

تعیین نوع رسوبات بستر دریا با تخمین آزمایشگاهی مشخصات صوتی از رسوبات

حامد دلدار^۱، مهیار مجیدی^۱، وحید رضاعلی^{۲*}

۱. سازمان جهاد نیروی دریایی سپاه پاسداران انقلاب اسلامی

۲. دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

چکیده

فنون صوتی حسگری از دور ابزاری مفید در آونگاری (هیدروگرافی) برای طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا می‌باشند. در این روش با استفاده از ارسال و دریافت امواج صوتی و واکافت (تحلیل) داده‌های پس‌پراکند (امواج صوتی بازگشتی) جنس رسوبات بستر تخمین زده می‌شود. داده‌های پس‌پراکند (امواج صوتی بازگشتی) از رسوبات، دارای ویژگی‌های متعددی هستند که با استخراج آن‌ها می‌توان جنس رسوبات بستر را تفکیک و به طبقه‌بندی رسوبات پرداخت. در این مقاله، برای بررسی خواص صوتی رسوبات، شرایط آزمایشگاهی مهیا شدند. با دستگاه‌های صوتی و قرار دادن چهار نوع رسوب در بستر آکواریوم، پژواک‌های دریافتی (اکوهای بازگشتی) از انواع رسوبات در چهار بسامد ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۳ کیلوهرتز پردازش شدند. ویژگی‌هایی شامل ممان آماری (انرژی، زمان انتشار، چولگی و کشیدگی)، ممان‌های طیفی (انحراف معیار، مرتبه ممان‌ها، چولگی طیفی، کشیدگی طیفی و چگالی طیفی توان) و ابعاد شکستالی (فراکتالی- هازدورف) استخراج گشتند. در این آزمایش، مؤلفه‌ی انرژی، انحراف معیار به همراه میانگین توان (حاصل از چگالی طیفی توان) به خوبی توانسته‌اند رسوبات را تمییز دهند.

کلیدواژه‌ها: حسگری صوتی از دور، موج صوتی، رسوبات بستر دریا، آونگاری (هیدروگرافی).

۱. مقدمه

بررسی ویژگی‌های رسوبات بستر دریا و رودخانه‌ها برای کاربردهای دریایی همچون لایروبی، مطالعات زمین‌شناسی دریایی، عملیات‌های عمرانی، امور نظامی و غیره امری لازم و ضروری است. برای این منظور روش مستقیم نمونه‌برداری از بستر و بررسی نمونه‌های برداشت شده پیش‌تر مورد استفاده بوده است که امروزه با پیشرفت دستگاه‌های صوتی و ورود آن‌ها به پروژه‌های دریایی، بررسی و تعیین ویژگی‌های رسوبات بستر بدون تماس مستقیم و بوسیله واکافت (تحلیل) داده‌های پس‌پراکند (امواج صوتی بازگشتی) از بستر مورد استفاده قرار می‌گیرد که این روش تحت عنوان روش حسگری صوتی از دور^۱ مطرح می‌باشد. در این روش ثبت داده‌های پس‌پراکند از رسوبات بستر دریا بوسیله‌ی دستگاه‌های صوتی (اکوساندرها^۲، ساید اسکن سونار^۳ و ...) برای بررسی جنس

و طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در این روش از ارتباط میان ویژگی‌های استخراج شده از پژواک دریافتی (اکوی بازگشتی) نوع جنس بستر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ویژگی‌های استخراج شده از پژواک دریافتی به طور کلی به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

۱. ویژگی‌هایی که انرژی داده‌های پس‌پراکند صوتی از بستر را بیان می‌کنند.
۲. ویژگی‌هایی که شکل و تغییرات دامنه‌ی پژواک‌ها را بیان می‌کنند.
۳. ویژگی‌هایی که مشخصه‌های آماری پژواک‌ها را نشان می‌دهند.
۴. ویژگی‌هایی که مشخصه‌های طیفی پژواک‌های دریافتی را نشان می‌دهند و هم‌چنین می‌توان دیگر ویژگی‌هایی را مانند ویژگی‌های شکستالی (فراکتالی)^۴ و ویولت^۱ را نیز برشمرد [۲].

* نویسنده پاسخگو: vahid.rezaali@ut.ac.ir

¹ Acoustic remote sensing

² Eco sounder

³ Side scan sonar

⁴ Fractal feature

مشخص شد رسوبات بستر در بسامد ۱۵۰ کیلوهرتز دارای قدرت تمایز بهتری می‌باشند [۳]. چنانچال و همکاران طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا در کشور هند را با استفاده از هفت ویژگی استخراج شده از پژواک‌های دریافتی (انرژی، چولگی آماری، زمان انتشار آماری، چولگی طیفی، عرض طیفی، کشیدگی طیفی و ابعاد هازدورف^۹) اکوساندر تک پرتو با بسامدهای ۳۳ و ۲۱۰ کیلوهرتز و بکارگیری روش طبقه‌بندی فازی سیمینز^{۱۰} و الگوریتم‌های شبکه عصبی انجام داده‌اند [۴]. امیری سیمکویی و همکاران تعیین و طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا را با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده از پژواک‌های دریافتی شامل انرژی، زمان انتشار، چولگی و کشیدگی از طریق اکوساندر تک پرتو در سه بسامد ۱۲، ۳۸ و ۲۰۰ کیلوهرتز انجام داده‌اند که در این تحقیق در نهایت با استفاده از ۱۲ ویژگی استخراجی در این سه بسامد با استفاده از روش طبقه‌بندی پی‌سی‌ای^{۱۱} و کا-مینز^{۱۲} طبقه‌بندی کلاس‌های صوتی و در نهایت رسوبات بستر دریا صورت گرفت [۵]. باسکامب و همکاران طبقه‌بندی رسوبات رودخانه‌ای در آریزونا را با استفاده از اکوساندر چند پرتو و بکارگیری روش واکافت آماری پژواک‌های دریافتی از بستر استفاده کردند؛ آن‌ها نقشه‌ای با تفکیک‌پذیری (رزولوشن) بالا از ویژگی‌های طیفی پژواک‌های دریافتی (مؤلفه طیفی^{۱۳})، شدت طیفی^{۱۴} و زبری صوتی^{۱۵}) که تصحیحات هندسی و رادیومتریکی روی آن‌ها اعمال شده بود تهیه کردند که مشخص شد ارتباط واضحی میان ویژگی‌های طیفی استخراجی و رسوبات بستر وجود دارد [۶]. التراکیس و همکاران تحقیقی را بر روی دو ویژگی مهم حاصل از چند پرتویی (بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز) در محیطی با رسوب خیلی سخت انجام دادند. در این تحقیق ویژگی‌های شدت داده‌های پس‌پراکند و ماندال (رزیدوال) عمق (حاصل از تغییرات عمق نسبت به یک صفحه‌ی برآزیده (فیت) شده به داده‌های عمق‌یابی) به عنوان ویژگی‌هایی مهم استفاده شدند و نتایج نشان داد که با افزایش اندازه دانه‌بندی

هدف از این مقاله، پایش رفتار صوتی رسوبات بستر در محیط آزمایشگاهی و تعیین نوع جنس بستر از داده‌های پس‌پراکند صوتی از رسوبات می‌باشد. از این‌رو تجهیزات آزمایشگاهی به گونه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا بتوان از ویژگی‌های صوتی به نوع رسوبات موجود در بستر دست یافت. ویژگی‌های بررسی شده در این مقاله عبارتند از:

۱. ممان‌های آماری (انرژی، زمان انتشار^۱، چولگی^۲، کشیدگی^۳)
۲. ممان‌های طیفی^۴ (انحراف معیار، چولگی طیفی، کشیدگی طیفی، ممان‌های مرتبه دوم، سوم و چهارم و چگالی طیفی توان^۵)
۳. ویژگی‌های شکستالی (ابعاد هازدورف).

در زمینه‌ی بررسی جنس رسوبات بستر از طریق ویژگی‌های پژواک‌های دریافتی از بستر، تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. تگوسکی و همکاران برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی بستر دریا از طریق واکافت پژواک‌های جمع‌آوری شده به‌وسیله‌ی اکوساندر با بسامد ۲۰۸ کیلوهرتز و استخراج ویژگی‌های پژواک‌ها استفاده کردند. در این تحقیق ویژگی‌های ممان اینرسی^۶، عرض طیفی^۸ و ابعاد شکستالی (فراکتالی) برای تمایز میان پوشش‌های گیاهی استخراج شدند که مؤلفه ممان اینرسی پژواک‌ها بهترین تمایز را برای نمایش پوشش‌های گیاهی نتیجه داده است [۲]. پائول و همکاران ویژگی‌های استخراج شده از پژواک دریافتی از بستر دریا به‌وسیله‌ی دو اکوساندر با بسامدهای ۶۶ کیلوهرتز و ۱۵۰ کیلوهرتز را با داده‌های میدانی شامل ۵۰ نمونه‌ی برداشت شده در دریا مقایسه کردند که مشخص شد مؤلفه‌های انرژی، آماری، طیفی و شکستالی (فراکتالی) پژواک‌های دریافتی شامل اطلاعات مفیدی برای تعیین نوع رسوبات و در نتیجه طبقه‌بندی آن‌ها می‌باشند؛ در این تحقیق چهار نوع رسوب در بستر دریا شناسایی و طبقه‌بندی شد که

⁹ Hausdorff dimension

¹⁰ Fuzzy C-means

¹¹ PCA

¹² K-means

¹³ Spectral exponent

¹⁴ Spectral strength

¹⁵ Acoustic roughness

¹ Wavelet

² Time-spread

³ Skewness

⁴ Kurtosis

⁵ Spectral moment

⁶ Power spectral density

⁷ Moment of inertia

⁸ Spectral width

سومین مرتبه ممان آماری تحت عنوان چولگی آماری بر طبق معادله ۴ قابل دستیابی است،

$$S = \frac{\lambda}{T^{\frac{1}{E}}} \int_0^T I(t)(t-t_0)^{\frac{1}{E}} dt \quad (4)$$

مؤلفه S مقدار عدم تقارن را بیان می‌کند و عموماً برای پژواک‌های دریافتی از بستر مثبت می‌باشد. چهارمین مرتبه ممان آماری تختی^۲ یا کشیدگی است که به صورت رابطه ۵ بیان می‌شود،

$$F = \frac{\lambda^2}{T^{\frac{1}{E}}} \int_0^T I(t)(t-t_0)^{\frac{2}{E}} dt \quad (5)$$

که مؤلفه F مقدار تیزی شکل پژواک می‌باشد. از این‌رو واژه‌ی تختی به عنوان مقداری برای مؤلفه‌ی کشیدگی مورد استفاده می‌باشد.

تمامی روابط بیان شده در بالا، ممان‌های مرتبط با توزیع آماری می‌باشند. مؤلفه‌های T و S بدین دلیل که به‌وسیله‌ی مؤلفه E بهنجار (نرمالیزه) شده‌اند به عنوان مؤلفه‌های شکل و مستقل از انرژی پژواک می‌باشند. هم‌چنین مؤلفه S به‌وسیله‌ی توان سوم T بهنجار شده و مدت زمان پژواک تأثیری بر روی مؤلفه چولگی ندارد [۴،۲].

۲-۲. ابعاد شکستال (فراکتال)

در واکافت‌های شکستالی (فراکتالی)، یک روش برای اندازه‌گیری و مقایسه ابعاد شی شکستال، مورد نیاز می‌باشد. ابعاد هازدورف یکی از راه‌های ممکن است که به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود،

$$D_H = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(r)}{\log r} \quad (6)$$

که N(r) نشان‌دهنده‌ی کوچک‌ترین مقدار بال‌های باز B(p,r) موقعیت p و شعاع r که نیاز است به‌طور کامل شی را پوشش دهد. هم‌چنین $B(p,r) = \{x: \text{dist}(x,p) < r\}$ که $\text{dist}(x,p)$ فاصله میان نقطه x و p می‌باشد. ابعاد هازدورف مقدار پیچیدگی اندازه یک شکل را بیان می‌کند. در مورد پژواک‌های دریافتی که شامل یک مقدار محدود از نمونه‌ها می‌باشند، ابعاد هازدورف به عنوان حدی که به صفر میل می‌کند قابل محاسبه نمی‌باشد. روشی که برای تخمین ابعاد شکستالی (فراکتالی) داده‌های این مقاله مورد استفاده قرار گرفته شده مطابق با منابع [۲، ۸] است. ابتدا

رسوبات، شدت داده‌های پس‌پراکند افزایش و ماندال (رزیدوال) عمق کاهش می‌یابد که این مورد فقط در رسوبات با درجه سختی کم مطرح است و در رسوبات سخت‌تر (مثل رسوب نوع شن درشت دانه^۱) عکس این مطلب صحیح است [۷].

۲. نظریه روش

امواج صوتی منتشر شده درون آب بعد از بازگشت از رسوبات بستر، حاوی ویژگی‌های گوناگونی می‌باشند که با استخراج آن‌ها می‌توان اطلاعاتی در مورد شکل و جنس بستر بدست آورد. ویژگی‌های بررسی شده در این مقاله شامل ممان‌های آماری در حوزه زمان (انرژی علامت، زمان انتشار، چولگی، کشیدگی)، ابعاد شکستالی (فراکتال- هازدورف) و ممان‌های طیفی در حوزه بسامد (واریانس، چگالی طیفی توان، چولگی طیفی و کشیدگی طیفی) می‌باشند.

۲-۱. ممان‌های آماری

مؤلفه انرژی پژواک‌ها (E)، انتگرال در حوزه زمان شدت علامت‌های صوتی است که شدت علامت حاصل از توان دوم ولتاژهای ثبت شده به فشار صوتی است. انرژی کل یک پژواک مطابق رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود،

$$E = \int_0^T I(t) dt = \frac{1}{\rho c} \int_0^T P^2 \quad (1)$$

که در آن I(t) شدت علامت صوتی (تابعی از زمان)، P فشار صوتی، ρ چگالی آب، c سرعت صوتی و T مدت زمان بازگشت تیپ (پالس) صوتی می‌باشد. E مؤلفه‌ی بسیار مهمی بوده و به‌طور مستقیم در ارتباط با شکل و جنس بستر دریا است. دومین مرتبه ممان آماری تحت عنوان زمان انتشار به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود،

$$T = \sqrt{\frac{1}{E} \int_0^T I(t)(t-t_0)^2 dt} \quad (2)$$

مؤلفه T اندازه‌ی مقدار زمانی پژواک و مؤلفه t مرکز جرم پژواک بوده که بر اساس رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌گردد،

$$t_c = \frac{1}{E} \int_0^T I(t) t dt \quad (3)$$

² Flatness

¹ Coarse gravel

توان یک پژواک باشد، ممان طیفی m_n در مرتبه n به شکل رابطه ۱۰ تعریف می‌شود،

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) f^n df, n = 0, 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

ممان طیفی m بیانگر واریانس یک پژواک است. ممان طیفی مرتبه دوم توان طیفی در محدوده متوسط بسامد طیف پژواک مورد نظر را بیان می‌کند. چولگی طیفی از طریق ممان‌های دوم و سوم مطابق رابطه‌ی ۱۱ محاسبه می‌شوند،

$$SpSkew = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (11)$$

هم‌چنین کشیدگی طیفی پژواک از طریق ممان‌های دوم، سوم و چهارم به صورت رابطه ۱۲ محاسبه می‌شوند،

$$SpKurt = \frac{m_4}{(m_2^2 - 3m_3^2)} \quad (12)$$

چگالی طیفی توان (پی‌اس‌دی) که توزیع توان را در یک علامت بیان می‌کند می‌تواند کاربردهایی برای توصیف ویژگی‌های علامت‌های صوتی داشته باشد [۹-۱۰] که در این مقاله برای بررسی پژواک‌های دریافتی از رسوبات استفاده شده است. رابطه پی‌اس‌دی با استفاده از تبدیل فوریه زمان گسسته به صورت رابطه ۱۳ بیان می‌شود،

$$P_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xx}(m) e^{-j\omega m} \quad (13)$$

که در آن $\omega = 2\pi f$ و f بسامد نمونه‌برداری می‌باشند. راه‌های متفاوتی برای محاسبه پی‌اس‌دی موجود است که یکی از آن‌ها روش پریودوگرام^۶ می‌باشد [۹]. در این روش پی‌اس‌دی علامت $x_L[n]$ از طریق رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود،

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{L} \left| \sum_{n=0}^{L-1} x_L(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (14)$$

میانگین توان یک علامت را می‌توان از طریق انتگرال‌گیری از پی‌اس‌دی در یک محدوده بسامد مشخص (ω_1, ω_2) محاسبه کرد:

$$P[\omega_1, \omega_2] = \int_{\omega_1}^{\omega_2} P_{xx}(\omega) d\omega \quad (15)$$

۳. شرح آزمایش

برای بررسی رفتار صوتی رسوبات بستر، شرایط آزمایشگاهی برای این منظور مهیا شد. در آکواریومی به

مؤلفه‌ای تحت عنوان هرست^۱ به همراه روش ضرایب ویولت میانگین‌گیری شده، که به‌وسیله منبع [۸] بیان گردیده، تعیین می‌شود. یک تبدیل ویولت علامت را به یک ویولت مادر $\psi(x; a, b)$ انتقال داده شده و مقیاس داده شده تفکیک می‌کند:

$$\psi(x; a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (7)$$

ضرایب تبدیل ویولت $W(a, b)$ یک علامت $y(x)$ به‌وسیله‌ی روابط ۸ و ۹ تعریف می‌شوند،

$$w(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (8)$$

$$y(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W(a, b)}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \frac{1}{a} da db \quad (9)$$

که a مؤلفه مقیاس می‌باشد و بسط تابع ویولت را کنترل می‌کند، b مؤلفه انتقال می‌باشد که مقدار شیفت ویولت مادر را تعریف می‌کند و C_ψ یک ثابت بهنجار شده است که به‌وسیله‌ی تبدیل فوریه ویولت مادر تعیین می‌شود. مؤلفه‌ی هرست و ابعاد هازدورف از شیب یک log-log ارتباط تبدیل ویولت میانگین‌گیری شده‌ی پژواک دریافتی y در مقابل مؤلفه مقیاس a بدست می‌آیند. رابطه‌ی $\langle |W[y](a, b)| \rangle_b < |W[y](a, b)| \rangle_b$ را متوسط تبدیل ویولت نسبت به مؤلفه انتقال b در نظر می‌گیریم؛ سپس مؤلفه‌ی هرست H از طریق شیب نمودار $\langle |W[y](a, b)| \rangle_b$ در مقابل مؤلفه مقیاس a قابل محاسبه می‌باشد. مطابق با منبع [۸] مؤلفه‌ی H به‌وسیله‌ی رابطه‌ی $D_H = 2 - H$ با ابعاد هازدورف مرتبط می‌شود. برای محاسبه‌ی H از روش‌های متفاوت ویولت (هار^۲، سیم‌لتز^۳، دوپچایز^۴، کافلت^۵، ...) می‌توان استفاده کرد [۲]. در این مقاله از روش سیم‌لتز برای محاسبه‌ی مؤلفه‌ی هرست استفاده شده است.

۲-۳. ممان‌های طیفی

ویژگی‌های طیفی یک پژواک که در حوزه‌ی بسامد محاسبه می‌شود برای توصیف شکل طیفی یک پژواک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از ممان‌های طیفی برای محاسبه‌ی این ویژگی پژواک‌ها استفاده می‌شود [۲، ۶]. با افزایش مرتبه‌ی ممان، ممان مورد نظر حساسیت بیش‌تری را به مؤلفه‌ی بسامد پیدا می‌کند. اگر $S(f)$ چگالی طیفی

¹ Hurst

² Harr

³ Symlets

⁴ Daubechies

⁵ Coflets

⁶ PSD

⁷ Periodogram

جی‌دی‌اس-۱۰۵۲-یو^۶ که دارای عرض باند ۵۰ مگاهرتز می‌باشد، به کار گرفته شد. امواج صوتی به شکل سینوسی در بسامدهای ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۳ کیلوهرتز و دامنه‌ی ۲۰ ولت به درون آب ارسال شدند. با تغییر موقعیت تراگذار در طول آکواریوم، داده‌های صوتی در قسمت‌های مختلف آکواریوم برداشت و داده‌ها برای پردازش و استخراج ویژگی‌های ذکر شده تخلیه شدند.

۴. نتایج

۴-۱. ممان‌های آماری

همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد علامت‌ها در بسامدهای ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۳ و در چندین نقطه در طول آکواریوم ثبت شدند. علت انتخاب این بسامدها بدین دلیل بود که حین انجام آزمایش باید بسامدهای معمولاً نوفه (نویز) بسیار بالایی در علامت‌های دریافتی داشتند. تمامی مراحل پردازش علامت‌های دریافت شده از رسوبات در نرم افزار متلب^۷ صورت گرفت. برای استفاده از علامت‌های صوتی برای استخراج ویژگی‌های ذکر شده، ابتدا می‌بایست برای حذف نوفه (نویز) و آماده‌سازی برای پردازش، از صافی مناسب استفاده کرد که برای این هدف از صافی تبدیل فوریه سریع (اف‌اف‌تی^۸) برای حذف نوفه (نویز) داده‌های صوتی مطابق با منبع [۱۱] استفاده شد. مطابق با رابطه‌های ذکر شده در بخش ۲، ابتدا ویژگی ممان‌های آماری برای تمامی علامت‌ها و در چهار بسامد مورد نظر محاسبه شد. در جدول ۱ چهار نوع ویژگی محاسبه شده برای علامت دریافتی از هر رسوب مشخص است.

جدول ۱ ویژگی‌های آماری در بسامد ۵۵ کیلوهرتز.

نوع رسوب	ویژگی		
	انرژی پژواک (دسی‌بل)	زمان انتشار (میلی ثانیه)	چولگی آماری
خاک نرم	-۲۱٫۳۷	۶٫۹۹	۱۱٫۹۹
شن	-۲۰٫۱۵	۴٫۰۶	۳۷٫۵۲
سنگ‌ریزه	-۱۹٫۳۱	۳٫۲۵	۲۴٫۲۰
قلوه‌سنگ	-۱۸٫۸۶	۰٫۶۲	۹٫۴۳

^۶ GDS-1052-U

^۷ Matlab

^۸ FFT

طول ۳/۲۰ متر چهار نوع رسوب مطابق شکل ۱ با دانه‌بندی‌های متفاوت در مکان‌های مشخصی کنار هم قرار گرفتند.



شکل ۱ چهار نوع رسوب موجود در آکواریوم به ترتیب از راست به چپ؛ خاک نرم، شن، قلوه سنگ و سنگ‌ریزه.

برای ارسال و دریافت امواج صوتی دو تراگذار (ترانسدیوسر) به صورت موازی در کنار هم در داخل آب قرار گرفتند به طوری که فاصله تراگذارها با رسوبات تقریباً ۴۵ سانتی‌متر بود.



شکل ۲ تراگذارها در آب به همراه دستگاه‌های تولید و دریافت امواج صوتی.

برای تولید امواج صوتی از یک مولد موج‌دیس مگاتک^۱ ام‌اف‌جی-۲۲۰۵ پی^۲ که قابلیت تولید امواج تا ۵ مگاهرتز و به شکل‌های مختلف (سینوسی، مربعی، پله‌ای و ...) و به صورت‌های مختلف (سواپ^۳، برست^۴ و ...) را دارا می‌باشد، باشد، استفاده شد. هم‌چنین برای بررسی داده‌های پس‌پراکند یک نوسان‌نمای (اسیلوسکوپ)^۵ نوع

^۱ Waveform generator MEGATEK

^۲ MFG-2205P

^۳ Sweep

^۴ Burst

^۵ Oscilloscope

جدول ۳ ویژگی‌های آماری در بسامد ۶۵ کیلوهرتز.

نوع رسوب	ویژگی		
	انرژی پژواک (دسی‌بل)	زمان انتشار (میلی‌ثانیه)	چولگی آماری
خاک نرم	-۲۲٫۳۱	۲٫۴۳	۷٫۳۲
شن	-۲۰٫۲۲	۵٫۴۴	۷٫۵۴
سنگ‌ریزه	-۱۶٫۷۲	۳٫۵۲	۳۲٫۸۶
قلوه‌سنگ	-۱۱٫۱۸	۲٫۳۵	۲٫۹۹

جدول ۴ ویژگی‌های آماری در فرکانس ۷۳ کیلوهرتز.

نوع رسوب	ویژگی		
	انرژی پژواک (دسی‌بل)	زمان انتشار (میلی‌ثانیه)	چولگی آماری
خاک نرم	-۲۲٫۹۴	۱٫۰۰	۱۴٫۴۳
شن	-۲۲٫۶۴	۱٫۲۷	۱٫۳۳
سنگ‌ریزه	-۱۹٫۵۹	۱٫۵۱	۴۰٫۴۱
قلوه‌سنگ	-۱۹٫۵۴	۳٫۰۶	۱۳٫۹۸

شاید دلیل این نتایج در مؤلفه زمان انتشار به دلیل عمق بسیار کم تراگذارها تا بستر باشد. البته شایان ذکر است که این مؤلفه در نتایج تحقیق در منبع [۲] که از دو بسامد متفاوت (۱۵۰ و ۶۶ کیلوهرتز) برای بررسی ویژگی‌های صوتی رسوبات بستر دریا استفاده کرده بود، نیز نتایج متفاوتی داشته است به طوری که این مؤلفه در بسامد ۶۶ کیلوهرتز تفکیک بسیار بهتری را از رسوبات نسبت به بسامد ۱۵۰ کیلوهرتز ارائه کرده است. دو مؤلفه بررسی شده‌ی دیگر یعنی چولگی و کشیدگی آماری نیز در تمامی بسامدها برای تعیین تفاوت میان رسوبات در این آزمایش مقادیر مناسبی را نشان دادند برخلاف منبع [۲] که این دو مؤلفه مخصوصاً در بسامدهای بالا برای نمایش تمایز میان رسوبات مناسب تشخیص داده شده بود.

۴-۲. ممان‌های طیفی و ابعاد شکستالی (فراکتالی)

ویژگی‌های طیفی پژواک‌ها مطابق با روابط بیان شده در قسمت ۲ محاسبه شدند. انحراف معیار پژواک‌ها (اکوها) به عنوان یک ویژگی طیفی محاسبه شده‌اند. مشاهده می‌شود مقدار این مؤلفه برای رسوبات نرم کم‌تر از رسوبات سخت‌تر می‌باشد و این مورد در هر چهار بسامد مشاهده می‌شود. مقادیر ویژگی‌های چولگی و کشیدگی طیفی در این میان از قاعده‌ی خاصی پیروی نمی‌کنند و نمی‌توان از

همان‌طور که مشاهده می‌شود انرژی حاصل از علامت‌ها در چهار نوع رسوب به خوبی بین جنس نرم و سخت رسوب را تمایز ایجاد کرده است. مسلماً رسوب سخت تشکیل شده به وسیله‌ی قلوه سنگ‌ها، پژواک‌هایی با انرژی بیش‌تری را در مقابل خاک نرم دارا می‌باشند و همین‌طور رسوب نوع شن و سنگ‌ریزه‌ها که از لحاظ اندازه دانه‌بندی بین رسوب خاک نرم و قلوه سنگ قرار می‌گیرند، دارای انرژی پژواک میانه‌ای می‌باشند، این ویژگی در دیگر بسامدهای برداشتی نیز مبین این نکته است که مؤلفه انرژی به عنوان مؤلفه‌ی مهم در تفکیک جنس رسوبات بستر است و هرچه نوع رسوب سخت‌تر باشد انرژی بیش‌تر و هرچه رسوب نرم‌تر باشد میزان انرژی دریافتی کم‌تری مشاهده می‌شود. نکته‌ی دیگر که قابل توجه می‌باشد این است که در بسامدهای متفاوت مؤلفه انرژی برای رسوبات تغییر می‌کند ولی هم‌چنان تفکیک چهار نوع رسوب در این مؤلفه قابل مشاهده است. ویژگی مورد بررسی بعدی زمان انتشار می‌باشد که همان‌طور که گفته شد این مؤلفه، مستقل از مؤلفه‌ی انرژی است و انتظار می‌رود که برای رسوبات درشت‌تر، این مؤلفه افزایش پیدا کند بدین دلیل که زبری افزایش می‌یابد [۴،۲]. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده شد مقدار زمان انتشار با درشت‌تر شدن نوع رسوب کاهش پیدا کرده که بر خلاف نتایج بیان شده در منبع [۲] می‌باشد. در جدول ۲ و ۳ نیز از طریق این مؤلفه نمی‌توان میان نوع رسوبات تفاوت قائل شد، اما همان‌طور که در جدول ۴ که نتایج مربوط به علامت در بسامد ۷۳ کیلوهرتز نمایش داده شده، مؤلفه زمان انتشار با افزایش دانه‌بندی رسوبات افزایش پیدا کرده و تفکیک رسوبات قابل توجهی می‌باشد.

جدول ۲ ویژگی‌های آماری در بسامد ۶۰ کیلوهرتز.

نوع رسوب	ویژگی		
	انرژی پژواک (دسی‌بل)	زمان انتشار (میلی‌ثانیه)	چولگی آماری
خاک نرم	-۲۱٫۴۷	۳٫۵۲	۳۱٫۳۰
شن	-۲۰٫۲۲	۲٫۱۶	۷٫۹۹
سنگ‌ریزه	-۱۸٫۷۷	۳٫۱۱	۲۵٫۴۲
قلوه‌سنگ	-۱۷٫۸۹	۱٫۱۶	۴٫۴۴

جدول ۵ ویژگی‌های طیفی و شکستالی (فراکتالی) در بسامد ۵۵ کیلو هرتز.

نوع رسوب	ویژگی					
	انحراف معیار	چولگی طیفی	کشیدگی طیفی	دومین ممان	سومین ممان	چهارمین ممان
خاک نرم	۲۱,۰۳	۰,۰۰۲۴	۱,۵۲	۴۴۲,۱۵۸	۲۲,۷۶	۲۹۷۳۳۶
شن	۲۲,۳۵	۰,۰۰۱۷	۱,۵۱	۴۹۹,۵۶	۱۹,۹۷	۳۷۸۱۹۸
سنگ ریزه	۲۳,۱۴	۰,۰۰۶۸	۱,۵۲	۵۳۵,۵۰	۸۴,۳۹	۴۳۷۰۲۷
قلوه سنگ	۲۳,۸۲	۰,۰۰۵۲	۱,۵۱	۵۶۷,۲۷	۷۰,۶۶	۴۸۷۸۵۹

جدول ۶ ویژگی‌های طیفی و شکستالی (فراکتالی) در بسامد ۶۰ کیلو هرتز.

نوع رسوب	ویژگی					
	انحراف معیار	چولگی طیفی	کشیدگی طیفی	دومین ممان	سومین ممان	چهارمین ممان
خاک نرم	۲۰,۹۱	۰,۰۰۳۳	۱,۴۷	۴۳۷,۳۷	۳۰,۲۹	۲۸۲۶۴۷
شن	۲۲,۲۷	۰,۰۰۱۱	۱,۴۶	۴۹۶,۲۳	۱۲,۵۰	۳۶۰۶۳۱
سنگ ریزه	۲۳,۹۵	۰,۰۰۳۵	۱,۴۶	۵۷۳,۷۳	۴۸,۴۷	۴۸۳۲۱۶
قلوه سنگ	۲۵,۰۲	۰,۰۰۱۷	۱,۴۷	۶۲۶,۰۹	۲۶,۶۴	۵۷۸۵۸۸

جدول ۷ ویژگی‌های طیفی و شکستالی (فراکتالی) در بسامد ۶۵ کیلو هرتز.

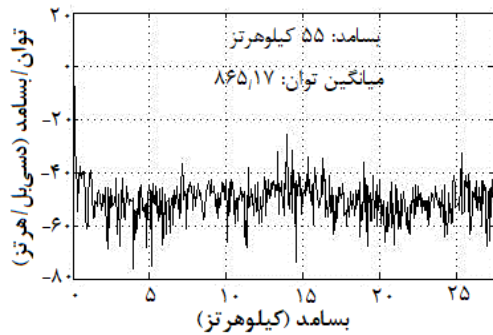
نوع رسوب	ویژگی					
	انحراف معیار	چولگی طیفی	کشیدگی طیفی	دومین ممان	سومین ممان	چهارمین ممان
خاک نرم	۱۹,۹۴	۰,۰۱۵	۱,۵۴	۳۹۷,۶۴	۱۲۳,۳۹	۲۴۴۰۱۷
شن	۲۲,۱۴	۰,۰۰۹	۱,۵۳	۴۹۰,۱۶	۱۰۵,۲۷	۳۶۸۶۶۷
سنگ ریزه	۲۶,۵۱	۰,۰۰۵	۱,۵۴	۷۰۲,۶۴	۹۴,۳۰	۷۶۲۰۲۱
قلوه سنگ	۳۴,۹۹	۰,۰۰۸	۱,۵۴	۱۲۲۴	۳۸۴,۳۵	۲۳۱۲۳۸۲

جدول ۸ ویژگی‌های طیفی و شکستالی (فراکتالی) در بسامد ۷۳ کیلو هرتز.

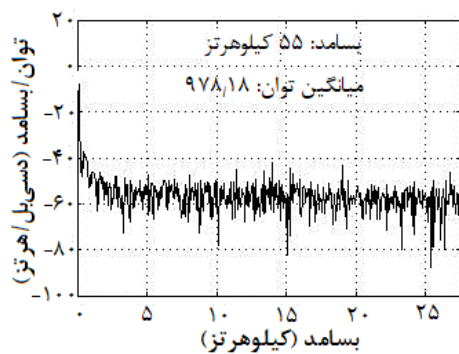
نوع رسوب	ویژگی					
	انحراف معیار	چولگی طیفی	کشیدگی طیفی	دومین ممان	سومین ممان	چهارمین ممان
خاک نرم	۱۸,۵۷	۰,۰۲۹	۱,۴۹	۳۴۴,۸۵	۱۸۹,۳۲	۱۷۷۷۷۴
شن	۱۹,۶۵	۰,۰۱۳	۱,۴۷	۳۸۶,۰۳	۹۹,۴۸	۲۲۰۵۳۰
سنگ ریزه	۲۲,۹۸	۰,۰۱۸	۱,۴۷	۵۲۸,۴۰	۱,۱۲۹	۴۱۱۴۲۳
قلوه سنگ	۲۲,۹۹	۰,۰۹۲	۱,۴۸	۵۲۸,۷۰	۲۱۹,۵۴	۴۱۳۲۵۰

است. مشاهده می‌شود که ممان‌های مرتبه‌ی دوم و چهارم دارای مقادیر افزایشی با بزرگ شدن اندازه دانه‌بندی رسوبات هستند و در همه‌ی بسامدهای آزمایشی این مورد

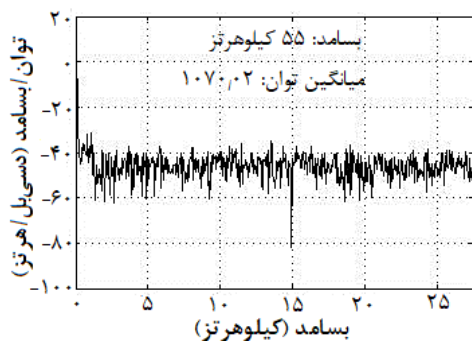
روی مقادیر آن‌ها تفکیکی میان جنس رسوبات قائل شد. مقادیر حاصل از ممان‌های مرتبه دوم، سوم و چهارم نیز به عنوان یکی از ویژگی برای هر پژواک در نظر گرفته شده



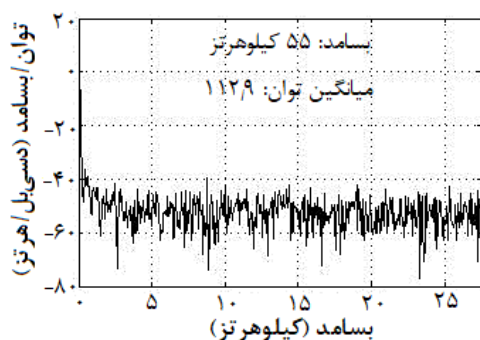
شکل ۱ پی‌اس‌دی رسوب نوع خاک نرم.



شکل ۲ پی‌اس‌دی رسوب نوع شن.



شکل ۳ پی‌اس‌دی نوع رسوب سنگ ریزه.

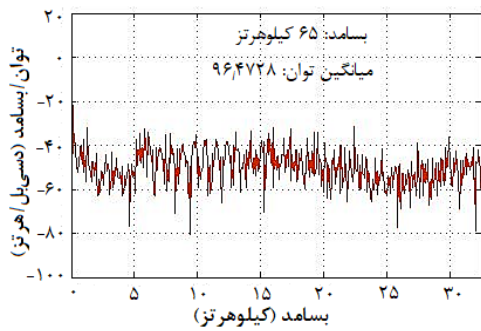


شکل ۴ پی‌اس‌دی نوع رسوب قلوه سنگ.

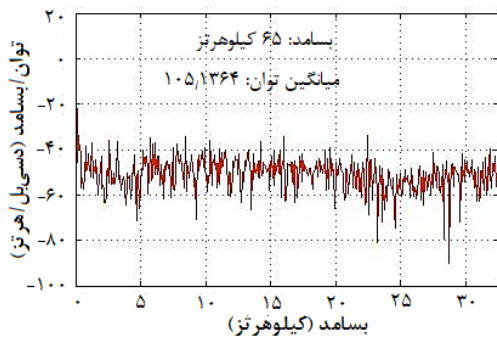
مشاهده می‌شود. در واقع این دو مرتبه از ممان برای نمایش تمایز میان نوع رسوبات مناسب تشخیص داده شد و ممان مرتبه‌ی سوم همانند مؤلفه‌های چولگی و کشیدگی طیفی در این آزمایش برای شناسایی و تفکیک جنس رسوبات کارایی ندارد. مؤلفه مورد بررسی دیگر که از ویژگی‌های شکستالی (فراکتالی) به حساب می‌آید ابعاد هازدورف می‌باشد. در منبع [۲] مشخص شده است که مقدار این مؤلفه با سخت‌تر شدن نوع رسوبات افزایش پیدا می‌کند و به عنوان مؤلفه‌ی مناسب برای تشخیص تمایز میان نوع رسوبات بستر معرفی شده است. در این آزمایش این مؤلفه نیز با توجه به نوع استفاده از امواج صوتی در فاصله‌ای بسیار کم، دارای مقادیری که بتوان از روی آن‌ها تمایزی میان رسوبات قائل شد، نبوده است.

۳-۴. چگالی طیفی توان

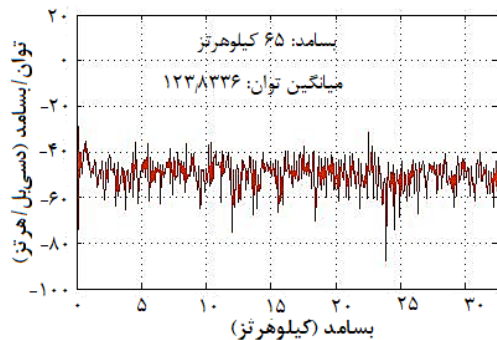
پی‌اس‌دی داده‌های پس‌پراکند (امواج صوتی بازگشتی) از رسوبات به عنوان یک ویژگی طیفی برای بررسی جنس رسوبات در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. راه‌های مختلفی برای محاسبه‌ی پی‌اس‌دی یک علامت وجود دارد که در اینجا از روش پریودوگرام برای محاسبه‌ی پی‌اس‌دی استفاده شد. هم‌چنین مؤلفه میانگین توان که حاصل انتگرال‌گیری از پی‌اس‌دی می‌باشد به عنوان یک مؤلفه برای بررسی ویژگی پژواک‌های دریافتی برای نمایش تغییرات پژواک نسبت به جنس مورد بررسی قرار گرفت. پی‌اس‌دی تمامی پژواک‌ها (اکوها) در بسامدهای مورد آزمایش برای هر چهار نوع رسوب مطابق شکل‌های ۱ تا ۱۶ به همراه مؤلفه میانگین توان مشاهده می‌شود. همان‌طور که در نمودارها مشخص است مؤلفه میانگین توان در هر بسامد با افزایش مقدار دانه‌بندی رسوب افزایش یافته است و این مؤلفه که حاصل از پی‌اس‌دی پژواک دریافتی می‌باشد، تابعی از جنس رسوب بوده و می‌توان از طریق آن تمایز میان رسوبات را متوجه شد.



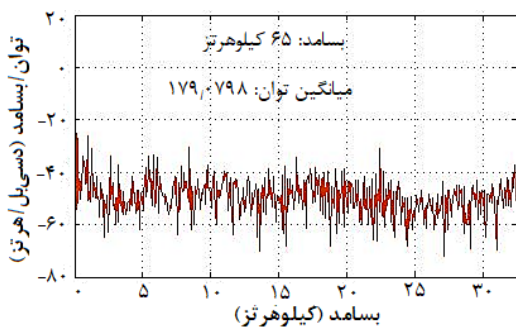
شکل ۹ پی‌اس‌دی نوع رسوب خاک نرم.



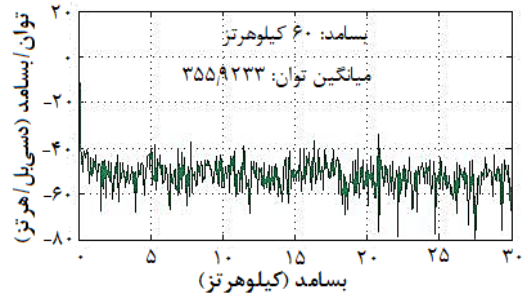
شکل ۱۰ پی‌اس‌دی نوع رسوب شن.



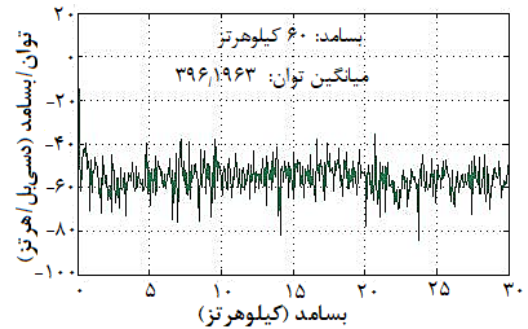
شکل ۱۱ پی‌اس‌دی نوع رسوب سنگ ریزه.



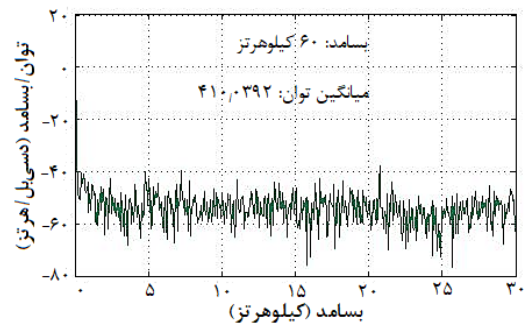
شکل ۱۲ پی‌اس‌دی نوع رسوب قلوه سنگ.



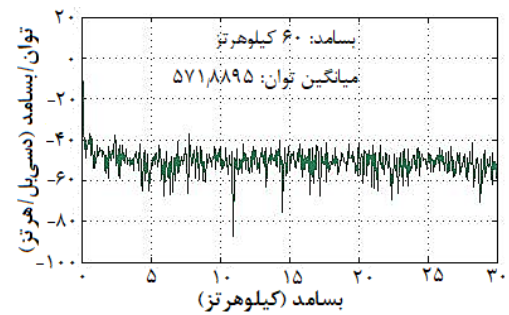
شکل ۵ پی‌اس‌دی نوع رسوب خاک نرم.



شکل ۶ پی‌اس‌دی نوع رسوب شن.



شکل ۷ پی‌اس‌دی نوع رسوب سنگ ریزه.



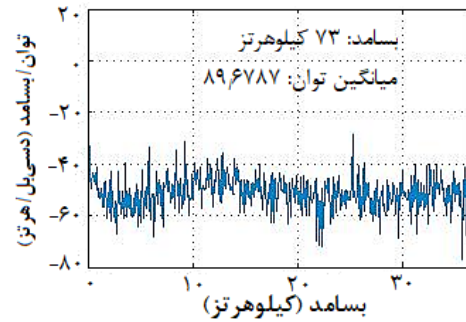
شکل ۸ پی‌اس‌دی نوع رسوب قلوه سنگ.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

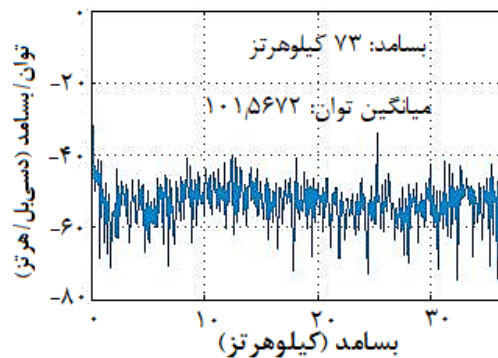
بررسی جنس رسوبات بستر دریا به وسیله‌ی سامانه‌های صوتی به دلیل اهمیت هدف آن یعنی شناخت بستر دریا بدون تماس مستقیم، طیف وسیعی از تحقیقات را شامل می‌شود که با توجه به دستگاه‌های صوتی و شرایط محیط جغرافیایی هر منطقه، هم‌چنان جای تحقیقات بسیاری در این زمینه وجود دارد. یکی از روش‌های تحقیق برای این موضوع، بررسی ویژگی‌های صوتی رسوبات در آزمایشگاه است. در این مقاله با استفاده از دستگاه‌های تولید و دریافت امواج صوتی در یک آکواریوم با چهار نوع رسوب در بستر آن، بررسی ویژگی‌های پژواک‌های دریافتی از بستر مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های مورد بررسی ممان‌های آماری، شکستالی (فراکتالی) و طیفی بودند که مشخص شد که مهم‌ترین ویژگی پژواک‌ها در بررسی نوع رسوب شامل مؤلفه انرژی پژواک است که به خوبی نوع رسوبات را تفکیک کرد. در این مقاله هم‌چنین برخلاف دیگر تحقیقات از ویژگی چگالی طیفی توان برای بررسی ویژگی‌های صوتی رسوبات استفاده شد که نتایج نشان داد این ویژگی می‌تواند برای نمایش تمایز میان رسوبات مناسب باشد. اما می‌توان ویژگی ویولت پژواک‌ها را نیز برای بررسی نوع رسوبات مورد بررسی قرار داد که این ویژگی برای این هدف در تحقیقات دیگران نیز کم‌تر مورد توجه واقع شده است. به طور کلی روش سنجش از دور صوتی را می‌توان روشی شناخته شده و مناسب برای بررسی رسوبات در بستر دریا دانست که به‌کارگیری آن نیازمند شناخت و بررسی دستگاه‌های مورد استفاده و آزمایش‌های میدانی برای رسیدن به بهترین نحوه اجرای این روش است.

۶. فهرست منابع

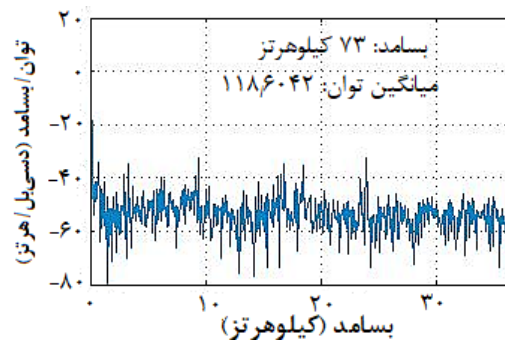
- [1] V. Rezaali, H. Amiri, "Evaluation of acoustic remote sensing method for seafloor sediment classification," Geospatial Engineering Journal, vol. 6, no. 3, pp. 33-42, 2015 (in Persian).
- [2] J. Tgowski, N. Gorska, Z. Klusek, "Statistical analysis of acoustic echoes from underwater meadows in the eutrophic Puck Bay (southern Baltic Sea)" Aquatic Living Resources, vol. 16, no. 3, pp. 215-221, 2003.



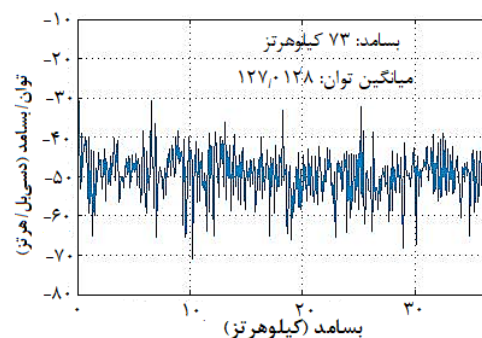
شکل ۱۳ پی‌اس‌دی نوع رسوب خاک نرم.



شکل ۱۴ پی‌اس‌دی نوع رسوب شن.



شکل ۱۵ پی‌اس‌دی نوع رسوب سنگ ریزه.



شکل ۱۶ پی‌اس‌دی نوع رسوب قلوه سنگ.

- [3] A.P. VanWalreea, J. Tegowski, Cees Laban, D.G. Simons, "Acoustic seafloor discrimination with echo shape parameters: A comparison with the ground truth" *Continental Shelf Research*, vol. 25, no. 18, pp. 2273–2293, 2005.
- [4] D. Chanchal, B. Chakraborty, "Acoustic characterization of seafloor sediment employing a hybrid method of neural network architecture and fuzzy algorithm" *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 4, 2009.
- [5] A.R. Amiri-Simkooei, M. Snellen, D.G. Simons, "Principal component analysis of single-beam echo-sounder signal features for seafloor classification" *IEEE Journal Of Oceanic Engineering*, vol. 36, no. 2, 2011.
- [6] D. Buscombe, P.E. Grams, M.A. Kaplinski, "Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 1. Spectral properties of scattering" *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 119, no. 12, 2014.
- [7] D. Eleftherakis, M. Snellen, A. Amiri-Simkooei, D.G. Simons, K. Siemes, "Observations regarding coarse sediment classification based on multi-beam echo-sounder's backscatter strength and depth residuals in Dutch rivers," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 135, no. 6, pp. 3305–3315, 2014.
- [8] B.B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature," Freeman, San Francisco, 1982.
- [9] P. Welch, "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, no. 2, pp.70-73, 1967.
- [10] P. Stoica, R.L. Moses, "Introduction to Spectral Analysis," Prentice-Hall, 1997.
- [11] A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing," Prentice-Hall, 1989.