دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک

دورهٔ ششم، شمارهٔ اول (بهار و تابستان ۱۳۹۹)؛ صفحات: ۲۰-۱۳

مقالهٔ پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.1.2.6

ارتباط داده‌های بازتابی صوتی با جنس رسوبات بستر از طریق بررسی توان چگالی طیفی اکوها

مهیار مجیدی‌نیک[۱*]، وحید رضاعلی[۲]

[۱*] دانشجوی دکتری اقیانوس‌شناسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر m.majidynik@yahoo.com

[۲] کارشناس‌ارشد مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران vahid.rezaali@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۶ **تاریخ پذیرش:** ۹۹/۰۱/۲۵

چکیده

روش شناسایی و طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا و رودخانه‌ها با ابزار آکوستیکی که بر مبنای ارسال و دریافت امواج صوتی از بستر عمل می‌کنند، روشی شناخته شده است. امواج صوتی بازگشتی از رسوبات ویژگی‌های متعددی دارند که با استخراج آن‌ها می‌توان جنس رسوبات بستر را شناسایی و طبقه‌بندی کرد. بدین منظور در این طرح برای بررسی رفتار آکوستیکی رسوبات، ۴ نوع رسوب با دانه‌بندی‌های مختلف در بستر تانک آزمایشگاهی مهیا و امواج صوتی در ۴ فرکانس ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ کیلوهرتز از سطح آب با دستگاه مولد امواج صوتی ارسال و امواج بازگشتی از رسوبات بستر ثبت شده است. برای بررسی داده‌های برداشتی با جنس رسوبات بستر، از ویژگی توان چگالی طیفی اکوها شامل دو روش پریدوگرام و برگ استفاده شده است. در روش اول پارامتر میانگین توان و در روش دوم پارامتر قدر مطلق شیب، میان کمینه و بیشینه پیک‌ها به‌عنوان دو ویژگی برای بررسی ارتباط داده‌ها با جنس بستر موردبررسی قرار گرفته است. نتایج بیان‌گر این موضوع است که پارامترهای مذکور رابطهٔ معنادار با جنس رسوبات داشته و می‌توان از آن‌ها برای تفکیک، شناسایی و طبقه‌بندی رسوبات استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: سنجش‌ازدور آکوستیکی، شکل امواج بازتابی، رسوبات بستر دریا، توان چگالی طیفی

۱. مقدمه

شناخت بستر حوزه‌های آبی ازجمله دریاها و اقیانوس‌ها در راستای به‌کارگیری فعالیت‌های ثانویه دریایی امری لازم و ضروری است. این مهم در بسیاری از فعالیت‌ها از قبیل طراحی

و احداث بنادر، انتقال خطوط نفت و گاز، کابل گذاری و عملیات های نظامی اهمیت زیادی دارد. تاکنون برای دستیابی به جنس و طبقه‌بندی رسوبات از روش نمونه‌برداری مستقیم از بستر و تحلیل و بررسی آن استفاده شده است. با وجود این امروزه و با پیشرفت دستگاه‌های آکوستیکی و ورود آن‌ها به پروژه‌های دریایی، بررسی و پایش بستر بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های مستقیم و تنها از طریق سنجش‌ازدور آکوستیکی (Acoustic Remote Sensing) قابل‌دستیابی است. در این روش با استفاده از امواج صوتی بازگشتی از بستر فرایند شناسایی و طبقه‌بندی رسوبات صورت می‌پذیرد. در سنجش‌ازدور آکوستیکی ثبت امواج صوتی بازگشتی از رسوبات بستر دریا به‌وسیله دستگاه‌های آکوستیکی برای بررسی جنس و طبقه‌بندی رسوبات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. از جمله بارزترین روش‌های آکوستیکی برای شناخت و طبقه‌بندی رسوبات بستر می‌توان به روش استخراج ویژگی‌های امواج صوتی و تعیین ارتباط آن‌ها با رسوبات برداشت شده در یک منطقه اشاره کرد. این ویژگی به‌طورکلی به چهار دسته زیر تقسیم می‌شود:

۱) مشخصه‌هایی که بیان‌گر انرژی موج صوتی بازگشتی از بسترند؛
۲) مشخصه‌هایی که بیان‌گر شکل و تغییرات دامنهٔ اکوها هستند؛
۳) مشخصه‌هایی که بیان‌گر مشخصه‌های آماری اکوها هستند؛
۴) مشخصه‌هایی که بیان‌گر مشخصات طیفی اکوهای بازگشتی بوده و می‌توان ویژگی‌های دیگر را مانند ویژگی‌های فراکتالی [۱] و ویولت [۲] حاصل نمود [۲].

هدف اصلی طرح حاضر، پایش رفتار آکوستیکی بازگشتی از رسوبات بستر در محیط آزمایشگاهی و تعیین نوع جنس بستر از امواج آکوستیکی بازگشتی از رسوبات است. ازاین‌رو تجهیزات آزمایشگاهی طوری مورد استفاده قرار گرفته تا با بررسی اصوات بازگشتی از بستر، جنس آن تعیین شده است. ویژگی‌های بررسی‌شده در طرح حاضر از ویژگی توان چگالی طیفی اکوهای برداشت شده با دستگاه شکل موج بازتابی استفاده شده است.

در زمینهٔ بررسی جنس رسوبات بستر از طریق ویژگی‌های اکوهای بازگشتی از بستر، تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. تگوسکی و همکاران در سال ۲۰۰۳، برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی بستر دریا، از آنالیز اکوهای جمع‌آوری‌شده به‌وسیلهٔ اکوساندر با فرکانس ۲۰۸ کیلوهرتز و استخراج ویژگی‌های اکوها استفاده کردند، در این تحقیق ویژگی‌های ممان اینرسی [۳]، عرض طیفی [۴] و ابعاد فراکتالی برای تمایز میان پوشش‌های گیاهی استخراج شدند که پارامتر ممان اینرسی اکوها بهترین تمایز را برای نمایش پوشش‌های گیاهی نتیجه داده است [۲]. پائول و همکاران در سال ۲۰۰۵، ویژگی‌های استخراج‌شده از اکوی بازگشتی از بستر دریا با دو اکوساندر با فرکانس‌های ۶۶ کیلوهرتز و ۱۵۰ کیلوهرتز را با داده‌های میدانی شامل ۵۰ نمونهٔ برداشت شده در دریا مقایسه کردند که مشخص شد؛ پارامترهای انرژی، آماری، طیفی و فراکتالی اکوهای بازگشتی شامل اطلاعات مفیدی برای تعیین نوع رسوبات و درنتیجه طبقه‌بندی آن‌ها هستند؛ در این تحقیق ۴ نوع رسوب در بستر دریا شناسایی و طبقه‌بندی شده که مشخص شد رسوبات بستر در فرکانس ۱۵۰ کیلوهرتز قدرت تمایز بهتری دارند [۳].

چانچال و همکاران در سال ۲۰۰۹، طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا در کشور هند را با استفاده از هفت ویژگی استخراج‌شده از اکوهای بازگشتی (انرژی، چولگی آماری، زمان انتشار آماری، چولگی طیفی، عرض طیفی، کشیدگی طیفی و ابعاد هازدورف [۵] اکوساندر تک بیم با فرکانس‌های ۳۳ و ۲۱۰ کیلوهرتز و به‌کارگیری روش طبقه‌بندی فازی سیمینز [۶] و الگوریتم‌های شبکه عصبی انجام داده‌اند [۴]. امیری سیمکویی و همکاران در سال ۲۰۱۱، تعیین و طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا را با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده از اکوهای بازگشتی

شامل انرژی، زمان انتشار[۷]، چولگی[۸] و کشیدگی[۹] از طریق اکوساندر تک بیم در سه فرکانس ۱۲، ۳۸ و ۲۰۰ کیلوهرتز انجام داده‌اند که در این تحقیق درنهایت با استفاده از ۱۲ ویژگی استخراجی در این سه فرکانس با استفاده از روش طبقه‌بندی PCA و کامینز[۱۰] طبقه‌بندی کلاس‌های آکوستیکی و در نهایت رسوبات بستر دریا صورت گرفت [۵].

باسکامب و همکاران در سال ۲۰۱۴، از طبقه‌بندی رسوبات رودخانه‌ای در آریزونا با استفاده از اکوساندر مولتی بیم و به‌کارگیری روش آنالیز آماری اکوهای بازگشتی از بستر استفاده کردند؛ آن‌ها نقشه‌ای با رزولوشن بالا از ویژگی‌های طیفی اکوهای بازگشتی (مؤلفه طیفی[۱۱]، شدت طیفی[۱۲] و زبری آکوستیکی[۱۳]) 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 روی دو ویژگی مهم حاصل از مولتی بیم (فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز) در محیطی با رسوب خیلی سخت انجام دادند. در این تحقیق از ویژگی‌های شدت امواج بازگشتی و رزیدوال عمق (حاصل از تغییرات عمق نسبت به یک صفحهٔ فیت شده به داده‌های عمق‌یابی) به‌عنوان ویژگی‌هایی مهم استفاده شدند و نتایج نشان داد که با افزایش اندازه دانه‌بندی رسوبات شدت امواج بازگشتی افزایش و رزیدوال عمق کاهش می‌یابد که این مورد فقط در رسوبات با درجهٔ سختی کم مطرح است و در رسوبات سخت‌تر (رسوب نوع coarse gravel) عکس این مطلب صادق است [۷].

۲. مواد و روش‌ها

امواج صوتی منتشرشده درون آب بعد از بازگشت از رسوبات بستر، ویژگی‌های گوناگونی دارند که با استخراج آن‌ها می‌توان اطلاعاتی در مورد شکل و جنس بستر به دست آورد. یکی از ویژگی‌های موردبررسی، توان چگالی طیفی اکوهاست که می‌توان از طریق آن‌ها ارتباطی را میان اکوها و جنس رسوبات پیدا کرد. در طرح حاضر از دو روش در محاسبهٔ توان چگالی طیفی که یکی روش پارامتریک و دیگری غیر پارامتریک هستند، استفاده شده است؛ در ادامه به تشریح هریک از روش‌ها پرداخته شده است.

۳. تئوری و محاسبات

۳-۱. توان چگالی طیفی به روش پریدوگرام

هدف از تخمین طیفی، توصیف توزیع (در فرکانس) توان یک سیگنال بر پایه مجموعه‌ای محدود از داده‌هاست. توان چگالی طیفی (PSD) یک فرایند اتفاقی ایستا ازلحاظ ریاضیاتی به دنباله همبستگی با تبدیل فوریه گسسته در زمان مربوط می‌شود [۸]. رابطه PSD با استفاده از تبدیل فوریه زمان گسسته به‌شکل

$$P_{xx}(\omega) = \frac{1}{2\pi}\sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{xx}(m)\, e^{-j\omega m} \qquad (۱)$$

بیان می‌شود که در آن $\omega = 2\pi f$ و f فرکانس نمونه‌برداری است. راه‌های متفاوتی برای محاسبهٔ PSD موجود است که یکی از آن‌ها روش پریدوگرام[۱۴] است [۹]. این روش جزو روش‌های غیر پارامتری محاسبهٔ PSD است که در آن به‌طورمستقیم از خود سیگنال تخمین زده می‌شود. در این روش PSD سیگنال $x_L[n]$ با رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{xx}(f) = \frac{1}{LF_s}\left|\sum_{n=0}^{L-1} x_L(n) e^{-2\pi f}\right|^2 \qquad (۲)$$

میانگین توان یک سیگنال را با انتگرال‌گیری از PSD در یک محدودهٔ فرکانس مشخص (ω_1, ω_2)، محاسبه می‌کند:

$$\overline{P[\omega_1, \omega_2]} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} P_{xx}(\omega)\, d\omega \qquad (۳)$$

۳-۲. توان چگالی طیفی به روش بِرگ

روش بِرگ، جزء روش‌های پارامتریک در محاسبهٔ PSD است. در روش‌های پارامتریک رزولوشن محاسباتی بالاتری را نسبت به‌روش‌های غیرپارامتریک داریم. در روش‌های پارامتریک برخلاف روش‌های غیر پارامتریک به‌جای تخمین مستقیم PSD از داده‌ها، مدل داده‌ها به‌عنوان خروجی یک سیستم خطی

به‌وسیلهٔ نویز سفید استخراج شده، سپس به تخمین پارامترهای این سیستم خطی پرداخته می‌شود. روش بِرگ تخمین طیفی یک سری زمانی را توسط کمینه کردن خطای پیش‌بینی خطی انجام می‌دهد. روش بِرگ و دیگر روش‌های پارامتریک مطابق رابطهٔ زیر PSD یک سیگنال را تخمین می‌زنند:

$$P(f)=\frac{1}{F_s}\frac{p}{\left|1-\sum_{k=1}^{p}a_p(k)e^{-j2\pi kf/F_s}\right|^2} \qquad (۴)$$

PSD محاسبه‌شده با این روش پیک‌های منحصری برای هر سیگنال دارد. یکی از ویژگی‌های قابل‌استخراج از این روش، محاسبهٔ شیب میان کمینه-بیشینه و در نظر گرفتن قدر مطلق آن به‌عنوان یک ویژگی برای اکوهای بازگشتی از رسوبات است[۱۰،۱۱].

۳-۳. شرح آزمایش

برای بررسی رفتار آکوستیکی رسوبات بستر، شرایط آزمایشگاهی برای این منظور مهیا شد. در آکواریومی به طول ۳ متر و عمق ۱ متر، ۴ نوع رسوب با دانه‌بندی‌های متفاوت در مکان های مشخصی کنار هم در آکواریوم قرار گرفته شدند. برای ارسال و دریافت امواج صوتی دو ترانسدیوسر به‌منظور ارسال و دریافت امواج صوتی به شکلی موازی در کنار هم در داخل آب قرار گرفتند؛ طوری که ترانسدیوسرها تا رسوبات دارای فاصلهٔ تقریبی ۴۵ سانتی‌متر بودند. برای تولید امواج صوتی از یک مولد امواج MEGATEK مدل MFG-2205P که قابلیت تولید امواج تا ۵ مگاهرتز و به شکل‌های مختلف (سینوسی، مربعی، پله‌ای و...) و به صورت‌های مختلف (sweep، burst و...) دارد، استفاده شد. همچنین برای بررسی امواج صوتی بازگشتی یک اسیلسکوپ مدل GDS-1052-U که دارای عرض باند ۵۰ مگاهرتز است، به‌کار گرفته شده است. امواج صوتی به شکل سینوسی در فرکانس‌های ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۳ کیلوهرتز و دامنهٔ ۲۰ ولت به درون آب ارسال و با تغییر موقعیت ترانسدیوسر در طول آکواریوم، داده‌های صوتی در قسمت‌های مختلف آکواریوم برداشت و داده‌ها برای پردازش و استخراج ویژگی‌های بیان‌شده تخلیه شده است.

شکل ۱. چهار نوع رسوبات در آکواریوم به ترتیب از بالا به پایین: خاک نرم، شن، قلوه‌سنگ و سنگ‌ریزه

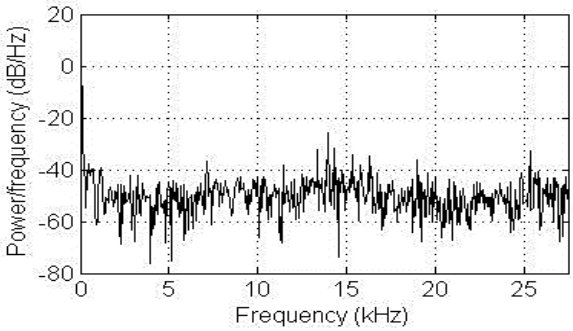
شکل ۲. ترانسدیوسرهای مستقر در آب به همراه دستگاه‌های مولد و دریافت امواج صوتی

٤. یافته‌ها

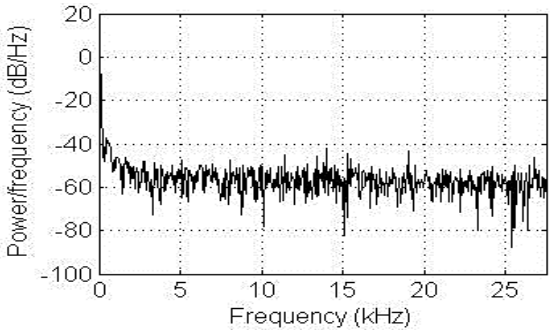
٤-۱. توان چگالی طیفی به روش پریدوگرام

PSD اکوهای آکوستیکی بازگشتی از رسوبات به‌عنوان یک ویژگی طیفی برای بررسی جنس رسوبات در این طرح مورد بررسی قرار گرفت. پارامتر میانگین توان[۱۵] (A.P) که حاصل انتگرال گیری از PSD است؛ به‌عنوان پارامتری برای بررسی ویژگی اکوهای بازگشتی در راستای نمایش تغییرات اکو نسبت

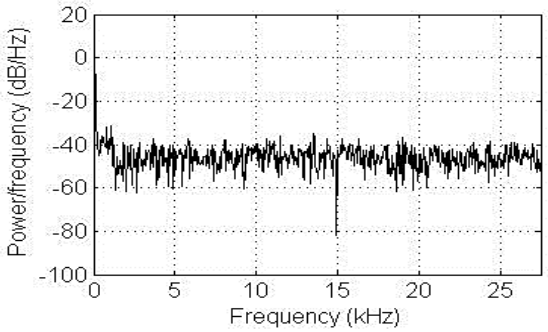
به جنس، محاسبه شده است. PSD اکوها در فرکانس‌های مختلف برای هر ۴ نوع رسوب محاسبه و پارامتر A.P برای هر اکو مشخص شد. به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۳ تا ۶، PSD اکوهای بازگشتی از ۴ نوع رسوب در فرکانس ۵۵ کیلوهرتز نمایش داده شده است. نتایج نهایی این قسمت در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول پارامتر A.P برای هر اکو در فرکانس‌ها و رسوبات مختلف مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این جدول مشخص است، این پارامتر در هر فرکانس با افزایش دانه‌بندی رسوب افزایش پیدا کرده است و این مورد در هر فرکانس به‌وضوح دیده می‌شود؛ ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که این پارامتر ارتباط معناداری با دانه‌بندی رسوبات داشته و می‌توان از طریق آن میان نوع رسوبات در بستر تمایز قائل شد.



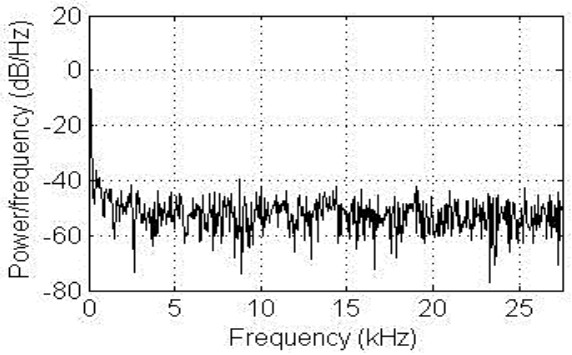
شکل ۳. PSD رسوب نوع خاک نرم



شکل ۴. PSD رسوب نوع شن



شکل ۵. PSD نوع رسوب سنگ‌ریزه



شکل ۶. PSD نوع رسوب قلوه‌سنگ

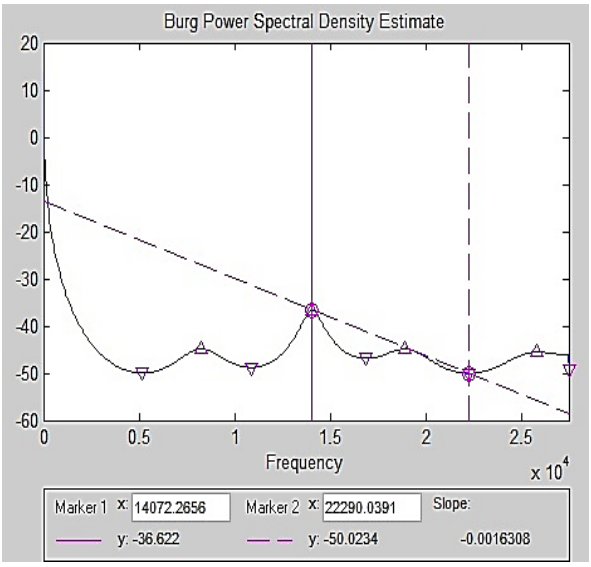
جدول ۱. پارامتر میانگین توان در روش پریودوگرام برای هر اکو

نوع رسوب	S%–فرکانس ۵۵kH	S%–فرکانس ۶۰kH	S%–فرکانس ۶۵kH	S%–فرکانس ۷۳kH
خاک نرم	۰/۱۶۳	۰/۱۷۶	۰/۱۷۷	۰/۱۷۷
شن	۰/۱۷۶	۰/۱۸۳	۰/۱۸۴	۰/۱۷۹
سنگ‌ریزه	۰/۱۸۵	۰/۱۸۵	۰/۲۰۴	۰/۲۳۴
قلوه‌سنگ	۰/۲۳۹	۰/۱۲۵	۰/۲۳۱	۰/۲۷۸

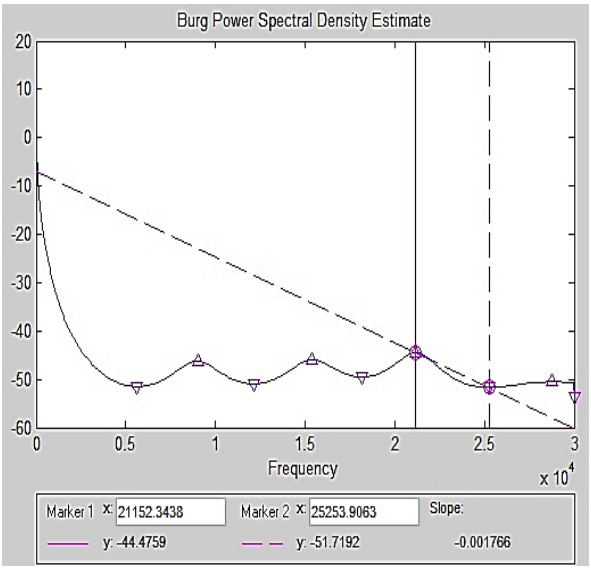
۴-۲. توان چگالی طیفی به روش برگ

توان چگالی طیفی با استفاده از روش پریدوگرام به‌عنوان روشی غیر پارامتریک برای بررسی اکوهای بازگشتی مورداستفاده قرار گرفت؛ مشاهده شد که پارامتر A.P حاصل از انتگرال PSD رابطهٔ معناداری با دانه‌بندی رسوبات دارد. در این قسمت روش دیگر و استفاده از توان چگالی طیفی مورد بررسی قرار گرفته است. روش برگ[۱۶] به عنوان روشی پارامتریک

برای محاسبهٔ PSD است. روش‌های پارامتریک این ویژگی را دارند که برای سیگنال‌هایی با طول‌موج کوتاه رزولوشن بالاتری را ارائه می‌کنند. در این روش‌ها و به‌خصوص روش برگ به دلیل اینکه ویژگی‌های طیفی محاسبه‌شده سیگنال، پیک‌های منحصربه‌فردی برای هر سیگنال دارد؛ می‌توان با بررسی این پیک‌ها رابطه‌ای برای تمایز میان اکوهای بازگشتی از رسوبات احصاء نمود.

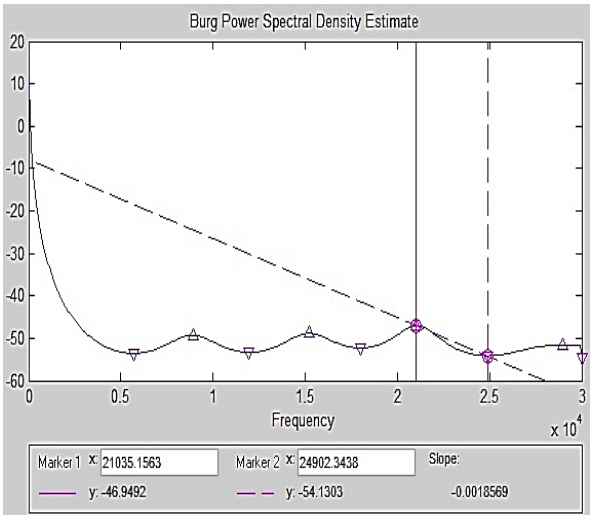


شکل ۷. رسوب نوع خاک نرم-فرکانس ۵۵

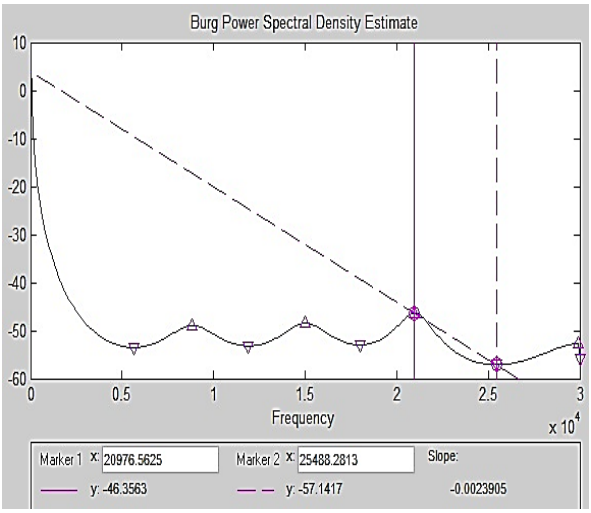


شکل ۸. رسوب نوع شن-فرکانس ۵۵

در جعبهٔ‌ابزار پردازش سیگنال نرم‌افزار متلب، PSD به روش برگ برای اکوهای برداشت‌شده در فرکانس‌های مختلف محاسبه شده است. شکل‌های ۷ تا ۱۰ نمونه‌ای از PSD روش برگ برای هر ۴ نوع رسوب در فرکانس ۵۵ کیلوهرتز را نمایش می‌دهند. این نمودارها پیک‌های خاصی برای هر اکو دارند. شیب بین بیشینه و کمینهٔ پیک‌ها برای هر اکو در نمودار PSD آن‌ها محاسبه شده است. قدر مطلق این شیب‌ها برای هر اکوی بازگشتی از رسوبات درفرکانس‌های مختلف، در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به‌جز فرکانس ۶۰ کیلوهرتز، در دیگر فرکانس‌ها این پارامتر مقداری افزایشی را با افزایش دانه‌بندی رسوبات دارد و این پارامتر توانسته به‌خوبی نوع رسوبات را تفکیک نماید. ازاین‌رو می‌توان به‌عنوان یک پارامتر مهم در شناسایی نوع رسوبات به‌حساب آید.



شکل ۹. رسوب نوع سنگ ریزه-فرکانس ۵۵



شکل ۱۰. رسوب نوع قلوه‌سنگ - فرکانس ۵۵

۵. بحث

در طرح حاضر برای بررسی ارتباط میان داده‌های شکل امواج بازتابی و نوع رسوبات از توان چگالی طیفی اکوها استفاده شد. روش‌های محاسباتی توان چگالی طیفی شامل روش غیر پارامتریک پریدوگرام و روش پارامتریک برگ موردبررسی قرار گرفت. در روش پریدوگرام پارامتر میانگین توان به‌عنوان یک ویژگی منحصربه‌فرد برای هر اکوی بازگشتی از رسوب محاسبه شد؛ نتایج نشان داد این پارامتر با افزایش دانه‌بندی رسوب افزایش یافته است. در روش برگ نیز پارامتر قدر مطلق شیب میان بیشینه و کمینهٔ پیک‌ها در نمودار توان چگالی طیفی اکوها به‌عنوان یک ویژگی منحصربه‌فرد برای هر اکو در نظر گرفته شد؛ نتایج بیان‌گر آن است که در تمامی فرکانس‌ها جز فرکانس ۶۰ کیلوهرتز این پارامتر با افزایش دانه‌بندی رسوبات افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که دو پارامتر حاصل از دو روش گوناگون توان چگالی طیفی اکوها قابلیت مناسبی برای شناسایی و تفکیک رسوبات از طریق داده‌های آکوستیکی را داشته باشند؛ بنابراین می‌توان از آن‌ها در بررسی جنس بستر و کلاس‌بندی آکوستیکی بستر از طریق داده‌های آکوستیکی استفاده کرد.

مراجع

[۱] رضاعلی وحید ، امیری هادی. بررسی روش سنجش‌ازدور آکوستیکی به‌منظور طبقه‌بندی رسوبات بستر دریا. نشریهٔ علمی ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی. ۱۳۹۴؛۶(۳).

[2] Tegowski J, Gorska N, Klusek Z. Statistical analysis of acoustic echoes from underwater meadows in the eutrophic Puck Bay (southern Baltic Sea). Aquatic Living Resources. 2003 Jul 1;16(3):215-21.

[3] Van Walree PA, Tęgowski J, Laban C, Simons DG. Acoustic seafloor discrimination with echo shape parameters: A comparison with the ground truth. Continental Shelf Research. 2005 Nov 1;25(18):2273-93.

[4] De C, Chakraborty B. Acoustic characterization of seafloor sediment employing a hybrid method of neural network architecture and fuzzy algorithm. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2009 Sep 4;6(4):743-7.

[5] Amiri-Simkooei AR, Snellen M, Simons DG. Principal component analysis of single-beam echo-sounder signal features for seafloor classification. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2011 May 12;36(2):259-72.

[6] Buscombe D, Grams PE, Kaplinski MA. Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 1. Spectral properties of scattering. Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2014 Dec;119(12):2674-91.

[7] Eleftherakis D, Snellen M, Amiri-Simkooei A, Simons DG, Siemes K. Observations regarding coarse sediment classification based on multi-depth residuals in Dutch rivers. The Journal of the Acoustical Society of America. 2014 Jun;135(6):3305-15.

[8] Mandelbrot BB. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco. 1982.

[9] Welch P. 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. 1967 Jun;15(2):70-3.

[10] Stoica P. Introduction to spectral analysis. Prentice hall; 1997.

[11] Oppenheim AV, Schafer RW. Discrete-Time Signal Processing. Prentice-Hall; 1989.

پی‌نوشت‌ها

1. Fractal Feature
2. Wavelet
3. Moment of Inertia
4. Spectral Width
5. Hausdorff Dimension
6. Fuzzy C-means
7. Time-Spread
8. Skewness
9. Kurtosis
10. K-means
11. Spectral Exponent
12. Spectral Strength
13. Acoustic Roughness
14. periodogram
15. Average Power
16. Burg