

تخمین امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ (GSR) از داده‌های لرزه‌ای در مخازن کربناته با استفاده از سیستم‌های هوشمند: با مثالی از میدان گازی پارس جنوبی

محمدعلی فرجی^{۱*}، حسین رحیم پور بناب^۱ و علی کدخدائی^۲

۱- دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه کرتین، پرت، استرالیا

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۲۲

چکیده

امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ (GSR)، که در این مطالعه برای مخازن کربناته معرفی شده است، یک امتیازدهی تجربی از مقاومت ژئومکانیکی سنگ‌ها است. GSR یک امتیازدهی از ۱۰ تا ۱۰۰ را فراهم می‌کند که مقادیر پایین مربوط به سنگ‌هایی هستند که از لحاظ مقاومتی و پایداری دیواره چاه ضعیف هستند و سنگ‌های شیلی و نیز سنگ‌های مخزنی با تخلخل و تراوایی بالا را در بر می‌گیرند. در مقابل، مقادیر بالای GSR در ارتباط با سنگ‌های بکر است که فاقد نقاط ضعف از قبیل شکستگی‌ها، ناپیوستگی‌ها و حفرات هستند. در این مطالعه، GSR با استفاده از معادلاتی که برای سنگ‌های آواری طراحی شده‌اند براساس نگارهای پتروفیزیکی محاسبه شده است. میدان مورد مطالعه، میدان گازی پارس جنوبی است که توالی کربناته پرمو-تریاس کنگان دالان در آن میزبان تجمعات عظیم گاز است. GSR محاسبه شده همبستگی بسیار خوبی با تخلخل و ضرایب الاستیک سنگ‌های کربناته مطالعه شده نشان می‌دهد. تمایز بین سنگ‌های مخزنی و بخش‌های شیلی غیر مخزنی به‌راحتی با کنار هم گذاشتن GSR و نگارهای چاه‌پیمایی امکان‌پذیر است. مقادیر بسیار پایین GSR که ارتباط خوبی با نگار پرتو گاما دارند، شاخص فواصل شیلی است. که این فواصل می‌توانند مسبب ریزش دیواره چاه، مجالگی لوله جداری و دیگر مشکلات وابسته به حفاری شوند. اگر مقادیر پایین GSR با نگار پرتو گاما ارتباط خوبی نداشته باشند، نشان‌دهنده توزیع بخش‌های مخزنی است. در انتها پس از محاسبه GSR، مقادیر آن با استفاده از یک مدل شبکه عصبی احتمالی از داده‌های لرزه‌ای سه بعدی پس از برانبارش میدان پارس جنوبی تخمین زده شده است. مقادیر بالای ضریب همبستگی بین GSR واقعی و مقادیر تخمین زده شده توسط شبکه عصبی، صحت مدل هوشمند را در تخمین GSR نشان می‌دهد. مکعب سه بعدی ساخته شده از GSR می‌تواند اساسی برای ساخت مدل‌های ژئومکانیکی بعدی در میدان گازی پارس جنوبی باشد.

کلمات کلیدی: امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ، نگارهای پتروفیزیکی، پایداری دیواره چاه، شبکه عصبی احتمالی، داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش.

مقدمه

شیلی نرم، مستعد ریزش در حین حفاری هستند. مقادیر بالاتر GSR معرف سنگ‌های با مقاومت بالا و مقادیر اندک تخلخل، شکستگی و سطوح ناپیوسته می‌باشد. دلایل مختلفی جهت مشمول نمودن تحلیل GSR در اکتشافات ژئوفیزیکی و مطالعات پتروفیزیکی در صنعت نفت وجود دارد، از جمله اینکه محاسبه GSR به‌علت در دسترس بودن نگارهای پتروفیزیکی مورد نیاز برای محاسبه آن، فرآیند ساده‌ای است. GSR همچنین اطلاعات زمین‌شناسی با ارزشی را برای درک رابطه بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی توالی‌های مخزنی فراهم می‌کند. علاوه بر این، داده‌های GSR برای تصحیح اطلاعات چاه‌پیمایی حائز اهمیت است. GSR همچنین قابلیت مشخص کردن زون‌های شکسته، متخلخل و تراوا و نیز بخش‌های غیرمخزنی را دارد لذا محاسبه GSR در مخازن غیرهمگن کربناته با سیستم پیچیده ذخیره، تولید و بازیافت حائز اهمیت است. داده‌های لرزه‌ای بازتابی تصویر تغییرات مقاومت صوتی را در زیر سطح فراهم می‌کند به این معنی که این داده‌ها توزیع لایه‌های مختلف با مقدار مقاومت صوتی متفاوت را نشان می‌دهد. مقاومت صوتی حاصل چگالی و سرعت موج فشارشی است [۷]. تکنیک‌های مختلفی برای محاسبه مقاومت صوتی از داده‌های لرزه‌ای برانبارش شده^۵ با هدف ارزیابی‌های هیدروکربوری در دهه‌های اخیر توسط محققین مختلف از جمله لاورن و ویلم در سال ۱۹۷۷ [۸]، بکوی و همکاران در سال ۱۹۷۹ [۹] توسعه پیدا کرده است. کاربرد داده‌های لرزه‌ای در مطالعه مخازن نفتی از دو جنبه قابل بررسی است. اول اینکه داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی در مدل‌های مخزنی برای مشخص کردن توزیع زیر سطحی ساختارهای زمین‌شناسی و رخساره‌های رسوبی قابل استفاده هستند [۱۰].

سنگ‌های رسوبی را نیز همانند خاک‌ها می‌توان به‌وسیله اندازه و نوع دانه‌ها، مقدار فضاهای خالی و درصد رطوبت یا مقدار اشباع از سیال، توصیف و طبقه‌بندی نمود. در مقابل، در مورد سنگ‌های کربناته توده‌ای، در نظر گرفتن تاثیر شکستگی‌ها به‌جای اندازه و نوع دانه اهمیت بیشتری دارد. طبقه‌بندی‌های فراوانی برای سنگ‌ها با اهداف ژئوتکنیکی انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به طبقه‌بندی RMR^۱ [۱]، CMRR^۲ [۲]، Q-system [۳] و RSR^۳ [۴] اشاره کرد.

امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ (GSR)^۴ در مورد سنگ‌های آواری برنامه‌ای تجربه‌ای است که براساس نگارهای ژئوفیزیکی و اندازه‌گیری‌های چاه‌پیمایی به‌ویژه سرعت موج صوتی، مقادیر تخلخل، شکستگی‌ها و محتوای رسی معرفی شده است [۵ و ۶]. همانند طبقه‌بندی‌های RMR و CMRR روش GSR هم کیفیت سنگ را در بازه صفر تا ۱۰۰ امتیازدهی می‌کند. GSR همانند سایر روش‌های امتیازدهی، ویژگی‌های سنگ بکر و نیز نقاط ضعف داخل توده سنگ را در امتیازدهی در نظر می‌گیرد. که براساس مشاهده و اندازه‌گیری مغزه و رخنمون طراحی شده‌اند. این طبقه‌بندی‌ها، سنگ بکر و نقاط ضعف آن را ارزیابی می‌کنند و مقدار آن‌ها از صفر تا ۱۰۰ متغیر است. در این مطالعه، محاسبه GSR در سنگ‌های کربناته از نگارهای پتروفیزیکی و وارون‌سازی لرزه‌ای بررسی شده است.

GSR روش جدیدی است برای طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته که مهم‌ترین مخازن نفت و گاز خاورمیانه را تشکیل می‌دهند. از نتایج این مطالعه می‌توان در صنعت نفت برای ارزیابی سنگ‌های مخزن و شناسایی واحدهای غیرمخزنی استفاده کرد. از لحاظ پایداری دیواره چاه، مقادیر پایین GSR مربوط به سنگ‌های ضعیف است و این سنگ‌ها به علت مقادیر بالای تخلخل و شکستگی و حضور واحدهای

1. Rock Mass Rating
2. Coal Mine Roof Rating
3. Rock Structure Rating
4. Geophysical Strata Rating
5. Stacked

اپیروژنیک مثبت قوس قطر^۱ در پرکامبرین نسبت داده شده است [۲۴]. ضخامت سازند دالان (پرمین پسین) در آن بیشتر از ۶۸۰ m می‌باشد که به سه عضو دالان پایینی (آهک)، نار (انیدریت) و دالان بالایی (آهک و دولومیت) تقسیم می‌شود [۲۵]. سازند کنگان با ضخامت تقریبی ۱۹۵ m شامل آهک، دولومیت، انیدریت و میان لایه‌های نازک شیلی می‌باشد [۲۶]. توالی دالان بالایی - کنگان در میدان پارس جنوبی شامل چهار واحد مخزنی است که از پایین به بالا شامل واحدهای K4، K3 (دالان بالایی) و K2، K1 (کنگان) است [۲۷].

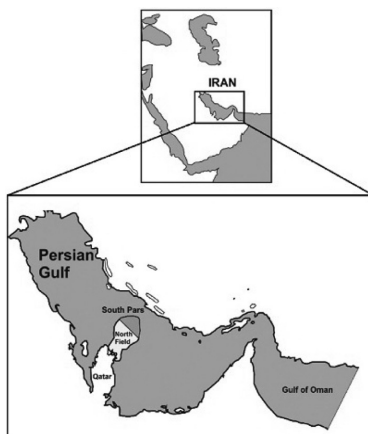
روش مطالعه

این مطالعه بر روی ۳ چاه در میدان گازی پارس جنوبی انجام گرفته است. به علت محرمانه بودن اطلاعات از نام بردن اسم واقعی چاه‌ها و موقعیت آنها خودداری شده است. روش انجام این پژوهش شامل دو مرحله کلی محاسبه امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ از نگارهای پتروفیزیکی و سپس تخمین این برنامه امتیازدهی از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی پس از برانبارش با استفاده از سیستم‌های هوشمند می‌باشد. در این راستا، ابتدا نگار امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ (GSR) بر مبنای نگارهای پتروفیزیکی یا ژئوفیزیکی برای توالی کربناته کنگان- دالان در میدان گازی پارس جنوبی محاسبه شده است.

(از جمله: یاو و چوپرا، [۱۱]؛ آبرئو و همکاران [۱۲]؛ جیان و فانهوا [۱۳]؛ رزواندهی و همکاران [۱۴]؛ پرز-مونوز و همکاران [۱۵]). علاوه بر این روابط خطی و غیرخطی بین داده‌های لرزه‌ای و چاه‌پیمایی این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان از داده‌های لرزه‌ای خصوصیات پتروفیزیکی را با استفاده از نشان‌گرهای لرزه‌ای استخراج نمود (از جمله: پیرسون و همکاران [۱۶]؛ هارت و بالچ [۱۷]؛ یاو و چوبرا [۱۱]؛ لیفرات و هارت [۱۸]؛ سوپوچوا و استوارت [۱۹]؛ نعیمی و همکاران [۲۰]). در همین راستا، می‌توان GSR را به‌عنوان یک ویژگی مهم پتروفیزیکی در نظر گرفت. با توجه به تخمین GSR از نشان‌گرهای داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی، پارامتر اصلی برای محاسبه GSR سرعت موج فشارشی است. سرعت موج منعکس‌کننده تداخل، محتوای رسی و شکستگی‌ها است که این‌ها بخشی از سیستم GSR هستند. در نتیجه، باید رابطه قوی بین GSR و مقاومت صوتی با سایر نشان‌گرهای لرزه‌ای وجود داشته باشد که با همدیگر ترکیب می‌شوند و امکان تخمین فاکتورهای مختلف را فراهم می‌کند. در این مطالعه در ابتدا، مقادیر GSR در محل چاه‌ها محاسبه شده و سپس مکعب مقاومت صوتی از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به‌دست آمده است و در نهایت مکعب GSR با استفاده از شبکه عصبی از مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی و سایر نشان‌گرهای لرزه‌ای ساخته شده است.

زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

میدان گازی پارس جنوبی در مرز بین ایران و قطر در حوضه خلیج فارس قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت میدان و در شکل ۲ ستون چینه‌شناسی میدان نمایش داده شده است. این میدان در سال ۱۹۷۱ به‌عنوان بزرگ‌ترین میدان گازی غیرهمراه جهان شناسایی شد [۲۱]. مخزن این میدان در توالی کربنات‌های پرمو-تریاس کنگان و دالان و معادل آن در کشورهای عربی یعنی سازند خوف قرار گرفته است [۲۲ و ۲۳]. تشکیل این مخزن به نتیجه حرکات



شکل ۱ موقعیت میدان مطالعه شده [۳۵].

AGE			FORMATION		LITHOLOGY	
MESOZOIC	L. TRIASSIC	Scythian	Dashtak	L. Sudair	Shale and Clay with Dolomitic Intercalations	
				Aghar Mbr.	Shale	
			Kangan	Kangan Mbr.	Shale Dolomite + Anhydrite	
				K1	Anhydrite + Dolomite	
				K2	Dolomite Limestone	
PALEOZOIC	PERMIAN	Upper	U-Dalan	K3	Anhydrite + Dolomite Anhydrite	
				K4	Dolomite limestone Anhydrite + Dolomite	
		Middle	L-Dalan	Nar Mbr.		Anhydrite
				K5	Limestone + Dolomite	
					Faraghan	
	DEVONIAN	Upper	Zakeen		Disconf.	
		Middle			Sandstone	
		Lower			Disconf.	
	SILURIAN	Lower	Sarchahan		Organic Rich Shales	
						Disconf.

شکل ۲ ستون چینه‌شناسی میدان پارس جنوبی [۲۶].

چاه و لרزه و استفاده از الگوریتم وارون‌سازی بر پایه مدل، مکعب مقاومت صوتی^۱ ساخته شده است. در قدم بعدی، مکعب مقاومت صوتی ساخته شده به همراه تعدادی دیگر از نشان‌گرهای لرزه‌ای با استفاده از رگرسیون چند نشان‌گر^۲ و شبکه‌های عصبی به مکعب GSR تبدیل شده است.

تعیین امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ

نمودار GSR یک طرح تجربی امتیازدهی به توده سنگ است که هدف آن امتیازدهی به سنگ با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی در مقیاس بین ۱۰ (سنگ به شدت ضعیف) و ۱۰۰ (سنگ سخت) است. این طرح توسط مدهارست و هادرلی در سال ۲۰۰۵ [۵] و هادرلی و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۶] معرفی شده است.

سپس مقادیر این سیستم امتیازدهی از داده‌های لرزه‌ای تخمین زده شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه مربوط به سه چاه از میدان گازی پارس جنوبی می‌باشد (چاه‌های A، B و C). مجموعه کاملی از نگارهای پتروفیزیکی برای چاه‌های مطالعه شده در دسترس بود که فرآیند کنترل کیفیت و تصحیحات محیطی بر روی این داده‌ها قبل از استفاده از آنها برای محاسبه GSR انجام پذیرفته است. داده‌های لرزه‌ای استفاده شده در این مطالعه عبارت است از مکعب لرزه‌ای سه‌بعدی پس از برانبارش میدان پارس جنوبی که در راستای انجام این پژوهش مکعب اصلی لرزه‌ای مربوط به میدان به حجم محدودی در اطراف چاه‌های مطالعه شده برش داده شده است. تمامی داده‌ها در دو مرحله کلی بارگذاری، کنترل کیفیت و پردازش شده‌اند. در قدم اول از ترکیب داده‌های

1. Acoustic Impedance

2. Multi-attribute Regression Analysis

به صورت $5 * X * Y$ - ارائه شده است. در این رابطه نیز X مربوط به حجم شیل و Y مربوط به مقدار تخلخل است که بازه تغییرات آن‌ها به صورت زیر است: اگر حجم شیل کمتر از $0/65$ باشد، مقدار X برابر صفر خواهد بود. اگر حجم شیل بین $0/65$ و $0/75$ باشد، مقدار X در بازه‌ای خطی بین صفر و 1 قرار دارد و اگر حجم شیل بیشتر از $0/75$ باشد، X برابر با 1 در نظر گرفته می‌شود. اگر مقدار تخلخل در نمونه سنگ کمتر از $0/025$ باشد، Y برابر صفر می‌باشد. اگر مقدار تخلخل بین $0/025$ و $0/075$ باشد، مقدار Y به صورت خطی بین صفر و 2 در نظر گرفته می‌شود و اگر مقدار تخلخل بیشتر از $0/075$ باشد، Y برابر 2 خواهد بود. بنابراین بیشترین مقدار عددی امتیاز رطوبت برابر 10 - می‌باشد و آن هنگامی است که حجم شیل بیشتر از $0/75$ و مقدار تخلخل بیشتر از $0/075$ باشد. در مقابل، کمترین مقدار عددی آن در حالتی که حجم شیل کمتر از $0/65$ و تخلخل کمتر از $0/025$ برابر صفر خواهد بود. بیشترین مقدار عددی آن مربوط به طبقات نرم با مقادیر بالای شیل و تخلخل که توانایی بالایی در جذب و ذخیره سیال دارند مشاهده می‌شود. که رطوبت جذب شده در این سنگ‌ها باعث کاهش مقاومت آن‌ها می‌شود.

۴- امتیاز چسبندگی بین صفر تا 25 براساس رابطه $10 + 5 * X$ تعریف شده است. که در این رابطه X مربوط به سرعت موج فشارشی (V_p) است و مقدار آن به صورت زیر تعریف می‌شود: اگر سرعت موج فشارشی کمتر از $2/75$ km/s باشد، آنگاه مقدار X برابر صفر خواهد بود. اگر سرعت موج بین $2/75$ و $3/25$ km/s باشد، X مقداری به صورت خطی بین صفر و 2 دارد و اگر سرعت موج بیشتر از $3/25$ km/s باشد، X برابر با 2 خواهد بود.

۵- امتیاز شکستگی که بین صفر و 20 - تعریف شده است که کاهش این امتیاز از صفر به سمت 20 - نشان‌دهنده افزایش تغییرپذیری^۱ در نگارهایی است که معرف افزایش لایه‌بندی و شکستگی هستند.

در حال حاضر کاربرد آن در سنگ‌های آواری است که به‌طور شاخص در توالی‌های گسترده زغالی یافت می‌شود. در اصل سرعت‌های صوتی شاخصی برای شناسایی توده سنگ سالم و دست نخورده هستند و GSR اساساً مبتنی بر داده‌های نمودارگیری صوتی است. به‌طور خلاصه GSR دارای مولفه‌های زیر است:

۱- امتیاز مقاومت سنگ که به صورت خطی به سرعت موج وابسته است و به صورت $20 * V_p - 45$ تعریف می‌شود که در این رابطه V_p بیانگر سرعت موج بر حسب km/s می‌باشد. مقدار آن بین صفر (زمانی که سرعت موج $2/25$ km/s است) تا 50 (زمانی که سرعت موج $5/5$ km/s است) می‌باشد. این امتیاز برای منعکس کردن کیفیت سنگ تعریف شده است.

۲- امتیاز تخلخل به صورت $5 * X * Y$ - تعریف شده است که بین صفر و 15 - در تغییر است. در این رابطه X مربوط به حجم شیل (V_{sh}) و Y مربوط به تخلخل (ϕ) است که مقادیر آن‌ها به صورت زیر متغیر است: اگر V_{sh} بیشتر از $0/35$ باشد، مقدار X برابر صفر است. اگر V_{sh} بین $0/25$ و $0/35$ باشد، مقدار X به صورت خطی بین 1 و صفر می‌باشد. اگر V_{sh} کمتر از $0/25$ باشد، مقدار X برابر 1 می‌باشد. اگر مقدار حجمی تخلخل کمتر از $0/05$ باشد، Y برابر صفر است. هنگامی که تخلخل بین $0/05$ و $0/2$ باشد، مقدار Y به صورت خطی بین صفر و 3 خواهد بود. اگر تخلخل بیشتر از $0/2$ باشد، مقدار Y برابر 3 لحاظ می‌شود. هنگامی که حجم شیل کمتر از $0/25$ و تخلخل بیشتر از $0/2$ باشد، مقدار امتیاز تخلخل 15 - خواهد بود و بیشترین تاثیر خود را در امتیاز سنگ خواهد گذاشت. امتیاز تخلخل در حالتی که حجم شیل بیشتر از $0/35$ و تخلخل کمتر از $0/05$ باشد به صفر می‌رسد و کمترین تاثیر را در امتیاز سنگ خواهد گذاشت. در سنگ‌های بکر با مقادیر ناچیز تخلخل و فاقد رس، امتیاز تخلخل صفر به دست می‌آید.

۳- امتیاز رطوبت که بین صفر تا 10 - تعریف و

و نیز استخراج موجک به کار می‌رود. قبل از ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی، تصحیحات شوت‌کنترل^۴ یا عبارتی تصحیحات زمان-عمق بر روی داده‌های چاه انجام شده و داده‌های چاه از حوزه^۵ عمق به زمان تبدیل شده‌اند. در ادامه الگوریتم وارون‌سازی بر پایه مدل بر روی مکعب داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی پس از برانبارش انجام شده و در نهایت GSR به وسیله رگرسیون چند نشان‌گر و شبکه عصبی از نشان‌گرهای لرزه‌ای تخمین زده شده است.

تخمین GSR از نشان‌گرهای لرزه‌ای

فرضیه اصلی انجام این پژوهش که با هدف تخمین GSR از داده‌های لرزه‌ای انجام شده است این است که تمام نشان‌گرهای لرزه‌ای نماینده‌ای از خصوصیات مشابه‌شان داخل زمین هستند. در مطالعه حاضر از رگرسیون چند متغیره و الگوریتم شبکه عصبی برای تخمین GSR از داده‌های لرزه‌ای استفاده شده است. برای رسیدن به این هدف مقاومت صوتی به دست آمده از داده‌های لرزه‌ای به همراه دیگر نشان‌گرهای مناسب در تخمین امتیازدهی ژئوفیزیکی استفاده شده است. در مطالعه حاضر برای به کار بردن نشان‌گرهای لرزه‌ای و مقاومت صوتی در تخمین GSR، مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی به همراه داده‌های لرزه‌ای خام و نیز نگار GSR محاسبه شده در مدول Emerge از نرم‌افزار همپسون راسل بارگذاری شده است. Emerge برنامه‌ایست که هدف آن ترکیب داده‌های چاه و لرزه است. هدف کلی در این قسمت از نرم‌افزار تخمین یک ویژگی چاه‌پیمایی از نشان‌گرهای لرزه‌ایست که این ویژگی می‌تواند یک نگار اندازه‌گیری شده مثل نگار سرعت موج، تخلخل و یا یک نشان‌گر سنگ‌شناسی مثل حجم شیل باشد. مراحل انجام آن در نرم‌افزار به صورت زیر می‌باشد [۳۳]:

1. Model-based Inversion
2. Recursive
3. Non-uniqueness
4. Checkshot
5. Domain

در مطالعات بعدی انجام شده، مدهارست و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۲۸] امتیازبندی‌هایی را برای زغال و سایر رسوبات آهکی معرفی نمودند به نحوی که این سنگ‌ها را هم می‌توان در قالب GSR امتیازدهی کرد. از لحاظ پارامترهای ورودی برای محاسبه GSR، سنگ‌های کربناته معمولاً محتوای رسی بسیار کمی دارند و در نتیجه آن امتیاز رطوبت همیشه برابر صفر خواهد بود و امتیاز چسبندگی به علت اینکه براساس سرعت موج و تخلخل تعریف شده است، به احتمال زیاد به مقدار بیشینه خود خواهد رسید.

وارون‌سازی لرزه‌ای بر پایه مدل^۱

وارون‌سازی لرزه‌ای از داده‌های لرزه‌ای پردازش شده، موجک بهینه و مدل مقاومتی برای استخراج کامل اطلاعات موجود در داده‌های لرزه‌ای استفاده می‌کند [۷]. در روش وارون‌سازی بر پایه مدل، یک مدل مقاومت صوتی اولیه ساخته شده و ردلرزه مصنوعی با استفاده از موجک لرزه‌ای محاسبه می‌شود. اختلاف بین ردلرزه مصنوعی و واقعی تعیین می‌شود [۲۹] و مدل مقاومت صوتی با کم‌ترین با کم‌ترین اختلاف به عنوان جواب انتخاب می‌شود. این روش اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط کوک و اشنايدر [۳۰] معرفی شد. این روش بر خلاف روش‌های وارون‌سازی بازگشتی^۲ به نوبه‌های موجود در داده‌ها حساسیت کمتری دارد [۳۱]. روش بر پایه مدل، با زمین به صورت بلوک‌های مقاومت صوتی رفتار می‌کند و مشکل عدم واحد بودن^۳ نتایج وارون‌سازی از راه محدودسازی تعداد لایه‌ها نسبت به تعداد نمونه‌های ردلرزه، در نظر گرفته می‌شود. این روش نسبت به روش‌های دیگر به مدل اولیه و موجک حساس‌تر است [۳۲].

در این مطالعه وارون‌سازی لرزه‌ای با استخراج موجک بهینه و ساخت لرزه‌نگاشت مصنوعی براساس نگارهای پتروفیزیکی صوتی و چگالی در مدول eLog از نرم‌افزار همپسون-راسل آغاز شده است. برنامه eLog برای انجام تصحیحات بر روی نگارها

همان گونه که در شکل مشاهده می شود، مقادیر GSR در سنگ های ضعیف که منطبق بر سنگ های متخلخل، دارای شکستگی (فواصل مخزنی با تراوایی بالا) یا سنگ های شیلی (مستعد ریزش در خلال حفاری)، پایین است و مقدار آن در سنگ هایی که از لحاظ پایداری دیواره چاه محکم و بکر هستند، بالاست. سنگ های دسته دوم از لحاظ کیفیت مخزنی در وضعیت نامطلوبی هستند. این رابطه همچنین در شکل ۴ قابل مشاهده است. در این شکل نمودار سرعت موج فشارشی در مقابل تخلخل نشان داده شده و GSR هم به صورت یک مقیاس رنگی قابل مشاهده است. تفکیک واحدهای مخزنی از غیرمخزنی به راحتی با مقایسه GSR با سایر نگارهای پتروفیزیکی قابل انجام است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، تطابق بسیار خوبی بین ضرایب مقاومتی یا ضرایب الاستیک دینامیک سنگ مثل یانگ، بالک و برشی با GSR وجود دارد. این قضیه دقت بالای محاسبات و نیز اهمیت دخیل کردن GSR در مطالعات ژئومکانیکی و پایداری دیواره چاه را نشان می دهد. پارامترهای مقاومتی دینامیک با استفاده از نگارهای چاه پیمایی صوتی و چگالی براساس روابط تجربی محاسبه شده اند. روابط تجربی مختلفی برای محاسبه ضرایب الاستیک معرفی شده است که مروری از این مطالعات توسط زوبک در سال ۲۰۱۰ [۳۴] ارائه شده است. در ادامه مطالعه، وارون سازی بر پایه مدل برروی داده های لرزه ای اجرا شده ست. پس از گره زدن داده های چاه به داده های لرزه ای^۲ و ساخت لرزه نگاشت^۳ مصنوعی با استفاده از موجک بهینه، وارون سازی انجام شده است. در شکل ۶ مشخصات موجک استخراج شده نمایش داده شده است. شکل های ۷ و ۸ به ترتیب نشان دهنده مدل مقاومت صوتی برای توالی مخزنی کنگان-دالان و تطابق بین GSR و مقاومت صوتی می باشند.

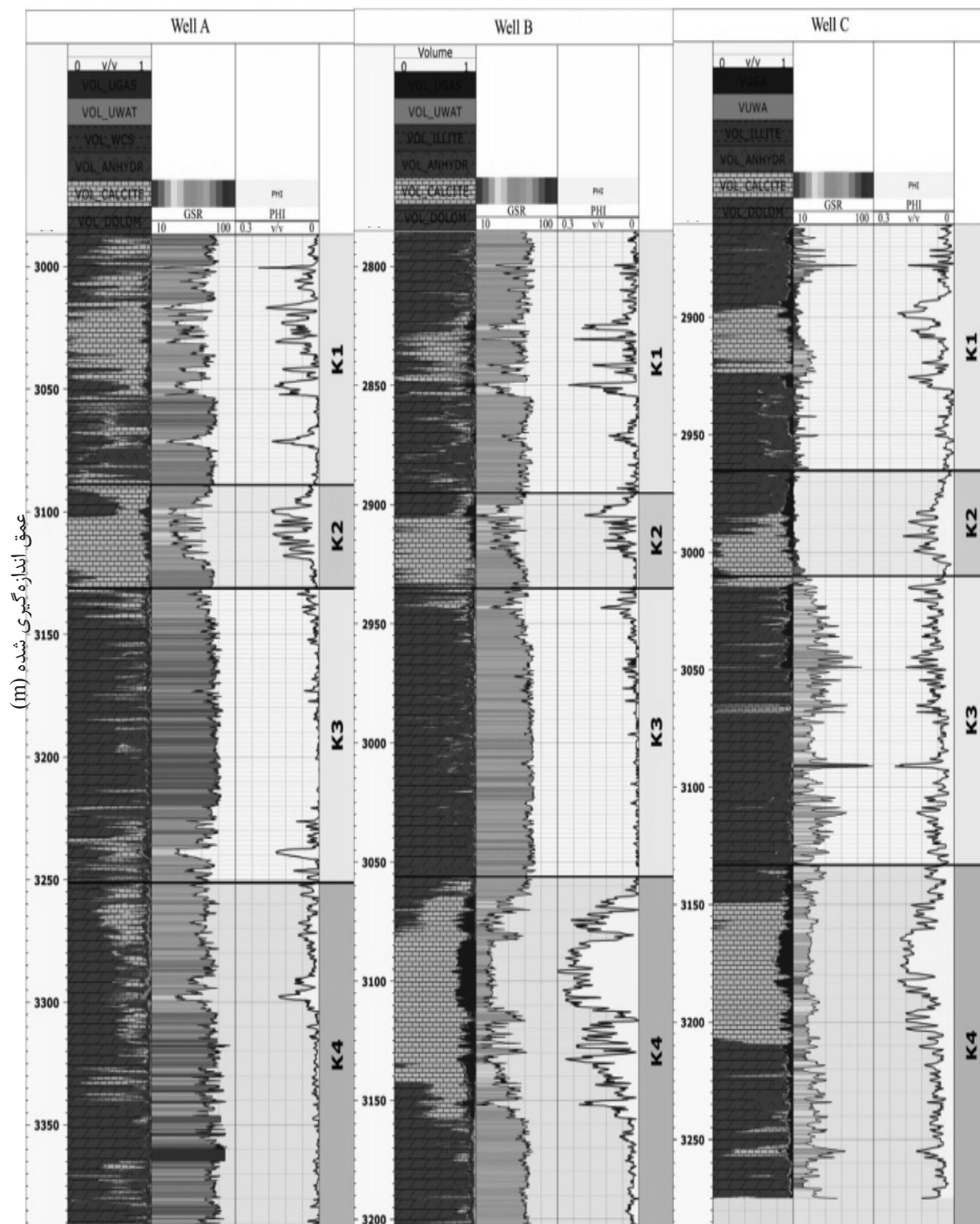
۱- ارزیابی داده های چاه و لرزه در محل چاه برای تعیین نشان گرهای مناسب.
 ۲- مشخص کردن رابطه بین نگار هدف و نشان گرهای لرزه ای با استفاده از رگرسیون چند نشان گر یا شبکه های عصبی.
 ۳- اعمال رابطه تعیین شده به مکعب لرزه ای برای ایجاد یک مکعب سه بعدی از نگار هدف.
 بر این اساس ابتدا با استفاده از رگرسیون چند نشان گر، نشان گرهای مناسب انتخاب شده و سپس در محل چاه ها آموزش شبکه عصبی احتمالی^۱ انجام شده و سپس عمل تخمین GSR در کل حجم مکعب لرزه ای با استفاده از شبکه عصبی ایجاد شده انجام شده است.

نتایج و بحث

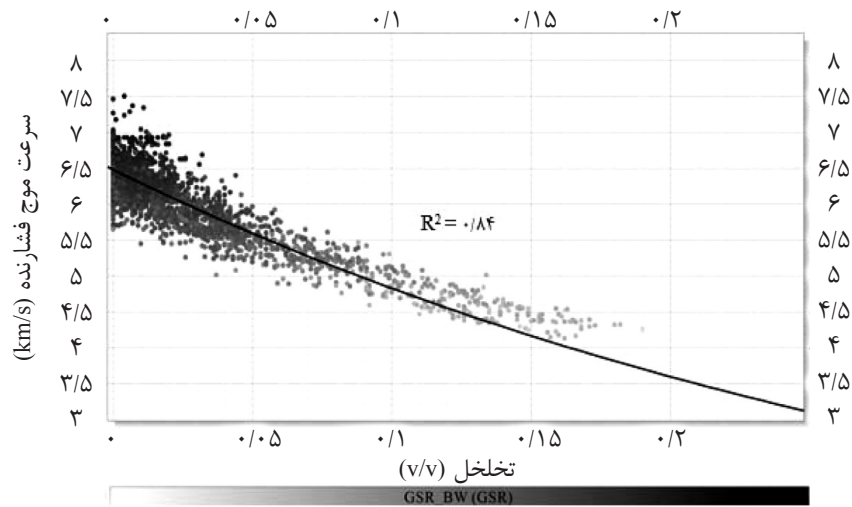
هدف مطالعه حاضر تخمین امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ از نشان گرهای لرزه ای با استفاده از سیستم های هوشمند است. این پژوهش در چند مرحله طبق زیر انجام شده است:

- ارزیابی داده های موجود در جهت انتخاب نشان گرهای مناسب از میان بیشتر از ۳۰ نشان گر پیشنهاد شده. این نشان گرها ورودی تخمین گرهای هوشمند هستند. فرآیند انتخاب نشان گرهای مناسب براساس ارزیابی رگرسیونی انجام شده است.
- ساخت شبکه عصبی احتمالی به عنوان یک تخمین گر هوشمند.
- تخمین امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ.
- اعمال مدل هوشمند به داده های لرزه ای سه بعدی میدان مطالعه شده برای به دست آوردن کعب GSR در سرتاسر زون های مخزنی و نیز ارزیابی مکعب به دست آمده.
- براساس روش ذکر شده، در ابتدا مقادیر GSR برای چاه های مطالعه شده محاسبه شده است. شکل ۳ مقادیر محاسبه شده برای GSR را در کنار نگار تخلخل برای همه چاه ها نشان داده شده است و واحدهای مخزنی مختلف با هم تطابق داده شده اند.

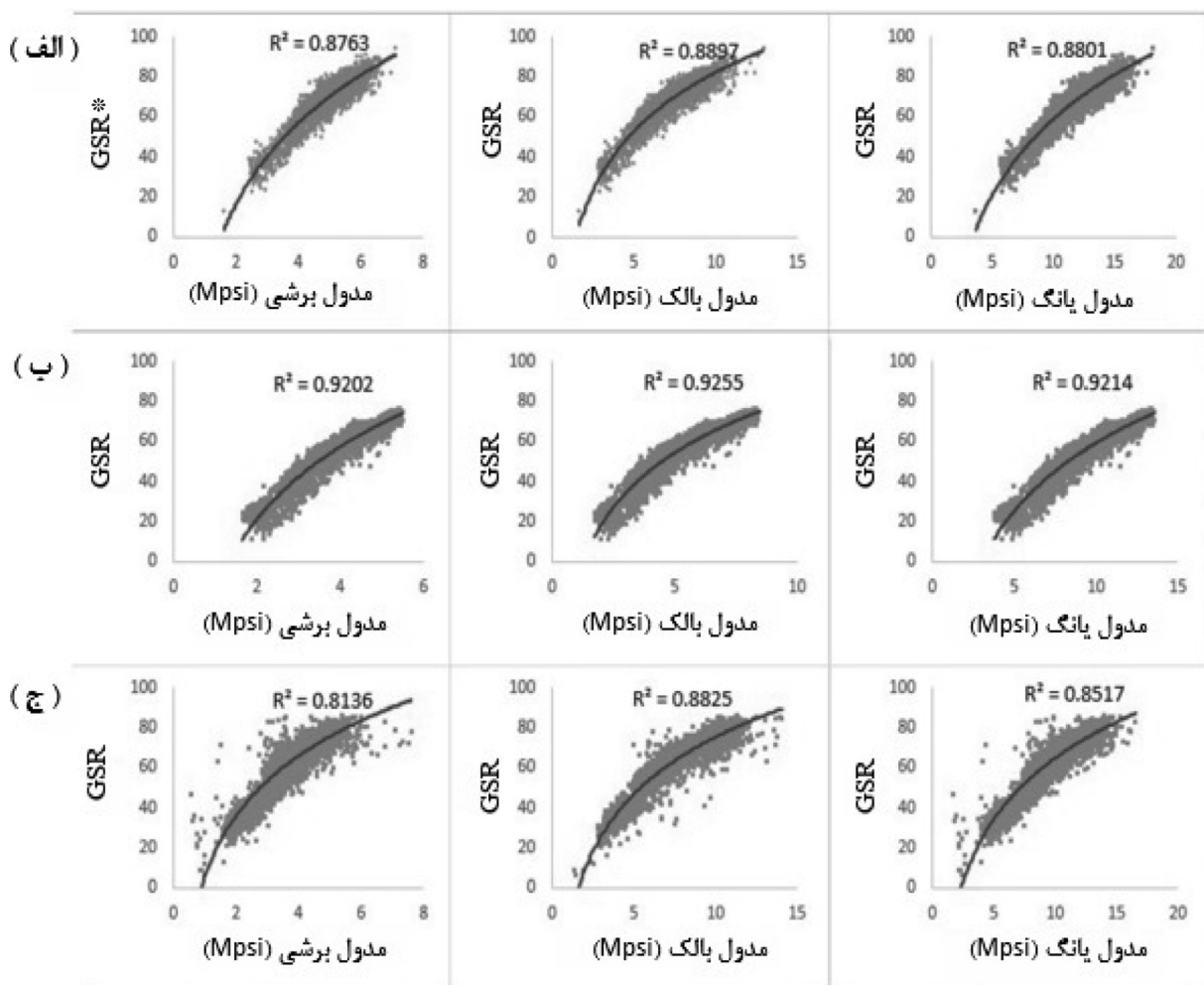
1. Probabilistic Neural Network
 2. Well to Seismic Tie
 3. Seismogram



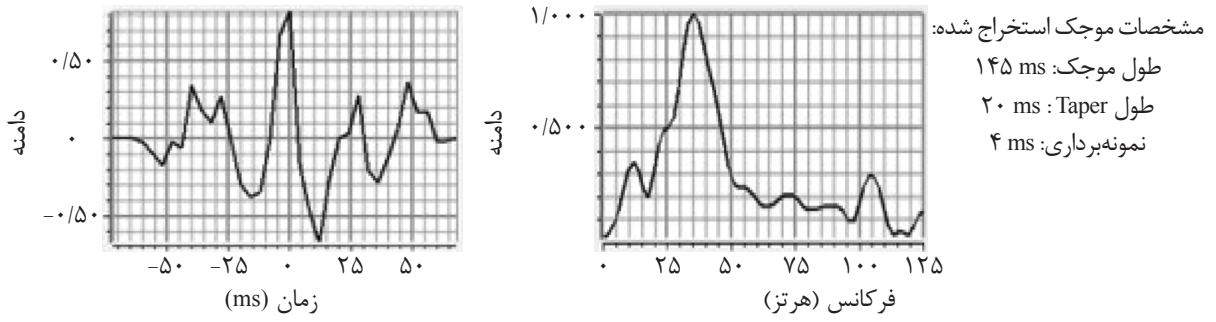
شکل ۳ تطابق بین چاه‌های مطالعه شده و شباهت بالای بین تغییرات GSR و تخلخل. بخش‌های مخزنی با تخلخل بالا و سنگ‌های شیلی ضعیف، مقادیر GSR پایینی را نشان می‌دهند. سنگ‌های محکم با تخلخل پایین بیشینه مقدار GSR را نشان می‌دهند.



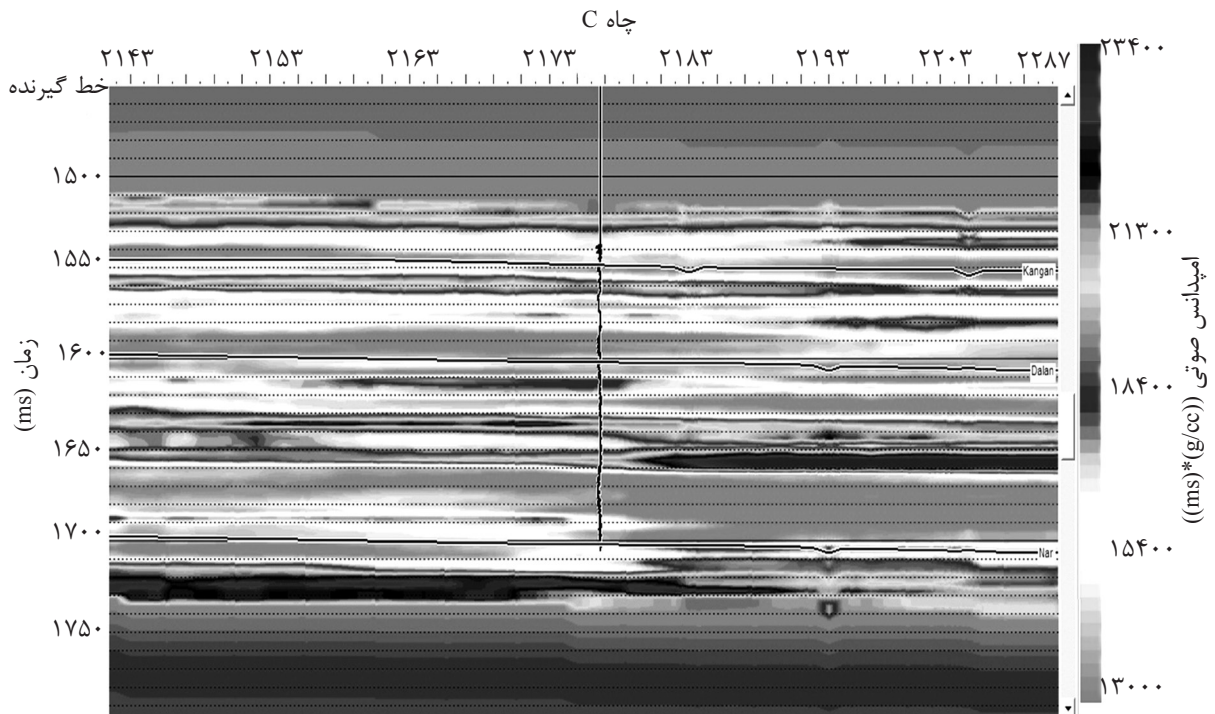
شکل ۴ نمودار تخلخل در مقابل سرعت موج فشارنده در چاه A. مقادیر GSR روی نمودار نشان داده شده است که شدیداً به تغییرات تخلخل و سرعت موج وابسته است.



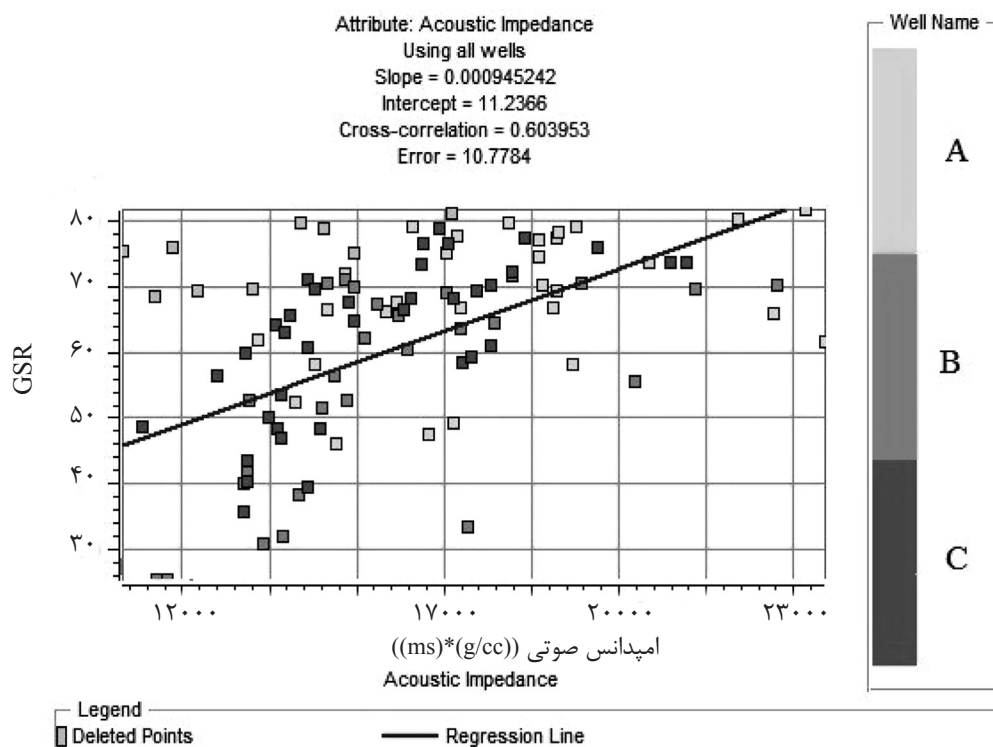
شکل ۵ رابطه و ضریب همبستگی بین GSR و ضرایب الاستیک. (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب مربوط به چاه‌های A، B و C می‌باشند. * امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ



شکل ۶ ویژگی‌های موجک استخراج شده در حوزه زمان و فرکانس برای انجام فرآیند گره زدن چاه به لرزه.



شکل ۷ یک مقطع وارون شده از داده‌های لرزه‌ای برای سازندهای کنگان- دالان در محل چاه C.



شکل ۸ همبستگی بین GSR و مقاومت صوتی برای چاه‌های مطالعه شده نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین این دو پارامتر است. مقادیر خطا به صورت درصد می‌باشد.

ارائه شده است. در شکل ۹ نتایج ارزیابی رگرسیون چند نشان‌گر و نمودار GSR واقعی در مقابل مقادیر تخمین زده شده نشان داده شده است.

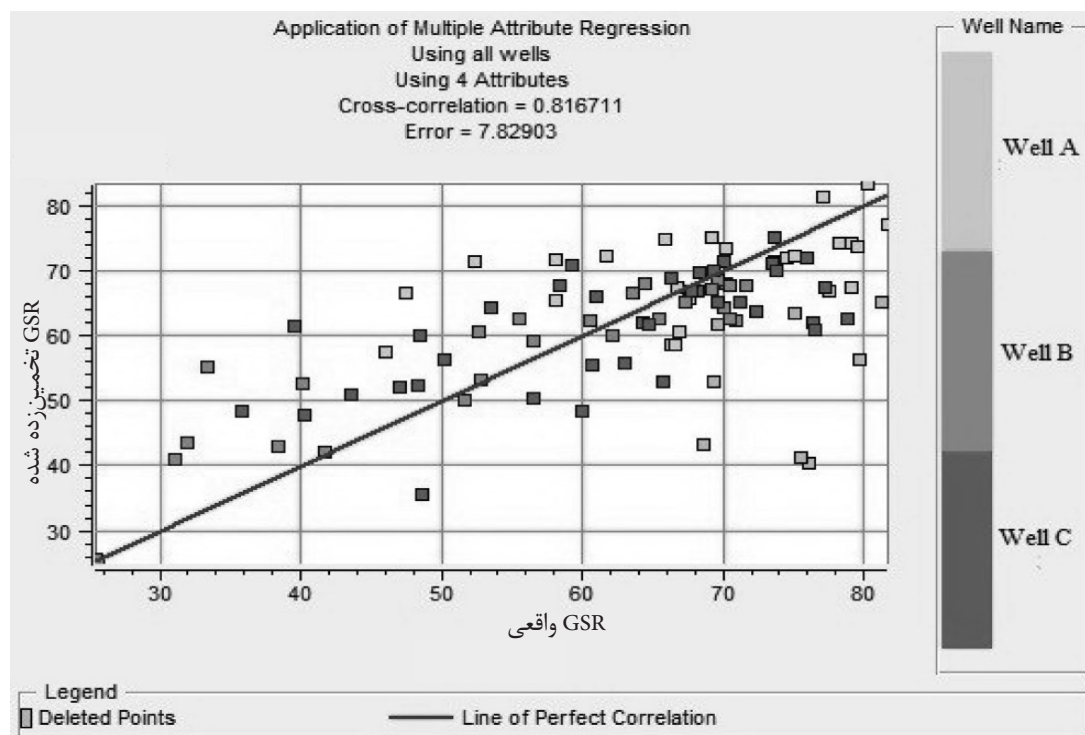
همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد نشان‌گرهای استفاده شده به مجموعه داده‌های ورودی، خطای آموزش به ترتیب کاهش می‌یابد. برای انتخاب تعداد نشان‌گرهای بهینه برای مجموعه ورودی باید خطای صحت‌سنجی هم در نظر گرفته شود. با انتخاب نکردن نشان‌گر اول، خطای صحت‌سنجی با افزایش تعداد نشان‌گرها تا ۴ نشان‌گر، کاهش می‌یابد و سپس مقدار این خطا شروع به افزایش می‌کند و مشکل بیش‌برازشی^۱ پیش می‌آید. بر این اساس ۴ نشان‌گر اول جدول ۱ به‌عنوان ورودی برای آموزش شبکه عصبی انتخاب شده است. در شکل ۹ نتایج ارزیابی چند نشان‌گر و نمودار همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده GSR نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، مقدار مقاومت صوتی در بخش‌های مخزنی پایین بوده و این به علت تخلخل، تراوایی، شکستگی و دیگر خواص مخزنی است که باعث کم شدن سرعت موج و متعاقب آن مقاومت صوتی می‌شود. از میان واحدهای مخزنی، بخش‌هایی که کیفیت مخزنی بالاتری دارند نسبت به بخش‌های با کیفیت پایین‌تر، مقاومت صوتی کمتری را نشان می‌دهند. در قسمت‌های مطالعه شده از میدان پارس جنوبی، در بین واحدهای K1، K2، K3 و K4، واحد K3 به‌علت ویژگی‌های سنگ‌شناسی و اثرات دیاژنزی مانند رخساره‌های گلی، جایگزینی انیدریت و دولومیتی شدن بیش از حد، کیفیت مخزنی پایین‌تری دارد که در نتیجه آن مقاومت صوتی این واحد از سایر واحدهای مخزنی بیشتر است. در ادامه، یک ارزیابی رگرسیونی چند نشان‌گر با تعداد ۱۵ نشان‌گر بر روی داده‌ها اعمال شده است. در جدول ۱ خطاهای آموزش و صحت‌سنجی برای نشان‌گرهای مختلف

1. Overfitting

جدول ۱ خطاهای آموزش و صحت‌سنجی برای مجموعه نشان‌گرهای مختلف. ۴ نشان‌گر اول به‌عنوان ورودی نهایی انتخاب شده است.

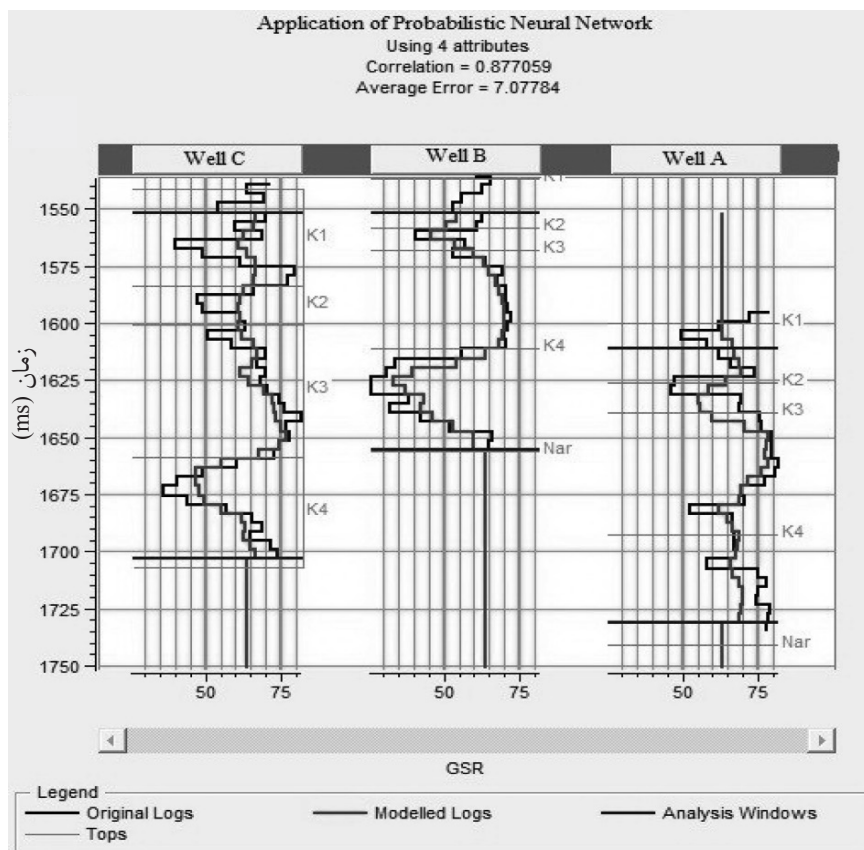
خطای صحت‌سنجی	خطای آموزش	نشان‌گرها	نگار هدف
۰/۱۰۸۳	۰/۰۹۸۲	معکوس امیدانس صوتی	GSR ²
۰/۱۱۰۹	۰/۰۸۸۹	فیلتر ۵/۱۰ و ۱۵/۲۰ (امیدانس صوتی)	GSR ²
۰/۱۱۰۱	۰/۰۸۳۱	طول جغرافیایی	GSR ²
۰/۱۰۶۶	۰/۰۷۸۲	دامنه مطلق یکپارچه (امیدانس صوتی)	GSR ²
۰/۱۰۹۶	۰/۰۷۴۲	ردلرزه موهومی (امیدانس صوتی)	GSR ²
۰/۱۰۴۱	۰/۰۷۰۴	فیلتر ۲۵/۳۰ و ۳۵/۴۰	GSR ²
۰/۱۰۷۲	۰/۰۶۷۱	دامنه فرکانس وزن‌دار	GSR ²
۰/۱۱۳۴	۰/۰۶۲۳	فیلتر ۵/۱۰ و ۱۵/۲۰	GSR ²
۰/۱۱۳۴	۰/۰۵۸۱	دامنه مطلق یکپارچه	GSR ²
۰/۱۱۳۸	۰/۰۵۵۶	فاز لحظه‌ای	GSR ²
۰/۱۱۳۹	۰/۰۵۳۷	عرض جغرافیایی	GSR ²
۰/۱۰۹۵	۰/۰۵۲۵	دامنه فاز وزن‌دار	GSR ²
۰/۱۱۵۹	۰/۰۵۰۶	فرکانس لحظه‌ای	GSR ²
۰/۱۰۷۲	۰/۰۴۶۳	کسینوس فاز لحظه‌ای	GSR ²
۰/۱۰۹۸	۰/۰۴۷۳	فیلتر ۵۵/۶۰ و ۶۵/۷۰	GSR ²



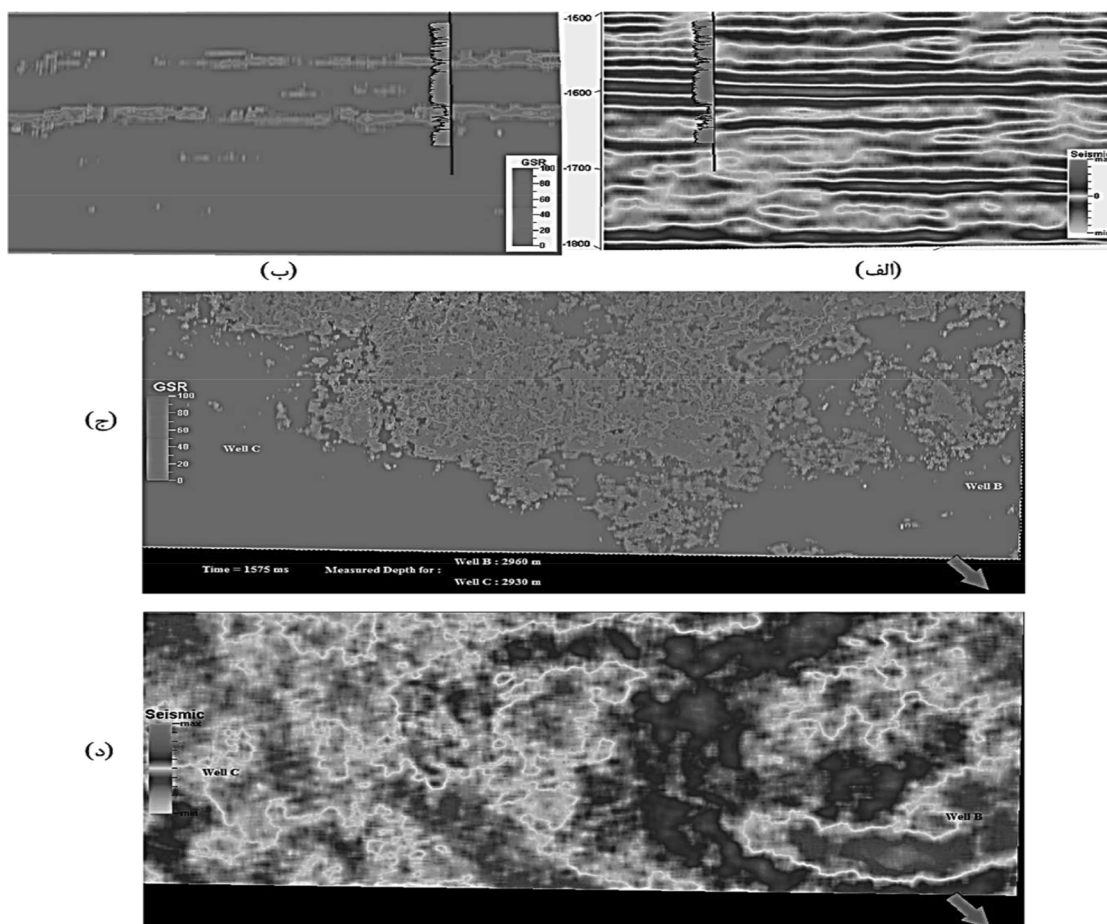
شکل ۹ کاربرد آنالیز چند نشان‌گر در تخمین GSR و همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده GSR با استفاده از روش چند نشان‌گر. مقادیر خطا به‌صورت درصد می‌باشد.

استفاده قرار گیرد. در شکل (۱۱-ج و د) یک برش زمانی در زمان ۱۵۷۵ ms از مکعب‌های لرزه‌ای و GSR نشان داده شده است. در شکل به‌وضوح مشاهده می‌شود که تغییرات در مکعب GSR تخمین زده شده با مکعب لرزه‌ای مطابق است. به عبارت دیگر، مکعب تخمین زده شده به نحو کاملاً معنی‌داری منعکس‌کننده توزیع کیفیت مخزنی و یا مقاومت سنگی در سرتاسر مکعب می‌باشد. به دلیل حجم پایین محتوای رسی در واحدهای K1 تا K4 تطابق خوبی بین مقادیر GSR و کیفیت مخزنی وجود دارد که مقادیر پایین GSR مشخص‌کننده بخش‌های با کیفیت مخزنی بالا هستند. بخش‌هایی با مقادیر بالای گاما باید با دقت بالایی بررسی شود، چون ممکن است که مقادیر پایین GSR مربوط به نقاط با کیفیت مخزنی بالا نباشد و در ارتباط با سنگ‌های ضعیف همچون شیل‌ها و رس‌ها باشد.

نتایج استفاده شبکه عصبی در تخمین GSR در محل چاه در شکل ۱۰ نشان شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده بسیار بالاست، در نتیجه می‌توان گفت که شبکه عصبی ساخته شده در تخمین GSR موفق عمل کرده است. در شکل (۱۱-الف و ب) یک برش دوبعدی از مخزن در مکعب‌های لرزه‌ای و GSR به تصویر کشیده شده است. این برش در برگزیده چاه‌های مطالعه شده در این مطالعه است و نگار GSR بر روی این برش نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری‌های حاصل از نگار وجود دارد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مکعب ساخته شده برای GSR براساس داده‌های لرزه‌ای از دقت قابل قبولی برخوردار است و این مدل می‌تواند برای ارزیابی کیفیت مخزن در نواحی حفاری نشده میدان مورد



شکل ۱۰ نتایج شبکه عصبی احتمالی در تخمین GSR در محل چاه‌ها برای واحدهای مخزنی K1 تا K4. تطابق قوی و تشابه بالای بین نگارهای واقعی و تخمین زده شده دقت شبکه عصبی را در تخمین نگار هدف نشان می‌دهد. مقادیر خطا به صورت درصد می‌باشد.



شکل ۱۱ (الف-ب) مقطع از داده لرزه‌ای و مقطع GSR معادل آن که نگار GSR مربوط به چاه B بر روی آنها نشان داده شده است، (ج-د) برش زمانی ۱۵۷۵ ms از مکعب لرزه‌ای و GSR

نتیجه‌گیری

امتیازدهی ژئوفیزیکی توده سنگ یک سنجه تجربی برای امتیازدهی به توده‌های سنگی است که توسط مدهارست و هادرلی در سال ۲۰۰۵ [۵] برای ماسه سنگ‌ها ارائه شده است. در این مطالعه دو هدف کلی دنبال شده است. در ابتدا GSR برای اولین بار در سنگ‌های کربناته براساس روش هادرلی، محاسبه شده است و سپس این برنامه امتیازدهی از داده‌های لرزه‌ای با استفاده از سیستم‌های هوشمند تخمین زده شده و نتایج زیر به دست آمده است:

کربناته همخوانی دارد. تطابق خوبی بین GSR و پارامترهای الاستیک سنگ وجود دارد.

- افق‌های مخزنی حاوی گاز در میدان پارس جنوبی به دلیل اینکه با تخلخل و تراوایی نسبتاً خوبی همراه هستند لذا در رده سنگ‌های ضعیف به لحاظ مکانیکی قرار می‌گیرند و مقادیر نسبتاً پایینی از GSR را از خود نشان می‌دهند. واحد مخزنی K2 که به لحاظ کیفیت مخزنی و تولید گاز از سایر واحدها بهتر است، مقادیر GSR پایین‌تری دارد.
- با توجه به هزینه‌های گزاف برداشت نمونه‌های مغزه برای ارزیابی کیفیت مخزنی، می‌توان از GSR به‌عنوان یک روش مقرون به صرفه برای ارزیابی کیفیت مخزنی و مقاومتی توده سنگ بهره برد.
- از نگار GSR می‌توان در مراحل حفاری و تولید برای بررسی پایداری دیواره چاه و نیز شناسایی بازه‌های

- نتایج این مطالعه نشان داد که با وجود اینکه GSR در ابتدا برای سنگ‌های آواری تعریف شده است، اما در مورد سنگ‌های کربناته هم قابل پیاده‌سازی است و نتایج آن با توجه به مقادیر تخلخل و خواص الاستیکی سنگ با روند مقاومت سنگ در سنگ‌های

شده است که با توجه به اینکه این حجم GSR در بردارنده امتیاز مقاومت سنگ در نواحی حفاری نشده است و نیز می‌تواند مشخص‌کننده بخش‌های تراوا و معرف بخش‌های ضعیف که مستعد ریزش در حین حفاری هستند، باشد لذا از آن می‌توان در مراحل آتی توسعه میدان بهره برد.

تراوا و همچنین بخش‌های سفت و محکم استفاده کرد.

- همبستگی خوبی بین نتایج GSR محاسبه شده و مقادیر تخمین زده شده از شبکه عصبی احتمالی وجود دارد که دقت شبکه عصبی را در تخمین نتایج اثبات می‌کند. در این مطالعه با تخمین GSR از داده‌های لرزه‌ای، یک مکعب سه‌بعدی GSR فراهم

مراجع

- [1]. Bieniawski Z. T., "Engineering rock mass classifications a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering", John Wiley & Sons, 1989.
- [2]. Mark C. and Molinda G. M., "The Coal Mine Roof Rating (CMRR) – a decade of experience," International Journal of Coal Geology, Vol. 64, pp. 85-103, 2005.
- [3]. Barton N. Loser F. Lien R. and Lunde J., "Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations", ISRM International Symposium-Rockstore 80, Stockholm, Sweden, 23-27 June 1980.
- [4]. Wickham G. E., Tiedemann H. R. and Skinner E. H., "Support determinations based on geologic predictions", North American Rapid Excav. and Tunnelling Conf, Chicago, United States, 1972.
- [5]. Medhurst T. and Hatherly P., "Geotechnical strata characterization using geophysical borehole logs", Proceedings of the 24th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, West Virginia University, United States, 2005.
- [6]. Hatherly P. J., Medhurst T. P. and MacGregor S. A., "A rock mass rating scheme for clastic sediments based on geophysical logs", Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining, Pennsylvania, United States, 2007.
- [7]. Huuse M. and Feary D. A., "Seismic inversion for acoustic impedance and porosity of Cenozoic cool-water carbonates on the upper continental slope of the Great Australian Bight", Marine Geology, Vol. 215(3-4), pp. 123-134, 2005.
- [8]. Lavergne M. and Willm C., "Inversion of seismograms and pseudo velocity logs", Geophysical Prospecting, Vol. 25(2), pp. 231-250, 1977.
- [9]. Becquey M., Lavergne M. and Willm C., "Acoustic impedance logs computed from seismic traces", Geophysics, Vol. 44(9), pp. 1485-1501, 1979.
- [10]. Kadkhodaie-ilkhchi R., Moussavi-harami R. and Rezaee, R., "Seismic inversion and attributes analysis for porosity evaluation of the tight gas sandstones of the Whicher Range field in the Perth Basin, Western Australia", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 21, pp. 1073-1083, 2014.
- [11]. Yao T. and Chopra A., "Integration of seismic attribute map into 3D facies modeling", Journal of petroleum Science and Engineering, Vol. 27(1), pp. 69-84, 2000.

- [12]. Abreu V. Sullivan M. Pirmez C., Mohrig D. "Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels", Marine and Petroleum Geology, Vol. 20, Issue 6-8, pp. 631–648, 2003.
- [13]. Jian W. and Fanhua L., "Prediction of oil-bearing single sandbody by 3D geological modeling combined with seismic inversion", Petroleum exploration and development, Vol. 36, Issue 5, pp. 623–627, 2009.
- [14]. Rezvandehy M., Aghababaei H. and Raissi S. H. T., "Integrating seismic attributes in the accurate modeling of geological structures and determining the storage of the gas reservoir in Gorgan Plain (North of Iran)", Journal of Applied Geophysics, Vol. 73, Issue 3, pp. 187–195, 2011.
- [15]. Perez Muñoz T., Velasco Hernandez J. and Hernandez Martinez E., "Wavelet transform analysis for lithological characteristics identification in siliciclastic oil fields", Journal of Applied Geophysics, Vol. 98, pp. 298–308, 2013.
- [16]. Pearson R., Hart B. and others, "Convergence of 3-D seismic attribute-based reservoir property prediction and geologic interpretation as a risk reduction tool: A case study from a Permian intraslope basin", Expanded Abstracts, 69th Mtg., Soc. Expl. Geophys., Houston, USA, 1999.
- [17]. Hart B. S. and Balch R. S., "Approaches to defining reservoir physical properties from 3-D seismic attributes with limited well control: An example from the Jurassic Smackover Formation, Alabama", Geophysics, Vol. 65, Issue 2, pp. 368–376, 2000.
- [18]. Leiphart D. J. and Hart B. S., "Comparison of linear regression and a probabilistic neural network to predict porosity from 3-D seismic attributes in Lower Brushy Canyon channeled sandstones, southeast New Mexico", Geophysics, Vol. 66, Issue 5, pp. 1349–1358, 2001.
- [19]. Soubotcheva N. and Stewart R. R., "Predicting porosity logs from seismic attributes using geostatistics", CREWES Res. Rep, 16, 2004.
- [20]. Na'imia S. R., Shadizadeha S. R., Riahib M. A., Mirzakhanianc M., "Estimation of reservoir porosity and water saturation based on seismic attributes using support vector regression approach", Journal of Applied Geophysics, Vol. 107, pp. 93–101, 2014.
- [21]. Konert G., Afif A. M., AL-Hajari S. A., Droste H., "Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate", GeoArabia, Vol. 6, pp. 407–442, 2001.
- [22]. Alshahran A. S. and Nairn A. E. M., "Sedimentary basins and petroleum geology of the middle east", Elsevier, 1997.
- [23]. Kashfi M. S., "Greater Persian Gulf Permian–Triassic stratigraphic nomenclature requires study", Oil & Gas Journal, Vol. 6, pp. 36-44, 2000.
- [24]. Rahimpour-Bonab H., Esrafil-Dizaji B. and Tavakoli V., "Dolomitization and anhydrite precipitation in permo-triassic carbonates at the south pars gasfield, offshore Iran: controls on reservoir quality," Journal of Petroleum Geology, Vol. 33, Issue 1, pp. 43–66, 2010.
- [25]. Szabo F. and Kheradpir A., "Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran", Journal of Petroleum Geology, Vol. 1, Issue 2, pp. 57–82, 1978.
- [26]. Aali J., Rahimpour-Bonab H. and Kamali M. R., "Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 50, Issue (3-4), pp. 161–175, 2006.

- [27]. Rahimpour Bonab H., Asadi Eskandar A. and Sonei R., "Effects of the permian–triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf," *Geology Journal*, Vol. 44, pp. 341-364, 2009.
- [28]. Medhurst T., Hatherly P. and Zhou B., "3D geotechnical models for coal and clastic rocks based on the GSR", *Proceedings of Coal Operators Conference*, University of Wollongong, Australia, 2010.
- [29]. Vecken P. C. H. and Da Silva M., "Seismic inversion methods and some of their constraints", *First Break*, Vol. 22(6), pp. 47–70, 2004.
- [30]. Cooke D. A. and Schneider W. A., "Generalized linear inversion of reflection seismic data", *Geophysics*, Vol. 48(6), pp. 665–676, 1983.
- [31]. Russell B. H., "Introduction to seismic inversion methods", *Society of Exploration Geophysicists*, 1988.
- [32]. Pramanik A. G. et al., "Post stack seismic inversion for enhancing vertical resolution", *Geohorizons*, 2002.
- [33]. Hampson Russell Users Guide, "Elog and emerge theory", *Hampson-Russell documentation*, 2006.
- [34]. Zoback M. D., "Reservoir geomechanics", *Cambridge University Press*, 2010.
- [35]. Rahimpour Bonab H., "A procedure for appraisal of a hydrocarbon reservoir continuity and quantification of its heterogeneity", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 58(1), pp. 1–12, 2007.