

مدل سازی رسوب معلق و تعیین عوامل مؤثر بر آن در حوزه های آبخیز کارون بزرگ و کرخه

- ❖ وحید چیت ساز*: دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ علی اکبر نظری سامانی: دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ سادات فیض نیا: استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ سعید سلطانی: استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

پدیده های فرسایش و رسوب دو پدیده اجتناب ناپذیر حوزه های آبخیز هستند. به علت نامنظم بودن نمونه برداری در ایستگاه های رسوب سنجی، داده های مناسبی از رسوب معلق در دسترس نیست. بنابراین مدیران و محققان ناگزیرند با استفاده از روش های درون یابی، رسوب تولیدی را در دیگر حوضه های فاقد آمار برآورد کنند. در این پژوهش به منظور مدل سازی تعیین بار معلق رسوب ۶۹ حوضه موجود در حوزه های آبخیز کارون بزرگ و کرخه ابتدا اطلاعات ۳۰ نوع ویژگی فیزیوگرافیکی، ژئومورفولوژیکی، پوشش گیاهی و اقلیمی برای تجزیه و تحلیل آماری استفاده شد. با استفاده از تجزیه مؤلفه های اصلی، ماتریس خصوصیات به ۸ ویژگی عامل مبنا شامل: رسوب سالانه، مساحت، محیط، طول آبراهه اصلی، رلیف حوضه، متوسط ارتفاع در ۸۵٪ بالایی آبراهه اصلی، ارتفاع موقعیت ۱۵٪ پایینی طول آبراهه اصلی و تعداد زمین لغزش در هر حوزه تقلیل یافت. در مرحله بعد حوضه های موجود بر اساس ویژگی های منتخب به ۶ گروه همگن تقسیم و با استفاده از رگرسیون چند متغیره گام به گام اقدام به مدل سازی رسوب دهی حوضه های مورد مطالعه شد. به دلیل وجود سدها در بالادست حوضه های مطالعاتی، دسترسی به داده های معتبر، یکی از چالش های مطالعات رسوب است. بر اساس منحنی های جرم مضاعف بین داده های رسوب بارش، از بین ۳۵ ایستگاه که در بالادست خود دارای انواع سدهای مخزنی بودند، رسوب دهی ۲۹ ایستگاه تحت تأثیر سدهای بالادست خود قرار داشتند. نتایج نشان داد که سدهای بزرگ می توانند بر عملکرد رسوب پایین دست خود تا طول ۹۸ کیلومتری رودخانه تأثیر بگذارد. همچنین نتایج نشان داد که در هر گروه ترکیب خاصی از ویژگی ها بر روی رسوب دهی حوضه ها تأثیر گذار هستند. بر اساس شاخص های اعتبار سنجی، مدل های به دست آمده دارای کارایی بالایی هستند (ضریب نش ساتکلیف ۰/۷۲ و ضریب تبیین ۰/۷۱). به طور کلی، ویژگی های فیزیوگرافی حوضه مانند محیط، مساحت، طول آبراهه اصلی و رلیف حوضه نسبت به سایر عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و زمین شناسی منطقه از درجه اهمیت بیشتری برخوردارند و کل واریانس تبیین شده توسط ویژگی های ذکر شده ۸۷/۳ درصد است.

کلید واژگان: مدل سازی، تجزیه مؤلفه های اصلی، خوشه بندی، حوزه های آبخیز کارون بزرگ و کرخه.

۱. مقدمه

ماهیت پیچیده و ویژگی بار رسوب رودخانه‌ها باعث شده است که برآورد میزان رسوب وارده به مخازن و تولید رسوب در دراز مدت برای تعیین عمر مفید سازه‌ها با مشکل روبه‌رو شود. یکی از پرکاربردترین روش‌های برآورد بار رسوبی معلق رودخانه‌ها استفاده از منحنی‌های سنجه رسوب می‌باشد که با استفاده از آمار دبی ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب سنجی و برقراری رابطه بین دبی آب و دبی رسوب تهیه می‌شود. تاکنون روش‌های متداولی برای محاسبه منحنی‌های سنجه ارائه شده است اما در اغلب روش‌ها رسوب برآورد شده کمتر از مقدار واقعی رسوب مشاهده شده است. [۱۰] از بین مدل‌های USBR^۱، USBR چند خطی، منحنی حد وسط دسته‌ها، منحنی سنجه فصلی و روش FAO^۲ برای تهیه منحنی سنجه دبی-رسوب، روش منحنی حد وسط دسته‌ها را کارآمدترین روش دانسته و استفاده از این روش را نسبت به سایر روش‌های مذکور توصیه می‌کنند. همچنین [۹] و [۱۱] عنوان می‌کنند که روش منحنی سنجه حد وسط دسته‌ها نتایج مطلوب‌تری را در برآورد دبی رسوب به همراه داشته است. از سوی دیگر عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب سنجی در بسیاری از زیرحوضه‌های کشور باعث شده تا استفاده از روش‌های تحلیل منطقه‌ای رسوب بیشتر مدنظر قرار گیرد.

استفاده از برخی از ویژگی‌های سهل‌الوصول حوضه و برقراری ارتباط بین این خصوصیات و دبی رسوب، باعث شده تا روش‌های تحلیل منطقه‌ای در حوضه‌های فاقد آمار یک ابزار قدرتمند جهت برآورد دبی رسوب تلقی شود. [۱۱] با بررسی ۲۰۹ ایستگاه رسوب سنجی کشور و با استفاده از رگرسیون چند متغیره اظهار داشت که مساحت، دبی سالانه و دبی ویژه از عوامل مؤثر در رسوب‌دهی حوضه‌ها می‌باشند. [۷] با استفاده از روش‌های رگرسیون چند

متغیره اقدام به مدلسازی میزان رسوب رودخانه جراحی استان خوزستان کردند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که ۹۸ درصد تغییرات رسوب رودخانه جراحی توسط متغیرهای طول آبراهه اصلی و دبی متوسط سالانه قابل توجیه است. [۱۳] با استفاده از روش تجزیه عاملی و رگرسیون چند متغیره، عوامل مؤثر بر رسوب حوضه طالقان را مساحت اراضی کشاورزی، مساحت زیرحوضه‌ها، مجموع مساحت سازندهای حساس و نیمه حساس و پستی و بلندی حوضه معرفی کردند و اظهار داشتند که ۸۸ درصد تغییرات رسوب‌دهی این حوضه تحت تأثیر این متغیرها می‌باشد. [۱۱] نیز با استفاده از روش تجزیه و تحلیل عاملی حوضه‌های آبخیز جنوب غرب ایران عوامل مساحت حوضه، درصد تذبذب و درصد اراضی با جهت شمال غربی را به ترتیب مؤثرترین عوامل بر تولید رسوب این حوضه‌ها معرفی کردند. همچنین در خارج از کشور [۶] از مدل رگرسیونی چند متغیره برای برآورد رسوب‌دهی روزانه حوزه آبخیز رودخانه راماجانا در هندوستان استفاده کردند و از بین ۱۷ ویژگی مورد استفاده در رگرسیون گام به گام 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 به عنوان ویژگی‌های مؤثر بر تولید رسوب شناخته شدند. [۱۲] در حوضه‌های کبک کانادا از روابط رگرسیونی جهت برآورد رسوب‌دهی استفاده کردند و اظهار داشتند که متغیرهای فیزیکی حوضه دقت مدل‌ها را بالا خواهد برد.

نکته مشترک در مدلسازی رسوب‌دهی حوضه‌های آبخیز، شناسایی و استفاده از ویژگی‌های تأثیرگذار بر روی تولید رسوب در هر حوضه می‌باشد که ممکن در حوضه‌های مختلف این ویژگی‌ها متفاوت باشد. در این مطالعه سعی شده تا پس از تهیه ماتریس ۳۰ ویژگی تأثیرگذار بر رسوب‌دهی حوضه‌ها (ستون) بر اساس سایر

^۱Food and Agricultural Organization

^۲United State Bureau of Reclamation

تا $34^{\circ} 55' . 0''$ عرض شمالی قرار دارد. این منطقه بخش عمده‌ای از سطح استان‌های کرمانشاه، همدان، ایلام، لرستان، خوزستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویر احمد و استان اصفهان را در بر گرفته است. مساحت منطقه مورد مطالعه ۹۸۶۸۶ کیلومتر مربع است که در حدود ۸۳ درصد از سطح حوضه های کارون بزرگ و کرخه را شامل می‌شود. شکل (۱) موقعیت حوضه‌ها و زیر حوضه‌های مورد مطالعه و ایستگاه‌های هیدرومتری را نشان می‌دهد.

۲,۲. روش کار تحقیق و داده‌های مورد نیاز

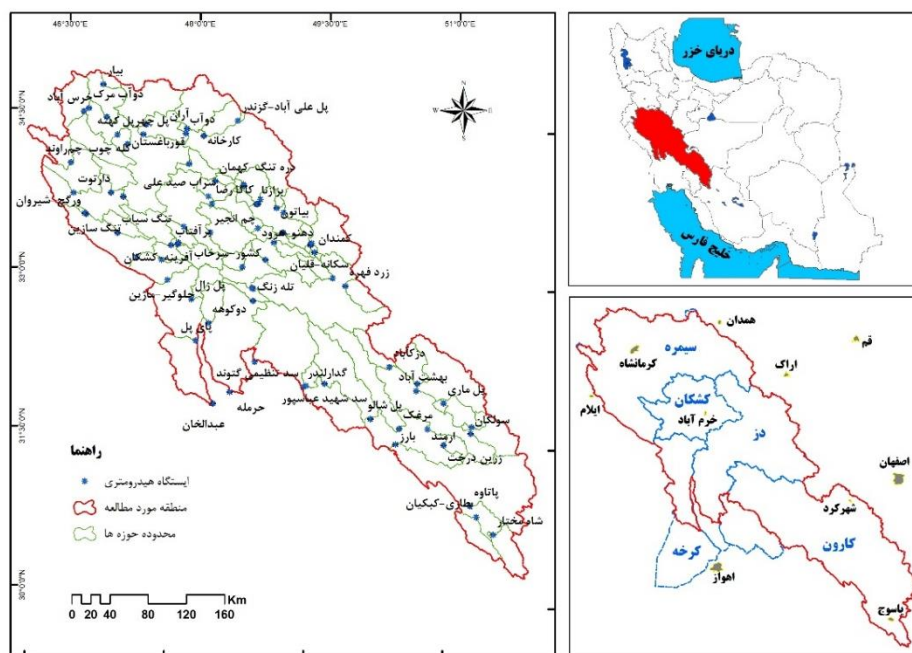
داده‌های مورد نیاز در این مطالعه شامل دبی جریان و دبی رسوب مربوط به ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی و همچنین اطلاعات و مشخصات مربوط به سدهای موجود در منطقه، شامل نوع سد، سال شروع و سال پایان پروژه سدسازی و سال آبگیری سدها، از سازمان تحقیقات منابع آب (تماب) وابسته به وزارت نیرو جمع‌آوری شد. با برقراری ارتباط بین داده‌های دبی جریان و دبی رسوب (منحنی سنجه) داده‌های رسوب برای ایستگاه‌های مورد مطالعه تهیه شد.

مطالعات شامل ویژگی‌های فیزیوگرافی، پوشش گیاهی، فرسایش‌پذیری و اقلیمی، برای ۶۹ حوضه و زیر حوضه‌های (ردیف) منطقه کارون و کرخه با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، اولاً ویژگی‌های تأثیرگذار شناسایی و ثانیاً با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی، حوضه‌های مشابه و نزدیک به هم از لحاظ این ویژگی‌ها تفکیک شوند. در نهایت سعی شده با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره گام به گام اقدام به مدلسازی رسوب‌دهی در هر یک از گروه‌های همگن شود. این مطالعه بدین لحاظ حائز اهمیت می‌باشد که تأثیر سد بر رسوب ایستگاه‌های هیدرومتری پایین دست بررسی شد و سعی شد با استفاده از منحنی‌های جرم مضاعف این تأثیرات کاهش یا حذف شوند.

۲. روش شناسی

٢.١. معرفي منطقة مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل بخش‌های از حوضه‌های
کارون بزرگ و کرخه است و در محدوده جغرافیایی
۳۰° ۱۶' ۴۰" شمال، ۵۱° ۵۸' ۵۰" شرق و ۴۶° ۶' ۰۰"



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه و موقعیت حوضه‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری

سدها تهیه شد. سپس اثر تغییرات دبی و رسوب در اثر احداث سد در محدوده زمانی سال‌های شروع پروژه احداث سد مورد بررسی قرار گرفت. چنانچه احداث سد تأثیری بر روی رفتار دبی و رسوب‌دهی زیر حوضه‌ها داشته باشد، به صورت شکستگی در امتداد منحنی جرم مضاعف ظاهر می‌شود. بنابراین از آمار ایستگاه تا سال قبل از شروع پروژه سدسازی استفاده شده و منحنی‌های سنجه مجدداً تعدیل شد.

همچنین علاوه بر داده‌های دبی و رسوب، ۳۰ ویژگی فیزیوگرافی، ژئومورفولوژیکی، پوشش گیاهی و اقلیمی برای هر حوضه مطابق جدول (۱) تهیه شد؛ اما به منظور مدلسازی بهینه و دقیق‌تر با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی تعداد ویژگی‌های فوق بر اساس قدر مطلق ضرایب بیش از ۰/۵ هر کدام یک از ویژگی‌ها در ۵ مؤلفه اول تقلیل داده شد (رابطه ۲).

$$PC_i = E_i^T X \quad (2)$$

در این رابطه: E_i^T ، i امین بردار ویژه و X بردار خصوصیات افراد است.

در مرحله بعد بر اساس ویژگی‌های منتخب در مرحله قبلی از خوشه‌بندی به روش وارد^۳ به دلیل کاهش تلفات ناشی از داده‌های پرت و فاصله اقلیدسی^۴ انجام و حوضه‌های مشابه با استفاده از پکیج NbClust در محیط برنامه R گروه‌بندی شدند [۲ و ۳]. در نهایت جهت مدلسازی رسوب معلق و ویژگی‌های حوضه‌های مورد مطالعه از رگرسیون چند متغیره گام به گام (رابطه ۳) بر روی ویژگی‌های منتخب در داخل هر گروه استفاده شد.

در این مطالعه به منظور تهیه روابط منحنی‌های سنجه ایستگاه‌های مورد مطالعه از روش حد وسط دسته‌ها استفاده شد؛ در این روش که اولین بار توسط [۵] ارائه شد، ابتدا مجموعه متناظر دبی-رسوب به صورت صعودی مرتب شده و پس از آن به دسته‌های مشخص تقسیم می‌شوند. در گام بعدی به صورت متناظر به ازای متوسط دبی هر دسته، متوسط غلظت رسوب آن دسته تعیین و یک سری جدید از زوج داده‌های دبی-رسوب تهیه می‌شود. پس از آن، سری مذکور به یک دستگاه مختصات لگاریتمی منتقل شده و یک رابطه رگرسیونی توانی^۱ با فرم معادله (۱) به آن برازش داده می‌شود و مطابق با آن از روی دبی روزانه مقادیر رسوب روزانه و در نهایت سری‌های سالانه رسوب برای هر ایستگاه برآورد می‌شود.

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

در این رابطه:

Q_s : دبی رسوب به ازای مقادیر دبی جریان

Q_w : دبی جریان

a و b: ضرایب معادله هستند.

به دلیل وجود سدها در بالادست حوضه‌های مطالعاتی، دسترسی به داده‌های معتبر، یکی از چالش‌های مطالعات رسوب است. به عبارت دیگر، احداث سد بر روی آبراهه‌های اصلی باعث تحت تأثیر قرار گرفتن ماهیت تصادفی داده‌های دبی و رسوب می‌شود؛ لذا به منظور حذف اثر سد بر روی داده‌های دبی و رسوب ایستگاه‌های پایین دست خود، مقادیر تجمعی رسوب در مقابل مقادیر تجمعی بارش به عنوان یک ویژگی مستقل رسم شد و منحنی جرم مضاعف برای تمامی ایستگاه‌های پایین دست

^۱Principal Component Analysis

^۳Ward

^۴Euclidian

^۱Power regression

Y متغیر وابسته، a_0 عرض از مبدأ خط و a_1 تا a_n ضرایب رگرسیون متغیرهای مستقل هستند.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (3)$$

در این رابطه: X_1 تا X_n متغیرهای ورودی (مستقل)،

جدول ۱. ماتریس ویژگی های مورد بررسی

ردیف	نام ویژگی	ردیف	نام ویژگی
۱	محیط حوضه	۱۶	رلیف حوضه
۲	مساحت حوضه	۱۷	شاخص ضریب زبری
۳	طول حوضه	۱۸	فرسایش پذیری سازندها
۴	ضریب فشردگی	۱۹	درصد اراضی مارنی
۵	ضریب شکل	۲۰	متوسط فرسایش پذیری مارنی
۶	نسبت دایره ای	۲۱	درصد ذرات شن خاک
۷	طول رودخانه	۲۲	درصد ذرات سیلت خاک
۸	تراکم آبراهه های	۲۳	درصد ذرات رس خاک
۹	طول بلندترین آبراهه	۲۴	NDVI_۲۰۰۶ (مرطوب ترین سال)
۱۰	شیب متوسط بلندترین آبراهه	۲۵	NDVI_۲۰۰۷ (سال نرمال)
۱۱	متوسط بارندگی سالانه	۲۶	NDVI_۲۰۰۸ (خشک ترین سال)
۱۲	متوسط ارتفاع در ۸۵٪ طول بالایی آبراهه اصلی	۲۷	درصد اراضی جنگلی
۱۳	متوسط ارتفاع در ۱۵٪ طول پایینی آبراهه اصلی	۲۸	درصد اراضی مرتعی
۱۴	ارتفاع نقطه در ۱۵٪ طول بالایی آبراهه اصلی	۲۹	درصد اراضی مرتعی فقیر
۱۵	ارتفاع نقطه در ۸۵٪ طول بالایی آبراهه اصلی	۳۰	تعداد زمین لغزش

همچنین به منظور ارزیابی مدل ها از شاخص های ضریب نش ساتکلیف (NS) و ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر مدل استفاده شد. باید اشاره کرد که به علت مقادیر زیاد ویژگی های رسوب، مقادیر RMSE برای مقادیر حقیقی و برآورد شده ممکن است اعداد بزرگی باشد که شاید برای ارزیابی کارایی مدل مناسب نباشد؛ لذا در این مطالعه مقادیر RMSE برای مقادیر استاندارد شده رسوب برآورد شده و واقعی محاسبه شد.

۳. نتایج

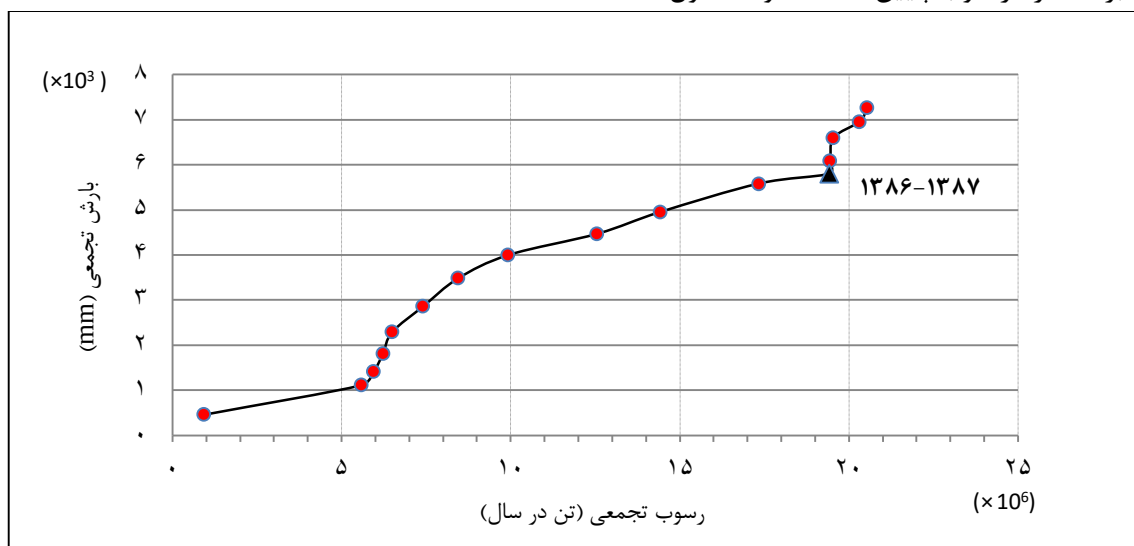
۳.۱. منحنی جرم مضاعف

تحلیل و مدل سازی مناسب برای یک ویژگی طبیعی زمانی با بیشترین صحت همراه است که تمامی رویدادهای

ویژگی مورد مطالعه به صورت تصادفی اتفاق افتاده باشد. نتایج بررسی اثر سدهای مورد بهره برداری بر روی رسوب دهی حوضه ها با استفاده از منحنی های جرم مضاعف رسوب-بارش نشان داد که از بین ۶۹ ایستگاه مورد مطالعه، ۳۵ ایستگاه در بالا دست خود دارای انواع سدهای مخزنی بودند که از این بین، رسوب دهی ۲۹ ایستگاه تحت تأثیر سدهای بالا دست خود بوده و از دوره آماری آنها تا سال پیش از احداث سد بالا دست آنها استفاده شد. شکل (۲) منحنی جرم مضاعف را برای ایستگاه هلیلان (۱۴۷-۲۱) بر روی رودخانه سیمره نشان می دهد که به صورت همزمان با سال احداث سد کلان ملایر (سال شروع عملیات اجرایی ۱۳۸۲ و سال خاتمه و آبگیری سد ۱۳۹۰) منحنی جرم مضاعف دچار شکستگی در محدوده سال ۸۷-۱۳۸۶ شده که نشان دهنده تأثیر

کیلومتری رودخانه تأثیر بگذارند.

عملیات اجرایی سد و پس از آن تأثیر آگیری این سد است. همچنین نتایج نشان داد که سدهای بزرگ می‌توانند بر عملکرد رسوب پایین دست خود تا طول ۹۸

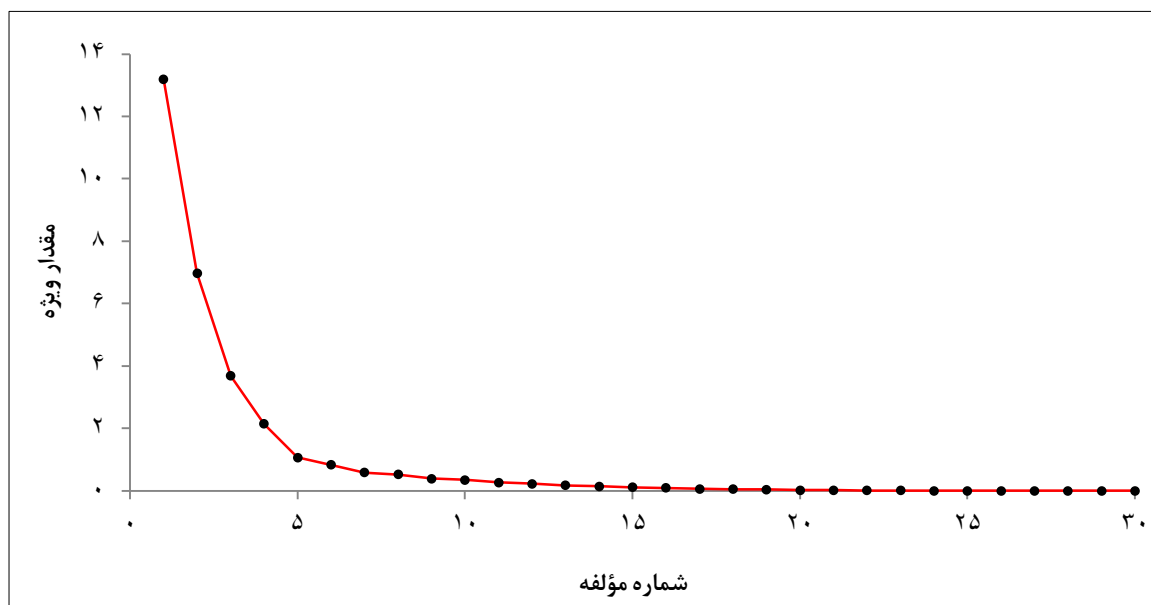


شکل ۲. منحنی جرم مضاعف بارش-رسوب ایستگاه هلیلان (۱۴۷-۲۱) بر روی رودخانه سیمره

۳.۲. تجزیه مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی

با تکمیل و آماده شدن داده‌های رسوب و ماتریس ویژگی‌های هر زیر حوضه به منظور کاهش ابعاد ویژگی‌ها و مدلسازی بهینه، عمل PCA بر روی ویژگی‌ها انجام شد. نمودار سنگریزه‌ای مؤلفه‌های اصلی نشان داد که ۵ مؤلفه اول ۹۰ درصد تغییرات را در بر می‌گیرند (شکل ۳) و کل

واریانس تبیین شده توسط ویژگی‌های ذکر شده ۸۷/۳ درصد است. بنابراین از بین بردارهای ویژه ۶ مؤلفه اول ویژگی‌هایی (مقادیر چرخش یافته) که دارای قدر مطلق ضرایب بیشتر از ۰/۵ بودند به عنوان ویژگی‌های تأثیر گذار انتخاب و در فرآیند خوشه‌بندی و مدلسازی مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۲).

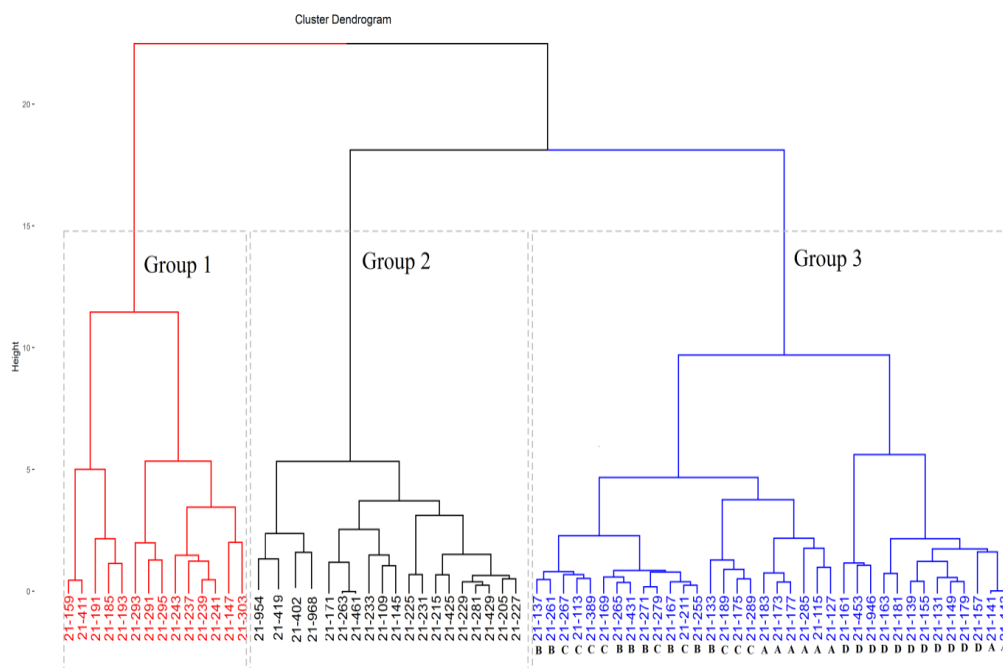


شکل ۳. نمودار سنگریزه‌ای مؤلفه‌های اصلی
جدول ۲. ضرایب ویژگی‌های انتخاب شده

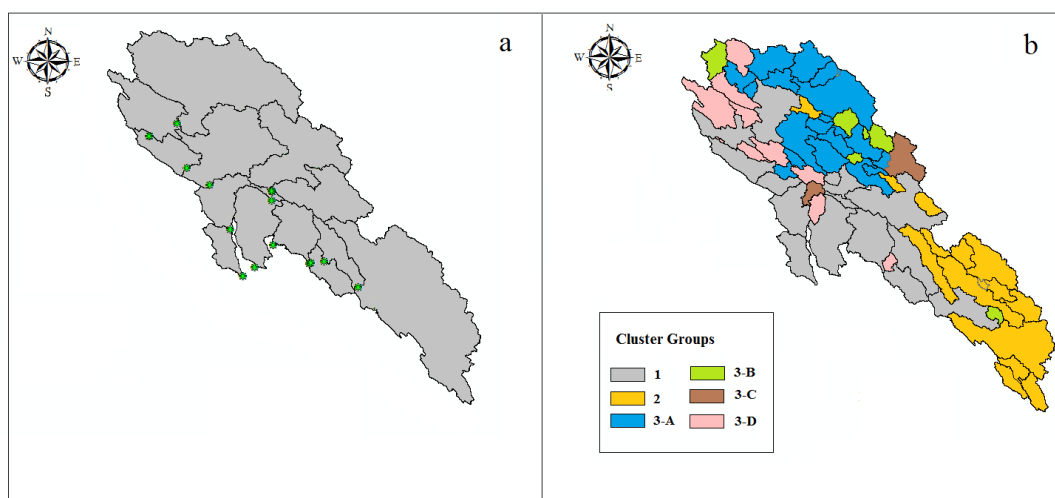
نام ویژگی	واحد	کد متغیر	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅
متوسط رسوب سالانه	Ton/Year	Y	۰/۸۷				
محیط حوضه	Km	X ₁		۰/۷۶			
مساحت حوضه	Km ²	X ₂		-۰/۸۱			
طول رودخانه اصلی	Km	X ₃		-۰/۵۸			
متوسط ارتفاع در ۸۵٪ بالایی آبراهه اصلی	m	X ₄					-۰/۶۰
ارتفاع نقطه در ۸۵٪ طول بالایی آبراهه اصلی	m	X ₅					-۰/۶۸
رلیف حوضه	m	X ₆					۰/۵۴
تعداد زمین لغزش	-	X ₇			۰/۷۵	۰/۶۱	

منفی نشان می‌داد. برای غلبه بر این مشکل مجدداً با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی، حوضه‌های گروه سوم به ۴ زیر گروه بر اساس ویژگی‌های مساحت، طول رودخانه اصلی و محیط حوضه تقسیم شدند. شکل (۵) موقعیت افراد هر گروه را در حوضه‌های اصلی و زیر حوضه‌های کوچکتر نشان می‌دهد. همچنین شکل (۶) نمودار جعبه‌ای هر یک از ویژگی‌های مورد بررسی را در هر گروه نشان می‌دهد.

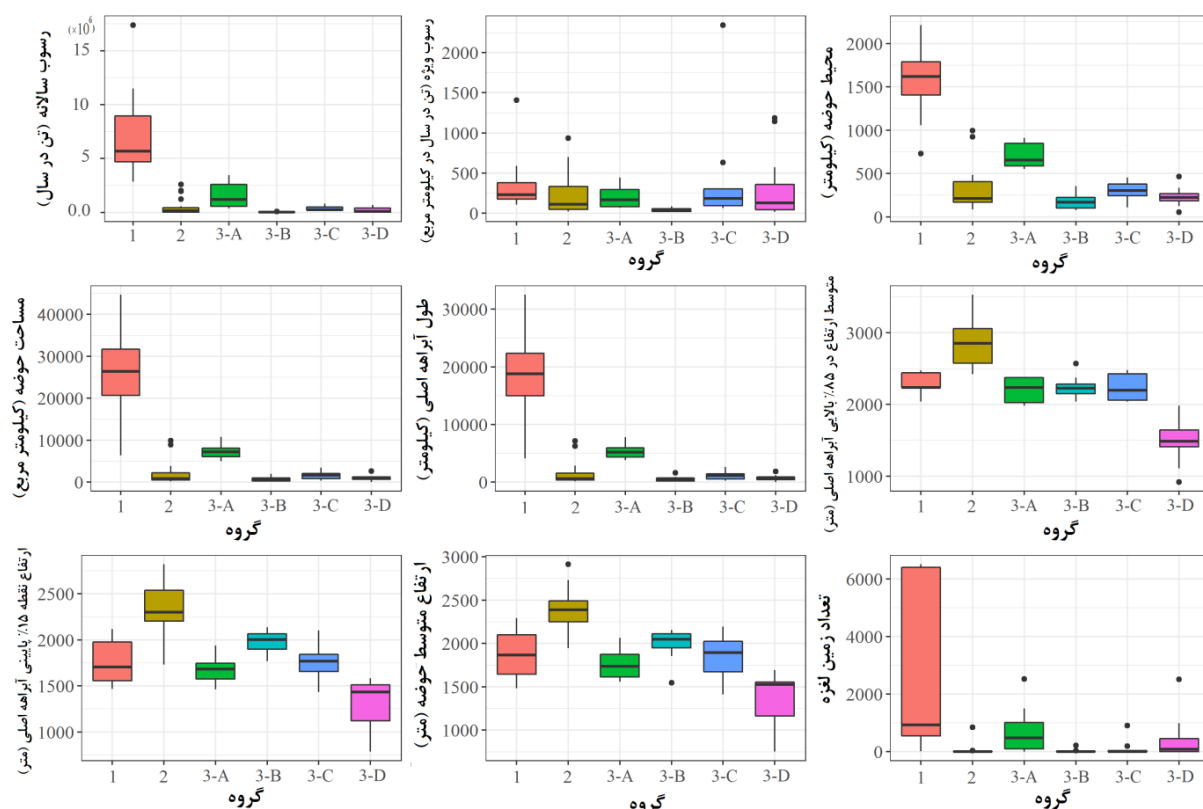
نتایج حاصل از خوشه‌بندی سلسله مراتبی حوضه‌ها و زیر حوضه‌های مورد مطالعه بر اساس ۸ ویژگی فوق ۳ گروه اصلی را نشان داد (شکل ۴). در هر یک از گروه‌ها، جداگانه اقدام به برقراری رگرسیون چندمتغیره گام به گام شد. نتایج نشان داد که مدل اولیه ساخته شده برای گروه سوم از ضریب تبیین کمی برخوردار بود ($R^2 = ۳۴/۷\%$). همچنین به خاطر تنوع زیاد حوضه‌ها در این گروه و تغییرپذیری درون گروهی حوضه‌ها مدل برآورد شده در برخی از حوضه‌های کوچک، مقادیر رسوب را صفر و یا



شکل ۴. خوشه‌بندی سلسله مراتبی حوضه‌های مورد مطالعه، حروف A، B، C و D زیرگروه‌های گروه سوم هستند.



شکل ۵. a: حوضه‌های بزرگ گروه اول، b: زیر حوضه‌های گروه اول و سایر گروه‌ها. برخی از زیر حوضه‌ها به علت هم پوشانی نمایش داده نشده‌اند.



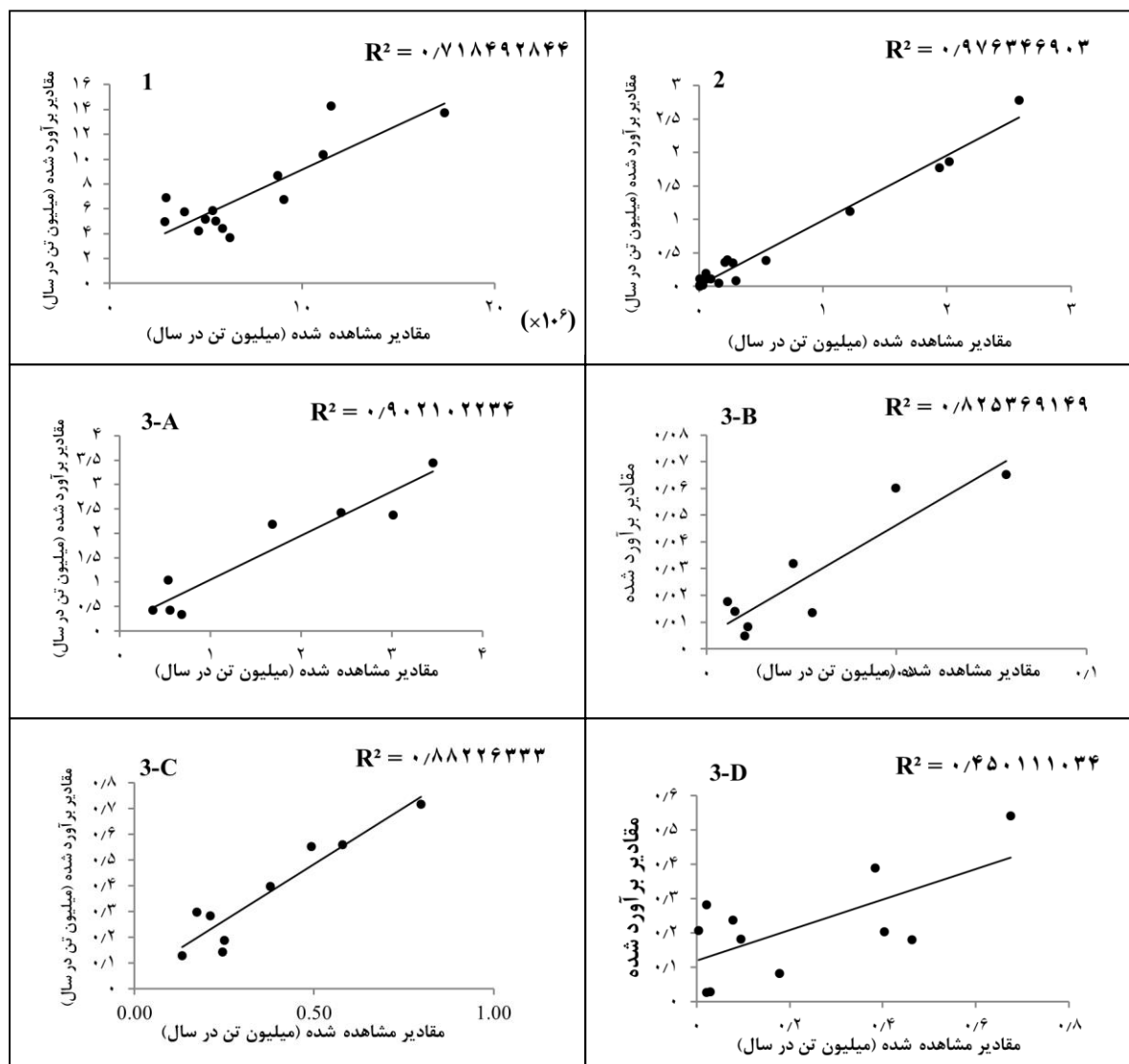
شکل ۶. نمودار جعبه ای ویژگی‌های مورد مطالعه در هر یک از گروه‌های همگن

ساخته شده برای هر گروه و نتایج ارزیابی کارایی این مدل‌ها را نشان می‌دهد. شکل (۷) نیز مقادیر برآورد شده را نسبت به مقادیر واقعی برای هر گروه نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از رگرسیون گام به گام در هر یک از گروه‌های فوق نشان داد که در هر گروه ترکیب خاصی از ویژگی‌ها بر روی رسوبدهی حوضه‌ها تأثیر گذار هستند. جدول (۳) مدل

جدول ۳. مدل‌های ساخته شده رسوب معلق سالانه برای هر گروه بر حسب هزار تن در سال

گروه	مدل	RMSEs	NS
۱	$Y = [-20.3(X_1) + 1.12(X_3) - 4.87(X_5) + 26339.63]$	۰/۵۳	۰/۷۲
۲	$Y = [3.3(X_1) + 3.16(X_2) - 4.46(X_3) + 0.480(X_4) - 1921.42]$	۰/۱۵	۰/۹۸
۳-A	$Y = [4.58(X_2) - 5.94(X_3) - 2.821(X_6) + 4591.08]$	۰/۳۰	۰/۹۰
۳-B	$Y = [0.46(X_2) - 0.55(X_3) - 5.83]$	۰/۴۰	۰/۸۳
۳-C	$Y = [-4.648(X_1) + 0.563(X_2) + 0.778(X_4) - 887.5]$	۰/۳۳	۰/۸۸
۳-D	$Y = [-4.983(X_1) + 0.824(X_2) + 2.057(X_5) - 1.739(X_6) + 232.11]$	۰/۷۷	۰/۴۵



شکل ۷. مقادیر واقعی در مقابل مقادیر برآورد شده رسوب تولید شده (میلیون تن در سال) در هر گروه

۴. بحث و نتیجه گیری

شده و رسوبدهی حوضه‌ها افزایش می‌یابد [۱]. اما با توجه به نتایج به‌دست آمده به نظر می‌رسد چنانچه مساحت حوضه‌ها از یک حدی زیادتر شود عامل مساحت تأثیر چندانی بر رسوبدهی حوضه نخواهد داشت. در حوضه‌های بسیار بزرگ، رسوب تولید شده افزایش یافته اما این مقدار رسوب تولید شده ممکن است به نقطه خروجی حوضه در این گونه حوضه‌ها نرسد و عملاً داده‌ای از حجم رسوب تولید شده ثبت نشود. به همین دلیل با افزایش بیش از حد مساحت حوضه‌ها، عامل مساحت به عنوان یک عامل مؤثر بر روی رسوبدهی حوضه‌های مورد بررسی در گروه اول

نتایج نشان داد که تقریباً در همه گروه‌ها به جز گروه ۳-D مدل‌های ساخته شده کارایی خوبی داشته و به‌طور کلی ویژگی‌های مساحت، محیط و طول رودخانه اصلی حوزه آبخیز از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر رسوبدهی حوضه‌های مورد مطالعه هستند. با توجه به جدول (۳) عامل مساحت (X_2) در تمامی مدل‌ها به جز مدل گروه اول به عنوان یک عامل مؤثر بر رسوبدهی حوضه‌ها شناخته شده است. عمدتاً با افزایش مساحت میزان رسوب تولید

شناخته نشد. همچنین ویژگی تعداد لغزش‌ها (X_7) علی‌رغم ضریب نسبتاً بالا در مؤلفه‌های سوم و چهارم در هیچ کدامیک از مدل‌های برآورد شده دارای اثر معنی‌داری بر روی رسوب سالانه نبود. علت این امر یکی دامنه بسیار گسترده وقایع (صفر تا بیش از ۶۰۰۰ رویداد) و دیگری یکسان بودن اعداد برای حوضه‌هایی که دارای همپوشانی بودند، است. از این جهت ویژگی تعداد لغزش‌ها به عنوان یک ویژگی مناسب جهت مدلسازی رسوب معلق در منطقه مورد مطالعه شناخته نشد. به منظور بررسی اثر لغزش‌ها بر روی رسوب تولید شده شاید بهتر باشد به جای تعداد لغزش‌ها از داده‌های وسعت لغزش‌های افتاده در هر حوضه استفاده کرد. از طرف دیگر مدل‌های برآورد شده برای گروه دوم و ۳-A به ترتیب دارای بیشترین مقادیر ضریب نشا-تاکلیف در بین سایر گروه‌ها هستند. علت این امر تا حدودی می‌تواند مرتبط با مساحت و طول آبراهه‌های زیر حوضه‌های این گروه باشد که نه شامل حوضه‌های خیلی بزرگ مانند گروه اول است و نه حوضه‌های خیلی کوچک مانند گروه‌های ۳-B، ۳-C و ۳-D؛ در حوضه‌های خیلی کوچک، اثر مساحت و طول آبراهه‌ها کمتر شده و کاهش چشمگیر ضرایب ویژگی‌های مساحت و طول آبراهه اصلی گروه‌های ۳-B، ۳-C و ۳-D نسبت به گروه اول، دوم و ۳-A و رسوب‌دهی در این حوضه‌ها ممکن است بیشتر تابعی از خصوصیات سنگ‌شناسی و حساسیت واحدها به فرسایش باشد. در ارتباط با گروه ۳-D به نظر می‌رسد که رسوب‌دهی در این حوضه‌ها ارتباط چندانی با ویژگی‌های مستقل مورد بررسی ندارد یا حداقل از یک مدل خطی پیروی نمی‌کند و نیازمند بررسی سایر ویژگی‌ها و آزمون مدل‌های دیگر است.

در این مطالعه سعی شد با استفاده از مدلسازی خطی ارتباط بین پارامترهای فیزیوگرافی، پوشش گیاهی و

اقلیمی با رسوب‌دهی سالانه حوضه‌های کارون بزرگ و کرخه مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که رسوب‌دهی در این حوضه‌ها بیشتر تحت تأثیر عوامل فیزیوگرافی است که با نتایج [۱۴ و ۱۵] که در این ارتباط نتایج مشابهی ارائه کرده‌اند مطابقت دارد. در این مطالعه حوضه سد کمال صالح استان مرکزی در گروه ۳-B قرار گرفت و در مدل ساخته شده برای این حوضه دو ویژگی مساحت (X_2) و طول رودخانه (X_3) بر روی رسوب‌دهی سالانه آن مؤثر هستند با این حال ضریب ویژگی طول رودخانه حدود ۲۵٪ بیش از ضریب مساحت در مدل ساخته شده بود که هم راستا با نتایج [۸] که اظهار داشتند عامل طول رودخانه به صورت معنی‌دار بر روی رسوب‌دهی حوضه سد کمال صالح استان مرکزی اثر دارد، مطابقت دارد. به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده نشان داد که در محدوده حوضه‌های جنوب غرب کشور متغیرهای فیزیوگرافی مانند محیط، مساحت و رلیف حوضه نسبت به سایر عوامل از درجه اهمیت بیشتری برخوردار هستند و با یافته‌های مشابه [۴ و ۱۱] مطابقت دارد. نکته دیگر در ارتباط با این تحقیق استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی جهت کاهش ابعاد ماتریس ویژگی‌ها و گروه‌بندی زیر حوضه‌ها به گروه‌های همگن بر اساس این ویژگی‌هاست که با نتایج [۴] مطابقت دارد. استفاده از این روش برای مناطق وسیع و ناهمگن بسیار کارآمد است به‌طوری‌که در منطقه مورد مطالعه نتایج مدل‌های ساخته شده بر اساس گروه‌بندی تمامی ویژگی‌های ماتریس، از دقت بسیار پایینی برخوردار بود. بنابراین با توجه به نتایج قابل قبول این مطالعه می‌توان اظهار داشت که استفاده از روش‌های خوشه‌بندی مناسب و رگرسیون چند متغیره گام به گام کارایی مناسبی در مدلسازی رسوب معلق و تحلیل منطقه‌ای رسوب معلق دارند.

References

- [1] Arabkhedri, M. (2005). A Study on the Suspended Sediment Yield in River Basins of Iran. *Iran-Water Resources Research*. 1(2): 51-60
- [2] Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2015). Determining the Best Number of Clusters in a Data Set. *Recuperado de: <https://cran.rproject.org/web/packages/NbClust/NbClust.pdf>*.
- [3] He, Q., 1999. A review of clustering algorithms as applied in IR. Graduate School of Library and Information Science University of Illinois at Urbana-Campaign, 6, pp.1-33.
- [4] Honarbakhsh, A., Niazi, A., Soltani, S. and Tahmasebi, P. (2019). Modeling the relationship between suspended sediments and hydrological and environmental characteristics of a basin (case study: basin of Dez Dam). *Journal of Quantitative Geomorphological Research*. 8(1): 105-117
- [5] Jansson, M.B. (1996) "Estimating a sediment rating curves of the Reventazon river at Palomo using logged mean loads within discharge classes ." *Journal of Hydrology*, ol.183, No.4, PP. 227-241
- [6] 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
- [7] Moazemi, M., Feyznia, S. (2007). Regional Analysis of Suspended Sediment yield (Case Study: Jarahi River). 4th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran. Tehran, Iran. pp. 13-26
- [8] Moradian, M., Najafinejad, A., Moradi, M. and Varvani, J. (2010). Application of Regional Analysis in Estimation of Annual Suspended Sediment (Case Study: Kamal Saleh Dam Watershed). 6th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran. Tehran, Iran.
- [9] Najafinejad, A., Moradian, M., Varvani, J. and Bordisheykh, V. (2010). Performance Evaluation of Correction Factors in Optimization of Sediment Rating Curve (Case Study: Kamal Saleh Dam Watershed, MARKAZI Province, Iran). *Journal of Water and Soil Conversion*. 18(2): 105-122
- [10] Rooshan, H., Vahabzadeh, Q. and Khaledi, A. (2017). Determination of the Best Model to Estimate Suspended Sediment Load in Zaremrood River, Mazandaran, Iran. *Quarterly journal of Environmental Erosion Research*, 7(3), 39-54.
- [11] Saghafian, B., Ghermezcheshmeh, B., Samiei, M. and Asheghi, R. (2009). Effective factors on suspended sediment load in southwestern basins of Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 1(3): 140-152
- [12] 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
- [13] Shaabani, M., Feyznia, S., Ahmadi, h. and Ghodousi, J. (2007). Investigation and Determination of Effective Factors on Sediment Production and Yield of Drainage Basins (Case Study: TALEGHAN DRAINAGE BASIN). *Iranian Journal of Natural Resources*, 60(3): 759-771
- [14] Shi, Z. H.; Huang, X. D.; Ai, L.; Fang, N. F.; & G. L. Wu, 2014. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds, *Geomorphology*, 226, 193-201.
- [15] Zhang, H. Y.; Shi, Z. H.; Fang, N. F.; & M. H. Guo, 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China, *Geomorphology*, 234, 19-27.