

## مدل‌سازی بار رسوب زیر حوضه دو حوضه آبخیز زاینده‌رود علیا با استفاده از روش

### رگرسیون کمترین مربعات فازی

امید مبارکی\* - کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد  
علیرضا داودیان - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد  
مهدی پژوهش - استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد  
عبدالکریم ویسی - دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۸/۱۰      تأیید نهایی: ۱۳۹۲/۱/۲۵

### چکیده

برآورد تولید رسوب حوضه‌های آبخیز، یک امر مهم در طراحی سازه‌های آبی، مسائل زیست‌محیطی و کیفیت آب رودخانه‌ها است. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای برآورد میزان رسوب، روش‌های تجربی است. با توجه به عدم قطعیت ارتباط بین تولید رسوب و عوامل مؤثر بر آن، روابط تجربی ارائه‌شده در این زمینه کارایی چندانی در این امر ندارند. این پژوهش به مدل‌سازی بار رسوب یکی از زیر حوضه‌های (زیر حوضه ۲) حوضه آبخیز زاینده‌رود علیا پرداخته است. روش آن از نوع توصیفی - تحلیلی مبتنی بر روش‌های آماری، میدانی و کتابخانه‌ای است؛ بدین گونه که ابتدا منطقه به واحدهای همگن ژئومورفولوژی بخش شد، سپس نمونه‌برداری خاک از عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری انجام گرفت و عوامل فیزیکی و شیمیایی خاک در هر واحد همگن، تعیین و مدل‌سازی بار رسوب با استفاده از مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی انجام گرفت. نتایج نشان داد که رسوب برآورد شده کل زیر حوضه با روش رگرسیون کمترین مربعات فازی سالانه ۲/۶۲۵ تن در هکتار است که واحد همگن ۱۰ حساس‌ترین واحد همگن به فرسایش و تولید رسوب است. همچنین نسبت نیکویی برازش بین رسوب برآوردی مدل مذکور و رسوب مشاهده‌ای ۰/۷۳ است.

کلیدواژه‌ها: فرسایش و رسوب، روش رگرسیون کمترین مربعات فازی، تنگ گزی و واحد همگن.

## مقدمه

پدیده فرسایش و رسوب یکی از معضلاتی است که موجب شست‌وشوی عناصر غذایی خاک‌های سطحی، کاهش حاصلخیزی و قدرت تولید اراضی فرسایش یافته، بروز سیلاب‌های مخرب، کاهش عمر مفید سدها و بناهای دیگر بر اثر رسوب‌گذاری، رها شدن اراضی کشاورزی به دلیل غیر اقتصادی شدن آنها در اثر فرسایش شدید، افزایش مهاجرت روستاییان و توسعه حاشیه‌نشینی شهرها و به دنبال آن، بروز مشکلات اجتماعی خواهد شد (Tangestani, 2006). برآورد و پیش‌بینی بار رسوب حوضه آبخیز، در طیف گسترده‌ای از مسائلی مانند مهندسی رودخانه، طراحی سدها، انتقال آلودگی، تأثیرات زیست‌محیطی، آبخیزداری و بسیاری از بخش‌های منابع آب کاربرد دارد. به طور معمول، برآورد میزان رسوب از راه اندازه‌گیری مستقیم یا روابط ارائه شده در روش‌های تجربی تعیین می‌شود. اگرچه اندازه‌گیری مستقیم قابل اعتمادتر است؛ اما وقت‌گیر و پرهزینه است. روش‌های تجربی ارائه‌شده نیز خاص شرایط کشورهای ارائه‌دهنده مدل بوده و در کشور ما بدون واسنجی مدل، نتایج مطلوبی را به دست نمی‌دهند. با توجه به وجود این مشکلات، باید به فکر بهره‌گیری از روش‌هایی بود که توانایی مدل کردن پیچیدگی‌های بین میزان تولید رسوب و عوامل مؤثر بر آن را داشته باشند. در این راستا روش‌های رگرسیون فازی، به طور گسترده‌ای در مدل کردن روابط موجود در طبیعت بهره‌گیری شده‌اند. این روش‌ها می‌توانند به وسیله داده‌های مشاهده‌ای، یک ارتباط منطقی بین ورودی و خروجی ایجاد کنند. دوگان و همکاران (۲۰۰۵) کارایی منطق فازی با سیستم استنتاج سوگنو را در برآورد رسوب معلق رودخانه لاورساکار نسبت به شبکه عصبی بررسی کردند. نتایج این بررسی نشان داد منطق فازی، به طور معناداری بهتر از شبکه عصبی و منحنی سنج رسوب عمل کرده است. کیسی و همکاران (۲۰۰۶) با بهره‌گیری از منطق فازی، میزان رسوب معلق را در ایستگاه روبردابلانس آمریکا برآورد کردند. در این بررسی مدل‌های فازی با توابع عضویت مثلثی و هشت تابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی‌ها، به منظور برآورد رسوب معلق توسعه داده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد همه مدل‌های فازی مورد بررسی، در شرایط یکسان عملکرد بهتری در برآورد بار معلق رودخانه نسبت به منحنی سنج رسوب دارند.

با پیشرفت مطالعات در زمینه فرسایش، برای بررسی جدا شدن و انتقال ذرات خاک در اثر بارندگی یا رواناب، فرآیندهای تأثیرگذار بر فرسایش از یکدیگر تفکیک شده‌اند (فاستر و همکاران، ۱۹۸۱؛ زانگ و همکاران، ۱۹۹۸؛ شریدان و همکاران، ۲۰۰۰؛ والامیس و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیو و همکاران ۲۰۰۶) در مدل‌های فرآیندی فرسایش، افرادی مانند رز و همکاران، ۱۹۸۳؛ رز، ۱۹۸۵؛ هیرسین و رز، ۱۹۹۱؛ رز و همکاران، ۲۰۰۶ و وپ نیرینگ و همکاران، ۱۹۸۹؛ فاستر و همکاران، ۱۹۹۵؛ لافلن و همکاران، ۱۹۹۷؛ یو و رزول، ۲۰۰۱؛ زانگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پیری و همکاران، ۲۰۰۷ مطالعاتی را انجام داده‌اند. فرسایش در حضور باران، به ترتیب با عناوین فرسایش ناشی از باران و فرسایش شیاری بیان می‌شود (ماس و گرین، ۱۹۸۳؛ کینل، ۱۹۹۳).

با توجه به وقت‌گیر و پرهزینه بودن روش‌های مستقیم و واسنجی نشدن مدل‌های تجربی برآورد رسوب، در این پژوهش تلاش شد با بهره‌گیری از روش‌های فازی (رگرسیون کمترین مربعات فازی) مدل‌سازی بار رسوب زیرحوضه ۲ حوضه آبخیز زاینده‌رود علیا برآورد شود و نتایج این مدل با رسوب مشاهده‌ای مقایسه شود.

## مواد و روش‌ها

### گستره مورد مطالعه

منطقه تنگ‌گزی یکی از حوضه‌های آبخیز رودخانه زاینده‌رود است که در طول جغرافیای ۵۰ درجه و صفر دقیقه و ۵۷ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۳۷ دقیقه و ۵۵ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه و ۵ ثانیه و ۳۲ درجه و ۴۲ دقیقه و ۳۳ ثانیه شمالی واقع شده است. میانگین ارتفاع این منطقه از سطح دریا ۲۱۰۰ متر است. این حوضه در جنوب غرب شهرکرد، مرکز استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد و دارای نه زیرحوضه است. این مطالعه روی زیرحوضه شماره ۲ با مساحت ۱۱۷/۲۹ کیلومترمربع که طی یافته‌های پژوهش و همکاران (۱۳۹۰)، دارای بیشترین مقدار رسوب‌دهی و فرسایش بوده، انجام شده است. رسوب خارج شده از این حوضه توسط رودخانه زاینده‌رود به مخزن سد زاینده‌رود انتقال می‌یابد. شکل شماره ۱ موقعیت پهنه مطالعاتی را روی نقشه نشان می‌دهد.

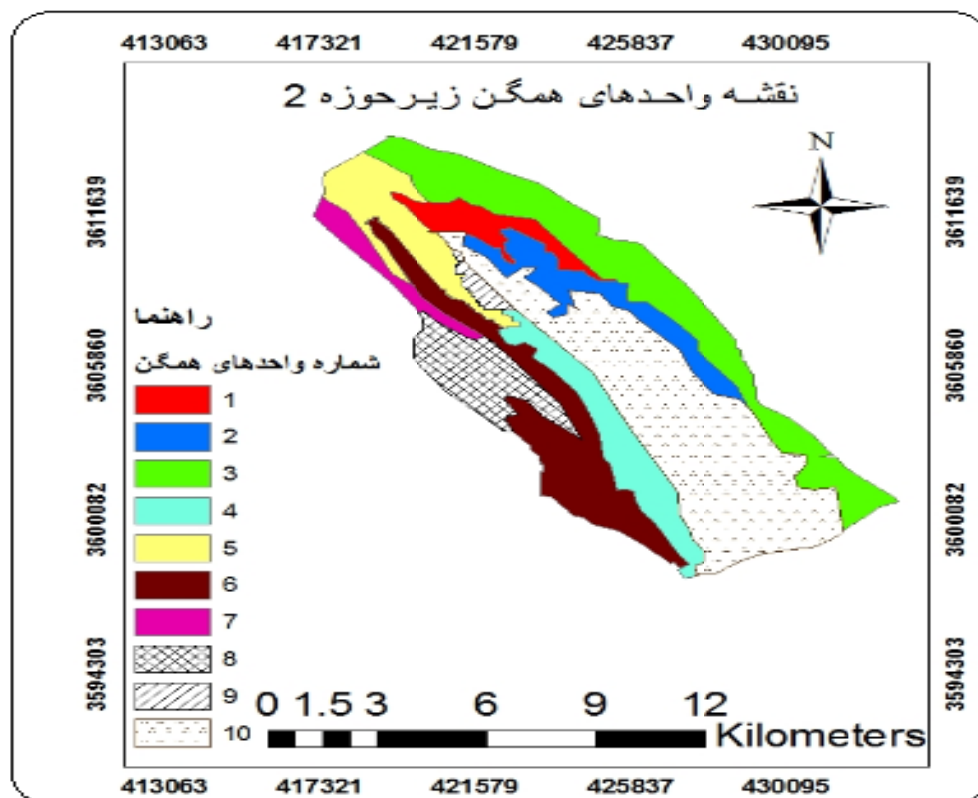


شکل ۱. موقعیت گستره مورد مطالعه (زیرحوضه‌ای که حاشیه آن خط پُرننگ است)

### واحدهای همگن

واحد همگن به محدوده‌ای از اراضی گفته می‌شود که ویژگی‌های نسبتاً یکسانی دارند. در پژوهش پیش رو نیز، نقشه واحدهای همگن با همپوشانی کردن نقشه‌های زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، واحدهای فیزیوگرافی زمین (شامل ارتفاع،

درصد شیب و جهت شیب) و خصوصیت‌های ژئومورفولوژیکی خاک در نرم‌افزار Arc Gis 9.3 تهیه شد. بر این اساس در زیرحوضه شماره ۲ تعداد ۱۰ واحد همگن تفکیک شدند (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه واحدهای همگن زیرحوضه‌ی مورد مطالعه (زیرحوضه ۲)

### نمونه‌برداری خاک

برای نمونه‌برداری خاک، ابتدا با توجه به نقشه‌های توپوگرافی و جهات شیب، تعداد ۳۷ نقطه در واحدهای همگن مشخص شد و از آنها نمونه‌برداری انجام گرفت. نمونه‌ها را بعد از خشک‌شدن در هوا، از الکت ۲ میلی‌متری عبور داده و عواملی که در زیر شرح داده می‌شود، در آزمایشگاه تعیین شدند.

ویژگی‌های فیزیکی شامل:

- ۱- بافت خاک به روش هیدرومتری؛
- ۲- سنگ و سنگ‌ریزه به روش حجمی؛
- ۳- وزن مخصوص ظاهری به روش حجمی.

ویژگی‌های شیمیایی

- ۱- قلیائیت به وسیله دستگاه pH متر کورینگ ۲۲۰؛
- ۲- هدایت الکتریکی به وسیله هدایت سنج مدل METEROHM؛

۳- کربنات کلسیم معادل به‌روش خنثی کردن کربنات‌های خاک با اسیدکلریدریک و تیتراسیون برگشتی؛

۴- کربن آلی به‌روش اکسیداسیون تر.

با توجه به اینکه در هر واحد همگن چند نمونه خاک برداشت شد، پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مذکور مربوط به هر نمونه خاک، به دلیل یکسان نبودن مساحت واحدهای همگن، از موارد نام‌برده میانگین وزنی به‌عمل آمد.

### روش رگرسیون فازی

در رگرسیون خطی کلاسیک، به‌ازای هر دسته از متغیرهای ورودی، یک مقدار مشخص برای متغیر خروجی محاسبه می‌شود؛ در حالی که در رگرسیون فازی، بازه‌ای از مقادیر ممکن برای متغیر خروجی برآورد می‌شود. توزیع این مقادیر به‌صورت تابع عضویت مشخص می‌شود. رگرسیون فازی ابزار مفیدی برای محققان در زمینه برآورد ارتباط بین متغیرهایی که اطلاعات مبهم و برداشت فازی دارند، با استفاده از مقادیر فازی به‌دست می‌دهد. هدف از رگرسیون فازی، مدل‌بندی پدیده‌های فازی و مبهم با استفاده از توابع فازی است (شایان‌نژاد، ۱۳۸۶).

به‌طور کلی برای برازش یک معادله رگرسیون خطی فازی سه دسته مدل وجود دارد:

۱- مدل‌های رگرسیون امکانی فازی؛

۲- مدل‌های رگرسیون کمترین مربعات؛

۳- مدل‌های رگرسیون مبتنی بر تحلیل بازه‌ای.

در این پژوهش از روش کمترین مربعات استفاده شده است. در این روش، حالتی مورد مطالعه قرار گرفته است که مشاهدات مربوط به متغیر وابسته (رسوب) نادقیق (فازی) و مشاهدات مربوط به متغیرهای مستقل (درصد کربنات کلسیم، درصد ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری و درصد سیلت) دقیق (غیر فازی) هستند. آن‌گاه بر پایه‌ی این نوع داده‌ها و در نظر گرفتن ۲۰ درصد خطای اندازه‌گیری متغیر وابسته (رسوب)، یک مدل با ضرایب فازی به داده‌ها برازش داده می‌شود. به بیان دقیق‌تر، هدف آن است که بر پایه‌ی مشاهداتی به‌صورت رابطه شماره ۱، یک مدل بهینه با ضرایب فازی به صورت رابطه شماره ۲، برای توصیف و تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی بر پایه‌ی آن به‌دست آوریم (طاهری، ۱۳۸۷).

رابطه ۱)  $(\tilde{y}_i, x_{i1}, \dots, x_{in})$  ,  $i = 1, \dots, m$

که در آن  $x_{ij}$  اعداد حقیقی و  $\tilde{y}_i$  اعداد فازی هستند.

رابطه ۲)  $\tilde{Y} = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_1 + \dots + \tilde{A}_n x_n$

که در آن  $\tilde{A}_i$  ها اعداد فازی هستند.

### طریقه محاسبه عوامل مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی

ابتدا ماتریس مشاهدات (داده‌ها) به‌شکل زیر محاسبه می‌شود (ماتریس  $X$ ).

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۳}$$

سپس دترمینان ماتریس  $X$  را در خود ماتریس  $X$  ضرب کرده و ماتریس  $A$  محاسبه می‌شود.

$$A = X^T X = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_{i0} x_{i0} & \sum_{i=1}^m x_{i1} x_{i0} & \dots & \sum_{i=1}^m x_{in} x_{i0} \\ \sum_{i=1}^m x_{i0} x_{i1} & \sum_{i=1}^m x_{i1} x_{i1} & \dots & \sum_{i=1}^m x_{in} x_{i1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_{i0} x_{in} & \sum_{i=1}^m x_{i1} x_{in} & \dots & \sum_{i=1}^m x_{in} x_{in} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه ۴}$$

بردار  $y$  (مقادیر رسوب مشاهده‌ای) و  $s$  (پهنای فازی) طبق روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$\bar{y} = \left( \sum_{i=1}^m y_i x_{i0}, \sum_{i=1}^m y_i x_{i1}, \dots, \sum_{i=1}^m y_i x_{in} \right)^T \quad \text{رابطه ۵}$$

$$s = \left( \sum_{i=1}^m s_i x_{i0}, \sum_{i=1}^m s_i x_{i1}, \dots, \sum_{i=1}^m s_i x_{in} \right)^T$$

پهنای فازی  $0.2$  یا  $20$  درصد مقادیر رسوب مشاهده‌ای در نظر گرفته شده است. دستگاه‌های  $a$  و  $\sigma$  از رابطه شماره ۶ محاسبه می‌شوند.

$$a = [a_0, a_1, a_2, a_3, a_4]^T = A^{-1} * y \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\sigma = [\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4]^T = A^{-1} * s$$

$A^{-1}$ : معکوس ماتریس  $A$ ؛

$y$ : بردار  $y$ ؛

$s$ : پهنای فازی هستند.

آن‌گاه مدل بهینه برازشی بر داده‌ها براساس رابطه ۲ و دستگاه‌های  $a$  و  $\sigma$  به صورت زیر است.

$$\tilde{Y} = [a_0, \sigma_0]^T + [a_1, \sigma_1]^T x_1 + [a_2, \sigma_2]^T x_2 + \dots + [a_n, \sigma_n]^T x_n \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه  $\tilde{Y}$ : رسوب برآوردی مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی و  $x_i$ ها عوامل فیزیکی و شیمیایی مورد

استفاده در برازش مدل هستند.

### انتخاب عوامل مورد استفاده برای برازش مدل

برای برازش مدل با استفاده از رگرسیون کمترین مربعات فازی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شرح داده شده خاک را در مقابل مقدار رسوب مشاهده‌ای واحدهای همگن، با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 مورد آزمون تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) قرار داده و ویژگی‌هایی که ضرایب کمتر و اثر مشترک با مقدار رسوب داشتند، حذف شدند. در نهایت از بین عوامل ذکر شده کربنات کلسیم، درصد ماده آلی، وزن مخصوص ظاهری و درصد سیلت ضرایب بالاتری داشتند و برای برازش مدل انتخاب شدند.

## یافته‌های پژوهش

مدل برازش داده شده بر اساس رابطه شماره ۷ به شکل زیر است.

$$\hat{Y} = (0.0139, 0.0028) - (0.0042, 0) \times x_1 + (0.1771, 0.354) \times x_2 + (0.9014, 0.1803) \times x_3 + (0.0628, 0.126) \times x_4 \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه

$\hat{Y}$ : تولید رسوب در هر واحد همگن (تن در هکتار در سال)؛

$x_1$ : درصد کربنات کلسیم معادل در هر واحد همگن؛

$x_2$ : درصد کربن آلی در هر واحد همگن؛

$x_3$ : وزن مخصوص ظاهری خاک در هر واحد همگن؛

$x_4$ : درصد سیلت در هر واحد همگن هستند (پارامترهای  $x_1, x_2, x_3$  و  $x_4$  به صورت وزنی هستند).

همان طور که مشاهده می‌شود در این مدل، درصد کربنات کلسیم معادل (درصد آهک) با مقدار تولید رسوب رابطه

عکس و دیگر عوامل رابطه مستقیم دارند.

## نیکویی برازش

همان طور که از نام آن بر می‌آید، آزمون نیکویی برازش برای تعیین اینکه آیا یک توزیع خاص به خوبی برازش داده شده است یا نه، به کار می‌رود. محاسبه نسبت نیکویی برازش همچنین کمک می‌کند تا توزیع‌های ثابت شده را برحسب آنکه چقدر خوب با داده‌ها برازش دارند، رتبه‌بندی شوند.

برای آزمودن روش فازی این پژوهش، از آزمون نیکویی برازش استفاده شده است. در این روش از نسبت اشتراک به اجتماع رسوب برآوردی به رسوب مشاهده‌ای (واقعی) استفاده می‌شود (رابطه ۹). هرچه نمودار رسوب فازی و نمودار رسوب مشاهده‌ای همپوشانی بیشتری داشته باشند، نشان‌دهنده دقت مدل فازی است. اگر این نسبت از ۰/۴۵ بیشتر باشد، بیانگر دقت خوب این مدل و هرچه این نسبت به یک نزدیکتر باشد، دقت مدل بالاتر است (پژوهش و همکاران، ۱۳۹۰).

$$SH = \frac{\int \sum_{i=1}^n A \cap B}{\int \sum_{i=1}^n A \cup B} \quad (\text{رابطه ۹})$$

SH: نسبت نیکویی برازش، A: رسوب واقعی و B: رسوب برآوردی از مدل فازی هستند.

## محاسبه تولید رسوب

تولید رسوب هر واحد همگن و در نهایت تولید رسوب کل زیر حوضه با توجه به مدل برازش داده شده بر داده‌ها (رابطه ۸) محاسبه و نتایج آن در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. همان گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، پارامترهای محاسبه شده در مدل‌های رگرسیون فازی، به صورت اعداد فازی هستند که دربرگیرنده مقدار مرکزی و همچنین درجه ابهام یا عدم قطعیت امکانی آنها هستند. بنابراین مقادیر ابهام نشان می‌دهد، رسوب برآوردی در هر واحد همگن بین یک دامنه قابل تغییر است که پهنای چپ ابهام، دربرگیرنده مقادیر کوچکتر رسوب و پهنای راست، ابهام منطبق با مقادیر

بزرگتر رسوب است. همان‌طور که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود، واحد همگن ۱۰ بیشترین مقدار تولید رسوب را داشته است (۰/۸۱۱ تن در هکتار در سال) که این امر ناشی از بالا بودن درصد سیلت و وزن مخصوص ظاهری است. بررسی نقشه زمین‌شناسی و بازدیدهای صحرائی به عمل آمده نشان داد که ۳۷ درصد مساحت این واحد را سازند گچساران به سن میوسن (متشکل از مارن‌های خاکستری با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ و آهک ماسه‌ای) و ۲۲/۸۴ درصد مساحت آن را سازند سروک (متشکل از آهک اوربی‌تولین‌دار و در بخش پایینی به‌طور محلی دارای رسوب‌های تبخیری) پوشانده شده است، براساس تقسیم‌بندی سنگ‌ها از نظر فرسایش (رفاهی، ۱۳۸۲) این دو گروه از سنگ‌ها در گروه فرسایشی خیلی زیاد قرار می‌گیرند. بنابراین حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش، به‌دلیل وجود سازندهای حساس به فرسایش ذکر شده، از دیگر دلایل تولید رسوب بالای این واحد همگن به‌شمار می‌آیند. همچنین واحد همگن شماره ۹ دارای کمترین مقدار تولید رسوب است (۰/۰۲۲ تن در هکتار در سال). پایین بودن مقدار ماده آلی و مقاومت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش، به‌دلیل وجود سازندهایی چون خانه کت و دالان، از دلایل تولید رسوب پایین این واحد هستند. این دو سازند به‌دلیل ترکیب سیلیس همراه با آهک، نسبت به فرسایش و تولید رسوب مقاوم هستند (احمدی، ۱۳۸۵).

رسوب برآوردی به‌دست‌آمده از مدل فازی در هر واحد همگن، به‌صورت وزنی محاسبه شد و مجموع رسوب وزنی ۱۰ واحد همگن، به‌عنوان رسوب تولیدی کل زیرحوضه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول شماره ۱ مشاهده می‌شود، رسوب برآورد شده کل زیرحوضه به‌وسیله مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی ۲/۶۲۵ تن در هکتار در سال است.

جدول ۱. برآورد تولید رسوب به‌وسیله مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی

واحد همگن	X1 *	X2	X3	X4	رسوب برآوردی مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی (ton/ha/year)	ابهام
۱	۱/۱۴۴	۰/۰۵۷	۰/۰۵	۰/۷۴۹	۰/۱۱۱	۰/۰۲۳
۲	۲/۴۸۱	۰/۱۲۹	۰/۰۷۵	۱/۱۹۶	۰/۱۷۹	۰/۰۳۵
۳	۷/۲۸۱	۰/۱۸	۰/۲۴	۴/۴۵۸	۰/۵۱۲	۰/۱۰۸
۴	۱/۳۴۲	۰/۱۶۸	۰/۰۸	۱/۶۲۹	۰/۲۱۸	۰/۰۴۳
۵	۲/۲۲۷	۰/۱۲	۰/۰۸۴	۱/۵۲۰	۰/۲۰۰	۰/۰۴۱
۶	۳/۵۰۹	۰/۲۱	۰/۱۳۶	۲/۸۷۴	۰/۳۳۹	۰/۰۷۱
۷	۰/۸۳۱	۰/۰۲۸	۰/۰۳۳	۰/۳۵۳	۰/۰۶۱	۰/۰۱۴
۸	۱/۸۳۹	۰/۰۹۸	۰/۰۷۹	۱/۳۴۹	۰/۱۸۲	۰/۰۳۷
۹	۰/۳	۰/۰۲۳	۰/۰۱۱	۰/۰۵۲	۰/۰۲۲	۰/۰۰۶
۱۰	۹/۶۶۱	۰/۵۲۵	۰/۳۱۲	۷/۴۳۱	۰/۸۱۱	۰/۱۷۱
کل زیرحوضه	-	-	-	-	۲/۶۲۵	۰/۵۵۲

### نیکویی برازش

نیکویی برازش بین رسوب مشاهده‌ای و رسوب برآوردی مدل فازی برای هر واحد همگن و برای کل زیرحوضه در

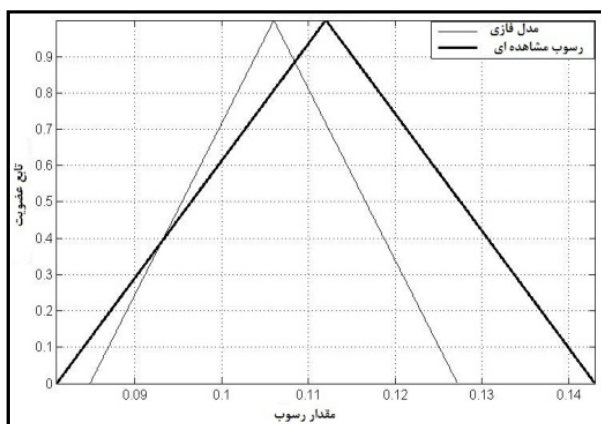


نرم‌افزار متلب انجام شد. از نسبت سطح اشتراک به اجتماع نمودارهای رسوب برآوردی مدل فازی و رسوب مشاهده‌ای، نسبت نیکویی برازش به دست آمد. این نسبت برای کل زیرحوضه  $0/73$  محاسبه شد. با توجه به یافته‌های پژوهش و همکاران (۱۳۹۰) و همچنین طاهری و ماشین‌چی (۱۳۸۷)، اگر این نسبت از  $0/45$  بیشتر باشد، دقت مدل برازشی مطلوب است. بنابراین دقت مدل برازشی بر داده‌ها در این پژوهش مطلوب است. در جدول شماره ۲، نسبت نیکویی برازش واحدهای همگن و در شکل شماره ۳، نمودار نیکویی برازش کل زیرحوضه و همچنین نمودار تابع عضویت چند واحد همگن برای نمونه آورده شده است. در نمودارهای نیکویی برازش، محور  $X$  مقدار رسوب و محور  $Y$  تابع عضویت را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نسبت نیکویی برازش در واحدهای همگن

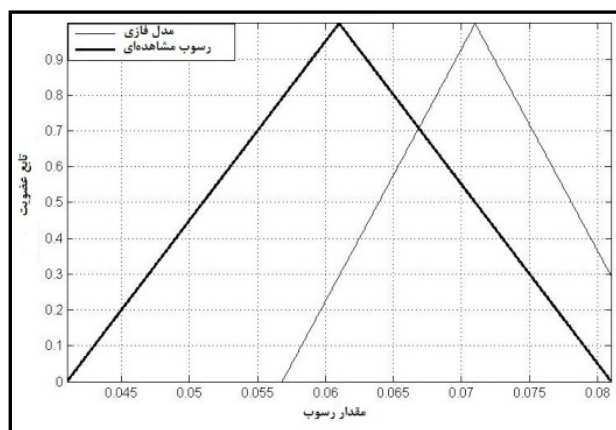
واحد‌های همگن	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	کل زیرحوضه
**	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۷۲	۰/۷	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۳۳	۰/۷۴	۲۴	۰/۷۷	

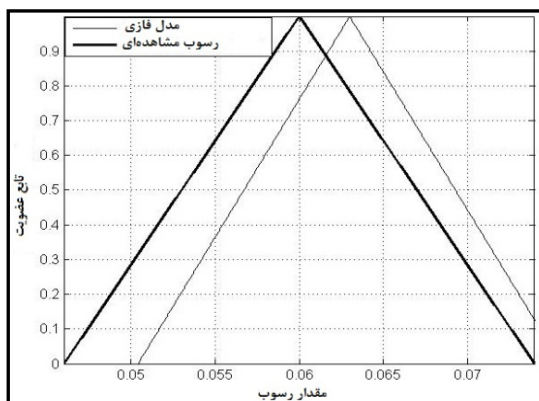
\*\*: نسبت نیکویی برازش



شکل ۳. نمودار تابع عضویت واحد همگن ۱

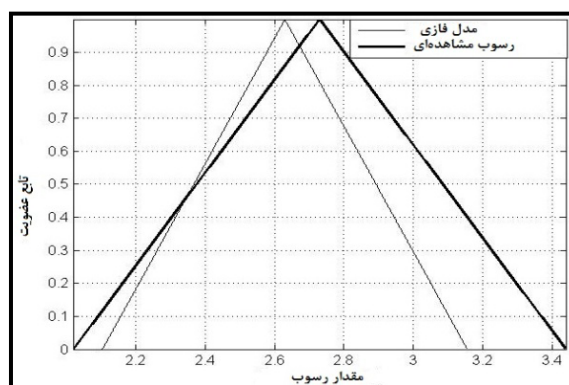
شکل ۴. نمودار تابع عضویت واحد همگن ۷





شکل ۵. نمودار تابع عضویت واحد همگن ۱۰

شکل ۶. نمودار تابع عضویت کل زیرحوضه



### مقایسه رسوب برآوردی مدل رگرسیون فازی و رسوب مشاهده

پژوهش و همکاران (۱۳۹۰) رسوب مشاهده‌ای را برای کل زیرحوضه سالانه ۲/۶۳ تن در هکتار اندازه‌گیری کرده‌اند. رسوب مشاهده‌ای هر واحد همگن به صورت وزنی محاسبه شد. نتایج مقایسه رسوب برآوردی مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی و رسوب مشاهده‌ای در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، درصد اختلاف رسوب مشاهده‌ای و رسوب برآوردی رگرسیون کمترین مربعات فازی ۰/۱۹ است (رسوب برآوردی مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی، ۰/۱۹ درصد کمتر از مقدار رسوب مشاهده‌ای است). نتایج این پژوهش با یافته‌های پژوهش و همکاران (۱۳۹۰) که نشان دادند مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی در مدل‌سازی بار رسوب مدلی توانمند است و همچنین کیسی و همکاران (۲۰۰۶) که عملکرد بهتر توابع عضویت مثلثی فازی را در برآورد رسوب‌های معلق رودخانه گزارش کردند، همخوانی دارد.

جدول ۳. مقایسه رسوب برآوردی به وسیله مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی و رسوب مشاهده‌ای

درصد اختلاف رسوب برآوردی مدل فازی با رسوب مشاهده‌ای	رسوب مشاهده‌ای (ton/ha/year)	رسوب برآوردی مدل فازی (ton/ha/year)
-۰/۱۹	۲/۶۳۰	۲/۶۲۵

## بحث و نتیجه‌گیری

برآورد و پیش‌بینی بار رسوب حوضه آبخیز در طیف گسترده‌ای از مسائل، مانند مهندسی رودخانه، طراحی سدها، انتقال آلودگی، تأثیرات زیست‌محیطی، آبخیزداری و بسیاری از بخش‌های منابع آب کاربرد دارد.

در این پژوهش به مدل‌سازی بار رسوب زیرحوضه ۲ حوضه آبخیز زاینده‌رود علیا با استفاده از مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی پرداخته شد. نتایج نشان داد که رسوب برآوردشده کل زیرحوضه به‌وسیله مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی ۲/۶۲۵ تن در هکتار در سال است که واحد همگن ۱۰ حساس‌ترین واحد همگن به فرسایش و تولید رسوب است و باید در برنامه‌های حفاظتی در اولویت قرار گیرد. نسبت نیکویی برازش بین رسوب مشاهده‌ای و رسوب برآوردی با استفاده از مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی در این زیرحوضه، ۰/۷۳ محاسبه شد که با توجه به یافته‌های پیشین مدل برازشی بر داده‌ها دارای دقت مطلوبی است. با توجه به یافته‌های این پژوهش چنین استنباط می‌شود که مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی، برای مدل‌سازی و برآورد رسوب در این زیرحوضه‌ها و حوضه‌های مشابه، قابلیت کاربرد مناسبی دارد.

مقایسه بین رسوب برآوردی مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی و رسوب مشاهده‌ای نشان داد که اختلاف بین رسوب مشاهده‌ای و رسوب برآوردی رگرسیون کمترین مربعات فازی بدین گونه است که رسوب برآوردی مدل رگرسیون کمترین مربعات فازی، ۰/۱۹ درصد کمتر از مقدار رسوب مشاهده‌ای است.

## منابع

- احمدی، ح.، فیض‌نیا، س. (۱۳۸۵). سازندهای دوره کواترنر، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- پژوهش، م. (۱۳۹۰). تعیین ضریب فرسایش‌پذیری خاک و مدل‌سازی بار رسوب با استفاده از رگرسیون چند متغیره و فازی و سیستم استنتاج فازی در حوضه سد زاینده‌رود علیا. رساله دکترای دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
- رفاهی، ح. (۱۳۸۲). فرسایش آبی و کنترل آن، جلد اول، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- شایان‌نژاد، م. (۱۳۸۶). مقایسه روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون فازی در تحلیل هیدرولیکی جریان از میان سدهای پاره سنگی. مجله پژوهش آب ایران، سال اول، شماره ۱، صص. ۱۶-۱۱.
- طاهری، م.؛ ماشین‌چی، م. (۱۳۸۷). مقدمه‌ای بر احتمال و آمار فازی، کرمان: انتشارات دانشگاه شهید باهنر.
- مخدوم، م. (۱۳۸۱). سالوده آمایش سرزمین، چاپ پنجم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

Dogan, E., Sasal, M. and Isik, S., 2005, **Suspended Sediment Load Estimation in Lower Sakarya River by Using Soft Computational Methods**, Proceeding of the International Conference on September. China.

Foster, G.R., McCool, D.K., Renard, K.G., and Moldenhauer, W.C., 1981, **Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units**, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 36, No. 6, PP. 355-359.

- Kinnell, P.I.A., 2005, **Raindrop- Impact- Induced Erosion Processes and Prediction: A Review**, Hydrological Processes, Vol. 19, No. 14, PP. 2815-2844.
- Kisi, O., Karahan, M. E. and Sen, Z., 2006, **River Suspended Sediment Modeling Using a Fuzzy Logic Approach**, Hydrological Processes, N.20, PP. 4351-4362.
- Moss, A.J., and Green, P., 1983, **Movement of Solids in Air and Water by Raindrop Impact, Effects of Drop-size and Water-depth Variations**, Australian Journal of Soil Research, Vol. 21, PP. 257-269.
- Pieri, L., Bittelli, M., Wu, J.Q., Dun, S., Flanagan, D.C., Pisa, P.R., Ventura, F., and Salvatorelli, F., 2007, **Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model to Simulate Field-observed Runoff and Erosion in the Apennines Mountain Range, Italy**. J. Hydro., Vol. 336, PP. 84-97.
- Rose, C.W., 1985, **Development in Soil Erosion and Deposition Models**, Advances in Soil Science, Vol. 2, PP. 1-63
- Rose, C.W., Williams, J.R., Sander, G.C., and Barry, D.A., 1983, **A Mathematical Model of Soil Erosion and Deposition Processes: I. Theory for a Plane Land Element**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 47, No. 5, PP. 991-995.
- Rose, C.W., Yu, B., Ghadiri, H., Asadi, H., Parlange, J.Y., Hogarth, W.L., and Hussein, J., 2006, **Dynamic Erosion of Soil in Steady Sheet Flow**, Journal of Hydrology, Vol. 333, No. 2-4, PP. 449-458.
- Sheridan, G.J., So, H.B., Loch, R.J., Pocknee, C., and Walker, C.M., 2000, **Use of Laboratory-Scale Rill and Interrill Erodibility Measurements for the Prediction of Hillslope- Scale Erosion on Rehabilitated Coal Mine Soils and Overburdens**, Australian Journal of Soil Research, Vol.38, No. 2, PP. 285-297.
- Tangestani, M. H., 2006, **Comparison of EPM and PSIAC Models in GIS for Erosion and Sediment Yield Assessment in a Semi-arid Environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran**, Journal of Asian Earth Sciences, 27, PP. 585-597.
- Valmis, S., Dimoyiannis, D., and Danalatos, N.G., 2005, **Assessing Interrill Erosion Rate from Soil Aggregate Instability Index, Rainfall Intensity and Slope Angle on Cultivated Soils in Central Greece**, Soil and Tillage Research, Vo. 80, No. 1, PP.139-147.
- Yu, B., and Rosewell, C.J., 2001, **Evaluation of WEPP for Runoff and Soil Loss Prediction at Gunnedah, NSW, Australia**, Australian Journal of Soil Research, Vol. 39, PP. 1131-1145.
- Zhang, X.C., Li, Z.B., and Ding, W.F., 2005, **Validation of WEPP Sediment Feedback Relationships Using Spatially Distributed Rill Erosion Data**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 69, PP. 1440-1447.
- Zhang, X.C., Nearing, M.A., Miller, W.P., Norton, L.D., and West, L.T., 1998, **Modeling Interrill Sediment Delivery**, Soil Science Society of America Journal, Vol. 62, PP. 438-444.