



توسعه و ارزیابی فناوری اندازه گیری غلظت رسوبات معلق در محیط های آبی به روش اندازه گیری نوری

فاطمه برزگری بنادکوکي^{۱*}، شروین فقیهی راد^۲، محمدتقی دستورانی^۳

۱ دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲ پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط های آبی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران

۳ دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶

کلمات کلیدی:

بازتاب نوری

شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

کدورت سنج

رگرسیون بردار پشتیبان

هوش مصنوعی

خلاصه: پایش رسوبات معلق نقش مهمی در شناخت رفتار رودخانه، شناسایی کانون های فرسایش و رسوب و مدیریت بهتر اراضی آبخیزها ایفا می کند. در حال حاضر به دلیل هزینه های بالای پایش مستمر رسوبات معلق، برنامه ریزی و مدل سازی جهت مهار فرسایش با چالش های جدی روبروست. هدف از این پژوهش، توسعه فناوری و ارزیابی دستگاه بازتاب نوری اندازه گیر رسوب معلق با سامانه توام چند منبع نوری همراه با مدل سازی هوش مصنوعی می باشد. دستگاه مذکور پس از ساخت، طی مراحل مختلف آزمایشی در آزمایشگاه هیدرولیک موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو مورد بررسی قرار گرفت. بررسی عملکرد دستگاه طی دو مرحله واسنجی و صحت سنجی انجام شد. در فرایند بررسی، تعداد ۴۰ نمونه رسوب تولید و نمونه برداری شد که ۷۰٪ آن ها برای آموزش دستگاه و ۳۰٪ باقی مانده داده ها جهت صحت سنجی استفاده شد. از کدورت سنج مرجع و نمونه برداری دستی جهت آزمون درستی عملکرد دستگاه استفاده گردید. منحنی های ترسیم شده، بیان گر همبستگی بسیار خوب بین عدد نوری ثبت شده توسط دستگاه و غلظت رسوب معلق می باشد. به منظور ارتقاء نتایج پیش بینی دستگاه، از روش هوشمند مبتنی بر آمار رگرسیون ماشین بردار (SVR) و همچنین شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) استفاده گردید. در نهایت نتایج حاصله توسط شاخص های میانگین خطای مطلق (MAPE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب ناش ساتکلیف (NSE)، ضریب همبستگی (R) و ضریب تبیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد استفاده از مدل MLP در مقایسه با نتایج حاصل از دستگاه بدون اعمال هوش مصنوعی و نیز در مقایسه با مدل SVR در بهبود نتایج پیش بینی رسوب معلق دارد. مقادیر شاخص های ارزیابی برای مدل MLP به ترتیب برابر با ۰/۰۲۳، ۰/۷۶۰۸، ۰/۹۹۷، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۹ می باشد.

مختلف و حتی گاهاً بر اساس تغییرات مکانی کوچک نوسانات چشم گیری دارد [۷]. در حال حاضر بیش از یک قرن است که محققان و دانشمندان علم هیدرولوژی به طور ویژه به بررسی رسوب معلق رودخانه ها پرداخته اند و در این راستا روش های مختلفی به وجود آمده است. استفاده از روش های تجربی در بررسی رسوب معلق به اوایل قرن نوزدهم برمی گردد. اندازه گیری رسوب معلق، برای اولین بار توسط گراس و سابورس در سال ۱۸۰۸ انجام گرفت [۸]. سپس در سال ۱۹۶۳ از وسایل جنبی نظیر نمونه بردارهای پیوسته عمقی برای نمونه برداری مناسب تر استفاده شد [۹]. روش سنتی نمونه برداری رسوب معلق، هنوز هم به عنوان روش متداول برآورد رسوب در بسیاری از کشورها - از جمله ایران - می باشد. این روش به عنوان یک روش مرجع و استاندارد برای واسنجی حسگرهای اندازه گیری رسوب استفاده می گردد. میزان خطای این روش در مرحله نمونه گیری و آنالیز آزمایشگاهی حدوداً ۲۰

۱- مقدمه

توسعه شتاب زده و برخی فعالیت های انسانی، تهدید مهمی برای کیفیت آب رودخانه ها و پایداری اکوسیستم ها محسوب می گردد [۱]. فرسایش به عنوان اولین نشانه کاربری نامناسب و تخریب اراضی، در قالب بار رسوبی، در رودخانه های زهکش آبخیزها نمایان می گردد [۲]. به منظور بررسی راهکارهای درمانی حوزه های آبخیز و ارائه استراتژی های حفاظتی مناسب، اطلاع از میزان فرسایش و بخصوص بار رسوبی انتقالی در رودخانه ها ضروری به نظر می رسد [۳].

برآورد میزان تولید رسوب در حوضه های آبخیز [۴] و برآورد میزان خروج آلاینده ها [۵ و ۶] ارتباط مستقیم با دقت برآورد میزان رسوب معلق دارد. بررسی ها نشان می دهد میزان رسوب معلق جریان در بازه های زمانی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: barzegari@pnu.ac.ir



بر اساس نظر رای و همکاران^۹ (۲۰۱۵) و هوآن و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۵) روش‌های نوری نسبت به سایر روش‌های نمونه‌گیری غیرمستقیم رسوب معلق از توسعه و استقبال بیشتری برخوردار بوده‌اند [۲۰ و ۱۲]. این روش در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸-۱۴ و ۲۶-۲۱].

با توجه به مزیت‌های موجود در دستگاه‌های اندازه‌گیر نوری رسوب معلق، در این پژوهش از تکنولوژی موجود در این دستگاه‌ها جهت ساخت اندازه‌گیر رسوب معلق استفاده شد.

هدف اصلی از این مطالعه ساخت دستگاه و توسعه فناوری بومی مطابق با استانداردهای (ASTM) برای مدیریت مقادیر معلق با استفاده از فناوری بازپخش نور می‌باشد. در این راستا از تکنولوژی موجود در کدورت‌سنج‌های فتوالکتریک نسبتی با چند منبع نوری - که پیشرفته‌ترین کدورت‌سنج موجود می‌باشد- استفاده شد. از نظر نوع کارکرد در ارتباط با جریان رودخانه نیز، دستگاه به صورت صحرایی و قابل استقرار در جریان رودخانه می‌باشد که از این نظر دارای طراحی منحصر بفرد است. به همین دلیل جریان طبیعی بدون دست‌خوردگی، از داخل دستگاه عبور می‌کند و مشکلاتی نظیر پرشدگی ناقص مجرای عبوری جریان موجود، حباب، ته نشینی رسوب و ... وجود نخواهد داشت. از طرفی، طراحی مقطع، نحوه قرارگیری منابع نوری و گیرنده‌ها به گونه‌ایست که تفاوت‌ها و قابلیت‌های قابل ملاحظه‌ای با دستگاه‌های مشابه موجود دارد.

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

پژوهش حاضر طی دو مرحله انجام شد.

مرحله اول: طراحی و ساخت دستگاه مطابق با استانداردهای
 ASTM D6698; 2014. ASTM D7512; 2009.
 Standard Method, 180.1 EPA, 1999. 7027 ISO
 (B 2130)

برای دستگاه‌های بازتاب نوری [۳۱-۲۷]

در ساخت دستگاه مورد پژوهش، از دو لامپ LED به عنوان منابع نوری استفاده گردید. این منابع نوری، امواج الکترومغناطیس را با طول موج نور مرئی ساطع می‌کنند. همچنین از دو آشکارساز نوری در زوایای ۱۸۰ و ۹۰ درجه نسبت به منابع نوری استفاده گردید. گیرنده‌ها از نوع فوتودیود می‌باشند که در واقع نوعی حسگر نوری است که نور دریافتی را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند. گیرنده فوتودیود که روبروی منبع نوری قرار دارد،

9 Rai et al.

10 Haun et al.

درصد می‌باشد [۱۰]. روش مذکور به دلیل مواردی نظیر هزینه زیاد نظارت، زمان بر بودن و برخی اوقات خطرات دسترسی به مکان‌های سیلابی، معمولاً با مشکلات اجرایی متعددی مواجه است [۱۱]. به علت موارد ذکر شده، سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۱ بین سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۸، بیش از ۷۵٪ از ایستگاه‌های هیدرومتری سنتی را به تکنولوژی‌های جدید اندازه‌گیری رسوب مجهز نمود. روش‌های جدید اندازه‌گیری رسوب معلق، روش‌های غیرمستقیم هستند و در دهه‌های اخیر توسعه بیشتری یافته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های صوتی، لیزری، نوری و اختلاف فشاری اشاره نمود. از بین روش‌های یاد شده، روش نوری در زمینه نمونه‌برداری پیوسته رسوب معلق روشی مطرح می‌باشد. کدورت‌سنج‌های نوری ابزاری برای اندازه‌گیری رسوب معلق در مقاطع رودخانه هستند که استفاده از آن‌ها به عنوان ابزار پایش مداوم رسوب معلق منجر به تولید سری‌های زمانی انتقال رسوب می‌گردد [۱۱-۱۳]. روش نوری شامل روش عبور نور و روش بازتاب نوری (OBS)^۲ می‌باشد. ناواراتیل و همکاران^۳ (۲۰۱۱)، بیان و همکاران^۴ (۲۰۱۲)، لین و همکاران^۵ (۲۰۱۱)، شوارتز و همکاران^۶ (۲۰۱۱) و هایمن و همکاران^۷ (۲۰۱۴) در مورد واسنجی دستگاه‌های کدورت‌سنج رسوب معلق، فعالیت‌هایی را انجام دادند [۱۸-۱۴].

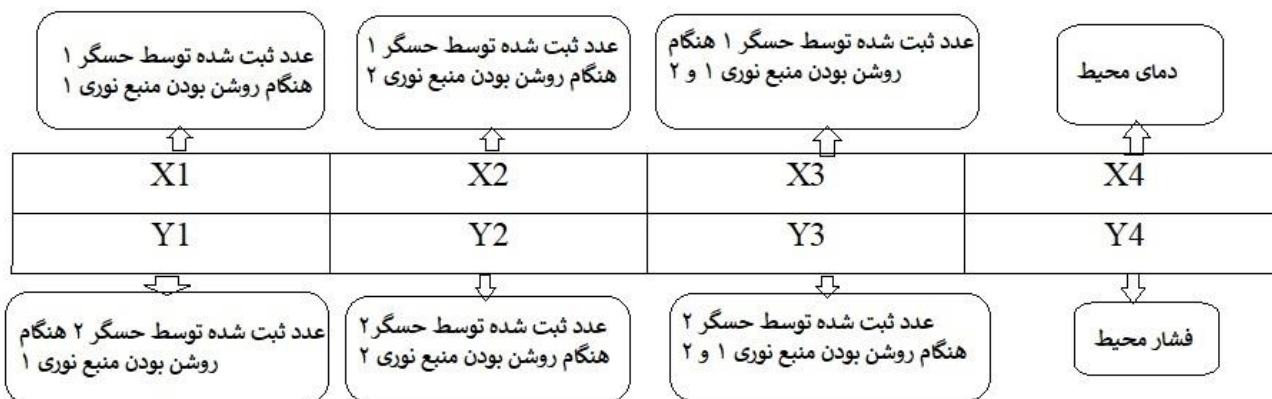
از مزیت عمده روش‌های نمونه‌برداری پیوسته در مقایسه با روش سنتی نمونه‌برداری رسوب معلق، می‌توان هزینه کم و تعداد نمونه‌های زیادتر را نام برد. نمونه‌برداری سنتی رسوب معلق برای صحت‌سنجی روش‌های نمونه‌گیری مداوم رسوب معلق مورد نیاز است. دستگاه‌های جدید باید در طول مقطع عرضی و نیز در فصل‌های مختلف، مورد واسنجی قرار بگیرند. گری و گارتنر^۸ (۲۰۱۰) دو مرحله واسنجی را برای این وسایل ضروری می‌دانند:

الف) واسنجی اولیه وسیله مورد نظر

ب) واسنجی در مقطع عرضی رودخانه

حالت دوم برای تطبیق وسیله مورد نظر با شرایط رودخانه لازم می‌باشد [۱۹].

- 1 United State Geology Survey (USGS)
- 2 Optical Backscatter Sources
- 3 Navratil et al.
- 4 Bian et al.
- 5 Lin et al.
- 6 Schwarz et al.
- 7 Haimann et al.
- 8 Gray and Gartner



شکل ۱. نحوه عملکرد گیرنده‌ها و منابع نوری

Fig. 1. The performance of receivers and light sources

دستگاه مذکور، استفاده از پرتوهای منابع نوری همزمان موازی و ۹۰ درجه برای یک گیرنده می‌باشد که این مورد (منابع نوری همزمان) برای اولین بار در این دستگاه مورد استفاده قرار گرفت.

مرحله دوم: آزمایش و واسنجی دستگاه

بررسی عملکرد و حساسیت دستگاه به رسوبات با دامنه

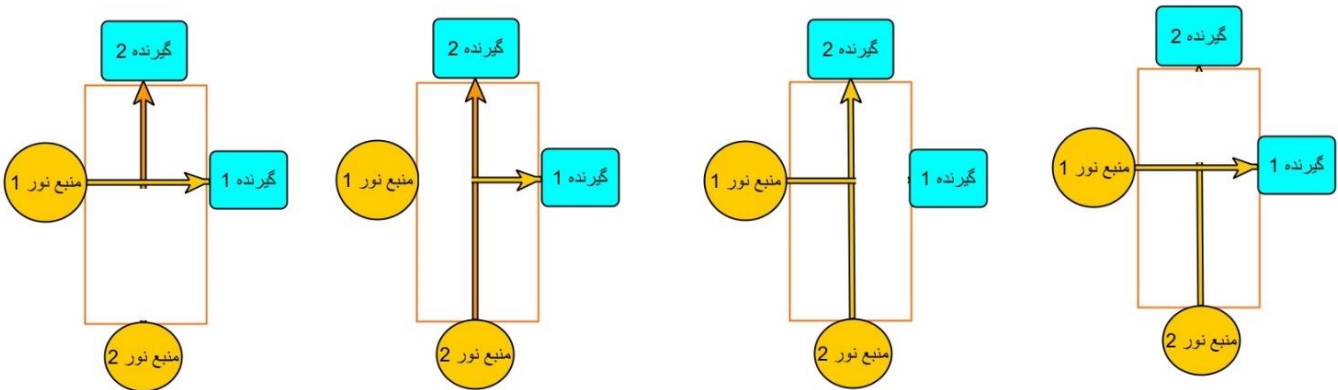
رنگی متفاوت

هدف از ساخت این دستگاه، پایش پیوسته رسوب معلق در رودخانه‌های مختلف می‌باشد. از طرفی رنگ رسوبات مناطق مختلف، با توجه به نوع سازندها، میزان هوموس، اقلیم و ... متفاوت است. با توجه به این که رنگ رسوبات، از جمله موارد تأثیرگذار در عبور و انعکاس نور می‌باشد، لذا جهت بررسی حساسیت و نحوه عملکرد دستگاه در مقابل رسوبات با رنگ‌های مختلف، طیف کوچکی از رسوبات با رنگ‌های روشن تا تیره تهیه و سپس عملکرد دستگاه مورد آزمون قرار گرفت. برای بررسی حساسیت دستگاه و بازتاب نور به ازای رسوبات رنگ‌های مختلف، ابتدا ۴ نمونه خاک با رنگ‌های قهوه‌ای تیره، قهوه‌ای روشن، زرد و قرمز تهیه و سپس برای هر نمونه خاک، با اضافه نمودن ۱۰ گرم خاک سرد شده با الک ۱۴۰ در هر مرحله به ۵۰ لیتر آب در گردش در فلوم آزمایشگاهی، جریان‌های با غلظت‌های مختلف ساخته شد. میزان ولتاژ عبوری دستگاه برای غلظت‌های مختلف نمونه‌ها ثبت گردید.

با افزایش غلظت رسوب معلق جریان، مقدار نور کمتری را دریافت می‌کند و گیرنده‌ای که در زاویه ۹۰ درجه نسبت به منبع نوری قرار دارد نور بازتاب شده از رسوبات معلق را دریافت می‌کند. دلیل قرارگیری گیرنده در زاویه ۹۰ درجه نسبت به منبع نوری این است که پراکندگی ۹۰ درجه برای تمام اندازه ذرات، بیشترین پراکندگی است [۳۲]. ولتاژ خروجی هر دو حسگر (گیرنده) توسط سیستم جمع‌آوری داده (دیتالاگر) جمع‌آوری و تبدیل به حالت دیجیتال می‌شود که روی صفحه نمایش دستگاه و نیز حافظه موجود قابل مشاهده و ذخیره می‌باشد. در مجموع ۸ داده برای هر مرحله قرائت، جمع‌آوری می‌گردد که مفهوم این اعداد در شکل ۱ آمده است.

اعداد X4 و Y4 به ترتیب دما و فشار محیط را نشان می‌دهد. اعداد X1 تا X3 و Y1 تا Y3 مربوط به حالات مختلف، اعم از عملکرد مجزا و ترکیبی گیرنده‌ها و منابع نوری می‌باشد.

در طراحی مقطع قرارگیری منابع نوری و گیرنده‌ها، با توجه به آزمایشات اولیه و بهره‌مندی از منابع علمی و استاندارد موجود در این زمینه، از مقطع مستطیلی برای مجرای عبور آب و محل قرارگیری گیرنده‌ها و منابع نوری استفاده گردید (شکل ۲). از مزیت‌های استفاده از این مقطع، قرارگیری گیرنده‌ها و منابع نوری در دو فاصله متفاوت می‌باشد. فاصله کم، برای اندازه‌گیری رسوب جریان‌های غلیظ و فاصله زیادتر برای جریان‌های کم غلظت کاربرد خواهد داشت. این مسئله بازه‌ی کاربرد دستگاه را گسترده‌تر از دستگاه‌های مشابه قبلی خواهد کرد از جمله نوآوری‌های دیگر در طراحی



شکل ۲. مقطع عبور آب و وضعیت قرارگیری گیرنده‌ها و منابع نوری

Fig. 2. Cross-section of water passage and the location of receivers and light sources



شکل ۳. قرارگیری دستگاه در فلوم هیدرولیکی و عبور جریان رسوبی

Fig. 3. Placement of the turbidimeter in the hydraulic flume and the sediment flow transmission

نمونه انجام شد. نمونه‌های رسوب با روش TSS مورد آنالیز قرار گرفتند (شکل ۴) و همزمان اعداد مربوط به خروجی دستگاه نیز قرائت گردید. ۷۰ درصد از داده‌ها برای واسنجی و آموزش دستگاه و ۳۰ درصد باقی‌مانده، جهت ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد دستگاه استفاده شد. در ضمن از کدورت‌سنج مرجع مدل Turb@ 355 T نیز برای بررسی عملکرد دستگاه استفاده گردید (شکل ۵).

مرحله آزمایش نهایی و واسنجی در آزمایشگاه مرجع
 پس از بررسی و آزمایشات اولیه دستگاه و اطمینان از عملکرد مناسب آن، دستگاه مذکور به آزمایشگاه هیدرولیک موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انتقال و با دامنه‌ای از جریان‌های با غلظت‌های متفاوت رسوب (۲۰-۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳).
 جریان رودخانه در محیط فلوم از حالت آرام تا آشفته شبیه‌سازی و برداشت



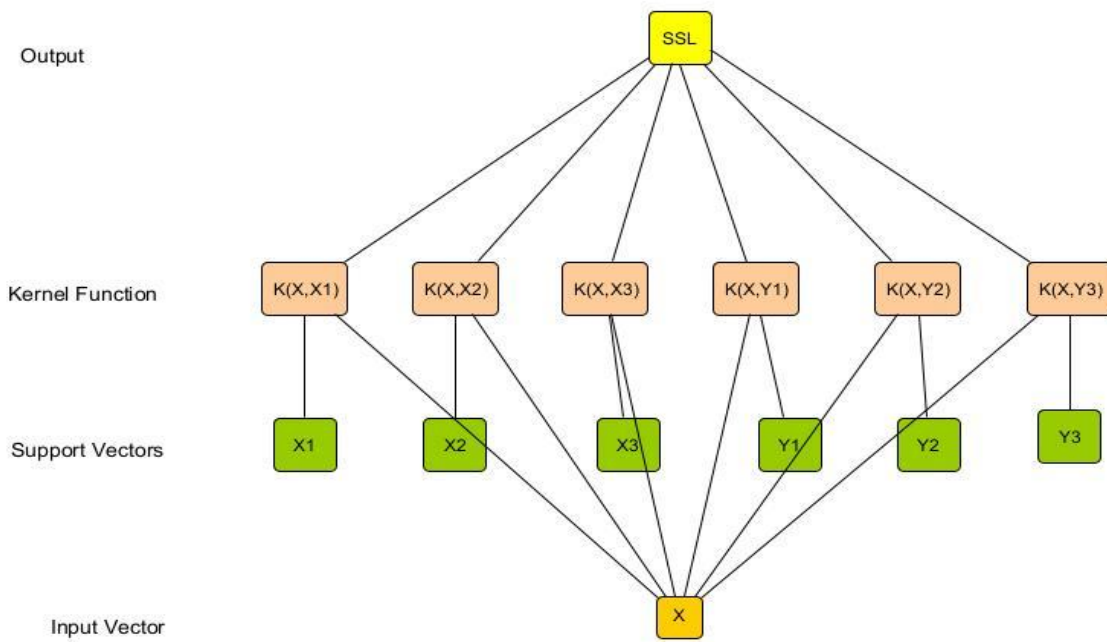
شکل ۴. نمونه گیری جهت بررسی غلظت جریان رسوبی با روش TSS

Fig. 4. Suspended sediment sampling to investigate the sediment concentration by TSS method



شکل ۵. کدورت سنج مرجع مدل Turb @ T ۳۵۵

Fig. 5. Turb @ T 355 reference turbidimeter



شکل ۶. نمای کلی روش SVR مورد استفاده در تحقیق.

Fig. 6. Schematic of the SVR model

هدف SVR تخمین پارامترهای وزن و اریب تابعی است که بهترین انطباق را بر داده‌ها داشته باشد [۳۳]. نمای کلی این روش در شکل ۶ آمده است. در این پژوهش از حالت‌های مجزا و تلفیقی نتایج حاصل از کدورت‌سنج (خروجی‌های ۶ گانه کدورت‌سنج)، حالت‌های X_1 تا X_3 و Y_1 تا Y_3 به عنوان ورودی مدل SVR استفاده گردید (جهت درک بهتر علائم رجوع شود به شکل ۱).

مدل شبکه عصبی چند لایه (MLP)

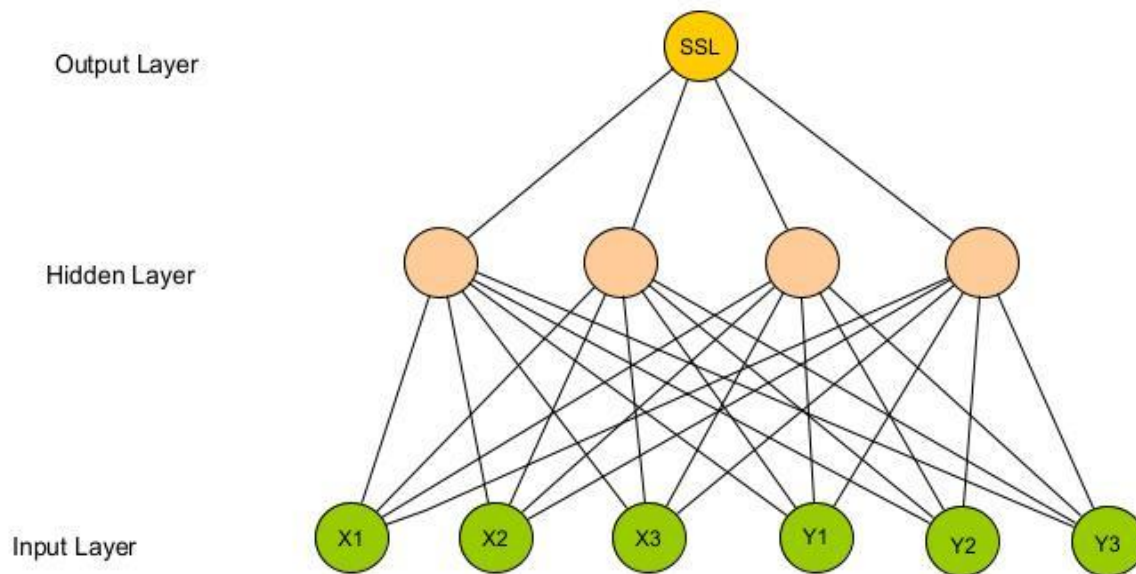
شبکه‌ی عصبی چندلایه به عنوان یکی از مدل‌های موفق محاسبات نرم در زمینه‌ی پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی می‌باشد. ساده‌ترین بخش شبکه، نرون نام دارد [۳۴]. نرون‌ها به صورتی با هم ترکیب می‌شوند که خروجی، ترکیب خطی از ورودی‌ها با کمک تابع تبدیل فعال‌سازی باشد. به طور معمول این شبکه‌ها از سه لایه تشکیل شده‌اند، لایه‌ی ورودی، لایه‌ی میانی یا پنهان و لایه‌ی خروجی. سیگنال ورودی در شبکه و در حین مسیر رو به جلو منتشر می‌شود [۳۵]. شکل ۷ ساختار شبکه‌ی عصبی چندلایه را نشان می‌دهد. مقادیر بایاس، مقادیر وزن اتصالات، تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌های پنهان از جمله مقادیر مجهول شبکه‌ی عصبی می‌باشند. در

مدل‌سازی ولتاژهای دریافتی از دستگاه با هوش مصنوعی

در نهایت جهت بالا بردن قابلیت دستگاه در اندازه‌گیری رسوب معلق، از تلفیق نتایج ولتاژ حاصل از دستگاه با مدل‌سازی هوش مصنوعی استفاده گردید. مدل‌های SVR و MLP برای این منظور استفاده گردید. استفاده تلفیقی از نتایج کدورت‌سنج و هوش مصنوعی از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

مدل رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)

مدل SVR یک نوع سیستم یادگیری نظارت شده است که هم برای گروه‌بندی و هم برای تخمین و برآورد تابع برازش داده‌ها در مسائل رگرسیون به کار می‌رود. این روش که جزء روش‌های آموزش نظارت شده محسوب می‌گردد، بین داده‌های ورودی و مقدار پارامتر وابسته، بر اساس کمینه‌سازی ریسک ساختاری ارتباط برقرار می‌کند. کمینه‌سازی ریسک ساختاری، نسبت به روش متداول کمینه‌سازی ریسک تجربی که در الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی و روش‌های کلاسیک آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای برتری است و به جواب‌های موضعی هم‌گرا نمی‌شود. هدف رگرسیون بردار پشتیبان اینست که تابع $F(x)$ را برای الگوهای آموزشی X طوری تشخیص دهد که کمترین خطا در داده‌های آزمون صورت گیرد. در حقیقت



شکل ۷. شبکه عصبی چند لایه

Fig. 7. Multilayer neural network

صحت‌سنجی

برای انجام مرحله صحت‌سنجی، ابتدا با استفاده از معادلات حاصل از مرحله واسنجی دستگاه، اعداد نوری گزارش شده از دستگاه به معادل‌های مربوط به غلظت رسوب (mg/l) تبدیل شد. سپس اعداد به دست آمده از این مرحله با اعداد حاصل از نمونه‌برداری (TSS) مقایسه و با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، ضریب تبیین، حداقل مجذور مربعات، ضریب ناش ساتکلیف مورد ارزیابی قرار گرفتند (روابط ۱ تا ۵).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

تحقیق حاضر، جهت به دست آوردن پارامترهای مقادیر وزنی، بایاس، تعداد نرون‌های پنهان و تعداد لایه‌های پنهان شبکه‌ی عصبی چندلایه از روش سعی و خطا استفاده گردید. بر این اساس تعداد لایه پنهان برابر با یک و تعداد نرون لایه پنهان ۴ عدد انتخاب شد. علاوه بر این، بر اساس مطالعات گذشته، تابع تبدیل سیگموئید که به عنوان تابع فعال‌سازی، دارای دقت بالایی در فرآیند شبیه‌سازی می‌باشد، در مطالعه‌ی حاضر مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۷).

در این مطالعه از حالت‌های مختلف مجزا و ترکیبی ولتاژ خروجی حسگرها (تعریف شده در شکل ۱) به عنوان ورودی مدل‌های MLP و SVR استفاده گردید. در هنگام آزمایش در هر دقیقه یک سری ۶ تایی از داده نمایش و در حافظه ذخیره می‌شوند. تعداد کل داده‌ها در حین آزمایش بسیار زیاد بود، بنابراین در هر بار اضافه نمودن رسوب از میانه داده‌ها به عنوان ولتاژ خروجی هر حسگر استفاده گردید. ۷۰ درصد داده برای آموزش مدل و ۳۰ درصد آن‌ها برای ارزیابی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از تمام اعداد مخابره شده در هر آزمایش (۶ داده) به عنوان ورودی مدل‌های MLP و SVR استفاده شد.

طرفی در مواردی که زاویه منبع نوری و حسگر ۹۰ درجه بوده و یا از منابع نوری همزمان به صورت تلفیقی در زوایای ۹۰ و ۱۸۰ درجه استفاده گردیده است، تاثیرپذیری حسگر از رنگ رسوبات - به خصوص در رنگ‌های نزدیک به هم - کمتر می‌شود (نمودارهای b, c, d, f). البته این آزمایش در رسوبات کم غلظت و صرفاً جهت بررسی حساسیت دستگاه به بازتاب نور در رنگ‌های مختلف انجام شده است.

نتایج حاصل از مرحله آموزش دستگاه در آزمایشگاه هیدرولیک موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو در شکل ۹ آمده است.

همانطور که از نمودارهای a تا f در شکل ۹ مشخص است، ضریب همبستگی بسیار خوبی (بالای ۰.۹۵٪) بین اعداد گزارش شده از دستگاه رسوب‌سنج و معادل‌های رسوب حاصل از TSS وجود دارد. البته در برخی موارد این ضریب بالاتر می‌باشد به عنوان مثال در نمودارهای b و c ضریب همبستگی ۰.۹۹٪ است. در توضیح نمودارها لازم به ذکر است که در مواردی که در دستگاه از خاصیت عبور نوری استفاده می‌شود (منبع نوری و حسگر در زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند)، با افزایش غلظت رسوبات، مقدار ولتاژ دریافتی توسط حسگر کاهش می‌یابد، زیرا افزایش غلظت، مانع عبور نور می‌شود و مقدار نور دریافتی توسط حسگر کاهش می‌یابد (نمودارهای a, e). در مواردی که از خاصیت انعکاس نور استفاده می‌شود (حسگر و حداقل یک منبع نوری در زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند)، با افزایش غلظت رسوب، میزان نور انعکاس یافته توسط ذرات رسوبی افزایش می‌یابد و لذا حسگر ثبت کننده نور انعکاسی، مقدار ولتاژ بالاتری را نشان می‌دهد (نمودارهای b, c, d, f). لذا با افزایش غلظت رسوبات، نمودارهای a و e حالت کاهشی و سایر نمودارها حالت افزایشی دارند.

صحت‌سنجی

نتایج حاصل از مرحله صحت‌سنجی در جدول ۵ ارائه گردیده است. نزدیک بودن معیار میانگین درصد خطای مطلق به صفر بیان‌گر دقت مناسب اعداد قرائت شده توسط دستگاه می‌باشد. در مورد معیارهای ناش ساتکلیف، ضریب همبستگی و ضریب تعیین نیز، نزدیک بودن عدد مربوط به یک، تایید کننده صحت اعداد قرائت شده توسط دستگاه می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج حاصل از مرحله صحت‌سنجی، عملکرد دستگاه در گزارش مقادیر مختلف رسوب از نظر آماری مناسب بوده و در درجه بالایی از قابلیت اعتماد قرار می‌گیرد استفاده همزمان از همه اعداد گزارش شده توسط حسگرهای دستگاه در هر آزمایش به عنوان ورودی الگوریتم‌های هوش

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

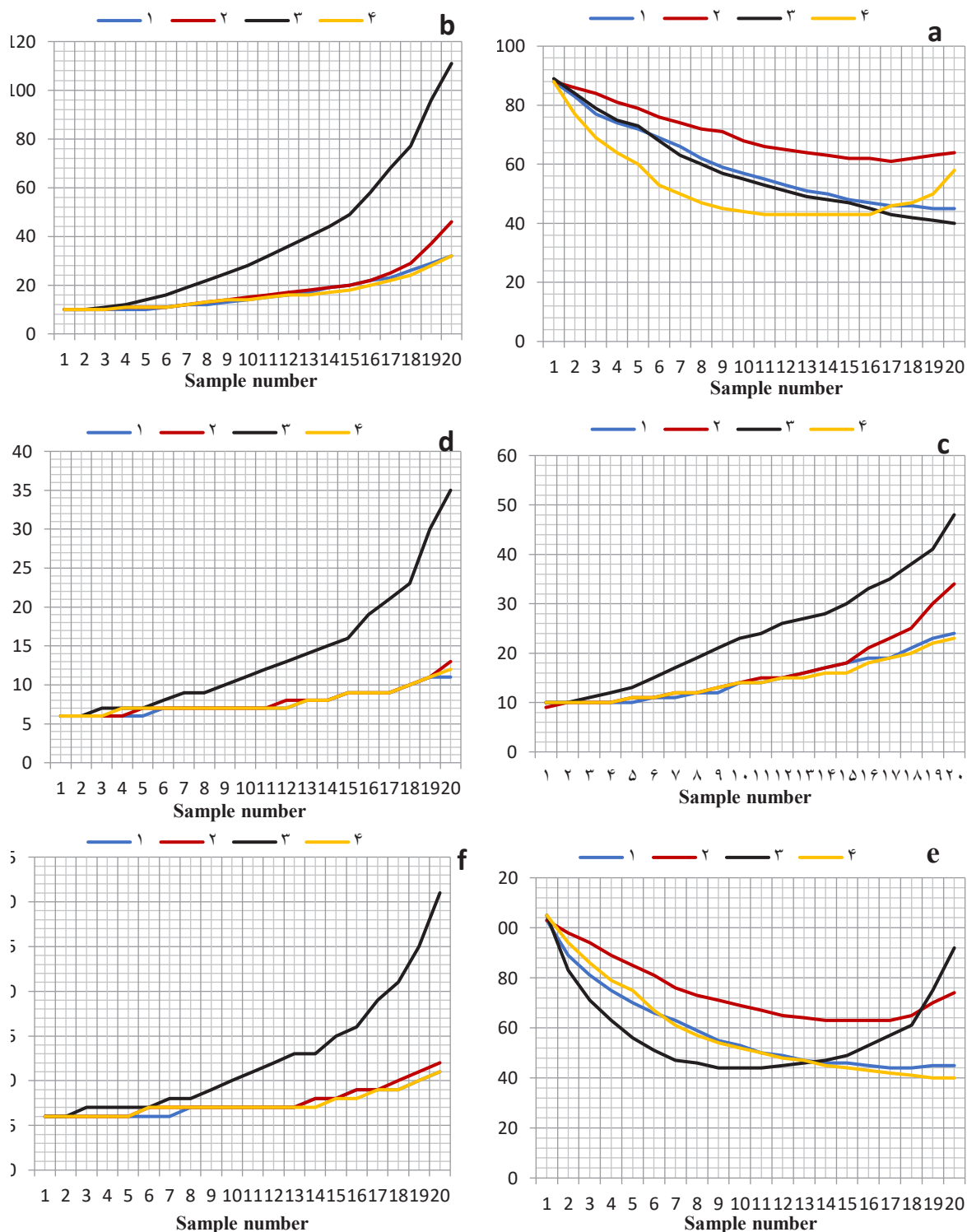
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

در این روابط y_i غلظت رسوب برآوردی (mg/l)، \bar{y} متوسط مقادیر برآوردی رسوب (mg/l)، x_i غلظت رسوب مشاهده‌ای (mg/l)، \bar{x} متوسط مقادیر مشاهده‌ای رسوب (mg/l) و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

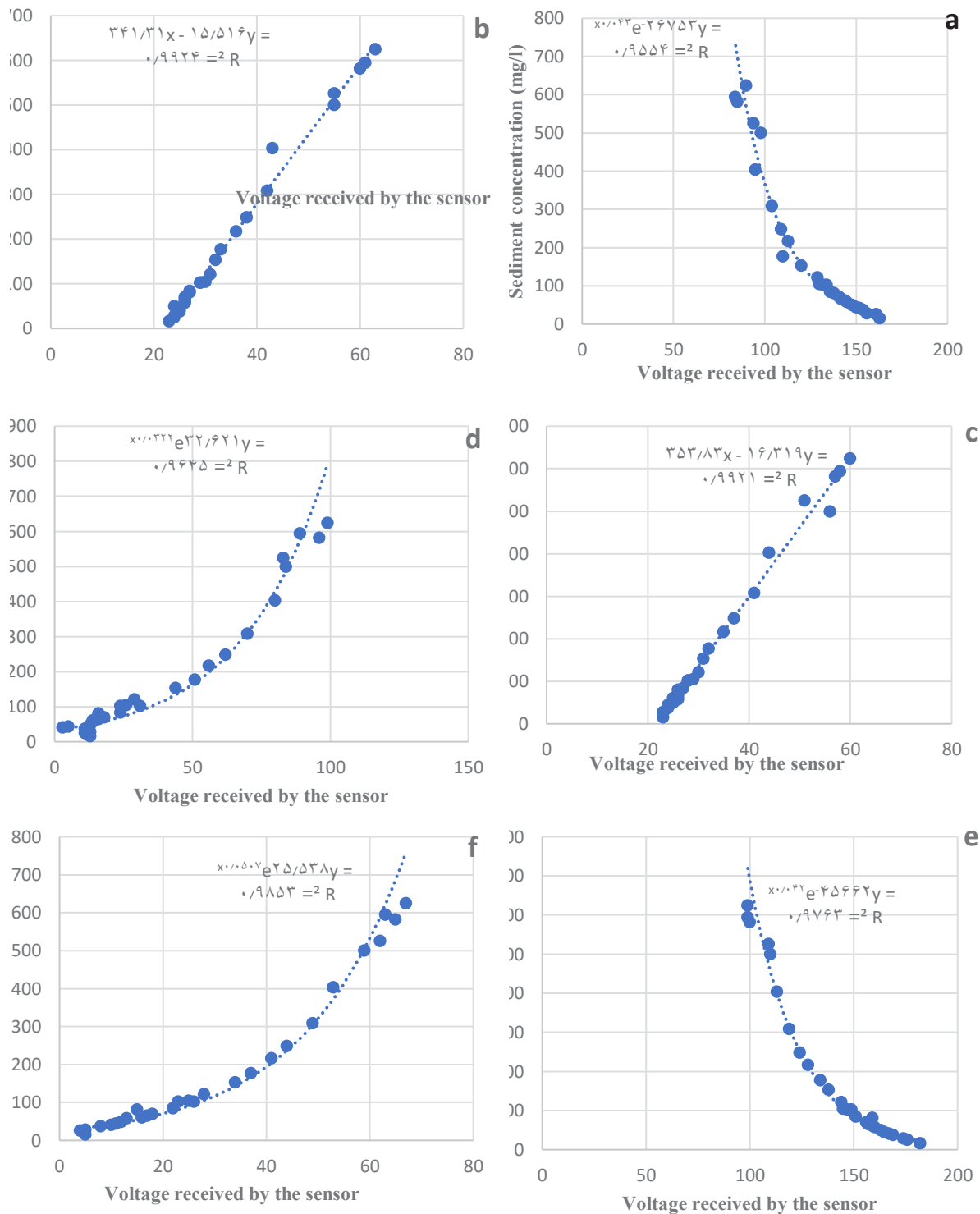
نتایج آزمایش حساسیت دستگاه در بازتاب نور از خاک‌های با رنگ متفاوت، در شکل ۸ نشان داده شده است.

با توجه به این مطلب که خاک شماره ۲ تیره‌ترین خاک می‌باشد و سپس خاک‌های شماره ۱، ۳ و ۴ به ترتیب، روشن‌تر می‌شوند، بهترین تمایز این تغییر رنگ در شکل a نشان داده شده است. به طوری که خاک تیره‌تر (خاک شماره ۲) در بالاترین وضعیت و سپس به ترتیب خاک‌های شماره ۱، ۳ و ۴ قرار می‌گیرند. در نمودار a وضعیت حسگر و منبع نوری به صورت موازی (۱۸۰ درجه) قرار دارد و لذا پدیده عبور نوری غالب است. از آنجا که خاک‌های روشن‌تر عبور نور کمتر و انعکاس بیشتری دارند، لذا نور عبوری (و به تبع آن، ولتاژ دریافتی توسط حسگر) کاهش می‌یابد، در حالی که در خاک‌های تیره‌تر، انعکاس نور کمتر و عبور نوری بیشتر می‌باشد و لذا نمودار خاک‌های تیره‌تر، ولتاژ بیشتری را نشان می‌دهد. این نتایج با نتایج مطالعات کبیر و همکاران در سال ۲۰۲۰ همخوانی دارد [۳۶]. در نمودار e نیز وضعیت مشابه با نمودار a می‌باشد، منتهی به دلیل این که مسیر عبور نور طولانی‌تر بوده و حسگر و منبع نوری در فاصله بیشتری نسبت به یکدیگر قرار دارند (شکل ۱)، تفکیک نمودار رنگ‌ها به خوبی نمودار a انجام نشده است. از



شکل ۸-الف. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۱ هنگام روشن بودن منبع نوری ۱. ب. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۱ هنگام روشن بودن منبع نوری ۲. ج. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۱ هنگام روشن بودن منبع نوری ۱ و ۲. د. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۲ هنگام روشن بودن منبع نوری ۱. ه. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۲ هنگام روشن بودن منبع نوری ۲. و. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۲ هنگام روشن بودن منابع نوری ۱ و ۲.

Fig. 8-a. Voltage received by the receiver 1 when the light source 1 is on, b. Voltage received by the receiver 1 when the light source 2 is on, c. Voltage received by the receiver 1 when the light source 1 and 2 are on, d. Voltage received by the receiver 2 when the light source 1 is on, e. Voltage received by the receiver 2 when the light source 2 is on, f. Voltage received by the receiver 2 when the light sources 1 and 2 are on



شکل ۹-الف. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۱ هنگام روشن بودن منبع نوری ۱. ب. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۱ هنگام روشن بودن منبع نوری ۲. ج. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۱ هنگام روشن بودن منبع نوری ۱ و ۲. د. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۲ هنگام روشن بودن منبع نوری ۱. ه. ولتاژ دریافتی توسط گیرنده ۲ هنگام روشن بودن منبع نوری ۱ و ۲.

Fig. 9-a. Voltage received by the receiver 1 when the light source 1 is on, b. Voltage received by the receiver 1 when the light source 2 is on, c. Voltage received by the receiver 1 when the light source 1 and 2 are on, d. Voltage received by the receiver 2 when the light source 1 is on, e. Voltage received by the receiver 2 when the light source 2 is on, f. Voltage received by the receiver 2 when the light sources 1 and 2 are on

جدول ۵. نتایج حاصل از صحت سنجی دستگاه در حالت های مختلف.

Table 5. Results of the turbimeter validation in different states.

نوع ضریب	مدل SVR	مدل MLP	نتایج حاصل از صحت سنجی دستگاه بدون اعمال مدل هوش مصنوعی
میانگین درصد خطای مطلق ^{۱۱} (MAPE)	۰/۰۳۵	۰/۰۲۳	۰/۱۱
مجدور میانگین مربعات خطا ^{۱۲} (RMSE)	۲۳/۶۴۴	۷/۶۰۸	۴۴/۵۴
ضریب ناش ساتکلیف ^{۱۳} (NSE)	۰/۹۹۲	۰/۹۹۷	۰/۹۷
ضریب همبستگی ^{۱۴} (R)	۰/۹۹۶	۰/۹۹۹	۰/۹۸
ضریب تبیین ^{۱۵} (R ²)	۰/۹۹۲	۰/۹۹۹	۰/۹۷

هنگام ارسال همزمان پرتوهای منابع نوری ۹۰ و ۱۸۰ درجه. بررسی ها نشان داد قرارگیری منابع نوری و حسگر در زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم باعث کاهش خطای تاثیر رنگ رسوبات در برآورد رسوب معلق می گردد. از طرفی عملکرد همزمان دو منبع نوری موجب بالا رفتن دقت دستگاه در پیش بینی رسوب معلق گردید. همچنین استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی و تلفیق حالت های مختلف خروجی حسگرها (عملکرد مجزا و ترکیبی منابع نوری) به عنوان ورودی مدل های هوشمند باعث بهبود نتایج پیش بینی در حد قابل توجهی می گردد.

با توجه به این که تهیه رسوبات با غلظت های بالا و شبیه سازی جریان رودخانه در محیط آزمایشگاه، هزینه بر و دشوار می باشد، پیشنهاد می گردد به منظور اعتبارسنجی دستگاه در رودخانه و بستر طبیعی، آزمایش هایی در محل رودخانه به مدت یک سال آبی نیز انجام گیرد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از اعتبارات مالی شرکت مدیریت منابع آب ایران طی قرارداد شماره WRE2-94020 انجام گرفته است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از تلاش ها و همکاری های شرکت مدیریت منابع آب ایران، موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس که نقش مهمی در مهیاسازی بستر لازم برای انجام این پژوهش داشتند، تشکر و قدردانی کنند.

¹¹ Mean Absolute Percentage Error

¹² Root mean square Error

¹³ Nash Sutcliffe

¹⁴ Correlation Coefficient

¹⁵ Coefficient of Determination

مصنوعی باعث بهبود توان پیش بینی رسوب معلق می شود و دقت پیش بینی رسوب را افزایش می دهد به طوری که همه معیارهای صحت سنجی مندرج در جدول ۵ در حالت ادغام نتایج دستگاه با الگوریتم های هوشمند، بهبود قابل توجهی داشتند. استفاده از مدل MLP در مقایسه با مدل SVR باعث افزایش دقت بیشتری در پیش بینی رسوب معلق گردیده است. عدد ضریب تبیین به دست آمده در این پژوهش (۹۹٪) با ضریب تبیین به دست آمده از مطالعات [۳۸ و ۳۷ و ۱۷ و ۱۵] مشابه و از ضریب تبیین به دست آمده در مطالعات [۳۹ و ۱۸ و ۱۶ و ۱۴] بیشتر می باشد.

دلیل حصول ضریب تبیین بالا در این آزمایش، استفاده توأمان از ترکیب دو منبع و دو حسگر نوری در زوایای ۹۰ و ۱۸۰ درجه و همچنین تلفیق نتایج خروجی حسگرها در حالت های مجزا و تلفیقی (۶ ورودی شامل X1:X3, Y1:Y3) در فرایند مدل سازی هوش مصنوعی می باشد.

۴- نتیجه گیری

مقوله اندازه گیری مداوم رسوب معلق به عنوان هشدار و زیربنای محاسبات مربوط به برآورد خسارات حاصل از هدر رفت خاک اراضی، بسیار حائز اهمیت است. علی رغم این مسئله، متأسفانه در کشور ما ابزار مناسبی برای پایش مداوم رسوب معلق در دسترس نمی باشد. هدف از این پژوهش بومی سازی و توسعه فناوری اندازه گیری رسوب معلق به وسیله ابزارهای نوری می باشد. کلیه مراحل طراحی و ساخت دستگاه در کشور و با حمایت شرکت تحقیقات منابع آب ایران انجام شد. در طراحی دستگاه از نوآوری هایی استفاده گردید که عبارت بودند از: الف) قرارگیری منبع نوری و حسگر در فواصل متفاوت کم و زیاد در قالب مقطع مستطیلی جهت اندازه گیری رسوب معلق جریان های غلیظ و کم غلظت. ب) ثبت عکس العمل حسگرهای نوری

- [12] A.K. Rai, A. Kumar, Continuous measurement of suspended sediment concentration: Technological advancement and future outlook, *Measurement*, 76 (2015) 209-227.
- [13] D. Wren, B. Barkdoll, R. Kuhnle, R. Derrow, Field techniques for suspended-sediment measurement, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(2) (2000) 97-104.
- [14] O. Navratil, M. Esteves, C. Legout, N. Gratiot, J. Nemery, S. Willmore, T. Grangeon, Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment, *Journal of Hydrology*, 398(3-4) (2011) 246-259.
- [15] S. Bian, Z. Hu, Z. Xue, J. Lv, An observational study of the carrying capacity of suspended sediment during a storm event, *Environmental monitoring and assessment*, 184(10) (2012) 6037-6044.
- [16] G.-W. Lin, H. Chen, D.N. Petley, M.-J. Horng, S.-J. Wu, B. Chuang, Impact of rainstorm-triggered landslides on high turbidity in a mountain reservoir, *Engineering Geology*, 117(1-2) (2011) 97-103.
- [17] K. Schwarz, T. Gocht, P. Grathwohl, Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in highly vulnerable karst systems, *Environmental Pollution*, 159(1) (2011) 133-139.
- [18] M. Haimann, M. Liedermann, L. Petra, H. Habersack, An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept, *International Journal of Sediment Research*, 29(2) (2014) 135-148.
- [19] J.R. Gray, J. Gartner, Overview of selected surrogate technologies for high-temporal resolution suspended sediment monitoring, in: *Proceedings of the 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, Citeseer*, 2010.
- [20] S. Haun, N. Rütger, S. Baranya, M. Guerrero, Comparison of real time suspended sediment transport measurements in river environment by LISST instruments in stationary and moving operation mode, *Flow Measurement and Instrumentation*, 41 (2015) 10-17.
- [21] I. Cáceres, J.M. Alsina, J. van Der Zanden, J.S. Ribberink, A. Sánchez-Arcilla, The effect of air bubbles
- [1] J.E. Cloern, P.C. Abreu, J. Carstensen, L. Chauvaud, R. Elmgren, J. Grall, H. Greening, J.O.R. Johansson, M. Kahru, E.T. Sherwood, Human activities and climate variability drive fast-paced change across the world's estuarine-coastal ecosystems, *Global change biology*, 22(2) (2016) 513-529.
- [2] C.E. Boyd, *Water quality: an introduction*, Springer Nature, 2019.
- [3] N. Hudson, *Soil conservation: fully revised and updated*, *Soil conservation: fully revised and updated.*, (Ed. 3) (2015).
- [4] M. Lenzi, L. Mao, F. Comiti, Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment, *Hydrological Sciences Journal*, 48(6) (2003) 899-915.
- [5] R. Hostache, C. Hissler, P. Matgen, C. Guignard, P. Bates, Modelling suspended-sediment propagation and related heavy metal contamination in floodplains: a parameter sensitivity analysis, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9) (2014) 3539-3551.
- [6] D. Walling, A. Collins, The catchment sediment budget as a management tool, *Environmental Science & Policy*, 11(2) (2008) 136-143.
- [7] H. Burchard, H.M. Schuttelaars, D.K. Ralston, Sediment trapping in estuaries, *Annual review of marine science*, 10 (2018) 371-395.
- [8] T. Sahab, *Comprehensive plan for Sistan flood control*, *Sediment studies in Sistan river*, 1992.
- [9] T.K. Edwards, G.D. Glysson, H.P. Guy, V.W. Norman, *Field methods for measurement of fluvial sediment*, US Geological Survey Denver, CO, 1999.
- [10] J. McHenry, N. Coleman, J. Willis, C. Murphree, G. Bolton, O. Sansom, A. Gill, Performance of nuclear-sediment concentration gauges, in: *Isotopes in hydrology. Proceedings of a symposium*, 1967.
- [11] J.R. Gray, J.W. Gartner, Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring, *Water resources research*, 45(4) (2009).

- [31] Standard Method 2130B, Available from Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition in: , American Public Health Association, Washington, DC, 2005.
- [32] M. Buttmann, Suspended solids measurement as reliable process control, in: Proceedings of ISA TECH EXPO Technology Update Conference, Houston, TX: Instrument Society of America, 2001, pp. 563-572.
- [33] H. Yu, S. Kim, SVM Tutorial-Classification, Regression and Ranking, Handbook of Natural computing, 1 (2012) 479-506.
- [34] T. Rajae, H. Ebrahimi, V. Nourani, A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling, Journal of hydrology, 572 (2019) 336-351.
- [35] M. Alizamir, O. Kisi, M. Zounemat-Kermani, Modelling long-term groundwater fluctuations by extreme learning machine using hydro-climatic data, Hydrological sciences journal, 63(1) (2018) 63-73.
- [36] S.M.I. Kabir, H. Ahmari, Sediment Color Effects on the Estimation of Suspended Sediment Concentration from Digital Imagery, in: World Environmental and Water Resources Congress 2020: Emerging and Innovative Technologies and International Perspectives, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2020, pp. 40-50.
- [37] Y. Shao, J.P.-Y. Maa, Comparisons of different instruments for measuring suspended cohesive sediment concentrations, Water, 9(12) (2017) 968.
- [38] Y.P. Wang, G. Voulgaris, Y. Li, Y. Yang, J. Gao, J. Chen, S. Gao, Sediment resuspension, flocculation, and settling in a macrotidal estuary, Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(10) (2013) 5591-5608.
- [39] F. Druine, R. Verney, J. Deloffre, J.-P. Lemoine, M. Chapalain, V. Landemaine, R. Lafite, In situ high frequency long term measurements of suspended sediment concentration in turbid estuarine system (Seine Estuary, France): Optical turbidity sensors response to suspended sediment characteristics, Marine Geology, 400 (2018) 24-37.
- on optical backscatter sensor measurements under plunging breaking waves, Coastal engineering, 159 (2020) 103721.
- [22] P. Ghaffari, J. Azizpour, M. Noranian, V. Chegini, V. Tavakoli, M. Shah-Hosseini, Estimating suspended sediment concentrations using a broadband ADCP in Mahshahr tidal channel, Ocean Science Discussions, 8(4) (2011) 1601-1630.
- [23] D. Felix, I. Albayrak, R.M. Boes, Continuous measurement of suspended sediment concentration: Discussion of four techniques, Measurement, 89 (2016) 44-47.
- [24] G.H. Merten, P.D. Capel, J.P. Minella, Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors, Journal of Soils and Sediments, 14(7) (2014) 1235-1241.
- [25] S. Miyata, S. Mizugaki, S. Naito, M. Fujita, Application of time domain reflectometry to high suspended sediment concentration measurements: Laboratory validation and preliminary field observations in a steep mountain stream, Journal of Hydrology, 585 (2020) 124747.
- [26] Z. Sirabahenda, A. St-Hilaire, S.C. Courtenay, M.R. Van Den Heuvel, Comparison of acoustic to optical backscatter continuous measurements of suspended sediment concentrations and their characterization in an agriculturally impacted river, Water, 11(5) (2019) 981.
- [27] A. D7512, Standard guide for monitoring of suspended sediment concentration in open channel flow using optical instrumentation, 2009.
- [28] A. D6698, Standard test method for on-line measurement of turbidity below 5 NTU in water, 2014.
- [29] EPA, Methods for the Determination of Inorganic Substances in Environmental Samples (EPA/600/R-93/100) in, USEPA (EPA) Office of Water (OW) 1993.
- [30] I. 7027, Water quality determination of turbidity in, ISO/TC 147/SC 2 Physical, chemical and biochemical methods, 1999, pp. 10.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Barzegari Banadkooki, Sh. Faghihi Rad, M. T. Dastorani , Assessment and development of optical technology for continuous suspended sediment measurement in aquatic environments, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 2051-2064.

DOI: [10.22060/ceej.2021.20356.7402](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.20356.7402)

