



## مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آبی در طبیعت، توزیع زمانی و مکانی غیر یکنواخت منابع آبی، افزایش آلودگی ها، تخریب منابع طبیعی و همچنین افزایش جمعیت، رشد و توسعه جوامع شهری و فعالیت های کشاورزی و صنعتی، ضرورت برنامه ریزی و مدیریت صحیح منابع آبی اجتناب ناپذیر است. شبیه سازی و ارزیابی آورد رسوب رودخانه نیز از جمله مسائل مهم و کاربردی در مدیریت منابع آب می باشد. در اغلب رودخانه های طبیعی بخش اعظم رسوبات به صورت بار معلق انتقال می یابند. رسوبات حمل شده توسط رودخانه ها مشکلات زیادی از جمله رسوبگذاری در مخازن سدها و کاهش حجم مفید آنها، تغییر مسیر رودخانه به دلیل رسوبگذاری در بستر آنها، کاهش ظرفیت عبور کانال ها و تاسیسات انتقال آب و تغییر کیفیت آب به لحاظ مصارف شرب و کشاورزی را به وجود می آورند [۲]. بار معلق به رسوباتی اطلاق می شود که درون آب و بالاتر از لایه بستر در حرکت هستند و بدلیل وزن کم شان، توسط جریان آب به راحتی حمل شده و به خاطر مولفه های روبه بالای جریان های متلاطم برای مدت زمان قابل ملاحظه ای به حالت معلق باقی می مانند [۹ و ۱۷].

برآورد دقیق میزان رسوب در مسائلی از جمله طراحی مخازن، انتقال رسوب، برآورد آلودگی دریاچه، طراحی کانال ها و لایروبی آنها بعد از سیلاب ها، تعیین خسارت های ناشی از رسوبگذاری به محیط زیست و تعیین تاثیرات مدیریت آبخیز مورد نیاز است. برای برآورد بار معلق رودخانه ها به طور کلی دو روش وجود دارد: الف) استفاده از مدل های تجربی، که از مفاهیم فیزیکی و حل معادلات هیدرودینامیک رسوب استفاده می کنند. این قبیل مدل ها معمولاً به داده های متنوعی از قبیل دانه بندی مصالح، دمای آب، وزن مخصوص و لزجت آب، سرعت جریان، شکل مقطع رودخانه، جنس جداره و شیب کناره نیاز دارند. در اکثر موارد چنین داده هایی با دقت کافی وجود ندارد و به طور عمده کل داده ها به دبی آب و دبی رسوب خلاصه می شود. با توجه به این مشکلات، بسیاری از پژوهشگران به روش های دوم رو می آورند. ب) استفاده از روش معادله همبستگی، که در این روش یک یا چند منحنی بر داده های رسوب برازش داده می شود. رایج ترین فرم برازش، منحنی توانی به  $Q_s = aQ_w^b$  می باشد که در آن  $Q_s$  دبی رسوب  $Q_w$  دبی آب،  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت می باشند [۶]. یکی از روش هایی که امروزه در حل مسائل مختلف آبشناختی و منابع آب کاربرد زیادی یافته، بهره گیری

## استفاده از نظام استنتاج فازی در برآورد رسوب معلق (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان)

حسن احمدی<sup>۱</sup>، محمد طهمورث<sup>۲</sup> و حسین محمدعسگری<sup>۳</sup>  
تاریخ دریافت: ۸۷/۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۲/۱۴

### چکیده

شبیه سازی و ارزیابی آورد رسوب رودخانه از جمله مسائل مهم و کاربردی در مدیریت منابع آب می باشد. بررسی روابط تجربی و معادلات ریاضی ارائه شده نشان می دهد که هنوز روش تحلیلی یا تجربی مناسبی که براساس آن به برآورد درستی از میزان رسوبات حمل شده توسط رودخانه دست یافت، ارائه نشده است. به همین دلیل در این مطالعه به منظور دستیابی به تخمینی نزدیک به واقعیت از میزان رسوبات حمل شده توسط رودخانه ها، از داده های همزمان دبی آب و دبی رسوب ایستگاه گلینک واقع بر رودخانه طالقان، جهت مدل سازی رسوب معلق روزانه با استفاده از نظام استنتاج فازی و روش معادله همبستگی چند متغیره آماری استفاده شد. به منظور ارزیابی نتایج این دو روش از معیارهای  $RMS$ ،  $MAE$  و  $R^2$  استفاده شد. نتایج نشان دهنده دقت بالاتر برآوردهای مدل فازی ( $R^2 = 0.91$ ) =  $RMS = 16.31$ ،  $MAE = 96.40$  و  $R^2 = 0.96$  در مقایسه با برآوردهای مدل معادله همبستگی چند متغیره ( $RMS = 3.93$ ،  $MAE = 85.52$  و  $R^2 = 0.81$ ) می باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش فازی توان تشخیص محدوده زمانی وقوع تغییرات رژیم رسوبی را در رودخانه دارا می باشد و روش فازی می تواند به عنوان طریقی موثر و کارآمد جهت تصمیم گیری در خصوص مسایل رسوبگذاری و فرسایش حوزه آبخیز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: دبی رسوب، دبی آب، مدل سازی، منحنی سنجه و نظام استنتاج فازی.

۱- استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲- نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه تهران  
tahmoures@ut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد بیابان زدایی، دانشگاه تهران

حوزه آبخیز طالقان رود است که در بخش پایاب به الموت رود پیوسته و شاهرود را تشکیل می‌دهد. این رودخانه پس از طی ۷۰ کیلومتر به سد سفید رود می‌پیوندد. حوزه آبخیز طالقان در ارتفاعات البرز مرکزی قرار گرفته و مساحتی بالغ بر ۱۳۲۵۰۰ هکتار دارد که ۲/۳٪ حوزه آبخیز سفیدرود و ۰/۸٪ مساحت کل کشور را شامل می‌شود. از مشخصات مهم این حوزه آبخیز ارتفاع بالا و شیب زیاد آن می‌باشد. ارتفاع متوسط حوزه ۲۶۶۵ متر از سطح دریا (ارتفاع حداکثر ۴۴۰۰ متر و ارتفاع حداقل ۱۰۸۰ متر) می‌باشد. همچنین ۵۰٪ حوزه آبخیز طالقان دارای شیب بالای ۴۰٪ است جهت کلی حوزه آبخیز شرقی- غربی است و پراکندگی نزولات آسمانی در نقاط مختلف آن متفاوت و بین ۲۵۰ تا بیش از ۱۰۰۰ میلی متر در سال متغیر است. طول رودخانه طالقان ۸۵ کیلومتر است. در فصل بهار دارای حداکثر دبی است بخشی از حوزه آبخیز که از سازندهای حساس میوسن تشکیل شده رسوب‌زایی زیادی داشته و باعث انباشت رسوب زیاد در مخزن سد سفید رود می‌شود.

### روش‌های متداول برآورد بار معلق

یکی از متداول‌ترین روش‌های برآورد بار معلق رودخانه‌ها استفاده از منحنی سنج رسوب می‌باشد. در این منحنی رابطه دبی آب و رسوب به طور معمول به صورت یک رابطه نمایی  $(Q_s = a Q_w^b)$  تعریف می‌شود. عامل‌های منحنی سنج (a و b) را از چندین روش شامل مدل‌های خطی و غیرخطی به دست می‌آورد. برآورد حاصل از مدل غیرخطی بر اساس روش آزمون و خطا بدست می‌آید که همیشه به جواب نمی‌رسد. همچنین مقدار خطای باقی مانده نیز قابل محاسبه نمی‌باشد که همین امر باعث کاهش صحت می‌شود [۶]. به همین دلیل در محاسبه عامل‌های منحنی سنج از روش خطی استفاده می‌شود. از مدل‌های خطی می‌توان به مدل لگاریتمی و مدل میانگین دسته‌ها اشاره کرد. در روش خطی بایستی داده‌ها به حالت لگاریتمی تبدیل شوند. این تبدیل لگاریتمی باعث ایجاد اریبی در خط ترسیم بر اساس حداقل مربعات می‌شود که به برآورد کمتر از واقعیت منجر می‌شود. برای رفع این مشکل افراد و سازمان‌های مختلف ضرایب تصحیحی مختلفی را ارائه داده‌اند که هر کدام نتایج متفاوتی را تولید کرده و هیچ کدام از آنها قطعی نیستند و برای استفاده از آنها به مطالعات بیشتری نیاز است [۸].

#### د) بررسی و آماده سازی داده‌ها:

داده‌های استفاده شده در این مطالعه مربوط به سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۰ ایستگاه گلینک طالقان می‌باشد. جهت آماده‌سازی داده‌ها، وجود داده‌های پرت با استفاده از روابط ۱ و ۲ که توسط انجمن منابع آب امریکا در سال ۱۹۸۱ [۱۲] ارائه شده است، مورد بررسی قرار گرفت و پس از رفع نواقص آماری، ۲۸۰ داده همزمان دبی آب و رسوب روزانه انتخاب گردید.

$$Y_L = \bar{y} + K_N S_y \quad (1)$$

$$Y_H = \bar{y} - K_N S_y \quad (2)$$

از منطق فازی می‌باشد. اولین بار پروفیسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ منطق فازی و تئوری مجموعه‌های فازی را معرفی کرد. او از این روش برای مدل‌سازی ابهامات و عدم قطعیت موجود در تصمیم‌گیری استفاده کرد. ایده اصلی منطق فازی ساده است. عبارات، فقط "صحیح" یا "غلط" نیستند، بلکه می‌توانند تا حدی صحیح باشند یا تا حدی غلط [۱۰ و ۱۱]. بعد از گسترش تئوری مجموعه فازی و منطق فازی، پژوهشگران دریافته‌اند که این منطق، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی فرآیندهای آبخیز است. مثال‌هایی از کاربرد نظام استنتاج فازی در مدل‌سازی فرآیندهای آبخیز را می‌توان در کارهای هوریکاو [۱۵]، بردسی و همکاران [۱۲]، کاپرا [۱۴] ملاحظه کرد. نظام استنتاج فازی را می‌توان بر اساس دانش شخص خبره<sup>۱</sup> یا داده‌های مشاهده شده<sup>۲</sup> ساخت. دینی [۴] با استفاده از نظام استنتاج فازی و نروفازی و عامل‌های هواشناسی و میزان مصرف روزهای قبل به عنوان ورودی مدل، میزان مصرف یک روزه آب شهری تهران را پیش‌بینی کرد. در این پژوهش در مجموع در حدود ۱۰۰ مدل فازی و نروفازی ساخته شده که نتایج نشان داد که نظام فازی به دلیل اینکه هیچ‌گونه آموزشی نمی‌بیند، قادر به پیش‌بینی مطلوب مصرف روزانه آب شهری نیست ولی نظام‌های نروفازی قادرند میزان مصرف روزانه شهری تهران را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کنند. از جمله مطالعات دیگر انجام گرفته در زمینه استفاده از مدل فازی در زمینه مسائل آبخیز عبارتند از: استفاده از منطق فازی در مدل‌سازی بارش - رواناب [۱۶]، استفاده از منطق فازی در پیش‌بینی دبی رودخانه و وقوع سیلاب [۱۹]، به کارگیری منطق فازی جهت برآورد رواناب فصلی - رواناب [۱۸]، استفاده از منطق فازی در پیش‌بینی فرسایش و هدررفت خاک در حوزه‌های آبخیز بزرگ و وسیع [۲۳]. از آنجایی که شبیه‌سازی و ارزیابی آورد رسوب رودخانه از جمله مسائل مهم و کاربردی در مدیریت منابع آب می‌باشد و اندازه‌گیری غلظت رسوب به روش‌های متداول به طور عام مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی بوده و گاهی از دقت کافی نیز برخوردار نمی‌باشد، در این مطالعه از داده‌های همزمان دبی آب و دبی رسوب ایستگاه گلینک واقع بر رودخانه طالقان، جهت مدل‌سازی رسوب معلق روزانه با استفاده از نظام استنتاج فازی و روش معادله همبستگی چند متغیره آماری استفاده شد.

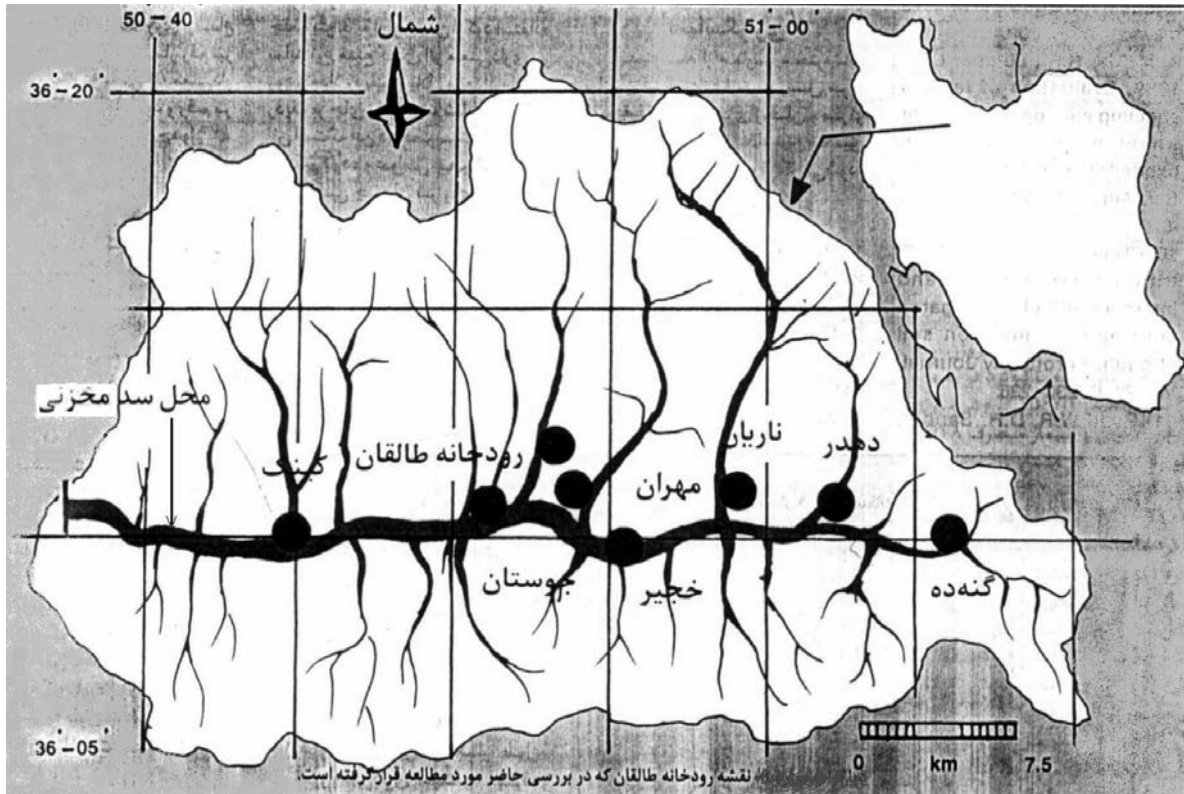
### مواد و روش‌ها

#### ۱) مشخصات منطقه مورد مطالعه:

حوزه آبخیز طالقان یکی از سرشاخه‌های سفید رود است که در ۱۱۰ کیلومتری شمال غرب تهران واقع گردیده و بین عرض‌های ۱۹° ۵' ۳۶" و ۳۰° ۲۱' ۳۶" شمالی و طول‌های ۵۰° ۲۰' ۵۰" و ۲۲° ۱۱' ۵۱" شرقی قرار دارد. زهکشی اصلی این

1- Expert knowledge

2- Observed data



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز طالقان در ایران

منطقه مورد مطالعه کلیه ایستگاه‌ها مجهز به نمونه برداری‌های غلظت مواد معلق بوده و دارای آمار رسوب می‌باشند. غلظت رسوبات عبوری از محل ایستگاه‌ها هر روز یا در فواصل زمانی مشخص برداشت نمی‌شود بنابراین به منظور برآورد دبی رسوب عبوری از ایستگاه‌های تحت بررسی، از منحنی سنجه رسوب استفاده می‌شود. منحنی سنجه رسوب، منحنی است که با ایجاد همبستگی بین دبی جریان و دبی رسوب معلق محاسبه می‌گردد. به منظور تعیین مناسب‌ترین رابطه برازش شده بر داده‌ها، از تابع هدف مجموع حداقل توان‌های دوم خطای برآورد<sup>۲</sup> استفاده می‌شود [۹].

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Q_{si} - \hat{Q}_{si})^2 \quad (3)$$

$$\text{objective function} = \text{Min. SSE} \quad (4)$$

در این رابطه  $Q_{si}$  عبارتست از مقدار دبی رسوب اندازه‌گیری شده به ازای  $Q_{wi}$  و  $\hat{Q}_{si}$  عبارتست از مقدار دبی رسوب محاسبه شده با استفاده از رابطه سنجه رسوب  $Q_{si}^{\hat{}} = aQ_{wi}^b$ . با مشتق‌گیری از تابع هدف و جایگزینی رابطه  $Q_{si}^{\hat{}} = aQ_{wi}^b$  به جای  $Q_{si}^{\hat{}}$ ، ضرایب  $a$  و  $b$  تعیین می‌شوند.

رسوبات انتقال یافته سالانه با جمع مقادیر رسوبات روزانه محاسبه شده در یک سال، با استفاده از رابطه زیر برآورد

1- Sum of Square Error- SSE

که در آنها:  $y_{L\&H}$ : لگاریتم آستانه‌های بالا و پایین داده‌های پرت،  $\bar{y}$ : میانگین لگاریتم داده‌ها،  $K_N$ : ضریب روش داده‌های پرت و  $S_y$ : انحراف معیار داده‌ها می‌باشد. جدول (۱) مشخصات آماری داده‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های مورد بررسی

عامل آماری	دبی آب $m^3/s$	دبی رسوب $ton/day$
حداکثر	۳۵/۸۸	۵۴۵۵/۳
حداقل	۴/۳۵	۱۲۰/۷
میانگین	۱۳/۴۴	۴۳۳/۹۹
انحراف معیار	۱۰/۰۸	۹۰۲/۵

### روش‌های تحلیل

#### روش معادله همبستگی آماری

به منظور محاسبه دبی رسوبات در محل ایستگاه‌های آب سنجی، از منحنی سنجه رسوب استفاده می‌شود. در ایستگاه‌های اندازه‌گیری مجهز به نمونه بردارهای بار معلق، همزمان با برداشت، غلظت مواد معلق توسط نمونه بردار، دبی جریان، غلظت، درجه حرارت و تاریخ نیز در برگه آماری ثبت شده است. در خصوص

1- Sediment Rating Curve

می شود.

$$Q_{S-ANNUAL} = \sum_{j=1}^{365} (Q_{Sj}^{\wedge}) \quad (5)$$

## روش فازی

اندازه گیری شده براساس دبی، امکان تفکیک نقاط مربوط به دبی پایه یا سیلابی و دوره های پرآبی 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 می تواند تأثیر سیاست های مختلف بهره برداری را ارزیابی نماید.

به منظور محاسبه میزان رسوبات حمل شده با استفاده از روش فازی، از فرآیند خوشه سازی فازی<sup>۵</sup> که در حقیقت فرایندی برای شناخت الگوی واقعی مربوط به عامل های مختلف است استفاده گردید. نتایج کاربرد این روش در برآورد محاسبات رسوب و روندنمای نحوه محاسبات برای رسوبات انتقال یافته توسط جریان با استفاده از الگوپذیری کاربرد این روش در سایر زمینه ها به خصوص در زمینه کنترل و هدایت سامانه های الکترومکانیکی اخذ شده است. به طور کلی این روش ها به دو گروه اصلی تقسیم می شوند که تعاریف و روندنماهای محاسباتی هر کدام از این روش ها در ادامه آمده است.

### روندنمای خوشه سازی فازی -C میانگین هدایت نشده

در این روش ابتدا تعداد خوشه ها مشخص می شود تعداد خوشه ها با توجه به دامنه پراکنش داده های مشاهداتی تعیین می گردد. فاصله خوشه ها معمولاً طوری انتخاب می شود که امکان بررسی تغییر الگوی انتقال رسوب با استفاده از داده های جریان وجود داشته باشد. تعداد خوشه ها (C) معمولاً بین ۲۰ تا ۳۰ خوشه در نظر گرفته می شود فاصله خوشه ها یکسان و مرکز هر خوشه با استفاده از رابطه زیر تعیین می گردد.

$$Q_i^C = Q_{\min} + (Q_{\max} - Q_{\min})(I-0.5)/C \quad (6)$$

که در آن  $I=1, C, \dots$  تغییر می کند.

مراکز خوشه ها را می توان به صورت تصادفی در حد فاصل بین  $Q_{\min}$  و  $Q_{\max}$  نیز انتخاب نمود.

این نقطه به عنوان نماینده کلیه دبی های رسوبی است که در محدوده  $Q_{I-0.5}^C \leq Q_i < Q_{I+0.5}^C$  قرار دارند.

در این صورت مرکز دبی های رسوب نظیر هر خوشه با استفاده از رابطه:

$$Q_{Si}^C = \sum_{i=1}^m Q_{Si} / m, \text{ if } Q_{I-0.5}^C \leq Q_i < Q_{I+0.5}^C \quad (7)$$

که در آن  $m$  تعداد داده های واقع در این خوشه است.

به منظور برآورد دبی رسوب روزانه  $Q_s^{\wedge}$  نظیر دبی روزانه  $Q_j$ ، درجه تعلق دبی روزانه به هر کدام از خوشه ها با استفاده از تابع نمایی  $w = e^{-\alpha(X-C)^2}$  (۸)

تعیین می گردد. بنابراین با استفاده از رابطه فوق درجه تعلق  $Q_j$  به خوشه  $I$  ام به صورت تابعی از فاصله دبی  $Q_j$  از مرکز خوشه  $I$  به شرح زیر تعیین می گردد.

در سال های اخیر به دلیل پیشرفت گسترده سامانه های سخت افزار و نرم افزار رایانه ای، امکان استفاده از روش های جدید محاسباتی همراه با عملیات تکراری فراوان که انجام آن به شکل غیر رایانه ای به طور عملی غیر ممکن بود، فراهم شده است. از بین این روش ها می توان به مدل های روندنمای ژنتیک<sup>۱</sup> مدل های شبکه های عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> و روش های فازی<sup>۳</sup> اشاره نمود. منطق فازی برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ میلادی در مقاله ای تحت عنوان مجموعه های فازی توسط دکتر لطفی زاده استاد دانشگاه کالیفرنیا ارائه گردید. در آن دوره از زمان، قبول ابهام و عدم صراحت در زمینه مسائل مهندسی دور از ذهن به نظر می رسید. لطفی زاده منطق فازی را براساس اصل ناسازگاری<sup>۴</sup> به شرح زیر بنیان گذاری کرد:

"هنگامی که پیچیدگی یک سامانه از حد تعیین شده ای فراتر می رود تعریف صریح، دقیق و با معنای عملکرد آن سامانه غیر ممکن می شود" [۳ و ۷ و ۲۲].

در سال ۱۹۷۴ 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 خودکار قطار در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۸۹ انجمن نظام ها و نظریه فازی (SOFT) پایه گذاری شد و آزمایشگاه بین المللی فازی (LIFE) در ژاپن تأسیس شد. سامانه های فازی از اوایل دهه ۱۹۹۰ در ساخت محصولات الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت و کم کم دامنه کاربرد آن در جامعه توسعه یافت [۴ و ۲۰].

بردوسی و همکاران [۱۲] روش فازی را برای محاسبات معادله های همبستگی در آبناختی به کار گرفتند. کیندلر [۱۳] از منطق فازی در برنامه ریزی منابع آب استفاده نمود. کاپرا [۱۴] از منطق فازی برای طبقه بندی نوع خشکسالی ها استفاده نمود.

در بررسی انتقال رسوب رودخانه ها، شناخت الگوی واقعی انتقال رسوب و تغییرات زمانی آن در ماه ها، فصول و یا سال های مختلف- با توجه به دبی جریان- دارای اهمیت ویژه ای است. این موضوع زمانی اهمیت می یابد که تعداد نقاط مشاهداتی به ویژه در نقاط دارای اهمیت زیاد (سیلاب ها) به مراتب کمتر از سایر نقاط است. روندنمای خوشه سازی فازی با دسته بندی داده های

- 1- Genetic Algorithm
- 2- Artificial Neural Network Algorithm
- 3- Fuzzy Logic Algorithm
- 4- Principle of Incompatibility

5- Unsupervised Fuzzy C-mean Clustering Method

داده‌های مشاهداتی به عنوان یک مرکز خوشه مستقل انتخاب می‌شوند. تفاوت کلی روش فوق با روش قبلی در امکان ایجاد فضاهای جستجوی دلخواه در برآورد متغیر می‌باشد.

$$w_{jl} = e^{-\alpha(Q_j - Q_1^C)^2} \quad (9)$$

که در این رابطه  $w_{jl}$  درجه تعلق دبی را به مرکز هر خوشه نشان می‌دهد. ضریب  $\alpha$ ، ضریبی است که دامنه فازی بودن سامانه را نشان می‌دهد و به شرح زیر تعیین شده است:

$$1 - \text{اگر } Q_j = Q_1^C \text{ باشد آنگاه } Q_s^{\wedge j} = Q_1^C \text{ و یا} \\ \text{if } Q_j = Q_1^C \Rightarrow Q_s^{\wedge j} = Q_1^C \quad (10)$$

$$2 - \text{اگر } Q_j = Q_{l+1}^C \text{ یا } Q_j = Q_{l+1}^C \text{ باشد آنگاه } W_{jl} \approx 0 \text{ و یا}$$

$$\text{if } Q_j = Q_{L \pm 1}^C \Rightarrow W_{jl} \cong 0 \quad (11)$$

با توجه به این که رسیدن به عدد صفر در تابعی نمایی امکان‌پذیر نیست، در این شرایط  $w_{jl}$  عدد کوچکی نظیر  $10^{-5}$  یا  $10^{-6}$  انتخاب و با کاربرد رابطه (۶) ضریب  $\alpha$  تعیین می‌شود. با توجه به کوچکی نسبی این عدد در مقابل ضریب تعلق یک، این عدد تاثیری بر تغییر خوشه‌های 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  $\Delta Q$  است. توضیح این که به دلیل کوچکی عدد مذکور اگر مقدار آن  $10^{-4}$  یا  $10^{-6}$  انتخاب گردد تغییری در نتیجه محاسبات ایجاد نخواهد شد.

$$W_{jl} = e^{-\alpha(Q_{L \pm 1}^C - Q_1^C)^2} = 10^{-5} \Rightarrow \alpha = \frac{5C^2}{(Q_{\max} - Q_{\min})} \quad (12)$$

با تعیین مقدار  $\alpha$ ، مقادیر  $w_{jl}$  برای هر  $Q_j$  در کلیه مراکز خوشه‌ها تعیین و مقادیر آن نرمال می‌شود.

$$\text{Sum } W_j = \sum_{l=1}^C W_{jl} \quad (13)$$

$$W_{jl}^N = W_{jl} / \text{Sum } W_j \quad (14)$$

به این ترتیب مقادیر دبی رسوب نظیر  $Q_j$  از متوسط گیری وزنی مقادیر دبی رسوب کلیه خوشه‌ها تعیین می‌گردد. به این ترتیب

$$Q_s^{\wedge j} = \sum_{l=1}^C W_{jl}^N Q_{sl}^C \quad (15)$$

میزان رسوبات انتقال یافته در هر سال با جمع مقادیر رسوبات هر روز در یک سال آماری با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد.

روش خوشه بندی فازی C میانگین به صورت هدایت شده<sup>۱</sup>

در این روش سه تفاوت اساسی با روش قبلی دارد که عبارتند از: الف) جستجو برای یافتن نقاطی که در محاسبه عامل متغیر ( $Q_s$ ) به کار می‌رود در بازه‌های خاصی صورت می‌گیرد. بنابراین برای یک دبی مشخص  $Q$  که در زمان  $t$  اتفاق افتاده است، جستجو برای یافتن  $Q_s$  در فاصله  $Q \pm \Delta Q$  و  $t \pm \Delta t$  صورت می‌گیرد.

ب) در این روش به جای محاسبه مراکز خوشه‌ها (C)، کلیه

ج) این روش مقادیر  $Q_s$  را برای دوره زمانی که در آنها  $Q$  روزانه وجود داشته باشد به صورت مستقیم روزبه روز حساب می‌کند در حالی که روش قبل منجر به ارائه منحنی سنجه رسوبی خواهد شد که در آن تاثیر کلیه نقاط در ترسیم منحنی یکسان انتخاب می‌شود. با توجه به وجود دوره‌های خشک و تر و وجود یا عدم وجود سد مخزنی طالقان تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رژیم رسوبی رودخانه طالقان اتفاق افتاده است، در این پژوهش از روش رده بندی هدایت شده فازی استفاده شده است.

در این روش نیز درجه تعلق هر کدام از دبی‌های روزانه به مجموعه داده‌های مشاهداتی دبی روزانه و دبی رسوب با استفاده از یک تابع فازی نمایی نظیر رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد. تابع تعیین درجه تعلق در این روش یک تابع ۲ بعدی است که یک بعد آن دبی جریان و بعد دیگر آن زمان اندازه گیری است. چنانچه تاریخ ثبت دبی - دبی رسوب  $t$ ام به ترتیب سال- ماه- روز به صورت  $(y-m-d)$  نشان دادن داده شود، عامل کمی زمانی به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$t_i = y_i + \frac{(m_i - 1 + di/30)}{12} \quad (16)$$

بر این اساس تابع درجه تعلق فازی مربوط به دبی  $Q_j$  در زمان  $t_j$  به مرکز خوشه  $Q_i$  در زمان  $t_i$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_{jl} = e^{-\alpha(Q_j - Q_i)^2 - \alpha_2(t_j - t_i)^2} \quad (17)$$

ضرایب  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$ ، ضرایبی هستند که دامنه فازی بودن سامانه را نشان می‌دهند و به شرح زیر تعیین می‌شوند:

$$\text{اگر } Q_j = Q_i \text{ و } t_j = t_i \text{ باشد آنگاه } W_{jl} = 1$$

$$\text{اگر } Q_j = Q_i \pm \Delta Q \text{ یا } t_j = t_i \pm \Delta t \text{ باشد}$$

آنگاه  $W_{jl} \cong 0$ ، اما از آنجا که رسیدن به عدد صفر در تابع نمایی مذکور امکان‌پذیر نیست، عددی نزدیک به صفر مثلاً  $10^{-5}$  برای تعیین ضریب  $\alpha$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به کوچکی نسبی این عدد در مقابل ضریب تعلق یک، این عدد تاثیری بر تغییر خوشه‌های 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  $\Delta Q$  یا  $\Delta t$  است. به این ترتیب:

$$e^{-\alpha_1(Q_j - Q_i)^2} = 10^{-5} \quad (18)$$

$$e^{-\alpha_2(t_j - t_i)^2} = 10^{-5} \quad (19)$$

بنابراین مقادیر  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$\alpha_1 = \frac{5}{\Delta Q} \text{ و } \alpha_2 = \frac{5}{\Delta t} \quad (20)$$

مقادیر  $\Delta Q$  و  $\Delta t$  بر اساس تعداد خوشه‌های انتخابی در جهت‌های  $Q$  و  $t$  تعیین می‌شوند و عموماً شبیه رابطه (۱۱) در نظر گرفته می‌شوند.

1- Supervised fuzzy C Mean method

## روش فازی

برای محاسبه مقادیر رسوب حمل شده توسط جریان با روش رده بندی هدایت شده فازی یک برنامه رایانه ای در محیط نرم افزاری MATLAB تهیه و محاسبات مربوط به مقادیر رسوب سالانه حمل شده توسط جریان با بهره گیری از این برنامه انجام گردید. نرم افزار (Matrix Laboratory) یک برنامه نرم افزاری قوی جهت دانشجویان و پژوهشگران رشته های ریاضی و مهندسی است که اولین نگارش های آن در دانشگاه نیومکزیکو و استانفورد در سال ۱۹۷۰ میلادی در جهت حل مسائل تئوری ماتریس ها، جبر خطی و تجزیه و تحلیل عددی به وجود آمده است.

با توجه به آنکه میزان انتقال رسوب سالانه تابع میزان جریان عبوری بوده که خود عاملی متغیر است، برای بررسی بیان رسوب و تغییرات زمانی آن و تفسیر نتایج محاسبات از منحنی جرم مضاعف استفاده شده است. منحنی جرم مضاعف یکی از مناسب ترین روش های تشخیص انحراف داده ها ناشی از ناهمگنی یا تغییر شرایط بهره برداری تحت تاثیر عامل یا عوامل نامشخص می باشد. بر اساس نتایج منحنی جرم مضاعف، امکان تشخیص زمان وقوع تغییرات، بررسی رفتار زمانی و برآورد پاسخ سامانه در شرایط رژیم طبیعی وجود خواهد داشت.

بر این اساس پس از ترسیم منحنی جرم مضاعف، داده ها به صورت شکلی کنترل و از ابتدای دوره تا محل وقوع اولین تغییر در شیب منحنی جرم مضاعف به عنوان شرایط رژیم طبیعی در نظر گرفته می شود [۱ و ۲۱].

در این پژوهش به منظور محاسبه مقادیر رسوب انتقال یافته در شرایط رژیم طبیعی رودخانه از نتایج محاسبات فازی قبل از وقوع اولین تغییرات در رژیم رودخانه استفاده شده است. به همین منظور بر آمار حداقل ۱۵ سال متوالی اولیه از ایستگاه گلینک، یا نقطه ای که تغییر روند انتقال رسوب مشهود است، مناسب ترین خط معادله همبستگی برآزش داده شد و این روند از ابتدا تا انتهای دوره آماری توسعه داده شد.

به منظور بررسی دقت و مقایسه مدل های فازی و معادله همبستگی در برآورد رسوب معلق رودخانه طالقان، از عامل های آماری RMSE و R<sup>2</sup> و MAE استفاده شد که نتایج آن در جدول (۳) آمده است.

در این پژوهش دو نوع سامانه ممدانی و سوگینو با تغییر در نوع و مقدار توابع عضویت مورد بررسی قرار گرفت. دقت حاصل از هر کدام از مدل ها با استفاده از معیار میانگین قدر مطلق خطا بررسی گردید. جهت مدل سازی رسوب از مدل های منطق فازی با تغییر در نوع سامانه، تعداد توابع عضویت و نوع تابع عضویت استفاده گردید که نتایج آنها در جدول های (۴ و ۵ و ۶) ارائه گردیده است.

مراحل فوق نیز با استفاده از سری یکساله داده انجام گردید. با توجه به جدول های فوق سامانه ممدانی با یک تابع عضویت مثلی به عنوان بهترین مدل استنتاج فازی جهت مدلسازی آورد

کاربرد این روش موجب می شود تا جستجو برای یافتن نقاطی که بر اساس آنها برآورد می شود در محدوده  $Q_i \pm \Delta Q$  و  $Q_i \pm \Delta t$  محدود می گردد. در واقع الگوها تغییرات رسوب ناشی از تغییر دبی و با گذشت زمان تعیین خواهد شد. با تعیین مقادیر  $\alpha$ ،  $W_{ij}$  برای هر  $Q_j$  در کلیه نقاط مشاهده ای ( $i=1, \dots, n$ ) تعیین و مقادیر آن با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) نرمال می شود. به این ترتیب مقدار رسوب تخمینی برای دبی  $Q_j$  در زمان  $t_j$  از رابطه زیر تعیین می گردد و میزان رسوبات انتقال یافته در هر سال با جمع مقادیر رسوبات هر روز در یک سال آماری و با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می گردد. همان گونه که ملاحظه می شود میزان فازی بودن روش های هدایت شده بیشتر از روش های هدایت نشده است (مجموع  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  در رابطه (۱۷) کوچک تر از میزان  $\alpha$  در رابطه (۱۲) است) این مسئله به دلیل توزیع نقاط مشاهداتی در روش فازی هدایت شده بر روی یک رویه فضایی ۳ بعدی است در حالی که در روش های هدایت نشده توزیع نقاط مشاهده ای بر روی منحنی دو بعدی است. در این بررسی به دلیل وجود دوره های خشک و تر و وجود یا عدم وجود سدهای کارون و دز، تغییرات قابل ملاحظه ای در رژیم رسوبی رودخانه های کارون و دز اتفاق افتاده است، از روش رده بندی هدایت شده فازی استفاده شده است.

## نتایج

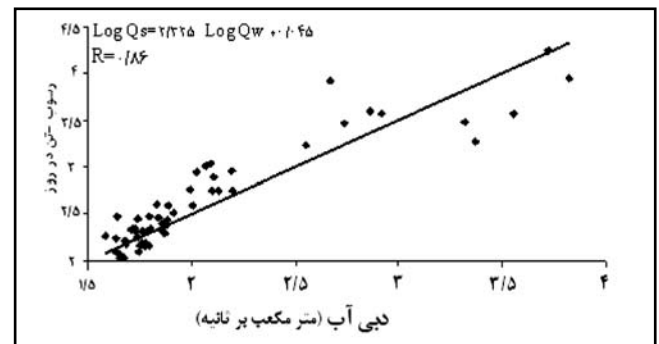
### روش معادله همبستگی

مسئله تخمین آورد رسوب رودخانه طالقان، با استفاده از مدل معادله همبستگی برآورد و ارزیابی گردید. نتایج حاصله در زیر آورده شده است (جدول ۲). البته لازم به ذکر است که به دلیل اختلاف تا حدودی زیاد در مقادیر کمینه و بیشینه و چولگی بالا در داده ها، لگاریتم آنها در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

شکل (۲) دیاگرام پراکنش برای مقادیر دبی پیش بینی شده با مدل معادله همبستگی برای ایستگاه گلینک را نشان می دهد.

### جدول ۲- مشخصات رابطه معادله همبستگی

$\text{Log } Q_w 325/2 \text{Log } Q^s = +0.045$	$R^2 = 0.83$
رابطه مذکور بر اساس آزمون فیشر در سطح ۹۹ درصد معنی دار می باشد.	



شکل ۲- دیاگرام پراکنش برای مقادیر دبی پیش بینی شده با مدل معادله همبستگی برای ایستگاه گلینک



جدول ۵- نتایج مدل سازی رسوب با سامانه سوگینو و با تغییر در تعداد توابع عضویت

سامانه	تعداد تابع عضویت	نوع تابع عضویت	RMSE
سوگینو	۱	مثلثی	۶۵۷۶
سوگینو	۲	مثلثی	۶۵۷۶
سوگینو	۳	مثلثی	۶۵۸۰

جدول ۳- مقایسه نتایج بدست آمده از مدل فازی و مدل معادله همبستگی در مدل سازی آورد رسوب رودخانه

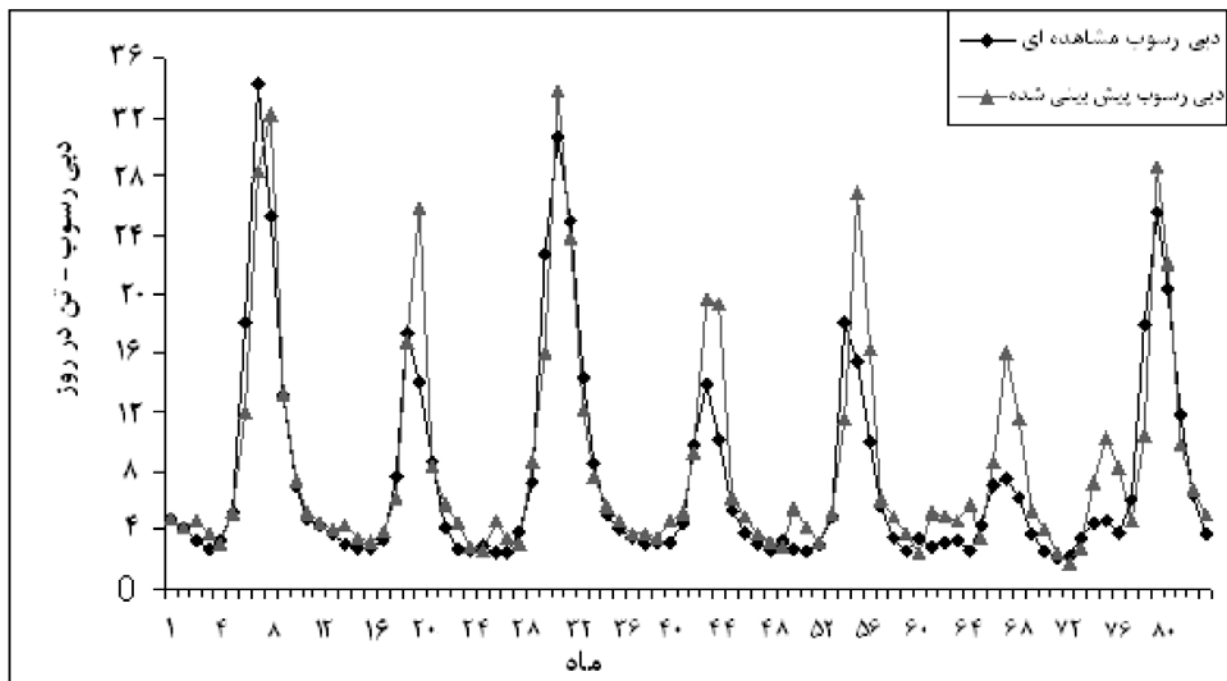
برآورد مدل معادله همبستگی	برآورد مدل فازی	عامل های مقایسه
۹۳/۳	۵۱/۳	RMSE
۰/۸۱	۰/۹۶۰۴	R <sup>2</sup>
۵۲/۸۵	۳۱/۱۶	MAE

جدول ۶- نتایج مدل سازی رسوب با سامانه ممدانی و با تغییر در نوع توابع عضویت

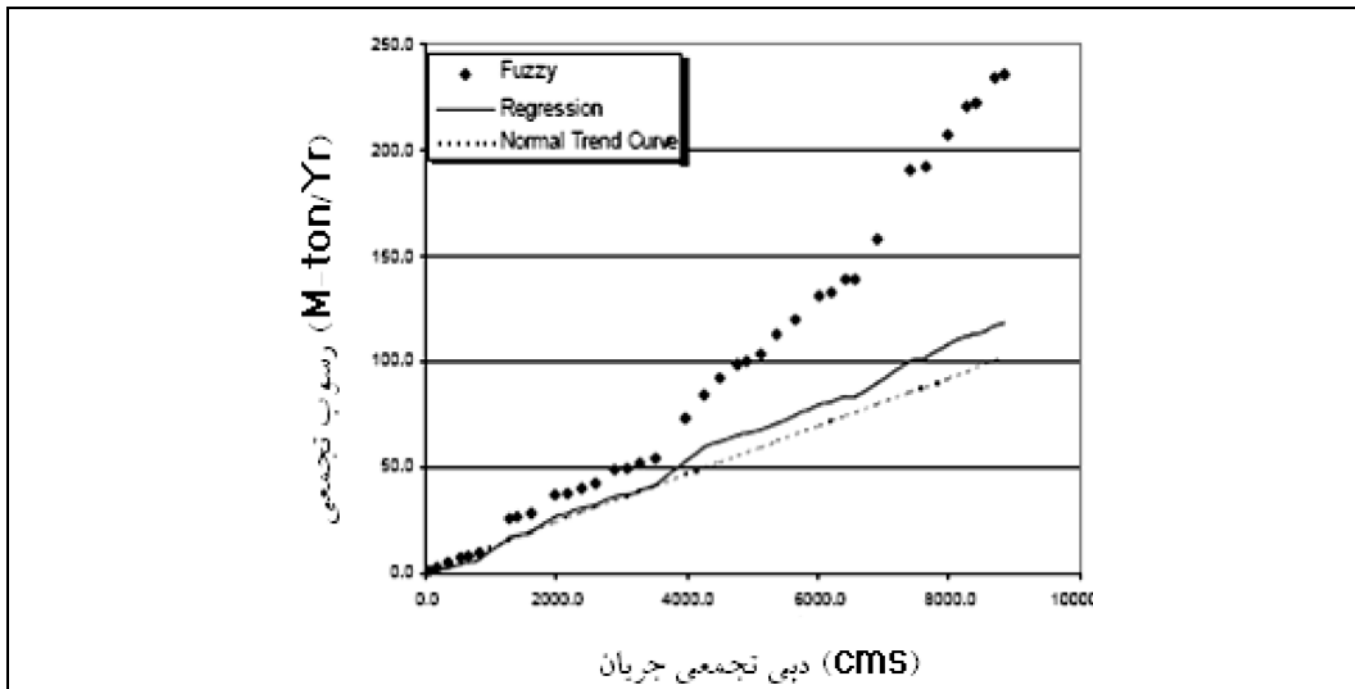
سامانه	تعداد تابع عضویت	نوع تابع عضویت	RMSE
ممدانی	۱	مثلثی	۶۵۷۵
ممدانی	۱	ذوزنقه	۶۵۸۰
ممدانی	۱	گوسی	۶۵۸۵

جدول ۴- نتایج مدل سازی رسوب با سامانه ممدانی و با تغییر در تعداد توابع عضویت

سامانه	تعداد تابع عضویت	نوع تابع عضویت	RMSE
ممدانی	۱	مثلثی	۶۵۷۵
ممدانی	۲	مثلثی	۶۵۸۰
ممدانی	۳	مثلثی	۶۵۸۰



شکل ۳- مقادیر دبی رسوب مشاهده ای و شبیه سازی شده با سامانه استنتاج فازی برای ایستگاه گلینک طالقان



شکل ۴- مقایسه نتایج برآورد بار رسوبی رودخانه با مدل های فازی، معادله همبستگی و منحنی سنج رسوب

تشخیص محدوده زمانی وقوع تغییرات رژیم رسوبی را در رودخانه دارا می باشد.

مورات و همکاران [۲۳] از سامانه استنتاج فازی جهت شبیه سازی و برآورد رواناب و رسوب و سپس مقایسه نتایج آنها با مدل معادله همبستگی در تعدادی از حوزه های آبخیز کانادا استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که برآوردهای مدل فازی در مقایسه با برآوردهای مدل معادله همبستگی خطی از دقت بالاتری برخوردار است. نتایج پژوهش حاضر نیز موید این مطلب بوده و نتیجه گیری شد که برآوردهای مدل فازی در مقایسه با برآوردهای مدل معادله همبستگی خطی از دقت بالاتری برخوردار است.

در مدلسازی با سامانه استنتاج فازی در مقایسه با مدل معادله همبستگی می توان در زمان کوتاهتر و با دقت تاحدودی بالاتر، به روابط میان دبی آب و رسوب دست یافت. دیگر مزیت این روش حساس نبودن آن به وجود تعداد معدودی خطا در داده های آماری است که همین امر باعث برآورد بهتر مدل فازی در مقایسه با مدل معادله همبستگی شده است. رضایی [۵] نیز در مطالعه خود به این مورد اشاره کرده است.

نتایج این پژوهش نشان می دهد که روش فازی می تواند در اتخاذ روش های صحیح مدیریت در حوزه های آبخیز، به ویژه در مورد مسایل رسوب گذاری و فرسایش مورد استفاده قرار گیرد.

از مهم ترین معایب روش های مختلف برآورد رسوب این است که هنوز رابطه های جهانی که قادر باشد در تمام حالات و شرایط به خوبی پاسخگو باشد، وجود ندارد. در مورد روش مذکور نیز از

رسوب رودخانه شناخته شد.

پس از انجام محاسبات، نتایج بدست آمده در شکل های (۳) تا (۵) نشان داده شده است.

همان گونه که از شکل های (۳) و (۴) مشاهده می شود، مقادیر رسوب محاسبه شده با روش فازی بیشتر از مقادیر رسوب محاسبه شده در روش های آماری می باشد که به نظر می رسد این موضوع ناشی از شناخت دقیق تر الگوی انتقال رسوب به خصوص در شرایط سیلابی است.

### بحث و نتیجه گیری

استفاده از روش هایی که بتوانند ارتباطات غیرخطی موجود در سامانه را مدل سازی کنند همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در سال های اخیر توجه متخصصین آشناسختی به استفاده از سامانه هایی چون شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی در پیش بینی و مدلسازی سامانه های غیر خطی معطوف شده است. منطق فازی به عنوان یک مدل جعبه سیاه، در سامانه های غیرخطی و پیچیده از جمله پیش بینی آورد رسوب رودخانه از اهمیت زیادی برخوردار باشد. در این پژوهش به منظور تخمین آورد رسوب رودخانه طالقان از سامانه استنتاج فازی و روش معادله همبستگی چند متغیره آماری استفاده شد.

بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد که روش فازی در شناسایی الگوهای انتقال رسوب در محدوده تحت بررسی نتایج قابل قبول تری از روش های آماری ارائه نموده است. روش فازی توان



۷- منهاج، م. ب. ۱۳۸۱. مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۷۱۵ ص.

۸- مهدوی، م. ۱۳۸۱. هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۳۹۷ ص.

۹- میرزایی، م. ر.، عرب خدیری، م.، فیض نیا، س. و احمدی، ح. ۱۳۸۴. مقایسه روش‌های آماری برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۸ (۲)، ۳۰۱-۳۱۳.

۱۰- نجفی نیسانی، ن.، حیدرپور، م. و گلماهی، ح. ۱۳۸۴. برآورد بار رسوب معلق با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مجموعه مقالات دومین کنفرانس آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان، ص ۲۴۹۳ تا ۲۵۰۰.

۱۱- تاناکا، ک.، وحیدیان کامیاد، ع. و طارقیان، ح. ر. (مترجمین). ۱۳۸۱. مقدمه‌ای بر منطق فازی برای کاربردهای علمی آن، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۲۷ صفحه.

12. Bardossy, A., Bogardi, I., and Duckstein, L. 1990. Fuzzy Regression in Hydrology, Journal of Water Resource Research, 26(7): 1497-1508.

13. Brent, R. P. 1973. Algorithms for Minimization without Derivatives, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 345.

14. Capra, A. 1994. Application of Fuzzy sets to Drought Classification, Advances in Water resource technology and management, Balkema Publication, P 479-483.

15. Horikawa, S., Furuhashi, T., and Uchikawa, Y. 1992. Fuzzy modeling using fuzzy networks with back-propagation algorithm. Neural Networks 3(5): 801- 806.

16. Kerem, H. 2002b. Suspended sediment estimation for river using artificial neural networks and sediment rating curve, Engineering Environment Science, Vol. 26, 27-36.

17. Kerem, H. 2006a. generalized regression neural network in modeling river sediment yield, Advances in Engineering Software Vol. 37, 63-68.

18. Kerem, H. 2006b. Methods to improve the neural network performance in suspended sediment estimation, Journal of Hydrology Vol. 317, 221-238.

19. Kindler, J. 1992. Rationalizing Water Requirements with Aid of Fuzzy Allocation Model, Journal of Water Resource Planning and

انجایی که حوزه‌های مختلف دارای ویژگی‌های متفاوت اعم از شیب حوزه، میزان و نوع پوشش گیاهی، جنس خاک و... بوده و نیز از لحاظ مدیریتی در سطوح مختلفی قرار دارند، بهتر است در مطالعه‌ای وسیع‌تر، با جمع آوری آمار حوزه‌های متعددی که از لحاظ عامل‌های مذکور تفاوت معنی داری با هم دارند، علاوه بر ورودی‌های به کار رفته، عامل‌های فوق نیز به نحوی به عنوان ورودی به مدل فازی تعریف شوند.

در پایان موارد پیشنهادی زیر مطرح می‌گردد:

۱- در سال‌های اخیر استفاده از روش شبکه عصبی- فازی (نروفازی) کاربرد زیادی در حل مسائل مختلف آبشناختی و منابع آب پیدا کرده است، که مهم‌ترین مزیت آنها توان یادگیری روابط بین متغیرها می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات بعدی از این سامانه‌ها جهت مدل‌سازی آورد رسوب رودخانه استفاده شده و دقت آنها مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- استفاده از روش‌هایی که در آنها عامل‌های شبکه عصبی و عصبی- فازی با استفاده از روندنمای ژنیتیک بهینه‌سازی شوند.

۳- استفاده از سایر مدل‌های فازی و شبکه عصبی از قبیل شبکه‌های معادله همبستگی و پایه شعاعی و برگشتی.

۴- استفاده از متغیرهای هواشناسی به عنوان عامل‌های ورودی در روش‌های فازی و هوش مصنوعی که به طور عام سبب بهبود عملکرد مدل‌ها می‌شود.

## منابع

۱- آوریده، ف.، بنی حبیب، م. و شمسی، ط. ۱۳۸۰، کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تخمین دبی رسوب رودخانه‌ها، سومین کنفرانس هیدرولیک، تهران، ۳۶۶ تا ۳۶۷.

۲- بایزیدی، ش.، یاسی، م.، فتاحی، ر. و کارگر، ع. ۱۳۸۴. پیش‌بینی و برآورد رسوب معلق روزانه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی- مدل پرسپترون چند لایه، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان، ص ۵۵۵ تا ۵۶۱.

۳- وانگ، ل.، تشنه لب، م.، صفارپور، ت. و افیونی، د. (مترجمین). ۱۳۷۸. سامانه‌های فازی و کنترل فازی، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۵۲۶ صفحه.

۴- دینی، ع. ۱۳۸۳. استفاده از سامانه استنتاج فازی و نروفازی جهت پیش‌بینی میزان مصرف یک روزه آب شهری تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، ۳۳۲ صفحه.

۵- رضایی، ع. ۱۳۸۳. مدل‌سازی منطقه‌ای دبی‌های اوج زیر حوزه‌های سد سفیدرود با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، پایان‌نامه دکتری آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ۲۱۵ ص.

۶- کوچک‌زاده، ص. و یوسفی، ا. (مترجمین). ۱۳۸۱. تئوری و کاربرد انتقال رسوب، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۲۴۶ ص.

investigation by MLP neural network, a case study of the Bar River, Neyshaboor, Iran, International Symposium on Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems, poster report Booklet, p.65-70, Dundee, Scotland.

23. Murat, A. and Cigizoglu, H.K. 2007. Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods and Fuzzy method, using hydrometeorological data, Environmental Modelling, Software Vol. 22, 2-13.

Management, ASCE, 118 (3): 308-323

20. Kosko, B. 1992. Fuzzy systems as universal approximators, Proceedings of IEEE International Conference. Fuzzy Systems, 1153-1162 pp.

21. Mamdani, E. H. 1977. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning using Linguistic Synthesis, IEEE Transaction on Computers, 26 (12): 1182-1191.

22. Memarian Khalilabad, H., Zakikhani, S. and Feiznia, S. 2006. River suspended sediment yield