

علمی- پژوهشی

استفاده از محاسبات نرم در شبیه‌سازی جریان‌های رسوبی

سیدمحمود کاشفی‌پور ^۴	مهدی قمشی ^۳	سید سعید اسلامیان ^۲	مهدی درخشان‌نیا ^۱
گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.	گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.	گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران و گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.	گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳)			

چکیده

جریان‌های غلیظ از مهم‌ترین عوامل در کاهش عمر مفید سازه‌های آبی بخصوص سدهای مخزنی می‌باشند، بر این اساس محققین همواره به دنبال راهکارهایی جهت حذف این جریان‌ها و افزایش عمر مفید سدها بوده‌اند. یکی از کاربردی‌ترین روش‌های شناخته شده، ساخت مانع در مسیر این جریان‌ها می‌باشد. در این تحقیق آزمایشگاهی عددی اثر مانع نفوذپذیر ذوزنقه‌ای شکل (پر شده با دانه‌های شن با قطر نیم سانتی‌متر) بر هد جریان غلیظ و با در نظر گرفتن متغیرهایی همچون دبی، غلظت، شیب و ارتفاع مانع مورد ارزیابی قرار گرفته شد. بر اساس مقادیر درصد کاهش هد جریان غلیظ به دست آمده از آزمایش‌ها، اقدام به مدل‌سازی هد جریان غلیظ نمکی با روش نرم، سامانه استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) شده و سپس با مقایسه نتایج آن با روش کلاسیک رگرسیون چند متغیره، کارکرد این دو روش مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که میزان خطا انفیس برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۰/۰۷، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۳ و برای روش رگرسیون چند متغیره به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۹۹ و ۰/۱۰۸۴ بوده است همچنین مقادیر رگرسیون آموزش و تست برای سامانه انفیس ۰/۹۹۵۴ و ۰/۹۶۵۲ بوده و برای روش کلاسیک رگرسیون چند متغیره ۰/۹۳۱۰۸ و ۰/۹۰۳۹۶ بوده است که نشان از برتری کارایی سامانه انفیس در مدل‌سازی داده‌های هد دارد.

واژه‌های کلیدی: جریان غلیظ، رسوب‌گذاری، درصد کاهش هد، سامانه استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، رگرسیون چند متغیره

The application of soft computing in the simulation of sediment flows

M. Derakhshannia

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

S.S. Eslamian

Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran and Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

M. Ghomeshi

Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

S.M. . Kashefipour

Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(Received: 25/April/2021 ; Accepted:14/August/2021)

ABSTRACT

Density flows are one of the most important factors in reducing the useful life of water structures, especially reservoir dams. Therefore, researchers have always been investigating solutions to eliminate these flows and increase the useful life of dams. One of the most practical methods known is to build an obstacle in the path of these currents. In this laboratory-numerical study, the effect of trapezoidal permeable obstacle (filled with 0.5 cm diameter grains) on the head of density flow is investigated and the effects of variables such as discharge, concentration, slope and height of the obstacle are studied. Based on the percentage reduction of the density flow head obtained from the experiments, the concentrated salt flow head is modeled using one of the soft computing methods known as the adaptive neural-fuzzy inference system (Anfis). Then, by comparing the results with the classical multivariable regression method, the performance of these two methods is compared. The error of training, validation and test data for the Anfis method are shown to be 0.07, 0.033 and 0.03, respectively, while for the multivariable regression method the mentioned errors are shown to be 0.12, 0.199 and 0.1084, respectively. Also, regression values for the training and test data for the Anfis method, are found to be 0.9954 and 0.9652 respectively whilst for the multivariable regression method, the mentioned parameters are shown to be 0.93108 and 0.90396 respectively which demonstrates the superiority and the efficiency of the adaptive neural-fuzzy inference system in modeling the head data.

Keywords: Density Flow, Sedimentation, Head Reduction Percentage, Adaptive Neural-Fuzzy Inference System, Multivariate Regression

۱- دانشجوی دکتری mehdir80@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): saeid@iut.ac.ir

۳- استاد: m.ghomeshi@scu.ac.ir

۴- استاد: kashefipour@scu.ac.ir

۱- مقدمه

جریان کدر یکی از اصلی‌ترین فرایندهای انتقال رسوبات معلق در مخازن سدها می‌باشد [۱]. مکانیسم اصلی حرکت در این جریان‌ها، اختلاف جرم مخصوص بین رسوبات و آب شفاف می‌باشد، به همین دلیل به این جریان‌ها، جریان‌های غلیظ یا چگال نیز گفته می‌شود [۲]. طبق تحقیقات انجام شده مشخص شد که جریان غلیظ متشکل از سه بخش هد، بدنه و نقطه غوطه‌وری می‌باشد. برای درک بهتر این جریان-ها، جرم مخصوص و شتاب گرانشی مؤثر بر جریان‌های غلیظ بر اساس روابط (۱) و (۲) ارائه شده است:

$$\rho_t = \rho_a + (\rho_s - \rho_a) C_s \quad (1)$$

$$g = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} = g C_s \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، C_s متوسط غلظت حجمی

رسوبات غیرچسبنده $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ، ρ_t جرم مخصوص متوسط

جریان غلیظ $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ، ρ_a جرم مخصوص سیال پیرامون

جرم مخصوص ذرات غیرچسبنده $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ، ρ_w

جرم مخصوص آب $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ و g' شتاب گرانشی مؤثر $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

است.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که رخ دادن این پدیده در مخازن سدها سبب انسداد خروجی‌های واقع در قسمت پایینی سدها شده و بر عملکرد سامانه‌های آبی و کاهش ظرفیت ذخیره مخزن مؤثر می‌باشد، بنابراین اگر بتوان حرکت جریان‌های غلیظ را قبل از رسیدن به دیواره سد در مراحل اولیه پیش‌روی کنترل نمود، ظرفیت ذخیره مخزن برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود [۳]. بر این اساس محققین راهکارهای مختلفی در این زمینه ارائه داده‌اند که در این بین یکی از کاربردی‌ترین آن‌ها، استفاده از موانع در بخش‌های میانی دریاچه پشت سدها می‌باشد. ساخت موانع نه تنها باعث کنترل رسوبات ریزدانه در نقاط بحرانی همچون ورودی‌ها و خروجی‌های بخش پایینی سد می‌شود، بلکه عملکرد مخزن سد را از منظر زیست‌محیطی بهبود می‌بخشد. در ادامه به ارائه تحقیقاتی آزمایشگاهی که بر تأثیر موانع بر کنترل جریان‌های غلیظ انجام شده، پرداخته شده است. جنزر آلتهاوس و همکاران [۴] مطالعه‌های موردی جریان‌های کدر و رسوب‌زدایی را در مخازن با بهره‌گیری از مطالعه‌های موردی و شبیه‌سازی عددی برای

تعیین تأثیر موانع مستغرق در رسوب‌گذاری پشت دیواره سدها ارائه داده‌اند. نصراله‌پور و قمشی [۵] در تحقیقی آزمایشگاهی به بررسی تأثیر هندسه زبری بر غلظت هد پرداختند. عشاقی و همکاران [۶] یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی با اعداد فرود، غلظت‌ها و ارتفاع‌های موانع مختلف انجام دادند. نتایج نشان داد که جریان غلیظ با عدد فرود ورودی کمتر نسبت به عدد فرود بیشتر واکنش سریع‌تری نسبت به حضور موانع نشان می‌دهد. قربانی و همکاران [۷] در تحقیقی آزمایشگاهی به بررسی اثر صفحات مستغرق بر جریان غلیظ پرداختند. آن‌ها متغیرهایی همچون شکل، زاویه، ابعاد و محل قرارگیری صفحات را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شکل مانع به میزان ۲۶ درصد، زاویه قرارگیری مانع ۱۷ درصد، ابعاد ۲۷ درصد و محل قرارگیری مانع نسبت به حالت مبنا ۴۵ درصد سبب کاهش در سرعت هد جریان غلیظ می‌شود. بقالیان و قدسیان [۸] در تحقیقی آزمایشگاهی اثر زبری مصنوعی (موانع با ارتفاع بسیار کوتاه) و شکست شیب را بر جریان غلیظ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از زبری‌هایی با آرایش‌ها و ارتفاع‌های مختلف استفاده نمودند. اهداف مورد نظر آن‌ها بررسی تأثیر زبری‌ها بر غلظت هد، سرعت بدنه، دبی و غلظت بود. نتایج نشان داد که ارتفاع زبری بر پارامترهای مورد بررسی اثر داشته اما تغییر آرایش زبری‌ها هیچ‌گونه اثر چشمگیر نداشته است. دی‌سیزر و همکاران [۹] مشاهده کردند که موانع با ارتفاع معقول (حداقل دو برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ) برای مسدود کردن جریان‌های غلیظ کارآمد می‌باشند. نتایج سایر محققان نشان داد که در حالت خاص، جریان غلیظ را می‌توان با استفاده از یک مانع ژئوتکتستایل یا یک صفحه جت آب شیب‌دار به‌طور قابل توجهی کاهش داد و سبب ته‌نشینی بسیاری از رسوبات در بالادست موانع شد. کوبو [۱۰] در تحقیقی به بررسی اثر توپوگرافی سطح شیب‌دار و تپه به‌عنوان مانع، بر روند رسوب‌گذاری جریان‌های غلیظ به‌صورت عددی و آزمایشگاهی پرداخت. در این تحقیق مشاهده شد که میزان رسوب‌گذاری در بالادست و بر روی برآمدگی و پایین دست سطوح شیب‌داری که شکستگی در آن‌ها رخ می‌دهد بیشتر است. اوهی [۱۱] به بررسی اثر موانع و جت‌ها بر روند رسوبات مخزن به‌دلیل جریان‌های کدر به‌صورت آزمایشگاهی و عددی با در نظر گرفتن ارزیابی مکانی و زمانی رسوب‌گذاری پرداخت و متوجه شد که نتایج شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دارد. در دهه‌های اخیر بسیاری

میسر نبود و در طرح‌های تحقیقی یک نقیصه بسیار بزرگ به حساب می‌آمد. از سوی دیگر روش‌های عددی قادرند که متغیرهای بسیار زیادی را مورد بررسی قرار دهند و نتایج را با میزان دقت مشخص تعیین نمایند. با گسترش این روش‌ها، طرح‌های عددی مختلفی در سطح جهان و با در نظر گرفتن نتایج به‌دست‌آمده توسط محققین دیگر، انجام شد اما این محققین به‌دلیل عدم شناخت کافی از روند تحقیق یا خطاهای موجود در حین آزمایش‌ها، خطاهای بسیاری در تحلیل‌هایشان مشاهده می‌شد. سایر تحقیقات در این حوزه نیز بیشتر به استفاده از روش‌های عددی ساده‌تر محدود می‌شد که سبب کاهش ارزش این طرح‌ها در سال‌های اخیر شده است. در این تحقیق محققین تلاش کرده‌اند تا با استفاده از نتایج آزمایش‌هایی که به‌طور دقیق در آزمایشگاه شهید چمران اهواز انجام شده استفاده کرده و با استفاده از روش‌های موسوم به محاسبات نرم به بررسی داده‌ها بپردازند سپس نتایج حاصل با نتایج حاصل از مدل‌سازی با روش کلاسیک چند متغیره مقایسه شد. هدف این تحقیق بررسی عملکرد نوع خاصی از روش‌های هوش مصنوعی موسوم به محاسبات نرم در مدل‌سازی نتایج آزمایشگاهی جریان‌های غلیظ می‌باشد.

بر اساس مطالب ارائه‌شده در زمینه کارایی مطلوب روش‌های هوشمند، اصلی‌ترین هدفی که در این تحقیق توسط نویسندگان دنبال می‌شود عبارت است از بررسی عملکرد روش‌ها مدل‌سازی محاسبات نرم و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک در شبیه‌سازی جریان‌های غلیظ می‌باشد. با توجه به مطالعات وسیع نویسندگان این مقاله مشخص شد که تحقیقات بسیار اندکی بر کارایی این روش‌های هوشمند در مدل‌سازی جریان‌های غلیظ انجام شده است.

بر این اساس در بخش اول این تحقیق به بررسی موانع دوزنقه‌ای ساخته‌شده از مش فلزی که با شن به قطر نیم سانتی‌متر کاملاً پر شده پرداخته شده و تأثیر پارامترهای مهم از جمله غلظت، دبی ورودی، شیب و ارتفاع موانع بر رفتار جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفته است. میزان شار هد جریان بر اساس پارامترهای دبی، غلظت و ارتفاع هد جریان غلیظ قبل و بعد از موانع محاسبه و بر اساس نتایج حاصله اقدام به آموزش سامانه استنتاج عصبی- فازی

از محققین از روش‌های عددی برای تحلیل نتایج خود بهره برده‌اند که دلیل اصلی آن هزینه‌بر بودن و زمان طولانی آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

ژانگ و استنلی [۱۲] به بررسی نحوه کارکرد شبکه عصبی بر شبیه‌سازی رسوب‌گذاری پرداختند. بودیو و همکاران [۱۳] نیز در طرحی هیدرولیکی-هیدرولوژیکی از شبیه‌سازی عددی نمونه‌ها استفاده نمودند. علی‌گودرز و همکاران [۱۴] در این تحقیق سعی کردند تا با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی افت‌های موجود در توربین‌ها با استفاده از مدل‌های افت اینلی-ماتیسون، دونهام-کیم و انگیر جهت بررسی تأثیر تلورانس‌های ضخامت بیشینه، ارتفاع و طول وتر پره بر بازده استفاده نمایند. مدل افت انگیر مقدار افت‌های رخ داده در توربین را نسبت به دو مدل افت دیگر دقیق‌تر پیش‌بینی می‌کرد و در نتیجه مقدار افت به‌دست‌آمده از دو مدل دیگر کمتر نشان داده می‌شد. گودرزی و همکاران [۱۵] در این تحقیق عددی به بررسی تأثیر اثرات ارتفاع مانع و شکل هندسی (مستطیل و مثلث) بر ته‌نشینی رسوبات و هیدرودینامیک جریان‌های غلیظ در یک فلوم پرداختند. آن‌ها از یک مدل عددی قوی بر اساس روش LES استفاده نمودند. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع مانع باعث کاهش سرعت جریان غلیظ و انتقال رسوب در فلوم می‌شود همچنین موانع مستطیلی اثرات بارزتری در انسداد رسوبات دارند. هو و همکاران [۱۶] در این تحقیق با اجرای رویکرد ترکیبی مرحله محلی-زمان-مرحله (LGTS) و حداکثر زمان-مرحله کلی (GMaTS) یک مدل عددی بسیار کارآمد با میانگین لایه برای جریان‌های کدر ارائه دادند. با بررسی‌های انجام‌شده مشخص شد که این روش نسبت به روش‌های سنتی کارایی بهتری داشته و به میزان ۸۰ درصد بهبود دقت مدل‌سازی داشته است.

استفاده از روش‌های عددی در رشته‌های مختلف بسیار کاربردی بوده که از اوایل هزاره سوم مورد توجه محققین قرار گرفته است. این روش‌ها توانستند بسیار از ضعف‌های طرح‌های اجرایی را کاهش دهند، چون در طرح‌های آزمایشگاهی هزینه و مدت آزمایش‌ها بسیار زیاد بوده و همچنین تنها امکان بررسی چند پارامتر خاص بود که سبب می‌شد در صورت تغییر دیدگاه‌ها یا درک خطا در بخشی از مراحل کار نیاز به تغییرات کلی در کلیت تحقیق باشد که در بسیاری از مراحل به‌دلیل مشکلات مختلف این تغییرات

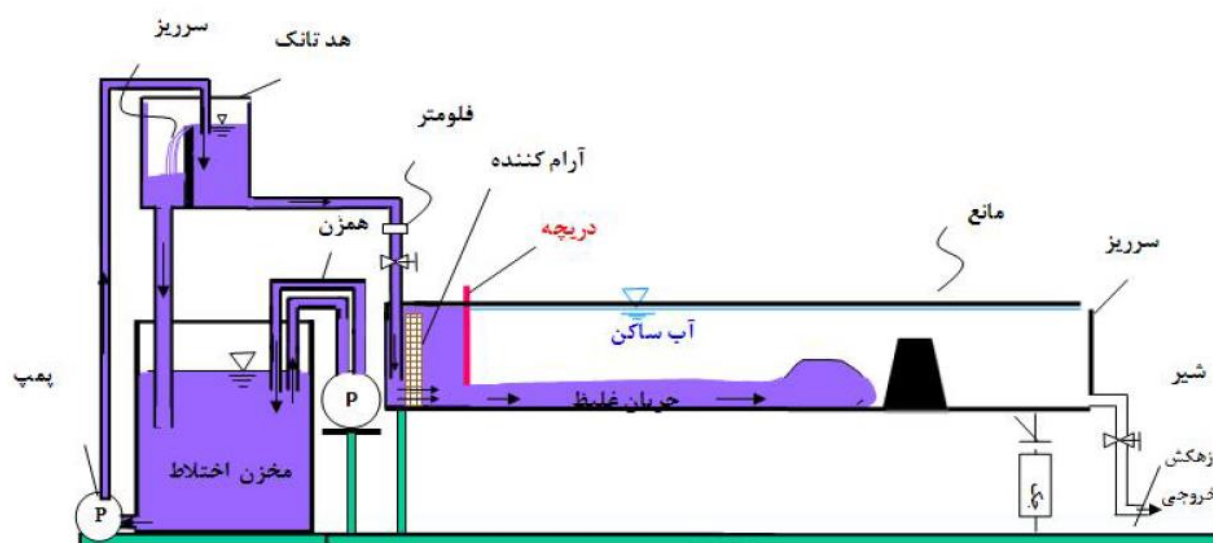
بالادست و پایین دست دریچه به ترتیب با سیال غلیظ و آب شفاف تا ارتفاع ۴۷ cm پر می‌شد. برای تهیه سیال غلیظ از یک مخزن استوانه‌ای با ظرفیت ۳۰۰ lit که مجهز به میکسر بود، استفاده شد. سیال غلیظ از مخزن استوانه‌ای که بر روی زمین قرار داشت، به هد تانک که در ارتفاع ۳ m از سطح زمین ثابت شده بود پمپ شده و با یک لوله سیال را به پشت دریچه منتقل می‌کرد. برای تعیین جریان غلیظ عبوری از یک دی‌سنج الکترومغناطیس با دقت یک‌هزارم لیتر در ثانیه استفاده می‌شد.

مانع مورد استفاده در این تحقیق به صورت ذوزنقه‌ای شکل بوده که با استفاده از توری فلزی با شیب جداره ۱:۱ ساخته و با دانه‌های شن با قطر ۰/۵ cm پر می‌شد. نحوه قرارگیری مانع‌ها به گونه‌ای بود که عرض فلوم به طور کامل پر می‌شد. طول مانع ۲۵ cm سانتی‌متر با ارتفاع متغیر که در فاصله ۲ m متری از دریچه نصب شده بود.

تطبیقی شد و مقادیر درصد شار هد جریان غلیظ حاصله با روش رگسیون چند متغیره مقایسه و روش بهینه ارائه گردید. در صورت عملکرد مناسب این روش‌ها امکان بررسی این پارامترها در بازه‌های مختلف در طرح‌های آبی میسر می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از فلومی با قابلیت تغییر شیب به طول ۷،۸m، عرض ۴۷cm و ارتفاع ۷۰cm استفاده شد. شکل ۱ نمایی شماتیکی از فلوم را نشان می‌دهد. در بالادست فلوم یک صفحه پلاکسی عمودی با دسته مخصوص جهت باز کردن ناگهانی دریچه قرار داشت که کمک می‌کرد بتوان دریچه را به میزان ۱۰ cm برای ایجاد جریان غلیظ به طور ناگهانی باز نمود. همچنین در قسمت پایین دست فلوم نیز سرریزی جهت تخلیه جریان اضافی تعبیه شده بود. قبل از شروع هر آزمایش قسمت‌های



شکل (۱): نمای فلوم آزمایشگاهی [۱۷].

مرکز محور عرضی فلوم قرار داده شده بود به طوری که مرکز اولین ورودی نازل سدهم سانتی‌متر بالاتر از بستر و فاصله بین نازل‌ها یک‌ونیم سانتی‌متر بود. سیفون‌ها از لوله‌های مسی با قطر بیرونی پنج میلی‌متر و قطر داخلی سه میلی‌متر ساخته شده بودند. برای تعیین غلظت نمونه‌های برداشت شده از ای‌سی^۲ سنچ با دقت یک‌دهم میکروگرم بر سانتی‌متر استفاده شده بود. برای انجام آزمایش‌های این تحقیق بر

به منظور بررسی اثر مانع نفوذپذیر ذوزنقه‌ای شکل بر هد جریان غلیظ، از تمام مراحل حرکت جریان غلیظ در فلوم فیلم‌برداری می‌شد و در پایان هر روز مقادیر سرعت و ارتفاع هد با بازبینی فیلم‌ها ثبت می‌شد و برای اندازه‌گیری غلظت هد جریان غلیظ در ارتفاعات مختلف یک سیفون در فاصله ۱/۵ m و ۲/۵ از دریچه ورودی نصب شده بود، تا امکان ثبت غلظت‌ها با استفاده از آن‌ها میسر شود. سیفون‌های مورد استفاده دارای ۱۴ نازل ورودی بود که در

^۲ EC

همان‌طور که پیشتر بیان شد، در این تحقیق ۴ متغیر شیب، غلظت، دبی و ارتفاع مانع مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی عملکرد آن‌ها نشان می‌داد که افزایش شیب، غلظت و دبی سبب افزایش مومنتم هد جریان غلیظ شده و این افزایش مومنتم در هنگام رسیدن جریان به مانع رفتاری متغیر داشته به این صورت که هنگام رسیدن هد جریان غلیظ به مانع با ارتفاع یک و یک‌ونیم برابر بدنه جریان غلیظ اندکی اغتشاش در پشت مانع ایجاد شده اما جریان همانند شکل (۲) از روی مانع عبور می‌کند، اما در ارتفاع دو برابر بدنه جریان غلیظ برای مومنتم کم و زیاد دو روند متفاوت مشاهده شده به این صورت که در مومنتم کم هنگام برخورد هد به مانع اغتشاش کمی ایجاد شده و هد شکل خود را حفظ کرده و به آرامی بر روی مانع صعود کرده و بخشی از جریان از روی مانع عبور می‌کند اما در مومنتم زیاد به دلیل شدت ضربه، اغتشاش زیاد ایجاد شده و مانع تقریباً به‌طور کامل جریان را کنترل می‌نماید. برای درک بهتر روند مشاهده شده در آزمایش‌ها می‌توان بیان کرد که با افزایش شیب میزان کنترل موانع در ارتفاع‌های مختلف از ۶۰ درصد تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. برای این روند از ۵۵ تا ۴۶ درصد بوده و برای غلظت این روند از ۵۶ تا ۴۵ درصد می‌باشد. افزایش ارتفاع مانع نیز به‌طور متوسط باعث بهبود عملکرد مانع در کنترل جریان از ۴۵ تا ۵۵ درصد می‌شود.

۲-۱- سامانه استنتاج عصبی_ فازی تطبیقی (انفیس)^۳

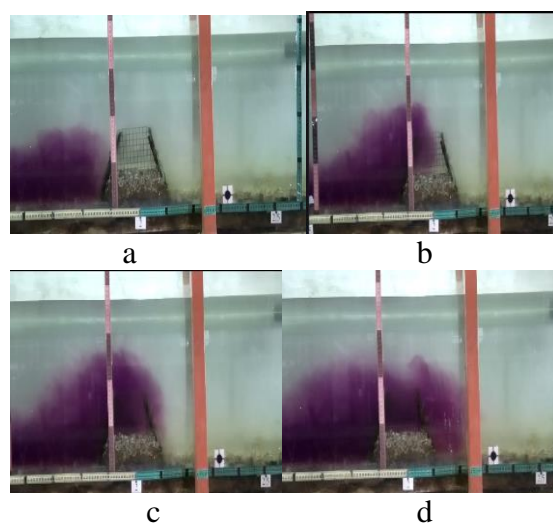
سامانه استنتاج عصبی_ فازی تطبیقی (انفیس) به‌عنوان سامانه تطبیقی استنتاج فازی مبتنی بر شبکه عصبی توسط جانگ [۱۸] ارائه شد. توانایی بالا در یادگیری بر اساس داده‌های ورودی و خروجی غیرخطی سبب افزایش علاقه به استفاده از انفیس در سال‌های اخیر شده است.

در ابتدا توضیح کلی در مورد سامانه‌های فازی ارائه شده به این صورت که سامانه‌های فازی به دو نوع سامانه فازی ممدانی و سامانه فازی تاکاگی و سوگینو^۴ تقسیم می‌شوند که در سامانه‌های انفیس از نوع دوم آن استفاده

اساس غلظت مورد نظر، نمک به مخزن استوانه‌ای اضافه شده و بعد از ایجاد سیال غلیظ یک‌نواخت، با استفاده از پمپ دستگاه، سیال به هد تانک که در ارتفاع ۳ m از سطح زمین قرار داشت پمپ شده و به این صورت امکان ایجاد جریان یک‌نواخت در طول آزمایش فراهم می‌شد.

۷۲ آزمایش جریان غلیظ نمکی با در نظر گرفتن پارامترهایی همچون شیب (یک و یک‌ونیم و دو درصد)، غلظت ورودی (پانزده و بیست گرم در لیتر)، دبی (یک، یک‌ونیم و دو لیتر در ثانیه) و ارتفاع مانع (با ارتفاع یک، یک‌ونیم و دو برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ) مورد بررسی قرار گرفته شد. ۱۸ آزمایش بدون مانع (برای تعیین بدنه جریان غلیظ) و ۵۴ آزمایش با مانع انجام شد. عدد فرود جریان در کلیه آزمایش‌ها کمتر از یک به دست آمد.

با باز شدن دریچه کشویی ورودی و به دلیل اختلاف غلظت بین دو سیال، جریان غلیظ تشکیل شده و به سمت پایین دست فلوم حرکت می‌کند. در قسمت ورودی به‌ویژه در دبی‌های بالا، هد جریان غلیظ در ابتدا متلاطم بوده و سبب ایجاد جریانی با ارتفاع قابل توجهی می‌کند، به همین دلیل سیفون‌ها و مانع با فاصله بیش از یک متر از دریچه ورودی نصب شده بودند تا جریان هنگام رسیدن به آن‌ها توسعه یافته باشد. هنگامی رسیدن جریان غلیظ به مانع (شکل ۲a) کمی به سمت بالا حرکت کرده و سرعت هد کاهش می‌یافت (شکل ۲b) و با این سرعت کاهش یافته جریان از روی مانع عبور می‌کرد (شکل ۲c, d).



شکل (۲): روند عبور هد جریان غلیظ از روی مانع.

³ ANFIS

⁴ Takagi and Sugeno

۲-۲- مدل سازی با استفاده از رگرسیون چندجمله‌ای

رگرسیون چندجمله‌ای یک مدل چندجمله‌ای بوده که قادر به ایجاد رابطه بین تمام مجموعه‌های ورودی و خروجی می‌باشد. این رگرسیون از نظر عددی می‌تواند ناپایدار شود اگر دامنه عملکرد صفر بوده و یا درجه خیلی کم داشته باشد و نمی‌تواند پیچیدگی تابعی را که فرا گرفته به خوبی ارائه دهد. با تمام ضعف‌های بیان شده اما هنوز این روش از بهترین روش‌های مدل سازی می‌باشد. در اینجا رابطه آماری بین درصد کاهش شار هد جریان غلیظ بر اساس سایر پارامترها (ارتفاع موانع، شیب، دبی و غلظت) را با استفاده از معادله چندجمله‌ای و به صورت رابطه (۵) ارائه شده است [۱۶].

$$y = P(m, n, k) = \beta_0 + \beta_{11}x_1 + \beta_{12}x_1^2 + \dots + \beta_{1m}x_1^m + \beta_{21}x_2 + \beta_{22}x_2^2 + \dots + \beta_{2n}x_2^n + \beta_{31}x_3 + \beta_{32}x_3^2 + \dots + \beta_{3k}x_3^k + \beta_{41}x_4 + \beta_{42}x_4^2 + \dots + \beta_{4p}x_4^p \quad (5)$$

که y نشان‌دهنده پیش‌بینی درصد کاهش شار هد جریان غلیظ و x_1, \dots, x_n پارامترهای ورودی هستند. برای به‌دست آوردن پارامترهای β از روش تحلیلی حداقل میانگین مربعات خطا با استفاده از مفاهیم جبر خطی به صورت زیر می‌توان استفاده نمود.

که y نشان‌دهنده پیش‌بینی درصد کاهش شار هد جریان غلیظ و x_1, \dots, x_n پارامترهای ورودی هستند. برای به‌دست آوردن پارامترهای β از روش تحلیلی حداقل میانگین مربعات خطا با استفاده از مفاهیم جبر خطی به صورت زیر می‌توان استفاده نمود.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{12} & \dots & x_{11}^m & x_{21} & \dots & x_{21}^n \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{12}^m & x_{22} & \dots & x_{22}^n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{1t} & \dots & x_{1t}^m & x_{2t} & \dots & x_{2t}^n \\ x_{31} & \dots & x_{31}^k & x_{41} & \dots & x_{41}^p \\ x_{32} & \dots & x_{32}^k & x_{42} & \dots & x_{42}^p \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{3t} & \dots & x_{3t}^k & x_{4t} & \dots & x_{4t}^p \end{bmatrix} \quad (6)$$

می‌شود، این سامانه‌ها می‌توانند بین ورودی‌ها و خروجی‌ها جهت انتخاب درست پارامترها ارتباط برقرار کنند، برای سادگی درک مطلب سامانه فازی تاکاگی و سوگینو، دو ورودی X و Y فرض شود [۱۹] در این صورت قوانین "اگر-آنگاه" فازی بر اساس رابطه (۳) و (۴) می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\text{Rule 1 : if } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \\ \text{Then } f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad (3)$$

$$\text{Rule 2 : if } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \\ \text{Then } f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad (4)$$

که A و B بر حسب‌های زبانی توابع عضویت مرتبط هستند و ضرایب p, q, r پارامترهای عملکرد سامانه را نشان می‌دهند [۲۰].

توسعه مدل انفیس را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود: مرحله شناسایی ساختار و مرحله تنظیم پارامترها. در ابتدا تعداد خوشه‌ها بر اساس پیچیدگی داده‌ها برای سامانه فازی در نظر گرفته می‌شود و در مرحله بعد با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به تنظیم قوانین فازی پرداخته شده، البته توجه شود که این تنظیم قوانین فازی به صورت آنلاین و تطبیقی صورت می‌گیرد یعنی با اولین داده‌ها سامانه فازی ایجاد می‌شود که از دقت کمی برخوردار بوده ولی با ورود داده‌های بیشتر سامانه انفیس تنظیم شده، کامل‌تر شده و بهتر می‌تواند به پیش‌بینی داده‌ها بپردازد.

برای مرحله تنظیم پارامترهای سامانه انفیس به روش-های بهینه‌سازی نیاز است تا بتوان بهترین ضرایب برای بهترین تخمین انتخاب نمود.

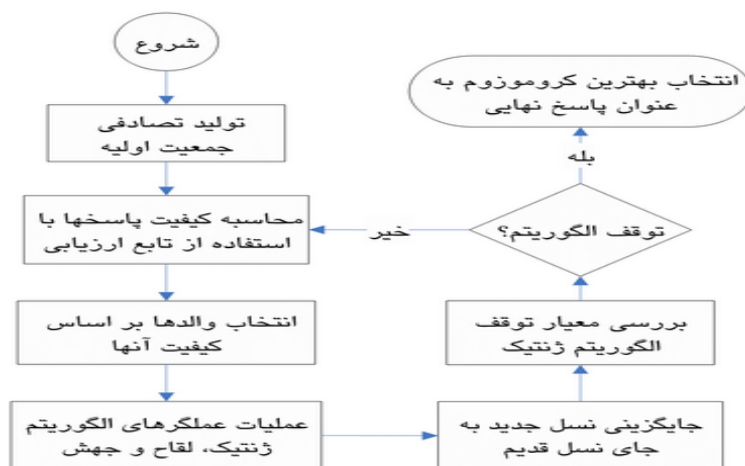
از روش‌های تنظیم پارامتر معمول برای انفیس می‌توان به دو روش معروف اشاره کرد (۱) گرادیان نزولی (۲) ترکیب روش گرادیان نزولی و تخمین حداقل مربعات. روش گرادیان نزولی از ساده‌ترین و مؤثرترین روش‌های تنظیم پارامترهای سامانه انفیس می‌باشد، با این حال روش ترکیبی گرادیان نزولی و تخمین حداقل مربعات از دقت بالاتری برخوردار است ولی سرعت کمی دارد و به دلیل تطبیقی بودن سامانه انفیس می‌تواند سرعت تنظیم پارامترها را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد [۱۹]. به دلیل پیچیدگی متوسط این مساله در این مقاله از روش معمول و کارآمد گرادیان نزولی در تنظیم پارامترها استفاده شده است.

بهینه‌سازی استفاده شود که در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده شده است

۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

یکی از مرسوم‌ترین روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد، در الگوریتم ژنتیک معمولاً یک جمعیت تصادفی مشخص شده سپس برای دستیابی به راه‌حل‌های بهتر، مجموعه اولیه تکامل می‌یابد [۲۲]. این فرآیند تکامل ادامه پیدا کرده تا شرایط توقف آن ایجاد و مهیا شود. در ابتدا جواب‌های اولیه به‌عنوان کروموزوم‌های اولیه انتخاب شده و بر اساس تابع هزینه، هزینه اولیه محاسبه می‌گردد و سپس با انتخاب کروموزوم‌های بهتر، این کروموزوم‌ها با هم ترکیب شده و نسل بعدی کروموزوم‌ها ایجاد می‌شوند،

پس از اجرای این فرآیند مشاهده می‌شود که در هر نسل، کروموزوم‌های (جواب‌های) بهتری حاصل می‌شوند. پس از انجام فرآیند تکامل، مناسب‌ترین کروموزوم به‌عنوان یک پاسخ بهینه برای مسئله داده شده انتخاب می‌شود. در شکل ۳ مراحل الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است [۲۲].



شکل (۳): چارچوب الگوریتم ژنتیک [۲۲]

تحقیق نیز از این روش برای تحلیل داده‌ها استفاده شده است.

عملکرد این روش به این گونه است که ابتدا به تعداد $K-1$ قسمت از داده‌ها برای بخش آموزش استفاده شده و سپس برای بخش اعتبارسنجی از باقی داده‌ها استفاده می‌شود، این فرآیند به‌طور مکرر تکرار می‌شود تا همه K بخش داده به‌عنوان داده‌های اعتبارسنجی مورد استفاده قرار

اگر رابطه (۷) شامل داده‌های پارامترهای ورودی باشد (تعداد داده‌ها می‌باشد).

$$y^T = [y_1, y_2, \dots, y_t] \quad (7)$$

y برداری شامل داده‌های خروجی می‌باشد و پارامترهای چندجمله‌ای به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\beta = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (8)$$

این روش بسیار دقیق و کارا بوده و قابلیت ایجاد پارامترهای مدل چندجمله‌ای را به‌صورت تحلیلی دارد. در بیان مشکلات این روش می‌توان گفت که ابعاد ماتریس $A^T A$ می‌تواند بسیار زیاد باشد که همین امر سبب می‌شود که گرفتن معکوس این ماتریس بسیار مشکل و زمان‌بر شود، همچنین ماتریس‌هایی که کامل نباشند سبب صفر شدن دترمینان‌شان می‌شود و در نتیجه ماتریس فوق معکوس‌پذیر نبوده و این روش پاسخگو نمی‌باشد [۲۱]. به‌دلیل مشکلات ذکر شده لازم است راه‌حلی اتخاذ گردد و بر این اساس برای تعیین این پارامترها لازم است از یکی از روش‌های

۴-۲- اعتبارسنجی متقابل

روش‌های اعتبارسنجی متقابل از سه نوع تشکیل شده‌اند که عبارت‌اند از نمونه‌گیری تصادفی، اعتبارسنجی متقاطع K فولد و اعتبارسنجی یکجا، که اعتبارسنجی متقابل K فولد به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی همچون سادگی، آسانی و استفاده از همه داده‌ها برای آموزش و اعتبارسنجی بسیار پرکاربرد می‌باشد، با توجه خصوصیات مناسب، در این

می‌توان گفت که سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) با موفقیت آموزش داده شده و شرایط لازم برای جایگزینی به‌جای طرح خاص آزمایشگاهی را دارد. این روش مزیت‌های بسیار زیادی دارد که در این بین عملکرد مناسب آن در زمان کوتاه بسیار مورد توجه کاربران می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که رویکرد این مطالعه در حل مسائل آبی با توجه به پارامترهای مختلف مورد بررسی در آن، بسیار کاربردی می‌باشد. سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) در این تحقیق شامل سه مرحله می‌باشد. در مرحله اول یک سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) با لایه‌های ورودی پنهان و خروجی و تعداد متفاوت نورون ایجاد می‌شود. ورودی‌های سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) شامل دبی، شیب، غلظت ورودی و ارتفاع موانع بوده و خروجی هدف سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس)، درصد کاهش شار هد می‌باشد. آموزش سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و استفاده از روش گرادیان نزولی انجام شده است، در مرحله آموزش سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس)، تکرارهای گرادیان نزولی ۱۰۰۰ بار فرض شده و سپس با یافتن تعداد نورون‌های بهینه و بر اساس شاخص RMSE و مقدار رگرسیون، نتایج مدل‌سازی سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست بررسی می‌شوند.

۳- نتایج

در این بخش به نتایج سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) و روش رگرسیون چند متغیره ارائه شده است.

۳-۱- نتایج مدل‌سازی با سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس)

در این بخش به مدل‌سازی داده‌ها با استفاده از سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) پرداخته شده است، ورودی‌های این شبکه شامل ارتفاع مانع، شیب کف، غلظت و دبی ورودی بوده و خروجی شبکه درصد کاهش شار جریان می‌باشد. در این بخش از سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) برای تعیین تعداد متغیر خوشه استفاده شده تا ساختار بهینه سامانه انفیس به‌دست آید. در این بخش توجه به دو نکته ضروریست:

گیرد و در مرحله نهایی میانگین خطاهای k بار اعتبارسنجی تعیین شود. یکی از ضعف‌های این روش نیاز به تعداد تکرار زیاد آن بوده به این صورت که اگر K خیلی بزرگ انتخاب شود، خطا تخمین زده شده بسیار کم بوده اما مدت زمان محاسبه بسیار زیاد می‌شود، حال اگر مجموعه K خیلی کوچک انتخاب شود، مدت زمان محاسبه کاهش یافته اما مقادیر خطا با دقت بسیار کم محاسبه می‌شود. بر این اساس تعیین تعداد بهینه بین میزان خطا و مدت محاسبات به‌عنوان یک چالش در این روش مطرح می‌گردد و کاربران تلاش می‌کنند که به‌طور هم‌زمان به انتخاب مدل و برآورد مقدار خطا بپردازند، انجام این هم‌زمانی نیازمند تقسیم مجموعه داده‌ها به سه مجموعه جدا از هم می‌باشد، به‌عبارت دیگر از زیرمجموعه اعتبارسنجی برای تنظیم پارامترهای مدل شبکه عصبی استفاده می‌شود اما نکته حائز اهمیت این است که برای ارزیابی عملکرد شبکه عصبی آموزش دیده نیاز به زیرمجموعه آزمایشی دیگر (مجموعه داده‌های تست) می‌باشد.

۲-۵- نحوه کاربرد سامانه استنتاج عصبی_فازی

تطبیقی (انفیس) برای پیش‌بینی هد جریان غلیظ

در این روش سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) آموزش داده شده تا بتوان از آن به‌جای آزمون آزمایشی استفاده گردد. برای آموزش سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) لازم است ابتدا ساختار مناسب برای این سامانه ایجاد شود، با توجه به کارایی بسیار زیاد این سامانه، زیرشاخه‌های بسیاری از آن ایجاد شده که در این بین شبکه عصبی پیش‌خور چند لایه بیشترین محبوبیت را بین کاربران دارد که در این طرح جهت تنظیم سامانه فازی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه تعداد سلول‌های عصبی موجود در لایه‌های خروجی و ورودی به‌طور خاص بر اساس تعداد اهداف طراحی ایجاد شده‌اند. در طول مهم‌ترین مرحله آموزش، سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) سعی می‌کند رابطه‌ای بین ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله بر اساس داده‌های آموزش را شبیه‌سازی کند. سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) این کار را فقط با وزن‌دهی نورون‌ها انجام داده تا زمانی که صحت‌سنجی و نتایج آزمون نشان دهد که دقت پیش‌بینی در سطح قابل قبولی است، در این صورت

باقیمانده، ۱۰ درصد برای تست و ۱۰ درصد جهت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مشخصاً سامانه عملکرد مناسب‌تری دارد که خطای تخمین خروجی آن برای هر سه داده آموزشی، تست و اعتبارسنجی کمینه باشد.

در این بخش به شبیه‌سازی و آموزش سامانه به ازای تعداد خوشه‌های مختلف پرداخته شده تا بدین طریق تعداد خوشه‌هایی که در آن‌ها خطای نوروون‌سازی کمینه می‌باشد، به‌دست آید نتایج حاصله در جدول ۱ ارائه شده است.

۱- به‌منظور آموزش صحیح سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) و تأثیر مناسب هر یک از ورودی‌ها بر خروجی مورد نظر، داده‌ها ابتدا نرمالیزه شده سپس به شبکه اعمال شده‌اند، به این صورت که داده‌های مربوط به هر پارامتر ورودی بر مقدار بیشینه آن پارامتر تقسیم شده تا داده‌های مربوطه بین ۰ و ۱ قرار گیرند.

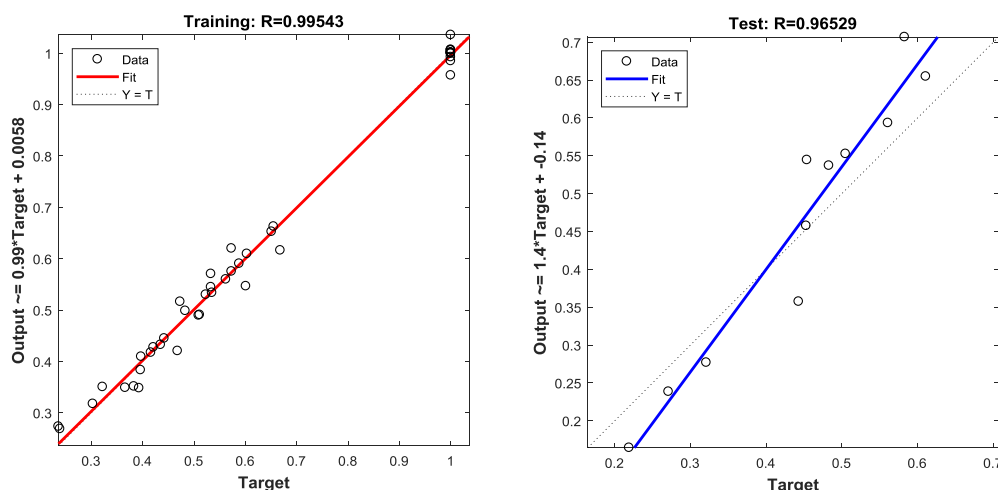
۲- در آموزش این سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) ۸۰ درصد داده‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب شده و برای آموزش سامانه استفاده شده‌اند و از ۲۰ درصد

جدول (۱): عملکرد سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) به ازای ساختارهای مختلف شبکه.

تست		صحت‌سنجی	آموزش		خوشه	ردیف	درصد کاهش شار هد جریان غلیظ
RMSE	R	RMSE	RMSE	R			
۰/۰۵۶	۰/۹۶	۰/۰۶۱	۰/۰۶۹	۰/۹۶	۲	۱	
۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۹۹	۳	۲	
۰/۰۴	۰/۹۸	۰/۳	۰/۰۹	۰/۹۸	۴	۳	
۰/۰۳	۰/۹۶	۰/۰۳۳	۰/۰۷	۱	۵	۴	
۰/۰۳	۰/۳۲	۰/۰۴	۰/۳۲	۰/۹۹	۶	۵	
۰/۰۱	۰/۸	۰/۵۶	۰/۰۷	۱	۷	۶	
۰/۰۱	۰/۹	۰/۴۴	۰/۱۲	۱	۸	۷	
۰/۰۰۶	۰/۲۷	۰/۶۱	۰/۴	۱	۹	۸	
۰/۰۱	۰/۶۷	۰/۲۳	۰/۱۵	۱	۱۰	۹	
۰/۰۰۳	۰/۱۹	۰/۷۹	۱/۶۹	۱	۱۱	۱۰	
۰/۰۰۹	۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۸	۱	۱۲	۱۱	
۰/۰۰۱	۰/۶	۰/۰۵۶	۰/۲۴	۱	۱۳	۱۲	
۰/۰۰۰۰۹	۰/۸	۰/۰۳۱	۰/۰۹	۱	۱۴	۱۳	
۰/۰۰۰۰۵	۰/۷۹	۰/۹۱	۰/۱	۱	۱۵	۱۴	
۰/۰۰۰۹	۰/۸۶	۰/۱۱	۰/۱	۱	۱۶	۱۵	

بسیار بهتری دارد و همچنین با توجه به نزدیکی خطا حالت تست که در حدود ۰/۰۳ می‌باشد خوشه ۵ به‌عنوان حالت بهینه انتخاب بسیار بهتری می‌باشد. لازم به ذکر است که خطای اعتبارسنجی در مدل‌سازی داده‌ها بسیار مهم بوده و مدلی که کمترین خطای اعتبارسنجی را داشته باشد بهترین تعمیم‌پذیری را برای آزمایش‌های دیگر دارد. در ادامه به بررسی دقیق‌تر نمودارهای رگسیون این شبکه برای داده‌های آموزشی و تست در شکل ۴ پرداخته شده است.

با توجه به جدول ۱ واضح است که سامانه با تعداد ۵ خوشه مناسب‌ترین شبکه برای مدل‌سازی داده‌های مربوطه بوده و مقادیر ۰/۰۷، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۳ به‌ترتیب کمترین خطا برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست می‌باشد. برای درک بهتر به بررسی خوشه بهینه با خوشه ۳ و ۷ پرداخته شده که در این حالت میزان خطای آموزش برابر یا بهتر از خوشه ۵ بوده اما چون مقدار صحت‌سنجی حالت بهینه برابر با ۰/۰۳۳ نسبت به آن دو خوشه با ۰/۲۲ و ۰/۵۵ وضعیت



شکل (۴): نمودار رگسیون را برای داده‌های آموزش و تست سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس)

در جدول ۲ نتایج مدل‌سازی داده‌ها به وسیله رگرسیون چندجمله‌ای با درجه‌های مختلف ارائه شده است. توجه شود که امکان مدل‌سازی داده‌ها با چندجمله‌ای‌های مرتبه بالاتر میسر نمی‌باشد، زیرا که در مدل‌سازی این داده‌ها فرابرازش اتفاق می‌افتاد به این صورت که عملاً چندجمله‌ای، داده‌های آموزشی را حفظ کرده و در نتیجه خطای داده‌های تست به صورت زیادی افزایش یافته و پاسخ‌های حاصل قابل استناد و مناسب نمی‌باشند.

با توجه به جدول ۳ مشخص است که رگسیون چندجمله‌ای به صورت نسبتاً مناسبی قادر بوده داده‌ها را مدل کند و رفتار آن‌ها را پیش‌بینی نماید. در این بین با مقایسه توابع چندجمله‌ای با درجه‌های مختلف مشخص شد که چندجمله‌ای (۲ و ۱ و ۲) p به بهترین حالت توانسته رفتار داده‌ها را مدل کند به صورتی که خطای پیش‌بینی برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۹۹ و ۰/۱۰۸۴ بوده که مقادیر مناسب و ناچیزی می‌باشند، در این حالت عملکرد این روش بسیار بهتر بوده است.

با بررسی حالت‌های ۱، ۲، ۳ و ۱۳ مشخص می‌شود که داده‌ها بسیار نزدیک بهم بوده به گونه‌ای که مقادیر صحت سنجی و آموزش تمامی حالات به ترتیب حدود ۰/۱۹ و ۰/۱۲ بوده اما خطا تست ردیف ۱۳ که حالت بهینه بوده با مقدار ۰/۱۰۸۴ مقدار مطلوب‌تری می‌باشد.

شکل ۴ نمودار رگسیون را برای داده‌های آموزش و تست سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) با تعداد ۵ خوشه نشان می‌دهد، همان‌طور که مشخص است هر چه مقدار رگسیون به ۱ نزدیک‌تر باشد، آن شبکه عملکرد بهتری در پیش‌بینی داده‌های جدید دارد. مقدار رگسیون داده‌های آموزشی و تست بهینه ۰/۹۹۵۴ و ۰/۹۶۵۲ بوده که به صورت مطلوبی نزدیک به ۱ است و نشان از قدرت پیش‌بینی بالای شبکه دارد. با بررسی مقادیر رگسیون در حالت آموزش برای تمامی خوشه‌ها مشخص می‌شود که رگسیون‌ها در بازه ۰/۹۶ تا ۱ بوده که بسیار مطلوب می‌باشد و در این حالت وضعیت تمامی خوشه‌ها مشابه است این روند برای رگسیون در حالت تست تا خوشه ۵ نیز صادق است اما از خوشه ۶ به بعد رگسیون‌ها به شدت کاهش یافته و در بازه ۰/۸۶ تا ۰/۱۹ متغیر می‌باشد که در بسیاری از حالات نزدیک به صفر بوده و نشان از ضعف مدل‌سازی در خوشه‌ها بالا دارد. در ادامه به مدل‌سازی داده‌ها با رگسیون چندجمله‌ای پرداخته شده است.

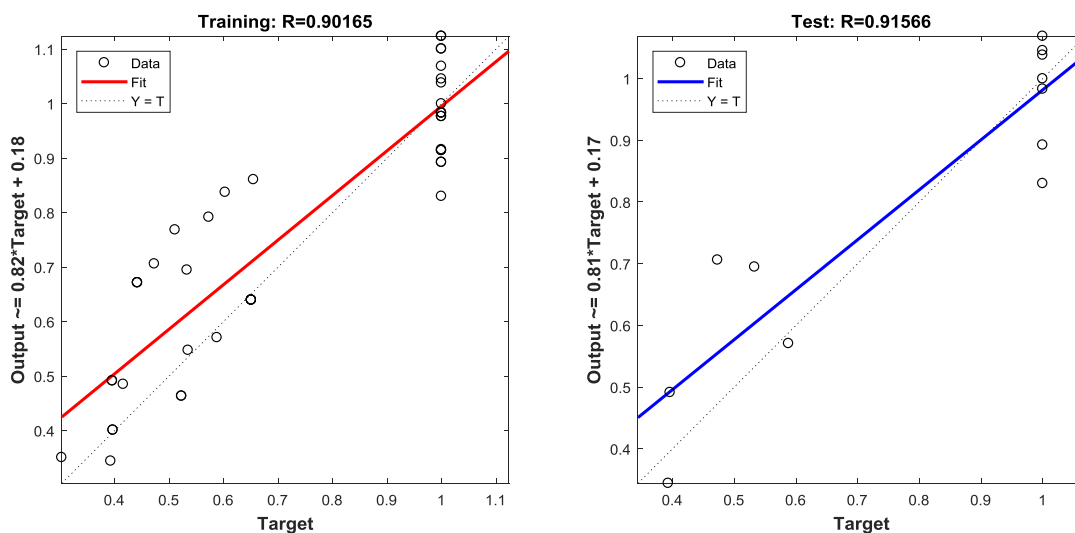
۳-۲- نتایج مدل‌سازی با روش رگرسیون چند متغیره

در این بخش به ارائه نتایج مدل‌سازی داده‌های درصد کاهش هد جریان بر اساس پارامترهای ورودی پرداخته شده و برای به دست آوردن ضرایب رگرسیون چندجمله‌ای از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است، به این صورت که ابتدا به مدل‌سازی داده‌ها با چندجمله‌ای‌های مختلف پرداخته و سپس توان پارامترها را تا حدی که فرابرازش اتفاق بیافتد ادامه داده، و بر اساس معیار RMSE و R بهترین مدل انتخاب شده است.

جدول (۲): نتایج مدل‌سازی داده‌ها توسط رگرسیون چندجمله‌ای و الگوریتم ژنتیک.

تست		صحت‌سنجی		آموزش		ساختار	ردیف	درصد کاهش شار جریان غلیظ
RMSE	R	RMSE	RMSE	R				
۰/۱۳۶۲	۰/۸۶۵۵	۰/۱۹۱۵	۰/۱۲۳۷	۰/۸۷۶۶	P(1,1,1,1)	۱		
۰/۱۲۱۶	۰/۸۹۱	۰/۱۹۲۳	۰/۱۱۵۸	۰/۸۶۷۶	P(2,1,1,1)	۲		
۰/۱۲۷۷	۰/۸۹۰۷	۰/۱۹۱۳	۰/۱۱۷۱	۰/۸۹۰۱	P(1,2,1,1)	۳		
۰/۶۳۱۱	۰/۶۳۶۴	۰/۶۸۳	۰/۶۴۰۳	۰/۶۹۸۴	P(1,1,2,1)	۴		
۰/۱۵۰۶	۰/۸۴۵۹	۰/۱۱۱	۰/۱۲۳۱	۰/۸۷۷۸	P(1,1,1,2)	۵		
۰/۱۰۹۳	۰/۸۹۵۲	۰/۱۴۴	۰/۱۰۷۵	۰/۸۹۰۴	P(2,2,1,1)	۶		
۰/۳۱۷۶	۰/۸۳۲۲	۰/۳۰۱	۰/۲۹۶۵	۰/۸۰۷۸	P(2,1,2,1)	۷		
۰/۱۲۴۳	۰/۸۸۴۱	۰/۳۱۱	۰/۱۱۵	۰/۸۹۳۴	P(2,1,1,2)	۸		
۰/۳۹۹۸	۰/۷۴	۰/۴۶۹	۰/۴۱۵۵	۰/۷۵۸۷	P(1,2,2,1)	۹		
۰/۱۳۰۷	۰/۸۸۴۲	۰/۱۶۱	۰/۱۱۶۸	۰/۸۹۰۹	P(1,2,1,2)	۱۰		
۱/۰۷۶	۰/۵۷۴۶	۱/۰۱۱	۱/۰۱۸	۰/۴	P(1,1,2,2)	۱۱		
۰/۵۶۱۲	۰/۸۴۵۱	۰/۴۹	۰/۵۳۲۵	۰/۷۹۱۴	P(2,2,2,1)	۱۲		
۰/۱۰۸۴	۰/۹۱۵۶	۰/۱۹۹	۰/۱۲	۰/۹۰۱۶	P(2,2,1,2)	۱۳		
۱/۴۶۵۱	۰/۵۰۸۳	۰/۸۷۶	۱/۳۶۶۵	۰/۳۳۹۷	P(2,1,2,2)	۱۴		
۱/۷۷۹۸	۰/۶۱۸۳	۱/۰۲	۱/۷۱۱۸	۰/۴۱۴۸	P(1,2,2,2)	۱۵		
۰/۹۳۱۱	۰/۸۲۳۹	۰/۹۳۳	۰/۹۳۷۲	۰/۸۴	P(2,2,2,2)	۱۶		

در ادامه به بررسی نمودارهای رگرسیون در شکل ۵ پرداخته شده است.



شکل (۵): نمودار رگرسیون چندجمله‌ای.

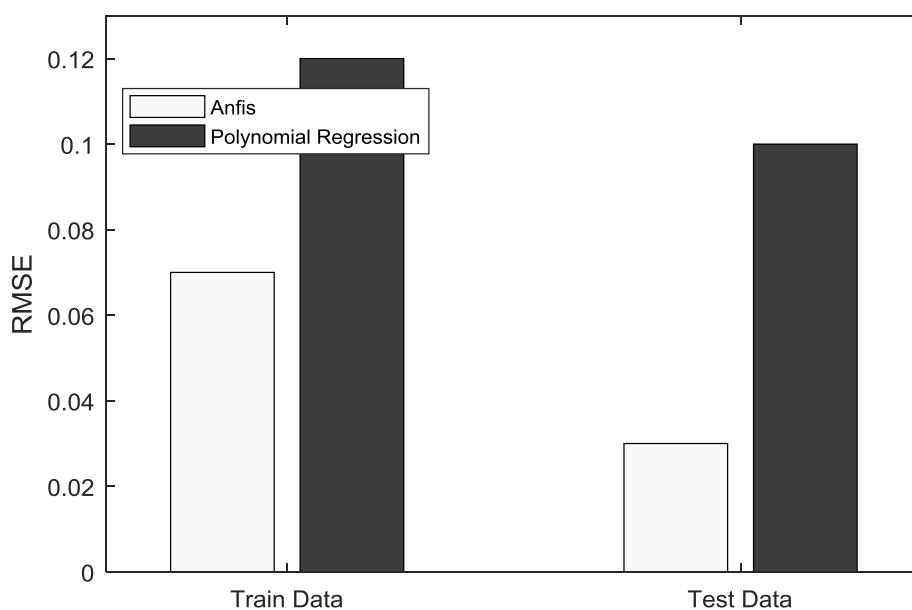
که نشان از قدرت پیش‌بینی این روش مدل‌سازی دارد. اما رگرسیون آموزش و تست در ردیف ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در حدود ۰/۸۷ و ۰/۸۹ بوده که تأییدی بر درستی خوشه بهینه دارد.

با توجه به شکل ۵ که نمودار رگرسیون چندجمله‌ای با درجه ۲ و ۳ و ۲ را نشان می‌دهد مشخص شد که خطاهای برازش شده بر روی داده‌ها به خط مرجع با شیب ۱ بسیار نزدیک بوده همچنین ضریب رگرسیون برای داده‌های آموزشی و تست به ترتیب ۰/۹۳۱۰۸ و ۰/۹۰۳۹۶ می‌باشد.

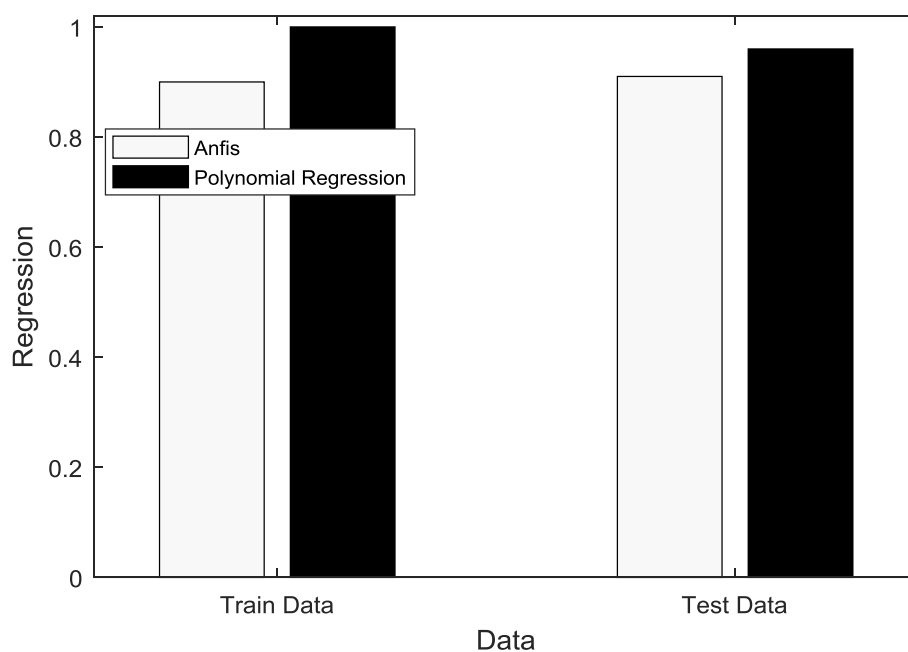
بیشتری دارد. به دست آوردن روش بهینه مدل‌سازی در این تحقیق بسیار حائز اهمیت بوده، چون انجام آزمایش و محاسبه درصد کاهش هد به صورت آزمایشگاهی به ازای طیف وسیعی از متغیرها بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. بر این اساس سامانه انفیس با تعداد خوشه بهینه و رگسیون چندجمله‌ای با مناسب‌ترین درجه با هم مقایسه شده‌اند. نتایج مقایسه در شکل ۶ ارائه شده است.

۳-۳- مقایسه انفیس و رگسیون چندجمله‌ای در مدل‌سازی درصد کاهش شار هد جریان

در این بخش عملکرد روش نرم انفیس با روش رگسیون چندجمله‌ای (بهینه‌شده با الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی ژنتیک) بر مقادیر درصد کاهش هد جریان مورد مقایسه قرار گرفته است تا بتوان تعیین نمود کدام روش مدل‌سازی کارایی بهتر، خطای پیش‌بینی کمتر و قدرت پیش‌بینی



(الف)



(ب)

شکل (۶): مقایسه انفیس و رگسیون چند متغیره.

به بررسی تأثیر دبی، غلظت جریان ورودی، شیب و ارتفاع موانع نفوذپذیر بر هد جریان غلیظ به‌طور آزمایشگاهی پرداخته شده و پس از محاسبه مقادیر شار هد جریان غلیظ برای حالت‌های مانع‌دار و بدون مانع، مقادیر درصد کاهش هد جریان تعیین شده است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های درصد کاهش شار هد به مدل‌سازی جریان غلیظ با استفاده از یکی از روش‌های موسوم به محاسبات نرم (سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس)) و روش کلاسیک رگسیون چند متغیره پرداخته شده و همچنین برای تعیین پارامترهای مورد نظر در روش رگسیون چند متغیره، از روش الگوریتم هوشمند ژنتیک استفاده شده است. نتایج نشان داد:

۱- در روش مدل‌سازی با سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) ۵ خوشه بهترین کارایی را داشته است.

۲- میزان خطای به‌دست‌آمده در روش انفیس برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۰/۰۳۳، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۳ می‌باشد.

۳- مقادیر رگسیون حالت آموزش و تست در روش انفیس ۰/۹۹۵۴ و ۰/۹۶۵۲ می‌باشد.

۴- در روش کلاسیک رگسیون چند متغیره ساختار (۲ و ۲ و ۲) بهترین کارایی را داشته است.

۵- میزان خطای به‌دست‌آمده در روش کلاسیک رگسیون چند متغیره برای داده‌های آموزشی، اعتبارسنجی و تست به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۹۹ و ۰/۱۰۸۴ می‌باشد.

۶- مقادیر رگسیون برای داده‌های آموزش و تست در روش کلاسیک رگسیون چند متغیره ۰/۹۳۱۰۸ و ۰/۹۰۳۹۶ می‌باشد.

نتایج حاصله نشان داد که معیار RMSE مربوط به سامانه عصبی_فازی تطبیقی (انفیس) بسیار کمتر از مقدار این معیار برای روش رگسیون چند متغیره بوده و مقدار رگسیون آن به یک نزدیک‌تر می‌باشد که نشان از قدرت و کارایی بهتر این روش در مدل‌سازی داده‌های هد جریان غلیظ دارد.

همان‌طور که از شکل (۶-الف) مشخص است عملکرد سامانه انفیس با تعداد ۵ خوشه عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش کلاسیک رگسیون چند متغیره بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک داشته است، همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص RMSE برای سامانه انفیس در پیش‌بینی داده‌های آموزشی در حدود ۰/۰۷ بوده که نزدیک به صفر است در حالی که همین معیار در رگسیون چند متغیره برای داده‌های آموزشی ۰/۱۲ بوده است. با بررسی عملکرد این دو روش برای داده‌های تست (داده‌هایی که روش یادگیری در طول آموزش با آن‌ها مواجه نبوده است و بر این اساس این داده‌ها در بررسی عملکرد روش یادگیری اهمیت بسیار بیشتری نسبت به داده‌های آموزشی دارند) مشخص شد که مقدار خطا در حدود ۰/۰۳ بوده و نشان از عملکرد مناسب سامانه انفیس دارد و کاملاً مشخص است که معیار RMSE برای این شبکه کمتر از نصف این مقدار برای روش رگسیون چند متغیره با خطایی در حدود ۰/۱ می‌باشد.

در شکل (۶-الف) به مقایسه مقدار رگسیون دو روش مدل‌سازی برای داده‌های آموزشی و تست پرداخته شده است. در هر دو روش مقدار رگسیون نزدیک به یک به‌دست آمده، با این حال تفاوت‌هایی در مقدار رگسیون آن‌ها مشاهده می‌شود و در داده‌های آموزشی مقدار رگسیون سامانه انفیس تقریباً برابر یک بوده که بسیار مطلوب است با این حال همین مقدار برای مدل‌سازی با رگسیون چند متغیره در حدود ۰/۹۳ بوده است که حکایت از عملکرد بهتر سامانه انفیس دارد. مقایسه این مقادیر در داده‌های تست نیز از عملکرد بهتر سامانه انفیس حکایت دارد همان‌طور که مشخص است مقدار رگسیون شبکه انفیس حدود ۰/۹۷ بوده که نسبتاً بهتر از رگسیون چند متغیره با ۰/۹ می‌باشد. که این نتایج نشان از عملکرد بهتر این سامانه و قدرت پیش‌بینی بالاتر آن برای مدل‌سازی داده‌های جدید دارد.

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق آزمایشگاهی_عددی جزو معدود تحقیق‌هایی می‌باشد که در آن به مدل‌سازی مقادیر درصد کاهش شار هد داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شده است. بر این اساس

۵- مراجع

11. Oehy, C. "Effects of Obstacles and Jets on Reservoir Sedimentation Due to Turbidity Currents", Unpublished doctoral dissertation, EPFL, LCH, Lausanne, Switzerland, 2003.
12. Zhang, Q. and Stanley, S.J. "Real-time Water Treatment Process Control with Artificial Neural Networks", *J Environ Eng*, Vol. 125, No. 2, pp.153-160, 1999.
13. Beaudeau, P., Leboulanger, T., Lacroix, M., Hanneeton, S., and Wang, H.Q. "Forecasting of Turbid Floods in a Coastal, Chalk Karstic Drain Using an Artificial Neural Network", *Ground Water*, Vol.39, No.1 , p. 109, 2001.
14. Aligoodarz, M., Mehrpanahi, A., and Karrabi, H. "One-dimensional Modeling of an Axial Turbine to Investigate the Effect of Blade Tolerances on Efficiency", *Bi-Quarterly J. Fluid Mechanics and Aerodynamics*, Vol. 5, No. 2, pp. 15-28, 2017, (in persian).
15. Goodarzi, D., Lari, K. S., Khavasi, E., and Abolfathi, S. "Large Eddy Simulation of Turbidity Currents in a Narrow Channel with Different Obstacle Configurations", *Sci. Rep.*, Vol. 10, pp. 1-16, 2020.
16. Hu, P. and Li, Y. "Numerical Modeling of the Propagation and Morphological Changes of Turbidity Currents Using a Cost-saving Strategy of Solution Updating", *Int. J. Sediment Res.*, Vol. 35, pp. 587-599, 2020.
17. Asghari Pari, S. A., Kashefipour, S., Ghomeshi, M. and Bajestan, M. S. "Effects of Obstacle Heights on Controlling Turbidity Currents with Different Concentrations and Discharges", *J. Food Agric Environ.*, Vol. 8, pp. 930-935, 2010.
18. Jang, J-SR. "Input Selection for ANFIS Learning", *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, September 8-11, Vol. 2, pp. 1493-1499, 1996.
19. Takagi, T. and Sugeno, M. "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, Vol. 1, pp. 116-132, 1985.
20. Jang, J-SR. "ANFIS: Adaptive-network-based Fuzzy Inference System", *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.
21. Bishop, C.M. "Pattern Recognition and Machine Learning", Springer, 2006.
22. Kochenderfer, M.J. and Wheeler, T.A.. "Algorithms for Optimization", Mit Press, 2019.
1. Lowe, D. R. "Sediment Gravity Flows; II, Depositional Models with Special Reference to the Deposits of High-Density Turbidity Currents", *J. Sediment. Res.*, Vol. 52, pp. 279-297, 1982.
2. Baas, J. H., McCaffrey, W. D., Houghton, P. D., and Choux, C. "Coupling between Suspended Sediment Distribution and Turbulence Structure in a Laboratory Turbidity Current", *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, pp. 1-20, 2005.
3. Oehy, C. D. and Schleiss, A. J. "Control of Turbidity Currents in Reservoirs by Solid and Permeable Obstacles", *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 133, pp. 637-648, 2007.
4. Jenzer Althaus, J., De Cesare, G., Boillat, J., and Schleiss, A. "Turbidity Currents at the Origin of Reservoir Sedimentation, case studies", 23rd Congress of the International Commission on Large Dams , Brasilia, 2009.
5. Nasrollahpour, R. and Ghomeshi, M. "Effect of Roughness Geometry on Characteristics of Density Currents Head", *Indian J. Sci. Technol.*, Vol. 5, pp. 3783-3787, 2012.
6. Oshaghi, M. R., Afshin, H., and Firoozabadi, B. "Experimental Investigation of the Effect of Obstacles on the Behaviour of Turbidity Currents", *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 40, No. 4, pp. 343-352, 2013.
7. Ghorbani, Z., Khozayemnezhad, H., and Ramezani, Y. "Laboratory Investigation of the Parameters of the Submerged Plates on the Turbidity Currents Characteristics", *J. hydraul. struct.* , Vol. 6, No. 4, pp. 16-32, 2020.
8. Baghalian, S. and Ghodsian, M. "Experimental Study On the Effects Of Artificial Bed Roughness On Turbidity Currents Over Abrupt Bed Slope change", *Int. J. Sediment Res.*, Vol. 35, No.5, pp. 256-268, 2020.
9. De Cesare, G., Oehy, C. D., and Schleiss, A. J. "Experiments on Turbidity Currents Influenced by Solid and Permeable Obstacles and Water Jet Screens", 6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, pp. 41-44. Czech Technical University in Prague-Institute of Hydrodynamics AS CR, 2008.
10. Kubo, Y. "Experimental and Numerical Study of Topographic Effects on Deposition from Two-Dimensional, Particle-driven Density Currents", *Sediment. Geol.*, Vol. 164, pp. 311-326, 2004.