

اهمیت گزینش موجک مادر بهینه در تحلیل داده‌ها در حوزه علوم زمین

هاله عزیزی^(۱*)، بهزاد تخم‌چی^۲، حسین احمدی نوبری^۳، پرویز جبه‌دار مارالانی^۴ و حسین معاریان^۵

۱. دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، لرزه‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

۴. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

۵. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۹/۶/۱

تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۱۷

چکیده

استفاده از تبدیل‌های تجزیه سیگنال همچون فوریه و موجک کمک شایانی به شناسایی ویژگی‌های نهفته در داده‌ها می‌کند. خوشبختانه استفاده از این تبدیل‌ها در حوزه مطالعات علوم زمین در سال‌های اخیر رو به رشد بوده است. در این بین، تبدیل موجک ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که مطلوبیت استفاده از آن را به مراتب افزایش می‌دهد. اما موجک خانواده وسیعی از تبدیل‌ها را شامل می‌شود که با عنوان موجک‌های مادر شناخته می‌شوند و عملکرد کاملاً متفاوتی دارند. بنابراین، گزینش موجک مادر بهینه برای تجزیه داده‌های مختلف به گونه‌ای که بیشینه اطلاعات ممکن از تجزیه داده‌ها حاصل شود؛ موضوعی است که همواره باید مد نظر باشد. بررسی مروری تحقیقاتی که در حوزه علوم زمین صورت گرفته و از موجک استفاده کرده‌اند، نشان می‌دهد که متأسفانه به طور معمول، گزینش موجک مادر بهینه مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله، این نقیصه بررسی و شیوه‌های گزینش موجک مادر بهینه بحث شده و نتایج یک مطالعه موردی بر روی چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی یکی از میدان‌های نفتی جنوب ایران برای نشان دادن اهمیت این مطالعات ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تطابق انرژی، تبدیل فوریه، تبدیل موجک، چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی، موجک مادر بهینه

مقدمه

ژوزف فوریه^۱ بیان کرد که هر تابع ایستا^۲ (موج‌واره تکرار شونده) را می‌توان به صورت یک مجموع نامتناهی از امواج سینوسی و کسینوسی با بسامدهای مختلف نشان داد. وی با تبدیلی که بعدها به افتخارش فوریه نامیده شد، اطلاعات حوزه زمان را به حوزه بسامد برده و بسامدهای سازنده سیگنال را آشکار کرد. به تدریج، این ایده برای توابع غیرایستا^۳، که توزیع آماری آنها

تبدیل‌های ریاضی همچون فوریه^۱ و موجک^۲ اطلاعات را از حوزه زمان به حوزه بسامد (فرکانس) و یا حوزه زمان - بسامد برده و تغییرپذیری‌های نهفته در اطلاعات را به صورت شفاف‌تری نمایش می‌دهند. مفاهیم تبدیل در ریاضی قدمتی نزدیک به دو قرن دارند. در سال ۱۸۰۷ ریاضی‌دان فرانسوی جین بپتیست

* نویسنده مرتبط azizihaleh@yahoo.com

1. Fourier
2. wavelet
3. Jean Baptiste Joseph Fourier
4. stationary
5. non-stationary

Mallat (1989) نشان داد که موجک‌ها به صورت ضمنی در فرآیند تجزیه چند تفکیکی حضور دارند. اهمیت کاربردی این موضوع در کاهش عملیات تبدیل موجک به یک سری عملیات ساده متوسط‌گیری بود. یک سال بعد (1990) Daubechies یکی از کلیدی‌ترین گام‌ها را در زمینه توسعه موجک برداشت. وی یک گروه کاملاً جدید از موجک‌ها را کشف کرد که علاوه بر خاصیت تعامد، با فیلتر کردن دیجیتال ساده نیز قابل اجرا بودند. به این ترتیب ابزار کارآمد و ساده‌ای حاصل شد که امکان تفکیک اطلاعات به اجزای سازنده آنها را فراهم آورد و کاربرد موجک در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی توسعه یافت.

در حوزه علوم زمین کاربرد موجک توسعه روزافزونی دارد. برای مثال در جدول‌های ۱ و ۲ نتیجه یک جستجوی ساده درباره تعداد مقالات منتشر شده با موضوع موجک در مجموعه مقالات Elsevier و SPE آورده شده است. چنانکه در این جدول‌ها مشاهده می‌شود، استفاده از موجک به منظور حل مشکلات در مسائل مختلف علوم زمین (در این جستجو بیشتر موضوعات نفتی مد نظر بوده است) توسعه فراوانی یافته است، به گونه‌ای که تنها در این دو سایت بیش از ۲۵۰۰ مقاله در این رابطه وجود دارد. البته بیشتر این مقالات در دهه گذشته ارائه شده‌اند و تولیدات علمی در این باره به سرعت رو به گسترش است.

اما یک بررسی ساده مجدد نشان می‌دهد که در بیشتر مقالات منعکس شده در جدول‌های ۱ و ۲، از موجک مادر هار (اولین موجک مادر که توسط آلفرد هار در سال ۱۹۰۹ معرفی گردید)

با زمان تغییر می‌کند، بسط داده شد. با گذشت زمان دانشمندان دریافتند که با شکستن سیگنال به اجزای جداگانه، که امواج سینوسی خالص نیستند؛ می‌توان اطلاعات را در هر دو حوزه زمان و بسامد متمرکز کرد. این موضوع ایده بنیادینی است که به تدریج به عنوان موجک شناخته شد (Policar, 1999). از منظر تحقیقات مدون، بیش از سه دهه از عمر نظریه موجک نمی‌گذرد. آلفرد هار^۱ مجارستانی اولین تابع موجک را در سال ۱۹۱۰ معرفی کرد (Haar, 1910). بعدها این تابع به افتخار ایشان به نام موجک هار شناخته شد. در دهه ۱۹۳۰ لیتلوود و پالی^۲ و در سال ۱۹۴۶ گابور^۳، ریاضیدانان انگلیسی، گام‌های کلیدی را در تبدیل سیگنال به حوزه زمان - بسامد برداشتند. با پیشرفت تحقیقات، بالاخره در سال ۱۹۸۴، موجک ماهیت مستقلی پیدا کرد. در این سال (Grossman and Morlet, 1984) برای نخستین بار از واژه موجک استفاده کرده و اثبات کردند که موجک‌ها از روی اجزای موجک آنها بهتر از فوریه ساخته می‌شوند.

مایر که از پایه‌گذاران تئوری موجک است، نخستین کسی بود که در سال ۱۹۸۷ ارتباط بین موجک مارلت و دیگر موجک‌های ریاضی مانند لیتلوود و پالی را دریافت. وی موفق به کشف نوع جدیدی از موجک‌ها شد، که دارای خاصیت ریاضی تعامد بودند. تعامد به این معنی است که زیرشاخه‌های حاصل از تجزیه یک سیگنال به وسیله موجک، در هر سطح، مستقل از یکدیگرند. به این ترتیب کار کردن با تبدیل موجک به سادگی تبدیل فوریه شد (Meyer, 1987).

جدول ۱- کلمات کلیدی جستجو شده در مجموعه مقالات Elsevier

تعداد مقالات	کلمات کلیدی		
25721			wavelet
2011		seismic	wavelet
359	petroleum	seismic	wavelet
473	Oil	seismic	wavelet
1296		fracture	wavelet
428	Seismic	fracture	wavelet
289	Oil	fracture	wavelet
164	seismic	Oil	fracture
127	seismic	petroleum	fracture
152		pore pressure	petroleum
178		up scaling	petroleum
384		up scaling	oil
78	history matching	petroleum	wavelet
159	history matching	oil	wavelet
368	periodic structure	oil	wavelet
129	periodic structure	petroleum	wavelet
305	well log	petroleum	wavelet

1. Alfred Harr
2. Littlewood & Paley
3. Gabor

جدول ۲- کلمات کلیدی جستجو شده در مجموعه مقالات SPE

تعداد مقالات	کلمات کلیدی
490	wavelet
377	seismic
189	fracture
356	seismic fracture
188	Pore pressure
320	Up scaling
192	history matching
297	periodic structure
453	well log

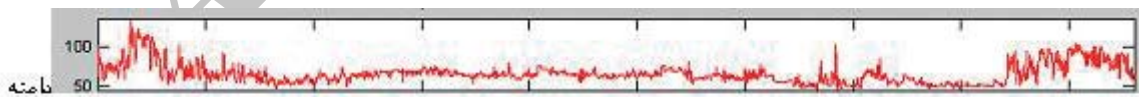
داده‌های مورد بررسی گزینش کرد؟ در این مقاله ضمن ارائه پاسخ به این سؤال با انجام یک مطالعه موردی بر روی چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی هفت چاه از یکی از میدانهای نفتی جنوب ایران، اهمیت گزینش موجک مادر بهینه و روش‌های کاربردی انجام آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تعریف مسئله

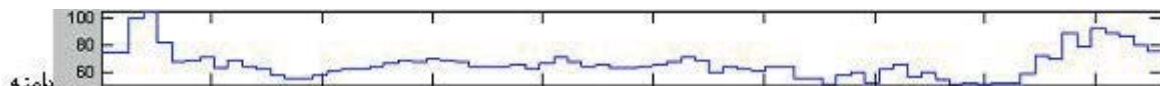
به منظور روشن شدن اهمیت گزینش موجک مادر برای تجزیه داده‌های مختلف، مثال ساده‌ای ذکر می‌شود. در اینجا چاه‌نمودار پتروفیزیکی صوتی یکی از چاه‌های میدان نفتی مورد مطالعه توسط سه موجک مادر مختلف تجزیه شده و رفتار بخش‌های تقریب و جزئیات^۲ سطح هفتم آنها مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل ۱ بخش تقریب سطح هفتم حاصل تجزیه چاه‌نمودار صوتی مورد بررسی در حالتی که چاه‌نمودار فوق با موجک‌های مادر هار^۳، کوئفلت ۱^۴ و بایوارتوگونال^۵ تجزیه شده آمده است. در شکل ۲ نیز بخش جزئیات حاصل تجزیه چاه‌نمودار فوق با موجک‌های مادر مذکور در سطح هفتم است.

برای تبدیل داده‌ها استفاده شده است. در بعضی مقالات نیز که از دیگر موجک‌های مادر استفاده شده، به طور معمول دلیلی برای گزینش موجک مادر استفاده شده، ارائه نشده است. برای مثال Pancaldi et al. (2007), Capilla (2005), Cattani and Sanchez Ruiz (2004), Sahimi and Hashemi (2001) and Mohebi et al. (2007) در حل مسائل مختلفی در زمینه‌های ژئوفیزیک، مدل‌سازی، مهندسی نفت و پتروفیزیک از موجک هار استفاده کرده‌اند. همچنین برای مثال Khene and Abdul-Jauwad (2000), Maraun and Miao and Moon (1999), Moreau et al. (1996) and Kurths (2004) نیز بدون اینکه گزینش موجک مادر را بررسی نمایند، از دیگر موجک‌های مادر در پژوهش‌های خود استفاده کرده‌اند.

البته تحقیقات مذکور و یا هر تحقیقی از این دست، بدون شک از اعتبار علمی مطلوبی برخوردار بوده و منظور از این نگارش بیان ایراد به آنها نیست. اما به هر حال این سؤال کلیدی مطرح است که آیا نوع تابع تبدیل موجک استفاده شده، نقشی در حل مسائل ندارد؟ بدون شک پاسخ این سؤال منفی است. حال سؤال دوم این است که چگونه می‌توان موجک مادر بهینه را برای تجزیه

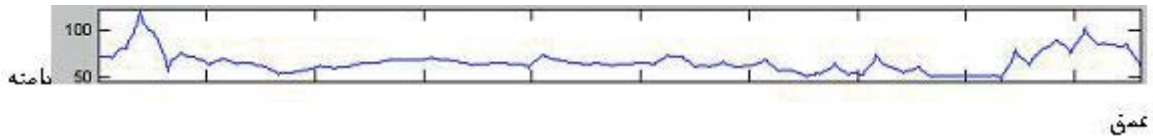


عمق
(الف) چاه‌نمودار صوتی

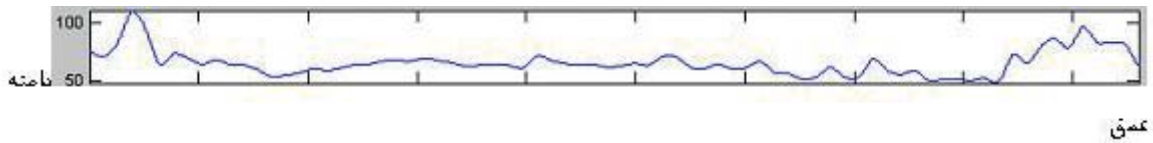


(ب) سطح هفتم تقریب حاصل تجزیه چاه‌نمودار صوتی با موجک مادر هار

1. approximation
2. details
3. Haar
4. coiflet 1
5. bior5.5



(ج) سطح هفتم تقریب حاصل تجزیه چاه‌نمودار صوتی با موجک مادر کویفلت ۱



(د) سطح هفتم تقریب حاصل تجزیه چاه‌نمودار صوتی با موجک مادر بایوارتوگونال ۵,۵

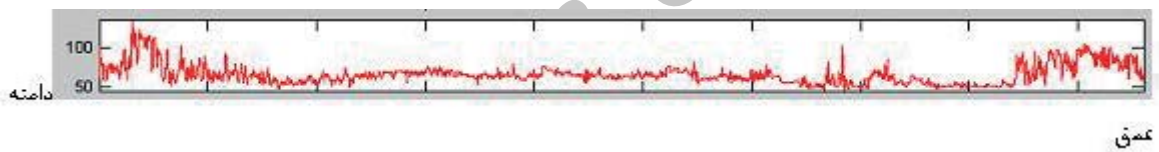
شکل ۱- سطح هفتم بخش تقریب حاصل تجزیه چاه‌نمودار صوتی (الف) با موجک‌های مادر (ب) هار، (ج) کویفلت ۱ و (د) بایوارتوگونال ۵,۵

در بازه ۵، ۵- تغییر می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود که انرژی سیگنال‌های حاصل از تجزیه با موجک‌های مادر مختلف، در محدوده‌های مختلف مکانی (عمقی)، و یا محدوده‌های مختلف بسامدی با هم متفاوت باشند.

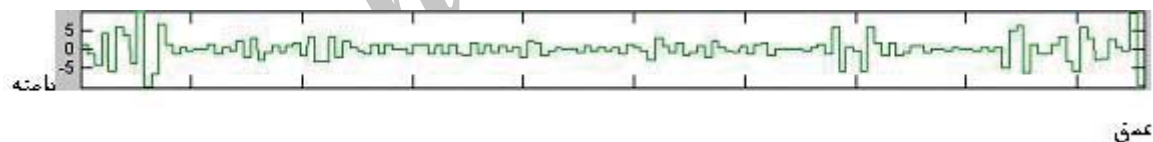
به منظور بررسی واضح‌تر تفاوت رفتار چاه‌نمودارهای حاصل از تجزیه، مقادیرشان به انرژی همان چاه‌نمودارها نرمالیزه شده‌اند. بدین منظور، انرژی چاه‌نمودار با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$E_{PL} = \sum_{i=1}^n PL_i^2 \quad (1)$$

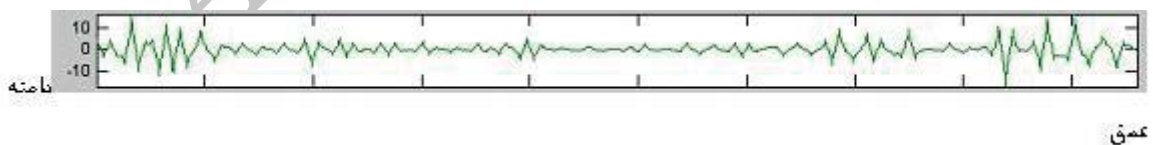
چنانکه در شکل‌های ۱ و ۲ ملاحظه می‌شود، رفتار سیگنال حاصل از تجزیه با استفاده از موجک‌های مادر مختلف کاملاً با هم متفاوت است. موجک مادر هار، چاه‌نمودار را پُرشکنج^۱ تجزیه کرده؛ در حالی که موجک مادر بایوارتوگونال آن را بسیار نرم^۲ تجزیه کرده است. موجک مادر کویفلت ۱ نیز بینابینی عمل کرده است. در بخش جزئیات نیز نه تنها قواعد بالا صادق است، بلکه حتی دامنه موج حاصل از تجزیه نیز متفاوت است. این دامنه در شرایط استفاده از موجک مادر کویفلت ۱، به‌طور تقریبی در بازه ۱۰، ۱۰- و در شرایط استفاده از موجک مادر هار، به‌طور تقریبی



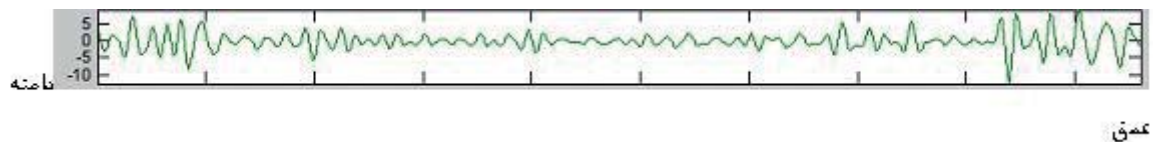
(الف) چاه‌نمودار صوتی



(ب) سطح هفتم جزئیات حاصل از تجزیه چاه‌نمودار صوتی با موجک مادر هار



(ج) سطح هفتم جزئیات حاصل از تجزیه چاه‌نمودار صوتی با موجک مادر کویفلت ۱



(د) سطح هفتم جزئیات حاصل از تجزیه چاه‌نمودار صوتی با موجک مادر بایوارتوگونال ۵,۵

شکل ۲- سطح هفتم بخش جزئیات حاصل از تجزیه چاه‌نمودار صوتی (الف) با موجک‌های مادر (ب) هار، (ج) کویفلت ۱ و (د) بایوارتوگونال ۵,۵

1. rough
2. smooth

لازم به ذکر است که عملیات فوق می‌تواند بر روی ضرایب تقریب (جزئیات) در سطوح مختلف انجام شود. در این صورت در روابط ۱ و ۲ منظور از انرژی بخش تقریب (جزئیات) چاه‌نمودار، PL_i مقادیر تقریب (جزئیات) چاه‌نمودار در هر عمق n ، i تعداد قرائت‌های صورت گرفته از بخش‌های تقریب (جزئیات) چاه‌نمودار در هر چاه و مقادیر نرمالیزه شده تقریب (جزئیات) چاه‌نمودار در اعماق i است.

برای نمونه در شکل‌های ۳ الف و ۳ ب به ترتیب نمودارهای خودهمبستگی سطح هفتم بخش‌های تقریب و جزئیات سیگنال در حالت تجزیه با موجک مادر کویفلت ۱ آورده شده‌اند. چنانکه در این شکل ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار همبستگی مشاهده شده برابر یک و در حالتی است که سیگنال مقابل به خود قرار گرفته است. بنابراین در صورت رسم نمودارهای همبستگی متقابل، میزان انحراف بیشترین همبستگی از مقدار یک، شاخصی از عدم شباهت سیگنال‌های حاصل از تجزیه با موجک‌های مادر مختلف خواهد بود. برای مثال در شکل‌های ۴ الف و ۴ ب به ترتیب نمودارهای همبستگی متقابل سطح هفتم تقریب و جزئیات در تجزیه با موجک‌های مادر هار و بایوارتوگونال ۵،۵ آورده

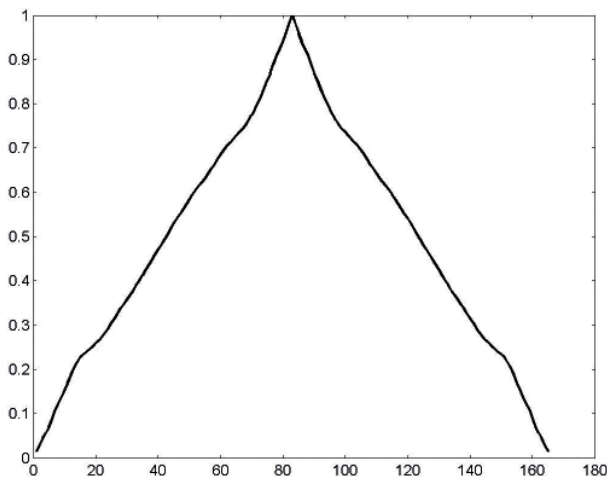
که در آن انرژی چاه‌نمودار، PL_i مقادیر چاه‌نمودار در هر عمق n و i تعداد قرائت‌های صورت گرفته از چاه-نمودار در هر چاه است. سپس مقادیر نرمالیزه شده چاه‌نمودار با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$N_{PL_i} = \frac{PL_i}{\sqrt{E_{PL}}} \quad (2)$$

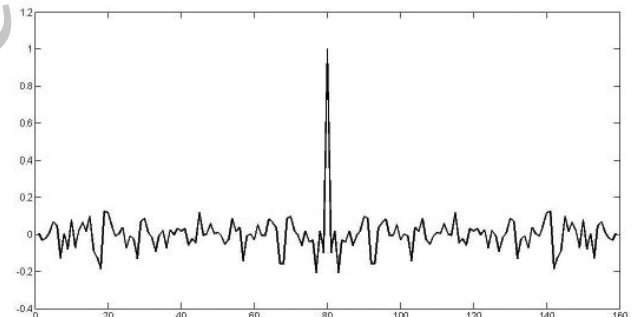
که در آن مقادیر نرمالیزه شده چاه‌نمودار در اعماق i است. در نهایت نمودارهای خودهمبستگی^۱ و همبستگی متقابل^۲ چاه‌نمودارهای نرمالیزه شده در شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده‌اند. به منظور سهولت بیان، چاه‌نمودارهای حاصل از تجزیه‌ای که نرمالیزه شده‌اند را سیگنال نامیده‌ایم. با توجه به اینکه مقادیر سیگنال به انرژی سیگنال نرمالیزه شده‌اند، بیشترین مقدار همبستگی آنها برابر یک خواهد شد:

$$\max_{auto} = \sum_{i=1}^n (N_{PL_i})^2 = \frac{\sum_{i=1}^n PL_i^2}{E_{PL}} = 1 \quad (3)$$

که در آن \max_{auto} مقدار بیشینه خودهمبستگی قابل ثبت است.

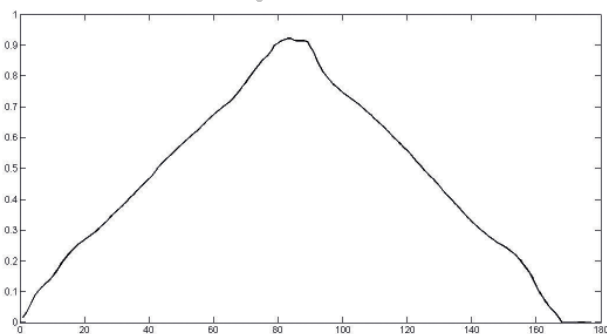


(ب)

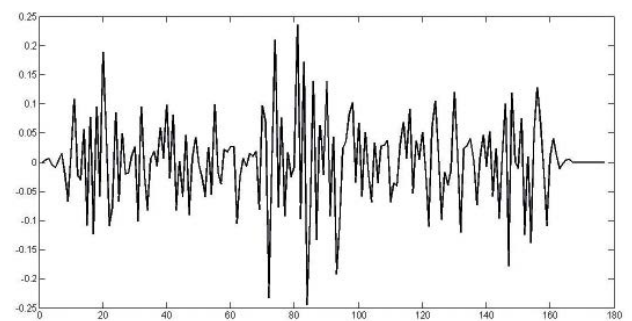


(الف)

شکل ۳- نمودارهای خودهمبستگی ضرایب در سطح هفتم تجزیه با موجک مادر کویفلت ۱ در بخش‌های الف) تقریب و ب) جزئیات



(ب)



(الف)

شکل ۴- نمودارهای همبستگی متقابل ضرایب در سطح هفتم تجزیه با موجک‌های مادر هار و بایوارتوگونال ۵،۵ در بخش‌های الف) تقریب و ب) جزئیات

1. auto corolation
2. cross corolation

الگوریتم‌های گزینش موجک مادر بهینه

الگوریتم‌های متعددی برای گزینش موجک مادر بهینه ارائه شده است؛ که به تعدادی از آنها به اختصار اشاره می‌شود، اما پیش از آن لازم به ذکر است که حتی روش‌هایی برای ساخت موجک‌های مادر مختص هر مجموعه داده ارائه شده‌اند که به نحو بسیار مطلوبی می‌توانند موجک مادر مناسب برای تجزیه داده‌ها را ارائه دهند. برای مثال روش گابور^۱ که توسط ریاضیدان انگلیسی ارائه شده به نحو نسبتاً مشکلی موجکی مادر مناسب برای هر مجموعه‌ای از داده را پیدا می‌کند (Mallat, 1999). البته بدیهی است که جستجو بین موجک‌های مادر موجود و گزینش موجک مادر مطلوب برای تجزیه داده‌ها به مراتب از ساخت موجک مادر جدید ساده‌تر خواهد بود.

یکی از روش‌های کارآمد برای گزینش موجک مادر مطلوب مورد استفاده برای تجزیه داده‌ها، الگوریتم تطابق انرژی است. در این الگوریتم، ابتدا تبدیل فوریه سیگنال گرفته شده و محدوده‌های بسامدی که انرژی سیگنال در آنها غالب است، شناسایی می‌شوند. سپس سیگنال توسط موجک‌های مادر مختلف تجزیه شده و انرژی سیگنال در محدوده‌های بسامدی که انرژی سیگنال حاصل از تبدیل فوریه آنها غالب بود، محاسبه می‌شود. بر اساس نظریه پارسوال^۲، موجک مادری مناسب‌تر است، که در آن تطابق بهتری بین این دو انرژی سیگنال محاسبه شده وجود داشته باشد (Burrus et al., 1997)؛ چرا که بالا بودن انرژی سیگنال در هر محدوده بسامدی، به مفهوم تمرکز اطلاعات در آن محدوده است. بنابراین با توجه به بیشینه بودن قابلیت تفکیک بسامدی فوریه، تطابق عملکرد تجزیه هر موجک مادر با فوریه به معنی قابلیت تفکیک بسامدی مطلوب آن موجک مادر خواهد بود. برای مثال در شکل‌های ۵.الف و ۵.ب تبدیل فوریه چاه‌نمودار صوتی مورد مطالعه در بخش پیش به ترتیب در کل و بخشی از محدوده بسامدی آمده است. در شکل ملاحظه می‌شود که بخش اعظم انرژی چاه‌نمودار در محدوده‌های بسامدی پائین نهفته است. بنابراین با توجه به شکل ۵.ب در الگوریتم تطابق انرژی موجک مادری گزینش خواهد شد؛ که برای مثال انرژی سیگنال حاصل از

شده‌اند. چنانکه در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار همبستگی متقابل قرائت شده کوچک‌تر از یک است. این موضوع به‌ویژه در نمودار همبستگی متقابل ضرایب بخش‌های جزئیات قابل مشاهده است؛ به گونه‌ای که در شکل‌های ۴.الف و ۴.ب بیشترین مقدار همبستگی به ترتیب برابر ۰/۹۲ و ۰/۲۴ است. انحراف این مقادیر از یک، معرف تفاوت عملکرد موجک‌های مادر مختلف در تجزیه سیگنال است.

در جدول ۳ خلاصه نتایج حاصل از این بررسی آمده است. چنانکه در این جدول مشاهده می‌شود، در بخش تقریب تفاوت به مراتب کمتری بین سیگنال‌های حاصل از تجزیه چاه‌نمودار صوتی با موجک‌های مادر مختلف مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که در تمامی موارد، بیشترین ضریب همبستگی متقابل بزرگ‌تر از ۰/۹۰ است. اما در بخش جزئیات، تفاوت‌ها بسیار بارز است؛ به صورتی که در عمده موارد بیشترین ضریب همبستگی متقابل کوچک‌تر از ۰/۳۰ است. بنابراین در این مورد خاص، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اگر اطلاعات داده‌های مورد بررسی در بخش‌های جزئیات (بسامد بالا) نهفته باشد، اهمیت گزینش موجک مادر بهینه جهت تجزیه داده‌ها به مراتب بیشتر از حالتی است که اطلاعات در بخش‌های بسامد پائین نهفته باشد. در ضمن از آنجا که در جدول ۳، ضریب همبستگی متقابل بخش‌های تقریب و جزئیات در حالات استفاده از موجک‌های مادر کویفلت ۱ و بایوآرتوگونال ۵،۵، بیشینه است (شکل‌های ۱ و ۲ نیز این موضوع را تأیید می‌کنند)، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این دو موجک مادر شبیه هم عمل می‌کنند.

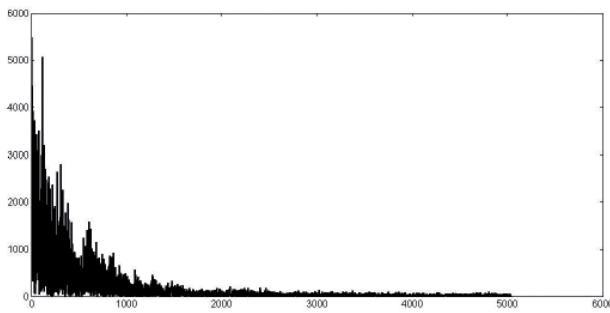
چنانکه ذکر شد، میانگین بیشترین ضریب همبستگی متقابل بخش‌های تقریب از جزئیات به مراتب بزرگ‌تر است. توجه شود که بخش جزئیات از عملکرد موجک‌های مادر کوتاه دامنه به دست آمده‌اند؛ بنابراین محدوده‌های کوچک‌تری از داده‌ها با این موجک‌ها آنالیز شده‌اند. به عبارت دیگر جزئیات، اطلاعات محلی را منعکس می‌کنند که به طور طبیعی تغییرپذیری‌های بیشتری را نمایندگی می‌کنند. بنابراین کوچک بودن ضریب همبستگی متقابل بخش‌های جزئیات، موضوعی قابل انتظار است.

جدول ۳- بیشترین مقادیر خود همبستگی و همبستگی متقابل ضرایب در سطح هفتم تجزیه با موجک‌های مادر مختلف

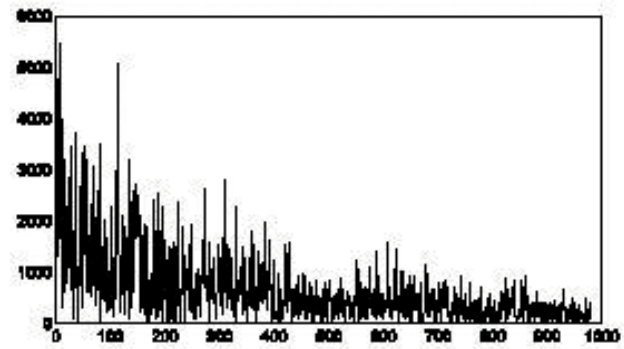
بخش	موجک مادر	هار	کویفلت ۱	بایوآرتوگونال ۵،۵
تقریب	هار	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۲
	کویفلت ۱	۰/۹۷	۱/۰۰	۰/۹۵
	بایوآرتوگونال ۵،۵	۰/۹۲	۰/۹۵	۱/۰۰
جزئیات	هار	۱/۰۰	۰/۲۵	۰/۲۴
	کویفلت ۱	۰/۲۵	۱/۰۰	۰/۹۳
	بایوآرتوگونال ۵،۵	۰/۲۴	۰/۹۳	۱/۰۰

1. Gabor

2. Parseval theorem



بسامد (هرتز)
(ب)



بسامد (هرتز)
(الف)

شکل ۵- تبدیل فوریه چاه‌نمودار صوتی به منظور یافتن محدوده بسامدی حاوی انرژی سیگنال بالا جهت اجرای الگوریتم تطابق انرژی الف) کل محدوده بسامدی حاصل از تبدیل فوریه ب) بخشی از محدوده بسامدی حاصل از تبدیل فوریه

مطالعه موردی

جهت مطالعه موردی، بررسی جهت تعیین موجک مادر بهینه به منظور تجزیه چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی چگالی (RHOB)، سانیک (DT)، اشعه گاما (GR) و نوترون (NPHI) هفت چاه یکی از میدان‌های نفت و گاز جنوب ایران در خلیج فارس صورت گرفته است. داده‌های پتروفیزیکی این میدان از سازندهای مختلفی برداشت شده‌اند. در جدول ۴ محدوده تقریبی عمقی سازندهای مختلف در هفت چاه مورد مطالعه آمده است. چنانکه در این جدول مشاهده می‌شود، ضخامت محدوده برداشت اطلاعات در چاه‌های مختلف از ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ متر متغیر بوده و شامل سازندهای مختلفی نیز است.

مقادیر چهار چاه‌نمودار مورد مطالعه (DT, RHOB, GR) و NPHI) تابعی از نوع سنگ هستند. نوع سنگ نیز در سازندهای مختلف، متفاوت است. بنابراین بدیهی است که محیط مورد مطالعه، برای چهار چاه‌نمودار، هتروژن است. چنانکه پیشتر نیز ذکر شد، در بسیاری از تحقیقاتی که از موجک برای تجزیه داده‌ها استفاده شده، نسبت به گزینش موجک بهینه اقدامی انجام نشده است. در ادامه نه تنها موجک مادر بهینه برای چاه‌نمودارهای مختلف در چاه‌های مختلف تعیین شده، بلکه نقش هتروژنتی نیز در گزینش موجک مادر بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور هتروژنتی چهار چاه‌نمودار مورد مطالعه در هفت چاه مورد مطالعه در حوزه بسامد بررسی و ملاحظه شد که به صورت تقریبی داده‌های هر چاه را می‌توان به چهار بخش نسبتاً هموزن تفکیک کرد. برای مثال در شکل ۶ چاه‌نمودار سانیک چاه شماره یک تا سطح دو تجزیه شده و چهار زون هموزن بر روی آن مشخص شده‌اند. از مطابقت عمقی این چهار زون با محدوده عمقی سازندهای مختلف (جدول ۴)، مشخص شد که این چهار زون به ترتیب شامل الف) پوش سنگ بالایی، ب) عضو غار سازند آسماری و آسماری بالایی، ج) آسماری زیرین تا سروک و

تجزیه آن در محدوده بسامدی ۱۰۰ تا ۳۰۰ هرتز سازگاری بهتری با انرژی سیگنال حاصل از تبدیل فوریه داشته باشد. لازم به ذکر است که در بخش مطالعه موردی این مقاله از این روش برای یافتن موجک مادر بهینه استفاده شده است.

الگوریتم تطابق آنتروپی^۱ یکی دیگر از روش‌های گزینش موجک مادر بهینه برای تجزیه داده‌ها است؛ که شبیه الگوریتم تطابق انرژی عمل می‌کند (Passoni et al., 2005). در این روش، محدوده‌های با آنتروپی بالا توسط تبدیل فوریه شناسایی شده و موجک مادری مطلوب خواهد بود که آنتروپی‌اش در آن محدوده‌ها سازگاری مناسبی با فوریه داشته باشد.

از دیگر روش‌های گزینش موجک مادر بهینه، الگوریتم تطابق شکل موج است. بعضی مواقع شکل موجی که باید ردیابی شود، تا حدی شناخته شده است. برای مثال معمولاً در عملیات لرزه‌ای شکل موج تولید شده توسط منبع تولید موج (انفجار، پُتک و...) تا حدی شناخته شده است. بدیهی است در این موارد، موجک مادری باید گزینش شود که بیشترین شباهت شکلی را با موجک منبع^۲ دارد (Chakraborty and Okaya, 1995). در این صورت ضرایب^۳ حاصل از تبدیل موجک سیگنال مورد بررسی در زمان‌های وقوع موجک منبع تقویت شده و لذا امکان ردیابی آن در سیگنال وجود خواهد داشت.

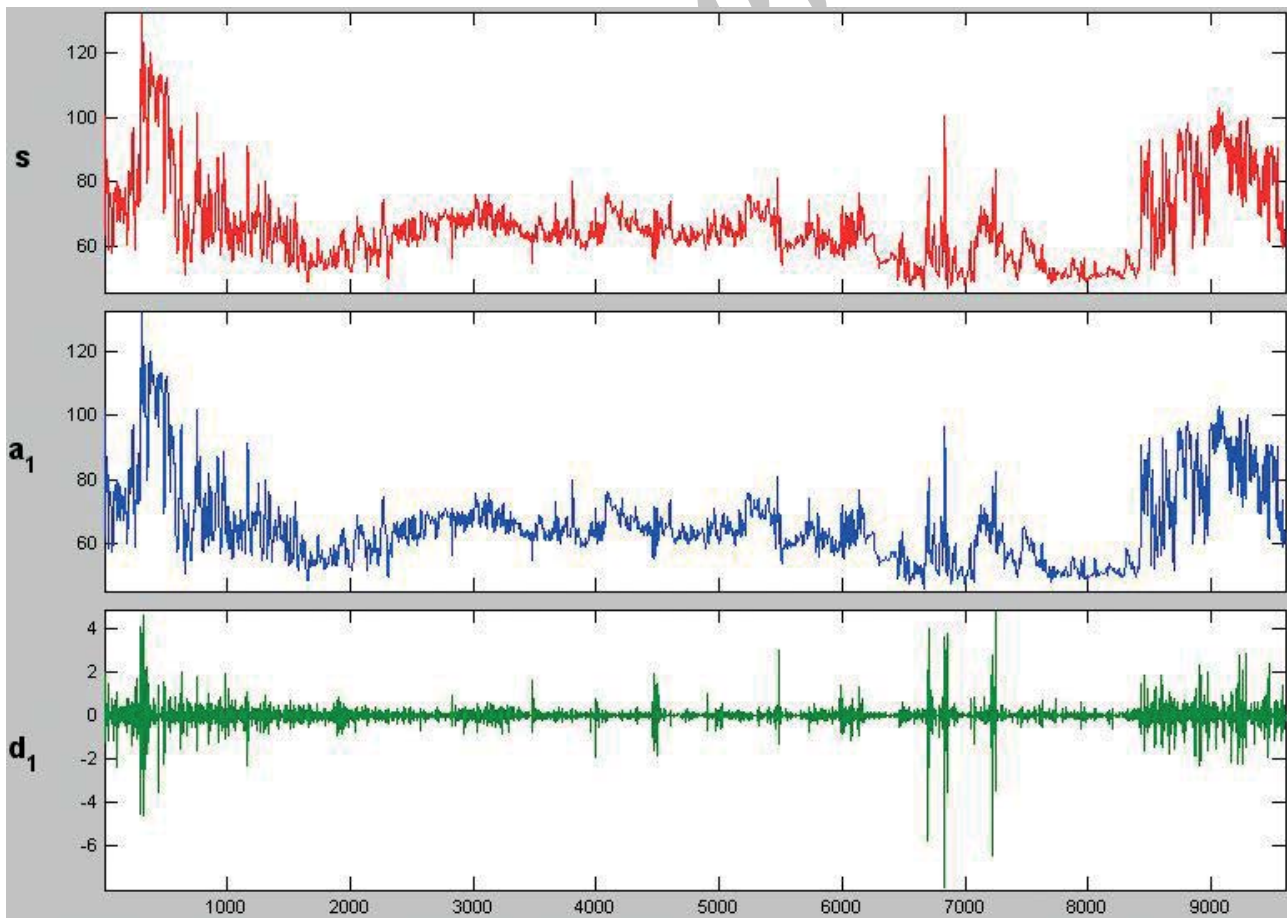
عده‌ای از محققان پیشنهاد کرده‌اند که موجک مادر مطلوب با توجه به عملکرد آن در شناسایی ویژگی‌های مورد جستجو انتخاب شود. بر اساس نظر این محققان، کاربر با توجه به پیش‌بینی‌هایی که نسبت به تغییرپذیری متغیر مورد مطالعه دارد، بهتر است موجک مادری را انتخاب کند که پس از تجزیه داده‌ها انتظاراتش برآورده شود.

البته روش‌های دیگری نیز برای گزینش موجک مادر بهینه ارائه شده‌اند، که به جهت رعایت اختصار، در اینجا از ذکر آنها خودداری می‌شود.

1. entropy matching algorithm
2. wavelet source
3. coefficient
4. member

جدول ۴- محدوده تقریبی عمقی (متر) چاه‌نمودارهای مورد بررسی در سازندهای مختلف (هفت چاه مورد مطالعه)

چاه ۷	چاه ۶	چاه ۵	چاه ۴	چاه ۳	چاه ۲	چاه ۱	سازند
۲۲۵۵-۲۲۸۵		۲۲۹۰-۲۳۰۰	۲۲۸۵-۲۲۹۵	۲۳۰۰-۲۳۱۰	۲۳۰۰-۲۳۱۰	---	پوش سنگ یا بخش نمکی
۲۲۸۵-۲۳۷۵		۲۳۰۰-۲۴۰۰	۲۲۹۵-۲۳۸۵	۲۳۱۰-۲۴۰۵	۲۳۱۰-۲۴۰۰	۲۲۹۰-۲۳۹۰	غار
۲۳۷۵-۲۴۰۵		۲۴۰۰-۲۵۲۵	۲۳۸۵-۲۵۱۰	۲۴۰۵-۲۵۲۵	۲۴۰۰-۲۵۲۵	۲۳۹۰-۲۵۱۵	آسماری
۲۴۰۵-۲۴۹۰							
۲۴۹۰-۲۶۱۵		۲۵۲۵-۲۸۶۰	۲۵۱۰-۲۸۴۰	۲۵۲۵-۲۸۶۵	۲۵۲۵-۲۶۴۰	۲۵۱۵-۲۸۴۰	چهرم
۲۶۱۵-۲۸۰۰		---	---	---	۲۶۴۰-۲۸۵۰	---	چهرم - پابده
۲۸۰۰-۲۸۱۵		۲۸۶۰-۲۹۳۰	۲۸۴۰-۲۹۱۰	۲۸۶۵-۲۹۴۵	۲۸۵۰-۲۹۲۵	۲۸۴۰-۲۹۱۵	پابده
---		۲۹۳۰-۲۹۵۵	۲۹۱۰-۲۹۳۰	۲۹۴۵-۲۹۶۵	---	۲۹۱۵-۲۹۳۵	گورپی
۲۸۱۵-۲۸۹۵		---	---	---	۲۹۲۵-۲۹۴۵	---	ایلام - گورپی
۲۸۹۵-۳۰۱۵		۲۹۵۵-۲۹۸۵	۲۹۳۰-۳۰۰۰	۲۹۶۵-۳۰۰۵	۲۹۴۵-۳۱۱۰	۲۹۳۵-۳۱۳۰	سروک
---		---	---	---	۳۱۱۰-۳۳۱۵	۳۱۳۰-۳۳۰۰	کزدمی



شکل ۶- تجزیه چاه‌نمودار صوتی چاه شماره یک تا سطح دو و تفکیک چهار زون نسبتاً هموزن بر روی آن

جدول ۵- محدوده تقریبی بخش‌های مشخص شده برای تعیین موجک‌های مادر بهینه در هفت چاه مورد مطالعه

سازند	چاه ۱	چاه ۲	چاه ۳	چاه ۴	چاه ۵	چاه ۶	چاه ۷
بخش اول (پوش سنگ)	---	۲۳۰۰-۲۳۱۰	۲۳۰۰-۲۳۱۰	۲۲۸۵-۲۲۹۵	۲۲۹۰-۲۳۰۰	---	۲۲۵۵-۲۲۸۵
بخش دوم (غار و آسماری بالایی)	۲۲۹۰-۲۴۵۰	۲۳۱۰-۲۴۷۰	۲۳۱۰-۲۴۶۰	۲۲۹۵-۲۴۵۵	۲۳۰۰-۲۴۶۰	۲۲۶۵-۲۴۸۰	۲۲۸۵-۲۴۰۵
بخش سوم (آسماری زیرین الی سروک)	۲۴۵۰-۳۱۳۰	۲۴۷۰-۳۱۱۰	۲۴۶۰-۳۰۰۵	۲۴۵۵-۳۰۰۰	۲۴۶۰-۲۹۸۵	۲۴۸۰-۳۰۳۰	۲۴۰۵-۳۰۱۵
بخش چهارم (کژدمی)	۳۱۳۰-۳۳۰۰	۳۱۱۰-۳۳۱۵	---	---	---	---	---

کل چاه، چاه شماره یک، موجک‌های مادر db4 و bior4.4 به عنوان موجک‌های مادر بهینه گزینش شده‌اند. به طور کلی در جدول‌های ۶ و ۷ به ترتیب نتایج شناسایی موجک‌های مادر بهینه در کل چاه و بخش‌های دوم و سوم و چهارم چاه یک و کل چاه و بخش‌های دوم و سوم چاه سه آمده است. مفهوم اعداد مذکور در این جدول‌ها به شرح زیر هستند:

چنانکه در جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، در کمتر مواردی موجک‌های مادر هار یا خانواده دابشیز برای تجزیه چاه‌نمودارها بهینه بوده‌اند. این در حالی است که در بیشتر مقالات در حوزه علوم زمین این موجک‌های مادر برای تجزیه داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در ضمن در جدول‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که موجک‌های مادر بهینه در حالتی که هتروژنتی‌ها تفکیک شده‌اند، متفاوت از حالتی هستند که هتروژنتی‌ها تفکیک نشده‌اند. نتیجه این که بهتر است پیش از شناسایی موجک‌های مادر بهینه در تجزیه داده‌ها، نسبت به شناسایی زون‌های هموزن اقدام و سپس در این زون‌ها نسبت به شناسایی موجک‌های مادر بهینه اقدام کرد.

در جدول ۸ موجک‌های مادر بهینه گزینش شده برای تجزیه چهار چاه‌نمودار مورد مطالعه در بخش‌های کل چاه، دوم و سوم (مطابق با جدول ۵) خلاصه شده‌اند. لازم به ذکر است که در جدول ۸، در مواردی که بیش از یک موجک مادر برای تجزیه داده‌های چاه‌نمودار بهینه بوده‌اند، تنها به ذکر یکی از آنها اکتفا شده است. برای مثال چنانکه در جدول ۶ در چاه‌نمودار DT در بخش کل چاه مشاهده می‌شود، موجک‌های مادر db4 و bior4.4 برای تجزیه بهینه بوده‌اند؛ اما در جدول ۸، در بخش کل چاه، چاه یک، تنها موجک مادر bior4.4 به عنوان موجک مادر بهینه جهت تجزیه چاه‌نمودار DT ذکر شده است.

به منظور استخراج اطلاعات معنی‌دار از جدول ۸ موجک‌های مادر بهینه جهت تجزیه چهار چاه‌نمودار مورد مطالعه در هفت چاه مورد بررسی در جدول ۹ خلاصه شده‌اند. چنانکه در این جدول مشاهده می‌شود، به ترتیب موجک‌های مادر dmey، bior5.5، dmey، bior3.1 و rbio3.9، rbio6.8 بهترین‌ها برای تجزیه چاه‌نمودارها هستند. در همین جدول مشاهده می‌شود که در سه چاه موجک مادر dmey و در دو چاه موجک مادر bior5.5 بهترین بوده‌اند.

د) کژدمی هستند. محدوده عمقی این زون‌ها در هفت چاه مورد مطالعه نیز در جدول ۵ آورده شده است.

در جدول‌های ۶ و ۷ به ترتیب نتایج شناسایی موجک‌های مادر بهینه در کل چاه و بخش‌های دوم و سوم و چهارم چاه یک و کل چاه و بخش‌های دوم و سوم چاه سه آمده است. مفهوم اعداد مذکور در این جدول‌ها به شرح زیر هستند:

- در این جدول‌ها، محدوده بسامدی مورد بررسی برای الگوریتم تطابق انرژی در ستون تبدیل فوریه آورده شده است. برای مثال محدوده بسامدی مورد بررسی چاه‌نمودار صوتی (DT)، در بخش کل چاه، چاه شماره یک، ۱۰-۵ هرتز بوده است.

- در محدوده بسامدی مشخص شده، درصد انرژی چاه‌نمودار تبدیل یافته با تبدیل فوریه (که در واقع معرف اطلاعات نسبی چاه‌نمودار، نهفته در آن محدوده بسامدی است) محاسبه شده است. برای مثال در جدول ۶، انرژی نسبی چاه‌نمودار (DT) در بخش کل چاه، چاه اول برابر ۰/۱۴ بوده است.

- انرژی نسبی چاه‌نمودارها که با موجک‌های مادر مختلف تجزیه شده‌اند، در محدوده‌های بسامدی مشخص شده، محاسبه شده است. برای این منظور تمامی موجک‌های مادر خانواده‌های مختلف موجک مادر مد نظر بوده، و در هر خانواده موجک مادری که انرژی‌اش در محدوده بسامدی مورد بررسی بیشترین سازگاری را با انرژی حاصل از تجزیه چاه‌نمودار با تبدیل فوریه دارد گزینش شده و در جدول‌های ۶ و ۷ معرفی شده است. برای مثال در جدول ۶ و برای چاه‌نمودار DT در بخش کل چاه، چاه اول، در خانواده موجک مادر دابشیز (db)، دابشیز ۴ (db4) بهترین سازگاری را با فوریه نشان داده است. بنابراین db4 بهترین موجک مادر از خانواده دابشیز برای تجزیه چاه‌نمودار DT در این چاه بوده است.

- از بین موجک‌های مادر برگزیده، آن موجک مادری به عنوان برگزیده‌ترین موجک مادر برای تجزیه چاه-نمودار گزینش شده که انرژی تجزیه چاه‌نمودار با آن در محدوده بسامدی مورد بررسی بیشترین سازگاری را با انرژی حاصل از اعمال تبدیل فوریه نشان بدهد. برای مثال برای تجزیه چاه‌نمودار DT در بخش

جدول ۶- گزینش موجک مادر بهینه برای ۴ چاه‌نمودار برگزیده در کل و سه بخش چاه یک به روش مطابقت انرژی

Fourier	dmey	rbio	bior	coif	sym	db	haar	خانواده	بخش
								موجک مادر	
چاه‌نمودار									
۵-۱۰	dmey	rbio4.4	bior4.4	coif2	sym6	db4	haar	DT	کل چاه
۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۴۳		
۱۰-۲۰	dmey	rbio2.8	bior5.5	coif5	sym6	db7	haar	GR	
۰/۴۹	۰/۱۶	۰/۶۱	۰/۵۶	۰/۹۷	۰/۹۳	۱/۳۹	۳/۴۶		
۲۰-۴۰	dmey	rbio2.8	bior5.5	coif5	sym8	db5	haar	NPHI	
۰/۱۶	۰/۴۲	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۴۹	۰/۸۳		
۲/۵-۵	dmey	rbio4.4	bior1.1	coif2	sym2	db2	haar	RHOB	
۰/۰۱۶	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲		
۲۵-۵۰	dmey	rbio2.2	bior5.5	coif5	sym2	db10	haar	DT	بخش ۱
۰/۱۶	۰/۴۴	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۵۱		
۲۵-۵۰	dmey	rbio3.9	bior5.5	coif5	sym8	db9	haar	GR	
۱/۳۳	۳/۹۶	۱/۷۶	۱/۶۸	۲/۴۹	۲/۹۱	۲/۴۴	۳/۶۷		
۲۵-۵۰	dmey	rbio3.7	bior5.5	coif1	sym8	db3	haar	NPHI	
۰/۱۷	۰/۶۴	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۵۰		
۲۵-۵۰	dmey	rbio2.6	bior5.5	coif5	sym8	db9	haar	RHOB	
۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۷		
۱۴-۲۷	dmey	rbio6.8	bior5.5	coif5	sym8	db10	haar	DT	بخش ۲
۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸		
۱۴-۲۷	dmey	rbio6.8	bior4.4	coif4	sym8	db10	haar	GR	
۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۳	۱/۵۶		
۱۴-۲۷	dmey	rbio6.8	bior5.5	coif5	sym8	db10	haar	NPHI	
۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۲۸	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۴۷		
۱۴-۲۷	dmey	rbio6.8	bior5.5	coif5	sym6	db7	haar	RHOB	
۰/۰۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲		
۱۴-۲۷	dmey	rbio3.5	bior1.5	coif5	sym8	db10	haar	DT	بخش ۳
۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۲۷	۰/۲۸		
۱۴-۲۷	dmey	rbio3.9	bior5.5	coif5	sym2	db10	haar	GR	
۰/۳۶	۰/۱۷	۰/۹۴	۱/۰۸	۲/۱۸	۱/۲۴	۲/۱۵	۲/۳۷		
۱۴-۲۷	dmey	rbio3.9	bior5.5	coif5	sym5	db10	haar	NPHI	
۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۴۷	۰/۶۴	۰/۲۹	۰/۷۸	۱/۰۰		
۱۴-۲۷	dmey	rbio4.4	bior2.2	coif2	sym4	db8	haar	RHOB	
۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱		

جدول ۷- گزینش موجک مادر بهینه برای ۴ چاه‌نمودار برگزیده در کل و دو بخش چاه سه به روش مطابقت انرژی

بخش	خانواده موجک مادر	چاه‌نمودار						
		haar	db	sym	coif	bior	rbio	dmey
کل چاه	DT	haar	db5	sym7	coif4	bior3.5	rbio3.3	dmey
		۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۴۴	۰/۲۷	۰/۱۶
	GR	haar	db1	sym8	coif5	bior3.5	rbio1.5	dmey
		۱/۹۹	۲/۰۳	۲/۰۳	۳/۶۴	۴/۸۴	۴/۰۹	۲/۵۴
بخش ۱	NPHI	haar	db5	sym2	coif5	bior3.1	rbio3.1	dmey
		۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۷۶	۲/۰۸	۱/۹۲	۱/۴۰
بخش ۲	RHOB	haar	db2	sym2	coif1	bior3.1	rbio3.1	dmey
		۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۳
بخش ۱	DT	haar	db1	sym8	coif5	bior1.1	rbio3.3	dmey
		۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۵۲	۰/۳۰	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۰۷
	GR	haar	db1	sym7	coif4	bior6.8	rbio3.3	dmey
		۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۰۶
بخش ۲	NPHI	haar	db8	sym7	coif2	bior2.6	rbio2.4	dmey
		۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۱
بخش ۲	RHOB	haar	db1	sym8	coif3	bior1.1	rbio1.1	dmey
		۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۰
بخش ۱	DT	haar	db8	sym8	coif5	bior6.8	rbio6.8	dmey
		۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱
	GR	haar	db1	sym5	coif5	bior5.5	rbio1.1	dmey
		۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۶	۱/۰۲	۰/۶۲	۰/۶۸	۰/۲۴
بخش ۲	NPHI	haar	db10	sym8	coif5	bior6.8	rbio6.8	dmey
		۰/۷۹	۰/۲۹	۰/۳۷	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۰۷
بخش ۲	RHOB	haar	db10	sym8	coif1	bior5.5	rbio6.8	dmey
		۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰

در جدول ۱۱ خانواده موجک مادر بهینه برای تجزیه چاه‌نمودارهای مختلف معرفی شده‌اند. چنانکه در این جدول ملاحظه می‌شود، خانواده موجک‌های مادر rbio، bior، dmey از بیشینه مطلوبیت به منظور تجزیه چهار چاه‌نمودار پتروفیزیکی مورد بررسی برخوردار بوده‌اند؛ به گونه‌ای که حدود ۸۷ درصد موجک‌های مادر بهینه در این خانواده‌ها قرار دارند. نظر به اینکه این موجک‌های مادر جهت تجزیه سیگنال‌های با تغییرپذیری کم مطلوب‌اند، اتفاق رُخ داده قابل پیش‌بینی بوده است. مجدداً متذکر می‌گردم که با استناد به شکل ۵، بخش عمده انرژی این چاه‌نمودارها در بسامدهای پائین نهفته که معرف تغییرپذیری‌های کم چاه‌نمودارها است.

در جدول ۱۰ مناسب‌ترین موجک‌های مادر برای تجزیه چهار چاه‌نمودار مورد بررسی در سه بخش مورد مطالعه آمده‌اند. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود برای تجزیه دو چاه‌نمودار DT و GR، موجک مادر dmey بهینه بوده است. برای تجزیه چاه‌نمودار NPHI، موجک مادر bior5.5 بهینه بوده و هر دو موجک مادر dmey و bior5.5 برای تجزیه چاه‌نمودار RHOB مناسب بوده‌اند. اما نکته مهم قابل توجه دیگر در جدول ۱۰، تفاوت موجک‌های مادر بهینه در حالتی که هتروژنتی چاه‌ها در نظر گرفته نشده، با حالتی است که این هتروژنتی لحاظ شده است. به عبارت دیگر در جدول ۱۰ به وضوح نشان داده شده که هیچ شباهتی بین موجک‌های مادر بهینه در بخش کل چاه با موجک‌های مادر بهینه در بخش‌های دو و سه وجود ندارد.

جدول ۸- موجک‌های مادر بهینه گزینش شده برای تجزیه چهار چاه‌نمودار مورد مطالعه در هفت چاه مورد بررسی به روش مطابقت انرژی

							چاه	بخش
چاه ۷	چاه ۶	چاه ۵	چاه ۴	چاه ۳	چاه ۲	چاه ۱	چاه‌نمودار	
rbio3.1	sym8	bior3.1	bior3.1	bior3.5	rbio3.9	bior4.4	DT	کل چاه
bior3.3	dmey	bior3.7	bior3.3	bior3.5	rbio3.9	bior5.5	GR	
bior3.1	bior5.5	dmey	bior3.5	bior3.1	rbio3.9	bior5.5	NPHI	
bior3.1	rbio3.5	dmey	bior3.5	bior3.1	rbio1.1	bior1.1	RHOB	
coif3	bior1.5	rbio6.8	bior3.9	rbio3.3	dmey	rbio6.8	DT	بخش دوم
db5	dmey	rbio3.9	rbi03.1	bior6.8	bior3.7	rbio6.8	GR	
coif3	rbio1.3	rbio1.1	bior3.7	bior2.6	dmey	bior5.5	NPHI	
coif1	dmey	rbio6.8	coif1	bior1.1	dmey	bior5.5	RHOB	
coif2	bior2.8	dmey	bior5.5	bior6.8	dmey	rbio3.5	DT	بخش سوم
dmey	db5	dmey	bior5.5	dmey	coif3	dmey	GR	
rbio2.4	bior5.5	rbio3.9	rbio2.6	bior6.8	sym7	rbio3.9	NPHI	
rbio2.4	bior1.1	rbio3.9	bior5.5	bior5.5	sym8	rbio4.4	RHOB	

جدول ۹- رده‌بندی موجک‌های مادر بهینه به منظور تجزیه چهار چاه‌نمودار مورد بررسی در هفت چاه مورد مطالعه به روش مطابقت انرژی

								چاه	موجک مادر
درصد	مجموع	چاه ۷	چاه ۶	چاه ۵	چاه ۴	چاه ۳	چاه ۲	چاه ۱	
۱۵/۵	۱۳	۳	۴	---	---	۱	۴	۱	dmey
۱۲/۰	۱۰	---	۲	---	۳	۱	---	۴	bior5.5
۸/۳	۷	---	---	۳	---	---	۳	۱	rbio3.9
۷/۱	۶	---	۲	۲	---	---	---	۲	rbio6.8
۷/۱	۶	۲	---	۱	۱	۲	---	---	bior3.1
۴/۸	۴	---	---	---	۲	۲	---	---	bior3.5
۳/۵	۳	---	۱	---	---	۱	---	۱	bior1.1
۳/۵	۳	۱	---	---	۱	۱	---	---	bior3.3
۳/۵	۳	---	---	۱	۱	---	۱	---	bior3.7
۳/۵	۳	---	---	---	---	۳	---	---	bior6.8
۳/۵	۳	۲	---	---	---	---	۱	---	coif3
۲/۴	۲	۲	---	---	---	---	---	---	rbio2.4
۲/۴	۲	۱	---	---	۱	---	---	---	rbio3.1
۲/۴	۲	---	۱	---	---	---	---	۱	rbio3.5
۲/۴	۲	۱	---	---	۱	---	---	---	coif1
۲/۴	۲	۱	۱	---	---	---	---	---	db5
۲/۴	۲	---	۱	---	---	---	۱	---	sym8
۱/۲	۱	---	---	---	---	۱	---	---	bior2.6

ادامه جدول ۹-۹

درصد	مجموع	چاه ۷	چاه ۶	چاه ۵	چاه ۴	چاه ۳	چاه ۲	چاه ۱	چاه موجک مادر
۱/۲	۱	---	۱	---	---	---	---	---	bior2.8
۱/۲	۱	---	---	---	---	---	---	۱	bior4.4
۱/۲	۱	---	---	---	۱	---	---	---	rbio2.6
۱/۲	۱	---	---	---	---	۱	---	---	rbio3.3
۱/۲	۱	---	---	---	---	---	---	۱	rbio4.4
۱/۲	۱	۱	---	---	---	---	---	---	coif2
۱/۲	۱	---	---	---	---	---	۱	---	sym7
۱۰۰	dmey	dmey	dmey	rbio3.9	bior5.5	bior6.8	dmey	bior5.5	موجک مادر بهینه

جدول ۱۰- موجک‌های مادر بهینه گزینش شده برای تجزیه چهار چاه‌نمودار مورد مطالعه به روش مطابقت انرژی

مجموع	بخش سوم	بخش دوم	کل چاه	بخش		چاه‌نمودار
				شرح		
dmey	dmey	rbio6.8	bior3.1	موجک مادر بهینه		DT
۳	۲	۲	۲	دفعات مشاهده		
dmey	dmey	---	bior3.3	موجک مادر بهینه		GR
۶	۴	---	۲	دفعات مشاهده		
bior5.5	rbio3.9	---	bior5.5	موجک مادر بهینه		NPHI
۴	۲	---	bior3.1	دفعات مشاهده		
bior5.5	bior5.5	dmey coif1	bior3.1	موجک مادر بهینه		RHOB
۳	۲	۲	۲	دفعات مشاهده		

جدول ۱۱- خانواده موجک‌های مادر بهینه گزینش شده برای تجزیه چهار چاه‌نمودار مورد مطالعه به روش مطابقت انرژی

خانواده موجک مادر بهینه	db	sym	coif	dmey	rbio	bior	خانواده موجک مادر چاه‌نمودار
bior	---	۱	---	۳	۶	۱۸	کل چاه
bior rbio	۱	---	۴	۵	۹	۹	بخش دوم
bior	۱	۲	۲	۶	۸	۹	بخش سوم
۸۴	۲	۳	۶	۱۴	۲۳	۳۶	مجموع
۱۰۰	۲/۴	۳/۶	۷/۱	۱۶/۶	۲۷/۴	۴۲/۹	درصد

نتیجه گیری

خوشبختانه به تازگی استفاده از تبدیل‌های تجزیه سیگنال همچون فوریه و موجک در حل مسائل حوزه علوم زمین روند رو به رشدی داشته است؛ اما از موجک مادر بهینه کمتر برای مطالعات استفاده شده است. در این مقاله سعی شد به بیان اهمیت شناسایی موجک مادر بهینه در تجزیه داده‌ها در حوزه علوم زمین پرداخته شده و تفاوت عملکرد موجک‌های مادر مختلف در تجزیه داده‌ها به زبان ساده‌ای نمایش داده شود. همچنین چندین روش گزینش موجک مادر بهینه به اختصار شرح داده شدند. در نهایت نسبت به شناسایی موجک‌های مادر بهینه برای تجزیه چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی DT، GR، NPHI و RHOB در هفت چاه یکی از میدان‌های نفتی جنوبی کشور به روش الگوریتم انطباق انرژی اقدام شد. نتایج مطالعه نه تنها تنوع موجک‌های مادر بهینه در تجزیه چاه‌نمودارها را نمایان ساخت؛ بلکه اهمیت تفکیک زون‌های هموژن پیش از شناسایی موجک مادر بهینه را نشان داد. در ضمن مشخص شد که رفتار سیگنال در شناسایی موجک مادر بهینه جهت تجزیه آن اهمیت دارد؛ به نحوی که برای تجزیه سیگنال‌های نرم، موجک‌های مادر نرم مطلوب‌ترند و برای تجزیه سیگنال‌های زبر، موجک‌های مادر با تغییرپذیری بالا باید گزینش گردند. در مطالعه موردی صورت گرفته مشخص شد که چاه‌نمودارهای پتروفیزیکی مورد بررسی نرم بوده (بخش اعظم انرژی آنها در بسامدهای پائین نهفته است)، و خانواده‌های موجک مادر bior، rbio و dmey بیشترین مطلوبیت را در تجزیه آنها دارند.

سپاسگزارى

بدین ترتیب از شرکت نفت فلات قاره و به‌ویژه آقای مهندس موسوی به دلیل همکاری و در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز تحقیق، تقدیر می‌گردد.

منابع

- Grossman, A. and Morlet, J., 1984, Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape, *SIAM J. Math. Anal.*, 15, 723-736.
- Haar, A., 1910, Zur Theorie der orthogonalen Functionensystem, *Mathematische Annalen*, 69, 331-371.
- Khene, M.F. and Abdul-Jauwad, S.H., 2000, Adaptive Seismic Compression by Wavelet Shrinkage, *IEEE*, 74, 544-548.
- Mallat, S.G., 1989, A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 45, 674-693.
- Mallat, S., 1999, A wavelet tour of signal processing, Academic press, 663.
- Maraun, D. and Kurths, J., 2004, Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 505-514.
- Meyer, Y., 1987, Ondelettes, fonctions splines et analyses graduees [Wavelets, spline functions, and multiresolution analysis], *Rend. Sem. Mat. Univ. Politec. Torino*, 45, 1-42, Translated by John Horvath.
- Miao, X.G. and Moon, W.M., 1999, Application of wavelet transform in reflection seismic data analysis, *Geosciences Journal*, 3, 3, 171-179.
- Mohebbi, A.R., Haghghi, M. and Sahimi, M., 2007, Using Conventional Logs for Fracture Detection and Characterization in One of Iranian Field, *International Petroleum Technology Conference held in Dubai, U.A.E.*, Paper IPTC 11186.
- Moreau, F., Gibert, D. and Saracco, G., 1996, Filtering non-stationary geophysical data with orthogonal wavelets, *Geophysical Research Letters*, 23, 4, 407-410.
- Pancaldi, V., Christensen, K. and King, P.R., 2007, Permeability up-scaling using Haar wavelet, *Transp Porous Med*, 67, 395-412.
- Passoni, I., Dai Pra, A., Rabal, H., Trivi, M. and Arizaga, R., 2005, Dynamic speckle processing using wavelet based entropy, *Optics Communications*, 246, Issues 1-3, 219-228.
- Policar, R., 1999, The Story of Wavelet, *IMACS/IEEE CSCC*, 5481-5486.
- Sahimi M. and Hashemi M. 2001, Wavelet Identification of the Spatial Distribution of Fractures, *Geophysical Reservoir Letters*, 28, 4, 611-614.
- Burrus, C.S., Burrus, C.Sidney, Guo, H. and Gopinath, R.A., 1997, *Introduction to Wavelet and Wavelet Transforms: A Primer*, Prentice Hall, 268.
- Capilla, C., 2005, Application of the Haar wavelet transform to detect microseismic signal arrivals, *Journal of Applied Geophysics*, 56, 36-46.
- Cattani, C. and Sanchez Ruiz, L.M., 2004, Discrete Differential Operators in Multidimensional Haar Wavelet Spaces, *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 44, 2347-2355.
- Chakraborty, A. and Okaya, D., 1995, Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods, *Geophysics*, 6, 6, 1906-1916.
- Daubechies, I., 1990, *The wavelet transform, time fre-*