مقایسه روشهای رگرسیون آماری و فازی جهت برآورد رسوب معلق رودخانه تلوار*

بهارک معتمدوزیری

دانشجوی دکتری رشته آبخیزداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

bmvaziri@yahoo.com

حسن احمدی

استاد گروه احیاء مناطق خشک و نیمه خشک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

محمد مهدوی

استاد گروه احیاء مناطق خشک و نیمه خشک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

فرود شریفی

استادیار سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور

چکیده:

یکی از مهمترین مسائل در طراحی سازه های آبی، بررسی کیفیت آب، تعیین تأثیرات مدیریت آبخیز و حفاظت زیستگاه ماهیان، تعیین مقدار رسوبات معلق رودخانه ها می باشد. جهت برآورد بار معلق رودخانه ها از دو روش تجربی و رگرسیون آماری استفاده می شود؛ اما به دلیل تعدد روابط تجربی ارائه شده و ضرورت اصلاح آنها و ارائه ضرایب واسنجی جدید، در بیشتر موارد روش های رگرسیون آماری مورد استفاده قرار می گیرند. در روشهای رگرسیون آماری، با برازش یک تابع مناسب توانی از میان داده ها ، رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب محاسبه و بر این اساس مقادیر رسوبات حمل شده توسط جریان محاسبه می گردد. این روش ها توان تفکیک ویژگی های خاص داده های جمع آوری شده را نداشته و از این جهت، نه تنها برآورد چندان دقیقی از میزان رسوبات حمل شده توسط جریان ارائه نمی دهند، بلکه امکان بررسی تغییرات زمانی رسوبات حمل شده توسط جریان نیز در آنها وجود ندارد. با توجه به این مشکلات، امروزه بسیاری از محققین به روش های نوین پردازشی نظیر منطق فازی روی آورده اند. در تحقیق حاضر، ضمن برآورد رسوب معلق ایستگاه های هیدرومتری واقع بر روی رودخانه تلوار با دو روش معمول رگرسیون آماریِ USBR و FAO ، با استفاده از مدل طراحی شده بر اساس اصول منطق فازی نیز مقدار رسوب معلق ایستگاه ها برآورد شده است. نتایج حاکی از این می باشد که با استفاده از منطق فازی، امکان بررسی تغییرات زمانی میزان رسوبات حمل شده توسط جریان وجود داشته و این روش نسبت به روش های USBR و FAO برآورد نسبتاً دقیق تری از میزان رسوبات حمل شده ارائه می نماید.

واژگان کلیدی: بار معلق، منطق فازی، USBR، FAO، رودخانه تلوار

*این مقاله برگرفته از رساله دکترائی است که با راهنمایی دکتر حسن احمدی و دکتر محمد مهدوی تهیه شده است.

مقدمه

هر ساله بالغ بر۲۰ میلیارد تن رسوب توسط رودخانه های جهان حمل می شود که بخش عمده آن را رسوبات معلق تشکیل می دهد. رسوبات معلق به رسوباتی اطلاق می شود که درون آب و بالاتر از لایه بستر در حرکت هستند و به دلیل وزن کم شان و مؤلفه های رو به بالای جریانهای متلاطم، برای مدت زمان قابل ملاحظه ای به حالت معلق باقی می مانند. رسوبات معلق، مشکلات زیادی از جمله رسوبگذاری در مخازن سدها، تغییر مسیر رودخانه ها به دلیل رسوبگذاری در بستر آنها، کاهش ظرفیت آبگذری کانالها و تأسیسات انتقال آب و تغییر کیفیت آب به لحاظ مصارف شرب و کشاورزی را به وجود می آورند. بنابراین برآورد دقیق بار رسوب معلق، در مسائل متعددی از جمله طراحی مخازن سدها و تعیین عمر مفید آنها، طراحی کانالها، حفاظت زیستگاه ماهیان ، برآورد میزان فرسایش حوزه های آبخیز و تعیین تأثیرات مدیریت آبخیز مورد نیاز می باشد.

علی رغم اهمیت رسوب معلق، اطلاعات دقیق و صحیح از این پدیده در کشور ما بسیار کم است و بین اندازه گیری ها و برآوردهای انجام شده نیز اختلافات زیادی مشاهده می شود. به عنوان مثال می توان به گزارش جاماب (۱۳٦۷) و شفیعی علویجه و همکاران (۱۳۷۵) اشاره کرد که در آنها تولید رسوب معلق رودخانه آجی چای در ایستگاه ونیار به ترتیب نهصد هزار و نه میلیون تن در سال برآورد شده که ده برابر اختلاف نشان می دهد. از جمله علل وجود این اختلافات، می توان به فقدان اندازه گیری های دراز مدت در زمینه رسوب معلق در ایران و همچنین به کاربردن روش های متفاوت جهت برآورد بار معلق اشاره نمود.

جهت برآورد بار معلق رودخانه ها اصولاً از دو روش تجربی و رگرسیون آماری استفاده می شود. در روش های تجربی، برای برآورد بار معلق از یک سری روابط تجربی استفاده می گردد که این روابط مبتنی بر مفاهیم فیزیکی می باشند و معمولا به داده های متنوعی نیاز دارند. تعدد روابط تجربی ارائه شده، لزوم اصلاح این روابط و ارائه ضرایب واسنجی جدید، لزوم دستیابی به اطلاعات گسترده و عدم وجود روش تحلیلی یا تجربی مناسبی که بر اساس آن بتوان به تخمین درستی از میزان رسوبات حمل شده توسط جریان دست یافت، از مهمترین محدودیتهای روشهای تجربی برآورد بار رسوبی به شمار می آیند؛ به همین دلیل عموماً بین نتایج اخذ شده در روش های مختلف تجربی اختلافات قابل توجهی وجود دارد. با عطف به این مشکلات، بسیاری ازمحققان به روشهای دوم یعنی روشهای رگرسیون آماری روی می آورند. در روشهای رگرسیون آماری مقادیر اندازه گیری شده دبی جریان و دبی رسوب در مقابل یکدیگر رسم شده و سپس تابع مناسبی بر داده ها برازش داده می شود . تجربیات محققین مختلف نشان می دهد که رابطه همبستگی $Q_s = aQ_w^b$ مناسب ترین رابطه برای بیان تغییرات دبی و رسوب در ایستگاه های اندازه گیری است که در این رابطه Q_s دبی رسوب و Q_W دبی آب می باشد. a و b ضرایب ثابت رابطه هستند که از طریق ایجاد همبستگی بین داده ها محاسبه می شوند و عواملی نظیر شرایط محیطی، شرایط هیدرولیکی رودخانه و نوع رسوبات برمیزان آنها تأثیر می گذارد. با توجه به این قضیه ، استفاده از این روابط منوط به ثابت ماندن شرایط کلی حوضه است که خود از مهمترین محدودیت های استفاده از آنها در تخمین و برآورد رسوب می باشد. علاوه بر این، در این روش ها امکان بررسی تغییرات زمانی رسوبات حمل شده توسط جریان نیز

وجود ندارد. بنابراین با توجه به مشکلات موجود، امروزه بسیاری از محققین به روشهای نوین پردازشی روی آورده اند.

یکی از روش های نوظهور در حل مسائل مهندسی، منطق فازی (Fuzzy Logic) می باشد. منطق فازی راه ساده ای را برای رسیدن به یک نتیجه قطعی و معین بر پایه اطلاعات ورودی ناقص و مبهم و دوپهلو فراهم می نماید. اگرچه منطق فازی پدیده های غیر قطعی و نامشخص را توصیف می کند ، با این حال تئوری فازی یک تئوری دقیق می باشد.

سابقه تحقیق

منطق فازی، اولین بار در سال ۱۹٦۵ میلادی در مقاله ای تحت عنوان "مجموعه های فازی" توسط پرفسور لطفی زاده استاد دانشگاه برکلی کالیفرنیا به جامعه علمی معرفی شد که انگیزه اصلی ارائه آن ، ابراز عدم رضایت از ناتوانی و ضعف منطق سنتی دوگانه و ریاضیات بسیار دقیق در برخورد با دنیای واقعی و نادقیق بود. در سال ۱۹۷٤ ابراهیم ممدانی برای نخستین بار منطق فازی را در زمینه کنترل یک موتور بخار ساده به کار برد. در سال ۱۹۸۰ منطق فازی برای کنترل کوره سیمان استفاده شد و سپس توسط مؤسسه هیتاچی برای کنترل اتوماتیک قطار در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۸۹ انجمن سیستم ها و نظریه فازی (SOFT) پایه گذاری شد و آزمایشگاه بین‌المللی فازی (LIFE) در ژاپن تاسیس شد. سیستم‌های فازی از اوایل دهه ۱۹۹۰ در ساخت محصولات الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت و کم کم دامنه کاربرد آن در جامعه توسعه یافت. بردوسی و همکاران (Bardossy et al., 1990) روش فازی را برای محاسبات رگرسیونی در هیدرولوژی بکار گرفتند. کیندلر (Kindler, 1992) از منطق فازی در برنامه ریزی منابع آب استفاده نمود. کاپرا (Capra, 1994) از منطق فازی برای طبقه بندی نوع خشکسالی ها استفاده نمود. راسل (Russel, 1996) منطق فازی را برای بهره برداری بهینه سدهای مخزنی تولید کننده انرژی بکار گرفت و نتایج را با روشهای بهینه سازی خطی مقایسه نمود. این بررسی تفاوت قابل توجهی را بین دو روش نشان نداد. شرستا و همکاران (Shrestha et al., 1996) نیز از منطق فازی برای مدلسازی بهره برداری از مخزن استفاده نمود. روش خاص استفاده شده در این مدل شرایط بهره برداری آسانتر و مناسبتری از مخزن را نشان داد. برایان و لینگیردی(Brion & Lingireddy, 1999) ، هوریکاوا و همکاران (Horikawa et al., 1992) ، کلر و همکاران (Keller et al., 1992) ، کاسکو (Kosko, 1992) و جانگ (Jang, 1993)، از روش فازی برای شناسائی الگو ها و طبقه بندی استفاده نمودند. بزدک (Bezdak) به منظور وارد نمودن مسائل عدم قطعیت در تعلق داده‌ها به گروه‌ها، تئوری فازی یا تعلق نسبی را با الگوریتم خوشه سازی K–میانگین ترکیب و الگوریتمی تحت عنوان آلگوریتم فازی C– میانگین ارائه نمودکه به دو صورت هدایت شده و هدایت نشده قابل کاربرد است.

عرصه تحقیق

حوزه آبخیز رودخانه تلوار یکی از زیرحوضه های حوزه آبخیز قزل اوزن می باشد که در منتهی الیه جنوبی این حوضه و در شمال شرق سنندج واقع شده است. این حوضه به طور عمده توسط رودخانه تلوار که خود آن از به

هم پیوستن رودخانه های چم تلوار، قوری چای، چم آسیاب، چشمه ختن و شور ، قرافلو ، نشور و اوزن دره غربی به وجود می آید، زهکشی می شود.

طول رودخانه اصلی تا نقطه خروجی حوضه تلوار برابر با ۸۲ کیلومتر بوده و شیب تندی دارد. این حوضه تقریبا گرد بوده و ضریب گراولیوس آن ۱/۱۳ می باشد. نزدیک به ۵۰ درصد از جریان آب سالانه این رودخانه در بهار و ۳۲ درصد نیز در زمستان جریان دارد. حداکثر ارتفاع ۳۲۵۰ متر و حداقل آن ۱٦۵۰ متر است و ارتفاع متوسط برابر ۲۰۰۰ متر می باشد. ۵۱٪ از مساحت حوضه دارای ارتفاعی کمتر از ۲۰۰۰ متر است. دبی متوسط سالانه این رودخانه ۸/٦۵ متر مکعب بر ثانیه طی یک دوره شاخص ۲۰ ساله بدست آمده و وزن مواد رسوبی سالانه بطور متوسط حدود ۹٤۲۰۰۰ تن برآورد گردیده است. رودخانه تلوار دارای چهار ایستگاه هیدرومتری دهگلان، سنگ سیاه، فرح آباد و سلامت آباد است که آخرین ایستگاه آن، نقطه خروجی زیرحوزه تلوار محسوب می شود و مساحت تحت کنترل آن ٦۵۲۵ کیلومتر مربع است. (جدول۱)

جدول ۱- ایستگاههای هیدرومتری واقع بر روی رودخانه تلوار

نام رودخانه	کد ایستگاه	نام ایستگاه هیدرومتری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	مساحت تحت تاثیر (کیلومتر مربع)	آمار رسوب	آمار دبی روزانه
تلوار	۱۷-۰۰۳	سنگ سیاه	٤۷°-۲۷′	۳۵°-۱۱′	۱۸۵۰	۲٦۵	۱۳٤۵-۷۹	۱۳۵۵-۵٦ تا ۸۱-۸۰
	۱۷-۰۰۵	فرح آباد *	٤۷°-۳۷′	۳۵°-۲۵′	۱۷۳۰	۱۸۲۲	--	۱۳۵٤-۵۵ تا ٦۵-٦٤
	۱۷-۰۰۷	سلامت آباد	٤۷°-۵۱′	۳۵°-٤۰′	۱٦۵۰	٦۵۲۵	۱۳٤۵-۸۱	۱۳٤۰-٤۱ تا ۸۱-۸۰
	۱۷-۰۸۳	دهگلان	٤۷°-۲۳′	۳۵°-۱۵′	۱۸۵۵	۲٤۵	۱۳٦۳-۸۱	۱۳۵۳-۵٤ تا ۸۱-۸۰

* با توجه به این مسئله که ایستگاه فرح آباد دارای آمار رسوب نمی باشد، بنابراین جهت برآورد بار معلق رودخانه قابل استفاده نبوده و بررسی ها با توجه به داده های ایستگاه های هیدرومتری سنگ سیاه، سلامت آباد و دهگلان صورت گرفته است.

روش تحقیق

۱- روش های رگرسیون آماری

۱-۱- روش USBR

به منظور محاسبه دبی رسوبات در محل ایستگاههای هیدرومتری ، از منحنی سنجه رسوب (Sediment Rating Curve) استفاده می‌شود؛ منحنی سنجه رسوب، منحنی است که با ایجاد همبستگی بین دبی جریان روزانه و دبی رسوب محاسبه می گردد. برای کاربرد این روش، ابتدا با استفاده از نرم افزار Excel بین دبی رسوب اندازه گیری شده و دبی جریان متناظر با آن رابطه برقرار شده و داده ها در محیط نمایشی لگاریتمی پلات شده است. سپس بهترین خط با ارزش توانی از بین آنها عبور داده شده و منحنی سنجه ترسیم گردیده است. با تعیین معادله منحنی سنجه رسوب و ضرایب آن و با استفاده از داده های موجود دبی روزانه اندازه گیری شده Q_j، مقادیر رسوب حمل شده توسط جریان به صورت روزانه $\hat{Qs}_j$ محاسبه شده و با جمع مقادیر رسوبات روزانه محاسبه شده در یک سال با استفاده از رابطه زیر، رسوبات انتقال یافته سالانه برآورد گردیده است.

$$Q_{S-annual} = \sum_{j=1}^{365} Qs^{\wedge}{}_j \qquad (۱)$$

۱-۲- روش FAO

در این روش، پس از برازش منحنی سنجه رسوب، معادله سنجه رسوب تعیین می شود ولی از معادله این خط که از نقطه میانگین عبور می کند، استفاده نمی شود و به جای آن از معادله خطی موازی که از میانگین دبی آب و دبی رسوب عبور می کند، استفاده می شود. بنابراین معادله جدید به صورت زیر خواهد بود :

$$Q_s = a'Q_w{}^b \qquad (۲)$$

از تقسیم میانگین دبی های رسوب بر دبی های آب متناظر اندازه گیری شده، ضریب فائو (a') به دست می آید:

$$a' = \frac{\overline{Q}_s}{\overline{Q}_w} \qquad (۳)$$

پس از تعیین ضریب فائو و قرار گیری آن در معادله سنجه رسوب ، داده های مربوط به دبی روزانه ایستگاهها در معادله سنجه رسوب قرارگرفته و بار معلق همان روز برآورد شده است. بر این اساس برای هر سال ۳٦۵ رقم بار معلق روزانه برآورد شده است که مجموع آنها بار معلق حمل شده در طول سال می باشد.

۲- روش فازی

در بررسی انتقال رسوب رودخانه‌ها ، شناخت الگوی واقعی انتقال رسوب و تغییرات زمانی آن در ماه‌ها، فصول و یا سالهای مختلف با توجه به دبی جریان دارای اهمیت ویژه‌ای است. این موضوع زمانی اهمیت می‌یابد که تعداد نقاط مشاهداتی به خصوص در نقاط دارای اهمیت زیاد (سیلابها) به مراتب کمتر از سایر نقاط است. الگوریتم خوشه سازی فازی با دسته بندی داده های اندازه گیری شده بر اساس دبی، امکان تفکیک نقاط مربوط به دبی پایه یا سیلابی و دوره‌های پر آبی یا کم آبی رودخانه را فراهم می آورد. در شرایطی که عامل زمان نیز در محاسبات فازی وارد شود، تغییرات زمانی غلظت رسوبات و دبی نظیر ماهانه، فصلی و سالانه نیز فراهم می گردد. تفسیر این نتایج میتواند تاثیر سیاست های مختلف بهره برداری را ارزیابی نماید.

به منظور محاسبه میزان رسوبات حمل شده با استفاده از روش فازی، از فرایند خوشه‌سازی فازی C– میانگین هدایت شده (Supervised Fuzzy C- mean Clustering Method) که در حقیقت فرایندی برای شناخت الگوی واقعی مربوط به پارامتر های مختلف است استفاده گردیده است. نتایج کاربرد این روش در برآورد محاسبات رسوب و الگوریتم نحوه محاسبات برای رسوبات انتقال یافته توسط جریان با استفاده از الگوپذیری کاربرد این روش در سایر زمینه‌ها به خصوص در زمینه کنترل و هدایت سیستم‌های الکترومکانیکی اخذ شده است.

در این روش ابتدا تعداد خوشه‌ها مشخص می‌شود. تعداد خوشه‌ها با توجه به دامنه پراکنش داده‌های مشاهداتی تعیین می‌گردد که معمولاً تعداد آن‌ها (C بین ۱۵ تا ۳۰ خوشه در نظر گرفته می‌شود. فاصله خوشه‌ها نیز معمولاً طوری انتخاب می‌شود که امکان بررسی تغییر الگوی انتقال رسوب با استفاده از داده های جریان وجود داشته باشد.

تابع تعیین درجه تعلق در این روش یک تابعه ۲ بعدی است که یک بعد آن دبی جریان و بعد دیگر آن زمان اندازه‌گیری است. چنانچه تاریخ ثبت دبی – دبی رسوب i ام به ترتیب سال – ماه – روز به صورت $(y-m-d)$ نشان دادن داده شود، پارامتر کمی زمان به این صورت تعیین می‌شود:

$$t_i = y_i + \frac{(m_i - 1 + di/30)}{12} \qquad (٤)$$

براین اساس تابع درجه تعلق فازی مربوط به دبی Q_j در زمان t_j به مرکز خوشه Q_i به صورت زیر محاسبه می شود.

$$w_{ij} = e^{-\alpha_1 (Q_j - Q_i)^2 - \alpha_2 (t_j - t_i)^2} \qquad (٥)$$

ضرایب α_1و α_2 ، ضرایبی هستند که دامنه فازی بودن سیستم را نشان می‌هند و به شرح زیر تعیین می‌شوند.

اگر $Q_j = Q_i$ و $t_j = t_i$ باشد آنگاه $w_{ij} = 1$

اگر $Q_j = Q_i \pm \Delta Q$ یا $t_j = t_i \pm \Delta t$ باشد آنگاه $w_{ij} \cong 0$، اما از آنجا که رسیدن به عدد صفر در تابع نمائی مذکور امکان پذیر نیست، عددی نزدیک به صفر مثلاً 10^{-5} برای تعیین ضریب α مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به کوچکی نسبی این عدد در مقابل ضریب تعلق یک، این عدد تاثیری بر تغییر خوشه های فازی و نتایج محاسبات نخواهد داشت زیرا به این ترتیب درجه تعلق در مرکز هر خوشه فازی 10^5 برابر بیشتر از درجه تعلق در فاصله ΔQ یا Δt است. به این ترتیب:

$$e^{-\alpha_1 (Q_j - Q_I)^2} = 10^{-5} \qquad (٦)$$

$$e^{-\alpha_2 (tj - ti)^2} = 10^{-5} \qquad (٧)$$

بنابراین مقادیر α_1و α_2 به شرح زیر محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_1 = \frac{5}{\Delta Q} \quad , \quad \alpha_2 = \frac{5}{\Delta t} \qquad (٨)$$

مقادیر ΔQ و Δt براساس تعداد خوشه‌های انتخابی در جهت ها Q و t تعیین می‌شوند. کاربرد این روش موجب می‌شود تا جستجو برای یافتن نقاطی که $Qs\hat{}_j$ بر اساس آنها تخمین زده می‌شود در محدوده $Q_j \pm \Delta Q$ و $t_j \pm \Delta t$ محدود می‌گردد. در واقع الگوهای تغییرات رسوب ناشی از تغییر دبی و با گذشت زمان تعیین خواهد شد.

با تعیین مقادیر α، مقادیر w_{ij}برای هر Q_j در کلیه نقاط مشاهداتی ($i = 1, \ldots n$) تعیین و مقادیر آن نرمال می‌شود.

$$Sum \quad w_j = \sum_{l=1}^{C} w_{jl} \qquad (٩)$$

$$w_{jl}^N = w_{jl} / Sum \;\; w_j \qquad (١٠)$$

به این ترتیب مقدار رسوب تخمینی برای دبی Q_j در زمان t_j از رابطه ذیل تعیین می گردد.

$$Qs\hat{}_j = \sum_{i=1}^{n} W_{ij}^N Q_{si} \qquad (١١)$$

سپس میزان رسوبات انتقال یافته در هر سال با جمع مقادیر رسوبات هر روز در یک سال آماری محاسبه می گردد.

نتایج تحقیق

جدول (۲) نتایج روش های USBR و FAO را در ایستگاه های تحت بررسی نشان می دهد. همان گونه که از جدول (۲) مشاهده می شود، ضریب a بین ۱/٦۹۵ تا ۷/۰۹۳ ، ضریب a' بین ۳/٥٦۰ تا ۱۵ /۲۳۰ و ضریب b بین ۱/۷۷۵ تا ۲/۱۰٦ متغیر است. ضریب همبستگی تابع رگرسیون (R^2) نیز از ۰/۸۹۸ تا ۰/۹٦۱ متغیر است که با توجه به مقادیر ضریب تبیین (CI) محاسبه شده برای آنها ، همگی معنی دار بوده و در نتیجه نشان دهنده همبستگی مناسب تا بسیار خوب بین داده ها دبی و رسوب اندازه گیری شده می باشند.

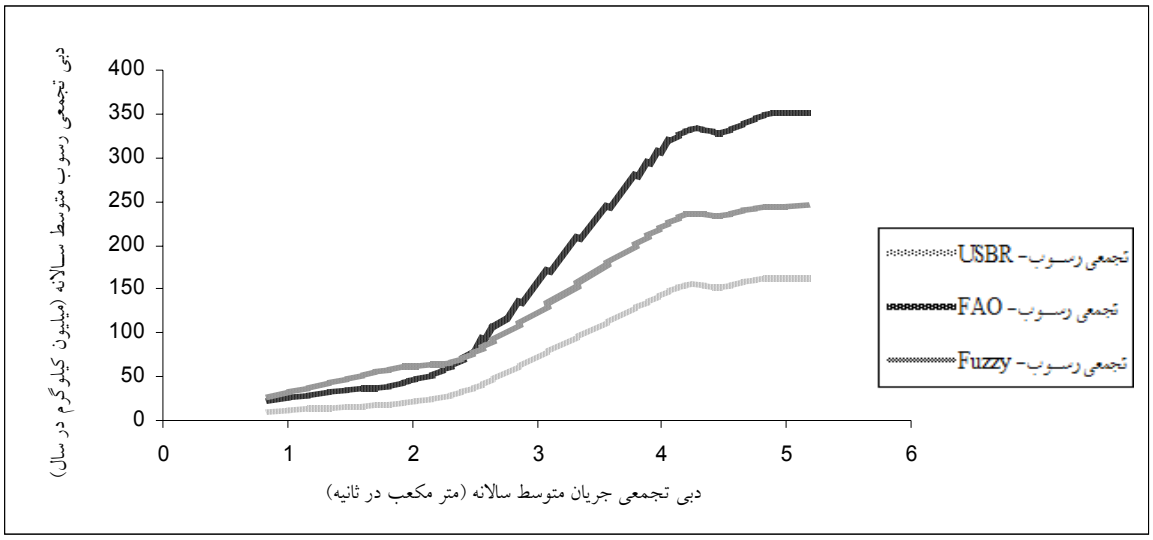
جدول۲- نتایج روشهای USBR و FAO در ایستگاههای حوضه

ایستگاه	a	a'	b	R^2	CI
سنگ سیاه	۷/۰۹۳	۱۵/۲۳۰	۲/۱۰٦	۰/۹۳۸	۰/۲۱۹
سلامت آباد	۵/۰۵۹	۸/۷٦٦٥	۱/۷۷۵	۰/۹٦۱	۰/۱۹۸
دهگلان	۱/٦۹۵	۳/۵٦۰	۱/۹٦٦	۰/۸۹۸	۰/۲۲۹

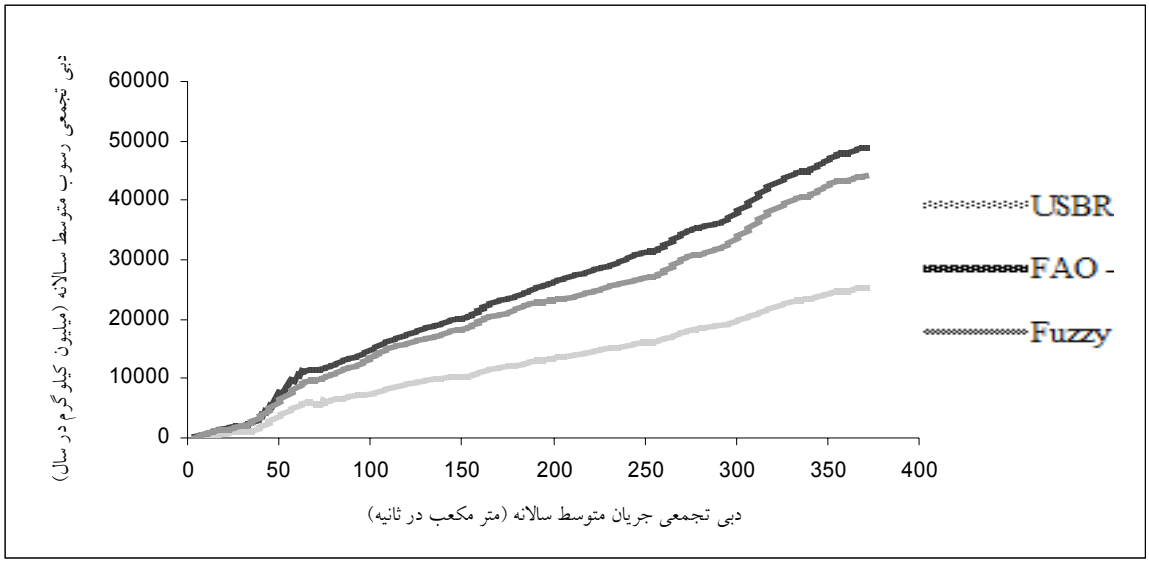
پس از محاسبه ضرایب مذکور، مقادیر رسوب سالانه حمل شده توسط جریان با روشهای ذکر شده محاسبه گردید.

برای محاسبه مقادیر رسوب حمل شده توسط جریان با روش خوشه سازی هدایت شده فازی، یک برنامه کامپیوتری (مدل Sediment) در محیط نرم افزار Visual Basic 6.0 تهیه و محاسبات مربوط به مقادیر رسوب سالانه حمل شده توسط جریان توسط این برنامه انجام گردید.

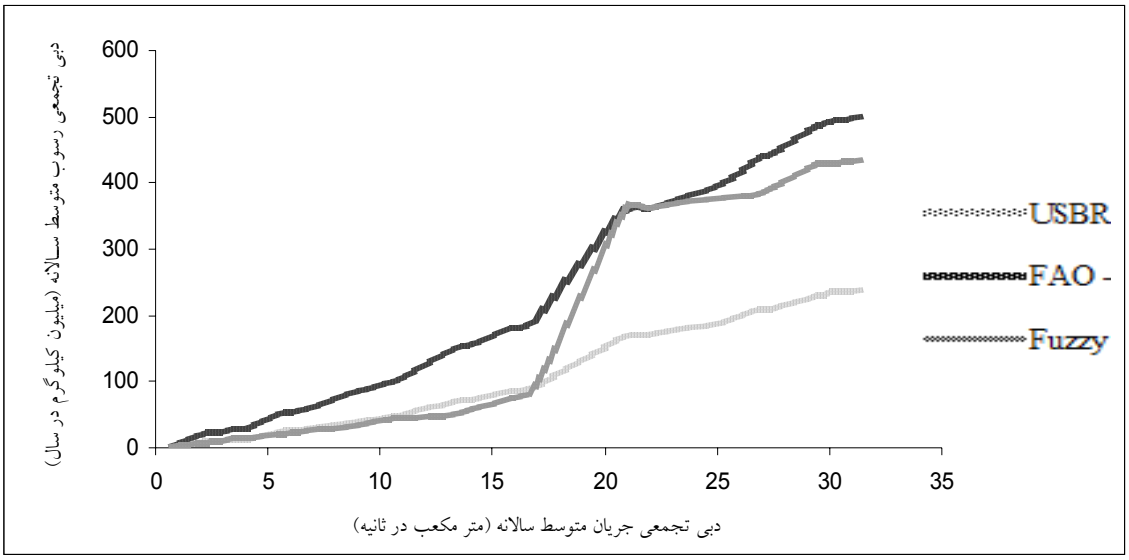
با توجه به آنکه میزان انتقال رسوبات سالانه تابع میزان جریان عبوری بوده که خود عاملی متغیر است، برای بررسی بیلان رسوب و تغییرات زمانی آن و تفسیر نتایج محاسبات از منحنی جرم مضاعف استفاده شده و مقادیر دبی تجمعی در مقابل مقادیر رسوب تجمعی محاسبه شده با روش های USBR ، FAO و فازی ترسیم شده است. (اشکال۱ تا ۳)



شکل۱- منحنی جرم مضاعف مقادیر تجمعی دبی رسوب در مقابل مقادیر تجمعی دبی جریان ایستگاه سنگ سیاه



شکل۲- منحنی جرم مضاعف مقادیر تجمعی دبی رسوب در مقابل مقادیر تجمعی دبی جریان ایستگاه سلامت آباد



شکل۳- منحنی جرم مضاعف مقادیر تجمعی دبی رسوب در مقابل مقادیر تجمعی دبی جریان ایستگاه دهگلان

جهت مقایسه آماری روشهای مورد استفاده و تعیین بهترین روش جهت برآورد بار معلق رودخانه تلوار نیز از روشهای آماری نظیر ضریب تبیین ، درصد خطا و مجموع مربعات خطا استفاده شده است.

جدول۳- نتایج آزمون آماری مقادیر رسوب معلق برآورد شده در ایستگاه سنگ سیاه

مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب - FAO	مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب - USBR	مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب - FUZZY	دبی رسوب مشاهده ای	دبی	زمان
	۵۸٤,۷٦۳	٤٤,٤٦۲		۱۵۱۳,۰۷۸	۱۸,۸۷٤		٦,۱۷۱	۳۲٤,٤۸۵	۳۰٤,٤٦۰	۱,۸۱۰	۱۳۵۱,۵۷۹
	٦۷۷,٤۷٦	۳۹,۷۰۳		۱۷٤۲,۹۹۹	۱٦,۷٤۹		۱,۲۸۵	۳۰٤,۷٦۵	۳۰۸,٦۸۰	۱,۷۰۰	۱۳۵۲,٦۳۵
	۵۱۲,۲۰۳	٤۰,۱۲٦		۱۳۵۰,۳۷۱	۱٦,۹۳۷		۱۹,۸٦۸	۳۰٦,۵۵۸	۲٤۵,٦۵۰	۱,۷۱۰	۱۳۵۲,۷۹۱
	۲۱,۷۰۲	۳۲,۰۵٤		۱۹۱,۹۳۳	۱۳,۳٦۳		۸۵,۵۸۹	۲۷۰,۷۰۲	۳۹,۰۱۰	۱,۵۱۰	۱۳۵۲,۸۳۲
	۲۵,۳۰۳	۹۸۳۸,۱۹۳		۳۰,٤۸٤	۵٦۳۱,۹۹۹		۱۳,۸۱٤	٦٤۵٦,۸۸۵	۷۳٤۸,۸٤۰	۳٦,۰۰۰	۱۳۵۳,۰۷۹
	۵۸۱,۰۱۹	٤۲,۷۰٤		۱۵۰۷,۸٤۷	۱۸,۰۸۸		۸,۳۵۰	۳۱۷,۳۱٤	۲۹۰,۸۲۰	۱,۷۷۰	۱۳٦۰,۵۵۵
	۳۳,۲۱۵	۱۸۱۰,٦۹۳		۱۵۵,۵۷۳	۹٤۳,۸۰۸		٤,۵۹۱	۲۵۲۸,۱۸۵	۲٤۱۲,۱۲۰	۱٤,۱۰۰	۱۳٦۱,۱۰۵
	۵۵,٤۵۸	۱٦۸,۰٦۵		۲٤۰,۲۱۰	۷٦,۷۹۷		٦۱,٤٤٦	٦۷۷,٦۷۳	۲٦۱,۲۷۰	۳,۷۸۰	۱۳٦۱,۹۵۵
	٤۲۷,۲۵۰	٦٦,۳۹۲		۱۱۱٤,۷۵۵	۲۸,۸۱۷		۱۳,٦۰۲	٤۰۵,۱٦۱	۳۵۰,۰۵۰	۲,۲٦۰	۱۳٦۳,۰٤۱
	٤۸۸,۲٤۰	۵۲,۷٦٤		۱۲۷۲,٦۲۷	۲۲,٦۱۲		۱۲,۹۹۹	۳۵٦,۷۵٦	۳۱۰,۳۸۰	۱,۹۹۰	۱۳٦۳,٦۱٦
	۱۲,۷۷٦	۲۷۰,۵۰۹		۱٤۰,۳۸٤	۱۲٦,۹۱۰		٦۵,٤۱٤	۸۸۲,۰٦۵	۳۰۵,۰۷۰	٤,۹۲۰	۱۳٦٤,۰۲۵
	۳٤,۵۹۹	۸۳۸٤,۷۷۵		۱۵,۲٦۰	٤۷۵۷,٦٦٦		۷,۲۰۷	۵۹۰۹,۵۸۱	۵٤۸۳,۷۰۰	۳۲,۹۵۰	۱۳٦٤,۰٦۸
	۲۱,۲۸۲	۳۸٤٦,۱٦٦		٤٤,۸٤۸	۲۰۹۰,۱۹۳		۲۱,۱۰٤	۳۸۳۷,٤۸٤	۳۰۲۷,٦۱۰	۲۱,٤۰۰	۱۳٦٤,۱۰۳
	٤۱۷,۰٦۷	۳۸,۸٦۳		۱۱۲۷,۱۵٤	۱٦,۳۷۵		۳۳,۲۷۹	۳۰۱,۱۷۹	۲۰۰,۹۵۰	۱,٦۸۰	۱۳٦٤,۵۹۷
	۷۲,۲۱۰	۹۱۱,۲۷۲		۲٤۳,۱۸۹	٤۵۷,۲۷۰		۹,۲۰٤	۱۷۲۸,۳۸٤	۱۵٦۹,۳۰۰	۹,٦٤۰	۱۳٦۵,۱۰۸
۱۰۱۵,۷۲۱	**۱۲,۳۸۲**	۲۵٦٦۲,٤۲۱	**۷۲۱,۳٦۹**	**۵۷,۵۷۲**	۱٤۲٦۹,۵٤٦	**۳۸۸,۸۱۱**	**۱۰,۲۱۵**	۲۵۰٤۲,۸۱٦	۲۲٤۸٤,۷۸۰		مجموع

جدول٤- نتایج آزمون آماری مقادیر رسوب معلق برآورد شده در ایستگاه سلامت آباد

مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب - FAO	مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب -USBR	مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب -FUZZY	دبی رسوب مشاهده ای	دبی	زمان
	۱۲,٦۸٤	۲٦۵,۱۵۹		۹۵,۲۷۵	۱۵۳,۰۱۰		۲۳,۸٦۷	۳۹۲,٤٦۰	۲۹۸,۷۹۰	٦,۸۳۰	۱۳۵۱,۱۸۳
	٦۵,٦٦۳	۱۷۹۷۰,۲۰۹		٤۰,٤۹۵	۱۰۳٦۹,٦۹۱		۱۷,۱۷۰	۷٤٤۹,۵۷۹	٦۱۷۰,٤۷۰	۷۳,۵۰۰	۱۳۵۱,۹۵۲
	۳٦۲,٤۷۲	۱۳,۳۹۸		۷۰۱,٤٤۳	۷,۷۳۱		۱۳,۲۷۵	۷۱,٤٤٤	٦۱,۹٦۰	۱,۲۷۰	۱۳۵۲,٤۹۳
	۷۸,۰۸۷۳	۸۸,٤۹٦		۲۰۸,٦۱۷	۵۱,۰٦٦		۲۳,۸۸۰	۲۰۷,۰٤۳	۱۵۷,٦۰۰	۳,٦۸۰	۱۳۵۳,۵۰۲
	۱۹,۹۰۱	۲٤٤,۸٤٤		۱۰۷,۷۸۳	۱٤۱,۲۸۷		۲۱,۷٦۰	۳۷۵,۲۱۷	۲۹۳,۵۷۰	٦,۵۳۰	۱۳۵۳,۵۹۷
	۱۲۸,٤۷۹	٦۸,٦۷٦		۲۹۵,۹٤۵	۳۹,٦۲۹		۱۲,۵۷۱	۱۷۹,٤۷۲	۱۵٦,۹۱۰	۳,۱۹۰	۱۳٦۰,۵۳۳
	۷۰,۳۲۹	۳۸۸,٤٦۸		٤۸,۵۸۳	۲۲٤,۱٦۵		۷٦,۳۲۰	٤۸٦,۷۳۸	۱۱۵,۲٦۰	۸,٤۷۰	۱۳٦۰,۷۳۲
	۳۷,۲٦۳	۳۰٤,۲۲۳		۸,۷۲۰	۱۷۵,۵۵۲		۵٤,۹۹٤	٤۲٤,۰۷۸	۱۹۰,۸٦۰	۷,۳۸۰	۱۳٦۲,۹۵۵
	۵۲,۰۸۷	٦۲۲,٦۹۱		۱٦,۹٦۹	۳۵۹,۳۲۳۲		۵۳,۰۲۲	٦۳۵,۰۸۰	۲۹۸,۳۵۰	۱۱,۰۵۰	۱۳٦۳,۸۹۱
	۸۰,٤٦٦	٦٦,٤۰۰		۲۱۲,۷٤۰	۳۸,۳۱٦		۳۱,۹۵۲	۱۷٦,۰۹٦	۱۱۹,۸۳۰	۳,۱۳۰	۱۳٦٤,۱٤۹
	۵۹,۸٤۱۳	۱۳٦۱,۲۱۳		۱۷٦,۹۹۸	۷۸۵,٤۸۷		۹,٤۹۵	۱۹۸۷,۱۰۷	۲۱۷۵,۷۸۰	۱۷,۱۷۰	۱۳٦۵,۱۰۵
	۳۰,۰۵۸٦	۳۷۳,۱۳۹		۱۲۵,۳۸٦	۲۱۵,۳۲۰		۱,۹۹۲	٤۷۵,۸۲۰	٤۸۵,۳۰۰	۸,۲۸۰	۱۳۷٦,۸۵
	۲۷,٤۱۸	۱۰۳۳٦۰,۹٦۵		۱۲۰,۸۰۹	۵۹٦٤٤,۳٤		۱,۳٦۲	۱۳۳۵۱۸,۳٦۸	۱۳۱۷۰۰,۱٤۰	۱۹۷,۰۰۰	۱۳۷٦,۹۹۳
	۱۱,۳۰۷	۱٦۰,۱۱٤		۵۳,۷۰۱	۹۲,۳۹٤		۵۱,۹۱۵	۲۹۵,۳۳۲	۱٤۲,۰۱۰	۵,۱٤۰	۱۳۷۷,۵۹۷
	۲۲۹,۱۳۸	۳۱٦,۰۲۵		٤۷۰,۳۸۲	۱۸۲,۳٦۲		۲۷,٤۲۸	۱٤۳۳,۲۸۱	۱۰٤۰,۱٦۰	۷,۵٤۰	۱۳۸۰,۹۰۷
	٦۸,۷۵۱	۱٤۹,۲۲٦		۱۹۲,٤۳۷	۸٦,۱۱۰۷۵		۱۱,۲۸۱	۲۸۳,۸۳۹	۲۵۱,۸۲۰	٤,۹٤۰	۱۳۸۱,۱۲٤
٦۱٤٦,۹٤٤	۱۲,۲٦۹	۱۳۱۳۸۱,٤۲	۱٤٤٤۰,۵۲٦	۹٤,۵۵٦	۷۵۸۱۳,۵۲	۵۰۹,۳۵۵	٤,۰۸۲	۱۵۳۷۷۷,٦۷۹	۱٤۷٤۹۹,۹۹۰		مجموع

جدول۵- نتایج آزمون آماری مقادیر رسوب معلق برآورد شده در ایستگاه دهگلان

مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب - FAO	مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب -USBR	مجموع مربعات خطا	درصد خطا	دبی رسوب - FUZZY	دبی رسوب مشاهده ای	دبی	زمان
	۹۹,۷٤٤	۵,۰۱۱		۳۱۹,۵۹٦	۲,۳۸٦		۹,۷۰۱	۱۱,۰۸۵	۱۰,۰۱	۱,۱۹	۱۳٦٦,۹۰۷
	۱٤۰,۳٤٦	٤,۵۲۷		٤۰٤,۸۸۷	۲,۱۵۵		۳,۳۵۹	۱۰,۵۲٦	۱۰,۸۸	۱,۱۳	۱۳٦۷,۹۵۵
	۳۵,۱٤۳	۸,۹٦۸		۱۸۳,۸۹۰	٤,۲٦۹		۱۸,٦۸٤	۱٤,۹۰۵	۱۲,۱۲	۱,٦	۱۳٦۸,۹٦۰
	۲٤٤,۱۳۸	۹,۸۷۱		٦۲۲,۹۱۹	٤,٦۹۹		۰,٦۲۷	۳٤,۱۸٤	۳۳,۹۷	۱,٦۸	۱۳٦۹,۹۳۹
	۳۰,۹۱۵	۲۱,۵٦٤		۱۷۵,۰۰۹	۱۰,۲٦۵		۲۱,۲۱۷	۲۳,۲۸۹	۲۸,۲۳	۲,۵	۱۳۷۰,۰۲۷
	۹۱,٦٦۲	۳,۹۱۸		۳۰۲,٦۱۸	۱,۸٦۵		٦,۱۰۰	۷,۹۹۸	۷,۵۱	۱,۰۵	۱۳۷۲,۱۹۱
	۱۰۹,۱۳٦	٦,۱٤٤		۳۳۹,۳۲۵	۲,۹۲۵		٤,۵۰۲	۱۲,۲۹٦	۱۲,۸۵	۱,۳۲	۱۳۷۲,٦۹۷
	۵۹,٤۱۷	۱٤۵,۳۸۲		۱٤,۷٤۹	٦۹,۲۰۷		٤,۰٤۰	٦۱,٤۸٤	۵۹	٦,٦	۱۳۷۲,۹۷٤
	٤۸,۵۱۵	۳۵,٤٦٤		۲۱۱,۹۸۰	۱٦,۸۸۲		۳,٤۰٦	۵٤,۵۲۷	۵۲,٦۷	۳,۲۲	۱۳۷۳,۱۰۵
	۱٤,٦٦۲	۱۵,۱٦۳		۷۹,۲٦٦	۷,۲۱۸		۱۸,۷۱۷	۱۵,۹۲۰	۱۲,۹٤	۲,۰۹	۱۳۷۳,۹٤٤
	۲۱,٦۳۹	۲۲,۷٦۷		٦٤,٦۱۰	۱۰,۸۳۸		۲۵,٤۸۳	۲۳,۹٤۱	۱۷,۸٤	۲,۵۷	۱۳۷٤,۱۱۳
	۱۳٦,۲٦۵	٤,٤٤۸		۳۹٦,۳۱۵	۲,۱۱۸		۰,۷۳۵	۱۰,٤۳۳	۱۰,۵۱	۱,۱۲	۱۳۷۵,۱٦۳
	٦٤,۲۱۲	۹٦,۵۷۰		۲٤,۸۲۲	٤۵,۹۷۱		۱۵,۳۵٤	٤۰,۸۲۹	۳٤,۵٦	۵,۳٦	۱۳۷۷,۰۲۲
	۳٤,۳۱۹	۲٤,۳٦۰		۳۷,۹۷۳	۱۱,۵۹٦		۳۵,٤۳۰	۲٤,۷۷۹	۱٦	۲,٦٦	۱۳۸۱,۰۸٦
۲۸,۸٦٤	۲۱,۰٤۸	٤۰٤,۱۵۸	۱٤,۵۸۹	٦۵,۸۵۱	۱۹۲,۳۹۵	۳,۷۰۷	۷,۸۳۰	۳٤٦,۱۹۷	۳۱۹,۰۹		مجموع

درصد خطای روش فازی در ایستگاه های مورد بررسی ٤/۰۸۲ تا ۱۰/۲۱۵ درصد بوده که این اعداد در مورد روشهای USBR و FAO به ترتیب ۵۷۲/۵۷۲ تا ۹٤/۵۵٦ و ۱۲/۲٦۹ تا ۲۱/۰٤۸ بوده است. مجموع مربعات خطای بدست آمده برای روشهای USBR ، FAO و فازی نیز از الگوی مشابهی پیروی نموده است. ذکر این نکته لازم است که در تمامی موارد ، روش های FAO و فازی مقادیری بیشتر از واقعیت را برآورد نموده اند که در مورد روش FAO اختلاف فاحش بوده اما در روش فازی مقادیر بدست آمده اندکی بیشتر از واقعیت بوده است. روش USBR عکس این دو روش بوده است یعنی در تمام موارد مقادیر کمتر از واقعیت برای ایستگاهها بدست آمد. (جداول۳ تا ۵)

بحث و نتیجه گیری

کمبود آمار نمونه برداری در مواقع پرآبی باعث می شود که عموماً ارقام برآورد شده از روش USBR به حداقل مشاهده شده در رودخانه نزدیکتر باشند ؛ زیرا در محاسبه ضرایب منحنی سنجه رسوب ، با کلیه نقاط مشاهداتی یکسان برخورد می شود. از آنجا که بیشتر نقاط اندازه گیری دبی جریان- دبی رسوب رودخانه ها در زمان اندازه گیری دبی پایه صورت گرفته و تعداد داده ها در زمان سیل به مراتب کمتر است؛ لذا نهایتاً روشUSBR به سمت مقادیر پائین تمایل پیدا می کند. از طرفی با توجه به این نکته که بیشترین مقدار رسوب هنگام وقوع سیل از رودخانه عبور می کند، کاربرد این روش در محاسبه میزان رسوب حمل شده در شرایط سیلابی با خطا همراه خواهد بود. در روش FAO نیز محدود بودن تغییرات دبی آب نسبت به تغییرات بار معلق رودخانه، باعث بزرگ شدن ضریب $\grave{a}$

و در نتیجه برآورد بیشتر بار معلق نسبت به روش USBR می گردد. از سوی دیگر روشهای USBR و FAO ، شرایط زمانی و فیزیکی خاص اندازه گیری داده ها را در نظر نمی گیرد. به عنوان مثال مشخص نیست که هر کدام از نقاط روی منحنی مربوط به دبی پایه یا سیلابی است و یا مشخص نیست دادهها مربوط به دورههای پر آبی یا کم آبی رودخانه است. این محدودیت زمانی بیشتر می شود که رودخانه از حالت رژیم طبیعی خارج و برداشت آب، احداث سد و یا سایر سازه های هیدرولیکی موجب تغییر در رژیم هیدرولوژیکی و هیدرولیکی جریان رودخانه گردد.

این در حالی است که در بررسی انتقال رسوب رودخانهها ، شناخت الگوی واقعی انتقال رسوب و تغییرات زمانی آن در ماهها، فصول و یا سالهای مختلف با توجه به دبی جریان دارای اهمیت ویژهای است. این موضوع زمانی اهمیت مییابد که تعداد نقاط مشاهداتی به خصوص در نقاط دارای اهمیت زیاد (سیلابها) به مراتب کمتر است. الگوریتم خوشه سازی فازی با دسته بندی داده های اندازه گیری شده بر اساس دبی، امکان تفکیک نقاط مربوط به دبی پایه یا سیلابی و دورههای پر آبی یا کم آبی رودخانه را فراهم می آورد. در شرایطی که عامل زمان نیز در محاسبات فازی وارد شود، تغییرات زمانی غلظت رسوبات و دبی نظیر ماهانه، فصلی و سالانه نیز فراهم می گردد.

بنابراین، روش فازی، به علت برآورد نزدیک به واقعیت مقادیر رسوب حوضه و توان تشخیص محدوده زمانی وقوع تغییرات رژیم رسوبی در رودخانه، مناسب ترین روش برای برآورد بار معلق رودخانه تلوار می باشد که می تواند در اتخاذ روش های صحیح مدیریت حوزه آبخیز، به خصوص در مورد مسایل رسوبگذاری و فرسایش مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

۱. تاناکا، کازو (۱۳۸۱): مقدمهای بر منطق فازی برای کاربردهای عملی آن. ترجمه علی وحیدیان کامیاد و حامدرضا طارقیان، مترجمین، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

۲. فرمنش مونس، علی (۱۳۸۰): روش های طراحی و تجزیه و تحلیل الگوریتم ها. انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر.

۳. وانگ، لی (۱۳۷۸): سیستم های فازی و کنترل فازی. ترجمه محمد تشنه لب، نیما صفار پور و داریوش افیونی، انتشارت دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی.

4. Bardossy, A., Bogardi, I. and Duckstein, L. (1990): Fuzzy Regression in Hydrology, Journal of Water Resource Research, 26(7): 1497-1508.
5. Brion, G. M. and Lingireddy, S., (1999): A Neural network approach to identifying non-point sources of microbial contamination, Water Resource 33(14), 3099-3106.
6. Capra, A., (1994): Application of Fuzzy sets to Drought Classification, Advances in Water resource technology and management, Balkema Publication, ISBN: 9054103892, P 479- 483.

7. Horikawa, S., Furuhashi, T. and Uchikawa, Y., (1992): On fuzzy modeling using fuzzy networks with back-propagation algorithm, IEEE Trans. Neural Networks 3(5): 801- 806.
8. Jang, J. S. R., (1993): ANFIS; Adaptive a network based fuzzy inferencesystem, IEEE Trans.Sys., Man and Cybernetics, 23(3): 665-685.
9. Keller, J. M., Krishnapuram, R. and Rhee, F. C. H., (1992): Evidence aggregation networks for fuzzy logic interface, IEEE Trans. Neural Network, 3(5): 761-769.
10. Kindler, J., (1992): Rationalizing Water Requirements with Aid of Fuzzy Allocation Model, Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE, 118 (3): 308-323.
11. Kosko, B., (1992): Fuzzy systems as universal approximators, Proc., IEEE Int. Conf. Fuzzy Sys., 1153-1162.
12. Mamdani, E. H., (1977):"Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning using Linguistic Synthesis", IEEE Trans. on Computers, 26C (12): 1182-1191.
13. Russel, S.,O., (1996): Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming, Journal of Water resource planning and management, ASCE, 122(3): 165-170.
14. Sherstha, B., Duckstein, L. and Stakhiv, E. Z., (1996): Fuzzy Rule based Modeling of Reservoir Operation, Journal of Water resource planning and management, ASCE, 122(4): 262-269.