

مدل سازی رابطه میزان رسوب و ویژگی های هیدرولوژیکی و محیطی حوضه (مطالعه موردی حوضه سد دز)

افشین هنربخش* - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.
علی نیازی - دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.
سعید سلطانی کوپایی - استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
پژمان طهماسبی - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۲/۰۶

چکیده

تجزیه و تحلیل منطقه ای بار رسوب رودخانه ها بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک و ارتباط آن به خصوصیات حوضه های آبخیز در برآورد میزان فرسایش و رسوب از اهمیت بسزایی برخوردار است. لذا هدف از مطالعه حاضر مدل سازی رابطه ی بین میزان بار رسوب معلق با ویژگی های هیدرولوژیکی و محیط حوضه سد دز است. برای این منظور از اطلاعات ۱۶ ایستگاه رسوب سنجی برای توسعه مدل های برآورد رسوبات معلق استفاده شد. سپس مدل های توسعه یافته با اطلاعات ۶ ایستگاه رسوب سنجی دیگر اعتبارسنجی شد. پانزده ویژگی مختلف فیزیوگرافی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و زمین شناسی به عنوان پارامترهای ورودی در مدل سازی برآورد رسوبات معلق استفاده شد. از روش تجزیه به مولفه های اصلی (PCA) برای انتخاب مهمترین پارامترها استفاده شد. سپس ایستگاه ها بر اساس پارامترهای انتخاب شده و با استفاده از روش تجزیه و تحلیل خوشه ای به دو گروه همگن تقسیم شدند. در نهایت مدل ها با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره گام به گام توسعه یافتند. از معیارهای R^2 ، درصد خطا (RE) و میانگین خطا (ME) برای ارزیابی مدل ها استفاده شد. نتایج نشان داد چهار عامل دبی سالانه، متوسط بارندگی سالانه، ضریب هورتون و ارتفاع متوسط حوضه مهمترین پارامترها در برآورد رسوبات معلق بودند و مدل های رگرسیونی بر اساس این عوامل ایجاد شدند. نتایج ارزیابی مدل ها نشان داد که مدل توسعه یافته با استفاده از همه چهار عامل با $RE = 1.8\%$ ، t_{ya-1} و $ME = 25375$ و $R^2 = 0.93$ بهترین کارایی و کمترین درصد خطای برآورد را داشت. نتایج همچنین نشان داد که دبی سالانه تاثیرگذارترین پارامتر در مدل های برآورد رسوبات معلق بود.

واژگان کلیدی: بار معلق، رگرسیون، ضریب هورتون، فرسایش خاک.

مقدمه

فرسایش خاک فرآیندی است که طی آن ذرات خاک از بستر خود جدا شده و توسط یک عامل انتقال دهنده به مکانی دیگر حمل می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۵). به مواد منتقل شده توسط عوامل فرساینده مانند آب، باد و یخ که بصورت لایه‌هایی در سطح پوسته زمین ته‌نشین می‌شوند رسوب اطلاق می‌شود (طالب بیدختی و همکاران، ۱۳۸۲). به مجموع رسوباتی که توسط آب درون جریان به صورت معلق، لغزش و یا غلتیدن در حرکتند بار رسوب نامیده می‌شود. اصولاً بار رسوب کل^۱ حوضه آبخیز در سه شکل کلی بار شسته^۲، بار معلق^۳ و بار بستر^۴ انتقال می‌یابد.

خصوصیات فیزیوگرافی حوضه به مجموعه ویژگی‌هایی گفته می‌شود که مقادیر آن‌ها برای هر حوضه در طول زمان نسبتاً ثابت بوده و نشان دهنده وضع ظاهری و مرفولوژیک حوضه آبخیز است. آگاهی از خصوصیات فیزیوگرافی یک حوضه همراه با داشتن اطلاعاتی از شرایط آب و هوایی منطقه می‌تواند تصویر نسبتاً دقیقی از عملکرد کمی و کیفی سیستم هیدرولوژی آن حوضه ارائه دهد. مهمترین خصوصیات فیزیوگرافی یک حوضه عبارتند از مساحت، محیط، طول آبراهه اصلی، شیب، شکل، ارتفاع، پستی و بلندی، مستطیل معادل و زمان (زینگلر و همکاران، ۲۰۱۴).

برآورد میزان رسوب در یک حوضه آبریز بسیار پر اهمیت است با این حال اندازه‌گیری مستقیم میزان رسوب بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است لذا از این رو یافتن رابطه‌ی بین خصوصیات فیزیوگرافی و محیطی حوضه اندازه‌گیری و بدست آوردن آنها آسانتر است با میزان رسوب تولید شده و در نهایت ارائه یک مدل کمی می‌تواند در ارزیابی میزان رسوب تولید شده و زیان‌های ناشی از آن در آینده بسیار حائز اهمیت باشد. روش‌های رگرسیون چند متغیره^۵، تجزیه تحلیل خوشه‌ای^۶ و تجزیه تحلیل عاملی^۷ از جمله روش‌های رایج در مدل‌سازی رابطه میزان رسوب و ویژگی‌های حوضه هستند. روش رگرسیون چند متغیره روش رایجی است که هدف از آن بیان متغیر وابسته به شکل تابعی ریاضی از متغیر(های) مستقل است (رابطه ۱).

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 + \dots + a_n X_n \quad (1) \text{ (رابطه)}$$

که در این معادله X_1 تا X_n متغیرهای ورودی (مستقل)، Y متغیر وابسته و a_0 عرض از مبدأ خط و a_1 تا a_n ضرایب رگرسیون متغیرهای مستقل متناظر می‌باشند. تجزیه به مولفه‌های اصلی^۸ یکی از روش‌های رایج برای کاهش تعداد متغیرهای ورودی مدل به تعداد کمی متغیر مهم است. در این روش تعداد زیادی از متغیرها را می‌توان به چند عامل کاهش داد و به این طریق خلاصه‌ای از داده‌های اصلی را تهیه نمود. از آنجا که در رگرسیون چند متغیره با افزایش تعداد متغیرها علاوه بر افزایش میزان خطا، معادله رگرسیون چندگانه به طور فزاینده‌ای بزرگ می‌شود لذا استفاده از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی بسیار کارآمد خواهد بود. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای تکنیکی است برای گروه‌بندی افراد یا موضوعات به طوری که در این گروه‌بندی موضوعات درون گروه شباهت زیادی به یکدیگر دارند، اما دارای تفاوت قابل توجهی با گروه‌های دیگر هستند. از جمله کاربردهای تجزیه و تحلیل خوشه‌ای دست‌یابی به مناطق همگن از نظر خصوصیات هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی، توپوگرافی و پوشش گیاهی است (نجفی، ۱۳۸۲؛ آرس و همکاران، ۲۰۱۶).

۱. Total Sediment Load

۲. Wash Load

۳. Suspended Load

۴. Bed Load

۵. Ziegler et al

۶. Multiple Regression

۷. Cluster Analysis

۸. Factor Analysis

۹. Principal Component Analysis

طی سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه مطالعه و مدل‌سازی رابطه بین ویژگی‌های حوضه و میزان رسوبات معلق در حوضه‌های آبخیز کشور انجام شده است از جمله معظمی و فیض‌نیا (۱۳۸۶) در مطالعه رودخانه جراحی استان خوزستان به مدلسازی میزان رسوب این رودخانه با استفاده روش رگرسیونی چند متغیره پرداختند. نتایج این پژوهش کاربردی مطلوب و مناسب روش رگرسیونی چندمتغیره را نشان داد. غلامی و همکاران (۱۳۸۷) در مدل‌سازی رسوب ناشی از رگبارها با استفاده از متغیرهای باران و روان‌آب در حوضه آبخیز چهل‌گری استان کردستان مشاهده کردند که مدل‌های رگرسیونی دو متغیره در مقایسه با چند متغیره از کارایی بالاتری برخوردار است.

کومار و داس (۲۰۰۰)^۱ از مدل رگرسیونی چندمتغیره برای برآورد رسوب‌دهی روزانه حوضه آبخیز رودخانه راماجانا در هندوستان استفاده کردند. در پژوهش آن‌ها مشاهده شد از میان ۱۷ متغیری که در رگرسیون گام به گام وارد شده بودند تنها چهار پارامتر شدت بارندگی در زمان رویداد و دو روز قبل از رویداد، دبی دو روز قبل و فرسایش روز قبل با ضریب تبیین ۸۲/۳ درصد در سطح اعتماد ۹۵ درصد در مدل باقی ماندند و مدل رگرسیونی بر اساس این پارامترها توسعه یافت. سرانجی و همکاران (۲۰۰۵)^۲ از یک سری روابط رگرسیونی جهت برآورد میزان بار رسوبی حوضه‌ای در ایالت کپک کانادا استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از پارامترهای فیزیکی حوضه دقت مدل را بالا برده به طوری که R^2 مدل را از ۷۸٪ به ۸۸٪ افزایش داد. ژو و همکاران (۲۰۰۷)^۳ در چین به مدل‌سازی رسوب معلق با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره پرداختند. در این مطالعه از ویژگی‌های بارندگی، دما، شدت بارش و دبی برای برآورد میزان رسوب استفاده شد. نتایج نشان داد که روش شبکه عصبی-مصنوعی کارایی نسبتاً بهتری نسبت به روش رگرسیونی چندگانه دارد. آرس و همکاران (۲۰۱۶)^۴ فاکتورهای کنترل غلظت رسوب را برای منطقه پامپاس آرژانتین مورد تجربه و تحلیل قرار دادند. در این مطالعه ۲۵ رخداد بارندگی طی ۴ سال در منطقه‌ای به وسعت ۵۶۰ هکتار بررسی شد. در این پژوهش روش رگرسیونی چندگانه برای مدلسازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته خطی قادر به توضیح ۸۵٪ از تغییرات غلظت رسوب است. لامب و تونیلو (۲۰۱۶)^۵ به کمی‌سازی بار معلق ۳ رودخانه در منطقه شمالی آلاسکا پرداختند. پایش منطقه مورد مطالعه برای ۳ سال به طول انجامید و نمونه برداری بار معلق در اعماق مختلف رودخانه انجام شد و بین میزان بار معلق و پارامترهای حوضه مدلسازی به روش رگرسیونی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که در هر سه رودخانه پارامترهای بارندگی و شکل حوضه تاثیر زیادی در میزان بار معلق حوضه داشتند. با توجه به مطالعات صورت گرفته اهمیت برآورد میزان رسوب با استفاده از ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه بر هیچکس پوشیده نیست با این حال تاکنون مطالعه جامع و کاملی در این خصوص در استان چهارمحال و بختیاری صورت نگرفته است تا از این طریق پارامترهای مهم و تاثیر گذار بر میزان رسوب حوضه مشخص شود. حوضه سد دز از حوضه‌های مهم غرب کشور از نظر تولید آب، انرژی و محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. این رودخانه رواناب‌های مناطق وسیعی از استان‌های لرستان، اصفهان، خوزستان، چهارمحال بختیاری و مرکزی را جمع‌آوری نموده و پس از آبرسانی به دشت‌های مسیر خود به رودخانه کارون می‌پیوندد. عدم تعداد کافی ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و محدودیت تعداد سال‌های آماری و نیز همچنین تعداد کم نمونه‌برداری سیلاب در زمان طغیان رودخانه دز اهمیت مطالعه حاضر در مدل‌سازی برآورد رسوب معلق در حوضه سد دز را نشان می‌دهد زیرا که در آینده می‌توان با استفاده از مدل‌های ایجاد شده برآوردی از میزان رسوبات معلق داشت.

^۱ - Kumar and Das

^۲ - Sarangi et al.

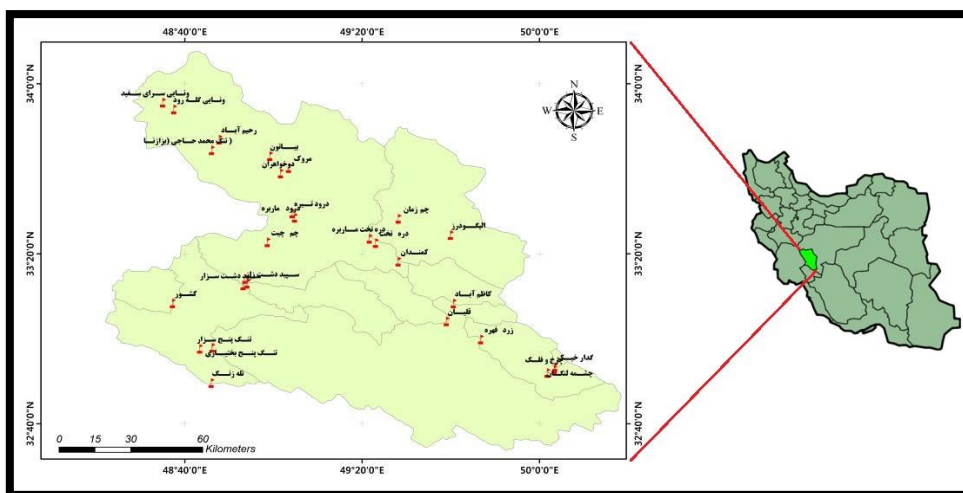
^۳ - Zh u et al.

^۴ - Ares et al.

^۵ - Lamb et al.

مواد و روش کار منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه دز در ارتفاعات زاگرس میانی و بین مختصات جغرافیائی $31^{\circ}17'$ و $34^{\circ}15'$ عرض شمالی $48^{\circ}17'$ و $50^{\circ}20'$ طول شرقی است. حوضه آبخیز رودخانه دز از نظر تقسیم‌بندی کلی حوضه‌های آبخیز ایران، جزئی از حوضه آبخیز خلیج فارس محسوب می‌گردد که از شمال به حوضه آبخیز رودخانه‌های قره‌چای ساوه، گلپایگان و زاینده رود، از مغرب به حوضه آبخیز رودخانه کرخه و از شرق در بخش‌های جنوبی به حوضه آبخیز رودخانه کارون محدود می‌شود. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز دز در استان چهارمحال و بختیاری و خوزستان را نشان می‌دهد (تلوری، ۱۳۸۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

اقلیم غالب در منطقه مورد مطالعه نیمه-خشک گرم است (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۹). متوسط بارندگی سالانه حوضه $670/5$ میلی‌متر است. $33/4$ درصد مساحت حوضه تحت بارشی کمتر از 500 میلی‌متر و $15/4$ درصد مساحت آن بارشی حدود 1000 میلی‌متر و یا بیشتر را دارد. ایستگاه تنگ پنج با بارش سالانه $1175/5$ میلی‌متر بیشترین بارش نقطه‌ای حوضه را داراست. دمای سالانه از $7/6$ تا $24/4$ درجه سانتیگراد متغیر است. مطالعات نشان می‌دهد که $21/4$ درصد نزولات جوی به شکل برف است که مناطق شرق و شمال شرق حوضه متأثر از آن هستند. رودخانه دز با طولی بیش از 500 کیلومتر زهکش اصلی حوضه آبخیز دز محسوب می‌شود. رودخانه دز از پیوند رودخانه‌های بختیاری و سزار تشکیل شده و با حرکت به طرف جنوب (در ادامه مسیر) از سمت راست خود رودهای دهم، مازو، بالارود و شاوور را دریافت می‌کند. همچنین از سمت چپ رودخانه‌های شیوین، تهلاب، لیوس و گلال تنگ‌دره به رودخانه دز می‌پیوندند (تلوری، ۱۳۸۱؛ پورعلی و همکاران، ۱۳۸۷).

روش تحقیق

ویژگی‌های حوضه

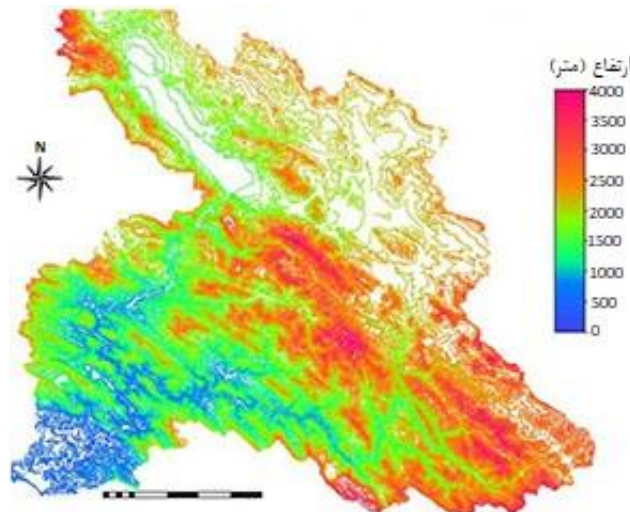
به منظور برآورد میزان رسوب معلق سالانه؛ در ابتدا ۲۲ ایستگاه رسوب‌سنجی واقع در استان چهارمحال و بختیاری انتخاب شدند. ایستگاه‌های انتخاب شده قبل از سد دز و دارای اطلاعات مناسبی از جمله آمار بارندگی، رسوب و دبی بودند. با ترسیم بارگراف دوره آماری داده‌ها، دوره مشترک آماری ۴۰ ساله (سال‌های ۱۳۵۰-۱۳۸۹) انتخاب گردید. سپس اطلاعات و نقشه‌های مربوط به فیزیوگرافی، هیدروولوژیکی، کاربری اراضی و اقلیمی مربوط به زیرحوضه‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، شبکه آبراهه، کاربری اراضی، تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 مربوط به سال ۲۰۱۵، عکس‌های هوایی و داده‌های اقلیمی فراهم گردید. ارتفاع، مساحت و محیط حوضه‌ها از روی نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس $1:25000$ و با

استفاده از نرم افزار ArcGis9.3 بدست آمد. شکل حوضه با استفاده از روابط گراویلوس (رابطه ۲) و هورتون (رابطه ۳) محاسبه شد.

$$C = 0.28 \frac{p}{\sqrt{A}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$R = \frac{A}{L^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این معادلات C ضریب گردی یا گراویلوس، P محیط حوضه- بر حسب کیلومتر، A مساحت حوضه بر حسب کیلومتر مربع، R ضریب شکل حوضه و L طول حوضه آبخیز بر حسب کیلومتر است. شیب متوسط آبراهه ها و حوضه ها با استفاده از نقشه DEM در محیط ArcGis 9.3 استخراج و سپس در محیط Excel پروفیل طولی ترسیم و شیب وزنی آبراهه اصلی محاسبه گردید. از بین پارامترهای اقلیمی بارندگی متوسط سالیانه و بارندگی متوسط ماه های پر باران و سیلابی سال شامل آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت در نظر گرفته شد. ابتدا داده های بارندگی متوسط ماهانه و ارتفاع هر یک از ایستگاه ها جمع آوری و بر اساس روش کوکریچینگ به عنوان مناسب ترین روش زمین آماری توزیع مکانی بارندگی منحنی های هم باران استخراج گردید (جدول ۱). سپس برای هر یک از زیر حوضه ها متوسط بارندگی سالانه و ماهیانه ۴۰ ساله استخراج گردید. کاربری های اراضی مختلف و درصد پوشش های گیاهی حوضه ها با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat 8.0 تعیین شدند. تغییرات ویژگی های زمین شناسی از نقشه های زمین شناسی رقومی شده با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ در محیط ArcGis 9.3 استخراج شدند. ارتفاع در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۴۰۰۰ متر متغیر بود (شکل ۲).



شکل ۲: نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

ساخت مدل رگرسیونی

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات ۱۶ ایستگاه (زیر حوضه) مدل سازی برآورد رسوب با استفاده از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه انجام شد. با استفاده از روش تجزیه به مولفه های اصلی مهم ترین متغیرهای موثر بر میزان رسوب شناسایی شد. سپس با استفاده از تحلیل خوشه ای، حوضه آبخیز دز به مناطق همگن تقسیم شد. در نهایت بر اساس مطالعات صورت پذیرفته (معظمی و فیض نیا (۱۳۸۶)؛ لامی و همکاران، (۲۰۱۴)؛ Ziegler et al. 2014) با استفاده از رگرسیون چند

متغیره گام به گام در مناطق همگن مدل‌سازی رسوب صورت پذیرفت. روش رگرسیونی گام به گام بدلیل سادگی در اجرا و تفسیر در مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی بخصوص برآورد میزان رسوب با استفاده از خصوصیات فیزیوگرافی حوضه بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (Gellis 2013 Ziegler et al. 2014). در انتها با استفاده از آمار ۶ ایستگاه باقی‌مانده کارایی مدل‌ها ارزیابی شد. برای انجام تجزیه به مولفه‌های اصلی در ابتدا داده‌ها از نظر فرضیات کلی شامل نرمال بودن، تست KMO و کرویت بارتلت ارزیابی شدند. در مرحله بعد همگنی حوضه آبخیز با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای ارزیابی شد. در تحلیل خوشه‌ای پس از استاندارد کردن داده‌ها به روش Z-SCORE، گروه‌بندی با روش طبقاتی تجمعی و محاسبه فاصله اقلیدسی به روش ward انجام شد. به تدریج زیر حوضه‌های مشابه طی فرآیند جمع‌آوری در یک گروه با هم ادغام شدند. در نهایت با روش گرافیکی و بصری، حوضه‌های همگن تعیین شدند و در آن‌ها با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره مدل‌های برآورد رسوبات معلق توسعه یافتند. در تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره فرضیات خطی بودن، ثابت بودن واریانس خطا، مستقل بودن اشتباهات، عدم همبستگی بین متغیرهای مستقل و عدم وجود هم‌خطی بین متغیرهای مستقل نیز مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیل چند متغیره، تحلیل خوشه‌ای و رگرسیون چند متغیره با استفاده از نرم افزار SPSS Statistics 17.0 انجام شدند.

بررسی کارایی مدل

در این مطالعه کارایی مدل‌های توسعه یافته حاصل از ۱۶ زیر حوضه، با داده‌های ۶ زیر حوضه دیگر ارزیابی شد. بهترین مدل‌ها بر اساس معیارهای خطای نسبی کم‌تر از ۴۰ درصد (رابطه ۴)، میانگین خطا (رابطه ۵)، ضریب تبیین بالاتر و سطح معنی داری کم‌تر از ۵ درصد مشخص شدند (صادقی و همکاران، ۱۳۸۴؛ Liu et al., 2008).

$$RE = \frac{Y_e - Y_o}{Y_o} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$ME = \sum \frac{Y_o - Y_e}{n} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن Y_e و Y_o به ترتیب مقادیر مشاهده شده و برآورد شده متغیر و n تعداد داده‌هاست (صادقی و همکاران، ۱۳۸۴).

نتایج و بحث

جدول ۱ اطلاعات مربوط به ۱۶ ایستگاه رسوب‌سنجی و زیرحوضه‌های مرتبط به آن‌ها را نشان می‌دهد. در حوضه رودخانه دز و سیعترین زیرحوضه تله‌زنگ و کوچک‌ترین آن‌ها کمندان است (جدول ۱). زیر حوضه تله زنگ با طول ۱۴۲ کیلومتر طولانی‌ترین و کمندان با ۶/۹ کیلومتر کوتاهترین حوضه‌ها هستند (جدول ۱). از لحاظ شیب آبراهه زیرحوضه دره تخت- دره تخت با ۱۲/۵ درصد پرشیب‌ترین زیرحوضه است. حوضه دره تخت-دره تخت با داشتن میانگین ۱۲۵۶ تن در سال کمترین و حوضه تله زنگ-دز با ۸۸۰۰۹۱۹ تن در سال بیشترین میزان رسوب معلق را دارد. اگرچه حوضه دره تخت-دره تخت با داشتن میانگین بارندگی ۷۰۶/۷ میلیمتر در سال جز حوضه‌ها پر باران محسوب می‌شود (جدول ۱) با این حال کمترین میزان رسوبات معلق در بین همه زیرحوضه‌ها را دارد. با توجه به گزارش طرح تحقیقاتی مطالعات آبخیزداری حوضه‌های غرب کشور (۱۳۸۶) بیش از ۷۵٪ مساحت زیر حوضه دره تخت-دره تخت پوشش گیاهی (شاخص NDVI بین ۰/۳۰ تا ۰/۴) و کابردی مرتع است لذا میزان فرسایش و شستشوی خاک در این حوضه بدلیل حضور پوشش گیاهی مناسب کمتر از سایر زیر حوضه‌هاست. بعلاوه ۵۷٪ از مساحت زیر حوضه دره تخت-دره تخت در کلاس S3 نسبت به فرسایش خاک (حساسیت متوسط) و حدود ۱۲٪ از مساحت این حوضه در کلاس S4 به فرسایش خاک (مقاوم) قرار دارند (گزارش طرح تحقیقاتی مطالعات آبخیزداری حوضه‌های غرب کشور، ۱۳۸۶).

جدول ۱- اطلاعات مربوط به ۱۶ ایستگاه رسوب‌سنجی و زیرحوضه‌های مرتبط به آن‌ها

ضریب ضریب گراولوس	ضریب هورتن	زمان تمرکز ساعت	درصد شیب متوسط زیر حوضه	ارتفاع متوسط متر	میانگین آبدی سالانه	میانگین رسوب معلق	بارندگی متوسط سالانه	محیط زیر حوضه کیلومتر	مساحت زیر حوضه کیلومتر مربع	زیر حوضه و ایستگاه مورد مطالعه
1.220	0.607	2.7	11.78	2785	1.71	1976	657.2	22	36.6	ونایی - سراب سفید
1.150	0.413	2.8	21.2	2191	2.23	2173	694.0	20	44.7	ونایی - گله رود
1.220	0.657	11.3	3.97	1848	5.35	19494	518.2	128	1007.1	رحیم آباد - سیالخور
1.280	0.340	3.5	4.83	1901	0.42	3468	483.1	50	119.9	بیائون
1.200	0.934	27.1	1.81	2216	3.25	64722	519.3	191	902.5	درود - تیره
1.160	0.575	2.2	20.41	2454	1.47	1963	633.9	24	27	کشتان
1.360	0.407	0.6	18.33	2865	6.7	1256	706.7	29	42.8	دره تخت - دره تخت
1.510	0.690	11.7	2.43	2111	1.3	149275	459.4	252	2200	دره تخت - مایرود
1.310	0.384	15.2	3.18	2077	8.8	297980	475.8	241	2574.9	درود - مایرود
1.520	0.219	10.7	5.8	2374	7.22	26010	507.9	101	321.3	چم چیت - سیزه
1.220	1.060	33.9	2.61	1990	43	1272090	527.6	129	7821.8	سیددشت - سزار
1.180	0.734	5.1	8.28	1669	5.9	671040	801.4	78	344.9	کثیر - سرخاب
1.850	1.622	59.3	1.18	2040	97.771	4029965	576.5	716	9353.4	تنگ پنج - سزار
1.760	0.310	43.5	1.69	2192	141.595	4888375	654.4	502	6307.2	تنگ پنج - یختاری
1.680	1.240	75.6	1.17	2102	252.114	8800919	616.6	766	16064.5	تله زنگ - دز
1.370	1.140	6.8	3.94	2273	3.9	67010	532.3	428	438.3	کاظم آباد - کاکستان

مدل‌سازی میزان رسوب

در ابتدا ۱۵ متغیر مستقل اعم از فیزیوگرافی، اقلیمی و هیدرولوژیکی موثر در تولید رسوب در زیر حوضه‌های مورد مطالعه شناسایی و داده‌های آن‌ها استخراج گردید. تاکنون مطالعات معدودی در زمینه مدل‌سازی رسوب صورت گرفته است، از جمله عرب‌خداری و زرگرا (۱۳۷۴) ۱۱ ویژگی، حکیم‌خانی (۱۳۷۷) ۱۹ ویژگی و رستمی و همکاران (۱۳۸۱) ۲۰ ویژگی و وفاخواه (۱۳۸۱) ۱۴ ویژگی را به عنوان متغیرهای مستقل در برآورد میزان رسوب مدنظر گرفتند. مقداره آماره KMO برابر با ۰/۶۷ نشان می‌دهد که داده‌های استخراج شده برای انجام تحلیل عاملی تجزیه به مولفه‌های اصلی مناسب‌اند. همچنین معنی‌دار بودن آزمون کرویت بارتلت در سطح ۰/۰۰۱ و کای اسکوار ۳۴۸/۶ بیانگر تحلیل عاملی برای شناسایی ساختار مناسب است.

در جدول ۲ مقادیر عامل‌های استخراج شده بعد از انجام تحلیل عاملی تجزیه به مولفه‌های اصلی آمده است. چنانچه در جدول ۲ مشاهده می‌شود چهار عامل دبی سالانه، متوسط بارندگی سالانه، ضریب هورتون و ارتفاع متوسط حوضه قابلیت تبیین واریانس‌ها را دارند. در جدول ۳ می‌توان دید که عامل‌های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب هر کدام ۷۱/۲۹۹، ۸۳/۲۴ و ۹۲/۲۳ درصد و در مجموع ۹۲/۲۳ درصد از واریانس را در بردارند.

جدول ۲: سهم متغیرها یا بار عاملی در هر عامل قبل از عمل چرخش

مولفه				متغیر
4	3	2	1	
-0.005	0.121	0.180	0.954	مساحت حوضه کیلومتر مربع
0.197	0.008	-0.003	0.920	محیط حوضه کیلومتر مربع
0.681	-0.287	0.544	-0.338	ارتفاع متوسط متر
-0.024	0.069	0.678	-0.678	درصد شیب متوسط حوضه
-0.136	-0.448	-0.045	0.839	طول حوضه کیلومتر
-0.011	0.015	0.120	0.985	طول آبراهه اصلی کیلومتر
0.035	0.026	0.735	-0.657	شیب آبراهه درصد
-0.043	-0.061	0.328	0.901	دبی سالانه متر مکعب بر ثانیه (آب)
-0.340	0.198	0.791	-0.148	بارش سالانه میلی متر
0.308	0.696	-0.068	0.603	ضریب هورتون

0.219	-0.379	0.084	0.790	ضریب گراولیوس
-0.326	-0.191	0.326	0.762	ارتفاع حداکثر- حداقل متر
0.007	0.146	0.179	0.958	مساحت جهت جنوب (کیلومتر مربع)
0.039	0.069	0.098	0.976	زمان تمرکز ساعت
0.020	0.112	0.164	0.961	مساحت جهت شمال (کیلومتر مربع)

روش استخراج: تجزیه و تحلیل به مولفه‌های اصلی

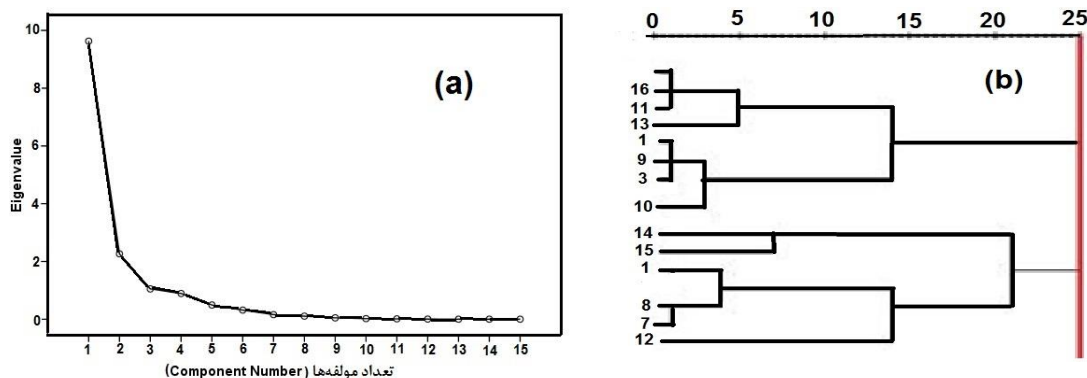
نمودار سنگریزه‌ای تعیین عامل‌های موثر در برآورد رسوب معلق در شکل ۳(a) آمده است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که از عامل چهارم (ارتفاع متوسط حوضه) به بعد تغییرات مقادیر ویژه کم می‌شود، در نتیجه می‌توان چهار عامل انتخاب شده (دبی سالانه، متوسط بارندگی سالانه، ضریب هورتون و ارتفاع متوسط حوضه) را به عنوان عوامل تاثیرگذار که بیشترین نقش را در تبیین واریانس داده‌ها دارند (جدول ۳) معرفی کرد.

جدول ۳: درصد واریانس تجمعی و مقادیر ویژه عامل‌های مختلف

مولفه	کلی	درصد واریانس	درصد تجمعی
دبی سالانه (آب)	8.06	53.78	53.78
متوسط بارندگی سالانه	2.62	17.51	71.29
ضریب هورتون	1.79	11.94	83.24
ارتفاع متوسط حوضه	1.34	8.99	92.23

روش استخراج: تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی

متوسط دبی سالانه بیشترین بار وزنی (۰/۹۴) را روی عامل اول دارد و ۵۳/۷۸ درصد تغییر در داده‌های اصلی را تبیین می‌کند. عامل دوم متوسط بارندگی سالانه است که بیشترین بار وزنی (۰/۸۸) را دارد و ۱۷/۵۱ درصد تغییر در داده‌های اصلی را توضیح می‌دهد. عامل سوم که ۱۱/۹۴ تغییر در داده‌های اصلی را توضیح می‌دهد، ضریب هورتون است که بار وزنی (۰/۹۰) بیشتری دارد. عامل چهارم ارتفاع متوسط حوضه است که بار وزنی (۰/۹۳) را داشته و ۸/۹۹ درصد تغییر در داده‌های اصلی را توضیح می‌دهد. لذا این چهار عامل مجموعاً ۹۲/۲۳ درصد واریانس یا تغییر در داده‌های اصلی را در بر دارند و برای تحلیل خوشه‌ای انتخاب می‌شوند (جدول ۲). با توجه به عامل‌های موثر تعیین شده (جدول ۳) اقدام به گروه‌بندی زیر حوضه‌ها به روش تحلیل خوشه‌ای شد. با توجه به ترکیب خوشه‌ای در فاصله ۲۵، زیر حوضه‌ها در دو گروه همگن قرار گرفتند (شکل ۳b).



شکل ۳: نمودار سنگریزه‌ای تعیین عوامل موثر در برآورد رسوب معلق (a) و دندروگرام زیر حوضه‌های همگن در فاصله ۲۵ (b)

مدل‌های رگرسیونی

زیر حوضه‌های ونایی-سراب سفید، ونایی-گله‌رود، کمندان، دره تخت-دره تخت، تنگ پنج-بختیاری، تله زنگ-دز و کشور-سرخاب در منطقه همگن ۱ قرار گرفتند. منطقه همگن ۲ شامل زیر حوضه‌های چم‌چیت-سبزه، کاظم آباد-کاکلستان، رحیم‌آباد-سیلاخور، بیاتون، درود-تیره، دره تخت-ماربره، درود-ماربره، سپیددشت-سزار و تنگ پنج-سزار است. مدل‌های برآورد رسوب معلق مناطق همگن ۱ و ۲ در مقیاس سالانه با استفاده از چهار عامل دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب هورتون و متوسط بارندگی و به کمک روش رگرسیونی چندگانه گام به گام در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج حاصل از مدل‌سازی رگرسیونی تحلیل منطقه‌ای رسوب معلق مناطق همگن ۱ و ۲

رابطه	متغیر مستقل	معادله	R ²
منطقه همگن ۱			
(۶)	دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب هورتون و متوسط بارندگی	$Y_t = 1054.4 (P) + 253596 (F) - 346.3 (H) + 34219.1(Q) - 28546.1$	۰/۹۸**
(۷)	دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه،	$Y_t = -481.1 (H) + 34202.1(Q) + 1158409.8$	۰/۹۸**
(۸)	دبی سالانه	$Y_t = 34797.1(Q) + 106880.2$	۰/۹۹**
(۹)	دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب هورتون	$Y_t = 255355.2 (F) - 446.1.3 (H) + 33754.8 (Q) + 947007.4$	۰/۹۸**
منطقه همگن ۲			
(۱۰)	دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب هورتون و متوسط بارندگی	$Y_t = 13834.6 (P) + 1351247.1 (F) - 1324.7 (H) - 1361.1 (Q) - 4686902.4$	۰/۶۳**
(۱۱)	ضریب هورتون	$Y_t = 2220067.4 (F) - 1079175.6$	۰/۵۷**
(۱۲)	دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه،	$Y_t = 13751.9 (P) + 1349534.8 (F) - 1307.2 (H) - 4691464.5$	۰/۶۳**
(۱۳)	ضریب هورتون و متوسط بارندگی	$Y_t = 12400.2 (P) + 1455365.2(F) - 6818613.5$	۰/۶۱**

*** به ترتیب در سطح پنج درصد و در سطح یک درصد معنی دار است. در کلیه روابط ارائه شده Y_t رسوب معلق بر حسب تن در سال، Q دبی متوسط سالانه بر حسب متر مکعب بر ثانیه، H ارتفاع متوسط حوضه بر حسب متر، F ضریب هورتون و P متوسط بارندگی (میلی متر در سال) می‌باشد.

همه مدل‌های توسعه یافته در منطقه همگن ۱ مقدار ضریب R^2 بیشتری نسبت به مدل‌های توسعه یافته در منطقه همگن ۲ دارند. با توجه به اینکه در مدل‌های توسعه یافته در منطقه همگن یک تعداد پارامترهای بیشتری معنی‌دار و به مدل وارد شده اند لذا مقدار ضریب تبیین در مدل‌های منطقه همگن ۱ بیشتر می‌شود زیرا با افزایش تعداد پارامترهای ورودی مدل مقدار ضریب تبیین افزایش می‌یابد اگرچه ممکن است مقدار خطای مدل نیز تا حدی افزایش یابد. چنانچه در جدول ۳ مشخص است مدل توسعه یافته بر اساس عامل دبی سالانه در منطقه همگن ۱ در مقایسه با سایر مدل‌ها با تعداد بیشتر پارامتر ورودی مقدار ضریب تبیین بالاتری ($R^2 = 0/99$) دارد که اهمیت عامل دبی سالانه در برآورد میزان رسوب معلق را نشان می‌دهد. در منطقه همگن ۲ مدل توسعه یافته با هر عامل دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب هورتون و متوسط بارندگی بیشترین کارایی را در مقایسه با سایر مدل‌ها توسعه یافته داشت (جدول ۳).

اعتبارسنجی مدل‌ها

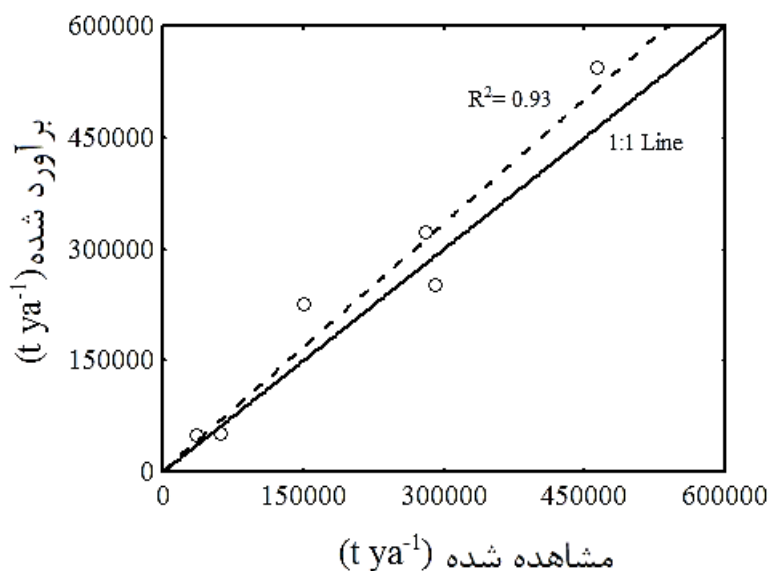
برای ارزیابی کارایی مدل‌های توسعه یافته در مناطق همگن ۱ و ۲ از اطلاعات ۶ ایستگاه رسوب سنجی چم‌زمان، سپید دشت، مروک، زردفهره، تنگ محمد حاجی و قلیان استفاده شد (جدول ۴). مقدار رسوبات معلق از ۳۶۲۷ تن در سال در ایستگاه تنگ محمد حاجی تا ۴۶۳۶۲۰ تن در سال در ایستگاه چم‌زمان متغیر است. جدول ۴ خلاصه آماری ارزیابی مدل‌های توسعه یافته با استفاده از معیار RE را نشان می‌دهد. برای ایستگاه‌های قلیان و حوضه چم‌زمان رابطه (۵) با خطای تخمین به ترتیب ۸ و ۹ درصد به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در این مدل ضریب هورتن مهمترین عامل موثر در مدل‌سازی بود و پس از این عامل به ترتیب عوامل متوسط دبی سالانه، متوسط بارش سالانه و ارتفاع متوسط زیرحوضه قرار گرفتند. حکیم‌خانی و همکاران (۱۳۷۷) نیز متغیرهای دبی متوسط سالانه، درصد سنگ‌های حساس به فرسایش، بارش متوسط سالانه و درصد اراضی رو به شمال را بعنوان عوامل موثر در تولید رسوب دریاچه ارومیه معرفی کردند. اما تحقیقات وروانی (۱۳۸۰) در آنالیز ناحیه‌ای رسوب معلق را برای حوضه آبخیز گرگانرود نشان داد که خصوصیات سنگ‌شناسی و حساسیت واحدها به فرسایش از مهمترین عوامل کنترل‌کننده تولید رسوب بوده و می‌توانند سایر عوامل را نیز تحت تاثیر قرار دهند. همچنین مردیان و همکاران (۱۳۸۹) در آنالیز ناحیه‌ای برآورد رسوب معلق سالانه (حوضه سد کمال‌صالح استان مرکزی) دریافتند که عامل طول رودخانه رابطه معنی‌داری با متوسط رسوبدهی معلق سالانه دارد. ثقفیان و همکاران (۱۳۸۵) نیز نتیجه گرفتند که مقدار رسوبدهی در بیشتر مدل‌های منطقه‌ای تحت تاثیر مساحت حوضه است با افزایش مساحت حوضه، مقدار رسوب نیز افزایش می‌یابد که با نتایج این تحقیق هم راستا می‌باشد. در مطالعه (Lamb and Toniolo (2016) پارمترهای بارندگی و شکل حوضه تاثیر زیادی در میزان بارر معلق حوضه داشتند.

جدول ۴: ارزیابی دل‌های توسعه یافته با استفاده از معیار RE

رابطه	RE (%)			RE (%)		
	سپیددشت	چم زمان	قلیان	تنگ محمد حاجی	زرد فهره	مروک
(۶)	۸۸	۹	۸	۵۴۷	۲۶	۱۰۳
(۷)	۱۴۸	۵۶	۹۴	۱۴۴۹	۱۵	۳۳۲
(۸)	۱۶۵	۴۰	۲۱۰	۱۳۴۷	۶۴	۲۸۹
(۹)	۱۱۸	۵۵	۹۴	۲۴۴۱	۱۵	۴۷۳
رابطه	RE (%)			RE (%)		
	چم زمان	زرد فهره	مروک	سپیددشت	تنگ محمد حاجی	قلیان
(۱۰)	۱۹۷	۴۲۸	۹۴۴	۳۳۰	۲۴۷۲	۴۹۶
(۱۱)	۶۵	۲۷۹	۱۳۳۵	۳۱۷	۱۴۴۹	۵۲۶
(۱۲)	۶۵	۴۲۳	۱۳۳۵	۳۱۷	۲۴۴۱	۴۹۸
(۱۳)	۱۹۴	۱۸۷	۹۳۶	۳۳۳	۲۳۴۸	۷۳۸

در ایستگاه‌های مروک، سپید دشت و تنگ محمد حاجی هیچ یک از مدل‌ها کارایی مناسبی در برآورد میزان رسوبات معلق خروجی از این زیر حوضه را نداشتند (جدول ۴). تلوری (۱۳۸۱) نیز در بررسی رسوبدهی سرشاخه‌های کرخه در استان لرستان با استفاده از برخی از ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه گزارش نمود که عدم دستیابی به رابطه معنی‌دار در برخی

مناطق به این دلیل است که یا آمار اندازه‌گیری رسوب از دقت خوبی برخوردار نیست و یا به دلیل کوتاه بودن طول دوره آماری تلاش در برقراری این‌گونه روابط جایز نمی‌باشد. برای ایستگاه زردفهره رابطه (۶) با داشتن کمترین ضریب خطای نسبی ۱۵٪ بهترین مدل در برآورد مقدار رسوبات معلق بود. در این مدل متوسط دبی سالانه مهم‌ترین عامل موثر در مدل‌سازی بود و پس از این عامل ارتفاع متوسط زیرحوضه قرار گرفت. تحقیقات مردیان و همکاران (۱۳۸۹) در حوضه سد کمال‌صالح استان مرکزی نشان داد که عامل طول رودخانه رابطه معنی‌دار با متوسط رسوبدهی معلق سالانه دارد. با توجه به نتایج حاصل از جدول ۴ رابطه‌ی ۶ به عنوان بهترین مدل در برآورد رسوبات معلق در نظر گرفته شد. شکل ۴ نمودار یک به یک مقدار اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده رسوبات معلق ایستگاه‌های اعتبارسنجی مدل‌ها را با استفاده از معادله ۵ نشان می‌دهد. به طور کلی معادله ۵ کارایی بسیار خوبی ($R^2 = ۰/۹۳$) در برآورد رسوبات معلق داشت. اگرچه بر اساس آماره ME این مدل تاحدی دارای بیش‌برآوردی ($ME = ۲۵۳۷۵ \text{ t ya}^{-1}$) است.



شکل ۴ - نمودار یک به یک مقدار اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده رسوبات معلق ایستگاه‌های اعتبارسنجی

نتیجه‌گیری کلی

با مطالعه و مدل‌سازی رابطه‌ی بین ویژگی‌های فیزیوگرافی و محیطی حوضه با میزان رسوبات معلق این امکان فراهم می‌شود که بتوان تخمین درستی از میزان رسوبات در اثر سیلاب‌ها داشت. هدف از مطالعه حاضر مدل‌سازی رابطه بین ویژگی‌های محیطی حوضه سد دز با میزان رسوبات معلق رودخانه‌های این حوضه در استان چهارمحال بختیاری با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره گام به گام بود. نتایج پژوهش نشان داد چهار عامل دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب هورتون و متوسط بارندگی مهم‌ترین عوامل در برآورد میزان رسوبات معلق بر اساس روش تجزیه به مولفه‌های اصلی بودند. نتایج همچنین نشان داد که مدل رگرسیونی حاصل از هر چهار عامل دبی سالانه، ارتفاع متوسط حوضه، ضریب هورتون و متوسط بارندگی با داشتن بیشترین ضریب تعیین ($R^2 = ۰/۹۳$)، کمترین درصد خطا (۸٪) ($RE =$ و کمترین میانگین خطا ($ME = ۲۵۳۷۵ \text{ t ya}^{-1}$) کارایی بسیار خوبی در برآورد رسوبات معلق را داشت. با توجه به نتایج قابل قبول این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که استفاده توأم از روش‌های تجزیه به مولفه‌های اصلی، تجزیه و تحلیل خوشه‌ای و رگرسیون چندمتغیره گام به گام کارایی مناسب و قابل قبولی در برآورد رسوبات معلق دارد و توصیه می‌شود در مطالعات بعدی از ویژگی‌های بیشتری از حوضه مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

- پورعلی ح، متکان ع ا، و حسینی اصل ا. ۱۳۸۷. تهیه نقشه خطر فرسایش و تولید رسوب حوضه آبخیز سد دز با استفاده از سنجش از دور و GIS. علوم محیطی. ۶ (۱): ۸۳-۱۰۰.
- تلوری ع. ۱۳۸۱. رابطه رسوبدهی معلق با برخی از ویژگی‌های آبخیز در سرشاخه‌های کرخه و دز در استان لرستان. مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۵۶.
- تلوری ع، بیرودیان ن، و منوچهری ا. ۱۳۸۶. مدل‌سازی تغییرات زمانی رسوب، مطالعه موردی حوزه آبخیز گاران در استان کردستان. مجله پژوهش و سازندگی. ۷۵: صص ۶۴-۷۰.
- -تفیان ب، قرمزچشمه ب، و سمیعی م. ۱۳۸۵. آنالیز منطقه‌ای رسوب در حوزه‌های منطقه جنوب غرب کشور، نتیجه گزارش طرح تحقیقاتی شرکت سهامی مدیریت منابع آب، ۹ ص.
- حکیم خانی ش. ۱۳۷۷. ارائه مدل رگرسیونی چندمتغیره بر اساس عوامل موثر بر رسوبدهی معلق حوزه آبخیز دریاچه ارومیه. پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران. ۲۰۰ صفحه.
- رستمی م، اردشیر ع، ابریشم چی ا، مرادی م ح و عرب‌خداری م. ۱۳۸۱. پیش‌بینی رسوب معلق حوزه‌های فاقد آمار با مقایسه روش‌های خوشه‌بندی اماری و فازی، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، ج اول، صفحات ۹ تا ۱۷، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۸ الی ۱۰ بهمن.
- رفاهی ح ق. ۱۳۸۵. فرسایش آبی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ۶۷۱ ص.
- صادقی س ح ر، نجفی د، وفاخواه. ۱۳۸۵. تحلیل منطقه‌ای برآورد رسوب معلق در حوضه اصفهان و سیرجان. تحقیقات منابع آب ایران زمستان ۱۳۸۵.
- طالب بیدختی ن، شاهویی ص، بهنیا ع، بهبودی ف، صادقی س ح ر، ملک ع، شریفی ف. ۱۳۸۲. فرهنگ تخصصی فرسایش و رسوب. انتشارات یونسکو، ۳۸۸ ص. عرب‌خداری م و زرگرا ا. ۱۳۷۴. برآورد تولید رسوب در بخش شمالی البرز با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، مجله پژوهش و سازندگی. شماره ۲۹ ص ۲۲.
- غلامی ل، صادقی س ح ر، خالدی درویشان ع، تلوری ع. ۱۳۸۷. مدل‌سازی رسوب ناشی از رگبارها با استفاده از متغیرهای باران و روان‌آب. مجله علوم و صنایع کشاورزی. ۲۲(۲)، صص ۲۶۳-۲۷۱.
- مردیان م، نجفی‌نژاد ع، مرادی م، وروانی ج. ۱۳۸۹. کاربرد روش آنالیز ناحیه‌ای در برآورد رسوب معلق سالانه (مطالعه موردی: حوضه سد کمال‌صالح استان مرکزی). ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس.
- معظمی م، و فیض‌نیا س. ۱۳۸۶. آنالیز ناحیه‌ای رسوب معلق (مطالعه موردی رودخانه جراحی)، چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران - مدیریت حوزه‌های آبخیز. ۱۳ ص.
- وروانی ج. ۱۳۸۰. آنالیز ناحیه‌ای رسوب معلق در حوزه آبخیز گرگانرود و بررسی وضعیت رسوبدهی سرشاخه‌های اصلی سد وشمگیر. پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران. ۲۰۳ صفحه.
- وفاخواه. ۱۳۸۱. ارائه مدل ریاضی جهت برآورد رسوب در منطقه شمال، مجموعه مقالات ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، ج اول، صفحات ۹ تا ۱۷، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۸ الی ۱۰ بهمن.
- *Ares M.G., Varni M., Chagas C., 2016: Suspended sediment concentration controlling factors: an analysis for the Argentine Pampas region. Hydrological Science Journal 61 (12): 2237-2248.*

- Gellis A.C., 2013: *Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico. Catena 104:39–57.*
- Kumar A., Das G., 2000: *Dynamic model of daily rainfall, runoff and sediment yield for a Himalayan watershed, Journal of Agricultural Research, 75(2): 189-193.*
- Lamb E., Toniolo H., 2016: *Initial Quantification of Suspended Sediment Loads for Three Alaska North Slope Rivers. Water 419 (8): 2-11.*
- Liu, X., Li, J., 2008: *Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in loess plateau of China, Chinese Geographical Sciences, 18(3): 235–241*
- Sarangi A., Bhattacharya A. K., 2005: *Comparison of artificial neural network and regression models for sediment loss prediction from Banha watershed in India, Agricultural Water Management, 78(3): 195–208.*
- Zhu X X., Zhou. L Y., 2007: *Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. Geomorphology 84: 111–125*
- Ziegler AD., Benner G., Tantasirin C., 2014: *Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: hysteresis, variability, and uncertainty. Journal of Hydrology 519: 2020–2039.*