

## وارون سازی همزمان و توأمان خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک جزیره‌ای موازی

مهدی سعادت دستنایی<sup>۱</sup>، و مجید نبی بیدهندی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۸)

### چکیده

برای وارون سازی خواص پتروفیزیکی، به مدل فیزیک سنگی جهت پیوند زدن خواص پتروفیزیکی زمین به خواص لرزه‌شناسی آن نیاز است. در این پژوهش، از مدل BISQ (Biot Squirt flow) برای وارون سازی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن استفاده شده است. مدل BISQ به طور همزمان هر دو سازوکار بایوت (Biot) و جریان فواره‌ای را دربرمی‌گیرد. جریان فواره‌ای از مهم‌ترین مدل‌های انتشار امواج در محیط‌های متخلخل حاوی سیال است. مدل بایوت، تضعیف موج لرزه‌ای را به حرکت کلی یا موازی سیال نسبت به جهت انتشار موج ارتباط می‌دهد، درحالی‌که مدل جریان فواره‌ای، آن را به حرکت محلی سیال پیوند می‌دهد. علاوه بر مدل فیزیک سنگی، وارون سازی خواص پتروفیزیکی نیازمند یک روش ریاضی است که مسئله بهینه‌سازی حاصل از اختلاف بین داده مشاهده‌ای و داده محاسبه شده از مدل پیشرو را به حداقل برساند. در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک جزیره‌ای موازی (Parallel Niche Genetic Algorithm, PNGA) به دلیل غیرخطی بودن مدل BISQ و نیز قدرت این روش به عنوان یک الگوریتم تکاملی (Evolutionary Algorithm) در مواجهه با مسائل پیچیده، بزرگ‌مقیاس و چندسطحی (multi objective) انتخاب شده است. در PNGA هر هسته به عنوان یک محیط مجزا عمل می‌کند که در آن، گونه‌ها تکامل می‌یابند. پایه این روش براساس دو اصل تکامل سریع و سکون بنا شده است. این روش از همگرایی پیش از موعد (premature convergence) جلوگیری می‌کند و قدرت الگوریتم در فرار از نقاط بهینه محلی را افزایش می‌دهد. در تحقیق حاضر، روش ذکر شده بر داده‌های مصنوعی و واقعی اعمال شد. نتایج وارون سازی، همبستگی مناسبی با مقادیر مفروض (در داده مصنوعی) و نگاه‌ها (در داده واقعی) نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** وارون سازی، الگوریتم ژنتیک، محاسبات موازی، مدل BISQ، خواص پتروفیزیکی

## ۱ مقدمه

کمی‌سازی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن، یکی از مسائل چالش‌برانگیز در مهندسی نفت است. در کلیه مراحل اکتشاف و بهره‌برداری یک میدان، برای محاسبه نفت یا گاز درجا، ضریب بازیافت، نرخ تولید، محل بهینه چاه‌ها و سایر موارد، در تمامی گستره مخزن، توزیع کمیت‌های تخلخل، تراوایی، درصد اشباع سیال و فشار مؤثر حائز اهمیت است. در این مطالعه، با به‌کارگیری مدل BISQ به‌عنوان مدل فیزیکی سنگی و الگوریتم ژنتیک برای فرایند وارون‌سازی، از داده لرزه‌ای برای وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن استفاده شده است.

انتخاب فرایند محاسباتی در مسائل وارون ژئوفیزیکی به مدل پیشرو وابسته است. در مسائل ساده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی مانند تندترین سراسیمی (steepest descent)، گرادیان مزدوج (conjugate gradient)، روش نقطه درونی (point interior) و الگوریتم یک‌طرفه (simplex algorithm) استفاده می‌شود (فنگ و ینگ، ۲۰۱۵). در موارد غیرخطی، این روش‌های حریصانه (greedy algorithm) - که در آنها با استفاده از گرادیان و هسین (hessian)، تابع خطا به نقطه کمینه (minimum) میل می‌کند - در رسیدن به نقطه بهینه سراسری با شکست مواجه می‌شوند. در چنین شرایطی روش‌های بهینه‌سازی سراسری به‌کار می‌روند. در این روش‌ها، اطلاعات کلی‌تری از تابع خطا برای میل کردن الگوریتم، به سمت مدل بهینه استفاده می‌شود (سن و استوفا، ۲۰۱۳). مثال‌های متعددی از کاربرد روش‌های بهینه‌سازی سراسری در مسائل وارون ژئوفیزیکی در دهه‌های اخیر وجود دارد که علت آن، همخوانی روش‌های بهینه‌سازی سراسری با مسائل غیرخطی ژئوفیزیکی است. استوفا و سن (۱۹۹۱) از روش‌های شبیه‌ساز تبرید و الگوریتم ژنتیک در وارون‌سازی شکل موج یک‌بعدی استفاده کردند. همپسون

(۱۹۹۱)، الگوریتم ژنتیک را برای وارون‌سازی AVO به‌کاربرد. باسکتی و همکاران (۱۹۹۶) نیز الگوریتم ژنتیک را برای وارون‌سازی داده‌های شکست مرزی مصنوعی به‌کاربردند.

به‌طور کلی در مدل فیزیکی سنگی، بین خواص پتروفیزیکی و خواص کشسانی (الاستیک) سنگ ارتباط برقرار می‌شود. هرچه این مدل دقیق‌تر باشد، نتایج وارون‌سازی آن نیز قابل‌اعتمادتر است (فنگ و ینگ، ۲۰۱۵). دورکین و نور (۱۹۹۳)، سازوکار بایوت (۱۹۵۶) و سازوکار جریان فواره‌ای (مافکو و نور، ۱۹۷۵) را ترکیب کردند و مدل واحدی ارائه دادند که هر دو سازوکار را دربرمی‌گرفت. دورکین و همکاران (۱۹۹۴)، مدل BISQ را برای محیط‌های با اشباع جزئی اصلاح کردند و پارا (۱۹۹۷)، این مدل را برای محیط‌های شامل ناهمسانگردی عرضی (transversely isotropy) توسعه داد. چنگ و همکاران (۲۰۰۲) این مدل را برای محیط ویسکوالاستیک توسعه دادند. برخی پژوهشگران نیز درجات مختلفی از ناهمسانگردی را در مدل وارد کرده‌اند.

نی و همکاران (۲۰۰۴)، از ترکیب مدل BISQ و نظریه متوسط هم‌ارز (Equivalent Medium Theory) به‌عنوان مدل فیزیکی سنگی و از الگوریتم ژنتیک برای فرایند بهینه‌سازی در وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی مخزن استفاده کردند. باکراش (۲۰۰۶) از داده‌های وارون‌سازی پیش از برانبارش و تئوری احتمالات برای به‌دست‌آوردن هم‌زمان تخلخل و درصد اشباع و تعیین عدم قطعیت آنها استفاده کرد. فنگ و ینگ (۲۰۱۵) نیز از مدل BISQ و الگوریتم ژنتیک ترکیبی (Hybrid Genetic Algorithm) برای وارون‌سازی تخلخل، تراوایی و درصد اشباع استفاده کردند. مُرگان و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل وایت و الگوریتم ژنتیک، درصد اشباع گاز را به‌دست‌آوردند. آنها با این استدلال که ضریب کیفیت در مقایسه با سرعت، در باند فرکانسی لرزه‌ای، حساسیت بیشتری نسبت به اشباع گاز

در مدل بایوت، سیال درون فضای خالی به دلیل اصطکاک ناشی از گرانش و جفت‌شدگی لختی (اینرسی)، در حرکت نوسانی فاز جامد شرکت می‌کند. در اصل، عبور موج تراکمی سریع از محیطی با اشباع جزئی، بین فاز جامد و مایع اختلاف فشاری ایجاد می‌کند که منجر به جریان سیال و ایجاد یک موج تراکمی کند می‌شود. حاصل این تبدیل انرژی به حالت موج کند و اثرهای پخش پس از آن، تضعیف شدید انرژی موج تراکمی اولیه در باند فرکانسی لرزه‌نگاری است (مُرگان و همکاران ۲۰۱۲). یک سازوکار متفاوت جریان سیال در خلال انتشار موج تراکمی، وابسته به فواره زدن سیال منفذی از درون منافذ به بیرون است که ناشی از تغییر شکل منافذ به دلیل عبور موج لرزه‌ای است. جهت جریان از فضای خالی نرم‌تر (compliance) به فضای خالی با سختی بیشتر است. مافکو و نور (۱۹۷۵) نشان دادند که سازوکار جریان فواره‌ای منجر به مقادیر بسیار بیشتر و واقعی‌تری از تضعیف امواج در محیط‌های با اشباع جزئی نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده با نظریه بایوت می‌شود. این دو سازوکار که مهم‌ترین سازوکارهای ارائه شده از برهم‌کنش سنگ و سیال هستند، به وسیله موازنه جرم با هم ارتباط دارند. به طور خلاصه، طبق نظریه بایوت، میدان موج در محیط متخلخل حاوی سیال، با دو معادله دینامیک حاصله از رابطه لاگرانژ، یک تابع اتلافی و همچنین یک معادله فشار سیال حاصله از موازنه جرم توصیف می‌شود؛ یعنی میدان موج با تعیین کردن جابه‌جایی فاز جامد، جابه‌جایی فاز سیال و فشار سیال مشخص می‌شود. در مدل BISQ، برخلاف مدل بایوت، میانگین تغییرات فشار در جهت عمود یا شعاعی نیز در معادله فشار در نظر گرفته می‌شود. طولی که در جهت شعاعی است و میانگین‌گیری و انتگرال‌گیری فشار روی آن انجام می‌شود، طول ویژه جریان فواره‌ای (characteristic flow length) یا R نامیده می‌شود. این طول، کمیت اساسی و مستقل در سنگ است

دارد و با توجه به اینکه داده سرعت، تابع عوامل متعددی است؛ این تحقیق را با استفاده از داده ضریب کیفیت تعیین شده توسط تبدیل موجک، انجام دادند.

در پژوهش حاضر، از داده‌های امیدانس صوتی و ضریب کیفیت به‌طور توأمان برای وارون‌سازی هم‌زمان پارامترهای پتروفیزیکی سنگ مخزن استفاده شده است. مدل فیزیک سنگی استفاده شده، سازوکار BISQ است که نقش عملگر مدل‌سازی پیشرو را دارد و ضریب کیفیت سنگ و امیدانس صوتی آن با استفاده از بردار پارامترهای این مدل محاسبه می‌شود. در فرایند وارون‌سازی، علاوه بر مدل پیشرو، به یک روش وارون برای تعیین بهینه پارامترهای مدل نیاز است که در اینجا از PNGA به دلیل غیرخطی بودن مدل پیشرو و کارایی و قدرت این روش استفاده شده است.

## ۲ مدل BISQ

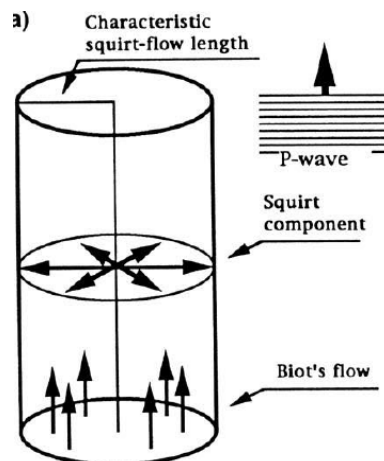
مدل BISQ انتشار موج در محیط متخلخل حاوی سیال را توصیف می‌کند و حاوی سازوکارهای انتشار و تضعیف بایوت و جریان فواره‌ای است. با فرض انتشار موج تخت، می‌توان سرعت، ضریب کیفیت سنگ و چگالی را به‌عنوان توابعی از فرکانس، خواص کشسانی سنگ و سیال و خواص پتروفیزیکی سنگ محاسبه کرد. مزیت مدل BISQ نسبت به دیگر مدل‌های فیزیک سنگ، در برداشتن دو سازوکار مهم برهم‌کنش سنگ و سیال با استفاده از کمیت‌های ماکروسکوپیکی قابل اندازه‌گیری در آزمایشگاه است. در این مدل نسبت به مدل بایوت، دو کمیت دیگر شامل طول ویژه جریان فواره‌ای و تراوایی در جهت شعاعی نیز در نظر گرفته می‌شوند (دورکین و نور، ۱۹۹۳). اهمیت این کمیت‌های ماکروسکوپیکی در این است که می‌توان از مدل شامل آنها به‌عنوان مدل پیشرو در فرایند وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن استفاده کرد (فنگ و ینگ، ۲۰۱۵).

تضعیف بایوت و جریان فواره‌ای مشخص شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، تضعیف ناشی از سازوکار بایوت به حرکت موازی و تضعیف ناشی از سازوکار جریان فواره‌ای به حرکت شعاعی سیال نسبت داده شده است. شکل ۱-ب نشان می‌دهد که چگونه با کاهش درصد اشباع، طول ویژه جریان فواره‌ای کم می‌شود.

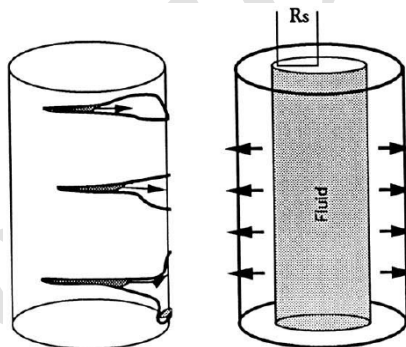
همچنین می‌توان نظریه متوسط هم‌ارز را به خدمت گرفت تا دیگر قسمت‌های مدل را برای محیط با اشباع جزئی اصلاح کرد (نی و همکاران، ۲۰۰۴). طبق مدل BISQ داریم:

$$Y = f(K, K_s, K_l, K_g, G, G_s, \rho_s, \rho_l, \rho_g, \rho_a, \nu, \phi, S_l, R_0, \eta, k, \omega, \omega_c) \quad (1)$$

که در آن،  $Y$  مقادیر سرعت‌ها یا ضریب‌های کیفیت است که تابعی از پارامترهای زیر است:  $K, K_s, K_l, K_g$  که به ترتیب نشان‌دهنده مدول‌های بالک گاز، مایع، فاز جامد و مدول بالک اسکلت خشک است؛  $G$  و  $G_s$  نشان‌دهنده مدول برشی اسکلت خشک و مدول برشی فاز جامد هستند؛  $\rho_s, \rho_l, \rho_g, \rho_a$  به ترتیب نشان‌دهنده چگالی فازهای گاز، مایع و جامد و چگالی جفت‌شدگی اضافی است. چگالی جفت‌شدگی اضافی برای کمی کردن جفت‌شدگی لختی بین فاز جامد و سیال استفاده می‌شود.  $\nu$  نسبت پواسون و  $\eta, k, R_0, \phi$  و  $S_l$  نیز به ترتیب گرانیوی، تراوایی، طول ویژه جریان فواره‌ای، تخلخل و درصد اشباع سیال است و در نهایت،  $\omega$  و  $\omega_c$  نشان‌دهنده فرکانس زاویه‌ای و فرکانس ویژه بایوت هستند (فنگ و ینگ، ۲۰۱۵ و دورکین و نور، ۱۹۹۳). جزئیات بیشتر و معادلات مربوط به مدل BISQ استفاده شده، در پیوست الف آورده شده است. از آنجاکه هدف ما در این مطالعه، تعیین خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن شامل تخلخل، تراوایی، درصد اشباع سیال و فشار مؤثر است، سایر پارامترهای



(الف)



(ب)

شکل ۱. تصویر مکانیکی استوانه فرضی استفاده شده در مدل BISQ. (الف) مؤلفه‌های جریان سیال ناشی از سازوکار بایوت و جریان فواره‌ای در استوانه‌ای که موج تراکمی، به موازات محور استوانه منتشر می‌شود، (ب) اشباع جزئی. شعاع استوانه فرضی یا طول ویژه جریان فواره‌ای با کاهش درصد اشباع کم می‌شود (دورکین و همکاران، ۱۹۹۴).

که به طور آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شود (دورکین و نور، ۱۹۹۳). می‌توان  $R$  را برای محیط‌های با اشباع جزئی با ضرب کردن در ریشه اشباع فاز مایع اصلاح کرد. در این حالت، طولی که جریان فواره‌ای در آن غالب است، در محیط‌های با اشباع کمتر نسبت به محیط‌های با اشباع بیشتر، کوتاه می‌شود (دورکین و همکاران، ۱۹۹۴). در شکل ۱-الف، برای موج تراکمی‌ای که به موازات محور استوانه حرکت می‌کند، جریان‌های ناشی از سازوکارهای

تأثیر چهار پارامتر تخلخل، درصد اشباع سیال، تراوایی و فشار مؤثر بر دو خروجی مدل BISQ یعنی امپدانس صوتی (حاصل ضرب سرعت موج تراکمی و چگالی) و ضریب کیفیت موج تراکمی (مواردی که در داده واقعی در دسترس هستند)، در شکل‌های ۲ و ۳ بررسی شده است. غیر از چهار متغیر ذکر شده، سایر پارامترهای دخیل در مدل، مطابق جدول ۱ و مقاله دورکین و نور (۱۹۹۳) انتخاب شده‌اند. اطلاعات کشسانی و پتروفیزیکی موجود در این جدول، مربوط به یک مخزن گازی از جنس ماسه کوارتزی تحکیم‌نیافته است. فرکانس ثابت به کاررفته در مدل‌سازی مقادیر امپدانس و ضریب کیفیت، ۱۰۰ هرتز (از مرتبه فرکانس لرزه‌ای) در نظر گرفته شده است. خروجی‌های مدل BISQ، تابع فرکانس هستند و با تغییر فرکانس، رفتار متفاوتی نسبت به نتایج حاضر خواهند داشت. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، امپدانس صوتی با افزایش درصد اشباع سیال، افزایش و با افزایش تخلخل، کاهش می‌یابد. همچنین افزایش فشار مؤثر، باعث زیاد شدن امپدانس صوتی گشته اما تغییرات تراوایی تأثیر چندانی روی این کمیت نداشته است. در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش درصد اشباع سیال، عکس ضریب کیفیت موج تراکمی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ پرواضح است که رفتار ضریب کیفیت، برعکس این حالت است. با افزایش تخلخل، ضریب کیفیت کاسته شده است، اما فشار مؤثر تأثیر کمتری روی این خروجی مدل دارد و با افزایش فشار مؤثر، ضریب کیفیت فقط در مقادیر تخلخل و اشباع زیاد، افزایش داشته است. با افزایش تراوایی نیز ضریب کیفیت زیاد شده است؛ لذا می‌توان گفت برای وارون‌سازی این خواص پتروفیزیکی (تخلخل، درصد اشباع سیال، تراوایی و فشار مؤثر)، ترکیبی از این دو خروجی مدل یعنی امپدانس صوتی و ضریب کیفیت موج تراکمی باید به کار گرفته شود تا وابستگی توابع هدفی که تعریف خواهند شد، به همه این پارامترها توجیه شود و وارون‌سازی امکان‌پذیر شود.

دخیل در مدل را می‌توان با توجه به نوع سنگ‌شناسی (لیتولوژی) و سیال، از داده‌های مرجع و آزمایشگاهی انتخاب کرد که در قسمت مربوطه توضیح داده می‌شود. شایان ذکر است که وابستگی برخی پارامترها مانند مدول بالک به برخی متغیرها مانند فشار مؤثر، باید با استفاده از مدل‌های فیزیکی توجیه شود. مدول‌های بالک و برشی سنگ در شرایط خشک، تابع فشار مؤثر هستند (هافمن و همکاران، ۲۰۰۵)؛ بنابراین طبق روابط (۲) و (۳)، برای محاسبه مدول‌های بحرانی ماسه‌سنگ تحکیم‌نیافته، از نظریه تماس هرتز-میدلین استفاده می‌شود که در آن  $\phi_0 = 0.36$ ، تخلخل حدی ماسه،  $C = 9$  میانگین تعداد تماس‌های بین دانه‌ها و  $P_{eff}$  فشار مؤثر است که برابر با اختلاف فشار محصورکننده و فشار منفذی است (سایر پارامترها مطابق با تعاریف قبلی است). (مافکو و همکاران، ۲۰۰۳):

$$K_c = \left( \frac{C^2(1-\phi_0)^2 G_0^2 P_{eff}}{18\pi^2(1-\nu)^2} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

$$G_c = \frac{5-4\sigma}{5(2-\sigma)} \left( \frac{3C^2(1-\phi_0)^2 G_0^2 P_{eff}}{2\pi^2(1-\nu)^2} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

برای محاسبه مدول‌ها در شرایط خشک، از روابط (۴) و (۵) و مدل ماسه شکننده (friable sand model) استفاده می‌شود (هائو و همکاران، ۲۰۱۶):

$$K_{dry} = \left( \frac{\phi/\phi_0}{K_c + 4\frac{G_c}{3}} + \frac{1-\phi/\phi_0}{K_0 + 4\frac{G_c}{3}} \right)^{-1} 4\mu_c/3, \quad (4)$$

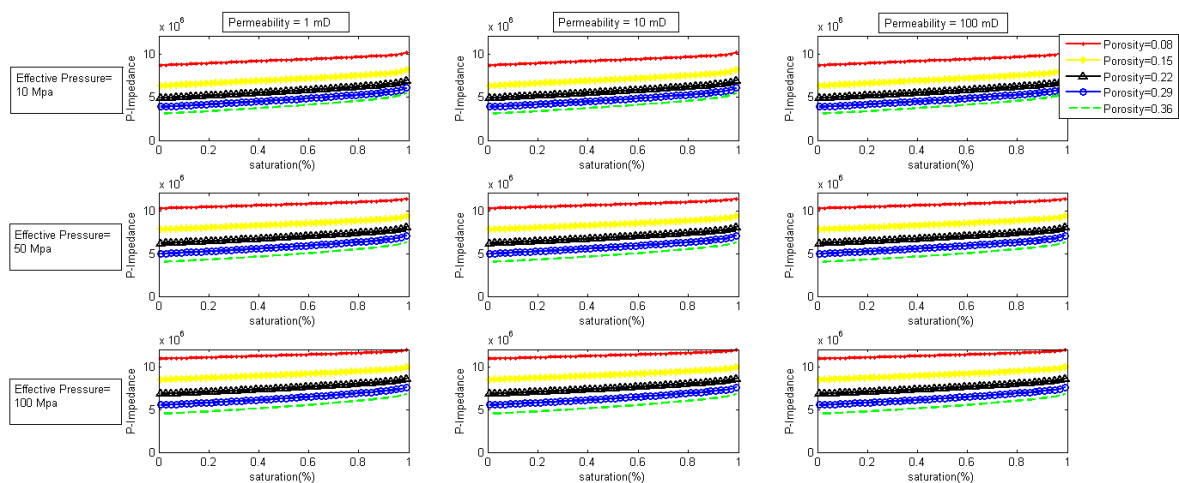
$$G_{dry} = \left( \frac{\phi/\phi_0}{G_c + \mu'} + \frac{1-\phi/\phi_0}{G_c + G'} \right)^{-1} G'. \quad (5)$$

$$G' = \frac{G_c}{6} \frac{9k_c + 8G_c}{k_c + 2G_c}.$$

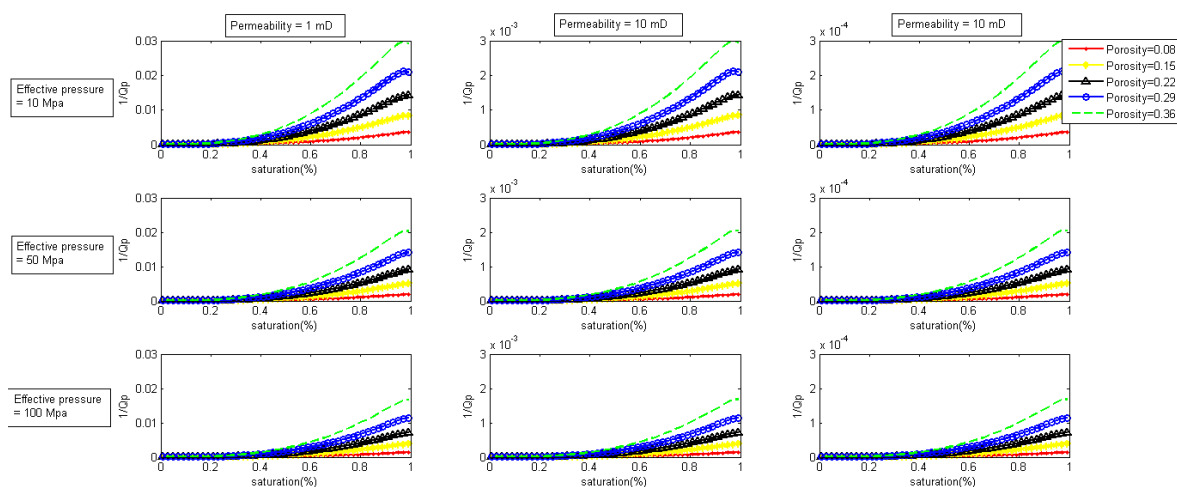
در واقع برای محاسبه  $Y$  در رابطه (۱)، ابتدا مدول بالک و برشی خشک به کمک روابط (۲) تا (۵) محاسبه و سپس در مدل BISQ استفاده می‌شوند.

دورکین و همکاران (۱۹۹۴) نشان دادند در تقریب فرکانس کم مدل BISQ، پارامتر  $X$  با  $X = V_p = \frac{1}{Re(X)}$  و سرعت موج تراکمی با  $\sqrt{\frac{(1-\phi)\rho_s + \phi\rho_f}{M + \alpha^2 F_{sq}/\phi}}$  تعریف می‌شود که  $F_{sq}$  ضریب جریان فواره‌ای و متغیری مختلط است و به نسبت بدون بعد  $\frac{S\omega R^2 \phi \mu (\beta_f + \beta_m)}{k}$  وابسته است (ر.ک. پیوست الف).  $\beta_f$  تراکم‌پذیری سیال،  $\beta_m$  تراکم‌پذیری فضای خالی و  $M$  مدول کرنش تک‌محوره است که مرتبه بزرگی آن نسبت به جمله‌ای که با آن جمع می‌شود، بسیار بزرگ‌تر است و می‌توان از جمله مجاورش صرف‌نظر کرد. به این ترتیب،  $V_p$  مستقل از تراوایی می‌شود و بیشتر تحت تأثیر  $M$  قرار می‌گیرد که خود وابسته به مدول‌های برشی و تراکمی‌ای است که در بالا نشان داده شد تابع فشار مؤثرند. از لحاظ فیزیکی نیز می‌توان گفت که در فرکانس‌های کم، سیال آهسته و راحت در جهت عمود بر انتشار موج منقبض می‌شود، پس در پاسخ محیط اشباع به موج لرزه‌ای شرکت نمی‌کند (دورکین و همکاران، ۱۹۹۴). تا اینجا وابستگی امپدانس به فشار مؤثر تأثیر دارند.

و استقلال آن از تراوایی توجیه شد، اما درباره ضریب کیفیت باید گفت که در فرکانس‌های زیاد، سیال فضای خالی ناپایدار (unrelaxed) می‌شود و نمی‌تواند به بیرون از فضای خالی فواره بزند؛ لذا در این فرکانس‌ها سازوکارهای بایوت و BISQ یکسان می‌شوند. در فرکانس‌های کم که مرتبه بزرگی طول موج، بزرگ‌تر از مرتبه اندازه میانگین طول فضاها خالی است، عبور موج لرزه‌ای از ناحیه‌ای که تراوایی کم دارد، باعث ناپایدار شدن سیال در جریان فواره‌ای، اتلاف انرژی و کاهش ضریب کیفیت می‌شود (دورکین و همکاران، ۱۹۹۴). به این ترتیب، افزایش ضریب کیفیت با افزایش تراوایی نیز توجیه می‌شود. از طرفی، ضریب کیفیت به صورت  $Q_p^{-1} = \frac{2 \text{Im}(X)}{\text{Re}(X)}$  تعریف می‌شود که پس از جایگذاری  $X = \frac{2\alpha^2 \text{Im}(F_{sq})}{\alpha^2 \text{Re}(F_{sq}) + M}$  و ساده‌سازی، به  $Q_p^{-1} = \frac{\phi}{M + \frac{2\alpha^2 \text{Im}(F_{sq})}{\alpha^2 \text{Re}(F_{sq}) + M}}$  تبدیل می‌شود. همان‌طور که از نمودارها پیداست، هم تراوایی (در جملات مربوط به  $F_{sq}$ ) و هم فشار مؤثر (در  $M$ ) در  $Q_p^{-1}$  تأثیر دارند.



شکل ۲. تأثیر پارامترهای مدل بر امپدانس صوتی. محور افقی همه نمودارها، درصد اشباع سیال و محور عمودی، امپدانس صوتی برحسب  $(\text{kg/m}^3)(\text{m/s})$  است. خطوط قرمز، زرد، مشکی، آبی و سبز به ترتیب معادل تخلخل‌های ۸، ۱۵، ۲۲، ۲۹ و ۳۶ درصد هستند. فشار مؤثر برای نمودارهای سطر اول، دوم و سوم به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال است. تراوایی برای نمودارهای ستون اول، دوم و سوم به ترتیب ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌داریسی است.



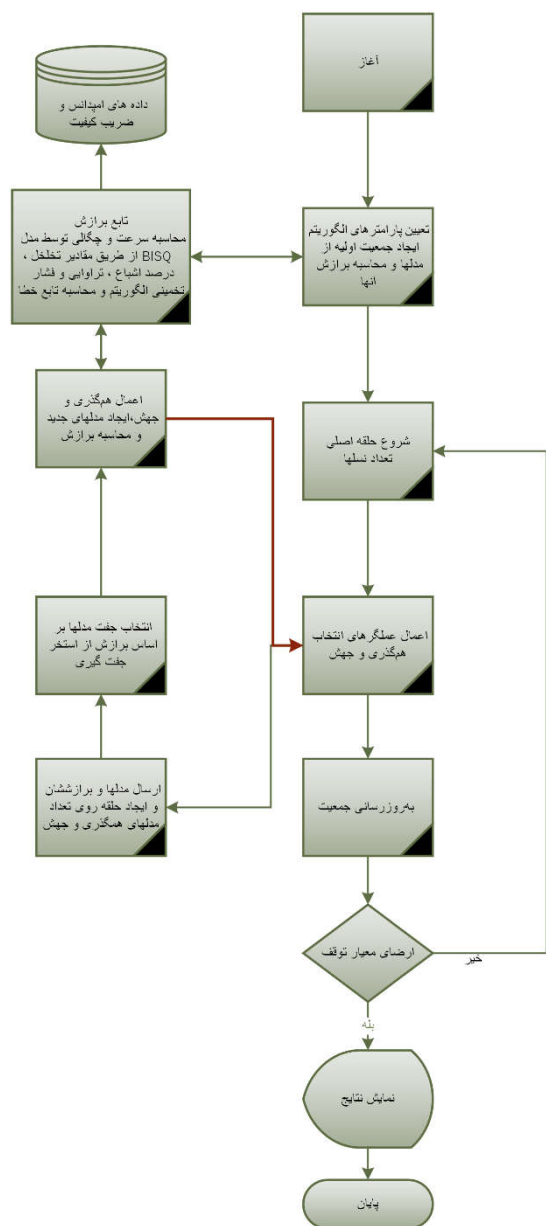
شکل ۳. تأثیر پارامترهای مدل بر ضریب کیفیت موج تراکمی. محور افقی همه نمودارها، درصد اشباع سیال و محور عمودی، عکس ضریب کیفیت موج تراکمی است. خطوط قرمز، زرد، مشکی، آبی و سبز به ترتیب معادل تخلخل‌های ۸، ۱۵، ۲۲، ۲۹ و ۳۶ درصد است. فشار مؤثر برای نمودارهای سطر اول، دوم و سوم به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال است. تراوایی برای نمودارهای ستون اول، دوم و سوم به ترتیب ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌داری است.

است. مزیت آن نسبت به الگوریتم‌های رمزگذاری شده مانند باینری (BGA)، علاوه بر تسریع در روند محاسبات به وسیله جلوگیری از هزینه محاسباتی رمزگذاری/رمزگشایی، جلوگیری از ایجاد فاصله همینگ (Hamming) است. در الگوریتم‌های ژنتیک باینری، از آنجاکه فضای مدل پیوسته نیست، مدل‌های نزدیک به هم، از یکدیگر فاصله دارند. همچنین مدل بهینه احتمالاً در فضای بین مدل‌های ممکن، قرار می‌گیرد که بار محاسباتی اضافی به مسئله تحمیل می‌شود. عملگرهای استفاده شده شامل عملگر انتخاب گیس، عملگر هم‌گذری شبیه‌ساز باینری (SBX) و عملگر جهش پارامتر حقیقی (RBM) هستند که در پیوست ب توضیح داده شده‌اند.

عملگرهای هم‌گذری و جهش، بر مدل‌هایی عمل می‌کنند که عملگر انتخاب، تعیین کرده است و مدل‌های جدیدی ایجاد می‌کنند (فندی و ملیک، ۲۰۱۳). در قسمت به‌روزرسانی، جمعیت سایر مدل‌های موجود در جمعیت قبل، با مدل‌های تازه تولید شده مخلوط و براساس

**۳ الگوریتم ژنتیک نیچه موازی (PNGA)**  
الگوریتم ژنتیک (GA) که نخستین بار هلند (۱۹۷۵) آن را پیشنهاد داد، براساس قیاس با فرایند تکامل زیست‌شناختی است. این روش‌ها را می‌توان شبیه‌ساز تکامل هم نامید. روش‌های الگوریتم ژنتیک قدیمی، همانند آنچه که هلند ارائه کرد، تفاوت بسیاری با روش‌های قدیمی شبیه‌ساز تیرید (SA) دارند. برخلاف SA، در روش GA یک جمعیت اولیه از مدل‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و GA سعی در بهبود برازش جمعیت در هر نسل دارد. برازش، معیاری از نحوه جورشدگی بین داده و مدل مصنوعی است. اصولاً فرایندهای ژنتیکی انتخاب (selection)، هم‌گذری (cross over) و جهش (mutation)، این عمل را انجام می‌دهند.

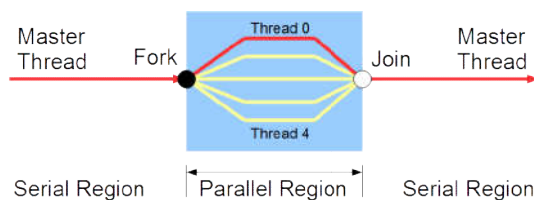
در این تحقیق، از یک الگوریتم ژنتیک حقیقی استفاده شده است که در آن به‌جای استفاده از رشته‌های رمزگذاری شده، از مقدار حقیقی مقادیر استفاده می‌شود و نیازمند عملگرهای هم‌گذری و جهش متناسب با این الگو



شکل ۵. نمودار الگوریتم PPGA

پردازشگرها باعث انجام هم‌زمان (synchronous) محاسبات برای هر زیرجمعیت شده و محاسبات را سریع‌تر می‌کند (آمبارکار، ۲۰۱۵). همچنین طبق نظریه تعادل نشان‌دار، پس از گذشت چند نسل، یک فاجعه رخ می‌دهد و جمعیت موجود در سایر پردازشگرها جمع‌آوری و مخلوط شده و تعداد زیادی از گونه‌ها (مدل‌ها) از بین می‌روند (فقط گونه‌هایی باقی می‌مانند که

برازشان مرتب و به تعداد جمعیت، با استفاده از اصل نخبه‌گزینی (elitism) از مدل‌های با برآزش بیشتر به نسل بعد منتقل می‌شوند. به‌منظور تسریع در روند محاسبات، الگوریتم توضیح داده شده به‌طور موازی روی پردازشگرها (CPU) پیاده‌سازی شده است. این روش در کامپیوترهای چند هسته‌ای (multi core) و موازی اجراشدنی است و طبق مدل تعادل نشان‌دار (PE) با الگوریتم ژنتیک تناسب دارد. روش‌های محاسباتی موازی شامل انواع مختلفی از جمله محاسبه موازی یک حلقه تکراری، اجرای یک برنامه روی چند داده، حالت موازی و ... است. روش استفاده شده در اینجا، روش حالت موازی است که مطابق شکل ۴، در آن هر پردازشگر برنامه فراخوانده شده را به‌صورت مستقل انجام می‌دهد و فضای کار مستقلی از دیگر پردازشگرها دارد. به این ترتیب، جمعیت کل مدل‌ها را می‌توان به تعداد پردازشگرها، به چند زیرجمعیت تقسیم کرد. بیشترین تعداد پردازشگری که در یک دستگاه برای محاسبات موازی می‌توان به‌کارگرفت، یکی کمتر از کل پردازشگرها است و پردازشگر باقیمانده وظیفه نظارت بر کار دیگر پردازشگرها را دارد؛ بنابراین جمعیت، تقسیم و روند محاسبات سریع‌تر می‌شود. شکل ۴ همین مفهوم را به کمک یک طرح کلی بیان می‌کند (آمبارکار، ۲۰۱۵).



شکل ۴. طرح کلی محاسبات به‌صورت موازی (آمبارکار، ۲۰۱۵)

از آنجاکه در مسائل بهینه‌سازی، با افزایش ابعاد مسئله، محاسبات به‌طور نمایی افزایش می‌یابد، تقسیم کار بین



استفاده شده توسط دورکین و نور (۱۹۹۳)، مدل‌سازی شده است. در این داده مصنوعی، ۵۰ نقطه داده در نظر گرفته شده است که برای تعیین خروجی‌های مدل در این نقاط لازم است همه پارامترهای ذکر شده در مدل BISQ تعیین شوند. پارامترهای مشترک بین این ۵۰ نقطه داده در جدول ۱ ذکر شده است، اما پارامترهایی که در این نقاط متفاوت‌اند و همان متغیرهای وارون‌سازی نیز هستند، در شکل‌های ۷ تا ۹ با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، سه پارامتر درصد اشباع، تخلخل و تراوایی به‌طور خطی در هر نقطه تغییر می‌کنند، اما فشار مؤثر در سایر نقاط مقدار ثابتی دارد. برخی خروجی‌های این مدل‌سازی نیز در شکل‌های ۲ و ۳ به تصویر کشیده شده است. این داده‌های مشاهده‌ای شامل سرعت‌ها، ضرایب کیفیت و چگالی هستند و با تابع هدف، به داده محاسبه شده ارتباط دارند.

در داده محاسبه‌ای نیز برای پارامترهای مشترک، از مقادیر جدول ۱ استفاده شده است، اما بردار پارامترهای مدل این داده را الگوریتم ژنتیک تعیین می‌کند. این الگوریتم می‌کوشد تا اختلاف بین داده مشاهده‌ای و داده محاسبه‌ای را که همان تابع هدف است، به حداقل برساند. در این میان، استفاده از قیدها می‌تواند فرایند بهینه‌سازی و در نتیجه فرایند وارون‌سازی را سریع‌تر و معنادار کند. به این منظور، در اینجا هم از قیود سخت (تعیین بازه‌ای که متغیرها فقط در آن بازه تعریف شوند) و هم از قیود نرم (در نظر گرفتن تابع هدف به صورت مجموع چند تابع هدف یا اطلاعات اضافی) استفاده شده است. در این تحقیق، از دو تابع هدف برای مقایسه تأثیر اطلاعات اضافی در نتایج وارون‌سازی استفاده شده است:

$$F(p) = \sqrt{\sum \left( \left( \frac{I_p - I_p(P)}{I_p} \right)^2 + \left( \frac{Q_p - Q_p(P)}{Q_p} \right)^2 \right)}, \quad (8)$$

توانایی انطباق خود با محیط جدید را داشته باشند) و گونه‌های جدید، جایگزین و دوباره بین پردازشگرها تقسیم می‌شوند. این کار باعث می‌شود اگر زیرجمعیتی توسط یک مدل بهینه محلی به دام افتاده باشد، از آن مدل رها شود و همگرایی به سمت مدل بهینه ادامه یابد. تقسیم کردن جمعیت مدل‌ها به زیرجمعیت‌ها، الگوریتم ژنتیک نیچه (NGA) یا مدل جزیره‌ای نیز نامیده شده است (نی و همکاران، ۲۰۰۴). این الگوریتم، طبق نمودار شکل ۵ کد نویسی شده و بر داده‌های توضیح داده شده در قسمت بعد، اعمال شده است.

#### ۴ روش کار

مطابق رابطه زیر، داده  $d$  از اثر عملگر  $l$  بر بردار مدل  $m$  حاصل می‌شود:

$$d = l(m). \quad (6)$$

وارون‌سازی سعی در تخمین مدل بهینه‌ای دارد که داده مشاهده شده را ایجاد کرده است؛ لذا در قالب تابع هدف ( $\epsilon$ ) می‌کوشد تا اختلاف بین داده مشاهده‌ای ( $d_{obs}$ ) و داده محاسبه‌ای ( $d_{cal}$ ) را به حداقل برساند:

$$\epsilon = d_{obs} - d_{cal}. \quad (7)$$

در این قسمت، ابتدا داده‌های مشاهده‌ای استفاده شده در این مقاله معرفی می‌شوند. سپس درباره توابعی بحث می‌شود که باید فرایند وارون‌سازی بر آنها عمل کند. در همه این موارد، داده محاسبه‌ای از مدل BISQ حاصل می‌شود.

یک مجموعه از داده‌های مشاهده‌ای، داده مصنوعی است که این داده با استفاده از عملگر مدل‌سازی پیشروی BISQ و با استفاده از مقادیر موجود در جدول ۱، داده‌های

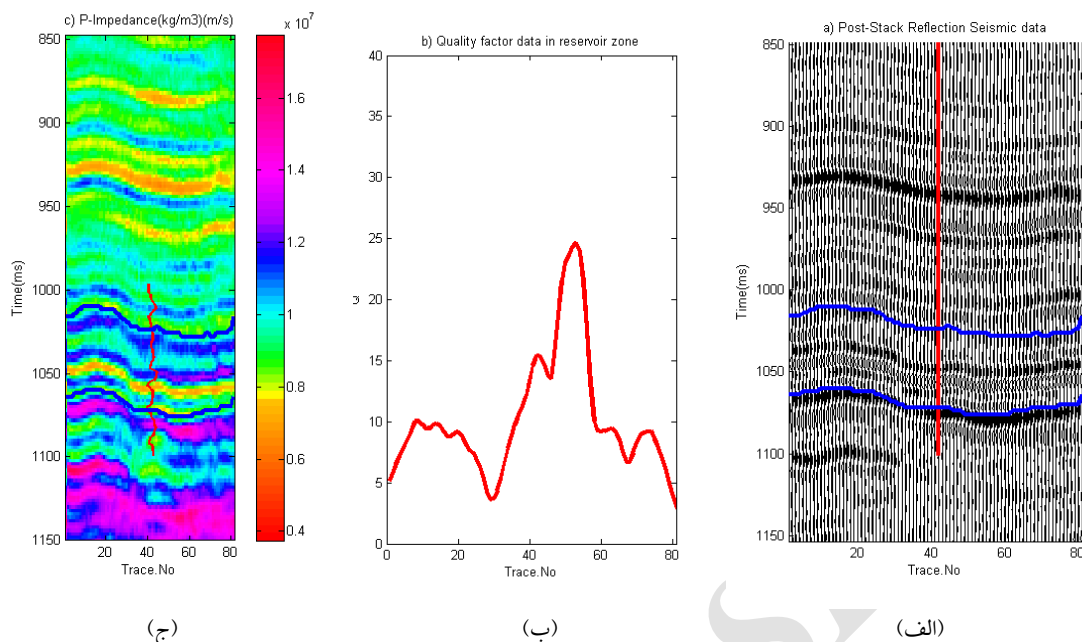
داده‌های مشاهده‌ای واقعی ورودی فرایند وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی مخزن، شامل ضریب کیفیت موج تراکمی و امپدانس صوتی از یک مخزن گازی ماسه‌ای است. داده امپدانس صوتی با استفاده از داده لرزه بازتابی پس از برانبارش اطلاعات چاه‌ها و افق‌ها و با وارون‌سازی بر مبنای مدل (model based inversion) به دست آمد. داده‌های واقعی استفاده شده در این مقاله در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل ۶- الف، داده‌های لرزه‌ای پس از برانبارش نمایش داده شده است که هرچند به‌طور مستقیم به‌عنوان داده در فرایند وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی استفاده نشده است، اما امپدانس صوتی و ضریب کیفیت از آن به دست آمده‌اند. در نمودار ۶- ب نیز ضریب کیفیت ناحیه مخزنی و در شکل ۶- ج امپدانس صوتی نمایش داده شده است. داده ضریب کیفیت موج تراکمی با استفاده از روش نسبت طیفی (spectral ratio) (استینزی و ورسینگن، ۱۹۸۵) و با استفاده از تبدیل موجک حاصل شد که جزئیات مربوط به آن در پیوست ج قید شده است. از آنجاکه داده سرعت به پارامترهای مختلفی وابسته است، در تعیین کمیت‌های پتروفیزیکی مثل درصد اشباع، داده‌ای مثل ضریب کیفیت که به چنین کمیت‌هایی حساس‌تر است، نتایج بهتری می‌دهد (مرگان و همکاران، ۲۰۱۲). در فرایند وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی داده واقعی، سایر پارامترهای داده محاسبه شده در مدل BISQ مطابق جدول ۳ و با توجه به مقادیر مرجع برای ماسه کوارتزی و سیال مخزن از فنک و ینگ (۲۰۱۵) تعیین شد.

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در مدل BISQ مصنوعی. اطلاعات کشسانی و پتروفیزیکی موجود، مربوط به یک مخزن گازی از جنس ماسه کوارتزی تحکیم‌نیافته است (دورکین و نور، ۱۹۹۳).

$\rho_l = 1009 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$R = 0.002 \text{ (m)}$
$\rho_g = 210 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_s = 37 \text{ (Gpa)}$
$\rho_s = 2650 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$f = 100 \text{ (Hz)}$
$\rho_a = 420 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_g = 0.021 \text{ (Gpa)}$
$k_l = 2.38 \text{ (Gpa)}$	$\eta = 0.001 \text{ (pa.s)}$

$$F(p) = \sqrt{\sum \left[ \left( \frac{V_p^* - V_p(P)}{V_p} \right)^2 + \left( \frac{V_s^* - V_s(P)}{V_s^*} \right)^2 + \left( \frac{\rho^* - \rho(P)}{\rho^*} \right)^2 + \left( \frac{Qp^* - Qp(P)}{Qp^*} \right)^2 + \left( \frac{Qs^* - Qs(P)}{Qs^*} \right)^2 \right]}, \quad (9)$$

که در این روابط  $P = (\rho, S_l, k, P)$  بردار پارامترهای وارون‌سازی است.  $V_p^*, V_s^*, Q_p^*, Q_s^*, \rho^*$  به ترتیب بردارهای سرعت و ضرایب کیفیت مشاهده‌ای موج P و S و بردار چگالی مشاهده‌ای هستند و  $V_p, V_s, Q_p, Q_s, \rho$  نیز به ترتیب بردارهای سرعت و ضرایب کیفیت موج P و S و بردار چگالی محاسبه شده توسط مدل هستند. رابطه (۸) که با توجه به اطلاعات موجود از داده‌های واقعی تعریف شده است، شامل نُرم مرتبه دوم مجموع اختلاف‌های داده‌های امپدانس صوتی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به‌علاوه مجموع اختلاف‌های داده‌های ضرایب کیفیت موج تراکمی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای است که به‌وسیله داده‌های مشاهده‌ای بهنجار شده‌اند. رابطه (۹) نیز با فرض موجود بودن همه داده‌های خروجی مدل و با هدف مقایسه نتایج وارون‌سازی با تابع هدف (رابطه ۸) تعریف شده است. همان‌طور که مشهود است، توابع هدف به‌صورت مجموع چند تابع مستقل هستند. در اصل، الگوریتمی که مدل بهینه را برای چنین توابعی می‌یابد، یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه است (کوئلو و لاموت، ۲۰۰۴). در وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی داده مصنوعی، هر دو تابع هدف، به کاررفته و نتایج مقایسه شده‌اند. همچنین نحوه تأثیر تغییر پارامترهای الگوریتم ژنتیک در نتایج وارون‌سازی بررسی شده است؛ لذا الگوریتم PNGA سه بار بر داده مصنوعی اعمال شده است، اما با توجه به اطلاعات موجود برای داده واقعی، فقط از رابطه (۸) استفاده شده است.



شکل ۶. داده‌های واقعی استفاده شده در فرایند وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن. (الف) داده لرزه‌ای پس از برنبارش که حدود مخزن و محل چاه روی آن مشخص شده است، (ب) ضریب کیفیت به دست آمده برای هر رد لرزه در حدود مخزن، (ج) مقطع امپدانس صوتی و نگاره مربوطه در محل چاه برحسب  $(m/s)(kg/m^3)$

## ۵ نتایج

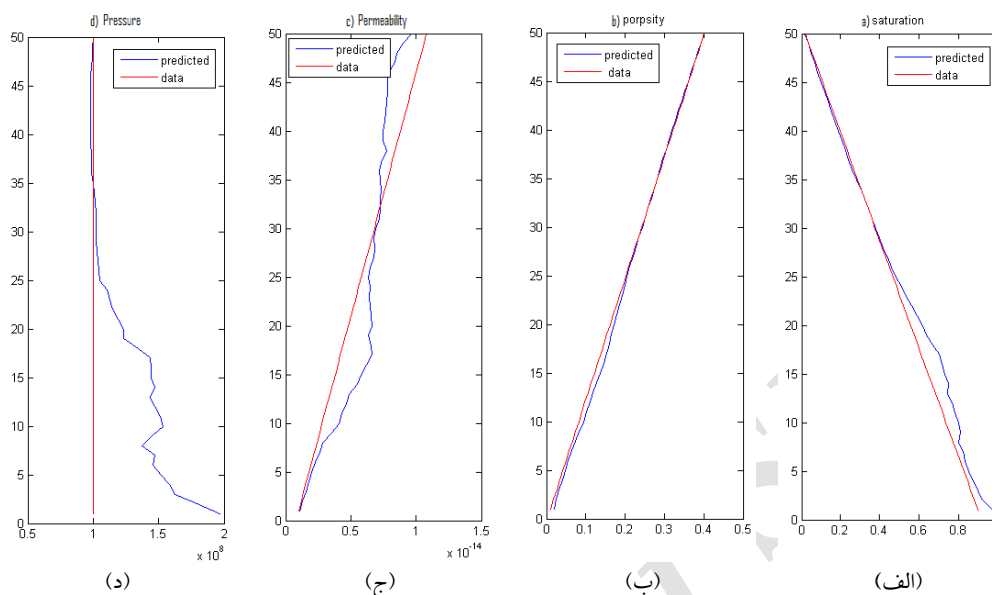
که بر الگوریتم اعمال کرده، اصلاح جزئی در برازش و کاهش در خطای داده‌ها داشته است. شایان ذکر است که در شکل‌های ۷ تا ۹، خطوط قرمز، داده‌های مفروض در تولید مدل مصنوعی است و خطوط آبی، نتایج وارون‌سازی را نشان می‌دهند. نتایج از راست به چپ شامل اشباع آب، تخلخل، تراوایی و فشار مؤثر هستند. محور افقی این نمودارها، خواص پتروفیزیکی مذکور و محور قائم شماره آزمایش است.

در قسمت مخزنی داده‌های واقعی نیز با توجه به اطلاعاتی که در دسترس قرار داشت، از تابع خطای (۸) استفاده شد. در شکل ۱۰، نتایج وارون‌سازی شامل تخلخل، تراوایی، درصد اشباع و فشار مؤثر نمایش داده شده است. با توجه به اینکه از مقادیر وارون شده، فقط نگاره تخلخل در چاه موجود است، تنها مقطع تخلخل نگاره مربوطه در محل چاه برای مقایسه رسم شده است. در شکل ۱۱ برای صحت‌سنجی، تخلخل، چگالی و

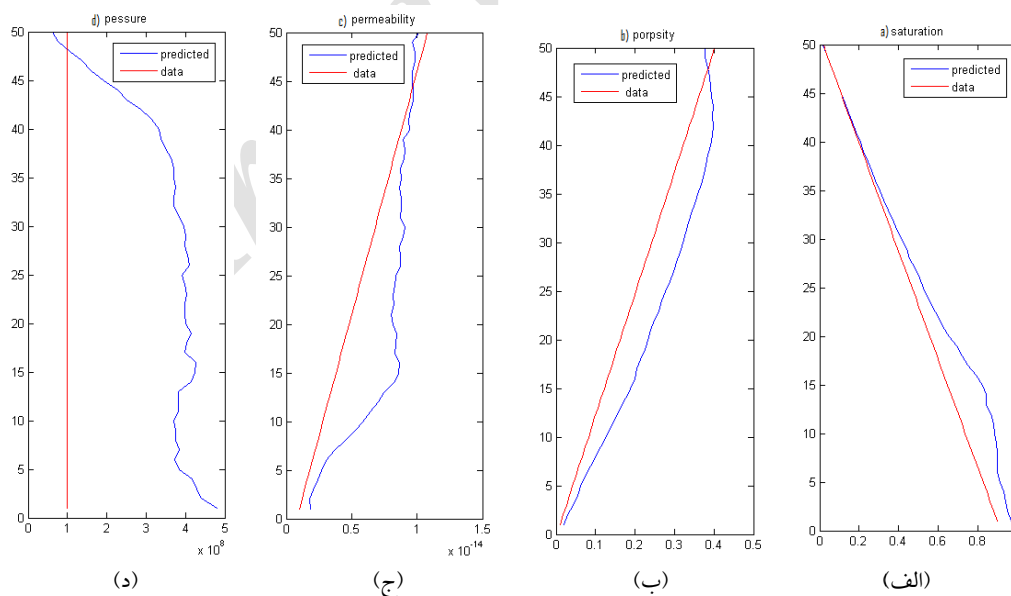
کارایی و توانایی الگوریتم PNGA برای یک مدل مصنوعی با استفاده از توابع هدف متفاوت و پارامترهای مختلف بررسی و بر داده واقعی اعمال شد. مطابق جدول ۲، در مرتبه اول اعمال الگوریتم بر داده مصنوعی، از تابع هدف رابطه (۹) استفاده شده که شامل کلیه اطلاعات خروجی مدل است. همان‌طور که در شکل ۷ و سطر اول جدول ۲ مشاهده می‌شود، نتایج وارون‌سازی با این تابع هدف دقت زیادی دارد و با تعداد نسل‌ها و جمعیت مشابه، نسبت به حالتی که از رابطه (۸) استفاده شده، میانگین خطای داده‌ها بسیار کمتر است. در مرتبه دوم اعمال الگوریتم بر داده‌های مصنوعی که از رابطه (۸) به عنوان تابع هدف استفاده شده نیز دقت داده‌ها قبول‌شدنی است (شکل ۸)، اما در مرتبه سوم اعمال الگوریتم که مجدداً از تابع هدف (۸) استفاده شده (شکل ۹)، افزایش تعداد نسل‌ها و تعداد جمعیت در مقابل هزینه محاسباتی سنگینی

ج نمودار آبی رنگ، نگاره تخلخل به دست آمده و نمودار قرمز رنگ مقادیر وارون شده را نشان می‌دهد. میانگین

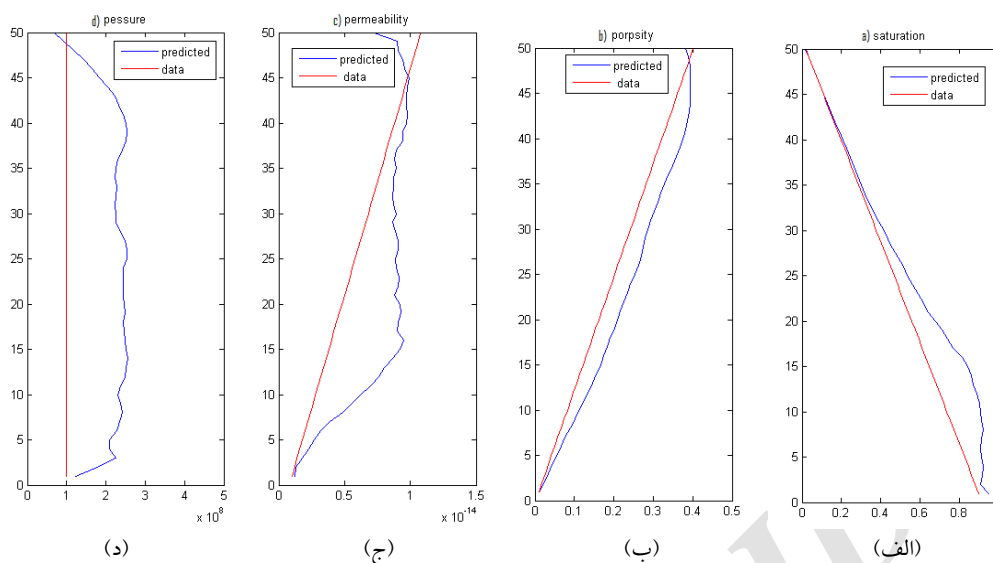
سرعت به دست آمده از وارون‌سازی، با نگاره‌های چاه و در محل چاه مقایسه شده است. برای مثال، در شکل ۱۱-



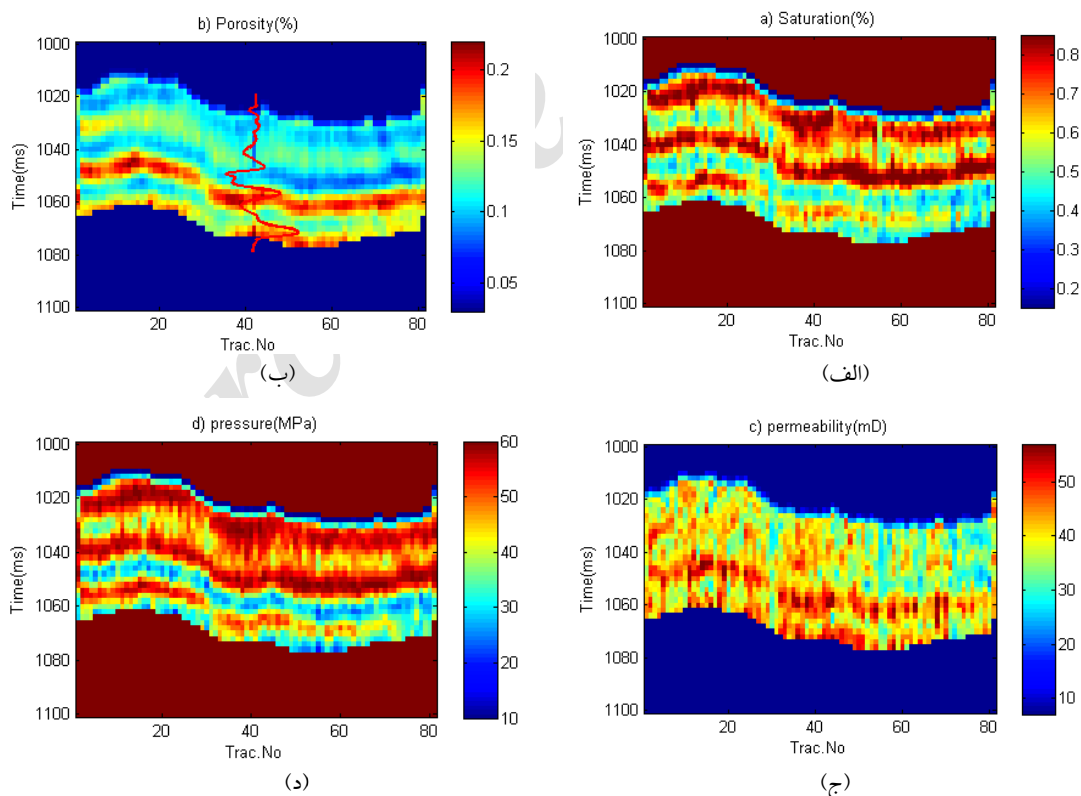
شکل ۷. نتایج وارون‌سازی مرتبه اول اعمال الگوریتم بر داده مصنوعی. پارامترهای مربوط به الگوریتم و نتایج این داده در سطر اول جدول ۲ آمده است. نمودارهای آبی رنگ، نتایج وارون‌سازی و نمودارهای قرمز رنگ، مقادیر مفروض در توسعه مدل پیشرو هستند. نتایج از راست به چپ شامل (الف) اشباع آب، (ب) تخلخل، (ج) تراوایی و (د) فشار مؤثر است.



شکل ۸. نتایج وارون‌سازی مرتبه دوم اعمال الگوریتم بر داده مصنوعی. پارامترهای مربوط به الگوریتم و نتایج این داده در سطر دوم جدول ۲ آمده است. نمودارهای آبی رنگ، نتایج وارون‌سازی و نمودارهای قرمز رنگ، مقادیر مفروض در توسعه مدل پیشرو هستند. نتایج از راست به چپ شامل (الف) اشباع آب، (ب) تخلخل، (ج) تراوایی و (د) فشار مؤثر است.



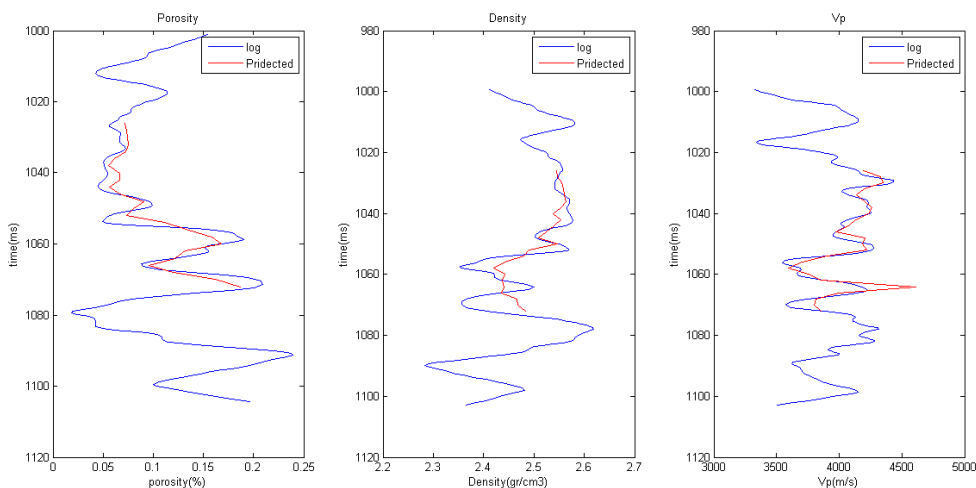
شکل ۹. نتایج وارون‌سازی مرتبه سوم اعمال الگوریتم بر داده مصنوعی. پارامترهای مربوط به الگوریتم و نتایج این داده در سطر سوم جدول ۲ آمده است. نمودارهای آبی رنگ، نتایج وارون‌سازی و نمودارهای قرمز رنگ، مقادیر مفروض در توسعه مدل پیشرو هستند. نتایج از راست به چپ شامل (الف) اشباع آب، (ب) تخلخل، (ج) تراوایی و (د) فشار مؤثر است.



شکل ۱۰. نتایج وارون‌سازی خواص پتروفیزیکی داده‌های واقعی شکل ۶. پارامترهای مربوط به الگوریتم مورد استفاده برای وارون‌سازی هر رد در سطر چهارم جدول ۲ آمده است. (الف) توزیع درصد اشباع آب در ناحیه مخزن، (ب) توزیع تخلخل در ناحیه مخزن که نگاره تخلخل در محل چاه برای مقایسه آن رسم شده است، (ج) توزیع تراوایی در ناحیه مخزن، (د) توزیع فشار مؤثر در ناحیه مخزن

۱۱- ب نیز سرعت و چگالی به‌دست آمده از جایگذاری مقادیر پیش‌بینی شده توسط الگوریتم در مدل BISQ با نگاره سرعت و چگالی در محل چاه مقایسه شده است که همبستگی بالایی نشان می‌دهند.

خطا بین دو نمودار ۷/۲ درصد است. این خطا با  $\frac{\sum_{i=1}^n |\varphi_i - \varphi_i^*|}{nL}$  محاسبه می‌شود که در این رابطه،  $\varphi_i$  تخلخل وارون شده،  $\varphi_i^*$  تخلخل نگاره چاه،  $L$  طول بازه جستجوی تخلخل و  $n$  تعداد نقاط است. در نمودارهای ۱۱- الف و



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱۱. مقایسه نتایج وارون‌سازی با نگاره‌های چاه. پارامترهای مربوط به الگوریتم و نتایج این داده در سطر چهارم جدول ۲ آمده است. نمودارهای قرمز رنگ، نتایج وارون‌سازی و نمودارهای آبی رنگ، نگاره‌های چاه هموار شده در محل رد مربوطه هستند. نتایج شامل (الف) سرعت موج تراکمی، (ب) چگالی و (ج) تخلخل است.

جدول ۲. مقایسه پارامترهای به‌کاررفته و نتایج وارون‌سازی داده‌ها

یک رد داده واقعی	مرتب‌بندی ۳ داده مصنوعی	مرتب‌بندی ۲ داده مصنوعی	مرتب‌بندی ۱ داده مصنوعی	
2000	3000	2000	2000	تعداد کل جمعیت
2500	4000	2500	2500	تعداد نسل‌ها
[0,1]	[0,1]	[0,1]	[0,1]	بازه جستجوی درصد اشباع
[0.02,0.35]	[0.02,0.4]	[0.02,0.4]	[0.02,0.4]	بازه جستجوی تخلخل
[1-100]	[1-10]	[1-10]	[1-10]	بازه جستجوی تراوی mD
96-112	200	200	200	تعداد کل پارامترهای مدل (متغیرها)
0.25	0.25	0.25	0.25	احتمال جهش Pm
0.7	0.7	0.7	0.7	احتمال هم‌گذری Pc
10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	دمای اولیه
0.99	0.99	0.99	0.99	نرخ کاهش دما
—	18	20	11	P
—	7	8.3	1.3	S
7.2	9.1	14.4	3.7	φ
—	23	26.4	9.3	k
0.977	0.973	0.934	0.997	بهترین برازش حاصله
311	981	473	473	زمان محاسبات S
8	8	8	9	تابع خطای استفاده شده

جدول ۳. پارامترهای استفاده شده در مدل BISQ برای داده واقعی (فنگ و ینگ ۲۰۱۵)

$\rho_l = 1006 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\rho_s = 2650 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_l = 2.19 \text{ (Gpa)}$	$R = 0.002 \text{ (m)}$
$\rho_g = 150 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_s = 37 \text{ (Gpa)}$	$G = 44 \text{ (Gpa)}$	$\eta = 0.001 \text{ (pa.s)}$
$\rho_a = 420 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$k_g = 0.021 \text{ (Gpa)}$	$f = 100 \text{ (Hz)}$	—

## ۶ نتیجه‌گیری

در وارون‌سازی هم‌زمان، طی یک فرایند وارون‌سازی چند پارامتر تخمین زده می‌شوند، حال آنکه در وارون‌سازی توأمان با استفاده از بیش از یک مجموعه داده، وارون‌سازی انجام می‌شود. در این تحقیق، طی فرایند وارون‌سازی هم‌زمان و توأمان، پارامترهای پتروفیزیکی سنگ مخزن شامل تخلخل، درصد اشباع آب، تراوایی و فشار مؤثر تخمین زده شد. مدل فیزیک سنگی BISQ به‌عنوان مدل پیشرو و الگوریتم ژنتیک جزیره‌ای موازی برای بهینه‌سازی سراسری توابع خطای چندسطحی استفاده شدند. دقت این الگوریتم، به‌وسیله داده مصنوعی ارزیابی شد و در فضای کاملاً غیرخطی و پیچیده مدل پیشرو، این الگوریتم توانست با دقت مناسبی پارامترهای وارون‌سازی را تخمین بزند. با این بررسی‌ها مشخص شد که هر چه اطلاعات از منطقه موردنظر بیشتر باشد و تابع هدف شامل جملات بیشتری از خروجی‌های مدل باشد، پارامترهای مدل با دقت زیادتری تخمین زده خواهند شد. علت این پدیده، نحوه وابستگی هر یک از خروجی‌های مدل به پارامترهای مدل است. برای تمامی جملات تابع هدف، مدل بهینه یکسان است، اما نحوه وابستگی هر خروجی به هر پارامتر تعیین می‌کند که طی وارون‌سازی با چنین تابع هدفی، آن پارامتر با چه خطایی تخمین زده شود. هنگامی که تابع هدف از برهم‌نهی سایر جملات تشکیل شود، علاوه‌براینکه دقت تخمین مدل بهینه برای سایر پارامترها افزایش می‌یابد، نوفه تصادفی نیز نقطه کمینه چنین تابعی را کمتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. با مدل‌سازی‌های انجام شده، نشان داده شد که در این مورد، امیدانس صوتی مستقل از تراوایی است و ضریب کیفیت

موج تراکمی وابستگی کمی به فشار مؤثر دارد؛ لذا استفاده از تنها یکی از این موارد برای وارون‌سازی خاصیتی که مستقل از آن است، جوابگو نیست، اما ترکیب آنها برای وارون‌سازی بردار پارامترهای مدلی که شامل تراوایی و فشار مؤثر باشد، مفید واقع شد و هنگامی که الگوریتم PNGA بر داده‌های واقعی شامل امیدانس صوتی و ضریب کیفیت اعمال شد، نتایج وارون‌سازی برای سایر پارامترها به‌جز تراوایی با دقت زیادی تعیین شد. تراوایی تخمینی در داده واقعی کیفیت مناسب ندارد؛ علت را می‌توان به این پدیده منتسب کرد که تنها عامل وابسته به آن، یعنی ضریب کیفیت برای هر رد لرزه، در محدوده مخزن یک مقدار دارد، لذا نمی‌توان انتظار تراوایی با تفکیک زیاد را داشت. نتایج وارون‌سازی داده واقعی شامل زون‌های منطبق با تخلخل و تراوایی زیاد و همچنین درصد اشباع آب و فشار محصورکننده کم هستند. این پدیده را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که چون در زون‌های گازی فشار سیال زیاد است، فشار مؤثر که از اختلاف فشار محصورکننده و فشار منفذی حاصل می‌شود، مقدار کمی دارد. همچنین درصد اشباع آب در این مناطق، کم و تراوایی و تخلخل زیاد است. مقایسه نتایج وارون‌سازی با نگاره‌های چاه، مؤید عملکرد این روش روی داده واقعی است.

## منابع

الا کشمی پای، ویجی، سکاران، راجا، ۱۳۹۱، شبکه‌های عصبی منطق فازی و الگوریتم ژنتیک، ترجمه محمود کشاورز مهر: انتشارات نوپردازان، تهران، ۲۴۷ ص.

- Mavko, G., and Nur, A., 1975, Melt squirt in the asthenosphere: *Journal of Geophysical Research*, **80**, 1444-1448.
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J., 2003, *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media*: Cambridge University Press.
- Morgan, E. C., Vanneste, M., Lecomte, I., Baise, L. G., Longva, O., and McAdoo, B., 2012, Estimation of free gas saturation from seismic reflection survey by the genetic algorithm inversion of a p-wave attenuation model: *Geophysics*, **88**(4), R175-R187.
- Nie, J. X., Yang, D. H., and Yang, H. Z., 2004, Inversion of reservoir parameters based on the BISQ model in partially saturated porous medium: *Chinese Journal of Geophysics*, **47**, 1241-1246.
- Phandi, A., Mallick, S., 2013, Multicomponent pre-stack seismic waveform inversion in transversely isotropic media using a non-dominated sorting genetic algorithm: *Geophysics*, **196**, 1600-1618.
- Parra, J. O., 1997, The transversely isotropic poroelastic wave equation including the Biot and the squirt mechanism: Theory and application: *Geophysics*, **62**, 309-318.
- Reine, C., Vanderbaan, M., and Clark, R., 2009, The robustness of seismic attenuation measurements using fixed- and variable-window time-frequency transforms: *Geophysics*, **74**(2), WA123-WA135.
- Sen, M. K., and Stoffa, P. L., 2013, *Global Optimization Methods in Geophysical Inversion (Second edition)*: Cambridge University Press.
- Stainsby, S. D., and Worthington, M. H., 1985, Q estimation from Vertical seismic profile data and anomalous variations in central North Sea: *Geophysics*, **50**, 615-626.
- Stoffa, P. L., and Sen, M. K., 1991, Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane wave seismograms: *Geophysics*, **56**, 1794-1810.
- Umbarkar, A. J., 2015, OpenMP Genetic Algorithm for Continuous Nonlinear Large-Scale Optimization Problems: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, **437**.
- Bachrach, R., 2006, Joint estimation of porosity and saturation using stochastic rock-physics modeling, *Geophysics*, **71**(5), O53-O63.
- Biot, M. A., 1956, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Low-frequency range: The Journal of the Acoustical Society of America, **28**(2), 168-178.
- Boschetti, F., Dentith, M. C., and List, R. D., 1996, Inversion of seismic refraction data using genetic algorithms: *Geophysics*, **61**, 1715-1727.
- Cheng, Y. F., Yang, D. H., and Yang, H. Z., 2002, Biot/squirt model in viscoelastic porous media: *Chinese Physics Letters*, **19**, 445-448.
- Coello, C. A. C., and Lamout, G. B., 2004, *Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms*: World Scientific.
- Deb, K., and Agrawal, R. B., 1995, Simulated binary crossover for continuous search space: *Complex Systems*, **9**, 115-148.
- Dvorkin, J., and Nur, A., 1993, Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms: *Geophysics*, **58**, 524-533.
- Dvorkin, J., Nolen-Hoeksema, R. C., and Nur, A., 1994, The squirt-flow mechanism: Macroscopic description: *Geophysics*, **59**, 428-438.
- Fang, Z., and Yang, D., 2015, Inversion of reservoir porosity, saturation, and permeability based on a robust hybrid genetic algorithm: *Geophysics*, **80**(5), R265-R280.
- Hampson, D., 1991, AVO inversion, theory and practice: *The Leading Edge*, **10**, 39-42.
- Hao, Y., Yang, D., and Zhou, Y., 2016, A feasibility of CO<sub>2</sub> geologic sequestration integrating reservoir simulation, rock-physics theory, and seismic modeling: *Geophysics*, **81**(5), M71-M82.
- Hofmann, R., Xu, X., Batzle, M., Prasad, M., Furre, A. K., and Pillitteri, A., 2005, Effective pressure or what is effect of pressure: *The Leading Edge*, **24**, 1256-1260.
- Holland, J. H., 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*: University of Michigan Press, Ann Arbor.
- King, R. T. F. A., and Rughooputh, H. C. S., 2003, Elitist multiobjective evolutionary algorithm for environmental/economic dispatch: in *Proceedings of The 2003 Congress on Evolutionary Computation*, **2**, IEEE, 1108-1114.

### پیوست الف) مدل BISQ

طبق مدل نی و همکاران (۲۰۰۴)، سرعت‌ها و ضرایب کیفیت به صورت زیر تعریف می‌شوند:



تراوایی، طول ویژه جریان فواره‌ای، تخلخل و درصد اشباع سیال است؛  $\omega$  و  $\omega_c$  نشان‌دهنده فرکانس زاویه‌ای و فرکانس ویژه بایوت هستند. سایر عبارات دخیل در مدل به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$F_{sq} = FS_q \quad \text{الف - ۹}$$

$$S_q = S_{q0} S_1$$

$$S_{q0} = 1 - \frac{2J_1(\gamma R)}{\gamma R J_0(\gamma R)} \quad \text{الف - ۱۰}$$

$$R = R_0 \sqrt{S_1} \quad \text{الف - ۱۱}$$

در روابط فوق  $J_0$  و  $J_1$  توابع بسل مرتبه صفر و یک است.  $M$  مدول کرنش تک‌محوره اسکلت خشک،  $R$  طول ویژه اصلاح شده و  $S_q$  ضریب جریان فواره‌ای در محیط با اشباع جزئی است.

$$\rho_x = (1 - \varphi)\rho_s + (1 - \theta)\varphi\rho_f \quad \text{الف - ۱۲}$$

$$\theta = \left( \frac{\rho_a + \varphi}{\rho_f} + i \frac{\varphi\eta}{\omega\rho_f k} \right)^{-1} \quad \text{الف - ۱۳}$$

$$\rho_1 = (1 - \varphi)\rho_s \quad \text{الف - ۱۴}$$

$$\rho_2 = \varphi\rho_f$$

$$\omega_c = \frac{\varphi\eta}{k\rho_f} \quad \text{الف - ۱۵}$$

$$\alpha = 1 - \frac{k}{k_s} \quad \text{الف - ۱۶}$$

$$M = 2G \frac{1-\nu}{1+\nu} \quad \text{الف - ۱۷}$$

$$F = \left( \frac{1}{K_{fl}} + \frac{a-\varphi}{\varphi K_s} \right)^{-1} \quad \text{الف - ۱۸}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\rho\omega^2}{F} \left( \frac{\varphi + \rho_a/\rho_f}{\varphi} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right)} \quad \text{الف - ۱۹}$$

$$V_s = \frac{\sqrt{G}}{\text{Re}(\sqrt{\rho_x})} \quad \text{الف - ۱}$$

$$V_{p1,2} = \frac{1}{\text{Re}(X_{1,2})} \quad \text{الف - ۲}$$

$$Q_s^{-1} = \frac{2\text{Im}(\sqrt{\rho_x})}{\text{Re}(\sqrt{\rho_x})} \quad \text{الف - ۳}$$

$$Q_{p1,2}^{-1} = \frac{2\text{Im}(X_{1,2})}{\text{Re}(X_{1,2})} \quad \text{الف - ۴}$$

در این روابط،  $V_s$  سرعت موج برشی،  $V_{p1,2}$  سرعت موج تراکمی سریع (۱) و کند (۲)،  $Q_s^{-1}$  و  $Q_{p1,2}^{-1}$  وارون ضریب کیفیت موج برشی و  $Q_{p1,2}^{-1}$  وارون ضریب کیفیت موج تراکمی سریع و کند است. مقادیر مفروض در این روابط عبارت‌اند از:

$$X_{1,2} = \sqrt{\frac{-B}{2A} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2A}\right)^2 - \frac{C}{A}}} \quad \text{الف - ۵}$$

$$A = \frac{\varphi F_{sq} M}{\rho_2^2} \quad \text{الف - ۶}$$

$$B = \frac{F_{sq} (2\alpha - \varphi - \frac{\rho_1}{\rho_2}) - (M + F_{sq} \frac{\alpha^2}{\varphi}) (1 + \frac{\rho_a + i\omega_c}{\rho_2 \omega})}{\rho_2} \quad \text{الف - ۷}$$

$$C = \frac{\rho_1}{\rho_2} + \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} + 1 \right) \left( \frac{\rho_a}{\rho_2} + i \frac{\omega_c}{\omega} \right) \quad \text{الف - ۸}$$

در این عبارات و روابطی که در پی خواهند آمد، پارامترها به قرار زیر هستند:  $K_s$ ،  $K_l$ ،  $K_g$  و  $K$  به ترتیب نشان‌دهنده مدول‌های بالک گاز، مایع، فاز جامد و مدول بالک اسکلت خشک است؛  $G$  و  $G_s$  نشان‌دهنده مدول برشی اسکلت خشک و مدول برشی فاز جامد هستند؛  $\rho_g$ ،  $\rho_a$  و  $\rho_s$  به ترتیب نشان‌دهنده چگالی فازهای گاز، مایع و جامد و چگالی جفت‌شدگی اضافی است.  $\nu$  نسبت پواسون و  $\eta$ ،  $k$ ،  $R_0$ ،  $\varphi$  و  $S_l$  نیز به ترتیب گرانروی،

می‌کند. از طرفی، برای جلوگیری از به دام افتادن در نقاط بهینه محلی، دما عهده‌دار نقش کشیدگی و جمع‌شدگی تابع برازش است؛ به این صورت که در مراحل اولیه اجرای الگوریتم که احتمالاً نقاط با برازش بیشتر، هم‌ارز نقاط بهینه محلی هستند، دمای انتخاب زیاد، باعث کشیدگی تابع برازش و کم‌اهمیت شدن برازش‌های بیشتر می‌شود و برعکس در نسل‌های پایانی، مقادیر کم دما باعث جمع‌شدگی و اغراق در مقادیر تابع برازش می‌شود (سن و ستوفا، ۲۰۱۳).

### ب- ۲- عملگر هم‌گذری

عملگر هم‌گذری مورد استفاده، هم‌گذری شبیه‌ساز باینری (Simulated Binary Crossover) یا (SBX) است که یک عملگر هم‌گذری برای الگوریتم ژنتیک‌های حقیقی است که دِب و همکاران (۱۹۹۵) آن را ارائه کردند. این عملگر، کارکرد یک عملگر هم‌گذری تک‌نقطه‌ای بر یک رشته باینری را شبیه‌سازی و قسمت مشترک نمودار (schemata) والدین را در نمودار فرزند حفظ می‌کند. نحوه محاسبه فرزندان  $x_i^{(1,t+1)}$  و  $x_i^{(2,t+1)}$  از والدین  $x_i^{(1,t)}$  و  $x_i^{(2,t)}$  به این صورت است که نخست، ضریب گسترش  $\beta_i$  تعریف می‌شود (دِب و همکاران ۱۹۹۵):

$$\beta_i = \left| \frac{x_i^{(2,t+1)} - x_i^{(1,t+1)}}{x_i^{(2,t)} - x_i^{(1,t)}} \right|, \quad \text{ب-۲}$$

سپس یک تابع توزیع احتمال (PDF) طوری طراحی می‌شود که قدرت جستجویی مشابه هم‌گذری تک‌نقطه‌ای در الگوریتم ژنتیک باینری داشته باشد. این توزیع به قرار زیر است:

$$\rho(\beta_i) = \begin{cases} 0.5(\eta_c + 1)\beta_i^{\eta_c}, & \beta_i \leq 1; \\ 0.5(\eta_c + 1)\beta_i^{\frac{1}{2+\eta_c}}, & \text{otherwise}; \end{cases} \quad \text{ب-۳}$$

$$K_f = S_1 K_1 + (1 - S_1) K_g \quad \text{الف-۲۰}$$

$$\rho_f = S_1 \rho_1 + (1 - S_1) \rho_g \quad \text{الف-۲۱}$$

$\alpha$  ضریب کشسانی فضای خالی استرس مؤثر است.  $K_f$  و  $\rho_f$  نیز به ترتیب مدول بالک مؤثر و چگالی مؤثر سیال هستند که با استفاده از نظریه میانگین هم‌ارز و روابط فوق تعیین می‌شوند.

### پیوست ب) عملگرهای استفاده شده در PNGA

#### ب- ۱- عملگر انتخاب

در عملگر انتخاب یک تابع توزیع احتمال تعریف می‌شود که احتمال انتخاب هر مدل را تعیین می‌کند. در اینجا تابع برازش (Fitness Function) هر مدل، با استفاده از توزیع گیس به تابع توزیع احتمال رابطه زیر مقیاس شده است. در واقع این تابع انتخاب از روش شبیه‌ساز تبرید (SA) به عاریه گرفته شده است تا در ترکیب با الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی را بهبود بخشد (سن و ستوفا، ۲۰۱۳):

$$P_s(m_i) = \frac{\exp\left[\frac{F(m_i)}{T}\right]}{\sum_{j=1}^n \exp\left[\frac{F(m_j)}{T}\right]} \quad \text{ب-۱}$$

که  $P(m)$  احتمال انتخاب شدن مدل  $m$ ،  $F(m)$  برازش مدل  $m$  و  $T$  دما است. سپس با استفاده از روش چرخ رولت (Roulette wheel) یک مدل انتخاب می‌شود: ابتدا احتمال انتخاب مدل‌ها به صورت تجمعی در یک متغیر مرتب و سپس یک عدد تصادفی از صفر تا بیشترین مقدار متغیر تعیین می‌شود. این عدد در محدوده برازش هر مدلی که باشد، آن مدل برای جفت‌گیری (mating) و اعمال عملگرهای هم‌گذری و جهش انتخاب می‌شود (پای و سکاران، ۱۳۹۱). واضح است که هر چه برازش یک مدل بیشتر باشد، احتمال انتخاب آن نیز بیشتر است و الگوریتم به سمت مدل‌های با برازش بیشتر حرکت

**ب- ۳ عملگر جهش**

برای عملگر جهش نیز از جهش پارامتر حقیقی (Real Parameter Mutation, RPM) استفاده شده است که در آن پارامتر مدل  $i$ -ام در فرزند جهش یافته  $x_i^{mutated}$  از نسخه اصلی  $x_i^{child}$  به صورت زیر تولید و همین روند برای سایر پارامترهای مدل و برای همه جمعیتی که باید جهش یابند، تکرار می شود.

ابتدا تابع توزیع احتمال  $\delta_i$  تعریف می شود (کینگ و رگپوت، ۲۰۰۳):

$$\delta_i = \begin{cases} [2r_i + (1 - 2r_i)(1 - \delta)^{k+1}]^{\frac{1}{k+1}} & 1; r_i \leq 0.5 \\ 1 - [2(1 - r_i) + \delta^{k+1}]^{\frac{1}{k+1}} & , \text{ otherwise.} \end{cases} \quad \text{ب-۵}$$

که در عبارت فوق  $r_i$  یک عدد تصادفی در بازه  $[0, 1]$  و  $k$  ضریب توزیع جهش است. ضریب توزیع جهش  $k$  نیز مانند ضریب توزیع هم گذری  $\eta$ ، غیرمنفی است. مقادیر کوچک  $k$  باعث ایجاد نسخه جهش یافته با فاصله زیاد از نسخه اصلی و مقادیر بزرگ آن باعث ایجاد نسخه جهش یافته در نزدیکی نسخه اصلی می شود. پس به طور ایده‌ال،  $k$  باید در خلال نسل‌ها تغییر کند. پارامتر  $\delta$  نیز به صورت زیر تعریف می شود:

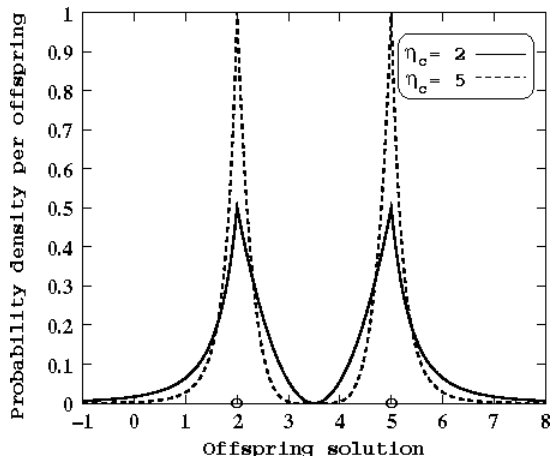
$$\delta = \frac{\min[(x_i^{child} - x_i^L), (x_i^U - x_i^{child})]}{x_i^U - x_i^L} \quad \text{ب-۶}$$

که در آن  $x_i^L$  و  $x_i^U$  کران‌های بالا و پایین جستجو برای پارامتر  $x_i$  هستند. پارامتر مدل جهش یافته به صورت زیر تعریف می شود:

$$x_i^{mutated} = x_i^{child} + (x_i^U - x_i^L)\delta_i \quad \text{ب-۷}$$

که در عبارت فوق ضریب توزیع  $\eta_c$  می تواند هر مقدار حقیقی غیرمنفی را بگیرد. مقدار بزرگ برای این ضریب، باعث زیاد شدن احتمال انتخاب فرزند در نزدیکی والدین می شود که اجازه جستجوی متمرکز را به ما می دهد و مقدار کوچک باعث ایجاد فرزندان با فاصله از والدین می شود که اجازه حفظ تنوع جستجو را می دهد. شکل (ب-۱) تابع توزیع احتمال فوق را برای مقادیر ۵ و ۲  $\eta_c = 2$  برای ایجاد فرزند از دو والد با مقادیر  $x_i^{(1,t)} = 2$  و  $x_i^{(2,t)} = 5$  نشان می دهد. در این مرحله، یک عدد تصادفی  $u_i$  بین صفر و یک انتخاب می شود سپس عرض  $\beta_{qi}$  از تابع توزیع احتمال، طوری تعیین می شود که مساحت زیر نمودار برابر با عدد تصادفی انتخاب شده باشد. بعد از تعیین  $\beta_{qi}$  از توزیع فوق، فرزندان به صورت زیر مشخص می شوند (دب و همکاران، ۱۹۹۵):

$$\begin{aligned} \text{ب-۴} \quad x_i^{(1,t+1)} &= 0.5 [(1 + \beta_{qi})x_i^{(1,t)} + (1 - \beta_{qi})x_i^{(2,t)}] \\ x_i^{(2,t+1)} &= 0.5 [(1 - \beta_{qi})x_i^{(1,t)} + (1 + \beta_{qi})x_i^{(2,t)}] \end{aligned}$$



شکل ب-۱. تابع چگالی احتمال برای ایجاد فرزند با عملگر SBX (دب و همکاران، ۱۹۹۵)

طیفی، روش تبدیل موجک کمترین حساسیت را به پهنای باند مورد استفاده برای رگرسیون دارد. از طرفی، چون در این روش به‌جز موجک مورد استفاده، پهنای باند رگرسیون تنها عامل کنترل کیفیت است، تعیین صحیح و بهینه آن بسیار مهم است. در این تحقیق، پهنای باند بهینه برای برازش خط به این صورت مشخص شد که ابتدا ضریب کیفیت ردها در بازه زمانی موردنظر (بالا و پایین مخزن) و در پهنای باندهای مختلف تعیین شد. سپس مقادیر غیرمنفی و واقع‌گرایانه برگزیده شد که منجر به انتخاب پهنای باند در محدوده ۷۵-۲۵ هرتز گشت، اما داده ضریب کیفیت قابل اعتماد برای مقایسه دقیق وجود نداشت؛ بنابراین با استفاده از برازش خط و رابطه (ج-۳)، ضریب کیفیت در محدوده مخزنی مشخص شده به‌دست آمد (شکل ج-۲) (مرگان و همکاران، ۲۰۱۲)

$$\ln\left(\frac{S(f)}{S_0(f)}\right) = \frac{\pi}{Q} t f \quad \text{ج-۳}$$

که در آن  $f$  محور فرکانس،  $Q$  ضریب کیفیت،  $t$  اختلاف زمان،  $S(f)$  طیف فرکانس در پایین مخزن و  $S_0(f)$  طیف فرکانسی بالای مخزن است.

### پیوست ج محاسبه ضریب کیفیت با استفاده از

#### روش نسبت طیفی

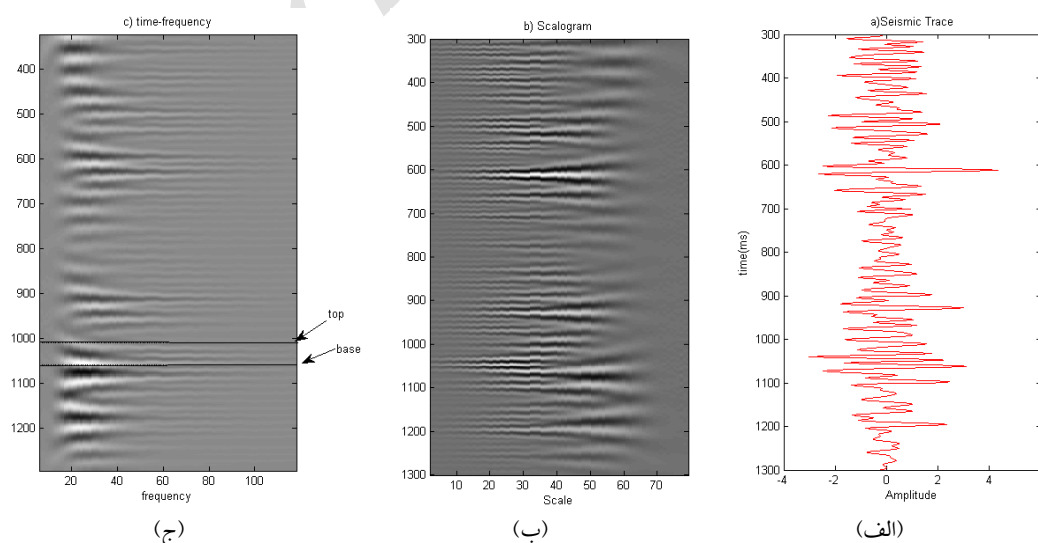
تبدیل موجک پیوسته یک رد لرزه مطابق رابطه (ج-۱) است که در اینجا از موجک گوسی استفاده شد (استینزی و ورسینگن، ۱۹۸۵):

$$S(\tau, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad \text{ج-۱}$$

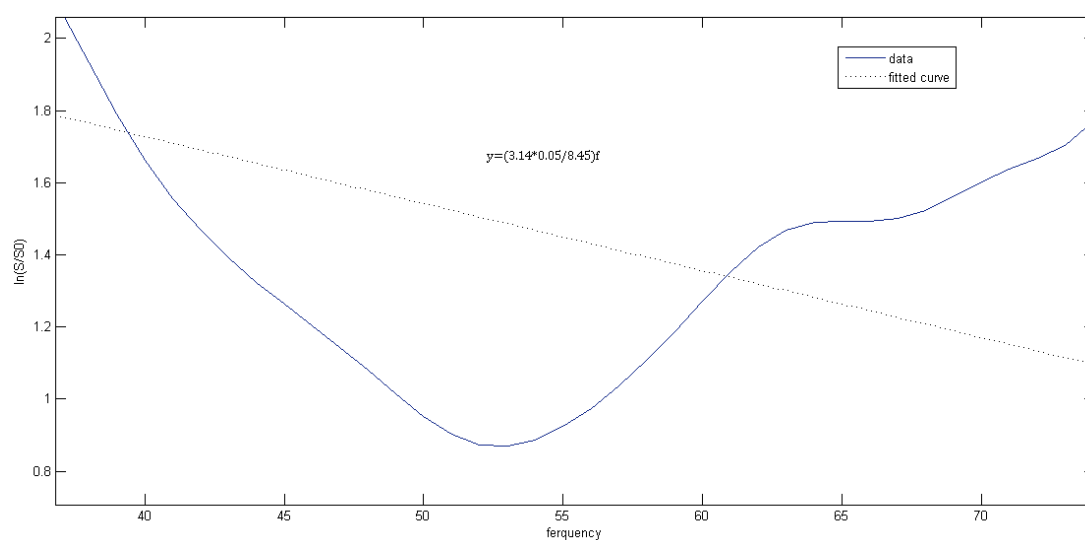
که در آن  $S(t)$  سیگنال لرزه‌ای، موجک مورد استفاده (علامت ستاره نشان دهنده مزدوج موجک است) و  $\alpha$  پارامتر مقیاس است. به‌عنوان نمونه، یک رد لرزه در شکل ج-۱ الف و تبدیل موجک آن در شکل ج-۱ ب نشان داده شده است. محور مقیاس در شکل (ج-۱ ج) توسط رابطه (ج-۲) با استفاده از مقادیر فرکانس مرکزی ( $F_c$ )، مقیاس ( $\alpha$ ) و فاصله نمونه‌برداری ( $\Delta t$ ) به محور فرکانس تبدیل شد و با استفاده از افق‌های تعیین شده برای منطقه مخزنی و باند فرکانسی در زمان‌های موردنظر، نسبت‌های فرکانسی تعیین شد:

$$F_a = \frac{F_c}{a} \quad \text{ج-۲}$$

رینه و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که در میان تبدیل‌های زمان-فرکانس برای استفاده از روش نسبت



شکل ج-۱. الف) یک رد لرزه از داده واقعی، ب) تبدیل موجک رد لرزه شکل الف، ج) رد لرزه شکل الف در حوزه زمان-فرکانس (ر. ک. توضیحات در متن)



شکل ج-۲. نسبت طیفی هموار شده پایین مخزن به بالای آن و خط برازش شده بر این منحنی. مطابق شکل، ضریب کیفیت برابر ۸/۴۵ به دست آمده است.

Archive of SID

## Joint and simultaneous inversion of petrophysical properties of reservoir rocks using parallel niche generic algorithm

Mahdi Saadat<sup>1</sup>, and Majid Nabi-Bidhendi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>M. Sc, graduated of Geophysics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Professor, Institute of Geophysics, University of Tehra, Tehran, Iran

(Received: 28 May 2018, Accepted: 30 September 2018)

### Summary

In a geophysical inversion process, the observed data is transformed to the meaningful properties of earth. For inversion of petrophysical properties, we need a rock physics model that links the petrophysical properties to the elastic properties of rock. The more accurate the model, the more reliable the results. There are a variety of procedures in which can invert petrophysical properties of earth through seismic data. Those procedures include experimental and empirical methods (In these methods, seismic data is assumed to be a function of some special petrophysical features of a zone), statistical methods and theoretical methods such as Biot model. Such theoretical method predicts elastic properties of rocks such as velocities and quality factors as functions of physical properties of rock and fluid. Here, we use BISQ (Biot-Squirt flow) model for inversion of petrophysical properties of reservoir rock. The BISQ describes seismic wave propagation in a fluid saturated poroelastic medium. This model consists of both Biot and squirt flow models and its accuracy is confirmed by several researchers versus other models. The model is developed for several anisotropic media too. Biot model relates the attenuation of seismic wave to parallel motion of fluid in a solid frame; while, the squirt flow model relates it to local motion of fluid. It is proven that both mechanisms exist during seismic wave propagation and BISQ model is correct for both of them, simultaneously.

In a petrophysical properties inversion process, there are two vital elements. First one, as described before, is using a rock physical model and the other one is mathematical method by which we solve an optimization problem that minimizes misfit between observed and predicted data. Here, we choose PNGA (Parallel Niche Genetic Algorithm) because of nonlinearity of BISQ model. Moreover, PNGA as an evolutionary algorithm, has capability of dealing with multi-objective optimization problems. We apply the mentioned method on both synthetic and real data. The inversion results show acceptable correlation with the used quantities in generation of synthetic and well logs.

**Keywords:** inversion, genetic algorithm, parallel computation, BISQ model, petrophysical properties

\*Corresponding author:

mnbhendi@ut.ac.ir