

بعد فرکتالی رد لرزه، ابزاری برای تعیین زمان اولین رسید

عصمت پورجم‌علویجه^{*}، حمیدرضا سیاهکوهی^{*} و عبدالرضا قدس^{**}

^{*} مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

^{**} مرکز تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، گاورنگ، زنجان

دریافت مقاله: ۸۱/۶/۱۲ پذیرش مقاله: ۸۱/۱۲/۲۳

چکیده

چشم انسان قادر است با مشاهده تفاوت در روند تغییرات دامنه ثبت شده در دهای لرزه، زمان اولین رسید در آنها را تشخیص دهد. در این مقاله سعی بر آن است که با الگوگیری از این توانایی طبیعی، جایگزینی ریاضی برای آن پیدا شود. یا به بیان دیگر در این مطالعه سعی شده تا روشی رایانه‌ای برای شبیه‌سازی عملکرد چشم انسان در تشخیص زمان اولین رسید در دهای لرزه ارائه شود. فرکتال‌ها مدل‌های ریاضی هستند که می‌توانند این تغییرات را درک کنند. از میان روش‌های فرکتالی موجود برای آنالیز بعد فرکتالی، روش پرگار برای رسیدن به اهداف فوق انتخاب شد. در این مقاله مراحل مختلف اجرای روش پرگار برای محاسبه بعد فرکتالی و نرم‌افزارهای تدوین شده در محیط MATLAB معرفی می‌شود. نتایج حاصل از به‌کارگیری این نرم‌افزارها روی رد لرزه برای تعیین زمان اولین رسید نیز ارائه شده است.

کلیدواژه: بعد فرکتالی، اولین رسید در رد لرزه، کاربرد فرکتال در ژئوفیزیک، روش پرگار

۱ مقدمه

معرفی شده‌اند که تعیین زمان اولین رسید نیز بخشی از آنها را تشکیل می‌دهد. این روش‌ها شامل روش‌های همدوسی (گلچینسکی، کراکلیس و موسیوا ۱۹۶۸؛ نیدل و تانر ۱۹۷۱) و روش‌های همبستگی متقابل (پرالدی و کلمنت ۱۹۷۲) و خواص همدوسی سیگنال‌ها (گلچینسکی و اشتیولمن ۱۹۸۳) است. در اکثر این روش‌ها فرض بر این است که شکل پالس (تپ) از یک رد لرزه‌ای به رد لرزه‌ای دیگر تغییر چندانی نمی‌کند. بدون شک در مورد اولین رسیده‌ها چنین فرضی نادرست است. روشی که در این مقاله معرفی می‌شود از نظر تشخیص خودکار زمان اولین رسید با سایر روش‌های به‌کار رفته متفاوت است، از این جهت که هیچ بستگی به شکل سیگنال ندارد و تنها به کمک بررسی تغییرات موجود در ناهمواری مربوط به نوفه و سیگنال موفق به تعیین زمان اولین رسید می‌شود. این تشخیص بر اساس مقایسه بعد فرکتالی نوفه و سیگنال در رد لرزه است. روش مورد نظر در این

عملاً در اکثر کارهای لرزه‌ای تعیین زمان دقیق اولین رسید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تعیین ساختار سرعتی منطقه در روش‌های شکست مرزی و درون چاهی، تعیین مقدار تصحیح استاتیک در روش بازتابی و تعیین موقعیت مرکز سطحی زمین‌لرزه، از جمله کاربردهای زمان اولین رسیده‌هاست. پیشرفت‌های اخیر در فناوری برداشت داده‌های لرزه‌ای باعث شده است که در اجرای هر طرح با مقدار بسیار زیادی داده لرزه‌ای سر و کار داشته باشیم، تا حدی که پردازش و استخراج اطلاعات از آنها بدون استفاده از رایانه امکان‌پذیر نیست. مشکل اساسی در تعیین زمان اولین رسید در رد لرزه ثبت شده به وسیله لرزه‌یاب، مشکل قدیمی تشخیص بین نوفه و سیگنال است. تعیین لحظه دقیق رسیدن امواج لرزه‌ای گاهی حتی برای مفسران با تجربه نیز مشکل می‌شود. تاکنون کاربردهای متعددی با استفاده از روش‌های ردیابی و یا شناسایی موجک‌ها یا سیگنال‌ها در ثبت‌های لرزه‌ای

بنا به تعریف توزیعی فرکتالی است که در آن بین تعداد اشیاء (البته با اندازه‌های بزرگ‌تر از یک حد معین) و اندازه آنها بستگی توانی وجود داشته باشد.

مثلاً یک منحنی در صورتی فرکتال است که مقدار طول به دست آمده برای آن به یکای به کار رفته در اندازه‌گیری، بستگی داشته باشد. یعنی اگر N_i تعداد یکاهای گنجانده شده روی طول منحنی مورد نظر باشد، داشته باشیم:

$$N_i \approx \left(\frac{1}{r_i}\right)^D \quad (1)$$

که در آن r_i یکای به کار رفته در اندازه‌گیری است. در این رابطه D به عنوان بعد فرکتال تعریف می‌شود. طول منحنی در این حالت برابر خواهد بود با

$$L \approx N_i * r_i = r_i^{1-D} \quad (2)$$

همچنین می‌توان نشان داد که:

$$D = -\frac{\ln(N_{i+1}/N_i)}{\ln(r_{i+1}/r_i)} \quad (3)$$

کاربرد تجربی روابط توانی در پدیده‌های زمین‌شناختی مدت‌ها قبل از بیان مفاهیم فرکتال‌ها کشف شده بود. به عنوان مثال رابطه گوتبرگ - ریشتر که بستگی آماری بسامد (فرکانس) - بزرگی را برای زمین‌لرزه بیان می‌کند، از جمله این روابط تجربی است

$$\log N = a - bm \quad (4)$$

در این خصوص، مقدار b تقریباً برای مکان‌های مختلف بین $0.7 < b < 1.1$ تغییر می‌کند، a ضریبی است که مقدارش از یک ناحیه به ناحیه دیگر متفاوت است (در نواحی با لرزه‌خیزی بیشتر، بزرگ‌تر است) و N تعداد زمین‌لرزه‌ها در سال با بزرگی m و بیشتر است.

فرم دیگر این معادله به صورت زیر است

$$N = \beta A^{-1/b} \quad (5)$$

که در آن β ثابت رابطه و A سطح شکسته شده در اثر زمین‌لرزه است. از آنجایی که $A \propto r^2$ است، از مقایسه با رابطه ۱ داریم

$$D = 2b \quad (6)$$

مطالعه قبلاً نیز مورد استفاده قرار گرفته است (باچتی و دیگران، ۱۹۹۶؛ چانگ، ۱۹۹۷؛ جیاو و دیگران، ۱۹۹۷).

در مطالعه طبیعت همواره با فرکتال‌ها روبرو هستیم، خواه در ابعاد بزرگ مقیاس به طبیعت نگاه کنیم یا در ابعاد ریز مقیاس در حد اتم، یا حتی فیزیولوژی درون بدن انسان، همه جا فرکتال دیده می‌شود. موضوع فرکتال‌ها یکی از جدیدترین و جذابترین مباحث اخیر در ریاضیات و گرافیک رایانه‌ای است که کاربرد وسیعی در حوزه هنر مدرن پیدا کرده است. ساختارهای ریاضی مشهوری وجود دارند که جزء دسته فرکتال‌ها هستند. از آن جمله می‌توان از Lorenz Attractor نام برد (میدلتون، ۲۰۰۰). این مورد شکل جالب و در عین حال ساده‌ای است که از نظر فلسفی هم بحث‌انگیز است و یک نکته غیر منتظره در مورد آن پیوند ریاضی جالبی است که با علم هواشناسی و پیش‌بینی هوا دارد. تغییرات جزئی در شرایط اولیه توده‌های هوا تأثیرات عظیمی بر وضعیت آینده آنها می‌گذارد. به همین دلیل پیش‌بینی وضع هوا برای آینده دور امری غیر ممکن و متنی است. یک مثال ساده‌تر از این مطلب بازی شطرنج است: نوع حرکات آغازین بازی تأثیرات بنیادین در پایان آن می‌گذارد، هر چند که الگوهای شروع بازی و نتایج احتمالی ناشی از آن تقریباً قابل پیش‌بینی است (رضایی، ۱۳۷۲). به طور کلی در علوم امروزی کم‌تر رشته‌ای را می‌توان یافت که فرکتال‌ها در آن کاربرد نداشته باشند.

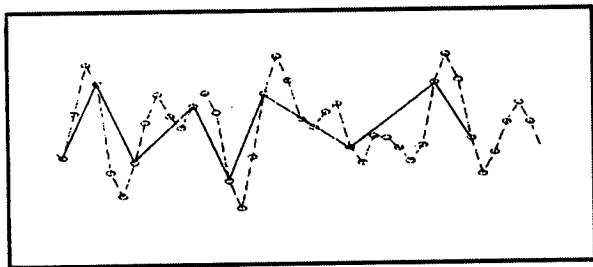
۲ معرفی فرکتال

استقلال از مقیاس در پدیده‌های زمین‌شناختی مفهوم شناخته شده‌ای است. در مطالعات زمین‌شناسی وقتی از پدیده‌ای عکس می‌گیرند، شینی را که بتواند مبین مقیاس باشد، مثل سکه یا چکش در عکس قرار می‌دهند. بدون مقیاس معمولاً غیر ممکن است که تشخیص داده شود آیا عکس ۱۰ سانتی‌متر یا ۱۰ کیلومتر را در بر می‌گیرد. استقلال از مقیاس، شالوده‌ای منطقی برای کاربرد رابطه توانی برای توزیع‌های فرکتالی فراهم می‌کند.

۱-۲ فرکتال‌های ساده

منحنی و ثبت تعداد قدم‌هایی است که برای پوشاندن منحنی لازم است. با افزایش قانونمند اندازه پرگار و تکرار فرایند گام برداری، رابطه بین اندازه قدم‌ها و طول منحنی در بازه مورد نظر تعیین می‌شود. در صورتی که رابطه به دست آمده مشابه رابطه ۲ باشد، منحنی مورد بحث فرکتال است و می‌توان بعد فرکتالی منحنی را به کمک همین رابطه تعیین کرد.

برخی فرکتال‌ها را می‌توان تنها با یک بعد مشخص نمود. اینها فرکتال‌های ساده هستند. گاهی بعد فرکتالی مساوی با بعد اقلیدسی است. مثلاً هر دو دارای مقدار یک برای خط، مقدار دو برای مربع و مقدار سه برای مکعب‌اند. ولی عموماً بعد فرکتالی عددی غیر صحیح و اعشاری است و همین مسئله عامل پیدایش کلمه فرکتال بوده است.

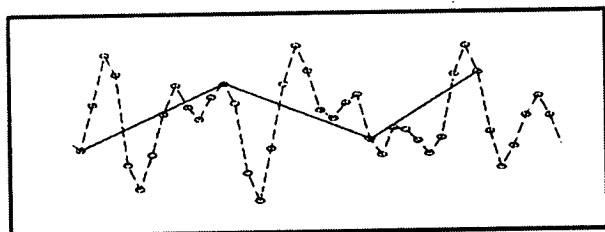


شکل ۱-الف. یک مرحله از پیمودن منحنی با اندازه قدم مشخص. در این مرحله طول منحنی هشت برابر طول قدم شده است.

۲-۲ فرکتال‌های چندگانه

نمی‌توان به راحتی تعریف خلاصه‌ای از فرکتال‌های چندگانه ارائه داد. اگر در مورد هندسه یک پدیده، معیاری در نظر گرفته شود (مثلاً احتمال یا مقداری فیزیکی)، و این معیار در قسمت‌های مختلف پدیده، ابعاد فرکتالی متفاوتی داشته باشد، آنگاه این معیار یک فرکتال چندگانه است.

به عبارت دیگر، فرکتال‌های چندگانه چند مقیاسی هستند. یعنی در مقیاس‌های متفاوت، ابعاد فرکتالی متفاوتی دارند (مثلاً شکستگی در شیب نمودار پرگار یا دیگر روابط نمایی).



شکل ۱-ب. مرحله بعدی با طول قدم بلندتر. در این مرحله طول منحنی سه برابر طول قدم بدست می‌آید.

۳ روش‌های مختلف محاسبه بعد فرکتالی

برای محاسبه بعد فرکتالی منحنی، سطح و حجم روش‌های مختلفی وجود دارد (کلینکنبرگ، ۱۹۹۴). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش پرگار، روش شمارش قاب و روش‌های طیفی اشاره کرد (تورکات، ۱۹۹۲؛ میدلتون، ۲۰۰۰). در این مطالعه الگوریتم همه روش‌های فوق تهیه شد و کارآیی و زمان‌بری آنها روی داده‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت. ولی به دلیل کارکرد بهتر روش پرگار در مورد منحنی‌ها و سادگی ابزار ریاضی مورد نیاز آن، برای انجام مطالعات از این روش استفاده شد.

۱-۳ روش پرگار

روش پرگار به صورت‌های مختلفی می‌تواند به کار رود. مطابق شکل ۱ معمول‌ترین روش به صورت «قدم زدن» پرگار در طول

در این روش هر بار طول رد لرزه با قدم‌های یکسانی طی و تعداد قدم‌ها شمارش می‌شود. سپس اندازه قدم تغییر کرده و طول رد لرزه مجدداً با این قدم جدید محاسبه می‌شود.

اگر منحنی مورد بررسی یک فرکتال ساده باشد، در نمودار طول منحنی برحسب طول قدم تنها یک شیب خواهد داشت، ولی در صورتی که منحنی از ترکیب دو یا چند فرکتال، که هر کدام بعد فرکتالی جداگانه‌ای دارند، ساخته شده باشد، در نمودار مزبور بیش از یک شیب خواهیم دید.

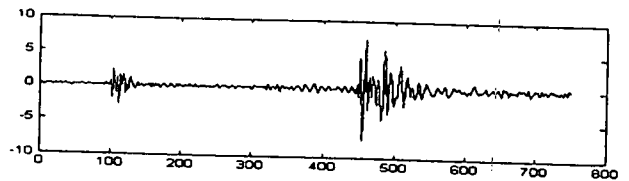
رد لرزه‌ها (شکل ۲) معمولاً از برهم نهد نوبه‌ها و سیگنال‌ها

تکه منحنی مربوط به باقی مانده، باعث زمان بر شدن اجرای الگوریتم می شود و از ارزش الگوریتم می کاهد. چون قسمت C از نمودار، بعد فرکتالی سیگنال را که مورد نظر این مطالعه است، مشخص می کند، از این رو الگوریتمی نوشته شد تا بتواند قسمت C از نمودار به دست آمده را تشخیص دهد. با توجه به این که ارائه جزئیات ریاضی این روش و شرح مبسوط آن از حوصله این نوشتار خارج است لذا علاقه مندان می توانند برای جزئیات بیشتر به پورجم، ۱۳۸۱ و میدلتون، ۲۰۰۰ رجوع کنند.

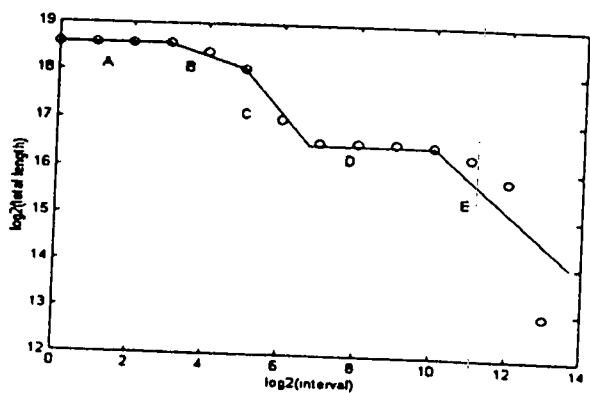
۴ شرح الگوریتم

انجام محاسبات با الگوریتم های تدوین شده در دو مرحله صورت می پذیرد. ابتدا محدوده رفتار فرکتالی با یکی از الگوریتم ها تعیین می شود و سپس اطلاعات این قسمت برای تعیین بعد فرکتالی به الگوریتم دیگری داده می شود. ایده کلی در شکل ۴ نشان داده شده است، بدین صورت که پنجره ای با طول مشخص را انتخاب می کنیم و آن را روی رد لرزه مورد نظر حرکت می دهیم. در هر موقعیت از پنجره، محاسبات لازم برای محاسبه طول رد لرزه انجام می شود و نموداری مثل شکل ۳ به دست می آید. از روی نمودار به دست آمده رفتار پاره خط C برای آن موقعیت از پنجره بررسی می شود، در هر موضعی از پنجره که در رفتار پاره خط C از منحنی حاصل تغییری مشاهده شود، می توان نتیجه گرفت که رفتار فرکتالی رد لرزه در این ناحیه تغییر کرده است و این می تواند حاکی از محل اولین رسید سیگنال باشد.

تشکیل شده اند. هرگاه این ردهای لرزه به وسیله روش پرگار بررسی شوند، منحنی لگاریتم طول رد لرزه بر حسب طول قدم های به کار رفته در این محاسبات به صورت شکل ۳ خواهد بود.

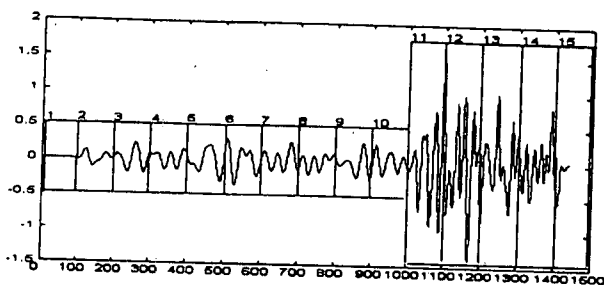


شکل ۲. رد لرزه.



شکل ۳. نمودار طول رد لرزه بر حسب طول قدم برای رد لرزه.

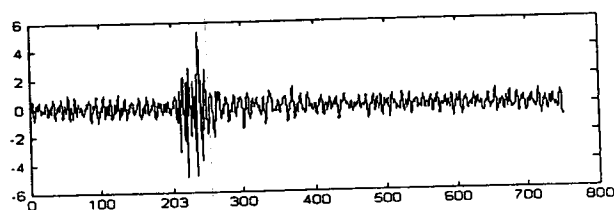
برای این نمودار طول قدم ها طوری انتخاب شده است که کوچک ترین قدم در حدود فاصله نمونه برداری و بزرگ ترین قدم به اندازه ای باشد که کل طول رد لرزه با ۷ یا ۸ قدم پوشانده شود. منطقه A روی نمودار، نشانگر قدم هایی است که به دلیل کوچک بودن بیش از حد آنها، تمام ناهمواری های موجود در رد لرزه در محاسبه طول آن منظور شده اند. ناحیه B ناحیه رفتار فرکتالی نوفه و ناحیه C ناحیه رفتار فرکتالی سیگنال را در رد لرزه نشان می دهند. ناحیه D ناحیه ای است که طول قدم ها در آن به حدی رسیده است که دیگر قادر به ناهمواری های موجود در رد لرزه نیستند. ناحیه E اثر باقی مانده ها را نشان می دهد. باقی مانده ها به قسمت آخر رد لرزه که کوچک تر از طول قدم است، مربوط اند و معمولاً به حساب آورده نمی شود. زمانی که قدم ها بزرگ تر می شوند این اثر خود را به وضوح نشان می دهد. به حساب آوردن



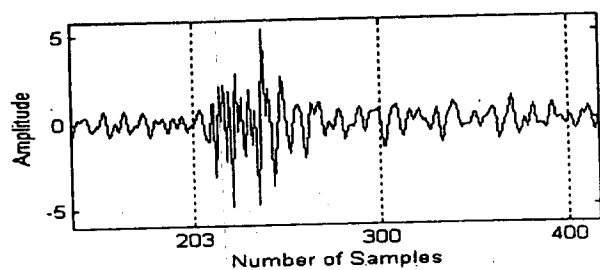
شکل ۴. نحوه حرکت پنجره انتخابی بر روی رد لرزه.

۵ تعیین زمان اولین رسید به کمک الگوریتم

رد لرزه مورد استفاده در این مطالعه برای ارائه کارآیی روش در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. این رد لرزه از یک رکورد (ثبت) لرزه‌ای چشمه مشترک است که دارای ۷۶۰ نمونه با فاصله نمونه‌برداری ۲ میلی‌ثانیه است و از قسمت بازخوانی و پردازش شرکت نفت دریافت شده است.

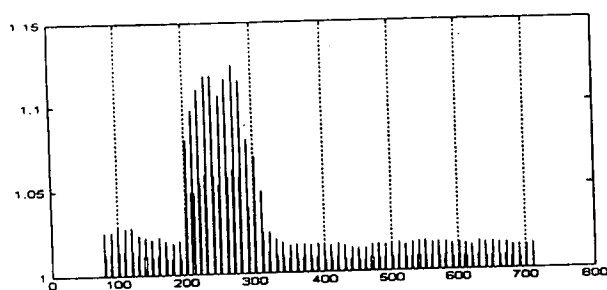


شکل ۵-الف. رد لرزه مورد استفاده در این مطالعه.



شکل ۵-ب. بزرگنمایی محل آغاز سیگنال.

محل آغاز سیگنال را (با دقت ۱۰ نمونه)، در محل نمونه ۲۰۰ام تشخیص می‌دهد. برای بررسی دقیق‌تر زمان اولین رسید و برای صرفه‌جویی در زمان محاسبات، بازه بررسی رد لرزه را روی محدوده‌ای که شامل اولین رسید بود متمرکز کردیم و هر بار پنجره را به اندازه یک نمونه به جلو حرکت دادیم. با این شرایط دقت الگوریتم در تعیین زمان مورد نظر به یک نمونه رسید.



شکل ۶. بعد فرکتالی درون پنجره متحرک.



شکل ۷. بعد فرکتالی داخل پنجره متحرک وقتی حرکت پنجره فقط یک نمونه.

از نتایج به دست آمده که در شکل ۷ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که محل نمونه ۱۹۵ توسط روش پرگار به عنوان محل آغاز سیگنال (یا اولین رسید) در این رد لرزه معرفی می‌شود.

۶ نتیجه‌گیری

در صورتی که نسبت سیگنال به نوفه در رد لرزه پایین باشد، گاهی حتی مفسران خبره نیز در تشخیص زمان اولین رسید سیگنال لرزه‌ای دچار مشکل می‌شوند، از این رو پیشنهاد می‌شود در این گونه موارد از روش‌های فرکتالی برای تشخیص زمان اولین رسید، استفاده شود.

تشخیص زمان اولین رسید باید با توجه به ردهای لرزه مجاور

با بزرگنمایی محل شروع سیگنال روی رد لرزه می‌توان صرفاً با مشاهده زمان اولین رسید را در محل نمونه ۲۰۳ تعیین کرد: اجرای الگوریتم با قرار دادن پنجره بررسی در ابتدای رد لرزه، شروع می‌شود. عرض پنجره ۱۰۰ نمونه انتخاب شده است. هر بار آن را ۱۰ نمونه به جلو حرکت می‌دهیم و محاسبات لازم انجام می‌شود. باید رفتار قسمتی از رد لرزه را که داخل آن قرار می‌گیرد، بررسی کرد و سپس شیب ناحیه C را محاسبه نمود. مقادیر این شیب‌ها در نمودار جداگانه‌ای رسم می‌شوند. این مرحله از اجرای الگوریتم در مورد رد لرزه فوق نتیجه‌ای به صورت نمودار شکل ۶ ارائه داد. روش پرگار به واسطه تغییر ناگهانی در مقدار بعد فرکتالی رد لرزه،

- Boschetti, F., Dentith, M. D., and List, R. D., 1996, A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces: *Geophysics*, **61**, 1095-1102.
- Chang, X., 1997, First arrival picking in seismic data using the Hausdroff fractal dimension technique in Chinese, the 2nd symposium of the Chinese geoscientists, Beijing, China, 10-13.
- Gelchinsky, B. J and Krauklis, L. A. and Moiseeva, L. A., 1968, Generalized algorithm and program of computer correlation of seismic waves, in problems of dynamic theory of seismic wave propagation, IX, pp. 120-135, Nauka Press, Leningrad (in Russian).
- Gelchinsky, B. J and Shtivelman V., 1983, Automatic picking of first arrivals and parameterization of travelttime curves, *Geophysical Prospecting* **31**, 915-928.
- Jiao, L., Moon, W., and Kinsner, W., 1997, Variance fractal dimension analysis of seismic refraction signals: Proceeding of IEEE WESCANEX 97 conference on communications, power and computing, 116-120.
- Klinkenberg, B., 1994, A review of methods used to determine the fractal dimation of linear features, *Mathematical Geology*, **26**: 23-46.
- Middleton, G. V., 2000, Data analysis in the earth sciences using MATLAB, Prentice-Hall.
- Neidell, N. S. and Taner, M. T., 1971, Semblance and other coherency measures for multi channel data, *Geophysics* **36**, 482-497.
- Peraldi, R. and Clement, A., 1972, Digital processing of refraction data- study of first arrivals, *Geophysical Prospecting*, **20**, 529-54.
- Turcotte, D. L., 1992, Fractals and chaos in geology and geophysics, Cambridge University Press, Cambridge.

صورت گیرد.

روش پرگار نسبت به دیگر روش‌های معرفی شده در منابع برای تشخیص بعد فرکتالی ردهای لرزه مناسب تر است.
در زمان تنظیم پارامترهای الگوریتم، باید میزان آلودگی ردهای لرزه با نوفه در نظر گرفته شود. هر چه درصد آلودگی رد لرزه با نوفه بالاتر باشد، باید پارامترهای برنامه پس از تکرارهای متعدد و با دقت بیشتری تعیین شوند.

تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران (طرح پژوهشی شماره ۶۵۲/۲/۷۶۱) انجام گردید که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- پورجم علویچه ع.، ۱۳۸۱، تشخیص اتوماتیک زمان اولین رسید در رد لرزه با استفاده از بعد فرکتالی تریس: پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- رضائی، م.، ۱۳۷۲، هندسه فرکتال، مجله ریاضی، شماره پنجم، ۳۳-۴۲.