



مقاله پژوهشی

تخمین مدل فشار منفذی در سازند آسماری میدان نفتی کوپال با استفاده از وارون سازی مکعب لرزه ای

فائزه موسویون^۱، سید محمد ابطحی فروشانی^{۱*}، حمزه صادقی سرخنی^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: ۰۸ خرداد ۱۴۰۴، بازنگری: ۲۰ مهر ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۷ آبان ۱۴۰۴)

چکیده

نظر به اهمیت فشار منفذی برای مدل سازی استاتیکی و دینامیکی مخازن نفت و گاز و طراحی حفاری و بهره برداری از آن ها، پیش بینی صحیح این کمیت پیش از انجام حفاری های گران قیمت و فرآیند چاه آزمایی، ضرورت دارد. پژوهش حاضر با استفاده از وارون سازی داده های لرزه ای به مدل سازی فشار منفذی در میدان نفتی کوپال در جنوب غربی ایران می پردازد که روشی ارزان برای تخمین این کمیت محسوب می شود. در این راستا، از مدل امیدانس صوتی به دست آمده از وارون سازی داده های لرزه ای در کنار سایر نشانگرهای لرزه ای و اطلاعات فشارسنجی با روش سازند آزمایی مکرر (RFT) سه حلقه چاه از چهار حلقه چاه موجود برای تخمین مدل فشار منفذی با استفاده از روش رگرسیون چند نشانگری استفاده شد. در گام بعد، شبکه عصبی احتمالاتی (PNN) و شبکه عصبی چندلایه ای پیش خور (MLFN) نیز برای تخمین فشار منفذی طراحی و آموزش داده شدند. چهارمین چاه به عنوان شاهد استفاده شد و در طراحی شبکه های یاد شده حضور نداشت. سپس برای ارزیابی عملکرد هر یک از این روش ها، ضریب تغییرات (CV) مدل فشار منفذی تخمین زده شده در طول در چاه چهارم با CV فشار منفذی اندازه گیری شده RFT در همان چاه مقایسه شدند. این مقایسه نشان داد در حالی که CV برای فشارهای اندازه گیری شده ۰/۱۲۳ بوده، اما CV برای فشارهای تخمین زده شده با روش های رگرسیون چند نشانگری، PNN و MLFN به ترتیب برابر ۰/۳۲۵، ۰/۲۳۸۶ و ۰/۱۹۸۶ است؛ بنابراین، فشارهای تخمین زده شده با روش MLFN نزدیک ترین ارتباط آماری را با داده های واقعی فشارسنجی داشته است. همچنین مشخص شد که همه نقاط مخزن از روند خطی افزایش هیدرواستاتیکی فشار منفذی با عمق تبعیت نمی کنند و در بعضی از نقاط، وجود پدیده فرافشار، سبب افزایش فشار منفذی به بیش از مقدار روند خطی هیدرواستاتیکی آن در مخزن یاد شده منجر شده است.

کلمات کلیدی

فشار منفذی، میدان نفتی کوپال، وارون سازی لرزه ای، رگرسیون چند نشانگری، شبکه عصبی PNN، شبکه عصبی MLFN

*عهده دار مکاتبات: smabtahi@iut.ac.ir

DOI: 10.22034/anm.2025.23186.1682

۱- مقدمه

فشار منفذی یا فشار شاره درون حفره‌های سنگ از جمله اطلاعات لازم برای انجام مدل‌سازی مخزن، طراحی بهبود برداشت (IOR) و یا ازدیاد برداشت نفت (EOR) است [۱]. همچنین این کمیت در ارزیابی روند شکستگی‌ها، گسل‌ها و دینامیک مهاجرت هیدروکربن به زمین‌شناسان کمک می‌کند. در طراحی لوله‌گذاری، تعیین وزن گل حفاری و ایجاد تعادل در فشار سیال داخل چاه نیز دانستن مقدار فشار منفذی ضرورت دارد؛ بنابراین محاسبه فشار منفذی نقش مهم در کاهش هزینه حفاری و افزایش ایمنی چاه دارد [۲]. در شرایط عادی و با فرض وجود اتصال مجراهای موجود بین حفره‌های سنگ‌ها تا سطح زمین، فشار حفره‌ای برابر فشار هیدرواستاتیک ناشی از وزن ستون سیال خواهد بود؛ اما اگر راه ارتباطی بین حفره‌ها تا سطح زمین قطع شود، ممکن است پدیده‌ای به نام فرافشار (Over-pressure) ایجاد شود. این قطع ارتباط می‌تواند به دلیل وجود یک لایه ناتراوا باشد. به این ترتیب، فشار منفذی مقداری بین فشار طبقاتی و فشار هیدرواستاتیکی خواهد داشت [۳-۶]. عدم پیش‌بینی محل فرافشار، می‌تواند به ایجاد مشکلاتی نظیر فوران چاه و ریزش آن در زمان حفاری و یا بهره‌برداری منجر شود [۷]. بنابراین، پیش‌بینی فشار منفذی و تغییرات آن یکی از زمینه‌های اصلی در مطالعات پتروفیزیکی مخازن نفت و گاز بوده است. اندازه‌گیری فشار منفذی از چاه در حال تولید و یا بعد از حفاری با استفاده از روش‌هایی نظیر روش سازندآزمایی مکرر (RFT)، فشار آزمای سریع (XPT) و سازندآزمای پویای پیمانه‌ای (MDT) امکان‌پذیر است؛ اما برای مهندسان نفت مهم است که قبل از حفر چاه، میزان فشار منفذی را در محل چاه جدید تخمین بزنند. در این راستا، مطالعات پیش‌بینی فشار منفذی اولین بار توسط جانسون و هاتمن (۱۹۶۵) بر پایه انحراف سرعت صوت از روند نرمال آن در سازندهای شیلی انجام شد. بر اساس این مطالعه دقت پیش‌بینی فشار سیال $\frac{psi}{ft}$ ۰/۰۴ به دست آمد [۸].

مسیو و کلی (۱۹۶۷) نیز فشار منفذی را در مناطقی که هیچ سابقه حفاری قبلی در آن نبود با استفاده از امواج لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند داده‌های لرزه‌ای یک ابزار ضروری برای پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری است [۹]. گاردنر و همکاران (۱۹۷۴) رابطه‌ای بین فشار

روباره و فشار نرمال سیال (فشار هیدرواستاتیک) و فشار سازندی پیشنهاد دادند. تحقیق یادشده نشان داد که تنش مؤثر (تفاوت بین فشار روباره و فشار سیال)، حاکم بر خواص کشسانی اسکلت سنگ‌های رسوبی متخلخل است [۱۰]. ایتون (۱۹۷۶ و ۱۹۷۲) و باورز (۲۰۰۱ و ۱۹۹۵) روش‌هایی تجربی برای تخمین فشار منفذی معرفی نمودند. ایتون از یک تبدیل مستقیم سرعت به فشار منافذ بهره می‌گیرد؛ درحالی‌که روش باورز، تنش مؤثر را از سرعت‌ها تخمین زده و سپس فشار منافذ را محاسبه می‌کند [۱۱-۱۳]. از دیگر پژوهش‌های قابل توجه در این خصوص، می‌توان به مقاله دوتا اشاره نمود که ارتباط بین داده‌های ژئوفیزیکی را با فشار منفذی موردبررسی قرار داده است [۱۴].

از میان محققان ایرانی، آزادپور و شادمنامن (۲۰۱۶) سازوکارهای ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میداین هیدروکربنی جنوب ایران را با استفاده از مطالعات نمودارهای سرعت، چگالی و تنش مؤثر مورد مطالعه قرار دادند. بررسی آن‌ها نشان داد که وجود تراکم یافتگی نامتوازن، عامل اصلی ایجاد فشار منفذی بالا در میدان مورد مطالعه بوده است. همچنین فشار منفذی پیش‌بینی‌شده مطابقت مناسبی با مقادیر فشار منفذی اندازه‌گیری شده در چاه‌ها نشان داد [۱۵]. همچنین محمدی و همکاران (۲۰۱۸) با تحلیل سرعت داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، مدل سرعت برانبارش را به دست آوردند. سپس با استفاده از مدل یادشده و رابطه باورز (۲۰۰۱)، مقدار تنش مؤثر را محاسبه نمودند. همچنین با تعیین فشار روباره و استفاده از رابطه بنیادی ترزاقی (۱۹۴۳)، فشار منفذی را در میدان کوپال با استفاده از روابط تجربی و زمین‌آماری به دست آوردند [۱۶].

فارابی و همکاران (۲۰۲۱) نیز مدل سه‌بعدی فشار منفذی را در سوماترا جنوبی اندونزی به دست آوردند. آن‌ها برای ساخت مدل فشار منفذی از روش تجربی مانند ایتون کمک گرفتند و برای تجزیه و تحلیل نتایج از دو الگوریتم رگرسیون چند نشانگری و شبکه عصبی احتمالاتی (PNN) استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شبکه عصبی احتمالاتی نتایج بهتری نسبت به رگرسیون چند نشانگری ارائه داده است [۱۷]. در ادامه، ریاحی و فخاری (۲۰۲۲) فشار منفذی را با استفاده از امپدانس صوتی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و نگارهای چاه به طور مستقیم و بدون وارون‌سازی آن، در یکی از مخازن کربناته ایران تخمین زدند.

(۲۰۲۲) در تخمین فشار منفذی سازندهای آسماری و بنگستان در فروافتادگی دزفول، قابل ذکر هستند [۲۳-۲۵]. باوجود مزیت های استفاده از داده های لرزه ای در تخمین فشار منفذی، تعداد پژوهش های صورت گرفته در این خصوص به ویژه در میدان های هیدرکوبنی ایران انگشت شمار بوده است و همچنان انجام مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است. در همین راستا، مطالعه موردی حاضر به تخمین فشار منفذی در سازند آسماری میدان نفتی کوپال و تشخیص زون های دارای فرافشار در آن میدان می پردازد.

شیان ذکر است که تخمین فشار منفذی در این میدان قبلاً توسط محمدی و همکاران (۲۰۱۸) انجام شده است؛ اما در آن تحقیق بدون استفاده از داده های لرزه ای و صرفاً با استفاده از رابطه تجربی باورز (۲۰۰۱) و استفاده از واریوگرام های افقی و قائم داده های فشار منفذی اقدام به تخمین زمین آماری این فشار در کل میدان نفتی با محاسبه برآورد کریجینگ نموده است؛ اما استفاده از ضرایب ثابت برای رابطه باورز در کل محدوده و تمام عمق ها، از اعتبار نتایج حاصله کاسته است. همچنین در طی فرآیند تحقیق یادشده، از رابطه عمومی گاردنر برای محاسبه چگالی از سرعت استفاده شده است، حال آنکه ضرایب این رابطه در لیتولوژی های متفاوت یکسان نیست. همچنین نویسندگان مقاله یادشده از فرض وجود رابطه فضایی افقی و قائم بین داده های فشار منفذی در تمام نقاط و تمامی عمق ها استفاده کرده اند؛ حال آنکه این فشار تحت تأثیر چین خوردگی ها و ساختارهای تکتونیکی تغییر می کنند [۱۰].

علاوه بر این، مدل نهایی تغییرات فشار منفذی به دست آمده نیز پدیده هایی با تغییرات تیز نسبت به عمق نشان داده است که از دیدگاه زمین شناسی قابل توجیه نیست [۱۶]؛ اما در مقاله حاضر، ابتدا با استفاده از وارون سازی لرزه ای، مدل امیدانس صوتی در محدوده ای شامل چاه های در حال بهره برداری از میدان یادشده محاسبه می شود. سپس، از مدل یادشده و سایر نشانگرهای لرزه ای برای آموزش و اعتبارسنجی تخمین گرهای مبتنی بر رگرسیون و روش های شبکه های عصبی در محل چاه های در حال بهره برداری استفاده می شود. از تعمیم آن تخمین گرها به کل محدوده سه بعدی داده لرزه ای، مقدار فشار منفذی در کل سازند مخزنی میدان یادشده محاسبه شده و مقادیر به دست آمده با داده های فشارسنجی RFT در محل یک چاه شاهد مقایسه می شوند. همچنین با مقایسه فشارهای منفذی به دست آمده با روند

سپس با استفاده از داده های فشارسنجی RFT و مقدار امیدانس به دست آمده ضرایب معادله را کالیبره کردند و در نقاطی که داده فشارسنجی وجود نداشت، فشار منفذی را محاسبه نمودند [۱۸].

در میان روش هایی که تاکنون برای پیش بینی فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفته اند، استفاده از تخمین فشار منفذی با استفاده از داده های لرزه ای، کمترین وابستگی را به حفر چاه و انجام اندازه گیری های درون چاهی دارد. همچنین استفاده از داده های لرزه ای سه بعدی، امکان مدل سازی سه بعدی فشار منفذی در یک سازند را فراهم می کند. برای مثال، با استفاده از مدل امیدانس صوتی به دست آمده از وارون سازی داده های لرزه ای سه بعدی، می توان چگالی و سرعت سازند را محاسبه کرده و سپس از این کمیت ها برای تخمین فشار منفذی استفاده نمود [۱۹].

برای صحت سنجی این تخمین ها می توان مقدار فشار منفذی تخمین زده شده را در محل چاه های در حال بهره برداری با داده های فشارسنجی اندازه گیری شده در چاه های موجود مقایسه نمود. همچنین استفاده ترکیبی از داده های فشارسنجی چاه های موجود در کنار داده های لرزه ای می تواند به پایش فشار منفذی در یک مخزن در حال بهره برداری کمک کند. برای مثال، ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) از داده های MDT و RFT برای آموزش یک شبکه عصبی کانولوشنی (CNN) استفاده کردند. شبکه بر روی مکعب های ویژگی های لرزه ای آموزش دید و توانست نقشه فشار منفذی را به صورت پیوسته در فضای سه بعدی با دقت بالا تولید کند [۲۰]. همچنین چاترجی و همکاران (۲۰۱۶) در حوزه ماهانادی هند یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) را با ترکیب ویژگی های لرزه ای و داده های MDT آموزش دادند. آن ها نشان دادند که اضافه کردن نشانگرهای لرزه ای به مدل، دقت آن را به طور قابل توجهی افزایش می دهد [۲۱]. روی و همکاران (۲۰۲۰) نیز در حوضه کریشنا-گوداواری هند از داده های MDT و نشانگرهای لرزه ای متعددی نظیر امیدانس صوتی، شیرینی و فرکانس لحظه ای برای آموزش یک مدل جنگل تصادفی برای تخمین فشار منفذی استفاده کردند [۲۲].

در میان پژوهش های انجام شده در ایران نیز مقالات غلامی و همکاران (۲۰۲۰) در تخمین فشار منفذی در حوضه جنوبی دریای خزر، فلاحت و همکاران (۲۰۲۱) در تخمین فشار منفذی در میدان پارس جنوبی و آزادپور و همکاران

فسیل‌دار، سنگ‌آهک دولومیتی، سنگ‌آهک رسی، ماسه‌سنگ و شیل تشکیل شده است. تمرکز آهک‌های متخلخل عمدتاً در نیمه تحتانی سازند است [۲۶].

۲-۲- داده‌های ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی مورد استفاده

اکتشاف میدان نفتی کوپال در سال ۱۳۴۴ توسط شرکت اکتشاف و تولید نفت ایران انجام شده است [۲۸]. برداشت داده‌های لرزه‌ای بازتابی در این میدان به صورت سه بعدی انجام شده و بخشی از آن در محدوده‌ی به خط‌های (Inlines) ۴۴۰۰ تا ۴۸۰۰ و عمود به خط‌های (Xlines) ۱۲۳۰ تا ۱۴۳۰ در اختیار نویسندگان قرار گرفته است. داده‌ها پس از انجام کوچ زمانی داده پس از برنابارش توسط شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب در اختیار پژوهش حاضر قرار گرفته است. افزون بر داده‌های لرزه‌ای، داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی مربوط به چند چاه واقع در محدوده داده‌های لرزه‌ای به همراه اطلاعات داده‌های شات کنترل و ترانشه زنی قائم لرزه‌ای (VSP) آن‌ها و داده‌های فشارسنجی RFT در چند چاه نیز مورد استفاده قرار گرفته است. کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار CGG Hampson Russell مورد پردازش و مطالعه قرار گرفته‌اند. مراحل کلی انجام این پردازش به طور خلاصه در ادامه معرفی می‌شوند.

در این پژوهش داده‌های چهار چاه ۳۶، ۴۸، ۵۲ و ۵۹ میدان کوپال مورد بررسی قرار گرفت. دلیل انتخاب این چاه‌ها، قرارگیری این چاه‌ها در محدوده داده‌های لرزه‌ای یاد شده است. همچنین داده‌های نگارهای صوتی، چگالی، شات کنترلی یا VSP و داده‌های نمودار فشار نظیر RFT هر چهار چاه در دسترس بود. به این منظور، ابتدا اطلاعات مربوط به مختصات و موقعیت چاه‌ها، نگارهای صوتی، چگالی، شات کنترل و فشار در نرم‌افزار همپسون راسل بارگذاری شدند. همچنین داده‌های لرزه‌ای با نرخ نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه نیز بارگذاری گردیدند. لازم به ذکر است که محدوده مورد مطالعه در این پژوهش به محدوده زمانی سرسازند آسماری تا سرسازند پایده محدود است.

کلی فشار هیدرواستاتیک مخزن، زون‌های دارای فرافشار معرفی می‌شوند.

۲- مواد و روش‌ها

پیش از ورود به مراحل تحلیل داده‌های لرزه و اکتشافی در میدان نفتی مورد مطالعه، ابتدا زمین‌شناسی محدوده و سازندهای مخزنی و غیرمخزنی آن معرفی می‌شوند. در ادامه، به معرفی داده‌ها و مراحل تحلیل آن‌ها، واروند سازی داده‌های لرزه‌ای و نحوه تخمین فشار منفذی در سازند مخزنی میدان یادشده می‌پردازیم.

۲-۱- زمین‌شناسی میدان کوپال

میدان کوپال یکی از میدان‌های بزرگ نفتی در استان خوزستان است که در ۵۰ کیلومتری شمال شرق اهواز و در بخش مرکزی فروافتادگی دزفول شمالی و در جهت ادامه چین‌خوردگی تاقدیس آغاجاری واقع شده است. موقعیت این میدان در شکل ۱ نشان داده شده است. این میدان مانند دیگر ساختارهای زاگرس روند شمال غربی- جنوب شرقی دارد [۲۶]. این میدان تاقدیسی تقریباً متقارن است که گسل خوردگی در یال جنوب غربی آن سبب دگرریختی شده است [۲۷]. سازندهای تشکیل‌دهنده ستون چینه‌ای میدان کوپال به ترتیب از سطح به عمق شامل: سازندهای آغاجاری، میشان، گچساران، آسماری، پایده، گورپی و گروه بنگستان (که شامل سازندهای ایلام، سروک و کژدمی) است [۱۶].

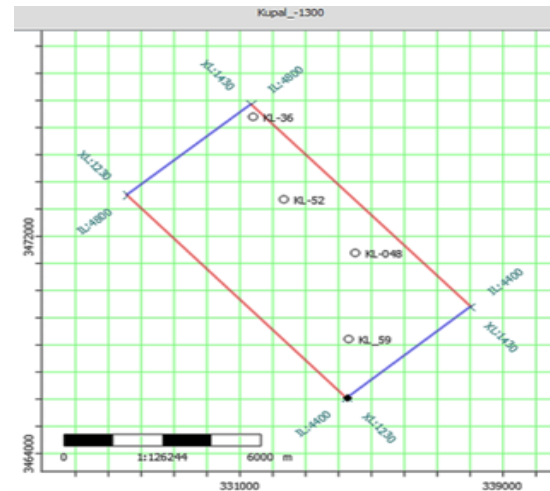


شکل ۱: موقعیت جغرافیایی میدان‌های نفتی خوزستان. میدان کوپال با رنگ قرمز مشخص شده است.

مخزن مورد مطالعه در این میدان در سازند آسماری واقع شده که دارای طول ۶۴ و عرض ۴ کیلومتر است. این سازند تقریباً ۴۵۰ متر ضخامت دارد و بیشتر از سنگ‌آهک

سیر موج از سطح زمین تا اعماق خاص است استفاده می شود. این زمان برای استفاده باید دو برابر شود؛ زیرا معمولاً زمان داده های لرزه ای به زمان سیر رفت و برگشتی موج ثبت می شود. این تطبیق داده ها برای تمامی چاه ها انجام گردید و داده های چاه پیمایی از حوزه مکان (عمق) به زمان تبدیل شدند. البته داده های VSP نیز پس از پردازش دورافت صفر (Zero Offset) نیز به این منظور قابل استفاده است [۲۹].

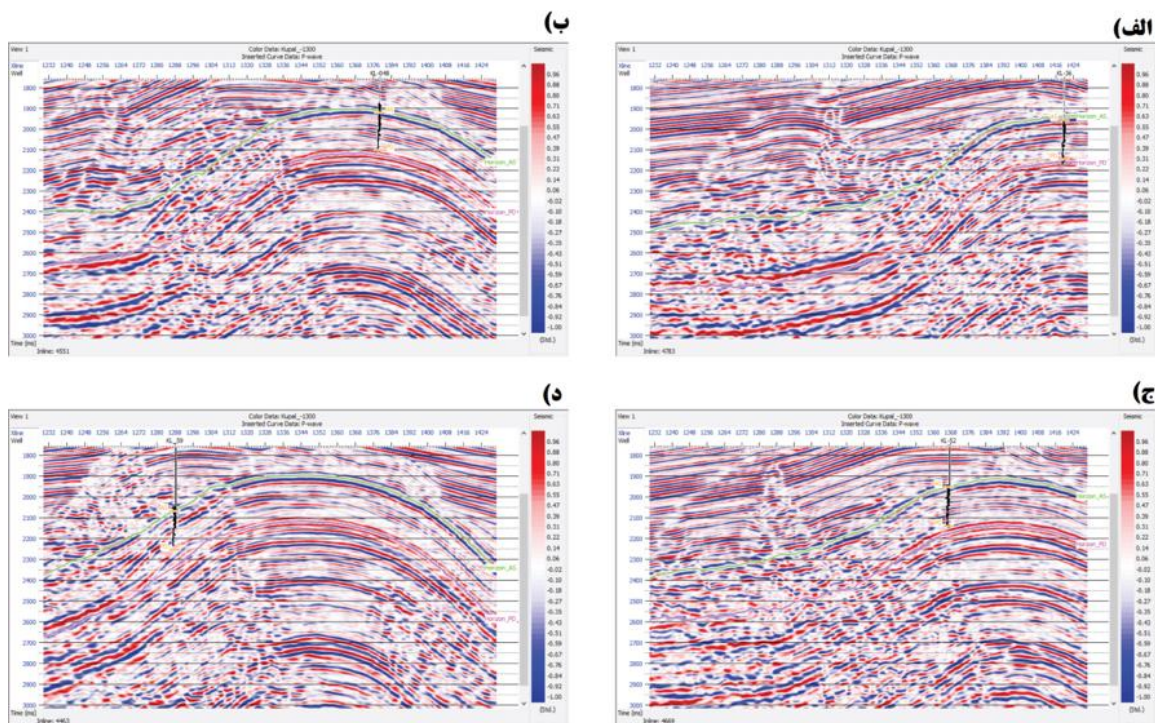
پس از تبدیل داده های چاه و از جمله محل سر سازندها از حوزه عمق به حوزه زمان، محل افق های سر سازندهای آسماری و پابده در داده های لرزه ای مشخص شد. سپس بازتاب های مربوط به افق های سر سازندها با استفاده از بازتاب لرزه ای در محل سر سازندها ردیابی شدند. از این افق ها برای تعیین محدوده بالا و پایین مخزن استفاده می شود. شکل ۳ مقاطع داده های لرزه ای را در محل هم خط های چهار چاه نشان داده شده در شکل ۲ نشان می دهد. در هر یک از این شکل ها سر سازنده آسماری با رنگ سبز و سر سازنده پابده با رنگ قرمز مشخص شده است. شکل یاد شده مشخص نمود که چاه های ۳۶، ۴۸ و ۵۲ نزدیک به رأس تاق دیس قرار گرفته اند، اما چاه ۵۹ در یال غربی تاق دیس قرار دارد. ضمناً حضور شکستگی و گسل خوردگی گسترده در یال غربی تاق دیس مشخص است.



شکل ۲: محدوده داده های لرزه ای مورد استفاده و محل چاه های ۳۶، ۴۸، ۵۲ و ۵۹.

۳-۲- گره زدن داده لرزه ای و داده های چاه پیمایی

ابزارهای چاه پیمایی تغییرات پارامترهای فیزیکی را بر اساس عمق ثبت می کنند؛ در حالی که داده های لرزه ای به صورت تغییر دامنه لرزه نگاشت با زمان ثبت شده اند. برای استفاده توام از این داده ها باید بین آن ها سازگاری ایجاد شود. برای مثال لازم است کمیت عمق در داده های چاه پیمایی با زمان رفت و برگشت موج لرزه ای از هر عمق جایگزین شود. به این منظور معمولاً از داده های شات کنترل که شامل زمان



شکل ۳: مقاطع لرزه ای بر خط عبور کننده از چاه های (الف) ۳۶، (ب) ۴۸، (ج) ۵۲، (د) ۵۹. منحنی های سبز و قرمز به ترتیب نمایش دهنده افق سر سازندهای آسماری و پابده می باشند.

لرزه‌نگاشت‌های واقعی داده‌های لرزه‌ای محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از هم‌میخت این موجک با ضرایب انعکاس در محل هر چاه، یک لرزه‌نگاشت مصنوعی محاسبه می‌شود. در صورت عدم انطباق این لرزه‌نگاشت با لرزه‌نگاشت واقعی در محل چاه، می‌توان با جابه‌جایی رد لرزه‌نگاشت مصنوعی در جهت زمان و یا تغییر فاز موجک، یک لرزه‌نگاشت مصنوعی با بیشترین میزان انطباق با لرزه‌نگاشت واقعی در محل چاه ساخته می‌شود [۲۹]. در همین راستا، با ابتدا با روش آماری موجک غالب در محدوده زمانی بین افق لرزه‌ای آسماری و پایده محاسبه شد. این موجک دارای طول موجک ۱۴۰ میلی‌ثانیه، فاز ثابت صفر است. بیشینه دامنه موجک در فرکانس‌های بین ۱۰ تا ۴۰ هرتز قرار دارد. شکل ۴ موجک یاد شده و تصویر طیف فاز و دامنه آن را نشان می‌دهد. با هم‌میخت این موجک در ضرایب انعکاس به‌دست‌آمده از نمودارهای چگالی و صوتی در هر چاه، لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی در محل چاه‌ها محاسبه شد. میزان همبستگی این لرزه‌نگاشت‌ها با لرزه‌نگاشت‌های واقعی موجود در محل چاه‌های ۳۶، ۴۸، ۵۲ و ۵۹ به ترتیب ۸۳، ۷۶، ۷۲ و ۶۴ درصد بوده است. **Error! Reference source not found.** روند کلی ایجاد یک لرزه‌نگاشت مصنوعی را در چاه ۳۶ نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که همبستگی‌های به‌دست‌آمده حداکثر همبستگی ممکن بودند و با تغییر فاز و زمان بهبودی در مقادیر همبستگی ایجاد نشد. این مسئله نشان می‌دهد پیش آنکه داده‌های لرزه‌ای در اختیار انجام این تحقیق قرار گیرد، احتمالاً پردازش تبدیل به فاز صفر داده‌ها روی آن‌ها اعمال شده است.

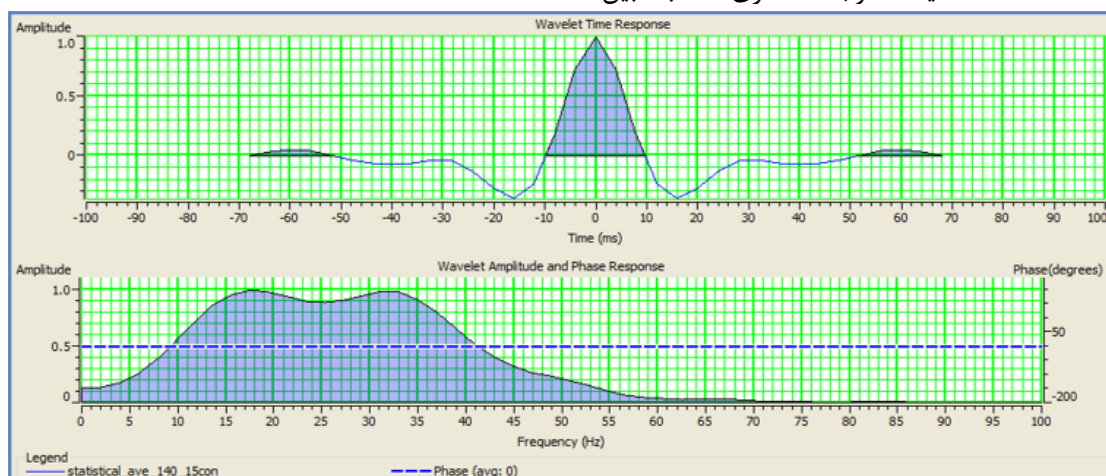
بعد از بارگذاری داده‌ها، عملیات گره‌زدن داده‌های چاه با داده‌های لرزه‌ای انجام شد. برای این کار نیاز است که ابتدا موجک لرزه‌ای غالب w در محدوده چاه مشخص شده و طبق رابطه (۱):

$$S = r * w \quad (1)$$

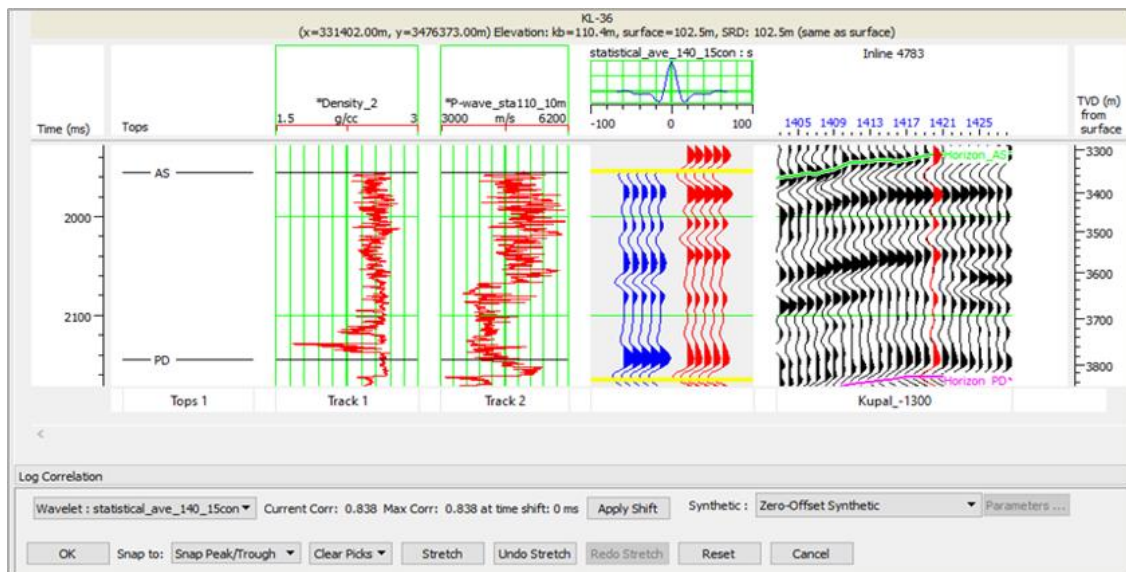
با هم‌میخت آن در تابع ضرایب انعکاس r به‌دست‌آمده از داده‌های چاه‌پیمایی، لرزه‌نگاشت مصنوعی S در محل چاه ساخته شود. تابع ضرایب انعکاس هر بازتاب‌دهنده به نوبه خود با استفاده از رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$r_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (2)$$

در این رابطه، Z امپدانس صوتی هر لایه است که به‌صورت حاصل‌ضرب چگالی و سرعت موج فشارشی در هر عمق تعریف می‌شود. نماد i نیز شماره بازتاب‌دهنده را نشان می‌دهد. رابطه (۱) ابزار اصلی تخمین موجک غالب داده‌های لرزه‌ای با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی است. تعیین این موجک ادامه برای انجام وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای ضرورت دارد. برای استفاده از رابطه (۱)، ابتدا ضرایب r باید تعیین شوند. به این منظور با محاسبه حاصل‌ضرب مقادیر چگالی و سرعت از نمودارهای مربوط به چگالی و صوتی یک چاه در هر عمق، یک نمودار تغییرات امپدانس ایجاد می‌شود. سپس می‌توان ضرایب انعکاس را با استفاده از رابطه (۲) محاسبه کرد [۳]. در مرحله بعد می‌بایست موجک w به‌گونه‌ای انتخاب شود که لرزه‌نگاشت مصنوعی حداکثر شباهت S را با لرزه‌نگاشت واقعی در محل چاه داشته باشد. به این منظور ابتدا با استفاده از روش‌های آماری مبتنی بر میان همبستگی (Cross-correlation)، یک موجک آماری غالب بین



شکل ۴: موجک غالب آماری در حوزه زمان (بالا) و طیف دامنه و فاز آن (پایین)



شکل ۵: گره زدن داده لرزه ای و نگارهای چاه پیمایی در چاه ۳۶ و روند ایجاد لرزه نگاشت مصنوعی

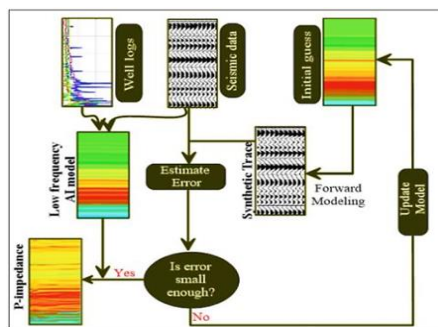
۲-۴- وارون سازی لرزه ای و تخمین مدل امپدانس

هر چند داده های لرزه ای، تصویر کلی لایه ها و ساختارهای زمین شناسی را به تصویر می کشند، اما به تنهایی برای تعیین مقدار پارامترهایی نظیر چگالی، سرعت و امپدانس لایه ها کافی نیستند. برای این منظور روش های مختلف وارون سازی داده های لرزه ای طراحی شده اند. وارون سازی لرزه ای فرآیندی برای تخمین مدل امپدانس صوتی زمین با استفاده از داده های لرزه ای آن است. با تخمین مدل امپدانس صوتی، تفسیر زمین شناسی به واقعیت نزدیک تر و قابل فهم تر خواهد بود [۴].

از میان روش های مختلفی که برای انجام وارون سازی داده های لرزه ای پیشنهاد شده اند، در این پژوهش از روش مبتنی بر مدل برای تخمین امپدانس در محدوده سازند آسماری استفاده شد. این روش با ثابت نگه داشتن موجک، امپدانس را آن قدر تغییر می دهد تا سرانجام به مدلی از امپدانس برسد که همامیخت ضرایب انعکاس به دست آمده از آن مدل با موجک آماری استخراج شده، لرزه نگاشت مصنوعی با بیشترین انطباق با داده لرزه ای واقعی داشته باشد [۵].

شکل ۶ روند کلی انجام وارون سازی بر پایه مدل را نشان می دهد. مطابق این شکل، برای آغاز وارون سازی لرزه ای، یک مدل امپدانس پایه یا مدل اولیه به عنوان یک حدس از میزان امپدانس لایه ها، مورد نیاز است. این مدل با استفاده از امپدانس صوتی به دست آمده از حاصل ضرب نمودارهای صوتی و چگالی با کمترین فرکانس موجود در نمودارهای چاه پیمایی ساخته می شود. مدل اولیه به دلیل داشتن

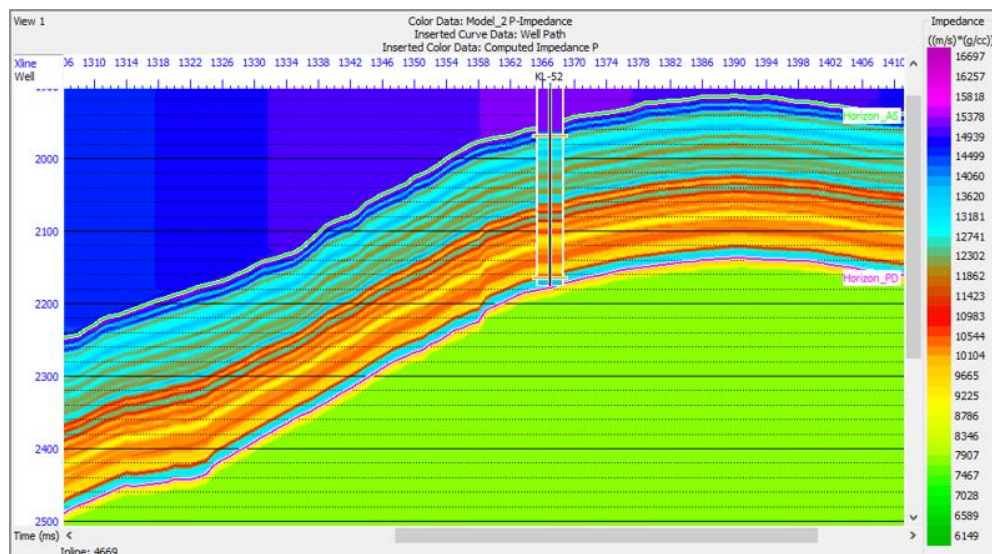
فرکانس پایین، دارای رفتاری بسیار هموار بوده و به زبان دیگر، ساده ترین حالت ممکن برای تغییرات کلی امپدانس سازند مورد مطالعه را نشان می دهد. ساخت مدل اولیه با استفاده از داده های چاه پیمایی، برای وارون سازی ضرورت دارد. دلیل این امر نیاز به پیش بینی وجود پدیده های هموار و با فرکانس های کمتر از ۱۰ هرتز است که داده های لرزه ای فاقد آن فرکانس ها می باشند. این مدل مبنای عملیات وارون سازی قرار گرفته و تغییرات بیشتر و فرکانس های بالا نیز در طی وارون سازی به آن اضافه می شود.



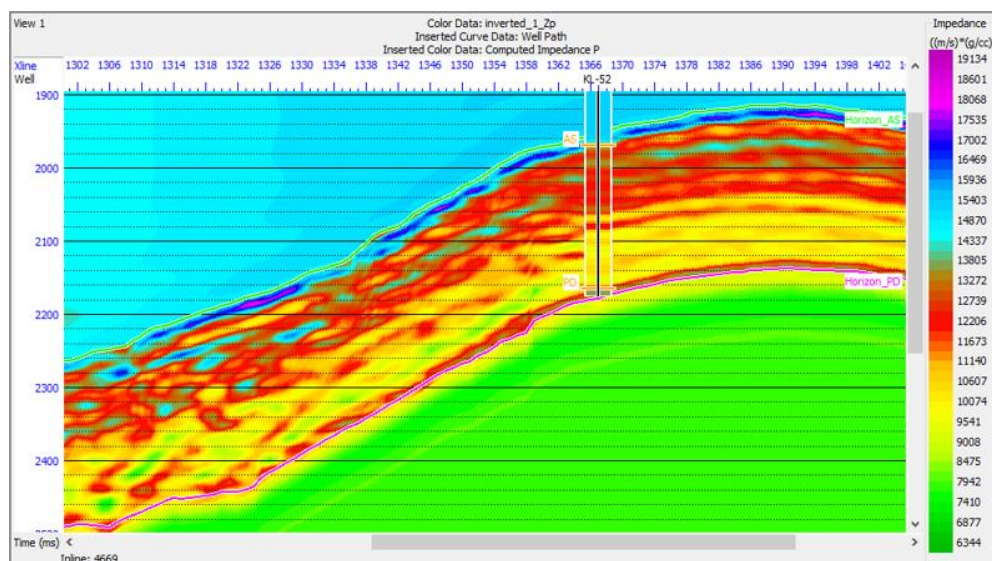
شکل ۶: روند انجام وارون سازی لرزه ای بر پایه مدل [۲۹].

پس از انجام وارون سازی بر پایه مدل، مدل امپدانس در سراسر محدوده سازند آسماری در میدان کوپال ساخته شد. سپس با استفاده از مدل امپدانس به دست آمده و رابطه (۲) تابع ضرایب بازتاب محاسبه شد. از همامیخت ضرایب بازتاب با موجک لرزه ای غالب، لرزه نگاشت های مصنوعی در سراسر محدوده مدل ساخته شد. میزان همبستگی بین لرزه نگاشت مصنوعی ساخته شده و لرزه نگاشت واقعی و خطای این روش بر مبنای درصد در محل چاه ۳۶ به ترتیب ۹۹ و ۱۳، در چاه

شکل ۷ به ترتیب مدل اولیه و نهایی تخمین زده شده برای امپدانس پس از انجام ۱۰ تکرار در مقطعی از مدل که از محل چاه ۵۲ می‌گذرد را نشان می‌دهند.



شکل ۷: مدل اولیه امپدانس صوتی در مقطع قائم گذرنده از چاه ۵۲



شکل ۸: مقطع قائم مدل امپدانس صوتی تخمین زده شده با استفاده از وارون‌سازی مبتنی بر مدل در مقطع گذرنده از چاه ۵۲. مقدار امپدانس به دست آمده از داده‌های چاه‌پیمایی نیز در محل چاه‌ها روی زمینه مدل امپدانس تخمین زده شده با استفاده از وارون‌سازی قرار داده شده است.

می‌تواند به صورت یک نقطه‌ای و یا چند نقطه‌ای انجام شود. تعداد نقاط نمونه‌برداری مشارکت‌کننده در محاسبه نشانگر، اصطلاحاً طول نشانگر نامیده می‌شوند. برای یافتن بهترین طول برای نشانگرها در این پژوهش، نشانگرهایی با ۹ طول متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و طول عملگر ۱ نقطه‌ای مناسب‌ترین گزینه تشخیص داده شد.

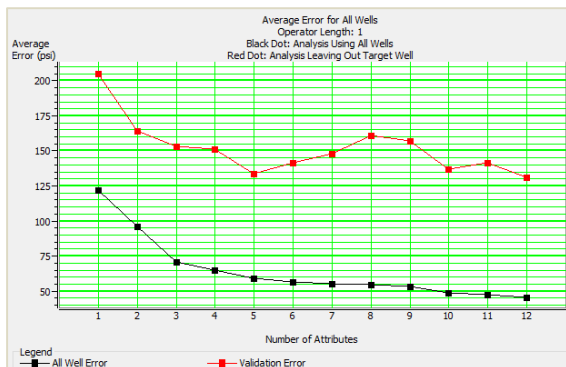
در این مرحله با استخراج یک ارتباط جبری بین تعدادی از نشانگرهای لرزه‌ای و مقادیر فشار اندازه‌گیری شده در

۴۸، ۹۸ و ۱۴، در چاه ۵۲، ۹۹ و ۱۴ و در چاه ۵۹، ۹۶ و ۲۶ درصد به دست آمد. به این ترتیب، مدل امپدانس صوتی در کل مکعب لرزه‌ای مخزن آسماری میدان کوپال به دست آمد.

۵-۲- تخمین فشار منفذی با رگرسیون چند نشانگری

بعد از محاسبه وارون‌سازی امپدانس صوتی می‌توان از آن به عنوان یک نشانگر لرزه‌ای استفاده نمود. افزون بر نشانگر امپدانس صوتی، سایر نشانگرهای لرزه‌ای قابل محاسبه با نرم‌افزار همپسون راسل نیز محاسبه شده و برای شناسایی بهترین نشانگرها جهت تخمین زدن فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفتند. محاسبه نشانگرهای لرزه‌ای

شکل ۹ نشان می دهد گر چه افزایش تعداد نشانگرها خطای آموزش را کاهش می دهد، ولی این افزایش همیشه لزوماً بهبود اعتبارسنجی نمی شود. برای مثال در این بررسی پس از پنجمین نشانگر خطای اعتبارسنجی افزایش یافته است. کاهش خطای آموزش در کنار افزایش خطای اعتبارسنجی نشانه وقوع پدیده نامطلوب بیش برازش (Over-fitting) در تخمین است [۳۰].



شکل ۹: روند تغییرات خطای آموزش (منحنی سیاه) و خطای اعتبارسنجی (منحنی قرمز) با تعداد نشانگرها

برای اجتناب از پدیده بیش برازش مدل امیدانس به دست آمده از تکرار پنجم به عنوان مدل امیدانس نهایی به دست آمده از روش رگرسیون چند نشانگری در نظر گرفته شد. در این تکرار، خطاهای متوسط نسبی آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۱/۴ و ۳/۱۵ درصد بوده است. همچنین میزان همبستگی بین فشارهای منفذی تخمین زده شده و فشار اندازه گیری شده در مراحل آموزش و اعتبارسنجی نیز به ترتیب ۹۵/۶ و ۸۵/۹ درصد بوده است. همچنین مقدار همبستگی ها و خطاهای یاد شده در روش رگرسیون چند نشانگری در سطر اول جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱: نشانگرهای مورداستفاده و بهینه از طریق روش رگرسیون چند نشانگری برای تخمین فشار منفذی

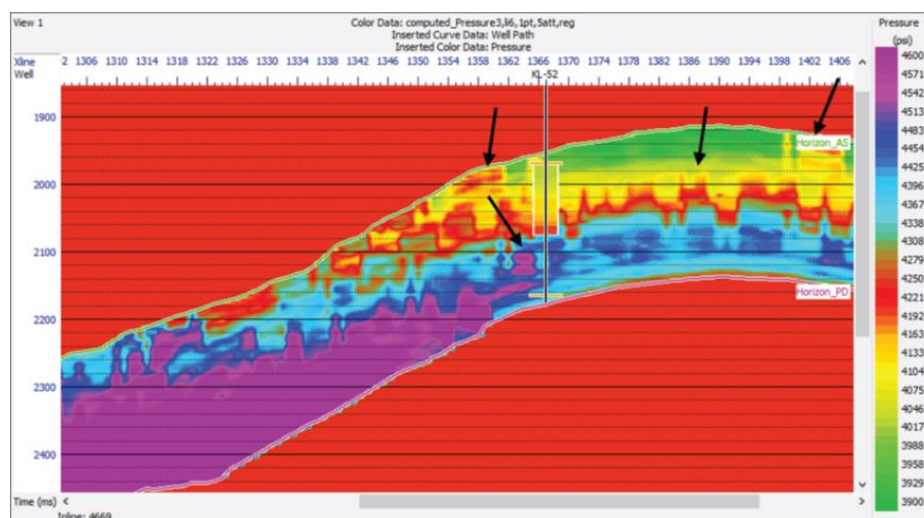
	Target	Final Attribute	Training Error	Validation Error
1	1 / (Pressure)	Time	122.198213	205.251183
2	1 / (Pressure)	1 / (inverted_1_Zp)	96.183919	164.758859
3	1 / (Pressure)	Apparent Polarity	70.883194	153.831619
4	1 / (Pressure)	Integrate	65.164270	151.515872
5	1 / (Pressure)	Amplitude Weighted Cosine Phase	59.568154	134.387342
6	1 / (Pressure)	Filter 0/10-50/60	56.825521	141.838407
7	1 / (Pressure)	Filter 5/10-15/20	55.478851	148.335391
8	1 / (Pressure)	Quadrature Trace	54.928942	161.064773
9	1 / (Pressure)	Second Derivative	53.391317	157.700775
10	1 / (Pressure)	Filter 15/20-25/30	49.438012	137.323163

چاه ها، بهترین نشانگرها برای این منظور انتخاب شده و سپس با استفاده از رابطه جبری استخراج شده، مقدار فشار منفذی در کل سازند محاسبه می شود. لازم به ذکر است در روش تخمین محاسبه فشار منفذی، همیشه یک چاه در محاسبات شرکت نکرده و نقش شاهد را بر عهده دارد. از میان سایر چاه ها، ابتدا دو چاه از سه چاه موجود انتخاب شده و با استفاده از فشار اندازه گیری شده در آن ها با داده های RFT، تابع رگرسیون چند نشانگری تعریف می شود. مقدار خطای تخمین فشار منفذی با استفاده از تابع یاد شده در محل چاه، خطای آموزش نامیده می شود. سپس با همین تابع، فشار در محل چاه سوم نیز تخمین زده شده و با محاسبه اختلاف فشار اندازه گیری شده و فشار تخمین زده شده اختلاف یاد شده؛ خطای اعتبارسنجی تخمین در محل آن چاه نامیده می شود. به این ترتیب، هر یک از سه چاه حاضر در محاسبات، یک بار نقش چاه سوم را ایفا کرده و خطای اعتبارسنجی روش در محل آن چاه ها محاسبه می شود.

در مقاله حاضر، از چاه های ۳۶، ۴۸ و ۵۹ برای آموزش و اعتبارسنجی روش رگرسیون چند نشانگری و سپس تخمین فشار منفذی در کل سازند آسماری استفاده شده است. چاه ۵۲ نیز به عنوان چاه شاهد در نظر گرفته شد. شکل ۹ روند تغییرات خطای آموزش و خطای اعتبارسنجی را با افزودن هر تکرار که معادل افزودن یک نشانگر با اهمیت کمتر برای تخمین فشار منفذی است؛ را نشان می دهد.

باتوجه به میزان خطای اعتبارسنجی که در جدول ۱ آمده است، ترکیب نشانگرهای زمان، مدل امیدانس صوتی حاصل از وارون سازی، قطبیت ظاهری، integrate و Amplitude Weighted Cosine Phase به ترتیب مؤثرترین نشانگرها در پیش بینی فشار منفذی هستند. ترتیب یاد شده در سه نشانگر اول موردانتظار است، چرا که نشانگر زمان مستقیماً با عمق در داده های لرزه ای در ارتباط است و تغییرات آن رابطه مستقیم با فشارهای هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک دارد. پس از زمان تغییرات چگالی و سرعت سنگ ها نیز سبب تغییرات در فشارهای یاد شده می شوند؛ لذا حاصل ضرب این دو یعنی امیدانس در جایگاه دوم اهمیت قرار گرفته است. کاهش یا افزایش امیدانس سبب تغییر قطبیت ظاهری بازتاب های لرزه ای می شود؛ بنابراین ارتباط این پدیده با فشار منفذی نیز قابل توضیح است؛ اما ارتباط دو نشانگر بعدی با فشار منفذی چندان روشن نیست.

خطی افزایش فشار منفذی، تأییدی بر غالب بودن تأثیر فشار هیدرواستاتیک در محدوده سازند محسوب می‌شود. باین وجود، روند یاد شده در مناطق مختلفی از سازند با حضور زون‌های با فشار بالاتر در افق‌های که فشار عمومی کمتر است، قطع می‌شود. این مسئله می‌تواند نشانه وجود محدوده‌هایی با فرافشار و یا فروفشار باشد. به‌ویژه در رأس تاقدیس که انتظار وجود کمترین فشار منفذی می‌رود؛ ولی شاهد افزایش غیرعادی فشار هستیم که احتمالاً نشانه وجود پدیده فرافشار است. فلش‌های سیاه‌رنگ نمایش داده شده در شکل ۱۰، برخی از نقاط دارای فرافشار را در این مقطع نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: فشار تخمین زده شده به روش رگرسیون چند نشانگری در مقطع گذرنده از چاه ۵۲ به‌عنوان چاه شاهد. فشار نشان داده شده در محل چاه، مقدار اندازه‌گیری با استفاده نمودار *RFT* است. مناطق احتمالی دارای فرافشار با فلش سیاه‌رنگ نشان داده شده‌اند.

در جنوب محدوده و در یال تاقدیس قرار گرفته است. همچنین وجود پدیده گسل و شکستگی سبب آشفتگی ظاهری مقطع لرزه‌ای در محل این چاه شده است؛ بنابراین، نمی‌توان انتظار داشت که در صورت حذف هر یک از چاه‌های ۳۶ و ۵۲ از مراحل تخمین فشار، چاه‌های باقیمانده تخمین‌گر مناسبی برای کل مخزن باشند و تخمین‌گر ایجاد شده عملاً تنها نماینده مناسبی برای نیمه جنوبی یا شمالی محدوده داده‌های لرزه‌ای خواهد بود. درحالی‌که با انتخاب چاه ۳۶ در شمال، چاه ۵۹ در جنوب و یکی از چاه‌های ۴۸ یا ۵۲ در مرکز محدوده داده‌های لرزه‌ای، می‌توان انتظار داشت مدل رگرسیون چند نشانگری نماینده مناسبی برای تخمین فشار در کل محدوده داده‌های لرزه‌ای باشند. همین رفتار در ادامه در مورد شبکه‌های عصبی مورد مطالعه نیز وجود داشت؛ بنابراین تا پایان تحقیق، تنها نتایج حاصل از

شکل ۱۰ مقطعی از مدل فشار منفذی تخمین زده شده با استفاده از روش رگرسیون چند نشانگری را نمایش می‌دهد. این مقطع قائم از چاه ۵۲ می‌گذرد. در این شکل، در محل چاه ۵۲ مقدار فشارهای نمودار *RFT* نیز نشان داده شده است.

در شکل ۱۰ مقدار فشار اندازه‌گیری شده در محل چاه نیز در شک نمایش داده شده است که انطباق کلی با روند مقدار فشار سازندی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون چند نشانگری نشان می‌دهد. همچنین حداقل فشار منفذی در رأس تاقدیس قابل مشاهده است و به‌طور کلی فشار با روندی خطی با افزایش عمق افزایش می‌یابد. وجود روند

شایان ذکر است؛ در مراحل انجام این تحقیق علاوه بر چاه ۵۲، هر یک از سه چاه دیگر یک‌بار نقش چاه شاهد را بر عهده گرفتند و تخمین فشار منفذی با سه چاه دیگر انجام شد. در این میان، انتخاب چاه ۴۸ به‌عنوان چاه شاهد، تغییر معناداری در نتایج ایجاد ننمود؛ اما انتخاب هر یک چاه‌های ۳۶ و ۵۹ به کاهش چشمگیر همبستگی در مراحل آموزش و اعتبارسنجی به کمتر از ۵۰ درصد منجر شد. به نظر می‌رسد دلیل این تفاوت آشکار را در ارتباط فضایی چاه‌ها باید جستجو نمود. برای مثال براساس شکل ۲، هر دو چاه ۴۸ و ۵۲ تقریباً در مرکز فضایی داده‌ها و نزدیک به هم واقع شده‌اند. همچنین بر اساس شکل ۳، این دو چاه هر دو تقریباً بر روی رأس تاقدیس مخزن واقع بوده و داده‌های لرزه‌ای در محل هر دو چاه کیفیت مشابهی دارند؛ اما چاه ۳۶ در کنج گوشه شمالی داده‌های لرزه‌ای واقع شده است. چاه ۵۹ نیز

که به دلیل تعداد کم چاه های استفاده شده برای آموزش شبکه روش PNN، وقوع پدیده بیش برازش، منتفی نیست. سطر دوم جدول ۲، مقدار همبستگی ها و خطاهای یاد شده در روش PNN را نشان می دهد.

جدول ۲: نتایج تخمین فشار منفذی با روش چند نشانگری و

شبکه های عصبی PNN و MLFN

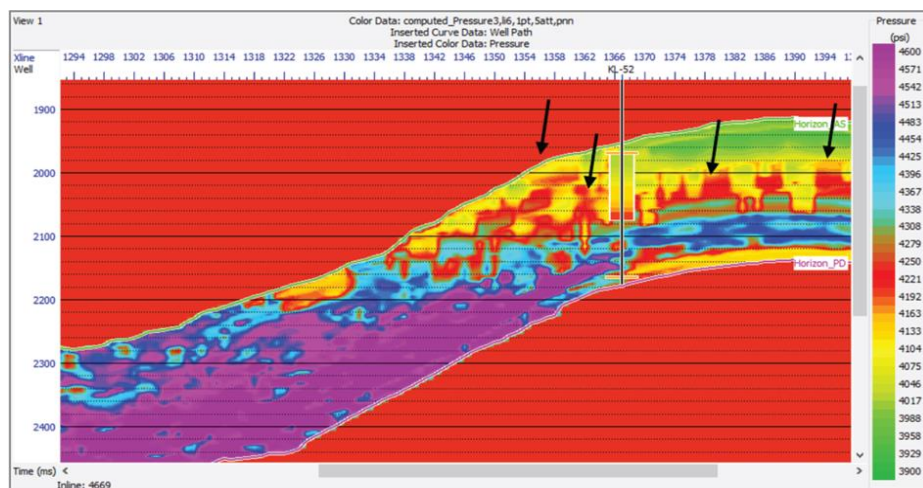
Method	Training correlation	Training error (%)	Validation correlation	Validation error (%)
Multi attribute	۹۵/۶	۱/۴	۸۵/۹	۳/۱۵
PNN	۹۸/۰۹	۰/۹۸	۷۷/۷	۳/۳
MLFN	۹۷/۹	۰/۹۶	۸۷/۶	۲/۸۹

مقطع قائم مدل فشار منفذی تخمین زده شده با استفاده از روش PNN که از چاه شاهد ۵۲ عبور می کند، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این شکل هر چند با شکل فشار منفذی مدل سازی شده با روش رگرسیون چند نشانگری تفاوت هایی دارد، اما به طور کلی در نشان دادن زون های دارای فرافشار تقریباً با شکل ۱۰ مطابقت دارد؛ بنابراین تفسیر کلی آن مشابه با نتایج روش رگرسیون چند نشانگری است. ضمناً محدوده های احتمالی دارای پدیده فرافشار در هر دو شکل ۱۰ و ۱۱ در مکان های تقریباً مشابه قرار دارند. هر چند عمق این نواحی در دو شکل یکسان نیست. دیگر تفاوت دو شکل در حضور پدیده های با ابعاد ریزتر در شکل ۱۱ است. حال آنکه شکل ۱۰ ظاهری هموارتر دارد.

تخمین فشار منفذی با سه چاه ۳۶، ۴۸ و ۵۹ و استفاده از چاه ۵۲ به عنوان چاه شاهد مورد بررسی قرار می گیرد.

۲-۶- تخمین فشار منفذی با روش شبکه عصبی احتمالاتی (PNN)

آموزش شبکه روش PNN، شبیه آموزش در روش رگرسیون چند نشانگری است با این تفاوت که در این روش از حاصل توابع وزنی بجای خود نشانگر استفاده می شود. برای تعریف تابع یاد شده، صرفاً از ۵ نشانگر برتر در تخمین فشار منفذی با روش رگرسیون چند نشانگری استفاده شده است. این شبکه طبق پیش فرض نرم افزار از تابع نمایی برای وزن دهی ورودی هر گره استفاده می کند. در این روش نیز از چاه های ۳۶، ۴۸ و ۵۹ برای تخمین فشار منفذی استفاده شده و چاه ۵۲ نقش شاهد را بر عهده دارد. میزان همبستگی بین فشار اندازه گیری و فشار تخمین زده شده توسط این روش در مرحله آموزش ۹۸ درصد با خطای ۰/۹۸ درصد به دست آمد. همچنین میزان همبستگی اعتبارسنجی ۷۷ درصد با میزان خطای نسبی متوسط ۳/۳۱ درصد به دست آمده است. این خطا نسبتاً به خطای اعتبارسنجی با استفاده از روش رگرسیون چند نشانگری نزدیک است؛ اما در مقایسه کیفی با روش رگرسیون چند نشانگری، فشارهای تخمین زده شده انطباق کمتری با داده فشار اندازه گیری شده در محل چاه نشان می دهند. همچنین در آموزش این شبکه، خطای تخمین بسیار کم بوده است و به نظر می رسد



شکل ۱۱: فشار تخمین زده شده به روش PNN در مقطع گذرنده از چاه ۵۲ به عنوان چاه شاهد. فشار نشان داده شده در محل چاه، مقدار اندازه گیری با استفاده نمودار RFT است. مناطق احتمالی دارای فرافشار با فلش سیاه رنگ نشان داده شده اند.

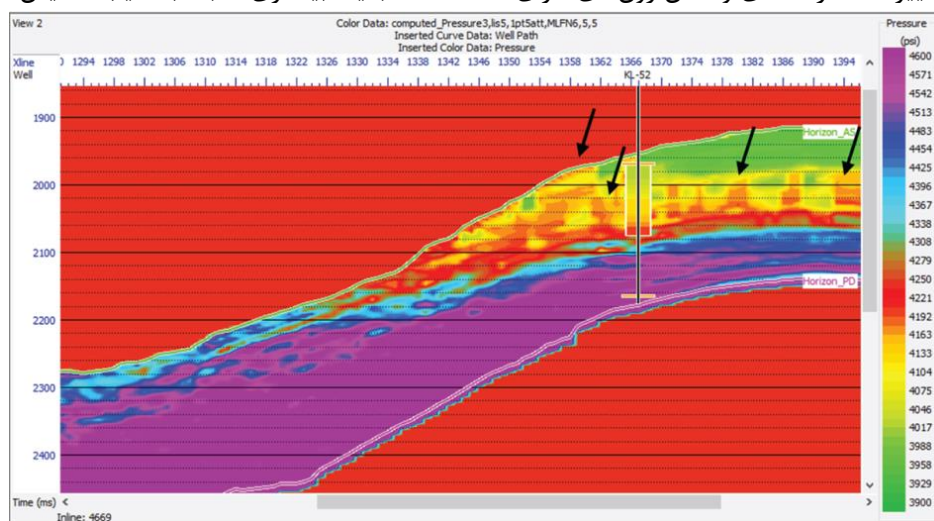
شبکه MLFN در پژوهش حاضر با استفاده از ۳ لایه مخفی و تعداد ۶ گره در هر یک از آن لایه ها تعریف شده

۲-۷- تخمین فشار منفذی با روش شبکه عصبی چند لایه پیش خور (MLFN)

پدیده فرافشار دارند. همچنین همان روند خطی کلی افزایش فشار از رأس تاقدیس به اعماق بیشتر در هر سه شکل مشاهده می‌شود. همچنین هر سه شکل نشان‌دهنده عدم تبعیت همه نقاط مخزن از روند فشار خطی یاد شده هستند که حضور زون‌های دارای فشاری بیش از روند کلی تغییرات خطی فشارمنفذی، تأییدی بر این مدعا است. همچنین باتوجه به اینکه وجود لایه‌های ناتروا و مخصوصاً حضور لایه‌های شیلی از رایج‌ترین عوامل ایجاد پدیده فرافشار است، انتظار می‌رود که گستردگی فضایی زون‌های دارای فرافشار نیز به موازات چین‌خوردگی شیل‌ها گسترش یابند؛ بنابراین، انتظار می‌رود که روند کشیدگی زون‌های یاد شده در مخزن آسماری از شیب کلی لایه که ناشی از چین‌خوردگی تاقدیس است تبعیت کند. این مسئله در هر سه شکل یاد شده قابل‌مشاهده و تأیید است هر چند به نظر می‌رسد که احتمالاً روش MLFN در مقایسه با رگرسیون چند نشانگری و PNN، در تخمین فشار منفذی موفق‌تر عمل نموده است، چرا که مقطع فشار منفذی شکل ۱۲ از شکل‌های ۱۰ و ۱۱ هموارتر است. همچنین کشیدگی زون‌های دارای فرافشار در شکل ۱۲، تبعیت بیشتری نسبت به شیب تاقدیس نشان می‌دهد.

است. این تعداد لایه و گره، پس از چندین مرتبه تغییر تعداد لایه‌ها و گره‌ها بررسی میزان خطای همبستگی و تخمین در مراحل آموزش و اعتبارسنجی داده‌ها انتخاب شد. همچنین با تکرار اجرای این شبکه، پاسخ‌هایی پایدار ایجاد شد. لازم به ذکر است مشابه روش PNN، در اینجا هم از همان ۵ نشانگر برتر در تخمین فشارمنفذی به روش رگرسیون چند نشانگری به‌عنوان ورودی استفاده شده است. میزان همبستگی بین فشار اندازه‌گیری شده و فشار تخمین زده شده توسط این روش در مرحله آموزش ۹۷ درصد با متوسط خطای نسبی ۰/۹ درصد به دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی نیز همبستگی ۸۷ درصد و میانگین خطای نسبی ۲/۸ درصد به دست آمد که نسبت خطای تخمین به دو روش‌های رگرسیون چند نشانگری و PNN کمتر است. سطر سوم جدول ۲ مقدار همبستگی‌ها و خطاهای یاد شده در روش MLFN را نشان می‌دهد.

مشابه شکل‌های ۱۰ و ۱۱، شکل ۱۲ نیز مقطعی از مدل فشار منفذی تخمین زده شده به روش MLFN را در محل چاه ۵۲ نشان می‌دهد. در نگاه کیفی، این سه شکل شباهت کلی در دامنه تغییرات فشار منفذی و مکان زون‌های دارای



شکل ۱۲: فشار منفذی تخمین زده شده به روش MLFN در مقطع گذرنده از چاه ۵۲. فشار نشان داده شده در محل چاه، مقدار اندازه‌گیری با استفاده نمودار RFT است. مناطق احتمالی دارای فرافشار با فلش سیاه‌رنگ نشان داده شده‌اند.

با بررسی شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ می‌توان تفاوت تغییرات فشار منفذی تخمین زده شده با روش‌های مختلف را مشاهده نمود. برای مثال، شکل ۱۰ نشان می‌دهد که فشار منفذی به‌دست‌آمده از روش رگرسیون چند نشانگری در مقطع زمانی ۱۹۵۰ ms بین ۳۹۰۰ تا ۴۲۰۰ psi تغییر می‌کند. همچنین در مقطع زمانی ۲۰۵۰ ms دارای فشار منفذی بین ۳۹۸۰ تا ۴۶۰۰ psi بوده و در مقطع زمانی

۲۱۵۰ ms از ۴۱۰۰ تا ۴۶۰۰ psi متغیر است. همچنین بر اساس شکل ۱۱، میزان تغییر فشار منفذی تخمین زده شده با روش PNN در مقطع زمانی ۱۹۵۰ ms از ۳۹۰۰ تا ۴۱۹۰ psi، در مقطع زمانی ۲۰۵۰ ms از ۴۰۰۰ تا ۴۵۲۰ psi و در مقطع زمانی ۲۱۵۰ ms از ۴۰۷۰ تا ۴۶۰۰ psi تغییر می‌کند. میزان تغییر فشار منفذی به روش MLFN نیز در شکل ۱۲ مشخص شده که در مقطع زمانی ۱۹۵۰ ms

۳۹۰۰ تا ۴۱۷۰ psi، در مقطع زمانی ۲۰۵۰ ms از ۳۹۸۰ تا ۴۶۰۰ psi و در مقطع زمانی ۲۱۵۰ ms از ۴۱۵۰ تا ۴۶۰۰ psi دارای تغییرات بوده است.

۳- نتایج و بحث

نتایج تخمین فشار منفذی با استفاده از روش های چند نشانگری، PNN و MLFN در جدول ۲ نشان داده شده است. ستون دوم شامل میزان همبستگی بین فشار اندازه گیری شده در چاه و فشار تخمین زده شده در مرحله آموزش، ستون سوم شامل میزان درصد میانگین خطای تخمین، ستون چهارم شامل میزان همبستگی اعتبارسنجی و در نهایت ستون پنجم شامل میزان متوسط خطای تخمین فشار دیده می شوند. ستون چهارم و پنجم این جدول، معیار انتخاب بهترین روش است؛ روشی که میزان همبستگی اعتبارسنجی بالاتر و خطای اعتبارسنجی پایین تری داشته باشد. بنابر اطلاعات جدول یاد شده، روش MLFN اعتبارسنجی بالاتر و خطای کمتری در این پژوهش داشته؛ پس بهتر از دو روش دیگر در تخمین فشار منفذی با استفاده نشانگرهای لرزه ای عمل کرده است.

علاوه بر مقایسه میزان خطای آموزش و اعتبارسنجی، می توان با محاسبه میزان ضریب تغییرات (نسبت انحراف معیار به میانگین یا CV) برای سه روش نشان داده شده در محل چاه شاهد ۵۲ نیز در مورد انتخاب روش برتر اظهار نظر نمود. شکل ۱۳ الف مقادیر نمودار فشار منفذی بر حسب زمان (افزایش عمق) را برای داده های اندازه گیری شده RFT از چاه و مقادیر فشار تخمین زده شده از روش رگرسیون چند نشانگری، PNN و MLFN را به ترتیب با نقاط رنگی به رنگ های آبی، نارنجی، خاکستری و زرد نشان می دهد. در این شکل در زمان های بیش از ۲۰۲۰ میلی ثانیه، نقاط زرد رنگ نزدیک ترین نقاط به نقاط آبی رنگ هستند؛ یعنی داده های فشار تخمین زده شده با روش MLFN، نزدیک ترین پاسخ را به داده واقعی اندازه گیری شده نشان داده است؛ اما در زمان های کمتر از ۲۰۲۰ میلی ثانیه، اختلاف روش ها کم است و حتی روش رگرسیون چند نشانگری کمی بهتر از سایر روش ها توانسته فشار منفذی را تخمین بزند. شکل های ۱۳ ب، ۱۳ ج و ۱۳ د نیز به ترتیب ضریب تغییرات به دست آمده از روش های رگرسیون چند نشانگری، PNN و MLFN را نشان می دهند. ضریب تغییرات در سه روش رگرسیون چند

نشانگری، PNN و MLFN به ترتیب برابر است با ۰/۰۳۲۵۰، ۰/۰۲۳۸۶ و ۰/۰۱۹۸۷۵ محاسبه شده است. همچنین ضریب تغییرات به دست آمده از داده های اندازه گیری از چاه برابر است با ۰/۰۱۳۶۷ که به روش MLFN نزدیک تر است. به این ترتیب برتری روش MLFN در تخمین فشار منفذی نسبت به دو روش دیگر به طور کمی تأیید می شود.

از دیدگاه کیفی، زمین شناسی، حضور توالی رسوبات شیلی در سازند آسماری؛ وجود پدیده های فرار فشار را توجیه می شود. این رسوبات تراوایی ناچیزی دارند و می توانند سبب قطع شدن ارتباط فشار در تخلخل سازند با فشار هیدرواستاتیک در سازندهای فوقانی شوند. از سوی دیگر، زون های دارای فرفشار عمدتاً زیر رأس تاقدیس دیده می شود. اما در یال تاقدیس این پدیده ضعیف تر است. باتوجه به شکل ۳ ج، می توان این رفتار را به حضور گسل و زون های به شدت شکسته در یال غربی تاقدیس نسبت داد. وجود این شکستگی ها سبب برقراری ارتباط هیدرولیکی بین منافذ سازند آسماری و سازندهای بالاتر می شوند. همین پدیده سبب کاهش فشار منفذی می شود. این مسئله به ویژه در شکل ۱۲ و فشار منفذی تخمین زده شده با استفاده از روش MLFN به وضوح قابل می شود. به طور خاص در عمود بر خط های ۱۳۳۰ تا ۱۳۴۲ شاهد کاهش فشار منفذی نسبت به مقدار فشار منفذی مورد انتظار در روند خطی کلی هستیم. وجود چنین زون هایی که احتمالاً دارای پدیده فرو فشار (under-pressure) در سازند آسماری میدان کوپال هستند، قبلاً به طور کلی توسط محمدی و همکاران (۲۰۱۸) پیش بینی شده بود [۱۶]. هر چند در آن مقاله تغییرات فشار منفذی بسیار کلی و بدون اشاره به زون های فرفشار در آسماری بوده است. ضمناً ارتباط فضایی تغییرات فشار منفذی با چین خوردگی تاقدیس بررسی نشده بود. شکل های ۱۰ تا ۱۲ همچنین نشان می دهند که پدیده فرفشار عموماً در نیمه فوقانی سازند آسماری رخ داده است. این نتیجه انطباق معناداری با شکل ۸ دارد. چرا که در شکل یاد شده، امپدانس نیمه فوقانی آسماری به شکل قابل ملاحظه ای از امپدانس نیمه تحتانی آن بیشتر است. باتوجه به آنکه نیمه تحتانی آسماری عموماً دارای سنگ های آهکی متخلخل است، می توان افزایش امپدانس در نیمه فولانی آسماری را به حضور لایه های شیلی متراکم و ناتروا نسبت داد.

۴- نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان نتایج کلی به‌دست‌آمده در مراحل مختلف انجام این پژوهش را به شرح زیر معرفی نمود:

۱. استفاده مستقیم از امپدانس به‌دست‌آمده از وارون‌سازی داده لرزه‌ای برای آموزش روش‌های مختلف شبکه عصبی برای تخمین فشار منفذی مفید است. این کمیت در عمل دومین نشانگر مؤثر در تخمین فشار منفذی با استفاده از روش رگرسیون چند نشانگری است.

۲. روند کلی فشار منفذی از رأس تاقدیس مخزن به سمت عمق در هر سه روش محاسبه به‌صورت خطی افزایش می‌یابد که وجود اثر غالب فشار هیدرواستاتیک در سازند آسماری را در میدان کوپال نشان می‌دهد.

۳. باوجود تفاوت‌های مختصر در جزئیات فشار منفذی به‌دست‌آمده به روش‌های مختلف، اما وجود پدیده کلی فرفشار با استفاده از هر سه روش دیده می‌شود. مناطق دارای فشار منفذی بالا به‌خوبی در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ قابل‌مشاهده است و محل آن‌ها با استفاده از هر سه روش، تقریباً بر هم منطبق هستند.

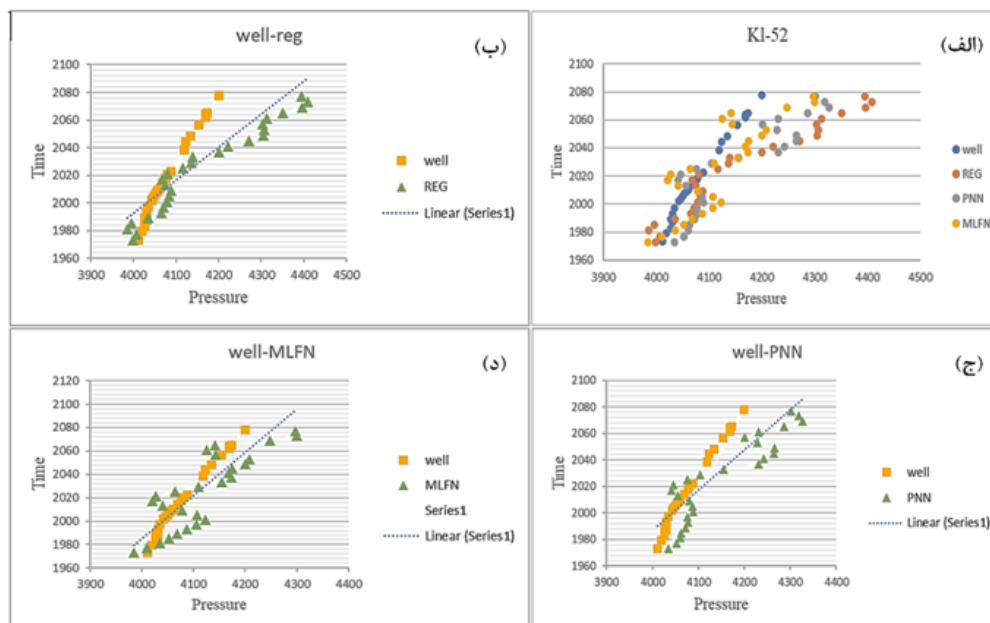
۴. به نظر در روش PNN پدیده بیش برآزش وجود دارد؛ زیرا مقدار خطای اعتبارسنجی آن از بقیه روش‌ها بالاتر است باوجوداینکه خطای تخمین در مرحله آموزش، زیر یک درصد

است. احتمالاً این مشکل به دلیل تعداد کم چاه‌های موردنیاز برای آموزش شبکه در این روش اتفاق افتاده است.

۵. در روش MLFN بیشترین همبستگی و حداقل خطای اعتبارسنجی در تخمین فشار منفذی مشاهده شد. همچنین، به نظر می‌رسد پدیده‌های فرفشار عمدتاً در رأس تاقدیس و پدیده فرفشار در یال غربی آن حضور دارند.

۶. تغییرات فرفشار به‌ویژه در صورت تخمین با روش MLFN، از چین‌خوردگی تاقدیس و شیب لایه‌های موجود در آن تبعیت می‌کنند. باتوجه‌به اینکه فرفشار معمولاً به دلیل حضور شیل و لایه‌های ناتروا ایجاد می‌شود، توجیه این پدیده با حضور لایه‌های شیلی با امپدانس صوتی بالاتر در نیمه فوقانی سازند آسماری امکان‌پذیر است. چنانچه وجود پدیده فرفشار به دلیل حضور گسل و شکستگی‌های گسترده در یال غربی تاقدیس توضیح داده شد.

۷. کلیه نتایج ارائه شده از تحلیل داده‌های لرزه‌ای به دلیل وجود نوفه‌های همبسته و تصادفی با عدم قطعیت رو به است. به‌ویژه اینکه داده‌های لرزه‌ای موجود به‌ویژه در یال تاقدیس، رفتارهای آشفته و شکسته در اثر گسل خوردگی نشان می‌دهند. باین‌وجود، انطباق تقریبی زون‌های دارای پدیده فرفشار در هر سه روش، بیانگر موفقیت نسبی پژوهش حاضر در ارائه تفسیر یکتا در تخمین فشار منفذی است.



شکل ۱۳: مقایسه فشار اندازه‌گیری شده در چاه شاهد ۵۲ و فشارهای تخمین زده شده با روش‌های رگرسیون چند نشانگری، PNN و MLFN (الف)، مقایسه فشار اندازه‌گیری شده در چاه و فشار تخمینی به روش رگرسیون چند نشانگری (ب)، مقایسه فشار اندازه‌گیری شده در چاه و فشار تخمینی به روش PNN (ج) و مقایسه فشار اندازه‌گیری شده در چاه و فشار تخمینی به روش MLFN (د).

مراجع

Offshore technology conference (pp. OTC-13042). OTC.

[14] Dutta, N. C. (2002). Geopressure prediction using seismic data: Current status and the road ahead. *Geophysics*, 67(6), 2012-2041.

[15] Azadpour, M. , & Shadmanaman, N. (2016). Overpressure Generation Mechanism in One of Hydrocarbon Fields in Southern Iran. *Journal of Petroleum Research*, 26(95-3), 147-160 (In Persian).

[16] Mohammadi, M. , Soleimani, B. and Mahmoudian, M. (2018). Predicting Abnormal Formation Pressure Using 3D Seismic Velocity, in Kupal Oil Field. *Journal of Petroleum Research*, 27(96-6), 103-115 (In Persian).

[17] Farabi, A. F., Winardhie, I. S. and Wibowo, N. C. (2021). Integrated Pore Pressure Model Estimation—Case Study of Jambi Sub-basin, South Sumatera, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 873, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.

[18] Riahi, M. A. and Fakhari, M. G. (2022). Pore pressure prediction using seismic acoustic impedance in an overpressure carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(12), 3311-3323.

[19] Nikanam Chenarestan-e Sofla, R. (2014). Estimation of petrophysical curves using seismic data inversion, Msc. Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz (In Persian).

[20] Zhang, Z., Zhang, H., Li, J., & Liu, Q. (2018). Seismic pore pressure prediction using machine learning. *Geophysical Prospecting*, 66(5), 998–1013.

[21] Chatterjee, R., Mukherjee, A., & Paul, S. (2016). Pore pressure prediction from seismic data using rock physics and machine learning: A case study from the Mahanadi Basin, India. *The Leading Edge*, 35(8), 702–707.

[22] Roy, A., Chatterjee, R., & Chakraborty, S. (2020). Machine learning-based pore pressure prediction using multi-seismic attributes in the Krishna-Godavari Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195, 107870.

[23] Gholami, A., Ansari, H. R., & Falahat, R. (2020). Seismic attribute selection and deep learning for pore pressure prediction in the South Caspian Basin. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83, 103526.

[24] Falahat, R., Gholami, A., & Ahmadi, M. (2021). Pore pressure prediction using seismic attributes and machine learning techniques: A case study from South Pars gas field, Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108836.

[1] Soleymani, H. , Sokooti, M. and Riahi, M. A. (2013). Porepressure prediction using seismic inversion and velocity analysis. *Journal of the Earth and Space Physics*, 38(4), 57-70 (In Persian).

[2] Poursiami, H. (2013). Pore Pressure Modeling of Hydrocarbon Reservoir in Southwest of Iran Using Well Logging Data. *Journal of Petroleum Research*, 23(74), 72-86 (In Persian).

[3] Adim, A., Riahi, M. A., Bagheri, M. (2018). Pore Pressure Prediction using Seismic and Well Log Data by Employing Eaton's and

[4] Bowers' Methods. *Journal of Research on Applied Geophysics*, 4(2), 267-275 (In Persian).

[5] Maddahi, I. , Moradzadeh, A. and Nejati Kalateh, A. (2020). Comparison of Pore Pressure Prediction Using Conventional Seismic Velocity and Acoustic Impedance-Based Methods. *Journal of Petroleum Research*, 29(109), 96-107 (In Persian).

[6] Zhang, J. (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1-2), 50-63.

[7] Moradzadeh, A. , Maddahi, I. and Nejati Kalateh, A. (2020). Pore pressure prediction using the seismic velocity produced by multi-attributes analysis in carbonate reservoirs. *Journal of Mining Engineering*, 14(45), 35-45 (In Persian).

[8] Wang, Z., & Wang, R. (2015). Pore pressure prediction using geophysical methods in carbonate reservoirs: Current status, challenges and way ahead. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 986-993.

[9] Hottmann, C. E. and Johnson, R. K. (1965). Estimation of formation pressures from log-derived shale properties. *Journal of Petroleum Technology*, 17(06), 717-722.

[10] Matthews, W. R. (1967). How to predict formation pressure and fracture gradient from electric and sonic logs. *Oil and Gas*, 20, 92-106.

[11] Gardner, G. H. F., Gardner, L. W. and Gregory, A. (1974). Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39(6), 770-780.
Eaton, B. A. (1976). Graphical method predicts geopressures worldwide. *World Oil*;(United States), 183(1).

[12] Bowers, G. L. (1995). Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction. *SPE Drilling & Completion*, 10(02), 89-95.

[13] [13] Bowers, G. L. (2001). Determining an appropriate pore-pressure estimation strategy. In

- [28] Asoodeh, M., & Bagheripour, P. (2013). Neuro-fuzzy reaping of shear wave velocity correlations derived by hybrid genetic algorithm-pattern search technique. *Open Geosciences*, 5(2), 272-284.
- [29] Russell, B. H. (1988). Introduction to seismic inversion methods (No. 2). SEG Books.
- [30] Todorov, T., Stewart, R., Hampson, D., & Russell, B. (1998). Well log prediction using attributes from 3C-3D seismic data. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998 (pp. 1574-1576). Society of Exploration Geophysicists.
- [25] Azadpour, M., Shiri, M., & Falahat, R. (2022). Machine Learning-Based Pore Pressure Prediction from 3D Seismic Attributes in the Dezful Embayment, SW Iran. 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition, Madrid, Spain.
- [26] Avarjani, Sh., Mahboubi, A. and Moussavi Harami, R. (2011). Microfacies, depositional environments and sequence stratigraphy of the oilgo-miocene asmari formation in the kupal oil field, central dezful embayment. *Iranian Journal of Geology*, 5(19), 45-60 (In Persian).
- [27] Alipoor, R. (2017). Fractures analysis of the Asmari formation in the Kupal oil field (Dezful embayment, SW Iran). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 27(105), 71-80 (In Persian).