

استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی در تعیین میزان رسوبات بارمعلق روزانه (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کسلیان)

مهری عبدی دهکردی^۱، امیر احمد دهقانی^{۱*}، مهدی مفتاح هلقی^۱،
مهدی کاهه^۲، موسی حسام^۱ و نوید دهقانی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۲)

چکیده

تخمین دقیق بار معلق رسوبات حمل شده توسط یک رودخانه در بسیاری از پروژه‌های منابع آب مانند سدسازی، مهار سیلاب، قابلیت کشتی‌رانی، زیبایی‌شناسی رودخانه و مسائل زیست محیطی دارای اهمیت فراوان می‌باشد. پیچیدگی رفتار رسوبات سبب شده است تا فن‌آوری‌های نوین مانند منطق فازی که توانایی شناسایی ارتباط غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی یک مسئله را دارا می‌باشند، مورد توجه قرار گیرند. در این تحقیق کاربرد الگوریتم خوشه‌بندی فازی در تخمین میزان رسوبات بار معلق مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از آمار متناظر دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه ولیک‌بن در حوزه معرف کسلیان که طی سال‌های آماری ۱۳۴۹-۱۳۵۰ الی ۱۳۵۳-۱۳۵۴، به صورت روزانه اندازه‌گیری شده است، استفاده گردید. ۷۵ درصد داده‌های متناظر به‌عنوان داده‌های آموزش و ۲۵ درصد دیگر داده‌ها به‌منظور صحت‌سنجی، آزمون و تعیین خطای معادلات در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده از این روش با استفاده از شاخص‌های آماری با نتایج حاصل از روش مرسوم منحنی سنج رسوب مقایسه گردید. نتایج نشان داد که چنانچه داده‌ها به‌صورت سالانه دسته‌بندی شوند، با استفاده از روش الگوریتم خوشه‌بندی فازی می‌توان تا ۰/۴۹ برابر مقدار رسوب سالانه‌ی مشاهده شده را تخمین زد، این در حالی است که با استفاده از روش معمول سنج رسوب در مقیاس سالانه این عدد ۰/۱۹ می‌باشد. بنابراین روش الگوریتم خوشه‌بندی فازی با دقت بسیار مناسب و با اطمینان بیشتر نسبت به روش منحنی سنج رسوب می‌تواند برای تخمین رسوبات بارمعلق مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بارمعلق، رسوب، حوزه کسلیان، خوشه‌بندی فازی، منحنی سنج رسوب

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. گروه آبخیزداری، دانشکده مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*. مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.dehghani@gau.ac.ir

مقدمه

مسائلی نظیر طراحی مخازن سدها، انتقال رسوبات، برآورد میزان آلودگی دریاچه، طراحی کانالها و لایروبی آنها بعد از سیلاب، تعیین خسارت‌های ناشی از رسوب‌گذاری به محیط زیست و زیبایی‌شناسی رودخانه‌ها مستلزم برآورد دقیق میزان رسوبات می‌باشد (۸). پدیده فرسایش و انتقال رسوب از پیچیده‌ترین مسائل هیدرودینامیکی است که به دلیل تأثیر پارامترهای مختلف، شبیه‌سازی رفتار آن به آسانی میسر نیست. حتی اگر مدلی ریاضی نیز ارائه شود، دسترسی به داده‌های مورد نیاز در اکثر موارد به آسانی امکان‌پذیر نخواهد بود. برای برآورد بارمعلق رودخانه‌ها به‌طور کلی دو روش وجود دارد: (۱) استفاده از روش‌های هیدرولیکی شامل مدل‌های تجربی و ریاضی، که براساس مفاهیم فیزیکی انتقال ذرات و حل معادلات هیدرودینامیک رسوب استوار است. برای استفاده از این مدل‌ها اغلب داده‌های متنوعی مانند دانه‌بندی رسوبات، دمای آب، وزن مخصوص و لزجت آب، سرعت جریان، شکل مقطع رودخانه، ضریب زبری و شیب کناره نیاز است؛ هم‌چنین برای استفاده از هر مدل فرضیات و محدودیت‌های خاصی وجود دارد (۲). استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی که عمدتاً براساس یک رابطه همبستگی بین دبی رسوب و دبی جریان استوار است (۱).

از آنجایی که مدل‌های فیزیکی برای شرایط خاصی با محدودیت‌های آزمایشگاهی توسعه می‌یابند و بسیار پرهزینه و وقت‌گیر هستند، هم‌چنین باتوجه به لحاظ کردن فرضیات زیاد برای ساده‌سازی معادلات دیفرانسیل جهت حل عددی و توانایی فن‌آوری‌های نوین مانند منطق فازی در شناسایی ارتباط غیرخطی بین متغیرهای ورودی و خروجی یک مسئله، سبب شده است که این فن‌آوری‌ها بتوانند در مدل کردن مسئله انتقال رسوب به‌کار روند. کیسی، رسوبات بارمعلق روزانه را با استفاده از منطق فازی تخمین زده و نتایج حاصل را با روش منحنی سنجه رسوب مقایسه نمود؛ ایشان در مطالعه خود دریافت عملکرد منطق فازی نسبت به منحنی سنجه‌ی رسوب بهتر بوده است (۱۶). هم‌چنین ایشان مدل عصبی - فازی را برای تخمین

رسوبات بارمعلق مورد استفاده قرار داد (۱۷). کیسی و همکاران، نشان دادند که منطق فازی با تابع عضویت مثلثی، رسوبات بارمعلق را با دقت بیشتری برآورد می‌کند (۱۸). کیسی و همکاران، دقت روش محاسباتی تطبیقی عصبی - فازی را در تخمین رسوبات بار معلق ماهانه مورد بررسی قرار دادند؛ ایشان هم‌چنین غلظت رسوبات کل را با استفاده از این روش‌ها محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که روش محاسباتی تطبیقی عصبی - فازی با دقت بیشتری رسوبات را تخمین می‌زند (۱۹).

جعفری میانائی و کشاورزی، با استفاده از روش منطق فازی به تخمین میزان رسوبات پرداختند. آنها سه آرایش مختلف ورودی را در نظر گرفتند. در حالت اول دبی جریان به‌عنوان ورودی و دبی رسوب به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد. در حالت دوم، دبی جریان در همان روز و دبی جریان در روز قبل به‌عنوان ورودی و دبی رسوب را به‌عنوان خروجی در نظر گرفتند. در حالت سوم دبی رودخانه در همان روز و دبی رسوب در روز قبل به‌عنوان داده‌های ورودی و دبی رسوب به‌عنوان داده‌ی خروجی مورد استفاده قرار گرفت. آنها نتایج حاصل را با روش رگرسیون آماری مقایسه نمودند؛ نتایج نشان داد روش فازی نسبت به روش معمولی آماری، برآورد نسبتاً دقیق‌تری از میزان رسوبات حمل شده ارائه نموده و با مقادیر مشاهداتی تطبیق بهتری داشته است. هم‌چنین از میان سه حالت مختلف، حالت سوم دارای کارایی بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد (۳). احمدی و همکاران، به‌منظور دستیابی به تخمینی دقیق‌تر برای میزان رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها، از داده‌های همزمان دبی آب و دبی رسوب ایستگاه گلینک واقع بر رودخانه‌ی طالقان، جهت مدل‌سازی رسوب معلق روزانه با استفاده از نظام استنتاج فازی و روش معادله همبستگی چند متغیره آماری استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده دقت بالاتر برآوردهای مدل فازی در مقایسه با برآوردهای مدل معادله همبستگی چند متغیره بود. نتایج نشان داد که روش فازی توان تشخیص محدوده زمانی وقوع تغییرات رژیم رسوبی را در رودخانه دارا می‌باشد (۱). تحقیقات نشان داده است برآورد رسوب با روش منحنی سنجه همواره با

حجمی رودخانه، بارمعلق درازمدت رودخانه مطابق رابطه (۱) برآورد می‌گردد.

$$Q_s = aQ_w^b \quad [1]$$

برای افزایش دقت برآورد رسوب به روش منحنی سنجی رسوب، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از بهترین آن‌ها دسته‌بندی داده‌ها می‌باشد. روش‌های مختلف دسته‌بندی شامل روش سالانه (کاربرد داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب بدون هیچ‌گونه تفکیک)، فصلی (تقسیم‌بندی داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب با توجه به تاریخ نمونه‌برداری به چهار سری بهار، تابستانه، پاییزه و زمستانه)، ماهانه، دوره‌ی مشابه هیدرولوژیک (در این روش براساس تشابه هیدرولوژیکی در ماه‌های سال، هر سال آبی به سه دوره تقسیم می‌شود. بر این اساس ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور در یک دوره، ماه‌های مهر، آبان، آذر، دی و بهمن در یک دوره و در نهایت ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت در یک دوره قرار می‌گیرند.)، دوره پرآب و کم‌آب (در این روش میانگین دبی ماهانه با میانگین دبی سالانه مقایسه می‌شود و ماه‌هایی که میانگین دبی آنها بیشتر از میانگین سالانه یا مساوی آن باشد، به‌عنوان دوره پرآب و ماه‌هایی که میانگین دبی آنها کمتر از میانگین سالانه باشد، به‌عنوان دوره کم‌آب در نظر گرفته می‌شوند.)، دبی کلاسه (تقسیم‌بندی داده‌ها براساس میانگین دبی سالانه به‌گونه‌ای که در دسته اول دبی‌های کمتر از دبی میانگین، در دسته دوم دبی‌های برابر یا بیشتر از میانگین و کمتر از دو برابر میانگین و در دسته‌ی سوم دبی‌های برابر یا بیشتر از دو برابر میانگین قرار می‌گیرند).

روش هیدروگراف جریان (در این روش هیدروگراف روزانه مربوط به هر سال آبی ترسیم شده و داده‌ها براساس قرار گرفتن جریان در شاخه صعودی، نزولی یا دبی پایه هیدروگراف به سه سری تقسیم می‌شود) و روش حد وسط دسته‌ها (در این روش دبی‌هایی را که در آنها نمونه‌گیری غلظت انجام شده مدنظر قرار داده و براساس حجم جریان (از کوچک به بزرگ) مرتب

مقداری خطا همراه است (۷، ۱۳ و ۱۴). مساعدی و همکاران، مدلی که در آن تقسیم‌بندی داده‌ها براساس ماه اندازه‌گیری دبی جریان صورت گرفته است را به‌عنوان مدل مناسب در ایستگاه مراوه‌تپه واقع بر رود اترک معرفی نمودند (۱۱). محققین بسیاری نیز روش حد وسط دسته‌ها را به‌عنوان مدل مناسب معرفی نمودند (۲، ۶، ۱۰ و ۱۲). از آنجایی‌که اندازه‌گیری روزانه رسوبات بار معلق مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی می‌باشد، بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت رسوبات بار معلق و دبی لحظه‌ای متناظر با آنکه به‌طور تصادفی و در بعضی از روزهای سال اندازه‌گیری شده‌اند، استوار می‌باشند. بنابراین برای انجام این پژوهش و به‌منظور افزایش دقت معادلات ارائه شده، از آمار متناظر دبی جریان و دبی رسوب در حوزه معرف کسلیان که به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شده است، استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

معرفی حوزه مورد مطالعه

حوزه‌ی کسلیان دومین حوزه‌ی آبخیز معرف کشور می‌باشد که با مساحت ۶۸۸۴ هکتار به سه زیر حوزه‌ی ولیک‌چال، سنگده و سربند تقسیم می‌شود و خود از زیر حوزه‌های رودخانه تالار در استان مازندران به‌شمار می‌رود؛ این حوزه با توجه به شرایط طبیعی و آب و هوایی خود به‌عنوان معرف مناطق کوهستانی و جنگلی در نظر گرفته می‌شود و بین عرض جغرافیایی $30^{\circ} 58'$ تا $35^{\circ} 15'$ و طول جغرافیایی $44^{\circ} 08'$ تا $42^{\circ} 15'$ واقع شده است. رودخانه‌ی اصلی حوزه از جنوب به طرف شمال‌غربی جریان داشته و در محلی به نام ولیک‌بن از حوزه خارج می‌گردد (۵).

روش‌های هیدرولوژیک برآورد بار معلق رودخانه‌ها

با استفاده از داده‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی و با توجه به این‌که دبی رسوب (Q_s) تابعی از دبی جریان (Q_w) می‌باشد، رابطه‌ای بین Q_s و Q_w استخراج می‌گردد و با استفاده از ارقام درازمدت گذر

$$J = \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^n U_{ik}^m d_{ik}^2 = \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^n U_{ik}^m \|x_k - v_i\|^2 \quad [2]$$

در فرمول فوق m یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موارد برای آن عدد ۲ انتخاب می‌شود. اگر در فرمول فوق m را برابر ۱ قرار دهیم تابع هدف خوشه‌بندی c میانگین غیر فازی به دست می‌آید. x_k نمونه k ام و v_i نماینده یا مرکز خوشه i ام و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد. U_{ik} میزان تعلق نمونه i ام در خوشه k را نشان می‌دهد. علامت $\|*\|$ میزان تشابه (فاصله) نمونه با مرکز خوشه می‌باشد که می‌توان از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد استفاده کرد. از روی U_{ik} می‌توان یک ماتریس U تعریف کرد که دارای C سطر و n ستون باشد و مولفه‌های آن هر مقداری بین ۰ تا ۱ را می‌توانند انتخاب کنند. اگر تمامی مولفه‌های این ماتریس ۰ و یا ۱ باشند الگوریتم مشابه c میانگین غیر فازی خواهد بود. مجموع مولفه‌های هر یک از ستون‌ها باید برابر ۱ باشد و خواهیم داشت:

$$\sum_{i=1}^5 U_{ik} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, n \quad [3]$$

معنای این شرط آن است که مجموع تعلق هر نمونه به c خوشه باید برابر ۱ باشد. برای به دست آوردن فرمول‌های مربوط به U_{ik} و v_i باید تابع هدف تعریف شده را حداقل نمود. با استفاده از شرط فوق و برابر صفر قرار دادن مشتق تابع هدف خواهیم داشت:

$$U_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^5 \left(\frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{2/(m-1)}} \quad [4]$$

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n U_{ik}^m x_k}{\sum_{k=1}^n U_{ik}^m} \quad [5]$$

در ادامه الگوریتم کارآمدی که توسط بزدک برای حل مسائل خوشه‌بندی c - میانگین فازی براساس بهینه‌سازی تکراری پیشنهاد گردید، ارائه شده است.

۱- مقدار c را مشخص کرده ($2 \leq c \leq n$) و ماتریس افراز اولیه، U^0 حدس زده می‌شود؛ یک مقدار برای m' انتخاب می‌شود.

می‌گردند، سپس این داده‌ها به دسته‌هایی (حدود ده دسته یا بیشتر) تقسیم می‌شوند. در مرحله بعد دبی متوسط هر دسته (دبی میانه) را در نظر گرفته و غلظت متوسط دسته را به دست می‌آورند. در مرحله بین این دو سری داده غلظت و جریان رابطه‌ی رگرسیونی توانی برقرار می‌شود (می‌باشد) (۴).

الگوریتم خوشه‌بندی c - میانگین فازی

خوشه‌بندی به مفهوم دسته‌بندی اجزای تشکیل‌دهنده یک سیستم براساس تشابه بین آن‌ها می‌باشد، به طوری که عضوهای متعلق به یک خوشه براساس معیارها و ویژگی‌های مورد نظر، بیشترین شباهت را داشته باشند. به‌طور کلی خوشه‌بندی عبارت است از این که یک مجموعه‌ی مرجع مانند X شامل n داده را به c دسته، خوشه یا گروه تقسیم‌بندی کنیم به طوری که دسته‌های مزبور دارای خصوصیات مشابهی باشند ($2 \leq c \leq n$). خوشه‌بندی را می‌توان به صورت فازی و غیرفازی (کلاسیک) انجام داد و روش‌ها و الگوریتم‌های خاصی نظیر خوشه‌بندی به وسیله روابط هم‌ارزی (خوشه‌بندی به وسیله روابط هم‌ارزی کلاسیک و خوشه‌بندی به وسیله روابط هم‌ارزی فازی) و خوشه‌بندی c - میانگین (خوشه‌بندی c - میانگین سخت و خوشه‌بندی c - میانگین فازی) برای آن پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های بسیار کارآمد خوشه‌بندی، روش c - میانگین می‌باشد. هدف این روش، افراز یک مجموعه معلوم از داده‌ها به تعداد معینی خوشه می‌باشد به طوری که این افراز دو ویژگی مهم داشته باشد اولاً، خوشه‌های آن همگن باشند ثانیاً، خوشه‌های مختلف نسبت به یکدیگر نامتجانس باشند؛ بنابراین برای خوشه‌بندی داده‌ها باید از یک تابع هدف استفاده گردد که به‌طور هم‌زمان دو کار را انجام دهد: ۱) فاصله اقلیدسی بین هر نقطه یک خوشه را با مرکز آن خوشه حداقل نماید. ۲) فاصله اقلیدسی بین مراکز خوشه‌ها را ماکزیمم کند (۹). در نسخه فازی الگوریتم خوشه‌بندی تعداد خوشه‌ها (c) از قبل مشخص شده است. در الگوریتم خوشه‌بندی c میانگین فازی تابع هدف به صورت زیر است:

حوزه معرف کسپیلان که در طی سال‌های آماری ۱۳۴۹-۱۳۵۰ الی ۱۳۵۳-۱۳۵۴، به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شده است استفاده گردید. کلیه روابط مربوط به منحنی‌های سنجی رسوب با و بدون دسته‌بندی داده‌ها براساس ۷۵ درصد داده‌های متناظر دبی جریان و دبی رسوب استخراج شدند و ۲۵ درصد دیگر داده‌ها به‌منظور صحت‌سنجی و تعیین خطای معادلات در نظر گرفته شد. همچنین برای بررسی توانایی خوشه‌بندی فازی در تخمین میزان رسوبات بار معلق، خروجی‌های متناظر با هر یک از روش‌های با و بدون دسته‌بندی داده‌ها در منحنی سنجی رسوب، با استفاده از برنامه نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB7.10، تعیین شدند. نتایج حاصل از منحنی سنجی رسوب و خوشه‌بندی فازی متناظر با آن، با استفاده از شاخص‌های آماری با یکدیگر مقایسه شده و در نهایت مقدار رسوبات بار معلق سالانه در هر یک از روش‌ها تعیین گردید.

نتایج و بحث

مطابق آنچه ذکر شد، داده‌ها براساس هر یک از روش‌های دسته‌بندی به چند دسته تقسیم شدند. در هر روش تعداد خوشه‌ها از ۲ تا \sqrt{n} (n تعداد داده در هر روش می‌باشد) متغیر در نظر گرفته شد، سپس با توجه به الگوریتم برنامه نوشته شده مراکز خوشه‌ها محاسبه و ماتریس تعلق از روی خوشه‌های محاسبه شده در مرحله قبل تعیین گردید. در این مرحله اگر میزان خطا از یک مقدار مشخص کوچک‌تر بود الگوریتم به پایان رسیده و در غیر این‌صورت مراحل فوق تکرار می‌شد. ملاک انتخاب مناسب‌ترین خوشه در نظر گرفتن اولین حداقل خطا و یا اولین حداقل بعد از یک تغییر ناگهانی در میزان خطا بود. بعد از آنکه با این روش چندین خوشه به‌عنوان مناسب‌ترین خوشه‌ها در نظر گرفته شدند، نهایتاً براساس شاخص‌های آماری تعداد دسته مناسب برای داشتن بهترین خروجی تعیین شد. تعداد خوشه‌های مناسب در هر روش در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از انتخاب خوشه مناسب، برای ۲۵ درصد باقی‌مانده داده‌ها، مقادیر دبی رسوب برآورد گردید و

هر گام از این الگوریتم با یک τ مشخص می‌گردد.

۲- مرکز خوشه‌ها $\{V_i^{(t)}\}$ در هر تکرار محاسبه می‌شود.

۳- محاسبه ماتریس تعلق از روی خوشه‌های محاسبه شده در مرحله قبل.

۴- اگر $\| \tilde{U}^{(r+1)} - \tilde{U}^{(r)} \| \leq \epsilon_L$ آنگاه محاسبات به پایان می‌رسد در غیر این صورت الگوریتم از گام دوم به بعد تکرار می‌شود (۱۵).

ارزیابی مدل‌های ارائه شده

جهت ارزیابی کارایی مدل‌های تخمین میزان رسوبات بار معلق روزانه، از شاخص‌های آماری مختلف مطابق روابط ۶ تا ۹ استفاده گردید.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Si}^0 - \bar{Q}_{Si}^0)(Q_{Si}^s - \bar{Q}_{Si}^s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Si}^0 - \bar{Q}_{Si}^0)^2 - \sum_{i=1}^n (Q_{Si}^s - \bar{Q}_{Si}^s)^2}} \quad [6]$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{Si}^0 - Q_{Si}^s|}{n} \quad [7]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{Si}^0 - Q_{Si}^s)^2} \quad [8]$$

$$C_{NS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Si}^0 - Q_{Si}^s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Si}^0 - \bar{Q}_{Si}^0)^2} \quad [9]$$

در این روابط τ ضریب همبستگی، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، MBE: میانگین خطای اریبی، C_{NS} : معیار ناش-ساتکلیف، Q_{Si}^0 : دبی رسوب بار معلق مشاهده شده، Q_{Si}^s : دبی رسوب بار معلق برآورد شده، \bar{Q}_{Si}^s : میانگین مقادیر برآورد شده، \bar{Q}_{Si}^0 : میانگین مقادیر مشاهداتی و n : تعداد داده است. معیار RMSE بزرگی خطا و معیار MBE میزان انحراف از خط نیمساز را نشان می‌دهد (۴).

داده‌های مورد استفاده و روش انجام کار

در این تحقیق به‌منظور تخمین میزان رسوبات بار معلق سالانه، از آمار متناظر دبی جریان و دبی رسوب ایستگاه ولیک‌بن در

جدول ۱. تعداد خوشه‌بندی مناسب در هر یک از روش‌های مورد استفاده

Cns	RMSE (تن بر روز)	MBE (تن بر روز)	r	تعداد خوشه مناسب	تعداد داده	دوره	مدل
۰/۳	۱۶۴۷/۵۴۶	۱۲/۶	۰/۹۹	۲	۴۵۶	-	سالانه
۰/۲	۳۴۷۹/۵	۱۰/۵	۰/۹۹	۶	۱۱۶	بهار	فصلی
۰/۲	۱۵/۶	۷/۲	۰/۹۷	۸	۱۱۶	تابستان	
۰/۴	۴۹/۱	۶/۴	۰/۹۹	۲	۱۱۲	پاییز	
۰/۶	۸۹/۲	۲۰/۳	۰/۹۵	۴	۱۱۲	زمستان	
۰/۳	۴۳/۲	۸/۷	۰/۹۹	۶	۱۵۵	خرداد-شهریور	مشابه هیدرولوژیک
۰/۳	۶۲/۵	۱۲/۱	۰/۹۹	۲	۱۸۷	مهر - بهمن	
۰/۲	۳۶۳۸/۴	۷/۴	۰/۹۹	۲	۱۱۴	اسفند-اردیبهشت	دبی کلاسه
۰/۶	۳۹/۸	۷/۳	۰/۹۹	۵	۲۸۷	$Q_w < \bar{Q}_w$	
۰/۳	۱۲۳/۴	۱۵/۷	۰/۹۸	۲	۸۴	$\bar{Q}_w < Q_w < 2\bar{Q}_w$	دوره پرآب - کم آب
۰/۲	۴۲۵/۴	۵/۹	۰/۹۹	۶	۸۵	$Q_w > 2\bar{Q}_w$	
۰/۳	۲۷۰۴/۶	۱۰/۸	۰/۹۹	۷	۱۶۸	دوره پرآب	وضعیت هیدروگراف
۰/۶	۳۹/۸	۷/۳	۰/۹۹	۵	۲۸۸	دوره کم آب	
۰/۴	۱۰۱/۵	۱۳/۲	۰/۹۹	۲	۲۰۸	نزولی	حد وسط دسته‌ها
۰/۲	۳۱۷۳/۹	۱۶/۰	۰/۹۹	۴	۱۴۴	صعودی	
۰/۲	۸/۲	۴/۶	۰/۸۱	۶	۱۰۴	جریان پایه	
۰/۶	۴۸۹/۲	۰/۶	۰/۹۹	۲	۲۲	-	

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های آماری الگوریتم خوشه‌بندی فازی در هر یک از روش‌های مورد استفاده

Cns	RMSE (تن بر روز)	MBE (تن بر روز)	r	مدل
۰/۳	۱۶۴۷/۶	۱۲/۶	۰/۹۹	سالانه
۰/۲	۱۷۵۵/۷	۱۱/۱	۰/۹۹	فصلی
۰/۲	۱۸۱۹/۸	۹/۸	۰/۹۹	دوره مشابه هیدرولوژیک
۰/۶	۱۲۱۳/۹	۸/۶	۰/۹۹	دبی کلاسه
۰/۳	۱۶۴۰/۲	۸/۶	۰/۹۹	دوره پرآب - کم آب
۰/۲	۱۷۸۴/۹	۱۲/۱	۰/۹۹	وضعیت هیدروگراف
۰/۶	۴۸۹/۲	۰/۶	۰/۹۹	حد وسط دسته‌ها

جدول ۳. دبی بار معلق برحسب تن در روز در کل دوره آماری در هر یک از روش‌های مورد بررسی در الگوریتم خوشه‌بندی فازی

سالانه	فصلی	دوره مشابه	دبی	دوره پرآب - کم -	وضعیت	حد وسط
۴۸۳۴۸/۴	۴۴۵۹۳/۹	۳۷۹۱۲/۶	۴۴۱۰۹/۷	آب	هیدروگراف	دسته‌ها
						۳۸۹۲۴/۱

جدول ۴. مقادیر ضرایب معادلات منحنی‌سنجه رسوب در هر یک از روش‌های مورد استفاده

مدل	دوره	a	b
سالانه	-	۱۰/۸	۱/۶
فصلی	بهار	۱۰/۵	۱/۹
	تابستان	۱/۲	۱/۶
	پاییز	۳/۶	۱/۲
دوره مشابه	زمستان	۱۵/۹	۱/۵
	خرداد - شهریور	۶/۷	۱/۶
	مهر - بهمن	۱۰/۹	۱/۶
	اسفند - اردیبهشت	۱۴/۲	۱/۹
دبی کلاسه	$Q_w < \bar{Q}_w$	۱۰/۶	۱/۷
	$\bar{Q}_w < Q_w < 2\bar{Q}_w$	۸/۸	۱/۵
	$Q_w > 2\bar{Q}_w$	۱۲/۶	۲/۰
دوره پرآب - کم‌آب	دوره پرآب	۱۱/۳	۱/۹
	دوره کم‌آب	۱۰/۶	۱/۷
وضعیت هیدروگراف	نزولی	۸/۹	۱/۶
	صعودی	۱۳/۵	۱/۷
	جریان پایه	۹/۰	۱/۷
حد وسط دسته‌ها	-	۱۴/۰	۱/۶

فازی استفاده شود با توجه به جدول (۳)، مقدار تخمین دبی بار معلق رسوب در کل دوره آماری ۴۸۳۴۸/۴ تن در روز به دست می‌آید که این مقدار ۰/۴۹ برابر مقدار رسوب سالانه مشاهده شده می‌باشد؛ پس از روش تقسیم‌بندی داده‌ها در مقیاس سالانه، تقسیم‌بندی آنها در مقیاس فصلی نیز می‌تواند ۰/۴۵ مقدار رسوب سالانه مشاهده شده را برآورد نماید؛ همچنین نتایج نشان می‌دهد تقسیم داده‌ها به روش دوره مشابه هیدرولوژیک و روش وضعیت هیدروگراف جهت استفاده از روش خوشه‌بندی

با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف، مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد که نتایج این مقایسات در جدول ۲ ارائه شده است. در جدول ۳ مقادیر رسوب بار معلق در کل دوره آماری، در هر یک از روش‌های مورد بررسی، که از جمع مقادیر متناظر در هر دوره به دست آمده، ارائه شده است. با توجه به این که مقدار رسوب بار معلق اندازه‌گیری شده در کل دوره آماری ۹۹۱۸۱/۹ تن بر روز می‌باشد، چنانچه داده‌ها به صورت سالانه دسته‌بندی شوند و سپس از روش خوشه‌بندی

جدول ۵. مقادیر شاخص‌های آماری معادلات منحنی سنجه رسوب در هر یک از روش‌های مورد استفاده

Cns	RMSE (تن بر روز)	MBE (تن بر روز)	r	مدل
۰/۱	۱۹۶۵/۴	۱۳/۹	۰/۹۶	سالانه
۰/۱	۱۹۱۸/۷	۱۲/۲	۰/۹۹	فصلی
۰/۱	۱۸۸۶/۱	۱۱/۵	۰/۹۹	دوره مشابه هیدرولوژیک
۰/۱	۱۸۷۷/۶	۱۲/۹	۰/۹۹	دبی کلاسه
۰/۱	۱۹۳۲/۰	۱۲/۸	۰/۹۷	دوره پرآب - کم‌آب
۰/۱	۱۸۷۸/۰	۱۲/۹	۰/۹۹	وضعیت هیدروگراف
۰/۳	۱۶۴/۳	۰/۴	۰/۹۹	حد وسط دسته‌ها

جدول ۶. دبی بار معلق برحسب تن در روز در کل دوره آماری در هر یک از روش‌های مورد بررسی در منحنی سنجه رسوب

سالانه	فصلی	دوره مشابه هیدرولوژیک	دبی کلاسه	دوره پرآب - کم- آب	وضعیت هیدروگراف	حد وسط دسته‌ها
۱۸۴۳۵/۶	۲۲۹۳۱/۷	۲۹۱۲۹/۴	۳۰۵۵۳/۷	۲۴۱۲۲/۷	۲۱۱۳۸/۸	۳۶۳۶۳/۳

سالانه دسته‌بندی شوند و سپس از روش منحنی سنجه استفاده شود با توجه به جدول ۶، مقدار تخمین دبی بار معلق رسوب در کل دوره آماری ۱۸۴۳۵/۶ تن در روز به دست می‌آید که این مقدار ۰/۱۹ برابر مقدار رسوب سالانه‌ی مشاهده شده می‌باشد. این مقدار برای روش حد وسط داده‌ها، ۳۶۳۶۳/۳ تن در روز و برای روش وضعیت هیدروگراف، ۲۱۱۳۸/۸ تن در روز بوده که به ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۲۱ برابر مقدار رسوب سالانه مشاهده شده است.

نتیجه حاصل از این تحقیق در انتخاب مدل حد وسط دسته‌ها به‌عنوان مناسب‌ترین مدل در برآورد بار معلق در بین سایر مدل‌های دسته‌بندی داده‌ها در روش مرسوم منحنی سنجه‌ی رسوب با نتایج محققان دیگر مانند میرابولقاسمی و مرید (۱۰)، پرهت و دومیری گنجی (۲)، مساعدی و همکاران (۱۱) و صادقی و همکاران (۶)

فازی از دقت کمتری نسبت به روش‌های دیگر تقسیم‌بندی داده‌ها برخوردار می‌باشند. برای مقایسه مقادیر به دست آمده از روش خوشه‌بندی فازی با روش‌های معمول منحنی سنجه، روابط منحنی سنجه رسوب در هر یک از روش‌های دسته‌بندی داده‌ها نیز براساس ۷۵ درصد داده‌ها تعیین گردید که ضرایب این معادلات در هر روش در جدول ۴ ارائه شده است. سپس برای ۲۵ درصد باقی‌مانده‌ی داده‌ها با استفاده از معادلات به دست آمده، با معلوم بودن مقادیر دبی جریان در هر روز، مقادیر دبی رسوب برآورد گردید که نتایج محاسبات در جدول ۵ ارائه شده است. مقادیر رسوب بار معلق در کل دوره آماری در هر یک از روش‌های مورد بررسی، در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به این که مقدار رسوب بار معلق اندازه‌گیری شده در کل دوره آماری ۹۹۱۸۱/۹ تن بر روز می‌باشد، چنانچه داده‌ها به صورت

مطابقت دارد.

روزانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این روش با استفاده از شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی، ضریب ناش - ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریبی، با نتایج حاصل از روش مرسوم منحنی سنجه رسوب مقایسه شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش منطق فازی برای خوشه‌بندی داده‌ها، با دقت بسیار مناسب و با اطمینان بیشتر نسبت به روش‌های دسته‌بندی معمول منحنی سنجه می‌تواند برای تخمین رسوبات بار معلق مورد استفاده قرار گیرد؛ هم‌چنین نتایج نشان داد که در روش منحنی سنجه رسوب، مقادیر رسوب سالانه‌ی برآورد شده با روش حد وسط دسته‌ها و در روش الگوریتم خوشه‌بندی فازی، مقادیر برآورد شده با روش سالانه، به مقادیر مشاهده شده رسوب نزدیک‌تر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

سهولت کاربرد معادلات رگرسیونی منحنی‌های سنجه رسوب باعث شده است که استفاده زیادی در برآوردهای بار رسوبی داشته باشند، اما از آنجایی که در این معادلات تنها یک متغیر مستقل وارد می‌شود، این منحنی‌ها قادر به پیش‌بینی دقیق و صحیح مقدار بار رسوبی واقعی رودخانه‌ها نمی‌باشد. بنابراین سعی می‌شود با اعمال شرایط یا تغییراتی در آنها از جمله دسته‌بندی داده‌ها، میزان این خطا را کاهش داد. ضعف این‌گونه روش‌ها در مدل کردن فرآیندهای رسوبی باعث شده که در دهه‌ی اخیر کاربرد فن‌آوری‌های نوین در مدل‌سازی رفتار رسوبات به‌طور چشمگیری افزایش یابد. در این تحقیق کاربرد الگوریتم خوشه‌بندی فازی در تخمین میزان رسوبات بار معلق

منابع مورد استفاده

۱. احمدی، ح.، م. طهمورث و ح. محمد عسگری. ۱۳۸۷. استفاده از نظام استنتاج فازی در برآورد رسوب معلق (مطالعه‌ی موردی: حوزه‌ی آبخیز طالقان). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران ۲(۵): ۱۴-۵.
۲. پرهت، ج. و م. دومیری گنجی. ۱۳۸۴. تحلیل روابط آورد رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه هندبجان - جراحی. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب تهران، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.
۳. جعفری میانائی، س. و ع. کشاورزی. ۱۳۸۷. مقایسه روش فازی و رگرسیون آماری جهت برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران تهران، دانشگاه تهران.
۴. زنگانه، م. ا. ۱۳۸۸. انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب استان گلستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۵. سبزواری، ت. ر. اردکانیان، ا. شمسایی و ع. طالبی. ۱۳۸۸. تخمین آب‌نگار سیلاب حوضه‌های آبخیز بدون آمار با استفاده از شبیه HEC-HMS و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). مجله مهندسی آب ۲: ۱۱-۱.
۶. صادقی، س. ح. ر.، پ. سعیدی، م. ب. ریسی و ح. نور. ۱۳۸۹. کاربرد روش‌های میان‌یابی گروهی در بهبود منحنی‌های سنجه ماهانه رسوب. چهارمین سمینار فرسایش و رسوب، دانشکده نور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۷. عرب‌خدری، م. ش. حکیم‌خانی و ج. وروانی. ۱۳۸۴. اعتبار برون‌یابی در برآورد میانگین رسوبدهی معلق سالانه ۱۷ ایستگاه هیدرومتری کشور. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان ۱۱(۴۳): ۱۳۱-۱۲۳.
۸. کوچک‌زاده، ص. و ا. یوسفی. (مترجمین). ۱۳۸۱. *تئوری و کاربرد انتقال رسوب*. انتشارات دانشگاه تهران.
۹. کوره‌پزان دزفولی، ا. ۱۳۸۷. *اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسایل مهندسی آب*. چاپ دوم،

انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران.

۱۰. میر ابوالقاسمی، ه. و س. مرید. ۱۳۷۴. بررسی روش‌های هیدرولوژیکی برآورد بار معلق رودخانه‌ها. مجله آب و توسعه ۱۰: ۲۷-۱۵.
۱۱. مساعدی، ا.، م. شهابی و ا. محمدی استادکلایه. ۱۳۸۴. بررسی تغییرات روابط دبی و رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری مراوه (اترک). دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان.
۱۲. مساعدی، ا.، ا. محمدی استاد کلایه و م. حسینعلی‌زاده. ۱۳۸۵. انتخاب مناسب‌ترین روش برآورد رسوب معلق در ایستگاه هیدرومتری قزاقلی. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۳. میرباقری، س. ا. و ط. رجایی. ۱۳۸۵. بهبود پیش‌بینی و تخمین بار معلق رودخانه‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، تهران.

14. Asselman, N. E. M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *J. Hydrol.* 23(4): 228-248.
15. Bezdek, J. C. 1981. *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Plenum Press, New York, 210 pp.
16. Kisi, O. 2004. Daily suspended sediment modelling using a fuzzy differential evolution approach. *Hydrol. Sci. J.* 49(1): 183-197.
17. Kisi, O. 2005. Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches. *Hydrol. Sci. J.* 50(4): 683-696.
18. Kisi, O., M. E. Karahan and Z. Sen. 2006. River suspended sediment modeling using fuzzy logic approach. *Hydrol. Proc.* 20(20): 4351-4362.
19. Kisi, O., T. Haktanir, M. Ardiclioglu, O. Ozturk, E. Yalcin and S. Uludag. 2009. Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. *Adv. Eng. Software* 40: 438-444.