

Estimation of Concentration of Suspended Sediments with Optical-ultrasonic Hybrid System and ANFIS Modeling

ALI KIAPEY¹, MAHDI GHASEMI- VARNAMKHASTI^{1*}, HOSSEIN MOUSAZADEH²

1. Mechanical Engineering of Biosystems Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2. Agricultural Machinery Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University

College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: March. 3, 2020- Revised: June. 1, 2020- Accepted: June. 1, 2020)

ABSTRACT

Developing a robust and reliable estimation method to detect suspended sediment concentrations from various environmental and geomorphological aspects including water quality, riverbed sustainability engineering, flood management and aquatic habitats is an unavoidable necessity. In this research, a new approach has been developed using a combined optical-acoustic sensors and hybrid intelligence-based system of ANFIS modeling to predict the concentration of suspended river sediments. Also, two measurement systems were placed in a water tank in vitro, and every 50 seconds, 10 g of soil (passed through sieve 140) was added to the water as suspended sediment until the total sediment in the water was 100 grams. The operation was performed in 20 iterations and the output values of the two measurement methods were given as inputs. Interface structure with only optical sensor inputs with higher efficiency coefficient of determination (R^2) 0.94 and mean square error root mean square error (RMSE) 7.15 (gr) compared with the ultrasonic sensor inputs with coefficient of determination (R^2) of 0.91 and root of the mean squared error was 8.72 (gr). Also, the highest efficiency of hybrid structure with two inputs of two measurement methods had coefficient of determination (R^2) 0.97 and root mean square error was 5.26 (gr). According to the results, the best distance between receiver and transmitter in the ultrasonic sensor was between 8 and 15 cm and the use of hybrid system in sediment estimation was more efficient with an error of 3 and 1.5 percent less than the error of separate ultrasonic and optical systems.

Keywords: Suspended sediment concentration, Optical sensor, Ultrasonic sensor, ANFIS modeling.

تخمین غلظت رسوبات معلق در آب با سامانه ترکیبی نوری - فراصوتی و مدل‌سازی انفیس

علی کیایی^۱، مهدی قاسمی و نامخواستی^{۱*}، حسین موسی زاده^۲

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۳/۱۲)

چکیده

توسعه یک روش تخمین قوی و مطمئن به منظور آشکارسازی میزان غلظت رسوبات معلق از جنبه‌های مختلف زیست محیطی و ژئومورفولوژی از جمله کیفیت آب، مهندسی پایداری بستر رودخانه، مدیریت سیلاب و زیستگاه‌های آبی یک ضرورت اجتناب ناپذیر است. در این تحقیق، یک شیوه جدید بر اساس یک سامانه مرکب اندازه‌گیری نوری - فراصوتی و هوش هیبریدی مبتنی بر رویکرد مدل‌سازی انفیس (ANFIS) برای پیش‌بینی غلظت رسوبات معلق رودخانه توسعه یافت. در این مطالعه در شرایط آزمایشگاهی دو سامانه اندازه‌گیری مذکور در یک مخزن آب قرار گرفتند و طی هر ۵۰ ثانیه، ۱۰ گرم خاک (عبور کرده از الک ۱۴۰) در آب به عنوان رسوب معلق اضافه شد تا زمانی که کل رسوب موجود در آب به ۱۰۰ گرم برسد. این عملیات در ۲۰ تکرار انجام گرفت و مقادیر خروجی دو روش اندازه‌گیری به عنوان ورودی به انفیس داده شد. ساختار انفیس با ورودی مجزای حسگر نوری دارای کارایی بالاتری با ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۴ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۷/۱۵ (gr) نسبت به ورودی مجزای حسگر فراصوتی با ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۱ و ریشه میانگین مربعات خطاها ۸/۷۲ (gr) بود. همچنین بیشترین کارایی ساختار ترکیبی با دو ورودی از دو روش اندازه‌گیری دارای ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۷ و ریشه میانگین مربعات خطاها ۵/۶۶ (gr) بود. با توجه به نتایج بدست آمده، بهترین فاصله بین گیرنده و فرستنده در حسگر فراصوتی بین ۸ تا ۱۵ سانتی‌متر بود و استفاده از سامانه ترکیبی در برآورد رسوبات دارای کارایی بیشتری با خطای ۳ و ۱/۵ درصد کمتر نسبت به خطای سامانه‌های مجزای فراصوت و نوری داشت.

واژه‌های کلیدی: غلظت رسوبات معلق، حسگر نوری، حسگر فراصوتی، مدل‌سازی انفیس

مقدمه

شوند که این روش‌های غیرمستقیم همه برای اندازه‌گیری غلظت رسوب به سرعت و به طور موثر در نمونه‌های آب تا حدی با کاهش دقت اندازه‌گیری استفاده می‌شود بنابراین در یک رودخانه می‌توان از حسگرها برای اندازه‌گیری غلظت رسوب معلق استفاده نمود. در حال حاضر اغلب این روش‌ها مبتنی بر روش‌های نوری و فراصوتی می‌باشند (Ban et al., 2017).

در مطالعه‌ای توسط ژانگ از یک کدورت سنج نوری استفاده شد که از نوع حسگرهای نوری یک طرفه بود. این حسگر شامل لامپ LED مادون قرمز و آشکارساز در زاویه ۹۰ و ۱۸۰ درجه آن بود که میزان نور دریافت شده از آشکارساز در اثر بازتاب از ذرات معلق توسط ولتاژ خروجی حسگر مشخص می‌شد. این سامانه برای تخمین ۵ خاک‌های مختلف به صورت مجزا دارای ضریب تبیین بیشتر از ۰/۹۵ بود. اما در حالت ترکیب خاکهای مختلف ضریب تبیین اعتبار سنجی ۰/۸۵ داشت (Zhang, 2009) در مطالعه‌ای توسط تکزیرا و همکاران رابطه بین کدورت و غلظت رسوب معلق از یک رودخانه واقع در سانتا ماریا (برزیل) ارزیابی

جدا شدن ذرات خاک از حوزه آبریز تحت اثر بارندگی و رواناب یکی از دلایل فرسایش خاک است. خاک جدا شده به نام رسوب به کمک آب به پایین دست حوزه آبریز می‌رسد (Samantaray & Sahoo, 2020). در حقیقت، درک مقدار دقیق رسوب منتقل شده در یک رودخانه خاص برای چشم انداز مهندسی هیدرولیک بسیار ضروری است. زیرا مقدار رسوبات معلق در ساختار بستر رودخانه و به طور کلی در پروژه‌های منابع آب اهمیت فراوانی دارد (Chang, 2008; Martinez et al., 2009). با این وجود، پیش‌بینی رسوب معلق یک پدیده بسیار پیچیده است، دلیل این امر آن است که فرآیند رسوب تحت تأثیر متغیرهای مختلف اندازه‌گیری و هیدرولوژیکی در یک حوزه خاص است (Frings, 2008).

تبخیر نمونه‌های آب، با روش‌هایی مانند خورشیدی و یا آون از دیرباز تنها روش مستقیم برای اندازه‌گیری غلظت رسوب بوده است (ASTM, 2013). با توسعه علم و فناوری، سعی شده بسیاری از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری غلظت رسوب اعمال

جذب صوت با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد، اما برای اندازه-گیری غلظت رسوب بایستی از فرکانس‌های بالا بهره برد چرا که فرکانس‌های پایین جذب مواد معلق نمی‌شوند و اندازه‌گیری غلظت ناممکن است (Sherman & Butler, 2007). در پژوهشی دیگر از یک سامانه فراصوت با چند فرکانس همزمان از ۲ تا ۵ MHz برای تشخیص غلظت رسوبات معلق در ارتفاع‌های مختلف بصورت پروفیل استفاده شد و نتایج آزمایش‌ها خوب توصیف شده بود و بصورت کمی کمتر از ۵٪ حجمی خطا داشته است (Zou et al., 2014). همچنین برای بهره مندی از مزایای دو روش ترکیبی نیز پژوهش‌هایی انجام گرفته است. به عنوان مثال لینچ و همکاران توانستند اطلاعات بسیار خوب و امیدبخشی را از تلفیق روش نوری به کمک حسگر نوری OBS^۱ که از نور مادون قرمز استفاده می‌کند و حسگر فراصوتی با فرکانس ۵ MHz بدست آورند (Lynch et al., 1994). علاوه بر روش‌های فوق برای اندازه‌گیری، در پژوهش‌ها از روش‌های دیگری نیز از قبیل گرمای ویژه و ظرفیت الکتریکی (Li et al., 2005) و روش هسته‌ای (DotOcean, 2018; Crickmore et al., 1990) استفاده شده است. همچنین در مدل سازی انتقال رسوب، از روش‌های مختلف مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده شده است؛ مانند شبکه عصبی مصنوعی (Afan, 2014)، منطق فازی (Dogan, 2005)، رگرسیون بردار پشتیبان (Buyukyildiz & Kumcu, 2017) و انفیس (Rezai et al., 2013).

برآورد میزان فرسایش و رسوب در بسیاری از حوضه‌های آبخیز بدون آمار رسوب یکی از مسائل اساسی حوضه‌ها بوده و عدم نظارت به دلیل وجود یا کمبود داده‌ها در زمان فرسایش خاک و تولید رسوب در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور موجب شده سالانه حجم قابل ملاحظه‌ای رسوب پیش‌بینی نشده وارد مخازن آبی کشور گردد و برنامه ریزی‌های مدیریتی آب و حفاظت از محیط زیست را با مشکل روبرو کند. با وجود این حجم عظیم از موارد مورد نیاز برای مطالعه و برنامه ریزی، در حال حاضر اندازه‌گیری مداوم غلظت رسوبات معلق و داده برداری در این رودخانه‌ها انجام نمی‌گیرد، حتی در چنین پایش‌هایی نیز مطالعات به روش‌های دستی و آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. از این رو تحقیقات و ارائه روش‌های علمی امکان پذیر و مورد استفاده در شرایط جغرافیای ایران برای به دست آوردن سریع و دقیق اطلاعات مربوط به رسوبات معلق در رودخانه‌ها، سد ها، دریاچه ها و غیره از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق سعی شد که با استفاده از روش‌های تلفیقی فراصوتی و نوری، سامانه‌ای

شد در این مطالعه از حسگر کدورت سنج نافلومتر^۱ استفاده شد. این حسگر شامل لامپ LED مادون قرمز و آشکارساز در زاویه ۹۰ بود. نتایج حاصل از این کار نشان داد که همبستگی خوبی بین غلظت رسوب معلق و کدورت با ضریب تبیین ۰/۷۴ وجود داشت (Teixeira et al., 2016).

فرکانس‌های فرا صوت را می‌توان بین ۲۰ کیلوهرتز تا چندین مگاهرتز در نظر گرفت. حسگرهای غیرصنعتی در فرکانس‌هایی در حدود ۴۰ کیلوهرتز کار می‌کنند. در این حسگرها دقت کار بالا نبوده و فقط در حد تشخیص یک فاصله یا عمق یک مایع می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. اما در حسگرهای که در فرکانس‌های در حد مگاهرتز کار می‌کنند به دلیل همین فرکانس بالا ما دقت زیادی را خواهیم داشت (Niazi et al., 2015). در اندازه‌گیری غلظت رسوب معمولاً از امواج صوتی با فرکانس ۵-۱۰ MHz استفاده می‌شود (Wren & Kuhnle, 2002). در این روش امواج از یک منبع انتشار داده می‌شوند و با عبور از درون سیال توسط گیرنده دریافت می‌شوند. موج صوتی در حین عبور از سیال و برخورد با رسوبات معلق تضعیف می‌شود که این تضعیف متناسب با غلظت رسوبات معلق می‌باشد. البته از روش‌های دیگری نیز مثل استفاده از امواج برگشتی، اندازه‌گیری تغییرات سرعت صوت در سیال و ... استفاده می‌شود. در این راستا در پژوهشی توسط استالوجانو و پراکاش از حسگر فراصوت با فرکانس ۳ MHz در توزیع اندازه رسوبات در سوسپانسیون جامد-مایع استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها بر اساس تغییرات سرعت، تضعیف پالس‌های صوتی بود. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش حجم مواد جامد از ۱۰ تا ۵۰ درصد، سبب تغییرات سرعت صوت از ۱۵۰۰ تا ۱۶۶۰ m/s شد. همچنین تضعیف در ذرات با قطر ۱۸۰ میکرو متر سه برابر ذرات با قطر ۳۵ میکرومتر بود (Stolajanu & Prakash, 2001).

نتایج بررسی‌ها توسط‌ها و همکاران به کمک امواج فراصوتی 1.5 MHz نشان داد میانگین خطای تخمین‌ها در حدود ۴/۱ الی ۷/۳٪ بدست آمد (Ha et al., 2011). نتایج ترکیب روش لیزر و فراصوت می‌تواند تقریب نسبتاً مناسبی از غلظت رسوبات معلق در آب بدهد؛ از طرفی هر کدام از این روش‌ها نواقصی دارند که این نواقص در روش لیزر عبارتند از محدوده کاری کم و نامناسب برای غلظت‌های زیاد رسوبات معلق و از طرفی امواج فراصوت نیز به عمق و دمای آب بستگی دارند و در نتیجه با ترکیب این دو روش می‌توان به تقریب مناسب با خطای ۴/۷٪ رسید (Guerrero et al., 2017). تحقیقات نشان می‌دهد که میزان

طرح واره‌ای از چیدمان آزمایشگاهی سامانه اندازه‌گیری در شکل ۱ الف، دستگاه واقعی شکل ۱ ب و تصویر واقعی حسگر فراصوت در شکل ۱ ج نشان داده شده است. دو سامانه مورد استفاده در یک محفظه آب (شکل ۱ الف شماره ۱) قرار داده شد. همانطور که در شکل دیده می‌شود حسگرهای صوتی (شکل ۱ الف شماره ۲) دارای دو بخش فرستنده و گیرنده می‌باشند. این حسگرها دارای یک قطعه پیزوالکتریک بوده که با اعمال یک ولتاژ مناسب امواج اولتراسونیک تولید و ارسال می‌شود. پس از ارسال میدان صوتی توسط فرستنده و برخورد با رسوبات این میدان تضعیف می‌شود. میزان تضعیف این موج بسته به مقدار رسوبات بین دو حسگر دارد. هر چه مقدار رسوبات بیشتر باشد تضعیف میدان صوتی نیز بیشتر است (Sung *et al.*, 2008).

حسگر نوری (شکل ۱ الف شماره ۳) امواج الکترومغناطیس با طول موج مشخص از منبع نور را منتشر می‌کند. پرتوهای نور پس از برخورد با ذرات معلق رسوبی جذب یا از مسیر منحرف می‌شوند و توان تابشی توسط آشکارسازهای نوری اندازه‌گیری می‌شود. این سامانه دارای یک حسگر تابشی است و دارای آشکارساز نور بوده که در زاویه ۹۰ درجه نسبت به فرستنده قرار دارند چون که پراکندگی ۹۰ درجه برای تمام اندازه ذرات بیشترین پراکندگی است که به طور ثابت وجود دارد (Buttmann, 2001). مطابق تحقیقات گذشته این حسگرها از منابع نوری با طول موج های مختلف در باندهای موج مرئی و مادون قرمز از منابع نور استفاده می‌کنند (Stoll, 2004). به هر حال در این تحقیق از نور با طول موج در حوزه مادون قرمز به طول موج ۸۵۰ nm استفاده شد که شامل یک عدد ال ای دی ۸ میلی متری است که پرتوهای نور (موج الکترومغناطیس) را با طول موج ۸۵۰ نانومتر ساطع می‌کند. این امواج دارای طول موج بیشتر از امواج مرئی و بسامد (فرکانس) کمتر از آن‌ها هستند. در طراحی گیرنده از فوتودیود PIN استفاده شد. فوتودیود یک نوع حسگر نور است که بسته به عملیات می‌تواند انرژی نورانی را به جریان الکتریکی تبدیل کند. گیرنده ای که روبروی فرستنده قرار دارد با افزایش ذرات معلق آب انرژی نورانی کمتری دریافت می‌کند و بلعکس گیرنده فوتودیودی که در زاویه ۹۰ قرار دارد نور بازتاب شده از سطح ذرات معلق را دریافت خواهد کرد.

رسوبات جامد موجود در آب باعث می‌شوند نوری که توسط فرستنده منتشر می‌شود، پراکنده شود (Bricaud *et al.*, 1995). میزان رسوبات معلق یا کدورت موجود در محلول توسط مقدار نور دریافت شده (که توسط رسوبات جامد پراکنده شده) توسط آشکارسازها محاسبه می‌شود. نور توسط رسوبات درون آب پراکنده و جذب می‌گردد. پس از برخورد پرتو با رسوب، پراکندگی

ارائه شود تا بتوان با کمترین هزینه و بیشترین دقت ممکن، میزان رسوبات معلق را در محدوده‌های غلظت رسوبات در شرایط کار در آزمایشگاه و با دقت قابل قبول به دست آورد. در این پژوهش با توجه به اینکه الگوریتم های تلفیقی دقت و صحت مناسبی را فراهم می‌نمایند، از سیستم‌های هوشمند شامل سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی استفاده گردید. مطابق تحقیقات گذشته بیشتر مطالعات مبتنی بر روش های ترکیبی بوده و ترکیب دو سامانه فراصوت و نوری به ندرت استفاده شده است. همچنین سامانه های فراصوت استفاده شده بری غلظت های بسیار پایین بوده و در این تحقیق یکی از اهداف، افزایش غلظت اندازه گیری بوده است. همچنین تا کنون از توانایی تخمین غلظت رسوبات معلق در آب به کمک مدل انفیس برای ترکیب این دو حسگر استفاده نشده است. منطق عصبی- فازی این امکان را فراهم می‌کند تا بر اساس اطلاعات نامشخص یا مبهم، تصمیم‌گیری‌های قطعی را اتخاذ کند.

مواد و روش‌ها

-چیدمان اندازه‌گیری رسوب و نحوه آزمایش

در این مطالعه از دو سامانه دارای حسگرهای فراصوتی و نوری استفاده شده است تا از مزیت‌های هر دو روش در اندازه‌گیری غلظت رسوب استفاده شود. حسگرهای مورد استفاده مدل MS2111 بوده که حسگرهایی ضد آب (IP65) با طول موج مرکزی 1 MHz و پهنای باند 200 kHz، حداقل حساسیت 35 dB و ولتاژ عملکرد 300 Vpp می‌باشد. داده های حسگر گیرنده توسط سیستم تحصیل داده (دیتالاگر) ساخته شده در این تحقیق به صورت دیجیتالی ذخیره می‌شدند. بدین صورت که سیگنال دریافتی از گیرنده بعد از عبور از فیلتر میان گذر، آمپلی فای شده و عبور مجدد از فیلتر با یک سیگنال مرجع مقایسه شده و دامنه آن تعیین شده و این اختلاف به صورت سیگنال DC توسط یک میکروکنترلر ARM نمونه برداری می‌شود. داده های نمونه برداری مجدداً به صورت نرم افزاری فیلتر، میانگین گیری و در اکسل ذخیره می‌شود. برای ارسال سیگنال تحریک فرستنده از مدار (E-power amplifier) استفاده شد که مختص همین سامانه ساخته شد. برای انتخاب فرکانس ضمن توجه به تحقیقات گذشته، رابطه بین طول موج سیگنال با قطر ذرات معلق و امکان دسترسی به حسگرهای داخل کشور، سه حسگر فراصوت 40 kHz و 2/5 MHz مورد ارزیابی قرار گرفتند. و از این بین فرکانس 1 MHz توانست انتظارات مورد نیاز تحقیق را تامین نماید. با توجه به اینکه حسگرهایی با باند 1-5 MHz برای تخمین غلظت رسوب مناسب است (Wren & Kuhnle, 2002).

نهایت به عنوان ورودی انفیس مورد استفاده قرار گرفتند و از مدل انفیس برای پیش‌بینی مقدار رسوبات موجود در مخزن آب با توجه به ورودی دو حسگر استفاده شد.

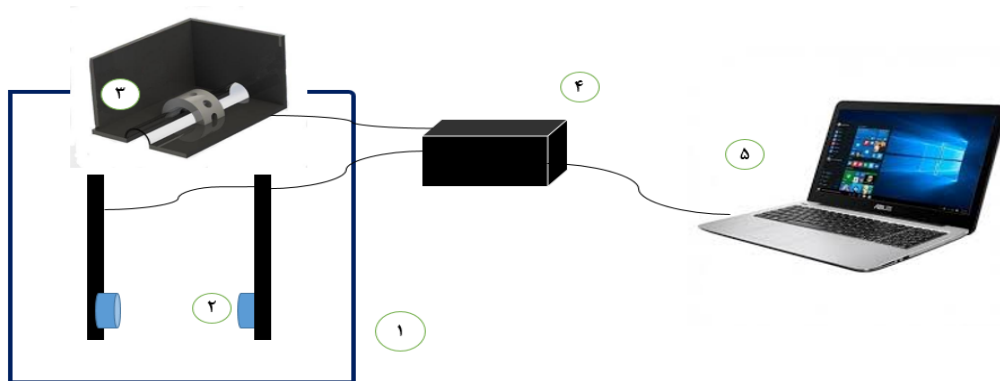
نحوه آزمایش به این صورت برنامه ریزی شد که دو حسگر در یک مخزن آب به ابعاد $400 \times 400 \times 500$ mm قرار گرفتند. با توجه به اینکه این سامانه در عمق‌های مختلف آب در حدود از چند سانتی متر تا چند متر قابل استفاده است و همچنین با توجه به عملکرد حسگرهای آلتراسونیک که به صوت ارتعاش مکانیکی می‌باشد، فشار استاتیکی روی حسگر می‌تواند عملکرد را تحت تاثیر قرار دهد. به همین دلیل تخمین فشار وارده به حسگر با توجه به عمق قرارگیری حسگر از رابطه ρgh بدست آمد.

پس از ۵۰ ثانیه داده برداری ۱۰ گرم خاک شنی که توسط الک ۱۴۰ سرند شده بود، به آب اضافه و خروجی ولتاژ دو حسگر به مدت ۵۰ ثانیه ذخیره گردید. این روند تا ۱۰ بار یعنی زمانی که در مجموع ۱۰۰ گرم خاک به آب اضافه شد تکرار و داده برداری انجام شد. کل آزمایش در ۲۰ نوبت تکرار گردید. در نهایت از ولتاژ خروجی دو سامانه به عنوان ورودی انفیس استفاده شد.

در هر جهتی می‌تواند باشد ولی شدت آن در هر جهت به منبع نور و اندازه رسوبات بستگی دارد. هنگامی که یک رسوب بسیار کوچکتر از پهنای پرتو نور است پراکندگی در همه جهات تقریباً متقارن است. هرچه رسوب بزرگتر می‌شود نور بیشتری به سمت جلو (دور از منبع) پراکنده می‌شود. طول موج نیز در پراکندگی نور تاثیر گذار است. به طور کلی، طول موج‌های کوتاهتر پراکندگی بیشتری نسبت به طول موج‌های بلندتر در یک نمونه یکسان ایجاد می‌کند. (Zhang, 2009).

ولتاژ خروجی هر دو حسگر توسط دیتا لاگر (شکل ۱ الف شماره ۴) جمع‌آوری و از حالت آنالوگ به حالت دیجیتال تبدیل شد. دریافت داده در این تحقیق توسط سامانه تحصیل داده ای که مختص همین تحقیق ساخته شد، انجام می‌گرفت. بعد از گرفتن سیگنال گیرنده عملیات فیلتر، افزایش دامنه، یکسو سازی و ... انجام شده و نهایتاً داده‌های توسط ADC دریافت و ذخیره می‌شوند.

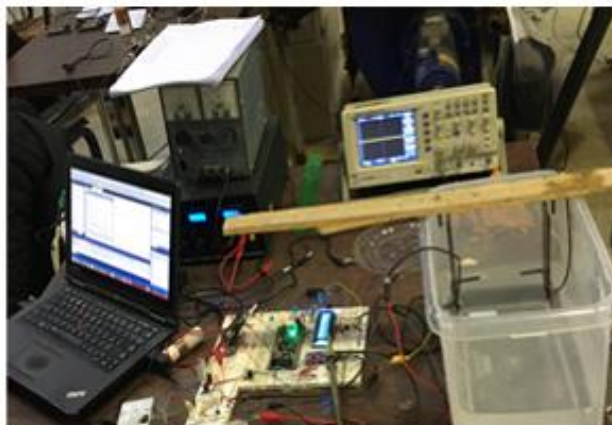
خروجی دیتا لاگر به صورت فایل اکسل روی یک سیستم کامپیوتری (شکل ۱ الف شماره ۵) ذخیره شد. این داده‌ها در



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۱ الف- چیدمان آزمایشگاهی سامانه اندازه‌گیری: ۱. مخزن آب، ۲. حسگرهای صوتی، ۳. حسگر نوری، ۴. دیتا لاگر، ۵. کامپیوتر. ب- تصویر دستگاه واقعی. ج. تصویر حسگر فراصوت.

-انفیس (ANFIS)

از آنجا که انفیس ظرفیت‌های یادگیری شبکه عصبی و توانایی های استدلال سیستم فازی را ادغام می‌کند، مزایای هم افزایی را می‌توان در یک مدل هیبرید به دست آورد (Hoang *et al.*, 2015; Ali *et al.*, 2015). جزئیات بیشتر انفیس را می‌توان در تحقیقات (Jang, 1993) یافت.

عملکرد مدل با استفاده از پارامترهای آماری، به طور عمده شامل ضریب تبیین R^2 و ریشه میانگین مربعات خطاها RMSE ارزیابی می‌شود. R^2 میزان همبستگی بین مقادیر تجربی و پیش بینی را نشان می‌دهد که می‌تواند با معادله (۱) بیان شود:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_p - y_e)^2}{\sum_{i=1}^N (y_p - \bar{y}_e)^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در جایی که N تعداد خروجی مدل است، y_p مقدار پیش بینی خروجی مدل است، y_e مقدار آزمایشگاهی و \bar{y}_e میانگین مقادیر آزمایش ها را بیان می‌کنید. RMSE خطاهای بین مقادیر تجربی و خروجی های مدل را به شرح معادله (۲) زیر نشان می‌دهد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_p - y_e)^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در اینجا، مقدار بالاتر R^2 و مقدار پایین تر RMSE عملکرد پیش بینی بهتری را نشان می‌دهد.

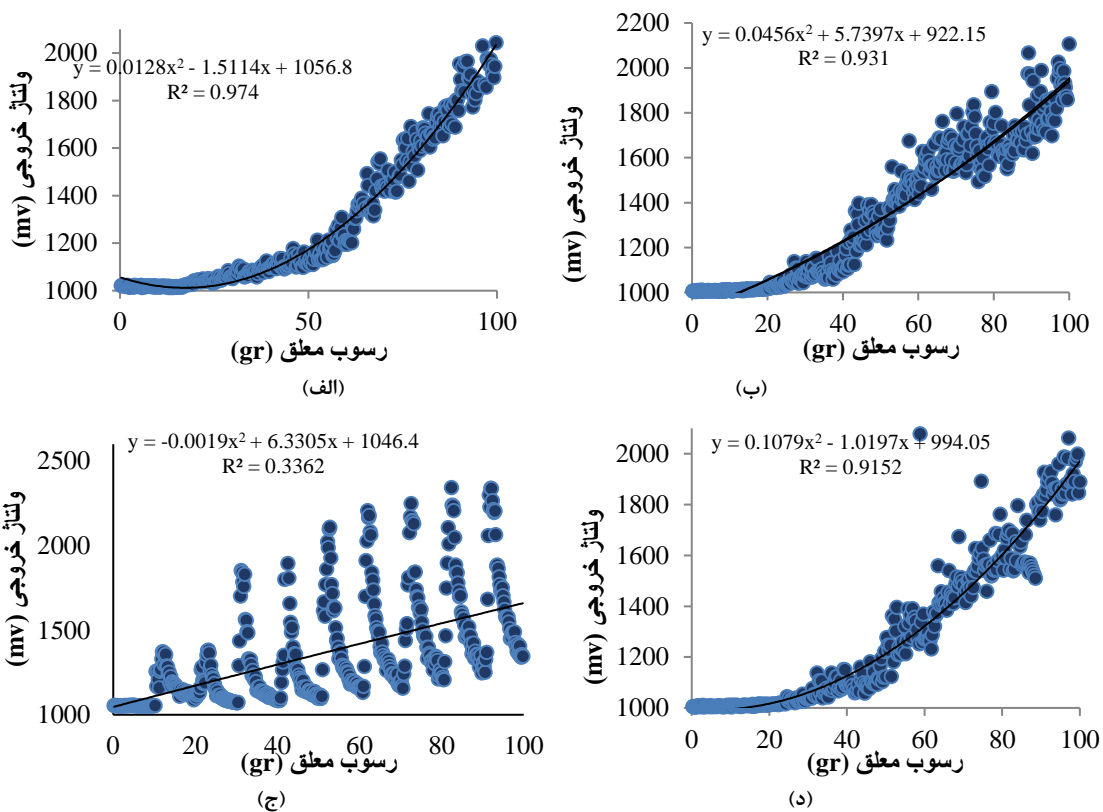
در این مطالعه ولتاژ خروجی از دو حسگر به عنوان ورودی مدل انفیس استفاده شد. تقریباً هر ثانیه دو داده خالص ثبت می‌شد. در واقع داده های اولیه با فرکانس بسیار بالای قرائت می‌شد و بعد از یافتن میانه ۱۰۰ داده و قرائت میانگین ۶۰ داده میانه یابی شده داده نهایی برای ذخیره سازی ارسال می‌شد. تعداد کل این داده ها برای هر آزمایش بیش از ۱۰۰۰۰ داده بود. ۷۰ درصد داده ها برای آموزش انفیس و ۳۰ درصد داده ها برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفت. بهترین ساختار انفیس با توجه به شاخص های ارزیابی با انتخاب نوع الگوریتم یادگیری، نوع و تعداد تابع عضوی ورودی و نوع تابع عضویت خروجی به کمک سعی و خطا بدست آمد.

نتایج و بحث

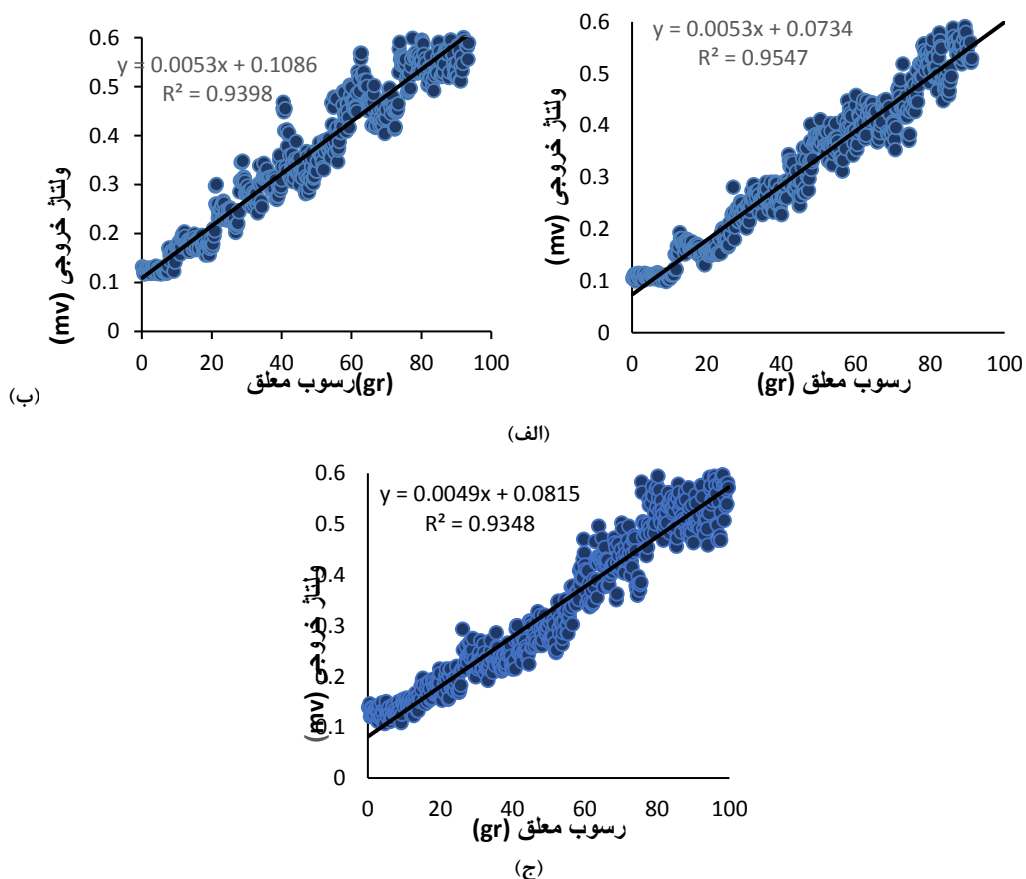
برای تعیین شرایط چیدمان با بیشترین میزان کارایی ابتدا این

چیدمان تحت شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. برای دستیابی به بهترین شرایط قرار گیری حسگر فراصوت این حسگر تحت شرایط فشار قرار گیری مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. فشار وارده به حسگر با توجه به عمق قرار گیری حسگر در شرایط آزمایشگاهی از ۴۹۰ تا ۱۱۷۷ (Pa) و فاصله قرار گیری فرستنده تا گیرنده از ۵ تا ۲۵ (cm) مورد بررسی قرار گرفت. دمای آب هم یا توجه به شرایط آزمایشگاهی از ۱۸ تا ۲۵ درجه ساسیوس تغییر داشت. شکل ۲ الف بهترین خروجی حسگر فراصوت را تحت شرایط دما (°C) ۲۱، فشار (Pa) ۸۸۲، فاصله فرستنده تا گیرنده حسگر (cm) ۸ نمایش می‌دهد. تغییرات خروجی نسبت به نقاط داده دارای روندی با معادله درجه دوم و با ضریب تبیین بالای ۰/۹۷ می‌باشد. پراکندگی داده‌ها تحت این شرایط کمتر از شرایط دیگر بود. در شکل ۲ ب افزایش فشار را تا ۱۱۷۷ Pa نشان می‌دهد. این افزایش فشار سبب پراکندگی داده شده است و ضریب تبیین را تا ۰/۹۳ کاهش داده است. کاهش فشار تا ۴۹۰ (Pa) اثری چندانی بر خروجی حسگر فراصوت نداشت. کاهش فاصله بین فرستنده و گیرنده حسگر فراصوت در شکل ۲ ج نمایش داده شده است. این کاهش فاصله موجب پراکندگی بیش از حد داده شد و کاهش ضریب تبیین تا ۰/۳۴ شد. افزایش این فاصله تا ۱۵cm سانتی متر اثر چندانی بر پراکندگی داده‌ها نداشت اما با افزایش بیش از ۱۸cm پراکندگی داده های خروجی حسگر افزایش یافت. در شکل ۲ د هم کاهش دما تا ۱۸ °C نشان داده شده است. این کاهش دما هم تا حدی سبب افزایش پراکندگی و کاهش ضریب تبیین تا ۰/۹۲ شده است. افزایش دما تا ۲۵ درجه هم اثر چندانی بر پراکندگی داده ها نداشت و مدل دارای ضریب تبیین ۰/۹۶ بود.

در شکل ۳ هم اثر تغییر دمای آب در سه دمای ۱۸-۲۱ و ۲۵(°C) برای حسگر نوری نشان داده شده است. روند تغییرات این حسگر به صورت یک تابع درجه اول برآزش شد. با توجه به چیدمان قرار گیری دو حسگر نیاز بود که حسگر نوری بالاتر حسگر فراصوت قرار بگیرد تا در عبور سیال بین فرستنده و گیرنده اختلال ایجاد نکند. فشار در این شرایط به صورت ثابت (Pa) ۴۹۰ در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل نشان داده شده است این افزایش دما تغییر چندانی در خروجی حسگر نشان نداد و ضریب تبیین بین ۰/۹۳ تا ۰/۹۵ تغییر داشت.



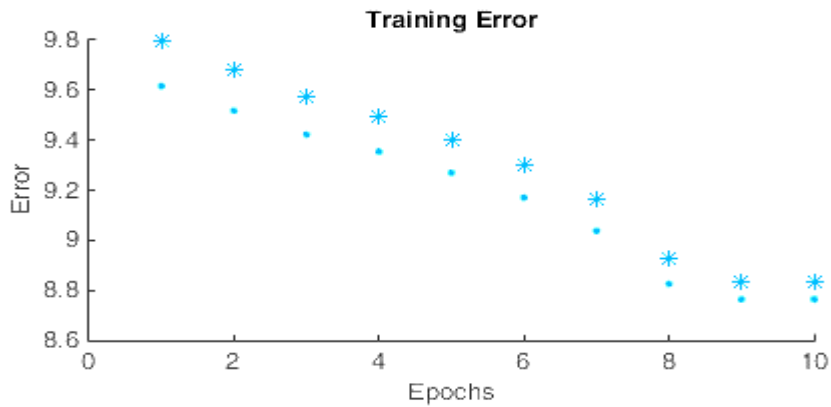
شکل ۲- ولتاژ خروجی چیدمان تحت شرایط مختلف. الف). دما (°C) ۲۱، فشار (Pa) ۸۸۲، فاصله بین فرستنده و گیرنده حسگر (cm) ۸. ب). دما (°C) ۲۱، فشار (Pa) ۱۱۷۷، فاصله بین فرستنده و گیرنده حسگر (cm) ۵. ج). دما (°C) ۲۱، فشار (Pa) ۱۱۷۷، فاصله بین فرستنده و گیرنده حسگر (cm) ۸. د). دما (°C) ۱۸، فشار (Pa) ۸۸۲، فاصله بین فرستنده و گیرنده حسگر (cm) ۸.



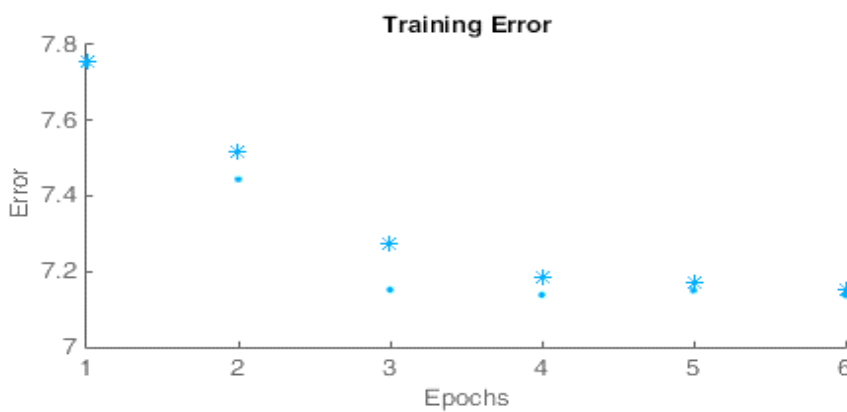
شکل ۳- تغییر ولتاژ خروجی حسگر نوری بر اساس نقاط داده. الف). دما (°C) ۲۱. ب). دما (°C) ۲۵. ج). دما (°C) ۱۸.

نوری و دو ورودی همزمان فراصوتی- نوری نشان می‌دهد. ستاره بیانگر داده‌های آموزش و دایره داده‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود اختلاف بین خطای داده‌های آموزش و خطای داده‌های واریسی در سه شکل داده شده، بعد از ۶، ۱۰ و ۸ تکرار به کمترین میزان خود می‌رسد.

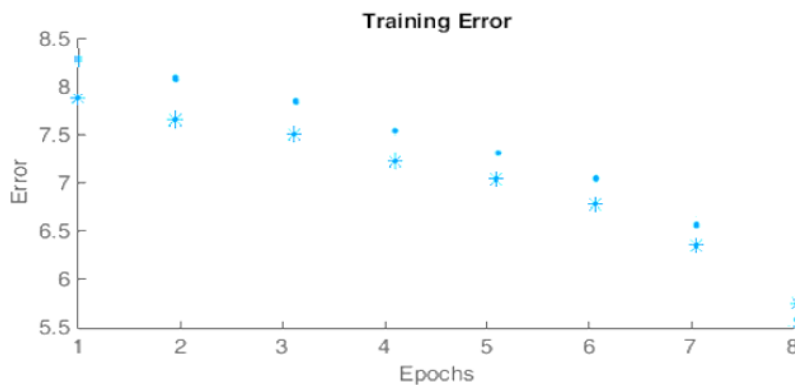
در مرحله بعد خروجی حسگرها در ساختار مورد نظر با ۲۰ تکرار وارد انفیس شد. ساختار انفیس برای دو ورودی حاصل از ولتاژهای خروجی حسگر سامانه‌های فراصوت و نوری آموزش داده شد. داده‌های استخراج شده از ولتاژ خروجی دو سامانه اندازه‌گیری به دو قسمت تقسیم شد؛ شکل ۴ الف، ب و ج روند آموزش انفیس را با کمترین میزان خطای آموزش برای ورودی فراصوتی،



الف



ب



ج

شکل ۴- خطای روند آموزش برای ورودی الف) فراصوتی ب) نوری و ج) فراصوتی-نوری

هر دو حسگر را به عنوان ورودی دارد. ساختار اول دارای ۶ تابع عضویت ورودی از نوع Psigmf و ساختار دوم دارای ۶ عضویت ورودی از نوع Dsigmf است. ساختار سوم که ترکیبی از هر دو ورودی را دارد، دارای (۳ ۳) تابع عضویت ورودی از نوع Psigmf است. در این مطالعه، از الگوریتم یادگیری هیبرید برای تعیین رابطه بین متغیر ورودی و خروجی استفاده شد توابع عضویت خروجی از نوع کانستنت می‌باشد. این توابع عضویت ورودی و تعداد آنها همچنین الگوریتم یادگیری و تابع عضویت خروجی به کمک سعی و خطا بدست آمدند.

جدول ۱- پارامترهای کارایی مدل انفیس

نوع ورودی	تعداد تابع عضویت	نوع تابع عضویت	R ²	RMSE (gr)
فرا صوتی	۶	Psigmf	۰/۹۱	۸/۷۲
نوری	۶	Dsigmf	۰/۹۴	۷/۱۵
نوری - فرا صوتی	(۳-۳)	Psigmf	۰/۹۷	۵/۶۶

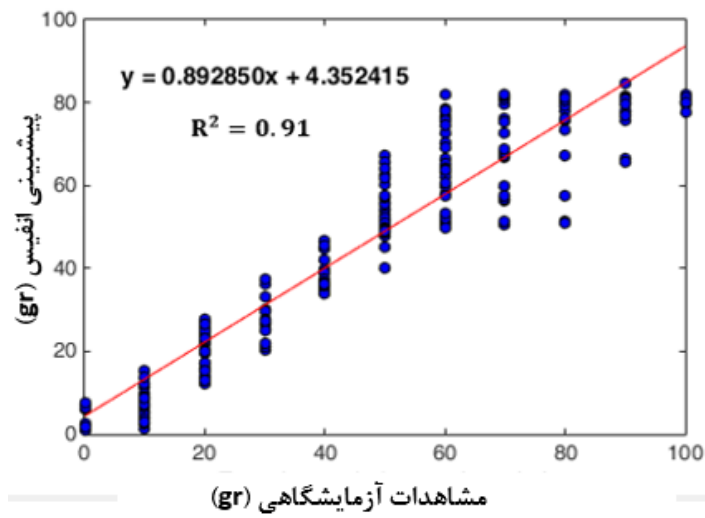
لیزر دارای محدودیت‌هایی در اندازه‌گیری غلظت هستند و همچنین نیاز به کالیبراسیون دوره‌ای و تمیزکاری برای ارتباط مؤثر با محلول آب دارند (Felix, 2017). منابع خطای تخمین مبتنی بر صوت مربوط به وابستگی دستگاه‌های صوتی به اندازه رسوبات معلق هست، هرچند این عامل در دستگاه‌های نوری تأثیر ندارد در مقابل جنس مواد، عامل اصلی خطا در این روش‌ها هستند. در دستگاه‌های مبتنی بر صوت برگشتی، خطای اندازه‌گیری شده وابسته به فاصله از بستر نیز هست. علت این مورد می‌تواند تضعیف صوت در فاصله بیشتر و تداخل امواج صوتی در فاصله کمتر باشد (Ha et al., 2011).

ساختار انفیس بهینه با دو ورودی در شکل ۶ نشان داده شده است. این مدل شامل دو ورودی می‌باشد که یکی ولتاژ خروجی حسگر فراصوت و دیگری ولتاژ خروجی حسگر نوری است. داده‌ها از هر ورودی وارد تابع عضویت ورودی می‌شود. ۲۱ قانون اگر- آنگاه فازی در این ساختار به کار رفته است.

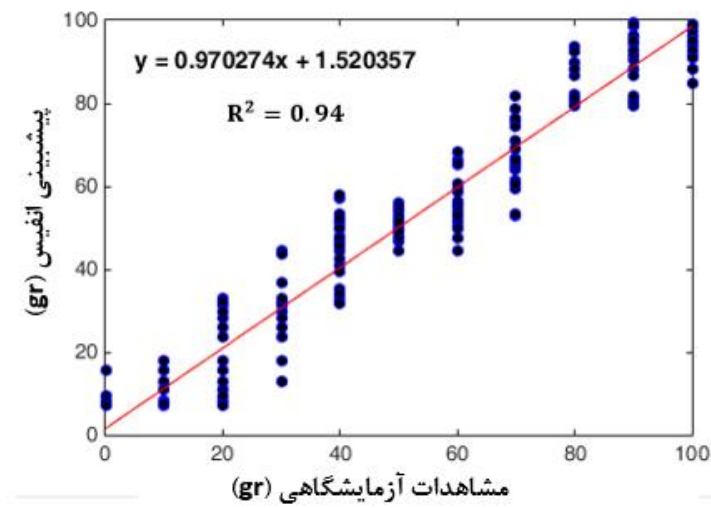
در شکل ۷ هم سطح سه بعدی از مدل انفیس که شامل مقادیر پیش‌بینی شده توسط انفیس بر اثر تغییر دو ورودی است، نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش ورودی ولتاژ دو حسگر خروجی انفیس افزایش یافته است. بیشترین دمای پیش‌بینی توسط انفیس در بالاترین مقدار خروجی هر دو حسگر و کمترین مقدار خروجی انفیس در کمترین مقدار خروجی هر دو حسگر است.

کارایی بهترین ساختارهای انفیس که خطای روند آموزش آنها در شکل ۴ نشان داده شده بود روی داده‌های واری در جدول ۱ آمده است، همچنین برازش بین داده‌های مشاهده‌های آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط انفیس در شکل ۶ نشان داده شده است. هر چه ضریب تبیین مدل بالاتر و جذرمیانگین مربعات خطاها کمتر باشد ساختار انفیس دارای کارایی بالاتری برای پیش‌بینی غلظت رسوب معلق با توجه به ورودی‌ها است. ساختار اول تنها با یک ورودی از حسگر فراصوتی و ساختار دوم دارای ورودی از حسگر نوری است، در حالی که ساختار سوم ترکیبی از

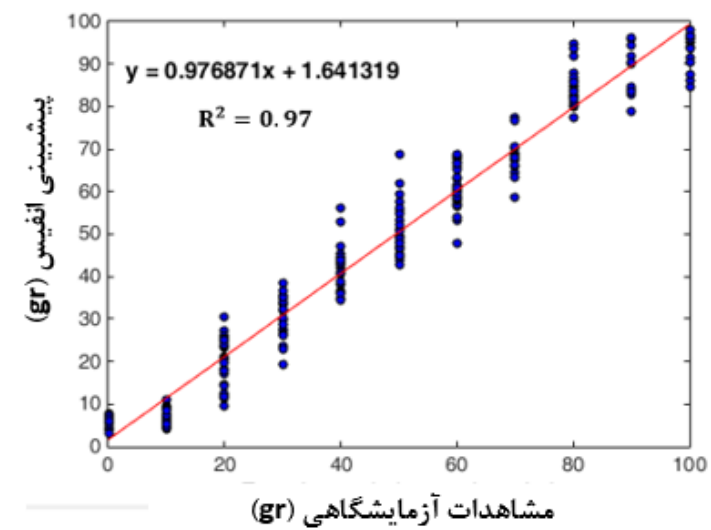
همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۵ دیده می‌شود کارایی مدل انفیس با ورودی نوری بیشتری از کارایی مدل با ورودی فراصوتی است. همچنین مدل انفیس با ورودی ترکیبی از دو حسگر دارای کارایی بیشتری نسبت به مدل‌های با ورودی تک حسگر است. این کارایی بیشتر به دلیل استفاده از مزایای هر دو سامانه در اندازه‌گیری رسوب است. نتایج حاصل از این مطالعه دارای ضریب تبیین بیشتری نسبت به مطالعات صورت گرفته به کمک حسگر نوری توسط ژانگ با ضریب تبیین ۰/۸۵ (Zhang, 2009) و تک‌زاریا (Teixeira et al., 2016) با ضریب تبیین ۰/۷۵ بود ولی از نتایج حسگر فراصوتی که توسط ها و همکاران با دقت ۴/۱ درصد (Ha et al., 2011)، ترکیب روش‌های لیزر و فراصوت توسط جیورینو و همکاران با دقت ۴/۷ (Guerrero et al., 2017) و سامانه چند فرکانسه فراصوت توسط زو با دقت ۵ درصد (Zou et al., 2014) دارای دقتی در حدود ۱ درصد کمتر بود. فلیکس در سال ۲۰۱۷ به بررسی روش‌های غیر هسته‌ای برای مقایسه روش‌های متداول اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق انجام داده است. بر اساس نتایج مشاهده شد که روش لیزر و روش مبتنی بر نور به ابعاد ذرات رسوب بستگی ندارند ولی در مقابل ذرات نوک تیز با خطا روبرو می‌شوند این در حالی است که روش فراصوتی به اندازه ذرات رسوب بستگی دارد و با افزایش اندازه، صوت برگشتی کاهش می‌یابد. روش مبتنی بر نور (مرئی و فرو سرخ)، روش فرا صوتی و روش مبتنی بر لیزر (مرئی و فرو سرخ)، به ترتیب دارای خطاهای کمتری هستند اما روش‌های نوری و روش



الف

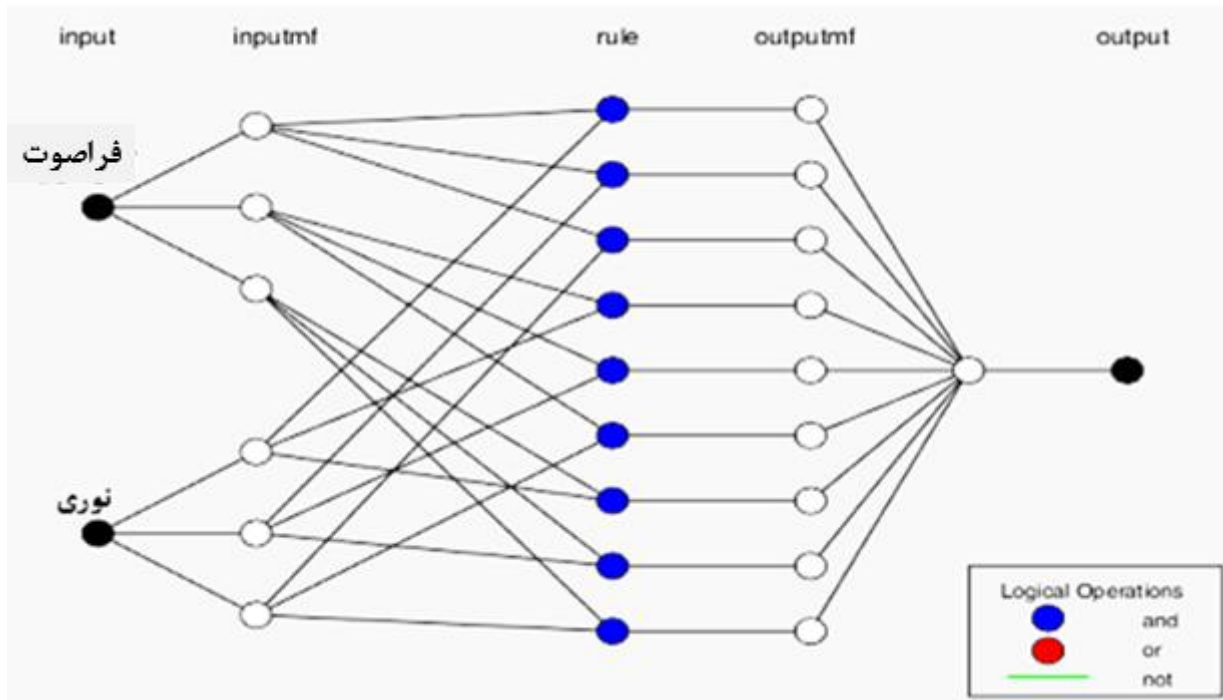


ب

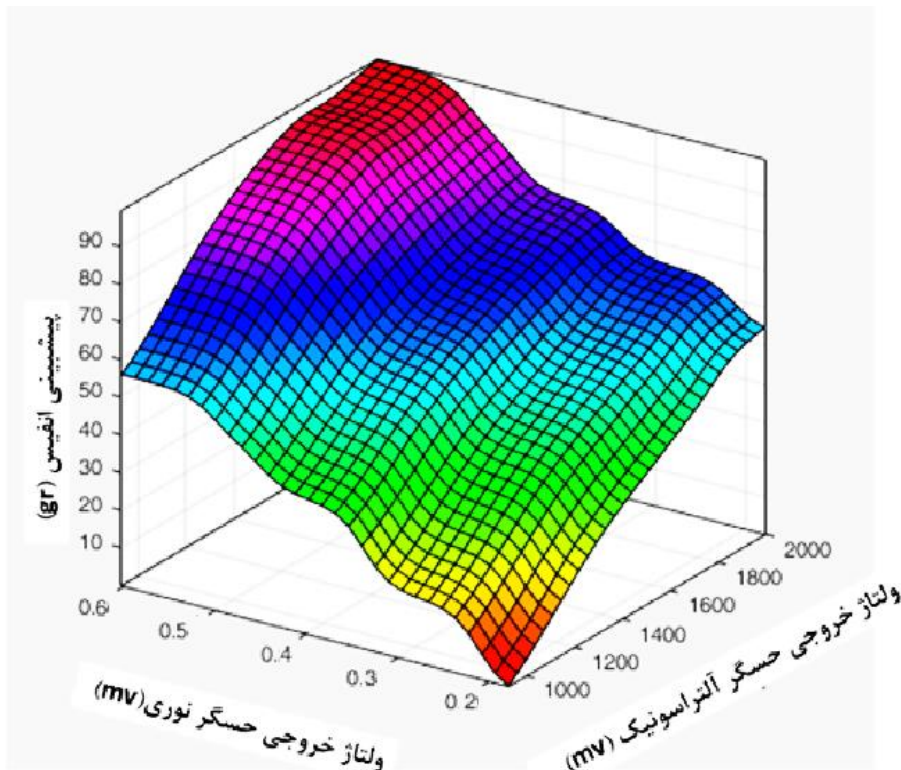


ج

شکل ۵- برازش مقادیر پیش‌بینی شده توسط انفیس در مقابل مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی: الف) فراصوتی، ب) نوری و ج) فراصوتی-نوری



شکل ۶- ساختار انفیس بهینه



شکل ۷- سطح سه بعدی خروجی انفیس در مقابل دو ورودی

در مقایسه روش‌های هوش مصنوعی در برآورد بار معلق رسوب (مطالعه موردی: رودخانه سیستان) از سیستم‌های هوشمند شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی و برنامه‌ریزی بیان ژن به‌منظور پیش‌بینی بار معلق رسوب رودخانه سیستان استفاده شد (Sheykhalipour et al., 2015) و برای ارزیابی دقت مدل‌ها از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای سوء‌گیری^۱ (MBE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده کردند. مشخص گردید که در میان روش‌های هوش مصنوعی سناریوی سوم سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی با مقدار ریشه میانگین مربعات خطای $۲۰۹۸۳/۴۳$

در مقایسه روش‌های هوش مصنوعی در برآورد بار معلق رسوب (مطالعه موردی: رودخانه سیستان) از سیستم‌های هوشمند شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج تطبیقی عصبی- فازی و برنامه‌ریزی بیان ژن به‌منظور پیش‌بینی بار معلق رسوب رودخانه سیستان استفاده شد (Sheykhalipour

برای تخمین میزان رسوب معلق در آب که یکی از مهم‌ترین مشکلات برای مدیریت منابع آب کشور است استفاده گردید. بر اساس نتایج، مشخص شد حسگر فراصوتی با فاصله بین گیرنده و فرستنده (۱۵-۸cm) و فشار کمتر از (۸۸۲Pa) دارای کارایی مناسبی در تخمین غلظت رسوب است. همچنین با ثابت بودن فاصله بین گیرنده و فرستنده حسگر صوتی و ثابت ماندن فشار اثر تغییر دما به کمک حسگر نوری جبران می‌شود. ساختارهای انفیس بهینه با ورودی از هر دو حسگر به شکل مجزا و ترکیبی از دو حسگر مورد آموزش و ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج مشخص شد که حسگرهای نوری دارای ۱/۶ درصد دقت بیشتری نسبت به حسگرهای صوتی در تخمین رسوب معلق هستند همچنین ترکیب دو حسگر با توجه به مزایای هر دو روش می‌تواند با ضریب تبیین ۰/۹۷ و ریشه میانگین مربعات خطاها (gr) ۵/۶۶ دارای ۳ و ۱/۵ درصد کارایی بیشتر نسبت به هر دو روش به صورت مجزا در اندازه‌گیری رسوب معلق به کار گرفته شود. با توجه به موفقیت آمیز بودن استفاده از ترکیب دو حسگر در نتایج آزمایشگاهی استفاده از این روش برای رسوب معلق رودخانه‌ها و منابع آبی کشور امیدبخش است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران به دلیل فراهم نمودن تجهیزات کارگاهی نهایت تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

REFERENCES

- Afan, H.A., El-Shafie, A., Yaseen, Z.M., Hameed, M.M., Wan Mohtar, W.H.M., Hussain, A., (2014). ANN based sediment prediction model utilizing different input scenarios. *Water Resour. Manag.* 29, 1231-1245. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0870-1>.
- Ali, J. M., Hussain, M. A., Tade, M. O., & Zhang, J. (2015). Artificial Intelligence techniques applied as estimator in chemical process systems—A literature survey. *Expert Systems with Applications*, 42(14), 5915-5931.
- ASTM D3977-97 2013 Standard test methods for determining sediment concentration in water samples www.astm.org/Standards/D3977.htm
- Ban, Y., Chen, T., Yan, J., & Lei, T. (2017). Accurate mass replacement method for the sediment concentration measurement with a constant volume container. *Measurement Science and Technology*, 28(4), 045906.
- Bricaud, A., Roesler, C., & Zaneveld, J. R. V. (1995). In situ methods for measuring the inherent optical properties of ocean waters. *Limnology and Oceanography*, 40(2), 393-410.
- Buttmann, M. (2001). Suspended solids measurement as reliable process control. In Proceedings of ISA TECH EXPO Technology Update Conference, Houston, TX: Instrument Society of America (Vol. 413, No. 1, pp. 563-572).
- Buyukyildiz, M., & Kumcu, S. Y. (2017). An estimation of the suspended sediment load using adaptive network based fuzzy inference system, support vector machine and artificial neural network models. *Water resources management*, 31(4), 1343-1359.
- Chang, H. H. (2008). River morphology and river channel changes. *Transactions of Tianjin University*, 14(4), 254-262.
- Crickmore, M. Tazioli, G. S., Appleby, P. G., & Oldfield, F. (1990). The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems (p. 170p). M. J. Crickmore (Ed.).

و ضریب همبستگی ۰/۹۷ بهترین نتیجه را در برآورد بار معلق رسوب دارد. در مطالعه‌ای تحت عنوان استفاده از سیستم استنتاجی فازی عصبی در تخمین بار رسوبی و مقایسه آن با مدل‌های mlr و src در حوضه رودخانه قران قو، از سیستم استنتاجی فازی عصبی (ANFIS) با بهره‌گیری از ترکیب‌های ورودی مختلف برای تخمین بار معلق رسوبی روزانه استفاده شد و به این منظور در اولین بخش از پژوهش، مدل ANFIS با استفاده از داده‌های دبی روزانه و بار معلق رسوبی روزهای پیشین، تعلیم داده شد و برای تخمین بار معلق رسوبی رودخانه قران قو مورد استفاده قرار گرفت. در دومین بخش از پژوهش، مدل ANFIS با استفاده از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) با مدل‌های منحنی سنجه رسوبی (SRC) و رگرسیون چندمتغیره خطی (MLR) مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل ANFIS با برخورداری از مقادیر ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۹۶۶۸، RMSE برابر ۱۹۰، در مقایسه با سایر روش‌ها از قابلیت بهتری در تخمین بار معلق رسوبی برخوردار است. مدل‌های انفیس به کار رفته در دو مطالعه فوق دارای ضریب تبیین بالا همانند مطالعه حاضر است اما ریشه میانگین مربعات خطاها در این دو مطالعه بسیار بیشتر از مطالعه حاضر است دلیل این امر میدانی بودن دو مطالعه بالا و آزمایشگاهی بودن مطالعه حاضر است (Rezai Banafshe et al., 2013).

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق از سامانه ترکیبی شامل دو حسگر نوری و فراصوتی

- Unesco.
- Dogan, E. (2005). Suspended Sediment Load Estimation in Lower Sakarya River By Using Artificial Neural Networks, Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Models. *Electronic Letters on Science&Engineering*, 1(2), 22-32.
- DotOcean, Dot ocean Company (website: <https://www.dotocean.eu/products-2/densx/> at Feb 2018). 2018.
- Felix, D. (2017). Experimental investigation on suspended sediment, *hydro-abrasive erosion and efficiency reductions of coated Pelton turbines* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Frings, R. M. (2008). Downstream fining in large sand-bed rivers. *Earth-Science Reviews*, 87(1-2), 39-60.
- Guerrero, M., R  ther, N., Haun, S., & Baranya, S. (2017). A combined use of acoustic and optical devices to investigate suspended sediment in rivers. *Advances in Water Resources*, 102, 1-12.
- Ha, H. K., Maa, J. Y., Park, K., & Kim, Y. H. (2011). Estimation of high-resolution sediment concentration profiles in bottom boundary layer using pulse-coherent acoustic Doppler current profilers. *Marine Geology*, 279(1-4), 199-209.
- Huang, M., Ma, Y., Wan, J., & Chen, X. (2015). A sensor-software based on a genetic algorithm-based neural fuzzy system for modeling and simulating a wastewater treatment process. *Applied Soft Computing*, 27, 1-10.
- Jang, J. (1993). ANFIS: adaptive network-based fuzzy inference system, *IEEE T. Syst. Man Cyb.*, 23 (3), 665-685.
- Li, X., Lei, T., Wang, W., Xu, Q., & Zhao, J. (2005). Capacitance sensors for measuring suspended sediment concentration. *Catena*, 60(3), 227-237.
- Lynch, J. F., Irish, J. D., Sherwood, C. R., & Agrawal, Y. C. (1994). Determining suspended sediment particle size information from acoustical and optical backscatter measurements. *Continental Shelf Research*, 14(10-11), 1139-1165.
- Martinez, J. M., Guyot, J. L., Filizola, N., & Sondag, F. (2009). Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*, 79(3), 257-264.
- Niazi, H., Mohammad Zamani, D., Sedaghat Hosseini. (2015), Design, construction and evaluation of a system for determining the actual cutting width of cylinder harvesters by ultrasonic sensors, *Bioengineering Engineering Certificate*. 4(2).
- Rezai Banafshe, M., Feyzolahpour, M., SadrAfshary, S., (2013). Using Neural Fuzzy Inference System to Estimate Sediment Load and a Comparison with MLR and SRC Models in Ghranghu River Basin. *physical geography research quarterly*. 45,77-90. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2013.35145>
- Samantaray, S., & Sahoo, A. (2020). Assessment of sediment concentration through RBNN and SVM-FFA in Arid Watershed, India. In *Smart Intelligent Computing and Applications* (pp. 701-709). Springer, Singapore.
- Sheikhali Pour Z., Hassan Pour. F., Azimi .V.(2015). Comparison of artificial intelligence methods in estimation of suspended sediment load (Case Study: Sistan River). *Water and Soil Conservation*.22., 41-60
- Sherman, C. H., & Butler, J. L. (2007). *Transducers and arrays for underwater sound* (Vol. 4). New York: Springer.
- Stoll, Q. M. (2004). Design of a real-time, optical sediment concentration sensor (Doctoral dissertation, Kansas State University).
- Stolojanu, V., & Prakash, A. (2001). Characterization of slurry systems by ultrasonic techniques. *Chemical Engineering Journal*, 84(3), 215-222.
- Sung, C. C., Huang, Y. J., Lai, J. S., & Hwang, G. W. (2008). Ultrasonic measurement of suspended sediment concentrations: an experimental validation of the approach using kaolin suspensions and reservoir sediments under variable thermal conditions. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(16), 3149-3154.
- Teixeira, L. C., de Paiva, J. B. D., da Silva Pereira, J. E., & de Moura Lisboa, R. (2016). Relationship between turbidity and suspended sediment concentration from a small hydrographic basin in Santa Maria (Rio Grande do Sul, Brazil). *International Journal of River Basin Management*, 14(4), 393-399.
- Wren, D. G., & Kuhnle, R. A. (2002, April). Surrogate techniques for suspended-sediment measurement. In *Turbidity and other sediment surrogates workshop*.
- Zhang, Y. (2009). An optical sensor for in-stream monitoring of suspended sediment concentration (Doctoral dissertation, Kansas State University).
- Zou, X. J., Ma, Z. M., Zhao, X. H., Hu, X. Y., & Tao, W. L. (2014). B-scan ultrasound imaging measurement of suspended sediment concentration and its vertical distribution. *Measurement Science and Technology*, 25(11), 115303.