

و از ۰/۸۲ تا ۰/۹۱، تغییر یافت.

کلمات کلیدی: استان خراسان، بار رسوبی، رگرسیون خطی فازی، متغیرهای موثر، مدل‌های رگرسیونی چند متغیره

## مقدمه

برآورد بار رسوبی به منظور آنالیز منابع آب، مدل سازی و کاربردهای مهندسی یک امر ضروریست و اندازه‌گیری آن یک فاکتور کلیدی برای درک اثرات پیشین کاربری اراضی و تغییرات آب و هوایی می‌باشد [۲۹، ۲۸]. در بسیاری از مناطق، فرآیند فرسایش خاک اثرات نامطلوبی را بر پایداری اکوسیستم می‌گذارد و باعث بروز مشکلات مهمی در منطقه و یا خارج از منطقه فرسایش می‌شود که می‌توان به فرسایش خاک غنی کشاورزی و ته نشینی آن در پشت مخازن سدها و کاهش حجم ذخیره آنها اشاره کرد. کل رسوب خروجی از یک حوزه زهکشی در واحد زمان، بار رسوبی نامیده می‌شود. بار رسوبی در دهانه رودخانه منعکس‌کننده کلیه فرآیندهای فرسایشی و ته‌نشینی رسوب درون حوزه می‌باشد. بنابراین بار رسوبی به کلیه عوامل کنترل‌کننده فرآیند فرسایش و تحویل رسوب بستگی دارد [۲۱]. فرسایش خاک به توپوگرافی منطقه، جنس خاک، شرایط آب و هوایی و پوشش گیاهی بستگی دارد در صورتی که تحویل رسوب از مورفولوژی حوزه، نوع و خصوصیات خاک، کاربری اراضی، شبکه و تراکم زهکشی اثر می‌پذیرد [۲۹، ۳۰]. در نتیجه تغییرات مکانی بار رسوبی از تغییرات مکانی در خصوصیات حوزه تاثیر می‌پذیرد. در طی دهه‌های اخیر انواع مدل‌ها و روابط به منظور برآورد فرسایش توسط جریان آب و متعاقباً بار رسوبی ارائه شده است که به سه دسته تجربی / رگرسیون، مفهومی و فیزیکی تقسیم می‌شوند [۱۰].

ضمن وجود مزیت‌های فراوان در مدل‌سازی فرآیند رسوب در سطح حوزه توسط مدل‌های مذکور یکی از محدودیت‌ها شامل تقلیل عوامل تاثیرگذار در فرآیند فرسایش و انتقال رسوب می‌باشد. همچنین بسیاری از مدل‌ها بر فرسایش شباری متمرکز می‌شوند و سایر آنها بر فرسایش خندقی و سواحل تاکید می‌ورزند [۸]. مریت و همکاران [۱۶] در طی مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که مدل‌های فیزیکی و مدل‌های پیچیده مفهومی در مدل‌سازی انتقال رسوب در مقیاس حوزه به دلیل تاکید بر تعداد محدودی

## برآورد رسوب حوزه‌های آبخیز شمال استان خراسان با استفاده از مدل رگرسیون فازی

گلاره فراهی<sup>۱</sup>، سعیدرضا خداشناس<sup>۲</sup>، امین علیزاده<sup>۳</sup>  
تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۲۵

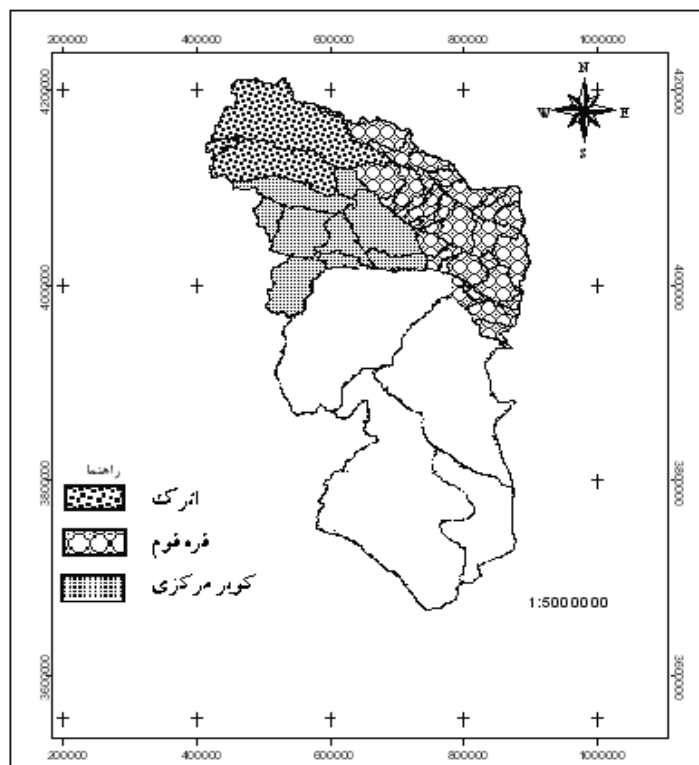
## چکیده

امروزه فرسایش خاک یکی از معضلات مهم در مدیریت پایدار آب و خاک در بسیاری از کشورها به حساب می‌آید. بنابراین برآورد فرسایش و بار رسوبی حوزه از ضروریات مدیریت پایدار می‌باشند. در این راستا ساخت و بکارگیری روشی نوین در برآورد رسوب بر پایه درک صحیح از متغیرهای موثر بر تولید و انتقال رسوب در مقیاس حوزه لازم بنظر می‌رسد. در سیستم‌های طبیعی مانند رسوب عموماً مشاهدات نادقیق و یا روابط بین آنها مبهم می‌باشند. لذا استفاده از روشی منطبق با دنیای واقعی مورد نیاز است. از اینرو، در این تحقیق از روش رگرسیون مبتنی بر نظریه مجموعه‌های فازی به منظور برآورد رسوب ۲۹ زیر حوزه آبخیز در شمال استان خراسان استفاده شده است. برای این منظور در ابتدا خصوصیات مختلف ژئومورفولوژیکی، اقلیمی، هیدرولوژیکی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی هر یک از زیرحوزه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و موثرترین متغیرها در برآورد رسوب حوزه توسط مدل‌های رگرسیونی چند متغیره، در حالت‌های مختلف بدست آمد. در ادامه مدل‌های رگرسیون خطی فازی با ضرایب و خروجی مشاهده شده فازی برپایه متغیرهای مستقل موثر ساخته شدند. نتایج حاصله بیانگر افزایش دقت مدل در برآورد بار رسوب در طی ماه‌های پرباران نسبت به کل سال (بدلیل تمرکز بارش در این بازه زمانی از سال) بود. به طوری که راندمان مدل در برآورد متوسط بار رسوبی در شرایط کل سال نسبت به ماه‌های پرباران در ۳ حالت ۲۹ زیرحوزه، ۱۷ زیرحوزه بزرگ و ۱۲ زیرحوزه کوچک به ترتیب از ۰/۸۵ تا ۰/۸۸، از ۰/۷۷ تا ۰/۸۷

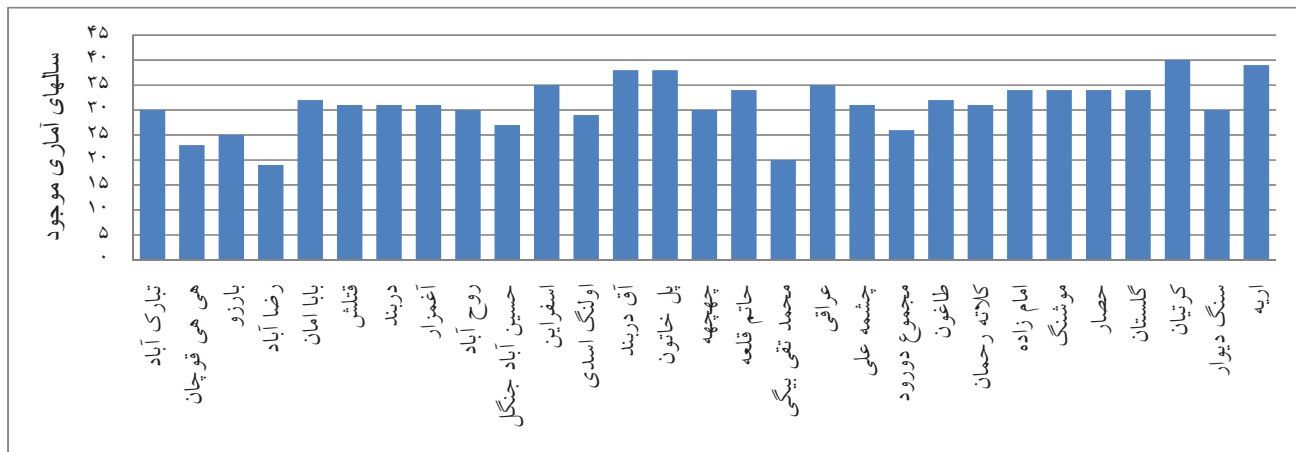
۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه فردوسی مشهد - نویسنده مسئول  
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد  
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدار مشخص برای متغیر وابسته محاسبه می‌شود، در رگرسیون فازی بازه‌ای از مقادیر ممکن برای متغیر خروجی تخمین زده می‌شود. این مقادیر به وسیله یک توزیع امکانی که به صورت تابع عضویت نشان داده می‌شود مشخص می‌گردند. بنابراین رگرسیون فازی بر اساس تئوری امکان و مجموعه‌های فازی پایه‌گذاری شده است [۳۴]. تئوری مجموعه‌های فازی اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی‌زاده [۳۳] در مقاله‌ای تحت عنوان مجموعه‌های فازی معرفی گردید. این تئوری را می‌توان به خوبی برای مدل‌سازی دو نوع اصلی عدم قطعیت در پدیده‌های پیچیده بکاربرد. نوع اول عدم قطعیت ناشی از ضعف دانش و ابزار بشری در شناخت پیچیدگی‌های یک پدیده و نوع دوم عدم قطعیت مربوط به عدم صراحت و عدم شفافیت مربوط به یک پدیده یا ویژگی خاص است [۱۵]. لذا در سیستم‌های طبیعی، مدل‌های مبتنی بر نظریه مجموعه‌های فازی قادر به ارائه الگوی مناسب‌تری هستند، بطوری که انطباق بیشتری با دنیای واقعی دارند. هم اکنون کاربرد نظریه‌های فازی در فرسایش رو به گسترش است [۱۶]. پرویز و همکاران [۱۸] جریان سالانه رودخانه حوزه آبخیز دریاچه ارومیه را به دو روش سری‌های زمانی و رگرسیون فازی برآورد نمودند. نتایج دلالت بر برتری عملکرد رهیافت رگرسیون فازی نسبت به مدل سری زمانی داشت. شایان‌نژاد و همکاران [۲۵] تبخیر-تعرق بالقوه را با استفاده از ۵ متغیر مستقل به سه روش پنمن-مونیت، شبکه‌های عصبی و رگرسیون فازی برآورد نمودند. نتایج حاصل از سه روش در مقایسه با داده‌های لایسیترا نشان‌دهنده برتری

از فرآیندهای انتقال رسوب و فرسایش، مناسب نمی‌باشند. پرین و همکاران [۱۹] نشان دادند که مدل‌های هیدرولوژیکی پیچیده پس از واسنجی در مقایسه با مدل‌های ساده نتایج مطلوبتری را ارائه می‌دهند. تحلیل رگرسیونی نیز یکی از رایج‌ترین روش‌های آماری در پیش‌بینی مقادیر یک یا چند پارامتر وابسته از مجموعه‌ای از مقادیر متغیرهای مستقل (پیش‌بینی‌کننده) می‌باشد. این روش در محیط‌های غیر فازی با تعریف صریح روابط بین متغیرها، کاربرد فراوانی دارد [۱۴]. در طی سالیان متمادی متخصصان مختلفی منجمه‌علی و بویر [۲]، زابلتا و همکاران [۳۲]، دیونت و پوسن [۸]، وروانی و همکاران [۲۷]، صادقی و همکاران [۲۳] و حکیم‌خانی و عرب‌خدری [۹] روابط متعددی بین میزان رسوب حوزه و مشخصه‌های حوزه آبخیز اعم از هیدرولوژی، فیزیوگرافی، اقلیم، کاربری اراضی و زمین‌شناسی به صورت رگرسیون یک یا چند متغیره با هدف تعیین متغیرهای موثر در تولید و انتقال رسوب در مقیاس حوزه آبخیز ارائه کرده‌اند. در رگرسیون کلاسیک فرض می‌شود متغیرها و مشاهدات مربوط به آن‌ها دقیق هستند و خطای مدل نیز از دو منبع حذف فاکتورهای تأثیر گذار و خطاهای تصادفی در حین برداشت داده، ناشی می‌شود. علاوه بر این، خطاها و مقادیر پیش‌بینی شده از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. در صورتی که در بسیاری موارد ممکن است برخی از مفروضات فوق برقرار نباشد، می‌توان رگرسیون فازی یا به عبارت دقیق‌تر، رگرسیون در محیط فازی را جایگزین رگرسیون کلاسیک نمود. برخلاف رگرسیون آماری که به ازای هر سری از متغیرهای ورودی تنها یک



شکل ۱- موقعیت سه حوزه آبریز مورد مطالعه در استان خراسان بزرگ



● ایستگاه‌های تبارک آباد، هی هی قوچان الی محمدتقی بیگ در شکل فوق جزو دسته ۱۷ ایستگاه بزرگ قرار می‌گیرند.  
شکل ۲- وضعیت آمار رسوب و دبی روزانه ۲۹ ایستگاه هیدرومتری منتخب

سانتی‌گراد و بارندگی سالانه از حدود ۸۰۰ میلی‌متر در نواحی مرتفع شمال غرب تا ۵۰ میلی‌متر در حاشیه کویر مرکزی و کویر لوت متغیر می‌باشند. طبق تقسیم‌بندی‌های هیدرولوژیکی، استان خراسان به ۶ حوزه آبریز تقسیم می‌شود. در این مطالعه بار رسوبی در سه حوزه قره‌قوم، اترک و کویر مرکزی مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱).

مجموعه داده‌ها و تعیین پارامترهای موثر توسط رگرسیون معمولی در این تحقیق جهت مدل‌سازی بار رسوبی سه حوزه آبریز ذکر شده، داده‌های همزمان دبی رسوب معلق- دبی جریان کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری در سرتاسر استان خراسان از شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان جمع آوری شد. پس از غربال داده‌ها ۲۹ ایستگاه هیدرومتری به عنوان ایستگاه‌های مناسب تشخیص داده شد به طوری که در بالادست این ایستگاه‌ها بند انحرافی و سدی ساخته نشده بود و از طول دوره آماری مناسب (بیش از ۲۰ سال) برخوردار بودند. در شکل ۲ مشخصات ایستگاه‌های منتخب ارائه شده است. بار رسوب معلق کلیه ایستگاه‌ها در دو حالت متوسط سالانه و ماه‌های پرباران (دی، بهمن، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد) با تلفیق معادله توانی منحنی سنجه (معادله ۱) و داده‌های دبی روزانه بدست آمد. به‌طوریکه در حالت اول از کلیه داده‌های همزمان دبی رسوب - دبی جریان و دبی روزانه موجود در کل سال و در حالت دوم از آن دسته از داده‌های ثبت شده موجود در ماه‌های پرباران استفاده شد.

$$Q_s = aQ_w^b \quad (1)$$

که در آن  $Q_s$  دبی بار رسوب (تن در روز)،  $Q_w$  دبی جریان (متر مکعب در روز) و  $a, b$  بترتیب توان و ضریب مدل توانی برآورد رسوب می‌باشند. صحت نتایج مدل بر اساس معیار ضریب تبیین<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت. در صورتی که به منظور تعیین ضریب و توان معادله توانی سنجه رسوب از روش لگاریتم‌گیری

روش رگرسیون فازی نسبت به دو روش دیگر در برآورد تبخیر- تعرق بلاقوه بود. باردوسی و همکاران [۵] در طی مطالعات خود به این نکته اشاره می‌کنند که در مباحث هیدرولوژی به جهت وجود مشاهدات نادقیق، می‌توان از نتایج رگرسیون فازی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی بهره جست. در نتیجه رگرسیون فازی در بسیاری از سیستم‌های طبیعی منجمله فرآیندهای تولید و انتقال رسوب در سطح حوزه آبخیز که در آن داده‌های در دسترس محدود و مبهم هستند و متغیرها در مقادیر نامشخص و مبهم فعل و انفعال دارند، می‌تواند کاربرد قابل ملاحظه‌ای داشته باشد [۱۱]. لذا در این تحقیق، نخست پارامترهای موثر بر تولید و انتقال بار رسوبی در سه حوزه شمالی استان خراسان بوسیله اثرات ترکیبی مورفولوژیکی، اقلیمی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی حوزه تعیین شد و در ادامه عملکرد رهیافت مدل رگرسیون فازی در برآورد رسوب حوزه مورد بررسی قرار گرفت.

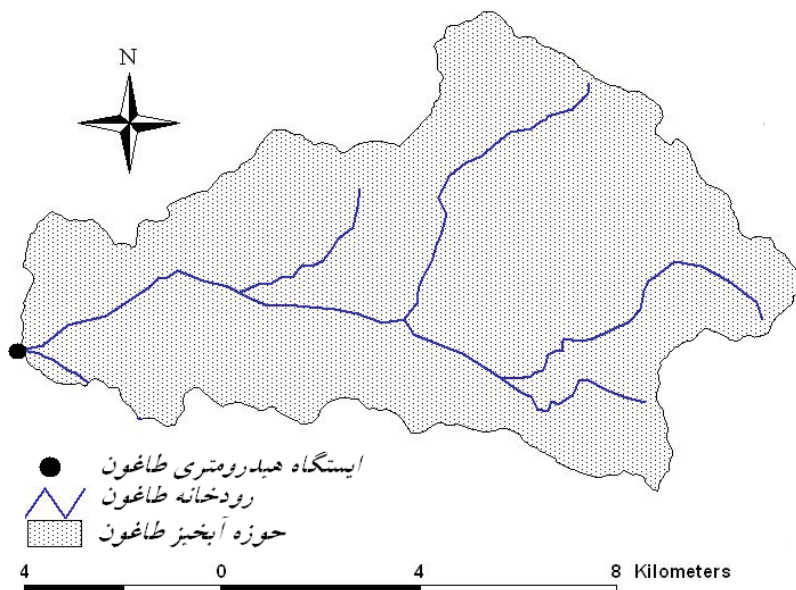
## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

استان خراسان با وسعتی معادل ۳۱۳۳۳۵ کیلومتر مربع بین ۵۵ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. بلندترین نقطه در استان قله بینالود به ارتفاع ۳۲۰۰ متر، و پائین‌ترین آن منتهی‌الیه دشت سرخس به ارتفاع ۲۷۵ متر از سطح دریا می‌باشد. ارتفاع متوسط استان از سطح دریا، برابر ۱۰۰۰ متر برآورد شده است. آب و هوای استان به علت تاثیرگذاری عوامل مهمی از جمله موقعیت جغرافیایی، وجود مناطق کویری و کوه‌های مرتفع و... بسیار متنوع و عمدتاً از نوع خشک تا نیمه خشک است.

تنوع آب و هوایی موجب توزیع بسیار متغیر زمانی و مکانی بارندگی و درجه حرارت هوا شده است بطوریکه متوسط حداقل و حداکثر درجه حرارت در سطح استان بین ۱/۷ تا ۱۴/۳ درجه

1- Coefficient of Determination



شکل ۳- مرز بسته شده زیر حوزه طاغون و آبراهه‌های ترسیم شده در آن

متغیرهای موثر در تولید و انتقال رسوب، معادله رگرسیونی بین داده‌های رسوبی (در دو حالت بار رسوبی کل سال و ماه‌های پرباران سال) و متغیرهای مستقل تولید شد. دو حالت فوق در سه وضعیت از حوزه‌ها یعنی تمام ۲۹ زیرحوزه مورد بررسی، ۱۲ زیرحوزه با مساحت کمتر از ۳۰۰ کیلومتر مربع و ۱۷ زیرحوزه با مساحت بیشتر از ۵۰۰ کیلومتر مربع در نظر گرفته شدند و مجموعاً در ۶ حالت داده‌های رسوبی مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور تعیین معادله رگرسیونی از بین روش‌های مختلف، تکنیک بهترین ترکیب‌ها در نرم‌افزار MINITAB انتخاب شد. در این روش اگر  $k$  متغیر مستقل داشته باشیم در مجموع  $2^k$  ترکیب از متغیرها را می‌توان به عنوان یک مدل رگرسیونی معرفی کرد. برای تعیین بهترین مدل از معیارهای ضریب تبیین و متوسط مربعات خطا استفاده شد. بطوری که مدلی مناسب است که از بیشترین ضریب تبیین و حداقل متوسط مربعات خطا برخوردار باشد.

### رگرسیون فازی

رگرسیون خطی فازی اولین بار توسط تاناکا و همکارانش (۱۹۸۲) ارائه شد و از آن پس تحقیقات در این زمینه به طور گسترده‌ای ادامه یافت که در این میان می‌توان به روش‌های پیشنهادی ساویچ و پدريچ<sup>[۲۴]</sup>، سلمینز<sup>[۶]</sup> و چنگ و ایوب<sup>[۷]</sup> اشاره نمود. فرم کلی تابع رگرسیون فازی به صورت زیر است:

$$\tilde{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1x_1 + \tilde{A}_2x_2 + \dots + \tilde{A}_nx_n \quad (2)$$

- 1- Mean Square Error
- 2- Savic and Pedrycz
- 3- Celmins
- 4- Chang and Ayyub

استفاده شود، دبی رسوب بدست آمده معمولاً کمتر از حد واقعی تخمین زده می‌شود. لذا برای حل این مشکل روش‌های مختلفی به کار برده شده است که در این تحقیق از ضریب اصلاحی فرگوسن استفاده شد [۱۳ و ۳]. در یک حوزه متغیرهای مختلفی در تولید و انتقال رسوب نقش ایفا می‌کنند، این متغیرها را می‌توان در پنج دسته خصوصیات ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، اقلیمی، زمین شناسی و کاربری اراضی تقسیم‌بندی کرد. در این مطالعه تعداد ۲۳ متغیر مستقل به عنوان متغیرهای موثر در تولید و انتقال رسوب از مرجع [۱۳] انتخاب شد.

این متغیرها شامل مساحت، طول حوزه، نسبت پستی و بلندی، ارتفاع متوسط، حداکثر ارتفاع، حداقل ارتفاع، نسبت اختلاف ارتفاع، شیب متوسط حوزه، شیب متوسط رودخانه اصلی، طول رودخانه اصلی، طول کل رودخانه‌ها، شیب متوسط رودخانه‌ها، تراکم زهکشی، میانگین دمای سالانه، متوسط بارندگی سالانه، درصد اراضی حساس به فرسایش از لحاظ خصوصیات لیتولوژیکی در حوزه، درصد اراضی زراعی (آبی و دیم) در حوزه، دبی متوسط جریان در سال، دبی متوسط جریان در ماه‌های پرباران، حداکثر دبی لحظه‌ای با دوره بازگشت ۲ سال، حداکثر دبی روزانه با دوره بازگشت ۲ سال، متوسط رواناب در سال، متوسط رواناب در ماه‌های پرباران، می‌شوند.

موقعیت کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری (مکان خروجی آبراهه از حوزه)، آبراهه‌های فرعی و اصلی در حوزه و مرز هر یک از حوزه‌های بسته شده بر روی ایستگاه هیدرومتری در نقشه‌های رقمی شده با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شده از سازمان آب استان خراسان رضوی موجود می‌باشند. مرز بسته شده، موقعیت ایستگاه هیدرومتری و آبراهه‌های حوزه طاغون در شکل ۳ ارائه شده است. پس از تعیین متغیرهای مستقل حوزه‌های مذکور، با هدف تعیین

$$\tilde{Y} = (p_0, C_{0,L}, C_{0,R}) + (p_1, C_{1,L}, C_{1,R})x_1 + \dots + (p_n, C_{n,L}, C_{n,R})x_n \quad (4)$$

بر اساس اصل کمترین مربعات بهترین ضرایب رگرسیون از حل همزمان معادلات ذیل با کمینه کردن مجموع مربعات خطا (تابع F) حاصل می‌شوند. به طوریکه مشتق تابع F نسبت به مرکز، پهنای سمت چپ و پهنای سمت راست هر یک از ضرایب محاسبه شده و طبق رابطه ذیل برابر با صفر قرار داده می‌شوند.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial P_n} = 0 \dots \dots \dots \frac{\partial F}{\partial P_1} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial P_0} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial C_{n,R}} = 0 \dots \dots \dots \frac{\partial F}{\partial C_{1,R}} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial C_{0,R}} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial C_{n,L}} = 0 \dots \dots \dots \frac{\partial F}{\partial C_{1,L}} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial C_{0,L}} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

در صورتی که n متغیر مستقل وجود داشته باشد از حل همزمان معادلات فوق، سه دستگاه 1+n معادله و 1+n مجهول بدست خواهد آمد که از حل آنها متغیرهای مجهول محاسبه می‌شوند. نتایج حاصل از حل معادلات (5) در حالت h=1 صادق می‌باشد و در صورت لحاظ [0,1]، h می‌بایست مقدار h را در پهنای هر یک از ضرایب فازی بدست آمده، ضرب نمود. به منظور تبدیل متغیر خروجی فازی محاسبه شده به عدد کلاسیک روابط متعددی پیشنهاد شده است که می‌توان به روش‌های اولین (یا آخرین) بیشینه، مرکز سطح، روش میانگین وزنی، روش میانه بیشینه و ... اشاره نمود. در این تحقیق به منظور غیرفازی سازی متغیر خروجی مدل از روش آخرین بیشینه استفاده شد.

### ارزیابی مدل

با توجه به تاثیر تغییرات h بر نتایج مدل، در ابتدا قبل از ارزیابی عملکرد مدل، حساسیت نتایج مدل نسبت به تغییرات h بر پایه دو شاخص ابهام کل<sup>4</sup> (Z) و اطمینان<sup>5</sup> (IC) تحلیل شد. در ادامه عملکرد مدل توسط آماره راندمان مدل<sup>6</sup> (ME) مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص‌های ابهام کل، اطمینان و کفایت مدل به ترتیب به صورت ذیل تعریف می‌شوند [17].

$$Z = m(C_0^L + C_0^R) + \sum_{i=1}^n [(C_i^L + C_i^R) \sum_{j=1}^m x_{ij}] \quad (6)$$

$$IC = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^m (y_j - y_j^c)^2}{\sum_{i=1}^m (y_j - e_j^R)^2 + \sum_{i=1}^m (y_j - e_j^L)^2} \quad (7)$$

که در آن ضرایب  $\tilde{A}_0, \tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$  و متغیرهای مستقل (x) وابسته (Y) می‌توانند فازی و یا صریح باشند. در بیشتر مسایل طبیعت ورودی‌ها قطعی و خروجی‌ها فازی هستند و بیشتر تحقیقات روی این حالت متمرکز شده‌اند [34].

هدف از تحلیل رگرسیون فازی تعیین ضرایب فازی است به گونه‌ای که بر اساس داده‌های مشاهده شده معادله مزبور بهترین برازش را با مقادیر مشاهداتی داشته باشد. جهت برازش یک معادله رگرسیون خطی فازی دو دسته مدل وجود دارند که شامل مدل‌های رگرسیون امکانی<sup>1</sup>، مدل‌های رگرسیون کمترین مربعات فازی<sup>2</sup> شوند. مدل‌های رگرسیون امکانی بهترین معادله رگرسیون را با کمینه کردن میزان فازی بودن به دست می‌آورند در صورتی که مدل‌های رگرسیون مجموع مربعات با کمینه کردن مجموع خطا این کار را انجام می‌دهند. مزیت مدل امکانی سادگی در برنامه‌ریزی و محاسبات می‌باشد در صورتی که مزیت روش کمترین مربعات برتری در پیش‌بینی است [15]. بدین منظور روش اخیر به عنوان روش برتر در برآورد بار رسوبی با استفاده از متغیرهای حوزه در نظر گرفته شد.

### رگرسیون فازی کمترین مربعات مبتنی بر حساب فازی وزنی

این روش توسط چنگ و ایوب [7] ارائه گردید که در آن ضرایب و متغیر خروجی به صورت اعداد فازی و به شکل مثلث غیر متقارن  $\tilde{Y}_j = \{y, e^L, e^R\}$  و  $\tilde{A}_i = \{P, C^L, C^R\}$  در آن  $P, C^L, C^R, e^L, e^R$  به ترتیب مرکز، پهنای سمت چپ و پهنای سمت راست ضریب و متغیر خروجی رگرسیون فازی می‌باشند. در این روش از عملگر ویژه‌ای تحت عنوان عملگرهای حساب وزنی و مبتنی بر یک برش h (فاکتور قطعیت<sup>3</sup>) از دو عدد فازی مثلثی نامتقارن استفاده می‌گردد. برش h میزان فازی بودن عدد را نشان می‌دهد و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. با افزایش برش h بر میزان فازی بودن عدد افزوده می‌شود. این عملگرها برای محاسبه مجموع مربعات خطاهای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی متغیرهای فازی استفاده می‌گردد، به طوری که در یک معادله رگرسیون فازی با تعداد مشاهدات برابر با m، برای هر متغیر مستقل  $X_{ij}$  یک متغیر وابسته مشاهداتی ( $Y_j^{obs}$ ) و یک متغیر وابسته محاسباتی ( $Y_j$ ) وجود دارد. با استفاده از عملگرهای حساب فازی وزنی، مجموع خطاهای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$F = \sum_{j=1}^m (\tilde{Y}_j - Y_j^{obs})^2 \quad (3)$$

که در آن:

4- Total Vagueness  
5- Index of Confidence  
6- Model Efficiency

1- Possibilistic Regression  
2- Least Square Regression  
3- Certain Factor

جدول ۳- نتایج به دست آمده از رگرسیون چند متغیره در برآورد بار رسوب معلق

ردیف	مجموعه ایستگاه‌ها	چگونگی استفاده از اطلاعات	مدل‌های پیشنهادی	ضریب تعیین	سطح معنی داری
۱	تمامی حوزه‌ها	کل سال	$SY = -6.895 - 1.56R_r + 3H_{mean} + 0.92Q_{dm^2} + 0.31Ac - 0.59S_{mr}$	۰/۹۰۳	۰/۰۰۰۱
۲	تمامی حوزه‌ها	ماه‌های پرباران	$SY = -7.101 - 1.57R_r + 3.1H_{mean} + 0.8Q_{dm^2} + 0.33Ac - 0.7S_{mr}$	۰/۹۱	۰/۰۰۰۱
۳	۱۷ حوزه بزرگ	کل سال	$SY = 0.52 - 0.693S_{tr} + 3L_{tr} + 0.268A_c + 0.311H_a - 0.461Q_{ym}$	۰/۷۹	۰/۰۰۰۲
۴	۱۷ حوزه بزرگ	ماه‌های پرباران	$SY = 16.926 - 2.232S_c + 0.766S_{mr} + 0.825L_{tr} + 5.993P + 0.651Q_{dm^2}$	۰/۸۸	۰/۰۰۰۱
۵	۱۲ حوزه کوچک	کل سال	$SY = 21.397 - 1.664H_{mean} - 2.425S_c - Q_{ym} - 3.91P + 1.16Q_{dm^2}$	۰/۸۷	۰/۰۰۰۱
۶	۱۲ حوزه کوچک	ماه‌های پرباران	$SY = -5.94 + 1.475S_c - 0.9798L_{tr} - 2.204R_r - 0.6963Q_{mm} - 1.379Q_{dm^2}$	۰/۹	۰/۰۰۰۱

$A_c$  درصد اراضی زراعی،  $S_{mr}$  شیب رودخانه اصلی،  $H_{mean}$  ارتفاع متوسط (m)،  $S_{tr}$  شیب رودخانه‌ها،  $Q_{dm^2}$  ماکزیمم دبی روزانه با دوره بازگشت ۲ سال ( $m^3/s$ )،  $P$  بارندگی متوسط (mm)،  $Q_{ym}$  متوسط دبی جریان در سال  $R_r$ ،  $m^3/s$  نسبت اختلاف ارتفاع (m/m)،  $S_c$  شیب متوسط حوزه،  $L_{tr}$  طول حوزه (m)،  $L_{tr}$  طول تمام رودخانه‌ها،  $H_a$  اختلاف ارتفاع مطلق،  $HI$  نسبت پستی و بلندی،  $Q_{mm}$  متوسط دبی جریان در ماه‌های پرباران،  $R_{ym}$  متوسط رواناب سالانه (mm)،  $SY$  بار رسوبی کل (year/Ton)

ایستگاه چشمه علی واقع بر رودخانه خرو محاسبه شد. به طور مشابه بیشترین (۴۳/۲۶ میلیون تن) و کمترین (۱۱۸۲۸ تن) مقدار بار رسوبی در ماه‌های پرباران برای ایستگاه‌های پل خاتون و چشمه علی بدست آمد. متوسط رسوب کلیه ۲۹ حوزه مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

$$ME = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m (y_j - \hat{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y}_j)^2} \quad (8)$$

#### بررسی همبستگی بین متغیرها

به منظور تعیین متغیرهای موثر در تولید بار رسوب حوزه، ابتدا ضریب همبستگی بین کلیه جفت متغیرهای مربوط به ۲۹ زیرحوزه در حالت با استفاده از نرم‌افزار MINITAB بدست آمد (جدول ۲). بررسی ماتریس همبستگی بین پارامترهای مختلف حوزه نشان داد که هیچکدام از پارامترهای حوزه به تنهایی قادر به شرح کلیه تغییرات مشاهده شده در بار رسوبی نیستند [۲]. از اینرو به منظور تعیین متغیرهای موثر، از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شد.

#### تهیه مدل رگرسیون کلاسیک

در مواقعی که یک متغیر به تنهایی قادر به تشریح بخش اعظمی از تغییرات بار رسوب در سطح حوزه نیست، رگرسیون چند متغیره بر اساس ترکیبی از سایر متغیرهای موثر ساخته می‌شود. در این تحقیق با توجه به عدم نرمال بودن اکثر متغیرهای مستقل و وابسته از کلیه داده‌ها لگاریتم گرفته شد و سپس عملیات مدل‌سازی انجام

شاخص  $Z$  بین صفر تا بینهایت متغیر می‌باشد. افزایش این شاخص نشان‌دهنده افزایش ابهام در نتایج مدل است. IC نشان‌دهنده کارایی و اعتبار نتایج مدل می‌باشد و مقدار آن بین صفر و یک متغیر است. هرچه مقدار شاخص به عدد یک نزدیکتر باشد اعتماد به نتایج افزایش می‌یابد. مقدار  $ME$  از ۱ تا منفی بینهایت تغییر می‌کند و نشان‌دهنده تغییرات اولیه محاسبه شده توسط مدل می‌باشد. هرچه مقدار  $ME$  به ۱ نزدیکتر باشد مدل دارای دقت و کفایت بیشتری است.

#### نتایج و بحث

##### بررسی رسوب در حوزه‌های آبریز منتخب

متوسط رسوب معلق کلیه ایستگاه‌ها با تلفیق نتایج منحنی سنجه، دبی روزانه و ضریب اصلاحی فرگوسن در دو حالت متوسط سالانه و متوسط ماه‌های پرباران محاسبه شد. در شرایط کل سال بیشترین مقدار بار رسوبی، ۶۷/۹۵ میلیون تن در سال در ایستگاه پل خاتون واقع بر رودخانه کشف رود و کمترین مقدار ۱۱۵۳ تن در سال در

جدول ۴- ضرایب بدست آمده به کمک رگرسیون کمترین مربعات فازی

مرکز ضرایب حاصل از رگرسیون فازی (اعداد داخل پرانتز مقدار کشیدگی سمت راست و چپ می‌باشند)						چگونگی استفاده از اطلاعات	مجموعه ایستگاه‌ها	ردیف
$\tilde{A}_5$	$\tilde{A}_4$	$\tilde{A}_3$	$\tilde{A}_2$	$\tilde{A}_1$	$\tilde{A}_0$			
$S_{mr}$	$A_c$	$Q_{dm^2}$	$H_{mean}$	$Rr$		کل سال	تمامی حوزه‌ها	۱
-۰/۵۹	۰/۳۱	۰/۹۲	۳	-۱/۵۶	-۶/۸۹			
(۰/۴۵, ۰/۰۳)	(۱/۸, ۰/۴۷)	(۰, ۰/۰۹)	(۱/۵, ۰/۶۸)	(۰/۳۸, ۱/۳۹)	(۰, ۰)			
$S_{mr}$	$A_c$	$Q_{dm^2}$	$H_{mean}$	$Rr$		ماه‌های پرباران	تمامی حوزه‌ها	۲
-۰/۷۵	۰/۳۳	۰/۸	۳/۱	-۱/۵۷	-۷/۱			
(۰/۲, ۰)	(۱/۹, ۰/۵۷)	(۰/۷, ۰/۱۴)	(۱/۷, ۰/۷۹)	(۱/۷۶, ۰/۳۹)	(۰, ۰)			
$Q_{ym}$	$Ha$	$Ac$	$L_{lr}$	$S_{rr}$		کل سال	۱۷ حوزه بزرگ	۳
۰/۴۶	۰/۳۱	۰/۲۶	۱	-۰/۶۹	۰/۵۲			
(۰, ۰)	(۰, ۹, ۰, ۳)	(۰, ۰)	(۰, ۰)	(۰, ۰)	(۰, ۰)			
$Q_{dm^2}$	$P$	$L_{lr}$	$S_{mr}$	$Sc$		ماه‌های پرباران	۱۷ حوزه بزرگ	۴
۰/۶۵	-۵/۹۸	۰/۸۲	۰/۷۶	-۲/۲۳	۱۶/۹۲			
(۰/۲, ۰)	(۰, ۰, ۳۶)	(۰, ۴, ۰)	(۰, ۹۹, ۰)	(۰, ۰, ۰, ۷)	(۰, ۰)			
$Q_{dm^2}$	$P$	$Q_{ym}$	$Sc$	$H_{mean}$		کل سال	۱۲ حوزه کوچک	۵
۱/۱۶	-۳/۹۱	-۱	-۲/۴۲	۱/۶۶	۲۱/۳۹			
(۱/۹۵, ۰/۲۷)	(۰, ۰)	(۰/۲, ۰/۰۹)	(۰, ۰, ۱۲)	(۰, ۰)	(۰, ۰)			
$Q_{dm^2}$	$Q_{mm}$	$Rr$	$L_{lr}$	$Sc$		ماه‌های پرباران	۱۲ حوزه کوچک	۶
۱/۳۸	-۰/۶۷	-۲/۲	-۰/۹۸	۱/۴۷	۵/۹۴			
(۰, ۰/۲۶)	(۰, ۰)	(۰, ۰)	(۰/۲, ۰/۰۳)	(۰, ۰/۳۱)	(۱, ۰/۴۷)			

واریانس بار رسوب حوزه در ماه‌های پرباران را حول میانگین نشان می‌دهند. با تقسیم حوزه‌ها به ۱۲ زیرحوزه کوچک متغیرهای شیب رودخانه اصلی، ارتفاع متوسط، متوسط بارندگی سالانه، حداکثر دبی روزانه با دوره بازگشت ۲ و متوسط دبی جریان، متغیرهای موثر در تولید و انتقال رسوب سالانه حوزه با ضریب تبیین ۰/۸۷ می‌باشند. همچنین متغیرهای نسبت اختلاف ارتفاع، طول تمام رودخانه‌ها، حداکثر دبی روزانه با دوره بازگشت ۲ سال، متوسط دبی جریان در ماه‌های پرباران و شیب متوسط حوزه با ضریب تبیین ۰/۹۰۴ متغیرهای موثر در تولید و انتقال رسوب ۱۲ زیرحوزه کوچک در ماه‌های پرباران شناخته شدند. نگاه کلی به متغیرهای بدست آمده نشان می‌دهند که در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی نقش عمده‌ای در فرآیندهای تولید و انتقال رسوب ایفا می‌کنند که با مطالعات انجام گرفته در این زمینه توسط

شد [۲۸، ۱۳ و ۲۸]. جدول ۳ نتایج حاصل از برازش ۶ تابع برآورد رسوب با استفاده از مدل رگرسیونی چند متغیره کلاسیک را نشان می‌دهد. مدل رگرسیونی به دست آمده ۹۰/۳ و ۹۱ درصد تغییرات بار رسوبی را به ترتیب در کل سال و ماه‌های پرباران سال در حالتی که ۲۹ زیرحوزه مورد مطالعه در نظر گرفته شد، شرح داد. در هر دو حالت متغیرهای نسبت اختلاف ارتفاع، حداکثر دبی روزانه با دوره بازگشت ۲ سال، ارتفاع متوسط، شیب متوسط و درصد اراضی زراعی موثرترین متغیرها شناخته شدند. در حالت ۱۷ زیرحوزه بزرگ متغیرهای شیب رودخانه‌ها، طول تمام رودخانه‌ها، درصد اراضی زراعی، متوسط دبی جریان در سال و اختلاف ارتفاع مطلق ۷۹ درصد تغییرات بار رسوب در کل سال و حداکثر دبی روزانه با دوره بازگشت ۲ سال، متوسط بارندگی سالانه، طول تمام رودخانه‌ها، شیب رودخانه اصلی و شیب کلیه رودخانه‌ها ۸۸ درصد

جدول ۵- مقایسه نتایج رگرسیون فازی در ۶ حالت متفاوت

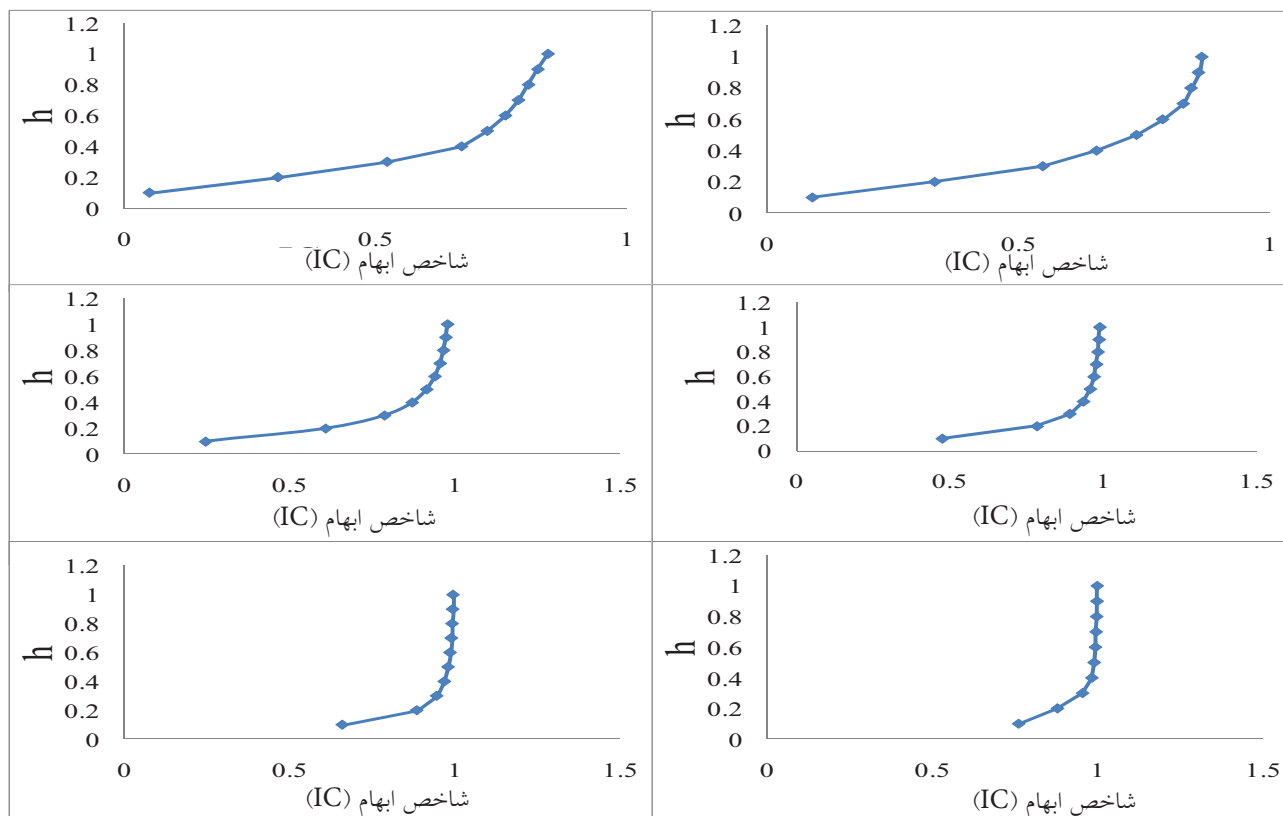
آماره	کل سال	ماه‌های پر باران	کل سال	ماه‌های پر باران	کل سال	ماه‌های پر باران
	تمامی حوزه‌ها	تمامی حوزه‌ها	۱۷ حوزه بزرگ	۱۷ حوزه بزرگ	۱۲ حوزه کوچک	۱۲ حوزه کوچک
ME	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۷۷	۰/۸۷۵	۰/۸۲	۰/۹

با در نظر گرفتن متغیرهای مستقل بدست آمده از روابط رگرسیون کلاسیک، به منظور برآورد بار رسوبی حوزه استفاده شد. به گونه‌ای که ابتدا رسوب سالیانه هر یک از ۲۹ زیرحوزه مورد مطالعه به شکل اعداد مثالی غیرمتقارن، فازی شد و سپس ضرایب فازی مربوط به هر یک از ۶ حالت با استفاده از نرم‌افزار ۱۱ Lingo و MATLAB و با حل معادلات (۳) و (۵) به ازای  $h$  برابر با ۱ بدست آمد (جدول ۴). بایستی به این نکته اشاره کرد که پهنای ضرایب نمی‌تواند مقادیر منفی اختیار کنند و این نکته به صورت یک شرط در برنامه‌نویسی می‌بایست لحاظ شود. همانگونه که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود ضرایب محاسبه شده به صورت اعداد فازی می‌باشند که در برگزیده مرکز و پهنای یا میزان عدم قطعیت (اعداد داخل پرانتز) هستند. این ابهام می‌تواند به صورت متقارن یا نامتقارن محاسبه شود. ضرایبی که پهنای آنها صفر می‌باشد، نشان‌دهنده عدم وجود ابهام یا عدم قطعیت در برآورد آن ضریب است و عدد فازی بدست آمده برابر با عدد

عرب خدری و زرگر [۴]، ورستراتن و پوسون [۲۹] و رسپرتو و همکاران [۲۱] مطابقت داشته و با نتایج علی و بایر [۲] مبتنی بر معرفی ضخامت لایه یخی در ارتفاعات بالادست حوزه ایندوس در شمال پاکستان به عنوان متغیر موثر در تولید و انتقال بار رسوبی حوزه مغایرت دارد. تفاوت بین متغیرهای موثر در هر مطالعه نشان دهنده پتانسیل متفاوت حوزه‌ها در تولید و انتقال رسوب است. لذا معادلات ارائه شده تنها برای شرایط منطقه‌ی مورد مطالعه موثر بوده و برای هر منطقه دیگر در صورت وجود اطلاعات لازم نیاز به ارائه رابطه‌ای جدید است.

### رگرسیون فازی

با توجه به نتایج بدست آمده از رگرسیون آماری، متغیرهای مستقل و رابطه خطی بین آنها در هر ۶ حالت تعیین و تأیید شد. در ادامه از رگرسیون خطی کمترین مربعات فازی مبتنی بر حساب وزنی و



شکل ۴- تغییرات شاخص ابهام کل در مقابل تغییرات  $h$  (بالا به پایین: به ترتیب ۱۷، ۲۹ و ۱۲ زیرحوزه، راست به چپ: ماه‌های پر باران و کل سال)



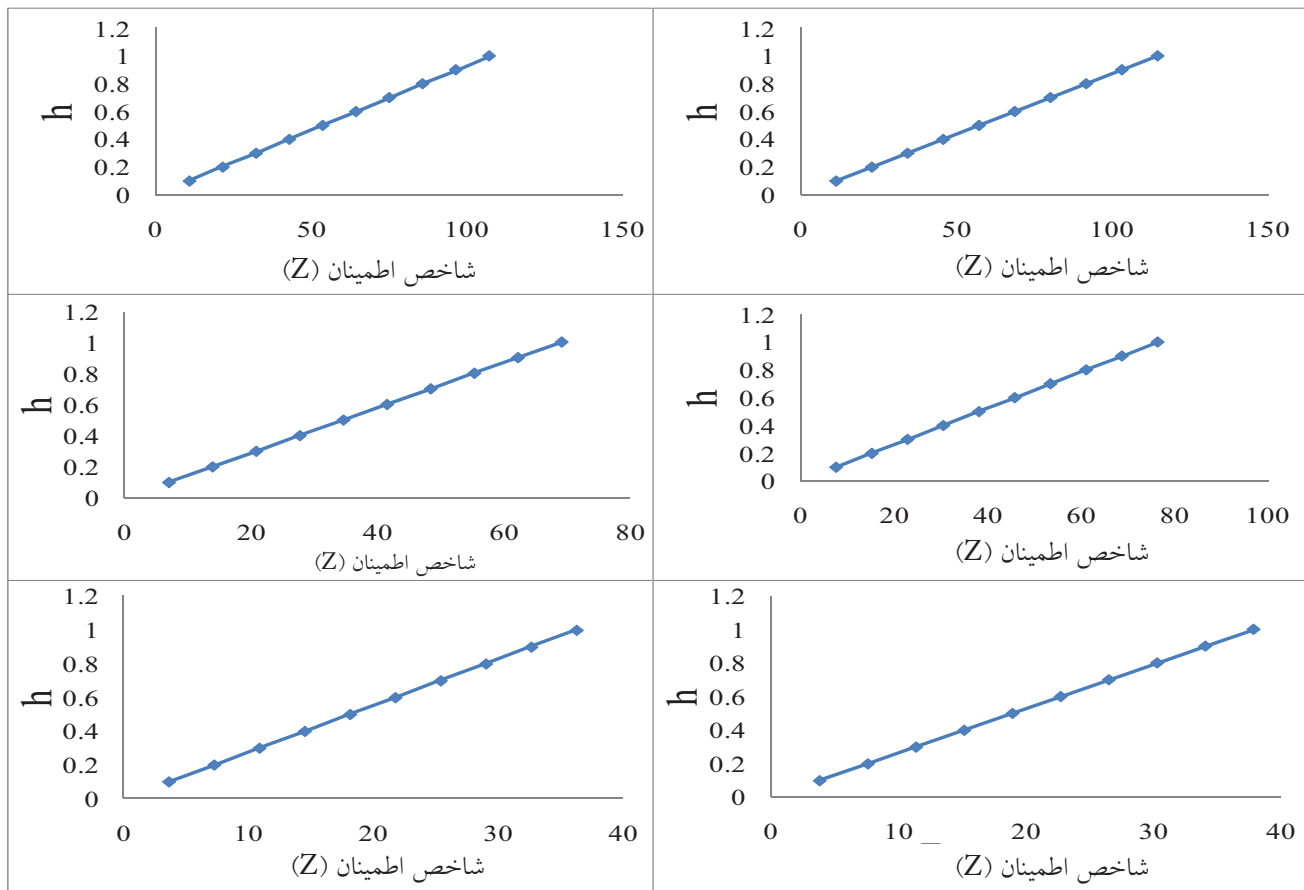
قطعی است. به طور مثال در تابع برآورد رسوب مربوط به کل سال ۱۲ زیرحوزه کوچک، ضرایب  $A_1$  و  $A_2$  اعداد قطعی و بدون عدم قطعیت هستند.

### آنالیز حساسیت و ارزیابی

در مدل رگرسیون با ضرایب فازی، پهنای سمت راست و چپ به اندازه‌ای است که کلیه نقاطی را که فرآیند مدل‌سازی مبتنی بر آنها بوده است را دربر گیرد. این میزان کشیدگی تابعی از مقدار فاکتور قطعیت است بطوری که تغییر آن باعث تغییر در مقدار سطح اطمینان (IC) و ابهام (Z) در نتایج مدل می‌شود. لذا قبل از ارزیابی مدل، حساسیت نتایج مدل رگرسیون فازی خطی نسبت به تغییرات  $h$  بر پایه دو شاخص ابهام و اطمینان مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور تغییرات  $h$  در بازه صفر و یک در مقابل IC و Z رسم شد (شکل‌های ۴ و ۵). نتایج نشان داد که افزایش مقدار  $h$  منجر به افزایش سطح اطمینان مدل و در عین حال افزایش ابهام در مقادیر پیش‌بینی شده می‌شود. همانگونه که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود نسبت تغییرات Z به  $h$  خطی است در حالی که تغییرات سطح اطمینان در مقابل  $h$  سهمی بوده و در اکثر حالات با افزایش  $h$

از عدد  $0.4$  تغییرات شاخص اطمینان بسیار اندک می‌شود. لذا سطح اعتبار  $h = 0.4$  به عنوان سطح اعتبار معقول و قابل قبول انتخاب شد. در ادامه به منظور ارزیابی نتایج مدل، بار رسوبی محاسبه شده توسط هر یک از ۶ حالت و به ازای  $h = 0.4$  به روش آخرین ماکزیمم به یک عدد قطعی تبدیل شد و سپس آماره راندمان مدل (معادله ۸) محاسبه شد. نتایج در جدول (۵) ارائه شده است. ارزیابی نتایج با معیار راندمان کاربرد مبین افزایش دقت در برآورد رسوب طی ماه‌های پرباران سال می‌باشد.

بطوری که در شرایطی که کلیه ۲۹ زیرحوزه آبخیز لحاظ شود راندمان کاربرد از  $0.85$  در حالت برآورد رسوب سالانه به  $0.88$  در حالت ماه‌های پرباران افزایش می‌یابد. همچنین با تقسیم حوزه‌ها به ۱۷ زیرحوزه بزرگ و ۱۲ زیرحوزه کوچک راندمان کاربرد به ترتیب از ۷۷ درصد به ۸۷ درصد و از ۸۲ درصد تا ۹۰ درصد افزایش یافت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با توجه به وقوع حداکثر بارش در طی فصول ابتدایی و انتهای سال و تمرکز تولید رسوب معلق در این دوران، تعیین رابطه بین رسوب و خصوصیات حوزه آبریز در طی ماه‌های پرباران می‌تواند نتایج دقیقتری را نسبت به سایر حالات ارائه دهد. ارزیابی نتایج با معیار مربوطه مبین افزایش دقت در برآورد



شکل ۵- تغییرات شاخص سطح اطمینان در مقابل تغییرات  $h$  (بالا به پایین: به ترتیب ۲۹، ۱۷ و ۱۲ زیرحوزه، راست به چپ: ماه‌های پرباران و کل سال)

جدول ۱- مقادیر a و b در معادله توانی منحنی سنجه رسوب به همراه متوسط رسوب محاسبه شده در طی دوره آماری

ردیف	نام ایستگاه	b	a	ضریب فرگوسن	ضریب تیبین	متوسط بار رسوب (تن در سال)	b	a	ضریب فرگوسن	ضریب تیبین	متوسط بار رسوب (تن در سال)	ماه‌های پرباران
۱	تبارک آباد	۲/۲۴	۶۴/۳۵	۲/۴۰	۰/۸۲	۹۲۳۳۸۴/۹	۲/۲۴	۵/۳۸	۲/۵۳	۰/۸۷	۹۴۹۹۵۰/۳	
۲	هی هی	۱/۸۷	۳۱/۴۹	۳/۰۴	۰/۶۸	۳۲۸۸۵۵/۹	۱/۸۷	۲۳/۵۰	۳/۱۳	۰/۶۸	۵۳۶۳۶۳/۸	
۳	بارزو	۲/۴۴	۴۰/۵۲	۱/۵۹	۰/۸۲	۵۷۹۰۱۰/۸	۲/۳۶	۴۳/۲۸	۱/۹۲	۰/۷۵	۳۹۵۰۷۰/۹	
۴	رضا آباد	۱/۷۵	۱۸۰/۵۵	۳/۵۳	۰/۷۶	۶۷۴۴۴۸۵	۱/۷۸	۱۵۱/۰۱	۲/۳۷	۰/۸۱	۳۵۶۴۱۵۵	
۵	بابا امان	۲/۳۸	۱۵/۶۳	۲/۳۲	۰/۷۱	۱۴۳۳۱۹/۳	۲/۳۴	۱۴/۶۵	۲/۶۱	۰/۶۸	۱۱۲۳۷۹/۴	
۶	قتلیش	۲/۲۹	۷۹/۹۳	۱/۷۳	۰/۸۳	۱۰۴۶۲۶۵	۲/۱۴	۱۰۹/۱۲	۱/۴۳	۰/۸۸	۳۲۴۵۳۲/۱	
۷	دربند	۱/۶۷	۴۲/۰۰	۱/۹۶	۰/۷۴	۷۰۲۵۲/۷۶	۱/۸۵	۳۶/۸۰	۱/۹۷	۰/۷۳	۴۹۴۵۲/۱۱	
۸	آغمزار	۲/۰۰	۲۹/۵۱	۲/۷۹	۰/۷۳	۶۹۸۲۰۰۹	۲/۱۳	۲۲/۴۱	۲/۰۰	۰/۷۸	۵۲۷۰۸۶۶	
۹	روح آباد	۱۸/۲	۷۶/۶۳۱	۲/۲۷	۰/۸۹	۱۶۲۴۸۹۳۰	۱۰/۲	۷۳/۹۰	۲/۱۰	۰/۸۵	۲۵۴۷۴۸۷۸	
۱۰	اریه	۱/۹۲	۲۹/۳۰	۲/۴۹	۰/۷۳	۴۵۶۷۵/۹۸	۱/۹۸	۲۸/۴۱	۲/۵۰	۰/۶۷	۴۶۸۹۳/۴۶	
۱۱	حسین آباد	۱/۹۴	۷۸/۱۹۶	۲/۳۴	۰/۸۷	۵۹۲۶۰۰۸	۱/۸۸	۲۷/۲۳	۲/۲۷	۰/۹۷	۵۴۵۲۴۷۸	
۱۲	بیدواز	۲/۰۰	۷۸/۱۶	۲/۲۶	۰/۸۶	۲۸۳۸۱۰/۹	۲/۰۱	۷۸/۳۶	۲/۰۷	۰/۸۷	۲۳۰۴۳۵/۴	
۱۳	عراقی	۲/۰۷	۵۰/۴۲	۲/۱۳	۰/۷۲	۳۵۸۶۳/۶	۲/۱۴	۵۶/۲۱	۲/۱۱	۰/۶۹	۳۸۸۷۲/۴۳	
۱۴	چشمه علی	۱/۸۳	۷۷/۱۵	۲/۷۴	۰/۷۱	۱۱۵۹۳/۶۶	۱/۸۰	۷۱/۱۷	۳/۴۸	۰/۷	۱۱۸۲۸/۴۸	
۱۵	دو رود	۱/۴۷	۶۰/۲۶	۱/۸۹	۰/۷۱	۱۴۷۳۳/۴۸	۱/۴۱	۱۹/۳۶	۲/۱۰	۰/۷۳	۱۴۸۰۸/۴۳	
۱۶	طاغون	۱/۶۵	۸۱/۳۵	۳/۶۷	۰/۷۶	۵۶۸۳۲/۲	۱/۵۷	۸۴/۳۷	۳/۳۰	۰/۶۵	۵۱۳۲۸/۰۵	
۱۷	کلاته رحمان	۲/۰۲	۱۴۰/۶۰	۲/۶۷	۰/۷۷	۱۹۲۱۶۴/۶	۱/۹۲	۱۵۳/۱	۲/۸۱	۰/۷۳	۱۴۷۹۱۱/۶	
۱۸	رادکان	۱/۱۵	۶۵/۹۱	۳/۲۱	۰/۶۹	۲۶۳۷۴/۹۹	۱/۱۲	۵۷/۴۱	۲/۶۰	۰/۶۸	۱۸۰۵۷/۹۱	
۱۹	فریزی	۱/۹۱	۸/۶۱	۳/۶۳	۰/۷۱	۱۳۲۶۵۵/۴	۱/۷۹	۱۰/۸۳	۳/۸۹	۰/۶۲	۱۲۴۰۳۴/۱	
۲۰	حصار	۱/۷۰	۴۲/۹۰	۲/۴۶	۰/۷۶	۳۸۷۹۳/۱۵	۱/۷۳	۴۲/۱۴	۲/۷۸	۰/۷۳	۴۱۱۵۱/۵۳	
۲۱	گلستان	۱/۹۶	۷۱/۴۹	۲/۱۶	۰/۸۳	۵۲۴۴۱/۸۱	۱/۹۸	۷۲/۱۱	۱/۹۴	۰/۸۱	۵۳۷۰۰/۷۳	
۲۲	کرتیان	۱/۹۷	۲۸/۹۷	۲/۴۶	۰/۷۵	۷۳۶۷۶/۶۶	۱/۹۷	۲۹/۳۱	۲/۴۶	۰/۷۵	۷۲۸۴۶/۵۳	
۲۳	اولنگ اسدی	۱/۹۶	۱۱۰/۲۳	۲/۵۴	۰/۸۷	۲۰۵۵۱۳۷	۱/۹۵	۱۲۱/۸	۲/۲۳	۰/۸۹	۱۸۶۷۵۵۶	
۲۴	آق دربند	۱/۸۶	۲۳۷/۱۹	۲/۴۵	۰/۸۵	۱۰۱۶۳۷۰۱	۱/۸۵	۲۳۹/۶	۲/۳۹	۰/۸۵	۹۶۲۶۴۱۴	
۲۵	پل خاتون	۲/۰۵	۱۷۸/۸۵	۲/۳۷	۰/۸۶	۴۶۹۵۴۱۱۶	۲/۰۶	۱۷۸/۹	۲/۲۰	۰/۸۶	۴۳۲۶۶۹۴۲	
۲۶	چهچه	۱/۷۶	۱۷۱/۰۵	۲/۰۵	۰/۷۶	۱۴۹۱۷۹/۸	۱/۹۹	۱۷۸/۲۳	۱/۹۴	۰/۷۹	۲۸۵۰۳۴/۸	
۲۷	لایبین سو	۱/۰۱۶	۲۱/۵۰	۲/۵۳	۰/۷۵	۶۸۲۰۳/۱۲	۱/۰۶	۵۶/۳۵	۱/۸۴	۰/۶۶	۳۷۰۴۳/۷۱	
۲۸	حاتم قلعه	۲/۶۳	۱۱/۵۷	۲/۶۰	۰/۶۶	۸۵۲۱۵۵/۸	۲/۶۹	۱۱/۶۶	۱/۶۵	۰/۷۰	۵۸۹۴۷۵/۹	
۲۹	محمد تقی	۳/۹۶	۶/۷۸	۱/۸۴	۰/۶۶	۱۹۷۸۲۸۹	۳/۷۸	۸/۰۱	۱/۸۰	۰/۶۳	۱۲۹۲۱۱۵	

جدول ۲- ماتریس همبستگی بین پارامترهای مستقل و رسوب حوزه

تعداد حوزه‌ها	نوع متغیر	دبی حداکثر لحظه‌ای با دوره بازگشت ۲ سال	دبی حداکثر روزانه با دوره بازگشت ۲ سال	دبی متوسط جریان	بارندگی	دما	ارتفاع حداقل	ارتفاع حداکثر	ارتفاع متوسط	نسبت پستی و بلندی	نسبت اختلاف ارتفاع
۲۹	متوسط بار رسوبی در سال	۰/۸۲	** ۰/۸۷	** ۰/۵۹	** -۰/۵۴	-۰/۱۳	** -۰/۱۲	* -۰/۲۳	** -۰/۵۶	* -۰/۵۸	** -۰/۹۲
	متوسط بار رسوبی در ماه‌های پرباران	** ۰/۸۵	** ۰/۷۸	** ۰/۶	** -۰/۵۴	-۰/۰۷	** -۰/۳۲	* -۰/۱۷۸	** -۰/۵۵	* -۰/۵۷	** -۰/۹
۱۷	متوسط بار رسوبی در سال	** ۰/۶۸۸	* ۰/۶۱۳	۰/۳۰۳	-۰/۱۹۶	۰/۴	-۰/۴۰۲	۰/۲۸۸	-۰/۳۲۶	-۰/۱۲۵	** -۰/۷۴۴
	متوسط بار رسوبی در ماه‌های پرباران	** ۰/۵۶۵	* ۰/۷۶	۰/۴۵	-۰/۳۲۸	۰/۳۲۵	-۰/۳۳۲	۰/۲۸۲	-۰/۱۴۲	-۰/۲۲۹	** -۰/۸۱
۱۲	متوسط بار رسوبی در سال	۰/۲۵۱	* ۰/۶۱۶	۰/۳۱	-۰/۳۲۹	۰/۰۷	۰/۱۲۹	-۰/۱۵۳	-۰/۳۶	۰/۵۴	-۰/۵۱
	متوسط بار رسوبی در ماه‌های پرباران	۰/۳۹	* ۰/۶۱	۰/۲۵	-۰/۲۷	۰/۱۷۲	۰/۲۴۷	-۰/۱۷۶	-۰/۲۵۲	-۰/۴۷۴	-۰/۵۲۵
۲۹	متوسط بار رسوبی در سال	۰/۲۸	** ۰/۹	** ۰/۸	** ۰/۸۹	** -۰/۷۷۶	** -۰/۸۰۳	-۰/۷۸	** ۰/۸۹	** -۰/۷۱	* ۰/۳۴
	متوسط بار رسوبی در ماه‌های پرباران	۰/۲۶	** ۰/۸۹	** ۰/۸	** ۰/۸۸	** -۰/۷۸	** -۰/۸۲	-۰/۸	** ۰/۸۸	** -۰/۶۳	* ۰/۳۷
۱۷	متوسط بار رسوبی در سال	-۰/۳۰۳	* ۰/۷۰۳	** ۰/۷۳۲	** ۰/۷۴۴	* -۰/۴۴۳	** -۰/۴۷۷	** -۰/۴۳۷	** ۰/۷۲۴	-۰/۳۲	۰/۵۴
	متوسط بار رسوبی در ماه‌های پرباران	-۰/۳۲۸	* ۰/۷۹	** ۰/۸۵	** ۰/۸۱	* -۰/۶۶۸	** -۰/۷۲	** -۰/۵۰۳	** ۰/۷۷	-۰/۲۲۴	۰/۶۰۲
۱۲	متوسط بار رسوبی در سال	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۲۴۶	۰/۴۷	* ۰/۵۷	۰/۲۶۱	۰/۳۷	۰/۱۲	۰/۵۱۲
	متوسط بار رسوبی در ماه‌های پرباران	۰/۲۹	۰/۲۴۲	۰/۳۲	۰/۵۲	۰/۴۳	* ۰/۵۵۷	۰/۳۷۷	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۴۷

(\*\* در سطح یک درصد و\* در سطح پنج درصد معنی‌دار)

در حوزه در فصل بهار تولید می‌شود. نتایج خواجه‌وند خراعی [۱۲] در حوزه آبخیز کسلیان و پیرسون و همکاران [۲۰] در آمریکا نیز نشان داد که بیشترین مقدار رسوب در حوزه در طی ماه‌های بهار و زمستان بدلیل مصادف شدن با بارندگی‌های سنگین و ذوب برف، تولید می‌شود. لذا با توجه به وقوع حداکثر بارش در طی فصول

رسوب طی ماه‌های پرباران سال نیز می‌باشد. نتایج مذکور با یافته‌های بسیاری از محققان همچون اهنرت [۱] که نشان داد قسمت اعظم رسوب تحویلی در سال در طول وقایع سیلابی رخ می‌دهد، مطابقت دارد. همچنین صادقی و همکاران [۲۲] در طی مطالعات خود در حوزه آبخیز هراز به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار رسوب

مستقل علاوه بر متغیر وابسته و بررسی تاثیر آنها در برآورد رسوب حوزه می‌تواند از چالش‌های تحقیقاتی پیش‌روی کارشناسان باشد. تهیه معادله‌ای بر اساس تعدادی از خصوصیات سهل‌الوصول در حوزه‌های فاقد آمار به منظور برآورد بار رسوبی ابزار ارزشمندی در انجام اقدامات مدیریتی است به طوری که به راحتی مناطق مستعد فرسایش و تولید رسوب قابل شناخت خواهند بود. لذا انجام تحقیقات مشابه در سایر حوزه‌های آبخیز کشور به منظور جمع‌بندی نهایی در تهیه مدل‌های رگرسیونی از پیشنهادها منتج از بررسی موجود می‌باشد.

### منابع

- 1- Ahnert, F. 1970. Functional relationship between denudation, relief and uplift in large mid-latitude grainage basins. American Journal of Science. 288: 243-263.
- 2- Ali, K. F. and De Boer, D. H. 2008. Factors controlling specific sediment yield in the upper Indus River basin, northern Pakistan. Hydrological Processes. 22: 3102-3114.
- 3- Arabkhedri, M., Hakimkhani, S. and Varvani, J. 2004. The validity of extrapolation methods in estimation of annual mean suspended sediment yield (17 Hydrometric stations). Journal of Agricultural Science and Natural Resources. 11(3): 123-131.
- 4- Arabkhedri, M. Zargar, A. 1995. Determination of sediment yield in the north part of Alborz using regression models. Journal of Search and construction. 1:22-28.
- 5- Bardossy, A., Bogardi, I. and Dukstein, L. 1990. Fuzzy regression in hydrology. Water Resources Research. 26: 1497-1508.
- 6- Celmins, A. 1987. Least squares model fitting to fuzzy vector data. Fuzzy Sets and Systems. 22: 260-269.
- 7- Chang, Y. O. and Ayyub, B. M. 2001. Fuzzy regression methods-a comparative assessment. Fuzzy sets and systems. 119: 187-203.
- 8- De Vente, J. and Poesen, J. 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. Earth-Science Reviews. 71: 95-125.
- 9- Hakimkhani, S. and Arabkhedri, M. 2006. A

ابتدایی و انتهایی سال و تمرکز تولید رسوب معلق در این دوران تعیین رابطه بین رسوب و خصوصیات حوزه آبریز در طی ماه‌های پرباران می‌تواند نتایج دقیقتری را نسبت به سایر حالات ارائه دهد. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که تقسیم حوزه‌ها تنها بر اساس مشخصه مساحت به دو دسته زیرحوزه‌های بزرگ و کوچک، لزوماً منجر به افزایش دقت مدل در برآورد بار رسوبی حوزه نمی‌شود، که با یافته‌های محققینی منجمله رسپرتو و همکاران [۲۱] تائید گردیده است. علی و بویر [۲] و ترامبلی و همکاران [۲۶] به منظور افزایش دقت مدل خود، زیرحوزه‌ها را بر اساس مجموعه‌ای از خصوصیات فیزیکی، هیدرولوژیکی و ... با استفاده از خوشه‌بندی به دسته‌های همگن تقسیم کردند که منجر به افزایش دقت مدل در برآورد بار رسوب در هر دسته شد.

### نتیجه‌گیری

در برآورد بار رسوب حوزه، تعیین متغیرهای موثر یکی از مراحل مهم در مدلسازی می‌باشد. بدین منظور موثرترین متغیرها از میان مجموعه‌ای از متغیرهای کاربری اراضی، زمین‌شناسی، اقلیم، هیدرولوژی و فیزیولوژیکی در تولید بار رسوب در مقیاس حوزه توسط رگرسیون کلاسیک چند متغیره در ۶ حالت مختلف تعیین شد. تنوع متغیرهای موثر در هر ۶ حالت نشان‌دهنده تغییرپذیری و پیچیدگی فرآیندهای کنترل‌کننده فرسایش و تولید بار رسوب در مقیاس حوزه می‌باشد. در ادامه با توجه به وجود عدم قطعیت در داده‌های مشاهده شده و نیز ابهام در شناخت فرآیندهای فرسایش و بار رسوب در مقیاس حوزه، این ساختار به صورت یک تابع خطی فازی متشکل از پارامترها و خروجی با توابع عضویت نامتقارن فازی، در نظر گرفته شد.

نتایج نشان داد مدل‌های رگرسیونی فازی تهیه شده در این مقاله، امکان برآورد رسوب در بخش‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری در سطح حوزه را با اعتبار مناسب فراهم می‌کنند. با این حال مدل‌های مذکور قادر به بیان کل تغییرات بار رسوب مشاهده شده در سطح حوزه نیستند. این محدودیت می‌تواند ناشی از عدم لحاظ کردن سایر متغیرهای موثر در فرآیند تولید و انتقال بار رسوب در سطح حوزه باشد. علاوه بر این، عدم وجود رابطه‌ای مشخص بین تغییرات زمانی بار رسوبی و کاربری اراضی نیز از دلایل مهم در کاهش دقت مدل‌های مذکور می‌باشد. بطوری که در مطالعات حاضر کاربری اراضی حوزه‌های مورد مطالعه در طی دوره آماری ثابت در نظر گرفته شده است.

همچنین با توجه به افزایش توانایی مدل در برآورد رسوب طی ماه‌های پرباران نیاز است که تغییرات رسوب در بازه‌های زمانی کوتاه مدت نیز مانند ماهانه و فصلی مورد بررسی قرار گیرد. بکارگیری مدل‌هایی بر اساس سیستم استنتاج فازی و سایر روش‌های رگرسیونی فازی مانند روش امکانی، تحلیل بازه‌ای و ... با استفاده از دیگر توابع عضویت فازی مانند نمایی، گوسی و ... و فازی‌سازی متغیرهای

and fuzzy regression. *Soil and water*. 19: 65-82.

19- Perrin, C., Michel, C. and Andre'assian, V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance. *Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments*. *Journal of Hydrology*. 242: 275– 301.

20- Pierson, F.B., C.W. Slaughter and Zane, K.C. 2001. Long-term stream discharge and suspended-sediment database, Reynolds Creek Experimental Watershed, Idaho, United States, *Water Resources Research*, 37 (11): 2857-2861.

21- Restrepo, J. D., Kjerfve, B., Hermelin, M., and Restrepo, J. C. 2006. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*. 316: 213–232.

22- Sadeghi, S.H.R. Aghabeigi, A. S. Yasrebi, B. Vafakhah, M. and Esmaili Saravi, A. 2005. Temporal and spatial variation of suspended sediment yield of important subwatersheds in Haraz basin. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources of Khazar* .3(3): 15-29.

23- Sadeghi, S. H. R., Najafi, D. A. and Vafakhah, M. 2007. Regional analysis of suspended sediment estimation in Esfahan and Sirjan watersheds. *Iran-Water Resources Research*. 2 (3):51-65.

24- Savic, D. and Pedrycz, W. 1991. Evaluation of fuzzy regression models. *Fuzzy Sets and Systems*. 39: 51-63.

25- Shayannejad, M., Sadatinejad, S. J. and Fahmi, H. 2008. Determination of potential evapotranspiration using the fuzzy regression method. *Iran-Water Resources Research*. 3 (3): 9-19.

26- Trambly, Y., Ouarda, T., St-Hilaire, A. and Poulin, J. 2010. Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics. *Journal of Hydrology* 380: 305–317.

27- Varvani, J. Feiznia, S. Mahdavi, M. and Arabkhedri, M. 2009. Analysis of regional

regression analysis of suspended sediment yield as against hydromorphological characteristics in Uromia lake basin. *Iranian Journal of Agricultural Science*. 37 (2): 223-231.

10- Haregeweyn, N., Poesen, J., Nyssen, J., Govers, G., Verstraeten, G., de Vente, J., Deckers, J., Moeyersons, J. and Haile, M. 2008. Sediment yield variability in Northern Ethiopia: A quantitative analysis of its controlling factors. *Catena*.75:65–76.

11- Heshmaty, A. and Kandel, A. 1985. Fuzzy linear regression and its applications to forecasting in uncertain environments. *Fuzzy Sets and Systems*.15: 159-191.

12- Khajvand, M. 2000. Evaluation of Hydrologic Parameters with Emphasis on Sediment Problem in Kasilian Watershed. *Proceedings of the International Congress of Erosion and Sediment*. Khoramabad. Iran. 321-325.

13- Khodashenas, S. R., Nazerian, H., Ghahraman, B., Davari, K. 2005. Multivariate regression models or sediment yield prediction in north of Khorasan. *Soil and water science*. 22 (2):150-164.

14- Kim, B. R. and Bishu, R. 1998. Evaluation of fuzzy linear regression models by comparing membership functions. *Fuzzy Sets and Systems*. 100: 343-352.

15- Koorehpazan Dezfali, A. 2008. Principles of fuzzy set theory and its application in the modeling of water engineering problems. *Jahad Daneshgahi Publications*. Amir Kabir Unit. pp 262.

16- Merritt, W.S., Letcher, R.A. and Jakeman, A.J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software*.18 (8–9): 761–799.

17- Mohammadi, J. and Taheri, S. M. 2004. Pedomodels fitting with fuzzy least squares regression. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*. 1 (2): 45-61.

18- Parviz, I., Kholghi, m. and Fakherifard, A. 2009. Forecasting annual stream flow using autoregressive integrated moving average model

- climate. *Geomorphology* 40: 123–144.
- 31- Walling, D.E. and Webb, B.W., 1996. Erosion global overview. In: Walling, and sediment yield: a and Sediment D.E., Webb, B.W. (Eds.), *Erosion Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS Publication. 236: 3 –19.
- 32-Zabelta, A., Martinez, M., Uriarte, J. and Antiguada, I. 2007. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena*. 71: 179-190
- 33-Zadeh, L.A. 1965. «Fuzzy sets», *Information and Control*. 8: 338-353.
- 34- Ziayi, m. 2009. Consideration of fuzzy regression by using fuzzy programming. Msc Dissertation. Department of Applied Maths. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. pp 110
- suspended sediment in Gorganroud drainage basin using regression equation. *Iranian Journal of Natural Resources*. 55 (1):35-47.
- 28- Verbist, B., Poesen, J., Van Noordwijk, M., Agus, F. and Deckers, Widiyanto, Suprayogo, D., J. 2010. Factors affecting soil loss at plot scale and sediment yield at catchment scale in a tropical volcanic agroforestry landscape. *Catena*. 80: 34–46.
- 29- Verstraeten, G., Poesen, J., De Vente, J. and Sediment yield variability Koninckx, X. 2003. in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology* 50 (4): 327– 348.
- 30- Verstraeten, G. and Poesen, J. 2001. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid