توسط ترزاقی^۱ در سال ۱۹۴۳ فرمول‌بندی شده است [۱۵]. ترزاقی آزمایشی را برای توصیف تراکم سنگ نسبت به فشار روباره طراحی کرد و نشان داد که فشار روباره در لایه‌های زیر سطحی به وسیله فشار منفذی و تنش موثر قائم خنثی می‌شود. بر طبق این نظریه همه اثرات قابل اندازه‌گیری ناشی از تنش، مانند تراکم و تغییرات سرعت موج الاستیک تابعی از تانسور تنش موثر است. تئوری تنش موثر بایوت و ترزاقی، رابطه یک را بین فشار روباره، تنش موثر و فشار منفذی ارایه می‌دهد [۱۶]:

$$p_p = \frac{(P_o - \sigma_e)}{\alpha} \quad (1)$$

که در آن:

P_p فشار منفذی

P_o فشار روباره

σ_e تنش موثر

α ضریب تنش موثر بایوت

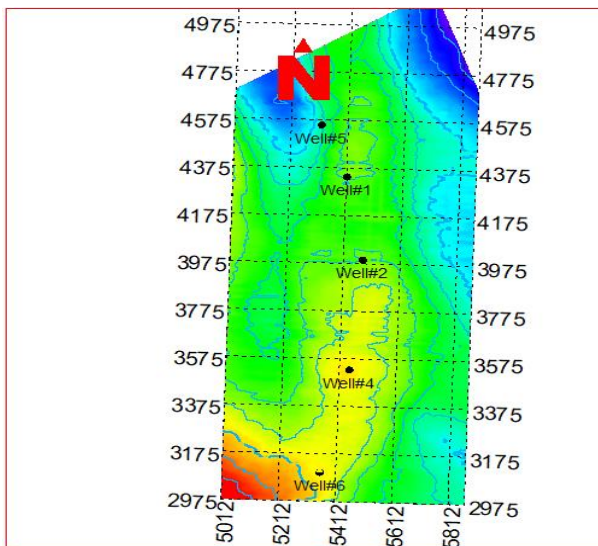
ضریب بایوت نسبتی از تغییرات حجم سیال منفذی به تغییرات حجم کل سنگ است و وقتی که سیال برای خارج شدن از منافذ سنگ آزاد باشد، مقدار آن برابر با ۱ خواهد بود [۱۷]. از نظر تئوری سنگ‌هایی که از یک ماده الاستیک تشکیل شده باشند و تراکم‌پذیری‌شان نیز وابسته به فشار باشد، تحت تنش‌های متوسط، ضریب تنش موثر برابر ۱ ($n=1$) دارند، با این حال این نتیجه‌گیری برای سنگ‌های غیرهمگن صادق نیست [۱۸].

1- Terzaghi

حالت رابطه به شکل ساده و بدون باربرداری درمی آید. $u=\infty$ مربوط به حالت تغییر شکل دائمی و برگشت ناپذیر است و بیان می کند که برای تمامی مقادیر تنش موثر کمتر از تنش بیشینه، سرعت برابر با بیشینه خواهد بود. σ_{max} مقدار تنش موثر در مرحله شروع باربرداری و در واقع مقدار بیشینه تنش موثر است [۱۶].

۳- موقعیت زمین شناسی

میدان نفتی مورد نظر با سنگ مخزن کربناته در جنوب غربی ایران و در ناحیه فروافتادگی دزفول به موازات مرز ایران و عراق قرار دارد و اولین بار در سال ۱۹۷۸ به وسیله اطلاعات لرزه نگاری مورد شناسایی قرار گرفت و از نظر هندسی از یک تاقیدس تقریباً متقارن و کشیده با ابعاد تقریبی ۲۲ در ۵۲ کیلومتر تشکیل شده است. داده های در دسترس در این مطالعه شامل داده های لرزه ای سه بعدی، نگارهای پتروفیزیکی ۵ چاه و نیز نتایج آزمایش های فشار چهار چاه است که در شکل ۱ ابعاد میدان، هندسه خطوط لرزه ای و موقعیت چاه ها نشان داده شده است. مخازن اصلی این میدان سازندهای ایلام و سروک است ولی سازند فهلیان و بخش بورگان از سازند کژدمی نیز از دیگر مخازن این میدان است. به جز بخش بورگان که ماسه سنگی است بقیه از نظر رسوب شناسی جزو مخازن کربناته اند.



شکل ۱- ابعاد میدان، هندسه خطوط لرزه ای (خطوط نقطه چین) و موقعیت چاه ها.

خاصیت تراکم پذیری شیل ها بستگی دارد، بنابراین با وجود رسوبات کربناته نمی تواند به طور قابل اعتمادی مورد واسنجی قرار گیرد.

۲-۲- روش باورز

باورز در سال ۱۹۹۵ معادله ترزاقی را برای پیش بینی فشار منفذی به کار گرفت. روش وی نیز مبتنی بر تنش موثر بوده است و هر دو عامل تراکم نامتوازن و مکانیزم باربرداری حاصل از انبساط سیال را به عنوان مکانیزم های اصلی ایجاد فشارهای غیرعادی در نظر می گیرد. با توجه به اینکه عامل تراکم موجب کاهش مقدار تخلخل و در نتیجه باعث افزایش سرعت صوت می شود، بنابراین نمودار بارگذاری در سنگ های با تراکم نرمال، دارای روند نرمال افزایش سرعت و تنش موثر خواهد بود. به هر حال وقتی که سیال منفذی محبوس شود، فشارهای بالا ایجاد خواهد شد. در این شرایط، در رسوبات با تخلخل پایین، عمل تراکم مهار شده و تنش موثر با افزایش ضخامت رسوب ثابت می ماند. باورز برای رسوباتی که شرایط تراکم نامتوازن را تجربه کردند، رابطه ۴ را بین تنش موثر و سرعت صوت ارائه کرد [۱۶].

$$V = V_0 + A(\sigma_e)^B \quad (4)$$

که در آن

V سرعت موج تراکمی در عمق داده شده

V_0 سرعت صوت در سطح زمین (معمولاً ۱۵۰۰ متر در ثانیه در نظر گرفته می شود).

σ_e تنش موثر قائم

A و B پارامترهای حاصل از واسنجی رابطه سرعت ناحیه ای در برابر داده های تنش موثر در چاه های آزمایشی

بر اساس نظر باورز و همکاران انبساط سیال می تواند سبب افزایش فشار منفذی شده و در نتیجه موجب کاهش تنش موثر در توالی های رسوبی شود [۱۶ و ۱۳]. برای برآورد فشار در نواحی دارای مکانیزم توسعه سیال، آن ها منحنی باربرداری (رابطه ۵) را بین تنش موثر قائم و سرعت لرزه ای پیشنهاد کردند:

$$V = V_0 + A \left[\sigma_{max} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} \right)^{1/u} \right]^B \quad (5)$$

که در آن:

u پارامتر باربرداری و بیانگر حالت پلاستیکی رسوبات است.

$u=1$ مربوط به تغییر شکل کاملاً برگشت پذیر است و در این

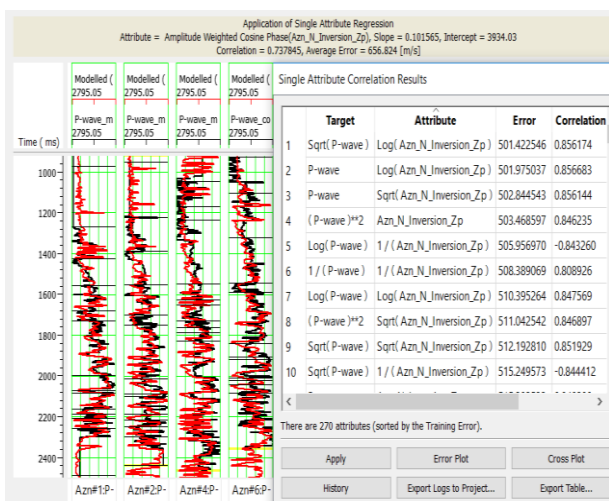
۴- روش تحقیق

در این تحقیق، ابتدا داده‌های لرزه‌ای در نرم‌افزار پترل^۱ مورد تفسیر ساختمانی قرار گرفت و افق‌های مخزنی به دست آمد و سپس با انجام آنالیزهای وارون‌سازی لرزه‌ای، روش وارون‌سازی بر پایه مدل انتخاب شد که نتایج این آنالیز در شکل ۲ و در محل چاه شماره ۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، میزان همبستگی و خطای لرزه‌نگاشت مصنوعی به دست آمده در محل چاه‌ها به ترتیب بالای ۹۹ و کمتر از ۵ درصد بوده است.

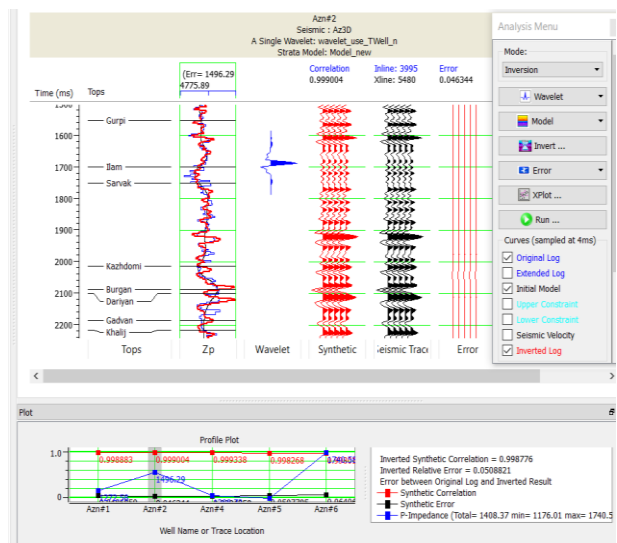
در نهایت با انجام وارون‌سازی لرزه‌ای، مکعب مقاومت صوتی به دست آورده شد که در شکل ۳ برش عرضی آن در محل چاه شماره ۲ نشان داده شده است.

برای استخراج مکعب سرعت لرزه‌ای از ماژول Emerge در نرم‌افزار همسون- راسل^۲ استفاده شد که هدف آن پیش‌بینی سرعت موج تراکمی در محل‌های حفاری نشده با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای است. برای این منظور ابتدا با انجام آنالیز تک نشانگری، میزان حساسیت نشانگرهای مختلف از نظر همبستگی و خطای پیش‌بینی نسبت به نگار هدف (سرعت موج تراکمی) مورد سنجش قرار گرفت که در شکل ۴ نشان داده شده است.

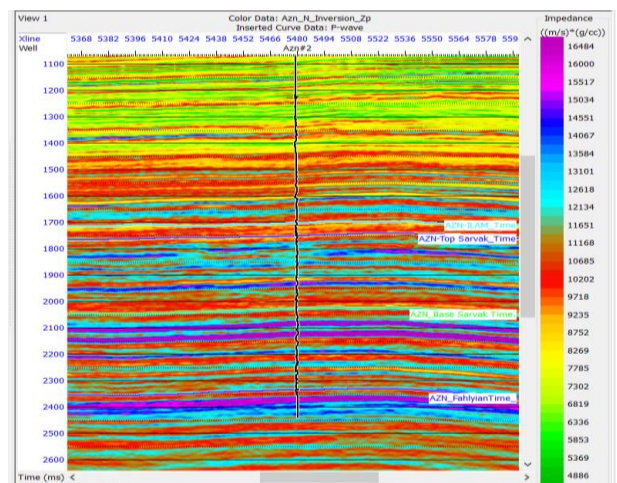


شکل ۴- آنالیز تک نشانگری: لیست نشانگرها و میزان همبستگی آن‌ها با نگار صوتی (سمت راست)، میزان انطباق اولین نشانگر و خطای مدل (سمت چپ).

سپس با انجام آنالیز چند نشانگری به روش بازگشت مرحله به مرحله^۳، بهترین گروه نشانگرها برای برآورد سرعت موج تراکمی مورد استخراج قرار گرفت. در این روش ابتدا از تک نشانگرها شروع کرده و سپس همبستگی جفت نشانگرها و بعد همبستگی سه نشانگری و تا آخر با نگار هدف سنجیده می‌شود و بنابراین بیشینه تعداد نشانگرهای انتخابی در واقع بیانگر تعداد مراحل تکرار روش نیز است که نباید بیشتر از تعداد کل چاه‌های مورد استفاده در آنالیز باشد (بر اساس راهنمای نرم‌افزار همسون- راسل). با توجه به اینکه تعداد کل چاه‌های مورد استفاده در پروژه ۵ حلقه بوده که در مرحله آنالیز یکی از آن‌ها (چاه ۵) برای اعتبارسنجی در مرحله آموزش به کار گرفته نشده بود، بنابراین تعداد چاه‌های به کار گرفته در مرحله آموزش نرم‌افزار چهار حلقه بود که به تبع آن تعداد بیشینه نشانگرها و در نتیجه تعداد



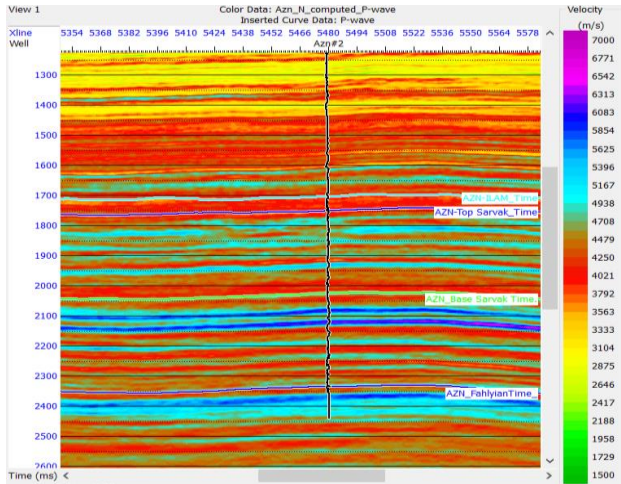
شکل ۲- نتایج آنالیز وارون‌سازی بر پایه مدل در چاه ۲.



شکل ۳- برش عرضی از مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی بر پایه مدل در محل چاه شماره ۲.

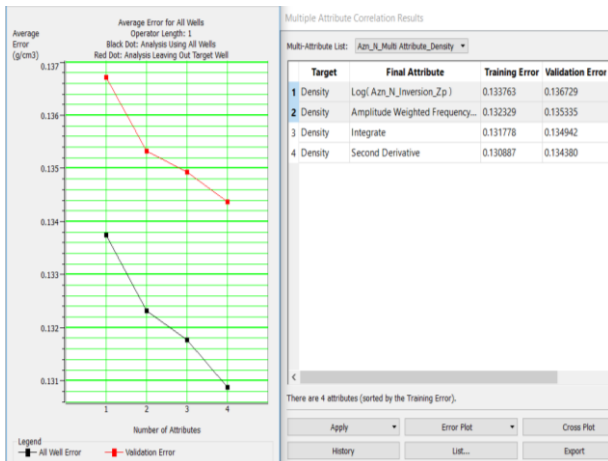
2- Hampson- Russell
3- Step-wise regression

1- Petrel



شکل ۶- برش عرضی از سرعت موج تراکمی حاصل از تخمین به روش آنالیز چند نشانگری در محل چاه ۲.

مراحل بازگشت در محاسبه همبستگی‌ها عدد چهار انتخاب شد. در ادامه با انجام آزمون همبستگی و حساسیت نشانگرها با نگار صوتی، بهترین لیست نشانگرهای چهارگانه انتخاب شد که در شکل ۵ (سمت راست) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ (پلات سمت چپ) دیده می‌شود با اضافه شدن تعداد نشانگرها، هردو نمودار خطا کم شده است و از نظر منطقی هم درست است که با اضافه شدن نشانگر به گروه، همبستگی نباید از حالت اولیه کمتر شود، با این حال با اضافه شدن نشانگر سوم، به همان اندازه که مقدار کل خطا کم شده است از مقدار خطای معتبر زیاد شده است، در نتیجه تعداد ۲ نشانگر (مقاومت صوتی و سرعت موج تراکمی انتخاب شد).

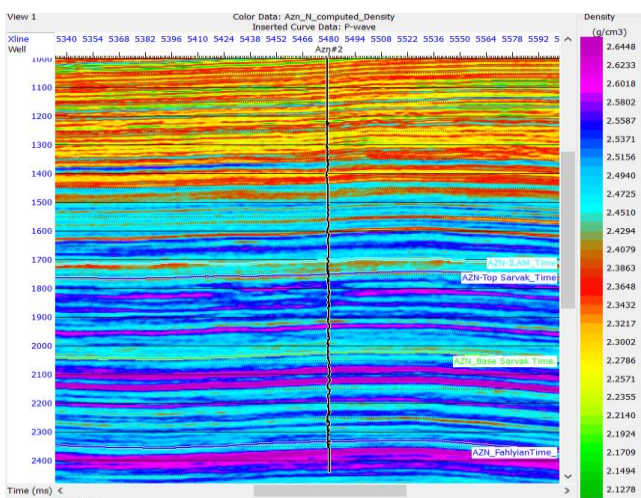


شکل ۷- آنالیز چند نشانگری و لیست نشانگرهای لرزه‌ای مورد استفاده در تخمین سرعت (سمت راست)، نمودار خطای کل و خطای معتبر (سمت چپ).

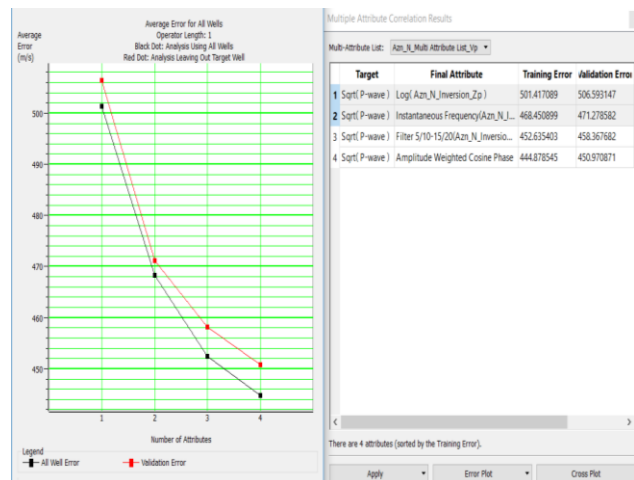
در نهایت مکعب سرعت لرزه‌ای به روش آنالیز چند نشانگری تخمین زده شد که برش عرضی (شرقی- غربی) آن در شکل ۶ نمایش داده شده است.

در ادامه مکعب چگالی با استفاده از نگارهای چگالی و داده‌های لرزه‌ای و در ماژول Emerge نرم‌افزار همسون- راسل همانند روش تخمین سرعت موج تراکمی مورد استخراج قرار گرفت که در شکل ۷ گروه نشانگرهای استفاده شده (سمت راست) و خطای تخمین (سمت چپ) نشان داده شده است.

در نهایت پس از تخمین نگار چگالی در محل‌های حفاری نشده، با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای، مکعب چگالی به دست آمد که برش عرضی (شرقی- غربی) آن در محل چاه ۲ در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- برش عرضی از مکعب چگالی حاصل از تخمین به روش آنالیز چند نشانگری در محل چاه ۲.



شکل ۵- آنالیز چند نشانگری و لیست نشانگرهای لرزه‌ای مورد استفاده در تخمین سرعت (سمت راست)، نمودار خطای کل و خطای معتبر (سمت چپ).

عرضی آن به صورت شرقی- غربی در محل چاه ۲ و در شکل ۹- ب نگار فشار روباره در چاه‌های میدان نشان داده شده است:

$$P_o = \rho_b z = g \int_0^z \rho_b(z) dz \quad (۶)$$

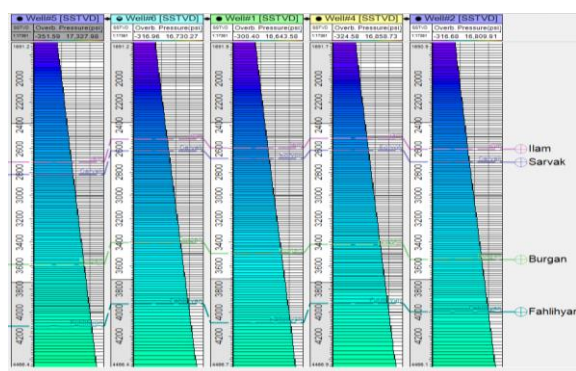
که در آن:

P_o فشار روباره

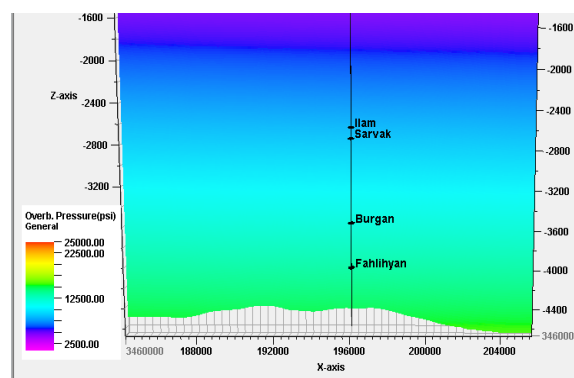
ρ_b چگالی بالک

z ضخامت قائم رسوبات بالایی

سپس مکعب فشار روباره که در هر عمق برابر با تنش قائم ناشی از وزن رسوبات بالایی و سیال داخل آن است با استفاده از ماژول مدلسازی در نرم‌افزار پترل محاسبه شد. به این صورت که ابتدا مدل مفهومی لایه‌های میدان و ضخامت سلول‌ها تا زمان رفت و برگشت ۴۰۰۰ متر بر ثانیه ساخته شد و سپس به سلول‌های مدل پارامتر چگالی اختصاص داده شد و استفاده از رابطه ۶، مدل تجمعی پارامتر چگالی در سلول‌ها به دست آورده شد. در نهایت با اعمال ضرایب تبدیل چگالی به فشار در مدل یاد شده، مکعب فشار روباره استخراج شد که در شکل ۹- الف مقطع



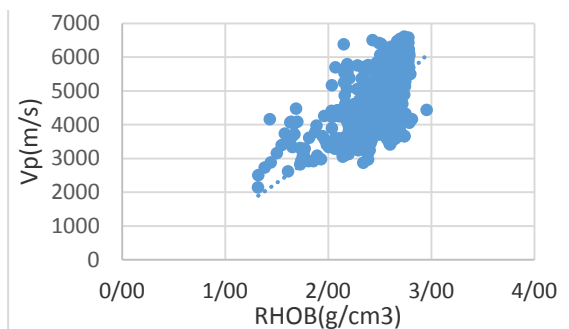
(ب)



(الف)

شکل ۹- برآورد فشار روباره از مکعب چگالی در نرم‌افزار پترل در محل چاه ۲. (الف) مقطعی عرضی (شرقی- غربی) از فشار روباره و (ب) نگار فشار روباره در نقاط چاه.

در دسترس بوده است، فشار موثر در نقاط چاهی با به کارگیری آزمایش‌های فشار چاه و فشار روباره استخراج شده در بالا و با استفاده از رابطه ترازقی (رابطه ۱) با فرض $n=1$ محاسبه شد، سپس با تشکیل نمودار متقاطع بین داده‌های سرعت و داده‌های فشار موثر به دست آمده، رابطه اولیه بین آن‌ها تعیین و ضرایب واسنجی A و B به ترتیب برابر با ۵۷۹۶۱ و ۰٫۵۱۳۸ برای رابطه ۴ به دست آمد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

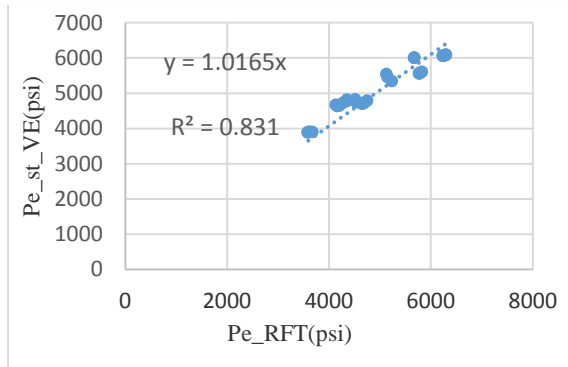


شکل ۱۰- نمودار متقاطع سرعت- چگالی که نشان‌دهنده مکانیزم تراکم نامتوازن و بارگذاری در ایجاد فشار است.

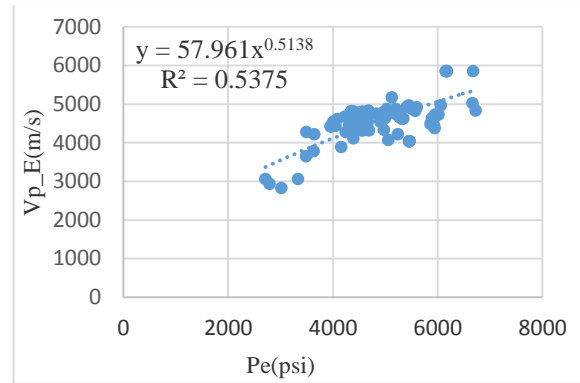
در انتخاب رابطه تجربی، به دلیل اینکه رابطه ایتون نیازمند زمان سیر صوت در شیل‌ها در فشار نرمال (مربوط به ناحیه روند نرمال در نمودار چاه) است و به دلیل وجود سازندهای غیرشیلی به ویژه سازندهای کربناته امکان به کارگیری آن وجود نداشت برای به کارگیری روابط باورز نیز ابتدا لازم بود مکانیزم‌های اصلی موثر در فشارهای مخزن مورد بررسی قرار گیرد تا با شناسایی مکانیزم اصلی، از مدل خاص آن مکانیزم استفاده شود.

برای این منظور با رسم نمودار متقاطع سرعت- چگالی بالک (شکل ۱۰) در چاه‌های این ناحیه نشان داده شد که با افزایش عمق، همواره سرعت و چگالی نیز افزایش می‌یابد که این نوع رفتار نمودار چه در حالت فشارهای بالا و چه در حالت فشارهای نرمال مطابق تحقیقات قبلی [۲۴] مربوط به روند تراکم نامتوازن و بارگذاری است، بنابراین در ادامه رابطه تراکم نامتوازن یا بارگذاری باورز (رابطه ۴) برای تعیین ارتباط بین تنش موثر و سرعت صوت به کار گرفته شد.

در مطالعه حاضر اطلاعات ۵ چاه از میدان نفتی مورد مطالعه

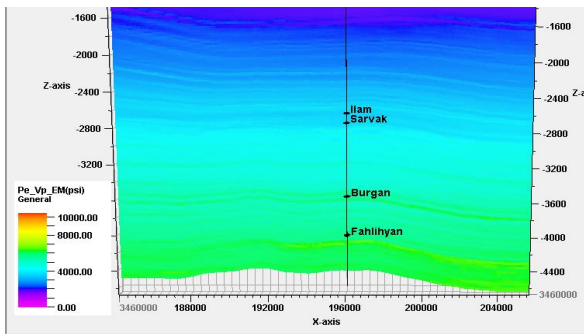


شکل ۱۲- برازش بین داده‌های تنش موثر پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی در چاه ۶.



شکل ۱۱- برازش بین تنش موثر و سرعت به دست آمده از آنالیز چند نشانگری.

در ادامه مکعب سرعت برآورد شده از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از رابطه ۷ به مکعب تنش موثر برگردانده شد که در شکل ۱۳ مقطع عرضی آن به صورت شرقی- غربی و در محل چاه ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود چهار زون مخزنی ایلام، سروک، بورگان و فهلیان در مقطع یاد شده به وضوح از بخش‌های بالا و پایین خود با رنگ‌های متفاوت تفکیک شده‌اند که نشان‌دهنده فشار موثر پایین در مخازن یاد شده است.



شکل ۱۳- مقطع عرضی (شرقی- غربی) از فشار موثر پیش‌بینی شده: بخش‌های مخزنی ایلام، سروک، بورگان و فهلیان با فشار موثر کمتر (رنگ آبی تیره‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده‌اند.

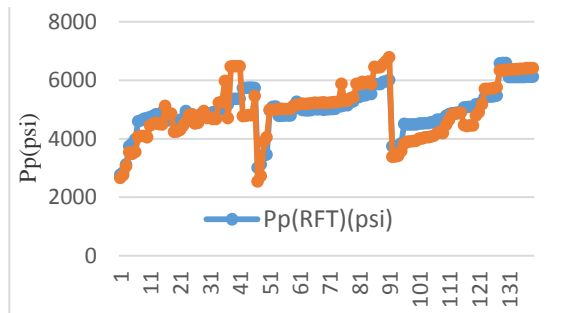
در ادامه با استفاده از داده‌های فشار روباره و فشار موثر به دست آمده در بالا و با بهره‌گیری از رابطه ترزاقی، مکعب داده‌های فشار منفذی مورد تخمین قرار گرفت که مقطع عرضی (شرقی- غربی) آن در محل چاه ۲ و نگار فشار منفذی در محل دیگر چاه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده‌اند.

از آنجا که ضرایب همبستگی اولیه به دست آمده در فوق، کم است و مناسب ادامه کار و پیش‌بینی پارامتر فشار منفذی نیست، بنابراین نیاز به یک سری تصحیحات و واسنجی در محل چاه‌ها وجود دارد تا رابطه یاد شده برای برگرداندن داده‌های سرعت به داده‌های فشار موثر دقت لازم را داشته باشد. این کار در عمل به دو روش انجام گرفت، در مرحله اول تعدادی از داده‌ها که خارج از محدوده بود و ارقام نامعقولی به نظر می‌رسید از لیست داده‌ها حذف شد، در قدم بعدی ضرایب رابطه به صورت مرحله به مرحله تغییر داده شد و در هر مرحله داده‌های فشار موثر پیش‌بینی شده و با داده‌های واقعی (RFT) مقایسه شد، این عمل تغییر ضرایب و تولید داده‌های پیش‌بینی تا آنجا ادامه پیدا کرد که ضریب همبستگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های RFT به اندازه کافی بهینه شده و ادامه بهبود ضرایب برای مولفان دیگر ممکن نبوده است. بنابراین ضرایب واسنجی نهایی با مقادیر $A=185$ و $B=0.44$ به دست آمد و در رابطه ۷ برای برگردان داده‌های سرعت به داده‌های تنش موثر مورد استفاده قرار گرفت.

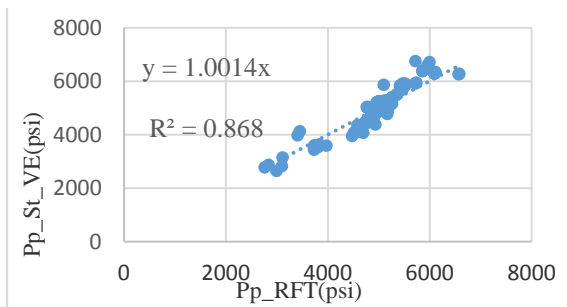
$$V = 1500 + 185(\sigma_e)^{0.44} \quad (7)$$

در این رابطه فوق V_0 ، ۱۵۰۰ متر بر ثانیه تعیین شد.

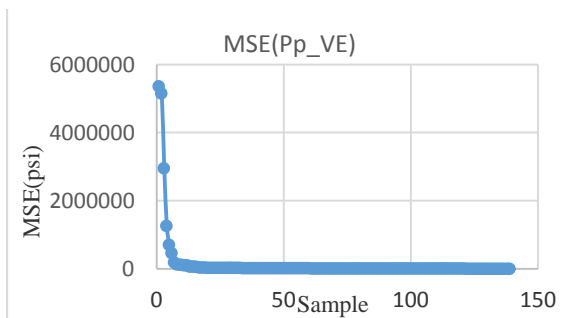
در نهایت دقت داده‌های پیش‌بینی شده با استفاده از داده‌های واقعی (RFT) چاه ۶ (به عنوان چاه آزمون) که قبلاً در برازش اولیه و استخراج رابطه ۷ استفاده نشده بودند، مورد بررسی قرار گرفته و اعتبارسنجی شدند. در شکل ۱۲ نتایج این آزمون با ضریب همبستگی نسبتاً بالایی ($R=0.912$) نشان داده است.



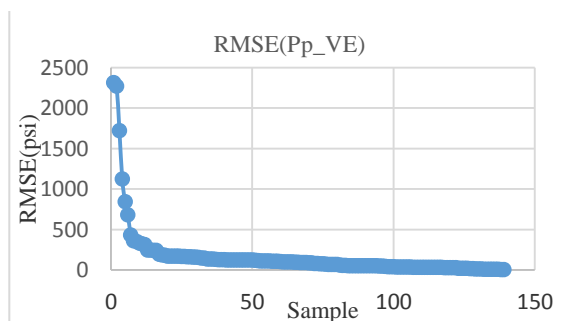
شکل ۱۶- انطباق داده‌های پیش‌بینی فشار منفذی با داده‌های آزمایش فشار در چاه‌ها.



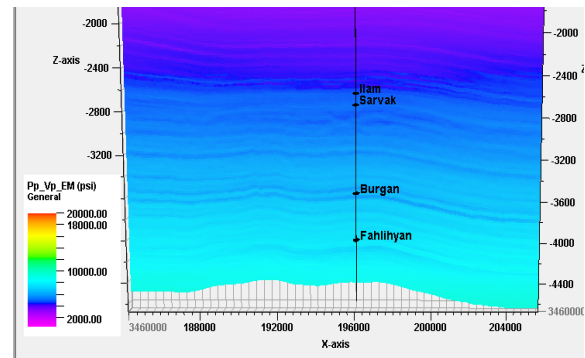
شکل ۱۷- نمودار متقاطع و ضریب همبستگی بین داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده با داده‌های آزمایش فشار در چاه‌ها.



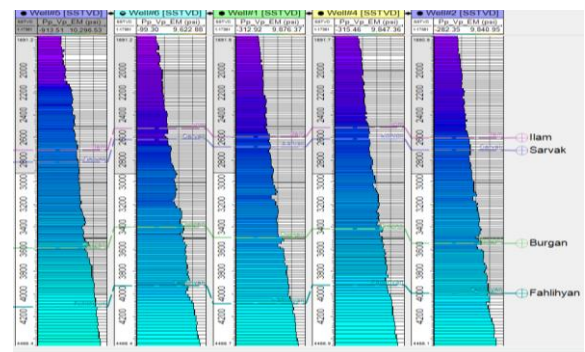
شکل ۱۸- خطای میانگین مربعات در مدل پیش‌بینی فشار منفذی.



شکل ۱۹- جذر خطای میانگین مربعات در مدل پیش‌بینی فشار منفذی.



شکل ۱۴- مقطع عرضی فشار منفذی پیش‌بینی شده: مخازن ایلام، بخش بالایی سازند سروک، بخش بورگان و بخش بالایی سازند فهلیان با فشار بیشتر (رنگ روشن‌تر) از لایه‌های بالا و پایین خود مشخص شده است.



شکل ۱۵- نگار فشار منفذی پیش‌بینی شده در محل چاه‌ها.

برای تعیین عدم قطعیت مدل به دست آمده، ابتدا میزان انطباق بین داده‌های فشار منفذی پیش‌بینی شده با داده‌های فشار منفذی حاصل از آزمایش فشار چاه ترسیم شد. همان‌طور که از نمودار شکل ۱۶ برمی‌آید انطباق قابل قبولی بین داده‌های یاد شده دیده می‌شود. همچنین برازش بین داده‌های پیش‌بینی شده و آزمایش فشار چاه‌ها دارای همبستگی بالایی بوده به طوری که ضریب (R^2) برابر با عدد ۰٫۸۶۸۹ است (شکل ۱۷). در نهایت میزان خطای مدل به صورت میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطا تعیین و نمودار آن‌ها در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شد. با توجه به خطای کم میانگین مربعات و جذر آن که در نمودارهای یاد شده نشان داده شده است، عملکرد مدل سرعت لرزه‌ای حاصل از آنالیز چند نشانگری در پیش‌بینی فشار منفذی در مخازن کربناته قابل قبول ارزیابی شده و نشان‌دهنده اعتبار این روش است.

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر مدل سرعت لرزه‌ای حاصل از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای که به روش آماری و در مازول Emerge استخراج شده بود برای اولین بار به وسیله مولفان این مقاله در پیش‌بینی فشار مخزنی، در یک مخزن کربناته مورد استفاده قرار گرفت. نتایج پیش‌بینی هم در خروجی‌های مقاطع عرضی و هم نگارهای استخراج شده از آن‌ها در محل چاه‌ها نشان داد که عملکرد مدل در تفکیک زون‌های پرفشار خوب بوده و به خوبی توانسته است سازندهای مخزنی (ایلام، سروک، بخش بورگان و سازند فهلیان) را که از فشار منفذی بالاتری نسبت به لایه‌های بالا و پایین خود دارند حتی در مخازن کربناته پیش‌بینی و مورد تفکیک قرار دهند. همچنین تجزیه و تحلیل آماری از نتایج این تحقیق، اعم از ضریب همبستگی بالا که R^2 برابر با ۰/۸۶۸۹ به دست آمد و همچنین خطای میانگین مربعات و جذر آن بین داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های آزمایش چاه که به صفر میل می‌کنند، نشان می‌دهند که پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری به روش سرعت لرزه‌ای در سازندهای کربناته با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر است، بنابراین انجام این نوع مطالعات با هزینه‌های نسبی اندکی که دارند، مزیت زیادی در ارزیابی پتانسیل خطر، تعیین وزن گل و سلامت حفاری خواهند داشت. در پایان به دلیل کمبود داده‌های ضروری که برای این نوع مطالعات در کشور وجود دارد، پیشنهاد می‌شود در گرفتن نگارهای چاه و آزمایش‌های فشار فقط به لایه‌های مخزنی اکتفا نشود تا بتوان نتایج مدل‌های پیش‌بینی را با دقت بیشتری و برای کل مقطع زمین‌شناسی تعمیم داده و برای طراحی برنامه حفاری و توسعه میدان مورد استفاده قرار داد. همچنین در ادامه مطالعات ترکیبی با روش‌های مختلف و با استفاده از نشانگرهای متفاوت پیشنهاد می‌شود که قطعاً در بالا بردن دقت مدل پیش‌بینی فشار منفذی برای این میدان موثر است.

منابع

- Hottmann, C.E. and Johnson, R.K., "1965", Estimation of formation pressures from log-derived shale properties. *Journal of Petroleum Technology*, 17(06), pp.717-722.
- Mouchet, J.P. and Mitchell, A., "1989", *Abnormal pressures while drilling: origins, prediction, detection, evaluation* (Vol. 2). Editions Technip.
- Sayers, C.M., den Boer, L.D., Nagy, Z.R. and Hooyman, P.J., "2006", Well-constrained seismic estimation of pore pressure with uncertainty. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006* (pp. 1530-1534). Society of Exploration Geophysicists.
- Ugwu, G. Z., "2015", An overview of pore pressure prediction using seismically derived velocities. *Journal of Geology and Mining Research*, 7(4), 31-40. Bell, F. (2002). *Engineering treatment of soils*. CRC Press.
- Dutta, N.C., "1983", Shale compaction and abnormal pore-pressures: A model of geopressures in the Gulf Coast basin. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983* (pp. 542-544). Society of Exploration Geophysicists.
- Kelly, M.C., Skidmore, C.M. and Cotton, R.D., "2005", Pressure prediction for large surveys. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005* (pp. 1239-1242). Society of Exploration Geophysicists.
- سلیمانی، ح. ر؛ سکوتی، م. ر. و ریاحی، م. ع؛ ۱۳۹۱؛ "پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از وارون‌سازی و تحلیل سرعت لرزه‌ای، مجله فیزیک زمین و فضا"، دوره ۳۸، شماره ۴، صفحه ۵۷-۷۰.
- نوری، م؛ شادی‌زاده، س. ر؛ ریاحی، م. ع. و جمالی، ج؛ ۱۳۹۲؛ "بررسی روش‌های تخمین فشار منفذی و تخمین فشار منفذی میدان سفید زاخور با استفاده داده‌های لرزه‌نگاری"، ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۰۵، صفحه ۷۱-۷۸.
- Hoskin, E. and O'Connor, S.A., "2016", The Influence of Rock Properties on Velocity Data with Respect to Pressure Prediction—with Particular Focus on Seismic Velocity Data. *Journal of Earth Sciences*, 2, pp.19-34.
- El-Werr, A., Shebl, A., El-Rawy, A. and Al-Gundor, N., "2017", Pre-drill pore pressure prediction using seismic velocities for prospect areas at Beni Suef Oil Field, Western Desert, Egypt. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 7(4), pp.1011-1021.
- Haris, S., & Vobbilisetty, S. "2017", U.S. Patent No. 9,807,031. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- محمدی، م؛ سلیمانی، ب؛ و محمودیان، م؛ ۱۳۹۶؛ "پیش‌بینی فشار غیرعادی سازند با استفاده از داده‌های سرعت لرزه‌ای سه بعدی، میدان کوپال"،

- Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. Society of Petroleum Engineers.
20. Bowers, G.L., "1995", Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction. *SPE Drilling & Completion*, 10(02), pp.89-95.
 21. Hermanrud, C., Wensaas, L., Teige, G.M.G., Bolas, H.N., Hansen, S. and Vik, E., "1998", Memoir 70, Chapter 4: Shale Porosities from Well Logs on Haltenbanken (Offshore Mid-Norway) Show No Influence of Overpressuring.
 22. Suwannasri, K., Promrak, W., Utitsan, S., Chaisomboonpan, V., Groot, R.J., Sognnes, H.I. and Morley, C.K., "2014", Reducing the variation of Eaton's exponent for overpressure prediction in a basin affected by multiple overpressure mechanisms. *Interpretation*, 2(1), pp.SB57-SB68.
 23. Contreras, O.M., Tutuncu, A.N., Aguilera, R. and Hareland, G., "2011", January. A case study for pore pressure prediction in an abnormally sub-pressured western Canada sedimentary basin. In *45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.
 24. Swarbrick, R., "2012", Review of pore-pressure prediction challenges in high-temperature areas. *The Leading Edge*, 31(11), pp.1288-1294.
 - مجله پژوهش نفت، شماره ۹۷، صفحه ۱۱۵-۱۰۳.
 13. Tingay, M.R., Hillis, R.R., Swarbrick, R.E., Morley, C.K. and Damit, A.R., "2007", 'Vertically transferred' overpressures in Brunei: Evidence for a new mechanism for the formation of high-magnitude overpressure. *Geology*, 35(11), pp.1023-1026.
 ۱۴. آدیم، ع؛ ریاحی، م.ع؛ و باقری، م.؛ ۱۳۹۷؛ "تخمین فشار منفذی به روش‌های ایتون باورز با استفاده از داده‌های لرزه نگاری و چاه‌پیمایی"، نشریه پژوهش‌های کاربردی ژئوفیزیک، دوره ۴ شماره ۲، صفحات ۲۷۵-۲۶۷.
 15. Terzaghi, K., "1943", Earth pressure and shearing resistance of plastic clay: a symposium: liner-plate tunnels on the Chicago (IL) subway. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 108(1), pp.970-1007.
 16. Biot, M.A. and Willis, D.G., "1957", The elastic coefficients of the theory of consolidation. *J. appl. Mech*, 24, pp.594-601.
 17. Zhang, J., "2011", Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1-2), pp.50-63.
 18. Gurevich, B., "2004", A simple derivation of the effective stress coefficient for seismic velocities in porous rocks. *Geophysics*, 69(2), pp.393-397.
 19. Eaton, B.A., "1975", January. The equation for geopressure prediction from well logs. In