

Numerical Modeling for Estimating the Mean Particle Size and Concentration of Suspended Sediments in Rivers Using the Acoustic Tomography Method

Maryam Jamshidnejad¹, Jaber Soltani^{2*}, Masoud Bahreinimotlagh³, Reza Roozbahani³

1- M.Sc. Water Structure Engineering, Aburaihan College, Tehran University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering Department, Aburaihan College, Tehran University, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Water Resources Studies and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran.

* jsoltani@ut.ac.ir

Received: 9 November 2022, Accepted: 28 December 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Today, due to the high statistics of erosion globally, the importance of continuous monitoring of rivers that carry most of the eroded rich soil in the form of suspended sediments is vital. In Iran, almost one billion tons of eroded soil are destroyed annually. One hundred million cubic meters will reduce the volume of dams. In such a situation, most sediment measurement stations worldwide still use traditional methods to monitor suspended sediments, which are costly and time-consuming and are associated with human error. In recent decades, attention to new methods of monitoring suspended sediments in rivers has increased. One of these methods is Hydroacoustic technologies such as Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), which transmit sound waves with different frequencies underwater. The analysis of its speed and intensity and the number of sound waves attenuation due to collisions with suspended sediment particles can measure the mean suspended sediment concentration and particle size estimating the mean suspended sediment concentration using a single frequency is possible only by sampling the river. Therefore, in this study, for the first time, with the development of tomographic relationships and the simultaneous dual frequencies, the possibility of estimating the mean particle size and suspended sediment concentration in the river using the Fluvial Acoustic Tomography (FAT) method without the need for sampling by using 10 and 30 kHz are presented.

Material and Methods: The acoustic tomography consists of two sources of sound production and a sound receiver installed diagonally on both sides of the river; They monitor the river cross-section by sending and receiving sound waves. This system is considered an active measurement system due to its sound production source. The systems are synchronized using nanosecond satellites using GNU satellites and transmit sound waves at a single time. Sound waves propagate throughout the water depth, and changes in water depth do not affect the measurement of this method, and there is no need to install several devices at different depths. These waves propagate forward in contact with the water surface and the bed of the aquatic environment. One of the disadvantages of the acoustic tomography method is trapping the foliage of plants around the transducers, which disrupts the measurement operation (Bahreinimotlagh et al., 2019; Bahreinimotlagh et al., 2018;

Bahreimotlagh et al., 2015).

Result and Discussion: In this study, to test the ability of the proposed equation in acoustic tomography, three hypothetical probabilities (A1, A2, and A3) were considered with SNR (36 and 23 dB), (39 and 26 dB), and (37 and 24 dB) respectively. First, by using the proposed equation, estimate the sediment absorption coefficient by using frequencies (10 and 30 kHz) as the hypothetical probability A1, A2, and, A3 are (0.013 and 0.025 dB), (0.009 and 0.020 dB) and, (0.011 and 0.023 decibels) respectively. Finally, by solving two equations and two unknowns for each hypothetical occurrence probability (A1, A2, and A3), the average concentration and size of suspended sediments in the river section are equal to (1.43 kg / m³ and 24.89 μm), (0.54 kg / m³ and 9.64 μm) and (0.93 kg / m³ and 16.43 μm) were estimated respectively.

In general, with increasing frequency, the measured SNR values decrease. The noise increases with increasing frequency, and the SNR decreases. Similarly, by reducing the SNR, the values of the sediment absorption coefficient also increase. It only could measure SNR between 10 and 40 dB.

Conclusion: This research showed that acoustic tomography could estimate PS and SSC with dual frequency using the proposed equation. Also, the results showed that the acoustic tomography method could monitor suspended sediment particles with a radius between 105 to 0.1 μm and mean sediment concentrations between 7.17 to 0.1 kg/m³ at 10 and 30 kHz.

Keywords: Hydroacoustic, Sound waves, 10 kHz frequency, 30 kHz frequency, Acoustic Tomography.



© 2023 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مدل سازی عددی تخمین میانگین اندازه و غلظت رسوبات معلق مقطع رودخانه‌ها با استفاده از روش تیکه نگاری صوتی

مریم جمشیدنژاد^۱، جابر سلطانی^{۲*}، مسعود بحرینی مطلق^۳ و رضا روزبهانی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

*jsoltani@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: امروزه با توجه به آمار بالای فرسایش در دنیا همچنان در اکثر ایستگاه‌های رسوب‌سنجی برای پایش رسوبات معلق از روش‌های سنتی استفاده می‌شود که هزینه و زمان‌بر بوده و با خطای انسانی همراه است. اخیراً فناوری‌های نوین نیم‌رخ جریان داپلر صوتی (ADCP) و آکوستیک توموگرافی یا تیکه نگاری صوتی رودخانه (FAT) رایج شده است. این فناوری‌ها بر پایه دانش آوصوتیات هستند که با ارسال و دریافت امواج صدا درون آب و تحلیل آن به تخمین میانگین غلظت و اندازه رسوبات معلق می‌پردازند. تخمین غلظت رسوبات معلق با استفاده از یک بسامد تنها با نمونه‌برداری از رودخانه امکان پذیر است. به همین جهت در این مطالعه برای اولین بار با توسعه روابط توموگرافی و استفاده هم‌زمان از دو بسامد امکان تخمین میانگین اندازه و غلظت رسوبات معلق رودخانه با استفاده از FAT بدون نیاز به نمونه‌برداری ارائه شده است. در نهایت صحت عملکرد رابطه توسعه یافته با سه احتمال رخداد فرضی با مقادیر SNR فرضی در هر بسامد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیلی با توجه به رابطه توسعه یافته نشان داد که روش تیکه نگاری صوتی با دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز قادر به پایش ذرات رسوبات معلق با میانگین اندازه شعاع حدودی بین ۰٫۱ تا ۱۰^۵ میکرومتر و غلظت رسوبات معلق بین ۰٫۱ تا ۷٫۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب است که در مقایسه با ای‌دی‌سی‌پی قادر به تخمین مقادیر بیشتر (۱۰^۲ تا ۱۰^۵ میکرومتر) و (۳٫۱ تا ۷٫۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب) است.

کلیدواژگان: آوصوتیات، امواج صوتی، بسامد ۱۰ کیلوهرتز، بسامد ۳۰ کیلوهرتز، آکوستیک توموگرافی.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین عامل‌های موثر در بهبود مدیریت منابع آب و طراحی و ساخت سازه‌های آبی وجود داده‌های اولیه دقیق و پیوسته از رسوبات معلق رودخانه است. این درحالی است که شمار ایستگاه‌های اندازه‌گیری رسوب در بیشتر رودخانه‌های جهان کافی نیست و بیشتر از روش‌های سنتی استفاده می‌کنند که نیاز به هزینه بالا و نیروی کار زیاد دارد و به ویژه در شرایط سیلابی دقت کمی دارد (Verstraeten et al., 2003). به همین جهت در کشورهای جهان بررسی روش‌های نوین سنجش از دور

برای برآورد میانگین غلظت (اس‌اس‌سی^۱) و اندازه رسوبات معلق رودخانه از جمله فناوری‌های آوصوتیات به ویژه نیم‌رخ جریان داپلر صوتی (ای‌دی‌سی‌پی^۲) و تیکه نگاری صوتی^۳ مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است.

۱-۱- فناوری نیم‌رخ جریان داپلر صوتی

ای‌دی‌سی‌پی‌ها به‌عنوان یکی از پرکاربردترین سامانه‌های صوتی در محدوده فراآوایی^۴ قادر به اندازه‌گیری

1 SSC; Suspended Sediment Concentration

2 ADCP; Acoustic Doppler Current Profiler

3 FATS; Fluvial Acoustic Tomography System, آکوستیک توموگرافی

توموگرافی صوتی

4 Ultrasonic

غلظت رسوبات معلق در ستون آب خلیج جاکارتا اندونزی با استفاده از ای‌دی‌سی‌پی با بسامد^۳ ۴۰۰ کیلوهرتز شدند و نتایج آن در مقایسه با نتایج روش نمونه‌گیری ضریب تعیین بالای ۰/۹۱ را نشان داد.

۲-۱- فناوری تیکه نگاری صوتی (Bahreinimotlagh et al., 2015) برای نخستین بار با ارائه یک رابطه جدید، غلظت رسوبها معلق در رودخانه جزر و مدی کیانتانگ چین را با استفاده از افای‌تی‌اس (۵ کیلوهرتز) برآورد کردند. نتایج نشان داد میزان غلظت رسوبها معلق رودخانه در طی جزر و مد بیش از سه برابر شرایط عادی افزایش می‌یابد. اگرچه با استفاده از رابطه ارائه شده توسط ایشان می‌توان غلظت رسوبهای معلق را به خوبی برآورد کرد، اما محدودیت این روش، عدم امکان برآورد میانگین اندازه ذرات معلق رسوب با یک بسامد است. لذا نیاز به نمونه‌برداری و تعیین میانگین اندازه ذرات معلق رسوب به عنوان مهم‌ترین محدودیت این روش بیان شد.

Kawanisi et al. (2017) در پژوهشی به پایش پیوسته سرعت جریان و رسوبهای معلق در رودخانه چیانتانگ^۴ در چین در شرایط جزر و مدی شدید با استفاده از سامانه‌های تیکه نگاری صوتی (FATS/CATS) به ترتیب با ۳-۴/۵ و ۳-۸/۵ کیلوهرتز و نیمرخ جریان داپلر صوتی (ADCPs) با ۱۲۰۰ کیلوهرتز و حسگرهای برگشت پرتوهای نوری (OBS) پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری نقطه‌ای و عمودی نمی‌تواند نشان‌دهنده مقطع رودخانه باشد و داده‌های ADCP بین ۱۶ تا ۲۲ درصد کمتر از میزان واقعی را نشان می‌دهند در حالی که داده‌های به دست آمده از FATS/CATS به صورت پیوسته حتی در شرایط اوج غلظت رسوبهای معلق که یک ساعت بعد از جزر و مد رخ داد نیز همچنان دقت مناسبی را ارائه کردند.

Bahreinimotlagh et al. (2020) با ارائه یک رابطه جدید به تحقیق در خصوص چگونگی تأثیر میانگین اندازه و غلظت رسوبهای معلق بر موج‌های صوتی روش تیکه‌نگاری صوتی در مقطع رودخانه پرداختند. نتایج نشان

فراسنج‌های آب با ارسال موج‌ها صدا با بسامدهای مختلف هستند و در انواع مختلف کف خواب، متحرک و افقی تولید می‌شوند (Bahreinimotlagh et al., 2019).

۲-۱- فناوری تیکه نگاری صوتی

فناوری تیکه نگاری صوتی به عنوان یکی از روش‌های سنجش‌از دور، ابزاری قدرتمند برای پایش منابع آب سطحی است. این روش را در آغاز (Munk and Wunsch, 1979) به منظور پایش دما و سرعت جریان‌های اقیانوسی ابداع کردند. این فناوری در سه سطح اقیانوسی (آی‌تی‌اس^۱)، ساحلی-دریایی (سی‌ای‌تی‌اس^۲) و رودخانه ای (افای‌تی‌اس) مورد استفاده قرار می‌گیرد. افای‌تی‌اس با ارسال موج‌های صدا قادر به پایش پیوسته جریان رودخانه‌ها در همه شرایط آب و هوایی است (Kawanisi et al., 2010).

از آنجا که ارزیابی جریان رودخانه‌ها، در شرایط ناپایدار دارای اهمیت بالایی است (Al Sawaf and Kawanisi, 2019) در پروژه‌ای با هدف بررسی کدورت دبی خروجی سالانه یک سد در کوهستان از دو روش ارزیابی منحنی رتبه‌بندی کلاسیک و سامانه تیکه نگاری صوتی رودخانه (افای‌تی‌اس) استفاده کردند. برحسب نتایج به دست آمده توسط افای‌تی‌اس، (با توجه به اینکه در هنگام بهره‌برداری از سد، رسوبها از سواحل رودخانه نیز وارد جریان می‌شوند و غلظت و کدورت افزایش می‌یابند) ویژگی‌های چشمگیری از جزییات جریان ناپایدار به خوبی نشان داده شد.

۳-۱- برآورد غلظت رسوبهای معلق با یک بسامد

برای برآورد غلظت رسوبهای معلق با استفاده از فناوری‌های صوتی (ای‌دی‌سی‌پی و افای‌تی‌اس) با یک بسامد نیاز به نمونه‌برداری از آب رودخانه برای تعیین میانگین اندازه ذرات رسوبهای معلق است. با اندازه‌گیری شدت موج‌ها برگشتی صدا و به کمک معادله سونار (Manik et al., 2020) موفق به اندازه‌گیری میانگین

3 Frequency Hz
4 Qiantang

1 OATS; Ocean Acoustic Tomography System
2 CATS; Coastal Acoustic Tomography System

در طول کار به تعمیر و مراقبت و سوخت زیستی کمتری نیاز دارند. سامانه ای‌دی‌سی‌پی در مقایسه با دیگر روش‌ها و حتی در واسنجی با شمار کم داده‌های آزمایشگاهی بهترین نتایج را در کنترل بار معلق و نظارت بر رسوب به همراه داشت.

(اف‌ای‌تی‌اس) در مقایسه با (ای‌دی‌سی‌پی) و دیگر روش‌ها برای پایش پیوسته و ثابت جریان در رودخانه‌ها دارای برتری‌هایی چون: عدم نیاز به کاربر و توانایی اندازه‌گیری درازمدت و پیوسته جریان است (Bahreinimotlagh, 2018) و موج‌های صوتی آن با توجه به بسامد کمتر، مسافت بیشتری را در بدنه‌ی آبی پخش می‌شوند و نسبت به ای‌دی‌سی‌پی در شرایط یکسان قادر به برآورد رسوب‌ها در شرایط سیلابی نیز است (Bahreinimotlagh, 2020). با توجه به کمبود تحقیقات گسترده برای پایش رسوب معلق رودخانه برای بررسی بیشتر در این تحقیق انتخاب شد. اگرچه تاکنون در پژوهش‌های زیادی از بسامدهای مختلف سامانه‌های تیکه نگاری صوتی شامل ۳۰ کیلوهرتز (Lin et al., 2011) و ۱۰ کیلوهرتز (Kawanisi et al., 2005) برای اندازه‌گیری ویژگی‌های جریان استفاده شده است و در دو پژوهش بالا نیز به برآورد غلظت رسوب‌های معلق با یک بسامد تیکه نگاری صوتی پرداخته شده است، اما پژوهش امکان‌سنجی برآورد میانگین اندازه ذرات و غلظت رسوب‌های معلق مقطع رودخانه با استفاده از سامانه تیکه نگاری صوتی با دو بسامد بدون نیاز به نمونه‌برداری تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به تحقیقات موفق گذشته برای ارتقای عملکرد و دقت در برآورد میانگین غلظت و اندازه‌ی ذرات رسوب معلق با به‌کارگیری دو بسامد در سامانه ای‌دی‌سی‌پی، در این تحقیق نیز به مدل‌سازی عددی با ترکیب یک سامانه تیکه نگاری صوتی (۱۰ کیلوهرتز) و آوصوتیات (۳۰ کیلوهرتز) برای برآورد میانگین اندازه ذرات و غلظت رسوبات معلق پرداخته شده است.

۲- مواد و روش

گام نخست در به‌کارگیری هر سامانه اندازه‌گیری، توسعه رابطه‌های نظری آن است. در پژوهش حاضر برای نخستین

داد که اندازه‌های مختلف رسوب‌های معلق، اثرگذاری‌های متفاوتی بر روی موج‌های صوتی سامانه تیکه‌نگاری صوتی با یک بسامد ثابت (۳۰ کیلوهرتز) می‌گذارد.

۱-۴- برآورد میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های

معلق مقطع رودخانه با دو بسامد

در این تحقیق اندیشه به‌کارگیری دو بسامد مختلف موج‌های صوتی به منظور برآورد میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق در روش تیکه‌نگاری صوتی، از تحقیقات انجام‌شده در زمینه استفاده از دو بسامد مختلف با روش ای‌دی‌سی‌پی نشأت گرفته است.

(Thomas et al., 2017) اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روند رسوب‌گذاری در منطقه بندر رودخانه‌ی کویین گراند آرژانتین در هنگام جزر و مد را بررسی کردند. نتایج توزیع غلظت و اندازه‌ی رسوب‌های به‌دست‌آمده با ای‌دی‌سی‌پی (۱۲۰۰-۶۰۰ کیلوهرتز) در مقایسه با دستگاه لیزر نوری (ال‌ای‌اس‌تی) نتایج همانندی را نشان داد. همچنین اطلاعات ای‌دی‌سی‌پی برخلاف اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای دستگاه نوری در کل ستون آب پیوسته بود. با این حال، هنگامی که تغییرپذیری‌های ناگهانی اتفاق می‌افتاد یا در جریان کم‌عمق، نتایج با خطا همراه بود.

(Szupiany et al., 2019) در پژوهشی برای تعیین غلظت رسوب معلق رودخانه‌ی پارانا آرژانتین دریافتند که از ای‌دی‌سی‌پی‌های تجاری با بسامدهای مختلف (۱۲۰۰ و ۶۰۰ کیلوهرتز) که اغلب استفاده می‌شود، می‌توان برای استنباط اطلاعات مربوط به غلظت رسوب‌های معلق در رودخانه‌ها استفاده کرد.

(Pomázi and Baranya, 2020) به بررسی برتری‌ها و کاستی‌ها دو روش سامانه‌های نوری و صوتی پرداختند. در این راستا چهار روش نامستقیم مختلف را به‌طور موازی در منطقه مطالعاتی رود دانوب مجارستان آزمایش کردند و بر پایه تجزیه‌وتحلیل آزمایشگاهی با تهیه بیش از ۱۰۰۰ نمونه فیزیکی به مقایسه این روش‌ها با روش‌های مستقیم پرداختند. نتایج نشان داد که حسگرهای صوتی، بر پایه‌ی پرتوهای برگشتی در هر دو حالت نظارت نقطه‌ای و پیوسته موفق و دقیق‌تر از دیگر روش‌ها عمل می‌کنند و

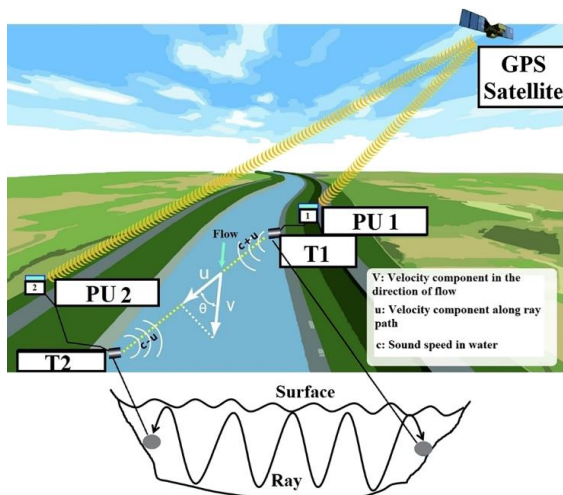


Fig. 1 The overview of (FATS) Fluvial Acoustic Tomography System function and the placement position of transducers in the river (Bahreinimotlagh et al., 2019).

شکل ۱ نمای کلی از عملکرد سامانه تیکه نگاری صوتی (FATS) و چگونگی قرارگیری مبدل‌ها در رودخانه (Bahreinimotlagh et al., 2019)

نسبت شدت سیگنال‌های دریافتی به نوفه SNR در سامانه تیکه نگاری صوتی در قالب معادله سونار (Urick, 1983)، به شرح زیر است:

$$RL = SL - 2TL + TS \quad (1)$$

که در آن SNR معادل سطح دریافتی موج‌های صدا RL در سامانه ای‌دی‌سی‌پی و SL سطح انرژی منبع و $2TL$ و TS قدرتهای هدررفت‌های انتقال در مسیر رفت و برگشت و هدف همگی برحسب دسی‌بل است. در بهره‌برداری از سامانه تیکه نگاری صوتی در فاصله افقی مایل بین مبدل‌ها R برحسب متر، در هر زمان مشخص، یک SNR منحصر به فرد به ازای هر بسامد اندازه‌گیری می‌شود.

موج‌های صدای منتشر شده در آب و در مسیر انتقال بین دو مبدل بر اثر عامل‌های مختلف از جمله برخورد به یک مانع (ذرات رسوب دچار ضعف و پراکندگی می‌شوند که میزان این هدررفت‌های انتقال با PL در سامانه تیکه نگاری صوتی برحسب دسی‌بل معرفی می‌شود و به کمک رابطه زیر قابل محاسبه است (Urick, 1983):

$$PL = 20 \log(R) + (\alpha_w + \alpha_s)R + L_0 \quad (2)$$

که در آن $\log(R)$ معرف هدررفت‌های پخش کروی موج‌های صدا برحسب دسی‌بل است، α_w و α_s ضریب‌های تضعیف یا جذب موج‌های صدا به ترتیب در اثر برخورد با

بار به بررسی نظری عملکرد سامانه تیکه نگاری صوتی و توسعه رابطه‌های تیکه‌نگاری به منظور برآورد هم‌زمان میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق مقطع رودخانه با استفاده از دو بسامد (۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز) پرداخته شده است.

۱-۲- سامانه تیکه نگاری صوتی

سامانه تیکه نگاری صوتی شامل دو منبع تولید صدا و گیرنده صدا است که در دو طرف رودخانه به صورت مورب نصب می‌شوند؛ و با ارسال و دریافت موج‌های صوتی مقطع رودخانه را پایش می‌کنند. این سامانه به علت داشتن منبع تولید صدا، از سامانه‌های اندازه‌گیری فعال به شمار می‌آید. سامانه‌های تیکه نگاری صوتی با توجه به فاصله اندازه‌گیری از دامنه بسامد ۲۰ هرتز برای اقیانوس تا ۵۰ کیلوهرتز برای رودخانه‌های کم‌عرض استفاده می‌شوند. سامانه‌ها با استفاده از ماهواره‌های جی‌ان‌اس‌اس^۱ با دقت نانو ثانیه هم‌زمان‌سازی شده و در یک زمان واحد موج‌های صوتی را ارسال می‌کنند. موج‌های صوتی در کل عمق آب منتشر می‌شوند و تغییرپذیری‌های عمق آب تأثیری بر اندازه‌گیری این روش نمی‌گذارند و نیازی به نصب چند دستگاه در عمق‌های مختلف نیست. این موج‌ها در برخورد به سطح آب و بستر محیط آبی به سمت جلو انتشار می‌یابند. از کاستی‌های روش تیکه نگاری صوتی به دام افتادن شاخ و برگ گیاهان اطراف مبدل‌ها و اختلال در دریافت موج‌های صوتی ارسال شده از طرف مقابل است که سبب اختلال در عملیات اندازه‌گیری می‌شود (Bahreinimotlagh et al., 2015, 2018, 2019). چگونگی قرارگیری ای‌ای‌تی‌اس را در دو طرف رودخانه شکل ۱ نشان داده شده است (Bahreinimotlagh et al., 2019) با معلوم بودن فاصله‌ی دو ایستگاه از یکدیگر و ثبت زمان رسیدن موج‌های صدا و شدت سیگنال‌های صوتی در ایستگاه‌های بالادست و پایین دست ویژگی‌های جریان آب محاسبه می‌گردد.

۲-۲- محاسبه میزان ضعف و پراکندگی موج‌های صدا توسط سامانه تیکه نگاری صوتی

1 GNSS; Global navigation satellite system

α_w ممکن است به صورت زیر برآورد شود (Yamaguchi et al., 2005):

$$\alpha_w = 0.001 \left(3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11 f^2}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2} + 3 \times 10^{-4} f^2 \right) \quad (5)$$

که در آن 0.101 برای تغییر واحد از کیلومتر به متر تعیین شده است و f بسامد صدا برحسب هرتز است. عامل دیگری که باعث تضعیف موج‌های صدا می‌شود؛ ذرات معلق رسوب موجود در آب هست که باعث تضعیف و پراکندگی موج‌های صدا می‌شود و با عنوان ضریب جذب رسوب‌های معلق (α_s) ارایه می‌شود (Dijkstra et al., 2019; Jourdin et al., 2014). α_s را Thorne et al. (1991) چنین بیان کردند:

$$\alpha_s = \frac{1}{R} \int_0^R \xi(R) \cdot SSC(R) dR \quad (6)$$

که در آن $SSC(R)$ و $\xi(R)$ به ترتیب غلظت و ثابت تضعیف رسوب در هر فاصله مشخص (R) فاصله مسیر اریب حرکت موج‌ها از فرستنده به گیرنده است. ثابت تضعیف رسوب ξ از دو بخش شامل ثابت تضعیف پراکندگی ξ_s و ثابت تضعیف چسبندگی ξ_v برحسب دسی‌بل در مترمربع بر کیلوگرم تشکیل شده است.

$$\xi = \xi_s + \xi_v \quad (7)$$

ثابت تضعیف پراکندگی ξ_s را (Richards et al., 1996) به صورت زیر ارائه کردند:

$$\xi_s = 8.687 \left(\frac{1}{\rho_s a_s} \right) \left(\frac{\gamma (ka_s)^4}{1 + (ka_s)^2 + \frac{4}{3} \gamma (ka_s)^4} \right) \quad (8)$$

که ρ_s و a_s چگالی برحسب کیلوگرم بر مترمربع و شعاع کره معادل ذرات معلق برحسب متر است، γ ضریبی که برای ذرات کوارتز 0.18 است و $(k = \frac{2\pi}{\lambda})$ شماره موج صوتی محاسبه شده برحسب طول موج است و $8/687$ ضریب تبدیل از نپر به دسی‌بل است. ثابت تضعیف چسبندگی ξ_v را می‌توان با استفاده از عبارت

مولکول‌های آب و ذرات رسوب‌های معلق برحسب دسی‌بل بر متر است و عبارت $(\alpha_w + \alpha_s)R$ معرف هدررفت‌های جذب صدا و L_0 دیگر هدررفت‌ها را برحسب دسی‌بل (مرتبط با جهت، بازتاب و تداخل) نشان می‌دهد. بیشترین میزان هدررفت‌های انتقال ناشی از تضعیف رسوب‌ها و پخش کروی موج‌های صدا است.

سامانه‌های تیکه نگاری صوتی سیگنال‌های صوتی را با استفاده از فن‌ام سیکونس بزرگ‌نمایی می‌کنند. (Kawanisi et al., 2012) از سوی دیگر، تأثیر نوفه‌ها باید در نظر گرفته شود. از این پس معادله (۱) به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$SNR = SL - PL - Ns - Na + Gp \quad (3)$$

که در آن Ns نوفه سامانه، Na نوفه محیط و Gp بهره پردازش به دلیل استفاده از دامنه‌ام‌سیکونس است.

در این پژوهش بدترین نوفه محیطی محتمل با 10.5 دسی‌بل برای موج‌های صوتی 10 و 30 کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. نوفه سامانه نیز 15 دسی‌بل برآورد شده است (Bahreinimotlagh et al., 2019). بهره پردازش نیز به ازای دوازدهمین ترتیب دنباله‌ام‌سیکونس دارای طول 2^{12} رقمی (4095 رقمی) است که ممکن است Gp را تا 36.1 دسی‌بل بهبود ببخشد (Bahreinimotlagh et al., 2020).

۲-۳- محاسبه ثابت و ضریب جذب موج‌های صدا

برای شناخت تأثیر اندازه‌ی ذرات رسوب در میزان تضعیف موج‌های صدا از رابطه‌های ضریب جذب یا ضریب تضعیف موج‌های صدا توسط رسوب‌های معلق (α) استفاده می‌شود.

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_s \quad (4)$$

موج‌های صدا با گذر از درون آب در اثر دو عامل عمده ضعیف می‌شوند. یکی در برخورد با مولکول‌های آب با عنوان ضریب تضعیف جذب آب (α_w) که به شکل کلی در شرایط رودخانه برابر با رابطه (۵) به بسامد (Dijkstra et al., 2019) و دما (Sándor and Józsa, 2013) بستگی دارد.

زیر برآورد شده است (Urick, 1948):

$$\xi_v = 8.687 \left(\frac{k(\sigma - 1)^2}{2\rho_s} \right) \left(\frac{s}{s^{2+(\sigma+\delta)^2}} \right) \quad (9)$$

$$s = \frac{9}{4\beta a_s} \left(1 + \frac{1}{\beta a_s} \right)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{9}{2\beta a_s} \right)$$

$$\sigma = \frac{\rho_s}{\rho}$$

$$\beta = \sqrt{\omega/2\nu}$$

$$\omega = 2\pi f$$

که در آن ρ چگالی آب برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، β تابعی از ω زاویه بسامد و ν لزوجت سینماتیکی آب برحسب مترمربع در ثانیه است.

۲-۴- میانگین مقطعی ضریب جذب رسوب‌های معلق ($\langle \alpha_s \rangle$)

از آنجایی که روش تیکه نگاری صوتی پایش کل سطح مقطع ماده است، می‌توان رابطه (۴) را با فرض غلظت رسوبات معلق همگن در مقطع رودخانه به صورت رابطه (۱۰) ساده کرد. این فرض در خم‌های رودخانه‌ای که جریان‌های گردشی ثانویه قوی در آن وجود دارد که باعث شار رسوب معلق می‌شوند، غیرقابل قبول است. خوشبختانه، سامانه‌های تیکه نگاری صوتی اغلب در مسیرهای مستقیم رودخانه‌ها نصب می‌شوند، جایی که شرایط مناسب برای فرض تعلیق همگن احتمالی برآورده می‌شود (Bahreinimotlagh et al., 2020).

$$\langle \alpha_s \rangle = \xi \text{ SSC} \quad (10)$$

که در آن $\langle \alpha_s \rangle$ و SSC به ترتیب میانگین ضریب جذب و غلظت رسوب‌های معلق در سطح مقطع رودخانه است.

۲-۵- میانگین مقطعی ضریب جذب رسوب‌های معلق ($\langle \alpha_s \rangle$)

پژوهش حاضر یک پژوهش بنیادی و نظری به منظور برآورد میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق رودخانه است. با توجه به آنکه برای نخستین بار در این تحقیق به مدل سازی عددی به منظور برآورد میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق با استفاده از تیکه‌نگاری صوتی پرداخته

شده است. در گام نخست آغاز به تحلیل و توسعه رابطه ریاضی مربوطه همانطور که در جدول ۱ آمده پرداخته شده است. در همین راستا و به منظور سنجش درستی رابطه‌های توسعه یافته و کارکرد آن‌ها از سه مثال فرضی استفاده شده است که در آن میزان‌های SNR یا نسبت سیگنال به نوفه در سه بازه زمانی مختلف در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز فرض شده است. در ادامه میزان‌های SNR هر مثال فرضی در هر دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز به عنوان داده‌های ورودی در محاسبه رابطه‌های توسعه یافته به کار گرفته شده و درستی روند محاسبه‌ها در برآورد میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق برابر آنچه در جدول ۲ آمده سنجیده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ثابت تضعیف موج‌های صدا توسط رسوب

(۵)

به منظور برآورد میانگین غلظت و اندازه‌ی رسوب‌های معلق مقطع رودخانه با استفاده از سامانه تیکه نگاری صوتی در گام نخست به بررسی تأثیر میانگین اندازه شعاع ذرات رسوب‌های معلق در تضعیف موج‌های صدا در قالب فراسنج ثابت تضعیف موج‌های صدا پرداخته شده است. ثابت تضعیف موج‌های صدا تابعی از بسامد به کاربرده شده در سامانه تیکه نگاری صوتی نیز است. به همین جهت میزان ثابت تضعیف موج‌های صدا در هر بسامد به ازای میانگین اندازه شعاع ذرات رسوب‌های معلق متغیر و متفاوت است. در شکل ۲، ثابت تضعیف موج‌های صدا در هر بسامد به ازای میانگین اندازه شعاع ذرات رسوب‌های معلق رسم شده است. به گونه‌ای که در هر بسامد یک نقطه فرود بین دو نقطه اوج دیده می‌شود و نقطه فرود محل تقاطع دو نمودار ثابت هدررفت‌های چسبندگی و ثابت هدررفت‌های پراکندگی است که به ترتیب به ازای بسامدهای ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز در میانگین اندازه شعاع ذرات ۳۳۹۴/۹۸ و ۱۳۰۰/۲۹ میکرومتر رخ می‌دهد. بیشترین میزان ثابت چسبندگی به ترتیب در بسامدهای ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز، در شعاع‌های ۷/۳۸ و ۴/۲۶ میکرومتر رخ می‌دهد. افزون بر این، با مقایسه میزان‌های ثابت

معنی است که سامانه تیکه نگاری صوتی نزدیک به در هر بسامد بیشینه تا قله دوم قادر به اندازه‌گیری رسوب‌های معلق است. این نشان‌دهنده عدم توانایی سامانه تیکه نگاری صوتی برای اندازه‌گیری ذرات رسوب‌های معلق بزرگ‌تر از حدود 10^5 میکرومتر است. همچنین با توجه به نمودارهای رسم شده ثابت تضعیف موج‌های صدا به ازای میزان‌های کوچک‌تر از 0.1 میکرومتر تقریبی کمتر از 10^{-5} دسی‌بل را نشان می‌دهد. این بیانگر آن است که تاثیر این ذرات در تضعیف موج‌های صدا کوچک‌تر از آن است که بتواند قابل جداسدن باشد. در نتیجه فن تیکه نگاری صوتی قادر به پایش ذرات رسوب‌های معلق با میانگین اندازه شعاع حدودی بین (10^5 تا 0.1) میکرومتر است.

هدررفت‌های چسبندگی، میزان اوج در بسامد 30 کیلوهرتز برابر با 0.052 دسی‌بل است که نزدیک به سه برابر بزرگ‌تر از 0.017 دسی‌بل میزان اوج ثابت چسبندگی در 10 کیلوهرتز است. به‌طور همانند، ثابت هدررفت‌های پراکندگی بیشینه میزان را به ترتیب در بسامدهای 10 و 30 کیلوهرتز، به ازای ذرات با میانگین شعاع 57865.8 و 19288.6 میکرومتر دارد. به همین ترتیب، بیشینه میزان ξ_s برای بسامدهای 10 و 30 کیلوهرتز به ترتیب در 0.024 و 0.072 دسی‌بل رخ می‌دهد. با توجه به این شکل نمودار هر دو بسامد به ازای ذرات با میانگین اندازه شعاع تقریبی $10^5 \times 2$ میکرومتر کاملاً بر روی هم قرار گرفتند و ثابت تضعیف موج‌های صدا به ازای هر دو بسامد یک میزان یکسان را نشان می‌دهد. بدین

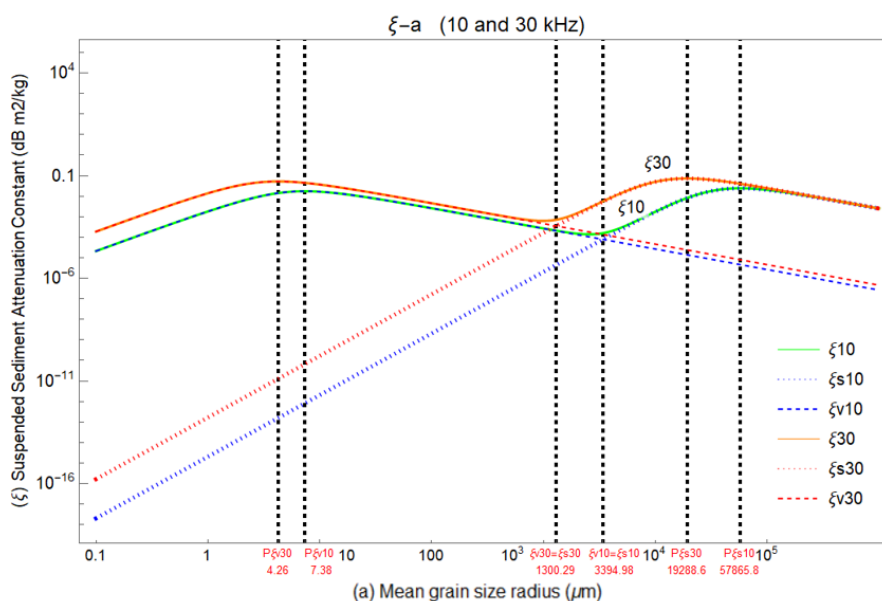


Fig. 2 Suspended sediment attenuation constant as a function of mean particle size at two frequencies (10 and 30 kHz).

شکل ۲ ثابت تضعیف موج‌های صدا به‌عنوان تابعی از میانگین اندازه شعاع ذرات رسوب‌های معلق رودخانه در دو بسامد (10 و 30 کیلوهرتز).

شعاع ذرات بزرگ‌تر از (10^3 تا 10^5) و ناتوان در پایش ذرات کوچک‌تر بین (0.1 تا 0.01) است. نکته جالب توجه دیگر این شکل آن است که به ازای هر بسامد به دقت سه نقطه با میانگین شعاع ذرات متفاوت ولی میزان ثابت تضعیف یکسان وجود دارد. بنابراین برای برآورد درست میانگین اندازه ذرات معلق رسوب مقطع رودخانه در هر پژوهش تنها بررسی ثابت تضعیف موج‌های صدا کافی

با توجه به آنکه سامانه‌های نیم‌رخ جریان داپلر صوتی ای‌دی‌سی‌بی از بسامدهای بزرگ‌تری استفاده می‌کنند قله‌های نمودار ثابت تضعیف موج‌های صدا به نسبت در میانگین اندازه ذرات کوچک‌تری رخ می‌دهند پس قادر به پایش ذرات رسوب‌های معلق با میانگین اندازه حدودی بین (10^3 تا 0.01) میکرومتر است. در نتیجه ای‌ای‌تی‌اس در مقایسه با ای‌دی‌سی‌بی قادر به پایش میانگین اندازه

ضریب جذب موج‌های صدا با افزایش میانگین غلظت افزایش می‌یابد و بیشترین میزان ضریب جذب در هر نمودار در قله دوم آن رخ می‌دهد. در این شکل در هر بسامد روند صعود و فرود نمودار با تغییرپذیری‌های میانگین غلظت تغییری نکرده و همچنان همانند شکل ۲ می‌باشد. به عنوان مثال در بسامد ۳۰ کیلوهرتز به ازای هر میانگین غلظت همچنان دو قله‌ی نمودار در میانگین شعاع (۴۲۶ و ۱۹۲۸۸۶) نشان داده شده است. همچنین با مقایسه دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز نتیجه می‌شود که در یک میانگین غلظت مساوی با کاهش بسامد ضریب تضعیف موج‌های صدا نیز کاهش می‌یابد. با توجه به نمودارهای رسم شده در شکل ۳ ضریب تضعیف موج‌های صدا به ازای میانگین غلظت کوچک‌تر از ۰/۱ کیلوگرم بر مترمکعب میزان تقریبی کمتر از 10^{-5} دسی‌بل را نشان می‌دهد.

نیست و لازم است تاثیر غلظت رسوب‌های معلق بر روی موج‌های صدا نیز با محاسبه ضریب تضعیف موج‌های صدا بررسی شود.

۳-۲- ضریب تضعیف موج‌های صدا توسط رسوب‌های معلق (α_s)

ثابت تضعیف موج‌های صدا در واقع تابعی از میانگین اندازه ذرات و مستقل از میانگین غلظت رسوب‌های معلق مقطع رودخانه است؛ بنابراین به‌منظور بررسی تأثیر غلظت رسوب‌های معلق بر موج‌های صدا در فناوری تیکه نگاری صوتی به محاسبه ضریب تضعیف موج‌های صدا پرداخته شده است. این ضریب با غلظت رسوب‌های معلق رابطه مستقیم دارد و به واسطه‌ی ثابت تضعیف موج‌های صدا تابعی از میانگین اندازه ذرات رسوب‌های معلق نیز است. ضریب تضعیف موج‌های صدا به ازای میانگین شعاع ذرات رسوب‌های معلق رودخانه در میانگین غلظت‌های مختلف در شکل ۳ رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که

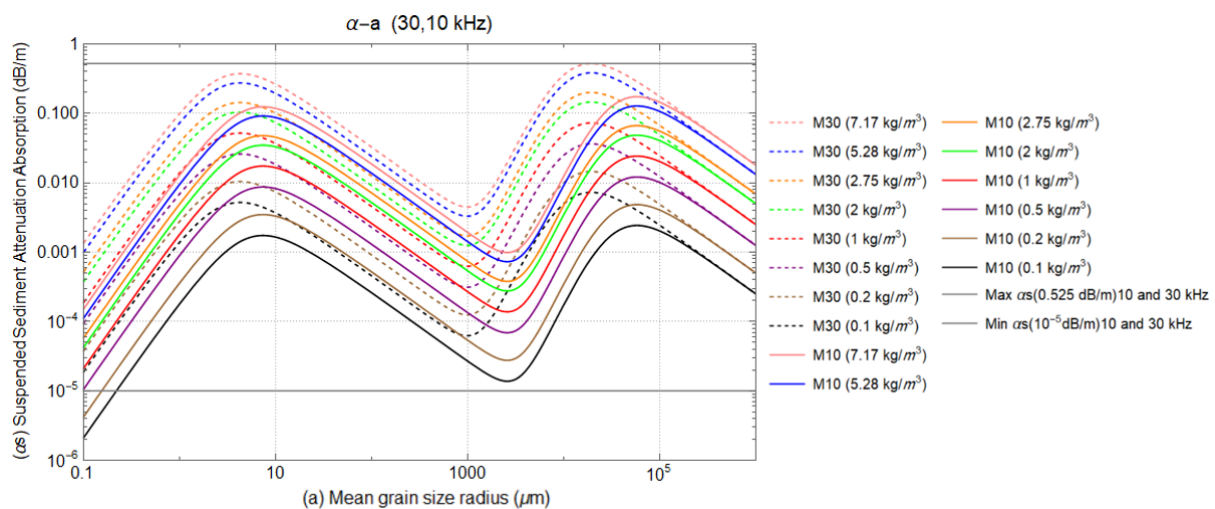


Fig. 3 Suspended sediment absorption coefficient per particle radius in different suspended sediment concentrations at two frequencies (10 and 30 kHz).

شکل ۳ نمودار ضریب تضعیف موج‌های صدا به ازای میانگین شعاع ذرات رسوب‌های معلق رودخانه در میانگین غلظت‌های مختلف در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز.

بر مترمکعب است.

۳-۳- نسبت ثابت‌های تضعیف رسوب

با استفاده هم‌زمان از دو بسامد سامانه تیکه نگاری صوتی در یک مقطع مشخص از رودخانه بر مبنای رابطه (۱۰) به

این بیانگر آن است که تاثیر این میزان از میانگین غلظت در تضعیف موج‌های صدا کوچک‌تر از آن است که بتواند قابل جدا شدن باشد. در نتیجه فن تیکه نگاری صوتی به ازای همه ذرات با میانگین شعاع ۰/۱ تا ۱۰^۵ میکرومتر تنها قادر به پایش میانگین غلظت بیشتر از ۰/۱ کیلوگرم

۴-۳- رویکرد پیشنهادی برای برآورد α_s

بر مبنای رابطه (۳)، همه فراسنج‌ها به‌جز α_s شناخته‌شده یا قابل اندازه‌گیری است. در نتیجه، رابطه (۱۲) ارائه می‌شود که در آن α_s به‌عنوان α_s که مستقل از میانگین مقطعی اندازه و غلظت رسوب‌های معلق است و مستقیم به R و SNR بستگی دارد معرفی می‌شود. البته از آنجا که SNR اندازه‌گیری شده با سامانه تیکه‌نگاری صوتی متأثر از میانگین مقطعی اندازه و غلظت رسوب‌های معلق مقطع رودخانه است می‌توان گفت که α_s به‌صورت نامستقیم به میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق مقطع رودخانه نیز ارتباط دارد. برای محاسبه α_s رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\alpha_s = - \left(\frac{-SL + \alpha_w R + \frac{20 \ln(R)}{\ln(10)} - Gp}{\frac{R}{L_0 + Ns + Na + SNR}} \right) \quad (12)$$

که در آن SL برابر ۱۹۷ دسی‌بل بر یک میکروپاسکال در یک متر، L_0 ، Na و Ns به ترتیب ۱۰، ۱۰۵ و ۱۵ دسی‌بل و Gp برابر با ۳۶/۱ دسی‌بل در نظر گرفته‌شده است (Bahreinimotlagh et al., 2020).

۳-۵- برآورد بیشینه میزان α_s

با توجه به رابطه (۱۲) می‌توان بیشینه میزان ضریب جذب موج‌های صدا به ازای ذرات با میانگین شعاع (۰/۱ تا ۱۰^۵ میکرومتر) در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز برآورد شد. بیشترین ضریب جذب موج‌های صدا در هر بسامد در SNR برابر با ۱۰ دسی‌بل و R برابر با ۱۰۰ متر رخ می‌دهد. به عبارتی دیگر در بیشترین نوفه و کمترین میزان سیگنال به نوفه قابل اندازه‌گیری توسط تیکه‌نگاری صوتی و کمترین مسافت قابل پایش بین دو مبدل که هر چه R کاهش یابد قادر به پایش میانگین غلظت رسوب‌های بزرگ‌تری است. بیشترین ضریب‌های تضعیف قابل پایش در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز از رابطه (۱۲) به‌دست آمده و در جدول ۱ ارائه شده است. حال با داشتن بیشترین میزان ضریب جذب می‌توان بیشترین میانگین غلظت رسوب‌های معلق

ترتیب برای دو بسامد (۱۰ و ۳۰) میزان‌های ξ_{10} و ξ_{30} و میزان‌های $\alpha_s > 10$ و $\alpha_s > 30$ قابل محاسبه است. بنابراین نسبت ثابت‌ها و ضریب‌های تضعیف رسوب به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\xi_i}{\xi_j} = \frac{\alpha_s > i}{\alpha_s > j} \quad (11)$$

که با توجه به یکسان بودن زمان و مقطع رودخانه پایش شده در هر دو بسامد میانگین مقطعی غلظت و اندازه رسوب‌های معلق یکسان است بنابراین با توجه به رابطه (۱۰) نسبت $\frac{\xi_i}{\xi_j}$ و $\frac{\alpha_s > i}{\alpha_s > j}$ با هم برابر است. همچنین نسبت هر دو بسامد تنها تابعی از میانگین اندازه ذرات رسوب و مستقل از میانگین غلظت رسوب‌های معلق است. در همین راستا شکل ۴ نسبت $\frac{\xi_{30}}{\xi_{10}}$ را برحسب میانگین شعاع ذرات رسوب نشان می‌دهد. این شکل برای همه مقطع‌های رودخانه با هر میزان میانگین غلظت رسوب‌های معلق صدق می‌کند و ثابت است.

در شکل ۴ همانند شکل ۲ یک قله در ناحیه ذرات درشت دانه است با این تفاوت که در نقاط آغازین در ناحیه ریزدانه محدوده تقریبی (۰/۷ تا ۰/۱) و (۱۰ تا ۱۰۰۰) دو روند نزدیک به ثابت را به جای روند صعودی به سمت یک قله نشان می‌دهد. این روند به ازای نسبت هر دو بسامد برقرار است و نشان می‌دهد که نرخ تغییرپذیری‌های ثابت تضعیف در این بازه‌ها به ازای هر بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز ثابت است.

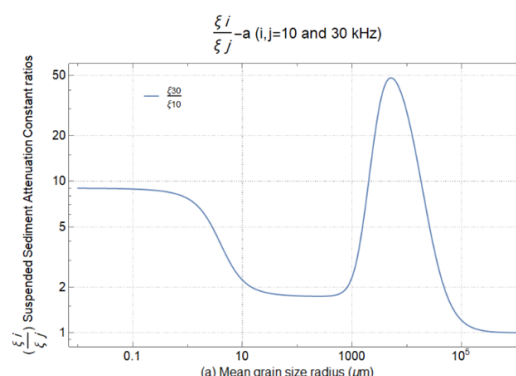


Fig. 4 The ratio of sediment attenuation constants at two frequencies 10 and 30 kHz as a function of mean suspended sediment particle size.

شکل ۴ نسبت ثابت‌های تضعیف رسوب در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز به‌عنوان تابعی از میانگین اندازه شعاع ذرات رسوب‌های معلق.

نامستقیم متأثر از (α) میانگین شعاع ذرات رسوب‌های معلق نیز است اما برخلاف ξ برای برآورد « ξ » نیازی به داشتن میزان میانگین شعاع ذرات رسوب‌های معلق نیست. در نتیجه با وجود SNR ، R و میانگین غلظت رسوب‌های معلق (SSC) می‌توان میانگین اندازه ذرات رسوب‌های معلق را به طور مستقیم با ترکیب این معادله با رابطه (۷) محاسبه کرد.

۳-۷- برآورد « SSC » با رابطه پیشنهادی

بر مبنای معادله (۱۰) و (۱۳) رابطه پیشنهادی برای برآورد میانگین غلظت رسوب‌های معلق « SSC » به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \langle\langle SSC \rangle\rangle &= -\left(\frac{-SL + \alpha_w R + \frac{20 \ln(R)}{\ln(10)}}{R \cdot \xi}\right) \\ &+ \left(\frac{L_0 + Ns + Na - Gp + SNR}{R \cdot \xi}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن « SSC » به‌عنوان میانگین غلظت رسوب‌های معلق تابعی از SNR و a و R معرفی می‌شود. با استفاده از این رابطه با موجود بودن میانگین اندازه شعاع ذرات رسوب‌های معلق و فاصله بین دو مبدل می‌توان میانگین غلظت رسوب‌های معلق را به طور مستقیم محاسبه کرد.

۳-۸- برآورد میانگین اندازه ذرات (PS) و غلظت رسوب‌های معلق (SSC)

همانطور که پیشتر توضیح داده شد ضریب « α_s » به‌دست‌آمده از رابطه (۱۲) و ضریب « α_s » به‌دست‌آمده از رابطه (۱۰) هر دو معرف یک فراسنج یکسان (ضریب جذب یا تضعیف رسوب‌های معلق) است که از دو رابطه مختلف به‌دست‌آمده‌اند و بر همین مبنای ضریب « α_s » مستقل از فراسنج‌های میانگین اندازه ذرات PS و میانگین غلظت رسوب‌های معلق SSC و وابسته به SNR دستگاه و فاصله R است در حالی که « α_s » مستقل از SNR دستگاه و مسافت R و وابسته به فراسنج‌های میانگین اندازه ذرات PS و غلظت رسوب‌های معلق SSC است. به‌منظور برآورد میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق می‌توان بر مبنای رویکرد پیشنهادی، ضریب « α_s » را

قابل پایش را برآورد کرد. با توجه به شکل ۳ بیشترین میزان ضریب جذب در هر بسامد در قله دوم نمودار رخ می‌دهد در نتیجه میانگین اندازه ذرات رسوب در قله دوم هر بسامد دارای بزرگ‌ترین ضریب جذب موج‌های صدا است و غلظت آن بیشترین میانگین غلظتی است که توسط همه ذرات با میانگین شعاع ۰/۱ تا ۱۰^۵ میکرومتر قابل پایش است.

در نتیجه همانطور که در جدول ۱ ارائه شده است. فن تیکه نگاری صوتی به ازای همه ذرات با میانگین شعاع ۰/۱ تا ۱۰^۵ میکرومتر در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز با استفاده از رابطه (۱۰) به ترتیب قادر به پایش میانگین غلظت رسوب‌های معلق کمتر از ۲۱/۸ و ۷/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب است که با توجه به به کارگیری هم‌زمان هر دو بسامد میزان ۷/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب که در هر دو بسامد مشترک است به عنوان بیشترین میانگین غلظت قابل پایش توسط همه ذرات رسوب در هر دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ بیشترین ضریب جذب موج‌های صدا و میانگین اندازه رسوب‌های معلق مقطع رودخانه با میانگین غلظت برآورد شده در آن در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز.

Table 1 The maximum sediment absorption coefficient and mean particle size with the estimated mean suspended sediment concentration in it at two frequencies of 10 and 30 kHz.

f (kHz)	$\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle$ (dB/m)	PS (μm)	M (kg/m^3)
30	0.5298	19288.6	7.17
10	0.5227	57865.8	21.8

۳-۶- برآورد « ξ » با رابطه پیشنهادی

با ترکیب معادله (۱۰) و (۱۲)، « ξ » به عنوان ثابت تضعیف موج‌های صدا مستقیم وابسته به SNR ، R و « SSC » معرفی شده است:

$$\langle\langle \xi \rangle\rangle = -\left(\frac{-SL + \alpha_w R + \frac{20 \ln(R)}{\ln(10)} + SNR}{R \cdot (SSC)} + \frac{L_0 + Ns + Na - Gp}{R \cdot (SSC)}\right) \quad (13)$$

که در آن « ξ » از طریق SNR به‌کاربرده شده به‌صورت

از آنجایی که SSC در هر دو بسامد یکسان است در نتیجه نسبت‌های $\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_j}$ با $\frac{\langle\langle \xi \rangle\rangle_i}{\langle\langle \xi \rangle\rangle_j}$ برابر است. بر همین مبنای، شکل ۵ نسبت ضریب جذب رسوب $\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_j}$ را به ازای میزان‌های مختلف SNR از ۱۰ تا ۴۰ دسی‌بل در فاصله افقی ۷۰۰ متر نشان می‌دهد. نسبت ضریب جذب رسوب $\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_j}$ با افزایش SNR کاهش می‌یابد و بیشینه میزان آن در ۱۰ دسی‌بل رخ می‌دهد که برای جفت بسامد (۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز) برابر با ۰٫۸۶ دسی‌بل و دامنه‌ی SNR دستگاه نیز برابر با (۱۰ تا ۴۰ دسی‌بل) است.

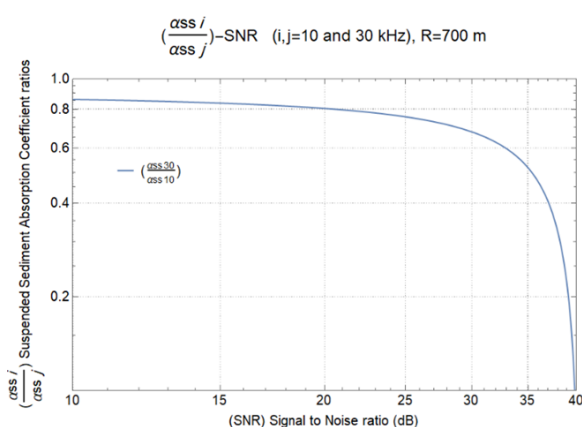


Fig. 5 Ratio of the suspended sediment absorption coefficient at two frequencies $\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_{30}}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_{10}}$ as a function of SNR at a fixed (R) distance of 700 meters.

شکل ۵ نسبت ضریب تضعیف موج‌های صدا در دو

بسامد $\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_{30}}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_{10}}$ به‌عنوان تابعی از SNR در فاصله ثابت (R)

۷۰۰ متر.

۳-۱۰- امکان‌سنجی برآورد PS و SSC با

استفاده از رویکرد پیشنهادی با سه احتمال

رخداد فرضی

پژوهش حاضر یک پژوهش بنیادی و نظری است. بنابراین به‌منظور بررسی رابطه‌ها و درستی عملکرد آن‌ها سه احتمال رخداد فرضی با میزان‌های SNR فرضی در هر بسامد در فاصله ثابت ۷۰۰ متر به‌منظور برآورد میانگین غلظت و اندازه ذرات رسوب‌های معلق رودخانه ارائه‌شده است. این سه احتمال فرضی در واقع برای برآورد میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق مقطع رودخانه در سه زمان فرضی مختلف در نظر گرفته شده است که به‌طور کامل در جداول ۲ و ۳ ارائه‌شده است. فاصله افقی مایل

که به ازای هر مقطع مشخص از رودخانه و زمان مشخص برای هر بسامد یک میزان ثابت به دست می‌دهد برابر با رابطه ضریب $\langle \alpha_s \rangle <$ در همان بسامد قرار داد تا همانند رابطه زیر یک رابطه با دو مجهول (میانگین اندازه ذرات PS و میانگین غلظت رسوب‌های معلق SSC) به دست آید.

$$\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i = \langle \alpha_s \rangle_i \quad (15)$$

برای برآورد میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق به کمک معادله (۱۵) با استفاده هم‌زمان از دو بسامد مختلف (i, j) در سامانه تیکه نگاری صوتی می‌توان یک دستگاه با دو معادله و دو مجهول ساخت:

$$\left. \begin{aligned} \langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i &= \langle \alpha_s \rangle_i \\ \langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_j &= \langle \alpha_s \rangle_j \end{aligned} \right\} \text{PS و SSC} \quad (16)$$

که در واقع PS و SSC دو مجهول این دستگاه است که در هر دو معادله یکسان است. با حل دستگاه معادلات به کمک دو بسامد به‌کاربرده شده (با روش حل دو معادله و دو مجهول) در آغاز PS بر مبنای میزان محاسبه شده و سپس SSC با کمک رابطه (۱۰) قابل برآورد است. در نتیجه با به‌کارگیری دو بسامد مختلف یک دستگاه معادلات دو معادله و دو مجهول به دست می‌آید و میزان‌های میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق با روش حل دو معادله و دو مجهول برآورد می‌شود.

۳-۹- نسبت ثابت‌های تضعیف رسوب با رابطه

پیشنهادی

در این پژوهش فرض دو جفت سامانه تیکه نگاری صوتی با بسامدهای ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز که در فاصله افقی R در یک رودخانه کنار هم قرار گرفته‌اند در نظر گرفته‌شده است. در بهره‌برداری از سامانه تیکه نگاری صوتی در هر زمان مشخص، یک SNR منحصر به فرد به ازای هر بسامد توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود.

در بهره‌برداری از سامانه تیکه نگاری صوتی به ازای هر بسامد و SNR منحصر به فرد آن بر مبنای معادله (۶)، $\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle$ میزان مشخصی خواهد داشت. بر همین مبنای نسبت‌های زیر نیز میزان مشخصی را به دست می‌دهند:

$$\frac{\langle\langle \xi \rangle\rangle_i}{\langle\langle \xi \rangle\rangle_j} = \frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_j} = A(\text{value})_{i,j} \quad (17)$$

یکسان هستند؛ اما علاوه بر وجود سه نقطه برخورد در هر دو بسامد (سه جفت میزان PS و SSC برآورد شده) همه این میزان‌ها از نظر منطقی قابل قبول نیستند و در آغاز باید بر مبنای سه شرط اصلی به‌طور منطقی بررسی شده و با بیان علت رد یا قبول شوند. نتایج این تصمیم‌گیری در جدول ۳ در ستون بحث آمده است و میزان‌های قابل قبول از نظر سه شرط با عنوان (منطقی) ارائه شده‌اند.

به‌طور کلی سه شرط اصلی برای انتخاب تک جفت مناسب از میان سه جفت (PS و SSC) برآورد شده به دست آمده از هر دستگاه دو معادله و دو مجهول متشکل از دو بسامد وجود دارد:

شرط اول میزان SNR مورد قبول همواره باید در محدوده بین ۱۰ تا ۴۰ دسی‌بل باشد (چراکه سامانه اف‌ای‌تی‌اس قادر به اندازه‌گیری SNR کمتر از ۱۰ دسی‌بل و بیشتر از ۴۰ دسی‌بل نیست)، شرط دوم میزان SSC برآورد شده باید در محدوده تقریبی ۰٫۱ تا ۷٫۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب باشد. شرط سوم اینکه PS باید در محدوده ۰٫۱ میکرومتر تا حدود ۲ سانتی‌متر باشد و در غیر این صورت ناممکن و غیرقابل قبول است. در گام بعدی پس از بررسی هر سه جفت PS و SSC برآورد شده (به ازای استفاده از دو بسامد هم‌زمان فن تیکه نگاری صوتی) بر مبنای سه شرط بالا و تعیین میزان‌های قابل قبول، در نهایت تنها یک جفت PS و SSC برآورد شده منطقی قابل قبول باید انتخاب شود.

چراکه همواره از بین هر سه جفت PS و SSC برآورد شده تنها یک جفت به درستی میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق آن مقطع مشخص از رودخانه در زمان مشخص را نشان می‌دهد.

بین مبدل‌ها R طبق (Bahreinimotlagh et al., 2020) ممکن است بین ۱۰۰ تا ۲۳۸۰ متر تنظیم شود؛ که در این پژوهش ۷۰۰ متر در نظر گرفته شده است. اصلی‌ترین نکته در این سه احتمال میزان‌های فرضی SNR می‌باشند که در شرایط واقعی این میزان‌های از سامانه تیکه نگاری صوتی به دست می‌آید. لازم به یادآوری است که همیشه با کاهش بسامد میزان SNR افزایش می‌یابد که نشان از کاهش نوفه و عامل‌های تضعیف موج‌های صدا و افزایش قدرت سیگنال دارد. به‌طور مثال SNR ۱۰ کیلوهرتز همیشه بزرگ‌تر از ۳۰ کیلوهرتز است. در جدول ۲ و ستون اول SNR اندازه‌گیری شده سامانه‌های تیکه نگاری صوتی و دو ستون دوم میزان برآورد شده $\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle$ از معادله پیشنهادی (۱۲) و ستون آخر میزان نسبت به دست آمده از معادله پیشنهادی (۱۷) در دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز ارائه شده است که در برآورد PS و SSC در جدول ۳ استفاده می‌شوند.

در هر احتمال فرضی، میزان‌های SNR فرضی برای دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز در جدول ۲ آمده است که در برآورد ضریب جذب موج‌های صدا از رابطه (۱۲) استفاده شد و در نهایت با استفاده از رابطه (۱۵) و (۱۶) با حل دستگاه دو معادله و دو مجهول میانگین مقطعی غلظت و اندازه ذرات رسوب‌های معلق برآورد شد؛ اما همان‌طور که در جدول ۳ آمده است با استفاده از دو بسامد ۱۰ و ۳۰ در هر مثال فرضی ($A1$ ، $A2$ و $A3$) سه جفت میانگین اندازه و غلظت برآورد شده است. این سه میزان برآورد شده را می‌توان در شکل ۶ در سه محل برخورد منحنی‌های ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز نیز مشاهده کرد. در این سه نقطه هر دو بسامد دارای میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق

جدول ۲ بررسی روش پیشنهادی برای برآورد ضریب جذب رسوب‌های معلق $\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle$ و $\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_j}$ با استفاده از SNR بسامدهای ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز در سه احتمال رخداد فرضی است.

Table 2 Investigation the proposed method for estimating the suspended sediments adsorption coefficient $\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle$ and $\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_i}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_j}$ using SNR frequencies of 10 and 30 kHz in three hypothetical cases.

Example	SNR	SNR	$\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle$	$\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle$	$\frac{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_{30 \text{ kHz}}}{\langle\langle \alpha_s \rangle\rangle_{10 \text{ kHz}}}$
	(dB)	(dB)	(dB/m)	(dB/m)	
	10 kHz	30 kHz	10 kHz	30 kHz	
A1	36	23	0.013	0.025	1.86
A2	39	26	0.009	0.020	2.26
A3	37	24	0.011	0.023	1.96

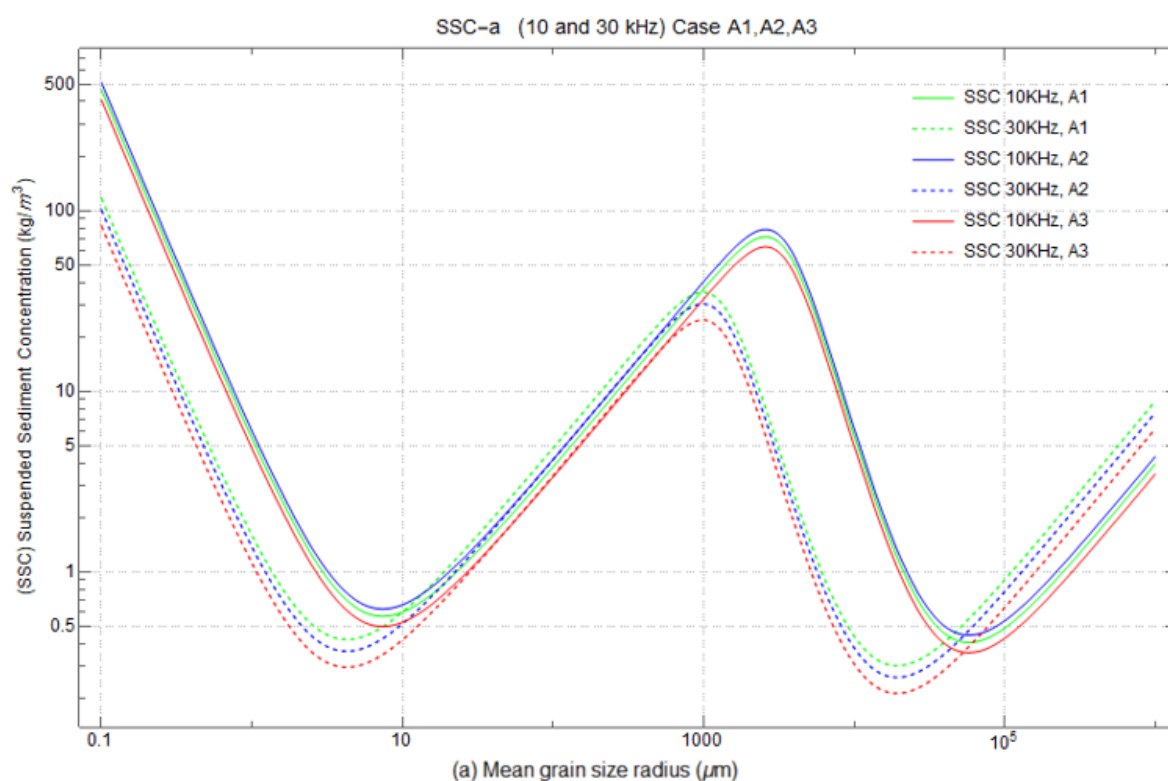


Fig. 6 Estimation of three pairs of (PS) mean particle size and (SSC) mean suspended sediment concentration in river section with two frequencies (10 and 30 kHz) in three hypothetical occurrences A1, A2, and A3.

شکل ۶ برآورد سه جفت میانگین اندازه ذرات و (SSC) میانگین غلظت رسوب‌های معلق مقطع رودخانه با دو بسامد (۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز) در هر سه احتمال رخداد فرضی A1، A2 و A3.

این درحالی است که ممکن است هر سه میزان برآورد شده از نظر سه شرط بالا به صورت منطقی قابل قبول باشند اما با این وجود حتی از میان میزان‌های قابل قبول تنها یک جفت از آن‌ها به درستی بیانگر میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق مقطع رودخانه است و به عنوان میزان نهایی باید انتخاب شود. نتایج این تصمیم‌گیری در جدول ۳ در ستون بحث آمده است و میزان نهایی در هر مثال فرضی به ازای دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز با عنوان (درست) ارائه شده است.

۳-۱۱- بررسی سه رخداد فرضی اول (A1)،
دوم (A2) و سوم (A3)
در رخداد فرضی اول (A1)، فرض می‌کنیم که SNR اندازه‌گیری شده سامانه تیکه نگاری صوتی در بسامدهای ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز به ترتیب برابر با ۳۶ و ۲۳ دسی‌بل است. در استفاده از دو بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز، نسبت

است و سه جفت میانگین اندازه ذرات و سه جفت میانگین غلظت رسوب‌های معلق (۶۶۸٫۸۹ میکرومتر - ۳۳٫۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب)، (۲۴٫۸۹ میکرومتر - ۱٫۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب) و (۵۱۱۹۶٫۲ میکرومتر - ۰٫۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب) برآورد شده است. هر سه جفت میانگین اندازه شعاع و غلظت برآورد شده بر مبنای شرط‌های مطرح شده برای انتخاب گزینه درست مورد بررسی قرار گرفتند، جفت اول با میانگین غلظت ۳۳٫۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب به علت میانگین غلظت خیلی زیاد رد شد. جفت سوم با میانگین اندازه شعاع ذرات معلق ۵۱۱۹۶٫۲ میکرومتر به دلیل میانگین اندازه ذرات خیلی بزرگ رد شد، بنابراین، جفت دوم با میانگین اندازه ذرات ۲۴٫۸۹ میکرومتر و میانگین غلظت ۱٫۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان جفت منطقی انتخاب شد. به همین ترتیب و همانند تحلیل‌های انجام شده در رخداد فرضی اول، در بررسی رخداد فرضی دوم (A2) جفت دوم با

یکدیگر می‌باشد. به کمک رابطه‌های توسعه‌یافته و به کارگیری دو بسامد مختلف با تشکیل و حل دستگاه دو معادله و دو مجهول میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق برآورد شد. در فرایند برآورد به ازای استفاده از دو بسامد سه جفت (*SSC* و *PS*) برآورد شد. در حالی که در هر بار اندازه‌گیری تنها یک جفت (*SSC* و *PS*) برآورد شده میزان درست و منطقی میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق را نشان می‌دهد. در نتیجه برای رسیدن به میزان منطقی نهایی در آغاز جفت میزان‌های برآورد شده با شرایط قابل قبول در اندازه‌گیری رسوب‌های معلق با سامانه تیکه نگاری صوتی بررسی شدند و در نهایت یک جفت درست منطقی باقی ماند.

شرایط قابل قبول سامانه تیکه نگاری صوتی *SNR* در بازه بین ۱۰ تا ۴۰ دسی‌بل، *SSC* در بازه ۰٫۱ تا ۷٫۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب و میانگین اندازه ذرات در بازه بین ۰٫۱ میکرومتر تا ۲ سانتی‌متر با فرض اینکه میانگین غلظت رسوب‌های معلق در مقطع رودخانه همگن و به خوبی مخلوط شده باشند است.

به منظور تعیین بازه میانگین غلظت قابل پایش رودخانه توسط تیکه نگاری صوتی به ازای میانگین شعاع ذرات در بازه ۰٫۱ تا ۱۰^۵ میکرومتر بیشینه ضریب جذب رسوب‌های معلق صدا برآورد شد. بیشینه ضریب جذب رسوب‌های معلق به کمک رابطه توسعه‌یافته با مفروضات نسبت سیگنال به نوفه برابر ۱۰ دسی‌بل و مسافت بین دو مبدل برابر ۱۰۰ متر به ازای بسامدهای ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز برابر با ۰٫۵۲۲ و ۰٫۵۲۹ برآورد شد. به کمک بیشینه ضریب جذب رسوب‌های معلق و بزرگ‌ترین میانگین شعاع قابل پایش ذرات رسوب ۵۷۸۶۵٫۸ و ۱۹۲۸۸٫۶ میکرومتر به ترتیب در بسامدهای ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز بیشینه میانگین غلظت قابل پایش به ترتیب برابر با ۲۱٫۸ و ۷٫۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. که به ازای استفاده از هر دو بسامد برای برآورد هم‌زمان میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق مقطع رودخانه بدون نیاز به نمونه‌برداری بیشینه میزان برابر ۷٫۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. در نتیجه فناوری تیکه نگاری صوتی در رودخانه با استفاده هم‌زمان از دو بسامد قادر به پایش

جدول ۳ برآورد میانگین اندازه ذرات و غلظت رسوب‌های معلق با استفاده از رویکرد پیشنهادی با استفاده از جفت بسامد ۱۰ و ۳۰ کیلوهرتز در سه مثال فرضی مختلف (*A1*، *A2* و *A3*) و بحث و بررسی برای انتخاب جفت (*SSC* و *PS*) منطقی و درست نهایی.

Table 3 Estimation of mean particle size and suspended sediment concentration using the proposed equation with two frequencies 10 and 30 kHz in three different hypothetical examples (*A1*, *A2*, and *A3*) and discussion to select the correct and logical pair of (*PS* and *SSC*).

Example	M (kg/m ³)	a (μm)	Decision
	30, 10 kHz	30, 10 kHz	
A1	33.57	668.89	High concentration
	1.43	24.89	Logic / OK
A2	0.55	51196.2	High particle size
	32.83	968.78	High concentration
A3	0.54	9.64	Logic / OK
	0.40	43001.2	High particle size
A3	34.93	780.76	High concentration
	0.93	16.43	Logic / OK
	0.50	48631.7	High particle size

میانگین اندازه ذرات ۹٫۶۴ میکرومتر و میانگین غلظت ۰٫۵۴ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان جفت منطقی انتخاب شد. به همین ترتیب نیز در بررسی رخداد فرضی سوم (*A3*) جفت دوم با میانگین اندازه شعاع ذرات ۱۶٫۴۳ میکرومتر و میانگین غلظت ۰٫۹۳ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان جفت منطقی انتخاب شد.

۴- نتیجه‌گیری

برای برآورد هم‌زمان دو فراسنج میانگین اندازه و غلظت رسوب‌های معلق (بدون نیاز به نمونه‌برداری) مقطع رودخانه با توجه به پژوهش‌های انجام شده بر روی سامانه ای‌دی‌سی‌پی در این پژوهش نیز از ایده‌ی به کارگیری دو بسامد هم‌زمان استفاده شده است و توانایی سامانه‌های ترکیبی صوتی (۱۰ کیلوهرتز) و فراصوتی (۳۰ کیلوهرتز) تیکه نگاری صوتی برای برآورد *PS* و *SSC* بررسی شده است. در این پژوهش با توسعه رابطه تیکه‌نگاری، رابطه‌ای جدید برای برآورد ضریب جذب موج‌های صدا به دست آمد که تابعی از *SNR* دستگاه و *R* فاصله‌ی مبدل‌ها از

K	شماره موج صوتی (m^{-1})
as=a	شعاع ذرات رسوب (m)
at	شعاع میدل (cm)
s	شوری
T	دما (C°)
ω	زاویه بسامد (Hz)
α	ضریب جذب موج‌های صدای کلی (dB/m)
α_w	ضریب جذب موج‌های صدا توسط مولکول‌های آب (dB/m)
α_s	ضریب جذب موج‌های صدا توسط رسوب‌های معلق (dB/m)
λ	طول موج (m)
D	عمق (m)
Sv	قدرت موج‌های برگشتی (dB)
TS	قدرت هدف (dB)
R	فاصله افقی مایل بین میدل‌ها (m)
SNR	نسبت سیگنال به نوفه (dB)
Na	نوفه محیط (dB)
Ns	نوفه سامانه (dB)

۶- منابع

Al Sawaf, M.B. and Kawanisi, K. (2019). Novel high-frequency acoustic monitoring of streamflow-turbidity dynamics in a gravel-bed river during artificial dam flush. *Catena*, 172, 738-752.

Bahreinimotlagh, M., Kawanisi, K. and Zhu, X. (2015). Acoustic investigations of tidal bores in Qiantang River. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 71(4), 139-144.

Bahreinimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., Kardan Moghadam, H. and Kavousi Heydari, A.R. (2018). Design, manufacture and the evaluation of fluvial acoustic tomography system (FATS). *Journal of Acoustical Engineering Society of Iran*, 6(1), 1-11. (In Persian)

Bahreinimotlagh, M., Kawanisi, K., Al Sawaf, M.B., Roozbahani, R., Eftekhari, M. and Khoshuie, A.K. (2019). Continuous streamflow monitoring in shared watersheds using advanced underwater acoustic tomography system: a case study on Zayanderud River. *Environmental monitoring and assessment*, 191(11), 1-9.

Bahrainimotlagh, M., Roozbahani, R., Eftekhari, M., and Hassanli, S.A.M. (2019). Investigation of acoustic technologies for monitoring flows in

میانگین غلظت رسوب‌ها در بازه ۰.۱ تا ۷/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب است.

در این پژوهش سه احتمال رخداد فرضی (A1، A2 و A3) در نظر گرفته شد که در نهایت با حل دو معادله و دو مجهول به ازای هر احتمال رخداد فرضی میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق مقطع رودخانه برای سه احتمال رخداد فرضی (A1، A2 و A3) به ترتیب برابر با $(1.43 \frac{kg}{m^3})$ و $(0.54 \frac{kg}{m^3})$ و $(9.64 \mu m)$ و $(0.93 \frac{kg}{m^3})$ و (16.43) به دست آمد که در شرط‌های مطرح شده در بالا صدق می‌کنند و منطقی هستند. این سه مثال فرضی به خوبی روند برآورد میانگین غلظت و اندازه رسوب‌های معلق رودخانه با دو بسامد بدون نیاز به نمونه‌برداری و درستی عملکرد رابطه‌های توسعه‌یافته تیکه‌نگاری را نشان دادند.

به‌طور کلی با افزایش بسامد میزان‌های SNR اندازه‌گیری شده‌ی دستگاه کاهش می‌یابد چراکه با افزایش بسامد میزان نوفه افزایش و باعث کاهش نسبت سیگنال دریافتی به نوفه می‌شود. به همین ترتیب با کاهش SNR میزان‌های ضریب جذب رسوب‌های معلق نیز افزایش می‌یابد.

۵- پیوست

فراسنج‌های اختصاری:

Gp	بهره پردازش (dB)
f	بسامد (Hz)
PL=2T	
L	هدررفت‌های انتقال در مسیر رفت و برگشت (dB)
ξ	ثابت تضعیف کلی موج‌های صدا ($dB m^2/kg$)
ξ_v	ثابت تضعیف موج‌های صدا بر پایه چسبندگی ذرات رسوب ($dB m^2/kg$)
ξ_s	ثابت تضعیف موج‌های صدا بر پایه پراکندگی ذرات رسوب ($dB m^2/kg$)
ρ_s	چگالی رسوب‌های معلق (kg/m^3)
v	چگالی سینماتیکی (m^2/s)
c	سرعت صدا در آب (m/s)
RL	سطح دریافتی موج‌های صدا (dB)
SL	سطح انرژی منبع (dB re 1 μPa at 1 m)
L0	سایر هدررفت‌های (مرتبط با جهت، بازتاب و تداخل) (dB)

- Environmental Science, 429, 012035, IOP Publishing, doi:10.1088/1755-1315/429/1/012035.
- Munk, W. and Wunsch, C. (1979). Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 26(2), 123-161.
- Pomázi, F. and Baranya, S. (2020). Comparative assessment of fluvial suspended sediment concentration analysis methods. Water, 12(3), 873, <https://doi.org/10.3390/w12030873>.
- Richards, S.D., Heathershaw, A.D. and Thorne, P.D. (1996). The effect of suspended particulate matter on sound attenuation in seawater. The Journal of the Acoustical Society of America, 100(3), 1447-1450.
- Sándor, B. and Józsa, J. (2013). Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in Danube River. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 61(3), 232-240.
- Szupiany, R.N., Lopez Weibel, C., Guerrero, M., Latosinski, F., Wood, M., Dominguez Ruben, L. and Oberg, K. (2019). Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. Earth Surface Processes and Landforms, 44(6), 1295-1308.
- Thomas, L.P., Marino, B.M. and Szupiany, R.N. (2017), July. Application of the two-ADCP technique in estuaries to characterize the suspended particulate matter transport. In 2017 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), 1-5. IEEE, 10.1109/RIOAcoustics.2017.8349736
- Thorne, P., Vincent, C., Hardcastle, P., Rehman, S. and Pearson, N. (1991). Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. Marine Geology, 98(1), 7-16.
- Urlick, R.J. (1948). The Absorption of Sound in Suspensions of Irregular Particles. The Journal of the Acoustical Society of America, 20(3), 283-289.
- Urlick, R.J. (1983). Principles of underwater sound. Peninsula Pub, New York, USA.
- Urlick, R.J. (1997). Principles of underwater sound. Los Altos, CA, USA. Peninsula Publishing.
- Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Poesen, J., Van Oost, K. and Govers, G. (2003). Evaluating the impact of watershed management scenarios on rivers. Journal of Sound and Vibration, 8(15), 73-82. (In Persian)
- Bahreinimotlagh, M., Kawanisi, K., Kavousi, A., Roozbahani, R., Abbasi, M. and Al Sawaf, M.B. (2020). Influence of suspended sediment concentration and particle sizes on the sound attenuation of the fluvial acoustic tomography technique. Journal of Water and Environment Technology, 18(5), 338-348.
- Dijkstra, Y.M., Schuttelaars, H.M. and Schramkowski, G.P. (2019). A regime shift from low to high sediment concentrations in a tide-dominated estuary. Geophysical Research Letters, 46(8), 4338-4345.
- Jourdin, F., Tessier, C., Le Hir, P., Verney, R., Lunven, M., Loyer, S., Lusven, A., Filipot, J.F. and Lepesqueur, J. (2014). Dual-frequency ADCPs measuring turbidity. Geo-Marine Letters, 34(4), 381-397.
- Kawanisi, K., Razaz, M., Kaneko, A. and Watanabe, S. (2010). Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system. Journal of Hydrology, 380(1-2), 74-81.
- Kawanisi, K., Razaz, M., Soltaniasl, M. and Kaneko, A. (2011). Long-term salinity measurement in a tidal estuary by the use of acoustic tomography. In: 3rd International Conference & Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, Greece, pp. 401-408.
- Kawanisi, K., Razaz, M., Ishikawa, K., Yano, J. and Soltaniasl, M. (2012). Continuous measurements of flow rate in a shallow gravel-bed river by a new acoustic system. Water Resources Research, 48(5), 1-10.
- Kawanisi, K., Zhu, X.H., Fan, X. and Nistor, I. (2017). Monitoring tidal bores using acoustic tomography system. Journal of Coastal Research, 33(1), 96-104.
- Lin, J., Kaneko, A., Gohda, N. and Yamaguchi, K. (2005). Accurate imaging and prediction of Kanmon Strait tidal current structures by the coastal acoustic tomography data. Geophysical Research Letters, 32(14), <https://doi.org/10.1029/2005GL022914>.
- Manik, H.M., Gultom, D.A. and Elson, L. (2020). Evaluation of ADCP backscatter computation for quantifying suspended sediment concentration. In: IOP Conference Series: Earth and

changes in sediment delivery to rivers? In: The interactions between sediments and water, Springer, Dordrecht, pp. 153-158.

Yamaguchi, K., Lin, J., Kaneko, A., Yayamoto, T., Gohda, N., Nguyen, H.Q. and Zheng, H. (2005). A continuous mapping of tidal current structures in the kanmon strait. *Journal of Oceanography*, 61(2), 283–294.

