INSO
20569
1st.Edition
2016

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۲۰۵۶۹
چاپ اول
۱۳۹۴

هیدرومتری- رسوب معلق در نهرها و مجراها- تعیین غلظت با استفاده از فن‌های جایگزین

Hydrometry — Suspended sediment in streams and canals — Determination of concentration by surrogate techniques

ICS:17.120.20

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک مادهٔ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است .

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان ، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود وکوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود . پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند درکمیتهٔ ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب ، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود . بدین ترتیب ، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[1] ،کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می کند . در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور ، از آخرین پیشرفت های علمی ، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود .

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون ، برای حمایت از مصرف کنندگان ، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی ، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی ، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/ یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید.

سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور ، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری نماید . هم‌چنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره ، آموزش ، بازرسی ، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی ، آزمونگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش ، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم ، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند . ترویج دستگاه بین المللی یکاها ، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش ، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است .

1- International Organization for Standardization
2 - International Electrotechnical Commission
3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«هیدرومتری- رسوب معلق در نهرها و مجراها- تعیین غلظت با استفاده از روش‌های جایگزین»

رئیس :	**سمت و/ یا نمایندگی**
زارع نیستاک، محمد (دکترای اقلیم‌شناسی)	عضو هیئت علمی پژوهشگاه شاخص پژوه
دبیر :	
نوریزاده دهکردی، اشکان (کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک)	شرکت اندیشه فاخر شهرکرد
اعضاء : (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
احمدی مطلق، امیررضا (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	دفتر معیارها واستانداردهای وزارت نیرو
الیاسی، حسین (کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی)	شرکت مدیریت منابع آب
اوحدی، افشین (کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی)	سازمان ملی استاندارد ایران
دایی جواد، حسین (کارشناسی مهندسی متالورژی)	اداره کل استاندارد استان چهارمحال و بختیاری
غلامی ارجنکی، زهرا (کارشناسی ارشد شیمی)	اداره آب وفاضلاب استان چهارمحال وبختیاری
فتوحی، رجبعلی (کارشناسی ارشد مهندسی آب‌های سطحی)	شرکت مدیریت منابع آب

قادری، مسعود
(کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک)
کارخانه صاایران اصفهان

محمودی‌نیا، مهدی
(کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی)
دانشگاه علم وصنعت ایران

مردانی، محمد
(کارشناسی مهندسی عمران)
اداره کل استاندارد استان چهارمحال‌وبختیاری

میرصالحی، سیدعلی
(کارشناسی ارشد متالورژی)
پژوهشگاه مواد و انرژی

نوریزاده دهکردی ، احسان
(کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی)
شرکت اندیشه فاخر شهرکرد

فهرست مندرجات

عنوان		صفحه
آشنایی با سازمان ملی استاندارد		ب
کمیسیون فنی تدوین استاندارد		ج
پیش گفتار		ه
مقدمه		۱
۱	هدف و دامنه کاربرد	۳
۲	مراجع الزامی	۳
۳	اصطلاحات وتعاریف	۴
۴	اصل اندازه‌گیری	۴
۴-۱	انتقال	۴
۴-۲	پراکندگی	۵
۴-۳	پراکندگی – انتقال	۵
۴-۴	پراش	۶
۵	خصیصه‌هایی از رسوب که برای فن‌های جایگزین رسوبی اهمیت دارند	۷
۵-۱	کلیات	۷
۵-۲	اندازه ذره	۷
۵-۳	رنگ ذره	۷
۶	روش‌های تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از فن های جایگزین	۷
۶-۱	کلیات	۷
۶-۲	نورهای کپه‌ای	۸
۶-۳	پراش لیزر(LD)	۹
۶-۴	پس‌پراکنش آکوستیک	۱۰
۷	کالیبراسیون و صحه‌گذاری	۱۰
پیوست الف (اطلاعاتی) تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از فن‌های نوری		۱۴
پیوست ب (اطلاعاتی) تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از فن پراش لیزر		۱۸
پیوست پ (اطلاعاتی) تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از پس‌پراکنش آکوستیک		۲۱
پیوست ت (اطلاعاتی) کتاب‌نامه		۲۵

پیش گفتار

استاندارد «هیدرومتری- رسوب معلق در نهرها و مجراها- تعیین غلظت با استفاده از روش‌های جایگزین» که پیش نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط شرکت مهندسی اندیشه فاخر شهرکرد تهیه و تدوین شده است و در دویست و هفتاد چهارمین اجلاس کمیته ملی استاندارد اندازه‌شناسی، اوزان و مقیاس‌ها مورخ ۱۳۹۴/۱۲/۰۹مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدید نظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO 11657:2014, Hydrometry — Suspended sediment in streams and canals — Determination of concentration by surrogate techniques

مقدمه

رسوب‌گذاری[1] و انتقال رسوب در نهرها[2]، رودخانه‌ها[3]، مخازن[4] و مصب‌ها در بسیاری از مسایل کشاورزی، مهندسی، زیست محیطی و علمی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. موفقیت در مدیریت و حل کردن مشکلات رسوب‌گذاری نیازمند درک کامل حرکت رسوب است. این امر نیازمند روش‌های معتبری است که بار رسوب را با استفاده از داده‌های با کیفیت بالا تخمین بزند. اما، در دهه‌های اخیر عمدتاً به دلیل مشکلات و هزینه‌های مربوط به روش‌های میدانی مورد استفاده در جمع‌آوری داده‌ها، مقدار داده‌های انتقال رسوب جمع‌آوری شده، به طور پیوسته کاهش یافته‌اند. درک بهتر و شرح بیشتر فرآیندهای رسوب‌گذاری بیشتر، نیازمند داده‌های با تفکیک‌پذیری موقتی بالا و دارای کیفیت بالا هستند.

بار بستر و بار معلق قسمت عمده بار رسوب کل را تشکیل می‌دهند. اما، گستره کاربرد این استاندارد به اندازه‌گیری رسوب معلق محدود می‌شود. روش‌های رایج اندازه‌گیری غلظت‌های رسوب معلق در نهر، وابسته به اصل جمع‌آوری نمونه‌ها از مخلوط رسوب– آب در نقاط مختلف زمانی و مکانی و با استفاده از تجهیزات نمونه‌برداری مناسب و روش‌های استقرار و تحلیل نمونه‌ها در آزمایشگاه تخمین غلظت رسوب، است. این روش‌ها به منظور اهداف آزمایشگاهی است و گران هستند و می‌توانند خطرناک باشند. علاوه براین، به دلیل تغییرپذیری موقتی و مکانی مرتبط با انتقال رسوب معلق، ممکن است درستی روش‌های تخمین غلظت رسوب رودخانه‌ها و نهرها در طی بازه زمانی قابل اطمینان نباشد.

تخمین درست و پیوسته غلظت رسوب معلق در موقعیت‌های خاصی مانند موارد زیر ضروری است:

الف- در پروژه‌های توان هیدرولیک مربوط به ایمنی توربین‌ها و سایر ماشین‌ها، رسوب‌شویی[5] و ته‌نشینی[6] مخازن؛

ب- پروژه‌های تامین آب مربوط به کنترل کیفیت آب؛

پ- آب توفان جاری شده از نواحی شهری؛

ت- ته‌نشینی زمین‌های تر؛ و

ث- کنترل طولانی مدت انتقال رسوب در رودخانه‌ها و نهرها، به منظور دست‌یابی به خطوط مبنای معتبر که بتوان از آن‌ها در تصمیم‌گیری‌ها استفاده کرد.

در چنین موقعیت‌هایی، برای جمع‌آوری داده‌های با کیفیت بالا در مورد غلظت‌های رسوب معلق و اندازه ذرات استفاده از فن‌های خودکار و مقرون به صرفه ضروری است.

1- Sedimentation
2- Streams
3- Rivers
4- Reservoirs
5- Flushing
6- Silting

پیشرفت‌های فناوری اخیر در زمینه‌های نور و آکوستیک[1]، فناوری‌های جایگزین رسوبی جدید و روش‌های تعیین مشخصه‌ها و شارهای رسوب معلق را ایجاد کرده است. برای اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق با تفکیک‌پذیری بالاتر، با اتوماسیون بیشتر و هزینه پایین‌تر بالقوه نسبت به روش‌های سنتی، می‌توان تعدادی از این روش‌ها را مورد استفاده قرار داد. این روش‌ها شامل فناوری‌های جایگزینی هستند که غلظت رسوب معلق را با استفاده از اندازه‌گیری‌های پس‌پراکنش نوری[2]، پراش‌های لیزر و پس‌پراکنش آکوستیک، تعیین می‌کنند.

می‌توان اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق(SSC)[3] در نمونه‌های آبی را با استفاده از فن‌های کدرسنجی[4]، انتقال، پراش لیزر و پس‌پراکنش آکوستیک انجام داد. اصل کاری، کاربردها، مزایا و کمبودها، محدودیت‌ها و دستگاه‌های قابل استفاده مربوط به فن‌های بالا به خوبی در این استاندارد آورده شده‌اند. فن پس‌پراکنش نوری به آسانی در دسترس و نسبتاً ارزان است. حساسیت حس‌گر پس‌پراکنش نوری وابسته به اندازه دانه، رنگ و ترکیب است. مزایای این فن عبارت است از اندازه کوچک‌تر و حجم نمونه کم‌تر، پاسخ خطی و با فرکانس بالا، عدم حساسیت به نور محیط، گستره اندازه‌گیری وسیع و هزینه پایین. هم‌چنین فن پراش لیزر(LD)[5] به آسانی در دسترس و ارزان است. یکی دیگر از فن‌های اندازه‌گیری SSC در اکوسیستم‌های آبی، پس‌پراکنش آکوستیک است. در این فن تنها می‌توان غلظت رسوب‌هایی که گستره اندازه آن‌ها مطابق با فرکانس آکوستیک باشد را تعیین کرد. در غلظت‌های بالا حداکثر عمق نمونه‌برداری در دسترس محدود خواهد شد.

1- Optic and acoustic
2- Optical backscatter(OBS)
3- Suspended Sediment Concentration
4- Nephelometry
5- Laser diffraction

هیدرومتری- رسوب معلق در رودها و مجراها- تعیین غلظت با استفاده از فن‌های جایگزین

۱ هدف ودامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین فن‌هایی است که با استفاده از آن‌ها، غلظت‌ها و توزیع اندازه ذرات رسوب معلق در نهرها و مجراها[1] را تعیین می‌کنند. فن‌های مبتنی بر اصول نوری کپه‌ای آب مانند انتقال و کدرسنجی رایج‌ترین جایگزین‌های مورد استفاده در تعیین غلظت‌های رسوب معلق(SSC) هستند. هم‌چنین در اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق از دستگاه‌ها و فن‌های مبتنی بر تضعیف[2] آکوستیک و/یا اصل پس‌پراکنش آکوستیک نیز استفاده می‌شود. هم‌چنین در اندازه‌گیری توزیع اندازه دانه از ساخت و طراحی دستگاه[3] مبتنی بر اصل پراش لیزر نیز استفاده می‌شود. در این استاندارد، اصول عملیاتی هر فن و جزئیات تعدادی از دستگاه‌های موجود، به اختصار شرح داده می‌شود.

جزئیات اصول و فن انتقال آکوستیکی و نوری، کدرسنجی و پس‌پراکنش نوری، فن پراش لیزر(LD)، و فن پس‌پراکنش آکوستیک(ABS)[4] همراه با محدودیت‌های آن‌ها به ترتیب در پیوست‌های الف، ب و پ شرح داده شده‌اند.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می شود.در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد،اصلاحیه‌ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه های بعدی آن ها مورد نظر است.

استفاده از مراجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

۲-۱ استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۶۱۱: اندازه گیری جریان مایع در مجاری روباز – فن‌های اندازه‌گیری مشخصه های رسوبات معلق

2-2 ISO 772, Hydrometry — Vocabulary and symbols

2-3 ISO 13320, Particle size analysis — Laser diffraction methods

1- Canal
2- Attenuation
3- Instrumentation
4- Acoustic Back Scatter

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد علاوه بر اصطلاحات و تعاریف ارایه شده در استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۶۱۱ و استانداردهای ISO 772 و ISO 13320 ، موارد زیر نیز به کار می‌روند.

۳-۱
فن جایگزین

فنی غیرمستقیم است که در آن برای اندازه‌گیری یک خصیصه یا هدف اصلی از یک خصیصه یا هدف جانشین استفاده می‌شود.

یادآوری- خصیصه‌های نوری یا آکوستیکی مخلوط رسوب- آب مانند انتقال نور، پراکندگی آکوستیک و پراش لیزر برخی دیگر از جایگزین‌های مربوط به اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق هستند.

۳-۲
کدرسنجی

فنی است که غلظت ذرات معلق را با استفاده از اندازه‌گیری شدت نور پراکنده شده، تخمین می‌زند.

یادآوری- پراکندگی نور به تعداد، توزیع اندازه، رنگ، ترکیب(که به‌صورت یک شاخص[1] مختلط انکسار آشکار می‌شود) و مشخصه‌های شکل ذرات وابسته است.

۴ اصول اندازه‌گیری

در اندازه‌گیری پیوسته غلظت رسوب می‌توان از فن‌های آکوستیکی و نوری استفاده کرد. اصول اندازه‌گیری مربوط به فن‌های جایگزین بالا مشابه هستند و می‌توان آن‌ها را به سه رده شرح داده شده در بندهای ۴-۱ تا ۴-۴، طبقه‌بندی کرد(به شکل۱ مراجعه شود).

۴-۱ انتقال

مطابق شکل ۱-الف، منبع و آشکارساز به‌صورتی در مقابل هم قرار می‌گیرند که فاصله بین آن‌ها l باشد. منبع یک پرتو نور موازی با شدت I_0 را ساطع می‌کند. ذرات رسوب در حجم اندازه‌گیری با جذب‌کردن، شدت پرتو اولیه را کاهش می‌دهند و در نتیجه سیگنال آشکارساز کاهش یافته پراکندگی اتفاق می‌افتد. ارتباط بین سیگنال آشکارساز(I_t) و غلظت رسوب(c) با استفاده از قانون بیر[2][۴۳] شرح و توسط فرمول(۱) ارائه می‌شود:

$$I_t = I_0 e^{-kcl} \quad (۱)$$

1- Index
2- Beer’s Law

که در آن:

I_t نور انتقال یافته از نمونه به طول l در آب با غلظت رسوب c؛

I_0 شدت اولیه منبع ساطع‌کننده؛

K ثابت وابسته به رسوب، آب و مشخصه‌های دستگاه است.

۴-۲ پراکندگی

مطابق شکل ۱-ب، منبع و آشکارساز به‌صورتی قرار می‌گیرند که نسبت به هم دارای زاویه Ψ باشند. آشکارساز قسمتی از تابش افتراق یافته توسط ذرات رسوب در حجم اندازه‌گیری را، دریافت می‌کند. ارتباط بین سیگنال آشکارساز(I_s) و غلظت رسوب(c) توسط فرمول(۲) ارائه می‌شود:

$$I_s = k_3 I_0 c e^{k_2 c} \quad (۲)$$

که در آن:

I_0 شدت اولیه منبع ساطع‌کننده؛

k_2 ثابت وابسته به رسوب، آب و مشخصه‌های دستگاه؛

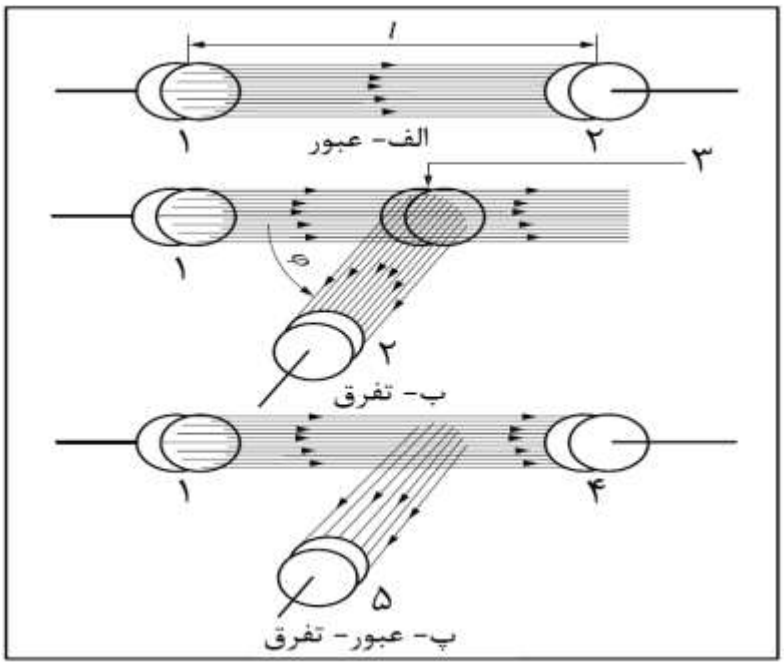
k_3 ضریب کالیبراسیون وابسته به هندسه دستگاه، خصیصه‌های ذره(توزیع اندازه، شکل، شاخص انکسار یا ترکیب)، طول موج آکوستیک/ نوری و طول حرکت(l) است.

یادآوری- اغلب، طول l را نمی‌توان در سامانه‌های نوع پس‌پراکنش نوری، تعیین کرد.

یک محدودیت مهم فن پراکندگی این است که در غلظت‌های زیاد، رابطه بین سیگنال آشکارساز و غلظت رسوب به شدت غیرخطی است. حتی در غلظت‌های پایین و جایی که پاسخ به‌صورت خطی است، خروجی‌ها شدیداً وابسته به رنگ و اندازه دانه هستند. به عنوان مثال، رنگ در غلظت‌های بالاتر[۳۷] به تنهایی می‌تواند با یک عامل ۱۰، کالیبراسیون دستگاه را تغییر دهد و اندازه دانه می‌تواند باعث ایجاد تغییر اضافی در کالیبراسیون شود. به عنوان مثال، کالیبراسیون نشان می‌دهد که با یک عامل ۲۰ بین رسوب $5\mu m$ سفید و $10\mu m$ خاکستری تغییر می‌کند. به همین صورت، تغییرات خصیصه‌های ماهیتی رسوب، که به طور کلی در طی مدت زمان کنترل کردن مشخص نمی‌شوند، غیرعادی نیست. احتمالاً زمانی که خصیصه‌های رسوب در فضا/ زمان تغییر می‌کند،کالیبراسیون نقطه‌ای نمونه‌ها تحت تاثیر خطاهای نامعلوم قرار می‌گیرد. مقدار خطاها می‌تواند به چندین صد درصد و بیشتر از آن‌هم برسد. اما، با استفاده از حسگرهای لیزری می‌توان از گسترش بیشتر این خطاها جلوگیری کرد.

۴-۳ پراکندگی – انتقال

مطابق شکل ۱-پ، این فن مبتنی بر ترکیب انتقال و پراکندگی است.



راهنما

۱ منبع
۲ آشکارساز
۳ حجم اندازه‌گیری
۴ آشکارساز
۵ آشکارساز

شکل۱- اصل مبنای مربوط به فن‌های آکوستیک و نوری

۴-۴ پراش

پدیده‌ای است که طی آن نور در اطراف گوشه‌های یک مانع یا شکاف، از مسیر خط مستقیم خود منحرف می‌شود. نور پراش یافته می‌تواند حاشیه‌های نوری، نوارهای تاریک یا رنگی تولید کند. از این خصیصه در دستگاه‌های پراش لیزر برای اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق استفاده می‌شود.

پراش لیزر، غلظت رسوب معلق را با اندازه‌گیری تغییر زاویه شدت نور پراکنده شده در اثر انتقال پرتو لیزر از نمونه حاوی ذرات پراکنده، اندازه‌گیری می‌کند. ذرات درشت، نور را در زاویه‌های کوچک (نسبت به پرتو لیزر) پراکنده می‌کنند در حالی که ذرات ریز، نور را در زاویه‌های بزرگ پراکنده می‌کنند. بنابراین برای محاسبه اندازه ذرات تشکیل‌دهنده الگوی پراکندگی، داده‌های شدت پراکندگی زاویه‌ای با استفاده از نظریه می[1] مربوط به پراکندگی نور، تحلیل می‌شوند.

1- Mie theory

۵ خصیصه‌هایی از رسوب که برای فن‌های جایگزین رسوبی اهمیت دارند

۵-۱ کلیات

انتقال رسوب مبتنی بر مشخصه‌های هیدرولیکی و خصیصه‌های فیزیکی رسوب است. تعدادی از این خصیصه‌ها در ارزیابی درستی و دقت فناوری‌های جایگزین رسوب مورد نظر، دارای اهمیت هستند که می‌توان آن‌ها را در این استاندارد تعیین کرد.

۵-۲ اندازه ذره

اگر فن‌های آکوستیکی و نوری کپه‌ای اساساً به مساحت(سطح مقطع) سطح ذرات پاسخ دهند، اندازه رسوب معلق دارای اهمیت است. اگر مساحت(سطح مقطع) سطح تغییر کند اما غلظت‌ها ثابت باقی بمانند، این حس‌گرها تغییر غلظتی را گزارش خواهند داد که متناسب با تغییر مساحت(سطح مقطع) سطح است[۳۷]. خروجی غلظت مربوط به حس‌گرهای LD با تغییر اندازه ذره، تغییر نمی‌کند.

۵-۳ رنگ ذره

خروجی حس‌گرهای نوری کپه‌ای تک پارامتر شدیداً به رنگ ذره وابسته است. در غلظت‌های بالاتر تنها تغییر رنگ رسوب می‌تواند با استفاده از عامل۱۰، کالیبراسیون را تغییر دهد. [۳۷] تغییر رنگ به همراه تغییرات اندازه دانه می‌تواند سبب تغییر اضافی در کالیبراسیون شود. به عنوان مثال، می‌توان نشان داد که کالیبراسیون با یک عامل۲۰ بین رسوب $5\mu m$ سفید و $10\mu m$ سیاه تغییر می‌کند[۳۷]. خروجی غلظت مربوط به حس‌گرهای LD یا آکوستیکی تحت تاثیر رنگ ذره قرار نمی‌گیرند.

۶ روش‌های تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از فن‌های جایگزین

۶-۱ کلیات

روش‌های جایگزین با استفاده از حس‌گرهایی که موارد زیر را اندازه‌گیری می‌کنند در اندازه‌گیری درجا به کار می‌روند

الف- خصیصه‌های نوری کپه‌ای مخلوط رسوب- آب شامل حس‌گرهای انتقالی، کدرسنجی و پس‌پراکنش نوری(OBS)، یا

ب- حس‌گرهای پراش لیزر(LD).

این روش‌ها هم‌چنین در برگیرنده حس‌گرهایی هستند که خصیصه‌های آکوستیک مخلوط رسوب- آب مانند: پس‌پراکنش آکوستیک را اندازه‌گیری می‌کنند.

۲-۶ نورهای کپه‌ای

اندازه‌گیری خصیصه‌های نور کپه‌ای مخلوط رسوب- آب رایج‌ترین راه برای تعیین میزان تیرگی[1] (درجه شفاف بودن آب) و تخمین SSC در رودخانه‌ها است. تعدادی از دستگاه‌های نوری را می‌توان از بازار تهیه کرد. دستگاه‌های نوری- کپه‌ای را می‌توان مانند زیر طبقه‌بندی کرد.

الف- انتقال‌سنج‌ها که از یک منبع نور استفاده می‌کنند که به طور مستقیم به حس‌گر پرتو می‌تاباند. این دستگاه، انتقال نور، یعنی قسمتی از نور که با ذرات معلق پراکنده نمی‌شود، را اندازه‌گیری می‌کند.

ب- کدرسنج‌ها، که نور پراکنده شده توسط ذرات معلق(به جای انتقال نور) را اندازه‌گیری می‌کنند. نور رسیده به آشکارساز به طور مستقیم با مقدار ذرات رسوبی که پرتو منبع را پراکنده می‌کنند، متناسب است البته در شرایطی که اندازه، شکل، رنگ و ترکیب این ذرات تغییر نکند. کدرسنج‌ها را می‌توان به دو طبقه کلی تقسیم کرد:

۱- تیره‌سنج‌ها که به طور کلی پراکندگی 90° یا روبه جلو را اندازه‌گیری می‌کنند. اندازه‌گیری‌های کدرسنجی نوعاً در یکاهای تیرگی تعریف شده توسط منبع نور، زاویه آشکارسازی و این‌که حس‌گر یک یا چند آشکارساز داشته باشد یا خیر، شرح داده می‌شوند. یکاهای تیرگی ناشی از کدرسنج‌های کالیبره شده، یکاهای تیرگی کدرسنجی(NTU)[2] نامیده می‌شوند.

۲- دستگاه‌های پس‌پراکنش نوری(OBS) نور مادون قرمز پس‌پراکنش شده را، که معمولاً در زاویه 165° نسبت به ساطع‌کننده پس‌پراکنش می شود، در یک حجم کوچک(بسته به غلظت) اندازه‌گیری می‌کند.

این دستگاه‌ها با استفاده از یک نقطه تکی، غلظت رسوب معلق را تخمین می‌زنند. انتقال و پراکندگی هر دو تابعی از تعداد، اندازه، رنگ، شاخص انکسار و شکل ذرات معلق هستند. در این روش می‌توان ذرات با اندازه‌های مختلف را اندازه‌گیری کرد. اما، حساسیت روش‌های نوری- کپه‌ای به غلظت مساحت(سطح مقطع) ذرات کپه‌ای، یعنی نسبت C/d یا $\sum C_i/d_i$ که در این‌جا C غلظت حجمی[زمانی که ذرات از طول موج λ کوچکتر باشند، مجموع آن‌ها شامل عامل وزن مطابق با بازده پراکندگی ذرات می‌شود که برای این‌چنین ذرات کوچک، این فاکتور ۲ نیست(مقدار ذرات $<\lambda$) و d اندازه ذره است. به عبارت دیگر، با افزایش اندازه ذره، حساسیت روش به تدریج کم می شود. هم‌چنین حداکثر غلظت کاری با اندازه ذره رابطه خطی دارد. جزئیات این روش در پیوست الف ارائه شده است.

به طور کلی این دستگاه‌های نوری- کپه‌ای گران نیستند، به غیر از برف پاک‌کن[3] مورد استفاده در پنجره‌های نوری هیچ قسمت متحرک دیگری ندارند، و ظرفیت نمونه‌برداری سریعی فراهم می‌کنند. دستگاه‌ها برای تبدیل

1- Turbidity
2- Nephelometric Turbidity Units
3- Wiper

اندازه‌گیری‌ها به تخمین‌های SSCبه کالیبراسیون‌های تجربی نیاز دارند. برای کالیبره کردن خروجی SSC انتقال‌سنج یا کدرسنج نمی‌توان از هیچ کالیبراسیون عمومی استفاده کرد.
اشکالات مرتبط با استفاده از دستگاه‌های نوری- کپه‌ای عبارت هستند از:

الف- فقدان ثبات در مشخصه‌های اندازه‌گیری دستگاه؛

ب- پاسخ متغیر دستگاه به اندازه دانه، ترکیب، رنگ، شکل و پوشش؛

پ- لجن‌بندی بیولوژیکی یا آسیب به پنجره‌های نوری؛

ت- پاسخ‌های غیر خطی یا سانسور شده حس‌گرها در غلظت رسوب بالا؛ و

ث- پاسخ متغیر ناشی از مواد محلول که سبب رنگی شدن می‌شوند.

حداکثر حدود غلظت مربوط به این دستگاه‌ها به قسمت توزیع‌های اندازه دانه وابسته است. به طور کلی یک حس‌گر پس‌پراکنش نوری(OBS) برای رس و گل‌ولای[1] در غلظت‌های کمتر از ۲g/l و برای ماسه در غلظت‌های کمتر از ۱۰g/l پاسخ خطی دارد اگرچه غلظت‌های دقیقی که در آن‌ها پاسخ حس‌گرها غیر خطی است به اندازه ذره بستگی دارد. علاوه بر این، حد غلظت بالایی مربوط به انتقال‌سنج‌ها به طول مسیر نوری وابسته است[مطابق فرمول(۱)].
انتقال‌سنج‌ها در غلظت‌های پایین حساسیت بیشتری دارند اما کدرسنج‌ها و حس‌گرهای OBS از نظر غلظت، گستره عملیاتی وسعتری دارند. کدرسنج‌ها و حس‌گرهای OBS به دلیل ارتباط بین کالیبراسیون و اندازه ذره و رنگ ذره، برای استفاده در مکان‌هایی که رنگ و توزیع اندازه ذره نسبتاً ثابتی دارند، مناسب‌تر هستند.

۳-۶ پراش لیزر(LD)

اصل پراش لیزرLD به اختصار در این زیر بند شرح داده شده است(برای جزئیات بیشتر به استانداردISO 13320 مراجعه شود).
پرتو لیزر به طرف حجم نمونه هدایت می‌شود که در آن‌جا ذرات معلق نور را پراکنده، جذب یا بازتاب می‌کنند. نور لیزر پراکنده شده توسط آرایه‌ای از آشکارسازهایی که مجاز هستند پراکندگی را در زاویه‌های متعدد نسبت به جهت اصلی پرتو اندازه‌گیری کنند، دریافت می‌شود. این امر سبب می‌شود بردار پراکندگی نور با یک مقدار عددی مربوط به هر آشکارساز، شدت پیدا کند. شدت‌های پراکندگی با استفاده از روش اجرایی ریاضیاتی مناسب و مدل نوری به یک توزیع اندازه حجمی تبدیل می‌شود که در این توزیع طبقه‌های اندازه مجزا، با استفاده از زاویه‌های پراکندگی پوشش داده شده توسط حس‌گرها، تعریف می‌شوند. با جمع کردن عناصر منفرد توزیع اندازه ذره، غلظت حجمی کل مربوط به گستره اندازه پوشش داده شده توسط دستگاه، به دست می‌آید.
روش LD برای اندازه‌گیری درجای غلظت(هم‌چنین اندازه‌ها) ذرات رسوب معلق در یک نقطه از ستون آب، مبنای کاملاً متفاوتی را ارائه می‌دهد. در روش LD بر خلاف روش‌های نوری- کپه‌ای یا آکوستیک با تغییر رنگ

1- Silt

رسوب، ترکیب یا اندازه آن، به شرطی که اندازه رسوب‌ها در حدود اندازه‌گیری دستگاه باشند، کالیبراسیون دستگاه تغییر قابل توجهی نمی‌کند و نیاز انجام کالیبراسیون توسط کاربر ندارد. این خصیصه سبب می‌شود که گستره کاربد این روش بسیاروسیع باشد و در اندازه‌گیری‌های نمونه‌های بیولوژیکی تا سرامیک‌ها و انواع مختلف ذرات استفاده شود.

۶-۴ پس‌پراکنش آکوستیک

در دهه‌های متعدد، مشخص کردن SSC با استفاده از پس‌پراکنش و تضعیف سیگنال‌های آکوستیک در آب شرح و بهبود داده شده‌اند. اصل اولیه این است که امواج آکوستیک با عبور کردن از یک مخلوط رسوب- آبی، بسته به رسوب، سیال و مشخصه‌های دستگاه، پراکنده می‌شوند و تضعیف می‌شوند. اندازه‌های آکوستیک پس‌پراکنش و تضعیف، تابع مشخصه‌های رسوب(غلظت، اندازه، شکل و چگالی) موجود حجمی است که پس از بررسی تاثیر مشخصه‌های دستگاه و سیال، در معرض تابش[1] آکوستیک قرار می‌گیرد. برای تصحیح عوامل غیر رسوبی(دستگاه و آب) موثر بر اندازه‌های آکوستیک از فرمول معینی استفاده می‌شود. محدودیت عمده سامانه‌های تک فرکانس این است که ممکن است اندازه‌های تضعیف آکوستیک و دامنه پس‌پراکنش به دلیل تغییرات غلظت و/یا اندازه رسوب، تغییر کنند. زمانی که توزیع اندازه ثابت یا غلظت ثابت باشد، می‌توان دامنه پس‌پراکنش آکوستیک ناشی از رسوب را به ترتیب با افزایش غلظت و اندازه دانه، افزایش داد؛ هم‌چنین تضعیف آکوستیک با چگالی ذره و اندازه تغییر می‌کند. اما، برای تخمین غلطت رسوب و مشخصه‌های اندازه، سامانه‌های آکوستیک چند فرکانسه با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فرکانس(های) بهینه مربوط به اندازه‌گیری مشخصه‌های رسوب به اندازه‌های رسوب و عمق کانال و/یا عرض اندازه‌گیری وابسته خواهد بود. روش آکوستیک با موفقیت در غلظت‌های تا ۳۰ g/l و با طول‌های مسیر آکوستیکی بسیار کوتاه، مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی در غلظت‌های کمتر از ۲۰mg/l، ارتباط آکوستیک‌ها با رسوب ضعیف است. با توجه به طبقه‌بندی‌ها می‌توان اندازه‌گیری‌ها را با استفاده از دستگاه‌های آکوستیکی که در پیکربندی‌های پایینی یا جانبی تثبیت شده‌اند، یا پروفایلرهای جریان داپلر آکوستیک متحرک[2]، انجام داد.

۷ کالیبراسیون و صحه‌گذاری

۷-۱ در مورد روش‌های آکوستیک و نوری کپه‌ای، کالیبراسیون درجای بین SSC با استفاده از نمونه‌های آبی انجام می‌شود و اندازه‌گیری سیگنال با استفاده ازحس‌گر ضروری است. هدف از کالیبراسیون محاسبه مقدار تغییرپذیری ثوابت k، k_2 و k_3 آورده شده در فرمول (۱) و (۲) است. در LD به دلیل این‌که غلظت حجمی رسوب معلق به دست می‌آید، انجام کالیبراسیون درجا ضروری نیست. اما، به منظور تبدیل غلظت حجمی به دست آمده

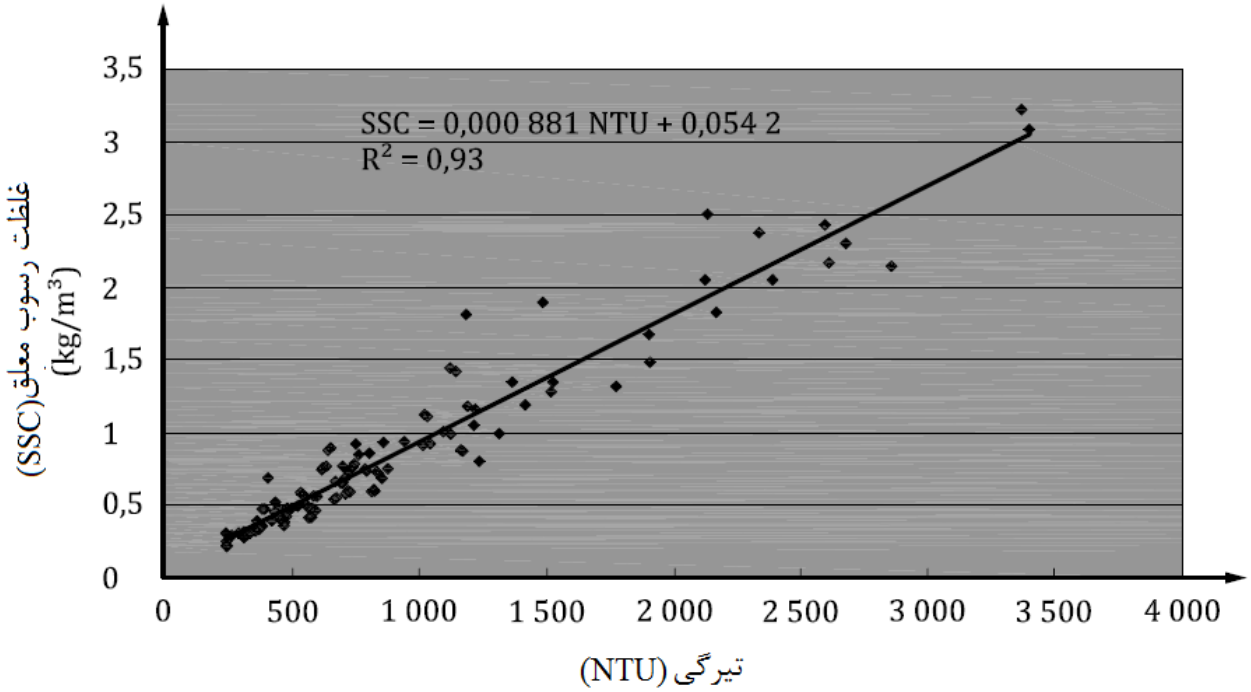
1- Ensonified
2- Mobile acoustic Doppler current profilers

از اندازه‌گیری LD به SSC، باید از دانسیته کپه‌ای ذرات استفاده کرد. می‌توان فرض کرد که دانسیته کپه‌ای با استفاده از نمونه‌های آبی شبیه‌سازی یا اقتباس می‌شود.
بهتر است کالیبراسیون درجا تحت شرایط شارشی انجام شود که تمام گستره سرعت‌ها، SSC و موقعیت‌های اندازه‌گیری(نزدیک به سطح آب و بستر) را پوشش دهد. در مورد روش‌های آکوستیک یا کپه‌ای، نیاز است کالیبراسیون‌ها در گستره شارش‌ها و شرایط رسوب‌گذاری به صورت منظم انجام شوند زیرا ممکن است به دلیل تغییرات موقت اندازه دانه، شکل، رنگ یا ترکیب، ثوابت k، k_2 و k_3 با گذشت زمان تغییر کنند. در عمل، برای جمع‌آوری نمونه‌های رسوب- آب مربوط به کالیبراسیون، تنها زمانی می‌توان از روش‌های نمونه‌برداری آکوستیکی استفاده کرد که با روش نمونه‌برداری مکانیکی همراه باشند. محدوده اندازه ذره‌ای که دستگاه‌های LD می‌توانند اندازه‌گیری کنند، تابعی از اندازه‌گیری زاویه پراکندگی دستگاه است. اگر اندازه رسوب معلق در گستره اندازه دستگاه LD باشد در این صورت دستگاه LD نیاز به کالیبراسیون مجدد ندارد مگر آن‌که در اثر تبدیل غلظت کپه‌ای به غلظت جرمی، دانسیته کپه‌ای ذره تغییر کند. اگر مقداری از رسوب خارج از گستره اندازه دستگاه LD باشد، برای دست‌یابی به اطلاعات مربوط چگونگی تحت تاثیر قرار گرفتن دقت، درستی و غلظت کل به کتابچه راهنمای تولیدکننده مراجعه کنید.
در رودخانه‌ها بیشتر رسوبات معلق در هنگام وقوع سیل جابه‌جا می‌شوند. بنابراین توصیه می‌شود نمونه‌های آبی مربوط به کالیبراسیون، به‌خصوص در زمان وقوع سیل گرفته شوند.

۲-۷ درستی و دقت داده‌های تولید شده توسط فناوری جایگزین رسوب به غیر از روش LD، وابسته به کیفیت کالیبراسیون است. درمورد روش LD، می‌توان با استفاده از استانداردهای دارای قابلیت ردیابی در حدود اندازه‌گیری دستگاه، در هر زمان اعتبار اندازه‌گیری دستگاه را به صورت مستقیم مشخص کرد. باید از روش اجرایی اعتبارسنجی تعیین شده در استاندارد ISO 13320 و کتاب‌چه راهنمای تولیدکننده استفاده کرد. درستی SSC به دست آمده از اندازه‌گیری LD به درستی غلظت حجمی و تخمین چگالی ذره وابسته است. برای مشخص کردن درستی اندازه‌گیری غلظت کپه‌ای به کتابچه راهنمای تولیدکننده مراجعه و بعد از محاسبه SSC، خطاها را اعلام کنید. در مورد نورهای حجمی و روش‌های آکوستیک به کار رفته در محاسبه آن دسته از خصیصه‌های رسوبی که در آزمایشگاه قابل شبیه‌سازی نیستند، مانند اندازه ذره‌ای که در در زمان اندازه‌گیری دارای نوسان است، بهتر است تنها از کالیبراسیون درجای دستگاه‌ها استفاده کرد.
یادآوری- ممکن است استانداردهای دارای قابلیت ردیابی، در موسسات یا آزمایشگاه‌های ملی مانند NIST[1] موجود باشند.
۱-۲-۷ بهترین راه کالیبره کردن OBS یا حس‌گر تیرگی مربوط به اندازه‌گیری SSC این است که نمونه‌های آبی را بلافاصله در مجاورت حس‌گر قرار داد و بین خروجی دستگاه و مقدارهای SSC نمونه‌ها یک رابطه عددی ایجاد کرد. بهتر است مقدارهای SSC با استفاده از روش‌های استاندارد مناسب به دست آیند. بنابراین به منظور SSC، می‌توان داده‌های تیرگی استاندارد NTU یا سایر یکاهای مناسب را با استفاده از داده‌های SSC تعیین

1- National Institute of Standards and Technology

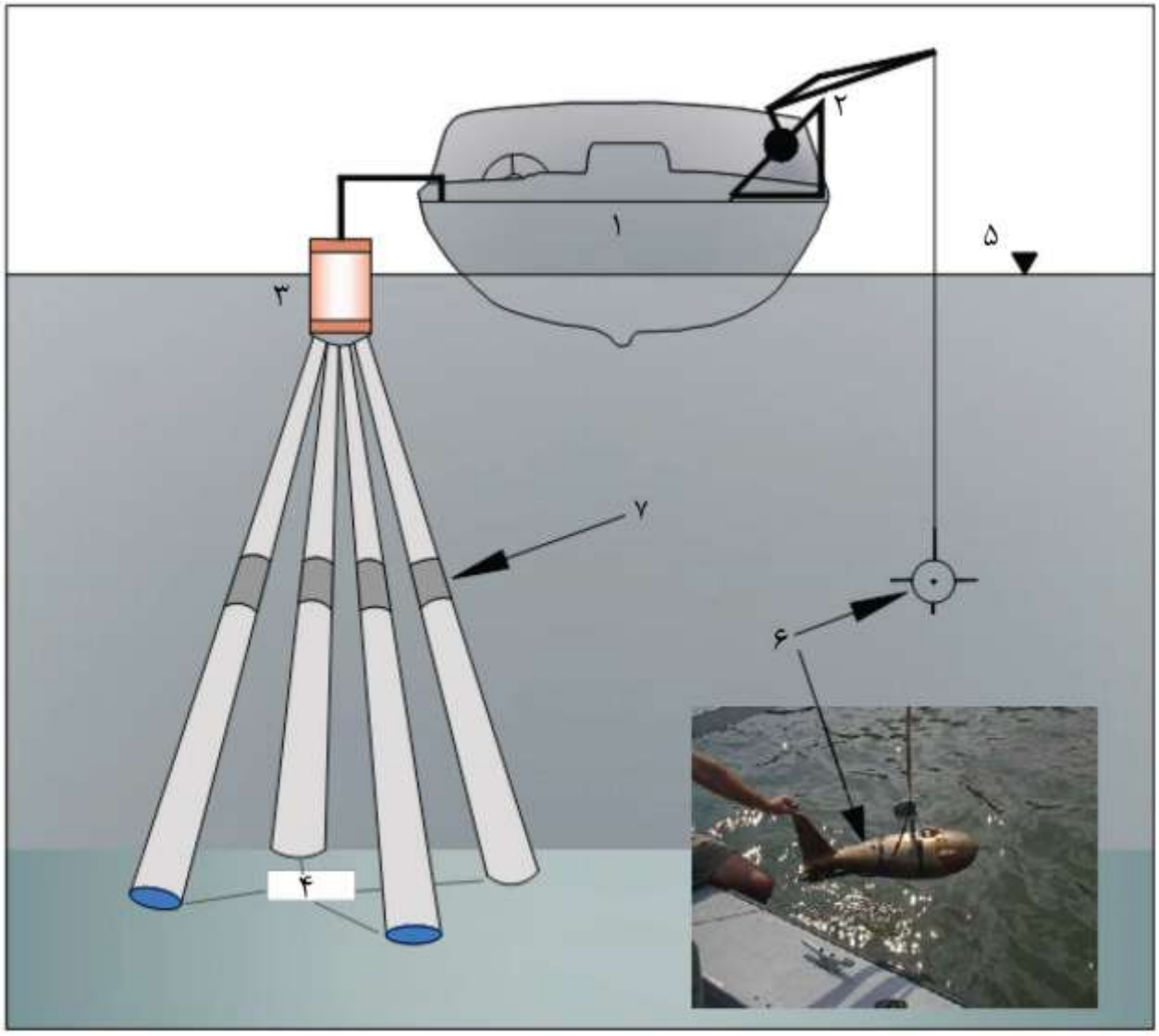
شده از نمونه‌های آبی فیلتر شده، کالیبره کرد. بهتر است یکاهای غلظت استاندارد براساس SSC تعیین شده از برنامه نمونه‌برداری هم‌زمان کالیبره شوند. در شکل۲، یک منحنی کالیبراسیون نوعی نشان داده شده است. به دلیل این‌که با تغییر توزیع اندازه ذره، رنگ یا ترکیب، می‌توان کالیبراسیون‌ها را تغییر داد، بهتر است کاربرهای این استاندارد همیشه آگاه باشند که کالیبراسیون یک روش را نمی‌توان در مورد روش دیگر استفاده کرد.



یادآوری– داده‌های ارائه شده از ایستگاه هیدرومتریک کان تان، رودخانه یانگتز بالایی، چین.

شکل۲– کالیبراسیون غلظت OBS با استفاده از نمونه‌های بطری

۲-۲-۷ بهترین روش اندازه‌گیری میزان قابل اطمینان بودن فناوری جایگزین، از کالیبراسیون‌های انجام شده در محدوده اندازه‌گیری دستگاه، اقتباس می‌شود. از این رو در صورت امکان بهتر است معیارهای ارزیابی فناوری‌های جایگزین رسوب، منحصراً برمبنای کالیبراسیون‌های دستگاه انجام شده در محدوده اندازه‌گیری باشد. اما، یکی از قابلیت‌های این روش، اندازه‌گیری نهایی بازده یک فناوری جایگزین مربوط به کنترل رسوبات معلق رودخانه‌ها است که به موجب آن مشخصه‌های رسوبی موردعلاقه را در سرتاسر مقطع عرضی به خوبی مشخص می‌کند. در شکل۳، یک نمای شماتیک از جمع‌آوری نمونه مربوط به کالیبراسیون آورده شده است.



راهنما

۱ قایق
۲ جرثقیل
۳ ADCP
۴ پرتوها
۵ سطح آب
۶ نقطه یک‌پارچه ککننده نمونه‌بردار آبی
۷ داده‌های آکوستیک جمع‌آوری شده از صدوق‌ها در عمق مشابه با نمونه‌بردار آبی

یادآوری- منتشر شده با اخذ مجوز از وال و سایرین([۱۸])

شکل۳- نمایی از جمع‌آوری نمونه مربوط به کالیبراسیون

پیوست الف
(اطلاعاتی)
تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از فن‌های نوری

الف-۱ انتقال

الف-۱-۱ اصل

منبع نور و آشکارساز در یک فاصله تنظیم شده از هم قرار می‌گیرند. جهت نور به سمت حجم نمونه است. رسوب موجود در حجم نمونه قسمتی از نور را جذب می‌کند یا باعث پراکندگی می‌شود. آشکارسازی که در مقابل منبع نور قرار دارد درجه تضعیف پرتو نور را تعیین می‌کند. این امر را می‌توان به تیرگی نسبت داد.

الف-۱-۲ گستره‌های عملیاتی

حس‌گرهای مبتنی بر اصل انتقال نسبت به حس‌گرهای مبتنی بر اصل پراکندگی، بیشتر برای کنترل تیرگی‌های ضعیف‌تر و SSC(اغلب بیشتر از ۱۰۰mg/l) استفاده می‌شوند.

الف-۲ پراکندگی

الف-۲-۱ اصل

این روش مبتنی بر اندازه‌گیری نور پراکنده شده توسط حس‌گر نوری است که نسبت به نور برخوردکننده زاویه دارد. اندازه‌گیری‌های نزدیک به زاویه 90° اصطلاحاً تیرگی نامیده می‌شود و مجموع خصیصه‌های نوری مخلوط رسوب- آبی که به جای انتقال نور از درون محلول، سبب پراکندگی یا تضعیف شده را انعکاس می‌دهد. اندازه‌گیریدر زاویه‌های کمتر از 90° اصطلاحاً پس‌پراکنش نوری(OBS) نامیده می‌شود که برای تعیین تیرگی محلول استفاده می‌شود. مقدار بیشتر پراکندگی یا تضعیف نور، سبب می‌شود که مقدار اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سنجش تیرگی با استفاده از کدرسنجی، نیز بیشتر باشد. اندازه‌گیری‌های کدرسنجی نوعاً در یکاهای تیرگی شرح داده می‌شود که این یکاها توسط منبع نور، زاویه آشکارسازی و این‌که آیا حس‌گر دارای آشکارساز تکی یا چندتایی است، تعریف می‌شود.

الف-۲-۲ ساخت دستگاه

حس‌گرOBS نوعاً به صورت استوانه‌ای است که بر روی آن یک پنجره نوری تعبیه شده تا نور را هم ساطع و هم دریافت کند. یک پالس از نور سفید یا مادون قرمز از درون پنجره نوری منتقل می‌شود و توسط ذرات، پراکندگی یا انعکاس می‌یابد، این ذرات در برخی فاصله‌ها در جلوی پنجره و در ناحیه مخروطی با زاویه$^{\circ}$۱۶۵ قرار می‌گیرند. برخی از نورهای پراکنده شده یا انعکاس یافته به پنجره نوری برگردانده می‌شوند که در آن‌جا یک گیرنده، نور پس‌پراکنش را به یک خروجی با ولتاژ متناسب تبدیل می‌کند.

خروجی دستگاه‌های سنجش تیرگی برحسب mV است و داده‌نگارها[1] معمولاً این داده‌ها را با فاصله‌های زمانی مناسب، ذخیره می‌کنند. بهتر است داده‌های ثبت شده به‌صورت منظم از داده‌نگار استخراج و به یک کامپیوتر یا یک واحد ذخیره، منتقل شوند. ولتاژ خروجی از حس‌گر به یکاهای تیرگی کدرسنجی(NTU) تبدیل می‌شود. توصیه می‌شود که کالیبراسیون با استفاده از محلول‌های بستر پلیمری دارای گواهی شود. کالیبراسیون بر اساس یکاهای استاندارد منجر می‌شود انحراف حس‌گر مشخص و برطرف شود. حس‌گرها ممکن است اغلب به دلیل تاثیر گذر زمان بر اجزای الکترونیکی یا خراشیدگی لنز دچار انحراف شوند. بهتر است کالیبراسیون هر سه ماه یک‌بار انجام شود. کاربر یا تولیدکننده می‌تواند کالیبراسیون را انجام دهد. اگر کالیبراسیون‌ها توسط کاربر انجام شود مهم است که روش‌های اجرایی کاربر مشابه با تولیدکننده باشد. سپس برای حذف داده‌های اشتباه، داده‌های تیرگی استاندارد از لحاظ کیفی تحت کنترل قرار می‌گیرند. این داده‌های اشتباه معمولاً به‌دلیل گیرافتادن مواد زائد در راس حس‌گر یا رشد جلبک بر روی لنز حس‌گر ایجاد می‌شوند. می‌توان این داده‌های اشتباه را به‌صورت مقدارهای ثابت بسیار بالا، مقدارهای بسیار متغیر، یا مقدارهایی که به‌صورت پیوسته افزایش می یابند و با تغییرات تراز(اشل) رودخانه ارتباطی ندارند، مشخص کرد.

الف-۲-۳ گستره‌های عملیاتی

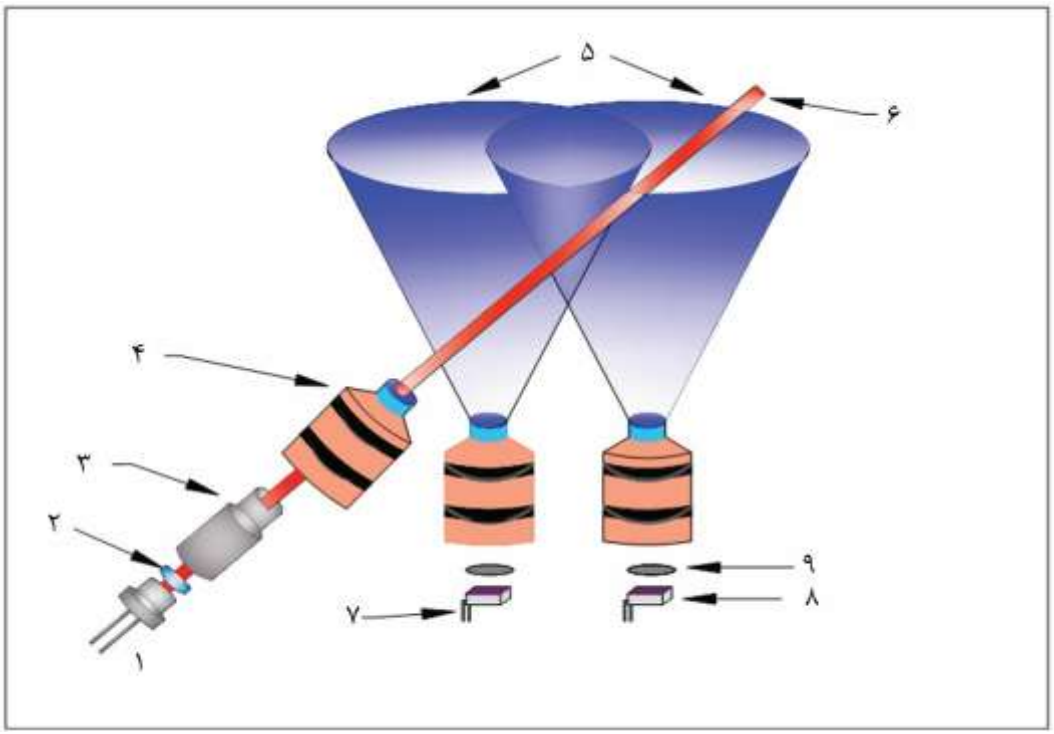
این روش اغلب برای اندازه‌گیر درست تیرگی‌هایی به کار می رود که در گستره NTU صفر تا ۳۰۰۰NTU قرار دارند. هم‌چنین برای اندازه‌گیری تیرگی‌های بالاتر(تا ۳۰۰۰۰۰NTU) کاوش‌گرهایی وجود دارند که مخصوصاً برای این امر طراحی شده‌اند.

الف-۳ کالیبراسیون

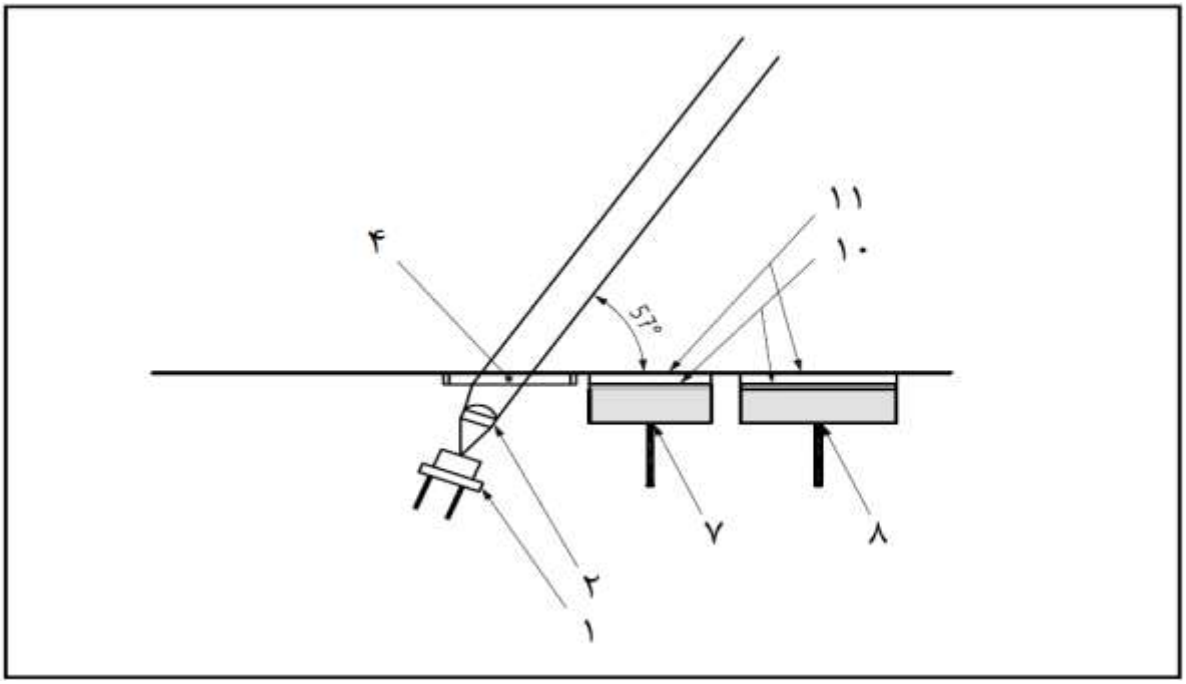
برای مقدارهای(mg/l)SSC می‌توان در پایان، داده‌های تیرگی استاندارد مربوط به مقدارهای NTU را با استفاده از SSC تعیین شده از نمونه‌های آبی فیلتر شده،کالیبره کرد. یکاهای تیرگی استاندارد براساس SSC تعیین شده از برنامه نمونه‌برداری هم‌زمان، کالیبره می‌شوند. این امر بسیار مهم است زیرا تیرگی نسبت به تغییرات

1- Data loggers

خصیصه‌های رسوب معلق مانند اندازه، رنگ و ترکیب بسیار حساس است. علاوه براین، به دلیل این‌که با گذشت زمان ممکن است خصیصه‌های رسوب تغییر کنند، ممکن است ضروری باشد که ثبت‌کننده تیرگی را با استفاده از نمونه‌های رسوبی که به بازه زمانی خاص مربوط هستند(یعنی کالیبراسیون فصلی می‌تواند ضروری باشد)، کالیبره کرد. تعداد زیادی از نمونه‌ها نیاز به یک کالیبراسیون درست دارند. برای انجام یک کالیبراسیون مطمئن، نیاز است نمونه‌های غلظت رسوب در یک گستره تیرگی‌های تحت کنترل کامل، جمع‌آوری شوند؛ بهتر است از کالیبراسیون‌ها هیچ برون‌یابی صورت نگیرد. می توان برای کالیبراسیون، بین یکاهای تیرگی و SSC اندازه‌گیری شده از مدل رگرسیون خطی ساده[1] استفاده کرد. اگر درصد خطای استاندارد مدل(MSPE)[2] مربوط به مدل رگرسیون خطی مطابق با ضابطه حداقلی ایجاد شده باشد، می‌توان از این مدل برای محاسبه سری‌های زمانی SSC استفاده کرد. اگر مدل رگرسیون ساده مطابق با ضوابط دسترسی نباشد، می‌توان با استفاده از زوج داده‌های شارش نهر و تیرگی فوری، یک مدل رگرسیون خطی چندگانه ایجاد کرد. اگر شارش نهر اضافی از نظر آماری قابل توجه باشد و عدم‌قطعیت مربوط به مدل رگرسیون چندگانه سبب بهبود آن نسبت به مدل خطی ساده شود و در نهایت قابل قبول باشد، از این مدل به عنوان مبنای محاسبه سری‌های زمانی SSC استفاده می‌شود. متعاقباً می‌توان با استفاده از فن‌های استاندارد از سری‌های زمانی SSC محاسبه شده به‌همراه سری‌های زمانی شارش نهر جفت‌شده به آن برای محاسبه سری‌های زمانی بار رسوب معلق(SSL)[3]، استفاده کرد.



1- Simple linear regression model
2- Model Standard Percentage Error
3- Suspended Sediment Load



راهنما:

۱ دیود لیزر
۲ لنز
۳ لوله متمرکز
۴ پنجره‌های از جنس سیلیکات آلومینیم و منیزیم(۳)
۵ مخروط پذیرش ۴۵°
۶ پرتو NIR
۷ آشکارساز نزدیک(ND)
۸ آشکارساز دور(FD)
۹ فیلترهای وارتن[1](۲)
۱۰ پنجره وارتن
۱۱ پنجره اپوکسی[2]

یادآوری- منتشر شده با اخذ مجوز از موسسه علمی کمپبل([۳۰])

شکل الف-۱ نمای فن پس‌پراکنش نوری(OBS)

الف-۴ محدودیت‌ها

می‌توان محدودیت‌های فن‌های نوری را به‌صورت زیر نشان داد:

الف- وابستگی شدید به اندازه ذره و رنگ رسوب و نیاز کالیبراسیون منظم؛

ب- وابستگی شدید به رنگ آبی ناشی از ترکیبات محلول؛

پ- تاثیرپذیری توسط لجن‌بستن بیولوژیکی و نور محیطی؛

ت- عملکرد مناسب مربوط به اندازه‌گیری غلظت‌ها در جایی که اندازه ذره ثابت است یا در گستره ۰٫۲mm تا ۰٫۴mm قرار می‌گیرد؛ و

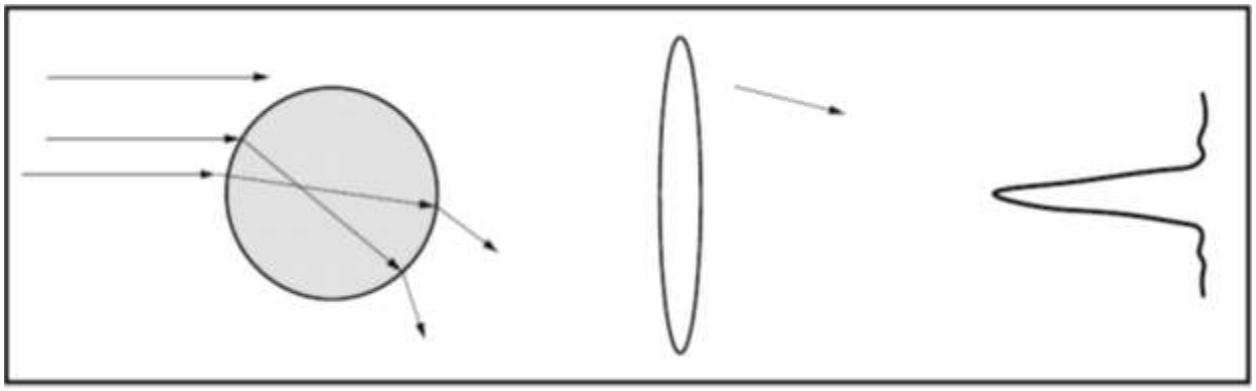
ث- حساسیت بالا به حباب‌های هوا.

1- Wratten filters
2- Epoxy

پیوست ب
(اطلاعاتی)
تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از فن پراش لیزر

ب-۱ اصل

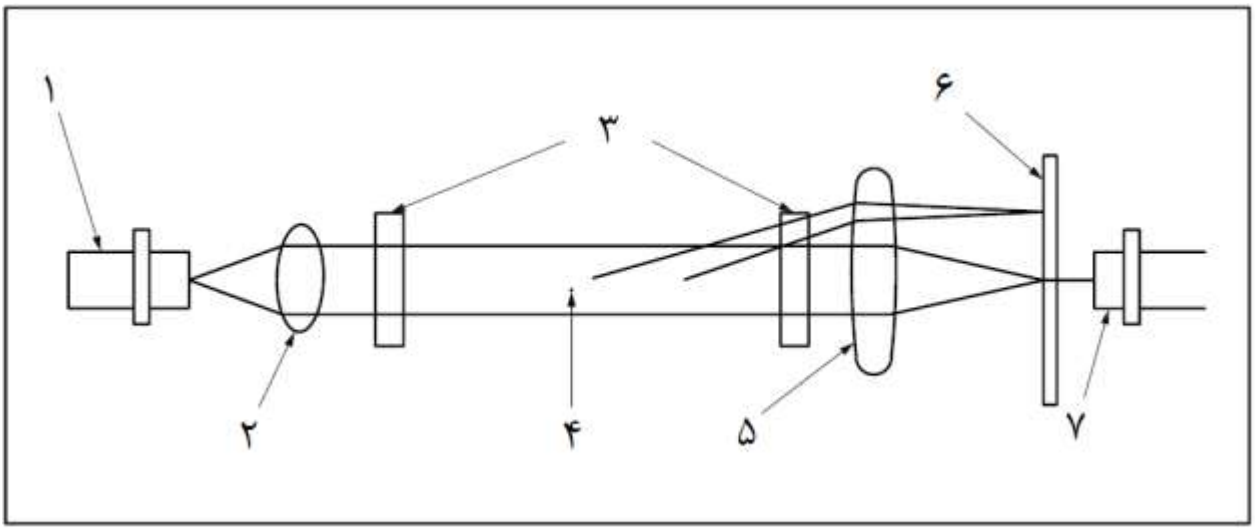
پراش لیزر فنی مبتنی بر اصل پراکندگی نور لیزر با زاویه کوچک(نظریه می) است. در زاویه‌های پراکندگی روبه‌جلو کوچک، پراش لیزر انجام شده توسط ذرات کروی کوچک اساساً مشابه پراش انجام شده توسط یک روزنه با اندازه یکسان است. در شکل ب-۱ شرح قابل درک ساده این امر نشان داده شده است. یک ذره مسیر امواج نوری را مسدود می‌کند. برخی از این امواج به ذره انتقال می‌یابند و برخی دیگر در اطراف ذره پراش می‌یابند. اشعه‌های پراش یافته در ناحیه زاویه کوچک ظاهر می‌شوند. اشعه‌های وارد شده به ذره به نحوی در تمام گستره زاویه‌ای π پراش می‌یابند که سهم آن‌ها در ناحیه زاویه کوچک، حداقل باشد. در نتیجه، پراش بر پراکندگی روبه جلوی زاویه کوچک غالب می‌شود. در این صورت ترکیب و رنگ ذره، که با شاخص‌های انکساری و به عنوان تابعی از طول موج نشان داده می‌شوند، بی تاثیر می‌شوند. با استفاده از معکوس کردن داده‌های پراکندگی نور زاویه کوچک، می‌توان اثر پراش،که شکل مشخصی دارد و تابع هوا نامیده می‌شود، اندازه ذره و غلظت را تعیین کرد. به عبارت دیگر، اگر اثر پراکندگی زاویه کوچک مشاهده شد، با معکوس کردن آن، توزیع اندازه به دست می‌آید. فرض می‌شود توزیع اندازه، غلظت کل را نشان می‌دهد. با اندازه‌گیری اثر پراکندگی در گستره دینامیکی وسیع از زاویه، می‌توان به غلظت ذراتی که در این گستره زاویه‌ای قرار دارند دست یافت.



شکل ب-۱ نمایشی از پرتوهای موازی نور برخورد کننده به ذره کروی

ب-۲ دستگاه‌ها

برای محاسبه غلظت حجمی رسوبات معلق، دستگاه‌های پراش لیزر مختلفی در بازار وجود دارد. این دستگاه‌ها با استفاده از اندازه‌گیری پرتو لیزر پراکنده شده در زاویه‌های متفاوت، غلظت ذرات رسوب معلق را محاسبه می‌کنند.



راهنما:

۱ منبع دیود لیزر
۲ نور متمرکز همراه
۳ پنجره فشار
۴ حجم نمونه‌بردار
۵ لنزهای گیرنده
۶ حلقه‌های عکاس متصل
۷ آشکارساز انتقالی

شکل ب-۲ طرح کلی فن پراش لیزر

ب-۳ محدودیت‌ها

محدودیت‌های این روش را می‌توان به‌صورت زیر شرح داد:

الف- این روش، محدود به گستره غلظت‌هایی است که بتواند اندازه‌گیری کند. زمانی که انتقال نور کمتر از ٪۳۰ باشد، تاثیرات پراکندگی چندگانه(پراکندگی مجدد نور پراکنده شده) ظاهر می‌شود. انتقال کمتر سبب می‌شود پراکندگی چندگانه‌ای که اتفاق خواهد افتاد تاثیرات قوی‌تری داشته باشد. حداکثر غلظت رسوبات مبتنی بر طول مسیر دستگاه است. در مورد انتقال‌های نوری بالا(غلظت‌های پایین) برای جلوگیری از مواجه شدن با حساسیت پایین، عموماً توصیه می‌شود انتقال نور در گستره ٪۶۰- ٪۴۰ باشد. می‌توان با استفاده از کاهش طول مسیر نوری، حد غلظت بالایی را افزایش داد.؛ اما، طول مسیر بسیار کوتاه نیز می‌تواند در اندازه‌گیری حجم، برش نسبتاً بزرگی ایجاد کند که منجر به مختل کردن توزیع اندازه درجا می‌شود.

ب- دستگاه‌ها شدیداً به لجن‌بستن بیولوژیکی حساس هستند.

یادآوری- برای برطرف کردن این محدودیت می‌توان از وسایل ضد لجن‌بستن استفاده کرد.

پ- دستگاه‌ها، گستره محدود از زاویه‌های پراکندگی و در نتیجه گستره محدود اندازه‌های رسوب را اندازه‌گیری می‌کنند. رسوب‌هایی که از حداقل و حداکثر گستره اندازه به‌ترتیب کوچکتر و بزرگتر حداکثر گستره باشند، تاثیری بر مقدار اندازه‌گیری شده ندارند. بنابراین، روش مربوط به رسوب اندازه‌گیری نشده نیاز به کالیبراسیون دارد؛ و برای تغییرات مربوط به تغییر کسر اندازه‌گیری نشده نیز نیاز به کالیبراسیون مجدد وجود دارد[۸].

ت- این فن به شدت نسبت به حباب‌های هوا حساسیت دارد.

پیوست پ
(اطلاعاتی)
تعیین غلظت رسوب معلق با استفاده از پس‌پراکنش آکوستیک

پ-۱ اصل

در دهه‌های متعدد، مشخص کردن رسوب معلق با استفاده از پس‌پراکنش و تضعیف سیگنال‌های آکوستیک در آب شرح داده شده و بهبود یافته است[۴۲][۱۶][۳۸][۲۳][۳۴]. اصول اولیه این است که امواج آکوستیک با عبور کردن یک مخلوط رسوب- آبی بسته به رسوب، سیال و مشخصه‌های دستگاه شامل فرکانس ورودی و قطر ترانسدیوسر، پراکنده خواهند شد و تضعیف می‌شوند. اندازه‌های آکوستیک پس‌پراکنش و تضعیف، تابع مشخصه‌های رسوب(غلظت، اندازه، شکل و چگالی) موجود حجمی است که پس از بررسی تاثیر مشخصه‌های دستگاه و سیال، در معرض تابش آکوستیک قرار می‌گیرد. تحقیقات اولیه در مورد جایگزین‌های آکوستیک، براساس دستگاه‌هایی انجام شد که در این دستگاه‌ها منبع صدا و گیرنده برعکس فرستنده و گیرنده‌های امروزی(ذکر شده در این‌جا و نوعاً ترانسدیوسرها) که سر هم هستند، جدا بودند. ترانسدیوسر، یک پالس آکوستیک ساطع می‌کند و سپس، بعد از طی کردن یک فاصله مناسب جهت متوقف کردن «زنگ»، همان‌طور که به روشنی در شکل پ-۱ نشان داده شده، ترانسدیوسر، پژواک پس‌پراکنش یافته از ذرات معلق در مسیر آکوستیک را دریافت می‌کند. سرعت سنج‌های داپلر آکوستیک برای تعیین سرعت ذراتی که سیگنال(سرعت آب فرض شده) مربوط به ترانسدیوسر را پس‌پراکنش می‌دهند، تغییر داپلر در فرکانس سیگنال پس‌پراکنش یافته را اندازه‌گیری می‌کنند. تضعیف و دامنه سیگنال پس‌پراکنش یافته، موجب اندازه‌گیریSSC می‌شوند.

محققانی که بر روی محیط‌های آبی و رودخانه‌ای[۳۴] کار می‌کنند، روش‌های تخمین SSC با استفاده از اندازه‌های آکوستیک را ارتقا دادند[۳۸]. روش‌ها تقریبا مانند یکدیگر هستند. این استاندارد که روش‌ها را شرح می‌دهد[۴۲]، اصولاً برای سادگی کار ایجاد شده است.

با استفاده از معادله مربوط به دستگاه تولید صوت، جایگزین‌های آکوستیک مرتبط با غلظت رسوب، شرح داده می‌شود[۴۲]. در فرمول(پ-۱)، معادله مربوط به دستگاه تولید صوت برحسب یکاهای لگاریتمی دسی‌بل نوشته شده است:

$$RL = SL - 2\,TL + TS \qquad (پ-۱)$$

که در آن:

$$2\,TL = 20\log_{10}(\psi r) + 2r(\alpha_s + \alpha_w) \qquad (پ-۲)$$

در این روش RL سطح پژواک(شدت پس‌پراکنش اندازه‌گیری شده) سیگنال دریافت شده است که معادل $10\log_{10}(p_{rms}^2)$ می‌باشد، p_{rms} میانگین(مجذور متوسط ریشه) دامنه پس‌پراکنش(در زمان فشار) دسته‌ای از

اندازه‌گیری‌های حجمی است که در معرض تابش آکوستیک قرار گرفته، SL سطح منبع سیگنال ساطع شده(عموماً در این روش ارزیابی نمی‌شود)، 2 TL اتلاف انتقال دومسیره معادل مجموع تضعیف و گسترش کروی است و TS شدت سیگنال پژواک یافته توسط ذرات موجود در حجمی است که در معرض تابش آکوستیک قرار گرفته که معادل $10\log_{10}(SSC)$ می‌باشد. در فرمول(پ-۲) ،α_s، ضریب تضعیف انرژی آکوستیک به وسیله رسوب است، α_w ضریب تضعیف انرژی به وسیله آب است، r گستره شامل ترانسدیوسر تا حجمی است که در معرض تابش آکوستیک قرار گرفته، برای انرژی غیریکنواخت گسترش یافته در میدان نزدیک به ترانسدیوسر ψ محاسبه می‌شود، r_n، هم‌چنین تحت عنوان فاصله ریلی[1] شناخته می‌شود. فرمول تخمین ψ در زیر نشان داده شده است[۳۴][۳۸]:

$$\psi_{(r)} = 1 + \frac{1}{\left(\frac{1.35}{r_n}\right) + \left(\frac{2.5r}{r_n}\right)^{3.2}} \quad (پ-۳)$$

جذب آب، α_w، تابعی از دما، شوری و فشار است و می‌توان آن را از فرمول(پ-۴) به دست آورد[۷][۱۵]:

$$\alpha_w = \frac{A_1P_1f_1f^2}{f_1^2+f^2} + \frac{A_2P_2f_2f^2}{f_2^2+f^2} + A_3P_3f^2 \quad (پ-۴)$$

قسمت اول فرمول(پ-۴) جذب صوت توسط اسید بوریک را نشان می‌دهد. قسمت دوم، جذب صوت توسط منیزیم سولفات را نشان می‌دهد. قسمت سوم جذب توسط آب خالص را نشان می‌دهد. سهم جذب توسط سایر ترکیب‌های شیمیایی ناچیز در نظر گرفته می‌شود. قسمت سوم جذب صوت ناشی از آب خالص را فراهم می‌کند. ثوابت P_1، P_2 و P_3 نشان‌دهنده اثر فشار هستند. وابستگی به فرکانس توسط فرکانس‌های f_1 و f_2 نشان داده شده است. این‌ها فرکانس استراحت اسید بوریک و منیزیم سولفات هستند؛ f فرکانس صوت است. مقدارهای A_1، A_2 و A_3 به خصیصه‌های آب مانند دما، شوری و PH وابسته هستند.

برای اغلب محیط‌های رودخانه‌ای آب‌شیرین(در عمق‌های کمتر از۱۰۰m)، تنها دما بر روی α_w تاثیر قابل توجه دارد. برخی با فرض آن‌که α_s ناچیز است از فرمول(پ-۲) استفاده می‌کنند و برخی دیگر برای تخمین α_s از فرمول(پ-۵) استفاده می‌کنند[۳۴][۳۸]:

$$\alpha_s = SSC_v\left[k(\gamma-1)^2\left\{\frac{s}{s^2+(\gamma+\tau)^2}\right\} + \frac{1}{6}(k^4a_s^3)\right]4.34 \quad (پ-۵)$$

که در آن:

SSC_v غلظت رسوب حجمی بدون بعد(SSC بر اساس چگالی تقسیم می‌شود)؛

k عدد موج ،$2\pi/\lambda$، λ طول موج برحسب cm؛

γ وزن مخصوص رسوب؛

a_s شعاع رسوب متوسط بر حسب cm؛

s برابر با $[9/(4\beta a_s)][1+1/(\beta a_s)]$؛

τ برابر با $[0.5+9/(4\beta a_s)]$، که در آن β برابر با $[w/2v]^{0.5}$ و w برابر با $2\pi f$؛

1- Rayleigh distance

f فرکانس برحسب هرتز(Hz) ؛

v گرانروی سینتیکی آب و بر حسب استوکس؛

۴٫۳۴ ضریب تبدیل نپر به دسی‌بل مربوط به تضعیف است.

قسمت اول عبارت جمع داخل پرانتزها تضعیف آکوستیک ناشی از اتلاف ویسکوزیته و دومین قسمت تضعیف آکوستیک ناشی از اتلاف پراکندگی است.

به وسیله پروفایلینگی که از سرعت سنج‌های آکوستیک بهره می‌برد می‌توان در تخمین α_s بهبود مهمی ایجاد کرد[۳۹].

پس‌پراکنش‌های نسبی(RB) به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$RB = RL + 2TL \quad (پ-۶)$$

مقدار فوق، معادل پراکندگی کلی اتفاق افتاده توسط ذرات معلق است. در نتیجه $\log_{10}(SSC)$ تابعی از RB است و

$$SSC = 10^{(A + B \times RB)} \quad (پ-۷)$$

ضرایب A و B با استفاده از رگرسیون مربوط به SSC فیزیکی جفتی و اندازه‌گیری‌های آکوستیک ارزیابی می‌شوند.

پ-۲ دستگاه‌ها

سرعت‌سنج‌های داپلر آکوستیک و پروفایلرهای جریان در بازار موجود هستند و به‌طور گسترده در آزمایشگاه و کاربردهای محیطی برای محاسبه پروفایل‌های سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعدادی ترانسدیوسر چندگانه با آرایش ثابت، سرعت‌های محوری که برای دست یافتن به بردار سرعت جریان دو یا سه بعدی استفاده می‌شوند، را اندازه‌گیری می‌کنند. ترانسدیوسر(نوعاً پیزوالکتریک[1]) وسیله‌ای است که ولتاژ را به یک پالس تولیدکننده موج صوتی و بالعکس، تبدیل می‌کند.

سیگنال‌های ولتاژ برگشتی براساس فاصله زمانی به صورت عددی در آمده و تفکیک می‌شوند و در گستره‌ها و دسته‌هایی قرار می‌گیرند که به موجب آن می‌توان پروفیل سرعت را محاسبه کرد. ADCP مانند یک دستگاه اندازه‌گیری سرعت، دامنه پس‌پراکنش را به‌صورت یک نمایشگر کیفی داده‌ها، ثبت می‌کند. اندازه‌گیری سرعت نیازمند آن است که اندازه پس‌پراکنش اندازه‌گیری شده از صدای آکوستیک محیطی بزرگ‌تر باشد. حداکثر گستره ADCP، اگر مرز را قطع نکند، به تضعیف سیگنالی وابسته است که خود آن تابعی از آب، رسوب و مشخصه‌های دستگاه است. می‌توان از آکوستیک‌سنج‌هایی به‌صورت مخصوص برای مشخصات رسوب ساخته و از فرکانس‌های چندگانه استفاده می‌کنند، بهره برد.

1- Piezoelectric

پ-۳ محدودیت‌ها

محدودیت‌های این روش را می‌توان به‌صورت زیر شرح داد:

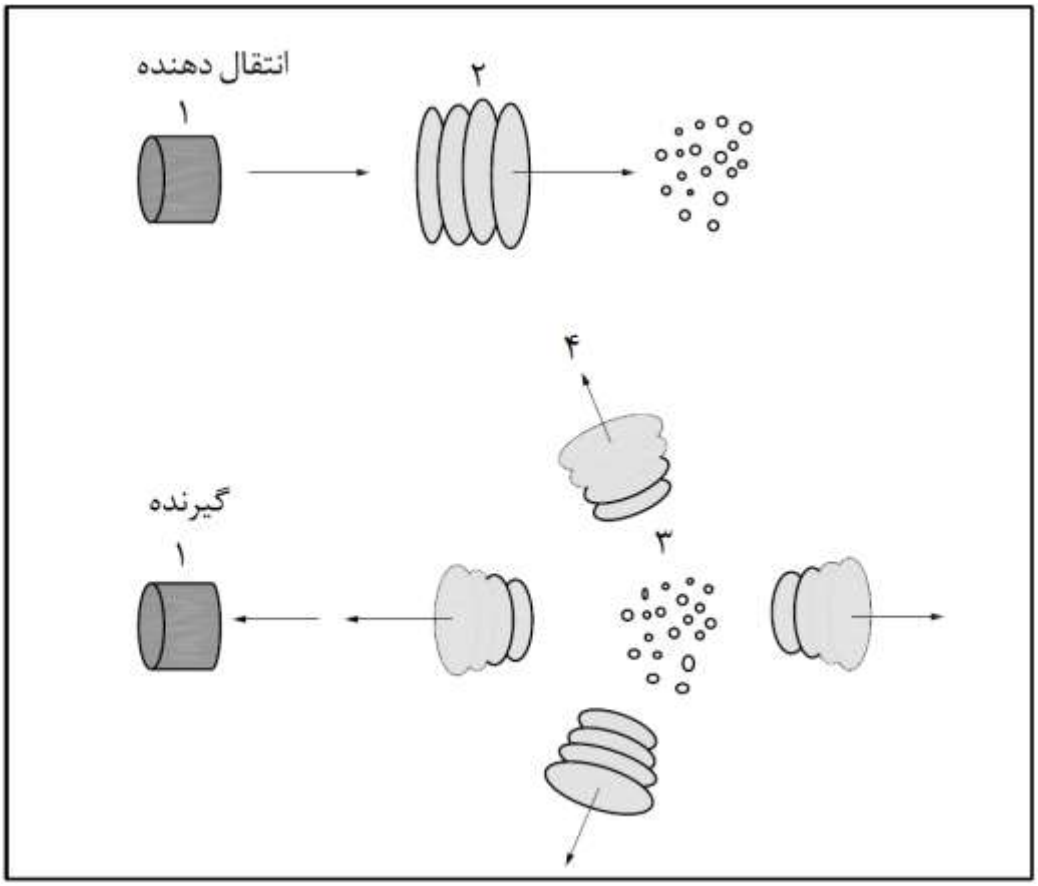
الف- اندازه‌های آکوستیک تحت تاثیر تغییرات توزیع اندازه ذره قرار دارند.

ب- روش‌ها بسیار پیچیده هستند و تا این زمان کم‌تر برای نورهای کپه‌ای یا LD کمتر تعمیم داده شده‌اند.

پ- در مورد غلظت‌های پایین، حدوداً کمتر از ۱۰mg/l، درستی داده‌ها محدود است.

ت- بسته به روش مورد استفاده، ممکن است تعیین تضعیف سیگنال به دلیل رسوب، مشکل باشد.

ث- این فن به شدت به حباب‌های هوا حساسیت دارد.



راهنما:

۱ ترانسدیوسر

۲ صدای آکوستیک انتقال داده شده

۳ پراکنده‌سازها

۴ انرژی آکوستیک بازتاب شده

یادآوری- منتشر شده با اخذ مجوز از سیمپسون سال ۲۰۰۱ میلادی([۳۶])

شکل پ-۱ پس‌پراکنش ناشی از ذرات معلق

پیوست ت
(اطلاعاتی)
کتاب‌نامه

[1] ISO/TS 3716, Hydrometry — Functional requirements and characteristics of suspended sediment samplers

[2] ISO 4365, Liquid flow in open channels — Sediment in streams and canals — Determination of concentration, particle size distribution and relative density

[3] ISO/TR 9212, Hydrometry — Methods of measurement of bedload discharge

[4] Agrawal Y.C., & Pottsmith H.C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. Mar. Geol. 2000, 168 pp. 89–114

[5] Agrawal Y.C. Whitemore, Amanda, Mikkelsen, O.A., and Pottsmith, H.C. (2008). Light scattering by random shaped particles and consequences on measuring suspended sediments by laser diffraction, Journal of Geophysical Research, v. 113, C04023, 11 p

[6] Agrawal Y.C., & Pottsmith H.C. Laser Diffraction Method: Two New Sediment Sensors, Sequoia Scientific, Inc., 2700 Richards Road, Bellevue, WA 98005

[7] Ainslie M .A., & McColm J .G. A s implified formula for v iscous a nd chemical absorption i n sea water. J. Acoust. Soc. Am. 1998, 103 (3) pp. 1671–1672

[8] Andrews S .W., N over D.M., Reuter J .E., S chladow S.G. Limitations of laser diffraction for measuring fine particles in oligotrophic systems: Pitfalls and potential solutions. Water Resour. Res. 2011, p. 47

[9] Boss E ., S lade W.H., Behrenfeld M ., D all'Olmo G . A cceptance a ngle e ffects o n t he beam attenuation in the ocean. Opt. Express. 2009, 17 pp. 1535–1550

[10] Clavano W.R., Boss E., Karp-Boss L. Inherent Optical Properties of Non-Spherical Marine-Like Particles - From Theory to Observations. Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev. 2007, 45 pp. 1–38 [CRC Press]

[11] Clifford N.J., Richards K.S., Brown R.A., Lane S.N. 1995). "Laboratory and Field Assessment of an Infrared Turbidity Probe and its Response to Particle Size and Variation in Suspended Sediment Concentration." Hydrological Sciences. 40(6):771-791. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 – May 2, 2002, Reno, NV

[12] Daniel G. Wren, Roger A. Kuhnle, 2002. Surrogate Techniques For Suspended sediment Measurement, Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 – May 2, 2002, Reno, NV

[13] Downing J. Twenty-five years with OBS sensors—the good, the bad, and the ugly. Continental Shelf Research, 2006, 20 p.

[14] Elizabeth L. Creed, Anne M. Pence, Kelly L. Rankin, Inter-Comparison of Turbidity and Sediment Concentration Measurements from an ADP, an OBS-3, and a LISST

[15] Fisher F.H., & S immons V.P. S ound absorption i n s ea w ater. J. Acoust. Soc. Am. 1 977, 62 (3) pp. 558–564

[16] Flammer G.H. 1962), Ultrasonic measurement of suspended sediment. U.S.G.S. Bul. 1141–A, 48 pp

[17] Foster I.D.L., Millington R ., G rew R .G. 1 992) The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield

estimation. In: Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins (ed. by J. Bogen, D.E. Walling & T.J. Day) (Proc. Oslo Symp., August 1992), 51-62. IAHS Publ. 210

[18] Gary R. Wall, Elizabeth A. Nystrom, and Simon Litten, 2006. Use of an ADCP to Compute Suspended– Sediment Discharge in the Tidal Hudson River, New York, Scientific Investigations Report 2006–5055, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey

[19] Gartner J.W. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. Mar. Geol. 2004, 211 (3/4) pp. 169–187

[20] Gartner J.W., Cheng R.T., Wang P.F. and Richter, Kenneth. Laboratory and field evaluations of the LISST-100 instrument for suspended particle size determinations. Mar. Geol. 2001, 175 (1-4) pp. 199–219

[21] Gartner, J.W., and Gray, J.R. (2003). Summary of suspended sediment technologies considered at the interagency workshop on turbidity and other sediment surrogates. Federal Interagency Workshop on Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research, September 9-11, 2003, Flagstaff, Arizona, 9 p. Available (2014-01-31) at (http://water.usgs.gov/osw/techniques/sediment/sedsurrogate2003workshop/gartner_gray .pdf)

[22] Gray J. R ., & Glysson G. D. (2003) Attributes for a sediment monitoring instrument and analysis research program . In Proceedings of the Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop, September 9 – 11 2003, Flagstaff, Arizona, 6pp.,

[23] Gray J .R., & G artner J.W. 2009) Technological advances in suspended - sediment surrogate monitoring. Water Resources Research, 45, W00D29, doi: WR 007063, 20 pp doi:10.1029/2008

[24] Gray J.R., & Melis T.S. Patiño, Eduardo, Larsen, M.C., Topping, D.J., Rasmussen, P.P., and Figueroa- Alama, Carlos, 2003, U.S. Geological Survey research on surrogate measurements for suspended sediment, in, Renard, Kenneth, G., McElroy, Stephen A., Gburek, William J., Canfield, H. Evan, and Scott, Russell L., eds., Proceedings of the 1st Interagency Conference on Research in Watersheds: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, October 27-30, Benson, Arizona, p. 95-100

[25] Gray J.R., & Gartner J.W. 2010, Overview of selected surrogate technologies for high-temporal resolution suspended sediment monitoring: Proceedings of the Joint Federal Interagency (9th Sedimentation, and 4th Hydrologic Modeling) Conferences, June 27–July 1, Las Vegas, Nevada, 12 p., available at: http://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/ _Gray_surrogates_3_3_2010_paper. Pdf

[26] Gray J.R. ed. 2005, Proceedings of the Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop, September 9-11, 2003, Flagstaff, Arizona: U.S. Geological Survey Circular 1276, 46 p.; also available at http://water.usgs.gov/pubs/circ/2005/circ1276/ 46 p. also available at http://water.usgs.gov/pubs/circ/2005/circ1276/. Appendix 4 is available only at: http://water.usgs.gov/osw/techniques/sediment/sedsurrogate2003workshop/listofpapers. html

[27] IAEA-TECDOC-1461 (2005), Fluvial Sediment Transport: Analytical Techniques for Measuring Sediment Load, IAEA, VIENNA, 2005 http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1461_ web.pdf

[28] International Organization for Standardization. Water-quality determination of turbidity, method 7027. International Organization for Standardization, 1999, 10 p.

[29] Downing J. Twenty-five Years with OBS Sensors, The Good, the Bad, and the Ugly, D & A Instrument Company, 24 Seton Road, Port Townsend, Washington, 98368 In. Cont. Shelf Res. 2006, 26 pp. 2299– 2318

[30] Downing J. 2006. OBS-5+ High Sediment-Concentration Monitor Instruction Manual. D & A Instrument Co.

[31] John R. Gray, Jeffrey W. Gartner, 2006. Overview Of Selected Surrogate Technologies For Continuous Suspended sediment Monitoring, Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC), April2-6, 2006, Reno, NV, USA. pp. 337 – 344

[32] Lewis J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation Water Resour. Res. 1996, 32 (7) pp. 2299–2310

[33] Lewis J. Turbidity-controlled sampling for suspended sediment load estimation. Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances, IAHS Publication. 2003, 283 pp. 13–20

[34] Mark N. Landers, 2010. Review Of Methods To Estimate Fluvial Suspended Sediment Characteristics From Acoustic Surrogate Metrics, 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010

[35] Patrick P. Rasmussen, John R. Gray, G. Douglas Glysson, and Andrew C. Ziegler Guidelines and Procedures for Computing Time-Series Suspended sediment Concentrations and Loads from In Stream Turbidity-Sensor and Streamflow Data, Techniques and Methods 3–C4, U.S. Geological Survey

[36] Simpson M.R. (2001) Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler, U.S.G.S. Open File Report 01-1, 123 pp

[37] Sutherland T.F., Lane P.M., Amos C.L., Downing J. Calibration of Optical Backscatter Sensors for Suspended Sediment of Varying Darkness Levels. Mar. Geol. 2000, 162 pp. 587–597

[38] Thorne P.D., & Hanes D.M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. Cont. Shelf Res. 2002, 22 pp. 603–632

[39] Topping D .J., W right S .A., M elis T .S., R ubin D.M. 2007), High-resolution measurement of suspended sediment concentrations and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using multi-frequency acoustic system, in Proceedings of the 10th International Symposium on River Sedimentation, Moscow, Russia, 1-4 August, 330-339

[40] U.S. Environmental Protection Agency. 1999, Guidance manual for compliance with the interim enhanced surface water treatment rule—Turbidity provisions: Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, EPA 815-R-99-010, variously paged

[41] Urick R .J. T he absorption of sound in suspensions of irregular particles. Acoustical Society of America. 1948, 20 pp. 283–289

[42] Urick R.J. Principles of underwater sound. McGraw Hill, N. Y., Second Edition, 1975, 384 p.

[43] van de Hulst H.C. 1957), Light Scattering by Small Particles, Wiley, New York, 1957, Dover Publications, Inc., New York, 1981

[44] Wren D.G., Barkdoll B.D., Kuhnle R.A., Derrow R.W. Field Techniques for Suspended-Sediment Measurement. J. Hydraul. Eng. 2000, 126 (2) pp. 97–104