

دقت قابل قبولی از روش مدل‌سازی منطقه‌ای برای برآورد مقدار رواناب و رسوب استفاده کرد.

**کلید واژه‌ها:** مدل منطقه‌ای، فیزیوگرافی، تخمین، PCA، Ward.

### مقدمه

رواناب و رسوب تولیدی از حوزه‌های آبخیز یک فرآیند غیر قابل اجتناب می‌باشد که با مطالعه و شناخت عوامل تأثیرگذار در این فرآیند می‌توان مدیریت بهتری در حوزه‌های آبخیز ارائه نمود. برای اجرای یک مدیریت جامع و یکپارچه داشتن اطلاعات مناسبی از مشخصات هیدرولوژیکی هم از حوضه‌های دارای ایستگاه و هم از حوضه‌های فاقد ایستگاه ضروری می‌باشد. ولی متأسفانه در بسیاری از مناطق دنیا و به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه، اطلاعات ایستگاه‌های اندازه‌گیری رواناب و رسوب کم و ناقص می‌باشند [۳۴]. به‌منظور تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های فاقد آمار یا با آمار ضعیف نیاز به توسعه روش‌های مناسب می‌باشد که ابزارهای مدل‌سازی عددی و رویکردهای تجربی در این راستا از شهرت بیشتری برخوردار می‌باشند [۱۴].

تخمین مقدار رواناب و رسوب تولیدی با توجه به تأثیرگذاری عوامل مختلف مشکل می‌باشد [۱۶، ۲۵]. فرسایش خاک در یک منطقه شامل فرآیندهایی مانند جدایش، انتقال و در نهایت ته‌نشینی ذرات خاک می‌باشد، که ذرات ته‌نشین شده به‌عنوان رسوب معرفی می‌شوند. بنابراین مقدار فرسایش خاک به عوامل مختلفی مانند شدت و مقدار بارندگی، توپوگرافی، کاربری اراضی، فعالیت‌های مدیریتی، بافت خاک و پتانسیل جدایش ذرات خاک وابسته است [۳۱، ۲۵].

در مطالعات مختلفی اهمیت استفاده از مدل‌های منطقه‌ای برای تعیین پارامترهای حوزه‌های آبخیز در ایستگاه‌های فاقد آمار بیان شده است [۲۱، ۹]. طی دهه‌های اخیر یک انتقال مطالعاتی به سمت مدل‌سازی منطقه‌ای به‌عنوان روش‌های اولیه برای ارزیابی پاسخ حوزه‌های آبخیز به ورودی‌های هیدرولوژیکی و مدیریت زمین وجود دارد [۱۱]. تعیین ارتباط بین مشخصات حوزه‌های آبخیز با تولید رواناب و رسوب، پیش‌نیاز اصلی روش مدل‌سازی منطقه‌ای می‌باشد [۳۳]. بدون دسترسی به اطلاعات مقدار دبی رودخانه در طی یک دوره آماری، مدل‌های هیدرولوژیکی نمی‌توانند برای یک منطقه واسنجی و اعتبارسنجی شوند [۴]. از این‌رو مدل‌های منطقه‌ای

## مدل‌سازی تولید رواناب و رسوب با استفاده از خصوصیات هیدروژئومورفولوژیک در حوزه آبخیز سامیان، استان اردبیل

محمدگلشن<sup>۱</sup>، عطاله کاویان<sup>۲</sup>، اباذر اسمعیلی عوری<sup>۳</sup> و الان دی زیگلر<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۲۳

### چکیده

تولید رواناب و هدررفت خاک از مسائل مهم مدیریت منابع آب می‌باشند که منجر به مشکلاتی در بهره‌برداری از تأسیسات آبی و سدها می‌شوند. حجم رواناب، شدت فرسایش خاک و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز به‌طور قابل توجهی به ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیک منطقه بستگی دارد. بنابراین این تحقیق با هدف بررسی رابطه ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیک و تولید رواناب و رسوب در بالادست ایستگاه هیدرومتری سامیان با مساحت ۴۲۱۵۷ هکتار انجام شده است. برای این منظور حوضه بالادست ایستگاه سامیان همراه با ۱۹ زیرحوضه دیگر تعیین و مشخصات مربوط به هر حوضه در ۶ گروه و ۷۶ پارامتر مستقل تهیه شد. با استفاده از ماتریس همبستگی، روش خوشه‌بندی Ward و روش PCA پارامترهای انتخابی برای ورود به مدل‌سازی در سه مقیاس انتخاب شدند که ۷۲ معادله برای برآورد رواناب و رسوب به دست آمد. همچنین به‌منظور ارزیابی معادلات به دست آمده، نمایه‌های آماری نش-ساتکلیف (NS)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ریشه خطای مطلق (RMSE) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که معادلات در سطح کل حوزه آبخیز با ضریب NS بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ و ضریب  $R^2$  بین ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ از بیشترین دقت برخوردار می‌باشند. همچنین معادلات حاصل از پارامترهای انتخابی به روش PCA نسبت به روش خوشه‌بندی دارای دقت بالایی هستند. با توجه به اهمیت تعیین مقدار رواناب و رسوب برای مدیریت حوزه‌های آبخیز، در مناطق فاقد آمار می‌توان با

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
۲- نویسنده مسئول و دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، پست الکترونیک: a.kavian@sanru.ac.ir  
۳- دانشیار گروه منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی  
۴- استاد گروه جغرافیا، دانشگاه ملی سنگاپور

مورد نیاز می‌باشند که به مشخصات ساده قابل اندازه‌گیری حوضه‌ها وابسته می‌باشند.

برای ارائه مدل منطقه‌ای اولین گزارشات مربوط به تحقیقات جامز و همکاران [۱۷] و ماگت و همکاران [۲۴] می‌باشد. از مهمترین روش‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی منطقه‌ای، روش‌های رگرسیون دو متغیره و رگرسیون چندمتغیره می‌باشند که در مطالعات مختلفی استفاده شده‌اند [۲، ۲۶، ۲۸، ۴۳].

انتخاب دقیق پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی اولین شرط برای ارائه مدل مناسب می‌باشد [۱۵]. روش‌های آماری برای کاهش تعداد زیادی از پارامترها به تعداد محدودی از پارامترهای غالب به‌عنوان تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA<sup>1</sup>) نامیده می‌شود که در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱، ۱۳، ۳۶]. گزارش وسترا و همکاران [۴۱] نشان داد که روش PCA نسبت به روش تجزیه و تحلیل اجزاء مستقل از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد.

در رابطه با مدل‌سازی منطقه‌ای در تحقیقی رستروپو و همکاران [۳۰] یک مدل رگرسیون چندگانه برای تخمین تولید رسوب در مناطق جنوبی آمریکا را ارائه دادند. آن‌ها برای این منظور پارامترهای رواناب، بارندگی، بارندگی اوج، ارتفاع متوسط، میانگین دبی جریان و عوارض زمین در ۶ حوضه را تهیه نمودند. نتایج نشان داد که در مدل منطقه‌ای مقدار متوسط دبی سالانه به‌طور مشخص تأثیر بیشتری بر تولید رسوب دارد. سویتزکی و میلیمان [۳۵] جهت تخمین رسوب عامل‌های تأثیرگذار بر آورد رسوب را جمع‌آوری کردند که شامل مساحت حوضه زهکشی، پستی و بلندی حوضه، وضعیت زمین‌شناسی، اقلیم و کاربری اراضی می‌باشد. سپس با روابط رگرسیونی به‌طور موفقیت‌آمیزی جریان رسوب ورودی به مناطق ساحلی را برآورد کردند. همچنین می‌توان به مطالعات کوهن و همکاران [۶]، بارباروسا و همکاران [۲] و بوسکل [۲۶] برای مدل‌سازی منطقه‌ای اشاره نمود.

در تحقیقات داخل کشور نیز کاشی [۱۸] جهت برآورد شدت فرسایش خاک از مشخصات هیدروژئومورفولوژیک در حوزه آبخیز هرزند چای استفاده کرد. در این تحقیق بر اساس مدل ژئومورفولوژی کیفی، ۶ معیار توپوگرافی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، اقلیم، سنگ‌شناسی و خاک‌شناسی با ۳۱ شاخص مؤثر در تعیین فرسایش خاک انتخاب شد. نقشه شدت فرسایش خاک در سطح حوضه نشان شد که مقدار فرسایش خاک در سطح یک هکتار معادل با ۰/۰۳۳ می‌باشد. همچنین محمدی [۲۷] در تحقیقی در حوزه آبخیز سفید رود با توجه به مشخصات توپوگرافیکی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، هواشناسی و هیدرولوژیکی اقدام به ارائه مدل مناسب برای منطقه مطالعاتی کردند. نتایج نشان داد که روش رگرسیون گام به گام از دقت بالایی برای تخمین دبی رسوب برخوردار می‌باشد.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد استفاده از رویکرد مدل‌سازی منطقه‌ای برای حوزه‌های آبخیز فاقد آمار به کمک

## 1. Principal Components Analysis

تحلیل‌های آماری از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. حوزه آبخیز سامیان در قسمت مرکزی استان اردبیل قرار دارد که دارای تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری مناسب برای مطالعات مدل‌سازی منطقه‌ای می‌باشد. این تحقیق با هدف مدل‌سازی تولید رواناب و رسوب در حوضه‌های فاقد آمار نزدیک به منطقه مطالعاتی انجام شد. برای این منظور با توجه به تأثیر بالای سطح حوضه در میزان رواناب و رسوب تولیدی، اقدام به تقسیم‌بندی حوضه‌های آبخیز در سه سطح مطالعاتی شد که در مطالعات دیگر به این موضوع پرداخته نشده‌است. با ارزیابی پارامترها و معادلات مختلف مهمترین عوامل مؤثر در تولید رواناب و رسوب تعیین شدند و در سه سطح کل حوضه، زیرحوضه‌های بزرگ مقیاس و زیرحوضه‌های کوچک مقیاس مناسب‌ترین معادله برای برآورد رواناب و رسوب منطقه‌ای ارائه شد.

## مواد و روش‌ها

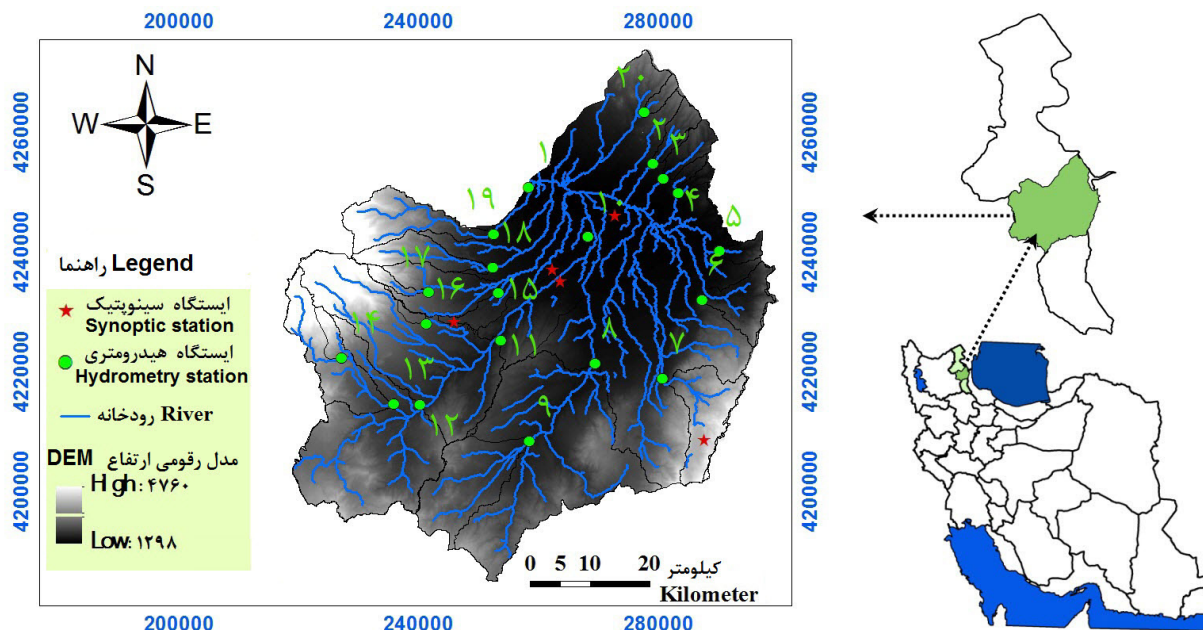
### منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق برای مدل‌سازی منطقه‌ای از اطلاعات مختلف ۲۰ ایستگاه هیدرومتری در حوزه آبخیز سامیان استفاده شد. حوزه آبخیز سامیان از مجموعه حوضه‌های رودخانه ارس می‌باشد. محدوده طبیعی حوضه بدین ترتیب می‌باشد که از طرف شمال به شهرستان گرمی و دشت مغان، از طرف شرق به رشته کوه‌های تالش، از سمت جنوب به رشته کوه‌های بزقوش و از غرب به رشته کوه‌های مرتفع سبلان محدود می‌شود. مقدار متوسط بارندگی و درجه حرارت در این منطقه به ترتیب ۳۰۴ میلی‌متر و ۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. تعداد روزهای یخبندان به‌طور متوسط ۱۳۰ روز در سال می‌باشد [۳۸]. موقعیت مربوط به منطقه مطالعاتی، ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی در شکل ۱ ارائه شده‌است. همچنین در جدول ۱ اطلاعات مربوط به هر یک از حوضه‌های مطالعاتی آورده شد.

### روش کار

#### تهیه پارامترهای مورد نیاز

باتوجه به خصوصیات حوضه، تحقیقات انجام شده و تجربیات کارشناسی [۲۸] پارامترهای مناسب برای مدل‌سازی تولید رواناب و رسوب انتخاب شدند. که شامل مشخصات هیدرولوژیکی (دبی متوسط (QA)، دبی حداکثر روزانه (Qmd)، دبی حداکثر (Qm)، دبی حداکثر با دوره بازگشت‌ها ۲، ۳، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ ساله (Q2 تا Q200)، متوسط دبی پنج ماهه (Qm5)، متوسط دبی ۴ ماهه (Qm4) و زمان تمرکز (Tc))، زمین‌شناسی (حساسیت سازندها به فرسایش با استفاده از روش خانم دکتر فیض‌نیا (گروه A، B، C، D)، سازندهای حساس کواترنری (Q)، سازندهای حساس ماقبل کواترنری (PQ)، مجموع آن‌ها (QPQ) و امتیاز حساسیت سازند (Wscr))، کاربری اراضی (کاربری کشاورزی (Agri)، مراتع فقیر (Bar)، مراتع متوسط (PR)، مراتع خوب (GR)، جنگل (Frst)،



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی

Figure 1. Location of study area and weather stations

جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافیکی حوضه‌های

Table 1. Physiographic characteristics of studied watersheds

ضریب گراویلیوس	نسبت انشعاب	شیب (درصد)	مساحت (هکتار)	میانگین ارتفاع (متر)	بارندگی (میلی‌متر)	نام حوضه	شماره حوضه
Gravelius coefficient	Branching ratio	Slope (percent)	Area (ha)	Average height (m)	Precipitation (mm)	Watershed name	Watershed number
1/48	15/2	12.58	42157	1778	461	سامیان Samian	1
1/33	3/8	19.58	3297	1700	299	نمین Namin	2
1/4	1/25	16.67	3946	1549	283	سولا Sola	3
1/54	2	72.16	1201	1435	264	ننه‌کران Nanakaran	4
1/46	1/5	18.41	2054	1484	279	آلادیزگه Aladizgah	5
1/39	7/75	13.2	8053	1638	318	آیریل Airil	6
1/56	7/2	25.3	12761	2489	390	هیر Hir	7
1/48	8/47	13.42	76673	1755	335	کوزه Koza	8
1/47	3/27	15.45	18157	1840	339	شمس‌آباد Shamsabad	9
1/76	6/93	15.65	119392	2033	462	گیلانده Gilandeh	10
1/48	6/78	17.34	102739	2120	472	پل‌الماس Polalmas	11
1/5	12/3	17.65	56624	2161	456	یامچی Yamchi	12
1/8	5/36	22.49	15796	2516	461	نیر Nir	13
1/66	3/75	27.32	2350	2821	452	لای Lay	14
1/34	7/35	16.33	12847	1944	395	نوران Noran	15
1/62	2	17.27	866	2091	348	ویلادق Viladaragh	16
1/19	2	31.34	1661	2429	434	آتشگاه Atashgah	17
1/71	3/9	21.84	7470	2229	410	عموقین Amoghin	18
1/55	3/37	25.76	12647	2469	418	باروق Baroq	19
1/41	2	22.36	1546	2362	323	عنبران Anbaran	20

مسکونی (Resi)، باغ (Grd)، آب (Wat) و شاخص (NDVI))، خاکشناسی (۱۳ نوع گروه خاک)، توپوگرافیکی و فیزیوگرافیکی (ارتفاع حداقل (HL)، ارتفاع حداکثر (HM)، ارتفاع متوسط (HA)، ۵ جهت اصلی دامنه، مساحت (Area)، محیط (P)، قطر دایره هم سطح حوضه (Dim)، شیب حوضه (SlpW)، شیب رودخانه (SlpR)، رتبه رودخانه (Ord)، تراکم زهکشی (Dens)، طول رودخانه (LR)، طول حوضه (LW)، نسبت انشعاب (Brat) و ضریب گراویلیوس (Grav)) و مشخصات اقلیم و هواشناسی (بارندگی متوسط (Pa)، بارندگی حداکثر روزانه (Pmd)، بارندگی حداکثر ماهانه (Pmm)، بارندگی حداکثر با دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ ساله (P<sub>2</sub> تا P<sub>200</sub>)، شدت بارندگی ۳۰ دقیقه‌ای با دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله (EI30<sub>2</sub> تا EI30<sub>100</sub>)، ضریب فورنیه (For)، ضریب دومارتن (Dom) و درجه حرارت (T)) می‌باشند.

تعداد و نوع پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌سازی منطقه‌ای به جنبه‌های ژئوگرافیکی منطقه مطالعاتی بستگی دارد. به‌طور کلی حوضه‌های بزرگ تنوع بیشتری از پارامترها را نشان می‌دهند و به خصوصیات فیزیوگرافی بیشتری برای تفسیر تغییرات نیاز دارند. به‌عنوان مثال در حوضه‌های کوچک متغیرهای اقلیمی ممکن است حذف شوند در حالی که در حوضه‌های بزرگ ممکن است اقلیم به‌عنوان یک معیار تأثیرگذار باشد. در این تحقیق مقدار ۷۶ پارامتر مستقل تأثیرگذار بر دبی رواناب و رسوب در بالادست ۲۰ ایستگاه هیدرومتری با استفاده از نرم‌افزارهای مختلف (SMADA، GIS، ENVI 5.3، SAGA GIS، R v3.3.4، MATLAB 2016b) و معادلات هیدرولوژیکی محاسبه شدند.

#### مدل‌سازی رواناب و رسوب

به‌منظور انتخاب پارامترهای مؤثر برای مدل‌سازی به‌دلیل متفاوت بودن مقادیر مربوط به پارامترهای مختلف ابتدا استانداردسازی داده‌ها انجام شد. استانداردسازی داده‌ها (رابطه ۱) از تأثیر واحدهای اندازه‌گیری بر نتایج مدل جلوگیری می‌کند [۵].

$$X_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

که  $x$  و  $x_{norm}$  داده‌های استاندارد شده و داده‌های اصلی می‌باشند و  $x_{min}$  و  $x_{max}$  به‌ترتیب حداقل و حداکثر بازه ورودی‌ها می‌باشند. با استانداردسازی داده‌ها، ماتریس همبستگی به تفکیک بین هر گروه از متغیرهای مستقل شامل متغیرهای فیزیوگرافی، هیدرولوژی، هوا و اقلیم‌شناسی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و خاک‌شناسی و متغیرهای وابسته (رواناب و رسوب) تشکیل شد سپس در نرم‌افزار R با استفاده از روش خوشه‌بندی Ward و PCA پارامترهای مؤثر انتخاب شدند. با تعیین پارامترهای مؤثر با استفاده از روابط رگرسیون چندگانه اینتر و گام به گام اقدام به تعیین معادلات مختلف بین رواناب و رسوب شد. علاوه بر آن با استفاده از روش‌های مورد استفاده

مدل‌سازی لگاریتمی مربوط به پارامترهای مورد مطالعه نیز انجام شد. همچنین به‌منظور بررسی تعیین تأثیر مقیاس حوضه بر عملکرد مدل منطقه‌ای مطالعات در سه سطح کل حوضه، زیرحوضه‌های بزرگ و زیرحوضه‌های کوچک انجام شد. برای این منظور زیرحوضه‌های بزرگ‌تر از ده هزار هکتار به‌عنوان زیرحوضه‌های بزرگ با پاسخ هیدرولوژیکی آهسته و زیرحوضه‌های کوچک‌تر از آن به‌عنوان زیرحوضه‌های کوچک با پاسخ هیدرولوژیکی سریع انتخاب شدند [۷].

#### اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی مدل‌ها برای تعیین مدل مناسب ضروری می‌باشد، که بعد از ارزیابی عملکرد مدل در مرحله اعتبارسنجی می‌توان از آن مدل در منطقه مطالعاتی استفاده نمود. برای ارزیابی کارایی مدل و محدود کردن جواب‌ها به سمت جواب بهینه، گاهی لازم است چندین معیار آماری مورد استفاده قرار گیرد [۳۲، ۱۰]. به‌طوری‌که در این تحقیق انتخاب بهترین مدل مناسب با استفاده از معادلات لگاریتمی و غیرلگاریتمی بر اساس نمایه‌های آماری ناش-ساتکلیف<sup>۱</sup> (NS)، ضریب تبیین<sup>۲</sup> (R<sup>۲</sup>) و ریشه خطای مطلق<sup>۳</sup> (RMSE) انجام شد که فرمول مربوط به این ضرایب به‌ترتیب در روابط ۲ تا ۴ آورده شده‌است [۲۷]:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \bar{Q}_i^{sim})(Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \bar{Q}_i^{sim})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{n}} \quad (4)$$

در این روابط  $n$  تعداد مشاهدات،  $Q_i^{sim}$  و  $Q_i^{obs}$  مقادیر متناظر مشاهداتی و پیش‌بینی شده،  $\bar{Q}_i^{sim}$  و  $\bar{Q}_i^{obs}$  نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده‌است.

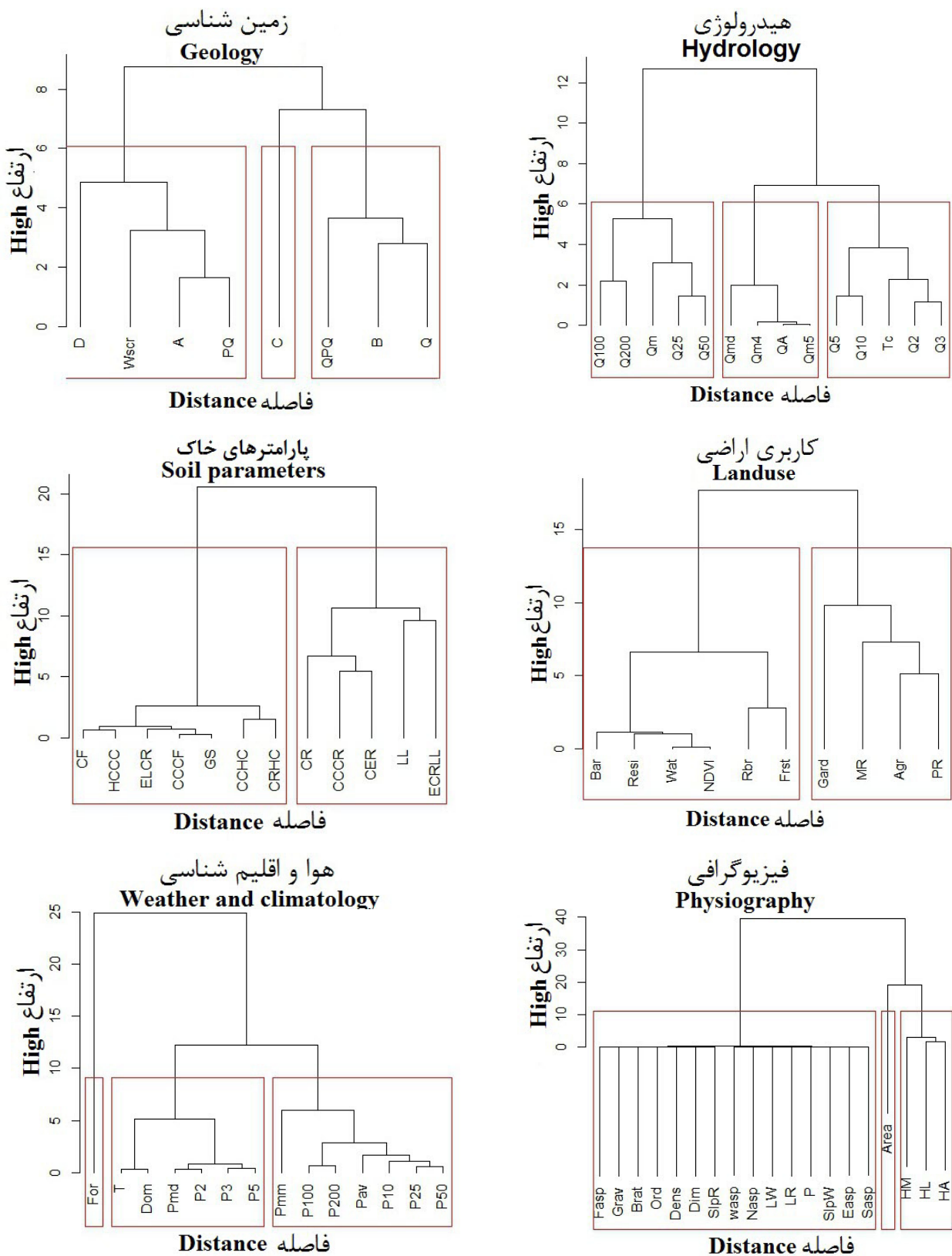
#### نتایج

در بین زیرحوضه‌های مورد مطالعه ۱۰ حوضه به‌عنوان حوضه بزرگ با مساحت بیش از ۱۰ هزار هکتار و ۱۰ حوضه به‌عنوان حوضه کوچک با مساحت کمتر از ۱۰ هزار هکتار تعیین شد. پارامترهای مستقل زیادی بر مقدار رواناب و رسوب در ایستگاه‌های هیدرومتری تأثیرگذار می‌باشند که جهت تعیین پارامترهای مهم از ماتریس همبستگی و روش‌های خوشه‌بندی و PCA در سه سطح کل حوضه، حوضه بزرگ مقیاس و حوضه کوچک مقیاس استفاده شد

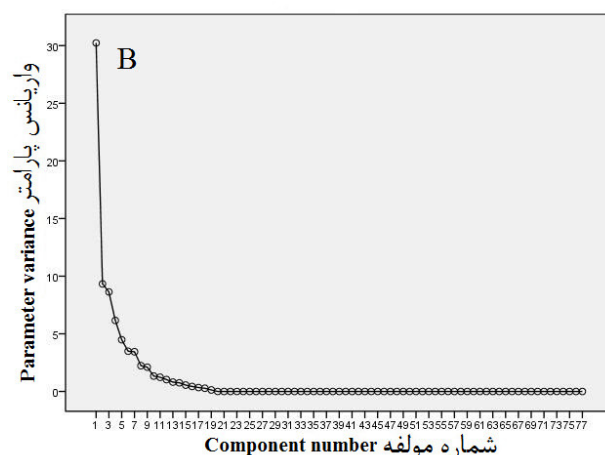
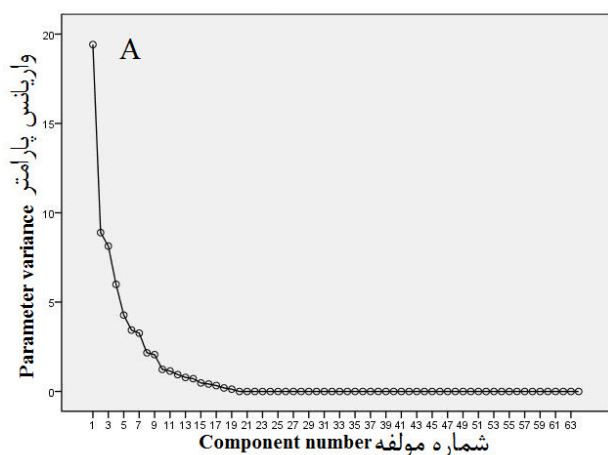
1. Nash-Sutcliffe
2. Correlation coefficient
3. Root Mean Square Error

که به دلیل محدودیت صفحات نتایج حاصل از خوشه‌بندی پارامترها در سطح کل حوضه به روش Ward در شکل ۲ و نتایج روش PCA

در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- خوشه‌بندی پارامترهای مؤثر در تولید رواناب و رسوب با استفاده از روش Ward  
Figure 2. Cluste ring effective parameters in runoff and sediment yield using Ward method



شکل ۳- نتایج روش PCA برای پارامترهای مستقل تأثیرگذار بر رواناب (A) و رسوب (B)

Figure 3. The PCA method results for effective independent parameters on sediment (A) and runoff (B)

مستقل برای تخمین رواناب مناسب می‌باشد. سپس با استفاده از معادلات لگاریتمی و غیر لگاریتمی اقدام به مدل‌سازی روابط بین پارامترهای مستقل و وابسته شد. تعداد ۷۲ معادله برای تعیین رواناب و رسوب در سه مقیاس مطالعاتی به دست آمد که با استفاده از نمایه‌های آماری NS،  $R^2$  و RMSE اقدام به ارزیابی دقت معادلات شد. دقت نمایه‌های آماری برای معادلات تخمین رواناب در جدول ۲ و برای معادلات تخمین رسوب در جدول ۳ ارائه شده است.

با اجرای خوشه‌بندی به روش Ward، پارامترها در سطح کل حوضه به ۱۵ خوشه، در سطح حوضه‌های بزرگ به ۲۰ خوشه و در سطح حوضه‌های کوچک به ۱۷ خوشه طبقه‌بندی شدند که با توجه به ماتریس همبستگی از هر خوشه پارامتری که دارای بیشترین همبستگی با مقدار رواناب و رسوب می‌باشد انتخاب شد، که در سطح کل حوضه، حوضه‌های بزرگ و کوچک به ترتیب ۹، ۱۱ و ۵ پارامتر برای تخمین رسوب و ۹، ۱۰ و ۷ پارامتر برای تخمین رواناب دارای همبستگی بالا بودند. همچنین نتایج روش PCA نشان داد که انتخاب ۱۲، ۹ و ۹ پارامتر برای تخمین رسوب و ۸، ۱۱ و ۸ پارامتر

جدول ۲- نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل برای تعیین رواناب

Table 2. The results of model performance evaluation to determine runoff

تخمین رواناب در حوضه‌های کوچک			تخمین رواناب در حوضه‌های بزرگ			تخمین رواناب در کل حوضه			معادله رگرسیون Regression equation
Runoff estimation in small watersheds			Runoff estimation in large Basin			Runoff estimation in total watershed			
ریشه خطای مطلق	نش	تیین $R^2$	ریشه خطای مطلق	نش	تیین $R^2$	ریشه خطای مطلق	نش	تیین $R^2$	
RMSE	NS	$R^2$	RMSE	NS	$R^2$	RMSE	NS	$R^2$	
1.06	0.62	0.62	0.3	0.71	0.78	0.29	0.96	0.98	خطی با خوشه جزئی Inter with partial clustering
1.42	0.66	0.69	0.4	0.79	0.82	0.32	0.95	0.97	گام به گام با خوشه جزئی Stepwise with partial clustering
0.67	0.61	0.63	0.1	0.96	0.98	0.32	0.95	0.97	خطی با خوشه کلی Inter with total clustering
0.63	0.51	0.57	0.04	0.91	0.92	0.32	0.95	0.97	گام به گام با خوشه کلی Stepwise with total clustering
0.33	0.48	0.59	0.07	0.88	0.92	0.21	0.98	0.99	خطی با PCA Inter with PCA
1.01	0.61	0.53	0.05	0.88	0.93	0.22	0.98	0.99	گام به گام با PCA Stepwise with PCA

جدول ۳- نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل برای تعیین رسوب

Table 2. The results of model performance evaluation to determine sediment yield

تخمین رواناب در حوضه‌های کوچک			تخمین رواناب در حوضه‌های بزرگ			تخمین رواناب در کل حوضه			معادله رگرسیونی Regression equation
Runoff estimation in small watersheds			Runoff estimation in large watershed			Runoff estimation in total watershed			
ریشه خطای مطلق	نش NS	تبیین R <sup>2</sup>	ریشه خطای مطلق	نش NS	تبیین R <sup>2</sup>	ریشه خطای مطلق	نش NS	تبیین R <sup>2</sup>	
RMSE			RMSE			RMSE			
617	0.48	0.58	831.5	0.61	0.63	16466	0.98	0.99	خطی با خوشه جزئی Inter with partial clustering
393	0.43	0.51	895.9	0.64	0.78	19057	0.97	0.99	گام به گام با خوشه جزئی Stepwise with partial clustering
395	0.53	0.54	563.2	0.62	0.68	18092	0.98	0.99	خطی با خوشه کلی Inter with total clustering
393	0.43	0.48	113.4	0.91	0.93	19057	0.97	0.99	گام به گام با خوشه کلی Stepwise with total clustering
519	0.52	0.58	7310.6	0.78	0.81	12241	0.99	0.99	خطی با PCA Inter with PCA
235	0.62	0.63	916.3	0.81	0.86	19057	0.97	0.99	گام به گام با PCA Stepwise with PCA

گام با خوشه‌بندی جزئی (رابطه ۹) نسبت به سایر معادلات از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند که معادلات به دست آمده در جدول ۵ ارائه شده است. در این معادلات  $qs_T$  مقدار رسوب تولیدی در سطح کل حوضه،  $qs_H$  مقدار رسوب تولیدی در سطح حوضه‌های بزرگ،  $qs_T$  مقدار رسوب تولیدی در سطح کل حوضه،  $qr_T$  مقدار رواناب تولیدی در سطح کل حوضه،  $qr_H$  مقدار رواناب تولیدی در سطح حوضه‌های بزرگ،  $qr_L$  مقدار رواناب تولیدی در سطح حوضه‌های کوچک می‌باشد.

در هر یک از سطوح مطالعاتی کل حوضه، حوضه‌های بزرگ و حوضه‌های کوچک به منظور تخمین رسوب از بین معادلات به دست آمده یک معادله مناسب انتخاب شد که به ترتیب معادلات رگرسیون خطی با روش PCA (رابطه ۵)، رگرسیون گام به گام با خوشه‌بندی کلی (رابطه ۶) و رگرسیون گام به گام با روش PCA (رابطه ۷) دارای بیشترین دقت می‌باشند. معادلات مربوط به این روابط در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین برای تخمین رواناب به ترتیب معادلات رگرسیون خطی با روش PCA (رابطه ۷)، رگرسیون خطی با خوشه بندی کلی (رابطه ۸) و رگرسیون گام به

جدول ۴- معادلات رگرسیونی مناسب برای تخمین رواناب در سطح مطالعاتی مختلف

Table 4. Suitable regression equations for estimation runoff in different study area

سطح مطالعاتی Study area	معادلات رگرسیونی Regression equations
کل حوضه Total watershed	$qr_T = -0.0361 - 0.001Q - 0.0093PQ - 0.0067Rbr + 0.106CRHC + 0.244ECCR + 0.00000086HA + 0.0014Wasp + 0.0000114Area + 0.56Grav - 0.00865P10 + 0.0011Dom$ (۵)
حوضه‌های بزرگ Large watersheds	$qr_H = -810585 + 7337q10 + 2492Q + 3434CER + 7849Nasp + 5354Easp + 5997Sasp$ (۶)
حوضه‌های کوچک Small watersheds	$qr_S = -0.0523 - 0.02W_{scr} - 0.007Agr + 0.001MR + 0.012Dens + 0.2Grav - 0.004Pav + 0.006P10$ (۷)

جدول ۵- معادلات مناسب برای تخمین رسوب در سطح مطالعاتی مختلف

Table 5. Suitable regression equations for estimation sediment in different study area

سطح مطالعاتی Study area	معادلات رگرسیونی Regression equations
کل حوضه Total watershed	$qs_T = 0.0002 - 0.0113C - 0.0162rBR - 0.047MR + 0.033CCCR + 0.0034CCHC + 0.0035CRHC - 0.574HA + 1.25Area + 0.00644Grav - 0.0693P10 + 0.0021Dom$ (۸)
حوضه‌های بزرگ Large watersheds	$qs_H = 67770 + 2074Q25 + 42490Qm4 - 154.6HL + 0.98Area - 10090Dim - 4504Pmm$ (۹)
حوضه‌های کوچک Small watersheds	$qs_S = 7015.3 - 244.49Agr - 3857.3Dens + 5993Grav$ (۱۰)

می‌باشد [۲۰، ۱۲، ۳]. لذا این مدل‌ها برای مناطق فاقد آمار کاربردی ندارند. در این تحقیق معادلات مختلفی با استفاده از خصوصیات متفاوت مربوط به مناطق مطالعاتی ارائه شده است. نتایج نشان داد که این معادلات دارای کارایی بالایی می‌باشند و می‌توانند با عملکرد مناسبی برای حوضه‌های فاقد آمار در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرند که در مطالعات وفاخواه [۳۷]، فرناندز و همکاران [۹] و گیتو و چائوبی [۱۱] و بسیاری از مطالعات دیگر این موضوع بیان شده است.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به مطالعات انجام شده به‌طور جزئی‌تری پارامترهای تأثیرگذار بر رواناب و رسوب حوزه آبخیز سامیان انتخاب شدند، به‌طوری‌که تعداد ۷۶ پارامتر تأثیرگذار بر دبی رواناب و رسوب منطقه در این حوزه آبخیز همراه با ۱۹ زیرحوضه دیگر در داخل حوضه با استفاده از روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلف تعیین شد. مطالعات در سه سطح کل حوضه، حوضه‌های بزرگ مقیاس و حوضه‌های کوچک مقیاس انجام شد. با تعیین پارامترهای مستقل اقدام به انتخاب پارامترهایی با همبستگی بالا با روش خوشه‌بندی و PCA به‌صورت جداگانه در سه مقیاس مطالعاتی شد. نتایج طبقه‌بندی پارامترها نشان داد که دقت معادلات حاصل از خوشه‌بندی پارامترهای مربوط به هر گروه از مشخصات با وجود زمان‌بر بودن، دقت معادلات را افزایش نمی‌دهد در حالی که معادلات حاصل از پارامترهای انتخابی به روش PCA دارای دقت بالایی می‌باشند. بنابراین می‌توان از روش PCA به‌منظور تعیین پارامترهای موثر در مدل‌سازی منطقه‌ای استفاده کرد. بررسی معادلات مختلف حاصل از تحقیق نشان داد که معادلات بدون الگوریتم‌گیری پارامترها نسبت به معادلات حاصل از الگوریتم‌گیری پارامترها دارای دقت بالایی می‌باشند. همچنین مقایسه نتایج معادلات در سطح مقیاس‌های مطالعاتی نشان داد که معادلات در سطح کل حوضه از بیشترین دقت برخوردار می‌باشند. به‌عبارتی در مدل‌سازی منطقه‌ای بهتر است از حوضه‌هایی با مقیاس‌های متفاوت استفاده شود.

مقایسه نتایج در سطح مقیاس‌های مطالعاتی نشان داد که تقسیم‌بندی حوضه‌ها جهت مدل‌سازی باعث افزایش دقت تخمین رواناب و رسوب نمی‌شود. دقت معادلات به‌دست آمده برای تخمین رواناب و رسوب در حوضه‌های بزرگ به‌ترتیب با مقدار ضریب NS بین ۰/۷۱ تا ۰/۹۶ و ۰/۶۱ تا ۰/۹۶ نسبت به حوضه‌های کوچک با ضریب NS بین ۰/۴۸ تا ۰/۶۶ و ۰/۴۳ تا ۰/۶۲ بیشتر می‌باشد ولی در مقایسه با مدل‌سازی کل حوضه با ضریب NS بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۸ و ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ دارای دقت کمتری می‌باشد. تأثیر خصوصیات هیدروژئومورفولوژیکی حوضه بر مدل‌سازی رواناب و رسوب به‌طور دقیق‌تر در نظر گرفته می‌شود که در مطالعات استیوز و اپاتیت [۸] به افزایش دقت مدل با افزایش مساحت اشاره شده است. برخی پارامترهای انتخابی برای معادلات رگرسیونی رواناب و رسوب توسط روش PCA و خوشه‌بندی دارای مشابهت می‌باشند که نشان دهنده ارتباط بین تولید رواناب و رسوب در حوضه‌های آبخیز می‌باشد لذا با کنترل رواناب می‌توان تولید رسوب حوضه را کنترل کرد و بالعکس. بالا بودن همبستگی بین رواناب و رسوب در مطالعات هیدروژئولوژیکی مختلف مانند واریک و همکاران [۴۰] و لیما و همکاران [۲۳] بیان شده است. پارامتر مستقل مساحت در اکثر معادلات تخمین رواناب و رسوب از همبستگی بالایی برخوردار می‌باشد که با مطالعات انجام شده در این زمینه مطابقت دارد [۳۸، ۱۹].

همچنین نتایج نشان داد که معادلات حاصل از پارامترهای انتخابی به روش PCA نسبت به روش خوشه‌بندی از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد که بالا بودن کارایی روش PCA در مطالعات و تیچکارون و سینگ [۴۲] و خیرفام و وفاخواه [۱۹] بیان شده است.

استفاده از مدل‌های هیدروژئولوژیکی در سال‌های اخیر به‌طور گسترده برای مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که این مدل‌ها برای مناطقی با خصوصیات متفاوت ارائه شده‌اند و لازم است با توجه به اطلاعات مشاهداتی برای منطقه مطالعاتی واسنجی شوند که واسنجی کردن این مدل‌ها یک فرآیند بسیار پیچیده می‌باشد [۲۹، ۲۲]. زیاد بودن تعداد پارامترها، هم‌پوشانی پارامترها، عدم قطعیت و عدم توانایی تشخیص مسأله در این موضوع تأثیرگذار



12. Gotzinger, J. and Bgrdossy, A. 2007. Comparison of four regionalization methods for a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*. 333: 374–384.
13. Gurmessa, T.K. and Bárdossy, A. 2009. A principal component regression approach to simulate the bed-evolution of reservoirs. *Journal of Hydrology*. 368: 30–41.
14. Heng, S. and Suetsugi, T. 2013. An Approach to the Model Use for Measuring Suspended Sediment Yield in Ungauged Catchments American. *Journal of Environmental Science*. 9(4): 367-376.
15. Heuvelmans, G., Muys, B. and Feyen, J. 2006. Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology*. 319(1): 245-265.
16. Isik, S. 2013. Regional rating curve models of suspended sediment transport for Turkey. *Earth Science Information*. 6: 87-98.
17. James, L.D. 1972. Hydrologic modeling parameter estimation and watershed characteristics. *Journal of Hydrology*. 17: 283–307.
18. Kashi, L., Namdar, M. and Sadat, H. 2011. Estimation erosion intensity with geomorphology model 5th national watershed conference and soil and water management. Irrigation and water community Kerman. (In Persian)
19. Kheirfam, H. and Vafakhah, M. 2015. Assessment of some homogeneous methods for the regional analysis of suspended sediment yield in the south and southeast of the Caspian Sea. *Journal Earth System Science*. 124: 1247–1263.
20. Kirchner, J. W. 2012. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements analyses and models to advance the science of hydrology. *Journal Water Resources Researches*. 42: 1-5.
21. Kokkonen, T.S. Jakeman, A.J., Young, P.C., and Koivusalo, H.J. 2003. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta. *Hydrologic Laboratory North Carolina Hydrological Processes*. 17: 2219-2238.
22. Lerat, J., Andréassian, V., Perrin, C., Vaze, J., Perraud, J.M., Ribstein, P. and Loumagne, C. 2012. Do internal flow measurements improve the calibration of rainfall–runoff models?. *Journal Water Resource Research*. 48 (2): 1-18.
23. Lima, J.E.F.W., Montenegro, S., de Assunção Montenegro, A. A. and Koide, S. 2015. Comparative
  1. Al-Alawi, S.M., Abdul-Wahab, S.A. and Bakheit, C.S. 2008. Combining principal component regression and artificial neural networks for more accurate predictions of ground-level ozone. *Environment Model Software*. 23: 396–403.
  2. Barbarossa, V., Huijbregts, M.A.J., Hendriks, A.J., Beusen, A.H.W., Clavreul, J., King, H. and Schipper, A.M. 2017. Developing and testing a global-scale regression model to quantify mean annual streamflow *Journal of Hydrology*. 544: 479–487.
  3. Beven, K. 2001. How far can we go in distributed hydrological modelling?. *Journal Hydrology. Earth System Science*. 5(1): 1–12.
  4. Boongaling, C.G.K., Faustino-Eslava, D. V. and Lansigan, F. P. 2018. Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. *Land Use Policy*. 72: 116-128.
  5. Choubin, B., Solaimani, K., Roshan, M. H. and Malekian, A. 2017. Watershed classification by remote sensing indices: A fuzzy c-means clustering approach *Journal of Mountain Science*. 14(10): 2053-2063.
  6. Cohen, S., Kettner, A.J., Syvitski, J.P.M. and Fekete, B.M. 2013. WBMsed a distributed global-scale riverine sediment flux model: Model description and validation *Computer Geoscience*. 53: 80–93.
  7. Esmali, A. and Abdollahi, Kh. 2011. Watershed and soil conservation. University of Mohaghegh Ardabili publish, 564 p.(In Persian)
  8. Esteves, M. and Lapetite, J. M. 2003. A multi-scale approach of runoff generation in a Sahelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena*. 50(2): 255-271.
  9. Fernandez, W., Vogel, R.M. and A. Sankarasubramanian. 2000. Regional calibration of a watershed model *Hydrological Sciences Journal*. 45(5): 689-707.
  10. Gassman, P.W., Reyes, M., Green, C.H. and Arnold, J.G. 2007. The soil and water assessment tool: historical development applications and future directions. *Journal Transactions of the ASABE*. 50 (4): 1212-1250.
  11. Gitau, M.W. and Chaubey, I. 2010. Regionalization of SWAT model parameters for use in ungauged watersheds. *Water*. 2(4): 849-871.

34. Swain, J. B. and Patra, K. C. 2018. Impact assessment of land use/land cover and climate change on streamflow regionalization in an ungauged catchment. *Journal of Water and Climate Change*. jwc2018161.
35. Syvitski, J.P.M. and Milliman, J.D. 2007. Geography and Humans Battle for Dominance over the Delivery of Fluvial Sediment to the Coastal Ocean. 115: 1–19.
36. Tayfur, G., Karimi, Y. and Singh, V. 2013. Principle component analysis in conjunction with data driven methods for sediment load prediction. *Water Resource Management*. 27: 2541–2554.
37. Vafakhah, M. 2007. Regional analysis of sediment yield in the part of Caspian Sea coastal basin. *Iranian Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*. 13(6): 121-132.
38. Vousoughi, F.D., Dinpashoh, Y., Aalami, M.T. and Jhajharia, D. 2013. Trend analysis of groundwater using non-parametric methods (case study: Ardabil plain). *Stochastic environmental research and risk assessment*. 27(2): 547-559.
39. Walling, D.E. and Fang, D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Glob Planet Change*. 39: 111–126.
40. Warrick, J. A., Melack, J. M. and Goodridge, B. M. 2015. Sediment yields from small steep coastal watersheds of California. *Journal of Hydrology*. 4: 516-534.
41. Westra, S., Brown, C., Lall, U., Koch, I. and Sharma, A. 2010. Interpreting variability in global SST data using independent component analysis and principal component analysis. *Journal Climatology*. 30: 333–346.
42. Wuttichaikitcharoen, P. and Babel, M.S. 2014. Principal component and multiple regression analyses for the estimation of suspended sediment yield in ungauged basins of northern Thailand. *Water*. 6(8): 2412-2435.
43. Xu, C.Y. 2003. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to a large area in central Sweden. *Hydrology and Earth Systems Sciences*. 7(3): 317-324.
- hydrology: relationships among physical characteristics hydrological behavior and results of the SWAT model in different regions of Brazil. 7(6): 1187-1195.
24. Magette, W.L., Shanholtz, V.O. and Carr, J.C. 1976. Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water Resource Reserch*. 12 (3): 472–476.
25. Melesse, A.M., Ahmad, S., McClain, M.E., Wang, X. and Lim, Y.H. 2011. Suspended sediment load prediction of river systems: An artificial neural network approach. *Agriculture Water Management*. 98: 855- 866.
26. Merz, R. and Blöschl, G. 2004. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*. 287: 95–123.
27. Mohammadi, S. 2013. Modeling soil erosion and sediment yield in arid and semi-arid region in Iran (Case study: Sefid rood watershed). PhD thesis natural resource faculty Tehran University 367. (In Persian)
28. Mwakalila, S. 2003 Estimation of stream flows of ungauged catchments for river basin management. *Physics and Chemistry of the Earth*. 28: 935-942.
29. Pechlivanidis, I.G., McIntyre, N.R. and Wheater, H.S. 2010. Calibration of the semi-distributed PDM rainfall–runoff model in the Upper Lee catchment UK. *Journal of Hydrology*. 386(1-4): 198-209.
30. 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.
31. Sadeghi, S.H.R. and Singh, J.K. 2005. Development of a synthetic sediment graph using hydrological data. *Journal Agriculture Science Technology*. 7: 69–77.
32. Santhi, C., Arnold, JG., Williams, J., Dugas, W.A. and Hauck, L. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *The American Water Resources Association*. 37(5): 1169-1188.
33. Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiondo, E.M., 'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S. and Zehe, E. 2003. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB) 2003–2012 shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrology Science Journal*. 48(6): 857–880.