

## Field Assessment of Automatic Device Performance for Estimating the River Suspended Sediment Concentration Based on Opto-Electronic Technology

S.H. Sadeghi<sup>1\*</sup>, V.S. Sadeghi<sup>2\*</sup>, S.V. Sadeghi<sup>3</sup>, P.S. Sadeghi<sup>4</sup>, S.P. Sadeghi<sup>5</sup>, H.S. Sadeghi<sup>6</sup>, A. Katebikord<sup>7</sup>, N. Hassanzadeh<sup>8</sup>, D. Jalili<sup>9</sup>, S. Yavari<sup>10</sup>, and M. Zabihi Seilabi<sup>11</sup>

### Abstract

Nowadays, issues related to soil erosion are one of the most critical issues and one of the major concerns in watershed management. Accordingly, knowledge on soil erosion process at watershed scale needs proper, suitable, accurate, and desirable temporal resolution data collection using appropriate device. An innovative device is designed and manufactured through this research for automatic sampling and measuring suspended sediment concentration. This aimed at a better understanding of the processes of soil erosion and sediment yield through better time-distributed measurements. The background of studies and research related to the project has been reviewed worldwide and based on previous experiences, manufacturing the mechanical part of the system was carried out and completed. Also, the necessary laboratory practices for designing, formulating, and simulating the electronic parts were performed. Numerous tests and attempts were made to optimize the mechanical and opto-electronic parts based on determining different arrangements and sources of light. The field test of the device in several rivers in the northern Iran indicated a high agreement of more than 93.25% between the observed and estimated suspended sediment concentrations. The designed sampler is expected to provide suitable estimates on concentration of suspended sediment in the dominant range in watercourses with acceptable, affordable cost and energy, particularly in special conditions such as floods, in the entire day and night hours, and even for remote areas.

**Keywords:** Hydrometry, Sediment Measurement, Sediment Load, Water-Based Monitoring Management, Water Sampler.

Received: August 11, 2022

Accepted: November 27, 2022

## ارزیابی میدانی عملکرد دستگاه خودکار تخمین غلظت رسوب معلق رودخانه مبتنی بر الکترونیک نوری\*\*

سیدحمیدرضا صادقی<sup>۱\*</sup>، وحیده السادات صادقی<sup>۲\*</sup>، سیدوحید صادقی<sup>۳</sup>، پدیده السادات صادقی<sup>۴</sup>، سیدپارسا صادقی<sup>۵</sup>، حمیده السادات صادقی<sup>۶</sup>، آزاده کاتبی کرد<sup>۷</sup>، نگار حسن زاده<sup>۸</sup>، داریوش جلیلی<sup>۹</sup>، سپهر یآوری<sup>۱۰</sup> و مصطفی ذبیحی سیلابی<sup>۱۱</sup>

### چکیده

امروزه مباحث مربوط به فرسایش خاک به عنوان یکی از بحث‌های مهم در مدیریت آبخیز مطرح است. بر همین اساس درک فرآیند فرسایش خاک در سطح آبخیزها مستلزم جمع‌آوری اطلاعات مناسب، دقیق و با فاصله زمانی مطلوب با استفاده از وسایل مناسب اندازه‌گیری است. حال با توجه به اهمیت برآورد رسوب معلق در کلیه مطالعات هیدرولوژی و هیدرولیک و طراحی‌های مبتنی بر آن‌ها، طی طرح حاضر مبادرت به ساخت یک دستگاه اولیه نمونه‌بردار و برآوردکننده غلظت رسوب معلق خودکار به عنوان یکی از ابزارهای مهم مطالعات رسوبات رودخانه‌ای شد. تا از این طریق زمینه‌های درک بیشتر فرآیندهای حاکم فرسایش خاک و تولید رسوب از طریق اندازه‌گیری لازم با دقت زمانی مناسب فراهم شود. در همین راستا و بر اساس تجربه‌های پیشین، اقدامات اجرایی لازم برای بهینه‌سازی بخش‌های مکانیکی و الکترونیک نوری مبتنی بر تعیین نوع و منبع نور، آرایه و چیدمان بخش‌های مختلف انجام شد. آزمون میدانی دستگاه ساخته شده در چند رودخانه در شمال کشور نیز بر تطابق بالای داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی رسوب معلق با ضریب هم‌بستگی بیش از ۹۳/۲۵ درصد در دامنه غلظتی موردبررسی دلالت دارد. پیش‌بینی می‌شود نمونه‌بردار طراحی‌شده، تخمین‌های مناسب برای ارزیابی غلظت رسوب معلق در دامنه غالب در جریان‌های آبی با هزینه و نیروی قابل قبول و به‌ویژه در شرایط خاص، تمام ساعات شبانه‌روز و حتی مناطق دوردست را مهیا نماید.

**کلمات کلیدی:** آب‌سنجی، اندازه‌گیری رسوب، بار رسوبی، نمونه‌بردار آب، مدیریت پایش محور آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۹/۶

1- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: [sadeghi@modares.ac.ir](mailto:sadeghi@modares.ac.ir)

2- Assistant Professor, Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran. E-mail: [vs.sadeghi@iut.ac.ir](mailto:vs.sadeghi@iut.ac.ir)

3- M.Sc. Graduate in Photonics, Teacher at Department of Education, Fereidan, Iran.

4- M.Sc. Graduate in Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

5- B.Sc. Student, Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

6- B.Sc. Graduate in Industrial Drawing, Teacher at Department of Education, Khansar, Iran.

7- Ph.D. Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

8- Expert, Rainfall Simulation and Soil Erosion Laboratory, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

9- Expert, Mechanical Engineerin Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran.

10- B.Sc. Graduate, Electrical and Computer Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran.

11- Ph.D. Student, Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.3.12.4](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.3.12.4)

۱- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران.

۳- کارشناس ارشد فوتونیک و دبیر آموزش پرورش شهرستان فریدن، ایران.

۴- کارشناس ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۵- دانشجوی کارشناسی مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۶- کارشناس نقشه‌کشی صنعتی و دبیر آموزش پرورش شهرستان خوانسار، ایران.

۷- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۸- کارشناس آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۹- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران.

۱۰- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی برق، گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ایران.

۱۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

\*- نویسنده مسئول

\*\* لازم به ذکر است نویسندگان با نام‌انوادگی صادقی، اعضای فعال، تخصصی و در عین حال رسمی یک پروژه پژوهشی بین‌رشته‌ای مورد اشاره در بخش قدردانی مقاله هستند.

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۱ امکان‌پذیر است.



و زمان بارش، مقدار رسوب در دسترس، سرعت انتقال جریان، تشکیلات زمین‌شناسی و پوشش گیاهی است. بنابراین پیش‌بینی و شبیه‌سازی چگونگی تولید رواناب و رسوب دشوار خواهد بود (USEPA, 2000; Seeger et al., 2004; Gao and Josefin, 2012). در همین راستا یکی از مراحل مهم در نمونه‌برداری رسوب، انتخاب مناسب‌ترین تجهیزات و امکانات است (Eder et al., 2010; Sadeghi et al., 2018). انتخاب دستگاه‌های اندازه‌گیری با توجه به طیف گسترده آن‌ها، به عوامل موردسنجش، امکانات موجود شامل کارکنان متخصص و کارآموده، اتومبیل صحرائی، قایق، ادوات و تجهیزات اندازه‌گیری به همراه استفاده از فن‌آوری و دقت موردنظر وابسته است (Pavanelli et al., 2005a,b). شناخت اولیه از محدوده عملکرد و دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری در هر رده اعم از بار معلق، بار بستر<sup>۷</sup> و مواد بستر<sup>۸</sup> می‌تواند کاربر را به مسیر درستی رهنمون سازد (Rastgar and Habibi, 2010; Sadaei and Soleimani, 2013; Asadi and Fathzadeh, 2018; Akhordzadeh, 2018) به نظر می‌رسد، علاوه بر شناخت فیزیکی از هر سامانه اندازه‌گیری، تجربه عملی آشنایی با دستگاه، یک امر مهم تلقی شده و باید قبل از انجام یک پروژه اندازه‌گیری، به‌درستی از صحت عملکرد آن اطمینان حاصل کرد.

دستگاه‌های اندازه‌گیری بار معلق، بر اساس دو روش نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مستقیم<sup>۹</sup> و غیرمستقیم<sup>۱۰</sup> غلظت مواد معلق طراحی و ساخته شده‌اند (Barzegaribanadkoki et al., 2017). روش مستقیم بر مبنای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مستقیم متوسط زمانی غلظت رسوب در حال انتقال در یک نقطه معین (پیوسته-نقطه‌ای<sup>۱۱</sup>) یا در امتداد یک عمق معین (پیوسته-عمقی<sup>۱۲</sup>) است. طرز نمونه‌برداری بدین صورت است که نمونه‌بردار در امتداد یک عمق معین به‌صورت عمودی و با سرعت ثابت حرکت کرده و نمونه‌برداری می‌کند. ازجمله این نمونه‌بردارها، می‌توان به بطری‌ها و نمونه‌بردارهای تله‌ای و پمپی اشاره کرد. حال آن‌که روش غیرمستقیم بر پایه نمونه‌برداری و اندازه‌گیری غیرمستقیم متوسط زمانی غلظت استوار است. طبیعی است در استفاده از این روش فرضیات اغماض از نوسان سرعت دانه رسوب و غلظت رسوب در ارتفاع (عمق) و تساوی سرعت دانه‌های رسوب و سیال با یکدیگر مدنظر قرار می‌گیرد. روش‌های مختلف غیرمستقیم تخمین رسوب<sup>۱۳</sup> به مواردی اطلاق می‌شود که بدون تماس مستقیم و یا نمونه‌برداری و تبعیت از شیوه‌های معمول و سنتی اندازه‌گیری رسوب، مقدار آن را با کمک یک سری ویژگی‌ها و یا مؤلفه‌های منحصربه‌فرد تخمین زد (Pavanelli et al., 2005a,b; Lobo and Lopes, 2018).

امروزه مباحث مربوط به فرسایش خاک<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از بحث‌های مهم در مدیریت آبخیزها<sup>۲</sup> مطرح است، به‌طوری‌که به‌عنوان یکی از نگرانی‌های مهم طی سال‌های اخیر در اغلب کشورها خصوصاً کشورهای درحال توسعه مدنظر قرار گرفته است. جدا شدن ذرات خاک از بستر اصلی خود، به‌عنوان اولین نکته قابل‌تأمل در مباحث مربوط به فرسایش خاک است. از طرفی کمی کردن فرآیندهای مرتبط با فرسایش خاک یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در منابع طبیعی و طرح‌های محیط زیست است (Sadeghi and Singh, 2017). اطلاع از چگونگی فرسایش و توانایی حمل رسوب<sup>۳</sup> در آبراهه‌های مختلف حوضه ازجمله مواردی است که در هر پروژه هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مدنظر قرار می‌گیرد (Saeidi and Sadeghi, 2010; Kabolizadeh et al., 2022). از طرفی برای برنامه‌ریزی جامع حفاظت از منابع آب‌و‌خاک از طریق انتخاب مدیریت اراضی و عملیات کنترل فرسایش در مزارع و مراتع، اطلاع از فرآیندهای مختلف حاکم و از جمله فرسایش خاک و تولید رسوب در بوم‌سازگان‌های<sup>۴</sup> مختلف در مقیاس اجرایی و مدیریتی آبخیزها ضروری است (Sadeghi and Saeidi, 2009; Saeidi and Sadeghi, 2010; Sadeghi and Zakeri, 2015; Sadeghi and Singh, 2017; Mohammadi et al., 2018; Sadeghi et al., 2018; Rymaszewicz et al., 2018; Zheng, 2018; Hatefi and Sadeghi, 2021; Mirchooli et al., 2021; Sadeghi et al., 2021; Kabolizade et al., 2022).

از آنجایی که درک و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به فرآیند فرسایش خاک در سطح حوضه‌های آبخیز مستلزم جمع‌آوری اطلاعات مناسب، دقیق و با دقت زمانی مناسب است؛ لذا استفاده از وسایل مناسب اندازه‌گیری از ضروریات اساسی محسوب می‌شود. بر همین اساس اندازه‌گیری بار معلق<sup>۵</sup> در مناطق مختلف و به‌ویژه در زمان‌های خاص و مصادف با مواقع فاقد امکانات و نیز سیلابی از موارد حائز اهمیت خاص در کشورهای درحال توسعه مثل ایران تلقی می‌شود. یکی از مراحل مهم در نمونه‌برداری رسوب<sup>۶</sup>، انتخاب مناسب‌ترین تجهیزات و امکانات است. برآورد رسوب‌دهی رودخانه‌ها در موارد متعددی نظیر طراحی سازه‌های آبی، مهار سیلاب و آبیگری از رودخانه‌ها حائز اهمیت بسیار است (Arabkhedri, 2001; Sadeghi and Saeidi, 2009; Saeidi and Sadeghi, 2010; Mohammadi et al., 2018; Sadeghi et al., 2018; Kabolizadeh et al., 2022). از طرفی میزان غلظت رسوبات معلق یکی از مهم‌ترین متغیرهای مهم در برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها به‌شمار می‌رود. همچنین مقدار رسوب معلق آبخیز تابعی از مجموعه پیچیده‌ای از عوامل مختلف از جمله نحوه توزیع

از مجموع این روش‌ها می‌توان به روش‌های مختلف مبتنی بر نورشناسی<sup>۱۴</sup> مشتمل بر مطالعه حوزه نور مرئی<sup>۱۵</sup>، فرورسرخ<sup>۱۶</sup>، ماوراء بنفش<sup>۱۷</sup> و امواج الکترومغناطیسی<sup>۱۸</sup> اشاره کرد. این روش مبتنی بر کاربرد طیف نور<sup>۱۹</sup> مرئی با طول موج بین ۳۸۰ تا ۷۴۰ نانومتر و بسامد بین ۴۳۰ تا ۷۷۰ تراهرتز نیز است (Driggers, 2003). اساس کاربرد این روش‌ها اساساً بر پراکندگی<sup>۲۰</sup> و بازپراکنش نوری<sup>۲۱</sup> و قانون مبنایی Beer-Lambert استوار است (Saleh, 2019). مفاهیم مرتبط با نورشناسی بعضاً اساس ابزارهای اندازه‌گیری کدورت<sup>۲۲</sup> را تشکیل می‌دهند. ابزار اندازه‌گیری کدورت بر دو نوع هستند. روش سنجش انعکاس پرتو را سنجش ابرناکی یا نفلومتری<sup>۲۳</sup> و روش کاهش توان پرتو را کدورت‌سنجی یا توربیدی‌متری<sup>۲۴</sup> می‌خوانند. عملکرد نفلومتر مرتبط با شدت نور پراکنده شده توسط نمونه است که با مقدار ماده معلق در مسیر نور، متناسب است هرچند تأثیر اندازه، شکل و شکست شاخص ذرات پراکندگی نیز مهم است. نفلومتر معمولاً دقت و حساسیت بهتری نسبت به توربیدی‌متر دارد و به‌طور معمول برای نمونه‌های با کدورت کم حاوی ذرات کوچک استفاده می‌شود. یک توربیدی‌متر، که گاهی اوقات انتقال‌سنج<sup>۲۵</sup>، جذب‌سنج<sup>۲۶</sup> یا کدورت‌سنج<sup>۲۷</sup> نیز نامیده می‌شود، شدت پرتو پس از عبور از نمونه مدنظر را اندازه می‌گیرد، یعنی مقدار انتقال‌یافته باقی‌مانده را کمی می‌کند. مواد معلق در مسیر نور باعث پراکندگی و جذب بخشی از انرژی نور می‌شود، که باعث کاهش نور رسیده به سلول نوری<sup>۲۸</sup> می‌شود. این ابزارها بیش‌تر برای نمونه‌های نسبتاً کدر با ابعاد زیاد ذرات پراکندگی نسبت به طول موج استفاده شده مناسب هستند. برخی از ابزارهای جدید، به نام کدورت‌سنج‌های نسبی، دارای سامانه‌های اندازه‌گیری نور هستند که نور به‌صورت پراکندگی در اطراف و نیز روبه‌جلو منتقل می‌شود تا کدورت به‌صورت نسبت سیگنال پراکنده و منتقل شده به جلو سنجیده می‌شود و دارای چند مزیت افزایش عمر حس‌گر، کاهش تأثیر تغییرات دما بر عملکرد دستگاه و جبران پیری نوری<sup>۲۹</sup> است (Lawler, 2005).

پیشرفت‌های اخیر شامل کدورت سنج‌های مبتنی بر لیزر، بازتاب‌سنج‌ها<sup>۳۰</sup> یا سامانه‌های فیبر نوری است. همچنین روش‌های بازپراکنش نوری<sup>۳۱</sup> (OBS) برای استفاده در علوم هیدرولوژی و اقیانوس‌شناسی محبوب شده و توسعه‌یافته است. این ابزار کدورت آب را از طریق پایش نور مادون‌قرمز ضربانی<sup>۳۲</sup> منتشر شده از OBS مورد استفاده تعیین می‌کند. وابستگی شدیدی بین پراکندگی و طول موج نور وجود دارد. در نتیجه، برای یک آشکارساز معین، منابع نوری با طول موج<sup>۳۳</sup> کوتاه حساس‌تر هستند و بنابراین بیش‌تر برای تشخیص

ذرات کوچک مفیدند. برعکس، طول موج‌های طولانی‌تر برای تشخیص نمونه‌های حاوی ذرات بزرگ (به‌عنوان مثال، رسوب در بسیاری از سامانه‌های علوم زمین یا محیط‌زیست) مناسب‌ترند. لذا رابطه منبع-آشکارساز می‌تواند به‌طور گسترده‌ای بین ابزارهای مختلف متفاوت باشد و طبعاً بررسی نمونه مشابه توسط دستگاه‌های مختلف قرائت‌های مختلف به دست می‌دهد.

(Novo et al. 1989) نیز در پژوهشی از روش انعکاس طیفی برای اندازه‌گیری رسوب استفاده کردند. اساس کار این روش استفاده از یک اسپکتروفتومتر و یک منبع نوری بود. این روش در زمینه بررسی رسوب دریاها به دلیل در نظر گرفتن محدوده وسیع به کار گرفته شد. پژوهش‌گران دیگر از جمله (Ludwing and Hanes 1990) و (Green and Boon 1993) نیز از روش بازتاب نوری استفاده کردند. (Agrawal and Pottsmith 1994) از روش انکسار نور لیزری برای اندازه‌گیری رسوب معلق به کار گرفتند. اندازه ذرات رسوب را با تغییر زاویه نور برخورداری تعیین کردند. (Black and Rosenberg 1994) به‌منظور تعیین میزان رسوب معلق از روش بازتاب نوری استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد روش استفاده از OBS یا بازتاب نوری برای ذرات ۲۰۰ تا ۴۰۰ میکرون بهترین نتیجه را دارد. Clifford et al. (1995) روش عبور نور را به کاربرند. در این روش نور از یک منبعی ساطع شده و به نمونه آب حاوی رسوب برخورد می‌کند و در طرف دیگر یک حس‌گر حساس، میزان نور عبوری از توده را جذب می‌کند که این میزان نور وابسته به میزان گل‌آلودگی آب است. در همین ارتباط خطای روش غیرمستقیم در تخمین رسوب انتقالی حدود ۱۰ درصد از مقدار اندازه‌گیری شده توسط روش مستقیم گزارش شده است (Lawler, 2005). (Navaratil et al. 2011) در رودخانه Galaber در فرانسه با استفاده از روش نمونه‌بردار نوری به اندازه‌گیری رسوب معلق پرداختند. ایشان محدوده غلظت رسوب بین ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را بررسی و ضریب همبستگی به‌دست آمده بین رسوب برآوردی و رسوب واقعی را ۰/۹۳ گزارش کردند. (Bian et al. 2012) با استفاده از روش نمونه‌بردار نوری محدوده غلظت رسوب  $SCS < 524/3$  (میلی‌گرم بر لیتر) در رودخانه زرد چین را بررسی و ضریب همبستگی بین رسوب تخمینی و واقعی را ۰/۹۹۵ گزارش دادند. همچنین، (Haiman et al. 2014) نیز در رودخانه دانوب با استفاده از روش نوری به نمونه‌برداری رسوب معلق در بازه غلظت کم‌تر از ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر پرداختند. ضریب همبستگی ۰/۹۳ بین رسوب برآوردی و واقعی محاسبه شد. (Merten et al. 2014) در پژوهشی به مطالعه در مورد اثر غلظت

رسوب معلق و اندازه دانه روی حس گر کدورت نوری پرداخته و دریافتند که واسنجی کدورت سیگنال باید درجا انجام شود و می توان سیگنال کاهش کدورت ناشی از شن را در صورت تخمین نسبت شن و ماسه در SSC اصلاح کرد. (Chelotti et al., 2019) به تجزیه و تحلیل فضا-زمانی رسوبات معلق<sup>۳۴</sup> در مخزن کم غلظت توسط سنسور از دور پرداخته و دریافتند که استفاده از داده های ماهواره ای برای تخمین اطلاعات SSC در مخازن کم عمق مناسب است. Pomázi and Baranya (2020) در مطالعه ای مزایا و محدودیت های دستگاه های نوری و صوتی و ارزیابی مقایسه جامعی از روش های غیرمستقیم را بررسی کردند. در این مطالعه از لیزر تابشی مبتنی بر LISST-Portable|XR و یک ابزار نوری مبتنی بر مادون قرمز، توربیدیته متر VELP TB1، حس گر ISST-ABS<sup>۳۵</sup> مبتنی بر رفتار صوتی و یک نیمرخ جریان داپلر صوتی Teledyne RD Instruments 1200 (ADCP) kHz استفاده کردند. واسنجی تمام روش های غیرمستقیم بر اساس ۱۰۰۰ نمونه از رودخانه دانوب در مجارستان در محدوده وسیعی از غلظت رسوب معلق انجام شد.

در ایران نیز با توجه به بررسی های انجام شده توسط گروه پژوهش گران حاضر، تاکنون دو دستگاه اندازه گیر رسوبات معلق بر اساس ابزارهای نوری ساخته شده است. اولین دستگاه معرفی شده دستگاهی است که بر اساس پراکنش نور مادون قرمز ساخته شده است (Siadatmoosavi et al., 2015). عملکرد این دستگاه به شرط مشخص بودن نوع خاک ذرات رسوبی مناسب بوده و برای سنسور میزان رسوب معلق با توجه به نوع رسوب مورد نظر نیاز به واسنجی دارد و لذا استفاده از آن در شرایط واقعی و به ویژه شرایط فاقد اطلاعات قبلی از نوع رسوبات معلق دچار مشکل خواهد بود. دومین دستگاه موسوم به دستگاه اندازه گیری گل آلودگی جریان رودخانه است که بر اساس میزان عبور نور ارسالی توسط فرستنده نوری و جذب آن توسط گیرنده نوری عمل می کند (Barzegaribanadkoki et al., 2017) و البته به اذعان نویسندگان ارزیابی آن در رودخانه مهریز و در شرایط عادی انجام گرفته و نتایج مناسبی داشته است. Barzegaribanadkoki et al. (2017) به مطالعه و بررسی ساخت و ارزیابی دستگاه اندازه گیری گل آلودگی جریان رودخانه ای در رودخانه مهریز استان یزد پرداختند. ایشان دستگاه اندازه گیری گل آلودگی جریان رودخانه با کارکرد نوری تهیه و واسنجی آزمایشگاهی دستگاه در دو مرحله رسوبات غلیظ و رسوبات کم غلظت انجام دادند. ضریب همبستگی برای رسوبات کم غلظت و غلیظ به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۹۵ به دست آوردند. طی سال های اخیر نیز نوعی دیگر از نمونه بردار خودکار رسوب معلق نیز توسط Sadeghi (2018)

در دانشگاه تربیت مدرس، طراحی و ساخته شده که تنها قادر به نمونه گیری رسوب معلق با فواصل زمانی قابل تنظیم توسط کاربر است.

حال از آنجایی که پیش بینی دقیق میزان رسوب رودخانه ها اهمیت قابل توجهی در مدیریت منابع آب و طراحی و ساخت و همچنین برنامه ریزی در بهره برداری از سازه های آبی دارد (Dastorani et al., 2012). لذا پروژه ساخت نمونه بردار و تخمین گر خودکار رسوب معلق<sup>۳۶</sup> مبتنی بر فناوری الکترونیک نوری به کارفرمایی شرکت مادر مدیریت منابع آب ایران، مشاوره دانشگاه های تربیت مدرس و صنعتی اصفهان و طراحی، ساخت و ارزیابی نویسندگان به سبب ضرورت نمونه برداری سریع، آسان، دقیق از رسوب معلق و بدون نیاز به نیروهای تخصصی، اندازه گیری غیرمستقیم میزان بار رسوبی معلق در بازه های زمانی مختلف و تمام شرایط هیدرولوژیکی جریان خصوصاً طی وقایع رگبار و همچنین زمینه سازی بررسی تغییرات زمانی رسوب معلق از طریق تهیه رسوب نمود<sup>۳۷</sup> و طبعاً امکان تحلیل دقیق فرآیندهای حاکم بر تولید رسوب در بوم سازگان ها و شرایط مختلف در دستور کار قرار گرفت. از این رو، نوشتار حاضر با هدف بررسی عملکرد میدانی دستگاه مذکور در راستای فراهم سازی امکان تخمین غیرمستقیم مستدام، مرتب و خودکار غلظت رسوب معلق، ساخت تخمین گر خودکار با هزینه قابل قبول و درعین حال ساختار ساده و کارایی و کاربرد بالا در شرایط غلظت رسوب غالب در شبکه های آبی برای استفاده توسط سازمان های مربوطه و همچنین طرح های پژوهشی تهیه و تدوین شده است.

## ۲- مواد و روش ها

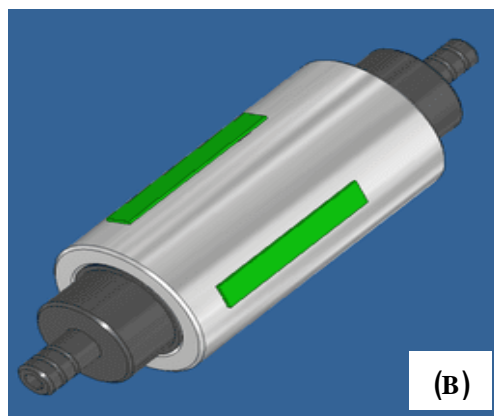
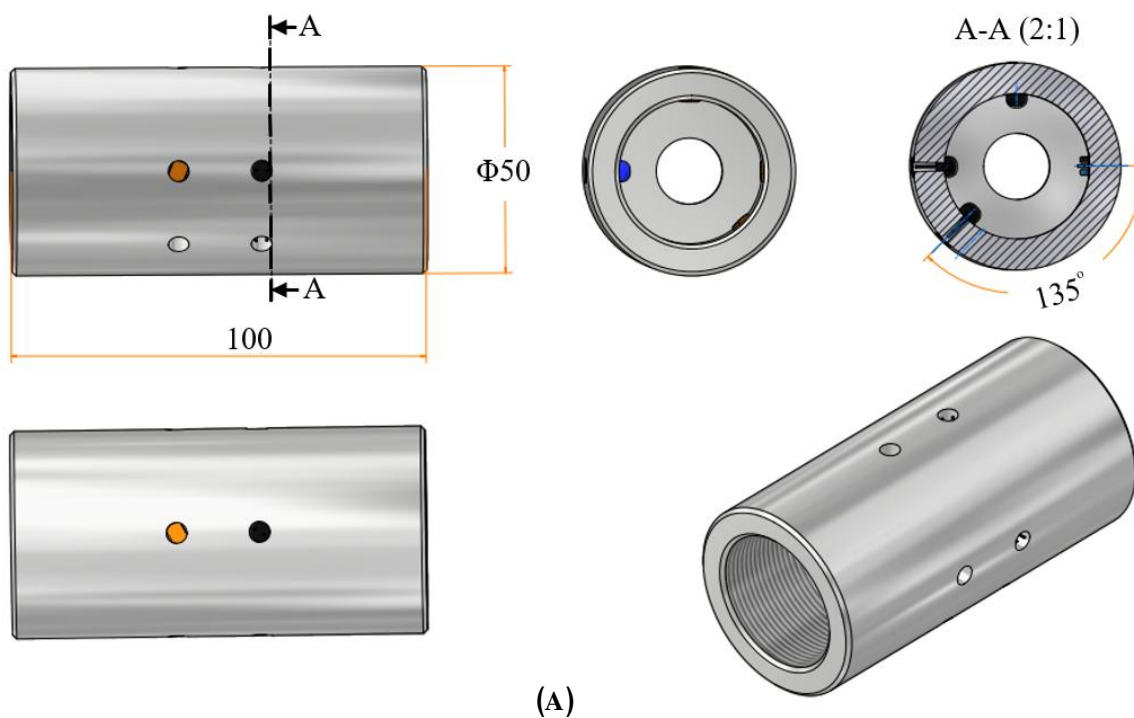
طراحی و ساخت بخش مکانیکی نمونه بردار مورد نظر با الگوگیری از نمونه اولیه موجود (استوانه ای با جداره های فلزی و با قطر بیرونی حدود ۹۰ سانتی متر، ارتفاع یک متر و ظرفیت نمونه بردار نیم لیتری برای تعداد ۲۹ نمونه آب) در دانشگاه تربیت مدرس و ساخته شده توسط مجری پروژه در سال ۱۳۹۱ با استفاده از فلز سبک و یا پلاستیک فشرده صورت گرفت. این نمونه بردار همچون نمونه موجود شامل سه سری حس گر بود که یک حس گر باید به طور دائم در تماس با جریان آب رودخانه بوده، حس گر دوم برای قرار گرفتن در شرایط دبی پایه جریان منطقه مورد استفاده و حس گر سوم برای شرایط سیلابی، بر اساس محاسبات و قابل تنظیم برای قرار گرفتن در شرایط دبی آستانه سیلابی مناطق مختلف طراحی شد. نمونه بردار طراحی شده دارای یک ورودی مجهز به پالایه<sup>۳۸</sup> یا صافی بوده که مانع از ورود خار و خاشاک به ظروف نمونه بردار می شود. ظرفیت نمونه بردار جدید نیز با توجه به فضای لازم برای تعبیه بخش برآورد کننده نوری، سامانه هوشمند ثبت

و انتقال داده و اطلاعات، تعداد و حجم نمونه آب و رسوب معلق در نظر گرفته شده، وزن و ابعاد قابل قبول نهایی دستگاه و حتی هزینه‌های ساخت عمده و صنعتی آن بهینه شد. نمونه بردار پیش‌بینی شده قابلیت ارتقا و تجهیز به سامانه هوشمند برای ثبت اطلاعات مربوط به تغییرات و آغاز روند افزایشی ارتفاع سطح جریان آب در مواقع سیلابی، آغاز و پایان نمونه برداری و بازگشت سطح جریان به حالت دبی پایه در داخل خود دستگاه و هم‌چنین ارسال این اطلاعات از طریق پیامک به کاربر هست. اطلاعات مربوط به حافظه دستگاه نیز به سهولت قابل انتقال به رایانه و در نهایت تخلیه حافظه دستگاه به وسیله کاربر هست. انرژی مورد نیاز دستگاه به وسیله یک باتری قابل شارژ و تعبیه شده در بدنه دستگاه و سامانه خورشیدی تأمین شد. تنظیم فواصل زمانی بین دو نمونه برداری از منبع آبی و هم‌چنین مدت زمان لازم برای پر شدن یک ظرف نمونه بر اساس نیاز کاربر در دستور کار قرار گرفت.

دستگاه تخمین‌گر رسوب معلق بر اساس قوانین حاکم بر انتشار نور در سیالات با ابرناکی و یا گل‌آلودگی مختلف طراحی، ساخته و در مسیر ورودی نمونه بردار تشریح شده در بالا قرار داده شد. برای این منظور، یک آرایه لیزری به عنوان چشمه نور در یک سوی شاره و یک آرایه دیود نوری به عنوان گیرنده نور، در سمت دیگر اشاره قرار گرفت. بسته به شدت نور رسیده به دیود نوری، جریانی ایجاد می‌شد که میزان آن متناظر با میزان رسوبات معلق موجود در آبی بود که توسط پمپ تعبیه شده در ورودی سامانه در حال انتقال به سامانه نمونه بردار بوده است. با توجه به وابستگی روش‌های نفلومتری به ابعاد و همگنی اندازه ذرات، روش توربیدی متری یعنی ارسال نور به نمونه و اخذ آن پس از عبور از نمونه کار آغاز شد. به این ترتیب در روند ساخت سامانه، ابتدا مدار گیرنده و فرستنده بر اساس مفهوم توربیدی متری و ارتباط بین چشمه/چشمه‌های نور با طول موج‌های احتمالی متفاوت و مقاومت‌های متغیر با نور<sup>۳۹</sup> در مقابل مقادیر مختلف رسوب معلق طراحی شد. در گام بعدی مقاومت‌های متغیر با نور با دیودهای نوری جایگزین شدند و به جای چشمه نور نیز از فرستنده نور مرئی و مادون قرمز استفاده و به این ترتیب مدار پایه ساخته شد. در ارزیابی اولیه، تغییر نور دیودهای نورافشان با تغییر غلظت رسوبات مورد بررسی کیفی قرار گرفت که تا حد زیادی با انتظارات هم‌خوانی داشت. پس از راه‌اندازی سامانه و دریافت پاسخ‌های تأییدی سلامت مدار، نمونه‌های ساخته شده در محور مرکزی استوانه قرار گرفت. به این نحو که از یک استوانه توخالی مقوایی به عنوان شاسی دستگاه استفاده شد و روی آن آرایه‌های گیرنده

و فرستنده نور شامل دیودهای نورافشان مادون قرمز کوچک و دیودهای نوری معمولی سری شده با دیودهای نورافشان عادی با میزان نور متأثر از شدت نور دریافتی از چشمه نور قرار گرفت. با توجه به این که قرار دادن لوله آزمایش به صورت افقی منجر به ایجاد حباب در محدوده مورد اندازه‌گیری می‌شد و لذا دقت دستگاه اولیه را تحت تأثیر قرار می‌داد در مرحله بعد سعی شد با زاویه دار کردن لوله آزمایش به تبع آن کل سامانه، بررسی‌ها تکرار شود. در طرح بعدی استفاده از روش OBS بر مبنای امواج مادون قرمز مدنظر قرار گرفت. به این منظور تلاش شد از انواع حس‌گرهای مادون قرمز متداول در بازار با ساختارهای فیزیکی متفاوت استفاده و سامانه الکترونیک نوری دستگاه تخمین‌گر غیرمستقیم رسوب معلق نهایی شد. برای آزمون آزمایشگاهی عملکرد سامانه ابتدا از دامنه معمول از نمونه‌های غلظت از پیش تعیین شده در آزمایشگاه و در محدوده پنج تا ۲۵۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با توجه به اطلاعات و منابع موجود (Pavanelli and Bigi, 2017; Barzegaribanadkoki et al., 2005) و استعلام به عمل آمده از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور مبتنی بر آمار تفصیلی ۷۶ ایستگاه رسوب‌سنجی مهم با طول دوره‌های آماری مختلف در بوم‌سازگان‌های متنوع و پراکنده در نقاط مختلف کشور و غالباً مربوط به رودخانه‌های مهم نواحی شمالی و غرب کشور و با نمونه‌های تهیه شده از خاک‌های مرتعی با ابعاد زیر ۷۵ میکرون (Woo et al., 1986; Kuhnle et al., 2013) استفاده شد. هم‌چنین، بهینه‌سازی قطر ۱۶ میلی‌متر برای لوله مورد استفاده در دستگاه با کمک شبیه‌سازی آزمایش Beer-Lambert با استفاده از شبیه‌ساز Phet (2021) صورت گرفت. نمایی از بخش الکترونیک نوری و سامانه نهایی طراحی و ساخته شده از دستگاه تخمین‌گر خودکار رسوب معلق در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

به منظور آزمون و ارزیابی عملکرد تخمین‌گر خودکار رسوب معلق مبتنی بر فناوری اپتیک باز دیده‌ها و اندازه‌گیری‌های متعدد نمونه‌های رواناب و رسوب از ایستگاه‌های الیمالات (۱۲ دی ۱۴۰۰)، خطیرکوه (۱۴ بهمن ۱۴۰۰)، سبز رود، وازیوار، عالم‌کلا و ملاکلا (۱۴ اردیبهشت ۱۴۰۱)، بخش‌های مختلف رودخانه هراز (۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۱)، تالار و بابل رود (۱۰ خرداد ۱۴۰۱)، پل سفید (۲۵ خرداد ۱۴۰۱) انجام شد. نمودار جریانی مطالعه حاضر در شکل ۳ ارائه شده است.



**Fig. 1- The Aluminum structure used to place the receiver of the optical transmitter (A) and the general scheme of the aluminum tube used to place the receiver of the optical transmitters and the double end caps connecting to the inlet and outlet (B)**

شکل ۱- ساختار آلومینیومی مورد استفاده برای قرار دادن گیرنده فرستنده‌های نوری (A) و شمای کلی لوله آلومینیومی مورد استفاده برای قرار دادن گیرنده فرستنده‌های نوری و درپوش‌های دو سر برای اتصال به شیلنگ‌های ورودی و خروجی (B)

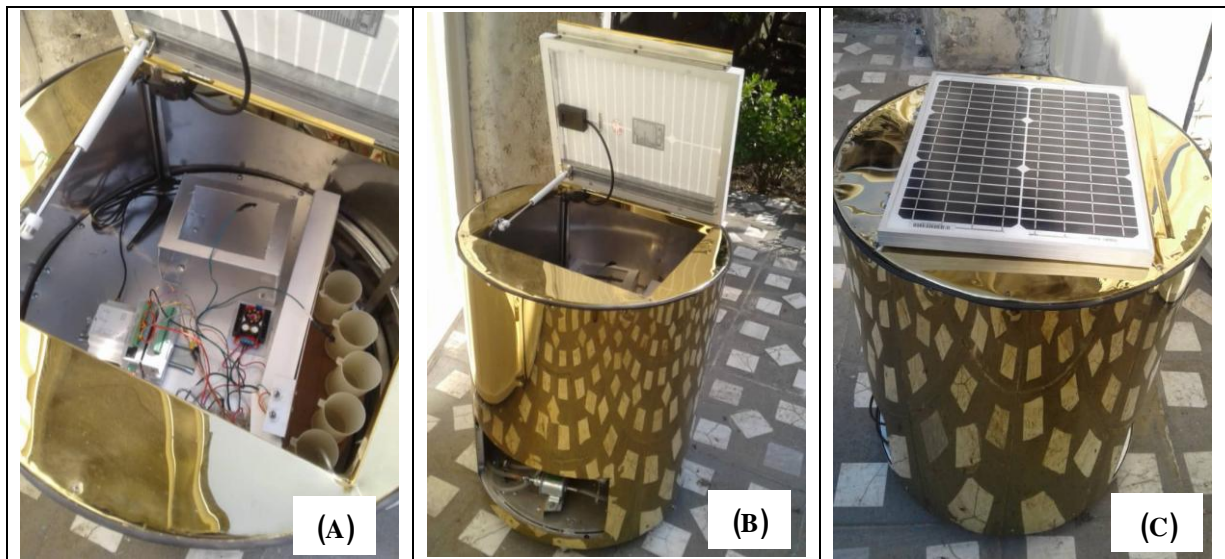


Fig. 2- Mechanical part (A) and energy supply system (B) and a general view of the automatic suspended sediment sampling device (C)

شکل ۲- تصویرهایی از بخش مکانیکی (A) و سامانه تأمین انرژی (B) و نمایی کلی از دستگاه خودکار نمونه‌برداری رسوب معلق (C)

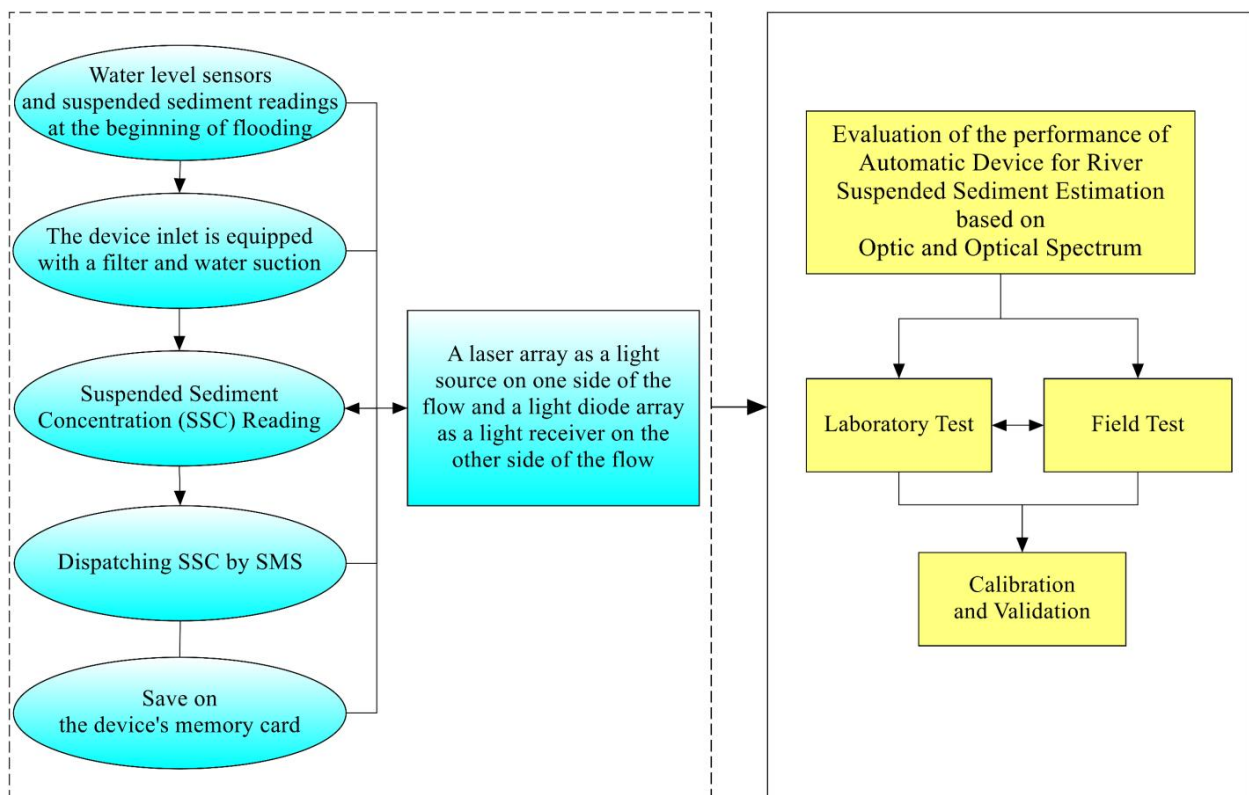


Fig. 3- Flow chart and steps of the research

شکل ۳- نمودار جریانی و مراحل انجام پژوهش

### ۳- نتایج و بحث

و نهایتاً ایستگاه پل سفید برای قرائت مستقیم دستگاه و اعتبارسنجی نهایی با حضور کارشناسان آب منطقه‌ای مازندران انجام پذیرفت. نمونه‌های رواناب و رسوب به آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش منتقل و توسط دستگاه قرائت، سپس به منظور آزمون دستگاه، غلظت رسوب معلق نمونه‌ها به شیوه برجای‌گذاری نیز اندازه‌گیری شد. اگرچه قرائت‌های نمونه‌های منتقل شده به آزمایشگاه الزاماً وضعیت کامل و دقیق نمونه‌گیری مستقیم از جریان در رودخانه‌ها را منعکس نمی‌نماید.

برای ارزیابی اولیه و عملکرد کلی میدانی دستگاه خودکار نمونه‌برداری رسوب معلق مبتنی بر فناوری الکترونیک نوری، در مورخ ۱۲ دی ۱۴۰۰ در رودخانه الیمالات در مسیر نور-چمستان در استان مازندران با دبی حدود ۶۰۰ لیتر بر ثانیه صورت گرفت. برای این منظور دستگاه مزبور در پس از تکمیل تغذیه سامانه انرژی خورشیدی طی روزهای قبل به منطقه منتقل و در مسافتی حدود ۱۵ متر از محل نمونه‌برداری در ارتفاع بیش از دو متر روی یک پشته خاکی قرار داده شد. سپس، تنظیمات زمانی دستگاه صرفاً برای آزمون میدانی مزبور به صورت جزئیات مندرج در جدول ۱ تنظیم شدند. طی حدود چهار ساعت حضور در منطقه، داده‌های حاصل از قرائت‌ها در حافظه دستگاه ضبط، پیامک‌های متوالی دریافت و حدود ۲۰ نمونه آب به داخل ظروف دستگاه تخلیه شد. تصویرهایی از مراحل مختلف کاربرد و آزمون میدانی دستگاه خودکار نمونه‌برداری رسوب معلق در شکل ۴ ارائه شده است. همچنین، نتایج حاصل از قرائت‌های دستگاه و مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت رسوب معلق ۱۵ نمونه قابل استفاده و منتقل شده به آزمایشگاه به همراه شاخص‌های آماری مربوطه در شکل ۵ ارائه شده است.

در گام اول تلاش شد عملکرد کلی سامانه در وضعیت تخمین در محل نمونه‌برداری از آب<sup>۴۰</sup> مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور در جوی آب، گل‌آلودگی‌های متفاوت ایجاد شد تا حساسیت کلی سامانه مورد ارزیابی قرار گیرد. در این مرحله به منظور واسنجی سامانه در شرایط نزدیک‌تر به شرایط واقعی نمونه‌های جدیدی از رسوبات با طیف دانه‌بندی وسیع‌تر (ریزدانه‌های کوچک‌تر از ۱۴۰ میکرون) در ظروف مدرج ۲۵۰ سی‌سی تهیه شد و سپس پمپاژ نمونه‌ها به داخل دستگاه نمونه‌بردار الکترونیک نوری و نیز ذخیره‌سازی نمونه‌های مورد نظر با زمان‌بندی‌های پیش‌بینی شده انجام گرفت. در نهایت نتایج ارزیابی تخمین در محل نمونه‌برداری از آب دستگاه خودکار نمونه‌برداری رسوب معلق مبتنی بر فناوری الکترونیک نوری، دقت بالای ۹۰ درصد در نمونه‌های تا غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر را تأیید نمود که این دقت در رابطه با نمونه‌های با غلظت بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به بیش از ۹۵ درصد رسید.

در اندازه‌گیری‌ها و تخمین‌های صورت گرفته، ایستگاه الیمالات برای آزمون اولیه و عملکرد کلی میدانی دستگاه به همراه نمونه‌برداری از محل مکش و خروجی دستگاه، ایستگاه خطیرکوه برای آزمون مقدماتی مجدد و ارزیابی عملکرد میدانی دستگاه به همراه نمونه‌برداری از محل مکش و خروجی دستگاه به همراه کارشناسان آب منطقه‌ای مازندران، ایستگاه‌های سبزود، وازیوار، عالم‌کلا و ملاکلا برای نمونه‌برداری از محل مکش و خروجی دستگاه با هدف واسنجی دستگاه، نُه نقطه مختلف نمونه‌برداری در طول رودخانه هراز و همچنین رودخانه تالار و بابل‌رود برای گرفتن نمونه با بطری‌های بزرگ یک و نیم و دو لیتری و انتقال به آزمایشگاه و قرائت نمونه‌ها توسط دستگاه و اعتبارسنجی،

Table 1- Time settings (seconds) used in evaluating the field performance of the automatic suspended sediment sampler and estimator based on opto-electronic technology

جدول ۱- تنظیمات زمانی (ثانیه) مورد استفاده در ارزیابی عملکرد میدانی دستگاه نمونه‌بردار و تخمین‌گر خودکار رسوب معلق

مبتنی بر فناوری الکترونیک نوری	
Time stability required for sampling (water suction) from the river and storing in the container	30
Duration of water suction	40
Snap time without readings to prevent mixing of previous readings	10
Interval between two suction	60
Interval of storing water in the containers of the device	480
Interval of readings of the device stored in the memory	3
Interval of device readings and transfer to mobile phone via SMS	120



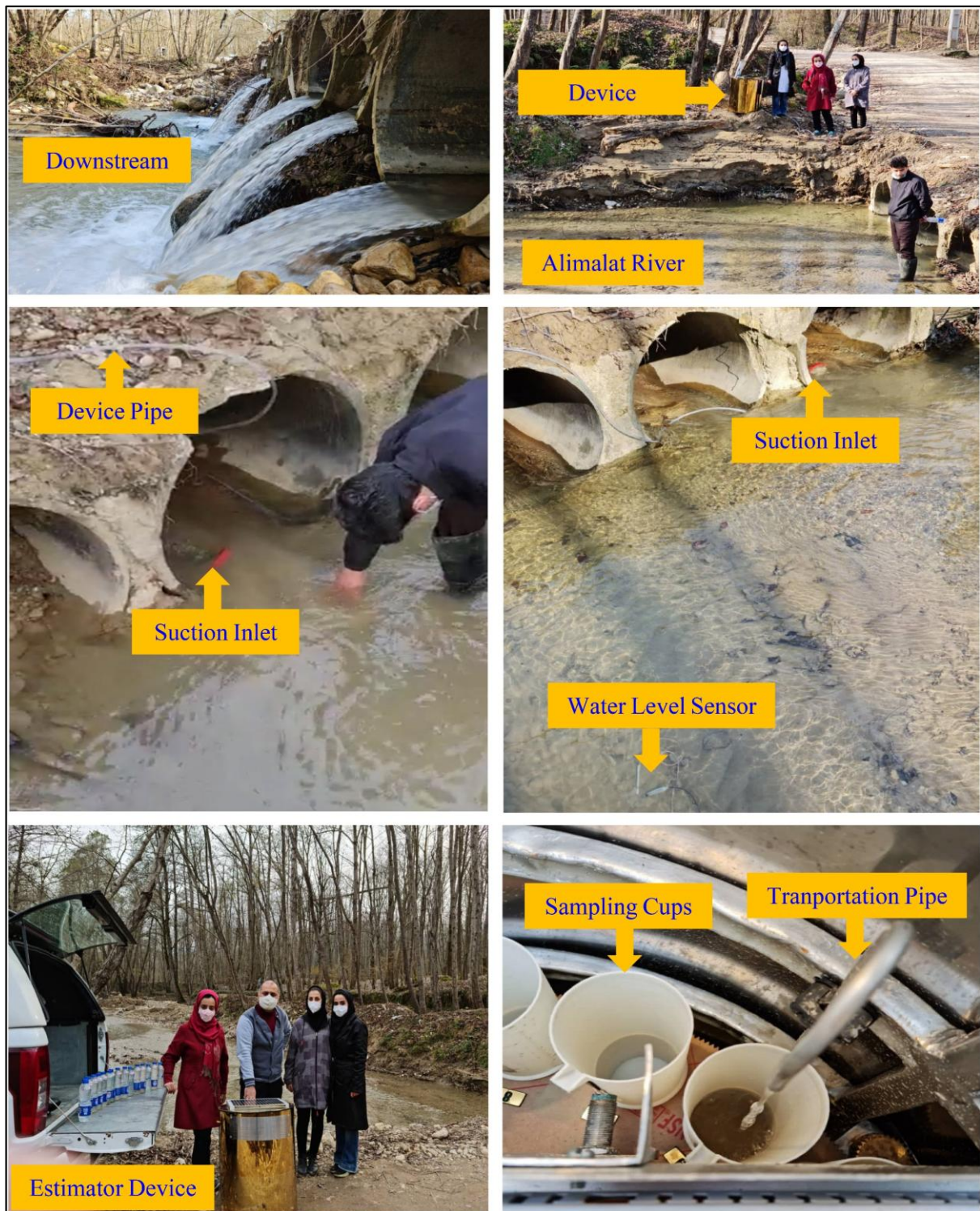


Fig. 4- Stages of the field test of the automatic sampling and estimation device of suspended sediment based on opto-electronic technology in the Alimalat River in Noor- Chamestan Road, Mazandaran Province, Iran  
 شکل ۴- تصویرهایی از مراحل آزمون میدانی دستگاه خودکار نمونه برداری و تخمین رسوب معلق مبتنی بر فناوری الکترونیک نوری در روخانه الیمالات در محور نور-چمستان، استان مازندران

همچنین، نمودار برازش و انتخاب بهترین معادله برای اصلاح داده‌های حاصل از قرائت دستگاه طی بازدید سوم در چهار ایستگاه در شکل ۶ ارائه شده است. در همین ارتباط معادله توانی برازش داده شده به داده‌ها به سبب برخورداری از شاخص‌های عملکردی بهتر برای اصلاح روابط داخلی برنامه دستگاه و خروجی نهایی آن استفاده شد. در نهایت ارتباط بین مقادیر تخمینی دستگاه پس از واسنجی و اندازه‌گیری شده حاصل بازدیدهای چهارم تا ششم و در ۱۳ نقطه در شکل ۷ بررسی شده است. بررسی آماری مزبور دلالت بر ضریب همبستگی بیش از ۹۳/۲۵ درصد و طبعاً تطابق بسیار بالای مقادیر مشاهده‌ای با تخمینی دستگاه در دامنه غلظتی مورد بررسی دارد. (Navaratil et al. (2011 در رودخانه Galaber در فرانسه با استفاده از روش نمونه‌برداری الکترونیک نوری به اندازه‌گیری رسوب معلق نیز همین حد از همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی را گزارش کرده‌اند. همچنین، خطای نسبی برآوردی برای داده‌های زوجی غلظت رسوب معلق نیز بر بیش‌برآوردی در حد ۱۸/۲۰ درصد دلالت داشته است که با گزارش Lawler (2005) در مورد کم‌تخمینی روش مستقیم در حدود ۱۰ درصد نسبت به تخمین‌های روش غیرمستقیم هم‌خوانی مناسب دارد. علاوه بر آن، پراکنش بسیار متعادل نقاط حاصل از تقاطع مقادیر برآوردی دستگاه و مشاهده‌ای حول خط استاندارد (۱:۱) در شکل ۵، دلیلی دیگر بر عملکرد خوب دستگاه تخمین‌گر رسوب معلق ساخته شده و مبتنی بر فناوری الکترونیک نوری دارد.

دقت در شکل ۵ نشان می‌دهد که به‌رغم تعداد محدود نمونه‌های اندازه‌گیری شده، اختلاف بین مقادیر و شاخص‌های آماری حاصل از داده‌های به دست آمده از طریق اندازه‌گیری آزمایشگاهی نمونه‌های آب جمع‌آوری شده به داخل ظروف دستگاه و همچنین تخمین‌های حاصل از سامانه الکترونیک نوری و مقادیر میانگین از ده قرائت انجام‌شده در هر نوبت نمونه‌برداری و منتقل شده از طریق پیامک به تلفن همراه معنی‌دار نیست و انطباق بسیار خوبی بین داده‌ها مشاهده می‌شود. در عین حال برخی از اختلافات موجود را می‌توان مشخصاً به خطاهای حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقادیر کم غلظت رسوب معلق و طبیعتاً حساسیت بالای اندازه‌گیری‌ها به هر یک از مراحل ساده و در عین حال مهم توزین، خشک کردن و حتی انتقال سریع از آون به ترازوی حساس در شرایط رطوبت بالای هوا در زمان اندازه‌گیری نسبت داد. از طرفی احتمال عدم انطباق کامل داده‌های پیامک‌شده با اندازه‌گیری‌های به عمل آمده به سبب تعطل موردی در ارسال پیامک‌ها و اختلال چندثانیه‌ای در آنتن‌دهی با توجه به فاصله زمانی بسیار کوتاه بین نمونه‌برداری‌ها، خارج از انتظار نیست. از طرفی عدم وجود ارتباط مشخص بالا بین دو دسته مقادیر گزارش شده با ضریب همبستگی حدود ۵۴ درصد در سطح معنی‌داری ۰/۰۱، مراتب عدم وجود خطای نظام‌مند<sup>۴۱</sup> در فرآیند طراحی و ساخت سامانه را تأیید نموده و بر سرشت وجود خطاهای تصادفی<sup>۴۲</sup> به عنوان جزء انکارناپذیر مدل‌سازی‌های فرآیندهای طبیعی در مراحل ارزیابی تأکید دارد. در هر صورت و با لحاظ تمامی شرایط میدانی ارزیابی شده بسیار خوب ارزیابی شده است. سایر نتایج تفصیلی اندازه‌گیری میدانی در تطابق با اندازه‌گیری آزمایشگاهی در جدول ۲ خلاصه شده است.

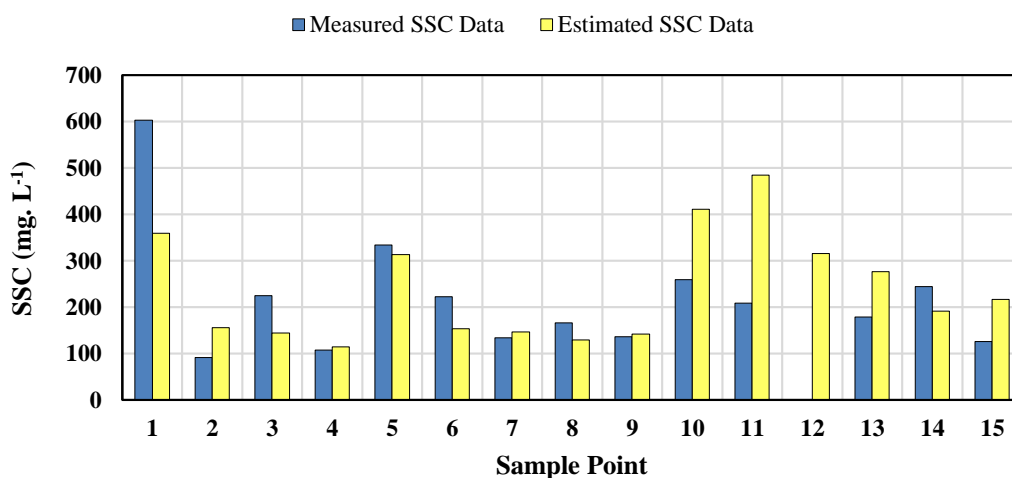


Fig. 5- Measured suspended sediment concentrations (mg.L<sup>-1</sup>) in device containers and automatic instrument readings (estimated) in the field study

شکل ۵- مقادیر غلظت رسوب معلق (میلی گرم بر لیتر) اندازه‌گیری شده در ظروف و قرائت‌های خودکار دستگاه (تخمینی) در مطالعه میدانی

نتایج حاصل از ارزیابی میدانی دستگاه مذکور نشان داد که محدودیت خاصی برای استفاده در اندازه‌گیری دامنه‌های متعارف غلظت رسوب معلق در اغلب رودخانه‌های کشور نیست که مشخصاً بر برتری دستگاه مزبور بر سایر نمونه‌های خارجی (Navarati et al., 2011; Merten et al., 2014; Pomázi and Baranya, 2020) و یا نمونه‌های مقدماتی ساخته‌شده در کشور (Siadatmoosavi et al., 2015; Barzegaribanadkoki et al., 2017) در اذعان به استفاده از دامنه خاص غلظتی، شرایط هیدرولوژیک و یا نوع خاصی از مواد تشکیل‌دهنده رسوبات معلق دلالت دارد.

#### ۴- جمع‌بندی

از آنجایی که دستیابی به شیوه‌های مناسب ارزیابی تغییرات زمانی رسوب معلق طی وقایع هیدرولوژی و تهیه اطلاعات تفصیلی در خصوص رفتار رسوبی حوضه‌های آبخیز با استفاده از روش‌ها و مفاهیم مختلف از ابزارهای مهم مدیریتی محسوب می‌شود. لذا دستیابی به روش‌ها و ابزارهایی که با استفاده از آن بتوان به صورت سریع، آسان، دقیق و بدون نیاز به نیروهای تخصصی و حتی غیرمستقیم میزان بار رسوبی معلق در بازه‌های زمانی مختلف و تمام شرایط هیدرولوژیک جریان خصوصاً طی وقایع رگبار اندازه‌گیری دست یافت، زمینه‌ساز تحلیل دقیق فرآیندهای حاکم بر تولید رسوب در بوم‌سازگان‌ها و شرایط مختلف را فراهم می‌کند. بنابراین، پروژه ساخت نمونه‌بردار و تخمین‌گر خودکار رسوب معلق مبتنی بر فناوری الکترونیک نوری شکل گرفت. در نوشتار حاضر بررسی عملکرد میدانی دستگاه مذکور در راستای فراهم‌سازی امکان تخمین غیرمستقیم و خودکار غلظت رسوب معلق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی فعلی و میدانی دستگاه مذکور نشان داد محدودیت خاصی برای استفاده در اندازه‌گیری دامنه‌های متعارف غلظت رسوب معلق در اغلب رودخانه‌های کشور نیست که مشخصاً بر برتری دستگاه مزبور بر سایر نمونه‌های خارجی و یا نمونه‌های ابتدایی ساخته‌شده در کشور دارد. به عبارت دیگر دستگاه مزبور تنها با یک مرحله واسنجی و در دامنه محدودی از غلظت رسوبی از عملکرد بسیار خوبی برخوردار بوده است. اگرچه ارزیابی‌های پیش‌تر و در دامنه غلظتی گسترده‌تر و در شرایط هیدرولوژیک متنوع‌تر و همچنین واسنجی‌های مختص به هر رودخانه و یا حوضه آبخیز برای دستیابی به نتایج بهتر و قابل‌اعتمادتر تأکید می‌شود. با وجود این، استفاده از دستگاه طراحی و ساخته‌شده به سبب قابلیت دسترسی و ساخت با قیمت قابل قبول، سهولت استفاده، عدم نیاز به نیروی فنی ماهر و امکان نمونه‌برداری‌های متعدد و در زمان‌های

غیرمتعارف و خاص و به ویژه در ساعات شبانه و یا وقوع سیل تأیید می‌شود. اگرچه افزایش قابلیت حمل از طریق کوچک‌سازی بیش‌تر دستگاه، پیش‌بینی سایر منابع تأمین انرژی و انجام واسنجی‌های منطقه‌ای و حتی تفکیک نوع رسوبات حاصل از بوم‌سازگان‌های مختلف برای پژوهش‌های آینده مورد تأکید است.

#### ۵- قدردانی

پروژه انجام شده از پشتیبانی‌های بسیار ارزنده مدیران ارشد و کارشناسان برجسته و زحمت‌کش شرکت مادر مدیریت تخصصی آب کشور در قالب قرارداد شماره ۱۳۹۹/۱۹۰/۳۰۱۴ با موضوع "خدمات مشاوره پژوهشی اندازه‌گیری خودکار و غیرمستقیم بارمعلق مبتنی بر فناوری اپتیک و طیف نوری" و به‌ویژه آقای دکتر نوری، خانم دکتر کرم‌زاده، آقای مهندس شفیع، خانم هاشم‌پور و خانم کرمی؛ مدیر و کارشناسان آب منطقه‌ای مازندران آقای مهندس خدایی، سرکار خانم مهندس ابراهیمی، آقای مهندس طاهری و آقای مهندس نعمتی و آقای مهندس اسبو، مهندس اکبری و جناب آقای مهندس ربیعی در آزمون‌های صحرائی، دکتر طباطبایی دانشیار پژوهش‌کننده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور در ارتباط با استعلام دامنه معمول و متوقع برای عملکرد مناسب در طول اجرای پروژه برخوردار بوده است. در همین ارتباط تلاش‌ها و خدمات تخصصی و مسئولانه آقایان فرجاله و شایان چاشنی‌دل و دکتر قنبری در طراحی، ساخت و برنامه‌نویسی بخش‌های مکانیکی و کنترلی دستگاه و تلاش‌های آقای مهندس صادق بور کارشناس مسئول آزمایشگاه مرکزی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس ستودنی است. همچنین، همراهی‌ها و خدمات پشتیبانی و صحرائی آقای فریبرز توکلی و اسماعیل درویش در بخش آزمون عملکرد سامانه طراحی و ساخته‌شده قابل تقدیر است. از همکاری مجموعه کارکنان آزمایشگاه خاک شهرستان گلپایگان در راستای آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و نیز کمک‌های کارشناسان محترم آزمایشگاه‌های مهندسی مواد و مکانیک دانشکده فنی مهندسی گلپایگان آقای مهندس خوبرو و آقای مهندس معصومی، همچنین همکاری‌ها و خدمات تخصصی خانم مهندس مرادی، کارشناس مسئول شرکت پویا آزما خوانسار به سبب در اختیار قرار دادن امکانات آزمایشگاهی و آقای مهندس مصطفی ذبیحی‌سیلابی، دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه تربیت مدرس در همراهی با نمونه‌برداری‌های صحرائی نیز تشکر می‌شود.

**Table 2- The results of direct (sampling) and indirect (device reading) field measurements of suspended sediment concentration**

جدول ۲- نتایج حاصل از اندازه‌گیری صحرائی مستقیم (نمونه‌برداری) و غیرمستقیم (قرائت دستگاه) غلظت رسوب معلق

Test No.	Station name	Date	Mean concentration of suspended sediment (mg.L <sup>-1</sup> )		Coefficient of Variation (%)	Standard Deviation
			Device	Measured		
One <sup>I</sup>	Alimalat	January 2, 2022	441.44	251.41	362.87	912.29
Two <sup>II</sup>	Khatirkooh	February 3, 2022	1730.00	480.00-695.00	--	--
Three <sup>III</sup>	Sabze-Rood	May 4, 2022	742.33	94.59	53.10	50.23
	Vazivar	May 4, 2022	3702.25	1230.59	61.16	752.67
	Alam-Kala	May 4, 2022	532.00	107.20	61.66	66.10
	Molla-Kala	May 4, 2022	2746.75	590.90	13.12	77.54
	Abshar	May 20, 2022	60.00	Close to zero*	-	-
Four (along Haraz river) <sup>IV</sup>	Upstream Poloor intersection	May 20, 2022	121.00	8.00	-	-
	Lar	May 20, 2022	48.50	Close to zero*		
	Lasem	May 20, 2022	00.00	Close to zero*		
	Vana	May 20, 2022	146.50	Close to zero*		
	Upstream Panjab intersection	May 20, 2022	458.75	721.74		
	Panjab	May 20, 2022	4499.93	5160.00		
	Downstream Panjab intersection	May 20, 2022	3262.00	2269.57		
	Amol Bridge	May 20, 2022	3601.00	1888.00		
Five (Some rivers in north of Iran) <sup>IV</sup>	Telar	May 31, 2022	233.75	150.30		
	Babol-rood	May 31, 2022	433.67	300.99		
	Faculty River	May 31, 2022	109.67	168.00		
Six <sup>V</sup>	Pole-Sefid	June 15, 2022	79.71	67.42	8.40	5.67

<sup>I</sup> For initial evaluation and general field performance of automatic suspended sediment sampling device,

<sup>II</sup> For the preliminary field test and re-evaluation of the automatic suspended sediment sampling device,

<sup>III</sup> For the calibration of the automatic suspended sediment sampling device,

<sup>IV</sup> For the validation of the automatic suspended sediment sampling device,

<sup>V</sup> For the final validation of the automatic suspended sediment sampling device,

\* Numbers close to zero were supposed as one to be used in calculations.

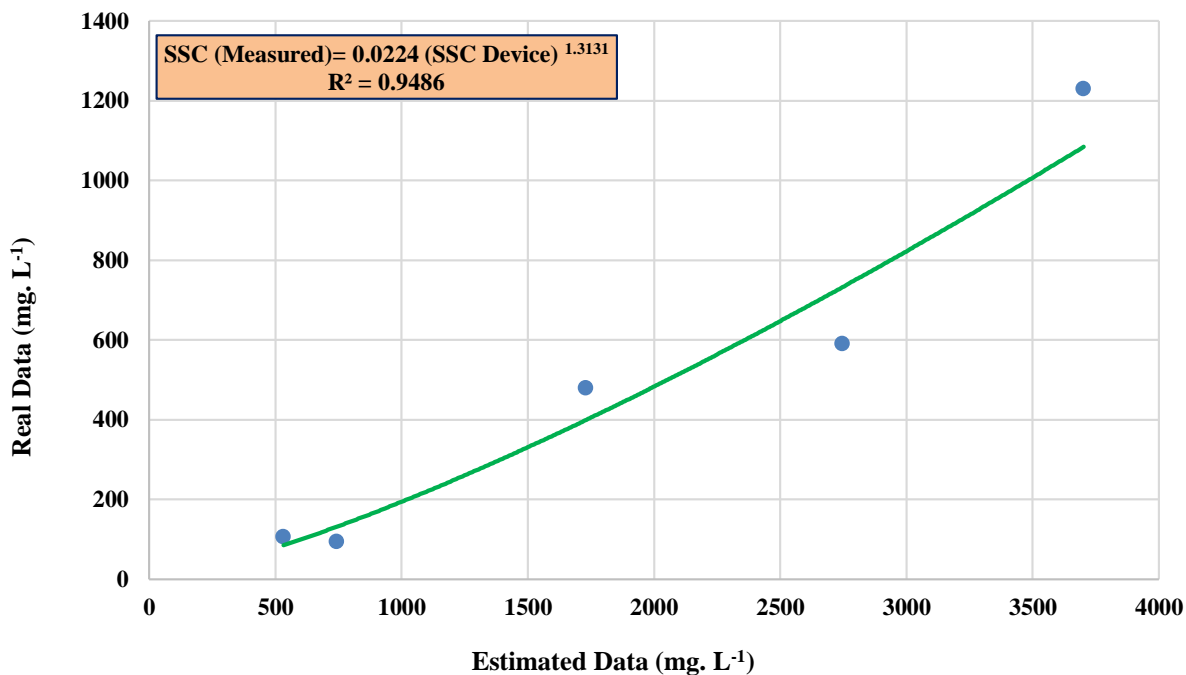


Fig. 6- The fitting curve and the selection of the best equatin to clibrate the data obtained from the device readings during the third visit to the four stations

شکل ۶- نمودار برازش و انتخاب بهترین معادله برای اصلاح داده‌های حاصل از قرائت دستگاه طی بازدید سوم در چهار ایستگاه

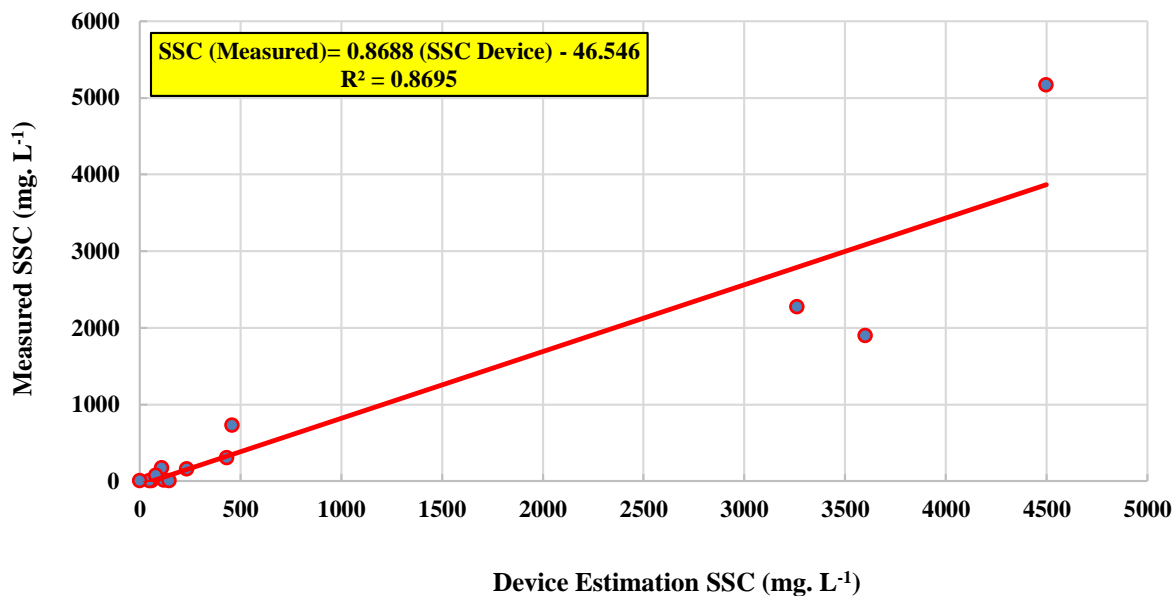


Fig. 7- Comparison of the measured data and the estimated values of the device after calibration

شکل ۷- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی دستگاه پس از واسنجی

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Soil Erosion
- 2- Watershed Management
- 3- Sediment Transportation
- 4- Ecosystems
- 5- Suspended Sediment
- 6- Sediment Sampling
- 7- Bed Load
- 8- Bed Material Load
- 9- Direct Method
- 10- Indirect Method
- 11- Point Integration Method
- 12- Depth Integration Method
- 13- Indirect Sediment Measurement
- 14- Optic
- 15- Visible
- 16- Infrared
- 17- Ultraviolet
- 18- Electromagnetic Waves
- 19- Light Spectrum
- 20- Scattering
- 21- Optical Backscattering
- 22- Turbidity
- 23- Nephelometry
- 24- Turbidimetry
- 25- Transmissometer
- 26- Absorptiometer
- 27- Turbidity meter
- 28- Photocell
- 29- Optical Degeneration
- 30- Reflectometer
- 31- Optical Backscattering System
- 32- Pulsed Infrared
- 33- Wavelength
- 34- Space-Temporal Analysis of Suspended Sediment
- 35- Acoustical Backscatter Sensor
- 36- Suspended Sediment Sampler
- 37- Sedimentgraph
- 38- Filter
- 39- Light Dependent Resistor, LDR
- 40- Online
- 41- Systematic Error
- 42- Random Error

## ۵- مراجع

- Agrawal YC and Pottsmith HC (1994) Laser diffraction particle sizing in stress. *Continental Shelf Research* 14(10/11):1101-1121
- Akhordzadeh H (2018) Direct measurement of bed load and determination of its ratio to suspended load in Kashkan river, Pol Dokhtar station. *International Congress on Water, Soil and Environmental*

Sciences, Tehran, <https://civilica.com/doc/827438> (In Persian)

- Arabkhedri M (2001) Determining the ratio of bed to suspended through tank and sediment grain-size. *Journal of Agricultural Engineering Research* 2(6):81-91 (In Persian)
- Asadi M and Fathzadeh A (2018) The use of computational intelligence base models in suspended sediment load estimation (Case study: Gillan province). *Journal of Range and Watershed Management* 71(1):45-60 (In Persian)
- Barzegaribanadkoki F, Dastorani MT, Sharifi M, and Barzegari A (2017) Manufacturing and evaluation of the efficacy of a new turbidity meter. *Iranian Journal of Watershed Management Science* 11(38):73-82 (In Persian)
- Bian S, Hu Z, and Lv J (2012) An observational study of the carrying capacity of suspended sediment during a storm event. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(10):6037-6044
- Black KP and Rosenberg MA (1994) Suspended sand measurements in a turbulent environment: Field comparison of optical and pump sampling techniques. *Coastal Engineering* 24(1-2):137-150
- Chelotti GB, Martinez JM, Roig HL and Olivietti D (2019) Space-temporal analysis of suspended sediment in low concentration reservoir by remote sensing. *Brazilian Journal of Water Resources* 2(24)
- Clifford NJ, Richards KS, Brown RA, and Lane SN (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
- Dastorani MT, Azimi Fashami Kh K, Talebi A, and Ekhtesasi MR (2012) Estimation of suspended sediment using artificial neural network (Case Study: Jamishan Watershed in Kermanshah). *Journal of Watershed Management Research* 3(6):61-74 (In Persian)
- Driggers RG (2003) *Encyclopedia of optical engineering: Las-Pho*. CRC Press 2:1025-2048
- Eder A, Strauss P, Krueger T, and Quinton JN (2010) Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects (in the Petzenkirchen catchment, Austria). *Journal of Hydrology* 389(1-2):168-176
- Gao P and Josefson M (2012) Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek watershed, central New York. *Journal of Hydrology* 426-427:17-27

- Green MO and Boon JD (1993) The measurement of constituent concentrations in nonhomogeneous sediment suspensions using optical backscatter sensors. *Marine Geology* 110(1-2):73-81
- Haimann M, Liedermann M, Petra LA, and Habersack H. (2014) An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept. *International Journal of Sediment Research* 29(2):135-148
- Hatefi M and Sadeghi SHR (2021) Perspective zoning of Iran provinces based on water stress, flood, drought and rainfall erosivity indices. *Watershed Engineering and Management* 13(1):213-221 (In Persian)
- Kabolizadeh M, Rangzan K, and Mohammadi Sh (2022) Increasing the accuracy of monthly and annual estimates of soil loss in Iran by considering the effect of snow cover in reducing rainfall erosivity. *Arabian Journal of Geosciences* 15:1344
- Kuhnle RA (2013) Suspended load. *Treatise on Geomorphology* 9:124-136
- Lawler DM (2005) Spectrophotometry: Turbidimetry and nephelometry. In *Encyclopedia of Analytical Science* 343-351
- Lobo R and Lopes LG (2020) Indirect estimation of flow and suspended-sediment concentration and load in small mountain streams: An exploratory study in Ribeira Seca Stream, Madeira Island. *WSEAS Transactions on Environment and Development* 16:869-879
- Ludwig KA Hanes DM (1990) A laboratory evaluation of optical backscatterance suspended solids sensors exposed to sand-mud mixtures. *Marine Geology* 94:173-179
- Merten GH, Capel PD, and Minella JP (2014) Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. *Journal of Soils and Sediments* 14(7):1235-1241
- Mirchooli F, Sadeghi SHR, Khaledi Darvishan A, and Strobl J (2021) Multi-dimensional assessment of watershed condition using a newly developed barometer of sustainability. *Science of the Total Environment* 791:148389
- Mohammadi SH, Karimzadeh HR, and Alizadeh M (2018) Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(2):551-569 (In Persian)
- Navratil O, Esteves M, Legout C, Gratiot N, Nemery J, Willmore S, and Grangeon T (2011) Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology* 398(3):246-259
- Novo EM, Hansom JD, and Curran PJ (1989) The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance data and suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing* 10(8):1357-1372
- Pavanelli D and Bigi A (2005a) A new indirect method to estimate suspended sediment concentration in a river monitoring programme. *Biosystems Engineering* 92(4):513-520
- Pavanelli D and Bigi A (2005b) Indirect methods to estimate suspended sediment concentration: reliability and relationship of turbidity and settleable solids. *Biosystem Engineering* 90(1):75-83
- Pomázi F and Baranya S (2020) Comparative assessment of fluvial suspended sediment concentration analysis methods. *Water* 12(3):873
- Rastgar H and Habibi M (2010) An investigation on five methods of sediment discharge estimation in Jagin River, Hormozgan province. *Journal of Watershed Engineering and Management* 3(1):12-20 (In Persian)
- Rymaszewicz A, Bruen M, O'Sullivan JJ, Turner JN, Lawler DM, Harrington JR, Conroy E, and Kelly-Quinn M (2018) Modelling spatial and temporal variations of annual suspended sediment yields from small agricultural catchments. *Science of the Total Environment* 619:672-684
- Sadeghi SHR (2018) Superior innovator of "Design and manufacturing of 1st automatic suspended sediment sampler of Iran". At Technology Development Council of Water, Drought, Erosion and Environment, Vice Presidency for Science and Technology of Iran, 2018 (In Persian)
- Sadeghi SHR and Saeidi P (2009) Suspended sediment: A suitable estimator for soil organic matter loss. *Journal of Water and Soil* 23(1):221-228 (In Persian)
- Sadeghi SHR and Singh VP (2017) Dynamics of suspended sediment concentration, flow discharge and sediment particle size interdependency to identify sediment source. *Journal of Hydrology* 554:100-110
- Sadeghi SHR and Zakeri MA (2015) Partitioning and analyzing temporal variability of wash and bed material loads in a forest watershed in Iran. *Journal of Earth System Science* 124(7):1503-1515
- Sadeghi SHR, Khaledi Darvishan V, Vafakhah M, Moradi RekabdarKolaei HR, Nasiri Khiavi A, Rajabi

- MR, Miar Naeimi S, Pournabi S, Ebrahimi Gatgash Z, and Zaki SA (2021) Integrated and problem-based management of the watershed using strategic planning framework. *Iranian Journal of Watershed Management Science* 15(52):63-66 (In Persian)
- Sadeghi SHR, Saeidi P, and Telvari AR (2018) Contribution of wash and channel sediment sources in supplying storm suspended sediment load in the Galazchai Watershed. *Water Resources Engineering Journal* 10(35):17-26 (In Persian)
- Saeidi P and Sadeghi SHR (2010) Analysis of observed sedimentgraphs and rating loops on storm basis in educational watershed of Tarbiat Modares University, Iran. *Journal of Water and Soil Conservation* 17(1):97-112 (In Persian)
- Saleh BE and Teich MC (2019) *Fundamentals of photonics*. John Wiley & Sons
- Sedaei N and Soleimani K (2013) Comparison of two estimation formulae with the measured values and implication of path analyzing method in Armand River. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 3(10):53-65 (In Persian)
- Seeger M, Errea MP, Begueria S, Arnáez J, Martí C, and Garcia-Ruiz JM (2004) Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology* 288(3-4):299-311
- Siadatmoosavi Sm, Habibi M, and Khoshkholgh A (2015) Device for measuring time series of suspended sediment concentration in water using light scattering return. The 17th Marine Industry Conference, Kish, <https://civilica.com/doc/474551/> (In Persian)
- USEPA (2000) The quality of our nation's waters. A summary of the national water quality inventory. Report to Congress, Office of Water, 841-S-00-001, Washington, DC. 19 p
- Woo HS, Julien PY, and Richardson EV (1986) Wash load and fine sediment load. *Journal of Hydraulic Engineering* 112(6):541-545
- Zheng M (2018) A spatially invariant sediment rating curve and its temporal change following watershed management in the Chinese Loess Plateau. *Science of the Total Environment* 630:1453-1463