



نشریه روش های تحلیلی و عددی



در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: <http://anm.yazd.ac.ir/>

(مقاله پژوهشی)

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

چکیده

نظر به اهمیت فشار منفذی برای مدلسازی استاتیکی و دینامیکی مخازن نفت و گاز و طراحی حفاری و بهره برداری از آنها، پیش بینی صحیح این کمیت پیش از انجام حفاری های گرانقیمت و فرآیند چاه آزمایی، ضرورت دارد. پژوهش حاضر با استفاده از وارون سازی داده های لرزه ای به مدلسازی 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 امپدانس صوتی به دست آمده از وارون سازی داده های لرزه ای در کنار سایر نشانگرهای لرزه ای و اطلاعات فشار سنجی 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 چند لایه ای پیشخوز (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 روشها، 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 ۰/۰۱۲۳ بوده، اما CV برای فشارهای تخمین زده شده با روشهای رگرسیون چند نشانگری، PNN و MLFN به ترتیب برابر ۰/۰۳۲۵، ۰/۰۲۳۸۶ و ۰/۰۱۹۸۶ می باشد. بنابراین، فشارهای تخمین زده شده با روش MLFN نزدیکترین 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

از حفاری است [۹]. گاردنر و همکاران (۱۹۷۴) رابطه‌ای بین فشار روباره و فشار نرمال سیال (فشار هیدرواستاتیک) و فشار سازندگی پیشنهاد دادند. تحقیق یاد شده نشان داد که تنش موثر (یعنی 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 موثر 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 (۲۰۰۲) اشاره نمود که ارتباط بین داده‌های ژئوفیزیکی را با فشار منفذی مورد بررسی قرار داده است [۱۴].

از میان محققان ایرانی، آزادپور و شادمنان (۲۰۱۶) سازوکارهای ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران را با استفاده از مطالعات نمودارهای سرعت، چگالی و تنش موثر 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 پیش‌بینی شده مطابقت مناسبی با مقادیر فشار منفذی اندازه‌گیری شده در چاه‌ها نشان داد [۱۵]. همچنین محمدی و همکاران (۲۰۱۸) با تحلیل سرعت داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، مدل سرعت برانبارش را به دست آوردند. سپس با استفاده از مدل یاد شده و رابطه باورز (۲۰۰۱)، مقدار تنش موثر 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 زمین‌آماري به دست آوردند [۱۶]. فارابی و همکاران (۲۰۲۱) نیز مدل سه بعدی 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

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) می‌باشد [۱]. همچنین این کمیت در ارزیابی روند شکستگی‌ها، گسل‌ها و دینامیک مهاجرت هیدروکربن به زمین شناسان کمک می‌کند. در طراحی لوله‌گذاری، تعیین وزن گل حفاری و ایجاد تعادل در فشار سیال داخل چاه نیز دانستن مقدار فشار منفذی ضرورت دارد. به این ترتیب محاسبه فشار منفذی نقش مهمی در کاهش هزینه‌های 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 فرفشار (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 فرفشار، 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 پیمانه ای (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 $0.4 \frac{psi}{ft}$ 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

استفاده از داده‌های لرزه ای و نگارهای چاه بطور مستقیم و بدون وارون سازی آن، در یکی از مخازن کربناته ایران تخمین زدند. سپس با استفاده از داده های فشار سنجی *RFT* و مقدار امپدانس یه دست آمده ضرایب معادله را کالیبره کردند و در نقاطی که داده فشارسنجی وجود نداشت، فشار منفذی را محاسبه نمودند [۱۸].

در میان روش‌هایی که تاکنون برای پیش بینی فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، استفاده از تخمین فشار منفذی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، کمترین وابستگی را به حفر چاه و انجام اندازه‌گیری‌های درون چاهی دارد. همچنین استفاده از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، امکان مدلسازی سه بعدی فشار منفذی در یک سازند را فراهم می‌کند. برای مثال، با استفاده از مدل امپدانس صوتی به دست آمده از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، می‌توان چگالی و سرعت سازند را محاسبه کرده و سپس از این کمیتها برای تخمین فشار منفذی استفاده نمود [۱۹]. برای صحت سنجی این تخمین‌ها می‌توان مقدار فشار منفذی تخمین زده شده را در محل چاه‌های در حال بهره برداری با داده‌های فشار سنجی اندازه‌گیری شده در چاه‌های موجود مقایسه نمود. همچنین استفاده ترکیبی از داده‌های فشارسنجی چاه‌های موجود در کنار داده‌های لرزه‌ای می‌تواند به پایش فشار منفذی در یک مخزن در حال بهره برداری کمک کند. برای مثال، ژانگ و همکاران (۲۰۱۸) از داده‌های *MDT* و *RFT* برای آموزش یک شبکه عصبی کانولوشنی (*CNN*) استفاده کردند. شبکه بر روی مکعب‌های ویژگی‌های لرزه‌ای آموزش دید و توانست نقشه فشار منفذی را به صورت پیوسته در فضای سه‌بعدی با دقت بالا تولید کند [۲۰]. همچنین چاترجی و همکاران (۲۰۱۶) در حوزه ماهانادی هند یک شبکه عصبی مصنوعی (*ANN*) را با ترکیب ویژگی‌های لرزه‌ای و داده‌های *MDT* آموزش دادند. آنها نشان دادند که اضافه کردن نشانگرهای لرزه‌ای به مدل، دقت آن را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۲۱]. روی و همکاران (۲۰۲۰) نیز در حوضه کریشنا-گوداوارای هند از داده‌های *MDT* و نشانگرهای لرزه ای متعددی نظیر امپدانس صوتی، شیرینی و فرکانس لحظه ای برای آموزش یک مدل جنگل تصادفی برای تخمی فشار منفذی استفاده کردند [۲۲]. در میان پژوهشهای 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 (۲۰۲۲) در تخمین فشار منفذی سازندهای آسماری و بنگستان در فروافتادگی دزفول، قابل ذکر هستند [۲۳-۲۵]. با وجود مزیت‌های استفاده از داده های لرزه ای در تخمین فشار منفذی، تعداد پژوهش‌های صورت گرفته در این خصوص بویژه در میدانهای هیدروکربنی 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 زون‌های دارای فرفشار در آن میدان می‌پردازد. شایان 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 واریوگرامهای 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 عمقها، از اعتبار نتایج حاصله کاسته است. همچنین در طی فرآیند تحقیق یاد شده، 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 یاد شده از فرض وجود رابطه فضایی افقی و قائم بین داده های فشار منفذی در تمام نقاط و تمامی عمقها استفاده کرده اند؛ حال آنکه این فشار تحت تاثیر 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 وارون‌سازی لرزه‌ای، مدل امپدانس صوتی در محدوده‌ای شامل چاه‌های در حال بهره برداری از میدان یاد شده محاسبه می‌شود. سپس، از مدل یاد شده و سایر نشانگرهای لرزه‌ای برای آموزش و اعتبارسنجی تخمین‌گرهای مبتنی بر رگرسیون و روش‌های شبکه‌های عصبی در محل چاه‌های در حال بهره‌داری استفاده می‌شود. از تعمیم آن تخمین‌گرها به کل محدوده سه بعدی داده لرزه‌ای، مقدار فشار منفذی در کل سازند مخزنی میدان یاد شده محاسبه شده

و مقادیر به دست آمده با داده‌های فشارسنجی *RFT* در محل یک چاه شاهد مقایسه می‌شوند. همچنین با مقایسه فشارهای منفذی به دست آمده با روند کلی فشار هیدرواستاتیک مخزن، زون‌های دارای فرفشار 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 غیر مخزنی 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 یاد شده می‌پردازیم.

۱-۲- 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 چین خوردگی 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 تشکیل دهنده ستون چینه‌ای میدان کوپال به ترتیب از سطح به عمق شامل: سازندهای آغاجاری، میشان، گچساران، آسماری، پابده، 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 می‌باشد. این سازند تقریباً ۴۵۰ متر ضخامت دارد و بیشتر از سنگ آهک فسیل دار، سنگ آهک دولومیتی، سنگ آهک رسی، ماسه سنگ و شیل تشکیل شده است. تمرکز آهک‌های متخلخل عمدتاً در نیمه تحتانی سازند می‌باشد [۲۶].

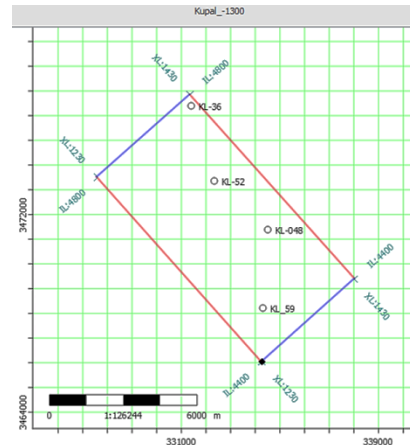
۲-۲- داده‌های ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی مورد استفاده

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 برانبارش توسط شرکت مناطق نفت خیز جنوب در اختیار پژوهش حاضر قرار گرفته است. افزون بر داده‌های لرزه‌ای، داده‌های نمودارهای چاه پیمایی مربوط به چند چاه واقع در محدوده داده‌های لرزه‌ای به همراه اطلاعات داده‌های شات کنترل و ترانسه زنی قائم لرزه‌ای *(VSP)* آنها و داده‌های فشارسنجی *RFT* در چند چاه نیز مورد استفاده قرار گرفته است. کلیه داده‌ها با استفاده از نرم افزار *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 ۴۸، ۵۲، ۵۹ و 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 نرم افزار همپسون راسل بارگذاری شدند. همچنین داده‌های لرزه‌ای با نرخ نمونه برداری ۴ میلی ثانیه نیز بارگذاری گردیدند. لازم به ذکر است که محدوده مورد مطالعه در این پژوهش به محدوده زمانی سرسازند آسماری تا سرسازند پابده محدود است.

خاص است استفاده می شود. این زمان برای استفاده باید دو برابر شود؛ زیرا معمولا 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) به این منظور قابل استفاده است [۲۹].

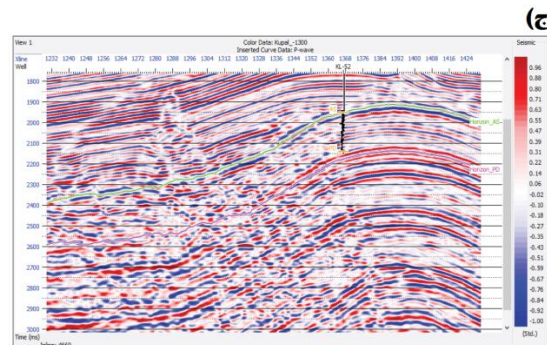
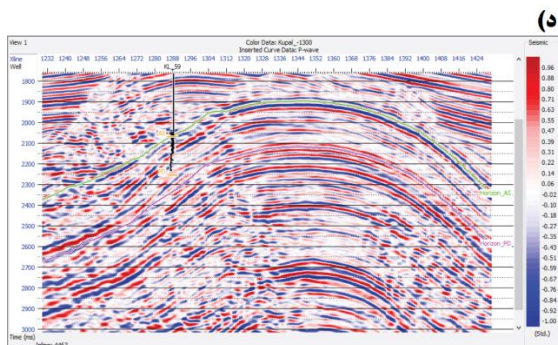
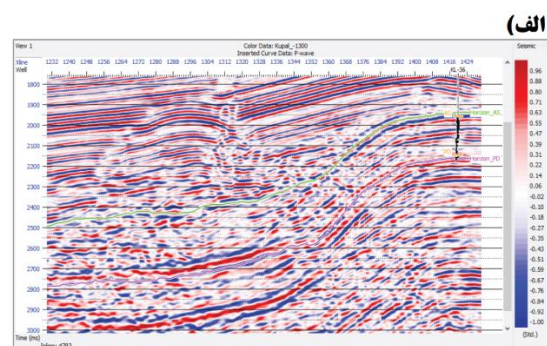
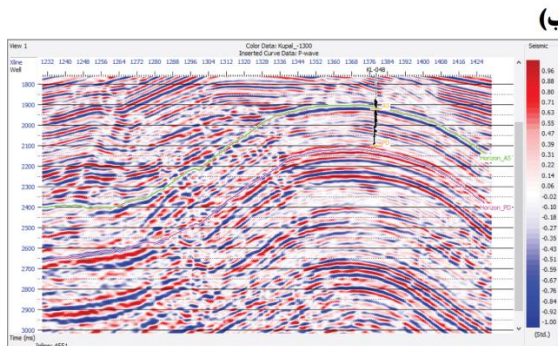
پس از تبدیل داده های چاه و از جمله محل سرسازندها از حوزه عمق به حوزه زمان، محل افق های سر سازندهای آسماری و پابده در داده های لرزه ای مشخص شد. سپس بازتاب های مربوط به افقهای سرسازندها با استفاده از بازتاب لرزه ای در محل سرسازندها ردیابی شدند. از این افق ها برای تعیین محدوده بالا و پایین مخزن استفاده 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 شکلها سرسازند آسماری با رنگ سبز و سرسازند پابده با رنگ قرمز مشخص شده است. شکل یاد شده مشخص نمود که چاههای ۳۶، ۴۸ و ۵۲ نزدیک به راس تقادیس قرار گرفته اند، اما چاه ۵۹ در یال غربی تقادیس قرار دارد. ضمنا حضور شکستگی و گسل خوردگی گسترده در یال غربی تقادیس مشخص است.



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

۲-۳- 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 آنها 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 معمولا از داده های شات کنترل که شامل زمان سیر موج از سطح زمین تا اعماق



شکل ۳- مقاطع لرزه ای برخط عبور کننده از چاههای الف (۳۶، ب (۴۸، ج (۵۲، د (۵۹. منحنی های سبز و قرمز به ترتیب نمایش دهنده افق سرسازند های آسماری و پابده می باشند.

بعد از بارگذاری داده‌ها، عملیات گره زدن داده‌های چاه با داده‌های لرزه‌ای انجام شد. برای اینکار نیاز است که ابتدا موجک لرزه‌ای غالب W در محدوده چاه مشخص شده و طبق معادله

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

با همامیخت آن در تابع ضرایب انعکاس r به دست آمده از داده‌های چاه‌پیمایی، لرزه نگاشت مصنوعی S در محل چاه ساخته شود. تابع ضرایب انعکاس هر بازتاب دهنده به نوبه خود با استفاده از معادله

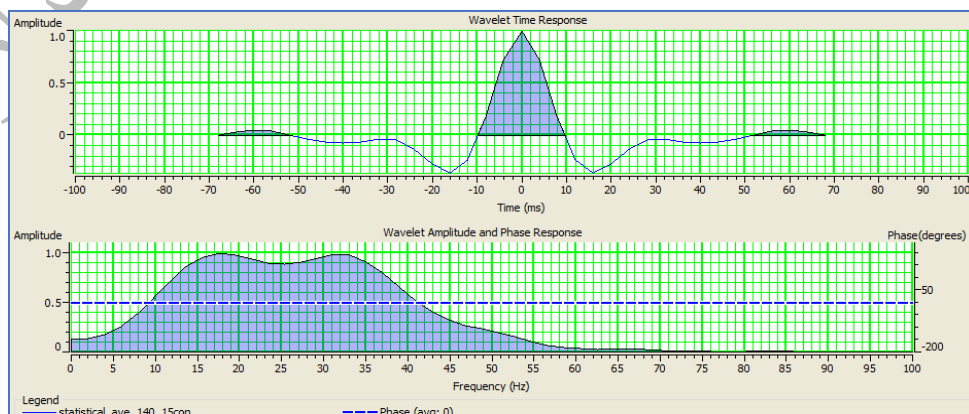
$$r_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} \quad (2)$$

تعریف می‌شود. در این معادله، Z امپدانس صوتی هر لایه است که به صورت حاصلضرب چگالی و سرعت موج فشارشی در هر عمق تعریف می‌شود. نماد i نیز شماره بازتاب دهنده را نشان می‌دهد. معادله ۱ ابزار اصلی تخمین موجک غالب داده‌های لرزه‌ای با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی است. تعیین این موجک ادامه برای انجام وارون سازی داده‌های لرزه‌ای ضرورت دارد.

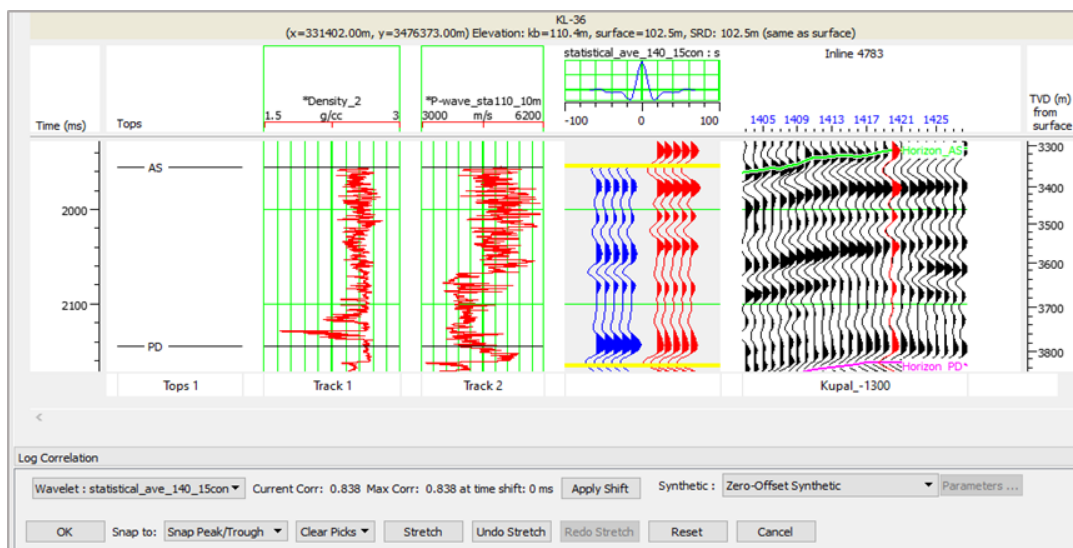
برای استفاده از معادله ۱، ابتدا ضرایب r باید تعیین شوند. به این منظور با محاسبه حاصلضرب مقادیر چگالی و سرعت از نمودارهای مربوط به چگالی و صوتی یک چاه در هر عمق، یک نمودار تغییرات امپدانس ایجاد می‌شود. سپس می‌توان ضرایب انعکاس را با استفاده از معادله ۲ محاسبه کرد [۳]. در مرحله بعد می‌بایست موجک W به گونه‌ای انتخاب شود که لرزه نگاشت مصنوعی حداکثر شباهت S را با لرزه نگاشت 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 لرزه نگاشت‌های واقعی داده‌های لرزه‌ای محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از همامیخت این موجک با ضرایب انعکاس در محل هر چاه، یک لرزه نگاشت مصنوعی محاسبه می‌شود. در صورت عدم انطباق این لرزه نگاشت با لرزه نگاشت واقعی در محل چاه، می‌توان با جا به جایی رد لرزه نگاشت مصنوعی در جهت زمان و یا تغییر فاز موجک، یک لرزه نگاشت مصنوعی با بیشترین میزان انطباق با لرزه نگاشت 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 پاینده محاسبه شد. این موجک دارای طول موجک ۱۴۰ میلی ثانیه، 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 همامیخت این موجک در ضرایب انعکاس به دست آمده از نمودارهای چگالی و صوتی در هر چاه، لرزه نگاشت‌های مصنوعی در محل چاه‌ها محاسبه شد. میزان همبستگی این لرزه نگاشت‌ها با لرزه نگاشت‌های واقعی موجود در محل چاه‌های ۳۶، ۴۸، ۵۲ و ۵۹ به ترتیب ۸۳، ۷۶، ۷۲ و ۶۴ درصد بوده است. شکل ۵، روند کلی ایجاد یک لرزه نگاشت مصنوعی را در چاه ۳۶ نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که همبستگی‌های به دست آمده حداکثر همبستگی ممکن بودند و با تغییر فاز و زمان بهبودی در مقادیر همبستگی ایجاد نشد. این مساله 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.

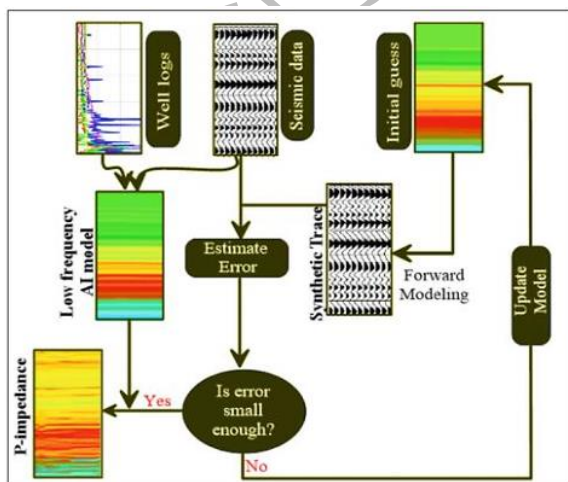


شکل ۴- موجک غالب آماری در حوزه زمان (بالا) و طیف دامنه و فاز آن (پایین)



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

نمودارهای صوتی و چگالی با کمترین فرکانس موجود در نمودارهای چاه پیمایی ساخته می‌شود. مدل اولیه به دلیل داشتن فرکانس پایین، دارای رفتاری بسیار هموار بوده و به زبان دیگر، ساده‌ترین حالت ممکن برای تغییرات کلی امپدانس سازند مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ساخت مدل اولیه با استفاده از داده‌های چاه پیمایی، برای وارون‌سازی 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 فرکانسها می باشند. این مدل مبنای عملیات وارون‌سازی قرار گرفته و تغییرات بیشتر و فرکانس‌های بالا نیز در طی وارون‌سازی به آن اضافه می‌شود.



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

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

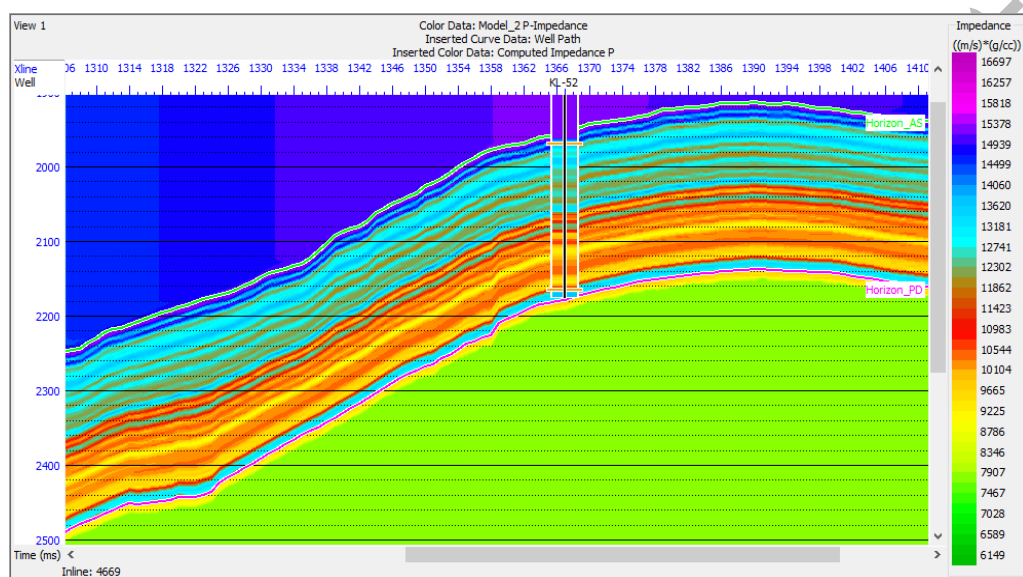
هر چند داده‌های لرزه‌ای، تصویر کلی لایه ها و ساختارهای زمین شناسی را به تصویر می کشند، اما به تنهایی برای تعیین مقدار پارامترهایی نظیر چگالی، سرعت و امپدانس لایه ها کافی نیستند. برای این منظور روشهای مختلف وارون سازی داده های لرزه ای طراحی شده اند. وارون سازی لرزه ای فرآیندی برای تخمین مدل امپدانس صوتی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

از میان روشهای 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 نگهداشتن موجک، امپدانس را آنقدر تغییر می‌دهد تا سرانجام به مدلی از امپدانس برسد، که همامیخت ضرایب انعکاس به دست آمده از آن مدل با موجک آسماری استخراج شده، لرزه نگاشت مصنوعی با بیشترین انطباق با داده لرزه‌ای واقعی داشته باشد [۵].

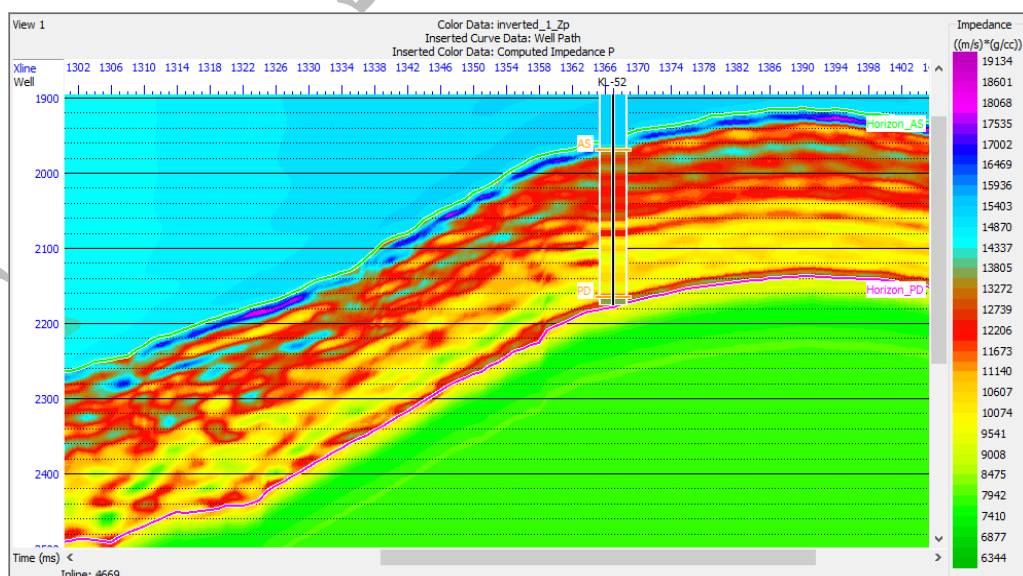
شکل ۶ روند کلی انجام وارون‌سازی بر پایه مدل را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، برای آغاز وارون‌سازی لرزه‌ای، یک مدل امپدانس پایه یا مدل اولیه به عنوان یک حدس از میزان امپدانس لایه‌ها، مورد نیاز می‌باشد. این مدل با استفاده از امپدانس صوتی بدست آمده از حاصل ضرب

ترتیب ۹۹ و ۱۳، در چاه 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. شکل ۷ به ترتیب مدل اولیه و مدل نهایی تخمین زده شده برای امپدانس پس از انجام ۱۰ تکرار را در مقطعی از مدل که از محل چاه ۵۲ می‌گذرد را نشان می‌دهند.

پس از انجام وارون‌سازی 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 معادله ۲، تابع ضرایب بازتاب محاسبه شد. از همامیخت ضرایب بازتاب با موجک لرزه‌ای غالب، لرزه نگاشت‌های 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



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 چاه پیمایی نیز در محل چاه‌ها روی زمینه مدل امپدانس تخمین زده شده با استفاده از وارون‌سازی قرار داده شده است.

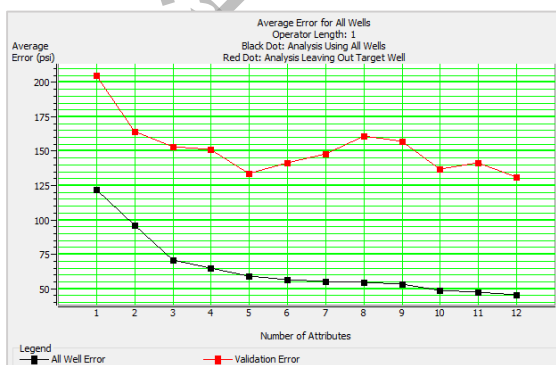
۲-۵- تخمین فشار منفذی با رگرسیون چند نشانگری

بعد از محاسبه وارون سازی امپدانس صوتی می توان از آن به عنوان یک نشانگر لرزه ای استفاده نمود. افزون بر نشانگر امپدانس صوتی، سایر نشانگرهای لرزه ای قابل محاسبه با نرم افزار همپسون راسل نیز محاسبه شده و برای شناسایی بهترین نشانگرها جهت تخمین زدن فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفتند. محاسبه نشانگرهای لرزه ای می تواند به صورت یک نقطه ای و یا چند نقطه ای انجام شود. تعداد نقاط نمونه برداری مشارکت کننده در محاسبه نشانگر، اصطلاحاً طول نشانگر نامیده می شوند. برای یافتن بهترین طول برای نشانگرها در این پژوهش، نشانگرهایی با ۹ طول متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و طول عملگر ۱ نقطه ای مناسب ترین گزینه تشخیص داده شد. در این مرحله با استخراج یک ارتباط جبری بین تعدادی از نشانگرهای لرزه ای و مقادیر فشار اندازه گیری شده در 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 اعتبار سنجی تخمین در محل آن چاه نامیده می شود. به این ترتیب، هر یک از سه چاه حاضر در محاسبات، یکبار نقش چاه سوم را ایفا کرده و خطای اعتبار سنجی روش در محل آن چاه ها محاسبه می شود.

در مقاله حاضر، از چاه های ۳۶، ۴۸ و ۵۹ برای آموزش و اعتبار سنجی 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 اعتبار

سنجی را با افزودن هر تکرار که معادل افزودن یک نشانگر با اهمیت کمتر برای تخمین فشار منفذی است؛ را نشان می دهد. با توجه به میزان خطای اعتبار سنجی که در جدول ۱ آمده است، ترکیب نشانگرهای زمان، مدل امپدانس صوتی حاصل از وارون سازی، قطبیت ظاهری، integrate و Amplitude Weighted Cosine Phase به ترتیب موثرترین نشانگرها در پیش بینی فشار منفذی هستند. ترتیب یاد شده در سه نشانگر اول مورد انتظار است، چرا که نشانگر زمان مستقیماً با عمق در داده های لرزه ای در ارتباط است و تغییرات آن رابطه مستقیم با فشار های هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک دارد. پس از زمان تغییرات چگالی و سرعت سنگها نیز سبب تغییرات در فشار های یاد شده می شوند. لذا حاصل ضرب این دو یعنی امپدانس در جایگاه دوم اهمیت قرار گرفته است. کاهش یا افزایش امپدانس 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.

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



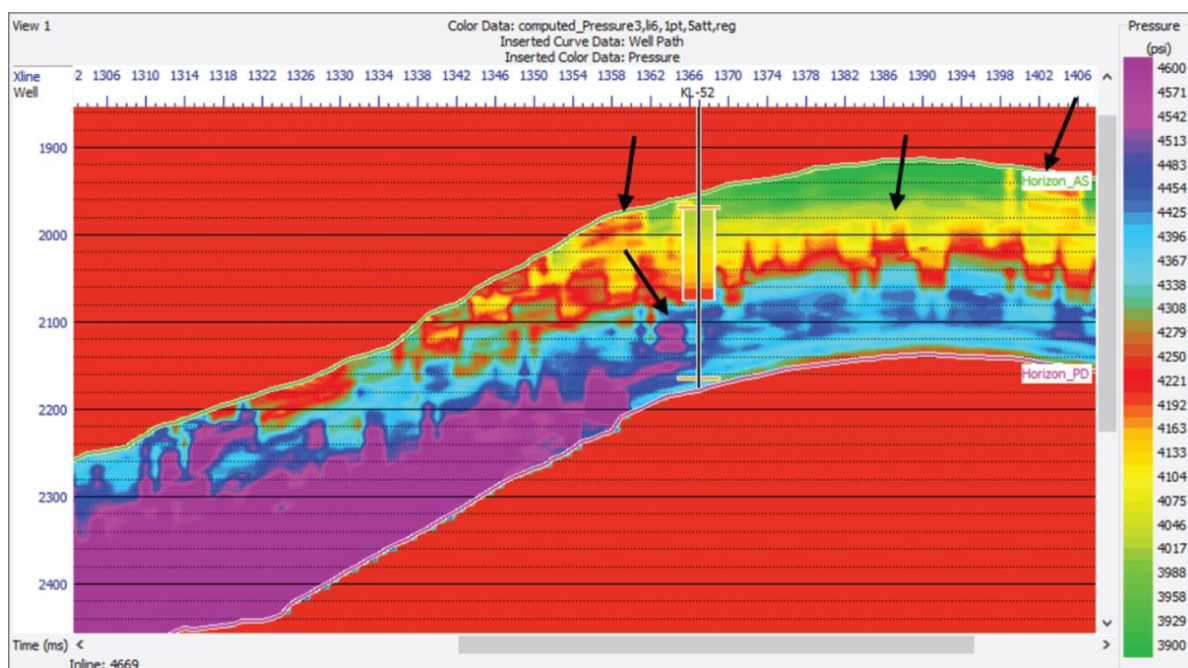
شکل ۹- روند تغییرات خطای آموزش (منحنی سیاه) و خطای اعتبار سنجی (منحنی قرمز) با تعداد نشانگرها

شکل ۱۰ مقطعی از مدل فشار منفذی تخمین زده شده با استفاده از روش رگرسیون چند نشانگری را نمایش می دهد. این مقطع قائم از چاه ۵۲ می گذرد. در این شکل، در محل چاه ۵۲ مقدار فشارهای نمودار RFT نیز نشان داده شده است. در شکل ۱۰ مقدار فشار اندازه گیری شده در محل چاه نیز در شک نمایش داده شده است که انطباق کلی با روند و مقدار فشار سازندی تخمین زده شده با استفاده از رگرسیون چند نشانگری نشان می دهد. همچنین حداقل فشار منفذی در رأس تاقدیس قابل مشاهده است و به طور کلی فشار با روندی خطی با افزایش عمق افزایش می یابد. وجود روند خطی افزایش فشار منفذی، تاییدی بر غالب بودن تاثیر فشار هیدرواستاتیک در محدوده سازند محسوب می شود. با این وجود، روند یاد شده در مناطق مختلفی از سازند با حضور زون های با فشار بالاتر در افق های که فشار عمومی کمتر است، قطع می شود. این مساله می تواند نشانه وجود محدوده هایی با فرافشار و یا فروفشار باشد. به ویژه در رأس تاقدیس که انتظار وجود کمترین فشار منفذی می رود ولی شاهد افزایش غیر عادی فشار هستیم، که احتمالاً نشانه وجود پدیده فرافشار است. فلش های سیاه رنگ نمایش داده شده در شکل ۱۰، برخی از نقاط دارای فرافشار را در این مقطع نشان می دهد.

برای اجتناب از پدیده بیش برآزش مدل امپدانس به دست آمده از تکرار پنجم به عنوان مدل امپدانس نهایی به دست آمده از روش رگرسیون چند نشانگری در نظر گرفته شد. در این تکرار، خطاهای متوسط نسبی آموزش و اعتبار سنجی به ترتیب $1/4$ و $3/15$ درصد بوده است. همچنین میزان همبستگی بین فشارهای منفذی تخمین زده شده و فشار اندازه گیری شده در مراحل آموزش و اعتبار سنجی نیز به ترتیب $95/6$ و $85/9$ 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 مورد استفاده 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



شکل ۱۰- فشار تخمین زده شده به روش رگرسیون چند نشانگری در مقطع گذرنده از چاه ۵۲ به عنوان چاه شاهد. فشار نشان داده شده در محل چاه، مقدار اندازه گیری با استفاده نمودار RFT می باشد. مناطق احتمالی دارای فرفشار با فلش سیاه رنگ نشان داده شده اند.

و تخمینگر ایجاد شده عملاً تنها نماینده مناسبی برای نمه جنوبی یا شمالی محدوده داده های لرزه ای خواهد بود. در حالی که با انتخاب چاه ۳۶ در شمال، چاه ۵۹ در جنوب و یکی از چاههای ۴۸ یا ۵۲ در مرکز محدوده داده های لرزه ای، می توان انتظار داشت مدل رگرسیون چند نشانگری نماینده مناسبی برای تخمین فشار در کل محدوده داده های لرزه ای باشند. همین رفتار در ادامه در مورد شبکه های عصبی مورد مطالعه نیز وجود داشت. بنابراین تا پایان تحقیق، تنها نتایج حاصل از 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

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 به عنوان چاه شاهد، تغییر معنا داری در نتایج ایجاد نمود. اما انتخاب هر یک از چاههای ۳۶ و ۵۹ به کاهش چشمگیر همبستگی در مراحل آموزش و اعتبار سنجی به کمتر از ۵۰ درصد منجر شد. به نظر می رسد 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 داده ها و نزدیک به هم واقع شده اند. همچنین بر اساس شکل ۳، این دو چاه هر دو تقریباً بر روی راس تاقدیس مخزن واقع بوده و داده های لرزه ای در محل هر دو چاه کیفیت مشابهی دارند. اما چاه ۳۶ در کنج گوشه شمالی داده های لرزه ای واقع شده است. چاه ۵۹ نیز در جنوب محدوده و در یال تاقدیس قرار گرفته است. همچنین وجود پدیده گسل و شکستگی سبب آشفتگی ظاهری مقطع لرزه ای در محل این چاه شده است. بنابراین، نمی توان 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

است. این شبکه طبق پیش فرض نرم افزار از تابع نمایی برای وزن دهی ورودی هر گره استفاده می‌کند. در این روش نیز از چاههای ۳۶، ۴۸ و ۵۹ برای تخمین فشار منفذی استفاده شده و چاه ۵۲ نقش شاهد را بر عهده دارد. میزان همبستگی بین فشار اندازه‌گیری و فشار تخمین زده شده توسط این روش در مرحله آموزش ۹۸٪ با خطای ۰/۹۸٪ به دست آمد. همچنین میزان همبستگی اعتبار سنجی ۷۷٪ با میزان خطای نسبی متوسط ۳/۳۱٪ به دست آمده است. این خطا نسبتاً به خطای اعتبار سنجی با استفاده از روش رگرسیون چند نشانگری نزدیک است؛ اما

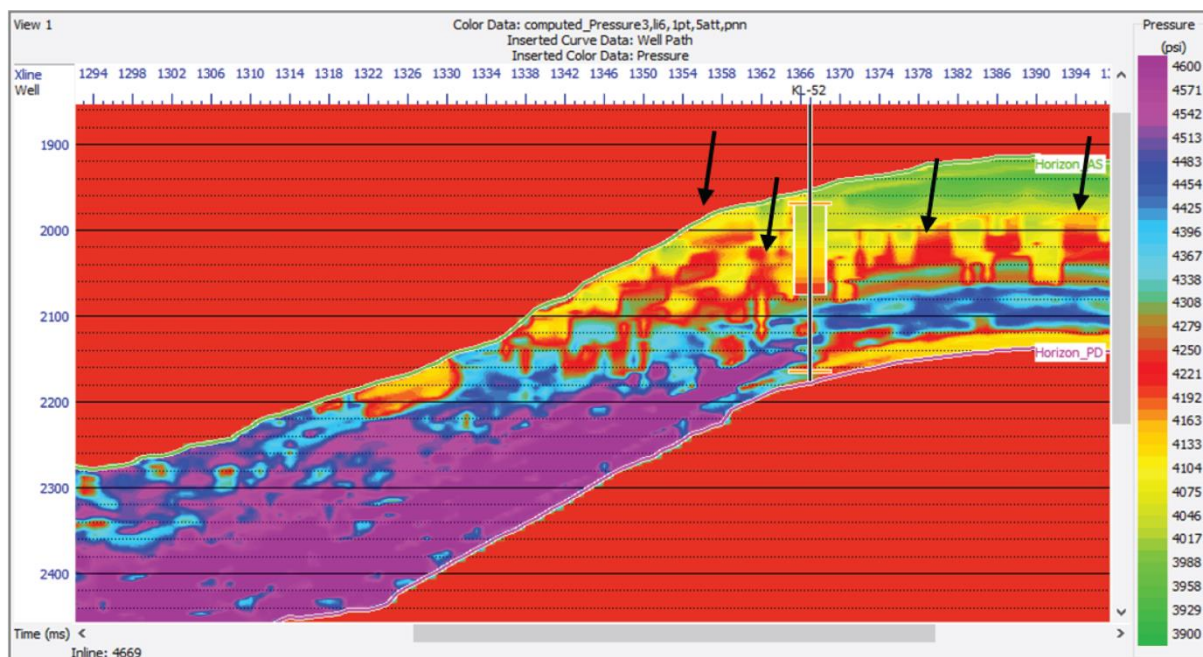
درمقایسه کیفی با روش رگرسیون چند نشانگری، فشارهای تخمین زده شده انطباق کمتری با داده فشار اندازه‌گیری شده در محل چاه نشان می‌دهند. همچنین در آموزش این شبکه، خطای تخمین بسیار کم بوده است و به نظر می‌رسد که به دلیل تعداد کم چاههای استفاده شده برای آموزش شبکه روش *PNN*، وقوع پدیده بیش برازش، منتفی نیست. سطر دوم جدول ۲، مقدار همبستگی ها و خطاهای یاد شده در روش *PNN* را نشان می‌دهد.

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 می‌کند، در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این شکل هر چند با شکل فشار منفذی مدل سازی شده با روش رگرسیون چند نشانگری تفاوت‌هایی دارد، اما به طور کلی در نشان دادن زون‌های دارای فرافشار تقریباً با شکل ۱۰ مطابقت دارد. بنابراین تفسیر کلی آن مشابه با نتایج روش رگرسیون چند

نشانگری می باشد. ضمناً محدوده های احتمالی دارای پدیده فرافشار در هر دو شکل ۱۰ و ۱۱ در مکانهای 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.



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* می باشد. مناطق احتمالی دارای فراقشار با فلش سیاه رنگ نشان داده شده اند.

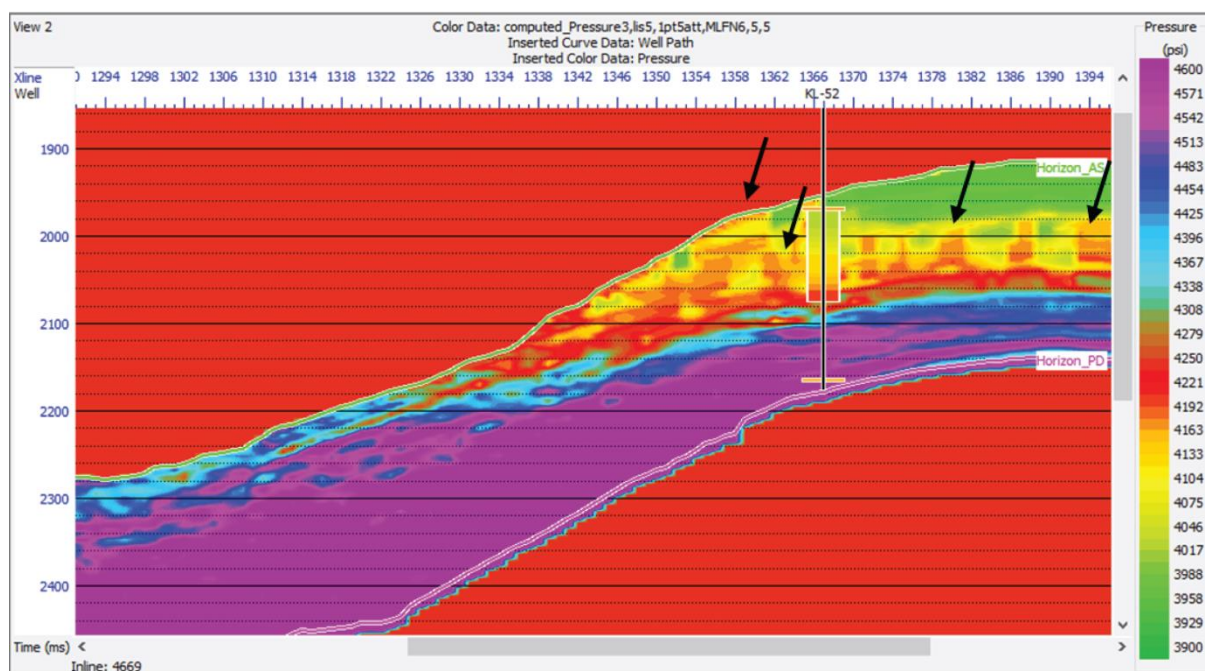
چاه ۵۲ نشان می دهد. در نگاه کیفی، این سه شکل شباهت کلی در دامنه تغییرات فشار منفذی و مکان زون های دارای پدیده فراقشار دارند. همچنین همان روند خطی کلی افزایش فشار از رأس تا قدیس به اعماق بیشتر در هر سه شکل مشاهده می شود. همچنین هر سه شکل نشان دهنده عدم تبعیت همه نقاط مخزن از روند فشار خطی یاد شده هستند که حضور زونهای دارای فشاری بیش از روند کلی تغییرات خطی فشار منفذی، تاییدی بر این مدعا است. همچنین با توجه به اینکه وجود لایه های ناتروا و مخصوصا حضور لایه های شیلی از رایج ترین عوامل ایجاد پدیده فراقشار است، انتظار می رود که گستردگی فضایی زونهای دارای فراقشار نیز به موازات چین خوردگی شیلها گسترش یابند. بنابراین، انتظار می رود که روند کشیدگی زونهای یاد شده در مخزن آسماری از شیب کلی لایه که ناشی از چین خوردگی تاقدیس است تبعیت کند. این مساله در هر سه شکل یاد شده قابل مشاهده و تایید است هر چند به نظر می رسد که احتمالا روش *MLFN* در مقایسه با رگرسیون چند نشانگری و *PNN*، در تخمین فشار منفذی موفق تر عمل نموده است، چرا که مقطع فشار منفذی شکل ۱۲ از شکل های ۱۰ و ۱۱ هموارتر است. همچنین کشیدگی

۷-۲- تخمین فشار منفذی با روش شبکه عصبی چند لایه پیشخور (*MLFN*)

شبکه *MLFN* در پژوهش حاضر با استفاده از ۳ لایه مخفی و تعداد ۶ گره در هر یک از آن لایه ها تعریف شده است. این تعداد لایه و گره، پس از چندین مرتبه تغییر تعداد لایه ها و گره ها بررسی میزان خطای همبستگی و تخمین در مراحل آموزش و اعتبار سنجی داده ها 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 فشار منفذی به روش رگرسیون چند نشانگری به عنوان ورودی استفاده شده است. میزان همبستگی بین فشار اندازه گیری شده و فشار تخمین زده شده توسط این روش در مرحله آموزش ۹۷٪ با متوسط خطای نسبی ۰/۹٪ به دست آمد. در مرحله اعتبار سنجی نیز همبستگی ۸۷٪ و میانگین خطای نسبی ۲/۸٪ به دست آمد، که نسبت خطای تخمین به دو روش های رگرسیون چند نشانگری و *PNN* کمتر است. سطر سوم جدول ۲ مقدار همبستگی ها و خطاهای یاد شده در روش *MLFN* را نشان می دهد.

مشابه شکل های ۱۰ و ۱۱، شکل ۱۲ نیز مقطعی از مدل فشار منفذی تخمین زده شده به روش *MLFN* را در محل

زونهای دارای فرافشار در شکل ۱۲، تبعیت بیشتری نسبت به شیب تاقدیس نشان می دهد.



شکل ۱۲- فشار منفذی تخمین زده شده به روش *MLFN* در مقطع گذرنده از چاه ۵۲. فشار نشان داده شده در محل چاه، مقدار اندازه گیری با استفاده نمودار *RFT* می باشد. مناطق احتمالی دارای فرافشار با فلش سیاه رنگ نشان داده شده اند.

با بررسی شکلهای ۱۰، ۱۱ و ۱۲ می توان تفاوت تغییرات فشار منفذی تخمین زده شده با روشهای مختلف را مشاهده نمود. برای مثال، شکل ۱۰ نشان می دهد که فشار منفذی به دست آمده از روش رگرسیون چند نشانگری در مقطع زمانی ۱۹۵۰ ms بین ۳۹۰۰ تا ۴۲۰۰ psi تغییر می کند. 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 می کند. میزان تغییر فشار منفذی به روش *MLFN* نیز در شکل ۱۲ مشخص شده که در مقطع زمانی ۱۹۵۰ ms از 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.

نتایج تخمین فشار منفذی با استفاده از روشهای 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

۳- نتایج و بحث

زمان (افزایش عمق) را برای داده‌های اندازه‌گیری 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 رنگ‌های آبی، نارنجی، خاکستری و زرد نشان می‌دهد. در این شکل در زمان‌های بیش از ۲۰۲۰ میلی ثانیه، نقاط زرد رنگ نزدیکترین نقاط به نقاط آبی رنگ هستند؛ یعنی داده‌های فشار تخمین زده شده با روش *MLFN*، نزدیکترین پاسخ را به داده واقعی اندازه‌گیری شده نشان داده است. اما در زمان‌های کمتر از ۲۰۲۰ میلی ثانیه، اختلاف روش‌ها کم است و حتی روش رگرسیون چند نشانگری کمی بهتر از سایر روش‌ها توانسته فشار منفذی را تخمین بزند. شکل‌های ۱۳ ب، ۱۳ ج و ۱۳ د نیز به ترتیب ضریب تغییرات به دست آمده از روش‌های رگرسیون چند نشانگری، *PNN* و *MLFN* را نشان می‌دهند. ضریب تغییرات در سه روش رگرسیون چند نشانگری، *PNN* و *MLFN* به ترتیب برابر است با ۰/۰۲۳۸۶ و ۰/۱۹۸۷۵ محاسبه شده است. همچنین ضریب تغییرات به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری از چاه برابر است با ۰/۱۳۶۷ که به روش *MLFN* نزدیک‌تر است. به این ترتیب برتری روش *MLFN* در تخمین فشار منفذی نسبت به دو روش دیگر به طور کمی تأیید می‌شود.

از دیدگاه کیفی، زمین‌شناسی، حضور توالی رسوبات شیلی در سازند آسماری؛ وجود پدیده‌های فرار فشار را توجیه می‌شود. این رسوبات تراوایی ناچیزی دارند و می‌توانند سبب قطع شدن ارتباط فشار در تخلخل سازند با فشار هیدرواستاتیک در سازندهای فوقانی شوند. از سوی دیگر، زونهای دارای فرافشار عمدتاً زیر راس تاقدیس دیده می‌شود. اما در یال تاقدیس این پدیده ضعیفتر است. با توجه به شکل ۳ ج، می‌توان این رفتار را به حضور گسل و زونهای بشدت شکسته در یال غربی تاقدیس نسبت داد. وجود این شکستگی‌ها سبب برقراری ارتباط هیدرولیکی بین منافذ سازند آسماری و سازندهای بالاتر می‌شوند. همین پدیده سبب کاهش فشار منفذی می‌شود. این مساله بویژه در شکل ۱۲ و فشار منفذی تخمین زده شده با استفاده از روش *MLFN* به وضوح قابل می‌شود. به طور خاص در عمود بر خط‌های ۱۳۳۰ تا ۱۳۴۲ شاهد کاهش فشار منفذی نسبت به مقدار فشار منفذی مورد انتظار در روند خطی کلی هستیم. وجود چنین زونهایی که احتمالاً دارای پدیده فروفشار (*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 زون‌های فرافشار در آسماری بوده است. ضمناً ارتباط فضایی تغییرات فشار منفذی با چین خوردگی تاقدیس بررسی نشده بود.

شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ همچنین نشان می‌دهند که پدیده فرافشار عموماً در نیمه فوقانی سازند آسماری رخ داده است. این نتیجه انطباق معناداری با شکل ۸ دارد. چرا که در شکل یاد شده، امیدانس نیمه فوقانی آسماری به شکل قابل ملاحظه‌ای از امیدانس نیمه تحتانی آن بیشتر است. با توجه به آنکه نیمه تحتانی آسماری عموماً دارای سنگ‌های آهکی متخلخل است، می‌توان افزایش امیدانس در نیمه فولانی آسماری را به حضور لایه‌های شیلی متراکم و ناتروا نسبت داد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان نتایج کلی به دست آمده در مراحل مختلف انجام این پژوهش را به شرح زیر معرفی نمود:

۱. استفاده مستقیم از امیدانس به دست آمده از وارون‌سازی داده لرزه‌ای برای آموزش روش‌های مختلف شبکه عصبی برای تخمین فشار منفذی مفید است. این کمیت در عمل دومین نشانگر موثر در تخمین فشار منفذی با استفاده از روش رگرسیون چند نشانگری می‌باشد.
۲. روند کلی فشار منفذی از راس تاقدیس مخزن به سمت عمق در هر سه روش محاسبه به صورت خطی افزایش می‌یابد؛ که وجود اثر غالب فشار هیدرواستاتیک در سازند آسماری را در میدان کوپال نشان می‌دهد.
۳. با وجود تفاوت‌های مختصر در جزئیات فشار منفذی به دست آمده به روش‌های مختلف، اما وجود پدیده کلی فرافشار با استفاده از هر سه روش دیده می‌شود. مناطق دارای فشار منفذی بالا بخوبی در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ قابل مشاهده است و محل آن‌ها با استفاده از هر سه روش، تقریباً بر هم منطبق هستند.
۴. بنظر در روش *PNN* پدیده بیش برآزش وجود دارد؛ زیرا مقدار خطای اعتبار سنجی آن از بقیه

حضور لایه های شیلی با امپدانس صوتی بالاتر در نیمه فوقانی سازند آسماری امکانپذیر است. چنانچه وجود پدیده فروفشار به دلیل حضور گسل و شکستگی های گسترده در یال غربی تاقدیس توضیح داده شد.

۷. کلیه نتایج ارائه شده از تحلیل داده های لرزه ای به دلیل وجود نوفه های همبسته و تصادفی با عدم قطعیت رو به است. بویژه اینکه داده های لرزه ای موجود بویژه در یال تاقدیس، رفتارهای آشفته و شکسته در اثر گسل خوردگی نشان می دهند. با این وجود، انطباق تقریبی زونهای دارای پدیده فرافشار در هر سه روش، بیانگر موفقیت نسبی پژوهش حاضر در ارائه تفسیر یکتا در تخمین فشار منفذی است.

روش ها بالاتر است با وجود اینکه خطای تخمین در مرحله آموزش، زیر یک درصد است. احتمالاً این مشکل به دلیل تعداد کم چاه های مورد نیاز برای آموزش شبکه در این روش اتفاق افتاده است.

۵. در روش *MLFN* بیشترین همبستگی و حداقل خطای اعتبار سنجی در تخمین فشار منفذی مشاهده شد. همچنین، به نظر می رسد پدیده های فرافشار عمدتاً در راس تاقدیس و پدیده فروفشار در یال غربی آن حضور دارند.

۶. تغییرات فرافشار بویژه در صورت تخمین با روش *MLFN*، از چین خوردگی تاقدیس و شیب لایه های موجود در آن تبعیت می کنند. با توجه به اینکه فرافشار معمولاً به دلیل حضور شیل و لایه های ناتروا ایجاد می شود، توجیه این پدیده با

شکل ۱۳- مقایسه فشار اندازه گیری شده در چاه شاهد ۵۲ و فشار های تخمین زده شده با روش های رگرسیون چند نشانگری، *PNN* و *MLFN* (الف)، مقایسه فشار اندازه گیری شده در چاه و فشار تخمینی به روش رگرسیون چند نشانگری (ب)، مقایسه فشار اندازه گیری شده در چاه و فشار تخمینی به روش *PNN* (ج) و مقایسه فشار اندازه گیری شده در چاه و فشار تخمینی به روش *MLFN* (د).

منابع

[4] 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).

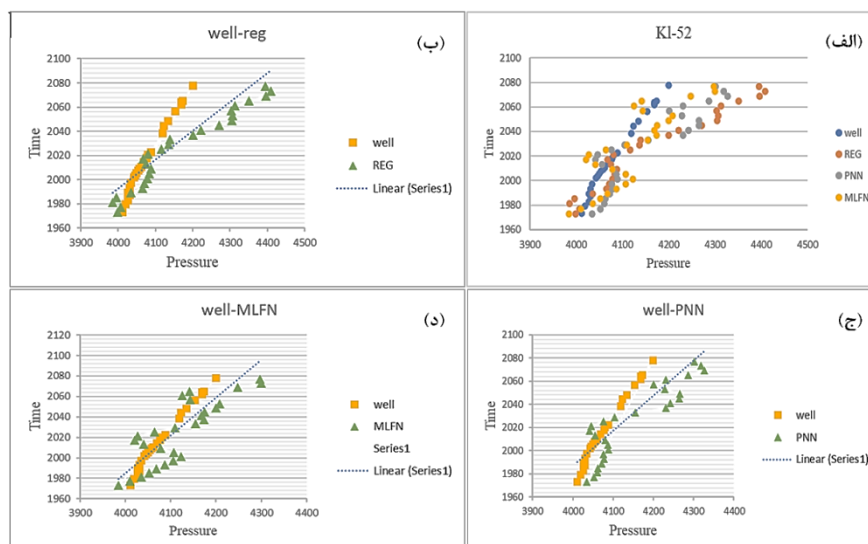
[5] Zhang, J. (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1-2), 50-63.

[6] 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).

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



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.

[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).

[7] 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.

[8] 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.

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

[10] 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.

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

[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.