

تعیین توزیع انواع منافذ سنگ مخزن آسماری با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای سه‌بعدی (3D)، در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران

سجاد قره‌چلو^۱، زیبا حسینی^۲، علی کدخدائی^{۳*} و علی چهارزی^۴

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

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تبریز، ایران

۴- پژوهشکده علوم زمین، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۷ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۲۳

چکیده

نوع منافذ سنگ مخزن یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده کیفیت مخازن هیدروکربنی است. این پارامتر جریان سیال و تراوایی سنگ مخزن را تحت تاثیر قرار می‌دهد به همین دلیل تنوع و توزیع نوع منافذ خصوصا در مخازن کربناته پیچیده و حائز اهمیت است. در این مطالعه انواع منافذ براساس رفتار الاستیکی و پتروفیزیکی به درون ذره‌ای، انحلالی، ریزتخلخل، بین ذره‌ای، بین بلوری، بین دانه‌ای، ریزتخلخل آواری و شکستگی تقسیم شدند. هر یک از زیررده‌های منفذی توسط نگار انحراف سرعت و داده مغزه در امتداد چاه‌های مطالعاتی تعیین شدند. همچنین به منظور تعیین کیفیت مخزنی تحت کنترل نوع منافذ، توزیع انواع منافذ در چارچوب واحدهای جریان از روش شاخص زون جریان نیز تعیین شدند. پس از تعیین نوع منافذ و خصوصیات پتروفیزیکی آنها در امتداد چاه‌های مورد مطالعه، از نشانگرهای لرزه‌ای به منظور گسترش نتایج در مقیاس میدانی استفاده شد. داده‌های لرزه‌ای سه بعدی پس از برانبارش میدان مورد مطالعه و آرون‌سازی امیدانس صوتی شده و در نهایت مدل سه بعدی و نقشه‌هایی از توزیع انواع منافذ با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای در میدان مورد مطالعه ارائه شد که این مدل در شناسایی زون‌های مخزنی و غیر مخزنی در مقیاس میدانی کارآمد می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل سه‌بعدی انواع منافذ، کیفیت مخزنی، نگار انحراف سرعت، مخزن آسماری، نشانگرهای لرزه‌ای

گرفته است.

روش پژوهش

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل مقاطع نازک میکروسکوپی از مغزه، داده‌های نگار، شوت کنترل، سرسازندها و داده سه بعدی لرزه‌ای می‌باشد. ابتدا با استفاده از نگاره‌های صوتی و نوترون نگار انحراف سرعت در سه چاه محاسبه شد و انواع منافذ به دست آمده از نگار انحراف سرعت را در واحدهایی که داده مغزه و مقاطع نازک میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده موجود بود مورد مقایسه و تطابق قرار گرفت. در این مطالعه انواع منافذ توسط نگار انحراف سرعت^۱ تعیین شدند. نگار انحراف سرعت از تفریق نگار سرعت مصنوعی (محاسبه شده توسط تخلخل نوترون یا چگالی) و واقعی به دست می‌آید [۲]. پس از محاسبه نگار انحراف سرعت در سه چاه انواع منافذ به ۳ رده و ۸ زیررده تقسیم شدند که توزیع هریک از آنها با ۹۵۰ مقطع نازک میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده با رزین آبی در سه چاه مطالعاتی نیز کنترل شد. پس از تعیین نوع منافذ و رده‌بندی آنها خصوصیات پتروفیزیکی و مخزنی (تخلخل و تراوایی) آنها از روش شاخص زون جریان تعیین شدند. در نهایت پس از تعیین انواع منافذ و خصوصیات مخزنی‌شان با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای مدل سه بعدی توزیع آنها در میدان مورد مطالعه پیش‌بینی شد. داده لرزه‌ای پس از برآورش میدان مورد مطالعه منطقه‌ای در حدود 130 km^2 را پوشش می‌دهد که شامل ۲۵۶ خطوط چشمه و ۷۷۳ خطوط گیرنده است.

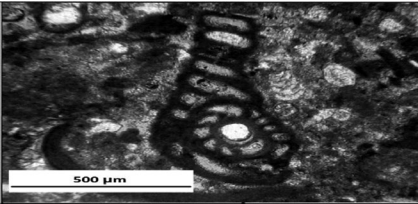
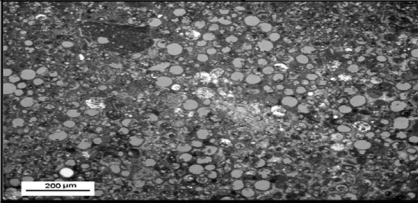
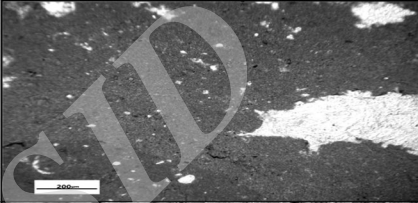
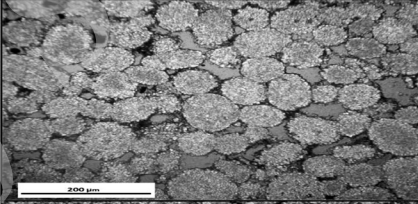
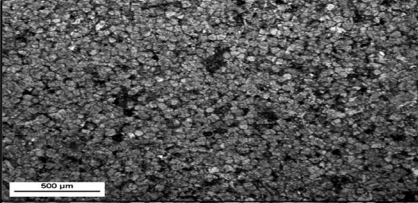
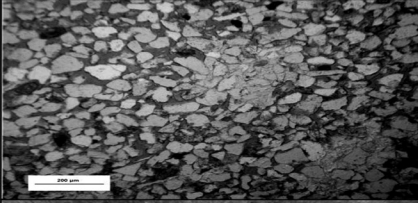
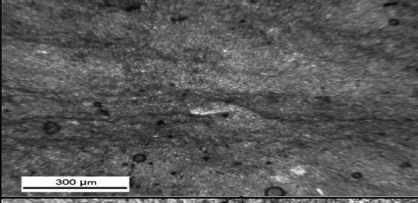
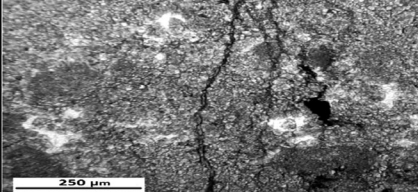
تعیین نوع منافذ

در این مطالعه براساس رفتار الاستیکی سنگ و نگار انحراف سرعت [۲] منافذ به ۳ رده و ۸ زیر رده تقسیم می‌شوند (شکل ۱).

نوع منافذ کنترل‌کننده بسیاری از پارامترهای پتروفیزیکی می‌باشد و از آنجایی که در جریان سیال در محیط متخلخل تاثیرگذار است در مدل‌های مخزنی و پیش‌بینی تراوایی اهمیت دارد. بنابراین درک صحیحی از توزیع انواع منافذ از کوچک مقیاس تا بزرگ مقیاس در تخمین تعداد چاه‌ها و پیش‌بینی ذخیره قابل برداشت نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشند. در سنگ‌های رسوبی نوع منافذ متاثر از شرایط محیط رسوبی، دیاژنز و فرآیندهای تکتونیکی می‌باشد. این مجموعه فرآیندها در کنار یکدیگر و در طول زمان موجب پیچیدگی توزیع منافذ و همین‌طور ناهمگنی در مخازن هیدروکربنی می‌شود. بنابراین ارائه یک مدل ساده و بدون در نظر گرفتن توزیع منافذ و خصوصیات پتروفیزیکی آنها به نظر می‌رسد که در نمایان کردن ناهمگنی‌های مخزن کارآمد نباشد. همین‌طور در مطالعات کیفیت مخزنی زون‌هایی با تخلخل بالا همیشه تراوایی بالایی نخواهد داشت یا شاید رابطه معکوسی وجود داشته باشد که این خود صحنه بر تاثیر نوع منافذ دارد.

اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- طبقه بندی انواع منافذ؛ ۲- تعیین خصوصیات پتروفیزیکی و مخزنی منافذ؛ ۳- تعیین توزیع منافذ در محل چاه؛ ۴- گسترش نتایج از محل چاه به مقیاس میدانی با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای است. با این نگرش جامع می‌توان آناتومی ریز مخزن را از مقیاس کوچک تا بزرگ مورد مطالعه قرار داد. در مطالعات پیشین نوع منافذ در فواصلی از چاه که داده مغزه موجود بود معطوف می‌شد که معمولاً نیز به صورت توصیفی بوده است [۱] ولی در این پژوهش سعی شده است نتایج را در مقیاس میدانی و به صورت کمی گسترش داد. این نگرش جامع از توزیع انواع منافذ در شبیه‌سازی دینامیکی و استاتیکی مخزن و استراتژی‌های گسترش میدانی نفتی نیز کاربردی به نظر می‌رسد. این پژوهش در سازند آسماری با ماهیت مختلط کربناته- آواری مورد بررسی قرار

1. Velocity Deviation Log (VDL)

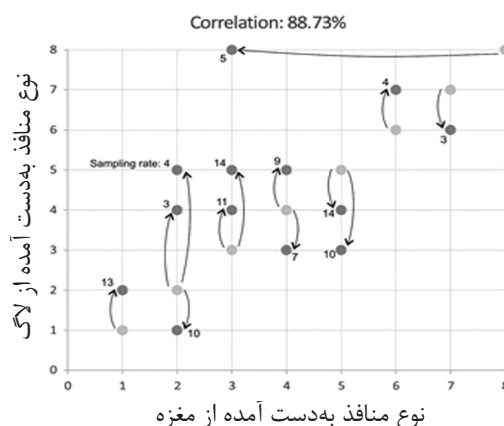
کلاس ۱	زیر کلاس ۱ ذره‌ای	انحراف سرعت ۷۵۰، ۱۵۰۰ m/s میانگین ۱۲۰۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۷٪ میانگین تراوایی ۰.۳ mD	
	زیر کلاس ۲ فالی و حفره‌ای	انحراف سرعت ۶۰۰، ۱۴۰۰ m/s میانگین ۷۵۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۱۵٪ میانگین تراوایی ۰.۹ mD	
کلاس ۲	زیر کلاس ۱ ریز تخلخل	انحراف سرعت -۲۰۰، ۴۰۰ m/s میانگین ۴۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۹٪ میانگین تراوایی ۰.۲۷ mD	
	زیر کلاس ۲ بین ذره‌ای	انحراف سرعت -۲۰۰، ۴۵۰ m/s میانگین ۲۵۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۱۸٪ میانگین تراوایی ۵۳۲ mD	
	زیر کلاس ۳ بین بلوری	انحراف سرعت -۷۵، ۵۰۰ m/s میانگین ۴۰۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۱۲۷٪ میانگین تراوایی ۰.۳ mD	
	زیر کلاس ۴ بین دانه‌ای	انحراف سرعت ۱۰۰، ۴۰۰ m/s میانگین ۱۲۰۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۲۲٪ میانگین تراوایی ۱۶۸۹ mD	
	زیر کلاس ۵ ریز تخلخل شیل	انحراف سرعت -۴۰۰، ۱۰۰ m/s میانگین -۱۰۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۹٪ میانگین تراوایی، صفر mD	
	زیر کلاس ۶ شکستگی	انحراف سرعت -۵۰۰، -۱۰۰۰ m/s میانگین -۸۰۰ m/s	میانگین تخلخل ۰.۷٪ میانگین تراوایی ۲۸۹ mD	

شکل ۱ طبقه بندی انواع منافذ در مخزن آسماری به ۳ رده و ۸ زیررده که ۶ زیررده مربوط به بخش کربناته و ۲ زیررده مربوط به بخش آواری می‌باشد. اساس این طبقه‌بندی نگار انحراف سرعت و رفتار الاستیک سنگ است که مقدار میانگین تخلخل و تراوایی نیز در هر یک از زیررده‌ها مشخص شده است.

نوع ثانویه آن رایج تر است. از نظر اندازه سه نوع تخلخل بین بلوری وجود دارد: ریز تخلخل بین ۱۰ تا ۲۰ μm ، مزوتخلخل بین ۲۰ تا ۶۰ μm و ماکرو تخلخل بیش از ۶۰ μm [۳]. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۵۰ تا ۲۰۰ m/s و میانگین m/s ۲۵۰ می‌باشد. زیررده IV (بین دانه‌ای): این نوع تخلخل در بخش آواری سازند آسماری وجود دارد، که در بین دانه‌های ماسه‌سنگ به صورت اولیه دیده می‌شود. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۱۰۰ تا ۴۰۰ m/s و میانگین m/s ۲۰۰ می‌باشد. زیررده V (ریز تخلخل شیل): این تخلخل در رخساره شیلی با شعاع منافذ حدود ۰/۰۵ تا ۵ μm دیده شده است. مقدار انحراف سرعت در این زیر رده از ۴۰۰- تا ۱۰۰ و میانگین m/s ۱۰۰ می‌باشد. رده III^۳ تنها دارای یک زیر رده می‌باشد. زیررده I (شکستگی): شکستگی درون سنگ به شدت رفتار الاستک سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد و یک انحراف منفی شدید در نگار انحراف سرعت ایجاد می‌کند. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰ m/s و میانگین m/s ۸۰۰ می‌باشد. نگار انحراف سرعت به طور پیوسته در کل چاه با استفاده از محدوده‌های مشخص شده می‌تواند نوع منافذ سنگ را براساس رفتار الاستیک‌شان شناسایی نماید. پس از شناسایی انواع منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت هر یک از انواع منافذ نیز توسط مقاطع نازک در عمق‌های معادل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. تطابق گرافیکی نگار VDL و پتروگرافی مغزه در شکل ۲ نشان داده شده است. این نگار با ضریب همبستگی متقابل^۴ ۸۸/۷۳٪ قادر به شناسایی ۸ زیررده منفذی شده است (شکل ۲).

رده I^۱ دارای دو زیر رده است که به ترتیب: زیررده I (درون ذره‌ای): تخلخل درون ذره‌ای ممکن است درون دانه‌ای یا درون فسیلی، به صورت اولیه یا ثانویه باشد که در اثر انحلال مواد ارگانیکی درون اسکلت کربناته ایجاد می‌شود. بنابراین اکثر تخلخل‌های درون فسیلی توسط دیواره اولیه خود محدود می‌شوند. مقدار انحراف سرعت در این زیر رده از ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ و میانگین m/s ۱۲۰۰ می‌باشد. زیررده II (انحلالی، قالبی یا حفره‌ای): تخلخل‌های قالبی در اثر بلوری شدن کامل یا بخشی دانه‌ها یا بلورها، به صورت ثانویه تشکیل می‌شوند که دارای یک مرز مشخص بین منفذ و سیمان یا ماتریکس اطراف دارد [۳]. تخلخل‌های حفره‌ای نیز در شکل و اندازه‌های متفاوتی به صورت انحلال در بخشی از دانه، سیمان و یا ماتریکس به صورت ثانویه تشکیل می‌شود. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۶۰۰ تا ۱۴۰۰ m/s و میانگین m/s ۷۵۰ می‌باشد. رده II^۲ دارای پنج زیررده می‌باشد که به ترتیب: زیررده I (ریز تخلخل): ریزتخلخل شامل تخلخل‌های زیر ۱۰ μm می‌باشد [۳]. این نوع منافذ ممکن است به صورت بین دانه‌ای ریز یا بین بلوری ریز در گل سنگ‌ها باشند. مقدار انحراف سرعت در این زیررده از ۴۰۰ تا ۴۰۰ و میانگین m/s ۴۰ است. زیررده III (بین ذره‌ای): تخلخل بین ذره‌ای فضای بین ذره‌ها را شامل می‌شود. این نوع منافذ معمولاً اولیه محسوب می‌شوند ولی گاهی در اثر انحلال ماتریکس یا سیمان به صورت ثانویه هم تشکیل می‌شوند. از نظر اندازه سه نوع تخلخل بین ذره‌ای وجود دارد: ریزتخلخل بین ۱۰ تا ۵۰ μm ، مزوتخلخل بین ۵۰ تا ۱۰۰ μm و ماکرو تخلخل بیش از ۱۰۰ μm [۳]. در این مطالعه بیشتر منافذ بین ذره‌ای از نوع مزوتخلخل بوده‌اند. مقدار انحراف سرعت در این زیر رده از ۴۵۰ تا ۲۰۰ m/s و میانگین m/s ۲۵۰ می‌باشد. زیررده III (تخلخل بین بلوری) این نوع تخلخل به صورت اولیه یا ثانویه در بین بلورها شکل می‌گیرد که

1. Stiff Pores
2. Reference Pores
3. Cracks
4. Cross Correlation



شکل ۲ تطابق گرافیکی بین ۸ زیررده منفذی از نگار VDL و مقاطع نازک میکروسکوپی. تعداد نمونه‌های مغایر با رده منفذی مغزه نیز مشخص شده است. بیشترین نرخ مغایرت در رده ۳، ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. کل نمونه: ۹۵۰؛ نمونه‌های مغایر: ۱۰۷؛ تطابق ۸۸/۷۳٪.

۲ واحد جریان‌ی در بخش آواری براساس نوع منافذ قالب شناسایی شدند (شکل ۳) که واحد جریان‌ی ۱ و ۲ هم در بخش کربناته و هم آواری زون‌های اصلی مخزنی را تشکیل می‌دهند که تحت کنترل منافذ نوع شکستگی، بین ذره‌ای، بین‌بلوری و بین دانه‌ای می‌باشند. واحدهای جریان‌ی ۳ و ۴ دارای کیفیت مخزنی پایین یا فاقد ارزش مخزنی بوده که غالباً تحت کنترل منافذ نوع ریزتخلخل، قالبی و حفره‌ای می‌باشند.

مدل‌سازی سه‌بعدی انواع منافذ با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای

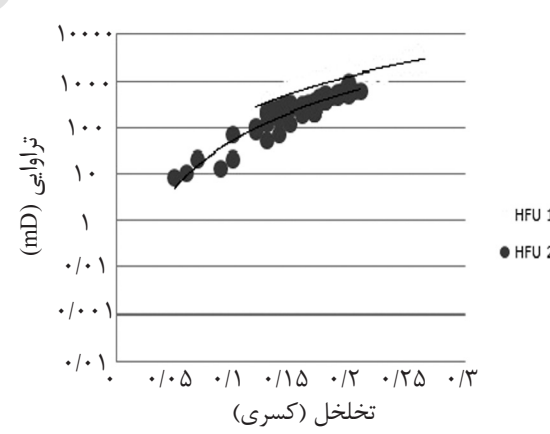
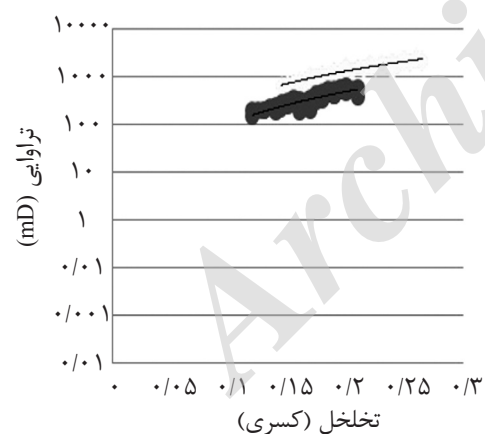
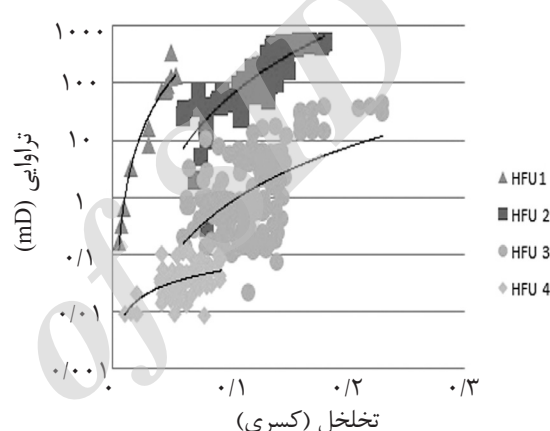
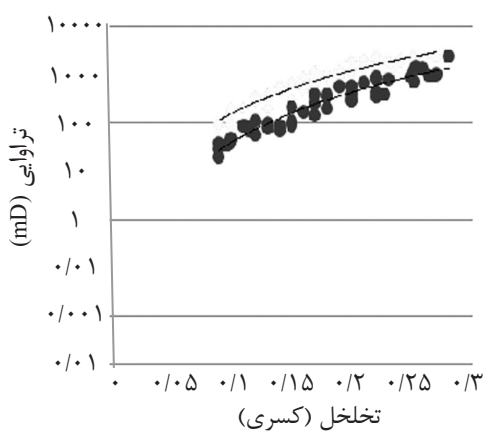
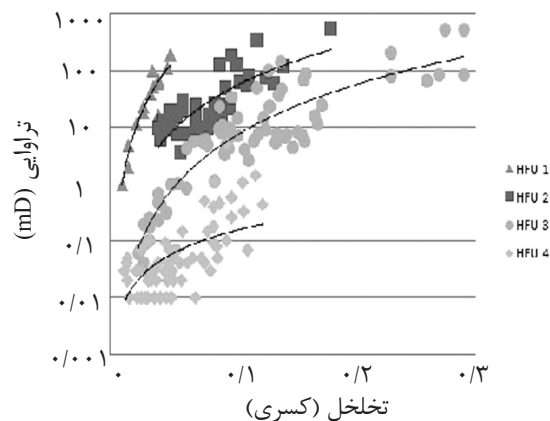
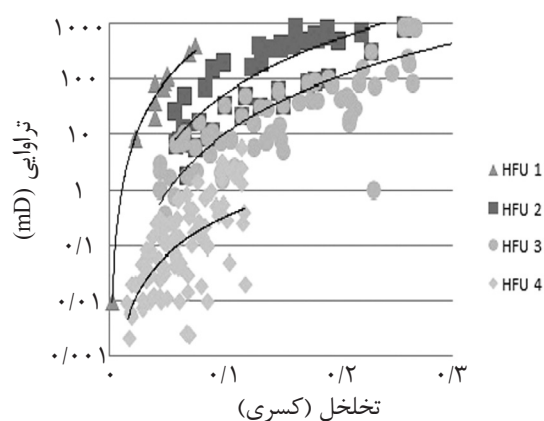
بسیاری از مطالعات نشان داده که رفتار ارتعاشی سنگ‌های رسوبی وابسته به عواملی مانند نوع و شکل منفذ، تخلخل، سیال منفذی و اشباع شدگی است اما نوع فضاهای خالی در سنگ‌های کربناته به‌شدت بر روی رفتار ارتعاشی سنگ اثر می‌گذارد [۶]. نشانگر لرزه‌ای در واقع هر کمیت به‌دست آمده از داده‌های لرزه‌ای با استفاده از اندازه‌گیری زمان، دامنه، فرکانس، میرایی و یا هر ترکیبی از اینها، خواه با اندازه‌گیری مستقیم و یا با استدلال منطقی یا مبتنی بر تجربه باشد [۷].

تعیین واحد جریان‌ی^۱ وابسته به نوع منافذ

مجزا کردن واحدهای مخزنی مانند لایه‌ها یا بلوک‌ها و تعیین یک‌سری از پارامترهای فیزیکی ثابت در این واحدها موجب درک صحیح‌تری از ناهمگونی مخزن می‌شود. نوع منافذ و اندازه گلوگاه‌ها جزء اولین پارامترهای کنترل‌کننده جریان سیال در فضای متخلخل می‌باشد. به‌عبارتی می‌توان گفت تنوع واحدهای جریان‌ی و عملکرد مخزن بستگی به توزیع نوع منافذ در واحدهای مخزنی دارد. مفهوم واحد جریان‌ی در واقع براساس ویژگی‌های پتروفیزیکی، مخزن به واحدهایی تقسیم می‌شود که هر کدام دارای یک مقدار معین از شاخص زون جریان است [۴]. واحد جریان‌ی در تعریف بیان‌کننده حجم قابل نقشه برداری از مخزن است که دارای مشخصات منفذی مشابه و دارای ویژگی پتروفیزیکی و زمین‌شناسی مختص به خود است [۵].

به‌طور ایده‌آل، با پلات کردن تراوایی در مقابل تخلخل نمونه‌هایی که مقادیر یکسان FZI^۲ دارند اطراف خط منحنی با شیب یکسان قرار می‌گیرند. در حقیقت داده‌هایی که اطراف یک منحنی قرار می‌گیرند دارای خصوصیات منفذی مشابهی می‌باشند که یک واحد جریان‌ی را تشکیل می‌دهند. در این مطالعه ۴ واحد جریان‌ی در بخش کربناته و

1. Hydraulic Flow Unit (HFU)
2. Flow Zone Index (FZI)



رخسره	واحد جریانی	شاخص زون جریانی	انواع منافذ غالب
کربناته	۱	۲۲/۵-۳۲	شکستگی
	۲	۴-۱۲	بین ذره‌ای و بین بلوری
	۳	۲-۶	درون ذره‌ای و قالبی
	۴	۰/۰۵-۲	ریز تخلخل

رخسره	واحد جریانی	شاخص زون جریانی	انواع منافذ غالب
آواری	۱	۷/۵-۱۲/۵	بین دانه‌ای (ماسه متوسط دانه)
	۲	۴-۷/۵	بین دانه‌ای (ماسه ریز دانه)

شکل ۳ توزیع انواع منافذ در چارچوب واحدهای جریانی در سه چاه مطالعاتی مخزن آسماری (ردیف بالا کربناته و ردیف پایین آواری). HFU ۱ و ۲ غالباً تحت کنترل منافذ نوع شکستگی، بین ذره‌ای، بین بلوری و بین دانه‌ای می‌باشند که زون‌های مخزنی را تشکیل می‌دهند. HFU ۳ و ۴ غالباً تحت کنترل منافذ نوع ریزتخلخل، قالبی و حفره‌ای می‌باشند که زون‌های غیر مخزنی را تشکیل می‌دهند.

۵) دستیابی به حجم سه بعدی شبه‌نگار VDL و ارائه مدل سه‌بعدی از انواع منافذ در میدان مورد مطالعه

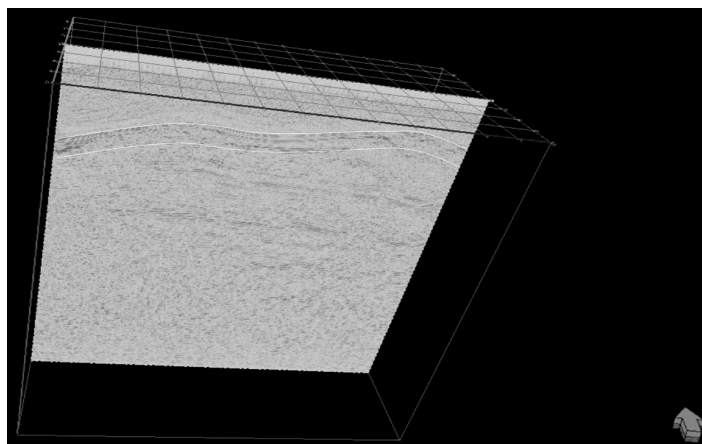
در این مطالعه نگارهای پتروفیزیکی از ۳ چاه و داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش سه‌بعدی با کیفیت بالا در سازند آسماری (حد فاصل افق‌های لرزه‌ای آسماری و پابده) مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۴).

برگردان امیدانس صوتی

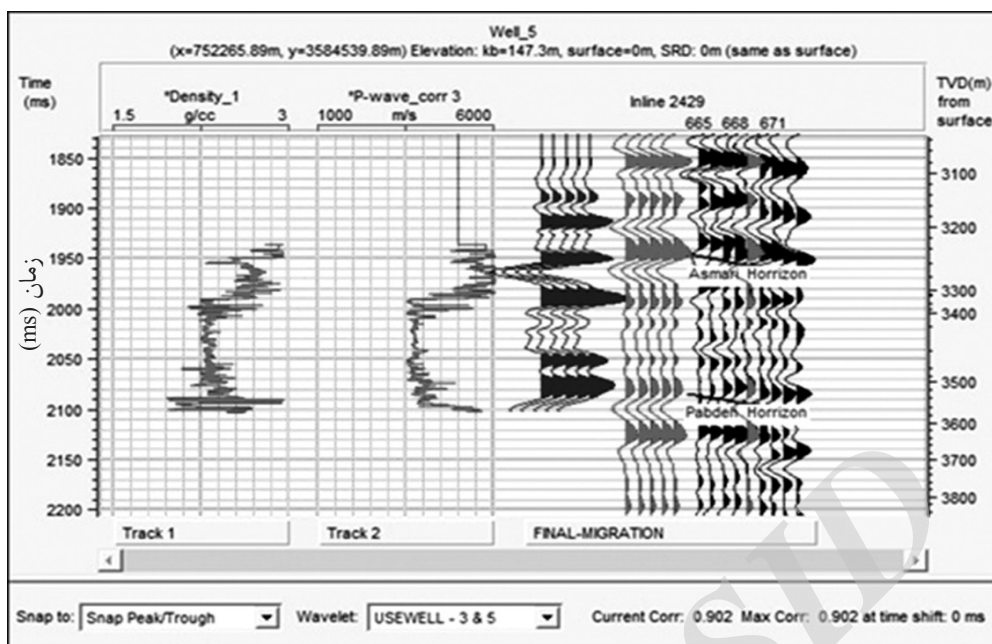
برگردان لرزه‌ای روشی مؤثر و مرسوم برای تفسیر خصوصیات مخزن می‌باشد [۷]. در مرحله اول، بین نگار چاه‌پیمایی با داده‌های لرزه‌ای از طریق نگاشت لرزه‌ای مصنوعی ارتباط برقرار می‌شود سپس می‌توان به‌عنوان هم‌آمیخت موجک لرزه‌ای و ضریب بازتاب بیان نمود. موجک لرزه‌ای از طریق روش آماري چند رد لرزه‌ای، و ضریب بازتاب از طریق داده‌های نگارهای صوتی (ضرب سرعت صوتی در مقدار چگالی کل) به‌دست می‌آیند. در این روش نگارها ابتدا باید از عمق به زمان تبدیل شوند برای این تبدیل نگارهای چاه‌پیمایی توسط اعمال داده‌های شوت کنترل که برای چاه‌های ۳ و ۵ وجود داشت، انجام پذیرفت. در ادامه ایجاد لرزه نگاشت مصنوعی و استخراج موجک به‌صورت مکرر، برای قرارگیری دقیق‌تر داده‌های نگار چاه‌پیمایی در بازه زمان لازم است (شکل ۵).

از این رو نشانگرهای لرزه‌ای ابزار معتبر جهت توصیف مخزن و سایر ویژگی‌های آن مانند نوع منافذ می‌باشند. نگار انحراف سرعت یکی از نگارهایی است که می‌تواند به‌صورت پیوسته نوع منافذ را در محل چاه‌ها اندازه‌گیری کند که در بخش‌های قبلی به‌طور کامل در مورد آنها شرح داده شد. نگارهای چاه‌پیمایی تنها می‌توانند خصوصیات سازند را در محل چاه ارزیابی کنند اما برای درک توزیع منافذ در مقیاس میدانی با استفاده از چند چاه مشکل می‌باشد. حتی در میدانی با تراکم بالای حفاری و داده‌های مغزه و نگار چاه‌پیمایی، ارزیابی انواع منافذ میان چاه‌ها و واحدهای مخزنی کاری چالش برانگیز است. از این رو داده‌های لرزه‌ای با کیفیت خوب به‌عنوان روشی مطلوب جهت ارزیابی انواع منافذ با رویکردی ژئوفیزیکی در مقیاس میدانی، به‌کار گرفته می‌شوند. هدف ما در این بخش ساخت مدلی سه بعدی از انواع منافذ در مقیاس میدانی می‌باشد که مراحل آن عبارتند از:

- ۱) ارزیابی نگار انحراف سرعت به‌منظور شناسایی انواع منافذ در محل چاه
- ۲) تطابق نگارهای صوتی و چگالی با رد لرزه‌ها با هدف به‌دست آوردن موجک
- ۳) داده‌های لرزه‌ای سه بعدی جهت برگردان حجم امیدانس صوتی
- ۴) تخمین VDL توسط روش‌های آنالیز نشانگرهای چندگانه



شکل ۴ نمای سه بعدی یکی از خطوط لرزه‌ای به‌همراه افق مورد مطالعه.



شکل ۵ پنجره‌ای از ارتباط دادن داده لرزه‌ای (گره زدن) به وسیله لرزه نگاشت مصنوعی در چاه شماره ۵.

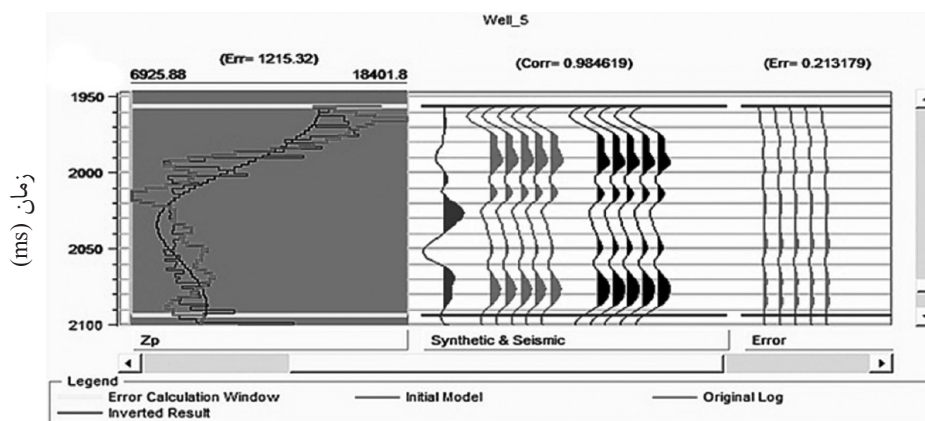
تعمیم یافته به‌طور کارآمد در برگردان داده‌های لرزه‌ای استفاده شد. مدل اولیه برگردان توسط درون‌یابی و برون‌یابی داده‌های نگار چاه‌پیمایی در حجم سه بعدی لرزه‌ای ساخته شده است. پس از برگردان، مکعبی از امپدانس صوتی باند محدود به‌دست می‌آید که یکی از مهم‌ترین نشانگرها برای توصیف خصوصیات مخزن می‌باشد (شکل ۷).

انتخاب نشانگرهای لرزه‌ای بهینه

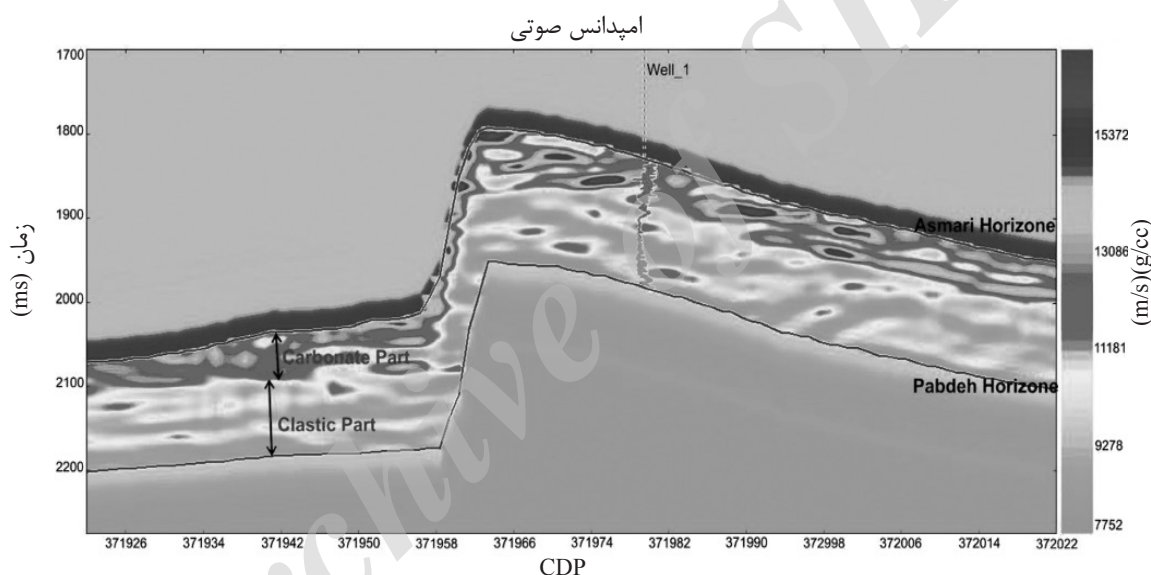
به‌طور کلی، هدف از استفاده چندین مدل آماری و هوشمند، پیدا کردن روابط خطی و غیر خطی و ساختارهای بین داده‌های ورودی و خروجی می‌باشد. به این منظور، بایستی ارتباطی منطقی میان ورودی و پارامتر هدف وجود داشته باشد. پژوهش‌ها نشان داده که روابط فیزیکی نزدیک‌تری بین داده‌های ورودی (نشانگرهای لرزه‌ای) و داده‌های خروجی (پارامترهای پتروفیزیکی) با استفاده از کاربرد آنالیز رگرسیون چندمتغیره می‌توان ایجاد کرد [۸]. مکعب امپدانس صوتی به‌دست آمده از بخش قبل یک نشانگر مهم است، همچنین نشانگرهای دیگر از داده‌های لرزه‌ای برای پیدا کردن بهترین ارتباط جهت برآورد انواع منافذ استخراج می‌شوند.

موجک فرآیند تطبیق نگارهای چاه‌پیمایی، تطابق عارضه‌ها روی رد لرزه‌های مصنوعی و سرسازندهای همراه را با داده‌های لرزه‌ای در بازه زمان امکان‌پذیر می‌سازد.

در این مطالعه از روش برگردان مبتنی بر مدل، یک الگوریتم برگردان خطی تعمیم‌یافته استفاده شده است. در این روش برای هر رد لرزه، یک لرزه نگاشت مصنوعی توسط امپدانس تخمینی ابتدایی و موجک مذکور برآورد می‌شود. در طی برگردان، امپدانس تدریجاً تغییر می‌کند تا رد لرزه مصنوعی حاصل به تدریج به حدی که تطابق آن با رد لرزه واقعی قابل پذیرش باشد، دست یابد. برای این منظور عملگر کنترل می‌کند که الگوریتم تا چه اندازه می‌تواند به‌منظور مطابقت با داده‌های واقعی از فرض اولیه فاصله گیرد. در این مطالعه، تطابق میان لرزه نگاشت مصنوعی و رد لرزه مرکب در محل چاه‌ها با ضریب همبستگی متقابل حدود ۹۸٪ انجام گرفت که شکل ۶ در چاه شماره ۵ میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد و آرون‌سازی از لحاظ ریاضی به خوبی انجام شده است. بنابراین روش برگردان مبتنی بر مدل با الگوریتم برگردان خطی



شکل ۶ آنالیز برگردان در محل چاه شماره ۵. به ترتیب از چپ به راست: امپدانس اصلی، مدل فرضی اولیه و حاصل از برگردان؛ ردلرزه‌های مصنوعی برآورد شده از نتیجه برگردان رادر مقایسه با ردلرزه‌های ورودی؛ و در قسمت سمت راست خطایی که اختلاف میان دو مجموعه ردلرزه‌های قبلی است.



شکل ۷ مقطعی از امپدانس صوتی وارون‌سازی شده از سازند آسماری در میدان مورد مطالعه.

نشانگر میان نشانگرهای لرزه‌ای مختلف، یکی از مهم‌ترین مراحل در تخمین نگار هدف (انحراف سرعت) می‌باشد. در این بخش اولین نشانگری که نماینده تخمین انواع منافذ است، مربع امپدانس صوتی می‌باشد. این مرحله به نوعی غربالگری در نشانگرها محسوب می‌شود لذا برای انتخاب نشانگر بهینه از آنالیز چند نشانگری استفاده می‌کنیم.

برآورد انواع منافذ توسط آنالیز چند نشانگری

امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای به‌عنوان نشانگر خارجی به‌همراه دیگر نشانگرهای داخلی جهت ساخت ترکیبی بهینه از

علاوه‌براین برای پیدا کردن نشانگرهای بهینه در برآورد انواع منافذ، آنالیز تک نشانگری، چندنشانگری و شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفت. در طول فرآیند تخمین، نشانگرهای لرزه‌ای به‌جای داده‌های لرزه‌ای خام استفاده شده است. زیرا نشانگرهای لرزه‌ای دارای توانایی بالاتری در برآورد ارتباط غیرخطی میان داده‌های لرزه‌ای و پارامتر هدف در کنار توانایی بالاتر آنها جهت تشخیص الگوها می‌باشند.

برآورد انواع منافذ توسط آنالیز تک نشانگری

در بخش آنالیز تک نشانگری، انتخاب بهترین

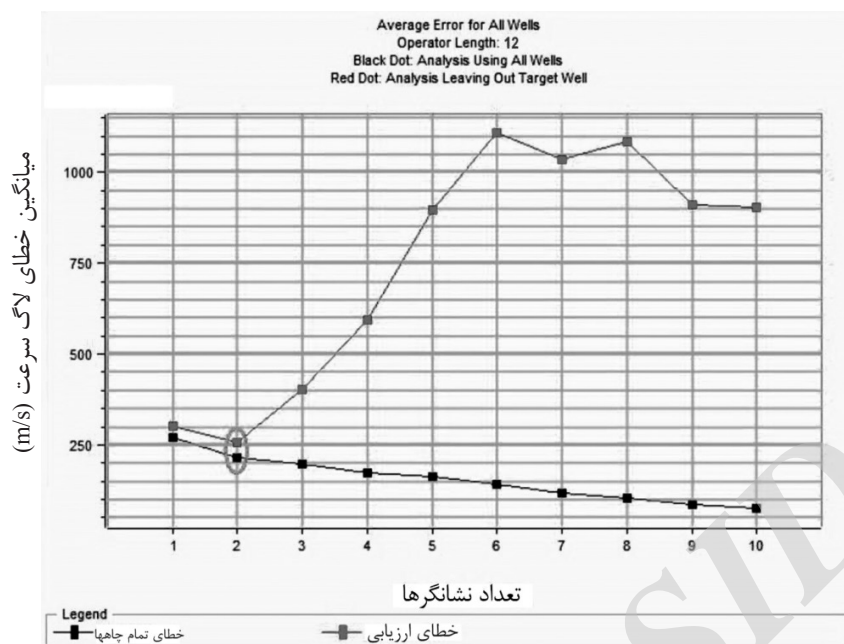
مقابل مقادیر واقعی پارامتر هدف در محل چاه‌های مطالعاتی نشان داده شده است. در جدول حاصل از رگرسیون مرحله‌ای برای تخمین نگار هدف، مشاهده می‌کنیم که پس از نشانگر شماره ۲ مقدار خطا در مرحله ارزیابی افزایش می‌یابد، پس ترکیب ۲ نشانگری بهینه می‌باشد. جدول ۱ (جدول چند نشانگری) ترکیبی از ۱۰ نشانگر را نشان می‌دهد. ۲ نشانگر بهینه شامل مربع نتیجه برگردان لرزه‌ای و فیلتر ۱۵/۲۰-۲۵/۳۰ می‌باشد که نشانگر فیلتر ۱۵/۲۰-۲۵/۳۰ (Filter ۲۰/۱۵-۳۰/۲۵) بیش‌ترین همبستگی و کم‌ترین خطا در مرحله ارزیابی را دارد (جدول ۱).

کاربرد شبکه‌های عصبی جهت برآورد انواع منافذ

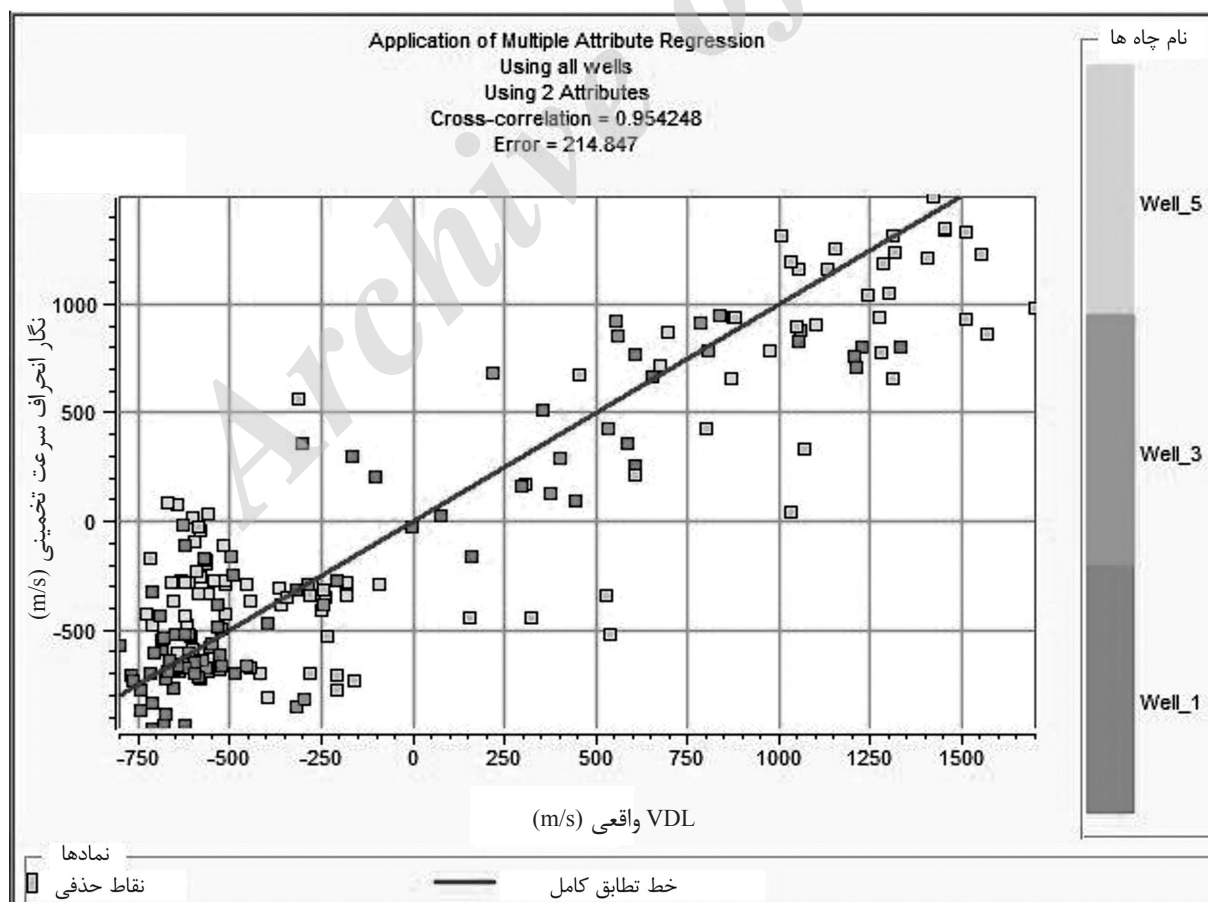
در این بخش، هدف از اعمال شبکه عصبی دست‌یابی احتمالی به ارتباط بهتر میان داده‌های ورودی (نشانگرهای لرزه‌ای) و داده‌های خروجی (نگار هدف) می‌باشد. شبکه‌های عصبی در این مطالعه را می‌توان به سه الگوریتم تفکیک نمود: احتمالی، پیش‌خور چندلایه و تابع پایه شعاعی.

در هر سه الگوریتم، ترکیب بهینه نشانگرها از برآورد تبدیل چند نشانگری پیشین مورد استفاده قرار گرفت (ترکیب دو نشانگری مربع نتیجه برگردان لرزه‌ای و فیلتر ۱۵/۲۰-۲۵/۳۰). پس از بررسی نتایج تخمین توسط سه الگوریتم مذکور، شبکه عصبی احتمالی با همبستگی ۰/۹۷ و خطای ۳۷ s/m در مرحله آموزش و همبستگی ۰/۹۲ و خطای ۶۵ s/m در مرحله ارزیابی، قوی‌ترین رابطه را جهت برآورد انواع منافذ برآورد نمود (جدول ۲). با توجه به رابطه پیچیده و غیرخطی میان نشانگرهای لرزه‌ای و پارامتر هدف، ماهیت غیرخطی شبکه عصبی، شباهت زیاد بین نگار تخمینی و واقعی را در محل چاه‌ها سبب می‌شود. در این مطالعه، نهایتاً شبکه عصبی احتمالی به دلیل همبستگی بالا و خطای پایین در مرحله ارزیابی تخمین پارامتر هدف، جهت برآورد مدل سه‌بعدی انواع منافذ انتخاب گردید.

نشانگرهای لرزه‌ای برای تخمین انواع منافذ مورد استفاده قرار می‌گیرد. خطای تخمین در مدل سه‌بعدی با ایجاد رابطه منطقی میان نشانگرهای لرزه‌ای و پارامتر هدف در محل چاه‌ها، کاهش می‌یابد. برای ایجاد رابطه منطقی بین داده‌های ورودی (نشانگرهای لرزه‌ای) و داده‌های خروجی (نگار انحراف سرعت) و انتخاب ترکیبی بهینه از نشانگرها، روش‌های هوشمند و آماری استفاده شده است. جهت تخمین نگار هدف، نیاز به استفاده گروهی از نشانگرها به صورت هم‌زمان می‌باشد. در روش رگرسیون چند نشانگری، از میان همه نشانگرهای لرزه‌ای موجود، اولین نشانگر براساس خطای میانگین پایین‌تر و همبستگی بالاتر با نگار هدف انتخاب می‌شود که توسط روش رگرسیون مرحله‌ای انجام می‌گیرد. در رگرسیون مرحله‌ای، ابتدا بهینه‌ترین نشانگر که دارای کم‌ترین خطای تخمین پارامتر هدف است، تعیین می‌شود. مرحله بعد انتخاب ترکیبی دو نشانگری با استفاده از نشانگر بهینه می‌باشد که دارای کم‌ترین خطای تخمین در مرحله آموزش می‌باشد. سپس در هر مرحله، نشانگری به ترکیب مرحله قبل اضافه می‌شود به طوری که ترکیب جدید کمترین خطای تخمین آموزش را نتیجه دهد. بر این اساس، ترکیب نشانگرها که به صورت افزایش در تعداد آن‌ها و کاهش در خطای تخمین پارامتر هدف (مرحله آموزش) می‌باشد در جدولی لیست می‌شوند (جدول ۱). بر خلاف خطای تخمین در مرحله آموزش که با افزایش تعداد نشانگرها کاهش می‌یابد، خطا در مرحله ارزیابی تا رسیدن به ترکیبی خاص که همان ترکیب بهینه نشانگرها در تخمین پارامتر هدف می‌باشد، کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده در این پژوهش تا ترکیب ۲ نشانگر خطا کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد که ترکیب ۲ نشانگر برای تخمین نگار هدف مناسب می‌باشد. همچنین در شکل ۹ نیز نمودار مقاطع مقادیر تخمین پارامتر هدف در



شکل ۸ نتیجه رگرسیون مرحله‌ای گرافیکی برای تخمین نگار هدف: منحنی پایین خطای تخمین و منحنی بالا خطای ارزیابی را در برابر عدد نشانگرها نشان می‌دهد که با توجه به شکل ۲ نشانگر اول بهینه می‌باشد.



شکل ۹ نمودار متقاطع نگار هدف واقعی در مقابل مقادیر تخمینی همان نگار با استفاده از روش چند نشانگری در محل چاه‌های مطالعاتی.

جدول ۱ جدول چند نشاگری که ترکیب ۱۰ نشانگر را برای تخمین نگار هدف نشان می‌دهد. ترکیب ۲ نشانگر دارای بیشترین مقدار تطابق در مرحله ارزیابی می‌باشد.

شماره	هدف	آخرین نشانگر	آموزش		ارزیابی	
			تطابق	خطا	تطابق	خطا
۱	(VDL) Log	(Inversion Result)**2	۰/۹۲	۲۷۲/۲	۰/۹۰	۳۰۰/۶
۲	(VDL) Log	Filter 15/20-25/30	۰/۹۵	۲۱۴/۸	۰/۹۳	۲۵۵/۹
۳	(VDL) Log	Apparent Polarity	۰/۹۶	۱۹۶/۰	۰/۸۳	۴۰۲/۴
۴	(VDL) Log	Integrated Absolute Amplitude	۰/۹۶	۱۷۴/۸	۰/۶۱	۵۹۵/۷
۵	(VDL) Log	Instantaneous Frequency	۰/۹۷	۱۶۱/۲	۰/۳۰	۸۹۷/۹
۶	(VDL) Log	Second Derivative Instantaneous Amplitude	۰/۹۸	۱۴۱/۳	۰/۱۳	۱۱۰۹/۴
۷	(VDL) Log	Cosine Instantaneous Phase	۰/۹۸	۱۱۷/۶	۰/۳۴	۱۰۳۶/۸
۸	(VDL) Log	Instantaneous Phase	۰/۹۸	۱۰۲/۶	۰/۳۸	۱۰۸۲/۸
۹	(VDL) Log	Amplitude Weighted Phase	۰/۹۹	۸۴/۷	۰/۴۸	۹۱۰/۴
۱۰	(VDL) Log	Filter 55/60-65/70	۰/۹۹	۷۵/۴	۰/۴۷	۹۰۴/۲

جدول ۲ شبکه عصبی احتمالی با بالاترین مقادیر تطابق و کم‌ترین خطا در آموزش و ارزیابی پیش‌بینی نگار هدف از نشانگرهای لرزه‌ای.

شبکه	نوع	نشانگر نهایی	آموزش		ارزیابی	
			تطابق	خطا	تطابق	خطا
	PNN	۳۰/۲۵-۲۰/۱۵ Filter	۰/۹۷	۳۷/۳	۰/۹۲	۶۵/۰

براساس محدوده‌های نگار انحراف سرعت به ۳ رده (مثبت، صفر و منفی) و ۶ زیررده در بخش کرناتنه و ۲ زیررده در بخش آواری به ترتیب: درون ذره‌ای (درون فسیلی)، قالبی یا حفره‌ای، ریزتخلخل، بین ذره‌ای، بین بلوری و شکستگی در رخساره‌های کرناتنه، و همچنین بین دانه‌ای و ریزتخلخل شیل در رخساره آواری تقسیم شده‌اند (شکل ۱). پس از تعیین منافذ به‌طور پیوسته در امتداد چاه‌های مطالعاتی انواع منافذ با مقاطع نازک میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده مقایسه شده که با تطابق ۸۸/۷۳٪ نگار انحراف سرعت قادر به تفکیک و شناسایی ۸ زیررده منفذی شده است.

مطالعه انواع منافذ در چارچوب واحد جریانی در درک بهتر کیفیت مخزنی و رفتار دینامیکی منافذ کمک بسیاری می‌کند. به همین منظور مقادیر FZI

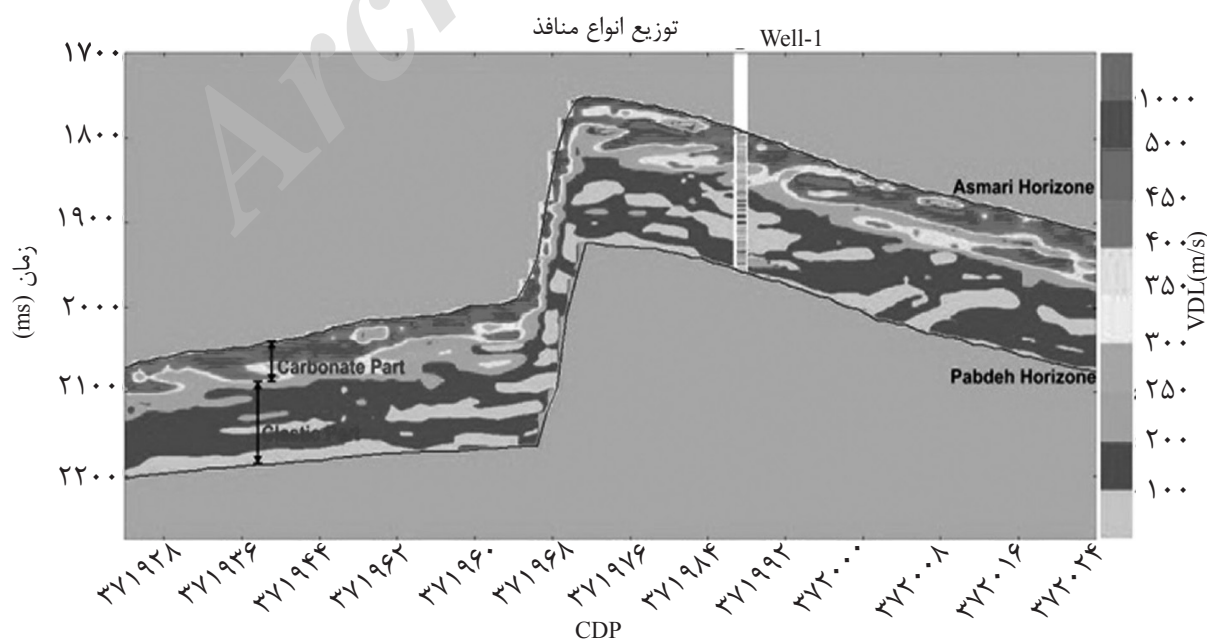
بحث و نتایج

سازند آسماری در میدان مورد مطالعه از نظر نوع منافذ بسیار متنوع می‌باشد و با درک صحیح از توزیع منافذ مدل استاتیک و دینامیک مخزن در میدان نیز به‌طور دقیق‌تر ارائه خواهد شد [۸]. به‌طور معمول در تعیین نوع منافذ از داده مغزه و در واحدهای محدودی از چاه که مغزه‌گیری شده است به‌منظور مطالعه استفاده می‌کنند ولی در این مطالعه انواع منافذ به‌طور پیوسته در کل ضخامت سازند (مخزن) آسماری در محل ۳ چاه شناسایی شدند. خصوصیت پیوسته بودن در امتداد چاه و دارا بودن ماهیت نگار در تعیین نوع منافذ امکان ایجاد ارتباط با نشانگرهای لرزه‌ای را فراهم نموده که به همین دلیل می‌توان نتایج در سرتاسر میدان مورد مطالعه تعمیم داد. در این مطالعه منافذ

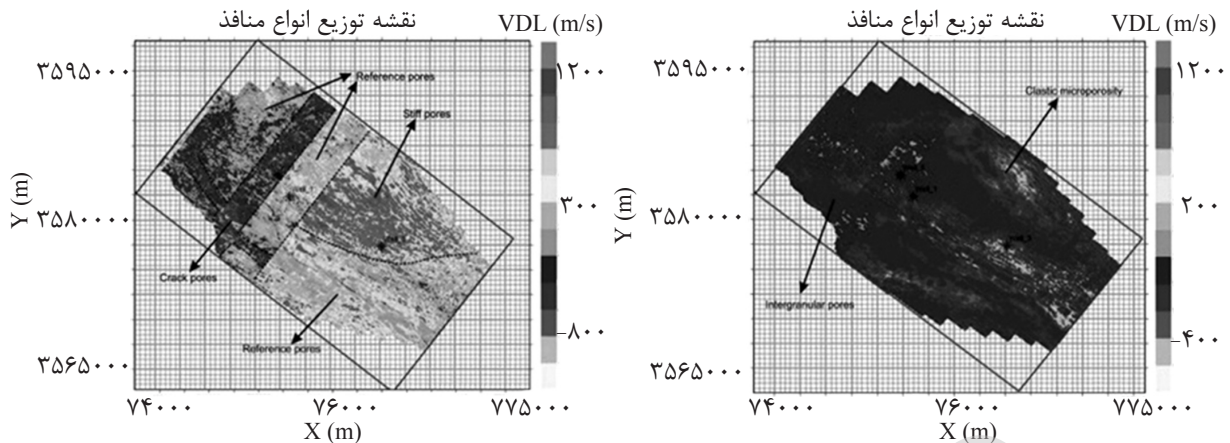
همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در بخش بالایی سازند (بخش کربناته) توزیع و تنوع ۶ نوع منافذ (درون ذره‌ای، قالبی یا حفره‌ای، ریز تخلخل، بین ذره‌ای، بین بلوری و شکستگی) نشان داده شده است و در بخش پایینی سازند (بخش آواری) تنوع منافذ تنها به دو نوع بین دانه‌ای و ریزتخلخل شیل محدود می‌باشند (شکل ۱۰). شکل ۱۱ الف نقشه میانگین 30 m/s زیر افق آسماری است که تنوع و توزیع منافذ در بخش کربناته را نشان می‌دهد و شکل ۱۱ ب نقشه میانگین 60 m/s بالا افق پابده است که تنوع و توزیع منافذ در بخش آواری را نشان می‌دهد. اسلایس‌ها به خوبی تنوع زیاد منافذ در بخش کربناته و کاهش آن در بخش آواری را نشان می‌دهند. در واقع طبقه‌بندی منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت دارای دو مزیت است: (۱) انواع منافذ به‌طور پیوسته در امتداد چاه شناسایی و طبقه‌بندی می‌شود؛ (۲) این نوع طبقه‌بندی را می‌توان به داده لرزه‌ای ارتباط داد و درک بیشتری از نحوه توزیع منافذ در مقیاس میدانی به‌دست آورد.

در ۴ گروه منفذی در بخش کربناته و ۲ گروه منفذی در بخش آواری مخزن مورد مطالعه تعیین شدند (شکل ۳). بر این اساس HFU1 و HFU2 که غالباً تحت کنترل منافذ نوع شکستگی در رخساره مادستونی / وکستونی، بین ذره‌ای در رخساره گرین استونی، بین‌بلوری در رخساره دولستونی و بین دانه‌ای در رخساره‌های ماسه سنگی بودند. همچنین این ۲ واحد جریان‌ی زون‌های مخزنی را تشکیل داده و HFU3 و HFU4 که تحت کنترل منافذ نوع ریزتخلخل در رخساره مادستونی، قالبی و حفره‌ای در رخساره پکستونی و ندرتا وکستونی بودند زون‌های غیر مخزنی را تشکیل داده‌اند.

به‌منظور ارائه مدل سه بعدی از انواع منافذ پس از وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای با تطابق ۹۸٪ و انتخاب نشانگر مناسب، نگار انحراف سرعت در مقیاس میدانی تخمین زده شد. سازند آسماری در میدان مورد مطالعه به‌صورت مختلط کربناته-آواری می‌باشد که بخش پایینی سازند آواری و بخش بالایی آن کربناته می‌باشد. شکل ۱۰ نشان‌دهنده یک مقطع عرضی از توزیع انواع منافذ در سازند آسماری می‌باشد.



شکل ۱۰ مقطع عرضی از توزیع انواع منافذ با استفاده از نگار انحراف سرعت در مخزن آسماری. در بخش کربناته توزیع ۶ رده منفذی و در بخش آواری توزیع ۲ رده منفذی دیده می‌شود.



شکل ۱۱ الف) نقشه توزیع انواع منافذ با پنجره میانگین ۳۰ ms زیر افق آسماری (بخش کربناته سازند). نقشه فراوانی منافذ نوع قالبی و حفره‌ای در بلوک مرکزی و متمایل به شمال، منافذ نوع بین‌بلوری، بین‌ذره‌ای، ریزتخلخل و شکستگی در بلوک غربی میدان و منافذ نوع ریزتخلخل و بین‌بلوری (میکرو و مزو) در بلوک جنوبی و جنوب شرق نشان می‌دهد. ب) نقشه توزیع انواع منافذ با پنجره میانگین ۶۰ ms در بالا افق پایده (بخش آواری سازند). فراوانی منافذ نوع ریزتخلخل به سمت غرب کاهش یافته و بین دانه‌ای افزایش می‌یابد.

انحراف سرعت به ۳ رده (مثبت، صفر و منفی) و ۶ زیررده در بخش کربناته و ۲ زیررده در بخش آواری تقسیم شدند. ارزش مخزنی هر یک از انواع منافذ بر اساس شاخص زون جریان بررسی شد که منافذ نوع بین‌ذره‌ای در بخش کربناته و بین دانه‌ای در بخش آواری بیشترین مقدار شاخص زون جریان را داشتند. پس از تعیین منافذ و خصوصیات مخزنی آنها در محل چاه‌ها با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای توزیع رده‌ها و زیررده‌های منفذی نیز در مقیاس میدانی تعیین شدند. با استفاده از نقشه‌های به‌دست آمده می‌توان توزیع هر یک از منافذ را در قسمت‌های مختلف میدان به‌صورت نسبی مشاهده نمود. مدل سه‌بعدی انواع منافذ در پیش‌بینی روندهای تراوایی در میدان نیز کارآمد می‌باشد، زیرا سرعت صوت و تراوایی توسط پارامتر مشابهی مانند نوع منافذ کنترل می‌شوند. زون‌بندی مخزن توسط نوع منافذ قالب نیز می‌تواند نوعی زون‌بندی تراوایی در مخزن باشد. منافذ نوع بین‌ذره‌ای، بین‌بلوری (ماکرو)، بین دانه‌ای و شکستگی زون‌های با تراوایی بالا را نشان می‌دهند و منافذ نوع درون‌ذره‌ای، قالبی و حفره‌ای منفرد و ریزتخلخل زون‌های سدی^۱ یا کم‌تراوا را تشکیل می‌دهند.

نقشه توزیع انواع منافذ در بخش کربناته سازند (شکل ۱۱ الف) فراوانی بیشتر منافذ نوع درون‌ذره‌ای، قالبی و انحلالی را در بلوک مرکزی متمایل به شمال میدان، منافذ ریزتخلخل و بین‌ذره‌ای میکرو تا مزو در بلوک جنوبی میدان، منافذ نوع بین‌ذره‌ای و بین‌بلوری مزو تا ماکرو در بلوک غربی میدان و منافذ نوع شکستگی در بلوک غرب و جنوب غرب میدان فراوان‌تر می‌باشند. همین‌طور نقشه توزیع انواع منافذ در بخش آواری سازند (شکل ۱۱ ب) نشان می‌دهد که از بلوک غرب به سمت شرق از فراوانی منافذ نوع بین دانه‌ای کاسته شده و به فراوانی منافذ نوع ریزتخلخل شیل افزوده می‌شود. نقشه‌های توزیع انواع منافذ با توزیع رخساره‌های کم انرژی و پر انرژی خصوصاً در بخش آواری سازند هم‌خوانی داشته است و همین‌طور تعداد چاه‌های حفاری شده در بلوک مرکزی و غربی به‌دلیل کیفیت مخزنی بیشتر حاصل از منافذ مرتبط نیز بیشتر بوده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه منافذ براساس محدوده‌های نگار

قابلی و انحلالی منفرد^۱ در بلوک میانی و متمایل به شمال میدان در اجرا دقیق تر پروژه های ازدیاد برداشت و اسیدکاری به منظور مرتبط کردن منافذ بخش کربناته اهمیت دارد.

با ایجاد نقشه هایی به فاصله چند متر بر ثانیه از مدل سه بعدی منفذی مخزن در شناسایی زون های تر و به منظور تولید و سوراخ کاری جدار چاه بسیار کارآمد می باشد. از سوی دیگر شناسایی منافذ نوع

مراجع

- [1]. Archie G., "Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical considerations," AAPG, Vol. 36, pp. 278– 298, 1952.
- [2]. Anselmetti F. S. and Eberli G. P., "The velocity-deviation log: A tool to predict pore type and permeability trends in carbonate drill holes from sonic and porosity or density logs," AAPG, 83, Issue 2-3, pp. 450- 466, 1999.
- [3]. Lønøy A., "Making sense of carbonate pore systems," AAPG, Vol. 90, No. 9, pp. 1381–1405, September 2006.
- [4]. Al-ajmi F. A. and Holditch S. A., "Permeability estimation using hydraulic flow units in a central Arabia reservoir," in SPE, Paper No. 63254, 2000.
- [5]. Amaefule J. O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D. G. and Keelan D. K., "Enhanced reservoir description; using core and log data to identify hydraulic flow units and predict permeability in uncored intervals/well," in SPE Annual Conference, Paper No. 2, 1993.
- [6]. Eberli G., Baechle G., Anselmetti F. and Incze M., "Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks," The Leading Edge, Vol. 22, pp. 654-660, 2003.
- [7]. Taner M. T., Scheuelke J. S., O'Doherty R. and Baysal E., "Seismic attributes revisites," in SEG Expanded Abstract, Annual International Meeting, 1994.
- [8]. Hampson D., Schuelke J. and Quirein J., "Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data," Geophysics, Vol. 66, No. 1, pp. 220–236, 2001.

1. Isolated