

تخمین تخلخل با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای در یکی از میداین هیدروکربنی جنوب غرب ایران

سپیده سهرابی^۱، علی اسعدی^۱ و حسین رحیم‌پور بناب*^۲

۱- کارشناس ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران

*rahimpour@khayam.ut.ac.ir

دریافت: ۹۱/۸/۹ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۱

چکیده

تخلخل یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی ظرفیت ذخیره و تولید یک مخزن هیدروکربنی است. این ویژگی به طور مرسوم از طریق داده‌های مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی محاسبه می‌شود. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این دو گروه از داده‌ها با وجود ارزشمندی فراوان، عدم گسترش و محدود بودن به محل چاه می‌باشد. استفاده از داده‌های لرزه‌ای با گسترش جانبی بالا، نقشی مهم و اساسی در تخمین شاخص‌های پتروفیزیکی در فواصل بین‌چاهی دارد. در این پژوهش، تخمین تخلخل نوترون با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای بر روی سازند آسماری در میدان چشمه خوش (شمال اهواز) صورت گرفته است. ابتدا از طریق نگارهای صوتی و چگالی در محل هر چاه، لرزه‌نگاشت مصنوعی ایجاد و در مرحله بعد با داده‌های لرزه‌ای انطباق یافته و موجک میانگین مورد استفاده در وارون‌سازی با میزان تطابق ۸۷.۴۷٪ استفاده از دو چاه، استخراج گردید. سپس داده‌های لرزه‌ای سه بعدی از طریق فرآیند وارون‌سازی به امپدانس صوتی تبدیل و به عنوان نشانگر خارجی در طی فرآیند تخمین، همراه نشانگرهای داخلی حاصل از داده‌های لرزه‌ای خام، مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از روش رگرسیون مرحله‌ای، ارتباط بین تخلخل و نشانگرهای لرزه‌ای مشخص و هشت نشانگر لرزه‌ای شامل، مربع نتیجه وارون‌سازی، مشتق دامنه لحظه‌ای، انتگرال قدرمطلق دامنه، مشتق، فرکانس لحظه‌ای، فیلتر ۳۵/۴۰ - ۲۵/۳۰، کسینوس فاز لحظه‌ای و داده لرزه‌ای خام به عنوان نشانگرهای لرزه‌ای بهینه مشخص گردیدند. در مرحله بعد به کمک دو روش رگرسیون خطی چند نشانگری (MLR) و شبکه عصبی احتمالی (PNN)، تخمین تخلخل انجام و مشخص شد که با توجه به نتایج اعتبارسنجی و میزان خطا، روش شبکه عصبی کارایی بیشتری را نشان می‌دهد. در نهایت با توجه به تخلخل تخمین زده شده از طریق داده‌های لرزه‌ای، مشخص گردید که توالی‌های ماسه سنگی-کربناته بخش پایینی نسبت به دولومیت‌ها و آهک‌های بخش بالایی سازند آسماری، عموماً از نظر تخلخل شرایط مطلوب‌تری را دارا بوده و این روند در داده‌های لاگ نوترون هم به آسانی قابل تشخیص می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سازند آسماری، تخلخل، نشانگرهای لرزه‌ای، وارون‌سازی، رگرسیون خطی چند نشانگری، شبکه عصبی احتمالی

مقدمه

هیدروکربن دارد. راه مستقیم تعیین این پارامتر پتروفیزیکی در مخازن هیدروکربنی حفر چاه است. به این دلیل که حفر چاه علاوه بر هزینه‌های فراوان، محدوده اندکی از یک میدان را پوشش می‌دهد، همواره تلاش برای تخمین خواص پتروفیزیکی از طریق داده‌های لرزه‌ای وجود داشته است [۵ و ۳]. نشانگرهای لرزه‌ای^۱، تمام اطلاعات کمی حاصل از داده‌های لرزه‌ای از طریق روش‌های مستقیم و غیرمستقیم می‌باشد [۷]. یک نشانگر لرزه‌ای می‌تواند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم تحت تاثیر تغییرات زمین‌شناسی یا ویژگی‌های مخزنی باشد. در حال حاضر نشانگرهای لرزه‌ای با خصوصیات متفاوت در تفسیر ساختارهای زمین‌شناسی و ویژگی‌های سنگ و

استفاده از روش‌های جدید به منظور تخمین پارامترهای مخزنی مختلف از قبیل تخلخل، تراوایی، لیتولوژی و سایر پارامترهای مرتبط، یکی از مهم‌ترین اهداف مورد نظر در مطالعات اکتشافی به منظور کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری می‌باشد. استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای در تخمین پارامترهای مخزنی، پیشینه طولانی در مطالعات نفتی دارد که به صورت خلاصه می‌توان به مطالعات تودورو و همکاران [۱]، تون [۲]، همپسون و همکاران [۳]، راسل و همکاران [۴]، راسل [۵] و کخدایی و همکاران [۶] اشاره کرد.

تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مخزنی است، که تعیین توزیع آن نقش مهم در حفر بهینه چاه‌های اکتشافی - توسعه‌ای و محاسبه ذخیره در جای

¹ Seismic Attribute

روش مطالعه

در این مطالعه به منظور تخمین تخلخل از برخی ماژول‌های نرم‌افزار^۱ به عنوان یک نرم‌افزار کاربردی ژئوفیزیکی، استفاده شده است. ابتدا فرآیند وارون‌سازی لرزه‌ای با دقت بالا و میزان خطای کم انجام و سپس از طریق یافتن ارتباط بین امپدانس صوتی به عنوان نشانگر خارجی^۲ و سایر نشانگرهای داخلی^۳ مرتبط، تخمین تخلخل صورت گرفته است. روند تخمین تخلخل از طریق داده‌های لرزه‌ای در چهار مرحله به صورت زیر می‌تواند خلاصه شود:

۱- ابتدا به منظور ایجاد بانک اطلاعاتی چاه^۴، باید نگارهای چاه‌پیمایی^۵ چگالی و صوتی همراه با داده‌های شوت کنترل^۶، بارگذاری شود.

۲- در مرحله بعد با بارگذاری داده‌های لرزه‌ای سه بعدی همراه با افق‌های زمانی و استفاده از بانک اطلاعاتی چاه، وارون‌سازی انجام و امپدانس صوتی به عنوان نشانگر خارجی ایجاد و ذخیره شد.

۳- داده‌های آموزشی، شامل نگار نوترون و نگار صوتی تصحیح شده^۷ در سه چاه در دسترس به همراه داده‌های لرزه‌ای خام و نشانگر امپدانس صوتی به منظور انجام فرآیند تخمین بارگذاری گردید.

۴- از روش رگرسیون مرحله‌ای^۸ به منظور شناسایی نشانگرهای مرتبط بهینه استفاده و در مرحله بعد از طریق دو روش رگرسیون خطی چند نشانگری^۹ و روش شبکه عصبی احتمالی^{۱۰}، داده‌های لرزه‌ای در دسترس به مکعب سه بعدی تخلخل تبدیل شد [۱۰].

بارگذاری نگارهای پتروفیزیکی و داده‌های لرزه‌ای

در اولین مرحله به منظور ایجاد بانک اطلاعاتی، نگارهای پتروفیزیکی چگالی، صوتی، نوترون و مختصات چاه به همراه داده شوت کنترل بارگذاری گردید. در این مطالعه از داده‌های سه چاه ۳، ۵ و ۱۲ در میدان نفتی چشمه خوش

سیال پرکننده منافذ، استفاده می‌شود. مطالعات گوناگونی توسط محققین مختلف به منظور تقسیم‌بندی و معرفی انواع نشانگرها صورت گرفته است [۸]. از طریق تعیین ارتباط بین نشانگرهای لرزه‌ای و خواص پتروفیزیکی در محل هر چاه و تعمیم این ارتباط به کل داده‌های لرزه‌ای، پارامتر پتروفیزیکی مورد نظر را در کل محدوده‌ای که داده لرزه‌ای پوشش می‌دهد، می‌توان محاسبه نمود. از آنجایی که توالی‌های کربناته بسیار ناهمگن‌تر از سنگ‌های آواری بوده و تغییرات شعاع گلوگاه تخلخل در آن‌ها پیچیده‌تر است از این‌رو در رسوبات آواری داده‌های لرزه‌ای ارتباط ساده‌تری با پارامترهای پتروفیزیکی دارند. با این وجود تخمین تخلخل که به طور مستقیم مرتبط با امپدانس صوتی است، ساده‌ترین پارامتر می‌باشد که تخمین آن از داده‌های لرزه‌ای صورت می‌گیرد. محدودیت‌های این روش در زمینه قدرت تفکیک باعث می‌شود تخلخل تخمین زده شده با این روش صرفاً برای شناخت روندهای کلی تخلخل کافی باشد. در این پژوهش از نگار نوترون برای تخمین تخلخل توسط داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است. داده‌های در دسترس، نگارهای پتروفیزیکی سه چاه به همراه داده‌های لرزه‌ای سه بعدی در محدوده میدان مورد مطالعه می‌باشد. با تلفیق نگارهای پتروفیزیکی و داده‌های لرزه‌ای، تخمین تخلخل در محدوده زمانی سازند آسماری، صورت گرفته است.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

سازند آسماری با سن الیگومیوسن، جوان‌ترین و مهم‌ترین سازند مخزنی ایران بوده و تقریباً ۸۰ درصد نفت ایران از آن تولید می‌شود. این سازند در ناحیه فروافتادگی دزفول میادین هیدروکربنی مهمی را تشکیل می‌دهد. میدان نفتی چشمه‌خوش در ۱۸۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر اهواز و ۶۰ کیلومتری غرب شهر دزفول در حد فاصل بین استان‌های خوزستان و ایلام در قسمت چین‌خورده زاگرس قرار دارد (شکل ۱). لیتولوژی سازند آسماری در این میدان شامل سنگ آهک، دولومیت، آهک‌های رسی، ماسه سنگ و شیل می‌باشد.

¹ Hampson-Russell

² External Attribute

³ Internal Attributes

⁴ Well Database

⁵ Wirelines Logs

⁶ Check Shots

⁷ P wave Corrected

⁸ Stepwise Regression

⁹ Multiattribute Regression (MLR)

¹⁰ Probabilistic Neural Network(PNN)

چینه‌شناسی لایه‌ها به دست آورد. به عبارت دیگر امپدانس صوتی، مقاومت سنگ‌ها در برابر انتشار امواج الاستیک می‌باشد که اختلاف آن در فصل مشترک لایه‌ها باعث بازتاب امواج لرزه‌ای می‌شود. رابطه بین دامنه انرژی موج بازتابی و دامنه انرژی موج تابشی به عنوان ضریب بازتاب فصل مشترک دو محیط خوانده می‌شود. روند فرآیند وارون‌سازی لرزه‌ای نشان داده شده است (شکل ۳). به صورت خلاصه، وارون‌سازی تبدیل داده‌های لرزه‌ای باند محدود به شبکه نگارهای مقاومت صوتی باند پهن در هر برداشت نقطه هم عمق یا نقطه میانی مشترک^۵ می‌باشد. به بیان دیگر وارون‌سازی فرآیندی است که براساس مدل‌های لرزه‌ای اولیه و موجک‌های تخمین زده شده، مدل مقاومت صوتی نزدیک به مدل واقعی زمین تخمین زده می‌شود [۱۳]. از آنجا که امپدانس صوتی عموماً ارتباط مشخص با تغییرات لیتولوژیکی، تخلخل و تا حدودی سایر ویژگی‌های پتروفیزیکی دارد، یکی از نشانگرهای لرزه‌ای مهم در تخمین پارامترهای پتروفیزیکی و ژئومکانیکی محسوب می‌شود. این پارامتر یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر روی تخلخل می‌باشد. با افزایش سرعت و چگالی تخلخل کاهش می‌یابد، بنابراین با افزایش امپدانس تخلخل کاهش نشان داده و یکی از مهم‌ترین نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با تخلخل می‌باشد.

تطابق داده‌های چاه و داده‌های لرزه‌ای

یکی از بخش‌های مهم انجام وارون‌سازی، تطابق نگارهای پتروفیزیکی و داده‌های لرزه‌ای است. برای رسیدن به این هدف نیاز است تا لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی و مرکب در هر چاه ایجاد و تطابق داده شوند. به منظور ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی، از حاصل ضرب چگالی در سرعت، ضریب بازتاب محاسبه و از طریق هم‌میخت^۶ با موجک لرزه‌ای، لرزه‌نگاشت مصنوعی در محل هر چاه محاسبه شده است. لرزه‌نگاشت مرکب با توجه به قائم بودن چاه‌ها با شعاع همسایگی^۷ یک که ۹ رد لرزه^۸ را شامل می‌شود در محل هر چاه استخراج گردیده است.

به همراه داده‌های لرزه‌ای سه بعدی پس از برانبارش^۱ استفاده شده است.

به منظور تلفیق داده‌های پتروفیزیکی و لرزه‌ای، نیاز است که اختلاف فرکانس بین این دو گروه متفاوت از داده‌ها در نظر گرفته شود. داده‌های چاه دارای تفکیک قائم زیاد و جانبی کم و در بعد عمق بوده و از طرف دیگر داده‌های لرزه‌ای دارای قدرت تفکیک قائم کم و جانبی زیاد و در بعد زمان اندازه‌گیری می‌شوند [۱۱]. به منظور تبدیل داده‌های چاه از عمق به زمان یا داده‌های لرزه‌ای از زمان به عمق از برداشت داده‌های لرزه‌ای در چاه، با عنوان نیمرخ لرزه‌ای قائم^۲، استفاده می‌شود. داده‌های شوت کنترل یکی از انواع برداشت‌های لرزه‌ای در چاه بوده، که در آن گیرنده‌های لرزه‌ای در عمق‌های مشخصی در چاه‌ها تعبیه و موج لرزه‌ای تولید شده از منبع لرزه‌ای را دریافت، و زمان گذر امواج را در اعماق مختلف ثبت می‌کنند. در این بررسی چاه‌های ۳ و ۵ داده شوت کنترل داشته و برای چاه ۱۲ نیز از داده‌های چاه ۵ به دلیل همجواری بیش‌تر با چاه ۱۲، استفاده شده است.

یکی از بخش‌های مهم برای وارون‌سازی داده لرزه‌ای، استفاده از افق‌های زمانی^۳ به منظور تطابق و درونیابی بین چاه‌ها است که عموماً براساس راس سازندها در چاه، ایجاد می‌شود [۱۲]. با توجه به این که توالی مورد نظر در این تحقیق سازند آسماری است، افق‌های زمانی مورد استفاده راس سازندهای آسماری و پایده بوده و ضخامت بین این دو افق زمانی، نشان دهنده این سازند مخزنی می‌باشد (شکل ۲).

وارون‌سازی لرزه‌ای

وارون‌سازی لرزه‌ای^۴، فرآیندی است که اطلاعات مرتبط با خواص لایه‌های زیرسطحی را از طریق داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌کند. این روش داده‌های لرزه‌ای را به ماهیت زمین که همان امپدانس صوتی است نزدیک کرده و تخمین خواص پتروفیزیکی را ممکن می‌سازد. امپدانس صوتی، حاصل ضرب سرعت در چگالی لایه‌ها است. از طریق تبدیل داده‌های لرزه‌ای بازتابی به امپدانس صوتی و تفسیر آن، می‌توان اطلاعات سودمندی از جزئیات ساختمانی و

⁵ Common Depth Point

⁶ Convolution

⁷ Neighbors

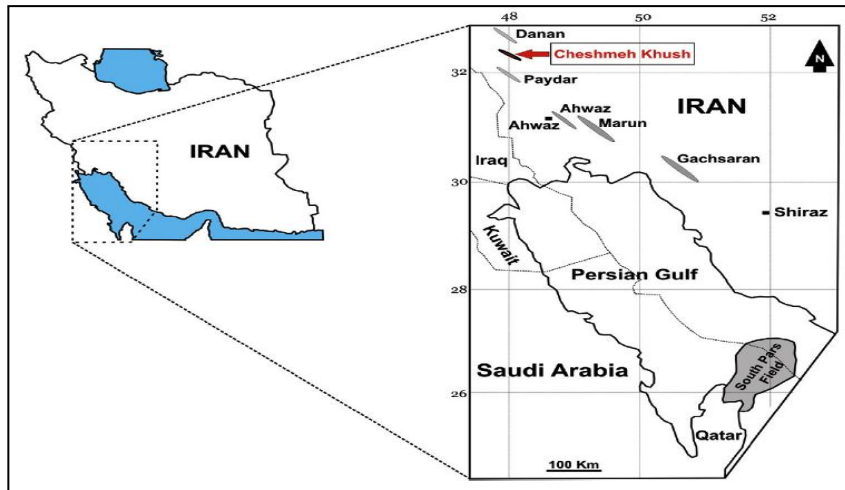
⁸ Seismic Trace

¹ Post Stacked

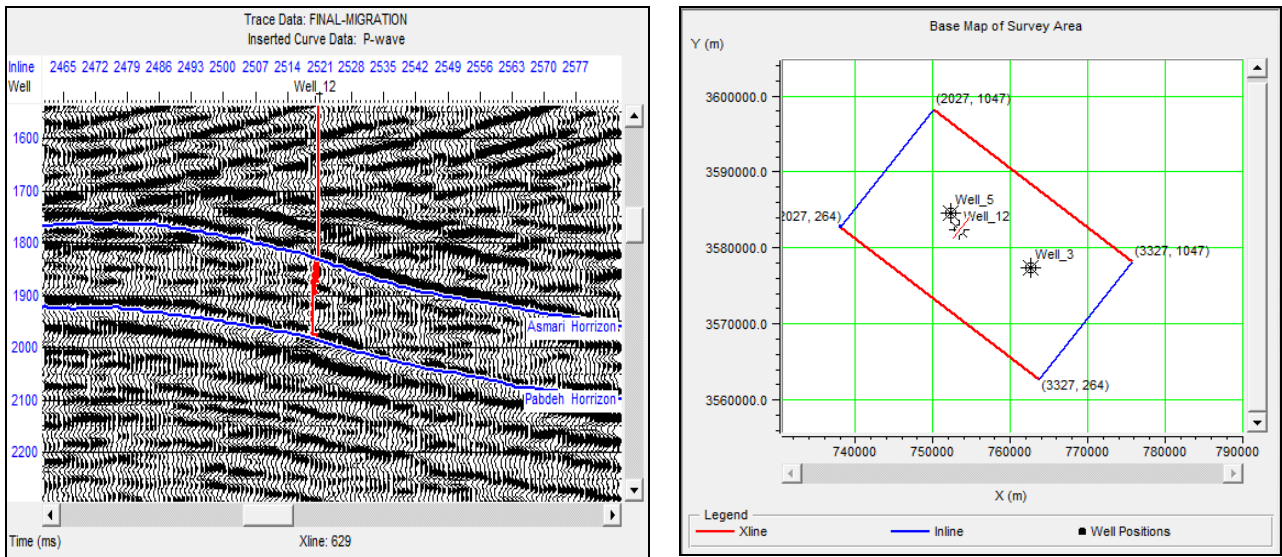
² Vertical Seismic Profile (VSP)

³ Time Horizon

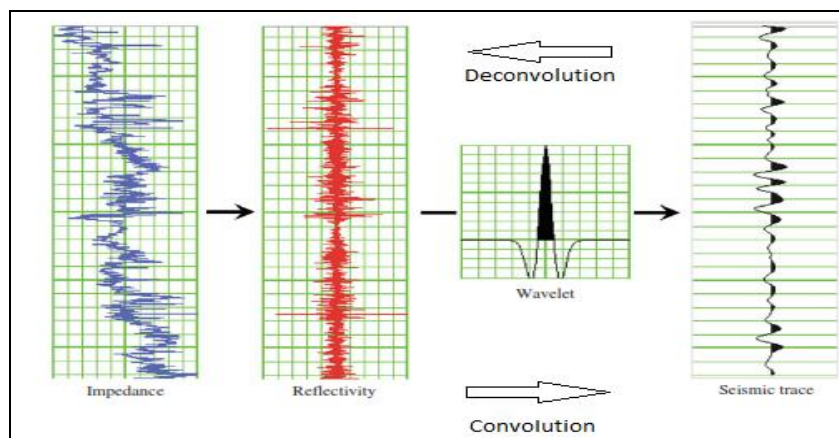
⁴ Seismic Inversion



شکل ۱. موقعیت میدان چشمه خوش در جنوب غربی ایران، در این شکل مهم ترین میدان‌های ناحیه که سازند آسماری مخزن اصلی است، مشخص می‌باشد [۹]



شکل ۲. (الف) نقشه موقعیت چاه‌ها نسبت به مکهب لرزه‌ای در میدان چشمه خوش، (ب) موقعیت چاه شماره ۱۲ و بالای سازندهای آسماری و پابده در یک خط چشمه لرزه‌ای از برداشت سه بعدی نشان داده شده است.



شکل ۳. در طی فرآیند وارون سازی از طریق واهمامیخت موجک از رد لرزه، ضربب بازتاب پذیری و امپدانس صوتی حاصل می‌شود.

موجک میانگین استفاده گردید. مشخصات موجک میانگین شامل دامنه، فرکانس و فاز نشان داده شده است (شکل ۵- الف و ب). هم‌چنین نمونه‌هایی از چگونگی تطابق داده‌های لرزه‌ای و نگارهای چاه‌پیمایی با استفاده از موجک لرزه‌ای میانگین در چاه شماره ۳ و ۵ ارائه گردیده است. میزان انطباق کلی موجک میانگین که در طی وارون‌سازی استفاده شده، برابر ۸۸/۴۷٪ می‌باشد (شکل ۵- ج و د).

ایجاد مدل اولیه برای وارون‌سازی

پس از تخمین موجک لرزه‌ای بهینه، مدل اولیه امپدانس با استفاده از نگارهای چگالی و صوتی تصحیح شده^۶ که واحد آن به واحد سرعت یعنی متر بر ثانیه (m/s) تبدیل شده، در محل چاه‌ها ایجاد و به صورت مبنایی برای وارون‌سازی استفاده شده است. الگوریتم‌های مختلفی به منظور وارون‌سازی لرزه‌ای با توجه به میزان کارایی و خطا استفاده می‌شود. مهم‌ترین این الگوریتم‌ها پایه مدل^۷، خارهای پراکنده^۸، الگوریتم باند محدود^۹ و الگوریتم شبکه عصبی^{۱۰} است. در این مطالعه از الگوریتم بر پایه مدل^{۱۱} به دلیل کمترین خطا و بیش‌ترین هم‌بستگی در مقایسه با سایر روش‌ها، به منظور وارون‌سازی استفاده شده است (شکل ۶). به عنوان نمونه امپدانس صوتی واقعی و محاسبه شده از طریق الگوریتم وارون‌سازی مورد استفاده در یکی از چاه‌ها نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است الگوریتم پایه مدل توانسته است به صورت کارآمد در وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای استفاده شود (شکل ۷- الف). در نهایت وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای در بازه زمانی بین قاعده و راس سازند آسماری انجام شده است. محدوده امپدانس در بخش‌های مختلف بر اساس رنگ، که در آن رنگ سبز بخش‌های با کمترین امپدانس و رنگ بنفش بخش‌های با بیش‌ترین امپدانس را نشان می‌دهد از هم تفکیک شده است. فایل لرزه‌ای استاندارد حاصل^{۱۲} در مرحله بعد به عنوان نشانگر لرزه‌ای خارجی در طی فرآیند تخمین استفاده می‌شود (شکل ۷- ب).

یکی از مهم‌ترین بخش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای استخراج موجک بوده و شکل موجک نقش مهمی در وارون‌سازی دارد. از آنجا که شکل دقیق موجک لرزه‌ای که در زمان برداشت از منبع لرزه‌ای ساطع می‌شود عموماً در دسترس و مشخص نمی‌باشد، نیاز است تا استخراج موجک صورت پذیرد. دو روش عمده برای این منظور شامل روش آماری^۱ و روش استفاده از چاه^۲ می‌باشد. در روش آماری موجک تنها از طریق داده‌های لرزه‌ای استخراج می‌شود. موجک لرزه‌ای از یک لرزه‌نگاشت به لرزه‌نگاشت دیگر تغییر می‌کند و تابعی از زمان گذر می‌باشد. بدین معنا که برای یک مقطع لرزه‌ای مجموعه‌ای از موجک وجود دارد. در این روش دامنه بهینه موجک از طریق میزان انطباق حاصل بین دو لرزه‌نگاشت، و فاز موجک نیز ثابت و عموماً برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. برخلاف روش آماری در هنگام استخراج موجک از طریق چاه، هم از داده‌های لرزه‌ای و چاه استفاده می‌شود، در این روش فاز موجک لرزه‌ای قابل تعیین است [۱۰]. در طی فرآیند استخراج موجک اگر خطا زیاد باشد مشخصات موجک تغییر داده می‌شود تا خطا کاهش یابد و این عمل تا زمانی که میزان انطباق بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و مرکب مطلوب گردد ادامه می‌یابد [۱۳]. در این بررسی پس از استخراج موجک لرزه‌ای تطابق بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و مرکب از طریق فرآیندهای کشش^۳ و فشارش^۴ و جابه‌جایی^۵ برای هر چاه صورت پذیرفت. یک نمونه از تطابق داده‌های چاه و لرزه در چاه شماره ۵ نشان داده شده، که در آن میزان همبستگی بین لرزه‌نگاشت مصنوعی (به رنگ آبی) و لرزه‌نگاشت مرکب (به رنگ قرمز) در محل چاه برابر ۸۸/۲٪ می‌باشد (شکل ۴).

پس از استخراج موجک برای هر سه چاه مورد مطالعه و انطباق بین لرزه‌نگاشت‌ها، نیاز است موجک بهینه میانگین با بیش‌ترین انطباق برای چاه‌ها استخراج شود، این موجک نهایتاً در وارون‌سازی استفاده خواهد شد. بر این اساس به دلیل اینکه استفاده از چاه شماره ۱۲، انطباق استخراج موجک میانگین را به شدت کاهش و با دو چاه دیگر همخوانی ندارد، تنها از دو چاه ۳ و ۵ برای استخراج

⁶ P wave Corrected

⁷ Model Base

⁸ Sparse Spike

⁹ Band limited

¹⁰ Neural Network

¹¹ Model-Based Inversion

¹² SEG Y

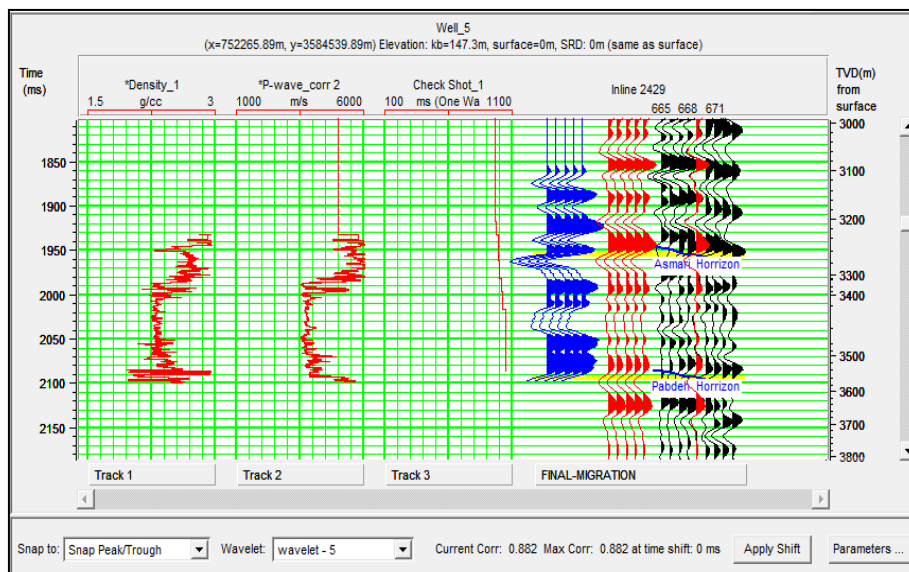
¹ Statistical

² Using Well

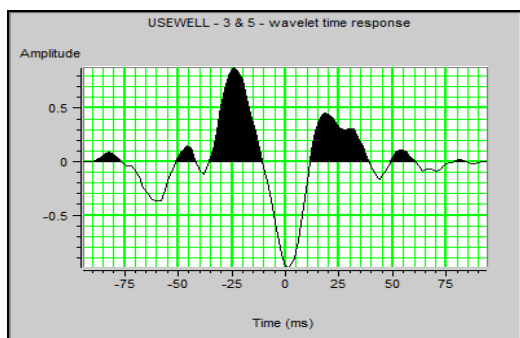
³ Squeezing

⁴ Stretching

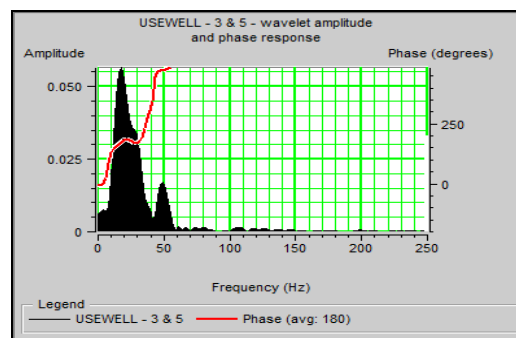
⁵ Shifting



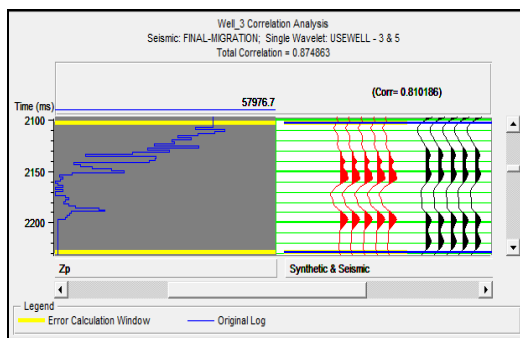
شکل ۴. تطابق بین داده‌های لرزه‌ای و نگارهای چاه‌پیمایی، در چاه شماره ۵، همان‌گونه که مشخص است پنجره تطابق، شامل بالای سازند آسماری تا پابده می‌باشد.



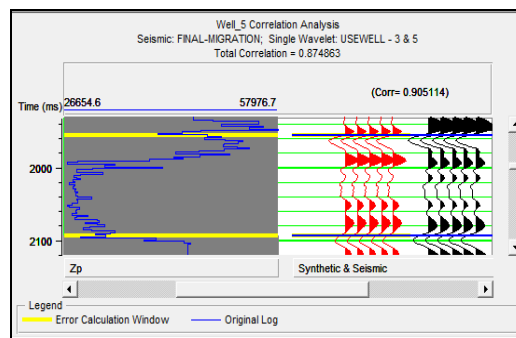
ب



الف

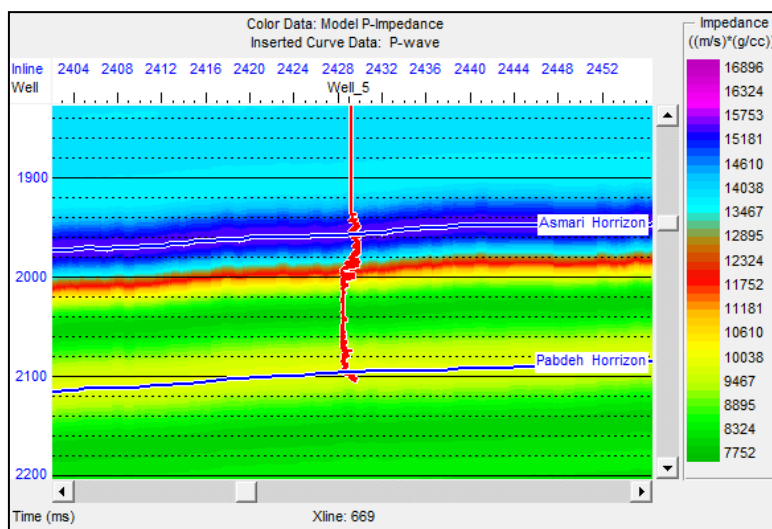


د

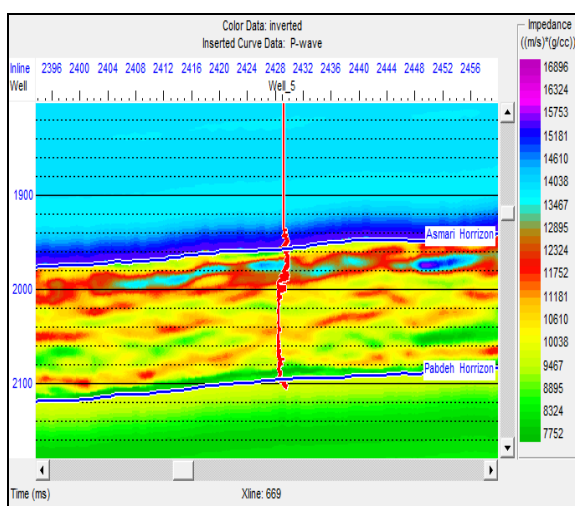


ج

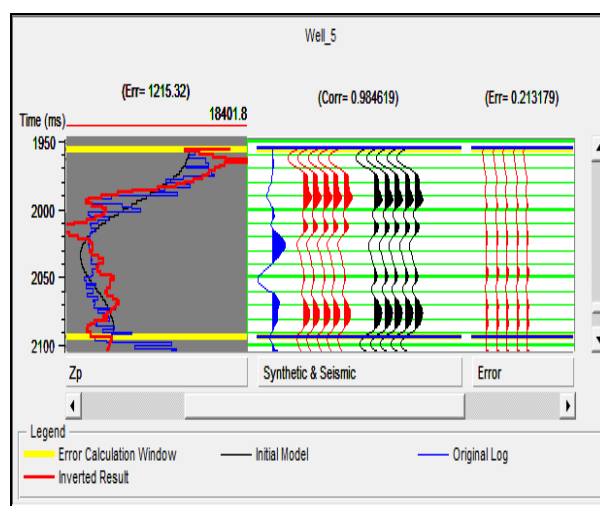
شکل ۵. مشخصات فاز، فرکانس و دامنه موجک میانگین استخراج شده برای انجام وارون‌سازی لرزه‌ای، (الف) فرکانس در برابر دامنه و تغییرات فاز، (ب) زمان در برابر دامنه. نمونه‌هایی از تطابق نگارهای چاه‌پیمایی و داده‌های لرزه‌ای با استفاده از موجک میانگین، (ج) چاه شماره ۵، (د) چاه شماره ۳.



شکل ۶. برشی از مدل اولیه امپدانس صوتی در محل چاه شماره ۵ که به عنوان نمونه نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۷. الف) نگار امپدانس صوتی واقعی و حاصل از روش پایه مدل در محل چاه شماره ۵. همان‌طور که مشخص است، تطابق زیادی بین امپدانس واقعی و حاصل از پایه مدل، دیده می‌شود. ب) برشی از امپدانس صوتی نهایی، در این شکل وضعیت امپدانس در محدوده چاه شماره ۵ به عنوان نمونه نشان داده شده است.

تقسیم‌بندی نمودند. راسل [۵] نشانگرهای لرزه‌ای را در هفت گروه اصلی شامل لحظه‌ای^۱، فرکانس پنجره‌ای^۲، بازگشتی^۳، باند محدود^۴، چند رد لرزه‌ای^۵، دامنه در برابر دورافت^۶ و بر پایه مدل^۷ تقسیم‌بندی کرد. نشانگرهای

تخمین تخلخل نوترون از طریق نشانگرهای لرزه‌ای دلیل اصلی استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای به جای داده‌های لرزه‌ای خام در طی فرآیند تخمین، این است که عموماً نشانگرهای لرزه‌ای توانایی بهتری در تخمین روابط غیرخطی بین داده‌های لرزه‌ای و پارامتر هدف را دارا بوده و قادر به شناخت دقیق‌تر الگوها هستند [۳]. تاکنون تقسیم‌بندی‌های مختلفی توسط محققین در مورد نشانگرهای لرزه‌ای معرفی شده است. تر و همکاران [۱۴] نشانگرها را به دو گروه اصلی به صورت هندسی و فیزیکی

¹ Instantaneous Attributes
² Windowed Frequency Attributes
³ Recursive Attributes
⁴ Band Pass Attributes
⁵ Multi-Trace Attributes
⁶ AVO Attributes
⁷ Model Base Attributes

ترکیب سه نشانگری داشته، انتخاب می‌شود. این فرآیند به صورت تکراری تا زمانی که کمترین مربع خطای میانگین^۱ حاصل گردد ادامه می‌یابد. با افزایش تعداد نشانگرها خطای آموزش کاهش می‌یابد، اما افزایش نشانگرها به دلیل رخداد تطابق بیش از حد^۲، همیشه باعث بهبود کارایی تخمین نمی‌شود و نیاز است تا از روش اعتبارسنجی متقاطع^۳ به منظور تعیین تعداد نشانگر بهینه استفاده شود. زمانی که خطای اعتبارسنجی به کمترین میزان خود می‌رسد، تعداد نشانگر بهینه مشخص می‌شود. بر این اساس در تخمین تخلخل در این مطالعه، تعداد ۸ نشانگر بهینه است و در طی تخمین استفاده شده است (شکل ۹).

یکی دیگر از شاخص‌های مهم در یافتن ارتباط بین نشانگرهای لرزه‌ای و پارامتر هدف طول عملگر^۴ است. این پارامتر برای از بین بردن اختلاف فرکانس بین داده‌های لرزه‌ای و نگارهای چاه‌پیمایی، به کار برده می‌شود. نگارهای چاه‌پیمایی دارای فرکانس بالاتر نسبت به داده‌های لرزه‌ای است. طول عملگر بهینه از طریق آزمون و خطا تعیین می‌شود. در این تحقیق طول عملگر بهینه برابر یک می‌باشد.

از طریق روش رگرسیون مرحله‌ای، هشت نشانگر لرزه‌ای بهینه برای تخمین تخلخل که کمترین خطا و بیش‌ترین ارتباط را با پارامتر هدف داشته‌اند، مشخص شد. در جدول شماره ۱ این هشت نشانگر و میزان خطای آموزش و اعتبارسنجی هر کدام نشان داده شده است. این نشانگرها شامل مربع نتیجه وارون‌سازی^۵، مشتق دامنه لحظه‌ای^۶، انتگرال قدرمطلق دامنه^۷، مشتق^۸، فرکانس لحظه‌ای^۹، فیلتر ۲۵/۳۰ - ۳۵/۴۰^{۱۰}، کسینوس فاز لحظه‌ای^{۱۱} و داده لرزه‌ای خام^{۱۲} است.

لرزه‌ای به دو دسته کلی داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند. نشانگرهای داخلی با استفاده از خود ماژول ایمرج از داده‌های لرزه‌ای خام استخراج می‌شود. برخلاف نشانگرهای داخلی، نشانگرهای خارجی مانند امیدانس صوتی به دلیل پیچیدگی بالا، قابل استخراج در خود ماژول ایمرج نبوده و باید به صورت فایل خارجی استاندارد در سایر نرم‌افزارها یا ماژول‌های دیگر مانند استراتا ایجاد و فراخوانی شوند [۱۲]. در این مطالعه ابتدا نشانگر لرزه‌ای خارجی که همان امیدانس صوتی می‌باشد، طی فرآیند وارون‌سازی در ماژول استراتا ایجاد و به صورت فایل استاندارد ذخیره گردید. از روش‌های آماری و هوشمند به منظور شناخت روابط خطی و غیرخطی بین نشانگرهای لرزه‌ای و پارامتر هدف (تخلخل نوترون) استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز برای تخمین تخلخل در این مرحله شامل نگار تخلخل نوترون و صوتی تصحیح شده، همراه نتایج وارون‌سازی لرزه‌ای و داده‌های لرزه‌ای خام می‌باشد (شکل ۸). نگار صوتی تصحیح شده در این مرحله نقش شوت کنترل را داشته و موجب می‌شود، پارامتر هدف که در این مطالعه تخلخل است در محل صحیح خود در برابر رد لرزه مرکب و نشانگر خارجی قرار گیرد.

انتخاب نشانگرهای لرزه‌ای بهینه

انتخاب ورودی‌های مناسب از بین نشانگرهای لرزه‌ای مختلف، یکی از مهم‌ترین بخش‌های تخمین از طریق داده‌های لرزه‌ای است. مهم‌ترین هدف روش‌های آماری و هوشمند یافتن روابط خطی و غیرخطی موجود بین داده‌های ورودی و خروجی می‌باشد. آنالیز رگرسیون خطی چند نشانگری، روشی ساده و کاربردی به منظور یافتن پارامترهای ورودی بهینه می‌باشد. در این بررسی از روش رگرسیون مرحله‌ای، برای رسیدن به این هدف استفاده گردید.

در روش رگرسیون مرحله‌ای، ابتدا از بین تمام نشانگرهای لرزه‌ای موجود، اولین نشانگر بر اساس کمترین میزان خطای پیش‌بینی و بالاترین انطباق با پارامتر هدف انتخاب می‌شود. سپس با ثابت ماندن نشانگر اول انتخاب شده، تمام جفت نشانگرها بررسی و نشانگری که دارای کمترین خطای تخمین در ترکیب با نشانگر اول است، انتخاب می‌گردد. سپس دو نشانگر انتخاب شده ثابت و از بین تمام نشانگرها، سومین نشانگر که کمترین خطای تخمین را

¹ Mine Square Error

² Overfitting

³ Cross Validation

⁴ Operator Length

⁵ Inversion Result

⁶ Derivative Instantaneous Amplitude

⁷ Integrated Absolute Amplitude

⁸ Derivative

⁹ Instantaneous Frequency

¹⁰ Filter 25/30-35/40

¹¹ Cosine Instantaneous Phase

¹² Raw Seismic

شبکه عصبی احتمالی (PNN)، روش پیشخور چند لایه^۱، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی^۲ و تجزیه و تحلیل تفکیکی^۳، به منظور بررسی کارایی در تخمین تخلخل، آزمایش گردید. در بین این روش‌ها، شبکه عصبی احتمالی به دلیل کارایی و دقت بالاتر انتخاب گردید.

در روش رگرسیونی، روابط بین متغیرها از طریق تحلیل رگرسیونی مشخص می‌شود. هدف اولیه در رگرسیون، کشف و ارائه توصیفی تا حد ممکن دقیق از روابط بین متغیرها می‌باشد. ضریب هم‌بستگی^۴، پارامتری است که میزان رابطه و هم‌چنین نوع رابطه‌ی مستقیم یا معکوس بین متغیرها را نشان می‌دهد و همواره بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند. علامت ضریب هم‌بستگی همان علامت شیب خط رگرسیون می‌باشد. ضریب تعیین^۵، که توان دوم ضریب هم‌بستگی است، پارامتر پرکاربردتری برای توضیح رابطه موجود بین متغیرها به شمار می‌رود. این پارامتر بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند، زمانی که مقدار آن ۱ باشد خط رگرسیون دقیقاً توانسته است تغییرات y را به تغییرات مستقل x نسبت دهد و بالعکس هر چه به سمت صفر میل کند، نمی‌توان با دقت بالایی تغییرات y را به x نسبت داد. شبکه عصبی احتمالی، یک روش پیش‌خور و تحت نظارت بوده که از یک تابع انتقال نمایی استفاده می‌کند. این شبکه با داده‌های پراکنده به صورت مناسب آموزش دیده و الگوهای جدید را در هنگام آموزش بر روی الگوهای قبلی بازنویسی می‌نماید. این شبکه هر الگوی آموزشی را ذخیره و در مورد مسائلی که در آن زمان آموزش، خیلی حساس نبوده یا داده‌های آموزشی در دسترس کوچک است، می‌تواند مناسب باشد [۱۵]. این نوع شبکه با استفاده از درون‌یابی^۶ اطلاعات آموزشی، مشابه با کریجینگ عمل نموده و به منظور تخمین داده‌های عددی توصیه می‌شود. علاوه بر این، می‌تواند به صورت مؤثر برای طبقه‌بندی نیز استفاده شود.

براساس میزان هم‌بستگی و خطای میانگین بین تخلخل واقعی و تخمین زده شده در مرحله ارزیابی از دو روش رگرسیونی و شبکه‌های عصبی، مشخص گردید که روش شبکه عصبی احتمالی کاربردی‌تر می‌باشد. ماهیت

با توجه به اهمیت تکنیک وارون‌سازی در تخمین و قرار گرفتن مربع نتیجه وارون‌سازی به عنوان نشانگر اول بهینه، می‌توان نتیجه گرفت که وارون‌سازی با دقت بالا و خطای کم صورت گرفته است.

در زیر توضیح مختصری درباره این هشت نشانگر لرزه‌ای بهینه، آورده شده است:

مربع نتیجه وارون‌سازی: این نشانگر لرزه‌ای ارتباط مشخصی با اکثر پارامترهای پتروفیزیکی دارد و عموماً یکی از نشانگرهای لرزه‌ای مهم در طی تخمین محسوب می‌شود. این نشانگر از حاصل ضرب چگالی در سرعت به دست می‌آید.

ارتباط آن با تخلخل معکوس و با افزایش آن تخلخل کاهش می‌یابد [۶]. مشتق دامنه لحظه‌ای: این نشانگر به وسیله تبدیل هیلبرت ایجاد می‌شود. [۵]. این نشانگر لرزه‌ای عموماً به تغییرات سنگ‌شناسی، تخلخل و سایر پارامترها حساس است.

انتگرال قدرمطلق دامنه: مجموع دامنه‌های اثر لرزه‌ای در یک محدوده مشخص می‌باشد. این نشانگر نیز به تغییرات تخلخل و سنگ‌شناسی عکس‌العمل نشان می‌دهد. مشتق: یکی از نشانگرهای لرزه‌ای بوده که عموماً به تغییرات تخلخل حساسیت نشان می‌دهد. فرکانس لحظه‌ای: به عنوان مشتق فاز لحظه‌ای با زمان تعریف می‌شود. این نشانگر اغلب جهت تخمین تضعیف لرزه‌ای و تعیین جذب غیرطبیعی و حضور لایه‌های نازک به کار می‌رود. فیلتر ۲۵/۳۰ - ۳۵/۴۰: این نشانگر نوعی نشانگر باند محدود بوده که از انواع فیلترهای برشی می‌باشد. کسینوس فاز لحظه‌ای: این نشانگر از فاز لحظه‌ای به دست می‌آید. از آن‌جا که حدود (مثبت یک تا منفی یک) آن آسان‌تر قابل فهم است اغلب همراه نشانگر فاز لحظه‌ای و برای نشان دادن تغییرات آن به کار برده می‌شود. داده لرزه‌ای خام: این نشانگر داده‌های لرزه‌ای خام می‌باشد.

مقایسه دو روش رگرسیونی و شبکه عصبی در

تخمین تخلخل

در این مطالعه از دو روش رگرسیون خطی چند نشانگری (MLR) و شبکه‌های عصبی به منظور تخمین تخلخل استفاده شده است. چهار روش شبکه عصبی مختلف شامل

¹ Multilayer Feed Forward (MLFN)

² Radial Basis Functions Neural Networks

³ Discriminate Analysis

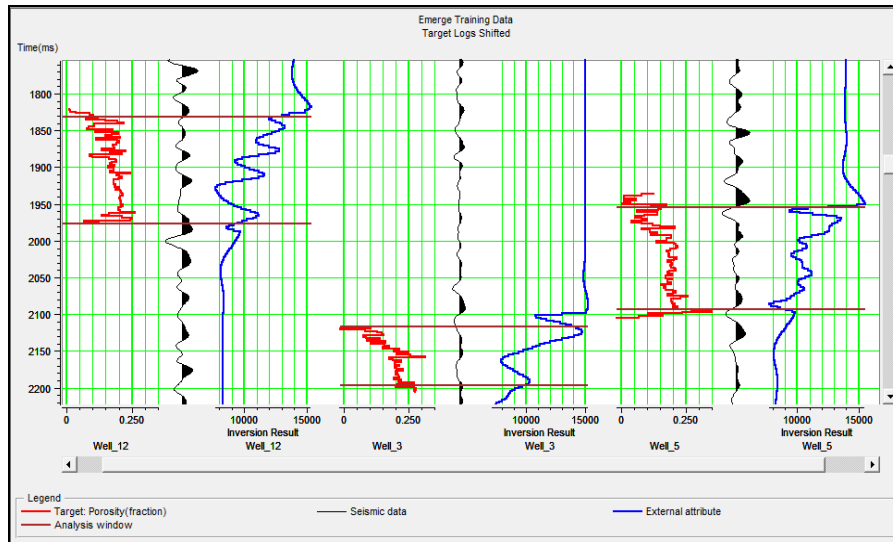
⁴ Correlation Coefficient

⁵ Determination Coefficient

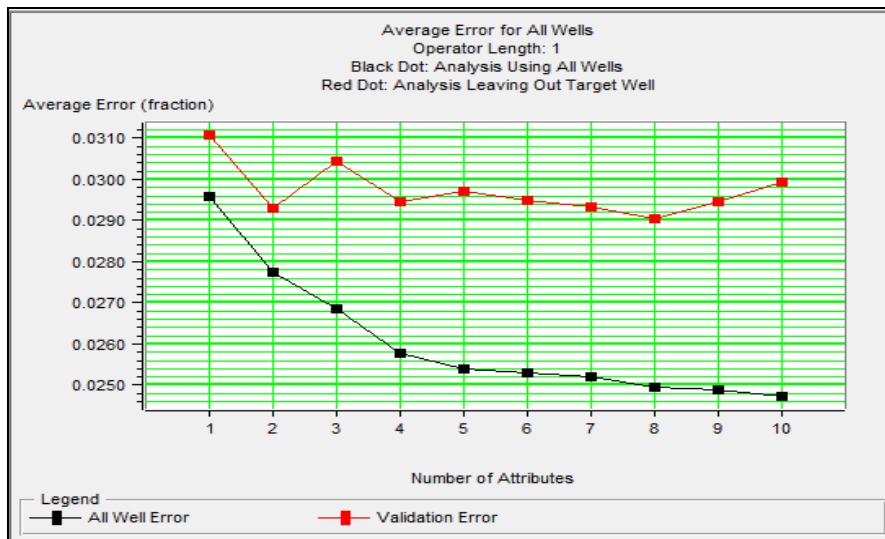
⁶ Interpolation

٪ ۸۰/۱۱ و ۲۵/۳ هزارم واحد تخلخل، دارای شرایط مناسب‌تری بر اساس میزان خطای کمتر و هم‌بستگی بیش‌تری می‌باشد. ترسیم مقاطع بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده تخلخل از طریق روش شبکه عصبی احتمالی نشان می‌دهد که هم‌بستگی بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده در مرحله آموزش، به میزان ۹۵/۵۲٪ بوده که نشان دهنده دقت بالای این روش در طی فرآیند تخمین است (شکل ۱۱).

غیرخطی شبکه عصبی، با توجه به روابط پیچیده و غیرخطی بین نشانگرهای لرزه‌ای و پارامتر هدف، کارایی بیش‌تر این روش را سبب می‌شود. مقایسه این دو روش بر اساس نتایج اعتبارسنجی آن‌ها نشان داده شده است (شکل ۱۰). میزان هم‌بستگی و خطای میانگین در روش رگرسیون خطی چند نشانگری به ترتیب ۷۲/۹٪ و ۲۹/۵ هزارم واحد تخلخل است. در مقابل، روش شبکه عصبی احتمالی با میزان هم‌بستگی و خطای میانگین به ترتیب



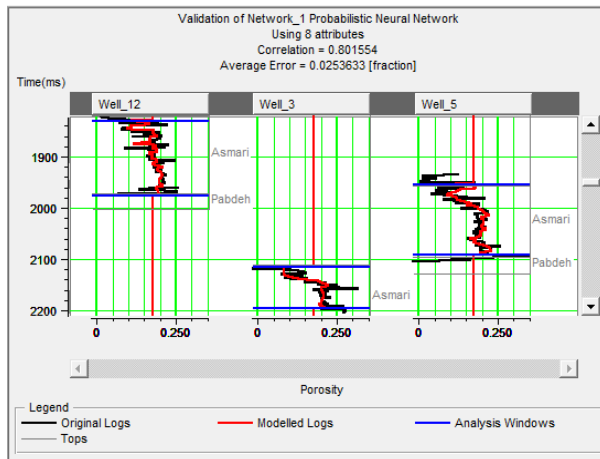
شکل ۸. داده‌های آموزشی مورد استفاده برای تخمین تخلخل با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، در این شکل از چپ به راست در هر چاه، شاخص هدف شامل نگار نوترون به رنگ قرمز، رد لرزه‌ای مرکب به رنگ سیاه، و امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی به رنگ آبی نشان داده شده است.



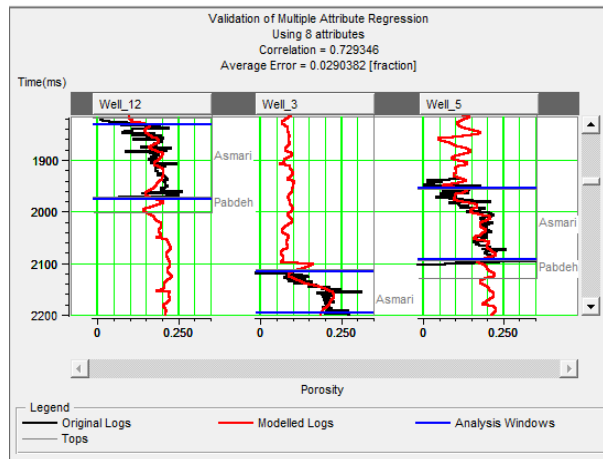
شکل ۹. نمودار اعتبارسنجی مقاطع برای شناسایی تعداد نشانگر بهینه، خطای آموزش به رنگ سیاه و خطای اعتبارسنجی به رنگ قرمز نشان داده شده است. در این شکل با افزایش هر نشانگر خطای اعتبارسنجی تغییر می‌کند. براساس این شکل، کمترین خطا در ترکیب بهینه از ۸ نشانگر دیده می‌شود.

جدول شماره ۱. نتایج روش رگرسیون مرحله‌ای به منظور شناسایی نشانگرهای لرزه‌ای بهینه برای تخمین تخلخل. همان‌گونه که مشخص است خطای آموزش و اعتبارسنجی اندک می‌باشد.

	Target	Final Attribute	Training Error	Validation Error
1	Porosity	(Inversion Result)**2	0.029587	0.031078
2	Porosity	Derivative Instantaneous Amplitude	0.027738	0.029289
3	Porosity	Integrated Absolute Amplitude	0.026839	0.030443
4	Porosity	Derivative	0.025766	0.029472
5	Porosity	Instantaneous Frequency	0.025398	0.029700
6	Porosity	Filter 25/30-35/40	0.025291	0.029497
7	Porosity	Cosine Instantaneous Phase	0.025197	0.029331
8	Porosity	Raw Seismic	0.024957	0.029038
9	Porosity	Apparent Polarity	0.024888	0.029442
10	Porosity	Dominant Frequency	0.024727	0.029937

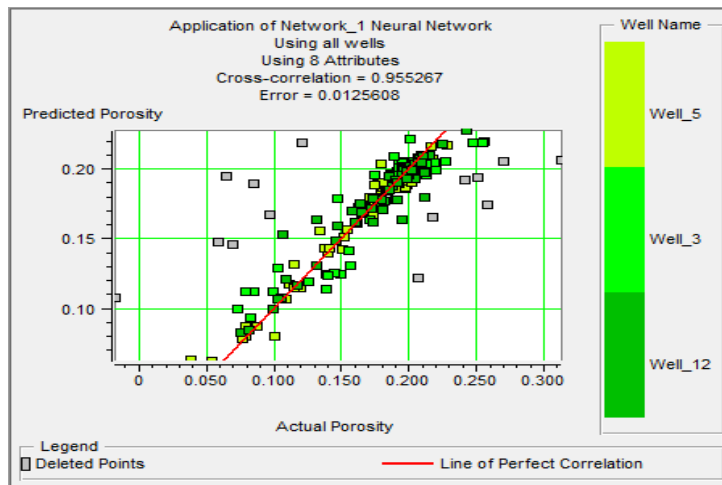


ب



الف

شکل ۱۰. تطابق بین مقادیر واقعی (سیاه) و تخمین زده شده (قرمز) تخلخل با استفاده از دو روش رگرسیون خطی چند نشانگری و شبکه عصبی مصنوعی در مرحله اعتبارسنجی، (الف) روش رگرسیون خطی چند نشانگری، (ب) روش شبکه عصبی احتمالی



شکل ۱۱. ترسیم متقاطع تخلخل واقعی و تخمین زده شده از طریق شبکه عصبی احتمالی در مرحله آموزش، که نشان دهنده میزان هم‌بستگی بالا می‌باشد.

تبدیل مقطع لرزه‌ای به تخلخل

پس از مشخص شدن کارایی بیش‌تر روش شبکه عصبی احتمالی در تخمین تخلخل، براساس میزان هم‌بستگی و خطای میانگین، از روش شبکه عصبی احتمالی به منظور تبدیل کل مکعب لرزه‌ای به تخلخل در محدوده زمانی سازند آسماری استفاده شده است. وضعیت چاه شماره ۵ از نظر تخلخل تخمین‌زده شده از طریق نشانگرهای لرزه‌ای نشان داده شده است (شکل ۱۲). بر اساس تغییرات رنگ می‌توان زون‌های با تخلخل متفاوت را از هم تفکیک نمود. رنگ سبز محدوده تخلخل‌های پایین و رنگ بنفش محدوده تخلخل‌های بالا را نشان می‌دهد. عموماً بخش‌های زیرین تخلخل بیش‌تری نسبت به بخش‌های بالایی دارند.

نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعه صورت گرفته به منظور تخمین تخلخل از طریق نشانگرهای لرزه‌ای در سازند آسماری میدان چشمه خوش، نتایج زیر حاصل شده است.

۱- تلفیق نگارهای چاه‌پیمایی و داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، یکی از روش‌های کارآمد به منظور تخمین تخلخل در میداين هیدروکربنی است.

۲- داده‌های لرزه‌ای با گسترش جانبی بالا، می‌توانند در تخمین شاخص‌های پتروفیزیکی مختلف با هدف کاهش هزینه‌ها و زمان، به منظور انجام مطالعات تلفیقی و جامع استفاده شوند. تخمین تخلخل از طریق داده‌های لرزه‌ای می‌تواند ریسک حفاری و هزینه اکتشاف را کاهش دهد.

۳- تخمین تخلخل به دلیل ارتباط بالای آن با نشانگرهای لرزه‌ای مختلف به ویژه امپدانس صوتی، می‌تواند به صورت دقیق و کارآمد از طریق داده‌های لرزه‌ای صورت پذیرد. در

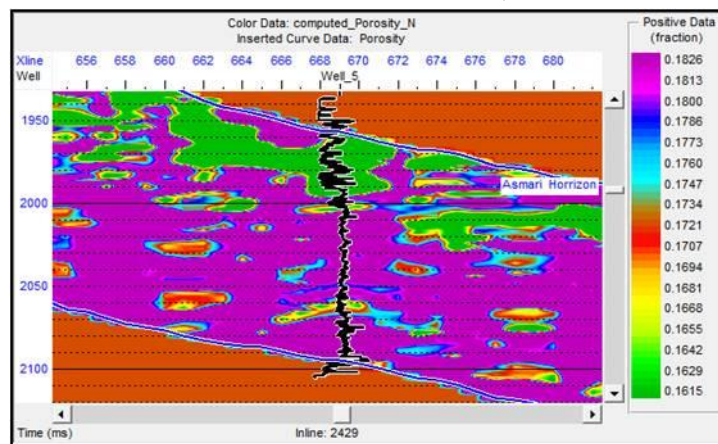
این تحقیق، نشانگر امپدانس صوتی اولین نشانگر لرزه‌ای بهینه انتخاب شده از روش رگرسیون مرحله‌ای در طی فرآیند تخمین بوده که نشان دهنده انجام وارون‌سازی با دقت بالا و خطای کم می‌باشد.

۴- تخمین تخلخل از طریق نشانگرهای لرزه‌ای، نشان می‌دهد که میزان انطباق تخلخل واقعی با مقادیر تخمین زده شده با استفاده از روش شبکه عصبی احتمالی در مقایسه با روش رگرسیون خطی چند نشانگری بیش‌تر است. این عموماً به دلیل ماهیت غیرخطی شبکه‌های عصبی در تخمین روابط غیرخطی و پیچیده بین پارامترهای ورودی و هدف می‌باشد. میزان هم‌بستگی و خطای میانگین در روش رگرسیون خطی چند نشانگری به ترتیب $72/9\%$ و $29/5$ هزارم واحد تخلخل است. در مقابل، روش شبکه عصبی احتمالی با میزان هم‌بستگی و خطای میانگین به ترتیب $80/1\%$ و $25/3$ هزارم واحد تخلخل، شرایط بسیار مناسب‌تری براساس میزان خطای کمتر و هم‌بستگی بیش‌تر دارد.

۵- در میدان چشمه خوش، براساس تخمین تخلخل از طریق نشانگرهای لرزه‌ای، مشخص گردید که بخش‌های زیرین سازند آسماری با لیتولوژی ماسه‌سنگی-کربناته، نسبت به توالی‌های آهکی- دولومیتی بخش‌های بالایی از نظر تخلخل شرایط مطلوب‌تری را دارا می‌باشند.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری و حمایت‌های شرکت نفت مناطق مرکزی به دلیل در دسترس قرار دادن اطلاعات انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.



شکل ۱۲. مقطع لرزه‌ای تخلخل. تغییرات تخلخل در چاه شماره ۵ به عنوان نمونه نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود بخش بالایی سازند آسماری دارای تخلخل کم‌تری نسبت به بخش پایینی می‌باشد. براساس رنگ، بخش‌های سبز رنگ کم‌ترین تخلخل و بخش‌های بنفش بیش‌ترین تخلخل را دارند.

[15] Specht, D (1990) Probabilistic neural networks, Neural networks, pp,109.

منابع

- [1] Todorov, T., Stewart, R., Hampson, D., Russell, B (1998) Well log prediction using attributes from 3C-3D seismic data, v. 17, pp. 1574-1577.
- [2] Tonn, R (2002) Neural network seismic reservoir characterization in a heavy oil reservoir. The Leading Edge, v. 21, No. 3, pp. 309-312.
- [3] Hampson, D.P., Schuelke, J.S., Quirein, J.A (2001) Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data. Geophysics, v. 66, No. 1, pp. 220-236 88/SEPM Miscellaneous Publication, No. 8, p. 97-137
- [4] Russell, B.H., Lines, L.R., Hampson, D.P (2003) Application of the radial basis function neural network to the prediction of log properties from seismic data: Exploration Geophysics, v. 34, pp. 15-23
- [5] Russell, B.H (2004) The application of multivariate statistics and neural networks to the prediction of reservoir parameters using seismic attributes. Ph.D. Dissertation, University of Calgary, Alberta, 392 pp.
- [6] Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Rezaee, M.R., Rahimpour-Bonab, H., and Chehrizi, A (2009) Petrophysical data prediction from seismic attributes using committee fuzzy inference system. Computers and Geosciences, v. 35, No. 12, pp. 2314-2330.
- [7] Taner, M. T (2001) Seismic attributes Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder, v. 26, No. 9, pp. 48-56.
- [8] Sheriff, R.E, Comp (2002) Encyclopedic dictionary of applied geophysical, 4th, ed: SEG, Geophysical Reference Series 13.
- [9] Honarmand. J, and Amini. A (2011) Diagenetic processes and reservoir properties in the ooid grainstones of the Asmari Formation, Cheshmeh Khush Oil Field, SW Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering, p-70-79.
- [10] HRS User's Guide (2007) Hampson-Russell, Calgary, Alberta, Canada.
- [11] Ibrahim S. O (2002) An integrated geological modeling of the Arab-D reservoir, Uthmaniyah area, Ghawar Field.
- [12] Verwest, B., Masters. R., and Sena, A (2001) Elastic Impedance Inversion., ARCO Exploration
- [13] Brown, R. L., McElhattan, W., and Santiago, D. j (1988) Wavelet estimation: An interpretive approach: Geophysics: The Leading Edge of Exploration, December, pp.16-19.
- [14] Taner, M. T., Scheuelke J.S. O Doherty.R. Baysal E (1994) Seismic attributes revisited, 64th, Annual international meeting, SEG expanded Abstract 1104-1106