

شناسایی مرز کانال‌ها در داده‌های لرزه‌نگاری سه‌بعدی بر مبنای تبدیل شیرلت

هاله کربالعلی^{*}، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ■ عبدالرحیم جواهریان، دانشگاه تهران ■ فرناز غلامی، شرکت نفت خزر

چکیده

امروزه شناسایی خودکار پدیده‌ها از داده‌های لرزه‌نگاری از الزامات اساسی تفسیر اطلاعات است. کانال‌ها در داده‌های لرزه‌نگاری از جمله پدیده‌های رسوبی مهم در اکتشاف منابع هیدروکربنی هستند که با توجه به عمق تدفین و نیز محتویات سیال ممکن است قابلیت مخزنی داشته باشند یا به‌عنوان مخاطره‌ی حفاری در نظر گرفته شوند. در هر دو صورت، قبل از برنامه‌ریزی جهت حفاری چاه باید بتوان محل وقوع آنها را تعیین کرد. تبدیل شیرلت به‌عنوان تبدیلی چندمقیاسی و چندجهتی قابلیت مناسبی در شناسایی پدیده‌ها با شیب‌های مختلف دارد و تا کنون کاربردهای زیادی در پردازش تصویر داشته است. از آنجا که داده‌های لرزه‌نگاری حالت خاصی از تصاویر رقومی است می‌توان برای یافتن لبه‌ها در داده‌های لرزه‌ای که محل وقوع کانال‌ها هستند از خاصیت ناهمسانگردی تبدیل شیرلت استفاده کرد. در این مطالعه، طرح‌واره‌ی شناسایی لبه بر مبنای شیرلت‌های دوبعدی مخروط-سازگار با پشتیبانی فشرده جهت شناسایی مرز کانال‌ها روی برش‌های زمانی از داده‌های لرزه‌ای سه‌بعدی پس از برانبارش مصنوعی و واقعی حاوی کانال طراحی و اعمال شد. نتایج حاصل از شناسایی مرز کانال‌ها بر مبنای تبدیل شیرلت با عملگرهای شناخته شده در پردازش تصویر مانند عملگرهای سوبل و کنی هم به‌صورت کیفی و هم به‌صورت کمی مقایسه شد که طرح‌واره‌ی شناسایی لبه بر مبنای تبدیل شیرلت حتی در حضور نوفه‌ی اتفاقی نتایج مطلوب‌تری ارائه داد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۱۱/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۲/۲۷

واژگان کلیدی:

شناسایی مرز کانال‌ها، تبدیل شیرلت، عملگر سوبل، عملگر کنی

مقدمه

روش اعمال پالایه در راستای ساختار که شامل انجام یک طرح انتشار در امتداد راستای ساختار است جهت شناسایی لبه‌ها مؤثر است [۸]. عملگر سوبل در راستای شیب نیز قادر به شناسایی بهینه‌ی ناپیوستگی هاست [۹]. مشتق جهتی مرتبه‌ی اول برای شناسایی لبه‌ها مفید بوده و می‌توان از فاز لحظه‌ای برای تعیین راستا استفاده کرد [۱۰]. اعمال عملگر سوبل بر نتایج همدوسی می‌تواند کانال‌ها را با دقت و وضوح بیشتری استخراج کند [۱۱]. تبدیل شیرلت [۱۲ و ۱۳] به‌عنوان تبدیلی چندمقیاسی و چندجهتی ویژگی‌های درخور توجه فراوانی دارد که آنرا برای بررسی سیستم‌های جهتی مناسب معرفی می‌کند. برخی از این خصوصیات شامل تخمین بهینه‌ی پراکنده‌ی عناصر ناهمسان‌گرد، توابع پایه با پشتیبانی فشرده با هدف محلی‌سازی فضایی، توصیف یکنواخت هر دو حیطه‌ی پیوسته و گسسته و پیاده‌سازی بر پایه‌ی طرح‌واره‌های عددی بهینه است. تبدیل شیرلت تا کنون در زمینه‌ی تضعیف نوفه‌ی ژئوفیزیکی [۱۴] به کار رفته است. در مطالعه‌ی پیش‌رو روش تبدیل شیرلت دوبعدی بر مبنای شیرلت‌های مخروط-سازگار با پشتیبانی فشرده جهت شناسایی مرز کانال‌ها روی برش‌های زمانی از اطلاعات لرزه‌نگاری سه‌بعدی واقعی و مصنوعی استفاده شده است.

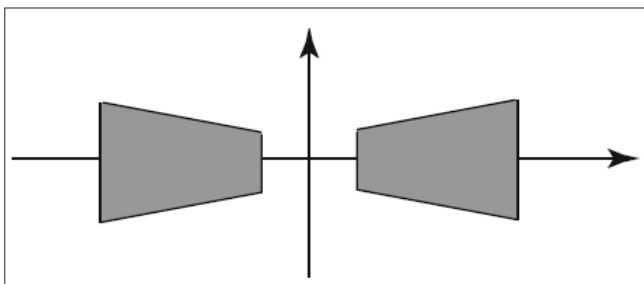
۱- روش انجام کار

از آنجا که عملگر مقیاس‌بندی برای تولید موجک‌هایی با پوشش ناهمسانگرد نیاز است، از خانواده‌ی عملگرهای اتساع و D_{A_h} و $a > 0$ میانگین بر مبنای ماتریس‌های مقیاس‌بندی سهمی‌گون A_p طبق رابطه‌ی ۱- استفاده می‌شود [۱۵]:

از منظر اکتشاف منابع هیدروکربنی، کانال‌ها از جمله پدیده‌های ساختاری حائز اهمیت هستند. در حوضه‌های رسوبی آب عمیق، کانال‌هایی که در اعماق کم مدفون شده‌اند عملیات حفاری را با چالش‌های زیادی روبرو می‌کنند و مکان‌یابی آنها قبل از تعیین محل چاه و تعیین مسیر حفاری ضروری است [۱]. به‌علاوه کانال‌های مدفون در صورت داشتن تخلخل کافی و اشباع با سیال هیدروکربنی می‌توانند از دیدگاه مخزنی اهمیت یابند. بنابراین شناسایی و تفسیر کانال‌ها در داده‌های لرزه‌نگاری از اهمیت فراوانی برخوردار است. در مقاطع لرزه‌ای می‌توان کانال‌ها را به‌عنوان لبه‌های تصویر که محل وقوع مؤلفه‌های فرکانس بالای تصویر هستند و عمدتاً به‌صورت مقادیر زیاد شدت نسبت به پیکسل‌های مجاور ظاهر می‌شوند در نظر گرفت. طرح‌واره‌های بهینه‌ی شناسایی لبه شامل مراحل نرم‌کنندگی، افزایش، تشخیص و محلی‌سازی است [۲]. با پیشرفت لرزه‌نگاری سه‌بعدی در دهه‌ی ۸۰ میلادی، نشانگرهای لرزه‌ای مختلفی جهت شناسایی لبه‌ها در اطلاعات لرزه‌نگاری معرفی شدند که مهم‌ترین آنها شامل: نشانگر شیب، آزیموت، دامنه و لکه‌ی روشن [۳]، نشانگر همدوسی [۴]، نشانگر انحنای [۵] هستند. روش تفاضل^۱ که از عملگر سوبل در پردازش تصویر الهام گرفته و بر مبنای تفاضل ردلرزه‌های مجاور در مکعب داده‌های دامنه، فرکانس لحظه‌ای و مقام لرزه‌ای کار می‌کند به‌عنوان روش مناسبی در شناسایی لبه‌ها عمل می‌کند [۶]. روش نرم‌کنندگی همراه با حفظ لبه که از پالایه‌ی کاواهارا در پردازش تصویر الهام گرفته به‌عنوان یک روش پیش‌پردازشی مؤثر در تضعیف نوفه تصادفی معرفی شده که برخلاف روش‌های پنجره‌ی لغزان^۲ و پالایه‌های میانگین‌گیری متحرک باعث تار شدن تصویر نمی‌شود [۷]. همچنین

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (haleh.karbalaali@aut.ac.ir)

(زمان مورد نیاز جهت انجام طرح‌واره) می‌گردد. شکل-۲ یک برش زمانی از داده‌ی لرزه‌نگاری مصنوعی در برگیرنده‌ی دو کانال با مقاومت‌های صوتی متفاوت در زمان ۶۴۸ میلی‌ثانیه را نشان می‌دهد. بیشینه‌ی محلی ضرایب شیرلت در مخروط‌های عمودی و افقی در بیشترین مقیاس تجزیه و نیز بیشینه‌ی محلی ضرایب شیرلت برش زمانی در این تصویر پیداست. از بیشینه‌ی هیستوگرام بیشینه‌ی محلی ضرایب شیرلت جهت یافتن حد آستانه برای تقسیم‌بندی تصویر استفاده می‌شود (شکل-۳). نتایج حاصل از اعمال طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی، پالایه‌ی سوبل و عملگر کنی جهت شناسایی مرزهای کانال‌ها بر این برش زمانی در شکل-۴ ارائه شده است. همان‌گونه که پیداست طرح‌واره‌ی شناسایی لبه با استفاده از شیرلت‌های دوبعدی نسبت به پالایه‌های سوبل و کنی در مکان‌یابی دقیق مرزهای کانال در برش زمانی موفق‌تر عمل کرده است. شکل-۵ مرزهای شناسایی شده از کانال‌ها در زمان ۶۴۸ میلی‌ثانیه با نسبت سیگنال به نوفه‌ی ۵ را توسط این سه روش شناسایی لبه نشان می‌دهد. در این حالت نیز طرح‌واره‌ی شناسایی لبه با استفاده از شیرلت‌های دوبعدی نسبت به پالایه‌های سوبل و کنی بهتر عمل کرده است. مقایسه‌ی کمی طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی، پالایه‌ی سوبل و عملگر کنی با استفاده از آزمایش دسته‌بندی دودویی شامل ویژگی، دقت، حساسیت و اندازه‌ی F- در شکل-۶ نشان داده شده است. برش زمانی دودویی بر اساس روش آستانه‌گذاری اتسو به‌عنوان تصویر مبنا برای مقایسه‌ی کمی استفاده شد. همان‌گونه که در شکل-۶ پیداست، طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی نسبت به عملگر سوبل در شناسایی مکان دقیق لبه‌ها و شناسایی کمتر نقاط غیرلبه به‌عنوان لبه موفق‌تر بوده است. از آنجا که عملگر کنی نتایج کیفی قابل‌قبولی ارائه نداده در محاسبه‌ی کمی از آن استفاده نشده است. در این بخش برش زمانی از داده‌ی لرزه‌نگاری سه‌بعدی پس از برانبارش حاوی کانال از دریای خزر جنوبی در حوضه‌ی خزر جنوبی مطالعه شده است. طبق شکل-۷ حوضه‌ی خزر جنوبی متشکل از دریای خزر جنوبی، شرق آذربایجان، غرب ترکمنستان و شمال ایران است. حوضه‌ی خزر جنوبی از اطراف توسط کوه‌های تالش، البرز، کاکاسس و کپه‌داغ احاطه شده است. حوضه‌ی خزر جنوبی باقیمانده‌ی حوضه‌ی پشت-قوسی اقیانوس دیرینه‌ی تتیس است. این حوضه از زمان پیدایش در کرتاسه در حال فرورفتن است که موجب تشکیل رسوباتی با ضخامت ۲۰ کیلومتر شده است. حوضه‌ی خزر جنوبی ویژگی‌های قابل‌توجهی دارد که شامل نرخ زیاد رسوب‌گذاری، فشردگی کم رسوبات، گرا دیان زمین-



شکل ۱ | پوشش یک شیرلت سستی در حیطه‌ی فرکانس [۱۵]

$$A_a = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a^2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

در مرحله‌ی بعد، یک تبدیل متعامد برای تغییر راستاهای موجک‌ها مورد نیاز است. می‌توان از عملگر برش D_{S_s} و $\mathbb{R} \in s$ استفاده کرد که ماتریس برش S_s طبق رابطه‌ی-۲ تعریف می‌شود [۱۵]:

$$S_s = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

سیستم‌های شیرلت پیوسته دوبعدی طبق رابطه‌ی-۳ تعریف می‌شوند [۱۵]:

$$SH(\psi) = \{\psi_{a,s,t} = T_t D_{A_a} D_{S_s} \psi : a > 0, s \in \mathbb{R}, t \in \mathbb{R}^2\}. \quad (3)$$

که T_t عملگر جابجایی است. برای $L^2 \in \psi(\mathbb{R}^2)$ تبدیل شیرلت پیوسته‌ی $L^2 \in f(\mathbb{R}^2)$ نگاشت رابطه‌ی-۴ است [۱۵]:

$$L^2(\mathbb{R}^2)f \mapsto \ell\mathcal{H}_\psi f(a,s,t) = \langle f, \psi_{M,t} \rangle, (a,s,t) \in \mathbb{S}. \quad \exists \quad (4)$$

بنابراین، $\ell\mathcal{H}_\psi$ تابع f را به ضرایب $\ell\mathcal{H}_\psi f(a,s,t)$ مرتبط با متغیر مقیاس $a > 0$ متغیر راستا $s \in \mathbb{R}$ و متغیر مکان $t \in \mathbb{R}^2$ می‌نگارد. پوشش فرکانسی یک جفت شیرلت در شکل-۱ ارائه شده است.

مکان‌های احتمالی حضور لبه‌ها را می‌توان بر مبنای بیشینه‌های محلی تبدیل شیرلت پیدا کرد. بیشینه‌ی محلی تبدیل شیرلت طبق رابطه‌ی-۵ تعریف می‌گردد [۱۶]:

$$E(n_1, n_2) = \sum_k |SH_f[j_0, k, n_1, n_2]|^2. \quad (5)$$

به‌طوری که f تصویر مورد نظر، (n_1, n_2) اندیس پیکسل، j_0 آخرین مقیاس تجزیه، k راستا، SH_f تبدیل شیرلت تصویر و E بیشینه‌ی اندازه‌ی تبدیل شیرلت است [۱۶].

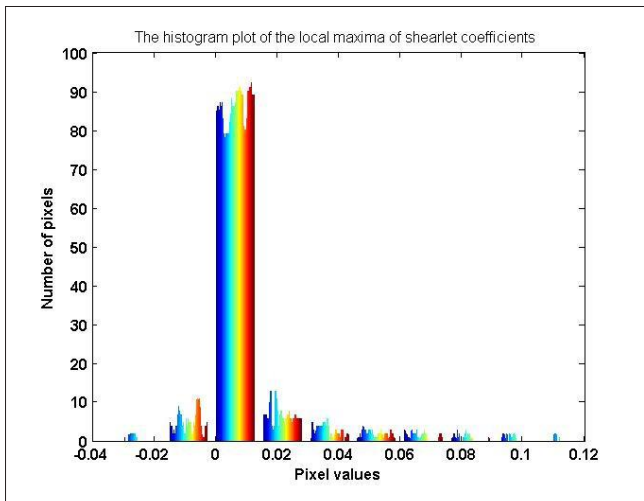
نتایج

طرح‌واره‌ی شناسایی لبه بر مبنای شیرلت‌های دوبعدی با پایه‌ی فشرده از طرح‌واره‌ی ارائه شده بر پایه‌ی شیرلت‌های باند-محدود [۱۶] الهام گرفته است. شیرلت‌ها با پوشش فشرده، باند-محدود در حیطه‌ی زمان دارد و همین امر آنها را برای مسأله‌ی شناسایی لبه توانمند می‌کند. تعداد مقیاس‌های تجزیه از متغیرهای حائز اهمیت در این روش نیست. اما نکته‌ی مهم اینست که برای شناسایی لبه‌های تصویر، بالاترین مقیاس تجزیه در نظر گرفته شود. تعداد راستاها، اندازه‌ی موجک و نیز یافتن صحیح حد آستانه و نازک‌کنندگی از متغیرهای تأثیرگذار در طرح‌واره‌ی شناسایی لبه بر مبنای شیرلت‌های دوبعدی است. تعداد راستاهای برش توسط کاربر تعیین می‌گردد. هرچه تعداد راستاها بیشتر باشد توانمندی روش در شناسایی پدیده‌ها با شیب‌های متفاوت بیشتر می‌شود. این در حالی است که افزایش تعداد راستاها موجب بیشترین هزینه

و پالایه‌ی سوبل با استفاده از اندازه‌های دقت، ویژگی، حساسیت و اندازه‌ی F- برای برش زمانی شکل ۸- را نشان می‌دهد. از آنجا که عملگر کنی نتایج کیفی قابل قبولی ارائه نداده در محاسبه‌ی کمی از آن استفاده نشده است.

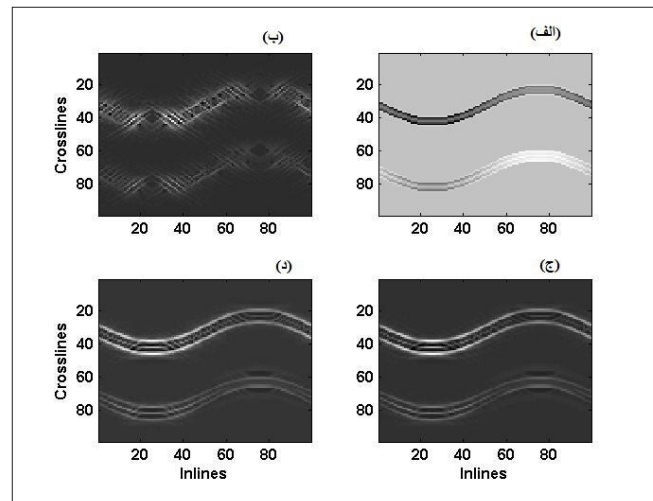
نتیجه‌گیری

ساختار ناهمسانگرد پالایه‌های شیرلت، آنها را برای شناسایی تکنیکی‌های موجود در تصاویر توانمند می‌کند. از آنجا که داده‌های لرزه‌نگاری را می‌توان حالت خاصی از تصاویر رقومی در نظر گرفت و کانال‌ها در داده‌های لرزه‌نگاری حکم لبه را دارند، طراحی و اعمال طرح‌واره‌ی شناسایی کانال در داده‌های لرزه‌نگاری بر مبنای تبدیل شیرلت منطقی به نظر می‌رسد. در طرح‌واره‌ی شناسایی لبه با استفاده از شیرلت‌های دوبعدی با پوشش فشرده،

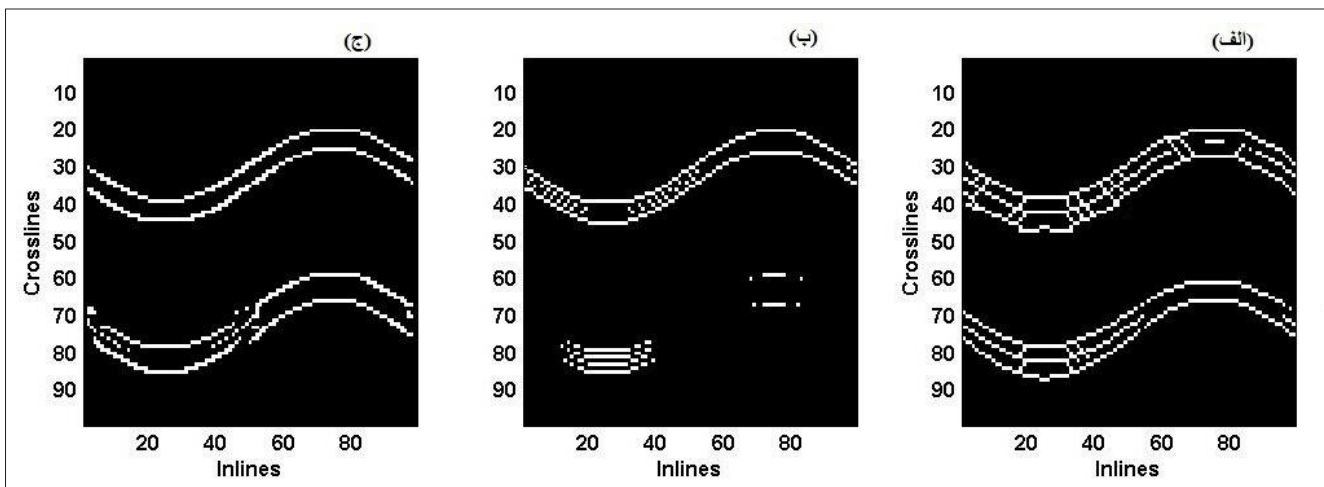


۳ | هیستوگرام بیشینه‌ی محلی ضرایب شیرلت در بیشترین مقیاس تجزیه (شکل ۴-د) مقدار بیشینه‌ی این هیستوگرام حد آستانه برای تبدیل تصویر به یک تصویر دودویی را مشخص می‌کند

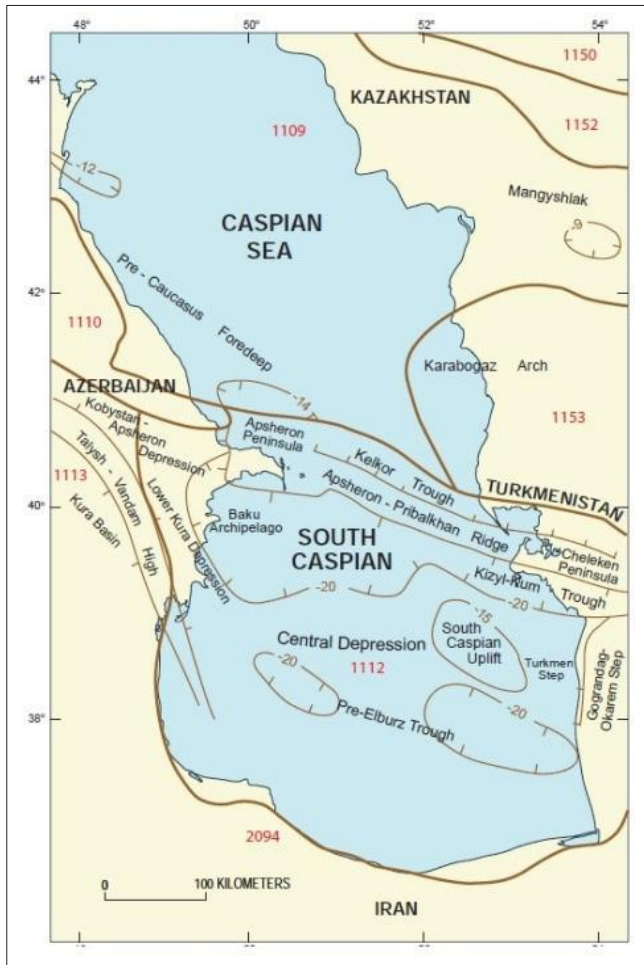
گرمایی کم و گرایان فشار زیاد است [۱۷]. در این ناحیه، کانال‌های کم عمق در تعیین مسیر چاه و نیز طی عملیات حفاری مخاطره آمیز بوده و شناسایی آنها روی داده‌های لرزه‌نگاری بسیار حائز اهمیت است. شکل ۸- برش زمانی ۲۰۰ میلی‌ثانیه از داده‌ی لرزه‌نگاری حاوی کانال را نشان می‌دهد. بیشینه‌ی محلی ضرایب شیرلت در بیشترین مقیاس تجزیه و لبه‌های شناسایی شده‌ی کانال توسط طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی، پالایه‌ی سوبل و عملگر کنی در شکل ۹- آمده‌اند. همان‌گونه که پیداست طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی نسبت به پالایه‌های سوبل و کنی در شناسایی مکان دقیق لبه‌ها و شناسایی کمتر نقاط غیر لبه به‌عنوان لبه موفق‌تر بوده است. شکل ۱۰- مقایسه‌ی کمی طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی



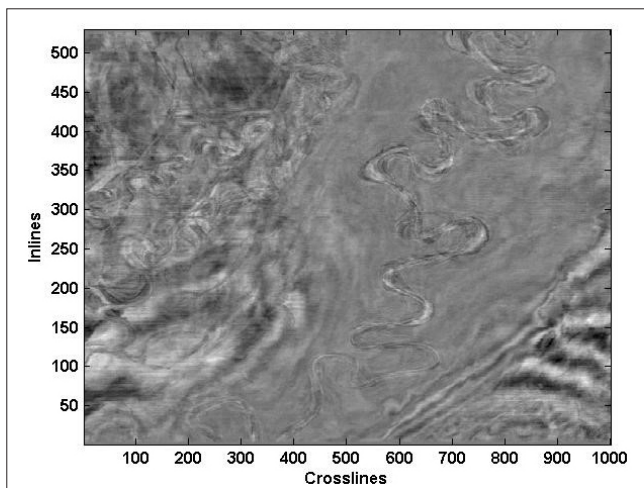
۲ | (الف) برش زمانی از داده‌ی لرزه‌نگاری مصنوعی حاوی کانال در زمان ۶۴۸ میلی‌ثانیه (ب) بیشینه‌ی ضرایب شیرلت در مخروط‌های افقی در بیشترین مقیاس تجزیه (ج) بیشینه‌ی ضرایب شیرلت در مخروط‌های عمودی در بیشترین مقیاس تجزیه (د) بیشینه‌ی محلی ضرایب شیرلت در بیشترین مقیاس تجزیه



۴ | (الف-ج) شناسایی مرزهای کانال‌های شکل ۴- الف بهتر تیب توسط طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی، پالایه‌ی سوبل و عملگر کنی. همان‌گونه که پیداست، طرح‌واره‌ی شناسایی لبه با استفاده از شیرلت‌های دوبعدی نسبت به پالایه‌های سوبل و کنی در مکان‌یابی دقیق مرزهای کانال در برش زمانی موفق‌تر عمل کرده است

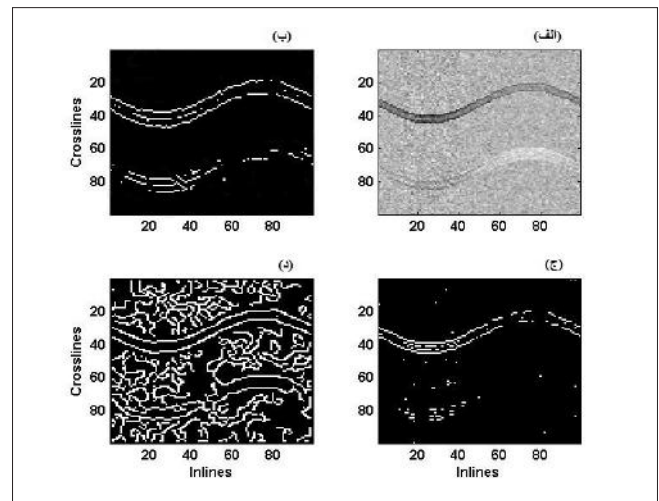


شکل ۷ | نقشه مکانی دریای خزر جنوبی که با کشورهای ایران، آذربایجان و ترکمنستان مرز مشترک دارد [۱۷]

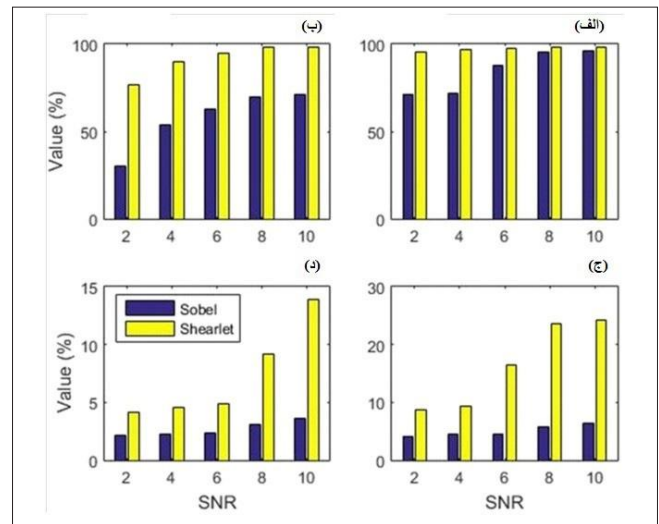


شکل ۸ | برش زمانی از داده‌ی لرزه‌نگاری واقعی حاوی کانال در زمان ۲۰۰ میلی‌ثانیه

لبه‌های تصویر حاصل بیشینه‌های محلی ضرایب شیرلت در تمامی راستاها در بیشترین مقیاس تجزیه هستند. نتایج حاصل از طرح‌واره‌های شناسایی لبه با استفاده از تبدیل شیرلت در داده‌های لرزه‌نگاری مصنوعی حاوی کانال هم به صورت کیفی و هم به صورت کمی با پالایه‌های معروف شناسایی لبه

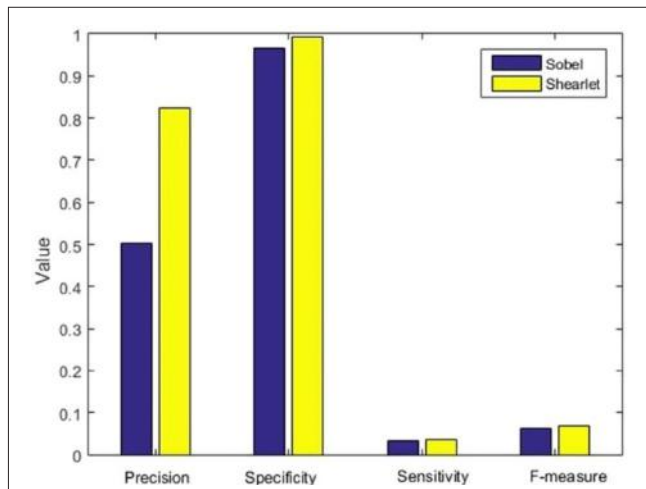


شکل ۵ | الف) برش زمانی از داده‌های لرزه‌نگاری مصنوعی حاوی دو کانال در زمان ۶۴۸ میلی‌ثانیه با نسبت سیگنال به نوفه ۵. ب-د) لبه‌های شناسایی شده‌ی کانال‌ها به ترتیب توسط طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی، پالایه‌ی سوبل و عملگر کنی، همان‌گونه که پیداست طرح‌واره‌ی شناسایی لبه با استفاده از شیرلت‌های دوبعدی نسبت به پالایه‌های سوبل و کنی در مرزهای کانال در حضور نوفه‌ی اتفاقی بهتر عمل کرده است



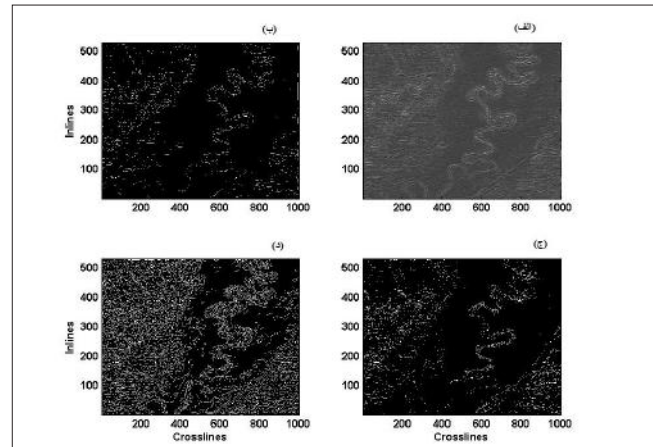
شکل ۶ | مقایسه‌ی کمی طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی و پالایه‌ی سوبل با استفاده از آزمایش دسته‌بندی دودویی: الف) ویژگی (ب) دقت (ج) اندازه‌ی F-د) حساسیت برای نسبت‌های سیگنال به نوفه ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۰۰ از آنجا که عملگر کنی نتایج کیفی قابل‌قبولی ارائه نداده در محاسبه‌ی کمی از آن استفاده نشده است

کمر نقاط غیر لبه به عنوان لبه موفق تر عمل کردند. همچنین طرح‌واره‌های شناسایی لبه با استفاده از تبدیل شیرلت در داده‌های لرزه‌نگاری واقعی از دریای خزر جنوبی به صورت موفقیت‌آمیز قادر به شناسایی کانال شدند. ■



۱۰ | مقایسه‌ی کمی طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی و پالایه‌ی سوبل با استفاده از اندازه‌های دقت، ویژگی، حساسیت و اندازه‌ی F-برای برش زمانی شکل-۴ از آنجا که عملگر کنی نتایج کیفی قابل‌قبولی ارائه نکرده در محاسبه‌ی کمی از آن استفاده نشده است

در پردازش تصویر مانند سوبل و کنی مقایسه شد. حتی در حضور نوفه‌ی اتفاقی با توزیع گوسی، طرح‌واره‌های شناسایی لبه با استفاده از تبدیل شیرلت نسبت به پالایه‌های سوبل و کنی در مکان‌یابی دقیق لبه‌ها و شناسایی



۹ | الف) پیشینه‌ی محلی ضرایب شیرلت در بیشترین قیاس تجزیه از برش زمانی شکل-۴ ب-د) لبه‌های شناسایی شده‌ی کانال به ترتیب توسط طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی، پالایه‌ی سوبل و عملگر کنی. همان‌گونه که پیداست، طرح‌واره‌ی شیرلت دوبعدی نسبت به پالایه‌های سوبل و کنی در شناسایی مکان دقیق لبه‌ها و شناسایی کمتر نقاط غیر لبه به‌عنوان لبه موفق‌تر بوده است

پانویس‌ها

1. Difference

2. Moving window

منابع

- [1] Deo, B., Jenning, C., Afia, M., Sheneshen, M.S., Shelander, D., Romani, K., Hussein, H., Nafie, T., Dutta, N.C., Srivastava, R., Singh, T. Pradhan, B., and Kumar, R., 2016, Integrated workflow for shallow hazard detection using imaging, inversion, pore-pressure prediction, and interpretation on 3D seismic data, 86th Annual International Meeting, SEG, Dallas, Texas, 1798-1802.
- [2] Jain, R., Kasturi, R. and Schunck, B.G., 1995, Machine Vision, McGraw-Hill, Inc., ISBN 07-032018-07-, pp. 459.
- [3] Rijks, E.J.H. and Jauffred, J.C.E.M., 1991, Attribute extraction: an important application in any detailed 3D interpretation study, The Leading Edge, 10(9), 1119-1124.
- [4] Bahorich, M. and Farmer, S., 1995, 3-D Seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube, The Leading Edge, 14(10), 1053-1058.
- [5] Roberts, A., 2001, Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons, First Break, 19, 8599-.
- [6] Luo, Y., Higgs, W.G. and Kowalik, W.S., 1996, Edge detection and stratigraphic analysis using 3D seismic data, 66th Annual International Meeting, SEG, Denver, Colorado, 324327-.
- [7] Luo, Y., Marhoon, M., Al-Dossary, S., and Alfaraj, M., 2002, Edge-preserving smoothing and applications: The Leading Edge, 21(2), 136158-.
- [8] Fehmers, G.C., and C.F.W. Höcker, 2003, Fast structural interpretation with structure-oriented filtering, Geophysics, 68(4), 1286-1293.
- [9] Aqrabi, A.A. and Boe, T.H., 2011, Improved fault segmentation using a dip guided and modified 3D Sobel filter, 81st Annual International Meeting, SEG, San Antonio, Texas, 9991003-.
- [10] Pampanelli, P.C.P., Mario Silva, P., Gattass, M., 2013, A new volumetric fault attribute based on first order directional derivatives. 13th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil, 1621-1625.
- [11] Chopra, S., Kumar, R. and Marfurt, K.J., 2014, Seismic discontinuity attributes and Sobel filtering, 84th Annual International Meeting, SEG, Denver, Colorado, 16241628-.
- [12] Guo, K., Kutyniok, G. and Labate, D., 2005, Sparse multidimensional representations using anisotropic dilation and shear operators, in Wavelets and Splines (Athens, GA, 2005), Nashboro Press, Nashville, TN, 189-201.
- [13] Labate, D., Lim, W.Q., Kutyniok, G. and Weiss, G., 2005, Sparse multidimensional representation using shearlets, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series 5914, 254-262.
- [14] Hosseini, S.A., Javaherian, A., Hassani, H., Torabi, S., and Sadri, M., 2015, Adaptive attenuation of aliased ground roll using the shearlet transform, Applied Geophysics, 112, 190-205.
- [15] Kutyniok, G. and Labate, D., 2012, Shearlets: Multiscale Analysis for Multivariate Data, Springer Science Business Media, ISBN 978-8315-8176-0-3, pp. 345.
- [16] Yi, S., Labate, D. G., Easley, R. and Krim, H., 2009, A Shearlet Approach to Edge Analysis and Detection", IEEE Transactions on Image Processing, 18(5), 929941-.
- [17] Smith, L.S., 2006, Oligocene-Miocene Maykop/Diatom total petroleum system of the South Caspian Basin province, Azerbaijan, Iran, and Turkmenistan, U.S. Geological Survey, Bulletin 2201-I.